

MITSUBISHI

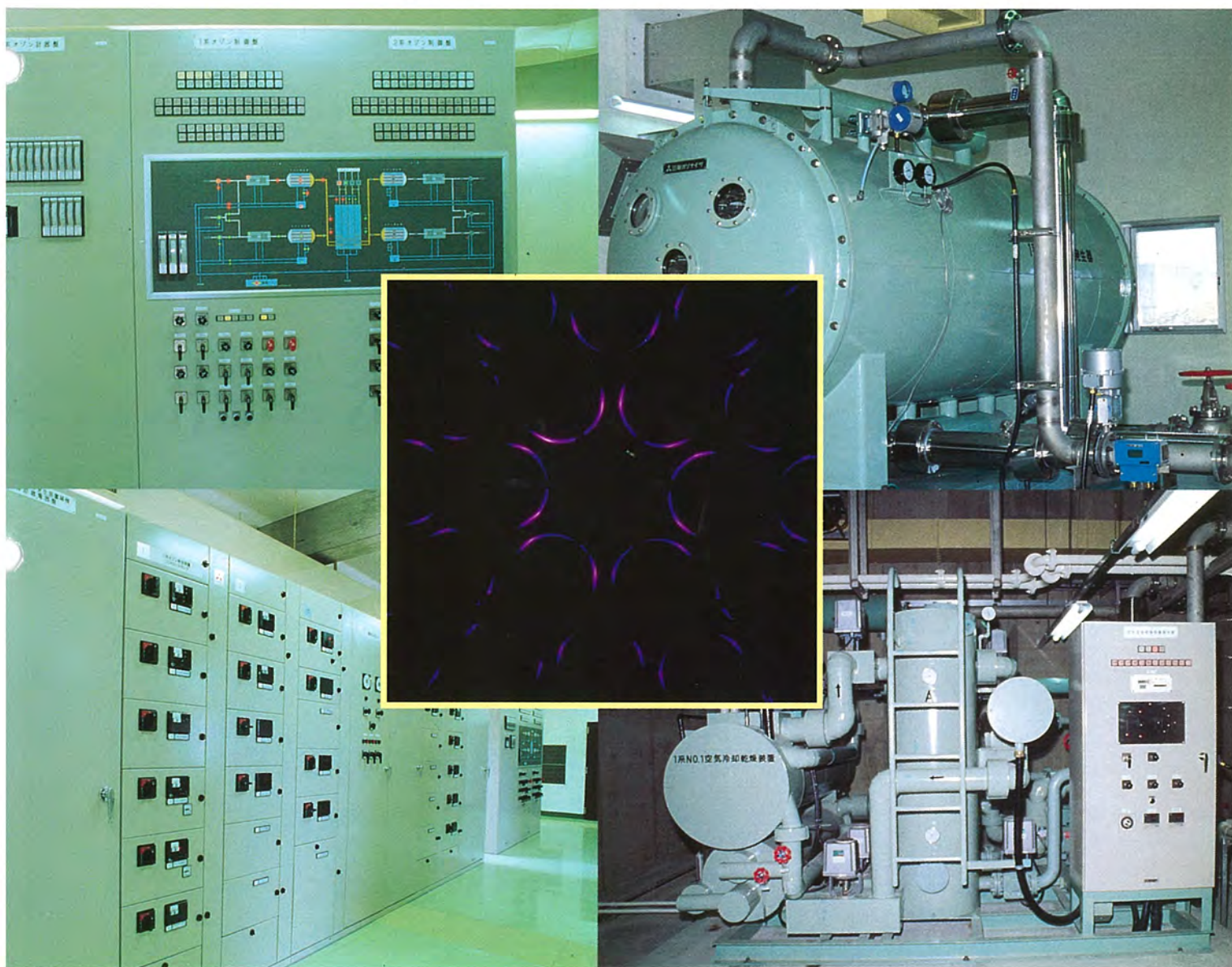
三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.67 No.2

2

1993

特集 “オゾンの発生技術と応用”



特集 “オゾンの発生技術と応用”

目次

特集論文

オゾンの発生技術と応用特集に寄せて……………	1
宗宮 功	
オゾン技術の現状と展望……………	2
磯部克彦	
オゾン発生技術……………	5
本多敏一・田中正明	
オゾン水処理技術……………	11
中山繁樹・久川義隆	
上下水分野でのオゾン処理技術……………	16
久川義隆	
水泳プール用水のオゾン浄化システム……………	21
小沢建樹・四元初男	
水族館、養魚場の海水浄化……………	24
四元初男・小沢建樹	
間欠オゾン供給システム……………	28
池田 彰・小沢建樹	
下水・し尿処理場臭気の脱臭……………	33
松永直利・江崎徳光	
余剰オゾン分解技術……………	38
松永直利・池田 彰	
酸素リサイクルオゾン発生システム……………	41
田中正明・中山繁樹	
純水製造におけるコロイダル物質除去……………	46
伴 功二・柳 基典・檜垣幸夫・福本隼明	

普通論文

可逆式冷間圧延機(CRミル)用電機品……………	50
森 賢嗣・石村耕一・岡本 健	
無電解電源“AE”搭載ワイヤ放電加工機……………	55
山田 久・真柄卓司・佐藤清侍・弥富 剛・伊藤彰康	
高速マルチプロトコルルータ“MELNET R2000”……………	59
江口眞行・斉藤正光・昆 資之・根本泰典・市橋立機	
自由電子レーザ発生用線形電子加速器……………	65
西原 進・鈴木敏允・八十島義行・佐藤信二・今崎一夫	
線形電子加速器を用いた医療用断層像撮影装置……………	70
炭谷博昭・幸丸正樹・花川和之・川上秀之・田中常稔・菊地 宏	
液晶ポリマースピーカー振動板……………	75
村上 治・馬場文明・山田 祥・棕田宗明・原 宏造	
マルチメディア対応高精細度プロジェクター 70P-X3……………	80
鈴木吉輝・南 浩次・中原仁志・一松 明・三原康敏	
車載DSPオーディオシステム(走行騒音適応信号処理技術)……………	86
田浦賢一・早川富士男・辻下雅啓・渡辺雅司・石川 淳	
家庭用燃焼器の燃焼騒音低減……………	91
梶本照男・佐藤 稔・中島伸治・村上洋二・田村真史	

特許と新案

オゾン発生装置、超音波探触子……………	97
半導体記憶装置……………	98

スポットライト

コードレス電話用ベースバンドIC M64023FP……………	95
新据置型自動車用空気清浄器……………	96
関西電力(株)新生駒変電所納め500kV 主要変圧器状態監視用診断処理装置……………	99
高性能アクティブフィルタ MELACT-1100……………	100
三菱UNIXワークステーション“ME RISCシリーズ”……………	(表3)

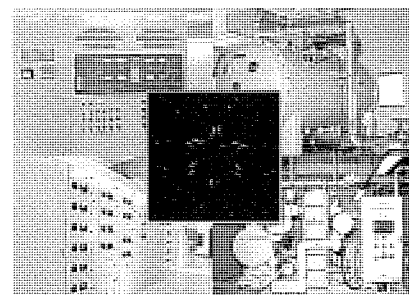
表紙

浄水場用大型オゾン発生装置

「よりおいしく、より安全な水」に対する関心の高まりと「清らかな水環境の回復」の必要性から、上下水に対するオゾン処理の役割は今日ますます重要になってきている。

表紙の写真は、本格的なオゾン高度浄水処理設備として、平成4年から運転を一部開始している沖縄県企業局北谷浄水場のオゾン発生装置であり、最終的なオゾン発生量は8.1kg×4台、処理水量は194,000m³/日となる。

左上：フローパネル
 左下：コントロールセンター
 中央：放電状況
 右上：オゾン発生器
 右下：空気冷却乾燥装置



三菱電機技報に掲載の技術論文では、国際単位“SI”[SI第2段階(換算値方式)を基本]を使用しています。ただし、保安上、安全上等の理由で、従来単位を使用している場合があります。

アブストラクト

オゾン技術の現状と展望

磯部克彦

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 2～4 (1993)

当社オゾン技術は、オゾン発生機技術とその応用技術とから構成されている。前者では電流型インバータの採用、冷却乾燥装置の改良により、オゾン発生効率の増大及びランニングコストの低減がなされ、より安価なオゾンを提供している。また、後者では各種水処理分野への積極的な適用を進め、オゾン利用の拡大に努めてきた。

今後は、発生機の周辺機器の改善及び上下水処理分野へのオゾン処理技術を推進し、オゾンの面からも社会への貢献を進める。

水族館、養魚場の海水浄化

四元初男・小沢建樹

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 24～27 (1993)

水族館や養魚場で使う海水は、オゾン処理によって細菌の繁殖が防止できるばかりでなく、脱色や透明度も改善される。しかし、海水をオゾン処理すると、海水中に存在する臭素イオンとオゾンの反応生成物であるオキシダントができ、魚類などに害を与える。筆者らは生成オキシダントによるアンモニア除去、オキシダント除去技術を開発し、シマアジ、イカ、トラバガニの飼育実験によって開発技術の有効性を実証した。

オゾン発生技術

本多敏一・田中正明

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 5～10 (1993)

本稿はオゾン発生に最も適した無声放電法によるオゾン発生機構及びエネルギー効率と放電条件との関係について説明するとともに、当社オゾナイザの変遷と特長を紹介したものである。

オゾンは、酸素分子を酸素原子に解離させるか、励起酸素分子の生成によって生ずるが、実用限界上のエネルギー効率は7.5～20%と小さい。こうした効率の中で、総合的な放電条件を考慮し、最適な運転条件でオゾナイザが実用化されている。

間欠オゾン供給システム

池田 彰・小沢建樹

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 28～32 (1993)

1日1～2回、各5分間の短時間で高濃度のオゾンを水中に間欠注入することにより、水管路や熱交換器に付着する微生物を除去するという新しい発想の生物付着防止装置を開発した。

本稿では、間欠オゾン供給装置の概要を説明するとともに、この装置を製鉄工場冷却水系及び下水利用ヒートポンプ熱交換器の生物付着防止に適用した事例を示した。

オゾン水処理技術

中山繁樹・久川義隆

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 11～15 (1993)

オゾン水処理の中でオゾン反応技術は中核となる技術である。それに必要なオゾン反応器としては通常気泡塔が用いられる。

気泡塔の理論モデルから導かれる反応器特性、オゾン反応機構、反応速度から、オゾン水処理が脱色、脱臭、生物分解性向上などに適していることを理論的に裏付けた。また、オゾンは紫外線や過酸化水素の添加により酸化力が促進され、オゾンの適用範囲が拡大されることを示した。

下水・し尿処理場臭気の脱臭

松永直利・江崎徳光

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 33～37 (1993)

オゾンの利用方法として脱臭装置への応用に取り組んでいる。オゾンは酸化力が強く様々な物質を酸化分解できるが、悪臭公害で問題となっている ppm 領域の濃度では反応速度が遅く、オゾン単独では脱臭への応用は困難であった。我々はオゾンの酸化力を効果的に利用するため、脱臭触媒との併用法を採用し、高効率のオゾン脱臭方式を実現した。

本稿ではその脱臭原理、各悪臭成分に対する脱臭性能のほか、実際の適用例についても紹介した。

上下水分野でのオゾン処理技術

久川義隆

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 16～20 (1993)

オゾンの利用分野として、最近、特に注目されているのは上下水分野である。オゾン処理の特徴である強い酸化力で臭気・トリハロメタン生成能・色度・細菌などに対する改善効果と、処理後は酸素に戻る安全性と、また技術革新による経済性などが評価された結果、上下水分野に多く利用されている。

本稿では、オゾンによる水質改善効果、効率的なオゾン反応装置、上下水分野への納入実績及び適用例を紹介する。

余剰オゾン分解技術

松永直利・池田 彰

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 38～40 (1993)

上下水向けオゾナイザを中心として、大型オゾナイザの導入計画が次々と実施に移されており、余剰オゾンの分解技術が一段と重要になってきている。

本稿では余剰オゾン分解技術として、活性炭法、熱分解法、薬液洗浄法、触媒法などのそれぞれのオゾン分解原理と、採用する場合の注意点などについて述べ、最後に、各々のオゾン分解法を用いた場合の設備費、運転費を相対比較で一覧表にまとめ、選定する際の一助とした。

水泳プール用水のオゾン浄化システム

小沢建樹・四元初男

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 21～23 (1993)

水泳愛好者が増加しており、遊泳プールの水質や遊泳環境の改善を求める声が高まっている。その要望にこたえる形で種々の新しい処理プロセスの導入が進められているが、中でも特にオゾン処理に対する評価が高い。ここでは、全国で約200か所のプールに導入されている三菱オゾンプール浄化システムの導入前後の水質分析結果とアンケートによる遊泳者の感覚的評価の両面から、オゾン処理による水質改善効果を検討した結果を報告する。

酸素リサイクルオゾン発生システム

田中正明・中山繁樹

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 41～45 (1993)

オゾン反応槽から酸素を回収して再びオゾナイザの原料ガスとして用いることにより、オゾンの製造コストを大幅に低減できる新しい酸素リサイクル方式のオゾン発生システムを開発した。この方式の重要なポイントは反応槽からの不純物ガスの除去であり、不純物ガスがオゾナイザのオゾン収率に与える影響を調べ、この結果をもとにオゾンによるバルブ漂白用の100g/hのオゾン発生システムのパイロットプラントを設計・建設し、総合運転動作とその経済性を実証した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 24~27 (1993)

Ozone Treatment of Seawater

by Hatsuo Yotsumoto & Tateki Ozawa

Ozone treatment can be used to control bacterial growth in such seawater environments as aquariums and fish farms, and also for decolorizing and clarifying. However the reaction between bromine ions present in seawater and ozone forms an active oxidant species that is harmful to fish. The authors have developed an active-substance ammonia removal technique. The effectiveness of this technology has been tested at fish hatcheries, where investigations on pseudosquilla dentex, squid and king crab have been conducted.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 2~4 (1993)

Present State and Prospects in Ozone Technology

by Katsuhiko Isobe

Mitsubishi ozone technology includes ozone generators and ozone application equipment. The generators employ inverters with improved cooling and dehumidifying units to enhance efficiency and reduce operating expenses, thus offering the supply of ozone at lower cost. Water-treatment applications are actively being developed, and the corporation is working to expand the use of this technology. In the future, continued improvements in ozone generators and associated equipment, and their increased use in drinking water and sewage treatment will offer immense contributions to society.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 28~32 (1993)

An Intermittent Ozone Feeding System

by Akira Ikeda & Tateki Ozawa

The corporation has developed a new biofouling control system that eliminates the microorganisms that cause blockage in water conduits and heat exchangers by intermittently injecting high-concentration ozone doses into the water once or twice daily five minutes each time. The article describes this intermittent ozone feeding system, providing example biofouling control applications in a water-cooling system for a steel plant and a heat exchanger for a heat pump that uses sewage as a heat source.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 5~10 (1993)

An Ozone Generation System

by Toshikazu Honda & Masaaki Tanaka

The report introduces the development and features of the corporation's ozonizers. It describes a silent discharge technique--currently the best available method of ozone-generation--including energy efficiency and discharge conditions. Ozone generators split oxygen molecules into energetic atomic oxygen that forms ozone with a comparatively low energy efficiency of 7.5-20%. Practical ozonizers seek to optimize operating parameters for maximum efficiency.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 33~37 (1993)

The Application of Ozone for Deodorization in Sewage and Raw-Sewage Treatment Plants

by Naotoshi Matsunaga & Norimitsu Esaki

The corporation is working on deodorizing applications of ozone. While ozone is capable of oxidative decomposition for a variety of compounds, the rate of reaction is too slow for typical odor-control applications in which concentrations of the target compounds are in the ppm range. The authors have developed a high-efficiency ozone deodorization system that employs a deodorizing catalyst to take better advantage of the oxidizing properties of ozone. The article introduces the principles, oxidizing performance on various odor-causing compounds, and examples of actual applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 11~15 (1993)

The Application of Ozone Technology to Water Treatment

by Shigeki Nakayama & Yoshitaka Kugawa

The ozone reactor--generally in the form of a bubble tower--is a critical element in ozone water-treatment applications. Ozone reaction rates and theoretical bubble tower models provide the ability to predict decolorization, deodorization and bactericidal effects. Oxidation effects are shown to be accelerated by using ozone in combination with ultraviolet light and hydrogen peroxide, allowing a wider range of applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 38~40 (1993)

Decomposition Technology for Residual Ozone

by Naotoshi Matsunaga & Akira Ikeda

Activated charcoal, thermal decomposition, chemical baths, and catalytic ozone decomposition methods are available for large ozonizer installations used in tap-water and sewage-treatment systems. The article compares the principles of operation, key application considerations, equipment costs, and operating costs of these methods.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 16~20 (1993)

The Application of Ozone to Treatment Technologies for Tap Water and Sewage

by Yoshitaka Kugawa

Among the most-published applications of ozone technology are the treatment of tap water and sewage. Ozone technology offers several advantages in these environments. The strong oxidizing effect of ozone is bactericidal and effective for deodorizing, decolorizing, and preventing trihalomethane formation; ozone treatment is safe, because the only by-product is oxygen; and continued innovations have made the cost of ozone technology competitive with other alternatives. The article describes the use of ozone for water quality improvement, efficient ozone reactor equipment, a summary of installed systems, and examples of tap water and sewage treatment applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 41~45 (1993)

An Ozone-Generation System with Oxygen Recycling

by Masaaki Tanaka & Shigeki Nakayama

The corporation has developed a new ozone-generation system that dramatically lowers operating costs by recovering oxygen from the ozone reactor tank and recycling it for subsequent ozone generation. The critical step is removing the gaseous impurities from the reactor tank exhaust. The authors studied the effect of the gaseous impurities on ozone generation efficiency, and used the results to design and construct a pilot pulp-bleaching plant based on a 100g/h ozone generator. The plant has proven practical and economic.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 21~23 (1993)

An Ozone Pool-Purification System

by Tateki Ozawa & Hatsuo Yotsumoto

Ozone water-purification systems for pools have proven an effective means of improving pool-water quality while causing small environmental impact. More than 200 Mitsubishi Ozone Pool-Purification Systems have been delivered in Japan. The article reports the results of water-quality analysis before and after installation, and also the results of an opinion survey of pool users on the system.

アブストラクト

純水製造におけるコロイダル物質除去

伴 功二・柳 基典・檜垣幸夫・福本隼明

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 46～49 (1993)

現在の超純水製造の解決すべき問題の中で、コロイダル物質はイオンと粒子の中間の性質をもつため除去が困難であり、特にコロイダルシリカはウェーハ上のシミ発生原因であるため除去法の開発が重要な課題となっていた。筆者らは純水中のコロイダル物質をオゾン／酸素ばっ(曝)気することによって粒子化し、除去可能とするとともに、オゾン曝気＋紫外線照射を行い、コロイダルシリカをイオン化し、除去する技術を開発した。また、そのメカニズムについても言及した。

可逆式冷間圧延機(CR ミル)用電機品

森 賢嗣・石村耕一・岡本 健

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 50～54 (1993)

近年、可逆式冷間圧延機プラントの新設工事において、三菱重工業(株)製のCR ミル(クラスタタイプ圧延機)が市場の多くを占めている。

当社は、このCR ミルプラントに電機品システムを納入しており、実績を重ねてきている。ここでは、CR ミルプラントの電機品システム、特に駆動システムと制御システムについて、その特長及び各制御実績を紹介する。

線形電子加速器を用いた医療用断層像撮影装置

炭谷博昭・幸丸正樹・花川和之・川上秀之・田中常稔・菊地 宏

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 70～74 (1993)

放射線治療を目的とした線形電子加速器(ライナック)にCT(Computer Tomography)診断機能を付加させた。治療用装置に診断機能を付加することにより、患者のベッドの移動がなくなり、治療部位の位置決めが行えるだけでなく、治療中の照射線量分布のモニタなどの新しい機能が実現できる。本稿ではX線源をX線管からライナック装置に置き換えてCT機能を実現するために生じる様々な問題点を抽出し、その対応策とともにライナックCTの装置構成、基本仕様と実際の応用例を示した。

液晶ポリマースピーカー振動板

村上 治・馬場文明・山田 祥・椋田宗明・原 宏造

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 75～79 (1993)

スピーカーシステムの高性能・高音質化が求められている中で、弾性率と振動減衰特性に優れた新しい成形材料の液晶ポリマーを適用したスピーカー振動板を開発した。液晶ポリマーを搭載したスピーカーシステムは、低音から高音まで自然な音質再生を実現した。また、高耐熱・高流動液晶ポリマーの開発及び高速射出成形技術の確立により、ボイスコイル巻線用コイルボビンと振動板コーンを一体化したコイルボビン一体型振動板の開発に成功した。

無電解電源“AE”搭載ワイヤ放電加工機

山田 久・真柄卓司・佐藤清待・弥富 剛・伊藤影康

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 55～58 (1993)

ワイヤ放電加工に対する高精度化、高品位化への要求にこたえるため、荒加工から仕上げ加工までをすべて無電解化した加工用電源を開発した。

この電源によって、従来問題となっていた工作物の電解腐食を抑制し、マイクロクラックや加工変質層を大幅に減少させることができるため、ワイヤ放電加工機は、高精度・長寿命を必要とする金型加工から部品加工に至るまで広い分野に適用可能となった。

マルチメディア対応高精細度プロジェクター 70P-X3

鈴木吉輝・南 浩次・中原仁志・一松 明・三原康敏

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 80～85 (1993)

大画面映像情報システムの核として、NTSC、ハイビジョン映像信号はもとより、パソコン、ワークステーションなどのグラフィック信号まで表示可能な高精細度70型リアプロジェクターを開発した。

本機では、水平周波数75kHzまで自動追従するオートスキャン技術、画面周辺部の色ズレを精度良く補正するデジタル偏向技術を開発し、映像回路、CRT、投写光学系の高解像度化を図ることにより、マルチメディアに対応した高精細度画面を実現した。

高速マルチプロトコルルータ“MELNET R2000”

江口眞行・斉藤正光・昆 資之・根本泰典・市橋立機

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 59～64 (1993)

各種のLAN(FDDI, CSMA/CDなど)及び広域網(専用線、パケット網、ISDNなど)を接続、複数プロトコルによる同時通信を可能とする“MELNET R2000”を開発した。この装置はRISCプロセッサ採用によって高い中継性能をもち、LAN広域網間の優れた接続性ときめ細かなセキュリティ機能を備えたマルチプロトコルルータである。LANシステムの規模を拡大できるMELNET R2000の特長、構成機能及び適用システム例を紹介する。

車載DSPオーディオシステム(走行騒音適応信号処理技術)

田浦賢一・早川富士男・辻下雅啓・渡辺雅司・石川 淳

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 86～90 (1993)

自動車の走行騒音による聴覚マスキングを回避し、快適な音楽聴取を可能とする走行騒音適応信号処理技術を開発した。この技術は走行騒音のレベルに適応して音楽信号のダイナミックレンジ圧縮、低音域ブーストの処理を行うものである。各処理効果量を、きめ細かく滑らかに制御することで動作に伴う音量のふらつきなど聴感上の違和感を抑えながら、走行条件の変化にかかわらず快適な音楽再生を可能とした。

自由電子レーザ発生用線形電子加速器

西原 進・鈴木敏允・八十島義行・佐藤信二・今崎一夫

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 65～69 (1993)

当社は、(財)レーザー技術総合研究所と協賛して、自由電子レーザを発生させるための線形電子加速器(ライナック)の開発を行っている。この線形電子加速器は、RF電子銃と呼ばれる新形の電子銃と電子を光速近くまで加速するための加速管から構成され、自由電子レーザ発振に必要な高性能の電子ビームを発生できるものであり、レーザ光の広範囲な利用が開けるものと期待される。

家庭用燃焼器の燃焼騒音低減

根本照男・佐藤 稔・中島伸治・村上洋二・田村真史

三菱電機技報 Vol. 67・No. 2・p. 91～94 (1993)

家庭用暖房機として今や主流の座を確立した石油ファンヒーターの燃焼騒音低減技術を開発した。燃焼騒音の低減には、混合気中の音や乱れを小さくすることが重要である。デラックスタイプに搭載されている空気噴流微粒化方式のRTSバーナでは、ツインノズルと二重整流板の採用により、また灯油蒸気のエゼクターを用いているコンパクトタイプのCCVバーナでは、吸引空気の加熱により、両バーナとも約5dBの燃焼騒音低減を達成した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 70~74 (1993)

The Development of a Linear Accelerator and Computed Tomography System for Medical Use

by Hiroaki Sumitani, Masaki Koumaru, Kazushi Hanakawa, Hideyuki Kawakami, Tsunetoshi Tanaka & Hiroshi Kikuchi

The corporation has added computed tomography (CT) functions to a linear accelerator designed for radiation therapy and related medical applications. Incorporating diagnostics and therapeutics in the same unit makes it no longer necessary to shuttle patients between two machines. The unit can also be used simultaneously for radiation treatment and dose monitoring. The article summarizes the problems involved in changing the X-ray source from an X-ray tube to a linear accelerator and adding CT functions. It also describes the configuration of the combined apparatus, lists specifications and provides application examples.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 46~49 (1993)

The Removal of Colloidal Substances in Pure Water

by Koji Ban, Motonori Yanagi, Yukio Higaki & Takaaki Fukumoto

A current issue in ultrapure water systems is the removal of colloidal substances. This is difficult because the properties of colloidal silica fall between those of ions and particles. Colloidal silica in ultrapure water causes wafer discoloration, making its removal a high priority. The authors explain the development of a technique that employs ozone/oxygen aeration with ultraviolet irradiation to ionize and then remove colloidal silica. The article also explains this mechanism.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 75~79 (1993)

The Application of Liquid Crystalline Polymers to Loudspeaker Diaphragms

by Osamu Murakami, Fumiaki Baba, Akira Yamada, Muneaki Mukuda & Kozo Hara

The corporation has developed a new diaphragm material for loudspeaker systems that incorporates liquid crystalline polymers. The polymers have a high specific modulus of elasticity, large internal loss and are easy to use for thin-well forming. The materials have been employed in a new speaker system that reproduces sounds naturally over an extended frequency range. Using the thermal-resistant polymers in combination with high-speed injection molding technology, the corporation has succeeded in the development of a loudspeaker in which a cone diaphragm is integrated with a coil hobbin.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 50~54 (1993)

Electrical Equipment for Reverse Cold-Rolling Mills

by Kenji Mori, Koichi Ishimura & Ken Okamoto

Cluster rolling mills manufactured by Mitsubishi Heavy Industries are becoming popular for use in new reverse cold-rolling mills. Mitsubishi Electric has delivered and proven its electrical systems for these mills. The article introduces the features and control performance records of its electrical equipment, specifically, the drive and control systems.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 80~85 (1993)

The 70P-X3 High-Resolution Multimedia Projector

by Yoshiteru Suzuki, Koji Minami, Hitoshi Nakahara, Akira Hitotsumatsu & Yasutoshi Mihara

The corporation has developed a high-resolution 70-inch rear-projection monitor system capable of displaying not only NTSC and HDTV signals, but also graphic images from personal computers and workstations. The unit's auto-scanning function is compatible with horizontal scanning frequencies up to 75kHz. Newly developed digital deflection technology prevents color errors near the screen edges, while uniformly high precision video circuits, CRT and projection optics realize resolution suitable for multimedia applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 55~58 (1993)

An Anti-Electrolysis Power Supply for Wire-Cut EDMs

by Hisashi Yamada, Takuji Magara, Seiji Sato, Takeshi Yatomi & Akiyasu Ito

The corporation has developed an anti-electrolysis power supply for wire-cut EDMs capable of both rough and mirror finishing. The power supply prevents corrosion due to electrolysis, dramatically reducing microcracks and surface damage induced by machining. The power supply gives wire-cut EDMs high precision, and makes them suitable for applications ranging from die machining--where extremely long tool life is necessary--to component machining.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 86~90 (1993)

Noise-Adaptive Audio Signal Processing for Car-Audio Systems

by Ken'ichi Taura, Fujio Hayakawa, Masahiro Tsujishita, Masashi Watanabe & Jun Ishikawa

The corporation has developed noise-adaptive signal-processing technology for car stereos that compensates for audio-masking effects that occur in a vehicle with its engine running. The system processes the signal, regulating dynamic-range compression and low-frequency boost to suit the current noise level. The operating parameters of the system were carefully adjusted to yield a subjectively constant sound level without displeasing effects, such as "breathing", under a wide variety of road conditions. Passengers can therefore enjoy music programs with a diminished sense of road noise.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 59~64 (1993)

The MELNET R2000: A High-Speed Multi-Protocol Router

by Masayuki Eguchi, Masamitsu Saito, Motoyuki Kon, Yasunori Nemoto & Tatsuki Ichihashi

The corporation has developed the MELNET R2000, a router capable of linking various LANs, such as FDDI and CSMA/CD, and wide-area networks like leased lines, packet-switched networks and ISDN. The multi-protocol router employs a RISC processor to achieve high performance, provides excellent connectivity for distributed networks, and offers essential security functions. The article introduces the features, configurations, and application examples for LAN systems.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 91~94 (1993)

Combustion Noise Reduction in Home-Use Burners

by Teruo Sugimoto, Minoru Sato, Shinji Nakashima, Yoji Murakami & Masashi Tamura

The corporation has developed a combustion noise-reduction technology for its kerosene "Fan Heater" series, now one of the most popular residential heating appliances in Japan. The major emphasis was placed on lowering noise and turbulence in the air-fuel mixture. The air-spray atomization RTS burner employs twin nozzles and double strainers. The CCV burner heats the combustion air and uses a hot gas ejector. These measures reduce the noise levels of both types of burners by approximately 5dB.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 67, No. 2, pp. 65~69 (1993)

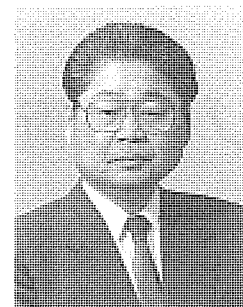
A Linear Accelerator for a Free-Electron Laser

by Susumu Nishihara, Toshimitsu Suzuki, Yoshiyuki Yosojima, Shinji Sato & Kazuo Imasaki

The corporation, together with the Institute for Laser Technology, has developed a linear accelerator for investigations related to free-electron lasers. The apparatus consists of a new RF electron gun and an accelerator cavity that accelerates electrons to close to the speed of light. The accelerator is capable of generating an electron beam with the intensity required for free-electron laser oscillation. The development of this laser holds much promise for expanding the applications of laser light.

オゾンの発生技術と応用特集に寄せて

京都大学工学部
衛生工学教室
教授 宗宮 功



最近の話題の一つにオゾン層の破壊問題がある。オゾン利用を促進しようとする立場からみると、オゾンそのものが身近な地球のジャケットとして存在し、我々を含め地上に生存する生物群を紫外線から保護する有益な層であると論ぜられており、オゾン存在の理解の助けとなる。生活や生産の各場でオゾンが広く利用されようとしているが、オゾンは強力な酸化剤であり、使用法を間違えば命取りになりかねないので、正しい使用法と適切な使用量を周知する必要がある。

オゾン処理の利用範囲は年々広がり、超純水製造、おいしい飲み水の製造、プールの水処理、食品の洗浄・殺菌・保存、クーリングタワーでの藻類繁殖防止とスケール除去、温泉や風呂水の消毒と有効利用処理、廃液処理、下水処理、し尿処理、汚水処理水の再利用、プロセス内有機物の酸化分解(IC製造)、空調設備での使用、時には医学的な治療(西ドイツなど)にまで利用されつつある。

水処理プロセスにあっても、高品質の水が要求されるようになり、オゾン処理は必須不可欠の処理プロセスとなりつつある。例えば、浄水過程では、オゾン・生物学的活性炭(BAC)が中心となり、下水処理にあっても処理水の再利用をする際には凝集・沈殿・ろ過・オゾン処理のプロセスが効果的に用いられている。適用の場は急激に広がりつつあるが、一方ではオゾン処理関連技術の開発や標準化が遅れている。オゾン処理プロセスが抱える技術的な問題の大きなものを区分けしてみると以下ようになる。

(1) オゾン発生装置関連では： オゾンの処理効果は十分評価できても、高価であるのでどうも？といった評価をあちこちで聞く。特に高品位の水質を求めながら、省エネルギーの立場を追求するとき、低コストの発生装置の開発が

期待されているが、それほど画期的な商品が新しい発想のもとに開発されているとは考えられない。また、変化に富む適応場所に応じた多種類の発生装置も開発する必要がある。

(2) オゾン吸収・反応槽について： 対象とする水ごとに、オゾンの吸収のさせ方、反応のさせ方が異なり、吸収槽と反応槽とを一つとするか別々に設計するかといった技術的な詰めがまだ不十分であり、経験に基づいて設計されている段階でしかない。いわばデータ蓄積段階であるが、設計因子の特定化、設計方法の規格化を進める必要がある。

(3) オゾン濃度の計測と制御について： 安全で安価な処理のためには、正確なオゾン濃度や消費オゾン量の計測が必要である。発生した高価なオゾンが無駄にすることなく、有効利用していくための処理プロセスの制御法を開発する必要がある。

(4) プロセス構成について： 必要な量のオゾンが発生し、注入し、有効に反応させ、目的とする効果を効率的に得るための処理プロセスをうまく構成し、かつ維持管理を容易にし、故障を減らし修繕を容易にするような最適なプロセスを効率よく設計できる手法の開発をする必要がある。

従来のオゾン処理プロセス自体は現場ごとの経験で設計されたため、組織的で総括的なプロセスの解析がなされていないので、時には過大設計となったり、対象水質の変化のため有効な処理効果が得られなかったりすることがみられることがある。これら为了避免するためにも、オゾン処理プロセスの特性化と規格化を早急に進め、多くの設計者が容易に新しい分野へ技術を導入できるような形で技術基準を整備する必要がある。

オゾン技術の現状と展望

磯部克彦*

1. ま え が き

当社がオゾン発生機とそれを用いた水や空気の浄化技術の開発に本格的に着手したのは1970年、今から22年前である。当時国内では、信頼できる工業用のオゾン発生機はまだなく、利用技術の研究も一部で行われていたに過ぎなかった。このような状況の中で、公害処理や環境改善にオゾンが有効であると考え、いち早く着手したわけである。この間、オゾン事業は順調とはいえない時期が長く続いた。しかし、当社はオゾンが将来必ず役立つ時代がくるであろうことを確信し、社会的使命として今日までオゾン技術の一層の開発、普及に努力し続けてきた。

最近のオゾンを取り巻く状況は急展開している。各地の浄水場で、カビ臭などの異臭味除去と並行して、有機塩素化合物生成の低減を図ることを目的としたオゾン高度処理技術の検討が行われ、厚生省も補助制度を創設した。いまや、浄水の高度処理としてオゾン処理に疑念を抱く人はいなくなったといっても過言ではない。また、1991年8月に国際オゾン協会アジア太平洋支部を発展的に解消し、日本オゾン協会が設立された。産官学が協力して健全なオゾン技術の発展と普及を図ることを目的としている。1991年3月に開催された日本オゾン協会主催の第1回学術講演会に63の発表があり、200名を超える参加者を見ることができた。

ここでは、当社におけるオゾン技術開発の軌跡を振り返り、今後の展望について述べてみたい。オゾン処理技術の理解に参考になれば幸いである。

2. 当社のオゾン処理技術開発の軌跡

22年にわたるオゾン技術開発の中で、研究・開発の成果を積極的に公開してきた。外部発表した技術論文の件数は195

件にのぼる。表1はその分野別内訳である。オゾン発生機にとどまらず、様々な応用分野の研究・開発も併せて行ってきた。

2.1 オゾン発生機

オゾンは通常、乾燥空気を原料として無声放電によって使用場所で製造される。したがって、オゾン発生機の経済性と信頼性がオゾン利用技術の中核をなす。

1973年以来、オゾン発生機に関する技術発表を38件行っている。無声放電に関する基礎理論についても多数発表しており、この分野で3名が学位を得ている。また、定電流型インバータ電源、高効率空気冷却乾燥装置、高精度放電管製造技術などの周辺技術、機器を独自に開発した。

図1はオゾン発生機の進歩の変遷である。乾燥機などの周辺機器が消費する電力を含めて、1kgのオゾンを発生させるのに必要な電力は、当初の30kWh強から20kWh程度にまで低減された。発生オゾン濃度も12g/Nm³から20g/Nm³に上がった。現在、発生量が1g/hから60kg/hに至る多彩なオゾン発生機を製品化している。市場に出したオゾン発生機は1,000台を超え、占有率は65%である。併せて、全国に保守体制を確立しており、ユーザーには安心して使用いただいている。

以上のようなオゾン発生機に加えて、酸素リサイクルオゾン発生システムを開発した。オゾン発生機は原料を空気から酸素に替えると発生濃度が倍増するので、使用電力量が低減される。酸素を有効に使うためオゾンに未変換の酸素を回収して再び原料に使用するのが酸素リサイクルである。これには、オゾンを低温のシリカゲルに吸着・蓄積させる方式と、オゾン処理反応器からの排気ガスをモレキュラーシーブなどで精製して再使用する方式とがある。前者の応用として、熱交換器などの生物付着抑制技術を実用化した。これはオゾン発生機の基礎技術と利用技術を融合して開発したもので、

表1. 当社の発表文献内訳

分 野	件 数
オゾン発生機	38
浄水処理関連	45
廃水処理関連	47
付着生物防止	15
し尿処理廃水	4
脱 臭	18
その他	28
合 計	195

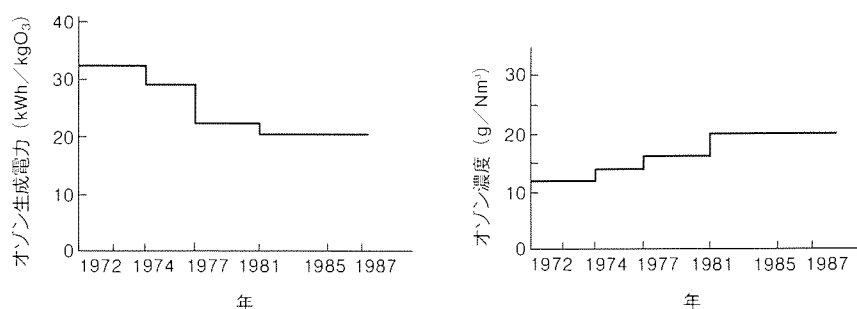


図1. オゾン発生機の変遷

ほかにはないユニークな技術である。

2.2 オゾン処理技術

表1に示したように、オゾン発生機に加えて多くの分野でも、オゾン処理技術の開発を進めてきた。

(1) 浄水処理

最も古い発表は22年前の1970年である。1970年代に水質改善に関する基礎研究、オゾン反応槽に関する基礎研究を実施している。その後、今日に至るまで研究・開発を続け、水道設備へのオゾン発生機・オゾン処理設備を9か所に納入している。

(2) 下水処理水

下水処理水の高度処理に関しても早くから開始した。20年前に団地生活排水の高度処理のパイロット試験を実施した。下水処理水の高度処理はその後長い間実用されるには至らなかったが、ここ2～3年、水に親しみ清流を復活させるための親水や修景用水としての再利用、トリハロメタン対策としての塩素代替消毒、脱色等のニーズが急速に出、この分野でオゾン発生機・オゾン処理設備を9か所に納入している。

(3) 排水処理

当初最も力を入れたのは染色排水の脱色である。1972年(昭和47年)から2か年にわたって通産省の補助金を得て京都の染色工場内に大規模の実証プラントを設置し、実用化試験を行った。染色排水処理自身はあまり普及しなかったが、ここで得た技術は当社のオゾン水処理の開発に大いに役立った。

工場排水処理としてユニークな技術は電着塗装排水の高度処理である。原水のCODが150ppmであったものを、生物処理(回転円盤)、電解浮上、過酸化水素添加オゾン処理で10ppm以下にすることができた。処理水は水洗用水として再利用された。過酸化水素添加オゾン処理は当社が世界に先駆けて開発した技術であり、有機物の完全酸化を可能にするものである。国内では普及していないが、ヨーロッパでは浄水処理における農薬分解に実用されており、アメリカでは浄水脱臭でオゾン必要量の低減化のために検討されている。

(4) 用水処理

水の再利用は水資源の有効利用のほかに、環境保全にも重要である。用水処理への応用は国外に比べて少ないが、この分野でも先駆的な研究開発を行っている。

プール用水浄化はオゾンと活性炭の組合せであるが、実際のプールでの実試験を通して、我が国の実態に合ったコンパクトなシステムを開発し、120件以上の納入実績をもっている。同様の技術として、水族館や栽培漁業用水の浄化技術を開発し、20件の実績を得ている。

ユニークな技術として、前述した吸着・蓄積させる方式の酸素リサイクルオゾンシステムを利用した間欠オゾン注入による水管路壁への生物付着防止技術がある。水管路壁に付着したスライムなどがはく(剥)離すると用水の水質が悪化し

て製品に重大な影響を与える。熱交換器であれば熱交換効率が大幅に低下する。オゾンの強力な殺菌作用と付着生物の増殖様式を利用したもので、塩素などのスライム防止剤と比べて格段の効果があるだけでなく、平均添加量が少ないので運転費も安くできた。製鉄工場の冷却水系、下水処理水を熱源としたヒートポンプと組み合わせて冷暖房に利用されている。最近話題になった花の博覧会の大温室(咲くやこの花館)の冷暖房は下水処理水を熱源としたヒートポンプシステムによって行われているが、熱交換のスライム付着防止にこの装置が使われている。

そのほか、し尿処理水高度処理、パルプ漂白、食品保存など、実に多くの分野における研究開発を行ってきた。し尿処理水高度処理のように、既に三百数十箇所で脱色を主体に使用実績があるものもあるが、今後必要になるであろう分野も多くある。

(5) 空気浄化

水処理に加えて空気脱臭技術も開発した。代表的なものはオゾンと脱臭触媒を併用したもので、現在下水やし尿処理場の脱臭に使われているが、今後この方面の発展が期待される。

3. 展 望

3.1 技術の展望

(1) オゾン発生機

オゾン技術の普及とともに、大容量オゾン発生機の需要が増すと考えられ、信頼性及び経済性の追求がますます重要になる。オゾン発生方法としては幾つかの方式があるが、大容量オゾン発生機としては現在のところ無声放電方式に代わるものはない。

無声放電によるオゾン発生効率にはほぼ限界近くまできており、今後空気原料のオゾン発生機では、電力効率を維持して発生濃度を上げること、全電力の35%を占める周辺機器の改善が課題になる。

原料気体の酸素濃度を高めるとオゾン発生効率、濃度の向上ができる。最近、低圧力で動作させるPSA方式の酸素富化装置が開発されており、エネルギーコストの低減が可能になった。設備コスト、信頼性、制御性など解決すべき課題があるが、いずれにしてもオゾン発生機の特性ととの整合が不可欠である。

(2) オゾン処理技術

オゾン処理の中で基幹となるのは浄水の高度処理であろう。これまでの浄水高度処理導入に当たっては、綿密なパイロット試験に基づき設計され、建設されたが、今後はより早期の設計と検討が要求されるようになって考えられる。このために、反応槽を含めた総合的な標準化が必要になる。

また、我が国ではオゾン処理単独ではなく、生物活性炭との複合処理が主体である。これに関しても、反応槽を含めた標準化が重要である。

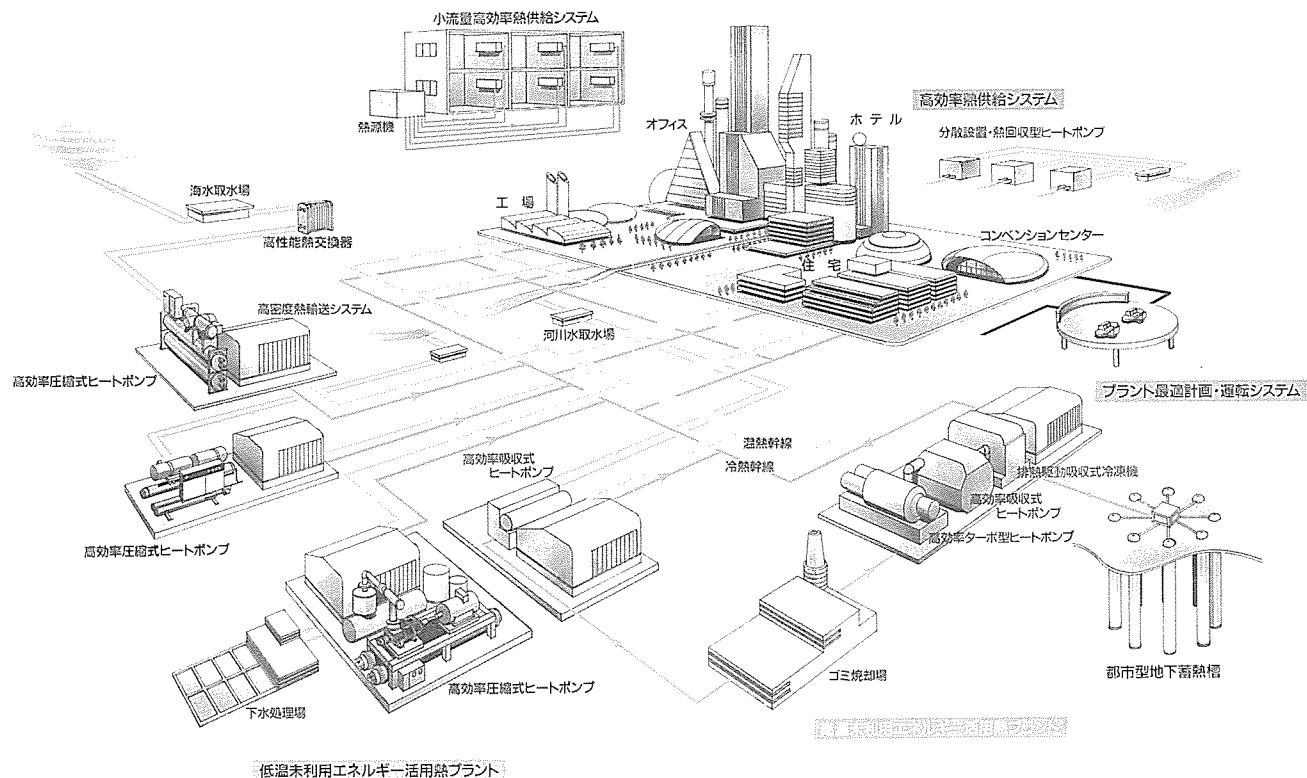


図2. 未利用エネルギー活用地域熱供給システム概念図
(出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)⁽²⁾)

浄水源の水質は多くの場合悪化する方向にあり、都市部の水源では種々の有害な薬品、農村部では農薬の混入が考えられる。過酸化水素添加オゾン処理法に代表されるAOP(アドバンスド オキシデーション プロセス)がヨーロッパやアメリカで実用又は検討されているので、近い将来我が国でも必要になることも考えられる。

3.2 市場の展望

(1) 上水

オゾンを取り巻く環境、特に上水分野でのそれは急激に変化している。米国で浄水消毒用塩素に替わってオゾンが使用され始めた時と同じくして、オゾンには消極的であった水道業界でも厚生省と自治省が強調して今後10年間に“おいしい水”を供給するためのオゾン高度処理導入の動きが出てきた。これらの総事業費は5,000億円とも言われており、今後大きな市場になると考えられる。

(2) 下水

下水道が100%普及したと想定した東京では、平均の雨水が233万 m^3 /日、水道配水量が370万 m^3 /日であるのに対して、下水処理量は485万 m^3 /日とされている⁽¹⁾。

このような豊富な資源としての下水はいろいろの方面で利用されようとしている。建設省が進めている事業として、アクアトピア計画(親水都市計画)、アメニティ下水道モデル事業、下水処理水循環利用モデル事業、アクアパークモデルなど多くの事業が計画・具体化されつつある。

また、通産省は未利用エネルギー高度活用冷暖房技術の開発を進めている。図2はその構想を示す概念図⁽²⁾である。

これらの中で、オゾンが果たすべき役割は極めて大きい。前述したように、当社は既に9か所で親水、修景用水を造るための施設にオゾン処理設備を納入している。また、通産省のプロジェクトに参画して、間欠オゾン発生機を組み入れた低温熱源対応ヒートポンプシステムの開発に着手している。水温5℃の海水から60℃の温水を成績係数(COP)3で得ることを目標にしている。これが実現すれば、下水を熱源として60℃の温水をCOPが3.6の高効率で得られることが期待できる。

(3) その他

水族館、水泳プール、ふろ(風呂)などの用水水質改善ができることから、レジャー、スポーツ分野への適用も広がっている。正に市民の要求が“量”から“質”へ方向転換する現代に、オゾンが多方面から期待されようとしているのが現状である。オゾンは市民生活を豊かにするための種々の分野で活用されるはずである。

参考文献

- (1) 東京都：下水道—21世紀都市東京を創る (1990-10)
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：未利用エネルギー高度活用負荷準化冷暖房技術開発 (1992-3)

オゾン発生技術

本多敏一*
田中正明**

1. ま え が き

オゾンは自然界にも普通に存在する物質であり、最終的には分解して酸素に戻るため、環境に対する安全性という意味で安心して使える利点をもつ。このためオゾン利用の歴史は古く、ドイツでは約100年も前に上水の殺菌用として使用されている。

無声放電が注目されたのは、1857年にドイツの W. von Siemens が無声放電を利用したオゾン発生装置（オゾナイザ）を考案して以来である。その後、オゾン発生方式として電解法、光化学法、高周波電界法、放射線照射法など多くの方式が見いだされたが、無声放電による方式が最も効率良くかつ工業的オゾン発生法として適しているため、今日ではオゾン発生装置はほとんどがこの方式によっている。

当社では、他社メーカーに先駆けて1961年ごろからオゾン発生技術の開発に着手、それまで主に化学反応の面から検討された現象を放電の立場から再検討を加え、放電現象を体系的に調査をした。その研究成果は38件に及ぶ研究論文発表とともに、国内最大容量の高性能オゾナイザである OT-E 型オゾナイザの性能だけでなく、三菱オゾナイザの全シリーズの中に生かされている。

ここでは、無声放電によるオゾン発生技術を概観するとともに、当社が開発してきた工業用オゾン発生装置の変遷を述べその特徴を紹介する。

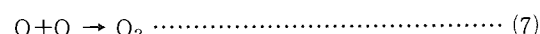
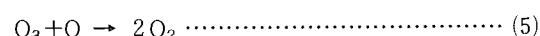
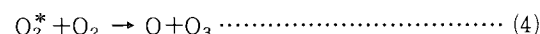
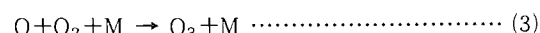
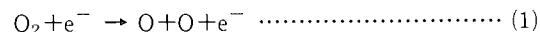
2. 無声放電法によるオゾン発生機構

2.1 無声放電法の概要

無声放電はオゾンを生成させるのに適した放電であるため、オゾナイザ放電とも呼ばれている。無声放電を生成させるためには、金属電極間に誘電体を介在させた図1に示すような電極構成が必要条件である。この電極間に直流電圧以外の交流やパルス電圧などの時間的に変化する電圧を印加するとギャップでは無声放電と呼ばれる無数の微細な放電が生成され、発生・消滅を繰り返している。個々の放電はアークに移行したり、電極面の局所に集中することがなく、パルス的な放電が電極面の全域にわたって均一に形成されるため、気体温度の上昇が抑えられて電子温度のみ高い非平衡放電が大気圧以上でも安定に実現できる。このような放電の特質が効果的に生かされたものがオゾナイザである。

放電ギャップ内では様々な反応が起こるが、基本的な反応

を式(1)～(7)に示す。

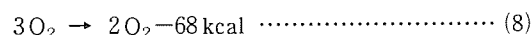


電極から放出された電子 (e^-) は、酸素分子と衝突して式(1)のように酸素原子へ解離させるか、式(2)のように励起酸素分子を生成させる。酸素原子及び励起酸素分子は、他の酸素分子と反応して式(3)、(4)でオゾンを生成する。放電場（放電ギャップ内）では、以上のようなオゾン反応と並行して式(5)～(7)のオゾン分解反応も行われる。式(5)はオゾンと酸素原子、式(6)はオゾンと電子、式(7)は酸素原子同士の衝突によるオゾン生成抑制反応である。

この方法によるオゾン生成効率、生成オゾン濃度によって異なるが、実用濃度範囲（空気原料：12～20 g/Nm³、酸素原料：30～60 g/Nm³）内での放電に消費した電力で示すと、空気原料の場合～13 kWh/kg-O₃、酸素を原料に用いると～6 kWh/kg-O₃ である。

2.2 無声放電によるオゾン生成反応とエネルギー効率

オゾンの生成は熱化学式で表すと、



であり、オゾン生成効率は1,200 g/kWh（エネルギー効率100%）である。放電ギャップ内におけるオゾン生成は、まず電子と酸素分子の衝突による酸素分子の励起に始まる。この励起状態の酸素分子を生成するためにエネルギーが必要であり、この場合のオゾン生成エネルギー効率は、最大32%の結果が得られている⁽¹⁾。極低濃度のオゾン生成に限定し

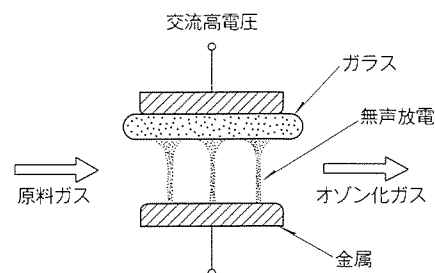
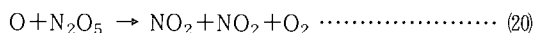
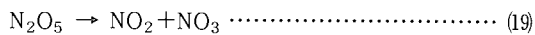
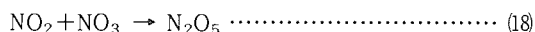
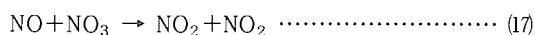
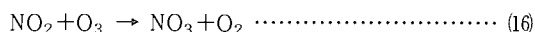
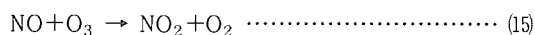
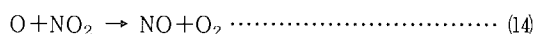
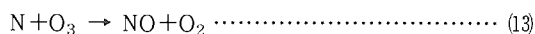
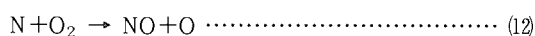
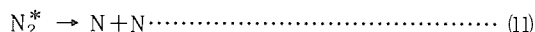
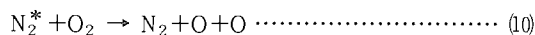
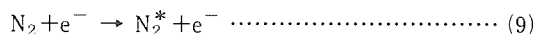


図1. 無声放電式オゾン発生機の構造

たときのオゾン生成効率の実測値は、空気を原料としたとき 90 g/kWh (エネルギー効率7.5%)、酸素を原料としたとき 250 g/kWh (エネルギー効率20%)である。

生成オゾン濃度が高い条件では、電子及び酸素原子によるオゾンの分解反応が顕著になり(式(5)、(6)の反応)、オゾン生成効率が低下する。

また、原料気体に空気をを用いた場合には共存する窒素がオゾン生成反応に影響を与える。これらの反応式を式(9)~(20)に示す。



式(9)は電子の衝突による窒素分子の励起を示し、引き続く反応のうち式(10)は励起窒素分子による酸素分子の解離を示したもので、これによってオゾンの生成効率が酸素濃度の約0.5乗に比例する特性を与える。酸素濃度とオゾン収率の関係を図2に示す。一方、窒素原子への解離は、生成したオゾ

ンや酸素原子を消費してオゾンの生成効率を低下させる。特に式(15)、(17)により、連鎖的にオゾンが分解される。

以上、実際のオゾン発生器の放電ギャップ内では、電極から放出された電子 e^- による酸素原子への解離や励起酸素分子の生成によるオゾン生成反応と同時に、電子 e^- による生成オゾンの解離、振動、窒素など共存ガスとの反応など様々な分解、消費反応が連続的に起こっており、熱化学式の式(8)で示されるエネルギー効率に比べ、実用上のエネルギー効率は低い。これらエネルギー効率を表1に示す。

2.3 オゾン生成効率(オゾン収率)と放電条件

前述したように放電エネルギーのうちで、オゾン生成に費やされるエネルギーは7.5~20%以下であり、残りのエネルギーは熱損失となり、放電空間のガス温度上昇を招く。一方、オゾン生成の化学反応の面からは放電空間のガス温度は低い方が良く、実用オゾナイザは電極を水冷することによって空間の温度上昇を抑えている。オゾナイザは電極の形状により、平板型と同軸円筒型のものに分けられるが、コストや設置面積、装置の信頼性などそれぞれ特徴があるだけで、オゾン発生性能は基本的には変わらない。最も代表的な同軸円筒型オゾナイザの構造を図3に示す。

オゾナイザのオゾン発生特性とオゾン収率に影響を与える諸因子について図4に示す。オゾナイザ入口に導入される原料ガスの酸素濃度とその乾燥度(露点)が決まるとオゾン発生特性は基本的にはオゾナイザの“放電状態”及び“温度の効果”の二つの状態で決定される。オゾナイザの諸因子のうちで、放電ギャップ長 d とガス圧力 P は“放電の状態”に関係し、 d と放電電力密度 W/S 、冷却水温度 T_w 、冷却方式は“温度の効果”に関係する。

表1. オゾン生成におけるエネルギー効率

単位: %

熱化学式による エネルギー効率	無声放電場での 理論エネルギー効率	実用上の限界 エネルギー効率	
100	32	空気	7.5
		酸素	20

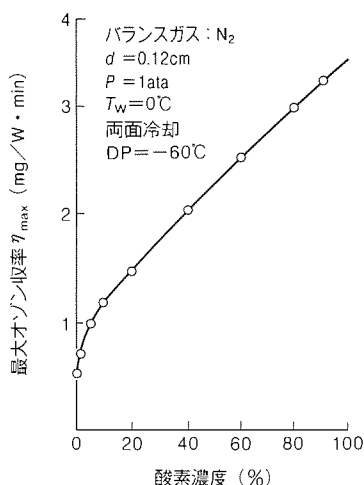


図2. 酸素濃度とオゾン収率の関係

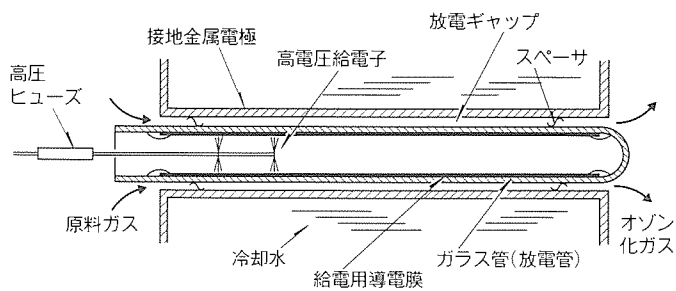


図3. 同軸円筒オゾナイザの構造(片面冷却式)

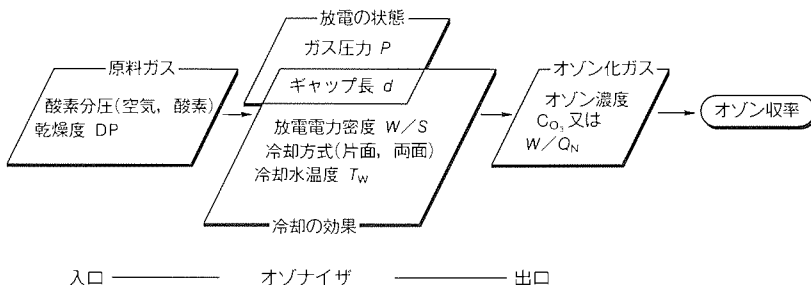


図4. オゾン発生に影響を与える諸因子

オゾン収率はオゾナイザの出口のオゾン濃度 C_{O_3} 又は W/Q_N によって決まり、これらが大きいほどオゾン収率は悪くなる。ここで、 W は放電電力、 Q_N は大気圧換算の原料ガス流量で、オゾン発生量を Y_{O_3} とすると、

$$Y_{O_3} = C_{O_3} \cdot Q_N \dots\dots\dots (21)$$

であり、オゾン収率は (Y_{O_3}/W) で定義される。

次に、オゾン収率に影響する因子として、原料ガス組成と放電条件について述べる。

2.3.1 原料ガス組成

(1) 酸素濃度

オゾン生成に最も影響を与える因子に酸素濃度が挙げられる。これは、オゾンの生成メカニズムが酸素の解離から始まるので当然のことである。酸素濃度の増加によってオゾン収率は増加するが、最大オゾン収率は酸素濃度に対して約0.5乗に比例する(図2)。したがって、原料ガスを空気から酸素へ替えると、オゾン収率が約2.2倍に向上する。このようにオゾンの生成効率が酸素濃度に対して一次でない理由は、共存ガス(空気を原料とする場合は窒素)の放電による励起がオゾンの生成に利用されることと、窒素と酸素から並行して生成される NO_x が連鎖反応でオゾンを分解するなど、複雑な競争反応による。

(2) 水蒸気

オゾン生成原料ガス中の水蒸気の共存は、大きくオゾン生成に影響を与える。図5は酸素を原料としたときの水蒸気濃度とオゾン収率の関係を示したものである。100 ppmの水蒸

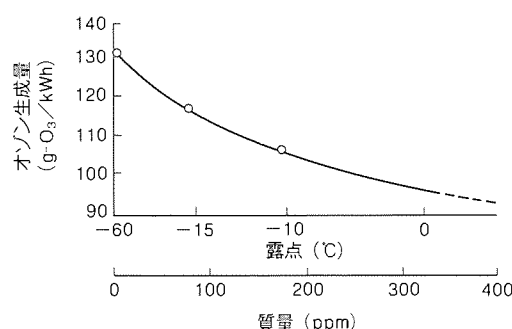


図5．オゾン生成への水蒸気の効果(原料ガス：酸素)

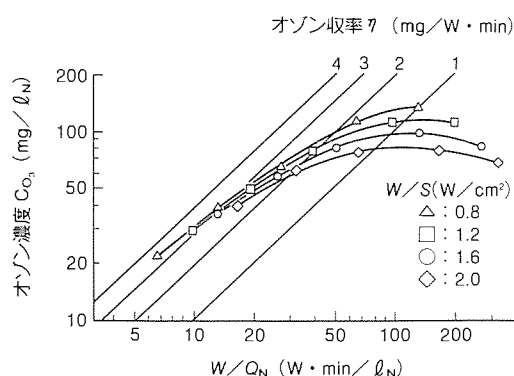


図6． W/Q_N とオゾン濃度の関係

気共存でオゾン収率が20%減少している。水蒸気によるオゾン収率の低下のメカニズムは明確ではないが、HO ラジカルによる連鎖オゾン分解反応と言われている。したがって、通常ではオゾン製造に露点が $-50^{\circ}C$ 以下の乾燥気体が原料ガスとして使用されている。

2.3.2 放電条件

(1) オゾン濃度と放電電力密度

図6に W/Q_N とオゾン濃度 C_{O_3} の関係を示す。図中、オゾン収率 η の読み取り線が書き入れてある。 W/Q_N の小さい領域では放電電力密度 W/S によらずオゾン収率 η は一定の値に漸近する。 W/Q_N の大きい領域では放電電力密度が大きくなると η が低下する。これらは W/Q_N (又はオゾン濃度) の小さいところでは、 η が空間の温度に無関係で“放電の状態”のみによって決まり、 W/Q_N の大きなところでは、“放電の状態”と“放電場の温度”が η に関係し、放電電力密度が大きくなると放電空間温度が上昇するためオゾン収率が低下するのである。また、放電電力密度を一定に保ったとき、オゾン濃度は W/Q_N の一義的な関数として表せるが、オゾン濃度が高くなるに従ってオゾン収率が低下する。

(2) 冷却水温度の影響

オゾナイザの電極の冷却水温度 T_w を上昇させると放電空間の温度が上昇するため、 W/S と同様の傾向が現れる。図7は冷却水温度とオゾン収率の関係を示したものであるが W/Q_N の小さいところでは冷却水温度上昇の影響は現れず、 W/Q_N の大きいところではオゾン収率が低下する。

(3) 放電ギャップ長 d の影響

放電ギャップ長は“放電の状態”と“放電場の温度”の両方に影響を与える。図8は放電ギャップ長とオゾン収率の関係を空気と酸素原料について示したものであるが両者は特性が異なる。 W/Q_N の小さいところでは放電ギャップ長の減少に伴いオゾン収率は増加するが、空気原料では $d=0.12cm$ 近傍で最適値をもつ。これはガス組成による放電空間内の反

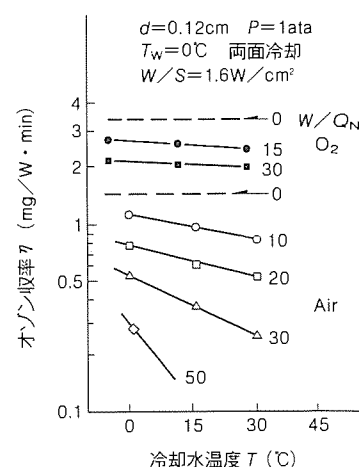


図7．冷却水温度とオゾン収率の関係

応の違いによると考えられている。 W/Q_N の大きなところでは“放電の状態”のほかにも、放電ギャップ長が小さくなるほど放電空間の“冷却効果”が良くなるためオゾン収率は増加する。酸素原料の特性はこの傾向を示すが、空気原料による $d=0.12\text{ cm}$ と $d=0.05\text{ cm}$ の特性を比べると逆に後者の方がオゾン収率が大きく低下している。これは空気原料ではオゾン発生の大きな妨害作用を及ぼす NO_x が副次的に発生し、図9に示すように放電ギャップ長が小さくなるほど NO_x の発生が増して、“冷却の効果”よりも大きな影響を与えるためと考えられている。

(4) 原料ガス圧力 P の影響

図10はガス圧力 P とオゾン収率の関係であるが、圧力の最適値が存在することが分かる。この最適値は放電ギャップ長が小さいほど大きな値となり、大まかには放電ギャップ長とガス圧力の積で決まる。オゾン生成反応からすれば圧力が増加するほどオゾン収率が大きくなるが、圧力が高すぎると、放電ギャップ長の影響と同様に“放電の状態”が変化してオゾン収率が減少するものと推定されている。

以上、オゾン収率と放電条件について述べた。図11にオゾン発生量・効率に及ぼす影響と対応する機器の関係を示す。現在の空気式オゾナイザはこれら要因の総合的な検討の上で実用化されている。

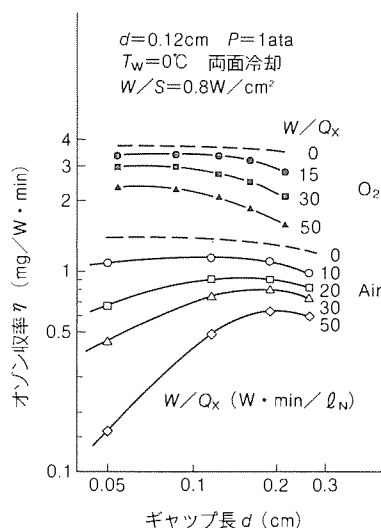


図8. 放電ギャップ長とオゾン収率の関係

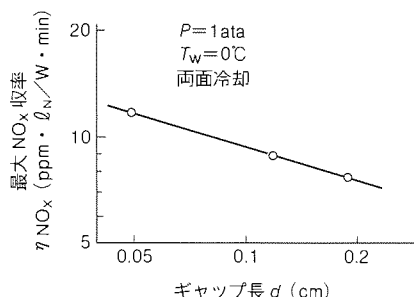


図9. 放電ギャップ長と NO_x 生成の関係

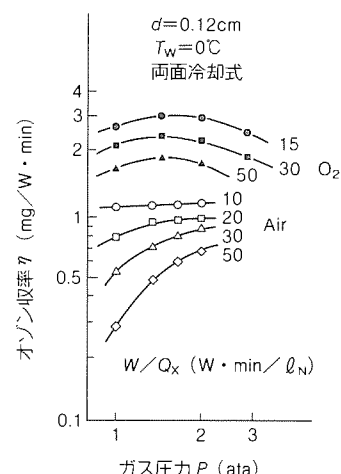


図10. ガス圧力とオゾン収率の関係

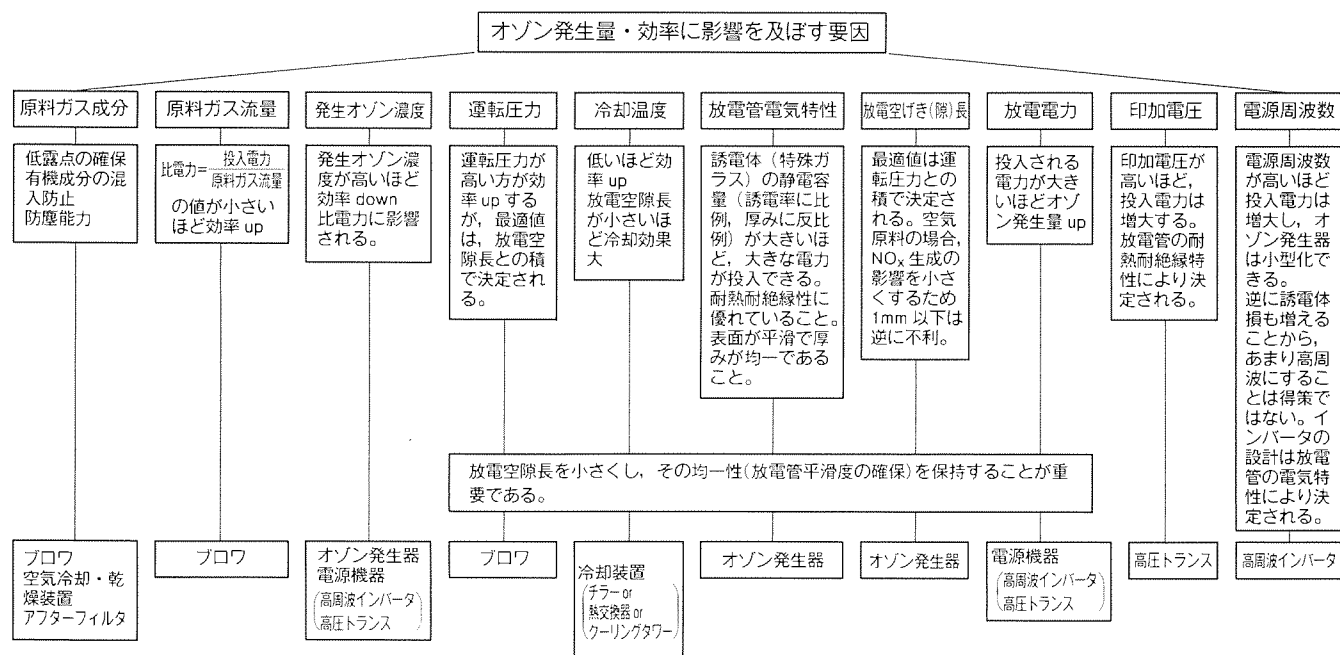
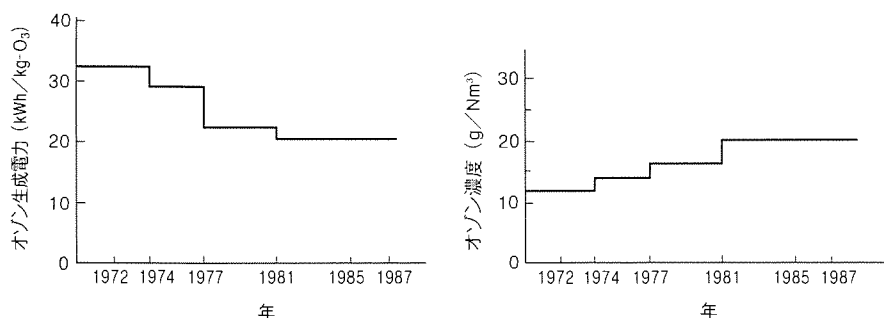


図11. 空気式オゾン発生装置における効率に及ぼす要因



(a) オゾン生成消費電力

(b) 生成オゾン濃度

図12. オゾン発生装置の進歩

3. オゾン発生装置 (オゾナイザ)

3.1 オゾナイザの進歩

我が国において工業用オゾナイザの製造を開始したのは昭和40年代で、当時のオゾナイザは高価で多大の電力を要し、大容量機の実績がないなどの批判を受けていた。その間、国産のオゾナイザは産業廃水やし尿二次処理水を対象に有害物質やCODの除去、殺菌、脱臭、脱色等を目的として使用され、現在1,500を超すプラントの実績を積み重ねてきており、同時にオゾナイザに数多くの改良が加えられてきた。

オゾン生成のための消費電力及び生成オゾン濃度の推移を図12に示すが、電力消費では昭和47年当初、オゾン1kgを製造するのに補機の動力を含めて32.5kWhの電力が必要だったのに対し、現在では18~20kWhと約40%軽減している。これに加えて、生成オゾン濃度も10g/Nm³から20g/Nm³と2倍に向上されるなど大幅に技術革新がなされている。生成オゾン濃度の高濃度化は、水処理プロセスに利用する際、オゾンの利用効率を高め、結果的にオゾナイザの小型化に結びつく。空気原料方式で単機容量が38kg/hのオゾナイザが製作実働し、また酸素原料方式では単機容量60kg/hが製作されるに至り、大容量化に関する問題点はほとんど解決されたといえよう。このように、性能においても容量においても世界の水準を越えるまでになり、オゾン発生の高効率化と省スペース、低価格、高制御性が一段と進歩したものとなっている。

これらの成果の主な要因は、

- (1) オゾナイザは定電流型インバータを電源に備え、高周波、高密度放電により、単位放電面積当たりの投入電力を大幅に増大させ、発生するオゾン濃度を高めるとともに、必要な原料ガス量を低減させた。
- (2) 放電空間寸法精度を飛躍的に向上させたガラス電極を開発し、放電ギャップ長をきん(僅)少に保持することにより、放電空間の冷却効果を高め、安定した放電を得ることを可能にした。
- (3) オゾン発生量の制御範囲が5~100%に広がり、オゾン発生量調節の応答を高速化し、急激な負荷変動に即応できる

高い制御性能が得られている。

(4) 信頼性の面では、高電圧放電管にアルミ溶射電極膜と異常放電防止用電界緩和処理を採用し、実使用約10年以上と格段に延びている。

(5) オゾン発生器本来の冷却は、中間熱交換器を用いた間接冷却方式が取り入れられ、冷却水質の悪いところでも発生器缶体の腐食防止が図られている。

3.2 オゾナイザの機器構成と維持管理

3.2.1 機器構成

オゾナイザは、①オゾン発生器、②原料空気供給装置、③冷却水供給装置、④電源・制御装置などで構成されるが、従来の商用周波を用いたものから、最近での高周波インバータを用いたシステムでは、これらが有機的かつ効率的に機能して初めてシステムとしての高効率化・省システム化・低価格化・高制御性・高信頼性を実現することができる。図13にシステムフローを示す。

(1) 原料空気供給装置

原料空気供給装置は、ブロワ、空気冷却・乾燥装置、アフターフィルタなどによって構成され、オゾン発生に必要な空気を必要な量・圧力・乾燥状態で、しかも大気中のじんあい(塵埃)を除去した状態でオゾナイザに供給する。

(2) 冷却水供給装置

冷却水供給装置は、循環ポンプ、熱交換器又はチリングユニットとクーリングタワー、空冷チラーなどによって構成され、オゾン発生時の発熱を除去し、効率的で安定したオゾン発生を可能とする。

(3) オゾン発生器

高誘電率で絶縁耐力に優れ寿命の長い特殊ガラスと耐食性の高いステンレス製の接地電極が高精度・微少ギャップで対向して構成されている。また、大口径放電管の採用により、1本当たりのオゾン発生量が多く、単位オゾン発生量当たりの使用放電管本数の低減を図っている。

(4) 電源・制御装置

電源・制御装置は、オゾナイザ高圧盤、コントロールセンタ、オゾナイザ操作盤・リレー盤、高周波定電流形インバータ盤、高電圧トランスなどから構成され、効率的で制御性の良いオゾン発生を実現する。

3.2.2 維持管理

空気を原料としてオゾンが発生させる場合、わずかながらN₂O₅とNO₂が生成されることが分かっている。湿気が高い空気を用いるとオゾンの生成効率が低下するのに対し、N₂O₅は湿度に関係なく発生するので、見掛け上N₂O₅の生成割合が高くなる。生成したN₂O₅は水蒸気と結合して硝酸となるので、金属材料を腐食させたり、水中の窒素化合物を

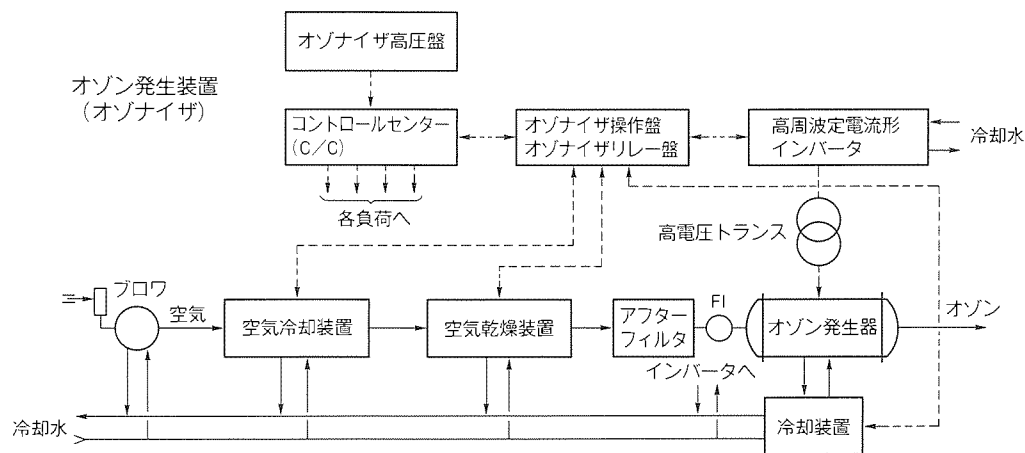


図13. オゾン発生装置のシステムフロー

増加させる原因となる。そのため、オゾン発生器へ供給される空気は、露点 -50°C 以下、有機物や不純物を含まないなどの条件が必要であり、特に空気源供給装置の維持管理は長期間の安定な運用において最も重要である。

4. む す び

空気中に豊富にある酸素分子を放電空間を通すことによって、電氣的にオゾンが発生させるオゾナイザも、今日その性能及び信頼性が著しく向上するとともに、環境分野に広く利用されるようになってきたことは、オゾナイザシステムのメーカーとしては誠に喜ばしく思う。ここではオゾン発生技術の一端を紹介したが、なお一層の技術開発を推進し、地球環

境改善に役立つことを念ずる次第である。本稿が技術者各位の参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) Kogelschats, U. : Ozone Synthesis in Gas Discharge, 17th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (Invited Lecture), Düsseldorf (1983)
- (2) 田中正明, 田畑則一 : オゾナイザの諸特性, 静電気学会誌, 7, No. 3, 150 (1983)
- (3) 出口富雄 : オゾンを中心とした高度浄水処理技術, 三琇書房 (1990)

オゾン水処理技術

1. ま え が き

オゾンは強力な殺菌作用があり、最初に工業的に利用されたのは浄水の消毒である(1892年)。その後ヨーロッパで広がったが、第一次世界大戦中に安価な塩素が製造できるようになり下火となった。1950年代に入って、オゾンの酸化力を利用した脱色などの工場廃水処理への適用がアメリカで検討されるようになった。我が国においても、1960年代からアメリカと同様廃水処理への応用が検討されるようになった。

最近になり、塩素消毒が種々の障害を引き起こすことが明らかになり、再び塩素代替としてのオゾンが脚光を浴びるようになったのは周知のとおりである。これまでの歴史をとおり、オゾンが様々な機能をもつことが明らかになり、一方でオゾン発生機の信頼性や経済性が飛躍的に向上したことが重なって、より広い分野でオゾン応用が広がつつあるのが現状である。ここでは、オゾン水処理の基礎的事項を当社が開発した成果を事例として総括的に紹介したい。

2. オゾン反応器

オゾン水処理の中核となる要素機器は、オゾン発生機とオゾン反応器である。周辺機器として、余剰オゾン分解装置、制御設備がある。ここでは、これらのなかでオゾン反応器にかかわる基礎的な事項について議論する。

2.1 オゾン反応器の理論モデル

オゾン反応器はオゾン発生機から供給されるオゾン含有気体を水中に分散させ反応させるものである。反応器は気体分散の方法で幾つかの形式があるが、実用されているほとんどは気泡塔形式である。

これは、反応器底部に多孔質のディフューザを設置したもので、それによってオゾン含有気体を微細気泡にして水中に分散させる。気泡が水中を上昇する間に、気泡中のオゾンが気液界面を通して水中に移動して反応する。反応器の重要な要件の一つはこのときの吸収率が高いことである。

気液界面でのオゾンの移動速度は拡散過程と考えることができ、気液界面と液本体の水中オゾン濃度差に比例する。単位気液界面積を移動する速度 N は次式で表される。

$$N = K_L (C^* - C_L) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K_L は液基準の物質移動係数、 C^* と C_L はそれぞれ界面における液中及び液本体中のオゾン濃度である。 C^* は、気泡中のオゾン濃度と平衡する液中オゾン濃度と考えること

ができる。

気液が連続流通する気泡塔の理論モデルとして、表1に示した3種類の極限モデルが考えられる。向流 GPLP モデルは気液が向流的に接触するもので、塔内の気液流は押出流れであると仮定される。並流 GPLP モデルは気液並流で共に押出流れ、GPLM モデルは液のみ完全混合であるとするものである。機械的かくはん(攪拌)がない場合、気泡は上昇の間に合体や再分散しないので気流は押出流れとしてよいが、液相は気泡群によりある程度攪拌されるので、これらは極限のモデルである。

この3種類のモデルでオゾンの物質収支式をたて、適当な境界条件で解くと、気中及び液中オゾン濃度を表す理論式として表1に示した式が得られる。液中でのオゾン減衰速度はオゾン濃度の一次に比例し、速度定数を k_1 とした。

2.2 オゾン反応器の特性

これらの式を用いて k_1 とオゾン吸収率、残留オゾン濃度である出口水中オゾン濃度の関係を計算した結果が図1である。ここで、ガス空塔速度 (U_G) は 5 m/h 、オゾン注入量は 3 g/m^3 、供給するオゾン含有ガス中のオゾン濃度は 20 g/m^3 、有効液深は 5 m 、水温は 20°C とした。浄水処理では通常この条件になる。

オゾン吸収率は、例えば浄水処理を想定した k_1 が $10/\text{h}$ の場合では、向流、並流及び完全混合モデルでそれぞれ75、70及び70%となり、向流が最も高くなる。この差は k_1 が小さくなるほど大きくなる。出口オゾン濃度は上記の順で1.5、0.9及び 0.9 g/m^3 であり、大きさは吸収率と逆の関係になる。

反応器の要件の一つであるオゾン吸収率の高い反応器モデルは向流 GPLP であることが分かる。つまり、気液を対向流にし、押出流れに近づけることによって吸収率は高くなる。

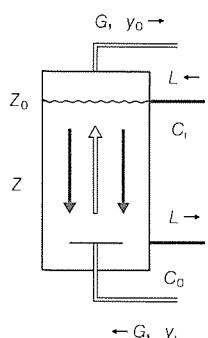
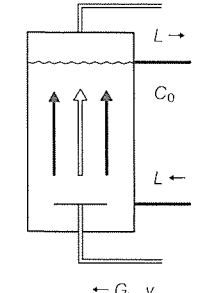
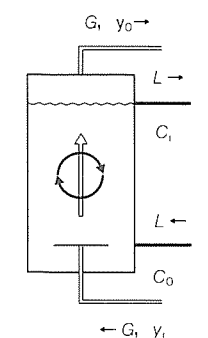
反応器のもう一つの重要な要件は反応器内での反応量である。塔内での反応によって消費されたオゾン量と供給したオゾン量の比として定義した液中オゾン反応率の比較を図1に併せて示した。 k_1 が $10/\text{h}$ の場合、上記の順で30、40、40%であることが分かる。吸収率の高い向流 GPLP は逆に低くなっている。これは塔内の水中オゾン濃度が相対的に低いためと解釈できる。オゾン吸収率と反応率は相反の関係にあり、いずれかが高ければ他方は低くなる。

3. オゾン反応

3.1 オゾン反応の機構

オゾンと有機物の反応は古くから多くの研究がある。しかし、水中での反応となると研究は非常に少ない。

表1. 気泡塔極限モデルによるオゾン濃度理論式

極限モデル	オゾン濃度計算式
<p>向流 GPLP</p> 	$C = \frac{y_i (P_0 Q - P Q_0) + C_i (NP - MQ)}{NP_0 - MQ_0} \quad (C_0 \text{は } Z=0 \text{ のときの } C)$ $y = \frac{y_i (NP_0 Q - MP Q_0) + C_i MN (P - Q)}{NP_0 - MQ_0} \quad (y_0 \text{は } Z=Z_0 \text{ のときの } y)$ $X_1 = \frac{S(1-h)k_1}{L}, \quad X_2 = \frac{SK_{La}}{L}$ $m = -\frac{L}{G} X_2 \alpha + X_1 + X_2, \quad n = \frac{L}{G} X_1 X_2 \alpha$ $a = \frac{m + (m^2 + 4n)^{1/2}}{2}, \quad b = \frac{m - (m^2 + 4n)^{1/2}}{2}$ $M = \frac{-a + X_1 + X_2}{\alpha X_2}, \quad N = \frac{-b + X_1 + X_2}{\alpha X_2}$ $P = e^{aZ}, \quad Q = e^{bZ}$ $P_0 = e^{aZ_0}, \quad Q_0 = e^{bZ_0}$
<p>並流 GPLP</p> 	$C_0 = \frac{y_i (P - Q) + C_i (MQ - NP)}{M - N}$ $y_0 = \frac{y_i (MP - NQ) + C_i MN (Q - P)}{M - N}$ $X_1 = \frac{S(1-h)k_1}{L}, \quad X_2 = \frac{SK_{La}}{L}$ $m = \frac{L}{G} X_2 \alpha + X_1 + X_2, \quad n = \frac{L}{G} X_1 X_2 \alpha$ $a = \frac{-m + (m^2 - 4n)^{1/2}}{2}, \quad b = \frac{-m - (m^2 - 4n)^{1/2}}{2}$ $M = \frac{a + X_1 + X_2}{\alpha X_2}, \quad N = \frac{b + X_1 + X_2}{\alpha X_2}$ $P = e^{aZ}, \quad Q = e^{bZ}$
<p>GPLM</p> 	$y = y_i \exp(-MZ) + \frac{1}{\alpha} NC$ $y_0 = y_i \exp(-MZ_0) + \frac{1}{\alpha} N_0 C_0$ $C_0 = \frac{C_i + \frac{G}{L} y_i N_0}{1 + \frac{G}{L} \frac{1}{\alpha} N_0 + Q}$ $M = \frac{SK_{La} \alpha}{G}$ $N = 1 - \exp(-MZ), \quad N_0 = 1 - \exp(-MZ_0)$ $Q = \frac{Z_0 S(1-h)k_1}{L}$

注 L : 液供給速度
G : ガス供給速度
Z : 気液混合相の液深
Z₀ : 気液混合相の有効液深
S : 塔断面積
V : 塔内液容積
k₁ : オゾン減衰反応速度定数(一次)
α : オゾンの気液分配係数
K_{La} : 液基準オゾン総括容量係数
h : ガスホールドアップ
C : 塔内液中オゾン濃度
C_i : 入口液中オゾン濃度
C₀ : 出口液中オゾン濃度
y : 塔内気中オゾン濃度
y_i : 入口オゾン濃度
y₀ : 出口気中オゾン濃度
a : 単位気液混合相容積当たり界面積

最も古くかつ有名な反応は二重結合との反応である。図2は二重結合とオゾンの反応機構である。二重結合にオゾンが付加して初期オゾンイドが生成するが、直ちに分解されて両性

イオンとケトン、アルデヒド又はカルボン酸ができる。両性イオンは水中では不安定で水と反応してケトン又はカルボン酸と過酸化水素を生成する。つまり水中で二重結合と反応すると、それが切断され安定な化合物として、残基に対応したケトン、アルデヒド又はカルボン酸が生成される。

芳香族との反応としてはフェノールが比較的詳しく研究されているが、非常に複雑である。しかし、最終的には種々のカルボン酸が生成されると一般に考えてよい。

アルデヒド及びケトンは更にオゾンと反応するとカルボン酸になる。ぎ(蟻)酸はカルボン酸でもありアルデヒドでもあるが、オゾンと反応すると水と炭酸ガスになる。

飽和化合物との反応になると更に研究は少ない。C-H結合と反応してトリオキサイドを生成するとされている。これは一般に不安定で幾つかのラジカルに分解された後、状況に応じて複雑な過程を経ると考えられる。アルコールはケトン又はアルデヒドになり、さらに進んでカルボン酸になる。

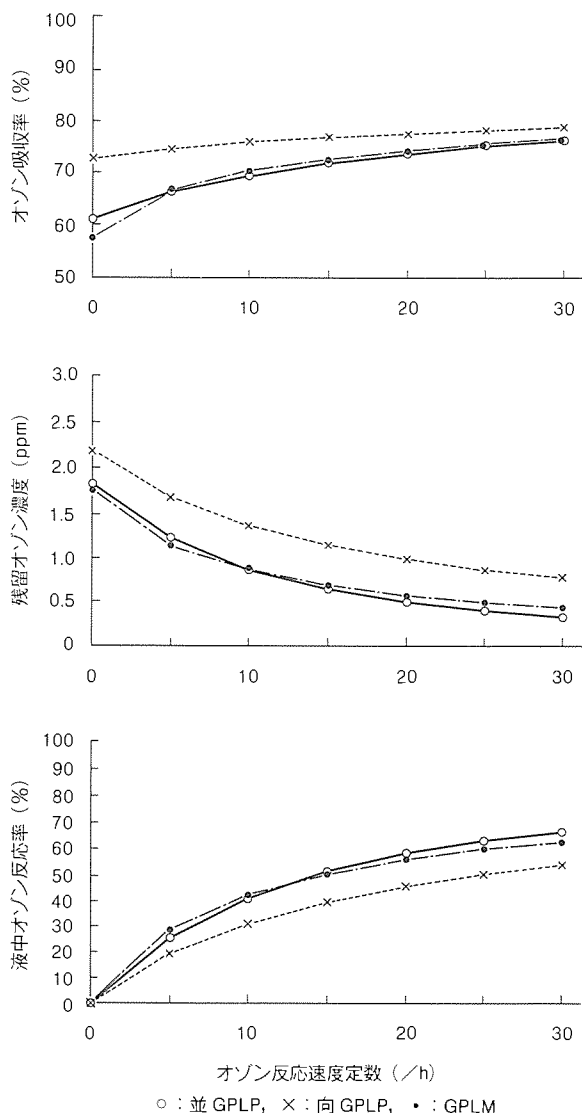
3.2 反応速度

表2は不飽和化合物、芳香族及び飽和化合物のオゾンの反応速度定数である。反応速度定数は次式で定義されるものである。

$$-\frac{d[R]}{dt} = k[O_3][R] \dots \dots \dots (2)$$

ここでRはオゾンとの反応物、[]はモル濃度を表す。

最も単純な二重結合をもった化合物であるエチレンの速度定数は4×10⁴ l/mol/sであり、非常に速い速度定数である。水素がエチル基に代わると速度は速くなる。エチル基は電子を供給する性質をもつので、



気液分配係数 $\alpha = 0.604 \times (1 + T/273) / (1 + 0.063T)$ T : 水温(°C)
 ガスホルドアップ $h = 8 \times 10^{-4} U_G$ U_G : ガス空塔速度(m/h)
 気泡直径 $d = 3\text{mm}$ (球形)
 気液界面積 $a = 6h/d$
 液基準物質移動係数 $K_L = 0.75\text{m/h}$

図1. オゾン減衰速度定数とオゾン吸収率, 残留オゾン濃度及び液中オゾン反応率(計算)

一般に電子を供給する基が置換されると速度は速くなる。逆に電子を引きつけるカルボニル基や塩素などが置換すると遅くなる。

不飽和化合物でも芳香族の速度定数は小さい。この場合も電子を供給する基が置換すると速くなる。HO基は電子供給基であるのでフェノールとオゾンの反応速度は比較的速い。

飽和化合物の速度定数は小さい。

表の下に幾つかの基の速度定数の定性的な序列を併せて示した。オゾンは一般に電子が豊富な部位と反応しやすいと考えてよい。

前述したオゾン減衰速度定数 k_1 は

$$k_1 = k[R] \quad (3)$$

で定義されるものである。気泡塔である程度の吸収率を得る

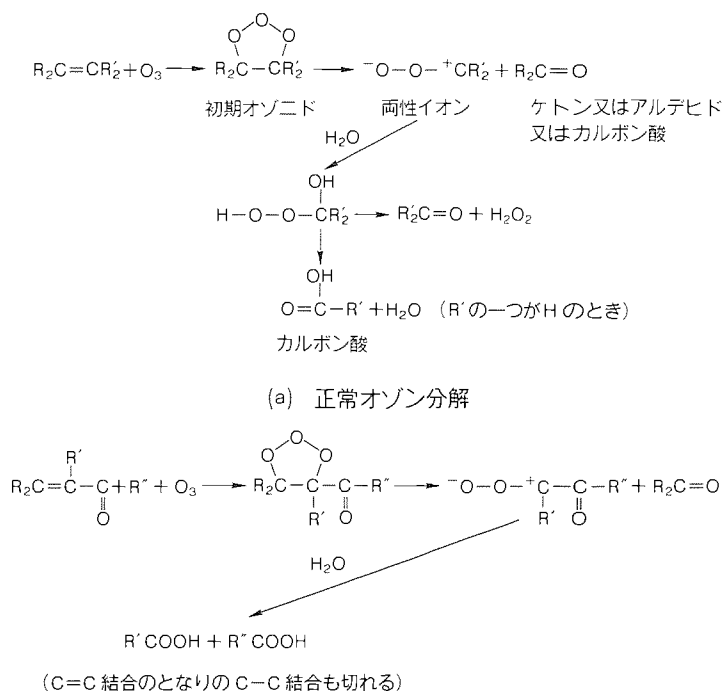


図2. オレフィンの水中でのオゾン分解

表2. オゾンと各種有機物の反応速度

	化 合 物	速度定数 ($\ell/\text{mol}/\text{s}$)
不飽和	$\begin{matrix} H & & H \\ & \backslash & / \\ & C=C \\ & / & \backslash \\ H & & H \end{matrix}$	4×10^4
	$\begin{matrix} H & & H \\ & \backslash & / \\ & C=C \\ & / & \backslash \\ H & & CH_2CH_3 \end{matrix}$	1.3×10^5
	$\begin{matrix} H & & H \\ & \backslash & / \\ & C=C \\ & / & \backslash \\ HOOH & & COOH \end{matrix}$	1.4×10^2
	$\begin{matrix} Cl & & Cl \\ & \backslash & / \\ & C=C \\ & / & \backslash \\ Cl & & Cl \end{matrix}$	1.0
芳香		2.8×10^{-2}
		1.7×10^{-1}
		5×10
飽和	$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$	1.9×10^{-2}
	$\begin{matrix} CH_3 \\ \\ CH_3CHCH_2CH_2CH_2CH_3 \end{matrix}$	1.7×10^{-1}

注 $\begin{matrix} >C=C< > -N- > -C \equiv C- > -C=O > \\ >C=N > -N=N- > \text{ベンゼン環} > \text{アルカン} \end{matrix}$

ためには、図1から推定されるように、 k_1 が10/h 程度以上必要であると考えられる。汚濁成分濃度が反に10ppm, 分子量が100 とすると、 $k = k_1/[R]$ であるので、 k は30 $\ell/\text{mol}/\text{s}$ 程度以上でなければならないことになる。表2を見ると飽和化合物の速度定数はこれより2~3けた低い。した

表 3. HO ラジカルと有機物の反応速度定数

化 合 物	速度定数 ($\ell/\text{mol}/\text{s}$)
フェノール	1.4×10^{10}
プロパノール	2.7×10^9
酢 酸	8.5×10^7
蟻 酸	2.8×10^9
マレイン酸	4.7×10^8
メタン	2.4×10^8
エタン	1.2×10^9

がって、オゾン水処理の対象になる汚濁物質は一般に不飽和化合物又は電子供給基をもつ化合物といえることができる。

3.3 オゾン反応の促進

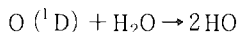
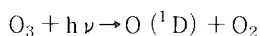
オゾンは不安定であり、何らかの方法で分解させるとオゾンより酸化力の強い化学種を生成する性質をもっている。これを利用したのが促進オゾン反応技術である。

(1) 高 pH オゾン処理法

高 pH でオゾン処理すると、中性又は低 pH では反応しなかった物質が酸化される場合がある。水中でオゾンは自己分解して酸素分子になるが、その過程で HO や HO₂ などのラジカルが発生し、これが酸化剤として働くと考えられる。HO は、表 3 に示したように、オゾンとは実質的にほとんど反応しない飽和有機とも高い反応速度で反応する。有機物の違いによる速度定数の差も小さい。

(2) 紫外線照射オゾン処理法

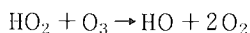
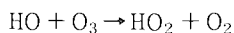
オゾンは低圧水銀灯が放射する 253.7 nm 付近の紫外線を吸収すると分解される。水中では以下の反応が進行して HO ラジカルが発生する。



この原理を利用して、紫外線を照射しつつオゾン処理するのが紫外線照射オゾン処理法である。

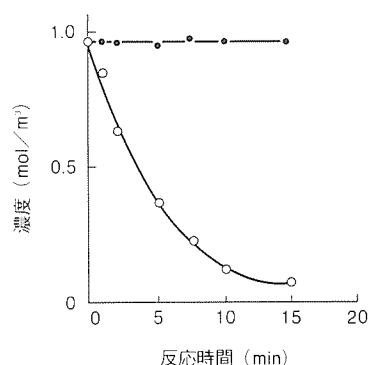
(3) 過酸化水素添加オゾン処理法

中性又はアルカリ性のもとで過酸化水素水溶液をオゾン処理すると次のような反応が起こる。



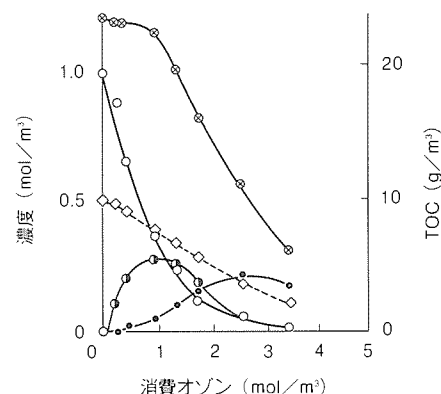
したがって、被処理水に少量の過酸化水素を添加し、通常の方法でオゾン処理すると HO ラジカルが発生して飽和有機化合物との反応が可能になる。

図 3 はエタノール水溶液を用いて、通常のオゾン処理と過酸化水素添加オゾン処理を比較したものである。通常のオゾン処理ではエタノールはほとんど反応しないが、過酸化水素を添加すると反応することが分かる。ここには示していないが過酸化水素単独でも反応しない。図 4 は反応過程の生成物の挙動を示したものである。エタノールが減少するとともに、アセトアルデヒドができ、その後に酢酸ができる。これらは



H₂O₂添加量：0.5mol/m³(○-), 0(●-)
温度：25℃, 初期 pH：7.5

図 3. エタノール(水溶液)のオゾン処理と過酸化水素添加オゾン処理の比較



エタノール(○), アセトアルデヒド(●), 酢酸(●), TOC(×), 過酸化水素(◇)
H₂O₂添加量：0.5mol/m³ 温度：25℃, 初期 pH：7.5

図 4. エタノール(水溶液)の過酸化水素添加オゾン処理

ピークを経て減少する。全有機炭素 (TOC) もほぼ直線的に低下しているの、完全酸化が行われていることが分かる。

HO ラジカルは極めて活性であるので、通常汚濁成分と考えない炭酸イオンなどとも反応する。これらのラジカル消滅剤が共存すると効率が低下する。

3.4 処理効果

オゾン処理は反応機構と特性からみて二つの異なる利用法がある。一つは二重結合や電子密度が高い部位をもつ化合物の選択的な分解である。他方は過酸化水素などを添加し、無差別に有機化合物を炭酸ガスや水にまで完全酸化させるものである。

不飽和化合物の分解で得られる代表的な処理効果は脱色である。多くの飽和有機化合物が吸収する光の波長は 200 nm 以下の紫外線であり無色であるが、不飽和結合は一般に飽和結合から長波長の光を吸収する。エチレンのような一つの二

重結合の最大吸収波長は162.5 nm 付近以下の極紫外光であるが、二つの二重結合が一重結合でつながったプタジエンは217 nm、三つつながったヘキサトリエンは260 nm のように吸収は順次長波長側に移動する。11 個つながった β -カロチンになると451 nm となり着色に至る。

このように一重結合でつながった二重結合の数が増すと吸収波長が長波長側に移動して着色するので、オゾンによって二重結合を切断すると、逆に短波長移行し脱色されることになる。

オゾンは脱臭にも有効であるが、臭気物質に関しては着色物質ほど一般性はない。臭気物質は二重結合や電子密度の高い部位をもっていると考えられる。

微生物の不活性化はオゾンによる細胞壁の破壊による生物機能障害、DNA の損傷、細胞質流出などによるとされている。ウイルスの不活性化はオゾンが直接 DNA や RNA に損傷を与えると考えられている。いずれにしても殺菌や不活性化は二重結合の切断と関係しているであろう。

前節で述べたように、オゾン反応は低分子化とカルボン酸の生成である。反応段階によってカルボン酸に至る前のアル

デヒド、ケトン、過酸化物もあるが、このようなオゾン反応生成物は不安定で一般に生物によって分解される。オゾン処理により、生物分解性が向上することが考えられる。

促進オゾン反応法はオゾン反応と基本的に異なり、無差別の完全酸化である。ラジカル消滅剤の共存によって効率低下があり得るが、有機物の高度除去、農薬などの難酸化性物質の除去に適用できる。過酸化水素添加オゾン処理法は従来のオゾン処理に過酸化水素を添加するだけの単純な方法である。ヨーロッパでは浄水処理における農薬分解に実用されており、アメリカでは浄水脱臭における必要オゾン量低減が検討されている。

4. む す び

オゾン水処理に必要であると思われる基礎的な事項について、概括的に考察した。オゾンは複数の機能をもち、目的によって異なる機構を利用する。目的を効率的に達成するためには、オゾン反応器を含めた合理的な総合的システムが必要である。

上下水分野でのオゾン処理技術

久川義隆*

1. ま え が き

オゾンは、その強い酸化力及び殺菌力により、多様な水処理並びに大気処理分野で利用されている。

オゾン処理の特徴としては、他の酸化剤や凝集剤、吸着剤と違い、

- (1) 残留性が小さく、処理後の二次汚染の心配が少ない。
- (2) 漏れによる危険性が少ない。
- (3) 建設費用、運転費用が安価。
- (4) 空気と電気が原料で、現場での製造のため、輸送・貯蔵の繁雑さがない。
- (5) 日常保守管理が容易。
- (6) 設置面積が少ない。

ことなどが挙げられる。

最近までのオゾンの利用分野としては、

- し尿処理場での脱色、COD 低減等
- 工場排水の処理
- し尿・下水処理場での空気脱臭

などが主体であり、オゾン処理が世の中に出て十数年は、この三つの分野での利用がほとんどであった。しかしながら、近年、より快適な環境を求めて

- 上水道への適用
- 下水道への適用
- プール・ふろ（風呂）への適用
- 水族館・養魚場への適用

が検討され、また実施されている。特に、プール・風呂、水族館・養魚場の分野にはここ数年で数百箇所にオゾン処理設備が設置されている。これは、オゾン処理設備の信頼性が増した結果、オゾン処理の専任技術者がいなくても利用できるようになったことが大きな要因になっている。

ここでは、オゾンの上下水道分野への適用として、オゾンによる水質改善効果、オゾン反応装置、納入実績及び適用例を紹介する⁽¹⁾。

2. オゾンによる水質改善効果

オゾンによる水質改善としては、

- (1) 異臭味の低減
- (2) トリハロメタン生成能の低減
- (3) 色度の低減
- (4) 殺菌

- (5) 有機塩素化合物の低減
 - (6) 過マンガン酸カリウム消費量の低減
 - (7) 鉄、マンガンの低減
- がある。

2.1 臭 気

藻類の繁殖により、水道では初夏や秋に臭気を発生することがある。国内での上水道へのオゾン処理は、臭気除去のために導入されたのが最初である。臭気成分として代表的なものはジオスミンと 2-MIB であるが、ジオスミンに対するオゾン処理効果を図 1 に示す。オゾン処理による臭気低減はわずかなオゾン注入率でよい。実設備でも臭気低減はオゾンの注入率 1~2 mg/ℓ で良好な結果が得られている。

2.2 トリハロメタン生成能

水道水中に含まれる総トリハロメタンは 100 ppb 以下、またクロロホルムは 60 ppb 以下に低減するよう厚生省は指導している。図 2 に腐葉土抽出水をモデル物質としてトリハロメタン生成能に対するオゾン処理結果を示した。TOC の 2 倍量のオゾンを注入することにより、トリハロメタン (THM) が約 70 % 低減できる。

高度浄水処理でのオゾン処理の役割は直接的なトリハロメタン生成能の低減とともに、分子量の大きな物質を小さくして後段の生物活性炭での生物処理効果を促進させることにより、トリハロメタン生成能低減効果を更に改善し、活性炭の長寿命化を可能にすることである。

泥炭地や湿原が多い場所では、フミン質などトリハロメタン生成能の高い水源が多く、人工的な汚染がなくても、トリハロメタンが多く発生する傾向がある。また、水を溜めると

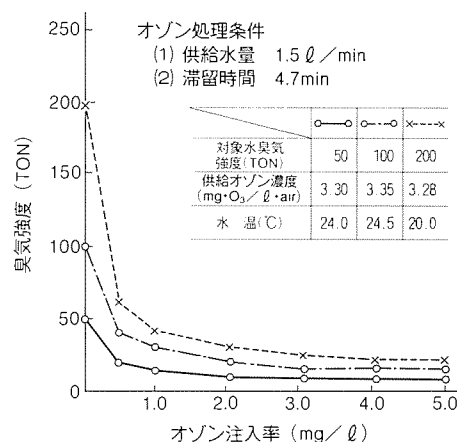


図 1. ジオスミン着臭水のオゾンによる脱臭効果⁽²⁾

トリハロメタン生成能は高くなる傾向にあるため、水源の多くをダムや湖沼に求めている我が国では、今後ともトリハロメタン対策は必要であり、オゾンには重要な役割を担っていく。

オゾンによるトリハロメタン低減は、井戸水や人工汚染を受けていなくてトリハロメタン生成能の高い水源に特に効果的である。

2.3 色 度

色度は、自然界では腐食質によるフミン質が主であり、泥炭地や湿原を流れてくる水源や地下水で高い。また、下水などを生物処理することによってもフミン質ができる。色度を高くする原因となる。

色度成分は分子量が1,000以上のフミン質類と1,000以下のフルボ酸類に大別できる。フミン質類は凝集処理により、また、フルボ酸類は活性炭処理によって処理可能であるが、オゾンは両者に効果的である。色度の発生原因は分子内の共役二重結合系による可視光の吸収に帰因するが、オゾンがこの二重結合を破壊することによって色度が低減される。

図3に泥炭地の非常に色度の高い地下水に対するオゾン処理結果を示した。実際に、このような水源に対してもオゾンによる色度低減が実用されている。

2.4 殺 菌

オゾンによって殺菌する場合、水中にはオゾンと反応する様々の共存物質により、同じ殺菌効果を得るにも水質により、

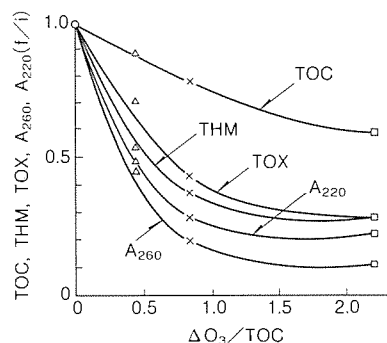


図2. オゾンによる腐葉土抽出液の処理⁽³⁾

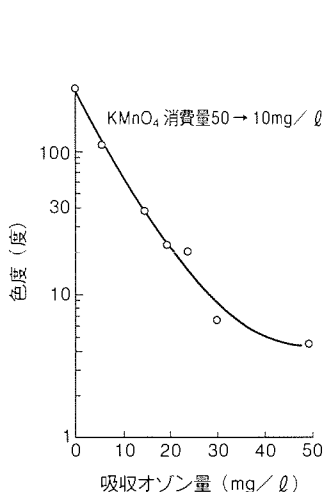


図3. オゾンによる地下水の脱色⁽⁴⁾

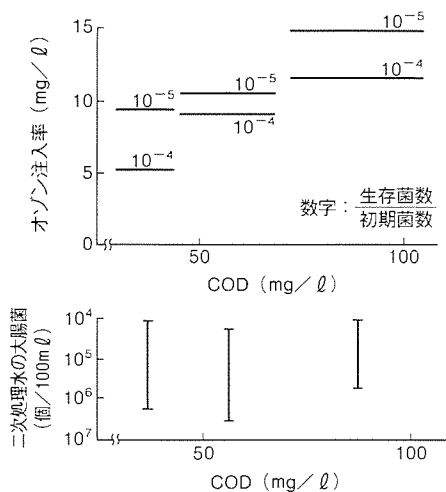


図4. 下水処理水のオゾン処理⁽⁵⁾

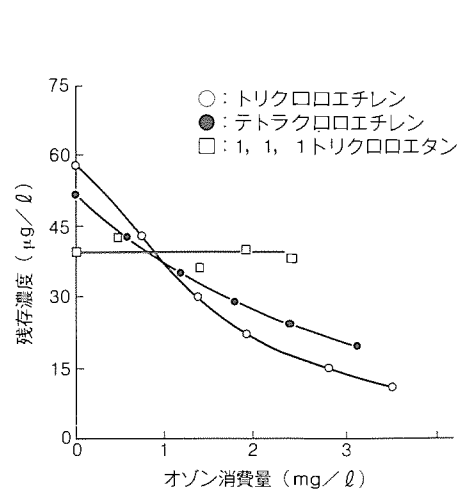


図5. オゾン消費濃度と残存濃度の関係⁽⁶⁾

必要なオゾン量に差がでる。例えば、図4に示したCODでみた場合、同じ殺菌効果を得るためにもCODが高いと必要オゾン量が増加していることが分かる。

2.5 有機塩素化合物

近年、工場などからの有機塩素化合物が地下水に混入し、問題となっているが、図5にオゾンによる低減例を示した。オゾン処理は二重結合の破壊による水質改善であるために、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンに対しては効果があるが、1, 1, 1トリクロロエタンに対しては低減効果はない。

3. オゾン反応装置

オゾン発生装置で生成されたオゾンを、対象物質と反応させるために、オゾン反応装置が必要である。反応装置では生成したオゾンをいかに効率的に利用するかが必要であり、ガス空塔速度、供給オゾン濃度、水深、気泡径などの因子が処理効果に関係する。

ここでは、下水二次処理水にオゾン処理を実施する場合のオゾン吸収効率について説明する。

3.1 ガス空塔速度

ガス空塔速度とは反応器に供給するオゾン化空気流量をオゾン反応装置の断面積で割ったものをいい、一般的には小さいほどオゾン吸収効率(オゾン利用効率)は高くなり、排オゾン量が少なくなる。しかしながら、ガス空塔速度を小さくするためには反応装置の断面積を大きくする必要があり、コスト・敷地の増大につながる。上水でのガス空塔速度は5～10 m/h、下水では20～30 m/hが多い。

3.2 供給オゾン濃度

供給オゾン濃度が高いほど、同一オゾン発生量の場合、オゾン化空気流量が小さくなるために、ガス空塔速度を小さくとれ、オゾン吸収効果率は良くなる。しかしながら、ガス空塔速度を一定にして供給オゾン濃度を变化させた場合のオゾン吸収効率は供給オゾン濃度10～60 g/Nm³でもほとんど差

はない。

オゾン反応槽断面積一定で供給オゾン濃度を変化させた場合のオゾン吸収効率は供給オゾン濃度 10 g/Nm^3 では低い、 20 g/Nm^3 以上では大差がない。

ちなみに当社の場合、供給オゾン濃度は 20 g/Nm^3 を標準としている。

3.3 水 深

水深が深いほど、オゾンの水への溶解性が上がり、オゾン吸収効率は高くなる。ただし、オゾン発生装置出口のオゾン化空気の圧力は当社の場合で 0.7 kg/cm^2 (ゲージ圧) であるため、通常的水深は $4 \sim 5 \text{ m}$ が多い。

3.4 気 泡 径

気泡径が小さいほど、オゾンの水への移動速度が上がり、オゾン吸収効率は原理的に高くなる。しかしながら、気泡径を小さくするためには、散気管の気孔径を小さくする必要があり、それとともに圧力損失が大きくなるために、一般的には気泡径は 3 mm 程度としている。

3.5 オゾン反応槽段数

オゾン反応槽段数を直列的に増加させるとオゾン吸収効率は増加するが、その割合はたかだか数%であり、段数増加による敷地の増加や建設費の増加を考えるとメリットは少ない。むしろ、水量が大きくなると水の短絡流がおきやすくなるため、短絡流防止を主目的に $2 \sim 3$ 段程度の段数に分割することが合理的である。

3.6 オゾン反応槽各段への注入オゾン量割合

オゾン吸収効率の点からはオゾン反応槽各段に対し、均一にオゾンを注入することが望ましい。一方、オゾン反応槽で消費されるオゾン量は反応槽前段に多く注入した場合の方が多くなる。オゾン反応槽各段への注入オゾン量割合は、均一注入をベースとし、オゾン反応槽後の活性炭吸着池までの反応滞留時間などを考慮して、注入割合を考える。

3.7 散気管配置

高度浄水処理の場合、オゾン化空気流量と処理水流量の比

G/L は 0.1 程度、また設計最大値でも 0.2 程度とする。下水処理のばつ (曝) 気槽では空気流量と処理水流量の G/L 5 程度であるのに比べると小さい。このように、浄水処理の場合の G/L は小さく、このため気液は完全混合にはならない。そのため、散気管の配置方法によっては短絡流が発生し、オゾンと水が十分接触せずオゾン反応槽から流出するおそれがある。よって、オゾン散気管のガス展開特性を考慮して、オゾンと水が全面接触するような散気管配列をする必要がある。

また、下水処理の場合も殺菌だけを目的とする場合は、高度浄水処理と同様のことがいえる。ただ、色度低減などを目的とする場合はオゾン化空気流量は数倍以上となり、高度浄水処理に比べ設計的な猶予性は高い。

3.8 オゾン注入方式

一般に上下水のオゾン処理の場合、オゾン反応装置はディフューザ方式が多いがエゼクター方式を用いる方式もある。それぞれの特徴としては以下のようなことがいえ、使用条件によりどちらかの方式を採用する。一般的にはディフューザ方式の採用が多く、エゼクター方式は小水量の場合に多く採用されている。

(1) ディフューザ方式

- 動力が要らず、装置構成も単純である。
- 反応槽高さが 6 m 前後が一般的であり、高さが問題となる場合がある。
- オゾン吸収効率は $70 \sim 90\%$ 程度である。
- オゾン発生装置への水逆流はない。

(2) エゼクター方式

- 動力 (エゼクター用加圧ポンプ) が必要であり、装置が複雑である。
- 反応装置高さはオゾン発生装置と同程度であり、コンパクトである。
- オゾン吸収効率は $50 \sim 70\%$ 程度である。
- オゾン発生装置への水逆流があるために、防止装置が必要である。

表 1. 三菱オゾン高度浄水処理設備納入実績

水道事業体	浄水場	水 源	処理目的	設備能力 ($\text{m}^3/\text{日}$)	オゾン発生量 (kg/h)	納 入 設 備
札幌市清掃工場	篠 路	地下水	色 度	1,000	2.5	オゾン処理設備・活性炭処理設備
千葉県成田市	豊 住	地下水	色 度	2,000	0.22	オゾン発生装置
日 光 市	丸 山	湖沼水	カビ臭	3,500	0.36	オゾン処理設備・活性炭処理設備
日 光 市	二 荒	湖沼水	カビ臭	2,000	0.36	オゾン処理設備・活性炭処理設備
千葉県成田市	豊 住	地下水	色 度	2,000	0.22	オゾン発生装置 (増設)
千 葉 県	福 増	ダム水	カビ臭	90,000	8.0×2 台	オゾン発生装置 *
稚 内 市	大規模草地	河川水	色 度	10	0.006	オゾン処理装置
飯 山 町	楠見池	湖沼水	臭 気	2,250	0.36	オゾン処理設備
沖 縄 県	北 谷	ダム水ほか	THM ほか	97,000	8.1×2 台	オゾン処理設備 (JV)
大 阪 府	村 野	河川水	高度処理	275,000	6.25×5 台	オゾン処理設備 *
阪 神 水 道	猪名川	河川水	高度処理	80,000	10×2 台	オゾン処理設備 *
白 鳥 町	入野川	ダム水	高度処理	3,000	0.36	オゾン処理設備 *

注 * は現在製作中

表 2. オゾンによる下水高度処理・再利用実施例設計諸元一覧

項目	納入先	A	B	C	D	E	F	G	H
処理水量		標準：6,000m ³ /日 最大：9,000m ³ /日	2,100m ³ /日 (将来4,200m ³ /日)	1,600m ³ /日 (将来2,500m ³ /日)	2,600m ³ /日	1,300m ³ /日	10,000m ³ /日	11,800m ³ /日 (8.2m ³ /min)	120m ³ /h(8h系) 及び 32m ³ /h(24h系)
オゾン発生量 形名：台数		4,000g/h OT-4F：1台	2,500g/h OT-2.5F：1台 (将来5,000g/h) (将来OT-2.5F：2台)	1,200g/h OS-700N：2台 (将来1,800g/h) (将来OS-700N：3台)	1,500g/h OT-1.5F：1台	700g/h OS-700N：1台	4,000g/h OT-4F：1台 (将来8,000g/h) (将来OT-4F：2台)	150g/回・日 SP-150：1台 間欠オゾン発生装置	12.5g/回 1回/日 4.0g/回 1回/日 SP-16.5：1台 間欠オゾン発生装置
設計オゾン注入率		標準水量時： 15mg/ℓ 最大水量時： 10mg/ℓ	25mg/ℓ	15mg/ℓ	13.8mg/ℓ	10mg/ℓ	9.6mg/ℓ (将来19.2mg/ℓ)	3.66g/m ³ 5 min 2回/日	1.25g/m ³ 1.5g/m ³ 5 min
目的		お堀の浄化 色度除去	中水、散水 せせらぎ用水 色度除去	中水 色度除去	せせらぎ用水 色度除去 脱臭	修景用水 水質向上	放流水水質改善 色度除去 COD 低減	スライム付着防止	スライム付着防止
色度目標値		10度以下	10度以下	5度以下	10度以下				
処理フロー		下水終沈水 ↓ 砂ろ過 (上向流式) ↓ オゾン処理 ↓ 塩素処理 ↓ お堀	下水終沈水 ↓ 砂ろ過 ↓ オゾン処理 ↓ 塩素処理 ↓ 中水道	下水終沈水 ↓ 砂ろ過 (上向流式) ↓ オゾン処理 ↓ 塩素処理 ↓ 中水道	下水終沈水 ↓ ろ布フィルタ (回転ドラム式) ↓ オゾン処理 ↓ 塩素処理 ↓ せせらぎ用水	下水終沈水 ↓ 砂ろ過 ↓ オゾン処理 ↓ 修景用水	下水終沈水 ↓ オゾン処理 ↓ 放流 (一部再利用)	下水終沈水 ↓ フィルタ ↓ 間欠オゾン注入 ↓ ヒートポンプ (熱源利用)	下水終沈水 ↓ フィルタ ↓ 間欠オゾン注入 ↓ ヒートポンプ (熱源利用)

●オゾン注入率として、一般的に数
mg/ℓ以下の制約がある。

4. オゾン高度処理設備 実施例

オゾン処理設備の建設に当たっては、オゾンによる水質改善効果の調査から始まり、詳細な設備計画を経て設備建設が実施される。水質改善効果については、バッチ式オゾン処理試験、連続式の数 m³/日程度の小規模実験、連続式の数百 m³/日程度の実証実験などが実施される。

4.1 バッチ式オゾン処理試験

オゾン処理対象となる水に対し、消費オゾン濃度を5点程度変化させて、オゾン処理特性を調べる。オゾン処理についてはこの試験が処理傾向をみるのに最も適しており、この試験のみでオゾン処理設備の基本設計ができる。

4.2 小規模実験

バッチ式オゾン処理試験において設定されたオゾン量での連続試験を実施するものであり、オゾン処理の水質改善効果の確認と後段に生物活性炭など物理化学的な処理方法以外の処理方式を検討する場合に実施する。オゾン処理によって分子量を小さくし、生物処理しやすくなった水が生物活性炭などによってどのように処理されるかなどを連続実験で確認するものである。

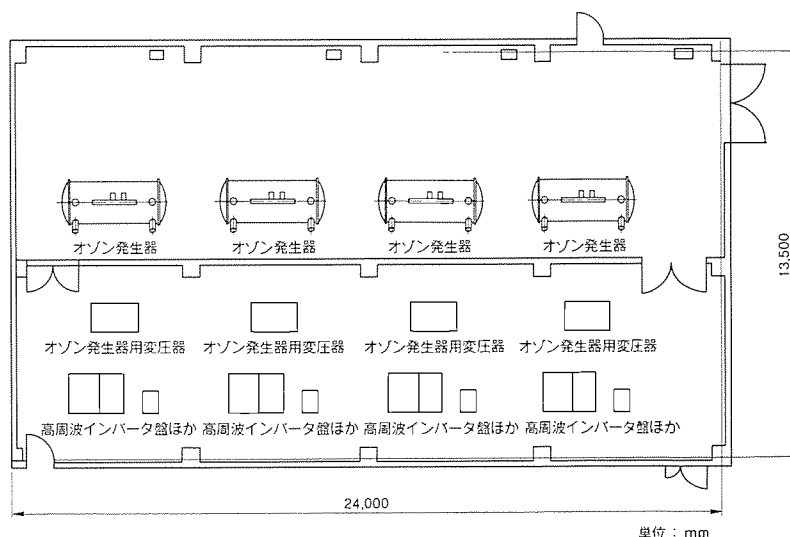


図 6. オゾン処理設備配置(1)

4.3 実証実験

実証実験は小規模実験によって得られた結果に基づき、オゾン処理設備、活性炭処理設備の装置特性を検討することを目的に実施される。しかしながら、現在では、今までの実験結果をもとに装置特性の解明は相当進んでおり、また実験室レベルでの処理特性実験などと併せると、ほとんど実施する必要のない時期にきている。

4.4 上下水道分野でのオゾン処理設備

当社では既にオゾン発生装置を1,000台以上製作し、世の中に送り出した。他社も700~800台程度の製作実績をもっている。しかしながら、これらのほとんどはし尿処理場の三

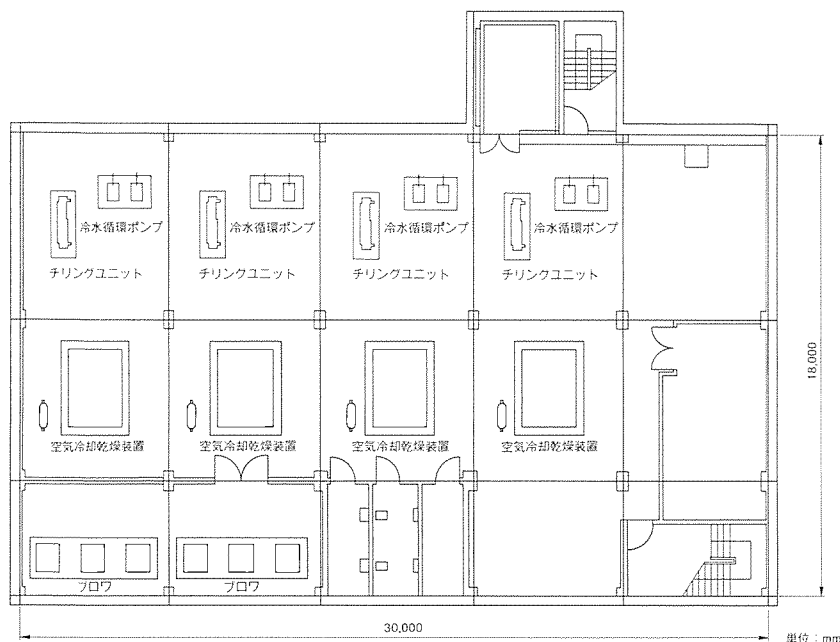


図7．沖縄県北谷浄水場オゾン処理設備配置(2)

次処理、し尿・下水の空気脱臭、工場排水の処理、プール・水族館・風呂の水処理などの分野であった。

しかしながら、上下水道分野においてもオゾン処理の有効性の認識及びより快適な水環境創造の必要性から、オゾン処理設備が多く場所で計画され、また、一部では既に稼働及び建設中の設備が出ている。

水道でのオゾン処理は高度浄水処理として、また下水では修景用水、親水用水、中水道などへの利用が多いが、水質保全の点から放流水の水質改善への用途増加が予想されている。

国内の水道でのオゾン処理設備は現在23か所で稼働又は建設中であるが、当社は表1に示すようにその内11か所にオゾン発生装置を納入(製作中を含む。)し、しかも、そのうち8か所ではオゾン処理設備や活性炭処理設備を納入している。

また、国内の下水道でのオゾン処理設備でも現在17か所で稼働又は建設中であるが、当社は表2に示すように既に8か所に設備を納入している。

5. 高度浄水処理設備

高度浄水処理設備の実施例について、沖縄県企業局北谷浄水場の処理水量194,000 m^3 /日、オゾン注入率4 mg/ℓ の場合、オゾン処理設備配置を図6、図7に、また図8にオゾン発生器、図9に当社製の省エネルギー型高性能冷却乾燥装置を示す。この設備はトリハロメタンの低減などを目的にオゾン処理、粒状活性炭処理の運転を平成4年度に開始している。

6. む す び

当社のオゾン発生装置は発売以来20年を超えたいま、ようやく本来のターゲットである上下水道分野で本格的に採用

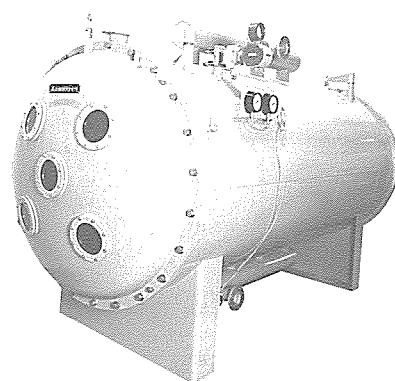


図8．沖縄県北谷浄水場オゾン発生器
(オゾン発生量8.1 kg/h)

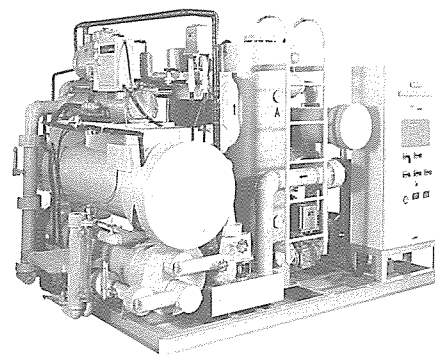


図9．沖縄県北谷浄水場空気冷却乾燥装置

されつつある。これまでは、市場が小さいために様子見を決め込んでいた国内外の他メーカーもここ2～3年は非常に積極的であり、今までのシェアを維持することは容易ではない。しかしながら、国内のオゾンの歴史を作ってきた当社としては今後とも、オゾン発生装置及びオゾン処理設備に関してトップメーカーとしての地位を確保しつつ、さらにオゾンパイオニアとしての自負を持ち、今後とも、関係者一同、開発・研究に励む所存である。

参 考 文 献

- (1) 久川義隆ほか：オゾン高度処理の設備計画と技術動向，三菱電機技報，66，No. 8，823～828（1992）
- (2) 日本水道協会：異臭味対策の指針，3～23（1979-12）
- (3) 河相好孝ほか：オゾン・活性炭併用処理による有機ハロゲン化合物生成抑制に関する基礎研究，第35回全国水道研究発表会講演集，450～452（1984-5）
- (4) 久川義隆，高原博文：オゾンの利用—水処理を中心として(I)，空気調和・衛生工学，62，8，25～32（1988）
- (5) Gomella, C. : Forum on Ozone Disinfection, International Ozone Institute, 205～213（1976）
- (6) 難波敬典：オゾンによるトリクロロエチレン等の除去，第36回全国水道研究発表会講演集，177～179（1985-5）

水泳プール用水のオゾン浄化システム

小沢建樹*
四元初男*

1. ま え が き

健康増進に対する国民の関心は年々高まっている。とりわけ水泳は全身運動であることから愛好者が増加し、これに伴って屋内プールの整備が進められている。従来、遊泳プールでは、衛生面における水質基準が満たされていればよしとされ、プール水の循環処理方法として、ろ過器による懸濁物質の除去と塩素による消毒が主体に行われてきた。しかし、利用者からは快適で清潔感の高いプールアメニティを求める要望が強く、それにこたえる形で従来の水処理方法に加えて、オゾン処理・紫外線殺菌・膜分離処理・活性炭処理などの新しい処理プロセスを導入したプールシステムが近年増加している⁽¹⁾。特に、オゾン処理プロセスを導入するケースが増加しており、利用者からはオゾンによって透明度が向上するとともに塩素臭が少なくなったという声が寄せられ、オゾンに対する評価は高い⁽²⁾。

筆者らは、1984年からオゾンと生物活性炭（以下“BAC”という。）を組み合わせた新しいプール水処理システムの開発を行い⁽³⁾、現在までに全国で約200か所のプールに三菱オゾンプール浄化システムとして導入している。

本稿では、オゾンプール浄化システムの導入前後に水質分析を行い、オゾン処理による水質改善効果を定量的に評価するとともに、アンケート調査による遊泳者の感覚から見た定性的評価も同時に実施し、その結果をまとめている。

2. 実 験 方 法

2.1 水処理システムと運転条件

実験は、図1に示す循環型水処理システムにより、常時水質浄化が行われている容積360m³の会員制レジャープールで行った。プールの底部から引き抜いたプール水は、ヘアキャッチャー・ろ過器・熱交換器・塩素処理の順に循環され浄化される。以上は一般的に行われているプール水処理システ

ムであり（以下“従来法”という。）、これに対して、ろ過器出口流量の約10%を分岐して、BAC及びオゾン処理を行う分岐回路を付加したのは新しい処理システムである（従来法に対して、以下“オゾン法”という。）。

さて、プール水処理用のろ過器には、砂ろ過・けい（珪）藻土ろ過・カートリッジろ過などがあるが、このプールの水処理施設は、凝集剤を必要としない珪藻土ろ過器を用いている。また、塩素剤としては、プールでは最も一般的な次亜塩素酸ナトリウム液（12%）を使用している。

BACはオゾン酸化によって低分子化した有機汚濁物を粒状活性炭に吸着し、それを活性炭表面に増殖した微生物によって生物処理するものである。したがって、活性炭に微生物層が付着していることが必要であるが、実験時には既に付着性微生物によるBACが形成されていた。オゾンは、無声放電型オゾンナイザで1時間当たり20g発生させ、エゼクターによって分岐水に溶解した後、このオゾン含有水を循環水に混合することにより、循環水もオゾン処理される。

この実験期間中の循環水量は、従来法・オゾン法ともに100m³/h、またオゾン法における分岐水量は9m³/hとした。

なお、両方法の運転時ともに、プール水の水温は28～30℃、pHは6.8～7.2であった。

2.2 水質分析方法

過マンガン酸カリウム（KMnO₄）消費量、大腸菌群、一般細菌数、残留塩素濃度（DPD法）は、上水試験方法によって測定した。全有機炭素（TOC）はJIS K 0102-22で、また透明度は目視で測定した。

3. 結果及び考察

3.1 運 転 結 果

実験期間中の遊泳者数、補給水量などの運転データを表1に示す。実験期日の関係上、オゾン法運転時の方が遊泳者数

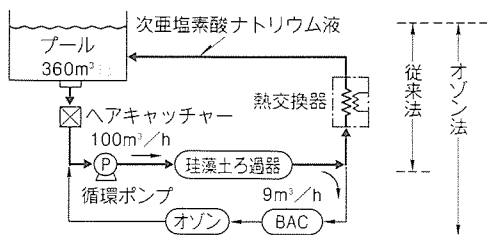


図1. プール水処理システム

表1. 調査期間中の運転データ

方 法	従 来 法	オゾン法
調査期間 (1987年調査)	4月25日～5月18日	6月1日～6月23日
遊泳者数 (人/日)	486±123	566±84
1日当たりの補給水量 (m ³ /日)	37.4±9.2	19.0±10.7
1人当たりの補給水量 (ℓ/人)	81±27	36±22
透明度 (m)	18.6±5.2	19.1±4.1

注 平均値±標準偏差

は約16%多かった。従来法とオゾン法の各方法で運転した期間中、1日当たりの補給水量及び1人当たりの補給水量は、オゾン法では従来法より半減した。このようにオゾン法では1人当たりの補給水量が半分以下であるにもかかわらず、透明度は従来法より若干良い結果となった。

水質分析の結果を表2に示す。透明度と同様に、プール水の KMnO_4 消費量及びTOCは従来法より低い値を維持した。各水質指標について、従来法とオゾン法による水処理効果の比較は次節以降で述べる。

3.2 残留塩素の形態

有効残留塩素には、中性付近では主に次亜塩素酸の形態で存在する遊離残留塩素とクロラミンの形態の結合残留塩素の2種類が含まれる⁽⁴⁾。

従来法及びオゾン法で運転した期間中の総残留塩素濃度と遊離残留塩素濃度、並びに結合残留塩素濃度との関係を図2、図3に示す。遊離残留塩素及び結合残留塩素のいずれの場合も、従来法とオゾン法で有意差はみられなかった。

これは、全循環水量に対するオゾン注入量が $0.2\text{mg}/\ell$ 程度と少ないために、オゾン処理の有無によって結合塩素濃度に有意差が表れなかったと考えられる。ただし、後述するように、アンケート調査ではオゾン法は塩素の刺激臭の顕著な低減効果が認められている。

3.3 殺菌効果

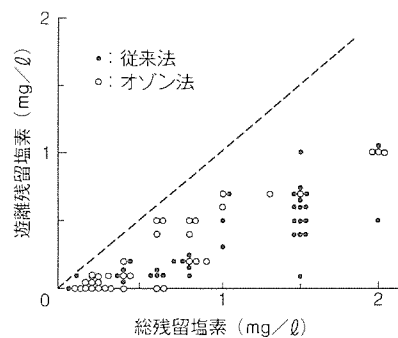


図2. 遊離残留塩素濃度と総残留塩素濃度の関係

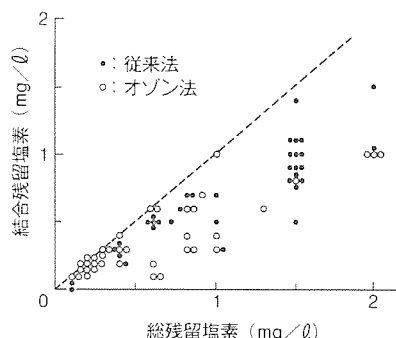


図3. 結合残留塩素濃度と総残留塩素濃度の関係

表2. 水質分析結果

方 法	従 来 法			オ ズ ン 法					
	プ ール 水			プ ール 水			BAC・オゾン処理水		
項 目	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
KMnO_4 消費量 (mg/ℓ)	8.7	11.2	5.9	5.3	6.1	4.4	3.7	4.7	2.8
TOC (mg/ℓ)	6.1	7.0	5.3	4.7	6.2	3.1	3.9	5.4	2.8
一般細菌数 (個/ $\text{m}\ell$)	43	210	0	8	110	0	1	10	0
大腸菌群 (本/5本)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
総残留塩素 (mg/ℓ)	1.07	2.0	0.1	0.64	2.0	0.1	0*	0	0
遊離残留塩素 (mg/ℓ)	0.40	1.0	0	0.26	1.0	0	—	—	—
結合残留塩素 (mg/ℓ)	0.67	1.5	0	0.38	1.0	0.1	—	—	—
残留オゾン (mg/ℓ)	—	—	—	0**	0	0	0.9	1.0	0.7

注 *BAC槽で残留塩素が分解されるために0となる。 **ろ過器出口水の測定結果。

この実験期間中、いずれの方法においても大腸菌群は全く検出されなかったが、一般細菌は表2に示したように検出された。

従来法及びオゾン法のそれぞれについて、プール水の遊離残留塩素濃度と一般細菌数の関係を図4、図5に示す。両図では、各残留塩素濃度において検出された一般細菌数の範囲と、これら計数値の対数平均を○印で示した。なお、計数値が0個/ $\text{m}\ell$ の場合は、便宜的に 10^0 個/ $\text{m}\ell$ としてプロットした。

データのばらつきがあるが、従来法(図4)では、遊離残留塩素濃度が厚生省のプール水質基準⁽⁶⁾の $0.4\text{mg}/\ell$ 以上に維持されていても、一般細菌が検出されることがしばしば認められた。これに対してオゾン法のプール水では、遊離残留塩素が $0.1\text{mg}/\ell$ 以上存在する場合には、一般細菌は全く検出されなかった(図5)。

前述のように、循環水量に対するオゾン注入量は約 $0.2\text{mg}/\ell$ で少量であったにもかかわらず、オゾン法では極めて顕著な殺菌効果のあることがこの実験において実証された。

図5に記したように、DINの水質基準⁽⁵⁾では、プール水中の遊離残留塩素濃度は $0.3\sim 0.6\text{mg}/\ell$ であるが、オゾン処理併用時には $0.2\sim 0.5\text{mg}/\ell$ で、 $0.1\text{mg}/\ell$ 低く設定している。この実験における一般細菌数計数結果は、オゾン処理を付加する場合には遊離残留塩素濃度を低く規定した西ド

イツの水質基準の方が合理的であることを示している。

3.4 水質の長期変動

前節までに示したデータは、従来法・オゾン法ともに約1か月間の比較的短期間に測定した結果を比較している。オゾン法についてはBACプロセスがあり、活性炭寿命の評価を行う目的で、表1に示した実験期間以降も更に、大腸菌群・一般細菌数・ KMnO_4 消費量の測定を継続した。

その結果は集中実験期間中と同様に、大腸菌群はプール水、BAC処理水、オゾン処理水ともに全く認められなかった。一般細菌はBAC処理水では認められたが、後段のオゾン処理水では全く認められなかった。プール水の一般細菌数は0～13個/ $\text{m}\ell$ であり、DIN基準(100個/ $\text{m}\ell$ 以下)を大きく下回る良好な結果を示した。

KMnO_4 消費量の経日変化を図6に示す。半年間運転を継続したが、オゾン法プール水の KMnO_4 消費量及びBAC・オゾン処理水の KMnO_4 消費量は共に安定な低減効果を示した。従来法のプール水 KMnO_4 消費量と比較すると、半年間の運転において

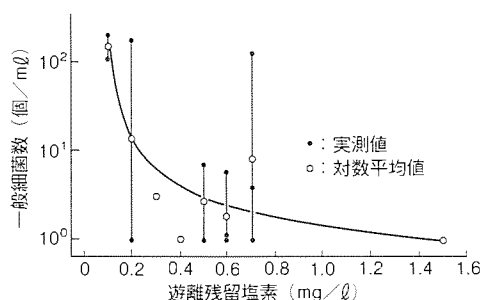


図4. 従来法プール水の残留塩素濃度と一般細菌数(データ数15)

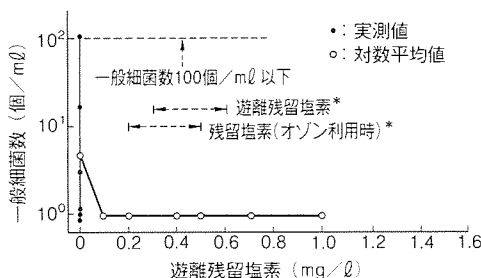


図5. オゾン法プール水の残留塩素濃度と一般細菌数(データ数14)

注 * DIN 水質基準

触を尋ねた。この質問はやや難しかったようで、両法とも2/3以上の方が普通又は分からないと回答した。水が肌にも馴染まないと答えた人は従来法に比べて、オゾン法は極めて少なく、逆に肌に滑らかであるとの回答はオゾン法では従来法の5倍以上に増加した。

5. む す び

実際のプール施設において、従来法とオゾン法の各水処理システムで運転してプール水の浄化効果を比較調査し、現在のプール水質基準と対比しながら考察した。さらに、遊泳者の感覚的評価を得るために、アンケート調査を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 全循環水量の約10%を分岐してオゾン処理するこの方式においても、プール水中の一般細菌数は残留塩素濃度が低くても顕著に減少した。
- (2) オゾン法で活性炭を交換せずに半年以上にわたって運転したが、プール水の KMnO_4 消費量は安定的に $5 \sim 6 \text{ mg/l}$ 程度以下に維持できた。
- (3) オゾン法において結合残留塩素濃度の低減はみられなかったが、アンケート結果から、塩素臭の低減効果は十分に認められた。
- (4) アンケート結果から、遊泳者の感覚的評価においても、オゾン法は満足できる処理効果を発揮していると評価できる。

参 考 文 献

- (1) 大山和彦：プールの水が気にかかる—新しい水処理装置を積極的に導入，月刊スクール・サイエンス，184，27～29 (1988)
- (2) 石橋多聞：マンモスプールと水処理，造水技術，14，No. 3，20 (1988)
- (3) 佐々木利彦，田中政之，納庄貞宏，四元初男：三菱オゾンプール浄化装置，三菱電機技報，64，No. 3，254～257 (1990)
- (4) 日本薬学会編：衛生試験方法・注解，金原出版，946 (1990)
- (5) Aufbereitung und Desinfektion von Schwimm- und Badebeckenwasser, DIN 19643 (1984)
- (6) 厚生省生活局長通知：遊泳用プールの衛生基準について，衛企第56号 (1986-5-30)

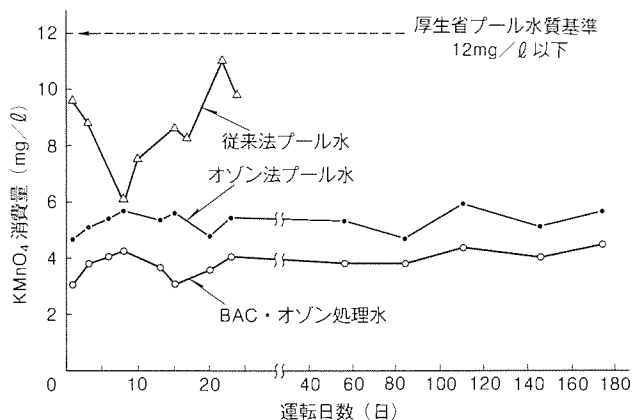


図6. KMnO_4 消費量の経日変化

も約 3 mg/l 以上低い値で推移しており、オゾン法の水処理効果は長期間良好に維持された。

4. アンケート調査結果

プール水質の改善効果を遊泳者の感覚で評価してもらうために、最近特に問題が指摘されている、塩素臭、水の透明感等について従来法及びオゾン法でプール水を処理している期間中に、それぞれ同一項目でアンケート調査を行い、次のような結果が得られた。

(1) 塩素臭

屋内の雰囲気中の塩素臭については、これを強いと感じた人が従来法では15.8%あったのが、オゾン法では1.5%に、またプール水の塩素臭についても、強いとの回答が従来法の13.2%からオゾン法では3.3%に減少した。このようにオゾン法では、塩素臭が強い(不快)と感じる人が極めて小数になっている。

(2) 水の透明感

水の透明感について、従来法では約65%の人が透明感がないと回答したのに対して、オゾン法では透明感がないと回答した人はわずか8.1%であり、逆に透明で気持ちが良いと答えた人は、従来法が7.3%であったのに対してオゾン法では約50%にまで増えている。

(3) 水の感触

通常の水質分析では評価が困難なプール水の肌に対する感

水族館，養魚場の海水浄化

四元初男*
小沢建樹*

1. ま え が き

我が国は周囲がすべて海で囲まれていることから、昔から水産業が盛んである。しかし、環境汚染や乱獲、領海等の問題から、近年では漁獲量が激減し、漁場の確保も困難な状態にある。

このような背景から給餌や薬剤投与を計画的に行い、効率良く生産する栽培漁業が盛んになってきた。この栽培漁業の一部である種苗生産分野では陸上に飼育水槽を設置し、用水を引き込んでいる。この方法によっても用水引込み海域と排出海域が同じであり、当然のことながら海域の汚染は拡大し、自家汚染による生産効率の減少は避けられない。

また、最近水族館の建設が増加するなかで、用水の確保が課題として挙げられる。水族館では閉鎖循環システムで用水を浄化しているが、近年では展示構造や展示内容の充実が図られ、展示される対象物のLSS（生命維持装置）としての機能と、み（観）せるための用水としての品質が求められている。

筆者等はこのような分野におけるオゾン処理技術を開発するため大分生態水族館マリンパレスと共同研究を行い、海水高度オゾン処理技術を確立した。

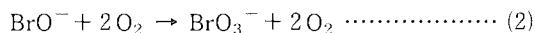
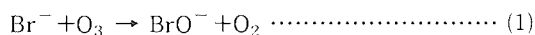
ここでは、基本的な技術説明と、水族館・養魚関係への導入事例とその効果について紹介する。

2. 海水のオゾン処理技術

2.1 海水中の臭素とオゾンの反応

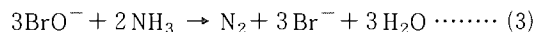
淡水のオゾン処理は、水中にオゾンが分子状の形で溶解し脱色、殺菌、有機物の酸化分解など水質浄化を行う。この反応で消費されずに残ったオゾンは、自己分解によって比較的速度やかに酸素分子になるので残留性が少なく、安全性が高いという特長をもっている。

海水のオゾン処理は淡水の場合と根本的に異なる。自然海水には臭素イオンが約60 mg/l含まれるが、臭素イオンとオゾンが反応して式(1)、(2)に示すように酸化力の強い次亜臭素酸(BrO^-)や臭素酸(BrO_3^-)が生成されると考えられている⁽¹⁾。



この次亜臭素酸や臭素酸はオキシダントと総称される物質で殺菌、有機物の分解に効果が大い。さらに、重要なこと

として、淡水中ではオゾンで分解できないアンモニア性窒素が臭素イオン共存下のオゾン処理で除去できることが分かった。



しかし、このオキシダントはその酸化力によって魚類にも毒性があり、かつ残留性がある。したがって、飼育用水として使用するには十分なオキシダント除去技術が要求される。

2.2 オキシダント除去技術

オキシダントは魚類に対する毒性が強く、飼育海水に許容される濃度は極めて低い。一方、オゾン処理による殺菌消毒効果やアンモニア性窒素の除去効果を十分に発揮させるには結果としてオキシダントの残留が避けられない。オキシダント除去法として、還元法による除去等、種々検討した結果連続処理、閉鎖循環という条件では活性炭処理法が有効であることを明らかにした。

図1は、活性炭のオキシダント除去特性であり、海水をオゾン処理することにより、生成したオキシダント濃度をパラメータとして、SV（空間速度）とオキシダント除去率の関係を示している。

同図によれば、海水のオゾン処理によって生成したオキシダントは、活性炭で容易に除去され、SV値が一定であればオキシダントの濃度が低いほど除去率が高くなることが分かる。

試薬による BrO^- 、 BrO_3^- の除去率はオキシダントに比べて低いことから、海水のオゾン処理で生成されるオキシダントは BrO^- や BrO_3^- ではない可能性が強い。活性炭によ

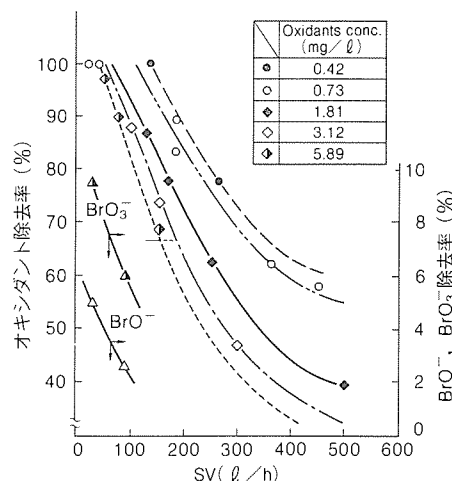
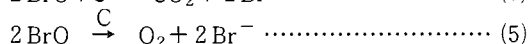
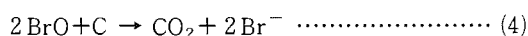


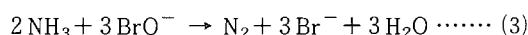
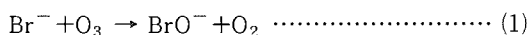
図1 活性炭によるオキシダント除去特性

るオキシダントの除去メカニズムは、閉鎖系で臭素イオンの減少がないことから活性炭の一般的な作用である吸着ではなく、下記に示す式(4)の還元反応であると考えられる。また、式(5)に示す触媒作用による接触分解もオキシダント除去に関与しているものと推定される。



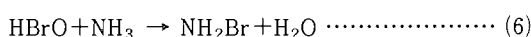
2.3 アンモニア性窒素の分解

海水系におけるオゾンのアンモニア性窒素は前述したように式(1)及び(3)によって分解される。

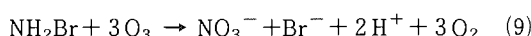
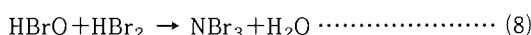
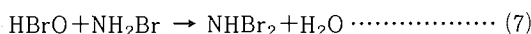


式(1)及び(3)から、アンモニア性窒素1mg/ℓを分解するのに要するオゾン量は、5.14mg/ℓと計算される。

一方、アンモニア性窒素と次亜臭素酸との反応は式(6)～(8)の反応が知られている⁽²⁾。



$$K_2 = 8 \times 10^7 / \text{mol} \cdot \text{s}$$



$$K_3 = 40 / \text{mol} \cdot \text{s}$$

これを確認するために、アンモニア性窒素の分解に必要な

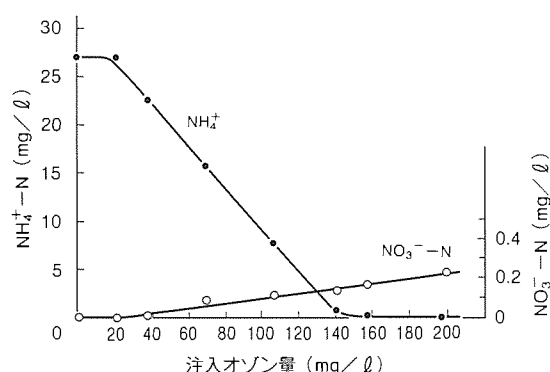


図2. オゾンによる海水中アンモニア性窒素の除去

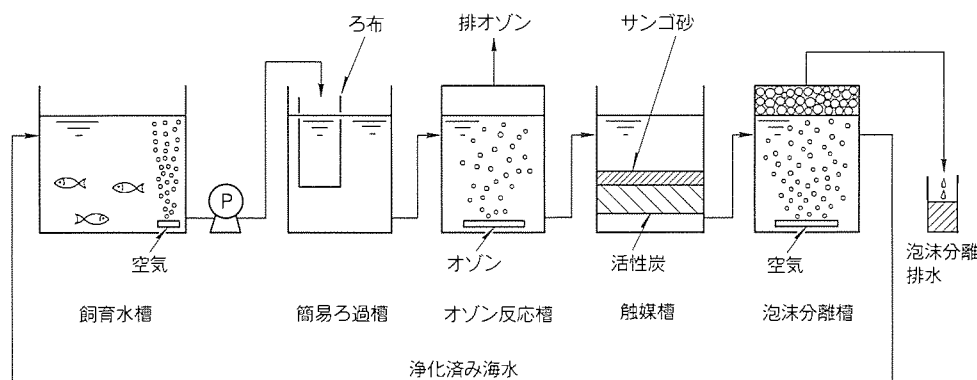


図3. 海水浄化システムフロー

オゾン量と硝酸性窒素生成量を実験で求めた。

塩化アンモニウムを添加した海水のオゾン処理結果を図2に示す。同図から、アンモニア性窒素27mg/ℓを分解するのに要したオゾン量は約145mg/ℓであり、これは式(1)及び(3)に基づき算出したO₃/Nの値5.144とほぼ一致した。このとき生成した硝酸性窒素は約0.24mg/ℓであり、初期のアンモニア性窒素の濃度に対して1%以下であった。

すなわち、海水中的アンモニア性窒素のオゾンによる分解の大部分は脱窒反応であり、硝化反応式(9)による硝酸性窒素への変換はわずかであることが明らかになった。

3. 高度オゾン処理システムによる海水系水せい(棲)生物の飼育例

3.1 シマアジの飼育実験例

図3に高度オゾン処理の実験システムフローを示す。このシステムの特徴は、アンモニア性窒素の分解を生物処理によらずオゾン処理で行うこと、さらに閉鎖循環方式を採用していることである。飼育水槽の海水は、ろ布による簡易ろ過槽、オゾン反応槽、触媒(サンゴ砂+活性炭)槽、ほうまつ(泡沫)分離槽の順に処理された後、再び飼育水槽へ返送され循環利用される。

この実験は卵の状態から110日間実施した。この間の生残率は98日まで73.9%、110日では30.7%と低下した。生残率の低下は、魚体長100mmのものを小型水槽で高密度飼育したためと思われる。この実験期間における補給水槽は163ℓであり、1日当たりの換水率は約0.3%というほぼ完全な閉鎖循環システムにおいて、これだけの高い生残率でシマアジを飼育できたことは、栽培漁業の新しい展開の可能性を示すものである。また、用水の再生利用システムがオゾン処理を中心とした物理化学プロセスのみで構成されており、処理性能の安定性が重要な要素となる閉鎖循環水再利用養魚システムとして、実用上大きな意義がある。

飼育実験期間中のアンモニア性窒素濃度の時系列を図4、またCOD濃度の時系列を図5に示す。

3.2 無脊椎種(イカ)の飼育実験例

魚類より水質や薬物、環境変化に対して敏感であり、また人工的に長期間の飼育が難しいと言われているイカを対象に前述の実験システムを用いて、高度オゾン処理水の安全性の確認と長期飼育実験を行った。供試個体はカミナリイカ (*Sepia Lycidas Gray*) で体長10~20cm のもので、飼育期間は80日間である。

飼育尾数は当初5尾であったが、小型個体が大型個体に捕食されたものの、2尾の個体は80日間良好な状態で生存し、無せきつい(脊椎)種の飼育期間としては前例のないものであり、水族館における展示対象としての位置付けが明確になり、高度オゾン処理水の安全性も実証された。図6は、非常に安定した状態の実験供試個体を示す。

3.3 甲殻類(タカバガニ)の飼育実験例

甲殻類に対して閉鎖循環システムによる人工飼育の可能性を探り、高度オゾン処理水の安全性を実証するため、前述の実験装置によってタラバガニを対象に飼育実験を行った。

2か月の飼育実験で、供試個体10尾すべてが脱皮に成功し、また1か月間の平均体重増加率は5%であり、し(餌)量に対する体重増加率は平均で16%であった。

この実験結果により、海水高度オゾン処理によって甲殻類の人工飼育が可能であること、さらに前述の無脊椎種の飼育実験結果と併せて高度オゾン処理水の安全性も確認できた。

図7は飼育実験中のタラバガニを示す。

4. 水族館における LSS としての納入事例

大分生態水族館マリンパレスは、ラッコのLSSとして、また展示水槽用、種苗生産用にそれぞれ導入している。

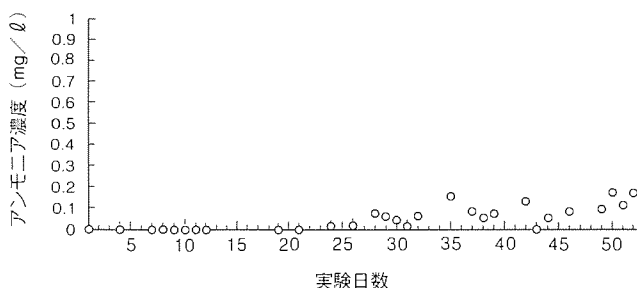


図4. 高度オゾン処理水中のアンモニア性窒素時系列

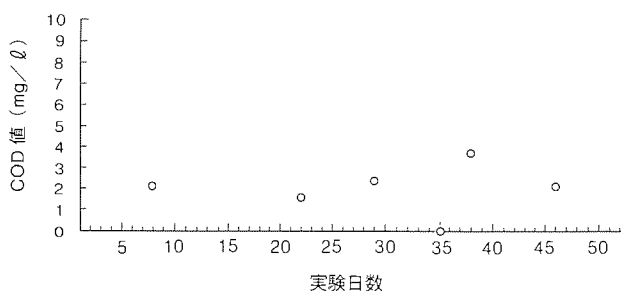


図5. 飼育水槽中のCOD時系列

ラッコ飼育用水にオゾン処理システムを導入した目的は、用水の殺菌と透明度の改善、及びアンモニア性窒素の除去である。特に用水の殺菌については、塩素系殺菌剤が使用できないため、夏季にはしばしば細菌が異常発生し、ラッコの健康管理に苦慮していた。オゾン処理法では完全な殺菌を行い、残留オキシダントは触媒で除去するため海獣系の用水殺菌には最適であり、導入の効果は絶大との評価を得ている。

魚類の展示水槽では、用水の透明度維持効果と、魚病を防止する目的のため導入され、その評価も高い。また、ここでは展示されているシマアジの親魚から卵を採取し、種苗生産用に供している。

親魚は良好な環境の中で飼育でき、計画採卵量も確保されている。次工程の種苗生産用に導入された同システムは、自然海水中に含まれる病原性細菌類の殺菌と、細菌が異常繁殖した海水の場合でも確実な殺菌効果により、種苗生産に効果を発揮している。

図8は納入された海水高度オゾンリアクタ、図9は同システムの導入前のラッコ飼育水槽の状態、図10はシステム導入後の状態である。導入前の状態は用水が藻類の影響によって緑色を呈していたが、導入後わずか1日で着色成分が除去され透明感が回復し、水中の生態観察に効果を上げている。また、現在では海水高度オゾン処理装置を用いて伊勢エビの人工飼育研究も行っており、養殖適用範囲の拡大と技術の発展が期待される。

その他の水族館では、東京葛西臨海水族園、名古屋港水族

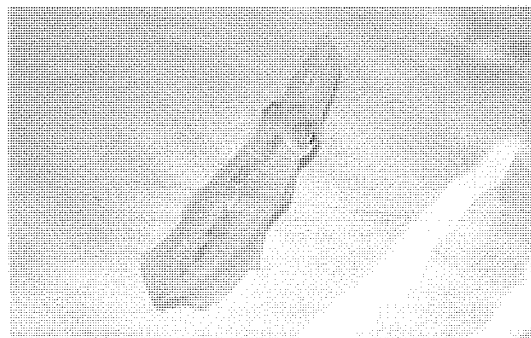


図6. 飼育実験用のイカ



図7. 人工飼育実験中のタラバガニ

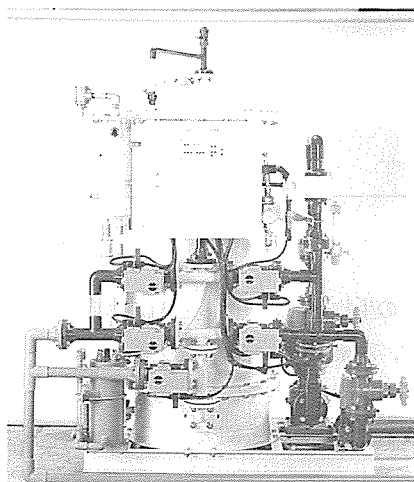


図8. 海水高度オゾンリアクタ

館が平成5年3月のしゅん(竣)工に向けて取り組んでおり、いずれにも開発技術は高い評価を得ている。

5. む す び

開発した海水のオゾン処理技術は、単に汚濁物を分解除去するだけでなく、そこに生息する多種類の魚類・動物の生命維持装置としての性能が実証された。また、種苗生産にも適用可能であることが分かった。現在各方面から注目されており、今後急速に普及するものと期待されている。

最後に、このシステムの開発に際し、御指導、御協力をいただいた大分生態水族館マリンパレスの関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

(1) Ozawa, T., Yotsumoto, H., Nakayama, S., Kobayashi, T.
: Ozonation of Seawater — Applicability of Ozone
for Recycled Hatchery Cultivation —, Proceedings of
9th Ozone World Congress, 257~266 (1989)

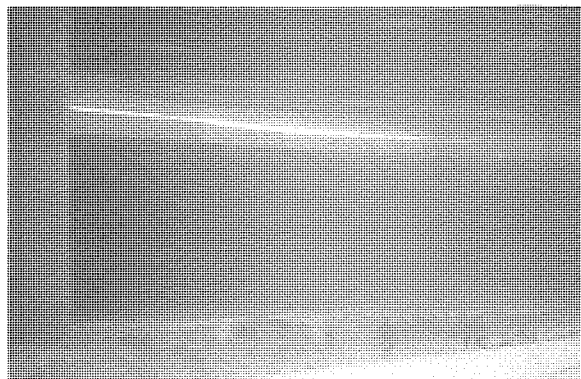


図9. 海水高度オゾンリアクタ導入前のラッコ水槽

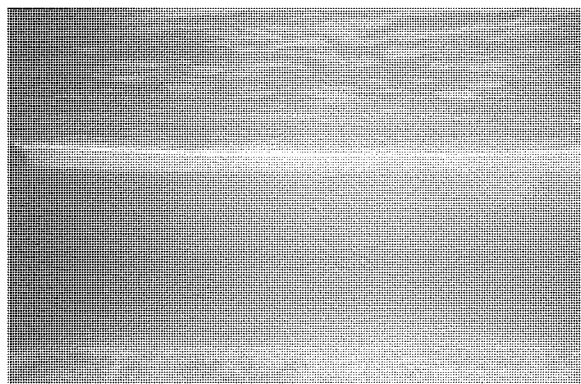


図10. 海水高度オゾンリアクタ導入後のラッコ水槽

(2) Ozawa, T., Yotsumoto, H., Nakayama, S., Kobayashi, T.
: Application of Ozone to Closed Loop Aquaculture,
Proceedings of 10th Ozone World Congress (1991)
(3) 菊池弘太郎, 清野通康, 本田晴郎, 佐伯 功: 電力中央
研究所報告, U 86028 (1987)
(4) 佐野和生: 水産増殖と水 — 水質評価と技術的対応, サ
イエнтиスト社 (1979)
(5) 佐野和生: 水産増殖と水 (第2段) — 水の有効利用技術
から沿岸環境の改善まで, サイエнтиスト社 (1979)

間欠オゾン供給システム

池田 彰*
小沢建樹**

1. ま え が き

工場や発電所などの冷却水系では、水管路内壁や熱交換器表面に微生物が付着し、送水量の低下、水管路の閉そく(塞)及び熱交換効率の低下を引き起こし、そのメンテナンスに多大の労力を費やすとともに、大量のエネルギー損失が生じている。また、最近では半導体関連の超純水製造ラインにおいても微生物が発生し、製品の不良率を高める要因の一つとして問題になっている。

このような生物付着を防止するために、従来は塩素系殺菌剤を大量に投与する方法が一般的に行われてきた。しかし、この方法は残留塩素系殺菌剤の流出による環境汚染などの副次的な問題が派生し、また分解後も系内に塩素イオンが残るといった問題がある。

一方、オゾンは塩素よりも強力な殺菌剤であり、しかも水中で比較的短時間に無害な酸素分子に分解するため、生物付着防止剤として優れたものである。しかし、オゾンの生成コストは塩素に比べて高価であることから、その実用化が遅れている。

筆者らは、高濃度のオゾンを1日1～2回、各5分間の短時間で間欠注入することによって生物付着を防止できることを見だし、この目的に合った新しい発想の間欠オゾン供給装置を開発した⁽¹⁾。この装置は、従来のオゾン法の課題であった設備コスト及び運転コストの問題を解決することができ、これまでに製鉄工場冷却水系や下水利用ヒートポンプ熱

交換器などの生物付着防止装置として実用化されている⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では、高濃度のオゾンを間欠的に短時間で供給する間欠オゾン供給装置の概要を説明するとともに、一例として淡水系モデル水管路を用いて間欠オゾン注入による生物付着防止効果を実証した結果⁽⁴⁾を示す。また、間欠オゾン供給装置の適用例について紹介する。

2. 間欠オゾン供給装置の概要と特長

図1及び図2は、間欠オゾン供給装置の構成及び外観を示したものである。図1に示したように、この装置はオゾナイザ、シリカゲル吸着塔、冷凍機及びエゼクターから構成され

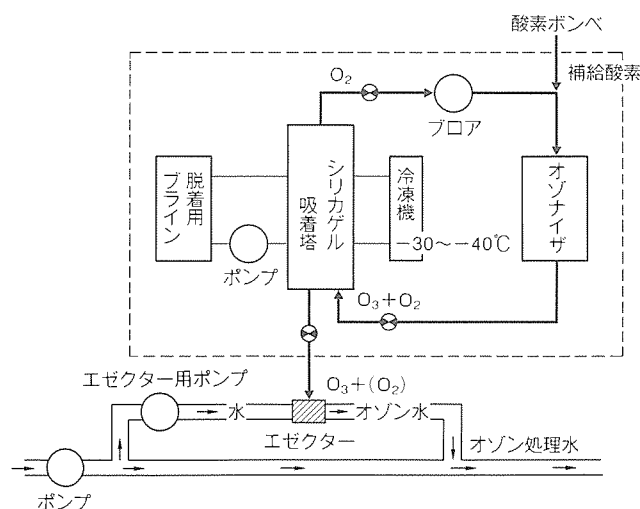
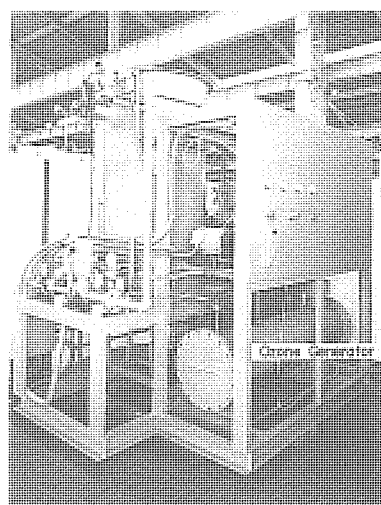
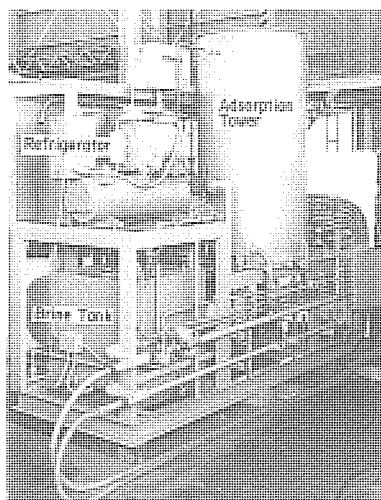


図1. 間欠オゾン供給装置の構成



(a) 前面



(b) 背面

図2. 間欠オゾン供給装置の外観

ている。オゾナイザで無声放電によって生成されたオゾンは、循環エアポンプによって吸着塔に送られ、 $-30\sim-40^{\circ}\text{C}$ に冷却されたシリカゲルに吸着・蓄積される。一方、吸着塔から排出された酸素は再びオゾナイザに戻され、一定時間(約12時間又は24時間)吸着過程が繰り返される。吸着過程が終了すると、被処理水の一部を駆動水とするエゼクターが稼働され、吸着されたオゾンは減圧下で昇温されながら短時間(5~10分程度)に脱着され、数十%の高濃度のオゾンが被処理水に溶解される。

表1は一例として250g/回の間欠オゾン供給装置の仕様を示したものである。この装置は25g/hのオゾナイザを使用し、最大1日2回、各5分間で約250g/回のオゾンを間欠的に供給することができる。例えば、被処理水量に対する5分間の平均オゾン濃度を $5\text{g}/\text{m}^3$ (5ppm)とする場合、約 $600\text{m}^3/\text{h}$ の冷却水系水管路の生物付着を防止することができる。

この間欠オゾン供給装置の特長は以下のとおりである。

- (1) オゾナイザは、連続的にオゾンを注入する場合の1/100程度に小さくなり、設備コストを従来のオゾン法よりも大幅に低減できる。
- (2) オゾン注入量及び電力消費量は、従来の塩素注入法(1ppmを連続注入)の場合に比べて、1/10以下に低減される⁽⁴⁾。

表1. 間欠オゾン供給装置の仕様例

項 目	仕 様
オゾン注入量	250g/回
注入回数	2回/日、各5分間
注入濃度	5ppm(5分間の平均濃度)
被処理水	約 $600\text{m}^3/\text{h}$
消費電力	25kWh/日
酸素消費量	$1.2\text{m}^3/\text{日}$
外形寸法	1.8m(L)×1.8m(W)×2.2m(H)
概算質量	1,550kg
電 源	AC 三相200V, 10kVA

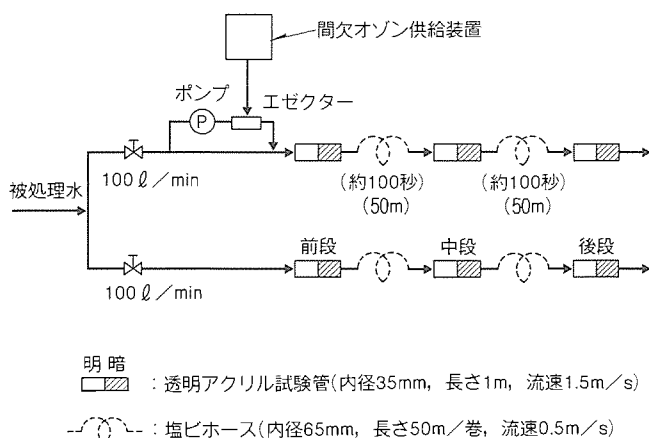


図3. モデル水管路フロー

- (3) 低残留性のオゾンを用い、かつその使用量が少ないので、環境汚染が少ない。

3. 間欠オゾン注入によるモデル水管路の生物付着防止

オゾンは水中で比較的短時間に分解されるため、付着防止効果がどの程度の距離まで有効に作用するかを調べる必要がある。以下では、モデル水管路を用いて付着防止効果と有効距離の関係を調べた。

3.1 実験装置及び方法

実験には小型の間欠オゾン供給装置(オゾナイザ:OS-1型, $1.8\text{g}/\text{h}$)を用いた。モデル水管路は、図3に示したようにオゾン系列及びコントロール系列から構成した。オゾン系列には、オゾンを1日1~2回、各5分間、水中オゾン濃度5~10ppmで間欠注入した。各系列には付着防止効果の有効距離を調べるために、前段(注入地点)、中段(水管路約150m相当、滞留時間100秒)及び後段(水管路約300m相当、滞留時間200秒)に透明アクリル試験管(内径35mm, 長さ1m)を設置した。

水量は100ℓ/分で、試験管内の流速は約1.5m/sであった。一方、300m相当の水管路長(滞留時間200秒)とするために使用した塩ビホースは、内径65mm, 長さ100m(1巻50m)で、塩ビホース内の流速は0.5m/sであった。

第1回テストでは、付着防止効果を予備的に把握するために、1日1回、5分間、平均オゾン濃度が約5ppm(被処理水量100ℓ/分に対する5分間の平均オゾン濃度)となるようにオゾン注入した。この場合、35日後に後段でわずかな付着が認められたので、第2回テストでは、全長にわたって完全に付着を防止できるように1日2回、各5分間、それぞれオゾン濃度が10ppmとなるようにオゾン注入量を増加した。なお、被処理水の水温及びpHは、それぞれ $25\sim33^{\circ}\text{C}$ 及び7.5~8.3であった。また、全有機物質(TOC),

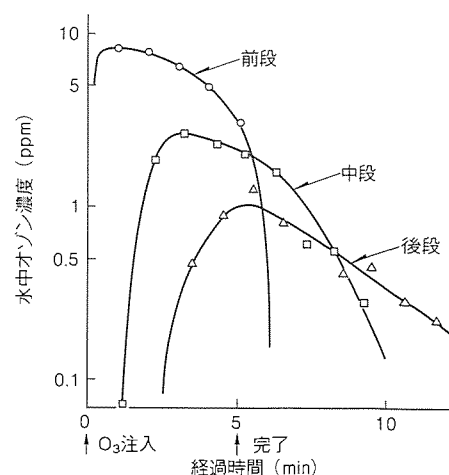


図4. 間欠オゾン注入時の水管路内のオゾン濃度

浮遊物質 (SS), Mg イオン及び Ca イオン濃度はそれぞれ 12, 15, 9 及び 107 ppm であり, 通常の工業用水よりも有機物質や無機イオン濃度が高くなっている。付着量は, 実験終了時に, アクリル試験管及び塩ビホースに付着した付着物の乾燥質量 (110℃, 2 時間乾燥) 及び強熱減量 (約 600℃, 1 時間強熱) を電子てんびん (天秤) (± 0.1 g) で測定した。

3.2 間欠オゾン注入時の水管路内オゾン濃度

図 4 は, 5 分間の平均オゾン濃度が 10 ppm となるようにオゾンを注入したときの前段, 中段及び後段におけるオゾン濃度の経時変化を示したものである。前段では, オゾン注入約 1 分後に, 最大オゾン濃度 8 ppm を示し, 5 分間の平均オゾン濃度は約 5 ppm であった。一方, 中段及び後段での平均オゾン濃度はそれぞれ約 2 ppm 及び 0.5 ppm であった。このように, この被処理水ではオゾン濃度は指数関数的に減少し, 60~80 秒で半分に減衰した。

この際, 被処理水の一般細菌は, 約 800 個/ml であったが, 平均オゾン濃度 10 ppm のオゾン注入によって各段とも

0~2 個/ml に低減でき, ほぼ完全に殺菌された。

3.3 付着実験結果

(1) 付着状況

オゾン注入を行わなかったコントロール系列では通水約 2 週間後にアクリル管の内壁に著しくスライムが付着するのが観察された。特に, 光を遮った暗部での付着は著しく, 35 日後には各段とも管全体が真黒となり, 付着量は約 5 mg/cm² (110℃, 2 時間乾燥) となった。このとき, 通水圧力は開始時 0.11 MPa {1.1 kg/cm²} であったのが, 0.17 MPa {1.7 kg/cm²} に増加した。このように, 水管路にスライムが付着すると, 通水圧力損失が著しく増加する傾向が認められた。

表 2 に示したように, 流速が 0.5 m/s の塩ビホースでの付着量 (110℃乾燥) は最大 30 mg/cm² となり, 流速が 1.5 m/s のアクリル試験管の場合の約 6 倍に増加した。また, 付着物の組成は有機物質 (600℃, 2 時間強熱減量) が約 60% であり, スライムの特性を示すと考えられる。

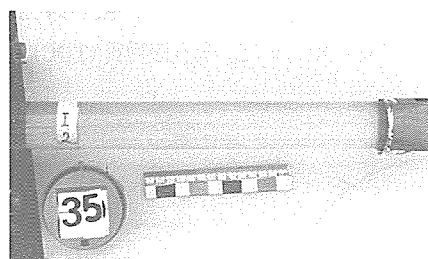
(2) 間欠オゾン注入による付着防止効果

1 日 1 回, 5 分間, 5 ppm のオゾンを注入した場合, 前段及び中段のアクリル試験管では, 通水 3 週間後においても付着は認められなかったが, 後段ではわずかに付着が観察された。

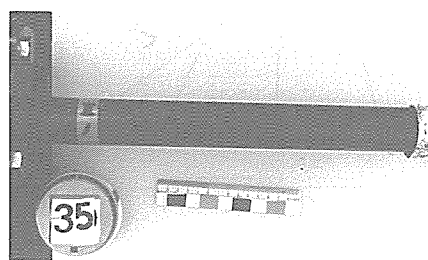
一方, 図 5 に示したように, 1 日 2 回, 各 5 分間, それぞれ 10 ppm にオゾン注入量を増加した場合, 通水 35 日後においても各段とも付着は全く認められなかった。最適なオゾン注入条件については今後の詳細な検討が必要であるが, この被処理水では, 1 日 2 回, 各 5 分間, それぞれ 10 ppm の条件でオゾンを間欠的に注入することにより, 約 300 m 相当 (オゾン滞留時間 200 秒) の水管路の生物付着をほぼ完全に

表 2. コントロール系列における付着量 (通水 35 日後)

		乾燥付着量 (110℃, 2h) (mg/cm ²)	強熱減量 (600℃, 1h) (mg/cm ²)
アクリル試験管	前段 明	3.0	2.0
	前段 暗	6.0	3.3
	中段 明	1.4	0.8
	中段 暗	5.5	3.2
	後段 明	2.2	1.2
	後段 暗	4.8	2.8
塩ビホース	前段	22.7	14.1
	中段	29.5	13.6
	後段	29.3	17.9



(a) 間欠オゾン処理系列



(b) コントロール系列

図 5. 通水 35 日後の付着状況

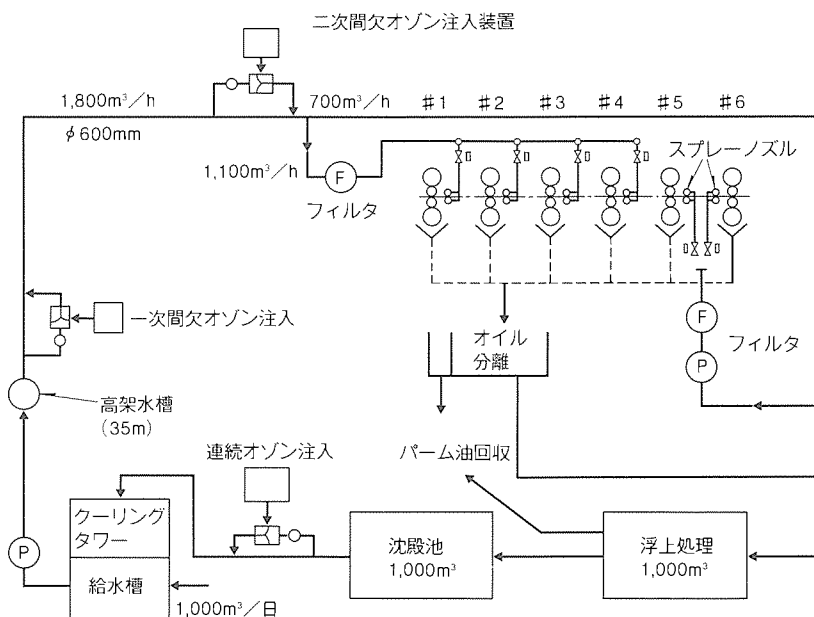
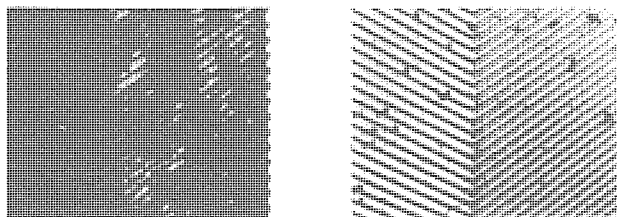


図 6. ロール圧延冷却水系の生物付着防止システム



(a) 無処理

(b) 間欠オゾン処理

図8. プレート式熱交換器のスライム付着状況(運転35日後)

スライム及びスケール付着が完全に防止されている。

従来の熱交換器のスライム付着防止法としては、スポンジボール洗浄やブラシ洗浄など機械的な方法が一般的に行われているが、これらは洗浄むらが大きく効果が十分でなく、また熱交換器表面を傷つけやすいといった問題がある。

今回、開発した間欠オゾン注入法は、これらの問題を解決するものであり、省エネルギー技術として大きな期待が寄せられている。

5. む す び

1日1～2回、5分間の短時間で高濃度のオゾン在水中に間欠注入することにより、水管路内壁や熱交換器表面に付着する微生物を除去するという新しい発想の生物付着防止装置を開発した。

本稿では、このような間欠オゾン供給装置の概要を説明するとともに、淡水系モデル水管路(約300m相当)の間欠オゾン注入による生物付着防止効果を実証した結果を示した。また、間欠オゾン供給装置の実用例として、製鉄工場冷却水系及び下水利用ヒートポンプ熱交換器の生物付着防止への適用例を紹介した。これらの実用例に示したように、間欠オゾ

ン注入により、水管路の生物付着が完全に防止され、砂ろ過設備など付帯設備の軽減や補給水の大幅節約が達成できることが実証された。また、プレート式熱交換器の生物付着による性能低下が防止され、この装置は省エネルギー技術として有効であることが分かった。今後の課題としては、付着メカニズムに基づく最適なオゾン注入条件の検討や、海水系への応用など適用分野の拡大といった課題が残されている。

この間欠オゾン供給装置は、従来のオゾン法の課題であった設備コスト及び運転コストを大幅に低減し、また環境汚染が少ないといった特長をもっている。今後、この装置が工業用水系の水管路、貯水槽、熱交換器を始め、半導体製造プロセスの超純水製造ラインや、火力・原子力発電所の冷却水系など幅広い分野での生物付着防止に応用されることを期待している。

参 考 文 献

- (1) 中山繁樹, 田中正明, 山内四郎, 田畑則一: オゾンの短時間間欠注入による水管路の生物付着防止システム, PPM, No. 10, 14～27 (1981)
- (2) 松本正次, 北村秀樹, 矢田充宏, 田中 誠, 清野芳一, 小沢建樹: 工業用循環水のオゾンによる水処理技術の開発, 川崎製鉄技報, 18, No. 3, 227～283 (1986)
- (3) 加藤 晃, 大高一博, 本間俊輝: 大阪市大温室“咲くやこの花館”の空気調和設備, 空気調和・衛生工学, 65, No. 13, 1009～1022 (1991)
- (4) 池田 彰, 田中正明, 小沢建樹, 中山繁樹: オゾンによる水管路の生物付着防止, エネルギー資源学会, 第11回研究発表会講演論文集, 301～306 (1992)

下水・し尿処理場臭気の脱臭

松永直利*
江崎徳光*

1. ま え が き

我が国は、世界に先駆けて1972年(昭和47年)に悪臭防止法を施行し、それ以来悪臭公害への取組が各地で進められてきた。その結果、近年はピーク時に比べて悪臭苦情は半減しているものの、いまだに年間一万件余りの苦情が発生している。

臭気成分は地球上に数万種以上あるとも言われているが、人に不快感を与えるものとして悪臭防止法に定められているのは、表1に示す12物質である。悪臭成分の処理法には、①臭気成分を水や炭酸ガスにまで酸化分解する方法(燃烧脱臭法)、②臭気成分を固相に固定して脱臭する方法(吸着脱臭法)、③臭気成分を液相へ固定して脱臭する方法(薬液洗浄法他)等があり、通常、いずれかで脱臭が行われている。

下水処理場やし尿処理場等で脱臭対象となる主要な悪臭成分は、通常アンモニアからトリメチルアミンまでの6成分で、これら成分を脱臭すればその目的が果たせることが多い。

オゾンが脱臭用に使われだしたのは1930年代で、水洗塔

と組み合わせて下水処理場の脱臭に利用されていた。その方法は、まず水洗によってアンモニア等の水溶性臭気を除去した後、オゾンを添加する方法で、設備費が安価である上に維持管理が容易であることから、我が国でも悪臭対策を始めた当初、比較的多く採用されていた。しかし、その脱臭原理は臭気成分そのものを分解して脱臭するものではなく、マスキングによるものであったため、添加したオゾンの臭気が逆に二次公害になるなどの問題があり、現在ではほとんど採用されていない。その後、より効果的な脱臭法として、オゾン化水洗+活性炭法が考案され実用化されてきた。そして、その後さらに、オゾンの酸化力を効果的に利用するための研究開発が強力に進められた結果、既存の三種活性炭法をしのぐ脱臭性能をもつオゾン+触媒(乾式オゾン脱臭)法が実用化されるに至った。ここでは、その乾式オゾン脱臭法の脱臭原理と応用例について述べる。

2. 乾式オゾン脱臭法の脱臭原理

オゾンは自然界ではフッ素に次いで酸化力が強い物質である。したがって、その酸化力で悪臭成分が酸化分解できれば、容易に脱臭装置が構築できるが、悪臭公害で問題になるような低濃度領域では、表2⁽¹⁾に見られるように反応速度が非常に遅くなる。例えば、オゾンと硫化水素をそれぞれ1ppmで反応させるとその半減期は9,000分となる。また、比較的反応速度が速いメチルメルカプタンにおいても、その半減期は220分となり、実用化にはほど遠いことが分かる。すなわち、単に臭気ガス中にオゾンを添加しても、それらを瞬時に分解し脱臭することが期待できないということである。しかし、脱臭反応促進のために適当な触媒(脱臭触媒)を併用すると、ごくわずかの接触時間で十分な脱臭効果が得られる⁽²⁾ことが確認できた。また、脱臭触媒としては、ベース活性炭に特殊な成分を添着することで調整できた。

オゾンに脱臭触媒を併用し、臭気成分を処理すると、次のような反応によって脱臭反応が進行する。

(1) オゾンによる触媒の活性化

表1. 臭気物質の規制基準

臭気強度 物質名	(濃度: ppm)						
	1	2	2.5	3	3.5	4	5
アンモニア	0.1	0.6	1	2	5	10	40
硫化水素	0.0005	0.006	0.02	0.06	0.2	0.7	8
メチルメルカプタン	0.0001	0.0007	0.002	0.004	0.01	0.03	0.2
硫化メチル	0.0001	0.002	0.01	0.05	0.2	0.8	2
二硫化メチル	0.0003	0.003	0.009	0.03	0.1	0.3	3
トリメチルアミン	0.0001	0.001	0.005	0.02	0.07	0.2	3
アセトアルデヒド	0.002	0.01	0.05	0.1	0.5	1	10
スチレン	0.03	0.2	0.4	0.8	2	4	20
プロピオン酸	0.002	0.01	0.03	0.07	0.2	0.4	2
ノルマル酪酸	0.00007	0.0004	0.001	0.002	0.006	0.02	0.09
ノルマル吉草酸	0.0001	0.0005	0.0009	0.002	0.004	0.008	0.04
イソ吉草酸	0.00005	0.0004	0.001	0.004	0.01	0.03	0.3

注 6段階臭気強度

臭気強度	内 容
0	無 臭
1	やっと感知できるニオイ(検知閾値濃度)
2	何のニオイかが分かる弱いニオイ(認知閾値濃度)
3	らくに感知できるニオイ
4	強いニオイ
5	強烈なニオイ

O₃ + 触媒 (M)

→ 活性状態の触媒 (M*) + O₂ (1)

(2) 活性化された触媒による悪臭物質の酸化 (無臭化)

M* + 悪臭物質

→ 悪臭物質の酸化物 + M (2)

触媒 (M) は、まずオゾンと迅速に反応して活性状態 (M*) になる。ここで M* はオゾンに比べて酸化速度が速く、短時間に容易に悪臭物質を酸化脱臭するとともに、それ自身は再

び元の状態 (M) に戻る。したがって、総括反応は次のように表すことができる。

(3) O₃ + 悪臭物質

触媒 (M) → 悪臭物質の酸化物 + O₂ (3)

本来、完全な脱臭のためには、上記の反応で悪臭物質が水や炭酸ガスにまで酸化されるのが望ましいが、この脱臭触媒の場合には、硫化水素以外は表 3 に示す中間酸化物の形にまでしか酸化されないが、それぞれの酸化生成物は無臭又は無

表 2. オゾンとガス成分の反応

	反 応	反応速度式	速度定数 (k)	半減期 (min)
H ₂ S	H ₂ S + O ₃ → SO ₂ + H ₂ O	$d[SO_2]/dt = k[H_2S]^{0.5}[O_3]^{1.5}$	$2.28 \times 10^3 \exp(-6.800/RT) \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	9,000
	H ₂ S, O ₃ → ?	$-d[H_2S]/dt = k[H_2S]^{0.2}[O_3]^{1.5}$ 活性化 E ≈ 8 kcal/mol	$(2.7 \pm 0.67) \times 10^2 (\text{cm}^3)^{1.5} \text{mol}^{-1.5} \text{s}^{-1}$ (26℃)	
	H ₂ S, O ₃ → SO ₂ , H ₂ O, O ₂	$-d[O_3]/dt = k[O_3]^{1.75 \pm 0.25}$	$\log(k/M^{-1} \text{s}^{-1}) = 9.2 \pm 0.8 (5,200 \pm 1,200) / 2.3RT$ (2 次反応, M: $\mu \text{mol}^{-1} \ell$) $\log(k/M^{-1/2} \text{s}^{-1}) = 5.0 \pm 0.5$ $-(5,000 \pm 700) / 2.3RT$ (1.5 次反応)	
MM & DMDS	CH ₃ SH, O ₃ → CH ₃ OH, SO ₂ CH ₃ SH $\xrightarrow{O_3}$ (CH ₃) ₂ S ₂ $\xrightarrow{O_3}$ CH ₃ SOSCH ₃ $\xrightarrow{O_3}$ CH ₃ SOSOCH ₃ $\xrightarrow{O_3}$ (CH ₃ SO ₂) ₂ O	$-d[CH_3SH]/dt \approx k[CH_3SH][O_3]$	$\sim 1.1 \times 10^5 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} (20^\circ\text{C})$	220
DMS	(CH ₃) ₂ S + O ₃ → (CH ₃) ₂ SO (CH ₃) ₂ , SO ₂	$-d[(CH_3)_2S]/dt \approx k[(CH_3)_2S][O_3]$	$2 \sim 12 \times 10^5 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} (20^\circ\text{C})$	20~120
	CH ₃ SCH ₃ + O ₃ → CH ₃ SCH ₃ O O + CH ₃ SCH ₃ + O ₂ O (副生成物)			
	(CH ₃) ₂ S, O ₃ → SO ₂			
CS ₂	CS ₂ , O ₃ → O ₂ , SO ₂ , OCS, CO, CO ₂	$-d[O_3]/dt = k[O_3]^2/[O_3]_0$	$1.13 \sim 3 \text{ min}^{-1} (\sim 30^\circ\text{C})$	0.23~0.61
メチルアミン	CH ₃ NH ₂ , O ₃ → CH ₃ NO ₂ , NH ₃	$-d[CH_3NH_2]/dt = k[CH_3NH_2][O_3]$	$0.41 \times 10^5 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} (40^\circ\text{C})$	580
ジメチルアミン	(CH ₃) ₂ NH, O ₃ → CH ₃ NO ₂ , CO ₂ , H ₂ O	$-d[(CH_3)_2NH]/dt = k[(CH_3)_2NH][O_3]$	$10.8 \times 10^5 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} (40^\circ\text{C})$	23
トリメチルアミン	(CH ₃) ₃ N, O ₃ → CH ₃ NO ₂ , CO ₂ , H ₂ O	$-d[(CH_3)_3N]/dt = k[(CH_3)_3N][O_3]$	$1.87 \times 10^5 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} (40^\circ\text{C})$	130
NO _x	NO + O ₃ → NO ₂ + O ₂	$-d[O_3]/dt = k[NO][O_3]$	$5.16 \sim 6.6 \times 10^8 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (室温)	0.036~0.046
	NO ₂ + O ₃ → NO ₃ + O ₂	$-d[O_3]/dt = k[NO_2][O_3]$	$(1.2 \sim 2.8) \times 10^5 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (室温)	85~200
SO ₂	SO ₂ + O ₃ → SO ₃ + O ₂	?	$< 6 \times 10^{-3} \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (室温)	$> 4 \times 10^5$
CO	CO + O ₃ → CO ₂ + O ₂	?	$< 6 \times 10^{-6} \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (23℃)	$> 4 \times 10^8$
その他の	Olefin + O ₃ → Aldehyde, H ₂ O, CO ₂ etc.	一般的に $-d[O_3]/dt = k[O_3][\text{Olefin}]$	$(6 \sim 600) \times 10^4 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	4~400
	Parafin or H ₂ + O ₃	?	ほとんど反応しない	
	C ₂ H ₂ + O ₃ → ?	$-d[O_3]/dt = k[C_2H_2][O_3]$	$\sim 2.8 \times 10^3 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	> 8,500
	HCHO + O ₃ → (Peroxyacid)	?	$\sim 600 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	> 4,000
	Aromatic Hydrocarbons + O ₃	?	未詳 (しかし反応性に乏しい)	
	Aliphatic Aldehydes or Ketones + O ₃	?	$(6 \sim 60) \times 10^2 \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (予想値)	(4~400) × 10 ³

注 ? : 未詳 k : 2 次反応を想定して算出された値 半減期 : オゾンとガス成分の初期濃度を各 1 ppm として算出した値

臭に近い成分である上、触媒担体の活性炭に強く吸着されるため、従来の吸着法と比べて何らそん(遜)色のない脱臭効果が得られる。

3. 脱臭触媒の性能

図1は硫化メチル(DMS)について、実験室的にヤシガラ活性炭と脱臭触媒の脱臭性能比較を行った場合の結果である。図の縦軸には破過率(C/C_0)、横軸には時間(h)を対数目

表3. オゾンと触媒による脱臭反応

悪臭成分	脱臭原理	脱臭反応生成物	脱臭効果
アンモニア	化学吸着	NH_4^+	○
硫化水素	酸化	SO_4^{2-} S	◎
メチルメルカプタン	〃	$\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ (メタンスルホン酸)	◎
硫化メチル	〃	$(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ (ジメチルスルホキシド)	◎
二硫化メチル	〃	$\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ (メタンスルホン酸)	◎
トリメチルアミン	化学吸着酸化	$(\text{CH}_3)_3\text{NO}$ (トリメチルオキザミン)	○
アセトアルデヒド	物理吸着	—	×
スチレン	〃	—	△

注 ◎：極めて大、○：大、△：中、×：小

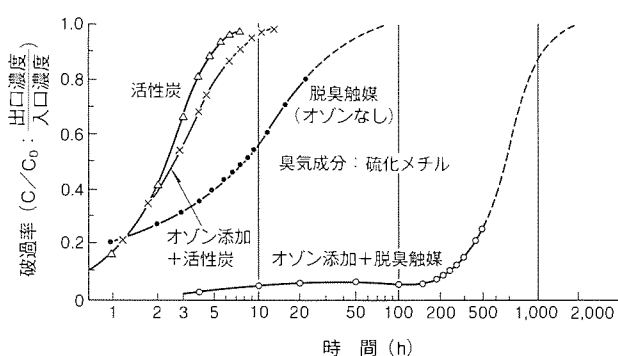


図1. 硫化メチルに対するヤシガラ活性炭と脱臭触媒の性能比較

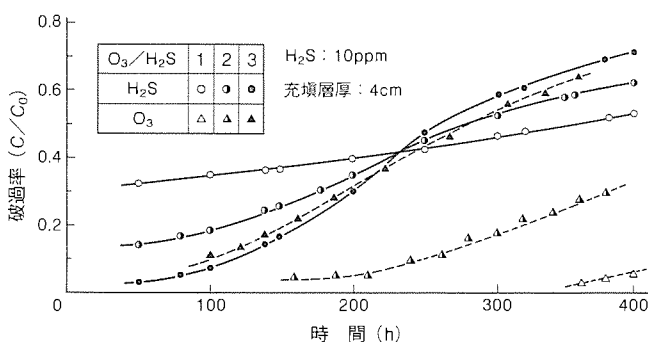


図2. オゾン添加効果と硫化水素の破過特性

盛りで示した。図から、ヤシガラ活性炭では約10時間で完全にDMSが破過するが、同一条件下で(オゾン+脱臭触媒)方式の場合にはDMSの完全な破過までに、2,000時間程度以上になることが分かる。また、ヤシガラ活性炭にオゾンを用いてもその破過時間がたかだか2倍程度になるだけなのに対して、逆に脱臭触媒の場合は、オゾンなしの状態でも通常のヤシガラ活性炭以上の性能を示した。この事実から、脱臭触媒はそれ自身脱臭効力を示すが、オゾンとの組合せにより、触媒としての機能を果たすことも分かった。

図2は、オゾン/硫化水素(H_2S)添加比($\text{O}_3/\text{H}_2\text{S}$)を1, 2, 3と変えた場合の、 O_3 と H_2S の破過曲線である。この試験ではオゾンの添加比が高いほど H_2S の脱臭効果が良くなり、 H_2S の破過に連れて O_3 も破過していく現象が見られる。これは脱臭反応の進行に連れて、その生成物が触媒上に蓄積し、触媒とオゾン、触媒と臭気成分の接触が妨げられ、脱臭反応が阻害されるためと思われる。なお、この現象によって脱臭触媒の劣化状態を間接的に把握でき、脱臭触媒出口のオゾン漏れを計測すれば、その取替え時期が確認できることになる。

図3は、メチルメルカプタン(MM)について、オゾンの添加割合を変えた場合のMM及びMMから生成する二硫化メチル(DMDS)の破過曲線について示した。図からオゾン添加比が2と小さい場合は、MMの漏れ出しは緩やかであるが、MMから生成するDMDSが短時間で破過してくる。

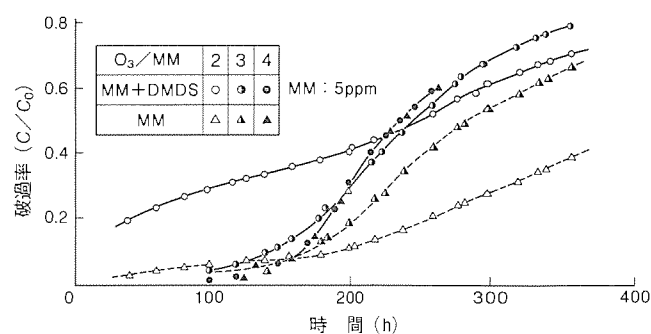


図3. オゾン添加効果とメチルメルカプタン及び二硫化メチルの破過特性

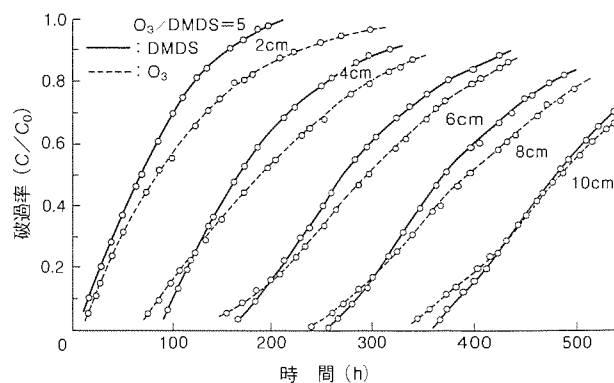


図4. 二硫化メチルの触媒層方向の破過特性

そして、オゾンの添加比が大きくなるに連れてMMの漏れが減少し、またDMDSの破過も見られなくなる。すなわち、オゾンが不足状態の場合には、それに見合った量のMMがDMDSまでの酸化に終わるが、オゾン濃度の増加に連れて更に酸化反応が進み、脱臭効果が良くなることを示している。

表4. 好適オゾン添加比

悪臭成分	悪臭成分
H ₂ S	4
MM	3
DMS	1
DMDS	5
TMA	1

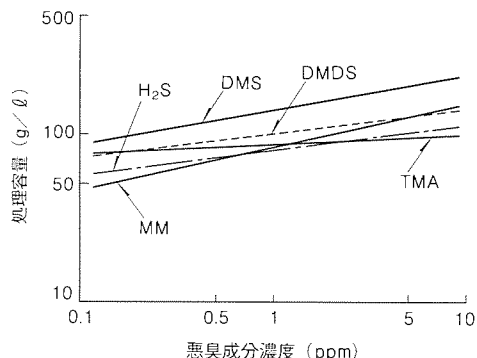


図5. 各臭気成分に対する脱臭触媒の処理能力

図4は、オゾン添加比を5としてDMDSを脱臭処理していった場合の触媒層深さ方向における破過曲線で、触媒の劣化に連れてオゾンとDMDSの破過がほぼ並行に進行していく様子が見られる。

以上のように種々な臭気成分に対する特性と、また実ガスでの経験を加味した結果から、各臭気成分に対する好適オゾン添加比率を表4に、また好適オゾン添加比率の下での各悪臭成分に対する処理

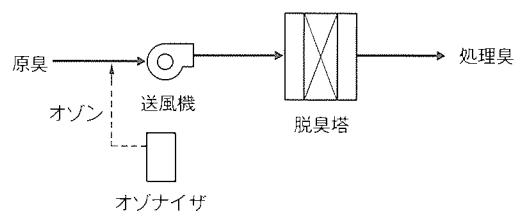


図6. 乾式オゾン脱臭装置の基本フロー

表5. 乾式オゾン脱臭設備の脱臭性能(その1)

		NH ₃	H ₂ S	MM	DMS	DMDS	TMA	AA	STR	臭気濃度	備 考
設計値	原 臭	0.6	0.06	0.004	0.05	0.03	0.02	—	—	—	100時間稼働後
	処理臭	0.6	0.006	0.0007	0.002	0.003	0.001	—	—	—	
	原 臭	<0.1	0.145	0.0049	0.0021	0.0020	<0.0001	—	—	—	
	処理臭	<0.1	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	—	—	—	

注 臭気発生源：下水中継ポンプ場、脱臭設備フロー：オゾン＋脱臭触媒方式、脱臭風量：310m³/min

表6. 乾式オゾン脱臭設備の脱臭性能(その2)

		NH ₃	H ₂ S	MM	DMS	DMDS	TMA	AA	STR	臭気濃度	備 考
設計値	原 臭	0.13	3.5	0.14	0.0088	0.0019	0.0014	—	—	—	
	処理臭	0.6	0.006	0.0007	0.002	0.003	0.001	—	—	—	
1	原 臭	4.0	1.0	0.0076	0.004	0.0073	0.0015	0.003	<0.001	1,300	竣工時 200h
	脱硫後	0.4	<0.0005	0.0034	<0.0005	0.0062	0.0002	0.013	<0.001	2.3	
	処理臭	0.3	<0.0005	0.002	0.0007	0.0013	<0.0002	<0.001	<0.001	1.5	
2	原 臭	0.34	19.4	0.054	0.0073	0.0012	0.0061	0.008	<0.03	5,620	稼働後 1,200h
	脱硫後	0.23	0.34	<0.0005	0.0062	<0.0005	—	—	—	133	
	処理臭	0.09	<0.0007	0.0007	0.0013	<0.0005	0.0009	0.003	<0.03	7.5	
3	原 臭	0.52	101	1.0	0.019	0.0016	0.072	0.012	<0.03	98,000	稼働後 1,860h
	脱硫後	0.26	4.8	0.47	0.018	0.0013	0.030	—	—	3,100	
	処理臭	0.21	0.018	0.0052	0.0002	<0.0001	0.010	<0.002	<0.03	41	
4	原 臭	0.48	6.6	0.15	0.31	<0.082	—	—	—	—	稼働後 2,200h
	脱硫後	0.1	0.93	<0.002	0.011	0.0038	—	—	—	—	
	処理臭	0.1	<0.0008	<0.0003	0.0005	<0.0003	—	—	—	—	
5	原 臭	0.15	1.89	0.08	0.06	<0.04	—	—	—	—	稼働後 2,580h
	脱硫後	<0.1	1.88	0.0017	0.037	<0.0003	—	—	—	—	
	処理臭	<0.1	0.0008	0.0003	0.0009	<0.0003	—	—	—	—	
6	原 臭	0.2	0.97	0.091	0.0094	0.0024	0.032	0.004	<0.03	1,000	稼働後 3,036h
	脱硫後	<0.1	0.1	0.0011	0.0061	0.0079	0.030	0.002	<0.03	170	
	処理臭	0.1	0.0066	<0.0001	0.0003	0.0002	0.007	<0.002	<0.03	17	
7	原 臭	0.17	0.87	0.011	0.0078	0.0035	—	—	—	—	稼働後 5,120h 脱硫炭のみ入替え後 1,120h
	脱硫後	<0.1	0.030	0.0008	0.0049	0.0003	—	—	—	—	
	処理臭	<0.1	<0.0005	0.0020	0.0020	0.0003	—	—	—	—	

注 臭気発生源：下水処理場沈砂池、脱臭設備フロー：脱硫炭＋オゾン＋脱臭触媒方式、脱臭風量：130m³/min

表7. 乾式オゾン脱臭設備の脱臭性能(その3)

		NH ₃	H ₂ S	MM	DMS	DMDS	TMA	AA	STR	臭気濃度	備 考
設計値	原 臭	0.4	0.49	0.08	0.07	0.01	—	—	—	—	
	処理臭	<0.4	0.006	0.0007	0.002	0.003	—	—	—	—	
1	原 臭	0.16	0.30	0.11	0.010	0.0016	<0.0005	—	—	—	300時間稼働後
	処理臭	<0.05	0.002	<0.0005	0.0016	<0.0005	<0.0005	—	—	—	

注 臭気発生源：し尿処理場機械室，脱臭設備フロー：オゾン＋脱臭触媒方式，脱臭風量：50m³/min

能力を図5に示した。

4. 乾式オゾン脱臭装置の機器構成と標準仕様

基本的な乾式オゾン脱臭装置のフローを図6に示す。装置構成は、吸着脱臭法と同様でミストセパレータ、送風機、オゾナイザ及び脱臭触媒が充てん(填)された脱臭塔から構成される。

被処理ガス中の硫化水素やアンモニアが濃厚な場合があるが、そのような場合には前段に脱硫炭や脱安炭等を設けてそれらを粗取りし、脱臭触媒処理工程での臭気負荷変動を小さくしてオゾン不足が起きないように工夫している。なお、下水処理場臭気の場合には、一般にアンモニア濃度は稀薄であることが多く、濃臭処理の場合でも脱硫炭を前段に設けることで対処できることが多い。

標準的な脱臭触媒塔の仕様を次に示す。

脱臭触媒充填量：接触時間1.2s

塔内ガス線速度：0.3m/s

なお、触媒寿命は通常半年～1年を目安とし、対象となる悪臭成分濃度により、その充填量の増減を行う。

5. 脱臭装置の適用例

表5～7に下水処理場やし尿処理場臭気に、実際適用した場合の脱臭性能の一例を示した。下水中継ポンプ場(表5)や、し尿処理場における臭気でも稀薄な場合(表7)には、オゾン＋脱臭触媒方式で十分な脱臭性能が得られている。ま

た、硫化水素など硫黄系臭気成分が特に濃厚な臭気の場合(表6)には、脱硫炭＋オゾン＋脱臭触媒方式が非常に良い結果を与え、しかも長期間安定して良好に脱臭性能が維持されているのがよく分かる。

この方式を既存の三種活性炭法と比較すると、設置面積はコンパクトとなり、ランニングコストもかなり割安となるなどのメリットが出ている。

6. む す び

オゾンの脱臭への効果的な利用法として、脱臭触媒との併用法について原理、触媒特性、実用例等を紹介した。最近、同様な原理に基づき、家庭用冷蔵庫やその他機器の脱臭用に、小型オゾン発生機と触媒が組み込まれ採用されている。これは触媒法が新しいオゾン脱臭方式として広く一般にも受け入れられつつあることを示すもので、今後更に性能の良い触媒の出現が期待できる。

我々は、今後も乾式オゾン脱臭装置の性能向上及びその普及のために、更に一層尽力する所存である。

参 考 文 献

- (1) 化学工学協会編：悪臭・炭化水素排出防止技術(第2巻)(1977)
- (2) 土居邦宏、竹山 哲、吾妻健国、松永直利：下水臭気の乾式脱臭の実例と効果，PPM, No. 5, 36 (1982)

余剰オゾン分解技術

松永直利*
池田 彰**

1. ま え が き

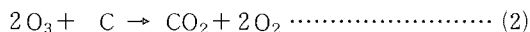
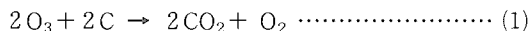
オゾン利用において、オゾンを100%完全に使い切ることができるのは非常にまれで、通常は余剰の未反応オゾンが残るため、これを処理することが必要となる。オゾンの労働環境衛生濃度は0.1ppmである。また、オゾンは光化学オキシダントが生成する過程でも生成し、大気汚染防止法ではオゾンを含むオキシダント濃度が0.06ppmを超えると警報が発令される。これを背景として、オゾン利用における排出濃度は、0.06ppm以下が望ましいとされている。

近年、高度浄水処理や下水の高度処理など特に大型オゾンイザを利用する計画が実施されるに至り、余剰オゾンの処理技術がますます重要となっている。

2. 活性炭接触分解法

2.1 オゾン分解機構

活性炭によるオゾンの分解は、活性炭とオゾンの直接反応に加えて、活性炭表面での触媒的分解が並行して起きていると言われている。式(1)～(3)は活性炭によるオゾンの分解反応だが、このうち、式(3)は触媒分解を示す。



活性炭1g当たり分解できるオゾン量は、式(1)でオゾン分解が起こるとすれば4gであるが、実際には式(1)～(3)の競合反応であり、実験的には4～7g-O₃/g-ACの値が得られている。その差は活性炭の種類や、オゾン进行处理するときの温度、湿度等の処理条件が関係している。

一般的にオゾン分解設備の設計に当たっては、浄水処理用では4g-O₃/g-AC、また下水やし尿処理関係では2g-O₃/g-ACを使って、補充期間(寿命)3～4か月程度でそれぞれの活性炭充てん(填)量を算出している。

2.2 活性炭の昇温と燃焼

オゾン分解反応は発熱反応である。したがって、オゾン分解に伴って活性炭は昇温する。図1は一定風速下で濃度を変えてオゾン分解した場合の、活性炭層の温度上昇について実測した結果⁽¹⁾で、オゾン濃度に直線的に変化している。原料ガスに酸素を用いてオゾン発生させた場合には、オゾンの通気開始当初は入り口部分が最も温度が高く、時間の経過とともに徐々に後段側へと移動する現象が認められた。図中の

活性炭温度はその最高温度で示したものである。

活性炭の着火温度は通常300℃前後と言われているが、オゾン化酸素を用いた実験では、オゾン濃度が1.7vol%以上で燃焼が確認された。その時の着火温度は約200℃で、また着火に至る時間は1.7vol%のオゾン通気後20分程度であった。この差は、オゾン分解では活性炭部に局所的に温度上昇を生じるためと考えられている。

オゾン反応槽から出る排オゾン濃度は通常数百～数千ppmであり、上記の結果から活性炭の昇温は数℃～数十℃程度で燃焼の可能性はないが、さらに高濃度の排オゾン进行处理する場合には着火の懸念がある。そのような場合にはシリカアルミナと混合して不燃化した活性炭を利用するのがよい。

2.3 活性炭法における爆発

活性炭層へオゾン化酸素を高濃度で流すと、燃焼を起こすが爆発は起きない。しかし、オゾン化空気の場合には、そのまま直接活性炭層へ流し続けると、いずれは爆発を起こす場合がある。その原因は次のような理由による。

オゾン化空気の場合、放電空間においてオゾンを生成する際、窒素酸化物(N₂O₅)がオゾン発生量の1～2%程度副生するが、これが活性炭上で濃縮され火薬様物質を形成することによる。これは硝酸塩が活性炭上で濃縮されるためで、硝酸アンモニウムを添加した活性炭にオゾンを通じる実験⁽¹⁾からも確認されており、硝酸アンモニウム濃度が高いほど、より低い温度で爆発することが確認されている。

なお、N₂O₅は極めて水に溶解しやすく、オゾン反応槽を潜らせると完全に溶解し、通常はこのような問題は発生しない。

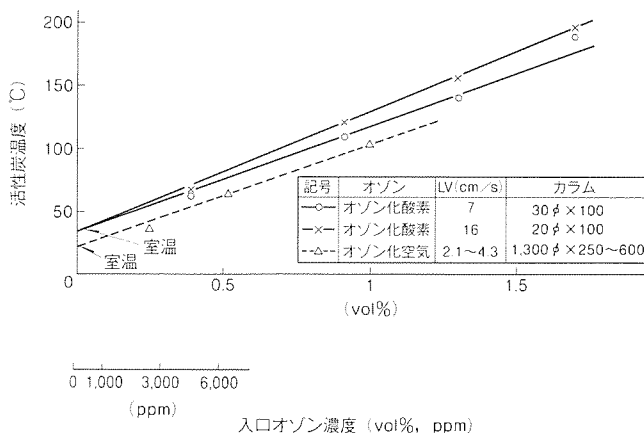
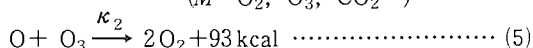
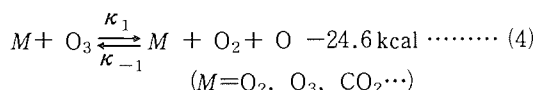


図1. 入口オゾン濃度と活性炭温度

3. 熱分解法

オゾンは常温の大気中でも徐々に分解していくが、加温によって分解を促進することができる。Benson ら⁽²⁾は、オゾンの空気中での分解速度として次式を得ている。



$$-d[O_3]/dt = 2 k_1 k_2 [O_3]^2 / k_{-1} [O_3]$$

$$= 2.27 \times 10^{15} \exp(-30,600/RT)$$

molecule/ℓ · s (6)

図2には、式(6)による計算結果と燃焼炉による実測値を示したが、比較的良好に一致していることが分かる。200℃前後からオゾンの熱分解は顕著となり、350℃で1秒程度保持すれば、オゾンはほぼ完全に分解できることが分かる。

4. 薬液洗浄法

薬液洗浄法には、オゾンの自己分解特性を利用して薬剤で分解を促進させる方法と、還元剤でオゾンを分解する方法がある。

4.1 薬液による自己分解促進法

オゾンは水中では比較的不安定で、気相の場合に比べ極めて短時間に自己分解によって酸素に分解する。水中でのオゾンの分解には、HO や HO₂ ラジカルが関与しており、以下に示す複雑な連鎖反応により、オゾン分解が進むものと考えられている。

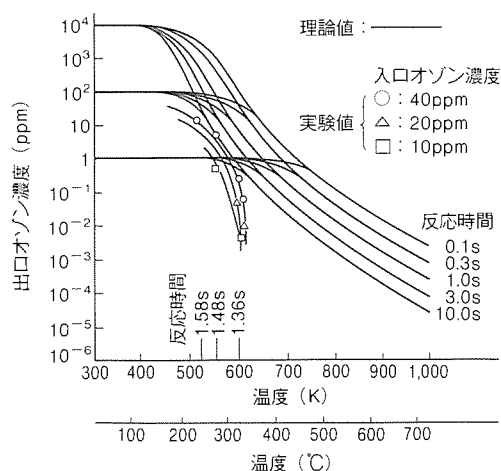
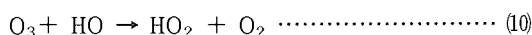
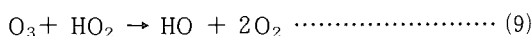
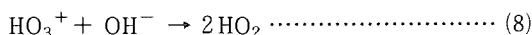
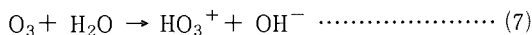
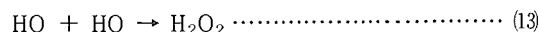
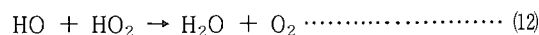
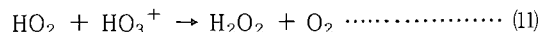


図2. 気相オゾンの熱分解



また、水中でのオゾン分解式として、以下の実験式⁽³⁾が提案されており、pH に大きく依存していることが分かる。

$$-d[O_3]/dt = k_1 [OH^-]^{0.28} [O_3]^{1.5} + k_2 [OH^-] [O_3] \quad (14)$$

$$k_1 = 4.6 \times 10^{13} \exp(-17,900/RT) \quad (15)$$

$$k_2 = 1.8 \times 10^{18} \exp(-20,600/RT) \quad (16)$$

水中でのオゾンの自己分解半減期は、pH 7 では20分だが、pH 13 では0.005秒にまで短縮される。池畑ら⁽⁴⁾は5%苛性ソーダ水溶液を用いて、充填塔式洗浄塔による排オゾン分解実験で95%の分解率を得ており、それによって次の実験式を得ている。

$$\ln \{ [O_3]_{in} / [O_3]_{out} \} = 3.5 \times (Z/G) \quad (17)$$

$$Z: \text{塔高 (m)} \quad G: \text{ガス流速 (m/min)}$$

4.2 還元剤薬液洗浄法

酸化力の強いオゾンを還元剤と反応させて分解⁽¹⁾するので、①チオ硫酸ソーダ+苛性ソーダ、②チオ硫酸ソーダ+亜硫酸ソーダ+苛性ソーダを、それぞれ洗浄液として用いる方法がある。いずれの方法も高い除去率が得られるが、洗浄廃液のCOD除去が必要となるため、特殊な場合にのみ使われているのが現状である。

5. 触媒法

種々な金属酸化物がオゾン分解触媒として使え、MnO₂, NiO, TiO₂, Fe₂O₃などがオゾン分解触媒として利用されている。触媒によるオゾンの分解メカニズムは、次のように考えられている。まず、触媒はオゾンとの反応によって過酸化物を形成し(式(18))、次いでこの過酸化物が分解することにより、触媒は元の状態に再生される(式(19))。

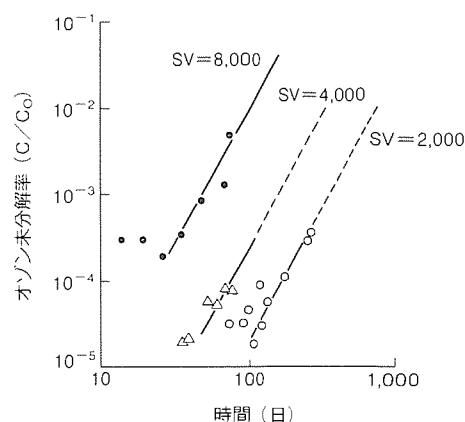
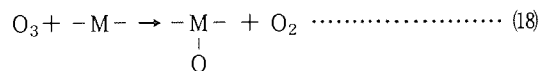


図3. マンガン触媒のオゾン分解性能の経時変化

表 1. 各種排オゾン処理法の比較

処理法		設備費	運 転 費		圧 損	オゾン 除 去 性 能
			低濃度 オゾン	高濃度 オゾン		
活性炭法		小	小	中	小～中	◎
燃焼法		中～大	中	小	小～中	◎
薬液洗 浄法	NaOH 法	小～中	小～中	小	中～大	○
	還元法	中	小～中	大	中	○
触媒法	MnO ₂ 法	中～大	小～中	小	小～中	◎
	MnO ₂ +AC 法	中	小	小	小～中	◎

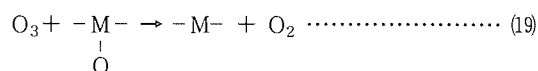


図 3 は処理前オゾン濃度 800～1,500 ppm の排オゾンを 35℃ に加温した MnO₂ 触媒で分解した場合の長期フィールド実験結果⁽⁵⁾である。図において、稼働日数に対する(出口オゾン濃度/入口オゾン濃度) (C/C₀) 比をオゾン未分解率として、それぞれ対数でプロットすると空間速度 (SV) 2,000～8,000 では、同一こう (勾) 配で直線的に触媒が劣化することが分かった。なお、出口オゾン濃度を 0.06 ppm 以下にするためには、処理前オゾン濃度が 800～1,500 ppm では、その除去率は 99.993～99.996% 以上が必要となる。すなわち、オゾン未分解率として、 $4 \sim 7 \times 10^{-5}$ 以下でなければならないが、これを長期間維持するというのは、触媒にとっては非常に過酷な性能を強いるもので、SV=2,000 においても 100 日程度しか使えず、より長期間使えるようにするた

めには、更に小さな SV で触媒を使用する必要があることが分かる。

なお、触媒層の後段に低濃度オゾン分解用として活性炭を配し、稀薄となったオゾンを活性炭で分解するようにすれば、長寿命でコンパクトな排オゾン分解装置が製作できる。

6. む す び

上述のように各種のオゾン分解法がある。活性炭法、還元剤洗浄法は、排オゾン濃度に比例して活性炭や薬剤が消耗し、ランニングコストが増加するが、熱分解法、苛性ソーダ法、触媒法は排オゾンガス量に比例してランニングコストが増加する。したがって、最適なオゾン分解法を選択するには、対象となる排オゾン濃度や共存ガス等の影響を考慮しなければならない。各種排オゾン分解法の特徴を、表 1 にまとめて示した。

参 考 文 献

- (1) 松岡宏昌, 田畑則一, 吾妻健国, 前田満雄, 中山繁樹: 排オゾン処理, 三菱電機技報, 48, No. 4, 438～443 (1974)
- (2) Benson, S. W., Axworthy, A. E.: J. Chem. Phys., 26, 1718 (1957)
- (3) 諸岡誠治, 池永善雄, 加藤康夫: 化学工学論文集, 4, No. 4, 377 (1978)
- (4) 池端 昭, 先崎哲夫: 日本化学会, 昭和 48 年春季大会要旨集 (1973)
- (5) 松永直利, 池田 彰, 田中政之: 第 43 回全国水道研究発表会要旨集 (1992-5)

酸素リサイクルオゾン発生システム

田中正明*
中山繁樹**

1. ま え が き

オゾナイザは通常その原料ガスとして空気を使用するが、原料ガスを空気から酸素に代えるとオゾン発生量は約2倍になり⁽¹⁾、オゾン収率(1 kgのオゾンが発生するための電力)の観点からは好ましい。しかし、原料酸素のうちオゾンに変換されるのは高々数%であり、そのまま未反応の高価な酸素ガスを使い捨てると、総合的なオゾンの製造コストはかえって高価となる。したがって、酸素が安価に使える所以外では、未反応の酸素を再びオゾナイザに戻して再利用(リサイクル)する酸素リサイクル方式が経済的である。

従来の酸素リサイクルはオゾンと酸素を低温シリカゲルで吸着分離する方式であるが⁽²⁾、我々はオゾン反応槽から直接酸素を回収して酸素リサイクルを行う新しい方式を開発した。この方式によるとその適用対象によってはオゾン発生システムのイニシャル及びランニングコストともに大幅に低減される。この方式の適用対象として将来一つのシステムで数百 kg/hの大容量のオゾンの需要が期待されるオゾンによるパルプ漂白が考えられる。

本稿ではこのシステムの重要なポイントである反応槽からの不純物ガスの影響に関する基礎実験と、この結果に基づいて設計したパルプ漂白用の100 g/hの酸素リサイクルオゾン発生システムのパイロットプラントの構成と動作試験結果、及びその経済性について述べる。

2. パルプ漂白用酸素リサイクルシステム

2.1 背 景

パルプの漂白には塩素系の漂白剤が使われているため、有機塩素化合物の副次物を含んだ大量の水が排出される。パルプ漂白の廃液には種々の毒性物質が含まれていることは以前から報告されているが⁽³⁾⁽⁴⁾、近年、地球環境保護の立場からこの問題がクローズアップされる中で、各国の製紙メーカーはパルプ漂白の処理方法の一つとして、塩素に代わりオゾンを使用することを検討している⁽⁵⁾。

オゾンは強力な酸化力をもつため、塩素と同様

の脱リゲニンによる漂白が可能であり、かつ塩素漂白で問題となっている毒性物質を生成しない。しかし、オゾンは塩素に比べて比較的高価であるため、その実用化のためには安価にオゾンを製造する装置を開発する必要がある。

これに対して、我々は以下に示す酸素リサイクルオゾン発生システムを提案し、パイロットプラントを建設してパルプ漂白プロセスへの適用実証を行った。

2.2 システムの概要

図1はパルプ漂白の酸素リサイクルオゾン発生システムの基本構成である。オゾナイザから供給されるオゾン化酸素は、反応槽で水にパルプを溶解させたスラリー状のパルプと反応し、残りの酸素は気液分離槽で回収され、吸着塔を介してオゾナイザの原料ガスとしてリサイクルされる。反応槽から回収される酸素には不純物ガスが含まれており、予備実験による分析結果から、これらはパルプスラリーからの水蒸気とこの水溶液に溶け込んでいた空気中の窒素、またパルプとオゾンの反応によって生成された二酸化炭素及び揮発性の有機物(アセトン、メタノール、ギ(蟻)酸など)が含まれることが分かっている。これらの不純物ガスを含む酸素がオゾナイザの原料ガスとしてリサイクルされるとオゾン収率に悪影響を及ぼすため、反応槽とオゾナイザの間に不純物ガスを除去するための吸着塔が必要となる。

この吸着塔の吸着剤の種類や容量、動作条件などを最適設

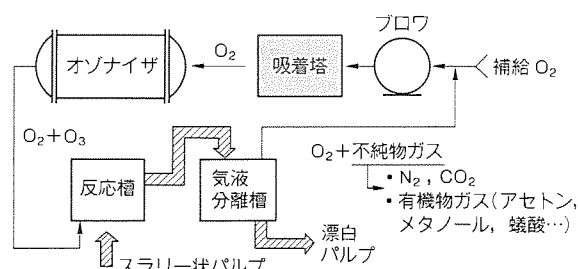


図1 システムの基本構成

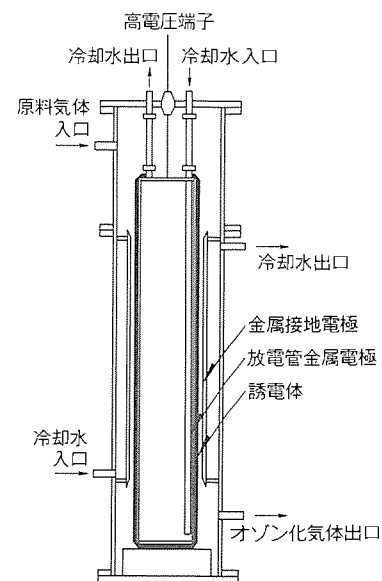


図2 高放電密度オゾナイザの構造

計することがこのシステムの開発の一つの重要なポイントである。このため、パイロットプラントの設計に先立ち、これらの不純物ガスがオゾナイザの収率に与える影響を調べるための実験を行ったので次に示す。

2.3 不純物ガス混入時の酸素原料オゾナイザの基礎特性

2.3.1 実験装置と方法

図2は実験に使用したオゾナイザの構造である。これは単機当たり数十kg O_3/h 以上の大容量向きに開発した高放電密度タイプのオゾナイザであり、放電管1本当たり酸素原料の場合で最大750 g/h のオゾンを生産させることができる。ガラス電極(直径100 mm, 有効長さ1,000 mm)は鉄パイプにガラスをライニングしたもので、ガラス電極と金属電極の両方を水冷($T_w=15^\circ C$)することができ、放電のギャップ長は1 mm である。このため、従来の片電極冷却の高周波オゾナイザに比べて約4倍の高放電電力密度で、また約2倍の高い原料ガスの圧力でも高いオゾン収率を保つことができる。実験ではこの放電管1本を用いてオゾン発生特性を調べた。原料ガスの酸素は純度99.6%の市販のボンベのものを露点 $-50^\circ C$ 以下に乾燥させて用い、オゾナイザの内圧 P は絶対圧力で2.5気圧一定とした。不純物ガスとしての窒素、二酸化炭素はボンベから、また各種有機物は、これらの液体を電気駆動式マイクロシリンジに入れて駆動速度を調整して原料酸素中に注入・気化混入させた。有機物ガスの濃度は燃焼式

素濃度計により、また水蒸気濃度は静電式の露点計によって測定した。オゾナイザの放電電力は電圧と電荷のリサージュ図形から、またオゾン濃度はKI法により、校正された紫外線吸収式のオゾンモニタによって測定した。

2.3.2 実験結果

オゾン収率 η は実験によって得られた放電電力 W とオゾン発生量 Y_{O_3} の関係のグラフから、放電電力密度 W/S が $1.6 W/cm^2$ における W と Y_{O_3} の比($\eta=Y_{O_3}/W$ 又は W/Y_{O_3})として求めた。

(1) 窒素、二酸化炭素の混入の影響

図3は窒素、二酸化炭素が単独で酸素に混入したとき、また図4は窒素と二酸化炭素が同時に混入したときのオゾン収率を示したものである。図から、窒素や二酸化炭素が単独で酸素に混入したときにはオゾン収率は低下するが、例えば窒素が5%程度混入しているときには、むしろ二酸化炭素が1~1.5%含まれている方が二酸化炭素がないとき(酸素:95%, 窒素5%)よりも若干収率の改善が見られる。この結果から、酸素中に窒素が含まれているときには不純物ガス除去用の吸着塔から二酸化炭素が少し漏えいするように吸着塔を設計するのが好ましいことが分かった。

(2) 有機物ガスの混入の影響

図5はアセトン: CH_3COCH_3 、メタノール: CH_3OH 、蟻酸: $HCOOH$ の有機物ガスの混入によるオゾン収率の影響についての実験結果である。先に示した実験結果のように窒素

や二酸化炭素の場合は%のオーダーの混入からオゾン収率に悪影響を与えるが、

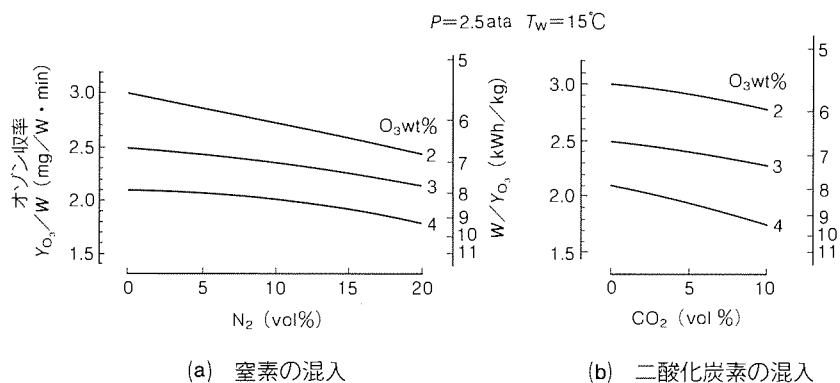


図3. 窒素、二酸化炭素の混入によるオゾン収率への影響

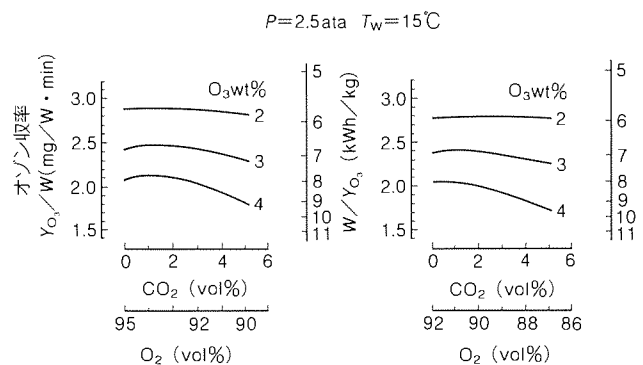
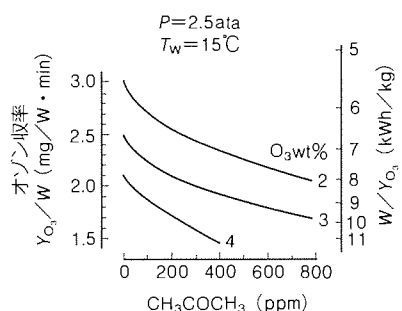
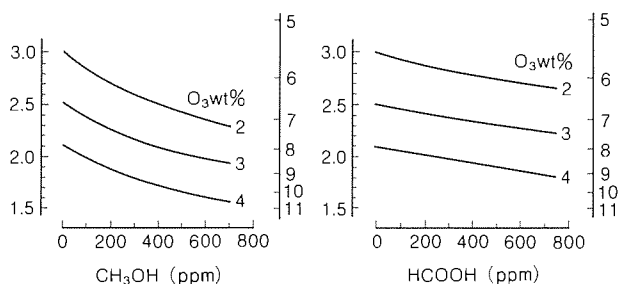


図4. 窒素と二酸化炭素の同時混入によるオゾン収率への影響



(a) アセトンの混入



(b) メタノールの混入 (c) 蟻酸の混入

図5. 有機物ガスの混入によるオゾン収率への影響

有機物ガスの場合には ppm のオーダーの微量の混入でもオゾン収率に影響を与えることが分かる。水蒸気の混入の場合はオゾン収率に大きな悪影響を与えることは分かっており、通常はオゾナイザの原料ガスは数十 ppm 以下（露点 -50°C 以下）に乾燥して使用されるが、有機物ガスも水蒸気と同様に微量の混入でもオゾン収率に影響を与える。オゾン収率低下に対する影響力は、蟻酸、メタノール、アセトンの順で大きくなり、これは各有機物の分子に含まれる H の数の多い順に対応している（この考察については別の文献⁽⁶⁾を参照されたい）。例えば、オゾン濃度 3 wt % ではアセトンが 100 ppm 混入してもオゾン収率は 6 % も低下する。この結果から有機物ガスがオゾナイザに混入しないように、吸着塔で極力除去するように吸着塔を設計しなければならないことが分かった。

2.4 パイロットプラント

試作したバルブ漂白用のパイロットプラントの全量を図 6 に示す。このシステムは、オゾナイザ、反応槽、ブロワ、気体冷却機、吸着塔などから成り立っており、システムの構成とフローを図 7 に示す。オゾナイザで発生させた約 3 wt % (43 g/Nm³) のオゾン化酸素を反応槽へ供給すると同時に 0.5 wt % のバルブ濃度のスラリーも連続的に反応槽に供給し、反応槽でオゾンとバルブの反応を行わせる。オゾンは反応槽で消費され、残りの酸素はリサイクル系に回収されるが、この酸素には前述の不純物が含まれている。この酸素はブロワで昇圧した後、気体冷却機で約 5°C に冷却して予備除湿を行い、吸着剤を充てん（填）した吸着塔でオゾナイザの収率に悪影響を与えない程度にまで水蒸気、二酸化炭素や有機物ガスなどの不純物を除去する。反応によって消費された酸素は定圧弁を通じてポンプから補給される。

2.4.1 装置の構成と動作

(1) オゾナイザ

先に示した図 2 のオゾナイザを用いた。バルブ漂白システムではオゾンとバルブとの反応効率を高めるため、原料酸素圧力 2.5 気圧、オゾン濃度が 3 wt % の高圧力、高濃度でオゾナイザを運転させる必要があるが、このオゾナイザはこのような条件でも 6.7 kWh/kg (2.5 mg/W \cdot min) という高いオゾン収率を得ることができる。

(2) 循環用ブロワ

反応槽から回収された約 0.5 気圧の酸素を 2.5 気圧まで昇圧してオゾナイザにリサイクルするもので、ダイヤフラム式のものをを使用した。流量は 2.4 Nm³/h である。

(3) 気体冷却機

次段の気体乾燥機の容量を小さくするために設けたもので、プレートチューブ型の熱交

換器と冷凍機によって回収酸素を 5°C まで冷却除湿し、取り除かれた水はドレンとして外部に排出する。

(4) 吸着塔

前段の気体冷却機により、ある程度除湿された回収酸素をオゾン収率が悪化しないように、露点 -50°C 以下にまで乾燥し、かつ反応槽で発生した二酸化炭素、有機物ガスを同時に除去するためのものである。図 8 に吸着塔の構造を示すが方式は熱再生式であり、吸着剤を充填した二つの吸着塔と吸着剤の再生時に用いる気体加熱器から成る。吸着剤の種類と容量は前章の不純物ガスがオゾナイザの収率に与える影響の実験結果とリサイクル流量 (2.4 Nm³/h) から決定したもので、モレキュラーシブス 5 A の吸着剤を一塔当たり 2.2 kg 充填した。2 塔の吸着/再生動作の切替は 8 時間サイクルとし、再生行程では 270°C の加熱空気を吸着剤に 5 時間流通させることにより、不純物ガスを脱着して系外に排気し、残りの 3 時間で吸着剤の冷却と、吸着塔に残留している空気を真空ポンプで排気して酸素を充填する。

(5) オゾン反応槽

オゾンとバルブを反応させる気液反応槽であり、内径 35 cm、液深 2.2 m の反応槽の内部に二つのかくはん（攪拌）用プロペラを設けてバルブスラリーを攪拌させる。反応槽での

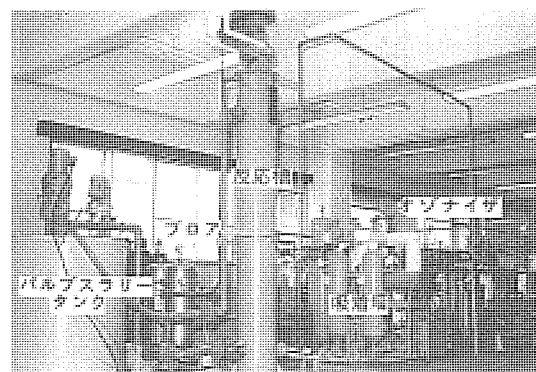


図 6. パイロットプラントの全景

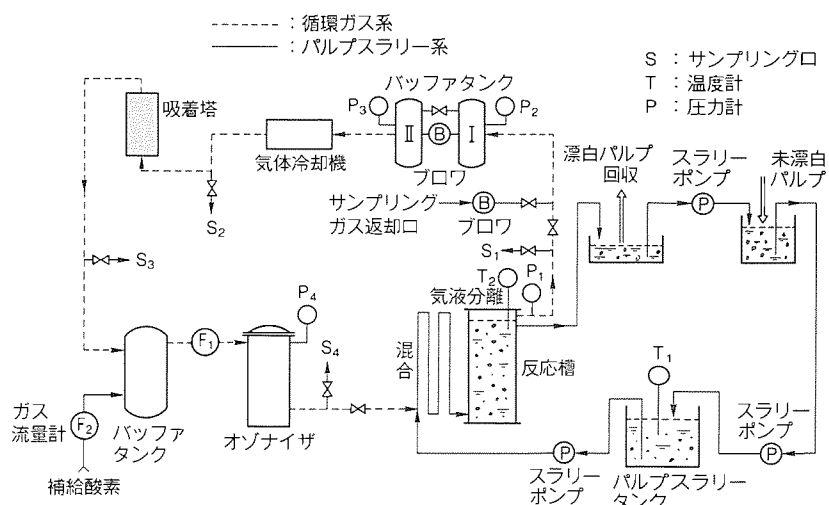


図 7. パイロットプラントのシステムフロー

オゾンの吸収率は80%以上である。

2.4.2 試験結果

パイロットプラントの動作特性と経済性及びパルプ漂白への適応性を総合的に実証する目的で運転試験を行った。ここでは試験の一例として、表1に示す条件での結果を示す。

(1) リサイクル系の不純物ガス

吸着塔の吸着剤再生のための切替え時間は8時間であり、この間の吸着塔入口(反応槽出口)と吸着塔出口(オゾナイザ入口)の二酸化炭素濃度の経時変化を図9に示す。吸着塔入口の二酸化炭素濃度は運転初期で0.55%であり、約1時間後から二酸化炭素が漏えいし始めて濃度が増加していき8時間後に1.5%となる。先の2.3.2項で述べたように、この程度の二酸化炭素のオゾナイザへの混入はオゾナイザの特性からは好ましく、ほぼ設計どおりの値となっている。一方、有機物ガスに関しては図10に示すように、吸着塔入口の濃度は定常値でメタノール換算で60ppm程度であるが、吸着塔出口では完全に除去されている。

窒素は吸着塔では除去できなく、リサイクル系のガス濃度として図11に示す経時変化が得られる。窒素については運転時間の経過とともに増加していき、8時間で約5%程度に

なる。この窒素はパルプスラリーに溶け込んでいた空気中の窒素であり、今回吸着剤として使用したモレキュラーシーブ5Aでは吸着除去できないため、さらに連続運転するとリサイクルガス中の窒素濃度は増加していき、これに対応して酸素濃度は低下していく。したがって、実際のプラントでは大量の窒素の混入を避けるため、パルプスラリーを適当に減圧脱気することにより、オゾナイザの特性の観点から好ましい5%程度の窒素濃度になるように調整する必要がある。また、図には示していないが水蒸気濃度は露点が一50℃以下に保たれている。

(2) 酸素消費量

図12に8時間の連続運転試験中に消費された酸素、すなわちリサイクル系への補給酸素量とパルプに吸収されたオゾン量を示す。図から反応槽で消費されたオゾンよりも補給酸素の方が若干少なくなっているが、これはオゾンとパルプとの反応で、オゾン分子がそのままリグニンと反応して漂白に利用される過程のほかにも、 $O_3 \rightarrow O_2 + O$ の反応でOのみが漂白に寄与し、 O_2 がリサイクルガスとして返還される反応過程もあるためと考えられる。

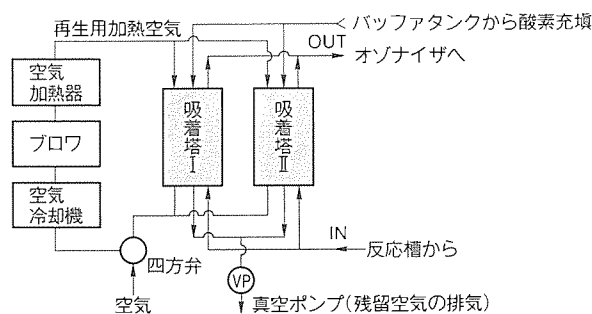


図8. 吸着塔のシステム構成

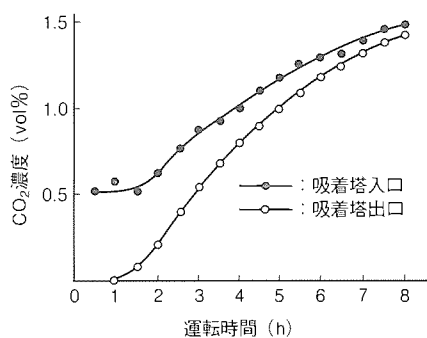


図9. 二酸化炭素濃度の変化

表1. 試験条件

パルプの種類	ダグラスファイバーパルプ
スラリー中のパルプ濃度	0.5wt%
スラリー流量	870 l/h
オゾン注入量	117ppm(吸収量83%)
オゾン発生量	102g/h
オゾン濃度	3wt% (43g/Nm ³)

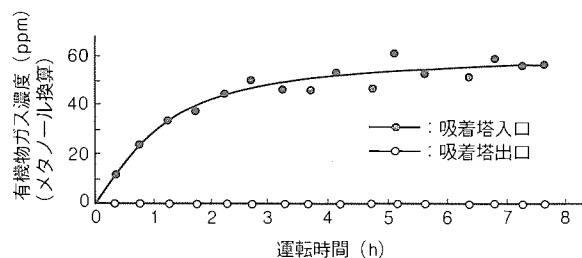


図10. 有機物ガス濃度の変化

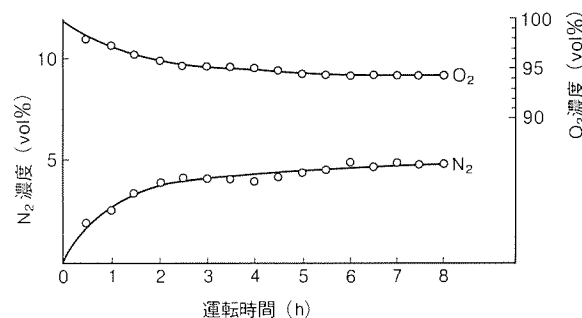


図11. リサイクルガス中の窒素、酸素濃度の変化

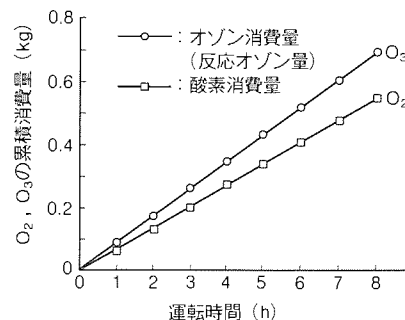


図12. 酸素消費量とオゾン消費量のマスバランス

表2. オゾンによるパルプ漂白の品質

	白色度(%)	粘度(cp)	カップパー値*
処理前	24.6	17.6	21.4
処理後	45.5	9.7	7.3

注 *リグニン量の指標

(3) 漂白パルプの品質

表2に漂白処理前と処理後のパルプの品質の一例を漂白の基本性能評価である白色度、粘度、カップパー値で示す。詳細は本稿では割愛するがオゾンによる漂白が実証されている。

以上、パイロットプラントの運転試験により、パルプ漂白プロセスも含んだシステム動作の総合実証が行えた。また、このシステムの開発の一つの重要なポイントである不純物ガスの除去や酸素消費量などに関しても総合的に検討することができ、実プラント設計のための資料を得ることができた。

3. 実プラントの消費電力の検討

パイロットプラントの試験結果からオゾン発生量 360 kg/h のパルプ漂白の実プラントの消費電力を検討した結果を表3に示す。このシステムを適用するとオゾン 1 kg を発生するのに必要な全電力は 10 kWh 以下になり、また酸素を原料ガスとするため、オゾナイザ、ブロワなどの設備容量も空気原料の半分になるのでインシタルコストも安く、補給酸素を考えても経済性は大幅に向上する。このシステムと従来の低温シリカゲル吸着式の酸素リサイクル方式など各種システムの消費電力の比較を表4に示すが、このシステムが最もランニングコストが安いことが分かる。

4. む す び

オゾン反応槽から直接酸素を回収する新しい方式の酸素リサイクルオゾン発生システムを開発した。この方式の適用としてパルプ漂白を取り上げ、反応槽から発生する不純物ガスの除去に関する基礎実験に基づき、パルプ漂白用の 100 g/h のオゾン発生システムのパイロットプラントを建設した。そして運転試験の結果、システムの総合的な経済性を実証することができ、パルプの漂白剤としてオゾンの使用を拒んで

表3. オゾン発生量360kg/hの実プラントの消費電力の見積り

単位: kW

オゾナイザ電力(放電電力+電源のロス)	2,500
オゾナイザ冷却電力(四季の平均)	335
酸素循環用ブロワ	240
気体冷却機用冷凍機	80
吸着塔再生	180
全電力	3,335
(オゾン 1 kg 当たりの電力)	(9.26)

表4. 各種システム(当社)の消費電力の比較

単位: kWh/kgO₃

原料ガス	オゾナイザ形式 システムの方式	放電電力	全電力	備 考
酸素原料 (リサイクル)	パルプ漂白用 酸素リサイクル	6.7	9.3	必要酸素量: 0.5~2kg/kgO ₃ システム規模: 数十kg/h 以上
	低温シリカゲル吸着式 酸素リサイクル	6.7	11.5	必要酸素量: 2kg/kgO ₃ システム規模: 数十kg/h 以上
空気原料	OT-E 型	13.3	28.5	冷却水: 15℃ チリングユニット クーリングタワー

たオゾンの製造コストの問題が解決されたと考える。

当社ではこれらの試験によって得た資料をもとに、数百 kg/h の大容量のパルプ漂白用オゾン発生システムの実プラントの建設に備えている。このシステムは他のオゾン処理にも利用でき、今後、適用拡大のための検討を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 田畑則一, 田中正明: オゾナイザの諸特性, 静電気学会誌, 7, No. 3, 150~158 (1983)
- (2) 難波敬典, 八木重典, 田畑則一, 臼井 明, 井上誠二: 酸素リサイクルオゾン発生装置, 三菱電機技報, 52, No. 8, 591~595 (1978)
- (3) Leach, J. M., Thakore, A. N.: Compounds Toxic to Fish in Pulp Mill Waste Streams, Prog. Wat. Tech., 9, 787 (1977)
- (4) 松本雄二: 紙パルプ技術タイムス, 32, No. 9, 7~17 (1989)
- (5) 細谷修二: 製紙用パルプのオゾンによる漂白, (2) オゾン漂白技術の現状と今後の方向, 平成4年度オゾンに関する講習会講演予稿集, 7 (1992-9)
- (6) 田中正明, 田畑則一: 酸素原料オゾナイザの基礎特性, 第1回日本オゾン協会年次研究講演会資料 (1992-3)

純水製造におけるコロイダル物質除去

伴 功二* 福本隼明**
柳 基典*
檜垣幸夫*

1. ま え が き

LSI 製造プロセスでは、各プロセス時に清浄表面を供することが常に要請されており、デバイスの微細化・薄膜化に従って、要求される清浄条件はますます厳しくなっている。コンタミナント除去としての清浄化プロセスでは、RCA 前処理⁽¹⁾を始めとするケミカル洗浄が通常行われてきており、その最終工程には優れたツールとして純水は欠かせないものとなっている。純水清浄はウェーハ表面清浄化ツールの最終工程であるために、その水質が表面清浄度を決定するといっても過言ではなく、特に ULSI 製造用洗浄水は Ultra Pure であることが要求される。

ULSI 製造に用いられる超純水中の不純物は様々な項目で管理される。管理項目の現状値は ppb から ppt レベルであるにもかかわらず、条件によっては超純水洗浄・乾燥後に、デバイスに悪影響を及ぼす“シミ”が発生する場合があります問題となっている。シミ形成の原因の一つに不純物が乾燥時に残さい(滓)として析出することが考えられるが、その不純物はイオンとしても微粒子としても除去困難なコロイダル物質である可能性が高い。

一方、オゾン処理の歴史は古く、殺菌、色度・臭気除去、酸化を目的として幅広い分野に応用されてきた。オゾンは 1785 年 Van Marum によって確認され、1886 年 De Meritens によって水に対する消毒効果が発表されている。また、色度・臭気除去を目的とした本格的なプラント実験は、1950 年以降のフィラデルフィア浄水場での実験の後、現在に至るまで、排水及び上水処理を対象とした水に対する適用研究が行われている。

著者らは、排水及び上水レベルの水処理に用いられていたオゾンのポテンシャルエネルギーの高さに着目し、不純物のほとんど含まれない超純水に適用、さらに殺菌や有機物分解

に用いられてきた UV (Ultra Violet ray : 紫外線) 照射を組み合わせることで、コロイダル物質、特に問題となっているコロイダルシリカの除去に成功した。

この論文では、現在の超純水製造法の問題を明確化するとともに、次世代の ppt 不純物レベルの超純水を製造するための要素技術として、オゾン又はオゾン及び UV を用いたコロイダル物質除去法、コロイダルシリカ除去法について述べる。

2. 次世代超純水製造技術に要求されること

1990 年代に入ると、微粒子・生菌・イオン状シリカ等も検出限界に近づき、要求水質の限界が評価検出限界に近くなってきた。参考に、超純水測定器とそれらの検出感度の代表例を表 1 に示す。現状の超純水製造システムは、①低圧でしかも高脱塩率、高有機物除去率の RO 膜、②低溶出型イオン交換樹脂、③有機物の分解除去を目的とした光酸化、④膜、触媒、真空脱気塔による溶存酸素の除去、⑤最終の精製フィルタである UF/RO、これらを多段に組み合わせたシステム構成によって水質の高純度化を図っている。しかしながら、このような複雑なシステム構成による水質の高純度化への努力にもかかわらず、現状システムではウェーハ上のシミ発生原因の一つであるコロイダル物質を完全には除去できない⁽²⁾。

コロイダル物質を除去するためには、①コロイダル物質の形態を固定して除去を容易にする技術、②コロイダル物質をそのまま除去しうる技術、を開発することが必ず(須)となる。

3. コロイダル物質除去法の開発

3.1 ウェーハのシミのモデル

シリコンウェーハを純水リンスして乾燥すると、ウェーハ上にシミが発生する場合がある。現在、シミ形成の原因としては、①超純水中に含まれる微量不純物が乾燥時に残さい(滓)として析出する、②ウェーハを構成する物質が超純水中に溶出し、乾燥時に残滓としてウェーハ上に残る、が考えられる。

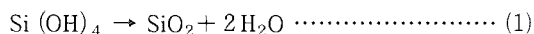
①で析出する微量蒸発残留物は、超純水製造装置において NVR (Non Volatile Residue) としてモニタされているが、超純水中に含まれる微量蒸発残留物の構成は明らかとはいえない⁽³⁾⁽⁴⁾。シミを AES (Auger Electron Spectroscopy) で

表 1. 超純水測定器の感度

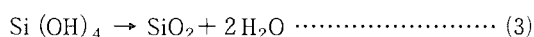
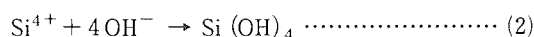
水 質	機器・方法(メーカー)	感 度(単位)
比抵抗	AQ-11 (DKK)	$18.24 \pm 0.01 (M\Omega \cdot cm)$
NVR	HPM-10S (NMS)	0.1 (ppb)
TOC	A-100SE (Anatel)	0.05 (ppb)
生 菌	ASTM	1 (cfu/100cc)
微粒子	Dust Counter (PMS)	1 (ps/cc : $\geq 0.05 \mu m$)
イオン状シリカ	SLC-2605 (DKK)	0.2 (ppb)
溶存酸素	Orbisphere 2713	0.1 (ppb)

分析したところSi, Oが、また、SIMS (Secondly Ion Mass Spectroscopy) で分析したところSi, O, C, Fが検出されていることから、シミは主にSiO_xから構成されていると考えられる。

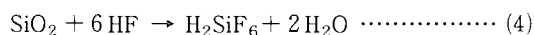
①のモデルとして考えられるのは、反応式(1)に示されるように、イオン交換樹脂などで除去しきれなかったコロイダルシリカが、乾燥時にウェーハ上で水分を奪われて、SiO₂として析出するというものである。



②のモデルとして考えられるのは、反応式(2), (3)に示されるように、純水中にシリコン基板が溶出し、それがOH⁻イオンと結合してコロイダルシリカを形成し、乾燥時にウェーハ上で水分が奪われてSiO₂として析出するか、又は溶出したシリコン基板が酸化されてSiO₂になるというものである(この反応式も基本的には式(2), (3)で表される。)



もう一つの②のモデルとして考えられるのは、HF ライトエッチ処理をしたときに、HF (又はF⁻) が純水リンス後もウェーハ上に残存し、反応式(4)が右向きに進み、



そして、乾燥時にH₂Oが蒸発し、逆反応が起こることによって、SiO₂がシミという形で残るというものである。

実際は、これらのモデルの反応のうちの幾つかが同時に進んでいることも考えられることから、更なる研究が必要である。とにかく、これらのモデルからウェーハ上のシミの発生を防ぐには、コロイダルシリカの低減、溶存酸素の低減、乾燥法の工夫が重要であると結論づけられる。

3.2 コロイダル物質除去法の開発

オゾン/酸素ばっ(曝)気には、①殺菌作用(オゾンの場合)、②有機物の酸化分解作用の2種類の効果が得られることは従来からよく知られていた。①は工業的にも広く用いられ、半導体製造ラインでは10~20ppb 注入すれば微生物の増殖は抑えられる⁽⁵⁾。また、酸化作用に関しては、水中

でオゾンや酸素と有機物を接触させると、その酸化作用によって分子量の大きな有機物が低分子化されCO₂とH₂Oに分解、臭気物質や陰イオン界面活性剤の分解、色度除去が可能である。

著者らは、オゾン/酸素曝気が③コロイダル物質を酸化凝集させる効果、オゾン/酸素曝気+UV 照射処理が④コロイダルシリカをイオン化させる効果を見いだした。これにより、従来除去困難であったコロイダル物質を酸化凝集させ微粒子状にし、微粒子としてフィルタなどで除去可能とした。また、コロイダルシリカに関しては、イオン化することによってイオンとして除去可能とした⁽⁶⁾。

まず、酸素曝気の実験結果から、コロイダル物質の微粒子化が酸化効果によるものではないかと推察し、さらに酸化力の強いオゾンを曝気に用い、凝集効果を酸素曝気の場合と比較した。その結果をそれぞれ図1、図2、図3に示す。

図1、図2から分かるように、測定範囲全域にわたって微粒子数及び微粒子質量濃度の増加が認められる。オゾン及び酸素曝気処理による微粒子数増加の割合はオゾン曝気処理の場合約6~12倍、酸素曝気処理の場合約2倍であり、微粒子数増加の割合は酸素曝気処理に比べてオゾン曝気処理の方が約2~6倍多い。

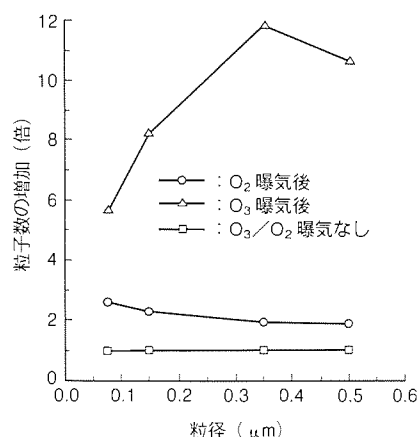


図1. O₃/O₂曝気による粒径シフト

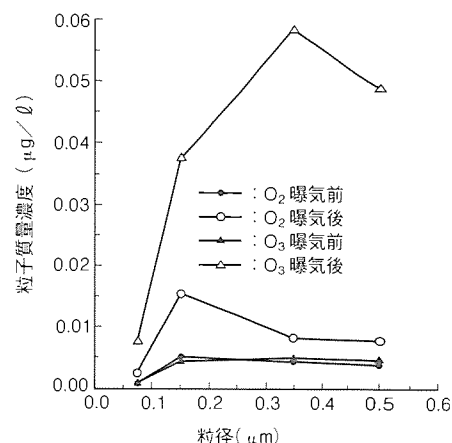


図2. O₃/O₂曝気による粒子質量濃度の増加

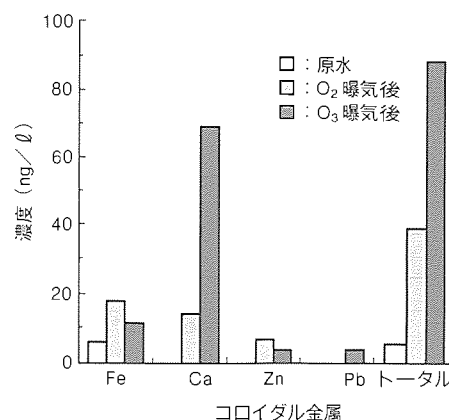


図3. O₃/O₂曝気によるコロイダル金属の凝集効果

酸化力の強いオゾン曝気処理の場合は、加えて粒径分布のシフトが観測され、粒径が大きくなるほど微粒子数増加率も高い。これは、粒径の小さなものが凝集・成長し、より大きな粒子を形成していることを示唆しており、コロイダル物質が酸化凝集することの一つの裏付けとなる。

また、図3からコロイダル金属に関しても、オゾン及び酸素曝気処理によって原水中にあった金属不純物が大きくなり、 $0.1\mu\text{m}$ のろ（濾）過膜に捕そくされるようになったことが示される。コロイダル金属の場合も、酸化力の強いオゾン曝気処理の方が酸素曝気処理と比較して強い凝集力をもっているといえる。

コロイダル物質から微粒子が生成される詳しいメカニズムに関しては考察中であるが、酸化力の強いオゾンを用いた方が凝集効果が顕著であることから、酸化によって生じる酸化重合等の効果によって凝集が引き起こされているものと考えている。

次に、ウェーハ上にシミを作る原因とされるコロイダルシリカに注目して除去率を調査した。この実験では、原水を前処理後、イオン交換樹脂+逆浸透膜+ポリリッシャ（2B3T処理水）で処理したものを被処理水として用いた。この被処理水にアスピレータ作用を用いたエゼクターでオゾンを注入し、反応槽で酸化凝集反応をさせた。気液分離を行った後、UV照射（254nm）し、RO膜+MBPで不純物除去を行った。この一連のシステムフローを図4に示す。

このシステムにおいて、オゾン曝気+UV照射処理を施した場合とオゾン曝気なしでUV照射処理のみを施した場合について、原水、オゾン曝気+UV照射処理/UV照射処理出口水、RO出口水、MBP処理水の全シリカ及びイオン状シリカをそれぞれICP-MS及びシリカモニターで測定した。その結果を図5、図6に示す。ここで、コロイダルシリカは全シリカ測定量からイオン状シリカ測定量を引いた差として

図5、図6から分かるように、21.54ppbのコロイダルシリカを含む2B3T処理水にオゾン曝気+UV照射処理を施すことによって、コロイダルシリカの71.2%をイオン化することができた。その後、オゾン曝気+UV照射処理水をRO膜+イオン交換樹脂に通すことによって、2B3T処理水中のコロイダルシリカの93.1%、全シリカの94.9%が除去

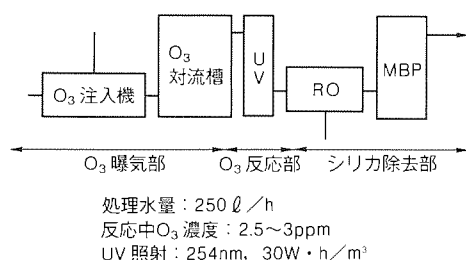


図4. コロイダルシリカ除去システム

できた。結局、このフローのみで2B3T処理水中のコロイダルシリカを1.48ppbまで低減できた。この実験からオゾン曝気+UV照射処理によって全シリカを1/5以下に低減できることが実証された⁽⁷⁾。

オゾン/酸素曝気の効果をまとめると、①殺菌作用（オゾンの場合）、②有機物の酸化分解作用、③コロイダル物質の酸化凝集作用、またオゾン/酸素曝気+UV照射による④コロイダルシリカのイオン化作用、の4種類が挙げられる。

3.3 コロイダルシリカイオン化のメカニズム

3.2節で説明した比較実験から、コロイダルシリカはオゾン曝気後UV照射を行うことにより、イオン交換樹脂によって効果的に除去されていることが確認された。

コロイダルシリカの形成メカニズムは、図7に示されるように、イオン状シリカ（ $\text{Si}(\text{OH})_6^{2-}$ ）が結合を繰り返しながら多量体を形成し⁽⁸⁾、さらにその多量体どうしが結合又は凝集すると考えられる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

著者らはこの形成メカニズムの物理的機構として、単量体であるイオン状シリカ（ $\text{Si}(\text{OH})_6^{2-}$ ）が、より安定な状態になるために、単位分子量当たりの化学ポテンシャルを下げる

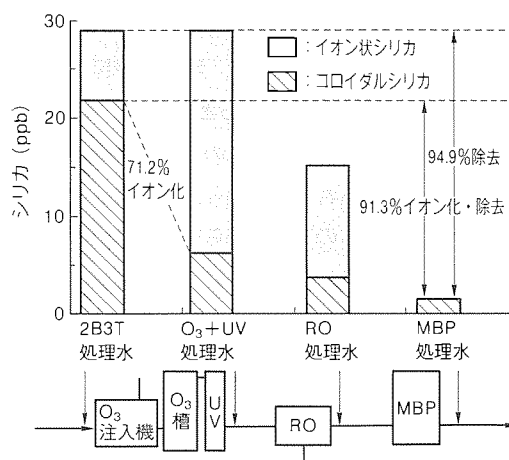


図5. O₃曝気+UV照射のイオン化効果

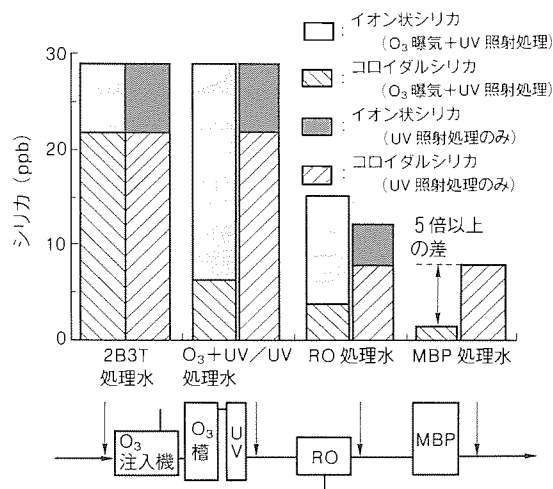


図6. O₃曝気とUV照射共存の必要性

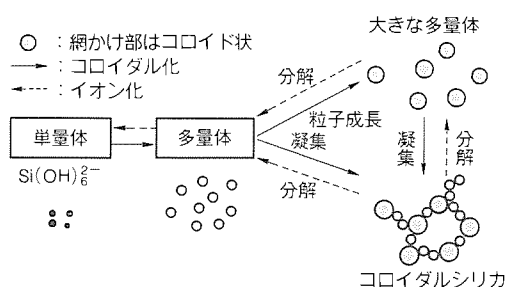


図7. コロイダル化/イオン化のメカニズム

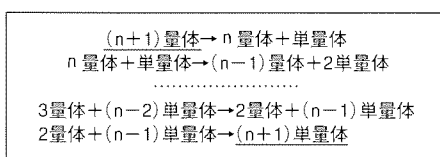
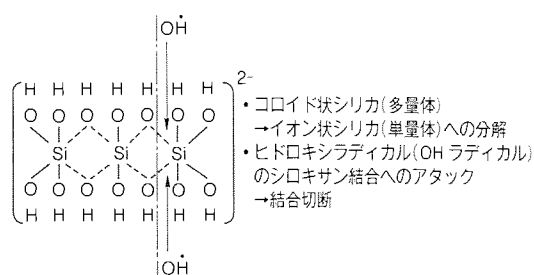


図8. イオン化反応モデル(ラジカル介在)

べく単量体どうし結合を繰り返し、より分子量の大きい多量体に成長していくものと考えている。つまり、イオン状シリカのコロイダル化は自発的に進む反応といえる。具体的に例示すると、単量体が2量体($\text{Si}_2(\text{OH})_{10}^{2-}$)になることによって単位分子量当たりの化学ポテンシャルはほぼ $1/2$ になる。よって、 n 個の単量体が結合して n 量体に変化すると、単位分子量当たりの自身の化学ポテンシャルは、約 $1/n$ になることが容易に推察される。この物理的機構は多量体と多量体が結合して更に大きな多量体に成長していくときにも当てはまる。

図8に示すように、コロイダルシリカがイオン化する物理的機構は、上述したイオン状シリカが高分子化・コロイダル化する物理的機構の逆反応と考えると説明できる。コロイダルシリカがイオン化する反応はシリカの単位分子量当たりの化学ポテンシャルが上昇する方向であり、ギブス・ホルムヘルツの法則によってイオン化するためには反応エネルギーの供給が必要である。著者らはイオン化反応を促進する物質は、溶存オゾンがUVのエネルギーを吸収することによって生成されるであろうヒドロキシラジカル(OHラジカル)又はヒドロキシイオン(OHイオン)であると考えている。

基本的なモデルを図9に示す。まず、イオン状シリカの多

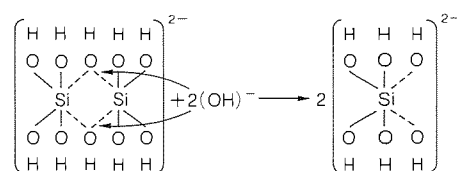


図9. イオン化反応モデル(イオン介在)

量体と考えられるコロイダルシリカのヒドロキシブリッジ(-Si-OH-Si-)にアタックし、弱い水和結合であるシロキサン結合を切断、 $(n+1)$ 量体を単量体+ n 量体に分解すると考えている。

4. む す び

現在の超純水の解決すべき問題点を浮き彫りにした。その中で解決困難といわれていたウェーハ上のシミ発生の問題を取り上げ、原因となるコロイダルシリカに着目し、オゾン/酸素曝気及びオゾン/酸素曝気+UV照射が、超純水中のコロイダル物質を大幅に低減し得ることを示した。また、そのメカニズムを示すモデル提案を行った。

この論文におけるオゾン/酸素曝気実験に関しては日本錬水研究所の御協力をいただいた。関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) Kern, W., Puotien, D. A. : RCA Review, **31**, No. 6, 187~205 (1970)
- (2) 福本肇明: 超純水の科学, リアライズ社, 883~890 (1990)
- (3) 高橋燦吉, 金子俊彦: 超純水の科学, リアライズ社, 554~565 (1990)
- (4) 高橋燦吉, 金子俊彦: 超純水の科学, リアライズ社, 761~764 (1990)
- (5) Arrowhead Industrial Water Inc. : Technical Bulletin.
- (6) Ban, C., Fukumoto, T., Yanagi, M., Ohmori, T., Higaki, Y. : Ultra Clean Technology, **3**, No. 5, 414~428 (1991)
- (7) Ban, C., Yanagi, M., Higaki, Y., Fukumoto, T., Manabe, T., Yamome, H. : 11th International Confederation of Contamination Control Societies Proceedings, 67~74 (1992)
- (8) Iler, R. K. : The Colloid Chemistry of Silica and Silicates, Cornell Univ. Press (1955)
- (9) Okura, T., Goto, K., Murai, M. : Memoirs of Engineering Faculty, Hokkaido Univ., **11**, No. 1, 25 (1960)
- (10) 後藤克巳: 水処理技術1, 6巻, p.1 (1960)

可逆式冷間圧延機(CRミル)用電機品

森 賢嗣* 石村耕一* 岡本 健*

1. ま え が き

近年、冷間圧延製品に対する市場の品質要求は高度化し、中でも製品の形状に対するニーズは、材料の極薄化、高剛性化傾向に伴い、ますます厳しくなっている。これらの市場ニーズにこたえるために、形状制御性の非常に優れた12段クラスタタイプ圧延機(CRミル)が三菱重工業(株)によって開発され、ここ数年、特にステンレス鋼等の特殊鋼向けの高品質、高速圧延用可逆式冷間圧延機として数多く導入されている。

このCRミル設備の電機品システムについては、当社が納入し良好に稼働している。ここでは、CRミル設備特有の電機品、特に駆動システム及び制御システムについて紹介する。

2. CRミルの特徴

CRミルは、高圧下を目的とした小径ワークロール(WR)を中間ロール(IMR)を介して特殊機構のバックアップロール(BUR)で支持した12段クラスタタイプ圧延機である。そして、圧延機の両側には圧延鋼板の巻戻し用、巻取用のリールを備えている。また、設備によっては、コイル挿入のダウンタイム低減の目的から、更に外側にペイオフリール(1パス目の巻戻し用リール)を設置しているものもある。

CRミルの電気的特長としては、以下のものが挙げられる。

- (1) 駆動システムに誘導電動機+循環電流方式サイクロコンバータを適用し、速度制御応答及び張力制御応答の向上を図るとともに、高速圧延(1,200 m/min)を実現している。
- (2) 計算機システムを導入し、パススケジュール計算モデル及び形状プリセット計算モデル、さらに学習計算モデルをもっており、プリセット制御精度を向上させている。
- (3) 形状フィードバック制御をデジタルダイレクトコントロール(DDC)レベルで導入し、高精度形状制御を得ている。
- (4) 油圧圧下及びサイクロコンバータシステムによる高応答化

によって、板厚制御精度向上を実現している。

- (5) マンマシンインタフェースの充実(CRTによるタッチオペレーション)により、操業の容易化を図っている。

3. 駆動システム

CRミル設備は、圧延する板厚・板幅の範囲とその用途により、主機(ミル、リール)電動機の規模は大きく違う。その中で厚板・広幅材向けのCRミルで大容量、高速性を必要とする主機電動機には、従来の直流電動機に替えて交流電動機の適用が一般的となっている。交流電動機駆動システムは、直流電動機と比較して電動機保守性及び駆動効率の点で優れており、また整流の問題がないことから高応答の特性が得られる。図1に主機電動機の交流化のメリットについてまとめた。

CRミル設備の主機(ミル、リール)駆動システムとしては、誘導電動機+循環電流方式サイクロコンバータシステムを適用している。表1にCRミルの主機交流化実績を示す。

また、補機関係の駆動システムについても、電圧形インバータ(VVVF)を採用し、全交流化を図っている。

4. 制御システム

4.1 制御システム構成

図2にCRミル設備の代表的な制御システム構成を示す。計算機システム(SCC)と、これに統括された5台のプラントコントローラシステム(PLC)によって構成されている。



図1. 主機電動機の交流化メリット

表1. CRミルの主機交流化実績
—誘導電動機＋循環電流方式C/Cシステム—

納入年度	ミル	左リール	右リール
1990年	6,300kW 400/1,000r/min	4,400kW 235/1,000r/min	4,400kW 235/1,000r/min
1991年	4,000kW 444/1,000r/min	4,000kW 260/1,000r/min	4,000kW 260/1,000r/min
1993年 (建設中)	5,000kW 300/1,260r/min	3,700kW 200/1,200r/min	3,700kW 200/1,200r/min

計算機システムとしては、機能レベルに応じて、マイクロプロセッサ MELMIC、プロセスコンピュータ MELCOM 350-60を導入している。また、バックアップ及び開発系として、同一の SCC を更に1台導入し、システムによって充実を図る場合もある。計算機システムの主要機能は、

- パススケジュール計算及び設定
- 形状プリセット計算及び設定
- プリセット計算学習制御
- 板厚制御 (AGC)、形状制御 (ASC) の影響係数設定
- コイル情報管理とマクロトラッキング

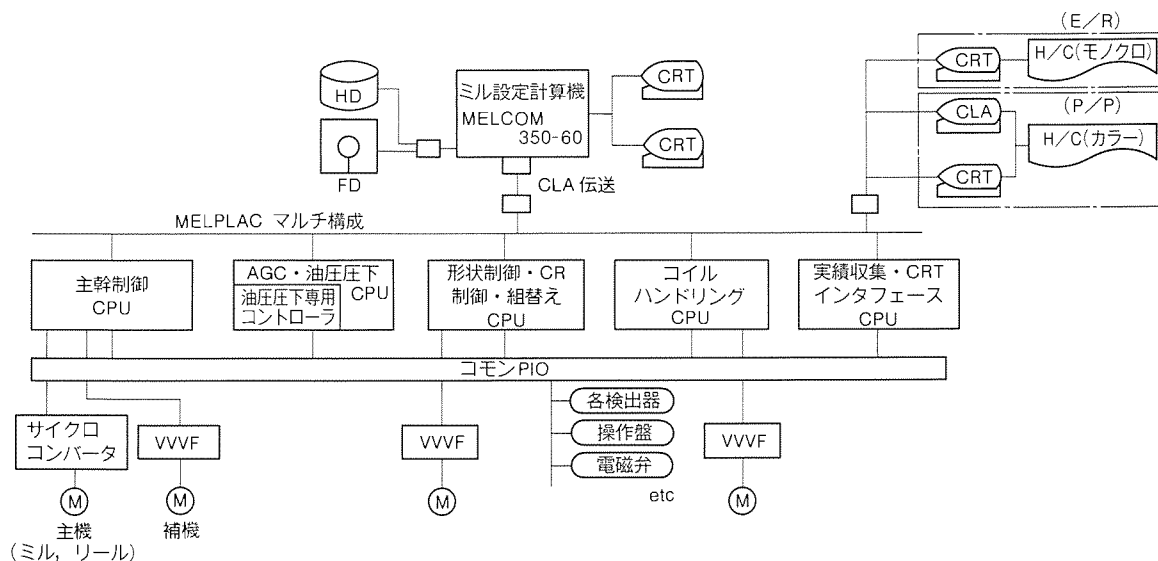


図2. CRミルの制御システム構成

主幹制御 CPU <ul style="list-style-type: none"> ・ミル速度基準 ・TR・POR 電流制御(張力制御) ・自動加減速制御 ・ストリップ通板、巻付自動 ・パス切替え ・ギャ切替え ・ペーパーワインダ制御 ・間紙口出し、巻取、挿入 ・先後進率計算 ・板破断検出 ・スピンドルポジショニング ・計装 I/F(張力計) ・CRT I/F ・P/C I/F 	AGC・油圧圧下 CPU <ul style="list-style-type: none"> ・定位・定圧制御 ・零調 ・ギャップ開閉設定及び表示 ・ブルバックロジック、バルプロジック ・モニタ AGC ・ロールフォース AGC ・ΔH FF AGC ・非干渉張力制御 ・マスフロー AGC ・計装 I/F(厚み計) ・CRT I/F ・P/C I/F 	形状制御・CR制御・組替え CPU <ul style="list-style-type: none"> ・レベリング制御 ・ロールベンディング制御 ・BURクラウン調整 ・荷重補正 ・レンジオーバー補償 ・影響係数学習制御 ・計装 I/F(形状計) ・形状目標値設定 ・テスト・AO 機能・急峻度グラフ表示
コイルハンドリング CPU <ul style="list-style-type: none"> ・自動コイル挿入シーケンス ・自動コイル取出シーケンス ・自動スプール挿入シーケンス ・自動スプール取出シーケンス ・コイル径・スプール径計測 ・コイル尾端停止 ・MANUAL LOGIC ・CRT I/F 	実績収集・CRT CPU <ul style="list-style-type: none"> ・板厚クラシファイ ・形状クラシファイ ・圧延速度クラシファイ ・P/C 学習用実績収集 ・ミル停止実績収集 ・入/出側コイル実績収集 ・CRT I/F, ホスト機能 ・セラー監視 ・セラー操作 ・クーラント制御 	<ul style="list-style-type: none"> ・上部 BUR クラウン調整 ・下部 BUR クラウン調整 ・IMR オシレーション
		組替え <ul style="list-style-type: none"> ・組替えモード LOGIC ・自動 WR 組替えシーケンス ・自動 IMR 組替えシーケンス ・IMR 組替え前/後処理 ・通板前/後処理 ・パスライン調整 ・MANUAL LOGIC
		<ul style="list-style-type: none"> ・CRT I/F ・P/C I/F

図3. PLCシステムの機能一覧

- 圧延実績収集
- ロール管理
- 休止管理

などである。

PLCシステムとしては、制御する機能によって台数の変動はあるが、通常はMELPLACによって構成されている。代表的な例を挙げると5CPU構成となり、

- 主幹制御CPU
- AGC・油圧圧下CPU
- 形状制御・CR制御・組替えCPU
- コイルハンドリングCPU
- 実績収集・CRTインタフェースCPU

に区分される。図3にPLCシステムの機能一覧を示す。PLCのCPU数については、コイルハンドリング機能、ロール組替えの自動化レベルや計装制御のPLCでの実施有無、又は実績収集、監視項目の量などによって増減する。

そして、計算機システムとPLCシステム間のデータインタフェースについては、その容量によってデータウェイシステム(MDWS-600S2)、又はシリアル伝送システム(CLA伝送、データネットワーク)を使い分けている。

上述の計算機・PLCによって構成される制御システムでは、上位の生産管理計算機からの情報に基づき、ミル設定計算機(SCC)は、パススケジュール計算、形状制御用アクチュエータのプリセット計算を行い、下位PLCへ自動設定する。これに加え、PLCレベルでは、自動コイル挿入・抜き出し、自動通板、自動巻付け及び自動ロール組替えといった

ハンドリング機能の自動化を図っている。また、主幹制御の中でも自動尾端減速停止、自動バス切替えなどの圧延作業も自動化を実現している。さらに、付帯作業をつかさどるコントローラともデータリンクageをすることにより、コイル搬送、スプール搬送、ロール搬送及び中間紙搬送まで、圧延作業に関連するほとんどの作業を自動化し、圧延作業全体の省力化を実現している。

圧延作業に必要なデータは、すべて集中運転室及び電気室の操業監視用CRTに表示され、ワンマンオペレーション及びコイル情報管理を容易にしている。

CRミル設備の制御システムとしては、これまで1989年から1992年まで、4プラントを納入しており高い評価を得ている。

4.2 板厚制御(AGC)システム

AGC(Automatic Gauge Control)システムは、多鋼種及び広範囲な板厚に対して高精度な板厚精度を実現するため、以下の機能をもっている。

- フィードフォワードAGC(FF AGC)
- モニタAGC
- ロールフォースAGC(RF AGC)
- マスフローAGC(MF AGC)
- 非干渉張力制御(NI-RTC)
- 張力モニタ制御(TC)

図4にこれらの構成について示す。

AGCシステムの特長は、以下のとおりである。

- (1) 制御周期 Min. 5 ms の高速 AGC を採用
- (2) 高応答油圧圧下の採用：
23 Hz 以上
- (3) サイクロコンバータシステムの採用によるトルク(張力)制御応答の向上：
600~900 rad/s
- (4) 高精度マイクロラッキングシステム(25 mm ピッチ)を用いたFF AGC主体のシステム
- (5) FF AGC, FB AGC 及びマスフローAGCでは、圧下・入側張力の二つのアクチュエータをもち、鋼種・サイズにより、圧下と入側張力の動作量を任意に決定することが可能
- (6) 圧下操作による入出側張力外乱を抑制する非干渉制御の採用
- (7) パススケジュールごとに任

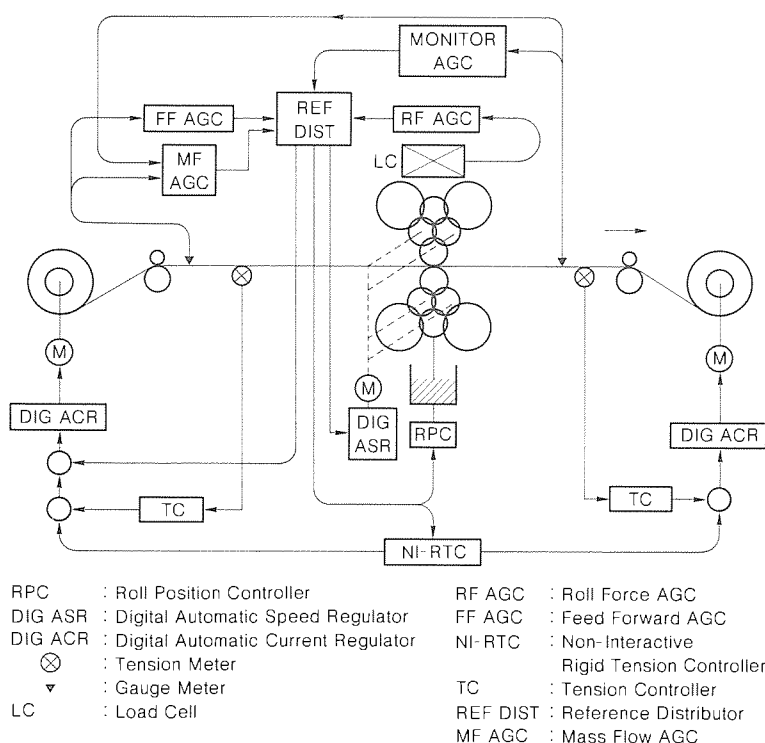


図4. 板厚制御(AGC)システム構成

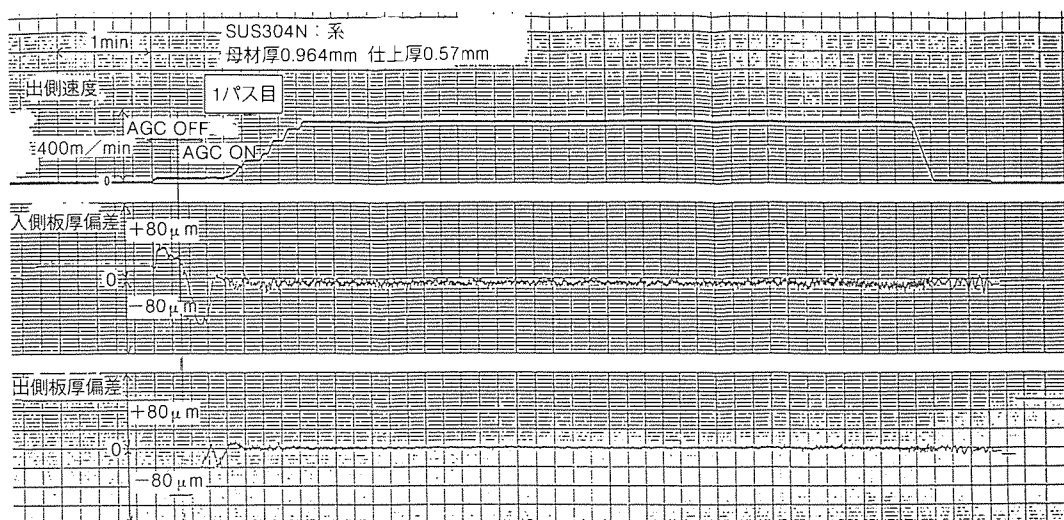


図5. 板厚制御実績データ

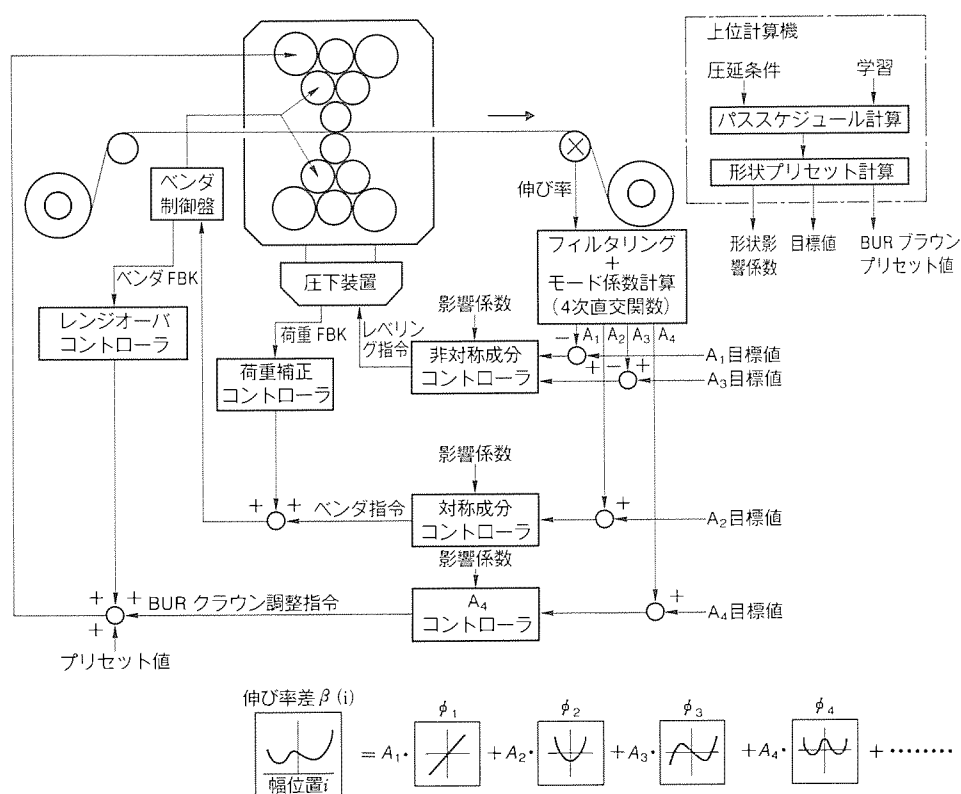


図6. CRミルの形状制御システム構成

意のAGCパターンを選択して構成することが可能

以上のようなAGCシステムにより、極めて高精度な板厚制御精度を実現し、全鋼種、サイズにおいて±0.5%以内の板厚精度を達成している。図5に板厚制御実績データを示す。

4.3 形状制御(ASC)システム

ASC (Automatic Shape Control) システムは、鋼種、板厚、圧下率等の圧延条件の変化に対しては、各パスごとに圧延開始前にBURクラウン調整(上下共)及びIMRベンダを

最適値に設定するプリセット制御で対応する。それに対して、圧延中のストリップの変形抵抗の変動、AGC等による圧下力や張力の変動及びロールの機械的、熱的変形によって発生する圧延鋼板の板幅方向の伸びの不均一、すなわち形状変化については、形状検出器からの信号によるフィードバック制御で対応する。システムとしては、図6に示すとおり、圧延機の両側に設置された形状検出器からの板幅方向の伸び率分布信号(通常50チャンネル程度)によって、目標形状に一致するように制御する。ASCは以下の機能をもっている。

- 形状モード展開機能
- 非対称モード制御(圧下レベリング制御)
- 対称モード制御(IMRベンダ制御)

- A4制御(上BURクラウン調整制御)
- 荷重補正制御
- レンジオーバー制御

ASCシステムの特長としては、以下のとおりである。

- (1) 形状検出器からの信号を正規化直交関数展開を用いて、独立した非対称成分(A1, A3モード)、対称成分(A2, A4モード)に分離して形状偏差を演算する。
- (2) クォータ伸び等の複合伸びを示す対称成分であるA4モ

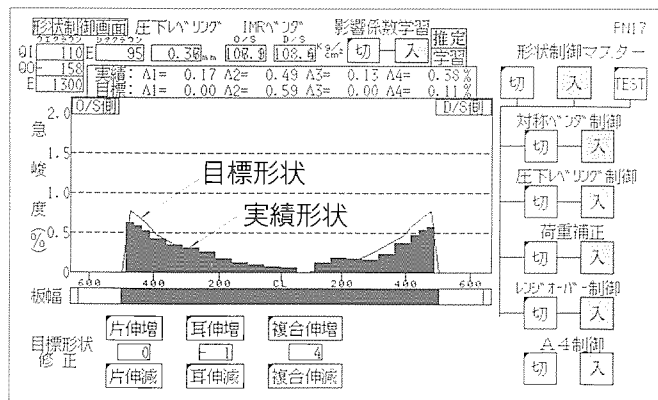


図7. CRミルの形状制御効果

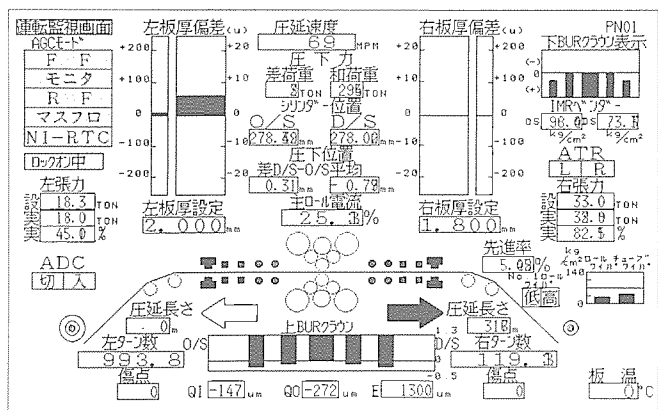


図8. 操業監視 CRT 画面例

ードについては、CRミル特有のアクチュエータである上BURクラウン調整のパターンを動作させることによって対応する。

(3) 圧延荷重の変化から形状A2モードの変化を予測し、これを取り除くようにIMRベンダを操作させる荷重補正機能をもっている。この制御は、特に加減速時及び急しゅん(峻)な外乱となる溶接部通過時に有効である。

(4) 対称成分の形状修正に有効かつ応答の早いアクチュエータであるIMRベンダの能力が不足(レンジオーバー)するときには、上BURクラウン調整を自動操作し、IMRベンダを補償するレンジオーバー制御を行う。

以上のようなASCシステムにより、極めて高精度、高応答かつ非常に安定した形状制御精度を実現し、先端から尾端まではほぼ目標形状どおりの制御効果を得ており、急峻度では、0.5%以内の良好な形状精度を示している。図7に形状制御実績データを示す。

4.4 マンマシンインタフェース(MMI)

CRミル設備としては、制御の高級化と自動化、生産の高速化、高効率化、オペレータの省力化をいかに実現していく

かが大きな課題であり、それを踏まえた上でのMMIは、以下の考え方を特長として構築されている。

- (1) デスクとCRTの最適な機能分担。デスクには重要度が高いもの(非常停止押しボタンなど)、迅速性を要するもの(張力微調バーニヤなど)を集中的に配置している。CRTは、タッチオペレーションを主体とし、必要な操作を簡単に行えるものとしている。また、計器類の表示及びアラーム表示もCRT画面化し、従来のメータ表示盤や警報表示盤は削除し、大幅な省スペース化を実現している。
- (2) 集中運転室に設置される複数台のCRTは、操作方法の変更への対応、バックアップ機能としての対応のために、同一の表示・操作機能を各々にもつようにしている。
- (3) 圧延作業に必要なデータはすべて、集中運転室のCRTに集約させ、ワンマンオペレーションを可能にしている。

CRT画面数は30~60種類程度をもっており、その代表的なものは運転監視画面、形状制御画面、AGC画面、ミル制御画面、パススケジュール画面、ハンドリング画面、ロール組替え画面、主幹及び各自動フローのインタロック画面、アラームリスト画面、そして電源監視画面等である。その一例を図8に示す。

5. むすび

以上、CRミルの電機品システムについて、その特長を中心に紹介した。CRミル設備では、製品の高品質化及び省力化を実現するために、設備技術、操業技術及び制御技術の面で更に進歩を遂げていくものと考えられる。今後も、これまでの実績を基盤として更にCRミル技術の充実に図り、市場の動向にも注目しつつ、新技術、新システムの開発に努力していく所存である。

参考文献

- (1) 林 康生, 佐々木伸二, 南 元彦, 西本忠博, 三浦博昭 : 周南製鋼所12段クラスター圧延機の概要, 日新製鋼技報, 63, 126~133 (1990)
- (2) 石川 勝, 覚張文夫, 拝司裕久, 白石幸夫, 鈴木宣嗣 : ハイテク薄板ミル(SCRM)の建設, NKK技報, No. 133, 25~29 (1990)
- (3) 中野恒夫, 福山五郎, 有田一豊, 梶原哲雄, 森本和夫 : クラスタミル(CRミル)の特殊鋼圧延への適用, 三菱重工技報, 29, No. 1, 8~12 (1992)
- (4) 三吉貞行, 小松富夫, 齊藤輝弘, 森 賢嗣, 小寺嘉一 : 冷間圧延機の形状制御システム, 三菱電機技報, 64, No. 12, 1016~1021 (1990)

無電解電源“AE”搭載ワイヤ放電加工機

山田 久* 真柄卓司* 佐藤清侍* 弥富 剛** 伊藤影康*

1. ま え が き

ワイヤ放電加工機は、特に熟練技術を必要とせず、無人加工が可能であることから、金型加工のマザーマシンとしての地位を確固たるものとしている。また、技術的にも製品化以来進歩が著しく、金型の高精度化、高生産性に大きく貢献している。

近年、金型業界においても、無人化・省力化の要求は強く、ワイヤ放電加工後の磨き工程等の省略や、研削加工等の熟練技術を要する加工工程へのワイヤ放電加工への置き換えが重要な課題となっている。そのため、ワイヤ放電加工に要求される加工精度及び加工品質はますます厳しいものになってきている。

こうした市場ニーズにこたえるため、当社では無電解電源“AE” (Anti-Electrolysis) (図1) を製品化した。無電解電源“AE”は、ワイヤ放電加工機において世界で初めて、高速加工から仕上加工までのすべての領域を無電解化した加工電源であり、高品位・高精度加工の生産性向上を可能とするとともに、金型寿命の大幅な向上を実現した。

2. 開発のねらい

2.1 ワイヤ放電加工の高精度・高品位加工への適用

近年の金型製作において、長寿命化のために超硬合金等の高硬度材料を使用するが増加しており、特に電子部品、半導体部品を中心とした高精度金型では、今後このような材料が主流となると思われる。従来、こうした加工では加工精度、加工品質の点から研削加工が主流となっているが、研削加工を始めとする機械加工は、熟練者を必要とし、有人加工が必要なため省人化、自動化の弊害となっている。そこで、特に熟練者を必要としないこと、連続無人加工が可能であること、さらに微細化する加工に適用可能なことなどから、ワイヤ放電加工への置き換えが検討されるようになった。

2.2 従来技術の問題点

ワイヤ放電加工は、数十～数百Vの直流パルス電圧を正極性(ワイヤ電極を一極、工作物を+極)接続したワイヤ電極と工作物との間に印加して放電を発生させることによって加工を行う。一般には加工液として水を用いるため、加工と同時に電気分解(以下“電解”という。)が起こる。したがって、工作物には放電発生の際の熱に起因する熱変質層のほかに、電解に起因する電解変質層が加工面に生成され加工面品質が

低下する。特に最近、金型材料として需要の伸びている超硬合金等の焼結材料の加工では、結合材であるコバルトが電解腐食によって選択的に溶出してWC(タングステンカーバイド)粒子が欠落しやすくなり、金型としての寿命が低下するといった問題がある⁽¹⁾。

従来、こうした電解腐食に対しては、

- (1) 加工液であるイオン交換水の比抵抗を高める。
- (2) 仕上加工(加工エネルギーの小さな加工)で、交流高周波電源を使用する。

などの方法により、加工物への影響を抑制してきた⁽²⁾⁽³⁾。しかし、このような方法では、イオン交換のためのランニングコストがアップすること、また、仕上加工以前の荒加工において広範囲に電解腐食が発生し、仕上加工によって電解変質層を除去しきれない場合があることなど十分とはいえない。また、加工液に非導電性である油を使用する方法もあるが、火災の心配があるため長時間の連続無人加工が不可能であること、水を加工液とした場合に比較して加工速度が遅いといった短所がある。

以上を開発の背景として、ワイヤ放電加工において、荒加工から仕上加工まで、加工中の電解作用を電氣的に抑制することができる無電解電源“AE”を製品化した。

3. 無電解電源“AE”の特長

3.1 電解抑制による金型品質の向上

- (1) 工作物表面の電解腐食の防止

ワイヤ放電加工後の工作物の電解腐食の例を図2に示す。図は特に、加工液の比抵抗が低い条件において、従来電源に

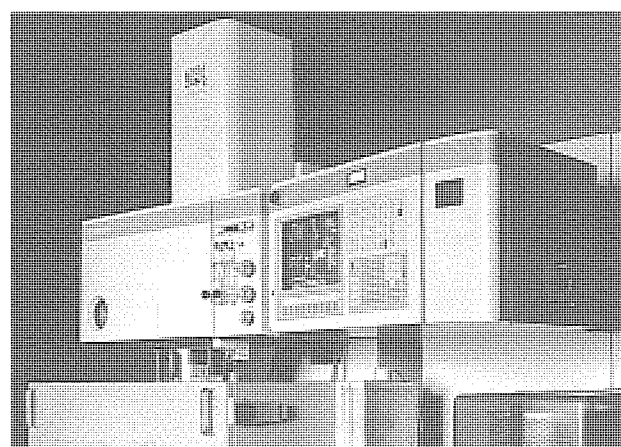
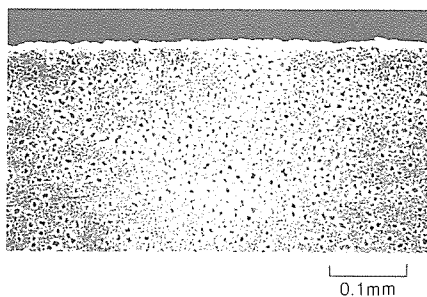


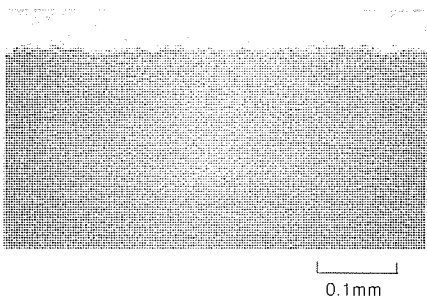
図1. 無電解電源“AE”搭載 DWC110SZ

による加工（以下“従来加工”という。）と無電解電源“AE”による加工（以下“AE 加工”という。）により、仕上げ後の加工面を走査型電子顕微鏡（SEM）によって観察したものである。従来加工の場合、表面に電解による数 μm 程度の腐食こん（痕）が多数形成されているのに対し、AE 加工の場合には全く形成されていないことが分かる。

電解による影響は、電子部品用金型などの精密型において型破損として現れる場合がある。IC のリード部材を打ち抜くタイバーカットパンチ（超硬合金）をワイヤ放電加工した後のパンチのくし歯の根元付近を研削面から光学顕微鏡によって観察したものを図3に示す。図において、従来加工ではワイヤ放電加工前の研削痕（横方向のスジ）が腐食によって消失し、特に加工面に近い部分で変色が大きくなっているのが分かる。これは、バインダであるCoが電解作用によって

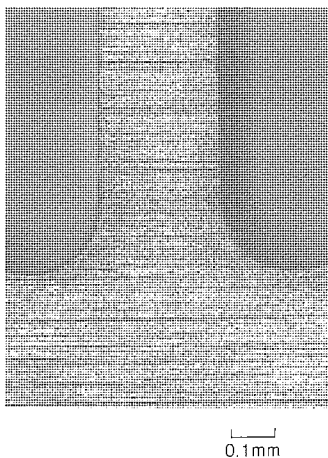


(a) 従来加工

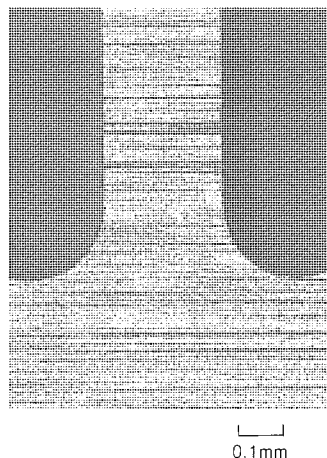


(b) AE 加工

図2. 工作物表面の電解腐食(工作物:SKD61, 加工液比抵抗: $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$)



(a) 従来加工



(b) AE 加工

図3. 加工後における超硬合金表面の電解腐食

溶出し、パンチ表面のWCが欠落したためである。一方、AE 加工では、研削痕もきれいに残っており、電解腐食の発生がないことが分かる。

(2) 加工変質層の低減

加工断面の変質層における硬さの低下は、金型の初期摩耗に大きく影響を及ぼす。従来加工, AE 加工, 油を加工液として使用した油中加工について、ダイス鋼の仕上加工断面の硬さ変化を求めたものを図4に示す。図において、従来加工では加工面から約20 μm の深さから硬度が低下しているのが分かる。それに対してAE 加工では硬度低下は5 μm 以下となっており、この差は電解変質による軟化と考えられる。油中加工の場合、加工液が非導電性であるため電解変質層は生成されないが若干の硬度低下が見られる。これは荒加工において発生したろいオーステナイト層（熱影響層）が残留したことによるものと考えられる。

3.2 陽極酸化の抑制

(1) 鉄系材料の錆の抑制

鉄系材料のワイヤ放電加工の問題として、さび（錆）の発生が挙げられる。錆の発生は電解作用と深い関係があり、陽極では酸化が進行しやすいことが知られている。無電解電源“AE”では、こうした陽極酸化が進行しないため、錆の発生が抑えられる。加工面における酸素含有量をX線分析した結

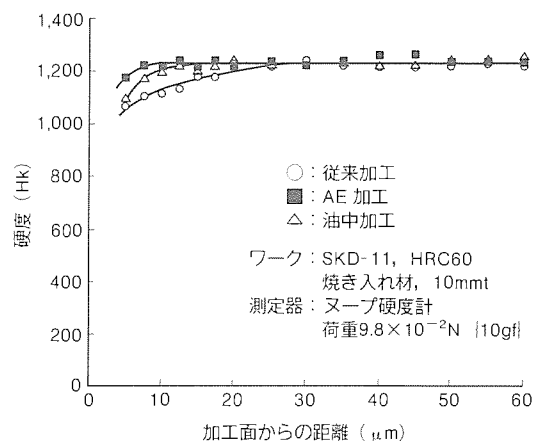


図4. 仕上加工断面の硬さ変化

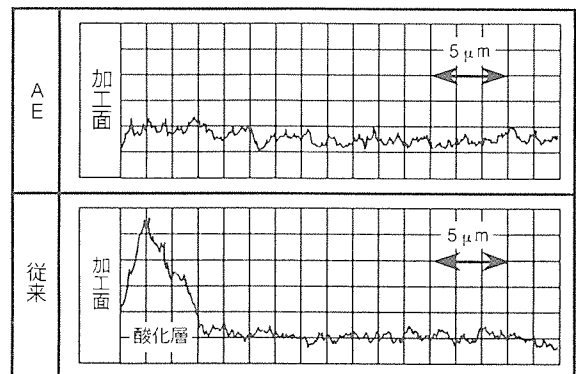


図5. 工作物表面のX線分析(酸素含有量)



図6．チタン合金加工における変色

果を図5に示す。図において、従来加工の場合、加工面から約5 μm の深さまで酸素の含有量が増加しており、工作物表面に錆の原因となる酸化層が形成されていることが分かる。一方、AE加工の場合は、こうした酸化層が全く形成されていないことが分かる。

(2) 非鉄材料の酸化防止

チタン合金は最近航空機部品や医療部品などに使用されており、これまでワイヤ放電加工後の変色が問題となっていた。チタン合金について、従来加工とAE加工でスリットを加工して加工部分の状態を観察比較を行った結果を図6に示す。図において、従来加工では変色が発生したのに対して、AE加工では変色は発生していない。したがって、今後、チタン合金を始め、酸化しやすい非鉄材料への適用が期待されている。

3.3 微細仕上げによる機械強度低下の抑制

加工面におけるマイクロクラックは型の破損・異常摩耗につながることから、極力発生を防止する必要がある。無電解電源“AE”では、エネルギーを均一化した特殊パルスにより、型寿命低下の原因となるマイクロクラックが極めて少ない、均一な微細仕上加工面（面あらし1 μmRmax ）が得られる。

図7にAE加工と油中加工における超硬加工面の性状を比較した結果を示す。図から、油中加工では厚さ5 μm 程度の熱変質層（再凝固層）が形成され、この熱変質層の厚み程度のマイクロクラックが多数観察される。一方、AE加工では加工面の冷却速度が速いため、熔融金属は加工表面から離脱しており、熱変質層が残留しない。このため、マイクロクラックの極めて少ない加工面が得られる。

工作物表面のマイクロクラックの発生は機械強度の低下として現れる。図8にワイヤ放電加工をほどこした超硬合金材の抗折力試験を行った結果と試験方法を示す。試験片は、2種類の超硬合金を使用し、図8に示すように引っ張り側と圧縮側になる部分をワイヤ放電加工により、約1 μmRmax に仕上げた。加工は、AE加工、従来加工、油中加工についてそれぞれ行った。ここでの抗折力は研削によって仕上げた基準試験片の抗折力を1とした比率で示した。抗折力試験結果から、AE加工の場合、特にV4（JIS分類）において研削加工の約83%の抗折力が得られた。一方、油中加工は抗折力の低下がもっとも大きい。これは、先に述べたマイクロクラックの影響によるものと考えられる。

3.4 高生産性・安全性

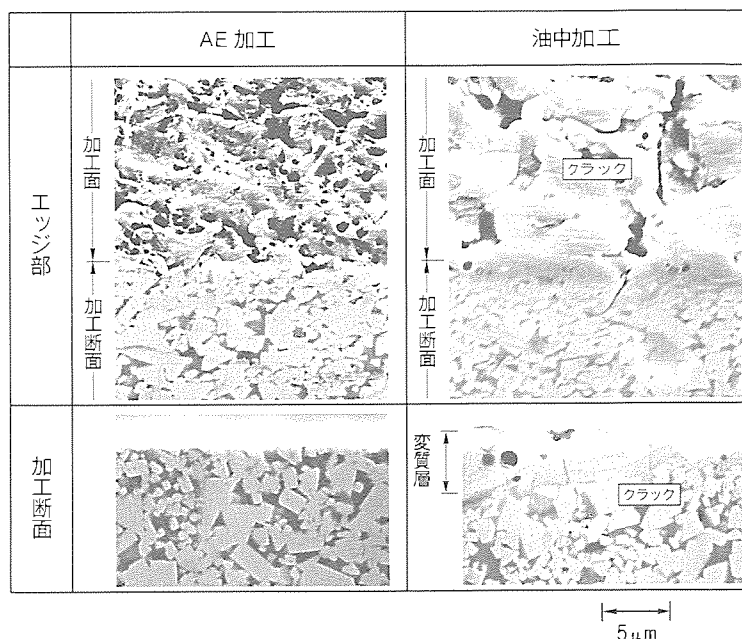


図7．仕上面におけるマイクロクラック(超硬合金)

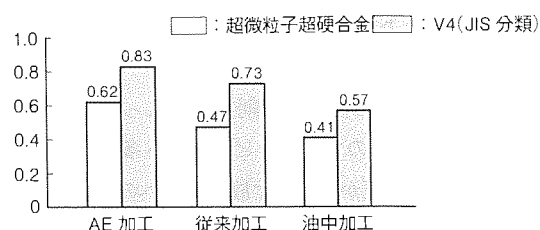
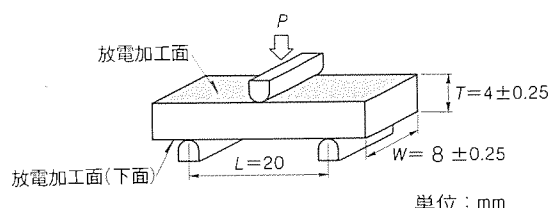


図8．加工方法と抗折力

無電解電源“AE”は従来と同様に加工液に水を使用するため、油中加工のような火災の心配がない。したがって、夜間運転などの長時間加工も安心して行え、操作性、メンテナンス性も良好である。

4. 金型加工への適用例

4.1 超硬プレス抜き型寿命試験

4.1.1 試験方法

従来加工、AE加工、油加工、研削加工の4種類の加工方法にて超硬パンチ・超硬ダイを製作し、同一の型に組み込んで打抜きを行った。各加工方法ともに面あらしは1 μmRmax に統一するとともに、データのばらつきを抑えるために各加工方法とも3組ずつ計12組のパンチ・ダイを組み込んで同時にテストを行った。

4.1.2 試験結果

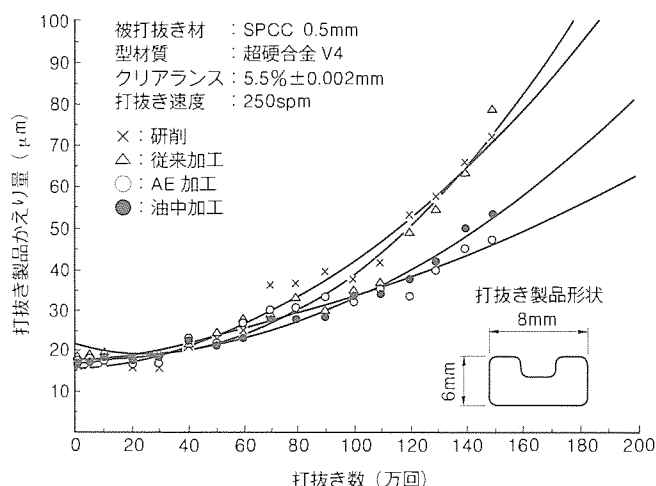


図9. 超硬抜き型寿命テスト結果

ショット数に対する打抜き製品のかえり量を測定した結果を図9に示す。プレス抜き型試験において、従来加工では約120万ショットでかえり量が50 μ mとなり、金型の寿命と判断された。これに対し、AE加工はかえりの発生が少なく、150万ショット以上の寿命が得られた。なお、研削加工のかえり量はAE加工より大きくなっているが、これは、コーナ部における加工精度又はクリアランスが十分でなかったためと考えられる。以上の結果から、AE加工を行った超硬合金金型は、従来加工と比較して対摩耗性の点で向上が認められ、金型寿命も改善されることが分かった。

4.2 IC リード金型への適用

4.2.1 試験方法

IC リード金型は従来、研削加工によって製作されていたが、最近ではICのファインピッチ化、多ピン化が進んでいるため、研削加工からワイヤ放電加工への置き換えが検討されるようになってきた。そこで、タイバーカットパンチ金型へのワイヤ放電加工の適用の可能性を試験した。

タイバーカットパンチ金型は材料に超微粒子超硬合金を使用し、従来加工、AE加工、研削加工の3種類の加工方法により、それぞれ面あらさを1.5 μ mRmaxに仕上加工した。それぞれの加工方法で加工した金型を、4本1セットして生産ラインに組み込み、同一の条件下で打抜きを行い、初期摩耗を観察した後、打抜き数10万回ごとにパンチの摩耗量、刃先の折れ、はく(剥)離及び打抜き製品のかえりの発生状況を観察した。

4.2.2 試験結果

図10に打抜き数に対する摩耗量の測定結果、表1に評価結果を示す。従来電源の場合、5万ショット程度でパンチの摩耗量が大きく打抜き製品にヒゲが発生したため、寿命と判定した。それに対して、AE加工の場合、打抜き数25万回時点で一部パンチに破損がみられたものの、摩耗による限界は30万回と判定した。また、その他の評価項目に関しては

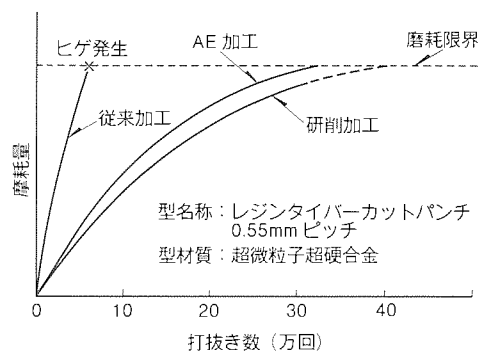


図10. IC リード金型寿命テスト結果

表1. IC リード金型の寿命評価結果(AE加工)

項目 \ 打抜き数	初期	10万回	20万回	30万回
切り刃摩耗	良	良	良	限界
切り刃断面はんだ付着	—	なし	なし	なし
打抜き製品のかえり	なし	なし	なし	なし
打抜き製品の切り口	良	良	良	良
切り刃チッピング	なし	なし	なし	一部破損

打抜き数30万回までは良好であった。

この結果から、パンチの破損という課題が残ったが、摩耗の点から、AE加工の場合、従来加工の約6倍程度の寿命が得られており、研削加工による金型寿命に非常に近い結果が得られた。したがって、今後はパンチ破損の対策を行うとともに、より小さいリードピッチの金型に関しても検討を進めていく必要がある。

5. む す び

以上、無電解電源“AE”の特徴について述べた。AE加工は新しい加工方法として高品位ワイヤ放電加工の主流となるものと考えられ、適用分野の一層の拡大が期待される。今後もアプリケーションの充実、ユーザーへの技術支援などを通じ、金型生産の効率化に貢献していく所存である。

最後に、金型寿命評価に当たり多大なる御協力をいただいた関係各位に対して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 増井清徳, 曾根 匠 : ワイヤ放電加工面の電解腐食, 精密工学会誌, 54, No. 6, 160~165 (1988)
- (2) 増井清徳, 曾根 匠 : ワイヤ放電加工の研究 (第5報), トランスカプラーの試作と微細仕上げ加工への応用, 昭和59年精機学会春期大会学術講演会論文集, 第1分冊, 604, 315~318 (1984)
- (3) 真柄卓司, 弥富 剛, 小林和彦 : ワイヤ放電加工における高精度仕上の研究—交流高周波による垂鏡面仕上げ加工—, 電気加工学会誌, 24, No. 48, 45~63 (1990)

高速マルチプロトコルルータ“MELNET R2000”

江口眞行* 斉藤正光** 昆 資之** 根本泰典*** 市橋立機***

1. ま え が き

LAN (Local Area Network) は、構内に分散配置されたデータ端末相互間を高速通信するネットワークシステムと定義されるが、LAN の規模が拡大されるにつれて LAN 同士を直接又は広域網経由で接続するインタネットワークング (LAN 間接続) 及びネットワークの管理が重要になる。

インタネットワーク機器はネットワーク固有の規模の限界を個々のネットワークへ影響を与えないプロトコル中継方式によって克服し、プロトコルの独立性を維持しつつ拡張することを目的とした装置である。ネットワーク管理装置は複雑化するネットワークの状態を監視制御し、トラヒック分析及び故障検出などネットワーク管理者に不可欠な情報を提供することを目的とした装置である。

このたび、複数プロトコルに対応、多様な広域網/LAN インタフェースとネットワーク管理エージェント機能をもつインタネットワーク機器である高速マルチプロトコルルータ“MELNET R2000” (以下“R2000”という。)を開発した。R2000 は any-to-any 通信を実現すべく“トラヒックの自由な接続と遮断”を基本ポリシーとしている。

本稿では開発のねらい、機能、構成及び適用システムについて概要を紹介する。

2. 開発のねらいと特長

2.1 開発のねらい

R2000 は次のようなねらいのもとに開発した。

- (1) 国際標準及び業界標準プロトコルを広くサポート
- (2) FDDI (Fiber Distributed Data Interface) -FDDI 間の中継やネットワークのトラヒック増大に対応できる高速性
- (3) FDDI, CSMA/CD, トークンリング, 各種 WAN (Wide Area Network) 接続が可能な価格性能比に優れたマルチポート (多ポート) ルータ
- (4) 現行の高速光 LAN “MELNET R100”⁽¹⁾⁽²⁾ と FDDI 標準による相互接続が可能
- (5) 10BASE-T ハブ機能, FDDI コンセントレータ機能内蔵による統合配線システムとの優れた親和性

2.2 特 長

R2000 は以下の特長をもつ。

- (1) ISDN (INS ネット 64, INS ネット 1500), 高速デジタル回線, パケット交換網及び専用線など種々の広域網インタフェースをマルチポートでサポート
- (2) CSMA/CD (10BASE 5, 10BASE-T, 10BASE-T ハブ), トークンリング (4 Mbps, 16 Mbps) 及び FDDI など多様な LAN インタフェースをマルチポートでサポート
- (3) RISC CPU の搭載, マルチプロセッサ構成の採用によって高い中継性能を実現

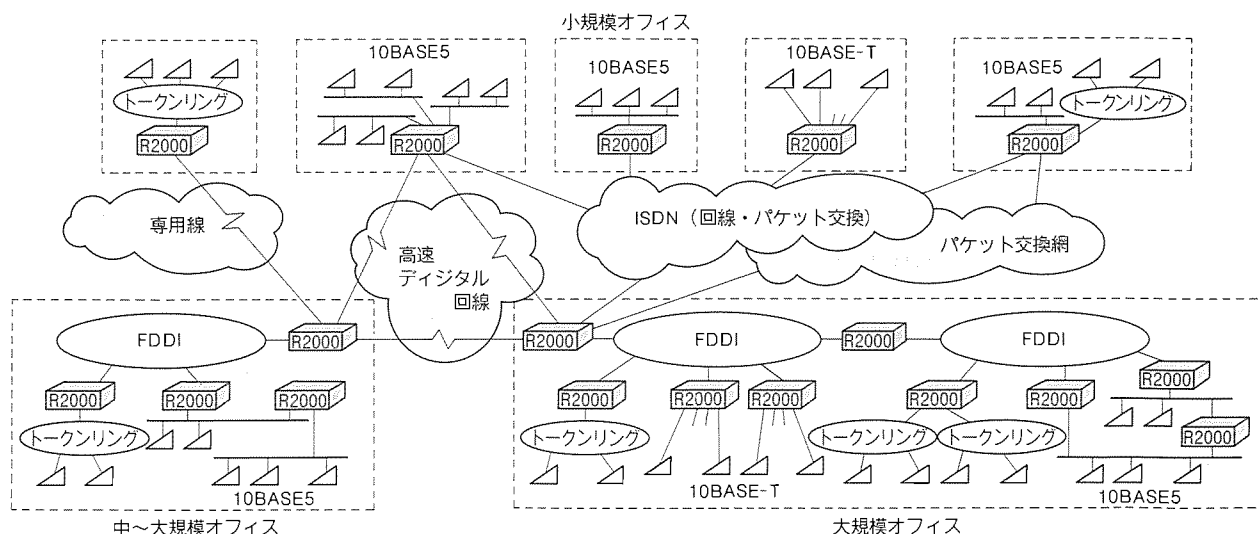


図1 システム構成の概念

- (4) フラッシュメモリの採用，稼働中のリモートローディング機能によって信頼性，保守性の向上
- (5) 高密度実装技術の採用により，小型サイズのマルチポートルータを実現
- (6) 閉域接続，不当アクセスの遮断など高度のセキュリティ機能を提供
- (7) ネットワーク管理はRFC (Request For Comment) 準拠の SNMP (Simple Network Management Protocol) 及び標準・拡張 MIB (Management Information Base) のサポートにより，マルチベンダネットワーク管理に対応
- (8) ネットワーク管理装置以外の TELNET 端末からも管理が可能，また網内のどこからでもリモート（遠隔）管理が可能
- (9) ポート間の中継フレーム数などきめ細かなトラフィック統計情報の収集

3. システム構成と機能

3.1 システム構成

R2000 によるシステム構成を図 1 に示す。R2000 は CSMA/CD，トークンリング，FDDI の LAN 間接続とともに，専用線，ISDN，パケット網などとの接続により LAN の広域化を図ることができる。小規模オフィスでは CSMA/CD，トークンリングにより，中規模ないし大規模オフィスでは FDDI によるバックボーン LAN を中心にネットワークを構成する。各オフィス間の通信では，通信量や通信形態，接続地点の数などにより，専用線，高速デジタル回線，ISDN，パケット交換網等を使い分けて最適なネットワークを構築できる。

また，複数の建物にまたがる大規模オフィスでは複数の FDDI バックボーン LAN を直接相互接続するネットワークを構成することも可能である。

ネットワーク構成上重要な通信パスでは，LAN，広域網のいずれにおいても複数経路をもつ冗長構成をとることができる。また，広域網では負荷分散によって複数の回線を効率的に使用することもできる。

3.2 仕 様

システム仕様を表 1 に示す。R2000 はマルチプロトコルルーティング機能及びブリッジング機能の提供を基本に，ダイナミックルーティングや業界標準のネットワーク管理に対応することにより，接続性に優れた，適用範囲の広い機種としている。

この装置は実装する通信処理ボードの構成により，CSMA/CD，トークンリング，FDDI，及び専用線，ISDN，パケット交換網など種々の通信媒体を組み合わせ，ユーザー要求に合った最適なネットワークを構成することができる。

また，CSMA/CD に対しては，同軸ケーブルを通信媒体

として用いる 10BASE5，ツイストペアケーブルを用いる 10BASE-T の切替えができるほか，最大 36 ポートの 10BASE-T ハブ機能を付加したルータも構成することができる。

3.3 機 能

この装置の主要な機能について以下に説明する。

(1) マルチプロトコル対応のルーティング機能

ルーティング対象としているプロトコルとしては，IP，IPX，OSI など，マルチベンダ環境の LAN システムで使用されるプロトコルが実装される。IP ルーティング機能では，ルーティングプロトコルとして RIP (Routing Information Protocol) 及び OSPF (Open Shortest Path First) を採用してトポロジ変化に柔軟かつ動的に対応することを可能としている。特に OSPF は RIP に比べ，より大規模な TCP/IP ネットワークに適用できるルーティングプロトコルであり，OSPF を使用することによってルーティング制御にかかわるトラフィックを軽減し，障害等によるトポロジ変化をネットワーク全体が認識するまでの時間を短縮することができる。

また，IPX ルーティング機能では SAP (Service Advertising Protocol) フィルタリングを行うことにより，不要なトラフィックを軽減するよう配慮している。OSI ルーティング

表 1. システム仕様

項 目	仕 様
ルータ対応プロトコル	<ul style="list-style-type: none"> • IP (TCP/IP) • IPX (NetWare) • CLNP (OSI)
ルーティングプロトコル	<ul style="list-style-type: none"> • RIP (TCP/IP) • OSPF (TCP/IP) • ES-IS (OSI)
ブリッジ機能	<ul style="list-style-type: none"> • トランスペアレントブリッジ • トランスレーションブリッジ • ソースルーティングブリッジ • スパニングツリー (IEEE802.1d) • アドレス学習機能
LAN インタフェース	<ul style="list-style-type: none"> • CSMA/CD (10BASE5, 10BASE-T, 10BASE-T ハブ (最大36ポート)) • トークンリング • FDDI (DAS/SAS) (SAC 機能あり)
広域網インタフェース	<ul style="list-style-type: none"> • 専用線 • 高速デジタル回線 • DDX パケット交換 • INS ネット 64 (回線交換，パケット交換) • INS ネット 1500 (回線交換)
リモート接続プロトコル	<ul style="list-style-type: none"> • PPP • X.25
セキュリティ	<ul style="list-style-type: none"> • 各種条件設定によるフィルタリング • 閉域接続
ネットワーク管理	<ul style="list-style-type: none"> • SNMP (MIB-I, MIB-II, 拡張 MIB) • TELNET • ローカル管理ポート (RS-232C)
その他	<ul style="list-style-type: none"> • 負荷分散 • 遠隔診断 • ソフトウェアダウンラインロード

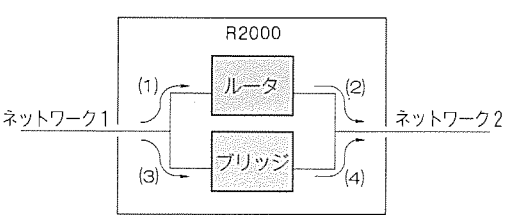
機能では、ES (End System) -IS (Intermediate System) のスタティックルーティングを採用しており、今後 IS-IS ダイナミックルーティングプロトコルも実装する計画である。

(2) ブリッジ機能

ブリッジングの機能については、IEEE 802.1d/i に準拠した学習機能及びスパンニングツリーを採用したトランスペアレントブリッジ、トークンリング系で使用するソースルーティングブリッジを採用している。また、異なるメディア間 (FDDI, CSMA/CD, トークンリング) をブリッジ接続するためのトランスレーション機能を実現した。トランスペアレントブリッジとソースルーティングブリッジの共存を可能としているため、両者が混在しているシステムでも、それぞれの端末が支障なく通信することを可能としている。

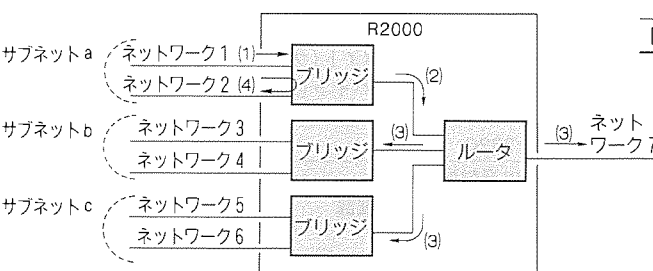
(3) ブリッジ／ルータの複合機能

この装置は直列、並列ブリッジ／ルータと称する機能を提供している。並列ブリッジ／ルータとは、ルーティング可能なプロトコルに対してはルータとして動作するが、それ以外のプロトコルに対してはブリッジとして動作する一般的な機能を称する。一方、直列ブリッジ／ルータとは、あるプロトコルに対して、複数の LAN をまとめて一つのサブネットワークを形成し、同一サブネットワーク内ではフレームをブリッジ中継させ、サブネットワーク間ではルータ接続させる機能を称する。直列ブリッジ／ルータの機能をサポートすることにより、LAN を収容しているポートの設定を自在に行う



- (1) ルーティング対象パケット(例: IP パケット)
- (2) ルーティングされたパケット
- (3) その他フレーム(例: IP パケット以外)
- (4) ブリッジを通過したフレーム

(a) 並列ブリッジ／ルータ



- (1) 受信フレーム(例: IP パケット)
- (2) ブリッジを通過したルータあてパケット
- (3) ルーティングされたパケット
- (4) ブリッジを経由したフレーム

(b) 直列ブリッジ／ルータ

図 2. 直・並列ブリッジ／ルータ

ことができ、不必要なサブネットワークの削減、ネットワークアドレス管理の容易さを実現している。図 2 に直列・並列ブリッジ／ルータの概念を示す。図(a)の並列ブリッジ／ルータは、例えば IP に対してはルータとして働き、その他のプロトコルに対してはブリッジとして働いている。一方、図(b)の直列のブリッジ／ルータでは、IP に対して複数の LAN を一つのサブネットワークとして動作させ、その上位で IP のサブネット間のルーティング機能を提供している。これにより、従来はルータ装置と別にブリッジ装置が必要であった(b)のシステムもこの装置 1 台で構成することができる。この装置は更にこれら直列、並列ブリッジ／ルータを組み合わせた直並列ブリッジ／ルータも構成することができる。

(4) トラフィック監視／制御機能

トラフィック監視／制御機能は、利用者がアクセス制御、セキュリティ、負荷分散などの目的のために、様々な条件で特定のフレームを検出し、中継／廃棄などの選択や統計情報の収集を行う手段を提供している。設定できる条件には、ポート番号、MAC アドレス、プロトコル種別、ネットワークアドレス、上位プロトコル、ユーザーグループなどがあり、条件が一致したときの処理として該当フレームの中継／廃棄、カウンタの加算などが可能である。この機能が提供されることにより、不当アクセスの検出／遮断、閉域接続、特権接続などの充実したセキュリティ機能を可能とした。

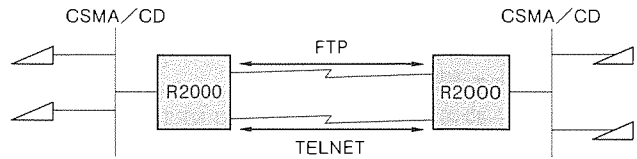


図 3. 負荷分散機能の例

表 2. 管理機能と使用プロトコル

管理機能	ネットワーク管理装置	リモート一般端末	ローカル一般端末
監視	SNMP	TELNET	TERM(無手順)
制御	SNMP	TELNET	TERM
システム更新	TFTP	TFTP	XMODEM
障害時の対応	SNMP	TELNET	TERM

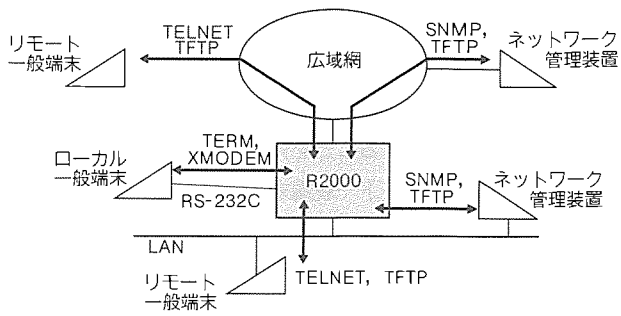


図 4. 管理装置(端末)の接続

(5) 負荷分散機能

広域網接続では、並列に設置された回線の間でそれぞれの回線で中継するフレームを指定することができ、これによって負荷分散を可能としている。中継フレームの指定はトラフィック監視／制御の「条件」を用いて設定することができる。図3に回線の負荷分散機能の実現形態を示す。この例では、一方の回線にFTP (File Transfer Protocol)、もう一方の回線にTELNET を指定して回線を使い分けることにより、TELNET の利用者がFTP 伝送 (大量伝送) の影響によるレスポンスの遅延が生じないような負荷分散機能を提供している。

3.4 管理機能

R2000 は、大規模システムには高性能なネットワーク管理装置による高度な管理機能を提供し、また中小規模のシステムには標準のワークステーションやパソコンによる管理も可能として、システム規模に合わせた経済的な管理機能が提供されるよう工夫がなされている。表2に管理機能と使用プロトコルを、図4に管理装置 (端末) とこの装置の関係を示し、以下にその概要を説明する。

(1) ネットワーク管理装置による管理

この装置及びネットワーク管理装置は、管理プロトコルとして広く用いられている SNMP をサポートしており、この機能によって監視・制御を行うことができる。管理オブジェクトとしては、RFC 準拠の MIB- I、MIB- II に加え当社独自の拡張 MIB を定義し、管理機能の強化を行っている。ネットワーク管理装置の画面を図5に示す。

(2) リモート一般端末による管理

リモート一般端末とは、ここでは TELNET、TFTP (Trivial File Transfer Protocol) がサポートされているワークステーションを指すものとする。

リモート一般端末からは、TELNET でこの装置にリモートログインし、各種操作を実行することができる。操作者には、この装置がもつマンマシンインタフェース機能により、コマンド入力又はメニュー形式入力による簡便な操作性が提供されている。また、TFTP によってプログラムファイル、パラメータファイルなどをダウンロードしシステムを立ち上げる、又は更新することを可能としている。リモート一般端末からは、前述の各種の管理オブジェクトに対するアクセスが可能であり、ネットワーク管理装置と同様の監視制御機能を提供している。

ログインユーザー名の登録、パスワードの設定、スーパーユーザーのみに与えられるアクセス権などにより、セキュリティ機能の向上を図っている。

(3) ローカル一般端末による管理

ローカル一般端末とは、この装置の RS-232C ポートに接続される RS-232C 端末、パソコンを指しており、ローカルコンソールの機能が提供される。ローカル一般端末では、ハードウェアの初期診断結果の表示、ハードウェア／ソフト

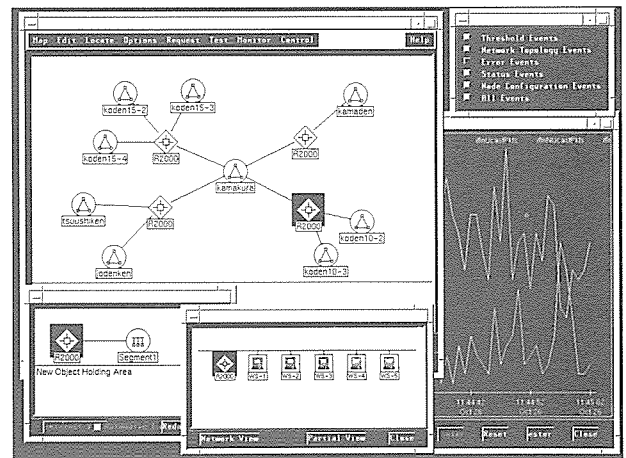


図5. ネットワーク管理装置の画面

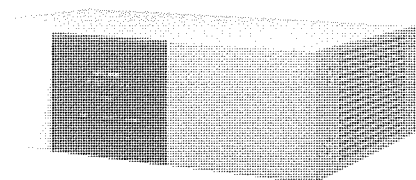


図6. “MELNET R2000”の外観

表3. 装置構成

項目	仕様
筐体スロット	4 スロット うち 1 スロットには基本処理部を実装
基本処理部構成	<ul style="list-style-type: none">• プロセッサ• メモリ• LAN インタフェース• ローカル管理インタフェース
インタフェースボード (右側の数字は実装ポート数を示す。)	<ul style="list-style-type: none">• FDDI通信処理部 1• CSMA/CD 通信処理部 2• CSMA/CD ハブ 12• トークンリング通信処理部 1• 汎用シリアル通信処理部 (X.21, V.24/V.28) 2• 低速 I 通信処理部 2• (高速デジタル回線, ISDN 基本インタフェース)• 高速 I 通信処理部 1• (高速デジタル回線, ISDN 一次群インタフェース)
その他	FDDI 用光スイッチユニット (外置き)
外形寸法	(W) 380 × (D) 308 × (H) 110 (mm)

ウェアのコンフィギュレーション状態の表示が行われるほか、リモート一般端末と同等の機能が提供され、またパソコンにXMODEMの機能を実装することにより、各種ファイルのローディングを行うことができる。

4. 装置構成

この装置の外観を図6に、構成を表3に示す。きょう(筐)体は4スロットからなり、そのうちの一つにはルータ機能/ブリッジ機能における中継処理や、装置全体の管理を行う基本処理部を実装する。

基本処理部には高い中継性能と高度な管理機能を実現するために、MIPS R3000系のRISCプロセッサを用いた。また、他のインタフェースボードにおいても基本的に同じプロセッサを用い、装置全体として最大四つのRISCプロセッサによる高速処理を行っている。

他の3スロットには表2に示した任意のLAN、広域網の各種インタフェースボードを実装して用いることができる。

3スロットすべてにCSMA/CD通信処理部を実装した場

合には、基本処理部の2ポートを合わせて8ポートのCSMA/CDルータを構成することができる。また、CSMA/CDハブ通信処理部を実装することにより、ハブ付きルータを構成することができる。この場合、基本処理部又は他のCSMA/CD通信処理部上のCSMA/CDポートを一つ専有する。このようなハブ付きルータをこの装置1台のうちに最大2組構成することができる。

ISDN一次群インタフェース用の高速I通信処理部は、一つのH1チャンネル又は四つのH0チャンネルとして使用できる一次群インタフェースを一つと、一次群インタフェースの呼制御を行う基本インタフェースを備えている。これにより、中高速の大規模ネットワークが容易に、かつ経済的に構成することができる。

5. 適用システム例

ここでは、比較よく使用されるシステムでR2000の特長を生かした利用形態例について述べる。

5.1 FDDIをバックボーンとしたネットワーク

事務オフィスA棟と開発オフィスB棟から成るオフィスのFDDIバックボーンネットワークを図7に示す。A棟はホストオンライン系のトークンリングとクライアントサーバ系のCSMA/CDをFDDIバックボーンでルータ/ブリッジ接続した構成である。B棟はホスト系・クライアントサーバ系CSMA/CDをFDDIバックボーンでルータ接続した構成である。業務形態の異なるA棟とB棟のネットワークはFDDI間ルータ接続により、両棟間のトラフィック分離、セキュリティの確保を行い、かつリソースの共有を図っている。

A棟ではトークンリング上のパソコン(PC)からもCSMA/CD(10BASE5, 10BASE-T)上のサーバへアクセスできる。また、CSMA/CD系端末の少ないフロア(6階)ではR2000に10BASE-T HUBボードを挿入し、直接端末を接続している。B棟では開発用のFDDI端末をR2000に接続している。

5.2 広域ネットワーク

本社・支社・営業所のLAN間を高速デジタル回線、ISDN(INSネット64/1500)で接続した広域ネットワークを図8に示す。トラフィック量の多い本社、支社、営業所a間は高速デジタル回線を常用とし、ISDNをバックアップ用としている。トラフィック量の少ない支社Bと営業所b間はISDN接続としている。R2000による負荷分散、セキュリティ機能によって効率の良い安全なシステムを実現している。

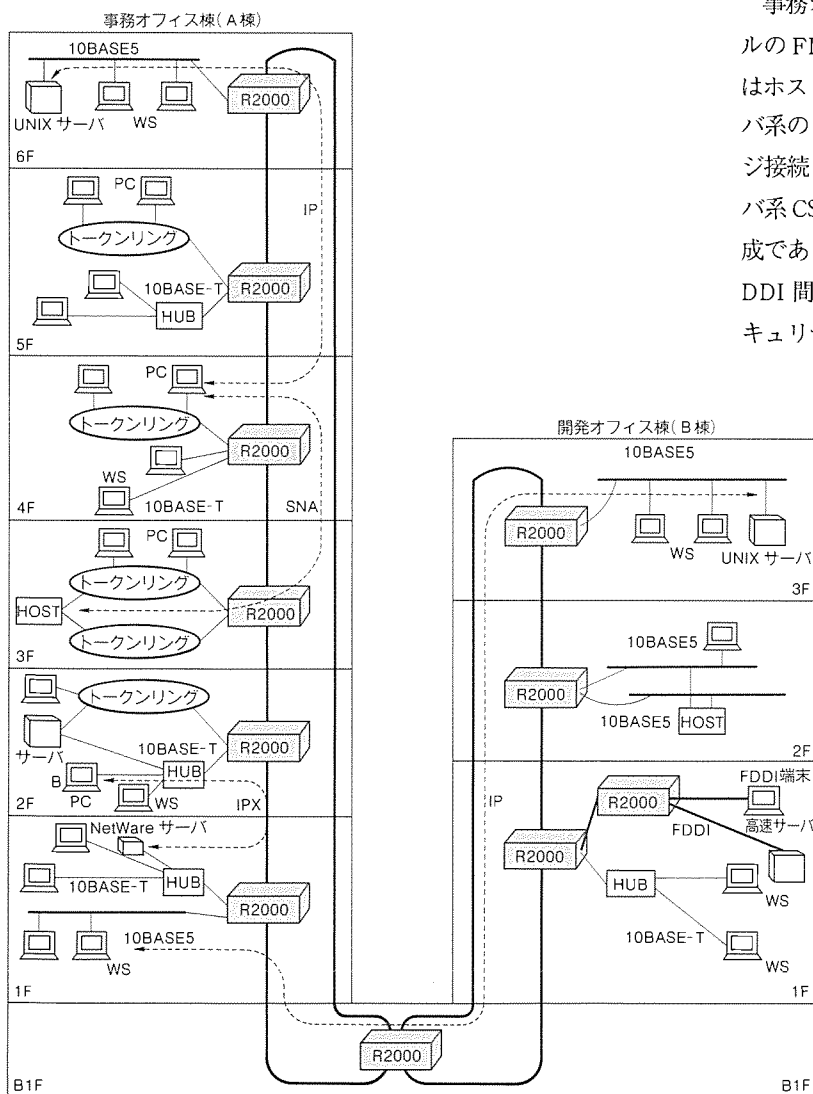


図7. FDDIをバックボーンとしたネットワーク

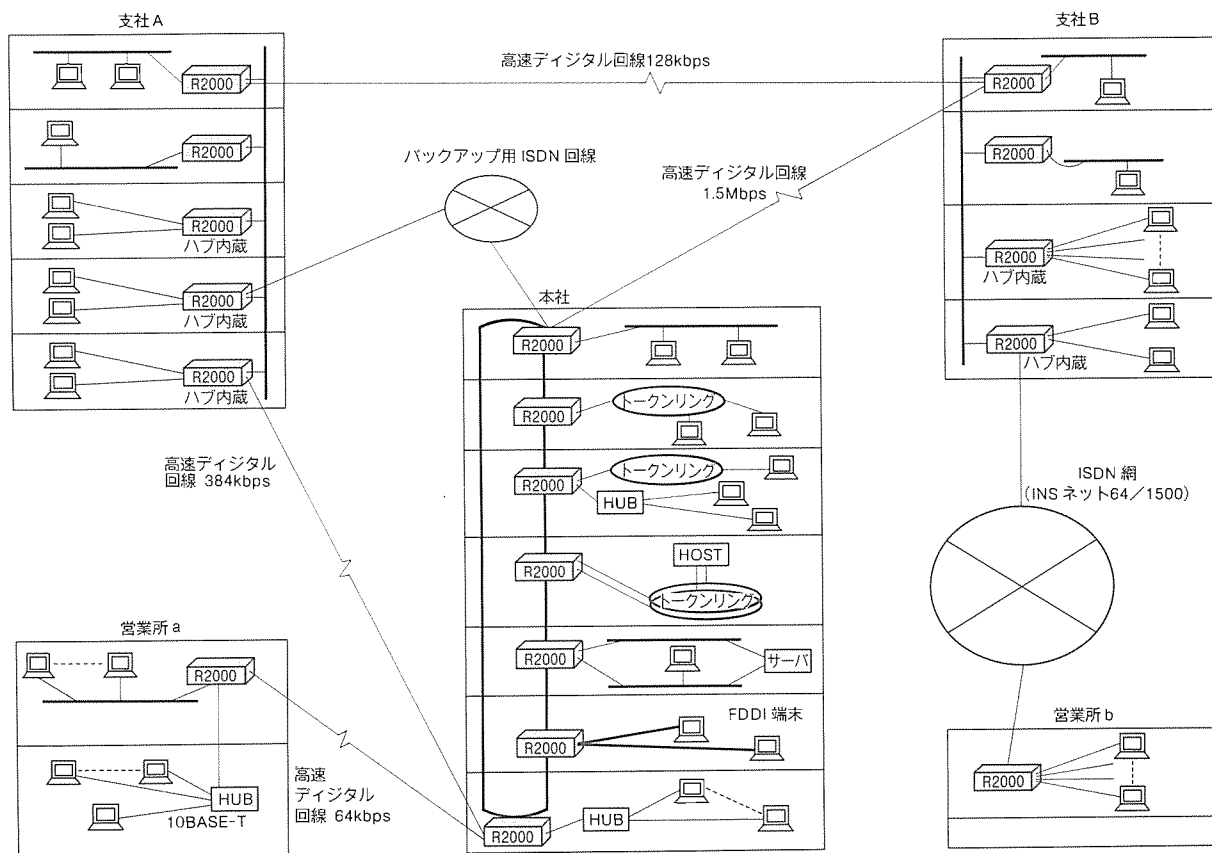


図 8 . 広域複合ネットワーク

6. む す び

複数の LAN をトランスペアレントに中継するマルチプロトコルルータ R2000 の概要を紹介した。

R2000 は西暦 2000 年時代に向けてのマルチプロトコルルータからネーミングしており、トップクラスの性能とルーティング、ネットワークセキュリティ、運用管理などに多くの特徴を備えている。LAN は今後も早いスピードで進展が予想される。当社はフレームリレー機能のサポートなど R2000 の更なる強化拡充に、努力を続けていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 山内才胤, 厚井裕司, 井出口哲夫, 松本正弘, 白井良武
：バックボーン LAN とその応用, 三菱電機技報, 64, No. 2, 150~154 (1990)
- (2) 多々良浩司, 佐藤浩之, 馬場義昌, 森木嘉宏, 板垣寛二
：三菱高速光 LAN “MELNET R100” システム技術, 三菱電機技報, 66, No. 8, 834~839 (1992)

自由電子レーザ発生用線形電子加速器

西原 進* 鈴木敏允** 八十島義行*** 佐藤信二+ 今崎一夫**

1. ま え が き

自由電子レーザ (Free Electron Laser : FEL) は、原理的に波長が連続可変で大出力・高効率発振が可能であることから、ウラン濃縮、放射性廃棄物群分離、医療などへの広範な応用が期待されている。

FEL の構成要素は、図 1 に示すように電子加速器、ウィグラー磁石、2 枚の反射鏡からなる共振器である。FEL の詳細な説明は Brau⁽¹⁾ の文献に譲って、ここでは簡単に述べる。光速に近い電子ビームがウィグラー磁場 (交互に向きが変わる磁場) の中を蛇行すると、シンクロトロン放射光を前方に放出しながら進む。周期磁場の各周期で発生する放射光は軸方向で位相が一致し、強い光 (アンジュレータ光) となるが、この光と進行する電子が相互作用することにより、電子は誘導放射を起こし、放射光が増幅される。ウィグラー磁石の前後に反射鏡を置いて、この放射光を閉じ込めて共振器内で繰り返すことにより、共振器内での損失に打ち勝ってレーザ発振を起こす。レーザ光の波長は、ウィグラーを通過する電子のエネルギーの 2 乗に反比例して短くなり、レーザ光の強度は電子ビームの電流値に比例して増加する。

しかし、レーザ発振のためには極めて質の良い電子ビームを用いなければならない。すなわち、電子ビームのエネルギー精度・ビーム平行度・電流密度のいずれについても通常加速器で得られる値の 10~100 倍の値が必要である。

当社は、自由電子レーザ発生装置の要素開発のため、(財)レーザ技術総合研究所と共同で RF 電子銃とアルファ電磁石を用いた高電流・低エミッタンス電子ビーム加速器を設計・製作した。RF 電子銃は、カソードで発生させた電子を空洞に入力したマイクロ波で加速する新型の電子銃である。この

空洞は、アルファ電磁石で電子ビームのパルス圧縮を行うためにリエントラント型の単空洞とし、マイクロ波の周波数は 2,856 MHz とし、マイクロ波電力 2 MW で最大加速エネルギー 1 MeV が得られるように設定した。アルファ電磁石はビームの中心エネルギー 0.89 MeV を 278.58° 偏向できるような二極電磁石とし、RF 電子銃から出た位相幅 40° の範囲を 3 ps に圧縮するような配置と磁場こう (勾) 配をもたせることにした。アルファ電磁石の後には定在波型加速管を配し、アルファ電磁石で圧縮された電子ビームを更に加速し、最終的に約 3 ps に圧縮されたエネルギー 6 MeV の電子ビームが得られるようにした。現在この加速器は、(財)レーザ技術総合研究所に設置されて総合試験を行っている。

2. 線形電子加速器に要求される性能

FEL の特性を決める主要なパラメータは、発振波長 λ と利得 G である。これらのパラメータは、線形電子加速器 (以下“ライナック”という。) の性能に大きく依存している。

発振波長 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + K^2/2) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 λ_w : ウィグラーの磁場周期長

$$K : \text{偏向パラメータ } (K = eB_w \lambda_w / (2\pi mc^2) = 93.4 B_w \lambda_w)$$

B_w : ウィグラーのピーク磁場

γ : 電子の静止エネルギー (mc^2) 単位で表した電子の全エネルギー

e : 単位電荷

c : 真空中での光速

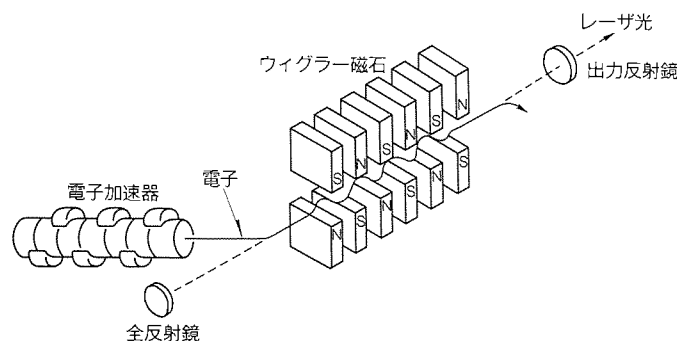


図 1. 自由電子レーザ発生装置の構成

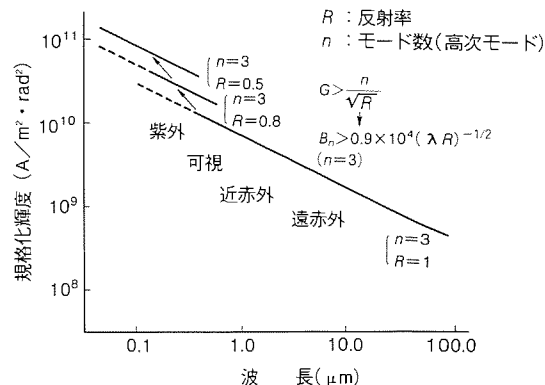
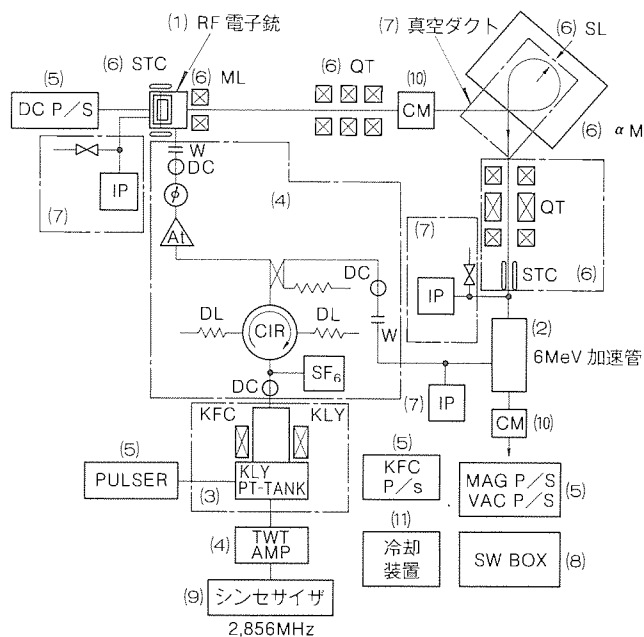


図 2. FEL 発振条件における波長とビーム規格化輝度の関係



- | | | |
|---------------------|-----------------|------------------|
| (1) RF 電子銃 | KLY | : クライストロン |
| (2) 6MeV 加速管 | KFC | : クライストロン集束コイル |
| (3) クライストロン装置 | KLY | : クライストロンタンク |
| | TWT AMP | : TWT 増幅器 |
| | CIR | : サークュレータ |
| (4) 立体回路系 | DC | : 方向性結合器 |
| | DL | : ダミーロード |
| | AI | : 減衰器 |
| | φ | : 移相器 |
| | W | : セラミック窓 |
| | SF ₆ | : ガス加圧系 |
| (5) 電源類 | DC P/S | : 直流電源 |
| | KFC P/S | : クライストロン集束コイル電源 |
| | MAG P/S | : 電磁石電源 |
| | VAC P/S | : ボンプ電源 |
| | PULSER | : パルス変調器 |
| | STC | : ステアリングコイル |
| | ML | : 集束レンズ |
| | OD | : 2 連 O 磁石 |
| | QT | : 3 連 O 磁石 |
| | SL | : スリット |
| | α M | : アルファ電磁石 |
| (7) 真空部品 | IP | : イオンポンプ |
| | 真空ダクト | |
| (8) スイッチボックス・SW BOX | | |
| (9) シンセサイザ | | |
| (10) コアモニタ | CM | : コアモニタ |
| (11) 冷却装置 | | |

図 3. システムのブロックダイアグラム

で表せる。これからウィグラーの構造と電子のエネルギーが大体決まる。上式に示したように発振波長はドップラー効果のため λ_w より著しく小さくなり、 $1/\gamma^2$ すなわち $1/E^2$ に比例して小さくなる。また、 λ_w に比例して小さくなる。例を挙げると、 $\lambda_w = 3.2 \text{ cm}$, $B_w = 0.24 \text{ T}$ $|2.4 \text{ kG}|$, $E = 24 \text{ MeV}$ で発振波長は $10.6 \mu\text{m}$ となる。

一方、利得 G は

$$G = 1.69 \times 10^{-3} N^3 \frac{K^2}{(1+K^2)^{3/2}} \cdot I \cdot \frac{\lambda_w^{1/2} \lambda^{3/2}}{\pi b^2} \\ = 5.98 \times 10^{-4} N^3 \cdot K^2 \cdot \lambda_w^2 \frac{I}{\pi b^2} \cdot \frac{1}{E^3} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 N : ウィグラー周期数

I : ビーム電流

πb^2 : 光束の断面積

で表せる。利得 G は発振波長 λ の $3/2$ 乗に比例するので短波長になるほど G は小さくなり、発振が困難になる。言い換えると短波長を得るためには E を大きくすることが効果的であるが、 E を大きくすると $1/E^3$ で G が低下し、発振が困難になる。

また、利得 G はビーム電流 I に比例し、光束の断面積に反比例するので、ライナックから得られる電子ビームは大電流、低エミッタンスであることが望ましい。これらのビーム特性を最良にするには、加速部の性能にも依存するが、最初に電子ビームを発生する入射系の性能に大きく依存する。

一般に、この入射系のビームの性能は規格化輝度と呼び

$$B_n = \frac{I}{\epsilon^2} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\epsilon = \beta \gamma \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}$

ϵ_x , ϵ_y はそれぞれ、 x , y 方向のエミッタンスで表せる。この値が大きいほどビーム性能は良いことになる。図 2 は FEL の発振条件における波長とビーム規格化輝度の関係を表す。図中、実線より上の規格化輝度が得られれば、FEL の発振が可能になると言われている⁽²⁾。

3. システムの構成

このライナックシステムの主要構成は、RF 電子銃、アルファ電磁石、主加速管、立体回路、クライストロンマウント、パルス変調器、冷却装置及び制御装置である。これらの機器のブロックダイアグラムを図 3 に示す。図 4 は現地に設置されたライナックの機器配置であり、ビームライン、立体回路は地下 1 階に設置され、残りの機器は一階に設置された。図 5 はライナック本体部を示す。

ビームライン機器配置を図 6 に示した。ビームラインの全体の長さは 2.7 m、幅は 1.5 m でビームラインの高さは 1.0 m である。加速管の後にはテストコンポーネントが取り付けられるようにゲートバルブを入れた。ビームモニタはコア型の電流モニタ、スクリーンモニタ、ワイヤ型の位置モニタが用意され、ビームの計測を行うことができる。特にアルファ電磁石の出入口及び中心部は概略のビーム位置が常時モニタできるように格子型のワイヤモニタを設けた。これらのビームモニタはピコ秒ビームの計測には適さないので別にファラデーカップと光計測によるピコ秒パルスビーム計測装置(ストリークカメラ)などを設ける。

4. システムの仕様及び性能

このライナックは、マイクロビーム電流値をパルス圧縮によ

って高めかつ低エミッタンスを実現するため、電子銃から取り出される電子ビームのエネルギーを高くすることがねらいであり、電子銃に高電界が得られるRF電子銃を採用し、パルス圧縮をアルファ電磁石で行った。システムの仕様を表1に示した。

以下にシステムの主要機器について説明する。

4.1 RF 電子銃

高品質の電子ビームを得るためには、低エネルギー領域で

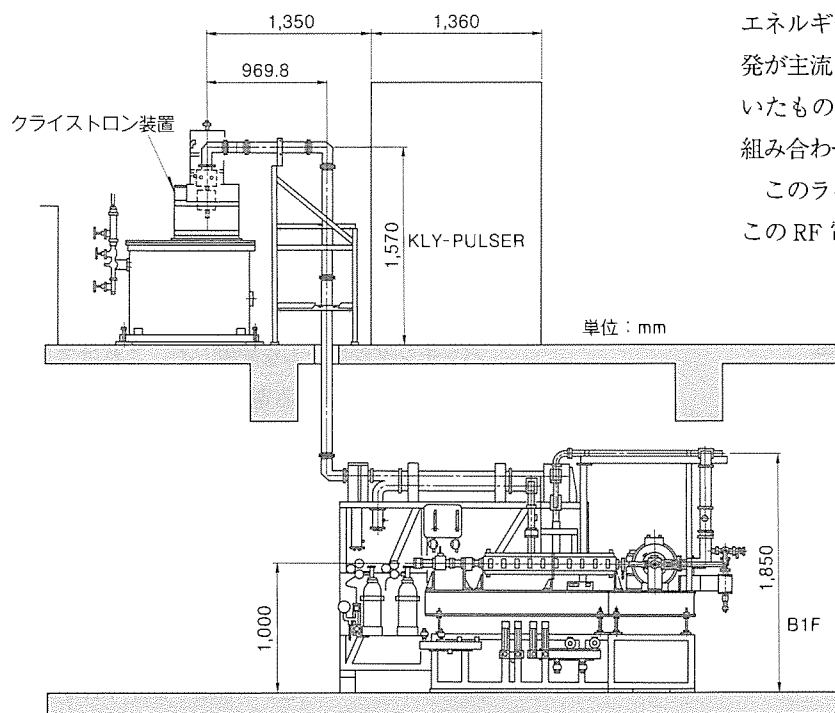


図4．現地機器配置

空間電荷効果により、ビーム性能(特にエミッタンス)が悪化する前に光速に近い速度まで電子を加速することが望ましい。しかし、アノードとカソード間に高電圧(数十～数百kV)の直流又はパルス電圧を印加して、電子を引き出す従来の電子銃では、まだ電子の速さは光速に比べて遅く、後段に配置して光速まで加速する加速管まで輸送する間に空間電荷効果によってビーム性能が悪化していた。これを除くため、最近では、より高い電界強度の得られるマイクロ波を利用して、空洞中に設置したカソードからの自由電子を光速に近いエネルギーまで、すぐ加速することのできるRF電子銃の開発が主流となっている。RF電子銃は当社が最初に提案していたものである⁽³⁾が、フォトカソードと短パルスレーザを組み合わせたシステムなど最近の進歩には著しいものがある。

このライナックでは、低エミッタンスビームを得るためにこのRF電子銃を採用した。RF電子銃の技術は当社におい

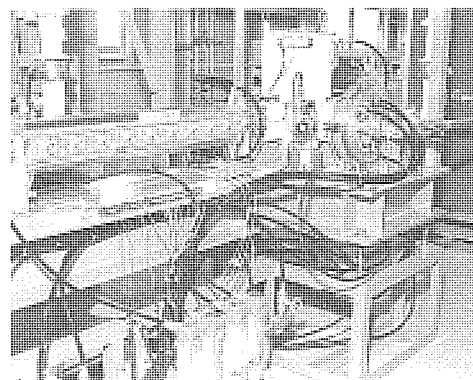


図5．ライナック本体部

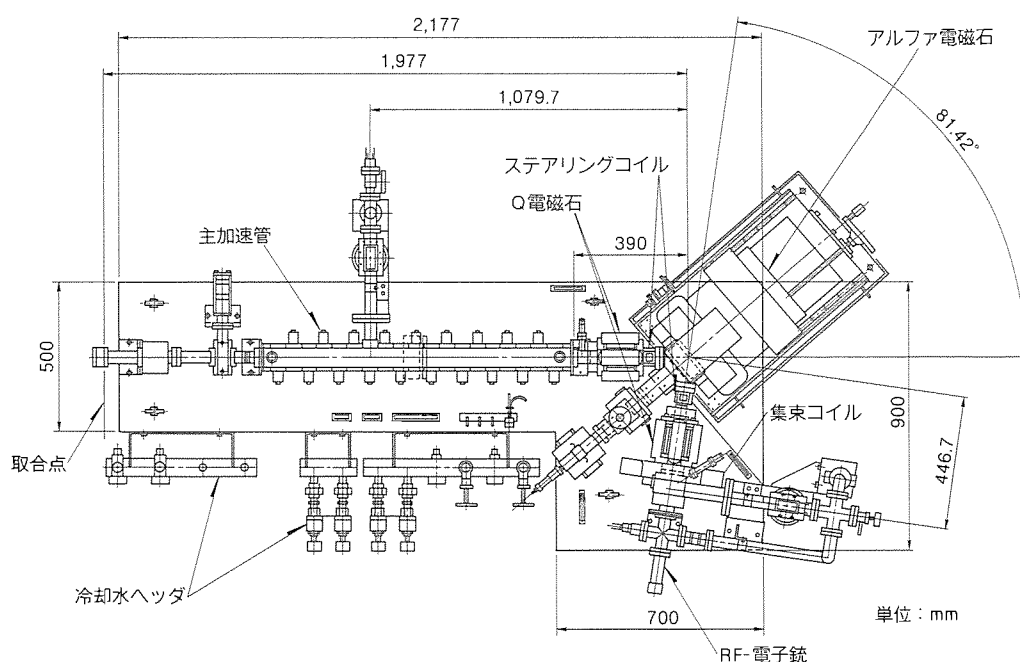


図6．ビームライン機器配置

表 1. システムの仕様

項 目	性 能
ビームエネルギー (100mA)	6 MeV
(0 mA)	10 MeV
ビーム電流(マクロパルス)	200 mA
(ミクロパルス)	24 A
エミッタンス	1π mm mrad
パルス幅(マクロパルス)	3 μ s
(ミクロパルス)	3 ps
パルス繰り返し(マクロパルス)	10 ps
(ミクロパルス)	2,856 MHz

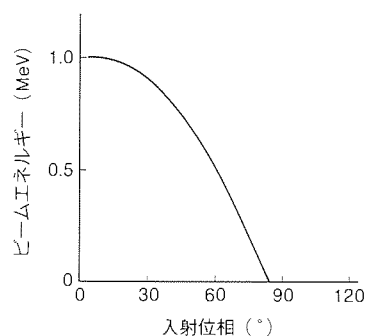
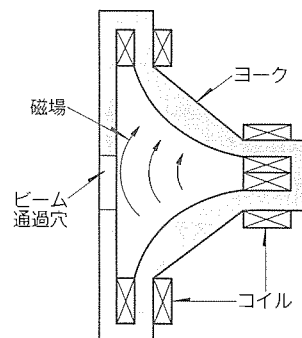
図 7. RF 電子銃からの
ビームエネルギーと入射位相

図 9. アルファ電磁石の断面

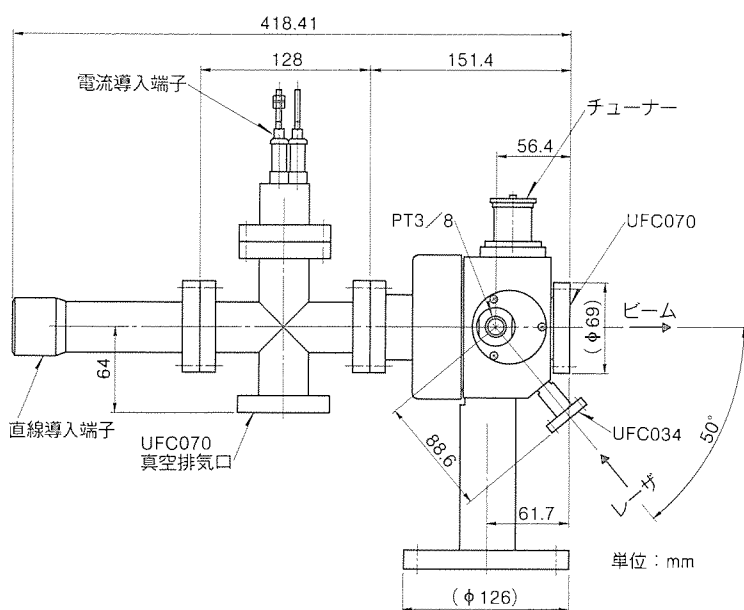


図 8. RF 電子銃の外形

で既に開発されており、この技術を今回の設計に反映させた(4)～(7)。

RF 電子銃で得られる電子線のエネルギースペクトルをシミュレーションした結果を図 7 に示した。RF 電子銃に投入されるパワーを 1 MW としたときは、引き出される電子線の位相は 0～85° までであるが、加速管に導かれるものは 0～40°、エネルギーにして 0.8～1.0 MeV の範囲に限定するようにした。

図 8 は RF 電子銃の外形である。直線導入端子により、空洞中のカソードの位置調整ができるようになっている。カソードは LaB₆ が用いられ、両端をカーボンのヒータ板で挟み、電流を流してカソードを熱している。

4.2 マグネチックバンチングシステム

RF 電子銃から引き出された電子ビームは、マイクロ波の加速位相のみによって加速されるので、それ自体バンチングされているが、このパルス幅は図 7 に示すように約 80 ps (約 80° 相当) であり、エネルギーは 0～最大エネルギーまで分布している。このため、この電子ビームはそのまま後段の

加速管に入射させて高エネルギーまで加速させても、得られる電子ビームの性能は良くならない。良い性能の電子ビームを得るために、RF 電子銃と加速管の間にエネルギー分析用のスリットとパルス幅を圧縮するためのマグネチックバンチングシステムを配置した。これはアルファ電磁石と呼ばれる電子ビームを約 280° 偏向させる磁石とスリットから構成されている。図 9 はアルファ電磁石の断面を示す。この磁石は四極電磁石を半分にした形状をしており、ビームの出入口部が同じであり、入射角を 40.71° にとると、アクロマチックなビームが得られる。磁石中では、電子ビームは図 10 に示すように高いエネルギーの電子は軌道の曲率半径が大きくなり、低いエネルギーの電子は小さくなる。このため、高エネルギーの電子は低エネルギーの電子に比べて軌道長が長くなり、磁石中の走行時間が長くなる。これにより、様々なエネルギーの電子を含むビームのパルス幅は圧縮される(バンチング作用)。

一方、自由空間中ではエネルギーの異なった電子を含むビームは、高いエネルギーの電子は早く進み、低いエネルギーの電子は遅く進み、全体的にパルス幅は長くなってしまふ(デバンチング作用)。

これらの性質を利用して、アルファ電磁石中の電子の軌道長と自由空間中の電子の軌道長を適当にとると電子ビームのパルス幅を短くすることができる。

以上に示したとおり、RF 電子銃から出た電子ビームはドリフトスペース・アルファ電磁石・ドリフトスペースの組合せで加速管まで輸送される。このビーム輸送系は、アルファ電磁石の磁場勾配及びビームスリットの位置を変えることにより、アルファ電磁石中の軌道を約 8.6 cm 変えることができ、加速管での位相圧縮率を調整することができる。

4.3 マイクロ波源

FEL の利得は、式(2)に示したように N^3 に比例するので、ウィグラー周期数が多いことが発振させるために有効である。

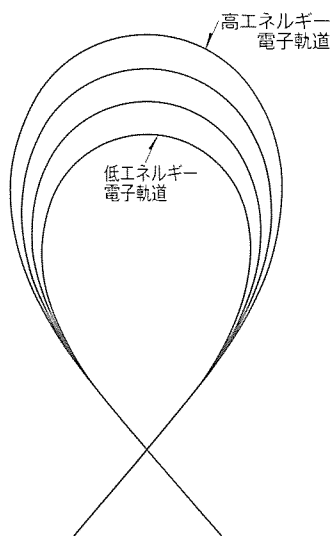


図10. アルファ電磁石中での電子の軌道

表 2. クライストロン PV-2016の性能

項 目	定 格
せん頭電力	5 MW
パルス幅	10 μ s
デューティファクタ	5×10^{-3}
平均出力	25 kW
動作電圧	120 kV
電流	96.7 A
ゲイン	50 dB

一方、ライナックではマクロパルス幅がこのパラメータに相当する。このため、マイクロ波源のパルス幅は従来の値より長くとることが発振のために有効である。このライナックシステムでは、パルス幅が10 μ sであるクライストロン PV-2016 (三菱電機製) を採用した。

このクライストロンは、従来用いられていたPV-2012 W (ピークパワー5 MW, 平均パワー10 kW) の電子銃を強力にしてパワーアップしたものである。このクライストロンの特性を表2に示す。

シンセサイザ HP 8665 Aで発生させた2,856 MHzのマイクロ波をTWTアンプで50 Wまで増幅して、クライストロン PV-2016に入力した。クライストロンで得られた5 MWのマイクロ波は、電力分配器でRF電子銃と加速管にそれぞれ3 MW, 2 MWを供給した。また、RF電子銃へ入力するマイクロ波は移相・減衰器によって位相とパワーが調整され、約2 MWのパワーがRF電子銃に入力されるようにした。

5. 結 果

図11はRF電子銃から取り出された電子ビームをコア型

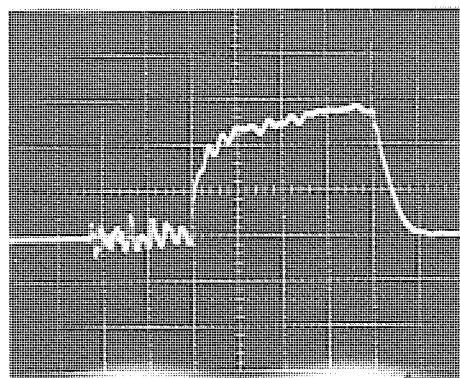


図11. RF電子銃からのビーム波形

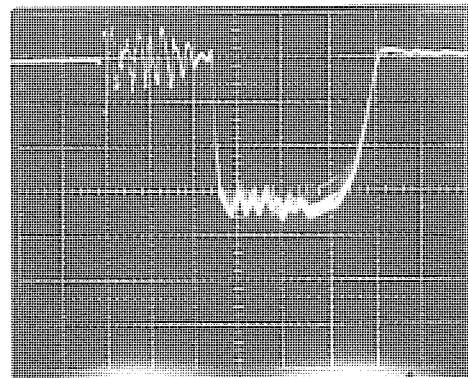


図12. 加速管通過後のビーム波形

の電流モニタで観測した写真である。マイクロ波の加速位相で引き出された電子は空洞中で減速位相に入ると減速され、逆にカソード方向に加速され、カソードへのバックボンバードを起こす。これにより、カソードの温度が上昇して時間が経過するとともに電流値が増加する。図12は加速管を通過した後でのビームの写真である。パルスの後ろ側はバックボンバードによる電流値の増加でビームエネルギーが低くなり (ビームローディング), アルファ電磁石中のスリットによってビームがカットされてパルス幅が低くなっている。

6. む す び

自由電子レーザを発振させるためのライナックを開発した。この開発により、RF電子銃、マグネチックバンチングシステム、RF源等の要素技術が確立された。また、このシステムは将来的に短パルスレーザと組み合わせて、レーザでフォトカソードを照射して、極短パルス電子を放出し、直ちに高周波空洞で加速する高輝度電子ビーム発生システムの開発に用いられる予定である。

最後に、クライストロンの開発に御協力をいただいた関係各位に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) Brau, C. A. : Free Electron Lasers, Academic Press, Inc. (1989)
- (2) 今崎一夫 : RFライナックによる短波長自由電子レーザの開発, 電気学会 OQD-91-15, 55 (1991)
- (3) 美濃和, 沢田 : 特許公報 昭58-20120 (1983)
- (4) Nishihara, S. : U. S. Patent 5,029,259 (1991)
- (5) Nishihara, S. : U. S. Patent 5,097,178 (1992)
- (6) Nishihara, S. : U. S. Patent 5,121,031 (1992)
- (7) Nishihara, S. : U. S. Patent 5,132,593 (1992)

線形電子加速器を用いた医療用断層像撮影装置

炭谷博昭* 幸丸正樹* 花川和之** 川上秀之** 田中常稔** 菊地 宏***

1. ま え が き

近年、放射線治療用線形電子加速器 (Linear Accelerator : 以下“ライナック”という。) を用いた放射線治療が盛んに行われている。従来、診断用機器と治療用機器は分けられていて、そのために診断用ベッドと治療用ベッドもそれぞれ別々になっていた。このため、診断を行って患部の位置決めをしても治療時には患者が別のベッドに移動するため、患者の身体に治療部位の位置決め用のマーキングを施しておく必要があった。このライナックによって断層像撮影 (Computed Tomography : CT) が行えれば、このような問題から解放されると同時に、将来的には治療中の患部の吸収線量分布をモニタすることも期待できる。

治療用ライナックではエネルギーが4～10 MeV の電子を重金属ターゲットに衝突させたときに発生するX線ビームを利用している。このX線は従来のX線管を用いたCT装置のX線と比べると高エネルギーにまで広がったスペクトルになっている。代表的なライナック装置のX線エネルギースペクトルを計算した結果を図1に示す。このような特徴をもったX線ビームを発生するライナック装置にCT機能を付加するためには、このX線の特性や装置規模が大きくなることによって派生する様々な問題点が考えられる。

我々はこれらの問題点を考慮して画像再構成方式の検討や問題の解析を行っていき、実際に治療用ライナックに適用してライナックCT装置の開発を実施した。

2. 画像再構成方法

CT手法は物質の投影像データからその断層画像を得るもので、投影データから断面像を再構成するためのアルゴリズムは数多く発表されている。代表的な画像再構成アルゴリズムを大別すると表1に示すように反復方式と非反復方式となる。反復方式は繰り返し計算を実施していき、だんだんと画質を向上させていくものであり、非反復方式は1回の計算で画像再構成を行ってしまうものである。したがって、反復方式で画質を向上させるためには反復回数を多くする必要がある。また、画像の分解能を上げるために画素サイズを小さくすれば画素数が増加し、ますます画像再構成時間が長くなる。これに対して、非反復方式では画像再構成

時間は短い画質はその再構成方式で決まってしまう。その中でもフーリエ変換法などのように高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transformation : FFT) を使用する方式では投影データにノイズ等が含まれている場合に再構成画像の画質が大幅に劣化するという欠点をもっている。

これらの要因を考慮して、今回のライナックCT装置では画像再構成アルゴリズムとして画像再構成時間と再構成画像の画質とを両立させることを主眼におき、非反復方式中でのFiltered Back Projection法 (以下“FBP法”という。) を採用することにした。この方式は投影データとフィルター関数のコンボリューションをとった後、後方伝搬を実施するものである。計算時間を短くするためにはコンボリューションをFFTを用いて行えばよいが、ノイズ成分による画質の劣化を考慮してフーリエ変換を用いずにコンボリューションを実施する方式とした。

今回のライナックCT装置では図2に示したように、ファンビーム状に放射されたX線が対象物質を透過し、その透

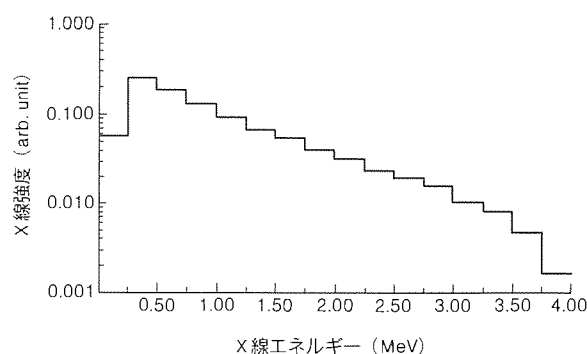


図1. 4MeVライナックの発生するX線のエネルギースペクトル

表1. CT法の様々な画像再構成アルゴリズム

反 復 法	直接マトリクス法	連立一次方程式法
	逐次近似法	代数的復元法 (ART) 同時逐次復元法 (SIRT) 最小二乗逐次近似法 (LSIT)
非反復法	フーリエ変換法	$T = F_2^{-1} \{ R F_2 (\text{Back Projection}) \}$ $T = F_2^{-1} \{ \text{Map } F_1 (\text{Projection}) \}$ $T = \text{Back Projection} \{ F_1^{-1} R F_1 (\text{Projection}) \}$
	Filtered Back Projection 法	$T = \text{Back Projection} (\text{Projection} * g(s))$
	Radon 積分法	$\rho(0) = \left[\frac{1}{2\pi} \right]^2 \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \frac{df_0(s)}{ds} ds d\theta$

表 2. フィルター関数

$ R $ の逆フーリエ変換	$g(s) = \int R \exp(2\pi jsR) dR$
Ramachandran & Lakshminarayanan の フィルター関数(RL 関数)	$g(n\tau) = \begin{cases} 1/4\tau^2 & n=0 \\ 0 & n=\text{even} \\ -1/n^2\pi^2\tau^2 & n=\text{odd} \end{cases}$
Shepp & Logan のフィルター関数 (SL 関数)	$g(n\tau) = 2/\pi^2\tau^2(1-4n^2)$
Chesler のフィルター関数	$g(s) = g_1(s) + [g_1(s-1/2W) + g_1(s+1/2W)]/2$ $g_1(s) = W\sin(Ws)/\pi s - [1 - \cos(2\pi Ws)]/2\pi^2s^2,$ $W = 1/2\tau$

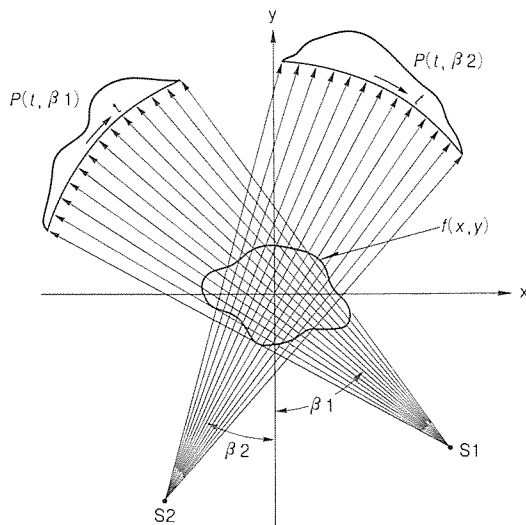


図 2. ファンビームによる投影データ収集方式

過X線をX線検出器アレーで検出するようになった、いわゆる第三世代方式^(注)を採用している。装置構成については次章で詳しく述べる。FBP法で画像再構成を行う場合、まずフィルター関数を選定しなければならない。このフィルター関数としては表2に示すようなものがあり、その選定は投影像からの画像再構成をファントムを用いてシミュレーション計算し、再構成画像の画質評価を行って決定した。画質評価は以下の三つの誤差評価関数を用いて行った。

$$E1 = \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (p_{ij} - r_{ij})^2 / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (p_{ij} - p_{ave})^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$p_{ave} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_{ij}$$

$$E2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |p_{ij} - r_{ij}| / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |p_{ij}|^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$E3 = \text{Max} |P_{ij} - R_{ij}| \dots\dots\dots (3)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4} \{ p_{2i, 2j} + p_{2i+1, 2j} + p_{2i, 2j+1} + p_{2i+1, 2j+1} \}$$

$$R_{ij} = \frac{1}{4} \{ r_{2i, 2j} + r_{2i+1, 2j} + r_{2i, 2j+1} + r_{2i+1, 2j+1} \}$$

評価関数E1, E2, E3はそれぞれ正規化誤差分散, 正規

表 3. 各フィルター関数使用時の画質評価結果

フィルター関数	E1	E2	E3
$ R $ の逆フーリエ変換	0.3759	0.3421	1.0239
RL 関数	0.2723	0.1866	0.9102
SL 関数	0.2827	0.1891	0.9922
Chesler のフィルター関数	0.2853	0.2008	0.8191

化絶対平均誤差, 隣合った4点の平均値絶対最大誤差である。また, p_{ij} はファントムの画素 (i, j) の値, r_{ij} は再構成画像の画素 (i, j) の値, M, N はそれぞれ i 方向, j 方向の画素数である。表3に各フィルター関数使用時の画質評価結果を示す。この結果から, FBP法を用いて画像再構成を行う際に使用するフィルター関数としてRL関数が最も画質が良く, 次いでSL関数が良いことが分かった。

これらの結果から, 今回のライナックCT装置では画像再構成法としてFBP法を, フィルター関数としてはRL関数を採用した。

3. ライナックCT特有の問題点とその対応策

1章でも述べたが, ライナック装置にCT機能を付加するためには, X線管をライナック装置に置き換えたことによって発生する以下のような問題点を解決していかなければならない。

- (1) 通常, ファンビームを用いて得た投影データから画像再構成を行うためには, 360° 回転分のデータが必要であるが, 装置が大きかりであるため, ライナックヘッド部分の回転速度が最大 1r/min となっている。そのために, ライナックヘッド部を 360° 回転させて投影データを取得するためには, 患者を1分間静止させておかねば画像が乱れることになる。
- (2) X線エネルギーが高いため人体に対する透過率が高く, わずかな密度差を識別することが困難である。
- (3) CT画像の画質を向上させるには, 人体構成物質中をX線が透過したときに, 構成物質の透過厚さとX線検出器の対数出力の関係が直線でなければならない。しかし, ライナック

(注) 第一世代CTは細いX線ビームとX線検出器を走査する平行ビーム方式, 第二世代CTはファンビームを用いて複数のX線検出器で受ける方式。第三世代CTは第二世代と同じで主に全身医療用である。

クからのX線は広がったエネルギースペクトルをもっており、それぞれのエネルギーのX線に対する人体構成物質の透過率が異なるため、人体構成物質の透過厚さとX線検出器の対数出力の直線性が悪くなり、画質が劣化する。

(4) X線のエネルギーが従来に比べて高いため、X線検出器に入射したX線が検出器中で散乱され、その検出器外に飛び出して隣のX線検出器に再度入射する現象(クロストーク)が発生し、画質が劣化する。

これらの項目について検討・評価を行った結果は次のとおりである。

まず、(1)については患者を1分間静止させておくことはなかなか困難であるため、360°分の投影データを取得しなくても画像再構成ができるように投影データの補間計算を行って、不足分の投影データを得るアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムではファンビームを用いて回転角 $180^\circ + \alpha$ (α : ファンビームの広がり角) 分の投影データを収集すれば、360°分のファンビームによる投影データ又は180°分のパラレルビーム投影データを得ることができる。今回の装置ではファンビームの広がり角が30°であるからライナックヘッド部の回転角が210°分の投影データを収集すれば画像再構成を行うことができ、その結果撮像時間は約35秒に短縮できた。

次に、(2)の密度差が識別しにくいという点については、投影データがX線検出器からのアナログ電流信号をA/D変換して作られていることからA/D変換時のビット数を大きくすることによって投影データの精度向上を図り、画像再構成を行ったときに人体構成物質の密度差が現れるようにした。今回のA/D変換のビット数はシミュレーション計算によって最適化したものである。

X線エネルギースペクトルの広がりが問題となって生じる(3)の一例として、骨(カルシウム)の透過厚さに対するX線検出器出力を入射X線のエネルギーに対して計算した結果を図3に示す。一方、あるエネルギーのX線に着目すると、物質の透過厚さに対するX線の強度の関係は物質の透過厚さを x 、吸収係数を μ 、入射X線の強度を I_0 で表すと式(4)で

表される。

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x) \dots\dots\dots (4)$$

この式は一つのエネルギーに対して成り立つものである。これに対して、図3に示した結果はあるエネルギーでカルシウム中に入射したX線がカルシウム中で散乱を受けてエネルギーが変化したものも含んでおり、それらのX線がX線検出器中に入射して、検出器中で失ったエネルギー量を各カルシウム透過厚さに対して示したものである。この図からカルシウムに入射するX線のエネルギーが一定であれば、カルシウムを透過してきたX線に対するX線検出器の対数出力はカルシウム厚さに対して直線性が良いことが分かる。しかし、入射X線のエネルギーが異なるとカルシウムに対する吸収係数 μ が異なるために直線の傾きがそれぞれ異なっている。

広がったエネルギースペクトルをもったX線ビームを用いて得られるCT画像の画質を向上させるためには、人体を構成する様々な物質に対して、このようなX線ビームで物質の透過厚さに対するX線検出器の対数出力の直線性を向上させなければならない。そこで、ライナックのヘッド部にフィルターを設置したり、X線検出器出力に補正をかける等の方式を検討中であり、現在その最適化を行っている。

次に、(4)のX線検出器間でのクロストークは検出器中に入射したX線が検出器構成物質の中で散乱されて、その検出器中から外に飛び出して隣にある検出器に再び入射することによって発生するもので、検出器間の幾何学的配置とX線のエネルギーによってクロストークの発生量が変わる。これはX線のエネルギーによって検出器中の透過長さや散乱方向分布が変わるためである。通常はこのクロストークを抑えるために検出器間に遮へい(蔽)材を入れる。図4に開口が3mmのX線検出器に各種エネルギーのX線が入射したときのクロストーク量を計算した結果を示す。この図では開口3mmのX線検出器の間隔を2mm、4mm、6mmとして、この間隔に検出器間の遮蔽材としてタンゲステンを挿入した場合と何も挿入しなかった場合のクロストーク量を示しており、クロストーク量としては最大でも5%程度であることを示している。この図からX線検出器間のクロストーク量は低エネルギーのX線に対しては検出器間にあるタンゲステン中でのX

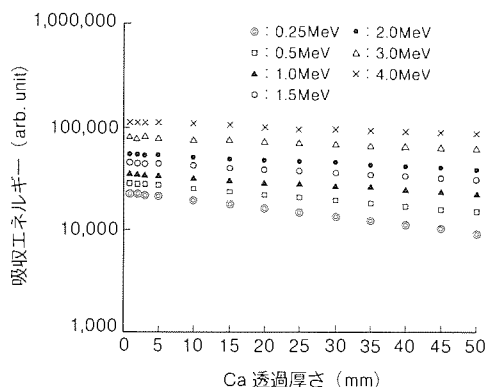


図3. カルシウム透過厚さに対するX線検出器出力

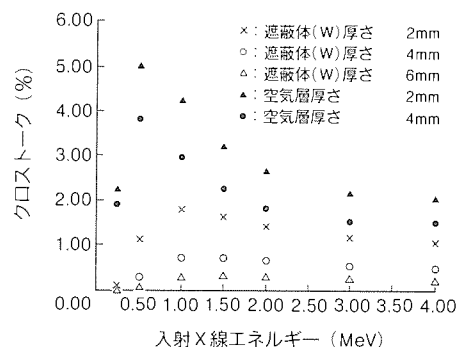


図4. X線検出器間のクロストーク量

線の吸収の効果が大きく、高エネルギーのX線に対しては検出器間のピッチが小さいほど大きく影響していることが分かる。一方、X線検出器のピッチはCT画像の分解能にも影響を与えるためにX線検出器のピッチをそれほど大きくすることはできず、今回のシステムでは検出器開口を3mm、タングステン遮蔽材厚さを4mmとした。

以上がライナック装置を用いたCTシステムを構築するに当たっての主な問題点とその対応策である。ライナック装置を決定すればX線のエネルギースペクトルが決定されるので、そのX線の特性に合わせたシステムの最適化を図ることでライナックCTシステムを構築していくことができる。次章以降で今回のライナックCT装置の装置構成とその応用例を示す。

4. 装置構成

今回開発した医療用ライナックCT装置は、三菱医療用ライナック ML-15MDX にCT装置を追加した構成となっている。ライナックから発生するX線エネルギーは、放射線治療に有効かつ取得画像のコントラストの良い4MeVと6MeVを選択している。

この装置ではまず、ライナックから発生するパルスX線を線状に並べたシンチレーション検出器で受け、検出器アナログ電流出力をデータ収集装置でA/D変換し、投影データをヘッド部の回転ごとにEWS (Engineering Work Station)を用いた画像処理装置にDMA (Direct Memory Access) 転送する。次に、投影データを画像再構成専用プロセッサを用いてFBP法によって断層像を再構成するようになっている。また、この装置は通常のX線管を用いたX線CT装置と同様に、治療台(CFRP製)の動きにライナックのX線パルスと同期させ、CR像(Computed Radiography)の取得も可能としている。図5にこの装置の構成を、図6にこの装置の外観、表4にこの装置の基本仕様を示す。

4.1 X線検出器

検出器全体は120チャンネルから構成され、X線源を中心に円弧状に配列している。4MeV、6MeVのX線を効率良く検出するため、密度の高いCdWO₄(タングステン酸カドミウム)単結晶シンチレータを用い、光電荷変換にはフォトダイオードを使用し、小型化を図っている。また、高エネルギーX線の被写体及び検出器からの散乱線を除去するため、タングステンを用いてコリメート・遮蔽している。

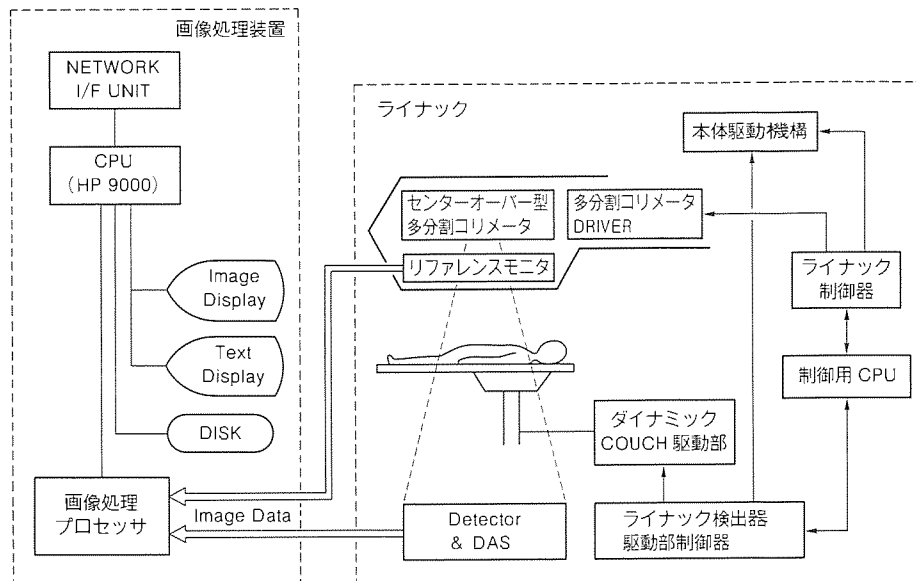


図5. ライナックCT装置の構成

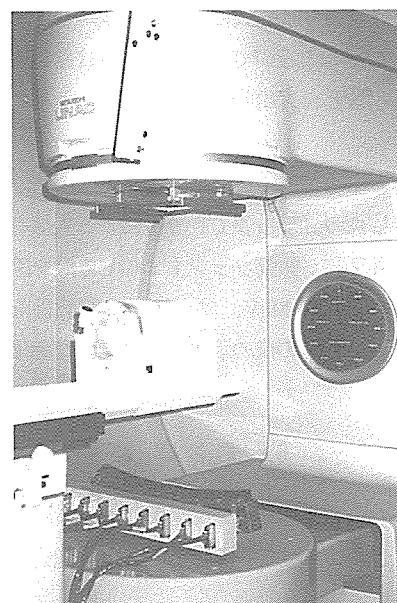


図6. ライナックCT装置

表4. CT装置としての基本仕様

(CT 横断面画像)	
撮影対象	: 全身
スキャン方式, 時間	: 第三世代方式, 35s/210°回転
画像再構成方式	: Filtered Back Projection 法
画像再構成時間	: 60s
スライス数	: 1スライス/スキャン
有効視野	: 380mm
表示マトリクス	: 256×256
CT値	: ハウンスフィールド系 -1,000~3,000
(CR 画像)	
撮影範囲	: 400mm×380mm
撮影時間	: 10s
画像処理時間	: 10s
表示マトリクス	: 256×256

4.2 DAS(データ収集装置, Data Acquisition System)

X線検出器出力すなわちフォトダイオードからの電流を積分・サンプルホールドし、16ビットA/D変換器でデジタル化し、GP-IOによるDMA転送を行っている。

4.3 画像処理装置

主メモリ24Mバイトをもった32ビットEWSを基本計算機とし、再構成専用演算に20MFLOPSのアレープロセッサを用いている。機能は以下のとおりである。

- (1) コンソール機能(オペレータとのマンマシンインタフェース部)
- (2) DASと同期をとって、投影データの収集を行う。
- (3) 投影データを前処理、再構成し画像をつくる。
- (4) 画像表示
- (5) 画像をもとにした患者治療部位の位置決め。
- (6) 患者登録、画像のファイリング
- (7) 検出器、DASの診断用メンテナンス

画質改善のために各チャンネルのオフセット補正、ライナック出力変動補正及び補正式によるビームハードニング補正を前処理として行うことができる。再構成に用いるフィルター関数はRL関数とSL関数から選択できる。

5. 応 用

今回開発したライナックCT装置による人体の胸部断層像(CT像)を図7に、頭部ファントムのCR像を図8に示す。X線エネルギーは6MeV、フィルター関数はRL関数を選択している。これらの像の示すとおり良好な画像が得られている。

6. む す び

以上、この装置を用いれば撮像開始から断層像が得られるまでの処理を約100秒で行うことができ、通常の放射線治療



図7. 胸部断層像(CT像)

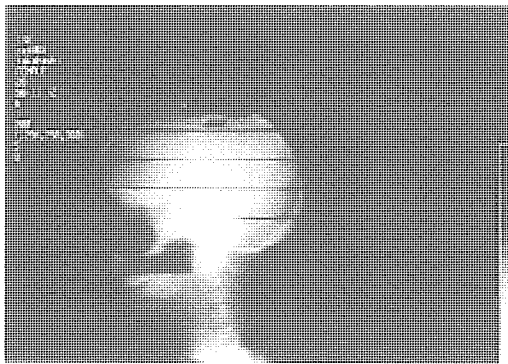


図8. 頭部ファントムの透視像(CR像)

の処理時間が患者一人当たり15分程度要していることを考慮すると、治療のスループットを維持しながら高精度の治療が可能になったといえる。

今後、システムとしては治療ビームのリアルタイムモニタ及び透過X線データからの線量分布の計算表示ができるように装置のグレードアップを図り、各ユニットとしてはX線検出器の最適化、広がったX線エネルギースペクトルの影響の補正法の最適化、再構成時間の短縮、再構成画像の高画質化などが課題となってくる。

液晶ポリマースピーカー振動板

村上 治* 馬場文明* 山田 祥* 棕田宗明* 原 宏造**

1. ま え が き

デジタルオーディオ機器や大画面 TV の普及に伴い、スピーカーシステムの高音質化に対する要求が強まり、スピーカー振動板の高性能化が求められている。

スピーカー振動板の高性能化には、振動板材料の弾性率と振動減衰特性の向上を図る必要がある。また、振動板の形状として、ボイスコイル巻線用コイルボビンと振動板コーンを一体化することにより、振動伝達ロスやひずみの低減が可能となる。

従来のスピーカー振動板は、ほとんどが紙系の材料で製造されていたが、最近では機械的特性や耐環境性に優れる高分子系材料が適用されつつある。その中でも液晶ポリマーは、優れた弾性率と振動減衰特性をもっていることから、スピーカー振動板への適用を検討し、1988年に液晶ポリマースピーカー振動板として製品化した。液晶ポリマースピーカー振動板は、自然な音質を再生できることから好評を得ており、小型高級スピーカーに加えて、AV 用、ホームシアター用として10機種の商品拡大を図ってきている。さらに、スピーカー振動板の高性能化を目指し、高剛性液晶ポリマーを開発することにより、大幅な弾性率の向上を実現し、ダイヤトーン DS-500 N として製品化した。また、液晶ポリマーの耐熱性・流動性を向上させるとともに、高速射出成形技術の開発により、ボイスコイル巻線用コイルボビンと振動板コーンを一体化した低音用コイルボビン一体型振動板を開発した。

ここでは、高剛性液晶ポリマー振動板と、コイルボビン一体型振動板について紹介する。

2. 液晶ポリマー

液晶ポリマーは、自己補強効果を示す新しいプラスチック材料である。一般のプラスチック材料は、熱を加えると溶融して液状となり容易に流動することができるようになる。この状態で型などに流し込んだ後、再び冷却すると固体となり、所望の成形品が得られる。また、熱に対して可塑性があることから、一般に熱可塑性樹脂と呼ばれている。一般の熱可塑性樹脂は、図1(a)に示すように溶融状態で鎖状のポリマーが絡み合ったランダムコイル構造を示す。一方、液晶ポリマーは、熱可塑性樹脂と同様に熱を加えると溶融して液状となるが、図1(b)に示すように一部のポリマーが並んであたたかも結晶のような構造を形成する。この状態を液晶相と呼び、液晶相の形成が可能なプラスチックが液晶ポリマーと呼ばれている。

液晶ポリマーは、溶融状態でのポリマーの絡み合いが少ないため、流動時の粘度が非常に小さいという特徴を示す。また、流動時に伸長力やせん断力などの外部応力が加わると容易に変形して、ポリマーが力の作用する方向に並ぶ配向現象を示す。一般の熱可塑性樹脂も配向現象を示すが、応力の緩和時間が短いため、すぐに応力が緩和して配向状態はもとのランダムコイル状態に戻る。これに対して液晶ポリマーは、緩和時間が非常に長いため配向状態が固定されたまま冷却固化する。このため、液晶ポリマーの配向した成形品は、ポリマーが並んだ繊維状になり、弾性率や強度が大幅に向上する自己補強効果を示す。

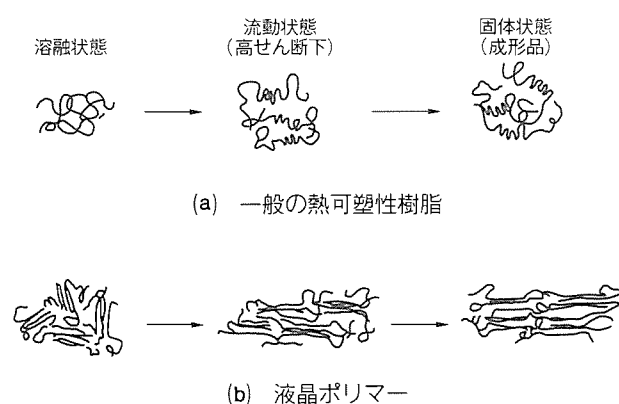


図1. 液晶ポリマーのせん断による配向効果

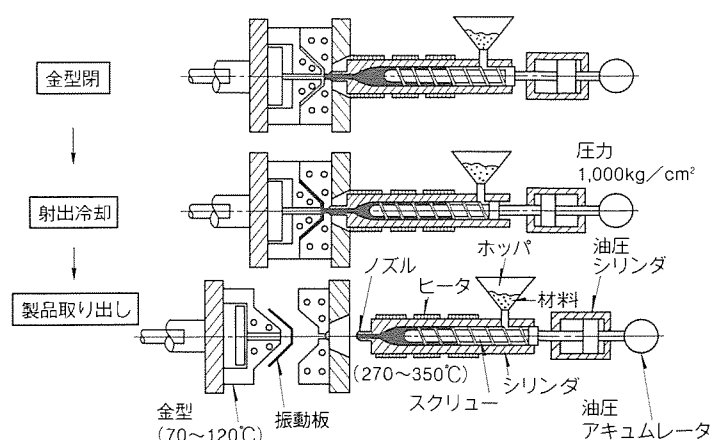


図2. 射出成形法

この自己補強効果により、液晶ポリマーの成形品には、次に示す特長が現れる。

- (1) 金属に匹敵する比弾性率（弾性率／密度）をもっている。
- (2) 機械的内部損失が大きい。
- (3) 線膨張係数が小さい。

3. スピーカー振動板の要求特性

スピーカーが忠実な原音を再生するためには、再生周波数特性の向上やひずみ率の低減が要求され、振動板には材料特性として、①比弾性率が高いこと、②内部損失が大きいこと、③低密度であること、が要求される。

振動板材料の比弾性率が高くなると、音の伝搬速度を示す音速値（ $\sqrt{\text{比弾性率}}$ ）が大きくなるため、振動板のピストン振動領域が広くなり、再生周波数帯域が拡大し、高調波ひずみの低減や過渡特性が改善される。また、内部損失が大きいと振動板の分割振動が制動され、周波数特性が平坦になるとともに、ひずみも低減する。密度が小さいと振動板の質量が軽くなり、同一入力に対して出力レベルを大きくすることができる。しかし、一般には比弾性率が高い材料ほど内部損失は小さく、比弾性率と内部損失の両特性を満足する材料は少ない。このため、従来は振動板の用途によって材料の使い分けを行ってきた。高音用スピーカーユニットでは、再生帯域の拡大が特に重要となるため、高い比弾性率をもつセラミックや金属材料が使用されている。一方、中低音用スピーカーユニットの振動板材料には、比弾性率と内部損失のバランスに優れた高分子材料やコーン紙が使用されている。高分子

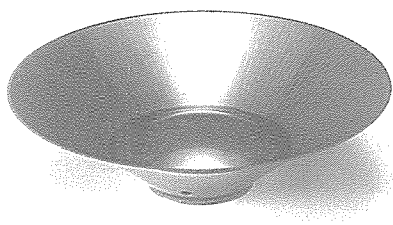


図3．液晶ポリマースピーカー振動板の成形品（低音用）

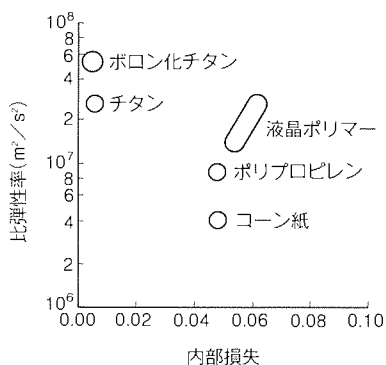


図4．各種振動板材料の比弾性率と内部損失

材料では炭素繊維やマイカ、グラファイトなどで強化されたポリプロピレンや、アラミド繊維、ガラス繊維等で補強されたエポキシ樹脂が用いられている。

4. 液晶ポリマーのスピーカー振動板への適用

液晶ポリマーの自己補強効果を十分に活用すれば、一般のプラスチックでは実現不可能な高い弾性率と大きな内部損失が可能となり、スピーカー振動板に最適な材料となる。

液晶ポリマーのスピーカー振動板への適用に当たっては、材料開発とともに自己補強効果を十分に発揮させる成形加工法の選択が重要となる。従来、スピーカー振動板の成形加工には真空成形法や射出成形法（熱可塑性樹脂）、及び圧縮成形法（熱硬化性樹脂）がよく用いられてきた。しかし、液晶ポリマーの適用に当たっては、自己補強効果を最大限に発揮できる射出成形法を採用した⁽¹⁾。

射出成形は図2に示すように、樹脂を加熱溶融したのち、高压で金型内に樹脂を射出注入する成形加工法であり、プラスチックの成形では最も広く用いられている方法である。射出成形では、雄雌対の高精度な金型を用いるため安定した品質の成形品が得られる特長がある。スピーカー振動板の成形では、板厚が中音用で0.2mm以下、低音用で0.4mm以下と薄いため、流動性に優れることが要求される。射出成形法は、薄肉部にポリマーを高速で流動させることにより、大きな伸長力やせん断力がポリマーに作用し、ポリマーの配向による弾性率の向上が期待できる成形法である。特に、液晶ポリマーは、配向による自己補強効果を示すことから、従来のプラスチックにない高い弾性率の実現が期待できる。

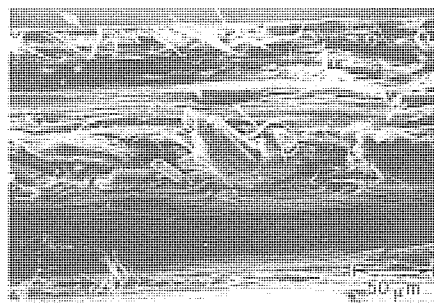


図5．振動板破断面の走査電子顕微鏡写真

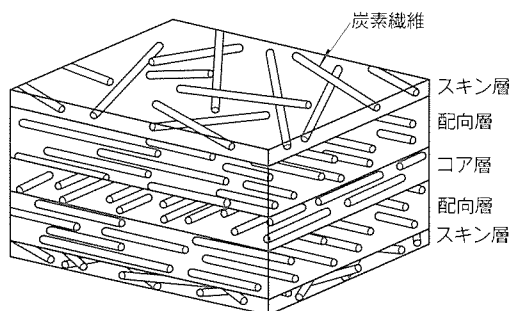


図6．振動板成形品の内部構造模式図

液晶ポリマーで成形した低音用振動板を図3に示す。液晶ポリマー振動板の射出成形では、少量の繊維状充填（填）材を液晶ポリマーに充填すると、成形加工時の流動が安定し低圧でも成形が可能となる効果が認められたため、10～20%の炭素繊維を充填して振動板の成形を行った。

4.1 液晶ポリマー振動板の特性と構造

射出成形によって成形された液晶ポリマー振動板は、液晶ポリマーが流動時に伸長力やせん断力により強く配向するため、樹脂の弾性率は大きく向上する。また、ポリマーの配向により、内部損失も従来にない優れた値が得られている。各種の振動板と液晶ポリマー振動板の比弾性率と内部損失を図4に示す。

セラミックや金属材料は、比弾性率が高く内部損失が小さい。一方、コーン紙やプラスチックのポリプロピレンは内部損失がセラミックなどに比較して大きな反面、比弾性率は劣る。液晶ポリマーは、チタンに匹敵する比弾性率と従来材料を越える内部損失を示すことから、高音用から低音用まで全帯域にわたって使用することが可能である。

図5に炭素繊維を充填した液晶ポリマー振動板の破断面の走査電子顕微鏡写真を示す。振動板は、液晶ポリマーと炭素繊維の配向状態が異なる5層の多層構造を形成している。

液晶ポリマー振動板は、炭素繊維がランダムに配向したスキン層、スキン層の下に樹脂の流動方向に強く配向した中間層（一般に“配向層”と呼ばれる。）、中心部が液晶ポリマーと炭素繊維が樹脂の流動方向と直角方向に配向したコア層から成り立っている。中間層とコア層では、液晶ポリマーが繊維状になっていることが観察される。

これらの各層の炭素繊維の配向状態をまとめて図示すると図6のように表される。

液晶ポリマーと炭素繊維は、図のような状態で配向していることから、振動板はコア層と中間層の配向が直交した多層構造を形成している。このため、異方性の少ない高弾性率の振動板が実現できた。

液晶ポリマー振動板の厚さと弾性率の関係を図7に示す。弾性率は、振動板の板厚が厚くなるほど低下する。この現象は振動板成形品の内部構造と関係する。振動板はスキン層、中間層、コア層から成るが、この中で最

も弾性率の高い層は、中間層である。この中間層の厚さは、表1に示すように射出速度の影響をほとんど受けず⁽²⁾、また成形品の厚さによらずほぼ一定であることから⁽³⁾、板厚が薄くなると配向層の占める割合が高くなり、弾性率は向上する。したがって、振動板を薄く成形することができれば、音響特性の向上と駆動ユニットの軽量化を図ることができる。

繊維長が短いミルド繊維と長いチョップド繊維の2種類の炭素繊維を充填させた液晶ポリマー振動板の弾性率と成形性の関係を表2に示す。一般に繊維の長さが長くなると成形品の弾性率は大きくなるが、繊維間の相互作用が大きくなるため、成形加工時の流動性は悪くなる。振動板のような薄肉成形品ではこの効果が顕著に現れ、弾性率と流動性は相反する結果を示す。種々の繊維長をもつ炭素繊維を液晶ポリマーに充填し、流動性と弾性率を評価した結果、炭素繊維の平均長さを50～60 μm に制御し、繊維長分布を最適化することにより、弾性率と成形加工性に優れた液晶ポリマーの開発に成功した。

4.2 流動シミュレーション

振動板の成形条件を最適化するため、金型内の液晶ポリマ

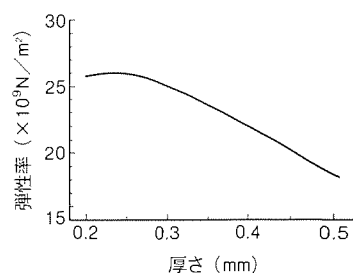


図7．振動板成形品の厚さと弾性率

表1．射出速度と各構成層の厚さ(mm)

各 層	単位: mm	
	高速成形品	低速成形品
スキン層	0.13	0.17
中間層	0.72	0.70
コア層	1.15	1.05

表2．炭素繊維長と物性

振動板成形品中の繊維長	$E (\times 10^9 \text{N/m}^2)$	成形性
ミルド繊維 14 μm	19.1	○
チョップド繊維 73 μm	30.4	×
チョップド繊維 53 μm	25.1	○

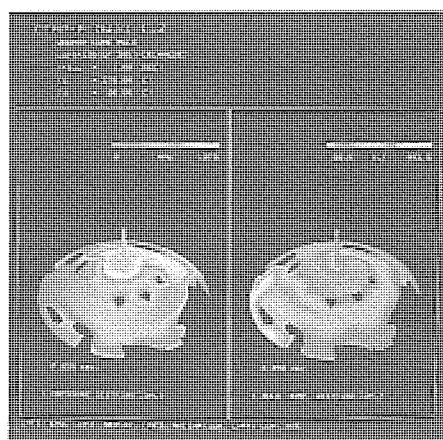


図8．低速射出時の流動解析

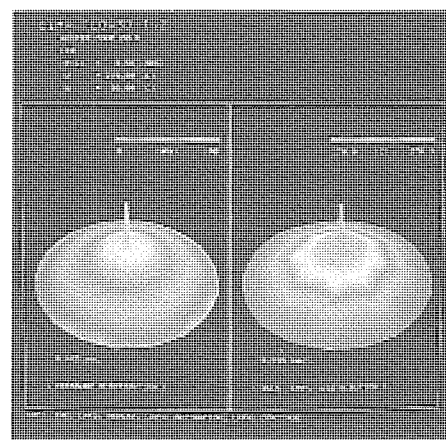


図9．高速射出時の流動解析

の流動をコンピュータシミュレーションで解析した。図8、図9は低速射出と高速射出を行った場合のシミュレーション結果である。低速射出の場合には、液晶ポリマーの異常流動が発生し、完全な成形品が得られないことを示している。これらの解析結果から、振動板を得るためには高速成形が必要であることが分かった。

実際のスピーカー振動板の成形では、振動板形状によって差があるものの、充填時間を0.2秒以下とすることにより、端部まで理想的な流動パターンを示す振動板が得られている。

4.3 液晶ポリマー振動板の音響特性

液晶ポリマーの特長を十分に発揮したスピーカー振動板を開発するため、剛直で直線性の高い分子構造をもつ高剛性液晶ポリマーに、繊維長を制御した炭素繊維を15%充填した振動板材料を開発した。また、液晶ポリマーの自己補強効果を十分に発現させるため、流動シミュレーションに基づいて高速成形することにより、弾性率が非常に高い液晶ポリマー振動板の開発に成功した。外径200mmの低音用振動板の充填時間は、0.08秒である。

図10は、これらの振動板を搭載した小型スピーカーシステム“ダイヤトーン DS-500N”を示す。液晶ポリマー振動板は、周波数特性(図11)に示すように従来のポリプロピレン系振動板と比較して、再生周波数特性が平坦で高音域まで延びている。また、高調波ひずみ率は、液晶ポリマーの優れ

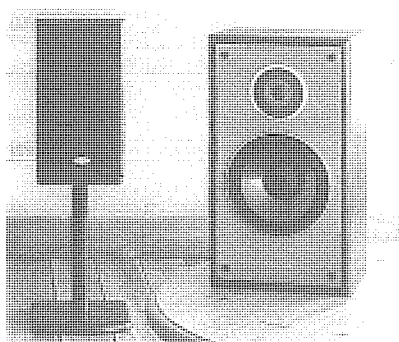


図10. ダイヤトーン DS-500N

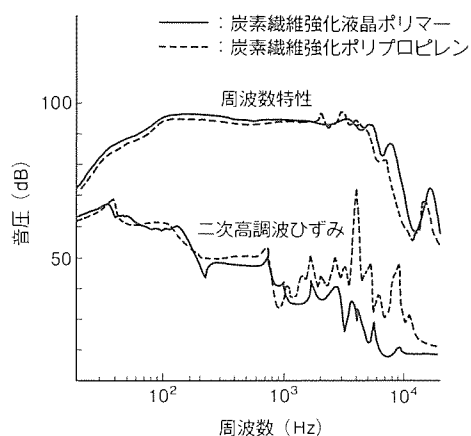


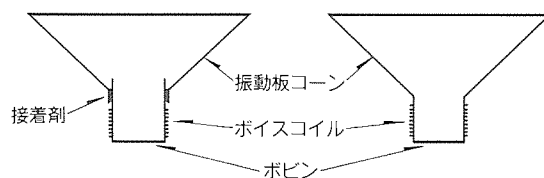
図11. 低音用ユニットの周波数特性

た内部損失を反映して、大きく低減した。従来のスピーカーシステムが再生ユニットにより音速の異なる振動板材料を用いていたのに対して、液晶ポリマー振動板搭載スピーカーシステムでは、全ユニットが同一の振動板材料で構成できることから、低音から高音までつながりの良い再生が可能となった。

これらの液晶ポリマー振動板の優れた特長により、液晶ポリマー振動板を搭載したスピーカーシステムは、ひずみの少ない自然な音質再生を実現している。

5. コイルボビン一体型振動板

従来のスピーカー振動板は図12(a)に示すように振動板コーンとボイスコイル巻線用ボビン(以下“コイルボビン”という。)を接着によって接合組立てしていたが、接合部において振動伝達ロスやひずみの発生が避けられず、材料特性が十分に反映できないという問題点があった。これを解決する手段としては図12(b)に示すようなコイルボビンと振動板コーンの一体化が理想的である。表3に、コイルボビン一体型スピーカー振動板に要求される材料特性を示す。



(a) 従来型接着構造 (b) コイルボビン一体型

図12. スピーカー振動板の構造

表3. コイルボビン一体型液晶ポリマースピーカー振動板に対する要求特性

耐熱性	270℃以上
弾性率	音速4,500m/s以上
内部損失	0.005以上
振動板板厚	平均0.25mm
振動板外径	250mm

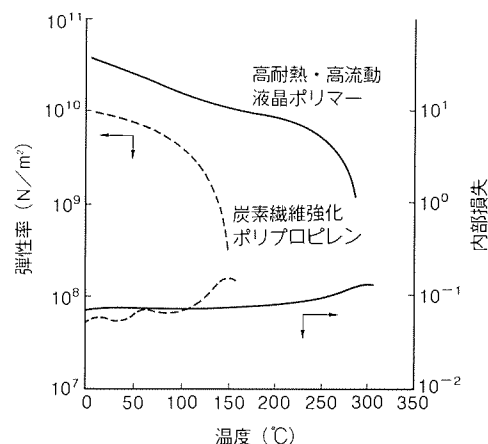


図13. 振動板成形品の動力学的性質の温度依存性

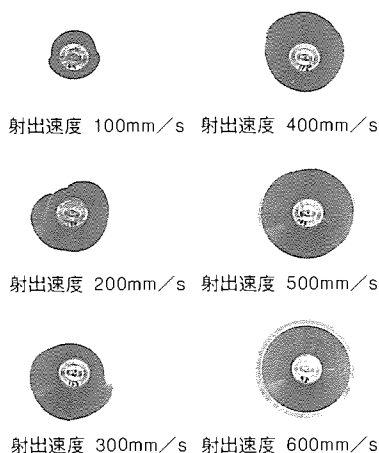


図14. 射出速度とスピーカー成形品形状

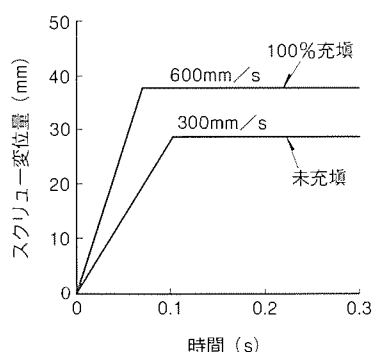


図15. 射出成形時のスクリュウ変位

コイルボbinは、異常時のボイスコイルの発熱(250~300℃)に耐える高い耐熱性が要求される。また、低音用スピーカーでは、振動板コーンの口径が大きく、さらにコイルボbinの成形を同時に行うことから従来の振動板に比べて流動長が著しく増大する。このため、耐熱性と流動性を改良した新しい液晶ポリマーの開発を行った。剛直で直線性の高い分子構造をもつ高剛性液晶ポリマーを基本骨格として、流動性を向上させる半剛直な分子構造を部分的に導入した。

図13は、新しく開発した高耐熱・高流動液晶ポリマーを適用したスピーカー振動板の弾性率及び内部損失の温度特性を示す。高温での弾性率の低下は小さく、300℃で 10^9 N/m^2 を保持し、優れた耐熱性を実現した。

射出速度と成形品形状の関係を図14に示す。コイルボbin一体型スピーカー振動板の成形には、射出速度600mm/sの超高速射出が必要である。また、スクリュウ変位を図15に示すが、完全充填時の600mm/sの射出時間は、0.07秒であることが分かり、これらの結果は流動シミュレーションの結果とよく一致した。

図16には、超高速射出によって成形した低音用コイルボbin一体型スピーカー振動板のコイル巻付けを完了した試作

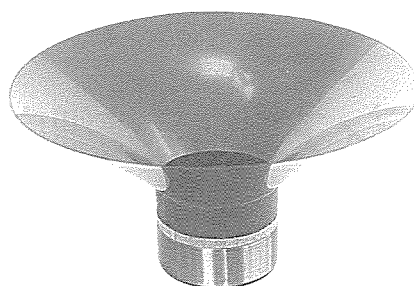


図16. コイルボbin一体型スピーカー振動板

表4. 各種振動板材料の定数比較

	弾性率 $\times 10^9 (\text{N/m}^2)$	密度 (kg/m^3)	比弾性率 $\times 10^6 (\text{m}^2/\text{s}^2)$	音速 (m/s)	内部損失 η
紙(コーン紙)	2.0	500	4.0	2,000	0.050
ポリプロピレン	8.9	980	9.1	3,016	0.050
高耐熱・高流動 液晶ポリマー	39.2	1,450	27.1	5,205	0.064
アルミニウム	72.0	2,700	26.7	5,167	0.001
チタン	110.0	4,540	24.2	4,919	0.001

注 音速 $=\sqrt{\text{比弾性率}}$, ポリプロピレンと液晶ポリマーは炭素繊維強化材

品を示す。表4に、従来の振動板材料とコイルボbin一体型スピーカー振動板の材料特性を示す。高耐熱・高流動液晶ポリマーと高速成形によるポリマーの配向効果により、耐熱300℃を達成するとともに、高分子の成形材料では初めて音速5,000m/sを超えることができた。

なお、現在この振動板を搭載するスピーカーシステムを開発中である。

6. む す び

液晶ポリマーの特長を十分に生かした高性能スピーカー振動板について紹介した。振動板に適した材料開発とこの材料の性能を最大限に発揮させる加工プロセスである高速射出成形技術の開発により、従来にない優れた音響特性をもつスピーカー振動板の開発に成功した。スピーカーを始めとして電子・電気機器では高機能材料や加工プロセスによる材料の高性能化が大きく期待されている。今後も、材料の特性を最大限に引き出した新しい製品を開発していく。

参 考 文 献

- (1) 馬場文明：機能材料，7，No. 10，21 (1987)
- (2) 村上 治，馬場文明，山本 泰，江藤昌平：炭素繊維強化液晶ポリマーの繊維配向と熱膨張特性，昭和63年度塑性加工春季講演集，621 (1988)
- (3) 神谷 武，清水徹男：液晶ポリマー新時代，工業調査会 (1991)

マルチメディア対応高精細度プロジェクター 70P-X3

鈴木吉輝* 南 浩次* 中原仁志* 一松 明* 三原康敏**

1. ま え が き

情報のマルチメディア化が進みつつある現在、グラフィック情報や映像情報を大画面で表示するというニーズが増大しており、大画面ディスプレイを核とした映像情報システムは、各種教育・会議システム、プレゼンテーションシステムや、電力・公共施設の監視システムなどに導入されつつある。

今回、このようなニーズにこたえる大画面ディスプレイとして、現行テレビ、ハイビジョンはもとより、パソコン、ワークステーションまで接続可能な高精細度70型リアプロジェクター 70P-X3を開発した。

本稿では、このプロジェクターの特長と、それを実現した主要な要素技術について述べる。

2. 特長と仕様

70P-X3の特長を以下に示す。

- (1) オートスキャン機能を搭載、水平周波数15~75kHz、垂直周波数45~150Hzまで自動追従。NTSC・PAL・SECAMなどのカラーテレビ放送信号にも対応。
- (2) 新開発デジタルコンバーゼンス回路により、画面周辺部においても中心部と同等な高精度なコンバーゼンス精度を実現。また、赤外線リモコンによって調整時の操作性も向上。
- (3) 広帯域映像出力回路(50MHz/−3dB)、ハイブリッドレンズ(プラスチック×2、ガラス×6)の採用により、高解像度化を実現。水平1,280ドット、垂直1,024ラインまで表

示可能。

(4) RS-422/485 インタフェース端子を装備、各種コンピュータからのコントロールが可能。

(5) オンスクリーン表示機能、自己診断機能の充実により、調整時の操作性、サービス性を向上。

図1、図2に高精細度プロジェクター 70P-X3の外観と構造、表1に主な仕様を示す。

3. 電気回路の構成

図3に70P-X3のブロック構成を示す。本機の特長である高解像度、及びオートスキャン機能を実現するため、オートスキャン対応水平・垂直偏向回路、高精度デジタルコンバーゼンス回路、広帯域ビデオ回路を新たに開発・搭載している。

また、高圧発生回路には、非同期(固定周波数)型高安定高圧回路を採用している。

信号入力部については、デコードボード、RGB入力ボード等を着脱可能な構成とし、目的・用途に応じ、EDTV、ハイビジョン等の入力に対応可能なものとした。

以下、主要な回路の要素技術について説明する。

3.1 偏 向 回 路

図4に代表的な各種信号(NTSC、各種パソコン、ワークステーション)の水平・垂直周波数分布を示す。

今回開発のプロジェクターは、これらの信号に対応すべく、水平周波数は15~75kHz、垂直周波数は45~150Hzまで

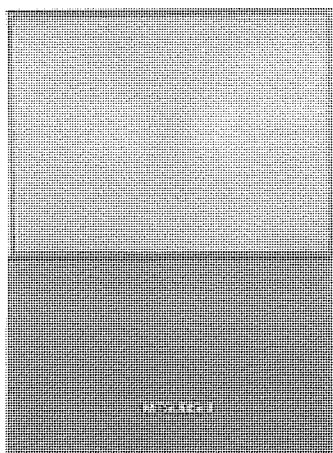


図1. 高精細度プロジェクター
70P-X3の外観

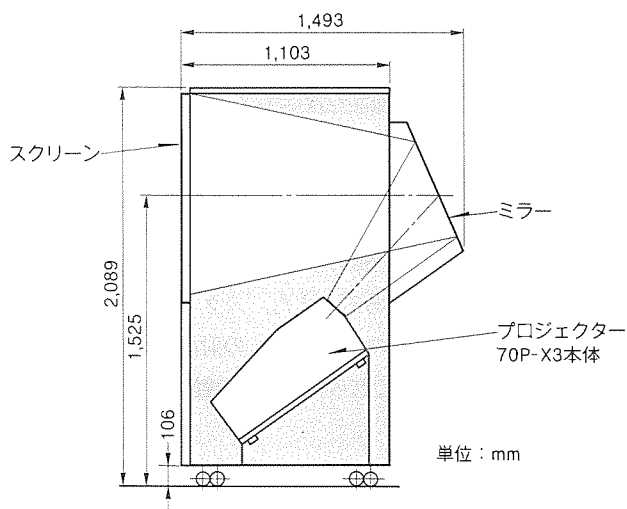


図2. 70P-X3の構造

ックする広い同期周波数範囲が要求される。

したがって、水平偏向回路では入力信号周波数に合わせて動作モードをコントロールし、リニアに追従する“リニアオートスキャン方式”を採用することにより、入力信号周波数にかかわらず安定した動作を実現した。

図5に水平同期回路のブロック図を示す。入力信号は、水平同期信号、及びシステムマイコンからのコントロール信号(周波数-電圧変換信号:F/V信号)であり、通常水平同期AFCに用いられるきょ(鋸)歯状波AFC回路の動作点を、

上記コントロール信号によって常に最適に保つような構成となっている。

まず、水平同期信号は、水平位相調整回路へ入力される。入力水平周波数は上記のとおり約5倍程度変化するため、F/Vコントロール信号によって、位相調整回路の感度が常に一定になるように動作させている。

次に、水平AFC回路では、比較パルス幅デューティ、比較鋸波デューティ、自走発振周波数を入力水平信号周波数に対応させてコントロールし、安定な水平同期AFCを確保し

ている。また、このような構成にすることによって、入力信号の切替時、及び無信号時の水平偏向系の動作を、システムコントロール側から所望の特性でコントロールできるため、種々の過渡的な動作時の安全動作も確保できる。

水平偏向出力回路では高速偏向回路を採用し、水平リトレース期間2.5μsを実現している。

さらに、水平偏向幅が入力信号周波数によって変化しないよう、帰還型の水平幅高安定化回路を採用し、そこへシステムコントロールからの幅調整信号を入力することによって感度が一定の水平幅調整も可能にしている。

水平ブランキング発生回路についても、上記水平位相調整回路と

表1. 高精細度プロジェクター 70P-X3の主な仕様

項 目	仕 様
投 影 方 式	3 管, 3 レンズ
C R T	7 型高輝度液冷管 ハイブリッドフォーカス(静電, 電磁), 70° 偏向
レ ン ズ	F1.2 ハイブリッドレンズ(プラスチック 2 枚, ガラス 6 枚)
ス ク リ ー ン	サイズ: 70 インチ, ピッチ: 0.78mm, ゲイン: 5.0, ブラックストライプ
輝度(白ピーク)	400cd/m ² (5 % ウインドウ)
カ ラ ー 方 式	NTSC, PAL, SECAM 対応
解 像 度	H: 1,280 ドット, V: 1,024 ライン
映 像 出 力	信号帯域 50MHz/−3 dB: 100Vp-p
水平偏向周波数	15~75kHz 水平ブランキング: 2.5μs
垂直偏向周波数	45~150Hz 垂直ブランキング: 200μs
コンバーゼンス	デジタルコンバーゼンス 精度: 垂直, 水平とも±0.1%以内
入 力 信 号	ビデオコンボジット: BNC ビデオ Y/C : BNC/S 端子 RGB アナログ : BNC 2 系統(R, G, B, HD, VD)
インタフェース	RS-422/485
自己診断機能	7 セグメント LED による故障箇所の表示
消 費 電 力	650W
外 形 寸 法	(W)1,482×(H)2,089×(D)1,493(mm)
質 量	280kg(プロジェクター本体97kgを含む。)

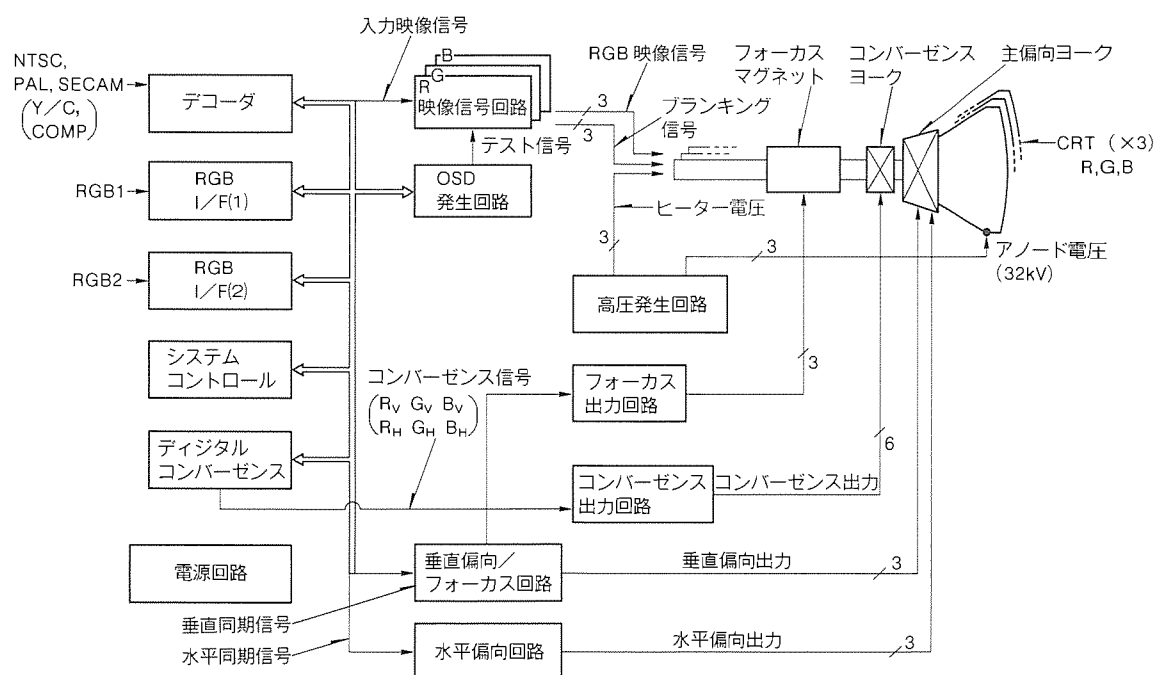


図3. 70P-X3のブロック構成

同様、調整感度の一定化を図っている。

以上に、上記コントロール信号による主な効果及び特長をまとめる。

- (1) 水平位相調整感度の一定化
- (2) 水平 AFC 動作の安定化
- (3) 過渡応答時における水平偏向回路の安全動作確保
- (4) 水平ブランキング信号の一定化

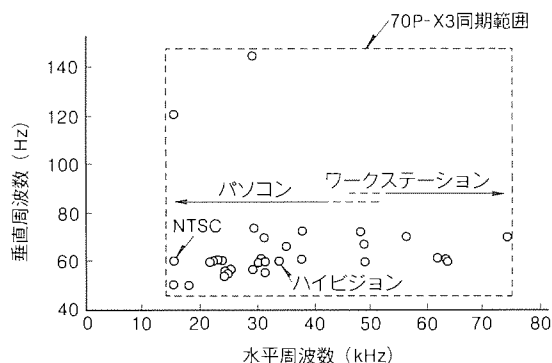


図 4. 各種信号の水平・垂直周波数分布

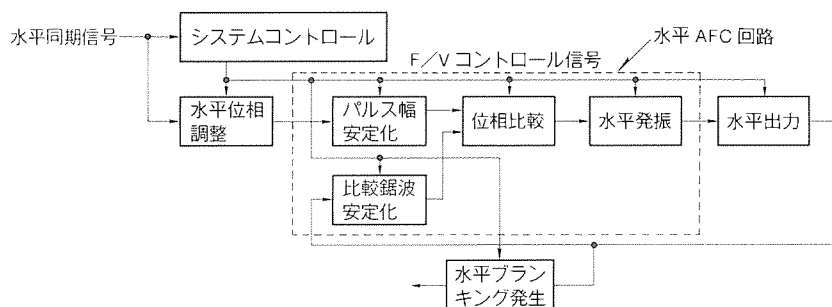


図 5. 水平偏向回路のブロック図

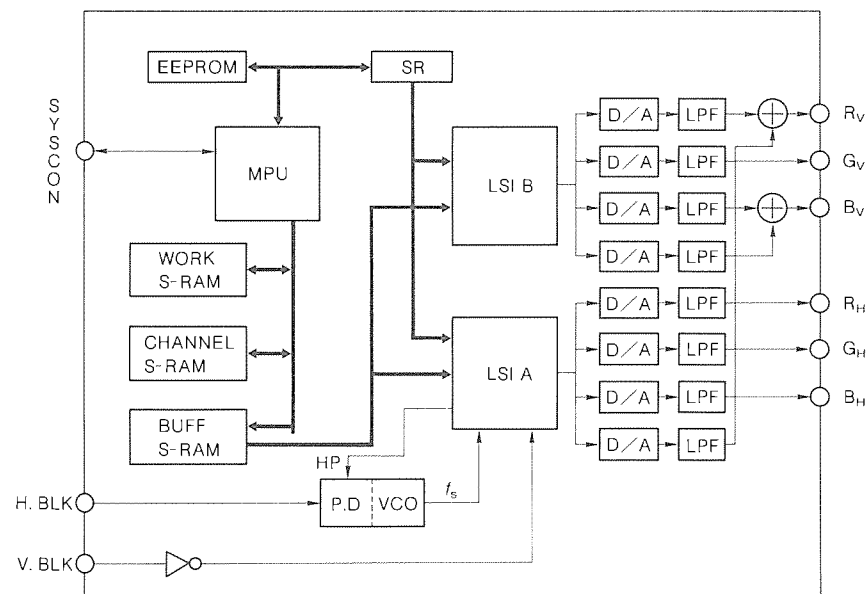


図 6. デジタルコンバーゼンス回路のブロック図

垂直偏向回路についても水平偏向回路と同様、入力垂直周波数に応じた動作を行う回路方式をとっている。なお、垂直ブランキング幅は、200 μ s を実現している。

3.2 デジタルコンバーゼンス回路

図 6 にデジタルコンバーゼンス回路のブロック図を示す。当社で開発したデジタルコンバーゼンス専用 LSI (M 60034 -5090 FP) を 2 個使用することにより、回路規模を非常に小さくした。また、コンバーゼンスの補正データ作成には、当社の 16 ビットワンチップマイコン (M 37700) を使用している。このマイコンは 16 MHz で動作しており、調整時のデータ演算を高速に行い、操作性を大幅に向上させている。

システムのメモリ構成としては、演算用のワークメモリ、専用 LSI がデータを読み出す出力メモリ、入力信号ごとに補正データを記憶するチャンネルメモリ、そして不揮発性のストアメモリからなる。

(1) オートスキャン対応方式

開発したデジタルコンバーゼンスシステムでは、入力信号に応じて補正点数及び垂直内挿線数の制御を行っている。

この補正点数と内挿線数の組合せを補正パターンと呼び、今

回は 18 個の補正パターンを用意している。この補正パターンは、入力信号の水平周波数と垂直走査線数によって決定され、マイコンが最適なパターンを選択してコンバーゼンス専用 LSI 等のパラメータ制御を行う。

高精度な PLL の実現のため、VCO は 2 段切替えとしている。また、D/A 変換特性を一定にするため、アナログローパスフィルターも 2 段切替えとしている。

画面消去期間の補正データに関しては、水平期間では三次曲線による補間を行い、画面左端への干渉を大幅に低減している。垂直期間では、画面外に仮想補正点を設定し、直線外挿によってデータ作成を行っている。

(2) ゾーン補正方式

開発したデジタルコンバーゼンスの調整方式の一つにゾーン調整がある。これは画面上の複数の補正点のデータをゾーン補正関数に従って可変させるものである。今回用意したゾーンはワイド/ナローの 2 種類であり、画面上を 40 のエリアに分割して独立に補正ができる。また、隣接ゾーンのデータはマイコンの演算によって滑らかに接続されるため、ポイント調整におい

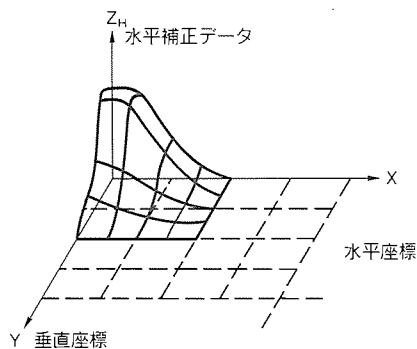


図7. ゾーン補正関数

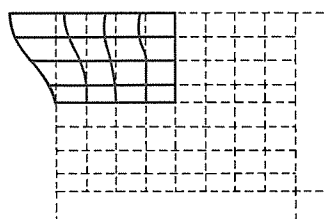


図8. クロスハッチの動き

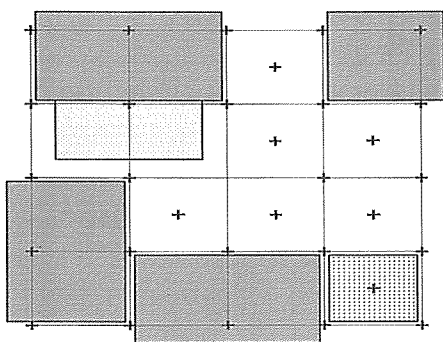


図9. ゾーン補正範囲例

で発生しがちな高次のひずみは発生しない。このゾーン調整により、画面全体での高精度なコンバーゼンス補正と、調整時間の短縮を実現している。さらに、ストアメモリにはこのゾーン関数の調整値レベルだけを記憶するため、メモリ容量の大幅な低減をも実現している。図7にゾーン関数、図8にゾーン補正でのクロスハッチの動きを示す。また、図9にゾーン補正エリアの例を示す。

3.3 映像信号回路

図10に映像信号回路のブロック図を示す。映像信号回路の特徴としては、信号帯域が広帯域(100 Vp-p, 50 MHz/−3dB)であること、ラスタの大きさに応じてビーム電流の最大値を可変できることが挙げられる。また、OSD (On Screen Display) 信号の付加回路の広帯域化、G1グリッドを使ったブランキング回路の高速化も行っている。

(1) 広帯域出力アンプ

広帯域化において特に問題になったのが、出力段の増幅用に使うデバイスの選択とパターン設計・基板レイアウトである。一般的に、広帯域大振幅のCRTドライブは、“カスケ

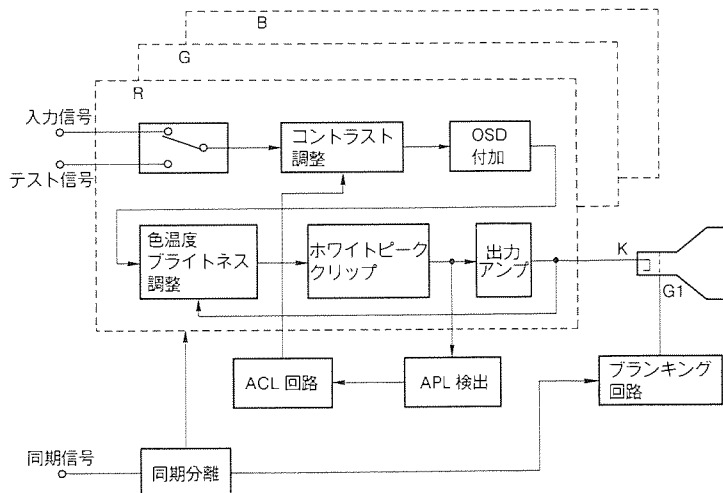


図10. 映像信号回路のブロック図

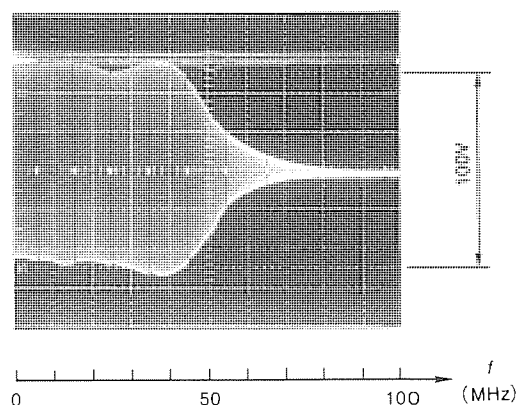


図11. 映像信号回路の周波数特性

ード接続+コンプリメンタリエミッタフォロフ”回路で構成する。しかし、単体トランジスタをプリント配線基板に実装する構成では、プリント基板のパターン配線、トランジスタの実装によって、広帯域回路で不安定な要素である浮遊容量及びリードインダクタンス成分が大きく影響を及ぼす。そこで、前記回路をチップ状態で直接実装してモジュール化したデバイスを使用して最適のピーキングを行い、かつ、このモジュールの出力とCRTカソードの位置を極力近づけるレイアウトをとることにより、100 Vp-p, 50 MHz/−3dBの周波数特性を実現している。図11に入力から出力までのトータルの周波数特性を示す。

(2) ラスタ適応型 ACL (Automatic Contrast Limiter) 回路

一般にCRTにビーム電流が流れ過ぎると、フォーカスがとれない、カソード・蛍光体の寿命が短くなるなどの問題がある。そのため、ビーム電流を制限するACL回路を設けている。オートスキャンディスプレイの場合、アスペクト比が違う信号を入力することもあるためアスペクト比が自由に変えられるように、縦横のラスタの大きさの調整をユーザーに解放している。すなわち、調整によってはラスタが極端に小さくなって、ビーム電流が狭い範囲に集中してしまうことが

ある。したがって、前記のビーム電流の制限値をラスタの大きさに応じて変えるように構成している。ラスタの大きさはリモコンの設定値、水平幅(H-Width)と垂直高(V-Height)の積により求まり、この値に応じた電圧によってACLの基準電圧を可変するようにしている。

3.4 高圧発生回路

高圧発生回路のブロック図を図12に示す。CRTのアノード電圧を発生する高圧回路のほか、高圧回路保護のための過電流防止回路、CRTの保護のための自動輝度制限回路(Automatic Brightness Limiter: ABL)とスポットキラー回路、安全性のためのX線の発生を防止するためのX線プロテクト回路などの保護回路を備え、装置の安全性を高めている。

(1) 高圧回路

高圧回路は、CRTのアノード電圧(DC 32kV)を発生する電源回路であり、CRTのビーム電流が負荷電流に相当する。したがって、ビーム電流が大きくなると高圧回路の出力電圧(アノード電圧)が下がる傾向があるが、アノード電圧が下がると電子ビームの速度が落ち、電子がより大きく偏向を受けるために結果として画面幅が広がる。この現象は輝度による画面幅の変動として現れるが、この変動を抑えるためには

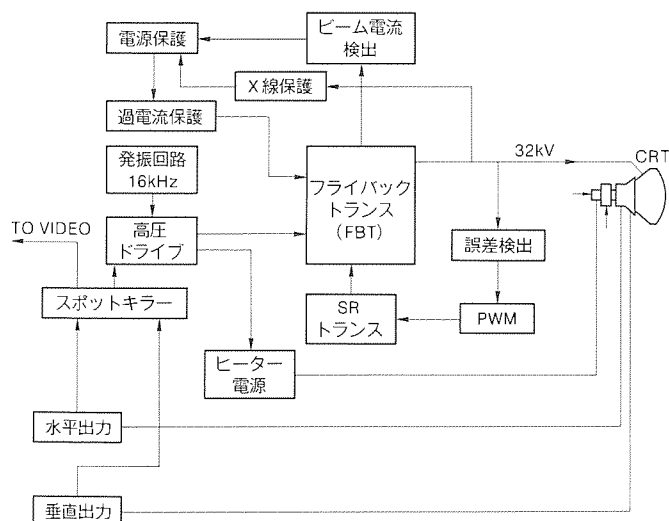


図12. 高圧発生回路のブロック図

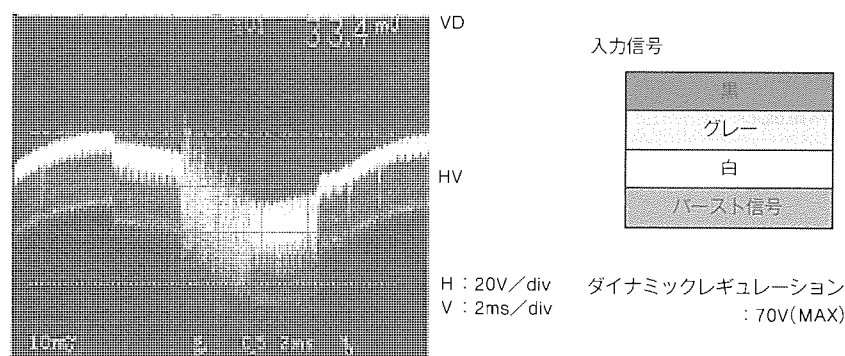


図13. 高圧発生回路の負荷変動

アノード電圧の安定化が必要である。ここではアノード電圧の変動を誤差検出回路で検出し、PWM(パルス幅変調)回路、サブトランス、整流回路によってフライバックトランスに補正電圧を供給することで安定化を図っている。この結果、アノード電圧(32kV)の変動は図13に示すようにビーム電流0~2mAに対して70V以内であり、良好な安定性を実現した。

なお、高圧発生回路は水平周波数同期型がよく用いられるが、オートスキャンタイプでは水平周波数が15~75kHzと広い範囲、高圧発生用には16kHzを用いた非同期型を用いた。

(2) 高圧回路保護の過電流防止回路

高圧ドライブ、フライバックトランスの電源電流を各々監視し、異常に大きい電流が流れた場合、サイリスタを動作させ電源の供給を停止させ、電源回路の保護を行っている。

(3) ABL

CRTのカソードの劣化を少なくするためにビーム電流をフライバックトランスの電流として検出し、電流が所定の値以下になるように制御している。

(4) スポットキラー回路

CRTの蛍光面の焼けを防止するためのもので、水平偏向又は垂直偏向の停止を検出し、高圧回路部の発振回路、CRTのヒーター回路を停止させ、さらに映像出力信号を遮断することでビーム電流を速やかに減少させている。

3.5 インタフェース

本機は、ワークステーションやパソコンに接続してシステム構築が簡単にできるように、入力切替えや画面調整等の各種のコントロールがRS-422/485のシリアルインタフェースで行えるようになっている。

リモコンに割り当てられている機能は、すべてこのRS-422/485を通してコントロールすることができる。通信プロトコルは、ボーレート9,600・4,800・2,400・1,200bps、キャラクタ長7・8ビット、パリティの有・無、ストップビット1・2ビットがあり、それぞれリモコンで設定できる。コントロールの方法は各機能に割り当てられたコマンド(約100種類)を送信後、ASCIIコード3けたで設定値を送信するという単純な方法で制御ができるようになっている。

4. CRT, 投写光学系

4.1 CRT

CRTは、フェース表面及び蛍光面が平面である70°偏向7インチCRTを採用した。収束方式は静電フォーカスと電磁フォーカスの両者を用いたハイブリッドフォーカス方式を採用した。このCRTでは静電レンズのフォーカ

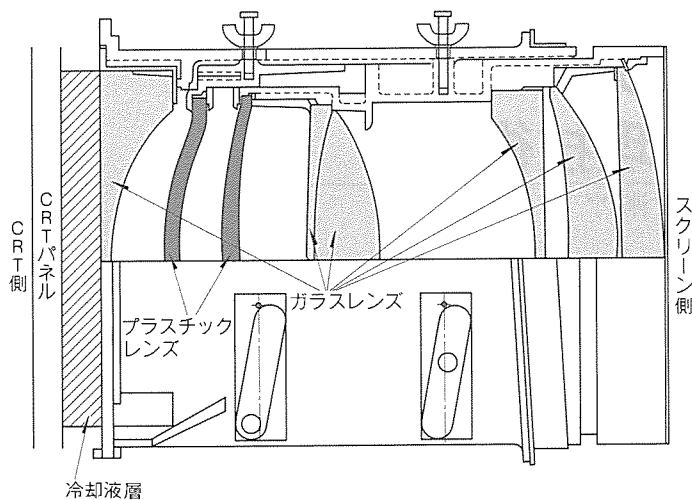


図14. 投写レンズの構成

ス電極にDC電圧（約10kV）を与えて、電磁レンズに入る電子ビームの入射角を最適になるようにし、収差低減と見掛け上のレンズ倍率を下げることで、フォーカス性能の向上を図っている。

4.2 投写レンズ

CRT蛍光面の温度上昇低減のため、投写レンズとCRTフェース面間にシリコンオイルの冷却液層を設けるオプティカルカップリング方式を採用した。

投写レンズは、大口径のガラスレンズ6枚と、非球面プラスチックレンズ2枚を用いた8枚構成のハイブリッド型レンズを採用し、高解像度化を図っている。レンズ構成を図14

に示す。なお、投写レンズ鏡筒径は155mmである。

投写レンズの仕様は、F値1.2、焦点距離152.4mmである。また、G（グリーン）の投写レンズには表面にダイクロイックコーティング処理を行い、色純度を改善し、色再現範囲の拡大を図っている。

4.3 スクリーン

スクリーンはレンチキュラーレンズとフレネルレンズを張り合わせた2枚構成であり、コントラスト改善のためにレンチキュラーレンズの表面にブラクストライプ処理を行っている。レンチキュラーレンズの水平画素ピッチは0.78mm、スクリーンゲインは5.0である。視野角は、水平80°、垂直22°を達成している。

5. む す び

以上、高精細度プロジェクター 70P-X3の概要について述べた。本機は既に監視システムやプレゼンテーションシステム用途に活用され始め、高い評価を得ている。今後、マルチメディア端末として、さらに幅広く展開を図っていくために、一層の表示性能の向上と低価格化を推進していくことが必要である。

最後に、今回の70P-X3の開発・製品化に当たり、御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する。

車載 DSP オーディオシステム (走行騒音適応信号処理技術)

田浦賢一* 早川富士男* 辻下雅啓* 渡辺雅司** 石川 淳***

1. ま え が き

車による移動が日常化するにつれ、車室の居住性・快適性向上への要求が高まっている。カーオーディオシステムについても、乗用車の静粛性向上、CD、DAT といった高品位音楽ソースの普及に伴い、より良い音質でより快適に音楽を楽しみたいという要求が強くなっている。

カーオーディオシステムの音質向上には、構成機器の性能向上はもちろんであるが、再生音場としての車室の音響的問題点の解消、走行騒音への対応が大きな課題となっている。

車室の音響的問題は具体的には、車室の狭さによる残響感の不足、車室の共鳴による周波数特性の凹凸、リスナーに対するスピーカー配置の非対称性によるステレオ効果の減少などであり、これらの解決手段として DSP (Digital Signal Processor) を用いるデジタル信号処理が利用され始めている。また、もう一つの問題である走行騒音に対しても、DSP を利用して解決を図ることが考えられている。

我々は、DSP を使用し、走行騒音のレベルに適応して音楽信号のダイナミックレンジ圧縮、低音域ブーストの処理を行うことで、自動車の走行時にも快適な音楽聴取を可能とする走行騒音適応技術を開発したので報告する。

2. 走行騒音適応

2.1 概 要

近年、乗用車の居住性・快適性向上を目指し、車室内の静粛化が進められている。これにより、停車状態では音楽再生にはほぼ十分な低騒音環境が得られている。ところが一たび走行を始めると、騒音の増加による音量の減少感、低音の不足感といった問題が生じる。

走行騒音によるこれらの問題は、音楽信号成分が近接する周波数帯域の騒音によってマスキングを受ける現象として説明できる。図1は排気量 2,000 cm³ 小型乗用車の走行騒音の例であり、車速 90 km/h 走行時と停止 (アイドリング) 時のスペクトラムを示す。騒音によるマスキングは、図において A を音楽信号 (純音) のスペクトラムとすると、A のレベル (パワー) がこれを中心とする臨界帯域幅 (図の斜線を施した部分) 内に入る騒音のレベル (パワー) よりも十分大きければこれを聴くことができ、A のレベルが騒音レベルに接近して小さくなるほど音量が低下して感じられ、A のレベルが騒音レベルより小さくなると聞き取り難くなるとい

う聴覚の特性を指すものである⁽¹⁾。音楽信号が聞き取れなくなる限界音圧レベル (最小可聴値) は、90 km/h 走行時には図中の破線の特性となる。

このようにマスキングは騒音によって音声信号の最小可聴値が上昇する現象であり、音楽信号の低レベル部分で特に問題となる。また、車の走行騒音は図示のとおり低周波域の成分が大きいためマスキングも低周波域でより顕著に現れることとなる。

これに対し、騒音レベルの増加に応じて自動的に再生音量を上げるといいう機能が従来から考えられてきた。騒音レベルと最適聴取音圧レベル・周波数特性の関係についての文献⁽²⁾⁽³⁾もある。しかしながら、ダイナミックレンジの広い音楽の再生では低レベル部分のマスキングによる音量不足を単なる増幅 (音量増加) で解決することは困難である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。つまり、低レベル部分を十分聞き取れるよう増幅すると、もともとレベルの高い部分では音量が大きくなり過ぎるのである。

このためこの開発では、

- (1) 音楽信号のダイナミックレンジ圧縮及び増幅
- (2) 低周波成分の聴感上の音量低下を補償する低音域ブースト

の二つのデジタル信号処理を行うこととした。

車室内の騒音レベルは走行の環境条件などによって変化するため、以上二つの処理効果を騒音レベルに応じて変化できるものとした。また、騒音レベル変化に伴う処理効果の変化が不自然、不十分と感じられることがないように制御方式を検討し最適化を図った。

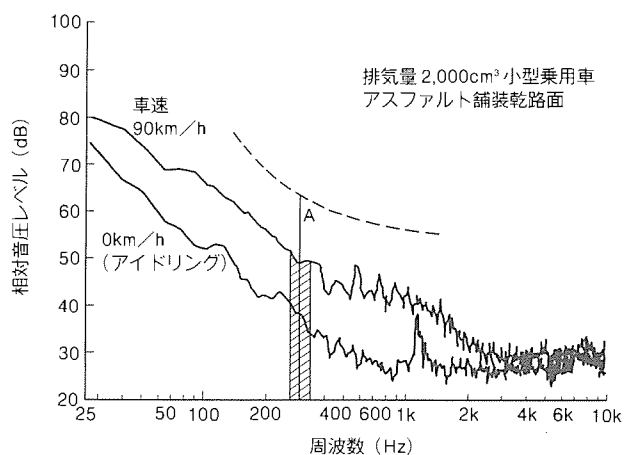


図1. 自動車車室内騒音の周波数スペクトラム例

2.2 デジタル信号処理部の構成、騒音レベル検出

図2に走行騒音適応機能部(デジタル信号処理部)を中心に描いたブロック構成を示す。

走行騒音適応は、①マイクロコンピュータによる走行騒音レベル及び再生音圧レベルの検出、②この騒音レベル、再生音圧レベルに基づくダイナミックレンジ圧縮量、利得、低音域ブースト量の決定、③これら信号処理の効果量に対応するパラメータのDSPへの送付と④DSPによるこのパラメータに従った音楽信号処理によって行われる。

表1は走行騒音適応の音楽信号処理に使用したDSPの主な仕様である。

走行騒音レベルの検出は、聴感との対応性を良くするためマイクロホンによる直接検出を主とし、車速からの推定値を補助とする組合せ方式とした。マイクロホンからの收音信号に含まれる再生音成分を騒音と誤認することのないようマイクロホンで検出の音圧レベル(車室内の騒音と再生音の合成音圧レベル)を電氣的音楽信号から推定する再生音音圧レベルと比較し、騒音の音圧レベルが再生音音圧レベルを上回るタイミングをとらえて騒音レベル検出をすることとしている。

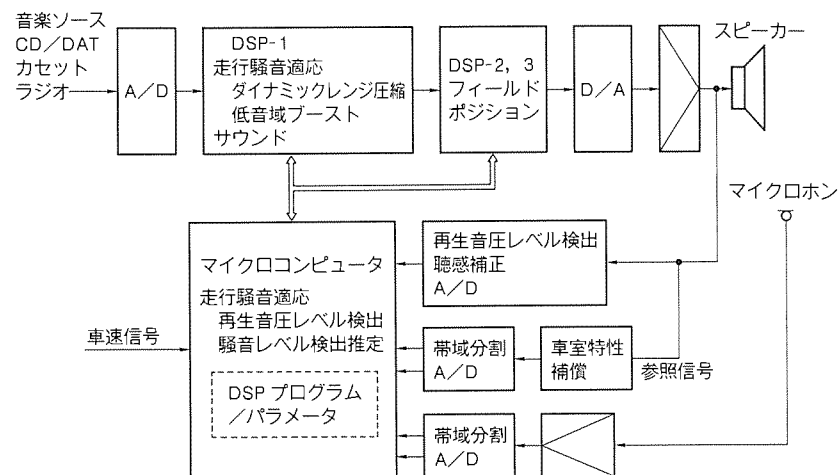


図2. 走行騒音適応機能部ブロック構成

表1. 走行騒音適応信号処理用 DSP 仕様

項 目	仕 様
命令実行時間	80ns
ALU ^{*1} 演算精度	32ビット
積和演算精度 (係数×データ)	32×24→52ビット
プログラム RAM ^{*2}	256ワード×24ビット
係数 RAM ^{*2}	256ワード×32ビット
データ RAM ^{*2}	256ワード×24ビット 32ワード×24ビット
オーディオデータ 入出力(シリアルポート)	入力: 2 出力: 2

注 *1 Arithmetic Logic Unit(算術論理演算装置)

*2 Random Access Memory(書換え可能メモリ)

また、マイクロホンによる騒音レベル検出は低音域、中音域の2帯域について行い、それぞれ低音域ブーストとダイナミックレンジ圧縮(増幅)との対応をとっている。また、マイクロホンによる検出のみでは再生音音圧レベルが大きい場合には騒音データが得られないという問題があるため、車速による騒音レベル推定値を使用している。

2.3 走行騒音適応信号処理

2.3.1 ダイナミックレンジ圧縮(増幅)

図3に今回採用のダイナミックレンジ圧縮処理入出力特性を示す。圧縮は入力レベルの0〜42dB(0dBはデジタル信号として表現可能な最大レベル)の範囲で行っており、圧縮特性は自然な聴感を得るため対数目盛り上で直線とした。入力レベル42dB以下では圧縮を止め暗騒音の上昇によるSN比の悪化を軽減している。最大圧縮比は2として過圧縮による聴感上の問題、つまり①音楽の抑揚が乏しくなる、②聞き疲れしやすい、を抑えている。これにより、−40dBの入力信号は最大20dB増幅されることとなる。小型乗用車では停止と高速走行で15〜20dB(音圧で6〜10倍)程度騒音レベルが変化するため、停止時に最小可聴値にある音声信号を高速走行時聞き取るためには、この信号を15〜20dB増幅することが必要となる。停止時の最小可聴値相当の入力レベル(L_0)が−40dB以下であれば20dBの増幅はダイナミックレンジ圧縮処理のみで実行できるが、 L_0 が−40dBより大きく、更に増幅が必要な場合には圧縮比は2のままで増幅のみの処理を別に行うこととしている。

図4にこのダイナミックレンジ圧縮の信号処理ブロック構成を示す。処理方式は入力信号のレベルを検出し、これに応じて入力信号に掛け合わせる利得係数を変化させるというフィードフォワード形式とした。利得係数を

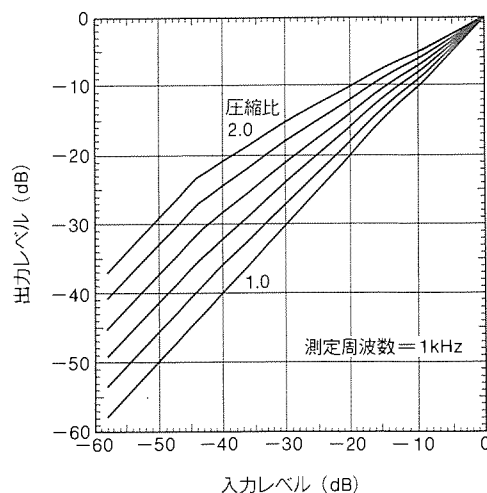


図3. ダイナミックレンジ圧縮入出力特性

掛ける際に入力信号を約0.1ms遅延させることで信号レベル検出の時間遅れを補償し、入力信号レベルの急増時に発生する聴感上有害な振幅オーバーシュートを抑えている。図5はこのダイナミックレンジ圧縮処理の入出力信号波形例である。これより、入力信号の振幅急増に対して出力がほとんど遅れることなく一定振幅となることが分かる。

2.3.2 低音域ブースト

低音域ブーストは二次 IIR (Infinite Impulse Response) 形デジタルフィルタ1段で行っている。図6にシグナルフローグラフを、図7に効果の実測結果を示す。ブースト量は中心周波数(55 Hz)にて最大12dBであり、1dB単位のブースト量設定を可能としている。

2.4 走行騒音適応制御方式

2.4.1 音楽信号処理効果の最適化

図8にこの走行騒音適応機能の車速・騒音レベルとダイナミックレンジ圧縮、音量増加、低音域ブーストからなる音楽信号処理効果の設定を示す。これは、実走行テスト及び疑似走行系を構成しての聴感テストによって最適化を図った結果である。処理効果は騒音レベルだけでなく、その時の再生音圧レベルを加味して決定している。再生音圧レベルが一定の場合、騒音レベル増加に伴うダイナミックレンジ圧縮は図中矢印(→)に沿って行すが、再生音圧レベルが増加すると矢印(⇨)のように騒音レベル対音楽信号処理効果特性を移動させることとしている。これは再生音圧レベルが低い場合に十分な効果を得るためには、騒音レベルがかなり低い領域か

ら処理効果を与える必要があり、そのままの処理効果を再生音圧レベルの高い場合に適用すると効果過多となるためである。図9にこの機能オフ時の音圧レベルをパラメータとする騒音レベル対再生音圧レベルの関係を示す。元の音圧レベルが低い場合には増幅の効果が始まる騒音レベルは小さく、元の音圧レベルが高い場合には増幅の効果が始まる騒音レベルが大きくなる。この制御を行うことでリスナーにより、設定される広い音量範囲にわたり過不足のない自然な効果を得ている。低音域ブーストもこれに準じている。

2.4.2 音楽信号処理効果の制御条件

刻々と走行条件が変化する自動車の場合、前項で設定した音楽信号処理効果も激しく変化することとなる。このため、再生音の特性が変化することによる聴感上の不自然さ(違和感)を抑えること、走行路面の凹凸などによる衝撃音に不必要に反応しないような制御を行うことが課題となる。

また、現実の効果調整動作としては連続に処理効果を変化させることは困難であるため、1段階の変化幅を適当に定めることが必要となる。1段階の変化幅は小さいほど、変化を与える時点での違和感発生は少ないが、より大きな変化幅を得るためには、この1段階変化を繰り返し与えることが必要となる。このため具体的には、DSPの動作パラメータ書換えを、より頻度高く行うこととなる。また、DSPに与える動作パラメータの数が処理効果の段階の細分化に対応して増大するなど制御を行う上での負担が大きくなる。

(1) 音楽信号処理効果の1段階変化幅

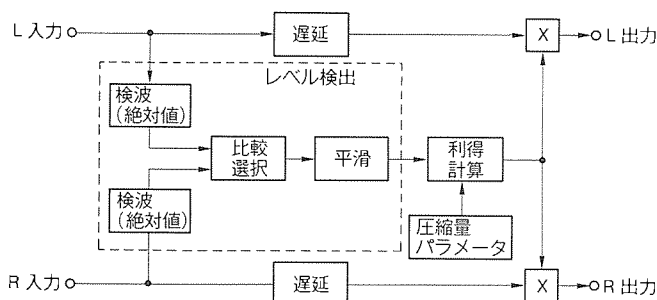


図4. ダイナミックレンジ圧縮処理ブロック構成

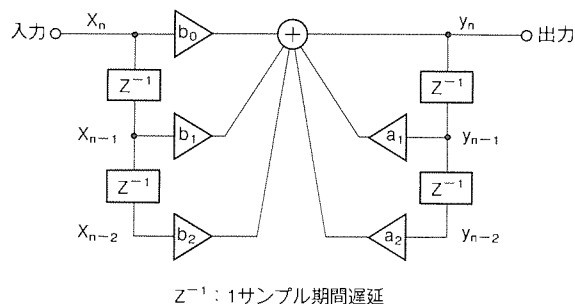


図6. 二次IIRフィルタ・シグナルフローグラフ

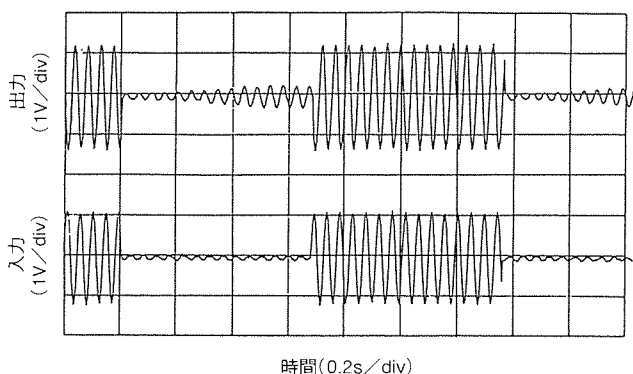


図5. ダイナミックレンジ圧縮入出力信号波形例

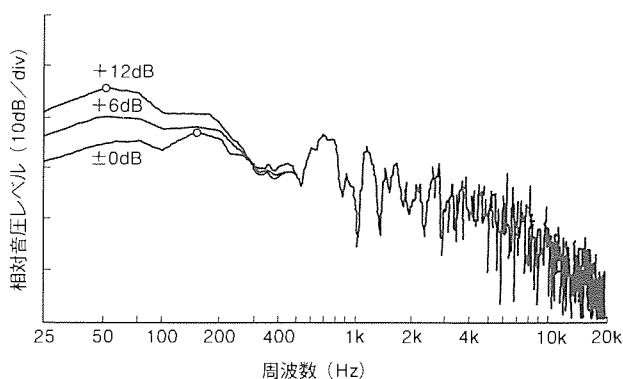
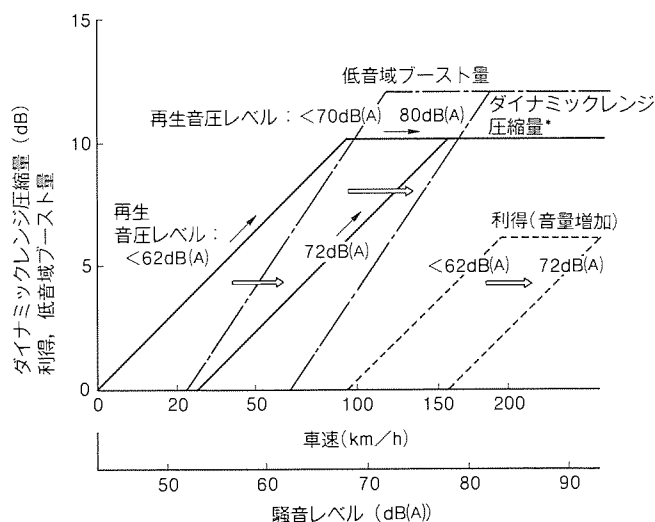


図7. 低音域ブースト処理特性測定結果



注 *この図では-20dB 入力に対する利得で表している

図8. 車速・騒音レベル対音楽信号処理効果

聴感実験により、實際上許容可能な値を検討した結果、通常の音楽再生では再生音圧レベルの1段階変化幅を1dBとすることで、その変化がほとんど検知できないことが分かった。実際には、ダイナミックレンジ圧縮処理では-20dB入力についての変化を1dBとしており、-40dB以下の入力では1段階約2dBの変化となる。低音域ブースト処理も1dBステップの制御としており、ダイナミックレンジ圧縮と同時に変化させているが、全体としてもこの変化はほとんど検知されることはなく音楽聴取の違和感とはなっていない。

(2) 音楽信号処理効果の変化速さ

音楽信号処理効果の変化速さについては、単発的な騒音への不必要な追従を抑えるため通常の運転状態で追従性に対する不満を生じない範囲で最小に抑えることとした。

通常、乗用車では停止から100km/hへの加速には10秒程度が必要である。図8のとおり100km/hでのダイナミックレンジ圧縮量(入力レベル-20dBの利得で表す。)は約10dBであり、加速(騒音レベル増加)に対して少なくとも毎秒1dBの変化が必要である。実際には騒音検出など制御動作に遅れがあること、加速時は定常走行時より騒音レベルが大きくなるなどのため余裕をとって最大毎秒2dB以下という制限を設けた。乗用車の急ブレーキ時の減速は加速に比べてかなり速いため、減速(騒音レベル減少)に対しては最大毎秒4dBの変化を許容することとした。低音域ブースト量もこれに準じた。

これにより、発進からの急加速や、高速走行からの急減速にも十分な追従性が得られた。また、走行路面凹凸やドア閉めなどによる衝撃音への不必要な反応も認められなかった。

2.5 走行騒音適応機能評価結果

図10にこの走行騒音適応機能の動作測定結果を示す。図は開発試験車にこのDSPオーディオシステムを装着し、パルス発生器から疑似的に車速データを与えて走行状態を模擬

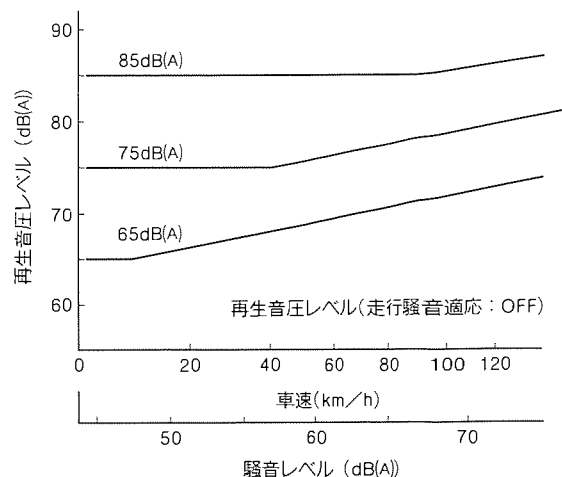


図9. 車速・騒音レベル対再生音圧レベル

し、この走行騒音適応機能のオン/オフによる再生周波数特性の変化をみたものである。車速は60km/h、音声信号はピンクノイズ(テスト用CDを使用、記録レベル:-20dB)であり、再生音圧レベルは停車時の聴取音量として平均的な値と考えられる65dB(A)と多少大きめの音圧レベル75dB(A)としている。この再生音を運転席ヘッドレストに設置したマイクロホンで収音、FFTアナライザで1/3オクターブバンド分析して周波数特性を得ている。

図中●は機能オフ、○は機能オンの場合であり、△は同じ車速での試験車の走行騒音を同様に1/3オクターブバンド分析した結果である。

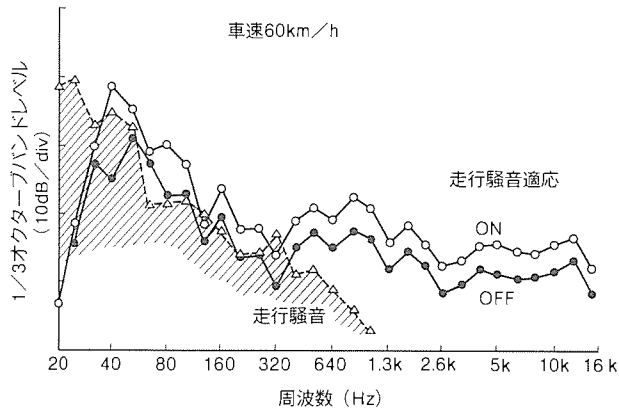
図10(a)から、音楽信号が騒音にマスクされ聞き取り難くなる条件でこの機能が有効に働いていることが分かる。また、図10(b)からはもとの再生音圧レベルが高く、騒音レベルが相対的に低い場合には音量増加などの不必要な効果が抑制される様子が分かる。

この開発品を試験車に搭載、一般道、高速道で走行試験を行い、以下の結果を得た。

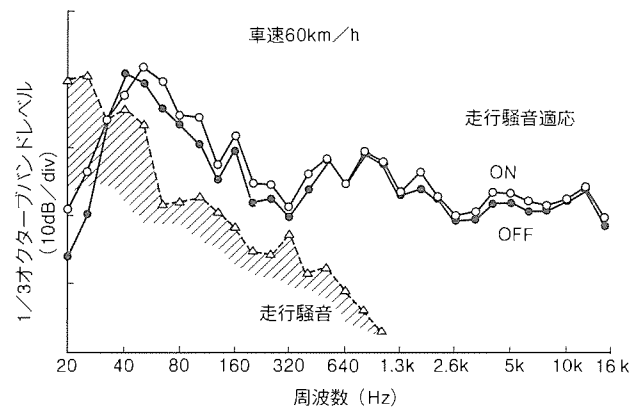
- (1) ポピュラー、クラシック音楽とも、停車時の音量設定を変更することなく高速走行時にも聴感上適度な音量を維持するという効果が確認された。また、ダイナミックレンジの圧縮量、低音ブースト量の大きい高速走行時にも聴感上の違和感がないことが確認された。
- (2) 走行条件の変化に伴うダイナミックレンジ圧縮量、低音ブースト量の増減にも、音量のふらつき、音質の不自然な変化といった聴感上の違和感は認められなかった。

3. む す び

カーオーディオシステムへのDSP応用として走行騒音適応機能の開発を行った。この走行騒音適応は、走行騒音レベル及び再生音レベルに応じて音楽信号のダイナミックレンジを適度に圧縮処理するという特長をもち、高速走行時にもクラシック音楽のようなダイナミックレンジの広い音楽



(a) 再生音圧レベル 65dB(A)(走行騒音適応：OFF)



(b) 再生音圧レベル 75dB(A)(走行騒音適応：OFF)

図10. 走行騒音適応効果測定結果

を十分に楽しむことができるという従来にない効果を得た。

参考文献

- (1) 三浦種敏 (監修)：新版「聴覚と音声」，電子情報通信学会 (1991)
- (2) Suzuki, Y., Sone, T., Kanasashi, H., Mafune, Y., Soma, J. : The Optimum Level of Music Listened to in the Presence of Noise, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), **3**, No. 2, (1982)
- (3) Suzuki, Y., Sone, T., Soma, J. : Optimum Frequency Response Characteristics for Music Reproduction in

the Presence of Noise, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), **6**, No. 3 (1985)

- (4) Kitzen, W. J. W., Kemna, J. W., Druyvesteyn, W. F., Knibbeler, C. L. C. M., Van de Voort, A. T. A. M. : Noise Dependent Sound Reproduction in a Car : Application of a Digital Audio Signal Processor, J. Audio Eng. Soc., **36**, No. 1/2 (1988)
- (5) Wagenaars, W. M., Houtsma, A. J. M., Vanlieshout, R. A. J. M. : Subjective Evaluation of Dynamic Compression in Music, J. Audio Eng. Soc., **34**, No. 1/2 (1986)

家庭用燃焼器の燃焼騒音低減

梶本照男* 佐藤 稔* 中島伸治* 村上洋二** 田村真史**

1. ま え が き

最近の家庭用機器では、その製品の本来の機能が重要視される傾向が高まっている。燃焼を利用した家庭用暖房機でも、安全性・信頼性、低公害性、快適性などが強く求められており、これら基本性能の向上が製品開発のかぎ（鍵）であるといっても過言ではない。居住空間の快適性追求には、安全で室内空気を汚さないためのクリーン燃焼や低 NO_x 、低臭気、また暖房負荷に応じて室温を一定に保つための広い燃焼可変幅、そして静音のための低騒音などが挙げられる。特に、燃焼ガスをそのまま暖房に利用する開放型の石油ファンヒーターでは、これらに対する要求が一段と強いものになっている。

当社の燃焼技術は、今までに平成2年度の燃焼幅の拡大、そして平成3年度の低 NO_x 化⁽¹⁾と、この基本性能向上を目指して研究開発を進めてきた。本稿では平成4年度石油ファンヒーターに搭載した低騒音化に焦点を当て、燃焼騒音低減技術を紹介する。

2. RTS バーナの低騒音化

2.1 RTS バーナの原理と騒音発生源

RTS (Real Time Synchronous) バーナは当社のデラックスタイプの石油ファンヒーターに搭載されており、その構造を図1に示す。燃焼用ブロアから供給される燃焼用空気の流れを圧加圧パイプを介して燃料供給装置（定油面器）に印加することにより、燃焼用空気量に比例して自律的に灯油を供給するバーナである。このバーナでは空気と燃料（灯油）の割合が常に一定であるため、良好でクリーンな燃焼が実現でき、当社が業界に先駆けて石油ファンヒーターを発表して以来、現在まで採用しているものである。さらに、このバーナでは灯油を気化する際にノズル部からの燃焼用空気噴流を利用して液体の灯油を微粒化し、気化特性の改善を図っている。

この方式のファンヒーターの騒音としては、①バーナ部の火炎から発生する燃焼騒音、②燃焼空気を供給するための燃焼用ブロア騒音、③温風を室内に送るための対流ファン騒音、が主なものである。

今回紹介する騒音低減は、このうちの①の燃焼騒音についてである。②の燃焼用ブロア騒音や③の対流ファン騒音の低減については文献(2)(3)等を参照されたい。

2.2 燃焼騒音の発生機構

燃焼騒音は火炎が乱流炎のときにはほとんど発生しないが、乱流炎になると大きくなる。その場合の燃焼騒音の発生機構は次のように考えることができる。混合気中の音波や乱れはバーナの開口部で流速変動を引き起こし、形成される火炎面に変動を生じさせる。この火炎変動に伴う燃焼量の時間的な変化が、新たに圧力変動を生じさせ燃焼騒音として伝わってくる。このようなメカニズムは未燃混合気中の音や乱れが火炎によって増幅を受けるという考え方である。

RTS バーナでは未燃混合気中の騒音は空気ノズルからの噴流音が支配的である。この噴流音はノズルからの空気流速 V と空気流量 M によって増減する。そこで、空気流量一定の条件でノズル断面積を変化させることによって流速 V の影響を、またノズル断面積と空気流量を同割合で変化させることにより、空気流速一定の条件で流量 M の影響を測定した。その結果、それらの寄与は式(1)で表されることが分かった。ノズル径一定で空気流量を増加させる場合には、流量 M と流速 V が同時に変化するため、噴流音は空気流量の4.8乗に比例することになる⁽⁴⁾。

$$\text{SPL} \sim 10 \log V^{2.4} M^{2.4} \quad (\text{SPL: 騒音レベル}) \dots (1)$$

火炎による増幅は全周波数域で生じるわけではなく、増幅

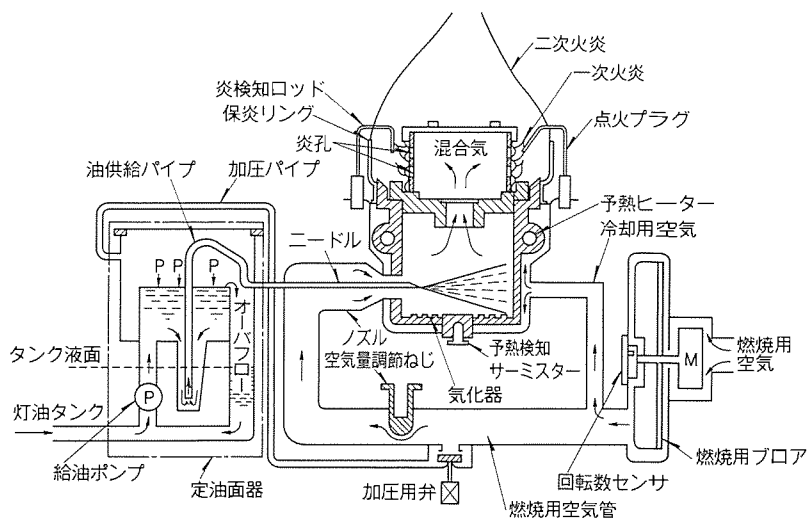


図1. RTS バーナの構造

割合は低周波域、特に 200 Hz 付近で大きい。この増幅割合に対しては筆者ら⁽⁵⁾が詳細に検討しており、混合気の流速変動に対する燃焼量変動の関係を表す伝達関数を導入することで騒音の位相変化による干渉までも説明できる。また、予混合火炎の燃焼騒音は未燃混合気の流れに乱れに伴って増加することが示されている⁽⁶⁾。

2.3 燃焼騒音の低減対策

上記の騒音発生機構を考慮した燃焼騒音の低減策としては、燃焼前の混合気の音や乱れを小さくすることが考えられる。

(1) 未燃混合気中の音の低減対策

混合気の音を小さくするには、ノズル部での空気噴流の音を小さくする必要がある。空気噴流の音は式(1)のように噴出する空気の流速及び流量とともに増大するため、この両方若しくはどちらか一方を減少させれば混合気の音は低減する。しかしながら、RTS バーナではこの空気噴流を灯油の微粒化に利用しているため、微粒化特性の面から空気流速を低下させることは困難である。また、良好な燃焼状態を維持するためには燃料流量に見合った適切な空気流量が必要であり、燃焼性能の面からも空気流量を今まで以上に減少させることは困難である。

このような問題点を解決するために、図2に示すような燃焼空気の一部をバイパスさせて二つのノズルから空気を燃焼

器に供給する構成(ツインノズル方式)を考案した。これは、ノズル部断面積と空気流量を同割合で減少させることで空気流速は従来と同じにし、減少した分の空気を別のバイパス経路で供給するものである。このような構成にすると、微粒化用ノズルの空気流速は従来と同じであるため灯油の微粒化特性は悪化せず、式(1)の特性から流量の減少した分だけ噴流の音が小さくなる。一方、バイパスノズルは断面積を大きくしてあり、バイパスさせた空気は低流速で供給されるため、騒音はほとんど発生しない。図3がツインノズル方式の燃焼騒音の周波数特性であり、従来に比べて800 Hz 付近が顕著に減少していることが分かる。

(2) 未燃混合気の乱れの低減対策

火炎での音(特に低周波域)の増幅は混合気の乱れとともに増加するため、増幅割合を小さくするには混合気を整流して乱れを小さくすればよい。流れを整流するには、まず大まかに整流した後、ある程度の間隔をあけて更に細かく整流すると効果的である。そこで、多数の細孔をもった整流板の下流側に、孔径の小さな整流板を適当な間隔をあけて設けた二重整流板(図4)を燃焼器内部に新たに設置した。設置した位置は図2中に示してある。この二重整流板の設置により、図5に示す周波数特性のように、1 kHz 以下の燃焼音が低減できる。

2.4 燃焼騒音の低減効果

ツインノズル方式と二重整流板の燃焼量に対する燃焼騒音特性を図6に示す。燃焼量に伴って燃焼騒音が増加する傾向はいずれも同じであり、騒音の低減効果は定格燃焼量(3,300 kcal/h)のときに最も大きい。定格燃焼量では、従来のRTS バーナをツインノズル方式にすることで約3 dB、さらに二重整流板を設置することで約2 dB、燃焼音の低減が達成できた。

3. CCV バーナの低騒音化

3.1 CCV バーナの原理と

騒音発生源

CCV (Clean Compact Vertical) バーナは当社のコンパクト型石油ファンヒーターに搭載されており、その構造を図7に示す。CCV バーナは高温(約300℃)の気化管内で灯油を気化させた後、ノズルの小さな穴から灯油蒸気を高流速で噴出させ、エゼクター効果によって燃焼用空気を吸引・混合して燃焼させるバーナ

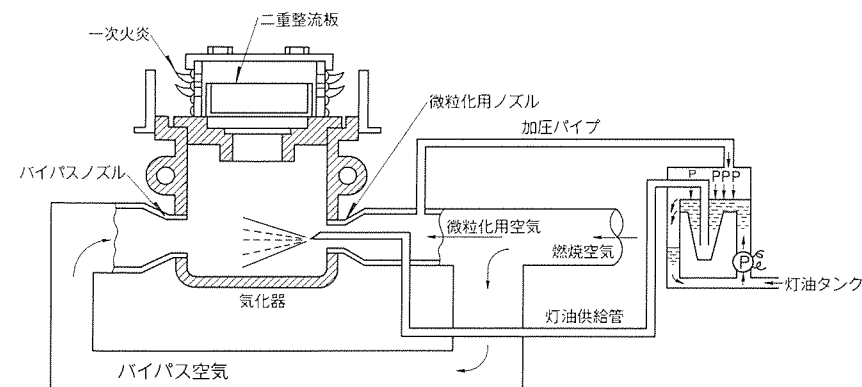


図2. ツインノズル方式の構造

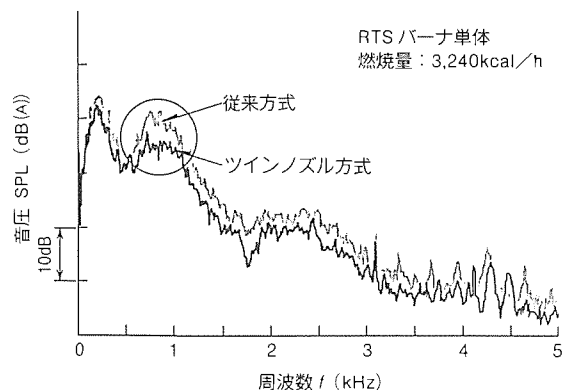


図3. ツインノズル方式の騒音周波数特性

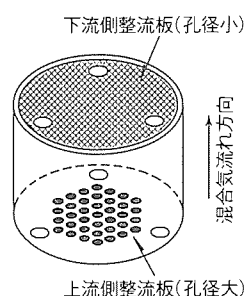


図4. 二重整流板の構造

である。このバーナは、灯油蒸気の噴流量に比例して燃焼用空気を吸引するため、燃料と空気の割合を常に一定にでき、単に給油ポンプを制御するだけで良好な燃焼状態のまま容易に燃焼量を可変できる⁽⁷⁾。それゆえ、燃焼用ブローが不要となり、燃焼部を小さくすることができる。

CCV バーナから発生する騒音にも、RTS バーナと同様に低周波領域を占める①バーナ部の火炎から発生する燃焼騒音、②温風を送るための対流ファンの騒音があるが、さらにCCV バーナに特徴的な騒音として、④エゼクター騒音がある。この騒音は気化管ノズルから灯油蒸気が噴出する

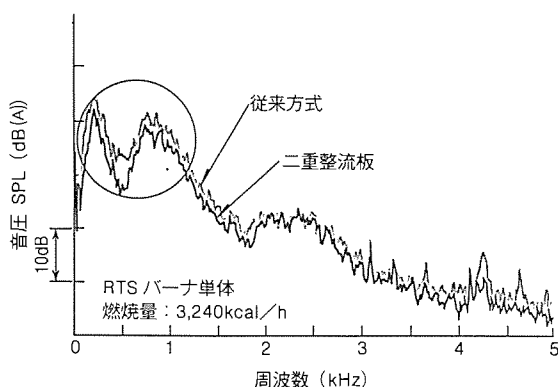


図5．二重整流板搭載時の騒音周波数特性

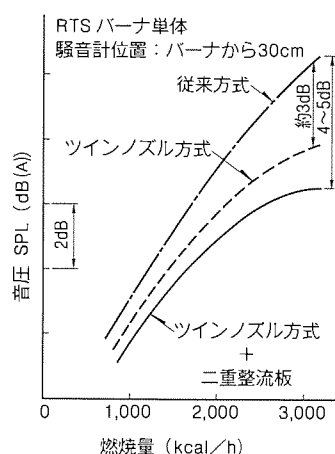


図6．RTS バーナの燃焼騒音の低減効果

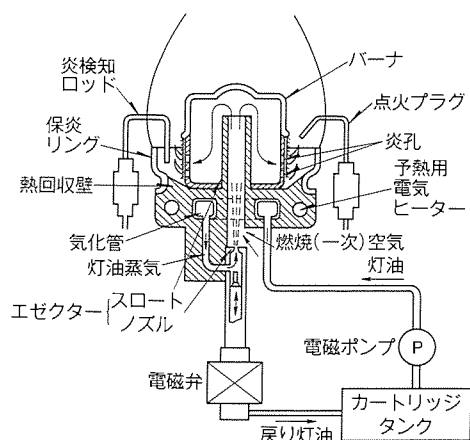


図7．CCV バーナの構造

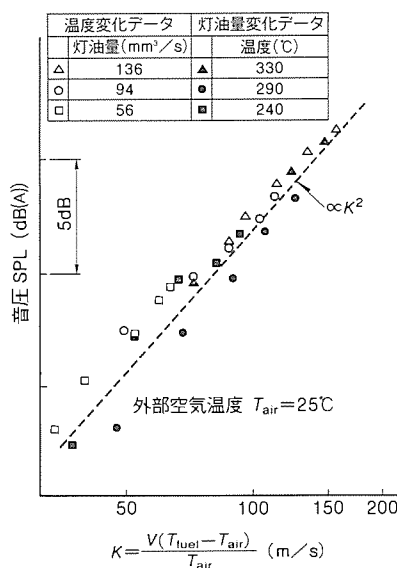


図8．エゼクター騒音の特性

際に発生する音であり、また“シュー”という高周波の耳ざわりな騒音であるので、コンパクト型石油ファンヒーターでは、この騒音の低減が従来大きな課題であった。

3.2 エゼクター騒音の発生機構

従来、このエゼクター騒音は気化管内部の圧力変動や振動によらないことが分かっている程度で、その発生機構は不明であった。この騒音を効果的に低減するためには、その発生原因を明らかにする必要がある。

エゼクター騒音の特徴を実験的に調べたところ、騒音の指向性は単極的で、灯油蒸気噴出速度 V の2乗に比例して騒音が大きくなることが分かった。また、気化管自体の温度や、ノズル周りに空気加熱用のヒーターを配置して吸引空気の温度を変えることにより、噴出灯油蒸気温度 T_{fuel} や吸引空気温度 T_{air} の騒音への依存特性を測定した。図8にそれらの測定値をプロットしてある。これらの結果と燃焼騒音の理論⁽⁸⁾を用い、灯油蒸気の比熱が空気のそれと比較して大きく、空気との混合が急速に行われることに着目して騒音発生モデル化を試みた。その結果、気化管式のエゼクター騒音は式(2)で表すことができ、また実験結果ともよく一致する(図8)ことが分かった。

$$\Delta SPL = 10 \log \left\{ \frac{V(T_{fuel} - T_{air})}{T_{air}} \right\}^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_{fuel} ：灯油蒸気の絶対温度

T_{air} ：吸引空気の絶対温度

以上のことから気化管式のエゼクター騒音の発生メカニズムとしては、次のように考えることができる。一般に、噴流と周囲気体が接する場合は、その境界で渦を伴って混合が生ずる。このCCV バーナでは、高温の灯油蒸気が低音の空気と急速に乱流混合されるとき、灯油蒸気の熱が空気に伝えられる。このとき、灯油蒸気は空気と比較して比熱が大きいために、空気の熱膨張が灯油蒸気の熱収縮よりも大きくなり、

混合渦の中で爆発に似た急激な密度変化が生ずる。その結果、乱流の渦の速度とその大きさに応じた高周波の騒音が発生する。

3.3 エゼクター騒音の低減対策

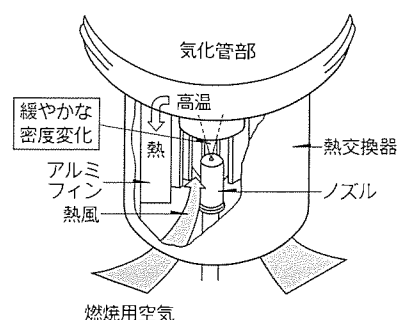


図9．熱交換フィン方式の構造

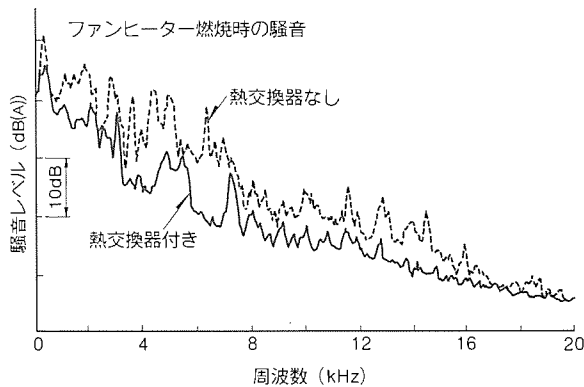


図10. CCVバーナの熱交換フィン方式騒音低減効果

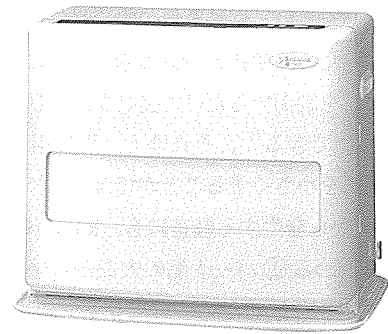
エゼクター騒音を低減するためには、式(2)からも分かるように、灯油蒸気温度を下げることで、燃焼用吸引空気温度を上げることが効果的であると予想できる。噴出灯油蒸気温度はエゼクターの空気吸引能力に大きく影響を与えるため燃焼性能を悪化させる。したがって、燃焼用空気温度を上げることによって騒音を低減した方が現実的である。そこで、図9のように高温の気化管の周りに熱交換フィンを取り付け、吸引する燃焼用空気の温度を高くする“熱交換フィン方式”を考案した。試験の結果、燃焼状態は良好なままでエゼクター騒音を約5dB低減できた。低減の効果を図10に示す。低周波から高周波にわたってエゼクター騒音が十分低減されていることが分かる。

4. 製品への適用

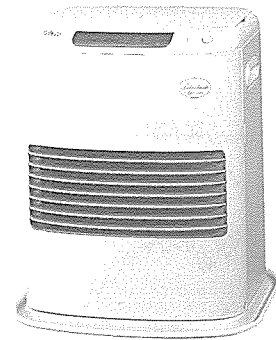
平成4年度の石油ファンヒーターには、上述した燃焼騒音低減技術のうち、二重整流板と熱交換フィン方式がそれぞれのタイプに搭載されている。実際の製品では、前述したように、①の燃焼騒音、④のエゼクター騒音以外の騒音源(②、③)があるため、それぞれの低減対策の効果は若干少なくなるが、送風ファンの改良も加えており、低騒音を実現した製品となっている。特に、最も音の大きい定格燃焼時の騒音が従来に比べて約3dB低減されており、業界トップレベルの静音石油ファンヒーターとなっている。図11(a)、(b)にデラックスタイプ(KD-337DS)とコンパクトタイプ(KD-257VE)の外観をそれぞれ示す。この低騒音化以外にも平成4年度は、セラミックヒーター採用による着火時の無放電音化、トリプルセンサによる快適性向上や温風吹出口を開閉するインテリアシャッターなど、デザイン面も含めて一層機能が充実した製品となっている。

5. む す び

当社家庭用燃焼器の燃焼騒音について基礎から研究を進め、ツインノズルや二重整流板そして吸引空気の加熱などの燃焼騒音低減技術を開発し、それらの成果を平成4年度の石油ファンヒーター製品に搭載することができた。



(a) デラックスタイプ(KD-337DS)



(b) コンパクトタイプ(KD-257VE)

図11. 平成4年度石油ファンヒーターの外観

このように機器の信頼性や性能の向上には、現象を理解し利用していくといった、基本に立脚した研究と新規アイデアの技術開発が重要である。燃焼技術において、今後ともこのような考えのもとに、安全性はもちろんのこと、更なる燃焼可変幅の拡大、低NO_x化、低騒音化、そして臭いの低減など燃焼機器の“基本性能の向上”を進めていく所存である。

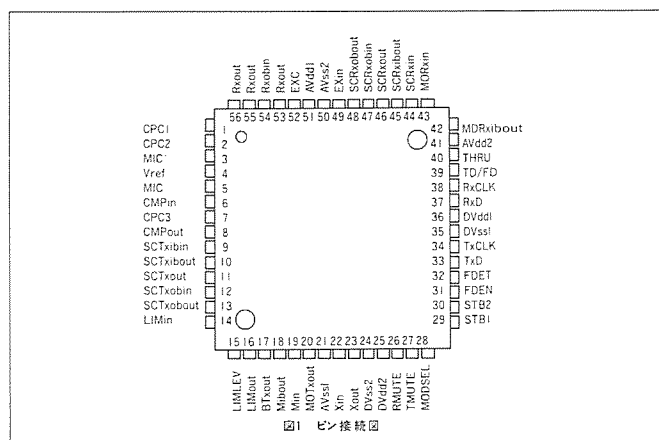
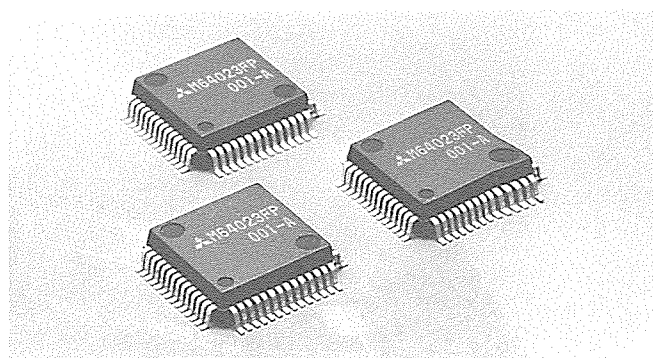
参 考 文 献

- (1) 梶本照男, 小関秀規, 佐藤 稔, 矢嶋大三, 小木曾明男 : 三菱電機技報, **65**, No. 11, 1149~1153 (1991)
- (2) 福野克哉, 塚原英行 : 三菱電機技報, **65**, No. 4, 361~365 (1991)
- (3) 田中英晴, 大蔭勝久, 辻内伸好 : 三菱電機技報, **62**, No. 4, 326~329 (1988)
- (4) 佐藤 稔, 梶本照男 : 第30回燃焼シンポジウム前刷集, (1992)
- (5) Sugimoto, T., Matsui, Y. : 19th Symp. (Int.) on Combustion, 245~250 (1982)
- (6) 高本慶二, 小竹 進 : 日本機械学会論文集(B編), **48**, No. 434, 2096~2109 (1982)
- (7) 梶本照男 : 第27回燃焼シンポジウム前刷集, 341~343 (1989)
- (8) 小竹 進 : 高圧ガス, **16**, No. 10, 499~505 (1979)
- (9) 中島伸治, 村上洋二, 大蔭勝久, 梶本照男 : 第12回流体騒音シンポジウム講演予稿集, (1992-12)

手軽に持ち運びができ、部屋のどこからでも通話が可能なコードレス電話が急速に普及しています。コードレス電話では、親機—子機間において、音声及びデータを電波により送信するため、音声信号処理機能、モデム信号処理機能が必要となります。また、電波を伝送媒体とするため、故意または偶然にかかわらず盗聴される可能性があるため、秘話機能も必要となります。従来、このようなコードレス電話のベースバンド信号処理機能は個別ICを用いて構成されていました。当社では、このほど、CMOSデジタル・アナログ混在技術を用いて、コードレス電話用ワンチップベースバンドIC、M64023FPを開発、製品化いたしました。

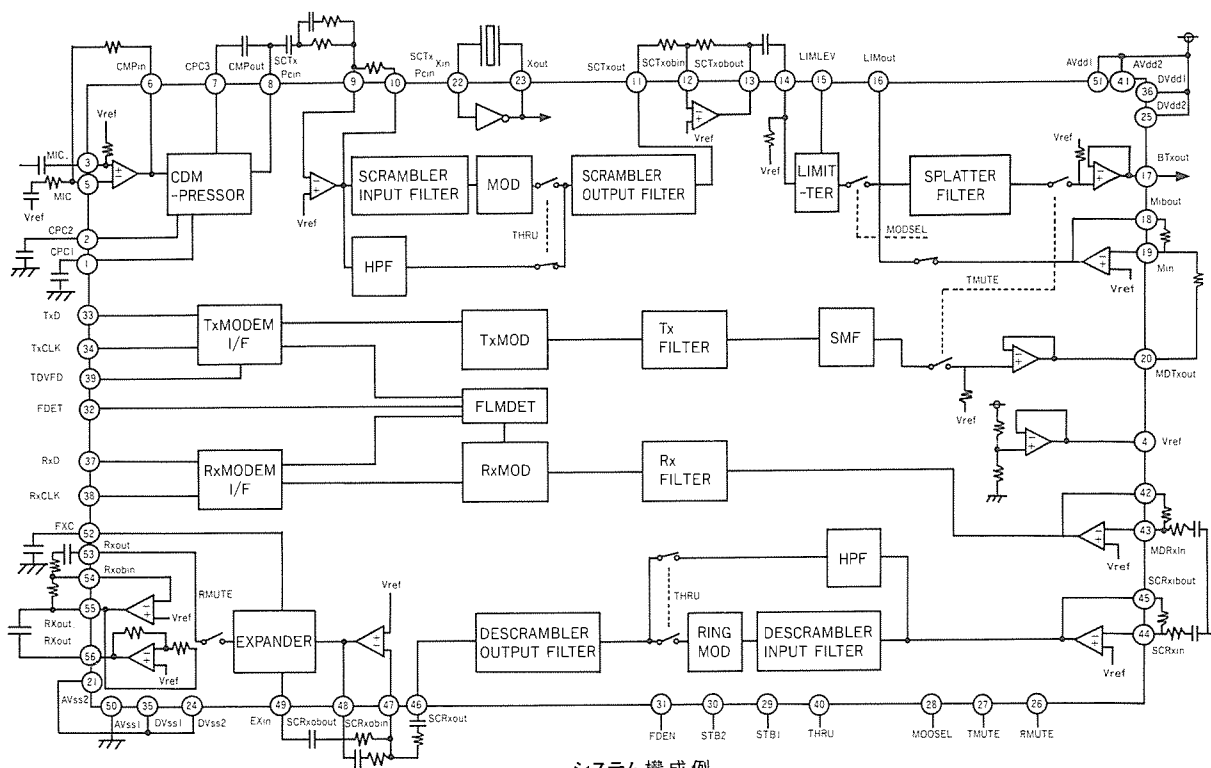
特長

- コードレス電話用ベースバンド処理機能を内蔵
 - (1)音声信号処理系
マイクアンプ、コンプレッサ、スクランブラ、リミッタ、スプラッタ、ディスクランブラ、エキスパンダ、セラミックレーバアンプを内蔵
 - (2)モデム信号処理系
2400bpsMSK変復調器、入出力フィルタ、プリセッタブルフレームディテクタを内蔵
- 各ブロック間のレベル設定が可能
- スタンバイモード制御が可能
 - (1)全機能待機モード
 - (2)モデム受信動作モード
 - (3)モデム送受信動作モード
- 送受信独立ミュート機能
- 発振回路内蔵
- 小型パッケージ

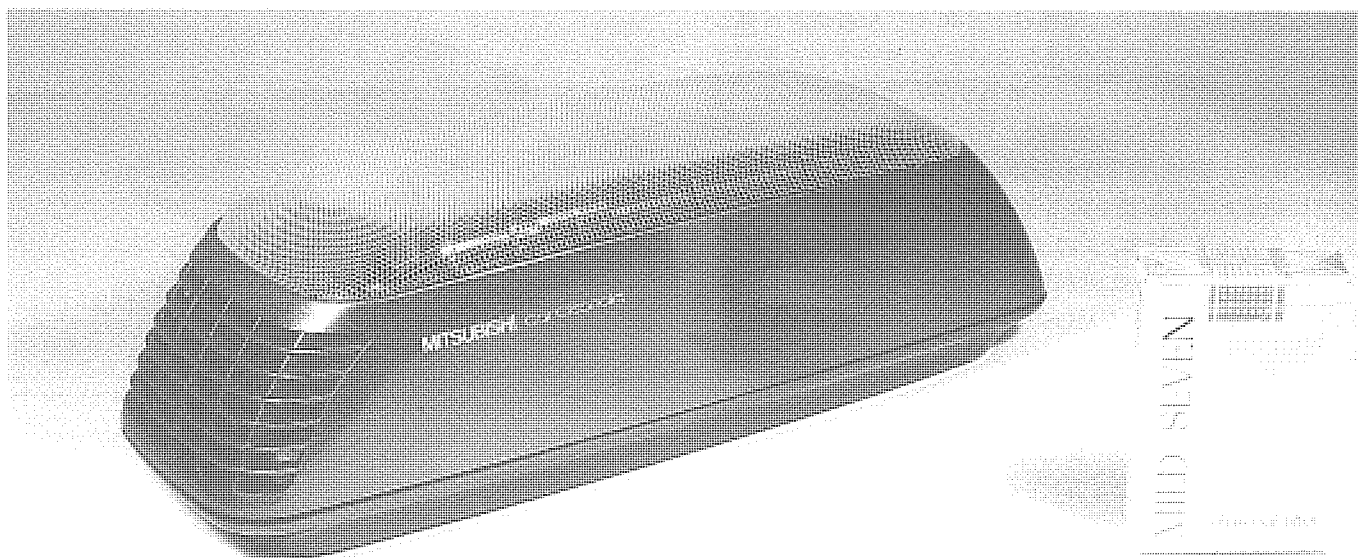


用途

- コードレス電話
- 特定小電力トランシーバ



スポットライト 新据置型自動車用空気清浄器



自動車用空気清浄器市場はここ数年 2 桁台の伸長率を示しています。今年度は、前年度比110%、110万台の需要が見込まれており、今後も着実な伸びが期待されています。近年、自動車の安全対策の一つとして、リヤシエルフ中央上にハイマウントストップランプを標準装備する車両が増加してきたことにより、当社従来品を更にコンパクトにした小型奥短タイプのニーズが高まってきました。また、快適志向により香りへの関心が強くなってきています。この様な市場の要求に対応するため、三菱電機では、空気清浄器としての基本機能(集塵、脱臭、静粛性、長寿命)を重視した上で車室内の快適性を演出する香り発生機能を付加した小型奥短タイプの空気清浄器を発売し好評を博しています。

特長

●香り発生機能内蔵

本体に付属されているフレグランス(香り)カプセルを本体内にセットしておくとしスイッチON時 約15秒間電磁弁の作動によりカプセルの口を開き香りを発生させます。3種類の純植物性・高級

芳香剤の入ったカプセルが付属されており、好みの香りをセットすることが出来ます。

●煙・臭いセンサによる自動運転方式

煙センサにより煙や有害ガスの量に応じて、自動的にHI/LO運転します。スイッチON時 約2分間“HI”で運転したのち、通常は“LO”で運転し、空気の汚れを煙センサが検知すると“LO”から“HI”に切り替えて約2分間運転します。

●コンパクトサイズ(当社比50%)でレイアウトフリータイプ

縦置き、横置き可能な構造によりダッシュボード、センタアームレスト等にも取付けが可能のため、多くの車種に取付けできます。

●フィルター交換不要の電気集塵極板式の採用

メンテナンスは極板を洗浄するだけで、フィルター交換の維持費が不要です。

●オゾン脱臭+活性炭触媒で強力脱臭

吸着性能とオゾン分解能に優れたハニカム状活性炭の採用により、脱臭性能を従来の5倍(当社比)に強化しました。また、一般ユーザー使用の場合で約2年間交換不要の長寿命タイプです。

●静かで長寿命のブラシレスファンを採用

ファンとモーターが一体化された軸流ブラシレスファンの採用により静粛性と長寿命化を図りました(当社比-5dB)。

仕様

使 用 電 源	DC 12V/バッテリー(⊖アース車)
消 費 電 力	HI : 9W、LO : 7W
集 塵 方 式	電気集塵(極板方式)
脱 臭 方 式	オゾン脱臭+活性炭脱臭
付 加 機 能	煙センサによる強弱自動切替え 香り発生機能
外 形 寸 法	(幅)298×(奥行)104×(高さ)93(mm)
重 量	1kg



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
特許営業グループ Tel(03)3218-2137

オゾン発生装置 (特許 第1274884号)

発明者 田中正明, 上野隆則, 田畑則一

この発明は、印加された交流高電圧による無声放電によってオゾンを発生させるオゾンナイザで、特に接地電極と高電圧電極との間の放電間隙を極力狭くしてオゾン発生効率を高めたオゾン発生装置に関するものである。

オゾン発生効率を高めるには一般に放電間隙を小さくすればよいが、図1に示す従来のオゾン発生装置では、接地金属管(2)と高電圧電極管(4)の寸法精度を高精度に仕上げる必要があり装置が高価になるという欠点があった。

この発明に係るオゾン発生装置は、図2に示すように接地金属管(2)と高電圧電極管(4)に挟まれた円筒状の放電間隙(3)の間に放電電極全面を覆うように金網から成る多孔金属筒(14)を挿入し、この多孔金属筒(14)の内外周面に多数の突子(14a)を形成するとともに、この突子(14a)を接地金属管(2)及び高電圧電極管(4)に係合させて放電間隙を極小に保つものである。なお、多孔金属筒(14)の多数の孔は原料空気を通過拡散させる作用を有する。

以上のように、この発明によれば、多孔金属筒(14)を使用することによって極めて狭い放電間隙を形成することができ

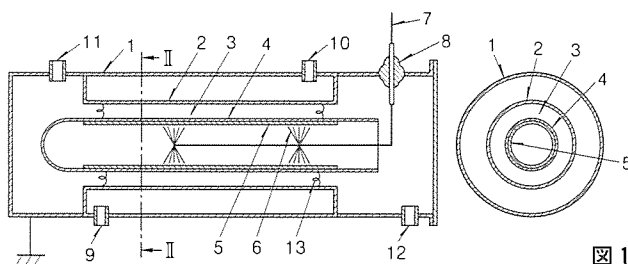


図1

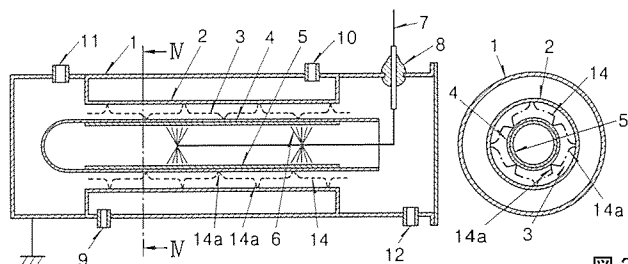


図2

超音波探触子 (実用新案登録 第1918861号)

考案者 田中洋次, 大力健市

鋼管の超音波探傷試験において被検材中の屈折角の温度による変化を少なくすることが重要となる。ところが、水等の接触媒体と鉄等の被検材との温度と音速の関係が逆の特性であるため、温度により屈折角は変化する。

この考案はこの欠点を改善するためのもので、図に示すように、超音波探触子(1)の振動子(2)と接触媒体(3)の間に楔(5)を設けることにより、楔(5)から接触媒体(3)への放射角 β 、被検材(4)への接触媒体(3)中の入射角 θ_1 及び被検材(4)中の屈折角 θ_2 は次式で表される。

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{V_2}{V_1} \times \sin \theta_6 \right) \quad (1)$$

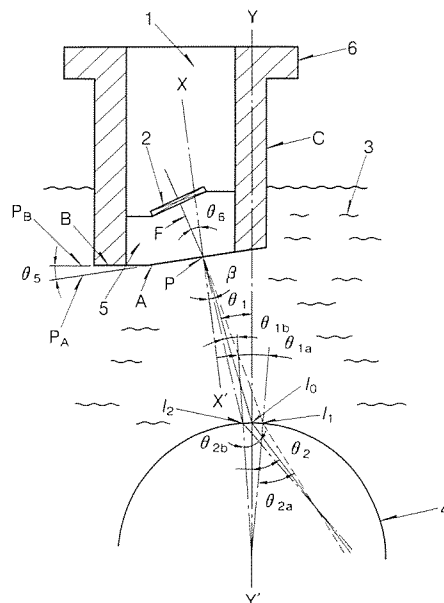
$$\theta_1 = \beta + \theta_5 \quad (2)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{V_3}{V_2} \times \sin \theta_1 \right) \quad (3)$$

ここで、 V_1 : 楔の音速、 V_2 : 接触媒体の音速、 V_3 : 被検材の音速、 θ_5 : 楔のA面の角度、 θ_6 : 楔中の入射角度

式(1)~(3)から明らかなように、周囲温度が高くなると V_2 が大 $\rightarrow \theta_1$ が大となるが、 θ_5 の値を $4^\circ \sim 10^\circ$ の範囲内に設

定することにより θ_2 の変化は少なくなり、温度変化による屈折角のばらつきが少ない超音波探触子を提供できる。





特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
特許営業グループ Tel (03) 3218-2137

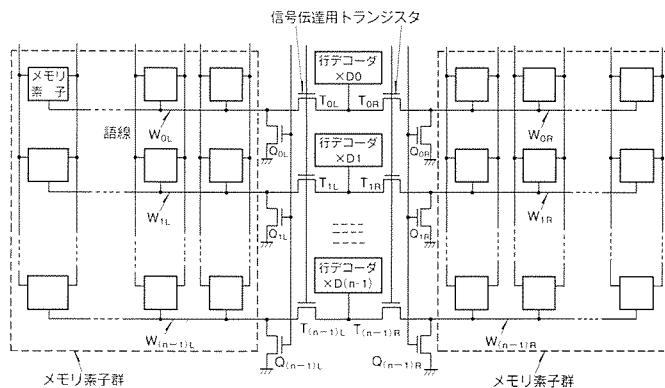
半導体記憶装置 (特許 第1652991号)

本発明は主として金属-絶縁膜-半導体トランジスタを用いた記憶装置の駆動方法に関するもので、“左右ブロック別語線駆動技術”と呼ばれ、高速・低消費電力の半導体記憶装置を実現するものである。

図に示すように、行デコーダの左右にメモリ素子群を配置し、メモリ素子群の各語線と行デコーダとの間にそれぞれ信号伝達用トランジスタを挿入し、左右の信号伝達用トランジスタに列選択用アドレス信号に基づいた互いに反転関係にある信号を印加し、選択されるメモリ素子群に接続された語線のみを導通状態にある信号伝達用トランジスタを介して活性化する。

このため、行デコーダに接続される負荷容量が片側のメモリ素子群の浮遊容量だけになるので、従回路に比較し約2

倍の速度で語線を駆動でき、またメモリ素子に流れる電流を半分にすることができる。



〈次号予定〉三菱電機技報 Vol. 67 No. 3 特集 “システム VLSI”

特集論文

- 半導体新時代
- システムオンチップ時代における VLSI の展望
- 0.5μm CMOS ゲートアレー
- 0.8μm CMOS エンベデッドセルアレー
- 画像圧縮 LSI 用高速 DCT コア
- セルベース設計用データバスジェネレータ
- キャッシュメモリを含んだメインメモリ用 4M ビットキャッシュ DRAM
- 2M ビットデュアルポート DRAM
- 高密度 SRAM 内蔵 ASIC
- ビジネスコンピュータ用 32 ビット CPU プロセッサ
- ATM スイッチ用 LSI
- 広帯域 ISDN 対応 Bi CMOS LSI

- 移動体通信用音声コーデック LSI
- 自動車用 LAN コントローラトランシーバ IC
- クローズドキャプションコントロール用マイコン
- プロトコル制御用マイコン
- 高速高密度 TSOP メモリモジュールシリーズ
- ミックスメモリカード
- ISDN インタフェースボード

普通論文

- 5.0V/3.3V 版第二世代 16M ビット DRAM
- ブロック消去可能な高速 4M ビットフラッシュメモリ
- 4M ビット バイトワイド/ワードワイド DRAM
- バッテリ駆動型システム用 3.3V 版 —
- 高放熱プラスチック QFP に封止した 32 ビットマイクロプロセッサ
- アナログ機能を強化した 16 ビットワンチップマイクロコンピュータ

三菱電機技報編集委員

委員長 山田 郁夫
委員 永田 譲蔵
〃 白井 健三
〃 谷 豊文
〃 風呂 功
〃 太原 啓治
〃 松村 恒男
〃 鈴木 幹雄
〃 小野 修一
〃 鳥取 浩
〃 岡田 久雄
幹事 長崎 忠一
2 月号特集担当 中山 繁樹

三菱電機技報 67 巻 2 号

(無断転載を禁ず) 1993 年 2 月 22 日 印刷
1993 年 2 月 25 日 発行

編集兼発行人 長崎 忠一
印刷所 千葉県市川市塩浜三丁目 12 番地 (〒272-01)
菱電印刷株式会社
発行所 東京都港区新橋六丁目 4 番地 9 号
北海ビル新橋 (〒105)
三菱電機エンジニアリング株式会社内
「三菱電機技報社」Tel. (03) 3437 局 2692
発売元 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 (〒101)
株式会社 オーム社
Tel. (03) 3233 局 0641 (代), 振替口座東京 6-20018
定価 1 部 721 円 (本体 700 円) 送料別
年間予約は送料共 9,373 円 (本体 9,100 円)

近年、高度情報社会の進展に伴い、電力の供給信頼度の向上、高品質化の要請が高まっています。また、膨大な設備に関する保守業務の効率化・省力化が要求されています。これらの要求に対して、今回、関西電力(株)新生駒変電所に変圧状態監視用診断処理装置を納入しました。

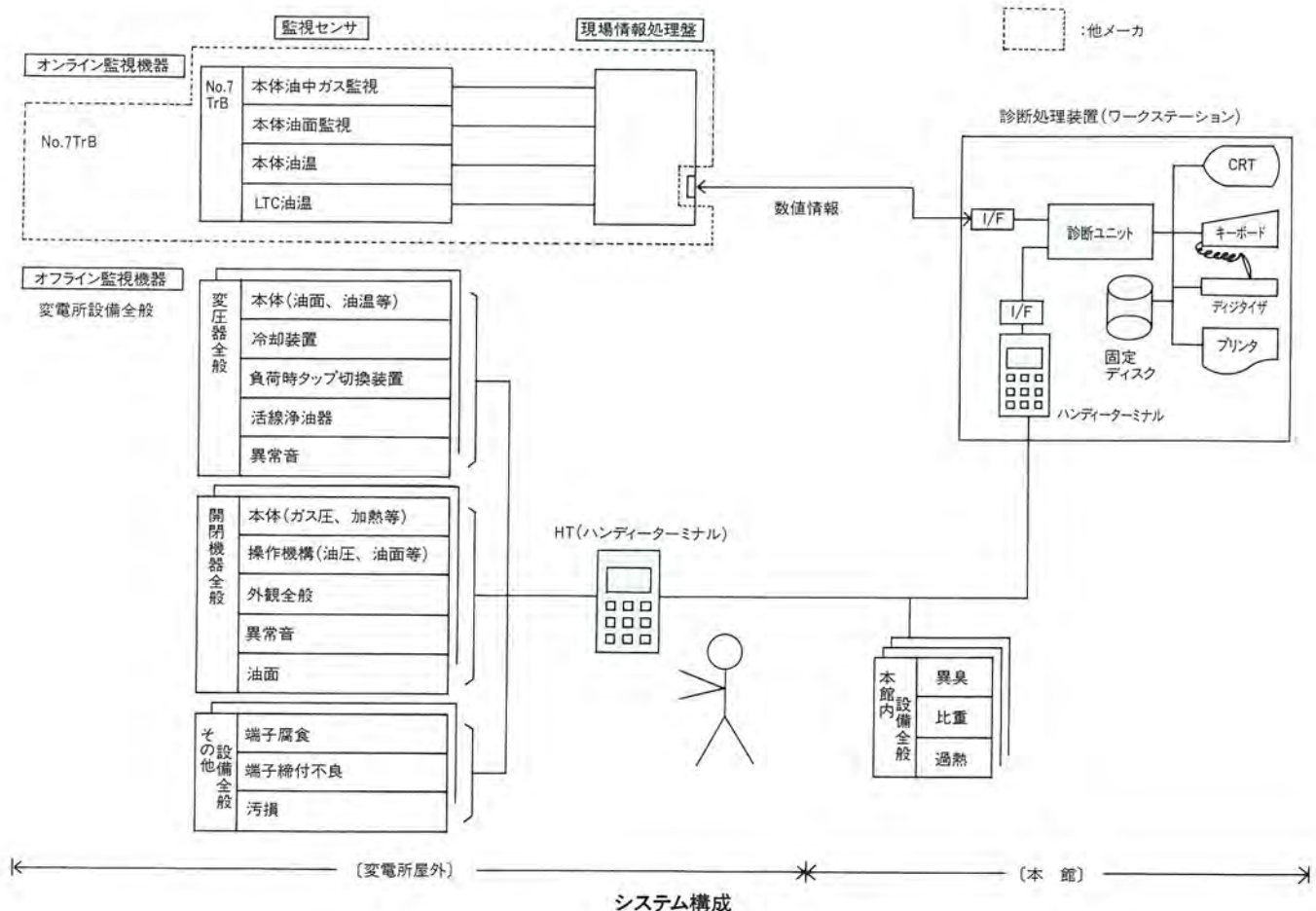
概要

- 変圧器に取り付けられた各種監視センサからのオンラインデータを随時取り込み、異常データ受信時には異常検出メッセージとして「監視項目・判定結果」を即時に表示し、運転員に注意を喚起して重大事故への拡大を未然防止します。また、取込んだデータについては短期間（最新データから過去48時間以内の全データ）・長期間（過去13か月以内のデータ）のトレンド表示（グラフ・数値表を一画面内に同時表示）ができ、三相データの比較や異常判定根拠の表示機能も備えています。これらにより異常発生時の機器異常状況の把握と運転員の処置判断を支援することができます。
- 日常の保守業務の内、普通巡視点検・細密巡視点検については従来の帳票による巡視点検から、ハンディターミナルを用いる巡視点検としました。この結果、データの良否判定（正常、異常、誤入力）・温度換算等がその場で実施できるようになり、巡視点検の効率化が図れました。さらに巡視点検終了後は、ハンディターミナル内のデータを診断処理装置に入力し、データ



管理（トレンド表示・データ保存等）を行うとともに、巡視点検結果表が自動出票されるようになったことで保守業務の省力化が図られています。

- ワークステーションの操作をデータ入力（日本語・数値）とメニュー選択操作に分類し、データ入力のみにキーボードを用い、メニュー選択操作にはデジタイザを適用しました。この結果、日常操作頻度の高いメニュー選択操作については、従来の「メニュー確認→キーボード数値入力→確認→実行」という操作から、「メニュー選択→実行」というキーボードを使用しない簡単な操作となり、操作性を格段に向上させました。



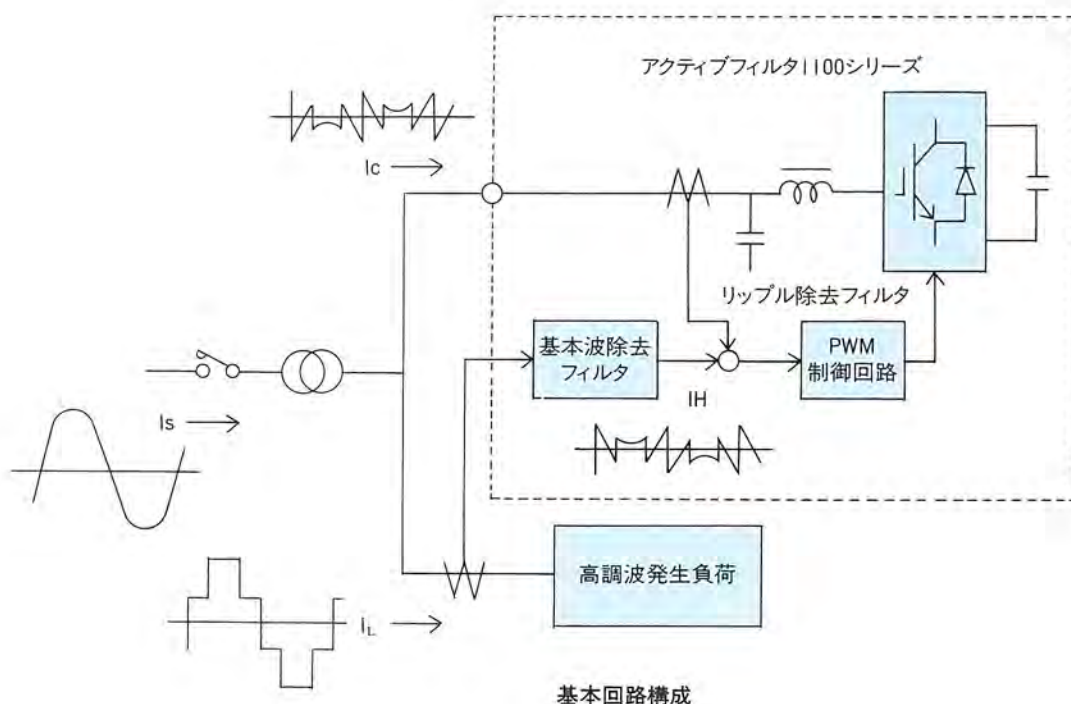
高度情報化社会を迎え、ビル電源システムのインテリジェント化が求められていますが、VVVFエレベーターや空調用インバータ等の半導体応用機器の普及により高調波電流が流出し、これに起因する電圧波形ひずみが問題となっています。三菱電機は高調波対策機器として、大容量のIGBT素子を採用したアクティブフィルタの新シリーズMELACT-1100（単機容量50～200kVA）を製品化しました。高周波PWM方式の採用により、2～25次の高調波電流の補償を可能とし、電源波形の高品質化を実現しています。

システム構成

アクティブフィルタは三相電圧形インバータで構成されています。負荷電流に含まれる高調波電流の瞬時値を検出してインバータの各素子を高速にスイッチングさせて高周波PWM制御を行い、アクティブフィルタに流れる電流を高調波電流と逆位相の電流とすることにより電源側への高調波の流出を抑制しています。

特長

- 従来のL、C、Rの共振回路を用いたパッシブフィルタのように同調周波数が固定されていないので、アクティブフィルタ1台で2～25次までの広帯域の高調波補償動作が可能です。
- パッシブフィルタ適用時には必要であった電源及び負荷条件に対する並列共振現象に対する複雑な検討が不要です。
- 高調波補償と同時に無効電力も補償しますので電源側の力率を改善し、電気料金の低減に寄与します。
- モータ起動などの負荷変動時に発生する電圧変動を補償し、電源電圧を安定化します。
- システムに応じて並列運転を行うことにより容易に容量の増加が可能です。
- 高周波PWM制御の採用により、小型・低騒音化を実現しました。



三菱UNIXワークステーション スポットライト "ME RISCシリーズ"



発表以来、77.5SPECmarks89という驚異的な業界最高性能でEWSの世界をひらいた「ME RISCシリーズ」が、更に画期的進歩を遂げました。新たにラインアップされた5モデルは最新の「スーパー スカラー アーキテクチャ」を採用。シングルプロセッサながら45.9～146.8SPECmarks89と、業界にも例のない性能レンジを実現しています。

特長

●ワイドレンジをカバーする性能

“ME RISCシリーズ”は、CPUにHewlett-Packard社が開発した第三世代RISC「PA-RISC7100」を採用し、最先端のCMOSテクノロジーにより開発しました。エン트리モデルで45.9

SPECmarks89、41MIPS、8.9MFLOPS、ハイエンドモデルで146.8SPECmarks89、128MIPS、40.8MFLOPSという高性能に加え、グラフィクス性能においては、124万×11ベクトル/秒、120万アンチエイリアス ベクトル/秒をもち、あらゆる分野をカバーする性能レンジを実現しています。

●標準プラットフォーム

ME RISCシリーズ基本OS「HP-UX」はSVID、IEEE POSIX 1003.1、1003.2、XPG3等の国際規格に準し、Xウィンドウ(X11 R5)、GUIはOSF/Motif1.2、デスクトップ環境にHP VUE3.0を標準装備。使いやすい操作環境を提供します。

●豊富なネットワーク

IEEE802.3/Ethernet、TCP/IPプロトコル、ARPA/BSDサービス、NFS、NCSなどをサポート。さらにFDDI、TokenRing、X.25、SNA、ISDNなどもサポートします。これらにより多彩なネットワークの構築が容易に実現できます。

アプリケーション

●EOSMASTARSシリーズ（設計情報管理システム）

CADシステムと文書システムが連動し、図面/文書を一括統合管理することにより、設計技術部門業務の効率化を図れます。

●FASTPLAN（設備資産管理システム）

図面データと台帳データを一元的に管理することにより、設備計画、設計・保守業務等の効率化を図れます。

●MELCAD MD+（二次元機械系CADシステム）

図面管理システムやデスクトップ環境による操作性、機能性をパワーアップした新「MELCAD MD+」を提供します。

※UNIXオペレーティングシステムは、UNIXシステムボタラズ社がライセンスしています。

機種構成

モ デ ル			ワークステーションモデル				
			エントリーモデル ME R7150-33	高性能 エントリーモデル ME R7150-50	高性能 デスクトップモデル ME R7250-50	超高性能 デスクトップモデル ME R7350 (注3)	超高性能 デスクサイドモデル ME R7550 (注3)
プロセッサ周辺	CPU (ブロック)		PA-RISC 7100 (33MHz)	PA-RISC 7100 (50MHz)		PA-RISC 7100 (99MHz)	
	CPU性能	SPECmark89	45.9	69.0		146.8	
		MIPS	41	62		124	
		MFLOPS (倍精度)	8.9	13.2		40.8	
	主 記 憶 容 量		16～192MB	16～256MB	32～256MB	32～400MB	64～768MB
グラフィックス			Grayscale Color CRX-24、-24Z、	Grayscale Color CRX-24、-24Z、-48Z		CRX CRX-24、-24Z、-48Z DualCRX	
大容量記憶装置	内蔵ディスク容量		525MB～2GB		1～2GB		2～4GB
	最大ディスク容量		69.7GB	69.7GB	239.8GB	126.4GB	295.5GB
	1.4MB 3.5" FDD		内 蔵				
	2GB DDS DAT又は 4-8GB DDS-DC DAT		内蔵/外付		外付		内蔵/外付 (内蔵DDS-DS：標準)
	600MB CD-ROM		内蔵/外付		外付		内蔵/外付
I/O	標準I/O		Ethernet SCSI-II (Single Ended)、セントロニクス、 RS-232C、HP-HIL、Audio I/O			Ethernet、SCSI-II (Single Ended)、セントロニクス、 RS-232C、HP-HIL、Audio I/O	
			—			SCSI-II (Fast Wide)、FDDI x1 (オプション)	
	EISAスロット		1 (オプション) (注1)	1 (注1)	4 (注1)	1	4
	EISA接続 インタフェースオプション		IEEE802.3Ethernet (増設)、SCSI-II (増設；Single Ended, Fast Differential)、HP-IB、FDDI、X.25、 SNA、ISDN、IEEE802.5TokenRing				
VMEバスアダプター		—			1 (オプション) (注2)		—

(注1) グラフィックオプション (CRX24/CRX24Z/CRX48Z) 使用時、EISAスロット数は“記載数-1”となります。

(注2) VMEバスアダプタ使用時、EISAスロット数は“0”となります。

(注3) 7350、7550にはサーバモデル(ME/S7350、ME/S7550)も用意しています。