

ふえらむ

*Bulletin of
The Iron
and Steel
Institute of
Japan*

Vol.17 / No.10 / 2012

(一社)日本鉄鋼協会会報

ISSN1341-688X

鉄と鋼

Tetsu-to-Hagané

Vol.98 / No.10 / 2012

ISSN0021-1575

CPROは鑄造・凝固に精通した材料工学エンジニアが壮大な構想の下に長年の歳月をかけて開発したソフトウェアです。本ソフトウェアには鑄造現場10年以上の経験と最新の凝固理論に立脚した“PHYSICAL METALLURGY”の本質が備わっています。

■CPROの特徴

対象とするプロセス及び物理現象:

鋼及びアルミ合金、銅合金等の非鉄合金の連続鋳造:V偏析、マクロ偏析、ポロシティ、オシレーションマークに代表される表面欠陥、エアギャップの形成、凝固と変形・応力との連成問題

大型鋼塊、ESR、Ni基超合金の一方方向凝固等の特殊 casting:
 押湯引き巣、V偏析、マクロ偏析、チャンネル偏析、ポロシティ

これら種々の欠陥の形成過程を追跡・究明することが可能であり、問題の解決に役立ちます。また、新しい鋳造プロセスの研究・開発のための強力なツールを提供するものです。

■理論

凝固現象：非線形多元合金モデルまたは相計算プログラム CALPHAD とのインターフェースによる温度と固相率の関係、エネルギー式、溶質再分布式、Darcy 流れ及び運動方程式等を最新の凝固理論に基づいて展開し、ミクロスケールにおけるドリフトライト凝固現象とマクロスケールにおける熱、溶質の拡散及び液相流れ現象を連成させた。さらに鋼の連铸では铸片の塑性変形、相変態も考慮。

力学的挙動: 内部状態変数理論に基づく粘塑性構成方程式を用いたFEMにより連続鋳造における応力・変形状態を精度良く解析。

電磁場解析:電磁場の影響を考慮した凝固解析。

■凝固解析機能

以下7段階の解析機能を持っています。

レベル1:凝固・温度計算

レベル2: Darcy 流れ計算

レベル3:レベル2+ポロシティ解析

レベル4: Darcy 流れ + マクロ偏析

レベル5・レベル4±ポロシティ解析

レベル6:運動方程式による流れ+Darcy 流れ+マクロ偏析

レベル7:レベル6+ポロシティ

ミクروسケールからマクروسケールまでの現象を解析

最高レベル7はエネルギー式+温度と固相率の関係式+溶質再分布式+運動方程式+Darcy 式の連成解析によりDAS、マクロ引け巣、ミクロポロシティをはじめ種々のマクロ偏析(チャンネル偏析を含む)の形成過程を計算します。固溶ガスの影響、相変態等も解析可能。

■ 計算実績

1989年、基本ソフト「多元合金鋼塊のマクロ偏析」の開発以来発展を続け100例以上の計算実績を積んでいます。

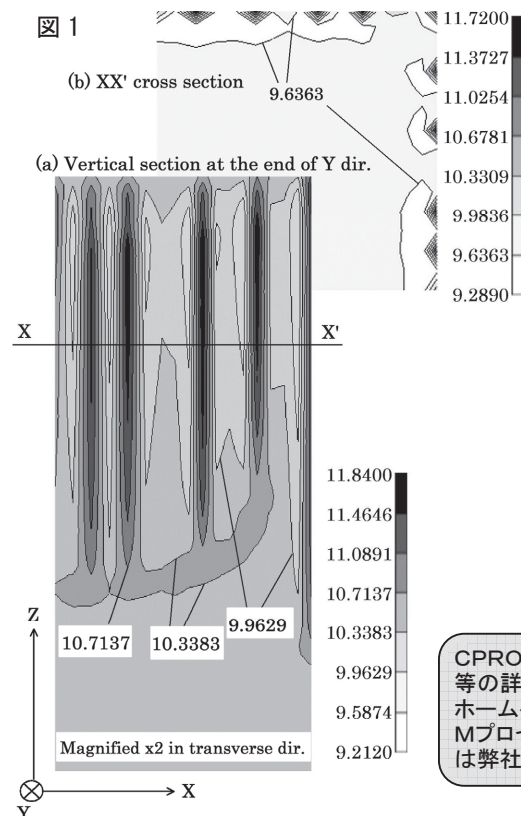
連続铸造: 鋼、特殊鋼、ステンレス鋼、アルミ合金、銅合金

普通鑄造：大型鋼塊、鑄鋼、特殊鋼、アルミ合金、亜鉛合金

特殊鑄造: ESR、一方向凝固

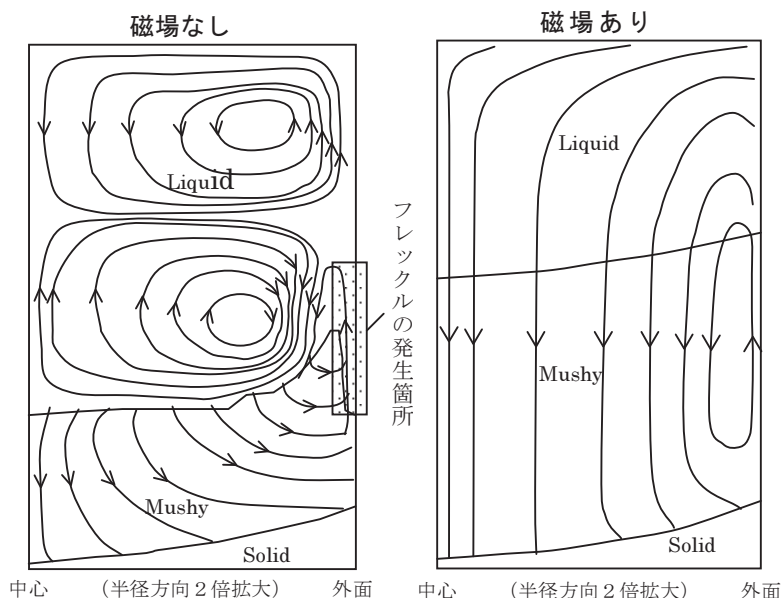
一方向凝固品のフレックル欠陥を再現

一方向凝固法による単結晶タービンブレードにはフレックル(チャンネル偏析)、ミクロポロシティあるいは不整方位結晶欠陥などの铸造欠陥が生ずる。図1はレベル7解析によってNi合金角インゴット端面に生じるフレックルを解析したもの(解析レベル7)。



M プロセス：無欠陥一方向凝固品の新製法

Mプロセスの原理： 一方向凝固方向に静磁場を印加することによりフレックルを生ずるデンドライト間液相流れを抑制し、フレックルの生成を無くす。図2は丸インゴットの液相及び mushy zone 内のフローパターンを示す。外面においてフレックル発生。図3は磁場によりフローパターンが変化する様子を示す。フレックルは生じない。(詳細は弊社ホームページを参照ください)



CPROに関する計算例、セミナー等の詳しい情報についてはホームページをご覧ください。
Mプロセスに関する詳細については弊社へお問合せください

Engineering & Basic Interdisciplinary Science
株式会社 エビス
 〒252-0325 神奈川県相模原市南区新磯野 5-10-6
 TEL 046-253-5593 FAX 046-253-5170
 E-mail: yoshio@ebiscorp.jp
 URL: <http://www.ebiscorp.jp/>

ふえらむ

Vol.17 (2012) No.10

C O N T E N T S

目 次

日本のものづくり力	伸縮と長寿命の両立ー溶接ベローズ	686
Techno Scope	アインシュタイン理論を検証する重力波検出	689
連携記事	KAGRAプロジェクトの概要と展望 黒田和明	693
入門講座	鋼の防錆・防食技術ー7 自動車の防錆・防食 藤田 栄	699
躍 動	変化をチャンスに ～製鋼精錬研究の現場から～ 佐々木直人	707
解 説	受賞技術ー14 ナノ炭化物制御による自動車用高加工性新高強度鋼板の開発 船川義正	711
会員へのお知らせ		715
海外鉄鋼関連最新論文		727



溶接ベローズの耐久性試験。使用環境を考慮して、高温下や真空内での試験も実施する。

MANUFACTURING
POWER OF JAPAN

伸縮と長寿命の両立

真空装置に不可欠なベローズ

さまざまな産業分野や理化学研究分野などで、真空装置は幅広く使われている。代表的な用途である半導体製造分野においては、わずかな塵さえ電子回路に紛れ込まないようにしたり、ウェハ上に回路を形成する際に光の乱れを防いだりするために、真空技術が必要となり、ときには超高真空レベル(10^{-5} Pa以下)のきわめて高度な真空装置が求められることもある。

真空装置および周辺システムで使用される部品の1つにベ

ローズがある。ベローズとは「蛇腹」のことで、伸縮する継手として使われる。ベローズには、製造方法によって成形ベローズや溶接ベローズなどの種類がある。このうち成形ベローズは、パイプ側面に水圧をかけて、蛇腹状に成形する。一方、溶接ベローズは薄い中空円盤を重ね合わせて溶接し製造される。

1955年ごろ米国で開発された溶接ベローズは、日本では1963年ごろから製造されるようになり、その後、真空装置の普及とともに需要も急増した。

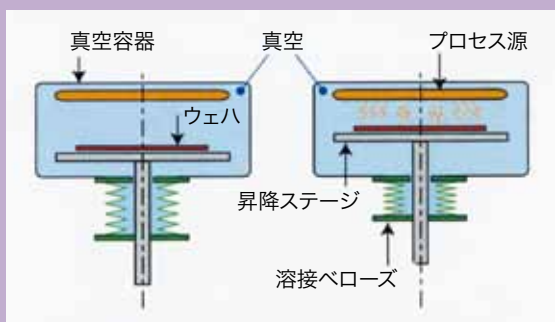
溶接ベローズは、材質の選択性が高い、内外径の寸法に対する自由度が大きい、などの特徴を持ち、用途や目的に合わせてさまざまな種類が使用されている。なかでも各真空装置間の位置ずれや運転中の振動、変位を吸収するために欠かせない要素部品として広く使用されている。

薄物を溶接するノウハウを蓄積

溶接ベローズの開発、製造で注目されているのが(株)ミラプロである。同社は十数年前から溶接ベローズの製造を始め、独自のノウハウを盛り込んだ製造技術を確認し、現在では国内でもトップクラスの実績を誇っている。

同社が作る溶接ベローズの種類は形状別におよそ130種類あり、大きいものは直径1m以上になる。最近では、液晶製造などに使われる直径約60cmの溶接ベローズを多く生産したという。

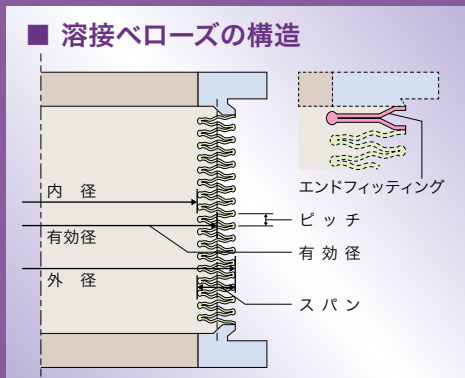
■ 真空装置内で使われる溶接ベローズの例



半導体製造でウェハ上に回路を形成する工程では、真空容器内にウェハを搬入し、位置制御するには、伸縮するベローズが使用される。このとき、ベローズは真空状態を維持する継手部品であり、なおかつ動作を行う機構部品でもある。



溶接ベローズのカットサンプル。
円盤は波型に成形されている。



■ 溶接ベローズの製造工程



部品となる中空円盤は、薄板からプレス
打ち抜きにより成形される。



溶接条件や位置制御、治具管理など、独自のノウハウを生かした
全自動溶接装置を開発し、24時間稼働システムを確立している。



成形された円盤

溶接ベローズ

溶接ベローズの製造工程を詳しく見てみよう。まず、蛇腹を構成する中空円盤を製造する。この部品は、プレス加工により薄板を打ち抜いた、波形形状の円盤である。次に、この円盤を重ね合わせ、内径および外径を交互に溶接し、蛇腹部を作る。この後、必要に応じてフランジなどを溶接する。最後の製品検査では、寸法検査、リーク検査、シール面検査、外観検査などの全数検査を実施する。

品質を左右するカギは、溶接技術である。同社では「薄物を溶接する」技術にこだわって技術開発を進めてきた。溶接ベローズにはおもにYAGレーザーを使用する。溶接棒などの異種材料は使用されないため、溶接部と母材の材質は同一である。溶接後、溶接部の断面形状は円形となり、丈夫で破損しにくい形状となる。このような形状であるため、溶接ベローズが収縮した状態では円盤同士は隙間なく密着し、縮んだ時と伸びた時との差（ストローク、伸縮幅）をより大きくすることが可能となる。

高精度のレーザーを使いこなすにはエネルギー制御や位置制御技術が必要となる。そのためには、優れた設備のみならずオペレータの技能も重要である。同社では、さまざまな溶接に関するノウハウを蓄積し、独自の全自動ベローズ溶接装置を開発した。この工程を核として24時間稼働生産システムを確立し、生産効率の向上を図り、製品のコストダウンと納期短縮を実現している。

最適設計から生まれる長寿命

同社の開発・設計部門では、需要家が使用する設備や環境などに応じて、最適な製品を提案している。

製品開発をする際、材料の選択は重要である。形状や寸法をはじめ、バネ特性、透磁性、疲労強度などの要求特性、さらに使用される環境やプロセスガス（腐食性ガスなど）の影響などを考慮し、最適な材料を選択する必要がある。

ものづくりの魅力

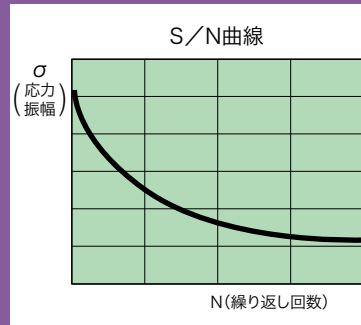
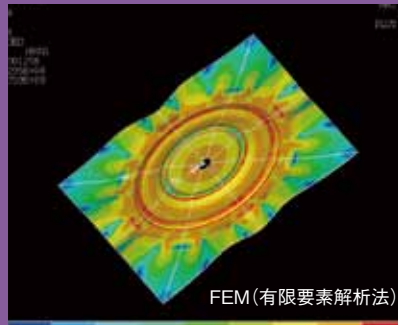


元は学校の教師だった私ですが、多くの人の助けがあってこそものづくりでここまでやってこられたと思います。日本のものづくりは、これまで努力して技術力を積み重ねてきました。これが最近ではどんどん海外に流出してしまっています。将来何をやって食べて行くべきか。真剣に考えるべき時期が来ているのではないかと感じます。（津金洋一 会長）

株式会社ミラプロ（山梨県北杜市）
1984年創業。半導体製造装置、加速器などの分野で使用される真空関連部品や製造装置の開発、製造を行う。主力商品である溶接ベローズは国内トップクラスのシェアを誇っている。
<http://www.mirapro.co.jp>

■ 最適化設計の取組み

伸縮に伴う応力集中や金属疲労が発生するため、溶接ベローズには緻密な寿命評価が求められる。そこでFEMシステムを導入して重要部分の評価を行なっている。これを元に精度の高いS-N曲線を求め、最適化設計を実施している。

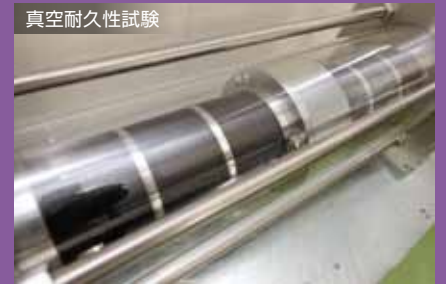


一般エリアと分離した製造室にはエアシャワー、クリーンマット、空気清浄機などを配置している。

■ 製品検査試験



品質検査では、寸法検査やリーク検査、外観検査などの全数検査を実施している。



品質検査では、寸法検査やリーク検査、外観検査などの全数検査を実施している。

使用される材料は厚さ0.1～0.3mm程度の薄板が多い。代表的な材料は、SUS304、304L、316Lなどのステンレス鋼である。このうちSUS316Lは、オーステナイト系ステンレス鋼の中でも特に耐食性に優れており、代表的な溶接ベローズの材料である。またAM350は、セミオーステナイト系析出硬化型ステンレス鋼であり、熱処理により優れた強度や硬度が得られる。例えば、長いストロークや狭い空間での配管誤差吸収用などの用途で、高い復元性や長寿命が求められる場合に適している。このほか、ハステロイなどの高ニッケル系合金は、強度、耐食性、耐熱性に優れ、腐食性ガス環境下などで使用される。

溶接ベローズの需要家にとって最も重要な特性は、寿命の長さである。薄い板を溶接して作るベローズは、長期間伸縮を繰り返すことにより、最初に破損するのは溶接部ではないかと思われやすい。ところが実際には、溶接部以外の箇所、つまり円盤部の疲労により破損が起こりやすいのだという。溶接部が弱点にならないように、いかに材料本来の強度を生かした設計ができるかがポイントである。

このため、円盤の形状を最適化することが重要であり、同社では、FEM解析を導入して最適設計を行っている。

製品は、耐久性評価を行い設計値との整合性を把握する。また高温環境など、使用環境を再現した試験も実施する。

同社では、耐久性試験のデータを長年にわたって蓄積しており、精度の高いS-N曲線を求めて、これを元に寿命予測を行っている。ベローズの要求寿命として、長いものは100万回あるいは1000万回の動作を保証するものとなっている。実際にこの回数に達するのは納入後概ね2、3年以上先のことである。将来の性能をどれだけ正確に予想できるかが、各メーカー



真空装置同士の連結に使用する角型ベローズ。従来は手動溶接が多かったが、一体プレス成形の大型部品を自動溶接によりベローズ形状に製造する技術が開発された。溶接は、パーティクルの混入を避けるため、高グレードのクリーンルーム内で行われる。

の持つ技術力の高さを計るバロメーターなのである。

同社のベローズの品質は業界でも評価され、製造装置関連だけでなく、これまでに科学技術の大型プロジェクトへ製品を納入してきた。例えば加速器や放射光施設の構築などで、真空関連領域のエンジニアリングや製品の提供を行ってきた。

最近の成果の一つが、東京大学宇宙線研究所が進めている大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」への真空機器の提供である。人類がいまだなしえなかった重力波の直接検出という世界初のプロジェクトのため、超高真空ダクト650t(12m×240本)をすでに納入した(本誌テクノスコープ記事参照)。この世界的な望遠鏡は、2017年から本格稼働する予定である。同社が長年ベローズで培ってきたノウハウは、世界が注目するビッグプロジェクトで、大きな役割を果たすものと期待されている。

●文 杉山 香里

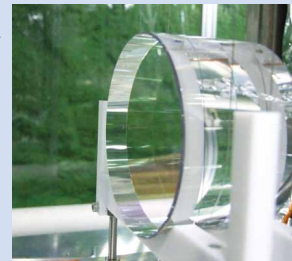
アインシュタイン理論を検証する 重力波検出

連星中性子星から放出される重力波のイメージ イラスト/KAGAYA

2012年7月、その存在が50年前に予言された「ヒッグス粒子」発見のニュースが世界を駆けめぐった。しかし、物理学には存在が予言されてから約100年後の現在でも未確認の現象がある。アインシュタインが予言した「重力波」である。重力波の検出は各国で試みられているが、未だに直接検出に成功した例はない。我が国でも、世界初の重力波検出を目指し、高精度の重力波検出装置の建設が進められている。



レーザー干渉計ではサファイア製の反射鏡が用いられる。写真(右):日本の重力波検出器(CLIO)で使用されている直径10cm、厚さ6cmの反射鏡。写真(上):反射鏡の上に見えるのが懸架システム。



相対性理論の4つの「予言」

1916年に発表された一般相対性理論では、重力とは質量の周辺の時空の歪みである、と説明している。アインシュタインは、重力が引き起こす事象として「重力レンズ」「光の赤方偏移」「水星の近日点の移動」「重力波」の4つを予言した。現在、アインシュタイン自身がその検証は難しいと考えていたと言われる重力波以外は、その存在が検証されている。

物理学100年の宿題とも言われる重力波とはどのようなものであろうか。重力波は、時空の歪みが波として伝播する「時空のさざ波」のイメージで説明される。静かな水面に鉄球を落としたときに波紋が広がって行くように、質量の運動によって時空が歪み、その歪みが光速で伝わって行くのである。

実は、連星中性子星^{*1}の詳細な観測によって、重力波の存在は間接的には検証されている。しかし、重力波の直接検出

は極めて難しく、各国で重力波を検出するための巨大な設備が建設されている。

水素原子1つ分の変位を測定する

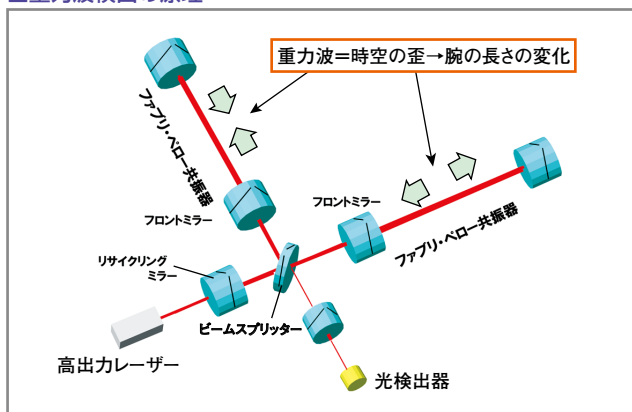
自然界には、原子核と電子を結びつける「電磁気力」、中性子のベータ崩壊を引き起こす「弱い力」、原子核を安定させている「強い力」と、「重力」の4つの力(相互作用)が存在している。重力波の検出が難しい理由は、重力が他の相互作用と比較して、極端に小さいためである。例えば、電磁気力と比較すると重力は約40桁も小さい力である。このため、超新星爆発や連星中性子星の合体などの巨大な質量による天体イベントが発する重力波でなければ、観測することが難しい。

しかし、その場合でも、予想される空間の歪みはごくわずかである。現在、最も確実な重力波の発生源と考えられている連星中性子星の合体が近傍の銀河で発生した場合、地球で観測される変位は 10^{-21} m程度である。これは地球と太陽の距離(1.5億km)に等しい長さの定規で、水素原子1個分(10×10^{-10} m)の伸縮を測定することに相当する。このような極

*1 連星中性子星

太陽の10倍程度の質量を持つ恒星は、燃え尽きた後には超新星爆発を起こし、中性子星になる。このような中性子星が互いの周りを回っているものを連星中性子星と呼び、重力波の発生源と考えられている。

■重力波検出の原理



マイケルソン干渉計は、2つの反射鏡と1つのビームスプリッターで構成されているが、KAGRAではファブリーペロー共振器とリサイクリングミラーを付け加えることで、実光路長を約1000倍に延ばし、レーザー光のパワーを向上させている。

微細な変位を精確に測定することは極めて困難であり、これこそが今日まで重力波が直接観測できなかった理由である。

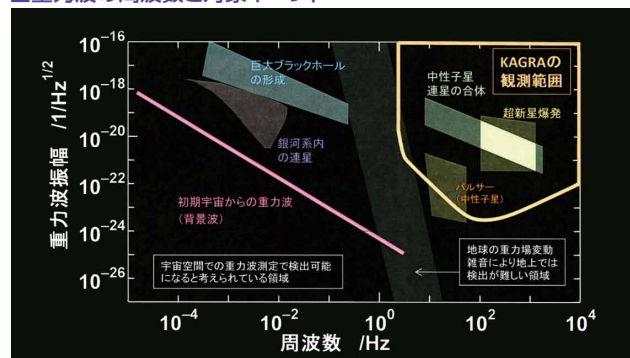
重力波を捉えるレーザー干渉計

重力波の直接的な検出は、1960年代から研究が始められている。現在主流となっているのは、レーザー光を利用したマイケルソン干渉計を利用する方法である。マイケルソン干渉計では、1つの光源から発した光をビームスプリッターで2つに分け、それぞれを鏡で反射させて、再び合成することで生じる干渉縞により、2つの反射鏡の位置を測定している。重力波は2つの物体の距離の変化として検出でき、例えば1000m離れた反射鏡の位置変化を 10^{-18} mオーダーで捉えることができれば、 10^{-21} m程度の重力波による空間の歪みを検出できること

日常生活に生かされている相対性理論

相対性理論というと天文や宇宙がイメージされるが、現代生活に欠くことのできないGPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)にも相対性理論が生かされている。GPS衛星は、地上との通信時間によってその位置を測定している。しかし、秒速4kmという高速で移動している(特殊相対性理論により時計は遅れる)ことと、高度2万kmを飛行している(一般相対性理論により重力ポテンシャルが高いところにある時計は進む)ことにより、地上の時計とは1日当たり 3.84×10^{-5} 秒の誤差が生じる。これは、地上では約11kmの距離に相当する誤差である。GPSでは相対性理論により、この誤差を補正して、正確な位置測定を実現しているのである。

■重力波の周波数と対象イベント



天文イベントで発生する重力波は、その発生源と距離によって、周波数と振幅(歪み)が決まる。KAGRAで検出を目指しているのは、 $10\text{Hz} \sim 10^3\text{Hz}$ の帯域の連星中性子星の合体や超新星爆発による重力波である。なお、地球上での観測では、重力場変動雑音のために、 1Hz 以下の重力波を捉えることは困難である。また、重力波の振幅の単位は $1/\text{Hz}^{1/2}$ であるが、重力波検出器では長さ(m)の変化として検出される。

■重力波イベントの発生頻度

種 類	頻 度	重力波振幅/ $1/\text{Hz}^{1/2}$	帯域/Hz
連星中性子星の合体(200 Mpc^{-1})	数回/年	10^{-21}	$10 \sim 10^3$
超新星爆発(銀河系内)	1回/数十年	10^{-18}	$\sim 10^3$
超新星爆発(おとめ座銀河団内)	数回/年	10^{-21}	$\sim 10^3$
巨大ブラックホールの形成 ^{※2}	1回/年	10^{-17}	$\sim 10^{-3}$
インフレーションからの背景波	常時	※3	※3

※1: $1\text{ Mpc} = \text{約}326\text{万光年}$

※2: 銀河中心部に存在する太陽の100万倍～1億倍の質量を持つブラックホール。

※3: 宇宙誕生後のどの時期で発生したかによって、重力波の振幅・帯域が異なる。

になる。

マイケルソン干渉計の精度を上げるためには、レーザーの光路長(基線長と呼ぶ)を長くとる方法がある。米国ではLIGO^{※2}(基線長4kmが2台、2kmが1台)、イタリアでは仏伊共同プロジェクトのVIRGO^{※3}(基線長3km)、ドイツでは英仏共同プロジェクトのGEO600^{※4}(基線長600m)がそれぞれ建設されている。

我が国では、基線長300mのTAMA300^{※5}(三鷹市)や、同100mのCLIO^{※6}検出器(神岡鉱山)を建設して、さまざまな検出技術を蓄積してきた。そして、現在岐阜県の神岡鉱山に建設中なのが3kmの基線長を持つ「KAGRA^{※7}(かぐら)」である。

このような観測設備では、どの程度の範囲の宇宙を観測することが可能であろうか。TAMA300の観測範囲は我々の住む銀河内であったが、GEO600では300万光年先のアンドロメダ銀河まで観測可能になっている。さらに、LIGOやVIRGOでは7000万光年先の乙女座銀河団までの観測が可能である。

※2 LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory

※3 VIRGO: Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations (VIRGO: おとめ座)

※4 GEO600: German-British Gravitational Wave Detector

※5 TAMA300: 干渉計型重力波アンテナの装置名称(TAMAは多摩地区に建設されていることによる)

※6 CLIO: Cryogenic Laser Interferometer Observatory(低温レーザー干渉計)

※7 KAGRA: 大型低温重力波望遠鏡の装置名称

■KAGRAの完成予想図



大型低温重力波望遠鏡にふさわしい名前として神岡 (KAmioka) と重力波 (GRAvitational wave) の造語であるKAGRAが公募により選ばれた。従来は、LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) の略称で呼ばれていた。

観測可能な重力波は、巨大な質量をもつ天体同士のイベントにより発生する。しかし、現在存在する最も高感度の検出器であるLIGOやVIRGOが測定できる範囲で、重力波が発生する天文学的なイベントが発生する頻度は、150年に1度程度であるとされている。観測距離が10倍になれば、観測対象となる銀河数は1000倍になる。KAGRAでは、3kmの長い基線長に加え、さまざまな技術的な工夫により感度を向上させることで、観測範囲を7億光年先のヘラクレス座銀河団まで広げ、より多くの天文学的イベントを捉え、年に数回から10回ほどの頻度での重力波を検出することを目指している。

「KAGRA」の革新的な測定技術

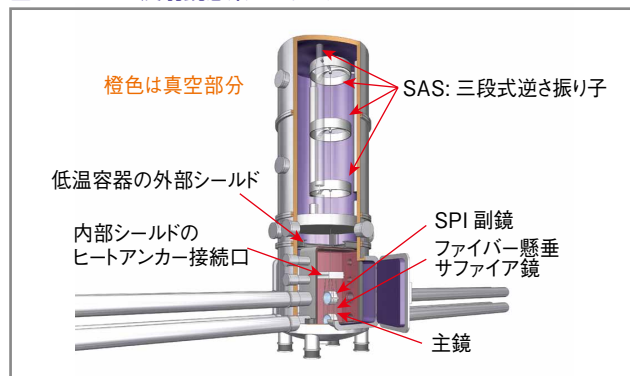
KAGRAには、TAMA300とCLIOで開発・検証された革新的な技術が随所に採用されている。

重力波の極微細な変位を捉えるためには、いかにして重力波以外の「雑音」を排除するかが課題である。重力波検出器としてのKAGRAの特長は、地下に建設することで低周波帯の雑音を抑え、鏡を冷却することで中～高周波数帯の雑音を抑え、高感度を実現することである。

CLIOによる測定結果から、飛騨片麻岩という硬い岩盤できている神岡鉱山では、比較的単純な防振装置でも地面振動雑音を十分に小さくできることが分かっている。さらに、TAMA300よりも多段かつ高性能の懸架システムを採用することで、防振効果を向上させている。

また、反射鏡や反射鏡を吊すワイヤーの熱振動の低減には、 -250°C (20K) という極低温まで冷却する日本独自の方

■KAGRAの反射鏡懸架システム

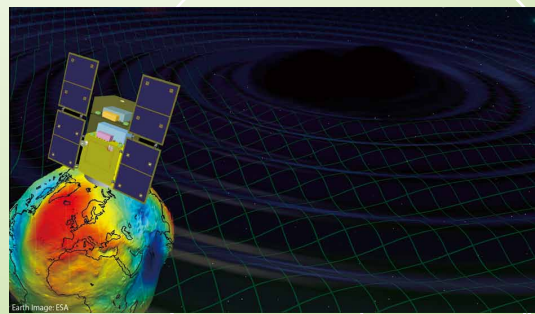


高さ14mにもおよぶ多段懸架システムの懸架図。なお、詳細については、解説記事を参照。

宇宙で重力波を観測する

次世代の重力波望遠鏡として、基線長10 kmで地下に建設する「アインシュタイン・テレスコープ」の計画があるが、地上のレーザー干渉計は、微小な振動が鏡の部材を伝わって、鏡に影響を与えるため、低い周波数の重力波を検出しづらい。

そこで宇宙空間で浮遊させた鏡を用いたレーザー干渉計の研究開発が、各国で進められている。日本では国立天文台などがDECIGO*8計画を進めており、海外でもESA (欧州宇宙機関) が主導となって計画を進めている。

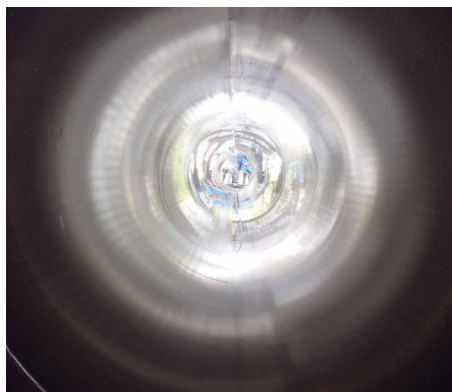


DECIGO パスファインダー (DECIGOのための試験衛星) のイメージ図

*8 DECIGO: DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (0.1ヘルツ帯干渉計型重力波天文台)

法を採用している。反射鏡の材料には低温での機械的性質や使用するレーザー波長などからサファイアが採用され、直径22cm、厚さ15cmのサファイア鏡が作成される計画である。

高周波数帯では、光の粒子性に起因する散乱雑音が問題である。これはレーザーの光量を増加させることでS/N比 (信号対雑音比) を向上させることが可能である。KAGRAでは、ファブリーペロー共振器とリサイクリングミラーを採用することで、これを実現している。ファブリーペロー共振器とは2枚の鏡の間でレーザーを1000回程度往復させることによって、光路長を実効的に延長する仕組みである。また、リサイクリングミラーはビーム



電解研磨後のダクト内面
写真提供：三愛プラント工業(株)



液圧成形によって製作されたベローズ
写真提供：(株)ミラプロ、本社工場



ダクトとベローズの溶接作業の様子
写真提供：(株)ミラプロ、野田工場

スプリッターからレーザー発振機側へ戻ってくるレーザー光を再びファブリーペロー共振器に戻すことで、レーザー光量を増加させている。

超精密測定に不可欠な超真空技術

重力波検出器では、空気などの影響を避けるために、レーザーの光路や反射鏡の周囲は真空であることが求められる。KAGRAでは、直径80cm、長さ6kmのレーザー光路と20個程度の真空タンク内で 10^{-7} Paという超高真空を実現する必要がある。

真空系を構成する材料には、ステンレス鋼やチタン、高純度無酸素銅などがあるが、KAGRAでは大型部材に対しても表面処理が可能で入手性のよいステンレス鋼(SUS304L)を採用している。真空ダクトは直径80cm、長さ12mのステンレス管を500本繋げて構成される。 10^{-7} Paの真空度を実現するためには、真空ダクトの前処理が重要である。通常はダクトを加熱することで表面の吸着ガスを除去するベーキングと呼ばれる脱ガス工程が行われるが、地下に設置するKAGRAでこの工程を行うことは難しい。そのため、事前にダクト内面を電解研磨処理し、超純水で洗浄後、熱風式ベーキングを行っている。

ダクト同士はフランジとベローズにより接続される。外径880mm、厚さ30mmのフランジ製作では、ステンレス鋼塊からのリング鍛造(SUS304F)を採用している。フランジの平面度を確保するためには、溶接時の残留歪みを避けるために、突き合わせ部分とフランジ間に十分な長さを確保する必要がある。このため、ステンレス鋼板からの切り出し加工では厚さ120mmの鋼板が必要になり現実的でない。さらに、棒材の曲げ加工では継ぎ目溶接部からの真空漏れの危険性があるため、リング鍛造が採用された。ベローズ材料にはSUS316Lを採用し、成形は折り目部分への粉塵の噛み込みの恐れがない液圧成形によって行っている。



ベーキング炉(手前)とリーク検査中のダクト(奥)
写真提供：(株)ミラプロ、野田工場

現在、KAGRAの建設は、坑道の掘削が行われており、2015年末には初期観測を開始し、2017年から本格的な重力波検出を目指すべく、作業が進められている。なお、KAGRAと同程度の感度を実現するために、米国のLIGOや欧州のVIRGOも改造工事が進められており、2017年頃に完成予定といわれている。大型重力波検出装置の建設ではやや出遅れていた我が国であるが、KAGRAの完成により、世界で初めて重力波の直接検出に成功する可能性が見えてきた。

極限の計測技術である重力波検出装置の開発で培われた、高安定・高出力レーザー技術、低温技術、真空技術、光学技術や計算機技術などは、幅広い分野での応用が期待できる。サイエンスの分野では、従来の電磁波やニュートリノによる観測では得ることのできなかった新しい情報をもたらす「重力波天文学」の誕生への期待が大きい。重力波は指向性が弱く、1つの観測装置では、発生源の方向を特定しづらいため、国際的な重力波天文学の観測ネットワークを実現させることにより、近い将来にはこれまでとは異なる新しい宇宙の姿を見ることができるようになるかも知れない。

●取材協力 東京大学宇宙線研究所、国立天文台、(株)ミラプロ
●文 石田 亮一

連携記事

KAGRAプロジェクトの概要と展望

KAGRA Project : Status and Scope

黒田和明

東京大学 宇宙線研究所
教授

Kazuaki Kuroda

1 はじめに

20世紀初頭にアインシュタイン (Albert Einstein) が一般相対性理論で予言した重力波は、地上の実験室では発生できたとしてもその効果の微弱さのために検出が不可能であり、実験にかかるような代物ではないと信じられていた。しかし、1960年代に米国メリーランド大学のウェーバー (Joseph Weber) 教授が重力波の検出装置を完成させ、銀河中心から重力波が来ていると発表した¹⁾。この報告が契機となって世界中で検出装置の製作が始まった。1980年代までには、これらの検出器による観測や発生源に関する理論的研究が進み、ウェーバーの検出したとされる重力波は、もし事実だとすると、理論的には銀河中心で極めて巨大な事象が発生していなくてはならず、当時の天文観測から該当する現象が見当たらないことから、誤りだったということになった²⁾。ウェーバーの検出器は、アルミ合金の円筒1.4トンで地面振動や音の影響から免れるように真空中に支持したもので、重力波によって円柱に引き起こされる弾性振動を側面に張り付けたピエゾ素子で検出する共鳴型アンテナだった。重力波の性質は後述するが、アンテナの弾性振動を起こす原因には、地面振動の影響を免れたとしても、室温の熱雑音による振動³⁾、ピエゾ素子の雑音力⁴⁾があり、これらの雑音を上回る重力波信号しか検出できない。より微弱な重力波信号を検出するためには、雑音のより小さい検出器が必要である。熱雑音は温度を下げることで低下でき、ピエゾ素子の雑音はより感度の高い他の形式のトランスデューサーを用いることで改善できる可能性がある。ウェーバーの重力波アンテナで検出された弾性振動の振動は、周波数が1.66kHz、振幅はおおよそ 10^{-15}m の程度であった。より微弱な重力波信号をとらえるために、アンテナ本体を低温化し、量子磁束を測るSQUID素子を用

いたトランスデューサーが開発され⁵⁾、ウェーバーの最初のアンテナから半世紀経った最新のアンテナの感度による検出振幅は 10^{-22}m に達している⁶⁾。しかし、これでもまだ重力波は検出できていない。これは、この種のアンテナの周波数帯域が狭帯域であることと、感度向上がさらに必要であるにも関わらず原理的限界に至っているためである。この限界は量子限界と呼ばれ、これを乗り越える理論も完成しつつある。しかし、実験的にはまだ誰も成功していない。このようなアンテナに代わるものとして、レーザー干渉計を用いた検出器が開発されてきた。この長所は感度を上げるためにはレーザー干渉計の基線長を伸ばせばよいという点にある。

現在、このような長基線レーザー干渉計は、米国LIGO⁷⁾、仏伊合同のVirgo⁸⁾、英独合同のGEO⁹⁾、日本のTAMA¹⁰⁾、CLIO¹¹⁾があり、前三者は感度向上のための改修作業が進められ、日本では筆者らが進めるKAGRA*1プロジェクト¹²⁾が進行中である。

本稿では、多額の研究費や人的資源が投入される大型科学プロジェクトの一つである重力波検出に向けた取り組みを紹介する。

2 重力波と発生源

重力波は、時空の歪み波が光速で空間を伝搬していくものである。これを理解するためには、まず時空について知る必要がある。今となっては驚くべきことであるが、機械工学科をはじめとする工学部の多くの学科の授業では、学生が相対性理論について学ぶことがない。これはこれまで相対性理論が工学部で伝授される実学と無関係であるためであった。しかし、レーザー光を用いたり、位置情報のためのGPSシステムが利用され、量子現象が顔を出すナノデバイスが研究対象

*1 Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT) に対して2012年1月に公募により決定されたニックネーム

となるような現在では無関係ではなくなりつつある。力学の基礎としてニュートンの法則さえ学んでおけばよい時代はとうの昔に過ぎ去ったのである。

ニュートン力学で頭がいっぱいの人は、地球から1.5億km離れた太陽の引力が瞬時に作用すると仮定するので、光が1ナノ秒の間にたった30cmしか進まないということは想像できないかも知れない。光の速さはこの世の中で最高の速さであるにも関わらず有限で、光はのろのろとしか進まないのである。アインシュタインの特殊相対性理論では、光の速さが光源の速さに依らず一定であるという仮定をし、加速度運動をしていない相対速度のみをもつ2つの座標系に優劣はなく対等（相対的）であるとする。これから2つの座標の間の変換式が導出され、その変換式では時間と空間が入り混じってしまうことが分かる。我々の日常での経験では考えられない現象も起きて来る。例えば、光速に近い速度で等速運動をしている電車（座標系A）を地上で観察する（座標系B）と、地上で列車の先頭と最後尾に同時に雷が落ちて、電車の中央の車両に乗っている人は先頭に落ちた雷は早く、最後尾に落ちた雷は遅く観察される（雷の光が観察者に到達するまでに観察者が移動するため）。速度に応じて、距離や時間が変化してしまい、物理法則を2つの座標系で成り立たせるためには時間と空間その物を変換（ローレンツ変換）する必要がある。双子のパラドックスなど多くの啓蒙書の格好の題材となっている現象が起きる。

物理学者は時間と空間とが独立な座標ではなく互いに入り混じった物理的存在だということを知ったのである。等速運動を考えた特殊相対性理論に対して、加速度運動と重力の効果を定式化した一般相対性理論では、時間と空間を合わせて時空と呼び、物質やエネルギーが存在しなければ時空は平坦であるが、物質やエネルギーがあれば、その周囲の時空は曲がっている。そこで、曲がりの原因となっている物体が加速度運動をすると、周囲の曲がりの様子は、時空のひずみ波となって周囲に伝搬していく。これが重力波である。電荷の作る電気力線が急激な電荷の運動により、歪みとなって電波の形で放出されるのと同様である。実はこれらの方程式の形式は次元を別にすれば同じになっている。

重力波は、電磁波と同様に横波であり、光速で伝播する。光に偏光があって2つの自由度があるように、重力波にも2つの偏波がある（Fig.1）。物質やエネルギーの加速度運動から重力波は放出されるが、宇宙に存在する星などの天体は、その起源はさておき、水素やヘリウムの核融合で光輝いているが、徐々に重い元素に転換され、核融合が鉄原子まで進むと燃え尽きて燃料がなくなり、重力による星内部へ向かう力

を核反応で保持できなくなると重力崩壊を起こす。この際に星形成物質の大きい加速度変化が起きて重力波が発生する。この重力崩壊には超新星爆発が伴うが、太陽の8倍程度の質量の星が重力崩壊すると、非常に強い重力のため、原子が存在できずに中性子だけから成る中性子星が誕生する¹³⁾。なお、超新星爆発によって重元素が周辺に撒き散らされる。知られている中性子星の質量は太陽質量のほぼ1.4倍程度であり、磁場を伴って自転することからパルサ的な電磁波を振りまくパルサーとなる。これまで観測されているパルサーは2千個に達する。パルサーが非球対称である時には、回転に伴い重力波が放出される。かにパルサー^{*2}や帆座パルサーは、これまで重力波検出の対象とされてきたパルサーであり、光学や電波望遠鏡でその回転周期を観測して、その周期（の半分）と同期する重力波が検出の対象となってきた。重力崩壊するもとの星が太陽質量の8倍程度よりさらに大きい質量の場合、崩壊の後でできる天体はブラックホールとなり、その周囲は光をも飲み込むほどの強い重力に支配される。重力崩壊する前の質量が太陽質量と同じ程度のように軽い場合には、中性子星ではなく電子の量子力学的な排他力が重力と釣り合った白色矮星となる。恒星がもともと連星である場合など、連星の中性子星が存在していることが知られており、遠くからその運動を観測すると、2つの質点同志が教科書通りの方程式に従って運動するように観測されるはずである。我々の銀河系で早くから発見されていた連星パルサーPSR1913+16からのパルスの精密な長期観測により、重力

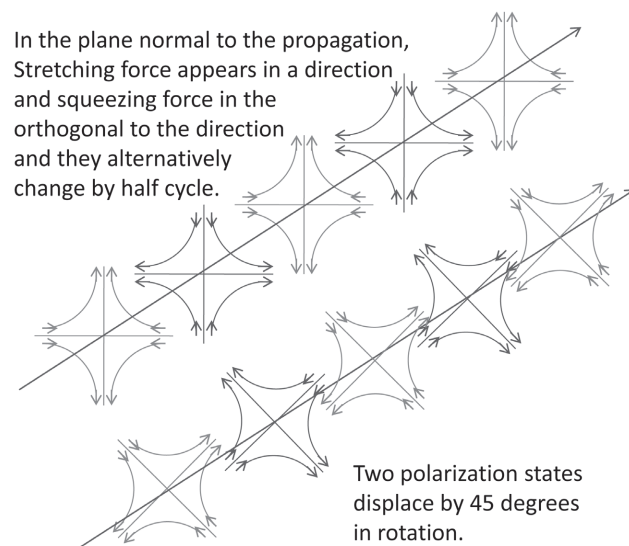


Fig.1 Gravitational wave is transversal plane wave that propagates in the speed of light in vacuum. There are two polarization states that coincide with each other by 45 degree rotation around the axis of the wave direction.

*2 おうし座のかに星雲の中心部にある中性子星

波によるエネルギーの放出がテーラー (J.H.Taylor) とハルス (R.A.Hulse) によって確認され、アインシュタインの一般相対性理論の正しさが検証された¹⁴⁾。ハルスとテーラーは1993年のノーベル賞に輝いた。連星パルサーは公転周期の半分の周期の重力波を放出していくため、連星パルサー系から力学エネルギーが失われ、その分、公転軌道が収縮して終には2つの中性子星が合体してしまう。合体までの時間や放出されるエネルギーは最初の軌道半径と連星の質量だけで決まり、同時に放出される重力波の時間変化の信号も計算できる。合体が起こると大抵の場合、中性子星であり続けることは不可能でブラックホールになる。このブラックホールができる、ブラックホールの時空が固有振動に似た振動を起こすことが分かっており、ここからも特徴的な重力波が放出される。ブラックホールの存在は、そこに落ち込む星屑から発せられるX線やガンマ線などの観測により確認されているが、ブラックホール時空そのものを観測することは重力波によってでしかできない。

3 検出原理

ウェーバーの検出器は重力波によって引き起こされる弾性体の共鳴振動を利用していたが、レーザー干渉計では、鏡

をフリーにしてレーザー干渉計の基線長に沿って振動が引き起こされる現象を利用する (フリーとは振り子状に吊るされた重りが水平方向に狭い範囲では自由に運動できること)。重力波レーザー干渉計の原理はFig.2に示す通りであり、その基本はいわゆるマイケルソン干渉計である。マイケルソン干渉計は、ライト兄弟が初めて空を飛んだ時代に、アメリカ人として初めてノーベル賞に輝いたマイケルソン (A.A.Michelson) が光の波長のレベルで長さを測定できるように発案したもので、エーテルの存在を否定した実験で有名であるが¹⁵⁾、現在では精密な変位計測分野では工業的に多く利用され、産業に必要な不可欠のアイテムになっている。重力波がこのレーザー干渉計に紙面の上から達するとビームスプリッターから鏡1までの距離が伸びる変化を受けるときには、ビームスプリッターから鏡2までの距離は縮む変化を受けるため、信号ポートから取り出される光の位相は、一つの腕における光の位相変化の2倍の変化を示すことになる一方、2つの同等な腕の鏡により、レーザー光源の強度雑音などレーザー干渉計に共通に入る雑音は打ち消されることになる。

重力波レーザー干渉計では、マイケルソン干渉計を基本として、高感度化のため、腕に当たる部分の鏡をファブリーペロー共振器^{*3}で置き換え、レーザー光導入部分にはレーザー光を無駄なく利用するためのリサイクリング共振器^{*4}、信号

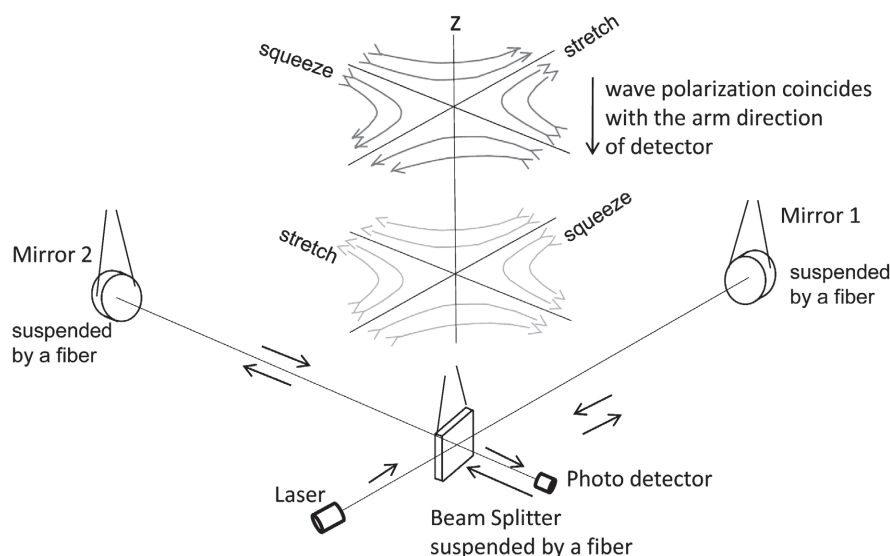


Fig.2 A Michelson laser interferometer is hit by gravitational wave incident vertically with a polarization that coincides with the arm direction of the detector. The gravitational wave causes tidal force that squeezes the length between the beam splitter and the mirror 1 at an instance, whereas the length between the beam splitter and the mirror 2 is stretched. The displacements of mirrors alternatively change with time, which is detected by output of the photodetector that converts the interference laser light into electrical signal.

- *3 高反射率の2枚の球面鏡を対向させ光を繰り返し反射させて共振状態に保つことにより光を閉じ込めることができるようにした干渉計で、閉じ込めの時間は共振の鋭さを示すフィネス (反射率で決まる) と鏡の間の距離で決まる。なお、閉じ込める光の折返しの回数に比例して等価的に光のパワーが増大する。
- *4 光検出器に向かう干渉光強度を最小にする状態が雑音最小の状態、この状態で動作させるが、この時、レーザー光源側に向かう干渉光強度は最大になる (理想的には100%の入射パワーが戻って行く)。これを打ち返すことができるように、適切な反射率をもつ鏡をレーザー光源とビームスプリッターとの間に置き、その位置を入射光の位相と合うように微調してマイケルソン干渉計の光と共振させる共振器系を構成する。これがリサイクリング共振器である。マイケルソン干渉計の腕鏡がファブリーペロー共振器に置き換えられても同様に共振器系を構成できる。

を取り出す側には信号の帯域を広げて取り出す共振器を付け加える構成が一般的である。共振器の仕様など、現実には種々の形式があり得る。KAGRAの干渉計はこれらの改良を加えた典型的な方式を用いているが、将来の開発研究によるバージョンアップが図られることは容易に想像できる。

レーザー干渉計のすべての鏡は地面振動の影響を避けるために精密な防振装置が施され、すべての鏡の熱振動は可能な限り小さい材料が選定され、また、鏡を吊るすワイヤにはこれまた熱雑音の小さい材料が選ばれる。鏡は光を無駄なく反射するように、精緻な誘電体多層膜の成膜が施されるが、その熱雑音の大きさを下げる努力が必要である。レーザービームが通過する空間は残留ガスの屈折率揺らぎが雑音とならない 10^{-6} Paよりよい超高真空中に保たれる¹⁶⁾。kmスケールの巨大な超高真空装置は、その容積の点で世界にも例がない大きさである。レーザービームはその強度揺らぎはもとより周波数揺らぎが小さい必要があり、これらは技術的に解決可能であるものの、レーザービームを構成する光子のために光検出器で発生するショット雑音はレーザーパワーを上げていくしか低減の方策がない。これまで世界で稼働してきた長基線レーザー干渉計のレーザーパワーは10Wクラスのものであり、入口の光リサイクリング共振器で10倍から100倍の間に拡大される。腕鏡に置き換えられたファブリーペロー共振器の中では、このレーザーパワーが光共振器のフィネスに応じて100倍から1000倍に拡大される。TAMA干渉計では数kWのパワーであったが¹⁷⁾、KAGRA干渉計ではこれが500kWになる。鏡面に研磨による微細な凹凸があると光を乱反射するため、この凹凸の大きさはサブナノメートルにする必要がある。ファブリーペロー共振器の中で高いフィネスを保証して無駄のない光折り返しのためには、鏡面の曲がりにも高い精密さが要求される。レーザーの周波数安定度は、重力波検出の感度に直接影響するため、長基線のファブリーペロー共振器を含むフィードバックループによる制御で保たれている。なお、吊るした鏡のゆれを押しとどめるための制御ループが鏡のゆれの自由度の数ほど必要である。例えば、レーザービーム方向の鏡の振り子振動のゆれは、実効値で1pmよりも小さくなるように制御される。

さて、以上の検出器で重力波の観測を行うわけであるが、現在、取り組んでいるKAGRAプロジェクトでは、超新星爆発に伴う重力波や連星パルサーの合体に至るまでの重力波、ブラックホール誕生時の時空の振動による重力波をとらえることができる。この説明は、アインシュタインの理論が正しいという前提での理論的な予測であり、重力波が現実に出れば、これらの予測が正しいかどうかを含めてアインシュタインの理論の検証がなされることになる。問題は、星の重力崩壊や連星パルサーの合体がどの程度の頻度で起こる

のかということであるが、天文観測の統計によれば、超新星爆発は我々の銀河のような大きさの銀河で数10年に1回、連星パルサーの合体は10万年に数回の割合で起こると予測されている¹⁸⁾。なお、天文学的データによれば、我々の銀河程度の銀河は、1辺の長さが1千5百万光年の立方体空間の中に1個の割合で存在する。従って、KAGRAプロジェクトのレーザー干渉計は、連星パルサーの合体による重力波を1年の観測で確実に検出するために、3.3億光年先で起こる合体現象までとらえることのできる感度に設計されている。

4 技術開発

これまで稼働してきたレーザー干渉計に特有の技術は、高性能反射膜を成膜した超低損失の石英ガラス製の鏡¹⁹⁾、高出力レーザー光源、巨大超高真空容器、超高性能防振装置²⁰⁾などであるが、これまでの検出器の感度をさらに上回る感度を実現するためには、さらに新たな技術開発が求められている。しかし、それらのすべてを限られた紙面で紹介することはできないため、ここでは日本のKAGRAプロジェクトで挑戦している新たな技術開発について紹介する。それは、極低温に冷却した鏡を使用し、かつ、地面振動の小さい地下に検出器を設置するという、これまで世界でも試みられたことのない技術である。

室温300Kを3Kにまで冷却すれば、他の物理的因子が変化しなければ、熱振動が10分の1に低下し、単純には感度が10倍になる。現実には、鏡の温度は20Kに設定され、すべての周波数領域で感度向上が見込めるわけではないので、感度改善はこれより悪いが冷却による感度向上は確実に見込める。技術的な問題の最大のもは、これまで開発されてきた石英ガラスが低温で使用できないことであり、これに代わる素材としてサファイヤを選択した。現時点で、低温鏡として使用できる素材は、ダイヤモンドを除けばサファイヤとシリコンしかないことが分かっており、シリコンでは現在1ミクロンのレーザー光の波長を1.5ミクロンに変更する必要がある、光学系の設計に大きい変更を施す必要が生じる。このため、KAGRAではサファイヤを用いることとした。鏡の直径は当初25cm、厚さ15cmであったが、これを可能とする大きさの光学品質の高い単結晶素材を製造することが容易ではないため、現実的な選択として直径22cmとしている。

Fig.3には、防振のために吊るされた鏡の冷却を吊るした2本のファイバーの伝熱特性を利用して行う概念図が描かれているが、この図から明らかなように極低温では熱輻射による冷却は不可能であり、かつ、超高真空中での残留ガスによる冷却はあり得ない。鏡は地面振動から隔離されているだけでなく熱的にも隔離されているので、もしも、設計値を超える

発熱があるとたちまち鏡の温度が上昇してしまう²¹⁾。ファブリーペロー共振器の設計光パワーは、500kWであり、鏡の反射における損失を1ppmとすると、0.5Wの熱が発生する勘定になる。この発熱を10Kに冷却された支持点からファイバーによる熱伝導で冷却を行う。このファイバーの材質としては、熱伝導性に優れ、熱雑音の小さいサファイアファイバーが選択され、その直径を2mmとした。支持点の冷却には、4Kで1Wレベルの冷却能力のあるパルスチューブ型の2段型冷凍機を使用する。鏡は閉空間ではなく真空ダクト方向に開いた空間に吊るされるため、熱の流入過程やレーザー光の乱反射を数値シミュレーションによりできるだけ精密に推定して、クライオスタットを設計する必要がある²²⁾。

検出器を地下に設置することについては、プロトタイプ装置で長年開発研究を進めてきており、実地の経験も蓄えている。設置予定場所は、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山であり、超新星からのニュートリノ検出で有名なカミオカンデが設置されていた地区であり、現在は、それを大きくしたスーパーカミオカンデによる観測が続けられている。すでにある坑道を利用して地面振動の計測を行い、岩盤の中の振動が地中に侵入するに従って低減され、地表面からも200m侵入すれば、それより奥深くの振動振幅と変わらないことを確認している。この結果に基づき、KAGRAレーザー干渉計設置のための空洞掘削の計画が立てられ、現在、掘削工事中である。空

洞内の出水に備えた排水のためにトンネル床面に勾配を取っているが、この勾配は、レーザー干渉計のレーザービームが鉛直に吊るされた鏡に斜めに入ることになり、防振性能を悪くする。しかし、トンネルが水平であると排水のための電動ポンプを設置することが必要となり、これだと振動源をまき散らすようなものでせっかく静寂な地下に設置する意味が薄れる。また、地下掘削によって発生する塵埃は長期にわたって空洞内に浮遊し、鏡を取り扱うクリーンな環境に負荷がかかるなど、新たな環境によって起こる新たな問題を的確に処理してい行かなければならない。

いずれにしても以上の新しい技術開発に関するお手本は世の中には存在せず、筆者らが試行錯誤で開発に取り組んでいるものである。

5 国際協力

本プロジェクトは、重力波の初観測を目指して建設がスタートし、他国の重力波プロジェクトと先陣争いが行われている。単独の検出器で信頼性の高い検出を実現することに疑問を呈する向きもあるが、原理的に単独の検出器による重力波検出は可能である。しかしながら、重力波の性質上、単独の検出では、重力波源の位置を決めることはできない。天空での位置を決めるのは、同等な感度の検出器が同時に3台稼

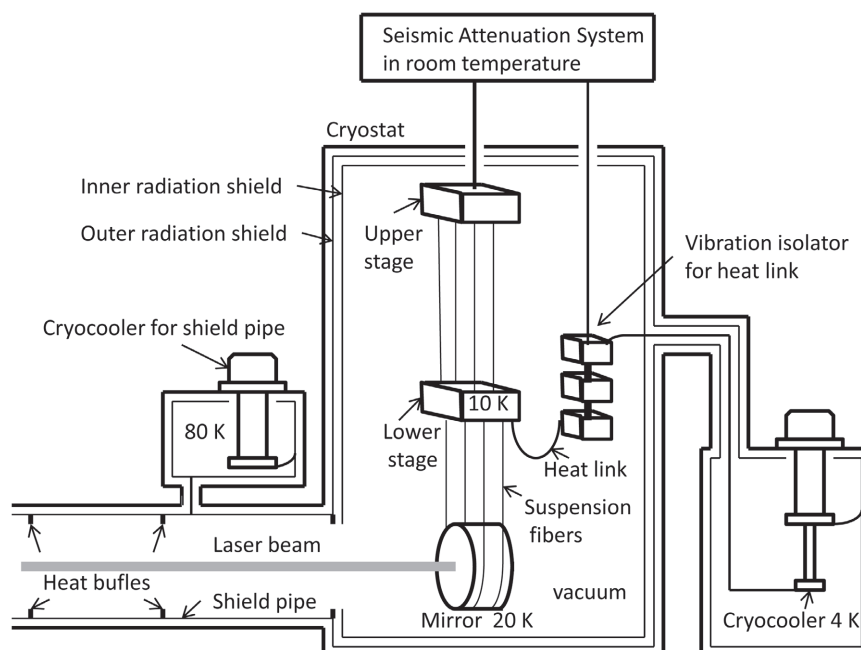


Fig.3 Schematic view of the cryogenic mirror system of KAGRA project. The prototype of the system has been tested by CLIO interferometer placed at Kamioka underground. The mirror is designed to be made of sapphire crystal and suspended by four sapphire fibers. Refrigerators cool the heat link that is connected through a vibration isolation with the lower stage that suspends the mirror. Since the 3 km beam tube is maintained at room temperature, the shield pipe isolates heat entering into the cryostat by reducing the solid angle pursued by the mirror and arranging heat bufiles inside the shield pipe. See text about the heat balance of the mirror.

働している必要がある。次々に重力波が検出され、それらの位置が決定できるようになってはじめて重力波天文学の世界が実現される²³⁾。重力波の最初の検出は筆者らが行うかも知れないし、欧米のプロジェクトかも知れない。また、全体の合同プロジェクトかも知れない。しかし、誰が最初に検出するにせよ、検出されることは間違いなく分かっている、その後最初の検出に劣らず実りある重力波天文学が開始されるであろうことも疑いがない。

このような大型のサイエンスプロジェクトは、共通の目標を持つ他の国々と協力して推進することが望ましいのは、その成果が日本国内にとどまらず人類共通の宝物になるからである。従って、初検出がなされた後には、他国と共同で観測網を整備することになる。また、困難な技術開発を共同開発することにより、新しいノウハウが編み出されこれを共有することで、関係する国々の絆が一層深まり、国際平和に貢献できる。ここで使用する技術はいずれも最先端の技術であり、これまで重力波レーザー干渉計の観測装置を稼働させてきた国々はいわゆるG8の先進国だけであった。KAGRAでは、重力波観測を核とする共同研究への参加を日本の周辺の国々に働きかけており、アジア諸国からの参加者が次第に増えつつある。

技術的協力として、これまでにLIGOプロジェクトを擁する米国の研究グループと技術情報の交換を行う枠組みを構築しており、Virgo計画やGEO計画に参画する研究者が立案したヨーロッパでの次期計画Einstein Telescopeをめぐり、KAGRAの先進技術を核とした研究者交流プログラムが走り始めた²⁴⁾。

6 まとめ

重力波は20世紀初頭にアインシュタインによって予言された時空の波動であるが、直接検出に成功した例はない。しかし、その科学的意義の重要性から地道な技術開発が半世紀にわたって連綿と続けられ、近年の大型レーザー干渉計の相次ぐ建設によりようやくその技術開発が実を結びつつある。そのような中で日本ではKAGRAプロジェクトが進行中であり、建設が終了して本格的な観測が始まる2017年以降、世界と初検出を争うことになる。初検出の後には、世界のプロジェクトと協力して国際観測ネットワークの構築を行い、KAGRAはアジア地域での重力波観測拠点として末長く学術上の国際貢献を果たすことになる。

参考文献

- 1) J.Weber : Phys. Rev. Lett., 22 (1969) , 1320.
- 2) 培風館 : 物理学辞典, 物理学辞典編集委員会編, 初版,

- (1984) , 901.
- 3) C.Kittel : Elementary statistical physics, Wiley, New York, (1958) Sec, 30.
- 4) 変位を電圧等の電気信号に変換するすべてのトランスデューサーでは、電気系電流雑音による反力が生じて被測定対象に雑音力を及ぼす。例えば, H.J.Paik : IL Nuovo Cimento, 55 (1980) 15.
- 5) H.J.Paik : J. Appl. Phys., 47 (1976) , 1168.
- 6) P.Astone : arXiv, 0806.1335v2 [hep-ex] , (2008) .
- 7) B.Abott et al. (LIGO Scientific Collaboration) : Rep. Prog. Phys., 72 (2009) , 076901.
- 8) F.Acernese et al. (Virgo Collaboration) : Class. Quantum Grav., 25 (2008) , 114045.
- 9) M.Prijatelj, et al. : Class. Quantum Grav., 29 (2012) , 055009.
- 10) M.Ando et al. : Phys. Rev. Lett., 86 (2001) , 3950.
- 11) T.Uchiyama and S.Miyoki : J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 46 (2011) , 392.
- 12) 黒田和明, 川邊径太 : 日本物理学会誌, 62 (2007) 9, 659. 黒田和明 : 低温工学, 46 (2011) 7, 385. 最新の情報はKAGRAプロジェクトWebサイト <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 13) K.Nomoto and M.Hashimoto : Phys. Rep., 163 (1988) , 13.
- 14) J.H.Taylor and J.M.Weisberg : Astrophys. J., 345 (1989) , 434.
- 15) A.A.Michelson and E.W.Morely : Phil. Mag., 24 (1887) , 449. 或いはA.A.Michelson : Studies in Optics, Univ. Chicago Press, (1927) , Chap 8.
- 16) 斉藤芳男・高橋竜太郎ほか : J. Vac. Soc. Jpn. (真空) , 44 (2001) 5, 481.
- 17) S.Nagano, et al. : Rev. Sci. Instr., 73 (2002) , 2136.
- 18) M.Burgay, et al. : Nature, 426 (2003) , 531.
- 19) 大橋正健 : 応用物理, 68 (1999) 6, 663.
- 20) R.Takahashi, et al. : Class. Quantum Grav., 25 (2008) , 114036.
- 21) T.Tomaru, et al. : Phys. Lett., A 301 (2002) , 215.
- 22) T.Tomaru, et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 47 (2008) 3, 1771.
- 23) B.F.Schutz : Class. Quantum Grav., 28 (2011) , 125023.
- 24) The ELITES Project Web site : <http://www.et-gw.eu/elitesmainmenu>

(2012年7月15日受付)



入門講座

鋼の防錆・防食技術－7

自動車の防錆・防食

Corrosion and Its Protection of Automobiles

藤田 栄

Sakae Fujita

JFEスチール(株)スチール研究所
部長 主席研究員

1 はじめに

世界の自動車生産台数は1980年に2900万台で、生産地、消費地共に米国、欧州、日本が大勢を占めていた。30年後の2010年には世界の自動車生産台数は7200万台に達した。その自動車市場の内訳をみると中国、インドを含む新興国が急増し、全体の約半分に達した。自動車車体には、自動車本来の機能である走行性に併せて居住性、安全性、耐久性、燃費性能など様々な性能が求められる。これまで自動車の防錆仕様は主に融雪塩散布地域を対象にその地域での腐食実態調査と塩化物を含む各種腐食加速試験との結果を総合的に解析することにより改良されてきた。しかし、現在、生産地・消費地のグローバル化により融雪塩散布地域から高温多湿な熱帯地域に至る幅広い消費地環境を満足する競争力のある防錆設計が求められている。

本稿では、自動車の防錆品質とその対策の概要を紹介するとともに、鉄鋼材料を中心に代表的な部位の腐食機構とそれを再現する腐食試験法の現状を述べる。

2 自動車の防錆品質

2.1 自動車の平均使用年数、平均車齢

日本の乗用車の平均使用年数は、1981年－8.70年、1991年－9.17年、2001年－10.40年、2011年－12.43年と年々延びてきた。また平均車齢も1981年－4.33年、1991年－6.02年、2001年－6.04年、2011年－7.74年と長期化している。自動車の寿命は、駆動系、電子制御系の不具合や、疲労、腐食、衝突などの車体損傷により使用不能となる物理的寿命、付帯する機能が陳腐化して上位機能に移行する機能的寿命、車体整備費用と新車購入費用とのバランスなどから判断される経済的寿命に分類される。2011年度の主要耐久消費財の買替え状況(平成22年4月～平成23年3月)¹⁾をみると、乗用車の

買替え要因は上位品目への移行24.9%、故障25.2%、その他50.9%であった。全体の1/4が故障による買替え要因である。

1990年登録者の世界における自動車の新車販売台数と保有台数の時系列解析を行い自動車の国別残存率を推計した解析結果が報告されている²⁾。この報告では自動車全体の故障特性は、個々のモジュールの平均的な故障特性ではなく、最弱のモジュールの故障特性だけで決まるため、残存率はワイブル分布に従うことが明らかにされている。図1²⁾にワイブル分布に基づいて1990年新規登録車の自動車残存率を推定した結果を示す。乗用車の平均廃車年数は、日本が最も短く、欧州主要国がそれに続き、米国、ブラジル、オーストラリアの順で長くなり、途上国のインド、中国では、日本の約2倍と推計されている。各国間に見られる残存率の差異は、乗用車の車種・用途構成や、国土構造・交通環境の違いに起因しているのではないかと推察されている。腐食が自動車の寿命を決定する要因であるかどうかは国によって異なると考えられるが、古くから融雪塩散布地域では自動車の腐食はその寿命を決定する最重要要因であった。

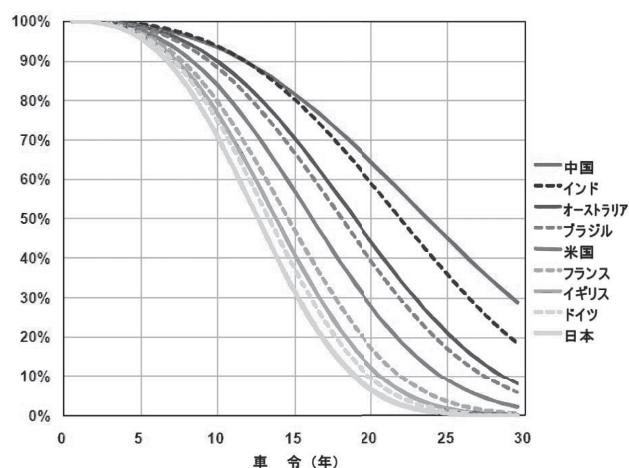


図1 主要国の乗用車残存率推定値(1990年登録車)²⁾

2.2 自動車の防錆品質

1960年代以降、北米、欧州では自動車の走行安全を確保するために冬季間に融雪塩を散布してきた。その散布量は年々急増し、1970年代になって融雪塩による自動車腐食が顕在化し社会問題として取り上げられた。自動車を安全に走行させるために散布した融雪塩が自動車車体の腐食を引き起こし、皮肉にも自動車の安全走行を損なう要因になった。そのため米国や北欧では自動車車体の防錆品質目標、カナダコード(1981年、穴あき腐食なし：20万kmあるいは5年、外観錆なし：6万kmあるいは1.5年)、ノルディックコード(1983年、穴あき腐食なし：6年、外観錆なし：3年)、米国BIG3自主目標(GM、FORD、Chrysler、1989年、穴あき腐食なし：10年、外観錆なし：5年、エンジン内錆なし：2年、床下部品錆なし：1年)が提示された。米国BIG3の自主目標は法的拘束力がなかったが、世界の自動車メーカーの防錆品質指針として長い間位置付けられてきた。同目標は、現在も米国の防錆自主目標として堅持されている。

1998年、ドイツの自動車メーカーから12年穴あき腐食なしの防錆目標が提示され、日本の自動車メーカーに衝撃が走った。米国の10年穴あき腐食なしの目標達成に向けて、日本の自動車メーカーは車体構造・化成処理・塗装の改良と表面処理鋼板の適用化率増大を図り、10年穴あき腐食なしの防錆設計が完成域に入っていた矢先であった。12年防錆の背景には、持続可能な環境保護を目的として欧州連合内で長い間議論を重ねてきた廃棄物管理に向けた一連の活動があった。1997年欧州委員会からELV指令提案(Proposal for a directive on End-of-life vehicles)が提案され、同年ドイツでもドイツ自動車工業会(VDA)とドイツ自動車輸入業会(VDIK)に鉄鋼、金属、プラスチック、ガラス、繊維など14の自動車関連工業、協会が加わって作成した「廃車およびリサイクルのための使用済自動車令」が成立し、翌年1998年4月に施行された。この自動車令発効以後に登録された使用年数12年以内の自動車はすべて無料で引き取ることが義務づけられた。また自動車の廃棄物量をメーカーあたり2002年15%、2015年に5%に削減することが盛り込まれた。輸入車もその対象であった。2002年の段階では12年防錆を保証する自動車メーカーは全体の半分程度であったが、現在はほぼ全自動車メーカーが12年穴あき腐食なしを保証している。

3 自動車の防錆必要部位と防錆技術の進化

3.1 防錆必要部位

図2³⁾に、自動車車体の腐食の厳しい部位を示した。腐食の厳しい部位は、下記の3部位である。

- ①水分や塩化物が滞留しやすい「鋼板合わせ部」
- ②飛び石などにより塗膜損傷を受けやすい「外板外面部」
- ③鋼板端面が露出しやすい「鋼板端部」

鋼板合わせ部の隙間は、化成処理や電着塗装、その後の塗装が廻りにくいところである。またこの隙間には水や塩化物が滞留しやすい。そのため、隙間内部から鋼板が腐食して、最終的に外部に貫通する「穴あき腐食」が問題となる部位である。これはいわゆる隙間環境における裸腐食に分類される。外板外面部は、塗膜損傷部から塗装下地の鋼板が腐食して塗装が膨れ、また赤錆が発生する塗膜下腐食が問題となる部位である。これは、「外観錆」に分類される。「鋼板端部」は塗装硬化時に塗膜が収縮しやすいために、鋼板端部が露出し腐食するところである。この腐食は「端面腐食」に分類される。外観錆や端面腐食は塗装による補修が比較的容易なのに比較して、穴あき腐食は外観から判明したときには外板内面から外板外面にまで達しており、補修が非常に難しい。そのため穴あき腐食は自動車車体の最重要防錆課題として位置付けられている。

3.2 自動車防錆技術の進化

自動車の腐食を防止するために、大別して以下の4通りの対策が実施されている。

- ①自動車構造の改良
- ②化成処理や塗装の強化
- ③防錆鋼板の適用
- ④ワックス、シーラーなどの副資材付与の強化

以下に、自動車構造の改良、化成処理技術、電着塗装技術の技術進歩の概要を紹介する。なお、ここでは中塗り塗装、上塗り塗装、副資材については割愛する。

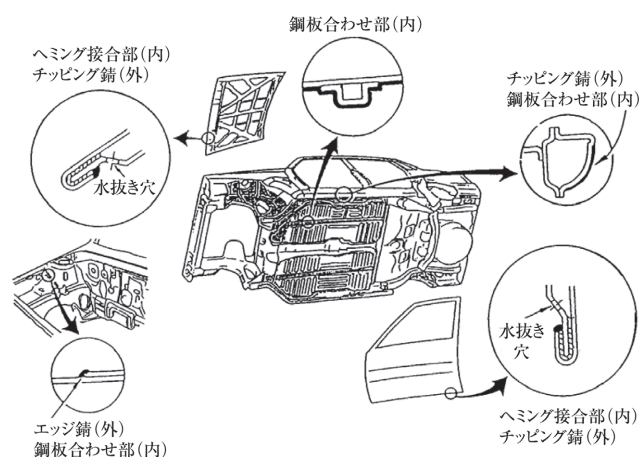


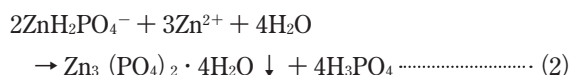
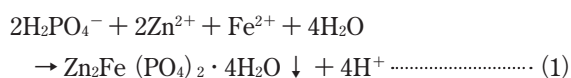
図2 自動車ボディーの防錆重要部位³⁾

(1) 自動車構造の改良

自動車車体には、鋼板合わせ部や袋部に電着塗装が入りやすくなるために鋼板合わせ部の接触面積をできる限り小さくすることや袋部内板に孔をあけるなどの構造上の対策が講じられている。日本車は世界で最もきめ細かく構造改良による防錆対策が実施されている。その防錆力向上効果は大きい。

(2) 化成処理技術の進歩

自動車鋼板には下記の反応⁴⁾により2種類の皮膜が生成する。鋼板上では $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ （フォスフォフィライト）が生成する。亜鉛めっき鋼板上では $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ （ホパイト）が生成する。



自動車の化成処理は、古くはスプレー方式であったが、鋼板合わせ部内部や袋部内部での化成処理性を改良するために、1980年頃から自動車を全浸漬するフルディップ方式が採用された。スプレー方式からフルディップ方式への変更により自動車の防錆性は格段に向上した⁵⁾。亜鉛めっき鋼板ではホパイトが析出するが、フォスフォフィライトと同等の特性を出すために化成処理液にNiやMnイオンを添加している。最近ではリン価格の高騰、Ni、Mnの廃液処理やスラッジ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)の廃棄物処理の点から酸化ジルコニウム系(ZrO_2)による化成処理も一部実用化され始めている^{6,7)}。

(3) 電着塗装技術の進歩

自動車の塗装は、下塗り塗装としての電着塗装、スプレー

塗装による中塗り、上塗りにより達成される。電着塗装の塗膜厚さは通常20 μm 程度である。

電着塗装はイオン性を持った樹脂、顔料を含んだ水溶液を電気分解することにより、金属表面に塗装を施す技術である。電着塗装技術にはアニオン型とカチオン型がある。自動車塗装技術としては古くはアニオン電着塗装であった。耐食性向上の要求から1970年代後半頃からカチオン電着塗装へ移行した。カチオン電着塗装への移行後、厚膜型、高エッジ防錆型、低温焼き付け型の塗料改良が行われた。ELV指令案により鉛使用量の規制が始まり、2000年から鉛フリー型カチオン電着塗装技術が急速に展開が進み、現在でボディーライン、部品ラインはすべて鉛フリーにおき換わっている⁸⁾。最近では、袋部内部の耐食性を向上させるために、電着の塗装回り性を向上させた高付き回り型電着塗料の開発が行われている。

(4) 表面処理鋼板の適用

自動車表面処理鋼板は、1980年代に盛んに開発研究が行われた。商品化されたものだけでもZn-Fe合金系電気めっき鋼板、Zn-Ni合金電気めっき鋼板、有機複合めっき鋼板、溶融亜鉛めっき鋼板、合金化溶融亜鉛めっき鋼板、有機系を含めると10種類程度ある。図3に表面処理鋼板のこの30年間の変遷を示した。現在は日本の自動車メーカーが主に採用している合金化溶融亜鉛めっき鋼板と欧米の自動車メーカーが主に採用している溶融亜鉛めっき鋼板とに二分化している。合金化溶融亜鉛めっき鋼板は、塗装性、溶接性が溶融亜鉛めっき鋼板に比較して優れており、併せて耐食性、プレス性が溶融亜鉛めっき鋼板と同等の特徴を備えるもので、日本が世界に先駆けて開発した高機能表面処理鋼板である。近年、プレス成形性を向上させるために、めっき層の上層に薄い皮膜を生成させたプレス成形性に優れた合金化溶融亜鉛めっき鋼板が

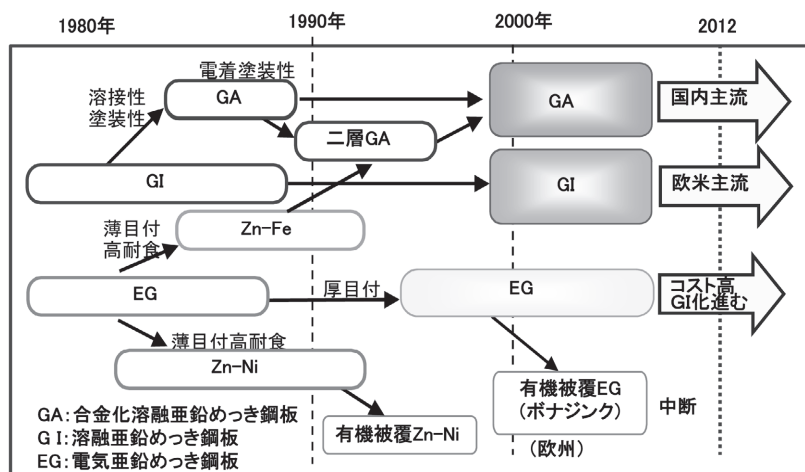


図3 自動車用表面処理鋼板の変遷

採用されている^{9,10)}。

最近、自動車車体の軽量化を目的として様々な高強度鋼板が開発され、自動車用材料として適用されている。鋼板を高強度化し、かつ機械特性を向上させるためには、鋼中へのSi、Mn等の固溶強化元素の添加が極めて有効である。しかしながら、Si、Mnは連続式溶融亜鉛めっきラインにおける再結晶焼鈍工程において、鋼板表面に選択的に外部酸化されるため、溶融めっき濡れ性を劣化させてめっき欠陥を発生させる傾向がある。この問題を解決するため、製造条件の最適化による焼鈍工程での選択外部酸化を抑制する方法が提案されており、同時に様々な高強度合金化溶融亜鉛めっき鋼板が実用化されつつある^{11,12)}。

4 自動車鋼板の腐食機構

4.1 穴あき腐食

藤田らは、北米融雪塩地域で5年から10年間使用した自動車を回収して、その腐食現象を詳細に解析をして、鋼板合わせ部を4段階に分割したモデルを提示した。図4¹³⁾および図5^{14,15)}に、4段階腐食モデルを示す。このモデルでは、①第1段階を、めっき皮膜が下地鋼板を全面被覆しており、その

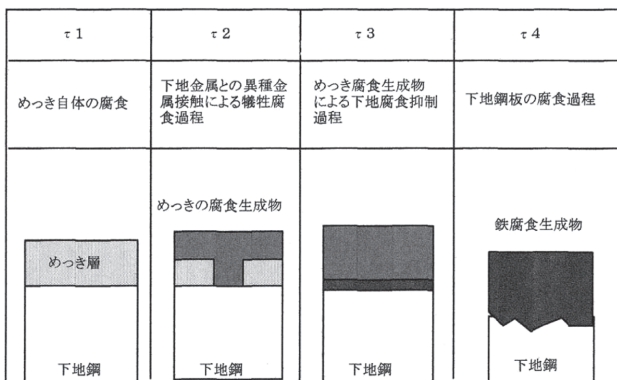


図4 亜鉛めっき鋼板の腐食過程¹³⁾

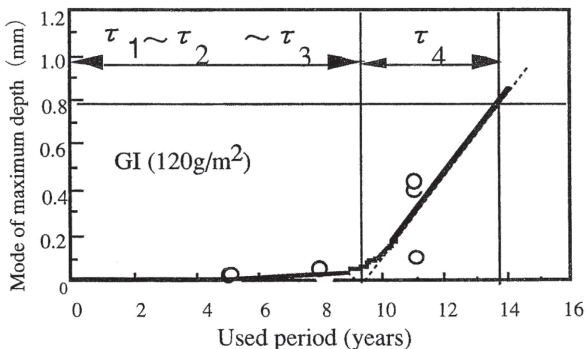


図5 防錆鋼板 (GI120g/m²) が穴あきに至るまでの期間¹⁴⁾

めっき皮膜が腐食する過程 (期間: τ_1)、②第2段階を、めっき面の一部において下地鋼板が部分的に露出し、めっき皮膜が下地鋼板を犠牲防食する過程 (期間: τ_2)、③第3段階を、下地鋼板が露出した周辺にめっき皮膜が残存していても犠牲防食の距離が長い、あるいは腐食生成物の閉塞効果などにより露出した下地鋼板への犠牲防食効果が機能しなくなるが、亜鉛の腐食生成物の効果で下地鋼板の腐食が抑制される過程 (期間: τ_3)、④第4段階を、亜鉛の腐食生成物による下地鋼板の腐食抑制効果が失われ、下地鋼板が腐食し穴あきに至るまでの過程 (期間: τ_4) としている。自動車の鋼板合わせ部では、めっき皮膜が下地鋼板を犠牲防食する過程の期間、 τ_2 は比較的短く、亜鉛の腐食生成物の効果で下地鋼板の腐食が抑制される過程の期間、 τ_3 が比較的長いと報告されている。また亜鉛の腐食生成物の効果で下地鋼板の腐食が抑制される過程を模擬して、回収車のサイドシル内部で検出されたZnOやZnCl₂・4Zn(OH)₂と鉄錆を腐食試験前にあらかじめ充填した合わせ部模擬試験を行い、亜鉛腐食生成物が下地鋼板の腐食におよぼす影響を検証した結果、冷延鋼板合わせ内部にZnOやZnCl₂・4Zn(OH)₂などの亜鉛系腐食生成物を充填するとオキシ水酸化鉄(III)とFe₃O₄の生成が抑制されていることから、ZnOやZnCl₂・4Zn(OH)₂などの亜鉛系の腐食生成物は、鉄錆の酸化還元反応を抑制し、下地鋼板に対して腐食抑制剤として作用しているものと報告されている¹⁵⁾。

図6¹⁶⁾に走行8年におけるドアヘム部およびサイドシル鋼板合わせ部の最大腐食深さの最頻値とめっき付着量の関係を示す。この試験では当時実用化されていためっき鋼板を評価した。その結果、鋼板合わせ部の腐食はめっき種の違いに依存しなく、めっき付着量が多いほど鋼板の穴あき腐食が抑制されることが明らかにされた。

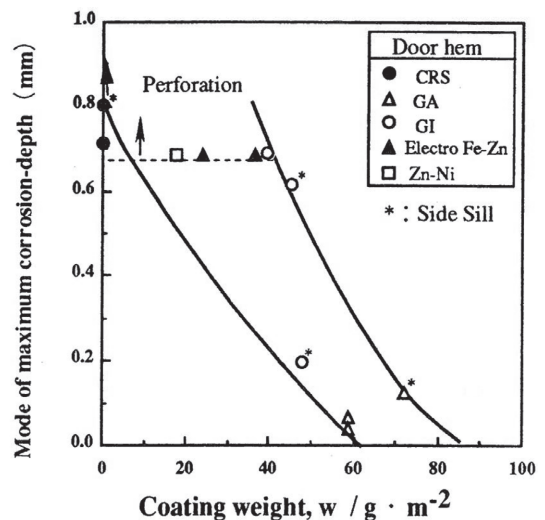


図6 臨海工業地帯8年走行車の腐食穴深さとめっき付着量の関係¹⁶⁾

4.2 外観錆

図7¹⁷⁾は自動車の外板外面にカッターナイフで人工的に損傷を加え、臨海工業地帯を8年間走行した後、塗膜を剥離し、塗膜下の腐食進行状態を観察した結果である。亜鉛めっきを施さない冷延鋼板では、糸錆腐食が進行している。これに対して溶融亜鉛めっき鋼板（めっき付着量90g/m²）では、糸錆の発生が抑制されていることが分かる。併せて同報告では外観腐食についても、穴あき腐食と同様にめっき種の違いに依存しなく、めっき付着量が多いほど塗膜膨れが抑制されることが明らかにされた。

塗膜下腐食の劣化現象には、図8¹⁸⁾に示したように、①傷部周辺の塗膜が膨れる現象と、②傷部から赤錆が発生し、錆びの生成により塗膜膨れが成長する現象とがある。①は塩水

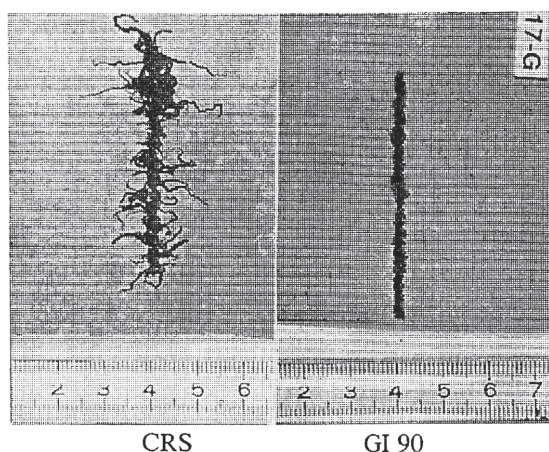


図7 自動車外板外面に発生した塗膜下腐食の形態¹⁶⁾

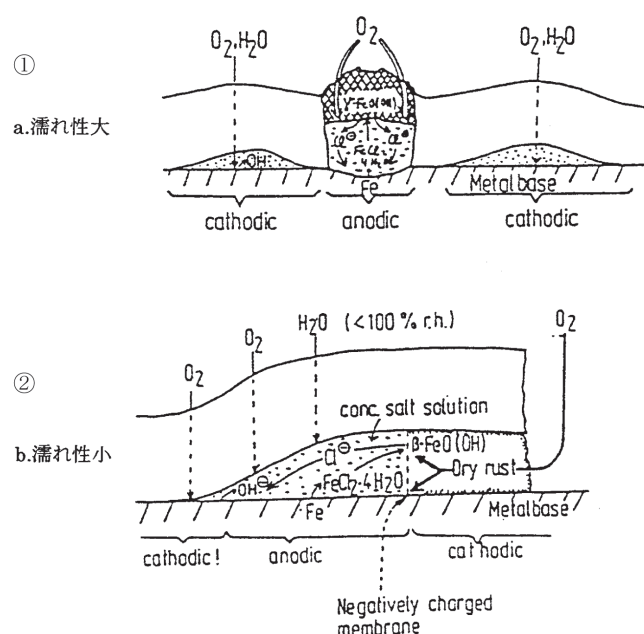


図8 塗膜下腐食機構モデル (W.Funke)¹⁸⁾

噴霧や塩水浸漬のような環境の濡れ性が高いときに起きる塗膜下の腐食現象である。傷部がアノードとなりその周辺の塗膜下部がカソードとなる電池を形成して塗膜下はアルカリ環境となるため塗膜膨れが進行する。②は比較的湿潤が低い環境で起きる塗膜下の腐食現象である。冷延鋼板の場合には塗膜膨れ先端部が局部アノードとなって糸状に塗膜膨れが進行する。実態腐食から明らかなように、自動車外観では②の腐食形態で塗膜下腐食が進行する。

図9¹⁹⁾に、外観腐食に関するカッター傷部の塗膜膨れ幅とめっき付着量の関係を示す。亜鉛めっき付着量が多いほど、塗膜の膨れ幅が小さくなり、腐食が抑制されていることが分かる。

4.3 シャーシー・足回り溶接部腐食

足回り部品は自動車車体を支えている部品である。自動車の走行安全性を確保する上で、足回り部品の防錆確保は重要である。足回り部品は化成処理と電着塗装により防錆されており、一般的に上塗り塗装は施されない。この部品はアーク溶接による鋼板を溶接しているため、非めっき鋼板では溶接熱により溶接部近傍に鉄の酸化皮膜が生成しやすい。鉄の高温酸化皮膜が生成したところでは化成処理皮膜が生成しにくいために、そこを起点にして塗膜劣化が進行し、鋼板の腐食が起きやすくなる。防食対策として電着塗装の強化やめっき鋼板の適用が有効とされる。溶接技術を改良することにより耐食性を改善できるとの報告もされている¹⁹⁾。

5 自動車腐食試験法

腐食試験の使用目的は、品質管理（工場出荷検査、受入検査など）と材料評価（材料開発試験、材料施工性試験、腐食クレーム再現試験、腐食機構解明試験など）に大別される²¹⁾。

表1および表2に、自動車用腐食試験法（工業規格）と自動車用腐食試験法（企業規格の一例）を示す。評価部位を明

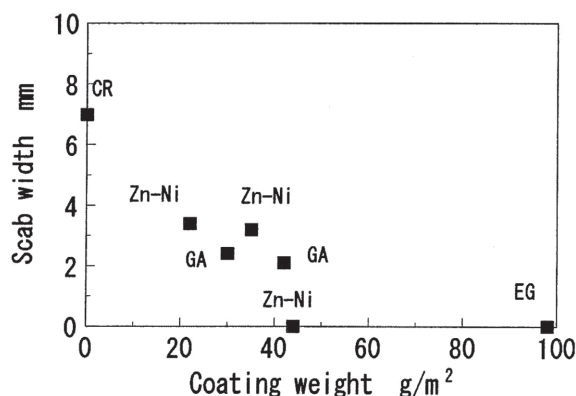


図9 沖縄10年走行車の塗膜膨れ幅とめっき付着量の関係¹⁹⁾

記していないが、その多くは外観腐食試験法として用いられている。代表的な試験法が塩水噴霧試験方法 (SST、JIS Z 2371) である。この試験法は、試験方法が非常に簡易的でかつ短期間に評価結果が得られることから金属の品質管理試験法として広く使われている。

図10²²⁾に沖縄海岸暴露における塗装表面処理鋼板の塗膜膨れ幅の経年変化と同塗装鋼板の塩水噴霧試験による結果を示す。沖縄の海岸暴露では冷延鋼板を下地とした塗装鋼板に発生した塗膜膨れ幅が最も大きく、亜鉛めっきを施すと塗膜膨れが抑制される。これに対して、常時濡れている塩水噴霧試験では、亜鉛めっきを下地とする塗装鋼板の塗膜が最も大きく、冷延鋼板が最も小さくなり、耐食性の序列が大気環境と逆転している。この耐食性の逆転は4.2節で紹介したように塩水噴霧試験と実環境との腐食機構が異なるためである。塩水噴霧試験法は工場出荷検査、受入検査など金属の品質管理試験法としては非常に優秀な試験法であるが、実環境での

材料評価腐食試験には適さない試験法であることが分かる。

塩水噴霧試験に替わる自動車用腐食試験法が国内外で開発されてきた。国内では、日本自動車技術会は実車適合性の高い外観腐食試験法を開発するプロジェクトを1980年代後半に開始した。各種表面処理鋼板の無塗装材、塗装材を供試材として、沖縄暴露試験との相関から試験条件を絞込み、1991年に「自動車用外観腐食試験法JASO M 610-1991」が規格化された。この試験法は、無塗装材については板厚減少および腐食減量で、塗装材については人工傷からの塗膜膨れ幅と剥離幅で耐食性を評価する方法である。同規格は1999年にJIS規格「めっきの耐食性試験方法 (JIS-H8502-1999) の中性塩水噴霧サイクル試験」として、また2001年に「塩化物を含んだ乾湿環境における腐食促進試験法”Corrosion of metals and alloys - Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, “dry” and “wet” conditions. (ISO 14993 : 2001 (E) “)」としてISOに規格化されている。米国では、米国自動車技術

表1 自動車車体用腐食試験法の工業・協会規格

規格No	機 関	規格名	試験条件	JIS, ISO 規格関係
JIS Z2371	日本工業規格	塩水噴霧試験方法	中性塩水噴霧試験 5%NaCl水溶液, 35℃, 6.5 < pH < 7.2	ISO 9227
			酢酸塩水噴霧試験 5%NaCl + 酢酸, 3.0 < pH < 3.1, 35℃	
			キヤス試験 5%NaCl + 塩化銅+塩化銅 (II) 水和物, 3.0 < pH < 3.1, 35℃	
JASO M609 : 1991	日本自動車工業会	自動車用材料腐食試験方法	SST (5% NaCl, 35±1℃, 2h) → Dry (60±1℃, 20-30%RH, 4h) → Wet (50±1℃, > 95%RH, 2h)	→JIS H8502 →ISO 14993
JASO M610 : 1992	日本自動車工業会	自動車部品外観腐食試験方法	同 上	→ISO11997-1 A
SAE J 2334-2003	Society of Automotive engineers Standards	Laboratory Cycles Corrosion Test	Daily: Wet (50℃, 100%RH, 6h) → Salt application-Dip, Fog or Spray (0.5%NaCl+0.1%CaCl2+0.075%NaHCO3, 25℃, 15min) → Dry (60℃, 60% RH, 17h 45min) -Weekend and Holiday only: Dry (60℃, 20-30% RH, 48hrs)	
VDA 621-415	Verband der Deutschen Automobilindustrie	Testing of Corrosion Protection of Vehicle Paint by Alternating Cycles Test	Monday: SST (5%NaCl, 35℃, 24h) → Tuesday to Friday: Wet (40℃, 95% RH, 8h) → Wet (23℃, 50% RH, 16h) → Saturday&Sunday: (23℃, 55% RH, 24h) 全部で10週間で終了	ISO 11997-1 B

表2 自動車車体用腐食試験法の企業規格例

規格No	企業名	規格名	試験条件
GM9540P	General Motors	Accelerated Corrosion Test	Daily: Ambient climate (directSST×4times, 25℃, 40-50% RH, 8h) → Wet (49℃, 100% RH, 8h) → Dry (60℃, < 30% RH, 8h) -Weekend and Holiday only: ambient climate 塩水噴霧はambient climate 8時間内に4回行う
STD1027, 1375	VOLVO	Accelerated Atmospheric Corrosion Test- Volvo Indoor Corrosion Test (VICT)	温度一定-相対湿度変化 Humid stage (35℃, 90%RH, 7hr) → Transition stage (35℃, 90 → 45%RH, 30min) → Dry stage (35℃, 45%RH, 4hr) → Transition stage (35℃, 45 → 90%RH, 30min) → 【Every 84 hours (7wet/dry cycles)】 Salt dip (1wt%NaCl, 1hr)
ECC-1	Renault	Corrosion test with automatic changeover of humidity & drying phases	【main test cycle】 Contamination (NaCl1%, 35℃, 30min, pH4) → Flush (35℃, 5min) → Wall rinsing (35℃, 5min) → Flush (35℃, 5min) → Forced drying (35℃, 20% RH, 1hr35min) → Drying (35℃, 55% RH, 1hr35min) → 【Sub test cycle】 Humidity (35℃, 90%RH, 1hr20min) → Drying (35℃, 55% RH, 2hr40min) main test cycleを行った後にSub test cycleを5回繰り返す

者協会 (SAE) と米国鉄鋼協会が1980年代後半に外観腐食試験法開発の共同プロジェクトを開始した。北米およびカナダで、自動車に試験材を取り付けて走行する on-vehicle 試験と19種類の腐食試験を行い、「自動車用外観腐食試験法 (SAE J2334)」を1998年に規格化した²³⁾。この試験法は、めっき鋼板の種類および化成処理の種類によらず、実車の腐食と最も高い相関性を示したことが報告されている。これらの腐食試験法はいずれも外観防錆を対象としたものである。

穴あき腐食を特定した工業規格はない。自動車の防錆設計上、穴あき腐食対策は極めて重要であることから、米国では穴あき腐食試験法として自動車用外観腐食試験法 (SAE J2334) の腐食条件と鋼板合わせ部の模擬的な試験片を組み合わせる試験法を推奨している²⁴⁾。藤田らは、穴あき腐食試験法の実環境再現性を評価する指数、PCI (Perforation Corrosion Index) を提案し、それを用いて国内外の自動車用に規格化された工業規格と自動車メーカーの腐食試験法を評価した²⁵⁾。また、国内では自動車用外観腐食試験法 (SAE J2334) を基本腐食条件として、穴あき腐食におよぼす試験片構造の影響を調査した結果、防錆鋼板の穴あき腐食を腐食試験法により評価する場合鋼板合わせ部の隙間の幅などを模擬的に調整することなく、自動車の製造工程に従った試験片を用いることが重要であると報告している²⁶⁾。

さらに最近、欧州から新自動車腐食試験法 (N-VDA 法) が提案され、自動車の外観腐食試験法ならびに穴あき腐食試験法として再現性が高いと報告されている²⁷⁾。

自動車車体では、前述した外観腐食、穴あき腐食の他に、エンジン回りや足回りの腐食なども自動車防錆設計上重要な課題である。これらについても各社各様の腐食試験法が規格化されているが、今後、自動車の生産地域、消費地域がグローバル化するに伴って自動車車体に係わる各種腐食試験法が統一化されることを期待したい。

6 まとめ

自動車の防錆品質目標と防錆対策の変遷を述べるとともに、鉄鋼材料を中心に代表的な部位の腐食機構とそれを再現する腐食試験法の課題を紹介した。

自動車の防錆技術は、日本の自動車産業の興隆に後押しされる形で、高生産性 (加工、溶接、塗装) と高耐食性を兼ね備えた化成処理、塗装、表面処理鋼板の研究開発により急速に進化した。しかし、その一方で、鉄鋼材料の観点では、腐食試験において高耐食性を示す新防錆鋼板の多くが、実車では期待したほどの耐食性を示さなかった。材料の耐食性序列が腐食試験と実環境とで入れ替わるという現象は、鉄鋼材料の材料開発方針そのものを揺るがした。この貴重な教訓から、その後実環境における亜鉛系めっき鋼板の耐食機構と腐食試験法の実環境再現性の研究が表面処理鋼板の分野で盛んに行われてきた。腐食試験は、品質管理試験と実環境腐食再現試験の両方の位置付けがある。大量消費時代には物理的寿命に達する前に、ほとんどの商品は機能的寿命が尽きて陳腐化して寿命に達していたと思われる。その時代には腐食試験は品質管理試験としての位置付けで済んでいた。しかし、現在、社会は、資源・廃棄物・エネルギーを最小化する循環型システムへ移行しようとしている。このような中で、材料・装置・構造物の物理的寿命を定量的に予測する寿命予測技術が求められている。今や、腐食試験は品質管理試験に加えて実環境再現試験としての位置付けが重要になってきた。また、それによる寿命予測技術へ展開が必要となっている。

自動車の生産地・消費地は全世界的に拡大している。商品の使われる環境は多種多様になり、従来とは異なった寿命、機能を備えた新表面処理鋼板が必要とされてくることが期待される。21世紀の急変する社会構造、生産地域、消費地域での材料の需要に的確にかつ敏速に対応できる新表面処理鋼板を開発していくために、定量的な予測ができる評価技術の開発は不可欠であると考えている。

参考文献

- 1) 消費動向調査 (全国、月次) 平成23年3月実施調査結果 (平成24年4月公表), 内閣府経済社会総合研究所, (2012), 13.
- 2) 佐野雅之: 同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター, ITEC Working Paper Series, (2008) 08-06.
- 3) 深田新: 表面技術, 43, (1992) 6, 516.
- 4) 最新工業塗装ハンドブックハンドブック (第1刷), 株式会社テクノシステム発行, 東京, (2008年), 159-167.
- 5) T.C.Simpson, A.W.Bryabt, G.Hook, R.J.Swinko and R.W.Miller: Corrosion 95, NACE, Orlando, (1995), 394.

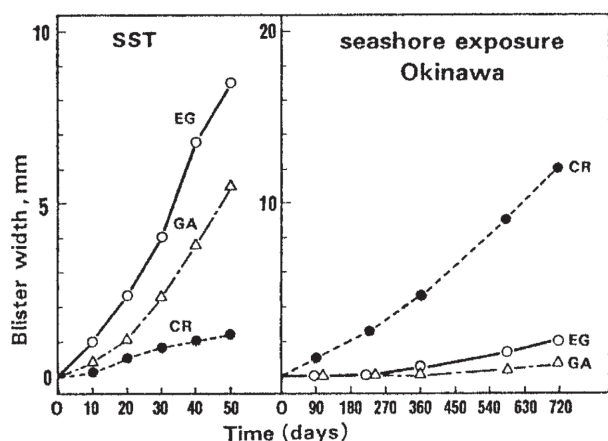


図10 沖縄暴露と塩水噴霧試験における塗装鋼板の塗膜膨れ幅¹⁹⁾

- 6) P.Kuhm (Henkel AG&Co) , 8th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech2011) , (2011) , 283.
- 7) 細野宏, 岡田栄作 : (社) 自動車技術会学術講演会前刷集, (2006) 46-06.
- 8) 村松孝亮 : 塗装工学, 46 (2011) 11, 363.
- 9) 落合忠昭, 鈴木眞一, 宮坂明博, 福井政治, 平田雅裕, 伊藤健 : 新日鉄技報, (2003) 378, 44.
- 10) N.Yoshimi, H.Masuoka, S.Taira, T.Imokawa, M.Nagoshi, Y.Yamasaki, Y.Sugimoto and S.Fujita : Proceedings of The 7th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech'07) , (2007) , 504.
- 11) 例えば, Y.Suzuki, T.Yamashita, Y.Sugimoto, S.Fujita and S.Yamaguchi : ISIJ Int., 49 (2009) 4, 564.
- 12) Y.Suzuki : 8th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech'11) , Genova, Italy, (2011) , 61.
- 13) 藤田栄 : 亜鉛系表面処理鋼板の防錆機構フォーラム活動記録, (社) 日本鉄鋼協会, 材料の組織と特性部会, (2001年7月20日) , 193.
- 14) 藤田栄, 梶山浩志 : 第43回腐食防食討論会講演集, (1996) , 331.
- 15) 藤田栄, 梶山浩志, 山下正明 : 材料と環境, 50 (2001) , 115.
- 16) 佐々井圭三, 馬淵晃, 藤田栄, 梶山浩志, 山下正明 : CAMP-ISIJ, 9 (1996) , 474.
- 17) S.Fujita : Proc. of The Int. Conf. on Zinc and Zinc Coated Steel Sheet (GALVATECH98) , ISIJ, Tokyo, (1998) , 686.
- 18) W.Funke : Prog. Org. Coatings, 9, (1981) , 29.
- 19) 本田和彦, 西村一実, 林公隆, 山崎文男, 湯浅健正, 井上郁也 : CAMP-ISIJ, 9 (1996) , 473.
- 20) 鈴木励一 : 溶接技術, (2012) 5, 52.
- 21) 第2版鉄鋼便覧Ⅲ (CD-ROM), 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, 第4章2編4・8・5, (1980)
- 22) 黒川重男, 番典二, 大和康二, 市田敏郎 : 鉄と鋼, 72, (1986) 8, 223.
- 23) H.E.Townsend, D.D.Davidson and M.R.Ostermiller : Galvatech98, (1998) , 659.
- 24) D.Davidson, L.Thompson, F.Lutze, B.Tiburcio, K.Smith, C.Meade, T.Mackie, D.McCune, H.Townsend and R.Tuszynski : SAE TRANSACTIONS, 112 (2003) 6, 1236.
- 25) S.Fujita and D.Mizuno : Corrosion Science, 49, (2007) , 211.
- 26) 大塚真司, 星野克弥, 水野大輔, 藤田栄 : CAMP-ISIJ, 21 (2008) , 554.
- 27) A.LeGac, N.LeBazec and D.Thierry : Eurocorr 2010, Moscow, (2010) , 1668.

(2012年7月23日受付)



若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

変化をチャンスに ～製鋼精錬研究の現場から～

佐々木直人*

Naoto Sasaki

新日本製鐵(株) 技術開発本部
プロセス研究開発センター
製鋼研究開発部 主任研究員

1 製鋼プロセスの研究開発

製鋼工程では、不純物濃度や凝固組織など鋼の「生まれ」を決定づけるため高精度な制御が必要とされる。同時に、全ての鋼が通過するためコストや生産性に大きなインパクトを与える重要な工程でもある。したがって、製鋼工程での課題のブレークスルーは、鋼材の性質や事業所の収益の大幅な向上に直結する。製鋼プロセス研究の面白みは正にそこにあると感じている。

その中でも、筆者は製鋼精錬工程のプロセス改善に携わってきた。精錬分野では特に近年、環境規制や資源高騰などで制約条件が厳しく変化しており、従来の手法では解決は難しい。しかし、だからこそ研究開発に対する期待は大きく、新たな手法や視点でのアプローチが必要となる。

例えば、転炉の生産性向上には高速送酸化が有効だが、ダスト発生量の抑制を考慮しながら送酸ノズルを設計する必要がある。多孔ノズルからの酸素噴流の合体や燃焼など各々の現象について、直近では高精度な予測が可能になっている^{1,2)}。近年、計算機能力は飛躍的に向上しており、精錬分野でも数値流体解析が有効なツールになりつつある。

製鋼スラグの発生量低減も重要なテーマである。新日鐵では、熱収支改善及び反応効率向上を目的に転炉型の溶銑脱りんを開発し、各所に導入してきた(図1)。現在では低塩基度での処理を特徴とする転炉型へのシフトが完了し、スラグ発生量の抑制効果を享受できる段階にある。更なる発展のためには、転炉型予備脱りん自体の反応効率を更に向上させたい。

従来の粉体を吹きこむトーチカー方式に対して、転炉型脱りんはトップスラグ/メタル間の反応が主で、かつ、酸素ポテンシャルが高く、塩基度が低い。そのため反応機構も大きく異なる。したがって、飛躍的な反応効率向上のためには、今一度基礎現象に立ち戻って考える必要がある。

例えば溶銑脱りんでは、Fe-FeO平衡で決まる酸素分圧を

基にすると、メタルに対するスラグへのりん分配比は2000程度が期待される。しかし実際には100程度しか得られない。これは溶銑中の炭素によってスラグ/メタル界面の酸素分圧が引き下げられた結果と考えられる(図2)。この非平衡状態をFe-FeO平衡側に引き上げることができれば極めて少量のスラグでの精錬が可能になる。今後取り組むべき課題の一つと考えている。

2 溶銑脱りん処理の 反応効率改善に関する研究

溶銑脱りんにおける基礎現象を考える上では、スラグ中ふっ

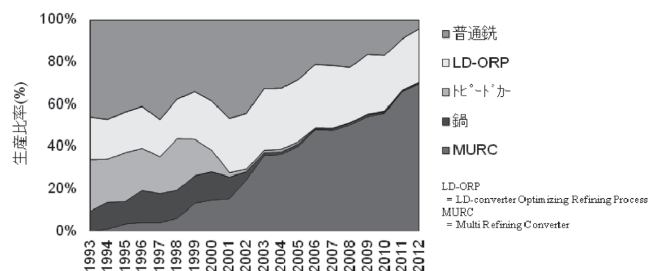


図1 溶銑処理率の推移³⁾(図中LD-ORP、MURCが転炉型)

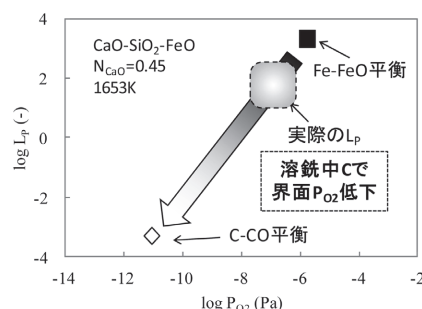


図2 スラグ及び溶銑の平衡酸素分圧 P_{O_2} とスラグ/メタルのりん分配比 L_p

* 現 新日鐵住金(株) 技術開発本部プロセス研究所製鋼研究開発部 主幹研究員

素濃度の制約が、もう一つの大きな変化となる。2001年のふっ素の溶出基準の設定により、効果的な媒溶剤であった蛍石の使用が制限された。従来、均一液相としての取扱で十分議論できていたものが、スラグ中の固相の寄与と、石灰分の溶解とを考慮することが必要となった。これらの基礎現象に注目してスラグ発生量の低減に取り組んだ事例を以下に紹介する。

2.1 脱りん反応に及ぼすスラグ中固相の影響⁴⁾

溶銑脱りんの精錬材CaOは、脱珪によって生成したSiO₂と反応して、珪酸カルシウム $n\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($n=1\sim3$ など)の固相としてスラグ中に存在する。中でも $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (以下C₂Sと記す)は平衡論的にはりんを高濃度に固溶することが知られている⁵⁾。筆者らは反応中にC₂Sにりんを濃縮することができれば、液相のりんを低濃度に維持でき、全体の反応効率を向上させることが可能ではないかと考えた。

そこで、異なる初期[Si]濃度の溶銑に生石灰と酸化鉄を添加する小型(メタル量600g)の脱りん実験を行った。CaO添加量は一定で、溶銑中Siはほぼ全量がSiO₂になるので、初期[Si]濃度によって生成スラグのCaO/SiO₂比が変化する。初期[Si]濃度と脱りん生石灰効率の関係を図3に示す。酸化鉄がSiの酸化に、CaOがSiO₂の固定に消費されるため、全体的には初期[Si]濃度の増加に伴い、脱りん生石灰効率は減少している。しかし、初期[Si]=0.15 mass%近傍で極大値を示し、初期[Si]=tr.の高塩基度の水準とほぼ同レベルとなった。

図3のI～IVの点について実験終了後のスラグの鉱物相解析を行った。その結果をそれぞれ図4のI～IVに示す。上段はSEM像であり、下段は組成から推定される鉱物相を示している。脱りん効率が極大を示したIIIの領域では、PはCaOとSiO₂との固溶体として存在し、かつI、II、IVで観察されたfree-CaOなど他のCaO含有相の存在は認められなかった。

反応中に存在していた固相を上記結果から検討し、図5に示した。図3、4のIIIで代表される領域は、C₂S飽和領域と推定される。III以外の領域ではPを固溶しない固相が存在するため液相中のP濃度が高くなる。これに対してIIIの領域では固相中にPが固溶するために液相中のP濃度が低位に保た

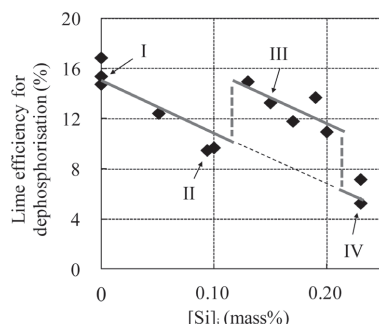


図3 初期[Si]濃度[Si]_iと脱りん生石灰効率の関係

れ、結果として高い脱りん効率が得られたと考える。

以上のように、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2\text{-}3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 系状態図にヒントを得て、反応中のスラグ内の固相に積極的にりんを濃縮することで、脱りん反応効率の向上が可能であることを溶銑脱りん実験で示した。

その後、マルチフェーズフラックスに関する研究会⁶⁾などでスラグ中固相に関する知見が整備され、現在では定量的な議論ができるようになりつつある。

2.2 転炉滓の溶解挙動の調査⁷⁾

転炉型脱りんでは、CaO分の再利用のために転炉滓がリサイクルされている。転炉滓はプリメルト品であるため迅速な溶解が期待されるが、1600℃を超える脱炭吹止温度を経て凝固するため脱りん処理温度域では固相率が高く、さらには未溶解のCaOを含んでいる場合が多い。このため転炉滓の溶解速度はスラグ組成の影響も受けると考え、その依存性を調査した。

図6に、CaO/SiO₂=1.0のスラグ中で100rpmの速度で回転させたときの転炉滓の溶解挙動を、石灰の結果⁸⁾とともにプロットした。転炉滓は高い半径減少速度を示し、かつ、CaOペレットとは異なり、溶媒側の物質移動律速では整理できなかった。転炉滓中に液相が生成するためと考えられる。

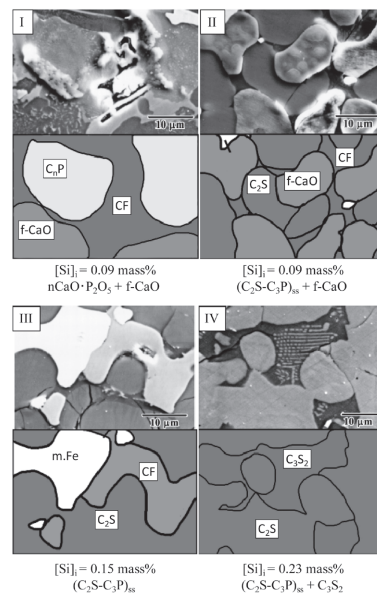


図4 脱りん処理後スラグのEPMA解析結果⁴⁾

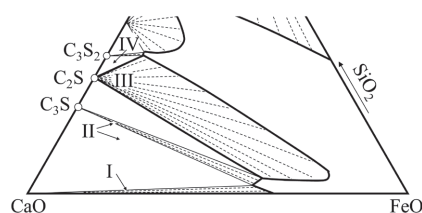


図5 実験温度(1673K)でのCaO-SiO₂-FeO系の等温断面図⁴⁾

高塩基度 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.5$) 条件においても同様の調査を行った。この場合、先の低塩基度条件に比べて、著しく溶解速度が低下した (図6)。実験後の試料を観察すると、実験前から半径が殆ど減少していない部分と、選択的に損耗している部分が観測された (図7)。転炉滓は、比較的高融点の高 CaO 濃度相と低融点の高 FeO 濃度相に分離している。特に高 CaO 濃度相では塩基度 1.5 の条件では C_2S の生成による溶解障害が発生したと考えられる。一方で、高 FeO 濃度の低融点相が液相になることにより部分的に剥離し、加えて界面積が増大するためさらに溶解が進行したと考える。このように、プリメルト状態である転炉滓のリサイクルにおいても、高融点相によって溶解が律速されるため、スラグ組成を考慮する必要性がある。現在では転炉滓などプリメルト品の溶解についてシミュレーションモデル¹⁰⁾で精緻な検討が可能になっている。

スラグ中ふっ素濃度の制限は、固相の影響や溶解遅れなど新たな課題を生み出した。しかし、基礎現象に基づいて考えることで、固相の積極利用と言う思想が生まれ、新たな可能性が開けたと考えている。定量的な知見も充実してきたが、実操業では極限まで利用出来ているとは言えず、精錬材の溶解挙動を含めたスラグ組成の最適ルートの探索、制御手法の開発など、今後も取り組んで行きたい。

3 製鋼精錬分野の活性化に向けて

国内の製鋼精錬分野の研究者は残念ながら過去に比べて少なくなっている。しかし、少ないからこそ緊密な議論ができ

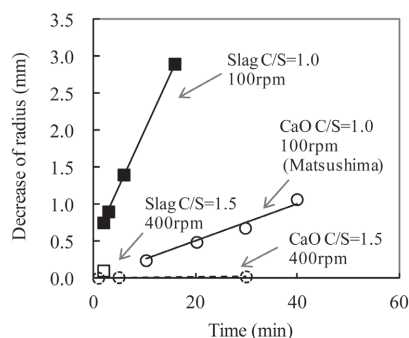


図6 低塩基度条件での生石灰と転炉滓の溶解速度比較⁷⁾

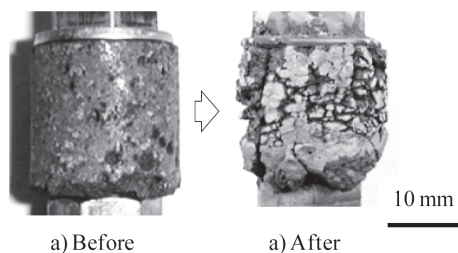


図7 高塩基度 ($\text{C}/\text{S} = 1.5$) 条件での転炉滓の溶解前後の外観⁷⁾



図8 第163回講演大会国際セッション参加の皆さんと
(筆者は右から3番目)

るという利点もある。組織・環境が異なれば視点も異なる。多様な視点を交えた議論が有効なヒントや加速手段になると考える。最近、筆者も国際セッションの企画運営などで内外に人脈を広げ、新たな視点に触れ刺激を受けた。また、精錬フォーラムの活動に参加する機会を得、特に研究グループでの議論では企業側研究者として正確なニーズをお伝えできるよう努力し、多くを学んでいる。産学の連携ではフィードバックも重要な役割と考え、研究会成果のモデルを適用した解析例¹¹⁾を報告するなどしてきたが、これまでの取り組みが十分であったか反省し、今後も継続して努力して行きたい。

参考文献

- 1) N.Asahara, K.Naito, I.Kitagawa, M.Matsuo, M.Kumakura and M.Iwasaki : Steel Research Int., 82 (2011) , 587.
- 2) A.Kaizawa, N.Sasaki, T.Inomoto and Y.Ogawa : Proceedings of 8th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries, SINTEF/NTNU, Trondheim Norway, (2011) , 88.
- 3) 熊倉政宣 : 新日鉄技報, 394 (2011) , 投稿中.
- 4) 佐々木直人, 内藤憲一郎, 出本庸二, 北村信也 : 鉄と鋼, 88 (2002) , 16.
- 5) W.Fix, H.Heyman and R.Heinke : J. Am. Ceram. Soc., 52 (1969) , 347.
- 6) マルチフェーズフラックスを利用した新製錬プロセス技術研究会 : マルチフェーズフラックスを利用した製錬プロセス技術の新展開, 日本鉄鋼協会編, (2009)
- 7) 佐々木直人, 小川雄司 : CAMP-ISIJ, 23 (2010) , 949.
- 8) 松島雅章, 矢動丸成行, 森克己, 河合保治 : 鉄と鋼, 62 (1976) , 182.
- 9) 佐々木直人, 小川雄司 : CAMP-ISIJ, 15 (2002) , 877.
- 10) K.Ito and M.Mori : CAMP-ISIJ, 25 (2012) , 187.
- 11) N.Sasaki, K.Miyamoto and Y.Ogawa : CAMP-ISIJ, 25 (2012) , 195.

(2012年6月15日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 多元物質科学研究所 教授

北村 信也

先日、佐々木さんが入社する前、1990年頃の講演大会予稿集を見る機会がありましたが、溶銑予備処理というセッションで10件以上の発表があり、それも最新のデータが企業・大学から公開されていました。私たちの年代は、ここで他社に先んじて優れた成果を発表する事が大きなモチベーションで、講演大会での質疑を通じて刺激も受けたし、大いに鍛えられたものでした。この頃は、他社が真似たら、追いつかれる前にもっと良い技術を開発すれば良いと思っていましたし、事実、そうやって次々と新しい技術が出現していたように思います。その頃に比べると、佐々木さんのような今の研究者は、気の毒なほど刺激が少ない環境にあると言えます。

研究を進めるには刺激が必要です。企業内でも上司や現場から刺激(圧力?)を与えられるとは思いますが、学問的な刺激は、やはり学会で求めなければなりません。鉄鋼協会を活性化させるには、我々の年代ではなく佐々木さんの世代が積極的に活動する事が必要です。私が精錬フォーラムの座長をお引き受けした時、各企業の部長さん達に「幹事は、あなたたちではなく次世代を担う人材にしてください」とお願いしたのは、その意味があったからです。佐々木さんが幹事であるという意味を、是非、良くかみしめて下さい。

佐々木さんも書かれているように日本では製鋼精錬関係の

研究者は企業も大学も大変に少なくなっています。これは、人員整理の問題ではなく、この分野でインパクトのあるプロセス開発がほとんど出なくなったためと解釈するべきで、我々のような先輩研究者の責任であるとも言えます。ただ、世界に目を向ければ、東アジアを中心に優秀な中堅・若手の研究者は多いですし、数は少なくなりましたが欧米でも熱心に研究をしている企業や大学もあります。さらに、この分野は何故か国際学会が目白押しです。企業にいと好き勝手に外国出張する訳にも行かないでしょうけれども、その機会を得たら、日本人とばかり話すのではなく、積極的に海外の研究者と交流して個人的なチャンネルを増やすようにして下さい。

佐々木さんがこれから大きく飛躍することについては、あまり心配していません。昨年、ふえらむに「鉄鋼精錬プロセス工学概論」をいう連載を書きました。佐々木さんには、その最終回で書いた以下のような文章を贈ります。

技術開発において最も重要なことは「直感」である。準備ができた人(「ニーズの的確な把握」と「現象の深い理解」ができて、かつ、柔軟な発想力を磨いた人)に、神様がほほ笑んでくれると「直感」が閃くことになる。ただ、神様はいつも微笑んでくれる訳ではない。しかし準備をしておかない人には神様の後ろ姿しか見えない。

(株)神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 技術開発センター製鋼開発室 主任研究員

木村 世意

初めて佐々木さんに会ったのは2年前。精錬フォーラムの幹事会だったと思います。今日に至るまでの、様々な研究会や講演大会の場で受ける印象では、私の方がわずかに年上かなと感じましたが、所属する会社は異なるものの、同僚のつもりでディスカッションさせていただいておりました。従いまして、本稿の執筆を依頼されたときは、自分が「先輩」として、しかも「エール」を贈るなど大変恐れ多いことと感じてしまったのですが、私自身もすでに若手から中堅に「変化」していることに改めて自覚を持つ意味で、執筆を引き受けました。

溶鉄の精錬工程における脱りんや脱硫など不純物除去プロセスを研究対象とすることは、「未利用資源の使用拡充」、「高効率生産」、「地球環境への対応」、「環境調和型鋼材の創出」、「地域との共生」、「ゼロエミッション」と、高温プロセス部会のロードマップに謳われている指針の全てに関わる、広範囲かつ複雑な課題を相手にすることになります。佐々木さんが書かれた本記事や鉄と鋼へ投稿された論文を読んだり、講演大会での発表を聴講したりしても分かりますが、上記指針のいずれも意識して研究に取り組まれています。一企業にとどまらず、日本の鉄鋼産業が置かれた現状を打破していかなければならない中、大変頼もしく感じます。

また、前出の精錬フォーラムでは、大学側の若手研究者と企業側研究者・技術者との間で、お互いのシーズやニーズ等を提案、提起しながら研究の方向性を決めていくのですが、議論が発散しかけても、佐々木さんの発言によって、場が引き締まる事が多々ありました。これまでの研究への取り組みの中で獲得された基礎知見、現場で実際に起こる現象と基礎知見を関連付けさせる応用技術、そして、これらの知見や技術が社会に与える影響にまで、深く精通していることによるのでしょう。学側のシーズを産側のニーズに上手に引き付けています。大学の若手研究者にとっても非常に頼もしい存在ではないかと思います。

溶鉄精錬プロセスを取り巻く環境は、少しずつではなく、一度に多くのことが変化しています。一視点ではなく多視点で、一組織だけではなく別組織も巻きこんで、産側だけでなく学側の研究成果を活用することによって、多くの変化に対応していけるはずで。日本国内では、産学ともに、精錬プロセスに関わる研究者、技術者が減少しつつありますが、押し寄せてくる多くの変化は、この減少に歯止めをかけ、復活させる絶好のチャンスとも言えます。今後も、変化をチャンスとして捉えながら、益々活躍されること期待しております。



受賞技術-14

ナノ炭化物制御による 自動車用高加工性新高強度鋼板の開発

Development of New High Strength Sheet Steel by Controlling Nanometer-sized Carbides with Excellent Press Formability for Automobile Use

船川義正

JFEスチール (株) スチール研究所
研究企画部 主任部員

Yoshimasa Funakawa

1 はじめに

走行時に排出されるCO₂量削減を目的とした自動車シャシー部品の高強度薄肉化は、プレス加工の難しさより主として440MPa～590MPa級までにとどまっておらず自動車の車体軽量化の課題となっている。従来鋼の組織設計を踏襲しながら加工性を維持したまま高強度化することが試みられてきたが、望まれる780MPa級の高強度と加工性とを実現するには至っていなかった。そこで、シャシー部品の高強度化を推し進めるため従来の組織設計から脱却し、新たな組織設計として加工性の富んだ鋼の組織フェライトを超微細炭化物で強化することで、伸びフランジ加工に優れた780MPa級高強度熱延鋼板を開発した。

従来鋼の組織設計では、加工性を担う軟質なフェライトとマルテンサイトおよびベイナイトのような硬質相とを複合することで高強度化が図られてきた。この複合組織を有する鋼板では高強度化に対して硬質相体積を増やさなければならず、フェライト／硬質相界面の面積の増加が避けられない。このため、フェライト／硬質相界面からの破壊で加工性の決まる加工法においては、高強度化に対して加工性を維持するには限界が生じていた。そこで、破壊の基点となるフェライト／硬質相界面を無くすため、フェライトそのものを強化することに着想した。フェライトの強化には大きさ約3nmの均一な炭化物を微細分散する技術を開発し、440MPa級鋼板と同等の加工性を維持したまま780MPa級への高強度化を達成した。技術課題は微細炭化物の微細析出と成長抑制であったが、これを相界面析出現象の初めての工業利用と過去に例のない炭化物 (Ti, Mo) Cを用いることで実現した。

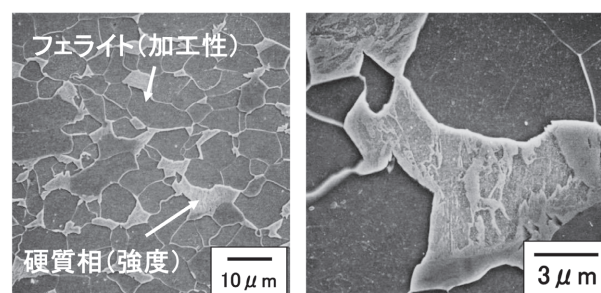
本稿では、このナノ炭化物制御による自動車用新高強度鋼板について述べる。

2 自動車用高強度鋼板の従来の組織設計思想と伸びフランジ加工性

かつて鋳造品や板厚の厚い熱延鋼板が主として用いられていたシャシー部品には、現在では引張強さ440～590MPa級の熱延鋼板が主に用いられている。そして、近年のCO₂排出量削減量厳格化により、現在ではさらなる軽量化が指向されるようになり、780MPa級熱延鋼板のシャシー部品への適用が検討されるようになってきた。

この自動車のシャシー部品には、厳しい伸びフランジ加工が行われる。伸びフランジ加工とは剪断で引きちぎられたブランク (プレス形成しやすいように剪断で打ち抜いた板) の縁を伸ばす加工を指し、剪断時の鋼板マイクロ組織中での空隙 (ボイド) 発生抑制が伸びフランジ加工性向上のポイント¹⁾となる。

一方、従来の自動車シャシー部品用高強度熱延鋼板では図1のように加工性を担うフェライトと強度を担う硬質相との複合組織 (大きき数ミクロンの組織の混合) 化で強度が高められてきた^{2,3)}。すなわち、強度は硬質相の分率の増加で調整



(a) 従来鋼組織

(b) 硬質相拡大

図1 従来鋼の複合組織

される。フェライトと数ミクロンの大きさの硬質相との混合を主とする従来鋼の組織設計では、ブランクを打ち抜いた時に変形しにくい硬質相と変形しやすいフェライトとの間に歪みが集中して、図2に示すように硬質相の周囲で優先的に破壊が進行する⁴⁾。すなわち、この複合組織鋼板では剪断でブランクを作製する際にフェライトと硬質相の界面から破壊が起こりやすい。打ち抜いた時点で硬質相の周囲にボイドが発生しているため、打ち抜きに引き続き行われる伸びフランジ加工ではこのボイドが容易に成長や合体を繰り返し、板厚を貫通する大きな亀裂に発展する。

上述のメカニズムにより780MPa級の引張強さを得るために硬質相の分率を増加させると、この硬質相分率の増加が打ち抜き時のフェライトと硬質相界面でのボイドの発生頻度を著しく高めてしまうため、440MPa級鋼板と比べて伸びフランジ加工性が急激に低下する。

3 開発鋼の組織設計思想とキー技術

前章において述べた伸びフランジ性の低下を回避しつつ780MPa級への高強度化を達成するため、フェライト組織そのものを高強度化する技術を探索し、超微細炭化物をフェライト中に分散することでフェライト組織そのものを高強度化することに成功した。この新たな組織設計思想の元でフェライト中への炭化物の超微細分散技術をもって開発された開発鋼⁵⁾は、440MPa級と同等の伸びフランジ加工性を維持しながら780MPa級の強度を実現した。

(1) 開発鋼の組織設計思想

フェライト粒中の転位が炭化物によりピン止めされることで、高強度が発現される。転位をピン止めする炭化物の平均

間隔が狭いほど強力に転位がピン止めされる。すなわち、鋼中の炭化物体積率が一定であれば、フェライト中の炭化物が微細なほどフェライトは高強度化できる。図3に、体積率一定の条件で計算したフェライト中の炭化物径と析出強化量($\Delta\sigma$)⁶⁾の模式図を示す。ここでは、降伏比を0.9と仮定して引張強さを見積もった。また、Pickeringの式⁷⁾より計算した地鉄強度、固溶強化量、結晶粒微細化強化量をベースとして、析出強化量を変化させた場合について示している。炭化物径が微細になると析出強化量が急激に上昇し、鋼は効率的に高強度化される。図3より見積もった場合、780MPa級の引張強さを得るには大きさ3nmの超微細炭化物径を実現する必要がある。従来鋼中に析出するTiCの大きさは約20～30nmであることが知られていることから、目標は従来鋼中のTiCの1/10の大きさであり、析出強化量も従来鋼の3倍にも及ぶことになる。

以上より、新組織設計における克服すべき技術課題は、炭化物の微細析出と成長の抑制であることが明らかとなった。

(2) 炭化物の微細分散技術

熱間圧延工程のスラブ加熱でオーステナイトに溶解した炭化物は、圧延後の冷却段階でオーステナイトから変態したフェライト中に析出する。変態したフェライト中に過飽和に溶解している炭化物が時効析出する場合、炭化物の核生成時間に分散が生じるため、先に析出した炭化物が成長しやすい。また、析出位置の制御ができない。そこで、開発に際して析出物の微細分散方法として相界面析出現象に着目した。相界面析出では図4に示すように移動しているオーステナイト-フェライト界面に炭化物が生成するため、析出するタイミングを界面の移動で律することができる。そして、低温で相界面析出させることで炭化物を微細化することができる。こ

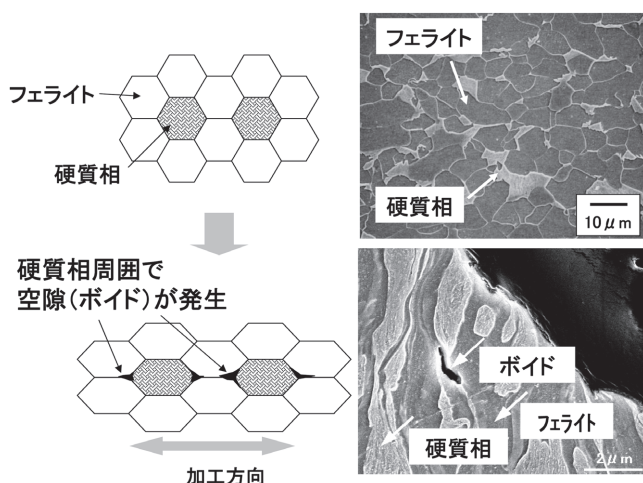


図2 加工時の硬質相周りのボイド発生

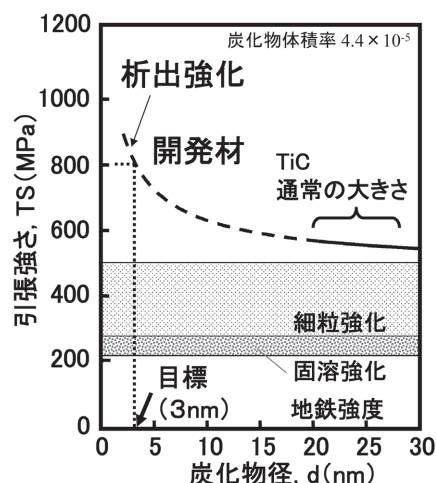


図3 炭化物径と鋼板強度

の相界面析出の利用で均一な大きさの超微細炭化物を鋼中に均一に分散することに成功した。相界面析出では、図5のような列状の特異な炭化物分散が観察される⁵⁾。相界面析出は古くより知られていた⁸⁻¹¹⁾が、工業的利用はなされておらず本開発が相界面析出現象の初めての工業利用となる。

(3) 微細炭化物粗大化防止技術

本開発では、比較的高強度を得やすいとされるTiの炭化物を活用することとした。しかしながら、炭化物は鋼中に存在する炭化物構成元素の量が多いほど粗大化しやすい。このため、炭化物析出後のフェライト中の固溶Ti量を低減することでTiC粗大化を抑制することに着想した。このフェライト中の固溶Ti量低減のためMoを添加し、(Ti, Mo)Cを析出させることに成功した。この(Ti, Mo)Cを用いることで、粗大化しにくい微細炭化物を実現した。フェライト中に(Ti, Mo)Cを微細分散させた加工用高強度鋼板について前例はない。TiCと(Ti, Mo)Cの粗大化しやすさを実験結果で示す。

図6に実験室においてTiCおよび(Ti, Mo)Cをそれぞれ600℃で微細析出させた鋼を作製し、析出温度よりも高い

650℃で加熱した時の硬さ変化と24時間保持後の炭化物の透過型電子顕微鏡写真を示す。TiCは保持時間に対して急激に硬さが低下(炭化物粗大化)するのに対し開発鋼の(Ti, Mo)Cは650℃での24時間の加熱に対しても硬さは維持された。これは、炭化物が加熱に対して極めて安定であることを示している¹²⁾。

(4) 開発鋼の加工性

開発鋼の加工性を引張試験と穴抜き試験で評価した結果を図7に示す。開発鋼は、従来の組織設計で製造された組織強化鋼と比べて優れた伸びフランジ加工性を示すことが示された。

(5) さらに高強度化

開発鋼の組織設計思想では、炭化物量を増加させることでフェライトをさらに高強度化することが可能であり、980MPa級と1180MPa級の強度を得ることができる。

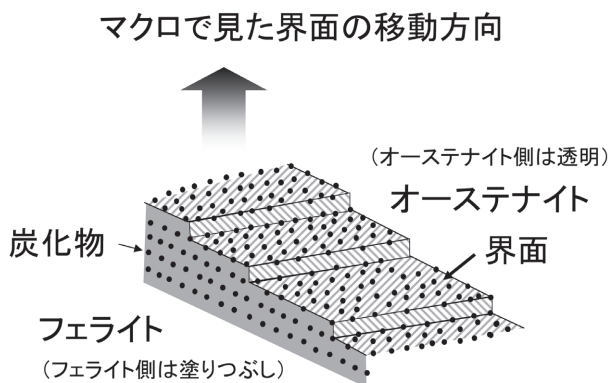


図4 相界面析出の模式図

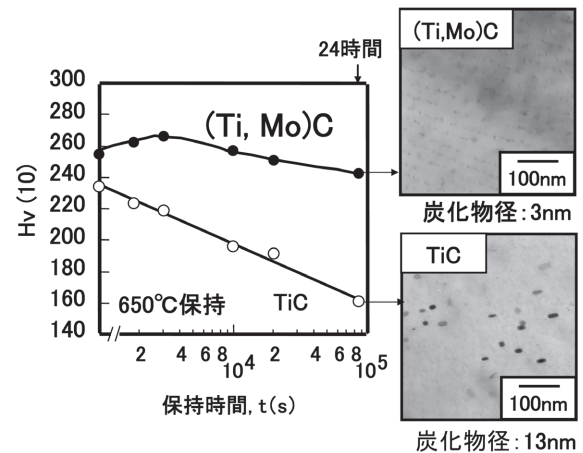


図6 650℃保持時間と硬さの変化および保持後の炭化物の透過型電子顕微鏡写真

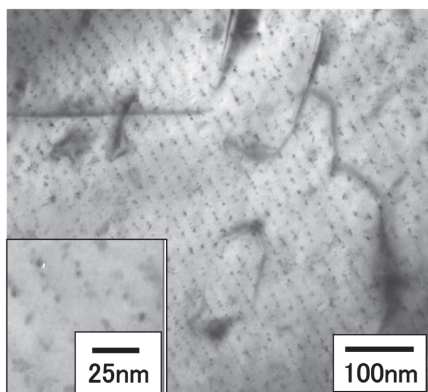


図5 開発鋼の超微細炭化物

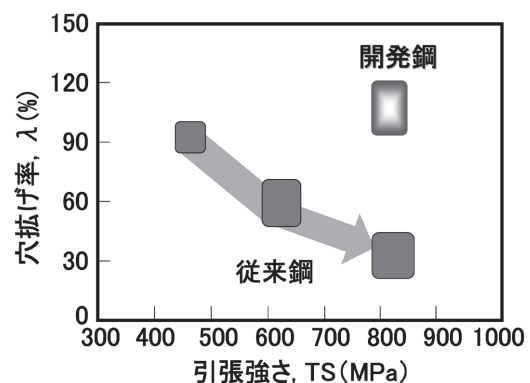


図7 開発鋼の伸びフランジ加工性

4 おわりに

従来の組織設計にとらわれず大胆に新たな理想組織を考えて、これを実現することで従来にない加工性を有する高強度熱延鋼板の開発に成功した。本稿は自動車に適用されることで、車体重量の軽量化を通じてCO₂削減に寄与している。

本鋼の開発で示した新たな思想や新たな価値観の創造こそが現在の日本の物づくりに必要であると感じるとともに、過去にとらわれない開発が今後数多く日本より発信できることを祈って、まとめの言葉としたい。

参考文献

- 1) H.Kimura, T.Ogura, M.Kinoshita, T.Okita and K.Osawa : SAE THECHNICAL PAPER, 930283.
- 2) A.P.Coldren and G.Tither : J.Metals, April, (1978) , 6.
- 3) 栗原孝雄, 逢坂忍, 岩瀬耕二, 大沢紘一 : 鉄と鋼, 68 (1982) , 9, 1270.
- 4) K.Hasegawa, K.Kawamura, T.Urabe and Y.Hosoya : ISIJ Int., 44 (2004) , 3, 603.
- 5) Y.Funakawa, T.Shiozaki, K.Tomita, T.Yamamoto and E.Maeda : ISIJ Int., 44 (2004) , 11, 1945.
- 6) T.Gladman, D.Dulieu and I.D.McIvor : Proc. of Symp. on Microalloying'75, Union Carbide Corp., New York, (1976) , 32.
- 7) F.B.Pickering : Physical Metakurgy and The Design of Steels, APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD., London, (1978) , 63.
- 8) W.B.Morrison : J. Iron Steel Inst., 201 (1963) , 317.
- 9) M.Krochynsky and H.Stuart : Proc. of Symp. On Low Alloy High Strength Steels, The Metallurgy Companies, Dusseldorf, (1970) , 17.
- 10) A.T.Davenport and R.W.K.Honeycombe : Proc Roy. Soc. (London) , 322 (1971) , 191.
- 11) F.G.Berry and R.B.G.Yeo : Trans. ASM, 61 (1968) , 255.
- 12) 船川義正, 瀬戸一洋 : 鉄と鋼, 93 (2007) , 49.

(2012年6月26日受付)

会員へのお知らせ目次

行事等予定	715頁
総合	
奨学賞の推薦校募集要項	719頁
イベント情報	
「鋼・コンクリート構造物の腐食・防食、劣化とセンシング技術の課題と展望」第64回白石記念講座開催案内	719頁
一般社団法人日本鉄鋼協会・社団法人日本鋼構造協会 交流企画連絡会	
第12回鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウム開催案内	721頁
平成24年度 レアメタル研究会のご案内	722頁
支部	
中国四国支部 第44回 材質制御研究会「合金の微細組織制御と物性」開催案内	722頁
九州支部 H24年度秋季講演会開催案内	723頁
東海支部 「湯川記念特別講演会」開催案内	723頁
東海支部 第22回学生による材料フォーラム開催案内	723頁
報告事項 技術部会トピックス 第136回圧延理論部会大会開催「優秀講演賞」受賞のお知らせ	724頁
人材募集案内	724頁
次号目次案内	725頁
会員欄（入会者・死亡退会者一覧）	726頁
海外鉄鋼関連最新論文	727頁

行事等予定

太字は本会主催の行事。国際会議で○は協会にてサーキュラー等入手できます。

開催期日	行事(開催地／詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
2012年10月			
3～5日	第33回日本熱物性シンポジウム（大阪）	日本熱物性学会	大阪府立大学 木下進一 Tel. 072-254-9231 jstp2012@me.osakafu-u.ac.jp
5日	S P r i n g - 8 金属材料評価研究会（第7回）（東京）	SPring-8利用 推進協議会	SPring-8金属材料評価研究会 http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/
7～11日	Materials Science & Technology 2012 Conference & Exhibition (MS&T'12) (U.S.A.)	TMS他	http://www.matscitech.org
9日	関西支部 平成24年度材料セミナー テーマ1「技術者のための鉄鋼材料入門」（大阪 8号598頁）	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部 材料セミナー係 n-kansai@ostec.or.jp
9日	技術交流フォーラム（愛知 9号674頁 申込締切9月30日）	日本鉄鋼協会 東海支部	名古屋工業大学 日原岳彦 hihara@nitech.ac.jp
10, 11日	第4回MLFシンポジウム・茨城県ビームライン平成23年度成果報告会（東京）	J-PARCセンター、 他	MLFシンポジウム事務局 Tel. 029-284-3934 http://j-parc.jp/MatLife/ja/meetings/MLFsympo/index.html
10～12日	第3回 若手研究者および技術者のための高温強度講習会（兵庫）	日本材料学会	「講習会」係 Tel. 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp
11, 12日	鉄鋼工学セミナー「水素脆化専科」（東京 7号519頁 申込締切9月14日）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
12日	セミナー 材料科学的アプローチによる太陽電池研究の最前線（東京）	日本金属学会	セミナー・シンポジウム参加係 meeting@jim.or.jp
12日	日本エネルギー学会 天然ガス部会 資源分科会シンポジウム（東京）	日本エネルギー学会	「シンポジウム」係 Tel. 03-3834-6456 http://www.jie.or.jp/2012/events/121012shigen_kouen.htm
14～18日	The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI2012) (Brazil)	ABM	http://www.abmbrasil.com.br/seminarios/icsti/2012/default.asp
14～18日	2012年粉末冶金国際会議(略称:PM2012 YOKOHAMA) (神奈川)	日本粉末冶金 工業会、他	Tel.03-3219-3541 pm2012@ics-inc.co.jp http://www.pm2012.jp/
15日	標準化と品質管理全国大会2012(東京)	日本規格協会	事務局 岩垂・天野 http://www.jsa.or.jp/info_detail/zenkoku.asp
17, 18日	第40回日本ガスタービン学会定期講演会（北海道）	日本ガスタービン学会	事務局 Tel. 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/html_calender/40teiki-yokoku.html
18日	関東地区 平成25年度「鉄鋼技術功績賞」受賞候補者の推薦募集締切（8号592頁）	日本鉄鋼協会	総務グループ Tel. 03-3669-5931
18, 19日	鉄鋼工学セミナー「圧延理論専科」（兵庫 6号411頁 申込締切9月27日）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
18, 19日	第37回複合材料シンポジウム（愛知）	日本複合材料学会	Tel. 03-5981-6011 jscm@asas.or.jp http://www.jscm.gr.jp/schedule/2012/37Cmsympo.pdf
18, 19日	日本鉄鋼協会 評価・分析・解析部会、日本セラミックス協会共催 分析信頼性実務者レベル講習会 第11回セラミックス原料・鉱石類分析技術セミナー（東京 8号596頁 申込締切8月31日）	日本分析化学会	日本分析化学会 セラミックス原料・鉱石類分析技術セミナー係 Tel. 03-3490-3351 koms@jsac.or.jp

開催期日	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
19日	第44回 材質制御研究会 一合金の微細組織制御と物性- (愛媛 本号722頁)	日本鉄鋼協会・日本金属材料学会・日本軽金属学会・日本軽金属協会	愛媛大学 仲井清真 nakai.kiyomichi.mz@ehime-u.ac.jp
20日	最先端鉄鋼体験セミナー(新日鐵室蘭)(北海道 7号517頁 申込締切9月20日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
22~26日	7th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2012) (China)	CSM	http://www.epm2012.cn/
23~25日	2012計装制御技術会議 (東京)	日本能率協会	ものづくりユニット Tel. 03-3434-5505 http://school.jma.or.jp/keisou/
24, 25日	日本エネルギー学会 第49回石炭科学会議 (北海道)	日本エネルギー学会	「石炭科学会議」係 Tel. 03-3834-6456 http://www.jie.or.jp/2012/sekika/sekika49.htm
26日	関西支部 平成24年度材料セミナー テーマ2「材料技術者・研究者のためのEBSIによる局所方位解析技術の基礎と応用」(京都 8号598頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部 材料セミナー係 n-kansai@ostec.or.jp
26日	H24年度秋季講演会 (福岡 本号723頁)	日本鉄鋼協会・日本金属材料学会・日本軽金属学会・日本軽金属協会 九州支部	住友金属工業(株) 村井暢宏 Tel. 093-583-6545
26日	平成24年度 工学教育連合講演会 (東京 8号593頁)	日本工学協会	工学教育連合講演会事務局 Tel. 03-5442-1021 https://www.jsee.or.jp/
26日	第192回塑性加工技術セミナー (京都)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
26日	第40回溶接学会東部支部実用溶接講座 (千葉)	溶接学会 東部支部	東京工業大学 三田尾 Tel. 03-5734-3915 jwseast@ide.titech.ac.jp
27日	第1回材料工学委員会シンポジウム「温故知新」(東京)	日本学術会議	東京大学生産技術研究所 前田研究室 secretar@iis.u-tokyo.ac.jp
28~30日	Scrap Supplements and Alternative Ironmaking (U.S.A.)	AIST	http://www.aist.org/conf/12_scrap_supplements.htm
29, 30日	第56回材料工学連合講演会 (京都)	日本学術会議 材料工学委員会	日本材料学会 Tel. 075-761-5321 jim@jms.jp http://www.jms.jp/
30日	早稲田大学各務記念材料技術研究所オープンセミナー (東京)	早稲田大学各務記念材料技術研究所	反田ゆかり Tel. 03-3203-4782 http://www.waseda.jp/zaiken/index.html
30日	先進超々臨界圧火力発電技術開発講演会 (東京)	火力原子力 発電技術協会	技術部 水上 勇 Tel. 03-3769-3095 http://www.tenpes.or.jp
31~2日	第48回X線分析討論会 (愛知)	日本分析化学会 X線分析研究懇談会	科学技術交流財団 岡本篤彦 Tel. 0561-76-8331 http://www.sangaku.nagoya-u.ac.jp/btk48x/
31~3日	International Conference & Exhibition on Analysis & Testing of Metallurgical Process & Materials (ICACI2012, CCATM2012) (China)	ICASI、他	http://www.icas-i-society.org
2012年11月			
1日	奨学賞の推薦校募集締切 (本号719頁)	日本鉄鋼協会 日本金属学会	日本金属学会 奨励賞係 Tel. 022-223-3685 gaffair@jim.or.jp
1~3日	第20回鉄鋼工学アドバンスセミナー (神奈川 6号407頁 申込締切6月15日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
1~3日	The 3rd China RM & PT Forum (China)	CAS	http://www.rmpt.org.cn
2日	平成24年度 材料科学基礎講座 「電気系エンジニアのための材料科学」(東京)	日本材料科学会	材料科学基礎講座係 Tel. 03-3262-9166 http://www.mssj.gr.jp/kisokoza24.htm
4日	第193回塑性加工技術セミナー (福岡)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
4~6日	第63回塑性加工連合講演会 (福岡)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 http://www.jstp.jp/jp08/kouen.html
5~8日	The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials ISAEM-2012 and The 3rd International Symposium on Advanced Materials Development and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Materials AMDI-3 (愛知)	日本学術振興会 加工プロセスによる材料新機能発現 第176委員会	豊橋技術科学大学 機械工学系 安井利明 Tel. 0532-44-6703 http://martens.me.tut.ac.jp/176/ISAEM2012/
7~9日	第53回高圧討論会 (大阪)	日本高圧学会	事務局 多田 他 Tel. 070-5545-3188 http://www.highpressure.jp/forum/53/
8, 9日	第18回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム (大阪)	化学工学会 粒子・流体プロセス部会	大阪府立大学 綿野 哲 Tel. 072-254-9305 http://www.chemeng.osakafu-u.ac.jp/FB18/FB18.html
8, 9日	第22回 圧力設備の材料、設計、施工、維持管理の基礎 大阪開催 (大阪)	日本高圧技術協会	Tel. 03-3255-3486 tanaka@hpij.org
8, 9日	STAHL 2012 (Germany)	VDEh	http://www.stahl2012.de/
9日	第211回西山記念技術講座「金属の界面腐食科学技術の進歩と今後の展望」(東京 9号663頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
9日	早稲田大学各務記念材料技術研究所 2012年度第2回教育プログラム① (東京)	早稲田大学各務記念材料技術研究所	http://www.waseda.jp/zaiken/index.html
9~11日	第42回結晶成長国内会議 (NCCG-42) (福岡)	日本結晶成長学会	事務局 Tel. 03-5950-4741 http://www.jacg.jp/jacg/japanese/top.html
10日	最先端鉄鋼体験セミナー(新日鐵広畑) (兵庫 7号517頁 申込締切10月10日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
10, 11日	「鉄の技術と歴史」フォーラム 震災復興支援講演会・見学会 (岩手 9号666頁 申込締切10月29日)	日本鉄鋼協会	千葉工業大学 寺島慶一 keiichi.terashima@it-chiba.ac.jp

開催期日	行事(開催地／詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
14日	湯川記念特別講演会 (愛知 本号723頁)	日本機械学会・日本金属学会 東海支部	事務局 tokai@numse.nagoya-u.ac.jp
14～16日	ものづくりNEXT↑2012 (東京)	日本能率協会	事務局 中野、吉野 Tel. 03-3434-0587 http://www.jma.or.jp/next/
14～16日	グリーン・イノベーションEXP02012 (東京)	化学工学会、 日本能率協会	事務局 竹生・上沖 Tel. 03-3434-0587 http://www.jma.or.jp/green/
15日	第32回疲労講座「はじめての金属疲労」 (岐阜)	日本材料学会	「第32回疲労講座」係 http://www.jsms.jp/
15, 16日	鉄鋼工学セミナー「高温融体物性専科」 (宮城 9号665頁 申込締切10月12日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
15, 16日	第5回トライボロジー入門西日本講座 (京都)	日本トライボロジー学会	Tel. 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp
16日	第212回西山記念技術講座「金属の界面腐食科学技術の進歩と今後の展望」 (大阪 9号663頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
16日	材料の組織と特性部会「ステンレス鋼の科学技術における最前線」 自主フォーラム研究会「ステンレス鋼利用技術の最前線」 (Frontier in the Application of Stainless Steel) (東京 9号666頁)	日本鉄鋼協会	住友金属工業(株) 前田尚志 TEL : 025-544-6626 FAX : 025-544-6646 maeda-tks@sumitomometals.co.jp
16日	関西支部 平成24年度材料セミナー テーマ3「透過型電子顕微鏡(TEM)による解析技術の基礎と応用」 (大阪 8号598頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部 材料セミナー係 n-kansai@ostec.or.jp
16日	一般社団法人日本鉄鋼協会・社団法人日本鋼構造協会 交流企画連絡会 第12回鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウム テーマ: 新ブランド“東京スカイツリー” “東京ゲートブリッジ” に見る最近の鋼構造が要求する新たな材料性能とは (東京 本号721頁)	日本鉄鋼協会 日本鋼構造協会	日本鋼構造協会 事務局 田代 Tel. 03-5919-1535 m.tashiro@jssc.or.jp
16日	早稲田大学各務記念材料技術研究所 2012年度第2回教育プログラム② (東京)	早稲田大学各務記念材料技術研究所	http://www.waseda.jp/zaiken/index.html
16日	平成24年度 第2回講演会 もしかして? 未来のデファクトスタンダード…『進化する部品塗装』 (東京)	日本塗装技術協会	事務局長 小山田護 Tel. 03-6411-9236 http://jcot.gr.jp/
17日	最先端鉄鋼体験セミナー(J F E 西日本倉敷) (岡山 7号517頁 申込締切10月17日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
17, 18日	第55回自動制御連合講演会 (京都)	システム制御情報学会、他	http://rengo2012.robot.kuass.kyoto-u.ac.jp/
8～20日	Techno-Ocean2012 (兵庫)	テクノ・オーシャン・ネットワーク	事務局 Tel. 078-303-0029 techno-ocean@kcva.or.jp
19日	第194回塑性加工技術セミナー (東京)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstjp@jstjp.or.jp
19日	関西支部第25回技術研究会 (大阪)	日本塑性加工学会 関西支部	関西支部事務局 Tel. 090-9280-0383 kansai@jstjp.or.jp
19～21日	修士・博士学生向け「第6回学生鉄鋼セミナー 製鉄・製鋼コース」 (千葉 5号324頁 申込締切6月29日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
20～22日	修士・博士学生向け「第6回学生鉄鋼セミナー 材料コース」 (茨城 5号324頁 申込締切6月29日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
20, 21日	第31回疲労シンポジウム (神奈川)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 http://fatigue.jsms.jp
20～22日	日本磁気科学会 第7回年会 (京都)	日本磁気科学会	大阪大学 安田秀幸 Tel. 06-6879-7475 http://www.mpd.ams.eng.osaka-u.ac.jp/magsci/
20～23日	第10回エコバランス国際会議 (神奈川)	日本LCA学会	Tel. 03-3503-4681 http://ilcaj.sntt.or.jp/EcoBalance2012/
22日	第22回学生による材料フォーラム (愛知 本号723頁 申込締切10月26日)	日本機械学会・日本金属学会 東海支部	豊橋技術科学大学 中村典代 nakamura@four-d.me.tut.ac.jp http://four-d.me.tut.ac.jp/index.html
24日	最先端鉄鋼体験セミナー(住金鹿島) (茨城 7号517頁 申込締切10月24日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
25～28日	The International Deep Drawing Research Group(IDDRG2012) (India)	SMART	http://www.iddrg2012.in/
26, 27日	日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2012 (宮城)	日本バイオマテリアル学会	事務局 Tel. 022-215-2728 http://kokuhoken.net/jsbm/event/meet_34.html
26～28日	Asian Thermal Spray Conference 2012 (アジア溶射会議2012) (茨城)	日本溶射学会	http://www.jtss.or.jp/atssc2012/
27, 28日	原子力構造機器の材料、設計、施工、検査、維持に関する講習会 (東京)	日本溶接協会	業務部 佐々木 Tel. 03-5823-6324
27～30日	第21回 AE国際シンポジウム (沖縄)	日本非破壊検査協会	中村芳江 Tel. 03-5821-5105 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/sciences/index3_1.html
28～30日	評価・分析・解析部会 国際シンポジウム「鉄鋼業における分析・解析法の最近の進歩」RATEC2012 (東京 4号241頁 発表者以外申込締切10月31日)	日本鉄鋼協会	東北大学 多元物質科学研究所 井上亮 Tel&Fax. 022-217-5157 ratec2012@imr.tohoku.ac.jp
28～30日	第2回次世代ものづくり基盤技術産業展—TECH Biz EXPO 2012— (愛知)	名古屋国際見本市委員会	Tel. 052-735-4831 techbiz@nagoya-trade-expo.jp

開催期日	行事(開催地／詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
28～30日	国際粉体工業展東京2012 (東京)	日本粉体工業技術協会	「国際粉体工業展東京2012」展示会事務局(株) シー・エヌ・ティ Tel. 03-5297-8855 http://www.appie.or.jp
28～30日	第127回塑性加工工学講座 (大阪)	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
29, 30日	第20回新粉末冶金入門講座 (京都)	粉体粉末冶金協会	総務課 井上羊子 Tel. 075-721-3650 http://www.jspm.or.jp
30日	第53回レアメタル研究会 (東京 本号722頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
30日	早稲田大学各務記念材料技術研究所 2012年度第2回教育プログラム③ (東京)	早稲田大学各務記念材料技術研究所	http://www.waseda.jp/zaiken/index.html
30～2日	第20回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012) (大阪)	日本機械学会	http://www.jsme.or.jp/conference/mpdconf112/ (9月上旬公開予定)
2012年12月			
3～5日	第25回国際超電導シンポジウム (ISS2012) (東京)	国際超電導産業技術研究センター	事務局 Tel. 03-3536-7283 iss@istec.or.jp http://www.istec.or.jp/ISS/
3～5日	第38回固体イオニクス討論会 (京都)	固体イオニクス学会	事務局 Tel. 075-383-2519 http://www.eguchi-lab.ehcc.kyoto-u.ac.jp/ssij38/
6, 7日	第50回記念高温強度シンポジウム (京都)	日本材料学会	シンポジウム係 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp
10, 11日	第9回ノートパソコンで出来る原子レベルのシミュレーション入門講習会～分子動力学計算と電子状態計算～ (東京)	日本材料学会	「第9回分子動力学講習会」係 Tel. 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://md.jsms.jp/
11, 12日	EcoDesign2012 (東京)	エコデザイン学会連合事務局、他	エコデザイン2012ジャパンシンポジウム事務局 http://www.ecodenet.com/ed2012/index.htm
13日	第64回白石記念講座「鋼・コンクリート構造物の腐食・防食、劣化とセンシング技術の課題と展望」 (東京 本号719頁)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
13日	第17回資源循環型ものづくりシンポジウム (愛知)	実行委員会	Tel. 052-736-5680 ims@nipc.city.nagoya.jp
13, 14日	第26回信頼性シンポジウムー安心・安全を支える信頼性工学の新展開ー (香川)	日本材料学会	シンポジウム係 Tel. 075-761-5321 RESYMP02012@jsms.jp http://sinrai.jsms.jp
20, 21日	鉄鋼工学セミナー「スラグ処理専科」 (東京 8号594頁 申込締切11月26日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
2013年1月			
11日	第54回レアメタル研究会 (東京 本号722頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
25日	「ISIJ International」特集号「Recent Progress of Science & Technologies for the Iron Ore Agglomeration Processes (鉄鉱石塊成化プロセスに関する科学技術の最近の進歩)」原稿締切 (6号401頁)	日本鉄鋼協会	東北大学 葛西栄輝 Tel. 022-795-4895 kasai@material.tohoku.ac.jp
30, 31日	KAST教育講座「切削・研削加工技術の新しい流れ」コース (神奈川)	神奈川科学技術アカデミー	教育情報センター 教育研修グループ 石川和宏 Tel. 044-819-2033 ed@newkast.or.jp
30～1日	先端セラミックス&機能性ガラス 先進応用技術展・会議 (Neo Ceramics 2013) (東京)	日本セラミックス協会、他	Neo Ceramics事務局 Tel. 03-3219-3568 ceramics@ics-inc.co.jp http://www.neoceramics.jp/
2013年2月			
22日	第13回機械・構造物の強度設計、安全性評価に関するシンポジウム (京都)	日本材料学会	シンポジウム係 Tel. 075-761-5321 design13@jsms.jp http://www.jsms.jp
2013年3月			
7日	第28回塗料・塗装研究発表会 (東京)	日本塗装技術協会	事務局長 小山田 護 http://jcot.gr.jp
22日	第55回レアメタル研究会 (東京 本号722頁)	レアメタル研究会	東京大学 岡部研究室 学術支援研究職員 宮寄智子 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp
2013年5月			
5～10日	The 5th international conference on Recrystallization and Grain Growth (Australia)	Organizing Committee	http://www.rex-gg2013.org/
6～9日	AISTech 2013 The Iron & Steel Technology Conference and Exposition (U.S.A.)	AIST	http://aist.org/13_aistech/13_aistech.htm
20～23日	The 3ed International Symposium on Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification, Casting and Refining (CSSCR2013) (Sweden & Finland)	KTH & Aalto Univ.	csscr2013@mse.kth.se http://www.kth.se/en/itm/inst/mse/research/applied-process-metallurgy/csscr2013/
2013年6月			
30～4日	第32回熱電変換国際会議 (兵庫)	産業総合研究所	舟橋良次 Tel. 072-751-9485 funahashi-r@aist.go.jp (準備中)

開催期日	行事(開催地／詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
2013年9月			
10～15日	The 8th International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys (第8回金属の歴史国際会議(BUMA8)) (奈良 7号511頁)	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-3669-5932
2013年12月			
2～6日	8th International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC2013) (Las Vegas, USA)	THERMEC2013 運営委員会	物質・材料研究機構 津崎兼彰 Tel. 029-859-2101 http://www.thermec.org/2013/

総合

奨学賞の推薦校募集要項

奨学賞はこれまで全国大学材料関係教室協議会参加大学の学部学生を対象にしておりましたが、材料分野の発展の貢献が期待できる多くの優秀な学生を幅広く奨励するため、全国大学材料関係教室協議会参加大学以外の教育機関からも広く募集することにいたしました。下記要項によりご応募下さい。

奨学賞募集要項

- 教育機関の募集：**
 - 国内の材料系の学科又はコース等を有する大学および高等専門学校
 - 同一の教育機関（1校）の応募数は、関係する材料系の学科又はコース等に拘らず1件とします。
- 教育機関における候補者の対象：**
 - 大学は学士課程4年に在学する学生。
 - 高等専門学校は専攻科2年に在学する学生。
- 推薦校の推薦者資格：**
 - 教育機関の代表専攻長（代表学科主任）。同一教育機関の応募窓口は事前にご調整願います。
 - 全国大学材料関係教室協議会の参加大学はこれまで通り、推薦校の資格が与えられます。
- 手続き：**所定の応募用紙（本会ホームページからダウンロードできます）に必要事項を記入の上、ご応募下さい。
- 応募締切：**2012年11月1日（木）

申込み・問合せ先：（社）日本金属学会 奨学賞係
〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32
TEL. 022-223-3685 FAX. 022-223-6312 E-mail : gaffair@jim.or.jp

イベント情報

「鋼・コンクリート構造物の腐食・防食、劣化とセンシング技術の課題と展望」 第64回白石記念講座開催のお知らせ

講座の視点

我が国は東日本大震災を経験し、社会インフラを支える鋼構造物やコンクリート構造物の安全、安心に関わるリスクモデルについて、様々な視点において新たな局面を迎えている。豪雨の増加や大型台風の上陸等の最近の自然環境の変化をみても、耐環境寿命に繋がる構造設計や部材の安全概念の見直しが迫られる可能性がある。

本講座では鋼構造物やコンクリート構造物に対して、それらの安全設計や維持・管理システムまで含めて、腐食・防食、劣化という視点から現状技術を見直し、今後の課題と展望を議論する。本年度の西山記念技術講座「金属の界面腐食科学技術の進歩と今後の展望」での腐食科学の基礎に関わる議論を土台に、将来の社会インフラの整備における鉄鋼業の大きな役割を考えつつ、構造物の腐食や防止、またモニタリング・センシングについて議論する。材料開発、構造設計、点検・診断、分析・評価技術等、幅広い分野からの参加と活発な討議の場を期待する。

- 日時： 2012年12月13日（木）9：25～17：15 受付時間 8：45～16：15
- 場所： 早稲田大学；西早稲田キャンパス 63号館2階（大会議室）（東京都新宿区大久保3-4-1）
※当該技術講座の撮影、録音は一切禁じます。No photography, audio recording and video recording.
- プログラム：
9：25～9：30 開会の挨拶 司会：杉山昌章（新日鐵）

- 9：30～10：15 東日本大震災の影響を受けた道路構造物の調査報告とそれらを踏まえた課題認識
ー鋼構造物を中心として、課題認識と今後の展望についてー
国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路構造物管理研究室長 玉越隆史

編集後記

10月の声を聞き、涼やかな虫の音と冴えた月の明かりが、夜長の読書心を誘う季節となったことを感じさせる今日この頃です。オリンピックに熱狂した夏が終り、秋の実りを享受しながら宵には沈黙考する、と言った日本の四季のめりはりは、私達の心身に大きな恵みをもたらしてくれているように思います。

鉄に係わる我々は、9月の秋季講演大会で、あるものは己の研究に評価が下され、あるものは多くの成果発表に触発され高揚した時を経て、今、大局の見極めと次の一手を熟考されている頃ではないでしょうか。

本誌10月号では、躍動する製鋼精錬研究の現場からの報告、連載入門講座の“鋼の防錆・防食技術”、巧みの技・日本のものづくり力“溶接ペローズ”の加工技術紹介まで、鉄づくりの源流工程から製品工程までの広範囲な話題を提供しました。広い視点から自身の足場を顧みる一助となればと思っております。また、鉄から離れてナノ炭化物の世界、更には、アインシュタイン理論を検証する“重力波”の話等、多彩な記事を揃えました。気分転換、発想の転換薬として、秋の夜長に味読して頂ければ幸いです。(T.S.)

会報委員会 (五十音順)

委員長	森田 一樹 (東京大学)			
副委員長	上島 良之 (新日本製鐵 (株))			
顧問	細谷 佳弘 ((株) 特殊金属エクセル)			
委員	小野 嘉則 (物質・材料研究機構)	大野 宗一 (北海道大学)	神戸 雄一 (日本冶金工業 (株))	
	梶野 智史 (産業技術総合研究所)	杉本 卓也 (愛知製鋼 (株))	高谷 英明 (三菱重工業 (株))	
	寺岡 浩 (大同特殊鋼 (株))	戸高 義一 (豊橋技術科学大学)	野崎 精彦 (UDトラックス (株))	
	早川 朋久 (東京工業大学)	林 幸 (東京工業大学)	藤本 延和 (日新製鋼 (株))	
	船川 義正 (JFEスチール (株))	前田 恭志 ((株) 神戸製鋼所)	森 善一 (住友金属工業 (株))	
	三木 貴博 (東北大学)	山内 昭良 (日本鉄鋼協会)		

ふえらむ/鉄と鋼 合本誌 定価 4,000円(消費税等込・送料本会負担)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan/Tetsu-to-Hagané: Unit Price ¥4,000 (Free of seamail charge)

1996年5月10日 第三種郵便物認可 2012年9月25日印刷納本、2012年10月1日発行(毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館5階 (一社)日本鉄鋼協会 専務理事 小島 彰

Tel: 学会・生産技術部門事務局: 03-3669-5931(代) Fax: 03-3669-5934(共通)

(会員の購読料は会費に含む)

印刷所 東京都文京区本駒込3-9-3 (株)トライ

©COPYRIGHT 2012 一般社団法人日本鉄鋼協会

複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先: 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL.03-3475-5618 FAX.03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(一社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、本会へお問い合わせください。

また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

©Copyright Clearance Center, Inc

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

TEL.1-978-750-8400 FAX.1-978-646-8600

結晶構造作成ソフトウェア

Crystal Studio, Ver.13

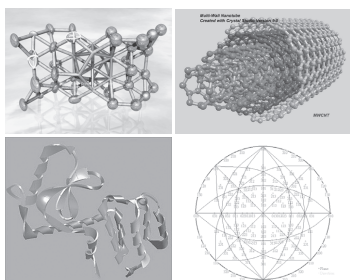
定価 Professional ¥241,500.-/¥199,500.-
Enterprise ¥262,500.-/¥220,500.-

(旧バージョンからのアップグレードについては要問い合わせ)

230の標準空間群情報、原子価、結合半径、最新の電子錯乱幅を備えた元素データ情報、回折計算に使われるデバイワラー因子から成るデータベースを内在し、作成された結晶を写真品位の画像で表現し、アニメーションをAVIファイルに保存できます。非標準の空間群を作成し、データベースを530までの空間群に拡張できます。空位、格子間原子、転位、積層欠陥他の項目を持つDefectメニューが追加されています。

おもな機能

- 格子定数や空間群番号から結晶を作成
- CIF、PDB、mmCIF、ICSDファイルのインポート
- 原子間距離と角度をCSVファイルにエクスポート
- ラベリングの自在性
- X線回折パターン、ステレオ投影図、逆格子の作成
- 単層カーボン、窒化ホウ素などのナノチューブとナノコンも作成
- 結晶データベース
(Professionalには2000件
/Enterpriseには3000件)



システムプラットフォーム：
Windows98/Me/2000/Xp/Vista/7 (CrystalSoft Corp.製作)

化学プロセス用の物性データベース

DIPPR with DIADEM pro

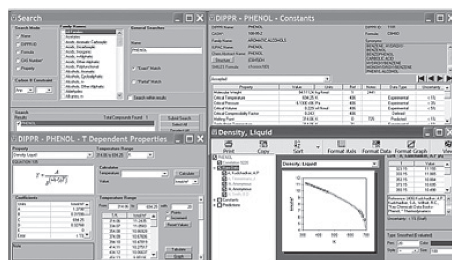
(Design Institute for Physical Property Data)

定価 ¥367,500.-/¥63,000.- (一般/教育)

2,030化合物についての49種類の熱物性値(実測値)、複数の推算式、原文献データと15種類の温度依存物性には推算式の係数などのデータベースです。AIChE推奨のインターフェイスソフトウェア(DIADEM)付きのスタンドアロンシステムです。

おもな機能 (DIADEM)

- 検索対象: Name, Formula, CAS番号、物性データ
- 物性値: 実測値、推算式による予測値
- データ表示: テーブルとグラフプロット
- 複数化合物データの重ね合わせプロット
- MDL Chimeプラグインによる構造式の立体表示
- ユーザーデータベースの作成



システムプラットフォーム：
Windows Xp/Vista/7 (AIChE DIPPR Project 801)

24,800件のセラミックス状態図データベース

ACerS-NIST

Phase Equilibria Diagrams, Version 3.4

定価 ¥168,000.- マルチユーザー ¥273,000.-

検索条件

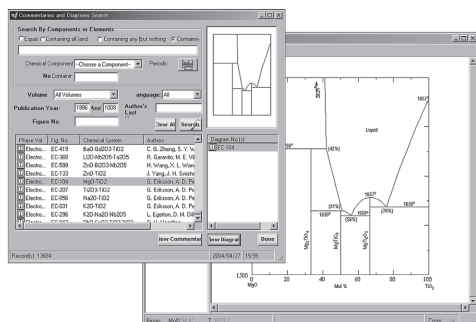
- 成分系、元素記号
- 著者、出典誌名、出版年
- 状態図番号

データ表示

- ◆モル百分率↔重量百分率
- ◆Lever rule計算
- ◆ズームアップ/ズームダウン

データソース/新データ2,500件を追加

●Phase Diagrams for Ceramists (Volumes I-III, Annual Volumes '91, '92 and '93, High Tc Superconductor monographs (two), Phase Diagrams for Zirconium + Zirconia Systems and Phase Diagrams for Electronic Ceramics I)



システムプラットフォーム: Windows95/98/Me/NT4.0/2000/XP/Vista/7

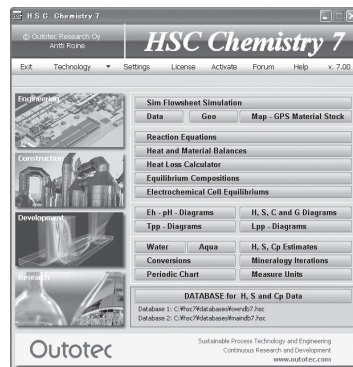
化学反応/平衡計算ソフトウェア

HSC Chemistry for Windows, Ver.7.0

定価 ¥315,000.-

約25,000種についてのエンタルピー(H)、エントロピー(S)、熱容量(Cp)のデータベースを基に化学反応の計算やGIBBSまたはSOLGASMIXのルーチンによる化学平衡を計算します。反応、熱平衡、分子量計算などの一般的なモジュールの他、エリンガム状態図、Eh-pH(プルベ)状態図、TppとLppの相安定性状態図の作成などユニークなモジュールを持ち合わせています。計算結果のテーブルと状態図はクリップボードにコピーできます。

SIM Flowsheet モジュールにより複数のユニットプロセスからなるプロセス全体のシミュレーションとモデリング、Excel上でのHSC計算が可能になるExcelAdd-In関数、プライベートデータベースを作成するための熱化学データからH、S、Cpを計算する変換機能などもあります。



システムプラットフォーム: Windows2000/XP/Vista/7
(Outokumpu Research Oy.製作)

株式会社

デジタルデータマネジメント

東京都中央区日本橋茅場町1-11-8 紅萌ビル 〒103-0025

TEL.03-5641-1771 FAX.03-5641-1772 <http://www.ddmcorp.com>

ELTRA
Analysers made in Germany

業界注目!!
この機能で低廉価格(500万～)発売中!!

炭素／硫黄分析装置 CS-800

システム概要



CS-800はJIS燃焼—赤外線吸収法に準拠した炭素/硫黄分析装置です。銅、鋳鉄、銅、鉬石、セメント、セラミックスその他の材料中の炭素及び硫黄を高速同時定量します。CS-800は最大で4機の独立した赤外線セルを備えることができ、それぞれが分析用例に応じて最適な赤外線吸収長に設定されます。16ビットマイクロプロセッサにより誘導燃焼炉のパワー制御や赤外線セル検出器のゼロ及び感度調整を行います。

特 徴

- ソリッドステート赤外線セル 4 機搭載
- 燃焼炉の自動クリーニング機構
- 誘導炉出力制御
- 単独及び外部PC制御による運転
- 助燃剤なしでの最大20gまでのCu試料分析



固体発光分析装置 OBLF GmbH [GERMANY]

鉄・鋼・アルミニウム等の品質保証・工程管理分析(JSG 1253)等に最適!!

GS1000

500mmタイプの光学系を持つGS1000は、最大分析受光部数に制約がある場合は、放電スタンド、データ処理部、発光電源部等はQSN/QSG750と完全に共通です。目的が明確化されたルーチン分析に圧倒的な高精度と安全性およびコストパフォーマンスを誇ります。

DSI

Dynamic Systems Inc.

グリーブル試験機シリーズ



熱・機械プロセスの物理シミュレーションのための業界基準となります。

高速加熱と広範囲の機械能力により、溶接HAZシミュレーション、ゼロ強度、熱サイクル、熱処理研究、低力試験、高温引張り試験、さらには高速圧縮・引張り試験、多衝撃高温変形試験、溶融および凝固、そしてストリップ焼なましなどの試験に理想的です。



日本総代理店

ジャパンマシナリー株式会社
JAPAN MACHINERY COMPANY

第三営業部 〒144-0046 東京都大田区東六郷 2-19-6 (JMCビル)
TEL.03-3730-6061(代表) FAX.03-3730-3737

関西営業課 〒530-0002 大阪府大阪市北区曽根崎新地 1-3-16(京富ビル)
TEL.06-6342-1550 FAX.06-6342-1557