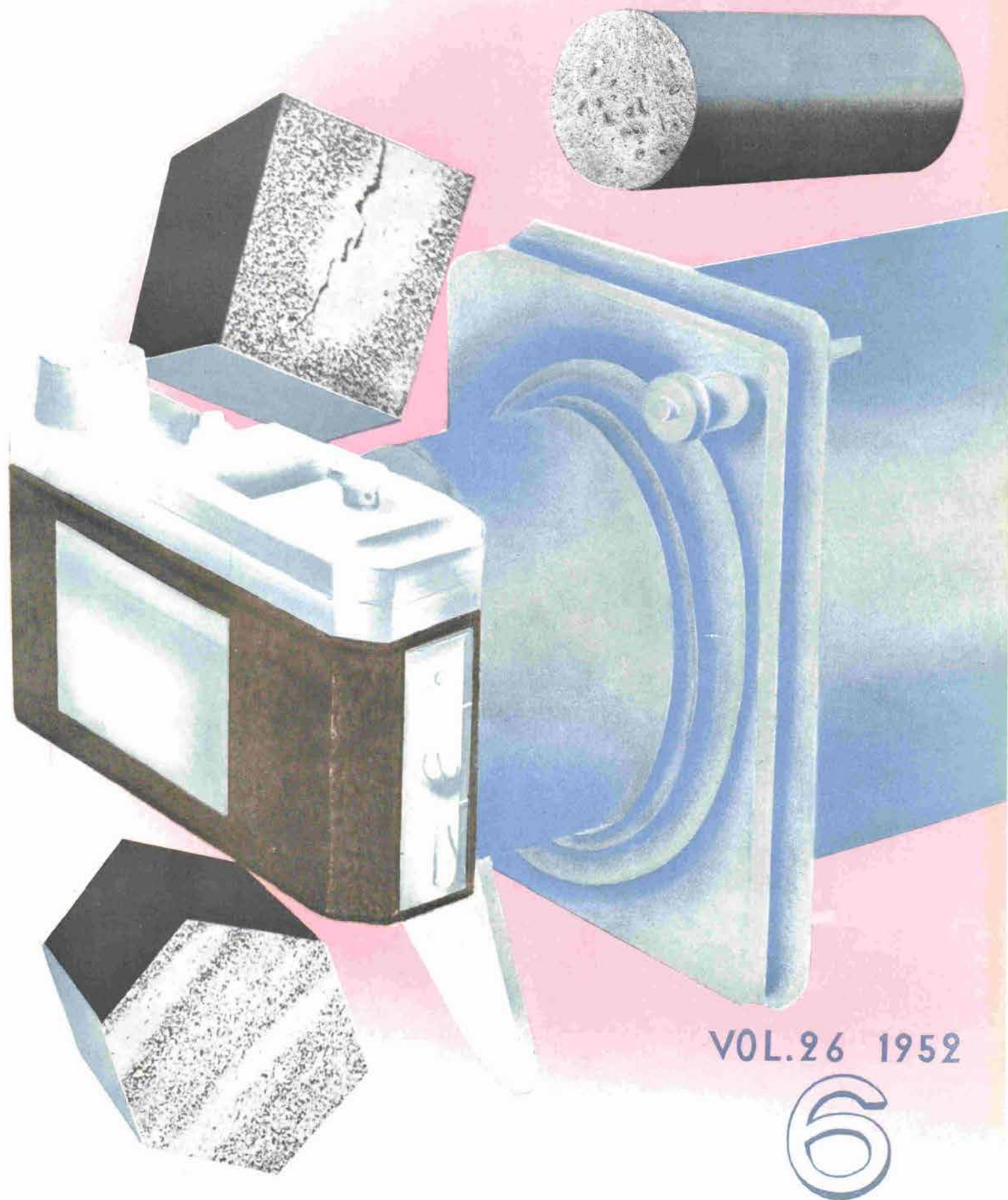


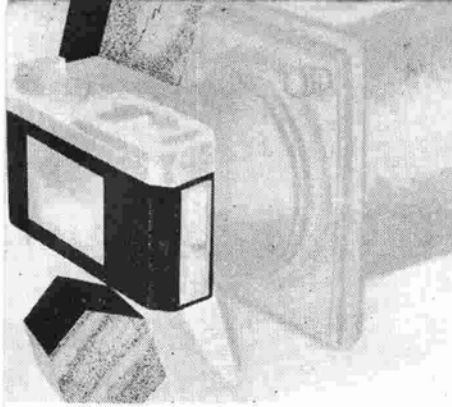
MITSUBISHI DENKI

三菱電機



VOL.26 1952

6



三菱電機

表紙説明

FD-4型超音波探傷器は衝撃高周波超音波を利用し金属材料中の欠陥、たとえば鉄板のラミネーション・鉄鋼中のゴースト割れ・白点・あるいは疲労疵等をごく簡便に側ることができる装置であります。表紙はブラウン管上の指示波により測定中の「キヤノン」カメラと試料の顕微鏡写真をデザインしたものです

三菱電機株式会社

本社

東京都千代田区丸の内(東京ビル)
(電) 和田倉 (20) 代表1631・2331

研究所 兵庫県尼ヶ崎市南清水
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町
名古屋製作所 名古屋市東区矢田町
伊丹製作所 兵庫県尼ヶ崎市南清水
長崎製作所 長崎市平戸小屋町
大船工場 神奈川県鎌倉市大船
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町
郡山工場 福島県郡山市字境橋町
福山工場 福山市沖野上町
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町
和歌山工場 和歌山市岡町
中津川工場 岐阜県恵那郡中津町
福岡工場 福岡市今宿青木
札幌修理工場 札幌市北二条東12
大阪営業所 大阪市北区堂島北町8番地1
(電) 福島 (45) 5251-9

名古屋営業所 名古屋市中区広小路通
(電) 本局 (23) 6231-5

福岡営業所 福岡市天神町(三菱ビル)
(電) 西 (2) 5821-5825

札幌営業所 札幌市南一条西5の14
(電) (2) 3378・3911

仙台事務所 仙台市東一番丁63
(電) 仙台 2573・8057

富山事務所 富山市安住町23の2
(電) 富山 4692・5273

広島事務所 広島市袋町1(明治生命ビル)
(電) 中 1069・4824

昭和27年 第26巻 第6号

目次

超音波探傷器による材料内部欠陥の調査……………緒方・有馬… 2

三菱FD型超音波探傷器……………尾島・近藤…11

細長い円錐型点弧子内部の電位分布と電流密度計算……………菅野・岡田…17

アルミカヒータの絶縁物……………田村…24

「三菱電機」編集委員会

委員長	岸 本 久 雄	荒 井 潔	安 藤 三 二	石 橋 英 樹
委員	浅 井 徳 次	岡 屋 精	川 田 勝 利	小 林 治 一
	洩 市 吉 惟 浩	岡 澄 谷 進	田 宮 利 彦	松 田 新 治
	進 藤 貞 和	前 田 幸 夫	松 尾 米 太 郎	松 岡
	每 熊 秀 雄	森 前 二	薄 井 廉 介	
幹 事	吾 郷 侃	木 村 久 男	(以上 50 音順)	

昭和27年7月15日印刷

昭和27年7月20日発行

【禁無断転載】

定価1部金60円

編集兼発行人

印刷所

印刷者

発行所

東京都千代田区丸の内2丁目3番地

東京都港区麻布竹谷町1番地

東京都港区麻布竹谷町1番地

三菱電機株式会社内

電話 和田倉 (20) 1631

吾 郷 侃 二

博文堂印刷所

大橋 佑 吉

「三菱電機」編集部

日本出版協会会員番號 213013

超音波探傷器による材料内部欠陥の調査

新三菱重工業株式会社神戸造船所

緒方幸藏・有馬春男

Interior Flaw-Detection of Metals by Super-Sonic Flaw Detector

By Kozo OGATA, Haruo ARIMA

Mitsubishi Heavy-Industries Reorganised, L.T.D.

Kobe Shipyard & Engine Works.

In the production of machineries, it is a very important fact to find out interior flaws of metal before machining or during the manufacturing process.

Needless to say, this greatly causes reduction of manufacturing cost and gives superior reliability for products. Super-sonic flaw detector can be said the most suitable apparatus for this purpose.

We are now extensively using this detector a product of Mitsubishi Electric & Manufacturing Co. who were the pioneers to manufacture and supply the detector in Japan. We have successfully applied this detector in our manufacturing process with great success.

Now in this paper, we will give report on the results.

1. ま え が き

金属材料内部欠陥を材料を加工する前、あるいはその工程中に、または成品を破壊することなく発見しこれを適当に処理することは作業の工程および製品の歩止りから見て、また製品の信頼度を増す意味からも非常に望ましいことである。このためにはX線のごとき放射線を利用して透視する方法があるが、試験される品物の大きさの制限を受け、また装置そのものも重く、取扱いも簡単ではなく、人体に対する影響も考慮せねばならない。

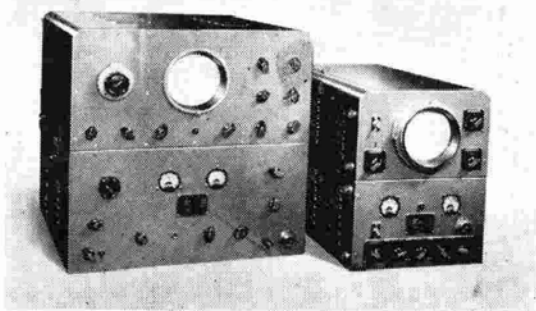
超音波による方法はかなり古くから試みられたものであるが実験的範囲を出ず実用に供せられなかつたが、最近電子管技術の発達に伴い超音波探傷法は急激に性能を向上し、外国では第二次大戦中、すでに実用化された状

況である。幸いわが国においても三菱電機研究所の不屈の努力により、戦後、限られたる資材の合理的な活用により外国製超音波探傷器に比し、何等遜色ない超音波探傷器をわが国においていち早く完成されたことを深く感謝し、ここに昭和24年末頃より現在に至るまでの当所において実際に探傷器を現場において使用した実例を述べ参考に供する次第である。

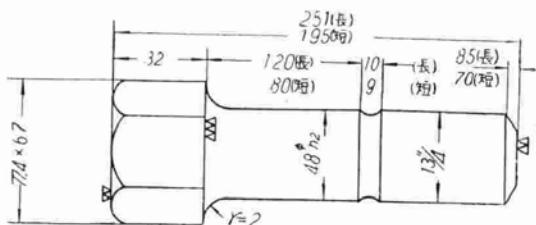
現在当所で使用の探傷器は1図に示すFD101型、FD103型の二つである。

2. 船用タービン翼車締付ボルトのキズの調査

一般に締付ボルトはその形状よりして首の所にキズが入り易いので超音波探傷器を利用してそのギズの有無を調査した。



1 図 三菱電機製超音波探傷器
FD 101 型 (左方) FD 103 型 (右方)
Fig. 1. Super-sonic Flaw Detector made by Mitsudishi
Electric & Manufacturing Co.
Type "FD-101" Type "FD-103"
(Left) (Right)



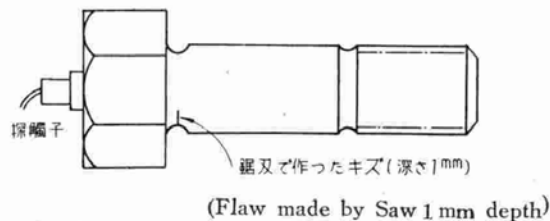
2 図 ボルトの形状
Fig. 2. Dimensions of a Bolt.

ボルトの形状を 2 図に示す。ボルト材料は $Ni-Cr-Mo$ 鋼である。

すでに締付けてあるボルトの首部のキズの有無を調査するには、これを抜いて行えば最も確実であるが、この場合ボルトが焼きついたりまた調査後再び締付けるには技術上の困難が伴うので、締付けたままで調査ができれば経済的にも時間的にも大いに利するところが大である。ボルトを締付けたまま超音波探傷器を利用して調査した例をつぎに示す。取付状態からして探傷器の探傷子はボルトの頭部に接触させて軸方向に調査したもので、使用周波数は 5 Mc である。

(a) 実際に調査する前に締付ボルトの首部に 3 図に示すごとく、故意に鋸刃にて深さ 1 mm のキズを入れ探傷機で試験してみた。4 図にその調査状況を示し、5 図にその探傷波形写真を示す。6 図はキズの無い部分の探傷波形 7 図はボルト頭部の多重反射波形を示す。

(b) なお実際のキズに近いキズを作るため前記のごとく首部にキズ (深さ 6 mm) を造りボルトの軸方向に鍛造した。このキズを確認するため 3 mm 程度切削したのでキズの残りの深さは 3 mm 程度になつていゝと考えられる。8 図にそのキズ部に対する探傷波形 9 図にそのキズの無い部分の探傷波形を示す。(8 図、9 図とも案内ピンの直径は 18 mm の場合である)

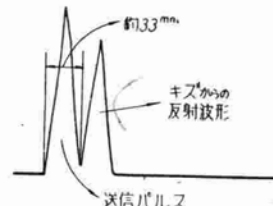
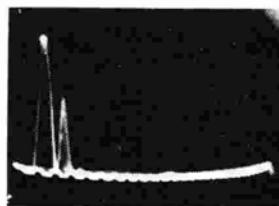


3 図
Fig. 3. Dimensions of a Bolt.

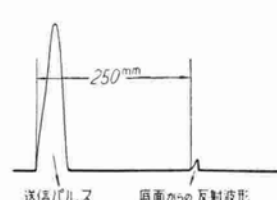


4 図 探傷状況

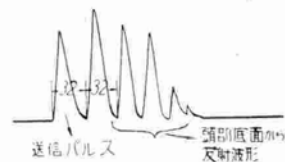
Fig. 4. Handling of
Detector Probe.



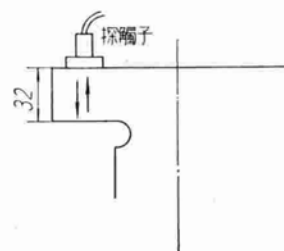
5 図 キズ部に対する探傷波形
Fig. 5. Wave form for a Flaw part.

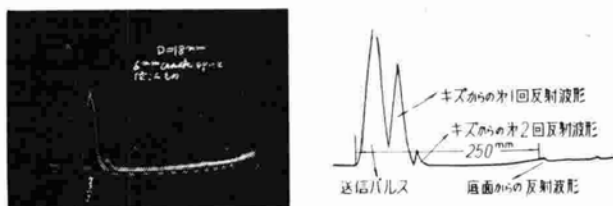


6 図 ギズの無い部分に対する探傷波形
Fig. 6. Wave form for a non-Flaw part.

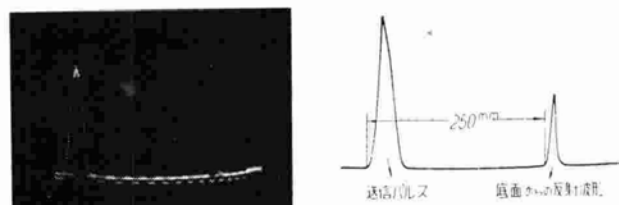


7 図 ボルト頭部の
探傷波形 (多重反射)
Fig. 7. Multi refraction
wave form for a
bolt head.





8 図 ギズ部に対する探傷波形
Fig. 8. Wave form for a Flaw part.



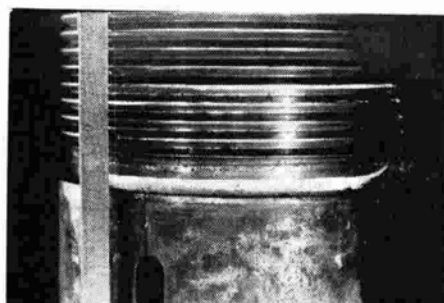
9 図 ギズのない部分に対する探傷波形
Fig. 9. Wave form for a non-Flaw part.



10 図 探傷波形
Fig.10 Example of a wave form.



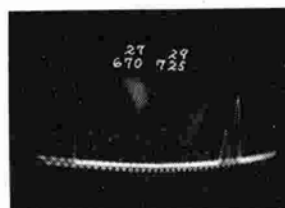
11 図 探傷波形
Fig.11. Example of a wave form.



12 図 ピストンロッド磁検キズ状況
Fig.12. Mognaflux inspection for a piston rod.

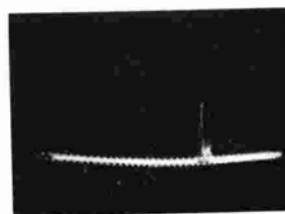


13 図 ピストンロッド探傷状況
Fig.13. Super-sonic inspection for a piston rod.



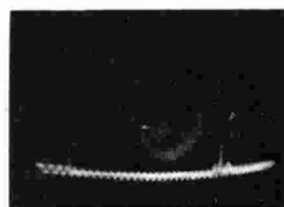
14 図 キズからの反射波形が油出口孔のそれより低い場合

Fig.14. Refraction wave form where it is smaller than that of the cooling oil hole.



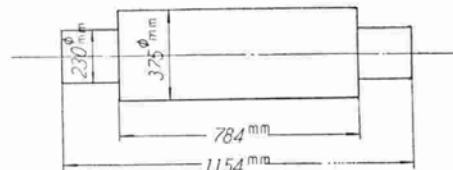
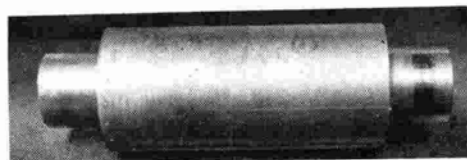
15 図 キズからの反射波形が油出口孔のそれより高い場合

Fig.15. Refraction wave form where it is larger than that of the cooling oil hole.

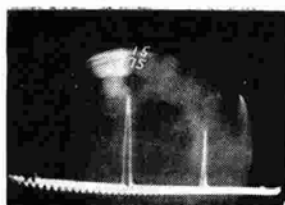


16 図 ギズからの反射波形2箇所ある場合

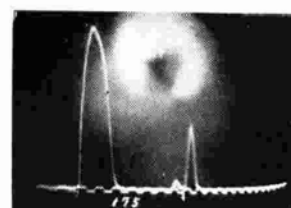
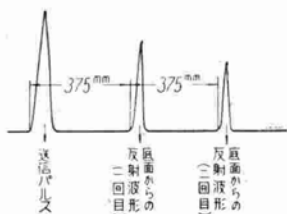
Fig.16. Refraction wave form from two flaws.



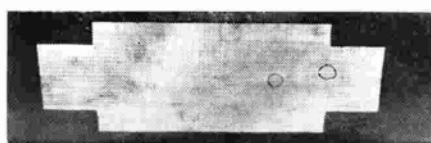
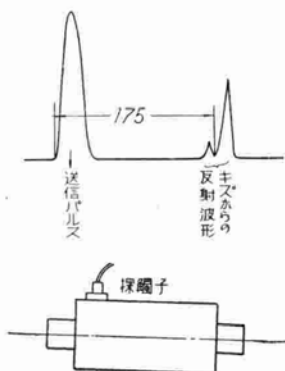
17 図 クロスヘッドピン荒削状況
Fig.17. Surface condition of a cross head pin & its dimensions.



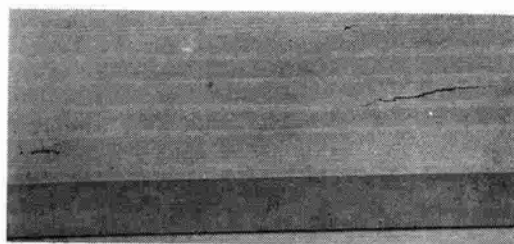
18 図 ギズのない場合の探傷波形
Fig.18. Wave form for a non flaw part.



19 図 ギズからの反射
波形がある場合
Fig.19. Wave form for
a flaw part.



20 図 縦断面 ギズ 状況
Fig.20. Detected flaw developed by cross section.



21 図 ギズの拡大状況
Fig.21. Magnified flaw.

(c) つぎに実際のボルトを翼車に締付けたまま、ギズの有無を調査したが、前記の故意にギズを作ったボルトで時々探傷器をチェックしながら施行した。10 図、11 図にその実例探傷波形写真を示す。

10 図、11 図に明らかなごとく、ギズの反射波形は現われていない。かくして 48 本を同様にして調査したが、ギズのあるものは 1 本も発見されなかった。実際に船内機関室にてタービン、ケーシングを開放しただけで開放の時間も入れて、わずか 40 時間で 96 本のボルトの調査を完了することができた。

3. 船用主機のピストンロッドのギズ調査

ある船舶の主機のピストンロッド 16 本を磁気検査した所、ギズのあるもの 14 本を発見した。12 図にその一例を示す。

磁気探傷では表面に存在するギズは発見されるけれども、このギズの内部における拡がり状態はよくわからない。そこで超音波探傷器でこれを調査した。使用周波数は 3 Mc でロッドの下端部に探触子を当てて調査した。その探傷状況を 13 図に示す。

その超音波探傷波形を 14 図、15 図、16 図に示す。14 図はギズからの反射波形が油出口孔からの反射波形より低い場合を示す。15 図はギズからの反射波形が油出口孔からの反射波形よりも高い場合で、14 図の場合のギズの大きさより大きいことを示す。(その探傷の位置では) 16 図はギズからの反射波形が二カ所でその一つは油出口孔からの反射波形より高い。

かくして磁気探傷により表面に在るギズの位置は発見され、超音波探傷器によりそのギズの深さを知り得たのでギズの深さ 5 mm 以上のピストンロッドは廃却とし、5 mm 以下のものはこれを削除して使用することとした。ギズの深さはギズの存在する谷底を切削することにより超音波探傷器により決定した深さと全く一致することを確認した。

以上のごとく超音波探傷器を使用することによりギズの深さが判り、その成品を廃却するかどうかを判断するのに最も有効なデータを与えられた。従来は材料の表面に現われているギズの状態のみで品物の使用あるいは廃却の如何を判断していたのに比べて格段の進歩を遂げたことになる。

3. 新三菱重工スルザ SD 72 型機関用クロスヘッドピンのギズ調査

頭記クロスヘッドピンを切削中ギズを発見した。材質は炭素含有量 C0.5~0.6 程度にして切削中 2 個もギズが発見されたので荒削後超音波探傷を行い、ギズの存在する場所如何ではギズの削除できるように加工するなど自後大いに工程を利用する所があつた。使用周波数は 3 Mcである。

クロスヘッドピン荒削後の形状を 17 図に示す。

(a) ピンを半径方向に探傷した場合、内部に欠陥のない場合の探傷波形を 18 図に示す。探傷波形の距離目盛はピンの直径が 375 mm なることを示しているがこれは実際の寸法に一致している。

(b) 内部ギズの発見

半径方向に探傷した場合、中には 19 図に示すごとく探傷波形が現われた。探触子を滑らして調査するとギズからの反射波形は多少位置は変るが連続して現われるので相当大きなギズが内部に存在することが考えられ、19 図は表面からギズまでの深さは 175 mm 位の所に存在することを示している。

これを縦断して見ると 20 図のごとくキズが存在し（切削しすぎてキズが連続していないように見えるが）その位置も計測どおりであつた。

20 図の円の中にキズが存在し、左のキズは（写真に現われている大きい割れが中心より外側に少し分れ発達していることを示す）19 図の反射波形に対応するものであり実測によるも 175 mm にして反射波形の位置とよく一致している。キズ付近の拡大写真を 21 図に示す。

(c) 内部ゴースト部分に存在するキズの発見
他のクロスヘッドピンを調査した所 22 図に示せるごとき反射波形を得た。

すなわち表面から深さ 50 mm 位の所に、小反射があり 100 mm の所に大なる反射波形がある。よつて品物を横断して見た。その断面状況を 23 図に示す。写真中チョークで囲んだなかにキズが存在し大体それらを含んで円形にゴーストゾーンが現われている。

24 図に示すごとく探触子を当てたのであるが表面から深さ 50 mm の所よりゴースト部分となり、それより約 50 mm 内部にやや大きなキズが存在したから 22 図に示すごとく表面から 100 mm の深さの所に高い反射波形があつたことが証明された。

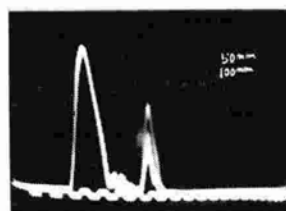
また表面から 50 mm 付近からの低い反射波形はゴースト部分の小さなキズを示すことも証明される。なおそれらキズの部分の顕微鏡組織を 25 図に示す。（スンプ法による。×100）

4. 船用中型機関クランクシャフトのキズ調査

船用中型機関用（One forging）のクランクシャフトを機械加工中、時々ゴーストが現われクラックを伴うことがある。とくにクラックのある場合は場所如何では廃却となり非常な損失を生ずることがある。これをなくすためには鍛造荒削後超音波探傷を行い、材料キズと機械加工仕上り面との関連性を知ることである。26 図にその機械加工中荒削後における調査状況を示す。27 図にその機械加工完成時における調査状況を示す。

(a) ブローホール（鋼塊の湯口側における）の発見
クランクシャフトの最前部ジャーナルフィレット部を荒削中鋼塊のブローホールが鍛造後なお残つてキズとなつたものが現われたので、その付近を探傷した。28 図にフィレット部を半径方向に探傷した場合の波形、29 図にフィレット部からウェブを軸方向に探傷した場合の波形を示す。30 図にフィレット部を半径方向に探傷したとき内部に欠陥のない場合の波形で参考までに示す。

ブローホールのごとく音波の進む方向に対して直角性の少ないものは 28 図に示す波形のごとく反射波形の先端が、なだらかで不安定である。



22 図 ゴースト部クラック探傷波形

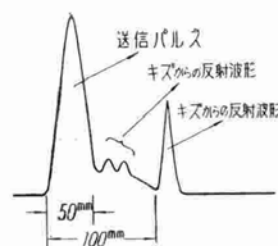
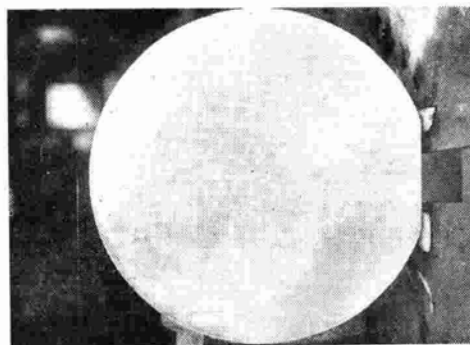


Fig.22. Wave form given by a crack in ghost zone.



23 図 ゴースト部横断面状況

Fig.23. Traverse section of the ghost zone.



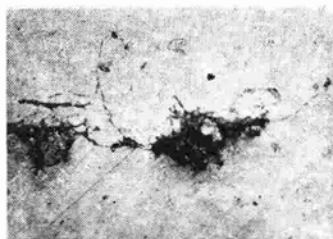
24 図 ゴースト部拡大図

Fig.24. Explanation of Fig.23.

(b) 白点（Ni-Cr-Mo 鋼）の発見

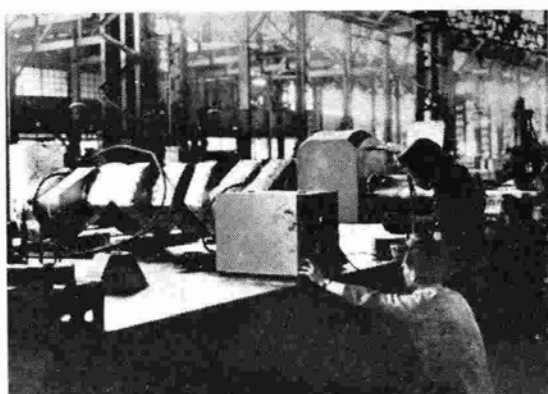
8 気筒小型クランクシャフト（ピン部の直径 100 mm 材質ニッケルクロームモリブデン鋼）を機械加工荒削のときピン部、ジャーナル部ウェブ部の表面に小さいキズが多数現われたので超音波探傷を行つた。31 図に半径方向に探傷した場合の波形を示す。

微小なクラックが表面近くから中心部にわたり多数多様な方向に多数あるため 31 図に示すごとき異様な反射波形となる。32 図にピン部を横折したときの断面写真を示す。2~5 mm のキズが各方向に無数にあるのが見られる。

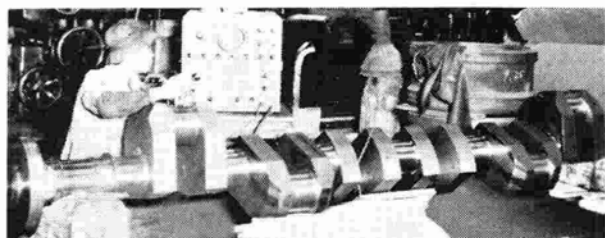


25図 ゴースト部組織

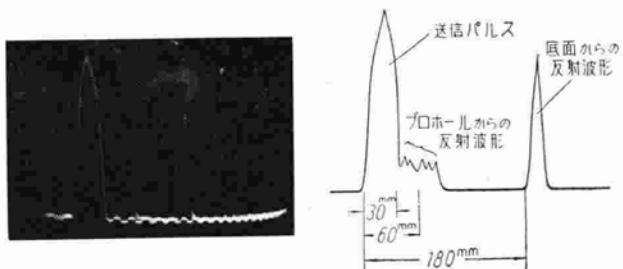
Fig.25. Magnified cracks in the ghost zone.



26 図 クランクシャフト探傷状況 (荒削後)
Fig.26. Super-sonic inspection of crank shaft.
(In process)

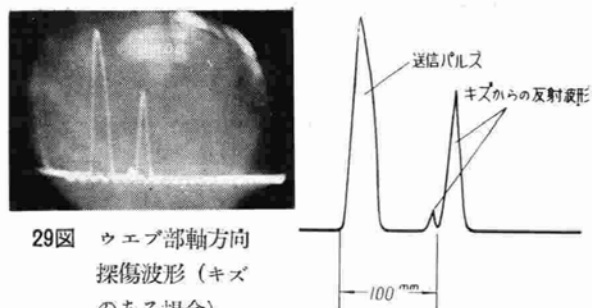


27 図 クランクシャフト探傷状況 (完成時)
Fig.27. Super-sonic inspection of a crank shaft.
(After assemble).



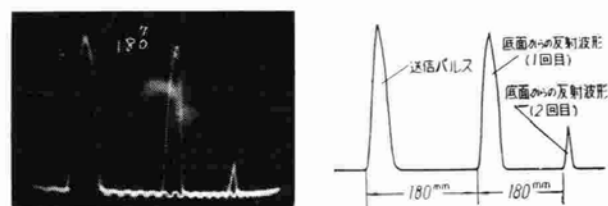
28 図 ファレット部半径方向探傷波形
(プロボールのある場合)

Fig.28. Wave form of a file in the radial direction. (Where blow holes were found).



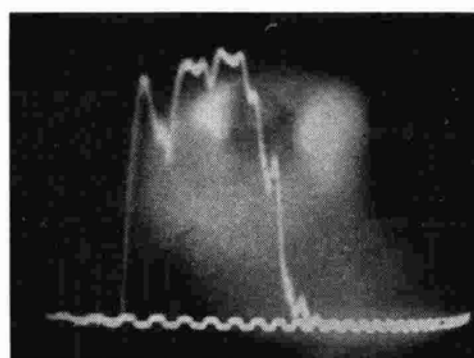
29 図 ウェブ部軸方向探傷波形 (キズのある場合)

Fig.29. Wave form of a web in the axial direction. (where flaws were found).

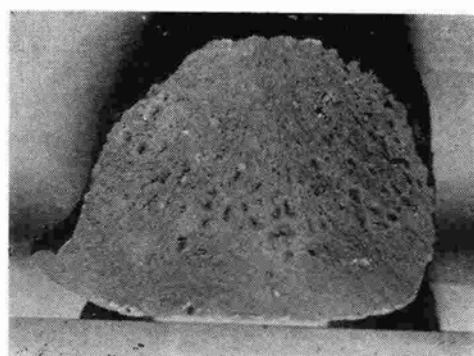


30 図 ファレット部半径方向探傷波形
(内部に欠陥のない場合)

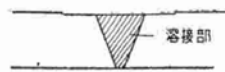
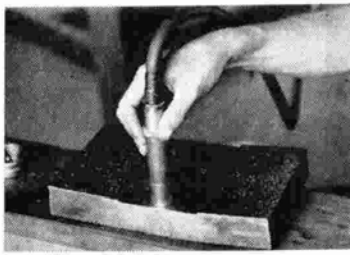
Fig.30. Wave form of a file in the radial direction. (where flaws were not found).



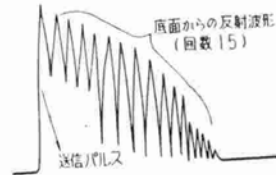
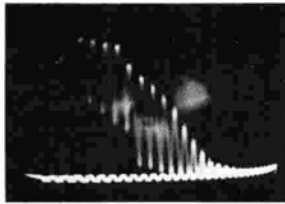
31 図 半径方向探傷波形 (白点が多数ある場合)
Fig.31. Wave form in the radial direction. (where many white spots were found).



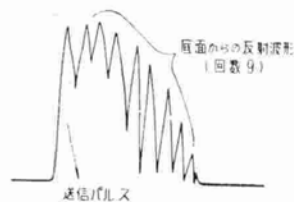
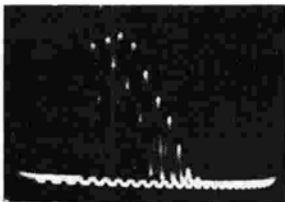
32 図 横断面の白点状況
Fig.32. White spots found in the cross section.



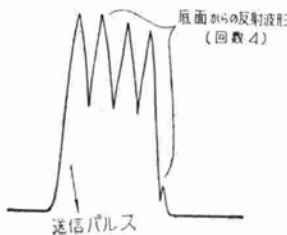
33 図 溶接箇所探傷状況
Fig.33. Flaw detection of the welded metal.



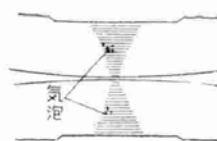
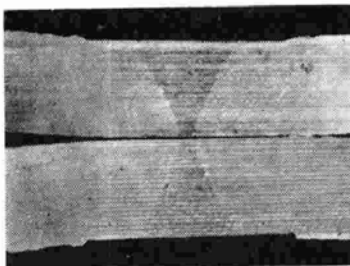
34 図 母材探傷波形
Fig.34. Wave form of the mother metal.



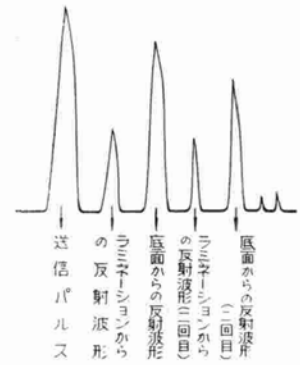
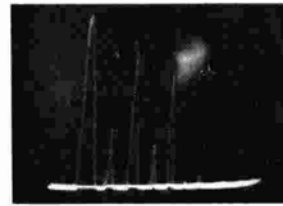
35 図 溶接部探傷波形 (気泡のない箇所)
Fig.35. Wave form of the welded part. (where blow holes were not found).



36 図 溶接部探傷波形 (気泡のある箇所)
Fig.36. Wave form of the Welded Part. (Where blow holes were found).

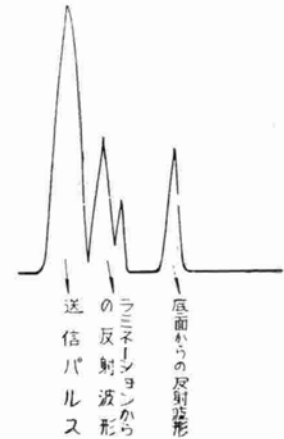
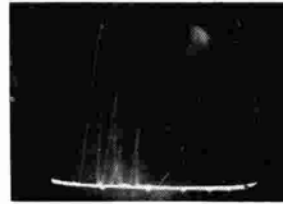


37 図 溶接部切断状況 (気泡のある箇所)
Fig.37. Cross section of the welded part. (Where blow holes were found).



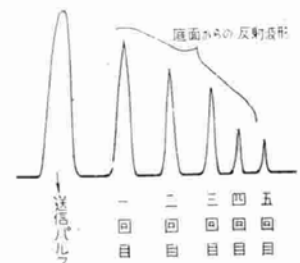
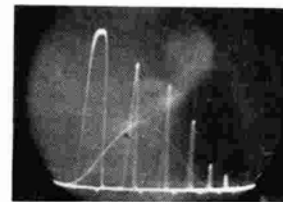
38 図
ラミネーション
探傷波形

Fig.38. Wave form of laminations in a metal.



39 図
ラミネーション
探傷波形
(クラック2箇所ある場合)

Fig.39. Wave form of laminations in a metal. (Where two cracks were found).

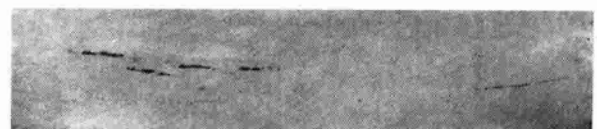


40 図 探傷波形
ラミネーション
のない場合)

Fig.40. Wave form of a metal. (Where laminations were not found).

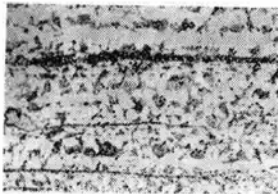


41 図 ラミネーション存在状況
Fig.41. Lamination.



42 図 ラミネーション存在状況
(クラック2箇所ある場合)
Fig.42. Lamination. (Found by two cracks).

×100



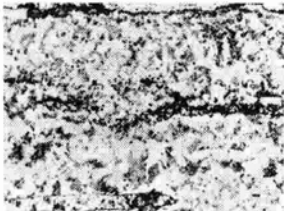
43 図

ラミネーション

顕微鏡組織

Fig.43. Microstructure of laminations.

×100



44 図

ラミネーション

顕微鏡組織

Fig.44. Microstructure of Laminations.

5. 鉄板材の調査

鉄板を溶接した場合、その溶接の良否を知る必要がある。現在はX線透過法で溶接の良否を判断しているが、費用がかさむのとまた現在のX線装置では鉄板の厚さに制限される不便がある。超音波を利用する場合、現在のものは溶接部の凸凹をある程度平滑にしなければならないという不便はあるが溶接による気泡の有無を知るに至極簡単である。現在三菱電機研究所で試作研究中の斜角探触子の完成も間近であると思われるから、完成の暁は上述の不便は除去されるので必ずや近き将来にはX線に代り使用されるようになると信ずるものである。つぎに鉄板材のラミネーションはX線による方法では判別し難いが超音波探傷法によれば簡単に知ることができる。

(a) 溶接気泡の調査

厚さ 40 mm の板の溶接箇所の気泡の有無を音波の減衰を利用して探傷した。使用周波数は 5 Mc である。33 図にその探傷状況を示す。

34 図に溶接の影響を受けていない母材の探傷波形を示す。底面反射の数は 15 である。35 図は溶接箇所の探傷波形でこの場合気泡のない箇所である。底面反射の数は 9 である。36 図に溶接気泡のある箇所の探傷波形を示す。底面反射の数は 4 である。以上のごとく底面多重反射の数で溶接気泡の有無を知ることができる。37 図は溶接気泡の箇所を切断したもので溶接気泡のあるのが見られる。

(b) 鉄板ラミネーションの調査

鉄板ラミネーションがあると場所如何では使用不能で取付工事の途中でラミネーションを発見すると、工事の進捗を防げ非常に困るものである。ラミネーションを調査した例について述べる。

38 図、39 図にラミネーションのある箇所の探傷波形を示す。

40 図にラミネーションのない箇所の探傷波形を示す。

41 図、42 図にその縦断面のラミネーション存在状況を示す。

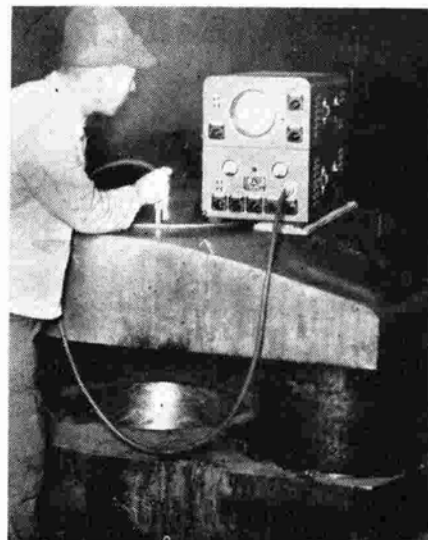
43 図、44 図にその顕微鏡組織を示す。

6. その他

以上述べた他に船用大型組立式クランクアーム（重量約数吨）中間軸（径約 350 φ×長さ 7,000 重量約 6 トン）推力軸（重量約 2.5 トン）各種鋳鋼品等、また板材の厚味測定法等種々探傷を行つてゐるが、これらの報告については機会あれば後日報告したいと思う。45 図……48 図に現場で探傷している状況写真を参考までに示す。

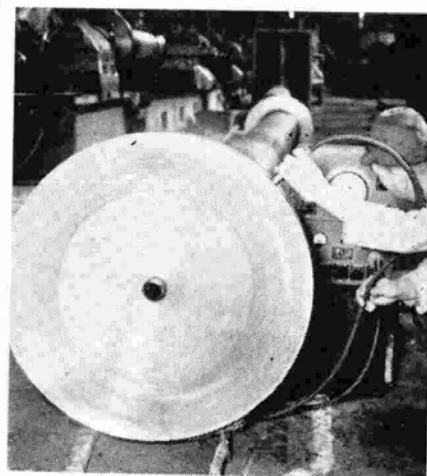
7. むすび

以上述べたごとく超音波探傷機の現場における利用は多種多様で、鍛鋼材・鋳鋼材・鉄板材・溶接部等の内部欠陥の有無の判定に対する従来の方法に比して格段の進歩を遂げたわけである。これはひとえに鋼材使用者側だけでなく製鋼者側にとつても利すること甚大なものであると確信する。



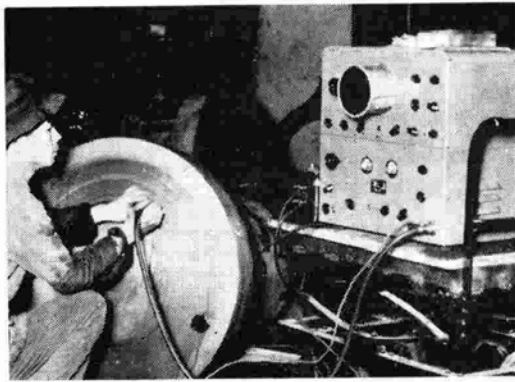
45 図 クランクアーム探傷状況

Fig.45. Super-sonic flaw detection of a crank arm.



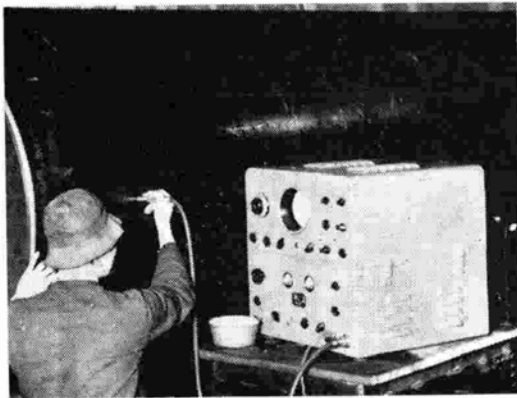
46 図 中間軸探傷状況

Fig.46. Super-sonic flaw detection of a connecting shaft.



47 図 推力軸探傷状況

Fig.47. Super-sonic flaw detection of a propeller shaft.



48 図 管胴探傷状況

Fig.48. Super-sonic flaw detection of a boiler plate.

結論を簡単に要約すればつぎのごとくである。

- (1) ゴースト・ゾーンからの反射はクラックが入っていない場合は反射波形のピークがゆるやかで幅があり不安定である。それに反してクラックが入つているときは反射波形のピークが安定していて高く出

る。使用周波数 7 Mc 以上ではゴースト・ゾーンからの反射はあるが、3 Mc ではゴースト・ゾーンにクラックが入つてなければ中型鍛鋼材以上では出ないようである。表面の仕上程度は細目のヤスリ仕上程度である。

- (2) 探触子（水晶振動子）からの超音波は（適当な粘度を有する油を使用した場合）探触子の中心を通つて物体の表面に線状に近い接触をすれば十分鋼材に伝導する。径 50 mm ϕ 中のものにつき行い底面の反射を得た。
 - (3) 探触子が被検材料の表面に面で接触する場合、水晶面が約 3/4 以上接触しなければ音波は材料に十分に伝導し難い。伝導したとしても深さ 50 mm 以上の所からの反射波を得ることはできないようである。円形のものを半径方向に探傷する場合は前述のごとくである。
 - (4) 超音波の減衰を利用して鍛鋼材の鍛造方向・鍛造比・結晶粒の大きさ、ならびに熱処理の状態を知ることができる。
 - (5) 溶接箇所の探傷は使用周波数 3 Mc ではその良否の判別はできない。5 Mc, 7 Mc では音波の減衰差ならびに反射波形により溶接による小さい気泡の有無を知ることができる。水晶の寿命を考えると 5 Mc 位が適当であると思われる。
 - (6) 現場においては工事途中で悪い材料は早く廃却する必要がある。面の仕上程度、油の粘度潜在するクラックの許容性等より考えて炭素鋼・鋳鋼の場合は使用周波数は 3 Mc 位が適当である。（鋼材ブルーム等はこの限りでない）。
- 大型・中型の鋼材の場合水晶振動子の直径は 20 mm 位がよく、ボルト類等小物の場合は水晶振動子の直径は 10~15 mm 位が良い。
- 終りに三菱電機研究所尾島課長近藤技師および当所久野所長付の懇切なるご指導を深謝する次第である。

三菱FD型超音波探傷器

研 究 所

尾 島 學 二 ・ 近 藤 敬 吉

Super-Sonic flaw detector Mitsubishi-Type "FD"

By Gakuji OJIMA, Keikichi KONDO

Engineering Laboratory

For inspecting interior flaws in metal, X ray method and magnaflux method were hitherto commonly used. However, the super-sonic method has recently become frequently used. Now this method is greatly appreciated by many practical engineers. Here we will give a brief explanation about this method of material inspection.

1. ま え が き

金属材料中に存在するキズ、たとえばゴースト割れ、白点、焼割れ等を超音波によつて探知しようとする試みはすでに外国においては1931年頃に始められているが、これが実用上盛んに使われるようになったのは今次大戦における電波兵器技術の長足の進歩をこの方面に応用してからである。

わが社においても昭和23年からこの方面の研究に着手し、昭和24年に実用上使用しうるものを完成し、その一部はすでに発表した所であるが、その後多くの経験をつみ現在わが社独特の方式による製品を市場に出しているのでこれについて報告する。

2. 他の探傷法との比較

現在実用されている探傷法としてはX線透過法、磁気探傷法の二つがあるが、これらに対してこの超音波探傷法を比較して見れば大体つぎのようになる。

まずX線透過法と比較して利点としてはつぎのものがあげられる。

- I 装置が簡便で移動が容易である。
- II 透過能力が大で大型物に適用できる。(約 10 m 程度)
- III キズの深さを正確に測定できる。

IV 人体に無害である。

V 表面に平行なキズに対しては非常に薄いキズに対しても感度がよい。

VI 被測定物を分解せずにそのまゝ測定が可能である。また欠点としては、つぎのものがあげられる。

I 被測定物の表面をある程度仕上げる必要がある。

II 材質・熱処理・結晶粒の大きさ等により異状分散を生じて音波を通さず測定できない場合がある。

つぎに磁気探傷法に比較して利点としては、つぎのものがあげられる。

I キズの大きさと位置を知り得る。

II 被測定物の表面仕上が荒くてよい。

III 操作が容易である。

IV 深度に関係なく感度がある。

V 表面に平行なキズに対して感度がよい。

VI 磁性体に限らず如何なる材質に対しても適用できる。

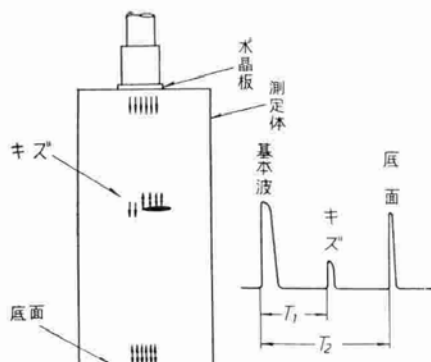
また欠点としては、つぎのものがあげられる。

I 装置がやや複雑となる。

II 機器の取扱いに熟練を要する。

III 表面に近接したキズに対しては測定困難となる。

以上X線透過法、磁気探傷法と比較して見てこれらの方法で測定困難なキズに対してその偉力を持つが、またその反面これらの方法に対してなお及ばない点もある。



1 図 原理説明図
Fig. 1. Explanation of principle

1 表 各物質の音波伝播速度、密度、音響輻射インピーダンスと音波透入度

Table 1. Sound velocity, Density, Sound radiation impedance and Sound penetration factor of various materials.

	伝播速度 (cm/sec)	密度 (g/cm ³)	音響輻射 インピーダンス (g/sec, cm ²)	水晶より測定 体への音波透 入度 α
水晶	5.45×10^5	2.65	1.44×10^6	1.000
アルミ	5.25×10^5	2.65	1.39×10^6	0.999
黄銅	3.42×10^5	8.5	2.9×10^6	0.884
鋼鉄	5.05×10^5	7.8	3.93×10^6	0.785
水銀	1.46×10^5	13.6	1.98×10^6	0.975
油	1.4×10^5	0.8	0.112×10^6	0.267
水	1.46×10^5	1.0	0.143×10^6	0.338
空気	3.44×10^4	1.2×10^{-3}	4.2×10	0.000

しかしより実用性を有することは明らかであり、これらと併用することによりさらにその効果をあげることができる。

3. 装置の動作原理

この探傷法の原理については、すでに各誌⁽³⁾に紹介されわが社でも筆者等により発表⁽⁴⁾しているが、ごく簡単にその要点を述べる。1 図にこの原理を示す。すなわち装置よりケーブルによつて高周波衝撃電圧を水晶板に印加する。この水晶板は X カットされたものでその圧電現象により水晶板の両面に電圧を印加すればその極性に応じ水晶板はその板面に直角方向に伸縮を行い、その結果として弾性振動を生ずることになる。今この水晶板を油等の薄膜を介して金属等に密着しておけばこの弾性振動は油膜を通して金属内に投入されることになり、高速度で金属中を伝播してゆく。(各種の金属の伝播速度は 1 表中に示してある) しかるに音波の性質として金属内の組織の変化、クラック等においては反射現象を生じ音波は再び投入点に帰ってくる。これが前記の水晶板により

逆に電気振動に変換されるのでこれを真空管回路により増幅してブラウン管の垂直軸に加えてやる。今ブラウン管を適当に水平軸掃引を行わせておけば、この掃引線に始め加えた衝撃電圧波形と反射してきた電圧波形とが音波の進行時間だけの時間差をもつて指示されることになる。

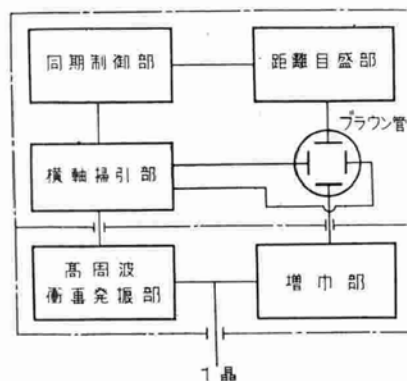
つぎにこれら相互関係を示した総合図を示せば 2 図のごとく構成されている。

ア. 同期制御部

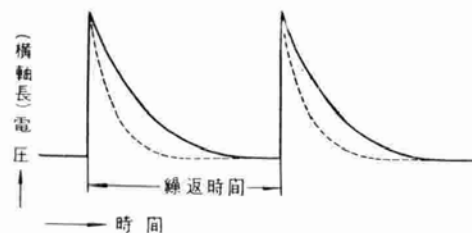
これは 1 秒間に繰返えす現象の回数を決定しているものであるが、この繰返えしは試験材料の長さ、この材料中における音波の進行速度から決定される。しかし実用上においては鋼材で 10 m 程度までを十分測定可能なようにとれば良く、この場合には電源に同期されたマルチバイブレータを使用している。

イ. 水平軸掃引部

この発生はサイラトロンによるコンデンサの放電を抵抗で制御したもので、この抵抗の変化による時定数の変化を使用したものであり、その波形は 3 図のごとなり、抵抗を変化すれば図中の実線、破線のごとく波形が変り掃引時間結局掃引速度が変化できる。この図について説明すれば平常はブラウン管の映像は管の左に出しておき、掃引電圧が印加されて急激に右方に移動し、そこ



2 図 総合結線図
Fig. 2. Block diagram.



3 図 ブラウン管横軸掃引波形

Fig. 3. Horizontal sweep wave form of Brown tube.

から掃引波形に従った速度で右方に移動し、この間に衝撃波、あるいは底面反射波等を現わす。

この対数減衰的な掃引は近距離のものを見るときは直線的な掃引よりも優っている。すなわち試験体が大物でこの表面より近い時には、この表面近くを拡大し底面の反射を縮めて同時に観測できる。この底面の反射を同時に見るということは超音波エネルギーを直接調べるという点で至極有効である。これは試験体の表面が不規則な場合等ここに加えるエネルギーの大きさを知るに便利であり、またある種のキズまたは小さなキズが沢山ある場合等はキズ自身の反射よりも底面からの反射の減衰による観測が有効な場合がある。このような点からこの掃引法はもつとも特色のある方法といえる。

ウ. 高周波衝撃発振部

これも前者と同じくサイラトロンを利用したもので、コンデンサを放電させ、この急激な放電を利用して、コンデンサと直列に入れたインダクタンスとの結合により生ずる減衰自由振動を利用したものである。このインダクタンスの両端に生ずる電圧を水晶板に印加している。この回路では発振をサイラトロンのみにより行っているため、回路としては非常に簡単になり電氣的に安定性をましている。この発振法の特色としては減衰自由振動の幅を自由に加減できる点でこれにより継続時間を数マイクロ秒から数十マイクロ秒まで平滑に変化できる点である。このことは観測点が近い場合あるいは遠い場合に超音波エネルギーを調整できるため観測上便利になつてくる。この代表的な波形を4図に示す。

エ. 距離目盛部

試験体中における音波の進行速度が既知であれば音波の進行距離すなわち寸法は時間により表わすことができる。

すなわち距離を l 、進行速度を c /マイクロ秒 とすれば進行時間 t は

$$t = \frac{l}{c} \text{ マイクロ秒}$$

で表わすことができ、 c がコンスタントであるため

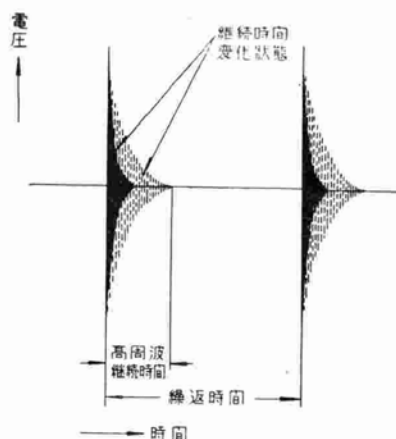
$$t \propto l$$

とおくことができる。この時間目盛を示すのが距離目盛部である。

しかしてこれらをまとめ上げたのが5図に示すとき「FD」型探傷器である。機械的寸法としては幅約 300 mm、高さ約 400 mm、奥行約 500 mm であり、重量は約 32 kg (上下各約 16 kg) となり、付属箱としてケーブル、水晶探触子を収容している。電氣的には交流 100 V、50/60 $\sim$ で入力約 150 VA となつている。

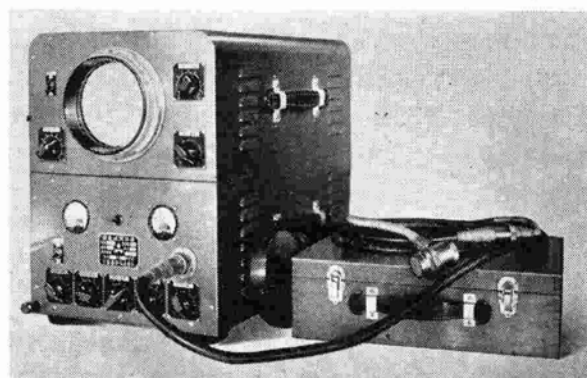
4. 超音波探傷における基本的問題

この超音波探傷法においては種々の問題が取り上げられるがとくにそのうちで重要な点二三につき簡単に述べることとする。



4 図 高周波衝撃電圧波形

Fig 4. High frequency impulse wave form.



5 図 三菱FD型超音探傷器

Fig. 5. Mitsubishi Super-sonic Flaw Detector Type "FD"

ア. 音波の透入問題

音波の発生には水晶板を用いているが探傷器としてはこの水晶板により発生された弾性振動を有効に試験体中に透入させることが重要な問題となる。一般に音波の透過について考えられることは二つの媒質を考えるととき一つの媒質の密度を ρ_1 、音波の進行速度を C_1 、他の媒質のそれを ρ_2 、 C_2 とすれば直角に音波が入る場合の透入度を α とし $\rho_1 C_1 = R_1$ $\rho_2 C_2 = R_2$ とおけば

$$\alpha = \frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2}$$

で表わされる。この場合に二つの媒質は完全に密着して、その間に空隙等を考えない場合である。しかし実際の場合には空隙が存在するため上記の式は適用できず、またこの空隙の影響をさけるために油等の薄膜を使用しているがこの場合については下記のごとき結果が導かれている。すなわち

$$\alpha = 1 - \frac{(R_2/R_1 - R_1/R_2)^2}{4 \cot^2 \frac{2\pi i/\lambda + (R_2/R_1 + R_1/R_2)^2}{2}}$$

ここで l は薄膜の厚さ、 λ はこの膜内の振動波長である。すなわち1表により各種の物質の音響幅射インピー

ダンスを示しているがこのうちで空気の場合と、油の場合ではその透入度は油を使用した方が遙によく、空隙の存在では音波はほとんど透入しないことがわかる。この油膜を介した場合には音波は透入の際と、反射して再び水晶板に到達する際と二度この境界を通過するため、この部分の減衰も考慮する必要がありこのために試験体の表面仕上げが良好なほど透入も良いということが結論づけられる。

上述の音波通過機構は水晶板より試験体への透入の場合のみならずまた試験体中での音波の伝播にもそのまま適用できるものである。すなわち試験体中に存在する空隙、あるいは偏折等について生ずる反射・透過の問題に関して、その厚さとの関係、あるいは周波数との関係を示すものである。

1. 水晶板の問題

Xカットされた水晶板が現在主として使われ、最近これ他にチタン酸バリウム等が実用化されかけているが、ここでは水晶板について述べる。

超音波探傷に使用される水晶板は通信機用に使用される水晶板と比較すればその周波数精度においては格段に粗であつてよい。この場合に厚味振動を行わせるが、この場合の振動周期は

$$T = \frac{a}{q} \times 0.352 \times 10^{-5} \text{ 秒}$$

で与えられ a は水晶板の厚さであり、 q は $q=1$ の場合基礎振動であり $q>2$ の場合高調波振動となる。一般には基礎振動を使う故X板の周期定数は $0.352 \mu\text{s}/\text{mm}$ となる。この数値から各周波数に対する水晶板の厚みを計算すれば2表のとおりである。

2 表

周波数 (Mc)	10	7	5	3	2.5	2	1.5	1.0	0.5
厚さ (mm)	0.284	0.406	0.568	0.95	1.137	1.42	1.895	2.845	5.68

以上に見られるごとく 10Mc, 7Mc のごとき高い周波数の水晶板ではその厚さが非常に薄くなつていくことがわかるがこのことは使用水晶板が機械的強度の面から制約されることもわかる。すなわちキズの検出の点からは高い周波数程良いが機械的強度からは低い周波数程良いということになり相反した面をもつことになり、この点から使用周波数の選択も考慮されなければならぬ。この点については後の部分でも言及している

つぎに問題となるのは指向性である。この指向性の影響を実際の探傷測定中にしばしば見受けるがこの点について考えるに一般には鋭い指向性を有する方がよい。厚み振動を行う円形水晶板の中心軸に対して θ の角度をなす方向の音響放射が中心軸方向の音響放射に対する相対値 R をもつて指向特性を示すと、つぎのようになる。

$$R = \frac{2J_1(Kr \sin \theta)}{Kr \sin \theta}$$

ただし r : 水晶板の半径

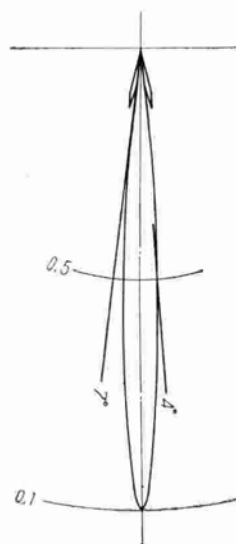
K : $2\pi/\lambda$

λ : 材料内の波長 $\lambda = \frac{c}{f}$

c : 音波の伝播速度

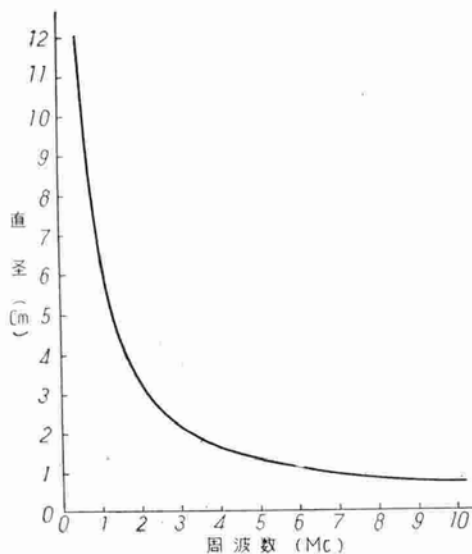
f : 周波数

この式によれば円板半径と波長の比が大であるほど指向性が鋭いことがわかる。すなわち同一円板半径に対しては周波数が高なるほど指向性は鋭くなつてくる。またこのことはある指向角度を持たすためには周波数と水晶板の直径より決定されることになる。一例として 3 Mc, 20 mm 直径の場合の指向性を6図に示す。第1に零になる角は約 7° となつてゐるが、今これと同じ指向性をもつための周波数と水晶板直径との関係は7図に示すよう



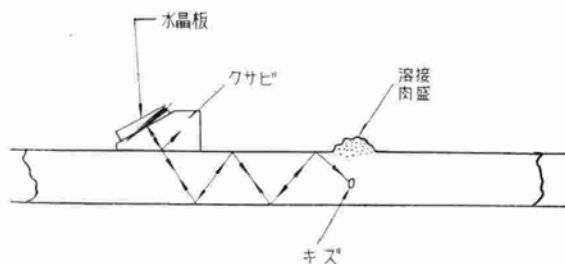
6 図
3 Mc 20 φ 水晶板よりアルミへの指向特性

Fig. 6.
Response characteristic of amplitude of supersonic wave from quartz plate (3 Mc 20 φ) to Al.



7 図 同一指向性 (7°) をもつための周波数と水晶板の直径の関係

Fig. 7. Relation between frequency and dia. of quartz plate in order to have same response character. (7°).



8 図 斜入投射法 (溶接部検査)

Fig. 8. Angle beam method (Detection of welding portion)

になつてくる。周波数が高ければ直径は可成り小さく、また周波数が低ければ直径は非常に大となつてくる。

ゆえに以上に述べた所より考えられることは周波数が大なれば水晶板の厚さが非常に薄くなるため、機械的強度が弱くなるが、指向特性は鋭くまた音波は減衰が甚だしいことになる。また周波数が低くなれば水晶板の厚さは厚くなるため機械的強度は大であるが、指向特性が非常に拡がるため直径は大きくとる必要があり、印加衝撃エネルギーを大にせねばならぬ。以上のことは水晶板は機械的強度・指向特性・探傷特性・価格等の面から検討する必要がある、これらを考慮して実用上十分な性能を有するために決定したのが 1.0, 1.5, 3.0, 5.0 Mc の 4 周波数となつているのである。

ウ. 斜 入 角 法

前述した方法は音波が試験体に入る場合についてであるが、この場合の最短探傷可能距離 $l_{\min}$ は

$$l_{\min} = \frac{P_t c}{2} \times k$$

P_t : 衝撃波の継続時間

c : 音速

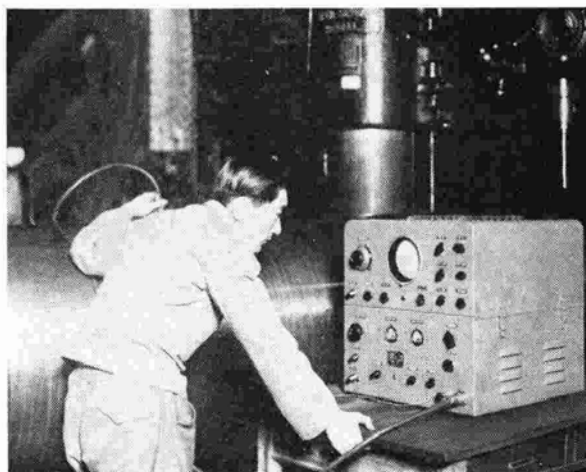
k : 電気回路により決定される常数

であるから仮りに $P_t = 3 \mu s$ とし $C = 5 \text{ mm}/\mu s$ とすれば $k=1$ の場合 $l_{\min} = 7.5 \text{ mm}$ となる。しかるに k は電気回路により多少の歪が考えられるので $k > 1$ となるため実際の値は上記の数値以上となる。ゆえにこの $l_{\min}$ 以内の傷あるいは厚さのものは探傷できないことになる。これに対しては減衰法も考えられるがその方法として斜入角法が考えられる。この原理を 8 図に示す。この方法の適用範囲は薄板、あるいは溶接箇所を検査に対して大きい特長をもっている。(5)

5. 使 用 状 況

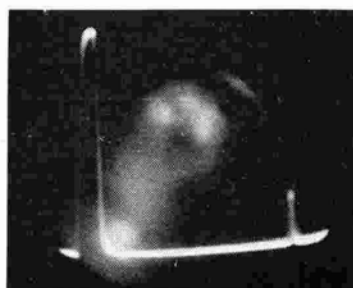
以上でこの装置の概要を述べたが、これらの探傷の実際については本誌において他の新三菱重工(6)(7)、住友金属工業(8)、日本製鋼所(9)、長崎製鋼所(10)等においてすでに使用された貴重な文献を載いているのでここにはその大要のみを記述するととどめる。

三菱FD型超音波探傷器・尾島・近藤



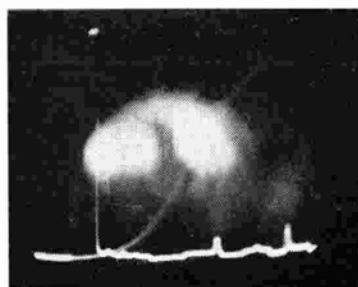
9 図 (ア) ターボロータ探傷器

Fig. 9. (ア) Super sonic flaw detection of a turbo-rotor



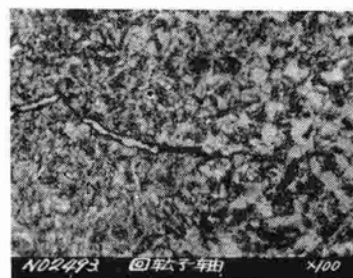
9 図 (イ) 良 好 部

Fig. 9. (イ) Non flaw part.



9 図 (ウ) キ ズ 部

Fig. 9. (ウ) Flaw part.



9 図 (エ) キズ部の破断面顕微鏡写真

Fig. 9. Micro-photo of a flaw part.

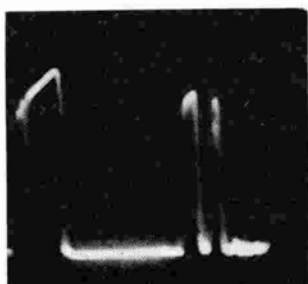
ア. 製鋼過程中に生ずるキズ

これらに対してはゴースト・白点・偏析・焼割れ・気泡等々が考えられる。製鋼中に生ずるキズが最も多いといえるがこの一例としてわが社において大型ターボロータの試験中の例と、そのとき得られた代表的な波形をそれぞれ9図に示す。

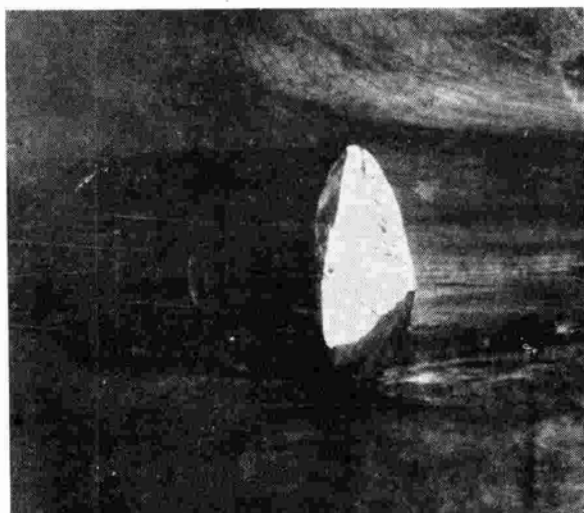
これらは探傷の対象として最も広範なものであり、また探傷としても最も複雑困難なものである。すなわち観測し得た波形からその内部の欠陥を判断するため欠陥の種類、あるいは欠陥があつても実際に使用し得るや否やということはこれら材料に対する専門的な知識、豊富な経験を有するとき始めていえることでこの点は各機械ご使用者の判断により決定されている。

イ. 使用中に生ずるキズ

これは言葉のごとく各種材料を使用中に生ずるキズであつてこの中に考えられるものは疲労キズ、熱的割れ、脆化等が考えられる。すなわち発生原因は外力・熱・化学変化等になりこの発生原因に応じてキズの発生の仕方も変化している。すなわち鉄道車両や各種繰返し応力



10 図 (ア) 車軸に生じたキズ
Fig. 10. (ア) Wave form of fatigue cracks in an axle.



10 図 (イ) 車軸に生じたキズ
Fig. 10. (イ) Broken surface of an axle detected

「注」 超音波の英文としては最近 Ultra-Sonic が用いられている。

旧来の Super-Sonic は超音速に用いられることになったようである。

本誌発表の英文題名として Super を用いたが旧来の習慣に従つたものであることをおことわりしておく。

のかかる部分、ボイラ等について考えられる。いま代表的一例として電鉄車軸に生じた疲労キズについてその写真を示す。(10図)

交通関係においてはこのようなキズを早期に発見することは事故を未然に防止することになり、ひいてはその交通機関への信頼感をますことになる。その点この超音波法は他に見られぬ利点を有し卓越した使用価値を発揮する。

6. む す び

以上において三菱 FD 型超音波探傷器について種々の観点から述べたが、これを要するに超音波探傷法は過去において幾多の試練を経て現在はずでに実用時代に入っているものであり、現在まだ利用されない分野においても今後この利用法が開かれるであろうと思われる。すなわち製鋼あるいは造機関係においてもこの検査段階を工程の早期に行うほど有利であるためこれらに適応するとき性能の探傷器が要求され、またこの探傷における生命ともいべき接触子(水晶板)の構造、あるいは探傷法についても各種用途に応じた方法が採用されるものと思われる。

また最も問題になる探傷波形と内部欠陥の関係とくにそれより生ずるその材料の製造者と使用者との間の利害相反する点などの解決点等種々の問題が残されている。しかしながらわが社の探傷器が現在つねに優位を保っているのも各ご使用者とくに住友金属工業河井泰次氏、日本製鋼所高沖亮氏、長崎製鋼所河合正吉氏、新三菱重工業久野五十男、緒方幸蔵、有馬春男氏等関係各位よりの絶大など支援ご指導によることが多い。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

文 献

1. 高木・丹羽「電学誌」69巻. 第9号
2. 尾島・近藤「生産と電気」1952 第4号
3. D. G. Erdman "Super Sonic-Flaw Detector" E.E. 67 181 (1948)
4. 豊田・近藤「三菱電機」1950 第3号
5. B. Carlin "Testing Welds with Super-sonic Waves" Weld. J. June 1948
6. 近藤・有馬「金属」1952 第3号
7. 緒方・有馬「三菱電機」本誌
8. 河井 他「三菱電機」1952 第5号
9. 高沖 「三菱電機」1952 第4号
10. 河合 「三菱電機」1952 第4号

細長い円錐型点弧子内部の 電位分布と電流密度計算

研 究 所

菅野正雄・岡田武夫

Calculation of Potential Distribution and Current Density inside of Thin and Long Conical Ignitor

By Masao KANNO, Takeo OKADA

Engineering Laboratory

Previously, a calculation was made on distributions of potential and of current density inside of a cylindrical ignitor, which was partly dipped in a mercury pool and was applied potential on its top.

Then, another calculation was worked out in the case of a thin and long conical ignitor similar to the shape of real ignitor through some proximate computation, and its result was compared with the former case.

It was found from this that equipotential surface and the current density were concentrated in the neighbourhood of the contact point of the ignitor with the surface of the mercury pool alike the case of the cylindrical ignitor, except that the equipotential surface moved upward with the increase of the conical angle.

1. 細長い円錐型導体内の電位分布を定める

基本式

一般に一定の比伝導度 σ なる導体に電圧を印加したとき導体中に電荷の集積がなければ導体内の電流密度分布は

$$i = -\sigma \text{ grad } \varphi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{div } i = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

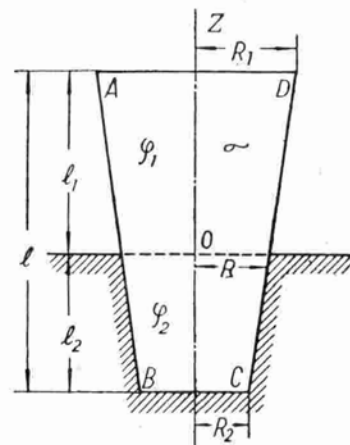
が成立つ。これから直ちに

$$\Delta \varphi = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

が導かれるが、これを1図のような細長い円錐型点弧子の場合に適用する。

1図において z 軸を含む平面による円錐の切口における直線 CD の方程式を

$$f(z) = \frac{R_1 - R}{l_1} z + R = p z + R \quad (-l_2 \leq z \leq l_1) \quad \dots\dots (4)$$



1 図 点弧子断面

Fig. 1. Section of a Conical ignitor.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (0 < \rho < \rho_2 + R) \quad \dots (5)$$
$$\rho = f(z) r \quad (0 \leq r \leq 1) \dots\dots\dots (6)$$
$$(1+p^2 r^2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1+2p^2 r^2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - 2p r (p z + R)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} + (pz + R)^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad \left(\begin{array}{c} 0 < r < 1 \\ -l_2 < z < l_1 \end{array} \right) \quad \dots\dots (7)$$

て $\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2}$ および $\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ の係数のうちから $p^2 r^3$ の項を省略し、さらに付録 1 に述べるような理由から

$$2pr(P_z+R)\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial z}\dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + (p z + R)^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0, \quad \begin{matrix} (0 < r < 1, \\ -l < z < l) \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$
$$z=0, \quad r=1 \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \cdot 2\pi \rho d\rho + \frac{\partial \varphi_1}{\partial \rho} \cdot 2\pi \rho dz = 0, \quad (15)$$

あるいは $p^2 \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial r} \right)_{r=1}$ の項を省略して

$$\left(\frac{\partial \psi_1}{\partial r}\right)_{r=1} + p(pz+R)\left(\frac{\partial \psi_1}{\partial z}\right)_{r=1} = 0. \quad \dots\dots(16)$$

$$\int_0^R \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right)_{z=0} \rho \, d\rho = \int_0^{R_2} \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \right)_{z=-l_2} \rho \, d\rho$$

$$+ \int_0^{-l_2} \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \rho} \right)_{\rho=f(z)} \rho \, dz + \int_R^{R_2} \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \right)_{\rho=f(z)} \rho \, d\rho$$

あるいは $p^2 \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial r} \right)_{r=1}$ の項を省略して

$$R^2 \int_0^1 \left\{ \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial z} \right)_{z=0} r - \frac{pr^2}{R} \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial r} \right)_{z=0} \right\} dr$$

$$\begin{aligned}
&= R_2^2 \int_0^1 \left\{ \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial z} \right)_{z=-l_2} r - \frac{p r^2}{R_2^2} \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial r} \right)_{z=-l_2} \right\} dr \\
&+ \int_0^{-l_2} \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial r} \right)_{r=1} dz + p \int_0^{-l_2} (pz + R) \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial z} \right)_{r=1} dz \\
&+ R_2^2 \int_0^1 \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial z} \right)_{z=-l_2} r dr \\
&+ \int_0^{-l_2} \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial r} \right)_{r=1} dz. \quad \dots\dots\dots (17)
\end{aligned}$$

$$\varphi_1(\rho, z) = \psi_1(r, \zeta) = E \left\{ 1 + \frac{2b}{R} (\zeta - R_1) + \sum_{s=1}^{\infty} A_s j_s(\zeta) J_0(\beta_s r) \right\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$f_s(\zeta) = 1/\zeta \left(\zeta^{\beta_s/p} - R_1^{2\beta_s/p} \zeta^{-\beta_s/p} \right) \quad \left(\begin{matrix} 0 \leq r \leq 1, \\ R \leq \zeta \leq R_1 \end{matrix} \right)$$

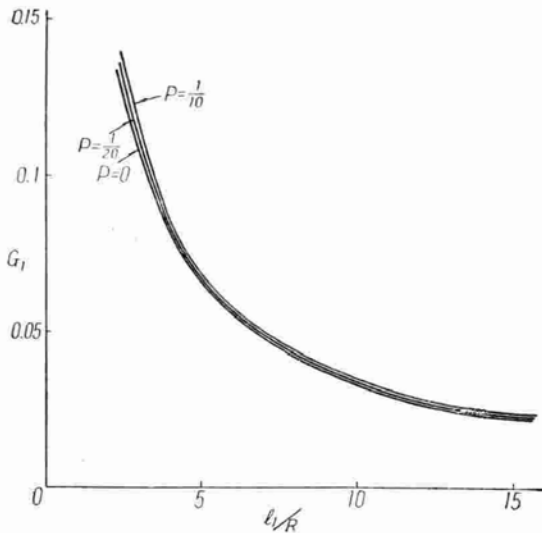
$$\varphi_2(\rho, z) = \psi_2(r, \zeta) = E \sum_{s=1}^{\infty} C_s g_s(\zeta) J_0(\alpha_s r) \quad \dots\dots(19)$$

$$g_s(\zeta) = \sqrt{\zeta} \left(\zeta^{\alpha_s/p} - R_2^{2\alpha_s/p} \zeta^{-\alpha_s/p} \right) \\ \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ R_2 \leq \zeta \leq R \end{array} \right)$$

$$b \cong \frac{R}{2(R_1 - R)} \left\{ 1 - 2 G_1 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_s^2} \right\} \dots\dots\dots (20)$$
$$A_s \approx \frac{G_1}{2f_s(R)J_0(\beta_s)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n^2 - \beta_s^2} \dots\dots\dots (21)$$
$$C_s = G_1 / \alpha_s q_s(R) J_1(\alpha_s) \dots\dots\dots (22)$$
$$G_1 \cong 1/0.246(9 - 7 \frac{R_1}{R}) + 2.95 \frac{l_1}{R} \dots\dots\dots(23)$$

1 表

	l_i/R	2.5	5	10	15
G_1	$p=0$	<0.125	<0.066	<0.0334	<0.0226
	$p=\frac{1}{20}$	<0.1283	<0.0678	<0.0344	<0.0233
	$p=\frac{1}{10}$	<0.1317	<0.0687	<0.0353	<0.0239



2 図

なお当然のことではあるが $p=0$ なる場合は円柱型点弧子の場合の G_1 の値と一致する。また φ_1 の式で G_1 を含む項は 5 で説明するようにほとんど利いてこないから大体のところ φ_1 を図示しうるわけである。

5. 点弧子内部の電位分布

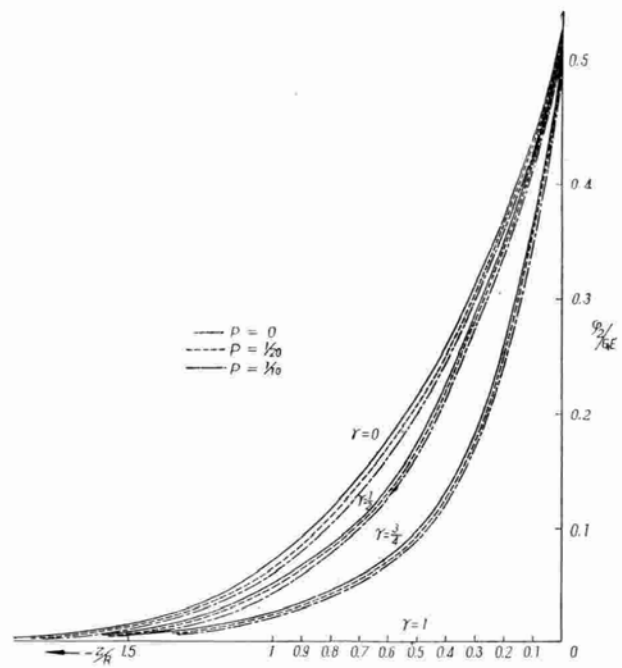
ア. 水銀面以下の電位分布

(19)式から

$$\begin{aligned} \varphi_2(\rho, z) = \psi_2(r, \zeta) &= E \sum_{s=1}^{\infty} C_s g_s(\zeta) J(\alpha_s r) \\ &= E G_1 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_s} \frac{\sqrt{\zeta} (\zeta^{\alpha_s/p} - R_2^{2\alpha_s/p} \zeta^{-\alpha_s/p}) J_0(\alpha_s)}{\sqrt{R} (R^{\alpha_s/p} - R_2^{2\alpha_s/p} \zeta^{-\alpha_s/p}) J_1(\alpha_s)} \\ &\cong E G_1 \left(1 + \frac{pz}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_s r)}{\alpha_s J_1(\alpha_s)} e^{-\frac{\alpha_s z}{R} \left(1 - \frac{pz}{2R}\right)}, \quad \dots (24) \\ &\quad \left(0 \leq r \leq 2_1 \text{ また } \frac{l_2}{R} > 1\right). \end{aligned}$$

2 表

	$(\varphi_2/EG_1)_{r=0}$	$(\varphi_2/EG_1)_{r=1/4}$	$(\varphi_2/EG_1)_{r=1/2}$	$(\varphi_2/EG_1)_{r=3/4}$	$(\varphi_2/EG_1)_{r=1}$
$P=0$	0.536	0.534	0.529	0.515	0
$z=0 \quad P=\frac{1}{20}$	0.535	0.534	0.529	0.515	0
$P=\frac{1}{10}$	0.534	0.534	0.529	0.515	0
$P=0$	0.435	0.431	0.428	0.357	0
$z=-\frac{R}{10} \quad P=\frac{1}{20}$	0.433	0.430	0.4265	0.355	0
$P=\frac{1}{10}$	0.4315	0.428	0.4245	0.354	0
$P=0$	0.339	0.330	0.312	0.2095	0
$z=-\frac{R}{4} \quad P=\frac{1}{20}$	0.336	0.328	0.3105	0.2075	0
$P=\frac{1}{10}$	0.331	0.323	0.3060	0.2045	0
$P=0$	0.215	0.210	0.170	0.095	0
$z=-\frac{R}{2} \quad P=\frac{1}{20}$	0.209	0.2045	0.1655	0.092	0
$P=\frac{1}{10}$	0.2035	0.199	0.1605	0.0895	0
$P=0$	0.070	0.065	0.050	0.025	0
$z=-R \quad P=\frac{1}{20}$	0.064	0.0595	0.046	0.023	0
$P=\frac{1}{10}$	0.0585	0.0540	0.0415	0.021	0
$P=0$	0.007	0.006	0.005	0.002	0
$z=-2R \quad P=\frac{1}{20}$	0.0053	0.00455	0.0038	0.0016	0
$P=\frac{1}{10}$	0.0028	0.0025	0.0027	0.0012	0



3 図

点弧子中心 $r=0$ より $r=\frac{1}{4}$, $r=\frac{1}{2}$, $r=\frac{3}{4}$,

点弧子表面 $r=1$ までについて電位 φ_2 を計算すると 2 表のようになる。2 表を r をパラメタとして図示すると 3 図のようになる。 $p=0$ のときは円柱型点弧子の φ_2 と一致し P が大きくなるほど、すなわち側面の傾斜が大きくなるほど、 z, r が同一の場所の電位は低くなる。

イ. 水銀面以上の電位分布

(18) 式より

$$\begin{aligned} \varphi_1(\rho, z) = \psi_1(r, \zeta) &= E \left\{ 1 + \frac{2b}{R} (\zeta - R_1) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{s=1}^{\infty} A_s f_s(\zeta) J_0(\beta_s r) \right\} = E \left\{ 1 + \frac{2b(\zeta - R_1)}{R} \right. \\ &\quad \left. + \frac{G_1}{2} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{f_s(\zeta) J_0(\beta_s r)}{f_s(R) J_0(\beta_s)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2 - \beta_s^2} \right\} \\ &\cong E G_1 \left\{ 0.492 + \left(\frac{1}{G_1} - 0.492 \right) \frac{z}{l_1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Pz}{2} \right) \sum_{s=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_s r)}{J_0(\beta_s)} e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 + \frac{Pz}{2R} \right)} \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2 - \beta_s^2} \right\}, \quad \left(0 \leq r \leq 1, \text{ また } \frac{l_1}{R} > 1 \right) (25) \end{aligned}$$

(25) 式から φ_1 は 3 つの項の和よりなり、第 1 項は z に無関係に一定値を示し、第 2 項は z に関して直線的に増大し、第 3 項は z に関し指数函数的に減少する。その 3 項を φ_1' とし (a) の場合と同様に電位 φ_1' を計算してこれを 3 表に示す。また r をパラメタとしてこの関係を図示すると 4 図のようになる。

$p=0$ なるときは円柱型点弧子の φ_1 と一致する。

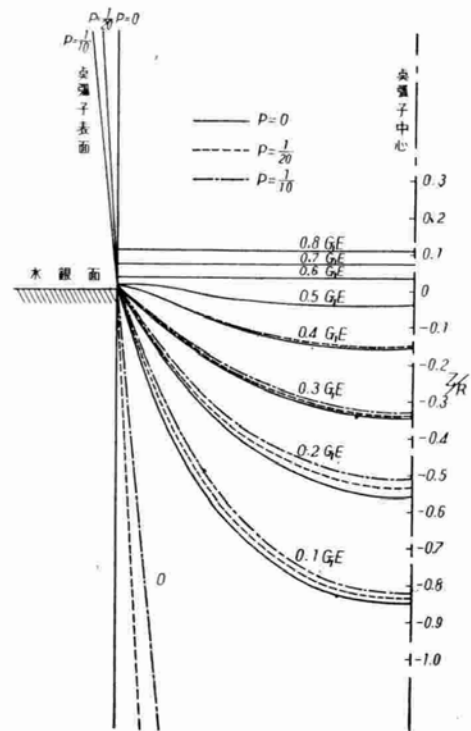
z が零 (水銀面) から $R/4$ の程度の範囲では p がすなわち側面の傾斜が大きくなるほど、 z と R が同一の

場所での電位は高くなる。そして $z=R/4$ 程度以上では P が大きくなるほど電位は低くなる。

ただし φ_1 の値の内、大部分は第2項の z に関し直線的に増大する項によつて占められ、第3項の φ_1' は無視しうる程わずかの部分である。

3 表

	$(\varphi_1'/EG_1)_{r=0}$	$(\varphi_1'/EG_1)_{r=\frac{1}{4}}$	$(\varphi_1'/EG_1)_{r=\frac{1}{2}}$	$(\varphi_1'/EG_1)_{r=\frac{3}{4}}$	$(\varphi_1'/EG_1)_{r=1}$
$P=0$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	-0.492
$z=0 \quad P=\frac{1}{20}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	-0.492
$P=\frac{1}{10}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	-0.492
$P=0$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$-2.78 \cdot 10^{-3}$
$z=\frac{R}{10} \quad P=\frac{1}{20}$	$1.701 \cdot 10^{-3}$	$1.503 \cdot 10^{-3}$	$1.062 \cdot 10^{-3}$	$2.304 \cdot 10^{-4}$	$-2.792 \cdot 10^{-3}$
$P=\frac{1}{10}$	$1.708 \cdot 10^{-3}$	$1.506 \cdot 10^{-3}$	$1.064 \cdot 10^{-3}$	$2.308 \cdot 10^{-4}$	$-2.795 \cdot 10^{-3}$
$P=0$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$-1.2 \cdot 10^{-4}$	$-8.5 \cdot 10^{-4}$
$z=\frac{R}{4} \quad P=\frac{1}{20}$	$1.006 \cdot 10^{-3}$	$9.03 \cdot 10^{-4}$	$6.51 \cdot 10^{-4}$	$-1.207 \cdot 10^{-4}$	$-8.51 \cdot 10^{-4}$
$P=\frac{1}{10}$	$1.012 \cdot 10^{-3}$	$9.11 \cdot 10^{-4}$	$6.58 \cdot 10^{-4}$	$-1.215 \cdot 10^{-4}$	$-8.55 \cdot 10^{-4}$
$P=0$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$-9 \cdot 10^{-5}$	$-2.6 \cdot 10^{-4}$
$z=\frac{R}{2} \quad P=\frac{1}{20}$	$4.97 \cdot 10^{-4}$	$3.96 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-4}$	$-8.95 \cdot 10^{-5}$	$-2.575 \cdot 10^{-4}$
$P=\frac{1}{10}$	$4.873 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$2.05 \cdot 10^{-4}$	$-8.82 \cdot 10^{-5}$	$-2.53 \cdot 10^{-4}$
$P=0$	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$-1.6 \cdot 10^{-5}$	$-3.4 \cdot 10^{-5}$
$z=R \quad P=\frac{1}{20}$	$7.38 \cdot 10^{-5}$	$5.61 \cdot 10^{-5}$	$2.05 \cdot 10^{-5}$	$-1.54 \cdot 10^{-5}$	$-3.08 \cdot 10^{-5}$
$P=\frac{1}{10}$	$6.82 \cdot 10^{-5}$	$5.25 \cdot 10^{-5}$	$1.89 \cdot 10^{-5}$	$-1.47 \cdot 10^{-5}$	$-2.83 \cdot 10^{-5}$
$P=0$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$-4 \cdot 10^{-7}$	$-7 \cdot 10^{-7}$
$z=2R \quad P=\frac{1}{20}$	$1.47 \cdot 10^{-6}$	$0.788 \cdot 10^{-6}$	$3.69 \cdot 10^{-7}$	$-2.91 \cdot 10^{-7}$	$-5.25 \cdot 10^{-7}$
$P=\frac{1}{10}$	$0.88 \cdot 10^{-6}$	$0.55 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$-1.76 \cdot 10^{-7}$	$-3.3 \cdot 10^{-7}$



5 図 点弧子内部の電位分布図

Fig. 5. Sections of Equipotential surfaces.

3 図および 4 図から等電位面の形に書き直すと 5 図のようになるが、この図から見ても等電位面は $z=0$, $r=1$ の点付近に集中し、この点付近での電界強度も電流密度も大きくなっていることがわかる。

6. 水銀面以下の部分の電流密度

$i = -\sigma \text{grad } \varphi_2$ なるゆえ、点弧子表面から水銀中に流し出す電流密度を計算する場合

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow 1} i &= -\sigma \lim_{r \rightarrow 1} (\text{grad}_p^2 \varphi_2 + \text{grad}_z^2 \varphi_2)^{\frac{1}{2}} \\ &= -\sigma \lim_{r \rightarrow 1} \text{grad}_p \varphi_2 \left\{ 1 + \left(\frac{\text{grad}_z \varphi_2}{\text{grad}_p \varphi_2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

ここで点弧子表面では電界強度ベクトルは表面に垂直なるゆえ

$$\lim_{r \rightarrow 1} \frac{\text{grad}_z \varphi_2}{\text{grad}_p \varphi_2} = p.$$

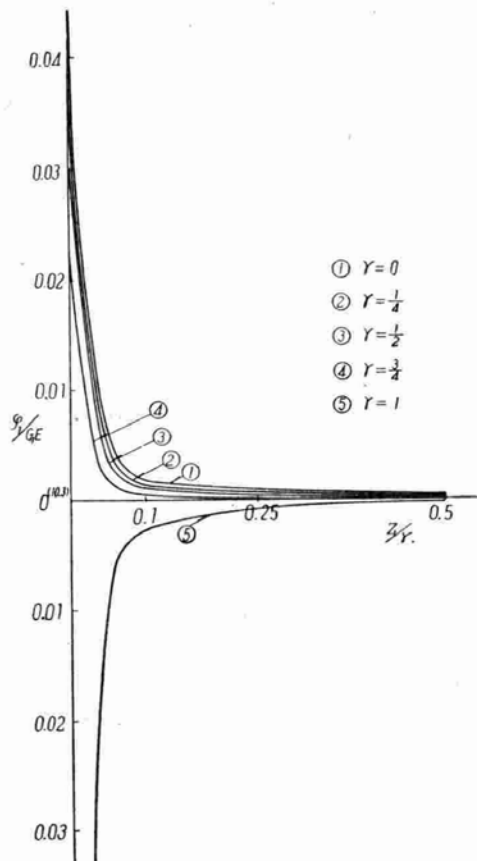
ゆえに

$$\begin{aligned} i_{r=1} &= -\sigma (\text{grad}_p \varphi_2)_{r=1} \left(1 + \frac{1}{2} p^2 \right) \\ &\cong -\sigma (\text{grad}_p \varphi_2)_{r=1} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (26)$$

これを (24) 式から計算すると

$$\begin{aligned} i_{r=1} &= -\sigma \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \rho} \right)_{r=1} = \frac{\sigma E G_1}{R} \left(1 + \frac{p z}{2R} \right) \\ &\quad + \sum_{s=1}^{\infty} e \frac{\alpha_s z}{R} \left(1 - \frac{p z}{2R} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (27)$$

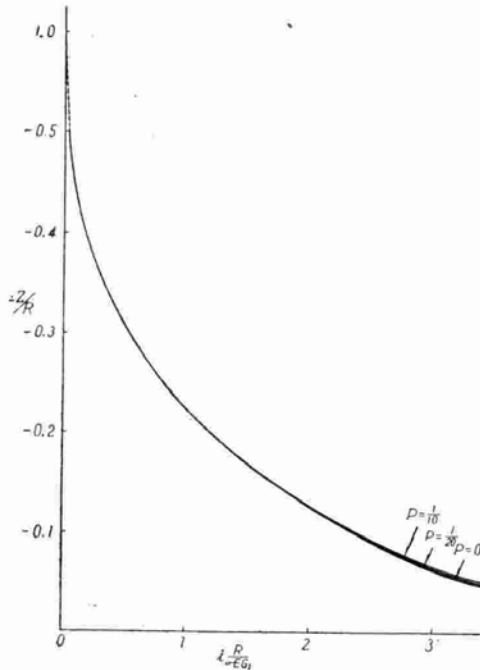
(27) 式を計算すると 4 表のようになり、これを図示すると 6 図のようになる。



4 図

4 表

z/R	0	-0.1	-0.25	-0.5	-1	-2
$\left(1 - \frac{p_z}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} e^{-\frac{\alpha_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R}\right)} \quad p=0$	∞	2.79	1.002	0.038	0.00945	0.0006
$\left(1 - \frac{p_z}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R}\right)} \quad p=\frac{1}{20}$	∞	2.795	1.005	0.0379	0.00908	0.00067
$\left(1 - \frac{p_z}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R}\right)} \quad p=\frac{1}{10}$	∞	2.800	1.008	0.0377	0.00877	0.00063



6 図 水銀面以下の電流密度

Fig. 6. Curve of current density versus depth in mercury pool.

$p=0$ なるときは円柱型点弧子の場合と一致するが、 $\frac{z}{R}$ が -0.25 付近以上の範囲では p が大きいほど電流密度が大きくなり、それ以下の範囲では p が大きくなるほど電流密度は小さくなる。

7. 水銀面以上の電位傾度

水銀面以上の点弧子表面近くの電位傾度は

$$\lim_{r \rightarrow 1} (\text{grad}_r^2 \varphi_1 + \text{grad}_z^2 \varphi_1)^{\frac{1}{2}} \\ = \lim_{r \rightarrow 1} \text{grad}_z \varphi_1 \left(1 + \left(\frac{\text{grad}_r \varphi_1}{\text{grad}_z \varphi_1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

点弧子表面では電界強度ベクトルは表面に平行なるゆえ

$$(\text{grad}_r^2 \varphi_1 + \text{grad}_z^2 \varphi_1)^{\frac{1}{2}} = (\text{grad}_z \varphi_1)_{r=1} \left(1 + \frac{1}{2} P^2 \right) \\ \cong (\text{grad}_z \varphi_1)_{r=1}.$$

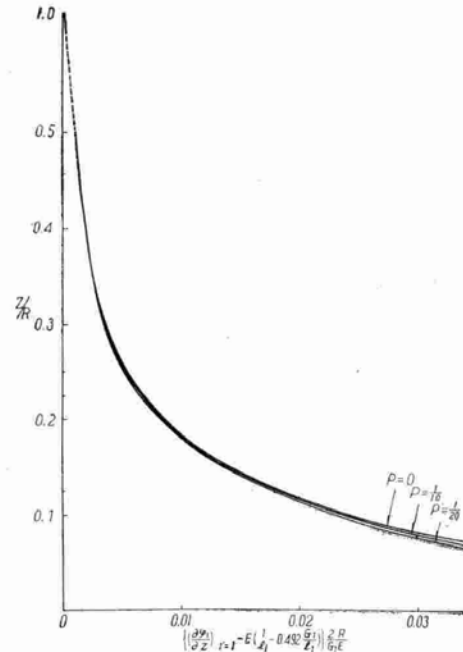
これを (25) 式を用いて計算すると

$$(\text{grad}_z \varphi_1)_{r=1} = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right)_{r=1} \\ = pE \left\{ \frac{2b}{R} + \frac{G_1}{2} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{f_s(\zeta) J_0(\beta_s r)}{f_s(R) J_0(\beta_s)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2 - \beta_s^2} \right\}$$

細長い円錐型点弧子内部の電位分布と電流密度計算・菅野・岡田

5 表

z/R	0	0.1	0.25	0.5	1
$-\left(1 - \frac{p_z}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} \left(\beta_s - \frac{p}{2}\right) e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R}\right)} \quad p=0$	∞	0.024	0.0054	0.0011	0.00013
$-\left(1 - \frac{p_z}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} \left(\beta_s - \frac{p}{2}\right) e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R}\right)} \quad p=\frac{1}{20}$	∞	0.0237	0.0053	0.00105	0.000135
$-\left(1 - \frac{p_z}{2R}\right) \sum_{s=1}^{\infty} \left(\beta_s - \frac{p}{2}\right) e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R}\right)} \quad p=\frac{1}{10}$	∞	0.0236	0.0052	0.00100	0.000139



7 図 水銀面以上の点弧子表面の電位傾度

Fig. 7. Curve of potential gradient versus height from mercury meniscus.

$$= E \left\{ \left(1 - 2 \left(\sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_s^2} \right) \frac{1}{l_1} - \frac{G_1}{2R} \left(1 - \frac{p_z}{2R} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{s=1}^{\infty} \left(\beta_s - \frac{p}{2} \right) e^{-\frac{\beta_s z}{R} \left(1 - \frac{p_z}{2R} \right)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2 - \beta_s^2} \right\} \right. \quad (28)$$

すなわち点弧子表面の電位傾度は z に無関係な第1項と z に関して指数函数的に減少する第2項とよりなる。

いま第2項を計算すると5表のようになり、これを図示すると7図のようになる。

$p=0$ である場合は円柱型点弧子の場合と同様である。 $0 < \frac{z}{R} < 0.5$ 程度の範囲では p が大きくなるほど電位傾度は小さくなる。 $\frac{z}{R}$ の値がそれ以上の範囲では p が大きくなるほど電位傾度はわずかに大きくなる。

8. むすび

細長い円錐型点弧子の一部を水銀中に挿入して、これに電圧を印加した場合の点弧子内部の電位分布および電流密度分布を計算し、さきの円柱型点弧子の場合と比較した。その結果は水銀面との接触点付近での電位傾度および電流分布は円柱型の場合とよく似ているが、ただ円錐面の傾斜が大きくなるほど等電位面が少し上昇してることが判った。

擧筆にあたり物理研究室長大野参事の有益なる示唆に感謝する。

付 録 I

$2pr(pz+p)\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial z}$ を省略する理由.

円柱型点弧子の場合の解で明らかとなったことであるが、その場合は $z>0$ の部分 (水銀面より上部) の円柱表面で $z\rightarrow+0$ では $\left(\frac{\partial\psi_1}{\partial z}\right)\rightarrow\infty$ となり、また $z<0$ の部分 (水銀面から下部) の円柱表面では $z\rightarrow-0$ で $\left(\frac{\partial\psi_2}{\partial r}\right)\rightarrow\infty$ となる. よつて ψ_1 の場合は $r\rightarrow 1, z\rightarrow 0$ で

$$\psi_1\sim z^m \quad (0<m<1), \quad (\text{A} \cdot 1)$$

また ψ_2 の場合は $r\rightarrow 1, z\rightarrow 0$ で

$$\psi_2\sim r^n \quad (0<n<1) \quad (\text{A} \cdot 2)$$

であらう.

円柱型に近い細長い円錐型の場合も、もし $\frac{\partial\psi_1}{\partial z}$ および $\frac{\partial\psi_2}{\partial r}$ が無限大になるとすれば、 $r\rightarrow 1, z\rightarrow 0$ の所においてであらう. そうすれば $r=1, z=0$ の近傍では

$$\psi_1\sim z^s \quad (0<s<1), \quad (\text{A} \cdot 3)$$

$$\psi_2\sim r^t \quad (0<t<1) \quad (\text{A} \cdot 4)$$

となるであらう. よつて

$$\frac{\partial^2\psi_1}{\partial r\partial z}\sim z^{s-1}, \quad (\text{A} \cdot 5)$$

$$\frac{\partial^2\psi_2}{\partial z^2}\sim z^{t-2} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

となり、 $r=1, z=0$ の近傍では $\left|\frac{\partial^2\psi_1}{\partial z^2}\right|$ の方が $\left|\frac{\partial^2\psi_1}{\partial r\partial z}\right|$ よりも速やかに無限大となる.

同様に $r=1, z=0$ の近傍では $\left|\frac{\partial^2\psi_2}{\partial r^2}\right|$ の方が $\left|\frac{\partial^2\psi_2}{\partial r\partial z}\right|$ よりも速やかに無限大となる.

結局 $\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial z}$ が有限な範囲では $2pr(pz+R)\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial z}$ は p の因子があるためと、 $\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial z}$ が無限大となる近傍では $\frac{\partial^2\psi}{\partial r^2}$ または $\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}$ が無限大となる程度より小さいという理由から省略できるものと考えられるであらう.

付 録 II

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r} + (pz+R)^2\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = 0.$$

$$\left(\begin{array}{l} 0 < r < 1 \\ -l_2 < z < l_1 \end{array} \right) \quad (\text{A} \cdot 7) \quad \{ (9) \}$$

において、 $\psi(r,z)=p(r)Z(z)$ として変数分離を行なえば、 k^2 を定数として

$$\frac{P''}{P} + \frac{1}{r}\frac{P'}{P} + k^2 = 0 \quad (\text{A} \cdot 8)$$

$$(pz+R)^2\frac{Z''}{Z} = k^2 \quad (\text{A} \cdot 9)$$

の二つの方程式に分離される.

$k=0$ に対しては (A・8) から $P(r)=\text{const}, P(r)=\log r$

$$(\text{A} \cdot 9) \text{ から } Z(z)=a'+b'z$$

$k\neq 0$ に対しては (A・8) から $P(r)=J_0(kr),$

$$P(r)=Y_0(kr)$$

$$(\text{A} \cdot 9) \text{ から } Z(z)=\zeta^2, Z(z)=\zeta^{\lambda'}$$

ただし $pz+R=\zeta$ とする.

(A・9) から

$$\lambda = -\frac{1}{2}(1+\sqrt{1+4k^2/p^2}) \cong -\frac{1}{2} + \frac{k}{p},$$

$$\lambda' = -\frac{1}{2}(1-\sqrt{1+4k^2/p^2}) \sim -\frac{1}{2} - \frac{k}{p}.$$

ここで $r=0$ で φ は有限であるという条件から $\log r, Y_0(kr)$ は考えなくてもよいから結局 φ の一般解は

$$\varphi_1(\rho, z) = \psi_1(r, \zeta) a_1 + 2b_1 \zeta + \sum_{k_1 \neq 0}^{\infty} (A_{k_1} \zeta^{\lambda_1} + B_{k_1} \zeta^{\lambda'_1})$$

$$J_0(k_1 r), \quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ R \leq \zeta \leq R_1 = J_1 l_1 + R \end{array} \right) \quad (\text{A} \cdot 10)$$

$$\varphi_2(\rho, z) = \psi_2(r, \zeta) = a_2 + 2b_2 \zeta + \sum_{k_2 \neq 0}^{\infty} (A_{k_2} \zeta^{\lambda_2} + B_{k_2} \zeta^{\lambda'_2})$$

$$J_0(k_2 r) \quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ -Pl_1 + R = R_2 \leq \zeta \leq R \end{array} \right). \quad (\text{A} \cdot 11)$$

(14) 式から、 $r=1$ で $\psi_2=0$ なる故 $a_2=0, b_2=0,$

$$k_2 = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_s, \dots$$

ただし α_s は零次の Bessel 函数 $J_0(x)=0$ の根であり

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_s < \dots$$

(16) 式から

$$p^2 \zeta \left(\frac{\partial\psi_1}{\partial \zeta} \right)_{r=1} + \left(\frac{\partial\psi_1}{\partial r} \right)_{r=1} = 0. \quad (\text{A} \cdot 12)$$

ここで (A・10) から

$$\left(\frac{\partial\psi_1}{\partial \zeta} \right)_{r=1} = 2b_1 + \sum_{k_1 \neq 0} (A_{k_1} \lambda_1 \zeta^{\lambda_1-1} + B_{k_1} \lambda'_1 \zeta^{\lambda'_1-1})$$

$$J_0(k_1) \quad (\text{A} \cdot 13)$$

$$\left(\frac{\partial\psi_1}{\partial r} \right)_{r=1} = - \sum_{k_1 \neq 0} k_1 (A_{k_1} \zeta^{\lambda_1} + B_{k_1} \zeta^{\lambda'_1}) J_1(k_1) \quad (\text{A} \cdot 14)$$

(A・13) および (A・14) 式を (A・12) 式に代入すると

$$2p b_1 \zeta + \sum_{k_1 \neq 0}^{\infty} \left\{ A_{k_1} \zeta^{\lambda_1} \left(p^2 \lambda_1 J_0(k_1) - k_1 J_1(k_1) \right) + B_{k_1} \zeta^{\lambda'_1} \left(p^2 \lambda'_1 J_0(k_1) - k_1 J_1(k_1) \right) \right\}. \quad (\text{A} \cdot 15)$$

(A・15) 式で $b_1 \neq 0, A_{k_1} \neq 0, B_{k_1} \neq 0$ とし、さらに近似的に $p^2 b_1 \zeta, p^2 \lambda_1 J_1(k_1), p^2 \lambda'_1 J_0(k_1)$ を省略すれば (すなわち $p^2 \zeta \left(\frac{\partial\psi_1}{\partial \zeta} \right)_{r=1}$ を省略)

$$J_1(k_1) = 0 \quad (\text{A} \cdot 16)$$

となる. (A・16) 式より求まる k_1 の値を $\beta_s (s=1, 2, \dots)$ とする.

ただしこの場合は $p^2 \zeta \left(\frac{\partial\psi_1}{\partial \zeta} \right)_{r=1} = 0$ としているゆえ、(A・12) 式の条件は成立せず、したがって求められた解は $r=0, z=0$ の付近では多少その形が実際の場合と異なってくることはやむを得ない. 以上の考えのも

とに

$$\begin{aligned} \varphi_1(\rho, z) &= \varphi_1(r, \zeta) a_1 + 2b_1 \zeta \\ &+ E \sum_{s=1}^{\infty} (A_s \zeta^{\frac{\beta_s}{p}} + \beta_s \zeta^{\frac{\beta_s}{p}}) \sqrt{\zeta} J_0(\beta_s r), \\ &\quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ R_2 \leq \zeta \leq R_1 \end{array} \right), \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 17)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(\rho, z) &= \varphi_2(r, \zeta) E \sum_{s=1}^{\infty} (C_s \zeta^{\frac{\alpha_s}{p}} + D_s \zeta^{-\frac{\alpha_s}{p}}) \\ &\sqrt{\zeta} J_0(\alpha_s r), \quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ R_2 \leq \zeta \leq R \end{array} \right). \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 18)$$

(11) 式から $z=l_1$ で $\varphi_1(r, R_1)=E$ なるゆえ

$$a_1 + 2b_1 R_1 = E.$$

ここで $b_1 = \frac{bE}{R}$ とおくと

$$a_1 = E - 2b_1 R_1 = E \left(1 - \frac{2b}{R} R_1 \right).$$

$$\text{また } B_s = -A_s R_1 \frac{2\beta_s}{p}.$$

(13) 式から $z=-l_2$ で $\varphi_2(r, R_2)=0$ なるゆえ

$$D_s = -C_s R_2 \frac{2\alpha_s}{p}.$$

よって

$$\begin{aligned} \varphi_1(\rho, z) &= \varphi_1(r, \zeta) \\ &= E \left\{ 1 + \frac{2b(\zeta - R_1)}{R} + \sum_{s=1}^{\infty} A_s f_s(\zeta) J_0(\beta_s r) \right\} \\ &\quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ R_2 \leq \zeta \leq R_1 \end{array} \right) \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 19)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(\rho, z) &= \varphi_2(r, \zeta) = E \sum_{s=1}^{\infty} C_s g_s(\zeta) J_0(\alpha_s r) \\ &\quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, \\ R_2 \leq \zeta \leq R \end{array} \right), \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 20)$$

ただし

$$\begin{aligned} f_s(\zeta) &= \sqrt{\zeta} \left(\zeta^{\beta_s/p} - R_1 \frac{2\beta_s}{p} \zeta^{-\beta_s/p} \right), \\ g_s(\zeta) &= \sqrt{\zeta} \left(\zeta^{\alpha_s/p} - R_2 \frac{2\alpha_s}{p} \zeta^{-\alpha_s/p} \right). \end{aligned}$$

上式に (12) 式の関係を入れると

$$\begin{aligned} 1 - \frac{2b(R_1 - R)}{R} + \sum_{s=1}^{\infty} A_s f_s(R) J_0(\beta_s r) \\ = \sum_{s=1}^{\infty} C_s g_s(R) J_0(\alpha_s r). \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 21)$$

また上式に (17) 式の関係を用いると

$$\begin{aligned} b - \sum_{s=1}^{\infty} A_s f_s(R) J_0(\beta_s) \\ = \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{J_0(\alpha_s)}{\alpha_s} \left(R g'_s(R) - 2g_s(R) \right). \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 22)$$

付 録 Ⅲ

(A・21), (A・22) 式から b を逐い出すと

$$1 + \sum_{s=1}^{\infty} A_s f_s(R) \left\{ J_0(\beta_s r) - \frac{2(R_1 - R)}{R} J_0(\beta_s) \right\}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{s=1}^{\infty} C_s \left\{ g_s(R) J_0(\alpha_s r) + \frac{2(R_1 - R)}{\alpha_s R} \right. \\ &\quad \left. J_1(\alpha_s) \left(R g'_s(R) - 2g_s(R) \right) \right\}. \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 23)$$

また $\int_0^1 (20 \times J_0(\beta_m r)) r dr$ をつくり Lommel の定理を利用すれば

$$2A_m f_m(R) J_0(\beta_m) = \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{\alpha_s g_s(R)}{\alpha_s^2 - \beta_m^2} J_1(\alpha_s). \quad (\text{A} \cdot 24)$$

同様にして

$\int_0^1 (20) \times J_0(\alpha_m r) r dr$ をつくり Lommel の定理を利用すれば,

$$\begin{aligned} 1 + \sum_{s=1}^{\infty} A_s f_s(R) J_0(\beta_s) \left\{ \frac{\alpha_s^2}{\alpha_s^2 - \beta_s^2} - \frac{2(R_1 - R)}{R} \right\} \\ = 2C_m \alpha_m g_m(R) J_1(\alpha_m) \\ + \sum_{s=1}^{\infty} C_s \frac{2(R_1 - R)}{\alpha_s R} \left(R g'_s(R) - 2g_s(R) \right) J_1(\alpha_s). \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 25)$$

(A・24) 式を (A・23) 式に代入し

$$C_m \alpha_m g_m(R) J_1(\alpha_m) = G_m \quad (\text{A} \cdot 26)$$

とおくと

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha_s^2}{\alpha_s^2 - \beta_m^2} - \frac{2(R_1 - R)}{R} \right) \frac{G_s}{\alpha_s^2 - \beta_m^2} \\ = G_n + \sum_{s=1}^{\infty} G_s \frac{R_1 - R}{\alpha_s^2 R} \left(R \frac{g'_s(R)}{g_s(R)} - 2 \right). \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 27)$$

(A・23) 式で $r=1$ とおくと

$$\begin{aligned} 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(3R - 2R_1)}{R} A_s f_s(R) J_0(\beta_s) \\ = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2(R_1 - R)}{R} \frac{C_s J_1(\alpha_s)}{\alpha_s} \left(R g'_s(R) - 2g_s(R) \right). \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 28)$$

(A・27) 式に (A・28) 式を代入すると

$$4G_n = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\beta_m^2}{\alpha_n^2 - \beta_m^2} \frac{G_s}{(\alpha_n^2 - \beta_m^2)}. \quad (\text{A} \cdot 29)$$

それゆえ (A・29) 式で $\frac{G_n}{G_1} = \bar{G}_n$ として $n=1, 2,$

3, …… ととつてゆくと $\bar{G}_2, \bar{G}_3, \dots$ に対して一次連立方程式が導かれるが、先の円柱型点弧子の場合と同様に $\bar{G}_n$ は初めはきわめて 1 に近く収斂は遅いが $\bar{G}_0$ は零になる。

G_1 の値としては (A・23) 式から

$$G_1 = 1 / \left(9 - 7 \frac{R_1}{R} \right) \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{G}_s}{\alpha_s^2} + \frac{2l_1}{R} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{G}_s}{\alpha_s}$$

ここで $\bar{G}_s$ は非常に収斂の遅いことを考えれば $s=50$ 程度まで $\bar{G}_s=1$ としてもなお

$$\begin{aligned} G_1 &< \frac{1}{\left(9 - 7 \frac{R_1}{R} \right) \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_s^2} + \frac{2l_1}{R} \sum_{s=1}^{50} \frac{1}{\alpha_s}} \\ &\cong \frac{1}{0,246 \left(9 - 7 \frac{R_1}{R} \right) + 2,95 \frac{l_1}{R}}. \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 30)$$

アルミヒータの絶縁物

本社
田村弘治郎

Insulators for "Almica" Heater

By Kojiro TAMURA

Head Office

A tube heater produced by this company is called "Almica" heater.

The characteristics of the "Almica" heater is considerably influenced by the quality of the insulator.

This article contains a brief description about some insulator which is used in "Almica" heater, and the results of its experiments.

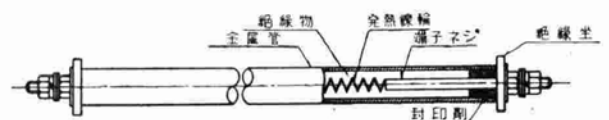
1. ま え が き

電熱器に使用される絶縁物は主として無機質材料であつて、マイカ・陶磁器・アスベスト・ガラス等はよく使用されている。しかしてこれらの絶縁物は温度上昇にしたがつて著るしく絶縁抵抗が下つていく現象はよく知られている所であつて、アルミカヒータのように絶縁物が熱の伝導をすると共に、電気的には高度の絶縁性を持たなければならないものでは上記の絶縁物はもはや満足に使用できない状態になつてくる。すなわち発熱線に発生した熱は絶縁物の層を伝導して金属管に伝わり、金属管の表面から被加熱物に伝達する。よつて絶縁物の熱伝導率が悪いと発熱線の温度は高くなつて寿命に影響してくる。またヒータの表面温度は表面電力密度の設計値によるほか、表面の熱伝達率によつても変り、その熱伝達率は被加熱物の状態によつて異なるから熱せられるものによつて絶縁抵抗値も変化してくるのである。このように、高温においても絶縁抵抗値がすぐれ、かつ熱の伝導率もよいというむずかしい条件の絶縁物は高純度の鉍物結晶質に求めなければならない。たとえば同じような分析値であつても絶縁物自身の結晶構造によつて性質が異なるわけであり、一般の電熱器とは違つた観点から検討してみなければならないと考える。ここには絶縁物の二三を比較したのち、これらの応用品として低温空焼用アルミカ

ヒータの一例について、性能を求める簡単な便法について述べ大方のご批判を得たいと思う。

2. ヒータの構造

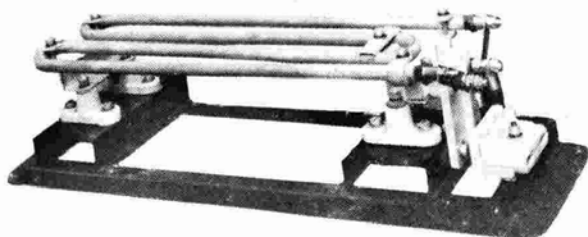
アルミカヒータの構造は1図に示したように非常に簡単なものであつて、発熱線輪の周囲には絶縁物粉末が詰められているに過ぎない。しかしこの絶縁物粉末にわずかな空隙があつたとしても著るしく熱の伝導を悪くし、その結果発熱線を高温にして寿命を短縮する。一例を示すならば、いま外径 14 mm のアルミカヒータに振動法によつて粉末を充填したときその熱伝導率は $0.3 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$ であつたが、これを外部から約 1 mm 減径させただけで絶縁物は緻密となつて空気層がなくなり $0.44 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$ とよくなつて、このため発熱線温度は 15 ~ 20 % も低くなるのである。すなわち外見にもなんら差がなくまた表面温度が同じであつても工作の差は発熱線温度を変化し寿命値に影響してくるのである。このヒ



1 図 アルミカヒータの構造
Fig. 1. Structure of "Almicr" heater.



2 図 液体加熱用アルミヒータ
Fig. 2. Immersion heater.



3 図 空気加熱用アルミヒータ
Fig. 3. Air heater.

ヒータを液体に使用する一例を2図に示したが、この場合は液体の粘度等によつて熱の放散度合が異つてくるのであつて、たとえばいま外径 15 mm のアルミヒータを温水実験したところ、静止した 10°C の水への熱伝達率は $1,370 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ だつたのに対し、沸騰させたときは $14,890 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ と約 10 倍になつた。このように同じ水でも状態によつて非常に違うから、さらに粘度の異なる液体とか、使用状態によつては大いに差が生じてくるわけである。またこのヒータを暖房器として空気中で使用する一例を3図に示したが、これの静止空気中への熱伝達率はヒータ表面温度 300°C ではわずかに $26 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ であり、900°C でも約 $100 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ に過ぎなかつた。このように使用状態によつて表面の熱伝達率が大きく異なるから、同一設計値でも使用場所で温度が異り絶縁抵抗値も非常に變つてくるのである。たとえば3図に示すヒータの入力を種々變えて実験した結果を示すと、表面温度が 300°C のとき 100 MΩ 以上あつたものが 400°C になつたら 7 MΩ に下つてしまう位急激なものである。それゆゑにこの絶縁物の品質はかなり慎重に選定しなければならないのであつて、われわれの標準絶縁物にも種類によつては 100 倍の開きがあり、各設計値にしたがつてその使用する絶縁物を使い分けなければならないわけである。

3. 石 灰

この絶縁物は石灰石を加熱分解して得られるもので、原料が豊富なことと、純粋なものが得られるという利点があり、また工作上はその化学的膨潤作用を応用できるために低温用ヒータに從來使用された。しかしながら、この溶融点は 2,450 ~ 2,570°C という高温であるにもかかわらず、電熱線を堅く包みこむようなこのヒータで

は、その内部温度が 700°C 以上になるときわめて短時間に発熱線と反応を生じ破壊するに至るものである。大体その設計値も内部温度が 300°C にならないように考慮を払わなければならないと思う。幾分長所もあるが、つぎのような欠点が考えられるので高級品になるにしたがつて使用されない。

ア. 非常に強い塩基性のため高温になると無水珪酸、アルミナ、酸化鉄などと容易に化合して溶融点の低い生成物をつくる。

イ. 空気中で水分や炭酸ガスを吸収して容易に水酸化石灰や炭酸石灰となつて崩壊する。こうしたヒータの場合には水酸化石灰の形で存在している割合が多いと考えられるので、600°C を超えると分解して水蒸気を発生するものと想像される。

ウ. 600°C 以上になると分解し、膨脹しかなり危険な状態が考えられるので、ヒータの内部温度が 300°C を超えないように注意して使用しなければならない。

エ. 吸湿しやすいので当然そのための電気絶縁抵抗の劣化が考えられる。これを防止するため気密にした場合は上記した膨脹による破壊という危険を考慮しなければならない。

オ. 工作上は吸湿しやすい性質が害をなし、かつ化学的膨潤作用も煩雑な工程となることは避けられない。

4. ア ル ミ ナ

アルミナの含有鉱物は地球上に 250 種以上もあるが、実際に溶融アルミナの原料として採用されるのはボーキサイト、ボーキサイト質粘土、ダイアスポア質粘土等きわめて少いものである。1897年アメリカの電気会社で、ボーキサイトから電気炉で天然の鋼玉と同成分の鉱石を人工的につくることに成功したのが初めて、1900年アメリカのノルトン社で製造権を得これをアラウンドムと称した。この溶融点は約 2,000°C で酸にも塩基にも作用されず耐火材料または研磨材として重要なものである。

アルミナの変態は古くから研究されているが、純粋な変態として確認されているものは α および β の 2 種だけであり、これらを文献⁽¹⁾から引用して示すと1表のようになる。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ はもつとも安定な形で溶融物が結晶する場合、純 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ を約 1,600°C 以上に加熱する場合、またはダイアスポアを脱水する場合等にできるといわれている。 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ は 1916年 G・A・Rankin 等によつて発見され、初め純粹の変態と考えられていたが、研究の結果 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11 \text{ Al}_2\text{O}_3$ として 1931年 W・L・Bragg 等によつて構造が決定された。そしてこれは X 線的にはスピネル類似の結晶構造であるといわれ、その成分は2表に示すようである。微粉にするにしたがつて主として SiO_2 を含みガラス質やムライト結晶等が入ってくることは避けられないのであつて純度は劣つてくる。また実際に分析したところからみても 0.12% 位の

1 表 アルミナの性質

Table. 1. Character of alumina.

変態	α	β	γ, δ, ε, ζ, η, θ
空間群	D _{3h} 三方	D _{6h} 六方	
結晶格子	5.12 Å	5.584 Å	
分子数	2	11	
晶癖	粒状	板状	
へき開	不規則	底面	
酸素原子充填様式	六方密充填	空隙ある立方的充填	
比重	3.99	3.23	
屈折率	n=1.768 ε=1.760	n=1.668 ε=1.630	
転移関係	安定	空気中では約1,600°C以上でNa ₂ Oを発生し分解しα-Al ₂ O ₃ となる	
酸・アルカリの作用	一般に安定であるがダイアスポアを脱水したてのものは作用される	結晶のよく発達したものは安定	
備考		厳密な意味の変態でない K ₂ O・11Al ₂ O ₃ もある	

2 表 熔融アルミナの成分

Table. 2. Components of fused alumina.

種類	粒度	比重	化学成分%			
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂
4A	10~220 240以下	3.93以上 3.85	0.3以下 0.2	0.1以下 0.05	98.8以上 98.5	0.05以下
3A	10~220 240以下	3.90以上 3.85	0.6以下 0.5	0.3以下 0.2	98.0以上 97.5	0.1以下
2A	10~80 90~220 240以下	3.92以上 3.90 3.85	2.5以下 3.0 4.0	0.6以下 0.7 0.8	93.0以上 92.0 90.0	4.0以下 4.5 5.0

Na₂O を含有しているのがあり、これはアルカリ法による避けられないものかも知れない。もしこの場合のNa₂Oが単独に含まれているものとしたら、たとえ微量であっても相当考えなければならない問題であるが、β-Al₂O₃の結晶の中に含有されているものと解釈され、かつ微量のものでほとんど実害はないようである。

5. マグネシア

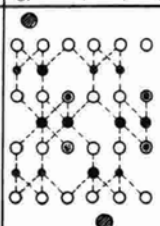
アメリカの製品を分析してみるとマグネシア系の絶縁物がかなり多く、そしてこれも一度熔融したのち粉碎したペリクレース結晶粉末であり、不純物として石灰、無水珪酸など少量を含んでいる。一般にマグネシアクリンカーと呼ばれているものは、マグネサイトを1,500~1,600°Cの高温度で焼成し硬焼としたもので、これは1,200°C以下ではα-MgOとなり、1,300°C以上ではβ-MgOのペリクレース結晶を形成するといわれる。しかしながら実際には不純物が相当量存在し、フォーステライトやマグネシオ・フェライト、あるいはアルミナ・石灰などの珪酸塩となつて存在し、着色している

ものが多くこれをただちにアルミカヒータに使用しても決して高性能のものは得られない。このためには純度のよい原料を選んでとくに精選し、少量の不純物でさえもこれを鉍化剤の添加等によつて安定な結晶塊にしなければならぬ。

たとえば、アメリカでさえもペリクレースの結晶をマグネサイトから製造する際に、石灰が混じってきて害を与えることを除くため適当量の無水珪酸を加えるというGE社の特許もあり、W社では金属マグシウムを発熱線輪に巻きつけた後、オートクレーブの中で蒸気を用いてマグネシアに変換させるという方法も採用しているのであつて、性能を一步前進させるためにかなり大きな努力が払われていることがわかる。熔融マグネシアの概略数値を示すと⁽²⁾、比重は3.47~3.64、融点2,800°C、溶解熱は700 cal/g、比熱は0.2494(24~100°C)、平均熱膨脹系数は100~1,000°Cにおいて6.3~12.8×10⁻⁶といわれている。日本にはマグネシア系の良質な原料が得られないので高性能のものにするには多くの操作を経なければならないが、処理方法によつては水酸化物や炭酸化合物をつくり易い傾向を生じ、この取り扱いに対しては十分注意しなければならないものである。

6. 珪酸塩の結晶とガラス

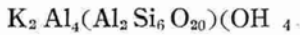
無水珪酸は天然に石英、水晶などとして多く産し、またトリデマイト、クリストバライト等いくつの変態のあることもよく知られている。無機質絶縁物の中には大なり小なり入つてくるもので、この物単独で使用するよりもその特性を知つて応用する方が興味深いものであり、この構造は1930年以来X線分析法の活用によつて明らかにされてきた。無機質絶縁材料は陽性原子と陰性原子の結合しているところに特長があり、その際原子半径が大きな役割を負っているものである。たとえば、珪素原子Si⁴⁺の原子半径が0.39 Åに対し、酸素原子O²⁻のそれは1.32 Åで、今4箇のO原子を正四面体に積み重ねたとすればこの中心の隙間にSi原子が1箇入る。このような基礎構成を拡張し1941年Hauserは珪酸塩を分類したがこれの一部分を文献⁽³⁾からとつて4図に示した。図中初めの欄は結晶格子の単位組成を一平面上に

1. 四面体の注		2. 四面体のアルミニウム		3. マ イ ナ	
	1 O - 2 1 Si + 4 3 O - 6		3OH - 3 1 Al + 3 3OH - 3		1 K + 1 6 O - 12 3Si+4Al + 15 4O+2OH - 10 4 Al + 12 4O+2OH - 10 3Si+4Al + 15 6 O - 12 1 K + 1

4 図 粘土鉍物の結晶構造

Fig. 4. Crystal structure of clay.

表わしたもので、中の欄は各格子面の原子または原子団とその数、右の欄は電子数を表わしたものである。たとえば図中の1から Si^{4+} と O^{2-} との結合は $(\text{SiO}_4)^{4-}$ と表現されるべきであり、これはさらに Mg^{2+} や Fe^{2+} などと結合してフォスフェイトや珪酸鉄の鉱物になることを示していると解される。たとえば前項に記したG E社の特許はこうした結晶構造を考えるならば納得がいくように思う。また3のマイカの構造からはもつとも特徴的なものとして



の化学組成が考えられ、これを高温で使用するれば、まず組成中の水酸基が放出し結晶を崩壊してしまうことがこれらの図や式から想像するに難くない。実験によれば 800°C 20分加熱すればX線によるラウエ斑点がぼやけてしまうということで、アルミカヒータの絶縁物としては工作上にも難点があるが温度からいっても満足する性能は得難い。アルミカヒータの内部が無機質の粉末から構成されるため、かなり緻密に充填しても湿気を吸着することになって絶縁を悪くする。ヒータに湿気が入っても熱すれば急速に放出してしまうから端子部分に封印しない場合もあり。すなわち一般の電気機器が吸湿して絶縁抵抗が悪くなった場合とはその状態が全く違うためであり、封印する場合は一般にガラスまたはそれに類するものを使用する。この性質は緻密であつて水分を吸着しないこと、使用温度で絶縁がよいこと、機械的に丈夫で金属との接着力が大きいこと、操作が簡単で金属と熱膨張係数の近いことなどが要求されるわけである。

このような絶縁物の組合せによつて製作したヒータについて、製品となつた状態の絶縁物の試験を行つたのでその一部をつぎに記してみたい。

7. 絶縁物の熱伝導率

アルミカヒータの絶縁物は粘着力のない結晶質鉱物粉末であり、この中のわずかな空隙の差は著るしく発熱線の温度を変えるものであるから、絶縁物単独で測定試片をつくつたり試験したりすることは非常に困難なばかりでなく、多くの誤差が入ることが予想される。よつて製品のまま実験し二三の仮定を入れて計算してみたわけである。

試験したヒータは低温空焼用の径 13 mm 継目無鋼管製で3図の写真に示した形状のものである。初めにこれを 20°C の静止空气中に水平においた場合の表面熱伝達率を求めなければならないが、この値は実験と計算により5図に示したよつた。これは輻射および空気自然対流による熱伝達率の和であることは申すまでもない。よつてヒータの表面温度は(1)式から求めることができる。

$$t_3 - t_0 = Q/E \cdot F \dots \dots \dots (1)$$

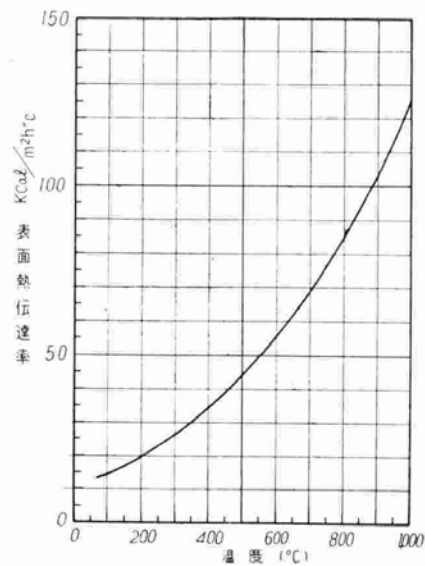
ただし t_3 = 鋼管の表面温度 $^\circ\text{C}$

t_0 = 室温 $^\circ\text{C}$

アルミカヒータの絶縁物・田村

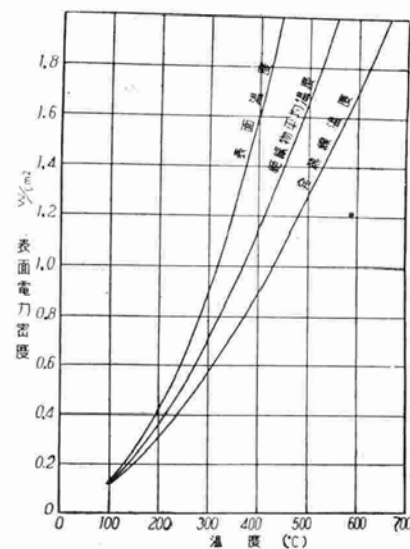
Q = ヒータの入力 kcal/h
 E = 鋼管の表面熱伝達率 $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
 F = 鋼管の表面積 m^2

この式を利用するにあつては、 E の値は t_3 によつて変り t_3 はさらに E によつて影響されるから、初め t_3 を推定して5図から E を求め、その結果出された t_3 に対しさらに補正した E の値を代入し、この操作を繰り返すことによつて真の t_3 を算出するのである。この結果を表面電力密度の設計値と対比して示すと6図左側の表面温度曲線が得られる。また絶縁物の熱伝導率がわかればさらにヒータの各部温度が推定され大いに参考になる。



5 図 アルミカヒータの表面熱伝達率
 径 13 mm 継目無鋼管を静止空气中に水平においた場合

Fig. 5. Heat conductivity on surface of "Almica" heater.



6 図 アルミカヒータの温度

Fig. 6. Temperature of "Almica" heater.

このためには熱電対を発熱線輪の中に埋め込んだ長さ260 mmの試験体を作り、入力を種々変えた場合の必要な実験値を求め、これを一般に蒸気管などの計算に適用される次の(2)~(5)式に代入して絶縁物の熱伝導率を算出してみたわけである。

$$Q = \frac{t_1 - t_0}{1/\lambda_1 l_n R_2/R_1 + 1/\lambda_2 l R_3/R_2 + 1/ER_3} 2\pi L \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで $t_2=t_3$ すなわち鋼管の内外は同じ温度であると仮定せば λ_1 は次のように簡単になる。

$$\lambda_1 = \frac{Q l_n R_2/R_1}{(t_1 - t_3) 2\pi L} \quad \dots\dots\dots(3)$$

また

$$t_2 = t_1 - k(t_1 - t_0)(1/\lambda_1 l_n R_2/R_1) \quad \dots\dots\dots(4)$$

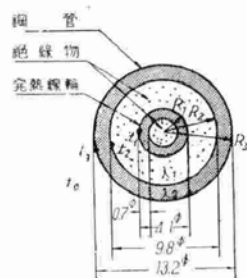
ただし

$$K = \frac{1}{1/\lambda_1 l_n R_2/R_1 + 1/ER_3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

t_1 =絶縁物内径の温度	°C
t_2 =絶縁物外径の温度	°C
R_1 =絶縁物内半径	m
R_2 = " 外半径	m
R_3 =鋼管の外半径	m
λ_1 =絶縁物の熱伝導率	k cal/m h °C
λ_2 =鋼管の熱伝導率	k cal/m h °C
L =鋼管の長さ	m
$l_n = \log e$	
K =熱貫流率	k cal/m² h °C

この場合のヒータ断面と符号および寸法は7図に示したとおりである。すなわち、発熱線輪内部の温度は一定状態になったとき、発熱線および絶縁物内径の温度と等しく、また発熱線輪は1本の棒とみなし得るとの仮定によつたものであるが、上式から λ_1 は0.44 k cal/m h °Cと計算され、この λ_1 の値は製作条件が同じとみられるヒータに適用されると思う。すなわち、全長1,780 mmの3図のヒータを種々の入力で実験し上式にしたがつて計算したところ、表面電力密度に対し6図に示すような発熱線温度と絶縁物温度を求めることができた。これからみると発熱線の温度は空气中にそのまま露出されたときの温度よりかなり低いことが想像され、発熱体としてこの場合非常に有利な点のあることがわかる。また図に



7図 アルミカヒータの断面
(単位mm)

Fig. 7. Section of
"Almica" heater.

示した絶縁物平均温度 t_m は t_1 と t_2 の算術的平均値で表わしたものである。

この実験では実測温度のばらつきに対して十分の検討を加えなければいけないと思う。よつて表面温度のばらつきはどの位まで生ずるものか当つてみた。初め発熱線輪単独の場合のピッチを実測するとそのむらの程度は±9%生じている。ところがこれをアルミカヒータとして鋼管の中に入れて絶縁物で囲うと、表面温度として±5%のむらになって生ずることは大体避け難いようである。また発熱線の温度については、線自身の抵抗温度係数を実測して曲線を描き、のち実際に電流を通じた時の温度上昇した抵抗の変化を実験し、平均温度を求めて確める等の手段をとつて再検討を行つたが、この結果は10%程度の誤差範囲内に納まるものと考えている。

このようにしてアルミカヒータの使用状態におけるその表面からの熱伝達率を知れば、発熱線等の温度が推定され設計上非常に役立つものと考え、ここに一つの便法として試みたわけである。

8. 絶縁物の絶縁抵抗と耐力値

前項と同じように絶縁物のわずかな差でその抵抗値は大いに異なるから、絶縁物単独で測定することは非常に困難な上多くの誤差が入つてくると思われる。よつてヒータ成品について求めるため試みたものである。いま3図に示したアルミカヒータを数多く絶縁抵抗を実測した結果によると、最高値は最低値の約20倍の値を示しているのである。よつて表面温度に対する絶縁抵抗値はある幅をもち、(6)式で表現されるような実験式が成立したのである。

$$R_{t3} = 6 \times 10^7 \sim 3 \times 10^6 e^{-0.0425 t_3} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし

R_{t3} =鋼管表面温度 t_3 °Cにおける絶縁抵抗値 MΩ

この表面温度を6図から絶縁物の平均温度に換算し(7)式に代入して各温度に対する固有抵抗を算出してみたが各部の寸法は7図のものを使用し、発熱線の線径は0.7 mm 長さは760 mm とした。

$$R_{tm} = \frac{(D_2 - D_1)(D_1 - d_0)}{d_0 l (D_2 + D_1)} \rho \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし

R_{tm} =平均温度 t_m における絶縁物の抵抗値 Ω

D_1 =絶縁物内径 cm

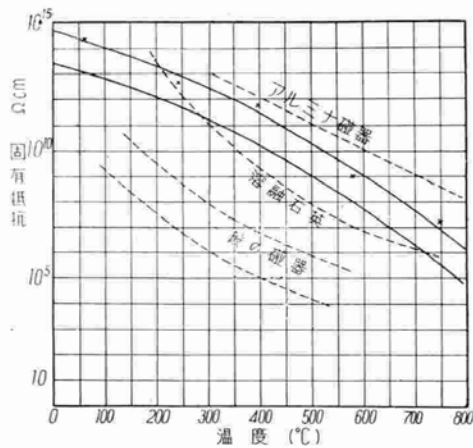
D_2 = " 外径 cm

d_0 =発熱線の線径 cm

l = " の長さ cm

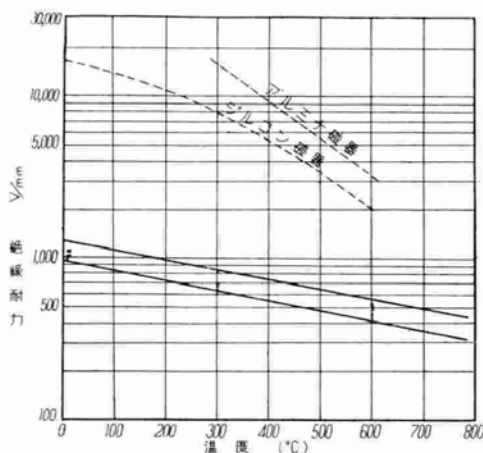
ρ =絶縁物の固有抵抗 Ωcm

この計算の結果絶縁物の固有抵抗は8図に示したように、2本の太い実線に挟まれた範囲内にあることが推定され、二三の一般に知られた点線の磁器の値と対比して



8 図 絶縁物の温度と固有抵抗

Fig. 8. Relation of temperature and specific resistance of insulator.



9 図 絶縁物の温度と絶縁耐力

Fig. 9. Relation of temperature and dielectric strength.

みるとかなり興味あるものと思う。

次にアルミカヒータの絶縁耐力の問題であるが、一般に発表されている磁器の値を適用して考えると全く意表外の結果になるのである。すなわちアルミカヒータの絶縁耐力値は大抵厚さには比例するが、磁器のそれと比較するとかなり低い値なのであつて、絶縁物の品質にはそれ程の關係がなく絶縁物の構成状態たとえばポーラスの度合とか、温度による影響などが大きいようである。

一般には破壊電圧は(8)式で表現されることが知られている。

$$V = \sqrt{\frac{\beta R}{\alpha e}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに熱伝導による熱の放散が主として絶縁物の厚さと直角の方向に行われるとすれば、熱の伝導係数 β はその厚さに比例する。また抵抗値 R も厚さに比例するから結局絶縁物の破壊電圧は厚さに比例することになる。アルミカヒータでも大抵この式が適用される熱電解的

アルミカヒータの絶縁物・田村

傾向をもつた破壊現象のようである。よつてこの場合は絶縁物を少量のバインダで成型した試料をつくり、一様温度の電気爐に入れ一定温度に保つて絶縁耐力値を求めた。この温度に対する絶縁耐力の実験値は9図に示す2本の太い実線に挟まれた範囲になり、(9)式のような実験式で表現される結果が得られた。

$$V_{tm} = 960 \sim 1,300 e^{-0.0014 tm} \quad \dots\dots\dots(9)$$

V_{tm} = 絶縁物温度 t_m °C における絶縁耐力 V/mm

すなわち、一般に知られている点線の磁器の値と比較するとかなり低い値であり、この値をヒータに適用すると絶縁物の平均温度が 360 °C のこの例に対しては 1,500 V の耐圧試験は恐らく極限值であつて実状に近いものと考えられる。工作上発熱線輪はつねに鋼管の中心になければならないことは至極当然のことであるが、耐圧値の問題から検討を加えるならばもつとも重大な点である。一般の機器においては絶縁抵抗試験は耐力試験を行う前の予備試験であるようにいわれているが、アルミカヒータにおいては絶縁抵抗値は絶縁物自身の品質とともに、その充填状態おも表現するもので寿命値にも関連する重大なものである。また絶縁耐力値は上述のようにその構造上あまり高くはなし得ないもの、言葉を換えるなら、絶縁耐力値を必要の範囲内に低くとつて他の性能を上げた方が賢明であるといえるわけである。

9. む す び

アルミカヒータに使用される絶縁物は、熱伝導率がすぐれた上、電氣的絶縁抵抗値も高くなければならないという、材料的にみるならばはなはだむずかしい条件を備えなければならない。また工作法による制限もあるため構造が簡単な割に他の機器と違つた種々の問題がある。絶縁物の種類としては高純度のアルミナ・マグネシアと共に少量の珪酸その他の塩類鉱物であり、それゆゑに性能を一步前進させるためには非常に大きな努力が必要となつてくるものと思う。

”ここにはこれら絶縁物についてその概略を記したが、このもの単体の性能を調べることは鉱物学的興味はあろうが、実際のヒータとしては条件が異なるため実験には誤りを伴いやすい。よつてここには成品について絶縁物の熱伝導率、絶縁抵抗値および絶縁耐力値を、簡単な方法を適用して求めてみた。この例として高級品とはいえないけれども低温空焼用の鋼管製のものを供し、方法自身にも批判の余地があるものと思うけれども、従来こうした文献が少いものであるから、筆者の一つの考え方を示し各位のご教示を賜りたいと思う。

文 献

1. 山口悟郎：研削材料の結晶学的諸問題。
工業物理化学第2輯
2. N.V.S. Knibbs : Lime and Magnesia. 1924
3. W.L. Bragg : Atomic Structure of Minerals.

日本最大の“水素冷却タービン発電機”完成近し

画期的なわが国最大の水素冷却タービン発電機が完成に近づいている。これは九州電力築上発電所・相浦発電所向で 3,600 rpm 13,200V 58,800 kVA 水素冷却方式のものである。

その特長はつぎのとおりである。

1. 水素冷却方式最大出力高速度記録品である

3,600 rpm 機のわが国の記録品は先般運転に入った 43,750 kVA 13,200V (九州電力築上発電所向) と目下製作中の 41,177 kVA, 11,000V (中国電力小野田発電所向) であるが、本機は 58,800kVA 13,200V (11,000 V) で 3,600 rpm 機として上記のものを凌駕するものである。なお水素冷却式という点で画期的記録品である。

2. 効率が上昇した

水素の密度は空気の密度の約 7% であるので、気体の密度に比例する摩擦損・通風損が約 10% に減少し、したがって発電機の効率が改善された。これはタービン発電機のように大型高速度機では摩擦とこれに冷却媒体を送るための動力は全損失の約 30% に達するからで、本機は全負荷効率は空気冷却式に比べて 1% 増加する。

3. 15% 連続過負荷も可能

本機のカス圧力は常時水柱 350 mm であるが、カス圧力を 1 気圧まで上昇できるように計画した。したがって本機は 15% の連続過負荷耐量が利く。なおカス冷却機の冷却水温が規定値よりも上昇した場合にはカス圧力を上昇させることにより連続全負荷をかけることができる。

4. 耐爆構造

固定子枠の中に軸方向にカス冷却器を設置し、固定子枠全部を耐爆構造にした。

5. 有害振動を防ぐ

2 極機械に固有な 2 倍振動の周波数が固定子鉄心に生ずるので、この振動収吸装置を固定子枠に取りつけ、この有害な振動が絶対に外部へ伝達しない構造を採用した。

6. 回転子線輪の収縮現象を防止するため回転子銅体に特殊銀入銅合金線を採用した。

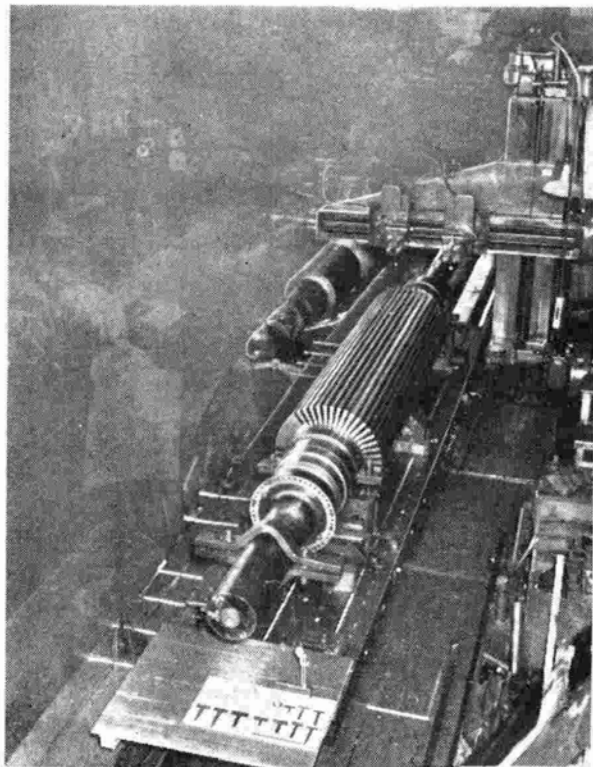
7. 回転子軸機はニッケルクロムモリブデン鋼で米国標準規格 G 6 相当品を採用した。

8. カス純度の低下を防ぐ特殊密封器

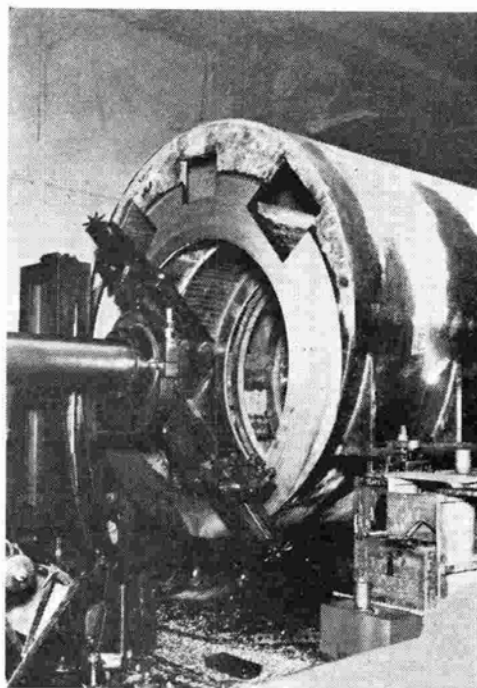
水素冷却タービン発電機はかならず密封器であるが、これには液体密封機を用い、密封油によるカス純度の低下をできるだけ少なくする構造を採用した。なお発電機停止中機内カス漏洩を極力少なくする目的で特殊軸封装置をつけた。

9. 点検容易、操作簡単

機内カスを逸出することなしに容易に軸受の点検ができる構造を採用した。また油制御装置、カス制御装置もできるだけ簡易化し、操作の安全簡易、信頼性をますますに計画した。



機械加工中の回転子枠



機械加工中の固定子枠