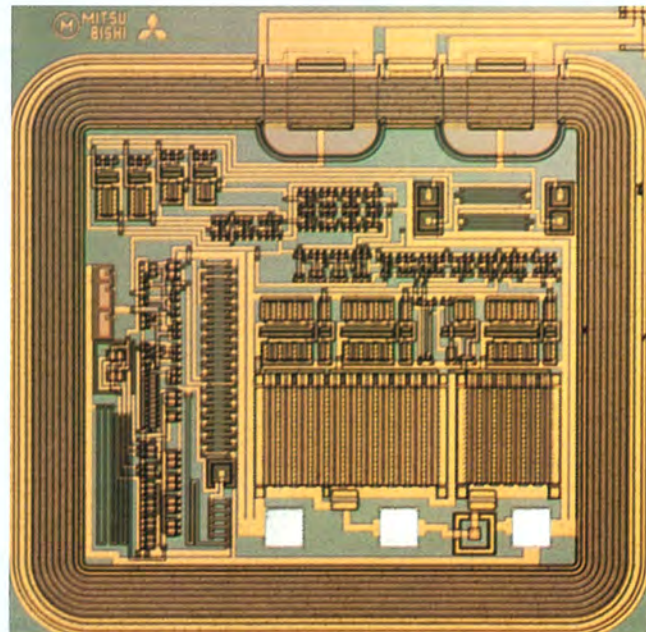
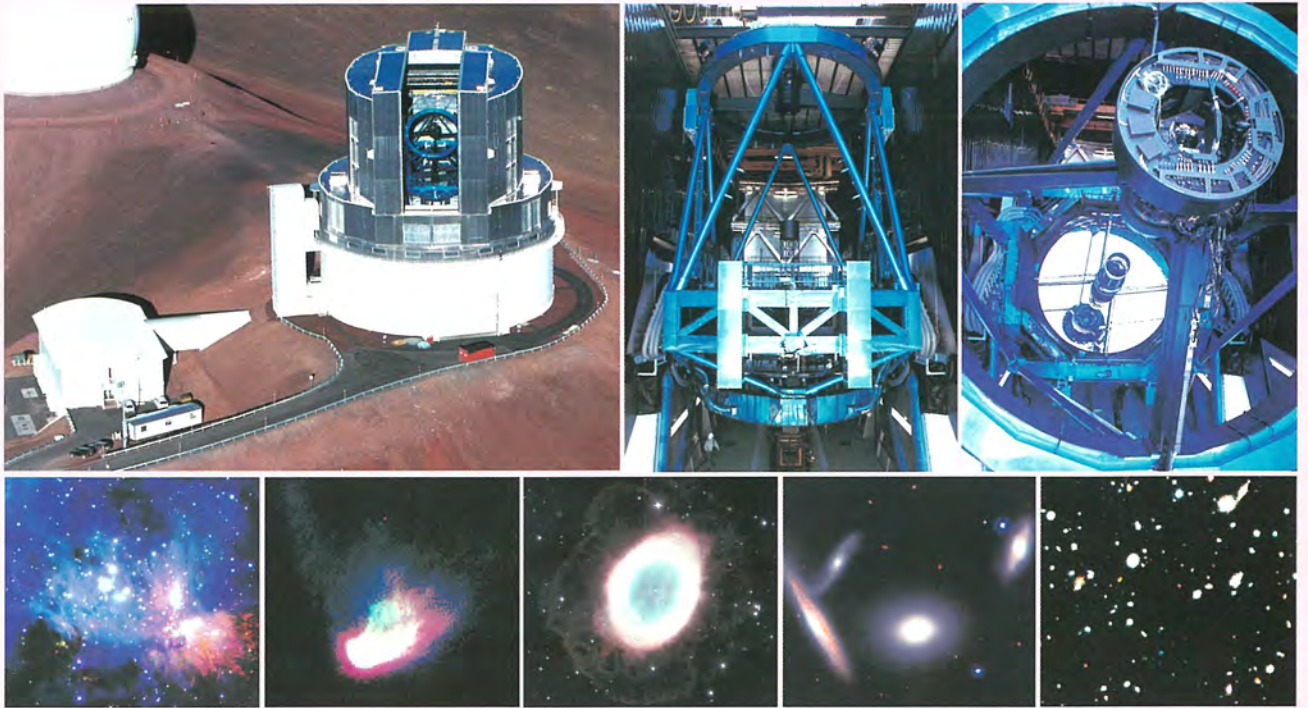


MITSUBISHI

三菱電機技報 Vol.73 No.12

特集Ⅰ「大型光学赤外線望遠鏡“すばる”」 '99
特集Ⅱ「パワーデバイス」

12



目次

特集 I 「大型光学赤外線望遠鏡“すばる”」

| | |
|------------------------------------|----|
| 21世紀観測天文学の行方 | 1 |
| 唐牛 宏 | |
| すばる望遠鏡に用いた主要技術と観測成果 | 2 |
| 三神 泉・伊藤 昇 | |
| 主鏡鏡面精度保持技術 | 7 |
| 宮脇啓造・田畑真毅 | |
| 超大型超高精度鏡製作技術 | 13 |
| 斉藤秀朗・谷本亜紀 | |
| 高い天体追尾精度を実現する望遠鏡駆動制御技術 | 19 |
| 浅里幸起・香月良夫・清水岳男 | |
| 良好なシーイング環境を確保する望遠鏡まわりの風速制御技術 | 23 |
| 三神 泉・石川 幹・古藤 裕 | |
| すばるの性能を維持するための望遠鏡保守技術 | 27 |
| 石川 幹・三神 泉 | |

特集 II 「パワーデバイス」

| | |
|---------------------------|----|
| パワーエレクトロニクスとパワーデバイス | 31 |
| 大野 榮一 | |
| パワーデバイスチップの技術動向と展望 | 32 |
| 萩野浩靖 | |
| 家電インバータ用超小型DIP-IPM | 37 |
| 岩崎光孝・川藤 寿・岩上 徹 | |
| 第四世代IGBTモジュール | 41 |
| 山口博史・山下潤一・田畑光晴 | |
| 逆阻止形GCTサイリスタ | 45 |
| 佐藤克己・山元正則・高田育紀 | |
| 1,200V級のHVICプロセス | 49 |
| 清水和宏・寺島知秀・守谷純一・日根史郎 | |
| SiC素子技術 | 53 |
| 杉本博司・樽井陽一郎・今泉昌之 | |

普通論文

| | |
|-------------------------------|----|
| 関西電力(株)ワン・ストップ・サービスシステム | 57 |
| 不動弘幸・岡村 彰・望月美彦・秋父基浩 | |

特許と新案

| | |
|-----------------------------------------|----|
| 「大型光学望遠鏡の反射鏡製造技術」「大型光学望遠鏡の鏡の支持技術」 | 61 |
| 「半導体装置」 | 62 |

スポットライト

| | |
|------------------------------------------|------|
| 高性能汎用インバータ“FREQROL-A500/A500Lシリーズ” | 63 |
| 家電インバータ用DIP-IPM Ver.2シリーズ | (表3) |

| | |
|--------------------|----|
| 三菱電機技報73巻総目次 | 64 |
|--------------------|----|

表紙

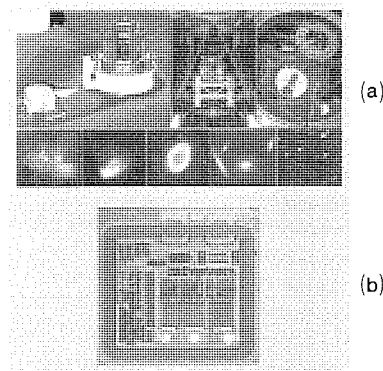
大型光学赤外線望遠鏡“すばる” (a)

研究開発フェーズから15年の年月を経て、一枚鏡として世界最大の反射鏡を持つすばる望遠鏡(国立天文台へ納入)が、ハワイ島マウナケア山頂に完成した。この特集号では、世界最高の性能を発揮することを使命として取り組んだ様々な技術開発の中から、ブレークスルーを必要とした困難な課題とその解決策を紹介する。

写真は国立天文台から提供いただいたものである。

1,200VプロセスによるHVIC (b)

パワーデバイスのシステム化に不可欠の要素技術として、HVIC(高圧IC)の技術が必要であった。産業用のインバータやサーボ制御用ASIPMの駆動・保護用として、今般、分割RESURF構造を適用し、AC400V系に対応できる1,200VのHVICを開発した。



I 21世紀観測天文学の行方

国立天文台
教授 唐牛 宏

日本がハワイのマウナケア山頂に建設を進めてきた口径8.2mの大望遠鏡“すばる”が完成を迎えた。何人かの先駆的な天文学者が海外設置を文字どおり“夢”見て現地とコンタクトをとり構想を立て始めた1980年代初頭から二十余年、研究者、製造現場の技術者、行政官、そのほか有形無形にこのプロジェクトに参画し支えた多くの人たちの努力が実って、外国に大型の先端的な科学研究施設を置くことが遂に実現したのである。

すばるの建設は、当たり前のことだが、世界中で孤立して行われたわけでも突出して先行したわけでもない。建設中のもも含めると、21世紀初頭の地球上には、10台以上の8m級望遠鏡が、協力して宇宙のなぞ(謎)を解き明かそうと、空に向けられているはずだ。その中で、すばるの特長はどこに見出せるのだろうか。十数台の中に紛れてしまうのではないかという不安はないのだろうか。

すばる望遠鏡は、実にたくさんの機能を持たせた設計になっている。欲張り過ぎだという声さえある。8m級では唯一の主焦点を始め計四つの焦点(他は1ないし2)、副鏡と第3鏡計5枚、観測波長帯0.3~30 μ m、演算速度40Gflopsのスーパーコンピュータと150Tバイトのデータ記録容量などがそれである。これらの機能は直ちにすべてがフル回転しなくとも、近い将来に必ずやってくるだろう未知の観測ニーズにもこたえられるような大きな汎用性を持つ、という点が他と顕著に違うところだろう。

さらに、この特集で詳しく解説されるであろう、世界最高の研磨精度、鏡面形状保持のための他に類を見ない重心

支持のメカトロアクチュエータ、非接触のダイレクトドライブと油圧軸受を組み合わせた望遠鏡駆動制御、空気の熱揺らぎを抑える機能をギリギリまで追求したドームなど、設計・製造に注いだ創意工夫は数限りない。

今後時代の進歩に合わせた改良や性能アップの努力を忘れなければ、これから先10年又は30年にわたって世界のトップレベルを保ち続けるだろうという強い期待を持たせてくれる望遠鏡である。

すばる望遠鏡は何を目指すのか。我々はこの計画を推進する中で、①宇宙の生成進化の中での暗黒部分である100億年以上過去の初期宇宙を直接に観測する、②我々の太陽系以外にも惑星が存在するかどうかを突き止めるという二つを21世紀天文学のグランドチャレンジと位置付け、“すばるの目標”と主張してきた。果たして、すばるを始めとする8m級望遠鏡は、この使命に明りょう(瞭)な答を出せるだろうか。

時代は今や、あたかも別な答を準備するかのように、とうとう(滔々)と流れ始めている。ハッブル宇宙望遠鏡の次に来る8m級の次世代宇宙望遠鏡、又は一挙に地上に50~100m級の超大型望遠鏡を建設する、月面に望遠鏡を、などの次期計画が熱っぽく検討され始めているのである。

しかし、いずれをとっても、8m級地上望遠鏡が切り開いた、主鏡の能動支持や分割鏡の制御、大気の揺らぎによる星像劣化を打ち消す補償光学、等の先端技術を基礎に次の飛躍を目指すものである。すばるは、その意味でも、次世代の天文学の礎となるのである。

すばる望遠鏡に用いた主要技術と観測成果

三神 泉*
伊藤 昇**

要 旨

国立天文台から受注し研究開発フェーズから約15年の歳月を掛けたすばる望遠鏡がついに完成し、1999年9月に完成式典が執り行われた。すばる望遠鏡は、一枚鏡として世界最大の有効口径(8.2m)を持つ反射望遠鏡であり、世界でも最高の観測所として知られるハワイ島マウナケア山の頂上付近(海拔約4,200m)に設置されている。

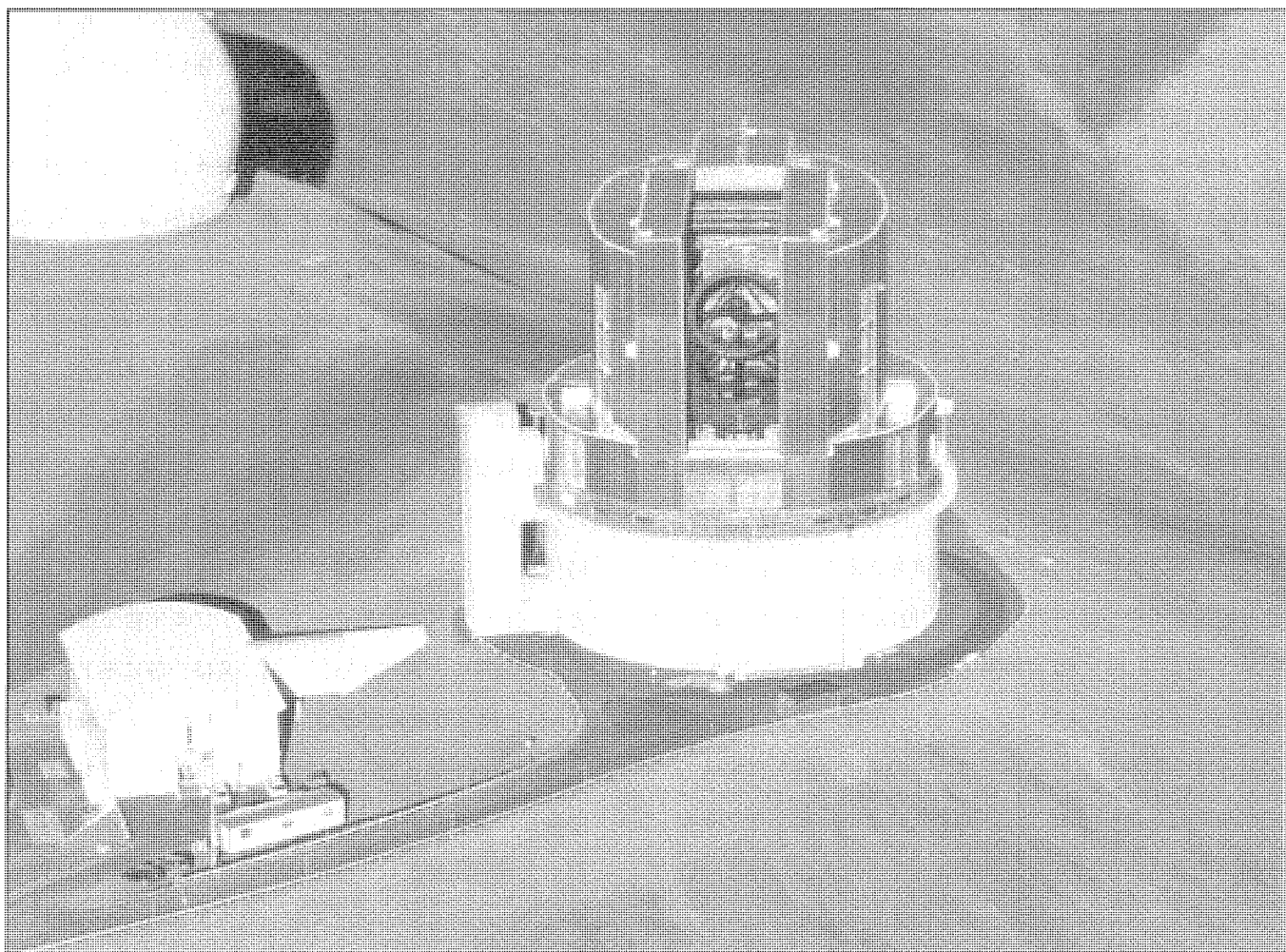
地上望遠鏡として世界最高の分解能を発揮させるため、薄型主鏡の支持技術、主鏡の製造や研磨技術、望遠鏡構造

の精密駆動技術、ドーム及び蒸着装置など保守設備の設計製造技術など、様々な分野でブレークスルーが展開された。

本稿では、この内容を紹介する。また、完成したすばる望遠鏡を用いた観測成果を紹介し、仕様値である星像の分解能(0.2秒角)が見事に達成されていることを示した。

三菱電機の総力を結集したすばる望遠鏡が永く天文学の発展に貢献することを願っている。

特集
1



すばる望遠鏡の全景

すばる望遠鏡本体がメインシャッターを開けたドーム内に見える。写真は国立天文台提供

1. ま え が き

有効口径8.2mのすばる望遠鏡が建設されたハワイ島マウナケア山頂は、海拔4,200mの高地である。この場所は、空気が薄く晴天率が高いだけでなく、偏西風がほぼ一定の風速で吹いているために、星のまたたき(空気の渦や揺らぎによって発生する星の位置変動や形状の変化)が極めて少ないという特色を持っている。このまたたきは、天文の世界ではシーイングと呼ばれ、地上望遠鏡の性能を決める目安となっている。マウナケア山頂は、このシーイングが世界で最も良い場所として知られるため、世界中から多くの大型望遠鏡が集まっている国際的な観測所である。マウナケア山頂付近の景観を図1に示す。

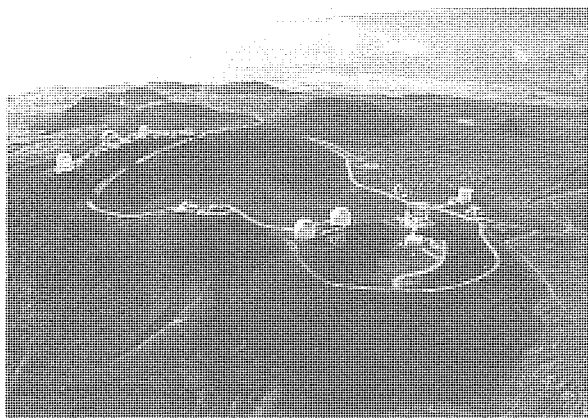
このシーイングの影響を回避するため、アメリカ合衆国は、1990年、2.4m口径のハブル望遠鏡を打ち上げた。ハブル望遠鏡は、極めて真空度の高い宇宙空間に設置されるため、シーイングの影響を受けない。しかし、望遠鏡の口径や質量が打ち上げ手段から制限を受けること、宇宙仕様を満足させる設計・製作や打ち上げのため費用が大規模化することなどのデメリットもある。

マウナケア山頂は、シーイング条件は宇宙には及ばないものの、宇宙に比べてアクセスが容易であること、観測データの配信などの基盤が整っていること、輸送制限が宇宙に比べて少ないため望遠鏡の大口径化が可能なことなどのメリットから、すばる望遠鏡の設置場所として選択された。

本稿では、設置場所の最高の条件を生かすためすばる望遠鏡に課せられた“夢”をいかに解決したかを、主として、システム設計とシステムインテグレーションの見地から紹介する。

2. すばる望遠鏡の開発目標

望遠鏡の最終性能は製造の分解能(空間的に隣接した二つの天体が識別できる能力)で定義される。したがって、望遠鏡そのものが持つ分解能は、設置場所のシーイングと



写真：国立天文台提供

図1. マウナケア山頂の望遠鏡群

同等又はより良いものであることが要求される。すばる望遠鏡は、マウナケア山頂のシーイングの最良値と考えられている0.2秒角台の分解能を発揮できることが開発目標であった。開発を開始した当時0.5秒角程度の分解能がマウナケア山頂でのチャンピオンデータであったことを考えると、この開発目標は、“夢”であったと言って過言ではない。この開発目標に向け、当社の自主開発、客先である文部省国立天文台(当時は東京大学東京天文台)との共同研究、特定研究などの受注を加えた本格的な研究開発が'85年に開始された。その後、実現可能性の検証や様々な技術開発を経て、本予算によるプロジェクト推進が'91年に始まった。そして、ついに、'99年9月17日には、皇室を招待した完成式典が開催されるまでに至った。'85年から今日に至るまでのプロジェクト推進経緯を図2に示す。

プロジェクト推進にはシステム設計や開発を含む技術管理、メークバイ管理、工程・コスト・文書管理等の総合的なプロジェクト管理が必要とされるが、次章では、特に技術管理面として、すばる望遠鏡の実現に不可欠であった主要技術の例を紹介する。

3. 主要技術の例

すばる望遠鏡が0.2秒角台の分解能を実現するためには、関連するすべての構成要素に対し、それぞれが達成すべき分解能の誤差を配分する必要がある。この例を、エラーバジェットとして図3に示す。この配分値のそれぞれにつき、実現可能性を解析や実験で検証し関連する構成要素の設計仕様値に落とし込んでいく作業を、システム設計段階で行った。しかし、各構成要素の難易度のレベルをできるだけ平滑化するため、何度も書換えが必要であった。その中でも最も開発難度の高かった構成要素を主要技術の例として、その開発を必要とした技術的背景とともに以下に紹介し、特集論文として詳述されるそれぞれの内容につなげる。

3.1 主鏡鏡面精度保持技術

アメリカパロマ山の5m望遠鏡に代表される主鏡は、鏡材が厚く剛性の大きなものである。すばる望遠鏡の主鏡(有効口径8.2m、外径8.3m)をこの方法で製作すると、ガラス材の鑄込みだけで10年余の年月がかかる。これを避けるためコンタクトレンズのような薄型の主鏡にして軽量化を図らなければならないが、剛性が小さくなるため、望遠鏡の姿勢(主鏡にとっては重力方向)が変わると有害な変形が生じやすい。この変形は、観測する光の波長0.5ミクロンに対し、1/10のオーダーしか許されない。したがって、変形をこのオーダーに抑え込むための主鏡鏡面精度保持技術の実現が必ず(須)であった。この背景の下で当社の独特な技術で生み出されたのが、アクチュエータに代表される主鏡能動支持システム⁽¹⁾⁽²⁾である。

3.2 超大型超高精度鏡製作技術

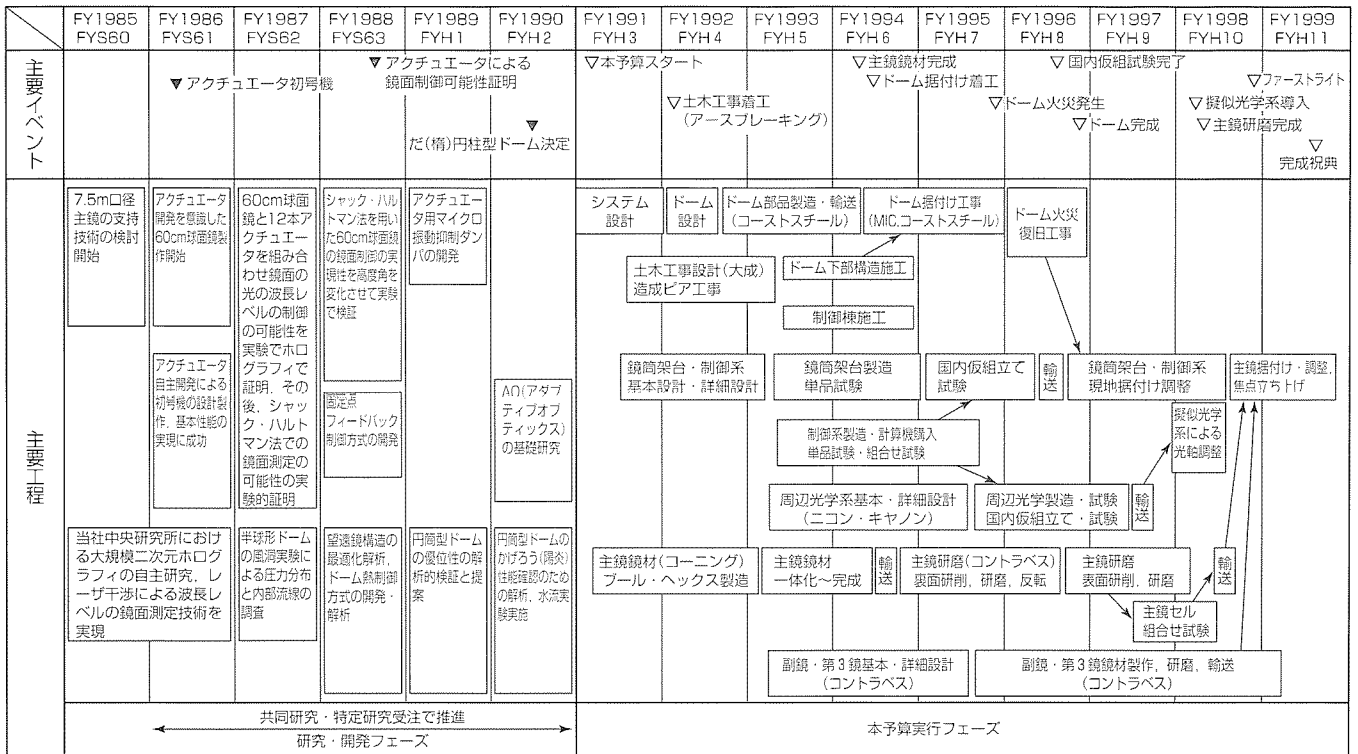


図2. すばる望遠鏡プロジェクト推進経緯

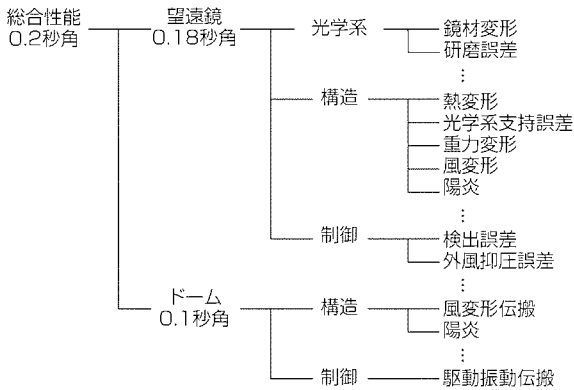


図3. エラーバジェット

'85年当時、一枚鏡として世界最大の外径8.3m主鏡鏡材を製造する設備や、その研磨を行う設備は存在しなかった。製造後の搬出・輸送の可能性を見極めた上での各メーカーの選定と必要な設備の開発、これに加えて、その後の製造・研磨工程でやがて遭遇するであろう技術的な問題の事前推定と事前克服がかぎ(鍵)となった。主鏡鏡材を担当させたアメリカ合衆国のコーニング社選定の過程、主鏡鏡材の持つ微妙な熱膨脹率の空間的な分布を制御し主鏡の熱変形を許容値以内に抑えるアルゴリズムの開発⁽³⁾、主鏡研磨を担当させたアメリカ合衆国のコントラベス社選定の過程、主鏡研磨最終段階での研磨精度とのかっこう(葛藤)等が特に重要であった。

3.3 望遠鏡本体の超精密駆動

3.1節で述べた主鏡能動支持システムの制御により、望

遠鏡の姿勢変化や風などの外乱の下で、常に安定かつ所定の支持精度に保たねばならない。また、この制御は、巨大な望遠鏡構造を滑らかに駆動させ、観測天体を精密(0.07秒角RMSの精度で)追尾する制御との同期が必要で、互いに干渉させてはならない。一方、追尾精度は、古典的な歯車駆動やフリクションドライブ機構を用いると、駆動部の摩擦が原因で精度が達成できないことがシステム設計段階で分かった。このため、望遠鏡の構造自身をモータ化するダイレクトドライブ方式を考案したが、このモータ化技術のほかにも、高周波数域まで制御を安定化させるための工夫⁽⁴⁾、北極星近傍の天体の追尾のため超低速駆動における角度信号の確保など、様々な工夫が必要となった。

3.4 人工のシーイング劣化を抑えたドームの概念

'85年当時、ドームと言えば、半球型で白色ペイント塗装が常識的であった。しかし、このドームは雰囲気と大きな温度差が発生したり渦で乱れた風を取り込みやすい等の理由で、自分自身でシーイングの劣化を引き起こしている可能性があることがようやく分かり始めた時期でもあった⁽⁵⁾。この原因を技術的・定量的に究明し、新しいドーム設計の概念を樹立する必要がある。地表乱流のドーム内への取り込みを抑える形状の工夫、夜の上空の冷気との熱放射結合による冷え過ぎの防止策、ドーム内発熱の熱輸送による遠方排熱、ドーム内の渦の吹き飛ばしのための自然風積極利用、ドームの風による振動を望遠鏡に伝えにくくする地盤や望遠鏡ピアの設計など、様々な新概念⁽⁶⁾が導入された。

3.5 保守・運用設備

主鏡は観測時間とともに反射率が劣化する。このため、年1回は古くなったアルミ蒸着層を洗い落とし再度蒸着を施す必要がある。このための設備を山頂のドーム内に収納するが、世界で最大の主鏡をドーム内でハンドリングするために必要な設備の配置の工夫に加え、真空蒸着装置¹⁷⁾や洗浄装置等の実現には大きな技術的ブレークスルーが必要であった。

4. すばる望遠鏡の主要性能・諸元、及び観測結果

すばる望遠鏡の外観を図4に、望遠鏡本体の模式図を図5に、すばる望遠鏡の主要性能・諸元を表1に示す。

図5に示すように、すばる望遠鏡は、主焦点、光学カセグレン焦点、赤外カセグレン焦点、光学ナスマス焦点、赤外ナスマス焦点の五つの焦点を持っている。'99年9月現在で、一枚鏡で8m以上の有効口径を持つ望遠鏡としてはヨーロッパ南天天文台のVLT(チリに設置)とアメリカ、カナダ、イギリス等の協力によるGEMINI望遠鏡(マウナケア山頂に設置)があるが、主焦点を持つのはすばる望遠鏡だけである。主焦点は明るい焦点である(焦点距離が短い。)ため、焦点スケールが小さくなる(0.1秒角に対応する

距離が焦点面で約7 μ mしかない。ちなみに、カセグレン焦点では45 μ mある。)したがって、同じ大きさのCCDカメラでも、主焦点では広い視野が観測できるため、興味深い天体の搜索に適している。その反面、主焦点に置かれたカメラと主鏡との間の距離がわずか変化しても、天体がすぐにじ(滲)んでしまうため、精度の確保が難しいという技術的問題がある。すばる望遠鏡は、この技術的問題を克服した8m望遠鏡としては唯一の望遠鏡である。

表に示した主要性能は平均風速7m毎秒という厳しい条件において達成されるべきものであるが、仕様値はすべて満足している。また、'99年9月現在、8m級の主鏡の中で、すばる望遠鏡の主鏡は、世界最高の鏡面精度(12nm RMS)を達成している。これに加えて、星像の分解能は、今までマウナケア山頂で観測された記録を次々と塗り替え、'99年6月10日には、0.198秒角を記録した。このときの星像の強度分布プロフィールを図6に示す。この図は、国立天文台のご好意で提供を受けたものである。

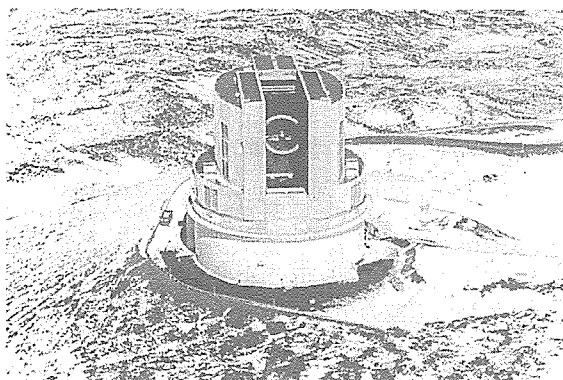


図4. すばる望遠鏡の外観

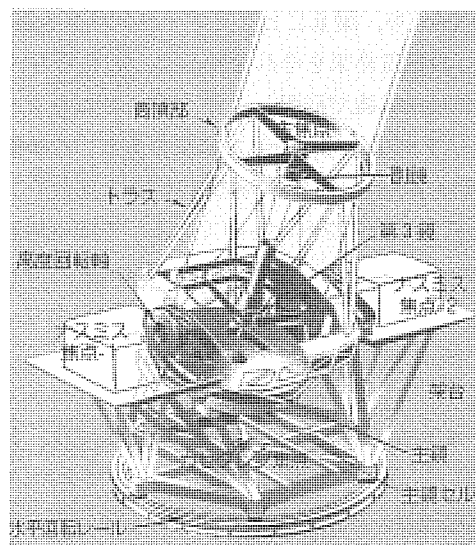


図5. 望遠鏡本体の模式図

表1. すばる望遠鏡の主要性能・諸元

| 項目 | 性能 (1999年9月現在) | 仕様値 |
|-------------|-------------------|----------|
| 総合分解能 | 0.2秒角以下 | 0.2秒角台 |
| 観測波長 | 0.4~10 μ m | 同左 |
| 主鏡有効口径 | 8.2m(外径8.3m) | 8.2m以上 |
| 望遠鏡方式 | 経緯台方式 | 同左 |
| 主鏡鏡面精度 | 12nm RMS | |
| 望遠鏡指向精度 | 1秒角RMS以上 | 同左 |
| 望遠鏡追尾精度 | 0.07秒角RMS以上 | 同左 |
| 望遠鏡最大駆動速度 | 0.5° 毎秒 | 同左 |
| 光学系込み望遠鏡質量 | 550トン | - |
| ドーム回転部質量 | 1,600トン | - |
| ドーム上部駆動精度 | 0.1°RMS以上 | 同左 |
| ドーム上部最大駆動速度 | 0.55° 毎秒 | 0.55° 毎秒 |

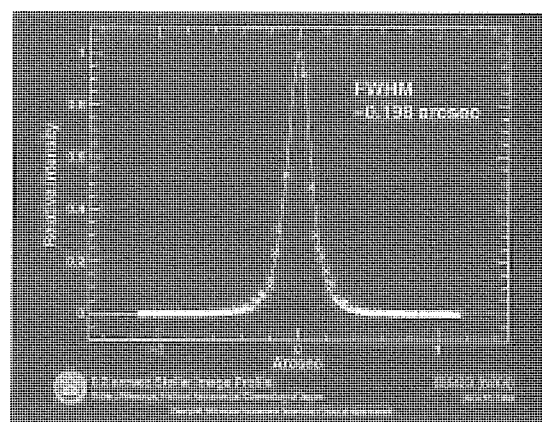
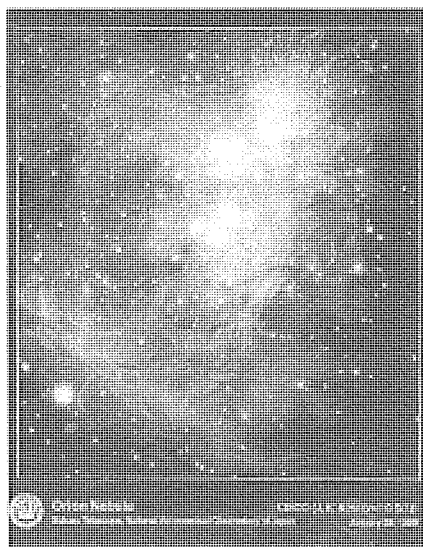
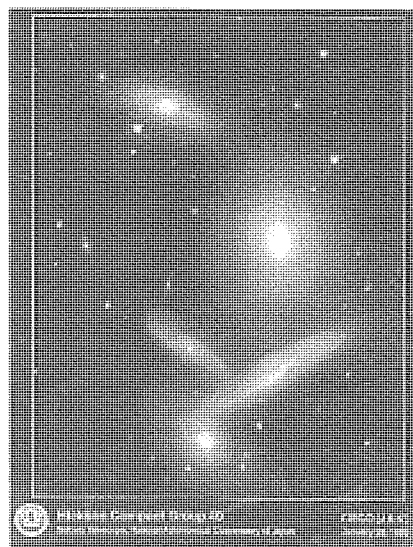


図6. マウナケアで測定された0.198秒角の分解能
(1999年6月10日)



写真：国立天文台提供

図7. オリオン星雲



写真：国立天文台提供

図8. ヒクソン・コンパクト銀河群40(うみへび座)

次に、このような性能を達成したすばる望遠鏡で観測された天体の代表的な撮像例を示す。図7にオリオン星雲(約1,500光年)を、図8にヒクソン・コンパクト銀河団(約3億光年)の撮像結果をそれぞれ示す。どちらも、1.25~2.15 μ mの近赤外線で見出し、青、緑、赤のカラー合成をコンピュータ画像処理で行った結果である。この撮像結果は、'99年1月28日(ハワイ時間)に国立天文台のファーストライト発表で公開されたものである。すばる望遠鏡の集光力と高い分解能により、鮮明で微細な天体の構造が明らかにされた例と言えよう。

5. むすび

ファーストライト以降、マウナケア山頂では、各焦点の精度を追い込むための微調整を鋭意行ってきた。しかし、すばる望遠鏡は、生まれて間もない赤ん坊のようなものである。本当の実力を発揮するには、今後も年月をかけて使い込み、精度を追い込んでいく必要がある。当社の統合力で日本の技術と世界の技術を融合させて築き上げたこのすばる望遠鏡が、長期にわたって世界一の座を守り続け、世界の天文学の発展に永く貢献できることを期待している。筆者らがすばる望遠鏡計画に参画して以来13~14年になるが、この間に、国立天文台の関係者の皆様や、天文学会、関係大学や多くの研究機関からたくさんのご指導を賜った。このご指導がなければ今日の成果は成し得なかったものと信じる。この場をお借りしてお礼申し上げる。また、既に国立天文台(当時東京大学東京天文台)を退官された山下泰正氏(現国立天文台名誉教授)には、光学技術の基礎からご教示いただき、暖かな目で未熟な筆者たちの技術を見守っていただいた。ここに特筆し、心から謝意を表したい。

文末ではあるが、このプロジェクトに参画されたすべて

の方々に敬意を表するとともに、プロジェクトの完成を見るまでに他界された何人かの貢献者に改めて哀悼の意を捧げる。

参考文献

- (1) Ando, H., Watanabe, M., Mikami, I., Itoh, N.: Mechanical and Optical Performance Analysis of JNLT Mirror Support System, ESO Proc., No.30, 569~575 (1988)
- (2) Nishimura, S., Yamashita, Y., et al.: Mechanical Design for JNLT Mirror Support System, ESO Proc., No.30, 577~582 (1988)
- (3) 西口憲一, 三神 泉, 佐々木亜紀, 市川 晃, 家 正則: 大型望遠鏡の主鏡鏡材最適配置問題へのシミュレーションアニーリングの応用, 計測自動制御学会論文誌, 31, No.1, 116~125 (1995)
- (4) 浅里幸起, 岡本健一, 伊藤富美夫, 山本 哲: 大望遠鏡における外乱抑圧特性の評価方法, 日本機械学会 No.910-52 シンポジウム講演論文集, 248~253 (1991)
- (5) Mikami, I., Itoh, N., Miyawaki, K., Ando, H., Noguchi, T.: Dome Design of JNLT, Astrophysics and Space Science, 160, 173~181 (1989)
- (6) Mikami, I., Yamauchi, H., Itoh, N., Kawahara, S., Cocksedge, C.P.E., et al.: Enclosure of SUBARU Telescope, Proceedings of SPIE, 2199, 430~441 (1994)
- (7) 野口 猛, 神澤富雄, 湯谷正美, 林 左絵子, 沖田喜一, ほか: 「すばる」望遠鏡8.2m主鏡の蒸着, 国立天文台報, 4, 129~140 (1999)

主鏡鏡面精度保持技術

宮脇啓造*
田畑真毅**

要旨

すばる望遠鏡の口径8.2mの主鏡を支持しその鏡面精度を保持する“主鏡能動支持システム”の機能・性能、及び開発過程で克服した技術的課題について述べる。

それまでの常識を破る超薄型鏡の鏡面精度を維持するために、従来からの主鏡支持手法である“フローティング”の精度を極限まで高めた。フローティングとは、主鏡を疑似的に無重力状態にし、主鏡自身の自重変形を限りなく小さくする手法である。まず、従来の機器の数十倍の精度で主鏡を支持するアクチュエータについて述べる。次いで、複数のアクチュエータ群で構成される“能動支持システム”の機能・性能、支持アルゴリズムについて述べる。能動支持

システムを完成させるための途中段階における数種の検証試験についても紹介した。静的・動的にシステムが適正かを検証する試験である。

その後、この能動支持システムを望遠鏡構造に組み込むときの技術課題について述べる。無重力状態で(言い換えればふわふわと)支えられている主鏡を強固に望遠鏡構造に結合する固定機構について記載する。

最後に、能動支持システムと主鏡を組み合わせた“セルテスト”の概要とその結果を述べる。非常に良好な結果であり、この性能は、この特集の別稿で紹介されている望遠鏡としての高い解像度を達成するための原動力となった。

| FY1986 | FY1987 | FY1988 | FY1989 | FY1990 | FY1991 | FY1992 | FY1993 | FY1994 | FY1995 | FY1996 | FY1997 | FY1998 | FY1999 |
|------------|--------------|----------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|---------|--------|-----------|--------|
| アクチュエータの開発 | | | | | | アクチュエータ実験の設計・製作・単品試験 | | | | | | | |
| | 能動支持システム検証試験 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 能動支持システム設計・製作 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | 能固定系フィードバックの開発 | | | | 固定点機構実験の設計・製作・試験 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 国内仮組立試験 | | | |
| | | | | | | | | | | | | セルテスト | |
| | | | | | | | | | | | | ▼ファーストライト | |
| | | | | | | | | | | | | 増付の試験 | |

セルテストの経過と試験状況

能動支持システムと主鏡を結合して主鏡支持の最終段階の試験をしている様子を示す(セルテスト)。開発開始から最終段階に至るまで十数年を経ている。

1. ま え が き

主鏡能動支持システム開発において最初に直面した課題は、いかにして非常に薄い主鏡に対応するかということであった。従来の望遠鏡で使われている主鏡に比べ、重力に対する変形感度は約50倍もある。まず、主鏡を支える多数点の各点を高精度支持できるアクチュエータ(Primary Mirror Actuator:以下“PMA”という。)を開発した。

次に、PMAと口径62cmの小型鏡によって構成される能動支持システムの縮小モデルを製作し、数種のシステム検証実験を実施した。

システムの有効性を確認した後、そのころ本格的な設計が始まった望遠鏡構造体にこの能動支持システムを組み込む設計作業を開始した。主鏡及び能動支持システムを望遠鏡全体の動特性に整合させる作業である。性能検証のため、主鏡と等価な特性を持つダミー主鏡と能動支持システムを国内で仮組立て中の望遠鏡に組み込んで、望遠鏡としてのシステム検証を実施した。

検証終了後、主鏡が研磨されている米国ピッツバーグへシステムごと輸送し、当地で主鏡と能動支持システムを結合して総合試験(セルテスト)を実施した。

試験終了後、主鏡と能動支持システムをマウナケア山へ輸送し、ファーストライトを迎えた。

本稿では、これら一連の流れに沿って、主鏡能動支持システムの原理・特長、機能・性能、及びトピックスを詳細に紹介する。

2. PMAの開発

2.1 従来の主鏡支持

図1に、従来から用いられている主鏡支持方法を示す(1840年ころ、Lasselらが提案したものである。)

地球の重力によって生じる主鏡の重さを、複数の支持点群で分散的に受ける。それぞれの支持点の受ける重さと同じ大きさの力を重力と逆の方向に掛けると、主鏡は擬似的に地球の重力から解放された状態(この状態をフローティングという。)になり、主鏡自身の重さによる変形が非常に小さく抑えられる。フローティングを実現するため、“機

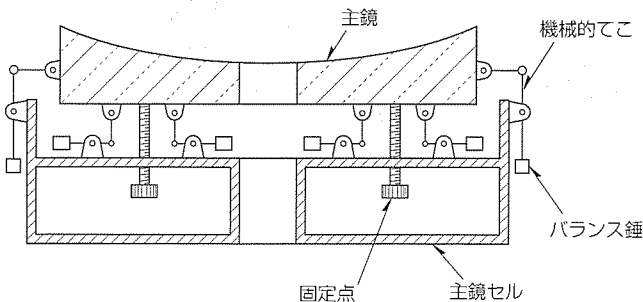


図1. 従来の主鏡支持

械的てこ”と“バランスおもり(錘)”を用いた機構が設けられている。望遠鏡の姿勢が変わって主鏡の鏡軸方向(Axial方向)と重力方向が一致しない場合もフローティングが可能のように、Axial方向と鏡軸に直交する方向(Lateral方向)に力を掛ける2種類の機構がある。

また、これらの機構とは別に、主鏡を望遠鏡構造体(主鏡セルという。)に結合する主鏡固定機構も設けられている。

2.2 すばるの主鏡支持

すばるの主鏡は、直径が8,300mmに対し厚さが200mmと薄い(比率は約40:1)ため、従来の主鏡(比率は6:1程度)に比べて非常に変形しやすい。特にAxial方向の剛性は極めて低いため、従来の支持方法よりもほぼ2けた高い精度で支持する必要がある。主鏡の支持点数が264の場合、各々の支持点に許されるAxial方向支持力誤差は0.1Nである。このため、力を測定しながら力を負荷する方式を採用した。

Lateral方向については、主鏡の裏面に円筒状の穴を設けて、厚さ方向重心位置を従来の“機械的てこ”と“カウンタ錘”方式で支持した。図2は、この支持方法を模式的に示したものである。

2.3 PMA

PMAの主機能・性能は次のように要約できる。

- (1) 主鏡セル上に配備され、重力によって生じる主鏡の質量と同じ大きさの力を重力方向と逆方向に負荷する。
- (2) Axial方向には、0.1N以上の精度で力を負荷する。一つのPMAが約100kgの鏡質量を分担して支持するため、全荷重と荷重精度比率は10,000:1以上になる。力を負荷するときの最小ステップは0.01Nである。
- (3) Lateral方向には、機械的てこカウンタ錘によって力を負荷する。
- (4) PMAが取り付けられる主鏡セルが変形して主鏡と主鏡セルの相対位置がずれたときも、(1)~(3)の性能を保持できる。

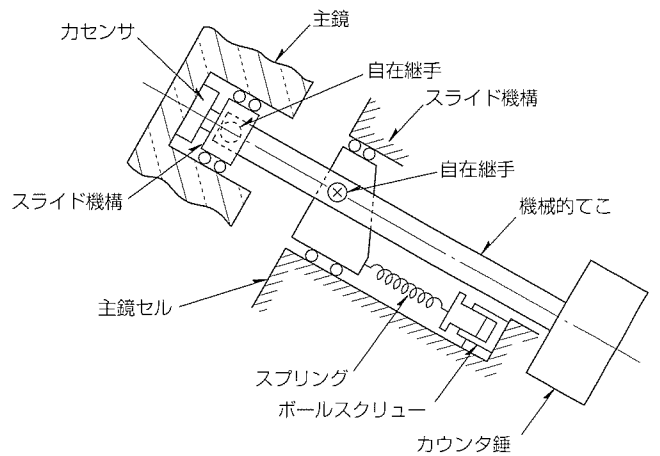


図2. すばるの主鏡支持(模式図)

(5) 主鏡への装脱着が容易である。PMA先端部を主鏡裏面穴内の金具に挿入するだけで(1)~(3)の性能を発揮する。

PMAにおいて技術的難度が高いのは、Axial方向の力を10,000：1以上の精度でLateral方向の力と干渉することなく検出し、検出値に応じて正確に力を負荷できることであり、これを達成するため次に示す手段を講じた。

(a) 力検出精度の極めて高い“音叉(又)振動型力センサ”を用いた。このセンサ自身の力検出精度は約100,000：1である。音叉に掛かる張力を変化させたとき、それに対する音叉の固有振動数の変化が非常に正確であることを応用したセンサである。このセンサをPMA内に組み込んで使用する際、外乱振動がセンサに漏れ込まないように工夫した。

(b) 二つの自在継ぎ手を主鏡側と主鏡セル側に設け、かつ力を負荷する部分をAxial方向にスライドさせることによって主鏡と主鏡セル間に相対的なずれが生じたときもずれがない場合と同じ機能を発揮するように工夫した。

(c) 力センサをLateral方向に力を負荷する“てこ機構”から分離して配置し、Axial方向の力だけを検出するように工夫した。

これらは米国特許⁽¹⁾などに公開されている。

図3に、PMAの力検出精度を検定している様子を示す。

3. 主鏡能動支持システムの開発・検証

3.1 能動支持システムの全体構成

主鏡能動支持システムの全体構成を図4に示す。主鏡の鏡面形状を保持する制御ループは、下記(1)、(2)による二重の力制御

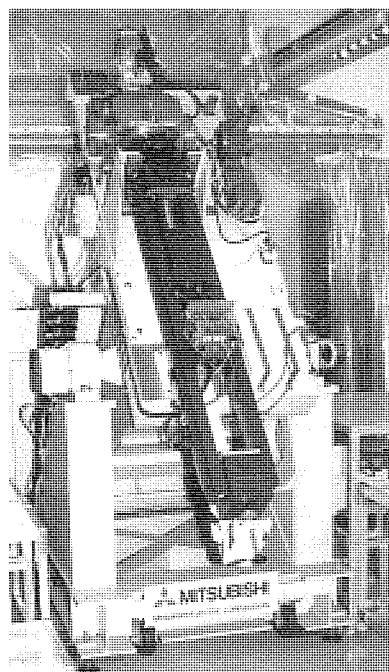


図3. PMAの力検出精度検定の様子

ープと、さらにその外側に形成された波面補正ループ(3)の三重構成となっている。

- (1) PMAの個々に配備された局所的な力制御ループ
- (2) 鏡の外縁付近3か所の固定点機構に装備された力センサ(固定点反力センサ)の検出値を基にPMA全体への力配分値を補正する固定点反力フィードバックループ
- (3) 入射光をモニタして波面誤差を検知し、それに基づいて鏡面形状を補正する光学的波面センサフィードバックループ

上記(1)は、各PMAごとの鏡面支持力を常時正確に発生・維持するものである。各点の支持力指令値は、望遠鏡の高度角に応じ、さらに個別のアクチュエータの取付け位置や特性に応じた補正を加味して上位コントローラから与えられる。すなわち、主鏡支持の特長であるフローティングを実現する根幹部分である。

上記(2)は、風圧などの外乱力による鏡面変形への対応である。PMAは主鏡と弱く結合しているため、風圧荷重などの外力が作用してもそれに対する反力を新たに生成することがない。したがって、風圧荷重に対する反力は、比較的剛性の高い固定点機構部に発生する(固定点機構については後節で説明する。)

この固定点に生ずる反力をモニタしそれをキャンセルするように適切に支持力をコントロールすれば、風圧荷重による鏡面変形をキャンセルすることができる。この考え方

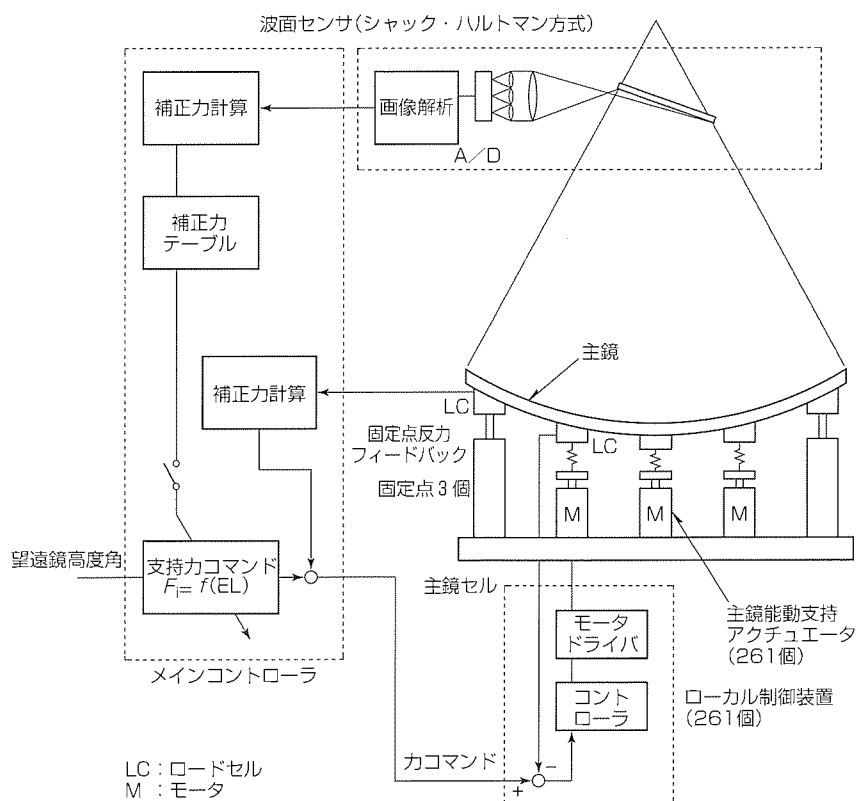


図4. 主鏡能動支持システムの全体構成

に基づき、(2)の固定点反力フィードバックループが設けられている。ただし、検出器(固定点反力センサ)が3点であるため、補正対象とする風圧の空間分布モードも主要な三次までの風圧分布のみに設定され、さらに(1)の力制御ループとの干渉を回避するために帯域の分離がなされている。

さらに、種々の環境変動に対しても高い鏡面精度を維持する手段として、天体からの光を用いて鏡面形状を検出・補正するループ(3)が用いられている。ここでは、シャック・ハルトマン方式による波面センサ⁽²⁾によって、鏡面のひずみが波面収差として検知される。波面収差から鏡面誤差を決定し、その情報に基づいて鏡面形状を補正する。このとき更に、主鏡の固有変形モードによるフィルタリングがなされており、主鏡に対するストレス(又はPMAに対する負荷)を極力少なくした上で、効率の良い鏡面形状補正が可能になっている。

3.2 能動支持システム検証試験

能動支持システムの原理検証は、おおむね以下の順に実施した。

- (1) レーザホログラフィ法を用いた鏡面能動補正実測と有限要素法による解析値の比較検証実験⁽³⁾
- (2) シャック・ハルトマン鏡面検査装置と能動支持機構の組合せによる開ループ試験⁽⁴⁾
- (3) シャック・ハルトマン鏡面検査装置と能動支持機構の組合せによる能動補正の閉ループ試験、及び種々の高度角変化や温度環境変化などの条件下における性能維持確認試験⁽⁵⁾

(3)の実験では、9本のPMAと3個の固定点の計12点で直径62cm、厚さ2cmの薄型実験鏡を能動支持し、10ナノメートルオーダーの精度で鏡面形状を能動的に制御できることを確認した。図5に実験結果の一例を示す。

3.3 能動支持システムダイナミクス評価試験

上記のいわば準静的な形状制御を対象とした能動支持システム試験に引き続いて、PMAと固定点機構を含む制御システムのダイナミクス評価も計算機シミュレーションと試験検証を併用して行われた⁽⁶⁾。計算機シミュレーション

におけるブロックダイアグラムを図6に示す。主鏡のダイナミクスモデルは、制御システムや風圧荷重応答の評価に必要な低次の固有振動モードと、それらでは表しきれない静的な変形を正確に表現するために取り入れられた剰余剛性との重ね合わせによって表現されている。これらの鏡面変形シミュレーションの結果は、最終的には光学的な性能評価にリンクさせて鏡面制御性能確認が行われている。

また、このような設計シミュレーションと併行して、図7に示す装置によるダイナミクス干渉実験を実施した。これらのシミュレーション/実験の相互参照を重ねることによって、設計・評価の妥当性が確認された。

4. 望遠鏡構造への組み込み

主鏡及び能動支持システムは、望遠鏡構造の主鏡セルに結合されている。前述のアクチュエータは主鏡セル上に装

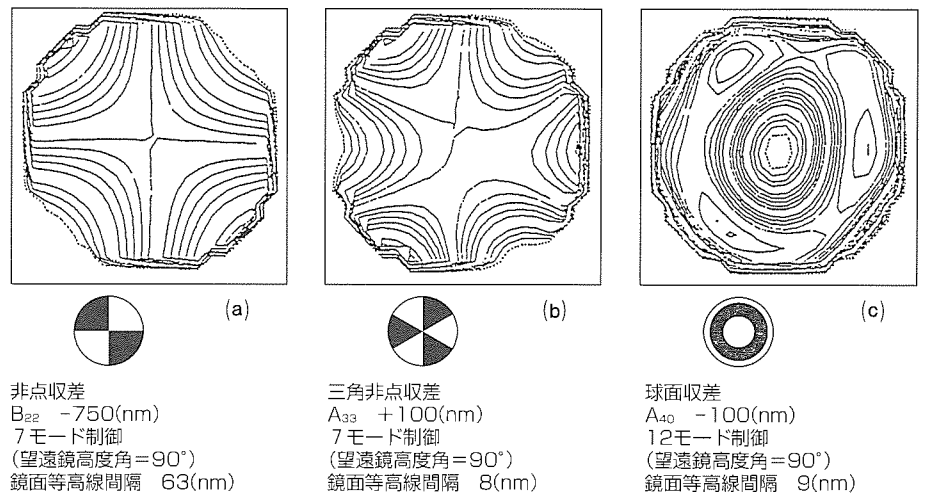


図5. 能動支持システム検証実験の結果の一例

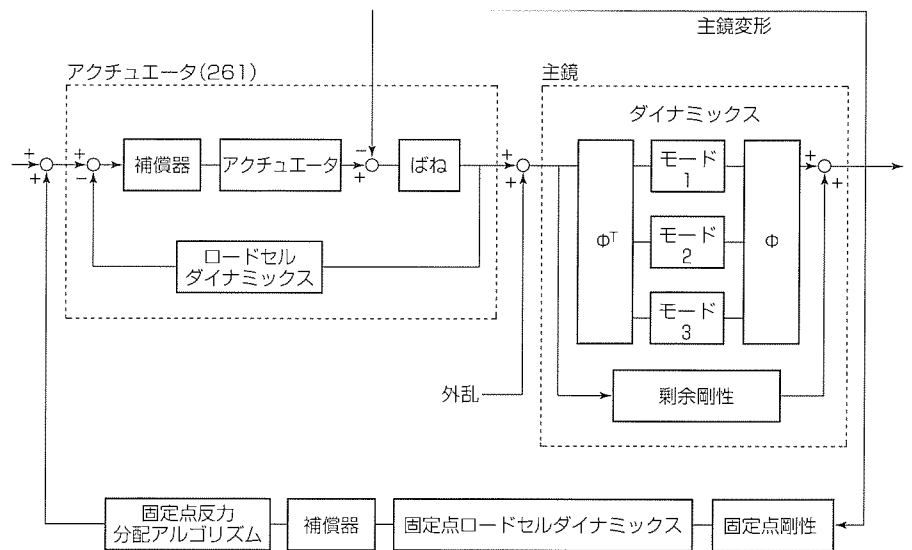


図6. ダイナミクスシミュレーションの概要

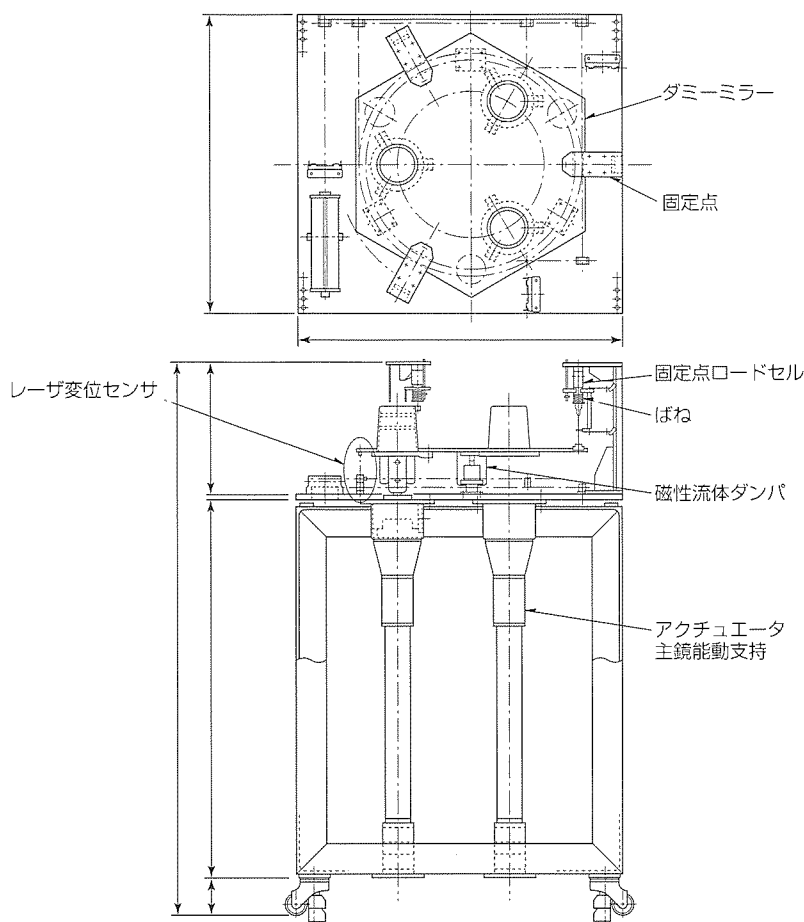


図7. ダイナミックス干渉実験装置の概要

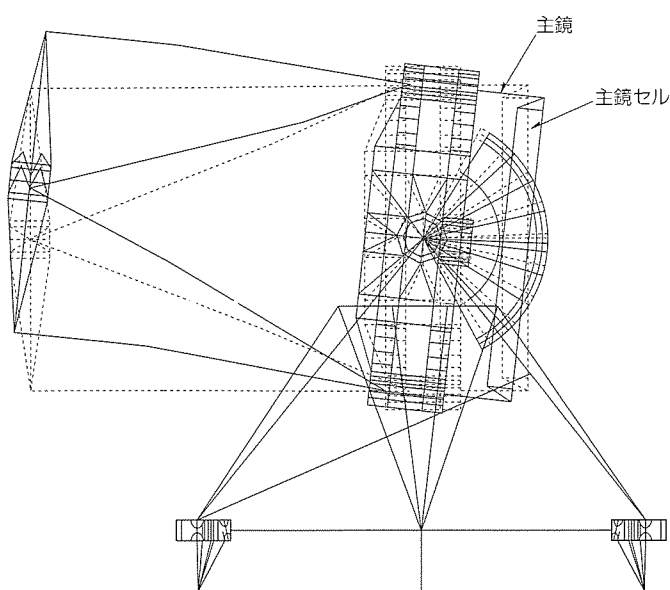


図8. 望遠鏡の動特性解析の一例

着され主鏡を支持しているが、主鏡との結合力を意図的に非常に小さく抑えている。主鏡セルはそれ自身の重さによって又は周囲温度の変化によって熱変形し、その変形量はミリオーダーであるため、主鏡の許容変形量との比率は10,000倍以上になるからである。言い換えれば、PMAは

鉄鋼構造物である望遠鏡から主鏡を“浮かせる”(フローティング)仕組みである。しかし、主鏡は望遠鏡の一部として正確に天体方向に指向する必要があるため、望遠鏡構造(主鏡セル)と強固に結合していただなければならない。そのため、能動支持システムの多数支持点のうち3点だけは他のPMAとは別の機能を持っている(固定点機構と呼んでいる)。

4.1 固定点機構

固定点機構の機能・性能は次のとおりである。

(1) 主鏡を主鏡セルに強固に固定する。主鏡の質量は約22,000kgであり、望遠鏡高度軸回りの質量の10%を占めるため、望遠鏡の追尾特性に与える影響が大きい。高い動特性を達成するため、固定点機構は高い剛性を持っている。図8に、主鏡、主鏡セル、PMA、固定点機構を含めた望遠鏡の動解析の一例を示す。

(2) 主鏡を主鏡セルに必要最小限に拘束する(合計6自由度だけを固定する。)必要最小限の拘束であるため、主鏡セルがどのように変形しても、その変形が主鏡を変形させることがない。これらは米国特許⁷⁾に公開されている。

(3) 風、加速度など外力が掛かったとき、その大きさを検出する。検出する力の精度は1N以上である。この検出値を用いて風による主鏡変形の補償を行う。この詳細は前章で説明している。

またこの検出機能は、主鏡能動支持システム異常時のセンサとして用いられる(PMAの力負荷機能に異常があるとき、固定点機構で異常値が検出される)。

4.2 望遠鏡構造への組み込み

主鏡の組み込みに先立ち、主鏡と同じ特性とインターフェースを持つダミー主鏡(アルミニウム製)と能動支持システム、及び主鏡セル始め望遠鏡構造を組み合わせて、望遠鏡構造との整合試験、3章に述べた動特性実験と類似の試験を実施した。

ダミー主鏡を能動システムに取り付ける様子を図9に示す。図中、左下に固定点機構の一部が見えている。

4.3 セルテスト(能動支持システム実機の性能検証)

能動支持システムは、上記のような要素開発やシステム実験を積み重ねた成果を反映して製作され、1998年には、

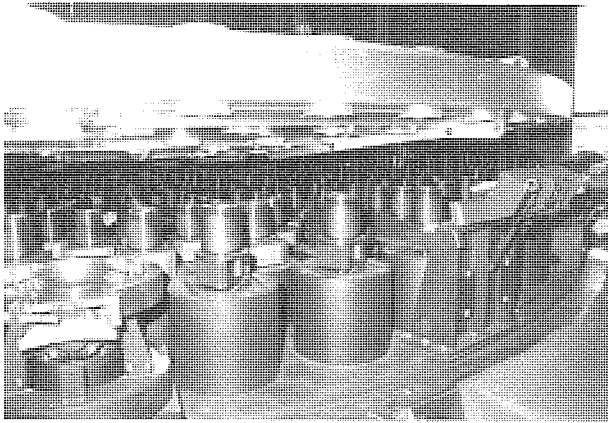


図9. ダミー主鏡を能動支持システムに組み込む様子

米国工場で研磨完了した主鏡との組合せ、動作性能試験が完了した。この過程では、研磨時の鏡材支持荷重と同値の支持力配分によって主鏡を保持した後、さらに、干渉式鏡面検査装置による計測値に基づいて、能動支持システムによる鏡面補正の実証試験が行われた。能動支持システムにおいて、初めて全要素の実機を組み合わせた実証試験となった。さらにこの試験の過程で、鏡面補正に用いる剛性パラメータのチューニングが行われた。研磨された鏡面を能動補正した後の鏡面誤差データの一例を図10に示す。史上最大級の一枚鏡で、最高の性能が得られる確証を得た。

5. むすび

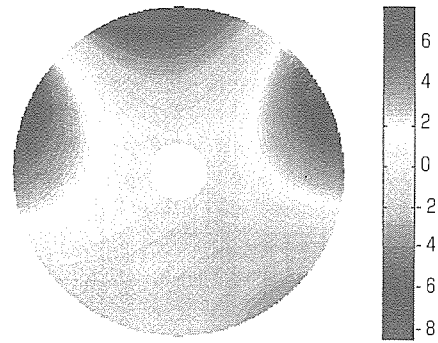
PMAの開発からセルテストまで10年以上にわたる開発・設計・製造・試験経緯を振り返ることにより、主鏡能動支持システムのかなりの部分について説明できたと考えている。

主鏡と能動支持システムはマウナケア山に運搬され、組立て・調整が実施された。回折限界に近い0.2arcsecの素晴らしい星像分解能を得られたことが、この特集の別稿で述べられている。開発・設計を担当した一員として喜びと同時に安ど(堵)感を覚える。

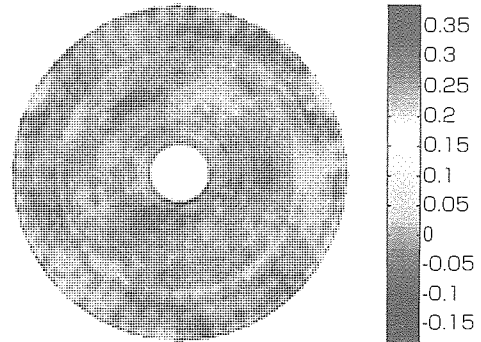
最後に、長きにわたり様々なご指導をいただいた国立天文台のスタッフの皆様、開発・設計・製作・調整にたずさわられたすべての方々に謝意を表す。

参考文献

(1) Miyawaki, K., et.al.: Mirror Support Apparatus and System, United States Patent, 5115351, (1992- 5 - 11)
 (2) Noguchi, T., et.al.: Active Optics Experiments I.Shack-Hartmann Wave Front Analyzer to



(a) 研磨時の支持荷重をPMAで再現したときの鏡面形状



(b) 光学測定→PMAによる能動補正後の鏡面形状

図10. セルテストにおける鏡面形状測定結果

Measure F/5 Mirrors, Publication of the National Astronomical Observatory of Japan, 1, No.1, 49 ~55 (1989)

(3) Itoh, N., et.al.: Active Optics Experiments II. Measurement of Mirror Deformation by Holographic Method, Publication of the National Astronomical Observatory of Japan, 1, No.1, 57~61 (1989)
 (4) Iye,M., et.al.: Active Optics Experiments III. Feasibility of Controlling the Figure of a Mirror at Tilted Orientaions, Publication of the National Astronomical Observatory of Japan, 1, No.1, 63 ~71 (1989)
 (5) 野口 猛, ほか: 62cm薄型鏡による能動光学実験, 国立天文台報, 1, No.2, 151~173 (1991)
 (6) Tabata, M., Itoh, N., Iye, M.: Active Mirror Support System for SUBARU Telescope, Proceedings of the 7th Interntional Precision Engineering Seminar (1993)
 (7) Miyawaki, K., et.al.: Reflecting Mirror Support Apparatus, United States Patent, 5642237, (1997- 6 -24)

超大型超高精度鏡製作技術

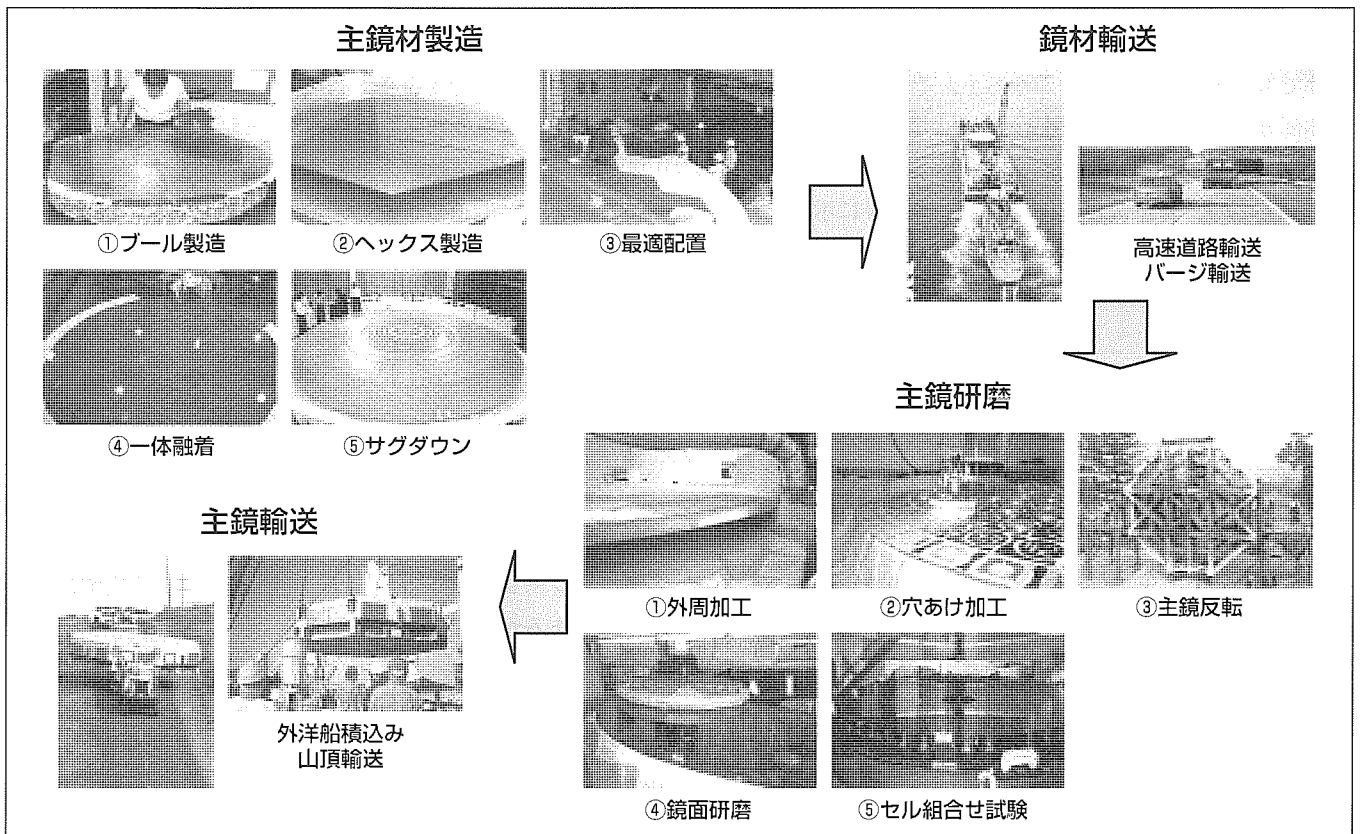
齊藤秀朗*
谷本亜紀*

要旨

すばる望遠鏡の口径を8メートルクラスに大口径化するために最も大きな技術的ブレークスルーの一つは主鏡の製作であった。天体望遠鏡の主鏡として使えるのは熱膨脹係数の小さいガラスであるが、すばる望遠鏡の主鏡材は米国コーニング社の超低膨脹ガラス(ULE)を採用し、直径8.3mで厚さわずか20cmという形状とすることにより、製

造期間の短縮化、軽量化、及び熱変形への対処を実現することができた。また、薄メニスカス形状の鏡を高精度に研磨するために温度が安定し振動の少ない研磨場所を保有する米国コントラベス社を選定し、仕上げ研磨フェーズでの研磨技術とシミュレーション技術との融合により、最終的には12nm rmsという世界最高の鏡面精度が達成できた。

特集
I



すばる望遠鏡の主鏡の鏡材製造、主鏡研磨、輸送

すばる望遠鏡の主鏡はコーニング社で鏡材を製造し、コントラベス社で研磨し、専用の輸送箱でパナマ運河を経てハワイ島マウナケア山頂へ輸送された。写真提供：国立天文台、共同通信社

1. ま え が き

すばる望遠鏡の口径を8メートルクラスに大口径化するために最も大きな技術的ブレークスルーの一つは主鏡の製作であった。すばる望遠鏡の主鏡材はコーニング社の超低膨脹ガラス(ULE)を採用し、直径8.3mで厚さわずか20cmという形状とすることにより、製造期間の短縮化、軽量化、及び熱変形への対処を実現することができた。また、薄メニスカス形状の鏡を高精度に研磨するために温度が安定し振動の少ない研磨場所を保有するコントラベス社を選定し、仕上げ研磨フェーズでの研磨技術とシミュレーション技術との融合により、最終的には12nm rmsという世界最高の鏡面精度が達成できた。

本稿では、すばる望遠鏡実現のキーとなった超大型超高精度鏡製作技術について述べる。

2. 主鏡材製造

従来の口径4~5mの望遠鏡の主鏡では、支持点数を少なくしてできるだけ鏡自身の剛性で鏡の形状を保つという手法が取り入れられてきた。例えば、パロマー山天文台の望遠鏡の主鏡は、口径5mに対して厚みが90cmであり、30~40点で支持されている。しかし、剛性を高くするために鏡を厚くするという手法を口径8mクラスの主鏡に適用すると、主鏡だけで重さは150t以上にもなり、鏡材の製造だけでも途方もない時間がかかる上、それを支える望遠鏡本体部分の質量は1,000tを超えてしまい非現実的である。

2.1 鏡材メーカー選定

1985年当時、軽量鏡用の主鏡材として表1に示す候補があり、下記の条件から選定を行った。

- (1) 夜間観測時の温度変化による熱変形を抑えることができること
- (2) 裏面のアクチュエータ用穴加工が可能なこと
- (3) プロジェクト全体工程からみて鏡材の製作期間が3年以内のこと

製法上、熱膨脹係数が温度1℃当たり100万分の1(10⁻⁶℃⁻¹)程度 of ガラス材で作るポロシリケート製のハニカム鏡は、温度変化による変形が大きく構造が複雑なため、夜間の温度変化に追従するよう温度管理することは必要な精度と時定数を考えると無理であった。独ショット社のゼ

表1. 主鏡材候補と特性

| 鏡材候補 | ULE コーニング社(米) | ゼロデュアー ショット社(独) | ポロシリケート アリゾナ大学(米) |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 熱膨脹係数 | < 5×10 ⁻⁸ K ⁻¹ | < 5×10 ⁻⁸ K ⁻¹ | 2×10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| 構造 | 薄メニスカス | 薄メニスカス | ハニカム構造 |
| 密度 | 2.2g/cm ³ | 2.5g/cm ³ | 2.2g/cm ³ |
| その他 | 熱膨脹係数の非破壊測定可能 | | |

ロデュアーと米国コーニング社のULEは薄メニスカス(薄皿)形状で熱膨脹係数が1℃当たり1億分の1(10⁻⁸℃⁻¹)以下の超低膨脹鏡材であるが、ゼロデュアーは裏面穴加工に難があり、また、非破壊での熱膨脹係数の測定ができないことから、最終的にコーニング社のULEガラスを選定した。さらに、研磨をコントラベス社で行うため、同じ米国内のコーニング社で鏡材を製造した方が直径8mもの鏡材の搬出・輸送ルートの確保が容易になることも重要な選定要因となった。

2.2 主鏡材製造プロセス

すばる望遠鏡の主鏡材は、1枚もののメニスカス形状では世界最大である。鏡材製造のプロセスフローを図1に示す。

不純物の少ない鏡材を得るために、鏡材は一度に鑄込むのではなく、まず、直径1.5mのプールと呼ばれる円盤状のガラスブロックを製造する。次に、プールの熱膨脹係数の板厚方向の分布を測定して、2枚重ね合わせたときにバイメタル変形が小さくなるように、また、一体融着したときの鏡面となる側に泡などの不純物の少ない部分(クリティカルゾーン)がくるように、プールを組み合わせさせて融着する。融着後、対辺1.3m、厚さ27cmのヘックスと呼ばれる六角形のユニット材に整形する。こうしてできたヘックスの熱膨脹係数は10ppb/℃(鉄の1,000分の1以下)程度と極めて小さいが、その熱膨脹係数はヘックスごとにppb一けたのオーダーで異なり、44枚のヘックスを融着してできる一枚主鏡の熱膨脹係数は、全面では一様ではない。気温20℃の研磨工場での研磨された主鏡は望遠鏡の設置場所であるマウナケア山頂の夜間の平均温度0℃の下では20℃の温度変化に対して不均一に変形し、その鏡面の変形量は、観測する波長(0.5μm程度)に比べれば決して無視できないものとなる。この鏡面全体の熱膨脹係数のばらつきによって生じる鏡面変形は261本のアクチュエータで能動補正するが、ばらつきのパターンによっては、鏡面の修正に必要な補正力がアクチュエータの容量を超えてしまったり、修正後の鏡面誤差が望遠鏡の性能から無視できないレベルである可能性がある。このため、補正力と補正後の鏡面誤差をシミュレーションして最適なヘックス配置を決定すればよいのであるが、主鏡に使われるヘックスは44枚あり、天文学的な(44! = 10⁵⁴通り)組合せの配置パターンについてシミュレーション計算を行うことは不可能である。そこで、当社の先端技術総合研究所で開発したアルゴリズム(シミュレーテッドアニーリング法を適用した手法)を用いることによって計算回数を10⁵と劇的に減らし、補正力、補正後の鏡面誤差とも満足する最適な配置パターンを得ることができた。

ヘックスを所定のパターンに配置後、全体を約1,700℃に加熱した回転炉で約2か月かけて一体に融着した。その

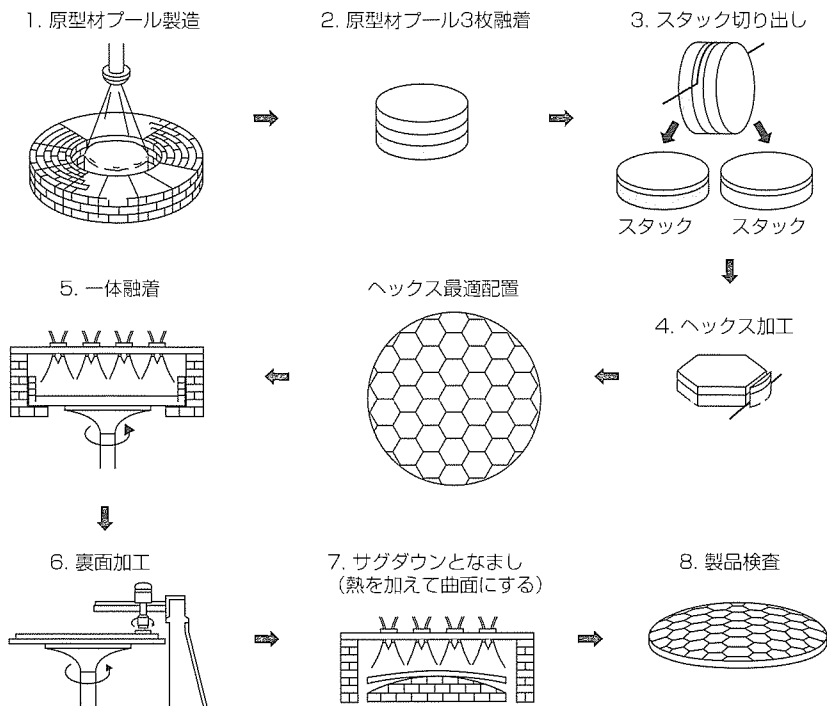


図1. 鏡材製造のプロセスフロー

後、凸型の耐熱れんが(煉瓦)の台の上に置き換え、約1,500℃に加熱して、最終的な鏡の形に近い薄メニスカス形状に整えた。また、鏡材製造メーカー側のヘックス材の熱膨脹係数測定精度が最適配置を決めるために不十分なことが製造途中に分かり、望遠鏡の性能確保のため当社エンジニアと鏡材製造メーカーのエンジニアが一体となって解決に当たった。

'91年にコーニング社カントン工場(ニューヨーク州)で製造に取り掛かった主鏡材は、約3年半かけ、'94年7月に完成した。完成した主鏡鏡材の外観を図2に示す。完成した主鏡材は、専用のこん(梱)包箱でセントローレンス川岸まで陸送し、その後バージに載せ替え、オンタリオ湖~ウエルランド運河~エリ湖を経て、主鏡研磨を行うペンシルバニア州ピッツバーグ近郊のコントラベス社ワンパン工場に8月末に到着した。

3. 主鏡研磨

3.1 研磨メーカー選定

'85年当時、8メートルクラスの薄メニスカス鏡を研磨することは未踏の技術であったが、従来の4メートルクラスの主鏡の研磨経験から表2に示す研磨メーカーが候補として考えられていた。8メートルクラスの主鏡の鏡面形状を精密に測定するために、研磨場所としては、

- (1) 年間を通じて温度が安定していること
- (2) 測定の妨げとなる振動が少ないこと
- (3) 曲率半径30mの主鏡の鏡面を干渉計で精密に測定するために直径10mで高さ30m以上の空間がとれること



図2. 完成した主鏡材

表2. 主鏡研磨メーカー候補

| 研磨メーカー候補 | コントラベス社(米) | レオスク社(仏) | カールツァイス社(独) |
|----------|------------------|---------------|-------------|
| 研磨場所 | 石灰岩の採掘坑跡の研磨施設を拡張 | 地上に高さ30mの塔を建設 | |

が必要であった。3社の中でコントラベス社は、石灰岩の採掘坑跡を利用した地下研磨施設を保有し、温度の安定性、振動とも研磨環境として適しており、また、口径8mの主鏡を研磨できるように地下施設の縦坑を拡張することも比較的容易であった。このことから、最終的にはコントラベス社を研磨メーカーとして選定した。

3.2 主鏡外形と研磨精度

主鏡の外形図を図3に示す。主鏡は外形8.3m、厚さ20cmで、裏面側の261個のアクチュエータ用の止まり穴に

スリーブが、3個の固定点パッドが外周端に接着されている。

主鏡の研磨精度は、光学性能として0.1秒角内に80%以上のエネルギーが集まることと鏡面のスケール誤差で規定した。しかし、実際の研磨では直径8.3mの鏡に対して非点収差のような大きなスケールの誤差はアクチュエータによる能動支持機構で容易に補正可能であり、研磨期間の短縮のために、最大で50Nのアクチュエータ補正力で鏡面を能動補正した後の鏡面形状での光学性能で規定した。

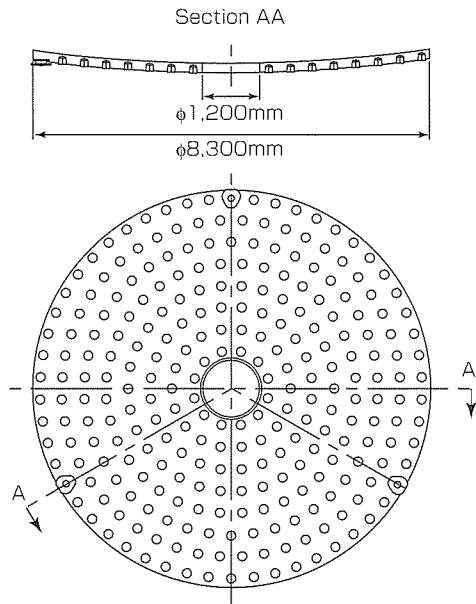


図3. 主鏡外形図

3.3 裏面加工

主鏡研磨のプロセスフローを図4に示す。鏡材は、まず直径が8.3mになるように外周を加工した。次に、泡などの不純物がなく鏡面として品質を満足する層(クリティカルゾーン)が研磨後に鏡面の位置にくるように裏面側を削り込み、必要な精度に仕上げた。中心に直径1.2mの貫通穴(カセグレン穴)をあけ、261個のアクチュエータを取り付けるための止まり穴をダイヤモンドヘッドで加工した。止まり穴は直径15cm、深さ約15cmで、穴の底の部分は鏡の厚さ20cmに対して5cmほどしかない。穴あけ加工後にガラス表面の微細な傷(マイクロクラック)を除去するために、化学的にエッチング処理を施した。この後、アクチュエータを挿入するためにスーパーインバー製のスリーブと呼ばれる金具を止まり穴に接着して裏面側の作業を完了した。外周、裏面加工、鏡面の研削や研磨にはドイツ製の加工機が導入された。ターンテーブルを装備した門型のNC加工機で、研削のためのダイヤモンドヘッドユニットや研磨のためのラップヘッドが装着できる。

裏面側の加工が完了すると、鏡面側の加工に移るために、鏡全体を反転した。直径8.3mの主鏡専用で製作した反転治具で、鏡の外側エッジにはU字型にベルトを巻き付け、裏面側と鏡面側は各々36個のエアバッグで鏡の挟み込み荷重を分散させて支持し、約2時間かけて慎重に反転した。

反転後は真空チャック方式の専用つ(吊)り治具で反転治具から持ち上げ、鏡面研磨用の支持台に移動した。鏡面研磨用の支持台は、望遠鏡に主鏡を搭載したときにアクチュエータで支えるのと同じ位置を3系統の油圧で支える方式

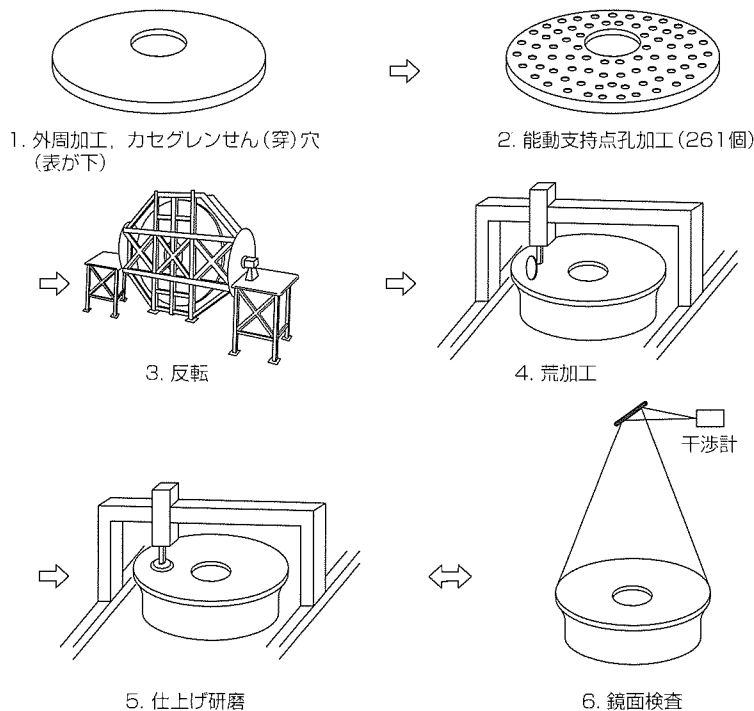


図4. 主鏡研磨のプロセスフロー

を採った。自重変形による鏡面変形が最も小さくなるような各支持点での最適支持荷重を求め、1 Nの精度で設定している。

3.4 鏡面加工

鏡面はまず球面形状に加工した。直径50cmのダイヤモンドホイールを用いて形状誤差0.1mm程度に研削し、直径3~1.5mの研磨ラップを用いて最終的に曲率半径約30mの球面形状に誤差10 μ m以下に仕上げた。直径約5cmの真ちゅう(銻)パッドを張ったラップでまず擦りガラス状鏡面を滑らかにし、その後じゅうたん(絨毯)を張ったラップで光沢状に磨き、ピッチを張ったラップで仕上げた。

すばる望遠鏡の光学系はリッチークリテイン系を採用しているため、主鏡の最終形状は回転双曲面である。球面から回転双曲面に鏡面の形状を修正していくが、まず、ドイツ製のNC加工機に装着した接触式プローブで鏡面形状を測定しながら、ラップで鏡面のガラスを徐々に削り取っていく。最終形状との鏡面誤差が50 μ m以下になると、ナイフシフト法を併用した。これは、ナイフエッジテストと同じ原理で、曲率中心に置いた光源から鏡に光を当て、返ってくる位置をナイフで切りながら鏡面上にできる明暗の位置を測り、鏡面形状を推定する方法である。

鏡面誤差が5 μ m程度になると接触式プローブによる測定は限界となり、赤外干渉計(測定波長10.6 μ m)と赤外ヌルレンズを用いた方法に切り換えた。球面でない鏡面(回転双曲面など)を干渉計で測定する場合、そのままでは中心部と端では位相差が大きく干渉じま(縞)が多数発生して測定できない。そこで、中心と端での位相差が少なくなるようなレンズを干渉計と鏡の間に挿入して測定しやすくする。このレンズをヌルレンズと言う。接触式プローブ、ナイフシフト法、赤外干渉計と赤外ヌルレンズによる各測定結果については測定方式の切り換わりで測定データの整合性を常に確認し、測定ミスを防ぎながら作業を進めた。

鏡面誤差が1 μ m程度になると、可視干渉計(波長0.633 μ m)と可視ヌルレンズによる計測に切り換えた。切換えの際は、赤外干渉計と可視干渉計による測定結果が異なっていないか十分に確認して作業を進めた。

主鏡の鏡面が測定波長程度の高精度になってくると、測定系の誤差を除くことが重要となる。測定誤差として、

- (1) 空気のゆらぎによる誤差
- (2) ヌルレンズや干渉計など測定系の誤差
- (3) 主鏡支持台の支持誤差

がある。

空気のゆらぎによる誤差は、測定回数を増やし測定値を平均化することで抑えた。測定系の誤差については、主鏡を中心軸回りに回転させて測定することによって測定系の非回転対称成分の誤差を取り除く。45°ピッチで8回転方向各200フレームの合計1,600フレームのデータを測定して

平均することにより、測定誤差を数nmに抑えた。

ヌルレンズ自体の誤差は鏡面形状測定の原器となるため、レンズ形状、組立精度の吟味は徹底して行い、また、測定方法の切換え時には測定データに矛盾がないことを十分確認して作業を進めた。また、主鏡の曲率半径が設計値とずれると望遠鏡鏡筒を改修しなければならないため、曲率半径をレーザ測長した基準鏡やテープを用いて何重にもチェックした。さらに、鏡面の最終カーブについてはナイフシフト法を用いてチェックした。

主鏡支持台はベローズを使った油圧支持機構を採用しているため、ベローズのヒステリシスによって支持力に再現性のない誤差が生じる。そのため、測定ごとに支持力の変動による鏡面形状が微妙に変化する。しかし、支持力の変動による鏡面変形は最終的には望遠鏡に主鏡が搭載されればアクチュエータによる能動補正で容易に修正可能なため、主鏡研磨時には測定ごとに動補正後の鏡面形状をシミュレーションで求め研磨作業に用いることで解決した。

主鏡の鏡面精度追い込みの最終フェーズでは、鏡面を思い通りに削り込む研磨技術とシミュレーション技術が鏡面精度達成のキーとなる。鏡面精度がnmオーダーの修正を問題にするようになると、鏡面は意図したとおりになかなか削れなくなってくる。ラップの大きさや研磨剤を様々に駆使し、最後には直径8.3mの主鏡を作業者自身がラップを持って手磨きを行って仕上げた。

主鏡の鏡面精度の仕様は0.1秒角以内のエネルギー値と鏡面のスケール誤差を規定しているが、鏡面誤差のうちどのような成分(空間ピッチの小さい誤差や端だれなど)を修正すれば光学性能が追い込めるのかを事前に予測シミュレーションを行い、研磨プランの作成に反映した。直径1m程度の鏡であればこのような予測は必要ないが、超高精度で面積が大きいすばるの主鏡では、作業者の勘に頼ることは無理である。このシミュレーションを併用した研磨作業は、主鏡の最終仕上げ研磨フェーズの工程短縮に大いに役立った。主鏡の能動補正シミュレーションや光学性能シミュレーションはあらかじめ望遠鏡の性能評価に必要なものとして準備していたものであったが、すばる望遠鏡の直径8.3mの薄メニスカス主鏡の仕上げ研磨フェーズでのブレークスルーとなった。

'98年7月に主鏡の研磨は完了し、鏡面誤差12nm rms(能動補正後の鏡面誤差)という、8メートルクラスの1枚鏡としては現時点で世界最高の精度に仕上がった。主鏡の研磨はコントラベス社の保有する研磨技術と当社の望遠鏡システムエンジニアリング技術の結晶といっても過言ではない。

研磨には4年近くを費やしたが、研磨工場搬入時に32tあった鏡材は、研磨後には厚さ20cmで重さ23tとなっていた。

3.5 主鏡セル組合せ試験

主鏡研磨完了後、すばる望遠鏡の主鏡セルをコントラベス社ワンパン工場に搬入し、研磨後の主鏡と261本のアクチュエータの組合せ試験を実施した。主鏡セルに搭載された主鏡の鏡面が計算機のシミュレーションどおりに能動補正できるか仕上げ研磨フェーズで使用した可視干渉計と可視ヌルレンズを用いて検証し、所定の精度で能動制御ができていることを確認した。

主鏡セルとの組合せ試験の後、主鏡は、専用の輸送箱に梱包し、9月中旬にワンパン工場をマウナケア山頂に向け出荷し、ミシシッピ川、メキシコ湾、パナマ運河、太平洋を経て11月初旬にハワイ島マウナケア山頂に無事到着した。山頂到着後の主鏡の外観を図5に示す。

4. むすび

世界最大の1枚鏡の主鏡の製造は、製造メーカーのみならず、国立天文台の関係者の皆様など多くの方々の協力によって完成したもので、関係者の方々に心から感謝の意を表します。

参考文献

- (1) ILLUMEA TEPCO Semi Annual Science Journal 9, No.2 (1997)
- (2) 安藤裕康：世界最大の望遠鏡「すばる」(平凡社)

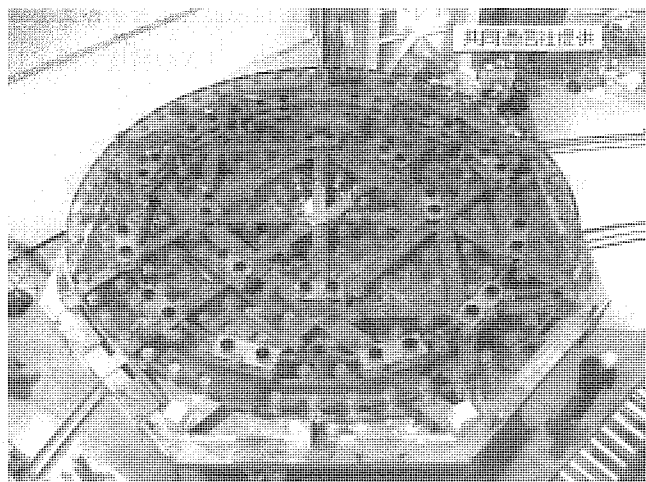


図5. 山頂に到着した主鏡

- (3) NHK科学番組部：「すばる」が捉えた驚異の大宇宙
- (4) 国立天文台：大型光学赤外線望遠鏡計画説明書 (1989-9)
- (5) 佐々木俊由紀，家 正則：大型望遠鏡すばるにおける計測と制御，計測と制御，37，No.12，822～827 (1998)
- (6) 家 正則，関口和寛，大坪政司，高見英樹，山下卓也：特集・天体望遠鏡と光学技術，光技術コンタクト，36，No.1，5～41 (1998)

高い天体追尾精度を実現する 望遠鏡駆動制御技術

浅里幸起*
香月良夫*
清水岳男*

要旨

すばる望遠鏡の駆動制御系の目的は、望遠鏡の光軸を観測天体に精度良く向け、波面収差が最小になるように複数の反射鏡の位置や形状を制御して、高精度で天体を追尾し、要求される星像の分解能を達成することにある。

波面の傾きや収差は、次のような互いに独立なZernikeモードに展開することができる¹⁾。

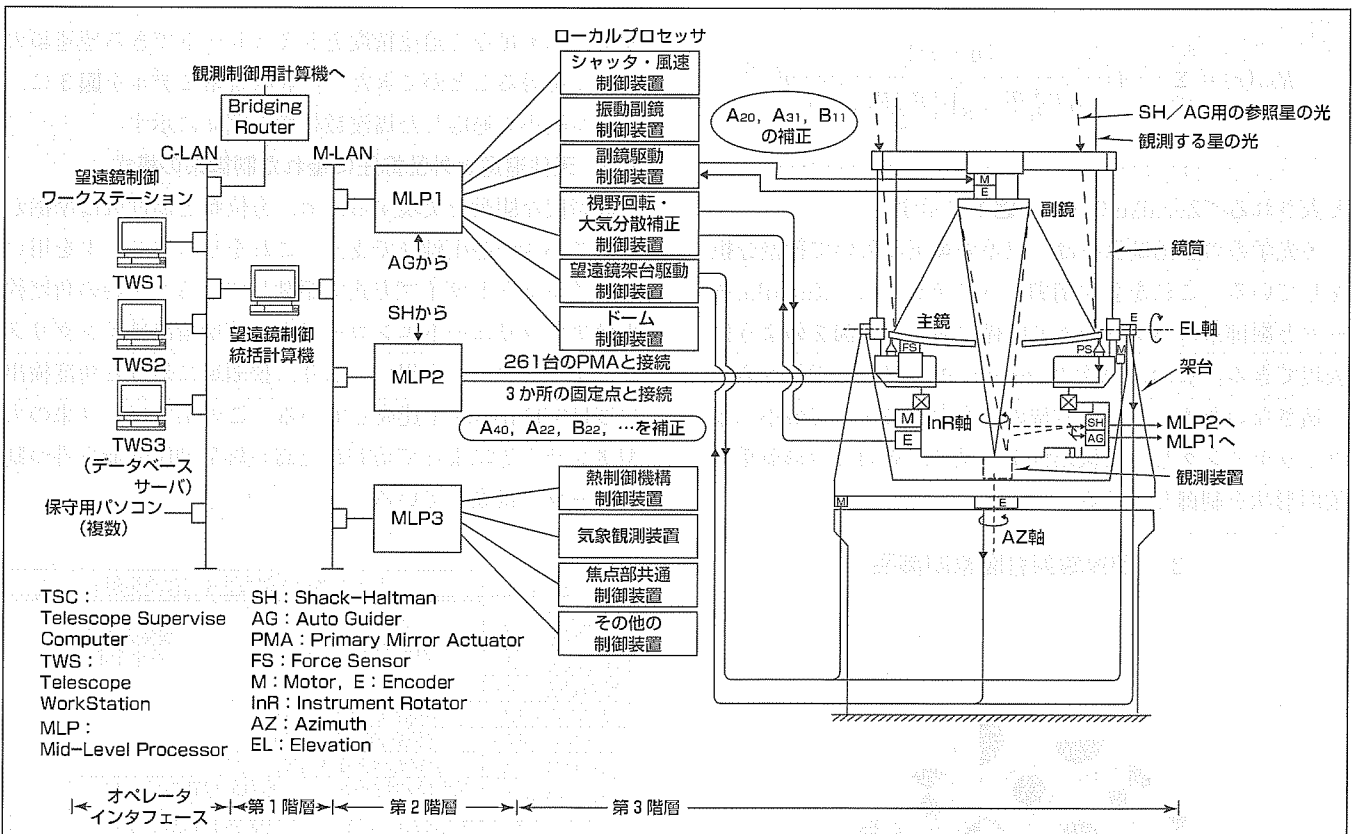
- A_{11} , B_{11} : 波面の傾き(Tilt)
- A_{31} , B_{31} : コマ収差(Coma)
- A_{20} : 焦点ずれ(Defocus)
- A_{22} : 非点収差(Astigmatism)
- A_{40} : 球面収差(Spherical Aberration)など

これらの値はシャック・ハルトマン鏡面検査装置によって検出するが、制御系では次の方法によって星像の分解能

を高めている。

- (1) 望遠鏡架台駆動制御系は光軸を観測天体に向けるが、これは波面の傾きを制御することになるので、 A_{11}/B_{11} は主鏡制御には用いていない。高周波数領域では振動副鏡制御系が波面の傾きを制御する役割を持っている。
- (2) 主鏡能動支持制御系は、直径8.3mの主鏡の形状制御を担い、非点収差 A_{22} 、球面収差 A_{40} を含む高次のZernike収差を補正する制御系を構成する。
- (3) 副鏡駆動制御系は、主に焦点ずれ A_{20} とコマ収差 A_{31}/B_{31} を補正する機能を持っている。

このように Zernikeモードの実測値を分配する制御系の構成により、0.2arcsecという優れた星像の分解能を達成した。



すばる望遠鏡の階層的分散制御システム

すばる望遠鏡の制御系は、3段階に階層化(望遠鏡制御統括計算機/ミッドレベルプロセッサ/ローカルプロセッサ)された分散制御系であり、LAN接続された3台のワークステーションや保守用パソコンからオペレータインタフェースを行う。下位2階層では、特にリアルタイム性を重視して設計している。

1. ま え が き

すばる望遠鏡の駆動制御系では、鏡筒を観測天体に高精度に指向し、波面収差を最小化するために、複数の反射鏡の位置と形状を分散制御して、最適な光学系を能動的に構成している(能動光学)。これを姿勢変化、風や摩擦等の外乱環境下においてリアルタイムに補正しながら維持し続けることで、高い天体追尾精度を実現し、要求される星像の分解能を達成することを目的としている。

結果として0.2arcsecという優れた星像の分解能が得られたが、本稿では、これを達成した制御方法について述べる。

2. 望遠鏡の制御ストラテジー

星像の分解能の劣化は、波面収差によって起きるが、この波面収差は互いに独立な成分にモード分解され、次のFourier-Zernikeの関数で表される⁽¹⁾⁽²⁾。

$$z(r, \theta) = \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_{n0}(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left\{ (A_{nm} \cos m\theta + B_{nm} \sin m\theta) R_{nm}(r) \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A_{nm} 、 B_{nm} は各モードの大きさを表す係数である。 $R_{nm}(r)$ はZernikeの動径多項式と呼ばれ、

$$R_{nm}(r) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} r^{n-2s} \dots\dots\dots(2)$$

と表される。Zernikeモードを図1に示す。

各光学系の駆動制御系は、収差の補正において役割分担をしている。これを表す制御ストラテジーは、Zernikeモードと制御系のバンド幅との関係において、図2のように表現できる。なお、高次のZernikeモードは力学的な変形に適さないため、主鏡の27個の固有振動モードで最小二乗フィッティングし、機械剛性から見て、適切な変形荷重で鏡面形状を制御している。

3. 望遠鏡架台駆動制御系

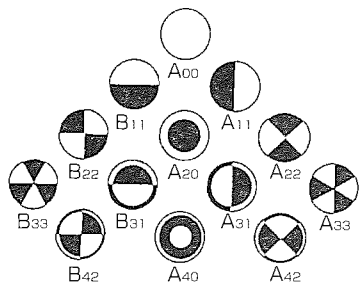


図1. Zernikeモード

望遠鏡架台駆動制御系は、方位軸(AZ:Azimuth)で架台を、高度軸(EL:Elevation)で鏡筒を回転して、光軸を観測天体に指向する系である。また、CCD(Charge-Coupled Device)によって天体位置を検出するオートガイダから追尾誤差信号を受け、天体を自動追尾する機能を備えている。

3.1 精密な設計評価を可能にするモデル縮小技術

望遠鏡機械系の有限要素モデルは2,884自由度を持つものであったが、制御系と接続して動的な性能のシミュレーションをするためには大き過ぎるため、精度評価に必要な自由度のみ残すモデル縮小を行った。これは、センサ取付け点・アクチュエータ取付け点・精度評価点等の注目点を残し、必要な固有振動モードのみ取り出すことで、適切な縮小モデルを得る方法である。縮小モデルの振動方程式⁽³⁾は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12}^T & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 q_1 は注目点の変位ベクトル、 ξ_2 は残された固有振動モードの変位ベクトル、 f は加振力ベクトル、 P_1 は座標変換行列、 M_{ij} は質量行列、 K_{ij} は剛性行列である。このとき注目点で見た剛性 K_{11} は、モデル縮小しても不変に保たれ、正確な指向・追尾精度の評価を可能にしている。

この方法により、24自由度という小規模ながら十分な精度で、過不足なく追尾精度をシミュレートできる望遠鏡のモデルを得ることができた⁽³⁾。有限要素モデルを図3に、モデル縮小を適応した周波数特性を図4に示す。

3.2 天体追尾と外乱抑圧に優れた制御系の構成

高精度な駆動を実現するため、方位軸と高度軸は摩擦が極めて小さい静圧軸受で支え、これをリニアモータを用いたダイレクトドライブ方式で駆動している。主軸の角度検出はアブソリュートエンコーダを、速度検出はインクリメンタルエンコーダを用いており、狭領域における角度検出精度は0.03arcsecを達成している。この系では、従来の大型アンテナ等によって培われた高い外乱抑圧性能を持つ制御ループを構成している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

| Zernikeモード | モード補正を担当する主たる制御系 | | |
|------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 高次収差 | : | 主鏡能動支持制御系 | |
| 非点収差 | B ₂₂ | | |
| 非点収差 | A ₂₂ | | |
| 球面収差 | A ₄₀ | | |
| コマ収差 | B ₃₁ | 副鏡駆動制御系 Y軸 | |
| コマ収差 | A ₃₁ | 副鏡駆動制御系 X軸 | |
| 焦点ずれ | A ₂₀ | 副鏡駆動制御系 Z軸 | |
| 波面の傾き | B ₁₁ | 架台駆動制御系 高度軸(EL) | 振動副鏡制御系 θ _軸 (ティップティルト) |
| 波面の傾き | A ₁₁ | 架台駆動制御系 方位軸(AZ) | 振動副鏡制御系 θ _軸 (ティップティルト) |
| ピストン | A ₀₀ | (星像の分解能に対して意味を持たない) | |

図2. 望遠鏡の制御ストラテジーの一例

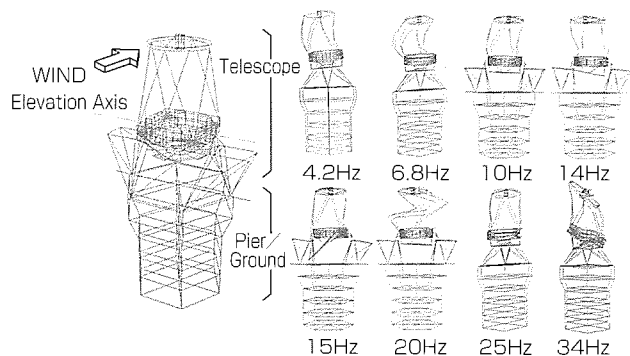


図3. 望遠鏡の有限要素モデル

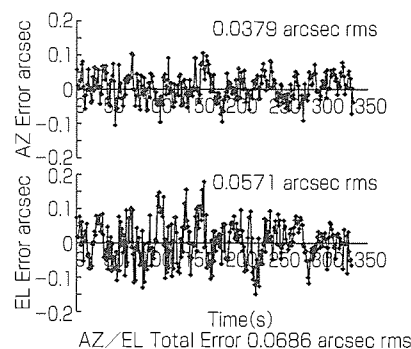
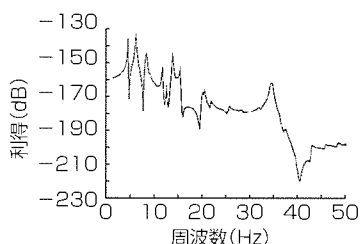
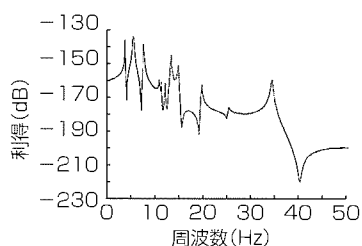


図5. 追尾精度の実測値



(a) 縮小前



(b) 縮小後

図4. モデル縮小の適用

3.3 滑らかな駆動を実現する速度オブザーバー

高精度のエンコーダを用いても、低速駆動のときには、エンコーダパルス周期が長くなり、角速度量子化分解能が得られず、精密な計測ができない。そこで、速度オブザーバーを用いて、精密な速度推定を行い、滑らかで精度の高い駆動を実現している。

3.4 28次IIRフィルタによる機械共振の抑制

ダイレクトドライブ方式では、複雑な機械振動特性が速度制御ループに現れる。所要バンド幅は16Hzであるが、最低次の機械共振周波数が4.2Hzであるので、クロスオーバー周波数の周辺では数多くの複雑な機械共振が存在する。そこで、28次のIIRフィルタを用いて、周波数特性を微細に整形し、安定で広帯域な制御ループを実現した。

3.5 追尾精度の実測値

天体追尾を実施した結果を図5に示す。要求仕様の追尾精度0.07arcsec rmsを達成している。

4. 主鏡能動支持制御系

主鏡では、直径8.3mのULE鏡を261台のアクチュエータ

(PMA: Primary Mirror Actuator)と、外周3か所の固定点によって能動的に支持し鏡面形状を高精度に保持する系で構成している。また、シャック・ハルトマン鏡面検査装置を備え、鏡面誤差から求めたZernike収差をフィードバックして形状制御を行っている。

4.1 PMAと固定点

PMAは超高精度な音さ(叉)振動式力センサを備えている。これは0~1,500Nの範囲で精度0.1N、分解能0.01Nの検出性能を持ち、周期50msで力検出値を出力する。制御部では、モータ部に取り付けたエンコーダ検出値と力検出値を基に、周期10msでサーボ演算をしている。固定点では、10kNまでの荷重を1Nの分解能で検出し、同時に補正用の温度を検出してホストであるMLP2に送信している。

4.2 PMAの制御方式

制御精度と速応性を両立させるため、次の制御方式を用いた。鏡の変位が微小なので、フックの法則に従って力検出値とエンコーダ検出値がほぼ比例する。したがって、これらを同一視し、低周波数領域では精度の良い力検出値を使い、高周波数領域では速応性に優れたエンコーダ検出値を用いて、0.16Hzを境に両者を合成し、バンド幅1Hzのオーバーシュートのない制御ループを構成した。

4.3 制御系の安定性の証明

PMAにて主鏡を支持する261個の制御系が主鏡の振動特性を通じて相互作用している系全体の安定性は、リアプノフの第二の方法によって論じることができる。リアプノフ関数の候補として系の全エネルギー(平衡点回りのエネルギー増分)を採ると、この系のようにセンサとアクチュエータを同置している場合、時間とともに関数値が常に減少することから安定性を証明した。

4.4 鏡面形状制御の実測値

鏡面誤差の実測値を図6に示す。

4.5 故障診断とリカバー動作

制御系に故障があってもできる限り観測を継続できるように、運用モードを変更する機能を持たせている。軽度の故障のとき、安全性に問題がなければ、故障のPMAがあっても観測を継続できる。力センサ系が故障しても、モータ

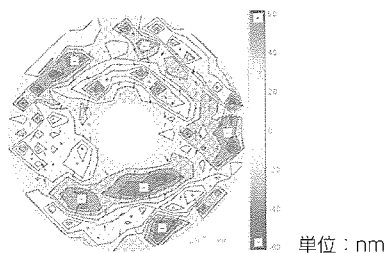


図6. 主鏡の形状制御精度の実測値

系が正常ならば、精度劣化はあるが位置制御に切り換えて運用する。さらに、モータ系が故障で、力センサ系が正常のとき、故障したPMAの発生力の過不足を周囲3~6台のPMAでリカバーすることで観測を継続する機能を備えている。

5. 副鏡制御系

5.1 合焦とコマ補正をする副鏡駆動制御系

副鏡は、スチュワートプラットフォームと呼ぶ6本のジャッキからなる機構を、0.5 μ mの精度の滑らかさで駆動している。光軸方向の位置決めで合焦を行い、副鏡の位置と傾きの制御でコマ補正を行っている。

5.2 追尾を高精度化する振動副鏡制御系

振動副鏡では、高速な傾き制御を30Hzのバンド幅で行う。この系は、望遠鏡架台駆動制御系と連動して波面の傾きをリアルタイムで補正するティップティルト(Tip-tilt)と、天体とその背景の撮像を高速に交互に切り換えるチョッピング(Chopping)の機能を備えている。

6. 計算機システム

すばる望遠鏡の計算機システムは、冒頭に示したように、

- ①制御統括計算機(TSC)
- ②ミッドレベルプロセッサ(MLP)
- ③ローカルプロセッサ(LP)

の3段階に階層化された分散制御系である。

MLPとLPはリアルタイム性を最重視して設計し、時刻装置から供給される共通クロックによって天体位置計算時刻に精確に同期して追尾を行っている。

TSCは、天体位置計算を定期的に行い、MLPに対して予報値を配信しているが、それ以外にも、観測制御用計算機(OBS)と望遠鏡制御計算機システムを結ぶゲートウェイとして、そのセキュリティのチェック及びインタフェース管理を行っている。それとともに、MLPから入力されるドーム・望遠鏡のすべての情報により、望遠鏡の事故及び人的事故の発生を防ぐインタロック機能のマネジメントを行っている。

オペレータインタフェースとしては、3台のワークステーション(TWS)を用い、うち1台はシステムパラメータ

を管理するデータベースサーバ、2台はMotifベースのGUIで望遠鏡の操作を行う専用マシンとして、役割分担を明確にし、部分的な拡張・改善が可能になるように配慮している。

TSCとTWSは汎用的な普及機を用いて、今後の計算機の高性能化に対応し、リプレース可能な構成としている。

計算機システムには、ドームや望遠鏡のモニタ以外にも望遠鏡周囲の風向や風力等の環境センサの情報を取り込んでおり、追尾誤差とそのセンサ情報の蓄積により、周囲の環境条件を加味した性能改善が更に計画されている。

制御系のハードウェア調達は、主に1991年からの約5年間で行ったものである。MLPは、DEC社のAlpha 21066Aを用いVxWORKSをOSとしている。LPでは、Motorola社のMC68030とTI社TMS320C31でサーボ系を構成しており、装置間の通信には主にMotorola社のMC68302によって64kbpsのHDLC通信をRS-422/485及び光通信で行い、特にリアルタイム性を要求される系では1MbpsのTMS320C3xシリアル通信を使用している。

7. むすび

すばる望遠鏡の駆動制御系について、全体構成と制御の考え方、各駆動制御系の機能と達成性能について述べた。

今後は、このプロジェクトで得られた大型で高性能の制御系の製造経験を生かし、科学の発展により貢献するシステムの開発を目指していく所存である。

最後に、長きにわたり御指導いただいた国立天文台の関係者の皆様、システムの構築に直接かかわった方々、御支援を賜ったすべての方々に対して、深い謝意を表する。

参考文献

- (1) Bron, M., Wolf, E.: 光学の原理II, 東海大出版会(1975)
- (2) Tabata, M., Itoh, N., Miyawaki, K., Satori, A., Iye, M., Yamashita, Y., Noguchi, T., Tanaka, W.: Shape Control Experiments with a Functional Model Large Optical Reflectors, First Joint U.S./Japan Conference on Adaptive Structures (1990)
- (3) 浅里幸起, 伊藤富美男, 岡本健一, 山本 哲: 大型望遠鏡における外乱抑圧性能の評価方法, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.910-52, 248~253 (1991)
- (4) 広沢春任, 市川 満, 河村英四郎, 榊原 修, 伊藤富美夫: 大型アンテナの精密指向制御, 三菱電機技報, 59, No.9, 631~636 (1985)
- (5) 西村昭三: 大型アンテナサーボ系における風の乱れの影響, 三菱電機技報, 40, No.6, 1010~1017 (1966)

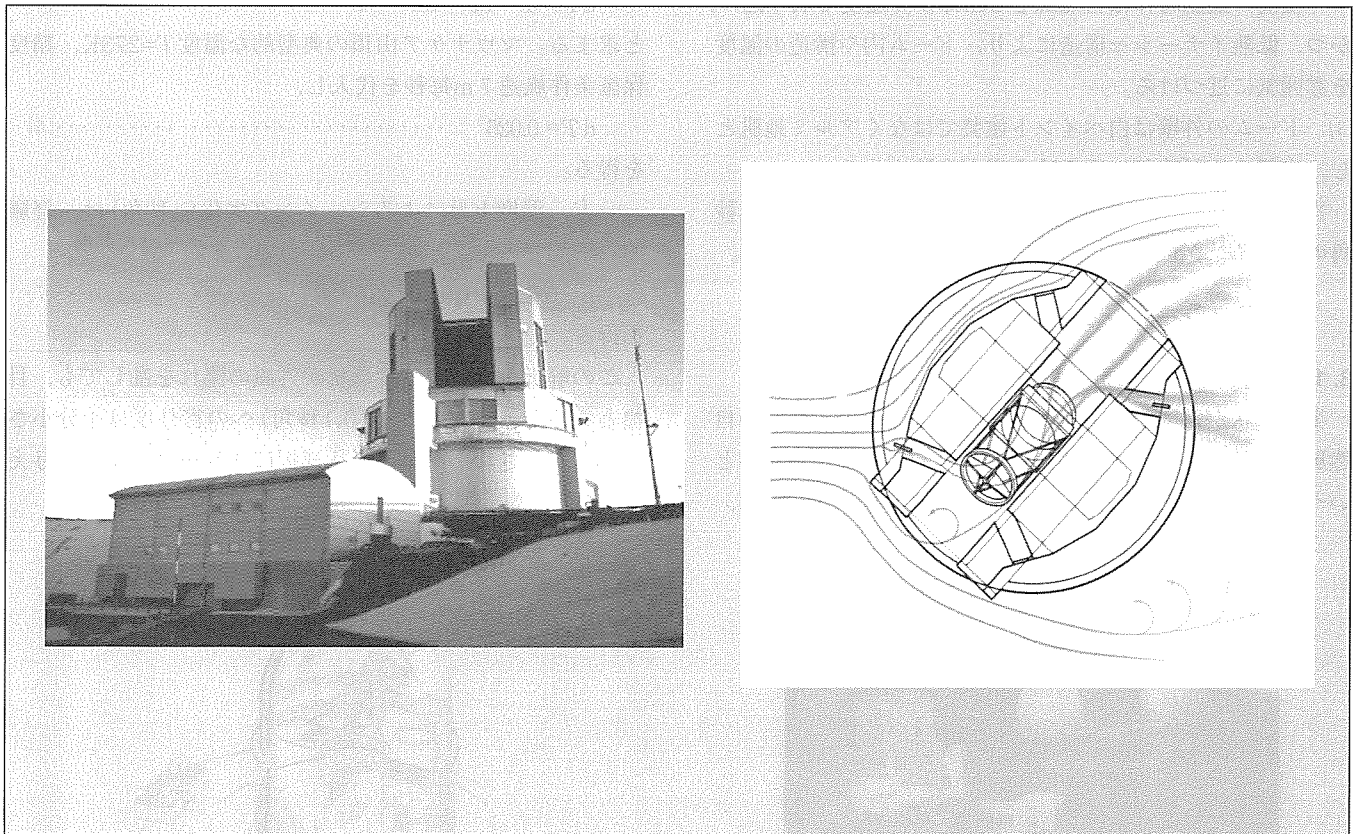
良好なシーイング環境を確保する 望遠鏡まわりの風速制御技術

三神 泉*
石川 幹*
古藤 悟**

要 旨

すばる望遠鏡のドームは、固定側のドーム下部と、望遠鏡と同期して水平回転するドーム上部からなる。直径が40m、高さが44mあり、ドーム上部だけで1,600トンを超える質量の巨大な構造である。この巨大な構造が、すばる望遠鏡の観測性能を確保する上で、重要な役割を果たしている。観測中の星の揺らぎをドーム自体が引き起こさないようにする工夫(外気温に瞬時に温度がなじむ低熱イナーシャ構造, 自然風を積極的に取り込むが乱れた接地境界層の渦を取り込まない形状など), 望遠鏡の観測性能を維持す

る工夫(取り込んだ風を望遠鏡の主鏡能動支持システムに影響の出ない風速に減速する機能, 外風速が大きい場合でも風圧による地盤の変形や振動を望遠鏡に伝達させない工夫など), 保守性や操作性を上げるための工夫など, 綿密な考慮の下に設計された精密な巨大ロボットであると言って過言ではない。ユニークな外観形状を呈するすばる望遠鏡のドームであるが, その内部に仕掛けられた多くの仕組みが, 世界最高の観測性能を発揮する影の立役者になっている。



望遠鏡まわりの風速制御技術

すばる望遠鏡のドームの全景写真(左)と, ドーム内を流れる風の流線を解析したコンピュータグラフィックス(右)を示す。いずれも, 国立天文台提供。

1. ま え が き

すばる望遠鏡のドームは、マウナケア山頂の望遠鏡群の中でも、ひときわユニークな外観を呈している(図1)。このユニークな形状は、空気の流れによって生じる空気の屈折率の空間的・時間的な変動を徹底的に抑えるために生み出されたものである。空気の屈折率の変動は、その中を通過する観測光に揺らぎを与えるものであり、ドームそのものが作る“人工的なシーイング劣化(Artificial Seeing Degradation)”と呼ばれている。ドームの設計コンセプトを樹立するための研究開発を実施した1986年ごろは、人工的なシーイング劣化の可能性が分かり始めたころであり、人工的なシーイングを定量化する設計手法はないに等しかった。

本稿では、このような時代背景下でいかにドームの設計概念を決定したかについて紹介する。

2. 開発当初のドームの概念

図2に開発当初のドームの概念図を示す。一目して分かるように、従来型の半球形状であるが、ねらったシーイング劣化に対する対策は次のとおりであった。

- (1) 制御系を別棟のビルディングに集中配置し、ドーム内から熱源を徹底廃絶する。
- (2) 夜間の観測時には自然風を2 m毎秒の速度で取り込み、かつ、低熱イナーシャ構造により、ドーム内や構造の温度を雰囲気近くに近づける。
- (3) ドームの外壁は白ペイント塗装ではなくアルミ地肌とし、夜間の放射冷却による冷え過ぎを防止する。

当時の検討結果は、この設計概念の延長線上に、0.1秒角のシーイング性能があるだろうというものであった⁽¹⁾。

3. 最良シーイングを目指すドーム形状の探求

3.1 半球形状以外の形状採用可能性の検証

半球形状が常識的であったドームには、この形が外の自然風の流れを乱さないため、ドーム外に渦が生じにくいという考え方があった。一方、円柱や角型形状のドームは、

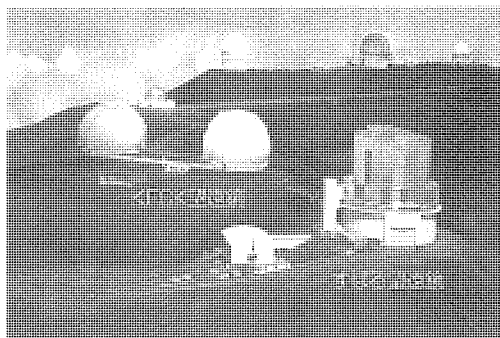


図1. すばる望遠鏡を始めとする山頂の望遠鏡群 (写真は国立天文台提供)

逆に大きく渦を作るため、人工的なシーイングの劣化が大きいと信じられていた⁽²⁾。この考え方を検証するため、ドーム外の風が垂直壁面に衝突しふさ(塞)ぎ止められる最悪のケースを想定し、シーイングの劣化を解析的に求める試みを行った。

外風速を v (m/s)とし、風の持つ動圧が垂直壁面に衝突して塞ぎ止められてすべて静圧に変化するものと考えれば、圧力上昇 H (Pa)は次式で表される。

$$H = (1/2) \rho v^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ρ は空気の密度である。

マウナケア山頂の平均気圧 P_0 との比が圧力変化率であるため、圧力変化率 α は、

$$\alpha = H/P_0 = 6.4 \times 10^{-6} \cdot v^2 \dots\dots\dots(2)$$

となる。断熱膨脹を仮定し、理想気体の状態方程式を用い、

$$P = (1 - \gamma^{-1}) \cdot C \gamma^{-1} = nRT \dots\dots\dots(3)$$

を得る。

ここで、 n 、 C 、 R は定数、 T は気体の温度、 γ は気体の定圧比熱と定積比熱の比である。

式(3)の両辺の対数をとった後、偏微分することにより、

$$dT/T = (1 - \gamma^{-1}) dP/P \dots\dots\dots(4)$$

を得る。 $\alpha = dP/P$ であり、式(2)を式(4)に代入し、最終的に、

$$dT/T = 1.9 \times 10^{-6} \cdot v^2 \dots\dots\dots(5)$$

と求まる。マウナケア山頂の典型的な温度 $T=273$ K、精度保証条件風速7 m毎秒を代入し、

$$dT = 0.025^\circ \dots\dots\dots(6)$$

を得る。

一方、温度上昇によるシーイング劣化 S (秒角)は、経験的に下記で表すことができる⁽³⁾ので、

$$S \sim 0.5 \Delta T = 0.013 \text{秒角} \dots\dots\dots(7)$$

を得る。

この解析から、ドーム形状が外風の流れを乱しても、目標とするシーイング性能(0.1秒角)への寄与度は十分小さいことが示され、ドーム形状選択にブレークスルーを与えた。

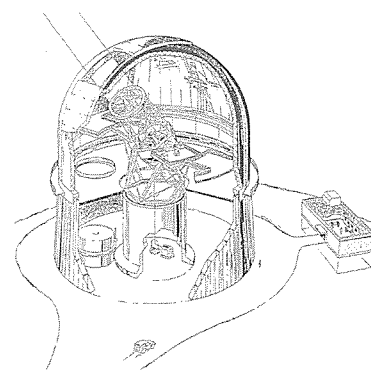


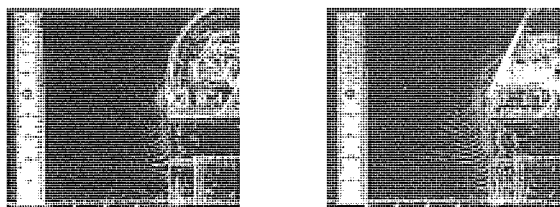
図2. 開発当初のドーム概念図

3.2 水流実験によるドーム形状の選択

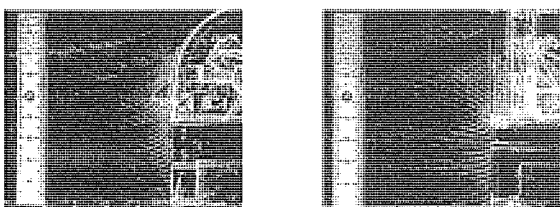
3.1節のプレークスルーに基づき、半球型、円筒型、台形型の3種類の模型を用いた水流実験(航空技術研究所と国立天文台の共同研究)が実施された¹³⁾。図3に、この実験によって得られたデータの一例を示す。この実験から、主として次の結論が得られた。

- (1) 半球や台形形状は接地境界層の乱れた渦を巻き上げて望遠鏡空間に呼び込むため、垂直壁面を持つ円筒形状が有利
- (2) 望遠鏡左右の風ガイドのための垂直壁(後口、グレトウォールと呼ばれる。)は有効であり、取り込んだ風を望遠鏡構造に当てる事が可能
- (3) 外風の方角変化に対しては、風取り入れ窓(ベンチレータ)の開閉位置を変化させることで必要な風量の取り込みが可能
- (4) 開孔率30%のウィンドスクリーンで取り込んだ後の風速を2 m毎秒程度(外風速7 m毎秒時)に抑圧することが可能

以上から、ドームは円筒形状に近いものとする方針が決定され、2章で述べたシーイング対策の実現に大きく近づいた。



(a) 球形ドーム (b) 台形ドーム



(c) 球形ドーム(張り出しあり) (d) 円柱ドーム

図3. 水素気泡法による流入高さの可視化 (国立天文台提供)

4. ドーム地盤の風変形が望遠鏡追尾に与える影響

ドームが円筒形状に近づくと、風を受ける断面積が半球形状よりも増大するため、ドームが受ける風圧で地盤が傾き、望遠鏡の追尾精度に影響を与えやすくなる。この影響が許容値以内であることを示すため、次のような解析手法を導入した¹⁴⁾。

- (1) 図4に示す風のパワースペクトル $S(f)$ を用い、精度保証風速(平均7 m毎秒)の変動成分の時間RMS(Root Mean Square)値 V_{rms} (m/3)を平均風速 V_0 (m/3)で表す。 k はTerrainの粗さ係数である。

$$V_{rms} = \sqrt{\int_0^\infty S(f) df} = \sqrt{(8k) \cdot V_0} \dots\dots\dots(8)$$

- (2) 地盤の振動が伝達され望遠鏡指向方向を変動させる成分の時間RMS値 θ_{rms} (秒角)を V_0 と V_{rms} で表し、最終的に θ_{rms} を望遠鏡揺れの平均成分 θ_0 (秒角)で表す。

$$\theta_{rms} = 2 \theta_0 (V_{rms} / V_0) = 2 (8k) \cdot \theta_0 \dots\dots\dots(9)$$

- (3) ドームが受ける V_0 の風の方角で発生する地盤の変形を求め、ドーム半径で割って θ_0 を算出する。
- (4) ガイド星を用いない望遠鏡の追尾駆動(Open Loop Tracking)時には、望遠鏡の揺れ角度そのものが追尾誤差となるため、 θ_0 と θ_{rms} のRSS(Root Summation Square)で追尾誤差 θ_{open} を求める。
- (5) ガイド星を用いる望遠鏡の追尾駆動(Closed Loop Tracking)時には、望遠鏡の揺れ角度を制御系が抑圧するので、図5に示すイメージで、望遠鏡の傾きのスペクトルに制御系の抑圧特性スペクトルを乗じて、追尾誤差のRMS値 θ_{close} を求める。

以上から、Open Loop Tracking時の影響は0.026秒角程度、Closed Loop Tracking時の影響は0.002秒角程度と、

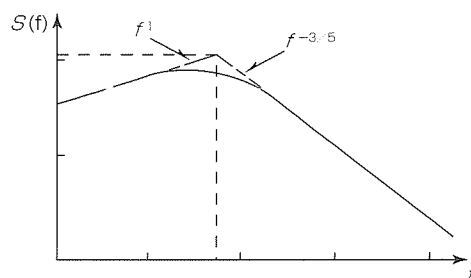


図4. 風のパワースペクトル

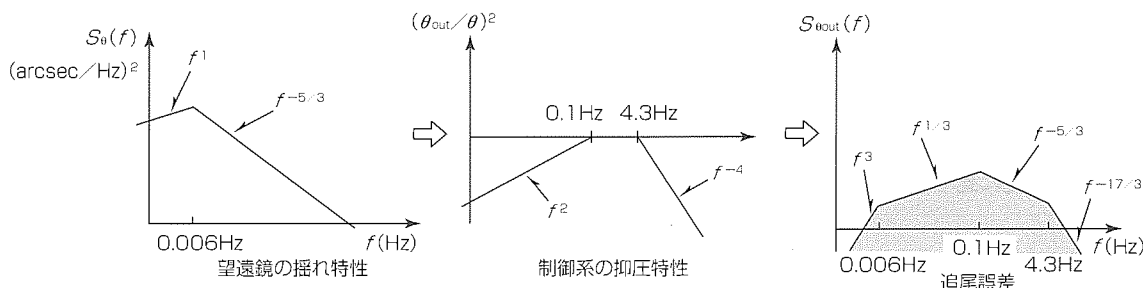


図5. Closed Loop Tracking時の追尾誤差導出イメージ

それぞれ許容値に十分入ることが示された。

5. ドームの最終形状と設計上の工夫

上述の検討に加え、当社のインハウスソフト“T-NET”を用いた熱解析⁽¹⁾、主鏡や副鏡等の光学系の保守をなし得るための検討等を行い、最終的に図6に示すドーム構造に至った。ドーム上部が途中からだ(楯)円柱になっているのは、正面からの風をより横方向に流しやすくするためと、余分な熱イナーシャを削除するためである。以下に、このドームに施した主な工夫を紹介する。

5.1 人工シーイング対策

- (1) 地上高24mに設置した望遠鏡の高度軸の高さと、併せて、接地境界層の乱れた空気の渦を観測光の中にほとんど取り込まない。
- (2) 前後左右に設けた合計21式の外風取り込み窓(ベンチレータ)は、外風の方向にかかわらずドーム内に必要な自然風を取り込むことが可能である。
- (3) ドーム観測床の下に設けた20式の外風取り込み窓は、ドーム下部から伝わる熱を断ち切る。
- (4) 望遠鏡構造の左右に設けた2枚のグレートウォールは裏側から厚く断熱され、観測空間の熱容量を最小化するとともに、取り込んだ自然風を前から後ろへ、又はその逆方向に、スムーズに導き、かつ、表面は風の温度に追従する。また、表面には可視光を吸収し赤外放射率が小さい特殊塗装を施し、光の散乱や、夜間の放射冷却による冷え過ぎを防止する。
- (5) ウィンドスクリーンは30%の開孔率を持ち、最大風速時に取り込む風速を2m毎秒まで減速することができる。
- (6) ドーム外壁は薄いアルミニウム板で、裏側から断熱され、熱イナーシャを小さくしている。地肌アルミのわずかな熱放射率のために、夜間は放射冷却を受けにくく、外風温度に容易に追従する。
- (7) 日中は約80kWの冷凍機でドーム内部を冷やして夜間の平均温度にドーム内部を保つことにより、観測時の雰囲気温度との差を小さくする。

5.2 強風対策

- (1) ウィンドスクリーンとベンチレータの組合せで、ドーム内部に取り込む風の速度を制御し、主鏡能動支持システムが精度を保つ限界の風速2m毎秒以下に抑える。
- (2) 望遠鏡構造を支えるピアとドーム下部の基礎はそれぞれ独立させ、振動は地盤を介してのみ伝達させる。この量は、望遠鏡の追尾精度に比べ十分小さい。

5.3 その他

- (1) 月が高い位置のとき光をグレートウォールで反射させないように、トップスクリーンを設ける。

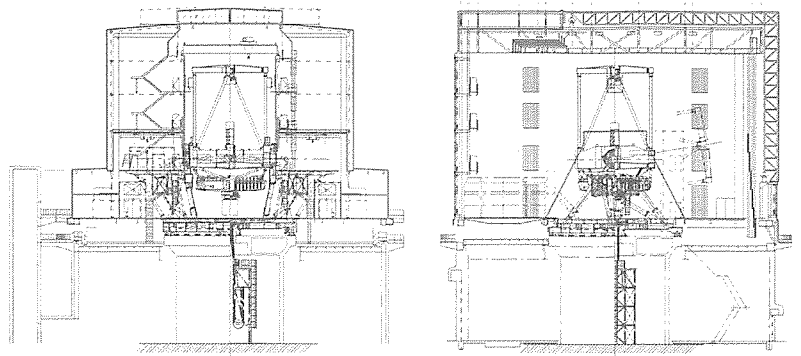


図6. 最終のドーム構造(断面図)

- (2) さらに迷光や散乱光を抑えるため、可視光領域で吸収率の大きな特殊塗装をグレートウォールに施す。
- (3) ドーム最上階に主鏡部をつ(吊)る80トンクレーンを設けている。このクレーンは、40トンクレーンとして、望遠鏡空間のどこにもアクセスが可能である。
- (4) トップユニット階には、6種類まで副鏡ユニットや主焦点ユニットが収納できる専用装置を設ける。

6. むすび

1999年1月の天文学的ファーストライトの後、次々と素晴らしい観測成果を挙げているすばる望遠鏡だが、ドームに施した工夫がこの一助になっていると思うと喜びを隠せない。ドームは望遠鏡本体に比べてサポート的存在であるため、開発に携わった方々の労苦が紹介される機会が少なかったことは否めない。本稿が、その役割の一つとなれば幸いである。

文末ではあるが、ドーム開発・製作に当たっては、イギリスのAcer Consultants、カナダのCoast Steel社を始め多くの方々のお借りしたので、ここに紹介する。また、不慮の事故から発生したドーム火災後は、不慣れな火災復旧工事の推進に、東京海上ハワイからの強力なご指導を得た。この場をお借りして、すべての関係者にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) Mikami, I., et al.: Dome Design of JNLT, *Astrophysics and Space Science*, **160**, 173~181 (1989)
- (2) Gillingham, P.R.: *Proc. SPIE*, **444**, 165~174 (1983)
- (3) Sindo, S., et al.: Some Flow Properties of Telescope Enclosure Estimated from Water Channel Tests, Technical Report of National Aerospace Laboratory, TR-1178T, 1992.
- (4) Mikami, I., et al.: Enclosure of SUBARU Telescope, *Proc. of SPIE*, **2199**, 430~441 (1994)

すばるの性能を維持するための 望遠鏡保守技術

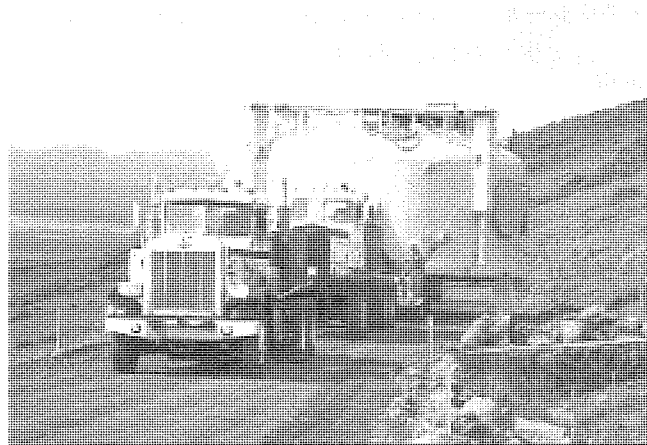
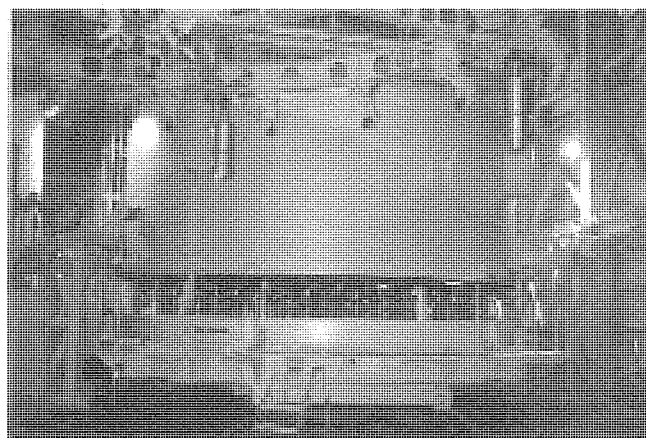
石川 幹*
三神 泉*

要 旨

すばる望遠鏡の主鏡(外径8.3m)は、高い観測性能を維持するため、1年1回のペースで古くなったアルミ反射面を洗い落とし、蒸着し直さなければならない。この再蒸着作業のたびに主鏡を山ろく(麓)まで輸送するのが大変な作業となるため、ドーム内に必要なすべての設備を設置している。この設備は、望遠鏡構造から主鏡を安全に着脱し、アルミ反射面を洗浄した後、真空中でアルミを蒸着するもので、専用に開発された多くの機械からなっている。この

中でも、外径8.3mの主鏡を収納し内部を高真空に引いた上でアルミを蒸着する大型真空蒸着装置は、幅約10m、高さ約9m、質量約80トンの巨大なものである。主鏡の口径の2倍は高さが必要とされた蒸着の当時の常識を、解析的手法で覆しドームに収納可能な大きさに抑えた過程、最終性能引き出し時に遭遇した大きな技術的問題の克服の過程等、大型真空蒸着装置を完成に導くためには幾多の困難があった。

特集
I



大型真空蒸着装置

ドーム内に据え付けられた大型真空蒸着装置(左)とマウナケア山頂に輸送中の大型真空蒸着装置上がま(釜)(右)。この輸送は主鏡輸送のリハーサルにもなった。

1. まえがき

すばる望遠鏡の主鏡(外径8.3m)は、一年に一回のペースで古くなったアルミ蒸着面を洗い流し、蒸着し直す必要がある。これは、可視光領域において高い反射率を確保し、赤外領域において放射率を小さく抑えるためである。一方、主鏡を蒸着の目的で山麓に輸送することは大掛かりな作業となることから、主鏡蒸着作業に必要なすべての保守設備は、マウナケア山頂のドーム内部に収納することとした。

本稿では、すばる望遠鏡の性能を維持するための保守技術の一例として、主鏡蒸着に関連する設備を紹介し、その実現のために必要であったブレイクスルー技術について述べる。

2. 主鏡蒸着設備

主鏡蒸着の際、ドーム内の限られたスペースの中で無駄なく安全に主鏡を運搬する動線の確保、必要最小限の装置の選択など、システム設計の初期段階から綿密な構想を練った。この結果、ドームの1階床に図1に示す設備の配置が決定された。図の設備以外に、主鏡を各設備位置に移動させるための主鏡運搬台車、セル台車等がある。各設備の目的と機能は以下のとおりである。

(1) 主鏡運搬台車

ドームの観測階で主鏡を収納する主鏡部(セルと称する枠体から261本のアクチュエータを介して主鏡を支える部分)を望遠鏡構造から取り外し、ドームの天井に設置した80トンクレーンのつ(吊)り位置まで主鏡を移動させる台車である。レール上を移動する機能、主鏡部支持ステージの水平面内スライド機能、垂直方向昇降機能等を持っている(図2)。

(2) セル台車

ドーム1階床で80トンクレーンで吊り下される主鏡部を受け取り、主鏡ハンドリング装置の位置まで主鏡部を移動させ、主鏡ハンドリング装置に主鏡を受け渡した後、セルとアクチュエータを退避位置まで移動させる台車である。ドーム1階床で円弧状のレール上を移動する機能を持って

いる。

(3) 主鏡ハンドリング装置

主鏡部から主鏡のみを分離させるための装置であり、主鏡に過大な応力を発生させないように、主鏡の外周と主鏡中央のカセグレン穴の周りを24本の支持腕で支える機能、主鏡に支持腕の位置を正対させるための支持腕部の水平面内駆動機能、主鏡の昇降機能などを持っている(図3)。

(4) 大型真空蒸着装置

装置の下釜部分を主鏡ハンドリング装置位置に移動させ、主鏡を収納する。その上で、下釜を大型鏡面洗浄装置位置に移動させ主鏡に洗浄を施した後、大型真空蒸着装置位置に復帰させ、上釜部分と合体させる。合体後、内部を所定の高真空に引き、主鏡にアルミ蒸着を施す装置である。

(5) 大型鏡面洗浄装置

蒸着装置の下釜に収納された主鏡を希塩酸などの化学薬品を用いて洗浄し、古くなった反射面を洗い落とす装置である。純水製造機能、化学薬品貯蔵機能、主鏡に洗浄液をスプレーする機能、スプレーする洗浄アームの垂直軸周りの回転機能、洗浄アームの昇降機能等を持っている(図4)。

以上の主鏡蒸着設備は、すばる望遠鏡の主鏡のために特別に計画されたものであり、世界中に例を見ない。このため、システム設計段階では、その実現性見極めのため、解析的検証はもとより、様々な実験的検証が要求された。その中で最も実現に苦労を要した大型真空蒸着装置について、次章で詳述する。

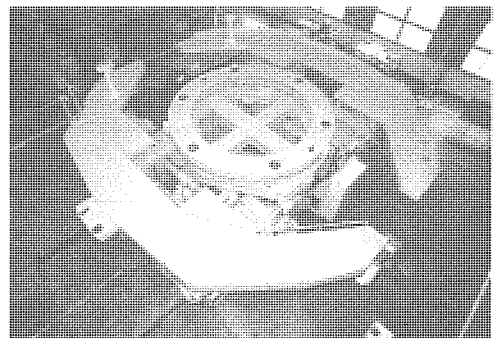


図2. 主鏡運搬台車

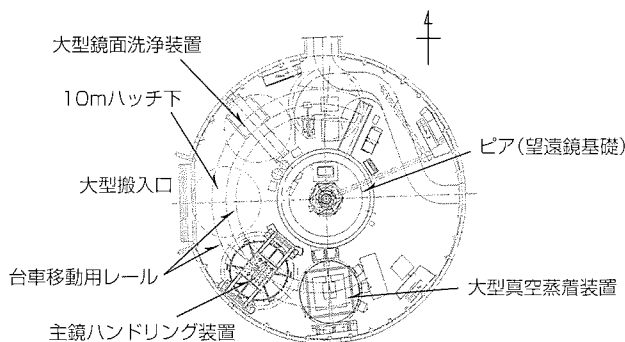


図1. ドーム下部の装置配置図

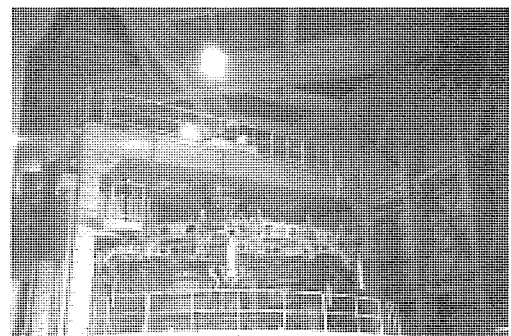


図3. 主鏡ハンドリング装置

3. 大型真空蒸着装置

3.1 大型真空蒸着装置に課せられた仕様

大型真空蒸着装置への主な要求仕様は次のとおりである。

- (1) ドーム下部1階に収納するための高さ制限：10m以下
- (2) 真空引き時間：大気圧から蒸着可能な真空度までの所要時間として4時間程度
- (3) 反射膜厚均一性：平均膜厚1,000Åに対し±5%以内
- (4) アルミ反射面の反射率：89%以上91%目標(波長0.5μm)

3.2 蒸着方法の選択

3.1節に示す仕様を満足する可能性のある方法は、蒸着法とスパッタリング法の二つに大別される。当時の技術において、両者の特徴は以下のとおりであった。

(1) 蒸着法

高真空中で蒸着金属を蒸発させ鏡面にぶつけて反射膜を形成する方法であり、4m級以下の望遠鏡で、反射率、蒸着膜厚の均一性ともに実績を持つ方法である。膜厚均一性を確保するためには、主鏡の曲率中心(すばる望遠鏡の場合30m)に蒸発源を置き、1点から蒸発させることが望ましく、蒸発源と主鏡との距離が長くなるため、いかに蒸着膜厚の均一性を保ちながら装置の背を低くするかが開発要素であった。

(2) スパッタリング法

比較的低い真空度で、蒸発源と鏡面との間の距離を短くし、双方に反対の電極を設け、その間にプラズマ流を発生させて金属を鏡面に付着させる方法である。装置の背は低くなり収納性の面では有利だが、小型鏡でしか実績がなく、反射特性や反射膜厚の均一性にも懸念があったため、大面積に対するコーティング法そのものが開発要素とされた。

スパッタリング法による反射面の反射特性を見極めるための実験が東京大学東京天文台(現国立天文台)で実施された⁽¹⁾。これによれば、蒸着法による反射面に比べ優位な結果が得られなかったため、あえて大きな開発リスクを負う必要はないとの結論に達した。しかし、蒸着法を選定するには、小型化、膜厚均一性の確保という難関を突破しな



図4. 大型鏡面洗浄装置

ればならない。そこで、アルミ蒸発源となるフィラメントと主鏡との距離の短縮を図るため、フィラメントを主鏡上に多数配置し、それぞれのフィラメントから蒸発するアルミの主鏡面上での積分値が主鏡全面で均一になるようなフィラメント数、配置を検討した。その実現可能性を大型真空蒸着装置の製造を担当させたProcess Systems International社とともに検証した結果、288本のフィラメントを主鏡の上方1.9mの所に配置することにより、予想される膜厚均一性は、図5のとおり、仕様値を満足する見込みを得た。以上のような過程を経て蒸着法が選定された。

3.3 大型真空蒸着装置の概要

図6に大型真空蒸着装置の概念図を示す。幅約10m、高さ約9m、総質量約80トンの巨大な設備である。主鏡は下釜の底から90本のばね式支持機構で保持される。下釜、上釜が結合した状態で、蒸着可能な所定の真空度まで排気する。上釜の内部に288本のフィラメントが装着され、抵抗加熱によって主鏡の上方からアルミ蒸着流が流れ、主鏡鏡面に反射面を形成する。

3.4 最終性能達成へのブレークスルー

大型真空蒸着装置完成後、蒸着性能の評価試験を国立天

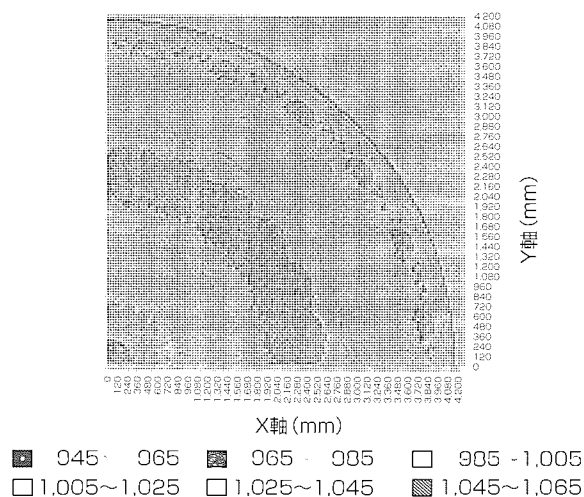


図5. 蒸着膜厚シミュレーション結果

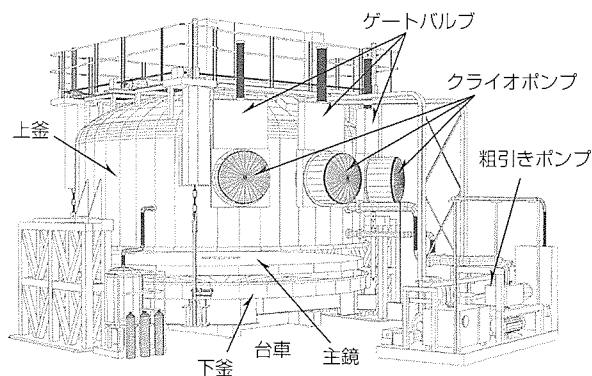


図6. 大型真空蒸着装置の概念図

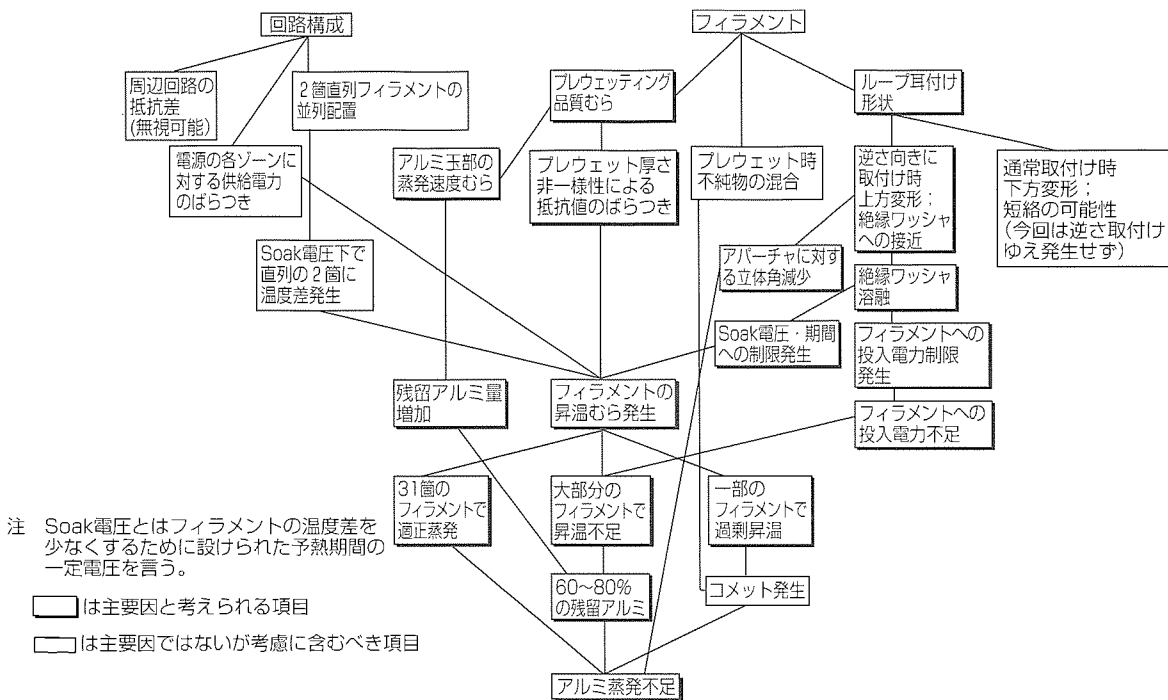


図7. 大型真空蒸着装置性能実現へ向けたFTAの一例

文台の協力を得て実施した。試験には、主鏡の代わりに顕微鏡プレパラートを多数並べ、主鏡面上の膜厚分布を評価できるようにした。評価試験は、まず、設計段階で構築したEnd-Loading法で行った。End-Loading法とは、蒸発対象であるアルミをコイル状に巻いたタングステンフィラメントの両端にぶら下げ、大型真空蒸着装置内の高真空状態で加熱してフィラメントに溶かし着ける方法である。蒸着は、この溶かし着けが完了した後、更にフィラメントの温度を上げることで実行する。しかし、この方法では次のような不具合が発生した。

- (1) アルミの溶かし着けの際にアルミが一部落下する。
- (2) 蒸着時にスピッツ、コメツと呼ばれるアルミの火花が発生する。
- (3) 288個のフィラメントが一様に加熱されない。
- (4) 反射膜厚の均一性が確保できない。

これらの不具合を解決するため、徹底的なFTA (Fault Tree Analysis) を実施した。その一例を図7に示す。

このFTAから、次に示す対策案が得られた。

- (a) あらかじめ別の真空槽でフィラメントにアルミを溶かし着け、質量測定で合格となった物のみを使用する(プレウエット法⁽²⁾)。
- (b) 2個直列だったフィラメントの配線を並列にし、負荷電圧の均一化を図る。

以上の対策案を実施することにより、スピッツ、コメツに代表されるアルミの落下は解消し、フィラメントの均一加熱も達成され、反射率、膜厚均一性ととも仕様を満足する大型真空蒸着装置が完成した。

4. すばる望遠鏡主鏡の保守の現状

1998年11月に初の主鏡蒸着を行い、約9か月間の試験観測の後、'99年8月に再蒸着作業が行われた。望遠鏡構造から主鏡部を取り外す工程、古いアルミ反射膜を除去する工程等、初めて経験する工程もあったが、全作業を無事完了した。なお、'99年9月17日に国立天文台が開催したすばる望遠鏡完成式典において、曇りなく輝く主鏡が来賓の皆様披露されたことをここに特筆させていただく。

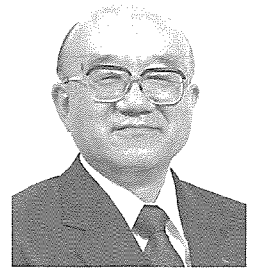
5. むすび

主鏡蒸着設備は、当社のシステムインテグレーション力だけでなく、国立天文台のご指導がなければ実現し得なかったものと信ずる。特に、鏡面洗浄法や蒸着法の最適化に関しては、国立天文台のご支援に負うところが多く、この場をお借りしてお礼申し上げます。また、各設備の詳細設計・製造を担当していただいた日立造船㈱、三菱重工業㈱、PSI社の皆様にも感謝する。

参考文献

- (1) 中桐正夫：大型望遠鏡の蒸着装置の検討，天文学に関する技術シンポジウム収録，136～144 (1986)
- (2) 佐々木五郎，神澤富雄，大島紀夫，鳥居康夫，湯谷正美，鎌田有紀子，林 左絵子，野口 猛：プレウエット法によるアルミニウム蒸着膜の生成，国立天文台報，4，121～128 (1999)

II パワーエレクトロニクスとパワーデバイス

三菱電機株 顧問
工学博士 大野 榮一

パワーエレクトロニクスは、エネルギーである電力を自由に変換し制御する技術として発展し、今や現代社会を支える基盤技術として産業・社会・家庭のあらゆる面で必ず(須)のものとなっている。

周知のように電力の形態には直流と交流があるが、従来は一定周波数の交流である商用電源が主役となっており、利用上での制約も大きかった。パワーエレクトロニクスによって直流-交流間の変換が自由自在に行えるようになったことに加えて、周波数・電圧・電流も任意に制御できるようになり、関連分野における技術革新の原動力となったと言える。

ところで、パワーエレクトロニクス発展の主役は、電力用半導体としてのパワーデバイスである。歴史的には、トランジスタより10年遅れて米国GE社からSCR (Silicon Controlled Rectifier)の名称で発表されたサイリスタが、そのきっかけを作ったのである。それ以前の電力の変換・制御にはサイラトロン、水銀整流器、磁気増幅器などのデバイスが使われていたが、それぞれ固有の問題点を抱えており、短時間のうちに新しく生まれた半導体デバイスに置き換わっていった。

パワーエレクトロニクスにおける技術革新は、このパワーデバイスというシーズと電力の変換・制御に関係する幅広い応用分野からのニーズが密接に絡み合い、相互に刺激し合いながら急速な発展を遂げてきたことに大きな特徴がある。終戦直後から始まった鉄道の交流電化や製鉄プラントからのニーズに合わせてパワーデバイスの大容量化・高信頼化が進み、今では、直流送電における交直変換器など電力系統にも実用化が進展している。また、情報・通信の普及拡大に伴って必要となった無停電電源にこたえてイン

バータ用の高速スイッチングデバイスが生まれ、それが交流モータの可変周波数駆動やACサーボの普及を促進し、省エネルギーと自動化に貢献した。さらに、インバータエアコンを頂点とする家電製品への需要に対しては、IGBTやIPMなどのパワーモジュールが開発され爆発的普及を引き起こした。今では新しい新幹線列車の制御にもパワーモジュールが実用化され、さらにCO₂抑制の決め手としての電気自動車やハイブリッドカーへの応用が進むとともに、太陽電池や燃料電池などの新エネルギー源にも必須のものとなっている。

このようなパワーデバイスの進歩・発展も、単独で実現したのではない。急速な大容量化が進んだのも、メモリやマイクロプロセッサなどで先行的に開発・実用化された大口径ウェーハが容易に使用できるようになったことが貢献している。同様に、サブミクロン領域に達した設計ルールを活用することによって、パワーデバイスの制御性能も著しく向上し、小型・高性能化が達成された。さらに、宇宙環境を含め応用分野の拡大を目指したパワーデバイスとしての課題は尽きることなく、関係者による多大の努力が続けられており、この特集号にもその成果の一端が発表されている。

21世紀に向けてエネルギーと環境の問題はますます重要となる。また、情報化社会における電源や駆動源の重要性もますます増大する。パワーエレクトロニクスは、これらの問題に対処する中心技術として、電力・都市・交通・生産・医療・家庭のあらゆる面において、その持てる能力を最大限に発揮することが求められており、更なる発展に期待するところ大である。

パワーデバイスチップの技術動向と展望

萩野浩靖*

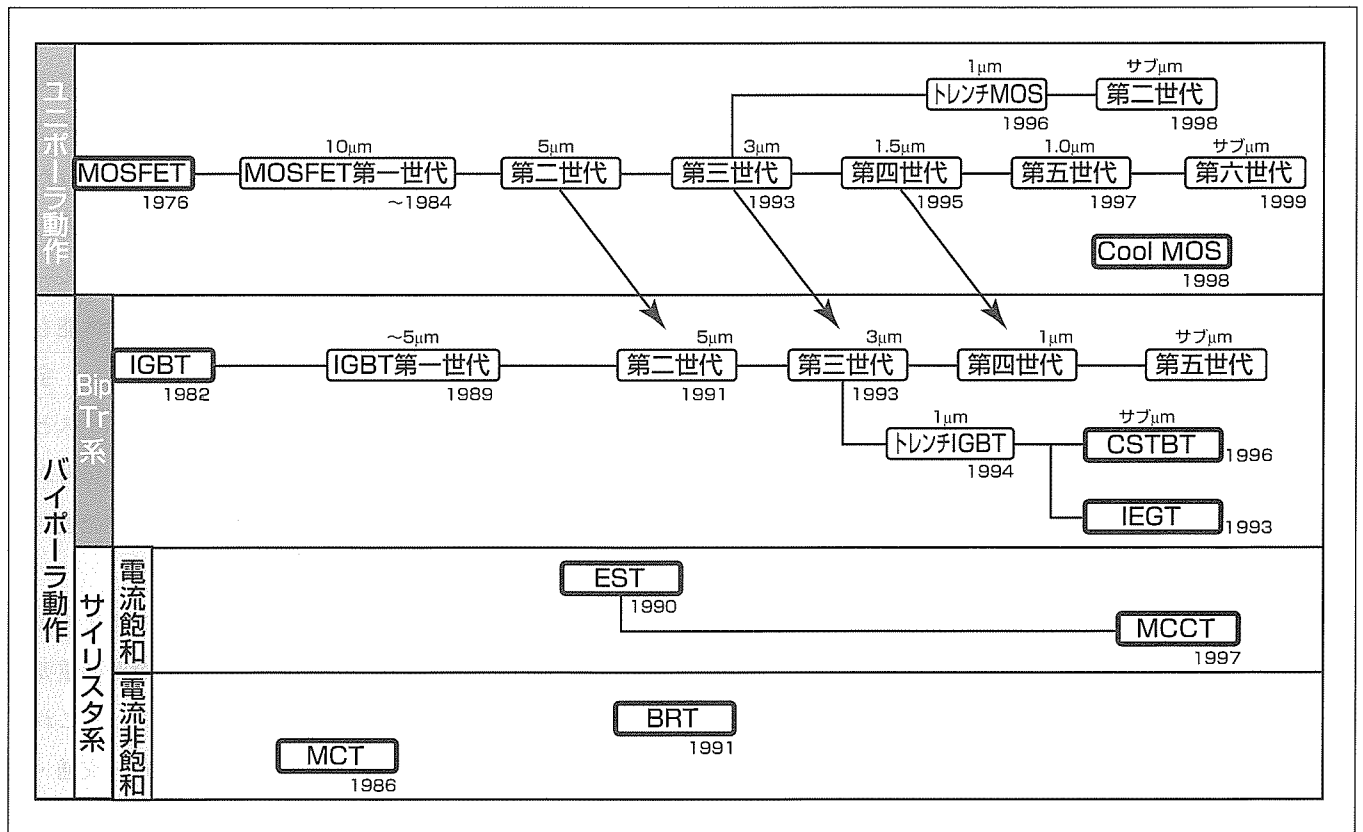
要旨

パワーデバイスは、産業・電力・交通・情報等の種々の分野で使用され、それらの機器の性能はパワーデバイスの性能によって大きく左右される。特に来るべき21世紀は、高度情報化時代が到来し、電力需要はますます増えてくるため、インバータ化等による省エネルギー対策やクリーンエネルギー等による新しいエネルギーの創出が重要な課題となる。一方、地球環境保護の面から電気自動車等の環境考慮型装置の普及が活発化してくることが予想される。このような社会環境の中で、パワーエレクトロニクスを支える素子として、パワーデバイスはますます重要な役割が期待される。

最近パワーデバイスとしては、デリスクリット、モジュール、IPM(Intelligent Power Module)等種々のデバイスが出現してきているが、その性能を決める中心になるのがパワーデバイスチップである。パワーデバイスチップ自身

も急速に進化し、現在主流になっているのがMOS系パワーデバイスチップである。その中でも使いやすさの面からMOSFETとIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が主に実用化され、微細加工技術やライフタイム制御技術の進展によって著しい性能改善が進行している。一方、工業用大容量インバータや電力応用で要求される高耐圧・大容量領域では、当面低損失の有意性からバイポーラ系のサイリスタ型デバイスが主流として使用され、この領域ではGTOに替わる素子としてGCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタが開発されて応用拡大が期待されている。また、電圧形インバータ装置ではIGBTやGCT等のスイッチングデバイスとともに環流用ダイオード(FWD)が必要であり、このFWDの特性改善もスイッチングデバイスの改善と並行して進められている。

特集
II



パワーエレクトロニクスの発展

パワーデバイスの性能改善は、パワーエレクトロニクスの発展に大きく貢献している。この性能改善は、MOS系パワーチップの微細加工技術の進歩によるところが大きい。図は、MOS系パワーデバイスチップの開発動向を示している。

1. ま え が き

パワーデバイスは、社会情勢を反映しながらパワーエレクトロニクスとともに開発が進められ、種々の電力変換装置の進展に大きく貢献してきた。

当社では、この分野に対応するため種々のパワーデバイスを開発し製品化をしてきたが、そのスタートはサイリスタやトランジスタ等のディスクリートデバイスから始まった。オイルショック直後の1980年代に世界に先駆けてバイポーラトランジスタを搭載した絶縁構造のモジュールを製品化すると、その利便性と省エネルギーを目的としたインバータ装置の普及とあいまって急速に需要が拡大した。'80年代後半になると、インバータ装置の室内設置など人間環境への密着が進むにつれて低騒音化への要請が強まり、その対応デバイスとして、高周波化が可能で駆動損失が小さいMOSゲート構造を持つIGBTが開発され、バイポーラトランジスタモジュールからIGBTモジュールへの移行が急速に進んだ。また、'90年代に入ると、インバータ装置の小型化・高性能化の動きに対応できる駆動・保護・故障診断回路を内蔵したIPMが製品化され、IPM時代に突入した。最近では、IPMの多様化が進み、高信頼度が要請される電鉄用の高耐圧(HV)IPMや電気自動車用のEVIPMや高機能化を目指したASIPM(Application Specified IPM)等が開発され、応用分野も拡大してきている。

一方、ディスクリート製品においては、小容量領域ではMOSFETやIGBTの応用が進み、バイポーラデバイスからMOS系デバイスへの移行が確実に進んできている。大容量領域ではGTO応用領域が高耐圧のIGBTモジュールやIPMで置き換えられる中、新型素子であるGCTが開発され、超高耐圧・大容量領域の工業用インバータや電力用途等で低損失性の利点から市場拡大が期待されている。

このようなパワーデバイスの進歩は、パッケージ技術や制御用IC技術の進展とともに、本流であるパワーデバイスチップの性能向上によるところが大きい。パワーデバイスチップの技術進歩は、低損失化と安全動作領域の拡大を主眼としてなされてきた。

本稿では、パワーMOS系デバイスの中心にあるMOSFET、IGBTチップの技術動向と工業用大容量インバータや電力応用での拡大が期待されるGCTの技術動向とともに、これらのチップの将来展望について述べる。

2. パワーMOS系チップの技術動向

前ページのパワーMOS系チップの開発動向の図に示されているように、種々のパワーMOS系チップ構造が学会や論文で報告されている。現在本格的に実用化が進められている代表的なものは、MOSFETとバイポーラトランジスタ系のIGBTである。ここでは、MOSFETとIGBTの性

能改善を中心とした技術開発について述べる。

2.1 MOSFETチップの動向

MOSFETは、微細加工技術の進展によって、セル密度の高密度化を図る低オン抵抗化を中心に開発が進められてきた。100V以下の低電圧領域のMOSFETでは、従来の平面構造に替わりトレンチ構造が採用され、セル密度の大幅な高集積化が進み、オン抵抗の著しい低減が実現されている。図1にトレンチ構造と平面構造でのMOSFETのオン抵抗成分の分解比較を示す。平面構造の場合、J-FET抵抗(R_{jFET})が存在し、セル間隔を狭くしすぎると R_{jFET} の効果よりもオン抵抗が大きくなるという問題があり、セル密度の高集積化を阻害していた。しかし、トレンチ構造では、構造上 R_{jFET} が存在しないため、大幅なセル密度の高集積化が図れ、オン抵抗を一層低減することができるようになる。特にOA機器や携帯機器に使用される20~30Vクラスの領域では、更なる低オン抵抗化を目指したサブミクロンのトレンチMOSFETの開発が活発に進められている。トレンチ構造にはメッシュ形とストライプ形があり、図2のデザインルールとオン抵抗の関係を示すデータによれば、メッシュ形による微細化が、ストライプ形よりもオン抵抗

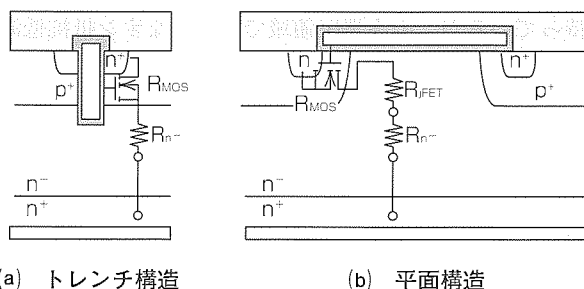


図1. トレンチ構造と平面構造でのMOSFETのオン抵抗成分の分解比較

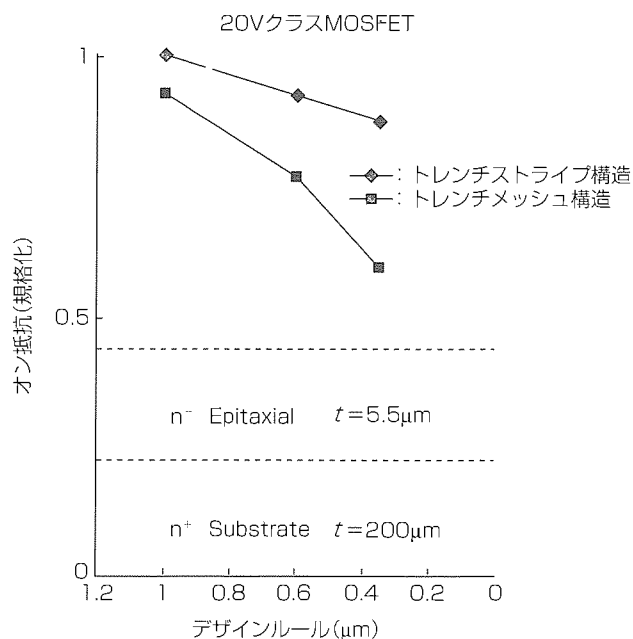


図2. トレンチMOSFETの微細化によるオン抵抗低減

に効果がある。ただし、メッシュ形の場合、ゲート容量が大幅に増大するため、DC/DCコンバータ等の高周波応用には適さない。高周波応用に対しては、ストライプ形トレンチ構造でトレンチ溝の幅を微細化し、ゲート容量を低減させる方法が優れている。なお、図から分かるように、20VクラスのMOSFETでは n^+ 基板抵抗もオン抵抗に影響を与えているため、 n^+ 基板の薄膜化等もオン抵抗低減策になる。この領域のMOSFETは、近年、急速に低オン抵抗化が進み、チップ性能とともに、電極取り出し配線の配線抵抗低減も非常に重要な課題となってきている。

一方、中高電圧領域では、微細化によるオン抵抗の改善効果が少なく、シリコン理論限界に近づいているため、ここ数年、オン抵抗低減以外のアバランシ耐量改善、低コスト化を目指した基板の拡散ウェーハ化、UPS等のL負荷使用時に必要となる内蔵ダイオードの性能改善等に技術開発の主眼が移ってきている。最近、図3に示すように、この領域のオン抵抗低減策としてシリコン理論限界を打ち破るアプローチがなされ、図4に示す新構造のCool MOSが発表され注目されている。現状のCool MOSは、数回のエピタキシャル成長プロセスとイオン注入プロセスを繰り返す複雑な製造プロセスで作られるためコストが高くなる難点を持っているが、中高電圧領域での大幅なオン抵抗低減の道が開かれたことから、実用化に向けた低コストプロセス技術開発の活発化が期待される。

2.2 IGBTチップの動向

IGBTについては、微細加工技術によるMOSFET部分の改善とともに、ライフタイム制御技術の進歩も性能改善に大きく貢献している。IGBTの現在の主力は平面構造の3ミクロンプロセスが使われた第三世代製品であるが、当社

では、最近、第四世代製品として、1ミクロン化による性能改善を進めている。

この第四世代製品では、従来から進めてきた平面構造以外に、トレンチ構造を採用したIGBTの開発にも着手している。トレンチIGBTの場合、MOSFET部分の通電能力を大幅に向上させているため、低飽和電圧の特長を最大限に生かそうとすれば、短絡時に非常に大きな短絡電流が流れて破壊を招く問題を持っている。このためトレンチIGBTでは、短絡電流を制限するための付加回路が必要になる。すなわち、20~30A以下の小容量領域では、コスト面や製品の小型化の面から、平面構造による微細化が得策である。中大容量領域では、低飽和電圧化によるチップ縮小等の効果が大きいので、コストと性能の両面でトレンチ構造を採用する方が有利になる。

一方、IGBTのライフタイム制御については、均一制御である電子線照射からプロトンやHe等の荷電粒子照射による局所ライフタイム制御に移行してきている。局所ライフタイム制御の場合、ターンオフ損失低減に大きく寄与する領域のライフタイムのみを制御するため、従来の電子線照射に比較してターンオフ損失と飽和電圧の相関を大幅に改善することができる。局所ライフタイム制御は、局所的なライフタイム制御であるため、素子の温度依存性への影響は小さくなり、ライフタイム制御を必要としないNPT (Non-Punch Through) IGBTと同様に実使用領域での電流温度係数を負にすることがPT (Punch Through) 構造においても可能となり、並列使用が容易となる利点を持っている。

また、IGBTの一つの動きは低コスト化の技術開発である。低コスト化については、製造プロセスの簡略化やチップ縮小とともに、基板のコスト削減の面から従来主流として採用されてきた高価な2層エピタキシャル成長ウェーハを使用したIGBTからエピタキシャル成長を使用しないNPT形構造への移行が1,200~1,700Vの耐圧領域で進んできている。当社では、この対応として、図5に示す新しいNPT形IGBTを開発した。このIGBTは、従来のNPT形構造にプロトン等を照射して疑似バッファ層を形成しているため、主耐圧を維持するn領域を薄くすることが可能と

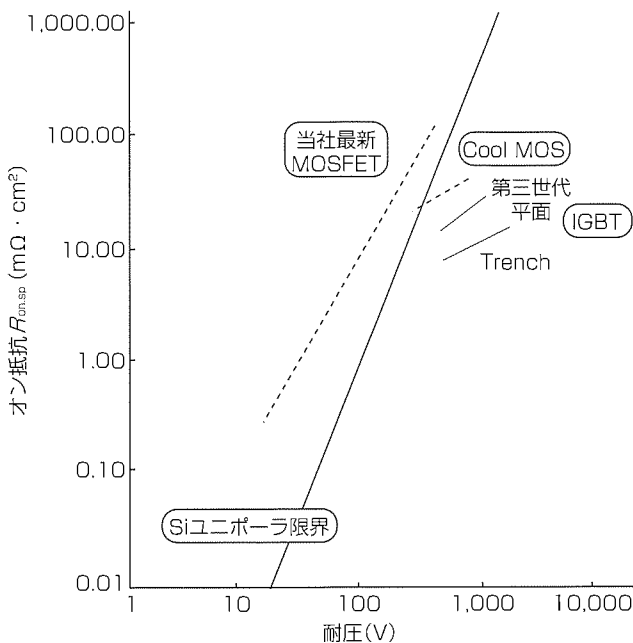


図3. MOSFETとCool MOSの耐圧とオン抵抗の関係

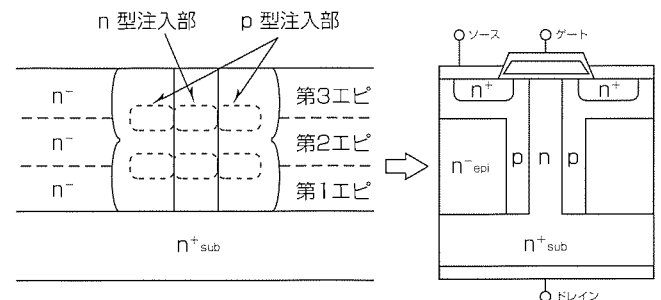


図4. Cool MOSの製法と構造

なる。これによって、PT形IGBTの長所である低損失特性を維持できる新しいNPT IGBTが実現できた。

IGBTの今後の展望としては、キャリア分布改善形のCSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)やIEGT(Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor)等による性能向上が期待されている。

当社では、トレンチIGBTの改良形であるCSTBTを次世代のパワーMOSチップとして位置付け研究・開発を開始した。図6に示すようにCSTBTはトレンチIGBTのpベス直下にn層を設けた構造で、このn層がキャリアの流れの障壁となり、図7(a)に示すようにエミッタ側表面付近にキャリア蓄積を発生させる。通常のトレンチIGBTでは、コレクタ側からエミッタ側に向かうに従って、キャリア濃度が徐々に減少する。

図7(b)に、600VクラスのトレンチIGBTとCSTBTの出力特性比較のシミュレーション結果を示す。CSTBTの飽和電圧は、トレンチIGBTに比較して低減され、理論限界であるPINダイオードにほぼ近づいていることが分かる。

前述のようにCSTBTは、キャリア蓄積効果によってエミッタ表面のキャリア濃度が上昇し、この効果によって飽和電圧が低減される。したがって、n層の厚い高耐压デバ

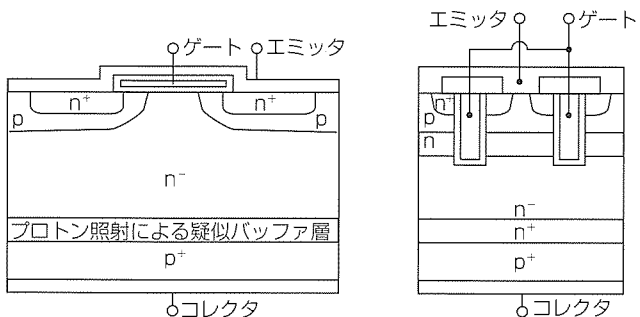
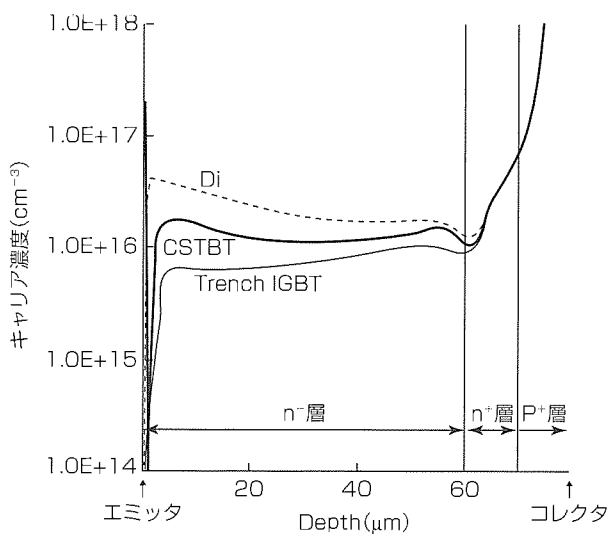
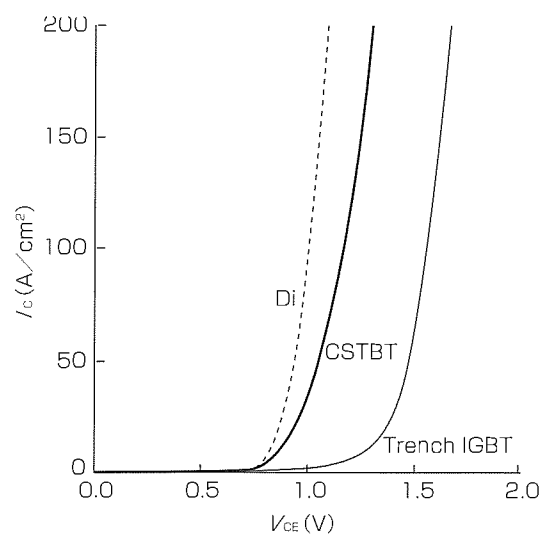


図5. 新しいNPT形IGBTの構造

図6. CSTBTの構造



(a) キャリア分布



(b) 出力特性

図7. トレンチIGBTとCSTBTのキャリア分布及び出力特性比較(600Vクラス)

イスになればなるほどこの効果は大きい。

3. GCTの動向

図8にIGBT, GCT, GTOの応用マップを示す。IGBTとGCTの出現によってGTO応用は急速に縮小してきている。GCTは、GTOに比較して dv/dt 抑制用のスナバ回路が不要で、IGBT応用と同様に過渡的なサージ電圧を抑えるための小さなスナバ回路を接続するだけで使用できるため、GTOに比較して大幅な装置の小型化が実現できる。一方、IGBTと比較すると制御回路が大きくなる反面、GCTは、GTOと同じ基本構造のサイリスタ系デバイスであるため、低オン電圧化が図りやすい利点を持っている。

図でも分かるように小中容量を中心にIGBTがパワーデバイスの主流となる方向は変わらないものの、低オン電圧性能がより重要になる高耐压・大容量領域では、GCTが主力として使用されるであろう。GCTの大容量化において、GCTの大口徑化におけるターンオフ性能改善が重要

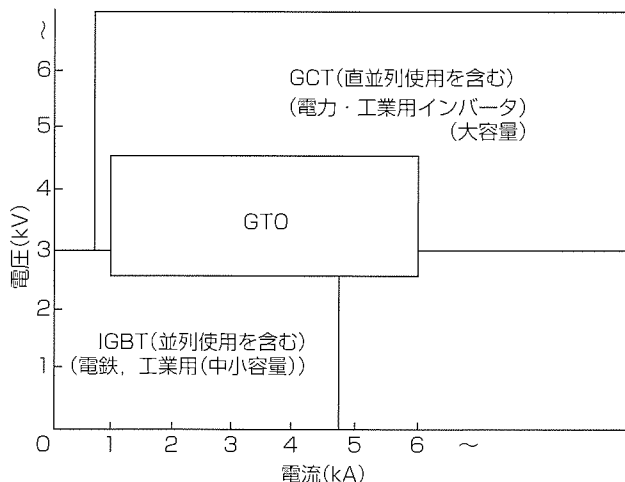


図8. IGBT, GCT, GTOの応用マップ

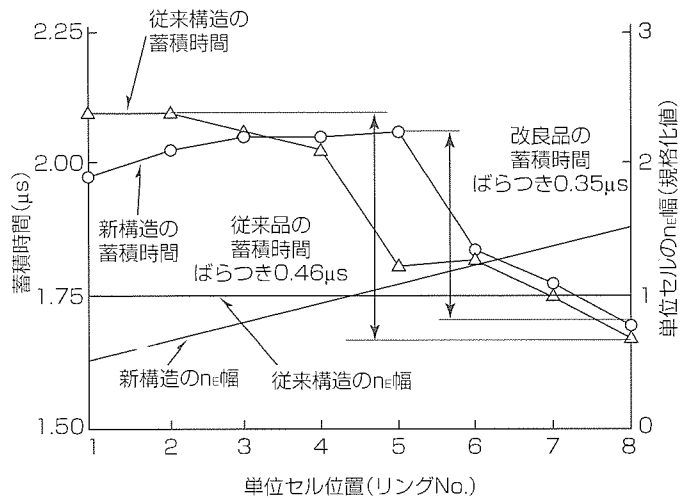
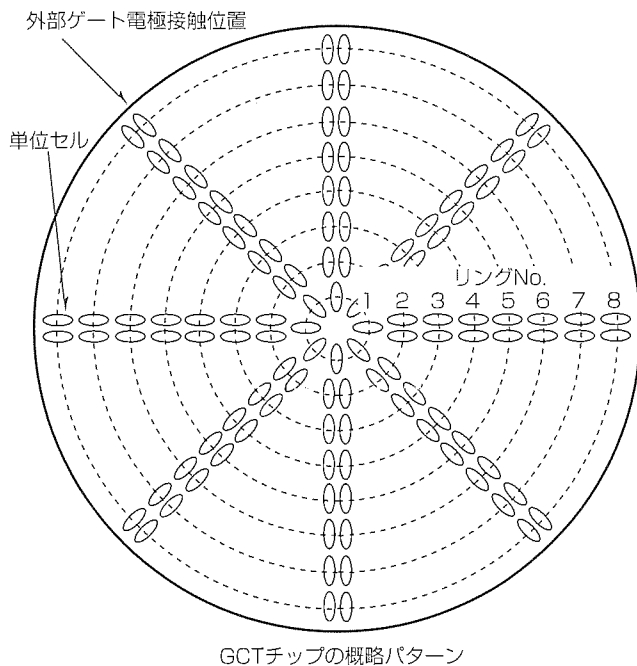


図9. 従来構造と新構造の n_E 幅と蓄積時間の分布

特集 II

な課題である。

図9に従来セグメント構造と新しい構造に対する各セグメントのターンオフ時の蓄積時間の分布を示す。従来のセグメント構造ではn形エミッタ(n_E)幅が均一であるのに対し、新しいセグメント構造では n_E 幅が外周リング方向に広がる構造になっている。蓄積時のばらつきに注目すると、従来の構造では各セル間のばらつきが $0.46\mu\text{s}$ であったのが、新構造では $0.35\mu\text{s}$ まで改善されているのが分かる。

現在実用化されているGCTは電圧形インバータ装置に適合した逆導電形及び逆導通形であるが、高耐圧・大容量インバータでは、装置の小型化が容易という面から電流制御方式の開発も注目されている。この場合には、逆導電形GCTの使用を考えると、逆導電形GCTに逆電圧阻止用のダイオードを直列に接続させる必要がある。そこで、電流形インバータ用デバイスとして逆阻止形GCTの開発が期待されている。

4. む す び

MOSFETとIGBTを中心に、デバイスシミュレーション技術の導入によって破壊現象の究明や性能改善のポイントが明確になり、パワーデバイスチップの性能向上が急速に進んできている。また、プロセス技術の進展により、トレンチ構造が適用できるようになり、トレンチMOSFETとトレンチIGBTの製品が活発になってきている。今後の動向としては、低電圧MOSFETではサブミクロン化、中高電圧MOSFETでは新構造のCool MOS、IGBTではキャリ

ア分布制御形のCSTBTやIEGTによって一層の性能改善が期待されている。一方、高耐圧・大容量領域では、GCTの高耐圧・大容量化、装置の小型化に貢献できる逆阻止GCTや逆導通GCTの製品化が進むであろう。

参 考 文 献

- (1) Lorentz, L., Deboy, G., Marz, j.M., Stengl, P., Bachofner, A.: Drastic Reduction of On-Resistance with Cool MOS, 250~258, PCIPM Europe, 5 (1998)
- (2) Harada, M., Minato, T., Takata, I., Takahashi, H., Inoue, K., Nishihara, H.: 600V Trench IGBT in comparison with Planar IGBT, Proc.ISPSD, 411~416 (1994)
- (3) 春口秀樹, 副島顕幸, 山田順治, 内田佐織, 岩本英雄: 新nバッファ構造 p^+ 型IGBTの開発, 平成11年電気学会全国大会, 744, 4-32 (1999)
- (4) Takahashi, H., Haruguchi, H., Hagino, H., Yamada, T.: Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor (CSTBT)-A Novel Power Device for High Voltage Application, Proc.ISPSD, 349~352 (1996)
- (5) Satoh, K., Morishita, K., Hirano, N., Yamamoto, M., Kawakami, A.: New Design Approach for Ultra High Power GCT Thyristor, Proc.ISPSD, 351~354 (1999)

家電インバータ用超小型DIP-IPM

要 旨

近年、家電のインバータ化が急速に進む中、高効率・小型コンパクト化、高コストパフォーマンス、及び信頼性の向上が望まれている。現在、DIP IPM (Miniature Dual In-line Package Intelligent Power Module) PS212XXシリーズがモータ制御用インバータ家電の主流を占めつつあるが、今回、特に容量の小さい冷蔵庫・洗濯機等のモータ駆動インバータとして超小型DIP-IPMの開発に着手し、製品化を実現した。このIPMは、業界初のコンセプトであるトランスファフルモールド技術を採用し、従来DIP-IPMの構造に対し、より生産性の向上、体積比40%縮小の小型化を図った。超小型DIP-IPMは、パワーエレクトロニクスの応用分野、特にインバータ家電分野に性能・構造・品質等の最適化を提供するために、絶縁技術とモールド技術の確立によって達成した。そのDIP-IPMのパッケージ技術及び機能・特長は次のとおりである。

(1) パッケージ構造

生産性向上を目的とし、トランスファフルモールド技術

とワイヤボンド技術を確立し、低損失IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), FWD (Free Wheel Diode) をフレームとワイヤで結線し、フルモールドパッケージの開発を実現した。また、絶縁技術の確立により、従来内蔵していたヒートシンクを省略し、低熱抵抗の絶縁構造を実現した。

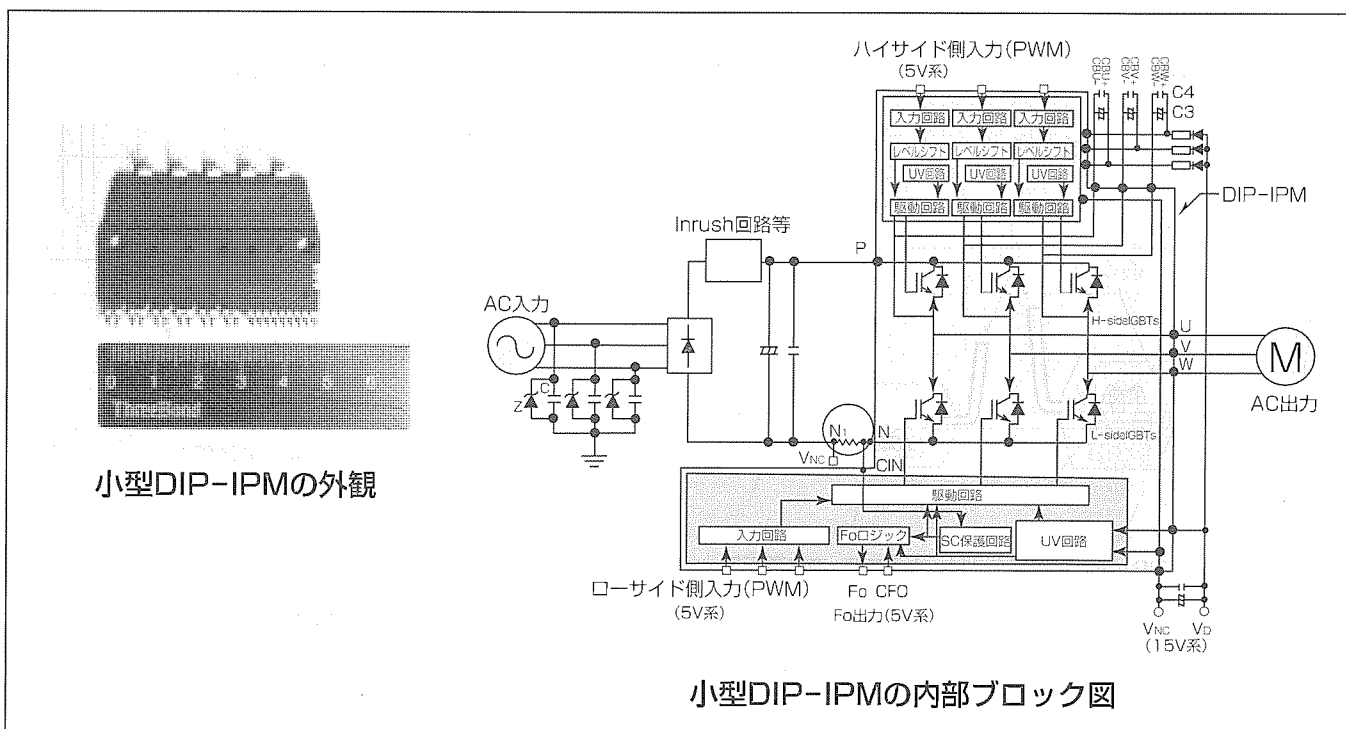
(2) 機能と特長

(a) パワー回路

- 低損失三相IGBT/FWDインバータ結線

(b) 駆動・保護機能

- IGBT駆動電源：DC15V単一電源
- P側IGBT用：駆動回路、高圧レベルシフト回路、駆動電源低下保護回路(エラー出力なし)
- N側IGBT用：駆動回路、過電流保護回路
- N側制御電源低下保護回路
- エラー出力：N側IGBT過電流保護、N側制御電源低下時出力



超小型DIP-IPM PS213XXシリーズの概要

従来のDIP-IPMに対し、パッケージ構造を簡素化し、外形で40%の小型化を実現した。

1. ま え が き

超小型DIP-IPMは、家電製品、特に洗濯機・冷蔵庫等の小容量家電モータ駆動用として開発を進めた。この分野において特に要求の高い小型化、高コストパフォーマンス、信頼性の追求、低損失化をコンセプトとし、超小型DIP-IPMの構成とした⁽¹⁾。

2. DIP-IPMの構造

超小型DIP-IPMに搭載した部品は三相インバータを構成するパワー素子IGBTとFWD及び制御用ICベアチップ(HVICとLVIC)のみのオールシリコンソリューション構成であり、従来のIPMと比較して大幅な部品点数削減及び小型化を実現した⁽¹⁾。各々のチップは、同一フレーム上にダイボンドされた後、ワイヤで電氣的に接続され、従来トランスファモールドによる二重モールドを行っていたものを一度のトランスファモールドで成形封止される。従来フレーム下部には放熱板を備えていたが、今回、絶縁技術の確立を行い、モジュール内部の放熱板の省略を実現し、フルモールド構造にすることで小型化を図った⁽¹⁾。図1に従来との構造比較を示す。また、モールド樹脂に高熱伝導樹脂を採用することにより、熱抵抗の低減を図り、5~10Aのシリーズ化を実現した。

表1にDIP-IPM PS213XXシリーズの製品系列を示す。

3. キーテクノロジー

上述の要求にこたえるために、次の主となる技術を開発した。

(1) パワーデバイスチップ技術

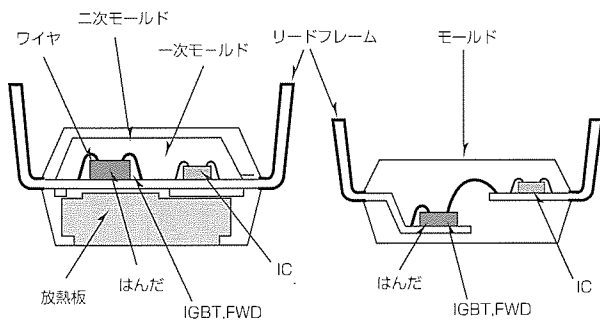


図1. 従来パッケージとの構造比較

表1. PS213XXシリーズの製品系列

| 型名 | 素子定格 | タイプ | モータ定格 (kW) | 100%負荷 | 150%負荷 (60秒) | 単位 |
|---------|-------------|-----|------------|--------|--------------|------|
| PS21302 | 5 A / 600V | 低速 | 0.2 | 1.5 | 2.25 | Arms |
| PS21312 | 5 A / 600V | 高速 | 0.2 | 1.5 | 2.25 | Arms |
| PS21313 | 10 A / 600V | 高速 | 0.4 | 3.0 | 4.50 | Arms |

低損失化のためのチップ技術としてIGBTのファインパターン化と縦方向のライフタイム制御技術を駆使した。また、用途に応じ低速と高速の2タイプを用意して最適化を図った⁽¹⁾。

(2) トランスファモールド技術

ワイヤ流れを抑制するためのワイヤボンド技術、モールド技術、熱拡散シミュレーション応用による最適設計、構造シミュレーション応用によるボイドレス化の確立により、高放熱によって信頼性を追求したトランスファモールド技術を用い絶縁形フルモールドタイプのDIP-IPMを開発できた。従来のDIP-IPMと比較し、実装面積で61%、樹脂部の体積で39%、質量で39%の小型化を実現している。従来との外形図比較を図2に示す。

4. 機能と特長

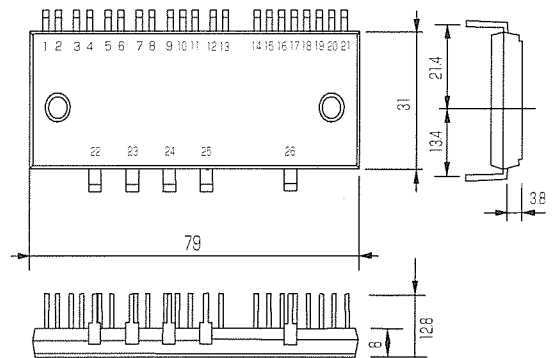
4.1 DIP-IPMの機能⁽¹⁾

DIP-IPMの機能と特長について述べる。

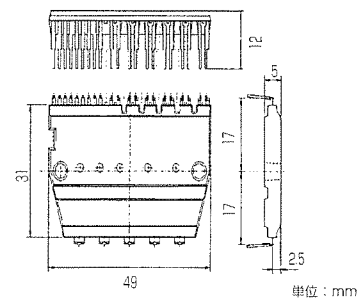
(1) パワー回路部

- (a) IGBTとFWDの三相インバータ結線を採用した。
- (b) 低損失を実現するためのIGBTは、飽和電圧とスイッチング時間のトレードオフを改善した。またFWDは、低損失とEMI (Electromagnetic Interference) 対策のため低リカバリーとソフトリカバリー特性とした。

図3に0.4kW/AC220V用PS21313の誘導負荷スイッチング波形を示す。



(a) 従来大型DIP-IPM外形図⁽¹⁾



(b) 小型DIP-IPM外形図

図2. 従来パッケージとの外形図比較

(2) 駆動・保護機能部

- (a) P側IGBT用駆動回路，高圧レベルシフト回路，電圧低下保護回路(エラー出力なし)を内蔵した。
- (b) N側IGBT用駆動回路と過電流保護回路を内蔵した。過電流保護は，DIP-IPM外部の電流検出抵抗で過電流に対する電圧を検出しDIP-IPM内部ICへフィードバックする方式を採った。図4にDIP-IPMの外部保護回路例を示す。
- (c) N側制御電源低下保護回路を内蔵した。
- (d) エラー出力機能を内蔵したN側IGBT過電流保護，N側制御電源低下時にエラー信号を出力する。
- (e) IGBT駆動電源はDC15V単一電源とした。

4.2 各保護機能の特長^{(2) (3) (4)}

(1) 制御電源電圧低下保護(UV)

N側共通制御電源には，電圧低下保護機能があり，Fo端子による異常検出出力を備えている。保護動作時はN側3素子の入力を受け付けなくなる。また，P側駆動用電圧に対しては電圧低下保護機能を内蔵しており，異常時は該当相のIGBTのみ入力を受け付けない。N側及びP側とも

一定時間幅以下(10 μ s程度)の電圧低下であれば制御回路動作に影響しない。

図5の制御電圧低下保護タイミングチャートを基に動作シーケンスを示す。

(2) 短絡保護(SC)

各アームの順方向コレクタ電流をDIP-IPMの外部のDC母線上に挿入したシャント抵抗で検出し，SCトリップレベルを超える電流が流れたとき，過電流及び短絡状態と判定し，IGBTを即自己遮断する。異常検出出力は，N側IGBTに電流異常が発生したとき出力し，CFO端子に接続するコンデンサで設定した期間出力し続ける。リセットは，異常検出出力の解除後の入力信号で行う。

図6に，短絡保護動作タイミングチャートを基に動作シーケンスを示す。

5. DIP-IPMの特性

表2に主な特性を示す。デッドタイムは，高圧レベルシフト回路内蔵によって絶縁素子の遅れ時間などが必要でないため，高速応答(デッドタイム3 μ s)が可能となっている。

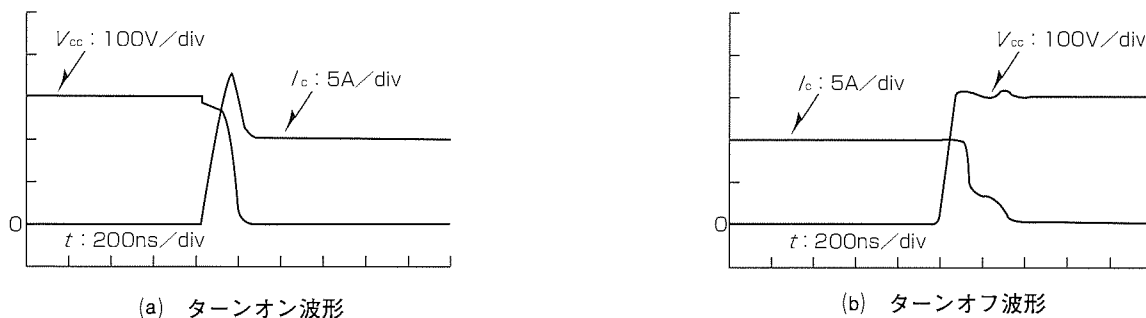


図3. 0.4kW/AC220V用PS21313の誘導負荷スイッチング波形

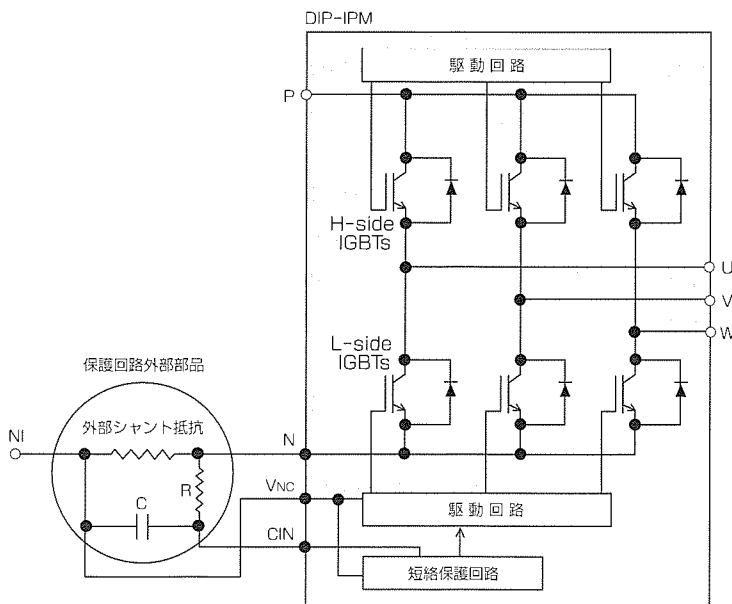
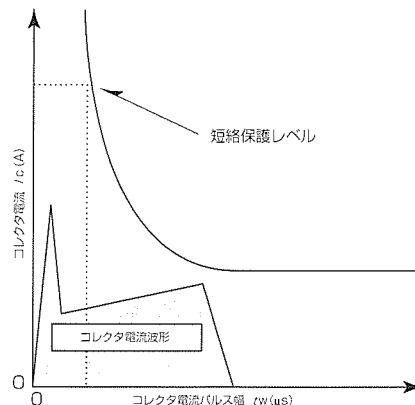


図4. 外部保護回路例

短絡保護機能

N側母線電流を検知し，CRフィルタを介し短絡保護回路を動作させる。SC基準電圧を超えた電流が発生した場合，N側三相IGBTゲートすべてを遮断するとともにエラー信号を出力する。



制御電源電圧低下保護動作シーケンス (N側, V_b)

- a1. 正常動作=IGBTオン=出力電流あり
- a2. 制御電源電圧低下 (UV_b)
- a3. IGBTオフ…制御入力にかかわらずオフ
- a4. FOタイマー動作開始…外付けコンデンサ C_{FO} でパルス幅を設定
- a5. 制御電源電圧低下 (UV_b)
- a6. 正常動作=IGBTオン=出力電流あり

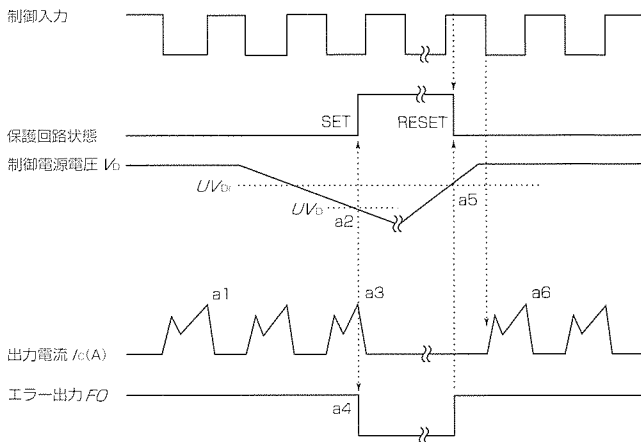


図5. 制御電圧低下保護タイミングチャート

SC動作シーケンス (ローサイド側のみ)…外付けシャント抵抗, CR時定数回路による保護

- a1. 正常動作=IGBTオン=出力電流あり
- a2. 過電流検出 (SCトリガ)…CR時定数回路で最適遮断時間を設定 (1.5~2.0 μ s)
- a3. IGBTゲートをハード遮断
- a4. IGBTをオフ
- a5. FOタイマー動作開始…外付けコンデンサ C_{FO} でパルス幅を設定
- a6. 入力'H'=オフ
- a7. 入力'L'=オン
- a8. IGBTはオフ状態

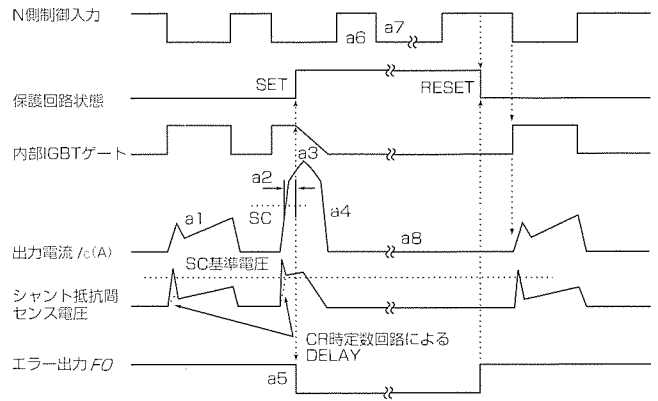


図6. 短絡保護動作タイミングチャート

表2. PS21313の諸特性

| 記号 V_{CES} | 項目 コレクタ-エミッタ間電圧 | 条件 | 定格・特性 600V max. |
|----------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| $V_{CE(sat)}$ | コレクタ-エミッタ間飽和電圧 | $V_D = 15V$ 注1 $V_{CIN} = 0V, I_c = 10A$ $T_j = 25^\circ C, Pulsed$ | 2.0V typ. |
| V_F | FWDi順電圧降下 | $-I_c = 10A, T_j = 25^\circ C$ | 2.1V typ. |
| t_{on} / t_{off} | スイッチング時間 | $V_{CC} = 300V, V_D = 15V, T_j = 125^\circ C$ $V_{CIN} = 0 \leftarrow 5V, I_c = 10A$ | 0.6 / 1.1 μ s typ. |
| $t_c(on) / t_c(off)$ | スイッチング時間 | $V_{CC} = 300V, V_D = 15V, T_j = 125^\circ C$ $V_{CIN} = 0 \leftarrow 5V, I_c = 10A$ | 0.20 / 0.35 μ s typ. |
| $P_{sw}(on) / P_{sw}(off)$ | スイッチング損失 | $V_{CC} = 300V, V_D = 15V, T_j = 125^\circ C$ $V_{CIN} = 0 \leftarrow 5V, I_c = 10A$ | 0.25 / 0.45 mJ / pulse typ. |

注1: V_D は制御電源電圧, V_{CIN} は入力電圧を示す。

6. むすび

以上, 小容量モータ駆動用として開発したAC200V, 0.2~0.4kWのモータ制御に適した超小型DIP-IPM PS213XXシリーズの機能と特長について述べた。以下にその成果についてまとめる。

今回の超小型DIP-IPMシリーズは, 小型化が望まれている家電モータ駆動において, 従来の概念を打ち破った新パッケージの開発を実現した。今後, 更なる省エネルギー化に向けた新構造パワーチップの開発, 更なる高機能化・システム化に向けての小型パッケージの開発を進め, 家電用インバータにとどまらず, 産業用の応用にも適したパワーモジュールの開発によって将来の電力変換分野のより一層の拡大, 発展の可能性の道を開くであろう。

参考文献

(1) ゴーラブ・マジウムダール, 野田祐久, 川藤 寿,

岩上 徹: Super Compact Dual In Line Package IPM, 平成9年電気学会全国大会 (1997)

(2) Majumdar, G., Hatae, S., Fukunaga, M., Oota, T.: Application Specific IPM for Low Power-end Motor Drives ISPSD'95, 207~211 (1995)

(3) Majumdar, G., Mori, S., Thal, E., Hatae, S., Fukunaga, M., Oota, T.: Application Specific Intelligent Power Modules (ASIPMs) for Low Power Motor Control, PCIM'95, 155~162 (1995)

(4) Iwasaki, M., Kawafuji, H., Shinohara, T., Hussein, K., Majumdar, G., Yoshioka, J., Toth, T.: Miniature Dual-Inline-Package Intelligent Power Module, PCIM'99 (1999)

(5) 森 敏, ゴーラブ・マジウムダール, 波多江慎治: 小容量モータ駆動用ASIPM, 平成8年電気学会全国大会 (1996)

第四世代IGBTモジュール

要旨

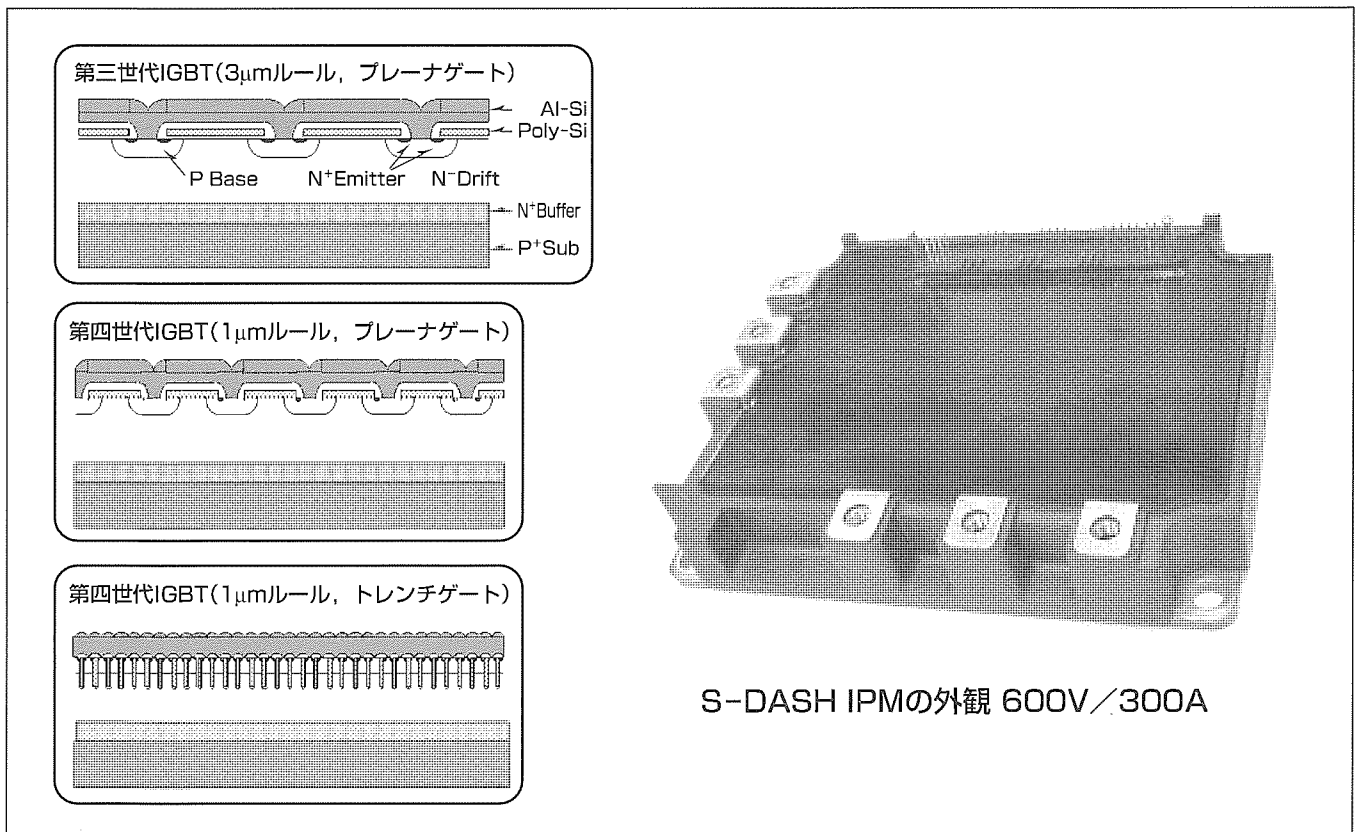
近年のパワーエレクトロニクスの花形であるインバータは、電力・産業・情報・家電の各分野に浸透し目覚ましい発展を遂げているが、キーコンポーネントであるパワーデバイスも、技術開発によってこの発展に大きく寄与してきた。近年のインバータにはほとんどIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュール又はIPM(Intelligent Power Module)が用いられているが、主素子であるIGBTの性能は、インバータの性能を大きく左右するため、開発当初から特性改善の開発が精力的に行われてきた。

IGBTの性能改善は“世代”として段階的に行われているが、ここに至り1 μ mの微細加工技術がパワー素子に適用でき、性能改善に大きく寄与できるようになってきた。この技術を中心に新ライフタイム制御技術などを導入し、

IGBTモジュールやIPMに要求され続けている低損失化に加え、近年要求の高まっているEMI(Electromagnetic Interference)ノイズ低減を更に追求した第四世代IGBTモジュールとIPMを開発したので紹介する。

今回導入したプロセス技術の特長は次のとおりである。

- (1) 1 μ mの微細加工技術及びトレンチ技術によるMOS(Metal Oxide Semiconductor)構造の性能改善による低飽和電圧化
- (2) 局所ライフタイム制御によるIGBT内部のキャリア分布最適化による低飽和電圧化
- (3) 重金属拡散と局所ライフタイムコントロールの併用によるFWD(Free Wheeling Diode)のソフトリカバリ化



S-DASH IPMの外観 600V/300A

第四世代IGBTモジュール

1 μ m微細加工技術を使ったトレンチゲート及び平面ゲートの両方のタイプのIGBTを開発し、また、局所ライフタイム制御技術によってダイオードのソフトリカバリ化を図った。これらの新プロセス技術の組合せにより、各チップの特長を製品系列ごとに生かして、第四世代モジュールにおける低損失化及び低ノイズ化を実現した。

1. ま え が き

インバータの小型化や環境適合性を高める低ノイズ化の要求を実現するために、IGBTモジュールの低損失化・低ノイズ化の対応が求められている。1 μ m微細加工技術と局所ライフタイム制御技術により、IGBTの低損失化とFWDの更なるソフトスイッチング化を図り、第四世代IGBTモジュール及びIPMを開発し製品化したので紹介する。

2. 1 μ m微細加工技術及びトレンチ技術の適用

IGBTはMOSゲート部の微細化・最適化によってその性能を向上させてきた。飽和電圧を下げるためには素子内部の寄生抵抗成分を小さくする必要がある。図1に平面ゲートIGBT及びトレンチゲートIGBTのユニットセル断面図を示す。主な抵抗成分はチャンネル抵抗(R_{MOS})、JFET抵抗(R_{JFET})、ドリフト抵抗(R_{n-})で構成される。 R_{MOS} を低減するにはMOS部の微細化が効果的であるが、平面ゲートの場合は、セル密度向上のためpベース間隔を狭めると R_{JFET} が増大する。トレンチゲートでは、構造上 R_{JFET} がないため、平面ゲートに比べてセル密度の向上が図れる。また、 R_{n-} 低減のためには素子内部のキャリア分布の最適化がキーであり、 R_{n-} 低減には、拡散形状やゲート形状の工夫や素子内部のキャリアライフタイムプロファイルの見直しによって、オン時のデバイス表面側のキャリア濃度を上げることが有効である。

当社では、低飽和電圧を実現するにはMOS部の寄生抵抗を極限まで低減したトレンチゲート構造が最適であると考え、トレンチIGBTチップを、まずバッテリーフォークリフト用途への250V系列として開発し、続いて600V、1,200V系列を開発した。

トレンチゲートIGBTは第三世代プレーナIGBTと比較してチャンネル密度が大きく、したがって、飽和電流密度が極めて高い。このため、飽和電圧が低く活性部動作が起こりにくい等、通常使用時の熱的マージンが大きくなるメリットがある反面、負荷短絡等の異常時に流れる電流も大きく

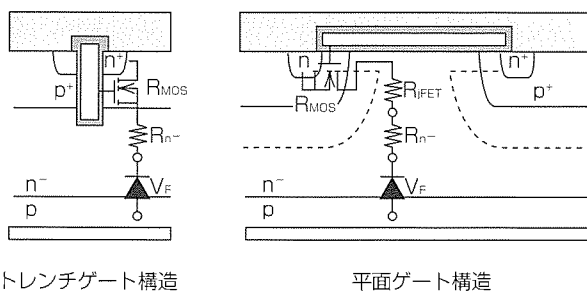


図1. 平面ゲートIGBT及びトレンチIGBTゲートIGBTのユニットセル構造比較

なり、単位時間内の素子発熱も比例して大きくなる。これにより、素子の短絡耐量が弱くなるデメリットがあり、短絡耐量を確保するためには飽和電流を適切に制限する回路 (Real Time Control : RTC)が必要となる。

またトレンチIGBTは、第三世代と比較してゲート容量が大きくなるため、ドライブ回路の変更が必要となる場合もある。これを補うため、次のような素子開発の要求があった。

- ゲート容量増加を抑制し、飽和電圧を下げる。
- アプリケーションに合わせた飽和電流設計がしやすい。
- RTCを使わずにSCWCを保持する。

デバイスシミュレーションを用いて検討した結果、1 μ m微細加工技術を用いた平面ゲートIGBTに可能性を見出し、第四世代平面ゲートIGBTとしての製品群を開発した。第四世代平面ゲートIGBTは、まず第三世代SシリーズIPMの置き換えをねらったS-DASH IPMシリーズに搭載し、今後小容量モジュールへも展開予定である。

第四世代平面ゲートIGBTの特長は次のとおりである。

- ユニットセル約30~40%縮小、チャンネル密度向上による飽和電流アップ
- 拡散形状を見直し、JFET効果低減による低飽和電圧化
- エミッタ部の最適設計による飽和電流設定自由度大
- 微細パターン採用による破壊耐量向上

図2に、飽和電圧-ターンオフ損失のトレードオフの世代間比較を示す。第四世代平面ゲートは、第三世代と比較し、飽和電圧にして約0.4Vの低減が達成できた。また、図3に、IPMにおける第三世代と第四世代プレーナIGBTの短絡耐量の比較を示す。第三世代と比較して高破壊耐量化が実現できた。

3. 局所ライフタイム制御技術の適用

ノイズ低減のためのダイオードの課題はソフトリカバリー化である。図4にソフトリカバリー化のためのダイオードの断面構造比較を示す。図の構造(a)はIGBTモジュールの従来構造のダイオードで、低濃度で浅いpアノード層を形成しており、pアノードからの正孔の注入効率を抑制し

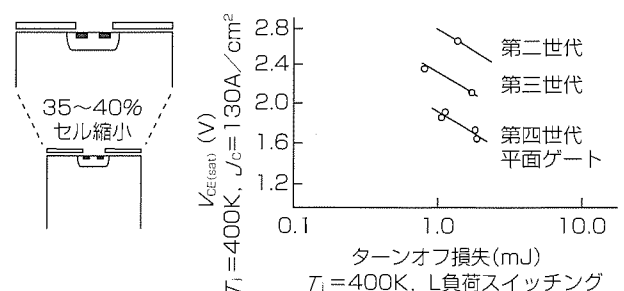


図2. 飽和電圧-ターンオフ損失の関係

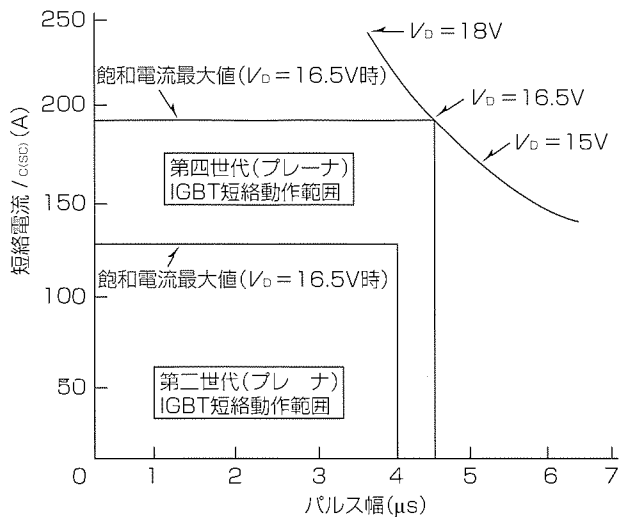


図3. 短絡耐量特性

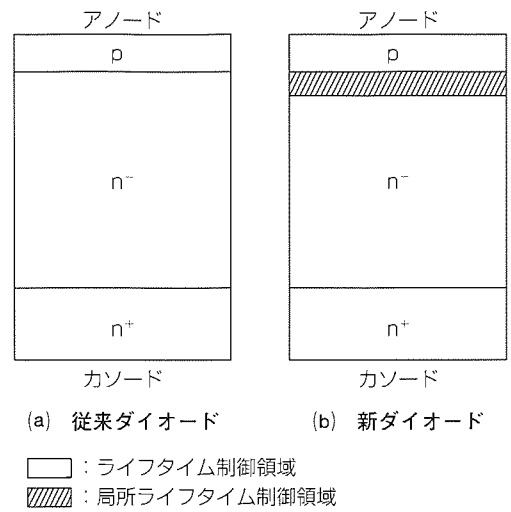
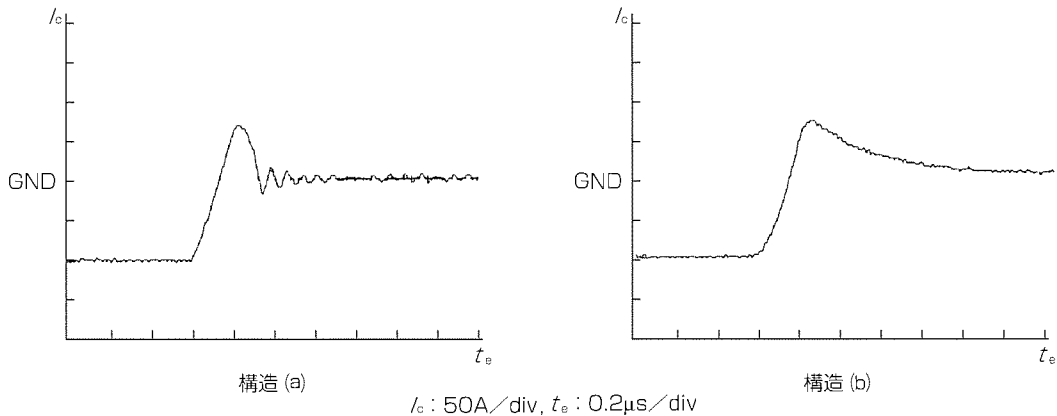


図4. 還流ダイオードの断面構造比較



条件： $I_c=100A$, $V_{cc}=600V$, $V_{GE}=\pm 15V$, $R_G=3.1/13\Omega$, $T_J=125^\circ C$
 (R_G は定格電流での dI/dt が同一になるように調整した値)

図5. ダイオードのリカバリー電流波形比較

ている。図の構造(b)では、斜線で示す領域のライフタイムを局所的に短縮し、ダイオードの順電圧降下(V_F)を犠牲にすることなく正孔の注入を(a)以下に抑制した。これらのダイオードのリカバリー電流波形を図5に示す。

4. 第四世代の適用製品開発

第四世代の主な技術要素には、採用する微細加工技術を1 μm ルールまで進めたことを筆頭に、局所ライフタイム制御技術及びトレンチ構造の採用が挙げられ、これらの新プロセス技術の組合せによって2種類の第四世代IGBTを開発した。一つはトレンチ技術を採用するもので、IGBTモジュールとして製品化し、もう一つは従来の平面構造(プレーナ構造)を採用するもので、IPMとして製品化を図った。

トレンチIGBTは、飽和電流が大きいので抑制手段が必要となるものの、ラッチアップ電流密度が高く高破壊耐量を持つので、過電流抑制にはIPMほど複雑な保護回路の必要はない。ややIPM寄りのIGBTモジュール形態として、

RTC回路を内蔵したモジュールをFシリーズIGBTモジュールとして開発した。

一方、平面構造の第四世代IGBTを搭載した製品の適用として、S-DASH IPMシリーズを開発した。

4.1 1 μm トレンチIGBT搭載Fシリーズ

第三世代まで主流であった熱損失低減は、第三世代で従来のバイポーラトランジスタモジュールを超えたことで一段落していたが、近年のノイズ低減要求の高まりから再度重要課題となった。近年問題視されているノイズは主に高い周波数の領域のものであり、ノイズ低減には通常ゲート抵抗増加などによってスイッチング速度を緩めることが効果的であるが、これはスイッチング損失の大幅増加を伴う。このため、最小限のスイッチング損失増加でノイズを低減できるようにすることと、増加してしまった損失分を飽和電圧の低減で相殺する必要が出てきた。

このような中で、IGBTモジュールは、1 μm の微細加工技術によって低飽和電圧化を図り、これに加えて、ダイオードのソフトリカバリー化による低ノイズ化を重点に開発

表1. S-DASH IPM一覧

| 素子 | 定格電圧(V) | 定格電流(A) | 型名 | 外形 | 回路構成 |
|-----------------|---------|---------|---------------------------|----|------|
| 6素子(3φ) | 600 | 50 | PM50CSD060 , PM50CSE060 | A | |
| | | 75 | PM75CSD060 , PM75CSE060 | A | |
| | | 100 | PM100CSD060 , PM100CSE060 | A | |
| | | 150 | PM150CSD060 , PM150CSE060 | A | |
| | | 200 | PM200CSD060 , PM200CSE060 | B | |
| | | 300 | PM300CSD060 , PM300CSE060 | B | |
| 7素子(3φ + Brake) | 600 | 50 | PM50RSD060 , PM50RSE060 | A | |
| | | 75 | PM75RSD060 , PM75RSE060 | A | |
| | | 100 | PM100RSD060 , PM100RSE060 | A | |
| | | 150 | PM150RSD060 , PM150RSE060 | A | |
| | | 200 | PM200RSD060 , PM200RSE060 | B | |
| | | 300 | PM300RSD060 , PM300RSE060 | B | |

パッケージA：(縦) 89×(横)110×(高さ)*22 (mm)

パッケージB：(縦) 110×(横)135×(高さ)*24.1 (mm) 注 *は主電極までの高さ

CSD, RSDは第三世代S-IPM互換パッケージ, CSE, RSEは第二世代互換パッケージ

を行った。

スイッチング時に発生するノイズは元々素子ではなく外部配線のインピーダンスに起因するものであるが、素子のスイッチング波形を調整することによってかなり抑制することができる。特にFWDのリカバリー時の di/dt がトリガとなって発生する電流振動は、FWDのリカバリー後の切れ味をソフトにすることで抑制可能である。この電流振動のパワースペクトルには30MHzを超える成分がかなり含まれるため、ふく(輻)射ノイズ(電磁波発生)の低減に効果的である。FシリーズのFWDは、第四世代の技術要素の一つである局所ライフタイム制御を用いてS.F.値(Softness Factor, リカバリーの上昇時間に対する下降時間の比)を従来の2倍程度に高めた。

トレンチIGBTの飽和電圧は1.5V(600V耐圧, 125℃), 1.8V(1,200V耐圧, 125℃)と非常に低い上に、近年のインバータはノイズ低減のためにスイッチング周波数を低めに設定する傾向があることから、この低飽和電圧は、単にスイッチング損失増加を補うには余りあり、更なる損失低減にも貢献する。インバータ回路の平均熱損失は単純計算でも第三世代よりも10~20%程度の損失低減効果はあるが、従来のIGBTモジュールを用いてノイズ低減を図った場合の大幅なスイッチング増加も考慮すると、場合によっては30%以上の低減効果も期待できる。

4.2 1μm平面形IGBT搭載S-DASH IPM

IPMの制御基板は熱環境的に不利な状況に置かれるため、

IGBTの駆動電力の増加は設計変更量が大きくなる。したがって、今回、IGBTには、トレンチIGBTと比較してゲート電荷の小さい平面構造の第四世代を採用した。S-DASHの飽和電圧は1.7V(600V耐圧, 125℃)であり、トレンチIGBTに近いレベルまで改善できた。装置に応じてゲート抵抗を調整できないIPMでは、置き換え性と汎用性の追求から、FWDにはスイッチング損失の犠牲を伴わずリカバリー電流ピーク低減のみでノイズ低減を図ったIGBTモジュールUシリーズと同等のものを用いた。ただし、ノイズ低減のため、従来のSシリーズよりも若干遅めの駆動に設定した。S-DASHシリーズの製品系列を表1に示す。

5. む す び

今回、1μm微細加工技術と局所ライフタイム制御技術によってIGBTの低損失化とダイオードの超ソフトスイッチング化を図ることができた。この新チップを搭載したS-DASH IPMは、従来の当社製品に比べて約15%のインバータ回路平均損失を低減し、また、FシリーズIGBTでは最大約30%低減した。

当社は、以上のように1μm微細加工技術を使ったトレンチゲート、平面ゲート両方のタイプのIGBTを用いて製品系列ごとのメリットを考えた製品展開を行っている。

アプリケーションの要求に合せたコストパフォーマンスの高い製品を世に送り出し、パワーエレクトロニクスの進展に貢献していけるものと信ずる。

1. ま え が き

逆導電形GCTは、4.5kV / 4kA製品が実用化され、6kV / 4kA製品も開発されている。これらのGCTをキーパーツにした電圧形インバータは、電力用周波数変換器や鉄鋼用スチールミルに適用されている。逆阻止形GCTは、逆導電形GCTとダイオードを直列接続した特性を示し、順方向の阻止電圧と同等の逆方向の阻止電圧を持っている。このため、スイッチング素子に対し逆阻止能力を必要とするパワーエレクトロニクス機器に使用される。この代表的な機器には電流形インバータがある。

従来の自己消弧形素子で逆阻止能力を持つ素子として逆阻止形GTOがあった。従来の逆阻止形GTOを応用した電流形インバータは、直列ダイオードが不要となることから、装置のコスト低減や小型軽量化が実現でき、一部の応用分野で実用化されている。しかしながら、逆阻止形GTOは逆導電形GTOに比べて、スイッチング損失が大きく、動作速度が遅い。このため、電流形インバータは、適用範囲が限られていた。

今回、高いスイッチング性能を持つGCTに逆阻止構造を適用し、逆導電形GCTと同等サイズかつ同等定格容量の4インチ6kV / 4kA逆阻止形GCTを開発した。GCTが持つ遮断耐量の限界と今回開発した逆阻止形GCTの特性、その応用について紹介する。

2. GCTの特長と遮断性能

GCTはGTOから発展した新たなサイリスタであり、4kA級GCTには図1に示す断面構造のセグメント(ユニットGCTセル)が1チップに約3,000個並列に配置されている。GTOに比べ、GCTは次のような特長を持っている。

- (1) GTOで遮断動作時の dv/dt を抑制するためのスナバ回路がなくても動作が可能である(電圧クランプ形のみ)。
- (2) 蓄積時間を従来GTOの約1/10に低減できるので、直並列接続応用が容易である。
- (3) ゲート蓄積電荷を従来GTOの約半分に低減できる。

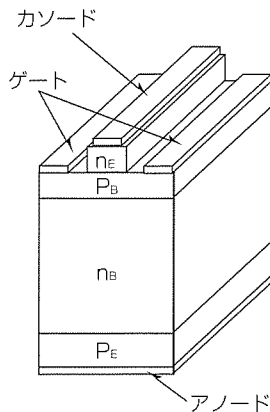


図1. 逆阻止形GCTのセグメント断面構造

GCTは、ターンオフ時にアノードからカソードに流れていたアノード電流(I_A)すべてをゲートに転流させ、サイリスタ動作領域全域を瞬時にトランジスタ動作領域に遷移させることによって遮断動作を行わせること、すなわち、ターンオフゲイン(I_A とゲート電流(I_G)の比)が1であることを動作上最大の特長とする。この転流動作により、チップ上にある約3,000個のセグメントがほぼ均一に動作し電流集中が緩和されることから、遮断性能は飛躍的に向上し、スナバ回路を付加しなくても遮断動作が可能である。

この動作による遮断耐量の限界について検討する。図2は、ゲートに信号を入れた時刻を0 μ sとしたときのGCTの遮断波形($I_A = 3$ kAで電源電圧2kVの条件下)である。図から、 I_A がゲートに完全に転流した後、約1 μ sで I_A が減少し始めるのが分かる。図3は、カソード電流がゲートに転流し終えた後に、アノード電圧(V_{AK})が増大していく過程の電子密度(n_e)、正孔密度(n_h)と電界強度(E)のウェーハ内部分布を模式的に示した図である。

このときのGCTのカソード側のnエミッタ(n_E)層は無視できる。オン状態にnベース(n_B)に蓄積された電子と正孔はカソード側からなくなるが、アノード側には残って中性領域を形成する。この中性領域は、第一にpnpトランジスタのベース領域として働き、第二に印加電圧が増大するときに伸展する空間電荷領域によって押し出される電子($1'$)と正孔(1)の供給源となる。押し出された電子($1'$)は、

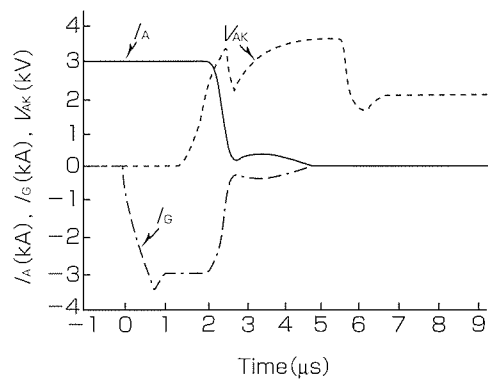


図2. 遮断波形

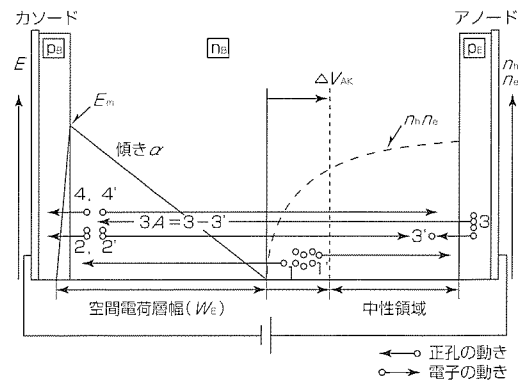


図3. 遮断動作の電圧上昇期間中のシリコン内部の電子密度と正孔密度、電界強度の分布

pnpトランジスタのベース電流の一部として働き、エミッタ(アノード: pE)から正孔(3)の注入を導く。同時に押し出された正孔(1)は、高電界領域である空間電荷層を走行し、インパクトイオン化を引き起こす(2, 2')。このほかに、中性領域で正孔(3)の一部と再結合する電子(3')と主に I_A を担う正孔(3A=3-3')が引き起こすインパクトイオン化による正孔(4)と電子(4')が、このpnpトランジスタ動作に寄与をする要素である。すなわち、正孔の和(3A+1+2+4)がコレクタ電流となり、電子の和(1'+2'+4')が実質的にベース電流として働いている。

このトランジスタ動作では、電子と正孔の反応速度は V_{AK} の変化よりもはるかに早いので、 V_{AK} は瞬時には一定と考えられる。部分的に平均よりも大きなアノード電流密度(J_A)が増大すると、空間電荷層の正電荷が増え、電界の傾き(α)が増加するので、その幅(W_E)が狭くなる。そうすれば、第一にベース電流成分(1')が減る。第二に、中性領域の幅が広がるために、主なエミッタ電流の成分である正孔(3)が中性領域内で消滅する量(3)が増大する(h_{FE} が低下する)。この状況のトランジスタは、 J_A の増大に対する強い負帰還作用を持っている。

このようなトランジスタ動作状態は、 V_{AK} が一定で、代わりにベース電流の供給手段を外部ベース電源による場合にも実現できる。この状況が、バイポーラトランジスタの負荷短絡動作である。nnpトランジスタの典型的な負荷短絡動作では、チップ全面に安定した均一動作が確認されている。そして、破壊は W_E 内のインパクトイオン化によるキャリアの発生が電界強度分布に影響を及ぼすために、 J_A が増大した際に、 W_E が広がり出す時点で起きる。インパクトイオン化作用は強い電界強度依存性があるために、特定の臨界電界(E_c)でこのような変化が起きると考えれば、破壊条件は式(1)で示される。

$$J_A \cdot V_{AK} = \epsilon_s \cdot v_s \cdot E_c^2 / 2 = 5.3 \times 10^{-6} \cdot E_c^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ϵ_s はシリコンの誘電率、 v_s は飽和速度

nnpトランジスタの測定データ($J_c \cdot V_{CE} = 180 \text{ kW/cm}^2$)に対応する E_c は $1.9 \times 10^5 \text{ V/cm}$ である。GCTの約 $300 \sim 400 \text{ kW/cm}^2$ に対応する E_c は $2.4 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ V/cm}$ である。この違いは、同速度のインパクトイオン化を起こすために必要な電子と正孔の電界強度の差として定量的に説明することができる。

3. 逆阻止形GCTの特性

逆阻止形GCTは、逆導電形GCTとダイオードを直列に配置したものと同等の基本特性を持っている。図4にオン電圧と遮断電流、ターンオフ損失、リカバリー損失のトレードオフ関係を示す。同図に同一サイズの逆導電形GCTのトレードオフ関係も併せて示す。

逆阻止形GCTはGCTのオン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係及びダイオードの順電圧とリカバリー損失のトレードオフ関係では個々の逆導電形GCT又はダイオードに比べて悪化するものの、GCTとダイオードを組み合わせたトータルの性能では、GCT部とダイオード部のnベース層を共有することで、ダイオードとGCTを合わせたトータルのオン電圧と損失のトレードオフ関係は約30%程度改善される。また、逆阻止形GCTは、オン電圧に対する遮断耐量の依存性が小さくかつ優れている。この性能より、高遮断耐量を損なわずに、応用機器の用途に合わせて損失を最小にするためのオン電圧の選択が可能である。

今回開発した6kV逆阻止GCTの代表的な遮断波形を図5に示す。電源電圧(V_A)3kVの条件下でも5kAの遮断能力を持ち、定格の4kAに対して1kAの裕度を持っている。図6は代表的なりカバリー波形であり、電源電圧(V_R)3kVの条件下で、 $di/dt = 1.5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ の耐量を持ち、高速動作に十分に対応できる能力を持っている。

表1に主要な特性を示す。同時に開発した6.5kV/1kA逆阻止形GCTの主要特性も併せて示す。

4. 逆阻止形GCTサイリスタの応用

逆阻止形GCTの代表的な応用としては、電流形インバータがある。図7は逆阻止形GCTを使用した電流形イン

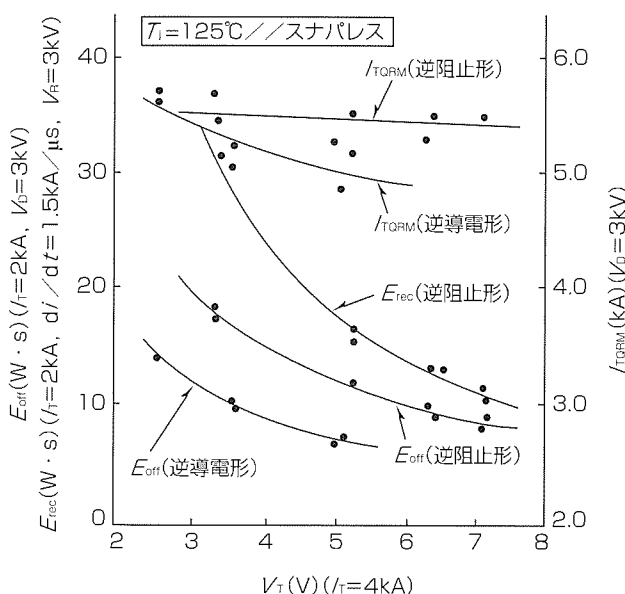


図4. GCTのトレードオフ関係

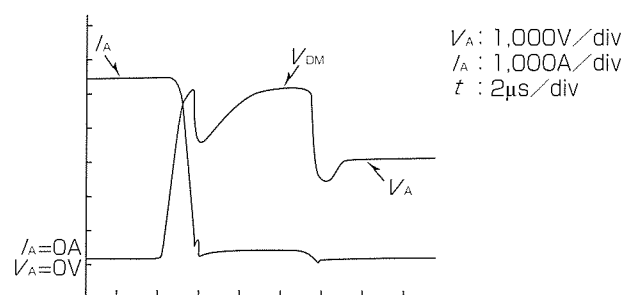


図5. ターンオフ動作波形(代表例)

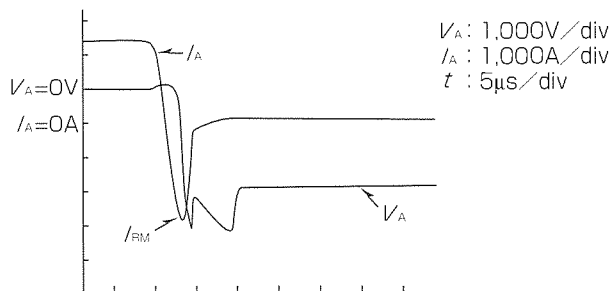


図 6. リカバリー動作波形(代表例)

表 1. 逆阻止形GCTの主要特性

| 項目 | 記号 | 条件 | 6 kV / 4 kA 逆阻止GCT | 6.5kV / 1 kA 逆阻止GCT |
|----------|---------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 可制御電流 | I_{TQR} | $V_D = 3,000V$ | 4,000A | 1,000A |
| オフ電圧 | V_{DRM} | $V_{GR} \geq -2V$ | 6,000V | 6,500V |
| 逆電圧 | V_{BRM} | | 6,000V | 6,500V |
| ターンオン損失 | E_{on} | $I_T = 1 kA$ | 0.7 W · s | 1.0 W · s |
| ターンオフ損失 | E_{off} | $V_D = 3 kV$ | 4.0 W · s | 4.5 W · s |
| リカバリー損失 | E_{rec} | $T_J = 115^\circ C$ | 7.0 W · s | 3.5 W · s |
| オン電圧 | V_{TM} | $T_J = 115^\circ C$ | 5.5V | 7.0V |
| ゲートトリガ電流 | I_{GT} | $V_D = 24V$ | 0.5A | 0.2A |
| 熱抵抗 | $R_{th(j-f)}$ | | 0.01°C/W | 0.025°C/W |

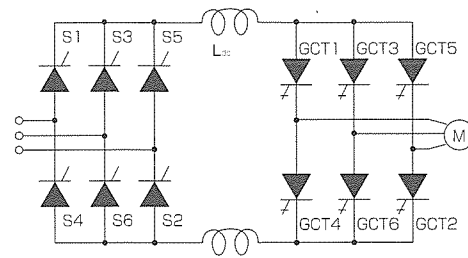


図 7. 電流形インバータの基本構成

E_{on} : ターンオン損失 AL : 損失アノードリアクトル損失
 E_{off} : ターンオフ損失 SN : 損失スナバ損失
 E_{rec} : リカバリー損失

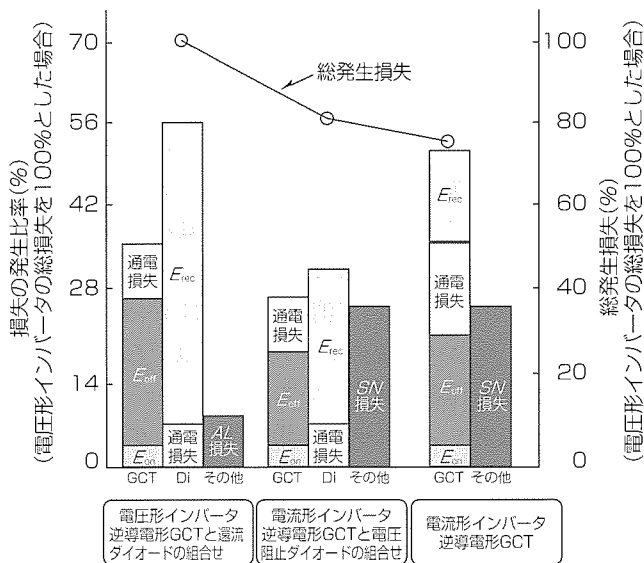


図 8. 電圧形インバータと電流形インバータの損失比較

表 2. 損失比較のためのインバータ動作条件

| インバータ種 | I_A | V_A | di/dt | Duty | 動作周波数 | C_c 又は C_s | スナバ方式 | L | V_{DM} |
|--------|-------|-------|---------|------|-------|----------------|-------|------|-----------------------------|
| 電圧形 | 1 kA | 3 kV | 1 kA/μs | 50% | 500Hz | 6 μF | クランプ | 3 μH | 6 kV at 4 kA, 3.4kV at 1 kA |
| 電流形 | 1 kA | 3 kV | 1 kA/μs | 50% | 500Hz | 0.5μF | CR | - | 6 kV at 4 kA, 3.4kV at 1 kA |

バタの基本構成である。逆阻止形GCTは、スナバレスで遮断動作が可能であり、過渡的なサージ電圧を抑えるための小さなスナバ回路を接続することで済む。逆導電形GCTと逆阻止形GCTの電圧形インバータ及び電流形インバータへの応用について、表2に示す条件で損失を比較した結果を図8に示す。逆阻止形GCTを電流形インバータに適用することにより、周辺回路及び素子を含めた回路全体の損失は、電圧形インバータに比べて、約25%低減することが可能である。さらに、GCTはターンオフ時間がGTOの約1/10であることから、インバータ周波数を向上することができ、装置の制御性をより改善することができる。

5. む す び

高遮断耐量を持ち、逆阻止能力を持つ逆阻止形GCTは、

幅広い応用に対応できる将来性を持ったパワーデバイスである。電力用や大容量の産業用等の応用システムに逆阻止形GCTを適用することで大幅な小型軽量化や高効率化を図ることができ、今後適用が飛躍的に広がると期待される。

参考文献

- (1) Takata, I., Bessho, M., Koyanagi, K., Akamatsu, M., Satoh, K., Kurachi, K., Nakagawa, T.: Snubberless Turn-off Capability of Four-inch 4.5kV GCT Thyristor, Proc. ISPSD'98, 177~180 (1998)
- (2) Satoh, K., Yamamoto, M., Morishita, K., Yamaguchi, Y., Iwamoto, H.: High Power Symmetrical GCT for Current Source Inverter, Proc. PEDS'99, 2, 877~882 (1999)

1,200V級のHVICプロセス

要旨

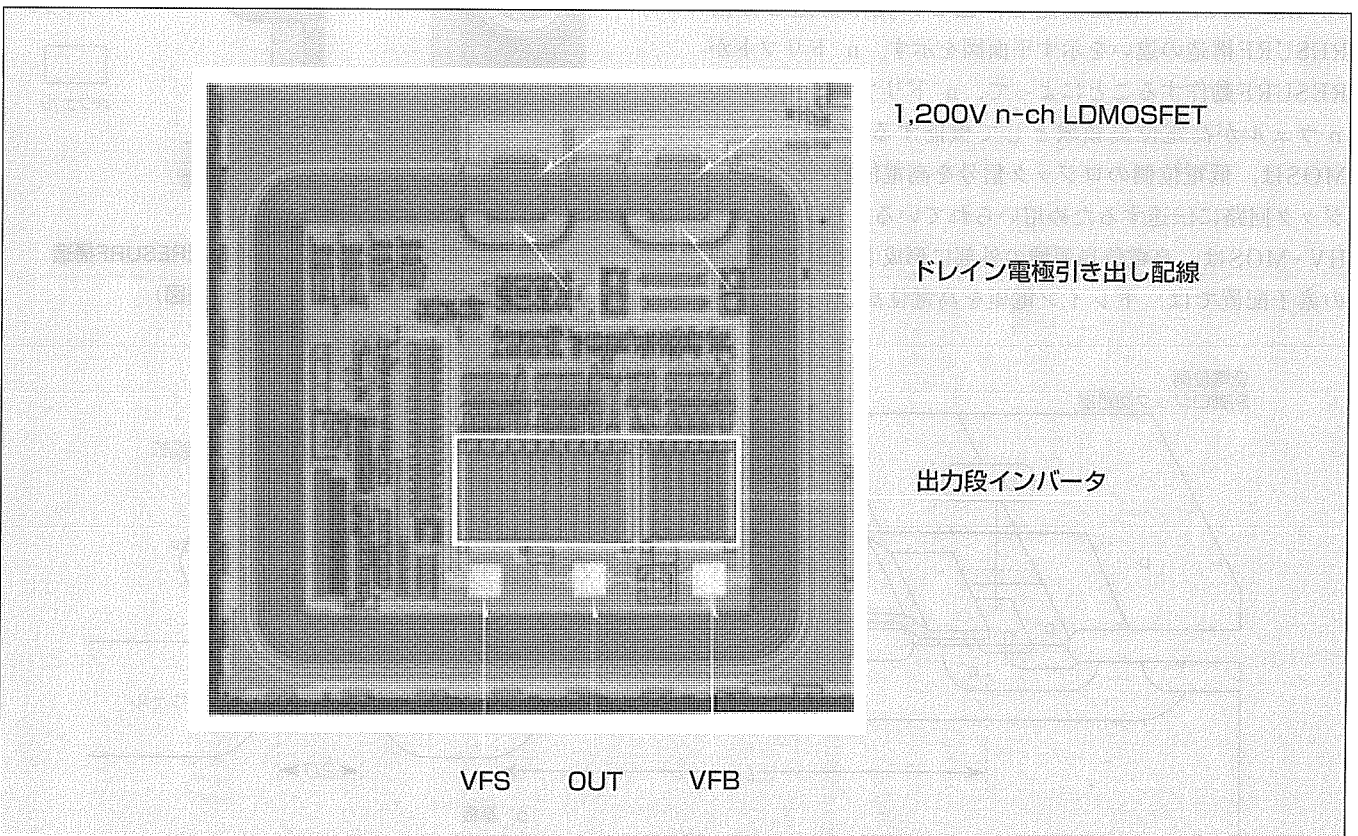
近年の地球環境問題から省エネルギーに対する要求はますます強くなっており、市場からは更なる高効率のパワーシステムの開発が望まれている。省エネルギーを目的としたパワーコントロールシステムのインバータ化は、これらに搭載されるパワー半導体デバイスの進歩に伴い、その適用範囲を大電力・高周波領域に拡大し続けている。パワーシステムの高効率化には、従来から行われてきたIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)等のパワー素子の性能向上に加え、パワー素子を最適に制御する“システムのインテリジェント化”が必ず(須)であり、このキーデバイスとしてHVIC (High Voltage IC)が注目されている。三菱電機では、ASIPM (Application Specific Intelligent Power Module)用途で、600V HVICを開発し製品化しており、市場実績から高い評価を得ている。今回、AC400V用機器

対応として、高電圧引き出し配線の問題を解決する“分割RESURF構造”を適用した1,200V HVICプロセスを開発した。

このプロセスの特長は次のとおりである。

- (1) エピレス基板による低コスト接合分離構造
- (2) 8V/24V系CMOSロジック回路とレベルシフト用1,200V系n-ch/p-ch MOSFETを同一チップ上に形成
- (3) 1,200V耐圧電位島形成

この1,200V HVICの開発により、600V、1,200VのIPM (Intelligent Power Module)が開発できるため、ほとんどの産業用機器へのアプリケーションが可能となる。今後、これらのシリーズ展開を実施していく計画である。



1,200V HVIC試作品チップ写真

高電位島と高耐圧デバイスを同時に形成する“分割RESURF構造”の考案により、1,200V級のHVICプロセスを開発した。

1. ま え が き

トータルシステムの高機能化・高効率化を目指した次世代IPMのキーデバイスとして、HVICが注目されている。特に近年話題になっている地球環境問題に対して高効率パワーシステムの開発は市場から強く望まれており、HVIC内蔵IPMの製品化が進んでいる。当社では既に600V HVICを開発し製品化しており、各種IPMや蛍光灯インバータ、PDP(Plasma Display Panel)ドライバ等へ積極的に適用している。このHVICの高耐圧化は、製品のシリーズ展開を行う上で重要であるが、高電位引き出し配線による耐圧低下という技術課題によって実現が遅れていた。今回“分割RESURF構造”によって耐圧低下問題を解決し、AC400V用のASIPMに搭載できる1,200V HVIC用プロセスを開発した。

本稿では、1,200V HVICの実現を可能とする分割RESURF構造を概説し、このプロセスで作製した素子の特性について述べる。

2. 分割RESURF構造

2.1 ドレイン電極引き出し配線問題

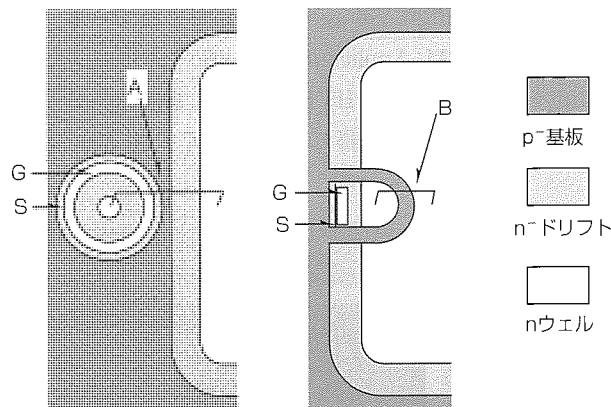
図1に分割RESURF構造によるn-ch LDMOSFET(n-ch HV-MOS)の断面構造を、図2に従来構造と分割RESURF構造の違いを示す平面図を示す。n⁻ドリフトがRESURF動作することによって、n⁻ドリフトに囲まれたnウェルが高電位島領域として機能する。n-ch HV-MOSは、低電位側のロジック信号を高電位島内にあるロジック回路に伝達するため用いられている。従来のn-ch HV-MOSは、高電位島領域の外部に形成されていた。この素子配置では、ドレイン電極を高電位島内に引き出す

“ドレイン電極引き出し配線”は基板電位領域(A)を通過するため、このオーバーラップ領域で配線電界を緩和しなければならない。従来の構造ではこの部分での耐圧の低下や層間膜耐圧の不足の解決が難しく、HVICを高耐圧化する上で極めて大きな問題となっていた。

このため、信号伝達においては高電位島領域内にロジック電位差を発生させることのみで十分であることに着目し、新たに分割RESURF構造を開発し、上記の問題を解決した。

分割RESURF構造では、高電位島領域のn⁻ドリフトとnウェルの一部が“分割”され、分割領域にn-ch HV-MOSが形成されている。ドレイン電極引き出し配線は空乏化したp⁻基板領域(B)に形成するので、引き出し配線と基板電位領域とのオーバーラップ部がなく、配線電界は耐圧へほとんど影響を与えない。このことから、分割RESURF構造は、本質的に引き出し配線電圧の制限がないと言える。

特集 II



(a) 従来構造 (b) 分割RESURF構造
図2. n-ch LDMOSFET (平面図)

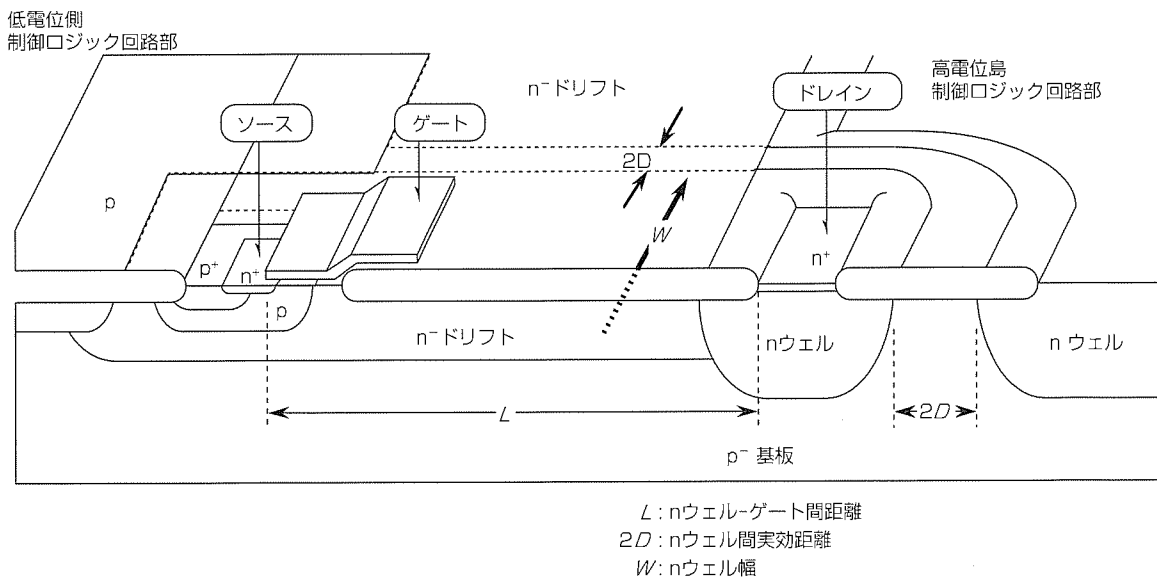


図1. 分割RESURF構造 (n-ch LDMOSFET)

2.2 分割RESURF構造設計理論

分割RESURF構造の設計には、以下の条件を満足させる必要がある。

- (1) n ウェル間(高電位島とn-ch HV-MOS間)のパンチスルー耐圧を制御ロジック電源電圧以上にする。
- (2) 高電位印加時にn ウェル間のp⁻基板領域をピンチオフさせ、ドレイン電極引き出し配線電界を緩和する。
- (3) 分割されたn ウェル部で、電界集中による主耐圧の低下を防止する。

この設計条件を解析的に導出する。n ウェル間のパンチスルー耐圧 V_{pt} は、片側階段接合近似で以下のように表せる。

$$V_{pt} < (2D)^2 \frac{q \cdot N_p}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $2D$: n ウェル分割距離

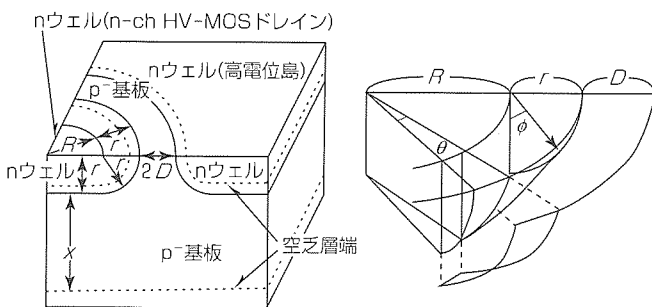
q : 電子の電荷量, N_p : p⁻基板の不純物濃度
 ϵ_0 : 真空の誘電率, ϵ' : Siの比誘電率

次に、n ウェル間の電界集中緩和条件を検討する。図3は電界が最大となるn ウェル分割領域コーナー部を示している。 r はn ウェル拡散長、 R はパターンコーナー半径である。ここでのピンチオフ条件は、高電位島及びn-ch HV-MOSからの空乏層がこの間にあるp⁻基板領域中央部で接するとき、pn接合電界 E_j が臨界電界 E_{cr} よりも低いことである。

$$E_j = \frac{q \cdot N_p}{\epsilon_0 \cdot \epsilon'} \frac{\int_r^{r+D} \int_0^{\pi} (R+r \cdot \sin \phi) \theta_r \cdot d\phi \cdot dr}{\int_0^{\pi} (R+r \cdot \sin \phi) \theta_r \cdot d\phi} \leq E_{cr} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、n ウェルからの空乏層の伸びをコーナー内側と外側で同一とし、 $R \gg r$ と仮定した。

一般に図に示すコーナー部耐圧は、平面部の耐圧と比較して低下する。これはpn接合コーナー部で単位面積当たりの電気力線が平面部よりも増加し、電界が上昇するからである。分割RESURF構造では、ピンチオフ効果でコーナー部の電界集中を緩和することができる。図(a)に示すように、空乏層が十分に伸びた場合、pn接合のコーナー部電界の平面部電界に対する比は、



(a) 断面図 (b) 計算モデル

図3. n ウェル分割領域コーナー部

$$\frac{\text{表面から見た面積}}{\text{pn接合の実際の面積}} = \frac{(R+(r+D))^2 - \pi R^2}{\int_0^{\pi} (R+r \cdot \sin \phi) \theta_r \cdot d\phi} \quad \dots\dots\dots(3)$$

が指標となる。一次元と同等の耐圧を得るには、この値を1以下にすることが目安になる。

$$2D \leq (\pi - 2) \cdot r \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(4)は、式(2)が成立することを前提としている。したがって、分割RESURF構造の設計パラメータである $2D$, r , N_p の関係式は次のようになる。

$$\sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot V_{pt}}{q \cdot N_p}} \leq 2D \leq (\pi - 2) \cdot r \quad \dots\dots\dots(5)$$

これが分割RESURF構造の設計理論式となる。

3. プロセス概要と素子特性

1,200V HVICは、5 μ m CMOSプロセスをベースとし、高抵抗p⁻基板上に各デバイスを形成している。前述した理論式に従ってp⁻基板濃度、n ウェル拡散深さ、n ウェル分割距離の関係を最適にするため、n⁻ドリフト、n ウェル形成はイオン注入・高温ドライブプロセスを使用している。これによって1,200V以上のRESURF分離耐圧のn-ch, p-ch HV-MOSと8V/24V系CMOS素子の集積化を実現した。搭載素子の諸特性を表1に示す。

4. HVIC試作と評価結果

分割RESURF構造でデバイスの動作を検証するため、ハイサイドドライバ用HVICを試作した。回路ブロック図を図4に示す。1,200V n-ch HV-MOSとその駆動ロジック

表1. 素子特性の諸元

| | | | |
|--------|------|---------------------------------|------------------------------------|
| CMOS | n-ch | $V_{DSS}=8V$ $V_{DSS}=24V$ | $V_{th}=1.2V$ $V_{th}=1.2V$ |
| | p-ch | $V_{DSS}=-8V$ $V_{DSS}=-24V$ | $V_{th}=-0.75V$ $V_{th}=-0.75V$ |
| HV-MOS | n-ch | $V_{DSS}=1,200V$ | $V_{th}=1.2V$ |
| | p-ch | $V_{DSS}=-1,200V$ | $V_{th}=-0.8V$ |

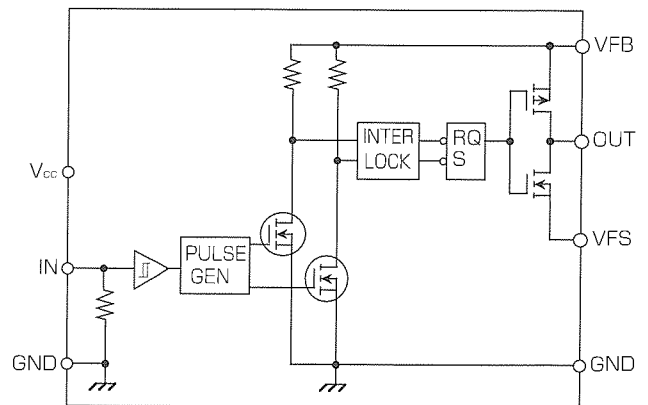


図4. ハイサイドドライバ用HVIC回路ブロック図

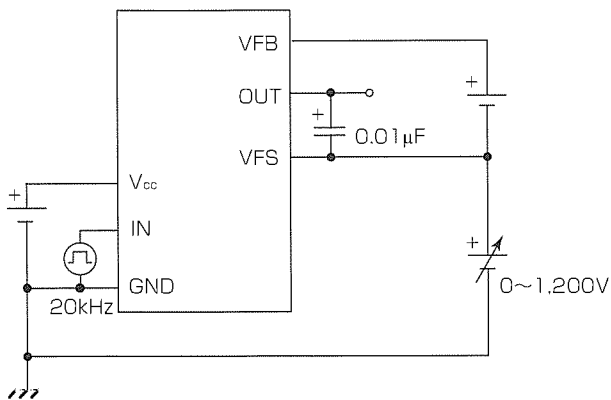


図5. ハイサイドドライバHVIC動作測定回路

ク回路、高電位島内にIGBTゲート駆動用出力段インバータを形成している。

また、図5にハイサイドドライバHVIC測定の接続図を示す。IGBTのゲート容量相当(0.01 μ F)の負荷を接続し、入出力の信号伝達特性を評価した。図6に評価結果の一例を示す。定格電圧1,200V印加状態で、GND電位を基準とした入力信号(IN)に対して、1,200V電圧基準上での出力信号(OUT)を測定しており、20kHzで問題なく動作している。この結果から、フォトカプラレスによる高周波動作の1,200V級ハイサイドIGBT駆動が可能となったと言える。

5. むすび

1,200V HVICを実現可能にした分割RESURF構造と、試作デバイスによるハイサイドドライバHVIC動作の検証結果について述べた。HVICは、高効率に加え、小型・低コストかつ高機能を持つインバータシステムを実現させた

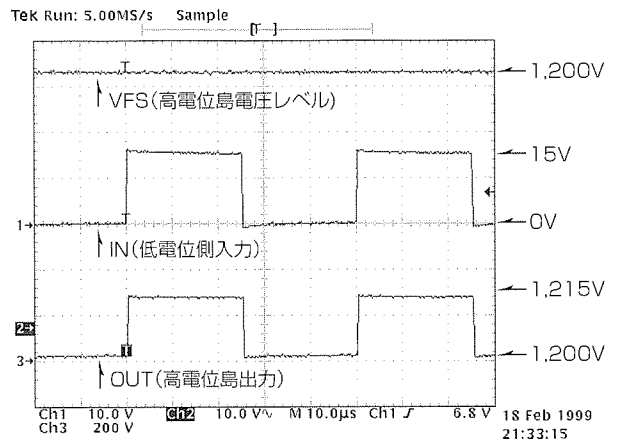


図6. ハイサイドドライバHVIC動作波形(1,200V印加状態)

めの主要デバイスである。また、高調波成分に起因する電磁波ノイズの低減を実現させるデバイスとしても期待が寄せられている。

この1,200V HVICの開発により、600V、1,200VのIPMが開発できるため、ほとんどの産業用機器へのアプリケーションが可能となる。

今後、これらのシリーズ展開により、パワーコントロールシステムの性能向上に寄与していくことを期待する。

参考文献

- (1) Terashima, T., Shimizu, K., Hine, S.: A New Level-shifting Technique by divided RESURF Structure, ISPSD'97, 57~60 (1997)

SiC素子技術

杉本博司*
樽井陽一郎**
今泉昌之*

要旨

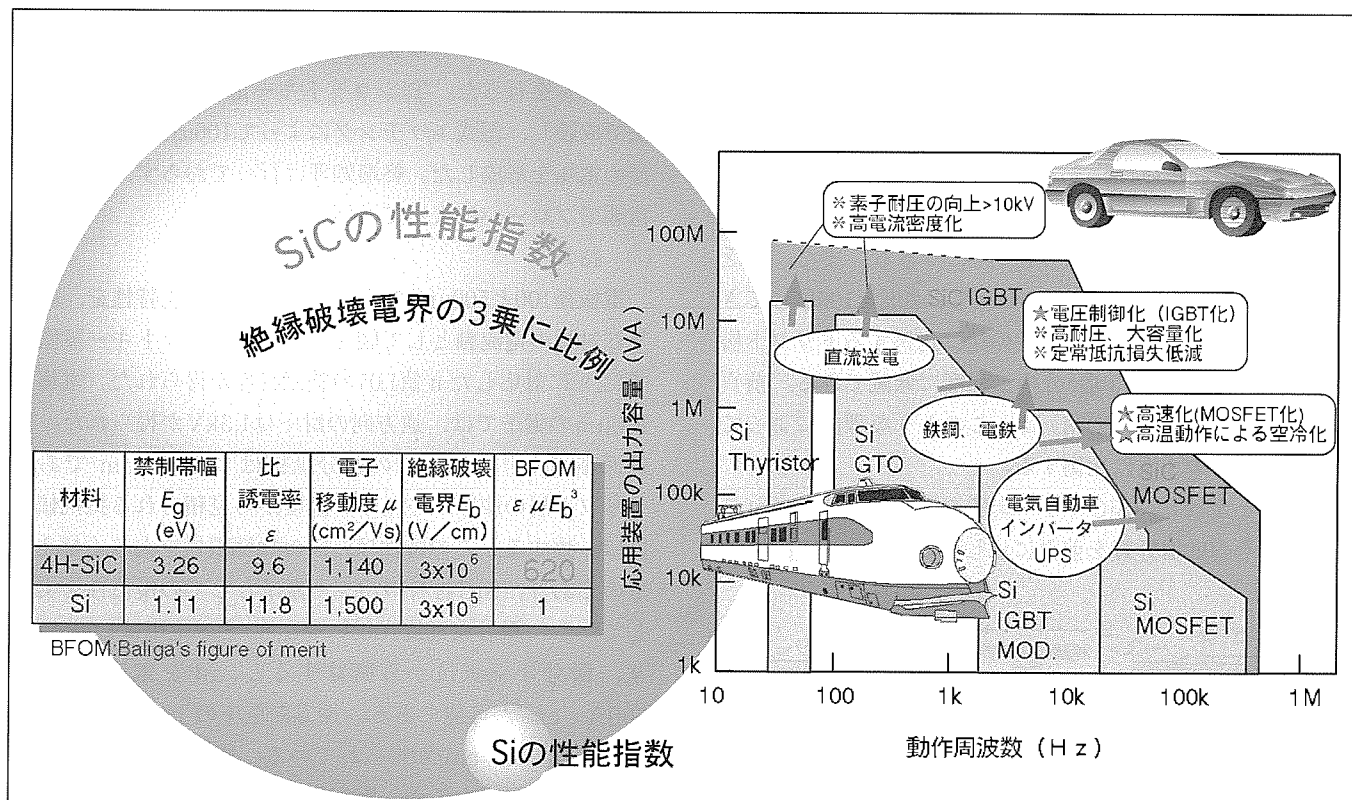
SiC材料特性の特長及び応用分野を紹介するとともに、三菱電機におけるSiCパワー素子への取組として、FET、ショットキーダイオード(SBDi)の試作結果、及びプロセス技術開発について述べる。また、国内外メーカーの開発動向、NEDOプロジェクトの動きをまとめる。

パワーデバイスでは、電力制御における効率向上を目指し、その損失の低減が図られてきた。その結果、例えば、SiパワーMOSFETのオン抵抗は、Si材料の理論限界近くまでに低減されている。Siに比べて絶縁破壊電界が一けた高く、このSiの物性限界を打ち破る可能性を持つSiC素子が、次世代パワー素子として期待を集めている。

SiCとSiの代表的な物性値を下図に示す。ユニポーラ型

電力素子としての半導体材料の特性は、性能指数(Baliga's Figure of Merit : BFOM)によって比較できる。BFOMは絶縁破壊電界の三乗に比例するため、Siに比べて10倍の絶縁破壊電界を持つSiCは、パワー素子として500倍以上の優れた特性が期待される。実際、比較的構造の簡単なSBDiでは、BFOMに見合う優れた特性が実証されており、当社でも、耐圧1.5kV、オン抵抗 $3\text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ のSBDiを試作している。

近年、Siの理論限界を超えた特性を持つMOSFET等のSiC素子も報告されており、当社でも、1994年から、NEDOプロジェクト等に参画し、高温素子、低損失電力素子、及びその要素技術の研究開発を行っている。



SiCの物性値、性能指数と応用分野

パワー素子としての半導体材料の性能指数は、ドリフト領域のオン抵抗の逆数で示され、絶縁破壊電界の3乗に比例する。SiCは、Siに比べて10倍の絶縁破壊電界を持ち、その性能指数は620倍も優れている。このSiCとSiの性能指数の違いは、例えば、半径が約10倍の球の体積比に相当する。

また、動作速度と電力容量においてSiCが期待される応用分野を示す。ユニポーラ素子化によって高速化が期待できる。

1. ま え が き

パワー半導体素子は、インバータ等による家電・産業用モータ、電車等の電力制御、及び直流送電の分野等で広く利用されている。SiCは、Siに比べて絶縁破壊電界が一けた高く、Siの物性限界を打ち破る次世代パワー素子用半導体として期待される。またほかにも、Siに比べて優れた材料特性を持ち、高出力高周波素子、高温素子、耐環境素子用材料としても注目される。

Si素子の理論限界を超えた特性を持つSiC-MOSFETが、国内外の研究機関から報告され⁽¹⁾⁽²⁾、実用化に向けた素子開発が進められている。当社でも、Si限界を超えたパワー素子と高温素子を目指し、SiC素子の研究開発を行ってきた。高温動作素子に関しては、1994年から通産省重要地域技術研究開発「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発」に、また、耐圧パワー素子に関しても、'98年から通産省ニューサンシャイン計画「超低損失電力素子技術研究開発」に参画して研究開発を行ってきた。

2. SiC半導体の特長と応用分野

前頁に示したSiCとSiの材料特性⁽³⁾によって得られる素子の寸法と特性の違いを、MOSFETを例として図1に示す。パワーMOSFETは、大きくは、高電圧を遮断する低電子濃度のn⁻耐圧領域(ドリフト層)と電流を制御するチャネル部で構成される。チャネル部によって電子が遮断されたオフ状態では、空乏化したドリフト層が高電圧を絶縁する。オン状態では、電子濃度の低いドリフト層がオン抵抗の主要因になる。高電圧に耐えるためには厚いドリフト層が必要であるが、絶縁破壊電界がSiの10倍であるSiC素子ではドリフト層の膜厚をSi素子の1/10にできる。また、空乏層厚も1/10でよく、ドリフト層の電子濃度を100倍にできる。このため、膜厚と電子濃度の積に比例するドリフト層の抵抗は1,000(10の3乗)分の1程度に低減できる。前頁に示した性能指数(BFOM)は、このような理由によって絶縁破壊電界の3乗に比例する。

Si素子と比較し、SiCパワー素子の優位性が期待される領域と、その応用分野を前頁に示した。インバータ用では、

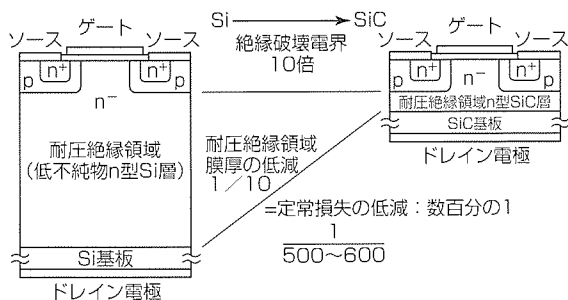


図1. SiCとSiパワー素子の寸法と特性

現在主にSi-IGBTが用いられている1kV以上の分野で、SiC-MOSFETを用い、定常、スイッチング両損失の低減を図ることが可能である。また、電気自動車用としては、損失の低減に加え、動作温度の高温化によって空冷化を実現し水冷機構を省くことが期待される。電鉄や鉄鋼プラント用では、GTO等が用いられる高電力容量分野の応用にSiC-IGBTを利用することができ、電圧駆動化による周辺回路の簡略化が期待される。また、直流送電、周波数変換など電力系統の大電力分野では、Siでは困難な10kVを超えたSiC高耐圧素子の実現が期待される。また、SiC-SBDiはフリーホイールDi用として注目され、Siではpn-Diでしか実現できなかった高耐圧の素子が、ユニポーラ素子で実現でき、高速化によるスイッチング損失の低減が期待できる。

3. SiC素子試作と特性

当社のSiC素子技術の開発状況を紹介する。基本的な構造ではあるが、SiC素子を試作し、特性を評価した。

3.1 ショットキーダイオード(SBDi)

SBDiは、比較的構造が簡単であり、様々な報告がなされており、SiCのBFOMに見合う優れた特性が実証されている⁽⁴⁾。以下に当社の試作結果を紹介する。

(1) 作製

市販エピ付き基板(エピ層厚10μm, $n = 5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$)を用い、最初に基板裏面にNi膜によるn型オーミック電極を形成した。ランプ加熱装置で約1分間、約1,000℃でアニールを行った。Tiショットキー電極は、DCスパッタ法で成膜し、湿式エッチングによって100μmから1,000μm径の電極を形成した。終端処理は行っておらず、ウェーハ状態でプローバによって評価した。

(2) 結果

電極径100と500μmの試作SBDiの電流電圧特性を、線形及び対数の電流軸として図2に示す。ショットキー障壁高さ1.2Vに対応したn値1.01の整流特性が得られた。電極径100μmの素子では、逆方向の耐圧は1.5kVが得られた。単位面積当たりの順方向の微分抵抗は $3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、ドリフト層の膜厚、キャリア濃度から見積られる抵抗値とほぼ一致する。この特性は、Siの物性限界を大きく超えるものであり、SiC材料のパワー素子としての優位性を実証している。順方向電流 $100 \text{ A} / \text{cm}^2$ のオン電圧は1.2Vであり、微分オン抵抗から概算すると、オン電圧1.8Vで $300 \text{ A} / \text{cm}^2$ が可能である。逆方向電圧の1kVのリーク電流は、 $10^{-5} \text{ A} / \text{cm}^2$ が得られている。電極径500μmでもほぼ同様な結果であるが、電極径が大きくなるに従い、3けた以上大きいリーク電流が生じる確率が増加する。このリークは、基板の欠陥に関係していると考えられる。

(3) 課題

リーク電流と欠陥の関係の解明と対策により、電極径の

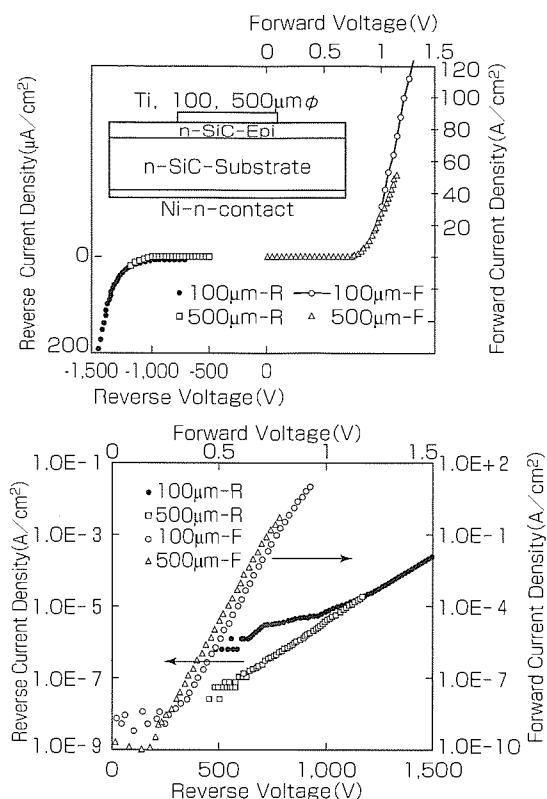


図2. 試作4H-SiC-SBDiの整流耐圧特性

拡大と、チップ当たりの順方向電流の増大を目指す。ガードリング等の終端構造の作製技術も重要である。

3.2 チャンネル特性評価用SiC電界効果トランジスタ

シリコン素子では、ユニポーラ素子による高耐圧・大電力容量素子の実現は難しく、一般に、GTOやIGBT等のバイポーラ素子が用いられる。SiC素子では、優れた材料物性のため、同様な仕様の素子がFET等のユニポーラ素子で実現可能である。ドリフト層の低抵抗化に加え、pn接合の拡散電位がなく、オン電圧の大幅な低減が期待できる。現在までのSiC素子の報告では、チャンネル部の抵抗が、ドリフト層に比べて大きく、素子特性を制限している。このため、チャンネル抵抗の低減が重要課題になっている。

チャンネル部の特性評価を目的に、図3中に示す耐圧層を持たない構造の平面型のMOSFETを試作した。

(1) 作製

基板には、市販p型4H-SiCエピ付きウェーハ(エピ層厚10μm, $p = 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)を用い、ソース、ドレインn型領域形成のため、50~200keVのエネルギーで N^+ のイオン注入(体積密度で $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)を行った。ウエット酸素で950℃、6時間の酸化を行いゲート絶縁膜を形成した。ソースとドレイン電極としてNi電極を、裏面電極とゲート電極としてはAl電極を蒸着によって形成した。ゲート長、ゲート幅はそれぞれ10μm, 100μmである。

(2) 結果

図3に示すように、ドレイン電圧に対するドレイン電流

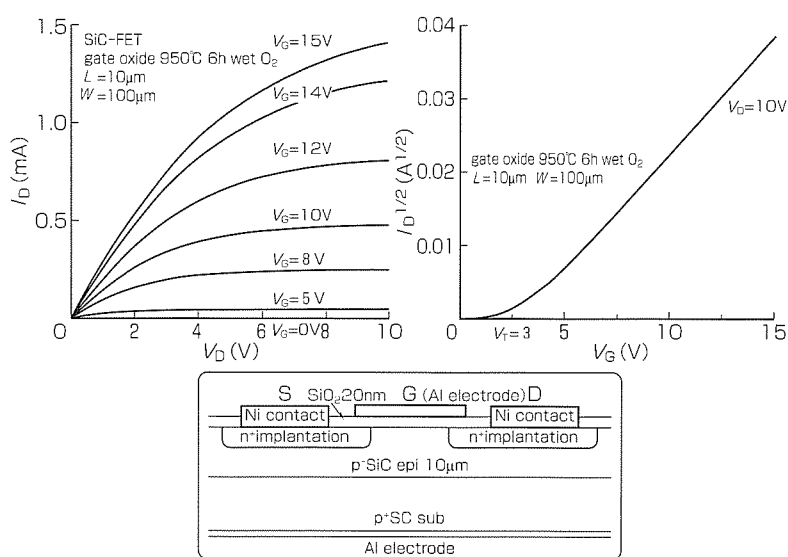


図3. 試作4H-SiC-MOSFETのドレイン電流電圧特性

は、ゲート電圧に応じた飽和特性を示し、MOSFET動作が確認された。また、ドレイン電圧10Vでの、ゲート電圧に対するドレイン電流の1/2乗の特性を示す。この傾きから、チャンネル移動度は $20 \text{cm}^2/\text{Vs}$ と見積られる。また、300℃でも評価を行い、高温素子としてのMOSFETの動作を確認した。

(3) 課題

得られたチャンネル移動度は、SiのMOSFETに比べて小さな値であるが、他の研究機関からも同様な報告がある。今回基板に用いた4H構造の結晶は、パワー素子として有利な物性を持つが、十分なチャンネル移動度が得難い問題点がある。今後この原因を調べるとともに、チャンネルドープや、チャンネル用に別のエピ層を設ける構造等の改善によってチャンネル移動度の向上を目指す予定である。

4. SiCプロセス技術

当社では、SiC基盤プロセス技術として、エピタキシ成長、イオン注入、ドライエッチング、電極技術等の開発を行ってきた。次にイオン注入技術を紹介する。

拡散係数が小さく拡散が困難なSiCでは、選択的にドーピングを行う技術として、イオン注入が用いられる。注入不純物をアクセプタ及びドナーとして活性化するためには、高温のアニールが必要である。なかでも、MeVの高エネルギー注入は、パワー素子で必要な深い接合形成が可能であり注目される。高エネルギー注入においても、高温注入により、注入後の結晶損傷が低減できることを既に報告した。アニールによる活性化を次に述べる。

(1) 実験

4H-SiC基板の n^- エピタキシ層に、0.9から7 MeVでAlの多重注入を行った。基板温度は、室温、500℃、1,000℃で注入した。SIMS測定により、深さ1.0から3.2μmに約

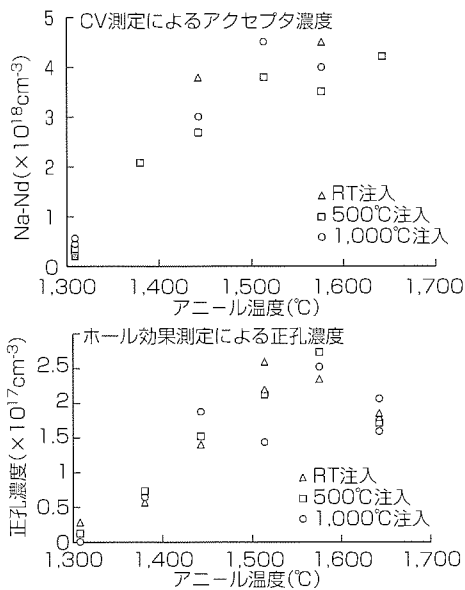


図4. アクセプタ, 正孔濃度のアニール温度依存

$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の濃度のAl注入層を確認した。この後、Ar雰囲気中のSiC容器中で1,300°Cから1,650°Cで1時間アニールを行った。RIEで表面1.3 μm をエッチングした後、評価用電極を形成し、ホール効果とCV測定を行った。

(2) 結果

シート抵抗のアニール温度依存では、1,500°C程度以上で顕著に低減された。図4には、CV評価によるアクセプタ濃度、及びホール効果測定による正孔濃度を示す。アニール温度とともに両濃度とも増加する傾向が見られ、アクセプタ濃度とSIMSによるAl濃度との比較から、1,500°C以上では、ほとんどのAlがアクセプタとして活性化していると考えられる。また、正孔の移動度は30 cm^2/Vs の値であり、エピ層の移動度と顕著な違いはない。

5. SiCの研究開発状況

5.1 基板の開発状況, メーカー

基板は、昇華法による成長が研究されている⁽⁵⁾。素子実用化のための重要な課題は、マイクロパイプ(MP)と呼ばれる直径数 μm の中空貫通欠陥の低減と大口径化である。MP密度とウェーハ径は、30個/ cm^2 、50mmが市販され、1個/ cm^2 、75mmの研究が報告されている。現状では米国クリー社が大半を供給しているが、新日鐵ほか数社も同程度の品質の基板の製造・販売を始めている。

5.2 素子研究開発の状況

素子開発は、ABB、シーメンス等の海外のパワーエレクトロニクスメーカーや、デンソー、ベンツ等の自動車関連メーカーで活発である。図5はパワー素子における耐圧-オン抵抗のグラフであり、SiCとSiのユニポーラ素子の限界及び各社のSBDi, MOSFETの学会発表例を示す。ABB社は、電力系統用素子を目標に、スウェーデンの国

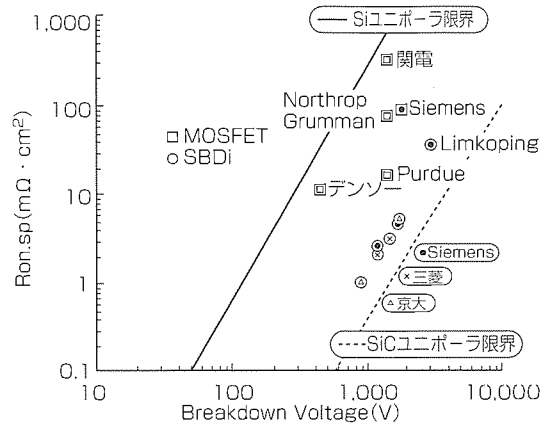


図5. SiCとSi素子の耐圧-オン抵抗の比較

家プロジェクトに沿って産学共同で開発を進めている。日本では、京都大学が優れた結晶成長技術を開発してきたが、海外メーカーに対抗するため、'98年から、ニューサンシャイン計画で、大学、電子技術総合研究所、メーカーが参画して「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトが始まった。基板から素子試作までの広い範囲の開発を行っている。

6. むすび

SiCの物性、性能指数、応用を紹介した。SiCショットキーダイオード(耐圧1.5kV, 微分オン抵抗3 $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$), チャネル特性評価用MOSFET(チャネル移動度20 cm^2/Vs)を試作した。今後、チャネル移動度の改善を含め、素子構造及びプロセス要素技術の開発を進め、1kV級MOSFETを目標として研究開発を行う予定である。

なお、この研究は、通産省重要地域技術研究開発「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発」としてNEDOからイオン工学研究所を通じて委託され実施されたものである。

参考文献

- (1) Tan, J., Cooper, J. A., Jr., Melloch, M. R. : High-Voltage Accumulation-Layer UMOSFET's in 4H-SiC, IEEE, Electron Device Lett., **19**, 487 (1998)
- (2) 恩田 正一 : SiC縦型MOSFETの現状, 電子情報通信学会論文誌C-II, **J81-C-II**, 134 (1998)
- (3) Yoder, M. N. : Wide Bandgap Semiconductor Materials and Devices, IEEE Electron Devices, **43**, 1633 (1996)
- (4) Kimoto, T., et al. : High-Voltage (>2.5kV) 4H-SiC Schottky Rectifiers processed on Hot-Wall CVD and High-Temperature CVD Layers, Materials Science Forum., **264-268**, 921~924 (1998)
- (5) 大谷 昇, ほか : 大口径SiC単結晶基板の開発, 電子情報通信学会論文誌C-II, **J81-C-II**, 112 (1998)

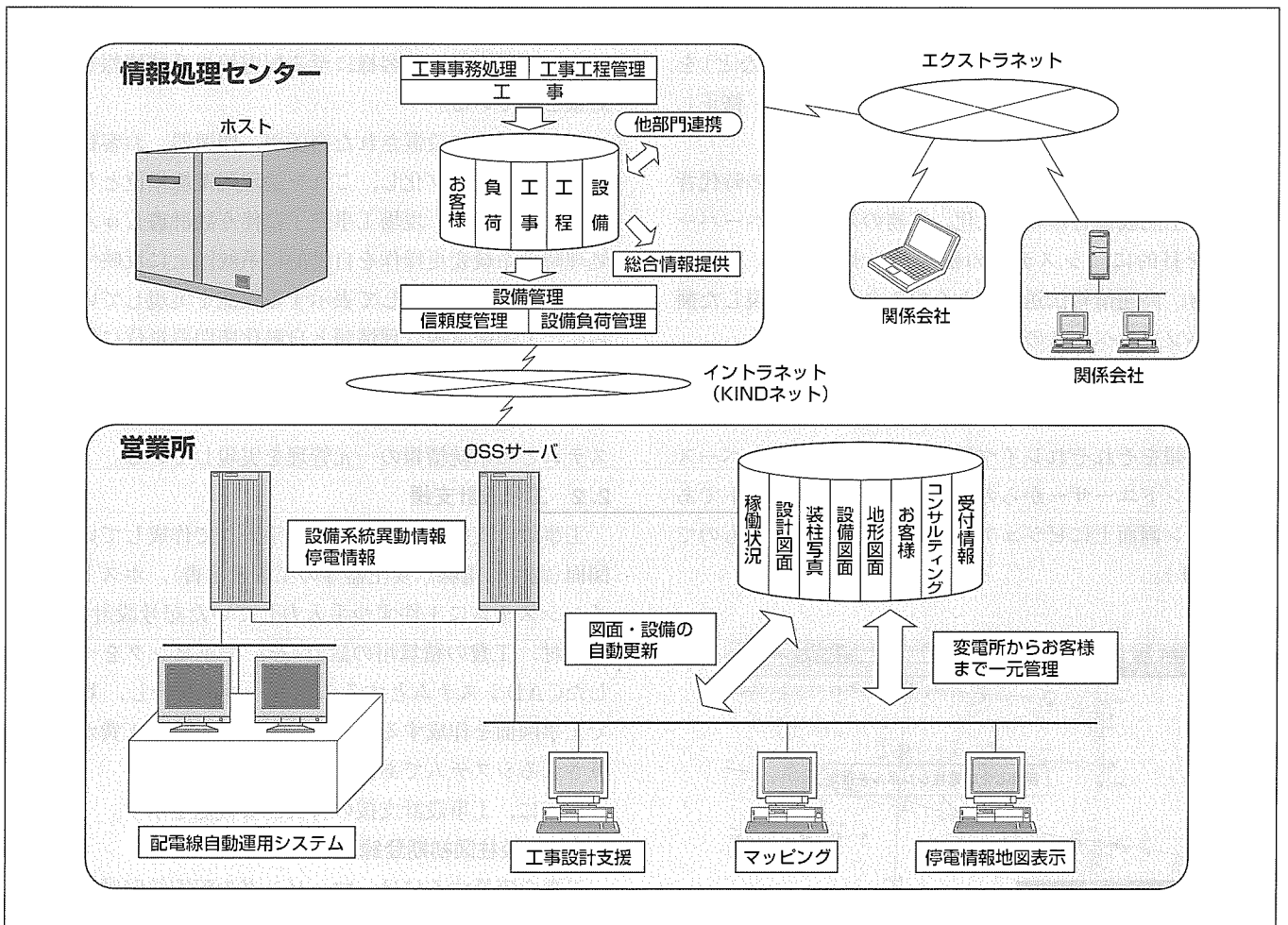
関西電力(株)ワン・ストップ・サービスシステム

不動弘幸* 秩父基浩**
 岡村 彰*
 望月美彦**

要 旨

関西電力(株)では、“お客様の申し出を受けた箇所で処理を完結する”というコンセプトで、ワン・ストップ・サービスを積極的に推進している。このサービスを支援するのがワン・ストップ・サービス(OSS)システムであり、パイロット営業所での試験実施を終え、1999年度から本格導入を進めている。OSSシステムは、設備管理情報、配電系統情報、配電線路図や装柱写真を一元管理しているマップ

ング(設備図面管理)を基盤として、これまでに、工事設計支援、停電情報地図表示のサブシステムの開発が完了し、全営業所への導入を進めている。また、今年度は、新たに配電線自動運用システムへの連携機能も開発中である。これらにより、お客様からの申込み等への迅速な対応や、設計作業の効率化による送電工期短縮、配電線事故の問い合わせに対する即時情報提供等のサービス向上を図っている。



ワン・ストップ・サービスシステムの全体システム構成のイメージ

設備管理情報や配電系統情報といったネットワーク技術部門に関連する情報を各営業所のサーバで一元管理し、そのデータベースを核としてマッピング/工事設計支援/停電情報地図表示などのシステムが実現されている。全体システムの構成は、ホスト/サーバ/クライアントによる3階層構成としている。

1. まえがき

関西電力(株)では、電力自由化の時代を迎え、一層のお客様サービスの向上を図るため、“お客様の申し出を受けた箇所での処理を完結する”というコンセプトで“ワン・ストップ・サービス(OSS)”を積極的に推進している。このサービスを支援するのがOSSシステムであり、“お客さま本部”の“お客さまサービス部門”とネットワーク技術部門が一体となって開発し、展開している。

本稿では、三菱電機が主として開発を行ったOSSシステムのネットワーク技術部門のシステムを中心に紹介する。

2. OSSシステムの機能と特長

OSSシステムは、これまでに“マッピング”(設備図面管理)“工事設計支援”“停電情報地図表示”のサブシステムの開発が完了し、営業所での運用が開始されている。

これらのサブシステムについて、その機能と特長を述べる。

2.1 マッピング

従来、ネットワーク技術部門では、膨大な配電設備(電柱280万本、変圧器170万台、配電線13,000回線など)を、設備図面や装柱写真などの紙ベースによって管理・修正していた。

マッピングは、パソコンの高性能化・低価格化の時代背景の下、上記設備管理の一元化、業務の効率化、ペーパーレス化を目的に、システムの根幹をなすマッピング技術、GUI技術、高速情報伝送技術とを組み合わせ実現した画期的なパソコンベースのマッピングシステムである。

サーバは、地形図、電柱、高低圧電線、機器などの設備管理情報や塩害・雷害などのエリア情報、さらに装柱などの写真情報をそれぞれレイヤ構造に分解してデータベース化し、エンドユーザーからの各種要求をクライアントであるパソコン画面上にビジュアル情報として表示するものである(図1)。

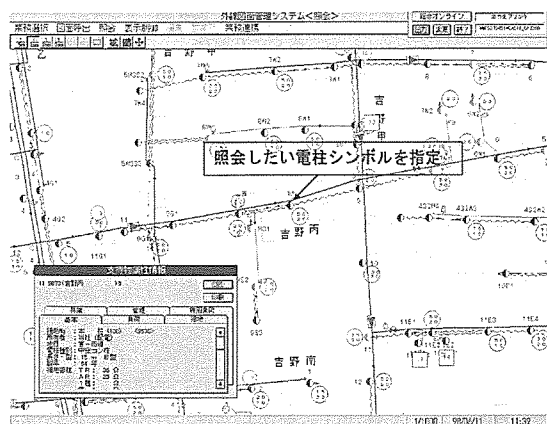


図1. マッピングの表示画面

以下に、マッピングの特長的な機能を示す。

2.1.1 シンボルの自動配置機能

シンボルは、レイヤごとにベクトル情報として保有しているため、複数レイヤの重畳によって部分的に重なりが生じる。特に、系統にまつわる重なりは誤認トラブルを招く可能性がある。

このため、レイヤ単位に表示プライオリティを持たせ、電柱の中心に10個の配置候補位置を設定し、重なり発生時にはプライオリティ順に候補位置を埋めていくことでシンボルの自動配置機能を実現している。

2.1.2 連続スクロール機能

従来のシステムでは、表示メッシュの範囲を逸脱した場合、初期画面に戻りメッシュの再選択が必要で、問い合わせへの即応性に欠けていた。

このため、電柱番号や住所などから画面呼び出しができる機能に加えて、マルチスレッド処理によって移動方向の画面分の図面データを先読みすることによって、スクロールエッジの停止時間が短い連続スクロールを可能とした。

2.1.3 配電線系統情報管理機能

マッピングでは、配電設備を対象とした設備管理機能に加え、変電所からお客様に至る配電線の系統情報をも管理対象としている。

同一配電線に設置された高圧線、開閉器、お客様等の高圧設備をグループ化し、これを論理配電線単位として管理することにより、現場工事完了に伴う設計書しゅん(竣)工処理時の系統変更操作を自動的に系統図上に反映する機能や、1配電線を強調して表示する機能を実現している。さらに、上記配電線管理情報と自動化開閉器単位に管理する区間情報を配電線自動運用システム(以下“自動化システム”という。)へ提供する機能により、OSSシステムと自動化システムとの系統情報の一元管理を実現している。

2.2 工事設計支援

工事設計支援は、従来すべて手書きで作成していた工事図面(電柱、電線、変圧器等の工事指示書)、ホストオンラインシステムに1件ずつ手入力していた記号設計書(工事の資材、工費の積算用の設計)を、マッピングをベースとしたCADシステムとすることで一つに統合し、対話形式で工事図面を作成するだけで、同時に資材や工費が自動積算されるシステムである。

以下に、工事設計支援の特長的な機能を示す。

2.2.1 装柱図初期登録

工事を実施するには、マッピングの配電線路図面のほかに、電柱を立体的に表した装柱図と呼ばれる図面が必要である。この既設の装柱図を作成するために、装柱図初期登録という手法を用いた。

これは、マッピング及びホストに存在する設備属性情報、地域情報、電線の架線方向/角度、架線用アームの設置位

置情報を基に、業務ノウハウである工事標準から設備の設置位置や設置形態等を予測し、実際にある装柱図を生成するものである(図2)。

装柱図初期登録を実施することにより、全電柱の既設装柱図が作成され、これを基に工事図面を作成することが可能となる。

2.2.2 工事箇所の切り出し

設計開始時にマッピングで工事箇所をポリゴンで囲むことにより、そこに含まれる電柱の既設装柱図情報、設備属性情報、系統情報、塩害・雷害等の地域情報を基に、既設の工事図面を自動的に作成する。

工事の多くは、お客様からの申し込みによって実施されるため、同一電柱を短期間に再度工事する場合がある。この場合は、マッピングから工事箇所を切り出す際に、先行工事を指定することにより、既設情報の上に更に先行工事の工事情報を反映した既設の工事図面が作成される(図3)。

2.2.3 自動積算

従来の資材や工費積算は、ホストの記号設計というバッチ処理によって実施されていた。工事内容を入力することにより、その内容を夜間バッチ処理で積算し、次の日に積算結果の帳票を打ち出すシステムである。

工事設計支援では、工事図面を作成する際に、同時に工事にかかわる資材と工費を抽出し、設計完了時点では、工事に関する資材や工費がすべて積算され、帳票を打ち出すことが可能となっている。

これにより、従来最低2日かかっていた積算処理が、数時間で可能となった。

2.2.4 工事情報による設備・系統情報の自動更新

工事設計支援で作成された工事図面は、工事の完了後に工事検査が実施され、竣工処理される。このときに、工事図面の工事情報を基に、マッピングに設備の異動情報、系統の異動情報を自動更新する。

特に、系統の異動情報については、装柱図でのジャンパの新設/撤去、開閉器の入り/切り等の情報を基に、マッピングの系統情報を再生成している。

また、この系統情報のマッピングへの更新時に、系統チェックと呼ばれる電気の流れのチェック処理を実施している。工事情報を撤去情報と新設情報に分類し、まず、撤去情報をすべて反映した後、新設情報の一つずつ反映していき、その結果、電源衝突、電線遊休等の系統の異常を検知することができる。

2.3 停電情報地図表示

従来は、お客さまセンターへは、給電情報伝達システムや自動化システムによって配電線事故などの停電情報を提供していたが、これらは一覧表形式の画面表示であった。このため、お客様からの問い合わせに待ち時間が生じ、即応性に欠けていた。

停電情報地図表示では、これを解決するため、自動化システムの配電線の事故情報や復旧情報とマッピングの地図・系統情報を連携した。これにより、事故が発生した場

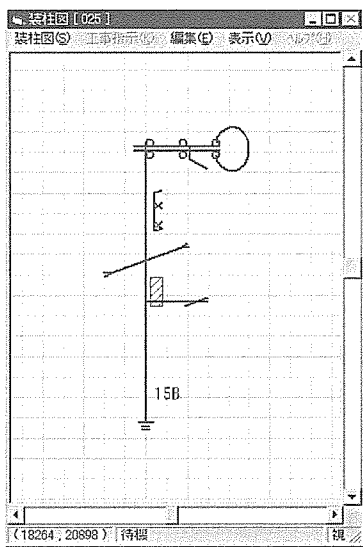


図2. 装柱図初期登録結果

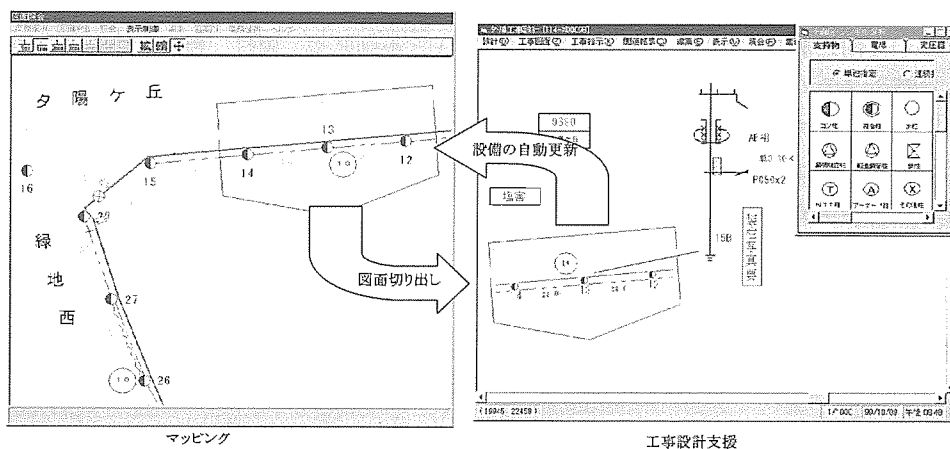


図3. 工事箇所の工事設計支援への切り出しとマッピングデータの自動更新

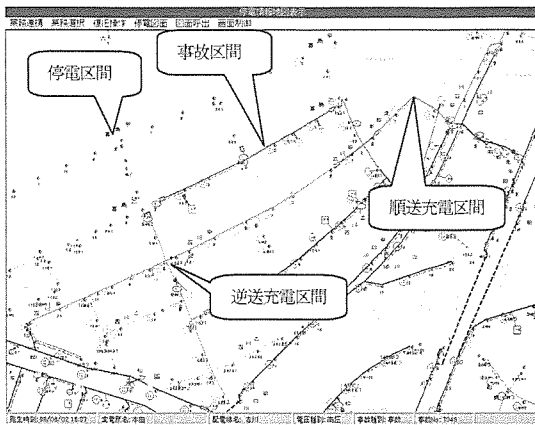


図4. 停電情報地図表示の表示画面

合に、瞬時に変電所名や配電線名が分かるようになり、また、停電範囲や復旧状況等の系統状況が地図上で表示されるため、確実に迅速なお客様対応が可能となった(図4)。

停電情報地図表示の主な機能は以下のとおりである。

- (1) 停電・復旧区間の地形図上へのリアルタイム表示
- (2) 配電線の事故や復旧情報の一覧表示
- (3) お客様の停電状況の一覧表示

3. 自動化システムとの連携

自動化システムは、配電線利用率の向上、事故発生時の早期送電を目的として導入されたシステムである。

この機能は、OSSシステムで管理している配電設備や系統の情報を自動化システムで活用できることから、設備や系統の異動情報を自動化システムに提供することにより、データ更新作業の軽減を図るとともに、設備や系統情報の一元管理を目的としている。

OSSシステムと自動化システムとの連携の概要を図5に、また、システム連携のポイントを以下に示す。

3.1 設備異動データの連携方式

双方向の設備異動データの連携は、その方式が煩雑になるばかりか、データの整合性を崩す要因にもなりかねない。そこで、設備異動データの連携は、OSSシステムから自動化システムへ提供する一方方向連携方式とした。

系統運用状態は、OSSシステムで管理する情報を正としている。これにより、自動化システムで開閉器等の系統運用状態変更操作を行った場合には、その設備異動データそのものをOSSシステムへ提供するのではなく、その系統変更操作のみをOSSシステムへ提供する。OSSシステムではその情報を基に、系統変更後の設備異動データを生成し、自動化システムへ提供する。

3.2 設備異動データの連携タイミング

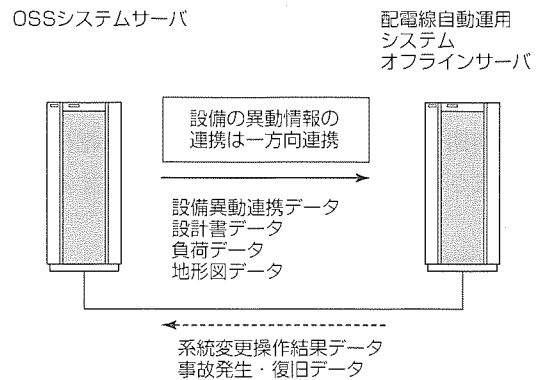


図5. OSSシステムと配電線自動運用システムとのデータ連携

OSSシステムによって自動化システムへ設備異動データを提供するタイミングは次の2通りである。

一つは、設計書竣工処理時点で、工事完了に伴う最終の設備・系統異動データを提供するものである。もう一つは、工事設計書作成完了時点で、まだ工事を終えていない仮の設備・系統異動データを自動化システム側へ提供するものである。

この機能により、自動化システムではそのデータを将来システムとみなし、参考情報として流用することができ、より実工事に近い内容で無停電工事図面等を作成することができる。

4. むすび

本稿では、関西電力㈱が開発を進めているOSSシステムについて、その機能と特長を紹介した。

このシステムは、オブジェクト指向技術を取り込み、多様なユーザーニーズにこたえて開発した。今後は、EDI (Electronic Data Interchange) やWEBといった技術をシステム開発に取り込み、より高度となっているユーザーニーズにこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 不動弘幸, 岡村 彰, 高野久美, 清水健司: ワンストップサービスの開発, 電気評論 (1999)
- (2) 不動弘幸: 高度NCによるワン・ストップ・サービスシステム, インターナショナル・テクノロジー・インスチテュート (1999)
- (3) 不動弘幸, 岡村 彰, 高野久美, 清水健司, 山上 明, 望月美彦: ワンストップサービスを目指したマッピングシステムの開発, AMFMインターナショナル第9回コンファレンス (1998)



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
電話 (03) 3218-9192(ダイヤルイン)

大型光学望遠鏡の反射鏡製造技術 (特許 第2641348号, 第2641331号, 第2871918号, 米国特許5,329,407号, 5,461,514号, 5,477,393号, 5,452,136号, 5,423,896号, 欧州特許04/1,362号)

発明者 三神 泉, 佐々木亜紀, 浅里幸起, 西口憲一

すばる望遠鏡の主鏡は、20℃で研磨された後、平均温度0℃のマウナケア山頂に据え付けられる。主鏡は、1PPB(10⁻⁹) /℃台の熱膨脹率を持つ40個以上の鏡材を融着して製造するが、各鏡材間の熱膨脹率のばらつきも1PPB/℃台あるため、温度差により、1μm以上の熱変形を発生することが分かった。

(2) 残留熱変形の2乗和を最小にするための熱膨脹率ベクトルの配置を解析的手法(固有ベクトルの向き=熱膨脹ベクトルの向き), 又は統計的な手法(シミュレーテッドアニーリング法)で求める。

この発明は、熱変形による鏡面精度劣化を所定の範囲(0.02μm)に抑えるためのもので、熱変形を支持機構によって矯正することを前提に、熱変形を矯正しやすい低次モードに集中させるための部分鏡材の最適な並べ方を、10¹⁰通りの組合せの中から、現実的な計算回数で見付ける以下の手法からなる。

| | 直感的な方法 | シミュレーテッドアニーリング法 |
|---------------------|------------|-----------------|
| ヘックスの配置 | | |
| 主鏡能動支持システムに要求される補正力 | ~40N | ~30N |
| 補正後の主鏡変形残差 | 25.5nm RMS | 2.6nm RMS |

(1) 鏡の熱変形ベクトルを、鏡材の熱膨脹率ベクトルと鏡の剛性行列を用い、行列方程式で表し、鏡の熱変形から変形の低次級数の和を減じ、矯正後の残留熱変形とする。

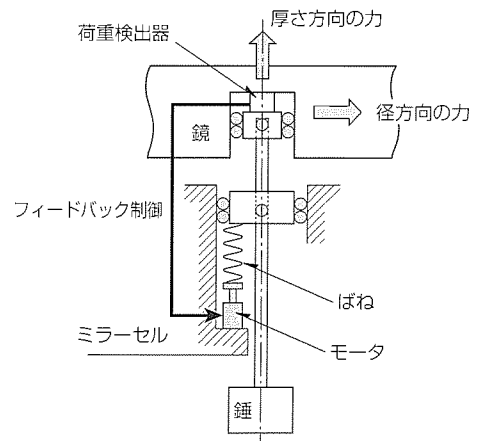
大型光学望遠鏡の鏡の支持技術 (特許 第2111006号, 米国特許5,115,351号, 独国特許3,908,430号)

発明者 宮脇啓造, 伊藤 昇

光学望遠鏡は、全天の天体のほそく(捕捉)・追尾が目的で姿勢角度を変化させるため、反射鏡の支持構造物は自重変形する。また、支持構造物と反射鏡間の熱膨脹率差や温度差も、相対的熱変形を生じさせる。この発明は、一つの支持装置で直交する2方向(反射鏡の厚さ方向と径方向)にそれぞれ同時に力を発生させ、その力を組み合わせ、変化する重力方向に常に重力とつりあう支持力を与えることで、近似的な無重力状態を作り、変形する支持構造とは無関係に反射鏡の支持位置を保つものである。

支持装置の実現で、すばる望遠鏡の主鏡(外形8.3m)を261個の支持装置で支えることが可能となり、厚さ20cm軽量反射鏡の精度確保がなされた。

変形しやすい鏡の厚さ方向には正確な支持力を発生するためのロードセル(力検出器)を用いたアクティブ制御を、変形しにくい径方向には“てこ”とおもり(錘)を用いたパッシブな支持方法で力を発生させ、所定の力精度の実現と、軽量・コンパクト化を成し得た。熱変形に対しては、熱変形矯正力を支持力に足し合わせて補正する。このような支





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
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

半導体装置 (特許 第2137288号, 特公平6-10163号)

発明者 福永匡則

この発明は、半導体装置に関し、モジュール化されかつブリッジ接続されたパワースイッチングデバイス及びその制御回路のノイズ等の誤動作防止に関するものである。

従来、単一の金属基板上にモジュール化されたパワースイッチングデバイスのブリッジ回路において、その制御回路の入力端子にノイズが現れることで回路が誤動作するという問題がしばしばあった。

この発明は上記のような問題点を解決するためのもので、**図1**に示す斜線部の制御回路の部分をシールドパターンで二層構造を構成すること、及びこのシールドパターンの電位をそれぞれ制御回路の基準電位に保つことにより、ノイズによって誤動作することのない、金属基板上に配置されたブリッジ接続のパワースイッチングデバイス及びその制御回路からなる半導体装置及びパワースイッチングデバイスを高速動作させた場合の金属基板への漏えい(洩)電流を低減するようにした半導体装置を提供する。

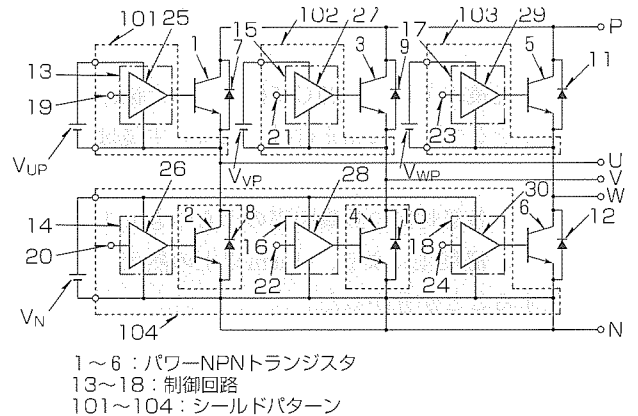


図1

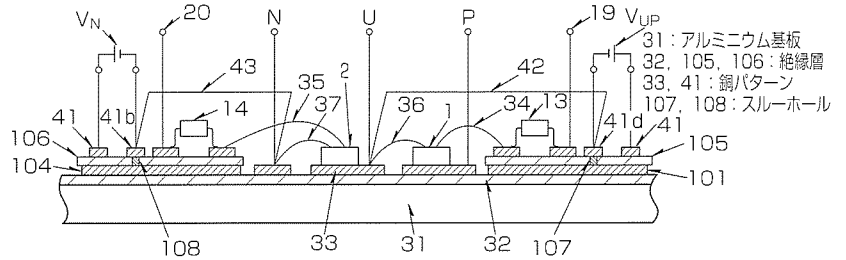


図2

<次号予定> 三菱電機技報 Vol.74 No.1 「20世紀の技術成果と21世紀の展望」特集

- "技術の進歩" 昨日・今日そして未来
- 宇宙及び衛星通信
- F A 及び産業メカトロニクス
- 研究・開発
- 通信
- 自動車
- 発電及び産業・公共
- 情報
- 半導体
- 系統変電及び電気鉄道
- 映像情報
- 昇降機とビルシステム
- 住環境

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>三菱電機技報編集委員</p> <p>委員長 鈴木 新</p> <p>委員 中村 治樹 永峰 隆 宇治 資正 河内 浩明 奥山 雅和 茅 嶋 宏 佐々木 和則 石川 孝治 畑谷 正雄 津金 常夫 村松 洋 才田 敏和 鎌田 裕 猪熊 章 本庄 正司</p> <p>幹事 鈴木 隆二 12月号特集担当 石川 幹 森 敏</p> | <p>三菱電機技報 73巻12号 1999年12月22日 印刷 (無断転載・複製を禁ず) 1999年12月25日 発行</p> <p>編集人 鈴木 新 発行人 鈴木 隆二 発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 ドキュメント事業部 〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目4番1号 秀和芝パークビルA館9階 電話 (03) 3437局2692</p> <p>印刷所 菱電印刷株式会社 発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03) 3233局0641</p> <p>定 価 1部735円(本体700円) 送料別</p> <p>お問い合わせ先 giho@hon.melco.co.jp</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

スポットライト

高性能汎用インバータ

“FREQROL-A500/A500Lシリーズ”

汎用モータのインバータ駆動が進む中、従来の汎用インバータでは実現できない高度な駆動性能を求める声が一層強まってきました。三菱電機では、このニーズにこたえるため、超低速までの高精度運転を実現させた“アドバンスド磁束ベクトル制御”“オンラインオートチューニング”を始め、三菱ならではの高次元パフォーマンスを搭載した“FREQROL-A500/A500Lシリーズ”を製品化しました。

特長

1. 駆動性能の向上

高速RISCマイコンを採用したアドバンスド磁束ベクトル制御とオンラインオートチューニングの組み合わせにより、始動時にモータ定数を素早くチューニングするため、モータの温度に影響されない高精度運転と超低速までの高トルク・安定運転が可能となりました(速度制御範囲1:120, 当社従来比6倍)。

また、インバータの主回路の状態を直接監視し出力波形を制御するスマートドライバを開発して採用し、低速時の回転むらを大幅に改善しました。

2. 簡単操作・簡単メンテナンス

全機種に操作パネルFR-DU04を標準装備しました。パネルを取り外し、オプションや市販のケーブルを使って、制御盤の盤面に取り付けることも可能です。オプションのパラメータユニットはバックライト付きLCDを採用し、8か国語表示も可能となりました。

通信機能を標準装備し、RS-485で通信運転を行うことが可能となりました。さらに、セットアップソフトを用いて、短時間での立ち上げが可能となりました。

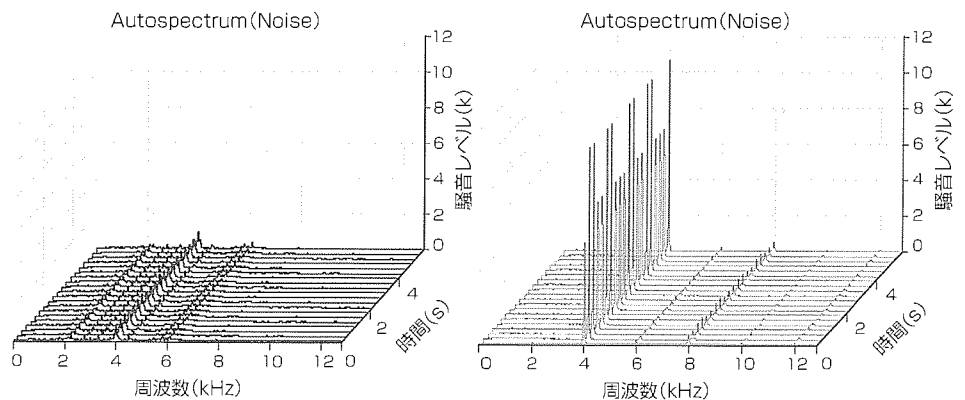
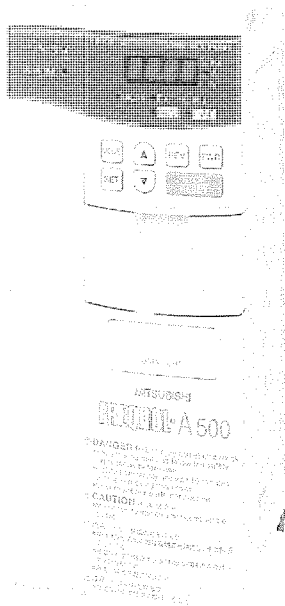
冷却ファンは、ON/OFF制御の採用によって長寿命化を実現しました。また、取付方法を改善し、ユーザーでの交換が容易になりました。制御端子台を脱着式端子台としたため、インバータ交換時のメンテナンス時間も大幅に短縮できました。

3. 低騒音・低ノイズ

モータから発生する金属音の成分を分散化することでモータ騒音を低減するSoft-PWM制御(発生ノイズは非低騒音運転並み)を開発し採用しました。

4. 海外仕様・海外規格への標準対応

海外の標準仕様(480V電源、入出力端子のシンク・ソース切換えなど)への対応を可能とし、北米や欧州の規格(UL, cUL, EN)にも標準で対応しました。内蔵オプションの装着により、世界の主要オープンネットワーク(CC-Link, Profibus-DP, DeviceNet)にも対応することもできます。



(a) Soft-PWM

(b) 従来のPWM制御

モータ騒音データ例

(運転周波数 3 Hz, キャリア周波数 2 kHz, 3.7kW 4 Pの場合)

FREQROL-A500シリーズの外観

機種構成

| シリーズ名 | FREQROL-A500 | | | | | | | | | | | | | | | FREQROL-A500L | | | | | | |
|-------------|--------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|----|----|----|----|----|---------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 適用モータ容量(kW) | 0.4 | 0.75 | 1.5 | 2.2 | 3.7 | 5.5 | 7.5 | 11 | 15 | 18.5 | 22 | 30 | 37 | 45 | 55 | 75 | 90 | 110 | 132 | 160 | 220 | 280 |
| 200Vクラス | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | - | - | - | - | - |
| 400Vクラス | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

| | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1号 技術の進歩特集 | 6号 特集“オープン分散計装制御システム” “最新の火力発電技術” | 9号 特集“設計技術を革新する設計システム技術” “進展するFA駆動制御技術” |
| 2号 特集“材料・分析技術の応用と展開” | 7号 特集“パワーエレクトロニクス” “光・マイクロ波デバイス” | 10号 特集“動き出したITS” |
| 3号 特集“システムLSI” | 8号 特集“センシング技術” | 11号 特集“ウエルネス” |
| 4号 特集“広がりゆくオゾン応用技術” “バーチャル数値実験室” | | 12号 特集I「大型光学赤外線望遠鏡“すばる”」 特集II「パワーデバイス」 |
| 5号 特集“環境技術” | | |

技術の進歩特集

| 号 | ページ | 号 | ページ |
|----------------------------|--------|---------------------|--------|
| 巻頭言 | 1 … 4 | 7. 情報関連機器・システム | 1 … 65 |
| カラートピックス・社外技術表彰 | 1 … 6 | 8. 映像情報関連機器・システム | 1 … 69 |
| 1. 研究・開発 | 1 … 31 | 9. 住環境機器・システム | 1 … 72 |
| 2. 電力及びエネルギー関連機器・システム | 1 … 41 | 10. 産業及びFA関連機器・システム | 1 … 77 |
| 3. ビル及び公共関連機器・システム | 1 … 47 | 11. 自動車関連機器・システム | 1 … 83 |
| 4. 電気鉄道関連機器・システム | 1 … 53 | 12. 半導体と電子デバイス | 1 … 87 |
| 5. 宇宙及び衛星通信, 電波応用関連機器・システム | 1 … 56 | 社外技術表彰一覧・総目次 | 1 … 96 |
| 6. 通信関連機器・システム | 1 … 61 | | |

特集論文

特集“材料・分析技術の応用と展開”

| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------|
| 1. 材料・分析技術の現状と展望 | 中島博行・肥塚裕至 | 2 … 108 |
| 2. 半導体用0.1μmホールパターン形成技術“RELACS” | 豊島利之・保田直紀・石橋健夫・杉野幹二・片山圭一 | 2 … 112 |
| 3. 溶液気化CVD法による次世代メモリ用BSTキャパシタ膜 | 松野 繁・佐藤剛彦・内川英興・堀川 剛・川原孝昭 | 2 … 116 |
| 4. 半導体パッケージ用プリント基板 | 岡 誠次・古橋靖夫・澤田祐子・畑中康道・山口明彦 | 2 … 120 |
| 5. 透過型電子顕微鏡による半導体デバイスの評価解析技術 | 福本晃二・橋川直人・村田直文・池野昌彦・益子洋治 | 2 … 124 |
| 6. 超LSIゲート絶縁膜の構造・欠陥解析技術 | 黒川博志・河瀬和雅・寺田久美・谷村純二・上原 康 | 2 … 130 |
| 7. 位置決め機能付き原子間力顕微鏡によるウェーハ表面微小欠陥解析 | 藤野直彦・小林淳二 | 2 … 134 |
| 8. 光通信デバイス用導波路グレーティング技術 | 吉新喜市・高林正和・竹谷 元・前川武之・宮下章志・内川英興 | 2 … 139 |
| 9. 携帯電話機用バルク超音波方式バンドパスフィルタ | 山田 朗・前田智佐子・内川英興・三須幸一郎・和高修三 | 2 … 143 |
| 10. 携帯情報機器における外装筐体薄肉軽量化材料 | 山田 祥・藤田章洋・鈴木 渉・立野宏明 | 2 … 147 |
| 11. ピッチ系CFRPによる衛星構体及び搭載アンテナの寸法安定性の向上 | 尾崎毅志・樺島重憲 | 2 … 151 |
| 12. 縮小型避雷器用新酸化亜鉛素子 | 高田良雄・加東智明・和田 理・小林正洋・古瀬直美 | 2 … 155 |
| 13. フレームレス中小型モータ用モールド樹脂 | 伊藤浩美・三村研史・藤岡弘文・八代長生・鈴木睦治 | 2 … 161 |
| 14. HFC対応冷凍・空調機の高信頼化技術 | 外山 悟・榎本順三・三木伸介 | 2 … 165 |
| 15. 電気機器用材料における最新の微小分析技術 | 和田 理・黒木洋志・三木伸介・黒川博志 | 2 … 169 |

特集“システムLSI”

| | | |
|---------------------------------------------|-------------------------------|---------|
| 1. システムLSIの現状と展望 | 土橋宏二 | 3 … 176 |
| 2. 4 MバイトDRAM内蔵32ビットRISCマイクロコントローラ“M32Rx/D” | 高田浩和・近藤弘郁・清水 徹 | 3 … 182 |
| 3. 単一電源フラッシュメモリ内蔵16ビットマイコン“M37920FGMHP/CGP” | 井上尚起・小浦正人・樋口光誠・今村 昭・網 康裕 | 3 … 186 |
| 4. 人工網膜モジュール | 近藤由和・田村俊之・三宅康也・田中健一・田井修市・久間和生 | 3 … 191 |
| 5. システムLSI開発環境 | 安藤智子・石川淳士・東田基樹 | 3 … 195 |
| 6. 微細化・高速メモリ設計による128MSDRAM, 64MSDRAM | 濱本武史・朝倉幹雄・鈴木富夫・豆谷智治・石井敦司 | 3 … 199 |
| 7. 2.7V単一電源動作の70ns 16MビットBGO機能付きフラッシュメモリ | 早坂 隆・石崎 統・稲葉 努・木村広嗣・榎本ひろみ | 3 … 203 |

| | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------------|---|-----|
| 8. 高速メモリバス対応モジュール | 武 正行・福永英樹 | 3 | 207 |
| 9. 高性能16ビットマイコンM16Cシリーズ | 中村和夫・藤高繁明・北上尚一・山崎貴志・林 直人・柳 浩彰 | 3 | 211 |
| 10. フリップチップBGAを採用した高速ECA ASIC | 植田昌弘・真金光雄・高木亮一・馬場伸治・齊藤 健・藤原隆成 | 3 | 215 |
| 11. 165GOPS MPEG2対応広範囲、全探索動き検出LSI | 花見充雄・石原和哉・ステファン スコツニオフスキー・松村哲哉・風山雅裕・鈴木弘一 | 3 | 219 |
| 12. プリンタ及びPPC用パルス幅変調LSI | 長野英生・菅 庸拓・谷口正治・坂本 淳 | 3 | 224 |
| 13. 高速システムLSI対応Cu配線技術 | 大崎明彦・林出吉生・東谷恵一・三上 登 | 3 | 229 |
| 14. ディープサブミクロン対応トランジスタモデルパラメータ技術 | 越智麗仁・中村旨生・谷沢元昭・木寺真琴 | 3 | 233 |
| 15. 2,000ピン級超多ピンパッケージ技術 | 馬場伸治・富田至洋・松嶋弘倫・竹本好孝 | 3 | 237 |

特集“広がりゆくオゾン応用技術／パーチャル数値実験室”

| | | | |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|---|-----|
| 1. オゾン利用の移り変わりと将来展望 | 中山繁樹・船谷邦宏・塩野 悟・鐘ヶ江裕三 | 4 | 244 |
| 2. 円筒多管式オゾン発生器の性能進歩 | 北山二郎・江崎徳光・小沢建樹 | 4 | 248 |
| 3. 大容量積層平板型高濃度オゾン発生装置 | 和田 昇・太田幸治・葛本昌樹・田畑要一郎・白井 明・眼龍裕司 | 4 | 252 |
| 4. 普及する浄水オゾン高度処理システム | 小沢建樹・田村哲也・久川義隆・広辻淳二・山口昌二 | 4 | 257 |
| 5. オゾン利用による下水の消毒と水再生 | 河相好孝・中崎幸一・M.Brahim・安永 望・田村哲也・真田欣将 | 4 | 262 |
| 6. 乾式オゾン脱臭システム | 松永直利・本多敏一 | 4 | 267 |
| 7. 吸着技術を利用したオゾン発生システム | 谷村泰宏・広辻淳二・宮 一普・白庄司直美・小川孝明・弓削 裕 | 4 | 271 |
| 8. オゾン併用型余剰汚泥低減システム | 神谷俊行・広辻淳二・福長由起子・渡部徹雄・森 一晴 | 4 | 275 |
| 9. クリーンオゾナイザと半導体プロセスへの応用 | 葛本昌樹・宮本 誠・鷺谷明宏・眼龍裕司・笹井 寛 | 4 | 279 |
| 10. パーチャルエンジニアリング実行環境(IEVE)ナビゲータ | 井上彰夫・吉岡純夫・田宮洋一・古藤 悟・西中川勇人・山内英士 | 4 | 286 |
| 11. 光・電子機能性材料の新しい電子モデルによる分子設計技術 | 信時英治 | 4 | 290 |
| 12. 放射光装置のビームシミュレーション(三次元磁界対応新手法) | 田中博文 | 4 | 294 |
| 13. 連成解析可能なEMIシミュレータ — FDTD電磁場解析とSPICE回路解析の融合 — | 田邊信二・山中康弘 | 4 | 298 |
| 14. LSIパッケージ構造設計支援システム | 佐藤 満・安田直世 | 4 | 302 |
| 15. ユーザーフレンドリなファンの設計支援システム | 中島伸治・廣中康雄・山田彰二 | 4 | 306 |
| 16. WWW対応圧縮機軸振動計算システム | 羽下誠司・福島康之・月居和英・橋本裕美・鈴木賢志 | 4 | 310 |

特集“環境技術”

| | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|-----|
| 1. “持続可能性”から考える21世紀の環境経営と技術 | 三橋 堯・東 和彦・吉田敬史 | 5 | 318 |
| 2. 有機塩素系溶剤の全廃 | 加峯茂行・小野三喜男・森 邦雄 | 5 | 323 |
| 3. オゾン応用エコプロセス技術 | 鐘ヶ江裕三・大家 泉・葛本昌樹・野田清治・宮本 誠 | 5 | 329 |
| 4. 家電製品リサイクルプラント | 山口省吾・内山幸雄・小寺嘉一・崎谷秀幸・篠田啓二・甲斐公一郎 | 5 | 335 |
| 5. 業務用有圧換気扇 | 内田敏彦 | 5 | 341 |
| 6. リサイクル情報システム | 内藤知子・鹿島 矯 | 5 | 345 |
| 7. リサイクル容易性評価に着目した環境配慮型製品設計支援ツール | 馬場孝夫・ムルター・ニアル | 5 | 349 |
| 8. エコマテリアル | 馬場文明 | 5 | 353 |
| 9. 太陽光発電への取組 | 岸添義彦・有本 智 | 5 | 357 |
| 10. 環境に優しいコジェネレーションシステム | 加治屋 脩 | 5 | 361 |
| 11. オゾンによる環境負荷低減技術 | 小沢建樹・広辻淳二・神谷俊行 | 5 | 365 |
| 12. 燃料電池発電システム | 三好英明・田熊良行・大谷 徹・村橋俊明 | 5 | 369 |
| 13. MDUブレーカ／電力計測ユニットによる省エネルギー管理支援システム | 有信一郎・川口真由 | 5 | 373 |
| 14. トロリーバスなど交通車両の省エネルギー | 古田俊久・宮園博之・児島 繁 | 5 | 377 |
| 15. 自動車の有害排出ガス低減とEGRバルブ | 三宅俊彦・三好帥男・岡田英俊 | 5 | 381 |
| 16. 蓄熱空調システムの動向 | 岩瀬 進 | 5 | 385 |

特集“オープン分散計装制御システム／最新の火力発電技術”

| | | | |
|-------------------------|-----------------|---|-----|
| 1. オープン分散計装制御システムの現状と展望 | 岡村 繁・江上憲位・菊地原博夫 | 6 | 392 |
|-------------------------|-----------------|---|-----|

| | | | |
|--------------------------------------------|--------------------------|---|-----|
| 2. オープン分散計装制御システムのコントローラ | 戸田明男・佐藤千春・大川裕利・織田修司 | 6 | 397 |
| 3. オープン分散計装制御システムのヒューマンインタフェース | 清水広之・巻田幸司・森岡雄二・井上敦士 | 6 | 402 |
| 4. オープン分散計装制御システムのオープン分散ネットワーク | 田中康博・矢口幸男・神余浩夫・水沼一郎 | 6 | 408 |
| 5. オープン分散計装制御システムのエンジニアリング | 廣島郁芳・中村正博・杉谷 穰 | 6 | 412 |
| 6. 上下水道分野におけるオープン分散計装制御システム | 安藤 隆・池田洋一・中川貴雄 | 6 | 417 |
| 7. 一般工業分野におけるオープン分散計装制御システム | 西元朗雄・那須広実・中村修一 | 6 | 422 |
| 8. 発電原子力分野におけるオープン分散計装制御システムとそのエンジニアリングツール | 小倉啓七・原田和世・小菅真人 | 6 | 426 |
| 9. 火力発電設備における現状と展望 | 岡村信行・赤木一夫・濱本総一 | 6 | 432 |
| 10. 大容量タービン発電機における最新技術 | 河瀬千春・中野直広・鈴木 市 | 6 | 436 |
| 11. 発電機励磁制御による電力系統安定度向上技術 | 下村 勝・田中誠一・夏 毓鷗・北村仁美 | 6 | 439 |
| 12. タービン監視計器における最新技術 | 藤田高規・高木雄二・浅田幸広 | 6 | 443 |
| 13. 火力発電所における監視制御システムの動向 | 山田正成・松野聡之・船越淳司 | 6 | 447 |
| 14. 火力発電設備監視制御室トータルデザイン | 伊藤伸哉・金子達史 | 6 | 451 |
| 15. 配線工事における最新技術 | 塚田光政・佐藤 寛・佐々木順一 | 6 | 456 |
| 16. 経年火力発電所での最新の監視・制御システム | 土手内 巧・武田和茂・阿南義憲 | 6 | 459 |
| 17. 中国電力(株)三隅発電所第1号機の概要と適用技術 | 百地照雄 | 6 | 463 |
| 特集 “パワーエレクトロニクス/光・マイクロ波デバイス” | | | |
| 1. パワーエレクトロニクスの現状と展望 | 打田良平・桑原秀夫 | 7 | 470 |
| 2. 高耐圧・大容量パワーデバイスの技術動向 | 山元正則・石井一史 | 7 | 475 |
| 3. 電力系統用パワーエレクトロニクス機器 | 細川靖彦・伊与田 功・城地慎司 | 7 | 480 |
| 4. 鉄鋼プラント用可変速ドライブシステム | 小川晴毅・下村弥寿仁・山口弘昭 | 7 | 487 |
| 5. 鉄道車両用3.3kV HVIPMインバータ | 菊池高弘・田中 毅・大山裕二 | 7 | 491 |
| 6. 省エネルギー高圧インバータ“MELTRAC-F500HVシリーズ” | 土本直秀・磯田昭二・桑田朗子 | 7 | 495 |
| 7. エレベーター駆動制御システム | 山川茂樹・後閑 博・池島宏行 | 7 | 499 |
| 8. 汎用モニタリング機能を搭載した中・大容量UPS | 森 治義・真田和法・池内謙二 | 7 | 503 |
| 9. 光・マイクロ波デバイスの現状と展望 | 松川隆行 | 7 | 508 |
| 10. 長距離伝送用2.5Gbps変調器集積半導体レーザ | 石村栄太郎・多田仁史 | 7 | 513 |
| 11. 2.5GbpsアンカールドDFBレーザモジュール | 柴田公隆・渡辺 斉・小柳晴揮 | 7 | 517 |
| 12. CD-R/RW用780nm帯低動作電流型レーザ | 西口晴美・島 顕洋・川津善平 | 7 | 521 |
| 13. DVD-RAM用650nm帯70mWレーザ | 坂本善史・山下光二・島 顕洋 | 7 | 525 |
| 14. 基地局用高出力FET | 國井徹郎・後藤清毅・藤井憲一 | 7 | 529 |
| 15. 地上マイクロ波リンク用K/Ka帯MMIC増幅器 | 小丸真喜雄・茶木 伸・石田多華生 | 7 | 533 |
| 16. 携帯電話用0.1cc送信電力増幅モジュール | 片山秀昭・井上 晃・中本隆博 | 7 | 537 |
| 特集 “センシング技術” | | | |
| 1. センシング技術の役割と変革に向けて | 小林 彬 | 8 | 544 |
| 2. 三菱電機のセンシング技術の現状 | 宇佐美照夫 | 8 | 548 |
| 3. 送変電機器用故障診断システム | 前川 洋・篠原秀雄 | 8 | 552 |
| 4. 光給電・光通信による携帯型ワイヤレスデータ収集システム | 中島利郎・鹿井正博・池田郁夫・柄尾 篤 | 8 | 556 |
| 5. 光ファイバ放射線モニタ | 西浦竜一・岡 徹・池田郁夫・津高良和 | 8 | 560 |
| 6. 鉄鋼用形状センサ | 杉山昌之・田壺宏和・中島利郎・植木勝也・鹿井正博 | 8 | 564 |
| 7. がん治療用深部線量測定装置 | 西沢博志・藤原博次・津高良和・池田郁夫 | 8 | 570 |
| 8. フィールドバスによる排水処理計装システム | 平位隆史・平井敬秀・佐々木文夫 | 8 | 574 |
| 9. エレベーターインテリジェント化のためのセンサ | 小浦邦和・高橋達司・額綱雅彦・水野滋基 | 8 | 578 |
| 10. 画像レーダ技術 | 岩本雅史・山本和彦・桐本哲郎・志村誠一・原 芳久 | 8 | 582 |
| 11. 赤外線カメラとその応用 | 高橋 進 | 8 | 586 |
| 12. 宇宙用観測EOセンサ | 森本幸博・玉川恭久・鈴木浩志 | 8 | 590 |

| | | | |
|------------------------------|--------------------------|---|-----|
| 13. 携帯端末における撮像センサを用いた画像入出力装置 | 井上禎之・植田信夫・的場成浩・大深輝孝・麻生陽平 | 8 | 594 |
| 14. 家電製品用センサのインテリジェント化 | 長田正史 | 8 | 598 |
| 15. ロボット用ビジョンセンサ | 橋本 学・鷺見和彦・小平紀生 | 8 | 602 |
| 16. エアバッグ用容量式半導体加速度センサ | 番 政広・大谷 浩・荒木 達・平田善明 | 8 | 606 |

特集 “設計業務を革新する設計システム技術／進展するFA駆動制御技術”

| | | | |
|----------------------------------------------------|---------------------------|---|-----|
| 1. 設計プロセス革新への取組 | 清尾克彦 | 9 | 614 |
| 2. システムレベル協調設計・検証技術 —— 組み込みソフトウェアとハードウェアの協調設計検証 —— | 安田光宏・鍋田芳則・楠原崇史 | 9 | 619 |
| 3. システムLSI応用製品の品質向上をねらいとした検証・テスト技術 | 橋田光弘・中野 哲・君島達也 | 9 | 623 |
| 4. オブジェクト指向組み込みソフトウェア設計技術 | 原島忠雄・松井聡一・森 重文 | 9 | 627 |
| 5. タービン発電機への三次元設計適用 | 庄山高央・岡本紘一・玉木政守 | 9 | 631 |
| 6. プリント基板設計PDMシステム | 赤坂広樹・脇田次郎・西野義典・齋藤光司 | 9 | 635 |
| 7. スイッチギヤ設計システムの統合化 | 勝山恒吉・仁志真由美・大津智弘・野口敬介・岩本直子 | 9 | 639 |
| 8. ファミリーツリー中心設計システム | 花村輝之・佐藤尚之・前川宗久 | 9 | 643 |
| 9. FAを取り巻く駆動制御技術の動向と展望 | 松本圭二・瀬戸 誠・竹垣盛一 | 9 | 648 |
| 10. ファン、ポンプ用省エネルギーインバータ“FREQROL-F500シリーズ” | 桜井寿夫・木全政弘・永瀧美博 | 9 | 653 |
| 11. 小型高性能汎用インバータ“FREQROL-E500シリーズ” | 池下 互・朝長慎三・市川広樹 | 9 | 657 |
| 12. 次世代汎用サーボアンプ“MELSERVO-J2 Superシリーズ” | 井川 康・長野鉄明・池田英俊 | 9 | 661 |
| 13. インテリジェントサーボモータ“HSシリーズ” | 堤下洋治・佐野修也 | 9 | 667 |
| 14. 高応答・高精度リニアサーボシステム | 加知光康・筒井和彦・加藤和彦 | 9 | 671 |
| 15. 省エネルギー機器としての誘導電動機 | 吉野 裕・中本道夫 | 9 | 676 |
| 16. 埋め込み磁石型同期モータと駆動技術 | 貝谷敏之・松原浩樹・度会 明 | 9 | 680 |

特集 “動き出したITS”

| | | | |
|----------------------|--------------------------|----|-----|
| 1. ITSの最近の動向と当社の取組 | 大石將之・鷺野翔一 | 10 | 688 |
| 2. ITSのインフラ系要素技術 | 内原正一・黒田伸一・野田博司・山根信吾・伊東正雄 | 10 | 696 |
| 3. ITSの車載系要素技術 | 佐藤真一・赤須雅平・堤 和道・浅山嘉明 | 10 | 700 |
| 4. ITSの広域移動通信技術 | 児山淳弥・小野英世 | 10 | 704 |
| 5. 車載ナビゲーションシステム | 横内一浩・井手野宏昭・太田正子 | 10 | 709 |
| 6. ノンストップ自動料金収受システム | 加藤博光・広岡右字・毛利徳彦・石津文雄・檜枝護重 | 10 | 714 |
| 7. AHS：走行支援道路システム | 三好哲夫・内藤初彦・堀口 彰 | 10 | 718 |
| 8. 新物流情報システム | 川上眞二・福地陽一・平野昌彦 | 10 | 722 |
| 9. ISO/TC204の現状 | 福田 稔 | 10 | 726 |
| 10. 欧米における道路通信の標準化動向 | 松永 誠 | 10 | 730 |
| 11. システムアーキテクチャ | 播口正雄 | 10 | 734 |
| 12. ITS評価シミュレータ | 熊沢宏之・後藤幸夫・伊川雅彦・中堀一郎・大石將之 | 10 | 738 |
| 13. 複合センサシステム | 岡田隆光・辻道信吾・小菅義夫・春山鉄男 | 10 | 742 |
| 14. 自動車用小型スキャンレーザレーダ | 赤須雅平 | 10 | 746 |

特集 “ウエルネス”

| | | | |
|-----------------------------|---------------------------|----|-----|
| 1. ウエルネスシステムの現状と展望 | 前田満雄・平山正治・藤山 浩 | 11 | 754 |
| 2. ストレングスエルゴ | 水庫 功・吉田光伸・吉田敬三・鈴木浩徳 | 11 | 761 |
| 3. 介護サービス相談システム“佐々衛門” | 仲谷美江・辻野克彦 | 11 | 765 |
| 4. 赤外線音声情報案内システム“トーキングサイン” | 久良知國雄・大久保紘彦・伊藤啓二 | 11 | 769 |
| 5. 分散仮想環境を用いた医療応用システム | 前田慎司・高橋克英・福岡久雄・下間芳樹・二瓶健次 | 11 | 773 |
| 6. 高知県保健・医療・福祉情報システム | 山田晃男・小南 貢・菊地 豊・森口博基・浜田加代子 | 11 | 777 |
| 7. ベッドサイドウエルネスシステムのがん患者への適用 | 大須賀美恵子・小山博史 | 11 | 782 |
| 8. 眼科手術シミュレータシステム | 向井信彦・原田雅之・室井克信・寺田尚史 | 11 | 786 |
| 9. ユニバーサルデザイン | 宮地泰造・大矢富保・酒寄映子 | 11 | 790 |

| | | | |
|----------------------------------------------------------|---------------------|----|----------|
| 10. ウェルネス分野のCo.Solution及び遠隔医療を含む広域ウェルネス情報ネットワーク | 浅野和彦・小西秀俊 | 11 |794 |
| 11. 三菱病院情報システム“DIAKARTE(ダイヤカルテ)” | 倉岡立郎・中津佳彦・伊東十三男 | 11 |798 |
| 12. 介護サービス支援システム | 長束晴弘・平島保彦 | 11 |802 |
| 13. 在宅妊婦遠隔診療支援システム“エンゼルケア” | 西田正実・松室昌宏・小室久美子 | 11 |806 |
| 特集Ⅰ「大型光学赤外線望遠鏡“すばる”」 | | | |
| 1. すばる望遠鏡に用いた主要技術と観測成果 | 三神 泉・伊藤 昇 | 12 |818 |
| 2. 主鏡鏡面精度保持技術 | 宮脇啓造・田畑真毅 | 12 |823 |
| 3. 超大型超高精度鏡製作技術 | 斉藤秀朗・谷本亜紀 | 12 |829 |
| 4. 高い天体追尾精度を実現する望遠鏡駆動制御技術 | 浅里幸起・香月良夫・清水岳男 | 12 |835 |
| 5. 良好なシーイング環境を確保する望遠鏡まわりの風速制御技術 | 三神 泉・石川 幹・古藤 悟 | 12 |839 |
| 6. すばるの性能を維持するための望遠鏡保守技術 | 石川 幹・三神 泉 | 12 |843 |
| 特集Ⅱ「パワーデバイス」 | | | |
| 1. パワーデバイスチップの技術動向と展望 | 萩野浩靖 | 12 |848 |
| 2. 家電インバータ用超小型DIP-IPM | 岩崎光孝・川藤 寿・岩上 徹 | 12 |853 |
| 3. 第四世代IGBTモジュール | 山口博史・山下潤一・田畑光晴 | 12 |857 |
| 4. 逆阻止形GCTサイリスタ | 佐藤克己・山元正則・高田育紀 | 12 |861 |
| 5. 1,200V級のHVICプロセス | 清水和宏・寺島知秀・守谷純一・日根史郎 | 12 |865 |
| 6. SiC素子技術 | 杉本博司・樽井陽一郎・今泉昌之 | 12 |869 |

普通論文

| | | | |
|----------------------------|---------------------|----|----------|
| 1. FREQUUPSシリーズ無停電電源装置 | 伊藤勝彦・山本 学 | 11 |810 |
| 2. 関西電力(株)ワン・ストップ・サービスシステム | 不動弘幸・岡村 彰・望月美彦・秩父基浩 | 12 |873 |

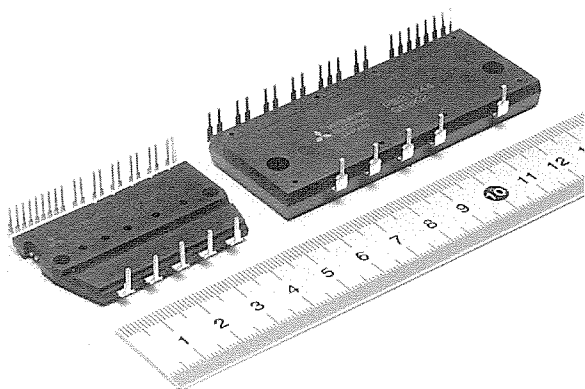
スポットライト

家電インバータ用DIP-IPM Ver.2シリーズ

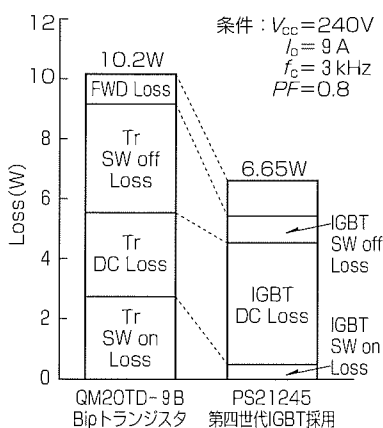
近年、産業・民生等の分野で省エネルギー、省電力を推進するため、製品のインバータ化が急速に進んでいます。このような動きの中で、特にエアコン、冷蔵庫、洗濯機等の小容量モータ駆動のインバータの応用分野では、インバータのコンパクト化と更なるコストパフォーマンスの追求、及び信頼性の向上が望まれています。

さらに、省エネルギー法の改正に伴い、家電製品のインバータ化の促進とインバータ自身の低損失化が望まれています。

今回、このような要求にこたえるため、従来のDIP-IPMのオールシリコンソリューションのコンセプトを継承し、さらに、最先端の微細加工技術を用いて第四世代プレーナ構造IGBTを搭載し、これまでのDIP-IPMよりも低損失化を実現しました。また用途に応じ、高速・低速の2タイプと電流容量に応じ2パッケージを用意しました。



家電インバータ用 DIP-IPM Ver. 2 の外観
 左：小型パッケージ(5A, 10A) 右：大型パッケージ(15A, 20A)



エアコン用IPM/DIP-IPMの電力損失の低減

特長

1. 家電インバータの低損失化を実現

第四世代プレーナ構造IGBTを搭載し、飽和電圧を当社第三世代品と比較して10%下げることにより、インバータの低損失化にこたえます。従来のバイポーラトランジスタモジュールとの比較では、主回路部分で35%の低損失化を実現しています。

2. トランスファームールドパッケージの採用で小型化を実現

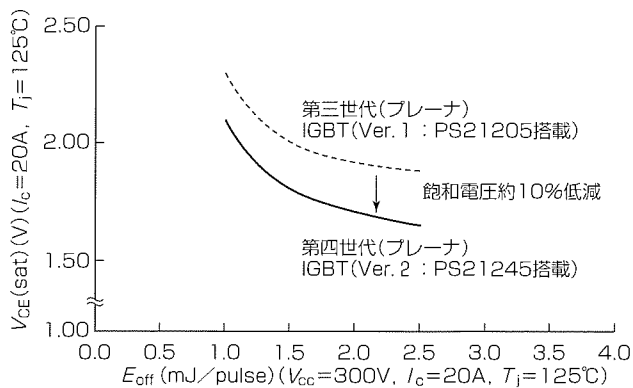
三相インバータ回路を構成するIGBTとFWD、これらの駆動・保護・診断をつかさどるHVICとLVIC、及び絶縁・放熱の各機能をトランスファームールド技術によって一体化してIPM化することで、小型化と信頼性の向上を追求しています。

3. HVIC内蔵によってフォトカプラレス化・単電源化を実現

従来のIPMではマイコン等の制御回路との絶縁にフォトカプラが必要でしたが、HVICを搭載しレベルシフト機能を内蔵することで、フォトカプラレス化を実現しました。また、HVICのCMOS構造化による消費電力の低減とブートストラップ電源方式採用により、従来の三相インバータ回路では最低4電源必要であった制御電源の単電源化を可能としました。

4. 保護回路の内蔵

過電流や制御電源の低下など異常動作に対する保護回路を内蔵し自己保護を図ることで、システムの信頼性向上に貢献します。



第三世代及び第四世代のIGBTトレードオフ比較

家電インバータ用DIP-IPM Ver. 2 の主な定格・特性

| 形名 | 主な用途 | スイッチング周波数 | パッケージ | IGBT定格電流/電圧 | 飽和電圧 ($T_a=25^\circ C$, 定格電流) |
|---------|------------|-----------|-------|-------------|---------------------------------|
| PS21352 | 冷蔵庫 洗濯機 | 高速 | 小型 | 5A/600V | 1.8V |
| PS21353 | 洗濯機 | 高速 | 小型 | 10A/600V | 1.8V |
| PS21244 | エアコン | 低速 | 大型 | 15A/600V | 1.65V |
| PS21245 | エアコン | 低速 | 大型 | 20A/600V | 1.65V |