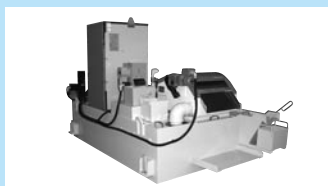
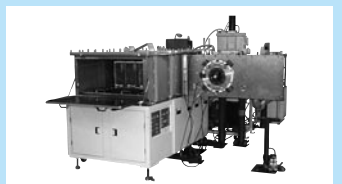
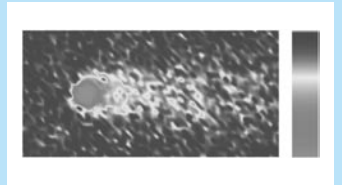
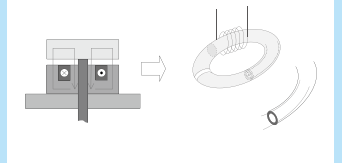
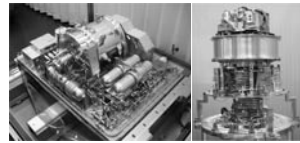


住友重機械技報

**Sumitomo
Heavy Industries
Technical Review**

No.173 Aug. 2010



住友重機械技報 No. 173 2010

論文・報告	宇宙ステーション搭載SMILES冷却システム	恒松正二, 檜崎勝弘, 岡林明伸	1
	ほう素中性子捕捉療法用がん治療装置	密本俊典	7
	平面研削盤のびびり解析	市原浩一, 石田浩修	11
	砥粒回収マグネットセパレータ ファインマグ	巖 義輝	17
	蒸気タービンの高効率化	浜田周作, 菊地知希, 中西良輔	21
	電磁型締装置のモデリングと制御	加藤 敦, 森田 洋	25
	くりこみ群分子動力学法による流れの計算機実験	市嶋大路, 広瀬良太, 大西良孝	29
	イオン照射によるパワー半導体特性の改善	坂根 仁	33
技術解説	MINDシステムー先端半導体デバイス歩留まり向上注入技術	二宮史郎	37
新製品紹介	カウンタ式電気フォークリフト用バッテリー液自動補水装置		39

T/PAPER	Cryogenic System for SMILES	Shoji TSUNEMATSU, Katsuhiro NARASAKI, Akinobu OKABAYASHI	1	
	Cancer Therapy System for Boron Neutron Capture Therapy	Toshinori MITSUMOTO	7	
	Analysis Method on Chatter Mechanism of Surface Grinding Machine	Kouichi ICHIHARA, Hironobu ISHIDA	11	
	Grinding Abrasive Recovery FINEMAG	Yoshiteru IWAO	17	
	Improvement in Steam Turbine Efficiency	Shusaku HAMADA, Tomoki KIKUCHI, Ryosuke NAKANISHI	21	
	Modeling and Control of Electromagnetic Molding Machine	Atsushi KATO, Hiroshi MORITA	25	
	Computer Experiments of Flow Fields by Renormalized Molecular Dynamics Method	Daiji ICHISHIMA, Ryota HIROSE, Yoshitaka OHNISHI	29	
	Characteristic Improvement of High Power Semiconductor by Ion Irradiation	Hitoshi SAKANE	33	
	T/INVITATION	Mapping of Intentional Non-uniform Dosage System	Shiro NINOMIYA	37
		NEW PRODUCT	Automatic Battery Water Charger for Electric-CB Forklift	39

宇宙ステーション搭載SMILES冷却システム

Cryogenic System for SMILES

● 恒松正二* 植崎勝弘* 岡林明伸*
Shoji TSUNEMATSU Katsuhiko NARASAKI Akinobu OKABAYASHI



SMILES冷却システム
SMILES cryogenic system



Inside of cryostat

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)は、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟(JEM)に搭載され、運用されている。SMILESは、二つの超伝導/絶縁体/超伝導(SIS)ミキサにより、サブミリ波で大気観測を行うミッションであり、このSISミキサは、当社が製作した2段スターリング冷凍機、ジュール・トムソン(JT)回路冷凍機および三つの冷却ステージを有するクライオスタットに組み込まれ、4Kレベルに冷却される。

SMILESは、2009年9月11日に種子島宇宙センター(TNSC)から打ち上げられ、冷却システムは冷却開始後約70時間で4.1Kに到達し、その後、観測が開始された。現在も軌道上でかなり少ない消費電力で順調に運用され、約4500時間が経過している。

Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder(SMILES) has been operated aboard the Japanese Experiment Module(JEM) of the International Space Station(ISS). SMILES uses two superconductor-insulator-superconductor(SIS) mixers to conduct atmospheric observation based on submillimeter waves. These SIS mixers, which are assembled into our cryogenic system equipped with a two-stage Stirling cycle cooler, a Joule-Thomson(JT) cycle cooler, and a cryostat composed of three stages, are cooled to the temperature level of 4K. SMILES was launched on September 11, 2009(UT) from the Tanegashima Space Center(TNSC). The cryogenic system reached 4.1K in about 70 hours after it began the cooling task, and the observation was initiated. The cryogenic system is now being operated successfully with significantly less power consumption in orbit. This system has been working for about 4500 hours.

1 まえがき

国際宇宙ステーションISS(International Space Station)は、高度330~460 kmの低軌道を1周約90分で周回する巨大な有人実験施設である。アメリカ、日本、カナダ、欧州各国およびロシアが参加する国際協力プロジェクトであり、日本は「きぼう」日本実験棟を開発し、参加している。このISSの「きぼう」船外実験プラットフォームに搭載される超伝導サブミリ波リム放射サウンダSMILES(Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder)は、外形1.85×1×0.8m、質量500 kg、ノミナル電力900 Wのサブミリ波受信機である。高感度の超伝導センサを使用し、オゾン層破壊や

温暖化現象解明の鍵となる大気超微量成分が放射する固有のサブミリ波を進行方向から斜め左約2000 km先の大気のリムを観測することにより検出し、そのグローバル分布を連続観測することがSMILESのミッションである⁽¹⁾。SMILESは、宇宙ステーション補給機HTV(H-II Transfer Vehicle)技術実証機に搭載され、H-IIBロケット試験機により、2009年9月11日午前2時01分26秒に、独立行政法人宇宙航空研究開発機構の種子島宇宙センターから打ち上げられた。9月18日にISSにドッキングし、9月28日以降、SMILESの二つの超伝導センサは、冷却システムにより4Kレベルに冷却され、現在、観測が続けられている。

当社は、SMILESの心臓部ともいえる冷却システム(2段

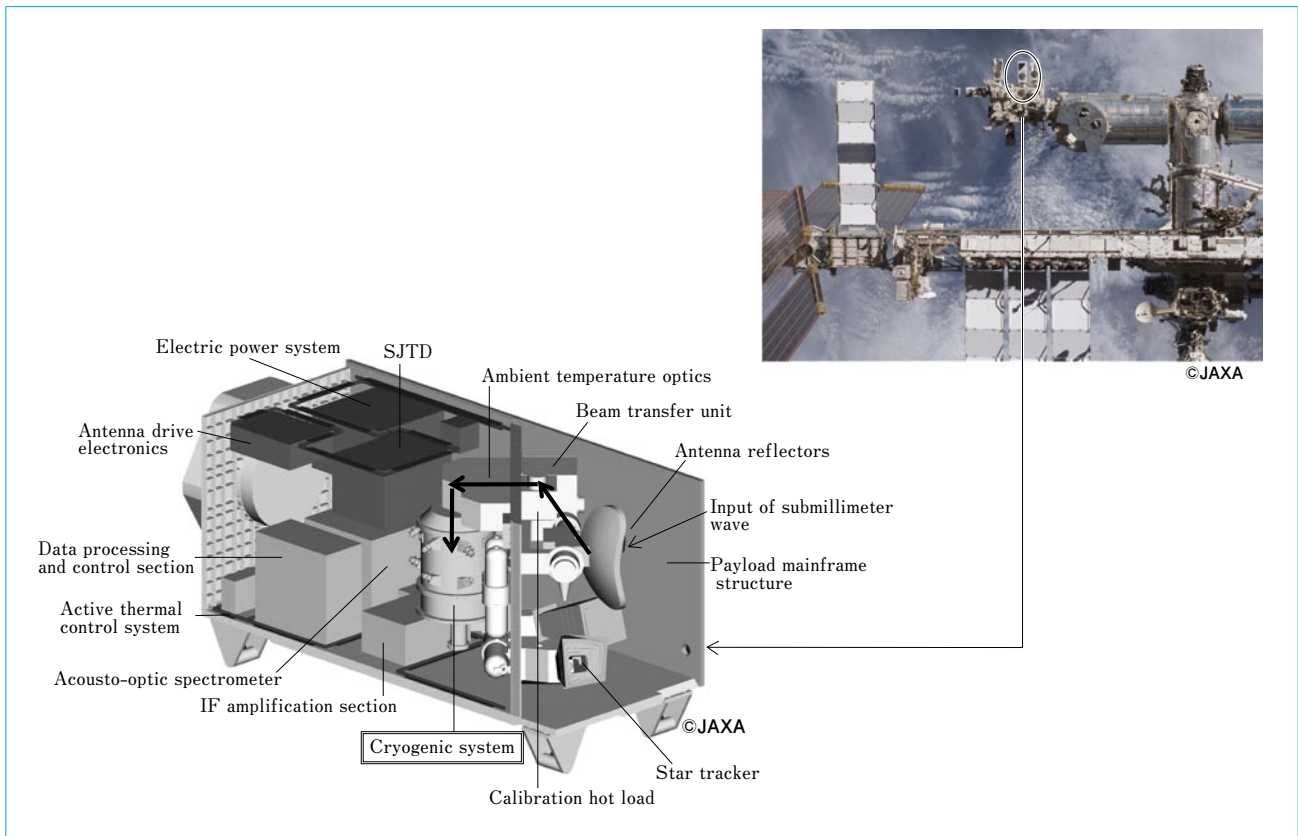


図1 SMILESシステム構成
SMILES system configuration

表1 SMILES冷却システム要求仕様
Specifications for SMILES cryogenic system

Items	Specifications
Cooling capacity (Additional heat loads)	4 K stage for SMX ≥ 1 mW at 4.5K 20 K stage for CAMP ≥ 20 mW at 20K 100 K stage for CAMP ≥ 30 mW at 100K
Temperature stability	4 K stage ≤ 0.05 K/min 20 K stage ≤ 0.2 K/min 100 K stage ≤ 0.2 K/min
Receiver components	Optical window 25 mm in diameter 2 sets of CAMP on 100 K stage, 120 g per each 2 sets of CAMP on 20 K stage, 145 g per each COPT with two SMX on 4 K stage ≤ 410 g
Electromagnetic shield	For cryostat ≥ 40 dB
Power consumption	≤ 160 W (Except driver electronics)
Mission life	\geq One year

スターリング冷凍機、ジュール・トムソン回路冷凍機、クライオスタットおよび駆動制御回路部(SJD))のほか、排熱用流体制御系、電波校正源および主構造パネルを製作した。図1に、SMILESのシステム構成を示す。

本報では、この冷却システムとその軌道上性能について報告する。

2 SMILES 冷却システム

2.1 要求仕様

冒頭の写真にSMILES冷却システムを、表1にSMILES冷却システムへの要求仕様を示す。

サブミリ波受信機の冷却光学部(COPT)に二つ搭載される超伝導ミキサ(SMX)は4Kレベルに、SMXからの出力信号を低ノイズで増幅する四つの低温増幅器(CAMP)は20Kおよび100Kレベルに冷却する必要がある。

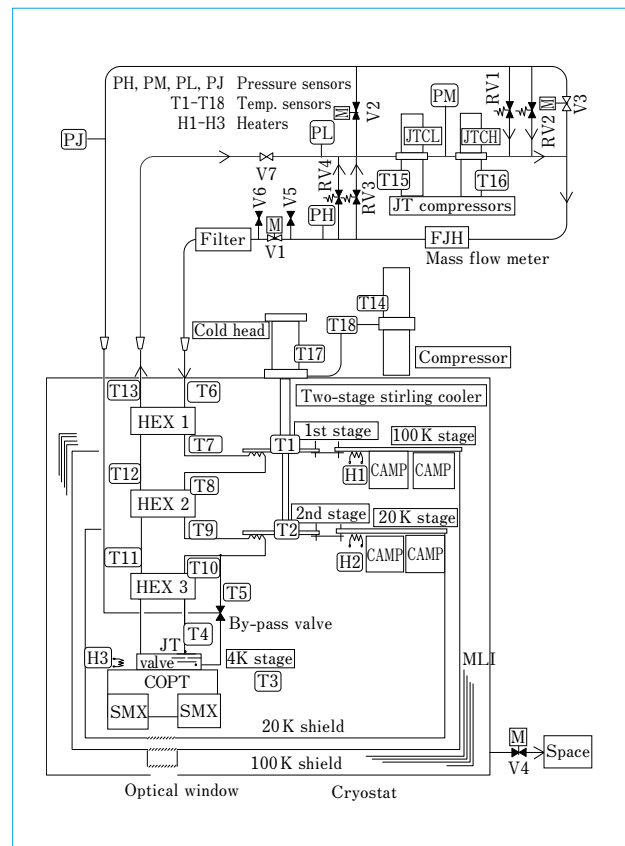


図2 SMILES冷却システムの構成
Configuration of SMILES cryogenic system

クライオスタットは、COPT、SMXおよびCAMPを所定の温度に冷却する三つの冷却ステージを有するとともに、ISSの電磁波環境から受信機を保護するべく、40dB以上の電磁

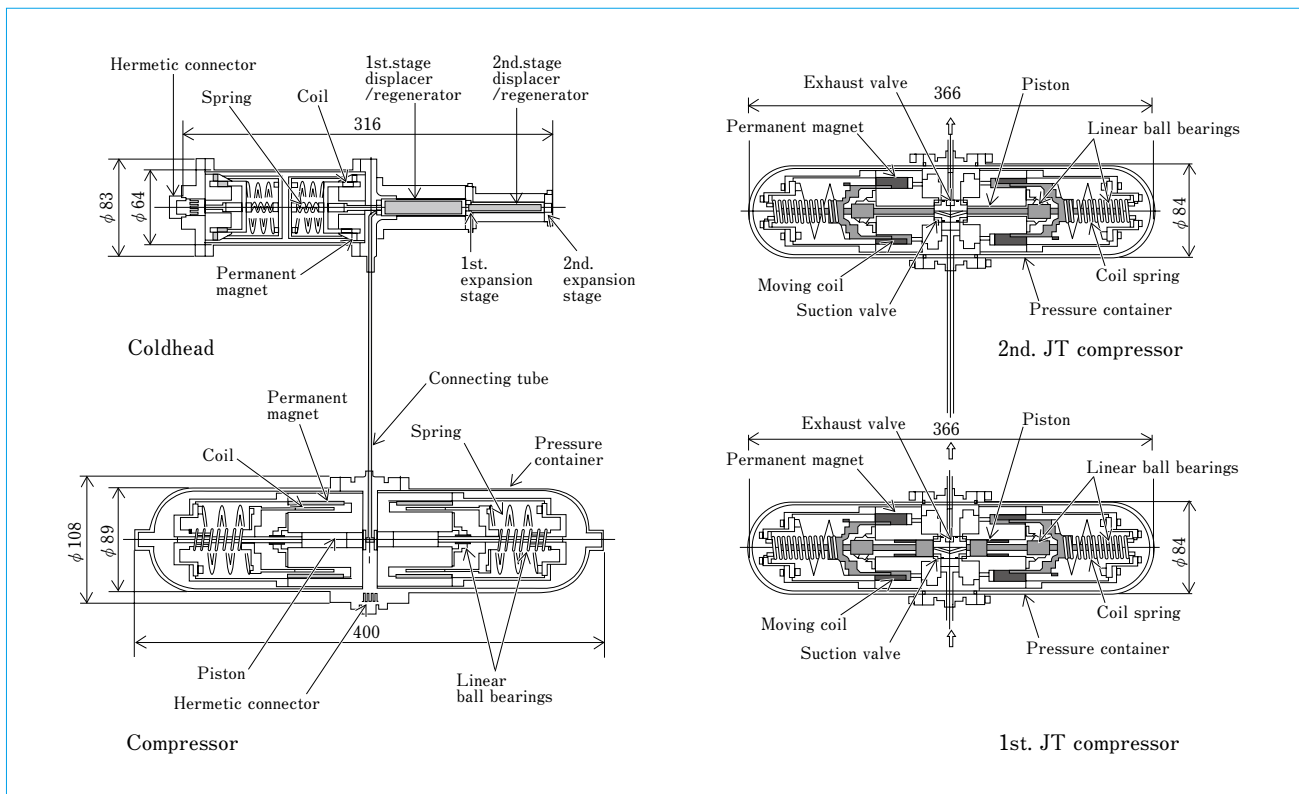


図3 2段スターリング冷凍機およびJT圧縮機断面
Schematic drawing of two-stage stirling cooler and JT compressors

シールド性能も要求されている。

クライオスタットの各冷却ステージを冷却する4 K冷却システムの冷凍機本体に供給される電力は160 W以下であり、冷凍機部の発熱は、「きぼう」船外実験プラットフォームから供給される冷却液(16~24℃)により排熱される。

表1の要求以外にも、耐環境性要求(打ち上げ時の振動、軌道上での熱環境、高真空および放射線など)および有人施設であるISSに関する安全要求を満たす必要がある。

2.2 SMILES冷却システムの構成

SMILES冷却システムの構成を、図2に示す。SMILES冷却システムは、2段スターリング冷凍機と、ジュール・トムソン(Joule-Thomson:JT)回路冷凍機を組み合わせた4 K冷却システムと、4 K冷却システムを組み込み、サブミリ波受信機のCOPT、SMXおよびCAMPを冷却するクライオスタットから構成される。

2.3 4 K冷却システム

4 K冷却システムは、2段スターリング冷凍機、JT圧縮機、熱交換器、JTバルブ、バイパスバルブ、100 K・20 K・4 K冷却ステージ、輻射シールドおよび外部配管系から構成されている。作動ガスは、ヘリウムである。各構成機器の構造を次に示す。

2.3.1 2段スターリング冷凍機

2段スターリング冷凍機の構造を、図3に示す。この冷凍機は、赤外線天文衛星「あかり」⁽²⁾⁽³⁾に搭載(軌道上で4年以上駆動中)されているものと基本構造は同じものであり、二つの冷却ステージを有するコールドヘッド、圧縮機および両者を接続するキャピラリチューブにより構成される。圧縮機は、ツイン対向型リニア駆動ピストン方式を採用している。永久磁石内に電磁コイルと同期用バネが付いたピストンがセ

ットされており、電磁コイルに交流電流を流すことにより、ピストンが往復運動し、このピストンを同一直線上で互いに反対方向に運動させることにより、低振動の運転が得られる。このピストンは、そのシャフトをリニアボールベアリングで支持することにより、長ストロークとピストン/シリンダ間の非接触構造を実現している。

コールドヘッドは、耐圧円筒シリンダの内部に2個の蓄冷器(再生熱交換器)を有しており、その蓄冷器をシリンダ軸方向に移動させる機構は圧縮機と同様のリニア駆動を採用している。圧縮機のピストンと蓄冷器を90度の位相差で正弦波状の動きをさせることにより、逆スターリングサイクルを近似的に実現している。この蓄冷器の移動により発生する振動は、逆位相で駆動させるバランスにより低減される。

耐圧円筒シリンダの外側には、ガラス繊維複合材(GFRP)の筒状のサポートがあり、打ち上げ時の耐振性が強化されている。

この冷凍機は、15 Hzの正弦波電圧で駆動され、冷却能力は電力90 W以下で、次の能力を有する。

2段ステージ 200 mW以上@20 K

1段ステージ 1 W以上@100 K

2.3.2 JT圧縮機

JT圧縮機の構造を、図3に示す。JT圧縮機は同じ圧縮比を持つ2台の圧縮機から構成されており、2段スターリング冷凍機の圧縮機と同等の構造および駆動方式を採用しており、異なる点は吸込み/吐出用の逆止バルブが追加されている点であり、このバルブにより作動流体であるヘリウムガスは一方方向に流れることになる。それぞれの圧縮機に吸い込まれたヘリウムガスが最初に導入されるケーシングは、圧力バッファとして安定した流れを供給することに役立っている。初段

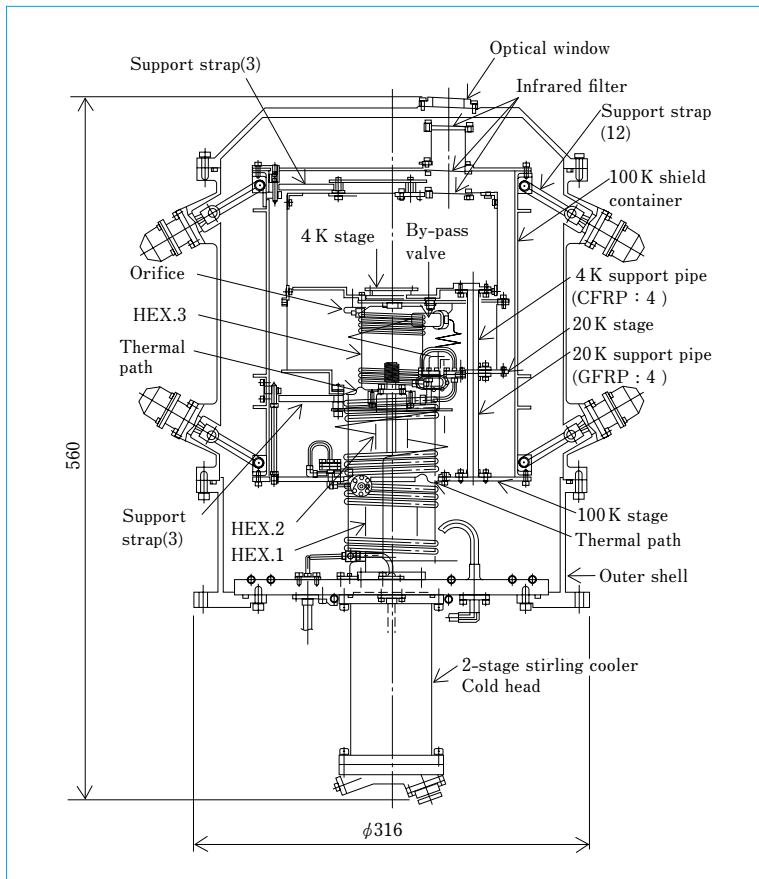


図4 クライオスタット断面
Cross-sectional view of cryostat

のJT圧縮機のケーシング内のガスは、ピストンがシリンダ外端に移動することにより、吸込み用バルブを通して圧縮室に入り、ピストンがシリンダセンターへ向かうと圧縮され、吐出用バルブを通して後段のJT圧縮機に流れる。後段のJT圧縮機も同様に働き、圧縮されたガスが排出される。このJT圧縮機は30Hzの正弦波電圧で駆動され、電力65W以下で次の各項目を満足するように設計されている。

吸込み圧力 約0.1MPa

吐出圧力 約1.6MPa

流量 6 mg/s 以上

作動ガス 常温ヘリウムガス

2.3.3 熱交換器, JTバルブおよび外部配管系

熱交換器は、常温側から第1, 第2および第3熱交換器の三つのコイル型二重管式熱交換器により構成され、高圧ヘリウムガスと低圧ヘリウムガスを向流で熱交換させている。第1および第2熱交換器は全長が約2mで、外管側が高圧、内管側が低圧となっており、高温の高圧側ガスと低温の低圧側ガスの間で効率97%以上で熱交換する。高圧側ガスは、低圧側ガスの他に、第1熱交換器出口で予冷機1段に、第2熱交換器出口で予冷機2段により冷却される。4K~20Kレベルで熱交換する第3熱交換器は、管内圧力損失を小さくするため、外管側が低圧、内管側が高圧となっている。

JTバルブは孔径24 μ mの固定オリフィスであり、クライオスタットの冷却性能試験結果から、常温からの冷却能力および長期運用に対する冷却性能余裕を見込んで孔径を選定した。

バイパスバルブは、第3熱交換器高圧ラインをバイパスする温度20K以下のラインに設置され、このラインを循環経路としない場合は閉とする。バルブの開閉駆動は侵入熱量を抑

えるべく全長約1mの ϕ 1.5mm配管を通してのガス圧駆動としており、開操作時にはJT圧縮機の吸込み圧を、閉操作時にはJT圧縮機の吐出圧を使用する。

外部配管系は、電磁弁、インラインリリーフ弁、圧力センサ、フィルタおよび接続配管により構成され、SJTDによりヘリウムガスの流れを制御している。JT圧縮機からの吐出ガスを第1熱交換器の高圧ラインに供給し、第1熱交換器の低圧ラインからのガスをJT圧縮機の吸込みラインに導いている。また、バイパスバルブの開閉操作も、外部配管系に設置している電磁弁の操作により行っている。電磁弁は消費電力を抑えるべく、駆動時のみ通電するラッチ式を採用している。インラインリリーフ弁は安全性設計上の二重故障許容に配置されており、フィルタはクライオスタット内の低温部への異物の流入防止にJTラインの高圧側に設置されている。

JTバルブおよびバイパスバルブシール面への異物付着は冷却性能へ多大な影響を与える。使用する配管系、特に熱交換器内のクリーニングはその手順および検査工程が非常に重要なものとなる。また、ヘリウム以外のガスは極低温環境下では固化することから、ヘリウムガスラインに使用する材料の選定、およびベーキングや超高純度ヘリウムガスを4Kレベルで精製しながら循環させるアウトガス低減手順も、重要な工程となっている。

2.3.4 動作概要

JT圧縮機で圧縮された高圧ヘリウムガスは第1, 第2および第3熱交換器で戻りの低圧ヘリウムガスと熱交換し、冷却される。さらに、スターリング冷凍機の1段および2段冷却ステージでも冷却される。この冷却された高圧ヘリウムガスは、JTバルブにおいてJT効果(断熱自由膨張)により低圧

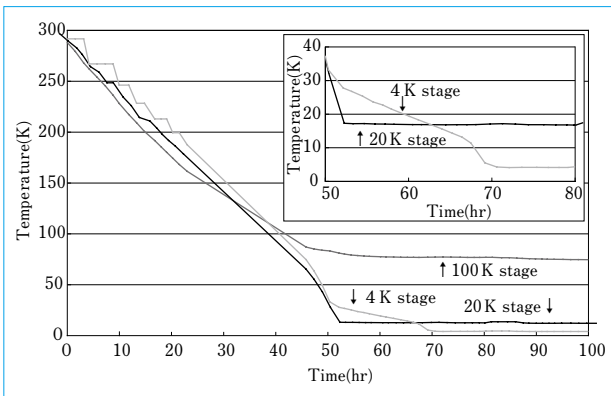


図5 軌道上初期冷却プロファイル
Initial cooling profile on orbit

表2 軌道上冷却性能試験結果
Thermal performance test results on orbit

	Requirements	Test results on orbit
4 K stage	≦ 4.8 K @ 1 mW	4.53 K @ 1.0 mW
20 K stage	≦ 23 K @ 20 mW	17.0 K @ 26.4 mW
100 K stage	≦ 95 K @ 30 mW	76.6 K @ 35.4 mW
Cool down time	≦ 168 hours	69.4 hours
Power consumption		
Two-stage stirling cooler	≦ 100 W	49.6 W
JT compressors	≦ 60 W	18.3 W
Total	≦ 160 W	67.9 W

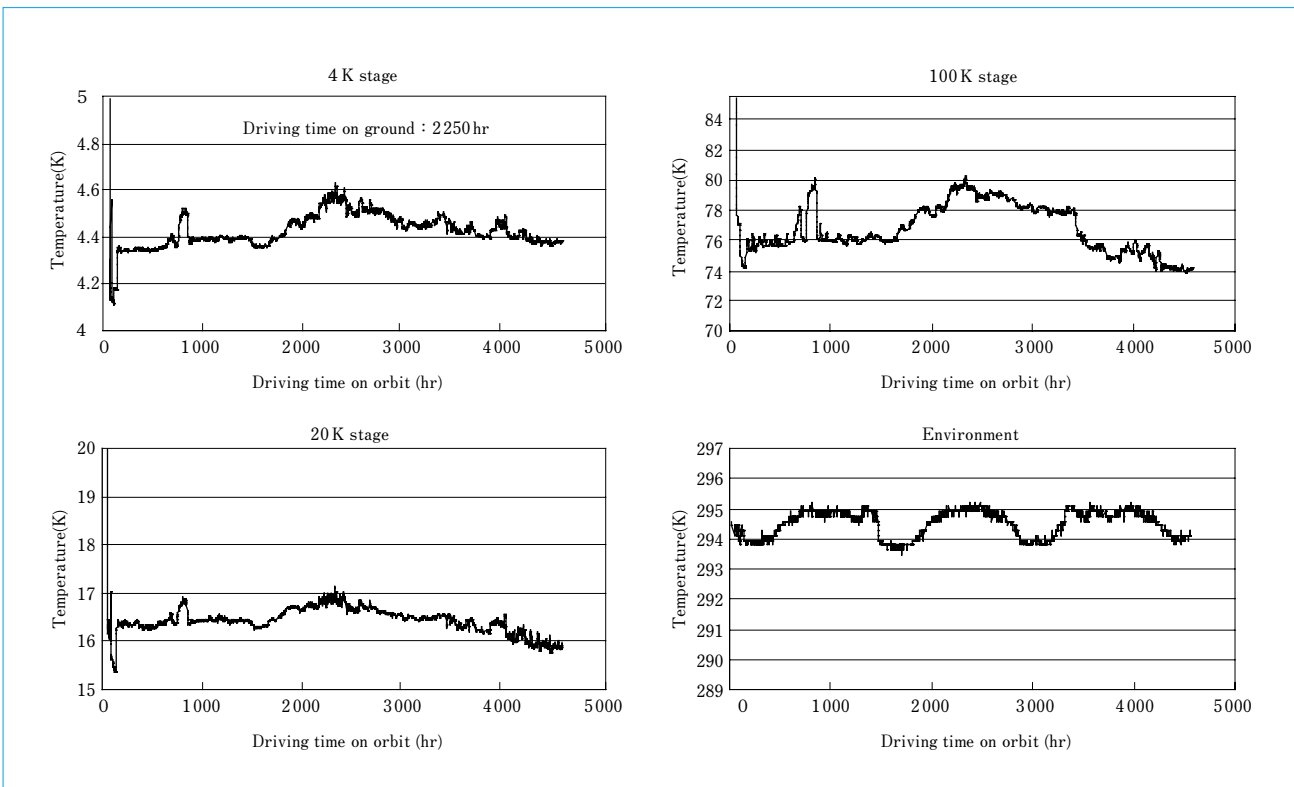


図6 軌道上温度プロファイル
Temperature profile on orbit

のヘリウムミストとなり、液化ヘリウム温度域での冷却能力が発生する。

未液化および蒸発した低圧ヘリウムガスは、熱交換器内で高圧ヘリウムガスを冷却しながら昇温し、第3、第2および第1熱交換器の順に低圧側を通して常温となり、JT圧縮機の吸込み側へ戻り、再びJT圧縮機で圧縮され、循環する。

常温からの運転時には、冷却時間短縮から、JT効果により温度が下がる温度領域になるまでは、第3熱交換器の高圧側をバイパスさせて、スターリング冷凍機で4 Kステージを冷却する。その後、バイパスバルブを閉じ、バイパスラインからJTバルブラインのみに切り換えて、JT効果を利用し4 Kまで冷却する。

以上の4 K冷却システムの駆動制御は、すべてSJTDにより行われ、地上からのコマンドにより運用される。SJTDは、上記以外にも、冷凍機駆動電流、各部温度および圧力測定や、バイパスライン切替えシーケンス制御も行い、異常が発生し

た場合はSJTDが異常処理を実行し、冷却システムを安全な状態で停止させる機能も有している。

2.4 クライオスタット

図4に、クライオスタットの断面を示す。直径316 mm、全長約560 mmのクライオスタットには、真空容器であるアウトシェルに、サブミリ波導入用の窓が1個、4 K冷却システムのうち2段スターリング冷凍機のコールドヘッドと熱交換器およびJTバルブが取り付けられている。クライオスタットの内部には2系統の受信機が装着される4 K、20 Kおよび100 Kステージがある。COPT、SMXおよびCAMPを冷却する4 K、20 Kおよび100 Kステージは、クライオスタットに組み込まれた4 K冷却システムの4 K、20 Kおよび100 K冷却部とそれぞれ熱的に接続されている。

クライオスタット内の各ステージの支持構造は打上げ時の機械環境に耐えるべく、高強度、高剛性が要求される。一方、その支持構造を通じての熱侵入は高効率化の点から低熱伝導

であることが、同時に要求される。100Kステージを支持する100Kシールド容器は、アウトシェルから低熱伝導特性および剛性において優れるGFRPのベルト状のサポートストラップ12本による吊り構造方式で支持している。20Kおよび4Kステージは、それぞれの温度領域での熱伝導特性の違いを考慮して、GFRP製およびCFRP製の薄肉円柱サポート各4本と振れ止めサポートを併用して、100Kおよび20Kステージからそれぞれ支持している。輻射侵入熱を抑えるべく、100Kシールド容器の周囲には多層断熱材(MLI)を取り付け、さらに4Kステージの周囲には20Kシールドを設置している。サブミリ波導入部のアウトシェルと4Kステージの間には赤外線遮断フィルタを3個設置し、4Kステージへの侵入熱を低減している。

ISSの真空環境は、係留されたスペースシャトルから放出される廃棄物などにより、クライオスタット内の真空環境より悪化する場合があることから、クライオスタットには電磁弁制御の真空排気ラインがあり、通常運用時には閉じられている。

40dB以上の電磁シールド性能を満たすべく、クライオスタット各接続部分はメタルOリングあるいはインジウムを使用した金属シール構造を採用しており、ハーネスラインには、EMIフィルタを設置している。

また、SMILES構体パネルを介して宇宙空間に開放される排気ラインには、排気性能への影響を考慮した形状の電磁シールド用アダプタを設置している。

3 軌道上実績

3.1 初期運用

2008年度に納入したSMILES冷却システムは、全体システムに組み込まれ、各種試験にて機能・性能が確認され、打ち上げられた。SMILESは「きぼう」船外実験プラットフォームに搭載された後、9月25日に約1時間クライオスタット内の真空排気を行い、排気ラインの電磁弁を閉じた後、4時24分から冷却を開始し、9月28日1時43分に4.8K以下となり、その後4.1Kに到達した。図5に、温度プロファイルを示す。常温からの冷却時間は69.4時間であり、冷凍機への投入電力は67.89W、各冷却ステージにヒータを負荷する性能確認においても仕様を満足する結果であった。表2に、軌道上冷却性能試験結果を示す。

3.2 観測

現在、SMILESは観測中であり、冷却システム運転時間は、2010年3月末で4500時間となり、打上げ前の地上試験における運転も含めると、約6800時間(約9.4ヶ月)となる。図6に、軌道上における各冷却ステージの温度を示す。各温度が若干変動しているが、これは環境温度の変化によるものと推測される。今後SMILESは軌道上で約1年間の運用を終えた後、再びHTVに搭載され、地球大気圏に再突入し燃焼廃棄される予定である。

4 むすび

- (1) SMILES冷却システム他を2008年度に納入した。
- (2) SMILESは、2009年9月11日にH-II Bロケットにより打ち上げられ、ISS「きぼう」船外実験プラットフォーム

ームに搭載された。

- (3) 冷却システムは、9月24日から冷却を開始し、約70時間後に4.1Kに到達し、その後、観測が開始された。
- (4) 冷却システムの駆動時間は、軌道上で4500時間が経過した。今後、軌道上で約1年の間、観測が行われる。

(参考文献)

- (1) K.Narasaki et al. Development of cryogenic systems for SMILES. *Advanced in Cryogenic Engineering* 49B, 2004, p.1785-1794.
- (2) M.Hirabayashi et al. Thermal design and its on-orbit performance of the AKARI cryostat. *Cryogenics* 48, 2008, p.189-197.
- (3) K.Narasaki et al. Development of Two-stage Stirling Cryocooler for ASTRO-F. *Advanced in Cryogenic Engineering* 49, p.428-1435.

ほう素中性子捕捉療法用がん治療装置

Cancer Therapy System for Boron Neutron Capture Therapy

● 密本 俊典*
Toshinori MITSUMOTO



BNCT用加速器中性子源に使用されるHM-30サイクロトロン
HM-30 cyclotron utilized in accelerator based BNCT system

ほう素中性子捕捉療法(BNCT)は、選択的にがん細胞に集まるほう素薬剤と中性子を照射によりがん細胞を破壊する治療法である。この治療法に、中性子源としてサイクロトロンを利用した加速器中性子源を国立大学法人京都大学と共同で開発した。

中性子源用として新たに開発されたサイクロトロンは、陽子30MeV、1.1mAの加速を達成した。この陽子ビームをベリリウムターゲットに当てることにより、中性子を発生させる。中性子は、減速材により熱外中性子のエネルギー範囲にまで減速する。中性子の特性は水ファントムにより測定され、ファントム中の熱中性子束のピーク値は陽子電流1mA当たり 1.8×10^9 neutrons/cm²/sを達成した。この中性子を利用して安全性・効果確認試験が行われており、加速器中性子源によるBNCTがん治療に向けて準備が進められている。

Boron neutron capture therapy(BNCT) is a cancer therapy where cancer cells are damaged by using neutron irradiation and boron compounds, which are selectively gathered in cancer cells. We developed an accelerator-based neutron source that utilizes the cyclotron as a neutron source, in cooperation with Kyoto University. Our cyclotron, which is newly developed as a neutron source, achieves a stable acceleration of protons to 30MeV at a current of 1.1mA. The proton beam produced in the cyclotron is transported to the beryllium target to generate neutrons. The neutrons are decelerated by the moderator and their energy levels fall within the energy range of the epithermal region. Characteristics of the neutrons were measured with water phantom, and the peak of the thermal neutron flux in the water phantom reached 1.8×10^9 neutrons/cm²/s per 1mA of proton beam. By using this neutron beam, safety and effectiveness tests have been performed to realize the cancer therapy by BNCT with the accelerator based neutron source.

1 まえがき

中性子とほう素薬剤を併用してがん治療を行うほう素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy BNCT)は、これまでの放射線治療では治療困難であった浸潤性あるいは放射線抵抗性のあるがんにも効果がある治療法として、近年注目されてきている。ほう素の安定同位体である¹⁰Bは、熱中性子に対して3837barnという大きな反応断面積をもってい

る。この値は、人体構成元素の2000倍以上の値である。この反応は、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ により高LETの α 粒子と⁷Li原子核を放出する。生体内における飛程はそれぞれ9 μm と4 μm であり、細胞の大きさに相当している(図1)。¹⁰B元素を選択的にがん細胞に取り込ませることができれば、中性子を照射することによりがん細胞だけを破壊することが原理的に可能となる。BNCTは細胞ごとの、すなわち μm 単位の放射線治療とすることができる。

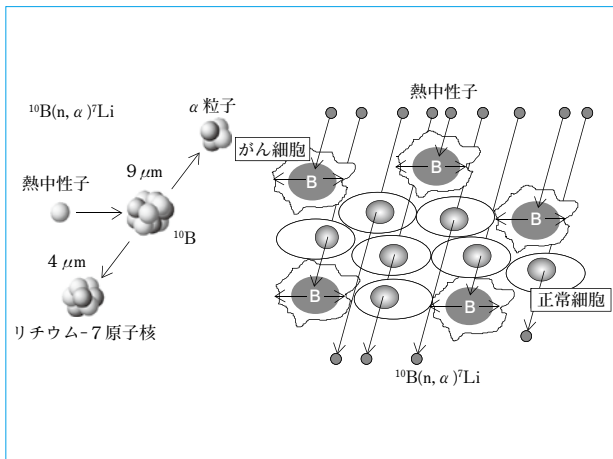


図1 BNCTの原理
Schematic of boron neutron capture therapy

また、がん細胞だけに大量の線量を与えることができることから、照射回数が1～2回で治療ができる。これまでのX線治療では、10回以上の照射が必要であるので、通院の負担が少ないのも特長である。

現在、ほう素を含む薬剤としては、ボロカプテイト(BSH)とボロフェニルアラニン(BPA)が臨床研究に用いられている。天然のほう素は ^{10}B および ^{11}B がそれぞれ20%と80%であるが、これらの薬剤に使われるほう素は ^{10}B を99%程度まで濃縮してあるものが使用されている。

一方、臨床研究において中性子の発生源として利用されているものは原子炉である。当初は熱中性子が利用されていたが、中性子の到達距離が短く、脳腫瘍の治療には、開頭して照射が行われていた。その後、熱中性子よりエネルギーの高い熱外中性子が使われるようになり、中性子の到達距離が長くなり、非開頭での照射が一般的になった。

薬剤の開発と中性子場の改良により、2005年には国内で80人以上の臨床研究による治療が行われたが、その後国内で利用されていた2機の原子炉がメンテナンスや故障で利用できなくなり、国内では治療ができない状態となっていた。(2010年度より稼働予定)

原子炉に代わる中性子源として、加速器が以前より提案されてきている。加速器は原子炉に比べて小型化することができ、取扱いも容易である。また、新規の建設に関しても制限は少ない。しかしながら、治療可能な強度を持つ中性子場を生成する加速器中性子源は、これまで実現されていなかった。

当社は国立大学法人京都大学(京大)との共同研究により、BNCTに適用可能な中性子を生成することができる加速器中性子源の開発を進めており、京大原子炉実験所(大阪府泉南郡熊取町)内に装置を設置し性能確認試験を行っている。

本報では、開発の経緯、装置の構成と性能評価について報告する。

2 開発の経緯

加速器を利用してBNCTに利用可能な中性子を発生させる方法としては、2～3 MVの静電加速器を利用して陽子を加速し、リチウムターゲットに陽子を当てて $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 反応により中性子を生成する方法が提案されてきている。しかし、この方法は数10 mAの陽子ビーム電流を加速できる加速器と

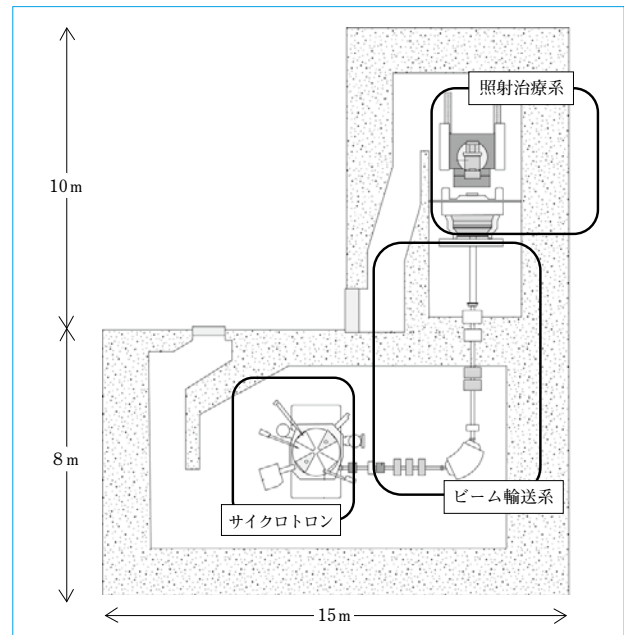


図2 加速器中性子源の構成
Configuration of accelerator based neutron source

表1 HM-30サイクロトロン主要仕様
Major specifications of HM-30 cyclotron

型式	AVFサイクロトロン
加速エネルギー	30 MeV
最大加速電流	1ポート 1.1 mA 2ポート 2.0 mA
加速イオン	H^-
取出しイオン	H^+
イオン源	マルチカスプ型外部イオン源

大きな熱負荷に耐えるリチウムターゲットに開発の課題があり、治療可能な装置が実現されていない。

30～70 MeVの中高エネルギー陽子ビームを利用して中性子を発生させ、BNCT用の中性子を発生させる方法は2003年に提案された⁽¹⁾。中高エネルギーの陽子ビームをタンタルターゲットに当て、核破砕反応により発生する中性子を利用する方法である。この方法では、ビーム電流量は1 mA程度でよく、また陽子の飛程も大きいことから、ターゲットの冷却もリチウムターゲットに比べると容易である。京大と当社は、この提案を元にさらに検討を進め、30 MeV陽子ビームとベリリウムターゲットを使用した中性子源の開発を進めるに至った。開発された加速器中性子源について、次に説明する。

3 加速器中性子源の構成

加速器中性子源の構成を、図2に示す。装置は、サイクロトロン、ビーム輸送系および照射治療系により構成されている。

3.1 サイクロトロン

加速器は、AVF型サイクロトロンを採用している。30 MeVの陽子ビームをmAオーダーで加速するに当たっては、サイクロトロンは小型で経済的な加速器である。今回、BNCT中性子源用として新たにHM-30が開発された。

HM-30の主要仕様を、表1に示す。mAの電流の加速には、

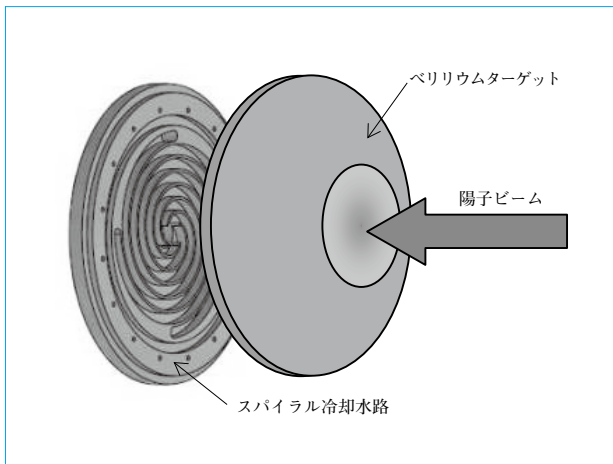


図3 ターゲットの構造
Configuration of target



図5 治療台(座位)
Patient couch (Chair configuration)

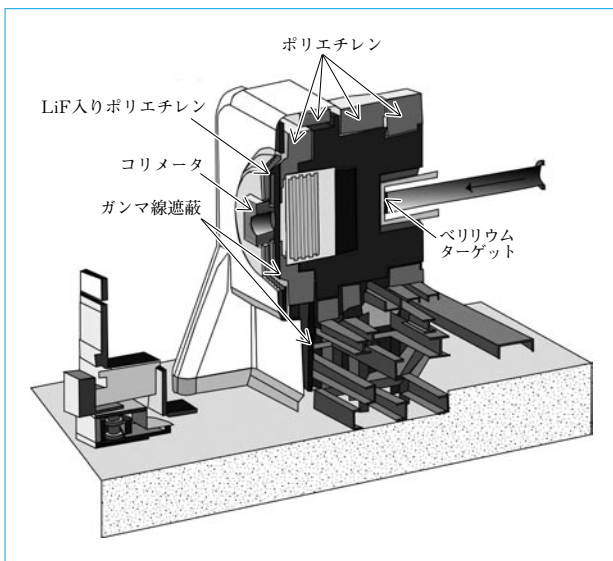


図4 照射治療系の構成
Configuration of irradiation system

イオン源は外部イオン源を採用し、垂直入射で10mA以上の水素負イオンビームを入射することができる。この水素の負イオンを高周波により30MeVまで加速する。取出しは、炭素薄膜を利用した荷電変換取出しを採用しており、これにより加速ビームを損失することなく取り出すことが可能となっている。BNCT用のHM-30はビームの取出しは1ポートであるが、取出し用の炭素薄膜を2式使用することにより、2ポート同時取出しも可能なサイクロトロンである。

3.2 ビーム輸送系

サイクロトロンから取り出されたビームは、ビーム輸送系によりその終端にある中性子発生ターゲットまで輸送される。

輸送されるビームの持つパワーは約30kWであるので、熱や放射線による機器の損傷や劣化の防止に、輸送中のビーム損失を極力抑えた設計となっている。また、使用する材料についても、ビームの当たる可能性のある部分はグラファイト、その他の部分についてもアルミニウム系の材料を使用し、放射線の発生や放射化を抑えた設計となっている。

陽子ビームを中性子に変換させる中性子発生ターゲットには、ベリリウムを採用している。陽子エネルギー30MeVでは中性子の発生量が最も多いのがベリリウムであり、照射後

表2 照射治療系主要仕様
Major specifications of irradiation system

照射ポート	水平固定 1台
中性子エネルギー	熱外中性子
最大照射野	250 × 250 mm
治療台	座位および臥位に対応
位置合わせ	レーザマーカ X線撮影システム

の放射化量も他の元素に比べて小さい値であるのが選択の理由である。陽子がベリリウム当たることにより、主として(p, n)反応で中性子が発生する。

また、30MeV陽子のベリリウム中での飛程は5.8mmとなる。厚いベリリウム板をターゲット材として使用することができ、ベリリウム裏面を冷却水により直接冷却することが可能となった。冷却水路はスパイラル型として、流速を上げ冷却効率を高めている(図3)。また、ターゲット上での陽子ビームによる入熱密度を低下させるべく、ターゲットの前方に交流励磁可能な電磁石を置いている。この電磁石によりビームを振り、ターゲット上でビームサイズを拡大し入熱密度が低減されている。

3.3 照射治療系

ベリリウムターゲットより発生する中性子は広いエネルギー範囲に分布しているが、減速材を通すことにより、BNCTに適した熱外中性子の領域まで減速させることができる。減速材は中性子のエネルギーに合わせて選択され、鉛、鉄、アルミニウムおよびフッ化カルシウムを採用している。照射口に置かれたフッ化リチウム入りのポリエチレンのコリメータにより中性子ビームは整形され、必要な部分に中性子を照射できるような構造になっている(図4)。

治療台は座位および臥位に対応できるようになっており、頭部、頸部および胸部の照射が可能となっている(図5)。患者の位置合わせはレーザマーカを基準に行い、中性子照射側からも目視で確認できるように工夫されている。さらに、X線撮影システムにより患者位置の確認ができるようになっている。

表2に、照射治療系の主要仕様を示す。

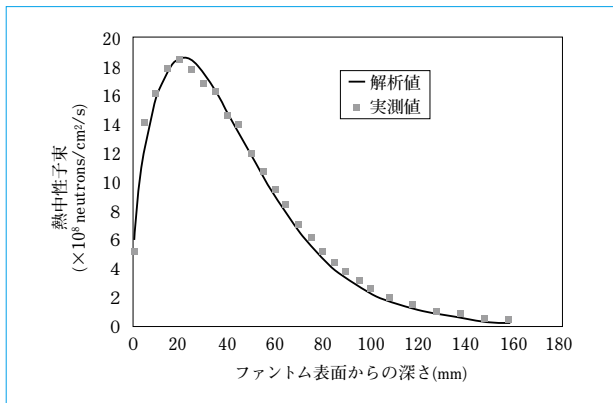


図6 ファントム中の熱中性子の深度分布特性
Thermal neutron flux distribution in water phantom

4 性能評価

4.1 サイクロトロン

開発されたHM-30は30 MeV、1.1 mAまでの陽子ビームの加速に成功し、安定な連続運転を達成した。

施設の放射線遮蔽の制限から、加速試験は最大1.1 mAであるが、サイクロトロンの中心領域では2.2 mAの電流を実現している。2ポートの構成では、陽子を30 MeVで1 mAの引出しポートを2本、すなわち2 mAのビームを加速できる能力があることを示している。

4.2 ビーム輸送系

ビーム輸送系は、サイクロトロンからの1 mAのビームを99.5%以上の透過率でターゲットまで輸送することができている。また、ターゲットは、30 kWの入熱に対して異常な発熱などが生じることがなく、稼働していることが確認された。

4.3 照射治療系

中性子の性能は、コリメータ直後に置かれた水ファントムを用いて測定した。ファントム中に金線を入れ、中性子を照射すると、金の原子核が熱中性子を吸収して放射核となる。照射後、その原子核から放出されるガンマ線を測定することにより、熱中性子の強度を評価することができる。ファントム中での照射軸方向の中性子深度分布特性を、図6に示す。1 mAの陽子ビームにより、ファントム中の照射軸上20 mmの位置での中性子の強度は 1.8×10^9 neutrons/cm²/sが得られた。また、測定されたファントム中の中性子深度分布は計算値とよく一致していることが確認された。

軸上の深度分布特性は中性子のエネルギースペクトルと相関があり、分布が一致していることは、中性子のエネルギーがBNCTに適したエネルギーであることを示している。この強度では、治療の照射時間については、30分から1時間程度が想定されている。

この中性子を用いて細胞照射試験が実施され、本装置からの中性子の生物学的効果が測定された。また、腫瘍細胞を植え付けたマウスの照射試験によりBNCTの効果が測定されている。これらのデータは良好な成績を示しており、加速器によるBNCT実証の基礎データとなる。

5 今後の予定

装置の普及には医療機器としての承認を得ることが必須で

あり、安全性の実証の試験を実施している。また、加速器中性子源によるBNCTの安全性と効果をj確認する治験の実施が予定されており、その準備が進められている。

6 むすび

- (1) BNCT用に開発された加速器中性子源が開発され、30 MeVサイクロトロンでは1.1 mAの陽子ビームの加速成功にした。また、1 mAでの連続運転で装置が安定に動作することが確認された。
- (2) 中性子の特性測定を行い、ファントム中の熱中性子強度は陽子ビーム電流1 mAで 1.8×10^9 neutrons/cm²/sを達成した。照射軸上の深度分布測定では、測定値と計算値がよく一致し、中性子のスペクトルがBNCTに適することが確認された。
- (3) この中性子を用いて、細胞照射試験およびマウス照射試験が実施され、加速器中性子源によるBNCT実施の基礎的なデータが取られた。
- (4) 今後、このシステムを医療機器とする治験が計画されている。

(参考文献)

- (1) S.Yonai et al. Feasibility Study on Epithelial Neutron Field for Cyclotron-Based Boron Neutron Capture Therapy. Medical Physics, 30 (8), 2003, p. 2021-2030.

平面研削盤のびびり解析

Analysis Method on Chatter Mechanism of Surface Grinding Machine

●市原 浩一* 石田 浩修*
Kouichi ICHIHARA Hironobu ISHIDA



門形平面研削盤 KSL
Slideway & surface grinding machine KSL

研削盤のびびり問題は、測定の困難さと発生要因が多岐にわたることから、原因特定が難しく対策も試行錯誤的な対応を余儀なくされてきた。

本報では、まず、びびりマークの解析ツールとして、レーザ変位計測とFFT分析を組み合わせた研削面のうねり測定方法が、びびりピッチ測定に有効な手段であることを示した。また、赤外線ヒータとカメラを用いて、目視以上の検出力を持つびびりマークの可視化装置が実現できることを紹介した。

次に、普通砥石を用いた平面研削加工において、びびりの発生頻度が最も高い原因であるドレッシングの影響について磁石作用面形状とうねりとの関係を示し、さらにこのうねりがびびりマークとして観測されるメカニズムを解説した。

最後に、実験より磁石とワーク間の相対振動のびびりマークへの影響について、限界振幅レベルが $0.5\mu\text{m}$ 前後であることを示した。

The chatter mark problem associated with surface grinding machines has so far been dealt with only on a trial-and-error basis due to the difficulty in cause identification stemming from the measurement challenges and diversely presumed causes. In this paper first shown is the effectiveness of the measurement of undulations that appear on the ground surface, combining laser-based displacement measurement and FFT analysis as the chattering mark examination tool. Also introduced is the chattering mark visualization device with a sensitivity better than naked eyes using an infrared heater and camera. Next clarified is the mechanism of the chattering mark to appear through the undulation generated on the work surface. As a matter of fact this work surface undulation is to be created by the surface form of grinding wheel that has gone through a dressing process, and which is considered to be a cause that leads most frequently to generating the chatter mark as for the planer grinding process with the general-purpose grinding wheel. At last shown is the chattering amplitude that occurs due to the relative vibration of work piece and grinding wheel of the order of $0.5\mu\text{m}$.

1 まえがき

研削びびりとは、平面研削および円筒研削加工において研削面に現れる光沢むらの縞模様の外観不良現象である。昔から発生メカニズムの解明や対策について研究されて、半世紀以上の歴史になる。しかし、びびりマークの評価は、従来からの目視確認や「すりとり」と呼ばれる可視化方法を用いるが、その測定ばらつきによりびびりマークを正確に捉えることが難しい。また、びびりの発生要因も多岐にわたり、要因分析も試行錯誤的な現場対応になる場合が多かった。

現在では、最近の計測器およびシミュレーション技術の進歩により、比較的容易に先哲の知見や理論の検証が可能となった。本報では、工作機械のベッド研削に代表される門形平面研削盤のびびり現象のメカニズムと分析手法について紹介する。

2 従来の研削びびりの解析手法

従来びびりマークの分析には、「すりとり」と呼ばれる手法が用いられてきた。研削面に現れた明暗の縞模様を図1(1)に示すように、当たり定盤にインクを乗せて対象面に擦りつ

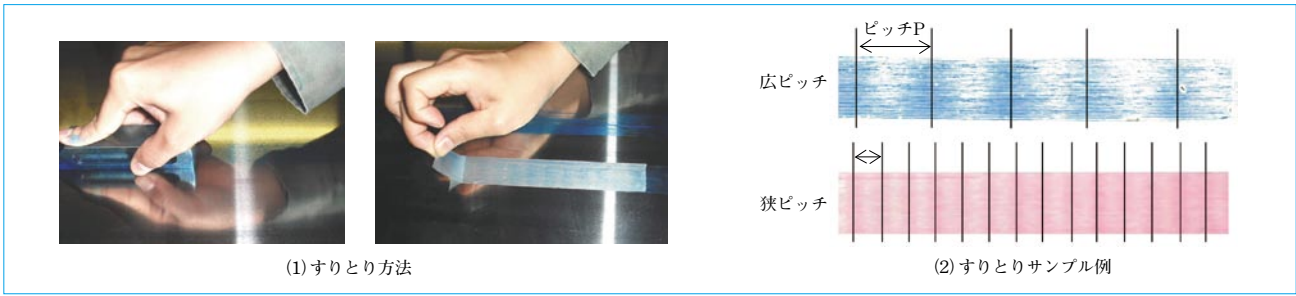


図1 研削びびりと解析手法
Grinding chatter marks and analysis method

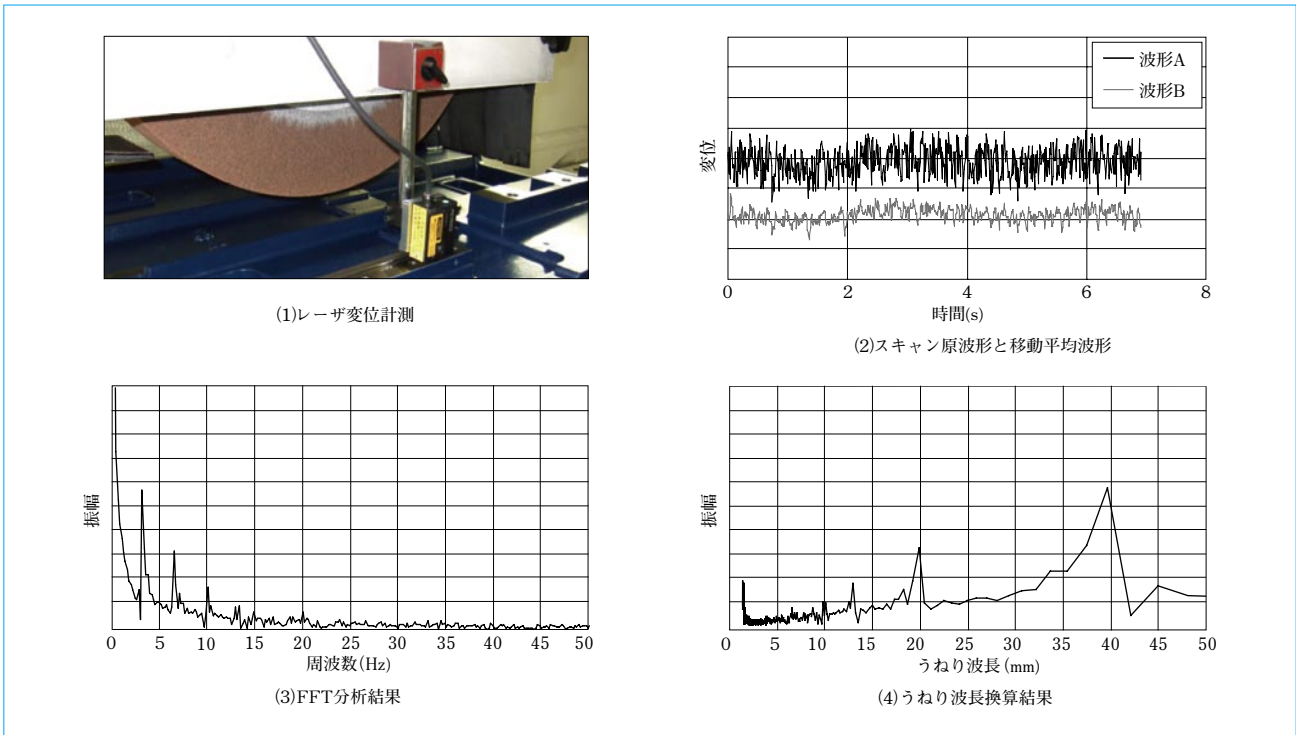


図2 研削面の分析
Analysis of grinding surface

けて縞模様を浮き上がらせて可視化し、その縞模様のピッチ(以降びびりピッチ)および模様の濃淡の度合いからびびりの強度評価を行っている(図1(2))。この「すりとり」作業は作業者の技量に左右され、びびりピッチの繰返し再現性はあるが、びびりマークの濃淡度合いは「すりとり」ごとに異なり、繰返し再現性は低く、また濃淡評価には人の官能評価も入ることからバラツキが大きい。

びびりマークは、研削プロセスで形成される。ワークは、研削加工時に砥石に接触しながら、テーブルと一緒に一定速度で往復運動をしている。テーブルの単位時間当たりの移動距離に対しピッチPのびびりマークがn個スタンプされることから、びびりマークが繰返される周波数をびびり周波数と呼び、テーブル速度VとびびりピッチPから $f = V/P$ として求まる。このびびり周波数に該当する振動源を研削盤の内部振動と基礎を通して伝達される環境振動の両面から、FFT分析を用いて特定する。また、研削盤のモーダル解析から固有振動数および動剛性などの振動特性を調べ、減衰特性改善することが一般的な解析手法であった。

「すりとり」の測定精度の影響もあるが、振動のFFT分析の周波数とびびり周波数は一致しない場合が多く、また同じ研削条件でも整数倍のびびり周波数に突然遷移することも多

く、一度問題が発生すると解決に時間を要していた。

3 研削面の分析手法

びびりマークは、研削面上に現れる現象から、研削面上にびびりマークの痕跡が残っているのではないかと考えるのは当然な帰結である。研削表面形状の測定手段として、一般的なツールは表面粗さ計である。しかし、構造上びびりピッチのような数mm~数十mmピッチの長い波長の分析には向かない。

ここでは、レーザ変位計を使った分析手法を紹介する。レーザ変位計は0.01 μm の分解能を持ち、非接触で物体表面の凹凸形状の測定が可能なツールである。図2(1)のように、ワークをテーブルに乗せる。そして、一定速度でレーザ変位計の下を通過させて対象研削面をスキャンすると、研削面の全長にわたる表面形状が得られる。ただし、この波形はセンサとワーク表面間の変位測定を行っているため、テーブルの送り誤差成分および砥石頭とテーブル間の振動成分が測定誤差として含まれるので注意を要する。

図2(2)に、スキャン波形を示す。波形Aは、研削面の表面粗さとうねり成分が含まれた原波形である。びびりピッチに関係する信号を取り出すには、表面粗さの高周波成分がノイ

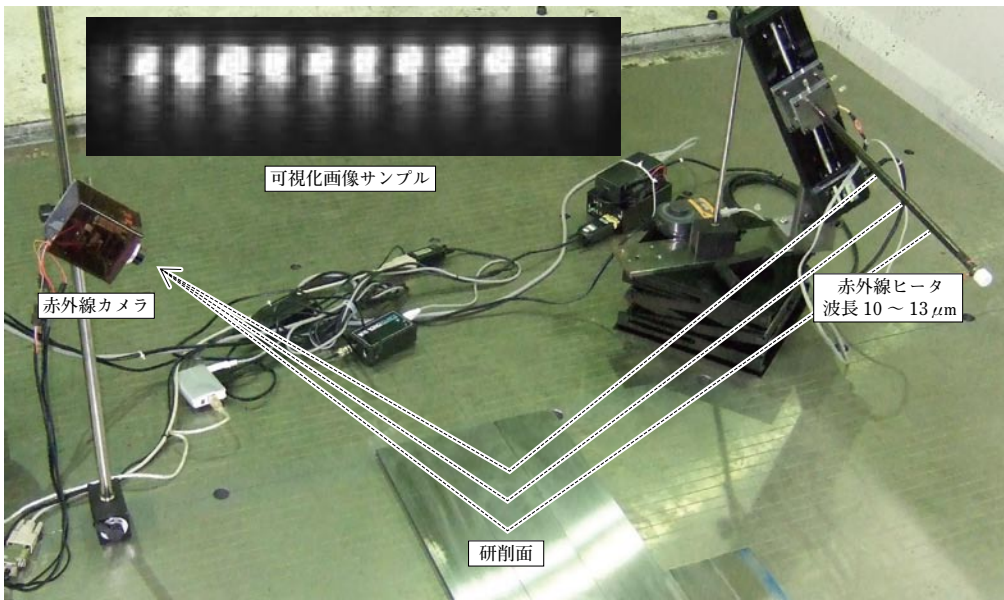


図3 びびりマーク可視化装置
Visualizing equipment for chatter mark

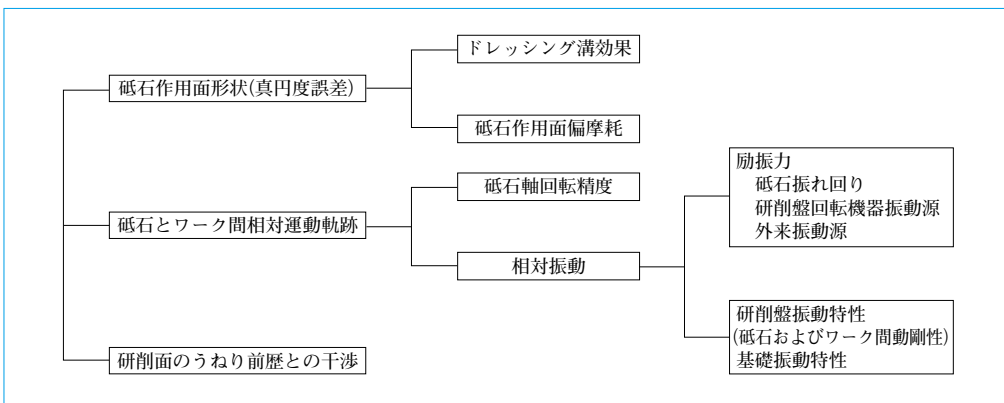


図4 研削びびりの主要因
Main causes of grinding chatter marks

ズとなり、分析に不向きである。そこでびびりピッチに影響しない範囲で、移動平均して平滑化処理を加える。平均化処理は、びびり最小ピッチの1/10程度の長さである。この処理により波形Bが得られるが、波形Bから客観的にびびりピッチを読み取るのは困難である。そこで、さらにB波形に対しFFT分析を行い、図2(3)のようなスペクトラムを得る。これにより、振幅の高い顕著な周波数が明確になる。

周波数から波長の換算はスキャン速度 V_{sc} 、ピーク周波数を f_{pk} とすると、波長 $\lambda = V_{sc}/f_{pk}$ として求まる。図2(4)に、その結果を示す。うねり振幅が大きい波長は40mm、20mmおよび13mmの順である。「すりとり」の結果が20mmより一見一致していないように思われるが、これは5章で後述するが、40mmピッチのうねりが半波長ずれて交互に並ぶことにより、20mmのびびりマークが発生することによる。研削面のうねりの波長はスキャン速度に依存しないはずであるから、スキャン速度で波長が変化しないモードのみを有効として、それ以外は測定誤差として除外する。この方式を用いると、「すりとり」では分離が困難だった複数の波長成分を正確に測定でき、またうねりの振幅も求まりびびり解析に有効な情報が得られる。

レーザ変位計から得られる情報は、スキャンしたライン上

の表面形状のみである。びびりマークは面全体に広がった現象から、数ミリ幅の面情報が得られると、さらにびびり解析に有効な情報が得られると考えられる。これには、レーザ変位計を幅方向へシフトしてスキャンし、面形状を生成する方法、およびマイクロSCOPEによる3D計測方法などの利用が考えられる。

「すりとり」に替わるびびりマークの可視化装置を、図3に示す。これは赤外線ヒータと赤外線カメラを使った方式で、目視では検出できないレベルのびびりマークの可視化ができる。「すりとり」方式で問題であった「すりとり」ごとの模様のはらつきが少なく、びびりの強度の評価が容易となった。

4 研削びびりの発生要因の分類

研削加工は砥石外周面の無数砥粒が多刃切れ刃となり、ワーク表面に切り込まれ、除去加工が行われる。ワークの加工面形状は工作機械の母性原理に基づき、工具形状とその工具の運動軌跡の転写に支配される。平面研削盤で発生するびびりマークも、同様の原理が適用されると考えられる。図4に、発生頻度の高いびびりの主要因を示す。これは文末掲載の参考文献⁽¹⁾でも指摘があり、住友重機械ファインテック株式会社(FTEC)での実験からも検証された主要因である。大き

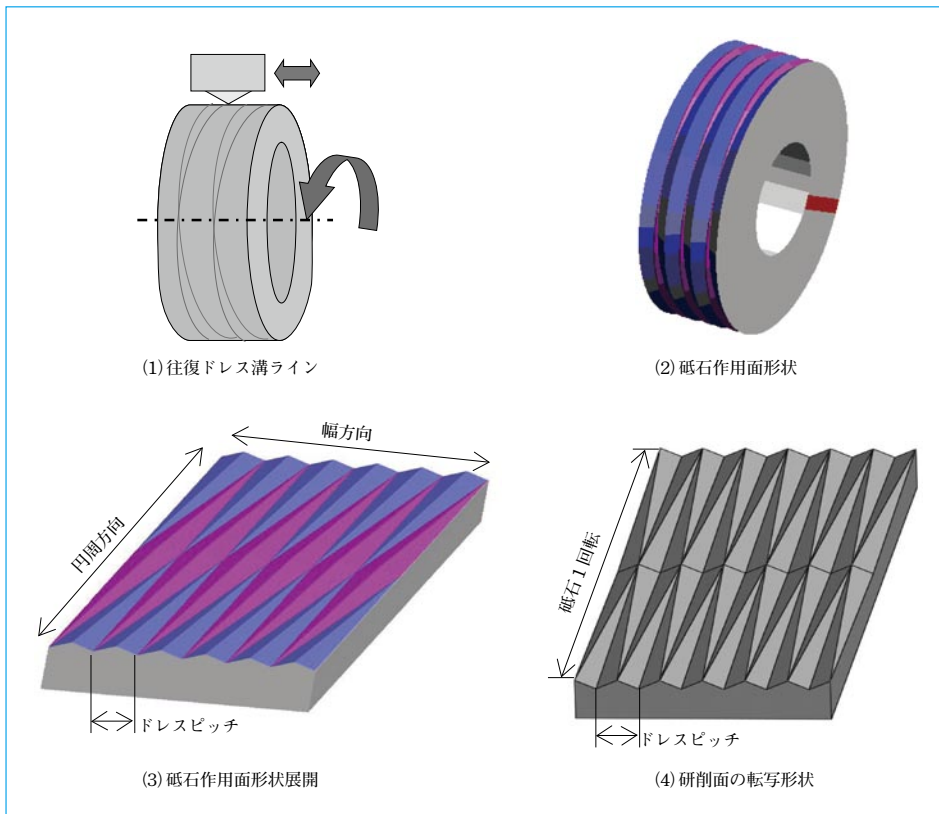


図5 ドレッシング溝による砥石作用面と研削面形状
3D surface shape of grinding wheel and work by dressing groove

くは工具である砥石作用面形状、砥石とワーク間の相対運動軌跡およびそして研削面のうねり前歴との干渉の三つの要因の影響が高い。

5 砥石作用面形状起因のびびり

砥石作用面形状起因のびびりは、砥石作用面がドレッシング動作で楕円に成形されることによる、砥石の非真円性の転写から生じるびびりである。普通砥石の研削で、最も発生頻度が高い。砥石はワーク研削により作用面の砥粒が摩滅し、切れ味が悪化するとドレッサと呼ばれるダイヤモンドで作用面の摩滅した砥粒を削り落とし、新しい砥粒を出すドレッシングを行う。これは、砥石を一定回転させた状態でドレッサに一定の送りをかけて、砥石作用面を数十 μm 削り落とすプロセスである。ドレッシング後の砥石作用面は、ドレッシングにより深さ数十 μm のスパイラル状の溝が形成されることになる。通常ドレッシングは往復で行われ、図5(1)のようにスパイラル状の溝は互いに交差する。図5(2)の砥石作用面形状の展開を、図5(3)に示す。図のように、円周方向に1山、砥石幅方向に無数のひし形形状の山が並ぶ。ここで留意すべき点は、同様な山が180度位相がずれた点にも形成されている点である。ひし形山は、四角錐となり中央が最も高く、先端に向けて低くなっている。

このように、砥石作用面はドレッシングにより結果的に真円ではなく、起伏を持った楕円形状に成形されることになる。この砥石作用面の半径変動により砥石のワークへの接触力は変化し、図5(4)のように砥石1回転に1回の研削溝のうねりが生じる。同様な研削溝のうねりは、ドレスピッチの半分ずれたライン上にも生じる。砥石の周速度はワーク速度の数

十倍であり、砥石作用面はワーク表面を滑りながら削っていく。研削溝のうねり波長 λ は砥石一回転当たりのテーブル移動量であるから、砥石回転数 N 、テーブル送り速度 V とすれば、 $\lambda = V/N$ となる。2系列のうねりの位相差は、 $\lambda/2$ である。うねりの波高値は、図2(2)および図2(3)で示したように、 $1\mu\text{m}$ 前後と表面粗さと同じオーダーである。このことから、うねりの違いは区別が付かず、あたかも砥石一回転で2回のうねりが発生しているように観測される。

引き続き、びびりマークとの関係を示す。びびりマークが見えるメカニズムは確定していないが、粗さムラとうねりの2説が考えられる。図6(1)の「すりとり」の原画像を横に引き伸ばすと、図6(2)のような画像となる。インク点列の規則性を見ると、A系列とB系列の点はそれぞれ砥石回転方向に一直線上に並んで、A系列のほぼ中間にB系列の点が存在している。また、砥石幅方向に対しA系列の中間にB系列の点が存在している。これは、先程の研削面モデルで容易に説明ができる。当たり定盤でインクを研削面に擦り付けた場合、図6(3)のように研削面の高い部分のA系列とB系列にインクが付くと考えられ、インクの付着モデルは「すりとり」現象と一致する。また、目視による縞模様現象についても、次のように説明が可能である。図6(4)のように、研削面に対し入射角を持った可視光線は研削面にて反射して目で観測される。このとき、A部のうねり溝幅が広い領域に入射した光は反射面積が広く、光量も多くなり、明るく見える。これに対しB部のうねり幅の狭い領域に入射した光は反射面積が小さく、光量も少なめとなり暗く見える。これが明暗差となり、縞模様となって観測されると考えられる。

このドレッシング起因びびりの対策には、砥石作用面に形

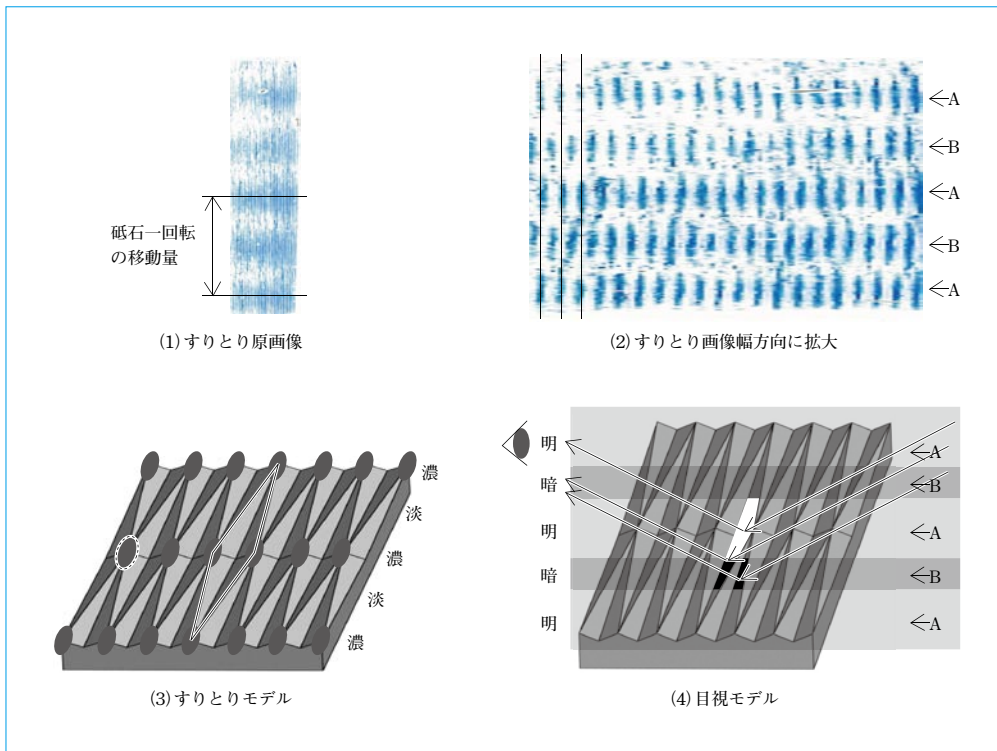


図6 びびりマークの可視化原理
Visualizing mechanism of chatter marks

成されるひし形状の突起パターンを形成させないことが有効である。その一つが一方方向ドレッシングであるが、平面研削の場合、ワーク表面に転写される往路研削溝と復路研削溝が互いに交差干渉し、結果的にひし形状溝のうねりを発生する。以上の理由から、円筒研削で効果のある一方方向ドレスは、平面研削では効果は低い。一方方向ドレッシングに往路または復路のみ研削を行う一方方向研削を組み合わせれば、びびりのない面に仕上げることが可能である。プランジ仕上げが可能な加工面に有効な手段であると考えられる。また、被削材にもよるが、ドレッシングでスパイラル状の溝が形成されないダイヤモンド砥石およびCBN砥石の利用も有効である。

6 砥石とワーク間の相対振動起因のびびり

研削盤は多自由度系の振動特性を持ち、砥石軸およびモータなどの研削盤内部の回転機器の振動源に加え、研削盤が設置された基礎から伝達される外来振動源からの強制振動により、砥石と研削面の相対振動を生じる。振幅レベルは、砥石とワーク間のコンプライアンス($\mu\text{m}/\text{N}$)と強制振動の励振力で決まる。この振幅レベルはFTECの研削盤ではサブ μm オーダーであるが、研削除去量の周期的な変動を生み、研削面にうねりが形成される。

研削盤内部で最も大きな振動源は、砥石の動的アンバランスによる砥石振り回りである。砥石は交換が容易に行えるようにフランジで挟み込んで固定しているが、砥石が砥石内径と砥石フランジ軸のクリアランスにより偏心して固定されることから、砥石軸回りに偏重心が生じ、砥石軸の回転周波数の励振力が発生する。この砥石の偏重心は砥石軸に設置されたバランスにより調整されるが、励振力はゼロにはならず、砥石頭で観測される振動成分として最も発生頻度が高い。

図7(1)は、研削中の砥石頭の振動のFFT分析結果の一例

である。回転周波数とその2倍、4倍モードの周波数の振幅が高いことが分かる。回転周波数は砥石振り回りによるもの、2倍は前述のドレッシングによる砥石作用面の楕円変形によるもの、4倍以上のモードは前歴うねり面との位相的な干渉と考えられる。

振動により形成されるうねりは研削除去量で決まるが、これは砥石とワーク間の接触力と砥石の切れ味に比例すると考えられる。接触力は、砥石とワーク間の弾性変位に動剛性を掛けた値である。砥石の切れ味は砥石とワーク間の摩擦係数の大小で評価され、摩擦係数が高い程切れ味が良い砥石である。摩擦係数が高いとワーク表面での滑りが小さく、ワークへの食込みが良く、除去能力が高くなる。しかし、砥石の移動量以上は削れないことから、うねりの波高値は振動の両振幅以下である。振動により形成されるうねり形状は砥石作用面の運動軌跡の包絡面となり、図7(2)のように正弦波を歪ませた山が尖った形状となる⁽¹⁾。この断面形状が砥石幅で転写されることから、びびりマークは幅の狭いライン状となり、前述のドレッシング起因の幅の広いマークと異なる特徴を持つ。

ところで、振動がびびりマークとして影響する振幅レベルがどの程度かは興味を引くところであるが報告はない。そこで、本報ではこれについて紹介したい。うねりは前述のように振幅だけでなく、砥石切れ味にも影響されるので、この実験結果は参考値である。実験は、研削盤に加振器を設置して研削盤の固有振動数で慣性加振を行って、砥石とワーク間の相対振幅レベルを調整して研削を行い、振幅とびびりマークの強さとの相関を見た。実験は振動要因以外の影響を小さくし、ドレッシングによる砥石作用面形状誤差を除くべく、一方方向ドレスと一方方向研削の条件で実験を行った。その結果を、図7(3)に示す。びびりの評価は、前述のびびりマーク可視

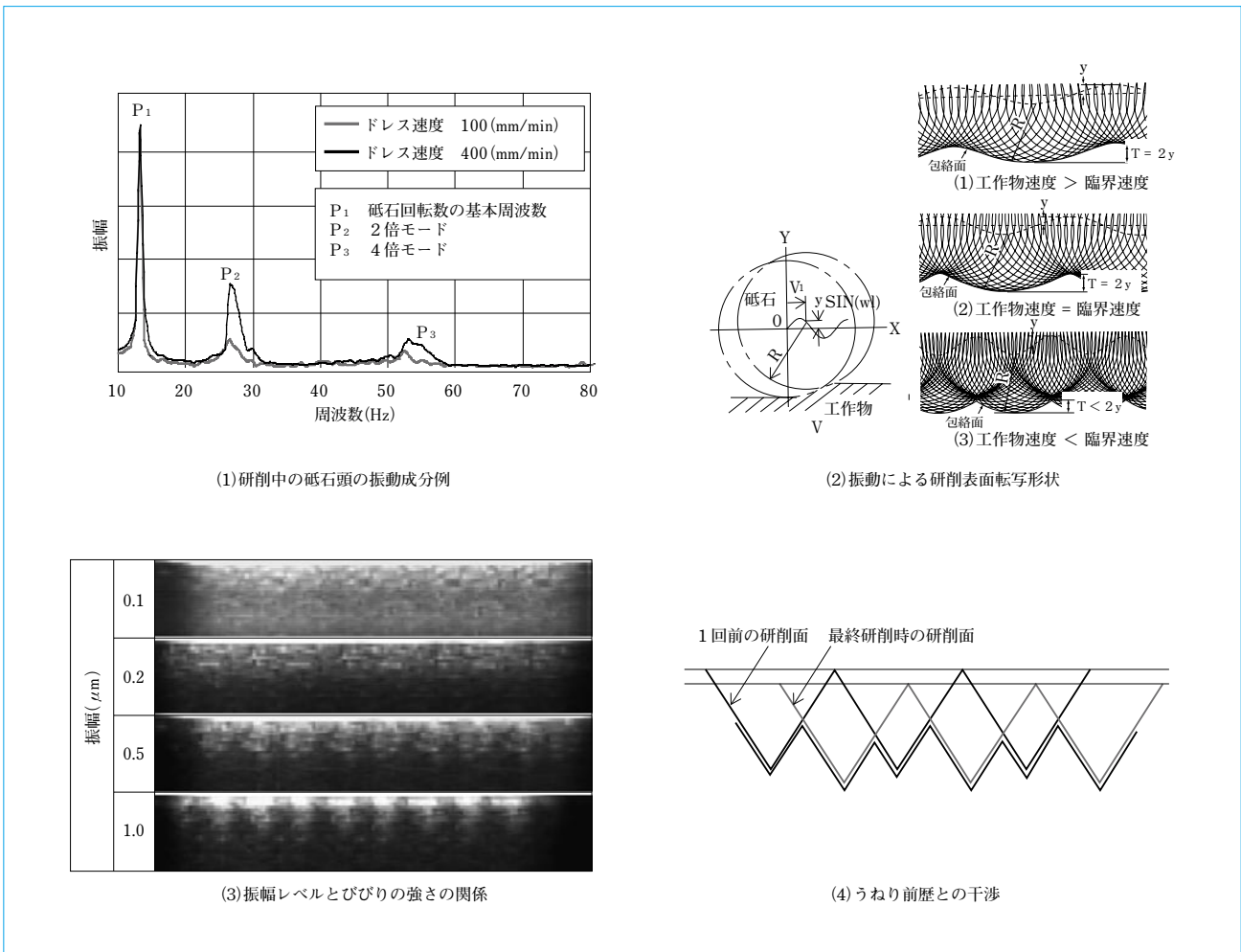


図7 びびりへの振動の影響
Effect of vibration in chatter marks

化装置を用いた。画像より、振幅がびびりマークとして現れるレベルは $0.5\mu\text{m}$ 前後であることが分かる。これはFTECの研削盤の内部振動で生じる振幅の2倍以上のレベルであり、振動起因のびびりは起こり難いと考えられる。

7 研削面のうねり前歴の影響

粗研削および仕上げ研削時に加工面を数回削るが、仕上げ研削時の除去量は $1\mu\text{m}$ 前後である。前歴の加工面に同レベルのうねりが存在すると前歴のうねり面が完全に除去されずに残り、うねり面が互いに干渉を起こす⁽²⁾。往路で転写されたうねりパターンと復路のパターンの位相が一致するのは稀である。砥石作用面形状起因や砥石とワーク間の相対振動起因で生じるうねりの山谷が干渉し、図7(4)のように、基本ピッチの半分以下のびびりマークが発生する。この位相差は、テーブル速度、反転時間および砥石回転数の研削条件で容易に変化する。びびりマークピッチが短い場合は、前歴うねり面との干渉の可能性が高い。

8 むすび

- (1) 従来の「すりとり」に変わるレーザ変位計測とFFT分析を組み合わせた方法により、再現性の高いびびりピッチの測定が可能であることを示した。
- (2) 赤外線ヒータとカメラを使い、目視よりも検出力の高いびびりマークの可視化が可能であることを示した。

- (3) 平面研削盤において、最も発生頻度の高いびびりの原因はドレッシング効果である。これにより、楕円形になった砥石作用面が研削面に転写され、砥石1回転に2個のうねりがびびりマークとして観測される。
- (4) 同上のうねり形状から、「すりとり」の可視化原理および目視での縞模様が見える原理が説明できることを述べた。
- (5) 砥石とワーク間の相対振動に起因するびびりの発生する振幅レベルが、実験より $0.5\mu\text{m}$ 前後であることを示した。

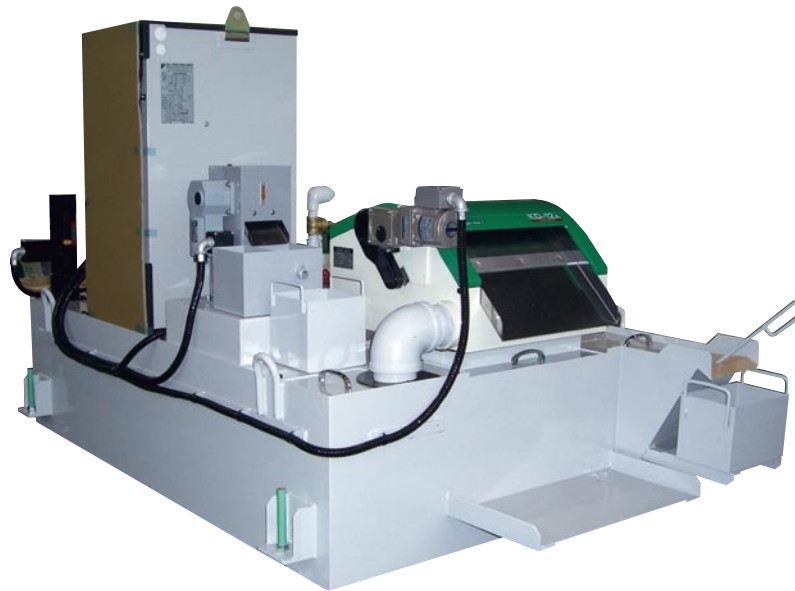
(参考文献)

- (1) 星鐵太郎. 機械加工振動解析. 工業調査会, 1, 2, 8章, 1990.
- (2) 市原浩一. 超精密平面研削盤KSXの平面生成とクラウニング. 住友重機械技報, no.164, 2007, p.17.

砥粒回収マグネットセパレータ ファインマグ

Grinding Abrasive Recovery FINEMAG

● 巖 義 輝*
Yoshiteru IWAO



砥粒回収マグネットセパレータ ファインマグ
Grinding abrasive recovery FINEMAG

部品の研削加工において、スクラッチ(研削加工時におけるワーク表面に生成される傷のこと)の発生が生産現場で品質面の問題となっている。そのスクラッチ発生の要因として、研削工程における砥石のドレッシングや研削時の砥粒脱落が大きなウェイトを占めている。本来非磁性体である砥粒は、ペーパーフィルタおよびサイクロンセパレータなどで回収を行っている。しかし、ランニングコスト、メンテナンスおよび遠心効果によるクーラント液温上昇の問題が発生し、送水用ポンプおよびクーラント液の冷却用温度調整機などの付属機器が必要となる。それが大きなスペースを必要とする。

砥粒回収マグネットセパレータファインマグは、磁性体を回収するマグネットセパレータ単体のみで砥粒とスラッジを分けて回収する機能を付加した商品である。本品では、その80%をマグネットセパレータ内で回収することを可能とした。また、スラッジと砥粒を分別回収することで、従来は産業廃棄物であったものがリサイクルにもつながると期待している。

In parts grinding processes, scratches generated on workpiece surfaces have been causing quality problems in the production scene. These scratches are primarily caused by the whetstone dressing in the grinding process and the grinding abrasive separation during the process. The grinding abrasives that are inherently non-magnetic material are recovered with paper filters or centrifugal separators. However, traditional recovery methods raise problems of high running costs, extensive maintenance operation, and coolant temperature increase brought by centrifugal effect. Specifically, the coolant temperature increase requires the operator to install auxiliary devices, including supply pumps and temperature controllers for use in coolant cooling, all of which need wider installation and operation space. The grinding abrasive recovery FINEMAG is new magnetic separator. Although the magnetic separator originally recovers magnetic materials, new product can recover grinding abrasives and sludges separately. This equipment makes it possible to recover about 80% of this waste within it. In addition, sludges and grinding abrasives are separated and recovered and, therefore, Sumitomo Heavy Industries Finetek, Ltd. expects these materials that have been handled as industrial waste will be recycled.

1 まえがき

部品の研削加工において、スクラッチ(研削加工時におけるワーク表面に生成される傷のこと)の発生が生産現場で品質面の問題となっている。そのスクラッチ発生の要因として、研削工程における砥石のドレッシングや研削時の砥粒脱落が大きなウェイトを占めている。本来非磁性体である砥粒は、ペーパーフィルタおよびサイクロンセパレータなどで回収を行っている。しかし、ランニングコスト、メンテナンスおよび

遠心効果によるクーラント液温上昇の問題が発生し、送水用ポンプおよびクーラント液の冷却用温度調整機などの付属機器が必要となる。それが大きなスペースを必要とする。

現状では、非磁性体である砥粒の回収にいろいろな方法が考えられ使用されているが、デメリットも多く存在する。

次に、砥粒回収装置のデメリットを例示する。

- (1) ペーパーフィルタ
 - a. 大きなスペースが必要である。
 - b. ろ紙のランニングコストが掛かる。

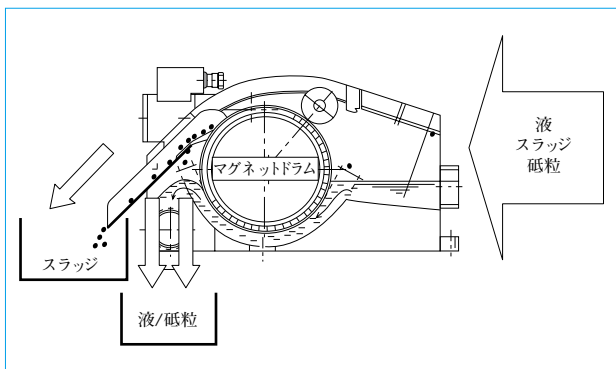


図1 従来のマグネットセパレータ
Configuration of traditional magnetic separator

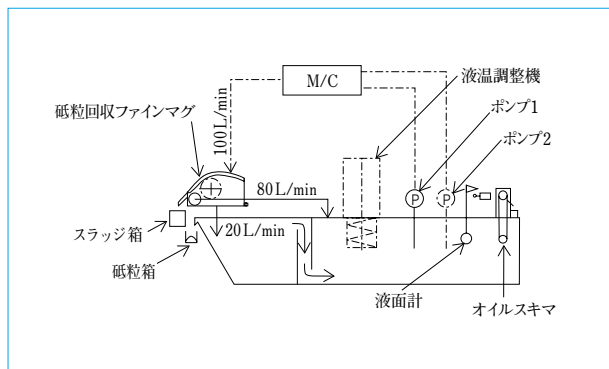


図3 砥粒回収ファインマグのシステム例
System example of grinding abrasive recovery FINEMAG

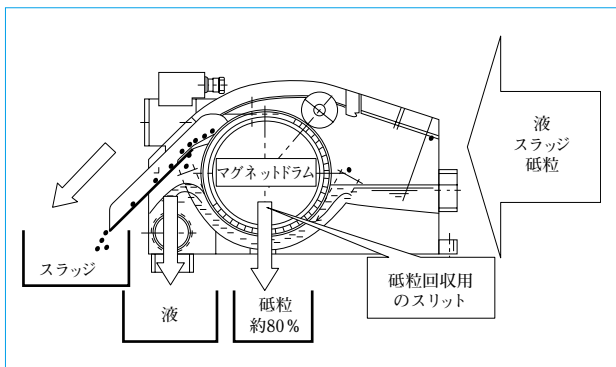


図2 砥粒回収ファインマグ
Configuration of grinding abrasive recovery FINEMAG

- c. 砥粒以外にろ紙そのものの廃棄が必要である。
- d. ろ紙によるクーラント液の持出しによるクーラント液の補充が必要である。
- (2) サイクロンセパレータ(遠心分離)
 - a. サイクロンセパレータへ送水する高圧ポンプが必要である。
 - b. 高圧ポンプの電力量の負担が発生する。
 - c. 液の泡の発生によるタンクからのオーバーフローなど種々の問題が発生する。
 - d. 液温上昇による液の冷却装置が必要である。

本報で報告する砥粒回収マグネットセパレータファインマグは、磁性体を回収する目的のマグネットセパレータ⁽¹⁾に砥粒回収機能を付加したことで、上記のデメリットをすべて解消した商品である。

2 構造

図1および図2に、従来のマグネットセパレータの構造と砥粒回収機能付きの構造の違いを示す。

従来のマグネットセパレータは、流入口よりダーティ液が入りマグネットドラムと液通路の隙間を通過する。この際にスラッジはマグネットドラムに吸着され、マグネットドラムにて搬送され、水分を絞りローラにて絞られ、乾いたスラッジがカキ板により回収される。一方、スラッジが回収されたクリーン液は流出口よりクリーンタンクへと排出される。

砥粒回収ファインマグは、従来のマグネットセパレータの液通路のほぼ中間部分(マグネットドラムの真下)に砥粒を回収するスリット(ケース下側)を設けることで、このスリットより砥粒を回収する構造となっている。当然ながら、このス

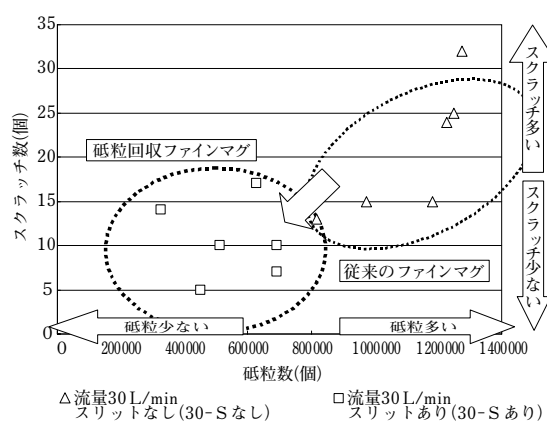


図4 砥粒回収ファインマグのスクラッチ削減効果
Scratch reduction result of grinding abrasive recovery FINEMAG

リットからクーラント液およびスラッジも排出されるが、その量を最少限に抑えるべく、次の対策を施している。

- (1) スリットより排出されるクーラント液量を最少にするべく、スリットの位置、幅および長さなどについて実験を重ね、最適な構造とした。
- (2) スリットより排出されるスラッジ量を最少にするべく、マグネットドラムのサイズを通常サイズよりアップした大径マグネットドラム($\phi 140 \rightarrow \phi 217$)を採用することで、スラッジの吸着力をアップさせ、スラッジの逃げを最少限に抑えている。

3 砥粒回収ファインマグのタンクユニット例

図3に、砥粒回収ファインマグを組み込んだタンクユニット例を示す。

砥粒回収ファインマグの砥粒回収のスリットより回収された砥粒は、砥粒回収沈殿タンクあるいは砥粒回収沈殿コンベアに排出され、手動あるいは自動で回収される。一方、クーラント液はオーバーフローし、ダーティタンクへ戻される。なお、従来のマグネットセパレータと異なる点はスラッジと砥粒を分別して回収できるところであり、砥粒の再利用を先取りしたマグネットセパレータである。

4 性能評価

4.1 スクラッチ削減効果

従来のマグネットセパレータと砥粒回収ファインマグの両

者を使用し、検証レベルではあるがスクラッチの発生個数の比較を行った結果を、図4に示す。

縦軸は発生したスクラッチの個数、横軸はクリーン液中の砥粒の数である。

図4の□が砥粒回収ファインマグでのスクラッチ発生個数、△が従来のマグネットセパレータでのスクラッチ発生個数の結果を表わす。

この図から、砥粒回収ファインマグを使用することでクリーン液中の砥粒の個数は減少しており、また発生スクラッチの個数が減少しているのが分かる。すなわち、砥粒回収ファインマグを使用することでスクラッチの発生を抑えることが可能になった。

4.2 顧客の貸出機テスト結果に対する評価

砥粒回収ファインマグを貸出機として、約半年以上にわたり使用の顧客を紹介をする。この顧客はベアリングメーカーで、今回貸出した部門は直動タイプのベアリングを製作している工場である。

4.2.1 顧客の要求

現在のクーラント装置は、2次処理にペーパーフィルタあるいはサイクロンを使用しているが、産廃および液温上昇などの問題があり、砥粒回収ファインマグでの対応を期待するものであった。

4.2.2 モニタ前のタンクシステム

マグネットセパレータ+ペーパーフィルタのコンビネーションタイプである。

平面研削盤より排出されたダーティ液は、まずマグネットセパレータに入り、大半のスラッジを回収する。次に、マグネットセパレータから排出された1次クリーン液はペーパーフィルタに投入され、微小スラッジおよび砥粒がペーパーにより回収され、一方ペーパーフィルタにて処理された2次クリーン液は再びポンプにて平面研削盤へ循環使用される。

4.2.3 貸出機のタンクシステム

現状使用していたマグネットセパレータを撤去し、砥粒回収ファインマグに置き換え、現状使用しているペーパーフィルタはそのまま使用することとした。

4.2.4 評価方法

ペーパーフィルタのろ紙の消耗量の比較をメインとした顧客の評価を次に示す。

- (1) ろ紙の消耗量が1/8に減少した。
- (2) ろ過後のろ紙の表面を観察すると、従来のシステムでは砥粒が肉眼で見えるほど滞留していた。砥粒回収ファインマグを使用したシステムでは、ほとんど砥粒の存在が見られない状況であり、ろ紙の消耗量の減少と合わせて効果があった。
- (3) 現在、使用後のろ紙に付着したスラッジおよび砥粒を手で回収して(可能な範囲で)、ろ紙とスラッジ/砥粒を分別することで、各々再利用の検討を行っている。
- (4) 砥粒回収ファインマグを使用することで、上記の作業の時間短縮およびスラッジと砥粒を分別して回収できるので、さらに再利用の可能性が高まることとなった。

5 砥粒回収用スリットの構造

砥粒をスリットにて回収するが、当然このスリットからは

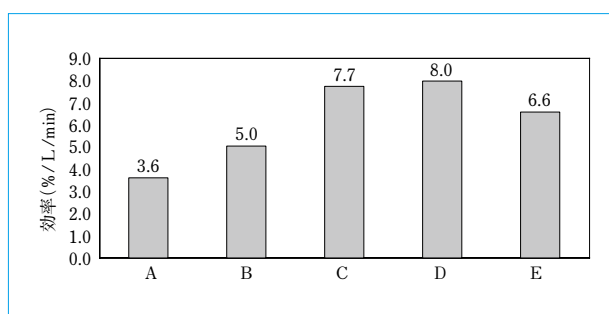


図5 砥粒回収効率の比較
Comparison of grinding abrasive recovery efficiency

砥粒以外に、クーラント液およびスラッジも同時に排出される。第2章でも少しふれたが、次の3点を考慮した構造にする必要がある。

- (1) スリットから回収する砥粒の量を最多にする。
- (2) スリットより排出されるクーラント液量を最少にする。
- (3) スリットより排出されるスラッジ量を最少にする。

5.1 回収する砥粒の量を最多にする

本来の砥粒回収ファインマグの目的は砥粒を回収することにあるので、単純に考えるとスリットから排出するクーラント液を多くすることで砥粒の回収を多くすることができる。

5.2 クーラント液量の最少化

スリットから排出されるクーラント液の量が多くなると本来のクリーン液の量が少なくなり、マグネットセパレータの本来の処理能力(クリーン液排出量)の低下につながる。従来のマグネットセパレータでは、処理するダーティ液がそのままクリーン液となる。たとえば、40L/minのダーティ液が流入されると同じく40L/minのクリーン液を供給できる。しかし、砥粒回収ファインマグの場合は、スリットから排出されるクーラント液をたとえば10L/minとすれば、供給できるクリーン液の量は30L/minとなり、一つ上の型式を選択する必要がある。この場合、設置スペースおよび設備費用などの問題が発生する。この問題解決には、スリットから排出されるクーラント液を最少にする必要がある。

5.3 スラッジ量の最少化

スリットから排出されるスラッジ量が多くなると、クーラント液と同時にスラッジを回収することになる。マグネットセパレータのマグネットドラムで回収すれば乾いたスラッジを回収できる。しかし、スリットから回収されたスラッジはクーラント液と混ざった形での回収となり、スラッジの廃棄の際に引取り価格が高くなることもある。

5.4 砥粒回収効率

3項目をすべて満足するスリットの構造を確立する必要があり、どの構造が最適であるかどうかの判断基準を、砥粒回収効率という指標を設定し構造を決定した。

具体的には、スリットより排出されるクーラント液の量とスリットより排出される砥粒の回収率の数値を基準に、

$$\text{砥粒回収効率} = \frac{\text{スリットより排出される砥粒の回収率(\%)}}{\text{スリットより排出されるクーラント液の量(L/min)}}$$

で表わす。

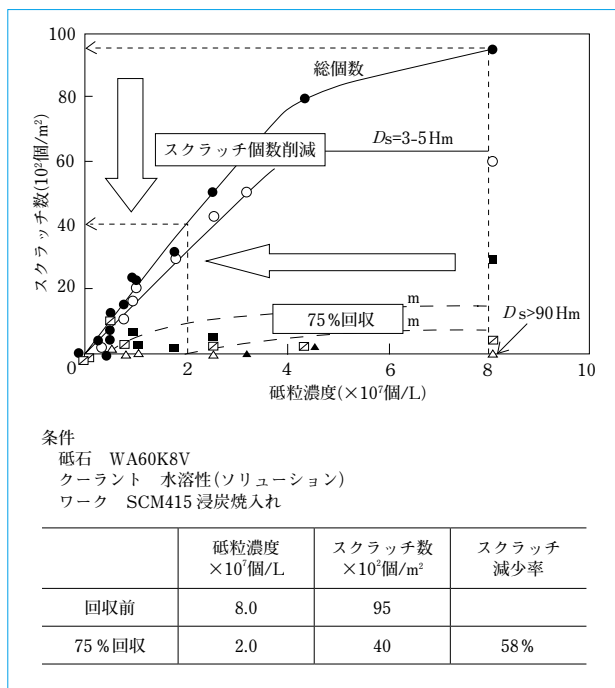


図6 砥粒回収ファインマグ使用によるスクラッチ削減
Scratch reduction using grinding abrasive recovery FINEMAG

判断基準としては、この数字が大きいほど効率が良いと判断する。すなわち、供給できるクリーン液を最多に保ちながら、砥粒の回収率を最大にすることである。砥粒回収率は最大でも100%であり、いかにスリットより排出されるクーラント液の量を少なくするかがポイントである。

図5に、種々の条件での砥粒回収効率の結果を示す。条件「D」が最大の砥粒回収効率を示しているのが分かる。

6 砥粒回収ファインマグの導入メリット

6.1 加工ワークのスクラッチ低減

砥粒濃度 8×10^7 個/L から75%砥粒を回収した場合、砥粒濃度 2×10^7 個/L に低減され、図6よりスクラッチの個数も約50%以上削減となる。

6.2 設置スペースの削減

ペーパーフィルタあるいはサイクロンセパレータを使用する場合に比べ、スペースは各々50%、20%の削減となる。

6.3 ランニングコストの削減

ペーパーフィルタを使用した場合、ろ紙が消耗品となる。月1回ろ紙を交換するとした場合、ろ紙1本について1万円×12ヶ月=12万円/年のコスト削減が可能となる。また、サイクロン(FC-1)を使用した場合、1.5kW(60Hzの場合)のポンプが必要になる。マグネットセパレータのモータが25Wであるので、サイクロンに対し、1/60の電力消費となる。また、サイクロンではポンプによる液温上昇で液温調整機が必要になる場合もあるが、砥粒回収ファインマグではその必要はない。

6.4 タンク清掃回数の削減

マグネットセパレータでは回収できない砥粒を回収できれば、タンク内の沈殿が減り、タンクの清掃回数削減が可能となる。マグネットセパレータで回収されず、クリーン液中に流出するスラッジおよび砥粒の量を砥粒回収機能のない従来のマグネットセパレータ(KD型)と砥粒回収ファインマグと

表1 タンクに沈殿するスラッジおよび砥粒の比較
Comparison of sludge & grinding abrasive settling in tank

タイプ	回収率	流出率	流出砥粒	流出合計 (%)
従来のマグネットセパレータ	94	6	3	9
砥粒回収ファインマグ	98	2	0.75	2.75

で比較し、その結果を表1に示す。

すなわち、沈殿量から考えると砥粒回収ファインマグは従来のマグネットセパレータに対し約1/3(9→2.75)の沈殿量となり、タンク清掃回数も約1/3となる。

7 むすび

- (1) 砥粒回収の目的で、ペーパーフィルタあるいはサイクロンセパレータなどが主に使用されているが、砥粒回収機能を付加したマグネットセパレータ砥粒回収ファインマグの導入により、大きい効果が得られる。
- (2) その効果は、加工ワークのスクラッチ低減、クーラント装置のスペース削減、ランニングコスト削減およびタンク清掃回数削減である。
- (3) 環境面でCO₂削減および省エネルギーという効果も期待できる。

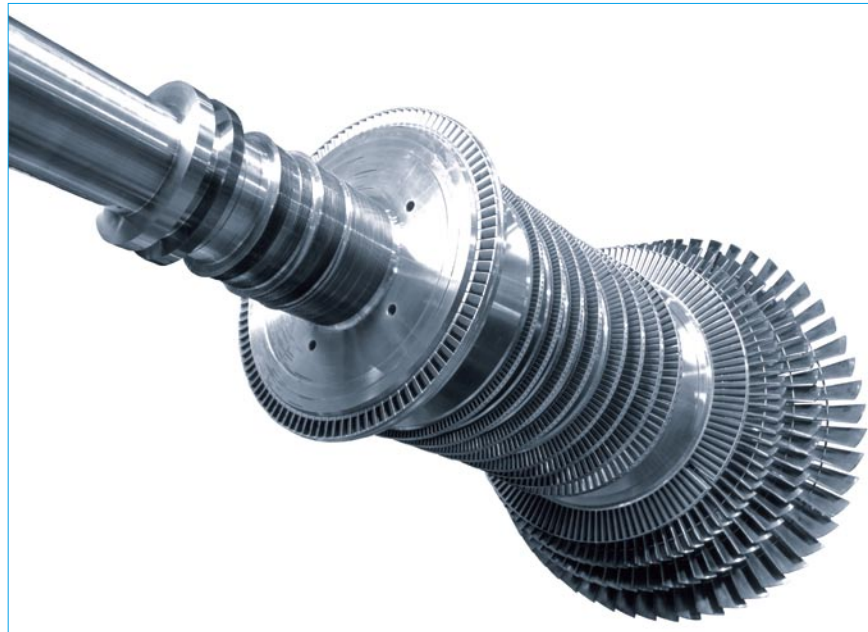
(参考文献)

- (1) 西澤信也. 研削クーラントの汚染度とワーク表面品位との相関研究. 住友重機械技報, no. 164, 2007, p.26.
- (2) 岡本敏宏(岡山大学). 研削クーラントの汚染度とワーク表面品位との相関研究. 砥粒加工学会52巻10号, Oct., 2008, p.589.

蒸気タービンの高効率化

Improvement in Steam Turbine Efficiency

● 浜田 周作* 菊地 知希** 中西 良輔**
 Shusaku HAMADA Tomoki KIKUCHI Ryosuke NAKANISHI



蒸気タービンロータ
Rotor for steam turbine

産業用蒸気タービンを取り巻く市場は、プラントの初期投資額の削減と同時に、環境問題を意識した効率向上要求がますます高まっている。こうした市場ニーズに応えるべく、新日本造機株式会社ではタービン内部における各種損失を低減する開発に取り組んでいる。

捩れ則を適用し最適な流入・流出角とした長翼の開発および段落における漏洩損失の低減を目的としたブレードチップフィンやルートフィンなどは既に開発を完了し、実機に搭載済みであり、所期の性能を達成している。一方で、翼プロファイル損失に関してはこれまで未着手であったが、近年の解析ツールの発達によりこれらを改良する手法を確立した。

本報では、特に高・中圧段翼列におけるプロファイル損失の低減策について報告する。

The industrial steam turbine market is facing substantially increased demand for efficiency improvements, which are the results from consideration of environmental problems, as well as the reduction of plant initial investment cost. To cope with such market trends, Shin Nippon Machinery Co., Ltd.(SNM) is working on developments to reduce various losses in the turbine. Developments have already been completed with respect to, for example, long blades that offer optimum inlet and outlet angles through the application of the twist rule, and blade chip fins and root fins that can reduce the leakage loss in stages. These components have already been installed to actual steam turbines and demonstrated the expected performance. The reduction of profile loss had not been studied for a long period. However, SNM succeeded in establishing the profile loss reduction methodologies thanks to the development of analysis tools in recent years. This paper reports these profile loss methodologies specifically for high-pressure and middle-pressure stages.

1 まえがき

近年の地球温暖化問題を背景とする二酸化炭素排出量削減の要求が高まるなか、エネルギー生産の一役を担っている蒸気タービンに対しては更なる効率向上のニーズが高まっている。これらに応える手段の一つとして考えられることは、サイクル効率を向上することで、これは発電プラントの蒸気圧力および温度を高めることによって解決の一助とすることができる。一方で、蒸気タービンそのものの効率、すなわちタービン内部効率の向上もプラント効率向上に非常に重要な要素である。新日本造機株式会社では、これまでタービン内部

効率向上に、排出速度エネルギーの低減を目的とした最終段長翼の開発、および漏洩損失の低減を目的としたブレードチップフィンやルートフィンの開発を行い、実機へ適用してきた⁽¹⁾。

一方で、タービン内部の損失のなかで、比較的大きな割合を占めるものとしてプロファイル損失がある。そのなかで特に高・中圧段に適用される比較的翼長が短い翼においては、ノズル・翼型の空気力学的特性に大きく影響されることから、流れ場の特徴を考慮したプロファイル形状の開発が必要となる。

従来の翼形状の設計手法は、主に実験結果にもとづく損失モデルを考慮した計算式を用いて行っていたが、今回のプロ

表1 損失の種類と効率向上対策
Losses and improvements in efficiency

損失の種類	内容	主な対策
プロファイル損失	2次元翼形状に起因する損失	翼形の改良
		流入角の適性化
2次損失	内外壁面での流体摩擦や2次流れによる損失	翼高さの増加
		2次流れの抑制
		リークノズル
		リーケッジコントロール
内部漏洩損失	ブレード先端およびノズラピリンズにおける漏れ蒸気損失	クリアランスの減少
		シール形状の改良
		アクティブ クリアランス コントロール
		マルチチップフィン
湿り損失	水滴を含んだ蒸気に起因する損失	ドレンの分離および排除
		ノズルブレード間距離の拡大
		スリットノズル
		ドレンキャッチャ
排気損失	タービンを流出する蒸気速度エネルギー損失および排気室の圧力損失	最終段翼長の増加
		排気室およびディフューザ形状の改良

ファイル形状を決定するに当たっては、新たにCFD(Computational Fluid Dynamics 数値流体力学)と実験計画法(DOE)を組み合わせる最適形状を選定した。

本報では、この活動を中心に報告する。

2 蒸気タービン内部損失の分類

タービン内部における損失は、まず段落間内で生じる損失と段落間外で生じる損失に大別される。さらに段落間内で生じる損失については、翼列内部に生じる損失と翼列外部で生じる損失に区別される。翼列内部で生じる主な損失としては、2次元直線翼列の翼型損失であるプロファイル損失、および壁面での流体摩擦損失や2次流れにもとづく損失である2次損失などがある。翼列外部で生じる損失としては、流出速度損失、内部漏洩損失、回転円板損失および蒸気タービンに特有の湿り損失などがある。また、タービンの段以外で生じる損失として、外部漏洩損失、各種バルブや配管などで生じる圧力損失、軸受摩擦損失に代表される機械損失および放熱損失がある。

2.1 プロファイル損失

プロファイル損失は、翼ルート部・チップ部の壁面の影響を除いた純粋な翼型によって生じる圧力損失で、2次元翼列風洞実験により実測する方法がとられる。ノズル後縁ではウェークとよばれる速度が低下する領域が発生し、この速度減少分をプロファイル損失として計測する。プロファイル損失は流入角度が設計点において最も小さくなり、設計点からずれるに従って増加する。

2.2 2次損失

2次損失とは、翼ルート部・チップ部での壁面に発達する境界層と、2次流れにより発生する渦による損失を意味するが、最も難解でかつ予測が困難な損失であることより、実験で計測された全段落損失よりプロファイル損失などの直接検出可能な損失を差し引いた残りとして定義する。この損失はアスペクト比(翼コード長さと翼高さの比)と転向角に大きく影響を受け、翼高さが低くなれば大きくなるという特性を持つ。

2.3 流出速度損失

ブレードから流出する蒸気速度エネルギーが、次の段で有効に利用できない場合には、それをリーピング損失として扱い、復水式の蒸気タービン最終段では、この損失が大きくなる。また、最終段ブレード出口では低流量時に流出蒸気の再循環、いわゆるかき乱れにより発生するターンナップ損失、および排気室形状に依存して圧力回復度合いの妨げとなるフード損失があるが、これらを明確に区別することは困難であることから、まとめて排気損失として取り扱う。

2.4 内部漏洩損失

タービン内部で各種隙間を蒸気が漏れ出て仕事をしないことによる損失を漏洩損失と呼ぶ。そのなかで、段落間内での漏れを内部漏洩損失、段落間外のグラウンド部での漏れを外部漏洩損失と区別する。ノズル・ブレード間からの漏れ出した内部漏洩蒸気は漏洩損失となるばかりか、再度主流に流れ込んで発生する渦が2次流れ渦と干渉し、2次損失を増大させてしまう原因にもなっている。

2.5 湿り損失

過飽和現象に続いて自然凝縮という相変化現象が生じ、その際に潜熱が周囲の蒸気に放出される時に損失が生じる。同時に水滴が形成され、復水衝撃波が発生し、流体的な損失も伴う。蒸気が速度の遅い水滴を巻き込みながら流れることから、蒸気を持つエネルギーが失われる。ブレードの背面に水滴が衝突することにより、制動損失が生じる。さらに、翼表面に付着した水滴によるプロファイル損失や遠心作用による損失がある。これらの損失を総称して、蒸気タービン特有の損失でもある湿り損失と定義する。湿り損失は実験により測定することは困難であるが、経験的には段の平均湿り度が1%増すごとに、湿り損失も約1%ずつ増すといわれている。

2.6 その他の損失

その他の損失として、ロータディスクが回転することで蒸気をかき乱す回転損失、蒸気加減弁などに代表される圧力損失、軸受などの機械損失およびケーシング表面からの放熱損失などがある。

3 効率向上策

表1に、損失の種類と効率向上対策を示す⁽²⁾。本報では、

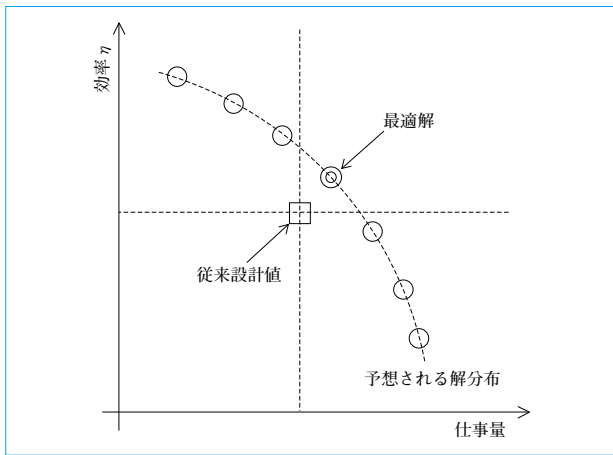


図1 最適解の探索
Search for optimized solution

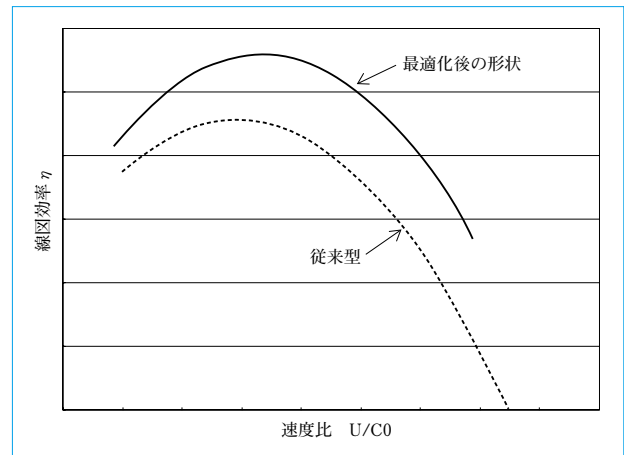


図3 線図効率
Diagram efficiency

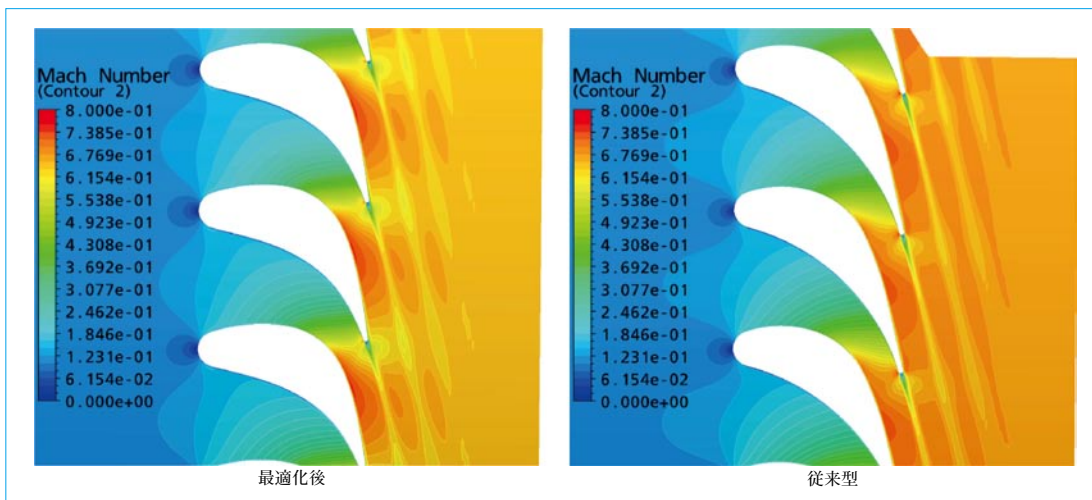


図2 マッハ数コンタ
Contours of mach number

プロフィール損失を低減させるべく行った翼型プロフィールの改良を中心に報告する。

3.1 高・中圧段プロフィール損失

高・中圧部の内部効率を向上させるには小径・多段化が有効であるが、多段化の方向での検討はコストアップに直結することから、顧客満足度が満たされるとは限らない。したがって、ある段落に着目した際に、効率および仕事量のいずれもが現状値を上回る領域を探索することにした。図1に、最適解探索の概念を示す。まずプロフィール形状に関しては、入口端半径やスタガ角度などに加え、圧力面側および負圧面側に配置した複数のコントロールポイントで形状を定義し、各パラメータが形状に与える影響を確認し、設計変数としての変動範囲を決定した。次に、実験計画法に基づくランダムサンプリングによって効率向上に寄与度の大きなパラメータの感度分析を行い、変動範囲の水準を再設定した。さらに、再設定した水準での遺伝的アルゴリズムを用いた最適集合探索によって、効率と仕事をどちらも向上する形状を探索し、最終的に得られた形状をCFDで確認した。CFDの結果をみると、ノズルはスロート部で圧力勾配が壁面に直角となり、ブレードは従来翼では入口側で一部剥離が生じていたものが、最適翼では剥離もなく非常にスムーズな流れであることが確認された。図2に、CFD結果の一例として

ノズルのマッハ数コンタ図を示す。形状決定に当たっては、蒸気による曲げ力を考慮した断面2次モーメントの確保や、翼のシュラウドバンドを固定するテノンと呼ばれるリベット状の構造も従来と同様に装備可能であることを確認している。また、本ノズル・ブレードプロフィールは各種条件下で使用されることから、流入角度の設計点からのずれに対するロバスト性も確認済みである。図3に、新旧それぞれの線図効率を示す。最適化後の形状においては全速度比域において効率が向上していることが確認できる。

次に、CFDの妥当性の確認に、新旧それぞれの形状で圧縮空気を用いた静止翼列風洞実験を行った。この際、マッハ数、レイノルズ数および入口/出口の圧力比は実機と同等となるように設定した。計測項目としては、ピトー管を用いて翼列入口出口の全圧・動圧と、翼モデルに複数個開けた静圧孔より翼表面の静圧を計測した。得られた実験結果は、翼表面の圧力分布などCFDの結果と良好に一致していることが確認された。

3.2 排気ディフューザおよび排気フード

最終段から排出される蒸気は速度エネルギーはタービンの仕事には使われないので、そのまま損失として捨てられることになる。そこで上(下)向き排気の場合は最終段後にエネルギー回収用の円錐ディフューザを設けて、排出速度エネルギー

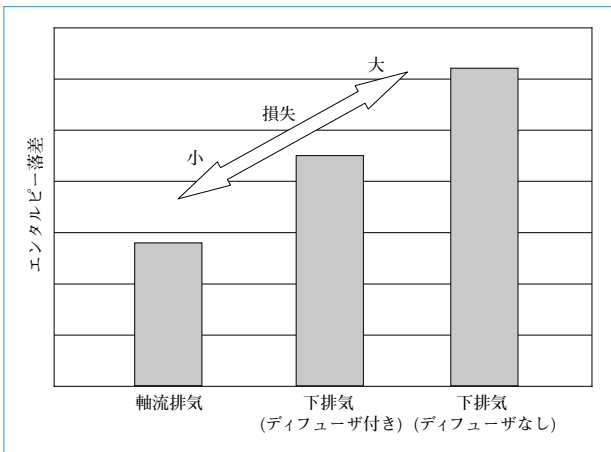


図4 排気損失の比較
Comparison of exhaust losses

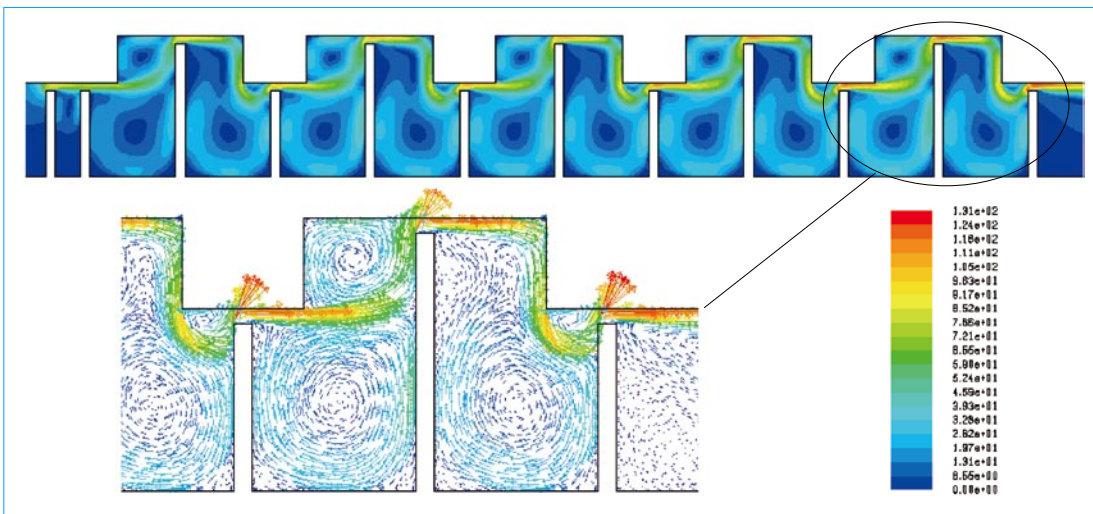


図5 ラビリンス内速度分布
Velocity distribution in labyrinth

を圧力エネルギーとして回収することで損失を低減する。軸流排気の場合は、排気フードそのものが徐々に圧力回復が可能となるように最適ディフューザ角を有し、さらに上(下)排気と比較して蒸気の曲がりがない分だけ圧力回復度が大きく効率向上に貢献している。これらの事象について、CFDを用いて解析した。図4に、排気室形状の違いによる損失の差異を示す。ディフューザなしの場合はケーシング壁に蒸気が高速のまま当たることから損失も大きく、複雑な回転流が生じていたが、ディフューザを装備することで圧力回復度も大きくなり、その傾向はさらに軸流排気型において、より顕著に現れることが確認された。

3.3 ラビリンスシール

タービン内部損失のうち、プロファイル損失、2次流れ損失および排気損失とともに大きな割合を占めるものとして漏洩損失がある。この蒸気が仕事をせずに漏れ出してしまう漏洩損失を低減させる目的でラビリンスシールがグラウンド部、ノズル部およびブレードチップ部に装備される。ラビリンスは、静止部と回転部の間に僅かな間隙を設け、ここでの絞り効果を利用して漏れ量を低減する効果がある。漏れ量の計算については、実験により得られる係数と隙間の面積や入口/出口の圧力比を考慮した計算式により算出が可能である。この計算式の妥当性を確認するべく、CFDによる解析を実施した

(図5)が、両者ともほぼ同等の値である結果が得られたことより、今後の新型ラビリンス構造を検討するうえでもCFDが有効なツールであることが確認された。

4 むすび

- (1) 蒸気タービンの効率向上策として、次の事例について紹介した。それは、中・高圧段プロファイル損失の低減、排気損失を低減させる排気ディフューザと排気フード、および漏洩損失低減のラビリンスシールの三つである。
- (2) 検討に当たっては、新たなツールとしてCFDを利用したが、今後の更なる高効率化に向けてCFDは必要不可欠な手法になりつつある。CFDの妥当性/精度の確認には実験による検証が合わせて必要になってくるが、今後もCFDを活用して、更なる蒸気タービンの高効率化に努めていく所存である。

(参考文献)

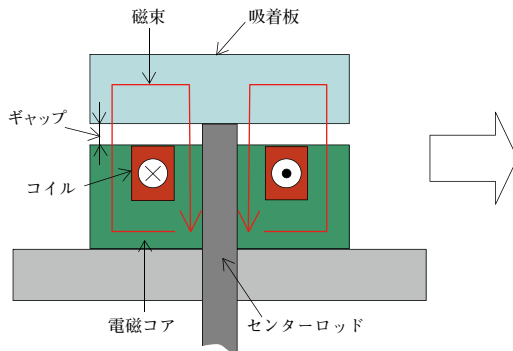
- (1) 井野正徳. 蒸気タービンの高効率化. 住友重機械技報 no.155, 2004, p.17~20.
- (2) ターボ機械協会編. 蒸気タービン. 1990, p.156~183.

電磁型締装置のモデリングと制御

Modeling and Control of Electromagnetic Molding Machine

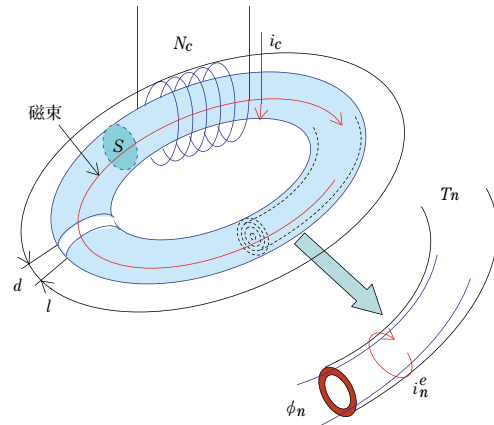
●加藤 敦*
Atsushi KATO

森田 洋*
Hiroshi MORITA



(a) 電磁石システム

電磁石モデル
Electromagnet model



(b) 提案する空間離散化モデル

射出成形機の高精度化を実現すべく、非接触式直圧型型締機構を備えた射出成形機が商品化されている。本機構の実現に電磁石で型締を行う電磁型締装置が採用されているが、電磁石内部に流れる渦電流により、制御調整が困難であるという問題点が発生している。そこで、電磁石内部に流れる渦電流を考慮して、電磁石の鉄心を渦電流に沿って空間離散化し、電磁石のモデリングを行う。得られたモデルは次元可変な有限次元の状態方程式で与えられ、その周波数応答および時間応答は実機試験結果と一致する。さらに、得られたモデルを用いて制御設計をし、実機試験を行った。得られた結果は提案モデルの数値計算結果と一致し、提案モデルの有用性を確認することができた。そして、提案モデルに基づいて制御設計を行うことで、より精密な型締力制御が可能となった。

We have brought to the market injection molding machines which have non-contact center press mold clamping for higher-accuracy mold clamping. This mold clamping consists of electromagnetic molding device. However, it is difficult to tune control parameters for this molding device due to eddy current that occurs inside electromagnet. In this paper, we propose a mathematical model for the electromagnet placed inside molding device. The frequency and time responses of proposed model have corresponded with both responses of experimental results. We have also designed the control parameters of the actual machine by using this mathematical model. The experimental results have agreed with the numerical calculation results obtained from the model. Hence, the availability of the proposed model has been confirmed. By designing the control parameters with the proposed model, it is possible to control the mold clamping force more accurately.

1 まえがき

近年、プラスチックレンズの高精度化などに伴って、射出成形機に対しても高精度な成形が要求されている。そこで、そのような要求に応えるべく、非接触式直圧型型締機構を備えた射出成形機が商品化されている⁽¹⁾。また、このような機構を実現すべく型締機構として電磁型締装置を採用している。電磁型締装置とは電磁石が発生した吸着力を直接金型に伝え、型締を行う機構である。

しかし、この電磁型締装置において、型締力の応答が扱いにくく、試行錯誤的な制御器調整では所望の応答を実現することが困難であるという問題が発生している。この現象は電磁石鉄心内部に流れる渦電流に起因することが予想されるが、渦電流は鉄心に分布して流れていることから、分布定数の問題となりそのモデリングは容易でない。

それに対して本報では渦電流を考慮し、鉄心を渦電流に沿って空間離散化することで電磁石のモデリングを行う。得られたモデルは次元可変な有限次元の状態方程式により与えられる。そして、提案したモデルは次数を大きくとることによって、実機の挙動と一致することを示す。さらに、得られたモデルに基づいて周波数整形によって制御調整された実機制御結果と提案したモデルを用いた数値計算結果を比較し、提案するモデルの妥当性について検証を行う。

2 電磁型締装置

2.1 装置概要

図1に、本論文で用いた電磁型締装置のプロトタイプシステムを示す。電磁型締装置は型締力を発生させる電磁石、電磁石で発生した力を伝えるセンターロッド、型締を行う型締機構、そして、これらを支持するフレームによって構成され

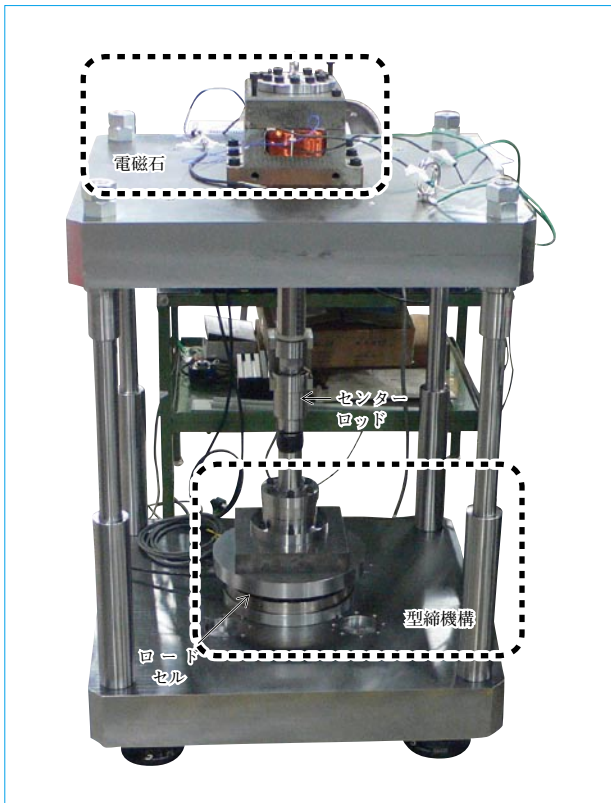


図1 プロトタイプシステム
Prototype system

る。また、型締機構は型締を行う金型部および型締力を計測するロードセルによって構成されている。

次に、冒頭左図に、試験装置に搭載された電磁石の模式図を示す。電磁石は電磁コア、吸着板およびコイルの三つの部分によって構成される。電磁石はコイルに電流を流すと、冒頭左図に示されるような磁束が発生する。そして発生した磁束によって、電磁石コアと吸着板の間に存在するギャップ部に吸着力が発生する。吸着板はセンターロッドを介して型締機構と一体となっていることから、発生した吸着力はそのまま型締機構にある金型に圧縮する力を加え、型締力となる。

2.2 PI制御系の「設計のしづらさ」

電磁型締装置において、所望の型締力をオーバーシュートせず、短い時間で整定する必要があることから、型締力応答が装置の重要な指標となっている。図1で示される電磁型締装置を用いた型締力制御システムのブロック線図を、図2に示す。ここで、図2にあるフィルタとは実機内部に含まれる何らかの時間遅れ要素を表し、一般にローパスフィルタの特性を有するものである。

次に、図2で構築した制御システムの比例ゲインを変化させた際の型締力応答に関する実機試験結果を、図3に示す。通常、PI制御系の設計においては、比例ゲインを大きくすると収束速度が速くなり、さらにゲインを大きくするとオーバーシュートする現象を観測することができる。しかし、図3の試験結果より、電磁型締装置の場合、比例ゲインを大きくすることで目標値への収束速度が速くなることはなく、さらにゲインを大きくしても、オーバーシュートし、かつ大きな振動が生じてしまうという現象が確認できる。

このように電磁型締装置においては、通常の制御システムでの直感にやや反する現象が生じている。そのことから、本

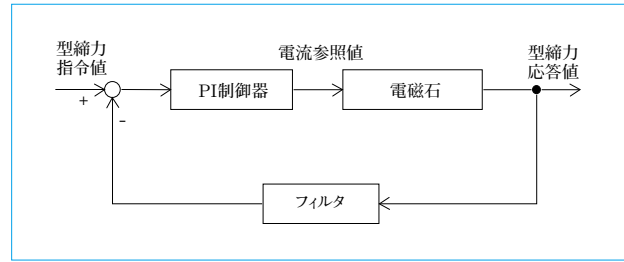


図2 PI制御システム
PI control system

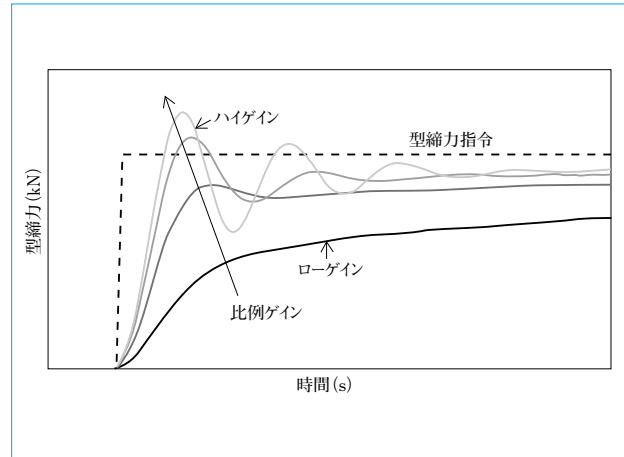


図3 電磁型締装置のステップ応答
Step response of electromagnet system

報が取り扱う電磁石は、従来の制御調整技術⁽²⁾では対応しづらく、電磁型締装置の性能向上を図ることが困難になっている。そこで、系統的な制御系の設計に向けて、まずこうした現象を再現することができるモデルを提案し、その妥当性を考察する。

3 電磁石モデル

3.1 従来モデル

一般に電磁石に対する制御系設計は電磁石が発生させる吸着力の定常特性 F_{st} を用いて、電磁石の制御設計が行われることが多い⁽³⁾。

$$F_{st} = \frac{N_c^2 \mu_0 S}{2(l/\mu_s + d)^2} i_c^2 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 S : 断面積、 N : コイル巻き数、 l : 鉄心磁路長、 d : 電磁石ギャップ、 μ_0 : 真空透磁率、 μ_s : 比透磁率、 i_c : コイルに流れる電流を表す。しかし、電磁型締装置においては、2.2で述べたように、型締力の応答特性が重要な性能指標となっている。したがって、定常特性を記述した(1)式のモデルでは、電磁石の特異な現象を再現することもできないことから、電磁型締装置の応答特性の分析は困難である。

3.2 提案する空間離散化モデル

2.2で述べた現象は電磁石鉄心内部に分布して流れる渦電流に起因することが予測される。そこで、この分布状に流れる渦電流を考慮した新たな電磁石分布定数モデルを提案する。冒頭左図に示される電磁石は左右に対称性が存在することから、片側のみについて考える。このとき、電磁石コアと吸着板の形状を円環状に単純化し、磁束の経路上に2箇所存在するギャップについては1箇所集約し、冒頭右図のようなモ

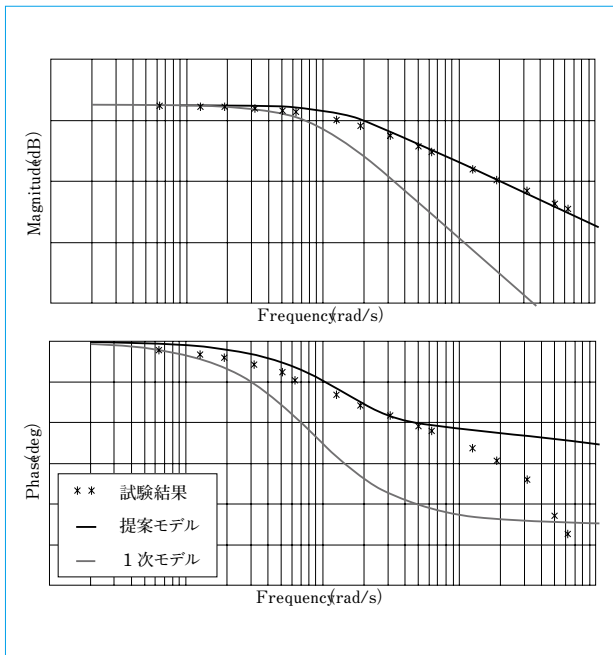


図4 電磁石分布定数モデルのボード線図
Bode diagram of proposed electromagnet

デル化を行う。このモデル化により、渦電流が径方向のみに流れることを仮定できる。ここで、電磁石コアと吸着板を合わせたこの円環部を電磁石鉄心と呼び、渦電流に沿って電磁石鉄心をN個のチューブ状に分割する空間離散化を行う。以下では、中心から順にチューブ T_1, T_2, \dots, T_n と呼ぶ。まず、チューブ T_n の磁気回路について考える。このとき、チューブ T_n に発生する磁束 ϕ_n は、チューブ T_n に作用する起磁力 E_{Mn} と磁気抵抗 R_{Mn} 、断面積 S_n を用いて、

$$\phi_n = E_{Mn} / R_{Mn} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_{Mn} = \sigma / S_n, \sigma = \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_s} + \frac{d}{\mu_0} \right) \dots\dots\dots (3)$$

と得られる。次に、チューブに作用する起磁力 E_{Mn} はチューブ T_n の外側の起磁力の総和であり、それはチューブ T_n の外側に発生する渦電流 $i_n^e (k \geq n)$ とコイルに流れる電流 i_c の総和によって、

$$E_{Mn} = \sum_{k=n} i_k^e + N_c i_c \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。一方、チューブ T_n に発生する渦電流 i_n^e は、チューブ T_n に発生する誘導起電力 E_{En} と電気抵抗 R_{En} を用いて、

$$i_n^e = E_{En} / R_{En} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。そして、誘導起電力 E_{En} はファラデーの電磁誘導の法則⁽⁴⁾により、チューブ内側の磁束変化の総和によって、

$$E_{En} = - \sum_{k \leq n} \dot{\phi}_k \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。また、チューブ T_n の磁束密度 B_n は磁束の定義から、

$$B_n = \phi_n / S_n \dots\dots\dots (7)$$

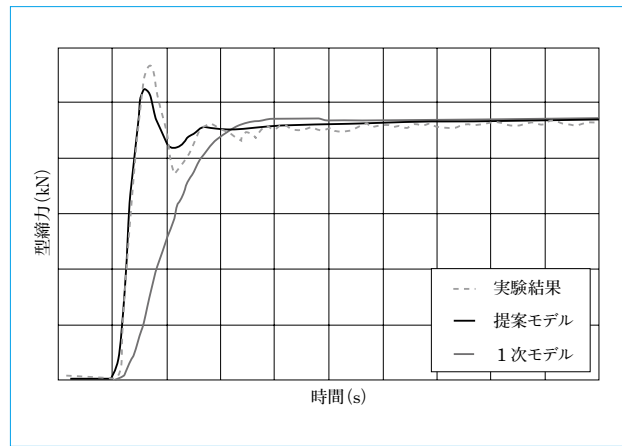


図5 電磁石分布定数モデルの時間応答
Time response of controlled system

の関係をもっている。そして、鉄心に作用する吸着力 F は各チューブに発生する吸着力の総和として、

$$F = \sum_{n=1}^N \frac{S_n B_n^2}{2\mu_0} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。以上の関係式を、入力を $u=i_c$ 、出力を $y=F$ とし、状態変数を

$$\mathbf{x} = [B_n, \dots, B_1]^T$$

として整理すると、状態方程式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \frac{1}{2\mu_0} \mathbf{x}^T \mathbf{S}_d \mathbf{x} \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。ただし、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N \times N}$$

$$\mathbf{S}_d = \text{diag} \{S_n, \dots, S_1\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$$

$$\mathbf{R}_d = \text{diag} \{R_{En}, \dots, R_{E1}\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$$

と定義し、

$$\mathbf{A} = -\sigma \mathbf{S}_d^{-1} \mathbf{D}^{-T} \mathbf{R}_d \mathbf{D}^{-1} \in \mathbf{R}^{N \times N}$$

$$\mathbf{B} = N_c \frac{R_{En}}{S_{En}} [1, 0, \dots, 0] \in \mathbf{R}^{N \times 1}$$

である。

最後に、出力方程式の非線形性に対して、動作点 $(\bar{u}, \bar{x}, \bar{y})$ 周りの線形化を施す。 (u, x, y) をそれぞれ動作点からの偏差と新たに定義すると、その挙動は、

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\mu_0} \bar{\mathbf{x}}^T \mathbf{S}_d \in \mathbf{R}^{1 \times N}$$

を用いて、

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。

3.3 実機試験結果との比較

本節では、提案した電磁石分布定数モデル(式(10))の妥当

表1 制御パラメータ
Obtained control parameters

	(i)	(ii)
K_p	9.6×10^4	1.9×10^3
K_i	7.3×10^1	1.5

性を検討するべく、実機試験結果およびそれと同程度の時定数をもつ1次モデルについて、周波数応答および時間応答の観点から比較検討を行う。周波数応答法⁽⁵⁾を用いて得られた電磁石の入出力に対する周波数応答の結果を、図4に示す。今回提案のモデルはゲイン曲線の高周波域での傾きが-10dB/decであり、実機電磁石の特徴と一致する。また、図2に示される型締力PI制御システムの時間応答の結果を、図5に示す。これにより、提案モデルを用いた数値計算結果が実機試験結果と一致していることが分かり、提案モデルは十分に問題となる現象を再現できていることが確認できる。

一般に、相対次数 k のシステムにおける高周波域でのゲイン曲線の傾きは-20kdB/decである。この点からも、制御対象である電磁型締装置は一般的な有理伝関数表現可能な集中定数系によって、適切に表現することが難しいであろうと予想できる。参考として、電磁石を1次系で近似したモデルとの差異について触れる。図4に示される周波数応答の結果において、1次系のゲイン曲線は高周波域で-20dB/decの傾きを有し、実機試験結果の周波数応答の結果とは異なる。同様に、時間応答についても2.2で述べた問題となる現象を再現することはできていない。

4 PI制御器の設計

4.1 周波数整形を用いた制御設計

提案モデル(式(10))を直接用いる場合、少なくとも図2におけるフィルタのカットオフ周波数まで-10dB/decの傾きを表現する必要がある。したがって、実機試験をモデル化するには、少なくとも $N=80$ 程度の次数が必要となる。よって、提案モデルをそのまま用いて制御設計を行う場合、その次数から計算量が多くなるという問題が発生する。

そこで、注目する周波数帯域に限定したモデルを求め、求めたモデルに基づいて周波数整形を行う手法が提案されている⁽⁶⁾。提案した手法を用いることで、少ない計算量で制御ゲインを設計することができ、実用的な制御設計を行うことができる。本報ではその手法を用いて得られた結果のみを、表1に示す。

4.2 実機試験による試験結果

本節では、実機試験による検討結果について述べる。4.1で得られた制御設計の結果を2種類の制御パラメータ(表1)として採用し、提案モデルに基づいた数値計算と実機試験の比較を行った。その結果を、図6に示す。図6の結果より、数値計算結果と実機試験結果が一致していることが良く分かる。特に、制御ゲインを変化させても電磁型締装置で問題となる現象(オーバーシュート、収束性)を再現することができている。したがって、提案モデルを用いて制御設計を行うことの有用性を確認することができたといえる。

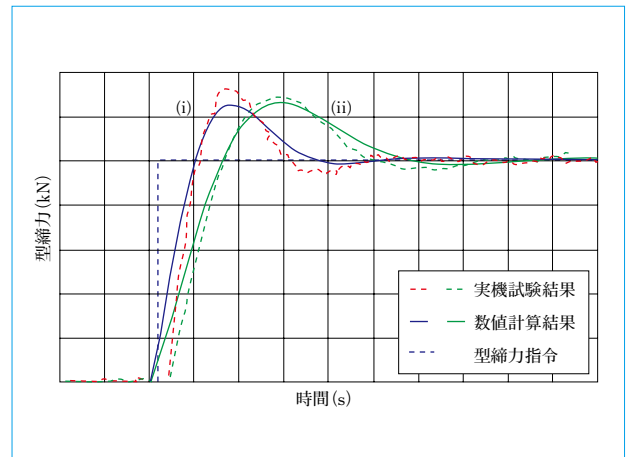


図6 数値計算結果と実機試験結果の比較
Numerical and experimental results

5 むすび

本報では、電磁型締装置のモデル化とその制御手法について報告を行った。

- (1) 高精度な成形を可能にする非接触式直圧型型締機構においては、電磁型締装置が採用されている。しかし、電磁型締装置は電磁石内部に流れる渦電流によって、従来の制御調整では対応しづらいという問題点がある。
- (2) 渦電流を考慮し、電磁石鉄心内部を空間離散化した新しいモデルを提案した。提案したモデルは周波数応答、時間応答ともに試験結果と一致している。
- (3) 提案したモデルを用いて周波数整形を行い、制御設計を行った。また、その試験結果は提案モデルを用いた数値計算結果と一致し、提案モデルの有用性を確認することができた。

本論文の内容に関する、国立大学法人東京工業大学の加嶋健司氏および石崎孝幸氏からの有益な助言に謝意を表す。

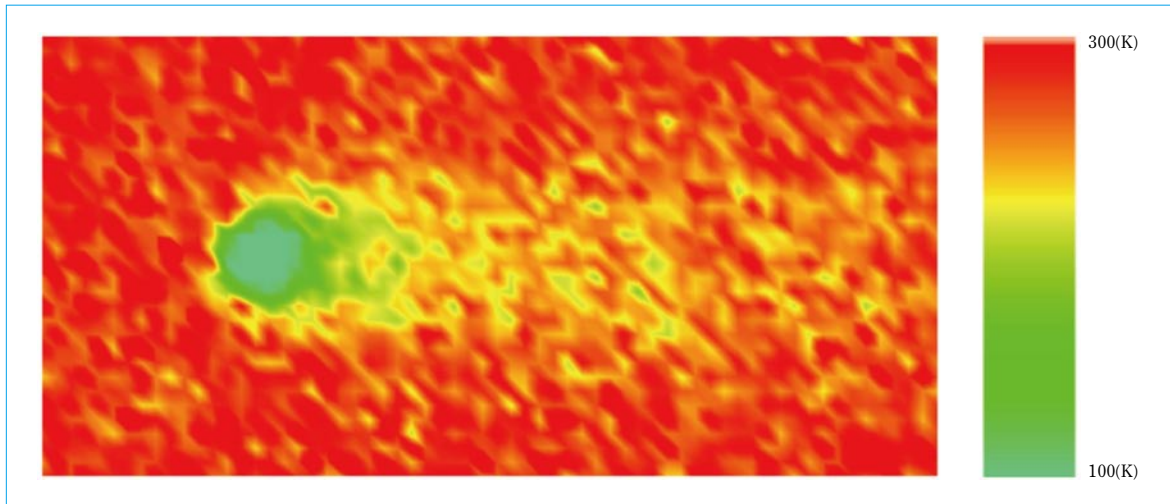
(参考文献)

- (1) 田村惇朗. 射出成形機の高精度型締装置. 住友重機械技報, no. 171, 2009, p. 17~20.
- (2) 須田信英. PID制御. 朝倉書店, 1992.
- (3) 日本機械学会編. 磁気軸受の基礎と応用. 養賢堂, 1995.
- (4) 渡辺征夫・青柳晃. 電磁気学. 培風館, 1991.
- (5) 足立修一. MATLABによる制御のためのシステム同定. 東京電機大学出版会, 1996.
- (6) 石崎孝幸, 加嶋健司, 井村順一, 加藤敦, 森田洋. 電磁型締装置の分布定数モデリングと制御. 計測自動制御学会論文集, vol. 45, no. 11, p. 502~511.

くりこみ群分子動力学法による流れの計算機実験

Computer Experiments of Flow Fields by Renormalized Molecular Dynamics Method

●市嶋大路* 広瀬良太* 大西良孝*
 Daiji ICHISHIMA Ryota HIROSE Yoshitaka OHNISHI



RMDによる $Re=545$, $Pr=1$ における円柱周りの流れのシミュレーション(流体と円柱の温度差 200K)
 Simulation of flow about circular cylinder at $Re=545$ and $Pr=1$ by RMD(Temperature difference between fluid and circular cylinder : 200K)

我々が開発したくりこみ群分子動力学法(Renormalized Molecular Dynamics RMD)を使えば、任意のスケールにおける流れのシミュレーションが可能であるだけでなく、DSMC法で唯一可能であった希薄な流れのシミュレーションも可能である。すなわち、すべてのクヌーセン数の領域に対して、シミュレーションが可能である。RMDは分子動力学法の利点をすべて継承することから、相転位や圧縮を伴う現象を再現でき、流れ場と温度場の間で連成する問題へも容易に適用できる。

本報では、流れと温度場の連成問題、そして自由膨張問題へ適用した結果を報告する。流れに平行に置かれた平板表面における対流熱伝達のシミュレーションから、レイノルズ数に対するヌセルト数の関係が得られ、近似式と良い一致を示した。一方、自由膨張問題のシミュレーション結果は、解析解と一致し、非定常な高クヌーセン数流れのシミュレーションが可能であることを示した。

Renormalized molecular dynamics(RMD) method, our new development, allows not only simulation of the flow fields on an arbitrary scale but also simulation of rarefied flow, which has been only simulated by means of the DSMC method. The RMD method offers simulations over the region of all Knudsen numbers. Since the RMD method has all the advantages of the MD method, it can reproduce the phenomena accompanying phase transition and compression and is applicable to even the coupled problem between flow and thermal fields. This paper reports the study results obtained by the RMD method, which is applied to the coupled problem between flow and thermal fields and the free expansion problem. The simulation for the convective heat transfer on a flat plate surface placed in parallel to the flow provides the relationship between Nusselt number and Reynolds number, and the relationship shows a good agreement with the approximate expression. The simulation results of the free expansion problem completely agree with the analytical solution, proving that the RMD method can simulate unsteady flows in high Knudsen numbers.

1 まえがき

古典的な物理現象は、原子や分子の集団運動の帰結であるから、原子や分子の個々の運動を位相空間内で追跡し、統計平均を取ることで測定に対応した物理量を得ることができる。この手法は、分子動力学(Molecular Dynamics MD)法⁽¹⁾⁽²⁾と呼ばれる。しかし、この方法で巨視的な体系を扱おうとすれば、膨大な数の粒子を追跡することになり、既存の電子計算機では実現できない。その代わりに、連続体近似を施した場

の方程式を用いることになる。流れ場は、濃度分布の時間発展を記述するボルツマン方程式によって記述され、DSMC法⁽³⁾で解かれる。さらに、ボルツマン方程式から質量や運動量の期待値を求めることで、流体力学で用いられる支配方程式が導出される⁽⁴⁾。他方、低温において原子は調和振動子であると仮定し、原子間距離をゼロとした連続体近似を導入すれば、弾性体を記述する波動方程式が得られる⁽⁵⁾。これら進化した場の方程式は、偏微分方程式であるから有限差分法、有限体積法、有限要素法、そして粒子法⁽⁶⁾によって解くことが

できる。しかし、この進化の過程で限定された領域にのみ適用する場の方程式へ退化したことから、異なる領域にまたがる解析が困難になった。

近年、弾性や流れや熱、さらに相転位を含む連成現象を高精度かつ高効率にシミュレート可能な手法が望まれている。既製の連成ソフトは、次のような対応をしている。一つは、個々の場の方程式の解を、時間遅れを持って共有する、弱連成と呼ばれる手法である。いま一つは、現象を統一的に記述する数理モデルを構築し、場の量すべてを同時に連成する、強連成と呼ばれる手法である。いずれも、モデルに人為的な仮定が多く信頼性に欠ける。また、非線形性に起因した数値計算上の不安定性を内在し、解が収束しないことが珍しくない。これらの困難は、場の方程式を得る仕分け作業の代償である。また、偏微分方程式を離散化し数値積分を実行する手法は、位相特性と振幅特性を保つことが困難である⁽⁷⁾。これは、運動量やエネルギーそして質量保存則を満たさないことを意味する。保存則は、相転位や圧縮を伴う現象の解析において、破ってはならない法則である。以上述べた問題点を解決し、現在の計測技術と比肩し得る計算精度を達成するには、MD法へ祖先帰りの必要がある。MD法による任意のスケールのシミュレーションが可能となれば、試作レス化は絵空事ではなくなる。

現在、8~16CPUの並列計算機が数十万円で入手でき、100万粒子程度のMD計算が現実的な時間で可能である。そこで、我々は現在の数値解析が抱える問題を払拭するべく、MD法の劇的な計算効率の向上を目指した。そして、くりこみ群分子動力学(Renormalized Molecular Dynamics RMD)法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を開発した。くりこみ群をMDへ適用することで、ハミルトニアンを不変に保ち、粒子数を桁違いに圧縮する相似側を導出した。MD法の利点すべてを継承し、飛躍的に計算効率をあげることができた。連成問題における困難は元来存在しない。すべての保存則が満足され、数値計算上の不安定も存在しない。個々の粒子の時間発展は、シンプレティック積分分子⁽¹⁰⁾により為されるからである。RMDは高い計算精度を持ち、任意の分解能のシミュレーションを可能とした。

前報告⁽⁸⁾において、固体の弾性変形、破壊および溶融の巨視的なシミュレーションがRMD法により可能であることを示した。本報では、工学上重要である流れ場と温度場の連成問題を扱い、熱伝達率の算出を行う。今一つは、高クヌーセン数非定常流れのシミュレーションが可能であることを示す。

2 くりこみ群分子動力学法の手順

2.1 分子動力学法

個々の粒子の運動は、正準変数 $(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$ に対する以下の運動方程式に従う。

$$m_i \frac{d\dot{\mathbf{q}}_i}{dt} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_i} \Phi(\mathbf{q}_i) + \mathbf{f}_i - \gamma \dot{\mathbf{q}}_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$\Phi(\mathbf{q}_i) = \sum_{j \neq i}^N \phi(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) \quad \dots\dots\dots (2)$$

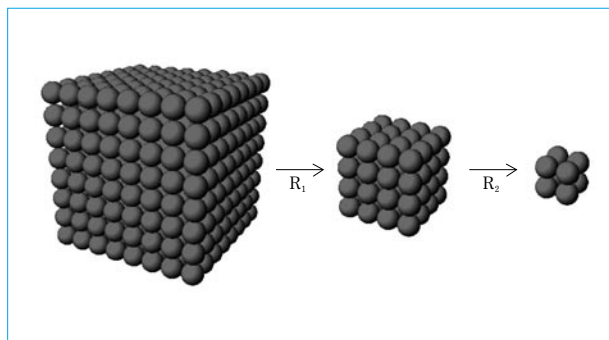


図1 元の系とくりこまれた系の関係(n=2の場合)
Relation between original system and renormalized system for $\alpha=2$

は粒子*i*が持つポテンシャルエネルギーであり、 $\phi(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)$ は原子間ポテンシャル⁽²⁾である。

\mathbf{f}_i と γ は、ランダム力と減衰定数であり、以下の関係式を満足する。

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{f}_i(t) \rangle &= 0 \\ \langle \{f_{ix}(t)\}^2 \rangle &= \langle \{f_{ix}(t')\}^2 \rangle = \langle \{f_{ix}(t)\}^2 \rangle = 2\gamma k_B T_B \delta(t-t') \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで k_B はボルツマン定数である。これらは温度 T_B の熱浴と接触している粒子を模擬する⁽¹¹⁾。

シンプレティック積分分子の一つである蛙飛び法⁽¹⁰⁾により運動方程式を離散化すれば、

$$\begin{aligned} m_i \frac{\dot{\mathbf{q}}_i(t+\frac{\Delta t}{2}) - \dot{\mathbf{q}}_i(t-\frac{\Delta t}{2})}{\Delta t} &= \frac{1}{1+\frac{\gamma}{2m_i}\Delta t} \left(-\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_i} \Phi(\mathbf{q}_i)(t+\mathbf{f}_i(t) - \gamma \dot{\mathbf{q}}_i(t-\frac{\Delta t}{2})) \right) \dots\dots\dots (4) \\ \frac{\mathbf{q}_i(t+\Delta t) - \mathbf{q}_i(t)}{\Delta t} &= \dot{\mathbf{q}}_i(t+\frac{\Delta t}{2}) \end{aligned}$$

を得る。

2.2 くりこみ群⁽⁸⁾⁽⁹⁾

現実の系が、体積 $V=L^3$ 、粒子数 N を持つとする。くりこみ群を使って粒子数を圧縮し、縮小された相似な系 (L', N') を作る。

$$\begin{aligned} L &\rightarrow L' = L \alpha^{-1} \\ N &\rightarrow N' = N \alpha^{-3} \quad \dots\dots\dots (5) \\ \alpha &= 2^n \end{aligned}$$

n はくりこみ回数である。図1に、 $n=2$ とした例を示す。くりこみに際し、式(4)に現れる物理量は次のようになりこまれる。

$$\begin{aligned} m_i &\rightarrow m'_i = m_i \alpha^2 \\ \gamma &\rightarrow \gamma' = \gamma \alpha^2 \quad \dots\dots\dots (6) \\ \mathbf{f}_i &\rightarrow \mathbf{f}'_i = \mathbf{f}_i \alpha \\ \phi &\rightarrow \phi' = \phi \end{aligned}$$

また、変数は次のようにスケールされる。

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i &\rightarrow \mathbf{q}'_i = \mathbf{q}_i \alpha^{-1} \\ \dot{\mathbf{q}}_i &\rightarrow \dot{\mathbf{q}}'_i = \dot{\mathbf{q}}_i \alpha^{-1} \quad \dots\dots\dots (7) \\ \Delta t &\rightarrow \Delta t \alpha \end{aligned}$$

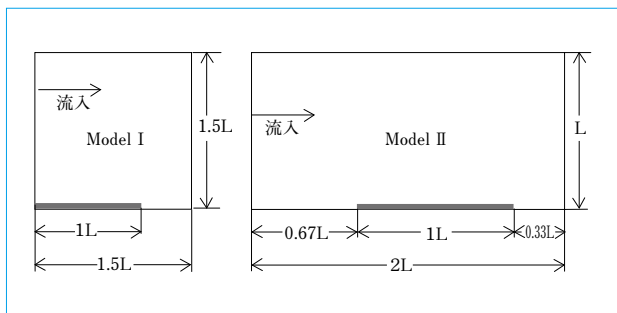


図2 対流熱伝達のシミュレーションモデル I と II
Simulation models I and II for convective heat transfer

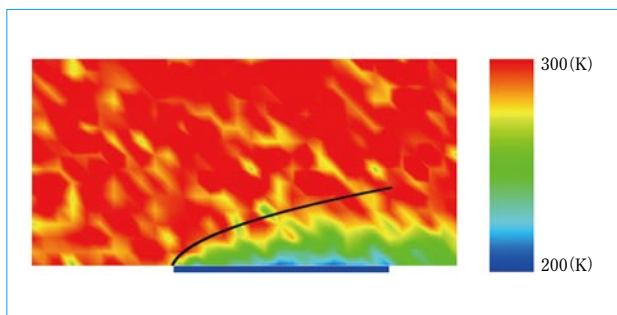


図3 対流熱伝達における温度場のシミュレーション結果 (Re=172)
Simulation result of temperature fields in convective heat transfer at Re=172

くりこみの結果, 時間刻み Δt は現実の系のその α 倍にとることができる。ただし, 時間軸はスケールされない($t'=t$)。くりこまれた系において通常のMD計算を実行し, 正準変数($\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_i$)の時間発展を求める。

2.3 場の量の算出

実測値に対応する場の量は, 正準変数($\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_i$)の統計平均により算出する。局所的な領域を $V_l \in V$, この領域に含まれる粒子数を $N_l \in N$ とする。空間座標 \mathbf{x} , 時刻 t における, 速度場 $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$, 密度分布 $\rho(\mathbf{x}, t)$, 温度場 $T(\mathbf{x}, t)$ そして応力場 $\sigma_{xy}(\mathbf{x}, t)$ を算出する公式を次に示す。くりこまれた系の場の量は現実の系と相似になる。相似則も共に示した。

$$\mathbf{x}' = \frac{\sum_i^{N_l} m'_i \mathbf{q}'_i}{\sum_i^{N_l} m'_i} = \mathbf{x} \alpha^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

$$\mathbf{v}'(\mathbf{x}', t) = \frac{\sum_i^{N_l} m'_i \dot{\mathbf{q}}'_i}{\sum_i^{N_l} m'_i} = \mathbf{v}(\mathbf{x} \alpha, t) \alpha^{-1}$$

$$\rho'(\mathbf{x}', t) = \frac{1}{V'_l} \sum_i^{N_l} m'_i = \rho(\mathbf{x} \alpha, t) \alpha^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$T'(\mathbf{x}', t) = \frac{2}{3N'_l k_B} \sum_i^{N_l} \frac{1}{2} m'_i (\dot{\mathbf{q}}'_i - \mathbf{v}'(\mathbf{x}', t))^2 = T(\mathbf{x} \alpha, t)$$

$$\sigma'_{xy}(\mathbf{x}', t) = \frac{1}{V'_l} \sum_i^{N_l} \left(m'_i \dot{q}'_{ix} \dot{q}'_{iy} - q'_{ix} \frac{\partial}{\partial q'_{iy}} \Phi(q'_i) \right) = \sigma_{xy}(\mathbf{x} \alpha, t)$$

局所的な領域 V'_l に含まれる粒子数 N'_l が十分でないときは, 分散の低減に, 時間平均を取る必要もある⁽¹²⁾。

3 くりこみ群分子動力学法による流れの計算機実験

原子間ポテンシャルは, レナード・ジョーンズポテンシヤ

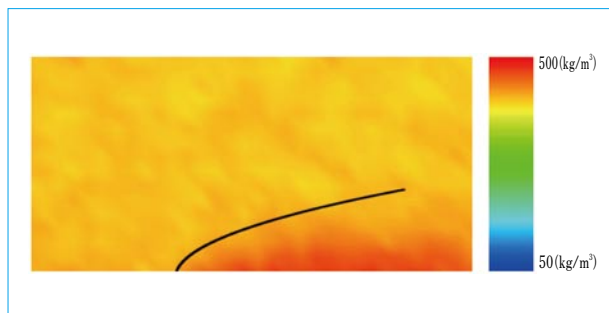


図4 対流熱伝達における密度分布のシミュレーション結果 (Re=172)
Simulation result of density distribution in convective heat transfer at Re=172

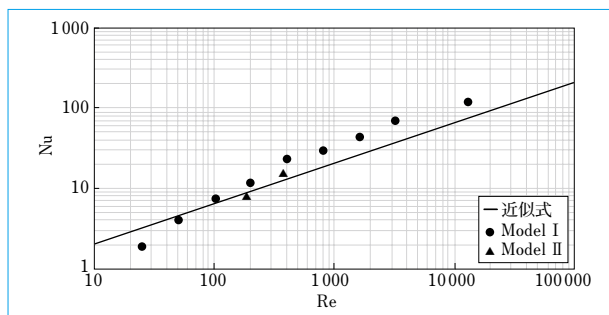


図5 対流熱伝達におけるレイノルズ数対ヌセルト数のシミュレーション結果
Simulation results of Nusselt number as function of Reynolds number in convective heat transfer

ルを用いる。

$$\phi(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \dots\dots\dots (10)$$

パラメータは, アルゴンに設定した。

$$\begin{aligned} \epsilon &= 119.8 k_B (J) \\ \sigma &= 3.41 \times 10^{-10} (m) \dots\dots\dots (11) \\ m &= 6.635 \times 10^{-26} (kg) \end{aligned}$$

3.1 対流熱伝達の計算機実験

3.1.1 シミュレーションモデル

図2に, シミュレーションモデル I と II を示す。紙面に垂直な方向は, 周期的境界条件を課した準2次元モデルである。両モデルとも, 流入時のガスの温度 T_A は300(K), 冷却平板の温度 T_B は200(K)とした。モデルIにおいて, くりこまれた原子数は67392個($n=2 \sim 6$), 濃度は $8.03 \times 10^{26} (1/m^3)$, モデルIIにおいて, くりこまれた原子数は204160個($n=0, 1$), 濃度は $6.30 \times 10^{27} (1/m^3)$ である。流入流出の扱いは, 文献⁽¹³⁾に従った。また, 流れに平行に置かれた平板はアルゴン原子を2次元上に配置し, 適当なバネでアースした。そして平板を構成する原子にのみ, (3)式を満足するランダム力と減衰を与え, 平板の温度を一定に保った⁽¹¹⁾。原子間に働く力は, 斥力のみとした。

面積 S' の平板から流体へ移動する熱量 $\dot{Q}(W)$ は, 文献⁽¹²⁾に従った。熱伝達係数 $h(W/m^2K)$ は,

$$h' = \frac{\dot{Q}}{(T_j - T_b) S'} = h \alpha^{-1} \dots\dots\dots (12)$$

から求める。レイノルズ数 Re_L とヌセルト数 Nu の定義に必要な粘度や熱伝導度などは, 気体の理論式⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を用いた。

3.1.2 シミュレーション結果

温度場を図3に, 密度分布を図4に示す。図3および図4

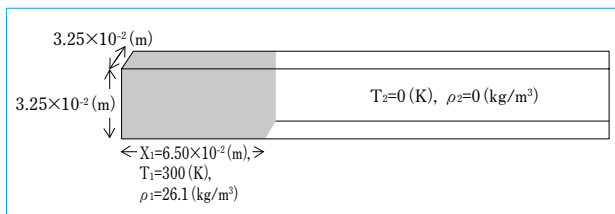


図6 自由膨張問題の初期状態
Initial conditions of free expansion problem

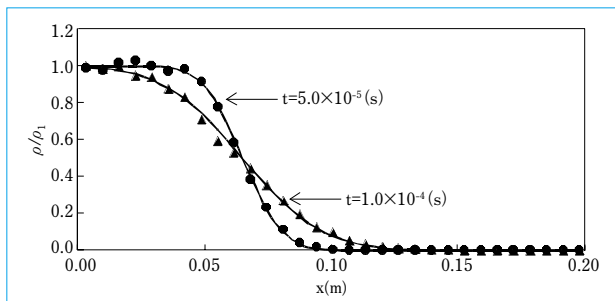


図7 自由膨張問題における密度分布
Number density profiles in free expansion

には、温度境界層厚さの理論解を図中に示した。レイノルズ数 R_{eL} 対ヌセルト数 N_u のシミュレーション結果と近似式⁽¹⁶⁾を、図5に併記した。

図3および図4から、境界層の厚さが、理論解を目安として、良く再現されていることが分かる。また、図4から、低温の平板により冷却された流体の密度がかなり変化していることが見て取れる。図5から、ヌセルト数は近似式と良い一致を示す。これらの結果から、熱伝達係数が分からなくとも、流れと熱交換のある連成シミュレーションが容易に実現できることが分かる。

3.2 自由膨張問題

3.2.1 シミュレーションモデル

温度が300(K)、密度が26.1(kg/m³)で平衡状態にあるアルゴンガスを、時刻 $t=0$ (s)で真空中へ開放する(図6)。くりこまれた原子数は、27000個($n=20$)である。

3.2.2 シミュレーション結果

図7に密度分布を、図8に速度分布のシミュレーション結果と解析解⁽¹⁷⁾と完全に一致する。シミュレーションは $K_n \rightarrow \infty$ であり、ナビエ・ストークス方程式を用いた従来法では、 $K_n < 0.2$ に制限される。RMDならば、全クヌーセン数のシミュレーションが可能である。

4 むすび

RMDの有用性を立証するべく、二つの流れのシミュレーションを実施した。一つは流れと熱が連成する熱伝達率を計るシミュレーション、もう一つは高クヌーセン数流れである自由膨張問題のシミュレーションである。これらの結果から、次の結論を得た。

- (1) 任意のスケールにおける、温度場と流れの連成シミュレーションが可能である。
- (2) 全クヌーセン数に対するシミュレーションが可能である。
- (3) 圧縮性と非圧縮性の流れを区別なくシミュレートできる。

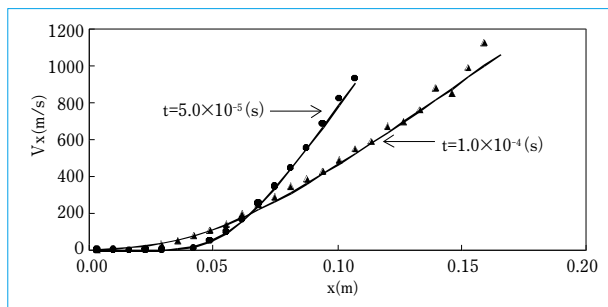


図8 自由膨張問題における速度分布
Velocity profiles in free expansion

(4) 数値粘性や数値分散が存在しないことから、安定な高い精度のシミュレーションが可能である。

今後は、凝集や沸騰を伴う流れのシミュレーションが可能であることを立証していく。この問題は、冷凍機や真空容器を始め、超音速機やロケットの開発において極めて重要である⁽¹⁸⁾。

計算機の更なる高速化により、RMDの適用範囲が広がる。そしてRMDの優位性が明快になり、イノベーションがシミュレーションの分野に起こることを確信する。

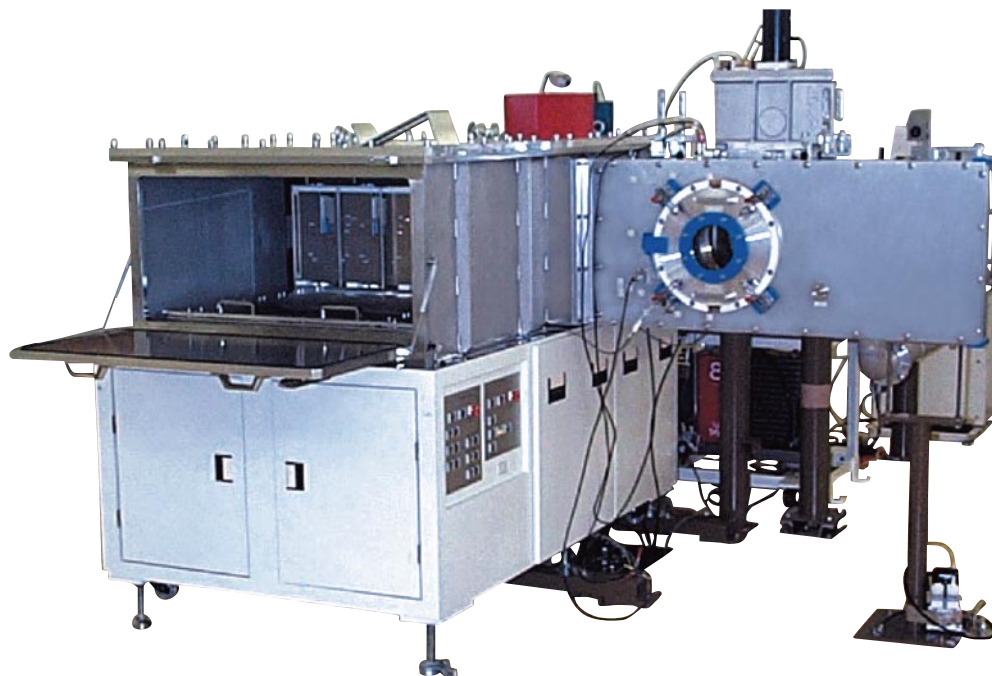
(参考文献)

- (1) J.M.Thijssen.Computational Physics.Cambridge University Press, Chap. 8,1999.
- (2) 日本機械学会編.原子・分子モデルを用いる数値シミュレーション.コロナ社,1章,2001.
- (3) K.Nanbu.Direct Simulation Scheme Derived from the Boltzmann Equation.Monocomponent Gases.J.Phys.Soc.Jpn.,vol.49,no. 5,1980, p.2042.
- (4) G.A.Bird. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows.Clarendon Press,Oxford,Sec.3.3,1994.
- (5) H.Goldstein.Classical Mechanics.Second Edition.Addison Wesley, Chap.12,1980.
- (6) 越塚誠一.日本機械学会編 粒子法.丸善,2006.
- (7) Andrei I.Tolstykh.High Accuracy Non-Centered Compact Difference Schemes for Fluid Dynamics Applications.World Scientific,Sec.1.2, 1994.
- (8) D.Ichishima,Y.Ohnishi,R.Hirose.Renormalization Group Theory for Molecular Dynamics.Sumitomo Heavy Industries Thechnical Review, no.168,2008,p.31.
- (9) 市嶋大路,大西良孝.シミュレーション方法及びプログラム.特開2006-285866.
- (10) J.M.Thijssen.Computational Physics.Cambridge University Press, Sec.8.4,1999.
- (11) 佐藤明.HOW TO 分子シミュレーション.共立出版,1.3節,2004.
- (12) 日本機械学会編.原子・分子モデルを用いる数値シミュレーション.コロナ社,6章,2001.
- (13) T.Ishiwata,T.Murakami,S.Yukawa,N.Ito.Particle Dynamics Simulations of the Navier-Stokes Flow with Hard Disks.Int.J.Mod. Phys.C, vol.10,no.10,2004,p.1413.
- (14) C.Kittel,H.Kroemer.Thermal Physics.W.H.Freeman and Company, Chap.14,1980.
- (15) A.I.Burshtein. Introduction to Thermodynamics and Kinetic Theory of Matter. John Wiley & Sons,Sec.1.16,1996.
- (16) H.Schlichting.Boundary-Layer Theory.McGraw-Hill,1987,p.298.
- (17) G.A.Bird.Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows.Clarendon Press,Oxford,Sec.7.4,1994.
- (18) M.I.Zeifman,J.Zhong,D.A.Levin.A Hybrid MD-DSMC Approach to Direct Simulation of Condensation in Supersonic Jets.AIAA 2004-2586,2004.

イオン照射によるパワー半導体特性の改善

Characteristic Improvement of High Power Semiconductor by Ion Irradiation

●坂根 仁*
Hitoshi SAKANE



ウエハ搬送装置とウエハ照射位置
Vacuum chamber and automatic wafer irradiation system

近年求められている省エネルギー化を実現する方法の一つとして、パワー半導体に対する局所的ライフタイム制御技術があげられる。住重試験検査株式会社では、サイクロトロンとバンデグラフ加速器を用いた高エネルギーの水素、ヘリウム-3およびヘリウム-4のイオン照射により、同技術を実現している。イオン照射により変化が生じる逆回復時間 T_{rr} 、オン電圧 V_f およびリーク電流 I_r に関する市販の評価装置を導入することで、客先に対してイオン照射の最適条件を迅速に提示できるようにした。さらに、イオン照射後に形成されるシリコン中のトラップ準位および不純物分析を、実装されているパワー半導体とほぼ同じ条件で測定するべく、550Vの逆バイアスが印加可能なDeep Level Transient Spectroscopy(DLTS法)装置と容量-電圧(C-V)測定器を新たに開発した。

Local lifetime control technology for high power semiconductors has been an effective energy conservation solution in recent years. S.H.I. Examination & Inspection, Ltd.(SHIEI) has achieved such technology by irradiating high-energy proton, helium-3, and helium-4 ions through cyclotron and Van de Graaff accelerators. SHIEI has succeeded in providing information on optimum ion irradiation conditions to customers by introducing a commercial assessor that evaluates the recovery time (T_{rr}), forward voltage (V_f), and leakage current (I_r), all of which will be changed as a result of ion irradiation. In addition, SHIEI has developed new devices called Deep Level Transient Spectroscopy system(based on DLTS method) and capacitance-voltage(C-V) profiling unit, both of which apply the reverse bias of up to 550 V to measure the trap energy level and impurities in the silicon formed after the ion irradiation under similar conditions to those for the mounted high power semiconductors.

1 まえがき

半導体といえばCPUやメモリといった演算記憶を行うLSIが一般的であるが、これに対して電源(電力)の制御や供給を行う半導体をパワー半導体という。代表的なものとしては、サイリスタ、パワートランジスタ、ダイオード、IGBTおよびPower-MOSFETなどがあげられる。これらは、主に交流を直流に変換、電圧の変換、モータの駆動およびバッテリー

の充電などのスイッチング回路の素子として使用され、エアコンやテレビなどの家電、ハイブリッド車、電車および重機などのさまざまな機器に組み込まれている。

近年、電気製品の性能指数として省エネルギー指標値があげられるほど、あらゆる機器で省エネルギー化が求められ、パワー半導体を用いた機器についても同様の効果を求められている。半導体メーカーは、半導体材料から構造の改良などによるさまざまな省エネルギー化の方策に積極的に取り組ん

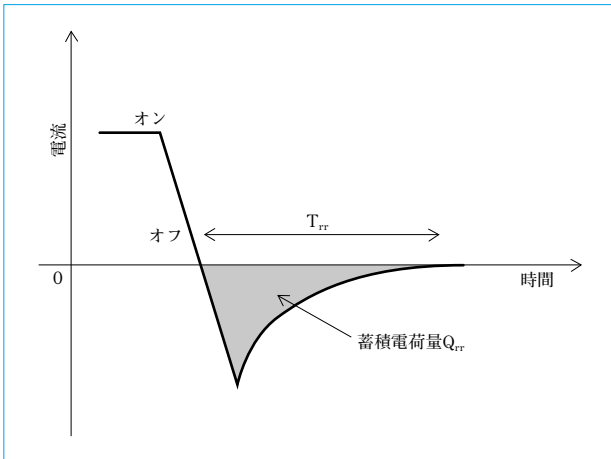


図1 ダイオードの典型的なリカバリ波形式
Typical recovery wave form of diode

である。その方策の一つとして、スイッチング速度の高速化によりエネルギー損失を低減させるライフタイム制御技術を取り入れている。住重試験検査株式会社ではこの技術をイオン照射により実現し、イオン照射から照射後の特性評価を含めて事業展開している。

2 ライフタイム制御

ライフタイム制御の原理は、半導体中に意図的に形成した深いトラップ準位がキャリア(電子および空孔)の再結合を促すことより、オン時に発生する蓄積電荷量を減らし、オフ時のライフタイム(逆回復時間 T_{rr})を短縮するものである。ライフタイムの概念を、図1に示す。蓄積電荷量が増えるほど逆回復時間 T_{rr} が長くなるのが分かる。

従来ライフタイム制御の方法として用いられてきたのは、金やプラチナなどを半導体中に拡散する重金属拡散法であるが、制御が難しく高品質な製品の提供には向かないとされている。他の方法として、半導体に電子線もしくはイオンを照射することで、シリコン格子中に欠陥を形成し、重金属拡散と同様の深いトラップ準位を形成する技術がある。これらは、電子線照射もしくはイオン照射を行う設備が必要となり、生産ラインから一度離れた場所でのプロセスが加わることになる。しかし、照射に関する制御が比較的容易であり、かつプロセス終盤での運用が可能であることから、多くのパワー半導体メーカーが採用している。さらに、イオン照射においては、必要のない部位にも欠陥を生成する電子線照射と異なり、局所的に欠陥を生成させることから、ライフタイム以外の特性を損ねることなく性能を向上させることができる。ハイブリッド車、電車およびハイエンドな家電製品といった要求性能が高い市場に関しては、イオン照射が積極的に採用されており、住重試験検査はこのような市場に対して、サイクロトロンとバンデグラフ加速器を用いたイオン照射サービス⁽¹⁾⁽²⁾を提供している。

3 装置の概要

3.1 イオン照射装置

イオン照射には、2種類の加速器を使用することができる。表1に、住重試験検査が所有する3台のサイクロトロンとバンデグラフ加速器で得られるイオン種とエネルギーを示す。

表1 加速粒子と加速エネルギー
Beam specification of 370 Cyclotron and Van de Graaff accelerator

加速粒子	加速エネルギー		
	サイクロトロン Cypris 370 1号機	サイクロトロン Cypris 370V 2号機・3号機	バンデグラフ AN2500
プロトン	18MeV 4.5MeV	17MeV 8MeV 4.5MeV 2MeV	0.5~2.5MeV
デューテロン	9MeV	9MeV	—
ヘリウム-3	24MeV	23MeV	—
ヘリウム-4	—	17MeV	0.5~2.5MeV

住友重機械工業株式会社製のサイクロトロンCypris 370およびCypris 370Vは最大18MeVのプロトン、最大24MeVのヘリウム-3といった加速粒子を発生させ、数百 μm 厚のウエハの内部でも十分に到達させる。加速粒子を到達させる深さの制御は、半導体ウエハの直前に任意の厚みのAl製アブゾーバを配置し、Alを通過する際に損失するエネルギーを調整することで、入射深さを調整する。

AN2500バンデグラフ加速器は、プロトンまたはヘリウム-4の一価イオンを、0.5~2.5MeVの間にわたって、およそ1万5千分の1の精度で可変加速を行う。照射深さは数十 μm 程度が限界であるが、狭い領域の照射が可能であり、微細化が進む半導体ウエハへの局所的な照射を行うのに効果を発揮する。

3.2 ウエハ搬送装置

イオン照射のサービスは半導体製造プロセスの一部に相当することから、処理量をできる限り向上させる必要がある。顧客より搬送されたウエハを、冒頭の写真のようなウエハプレート搬送装置に100~140枚程度装填し、コンピュータ制御による自動高速処理を行っている。1枚当たりの照射時間は製品により異なるが15~90秒程度であり、搬送などを含めて1時間でおおよそ80枚程度の処理が可能である。

3.3 半導体特性評価装置

パワー半導体に求められる性能は多岐にわたり、これらに対してさまざまな評価装置が市販されている。イオン照射を行うことで生じる特性変化は、主に逆回復時間 T_{rr} 、オン電圧 V_f およびリーク電流 I_{rr} などに現れる。逆回復時間とオン電圧はトレードオフの関係にあることから、双方の測定評価を行い、性能指数が最も良くなる条件を探索する必要がある。逆回復時間についてはコペル電子製 T_{rr} -Tester(Model 5015D)を使用し、オン電圧とリーク電流についてはTektronix製High Power Curve Tracer(Model 371A)を用いて測定することができる。

さらに、パワー半導体の開発では動作中に発生するキャリアの挙動を把握することが重要になる。特に、空乏層領域のキャリア分布や照射領域に形成されているキャリアトラップ準位の種類について評価する必要がある。このようなデータはデバイスシミュレーターを用いて、デバイス構造の設計または妥当性を検証する際に非常に重要な入力値となる。キャリア分布については容量-電圧測定(C-V測定)を行い、キャリアトラップ準位についてはDeep Level Transient Spectroscopy(DLTS法)⁽³⁾で測定する。市販されている測定器の最大バイアスが一般的に20~30V程度であるのに対して、パワー半導体の場合、数百から数千Vのバイアスが印加される。この



図2 DLTS装置
System of deep level transient spectroscopy

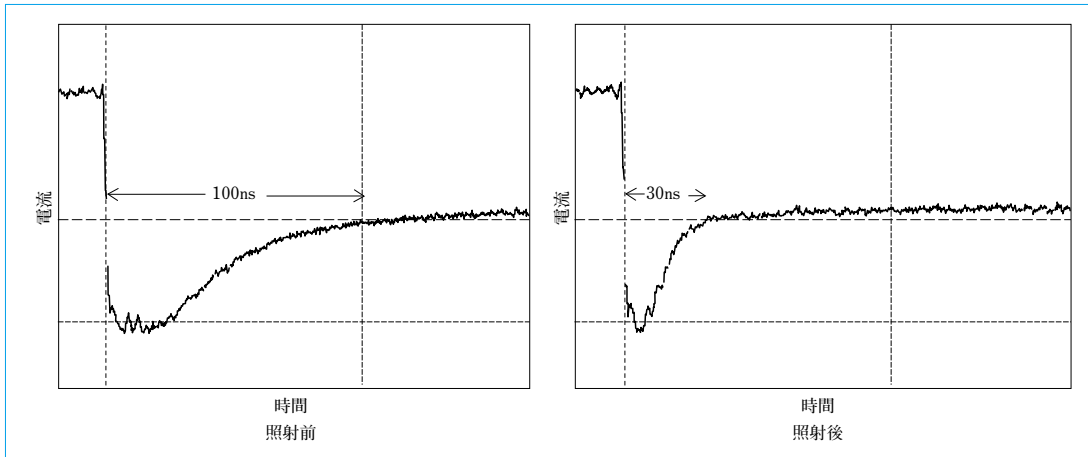


図3 イオン照射によるリカバリー時間の変化
Reduced recovery time by ion irradiation

ようなパワー半導体に対応できる装置は市販されていなかったことから、実験条件を模擬した状態でしか評価が行えなかった。そこで、550Vまで印加可能なパワー半導体仕様の装置を自社製作し、パワー半導体製品に実装時と同様の条件で照射を実施した際の特性を測定できるようにした⁽⁴⁾。図2は、DLTS装置である。試料の温度を70~300Kの範囲で温調が行えるクライオスタット(図2左)、容量計、信号処理回路(図2中央)、およびデータ収集系(図2右)で構成されており、C-V測定とDLTS測定の両方が実施できる。印加電圧以外の新たな特長としては、自動電気容量オフセット機能を追加したことで、数fFから数nFの広範囲にわたって高感度の測定が可能であることがあげられる。

4 イオン照射による半導体の特性評価

4.1 逆回復時間

イオン照射により生成された欠陥は、キャリアの再結合を促進し、逆回復時間を短縮する。イオン照射前とヘリウム-3照射後のリカバリー時間を、図3に示す。横軸が時間、縦軸は電流を意味している。照射前と比較して、照射後の逆回復時間が約1/3に短縮されていることが分かる。さらに、照射ドーズ量を増やすと逆回復時間は短縮されるが、抵抗値が増え、オン電圧が高くなることから、導通時の消費電力が増すことになる。また、余剰キャリアが発生しやすい位置に照射を行い、再結合を促進する欠陥を生成することで、オン電圧を必要以上に高めることなく逆回復時間を短縮化する。デバイスに求められる性能により最適値は異なるが、逆回復時

間とオン電圧の関係を把握することで、イオン照射の最適条件を導き出す。

逆回復時間のみだけでなく、リカバリー波形を観測することで、回復速度 dI/dt やノイズなどの情報も読み取り、スイッチング時のエネルギー損失が最も少なくなる条件を見出すのに有効な情報となる。

4.2 キャリア分布

イオン照射により生成された欠陥は、キャリアの発生を抑制し、逆に照射に使用したプロトンが固着しドナーとして機能すると、キャリアの発生を促進することになる。その様子は、空乏層の容量変化となって現れることから、デバイスに印加する逆バイアス電圧を変化させることで、接合面を基準とした容量分布を調べることができる。図4に、ヘリウム-3を接合面から15 μm の位置に照射したデバイス中のキャリア分布を示す。未照射デバイスのキャリア分布が一様であるのに対し、照射済みデバイスは照射した15 μm の位置にキャリア濃度が低い領域が現れており、イオン照射により形成された格子欠陥効果が確認できる。逆にプロトンのようなドナーとなるイオンを照射した場合、照射部位のキャリア濃度は高くなりドナー化効果を確認できる。通常イオン照射が行われている領域を確認するには、広がり抵抗測定法(SR法)が用いられているが、試料の調整や測定に時間がかかる。ダイオードのような接合がある試料に限るが、この測定方法ではおよそ数分で照射効果を確認でき、非常に有効な手段である。

4.3 トラップ準位測定

DLTS法とは半導体における深いトラップ準位を測定する

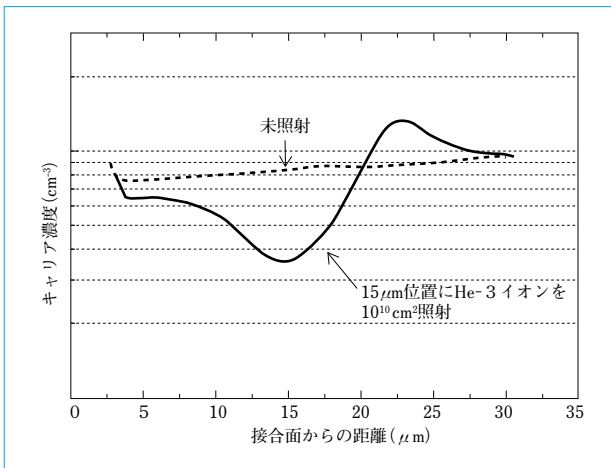


図4 イオン照射によるデバイス中のキャリア分布の変化
Variation of carrier profile in irradiated semiconductor

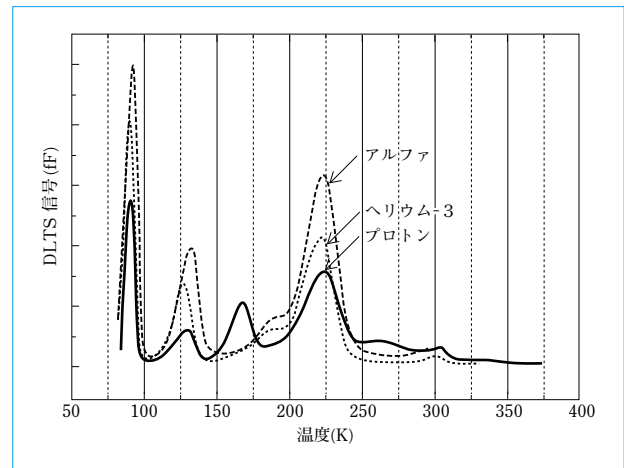


図5 イオン照射を行ったSi半導体から得られたDLTS信号スペクトル
DLTS signal spectrum with silicon semiconductor by ion irradiation

方法であり、容量の過渡応答を利用して禁制帯中のトラップ準位エネルギー、トラップ濃度および捕獲断面積を知ることができる。これにより、半導体中の不純物・欠陥を高感度 (10^{11} atoms/cm³) で測定できる。特に、最近では半導体デバイスの高集積化や効率向上に伴い、不純物・欠陥の測定制御が不可欠となっていることから、このような測定方法に対する注目が集まりつつある。

図5は、Siダイオードにプロトン、ヘリウム-3およびアルファ粒子を照射した試料から得られたDLTS信号のスペクトルである。横軸の温度は準位エネルギーに相当し、高温であるほど深い準位を意味する。縦軸の容量はトラップ濃度に相当し、高容量であるほど高濃度であることを意味する。照射したイオン種によって、形成されているトラップ準位が異なることが分かる。トラップ準位は、シリコン原子および空孔、そして水素原子や酸素原子の組み合わせにより発生するものであることから、シリコン中の欠陥や不純物の酸素および照射したイオンにより変化する。

5 むすび

住重試験検査では、パワー半導体のライフタイム制御を対象としたイオン照射サービスを提供してきた。更なるサービス性能向上および市場展開を目的として、さまざまなイオン照射設備と半導体特性評価技術を導入している。

- (1) 薄層化および微細化が進む半導体に対して、イオン照射が適応できる範囲をさらに広げるべく、深部照射が可能なサイクロトロン、および浅い部分に狭い照射が可能なバンデグラフを活用している。
- (2) イオン照射による特性評価に的を絞ったT_{rr}装置の導入で照射効果を迅速に評価し、最適条件の提案で動向の早い半導体市場に対して対応できるようにしている。
- (3) パワー半導体に適した測定を可能するDLTS装置の製作で、半導体デバイスの開発初期段階で必要なデータを取得できるようになり、半導体デバイスメーカーとの協力関係を深くすることができた。

(参考文献)

- (1) 日朝俊一, 柿平将次, 片岡昌治, 西原義明, 田澤修一. サイクロトロンによる半導体ウエハの軽イオン照射. 住友重機械技報, vol.41, no. 121, Apr.,

1993, p.68~71.

- (2) 正岡章賀, 西原義明, 坂根仁, 末澤宏樹. サイクロトロンのイオン照射におけるデバイス特性改善. 講演概要集パワーデバイス用シリコンおよび関連半導体材料に関する研究会, Dec., 2008, p.73~79.
- (3) D.V.Lang. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. J. Appl. Phys. 45, 1974, 3023.
- (4) 伊藤成志, 井上剛, 坂根仁, 矢野泰弘, 中井雅文, 永江陽一, 徳田豊. パワーデバイス評価のための高電圧C-V, DLTS装置の開発. 第57回応用物理学関係連合講演会発表, Mar, 2010.

MINDシステム-先端半導体デバイス歩留まり向上注入技術

Mapping of Intentional Non-uniform Dosage System

● 二宮 史郎*
Shiro NINOMIYA



図1 イオン注入装置 SHX-III
Ion implanter SHX-III

1 はじめに

我々が日常利用している半導体集積回路製品は、シリコンウエハ上に多数個の同一チップを作成し、それを切断することによって生産される。最終製品が完成するまでには、数百工程を要するが、そのなかでも重要な工程として、その名の通り不純物添加による電気伝導性(半導体的特性)の作込み工程があげられる。不純物添加工程は、主に高速イオン粒子のドーピングによって行われるが、株式会社SENは、そのイオン注入装置を製作している。本報では、まずSENのイオン注入装置を簡単に紹介し、半導体デバイスの歩留まり向上技術として開発したMINDシステムとその実際の半導体製品適用結果を示す。

2 イオン注入装置

イオン注入工程は、数十nm～数 μ mの微細な開口部構造を持ったマスクを置いたシリコンウエハ全面に、満遍なくイオンを照射する。イオンはマスクの開口部のみ透過し、イオンエネルギーに応じてある一定の深さで止まることにより、幾何学的に半導体構造が形成される。通常は、シリコンウエハ上に均一なドーピング量が求められる。

シリコンウエハ全面に満遍なくイオンビームを均一に照射するには、(1)固定したウエハ+2次元イオンビーム走査、(2)固定したイオンビーム+2次元ウエハ走査、(3)1次元イオンビーム走査+1次元ウエハ走査、および(4)ウエハ幅より広い均一濃度のイオンビーム+1次元ウエハ走査、の4通りが考えられる。SENでは、生産性が高く高品質なイオン注入が実

現できることから、上記(3)方式を採用している。

図1は、SENの最先端大電流イオン注入装置SHX-IIIの外観である。SENでは他に、中電流イオン注入装置MC3-II、高エネルギーイオン注入装置HE3および超高エネルギーイオン注入装置UHEなどをラインナップとして揃え、半導体製造で用いられるイオン注入工程すべてに対応している。

3 MINDシステム

シリコンウエハ上に同一集積回路チップを多数個作成するには、それぞれの半導体製造工程で、シリコンウエハ上に均一な条件を実現化する必要がある。しかし、近年、シリコンウエハサイズの大型化(現在主流は300mmウエハ)、半導体の微細化(現在の最先端チップは28nmノード)に伴い、この要請が満たせない工程が出てきた。特に、成膜工程など、プラズマ中にウエハを曝す方法を利用した製造工程は、シリコンウエハ中心部とウエハ端部のプラズマパラメータを一様にコントロールすることは非常に困難であることから、結果として膜厚などの物理量がウエハ面内で偏心形状の分布を持つことが知られている。この場合、最終集積回路製品の電氣的伝導性(半導体特性)が、ウエハ面内位置に依存して異なることになり、最悪の場合、製品不良が発生し、歩留まり悪化を招く。

そこで、SENは、他工程のシリコンウエハ面内特性不均一に起因する半導体特性の補正に、ウエハ面内に意図的に不均一イオン注入を実現する機能を開発した。それが、MIND (Mapping of Intentional Non-uniform Dosage)システムである。MINDシステムは、イオンビーム走査とウエハ走査を同時に

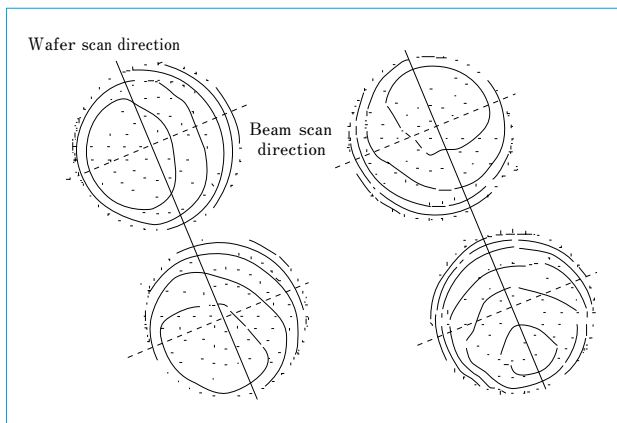


図2 意図的偏心形状イオンドーピング
Intentional eccentric-profile ion-doping

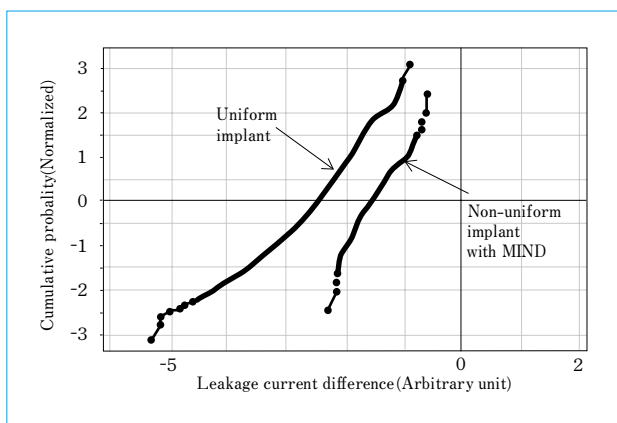


図3 先端ノードトランジスタのリーク電流値確率プロット
Cumulative probability plots of leakage currents of leading-node transistors

コントロールすることによって、意図的な2次元的不均一注入を実現できるSEN独自の方式である。図2に、MINDシステムを用いた偏心形状型面内不均一注入の例を示す。図に示すように、偏心中心は走査方向と独立に設定することができるので、他の注入条件と独立に不均一注入を行うことができることが分かる。

MINDシステムの特徴は、(1)走査方向を変えることなく面内2次元形状が可能である、(2)偏心中心が走査方向と独立に設定できる、(3)高精度な不均一注入が実施でき、かつ自由度が高い、および(4)通常注入と比べ特別な準備が不要で生産性を阻害しない、などの点である。詳しい説明は省くが、半導体デバイス製作時に使用されるすべてのイオン注入過程で意図的な面内不均一注入を行おうとすると、上記特徴(1)および(2)は必須であり、この点は他社類似機能に対して差別化要素となっている。

4 MINDシステムの製品適用

4.1 半導体特性の補正としての機能

MINDシステムは最近開発した新機能であるが、既に複数の顧客で採用され、半導体量産に適用されている。その量産レベルでの効果の一例を、図3に示す⁽¹⁾。この図は、ウエハ端部で作成されたある先端ノードトランジスタの電気的パラメータ(スイッチオフ時のリーク電流値)の確率(ワイブル)プロットである。基準(原点)は、ウエハ中心部のリーク電流値平均値である。今回はMINDシステムを使用し、ある特定の

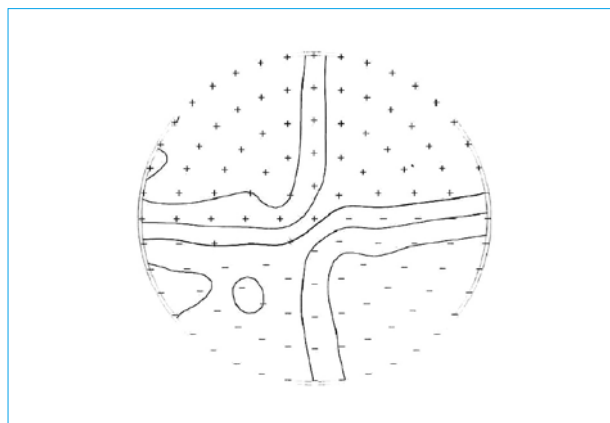


図4 ドーズ量分割イオンドーピング
Dose-split ion-doping

イオン注入工程に対して、ウエハ面内でドーピング量±30%の大規模な不均一注入を実施した。図3はその結果であり、MINDシステムを使用しない通常のイオン注入を行った場合に比べて、(1)リーク電流値が全体として原点に近づいている、および(2)チップごとのリーク電流値のばらつき度合いも小さくなっている、ことを示している。これはウエハ面内において、ばらつきの小さな半導体デバイスが生産できたことを意味する。

4.2 同一ウエハ内多条件注入としての応用

MINDシステムはその自由度が高く、更なる応用も考えられる。例えば、半導体チップ作成プロセス計画および検討段階においては、イオン注入量を種々変えて製品特性の最適化を行うが、現在までは複数枚のウエハを用いてのテストが主流であった。図4に示すように、MINDシステムでは、面内ドーズ量分割型注入も可能である。この機能を用いると1枚のウエハで製品特性の最適化が可能であり、顧客コスト削減の観点から、MINDシステムの活用が有望視されている。

5 おわりに

- (1) 先端半導体デバイスの歩留まり向上を目的として、意図的に面内不均一イオン注入を実現する機能、MINDシステムを開発した。
- (2) MINDシステムは既に半導体集積回路の量産工程に適用され、製品の歩留まり向上を果たし、特定の顧客では欠くことのできない注入技術となっている。
- (3) MINDシステムはその応用力が広く、種々の利用法が考えられる。

今後、ウエハサイズはさらに大型化(2012年には450mm化も)し、半導体の微細化の流れもしばらくは止まらないと考えられる。したがって、成膜工程での面内不均一性はさらに深刻さを増し、イオン注入を用いた集積回路製品の半導体特性補正は、ますます重要性を増すと考えられる。MINDシステムは、量産適用フェーズに入った。今後、顧客ニーズ把握と提案を繰り返すことで、更なる高機能化開発を進め、ビーム走査+ウエハ走査方式自身の差別化技術につなげていく。

(参考文献)

- (1) S.Ninomiya et al. Manufacturing Application of SEN's MIND system. Proceedings of 18th Int. Conference on Ion Implantation Technology (IIT2010), to be published.

カウンタ式電気フォークリフト用バッテリー液自動補水装置

Automatic Battery Water Charger for Electric-CB Forklift



フォークリフト用バッテリーには、一般的に鉛バッテリーが使われる。その使用において、充電中に起こる水の電気分解や自然蒸発によって電解液中の水分が失われることから、1～2週間に1回以上(15分程度)の補水作業が必要となる。この煩わしい補水作業を軽減するとともに、補水忘れを防止する目的で、カウンタ式フォークリフト用の自動補水装置を開発した。

本装置は、精製水を入れる補水タンク、補水タンクに付属したモータ&ポンプ、水の流量を検出するフロースイッチおよびそれらを接続する配管類で構成されている。モータおよびポンプは、車両のコントローラにて適切な電圧に制御される。また、バッテリーは満水になると弁を閉じる止水栓を各セルに配備し、各々をホースで接続した一括補水配管システムが装備されたものを使用する。

主要仕様

補水流量	0.5～0.6L/min
補水タンク容量	7.7L
補水タイミング	充電完了の一定時間経過後
フロースイッチ	ON点 0.40～0.68L/min OFF点 ON点の約0.2L/min低い値

特長

(1) バッテリーは充電すると充電末期に発生する気泡により

液面が上昇することから、手動による補水では補水タイミングによっては液溢れの可能性があった。しかし、自動補水装置を使用すれば、常に最適なタイミングでの自動的に適正レベルまでの補水、および補水忘れの防止など、最適な補水管理が可能となる。

(2) 精製水は入りやすいセルから順番に補水され、最も入りにくいセルが最後に補水される。すべてのセルに精製水が入り止水栓が働くと、止水栓やホースの接続部に余計な圧力がかかり、水漏れの原因の一つになる。本装置では、フロースイッチを使用し補水時の流量が少なくなったとき補水を停止する。最後の止水栓が完全に閉じる前に補水を停止するので、止水栓や配管類に余分な圧力がかからず、水漏れが発生しにくい。

(3) 長時間補水モータおよびポンプを使用すると馴染みにより回転数が上昇し、配管内の圧力が上がり、水漏れ発生の懸念があった。本装置では、補水開始時にモータ電圧をステップ状に上げていき、フロースイッチがONした時点で一定の電圧を保持する制御を行う。これにより、補水流量を常に一定とし、圧力上昇を抑え、水漏れを防止している。

(住友ナコ マテリアル ハンドリング株式会社 林 克彦)

