

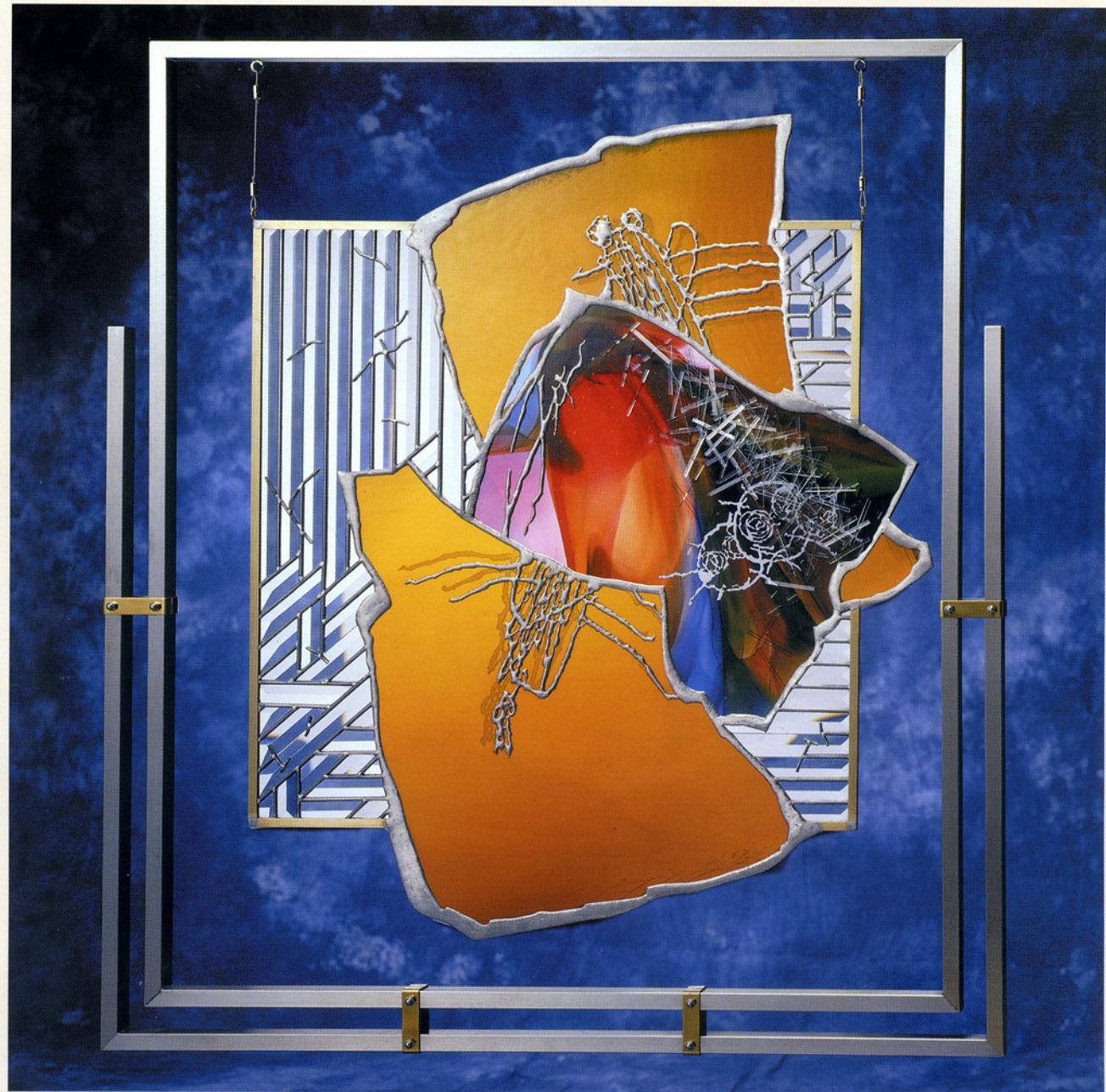
FUJICO

tsukuru

Fujico Technical Report 2002

「創る」

No. 10



表紙のことば

tsukuru [創る]

創意工夫による複合技術でトータルエンジニアリングを目指す弊社の理念を「創る」という、物づくりの原点で表現しました。表紙タイトルバックをギャラリーとして位置づけし、北九州市の産業基盤や文化的側面を反映するような創作活動を行っている人たちの「創る」行為をとりあげて“創造的な技術開発”という弊社からのメッセージに見えるものです。



表紙の作品は、ステンドグラス作家／高見俊雄氏の「Insect II」。高見氏は、グラフィック、ディスプレイ、ファッションと様々なジャンルの経験を経て、独学でステンドグラスを製作。従来の様式美にとらわれない自由な作品は、「建築における世界のグラスアート」(アンドリュー・ムーア著)に、日本人として唯一、高見氏の作品が掲載されています。

作者紹介

高見俊雄 Toshio TAKAMI [ステンドグラス作家]

1947年北九州市戸畠区生まれ。'72年セツ・モード・セミナー卒業。'85年第4回現代工芸美術九州会展 準大賞受賞。同年、日本ステンドグラス・グランドショウ優秀作品大賞受賞。'90年日本グラスアート展'90優秀賞受賞。'91～'93年ワールド・グラス・コンgresにて作品が紹介されるなど、受賞多数。様々なジャンルを経て、試行錯誤の果てに見つけた自己表現。ガラスの色彩と光が織り成すステンドグラスの世界。高見氏にとって、モノ創りとは、作品と共に心と心を織り成す、夢を織り成すことだという。難病の子どもを支援する会「がんばれ共和国」に参加するなど、福祉活動にも力を注いでいる。

グラスアート・TAKAMI主宰／福岡市在住。

目 次

卷頭言	・フジコー技報10号によせて	福岡県知事 麻生 渡	1
ご挨拶	・技報第10号発行にあたり	株式会社フジコー 代表取締役 山本 厚生	4
隨想	・日本の世界貢献	財団法人 北九州産業学術推進機構 専務理事 中村 琢磨	5
技術解説	・循環型社会の構築に貢献する溶射技術の新しい展望 ・超親水性光触媒による沸騰・蒸発熱伝達の促進 ・CALPHAD最前線 ・サーメット溶射の最新技術 ・(株)フジコーのハードフェーシング技術の紹介	大阪大学 接合科学研究所 教授 大森 明 九州大学 大学院工学研究院 助教授 高田 保之 九州工業大学 工学部物質工学科 教授 長谷部 光弘 (株)フジミインコーポレーテッド 課長 工学博士 五日市 剛 (株)フジコー 技術開発センター センター長 工学博士 永吉 英昭	7 15 19 23 32
技術論文	・WCサーメット自溶合金溶射皮膜の高性能耐摩耗特性 ・バナジウムアタックの研究 ・形鋼圧延ロールに適用した狭開先軸接合技術 ・省エネルギーのための高温燃焼を可能とする新しい表面処理技術の研究	尾崎 龍宏、河村 太一朗、古田 博昭 佐々木 満太郎、園田 晃大 大野 京一郎、芳谷 和政、尾崎 健一 坂田 太志、興梠 隆	39 44 48 55
新製品・新技術	・ボトムアッシュ選別装置 ・高精度寸法ライナ ・現地施工用高速フレーム溶射自動トラバース装置	寺村 敏一 古田 博昭 木下 利哉	62 65 68
全社組織			70
工場、事業所 所在地			71

tsukuru

Fujico Technical Report 2002

No.10

2002.10.1

CONTENTS

Foreword	Wataru Asoh	1	
Greeting	Atsuo Yamamoto	4	
Memoir	Takuma Nakamura	5	
Commentary	<ul style="list-style-type: none"> • A Promise of Thermal Spraying Contributing to Recycling Society • Enhancement of Boiling and Evaporation Heat Transfer by Superhydrophilic Photocatalyst • CALPHAD at The Forefront • New Technologies of High Velocity Flame Spraying and Cermet Materials • FUJICO offers Innovative Hardfacing Technology 	Akira Ohmori Yasuyuki Takata Mitsuhiro Hasebe Tsuyoshi Itsukaichi Hideaki Nagayoshi	7 15 19 23 32
Technical Paper	<ul style="list-style-type: none"> • High-Performansive Wear Resistant Hardfacing with Ni-based Self-Fluxing Cermet containing WC • Study of Vanadium Attacks • A combination technology of narrow-gap shaft welding and CPC process for rolls used in section mills • Study of Surface Treatment Technology to enhance The Possibility of High Temperature Incineration for Energy Saving 		39 44 48 55
New Products, New Technology	<ul style="list-style-type: none"> • Bottom Ash Magnetic Separating System • High-Precision Liners • Automatic Traverse Device for High Velocity Flame Spraying on site job 		62 65 68
Organization			70
Address			71

「フジコー技報10号によせて」

福岡県知事
麻生 渡
Wataru Aso



戸畠で生まれ育った私にとって、フジコーさんと言えば、溶接をはじめ高度で確かな技術を持った企業という強い印象があります。現在では、オリジナルな技術開発によってCPCをはじめとする100を超す特許技術を持ち、独創的で画期的な製品を生み出し、「技術のFUJICO」として国内はもとより広く海外に事業展開されています。また、大学や研究機関等との共同研究を積極的に進められ、本県における産学官連携の推進に大きく貢献されているところです。フジコーさんの次世代を切り開くチャレンジ精神、技術開発や社会貢献等に対する真摯な取り組みに対し、心より敬意を表します。

さて、経済をはじめ様々な分野でグローバリゼーションが急速に進展しています。

大競争時代の中で、これまでの国家単位だけでなく、これからは地域も世界的な競争の前面に立たざることになります。

このような中、福岡県がアジアの交流拠点として今後も発展していくためには、成長著しいアジアに先んじた次世代のリーディング産業、すなわち、経済や雇用を牽引する研究開発・頭脳集約型の産業を育てていく必要があります。

このため、IT（情報通信技術）、環境技術、バイオテクノロジー、ナノテクノロジーの分野で現在、重点的な取り組みを推進しています。

（IT）

まず、ITです。IT革命の進展により、時間・距離を超越し安価に情報交換ができる社会が形成されつつあります。

これに積極的に対応し、アジアをはじめ世界と競争できる環境を整備するため、福岡県では、自治体初の2.4ギガビットの高速大容量幹線「ふくおかギガビットハイウェイ」を昨年11月から運用開始しました。北九州市をはじめ県内9都市にアクセスポイントを設置し、専用回線で東京等と結び、企業・自治体等に広く無料で開放するという全国でもユニークな取り組みです。企業内や学校間のネットワーク構築、高精細画像を利用した遠隔医療、通信事業者によるインターネットサービスの提供、映像や経済記事のコンテンツ配信等幅広く利用され始めています。加えて、これを福岡と釜山間の54ギガビット海底ケーブル「日韓IT光コリドー」と結ぶことで、本県にアジアのインターネット結節点「ふくおかIX」を構築し、アジアにおけるITハブ拠点化を目指しています。

また、本年6月には、県内企業とアジア企業とを結ぶ国際電子商取引市場「eアジアマーケットプレイス福岡」の運用を開始しました。香港と台湾の貿易振興機関と既に提携を結んでおり、これにより、電脳商社に加盟する県内企業約1万3,000社にアジアの企業と電子取引を行う道が開けたことになります。

半導体生産においては、台湾、韓国、中国等のアジア勢が台頭する中、シリコンアイランド九州は、より高度な分野に転換していく必要があります。このため、本県では大学、企業等におけるLSI設計開発の知的集積、産業集積を核に、新産業の創出を図り、システムLSI設計開発・供給の中核拠点を目指す「シリコンシーベルト構想」を推進していま

す。人材育成、研究開発支援、ベンチャー育成、知的所有権の交換等を行い、海を挟んだアジアのベルト地帯の中で連携と分業の関係を形成していきたいと考えています。

この一環として、昨年12月、「福岡システムLSIカレッジ」を開講しました。システムLSIの実務者の教育を目的とした全国初の取り組みとして、九州大学や九州工業大学をはじめとする18大学及び企業等の講師陣による高いレベルの講義が行われています。

(環境技術)

二番目は、環境技術です。資源を浪費し、大量の廃棄物を生み出してきた20世紀の社会経済システムから、資源循環型システムに転換していくことが求められています。このためには、リサイクルを可能にする技術と産業が不可欠です。本県では、北九州市と大牟田市がエコタウンの指定を受けており、北九州市では既にOA機器、自動車、家電等のリサイクル工場が稼働し始めるなど、我が国最先端の取り組みが進められています。大牟田市では、家庭から出たゴミをいったん固形燃料化して発電に使う RDF発電所が建設中です。

県では、昨年6月、产学官による共同研究体制でリサイクル技術と社会システムの開発を行い、その実践を支援する「リサイクル総合研究センター」を北九州市に設立しました。現在、有機系廃棄物の発泡化装置の開発等、様々な廃棄物の再資源化等に向けた取り組みを行っています。アジアの環境問題解決の一翼を担うためにも、本県に確固とした研究・産業基盤を築いていきたいと考えています。

(バイオテクノロジー)

三番目はバイオテクノロジーです。人ゲノム解析を契機に、ポストゲノムの時代に入り、バイオテクノロジーは、遺伝子治療をはじめとする医療、農業、食品、環境、化学等幅広い分野で革命的な変化をもたらし、市場規模やベンチャー企業の増大が期待されています。

本県で、九州大学や久留米大学等にバイオ関連研究の優れた頭脳資源を有するとともに、県工業技術

センター生物食品研究所等にも多様な研究シーズを有しています。また、県南部地域は、醸造業を中心とした発酵技術の伝統やそれを背景とするバイオ関連企業の集積やバイオベンチャーの台頭も見受けられるようになりました。この集積を基礎に、产学官による「バイオ産業拠点推進会議」を設立し、久留米地域を中心にバイオテクノロジー分野における一大産業集積拠点の形成を目指した「福岡バイオバレープロジェクト」を推進しています。

(ナノテクノロジー)

四番目はナノテクノロジー（超微細技術）です。ナノレベルのスケールで、分子や原子を操作してモノを製造するという技術の大革新が現在進んでいます。ナノテクノロジーの活用により、製造技術の飛躍的な高度化や新材料の開発による新産業の創出が期待されます。この技術を持つか持たないかで地域の将来が決定されることになりかねません。

本県は、有機・無機化学を中心にナノテクノロジーに関する大学等の高い頭脳集積を持ち、また、金属・セラミックス等の材料、半導体産業関連及び自動車関連の多様なものづくり産業の集積があります。今後、产学官によるナノの研究開発を進めていき、本県を世界をリードするナノテク産業の拠点としていきたいと考えています。本年7月に、产学官で研究開発・産業化の推進等を行う「福岡ナノテク推進会議」を設立したところです。

(福岡ベンチャーマーケット)

横断的なプロジェクトとして「ベンチャーマーケット」があります。ベンチャー企業の資金調達、販路開拓、技術提携等を支援するため、投資家などビジネスパートナーとのマッチングの場を提供する「フクオカベンチャーマーケット」を毎月開催しています。ベンチャー企業を育成する画期的な取り組みであり、これまでにアジア企業を含む600社以上がプレゼンテーションを行っています。世界で活躍するベンチャーが巣立つための基盤になりつつあります。

今年7月、福岡・北九州両都市圏を核とした「北部九州圏におけるアジア産業交流拠点の形成」が都

市再生本部の第4次都市再生プロジェクトに決定されました。

500万県民の英知と活力を結集し、今後とも福岡県が21世紀においてアジアの知的拠点として繁栄していくため、懸命に取り組んでまいります。皆

様のご支援とご協力をよろしくお願ひいたします。

フジコーさんには、今後も伝統の独創的な技術開発力に一層の磨きをかけられ、大きく飛躍されるとともに、信頼の技術をもって豊かな社会づくりに貢献されますことを心から祈念いたします。

【略歴書】

あ そ う わ た る
麻 生 渡

昭和14年5月15日生

【学歴】

昭和38年3月 京都大学 法学部 卒業

【職歴】

- 昭和38年4月 通商産業省入省
- 昭和53年5月 外務省在英國日本国大使館参事官（在ロンドン）
- 昭和56年5月 通商産業省生活産業局紙業課長
- 昭和58年6月 通商政策局米州大洋州課長
- 昭和60年6月 産業政策局産業資金課長 兼 民間活力推進室長
- 昭和61年6月 大臣官房企画室長
- 昭和62年6月 大臣官房総務課長
- 昭和63年6月 通商政策局国際経済部長
- 平成元年7月 近畿通商産業局長
- 平成2年6月 通商政策局次長
- 平成3年6月 商務流通審議官
- 平成4年6月 特許庁長官
- 平成6年7月 財団法人中小企業総合研究機構顧問
- 平成7年4月 福岡県知事
- 平成11年4月 福岡県知事 再選（現在に至る）

ご挨拶

技報第10号発行にあたり

株式会社フジコー
代表取締役
山本 厚生
Atsuo Yamamoto



お陰をもちまして、弊社は今年で創業50周年を迎えることが出来ました。

これはひとえに皆様方のご指導ご鞭撻の賜物だと心より感謝いたしております。

10年前の創業40周年を迎えた時、この節目に何か記念に残ることをやろうと考え、技術年報『tsukuru（創る）』の発刊を決心いたしました。

決心したものの当社の底の浅い技術開発力からみて、3年続くのが関の山と思っておりましたが、『tsukuru（創る）』もお陰さまで10年続けることが出来ました。

3年続ければ4年と、継続は力だと皆に言い聞かせ頑張ってまいりました。

今年創業50周年を迎え、前回と同じように何かをやらねばと思い立ち、『技術開発センター』の設立を決心いたしました。

経営環境の厳しいこの時期に、新たなコスト計上をしなければならないものを作る…、現状の弊社財力・経営力では不可能に近い発想がありました。

どうしたらコストアップにならず『技術開発センター』の設立と運営が可能になるか皆と協議をしました。

私達は『北九州工場』の生産を止め主力工場の『山陽工場』に生産をシフトする、このリストラにより収益の向上を図り開発コスト増を吸収する、空いた工場を『技術開発センター』として活用し大きな建設費を掛けないようにする、研究装置は独自性の高い物は別とし新たな投資はせず、官・学所有の高級設備を積極活用する。

この結論により、リフォームで設備も満足とは言

えませんがまがりなりにも、『技術開発センター』設立の運びとなりました。

奇しくも『技術開発センター』（旧北九州工場）は弊社発祥の地に立地することになりました。小さな『技術開発センター』でありますが、私達は大きな夢を次々に創造開発するセンターにしたいと思っております。

製造業は技術が支えであり、技術なきところに企業は無いと思っております。

この競争激化の厳しい21世紀を生き残る最大ポイントは、次期の技術を人より早く創り、たゆまなき技術革新を続けることだと思います。

フジコーは技術を生命線とし、あらゆる企業のあらゆるニーズに対応できる、専門的高技術技能集団の確保と育成を常に志し、お客様に『フジコーでなくてはダメだ！』と言われるような、期待と信頼度の高い企業を構築する、をモットーとしております。

弊社は創業50周年を期に、『技術開発センター』を設立させました。

今後は一層技術開発に力を注ぎ、今まで以上に皆様のお役に立てる開発を可能にすべく、日々研鑽努力を重ねていく所存でございます。

今後とも皆様方のご指導とご支援を賜りますようお願い申しあげます。

日本の世界貢献

(財) 北九州産業学術推進機構

専務理事

中村 琢磨

Takuma Nakamura



宗教同志の争い

イスラエルで、血で血を洗う報復戦が続いている。ユダヤ教徒とイスラム教徒との争いである。カシミールで、イスラム教徒とヒンズー教徒とが殺し合っている。コソボのキリスト教徒とイスラム教徒、セイロンの仏教徒とヒンズー教徒、いずれも宗教同志の闘争である。似たような例は、地球上の至る所で探し出すことが出来る。しかも、その殺し合いの実相は、人間のやる事とは思えない、戦慄すべきものである。

愛や慈悲を説く宗教の信者達が、どうしてこのような残虐行為が出来るのであろうか。色々な解釈はあるが、行き着くところは一神教的信仰である。一神教の信徒にとっては、自らの神だけが唯一の神であり、他宗教は邪宗であり迷信である。他宗教徒は自分と同等の人間ではなく、殺しても良心の呵責を感じない動物と同等、あるいはそれ以下のものとして、見下す場合さえあるのである。

一神教の歴史は新しい

では、かくの如く、世界平和のために有害にも見える一神教的信仰が、有史以来、人類の歴史に君臨してきたのであろうか。否である。人類の歴史に比べると、一神教の歴史は、はるかに短い。

地球上に多くの信者を持つ代表的な一神教、キリスト教、イスラム教について考えてみよう。キリスト教は今から二千年前に、イエス・キリストを始祖として生まれた。イスラム教はもっと新しく、千四百年前にマホメットが創始した。このように、古い一神教でも、その成立をたどれば、今から二千年ほ

ど前に過ぎない。しかも、地域的に広がり、世界性を持って、多くの信者を獲得するためには、その後数百年を要している。

一方、人類の歴史はどうか。現在の人類と同じ種、つまりホモサピエンスの発生は十万年前と考えられるが、文明らしきものが生まれ、宗教的な感情が発生したのは、遅くとも一万年ほど昔であると推定されている。例えばメソポタミア地方では、その頃から農耕牧畜が始まったことが確認されており、また、豊穣の女神などの土偶や、人の埋葬された墓などが発掘されているからである。

こうした宗教の特徴を一言でいえば、多神教であり、また、他宗教に寛容であったということである。これもメソポタミアの例で見てみよう。六千年前、国造りを始めたシュメールと呼ばれる人々は、最高神、天の神、水の神を中心に、多数の神々を崇拝していた。続いて、アッカド、バビロニア、アッシリア、古代ペルシャというように、次々に新しい国が興って領土を広げていくのであるが、征服者達は、自民族固有の神々に加えて、支配下に入った国家の神々を包摂していくのである。最近の調査によると、バビロニア時代の神々の数は、四千にのぼったということである。

このような事情は、メソポタミア以外の地でも同様であり、一神教の誕生、更に汎世界性の獲得は、割に新しい現象であることが理解されるのである。

アレクサンダーも古代ローマも多神教で成功した

広大な領土で、異質な多民族の統治に成功した事例としては、オリエントにヘレニズムの花を咲かせ

たアレクサンダー、次に、ヨーロッパ、アフリカ、メソポタミアを含む大帝国を支配した古代ローマが思い浮かぶ。いずれも、西暦紀元前後の時代である。その成功の原因は、優れた統治政策によるといえるが、両者に共通したものとしては、征服地における土着の信仰を尊重したことである。

もともと、ギリシャもローマも、伝統的に多神教であった。当時、既に生まれていたユダヤ教のような一神教の神は、人間に行動規範を与え、それに反すれば罰を与える神であった。一方、ギリシャやローマの多神教の神々は、人間を守り、人間を助ける存在であった。だから、神の数が多いことは、守護する力の多いことであり、歓迎さるべきことであったのである。

そして両者とも、多分、古代ペルシャ、あるいはそれ以前のメソポタミア各国の統治様式を学んだに違いない。寛容な宗教政策こそ、異民族統治の原則であることを、熟知していたのであろう。そのため、領土内の神々は増え続け、特に古代ローマにおいては、遂に30万という途方もない数になってしまった。

ところが、古代ローマは紀元4世紀にキリスト教を国教と定め、他の宗教を邪教として魔女狩りを始める。これを境に、古代ローマ帝国の没落が始まるのである。

日本の世界における役割

「文明の衝突」の著者、サミュエル・ハンチントンによると、二十一世紀は、決して「普遍的な文明」の時代ではなく、「八つの文明」の対立の時代であるとする。そして事細かに、ここ数年来の世界各地における戦争の実態と、今後の文明間衝突のシナリオ

を書いているのであるが、その背後からは、殆どの場合宗教、特に一神教的信仰が顔を出している。こうした対立を沈静化し、世界の平和と文明の共存を可能ならしめるためには、宗教間の寛容と協調を求めざるを得ない。

このような分野で、日本は何らかの貢献が出来ないのであろうか。確かに日本は、ODAの実績だけでも分かるように、経済的には世界に貢献していることは間違いない。しかし一方では、「エコノミック・アニマル」とか、「小切手振り出し国家」とか、揶揄されているのも事実である。日本が本当に世界から愛され、尊敬されるためには、どうしても文化的な貢献が必要である。しかもそれは、国際社会の価値観や行動に影響を与えるような、思想性や哲学性を持ったものである事が望まれる。そのためには、深く日本の歴史に根ざし、実証性を持ったものでなければならぬであろう。

よく言われることだが、日本人は、正月には神社詣でをし、結婚式は教会でやり、葬式は寺に頼んで、何らこだわるところがない。極めて宗教的にルーズに見える。一神教の人々から見ると、唾棄すべき慣習かも知れない。しかし、一面から言うと、異宗教に非常に寛容であることを意味する。しかもこの特質は、日本史の示すところ、縄文時代以来何千年の長きに亘って、日本人のDNAに刻み込まれてきたものである。

前述したメソポタミア文明や、ヘレニズム、キリスト教国教化以前の古代ローマの歴史を考える時、日本の精神史も、現代文明における一つの役割モデルになり得ると考えられる。このような側面から研究してくれる歴史哲学者が、この日本の地に生まれることを、望むや切なるものがある。

大阪大学 接合科学研究所

教 授

大森 明

Akira Ohmori



循環型社会の構築に貢献する溶射技術の新しい展望

A Promise of Thermal Spraying Contributing to Recycling Society

1 はじめに

溶射技術が日本に導入されてから今年で80年を迎え、その上溶射装置が1910年頃、スイスのSchoopによって発明されてから約一世紀が経つ。日本での早期の溶射技術の導入には驚かされるが、この間の溶射技術の発展はすさまじく、この5年間では特に著しいものがある。

21世紀も2年目に入り、ものづくり分野にとってより厳しい年になり、溶射技術にとっても、環境と調和した循環型社会の形成に向けた方向への模索が重要な課題となると考えられる。

また、科学技術においても「環境」「リサイクル」「エネルギー」をキーワードとした研究・技術が重要な課題となると思われる。現在、私たちの周辺を見渡しても、地球環境問題、資源枯渇、地域環境(公害)など多くの解決すべき問題を抱えている。

循環型社会が形成されれば、このような諸問題は解決されると考えられる。このような循環型社会とは物質の循環を促進することによって環境への負荷を減らし、持続的に発展可能な社会とすることをいうが、その実現は容易ではないと思われる。

このような社会を実現するために、資源などの立場から、ごみなどの廃棄物の発生抑制(リデュースReduce)、次いで製品・材料の再利用(リユースReuse)と再生利用(リサイクルRecycle)の3Rが挙げられている。

溶射技術がこのような循環型社会にいかに貢献できるかを考えた時、それは材料の表面改質技術であり、その特徴を生かすことによって材料表面に耐摩耗性、耐熱性、電気導電性、光触媒性などの各種高機能性を有する膜形成が付与でき、材料を新しく創製されることにより寄与可能と考えられる。

地球上にある材料として、金属材料、無機材料(セラミックス)、有機材料(プラスチック)があり、セラミックスは資源として多少地球上に存在するが、金属材料、プラスチックは枯渇材料であることから、特に、リユース、リサイクルが求められている。環境保護及び循環型社会構築

の観点からプラスチクリサイクルが進められているが未利用分が多い。

繊維用途を除いても年間約70万トン生産されるPET樹脂は年産約24万トンの塩化ビニール樹脂に替わる材料として現在生産量が増大し、またPETボトルも回収され、社会の関心が高まっている。

このようなPETを始めとするプラスチック再生利用(リサイクル)は今後急激に進展する動向にあるが、リサイクル製品は、用途、価格面で魅力を見出せない状況にもある。今後、PETボトルを含めプラスチクリサイクルを一層促進していくためには、再生プラスチック材としての用途拡大が不可欠であり、溶射技術による前述した新たな機能の付与による高付加価値化が求められる。

以上のことを考え、21世紀の溶射技術の新しい第一の展望として「溶射技術によるプラスチックの表面改質」すなわち表面高機能プラスチックの創製がある。これは、廃PETボトルなどの廃プラスチックのリサイクルであり、さらに自然界においてCO₂とH₂Oに分解可能な地球にやさしいグリーンプラである「生分解性プラスチックの各工業分野での採用とその表面への高付加価値化による高機能生分解性プラスチックの創製」である。

第二の展望として、「光触媒TiO₂溶射皮膜の環境問題解決への適用」で、光活性なアナーゼ型TiO₂粒子の固定化のための溶射皮膜の創製である。

第三の展望として、溶射技術が長年培ってきた「材料の延命すなわち長寿命化達成皮膜の創製」であり、保護膜としての熱的、機械的特性の大幅な向上で、従来の溶射技術では達成が困難な、過酷な環境状態での使用を可能とする膜創製に対する溶射法の出現である。すなわち、その中でもプラズマ・レーザ及びHVOF・レーザ複合溶射法の適用である。

単独溶射法に対して、第四の展望としてWarm溶射法の開発と適用が挙げられる。これは、従来のプラズマ溶射、HVOFなどのHot溶射法及びCold溶射法(超高速低温粒子)に対応し、それらを補完する溶射法であり超高速Warm溶

射粒子の適用である。

さらに第五の展望として高活性ナノ粒子粉末の適用による高機能発現ナノ粒子構成溶射皮膜の創製である。

ここでは、これらの新しい展望に対し、溶射技術の現状と将来動向について順に触れる。

2 最近の溶射技術

それでは「溶射技術」とは何かとなると簡潔に説明するのは困難であるが、原理的には霧吹き、塗料の吹き付けと同様であり、図1に溶射技術の構成と施工を模式的に示す。

溶射技術(Thermal Spraying)とは粉末、棒状の固体(溶射材料)に何らかの方法で熱を与え溶融し、液体微粒子(数 μm ~百数十 μm)として素材表面に高速度(数十 m/s ~数百 m/s)で衝突させ、扁平微粒子の積層により表面に皮膜を形成させ、材料表面の改質を行う技術である。

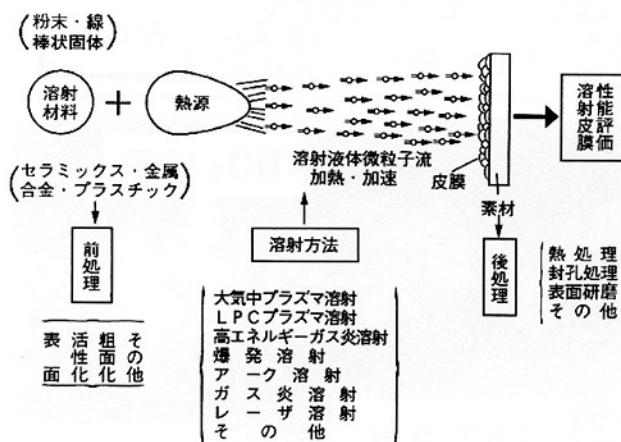


図1 溶射技術の構成と施工

溶射材料として、材料表面に新しい機能を与えるため、高融点のセラミックス、金属、合金などが使用され、加熱方法(溶射方法)としてプラズマ、レーザ、ガスの燃焼炎などが用いられる。プラズマ溶射ではプラズマジェットにより液体微粒子として加熱・加速され素材表面に高速度で衝突し、膜を形成する。

このような溶射技術によって前述したように、いかなる高機能性が材料表面に与えられるかについて次に触れる。

セラミックス溶射皮膜は主としてセラミックスの特性である耐熱性、断熱性、耐摩耗性、電気絶縁性などの性質を利用して、各種工業分野に適用されている。しかしながら、セラミックスの高機能性とくにファインセラミックスの特性、例えば固体電解質、半導体、高誘電性、光学的特性などを有効に利用した溶射技術の適用に対しては現在注目され、研究・開発が盛んに行われているが、端緒を開いたばかりで、近い将来さらにそのような適用分野の拡大がはかられると考えられる。

エネルギー分野へは、ガスタービン関連の部品の断熱に

対し、M-Cr-Al-Yなどの耐高温酸化性アンダーコートと断熱ZrO₂-Y₂O₃皮膜などが適用され、性能と耐久性向上に大きな効果が上げられている。

その他、鉄鋼、熱処理設備、ボイラ、熱交換器、バルブ、スピンドルなどの耐摩耗、耐熱、耐食、断熱に対してもセラミック溶射皮膜が有効に利用され、大きな効果が上げられている。

このようなセラミック自身の有する特性、耐熱、耐食、耐摩耗など、保護皮膜以外の高機能皮膜の適用について次に触れる。

セラミック溶射皮膜の高機能性を適用した例として、遠赤外輻射、光電極、酸素センサ、燃料電池、磁気ヘッド、メタルボンド砥石、ダイヤモンド合成、高温超電導、インプラントなどの生体材料、ホットプレート、セラミック・プラスチック複合材料の製作などがあり、これらの適用例にはすでに多くの実績を上げているものが多数あるが、現在開発研究中のものもある。

3 溶射技術の新展開(新応用分野への適用)

3.1 プラスチックの溶射技術による表面改質

溶射技術による各種プラスチックの表面改質による高機能プラスチック(高機能プラスチック複合材料)の創製があり、前述したように廃プラスチック、特にそれ自身の回収によりその再生利用が求められているPETボトルの再生利用を溶射技術によっていかに達成されるかを図2に示す。¹⁾

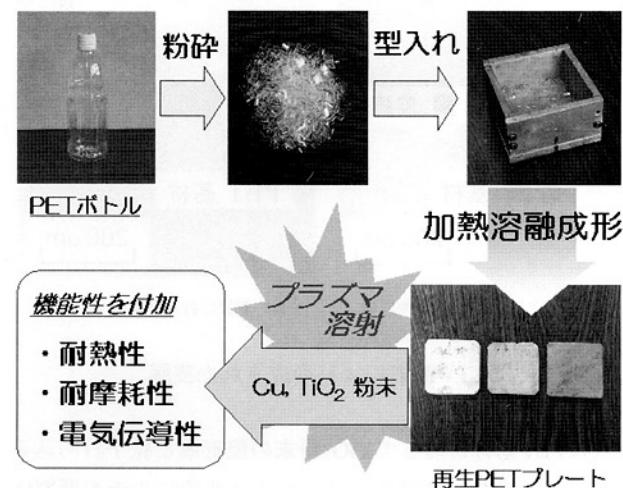
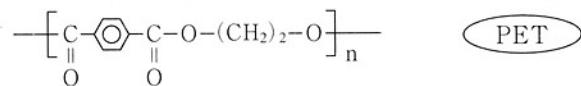


図2 PETボトルの溶射技術による再生利用の流れ

PETボトル(製品)が粉碎(解体)・加熱・溶融され、各種成形品(再生)された後、その表面にプラズマ溶射(PS)などにより、光機能性(光触媒TiO₂膜)、電気伝導性(Cu膜などの金属・合金膜)、耐摩耗性(Al₂O₃膜、TiO₂膜、WC-Co膜)などの高機能性が付与され、その結果、高機能化プラスチックへ再生する。この方法では、プラス

チックタイル、瓦、抗菌プレート、ボードなど、その適用範囲は広く、さらに利用の拡大が期待される。

PET（ポリエチレンテレフタレート）は融点が538Kで他のプラスチックと比較して高融点を持っている。しかし、プラズマジェット、ガス炎などの溶射中の高温での熱変形気にさらされたとき、当然熱変形などによってプラズマ溶射による表面皮膜形成は不可能であると予想された。そのため、材料として大きな位置を占めるプラスチック基材への溶射はなされていなかった。しかしながら、プラズマジェットでのPET板の照射を行ったところ、熱変形せず表面部での溶融が認められた。PETの化学構造式を次に示す。



PET板に電気伝導性を付与するため、Cu粉末のプラズマ溶射について示す。通常Cu粉末（粒径45~90 μm）をプラズマ溶射する場合、アーク電流500A、電圧55Vで溶射距離200mm、ガンの送り速度170mm/sで行われる。この溶射条件で軟鋼板及びPET板表面にCu粉末のプラズマ溶射を行った。両者のCu皮膜断面の光学顕微鏡観察結果を図3に示す。左図により、軟鋼基材表面に、予想されたようにCu積層扁平粒子による皮膜が形成され、PET基材の場合、右図に示すごとくPET基材の熱変形は生じず、溶融Cu粒子（白色部）が部分的に表面及び内部に深く球状Cu粒子が変形しない状態で多く存在する状態となった。

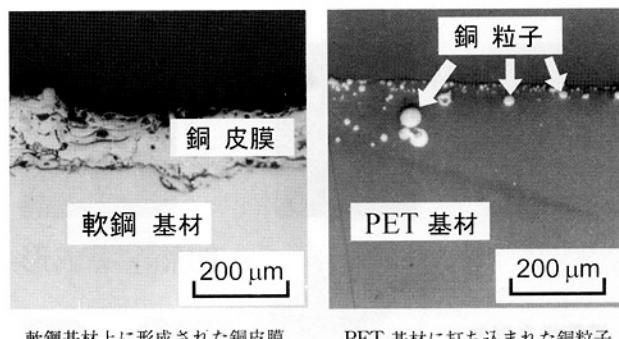


図3 溶射により形成された皮膜

次にPET基材に対してTiO₂粉末の膜形成と粒子打ち込みについて、また、高温に加熱されると敏感にルチル型TiO₂へ変態するアナターゼ型TiO₂造粒粉末（平均粒径33 μm、0.2 μm TiO₂粒子の造粒）を用いて粒子への入熱量の変化とPET基材表面温度の影響について調査した。さらに、セラミック粉末の入熱量がより容易に制御可能な内部供給方式のプラズマ溶射装置を用いて溶射条件を500Aとしプラズマガス中のHe圧を0.21、0.62MPaと変化させ調査した。その結果の断面組織を図4に示す。この図から分かるように、いずれの条件においても球形のTiO₂粒子の打ち込みが

認められた。He圧が0.21 MPaにおいては未溶融のTiO₂粒子と溶融粒子が混在し、アナターゼ相とルチル相が存在する皮膜（打ち込み）となっている。0.62 MPaでは主として大小の溶融粒子から構成されている。

引き続きCu粉末のプラズマ溶射において、溶射距離を300 mmと遠くすると図5に示すごとく皮膜の形成が認められ、PET基材の表面溶融は認められなかった。

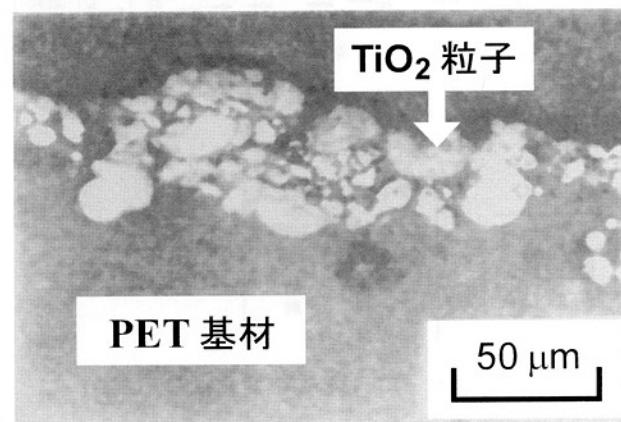
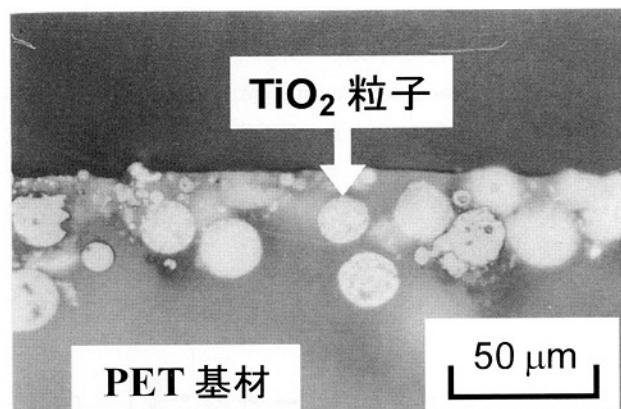


図4 プラズマガス中のHe圧を変化させたアナターゼTiO₂粉末のプラズマ溶射後の断面
(上図0.21MPa、下図0.62MPa)

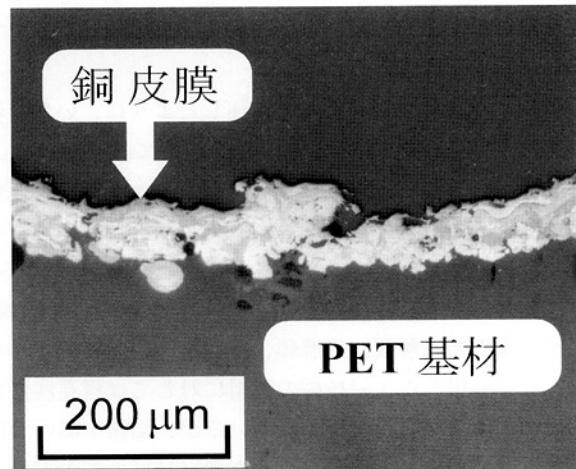


図5 PET基材の上に溶射により形成された銅皮膜

以上に示したように、Cu粉末及びTiO₂粉末のプラズマ溶射による廃PET基材への粒子打ち込みと膜形成がPET基材の変形を伴わず可能となった。廃PETによる各種成形品表面へのCu粒子打ち込みとCu皮膜形成による電気伝導性付与とTiO₂粒子打ち込みとTiO₂皮膜形成による耐摩耗性、光触媒性付与ができることによって廃PETの機能性プラスチックへの再生利用が可能となった。図6にPS(プラズマ溶射)とHVOF(高速フレーム溶射)による、従来の鋼板上及びプラスチックPET板表面へのCu及びTiO₂粒子による膜形成と粒子打ち込みの模式図を示す。

他のプラスチックに対しても、溶射技術を活用した表面改質による高機能性プラスチックの創製が可能である。

3.2 生分解性プラスチックへの溶射技術の適用²⁾

溶射技術の新展開としてPETボトルなどのプラスチックと異なり、土壤や海水中などの地球環境において細菌などの微生物によって分解を受けて消滅する生分解性プラスチック(グリーンプラ)の溶射技術による高機能性プラスチックへの再生がある。

PETなどの汎用プラスチックは自然界において、その分解させる微生物は確認されておらず、腐食に対して強く地球環境を汚染し、その処理に苦慮されている。それに対して、注目されているのが生分解性プラスチック(biodegradable plastic)で土壤や海水中などの地球環境において分解をうけて消滅するプラスチックである。生分解性

プラスチックは「自然界において、微生物が関与して低分子化合物に分解されるプラスチック」と定義されており、最終的にはCO₂とH₂Oへ酸化されグリーンプラとして環境汚染から注目されている。

しかしながら、汎用プラスチックと比較して成形性、機能性、価格面から多くの課題を有している。そこで、汎用プラスチックに機能面で勝る高機能性生分解性プラスチックとして再生させることができれば、多少価格が高くなってしまってもその用途が拡大され、地球に優しいプラスチックとして注目されると考えられる。生分解性プラスチックは製造法で天然高分子(植物産生、動物産生、微生物産生)と合成高分子に大別される。

ここでも発想の転換として汎用プラスチックと同様に比較的低融点であるが、前述したPET板と同様に、表面改質技術、特に優れた特徴を有する溶射技術によって、生分解性プラスチックの成形品の表面に高機能性(分解制御性を含む)を付与し、新しい機能性プラスチック(複合材料)として再生することが可能である。生分解性プラスチックとして脂肪族ポリエステルであるポリプロピレンサクシネート(株昭和高分子の商標、ビオノーレ)を基材として選び溶射を試みた結果について示す。ビオノーレの融点は387Kで、その化学構造式を次に示す。

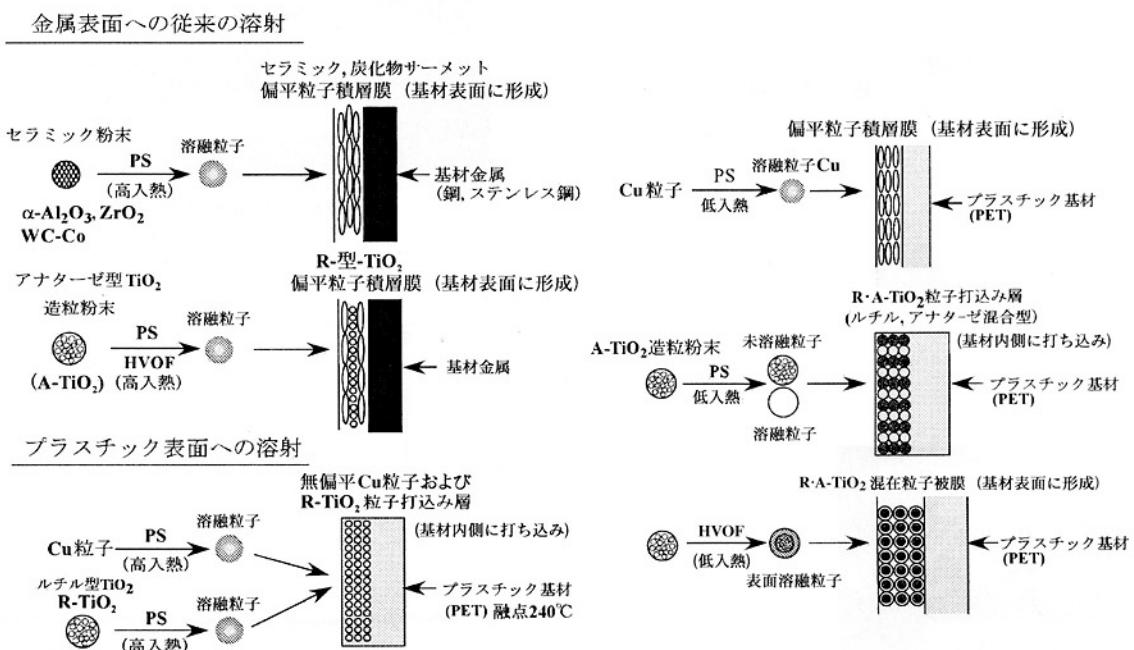
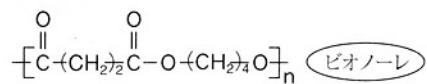


図6 プラズマ溶射(PS)と高速ガスフレーム溶射(HVOF)による膜形成と粒子打ち込みの模式図

PET板に用いたと同様のアナターゼ型TiO₂造粒粉末を用いてビオノーレ板表面にプラズマ溶射を行ったところ、PET板よりも低融点にかかわらず、図7に示すごとく、板の溶融及び熱変形などの熱ダメージが生じず、ビオノーレ板表面にTiO₂粒子の形成が認められた。このプラズマ粒子径の異なったTiO₂粒子がビオノーレ基材内部に打ち込まれているのが観察された。

低入熱の溶射であるHVOF溶射により図8に示されるごとく膜形成が生じアナターゼ相100%（図9参照）のTiO₂微粒子による膜形成が認められた。

このような生分解性プラスチックへの溶射技術による表面改質による高機能プラスチックへの再生と創製が可能であり、前述したごとく、生分解性プラスチックの利用は大幅に拡大されると考えられる。

3.3 溶射技術による高活性光触媒TiO₂皮膜の創製

溶射技術の新展開として環境問題の解決のための高活性光触媒TiO₂溶射皮膜の創製がある。循環型社会形成のための地球環境に対する取り組みとして、現在非常に注目され話題となっているTiO₂光触媒について、溶射技術の膜形成によるTiO₂光触媒の固定化を例に示す。特に、ここでは、溶射技術の特徴である溶射粉末に対しての入熱量制御が容易、皮膜の多孔質性、作業能率が良く、複雑形状及び大面積部分への表面改質が可能であるなどの利点を利用した高

活性TiO₂光触媒膜の形成について示す。

TiO₂光触媒の作用については種々検討されており、汚水の悪臭(NH_3 , $\text{H}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{C}}{\text{=}}}-\text{H}$ など)、有害物質の分解(PCE)、NO_xなどの分解、表面の親水性による汚染防止、抗菌・殺菌作用などその適用分野は高範囲にわたっている。

TiO₂は安定であり、結晶構造として主として正方晶のルチル型とアナターゼ型が存在し、アナターゼ型は約1123Kでルチル型へと変態が生じ、ルチル型の融点は2131Kである。光触媒としてアナターゼ型（バンドギャップエネルギー

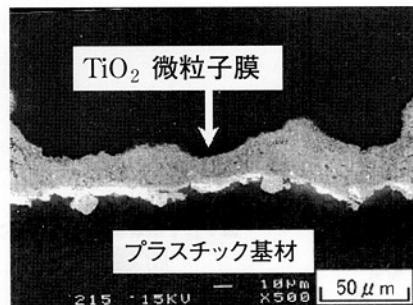
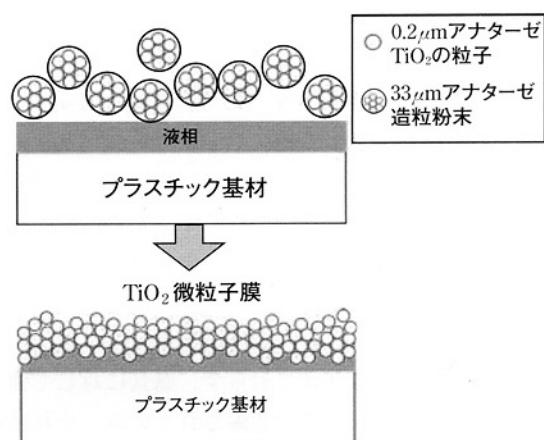


図8 TiO₂微粒子構成膜の断面と形成の模式図

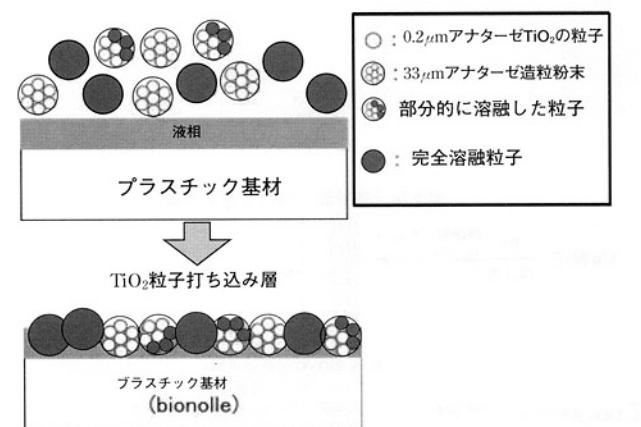


図7 粒子打ち込み層の断面と TiO₂粒子打込み層形成の模式図

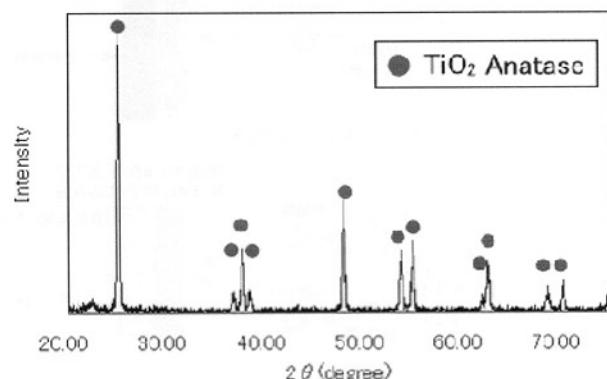


図9 アナターゼ相100%皮膜のX線結果

-3.2eV) が有効であるといわれており、n型半導体 TiO_2 はバンドギャップ以上の光の照射により、励起により伝導帯に電子(e^-)、荷電子帯に正孔が生じ、両者が O_2 と H_2O との反応により、 $\cdot\text{O}_2^-$ （スーパー・オキサイドアニオン）と $\cdot\text{OH}$ （ヒドロキシラジカル）が生成し、それらが有害物質などの分解に作用するとされている。

従来から、 TiO_2 光触媒としてアナターゼ型 TiO_2 微粒子が主として使用されており、膜としての固定化を行うため、グルーゲル法などのコーティングによる膜形成と刷毛塗り法などが行われてきているが、いずれも課題を残している。溶射技術が高活性 TiO_2 光触媒膜の形成による固定化に対して、前述した特長ゆえに注目されているが、プラズマ溶射におけるプラズマジェットは $10,000\text{ }^\circ\text{C}$ を超える、フレーム溶射においても溶射雰囲気は約 $3,000\text{ }^\circ\text{C}$ であり、アナターゼ型からルチル型への変態を制御し、高活性アナターゼ型 TiO_2 皮膜の形成は容易でないと考えられる。しかしながら、溶射技術において後述するように飛翔溶射粒子に対して入熱量の制御を粒子速度と温度の両面から行うことが可能であり、さらに溶射粉末の設計からも達成されると考えられる。

高活性 TiO_2 光触媒皮膜形成のため、溶射粉末として $0.2\text{ }\mu\text{m}$ のアナターゼ型 TiO_2 粉末の図10に示す造粒粉末を作成した。³⁾ プラズマ溶射において、400Aと500Aの低入熱条件の下で膜形成を行った。その結果、 TiO_2 皮膜表面において TiO_2 微粒子が焼結された状態での多孔質膜が得られ、悪臭ガス(アセトアルデヒド)の分解に有効であるのが認められた。このような皮膜形成技術はステンレス鋼製のメッシュ面に適用され、図11の汚水処理実験装置に適用され、有効な TiO_2 光触媒性を示した。図8に示した生分解性プラスチック表面にHVOF溶射で形成された皮膜は100%アナターゼ相となり、図10に示した溶射粉末と同様な高活性な光触媒特性を示した。

3.4 省エネルギー分野への複合溶射の適用

次に新展開として新熱源として期待されているレーザー導入によるハイブリッド(複合)溶射による省エネルギー

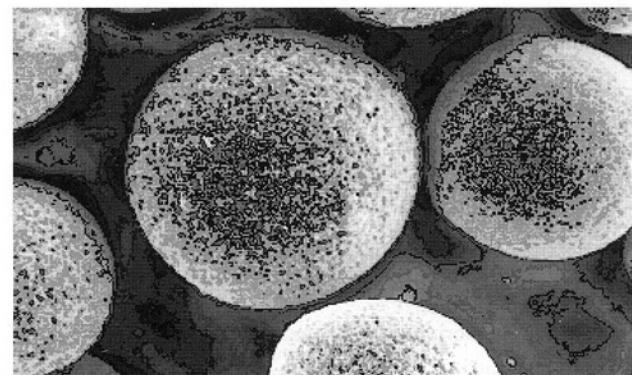


図10 TiO_2 アナターゼ造粒粉末の表面形状

(長寿命化)皮膜の創製がある。⁴⁾

図12に示されるプラズマ溶射+YAGレーザ及びHVOF溶射+YAGレーザの複合化があり、前者はガスターピンなどの断熱(熱遮蔽)皮膜(TBC)に対し、後者は超耐摩耗皮膜(High Density Coating)への創製に適用され、レーザの導入による熱的効果が期待される。

単独の溶射法の新展開として、Warm(超高速Warm粒子)溶射によるセラミック粒子の変態、熱分解制御、ナノ構造

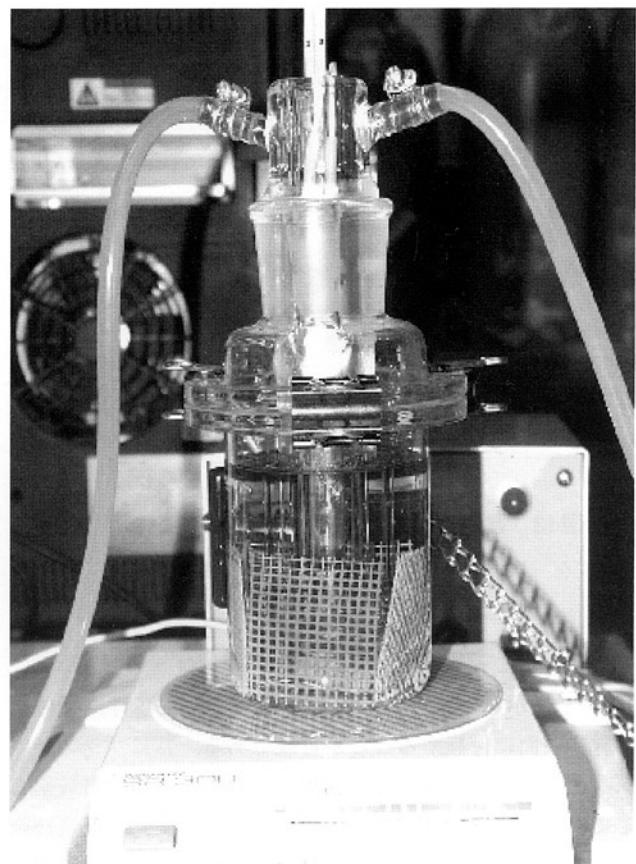


図11 TiO_2 溶射皮膜付きメッシュを用いた汚水処理実験装置

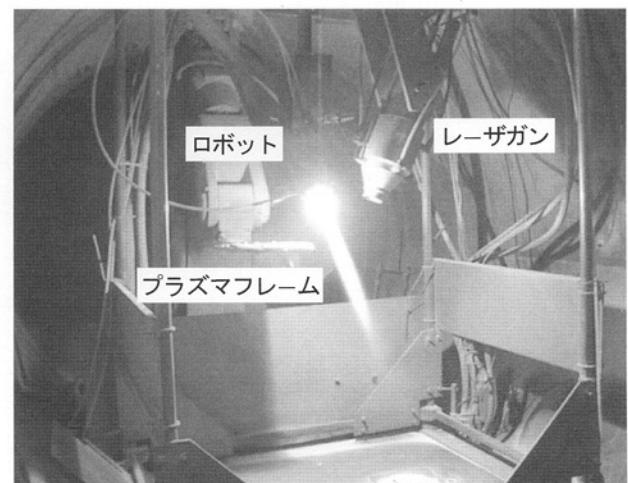


図12 プラズマ・レーザ複合溶射中の外観写真

皮膜の創製がある。

従来のプラズマ溶射、HVOF溶射はHot(高温)溶射であり、現在、Cu、Alなどの金属にのみ適用されているCold(低温)溶射に対し、両者を補完するWarm(温か)溶射の適用がある。図13にWarm溶射の領域をVp(粒子速度)とTp(粒子温度)に対して示す。熱分解されやすいハイドロオキシアパタイト、超電導皮膜などのセラミック皮膜の創製に期待される新溶射法である。

さらに、将来に向けての溶射技術の新展開として、再現性皮膜創製のための溶射技術のデータベース作成に関する溶射プロジェクトが進行している。

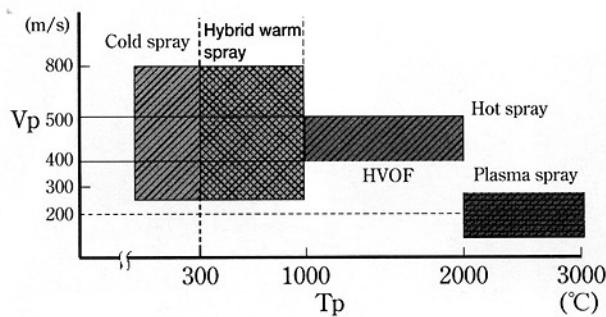


図13 各種溶射法のVp(粒子速度)とTp(粒子温度)の領域

4 おわりに

以上に示したように、溶射技術によって各種高機能性を材料表面に付与することが可能である。特にプラスチックなどのリサイクル（再生利用）に有効な表面改質技術として溶射技術が利用され、機能性プラスチックの製造技術として21世紀に向かって将来展望は明るい。また、その適用は飛躍的なものになることが期待される。

さらに、循環型社会に対して、プラスチックのリサイクル、光触媒皮膜による環境問題の解決、長寿命化皮膜創製など、溶射技術に対する期待は大きい。

参考文献

1)

- 1-1) 大森明, 最近の溶射技術と循環型社会における溶射技術の役割—廃プラスチックの表面改質によるリサイクルと環境への挑戦—配管技術, 43-5 (2001), 26-33.

- 1-2) T. Kanazawa, A. Ohmori, S. Matsusaka, Surface Modification of Recycled PET Plate by Particle Implantation and Deposition with Plasma Spraying, Proc. of Int'l. Thermal Spray Conf. Singapore, (2001), 331-336.

- 1-3) Ohmori, S. Matsusaka and T. Kanazawa, Surface Modification of Recycled PET Plate by Particle Implantation and Deposition with Plasma Spraying, Proc. of 1st International Symposium on Environmental Materials and Recycling, March, 8-9, (2001), 17-22.

- 1-4) 金澤朋実, 大森明, 溶射法によるプラスチック表面改質に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, No. 69 (2001), pp.200-201.

- 1-5) 金澤朋実, 大森明, プラズマ溶射によるプラスチック表面改質に関する研究, 第10回溶射総合討論会講演概要, (2001), 40-41.

- 1-6) A. Ohmori, S. Matsusaka and T. Kanazawa, Surface Modification of Recycled PET Plate by Particle Implantation and Deposition with Plasma Spraying, Transactions of JWRI, Vol.29, No.1 (2000), 39-44.

- 1-7) 大森明, 金澤朋実, プラズマ溶射による再生PETの表面改質に関する研究, 溶接構造シンポジウム'99講演論文集, (1999), 538-541.

2)

- 2-1) 谷知史, 大森明, 溶射法による生分解性プラスチック表面への固体膜の形成, 第10回溶射総合討論会講演概要, (2001), 38-39.

- 2-2) 大森明, 谷知史, 守屋公一, TiO₂溶射粒子打込みと皮膜形成による生分解性プラスチックの表面改質, 溶接学会全国大会講演概要, (2000-9), 486-487.

3)

- 3-1) Akira Ohmori, Fuxing Ye and Changjiu Li, The Effects of the Additives on Photocatalytic Performance of Plasma Sprayed Titanium Dioxide Coatings, Proceedings of the

- International Thermal Spray Conference, (2002), Essen, pp165-169.
- 3-2) Fuxing Ye and Akira Ohmori, **The Photocatalytic Activity and Photo-absorption of Plasma Sprayed TiO₂-Fe₃O₄ binary Oxide Coatings, Surface and Coatings Technology**, (2002), in press.
- 3-3) Akira Ohmori,Fuxing Ye, and Changjiu Li, **The Effects of the Additives on Photocatalytic Properties of Plasma Sprayed Titanium Dioxide Coatings**, Proceedings of the 7th International Symposium of Japan Welding Society, Kobe, (2002), pp953-958.
- 3-4) Fuxing Ye and Akira Ohmori, **Photocatalytic Activity and Photo-absorption of Plasma Sprayed TiO₂-10%Fe₃O₄ Coatings**, Transactions of JWRI, Vol.30, No.2, (2001), pp.73-78.
- 3-5) Souta Matsusaka, Akira Ohmori, and Yoshimasa Toki, **Fabrication and Properties of TiO₂ Photo-Catalytic Coatings by Thermal Spraying with TiO₂-Al Agglomerated Powder**, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, (2001) Singapore, pp.87-92.
- 3-6) C.Coddet, A.Ohmori, C.J.Li, H.Liao, G.Bertrand, C.Meunier, D.Klein, **Comparison of TiO₂ Crystalline Structures Obtained Using Different Thermal Spray Processes**, The First International Symposium on Environmental Materials and Recycling, Osaka, Japan, (2001. March), 3-6.
- 3-7) S. Matsusaka, A. Ohmori and Y. Toki, **Fabrication and Properties of TiO₂ Photo-Catalytic Coatings by Thermal Spraying with TiO₂-Al Agglomerated Powder**, Proc. of Int'l. Thermal Spray Conf. Singapore, (2001), 87-92.
- 3-8) 石崎祥希, 大森明, **ステンレス織金網に形成した光触媒TiO₂溶射皮膜の水質浄化特性**, 溶接学会全国大会講演概要, No.69 (2001-10), pp.202-203.
- 3-9) 大森明, Fuxing Ye, **TiO₂溶射皮膜の光触媒特性に及ぼすFe₃O₄, Al₂O₃とY₂O₃添加物の影響**, 溶接学会全国大会講演概要, No.69 (2001-10), pp.206-207.
- 3-10) 大森明, **溶射技術による光触媒皮膜の創製**, Preparation of TiO₂ Photo-Catalytic Coating by Thermal Spraying, 工業材料, Vol.49, No.7, (2001), pp.54-59.
- 3-11) 大森 明, 松坂壯太, 土岐吉正, **TiO₂-Al複合粉末を用いた光触媒溶射皮膜の作製とその評価特性**, 高温学会誌,(2001), Vol.27, pp.274-279.
- 3-12) A. Ohmori, H. Shoyama and K.Ohashi, **Study of Characteristics of Thermally Sprayed TiO₂ Photo-Catalytic Coating**, Proc. of the 20th Int. Welding Cong., Bratislava, Slovak, May (1999), 530-535.
- 4)
- 4-1) S. O. Chwa, A. Ohmori, **Thermal diffusivity and Erosion Resistance of ZrO₂-8wt.%Y₂O₃ Coatings prepared by Plasma Laser Hybrid Spraying Technique**, Thin Solid Films, (2002) in press.
- 4-2) S. O. Chwa, A. Ohmori, **Microstructures of ZrO₂-8wt.%Y₂O₃ coatings prepared by plasma laser hybrid spraying technique**, Surface and Coatings Technology, 153/2-3 (2002) 302-309.
- 4-3) S. O. Chwa, A. Ohmori, **The influence of surface roughness of sprayed zirconia coatings on laser treatment**, Surface and Coatings Technology, 148 (2001) 88-95.

九州大学大学院工学研究院

助教授

高田 保之

Yasuyuki Takata



超親水性光触媒による沸騰・蒸発熱伝達の促進

Enhancement of Boiling and Evaporation Heat Transfer by Superhydrophilic Photocatalyst

1 まえがき

酸化チタンは光触媒の一種であり、紫外線による光分解反応で抗菌、防汚、脱臭などの環境浄化を行なう物質として、最近非常に注目を浴びている物質¹⁾である。酸化チタンのもう一つの重要な機能は光励起超親水化現象である。これは、酸化チタンをコーティングした表面に紫外線を照射すると、時間の経過とともに水との接触角が減少し、ほぼゼロになるという性質である(図1参照)。この超親水性を利用して、防汚、ガラスなどの曇り止め、といった様々な効果が得られる。水に濡れ易い表面構造を利用すれば、汚れが付着しにくくなることが知られており、セルフクリーニング効果²⁾³⁾⁴⁾と呼ばれている。建材、自動車の塗装、サイドミラーの曇り止めフィルムなどで実用化が始まっている。他の分野への応用も急速に広がりつつある。

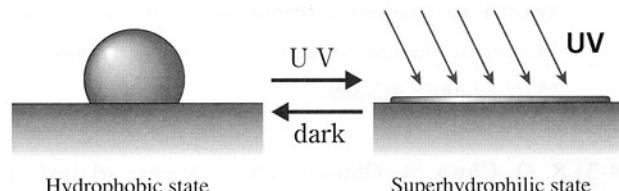


Fig.1 Photo-induced hydrophilicity

我々はこの超親水性コーティング面を沸騰・蒸発・凝縮など濡れ性が影響を及ぼす相変化伝熱系に応用することで、伝熱特性の向上と紫外線の有無による伝熱制御が可能であると考えている。超親水性の表面を伝熱面として、沸騰、蒸発、凝縮など気液間の相変化を伴う熱伝達に適用した場合に、通常の伝熱面と比べてどのような違いが現れるかを調べることは非常に興味深い。たとえば、プール沸騰においては、離脱気泡のサイズ、核沸騰開始過熱度、熱伝達係数、限界熱流束点(CHF)、極小熱流束点(MHF)などの諸特性に影響が現れる。また、超親水性を利用すれば非常に薄い液膜の形成が可能となるので、液膜の厚さが熱伝達を支配する系において伝熱特性に大きく影響を及ぼす。強

制流動沸騰系の環状流領域や流下液膜式蒸発器などでは熱伝達の促進が期待される。

本報では、超親水性伝熱面を各種の沸騰・蒸発熱伝達の制御に応用することを目的として、これまでに行ってきた相変化伝熱への応用事例を紹介する。

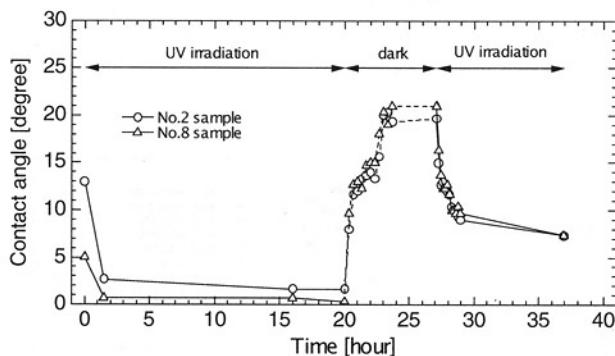
2 酸化チタンの成膜と親水化特性

酸化チタン薄膜の形成法には、大別して湿式法と乾式法がある⁵⁾。湿式法の代表的なものはゾルゲル法であり、酸化チタン粒子を懸濁させたコーティング液にディップし、熱処理によって成膜させる。主にセラミックへのコーティングに使用されている。ディップコーティング用のコーティング液には、数nm～μmサイズの酸化チタン粒子が使われており、市場で簡単に入手することができる。また、暗所における親水性の保持のためにSiO₂がブレンドされている。

最近では、金属用のコーティング剤も開発されているが、ステンレスのように酸化チタンコーティング液に濡れにくい性質のものに対しては、まずプライマーをコーティングした後に酸化チタンをコーティングする二度塗りが必要となる。

金属用のコーティング剤と言っても、伝熱面のように厳しい環境下での使用を想定している訳ではないので、実際の伝熱面に使えるようなタフなコーティング剤は現時点では存在しない。当初、我々が使用していたコーティング液による成膜の場合、実験毎にコーティングを実施する必要があった。また、ディップ法により作成された酸化チタン層は、膜厚が1～4 μmであり、沸騰熱伝達の場合には無視できないほどの熱抵抗層となる。このため、ディップ法に代わる薄くて強固な成膜法が望まれる。

我々の研究グループでは、3年ほど前からRFマグネットロンスパッタリング法による成膜を実施している⁶⁾。この方法は乾式法に分類され、密着性に優れた成膜が可能である。図2にスパッタで銅円柱の端面に成膜された酸化チタン表面の親水化過程および疎水化過程における接触角の変

Fig.2 Change in contact angle of TiO_2 -sputtered surfaces

化を示す。図中のNo.2とNo.8二つのサンプルは、全く同じ条件で成膜されたものであり、膜厚は250nmである。一回目の照射下では約1.5時間で接触角は低下し超親水状態になる。この状態は紫外線を照射し続ける限り持続するが、約20時間後に照射を止めて暗所に保管すると接触角は約22°まで急激に増加する。紫外線を照射すると接触角は再び低下し始めるが、最終到達角度は約7°であり、一回目よりも高い値となっている。これはスパッタにより成膜された表面が、まだ安定な条件になっておらず、時間の経過とともに変化しているのである。現在、成膜条件を変えながら、安定な酸化チタンコーティング面を開発中であるが、今しばらく試行錯誤が必要であろう。しかしながら、成膜直後から手際よく実験を行うことにより、超親水状態における伝熱実験は可能である。

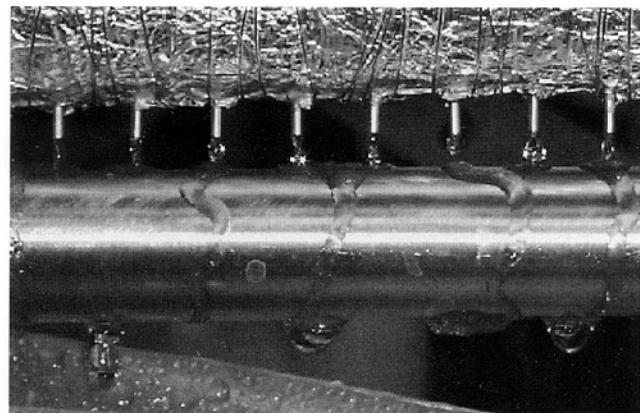
3 相変化伝熱への応用

表面の濡れ性は相変化伝熱に種々の影響を及ぼす。中でも特に重要なものは、ブル沸騰における限界熱流束(CHF)および極小熱流束(MHF)への影響、流下液膜蒸発および液滴蒸発における伝熱促進効果などである。ここでは、これまでに我々が行った実験結果を紹介する。

3.1 流下液膜蒸発

我々が超親水性表面を用いて最初に行った伝熱実験は、流下液膜蒸発⁷⁾である。これは伝熱面の濡れ性が向上することで、低流量域においても乾き面(ドライパッチ)が出現することなく、安定な薄液膜を実現できるであろうという考え方からである。図3の写真は、同じ流動および加熱条件で通常面と超親水面とで液膜の様子の違いを比較したものである。伝熱面は直径24mmの銅の丸棒であり、酸化チタンコーティングはディップ法によりおこなった。通常面では流れがリバレット状になっており、大きな乾燥部分が出現しているのに対し、超親水面では薄い安定な液膜が実現されている。

図4は伝熱特性を示したものである。縦軸はNusselt数で熱伝達係数に相当する無次元量であり、横軸は膜Reynolds数で液膜流量に相当する無次元量を表している。図から低



(a) Normal surface

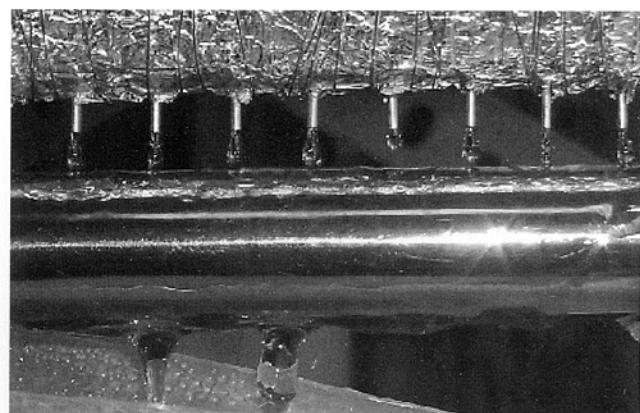


Fig.3 Behavior of falling film

($q=35\text{kW/m}^2, Re_f=150$)

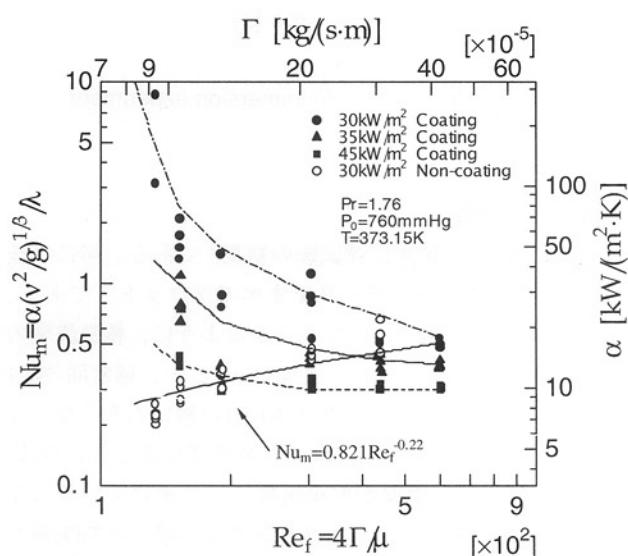


Fig.4 Heat transfer characteristics of falling film evaporation

流量、低熱流束になるほどNusselt数の値が大きくなっていることがわかる。Nusselt数は通常面に対し最大40倍となっている。流量が増加すると通常面においても伝熱面上のすべてが液膜に覆われるようになり、超親水面との差はなくなる。また、低流量で高熱流束の場合は、液膜が途中で蒸発してしまい、超親水面においてもやはり乾燥部分が出現するため通常面に対する優位性はなくなる。

3.2 浸漬冷却

MHF点に及ぼす濡れ性の効果を調べるために浸漬冷却実験⁸⁾を行った。浸漬冷却に使用した試料は、直径30mm、厚さ8mmの円盤状の銅塊であり、中心に熱電対が埋め込まれている。試料を電気炉で400°Cまで加熱し、水槽に浸漬し、サンプルの温度履歴を測定した。図5に水温100°Cの場合の冷却曲線を示す。超親水性コーティングを行なった試料は、冷却開始約10秒後、320°Cで急冷が開始されるのに対し、コーティング無しの場合の急冷開始点は30秒、210°C付近からである。濡れ性がよい面ほど極小熱流束点が高温側に移動するという予想通りの結果が得られている。

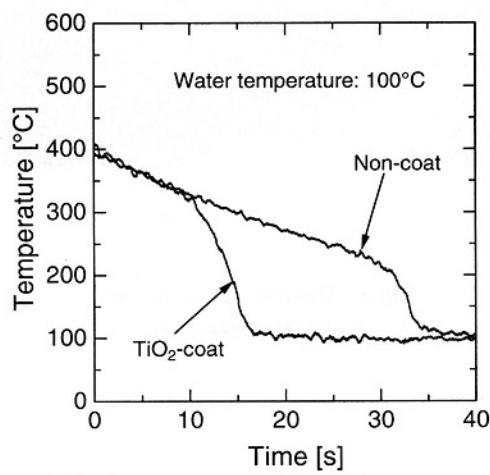


Fig.5 Cooling curves in immersion experiment

3.3 プール沸騰

図6はプール沸騰熱伝達試験の結果⁶⁾である。図には核沸騰域から膜沸騰域のデータをすべてプロットしてある。液温は飽和温度である。図から分かるように、核沸騰域の熱伝達係数は、スパッタリング面(No.8と9)、通常面(No.1と7)、ディップコーティング面(No.3)の順に大きくなっている。ディップコーティング面の伝熱性能が良くないのは、恐らく4 μmという膜厚が熱抵抗層として働いていることが原因と考えられる。スパッタリング面の場合はTiO₂層と基材との密着性が優れており、膜厚も250nmと薄いので熱抵抗は小さい。したがって、スパッタリング面の伝熱性能が優れているのは、高い濡れ性によるものと理解できる。

コーティング面の限界熱流束(CHF)が通常面に比べて高いことがわかる。特にスパッタリング面の限界熱流束は、通常面に比べて1.5~2倍ほど大きい。

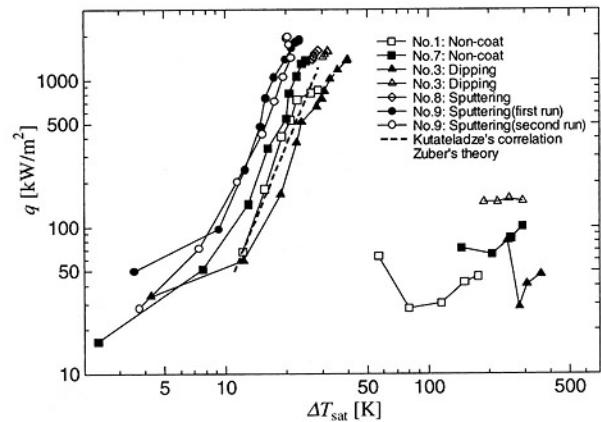


Fig.6 Boiling heat transfer characteristics

3.4 液滴の蒸発

図7はスパッタ法によりコーティングした凹面の伝熱面を用いて行った単一液滴の蒸発実験の結果⁹⁾である。使用した伝熱面は2種類で、通常面とスパッタ面である。スパッタ面の場合は、紫外線を照射した場合(30°)としない場合(90°)の2回の実験を行なった。Leidenfrost温度(T_{LEID})と濡れ限界温度(T_{WL})を示しているが、紫外線を照射した場合は、 T_{LEID} 、 T_{WL} ともに紫外線を照射しない場合に比べて約20K增加していることが分かる。紫外線を照射しない場合の接触角の値は通常面のそれとほぼ同じであり、蒸発曲線もほぼ一致している。

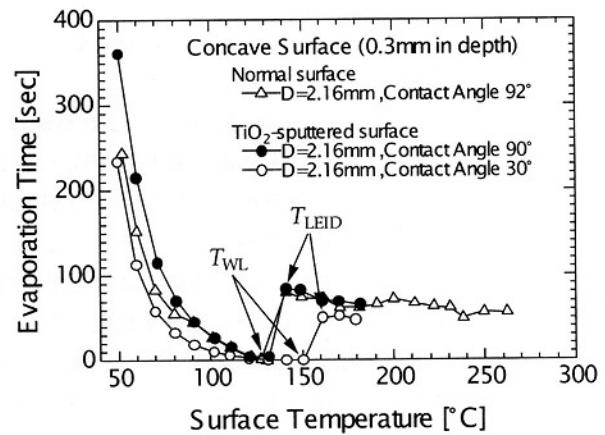


Fig.7 Evaporation curves on concave surface

さらに詳細なデータを取得するために、平面の伝熱面による接触角約4°, 13°, 32°, 82°の4通りの実験を行なった。

伝熱面が平面であるために、実験範囲は T_{WL} 以下に限定されている。液滴の等価直径は 2.16, 2.40, 2.66, 2.93 mm の 4 通りである。図 8 は 2.93mm を除く残りのデータをまとめたものである。縦軸は液滴の体積で除してある。この図から、接触角が小さいほど蒸発時間は短く、伝熱が促進されることが分かる。

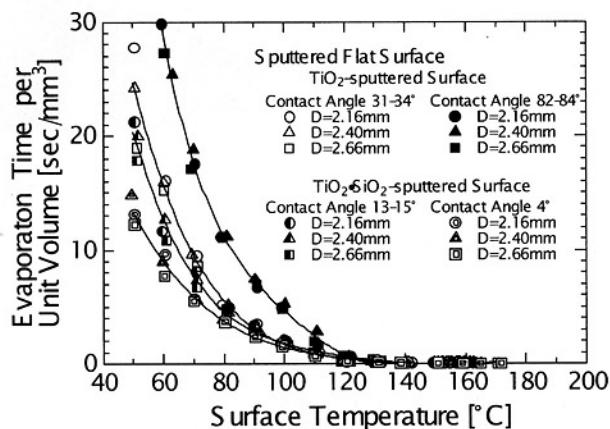


Fig.8 Evaporation curves on concave surface

図 9 は接触角に対する濡れ限界温度の変化を示したものである。接触角 13 ~ 82° の範囲では、接触角が小さいほど、 T_{WL} は高くなり、液滴の体積の影響もほとんど出でていないのがわかる。接触角が小さくなると液滴が伝熱面上に広がりやすくなるために、 T_{WL} が上昇する。また、液滴の直径の影響もない。しかしながら、接触角 4° では、液滴の寸法により T_{WL} に差が生じている。現時点での理由は不明であるが、伝熱面の熱容量が関係している可能性があり、今後もう少し大きな伝熱面で確認の実験を行なう必要があると考えている。

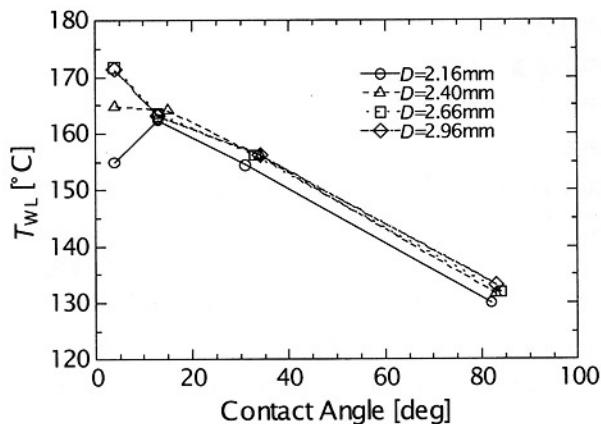


Fig.9 Influence of contact angle on wetting limit temperature

4 むすび

本報で紹介したように、超親水性伝熱面は理想的な伝熱面となる可能性を有している。実用に際して、(1) 安定で密着性に優れたコーティング層を実現できるか、(2) 紫外線の届かないところで長期間親水性を維持できるか、などが問題となる。(1)は最適な製膜条件を探索することで解決できるであろう。(2)は SiO_2 など保水性にすぐれた成分をブレンドすることで暗所でも 10° 程度の低接触角は実現できるであろうと考えている。

超親水面だけでなく超撥水面の開発²⁾も進んでおり、濡れ性の点で従来の伝熱面からは想像もつかないような特性を有する伝熱面が開発されるかもしれない。その意味でも濡れ性の効果を十分に把握しておく必要がある。

参考文献

- 橋本和仁、藤島昭編、酸化チタン光触媒のすべて－抗菌・防汚・空気浄化のために－、シーエムシー、1998
- 藤嶋ら、光クリーン革命、シーエムシー、1997
- R. Wang, K. Hashimoto, A. Fujishima, M. Chikuni, E. Kojima, A. Kitamura, M. Shimohigoshi and T. Watanabe, "Light-induced Amphiphilic Surfaces", Nature, Vol.388, No.6641, pp.431-432, 1997
- A. Fujishima, D. A. Tryk, T. Watanabe and K. Hashimoto, "Self-cleaning Glass", International Glass Review-Flat Glass Processing, Issue 2, pp.114-116, 1998
- 渡部俊哉、橋本和仁、光励起反応による固体表面濡れ制御、表面、Vol.37, No.5, pp.265-280, 1999
- Y. Takata, S. Hidaka, J.M. Cao, M. Masuda, T. Ito, T. Watanabe and M. Shimohigoshi, Boiling and Evaporation from a Superhydrophilic Surface, Thermal Science & Engineering, Vol.8, No.6, pp.33-41, 2000
- Y. Takata, K. Tanaka, K. Kaijima, T. Ito, T. Watanabe and M. Shimohigoshi, Enhancement of Heat Transfer with Liquid-Vapor Phase Change by Photo-Induced Hydrophilicity, Proc. 33rd National Heat Transfer Conf., NHTC99-080, 1999
- Y. Takata, K. Tanaka, K. Kaijima, T. Ito, T. Watanabe and M. Shimohigoshi, Enhancement of Boiling and Evaporation Heat Transfer by Superhydrophilic Photocatalyst, Proc. 6th UK National Conf. on Heat Transfer, pp.323-328, 1999
- Y. Takata, S. Hidaka, H. Yamamoto, M. Masuda, T. Ito, Evaporation of Water Drop on Photo- Induced Hydrophilic Surface, Proceedings of the 12th International Heat Transfer Conference, Vol.3, pp. 413-418, 2002

CALPHAD最前線

CALPHAD at The Forefront

九州工業大学工学部
物質工学科 教授
長谷部 光弘
Mitsuhiro Hasebe



1 はじめに

材料の開発・研究は、ある材質や特性を持つ合金組成および熱処理条件等を探索することであろう。これまでとは全く異なる合金系をターゲットとするのでなければ、ある合金組成を中心として、構成成分の濃度を変えたり、新たな成分を加えたりした試料を作製し、熱処理条件を変え、その特性を調べる。このとき顕微鏡による組織観察や、共存相の同定といった金属組織学的評価が実施されていると思う。この金属組織学的手法で得られるものがいわゆる状態図的情報である。つまり、材料の開発・研究では必ず“状態図”的研究も行っているといえる。したがって、ターゲットとしている合金系の状態図があれば、合金組成を探索する作業は大幅に簡減できるはずである。しかし、実用材料の多くが3元系以上の多元系合金であるにもかかわらず、状態図集としてあるのは2元系と僅かの3元系のものくらいで、本当に必要なものがないというのが実状であろう。

近年、信頼性のある状態図や熱力学的実測データを解析し、合金系に現れる相のGibbsエネルギーを温度・圧力・組成の関数として記述し、このGibbsエネルギー関数から状態図を計算によって構成する方法が行われるようになっている。この方法は CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) 法¹⁾と呼ばれ、2元系や3元系のより低次元の解析結果から3元系・4元系というより高次な多元系合金の状態図をかなりの信頼度で予測計算できることが大きな特徴の一つと言える。特に Thermo-Calc、ChemSage、F*A*C*T、Pandatなどの熱平衡計算ソフトウェア^{2),3)}が公開され、系のGibbsエネルギーを計算するための熱力学的パラメータを準備すれば多元系状態図が容易に計算できるようになった。その中でも Thermo-Calc⁴⁾は熱力学パラメータのデータベースが充実していることもあり、日本国内だけでも100ヶ所以上に導入されている。しかし、いわゆる“状態図”的計算にはよく利用されているようだが、これら熱平衡計算ソフトウェアの持つ機能が十分に活用されているとは思われない。

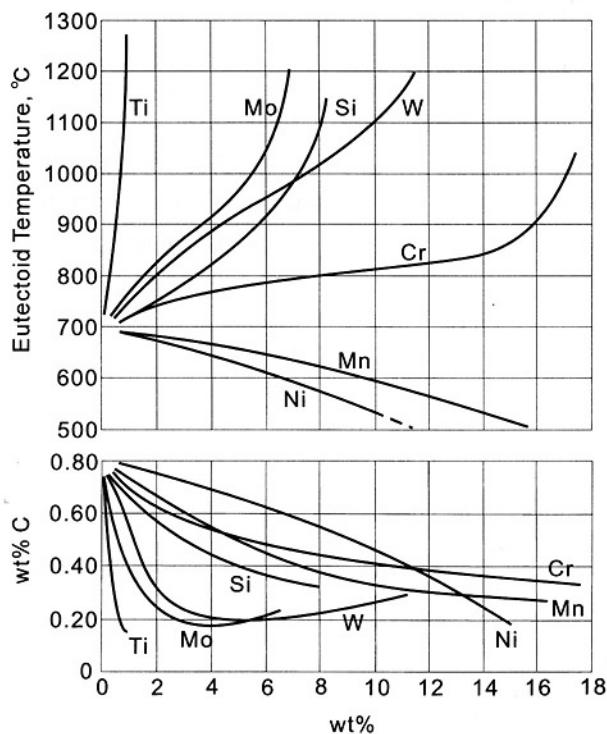
本稿では CALPHAD から得られるものを理解すると共に、CALPHAD法の活用・応用のポイントと今後の展望についてまとめる。

2 状態図計算から得られる情報

もっとも基本的な状態図計算はある温度 T 、圧力 P の下で、ある組成の合金がどのような平衡状態にあるかという状態図上的一点を計算することである。ここで、温度、圧力、合金組成が計算条件となる。計算の結果はどのような相がそれぞれどのような組成で共存するかという共役線 (tie line) であり、これより天秤の法則から各相の存在率も得られる。これが状態図情報である。計算条件の一つを変数として適当な間隔で振らせて計算すれば、変数軸に沿った平衡状態の変化を得ることができる。このとき单相から二相、あるいは二相から三相のように共存相の数や種類に変化が現れる場合、Thermo-Calc はその変化がちょうど起きる変数の境界値を探してくれる。この点が状態図上の相境界である。

Thermo-Calc では計算条件の設定に自由度がある。合金組成についても各成分の量を質量やモル数で与えてもよいし、質量分率やモル分率の濃度で与えることもできる。また合金組成だけでなく、例えば共存するオーステナイト相の炭素濃度が 0.2mass% という条件やフェライトとオーステナイトの存在割合が 1 : 1 というような設定も可能である。

図-1 は Fe-Fe₃C 2元系の共析点に及ぼす合金元素の影響を示した有名な図⁵⁾で、Fe-C-M 3元系についての非常に多くの実験結果から得られたものである。その後の研究によってこの図には、修正が必要な部分もあるが、鉄鋼材料の開発・研究には古くから活用してきたものである。これを今では熱力学パラメータに SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) の溶体データベース (SSOL)⁴⁾ を用いて、「フェライトとセメンタイトの共存量がちょうどゼロで、オーステナイト 100% である」という条件の計算を、合金元素濃度を変化させて行うことで、簡単に描くことができ

図-1 Fe-Fe₃C 共析点の合金元素による影響

る。この応用として、多元系鉄合金における $\gamma \rightarrow \alpha + \text{セメントタイト}$ 二元共析点が成分濃度を変えることでどのように変化するかを調べてみよう。例えば合金濃度が 1mass%Cr、0.5mass%Mn、0.5mass%Si、0.1mass%Mo である鋼の二元共析点は、常圧下において温度 $T_E = 1022$ K (749°C)、炭素濃度 $w_c^\gamma = 0.60\text{mass\%}$ と計算される。Thermo-Calc ではほとんどの変数についてその微分値を簡単に計算して得ることができる。その機能を用いて、ここでは T_E や w_c^γ の合金濃度による微分値を求めると、合金濃度の変動による二元共析点の変化は

$$T_E(\text{K}) = 1022 + 16.7 \cdot \Delta(\% \text{Cr}) + 11.9 \cdot \Delta(\% \text{Mn}) + 20.1 \cdot \Delta(\% \text{Si}) + 7.9 \cdot \Delta(\% \text{Mo}) \quad (1)$$

$$w_c^\gamma(\text{mass\%}) = 0.60 - 0.13 \cdot \Delta(\% \text{Cr}) - 0.04 \cdot \Delta(\% \text{Mn}) - 0.001 \cdot \Delta(\% \text{Si}) + 0.003 \cdot \Delta(\% \text{Mo}) \quad (2)$$

と得られる。ここで $\Delta(\% M)$ は合金元素 M の質量%濃度での変動量である。

ところで、CALPHAD法では状態図を熱力学的に計算している。したがって、計算結果として Gibbsエネルギー、エンタルピー、エントロピー等の熱力学的値が、合金系全体についてはもちろんのこと、共存する相それぞれについても得られる。例えばある材料を温度 T_1 から T_2 へ上昇させるにはどれだけの熱量が必要であるとか、凝固などの変態に伴う変態熱が計算できるので、熱処理の設計には有用な情報となる。

3 相変態シミュレーション

3.1 凝固シミュレーション

凝固進行中、融液中の溶質拡散は速くその分布は十分に均一であり、固相中の溶質拡散は遅く無視でき、かつ晶出する固相は一種類である凝固を考える。また、溶質成分の固相/液相間の平衡分配係数 k は凝固中一定とする。このような条件では、固相率が g のときに凝固した固相の溶質濃度 C_s は

$$C_s = kC_0(1-g)^{k-1} \quad (3)$$

となる⁶⁾。この式は極めて単純な式ではあるが、固相中の濃度分布を比較的良く表していると考えられており、一般に Scheil の式として知られている。しかし、実際の凝固では分配係数は凝固中一定であるとは限らず、また特に多元系合金では晶出する固相も一種のみとは限らず複数で、式(3)の適用には限界がある。

一方熱平衡計算ソフトウェアを次のような手順で用いれば、平衡計算を行うだけ多元系における凝固をシミュレーションすることができる。

まず、液相線直上の温度 T から始め(固相率 $g=0$)、次に $T-\Delta T$ と温度を ΔT だけ下げて平衡計算を行う。このとき得られた固相を系から取り除き、残りの液相について再び温度を ΔT 下げて平衡計算を行う。これを液相が無くなるまで繰り返し、固相率は時々刻々における固相分率の和として得られる。この方法は各ステップにおける計算は平衡計算であるので、晶出相が複数あっても、また分配係数が温度や組成によって変化するような場合でも、凝固シミュレーションが可能である。図-2は Al-4mass%Mg-2mass%Si-3mass%Cu 合金について計算した常圧下での固相率の温度

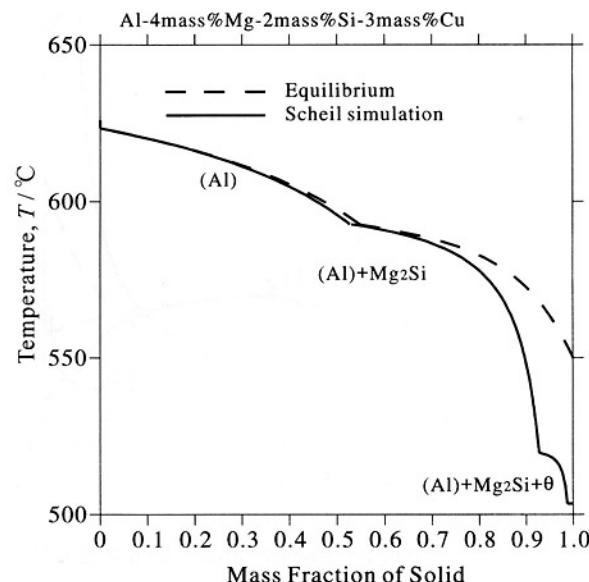


図-2 Al-4mass%Mg-2mass%Si-3mass%Cu 合金の凝固シミュレーションにおける固相率変化

変化である。図中の破線は合金が状態図通りに平衡凝固した場合のもので、図-3 に示した状態図から分かるように、凝固は温度 550 ℃で終了し、(Al)+Mg₂Si の状態となる。これに対して実線の Scheil モデルによるシミュレーションでは 550 ℃では凝固が完了せず、最後はこの合金にとって非平衡相である θ 相を晶出している。また図-4 は(Al)相中の溶質濃度を固相率に対してプロットしたもので、凝固終端での凝固偏析が示されている。

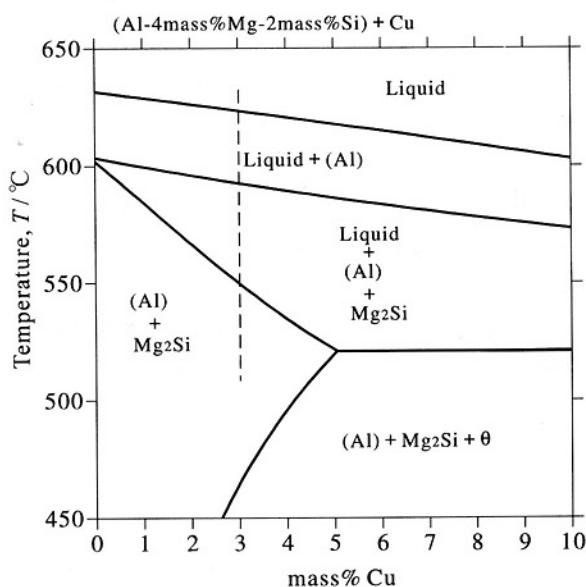


図-3 (Al-4mass%Mg-2mass%Si)-Cu の計算断面状態図

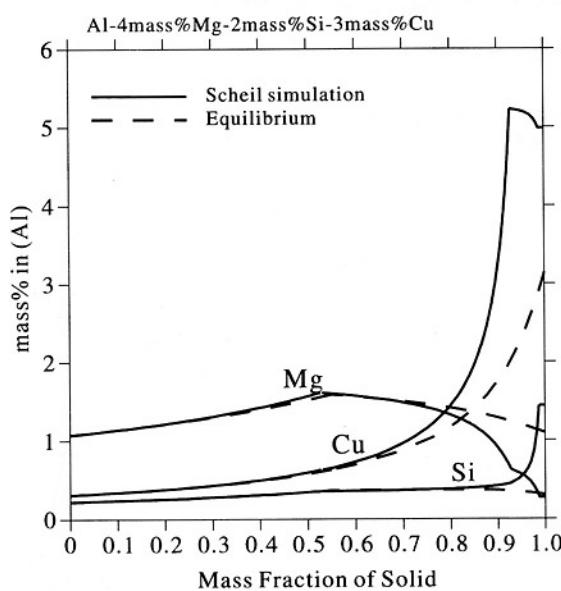


図-4 Al-4mass%Mg-2mass%Si-3mass%Cu 合金の凝固シミュレーションにおける (Al) 相の組成変化

3.2 拡散型変態シミュレーション

これまでに固相中の拡散を考慮した Scheil の式の修正もいくつか報告されているが^{7)~10)}、いずれも多元系や多相が晶出場合には適用することができない。

固相中の拡散を扱う基本は、熱伝導における熱流量が温度勾配に比例するという経験則と同じように、物質の流れは濃度勾配に比例するという Fick の第一法則によって表される。等温、等圧下での 2 元系合金の単相中における拡散を考えると、z 軸方向における成分 k の拡散は次式のように記述される。

$$J_k = -D_k \frac{\partial c_k}{\partial z} \quad (4)$$

ここでは拡散流束、 c_k は単位体積あたりの成分 k の濃度、 D_k は成分 k の相互拡散係数であり、濃度や温度に依存する。これを n 成分の多元系で表すと

$$J_k = - \sum_{j=1}^{n-1} D_{kj} \frac{\partial c_j}{\partial z} \quad (5)$$

となる。ここで、 D_{kj} は多元系の相互拡散係数である。つまり n 成分系の拡散を解析する場合には多元系相互拡散係数が $(n-1)^2$ 個も必要になる。しかし、これまでのところ拡散係数の測定はほとんど 2 成分系におけるもので、多成分系については非常に少ない。このため、拡散係数を用いた解析を多成分系で行うことは不可能に近い。

しかし、物質の流れは濃度勾配ではなく、化学ポテンシャル勾配に比例すると考えると、式(5)は

$$J_k = - \sum_i L_{ki} \text{grad } \mu_i \quad (6)$$

と表される。ここで、 μ_i は成分 i の化学ポテンシャルで、温度および組成に依存するが、CALPHAD 法による熱力学的解析がよく行われているので、多くの合金系についてすでに計算することが可能である。 L_{ki} は成分の易動度に依存する現象係数である。ここで成分 k の流束はその化学ポテンシャル勾配だけに比例すると考えると、必要な現象係数は n 個だけでよい。このことは多元系の拡散現象を解析する上で非常に有効で、拡散データのデータベース化の見通しが明るい。いずれにしても相変態の問題を扱うには、大前提としてその合金系の相平衡が分かっていかなければならない。特に拡散現象を扱う場合には、時間ごとに変化する熱力学的値をその都度計算できなければならぬ。

このような背景から開発された Thermo-Calc の応用ソフトウェアに拡散型相変態シミュレーション DICTRA(Diffusinal Controlled TRAns-formations)¹¹⁾ がある。

図-5 は Fe-18mass%Cr-8mass%Ni 合金の凝固シミュレーションを DICTRA を用いて行った結果を示している。比較のために平衡凝固および Thermo-Calc を用いて行った Scheil シミュレーションの結果も示している。固相中のパック拡散を考慮している分が Scheil シミュレーションとの差となって現れている。

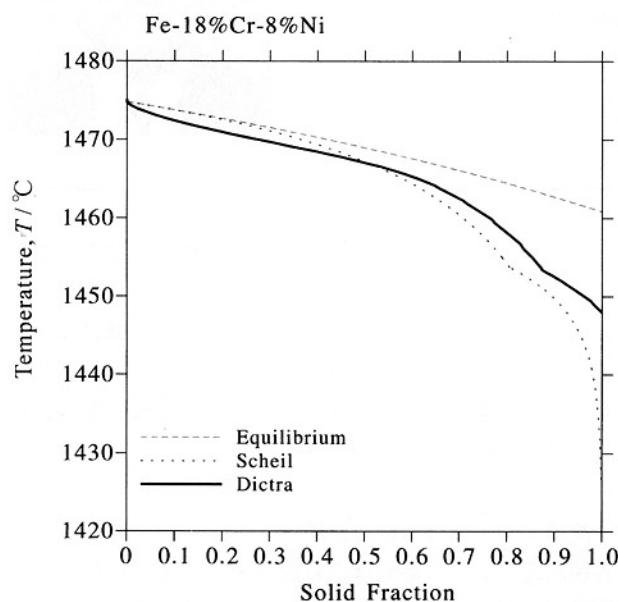


図-5 Fe-18mass%Cr-8mass%Ni 合金の凝固シミュレーションにおける固相率変化

拡散係数のデータベースに相当する易動度データベースは、熱力学データベースに比べると残念ながらまだ十分である。しかし、今後データベースが充実すれば、拡散を考慮した DICTRA によるシミュレーションは、材料開発に大いに役立つことと思われる。

4 おわりに

材料の開発・研究は、最終的には材質設計という問題になる。つまり、どのような組成の合金を、どのように熱処理したら、どのような組織が得られ、どのような材料特性を得られるかを予測することだろう。本稿で取り上げた CALPHAD は、最も基本的な情報を予測するものではあるが、材質予測という目的においては、組織を予測する道具の一部でしかない。しかし、合金の平衡計算、結晶粒成長計算、相変態計算により合金の組織を予測し、機械的性質、物理的性質、化学的性質のデータベースと組み合わせることによって材質を予測する試みがなされている¹²⁾。現状はまだまだ不十分な面もあるが、最も基本的な多元系についての状態図情報がかなりの信頼性で予測できるようになったことは、次のステップへ大きく前進するきっかけになると思う。

参考文献

- 1) N.Saunders and A.P.Miodownik, *CALPHAD, A Comprehensive Guide*, Pergamon Press, (1998).
- 2) C.W.Bale and G.Eriksson, *Can. Metall. Quart.*, 29(1990), 105.
- 3) 田中敏宏, 飯田孝道: 日本国金属学会会報, 32(1993), 535.
- 4) *Thermo-Calc User's Guide, Version N*, Thermo-Calc Software AB, Stockholm, (2002).
- 5) E.Bain and H.Paxton, *Alloying Elements in Steel*, ASM, (1961).
- 6) E.Scheil, *Z. Metallkd.*, 34(1942), 70.
- 7) H.D.Brody and M.C.Flemings, *Trans. Met. Soc. AIME*, 236(1966), 615.
- 8) T.W.Clyne and W.Kunz, *Met. Trans. A*, 12A(1981), 965.
- 9) I.Ohnaka, *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, 26(1986), 1045.
- 10) S.W.Chen, Y.Y.Chuang, Y.A.Chang and M.G.Chiu, *Met. Trans. A*, 22A(1991), 2837.
- 11) J.Agren, *ISIJ International*, 32(1992), 291.
- 12) N.Saunders, X.Li, A.P.Miodownik and J-Ph.Schille, *Proc.Symp.Materials Design Approaches and Experiences*, eds. J.-C.Shao, T.M.Pollock and M.J.Farhmann, TMS Warrendale, PA, (2001)

(株)フジミインコーポレーテッド
課長 工学博士
五日市 岡
Tsuyoshi Itsukaichi



サーメット溶射の最新技術

New Technologies of High Velocity Flame Spraying and Cermet

Materials

1 はじめに

硬質クロムメッキからサーメット溶射への代替が徐々に進んでいる。¹⁾ 欧米ではメッキ加工業者が高速フレーム溶射機(HVOFやHVAF)を購入するケースが増えているそうだが、最近国内でもその傾向が出てきた。これは、サーメット溶射市場の確実な広がりを実感させる、ほんのひとつの例である。

この数年間の高速フレーム溶射機の販売実績を調べてみると、「気体燃料(プロパン、プロピレン、エチレン、アセチレン、水素など) - 酸素」タイプよりも「液体燃料(灯油) - 酸素」タイプの方が人気が高いようである。上述の国内メッキ加工業者が選んだ溶射機はいずれも「灯油 - 酸素」タイプである。いろいろな種類のHVOFやHVAFが国内外の市場に出回っており、それぞれ固有の長所、短所を有している。それらを熟知し、特長をフルに活

かしてアプリケーションへ適用するのが重要ではないかと思われる。

本稿では、代表的な高速フレーム溶射機の特徴にまず触れ、私の思うところを率直に述べてみたい。その後、サーメット溶射に関する最近の興味深い話題に触れ、弊社で得られた研究データを中心に紹介させていただく。

2 高速フレーム溶射機の比較

各種高速フレーム溶射機の特徴を表1にまとめた。また、表2はヨーロッパにおける高速フレーム溶射機の事情を記したものである。²⁾ 各溶射機は、使用する燃料(気体or液体)、酸素源(酸素or空気)、燃焼方式(内部or外部(DJは外部))、フレームへの粉末の投入場所(フレーム軸中心orラジアル方向)、ガンの冷却方式(水冷or空冷)によって特徴づけることができる。

表1 各種高速フレーム溶射機の特徴

溶射機	メーカー or 商社	溶射粉末 粒度例 (μm)	スピッティング	特徴 ① (溶射条件)	特徴 ② (皮膜特性その他)
DJ2700	スルザーメテコ	-45+15 -53+20 -63+15	注意を要する	・水冷方式 ・プロピレン-酸素 ・SD=200~250mm	・緻密、高硬度 ・処理能力はDJの2~3倍 ・DJ同様、厚膜が難しい ・粉末調整で皮膜の圧縮残留応力可
JP-5000	日本ユテク	-45+15 -53+15 -53+20	注意を要する	・水冷方式 ・灯油-酸素 ・SD=300~450mm	・付着効率:やや低い ・密着強度が高く、耐摩耗性に優れる ・安全性高い ・Jガン、JPW5は同種。θガン取付可
DJ1000	スルザーメテコ	-45+5 -38+10 -30+10	あまり問題ない	・空冷方式 ・プロピレン-酸素 ・SD=180~250mm	・現場施工の実績多い ・ノズル口径が大きく、処理能力はDJの2倍 ・気孔率はDJより高い
DJ (ダイヤモンドジェット)	スルザーメテコ	-45+5 -38+10 -30+10	あまり問題ない	・空冷方式 ・プロピレン-酸素 ・SD=150~200mm	・気孔率は高く、処理能力低 ・付着効率は高い ・ノズルの工夫で膜質が向上するらしい(各社のノウハウ)
SB-250 (Intelli-Jet)	UniqueCoat Technologies (アメリカ)	-30+5 -25+10 -25+15	あまり問題ない	・空冷方式 ・プロパン-空気 ・SD=120~200mm	・緻密、低硬度 ・処理能力が特大 ・最も「低温-高速」のフレーム ・メタル溶射はスピッティング要注意
θガン	ウイティコジャパン	-30+5 -25 -20	全く問題ない	・水冷方式 ・灯油-酸素 ・SD=200~400mm	・緻密・微粉末の溶射に適する ・低融点金属も溶射可能 ・還元フレーム可能 ・処理能力大 ・フレームパターン大

*現場施工の際、プロパンを使用することがある

表2 ヨーロッパにおける高速フレーム溶射機の事情

溶射機	メーカー	長所	短所	販売台数 (ヨーロッパ以外含む)
DJ	Sulzer Metco	・低コスト ・構造がシンプル	・気体燃料を使用 ・皮膜の品質が低い	数百
DJ Hybrid (DJ2700など)	Sulzer Metco	・DJ皮膜の品質と信頼性を向上 ・品質は他社機並	・気体燃料を使用 ・DJとの整合性に注意	70~120
JP-5000	Praxair/TAFA	・灯油-酸素使用 ・高い皮膜品質 ・業界のスタンダードになるかも	・騒音大 ・PraxairがMiller ThermalとTAFAを買収したので混乱	150
Jet Kote Jet Kote II	Deloro Stellite	・最初のシステム(Jet Kote)は貧弱だが、Jet Kote IIは大きく改善された	・気体燃料を使用 ・技術サポートが貧弱	100~200(Jet Kote) 30~40(Jet Kote II)
HV2000 (Top Gun)	Miller Thermal (現在 Praxair)	・付着効率が高い ・局所溶射が得意 ・セラミックスの溶射可能	・気体燃料を使用 ・処理能力が低い ・スピッティングが生じやすい	40~50
C-CJS	Thermico	・灯油-酸素使用 ・JP-5000に比べて フレキシブルで完成度が高い	・高価 ・企業規模が小さい	20~30
K2	GTV	・灯油-酸素使用 ・低成本	・企業規模が小さい	10~15
MET-JET III	Metallisation	・灯油-酸素使用 ・低ランニングコスト		6~10

HVOFとして国内で最初に普及したのは「気体燃料-酸素」を使用するJet Koteであるが、初期型は手動操作が多く、スピッティングもかなり問題となり非常に使いにくかった。現在は、大幅に改良されたJet Kote II、Jet Kote IIIが販売されているが、国内ではそれほど普及していない。

コスト的に有利と言われている「灯油-空気」タイプのHVAFについては、現在数社のみ使用している。WC系サーメットの施工実績は多いものの、フレーム温度がかなり低いためにCrC系サーメットの溶射が比較的難しい。また、ガンの冷却方式が水冷ではないため、燃焼室の寿命が短いという難点もある。改良型(HVAF II)においては、ガンのメンテナンスが行いやすくなつばかりでなく、灯油と空気の混合方式を改善したために燃焼効率が向上し、付着効率がアップした。HVAFは大量の圧縮空気を連続的に使用するので、長時間溶射する際には流量の安定に留意しなければならない。

同じHVAFではあるが、灯油の代わりにプロパン(またはプロピレン)を使用したIntelli-Jet(例えばSB250)は粉末の処理量(単位時間当たりの溶射量)が非常に大きく、コストメリットが大きい。³⁾ 皮膜の硬度は比較的低いが、耐摩耗性は一般に良好で、緻密な皮膜が得られやすい。⁴⁾ ただ、粒度が細かめでシャープな粒度分布の粉末が望ましいため、粉末の選定に注意を要する。いずれのHVAFにおいても共通することは、設備的に能力の大きな集塵機が必要なことと、オペレーターの技量により皮膜の品質が大きく左右されることが挙げられ、後者に関してはフレームの調整など、きめこまかな標準化が望まれる。

DJ(ダイヤモンドジェット)はHVOFの中では普及台数が最も多い。皮膜の緻密性や機械的特性が他のHVOF皮膜と比べて低いと言われているが、ノズルを独自に改良することで、より高品質な皮膜の作製に成功している会社がいくつかある。これは各社のノウハウであり、一般に公開さ

れていらない。DJの欠点を補ったといわれるものがハイブリッドタイプ(例えばDJ2700)である。DJやDJ2700の溶射皮膜には、一般に引張の内部応力が生じているといわれるが、DJ2700においては粉末粒子の強度を調整した比較的粗めのサーメット粉末を溶射することで、皮膜の残留応力をやや圧縮の状態にすることができ、耐熱衝撃性などがより優れた皮膜の作製が可能である。⁵⁾

JP-5000は作業性、溶射特性、皮膜特性のいずれをとっても安定した信頼性があり、この数年間に国内外で最も普及したHVOFである。以前は4インチと8インチのバレルが使用されていたが、最近、6インチが標準仕様となった。皮膜の密着力や緻密性などの諸特性は(既存バレルの中では)8インチバレルを使用した場合が最も優れているが、スピッティングの問題が絶えないことから6インチの仕様に変更された。4インチバレルによる皮膜の気孔率は6インチのものよりも高く⁶⁾、腐食環境下での皮膜の適用においては注意を要する。スピッティング防止のために、どうしてもバレルを短くする必要がある場合は、溶射距離を短くしたり⁶⁾燃焼室圧力を高くする⁵⁾などして、より緻密な皮膜をつくるような工夫が必要となろう。もちろんこの場合、前者はフレームの熱影響を素材に与えたり、後者はスピッティングが生じやすくなるので注意しなくてはならない。そもそも、スピッティングを起こしにくい(起こさない)粉末⁷⁾を8インチバレルで溶射することがベストなのではないかと思われる(3.1参照)。図1はJP-5000(4および8インチバレル使用)で溶射した場合、飛行粒子の速度と温度が溶射距離によってどのように変化するのか測定した結果である。⁸⁾ やはりバレルが長いほど高温、高速となる傾向があり、バレル長さが皮膜の品質に大きな影響を及ぼすことは容易に想像できる。

θガン(図2)は粉末を外部供給することによりスピッティングの問題を解決した興味深いHVOFである。高速の

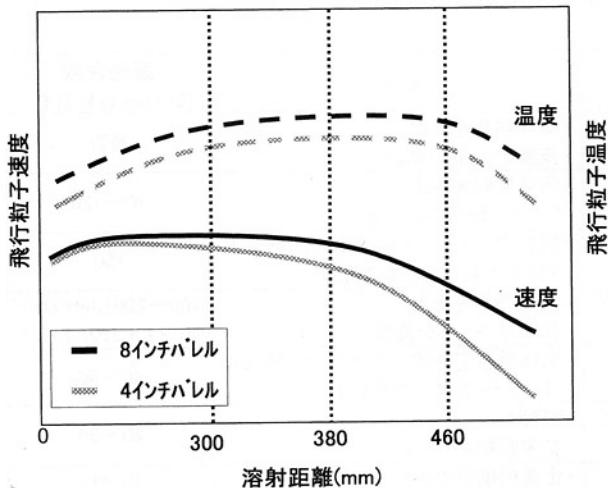


図1 JP-5000における飛行粒子の速度と温度の変化

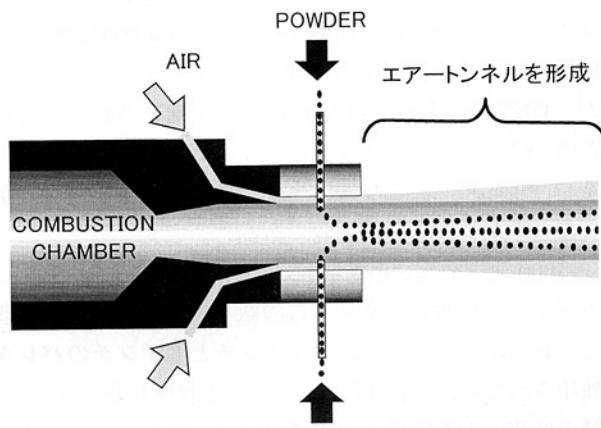


図2 θ ガンの構造

フレームに粉末を外部供給して、どうしてフレームにうまく乗るのか最初は不思議に思ったが、ノズル出口の周辺部から絶妙なバランスで圧縮空気を噴出させてエアーチャンネルを形成させ、ある程度バレルの役目を果たさせているのである。これによってフレームを収束させ、その中に粉末を滞留、加速させるような状態をつくっている。ただ、粉末が加熱される時間が短いことから、溶けやすい微粉が θ ガンに適しているようである。(低融点のメタルなどは粗めの粉末でもかまわない。)しかし、これまで市販されていたサーメット粉末に適当な微粉粒度が少なかったことと、流動性の低い微粉を安定的にガソリンへ送給できる粉末供給機が限られていたことから、 θ ガンの普及はこれまであまり進んでこなかつたように思える。最近では極端に流動性の悪い微粉末を送給できる粉末供給機^{3,9)}が簡単に入手できるようになり、さらに θ ガンに適した粉末が次々と開発⁵⁾されていることから θ ガンへの期待は高まるばかりである。また、 θ ガンに若干改造を加えることでセラミック

スの微粉を溶射できることも分かり⁵⁾、今後ますます興味深い分野を開拓していくものと思われる。

3 スピッティング対策

サーメットを溶射する際、オペレーターが現場でしばしば泣かされるトラブルのひとつがスピッティングである(図3)。溶射している最中に、ガソリンのノズル(またはバレル)の内壁先端部附近に溶けた飛行粒子が付着・堆積してしまい、時にはその堆積物が一部脱落して皮膜内に混入してしまう現象である。こうなると、溶射の継続は不可能となり、高価なノズルも交換しなくてはならない。場合によっては、ワークの皮膜をすべて剥がして施工し直す事にもなる。スピッティングの主原因としては、①粉末、②装置、③溶射条件の3点が挙げられる。それぞれの特性がバランスした状態で安定した溶射が行われることを考えると、この3点に関しては常に徹底した管理とチェックが必要である。ここでは粉末にスピッティングの原因があると仮定して、その背景や対処法などについてお話ししたい。

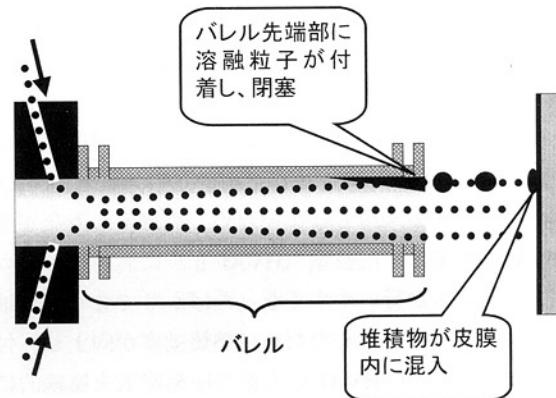


図3 スピッティング現象のイメージ図

3.1 Cr₃C₂/25NiCr粉末における調査

広汎に使用されるサーメットの中でもWC/12Coは比較的スピッティングが起こりにくいといわれているが、微粉が多く含まれたり、WC/17CoやWC/25Coのように金属成分(Co)が多くなると、スピッティングは起こりやすくなる。サーメットの製法別にみると、溶融-粉碎法による粉末が最もスピッティングを起こしにくく、次いで焼結-粉碎法。現在、最も普及している造粒-焼結粉は、スピッティングを起こしやすいので注意を要する。

ボイラーチューブやタービンブレードなどに溶射実績の多いCr₃C₂/25NiCrにおいてはスピッティングトラブルの話をよく聞く。最近のサーメットは、粉末コストや付着効率などの点で有利な造粒-焼結法によるものが主流であり、メーカーによって、あるいはロットによってスピッティ

グが起きたり起きなかつたりと常にオペレーターを悩まし続けてきた。材種的にも製法的にも $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\text{NiCr}$ はスピッティングを起こしやすい。その厄介な $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\text{NiCr}$ 粉末をどう選んだらよいのか?

サーメットのスピッティングに関しては、使用する粉末の中にフレームに溶けやすい微粉末が多く含まれることが原因と言われてきた。また、一見微粉末を含んでいない粉末の場合でも、粒子自身の強度が極端に低いと仮定すると、粉末供給機からガスへ至るまでに崩壊して微粉末化してしまったり、高速のフレームに突入してすぐに粉々に崩壊してしまい、同様なトラブルが起こり得る。ところで、サーメット粉末の粒子1個1個を押しつぶして直に粒子強度を測定する方法がある。¹⁰⁾ 造粒-焼結粉の場合は粒子と言わずに顆粒と表現する場合が多いので、「顆粒強度」とさせていただく。製造プロセスにおいて、造粒した顆粒を焼結する際、焼結温度を上げれば上げるほど顆粒は焼き締まり、顆粒自体の密度は高くなる。同時に顆粒強度は高くなり、粉末の見掛け密度(嵩比重)と流動性も向上する傾向となる。⁵⁾ 図4は $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\text{NiCr}$ 粉末の顆粒強度と微粉末の割合を変化させた場合のJP-5000(8インチバーレル使用)における付着効率とスピッティングの傾向を示す。^{7,10)} $D_{3\%}$ とは、細かめ粒子からの3%積算径を表す。顆粒強度が極端に低い粉末では、微粉末を大幅にカットした場合でもスピッティングは発生しやすい。顆粒強度を高めると、微粉末の割合をある程度以下に抑えれば、スピッティングは発生しなくなるが、顆粒強度が高すぎると微粉末の割合が低くなるにつれて付着効率は極端に低下する傾向が認められた。よって、スピッティングを避けるために、過度に顆粒強度を高くし、且つ微粉末の割合を極端に低くすると、大幅に付着効率を低下させることになる。バランス良く両特性を調整することで、付着効率を低下させずにスピッティングを回避できる粉末が作製できる。このような定量的な実測調査を $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\text{NiCr}$ だけでなく、すべてのサーメット溶射材について行なうことが理想であり、粉末メーカー側の徹底した品

質管理に組み込むことで、溶射現場でのスピッティングのトラブルを大幅に減らすことができると考えている。

3.2 バーレル長さと粉末特性の相性

上述の通り、粉末の特性をしっかりと管理すれば、長いバーレルを用いても付着効率を低下させずにスピッティングを防止できるわけだが、溶射施工する側は各社独自の溶射条件で溶射するケースが多く、粉末メーカーとしては対応が難しいのが実情である。例えば、JP-5000を用い、8インチバーレル、灯油-酸素量はTAFAの推奨条件で溶射してもスピッティングが生じない $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\text{NiCr}$ 粉末があるとする。この粉末は、通常、顆粒強度(および見掛け密度)を高めに設定され、微粉はしっかりとカットされている。しかし、溶射する業者が通常の溶射条件よりも極端に高温、高圧のフレームとなる条件で溶射したとすると、スピッティングが起こるかもしれない。また、この8インチ仕様の粉末を4(または6)インチバーレルで溶射したとすると、図1からも分かるようにバーレルが短いほど飛行粒子の温度と速度が低くなるので、粉末の溶け(と基材に衝突した時の扁平化)が不十分となり、付着効率は下がり、気孔率の高い皮膜となってしまう。この場合、過度なピーニングにより、大きな圧縮の内部応力が皮膜内に残留すると思われ、マイクロクラックが多数発生し、厚膜すると剥離しやすくなるかもしれない(表3)。

表3 バーレル長さと粉末特性の組み合わせのポイント

	4(or 6)インチバーレル仕様の粉末	8インチバーレル仕様の粉末
顆粒強度	低い	高い
微粉割合	少ない	ほとんどない
4(or 6)インチバーレルで溶射する?	・適している ・長時間溶射によって、バーレル内壁への付着が多少起こる可能性あり*	・粉末の溶けが悪いため、付着効率は低い。皮膜にクラックが生じやすく、気孔率が高くなる。
8インチバーレルで溶射する?	・スピッティング発生 ・付着効率は高い	・適している ・長時間溶射によって、バーレル内壁の摩耗が起こり得る

*6インチバーレル使用の場合

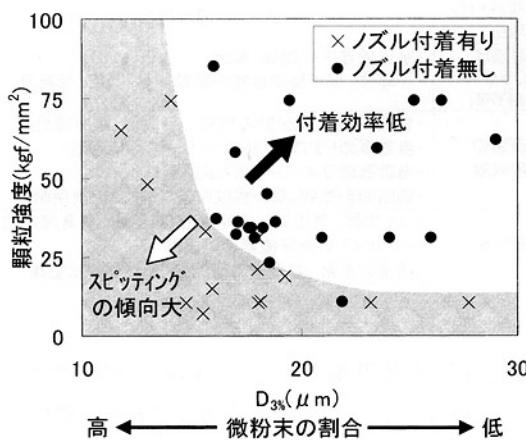


図4 顆粒強度と微粉末の割合とスピッティングの関係

逆に、短いバーレル用に作製した粉末は、フレームに溶けやすいように設計されており、具体的には顆粒強度(および見掛け密度)を低くし、微粉をある程度含ませるようにしている。この粉末をもし8インチバーレルで溶射したとすると、当然スピッティングが発生することが予想される。こうしたトラブルを起こさないためにも、粉末メーカーとしっかりコミュニケーションをとり、諸事情の理解を深めることを強くお勧めする。

4 微粉末溶射

私が2年ほど前にドイツのある会社を訪ねた際、その会社のトップにこう言われた。「夢のような話で恐縮だが、

サーメットの微粉末をHVOFで溶射したい。粉末は微細であればあるほどよい。するとどうなると思う？表面粗度は極端に低く、as sprayedで使用できるアプリケーションが大幅に増え、高価なダイヤモンド研磨加工が省ける分コストダウンできる。たとえ研磨が必要であっても、通常よりも短時間で研磨することができ、やはりコストダウンとなる。メリットは非常に大きい！」

帰国後、早速そのプロジェクトを社内につくった。

- ・サーメットの微粉末は社内でいくらでも造れる。粉末の件は問題ない。
- ・微粉末用のHVOFがない。微粉末の溶射となると、どんなガスでもスピッティングを起こしてしまう。いや、 θ ガスがある。
- ・微粉末用の粉末供給機がない。流動性がかなり悪く、普通のフィーダーでは無理だ。いや、テクノサーブのフィーダーがある。

その後、 θ ガスと微粉末供給機（テクノサーブ株製）を購入し、微粉末溶射の研究に取りかかった。使用した微粉末供給機（図5）は「表面倣い式」といわれ、粉末の取り込みに重力は利用せず、粉末表面に接近させたノズルに入れるガスの吸引作用により取り込み、微粉末を送給する機構となっている。⁹⁾よって、粉末の流動性が極端に悪くても全く問題なく粉末を安定供給することができる。

図6はWC/12Co (WCの一次粒子径：1.2 μm) 粉末を θ ガスで溶射した皮膜の平均粗さRaとWC/12Co粉末の平均粒度 (D_{50}) との関係を示している。¹¹⁾粉末の粒度が小さいほど、また溶射距離が短いほどRaは減少し、as sprayedでRaが1 μm 以下の皮膜を作製できることが分かった。皮膜は非常に緻密であり、気孔率は0.1%以下であった。皮膜硬度 (Hv200g) は850～900であり、スガ摩耗試験、密

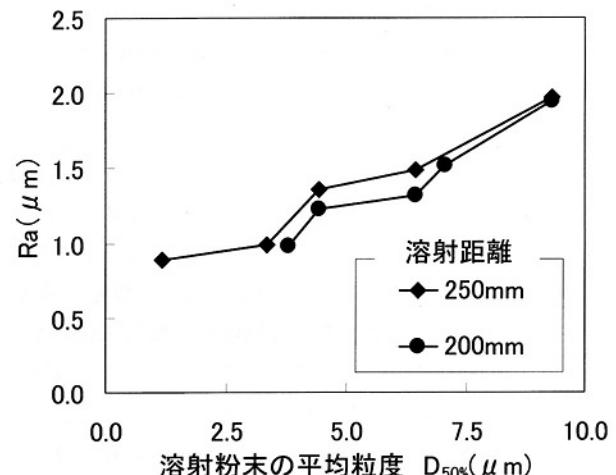


図6 粉末粒度が皮膜のRaに及ぼす影響

着力試験においても、満足のいく結果が得られた。¹²⁾ Raが1.2 μm のas sprayed皮膜を通常のダイヤモンド研磨を行った結果、Ra ≈ 0.008 μm 、Rmax ≈ 0.09 μm という面粗度を得た。これは、従来のサーメット溶射皮膜の常識を超えた値であり、面粗度においてはCrメッキに匹敵する領域に達している。今後、この微粉末溶射が普及することで、Crメッキからサーメット溶射への代替も加速的に進むものと期待される。

5 固体潤滑剤の溶射

固体潤滑剤の適用分野は表4に示すように、日常生活に密着した家電製品から橋梁や建築物の可動部まで多彩である。¹³⁾「固体潤滑剤を溶射して潤滑皮膜を形成したい」というニーズはかなり以前からあるが、実際には難しそうである。ただ、CaF₂粉末に関してはプラズマ溶射で皮膜形成する実施例がいくつか報告されており、900°C付近まで使用可能といわれている。

表4 MoS₂の固体潤滑剤としての適用例

固体潤滑剤の採用理由	適用例(適用理由)
極限環境 (油、グリース 使用不可)	・宇宙機器の可動部(真空) ・半導体、LSI 製造装置の駆動部品(真空、低発塵)
潤滑油の 使用制限	・食品、繊維、紙分野の機械の可動部(油汚染回避) ・自動車のドアロック機構(グリース汚染回避) ・自動車のワイパー(油汚染回避) ・切削油を使用しない機械加工(切削油の使用制限)
無保守化	・OA 機器、家電製品の可動部(無給油、終身潤滑剤) ・カメラなどの光学機器の可動部 ・橋梁の支承、建築物の可動部(潤滑剤補給困難)

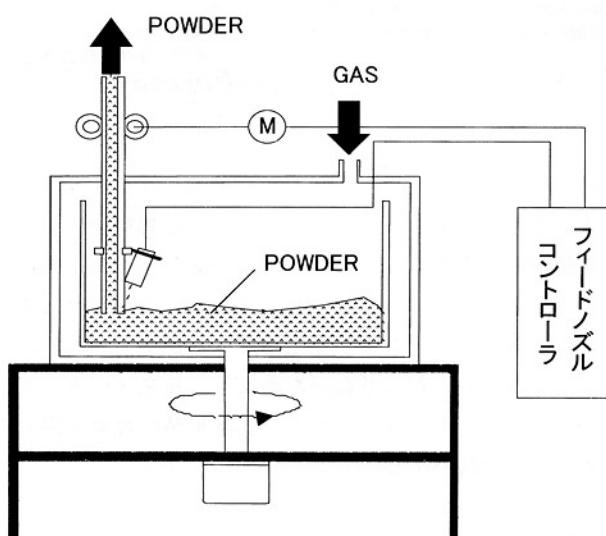
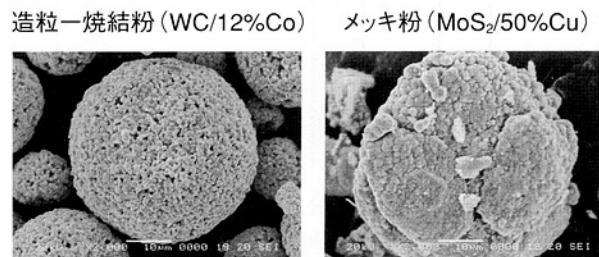


図5 微粉末供給機の模式図

代表的な固体潤滑剤としてはMoS₂、グラファイト、hBNなどがあるが、これらは層状物質であり、機械的強度に乏しいため、単体での皮膜化は困難である。そこで金属とのサーメット化が考えられるのだが、低温で分解してし

まう MoS_2 に対しては、それ以上の熱を加える通常の製造プロセスは使えない。そこで、無電解メッキ法による MoS_2 と Cu の複合化を試みた。¹⁴⁾ 図 7 の SEM 写真は、右側に $\text{MoS}_2/50\text{Cu}$ メッキ粉末を示すが、 MoS_2 粒子の表面を Cu が覆い尽くしているのが分かる。比較のため、造粒・焼結法により作製した WC/12Co の粉末写真を左側に載せた。製法の違いによる粉末形態の特徴差が確認できる。図 8^{5,14)} の(2)は $\text{MoS}_2/50\text{Cu}$ メッキ粉末の XRD パターンである。 MoS_2 と Cu のピークがはっきりと現れている。その粉末を 1000°C まで加熱すると、図 8 の(1)に示されるように MoS_2 ピークは完全に消失し、 $\text{CuMo}_{2}\text{S}_3$ 相が生成してしまい固体潤滑機能が低下してしまう。よって、このメッキ粉をプラズマ溶射ではなく、フレーム温度が低くて高速な HVOF で溶射してみたらどうかというアイデアが出てきた。表面の Cu のみを溶融または軟化させ、コアの MoS_2 に熱影響が及ぶ前に基材に衝突させ、密着力が高く緻密な皮膜にしたいという考え方からだ。図 8 の(3)は JP-5000、(4)は θ ガンにより形成した皮膜の XRD パターンである。どちらも同じ粒度 ($-53+20 \mu\text{m}$) の $\text{MoS}_2/50\text{Cu}$ 粉を溶射したわけだが、JP-5000 による皮膜は、 MoS_2 の分解が顕著に見られ、 Cu_2O の生成が確認された。それに対し、θ ガンによる皮膜は溶射粉末の XRD パターンとほとんど同一であり、 MoS_2 及び

図 7 WC/12Co と $\text{MoS}_2/50\text{Cu}$ 溶射粉末の SEM 写真

Cu の変質がほとんど起こっていないことを示している。

JP-5000 による $\text{MoS}_2/50\text{Cu}$ の付着効率は 13.0% と低かったのに対して、θ ガンによる付着効率は 35.2% と 3 倍近い高歩留りを示し、溶射粉末を変質させずに厚膜化が可能であることが調査の結果から判明した。¹⁴⁾

6 耐衝撃溶射材とその皮膜

図 9 は最も広汎に使用される WC サーメット皮膜のスラリーエロージョン試験の結果である。⁵⁾ いずれも JP-5000 で溶射した皮膜についてである。WC/12Co 皮膜は湿式（腐食）環境下では Co の腐食による WC 粒子の脱落が起り、優れた耐摩耗性は期待できない。それに対して国内でボピュラーな WC/20CrC/7Ni や欧米で最も人気の高い WC/10Co/4Cr の耐摩耗性は抜群である。図 9 によれば、WC/10Co/4Cr の耐摩耗性は WC/12Co の 4.5 倍、基材 (STKM12C) の 20 倍である。

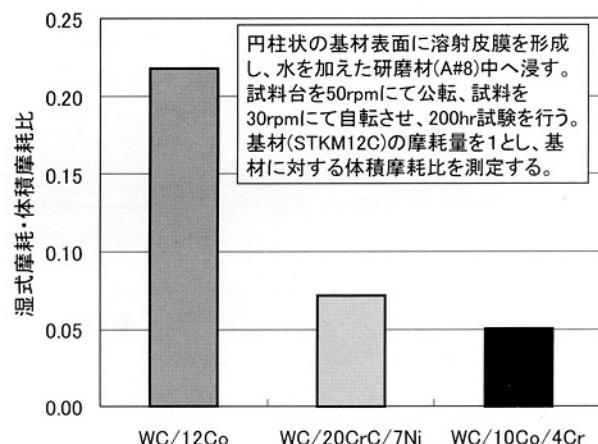
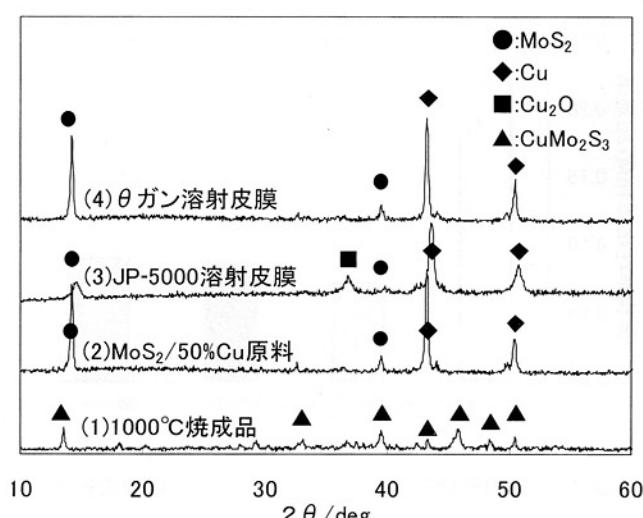


図 9 各種 WC サーメット皮膜のスラリーエロージョン試験の結果

しかし、皮膜に何らかの強い衝撃が加わる腐食環境下での使用となると、さすがの WC/20CrC/7Ni や WC/10Co/4Cr でもお手上げとなることが多い。特に WC/20CrC/7Ni の耐衝撃性、韌性は他のサーメット皮膜と比べると非常に低いことが知られている。そこで、WC/20CrC/7Ni をベースとして耐衝撃性を大幅に向上させることができないか試みることにした。

6.1 耐衝撃溶射材の開発¹⁵⁻¹⁷⁾

WC/20CrC/7Ni の WC 一次粒子は通常 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ である。これを $4 \sim 6 \mu\text{m}$ と大きくすると Ni バインダー相の平均自由行路が大きくなり、皮膜の韌性を向上させることができる。また、基本となる WC/20CrC/7Ni 中の Ni 量を 10% まで増やし、メタル量を多くすることで更なる韌性の向上が期待できる。さらに、純度を極限まで上げた NiCr または Ni を 10% あるいは 20% 均一にブレンドすることによって、

図 8 $\text{MoS}_2/50\text{Cu}$ 粉末およびその皮膜の X 線回折測定結果

皮膜中にメタル相を分散させ、衝撃に対するクッション効果を発揮させることができる。この溶射材を溶射した皮膜の断面模式図が図10である。丸みを帯びたメタル相が皮膜中に均一に分散していることが重要である。メタル相が溶けすぎて細長いラメラとなつては意味がない。適度な丸みを帯びさせるために溶射条件を工夫しなければならない。

図11はJP-5000における酸素と灯油の流量をパラメータとした燃焼室圧力のマップ⁵⁾である。stoichiometricと書いた直線は理論燃焼比を表しており、フレームの温度が最も高い状態であると考えることができる。この直線から遠ざかるほどフレーム温度は低下する。燃焼室圧力は右上へ行けばいくほど高くなる。耐衝撃サーメット材の溶射に適した灯油-酸素条件を模索した結果、通常のWCサーメット

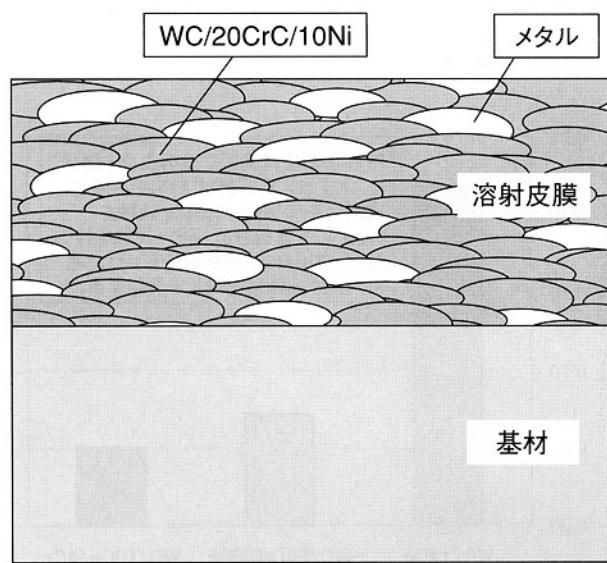


図10 耐衝撃サーメット皮膜断面の模式図

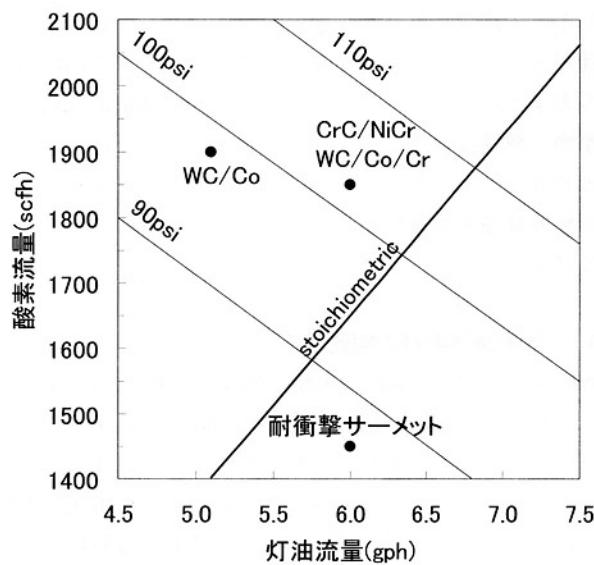


図11 JP-5000における灯油-酸素マップ

の溶射条件とは対照的に、灯油リッチの領域で見い出された。フレームが還元炎となるこの条件で、均一にブレンドされた粉末を溶射することにより、図10のようなユニークな皮膜が作製できるのである。

6.2 耐衝撃溶射皮膜の性質^{5,17)}

図12はJP-5000で溶射した各種WCサーメット皮膜のアプレッシブ摩耗（スガ摩耗）試験結果である。W2010XJとはWC/20CrC/10Niに10%のNiCrをブレンドしたもの、また、W2011XJとは10%のNiをブレンドしたものである。いずれもWC/12Coの耐摩耗性よりも優れており、WC/20CrC/7Niに対してはほぼ倍の耐摩耗性を示している。図13はスラリーエロージョン試験の結果である。W2010XJとW2011XJはいずれもWC/20CrC/7Niとほぼ同等の特性を有し、WC/12Coよりも倍以上の耐摩耗性を示している。図14は落球衝撃試験の結果（基材はS45C）である

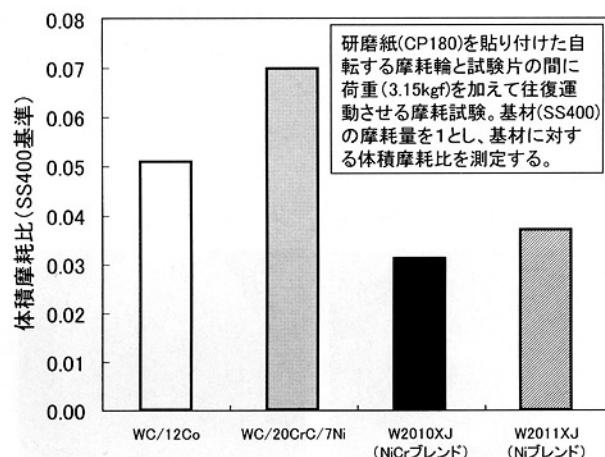


図12 各種皮膜のスガ摩耗試験の結果

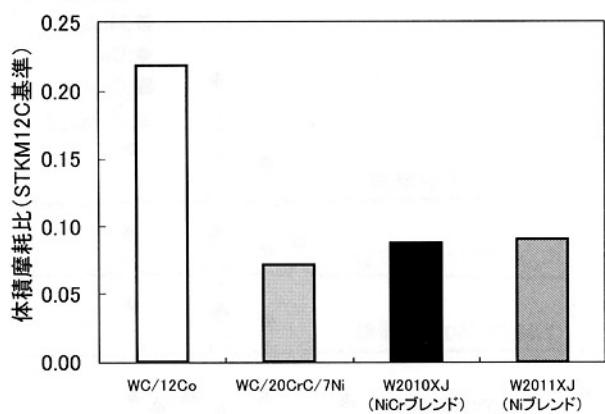


図13 各種皮膜のスラリーエロージョン試験の結果

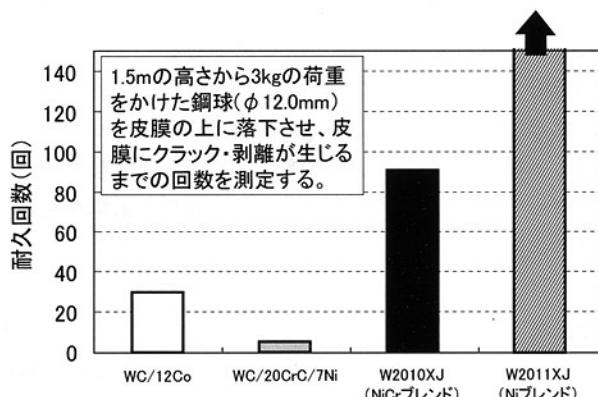


図14 各種皮膜の落球衝撃試験の結果

が、WC/12CoやWC/20CrC/7Niと比べて衝撃に対する耐久性が大幅に向上去ており、特にW2011XJにおいては顕著な耐久性が確認された。

図15はJP-5000で溶射したWC/12CoとW2010XJの皮膜内の残留応力をsin²Ψ法で測定した結果である。皮膜表面付近はほとんどゼロの値となっているが、表面から深さ方向に向かうにつれ、WC/12Co皮膜の圧縮応力が大きくなっている様子が認められる。ところが、W2010XJに関しては、やや圧縮側となるものの、ほとんど値に変化はなく、膜厚によらず安定した内部応力状態であることが分かった。これは、皮膜の耐衝撃性が高い一つの証左であると思われる。

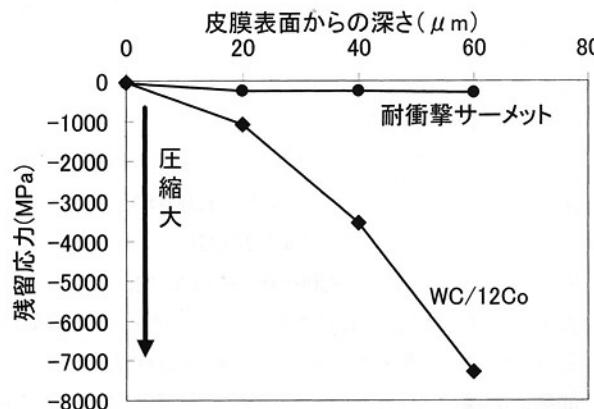


図15 WC/12CoとW2010XJの皮膜内の残留応力

6.3 耐衝撃溶射皮膜のアプリケーション例^{18,19)}

図16は掘削用ビットの模式図であるが、このビットにW2011XJを溶射し掘削テストを行った。図17は掘削テストを行っている様子を現している。図18は各種ビットで掘削後、重量摩耗率を比較したグラフである。①の「ノーマルビット」とは溶射を行っていないもの。②は超硬チップが埋め込まれていないビットに全面溶射したもの。③は超硬チップ部分を除いて溶射したもの。④と⑤はノーマルビ

ットの中古（ある程度現場で使用して擦り減ったもの）に超硬チップ部分を除いて溶射したもの。膜厚を変えてある。この結果より、溶射した効果は顕著に現れ、①に対して⑤

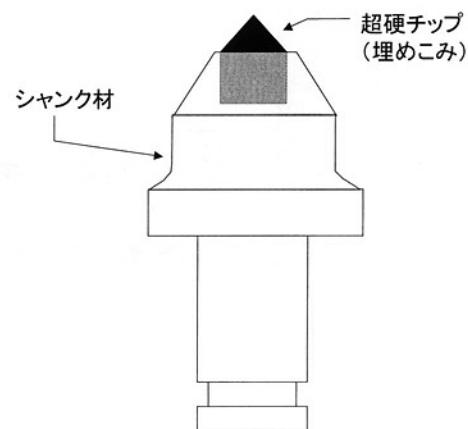


図16 掘削用ビットの模式図

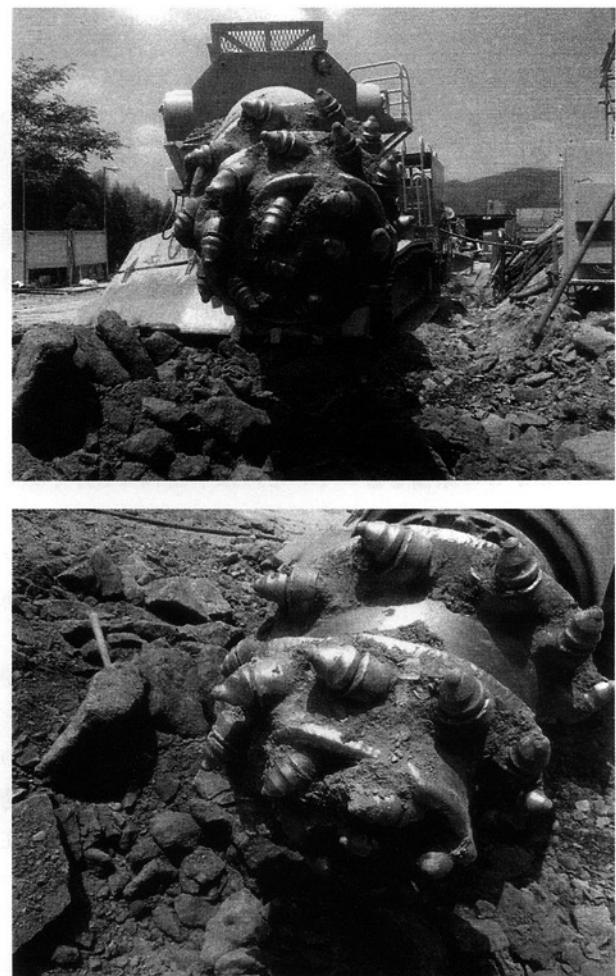


図17 掘削機（ブームヘッダー）で掘削している様子

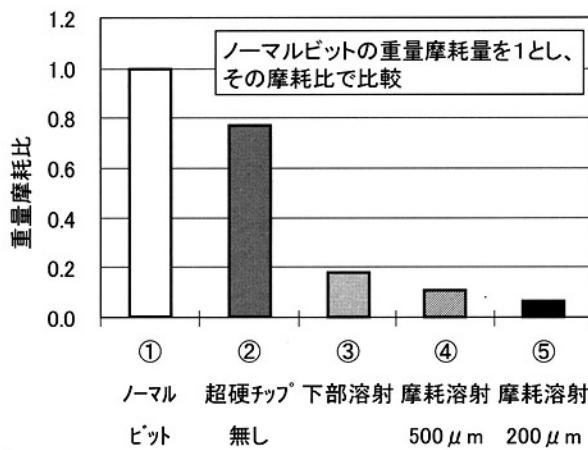


図18 各種ビットで掘削後、重量測定した結果

は約16倍の耐久性を示した。

ところで、現在、この耐衝撃サーメットはパワーショベルのアーム先端部とバケットジョイント部の摺動面にも溶射されており、けた違ひの耐久性を実証している。今後、パワーショベルにおいて、他の摩耗箇所にも適用されいく予定である。

耐衝撃サーメット皮膜は被溶射物の材質やプラスト後の表面粗度によって寿命が著しく異なることが分かっている。⁵⁾(サーメット皮膜全般に言えることであるが。) 例えば、母材がSUS304や316のようなステンレス鋼の場合、極端に良好な特性を示すが、SS400やSK材においては良好な特性が得られにくく。⁵⁾よって、溶射する母材の材質とプラスチック材の選択には常に注意を払いたい。

7 おわりに

今、私がこの原稿を書いているのは平成14年6月であるが、私が弊社で溶射材の事業を立ち上げてから、ちょうど2年が経過した。本稿で紹介させていただいた技術データのほとんどは、弊社における2年間の成果のごく一部である。

この2年の間に、それまで常識と思い込んでいたことが系統的な研究によってひっくり返されたり、新たな発見／発明が次々あったりと、溶射材の研究・開発が溶射技術の発展にいかに大切か強く実感できた。また、溶射材の開発には溶射機に対する深い知識と経験が不可欠であり、既述

の耐衝撃サーメット皮膜も弊社所有のHVOFを充分使いこなしてようやく完成した典型的な例である。サーメット溶射の分野は、このようにまだまだ発展途上ではあるが、世界的にもニッチであり、これから確実にマーケットが伸びていく屈指の分野であろうと確信している。今後もエンドユーザーとコミュニケーションを密に取り、市場の拡大に向けて邁進していきたい。

参考文献

- 1) 例えば: Proceedings, ITSC 2002, Essen (March, 2002) 12-22.
- 2) Peter Chandler : An Overview of the European Thermal Spray Market (May, 2002) 10.
- 3) 楠和彦, 五日市剛: 溶射技術, 21, 1(2001) 42.
- 4) 水谷健, 大澤悟, 五日市剛: 日本溶射協会第74回全国講演大会講演論文集, (2001) 31.
- 5) フジミインコーポレーテッド社内技術資料.
- 6) 渡辺崇貢, 太和田聰, 大澤悟, 五日市剛: 日本溶射協会第73回全国講演大会講演論文集, (2001) 39.
- 7) 大澤悟, 加藤伸映, 渡辺崇貢, 五日市剛: 日本溶射協会第73回全国講演大会講演論文集, (2001) 43.
- 8) J.G.Legoux, B. Arsenault, C. Moreau, V. Bouyer and L. Leblanc : Proceedings, ITSC 2000, Montreal (May, 2000) 479.
- 9) テクノサーブ(株)・製品カタログ「AMシリーズ」.
- 10) 五日市剛: 溶射, Vol.38, No.4 (2001) 235.
- 11) 大澤悟, 渡辺崇貢, 五日市剛: 日本溶射協会 第74回全国講演大会講演論文集, (2001) 11.
- 12) 大澤悟, 五日市剛: 特願2001-317497.
- 13) 鈴木峰男: 工業材料, 49 (2000) 72.
- 14) 青木功, 渡辺崇貢, 大澤悟, 五日市剛: 日本溶射協会 第75回全国講演大会講演論文集, (2002) 3.
- 15) 大澤悟, 五日市剛: 特開2001-234320.
- 16) 大澤悟, 五日市剛: US2001/0019742A1他.
- 17) 大澤悟, 太和田聰, 五日市剛, 戸部省吾: 日本溶射協会 第75回全国講演大会講演論文集, (2002) 5.
- 18) 加藤, 大澤, 五日市, 松浦, 岡本, 朝隈: 日本溶射協会 第75回全国講演大会講演論文集, (2002) 7.
- 19) 大澤悟, 五日市剛, 朝隈正雄, 異絃伸: 特願2001-224612.

技術解説

株式会社フジコーのハードフェーシング技術の紹介

FUJICO offers Innovative Hardfacing Technology

(株)フジコー 技術開発センター
センター長 工学博士
永吉 英昭
Hideaki Nagayoshi



1 はじめに

弊社は、昭和27年に鋼塊鋳型補修技術を中心とした創業を開始してから今年で50周年を迎える。これまでにも独自技術を開発し、鉄鋼メーカを中心とした事業展開が行われている。事業内容は、CPC・溶接・溶射・鍛かけ技術を駆使した各種機械部品の製造、耐熱耐摩耗用溶接材料の製造販売、産機設計・製作・据付、機械保全整備作業、生産工程の請負作業、機械加工・熱処理他多岐にわたる。

近年、地球環境やリサイクル資源関係の重要性が叫ばれ、しかもこれらの項目が身近に感じられることが多い。その中でも図1に示すようにダイオキシン類が人体に悪影響を及ぼすことから国内では1997年にごみや廃棄物などの焼却温度800℃以上が義務付けられた。また、地球温暖化の主要因とされているCO₂の抑制のために自動車エンジンなどの燃焼条件の高温化や製鋼メーカを中心とした国際競争力の激化に対応したロールなどの長寿命化のための高耐熱性・耐食性・耐摩耗性等の必要性がますます増加している。この対応として設備などの金属表面に表面処理するハードフェーシング技術が大変重要なっている。

弊社は幅広いハードフェーシング技術を有しており、これらのさまざまなニーズにお応えしている。そこで、本報に弊社が取り組んでいる現状ハードフェーシング技術を

紹介し、拝読していただいた方々からご意見などいただければ幸いである。

2 ハードフェーシング技術の代表例

図2にハードフェーシング技術の代表例を示す。大きく分けて

①鋼材などの外層にハイス材などのさまざまな種類の連続鍛かけ肉盛技術CPC

(Continuous Pouring Process for Cladding)

②鋼材と高クロム鍛鉄などを鍛かけする技術

③溶接肉盛技術

④溶射技術

の4種類である。

項①のCPCは、ハイス材やダクタイル鍛鉄材など様々な材料を使用目的に応じて選定されている。項②の鍛かけ技術は、代表例として複合鍛造技術で製造されている弊社のEST材がある。項③の溶接技術は一般的である溶接ワイヤやフープ材料による溶接とアトマイズ処理によって製造された粉末を約700℃の温度でプラズマによって直接肉盛するPTAがこの数年の間に展開されるようになり、高合金材料の施工が可能となった。その結果、MC炭化物の生成の制御が大きく改善でき、より機能性の高いハ

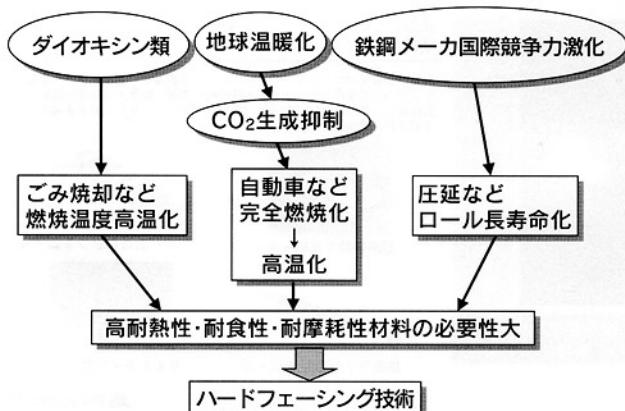


図1 ハードフェーシング技術の必要性

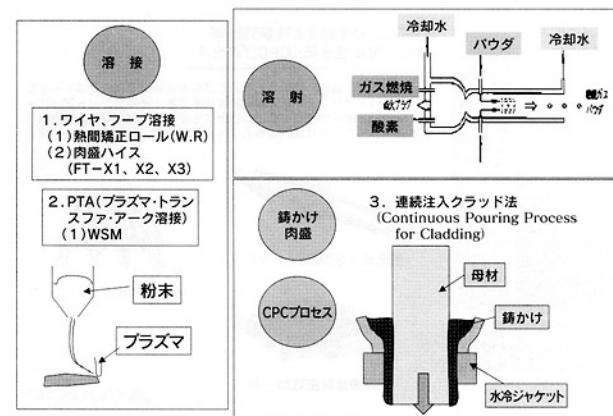


図2 ハードフェーシング技術の代表例

ードフェーシングが行えるようになった。項④の溶射技術は、示している溶射ガンがHVOFの高速フレーム溶射装置であり、ごみ焼却プラントをはじめ、色々な設備への施工に用いられている。

3 (株)フジコーのハードフェーシングの取り組み

弊社のハードフェーシングの取り組みについて弊社ホームページの掲載内容を参考にまず紹介する。ハードフェーシング技術は、施工技術や設備設計などプラント技術との組み合わせも重要であり、図3に示す弊社の事業内容のように複合製品製造部門と表面処理材料部門および機械加工部門などの連携によって安定した施工を行っている。

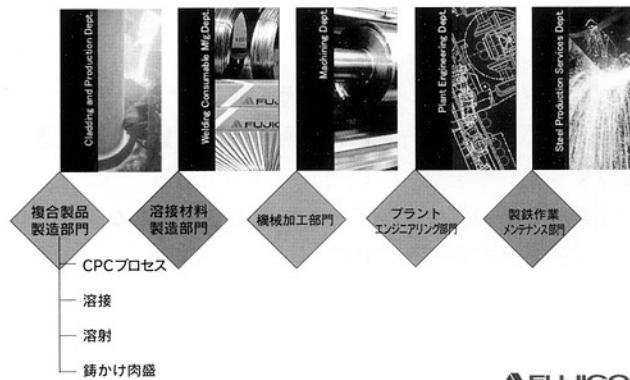


図3 (株)フジコーの事業内容

3.1 CPCプロセス

この方法は、弊社が独自技術を開発して数十年になる。鋼材の外層に数センチメートルの材料を鋤かけする技術である。溶接や溶射技術とは異なり、ハードフェーシング層の厚さが厚いことが特徴である。図4に弊社のホームページにある画面を示す。平成13年11月には、このCPC製品に鍛造や圧延などの塑性加工を加える特許が成立し、より高性能の製品作りを行っている。



図4 CPCプロセス

3.2 鋤かけ技術

図5に鋤かけ関連のホームページ画面を示す。極厚クラッド層をつくる事の出来る鋤かけ肉盛技術は、高性能・低コストを実現したFUJICO独自の複合技術で、クラッド材は、高炭素・高クロム系であり、製鉄所の焼結鉱粉砕設備など国内外で独占的な実績を誇っている。また、大型耐摩耗ライナ(EST)を開発し、設備保守コスト低減に大きく貢献している。



図5 鋤かけ技術

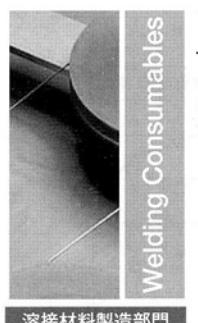
3.3 溶接技術

図6に溶接関連のホームページを示す。鋤鉄の特殊溶接からスタートしたフジコーは数多くの経験を通じて多彩なノウハウを蓄積している。また、溶接材料の開発・製造から製品の設計・製造まで一貫した体制で信頼性の高いバリエティに富んだ製品を幅広い産業分野に提供している。

図7に示すホームページの画面は、弊社が耐摩耗性・耐腐食性・耐熱性など高度な機能を持つ溶接材料を直接製造していることを示しており、ハードフェーシング技術は溶接施工技術のみではなく、材料面との組合せも行っている。高付加価値の新規材料の開発は、技術開発や事業拡張に強いインパクトになる。また、被覆アーク溶接棒・溶接ワイヤ・溶接フラックスなど、全般にわたり迅速且つ的確に対応している。



図6 溶接技術（その1）



蓄積した技術とノウハウから生まれた
多彩なニーズに応えるオリジナル溶材

耐摩耗性・耐腐食性・耐熱性など高度な機能を持つ溶接材料を製造しています。高付加価値の新規材料の開発は、技術開発や事業拡張に強いインパクトになります。被覆アーチ溶接棒、溶接ワイヤー・溶接フラックスなど、全般にわたり迅速且つ確実に対応しています。



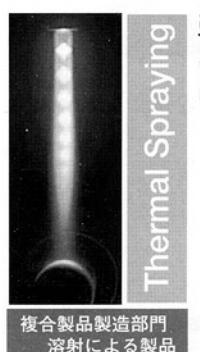
「バラエティに富んだ製品」

FUJICO

図7 溶接技術（その2）

3.4 溶射技術

図8に溶射関連のホームページ画面を示す。弊社は、長年の経験とノウハウを生かした幅広い溶射技術があり、特に、高速フレーム溶射では、優れた密着性により、従来概念を越えた領域にまで活用されている。また、製鉄・電力・環境・製紙・エネルギーなど広い分野で活躍している。図9に溶射事業の最近の動向を示す。製鉄所のOGフードや発電ボイラなどさまざまな箇所に溶射が行われている。



あらゆる素材を駆使した表面改質
高品位で優れた特性を生みだす溶射

FUJICOには、長年の経験とノウハウを生かして、幅広い溶射技術があります。特に、高速フレーム溶射では、優れた密着性により、従来概念を越えた領域にまで活用されております。製鉄・電力・環境・製紙・エネルギーなど広い分野で活躍しております。

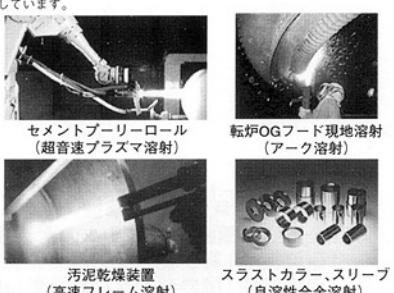


図8 溶射技術（その1）

溶射事業 最近の動向

フジコーは、密着性に優れた高速フレーム溶射など多種類の溶射技術を持っています。これら高い溶射技術で、現地施工や工場での加工に取り組んでいます。

作業拠点としての工場は、全国各地に配置されています。

フジコーの溶射事業の特徴は、

- 事業用発電ボイラなど、高度な仕様の施工実績が有ります。
- 標準化された作業とたゆまない技術開発が、高品質を維持しています。
- 高速フレーム溶射技術などのハイテクを、低価格で施工できます。

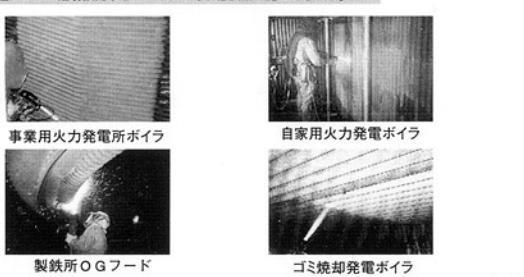


図9 溶射技術（その2）

4 ハードフェーシングの実例

4.1 ライナ製品

ハードフェーシングの実例として最初にライナを紹介する。図10に連続式アンローダ内に使用されているライナを示す。このように耐摩耗性や耐衝撃性が必要とされる部分には弊社の鋳かけライナESTや溶接ライナが使用されている。表1に弊社のライナ製品の構成例を示す。鋳かけ技術によって鋼材に高クロム高カーボン鋳鉄を接合させる複合鋳造材ESTは、10mm以上の肉盛厚さが確保でき、寿命特性を大幅に要求される場所を中心に使用されている弊社独自の開発製品である。図11にクイックスプレッド

高性能耐摩耗ライナの取組み

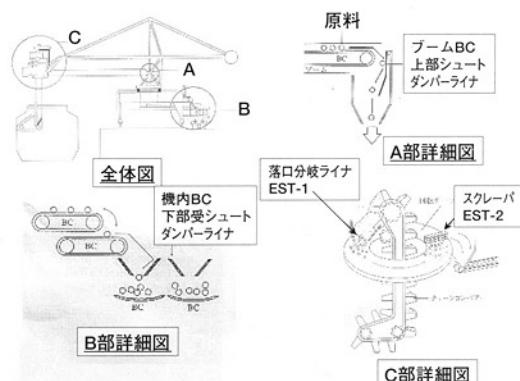


図10 連続式アンローダ内ライナ使用例

表1 現状ライナ製品構成例

区分	名称	サイズ	厚み (母材+硬化層)	成分系	特長
複合鋳造	EST-1	900×1800	25 (9+16) 30 (12+18)	高C 高Cr	耐熱耐摩耗 厚い硬化層
	EST-2				
	EST- α				
溶接	PLA-Tect1	400×1000 ~	7.5 (4.5+3) 12 (6+6) 15 (9+6)	高C 高Cr	耐熱耐摩耗 軽量
	PLA-Tect2				
溶射	シュールプレートA	100×1000 ~ 300×1000	6.5 (4.5+2)	Ni-Cr系	耐熱耐摩耗 耐食・極薄
	シュールプレートB			Ni-Cr-WC系	

肉厚ライナ(EST)→SS鋼材+高C・高Cr材料の接合

- | | |
|-----|---|
| ライナ | ①高炉スラグ水砕ライナ
②コンベアシートライナ
③ホッパーライナ
④コークスガイド車ライナ等 |
|-----|---|

10mm以上の厚肉ライナ
従来 : 3%以上→低衝撃性

↓
3%以下高Cr鋳鉄の鋳造一品
耐摩耗性の劣化

クイックスプレッド方式による
耐摩耗性・耐衝撃性厚肉ライナ開発

図11 EST製品の開発経緯

方式によって製造するEST製品のコンセプトを紹介する。これまで、耐摩耗性は優れているが耐衝撃性が悪いことから、高クロム・高カーボン鋳鉄材料のカーボン(C)重量は、3%に抑えられていた。そこで、鋼材との接合によって耐衝撃性を改善し、5%レベルのカーボン重量にすることを可能とした。図12にこのEST製造工程を示す。図13にライナ材の温度と硬さの関係を示す。ESTライナ材質が溶接ライナ材質に比較して高い硬さ変化を示す。弊社は更に図14のように高温度での硬さ低下を抑制した材質開発を行っている。EST製品は、図15に示すように鋼板部にボルトをスタッド方式で接合させることができることから接合強度が安定した施工が可能である。図16にESTライナ(クイックスプレッド方式による厚肉ライナ)の特長を示す。

このようにライナ製品は、使用用途に合わせて溶接ライナやESTライナなど耐摩耗性が必要とされているさまざまな箇所に使用されている。

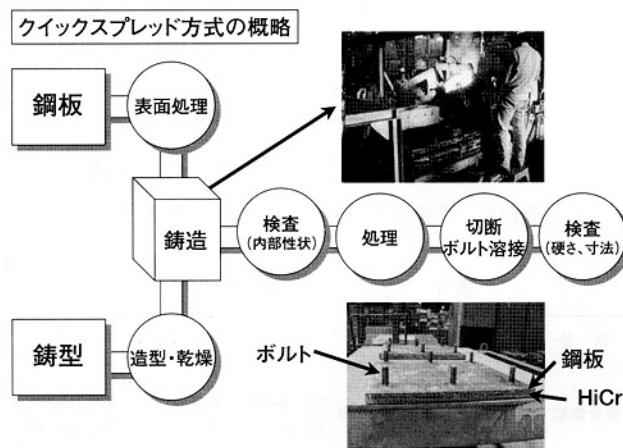


図12 EST 製造工程

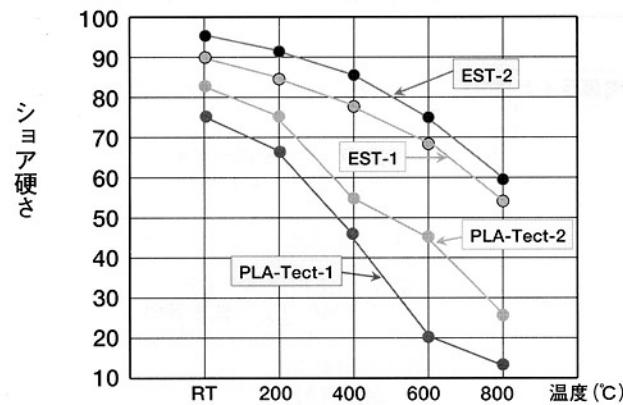


図13 高温硬さ特性

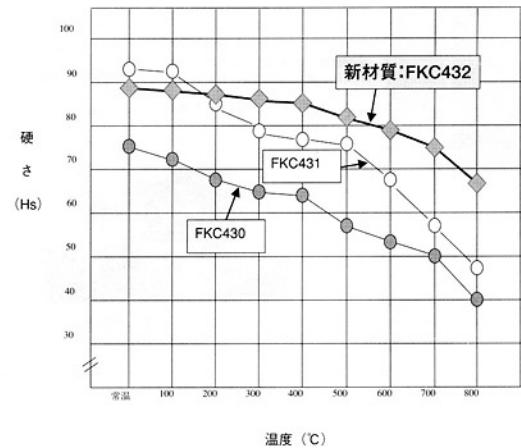


図14 新材質開発状況

表 引張試験結果

ボルト形状 (φ mm)	破断荷重 (N)	抗張力 (N/mm ²)	破断箇所
16	88181	562.9	ネジ部



図15 アークスタッド溶接部の強度

(1) 優れた耐摩耗性と耐衝撃性

ベース板(鋼板)…ライナへの衝撃緩和
「耐摩耗性」高C・高合金の複合素材化が可能
「耐衝撃性」境界部のせん断強度(JISG0601)
…37kgf/mm²レベル

(2) 溶接ボルトの耐強度特性

鋼板へのアークスタッド溶接…安定したボルト溶接強度

(3) ダイレクト製罐などの多用途対応

鋼板をライナ外部製罐構造へ利用

(4) 量産・ローコスト・短納期対応

大型サイズ(1800mm×900mm)を鋳造方式で生産
ニーズに応じたサイズで短納期対応が可能

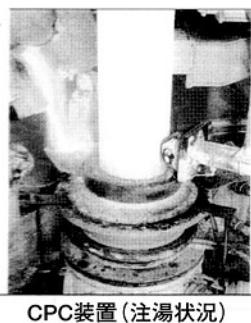
図16 EST (厚肉ライナ) の特徴

4.2 CPC製品

CPC製品は、図17の製造可能な寸法及び材質に示すように10mm以上の肉厚を鋳かけすることが可能であり、現在肉盛厚さ片肉約150mmも達成しており、図18に示す様々なロールへの施工が行われている。

また、図19にCPCプロセスの特長を示す。

現在、更にCPC製品に軽鍛造や圧延などの塑性加工を加えることによって、図20に示すようなクラック生成の抑制が可能となり、その結果、引張強度特性や耐衝撃特性が大幅に改善されることから、今後も種々の製品への応用展開が行われる。



肉盛ロール 製品 外径	Φ100~Φ700mm
” 長さ	Max 8,000mm (鋳放長)
” 重量	Max 15,000kg (鋳放重量)
肉盛厚み (片肉鋳放)	中空母材:15~85mm 中実母材:20~85mm (実績:147mm)→厚肉化
母材寸法、 材質	外径Φ70~Φ625mm 一般鉄鋼材料、特殊鋼
肉盛材質	鋳鉄、特殊鋳鉄、特殊鋼 非鉄材料

図17 CPC 製造可能な寸法及び材質



図18 CPC 製品例

1. 2種類の材料のクラッドにより新しい特性を有する材料を提供
2. 2種類の材料のクラッドにより安価な高級材料を提供
3. 従来の肉盛溶接法では不可能であった材料のクラッドが可能
4. クラッド・スピードが速く、一層肉盛の為、肉盛クラッド性能が高い
5. クラッド材の外形は円形、橢円形、正方形、多角形、長方形など
色々な形状のクラッド材を提供

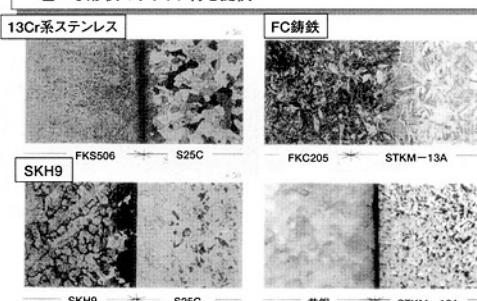


図19 CPC プロセスの特長

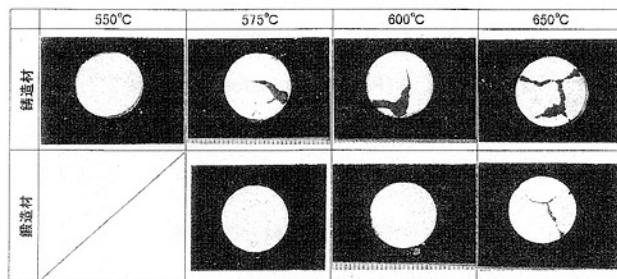


図20 耐ヒートクラック試験結果
「各温度3分間保持した後水冷」

4.3 溶接肉盛製品

ハードフェーシング層の硬さと摩耗は比例関係にあり、HS(ショア硬さ)が90以上と高い材料を溶接肉盛する材料として弊社材FT-Xシリーズ(図21参考)があり、図22に示すような製品に展開されている。この材料は、表2に示すようにMoやV元素を含有する高速度鋼系であり、耐熱・耐摩耗・耐溶接性など好評をいただいている材料である。表3にFT-Xシリーズの化学組成を示す。特殊元素としてNb、W、Vなどの元素を含有している。表4にFT-Xシリーズの機械的性質を示す。特にFT-X



図21 FT-Xシリーズ

施工例



図22 FT-Xシリーズの施工例

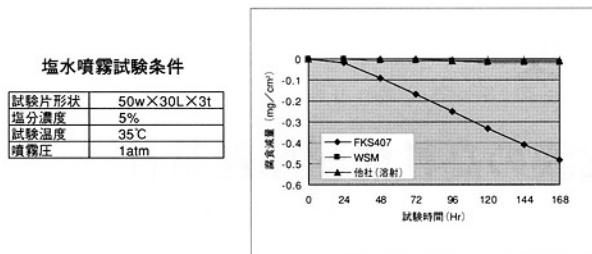


図27 WSM材の塩水噴霧試験結果

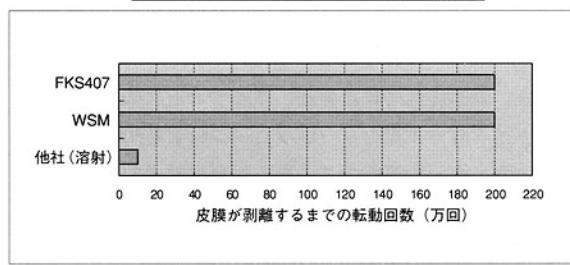


図28 WSM材の高温摩耗試験結果



図29 最近の溶射製品例

5 結言

本技報に弊社のハードフェーシング技術の概要を記載した。これまでにもさまざまな分野のスペシャリストの方々に弊社の技報に技術解説として掲載していただき、広く技術動向を述べていただいた。これらの分野や、地球上にやさしい環境・循環型社会づくりなどの達成には、基幹技術とそれを支える例えば弊社での取り組みのハードフェーシング技術も、間接的に貢献させていただいていると自負している。

本技報に紹介した技術はその一部であるが、今後とも皆様からの御指導、御鞭撻をいただきながら、環境や社会に少しでも貢献できるよう努力していく所存である。

4.4 溶射

溶射によるハードフェーシング処理は、プラズマ溶射や高速フレーム溶射、ガスフレーム溶射など様々な方法が取り入れられている。詳細は、弊社の技術論文をご参考いただき、本記載にあたっては最近の新しい施工事例を示すにとどめた。

図29に溶射事例を示す。左上は、塩化第二鉄の溶液を搬送するデカンタスクリュの事例で、従来はSUS310材などのステンレス系を用いていたが、数週間でスクリュ部に貫通穴が発生するほどの腐食があったが、Mo系の材料を高速フレーム溶射し、封孔処理を行うことによって数ヶ月の寿命延長が可能となった。右上は、約1,000°C温度で使用されるシームレス管や鋼板の搬送用ロール（ハースロール）にMCrAlY材を高速フレームにより溶射を行い、さらにプラズマ溶射によりセラミック材料を溶射した例である。左下は冷延用のプライドロールの下地に弊社のFT-X3を溶接肉盛した上にWC-12Co系材料をプラズマ溶射したもので、使用実績も大変好評を得ている。右下は、これまで溶射膜特性は衝撃に弱いと一般にいわれていたが、衝撃特性を大幅に改良が可能となり、振動篩へも使用展開が行われている例を示す。

WCサーメット自溶合金溶射皮膜の高性能耐摩耗特性

High-Performansive Wear Resistant Hardfacing with Ni-based Self-Fluxing Cermet containing WC



技術開発センター

尾崎 龍宏

Tatsuhiro Ozaki

技術開発センター

河村 太一朗

Taichiro Kawamura

技術開発センター

古田 博昭

Hiroaki Furuta

要旨

WC-Co系サーメットをブレンドした自溶合金（MSFWC）溶射は、耐摩耗性に特に優れ、圧延プロセス等の高温損傷を受けるラインや激しい摩耗環境下で使用される線材ガイドロール等のハードフェーシング技術として広く用いられている。当社では粉末式フレーム溶射装置による自溶合金溶射のさらなる耐摩耗性の向上を目指し、新材料の開発を行っている。その中でブレンドするWCの製造法及びかさ比重を変更した溶射粉末を溶射し、耐摩耗性評価法として、大越式摩耗試験を行った。

Synopsis:

Self-fluxing alloys blended with WC-Co cermets (MSFWC) coated over metal surfaces provide them with excellent wear resistance, a process popularly used, for example, in hard-facing guide rolls used in intensely abrasive environments and steel process lines subject to high-temperature damage. We are trying to develop other types of self-fluxing alloys whose coating by way of powder flame spraying can exhibit higher wear resistance. We tested alloys containing different types of WC-Co cermets produced in different methods and having different bulk density values, and measured their wear resistance by the Ohgoshi type wear resistance testing method.

1 緒言

ハードフェーシング技術の1つとして、溶射法による表面処理技術¹⁾が各種工業分野に広く利用されている。例えば、圧延プロセスでの鋼板の搬送部やガイドロール等のように鋼板との接触が激しく、また高温での使用による摩耗が大きい部材にも、耐摩耗性を向上させる目的で溶射による表面処理が行われている。溶射方法は、表面処理対象材に溶射した状態で使用する場合と、溶射後に溶射皮膜と表面処理対象材との密着強度を向上させる目的で1,000～1,100℃のフュージング処理を行なう場合がある。又、一般に耐摩耗性に優れた自溶合金溶射材料としては、Ni基またはCo基の耐熱合金やこれらの合金にWC（タングステンカーバイト）を添加した材料²⁾が使用されている。しかし、溶射皮膜の特性は溶射材料の製造条件や成膜プロセスの違いに大きく左右され、施工方法などの標準化が難し

いことから品質のバラツキが生じる場合が多い。そこで本論では、粉末式ガスフレーム溶射とフュージングを行う溶射法³⁾によりフレッティング摩耗やエロージョン摩耗に優れたNi基自溶合金+タングステンカーバイトコバルト（WC-Co）を用いて耐摩耗性の向上をはかることを目的として数種のWCの形態³⁾⁽⁴⁾が異なる材料を開発した。始めに、一般市場で使用されている材料を5種類選定し、ラバーホイールアブレージョン試験を行った。その結果に基づき、よりガイドロールの実使用条件に近い大越式摩耗試験⁵⁾を実施し、粉末の形態の違いが耐摩耗性に及ぼす影響について比較・検討を行った。以下にその結果について報告する。

2 自溶合金の特徴

耐摩耗処理として母材をフュージング処理（1000～

1200°C) することができる場合には硬さと韌性のある自溶合金が有効である。自溶合金 (self fluxing alloy) はJIS H 8303に規定されているようにニッケル基及びコバルト基合金にB、Siなどのフラックス成分を含有させたもので、フェュージング処理により合金中のB、Siの一部は酸化が起き易く B_2O_3 、 SiO_2 となり溶射皮膜中及び基材表面の金属酸化物を溶解し溶射皮膜の表面に浮上する。フェーズ後の皮膜は自溶合金成分と母材成分が相互拡散して、基材との界面に数 $10\mu m$ 程度の合金層を形成し冶金的に結合する。このため良好な密着性があり、かつ溶射粒子同士が溶融し、気孔の少ない皮膜が得られるため適用範囲が広い。溶射溶融処理には、燃焼炎トーチ(バーナ)を使用する方法、雰囲気を調整した加熱炉を使用する方法、高周波誘導加熱炉を使用する方法などが実用化されている。また、自溶合金は、組織中に初晶や共晶の酸化物や炭化物を含んでいるため、優れた耐摩耗性を示す。他にも塩酸、硫酸、フッ酸、苛性ソーダなど各種腐食環境に対し優れた耐食性を示す。

3 ラバーホイールアブレージョン試験

新材料の開発にさきがけ市販粉末を調査した。幾つかの試験粉末に限定し耐エロージョン性を計るためラバーホイールアブレージョン試験を行った。試験条件をTable 1に、装置の概略図をFig.1に示す。この試験機は、試料と回転するホイールの隙間に硬質粒子(SiO_2)を落下させ、試料を硬質粒子により摩耗させる装置である。試験前後の供試材の重量測定により摩耗量の測定を行う。耐サンド(スラリ)エロージョン性を評価する試験として用いた。

Table 1 Wear testing parameters

Test load	8.8 kg
Revolving speed	120rpm
Wheel width	15mm
Wheel diameter	250mm
Abrasive	SiO_2
Sand flowrate	300 gr/min

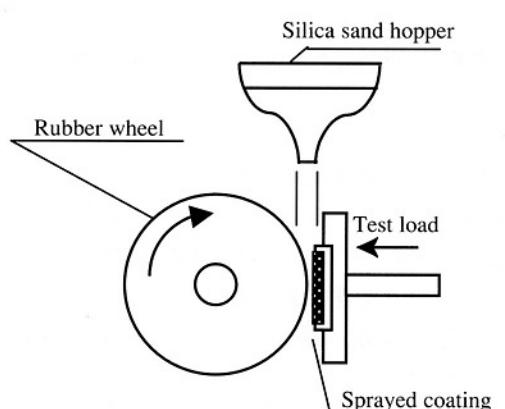


Fig.1 Rubber wheel abrasion test

摩耗量の測定結果をFig.2に示す。そのなかでもWC溶融分散型Ni基及びCo基自溶合金の耐摩耗性が優れている結果が得られた。自溶合金の中ではC、Crの含有量が組織中に多く存在する炭化物量の多いものほど摩耗量は少ない傾向がある。硬質粒子が衝突すると低硬度のマトリックス中の組織が選択的に摩耗する。そのため溶射皮膜中の素地組織の摩耗が進行しWC粒子の脱落等が発生していることが想定される。耐スラリ(サンド)エロージョンに対し、高硬度のWC等の炭化物が均一に分散し、微細な組織ほど摩耗量が少ない。

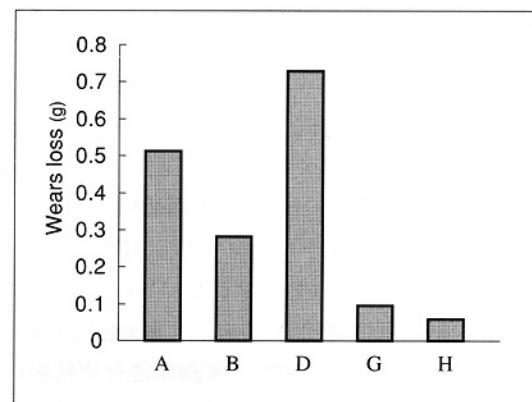


Fig.2 Wears loss in weight of test piece

4 溶射皮膜の評価方法

ラバーホイールアブレージョン試験結果に基づき、WC等の炭化物の均一化と微細組織化を狙った開発材料の耐摩耗性評価を行うにあたり、実際の環境に即した試験を行う必要がある。しかし、摩耗現象は影響因子が多く複合的な要素を含むため使用環境を再現することは困難である。そこで今回の試験では、大越式摩耗試験機を用い、線材ガイドロールの使用環境に近い条件を設定し、耐摩耗性の評価を行った。

5 大越式摩耗試験内容

5-1 大越式摩耗評価方法

大越式摩耗試験機の外観写真をFig.3に示す。この試験機は、回転円盤を固定した摩耗評価対象材の平面試験片に押しつけて摩耗させ、試験後の摩耗痕の大きさで摩耗量を測定するものである。回転円盤の外径を $2r$ 、厚さを B とすると摩耗量 W (体積)は

$$W = \frac{B b o^3}{12r} (mm^3)$$

で示される。

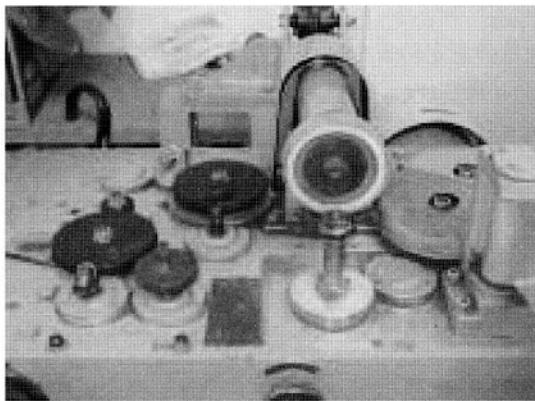


Fig.3 Ohgoshi type abrasion testing machine

5-2 供試材

試験母材には市販の $25W \times 45L \times 6t$ のSS材を用い、溶射は日本ユテク社製粉末式フレーム溶射装置（DS-8000）を適用した。フュージング処理後の溶射皮膜厚さを 2.0 mm とし、供試材の表裏面の 0.5 mm 平面研削加工を行った。供試材料は、試料A：SFNi4、試料B：SFNi5、試料C：MSFWC（35%WC）、試料D：試料CにWC1（スプレ造粒粉）を混合、試料E：試料CにWC2（流動床造粒焼結粉）を混合、試料F：試料CにWC3（流動床造粒焼結粉）を混合、試料G：WC溶融分散型Ni基自溶合金、試料H：WC溶融分散型Co基自溶合金、試料I：Ni基5種にWC-Ni混合した9種類を選定した。Table 2に試験対象の溶射粉末の仕様を記す。試料Bに関し、一般的に用いられているSFNi5に比べ成分中のC、Cr、Bを下げ、耐食性を高めている粉末を使用した。

Table 2 Contents of the test pieces

Test piece	data	granulation method
A	MSFNi4	Gas atomized powder
B	MSFNi5	Gas atomized powder
C	MSFWC-2(35%WC)	sintering agglomerated powder
D	sample c+WC1	spraying agglomerated powder
E	sample c+WC2	fluidized bed type sintering agglomerated powder
F	sample c+WC3	fluidized bed type sintering agglomerated powder
G	MSFWC-2(35%WC)	Gas atomized powder
H	MSFWC-1	Gas atomized powder
I	MSFNi5+40%WC-8Ni	fluidized bed type sintering agglomerated powder

5-3 試験条件

Table 3に試験条件を示す。線材ガイドロールの使用環境を基準とした。定荷重試験（ 5.0kgf ）で行い、摩耗速度を高速度（ 5.0m/s ）に設定した。

Table 3 Contents of Ohgoshi abrasion testing

Test piece size	$25W \times 45L \times 6.0t$
Ring form	$\phi 30 \times 3t$
Test load	5.0kgf
Abrasive speed	4.39 m/s
Abrasive distance	600m
Examination time	137sec

5-4 大越式摩耗試験結果

大越式摩耗試験後の摩耗痕写真の一例をFig.4に示す。摩耗粉による酸化膜形成の影響は見られなかった。各種供試材の大越式摩耗試験結果の摩耗量をFig.5に示す。グラフに示すように摩耗量は、試料Eが最も少なく、 $I < F < C < H < D < G < A < B$ の順に摩耗量が少ない結果を得られた。自溶合金粉末にWCを添加することで摩耗量の減少が著しい傾向がある。WC2はWC-12Niと同様の摩耗量であり、SFNi4に対し7.9倍、MSFWC(35 % WC)の1.39倍の耐摩耗性を示している。

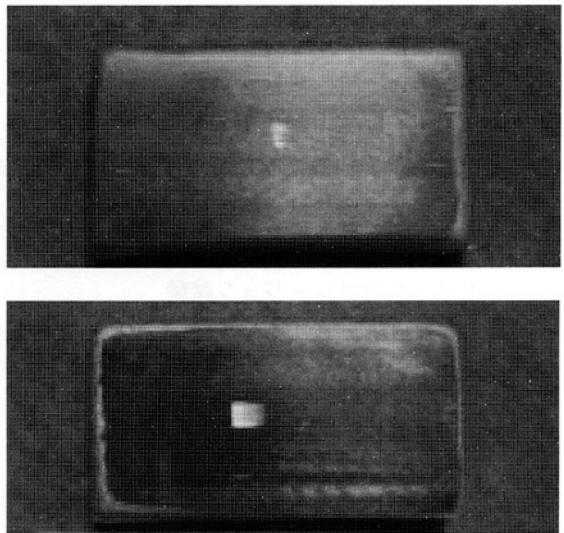


Fig.4 Abrasion mark on the test pieces

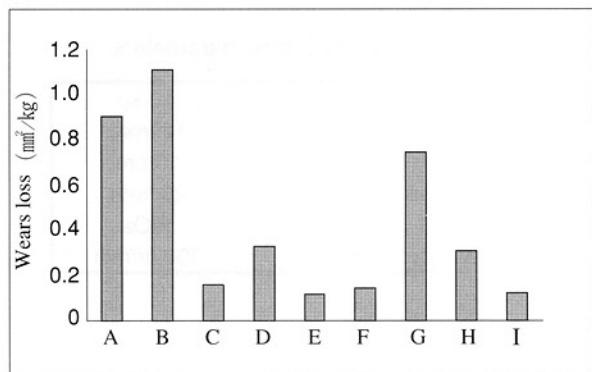


Fig.5 Wears loss in weight of test piece

5-5 ビッカース硬度測定結果

前述記載した供試材のビッカース測定結果をFig.6に示す。硬度測定にあたり溶射皮膜全体の組織の硬度測定を行うため、試験荷重を通常より重い 10kg とし測定は20回行った。その測定結果、試料Hの硬度($\text{Hv}890 \sim 980$)が最も高くC、E、F、Iはほぼ同様の硬度($\text{Hv}750 \sim 920$)を示した。WC形状による硬度の差はさほどみられない。B、Dは $\text{Hv}600 \sim 700$ と低い硬度を示している。

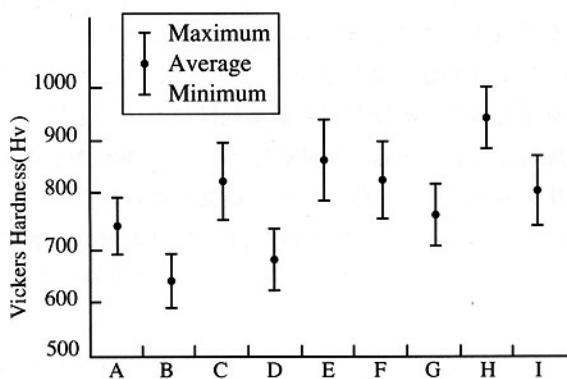


Fig.6 Vickers hardness of test piece

5-6 ミクロ観察

Ni基自溶合金はNi、B及びSiの3成分からなるマトリクス（基質）と組織中に硬質組織の初晶や共晶の炭化物、酸化物及びほう化物を含み、優れた耐摩耗性を有す。さらなる耐摩耗性の向上を目的に添加したWCの仕様をTable 4に、溶射皮膜中のWC形状の拡大写真(400倍)をFig.7に示す。WC1は、焼結されていないため焼き締まりがなくスプレー造粒時の気泡がそのまま粉末中に残っている。WCの結合及び粉末強度がもろく、溶射・フュージングの際Coの溶解が起こり、WCの収縮や脱落を招きやすい。WC2とWC3は、製造法は同じであるがかさ比重を変更しているためWC形状が異なっている。WC2はCoの溶解が少な

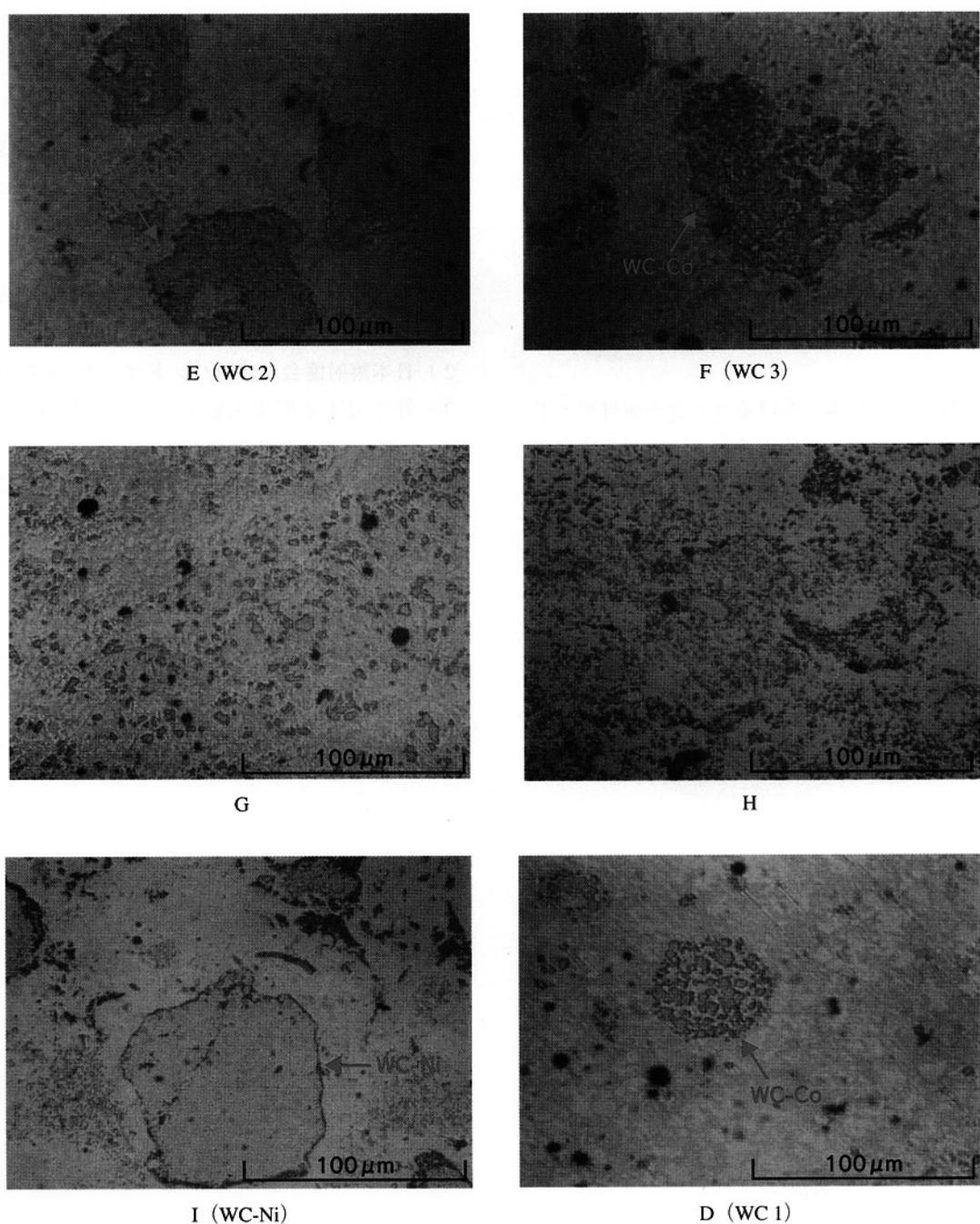


Fig.7 Microstructures of test piece

く粒状をそのまま維持している。WC3はWC2と比較しCoの溶解が若干おこり碎けた形状をしている。前者後者とも粉末粒度に差ではなく、粉末強度及びかさ比重が耐摩耗性に影響を及ぼしている。

Table 4 Particle size and bulk density of WC form (%)

Examination material	WC1	WC2	WC3	
Distribution of particle size	+106 μm +90 μm +75 μm +63 μm +53 μm +45 μm	0.1 11.0 25.3 39.9 72.2 91.9	0.0 12.2 36.2 67.9 88.2 98.3	0.2 12.3 32.2 63.2 87.5 97.3
Bulk density		2.82	6.08	4.55

6 考察

上記試験結果よりWCの添加により耐摩耗性の向上がみられた。また、WCの製造法及びかさ比重の違いにより耐摩耗性に大きな差が出ている。かさ比重を高くWCの結合が強固なWC2が最も優れておりCoの溶解やWCの収縮・脱落が少なく、皮膜中への歩留りも良好であり、WC-Niに匹敵する耐摩耗性を示した。

7 結言

圧延プロセス等の高温損傷を受けるラインや線材ガイドロール等の激しい摩耗環境下で使用されている自溶合金の耐摩耗性の向上を目的として、新材料の開発と耐摩耗性の評価を行った。以下にその内容を要約する。

(1)ラバーホイールアブレージョン試験において10~20

μmの微細なWC等の炭化物が皮膜中に均一に分散している組織ほど摩耗量が少ない結果が得られた。

(2)スプレ造粒法により製造したWC1は、WCが碎けた形状を示しWCの結合が弱く耐摩耗性においても低い。造粒焼結法により製造したWC2、WC3は、WCがそのまま塊状を維持し耐摩耗性も良好な結果が得られた。

(3)ガイドロールの使用条件を設定した大越式摩耗試験で、試料Eが最も耐摩耗性に優れている結果を得られた。

これらの結果、添加するWCの製造法により摩耗現象の耐摩耗性に差が出ていることから、使用環境に応じた適正な選択をすべきである。エロージョン等の流体摩耗には微細なWC分散型が適しており、アブレージョン・フレッティング等の機械的摩耗にはかさ比重が高いWC（造粒焼結法）が適している。

謝辞：溶射粉末製造を行って頂いた(株)フジミインコーポレーテッドの五日市氏及びラバーホイール試験資料を提供して頂いた九溶技研(株)藤家氏に感謝致します。

参考文献

- 1)坂田, 井上:日本溶射協会監修誌 溶射技術, Vol.9, No4, p.78
- 2)日本溶射協会 溶射ハンドブック, p.310, p502
- 3)谷:日本溶射協会監修誌 溶射技術, Vol.9, No4, p.57
- 4)谷:日本溶射協会誌, (1998), No.3, p.225
- 5)蓮井:溶射工学, (1996), p.180

技術論文

バナジウムアタックの研究

Study of Vanadium Attack



技術開発センター
佐々木 满太郎
Mantaro Sasaki

技術開発センター
園田 晃大
Akio Sonoda

要旨

近年、耐摩耗性、耐焼付き性を得るために溶接金属中にNb,V,W等を添加し、MC炭化物を溶接肉盛金属中に晶出させる研究が行われている。しかし、耐酸化性をも同時に求められる場合、これらMC炭化物生成元素の内特にバナジウム元素の酸化によるバナジウムアタックが懸念される。バナジウムアタックとは、一般的にガスタービン等の燃料油の灰分中に含まれるV₂O₅により、急激な高温腐食現象が発生する事であるが、本報では肉盛溶接金属中に固溶しているバナジウム分による、バナジウムアタック現象について報告する。

Synopsis:

Researches are underway to add Nb, V, W or other MC carbide-crystallizing element into overlaying metals to improve their wear and seizing resistance.

However, those additives are apt to lessen the oxidation resistance of overlaying metals.

In this connection, among others, vanadium is the most problematical causing a phenomenon called "vanadium attack". The phenomenon is seen with gas turbines susceptible to rapid high-temperature corrosion due to V₂O₅ contained in ashes of the fuel oil.

This report presents the results of our study of "vanadium attack" on overlaying materials due to the vanadium that is solid-dissolved in them.

1 緒言

従来から、耐摩耗性、耐腐食性、耐酸化性、耐候性、耐焼付き性など様々な性能を付加する目的で、設備等の表面処理を行うハードフェーシング技術として肉盛溶接がある。鉄鋼メーカーで使用されるロール・ローラ類はこれらの性能要求が大きい場合が多く、特にその中でも熱延工場等で使用される鋼板巻取り設備廻りのロールは、耐摩耗性、耐焼付き性等の要求が大きい。

それらの要求を満足させるために行われる肉盛溶接技術の中で、肉盛金属中に2,000°Cに近い高温度融点特性を有する各種のMC炭化物生成元素を添加する研究が広く行われており、当社もMC炭化物効果に関する研究を行っている。

しかし、ロールの使用条件によってはMC炭化物効果が

悪影響を及ぼし、耐食性などの特性が劣化する場合がある。特に、MC炭化物生成元素であるバナジウムでは酸化反応によって低融点バナジウム酸化物が生成し、耐食性などの効果を極端に劣化させる場合があり、一般的にバナジウムアタックと呼ばれている。

そこで、肉盛金属中にバナジウムを含有させた材質を用いて酸化傾向が確認できる900°Cでの酸化試験を行い、バナジウムアタック現象の進行状況についての基礎解析を実施した。

以下にその結果について報告する。

2 実験方法

2.1 供試材

本実験では、ステンレス鋼中にMC炭化物が分散している組成での酸化試験を行った。Table 1に今回試験に使用した肉盛材料の代表成分を示す。SUS材料をベースとし、Cr量を約20mass%、C量を3.5mass%およびV量を20mass%含有させた試料とした。

この成分の溶接材料をSS平板上に肉盛溶接した。その後、Fig.1に示す寸法で溶接試料から試験片を切り出し、その試料の溶接組織の調査を行った。

Table 1 Chemical composition of specimens

Element	Cr	C	V	Fe	(mass%)
					Value
	20.0	3.5	20.0	Bal	※SUS ベース

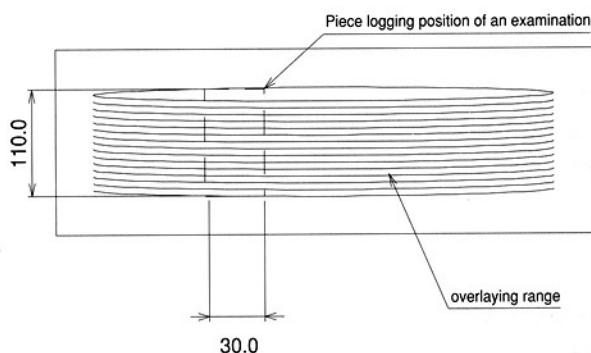


Fig.1 Working Diagram of oxidation test piece

Table 1に示す組成により肉盛溶接を行った試料の肉盛金属組織写真をFig.2に示す。

組織中に数 μ mのV炭化物が微細に晶出しているのが観察できる。この組織写真では確認できないが、EPMAなどの分析結果から、マトリックス（基地）中には、Vの存在も確認できた。

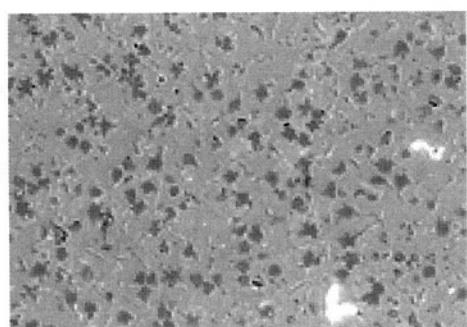


Fig.2 Microstructure of overlaying material

2.2 試験条件

Table 2に酸化試験条件を示す。昇温・降温および加熱についてでは、大気雰囲気の電気炉中にて実施した。昇温速度は50°C/hでまた、900°Cで12時間保持した後徐冷した。

Table 2 Condition for Oxidation test

Item	Condition
Temperature	900°C
Keep time	12h
Atmosphere	Air atmosphere

3 実験結果

3.1 試料外観

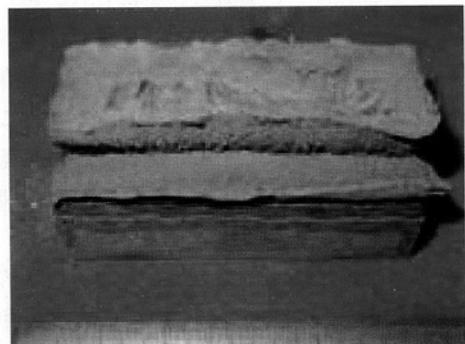
Fig.3に900°C加熱酸化試験後の試料の外観写真を2種類示す(No.1、No.2)。下面が母材(溶接肉盛対象材)で上面が肉盛材部である。加熱後は、溶接肉盛材表面のビード跡が全く見られず、泡状の膨張が確認できた。また、溶接肉盛部と溶接対象材料との空隙が大きく、明らかに酸化による体積変化によるものである事が分かる。

Table 1の材料の場合は、800°C以下の温度加熱ではこの現象はほとんど見られず、また、Table 1の組成でV元素の含有がない場合は、900°Cの加熱でも酸化は非常に少ないことも確認されている。

このことから、酸化皮膜の形態を確認することとした。



No.1



No.2

Fig.3 Appearance of test-piece after oxidation test

3.2 酸化皮膜の成分

900℃での酸化加熱試験を行った試験片に、生成されたいた酸化スケールの化学分析値をTable 3に示す。

Table 3 Analysis of chemical composition of oxide

(mass%)

Element	Cr	Ni	V
Analysis value	11.30	0.30	11.33
Element	Fe	N	O
Analysis value	32.65	0.08	27.705

この結果、Fe酸化物、Cr酸化物およびV酸化物が主に生成している。しかし、V元素の含有がない場合は、900℃での加熱試験でも酸化現象が見られないことから、V元素の影響が大きいことが分かる。

3.3 試験後試料断面組織

酸化試験後の酸化皮膜直下の試料断面組織をFig.4に示す。この組織写真から、黒色部はMC炭化物であるが、それ以外のマトリックスには溶接金属マトリックスのみに腐食が進行し、空洞状になっている部分が数ミリの深さまで確認できた。この空洞部は、明らかにMC炭化物間のマトリックス中に存在し、表面の酸化皮膜と試料本体の酸化との関係があり、酸化が溶接材料内部まで進んでいることが分かる。



Fig.4 Microstructure of overlaying material after oxidation test

また、その腐食先端部分及び健全部のEPMAによるマッピングを行った結果をFig.5、Fig.6に示す。Fig.5は、腐食されていない部分であり、また、Fig.6は空洞状の存在する部分である。

Fig.5の腐食が進んでいない部分は、左上の写真にあるように黒色部はMC炭化物を示しており、その間にあるマトリックスに右上の写真にあるように、赤色部分が最もCr濃度が高く分布している。左下のC分布および右下のV分布は、MC炭化物中に存在することから、明らかにMC炭化物を中心いて存在している。

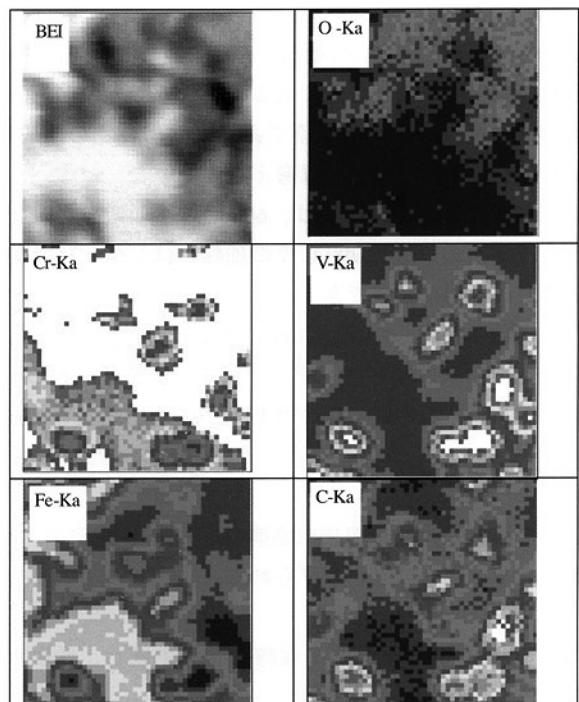


Fig.5 EPMA observation at tips of corroded parts

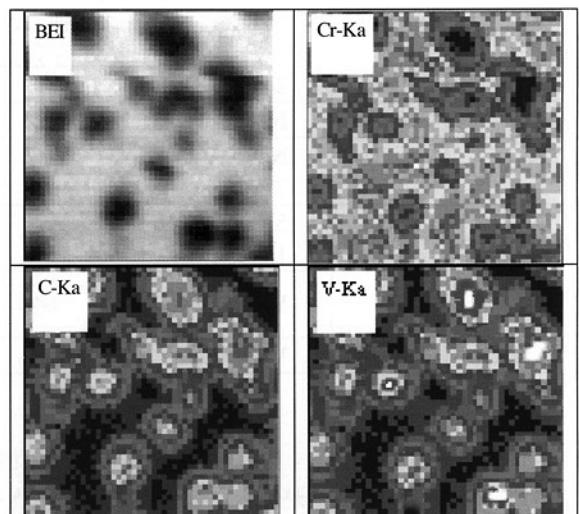


Fig.6 EPMA observation at tips of non-corroded parts

Fig.5に示す結果では、左上の写真は黒色部と中央右のVおよび右下のCの存在位置と一致する。左上の灰色部は、左下のFe分布でも確認できるように、濃度がほとんどない青色部を示す部分と一致することから、空洞部であると推察できる。この空洞部のCr分は、表層からの酸素の進入がなければ酸化によって低減する事がない。また、酸素の材料中の移動は、Fe元素の移動に較べて非常に小さいことから、Fe元素が表層に移動した可能性が高いと判断する。

4 考察

900℃での酸化試験での結果から、スケールはCr, FeおよびVの酸化物がほとんどである事が確認できたが、Cr酸化物は耐食性に優れた酸化膜であり、Cr酸化物の生成は、母材自体を腐食する要因とは考えられない。

しかし、V元素の酸化物は、600℃以下の低融点酸化物を形成するため、当然900℃での加熱ではV酸化物は溶融することが容易に推定できる。

今回実験に使用した肉盛材料はV量を多くし、晶出したMC炭化物中以外にもマトリックス中にV多く固溶している組成であったため、V₂O₅が生成しやすかったと考えられる。

今回、腐食が内部に溶接肉盛層内部に進行していった原因を考えると以下の点が挙げられる。

1) V₂O₅が他の金属酸化物と複酸化物を生成し、低融点化合物を作る。(Table 4 参照)

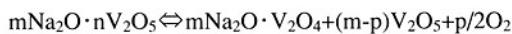
Table 4 Melting point of vanadium compounds

Compound	Temperature (°C)	Compound	Temperature (°C)
V ₂ O ₄	1970	2Na ₂ O·3V ₂ O ₅	565
V ₂ O ₅	690	Na ₂ O·3V ₂ O ₅	621
3Na ₂ O·V ₂ O ₅	850	Na ₂ O·V ₂ O ₄ ·7V ₂ O ₅	625
2Na ₂ O·V ₂ O ₅	640	5Na ₂ O·V ₂ O ₄ ·11V ₂ O ₅	535
10Na ₂ O·7V ₂ O ₅	574	V ₂ O ₅ ·Fe ₂ O ₃	640
Na ₂ O·V ₂ O ₅	630	V ₂ O ₅ ·CaO	621

V₂O₅は、冷却水などに多く含有されているNa系酸化物とも容易に結合して、融点がさらに低くなる複酸化物を形成する。

2) V₂O₅の腐食反応が雰囲気中のO₂をキャリアとして、金属材料の保護皮膜を化学的に破壊する。

これらの複酸化物が生成されると、900℃の高温度では複酸化物生成部が溶融し、酸化防止効果のあるCr酸化物膜を分断する傾向になり、酸素とFe元素の反応を容易にする。



凝固・溶融の際に上記のような反応を起こす事から、他金属元素の保護皮膜を破壊する事が考えられる。

実際に使用されているロールのハードフェーシング材料にV元素を高濃度で含有する場合に、本報告での現象が確認できる場合がある。

同一材料でのハードフェーシング処理でも、冷却水の水質の違いにより腐食程度が異なり、水質がNaを多く含む場合の方が腐食傾向が大きいことから、この現象もV酸化物とNa酸化物との複酸化物形成により、低融点部の影響によることが主であると推察できる。

5 結言

今回、耐摩耗性・耐焼付き性を付加させるために、VCを晶出させた材料についての高温における腐食機構について研究を行った。その結果、下記の内容が確認できた。

- 1) 900℃の加熱では、V量の増加とともに酸化が激しく起こる。この現象は、Vの酸化物の可能性が大きい。
- 2) ハードフェーシング処理した対象材料内部もV含有量が多くなるほど空洞状の酸化が進む傾向が見られた。特にFe元素の減少が大きいことから、大気中の酸素とFeとの反応が起きていることと推察される。
- 3) Crの酸化物は、防食効果が大きいことから、V酸化物がCr酸化物生成効果を低減している可能性が大きい。

以上のことから、当社では現在VC等を含む肉盛材料でありながら、このような高温における酸化現象が発生しないよう、肉盛溶接材料の開発を行っており、バナジウムアタックを考慮した使用条件に応じたV元素含有量調整を行っている。

参考文献

- 1) Fe-15%Cr-Nb-V-C系過共晶合金の凝固：山本 郁、宮川 昇、岡村誠之、廣瀬正憲、大城桂作
- 2) 圧延ロール用高炭素ハイス系合金の凝固機構：大城 桂作、小野幸徳、周 宏、宮原広郁

技術論文

形鋼圧延ロールに適用した狭開先軸接合技術

A combination technology of narrow-gap shaft welding and CPC process for rolls used in section mills



技術開発センター
大野 京一郎
Kyoichiro Oono

技術開発センター
芳谷 和政
Kazumasa Yoshitani

技術開発センター
尾崎 健一
Kenichi Ozaki

要旨

当社が独自に開発した、CPCプロセス（Continuous Pouring process for Cladding）は、クラッド厚を問わずに1層肉盛が可能なメリットを有し、すでに各種ローラ類の実績からその効果は明らかである。

特にハイスロールは、これまで熱延・冷延帶鋼、棒鋼、線材、平鋼等の圧延ロールで非常に良好な耐用を収めており、現在では当社の主要な製品の一つとなった。

しかし、これらのロールは、主に複合一体ロールとして製造しており、長軸を有するものにおいては、1チャージ複数本採りが困難であった。

そこで、CPCプロセスに狭開先軸接合技術を新たに導入し、従来の品質を維持したまま、ロール胴部材の複数本採りを可能とした経済的なロール製作方法を開発したので、ここに報告する。

Synopsis:

The CPC process, the FUJICO's metal cladding innovation, offers an advantage of thickness-free single-layer cladding as track records of many FUJICO's rolls in field service evidence.

Among others, high-speed rolls have been demonstrating their higher durability in the production of hot and cold rolled steel shapes including strip coils, bars, rods and flat bars, and make one of FUJICO's major product lines.

However, with the CPC process alone, since the roll was produced as a monobloc roll of clad barrel and shaft portions, only one roll was obtainable per charge of operation.

We have developed a technology to combine narrow-gap shaft welding with the CPC process to obtain two or more barrels per charge as a breakthrough to reduce roll production costs without sacrificing their quality. This report presents the combined technology.

1 緒言

形鋼圧延において圧延材の高品質化と省力・省エネルギーを図るため、より過酷な圧延条件に耐え、かつ長寿命のロール材が求められてきた。近年開発された高速度鋼（ハイス）系多合金白鉄ロールは、従来使用したダクタイル鉄やアダマイト鉄に比して、耐摩耗性、耐肌荒れ性に優れ、数倍の寿命を有するロール材として、圧延材の品質や生産性の向上に大きく寄与している。

当社では、圧延用ハイスロールの製造プロセスとして、

CPC法（連続注入クラッド法）を用いている¹⁾。CPC法とは Continuous Pouring process for Cladding の略称であり、概要是 Fig.1 に示す様に、中実または中空の芯材をモールド中心にセットし、黒鉛モールドと芯材との間隙にクラッドしようとする溶融金属を鉄込み、高周波誘導加熱により予熱された芯材に融接させながら、断続的に下方に引き抜き複合材を成形するプロセスである。CPC法の特徴は、一層肉盛法であるため、熱の集中度が極めて小さく、従来の溶接肉盛法では不可能であった材質、例えば過共晶材等の

クラッドを可能にした。また、溶接肉盛法に見られるビードマーク発生は皆無である。

これより、CPC法による圧延用ハイスロールは国内外で広く採用され、かつ非常に良好な耐用を収めており、現在では当社の主要な製品の一つとなった。

しかし、CPC法によるロールの製造は主に複合一体型であり、長軸を有するものは、1チャージ複数本採りが困難であり、客先の要望に対応すべく納期短縮および製造コスト削減に大変苦慮していた。

そこで、ロール胴部材の複数本採りを可能にするため、狭開先軸溶接技術を新たに導入し、短納期で経済的なロール製造方法を開発した。

本報告では以下に、狭開先溶接法の概要および溶接部位の特徴について述べる。

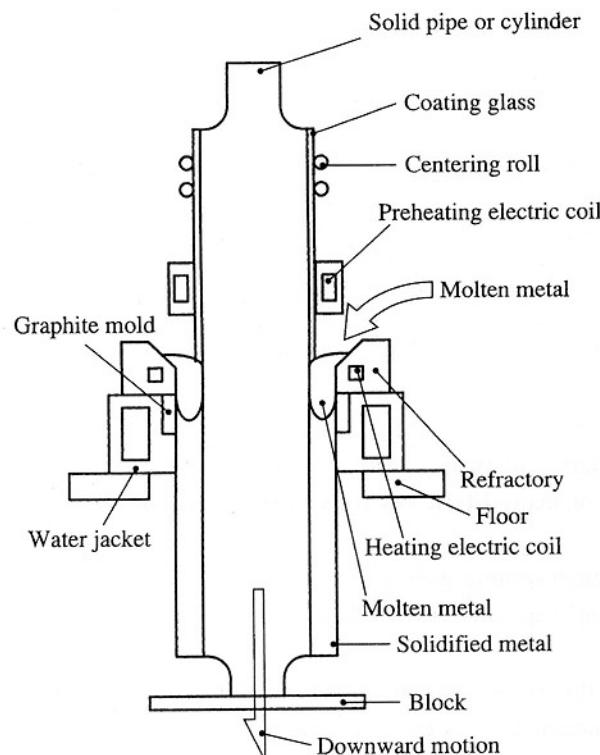


Fig.1 CPC process

2 狹開先溶接法

今回、狭開先軸溶接法に使用する溶接装置は、圧力容器や橋梁、重機械などの狭開先溶接で適用実績がある、高速回転アーク式自動溶接装置^{2)~5)}を採用した。

採用理由は以下の通りである。

(1)ワイヤに強制的な曲げぐせを与えることなく、アークを常に一定の幅で揺動させて、曲げぐせに起因した溶接欠陥が発生しにくい。

(2)機構的にアークの回転速度を電源周波数などの高速に

できるので、均一で安定した開先側壁の溶込みが得られる。

(3)開先内で回転するアーク電圧を検出することによる、自動開先倣い制御が可能な放置溶接システムである。

(4)狭開先なので、CPCの余長が短い。

ここで、高速回転アーク法の原理、特徴などを紹介する。

2.1 高速回転アーク溶接法の原理

高速回転アーク式狭開先溶接法の原理をFig.2に示す。溶接ワイヤは、電極ノズルの中心に送給され、通電チップの偏心孔によって偏心される。電極ノズルは、ベアリングを介して軸受けで支持され、電動モータで同一方向に高速回転される。

従って、ワイヤ先端のアークは、通電チップ孔の偏心量に対応した直径の円周状に単一の溶融池上を回転することになる。

アークの高速回転は、アークの物理的効果を周辺に分散させ、ビード形成現象、ワイヤ溶融現象に以下のような顕著な効果を与える。

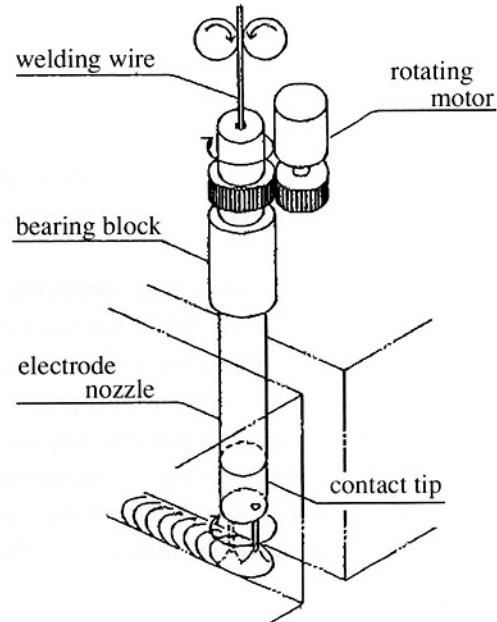


Fig.2 Rotating mechanism²⁾

(1)ビード形成現象

ビード形状に及ぼすアークの回転効果をFig.3に示す。回転なしの場合には、MAG溶接特有の中央集中型の溶け込み形状となるが、本法では周辺分散型の溶込みに変わる。

また、溶融池に作用する実効的なアーク圧力が、作用

面の分散により減少するため、ビード表面が平滑化され
ビード幅も増加する。

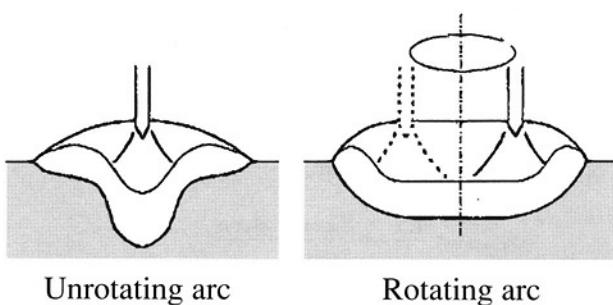


Fig.3 Effect of rotating arc on bead shape²⁾

(2) ワイヤ溶融現象

アークの高速回転は、Fig.4に示すように、ワイヤ先端の溶滴に回転遠心力が働き横方向に飛ぶと共に、アークもそれに引きずられる形で横に広がり、結果、開先壁の溶込み形成能力を増している。

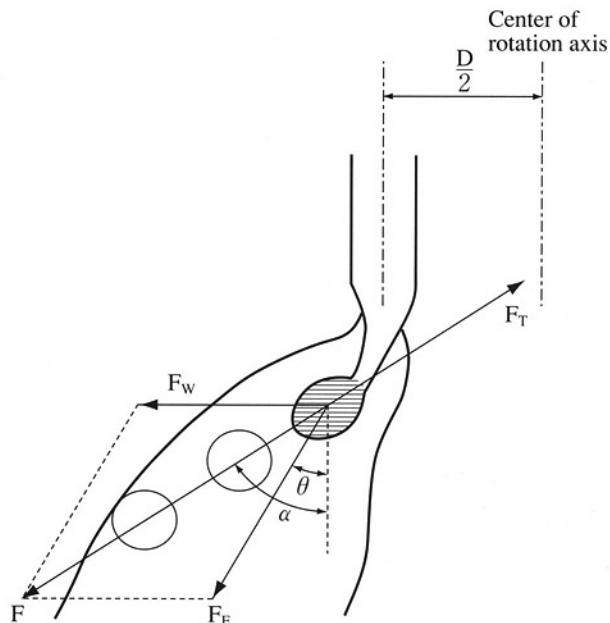


Fig.4 Relation of power acting on molten drop²⁾

2.2 アークセンサによる自動開先倣い制御⁶⁾

アークセンサとは、溶接トーチを開先内で揺動させ、このときの溶接電流やアーク電圧波形から開先と揺動中心のずれを検出し、トーチの狙い位置を修正する方法である。特徴は以下の通りである。

- (1) アーク自身がセンサとなるため特別な検出器が不要
- (2) トーチ廻りの簡素化が可能

(3) アーク直下の情報が常時検出可能

2.3 溶接装置

高速回転式アーク自動溶接装置の外観をFig.5に、溶接ノズル部の外観をFig.6に示す。

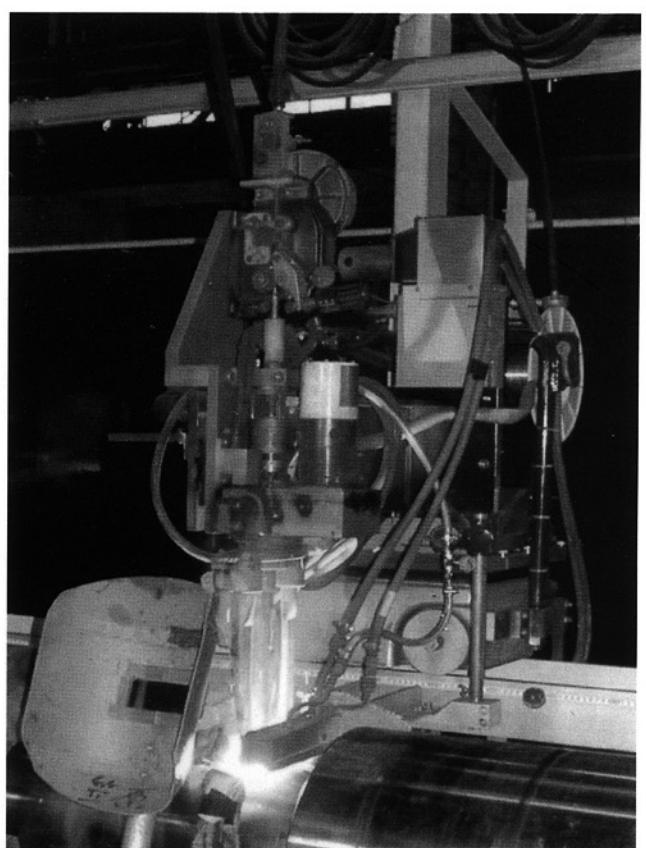


Fig.5 Narrow gap welding equipment with high speed rotating arc

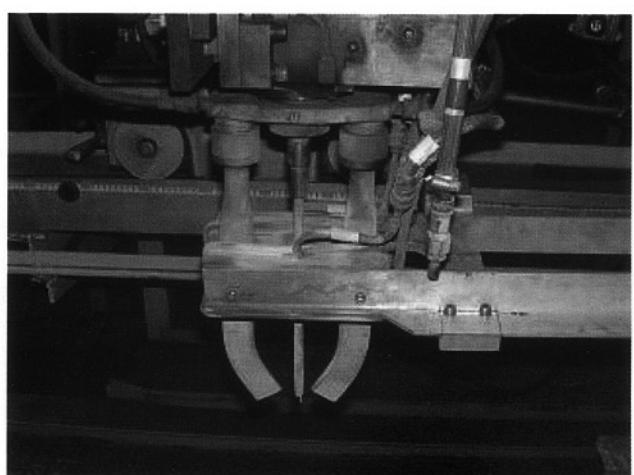


Fig.6 Welding torch

溶接ノズルの形状は多くの圧延ロールに適応できるよう、ノズル外径はφ8、ノズル長さは250mmと比較的長尺なものを使用する。

ガスシールドは、溶融池近傍では扁平ノズルを2本用い、開先表層部ではボックス型ノズルを併用する。

溶接電流の回転ノズルへの給電は、Fig.7に示す摺動式カーボンブラシが用いられている。

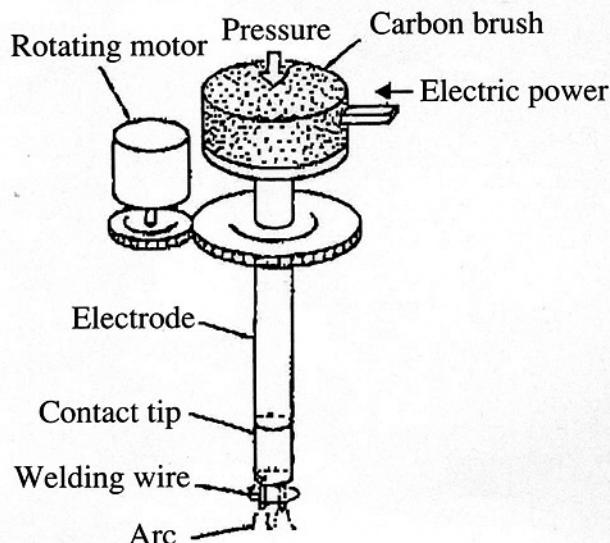


Fig.7 Rotation mechanism of welding torch

3 狹開先軸接合技術の開発主旨

本法を適用した圧延ロールの製造概要図をFig.8に示す。特長は通常のCPCロールと比して、開先加工を施したロール胴部と軸部を、高速回転アーク式自動肉盛装置を用いて溶接することである。

接合技術の開発を実行すべく、以下の事項を念頭においていた。

溶接金属 : 機械的強度の維持、溶込み

溶接施工 : 溶接欠陥、破断しない

製造法 : 品質の安定化、生産性の向上

3.1 溶接材料の選定

形鋼圧延において、ハイスロールを適用する以前はダクトイル铸鉄およびアダマイト铸鉄を使用していたが、軸部が使用中に破断していた。

そこで、接合部の強度はダクトイル铸鉄の1.5倍以上あれば破断しないと仮定し、これを踏まえた上で溶接材料の選定を行った。

溶接材料の選定は次式を用いた。

$$\sigma_{y,weld} \geq \frac{1.5 \times S_{weld} \times \sigma_{FCD}}{S_{FCD}}$$

ここで、

$\sigma_{y,weld}$: 溶接金属部の引張強さ(N/mm²)

σ_{FCD} : FCDの引張強さ(=500N/mm²)

S_{weld} : 溶接部の接合断面積(mm²)

S_{FCD} : FCDの軸断面積(mm²)

結果、溶接金属の引張強さ $\sigma_{y,weld} \geq 720 \text{ N/mm}^2$ ($=73.5\text{Kgf}$)となるので、溶接材料は780 N/mm²級高張力鋼を選定した。

3.2 溶込みの目標

自動車用铸物の接合において、溶込みが13%以上あれば、溶接欠陥が多く発生しても破断が生じない⁷⁾。

本法では、この事例を適用し、溶込みの目標を13%以上とした。

溶込み量を多くするため、以下の2点で溶込みの比較を行った。

(1)通電チップの偏心孔を改良し、より側壁方向へワイヤを送給させる。

(2)トーチ回転を速くし、遠心力によりワイヤの溶滴を側壁へ向ける。

3.3 母材の選定

供試材は従来の品質維持を念頭に置き、複合一体型製造法と同様、SCM材を選定した。

3.4 溶接条件

上記の供試材を使用し、ビード形状およびトーチ倣い制御が損なわれないことを念頭に置いた溶接条件を選定した。

開先形状 : H型

開先幅 : 開先底部: 13 mm 開先表層部: 18 mm

開先深さ : 120 mm

溶接電流 : 300 A

溶接電圧 : 33 ~ 34 V

溶接速度 : 250 mm/min

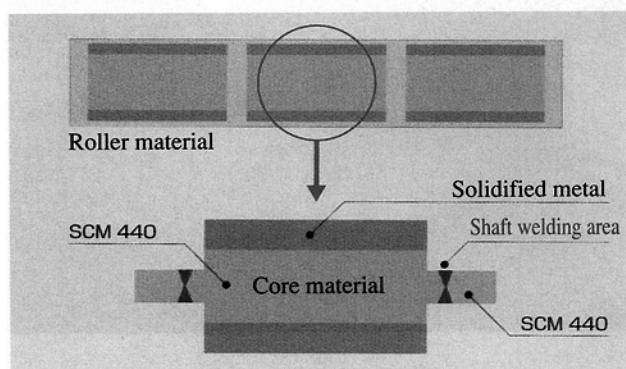


Fig.8 Roll shaft joint by CPC process

4 結果

4.1 溶接状況

Table 1 に各溶接条件で溶接した結果を示す。

通電チップの偏芯孔は2.1mmと2.3mmの2種類を準備した。結果、溶接性は共に良好であった。

また、トーチの回転速度は溶接装置の仕様上、50Hz,65Hz,80Hzの3種で比較した。結果、回転速度が50Hz,65Hzは良好であったが、80Hzではトーチ回転に振れが生じ、溶接アークが不安定になったので、不適と判断した。

Table 1 Results of welding test

No.	Rotating speed of torch (Hz)	Deviation of contact tip (mm)	Welding	Penetration ratio (%)	UT results		
					Results	Defect point	Defect type
1	50	2.1	○	9	○	—	—
2	50	2.3	○	13	×	Center of weld zone	Slag inclusion
3	65	2.1	○	10	×	Center of weld zone	Slag inclusion
4	80	2.1	×	—			

4.2 溶接部断面の状況

溶接性が良好なNo.1～3を施工後、UT検査および断面を切断し、溶接部の状況を調査した。

(1) 断面マクロ組織

溶接施工後のUT結果をTable 1に、断面マクロ組織の一例をFig.9に示す。

溶接部は肉盛り厚4mm程度で均一であるが、溶接金属の中心部に溶接欠陥が生じていた。

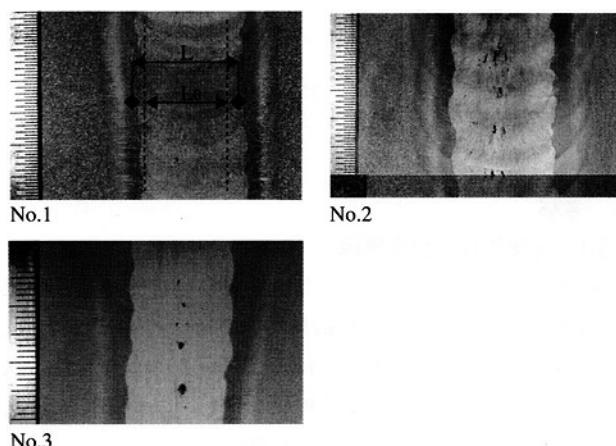


Fig.9 Microstructure of weld section

(2) 溶接金属の溶込み

Table 2 およびFig.10,11に各サンプルの溶込み量を示す。Lを溶接金属幅、L₀を溶接前開先幅とすると、溶け込み率Mは、次式で求められる。

$$M (\%) = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

その結果、No.2が目標値13%に達している。

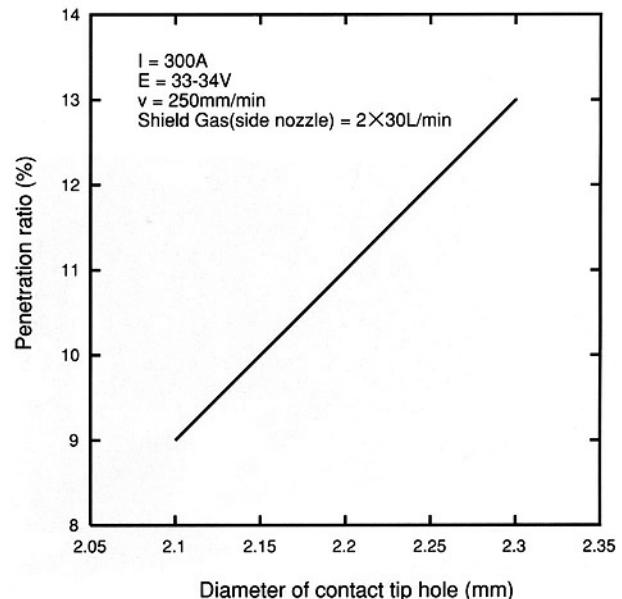


Fig.10 Penetration ratio versus contact tip hole diameter

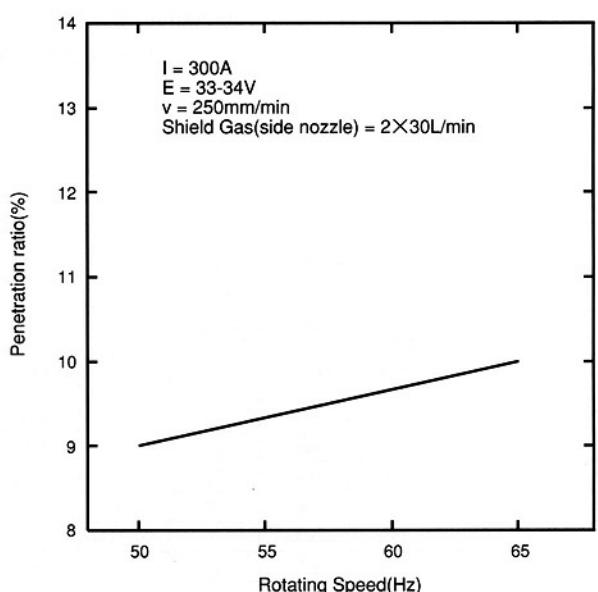


Fig.11 Penetration ratio versus rotating speed(Hz)

4.3 機械的強度測定結果

溶接したサンプルは、ハイスロールの製造仕様同様、熱処理（焼入れ・焼戻し）を施した後試験片に加工した。試験片は表層部、開先中央部、開先底部の3カ所から採取した。

引張試験にはJIS Z 2201 4号の試験片を用いた。試験は万能引張試験機を用いて常温で行った。

また、曲げ試験はJIS Z 2204 1号の表曲げ試験片を用いた。試験は事前に目視および浸透探傷試験（PT）にてサンプル表面の状況を確認した後、Fig.12に示すローラ曲げ試験方法で行った。評価は試験後のサンプル外観を観察した。

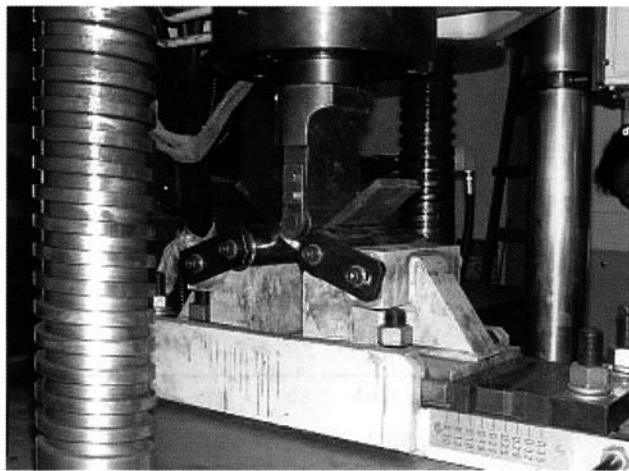


Fig.12 Method of roller bending test

(1) 引張試験

引張試験結果をTable 2に、破断した試験片の外観をFig.13に示す。引張強さは目標値720(N/mm²)を満足し、かつ破断位置は溶接欠陥の有無に関わらず、接合部以外である。

Table2 Results of tensile test

		mechanical factor				Fracture point
		Proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Reduction (%)	
NGW	1	640	810	16	42	SCM
	2	630	800	15	37	SCM
	3	630	800	14	43	SCM
SCM-H		610	785	17	39	—
FCD-H		450	500	2	0.21	—
Weld material		755	870	22	—	—

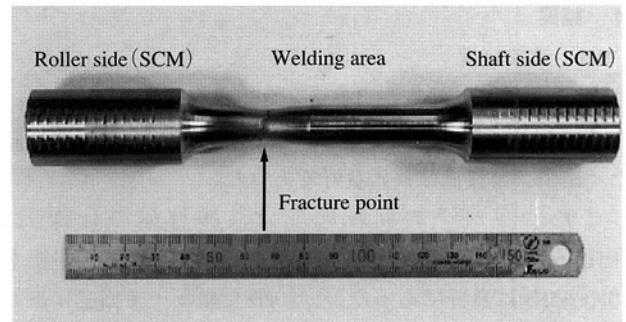


Fig.13 Tensile test piece after fracture

(2) 曲げ試験

試験前に行った表面の状況確認とローラ曲げ法で試験した結果をTable 3に示す。なお表中、破断および亀裂模様がないものは○、溶接中央部に亀裂が発生したものを△、破断が鋼材と溶接金属との熱影響部で生じたものを▲、溶接中央部にて生じたものを×と表記した。

結果、表面欠陥の有無に関わらず破断していた。

Table 3 Results of bend test

No	Gap top area		Gap middle area		Gap bottom area	
	Welding defect	Test	Welding defect	Test	Welding defect	Test
1	None	▲	None	△	None	×
2	None	×	Found	×	None	○
3	Found	×	None	×	None	×
SCM	None	△	None	△	None	△
FCD	None	×	None	×	None	×

5 考察

5.1 溶接欠陥の発生原因

溶接金属の中央部に発生した溶接欠陥を走査型電子顕微鏡(SEM)でミクロ観察した結果を、Fig.14に示す。また、溶接欠陥およびビード表面に付着していたスラグをEDAX分析した結果、ほぼ同等な分析値を示した。従って、溶接欠陥はスラグの巻込みであると推察した。

そこで、No.2の施工条件で、各パス毎に発生したスラグを除去し、ビード表面を清浄にした結果、溶接欠陥は回避できた。Fig.15にその時のマクロ断面組織を示す。

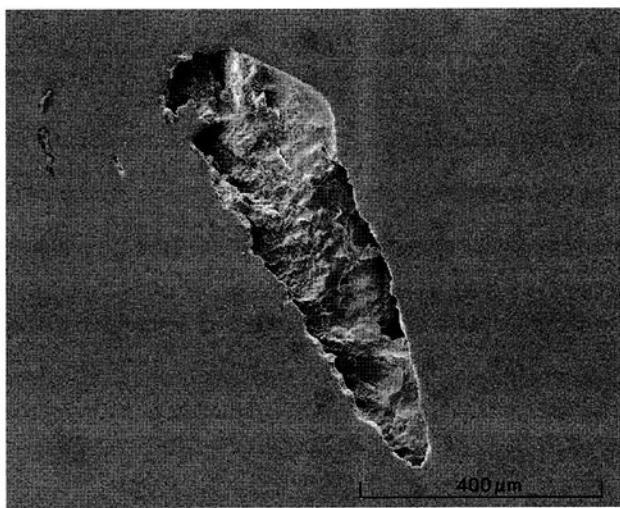


Fig.14 Microstructure of weld defect by SEM

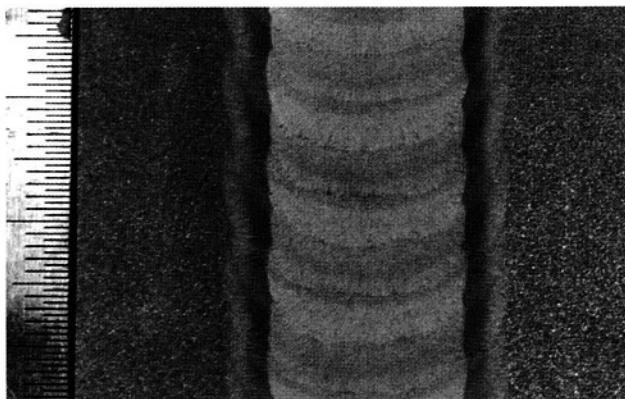


Fig.15 Microstructure of bead section after cleaning

5.2 引張試験

今回、溶接材料は、母材（SCM）と比較してやや高い機械的性質を有する780N/mm²級高張力鋼を用い、かつ完全に溶込んでいる。

また、応力が溶接線に垂直にかかるので、強度の低い部分で破断する^{8),9)}。従って、破断は母材で起こったと推察した。

5.3 曲げ試験での破断

曲げ試験において、サンプルが破断した原因は以下の通りと推察する。

- (1)溶接金属中にスラグが巻込んでいるため、スラグに応力が集中し脆性破壊が生じた。
- (2)結晶粒が溶接金属より大きい、溶接金属間の熱影響部がサンプルの表面に存在し、その影響で破壊靭性値が低下した。
- (3)伸びの不足により、亀裂の伝搬・破断に至る。

6 結言

形鋼圧延ロールに適用した狭開先軸接合技術として、ロール胴部と軸部に狭開先加工を施し、開先内を多層肉盛することで、在庫生産ならびに製作工期の短縮が期待できる。接合技術確立のため、溶接テストを行った結果、以下のこととが推察できた。

- (1)溶接金属の中央部に介在した溶接欠陥はビード表面に発するスラグの巻込みであった。対策として、肉盛溶接と並行してスラグを除去し、溶接ビード表面を清浄することにより、溶接欠陥は回避できた。
- (2)開先側壁への溶込みはチップの偏芯孔を大きくし、機械的に側壁方向へ溶接ワイヤを送給することで、目標値13%を確保できた。
- (3)溶接施工後、引張試験を行った結果、引張強さはダクタイル鉄の1.5倍以上であり、かつ溶接金属部以外で破断した。

今後、ロール形状での施工確立を行い、生産性の向上を図る。

7 謝辞

本施工技術の遂行に際し、高速回転式アーク溶接装置の立上げにあたり、ご指導、ご協力して頂いた（株）ジャパンテクノメイト殿に深く感謝いたします。

また、機械的強度の測定および溶接欠陥の調査にあたり、ご指導、ご協力して頂いた広島県立東部工業技術センター材料技術部坂村研究員殿に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 坂本真一：フジコー技報No.4(1996)44
- 2) 杉谷祐司：金属65(1995)10, p23
- 3) 野村博一ほか：日本钢管技報No.112(1986)75-80
- 4) 溶接学会編：溶接法ガイドブック ナロウギャップ溶接(狭開先溶接)、黒木出版社
- 5) 堀勝義、羽田光明：溶接学会誌Vol.68(1999)3,41-61
- 6) 杉谷祐司ほか：溶接技術No.2(1990)92-98
- 7) 例えは、竹本ほか：自動車技術(1997.2)
- 8) 溶接学会編：溶接・接合技術、産報出版(1998)
- 9) 鈴木春義：改訂 最新溶接工学、コロナ社(1974)

技術論文

省エネルギーのための高温燃焼を可能とする 新しい表面処理技術の研究

Study of Surface Treatment Technology to Enhance The Possibility of High Temperature Incineration for Energy Saving



技術開発センター

坂田 太志

Futoshi Sakata

技術開発センター

興梠 隆

Takashi Koroki

要旨

各種の廃棄物焼却プラントにおいて、省エネルギー効果を高めるために、蒸気ボイラ条件の高温・高圧化が図られている。このため、プラントにおいては、金属部材の劣化・損耗が顕在化し、その対策が急務となっている。

高温域の腐食環境下に晒される金属部の耐食性向上を図るため、耐食性の高い材料をMIG溶接機により肉盛りする技術については、「創る」No.9（廃棄物発電ボイラの高温耐食表面処理技術）に示している。

本号では、新たに数種の表面処理法による低希釈化の可能性について、研究調査した内容を報告する。

Synopsis:

Incineration plants are operating their waste heat boilers to generate higher-temperature higher-pressure steam as an effort of energy saving power generation, but having in turn a problem that the steam accelerates the deterioration and wear of metal parts of the equipment.

We presented a study report of MIG hard facing technology titled "High Temperature Hot Corrosion-resistive Cladding Technology for Boilers at Municipal Waste-fired Power Plants" in the preceding technical report "tsukuru" Volume No.9 as a breakthrough to improve the corrosion resistance of metal parts exposed to an corrosive environment.

We have further studied other surface treatment possibilities to lower dilution, and hereby present what we have learnt from the study.

1 緒言

ごみや廃棄物の焼却時に発生する排熱を熱交換し発電する廃棄物発電において、発電効率の大幅な向上がサーマルリサイクルの柱として社会的に注目されている事は、既に多くの報告書に述べられている。この発電効率の高効率化における問題点には、ボイラ発電設備内の高温化に起因し、燃焼ガスやダストに含まれる塩素やアルカリ溶融塩による高温腐食、飛灰中のシリカやアルミナ等の硬質粒子による高温アブレッシブ摩耗などにより、金属部材の劣化や損耗が激化する事があげられる。¹⁾ この劣化や損耗を防ぐため、ボイラ設備内の金属部材には、溶射・溶接などにより耐食性や耐摩耗性を向上させるための表面処理が広く行われて

いる。しかし、発電効率30%を可能とするようなボイラ蒸気の高温・高圧力条件下における耐食・耐摩耗表面処理性能が、現状では十分満足するレベルにあるとは言い難い。溶接による表面処理では、施工条件にもよるが、溶接時の表面処理対象材の溶け込みが大きいため、溶接材料自体の性能の劣化が大きい。また、溶射による表面処理では、表面処理対象材の溶け込みはほとんど無いが、密着強度が低く、また溶射皮膜中に気孔が内在する場合が多く、腐食成分の皮膜内部への浸透の問題もある。

そこで、材料の性能を100%活かし、また密着強度も強靭な表面処理方法の研究調査を行った。具体的には、下記の三項目について、その特性調査・試験を行った。

- ①ダブルワイヤ（以下DWと記す）方式MIG溶接機の研究調査
 - ②交流パルスMIG溶接機の研究調査
 - ③摩擦による表面処理の研究調査
- それぞれについての技術説明と、試験内容、試験結果、考察等を、以下順次報告する。

2 ダブルワイヤ方式MIG溶接機の研究調査

2.1 技術説明

DW方式MIG溶接機は、従来の1本溶接ワイヤ使用のMIG溶接機に更にもう1本溶接ワイヤを使用するMIG溶接機であり、低融点材料のアルミ用に開発された装置である。

このDW方式MIG溶接機を鋼材の溶接へ応用し、溶接速度の向上や従来と同じ溶接入熱で溶着量を増加させる目的で、1999年から実用化が進められている。一般的に使用されているシングルMIG溶接機に比べて、一般のSC材では同一溶接量を30%ほど少ない入熱量で実施できることが確認されている。²⁾³⁾⁴⁾

Fig.1にDW方式のシステム概要を示す。

電極ワイヤで通常溶融させ、もう1本のフィラワイヤを溶融池に供給する方法である。

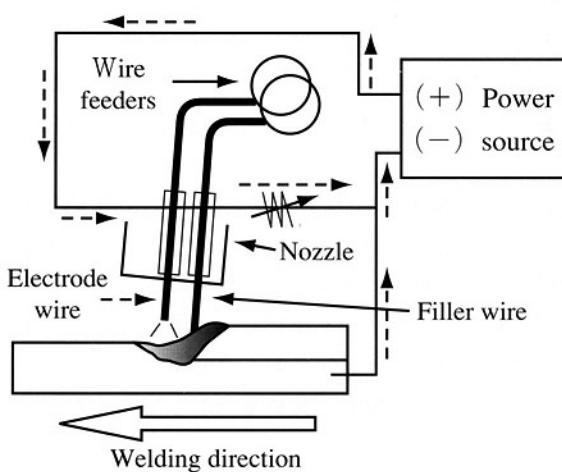


Fig.1 Configuration of DW system

このDW方式の特徴は、メインの電極ワイヤから母材側へ電流が流れるが、もう1本のフィラワイヤには母材側からの逆流の電流が流れる。そのため、溶接時の入熱量を一般の1本ワイヤ方式に比べ30~40%低く抑えることができる。

耐食材料についても同様の入熱量削減効果が期待できるが、DW方式MIG溶接機を用いた耐食材料の溶接には前例が無い。そこで、DW方式MIG溶接機を用いた耐食材料の溶接ビード形成の可否と入熱量削減効果の確認のため、以下に示す試験を行った。

2.2 試験内容と結果

開発段階の鋼材用DW方式MIG溶接機にて試験を実施した。Fig.2に試験に使用した装置の外観写真を示す。

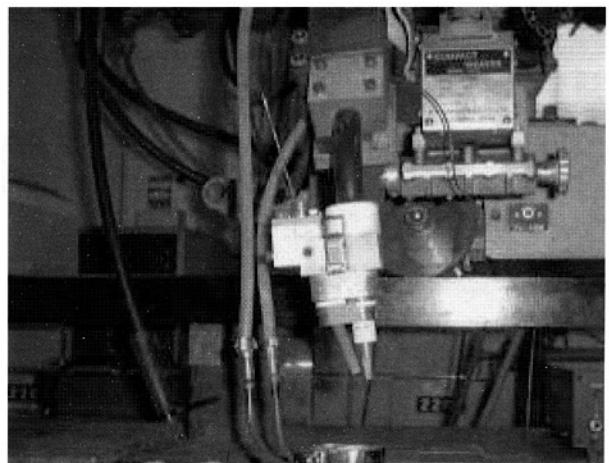


Fig.2 DW MIG Welding equipment DW MIG welding

耐食性溶接材料としては、一般的に用いられているインコネル625を用いた。

溶接条件をTable 1に示す。1.0mm φのインコネル625ワイヤを、メインとフィラワイヤの両方に使用した。

Table 1 DW welding conditions of alloy 625

No.	Shield gas		Welding wire	Welding conditions				
	Type	Flux (L/min)		Pulsation	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Filler feed (g/min)
1	100% Ar	20	Alloy 625	Yes	140	25	250	4.8
2	×	×	×	×	×	×	×	16.7

Fig.3に実験で行った溶接部の状況写真を示す。結果は、現状のDW装置では安定した溶接ビードが得られなかった。溶接部のビード形状変化が大きく、完全に溶けきれていないワイヤが飛散しているのが分かる。

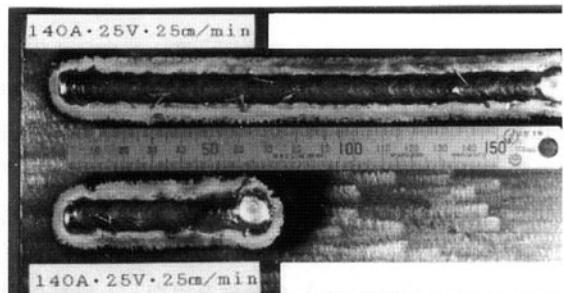


Fig.3 Welding bead of DW MIG welding

2.3 考察および今後の取り組み

Fig.4に示すようにメインワイヤである電極ワイヤは電流が母材側に流れ、溶接対象の母材に溶融池を形成する。その溶融池中にフィラワイヤを挿入しながら溶接は進行するが、フィラワイヤ側に母材側から電極ワイヤとは逆の電流が流れている。その結果として、入熱量の削減を期待した。

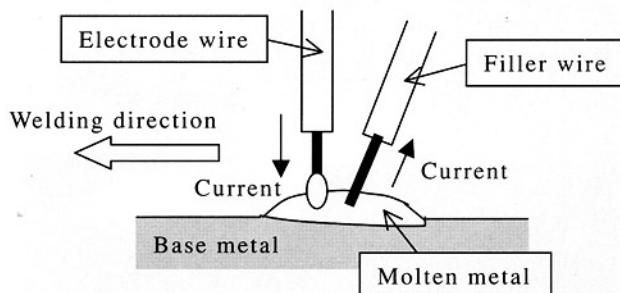


Fig.4 Outline of DW MIG welding

しかし、インコネル625はNi元素を60%程度含有するオーステナイト系であることから、フィラワイヤが溶融池に到達する前に、断続的に溶融・飛散し、良好なビードを得られないことが確認できた。原因は、現状の装置ではフィラ側の戻り電流がフィラ突き出し部（溶融池表面～戻り電流給電点の間）での電気抵抗に左右され、オーステナイト系合金の場合、炭素鋼と比較して電気抵抗が大きく、フィラ突き出し部の温度変化に応じて戻り電流が不安定に変化したためであると考えられる。そのため溶融池に安定してフィラワイヤが挿入されない結果となった。現状の装置制御では、フィラワイヤへ流れる電流制御が十分にできなかったため、インコネル625の適用は難しい。

今年度より、今回の結果を元にフィラワイヤの電流制御を加えたDW溶接機を開発する意向であることを確認した。その装置開発を待って、改めてインコネル625での溶接表面処理実験を行い、溶接ビード形成の確認と入熱量削減効果の確認を実施する予定である。

3 交流パルスMIG溶接機の研究調査

3.1 技術説明

通常使用される直流パルス溶接は、深い溶け込みが得られる棒プラス（E P = Electrode Positive）の極性が用いられる。しかし、アルミ板のように低融点材料や2mm以下の薄肉板などの溶接を行う場合は、母材への入熱が大きくなりすぎるため入熱量を抑制する必要がある。交流パルスMIG溶接機は、ベース電流出力時に棒マイナス（E N = Electrode Negative）の極性を出力し、母材への溶け込みを浅く（入熱制御）しながらワイヤ溶融量を確保することができるよう開発された溶接機である。Fig.5に直流パルスMIGと交流パルスMIGの概要を示す。

電流パターンは、交流パルスMIGでは電極プラスと電極マイナスのサイクルを細かく制御でき、また周波数も変更できることから希釈率制御の可能性が高いことが確認できた。

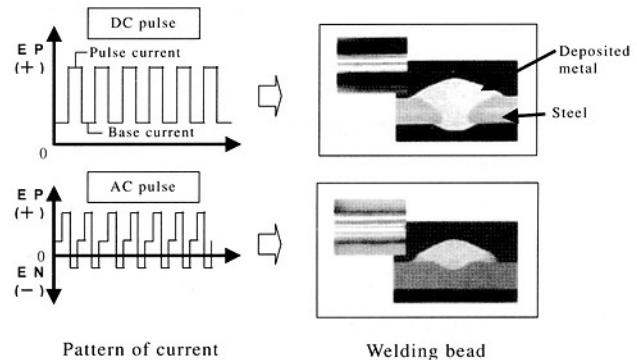


Fig.5 DC and AC-pulsed Properties of welding

耐食材料についても同様の希釈率制御が期待できるが、前例が無い。そこで、交流パルスMIG溶接機を用いた耐食材料の溶接ビード形成の可否と希釈率制御の確認のため、以下に示す試験を行った。

3.2 試験内容と結果

まず、希釈率制御の確認を行うため、溶接機メーカーより直流パルスMIG溶接機と、アルミ用の溶接機として平成12年に開発発売された交流パルスMIG溶接機で試験を行った。耐食性溶接材料にはインコネル625(1.2mm φ)を使用した。

直流パルスMIG溶接機と交流パルスMIG溶接機にて、同一溶接条件とそれぞれの溶接機に合った母材溶け込み最適条件で溶接を行い、溶接完了試験片の溶接部を切断して溶け込み状況（希釈率）を確認した。溶接による溶け込みは、単ビードのウェーピング無しで比較した。

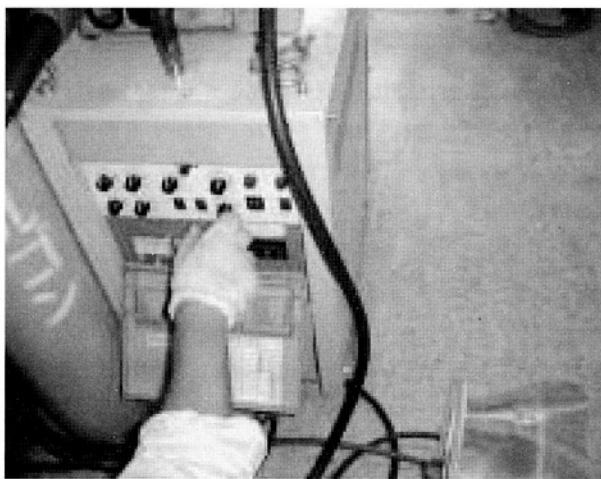
Fig.6に交流パルスMIG溶接機電源部と溶接試験状況の写真を示す。

希釈率の測定方法は、表面処理材料の耐食性や耐摩耗性などの目的で含有するCr、Ni、Moなどの特殊元素の含有重量変化率を表したものである。例えば、インコネル625の場合は、Cr、Ni、Mo元素の溶接ワイヤの含有する重量率に対する溶接後のFig.7に示す溶接ビード部のCr、Ni、Mo元素の含有重量変化率である。

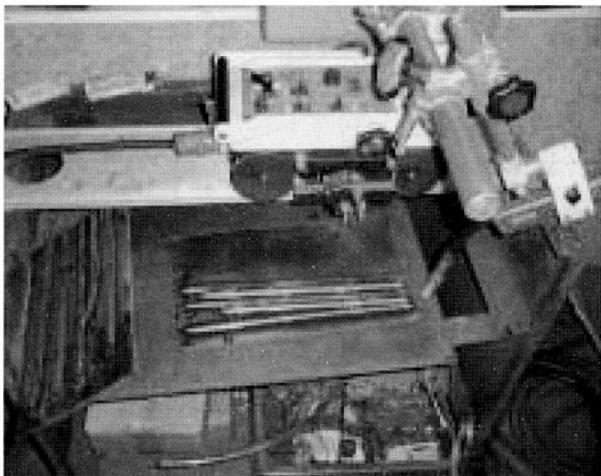
希釈率は、Fig.7に示す溶接対象母材の溶け込み深さと相關がある。そこで、まず溶接後の溶け込み深さを確認した。

Table 2に溶接条件と溶接後の溶け込み深さの結果について示す。

従来型の直流パルスMIGで溶接した場合、電流100A、電圧20.5V、溶接速度300mm/minでは、溶接ビード幅は4.5mmと小さく、また溶け込み深さが0.9mmに対して、交流パルスMIGの同一条件で溶接した結果はビード幅が



Power source of AC-pulsed arc welding



Appearance of welding part

Fig.6 Appearances of testing (AC-pulsed arc welding)

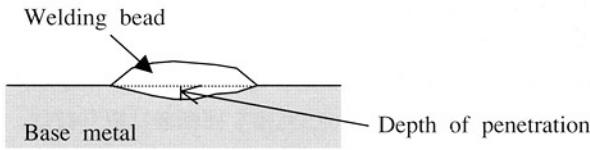


Fig.7 Welding bead

Table 2 Welding parameters and penetration depth

No.	Welding machine	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Width of welding bead (mm)	Welding thickness (mm)	MAX depth of penetration (mm)
1	AC pulse MIG	100	19~20	300	5	3.2	0.2~0.3
2		120	21	300	7	2.6	0.5
3		160	22	600	7.5	2.6	0.4
4	DC pulse MIG	100	20.5	300	4.5	2.7	0.9
5		120	21	300	7	3.3	1.5
6		160	22	600	6	2	1.4

5mmと若干広く、溶け込み深さは0.2~0.3mmと非常に浅いことが確認できた。すなわち、同じ溶接ビード形状で溶け込み深さの抑制が可能であり、希釈率の大幅低減ができることが分かった。

溶接電流を120A、160Aまで上げたがいずれの溶け込み深さも0.5mm以下と小さく、それぞれ直流パルスMIGよりも浅いことが確認できた。参考までに1.0mm ϕ の軟鋼溶接ワイヤでも溶け込み確認を行ったが、この場合も溶け込み深さは小さい結果となった。

交流パルスMIG溶接機による溶接は、直流MIG溶接機に比較して溶け込み深さを極端に小さく抑制できることが分かる。

Fig.8に電流120A、電圧21V、溶接速度300mm/minでの溶接断面写真を示す。交流パルスMIG溶接の方は溶け込み深さが殆どないことが分かる。

本実験では、溶接時のウェービング処理を実施しなかつたが、事業化への展開ではウェービングをしながらの溶接が必要であることから、交流パルスMIG溶接装置をお借りして、ウェービング処理を実施した場合の、希釈率確認試験を実施した。

Table 3にその結果を示す。

この結果からもウェービング機能を持たせた交流パルスMIG溶接機による溶け込み深さの小さい施工の可能性が高いことが確認できた。

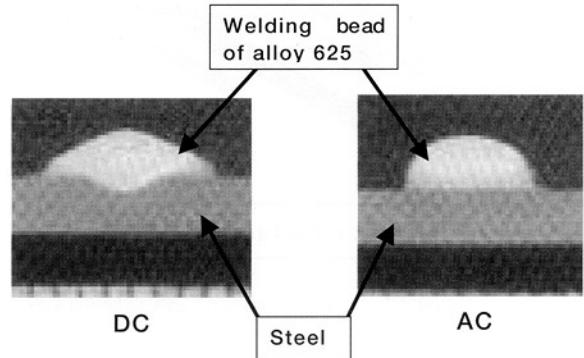
Fig.8 Weld sections of DC & AC-pulsed arc welding
(Current 120A, Voltage 21V, Welding speed 300mm/min)

Table 3 Results of AC-pulsed MIG arc welding

No.	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Width of weaving (mm)	Width of welding bead (mm)	Welding thickness (mm)	Appearance	Depth of penetration (mm)
1	100	18	200	12.5	15	2.5	△	0.2~0.4
2	135	20	200	17	20	2.3,2.0	○	M0.8,A0.4
3	140	22	200	17	21	2.2,1.7	○	M0.8,A0.5
4	130	22	200	16	17	3	○	0.2~0.4
5	145	25	200	17	21	2.5	○	M0.9,A0.2
6	132.5	23	200	17	20	2.5	○	M0.8,A0.2

M:Maximum
A:Average

3.3 考察および今後の取り組み

単ビードの溶接テストにより、交流パルスMIGの方が直流パルスMIGよりも、希釈率を低く抑えられることが判明した。また、ウェーピング処理においても、その効果を確認する事ができた。

今回の溶接施工は下向きで行ったが、今後はボイラ内での現地施工を想定し、溶接姿勢として立向きや上向きの溶接施工の研究が必要である。また、プラントメーカーからの許容希釈率条件はさらに厳しくなっており、この調査にとどまらず溶接条件の選定を実施する必要がある。

4 摩擦により表面処理の研究調査

4.1 技術説明

摩擦による表面処理（＝摩擦肉盛）とは、棒状の表面処理材料を回転させ、一定圧力で表面処理しようとする対象材料に押し付け、移動することによって一定肉厚の表面処理を行う方法である。接合形態は、母材と表面処理材との拡散接合であり、表面処理しようとする対象材料を溶かさずに摩擦を使って肉盛る方法である。Fig.9に摩擦肉盛法の略図を示す。⁵⁾⁶⁾

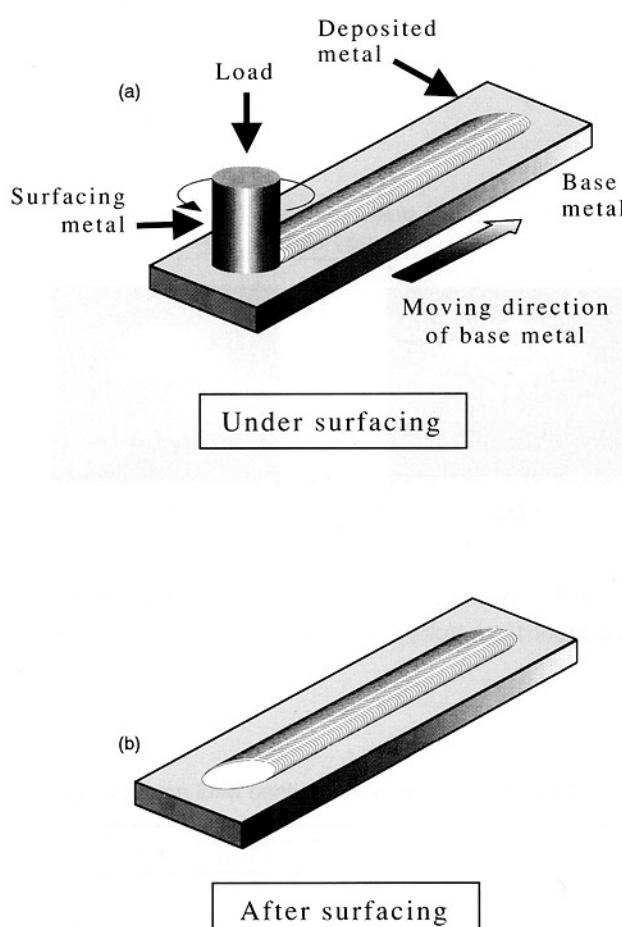


Fig.9 Outline of friction surfacing

棒状の肉盛材を一定の速度で回転させ、軸方向に圧力をかけて基材に押し付ける (Fig.9(a))。回転している肉盛材と基材との界面に摩擦熱が発生し、十分に肉盛材の温度が上がった時点で基材を移動させる。回転する肉盛材は融点に近い温度に達し、基材に塑的に圧着する。基材、肉盛材の熱伝導率、熱容量に差があるため、最高温度は界面から少し肉盛材の側に寄った点で得られる。ここで肉盛材がせん断し、基材側に移動する。このプロセスは固相のままの加工であり、溶融はしない。このため基材の成分が肉盛材に溶け込んで材質が変わることがなく、高温で割れる心配もない。また溶射と違って多孔質になることがなく、高い強度が得られる。⁵⁾⁶⁾ 摩擦肉盛法での最も基本的な応用は、基材の耐摩耗性・耐食性・耐高温性などの向上のための保護皮膜形成であり、Fig.10のような適用例の可能性があることが確認できた。⁵⁾⁶⁾

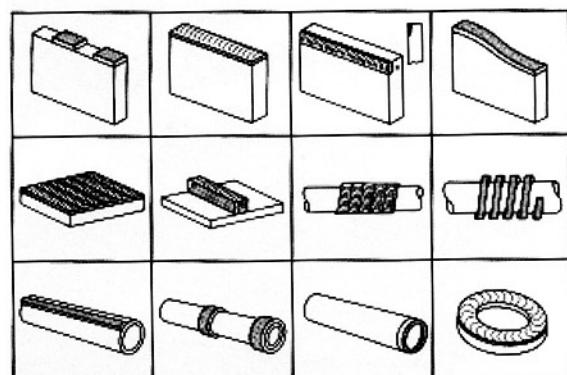


Fig.10 Promising example of friction surfacing

耐食材料についても同様の希釈率低減が期待できるが、前例が無い。そこで、耐食材料の摩擦肉盛の可否と希釈率低減確認のため、以下に示す試験を行った。

4.2 試験内容と結果

Fig.11に試験に使わせていただいた摩擦圧接機の仕様と外観写真を示す。

表面処理材料は、インコネル625 20mm $\phi \times 150\text{mm}$ の丸棒を用いた。インコネル625丸棒を回転部に取り付け、回転させながら 10mm 厚さのSS400に所定の圧力で表面に押し付け、さらにSS400を移動してインコネル625を肉盛した。

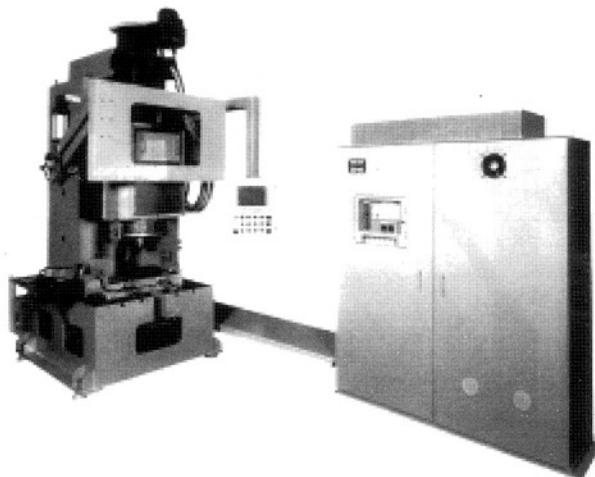
Fig.12に摩擦による表面処理状況写真を示す。

まず、インコネル625丸棒を今回の試験では、400～800rpmの回転数でSS400平板に接触させ、丸棒とSS鋼材の接触部が十分に過熱した時点でSS鋼材を移動させる。その後、回転している棒材とSS鋼材との界面に発生する定常的な摩擦熱によって棒材を塑的に圧着させ、SS鋼材上に安定した肉盛層を形成した。

Table 4に試験条件と肉盛部外観結果を示す。

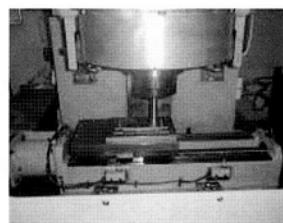
Full automatic friction pressure welding machine

Model: ACM-1

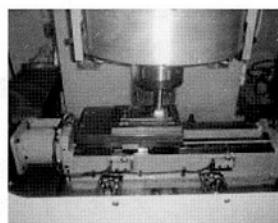


The maximum thrust 98.06KN
Revolving speed of main shaft
100~4000rpm

Fig.11 Appearance of friction surfacing machine
(SINODA laboratory in NAGOYA University)



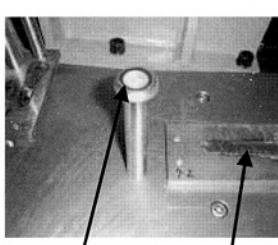
Rotation of alloy 625→
Pushing against base metal



Under friction surfacing



End of surfacing



Contact part with base metal

Fig.12 Appearance of friction surfacing examination

Table 4 Testing parameters of friction surfacing,
and appearance of processed surface

No	Rotating speed (rpm)	Moving speed of base metal (mm/sec)	Forcing pressure (Mpa)	Appearance of surfacing
1	800	1.0	20→40	Excessive holding time → Interruption
2	600	1.0	20→40	Uneven
3	600	0.5	20→40	Uneven
4	400	0.5	20→40	Uneven
5	400	1.0	20→40	Good
6	400	1.5	30→60	Slightly irregular
7	400	2.0	30→60	Good

インコネル625丸棒の回転数は400rpmが良好の結果となった。移動速度が1.0mm/secの低速では、押し付け圧力が20~40MPaの低圧が良好な外観結果を示し、2.0mm/secの高速側では押し付け圧力も30~60Mpaの高圧側が良好であった。

Fig.13に摩擦肉盛部外観の良好な試験No.5、6、7について肉盛部外観と切断面部カラーチェック写真を示す。

No	Friction surfacing bead	Result of penetrant testing
5		
6		
7		

Fig.13 Appearance and section of friction surfacing bead

Table 5に試料No.5~7の肉盛部断面の肉盛幅、肉盛厚および接合幅を示す。Fig.14には肉盛部と母材接合幅測定位置を示す。

No.5は、肉盛断面確認結果で、母材と肉盛り部の間に一面未接合部があり、接合が不十分であった。No.7は接合幅が10mm以上であり、摩擦による連続重ねを行うことによって未接合部低減の可能性は高いと判断する。また、接合面の溶け込みは全くなく、また希釈率はほぼ0%であることも確認できた。

Table 5 Sectional dimensions of friction surfacing

No	Bead width (mm)	Thickness (mm)	Width of joined part (mm)
5	11.5	1.65	0
6	15.0	1.61	9
7	16.0	1.45	10

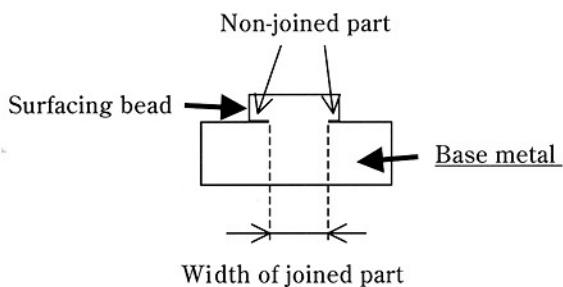


Fig.14 Junction width measurement position

4.3 考察および今後の取り組み

摩擦肉盛法でのインコネル625の肉盛に成功した。ただし、最も接合幅が大きな条件でも、ビード幅に対して約35%が未接合部であり、今後さらに肉盛条件の選定を行う必要がある。

接合部の溶け込みはほぼ存在せず、希釈率も0%である事が確認出来た。

作業性では、接合面のバリ生成によるロスが約50%であることから、事業化に向けては、このバリ低減方法や表面肉盛材料の連続供給方法など解決すべき課題が多くある。

5 まとめ

①DW方式MIG溶接機

初めて、この装置でのインコネル625肉盛を実施したが、フィラワイヤの電流制御が現状の装置では困難であったため、健全なビード形状を得ることができなかった。フィラワイヤの電流制御装置の開発を待ち、新たに試験を実施したい。

②交流パルスMIG溶接機

この装置で初めてインコネル625肉盛を実施し、低希釈率で肉盛りできることが確認できた。希釈率の面で、対象とするボイラ関連の表面処理法として十分に検討でき、今後さらに溶接条件を選定していきたい。

③摩擦による表面処理

肉盛棒として、初めてインコネル625を採用して試験を行い、SS鋼材表面に肉盛りできることが確認できた。しかし、品質の面では接合幅に問題を残している。また、作業性の面ではバリ発生の抑制・肉盛棒の連続供給などの問題がある。

摩擦肉盛法は、将来的にも非常に大きな効果をもたらすことが期待でき、今後とも名古屋大学に協力を仰ぎ、肉盛テストを実施したい。

6 総括

表面処理材料の性能を100%活かし、また密着強度も強靭な表面処理方法の探索のため、3方法について研究調査を行った結果、交流パルスMIG溶接法・摩擦肉盛法の2つについては、希釈率の面で良好な結果を得ることができた。さらに、事業化に結び付けられるよう、詳細の条件選定を実施していきたい。DW方式MIG溶接法についても、現状装置の問題提起ができたので、今後の調査を進めたい。

参考文献

- 1) 川原雄三・折田寛彦・高橋和義・中川裕二, 高効率廃棄物発電ボイラ用新耐食合金管の実証試験, 鉄と鋼 Vol. 87 No. 8, 2001
- 2) 宮内秀樹・中田実雄・篠田剛, ダブルワイヤ溶接法の鋼溶接への適用 (1)
- 3) 高野悠敬・山本光・高谷透・瀬山泰洋・中田実雄・宮内秀樹, ダブルワイヤ溶接法の鋼溶接への適用 (2)
- 4) 池上祐一・中田実雄・宮内秀樹・篠田剛・山本光, ダブルワイヤ溶接法の鋼溶接への適用 (3)
- 5) 篠田剛ら, 摩擦肉盛法による表面硬化層の形成に関する研究, 溶接学会論文集 Vol. 13 No.3 p.432, 1995
- 6) 篠田剛・李錦旗, 摩擦肉盛法による表面改質研究の現状, 溶接学会誌 Vol. 66 No. 6 p.441, 1997

新 製 品	新 技 術
-------	-------

ボトムアッシュ選別装置

1 はじめに

国内で発生する年間約5,000万tの都市ごみは、その約75%が焼却され、埋立処分されている。また、新ダイオキシンガイドライン・リサイクル法の制定に見られるように、「環境負荷の低減」「リサイクル」の視点で、従来の焼却の反省・見直しも含め「質的な転換」が求められていると同時に、現在、廃棄物の焼却処理は最終処分場の残存容量が減少してきており、社会的問題としてリサイクル技術の促進が急務となっている。

当社においても、メンテナンス・工事等でお付合いを頂いている東洋ゴム工業(株)殿より、廃棄タイヤにおけるボイラ燃焼後のボトムアッシュリサイクルについての相談があった。東洋ゴム工業(株)殿のボイラは、ストーカ型ボイラであり、石炭の他に廃棄タイヤを切片とした物も燃焼させている。燃焼された後はタイヤ内の金属ワイヤと石炭灰の塊となり、ボトムアッシュとして排出される。ボトムアッシュ中の金属ワイヤを取り除き、塊を粒にできれば、金

属ワイヤは鉄源へ、残滓は土壌改良剤へ再利用できる事となる。

そこで、塊を粒にするクラッシャの検討・テストを行ない、連続運転及び処理量・粒度の問題よりロールクラッシャによる破碎装置を採用することにした。また、金属ワイヤの分別方法としては磁気による分別を選択し、各種磁気選別機をテストした結果、連続運転及び分別能力の問題よりドラム型磁選機を採用することにした。

下記に、その装置の概要を紹介する。

2 装置の概要と仕様

本装置は、投入ホッパ・定量切出装置・クラッシャ・ベルトコンベア・電磁フィーダ・磁気選別機・非磁性物コンベアより構成されている。[図-1]に装置の全体図を示す。

投入ホッパへボトムアッシュを投入すると、定量切出装置により一定量をクラッシャに供給し、クラッシャにて灰

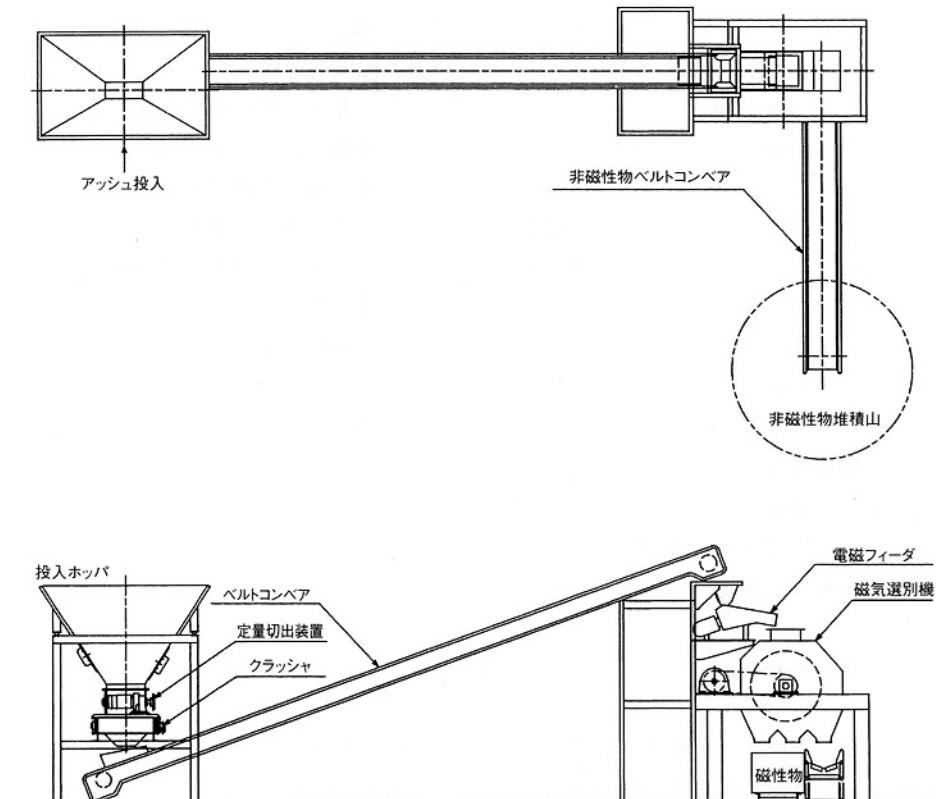


図-1 ボトムアッシュ選別装置全体図

塊は一定粒以下に碎かれ、ベルトコンベアに投下され、電磁フィーダへ供給される。電磁フィーダは振動機能により更に定量を磁気選別機に供給する。磁気選別機では、マグネットと回転ドラムの作用により、供給された粒状ボトムアッシュを磁性物と非磁性物とに分離して、非磁性物は非磁性物コンベアへ投下され、非磁性物堆積山へ搬出される。また、磁性物は、磁性物ボックスへ投下される。

(A) 投入ホッパ

投入ホッパは、ボトムアッシュが付着しない勾配をもったシートが架台内に挿入される構造となっている。また、ボトムアッシュ排出時における排出口での詰まりを防止する為に、ホッパシート側面にバイブレータを備え付けた。

ホッパ容量 0.95m^2

バイブルーティ 振動モータ型 (2台)

(B) 定量切出装置

定量切出装置は、ボックス形フレーム内に4枚のペーンをもったロータが備えられている。クラッシャへ供給するボトムアッシュ量を調整は、ロータを駆動するモータのインバータ周波数を設定変更する事により調整できる構造としている。

最大処理能力 $10\text{m}^3/\text{hr}$

ロータ変速機構 インバータ制御

(C) クラッシャ

クラッシャは、ボックス形フレーム内に2本のロールが備えられている。ロールの表面には硬い突起物が植え付けられており、ロール間にボトムアッシュを挟み込んで碎いて行く構造としている。

最大処理能力 $5.5\text{m}^3/\text{hr}$

ロール外径 $\Phi 166$

(D) ベルトコンベア

クラッシャにて破碎されたボトムアッシュを磁気選別機へ投入する電磁フィーダまで搬送する物であり、市販購入品を使用している。

最大運搬能力 $21\text{m}^3/\text{hr}$

ベルト幅 350mm

(E) 電磁フィーダ

電磁フィーダは、振動機能により粉粒体を均一に輸送供給する物であり、破碎されたボトムアッシュは、設定量を安定して磁気選別機へ供給する事ができる。供給量の設定変更は、電磁フィーダコントローラの調整で行なえる。

最大供給能力 $8 \text{ m}^3/\text{hr}$

(F) 磁気選別機

磁気選別機は、上部投入口より破碎ボトムアッシュを定量投入すると、ドラム型磁選機の磁気力により磁性体と非磁性体とに分別されて、2つの下部排出シートより分離されて排出される。

最大供給能力 $10\text{m}^3/\text{hr}$

(G) 非磁性物コンベア

磁気選別機によって分別されたボトムアッシュ中の非磁性物を、非磁性物堆積山へ排出・運搬するものであり、市販購入品を使用している。

最大運搬能力 $21\text{m}^3/\text{hr}$

ベルト幅 350mm

3 装置の特徴

今回のボトムアッシュは、金属ワイヤと石炭灰が水分を含んだ塊となっているため付着性が強く、また、外部からの異物混入も考えられる事より、各所にその対策を折り込んだ。

(A) クラッシャ

採用したクラッシャは、連続運転及び処理量・粒度の問題よりロールクラッシャによる破碎装置を選択した。ロールクラッシャは、ロール間での挾圧破碎が主機能であるが、今回のボトムアッシュは金属ワイヤが溶着混在している事が想定でき、挾圧と共に剪断機能を付加する為にロール間に回転差を与えていた。また、滑り・摩耗に対する対策として、高硬度突起物をロール表面に植え付けている。さらに、ボトムアッシュが付着性が強く、ロール表面突起物間に埋め込んでしまったり、フレームに付着堆積して行きロールの摩耗進行を早めてゆくので、エアーブロによる付着除去機能を付加している。

[図-2] にクラッシャの構造を示す。

(B) 磁気選別機

II-(F) 項に記載したように、内部に永久磁石を持ったドラムの表面にボトムアッシュを投入し、永久磁石の磁気力で磁性体と非磁性体とを分別するものである。また、ボトムアッシュがステンレスドラム表面に付着すると分別能力が格段に低下してしまう為、常時ステンレスドラム表面を清浄にしておく必要があり、ノズルによる常時エア噴射機構を付加している。

[図-3] に磁気選別機の構造を示す。

4 おわりに

以上説明してきた様に、ストーカ型ボイラで燃焼した後発生したボトムアッシュは、今まで廃棄物として処理してきたが、本装置を導入する事によりリサイクルする事に成功した事例であります。現在、東洋ゴム工業(株)仙台工場においてその性能を充分に発揮して稼働中であり、東洋ゴム工業(株)殿と弊社との共同特許出願中であります。

同種の設備等をお使いのお客様がいらっしゃいましたら、御要望に応じた設計・製作が可能でありますので、是非ご一報ください様お願い致します。

最後に、本装置の開発に当たって数多くの御協力を頂きました東洋ゴム工業(株)殿には、厚くお礼申し上げます。

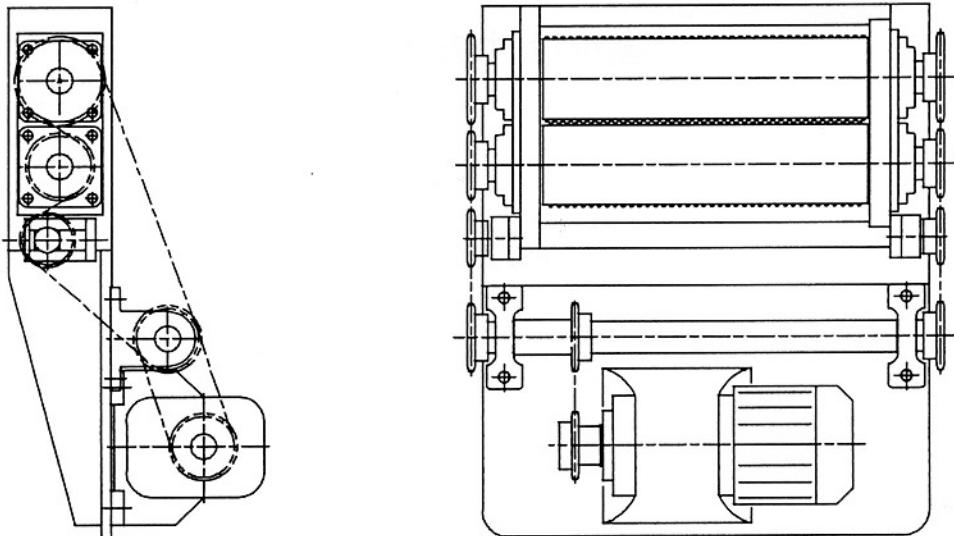


図-2 クラッシャ構造図

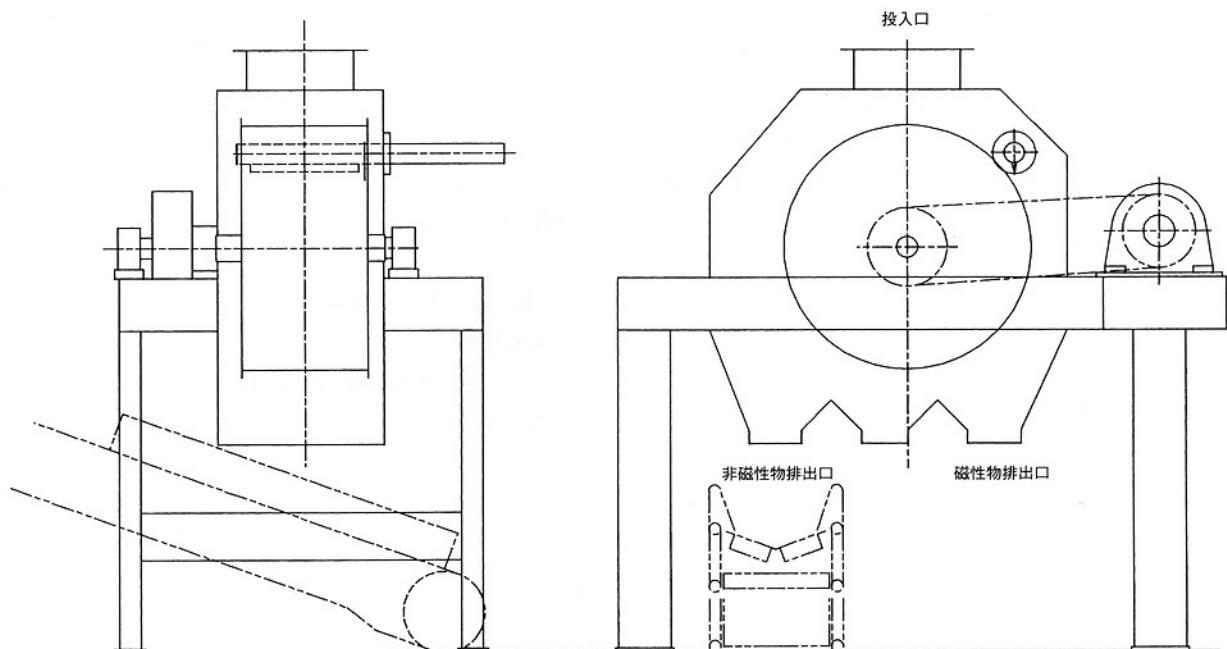


図-3 磁気選別機構造図

[問い合わせ先]—

技術開発センター

Tel. 0223(24)2450 寺村 敏一

Fax. 0223(29)2084

高精度寸法ライナ

1 緒言

弊社は、耐摩耗性を必要とする部分へのライナ製品を製造し、これらのライナは鉄鋼メーカーを中心に広く用いられている。

ライナ製品は、環境などの使用条件に応じて選ばれるが、大きく分けて高硬度の溶材を溶接する溶接ライナ、耐衝撃性を加味した鋼材に高硬度材料を鋳かけした厚肉製品（当社商品名ESTライナ）、耐摩耗特性の優れた材料を溶射したライナがある。

水などの流体物を搬送する管内にもライナが使用される場合があるが、特に土砂を含む流動物の搬送には、耐摩耗性が要求されることが多い。

このような管内を通過する土砂などを含む流動物の進行方向をコントロールするための弁を管内に使用する際、弁と管内に使用するライナ内面との隙間の公差が非常に狭く設定される場合が多い。

そこで、当社が行っているライナ製品の中で、水力発電用に使用され、弁との寸法公差が0.15mm以下である高精度寸法ライナ（シートライナ）を例にライナ製造技術について紹介する。

2 高精度寸法ライナの選定方法

2.1 摩耗性能について

(A) 材質選定

①キャビテーション・エロージョン性

ライナ部品の耐キャビテーション・エロージョン材料の選定は、耐摩耗に有効と言われている高硬度かつ加工硬化性も加味して検討される。表-1に各材料の代表的な性質

と耐用比較を示す。水力発電用のシートライナは、SUS304とSUS410がそのまま表面処理なしで使用される場合も多いが、キャビテーションの蒸気泡崩壊に伴う衝撃圧により材料表面が加工硬化するため硬さの低いSUS304がSUS410と耐キャビテーションにおいて同等の耐用を示す傾向が見られる。しかし、最近ではCo系材料を表面処理したライナの使用例も増加傾向にある。その理由として、各地の水力発電機器実地調査報告^(※1)によれば、この材料の表面処理膜の加工硬化により、SUS410の2~6倍の耐用を示すことが知られている。

まず、材料硬さ、加工硬化能および製品の安定性を考慮して、ライナの使用環境に適した材料を選定する。

②矯正

自溶合金溶射法での製作では、フュージング処理や加工中に大きな歪が発生した場合、矯正できないという問題がある。現状の施工法および加工法では、このような歪を制御することが困難な場合もある。そこで、キャビテーション・エロージョン性を考慮した上で歪矯正可能な延性特性の高いCo系No.2を選定することも多い。

(B) 施工方法の選定

①密着強度

フュージング処理を行う自溶性合金溶射法と肉盛溶接法の比較例を表-2に示す。肉盛溶接法は、自溶性合金溶射法と同様に高い密着強度を示す。剥離強度が特に必要とする場合は、肉盛溶接法を採用する場合も多い。

表-1 各材料の代表的な性質と耐用比較

種類	化学成分 (wt%)							硬さ HCR	加工硬化能	耐用比 1 ^{※1}	耐用比 2 ^{※2}
	Ni	Co	Cr	Mo	W	Fe	C				
SUS410	—	—	13	—	—	Bal.	<0.15	<11	×	1	
SUS304	8	—	18	—	—	Bal.	<0.08	<11	○	1	1
Co系 No.1	<3	Bal.	28		4	<3	1	35 ~ 42	○	6	1.9
Co系 No.2	<2.5	Bal.	27	5	—	<3	0.25	25 ~ 30	○~○	>2 ^{※3}	5.2
Ni基 自溶性合金	Bal.	<1	15	—	—	<5	0.75	B,Si 有 60 ~ 65	△	>6 ^{※3}	31(SFNi4)

※ 1…1956年ASME年次大会 キャビテーションシンポジウム報告より(各地の水力発電機器実地調査結果)。

※ 2…弊社、エンドレスエメリ摩耗試験結果より。

※ 3…Co系No.2,Ni基自溶性合金の耐用性は、硬さ、加工硬化能、※1より推量した。

表-2 自溶性合金溶射法と肉盛溶接法の比較例

項目	自溶性合金溶射法 (フュージング処理)	肉盛溶接法
母材への溶け込み	拡散層 50μ	最良施工→500μ
密着強度	200MPa	同左+α

3 製作方法について

3.1 製作手順、加工方法

高精度寸法ライナの標準的な製作手順および加工方法を図-1に示す。ワイヤカットおよびNC加工は、マシニング制御にて行う事が多い。マシニングによる加工精度には、一般的に0.01mm程度の許容値が設けられる。NC加工で使用したマシニング制御装置の測定精度の一例を表-3に示す。

3.2 熱処理方法

表面処理実施後、残留応力除去などの目的で、表-4に

示すような熱処理を施す。

3.3 矯正方法

溶接後および加工後に発生した歪が、製作工程や完工製品に支障をきたす場合は、シートライナに銅板をはさみ油圧プレス機を用いて矯正する。矯正時に剥離やクラック発生させない施工方法と表面材料の選定が重要である。

3.4 寸法検査

各検査位置の寸法検査を行うが、その検査方法をシートライナを例に図-2に示す。各加工工程での検査は、隙間ゲージで加工による歪のみを測定する。穴加工後に寸法公差の上限と下限の限界ゲージを製作し、最終検査を行う。最終検査で用いる限界ゲージは、NCフライス盤で製作し、3次元測定を行う。

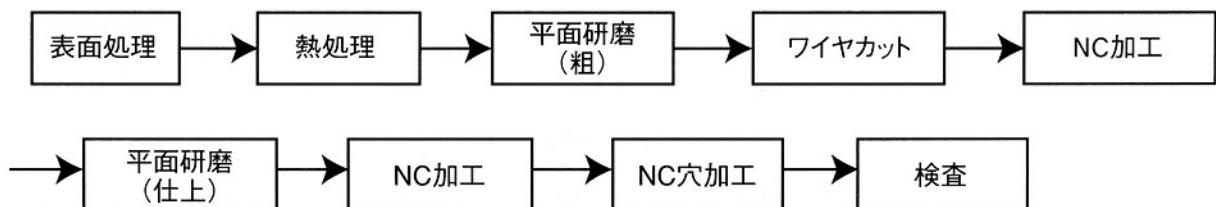


図-1 製作手順および加工方法

表-3 マシニング制御装置測定精度の一例

検査装置	許容値	測定値		
		X軸	Y軸	Z軸
レーザ 測定機		0.0031	0.003	0.0068

※製造元:ワイヤカット…ファンック、NCフライス盤…牧野精機

シニング制御装置…ワイヤカット、NCフライス盤共にファンック

表-4 Co系の熱処理条件

熱処理方法	昇温(加熱)	保持	降温(冷却)
SR	2°C/min	600°C×240min	炉冷

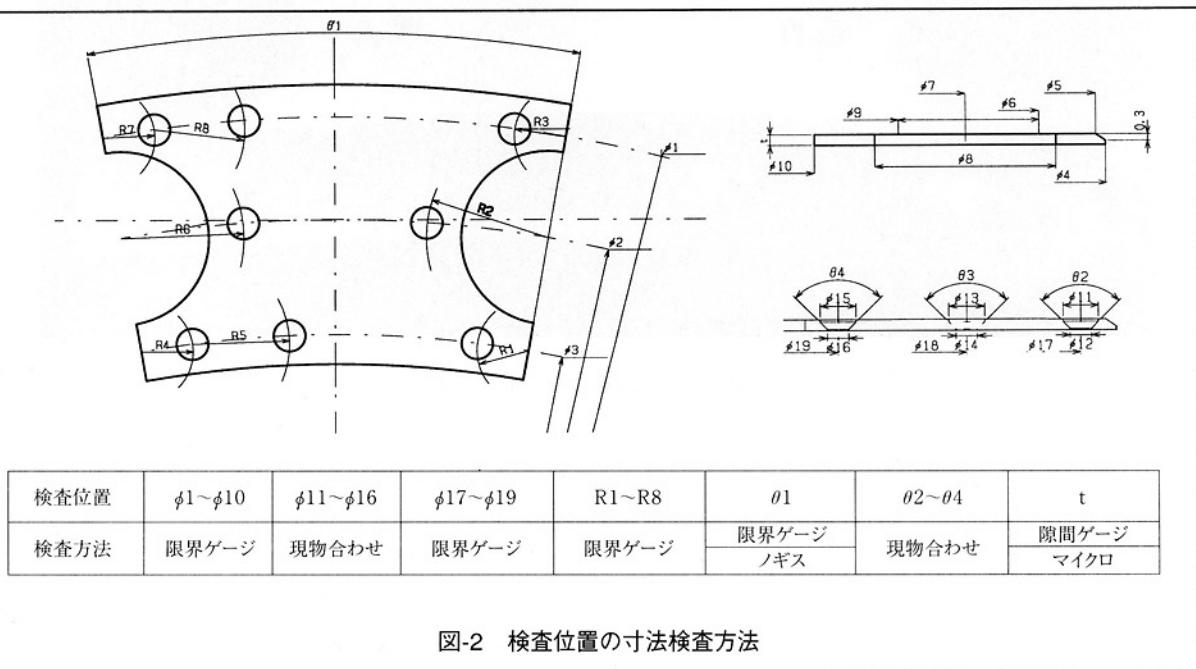


図-2 検査位置の寸法検査方法

3.5 品質検査

代表的な品質検査方法を下記に示す。

- ・硬度検査…平面研磨(粗)の工程後に、エコーチップにて測定を行う。
- ・浸透探傷検査…肉盛溶接後と穴加工後に検査を行う。
- ・超音波探傷検査…穴加工後に検査を行う。

4 ライナ取付方法について

4.1 コーキング衝撃に対する割れの発生について

ライナの取り付けには、ネジ部の頭部分をハンマリングによってつぶすコーキング処理が行われる場合がある。

フュージング処理自溶性合金溶射品、Co系No.2肉盛品共にコーキング処理の衝撃で割れが発生しないことを確認している。各材料の機械的性質を表-5に示す。

図-3に水力発電用シートライナの実製品を参考までに示す。

5 製作管理

5.1 全数製作時の歪範囲

全数製作時の歪の管理方法については、お客様と協議打合せし決定する。

6 結言

耐摩耗性を必要とする部位に使用されるライナは、使用環境によっては耐食性や耐熱性を加味する必要性のある場合も多い。しかも、使用される場所によっては寸法精度が厳しく要求されることもあるので、総合的に検討しなければならない。

当社は、鋳かけ・溶接・溶射を総合的に行い、適材適所の材料選定から施工技術を駆使した高精度寸法ライナの製造方法技術や品質管理技術を有している。

このように弊社はお客様のご満足いただける総合ハードフェーシングメーカーとして展開できます。

表-5 各材料の機械的性質の1例

	引張強さ(MPa)	0.2%耐力(MPa)	伸び(%)	衝撃値J/cm ²
SUS304	520	205	40	—
SUS410	540	345	25	98
Ni基自溶性合金	314	—	—	—
Co系No.1	896	541	1	0.46
Co系No.2	694	494	9	2.33



図-3 水力発電用シートライナ

[問い合わせ先]

技術開発センター

Tel. 093(871)0761 古田 博昭

Fax. 093(882)0522

新 製 品

新 技 術

現地施工用高速フレーム溶射自動トラバース装置

1 緒言

近年、ごみ焼却プラントや発電所などの排熱を有効活用しようとする目的で、発電効率向上の取り組みが盛んに行われている。それらの設備の使用環境は、800°C以上の高温やアルカリ金属による腐食など苛酷な場合が多く、そのため使用設備には各種表面処理（溶射・溶接等）による延命対策が種々行われている。

当社も、その一端を担いボイラ水管や燃焼室など、現地での溶射工事を事業展開している。

しかし、特にボイラ内や燃焼室内での超音速で溶射材料が噴出される高速フレーム溶射作業は、溶射装置の高速・高温などの条件から自動装置化が難しく、そのため人による溶射作業が主に進められていた。これらの悪環境内での作業を軽減するために当社は、現地施工用に高速フレーム用溶射装置開発を進めてきた。今回種々の障害をクリアして開発に成功し、又実施工においても成果を挙げる事が出来たので、以下に概要を紹介する。

（自動機に関する、主なメリット）

- ・ 溶射皮膜品質向上（肉厚変動均質化）
- ・ 作業効率の向上（皮膜厚みの安定化）
- ・ 進捗管理が容易であり、計画施工が可能
- ・ 安全面での向上（1直化、ガン1台施工）
- ・ 労務負担の軽減

2 自動溶射装置の概要と特徴

自動溶射装置は、現地での使用を考慮し、搬入が容易な3分割方式を採用した。その3分割とは、溶射装置全体を移動させる走行ユニット、溶射ガン移動ユニットおよびアームユニットである。トラバーサ装置（本体総重量88kg）については、シンプルな構造を有している。ガン移動ユニットは、固定した溶射ガンのストロークを有し、最大1.8mの範囲が可能である。また、走行ユニットは、足場に設置したレール上の走行方法を採用した。アームユニットは、装置本体の支持・補助の役割を担い、接合板面はメタルタッピングによる取り付け・分割が簡単な構造とした。

表1に自動装置の概要と仕様について、また、図1にトラバーサ装置本体の全体図を示す。

表1 高速フレーム自動溶射装置の概要と仕様

(1) 装置重量	
本体装置総重量	88 kg
本体装置寸法	2,550mm×1,200mm×1,038mm
各ユニット重量	
①走行ユニット	25 kg
②アームユニット	11 kg
③溶射ガン移動ユニット	42 kg
(2) 装置仕様	
本体ガイドフレーム	A6063S アルミ高合金製
トラバース速度	30~600 mm/min
トラバース範囲	max1,838mm リミット位置設定
ピッチ（ロール）駆動	6~30 mm/sec

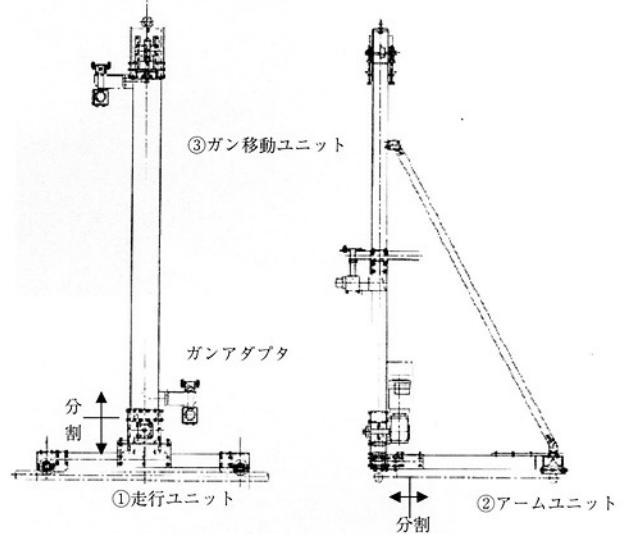


図1 高速フレーム自動溶射装置概略図

3 装置の特徴

この溶射装置の主な特徴を記載する。

- (1) 自動装置本体を大きく3個に分割でき、コンパクト化と軽量化を実現させている。これにより溶射施工場所への搬入口が例えばφ450の狭いマンホールの大きさであっても搬入可能であり、マンホール口からの搬入後、自動装置の分割・組み立てができる構造となっている。
- (2) 使用条件が異なる溶射の場合に、上下トラバース及

びピッチ駆動を単独に調整・運転することで必要な溶射膜厚の制御が出来る。HVOF（高速フレーム溶射）での使用時の高速（300～600mm/min）又は、低速（30～300mm/min）の速度調整を行うことができる。

- (3) 上下トラバースに関しリミット位置を調整することによりストローク幅を自在に変更することでき、溶射範囲を拡大縮小させることが出来る。
- (4) 燃焼室内部の鋼管などのように複雑で多様なサイズ及び形状のものに対しても、ガンアダプタに接続した搭載溶射ガン角度を0～180°に変更でき、希望する角度への溶射が可能である。
- (5) 炉内の悪環境下での使用を目的とするため、ガン移動モータ及び本体ガイドフレーム内部を強制空冷し、防塵・耐熱性を向上させている。

図2に現地での高速フレーム自動溶射状況を示す。

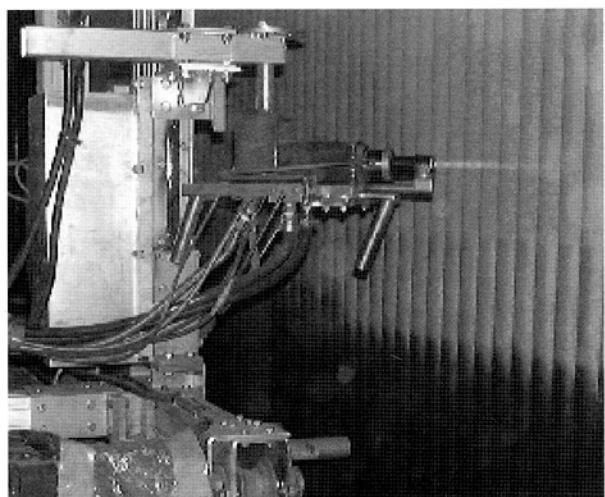
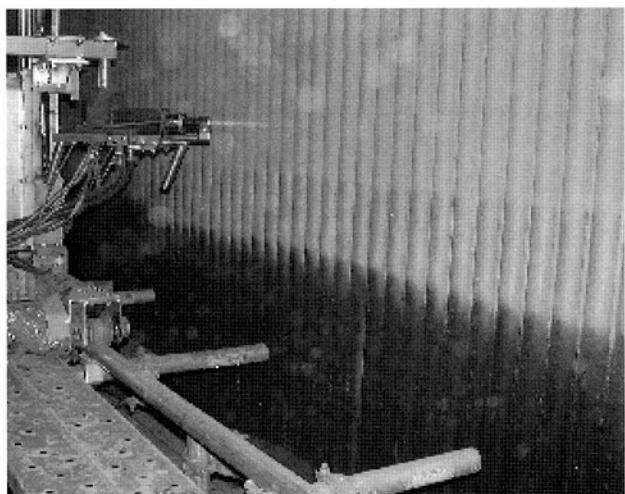


図-2 高速フレーム自動溶射装置による現地施工状況

4 溶射皮膜の品質

本装置の事前試験及び実施工において、均質性の高い溶射皮膜が得られることは実証済みである。以下に溶射後の钢管（溶射対象材料）上の溶射皮膜の模式図を示す。模式図に示すように膜厚250μmの仕様に対し、60μm以内のバラツキに抑制されていることが分かる。

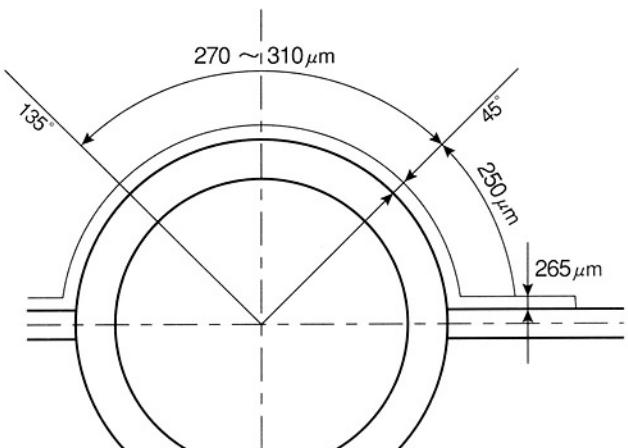


図-3 鋼管（溶射対象材料）円周上の溶射皮膜模式図

5 結言

当社で開発した現地施工用高速フレーム自動溶射トラバース装置は、広範囲の現地自動溶射を目的とした装置であり、

- (1) 装置本体を3分割することで、シンプルかつコンパクト化と軽量化を図った装置である。
- (2) 溶射皮膜の均質化と肉厚のバラツキを抑えられる。
- (3) 炉内の悪環境下での使用に耐えうる耐熱性・耐久性を有する。

これらの特徴を有し、HVOF溶射に限定されず他の溶射機での使用が可能であり、幅広い用途につなげられる。本装置の採用により溶射皮膜品質の向上はもとより、材料、歩留りを含む現地施工全般の効率向上が図られ、かつ従来の手動溶射での過酷な作業から解放されるなど大きな成果が期待できる。

[問い合わせ先]

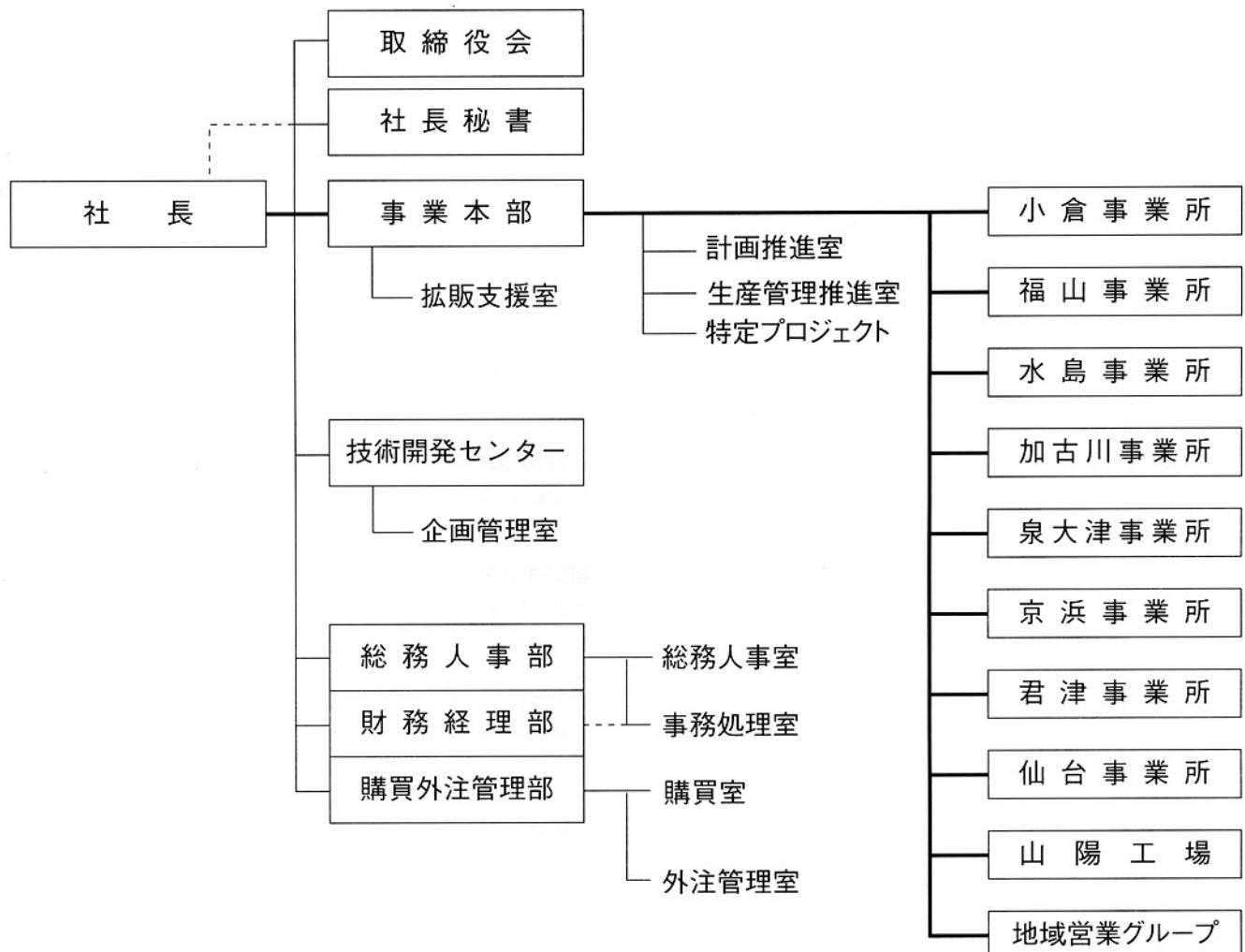
事業本部 拡販支援室

Tel. 093(871)3724 木下 利哉

Fax. 093(884)0009

FUJICO 運 営 組 織 図

平成14年10月1日現在



■本社

〒804-0011 福岡県北九州市戸畠区中原西2丁目18-12
TEL093-871-3724 · FAX093-884-0009
FAX093-884-0048

■技術開発センター

〒804-0054 福岡県北九州市戸畠区牧山新町4-31
TEL093-871-0761 · FAX093-882-0522

■工場

山陽工場

〒719-0253 岡山県浅口郡鴨方町鳩ヶ丘1丁目1298番地
TEL0865-44-5151 · FAX0865-44-5154

■事業所

仙台事業所

〒983-0001 宮城県仙台市宮城野区港1丁目6-1
エヌケーベース鋼株式会社仙台製造所構内
TEL022-258-4182 · FAX022-258-4183

仙台事業所産機工事課

〒989-2421 宮城県岩沼市下野郷字新南長沼87番1号
TEL0223-24-2450 · FAX0223-29-2084

君津事業所

〒299-1141 千葉県君津市君津1番地
新日本製鐵株式會社君津製鐵所構内
TEL0439-52-0497 · FAX0439-52-0498

京浜事業所

〒210-0868 神奈川県川崎市川崎区扇島1-1
NNK京浜製鐵所構内
TEL044-288-5565 · FAX044-288-5563

泉大津事業所

〒595-0052 大阪府泉大津市西港町18-14
株式会社淀川製鋼所泉大津工場内
TEL0725-21-9182 · FAX0725-21-9151

加古川事業所

〒675-0137 兵庫県加古川市金沢町1番地
株式会社神戸製鋼所加古川製鐵所構内
TEL0794-35-0393 · FAX0794-35-9641

水島事業所

〒712-8074 岡山県倉敷市水島川崎通1丁目
川崎製鉄株式会社水島製鐵所構内
TEL086-448-3035 · FAX086-448-3037

福山事業所

〒721-0931 広島県福山市鋼管町1番地
NKK福山製鐵所構内
TEL084-941-0924 · FAX084-941-0937

小倉事業所

〒803-0803 福岡県北九州市小倉北区許斐町1番地
株式会社住友金属小倉構内
TEL093-561-2081 · FAX093-561-2083

■営業部・出張所

西日本地域
〒804-0011 福岡県北九州市戸畠区中原西2丁目18-12
TEL093-871-3724 · FAX093-884-0009

中国地域

〒675-0131 兵庫県加古川市金沢町1番地
株式会社神戸製鋼所加古川製鐵所構内
TEL0794-35-0393 · FAX0794-35-9641

関西地域

〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1丁目8番38号
ハイマート第2新大阪403号
TEL06-6393-0031 · FAX06-6393-0068

関東地域

〒299-1141 千葉県君津市君津1番地
新日本製鐵株式會社君津製鐵所構内
TEL0439-52-0497 · FAX0439-52-0498

大分出張所

〒870-0913 大分県大分市松原町3-1-11 鉄鋼ビル5F
TEL097-558-1257 · FAX097-556-0794

■関連会社

株式会社サンフジ
〒804-0011 福岡県北九州市戸畠区中原西2丁目18-12
TEL093-871-1109 · FAX093-871-1139

株式会社フジテクノ

〒803-0803 福岡県北九州市小倉北区許斐町1番地
スマックスエスタホール内
TEL 093-571-2380 · FAX093-583-5757

株式会社アソート フジ

〒804-0011 福岡県北九州市戸畠区中原西2丁目18-12
TEL093-873-8770 · FAX093-873-8771

第一MPT株式会社

大韓民国慶尚北道浦項市長興洞140-5 (本社工場)
TEL011-82-562-285-7024 · FAX011-82-562-285-5275
大韓民国全羅南道光陽市太仁洞1657-6 (光陽工場)
TEL001-82-667-792-0933 · FAX011-82-667-792-2417

フジコー技報—tsukuru No.10 平成14年10月1日発行

発 行 人 永吉 英昭

発 行 所 株式会社 フジコー

技術開発センター

〒804-0054 北九州市戸畠区牧山新町4-31

Tel.093(871)0761 Fax.093(882)0522

印 刷 所 株式会社 スピナ印刷事業部

〒804-0071 北九州市戸畠区川代1丁目2-1



シンボルマークは、富士山の形とフジコーのFをデザイン化したものです。小プロックが右上がりにHOP、STEP、JUMPと飛躍、拡大していく状態を表現しております。