

科学技術庁

金属材料技術研究所

磁気クロマトグラフィー／

宇宙で起きる非接触溶融／

溶融状態のモニタリング

磁気クロマトグラフィーの可能性を解析

— 超伝導磁石と強磁性細線による強い磁気力で懸濁微粒子を分離 —

応用超伝導技術の進歩は、信頼性と操作性に優れた超伝導磁石を実現し、さまざまな超伝導機器実現への夢を拡げている。とりわけ超伝導磁気分離の実用性を高くしている。磁気分離は、磁気力を利用して微粒子を分離する技術で、二次廃棄物を伴わず、地球環境保全に大きく寄与する。その実用化には大空間強磁場を比較的小規模システムで発生できる超伝導マグネットの利用が最適である。当研究所では「第2期超伝導材料マルチコアプロジェクト」において、磁気分離制御システムの開発を推進している。その中で行っている磁気クロマトグラフィーの実証的研究を以下に紹介する。

磁気分離において粒子に働く磁気力は、分散質と分散媒の磁化率の差、磁場の大きさ、および磁場勾配の三つの量の積に比例する。微弱な磁性(常磁性と反磁性)を持つ微粒子を分離するには磁気力を大きくする必要がある。そこで通常は磁場を強くするか、あるいは磁場勾配を大きくする。従来は強磁性の細線に強磁場を印加し、その周辺に発生する高勾配磁場(高勾配磁気分離方式)が利用されてきた。これは粒子を細線に吸着させる方式である。

当研究所では、電総研など他研究機関との共同で、これとは全く違った新しい磁気分離の概念に基づいた磁気クロマトグラフィーを提案し、その性能解析を行い、新

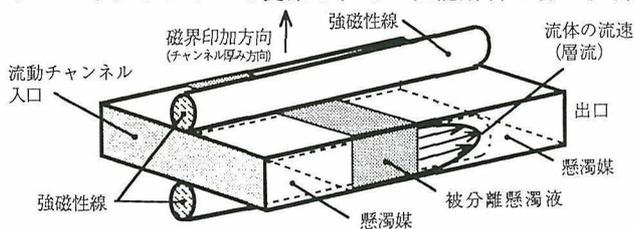


図1 磁気クロマトグラフィーの原理

方式実現の可能性を追究してきた。その原理を図1に示す。薄いチャンネル内に懸濁液微粒子を流し、極端に歪んだ磁場を印加すると、それらの間の相互作用により微粒子の磁性の強さに依存して流速が変わる。すなわち磁性の大きな微粒子は、磁場ひずみによりチャンネル壁面近くに保持される(懸濁液濃度が高くなる)ため、チャンネル通過時間が遅くなる。この現象の理論解析とシミュレーションの結果を図2に示す。図からわかるように、本方式により通常の液体クロマトグラフィーと似た分離動作が実現し、従来の高勾配磁気分離方式では分離不可能とされた弱い磁性を持つ微細粒子をも分離できる。

従来の磁気分離システムは鉱石選別、製紙業用カオリン粘土精製、あるいは製鉄排水浄化と再利用などさまざまに実用されているが、本方式の磁気クロマトグラフィーを用いれば、磁気分離の粒径限界を1桁以上向上できる可能性を持つ。さらに本方式はイオン交換樹脂などに相当する固定相を用いないため、取り扱いが簡単であり、先端産業や原子力産業から排出される有用あるいは有害物質の分離・濃縮の際の二次廃棄物の低減にも大きく貢献するものと期待される。

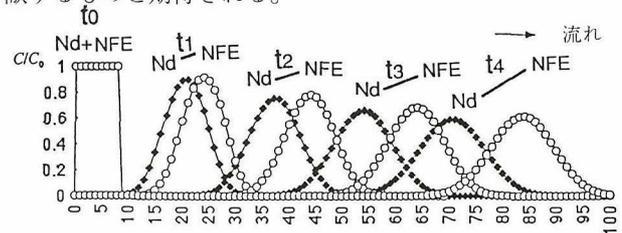


図2 チャンネル内の成分粒子濃度の経時変化 (横軸はチャンネルの長さ方向の位置。NFEはある放射性粒子で、磁化率はNdの1/5.6。それらの粒径は150 Å、強磁性線の径は20 μ m、外部印加磁場は7 T、 $t_0 \sim t_4$ は経過時間を示す。)

宇宙で起きる不思議な現象「非接触溶融」の原因

— 無重力空間で際立つ界面エネルギーの面白さ —

過去に行われたいくつかの宇宙実験で非接触溶融という一見不思議な現象が観測されていた。最初に観測されたのは1973年のスカイラブIII号の実験であった。化合物半導体のインジウム・アンチモンの細長い棒状の塊を石英のアンプルにほとんどぴったりと入れて真空に封入し、スカイラブに載せて宇宙に持っていった。無重力環境でそれを加熱して一旦全部融解させ、棒状の液体になったインジウム・アンチモンを一方の端から他端に向かって冷却、凝固させて行き、インジウム・アンチモンの単結晶を作製するという実験であった。この方法はブリッジマン法と呼ばれ、地上の実験室でも古くから行われている単結晶作製法の一つであるが、地上では融液が石英アンプルなどの容器に接して拘束されたまま固まるのが普通である。そのため結晶に容器から応力が加わり、結晶欠陥の多い結晶しか得られない。また融液が容器に接触しているので、容器からの汚染物質が結晶の中に溶け込むので高純度の結晶を作ることができない。

しかし、宇宙から持ち帰った石英アンプルを開くと、細長い棒状のインジウム・アンチモン結晶は石英アンプルから離れていて、するりと抜ける状態であった。詳細に見るとインジウム・アンチモン結晶と石英アンプルの間には平均 $25\mu\text{m}$ の隙間ができており、固まった結晶表面の状態から判断して、インジウム・アンチモンは固まった後に離れたのではなく、離れたまま固まったことがわかった。同じ現象は1975年のアポロ・ソユーズ計画でのゲルマニウムのブリッジマン結晶成長実験、および1983年のスペースシャトル・コロビア号で行なったSL-1計画の中のガリウム・アンチモン化合物半導体結晶成長の実験でも起こった。

地上での我々の経験では、ガラスのコップに入れた水はガラスの内側にぴったりと接し、ガラス瓶に入れた水銀はガラス瓶の底や壁をぬらさないながら、やはりぴったりと接触し、里芋の葉の上を転がる露も葉の表面の小さな突起に接しながら支えられている。ところが宇宙空間では重力や静水圧が働かないとはいえ、容器の壁に接触しないまま液体は容器に閉じ込められているということであり、これは地上の経験からすると手品のように不思議な現象に見える。そしてこれを利用すれば宇宙工場ですぐに高品位、高純度の半導体結晶を作製したり、液体を精製したりすることが可能になる。

筆者は、宇宙の無重力環境での化合物半導体の結晶成長に関する研究を行い、毛利宇宙飛行士を乗せたスペースシャトル・エンデバー号の宇宙実験の一部始終を地上管制基地からのコントロールにたずさわっていたが(金材技研ニュース1992年 No.9、12)、その後、上記の現象を解明し、それが決して不思議ではなくて、適当な条件の下でごく自然に起きる現象であることを示した。

その結果を要約すると、無重力環境では容器壁で囲まれた空洞の中にわずかの隙間を残してほとんどいっぱいになるように液体を閉じ込めた場合に、液体/真空の界面エネルギー + 壁/真空の界面エネルギー < 液体/壁の界面エネルギー、の大小関係が成立する系では、図(a)のように液体が容器壁から離れる。すなわち真空の膜に包まれて液体が浮かんだ状態が実現される。ただし、真空の膜はシャボン玉の膜のように弱いので少しの外力が働けば破れ、液体は容器壁に接触することが少々複雑な数式計算によって証明できる。これは地上で我々が通常経験するものである。また容器にわずかの液体を入れ、かつ、液体/真空の界面エネルギー + 壁/真空の界面エネルギー > 液体/壁の界面エネルギー、の関係が成立する系の場合は、外力が働かなければ図(b)のように、液体のシャボン玉の膜が真空を包む形になることも証明できる。

エンデバー号での実験中に、毛利宇宙飛行士は口の周りにへばりついたオレンジジュースが顔の表面に、目や鼻の中までも膜になって広がって行くことを地上基地に伝えてきた。また、シリコン油の中に注射針をさして吸い取ろうとした際の作業は大変むずかしく、シリコン油の中にうまく針がささらなかった。この興味深い交信記録がヒントになり、非接触溶融現象に上述の解釈を与えた。毛利飛行士の経験も非接触溶融も無重力環境で界面エネルギーが表立ってきたために生じた現象である。

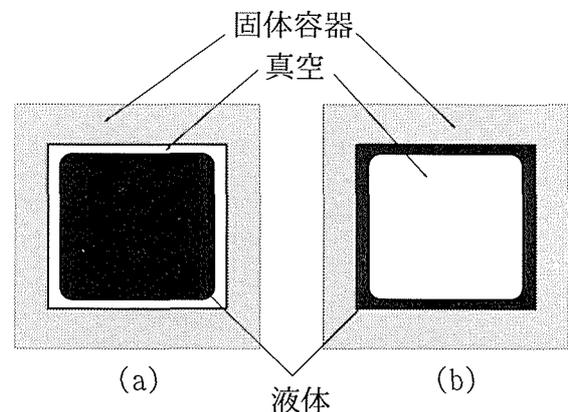


図 無重力状態で容器に閉じ込められた液体の二つの形態

小径配管の溶接における溶融状態のモニタリング

— 原子力発電施設用の有用かつ合理的技術 —

TIG(タンゲステン不活性ガス)アーク溶接は、比較的薄い板の溶接に適し、溶接部の表面が平滑でかつ高品質の溶接が可能であることから、特に原子炉・火力発電、化学プラントなどの配管の溶接に使用されている。プラントを人体に例えれば配管は血管に相当し、配管に欠かせない溶接の良否がこれらプラントの安全性や寿命を左右すると云ってよく、きわめて高い信頼性が要求される。これらの小径配管群の溶接は、その構造上の制約からかなり狭いスペース内での種々の姿勢で管の表側から溶接し、その内面まで十分に溶融させ、かつ流体を輸送する上で管内面の溶接部を平滑に形成させることが要求され、溶接技術としては最も難しい技術である。管径が小さい場合、管内面の溶接部(これを裏波ビードという)の形成状態を見るのがほとんど不可能であり、現在では溶接終了後にX線や内視鏡などを用いて検査する。しかし溶接を信頼性高くかつ効率よく行うには、溶接中に内部の溶融状態をモニターし、即座にその結果をフィードバックして、自動制御方式で溶接することが必要となる。

図1は既に当研究所で実用化した小径の固定管専用の自動溶接装置で、管内にアルゴンガスを充填し、管の各溶接位置に応じてその圧力を正から負まで微妙に変化させることにより、管内面に形成される裏波ビードの形状を精密に制御できる。すなわち管の上側の溶接時に溶融金属の形状は重力などの影響により管内面では凸型になり、下側の溶接時には凹型になるので、溶融金属に働く外力の影響を管内の圧力で補正しながら溶接するシステムである。このシステムにおいて管内面の溶融状態を正確にモニターできれば、品質良好な溶接が可能となる。

その方法として、アーク放電をパルス電流で行い、溶接中の溶融金属の内面に僅かな衝撃を与えて、その微小な振動挙動を溶融金属面での熱放射エネルギーの相対的变化として光電素子で検出し、溶融の量、形状、表面張力や粘性係数などをその場でモニターする。このアイデアに関して当研究所が既に日本、米国、英国で特許取得

しているが、このたび原子力発電施設用の溶接技術として再度見直し、本手法に関する理論的裏付けをしてその合理性と有効性とを明らかにした。図2(a)が示す様に板の裏側まで十分に溶接した時の溶融金属の振動挙動は、同図(b)に示す機械的振動の最も基本的なモデルで表現できる。すなわち溶融金属の質量は物体の質量Mに、溶融金属を保持する上向きの表面張力成分はバネ定数kに対応させ、また、溶融金属が上下に振動する際の制動力、すなわち溶融金属の粘性抵抗および溶融金属に接する気体の粘性による抵抗等は一括して、ダッシュポット(制動装置)の制動力を表す粘性減衰係数Rに対応させ得る。

図3は板の裏面が十分に溶融し、良好な裏波ビードが形成されている状態において、放電電流を遮断したときの裏面の光量変化の測定結果を示したものである。この減衰振動特性を表すパラメータとなる減衰振動消滅時間、減衰振動周期および減衰振動期間内の振動数と溶融金属の形状、表面張力、粘性抵抗係数等との関係を詳細に検討した。その結果、管内面の溶融金属の形状は振動周期の関数で表されること、表面張力で保持される溶融金属の安定性は溶融金属の減衰振動期間内の振動回数に対応すること等、溶融金属の形状寸法のみならず溶融状態の安定性まで評価できることが明らかとなった。すなわち溶融金属の振動特性は裏波ビード形成状態をよく反映し、溶融金属の安定かつ活発に振動し得る状態が良好な裏波ビードの形成に結び付くことがわかった。

この方式はテレビモニターなど視覚センサーでは判断できない溶融状態の詳細な挙動が定量的に計測でき、かつ溶融金属の微小減衰振動の計測、波形解析および結果

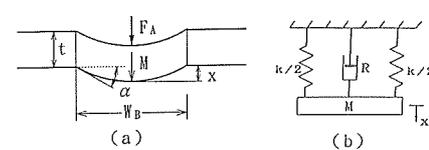


図2 溶接中の溶融金属断面とその振動モデル

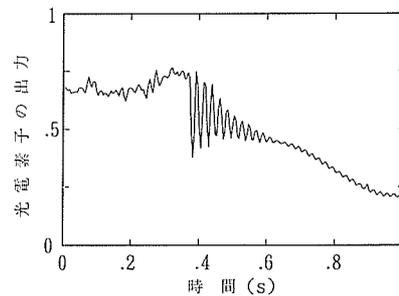


図3 溶接中の溶融金属の振動の計測波形

の人間や装置への情報伝達には、最近のパソコンによる高速情報処理・伝達技術が活用できるので、新しいモニタリング技術として発展する可能性がある。

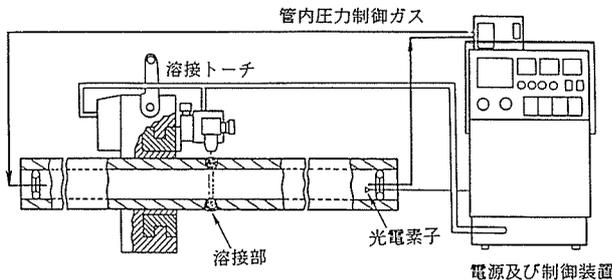


図1 管内面の溶接部形状を微小ガス圧力で制御する小径管自動溶接装置

◆短 信◆

●人事異動

平成8年3月31日
定年退職
小口 醇 (科学研究官)
前田 弘 (極限場研究センター長)
田中千秋 (計算材料研究部長)
河部義邦 (反応制御研究部長)
谷治治男 (管理部安全施設課長)
辞 職 矢部一義 (管理部研究支援課長)
平成7年4月1日
配置換 企画室長 八木晃一 (環境性能研究部長)
配置換 極限場研究センター強磁場ステーション
総合研究官 和田 仁 (企画室長)
昇 任 科学研究官 斎藤鉄哉
(極限場研究センター精密励起場
ステーション総合研究官)

昇 任 極限場研究センター長 西島 敏
(損傷機構研究部長)
昇 任 反応制御研究部長 福沢 章
(反応制御研究部第1研究室長)
昇 任 環境性能研究部長 入江宏定
(組織制御研究部第5研究室長)
昇 任 極限場研究センター精密励起場ステーション
総合研究官 野田哲二
(第2研究グループ第3サブグループリーダー)
昇 任 管理部安全施設課長 北原宣泰 (科学技術庁)
昇 任 管理部研究支援課長 戸田 勝
(管理部研究支援課高度技術専門官)
採 用 損傷機構研究部長 志賀千晃
(川崎製鉄株式会社)

●受 賞

日本鉄鋼協会俵論文賞
計算材料研究部 小野寺秀博, 阿部太一, 大沼正人,
田中千秋
環境性能研究部 木村一弘
第2研究グループ 藤田充苗
「炭素鋼の基底クリープ強度に及ぼす母相フェライト
中の微量固溶元素の効果」が最も有益な論文と認めら
れ, 平成8年3月26日, 上記の賞を受けた。

日本鉄鋼協会浅田賞
特別研究官 大河内春乃
鉄鋼化学計測技術の高度化に関する研究業績が鉄鋼
業の進歩発達に顕著な貢献をしたことが認められ, 平
成8年3月26日, 上記の賞を受けた。

日本金属学会研究技術功労賞
研究支援課 松田忠治
多年に亘って卓越した技術により金属の研究に協力
し, その進歩発展に大きく貢献した業績が認められ,
平成8年3月26日, 上記の賞を受けた。

日本金属学会功績賞
計算材料研究部 原田広史, 小野寺秀博
金属に関する学理, ならびに技術の進歩に対する功績
が認められ, 平成8年3月26日, 上記の賞を受けた。

セラモグラフィック賞技術部門銀賞
第5研究グループ 不動寺浩
集束イオンビーム描画による帯電像の形成とその観察
が優秀と認められ, 平成8年4月2日, 上記の賞を受け
た。

溶接学会業績賞
組織制御研究部 岡田 明
溶接の学術に関し優秀な業績が認められ, 平成8年4
月4日, 上記の賞を受けた。

平成8年度科学技術週間行事

—一般公開と青少年企画に744名が来場—

科学技術週間行事の一環として, 去る4月17日(水)に筑波・目黒の両地区の一般公開を, また20日(土)には金
材技研恒例となった青少年向けの公開を行った。一般公開では512名の来場者が, 日頃なかなか見ることのできない最
新の設備に目を光らせていた。青少年公開には, 232名が訪れ, 今回新たな企画として登場した「たたら製鉄」の実演
をはじめとする「鉄」をテーマにした様々な実験を通し, 大人から子供まで金材研ならではの体験を満喫した。来場者
は, 2日間で過去最多の744名を記録した。



発 行 所 科学技術庁金属材料技術研究所
〒305 茨城県つくば市千現1-2-1
TEL (0298)53-1045(企画室直通),
FAX (0298)53-1005

通巻 第450号
編集兼発行人
問 合 せ 先
印 刷 所

平成8年5月発行
武 藤 英 一
企画室普及係
前田印刷株式会社
茨城県つくば市東新井14-5