

# ふえらむ

Bulletin of The Iron and Steel  
Institute of Japan

Vol.25 / No.10 / 2020

(一社)日本鉄鋼協会会報

ISSN 1341-688X

## Techno Scope

世界の貨物輸送を支える鉄道レール

### 特別寄稿

俵賞受賞記念

魅せられて 鉄と歩みし 半世紀  
(名古屋大学 浅井滋生)

マルチマテリアルとマテリアルズインテグレーション  
(東京大学 岸 輝雄)

### 入門講座

インフォマティクス入門ー2

定量組織学 2

(数学的に重要な組織特徴量の抽出と類似性の評価)

(名古屋大学 足立吉隆、Zhi-Lei Wang、小川登志男)

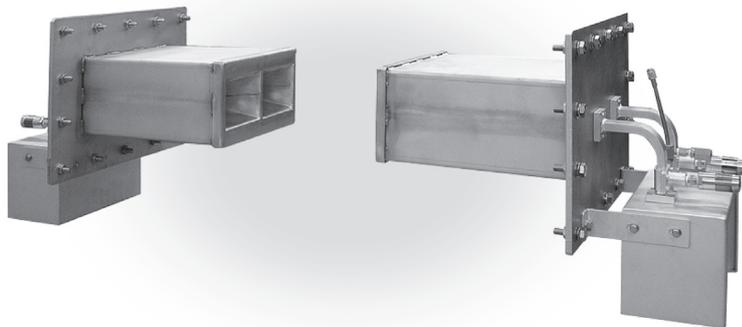
電磁波式だから実現できた

**「安全性」**

**「メンテナンスフリー」**

**「工事費削減」**

炉内専用 電磁波式CPCセンサ



ストリップや炉内設備との干渉がなく、安全操業ができます。

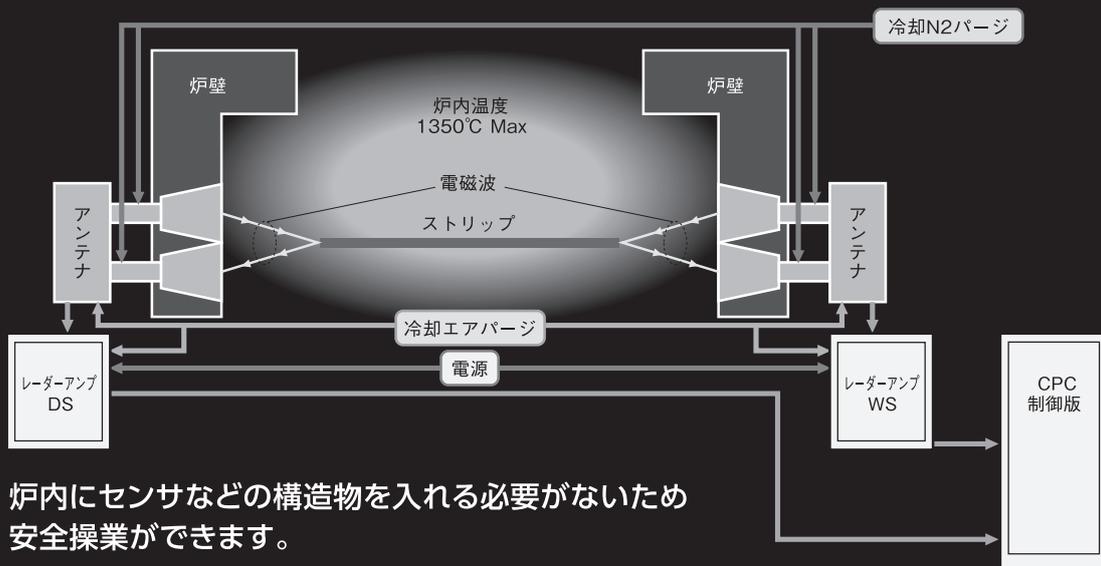
メンテナンスフリーです。

炉内雰囲気(粉塵・ヒューム)による汚れの影響はありません。

消耗品がありません。

小型・軽量で設置スペースが小さく工事が容易です。

工事費の削減ができます。



**株式会社ニレコ**

●製品についてのお問い合わせは プロセス営業部

八王子事業所 〒192-8522 東京都八王子市石川町 2951-4 TEL.(042)660-7353

大阪営業所 〒564-0062 大阪府吹田市垂水町 3-18-33 TEL.(06)6190-5552

九州営業所 〒803-0822 北九州市小倉北区青葉 2-5-12 TEL.(093)953-8631

# ふえらむ

Vol.25 (2020) No.10

## C O N T E N T S

### 目次

Techno Scope	世界の貨物輸送を支える鉄道レール	600
連携記事	マイクロ組織制御を活用した高耐久パーライトレールの開発 本庄 稔、安藤佳祐	604
	貨物鉄道用レールおよび溶接技術の開発 上田正治、才田健二、宮崎照久、山本剛士、園山恭平	610
特別寄稿 (褒賞受賞記念)	魅せられて 鉄と歩みし 半世紀 浅井滋生	618
	マルチマテリアルとマテリアルズインテグレーション 岸 輝雄	622
入門講座	インフォマティクス入門-2 定量組織学2 (数学的に重要な組織特徴量の抽出と類似性の評価) 足立吉隆、Zhi-Lei Wang、小川登志男	628
躍動	迅速な鉄鋼分析法の確立を目指して 今宿 晋	637
解説	自動車用薄鋼板溶接技術の最先端 抵抗スポット溶接 宮崎康信	641
会員へのお知らせ		651

2019年2月号より、冊子版を希望者へ無償配布しています(会員限定)  
配布を希望されない方は、会員グループ(members@isij.or.jp)へ連絡ください

ホームページ <https://www.isij.or.jp>

# 世界の貨物輸送を支える 鉄道レール

環境問題に伴うモーダルシフトや経済発展により、北米をはじめとして海外では貨物鉄道における輸送量が増加している。積載量の増加によりレールにかかる荷重は増大し、特にカーブの多い山間部などはレールの摩耗損傷が激しい。そこで選ばれているのが日本製のレールである。優れた性能を持つことから「プレミアムレール」と呼ばれ、大量輸送を支えている。

長編成の貨物列車がカーブの多い山間部を頻繁に運行する(アメリカ、カリフォルニア州)。

## 積載重量が著しく増大する貨物鉄道

警笛を鳴らしながら、延々と続く長い貨物列車が荒野を駆け抜ける。「マイル・トレイン」と呼ばれる長大編成列車はときに200両以上にもなり、全長は数kmに及ぶ。急なカーブの山道を走行する姿は、長いへびがぐるぐると山に巻き付いているようにも見える。貨物列車のなかにはコンテナを2段積みした列車もあり、これは「ダブルスタックトレイン」と呼ばれる(図1)。トレーのような形をした専用の低床貨車(ダブルスタッカー)を使用して積載時の重心を下げ、安定したコンテナの大量輸送を実現している。

アメリカの貨物輸送の主役は鉄道である。日本のスケールをはるかに超えた規模で、広大な陸地をひっきりなしに貨物列車が往来する。大陸の資源や穀物などを安価に大量輸送する主な輸送手段は鉄道であり、アメリカは世界最大の運行路線長および鉄道輸送量を誇る。

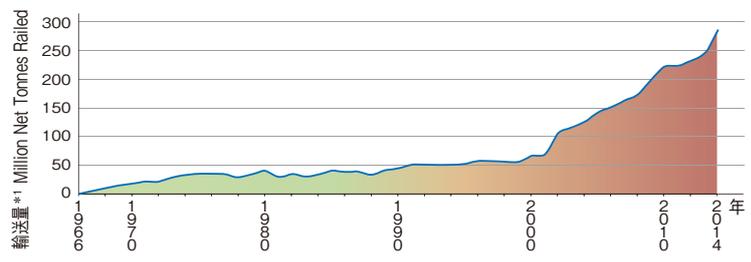
貨物鉄道においては、旅客鉄道のように乗り心地や快適性を追求する必要はなく、輸送効率化が最も強く求められる。そのため一度に大量の物資を輸送することが重要であり、近年、積載重量の増大や車両の長編成化が進んでいる。これは北

米に限らず、鉄鉱石や石炭を運搬するオーストラリアやブラジルの貨物鉄道でも同様の傾向がみられる。特に鉄鉱石や石炭などの資源輸送については中国の旺盛な鉄鋼需要がきっかけとなって、積載重量が著しく増大しており(図2)、1年間に通過する累積貨物重量は200百万トンを超えている。



ダブルスタックトレインは西海岸の港から中西部や東海岸への大量輸送に活躍している(図1)。

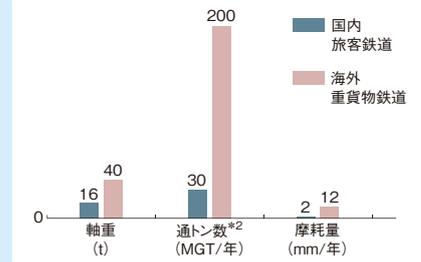
● 鉄鉱石輸送についての推移(図2) (オーストラリア・リオテント社)



\*1 貨物のみの重量であり、レールに作用する重量はこの数字よりさらに大きくなる。

出典:L. Wessels, S. Oswald, D. Welsby, P. Mutton, In Proceedings of the International Heavy Haul Conference, Perth, (2015) 1045-1054

● レール使用環境の比較(図3)



\*2 ある区間を通過した車両の累積トン数

資料提供: JFEスチール(株)

求められる耐摩耗性と耐表面損傷性

積載物が増えることでレールはより過酷な環境におかれる。「軸重」とは車軸1本にかかる荷重であり、左右両輪にかかる荷重(輪重)の和であるが、軸重は最大で40トン近くに達し、これは日本の旅客鉄道の倍以上の荷重となる。大きな荷重がかかった車輪が繰り返し通過することで、レールは著しく摩耗していく。図3のレール使用環境の比較をみると、日本の旅客鉄道が2mm/年の摩耗量に対して、海外の重貨物鉄道は12mm/年の摩耗量となっている。さらに列車に遠心力が加わるカーブ区間の外軌レールや、走行速度が極めて遅い急カーブかつ急勾配区間の内軌レールには過大な荷重がかかる場合があり、直線区間に比べて摩耗が激しい(図4)。最も摩耗が激しい区間では毎年のレール交換を強いられる場合もあり、メンテナンスコストが跳ね上がる。

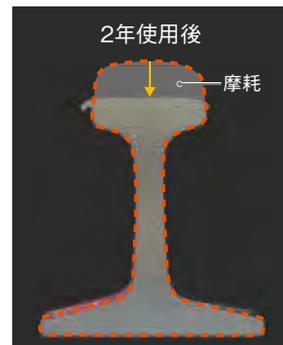
また、車輪と接触するレール頭部(ころがり接触面)は接触面圧が高いため、塑性変形に起因するスポーリングといった表面の疲労損傷も起こる(図5)。この疲労損傷や疲労層を除去し、レールを正常な状態に保つため削正などのメンテナンスが必要となる。このようなことから、耐摩耗性と耐表面損傷性(耐ころがり接触疲労損傷性)は、レールの長寿命化における最も重要な特性となっている。

求められる耐摩耗性や耐表面損傷性は、鉄鋼材料のマイクロ組織構造に大きく影響される。一般的に鉄道レールにはパーライト組織を有する鋼が使用されている。パーライト組織は板状の軟質なフェライトと硬質なセメンタイトが層をなすラメラ構造となっている。

繰り返し回転数と摩耗量の関係について炭素量が同一のパーライト鋼、焼戻しマルテンサイト鋼、硬質な炭化物の体積分率を高めた球状化炭化物鋼と比較すると、パーライト鋼の摩耗量は著しく少ないことがわかる(図6)。70万回転繰り返し後のころがり面直下の断面SEM組織をみると(図7)、フェライト中に炭化物が分散した球状化炭化物鋼では、ころがり面で最大深さ10μm程度の剥離痕が認められ、さらにころがり面直下においては、基地フェライトと炭化物の界面を伝播したと考えられるき裂の生成が認められた。一方、パーライト鋼はメタルフローに沿ってラメラが層状化し、微細化している。ころがり面においてラメラ構造が微細

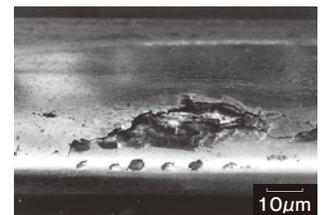
化することによりころがり面の硬さが増加し、さらに塑性変形に伴うマイクロな剥離が抑制されたことが耐摩耗性の向上に関係していると考えられる。

● 北米の重貨物鉄道の曲線区間におけるレールの摩耗状況(図4)



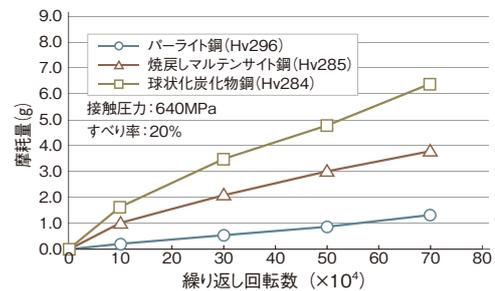
資料提供: JFEスチール(株)

● 表面損傷(図5) (スポーリング)



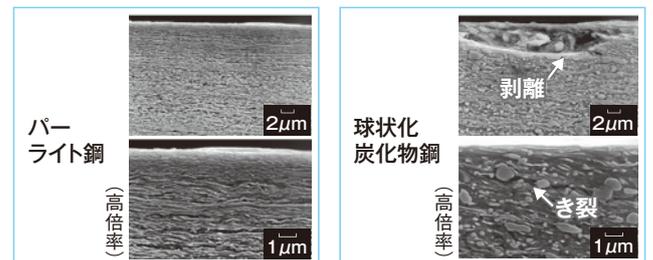
出典: 上田正治、松下公一郎、岩野克也、小林 玲、山本剛士、宮崎照久、高橋 淳、小林由起子: 新日鉄住金技報、第395号(2013) 64-72.

● 高炭素鋼の繰り返し回転数と摩耗量の関係(図6) (二元筒式ころがり接触摩耗試験)



出典: 上田正治、内野耕一、瀬沼武秀: 鉄と鋼、Vol.90(2004)、No. 12、P1027

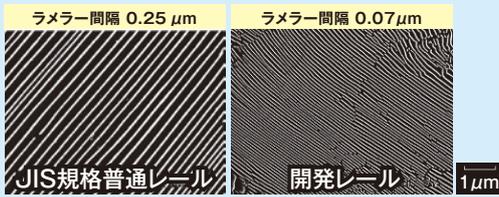
● 70万回転繰り返し後のころがり面直下のマイクロ組織(図7)



出典: 上田正治、内野耕一、瀬沼武秀: 鉄と鋼、Vol.90(2004)、No. 12、P1027

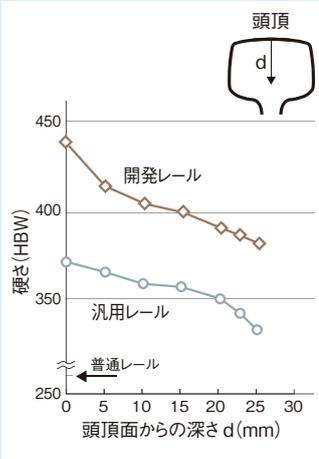
● 微細パーライト組織をもつ高耐久熱処理レールの開発(図8)

■ 普通レールと開発レールのマイクロ組織 (SEM)

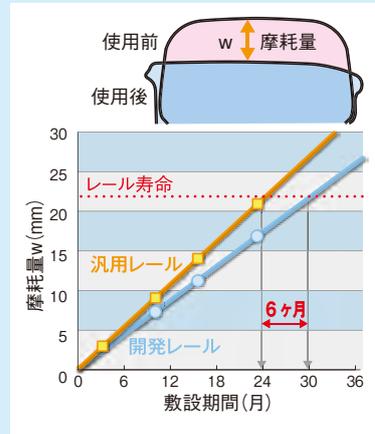


海外の重貨物鉄道で使用されている開発レールと敷設場所の一例

■ 開発レールの頭部硬さ分布と、従来レールとの表面硬さの比較



■ カーブ区間(曲線半径約240m)における開発レールと汎用レールとのレール頭頂の摩耗の比較



資料提供:JFEスチール(株)

ラメラ間隔の微細化により耐摩耗性の向上を実現

耐摩耗性を向上させるには、優れた加工硬化特性をもつパーライト組織をさらに硬くすることが有効であるが、その反面、延性の低下が生じる。レールには耐摩耗性、耐表面損傷性の他に、延性も必要となる。車輪がレールに当たる部分(頭部)は強い力がかかり、収縮するが、これとは逆にレールが地面と接する部分(足部)は伸びるため、延性の必要性が訴えられている。また延性が低いと、疲労き裂がレール内部に進展し、折損に至る場合もある。北米のレール規格等では、頭部における引張試験の全伸び値10%以上が定められている。硬さと延性を両立する一つの手法としてラメラ間隔の微細化が有効であることが知られている。1980年代から添加元素の最適化や熱処理によって、ラメラ間隔の微細化が各材料メーカーにより行われてきた。そしてさらなるラメラ間隔微細化を図ったレールの開発が2007年から始まった。

普通レールのラメラ間隔は約0.25 μmとなっているが、平成30年度の大河内賞を受賞した開発レールは、表面でラメラ間隔およそ0.07 μmを達成し、優れた耐摩耗性、耐表面損傷性、延性を有することから注目されている(図8)。同レールは0.8%程度の炭素を含有する鋼をベースにSiやMn、Cr、V等の微量元素が添加されているが、特にSiやCr量の増加、Mn量の減少など、微量添加元素の最適化によってラメラ間隔の微細化を図っている。さらに、熱間圧延後にエア圧力や冷却時間を最適化させた衝風冷却(Slack quenching)にて加速冷却を行うことでパーライト組織をより微細化している。

開発レールは北米の重貨物鉄道に敷設され、実環境において試験されたが、開発レールの摩耗量は汎用レールよりも少なく、レール寿命は6か月(24か月から30か月に)延びた。レール鋼におけるラメラ間隔の微細化は工業的には0.05 μmが限界であると言われているが、今後はこの限界値にさらに近づけるよう微細化を図っていくという。

溶接継手特性を確保するために

レールは溶接して使用されるため、溶接継手特性も考慮する必要がある。溶接して長尺化することで、継ぎ目部の管理やメンテナンスを軽減できるため、ロングレール化が進んでいる。海外の貨物鉄道では、工場溶接としてフラッシュバット溶接が、現地溶接としてテルミット溶接等が主に行われている。

継ぎ手性能の評価は、静的曲げ試験、曲げ疲労試験等があり、各材料メーカーは規格に準拠した試験を実施し、求められる溶接継手特性は確保されている。

特にパーライト鋼の炭素量が増すと、延性や靱性が低下し、欠陥に対する感受性が増す。溶接部に発生する摩耗や表面損傷はHAZ(Heat-Affected Zone, 熱影響部)の軟化が、また溶接部に起こる折損(図9)は引張残留応力が影響していると考えられている。そこでHAZ幅を低減するフラッシュバット溶接技術や溶接部の残留応力を低減させる後熱処理技術が開発されている(日本製鉄(株)の取り組み)。これらの技術はアメリカやオーストラリアの鉄道会社で実用化され、溶接部の耐久性や安全性の向上に貢献している。

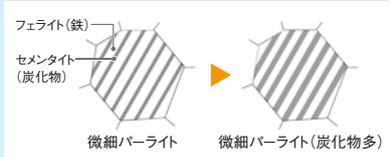


溶接部の折損(図9)

出典:PeterMutton et al., Proceedings of the 2011 International Heavy Haul Association Conference

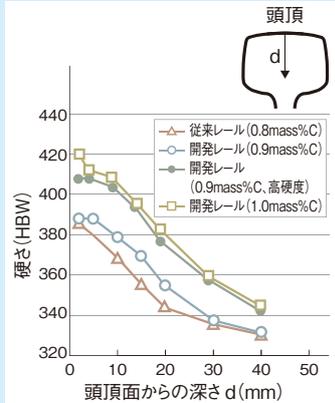
● 過共析鋼レールの開発(図10)

■ 新しい材料開発の考え方



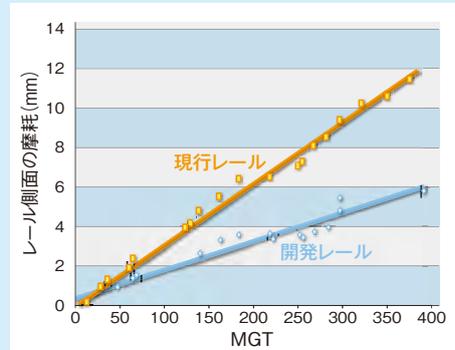
熱間圧延条件、熱処理条件の最適化により、求められる延性を確保している

■ 頭部断面硬度分布の比較



出典：上田正治、松下公一郎、岩野克也、小林 玲、山本剛士、宮崎照久、高橋 淳、小林由起子：新日鉄住金技報、第395号(2013) 64-72.

■ カーブ区間(曲線半径582m)における過共析鋼レールと現行レールとのレール側面の摩耗の比較



出典：P. Mutton, D. Welsby, E. Alvarez, In Proceedings of 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, (2009)

資料提供：日本製鉄(株)

さらなる性能向上を目指して開発された 過共析鋼レール

さらなる耐摩耗性、耐表面損傷性を目指し、炭素量の増加によって硬質セメンタイトを増加させる手法も検討され、炭素量を1%程度にまで増加させた過共析鋼レールが開発されている(図10)。

一般的に炭素量を増やすと硬くなるが、増やし過ぎると脆くなると考えられてきた。そのため炭素の含有量はアメリカのレール規格で約0.8%と定められていた。新型レールの開発は1995年に始まったが、0.8~1.0%に炭素の含有量を変えたパーライト鋼を用いて検証したところ、パーライト鋼では炭素量を増加させた試験片の方がころがり接触面の硬さが上昇し、その結果、ころがり接触面での摩耗が抑制され耐摩耗性が向上することが明らかになった。さらに、耐表面損傷性についても、炭素量が多い方がころがり面の剥離が大幅に減少することがわかった。またころがり面直下のき裂伝播挙動を見ると、炭素量の高い鋼ではき裂の生成範囲が小さくなることも確認された。

一方で高炭素化によってパーライト鋼の脆化組織である初析セメンタイト組織が生成しやすくなり、延性が低下することが課題となった。初析セメンタイト組織の生成防止には冷却速度の制御が重要となる。またパーライト鋼の延性を向上させるためにはパーライトブロックの微細化が有効であり、これは主に変態前のオーステナイト粒の微細化によって実現される。そのため熱間圧延条件の最適化によりオーステナイト粒の微細化を行い、さらに熱処理条件の最適化により、初析セメンタイト組織の生成を抑制し、求め

られる延性を確保することに成功している。

海外の貨物鉄道に敷設された過共析鋼レールは、従来の高強度レールと比べて摩耗量が少なく、約38%のレール使用寿命の改善が認められた。また剥離損傷の発生はなく、表面損傷の抑制効果が確認された。この製品は平成23年度文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞している。

オーストラリアのモナッシュ大学らの報告(レール接触問題の国際会議(2009年)資料)では、過共析鋼レールについて評価を行い、特にカーブ区間は遠心力によりレール側面が摩耗しやすいが、現行レールとの比較で、大きく摩耗量が低減していることを認めている(図10)。

これまで過共析鋼レールは約300万t以上が北米、豪州および南米の鉄道会社に出荷された(図11)。これは軌道の距離に換算すると2.3万kmとなり、地球を約1/2周した距離となる。

他国の汎用レールと比較すれば日本製レールは高価だが、それでも、はるばる海を越えて日本製品を求めるのには理由がある。北米をはじめとして貨物輸送の要となる鉄道は「止めてはならない」という強い使命感があるという。日本製プレミアムレールはその優れた性能でレール交換頻度やメンテナンスコストを抑え、貨物鉄道の使命を力強く支えているのである。



製造されたレールが搬送される様子。日本製レールは海外へ多く出荷されている(図11)

資料提供：日本製鉄(株)

●取材協力：日本製鉄(株)、JFEスチール(株) ●文：藤井 美穂





## 連携記事

# マイクロ組織制御を活用した 高耐久パーライトレールの開発

## Development of High Performance Pearlitic Rail Utilizing Microstructural Control

JFEスチール(株)  
西日本製鉄所(福山地区)  
鋼材商品技術部 形鋼室 主任部員

本庄 稔  
Minoru Honjo

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
鋼材研究部 主任研究員

安藤佳祐  
Keisuke Ando

### 1 はじめに

旅客や貨物の輸送を行う鉄道輸送は、バスやトラックなどの車輸送に比べて効率的に輸送可能な手段である。鉄道の輸送量当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、バスに比べて約1/2<sup>1)</sup>、トラックに比べて約1/9<sup>2)</sup>と少なく、地球温暖化や環境汚染の抑制の観点からモーダルシフトが進み、鉄道輸送の重要性はますます高まっている。

鉄道は、新幹線などの旅客鉄道と海外の穀物、鉱物輸送などの貨物輸送に大別される。輸送効率向上を目指し、旅客鉄道では、より早く目的地に到着するために、鉄道の高速化やダイヤの過密化が行われている。一方、貨物鉄道は、一度に大量の貨物を輸送するために、貨車の長大編成化や1車両当たりの積載重量が増加している。特に鉱物運搬を主体とする貨物鉄道では、積載重量が1車両当たり160トンまで増加しており、輸送環境が過酷化している。このような環境下で使用されるレールの寿命は短く、高耐久性を有したレールの開発が求められている。

これまで成分設計やレールのオンライン熱処理(圧延後の加速冷却(On-line Slack Quenching)のこと。以下、SQと略す)によるマイクロ組織制御により、高耐久熱処理レールを開発してきた<sup>3,4)</sup>。本報では、レールのマイクロ組織制御指針を述

べるとともに、現在、海外の貨物鉄道で主に使用されている、組織微細化を追求した高耐久レール(SP3: Super Pearlitic Type 3)の基本性能と使用特性について述べる。

### 2 レールに要求される特性

表1に海外の貨物鉄道におけるレールの使用環境を国内の旅客鉄道と比較して示す。ここで軸重とは、車軸1本に負荷される荷重である。MGT(Mega Gross Tonnage, 10<sup>6</sup>トン)とは、レールの上を通過した列車重量(車両重量(トン/両)×編成(両)で算出)の積算値であり、ある区間での1年間あたりの通過トン数が年間MGTである。これらは、レールに及ぼすダメージを評価する指標として使用される。海外の貨物鉄道は、国内の旅客鉄道に比べて軸重、年間MGTともに数倍高いため、レールの寿命が短い。例えば、図1に海外の貨物鉄道で使用されたブリネル硬さが370ポイント級の熱処理レールの摩耗状況を示す。使用期間がわずか2年で20mm以上摩耗し、レール交換寿命に達している<sup>5)</sup>。レール交換頻度低減のために、優れた耐摩耗性が要求される。レール表面には車輪との接触により転動疲労層が蓄積し、き裂発生と成長により図2に示す疲労損傷が生じる。この転動疲労層や疲労損傷除去のため、定期的なメンテナンス(レール削正)が必

表1 レールの使用環境

	軸重 (トン)	年間MGT (MGT/年)	摩耗量 (mm/年)	レールの要求特性
旅客鉄道(国内)	~16	~100	~2	耐疲労損傷性
貨物鉄道(海外)	~40	300~	~14	耐摩耗性 耐疲労損傷性 高延性、溶接継手特性

要となる<sup>6)</sup>。さらに、レールの延性が低いと、き裂がレール内部へ進展し、最終的に折損に至る。メンテナンス軽減やレール交換頻度の観点から優れた耐疲労損傷性や高延性が、更には、溶接されてロングレールとして使用されるため、優れた溶接継手特性も要求されている。

### 3 高耐久化のための基礎検討

#### 3.1 耐摩耗性・耐疲労損傷性向上に及ぼすマイクロ組織・硬さの影響<sup>5)</sup>

レールの高寿命化のための最適なマイクロ組織を導出するため、パーライト、ベイナイト、焼戻しマルテンサイトの3種類の組織で、種々の硬さを有する試験片を作製し、2円筒式回転接触試験（西原式摩耗試験）を行った。図3に試験片のブリネル硬さと摩耗量の関係を示す。試験前の試験片の重量と $9.1 \times 10^4$ 回回転接触試験後の試験片の重量の差を摩耗量とした。いずれの組織においても硬さの増加とともに摩耗量は減少した。また、同一硬さで組織の差を比較すると、ベイナイト、焼戻しマルテンサイト、パーライトの順で摩耗量は減少し、耐摩耗性はパーライト組織が最も優れていた。耐摩耗性は摩耗試験後の表面硬さと一義的な相関があることが知られており<sup>7)</sup>、初期の硬さが同じでも加工硬化能が高いパーライト組織は、ベイナイトや焼戻しマルテンサイトより優れた耐摩耗性を示す。このように現在のレールの組織は、分岐器の

一部などを除き、耐摩耗性向上の観点からパーライトが主流である。更なる耐摩耗性向上のためには、パーライト組織で高硬度化することが重要である。

図4に西原式摩耗試験後の試験片断面のマイクロ組織を示す。高硬度化により表層の塑性流動は浅くなり、疲労損傷に対しても高硬度化は有効であると判断できる<sup>8)</sup>。

#### 3.2 パーライト組織の高硬度化手法<sup>5)</sup>

パーライト組織は、軟質なフェライトと硬質なセメンタイトが層状をなすラメラ構造であり、ラメラが同一方向であるコロニー、ラメラの方向は異なるがフェライトの結晶方位が同一であるブロックで構成される<sup>9)</sup>。パーライト組織の高硬度化の主な手法として、ラメラ間隔の微細化<sup>10)</sup>とセメンタイト量の増加<sup>11)</sup>が知られている。本報では、ラメラ間隔微細化に注目して説明する。

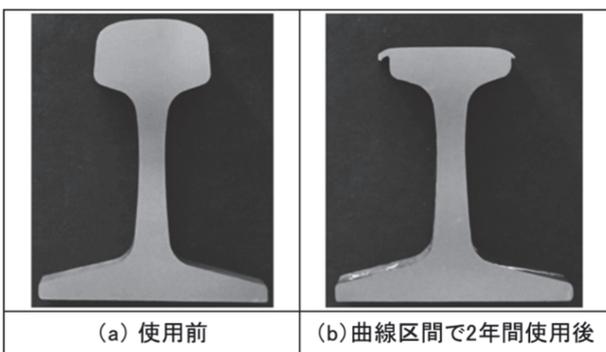


図1 海外の貨物鉄道におけるレールの摩耗状況<sup>5)</sup>

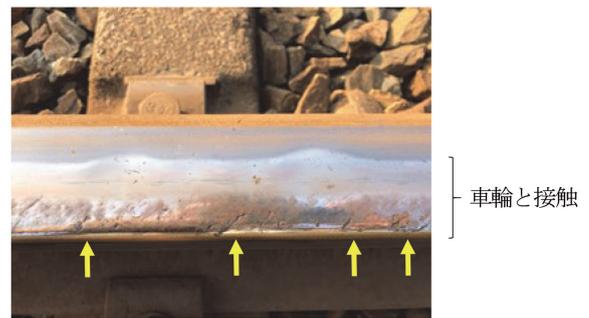


図2 レール表面に発生した疲労損傷の一例

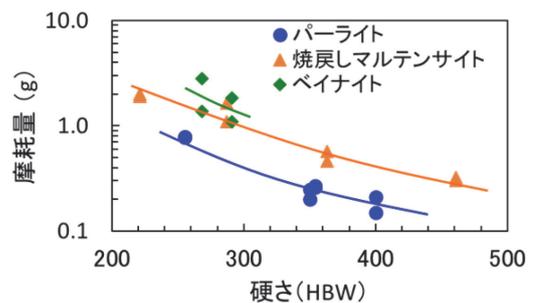


図3 異なるマイクロ組織を有する鋼の硬さと摩耗量の関係<sup>5)</sup>

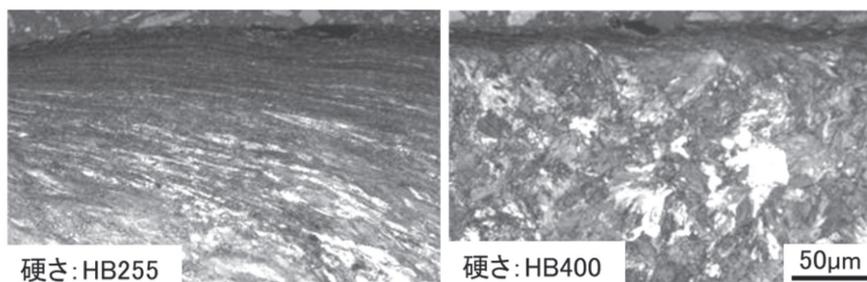


図4 摩耗試験後の断面マイクロ組織

図5に硬さに及ぼすラメラ間隔の影響を示す。硬さとラメラ間隔には相関があり<sup>12)</sup>、ラメラ間隔を微細化することで硬さを増加させることができる。オーステナイトからパーライトが変態する際、式(1)に示す変態に伴う体積的な自由エネルギーは減少するが、フェライト/セメンタイトの界面を形成するために、式(2)に示す界面エネルギーは増加する<sup>13,14)</sup>。

$$\text{体積的な自由エネルギー} : \Delta H \cdot \left( \frac{T_e - T}{T_e} \right) \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \delta \cdot dx \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{界面エネルギー} : 2\sigma \cdot \delta \cdot dx \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\Delta H$ は変態潜熱、 $\lambda$ はラメラ間隔、 $\delta$ はラメラの厚さ、 $dx$ はラメラが成長した距離、 $T_e$ はパーライトの平衡変態温度、 $T$ はパーライトの変態温度、 $\rho$ は密度、 $\sigma$ は単位面積当たりの界面エネルギーである。体積的な自由エネルギーよりも界面エネルギーが大きくなると、ラメラは成長しなくなる。そのため、ラメラ間隔の微細化には限界もある<sup>15)</sup>。

フェライト/セメンタイトの界面エネルギーに費やすことのできるエネルギーは、パーライト変態の駆動力の大きさになる。化学的な駆動力の大きさは、式(3)で記述されるパーライトの平衡変態温度( $T_e$ )からの過冷度( $\Delta T$ )と関係がある。過冷度については次節で詳細に説明する。

$$\Delta T = \frac{T_e - T}{T_e} = 1 - \frac{T}{T_e} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)、式(2)および式(3)より、ラメラ間隔( $\lambda$ )は式(4)で記述できる<sup>14,15)</sup>。

$$\lambda = \frac{2\sigma}{\Delta H \cdot \rho} \left( \frac{T_e}{T_e - T} \right) = \frac{2\sigma}{\Delta H \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\Delta T} \dots\dots\dots (4)$$

一般に、 $\lambda$ は $1/\Delta T$ に比例すると報告されており、ラメラ間隔微細化のためには、 $\Delta T$ の増加が有効である<sup>13,16)</sup>。

3.3 過冷度 ( $\Delta T$ ) 増加の考え方<sup>5)</sup>

$\Delta T$ は前述した式(3)に示すように、パーライトの平衡変態温度( $T_e$ )とパーライトの変態温度( $T$ )の関数であり、 $T_e$

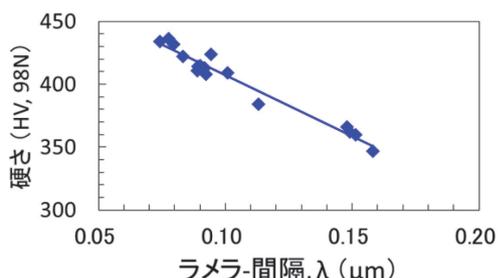


図5 硬さに及ぼすラメラ間隔の影響

の上昇、 $T$ の低下により増加する。

初めに $T_e$ の上昇のための考え方を説明する。図6に $T_e$ に及ぼす合金元素の影響を示す。 $T_e$ はThermo-Calc<sup>17)</sup>を用いて、Fe-0.8% C鋼をベースに計算した。Si量やCr量の増加、Mn量の減少により $T_e$ が上昇した。1000℃に加熱後、650℃で等温変態したFe-0.8% C鋼とCr添加鋼のラメラ間隔を図7に示す。同じ温度でパーライト変態したにも関わらず、Cr添加鋼のラメラ間隔は微細である。これはCrの添加により $T_e$ が上昇し、その結果、 $\Delta T$ が増加したことに起因する。このように $T_e$ の上昇のためには、Si量やCr量の増加、Mn量の減少などが有効である。

次に $T$ の低下のための考え方を説明する。図8に共析炭素鋼の連続冷却変態線図の模式図を示す。冷却速度を増加し、冷却曲線を(1)から(2)に移動させることによって $T$ は低下

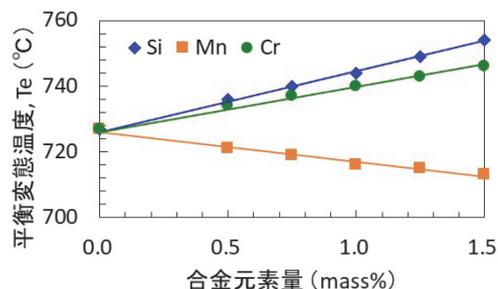


図6 パーライト平衡変態温度に及ぼす合金元素の影響

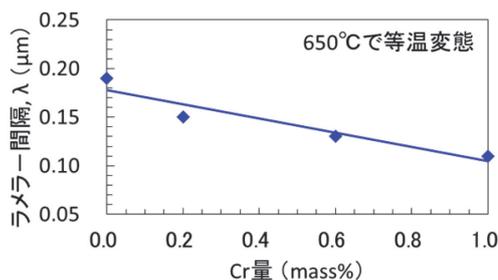


図7 Cr量の変化によるラメラ間隔の変化

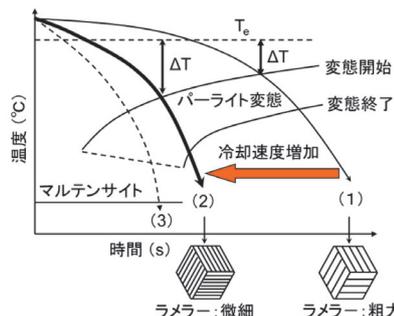


図8 共析炭素鋼の連続冷却変態線図の模式図

する。図9にラメラ組織に及ぼすレール圧延後の冷却方法の影響を示す。ラメラ組織は、熱間圧延後、エアー冷却条件 (SQ条件) を最適化することで微細化できる。しかし、図8の冷却曲線 (3) に示すように、過度に冷却速度を増加させると、パーライト以外の組織も生成する。 $\Delta T$ を最大化させるため、Tを制御する高度な熱処理技術が必要である。

以上述べたように、 $\Delta T$ を最大化する合金設計とSQ条件の最適化により、微細なラメラ組織を有した高耐久レール (SP3) を開発し、現在、海外の貨物・鉱山鉄道で使用されている。

## 4 高耐久レール (SP3) の基本性能と使用特性

### 4.1 SP3レールの化学成分と機械的特性

SP3レールの代表的な化学成分を表2に示す。比較レールは、海外の貨物鉄道で使用されているブリネル硬さが370ポイント級の熱処理レール (以下、従来レールと略す) である。SP3レールは、レール頭部表層から内部まで高硬度化することを目的に、上記検討結果を基に合金成分ならびにSQ条件の最適化を行い、 $\Delta T$ を最大化している。表3に代表的な引

張特性および米国鉄道工学 & 保線協会 (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association、以下、AREMA規格と略す) に記載の規格値を示す。SP3レールの0.2%耐力は987MPa、引張強さは1410MPaであり、AREMA規格を十分に満足している。また、SP3レールは従来レールに比べて約100MPaの高強度化も達成している。一般に、高強度化すると脆くなると考えられるが、SP3レールの伸びは従来レールと同等以上であり、高延性化が得られている。

図10にSP3レールの頭部断面の硬度分布の一例を従来レールと比較して示す。SP3レールは従来レールに比べて、ブリネル硬さで40ポイント以上高硬度化している。更に、従来レールの表層硬さとSP3レールの25.4mm深さの硬さがほぼ同等であり、SP3レールはレール頭部内部まで高硬度を有している。

図11にレール表層とレール頭部内部25.4mm位置のマイクロ組織を示す。SP3レールのラメラ間隔は表層で74nmであり、従来レールのラメラ間隔に比べてかなり微細である。SP3レールの頭部内部25.4mm位置のラメラ間隔は、従来レールの表層のラメラ間隔とほぼ同等であり、レール頭部内部までラメラ微細化が実現されている。

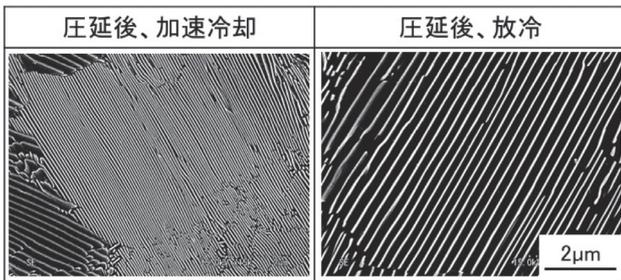


図9 ラメラ組織に及ぼす冷却方法の影響

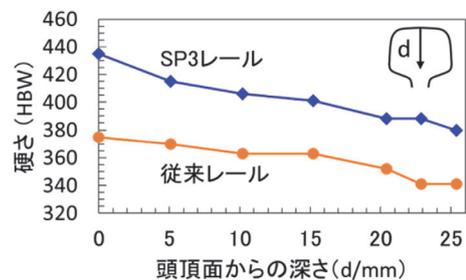


図10 レール頭部の硬度分布

表2 SP3レールの代表的な化学成分

	(mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	Others
SP3レール	0.82	0.52	0.56	0.014	0.004	Cr, V
従来レール	0.81	0.29	1.10	0.014	0.005	Cr

表3 SP3レールの代表的な引張特性

	0.2%耐力	引張強さ	伸び
SP3レール	987MPa	1410MPa	13.4%
従来レール	866MPa	1306MPa	12.2%
AREMA規格 (高強度)	$\geq 827$ MPa (120.0ksi)	$\geq 1179$ MPa (171.0ksi)	$\geq 10\%$

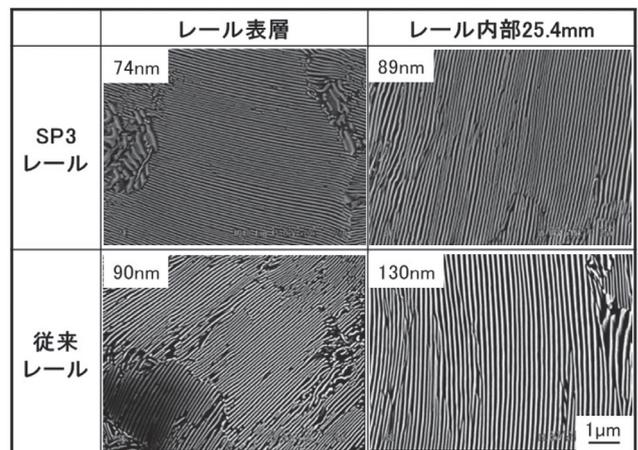


図11 パーライトラメラ組織の比較

### 4.2 SP3レールの溶接継手特性

レールは継目の管理、メンテナンス性などの観点から、溶接によりロングレール化されるため、優れた溶接継手特性も要求される。海外の貨物鉄道では、フラッシュバット溶接<sup>18,19)</sup>やテルミット溶接<sup>19)</sup>が適用されている。ここでは、フラッシュバット溶接とテルミット溶接の溶接継手特性について一例を紹介する。

図12にSP3レールの溶接部のマクロ写真を示す。溶接

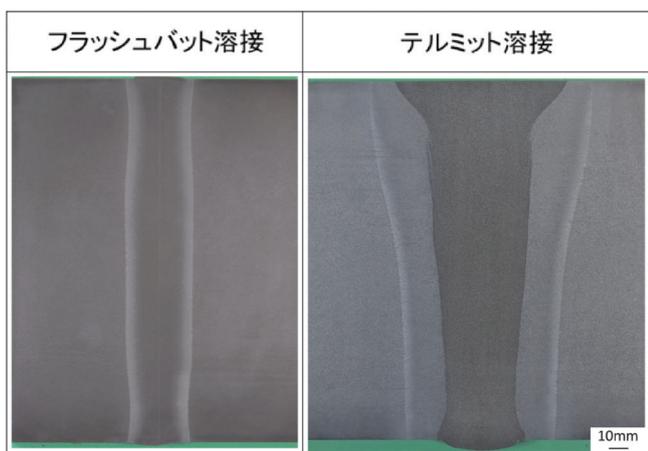


図12 溶接継手部のマクロ組織

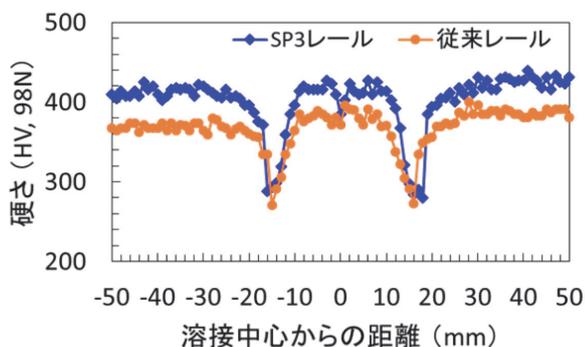


図13 フラッシュバット溶接継手部の硬度分布

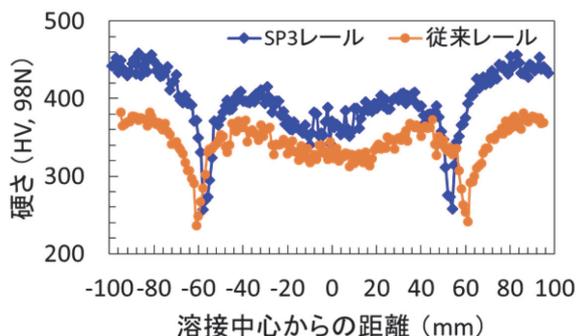


図14 テルミット溶接継手部の硬度分布

部には割れや未接合などの欠陥は認められず、マイクロ組織はフルパーライトであった。図13、図14にSP3レールの頭部2.5mm位置の硬さ分布を従来レールと比較して示す。SP3レールの溶接部の硬さは、従来レールよりも硬く、従来レールと同様に良好な継手硬さ分布を示している。表4にAREMA規格に準拠した静的4点曲げ試験を行った結果を示す。破壊強度、たわみ量ともにAREMA規格を十分に満足しており、優れた溶接継手特性を有している。

### 4.3 SP3レールの実敷設による評価試験

SP3レールと従来レールは、実際に海外の貨物鉄道の曲線区間に交互敷設 (SP3レール-従来レール-SP3レール-従来レールのように交互に敷設) され、摩耗挙動やレール表面の疲労損傷発生状況について継続的な観察も実施した。図15に約170MGT経過後 (レール削正を実施してから約90MGT通過後) のレールの表面状態を示す。SP3レールには有害な疲労損傷の発生は認められず、優れた耐疲労損傷性を有していた。図16にSP3レールの摩耗挙動を従来レールと比較して示す。レール頭部表面から22.2mm摩耗すると寿命となり、レール交換が行われる。そのため、摩耗量が22.2mmにおいてSP3レールと従来レールの寿命を比較すると、従来レール



図15 実敷設レールの表面状態

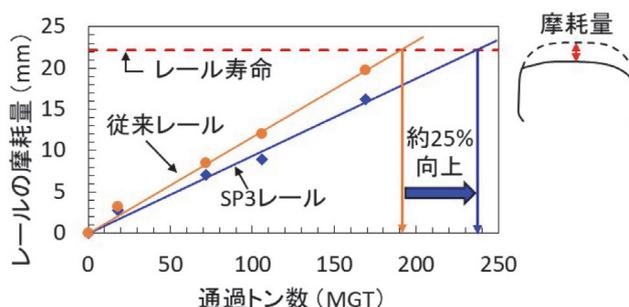


図16 実敷設によるレール摩耗量の変化

表4 SP3レールの溶接後の静的4点曲げ試験結果

	フラッシュバット溶接		テルミット溶接	
	破断荷重 ( $\times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ )	たわみ量 (mm)	破断荷重 ( $\times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ )	たわみ量 (mm)
SP3レール	14.5 13.2	48.0 35.7	10.9 11.0	23.1 19.6
AREMA規格 (Min.)	8.8 ( $1.25 \times 10^5 \text{lbs/in}^2$ )	19.1 (0.75 in.)	8.4 ( $1.20 \times 10^5 \text{lbs/in}^2$ )	15.2 (0.60 in.)

ルは約190MGT(2年)と短期間であるのに対し、SP3レールの寿命は約25%(約45MGT)向上し、優れた耐摩耗性を有していた。交互敷設の場合、レールのメンテナンスは特性の低いレールにあわせて実施されるため、メンテナンス時期ではないレールもメンテナンスが実施される。そこでSP3レールのみを敷設して試験を実施すると、レールの寿命が約80%(約150MGT)向上する結果も得られており、メンテナンス軽減やレールの高寿命化による交換頻度低減にも寄与している。北米の運輸技術センター(TTCI: Transportation Technology Center, Inc.)で行われた敷設試験においても、SP3レールは優れた耐摩耗性を示した<sup>20)</sup>。

## 5 おわりに

本報では、レールのマイクロ組織制御指針と開発したSP3レールの基本性能および使用特性について紹介した。SP3レールは紹介した敷設試験以外でも、優れた耐摩耗性や耐疲労損傷性を有することが確認されている。既に、北米、南米、オーストラリアの貨物・鉱山鉄道で広く採用され、レールの交換頻度低減やメンテナンス軽減に寄与している。今後も輸送効率向上の観点から、レールの使用環境はますます過酷化すると想定され、更なる高耐久レールの開発が必要になると考えられる。

開発したSP3レールは、平成23年に「日本金属学会技術開発賞」を受賞、平成30年には「大河内記念技術賞」を受賞し、高い評価を得ている。海外の鉄道会社様、溶接会社様をはじめ、関係各位の皆様のお協力があり実用化に至っており、この場をお借りして御礼申し上げます。

### 参考文献

1) 石渡健吾, 青木辰夫, 丸山美帆, 六川和歌子, 荒川奈美, 遠藤瞳, 檜垣達郎: 早稲田社会科学総合研究 別冊, 2015年度学生論文集, (2016), 167.  
 2) 翟碩: 近畿大学商学研究, 16 (2017) 1, 91.  
 3) Y.Kataoka, J.Furukawa, M.Ueda, T.Horita and H.Yamanaka: 1992 Rail Steels Symposium Proceedings,

(1992), 11.  
 4) 横山泰康, 三田尾眞司, 酒井潤一, 山本定弘: 鉄と鋼, 86 (2000) 6, 417.  
 5) 木村達己, 本庄稔, 長谷和邦: まてりあ, 55 (2016) 10, 448.  
 6) 野本耕一: 新線路, 72 (2018) 7, 50.  
 7) 杉野和男, 榎本引毅, 西田新一, 浦島親行, 影山英明, 服部正善: 製鉄研究, 303 (1980), 23.  
 8) M.Ueda and K.Matsuda: Wear, 444-445 (2020), 203120.  
 9) 高橋稔彦, 南雲道彦, 浅野巖之: 日本金属学会誌, 42 (1978) 7, 708.  
 10) 田代均, 佐藤洋: 日本金属学会誌, 55 (1991) 10, 1078.  
 11) 上田正治, 佐藤琢也, 山本剛志, 狩峰健一: ふえらむ, 17 (2012) 6, 380.  
 12) P.Clayton and D.Danks: Wear, 135 (1990) 2, 369.  
 13) C.Zener: Trans. AIME, 167 (1946), 550.  
 14) H.K.D.H.Bhadeshia and S.R.Honeycombe: Steels (Third Edition), Elsevier, Butterworth-Heinemann, UK, (2006), 53.  
 15) 山本定弘: 第161・162回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1996), 215.  
 16) 高木節雄, 津崎兼彰: 材料組織学, 朝倉書店, (2000), 57.  
 17) B.Jansson, M.Schalin, M.Selleby and B.Sundman: Computer Software in Chemical and Extractive Metallurgy, ed. by C. W. Bale et al., The Metall. Soc. CIM, Quebec, (1993), 57.  
 18) 藤井充, 中野渡弘昌, 成合潔: JFE技報, 34 (2014), 109.  
 19) 山本隆一: 溶接学会誌, 81 (2012) 8, 641.  
 20) D.Szablewski, D.Glltscher, J.LoPresti and S.Kalay: 10th International Heavy Haul Association Conference, (2013), 43.

(2020年6月30日受付)

# 連携記事

## 貨物鉄道用レールおよび溶接技術の開発

Development of Rails and Welding Techniques for Freight Railways

日本製鉄(株) 上田正治  
 技術開発本部 高炭素鋼材研究部 上席主幹研究員 Masaharu Ueda

日本製鉄(株) 才田健二  
 技術開発本部 高炭素鋼材研究部 主幹研究員 Kenji Saita

日本製鉄(株) 宮崎照久  
 技術開発本部 高炭素鋼材研究部 主幹研究員 Teruhisa Miyazaki

日本製鉄(株)九州製鉄所 山本剛士  
 品質管理部 軌条管理室 室長 Takeshi Yamamoto

日本製鉄(株)九州製鉄所 園山恭平  
 品質管理部 軌条管理室 主幹 Kyouhei Sonoyama

### 1 はじめに

鉄道は定時性や安全性の高い大量輸送機関として、国内外において重要な役割を担っている。近年、地球温暖化や大気汚染等の環境問題が深刻化する中で、都市間の旅客輸送として、CO<sub>2</sub>排出量や排気ガスの少ない鉄道の見直しが進んでいる。また、発展途上国や資源国では、その優れた輸送効率から、旅客や資源輸送の手段として新たな鉄道敷設も進められている。このように鉄道は輸送の要として現在でも主要な地位を占めている。

世界の鉄道は主に貨物鉄道と旅客鉄道に分類される。貨物鉄道の輸送対象はコンテナ等の物資や石炭、鉄鉱石等の天然資源である。一方、旅客鉄道の輸送対象は人である。使用

環境の特徴としては、貨物鉄道は天然資源などを輸送するため、輪重、すなわち、車輪に作用する荷重が大きく、レールに作用する接触面圧が高いという特徴を有している。一方、旅客鉄道は人を輸送するため、輪重が小さく、レールに作用する接触面圧が低い。しかし、走行速度は速いという特徴がある。

近年、貨物鉄道では、経済発展や資源開発にともない、輸送の効率化として重積載化が進められている(図1参照)。一方、旅客鉄道では、航空機等との熾烈な競争により、列車速度の向上が積極的に進められている。特に、北米・豪州等の貨物鉄道では、図2に示すように、最大輪重(1つの車輪に作用する荷重)が25年間で約2倍の20トンまで増加している<sup>1)</sup>。このような軌道環境の変化にともない、貨物鉄道の

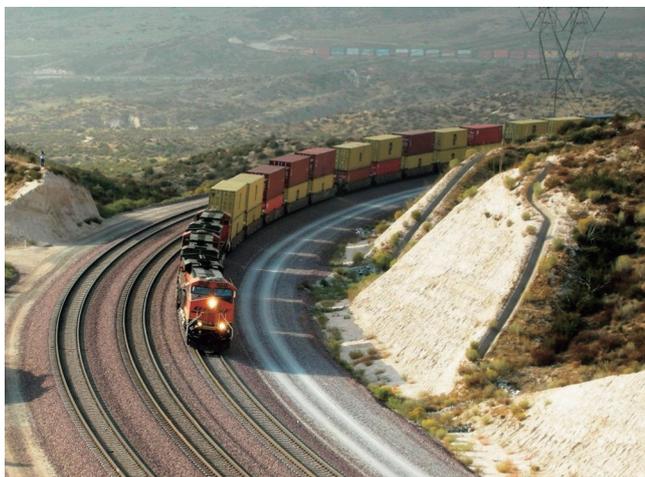


図1 貨物鉄道における重積載化の一例

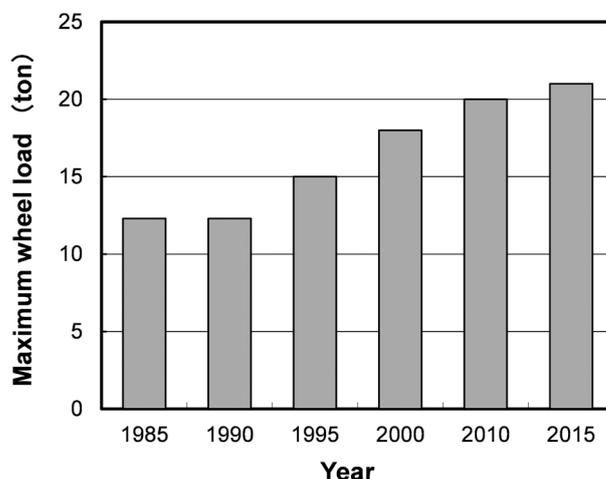


図2 海外の貨物鉄道における最大輪重の変化

使用環境は苛酷化しており、レールや溶接部の摩耗や損傷の増加<sup>2)</sup>により、耐久性に優れたレールの開発や溶接部の信頼性を向上させる技術の開発が望まれている。

本稿では、貨物鉄道におけるレールおよび溶接部の技術課題について紹介し、レールおよび溶接部の耐摩耗性や耐ころがり接触疲労損傷性、さらに、溶接部の耐折損性を向上させる技術開発や実用化状況について述べる。

## 2 貨物鉄道におけるレールおよび溶接部の技術的課題

貨物鉄道では、輪重の増加により、車輪と接触するレール頭部（ころがり接触面）の接触面圧および接線力（摩擦力）が著しく増加している。レールでは、図3に示すように、摩耗、塑性変形を起因とするスポーリング等のころがり接触疲労損傷<sup>1)</sup>が増加している。また、レール母材よりも性能が劣位である溶接部では、図4に示すように、溶接部の熱影響部（HAZ：Heat Affected Zone）の軟化域に発生する摩耗やころがり接触疲労損傷の増加、溶接部の引張残留応力を起因とする折損の発生が顕在化している。

これらのレールや溶接部の摩耗や損傷は、鉄道輸送の安全性や列車の安定走行を阻害するばかりでなく、使用寿命に大きな影響を及ぼす。したがって、レールや溶接部の耐摩耗性、耐損傷性の向上は、軌道において重要な技術的な課題となっ

ている。

## 3 過共析鋼レールの開発

### 3.1 耐摩耗性および耐ころがり接触疲労損傷性の向上の考え方

摩耗は車輪とのすべりを伴うころがり接触により発生し、その機構はころがり接触面の塑性変形による微小なせん断破壊を基本とした凝着摩耗<sup>3,4)</sup>であると考えられている。また、塑性変形を起因とするころがり接触疲労損傷は、車輪の接線力により塑性流動が発達し、この流動に沿ってき裂が生成、伝播し、その一部が剥離する現象<sup>5,6)</sup>であると考えられている。したがって、レールの耐摩耗性および耐ころがり接触疲労損傷性を向上させるには、レール鋼の基本組織であるパーライト組織の高硬度化が有効な手段であると考えられていた<sup>7,10)</sup>。図5にパーライト鋼における耐摩耗性および耐ころがり接触疲労損傷性の向上の考え方を示す。これまで、パーライト鋼の高硬度化を図るため、合金添加や熱処理によりパーライト組織のラメラ間隔（フェライト相とセメンタイト相の間隔）の微細化が行われてきた。この様な従来の方法に加えて、新たな試みとして、パーライト組織中のセメンタイト相（炭化物）の体積分率の増加、すなわち、高炭素化に着目した。本章では、パーライト鋼の耐摩耗性および耐ころがり接触疲労損傷性に及ぼす炭素量の影響を基礎的に検討した結果を紹介する。

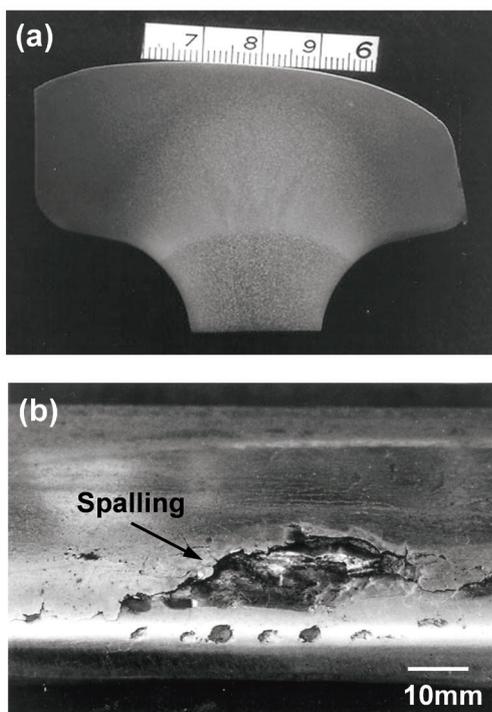


図3 貨物鉄道における摩耗と損傷の一例  
(a) 摩耗 (b) スポーリング損傷（ころがり接触疲労損傷）

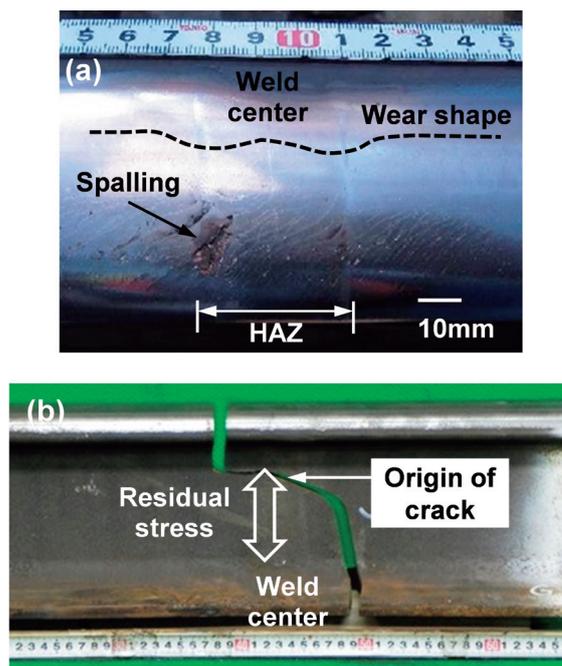


図4 貨物鉄道における溶接部の摩耗と損傷の一例  
(a) 摩耗・損傷 (b) 折損

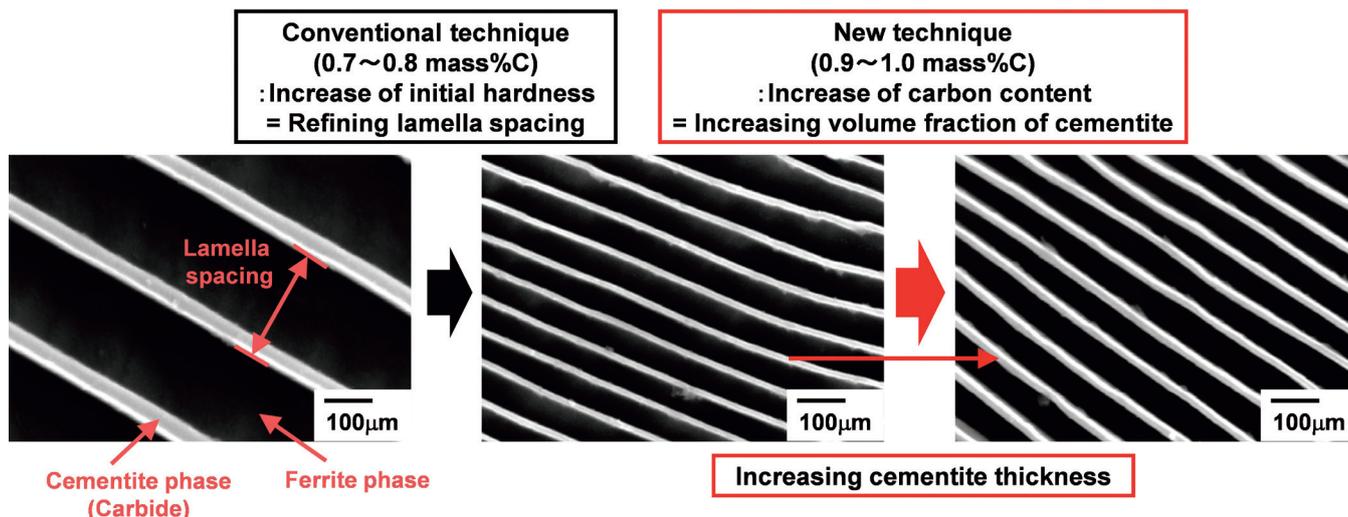


図5 パーライト鋼における耐摩耗性および耐ころがり接触疲労損傷性の向上の考え方

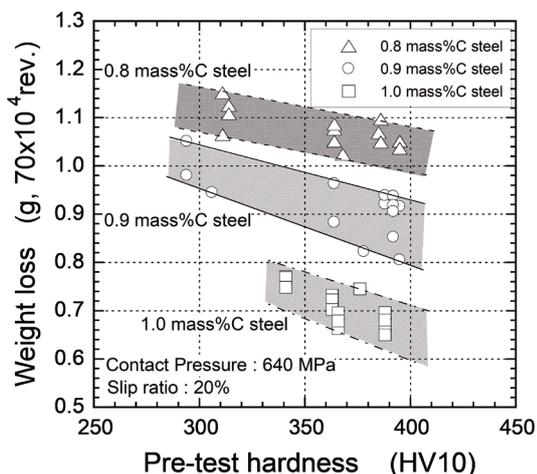


図6 初期硬さと摩耗量の関係

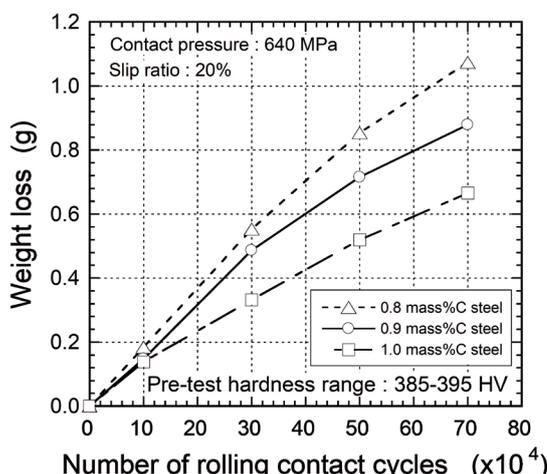


図7 繰り返し接触回転数と摩耗量の関係

### 3.2 耐摩耗性の検討

炭素量を0.8 mass%、0.9 mass%および1.0 mass%の3水準に変化させ、熱処理により初期硬さを294~395 HVの範囲に変化させたパーライト鋼を用いて、二円筒式のころがり接触摩耗試験を行った。図6に試験片の初期硬さと摩耗量の関係を示す<sup>11)</sup>。これまでに報告<sup>7-10)</sup>されているように、初期硬さが増加すると摩耗量は減少する。これに加えて、鋼の炭素量の増加にともない摩耗量は減少することを確認した。この摩耗量の減少は、図6に示したように、炭素量0.10 mass%の増加と硬さ100 HVの増加がほぼ等価であり、耐摩耗性の向上は高硬度化と比較して高炭素化が有効なことを示唆している。

さらに、摩耗機構を検証するため、初期硬さ385~395 HVのパーライト鋼を用いて、繰り返し接触回数を変化させたころがり接触摩耗試験を行った。図7に繰り返し接触回数と摩耗量の関係、図8に繰り返し接触回数ところがり接触面の硬さの関係をそれぞれ示す<sup>11)</sup>。繰返し接触回転数が一定回

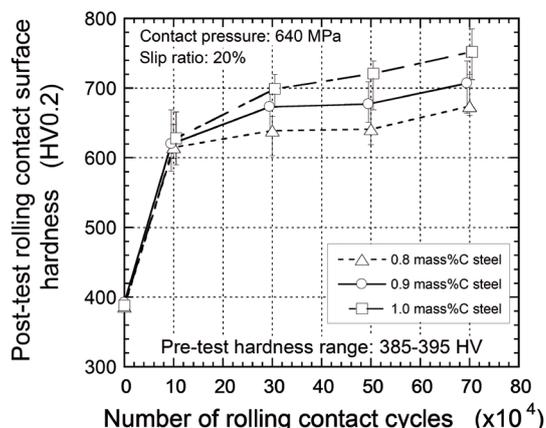


図8 繰り返し接触回転数ところがり接触面硬さの関係

数を超えると、鋼の炭素量の増加にともない摩耗量は減少する。一方、ころがり接触面の硬さは鋼の炭素量の増加にともない向上する。すなわち、パーライト鋼では、高炭素化、すな

わち、セメンタイト相の体積分率を増加させると、ころがり接触面の硬さが上昇し、その結果、ころがり接触面での摩耗が抑制され、耐摩耗性が向上する。

炭素量の増加に伴うころがり接触面での硬さの増加率の上昇機構を明らかにするためころがり接触面直下の組織変化を調査した。図9に70万回転繰返し後の炭素量1.0 mass%の試験片ころがり接触面直下の断面薄膜組織 (TEM) およびころがり接触面直下の3次元アトムプローブ (3D-AP) の解析結果を示す<sup>1)</sup>。ころがり接触面直下では塑性流動に沿ってパーライト組織が微細化している。3D-APの結果から、パーライト組織のラメラ間隔(フェライト相とセメンタイト相の間隔)やセメンタイト相の存在状態を推定すると、ころがり接触面直下では、ラメラ間隔が初期の約90nmから10~30nmレベルまで微細化している。さらに、セメンタイト相自体も薄膜化<sup>12)</sup>が進み、セメンタイト相から分解したと考えられる炭素が部分的にフェライト相までブロードに分布している。

さらに、詳細な組織調査を実施した結果、ころがり接触面では基地フェライト相の微細化、鋼の炭素量の増加にともなうナノサイズまでの基地フェライト相の超細粒化の傾向が確認されている<sup>11)</sup>。

図10にころがり接触面直下のパーライト鋼の組織変化を模式的に示す<sup>1)</sup>。試験片のころがり接触面直下では、強い接触面圧および接線力(摩擦力)が作用している。この結果、パーライト組織のラメラ間隔の微細化、基地フェライト相の細粒化、メカニカルリング実験等の強加工材で確認されているセメンタイト相の分解および炭素の基地フェライト相への固溶<sup>13)</sup>が部分的に発生している。この中で、鋼の炭素量の増加にともないころがり接触面の硬さが上昇する現象は、硬質なセメンタイト相の体積分率の増加により、基地フェライト相の結晶粒細粒強化や炭素の固溶強化が促進<sup>14)</sup>され、ころがり接触面での硬さが増加したためと考えられる。

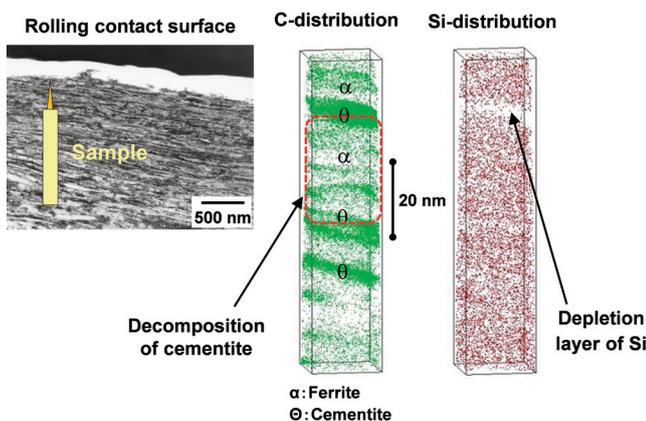


図9 試験片ころがり面直下の断面薄膜組織 (TEM) およびころがり接触面直下の3次元アトムプローブ (3D-AP) の解析結果

### 3.3 耐ころがり接触疲労損傷性の検討

パーライト鋼の耐ころがり接触疲労損傷性を向上させるため、前節で確認された炭素量の増加に伴うころがり接触面の硬さ増加の効果を検討した。主に炭素量を変化させたパーライト鋼 (炭素量: 0.8, 1.0 mass%, 初期硬さ: 400~415 HV) を用いて、実際の貨物鉄道のレールと車輪の接触を模擬した二円筒式の試験機により、水・乾燥間欠潤滑条件下におけるころがり接触疲労損傷特性を評価した。

図11にレール試験片のころがり接触面性状の一例を示す<sup>15)</sup>。車輪のフランジが接するコーナー (G.C.: Gauge Corner) 部を中心に剥離損傷が発生している。剥離の生成状況を比較すると、炭素量の高い鋼ではき裂の生成が少ない。図12にレール試験片のG.C.部ころがり面接触直下の断面マイクロ組織の一例を示す<sup>15)</sup>。炭素量が増加すると、塑性流動の発達抑制され、き裂深さが減少する傾向が認められる。さらに、図13にこれらのレール試験片のG.C.部のころがり接触面直下の断面硬さの測定結果を示す<sup>15)</sup>。ころがり接触面直下では硬さが大きく上昇しており、特に、炭素量の高い1.0 mass% C鋼

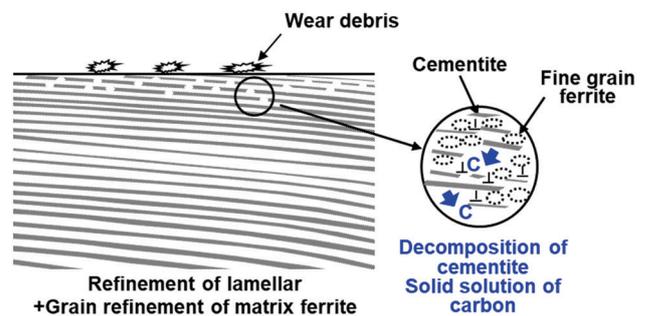


図10 ころがり接触面直下のパーライト鋼の組織変化

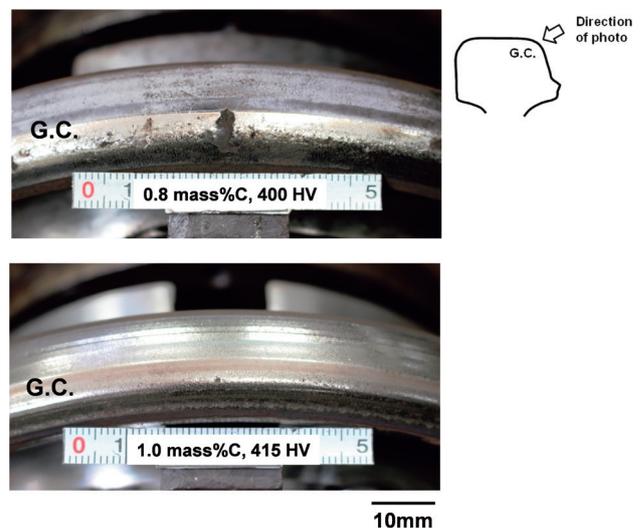


図11 試験後のころがり接触面性状の一例

は、0.8 mass% C鋼と比較して硬さが高く、その硬さの差は初期硬さの15 HVから80 HVまで増加している。

詳細な解析<sup>15)</sup>によると、炭素量の高いパーライト鋼において、耐ころがり接触疲労損傷性が向上する理由は、摩耗試験の結果と同様に、鋼の炭素量の増加によりころがり接触面の硬さが向上し、その結果、ころがり接触面直下の表層部において、シェークダウン限界<sup>16)</sup> (最大接触圧力、鋼のせん断降伏強度の関係から算定されるころがり接触面の塑性流動の発達の拳動を示す値) が向上する。この向上により塑性流動の発達が抑制され、これに伴い、塑性流動中に発生したき裂の傾斜角度 (ころがり面となす角度) の減少が抑えられる。さらに、このき裂に水が侵入し、先端に充満した場合に、き裂

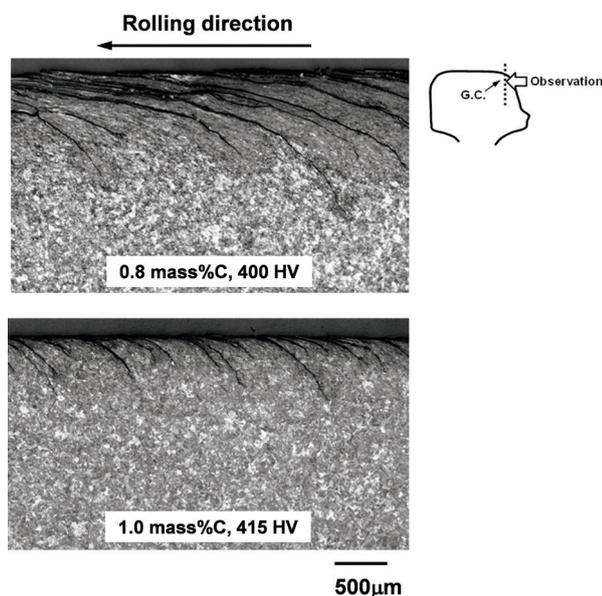


図12 レール試験片のG.C.部直下の断面マイクロ組織の一例

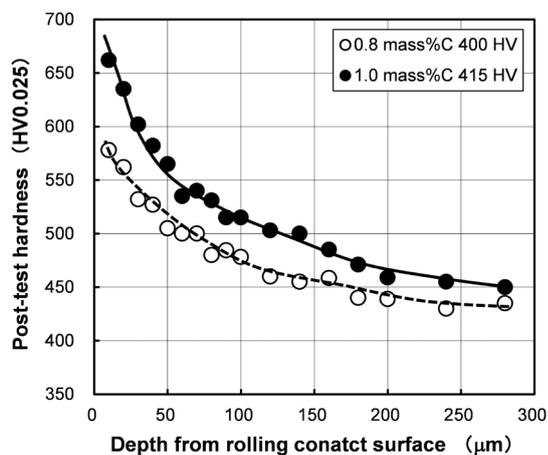


図13 レール試験片のG.C.部のころがり接触面直下の断面硬さ分布の一例

先端での応力集中が低下し、き裂の伝播が抑制されたことが主な理由と考えられている。

### 3.4 実軌道での諸特性

試作した過共析パーライト鋼レール (炭素量: 0.9 mass%、硬さ: 390 HB) を北米の貨物鉄道に試験敷設し、耐摩耗性、耐ころがり接触疲労損傷性を評価した。耐摩耗性については、曲率半径290 m (6 deg.) の曲線区間の軌道、耐ころがり接触疲労損傷性については、曲率半径400 m (4.4 deg.) の曲線区間の軌道でそれぞれ評価した。

図14に過共析パーライト鋼レールの累積通過トン数 (軌道上を通過した貨物の累積重量) と摩耗量の関係を従来の高強度レール (炭素量: 0.8 mass%、硬さ: 390 HB) と比較して示す<sup>1,17)</sup>。過共析パーライト鋼レールは、従来の高強度レールと比較して摩耗量が少なく、耐摩耗性の改善が認められる。頭側部の摩耗量が約1/2 inch (12.7 mm) に達する累積通過トン数から従来の高強度レールと過共析パーライト鋼レールの寿命を比較すると、約38%のレール使用寿命の改善が認められる。

図15に過共析パーライト鋼レールのころがり接触面性状 (累積通過トン数170 MGT) を従来の高強度レールと比較して示す<sup>1)</sup>。従来の高強度レールではころがり接触面に割れをともなった剥離損傷が発生している。一方、過共析パーライト鋼レールでは剥離損傷の発生はなく、耐ころがり接触疲労損傷性の向上が確認される。実軌道では剥離損傷等のころがり接触疲労損傷の発生を抑制するため、グラインディングによる定期的な削正が行われている。過共析パーライト鋼レールではころがり接触疲労損傷の発生が抑制されるため、削正等のメンテナンス作業の軽減、すなわち、保守管理コストの低減が可能になると考えられる。

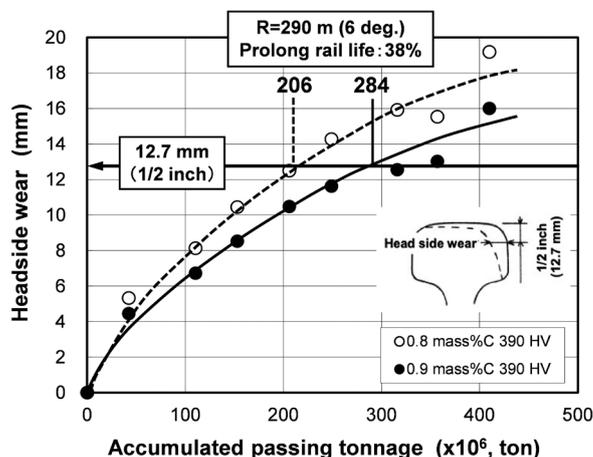


図14 過共析パーライト鋼レールの累積通過トン数と摩耗量の関係

### 3.5 過共析鋼レール (HE RAIL<sup>®</sup>) の実用化状況

これらの実績により、過共析鋼レール (炭素量: 0.9~1.0 mass%, 硬さ: 390~420 HB) を実用化した。その優れた耐摩耗性と耐ころがり接触疲労損傷性により、これらのレールは現在までに約300万トン以上が北米、豪州および南米の鉄道会社に出荷され、高い耐久性により貨物鉄道のレールの使用寿命を大きく向上させている。

## 4 溶接部信頼性向上技術の開発

### 4.1 溶接部信頼性向上の考え方

溶接部に発生する摩耗やころがり接触疲労損傷はHAZの軟化が主な原因であると考えられている<sup>18)</sup>。また、溶接部に発生する折損は溶接部に作用する引張残留応力が大きく影響していると考えられている<sup>19)</sup>。本章では、HAZの軟化、すなわち、HAZ幅を低減するフラッシュバット (FB: Flash Butt) 溶接技術の開発、溶接部の残留応力を低減させる後熱処理 (PWHT: Post Weld Heat Treatment) 技術の開発について紹介する。

### 4.2 HAZ幅低減技術の開発

FB溶接は全面短絡による予熱、アークを連続的に発生させるフラッシュ、最終的に加圧するアプセットの工程から

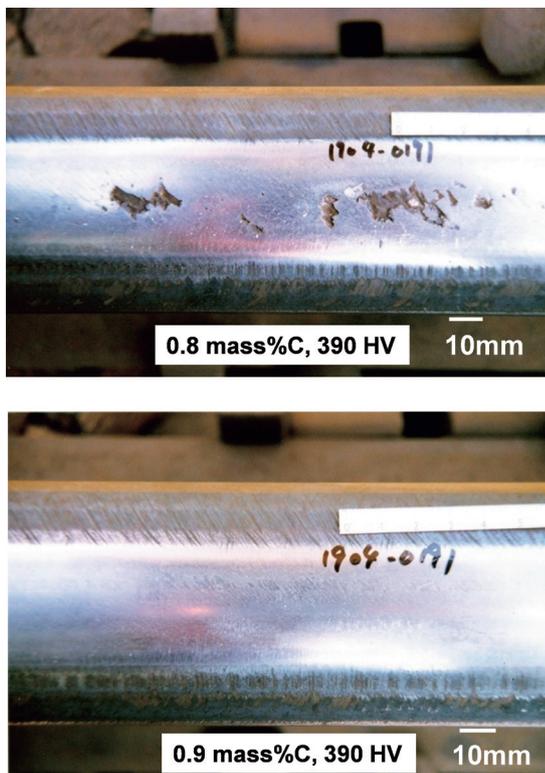


図15 過共析パーライト鋼レールのころがり接触面性状

なる。FB溶接においてHAZ幅を低減させるには、①予熱の低減、②フラッシュ時の溶鋼の飛散量 (フラッシュ速度) の増加が有効であると考えられている。今回、主にフラッシュ速度に着目して開発を行った。図16にフラッシュ速度を1.2, 2.6mm/secに変化させた溶接継ぎ手のマクロ組織<sup>20)</sup>、図17に溶接継ぎ手部の長手方向の硬度分布を示す<sup>20)</sup>。従来の継ぎ手と比較して、フラッシュ速度を増加した継ぎ手では、HAZ幅が従来の33mmから23mmまで減少する。また、硬度分布に示したように、軟化域の幅も減少することが確認されている。さらに、このHAZ幅の低減効果を検証するため、これらの溶接継ぎ手を用いて、実車輪との組み合わせによる転動疲労試験を行った。図18に累積通過トン数100MGT経過後の溶接継ぎ手部の長手方向の摩耗形状を示す<sup>20)</sup>。従来の溶接継ぎ手 (HAZ幅: 33mm) と比較して、HAZ幅を低減した溶接継ぎ手 (HAZ幅: 23mm) では、摩耗深さや摩耗幅が減少し、耐摩耗性が向上することが確認されている。なお、HAZ幅の低減は、溶接部の冷却速度を増加させ、異組織の生成を促進させる可能性がある。しかしながら、レール鋼の高炭素化と組み合わせることにより、これらの組織の生成を抑制する効果が期待できる。

### 4.3 残留応力低減技術の開発

FB溶接部に生成する引張残留応力は溶接部の加熱、収縮に伴う残留歪が主な発生原因であると考えられている。この残留歪を緩和するため、溶接部のPWHT技術を検討した。図

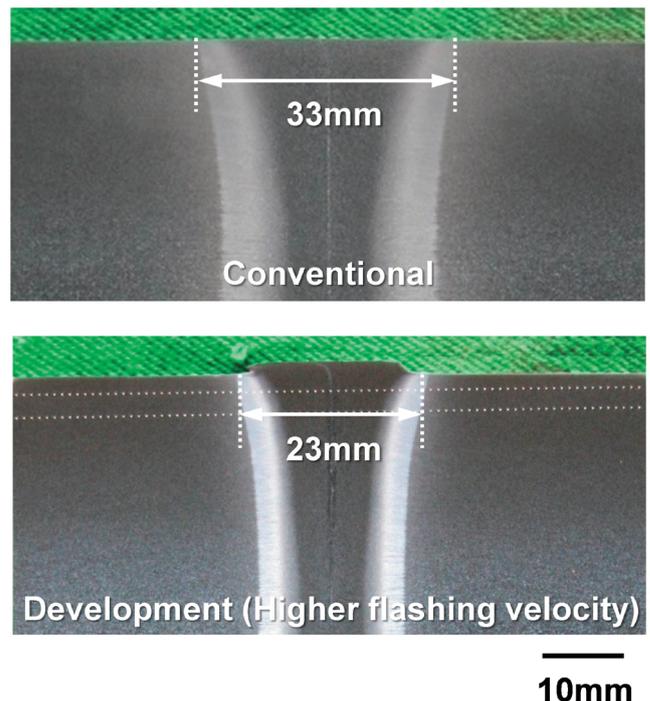


図16 溶接継ぎ手のマクロ組織

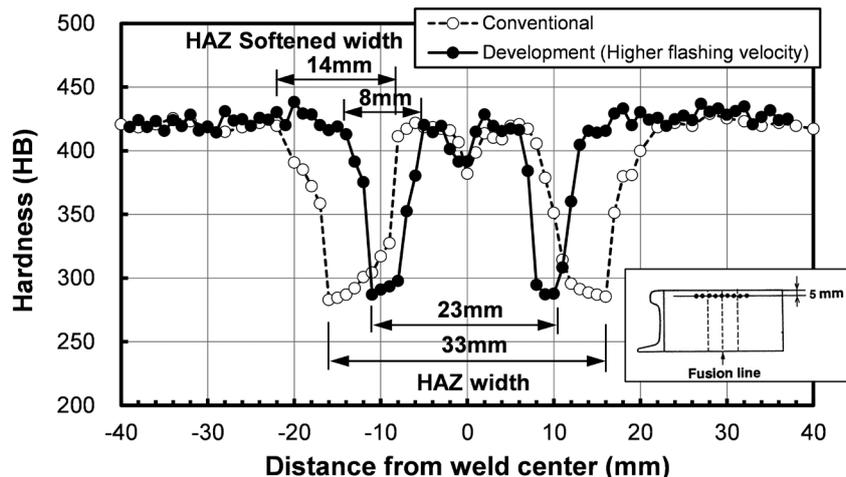
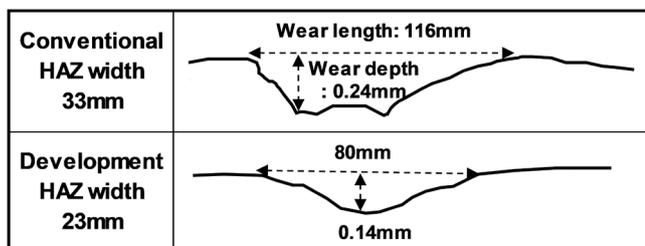


図17 溶接継ぎ手部の長手方向の硬度分布



Scale horizontal direction/vertical direction : 100

図18 累積通過トン数100MGT 経過後の溶接継ぎ手部の長手方向の摩耗形状

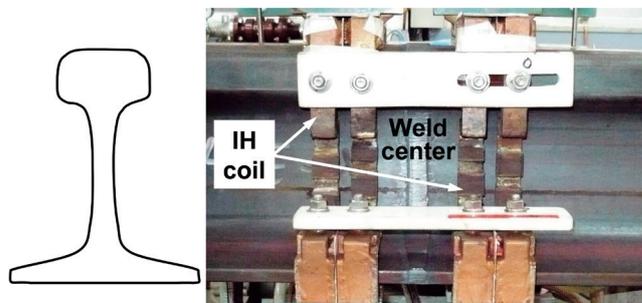


図19 溶接部のIHコイルによる加熱の一例

19に示すIHコイルを用いて、溶接後に溶接部の周囲のレール母材を加熱し、温度分布を平準化し、溶接部の残留歪を分散させる方法を検討<sup>20)</sup>した。図20に溶接継ぎ手部のHAZ幅と残留応力の関係を示す<sup>20)</sup>。従来の溶接部（溶接まま）では400 MPa以上の引張残留応力が発生しているが、PWHTを行った溶接部では、HAZ幅に関係なく、引張残留応力が200 MPa程度まで低減する。なお、このPWHTにおいては、溶接部の残留歪を低減し、かつ、加熱するレール母材の軟化を抑制するため、最適な加熱温度および溶接継ぎ手部の温度分布の制御が重要となる。

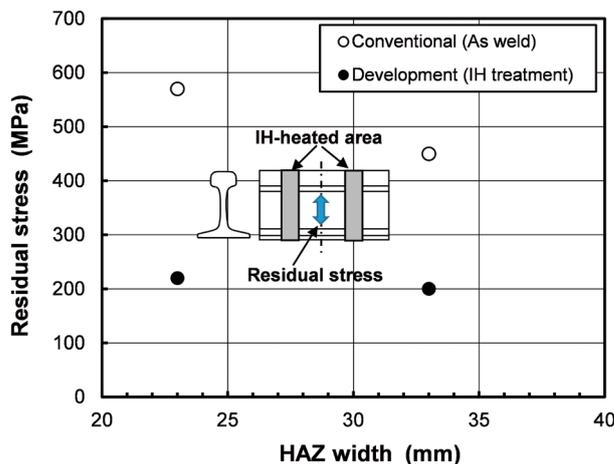


図20 溶接継ぎ手部のHAZ幅と残留応力の関係

#### 4.4 溶接部信頼性向上技術の実用化

上記のHAZ幅を低減するFB溶接技術、残留応力を低減させるPWHT技術については、米国Union Pacific社、豪州Rio Tinto社で実用化<sup>20)</sup>されており、貨物鉄道の溶接部の耐久性や安全性を向上させている。また、前章で説明した過共析鋼レールとの組み合わせにより、レールの使用寿命のさらなる向上に寄与している。

## 5 おわりに

貨物鉄道用レールの長寿命化を図るため、耐摩耗性、耐ころがり接触疲労損傷性の向上を狙って開発した過共析鋼レール (HE RAIL<sup>®</sup>)、さらに、溶接部の耐摩耗性、耐ころがり接触

疲労損傷性、耐折損性の向上を目的に開発したHAZ幅低減技術、残留応力低減技術を紹介した。

今後も世界的な環境問題の深刻化等により、地球環境に優しい鉄道の利用がさらに拡大すると考えられている。これにともない、輸送の効率化として、列車速度の向上や貨物の重載化がさらに進み、鉄道の使用環境は益々過酷さを増すと推定される。このような状況において、レールや溶接部の性能の飛躍的な向上が必要になると予想される。

これらのニーズに的確に答え、信頼性の高い鉄道輸送を支えるため、今後も安全性が高く、長寿命のレールおよびこのレールを支える溶接技術の研究開発に寄与していきたい。

#### 参考文献

- 1) 上田正治, 松下公一郎, 岩野克也, 小林玲, 山本剛士, 宮崎照久, 高橋淳, 小林由起子: 新日鉄住金技報, (2013) 395, 64.
- 2) L.Wessels, S.Oswald, D.Welsby and P.Mutton : Proceedings of the International Heavy Haul Conference, Perth, (2015), 1045.
- 3) 笹田直 : 潤滑, 24 (1979) 11, 700.
- 4) 山本雄二, 兼田禎宏 : トライボロジー, 理工学社, (1998), 190.
- 5) H.Ghonem, J.Kalousek, D.H.Stone and E.E.Laufer : Proceedings of the 2th International Heavy Haul Conference, Colorado Springs, (1982), 339.
- 6) M.Sato, P.M.Anderson and D.A.Rigney : Wear, 162-164 (1993), 159.
- 7) 影山英明, 杉野和男, 榎本弘毅 : 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S905.
- 8) 上田正博, 竹原準一郎, 岩崎宣博, 市之瀬弘之 : 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S906.
- 9) G.Brave, J.Hannafious and R.Steele : Fast/Hal rail performance experiment and overview, AAR Report R-796, (1991)
- 10) H.Muster, H.Schmedders, K.Wick and H.Pradier : Wear, 191 (1996), 54.
- 11) 上田正治, 内野耕一, 瀬沼武秀 : 鉄と鋼, 87 (2001) 4, 32.
- 12) 山口由起子, 高橋淳, 上田正治, 宮崎照久 : CAMP-ISIJ, 21 (2008), 539, CD-ROM.
- 13) 飛鷹秀幸, 木村勇次, 高木節雄 : 鉄と鋼, 85 (1999) 1, 52.
- 14) H.Hidaka, T.Suzaki, Y.Kimura and S.Takaki : Materials Science Forum, 304-306 (1999), 115.
- 15) M.Ueda and K.Matsuda : Wear, 444-445 (2020), 203120.
- 16) K.L.Johnson : Contact mechanics, Cambridge University Press, (1985)
- 17) M.Ueda, K.Uchino and A.Kobayashi : Wear, 253(2002), 107.
- 18) P.Mutton, J.Cookson, C.Qiun and D.Welsby : Wear, 366-367 (2016), 368.
- 19) P.J.Mutton, J.M.Cookson and W.K.Chiu : Fatigue behaviour of flashbutt welds in high strength, eutectoid and hypereutectoid rail steels under high axle loads, Proceedings of the International Heavy Haul Conference, Calgary, (2011)
- 20) K.Saita, M.Ueda, T.Miyazaki and T.Yamamoto : Proceedings of the 11th International Heavy Haul Conference, Cape Town, (2017), 187.

(2020年6月30日受付)

# 特別寄稿

□第179回春季講演大会俵賞受賞記念特別寄稿

## 魅せられて 鉄と歩みし 半世紀

### Half of a Century of Being Attracted and Walking with Iron

浅井滋生  
Asai Shigeo

名古屋大学 名誉教授、  
(公財)名古屋産業科学研究所 上席研究員、  
(一財)中部生産性本部革新的製品創出サロン 顧問



\*脚注に略歴

### 1 はじめに

この度、日本鉄鋼協会の俵賞受賞の栄誉に浴した。これも偏に多くの協会会員皆様方のご指導と励ましに因るものである。新型コロナウイルス禍により第179回春季講演大会が中止となり、予定されていた表彰式が取りやめとなった。その場にて直接、会員の皆様方には受賞の喜びと御礼を申し述べるところであったが、この紙面を借りて、協会と共に歩んだ半世紀の思い出と、研究・教育から離れ後期高齢者となって感じる新たな気づきを綴る。

### 2 人生万事塞翁が馬

1962年名古屋大学工学部に新設された鉄鋼工学科に、その第一回生として入学したのが鉄との関わり始まりであり、今年はその数えて57年目に当たる。協会との本格的関わりは、日本鉄鋼協会正会員となり、名古屋大学に助手として採用された1971年に始まるので、ちょうど半世紀となる。今だから正直に申し上げるが、名古屋大学に新設された鉄鋼工学科に入学したのは意図したものではなく、入学試験の成績の関係からたまたま第2次志望に回されたことに因る。振り返ってみれば大学入学の1962年には我が国の粗鋼生産量は約4000万トンだったが、大学院博士課程後期課程満了の年には1億2000万トンと実に3倍に伸びた。私の学生生活は我が国の高度経済成長期の真ただ中であつたことが分かる。“鉄鋼”という一工業製品名を冠した学科が国立大学に新

設されたことからもうかがえるように、当時、重厚超大産業の発展に力点を置いた国家戦略下にあつて鉄鋼業はそのけん引役であつた。その鉄鋼に入試成績の関係から偶然にも関わることとなったのは今思えば幸運としか申しようがない。この新設された鉄鋼工学科には40代前半の新進気鋭の教授陣が全国から集まり活気に満ち満ちていた。その中で石油化学産業を基盤としてアメリカで誕生した化学反応工学を専門とする鞭教授が着任していた特殊精錬工学講座に配属となった。配属当時、鞭教授は冶金学と化学反応工学の融合を図るべく“冶金反応工学”を提唱、具体的には高炉を化学反応装置の移動層として捉え、高炉の数学的モデルを展開して鉄鋼の学術分野において大きな注目を集めていた。この高炉の数学的モデルは鞭教授の弟子で私の先輩に当たり、後日、東北大学に移籍された八木順一郎教授に引き継がれ発展を遂げた。更に現場技術者による磨きもかかり、今や高炉操業には欠かせない制御モデルとして全国の高炉に実装されている。一方、私に与えられたテーマは“転炉の数学的モデルの展開”であつた。炉内の成分と温度の時間推移を記述する連立常微分方程式を数値解析するもので、カシオの電動式計算機を使用していたところ、電子計算機なるものが大学に設置された。早速、FORTRAN言語を習得して紙テープ、紙カードによる入力が始まった。これが電子計算機(真空管式)に関わる始まりとなった。当時、我が国の計算機事情は今では想像もできないほど貧弱なものであつた。大型計算機が設置されていたのは東京大学と京都大学のみであり、両大学に頻繁に出かけては一日に数回しかできないデバッグに明け暮れたこ

\* 1971年名古屋大学助手(工学部)に採用、1972~1974年ニューヨーク州立大学留学、1988年名古屋大学教授(工学部)に昇任、1998~2000年名古屋大学評議員、1999年~中国大連理工大学名誉教授、中国東北大学名誉教授に就任、2004~2007年日本学術振興会製鋼19委員会委員長、2007年名古屋大学名誉教授、2007年~2011年(法)科学技術振興機構JSTイノベーションプラザ東海館長、2007~2011年JFEホールディングス(株)社外取締役、2011年~2016年大同特殊鋼(株)顧問、2012~2014年(法)科学技術振興機構JSTシニアアドバイザー、現在、(公財)名古屋産業科学研究所上席研究員、(一財)中部生産性本部革新的製品創出サロン顧問。

とが懐かしい。とにかく20代の頃には新しいものに次々に飛びついて夢中で過ごした。

博士課程後期課程満了後、鞭教授の講座の助手として採用された。大学の助手ポストはめったに空きが生じるものではないが、そこが新設学科に所属していたということで、なんとも幸運なことに助手の席が残っていたのである。助手となって一年目、鞭教授が2年間のアメリカ留学の機会を与えて下さった。それは鞭教授同様、Chemical EngineeringをMetallurgyへと展開を図っていたニューヨーク州立大学のProf. J. Szekelyの下でのPost-Doctoral Fellowのポジションであった。留学が決まると“Szekely”の発音が日本人には“シッカリー”と聞こえたことから、“鞭”から“シッカリー”では大変だ、と皆にからかわれたものである。

Prof. Szekelyの下で与えられたテーマは“連続鋳造モールド内溶鋼流の数値解析”であった。具体的には2次元Navier-Stokes方程式を乱流モデル下で数値計算するものであった。幸い、日本で電子計算機を使用していた上、日本に比べ米国の電子計算機の使用環境は格段に恵まれていた（午前6時から午前2時まで好きなだけ使用可能）こともあり、水を得た魚といった状態で、次々と論文を専門誌に投稿することができた。

今、振り返れば、2年間の留学生活で得たものは無我夢中で書き上げた論文、それにも増して“自己の確立”であった。日本では当たり前と思われたことが当地では当たり前ではなく、人間として不可欠なことは何かを悟らされた。20代で海外生活を体験できたことは鞭教授の温情と決断以外の何ものでもなく、私のその後の人生に計り知れない影響をもたらした。もう一つの掛け替えのない留学の成果、それは私の下宿の隣家に住む家族およびProf. Szekelyの奥様との半世紀にも及ぶ親交である。そのきっかけは留学当初の私の語学力があまりにも拙く（分からない 笑顔で繕う 英会話）、日常生活にも支障を来す有様に同情をかけたことに始まる。日常生活の上では言葉の問題から次々と誤解が生まれた。その誤解をそのままにして別の下宿を探す手もあったが、それでは心にわだかまりが残ると考え、その一つひとつに深夜まで時間を掛けて説明を紙にしたため、真摯に誤解を解くことに努めた。この誤解解消の過程で相互信頼が生まれ、それが今日まで家族ぐるみのおつき合いというかたちで続いている。語学力がないことも、留学生活にあってはまんざら悪いことばかりではなかったことを悟った。今、振り返れば、私の足らざるところが私の人生に掛け替えのないものをもたらしてくれた。

### 3 高く心を悟りて、俗に帰るべし

この言葉を初めて耳にしたのは30年程前となろうか、ある俳句好きの教授の最終講義であった。その時、この言葉が何故か心に残り、その出典を調べてみると、芭蕉の俳論書の中にある言葉で、芭蕉が俳句を詠む時の心構えを述べたものであることが分かった。その解釈はいろいろあるようで、“精神的には日常卑近なものを越えた高見にありながら、目線は日常卑近なものに置く”とか“徹底したこだわりや執着心を持っているが、決してそれにこだわらない”などである。“奥の細道”は「月日は百代の過客にして、～」という言葉で始まるが、その「百代の過客」は李白の詩から採ったもので、芭蕉は一つひとつの言葉を古典に照らし合わせながら“奥の細道”を書いたそうである。研究にあっては「高く心を悟りて」は先人が培った学術の知識、情報を習得することにあるとすれば、「俗に帰るべし」とは習得した知識、情報を自分のものとし、かつ分かりやすい言葉で発信、活用するところにある、というのが私流の解釈である。

40有余年に及ぶ大学での研究生生活の中で、一番長く携わった研究テーマは「材料電磁プロセッシング」であった。そのきっかけは先に述べたニューヨーク州立大学でのポストドク時代（1972～74年）、宇宙物理に関わりのあるプラズマ物理現象解析には必須の電磁流体力学（Magnetohydrodynamics：MHD）の講義を受けたことに始まる。丁度1970年にはMHDを確立したH. Alfvénがノーベル賞を受賞し脚光を浴びていたことが受講の動機であったかもしれない。MHDは流体力学と電磁気学を結び付ける学問で、電気伝導性流体であるプラズマの解析には不可欠である。宇宙空間は99%がプラズマ状態にあり、MHDはプラズマ宇宙物理学の根幹をなす理論である。ところが熔融金属もプラズマ同様電気伝導性物質であり、MHDの知見がそのまま適用できる。この視点から1982年、英国のCambridge大学で「電磁流体力学の冶金への応用」とうたった国際シンポジウムが開催され、参加の機会を得た。そこで、熔融金属に電磁気力を印加する種々の研究成果に触れ、目からうろこが落ちる思いをした。学生時代、鞭教授が化学反応工学を冶金学に適応する姿を目の当たりにしていた私は、この電磁流体力学を冶金学に適応しようと考えた。帰国後、早速、日本鉄鋼協会に、この分野を扱う研究会設置を働きかけたが、助手の身分であったことから直ちには認められず、ようやく3年後に業界の先輩諸氏の支援を得て、「電磁気冶金研究会」の設置にこぎ着けた。当時、溶鋼の鋳造工程が連続化されるに伴い、連続モールド内電磁攪拌が必須設備となったことも追い風となった。分野名も「材料電磁プロセッシング（Electromagnetic Processing of Materials：EPM）」と改め、研究はすこぶる活発化した。名古屋での第1

回材料電磁プロセッシング国際シンポジウム (1994) を皮切りに、これまで当該シンポジウムは十数カ国から150名程の参加者を得て3年間隔で日本と欧州で交互に開催されている。2021年にはラトビア共和国の首都リガで第9回の開催が予定されている。日本鉄鋼協会の発案により発足した国際会議が30年近くに及ぶ長きにわたり継続開催されていることは喜びに堪えない。電磁流体力学は流体運動を記述するNavier-Stokes方程式と電磁気学の根幹をなすMaxwell方程式を連立して解く、という理論上は極めて難解な世界である。そのため、我が国はいうに及ばず、世界の大学、企業では理論にやかましい研究者や技術者が多く、彼らと喧喧諤諤<sup>けんけんがくがく</sup>の議論を重ねることとなった。しかし、連铸や精錬プロセスに適用する際の基本原理は意外にも簡潔なものであった。これも私流の拡大解釈では、「高く心を悟りて、俗に帰るべし」の一形態であった。

## 4 笑いは脳の良薬

学校教育で学術の知識や情報を身につけないと、目新しい事象に出あった際に、それが有用か否かの判断ができない、況や、その活用はできないこととなる。目新しい事象が学術に裏打ちされた知識の下ではどうにも理解できない時に、初めて新事象として認識できる。一方、学校での成績優秀者が必ずしも社会に出て活躍する者ばかりでないことは、知識や情報の段階で止まっていた意味がないことを如実に物語っている。知識や情報を自分の言葉で分かりやすく発信するには知恵が欠かせない。知恵の中身にはいろいろあろうが、人がこれまで気づいていない点に着眼すること、“意外性(創造性)”こそ、知恵の中身の重要な要素である。この意外性は絵画や音楽の世界をはじめ、芸術全般には満ち満ちているが、私にとってとっつきやすかったのが川柳と小唄にみる“笑い”であった。何故、意外性が笑いに不可欠かといえば、人は耳や目から情報が入ると、脳の記憶領域から過去の関連情報を引き出してきて前頭葉で入力情報との比較をし、会話では相手の話に同意したり別の意見を述べたりする。その際、これまで考えもつかない情報に接すると脳は興奮する。ノーベル賞受賞者が発見の瞬間を興奮気味に語るのはそのためである。脳は意外性を好むのである。この視点から落語でも小唄でも、聞いてもらえば分かることであるが、笑いがこみ上げる唄には必ず意外性が宿る。

小難しい“笑い”の説明はこのくらいにして自作川柳の一つをその英訳と共に紹介させていただきたい。

歳かなー 妻という字を 毒と読み

Maybe aging I heard a knife For a wife

この句は鉄鋼協会の年次総会後の懇親会にて、挨拶の際に披

露ささせていただいたものである。後日、その時の参加者のお二人(差し障りがあるといけないのでお名前は伏せる)より次のパロディー句をいただいた。

歳かなー 夫という字を 失うと読み

一目惚れ 毒という字を 妻と読み

川柳詠みにとってパロディー句がいただけるのは喜びの極みである。この句の英訳にみるとおり、漢字圏から英語圏へと異なる文化圏をまたがねばならない翻訳は結構骨の折れるものである。Knife, wifeと韻を踏んで、妻と毒の標記上の類似性を表してみた。翻訳に堪能な読者も多いと思うので、より良き翻訳を思いつかれた節には是非、ご一報いただきたい。

定年後、時間ができたことから趣味の川柳と小唄をまとめ『工学博士の笑い学』としてアマゾンから出版してしまった(詳しくは、PCか携帯で「アマゾン本」のHPを開き私の名前かここに記した書名を入力)。知恵を磨くため、という格好が良いが老人ボケから始まる悪い顕示欲なのかもしれない(自己出版 自己満足と 虚栄心)。そこでは多くの川柳と小唄に英訳を付けておいたので、現役の皆様が国際会議の晩餐会等で活用いただける、という少し真面目で有用な一面も残している。なお、この出版はPOD (Publishing on Demand) でおこなったので、経費は出版登録料 (5000円) のみであった。自負できる点はこの破格の自費出版費のみかもしれない。

## 5 一隅を照らす

人は異なる環境に置かれると見えるものも異なる。20代でアメリカに留学した際には、米国で異質な環境に浸り、無我夢中で研究に没頭し論文作成に励んだ。40代でライフワークとなる「材料電磁プロセッシング」に遭遇し、50代ではその発展と啓蒙に全力投球した。60代になると、協会の活動を通じて知遇を得たJFEホールディングス(株)の数土文夫社長、大同特殊鋼(株)の小澤正俊社長のご配慮をいただき、民間会社の経営や研究の一端をのぞく機会を得た。

大学での研究・教育を離れて十余年、今、70代となって(一財)中部生産性本部で中小零細企業の技術支援をボランティアで行っている。そこで驚くのは、中小零細企業経営者(兼技術者)が結構大胆な技術的挑戦を試み、成功する例を見ることである。創造性の発揮を邪魔するものは過剰な専門知識による発想力の鈍化なのかもしれない。この技術支援では、大学や大企業での研究では想像できないことであるが、たとえば技術的課題が解決できても、資金、マーケット、人材に起因する問題で苦戦する姿を見ることがある。そんな中でも持てる知恵、技術、人間関係を総動員して課題解決に当たっている人間力に満ち満ちた人に出あってきた。“一隅を照らす”

とはこのことかと、この歳になって悟り、恥じ入るばかりである。

画家は二次元のキャンパスの中という制約の中で創造性(意外性)を発揮すべく努めている。同様に、研究者・技術者は自然法則の下で新発見(創造物)を求めている。分野毎、それぞれ異なる制約条件の下で創造性が求められる。創造物が生まれる過程には必ずドラマが付きものである。ふと人は自分のドラマ作りのために生きているのではないか、と考える時がある。良きドラマに感動したいものである。

## 6 おわりに

俵賞受賞を受けて“ふえらむ”への執筆依頼を受けたことをいいことにして前代未聞、拙い自作川柳の披露と自費出版物の宣伝をしてしまった。ボケ老人のたわごととお許しいただければ幸いである。

“どうしよう 外はコロナで 内は妻”

(2020年7月13日受付)

# 特別寄稿

□第179回春季講演大会俵賞受賞記念特別寄稿

## マルチマテリアルと マテリアルズインテグレーション

Multi-materials and Materials Integration

岸 輝雄  
Teruo Kishi

東京大学 名誉教授、  
物質・材料研究機構 名誉理事長、  
新構造材料技術研究組合 理事長



\*脚注に略歴

### 1 はじめに

図1を参照していただきたい。これは、島根県安来市にある和鋼博物館の中にある俵先生の記念コーナーの写真である。俵先生は東京大学工学部冶金学科在任中、冶金学教育の基礎を確立し、金属組織学の発展の中心的な役割を担われた。同時に日本鉄鋼協会の設立に関与し、その後の日本鉄鋼業の大きな発展に寄与した。東京大学工学部4号館の中には、未だに俵先生の教授室は学科のシンボルとして使用されている。この度、俵先生を記念する俵賞の受賞の栄誉に浴することができ、望外の喜びである。ここに至るまで、ともに研究に従事していただいた方々に感謝の意を表します。

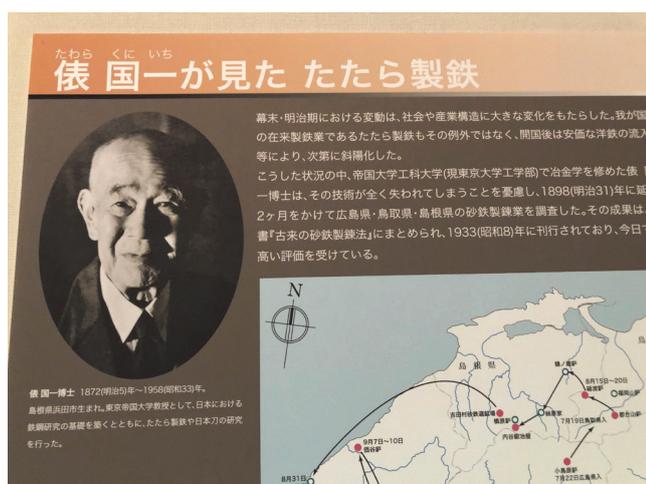


図1 和鋼博物館における俵先生記念コーナー

### 2 変形・破壊の研究と非破壊評価

ここで、鉄鋼研究に関する、自からの歩みをまとめてみたい<sup>1-5)</sup>。

大学3年の時に3週間の実習生として、北海道室蘭市の日本製鋼所に滞在し、水素脆性の研究に従事したことが研究の始まりであった。その後、恩師である五弓勇雄教授の塑性加工研究室で、卒業論文として4340鋼のオースフォーミングに関する研究をおこなっている<sup>1)</sup>。オースフォーミングに要した加工エネルギーと最終強度の上昇が比例するという関係を見出し、塑性加工としての加工熱処理の面白さを味わった。大学院の博士課程では、整直加工による強度を理解する観点から、各種金属のパウシンガー効果に関する研究を進めた。純鉄から0.8 mass% Cの鋼に至るまでのパウシンガー効果を測定し、加工硬化の量とパウシンガー効果の関係を導出している。結晶粒径、固溶元素、析出物、双晶、積層欠陥エネルギー等の金属学的因子のパウシンガー効果への影響を明らかにしている。同時に、パウシンガー効果を含む降伏条件式の提案を行い、変形に伴う異方性の導出に成功している。

東京大学工学部において助手を経て、その後東京大学の宇宙航空研究所に奉職した。高比強度材料の部門に配属され、堀内良教授のもとで、破壊および非破壊評価の研究に従事した。この間、ドイツのゲッチンゲン大学にフンボルト奨学生として滞在し、金属物理研究所に籍をおき、疲労と破壊力学に関する研究を進めた。帰国後、宇宙航空研究所の助教授として鉄鋼材料の破壊、特に破壊靱性試験における巨視亀裂進展前に生ずるマイクロクラックの形成と破壊靱性の関係に興

\* 1969年3月東京大学助手、同宇宙航空研究所助教授、工学部助教授、先端科学技術研究センター教授（現在 名誉教授）、1995年4月先端科学技術研究センター長、1996年4月通商産業省工業技術院産業技術融合領域研究所長、1997年7月日本学会会議員（17-20期）、2001年4月独立行政法人物質・材料研究機構理事長（現在 名誉理事長）、2003年7月日本学会会議副会長、2013年10月新構造材料技術研究組合理事長、2013年12月内閣府政策参与科学技術政策・イノベーション担当、2015年9月外務大臣科学技術顧問（外務省参与）。

味を持って研究を進めた。

マイクロクラックの検出のためにアコースティックエミッション (AE) の計測を行った。当初、AEによる破壊の予知に興味を持ち、ロケットモーターケースの耐圧試験の安全率を求める研究を行った。徐々にAE発生源の物理的意味に興味を抱き、多チャンネルのAE信号から、AE発生の位置を3次元で正確に評定し、そこでのマイクロクラックの破壊モード (せん断モード、引き張り破壊、混合モード) を同定し、大きさを決定することに注力した。これは、地震学の震源地でのサイスミックモーメントを求めることに対応し、ある時期、研究室の勉強会が地震学にシフトしたことを懐かしく思い出している。いずれにしろ、このAEの逆問題解析により、マイクロクラックの物理的特性を求めると同時にCT試験片における巨視亀裂進展の特性距離を求めることにより、破壊靱性の定量的な値を評価することが可能になった。

これらの研究で出会った興味ある現象が、マクロな破壊が進展する以前にマイクロなマイクロクラックが生ずること。そして、材料によっては、図2に示すように、マイクロクラックの数が多いと、き裂先端の応力緩和が進められ、破壊靱性 $K_{IC}$ が向上することが見いだされた。これを「フェイルセーフマテリアル」と名付けている。小さなクラックを導入し、主亀裂の進展を抑制するという概念であり、高強度材料の靱性向上の指針を示している。

マイクロクラックを、塑性変形、双晶と置き換えることにより、幅広く強度と延性・靱性の向上を考えることが可能となる。以下、このような概念に基づいた、現在進行中の高強度にして、高延性な材料を開発する「革新材料」のプロジェクトを次章で紹介する。また、開発した革新材料を接合して用いるマルチマテリアルの現状をまとめてみる。

加えるに、現在はデータ科学の時代のなかにある。材料科学と情報科学を融合し、材料開発を構成するプロセス・構造・特性を結び付け、最終性能を推測する順問題型の解析、および、所望の性能材料を開発する構造・組織を導き出す逆問題解析が、材料の開発期間の低減を含めて強く要望されている。この手法をマテリアルズインテグレーション (MI) と名付けているが、4章でその一例を紹介する。

### 3 革新材料の開発とマルチマテリアル

エネルギー消費量削減や二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量削減は、国際的な重要課題である。産業・運輸・民生の各部門で様々な対応が図られており、例えば、自動車の燃費改善に係る課題には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上、車両の軽量化、空気抵抗低減などがある。車両の軽量化は、燃費改善とともにCO<sub>2</sub>排出量の低減効果が大きいとされ、重要な課

題の一つになっている。

自動車における軽量化技術開発では、従来技術の延長上で形状最適化が進められてきたが、近年では高強度鋼材とともに軽量材料を適材適所に用いるマルチマテリアル化が進められている。自動車のマルチマテリアル化においては欧米が先行し、高級車やスポーツカーにおいて実用化されてきたが、国内においても2017年にトヨタ自動車がLEXUS LC500/LC500hにおいて軟鋼、高張力鋼板、アルミ合金、熱硬化性CFRP (繊維強化プラスチック)、G-SMC (Glass Sheet Moulding Compound) から成るマルチマテリアル車体を採用した<sup>6)</sup>。

筆者が理事長を務める新構造材料技術研究組合 (ISMAと略す) は、自動車、航空機、高速鉄道車両などの輸送機器の抜本的な軽量化に向け、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び熱可塑性炭素繊維強化樹脂 (CFRTP) などの輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進することを目的として2013年10月25日に設立された。2020年4月1日現在、42企業、1財団法人、2国立研究開発法人、2大学の組合員および65機関の再委託機関の構成にて「革新的新構造材料等研究開発」事業を推進している<sup>7,8)</sup>。

革新的新構造材料等研究開発事業は経済産業省における未来開拓研究プロジェクト<sup>9)</sup>の一つであり、事業化まで10年を超えるようなリスクが高い研究開発を国が主導し、技術と事業の両面で世界に勝てる産学官ドリームチームによって研究開発を推進することを狙いとする。本事業における研究開発項目は、①マルチマテリアル技術開発、②接合技術開発、③革新的チタン材の開発、④革新的アルミニウム材の開発、⑤革新的マグネシウム材の開発、⑥革新鋼板の開発、⑦CFRTPの開発、⑧革新炭素繊維基盤技術開発、⑨戦略・基盤研究、に大別されている。図3に示す通り2017年度までの事業期間の前半5年間は、革新的な接合技術・材料開発を推進してきたが、後半の5年間はマルチマテリアル技術開発に重点を置いている<sup>10)</sup>。

図4に各種構造材料の比強度と伸びの関係を示す。一般に

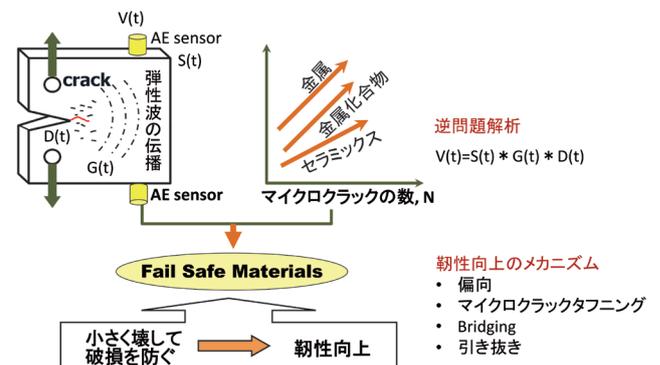


図2 フェイルセーフ材料の概念

高強度の材料は伸びが小さく、形状が似ているためバナナカーブと呼ばれている。伸びが小さいと変形能が低く成形加工性が劣ることとなる。本事業では、材料そのものの性能を高めるだけでなく、コストを低減して国際競争力を高めることも狙いの一つである。鉄鋼、非鉄金属、CFRTPなどの各材料の達成目標については、「革新的新構造材料等研究開発」基本計画<sup>11)</sup>を参照されたい。

本事業における研究開発成果の一部を紹介したい。革新鋼板の開発では、世界最高性能の自動車用超高強度鋼板開発を目指し、従来の590MPa級鋼板の2.5倍の引張強度である1.5 GPaかつ従来の590MPa級鋼板と同等の伸び20%を有する鋼板をラポレベルで開発することを最終目標とした。図5に結果を示す。a)の残留オーステナイト(γ)を高度に制御した革新鋼板の開発では、残留γを最大化し伸びを最大化するタイプAと、金属組織の微細化を併用し成形性バランスを兼ね備えたタイプBを開発した。b)の高炭素鋼をベースに軽元素を添加した革新鋼板では、成分設計と圧延・熱処理条件を最適化しマルテンサイト組織の微細粒を得るための組

織制御を行い、微細組織にすることで既存の高炭素鋼と比べ伸びを大幅に向上させた。一方、c)では安価な炭素活用と微細なγの均一分散により、合金成分と熱処理条件を最適化した。このようにラポレベルではあるが最終目標である引張強度1.5GPa、伸び20%を達成し、2018年度から超高強度鋼板の実装化のために水素脆性や腐食の研究に注力している。

接合技術開発では、同種の高融点材料同士の接合(高強度中高炭素鋼およびチタン合金)、異種材料接合(鋼/アルミニウム合金/CFRTPの組み合わせ)の技術開発を行っており、2017年度末目標として設定された接合強度などをほぼ達成している。図6は1.5GPa級高炭素鋼板の摩擦接合例であり、ツール素材・形状・接合プロセスを改善することによりツール寿命が大幅に改善されたことが示されている。

本事業ではほぼ全てのテーマで中間目標を達成しており、鉄鋼以外では成形加工性を考慮したCFRTPシャシーを作製し、難燃性マグネシウム材では高速鉄道車両用のモデル構体の試作に成功した<sup>12,13)</sup>。

2018年度から始まる事業後半の課題として、これまでに開

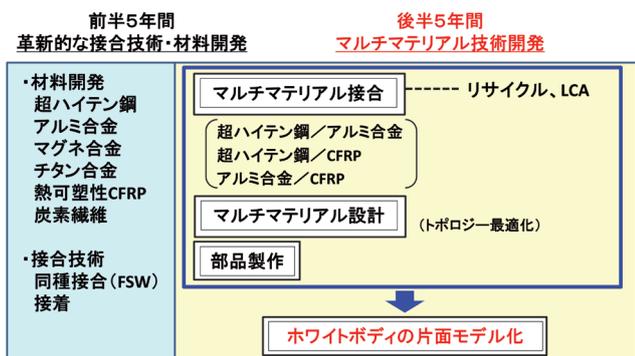


図3 革新的新構造材料等研究開発事業における研究開発項目の模式図

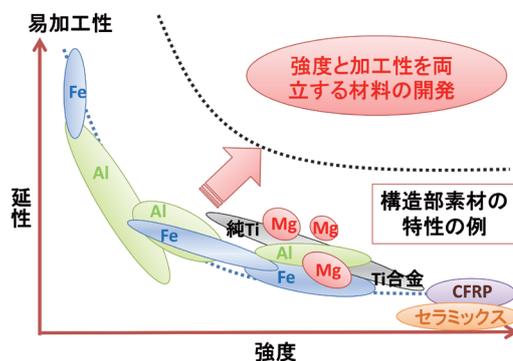
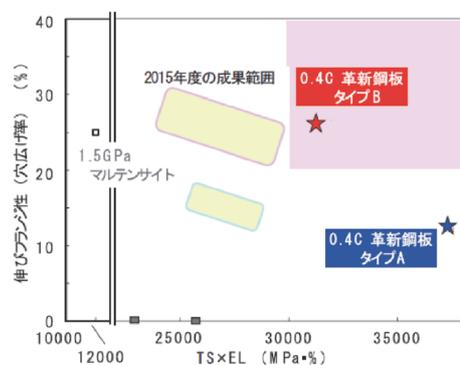
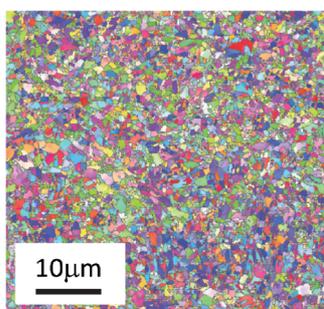


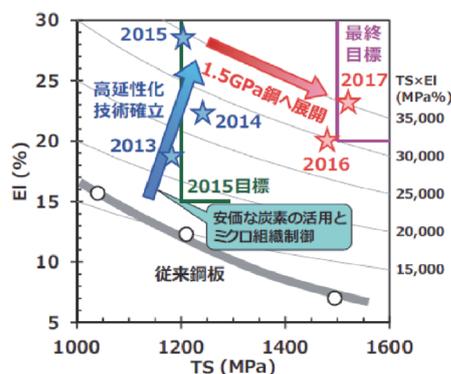
図4 各種構造材料の比強度と延びの関係



a) 残留オーステナイトの高度制御による強度、伸び、伸びフランジ性のバランス向上



b) 軽元素の有効活用によるマルテンサイト組織の微細化



c) 炭素活用とマイクロ組織制御による強度と延性の両立

図5 革新鋼板テーマにおける研究成果

発した材料を実用化するための成形技術や設計技術により重点を置いている。マルチマテリアル車の設計に向けて計算科学を駆使したCAE (Computer Aided Engineering)、成形加工を含む材料技術、量産化に適した接合技術を三位一体で確立していく。

## 4 マテリアルズインテグレーション (データ駆動型材料開発)

マテリアルズインテグレーション (MI) は、実験、計算、理論、データ科学を融合して、材料の4要素、すなわちプロセス (Processing)、構造 (Structure)、特性 (Property)、性能 (Performance) を計算機上で連関することである (図7)<sup>14,15)</sup>。複数の計算モジュールを、一つのモジュールの出力が次のモジュールの入力となるように接続し、そのデータ授受を自動化することにより、最初の入力である材料・プロセス・使用条件から、最終の出力である部材性能 (寿命予測、破壊確率など) までの計算を一気通貫で行う、データ駆動型材料開発であり、材料開発に要する時間・コストを大幅に削減しようとするのが主目標である。

マテリアルズインテグレーションは、自らプログラムディレクターを務めた内閣府戦略的イノベーション創造プログ

ラム (SIP) 「革新的構造材料」(2014~2018年度) において提唱した概念である。マテリアルズインテグレーションは「統合型材料開発システム」とも呼ばれ、これは内閣府総合科学技術・イノベーション会議による第5期科学技術基本計画 (2016~2020年度) で提唱されたSociety5.0を支えるサブシステムの一つとして位置づけられている<sup>16)</sup>。さらに、SIP第2期 (2018~2022年度) の「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」でも最初の1年間、プログラムディレクターを務めた。なお、類義語としてマテリアルズ・インフォマティクスがあるが、それに属する研究の多くは、構造・特性に着目した物質探索である、という印象を持っている。これに対してマテリアルズインテグレーションは材料の4要素の連関を扱うことが肝要である。本章では以下、SIP第1期「革新的構造材料」および第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」におけるマテリアルズインテグレーションに関する研究開発 (以下、SIP-MIと呼ぶ) の一端を紹介する。

SIP第1期「革新的構造材料」では、東京大学と物質・材料研究機構 (NIMS) を中心として産学官14の研究機関がMIシステムのプロトタイプの開発に取り組んだ。ゼロからのスタートであり、例題を解きながらシステムを構築していくことになった。例題としては金属材料の中で最も多様なプロセスで製造され、多様な条件で使用される鉄鋼材料を選定し、

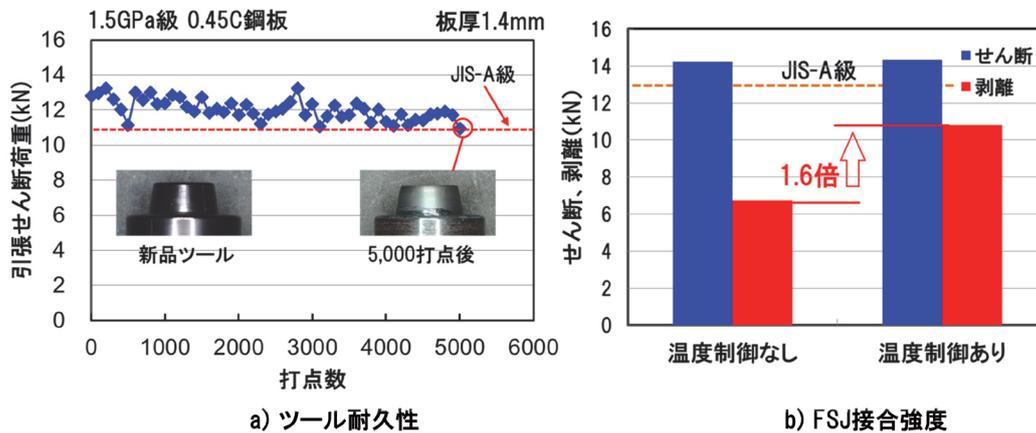


図6 引張強度1.5GPa級高炭素鋼板の摩擦点接合例



図7 マテリアルズインテグレーション (MI) システムの概念

特に工業的に重要な部位である溶接部を取り上げた。その組織予測は溶融・凝固・結晶成長・相変態、性能予測は疲労・クリープ・水素脆化・脆性破壊と、いずれも工業的に極めて汎用性が高いものを扱い、165個のモジュール、101個のワークフローを開発した<sup>17-20)</sup>。これらはチタン合金、ニッケル基合金等の材料開発にもスムーズに展開できると考える。

SIP-MIによる性能予測の一例として、耐熱鋼溶接管のクリープ損傷寿命の予測を紹介する(図8)<sup>14,21)</sup>。この場合、入力には部材形状、溶接条件、化学組成、初期組織で、出力は寿命と損傷箇所である。溶接を模擬するモジュールにより最高到達温度の空間分布を計算し、そこから組織分布を計算して、溶接金属、熱影響部、母材に分ける。さらに、そのデータベースから得られるクリープ特性を各部に付与し、これらを部材形状に組み込んだ有限要素解析モデルを作成し、クリープ損傷解析を行うモジュールについで、クリープ寿命や損傷箇所を求める。

このように、複数の計算モジュールを組み合わせたワークフローにより、プロセスから性能までを一気通貫で計算することが、SIP-MIの唯一無二の特徴である。計算の高速化・高精度化のために、個々の計算モジュールの性能向上はもちろん重要であるが、ワークフローも計算回数を重ねて蓄積されることで、より強力なツールとなる。

SIP-MIにおいてAIは重要な役割を果たす。例えば、データ同化は材料定数の推定に有効であり、スパースモデリングにより、ワークフローの各モジュールを開発する場面において、説明性の高いモデリングが可能となる<sup>22-24)</sup>。また、マイクロ

組織をはじめとする画像データを計算システムに取り込むことも不可欠であり、三次元画像処理、組織識別などの技術開発も並行して進めた<sup>25,26)</sup>。

SIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」においては、第1期のMIシステムの次のステップとして、「逆問題MIシステム」、すなわち要求される性能から、それを達成する材料・プロセス条件を導き出すMIシステムの開発に取り組んでいる。実際には、数的に逆関数を求めるのではなく、第1期で行った順方向(プロセス→構造→特性→性能)の計算を、入力パラメータを変えて要求性能に到達するまで続け、その時の入力、すなわち材料・プロセス条件が求める解となる(図9)<sup>27)</sup>。その際、できるだけ速く、すなわちできるだけ少ない計算回数で要求性能に到達することが肝要であり、そこでベイズ最適化などのAI手法が活用される。逆問題MIの代表的な対象として、3次元成形技術として極めて注目度が高い積層造形を扱い、例えば、成形時の微細亀裂発生を抑制



図9 逆問題MIシステムの概念<sup>27)</sup>

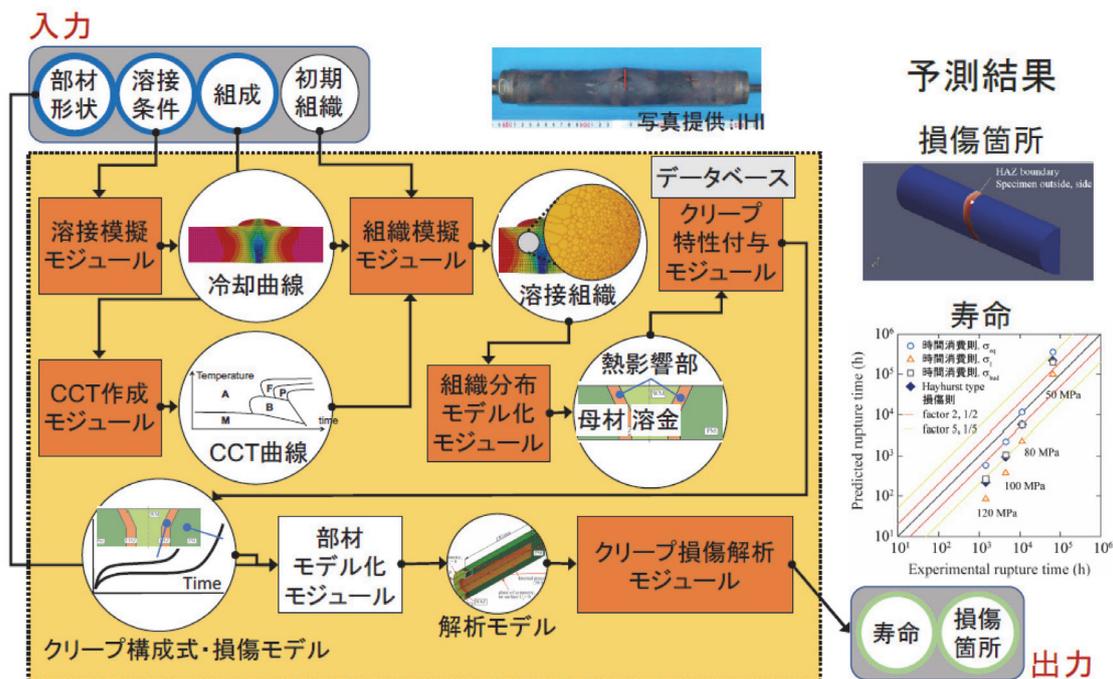


図8 耐熱鋼溶接配管のクリープ損傷寿命の予測のためのワークフロー

し、生産性を上げるプロセス条件の予測では、ベイズ最適化の導入により、網羅計算と比較して約1/6の計算回数で最適プロセス条件に到達した。また鉄鋼材料についても、引張強度2.0GPa、伸び20%の高張力鋼板という、従来の開発アプローチでは到達できないような目標を設定し、挑戦している。

これまで金属材料について述べてきたが、炭素繊維強化プラスチック (CFRP)、セラミックス基複合材料 (CMC) についても SIP-MI としての研究開発を行ってきた。特に CFRP に関しては "Atoms to Aircraft" と言うように、原子・分子レベルから、機体相当の構造体レベルまで、マルチスケール・マルチフィジックスの解析技術を取り入れ、航空機産業の海外 OEM にも注目されている<sup>28,29)</sup>。

## 5 おわりに

輸送機関構造物やロボットなどの軽量化は今後とも大きな解決課題であり、突出した性能の革新材料の開発とその時間依存型破壊の評価、および異材接合技術の開発による設計技術 (CAE) の連携研究開発が要請されている。このマルチマテリアルは未来の材料開発のキーワードといえる。一方、これらの材料開発のあらゆる段階で、計算科学の果たす役割が増大してくる。要求した材料性能を設定し、計算科学を多用した、逆問題計算材料科学がマテリアルズインテグレーションであり、新規材料を短期間に開発する切り札になりうる。

### 参考文献

- 1) 五弓勇雄, 岸輝雄: 塑性と加工, 10 (1969) 107, 863.
- 2) 森康彦, 岸輝雄: 機械の研究, 31 (1979) 2, 7.
- 3) 大平貴規, 岸輝雄: 鉄と鋼, 70 (1984) 16, 2188.
- 4) 岸輝雄, 榎学: 日本機械学会講演論文集, (1986) 860-3, 303.
- 5) 堀谷貴雄, 鈴木洋夫, 岸輝雄: 鉄と鋼, 75 (1989) 12, 2250.
- 6) LEXUS ホームページ, [https://lexus.jp/models/lc/features/multi\\_material\\_body/](https://lexus.jp/models/lc/features/multi_material_body/)
- 7) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ホームページ, [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100077.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100077.html)
- 8) 新構造材料技術研究組合 (ISMA) ホームページ, <https://isma.jp/>
- 9) 内閣府総合科学技術・イノベーション会議ホームページ, <https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/kentou/hikariele/haihu1/sanko2.pdf>
- 10) 兵藤知明, 山下秀, 平田好則: 自動車技術, 72 (2018) 11, 4.
- 11) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ホームページ, <https://www.nedo.go.jp/content/100749300.pdf>
- 12) 新構造材料技術研究組合: ISMA REPORT, (2018), 11, <https://isma.jp/2018/06/21/isma-report-no-11/>
- 13) 新構造材料技術研究組合: ISMA REPORT, (2018), 12, <https://isma.jp/2018/09/28/isma-report-no-12/>
- 14) 出村雅彦: 第70回白石記念講座, 日本鉄鋼協会, (2018)
- 15) 小関敏彦: 溶接学会誌, 86 (2017) 1, 12.
- 16) 内閣府: 第5期科学技術基本計画, (2016)
- 17) M. Ohno, Y. Shibuta and T. Takaki: Mater. Trans, 60 (2019) 2, 170.
- 18) F. Briffod, T. Shiraiwa and M. Enoki: Mater. Trans., 60 (2019) 2, 199.
- 19) K. Koiwa, M. Tabuchi, M. Demura, M. Yamazaki and M. Watanabe: Mater. Trans., 60 (2019) 2, 213.
- 20) A. T. Yokobori, Jr., G. Ozeki, T. Ohmi, T. Kasuya, N. Ishikawa, S. Minamoto and M. Enoki: Mater. Trans., 60 (2019) 2, 222.
- 21) H. Izuno, M. Demura, M. Tabuchi, Y.-I. Mototake, and M. Okada: Science and Technology of Advanced Materials, 21 (2020) 1, 219.
- 22) A. Yamanaka, Y. Maeda and K. Sasaki: Materials & Design, 165 (2019)
- 23) K. Sasaki, A. Yamanaka, S.-I. Ito and H. Nagao: Comp. Mater. Sci, 141 (2018), 141.
- 24) S.-I. Ito, H. Nagao, T. Kasuya and J. Inoue: Science and Technology of Advanced Materials, 18 (2017) 1, 857.
- 25) D. S. Bulgarevich, S. Tsukamoto, T. Kasuya, M. Demura and M. Watanabe: Scientific Reports 2018 8:1, 8 (2018) 1, 2078.
- 26) 足立吉隆, 田口茂樹, 弘川奨悟: 鉄と鋼, 102 (2016) 12, 722.
- 27) 国立研究開発法人科学技術振興機構: 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」ホームページ, <https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html>
- 28) Y. Kumagai, S. Onodera, M. Salviato and T. Okabe: International Journal of Solids and Structures, 193 (2020), 172.
- 29) G. Kikugawa, Y. Nishimura, K. Shimoyama, T. Ohara, T. Okabe and F. S. Ohuchi: Chem. Phys. Lett., 728 (2019), 109.

(2020年7月14日受付)



# 入門講座

インフォマティクス入門-2

## 定量組織学2\*

(数学的に重要な組織特徴量の抽出と類似性の評価)

Quantitative Microstructure Morphology Analysis 2

(Extraction of Mathematically Important Microstructure Features and Similarity Analysis)

名古屋大学  
大学院工学研究科  
材料デザイン工学専攻 教授

足立吉隆  
Yoshitaka Adachi

名古屋大学  
大学院工学研究科  
材料デザイン工学専攻 講師

小川登志男  
Toshio Ogawa

名古屋大学  
大学院工学研究科  
材料デザイン工学専攻 研究員

Zhi-Lei Wang

### 1 緒言

材料組織画像の特徴量を評価するに際しては、大きく分けて二つのアプローチがある。一つは前報<sup>1)</sup>で述べた人類が理解できる特徴量を抽出する方法であり、ここでは計量形態学に基づいて、二次元(結晶粒径、面積率など metric 特徴量)あるいは三次元の特徴量(連結性、分岐、曲率などの位相・微分幾何学的特徴量)が求められる。もう一つは画像の輝度値のパターンを数学的に解析する手法である。後者の特徴量は必ずしも人類が理解できるとは限らないが、組織形態の複雑性をより一層評価できる可能性がある。この手法は各座標における点の分散を数学的に解析する手法である。材料工学的に重要な特徴量であれ、数学的に重要な特徴量であれ、それらを使って画像の類似性を定量評価することが特性の理解に役立つこともであると推察される。

そこで、本稿では粒子分散状態の数学的な解析ならびに2つの画像の類似性評価に焦点を当てる。

### 2 2D3D 計量形態学

#### 2.1 一般的な位相幾何学を核とした定量画像解析

結晶粒径や面積率あるいは連結性などの材料組織の特徴量は人類がその物理的意味を理解できる特徴量といえる。この物理的に意味のある特徴量の抽出については、前報<sup>1)</sup>に詳しく書いているので、興味がある方は参照願いたい。

#### 2.2 パーシステントホモロジーを核とした定量画像解析

完全に閉じた穴や空洞の解析にはオイラー標数や種数(Genus)が有用であるが、材料組織では不完全な穴や空洞が特性に影響を与える場合があり、その定量評価が重要である。このような不完全な穴や空洞の解析にパーシステントホモロジー<sup>2)</sup>が用いられる。Fig.1 (a)に示すように、分散する点を少しずつ太らせていくと、やがて半径 $R=r_1$ で点と点が連結し、その後穴ができる。またここには示さないが、三次元の場合にはさらに太らせていくと空洞ができる。一層さらに太らせていくと、穴や空洞はやがて $R=r_2$ でふさがって消滅する。線、穴、空洞成分を $h_0, h_1, h_2$ 成分と書くことにして、その発生時期( $r_1$ )と消滅時期( $r_2$ )を太らせた点の半径(通常はピクセル数)を使って表現したものがパーシステント図(Fig.1 (b))である。 $r_2-r_1$ はおおよそ潜在的な穴の直径に相当する。寿命(=消滅時期-発生時期)が大きいほど、本質的(ロバスト)な穴あるいは空洞と考えられる。このロバストな穴はパーシステント図上では対角線から離れた点として現れる。また各点の寿命をFig.1 (c)に示すバーコード図で表現する場合もある。三次元の解析例をFig.2に示す。

パーシステント図のままでは特徴量として取り出すことは難しいが、パーシステント図に $x, y$ 方向に一定間隔のグリッドを切り、その各グリッド内のプロット数をカーネル密度として算出すると(ベクトル化していることになる)、グリッド番号が記述子となり、カーネル密度がその強度となる。こうすることで、機械学習などのデータとして取り扱うことができる。更に、対角線からの距離によって、プロットの重み

\* 本内容は日本表面真空学会編『図説 表面分析ハンドブック』に掲載されたものと重複する内容を含みます。

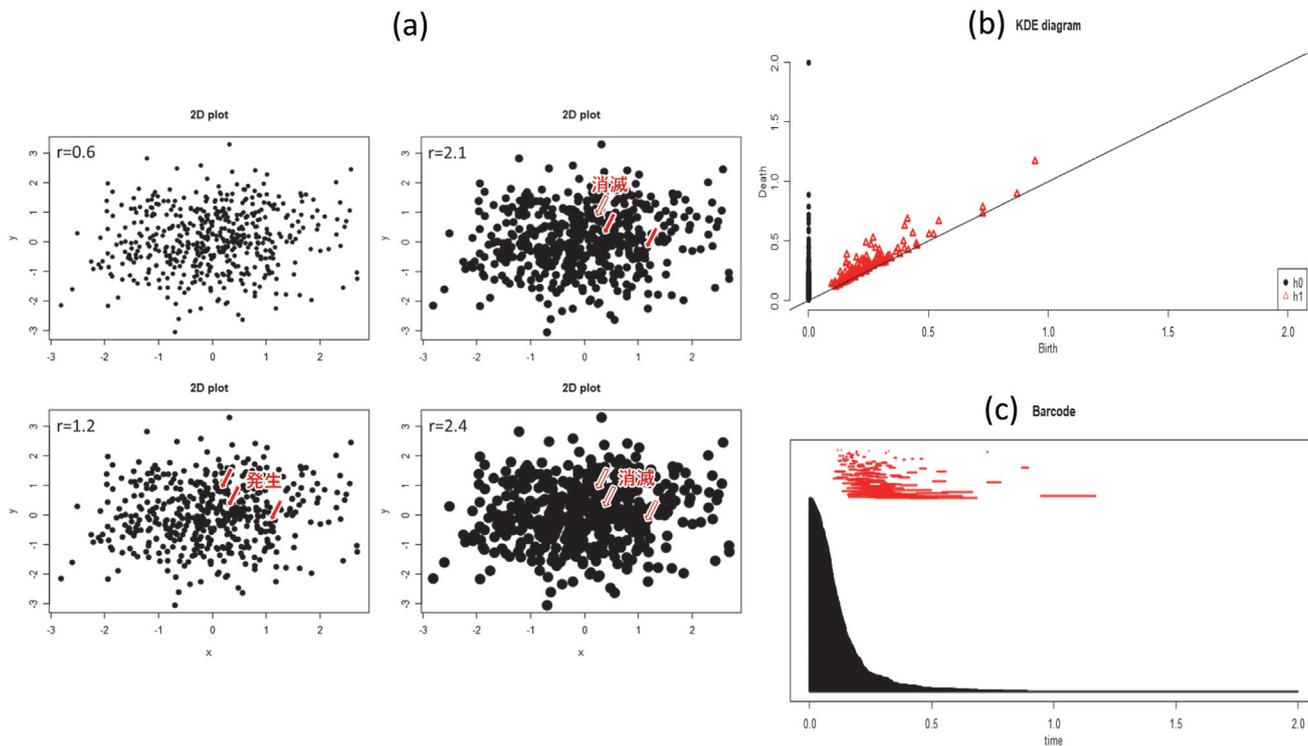


Fig.1 2D persistent homology analysis.

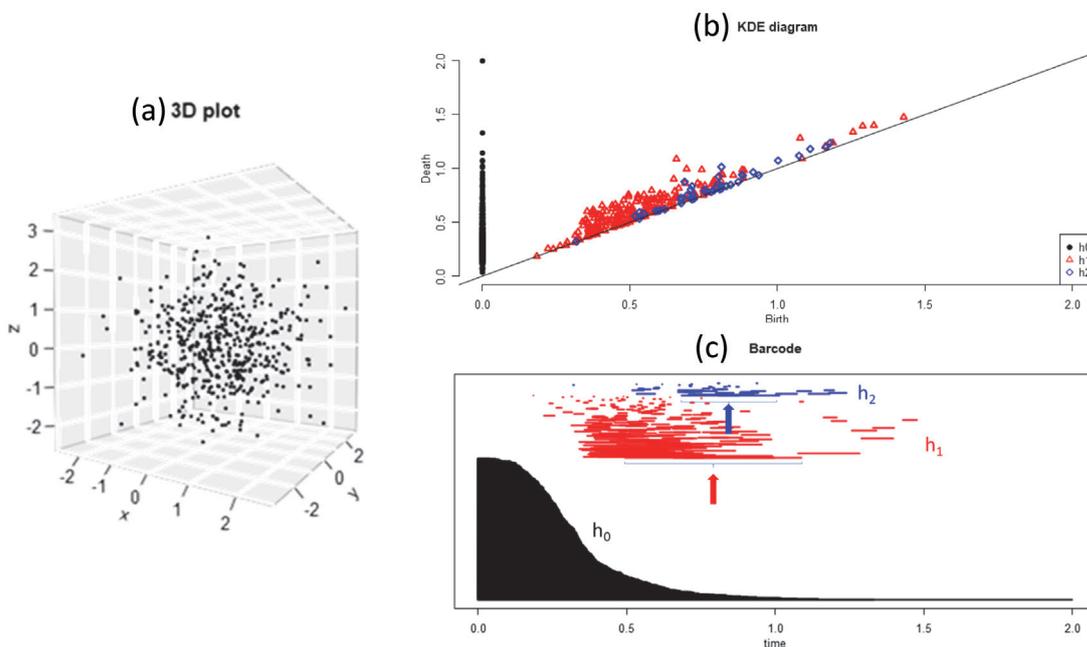


Fig.2 3D persistent homology analysis.

づけを行ったうえで、ベクトル化した方 (パーシステントイメージ: PIと呼ばれる) がベクトル情報により物理的意味を持たせることができる。PIは式 (1) で与えられる<sup>3)</sup>。

$$PI = \sum_{h=1}^p w(b_h, d_h) K_h \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $p$  は1あるいは2の値をとり、リング、空洞に対応する。 $b_h$  と  $d_h$  はそれぞれリングあるいは空洞が生成、消滅するサイズであり、 $K_h$  はカーネル密度である。重み係数  $w(b_h, d_h)$  は式 (2) で与えられる。 $C$  は定数である。

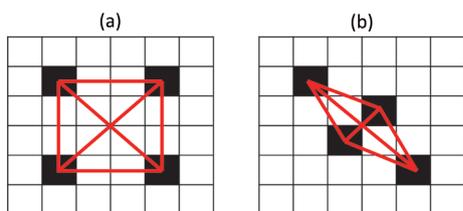
$$w(b_h, d_h) = \arctan\left(C(d_h - b_h)^p\right) \dots\dots\dots (2)$$

### 3 輝度値のパターン解析

#### 3.1 二点相関関数 (Two-point correlation function : TCF)

画像とは各 (x, y) 座標における輝度値 (あるいはRGB値) の集合である。この輝度値のパターンを解析することにより、その画像の特徴が評価できる。画像中の一点一点は銀河の中における星と類似しており、星の分布を数学的に表現する際に用いられている二点相関関数が画像の中の輝度値分散の解析にも有用である<sup>4)</sup>。二点相関により、ある距離rの場所に同じ輝度値を持つ点のペアが幾つあるかを解析でき、rが記述子であり、その量がペアの数である。したがって、多くの記述子があることになり、画像の特徴を簡潔に表現す

るには少々問題があるが、主成分分析やオートエンコーダなどによる次元削減の方法を併用して特徴量とすることができ。Fig.3 (a) は6×6ピクセルの中に4つの黒点があり、ここでは黒点の二相相関を考える (周期境界条件を仮定する)。r=3に4つのペアが存在し、r=√18に2つのペアが存在する。Fig.3 (b) では、r=√2, √5, √18にそれぞれペアが1, 4, 1つ存在する。画像 (a) と (b) が記述子rで定量評価できているということである。より複雑な画像に関しては、次の二点相関関数 (S<sub>2</sub> (r)) によりこの二点ペアの数 (P (r)) が計算できる。I (i), (j) は左隅からi, j番目の座標の輝度値である。二値化画像の黒点を対象とする場合は、黒点のI (i) = 1であり、周囲の白い領域ではI (i) = 0となる。二点相関関数により、フェライト-マルテンサイト二相組織鋼の組織を解析した結果をFig.4に示す。なお、P (0) の二倍は黒点ピクセルの数であり、したがって全ピクセル数で除することにより面積率に対応する。



r	1	√2	2	√5	√8	3	√10	√13	√18
A						4			2
B		1		4					1

Fig.3 An explanation of two-point correlation function analysis.

$$S_2(r) = \frac{1}{N\omega_r} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I(i)I(j)D_r(i,j)$$

$$\omega_r = \sum_i D_r(i,j), \text{ここで } |i-j|=r \text{ の時 } \dots\dots\dots (3)$$

$$D_r(i,j) = 1, \text{ else } 0$$

$$P(r) = N\omega_r S_2(r) / 2$$

二点相関関数は自動で記述子rを抽出する素晴らしい方法であるが、記述子rとその量 (P (r)) の物的な意味が理解しにくいことと、複雑な画像の違いを表現できるのかについては不明な点も多く、今後の評価を待ちたい。

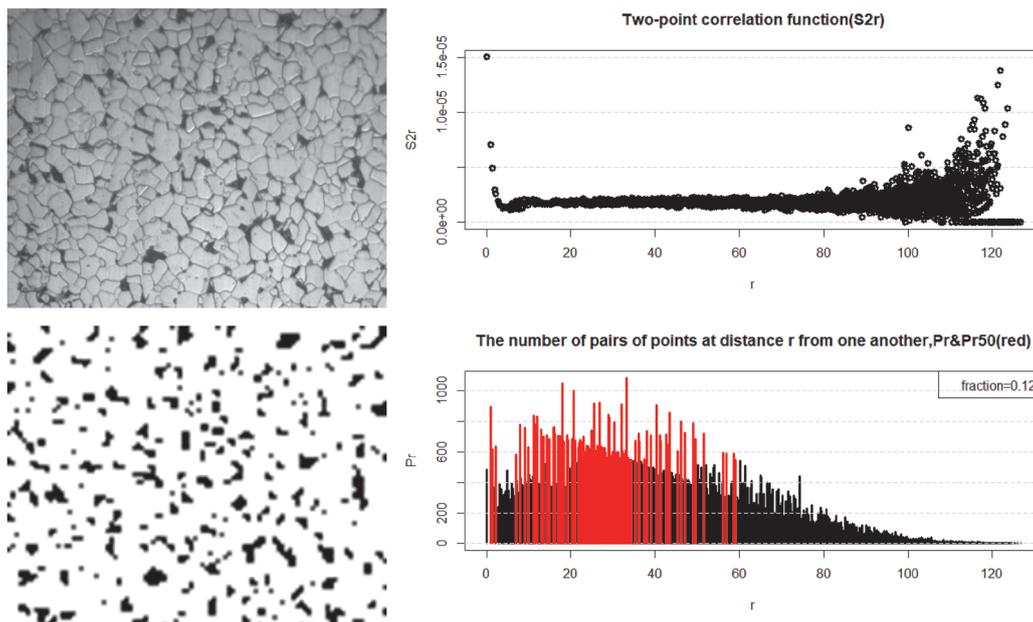


Fig.4 Analysis result by two-point correlation function.

### 3.2 自己相関関数・相互相関関数

組織画像に周期性がある場合、原画像から画像をずらしていくとある距離ずらしたところで画像がよく一致するところがある。この画像の重なりとずらす距離 (lag という。二点相関関数の  $r$  と同義。) の関係を表現するのが自己相関関数 (Auto-correlation function : ACF) である。同じ画像ではなく、異なる画像の類似度を評価する場合は相互相関関数 (Cross correlation function : CCF) というが、関数は ACF と同じである。ACF, CCF は次の関数  $z(\tau)$  で表され、 $x_i$  は  $i$  位置における画像の輝度値、 $x_{i+h}$  は  $h$  だけずらした画像の輝度値である。

$$z(h) = \int_{-\infty}^{\infty} x_i x_{i+h} dt \dots\dots\dots (4)$$

Fig.5 (a), (b) にチェック模様の画像の ACF, CCF 解析の結果を示す。ここでは輝度値を左上隅から右下隅まで一列に並べてベクトル化し、その相関を調べている。

なお、 $N$  次の自己相関関数は次式で与えられる。

$$x(a_1, \dots, a_N) = \int f(r) f(r+a_1) \dots f(r+a_N) dr \dots\dots\dots (5)$$

## 4 画像間の類似性評価

### 4.1 正規化相互相関係数

二つの画像の同じ場所における輝度値 ( $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$ ) の相関を調べ、それを全領域にわたって調べているのが相互相関係数で

あり、それを輝度値の和で正規化しているものが正規化相互相関係数である。また、二種類の画像間で全体的に輝度値が異なっても相関を調べることができるようにそれぞれの画像の輝度値の平均値をひく場合があり、英語ではこの関数を zero-mean normalized cross-correlation と呼び、次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{x_{ij} - \bar{x}\} \{y_{ij} - \bar{y}\}}{\sqrt{\{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x})^2\} \{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2\}}} \dots\dots\dots (6)$$

正規化相互相関係数による画像比較は、同じ座標における輝度値の一致を評価していることから、同じ画像でも少しずれるとその値が急激に小さくなってしまい、位置のロバスト性が低い手法といえる。4枚の組織像に対して、正規化相互相関係数を計算した結果を Fig.6 に示す。これに対して、前述した自己相関関数・相互相関関数は、2枚の画像をずらした場合 (Fig.6 右下図の裾野の部分) の一致度を併せて評価していることが特徴である。

### 4.2 相互情報量

相互情報量 (mutual information : MI) とは、B の画像の特徴を知る前後での A の画像の特徴の曖昧さ (前 :  $H(A)$ , 後 :  $H(A|B)$ ) の減少量をいう<sup>6)</sup>。別の表現をすると、B の画像の特徴を知ったうえで得た A の画像の特徴に関する情報量ともいえる。MI は次式で与えられる。単位はビットである。  $p(a_i)$

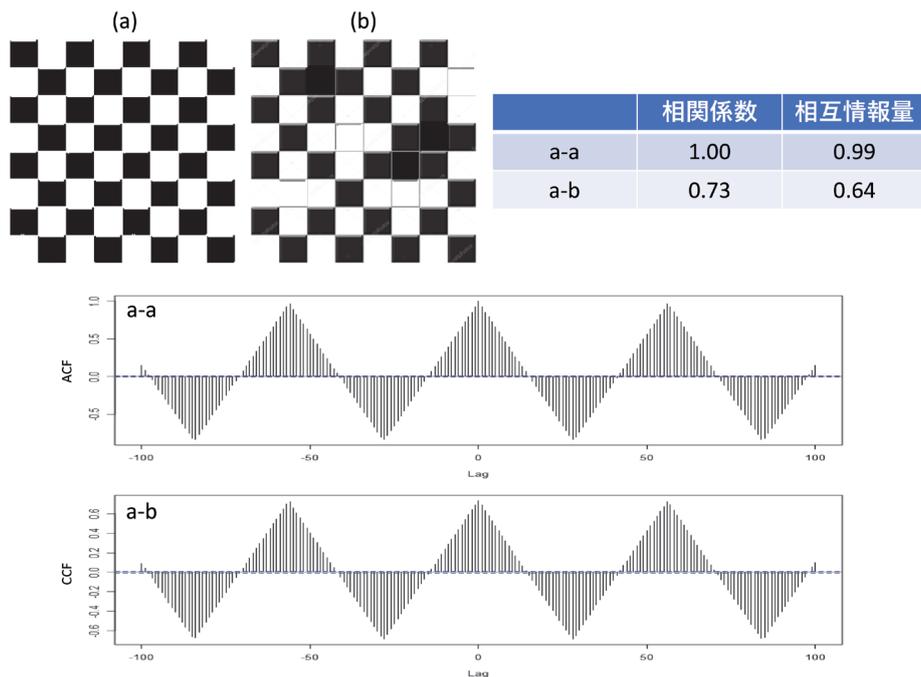


Fig.5 Analysis result by normalized cross-correlation coefficient and cross-correlation function.

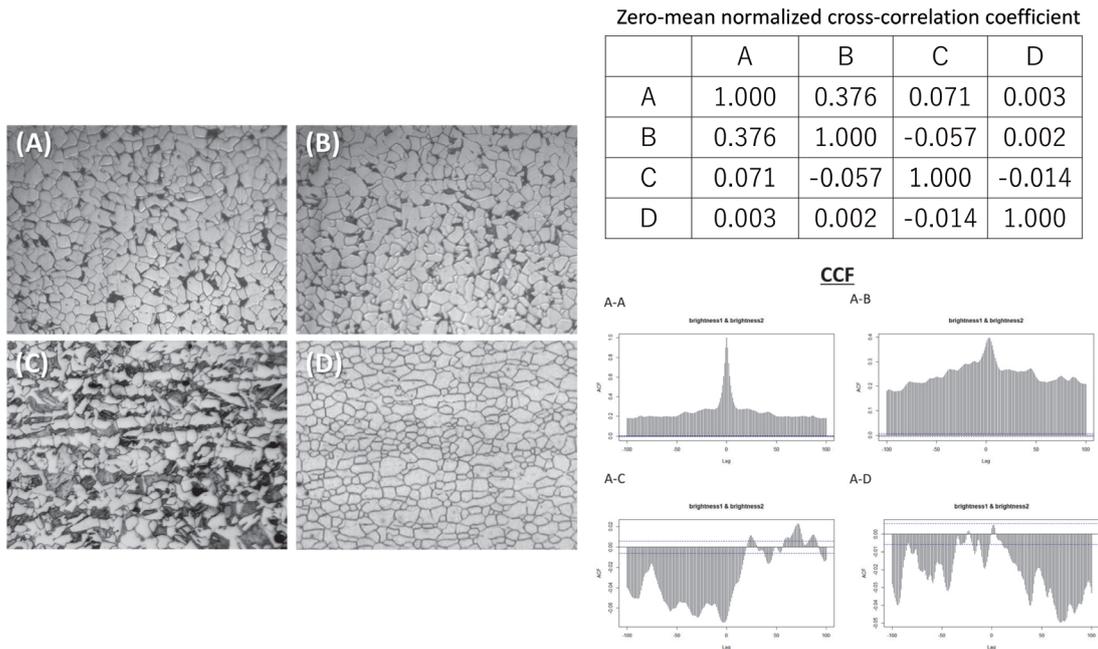


Fig.6 Analysis result by normalized cross-correlation coefficient and cross-correlation function.

はi座標における輝度値aが生じる確率であり、輝度値aを知ることによって得られる情報量は $-\log_2 p$ で表される。個々の座標における輝度値 $a_i$ の値を知った時に得られる平均情報量(H(A))は、それぞれの輝度値となる確率を重み付き平均した値になり、これを平均情報量(あるいは情報エントロピー)と呼ぶ。輝度値が大きくばらつく画像は情報エントロピーが高く、コントラストが小さい画像はエントロピーが小さい。

$$\begin{aligned}
 MI(A, B) &= H(A) - H(A|B) = -\sum_{i=1}^m p(a_i) \log_2 p(a_i) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \log_2 p(a_i|b_j) \\
 &= -\sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \right\} \sum_{j=1}^n \log_2 p(a_i) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \log_2 p(a_i|b_j) \\
 &= -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \log_2 p(a_i) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \log_2 p(a_i|b_j) \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \log_2 \frac{p(a_i|b_j)}{p(a_i)} \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(a_i, b_j) \log_2 \frac{p(a_i, b_j)}{p(a_i)p(b_j)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$H(A) = \sum_{i=1}^m p(a_i) H(a_i) = -\sum_{i=1}^m p(a_i) \log_2 p(a_i) \tag{8}$$

相互情報量による画像比較は、正規化相互相関係数と同様に、同じ座標における輝度値の一致を評価していることから、同じ画像でも少しずれるとその値が急激に小さくなってしまい、位置のロバスト性が低い手法といえる。

### 4.3 最尤法による混合正規確率密度分布解析

組織画像の輝度値( $x_i$ )をヒストグラム化し、そのヒストグラムが二つの正規分布確率密度関数(式(2))の重ね合わせでフィットできるという仮定の下、その平均値( $\mu$ )、標準偏差( $\sigma$ )、二つの正規分布関数の割合( $\lambda$ )を最尤法で求めて<sup>7)</sup>、二つの画像のそれぞれ三つの値の類似性より材料組織の類似性を評価することができる。

$$p(x_i) = N(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{9}$$

最尤法とは、正規分布などの確率密度関数に従うデータが生じる確率(密度)の同時確率(連続データの場合同時分布)

$$L(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - \mu)^2}{\sigma^2}\right) \tag{10}$$

が最大になる時の、確率密度関数のパラメータ(正規分布の場合は平均値( $\mu$ )と標準偏差( $\sigma$ ))を最適解とする尤度法を意味する。正規分布の尤度は積で与えられるが、その計算は煩雑であるので、通常、対数尤度を最大にするパラメータ( $\mu, \sigma$ )が求められる。

$$\begin{aligned}
 \log(L(\mu, \sigma)) &= \log\left(\prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - \mu)^2}{\sigma^2}\right)\right) \\
 &= -\frac{N}{2} \log(2\pi) - \frac{N}{2} \log(\sigma^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{\sigma^2}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

本手法も、2枚の画像があるだけで画像比較ができ、複数の

画像を使った学習用データが不要である。Fig.6で用いた4枚の画像を対象に輝度値のピークフィッティングを行った例をFig.7に示す。

4.4 組織特徴量の主成分分析

画像から物理的に意味のある特徴量を複数抽出し、その特徴量を主成分分析 (Principal component analysis : PCA) <sup>8)</sup>

するということは、多次元情報を低次元情報に圧縮して類似性を評価することを意味する。主成分分析では、多次元データを例えば二次元座標に射影する際に、分散が最大および二番目となる軸を探し、その二軸を主成分軸として元データを射影する (一例を Fig.8に示す)。類似しているデータは主成分座標で近くにプロットされる。主成分軸を見つけるということは、固有値と固有ベクトルを見つけるということと等価

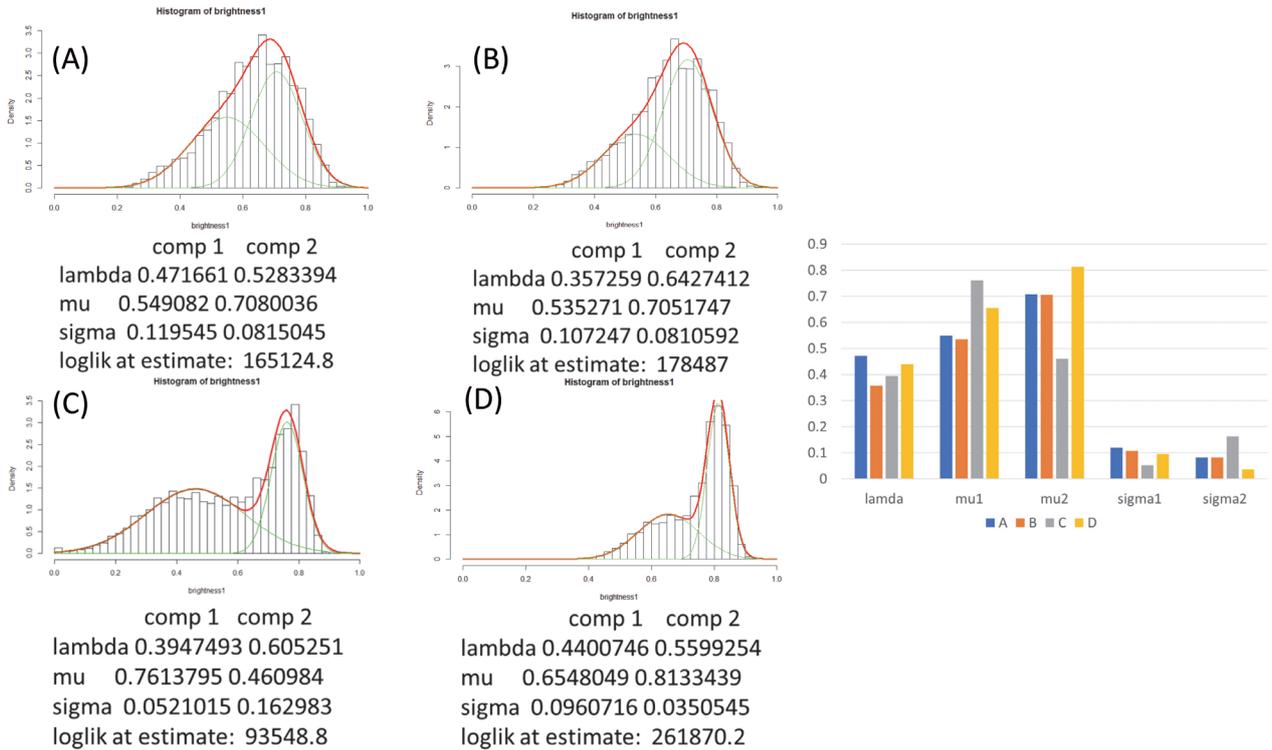


Fig.7 Gaussian mixture model powered by likelihood method.

Class	2D Count	2D %Areaの 平均値	2D Circ. の平均値	2D Solidityの 平均値	楕円長径 の平均値	楕円短径 の平均値	楕円長径 角度の平均 値	最大フェ レ径の平均 値	最小フェ レ径の平均 値	最大フェ レ径角度 の平均値
A=1	141	11.664	0.712	0.822	17.761	9.716	98.828	19.779	11.624	100.068
B=2	171	12.167	0.723	0.826	16.494	9.03	89.315	18.341	10.712	97.304
C=3	136	20.842	0.611	0.789	24.845	11.631	88.477	28.097	14.502	87.439
D=4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PCA

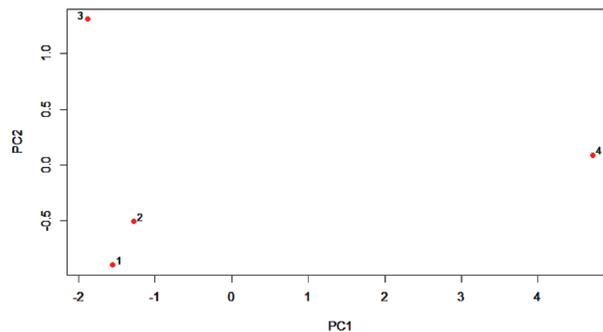


Fig.8 Principal component analysis.

である。本手法では、複数の画像の特徴量の相対比較で、対象とする2枚の画像を比較するので、複数の画像の特徴量が必要である。多次元データをもとの空間で一度PCAしても良好な主軸を見つけることができない場合がある。その場合は、元の空間をより高次の空間に射影したうえでPCAし主軸を見つける手法があり、カーネル主成分PCAといわれる。データ間に非線形の関係がある場合の主成分を見つけたい場合に、カーネル主成分分析は有効といわれている。

主成分分析と類似する方法で、教師なし学習のニューラルネットワークを使った方法としてオートエンコーダがあるが、詳細は割愛する。

#### 4.5 組織特徴量の自己組織化マップ

自己組織化マップ (self-organizing map : SOM)<sup>9)</sup> は、PCAと同様に多次元データを低次元空間に射影する手法である。PCAが単に数学的に分散が最大となる主軸を見つけて

データを一括射影したのに対して、SOMでは次に述べるように特徴量が物理的に類似しているデータを徐々に近くに集めてくるという手法である。SOMでの処理過程は以下のとおりである (Fig.9)。

①【勝者ニューロンの決定】 $n$ 個の特徴量を持つ元データ $X_i$ と同様に $n$ 個の特徴量を持つ射影空間座標ニューロン $M_{i,j}$ 間のユークリッド距離を評価し最も近いニューロンを勝者ニューロンとする。ここでは例として $M_{3,6}$ を勝者ニューロンとする。

$$\min(d) = \|X_i - M_{i,j}\| = \sum_{n=1}^n (x_{i,n} - m_{i,j,n})^2 \dots\dots\dots (12)$$

②【ニューロンの修正】ニューロンの特徴量を、元データをより一層表現するように、式 (13) に従って修正する。

$$M_{3,6}^{new} = M_{3,6} + \alpha (X_i - M_{3,6}) \dots\dots\dots (13)$$

$\alpha$ : 学習率 ( $0 < \alpha < 1$ )

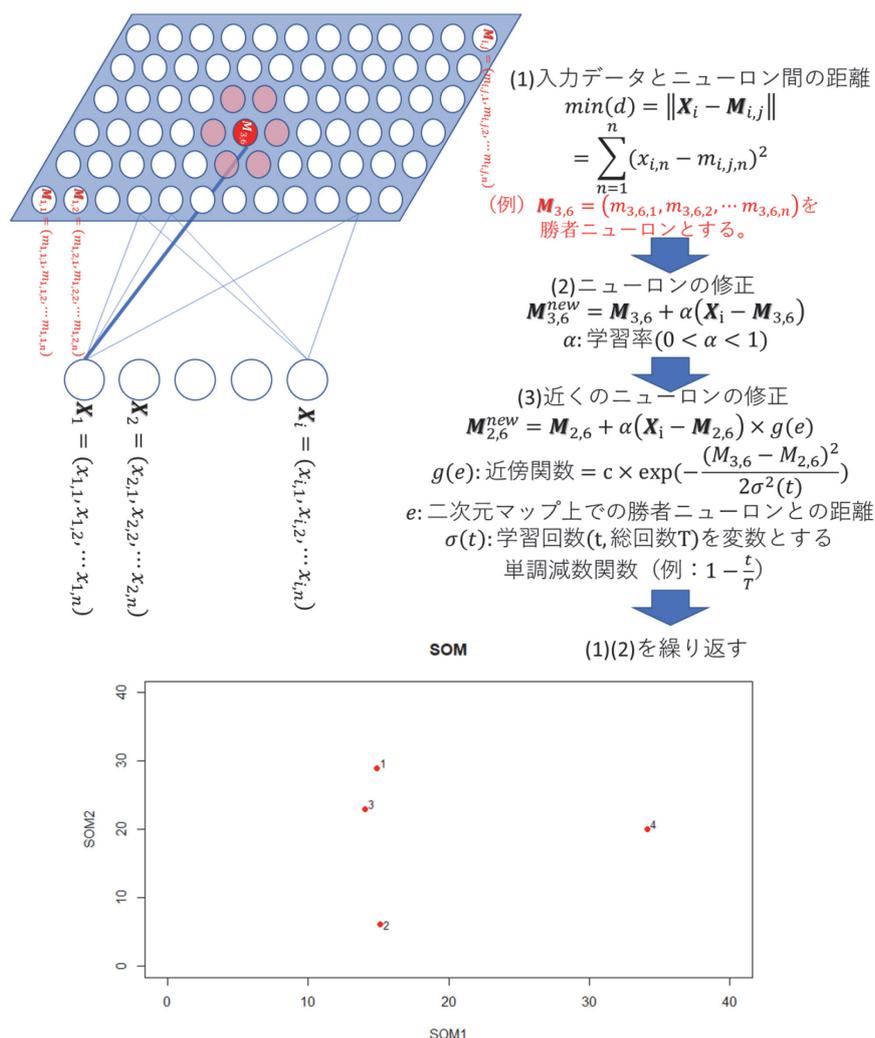


Fig.9 Self-organizing map.

③【近くのニューロンの修正】勝者ニューロンの近くのニューロン (例えば  $M_{2,6}$ ) を式 (14) に従って勝者ニューロンほどではないが修正する。ここで  $g(e)$  は近傍関数式 (15) であり、二次元ニューロンマップ上での勝者ニューロンとの距離を表現する。 $\sigma(t)$  は総回数  $T$  とした時の学習回数  $t$  を変数とする単調減数関数であり、最も簡単な関数としては  $1-t/T$  がある。 $c$  は係数である。

$$M_{2,6}^{new} = M_{2,6} + \alpha (X_i - M_{2,6}) \times g(e) \dots\dots\dots (14)$$

$$g(e) := c \times \exp\left(-\frac{(M_{3,6} - M_{2,6})^2}{2\sigma^2(t)}\right) \dots\dots\dots (15)$$

②③を繰り返すうちに、内容が類似しているデータはこの射影空間上で近くにプロットされるようになる。本手法では、複数の画像の特徴量を学習した上で、対象とする2枚の画像を比較するので、複数の画像の特徴量が必要である。

4.6 ディープラーニングによる組織識別

画像にフィルターを与えて特徴量 (人間が想像する物理的に意味のある特徴量とは異なる) を抽出し、その特徴量と物体名をニューラルネットワークなどの識別器で関連付けるといった点では、機械学習型の画像処理<sup>10)</sup> とディープラーニングは同じである (前報<sup>1)</sup> で詳細は説明)。ただし、機械学習型画像処理では専門家が予め設計したフィルターをあたえるのに対して、ディープラーニングでは特徴量が物体名にできるだけ関連付けられるようにコンピュータが自ら学習してフィルターを設計しそれを使う点が異なる。特徴量を抽出する過

程では、画像 (輝度値の行列) にフィルター (小さな行列) を与えて内積値をとり、フィルターを適用する画像の場所を少しずつ変えながら同様な操作を繰り返して、第1段階目の特徴量抽出を行う<sup>11)</sup>。この過程を畳み込み (convolution) という。続いて、畳み込みで得た特徴量行列を小分割し、その中の代表値 (例えば最大値) を抽出する。この過程をプーリングという。畳み込み、プーリングにより、当初大きかった画像の輝度値の行列から次元圧縮された特徴量が得られる。複数のフィルターを与えて、複数の特徴量を表現する行列を得る。この畳み込み、プーリングを繰り返した後、最終的に複数の小さな行列を全結合しベクトル化し、その回答が物体名となるようにその間をニューラルネットワークを用いてモデル化する。

この手法は物体の類似性の評価というよりは、物体識別に向いている。本手法では、複数の画像の特徴量を予め学習させておいた上で対象とする画像を識別するので、複数の画像が必要である。著者らは材料組織の認識に畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional neural network : CNN) が有用であることを報告した (Fig.10)<sup>12)</sup>。

4.7 画像中の対象領域の自動抽出技術の重要性

輝度値についても、特徴量抽出についても、組織画像中から対象領域をセグメンテーションした後で行われる解析であるが、このセグメンテーションに従来大変時間を要している点が問題である。ここに様々な機械学習の手法を適用して、自動セグメンテーションをする手法として、機械学習型画像処理, region with convolutional network (R-CNN)<sup>13)</sup>, fully

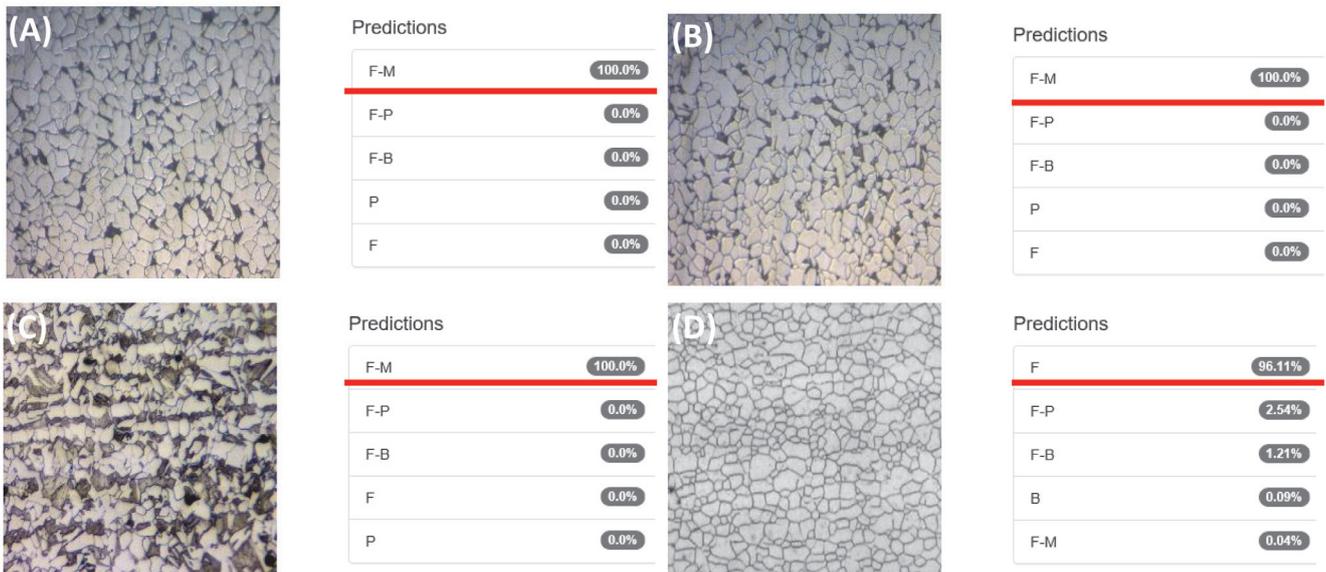


Fig.10 Microstructure recognition by convolutional neural network<sup>12)</sup>.

convolutional network (FCN)<sup>14)</sup> などがある。R-CNN も FCN もエンコーディング過程で画像を畳み込んで次元を削減し、それをデコーディングして画像抽出を行っているため細かい部分の領域抽出は必ずしも得意ではないが、元画像と畳み込んだ画像の両方の情報を使ってデコーディングする新しいアルゴリズムとして U-Net<sup>15)</sup> があり、高精度の領域抽出法として注目を集めている。U-Net はエンコーディング過程では全層畳み込みを行っているため FCN の一種とみることができる。

## 5 材料情報統合システム

以上に述べた画像解析を手動で行っている場合は時間がかかりすぎるが、近年ではプログラミング言語 Python や R の様々なパッケージが用意されており、コンピュータ上で自動解析することが可能である。材料関係では、画像解析、組織-特性間の順解析および逆解析を一気通貫で行うことができる材料情報統合システム MIPHA<sup>15)</sup>、shinyMIPHA<sup>16)</sup> が提供されている。MIPHA は人間が理解できる画像の特徴量抽出を得意としており、一方 shinyMIPHA は輝度値のパターン解析とパーシステントホモロジー解析、二点相関関数が実装されている。本稿で用いた図の大半は shinyMIPHA を使って作成したものである。

## 6 まとめ

材料組織画像の特徴量を抽出することは、材料工学の基本であり、また昨今のデータサイエンスによる材料開発の促進を進めるうえでも重要である。その特徴量には、人間が物理的意味を理解できる特徴量と、輝度値のパターンがある。また、画像の類似性を定量的に評価することも特性を理解するうえで有益と思われる。

### 謝辞

本研究の内容の一部は名古屋大学大学院材料デザイン工学専攻の福井ちひろ君の協力により行われたものである。ここに感謝の気持ちを表す。

### 参考文献

- 1) 足立吉隆, Zhi-Lei Wang, 小川登志男: ふえらむ, 25 (2020) 9, 569.
- 2) H. Edelsbrunner and J. Harer: Computational Topology: An Introduction, American Mathematical Society, (2010)
- 3) H. Adams, S. Chepushtanova, T. Emerson, E. Hanson, M. Kirby, F. Motta, R. Neville, C. Peterson, P. Shipman and L. Ziegelmeier: J. Mach. Learn. Res., 18 (2017), 1.
- 4) Y. Jiao, F. H. Stillinger and S. Torquato: Phys. Rev. E, 77 (2008), 031135.
- 5) A. Kraskov, H. Stögbauer and P. Grassberger: Phys. Rev. E, 69 (2004), 066138.
- 6) J. D. Hamilton: Time series analysis, NJ: Princeton University press, Princeton, 2 (1994), 690.
- 7) J. Martin and J. L. Crowley: Comparison of correlation techniques, Intelligent Autonomous Systems, (1995), 86.
- 8) H. Hotelling: J. Educ. Psychol., 24 (1933), 417.
- 9) T. Kohonen: P. IEEE, 78 (1990), 1464.
- 10) I. Arganda-Carreras, A. Cardona, V. Kaynig and J. Schindelin: Trainable Weka Segmentation, [http://imagej.net/Trainable\\_Weka\\_Segmentation](http://imagej.net/Trainable_Weka_Segmentation), (参照日: 2020-1-6)
- 11) Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner: Proc. of the IEEE, (1998), 1.
- 12) 足立吉隆, 田口茂樹, 弘川奨悟: 鉄と鋼, 102 (2016) 12, 722.
- 13) R. Girshick and J. P. N. Fotheringham-Smythe and G. Gamow: In International Conference on Computer Vision (ICCV), (2015)
- 14) J. Long, E. Shelhamer and T. Darrell: Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, USA, (2015), 3431.
- 15) Z. L. Wang and Y. Adachi: Mater. Sci. Eng. A, 744 (2019) 28, 661.
- 16) Z. L. Wang, T. Ogawa and Y. Adachi: Journal of Advanced Theory and Simulations, 1900177 (2019), 1.

(2020年1月7日受付)



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 迅速な鉄鋼分析法の確立を目指して

Rapid Analysis for Materials Related to Steel Industry

今宿 晋

東北大学  
金属材料研究所

Susumu Imashuku

准教授

## 1 はじめに

この度は本稿を執筆させていただく機会を頂き、感謝いたします。著者が鉄鋼に関係する研究を始めたのは、京大工学研究科の助教として赴任した2011年からです。赴任先は分析手法や装置の開発を研究の柱としている河合潤教授の研究室で、私の主要なテーマは、鉄鋼分析に応用できるような分析装置の開発でした。真空中で温度変化を与えること数十kVの電圧を発生させることができる焦電結晶を用いて、持ち運びが可能な電子プローブマイクロアナライザーの開発などを行っていました<sup>1)</sup>。河合研究室では、装置は自作することが基本方針でしたので、電気回路や工作技術などを鍛えられました。そのおかげで、今でも装置は基本的に自作のものを利用しています。コロナ禍のため、現在は、共用装置を使用したり、実験装置を使用するために出張したりできないなど、研究に大きな制約があると思いますが、そのような影響はほとんど受けず、これまでとほとんど変わらず研究ができています。これも自作装置を使っている大きな強みだと思います。2015年からは、東北大学金属材料研究所の我妻和明教授の研究室で准教授として赴任し、現在に至っています。東北大学に赴任してからは、鉄鋼材料の迅速分析を大きな柱とし、実際の鉄鋼分析に近い試料を分析対象にして研究を行っています。本稿では、東北大学に赴任してから、一番力を入れてきた研究である、カソードルミネッセンス (Cathodoluminescence : CL) 法を用いた鉄鋼関連材料の迅速分析手法の確立について紹介させて頂きたいと思います。

## 2 CL法による鉄鋼関連材料の迅速分析法の確立

CL法は、電子線照射によって価電子帯の電子が伝導帯、欠陥準位あるいは不純物準位に励起されることで、価電子帯に

正孔が生じ、この電子と正孔が再結合する際に発生する可視光域の光を測定する方法です。したがって、バンドギャップが存在する、絶縁体や半導体はCL現象を示しますが、金属などの導電体はバンドギャップが存在しないために、CL現象を示しません。これを鉄鋼材料に置き換えると、介在物、スラグ、酸化被膜などは発光する可能性があります。母材である鉄鋼は発光しません。また、多くの場合、化合物の種類によって発光色が異なるので、広い範囲に電子線を照射して、発光を撮影 (CL像) すれば、発光色から介在物、スラグ、酸化被膜などの種類を発光している領域から大きさや形状の測定を同時に行うことができる可能性があります。ここでは、CL法を用いた介在物の識別と製鋼スラグ中の遊離CaOの検出について紹介します。

### 2.1 CL法を用いた介在物の識別

鋼中の非金属介在物は連続 casting におけるノズル閉塞や伸線・撚線工程での破断の原因になるなど生産工程に問題を引き起こすだけでなく、疲労破壊、水素誘起割れ、耐食性の低下、低温脆性、表面の疵など製品に問題を引き起こす可能性があります<sup>2)</sup>。そのため、介在物分析は鉄鋼生産において重要な工程であります。介在物が引き起こすこれら問題は介在物の種類、大きさ、形状に依存する<sup>3)</sup>ため、介在物分析では種類、大きさ、形状が測定されます。従来、介在物分析には、検鏡法とEPMAを組み合わせた分析方法が広く用いられていますが<sup>4)</sup>、この分析は1週間程度の時間がかかるため<sup>5)</sup>、介在物分析の迅速化が望まれています。そこで、CL法を用いて迅速な介在物分析が可能か研究を行いました。CL像とスペクトルをともに取得できる安価な装置がなかったために、市販されている走査型電子顕微鏡を改造して、図1に示すようなCL装置を自作しました。この装置を用いて、アルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) とスピネル ( $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) を介在物として含む鉄鋼試料を測定しました。アルミナとスピネルは硬質介在物と呼ば

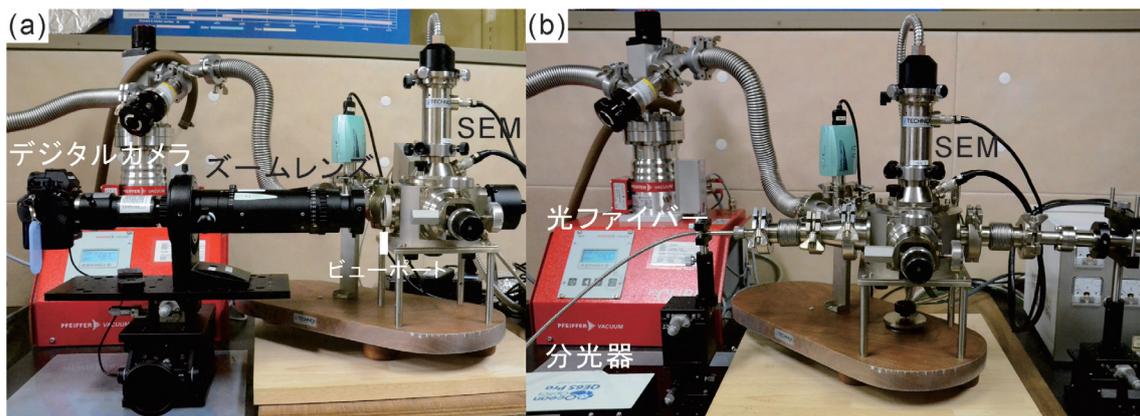


図1 CL装置の写真 ((a) : CL像撮影用、(b) : CLスペクトル測定用)

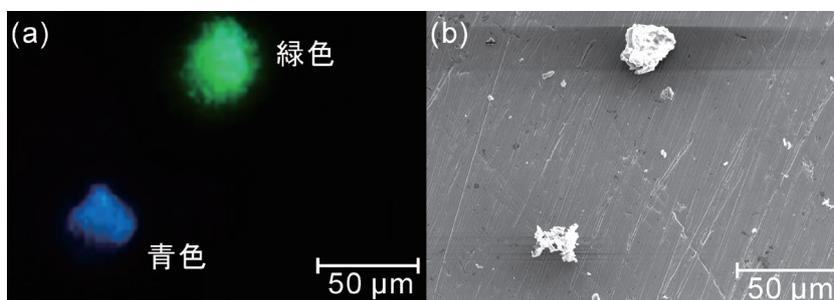


図2 スピネル(上側)およびアルミナ(下側) 介在物を含む模擬鉄鋼試料の (a) CL像(露光時間: 1秒) および (b) SEM像<sup>5)</sup>

れ、表面割れや伸線における断線や連铸ノズルの詰まりなど鉄鋼材料や鉄鋼生産に深刻な影響を与えるので、これらの介在物を検出することは重要です。図2に示すようにCL像を取得すると、アルミナは青色にスピネルは緑色に発光しました<sup>6)</sup>。このCL像の露光時間は1秒と非常に短時間で測定できるので、CL法は介在物を迅速に識別できる方法と言えます。

## 2.2 CL法を用いた製鋼スラグ中の遊離CaOの検出

日本国内で生産される製鋼スラグは、4割以上が道路用路盤材として再利用されており<sup>7)</sup>、製鋼スラグ中に遊離CaOが残留していれば、雨水や大気中の水分や二酸化炭素と反応してCa(OH)<sub>2</sub>やCaCO<sub>3</sub>を生成することで体積が膨張し、路盤材が崩壊する原因となります<sup>8)</sup>。そのため、製鋼スラグ中の遊離CaOを測定することは重要です。遊離CaOの測定法の中で最も広く用いられているのは、エチレングリコールに製鋼スラグを溶解させた溶液中のCa濃度を原子吸光あるいは高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法で測定する方法(エチレングリコール法)であります<sup>8)</sup>。この方法では、Ca(OH)<sub>2</sub>もエチレングリコールに抽出されるので、熱重量分析によるCa(OH)<sub>2</sub>の定量とエチレングリコール法を組み合わせた方法も提案されています<sup>9)</sup>。しかし、いずれの分析法でも、複雑

な分析手順と溶媒抽出に熟練した分析技術が必要とされるため、簡便な遊離CaOの測定法が望まれています。そこで、CL法を用いて簡便に遊離CaOを測定できるか研究を行いました。遊離CaOを含む模擬スラグを作製し、CL像を取得したところ、遊離CaOによる橙色の強い発光が検出され(図3(b))、600 nm付近にCaO中に数%含まれるMn<sup>2+</sup>に起因する発光ピークが存在しました(図3(c))。その他の領域は、2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、3CaO·SiO<sub>2</sub>が存在していましたが、発光は検出されませんでした。したがって、発光色から遊離CaOを製鋼スラグに含まれる他の鉱物相と識別できました<sup>10)</sup>。ここでは、CL像を撮影することによる、遊離CaOの定性的な測定法について述べましたが、現在、発光領域から遊離CaOを定量する手法の確立に取り組んでいます<sup>11)</sup>。また、遊離CaOと同様に路盤材が膨張する原因となる遊離MgOをCL法で検出する方法についても研究を行っています<sup>12)</sup>。

## 3 今後の予定

これまでの研究では、試薬から作製した模擬的な試料を用いて測定を行っていましたが、今後は実試料の測定を行い、

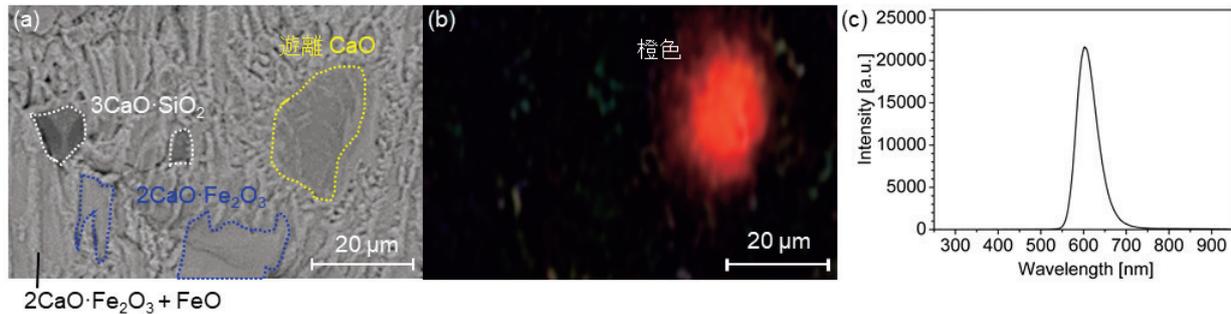


図3 遊離CaOを含む模擬製鋼スラグの (a) SEM像、(b) CL像および (c) 遊離CaOのCLスペクトル (測定時間1秒)<sup>10)</sup>

CL法の実用性を示していきたいと考えています。また、電子線の代わりにX線を照射源に用いても、CLと同じ現象が起こり、X線励起ルミネッセンスと呼ばれています。X線を用いると大気中でも測定が可能であるため、オンサイトやオンラインでの分析ができる可能性があります。X線励起ルミネッセンスを利用した小型装置の開発を行うことで、鉄鋼分析に役立つ新しい手法と装置を提案したいと考えています。

#### 参考文献

- 1) S.Imashuku, A.Imanishi and J.Kawai : Anal. Chem., 83 (2011), 8363.
- 2) H.Suito and R.Inoue : ISIJ Int., 36, (1996), 528.
- 3) P.Rocabois, J.N.Pontoire, J.Lehmann and H.Gaye : J. Non-Cryst. Solids., 282 (2001), 98.
- 4) M.Fernandes, J.C.Pires, N.Cheung and A.Garcia : Mater. Charact., 51 (2003), 301.
- 5) H.V.Atkinson and G.Shu : Prog. Mater. Sci., 48 (2003), 457.
- 6) S.Imashuku, K.Ono, R.Shishido, S.Suzuki and K.Wagatsuma : Mater. Charact., 131 (2017), 210.
- 7) 鉄鋼スラグ統計年表 (2018年度実績), 鉄鋼スラグ協会, 東京, (2019), 7.
- 8) L.M.Juckes : Miner. Process. Extr. Metall., 112 (2003), 177.
- 9) 加藤美佐, 波理竜也, 齋藤伸吾, 洪川雅美 : 鉄と鋼, 100 (2014), 340.
- 10) 常田大喜, 今宿晋, 我妻和明 : 鉄と鋼, 105 (2019), 522.
- 11) S.Imashuku, H.Tsuneda and K.Wagatsuma : Metall. Mater. Trans. B, (2020), in press. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01927-4>
- 12) S.Imashuku, H.Tsuneda and K.Wagatsuma : Metall. Mater. Trans. B, 51 (2020), 28.

(2020年7月16日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 マイクロシステム融合研究開発センター 教授

鈴木 茂

若手に安心と機会を与えよう、という見出しの新聞記事を見て、今宿晋先生は、「本当ですね」とボソッと言われた。弟子は師匠の影響を受けると言われるが、今宿先生のいずれの師匠も「ボソッと」言うタイプであったためかもしれない。この新聞記事では、「科学技術立国の復活」について書いてあり、様々なデータから日本の技術力が低下していると言うのである。それには国立大の法人化後の運営費交付金の低下と関係しているという。一方、文部科学省HPの「研究現場を取り巻く現状」で、最近は研究者の間に功名心が広がる反面、真理を探究するという研究への使命感が薄れてきていると書かれていた。真理探究は研究者の使命であるが、研究者の過度な功名心や行動が世の中を変にしているのであろう。

今宿先生は、紹介記事に見られるように、実験装置を設計し、基本から製作し組み上げる研究をされている。信号を出す原理が分からないと、それらはできない。最近の若手はお金があれば便利な装置が手に入ると思いがちで、真空系のラインにあるバルブを回さなくても動作する装置も出ている。ある学生はガスのレギュレータの昇圧弁を時計方向に回すとガスが止まると思ったのか、強く回しすぎて壊したことがあった。このような学生に対して、「ドアホ」と強く言う先生もいるし、「ああそう

か、これはね」と優しく説明する先生もいるであろう。今宿先生はどちらかと言うと、後者のタイプである。「教育」では様々な人を相手にするので、難しいことが多い。

今宿先生の「研究」について述べる。鉄鋼協会では複数の部会に参画しており、他の学会にも所属している。幅広い分野の知識をくみ取り、それをベースに斬新なアイデアを出す姿勢が感じられる。大き目の研究費を獲得したりプロジェクトリーダーをしたりすると変に偉ぶる先生がいるが、過剰な言動が見られることもある。例えば、鉄ウイスキーの引張強度が数GPaとかいう派手そうな記事が出ていた。しかし、試料や測定のパラツキのことが記されておらず、「不確かさ」が考慮されていないと言える。そもそもウイスキー試料を試験機にどう取り付けるのか知っているのだろうか？そういう点で今宿先生は現実主義であり、情報を慎重に捉える研究者である。

冒頭の新聞記事では、基本に立ち返り学究と斬新なアイデアで現場に活気がよみがえることを望んでいると書いてあった。大げさで派手なニュースに注意して、様々な情報を冷静に受け入れれば、斬新なアイデアが出てくると言おうとしたと思われる。今宿先生はそんな姿勢で研究や教育に取り組んでいますので、今後の活躍や発展に期待したいと思います。

日鉄テクノロジー（株） 富津事業所 技術営業部長

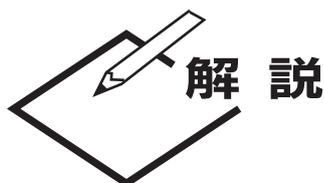
水上 和実

ある日、突然、今宿先生からメールが到着した。ふえらむ「躍動」の執筆をしており、記事の最後に大学・企業の前輩研究者からコメントをお願いしたいとの由。昨年の学会で先生に打診されたことを忘れかけていた頃であった。思い起こせば、先生とは2012年の学振19製鋼計測化学研究会でご発表いただいてから早くも8年近いお付き合いとなる。この間、先生は、京大 河合教授の元ではイオン金属を用いた絶縁物のSEM観察手法、焦電結晶を用いた超小型元素分析装置の開発、東北大学我妻教授のもとに移られてからは、今回執筆されているカソードルミネッセンス法（CL法）を用いた鋼材中介在物の迅速評価法の開発、スラグ中フリータイムの迅速評価法の開発など、我々、鉄鋼分析にかかわる者たちに、見るのも聞くのも初めてという、知的好奇心をおおいにくすぐる新たな分析・解析シーズ技術を創出されてきた。このような優秀な若手研究者が鉄鋼協会や学振の産学連携の輪の中で活躍しておられることは大いなる幸福である。本当に「有難い」ことであり、深く感謝申し上げたい。

技術的な課題を解決し事業化に結び付けたい民間企業と、先進的な研究成果をものづくり分野で実用化したい大学などの教育機関・研究機関とが連携して、新技術の研究開発や、新事業の創出を図ることを目的する産学連携で、このような意欲ある若手研究者の積極的なシーズ提案を、産業界は、どのように理解し、うまく現場へ適用するか大切な役割を担っている。従来のEPMAなどの元素マッピングが、試料台座をX軸、Y軸に移動させながら幾度も電子線照射して元素マップを作成するのに数時間、

時には一昼夜以上かかるのに対して、CL法はカメラのシャッターを切るのと、ほぼ同時に介在物のサイズ、成分、個数密度を秒単位で識別できる。この方法が製鋼の高精度作りこみ技術に適用されたら、画期的な介在物評価技術として世界のデファクトスタンダードになりうるポテンシャルを秘めている。また従来、エチレングリコール抽出法でしか評価できないスラグ中フリータイムを撮影と同時に、他のCa系介在物と分別定量できれば、時間短縮のみならず、フリータイム生成過程と膨潤防止原理の追及も容易になってくる。将来的には、執筆原稿中に指摘されているように励起源にX線を用いることにより製造現場ライン通板中の薄板表層部介在物のオンライン評価への適用も期待できる。いや鉄鋼業界のみならずCL法はEPMAを駆逐するかも知れないほどの破壊力を秘めている。

しかしながらCL法は、歴史は古いが鉄鋼分析の分野では、学術的に確固たる基礎理論とデータベースが完備されていない未開拓の分野でもある。ちょっとした不純物の混入度合いによっても、発光波長が変わるため、これから実用化を目指すには鉄鋼中介在物のサンプルを数多く供出して、世界に無いCLデータベースを構築するとともに、CL発光メカニズムの解明と現場に適用する上での技術的な課題が解決できるよう産学連携して「枯れた技術」に仕上げていくことが必須になる。これこそ産業界が担うべき大きな役割であり、今宿先生に対する力強いエールになると信じている。この場を借りて鉄鋼業界関係者の方々の絶大なるご協力を賜るよう頭を伏して願うところである。



# 自動車用薄鋼板溶接技術の最先端 抵抗スポット溶接\*

The Forefront of Welding Technology for Automotive Steel Sheet,  
Resistance Spot Welding

宮崎康信 日本製鉄(株)  
Yasunobu Miyazaki 鉄鋼研究所 接合研究部  
上席主幹研究員

## 1 はじめに

自動車車体では安全性向上と軽量化との相反する要請を克服するため、特に骨格に使われる鋼板の高強度化が急速に進展している。車体の溶接には主にスポット溶接が適用され、レーザ溶接が用いられることもある。シャーシの溶接では、主にガスシールドアーク溶接が適用されている<sup>1)</sup>。これらの内、最も幅広く用いられている溶接方法であることから、スポット溶接を本稿では紹介する。

## 2 自動車の歴史と現在の課題

1876年にドイツ人のオットーが4ストロークのガソリンエンジンを発明し、彼のもとで働いていたダイムラがこれを改良して小型軽量で大出力が得られるエンジンを開発した<sup>2,3)</sup>。ダイムラは早くも1889年のパリ世界博覧会に全鋼製の四輪車を出品し、一般にも売り出している。またフランスのパナールはダイムラからエンジンの製造権を買い、1891年には現在のFR方式の始祖といえる車を発売した。こうして現在の乗用車の基礎技術はダイムラのエンジンとパナールのシャーシによって確立された。

アメリカではフォードやオールズなどが自動車の試作に

乗り出し量産技術を開発していった。1908年のT型フォードは現在のコンベアラインによる大量生産方式の基礎となり、1923年には年産205万台と、全世界生産台数の1/3近くを占めた。

日本では1907年にオートモビル商會が国産ガソリン車第1号となるタクリ号を10台造り、福沢諭吉など当時の有力者に納入した。また現在まで続く自動車会社が次々と創立された。戦後になって、ライセンス生産や欧米の車をお手本にした自動車生産が本格化した。そうした1950年代、乗用車の需要はハイヤー・タクシーと法人であった。1956年からの神武景気、1960年の所得倍増計画、1966年のいざなぎ景気と経済が成長するに従って個人需要が伸び、1960年代に小型大衆車の量産技術が確立された。そして1970年に制定された米国の大気浄化法改正法(通称マスキー法)を契機とした1975年代の排出ガス浄化技術の確立を経て、1980年代には日本車の生産台数が1,000万台を超えた。

1973年(第1次)と1979年(第2次)に原油の供給逼迫と原油価格高騰、またそれによる世界経済の混乱が生じた。いわゆる石油危機である。日本経済の発展のためにはエネルギー使用効率を大幅に改善していくことが必要と考えられ、1979年に「エネルギー使用の合理化に関する法律」(通称:省エネ法)が制定された。そして同年にガソリン乗用自動車の燃費

### \* 【今回の解説記事について】

「ふえらむ」では、入門講座「鋼を接合する(2011年5号~2012年1号掲載)」で、溶接・接合に関する解説記事や、「ものづくりを支える溶接材料と技術(2012年)」の連報解説記事(1,5,6号)を掲載してきた。しかしながら、近年の輸送機器、特に自動車の軽量化に対しては、鉄鋼材料の高強度化や薄肉化の動きが加速しており、これに伴い接合技術が重要なキー技術になっている。前記の入門講座、解説記事から10年近くが経過したこともあり、現状の自動車用薄鋼板の溶接技術に関して、その最新技術を含む概要を掲載することは、鉄鋼材料やその利用技術の研究/開発者には有効であると考え、第229・230回西山記念技術講座「鋼材の性能を引き出す溶接技術の最先端」の中から「自動車用薄鋼板溶接の最先端」の講義資料の内容の一部を紹介する解説記事を掲載する。溶接技術の最先端の全貌や、自動車用薄鋼板溶接の最先端の詳細は、是非、第229・230回西山記念技術講座テキストで確認していただきたい。(会報委員会委員長 足立 吉隆)

基準 (1985年度目標) が策定された。その後CO<sub>2</sub>排出量の削減 (環境保護) という視点が加わり、同法は次々と改正・制定されて2013年には2020年を目標年度とする乗用車・小型バスの燃費に対するトップランナー基準が策定されている。

一方1970年には既に交通事故の多発が世界的な社会問題となっていた。米国運輸省道路交通安全局は自動車メーカーがより安全な車両を作るとを奨励し、消費者がそれらを購入できるように、1979年に新車アセスメントプログラム (New Car Assessment Program : NCAP) を開始した。日本でも1995年度より自動車事故対策機構により自動車アセスメント (Japan New Car Assessment Program : JNCAP) が開始された。フルラップ前面衝突試験や側面衝突試験がよく知られている。

こうして自動車は環境保護のための軽量化と同時に、重くなりがち安全性の確保という、相反する課題を抱えるようになった。

### 3 自動車用鋼板<sup>4)</sup>

自動車の大量生産と寸法成形が始まった1955年頃、成形の難しい部品には輸入のAlキルド鋼板が使われていた<sup>5)</sup>。その後1950年代後半になって深絞り用低炭素Alキルド鋼板が国産化された<sup>6,7)</sup>。この鋼板は箱焼鈍によって数日かけて製造され、1960年代の自動車産業の発展とともに大量に製造された。一方、当時連続焼鈍で製造された鋼板は硬質で時効劣化が大きく、自動車用途には不向きであった。1960年代後半に研究が進み、1970年代になって深絞り用低炭素Alキルド鋼板が連続焼鈍で造られるようになった。

Ti添加IF鋼板が1966年に、Nb添加IF鋼板が1981年に開発されている。IF (Interstitial Free) 鋼板は、極低炭素鋼にTiやNbを添加して炭化物を形成し、固溶NやCをほとんどなくした鋼板である。当初高コストであったが、真空脱ガスや連続鋳造など製造技術の進歩により低コスト化が進んだ。そして1980年代後半に車体形状の複雑化や部品の一体成形が求められると、広く外板用の鋼板として使われるようになった<sup>8)</sup>。

1970年前後になると衝突安全性確保や排気ガス対策で車体重量が増加し、燃費が悪くなった<sup>9)</sup>。このため高い成形性が求められるバンパーなどにNb、Tiなどの析出強化型鋼板やSi、Mn系の固溶強化鋼板が使われ始めた<sup>6)</sup>。

1973年の第1次石油危機を経ると、軽量化のために高強度鋼板を車体にも適用する必要が生じた。パネル系部品用の鋼板としてはP添加高強度鋼板や、焼付け硬化能をもつBH (Bake Hardening) 高強度鋼板が開発され、1978年の第2次石油危機を契機として量産自動車に使用され始めた<sup>6)</sup>。現在では、TS (引張強さ。以下省略) 340MPa級のBH鋼板までが鉄鋼連盟で規格化されている。

高い延性が求められる骨格系部品用鋼板として、複合組織鋼が開発された。DP (Dual Phase) 鋼板はフェライトとマルテンサイトからなる複合組織鋼板である。590MPa級DP鋼板が1999年に、780MPa級が2002年に、980MPa級が2004年に採用されたことが報告されている<sup>10)</sup>。現在1180MPa級の実用化も進んでいる。

DP鋼よりさらに延性を高めた低合金TRIP鋼の開発も行われ、1989年に熱延780MPa級鋼板が実部品として採用された<sup>7)</sup>。直近では1180MPa級鋼板の適用事例も報告されている<sup>11)</sup>。

冷間でのプレス成形の課題を克服するために、オーステナイト域の温度 (A<sub>c3</sub>点以上) まで加熱し、プレス成形と同時に金型で焼入れを行うホットスタンプ (以下、HS) 鋼板も開発された<sup>12)</sup>。国内では2001年にドアインパクトビームに採用されている<sup>13)</sup>。現在では焼入れ後1.8GPa級となるHS鋼板も使われている。

シャーシ系部材には剛性ととも疲労や腐食に対する耐久寿命が必要で、比較的厚手の熱間圧延鋼板が使われる<sup>8)</sup>。現在780MPa級までの鋼板が使われている。ホイールリムでは980MPa級鋼板も実用化された。

北米や北欧で冬季の路面凍結防止のために塩が散布されるようになると車体に錆が発生したり孔があいたりするようになり、高い耐食性が求められるようになった<sup>9)</sup>。1976年にカナダコードが最初の規制値として制定された。防錆鋼板への要求は2度に渡る石油危機による車体軽量化要請によっても強くなり、1980年代前半より防錆鋼板が多く使われるようになった<sup>6)</sup>。国内における防錆鋼板は片面研削合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (以下、合金化溶融亜鉛めっきはGAと略記する) の使用に始まる。その後電着塗装技術と化成処理技術が改良され、現在では厚目付の単相GA鋼板が主流となっている<sup>14)</sup>。

### 4 抵抗スポット溶接

#### 4.1 抵抗スポット溶接技術の概要

抵抗スポット溶接 (Resistance Spot Welding) は、自動車製造の比較的初期から使われてきた。この溶接法では複数の鋼板を銅合金の電極で挟み込んで加圧・通電し、鋼板間に溶融凝固した溶接金属 (ナゲット) を形成する。

図1<sup>15)</sup>に溶接工程の一例を示す。本図はナゲット形成後に改質のための通電を行う場合の工程である。電極での加圧後、加圧力が安定するまで待つスクイズ時間を設けて通電を開始する。すると鋼板は加熱・溶融される。通電初期に消失する接触抵抗と鋼板の固有抵抗によるジュール熱が熱源である。

鋼板表面は水冷銅電極により冷却されているため、合計板厚の中心が最も高温になりやすい。通電終了後、一定の加圧力保持時間を設けて電極を解放する。

スポット溶接部の断面写真例を図2<sup>15)</sup>に示す。本図において中央の碁石状の部分がナゲットである。その周囲にはコロナボンドと呼ばれる圧接部がある。さらに外側に母材とコントラストの違う領域が認められるが、この領域が溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) で、鋼板が $A_{c1}$ 点以上に加熱された領域である。

軟鋼板に対する推奨溶接条件を表1<sup>16)</sup>, 228)に示す。2サイクルのアップスロープが付けてある。また電極としてCF形またはCR形を前提としているが、DR形でも問題なく使える (電極形状については、JIS C 9304 (2010) を参照されたい)。溶接電流は数千Aから一万A程度である。

#### 4.2 抵抗スポット溶接機器

スポット溶接機は、構造面から定置式とロボットに搭載可能なポータブル式に分類される。さらにこれらは電源と加圧

機構により分類される。

電源には従来、単相交流電源が広く使われてきた。図3<sup>17)</sup>に示すように、単相交流電源は、単相200Vを溶接トランスにより降圧して溶接に供するものである。電流値の調整には各半サイクルの通電開始時期をサイリスタ等のスイッチン

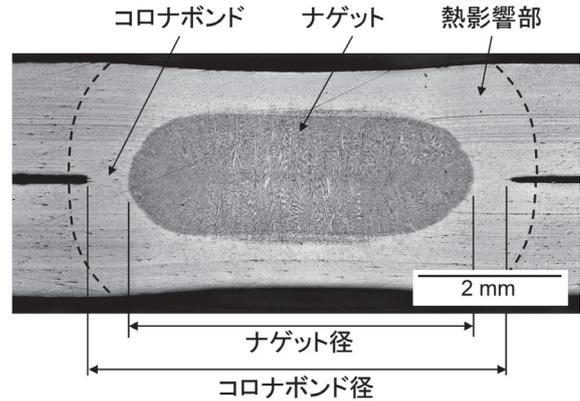


図2 抵抗スポット溶接部の構造

表1 軟鋼板に対する溶接条件例

項目	推奨条件
電極先端径 ( $d$ )	$d=5\sqrt{t}$ (mm) 但し、現実的には $t \geq 1.6$ で8mm, 他6mm
加圧力 ( $P$ )	$P=2.5t$ (kN)
全溶接時間 ( $T$ )	$T=10t+2$ (サイクル, 50Hz) $T=12t+2$ (サイクル, 60Hz)
溶接電流 ( $I$ )	$I=0.95I_e$ (kA) 程度

$t$ : 板厚 (mm),  $I_e$ : 散り発生限界電流

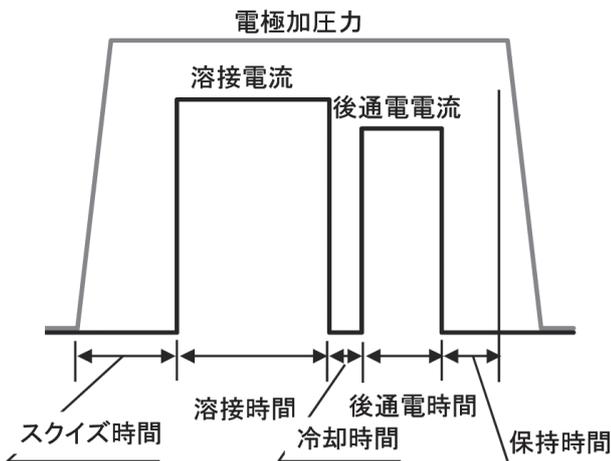
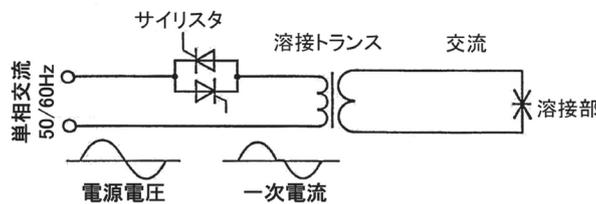
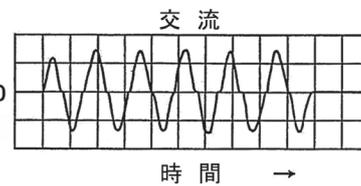


図1 抵抗スポット溶接の工程例

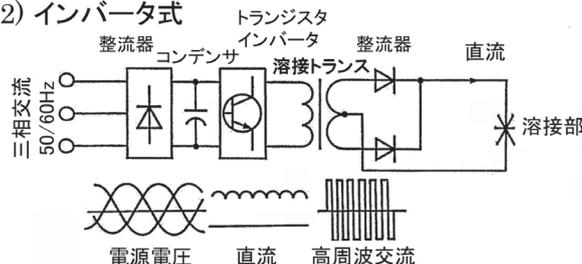
##### 1) 単相交流式



溶接電流波形



##### 2) インバータ式



直流

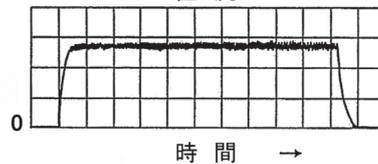


図3 溶接電源の回路<sup>17)</sup>

グ素子で調整する。これを位相制御（ヒートコントロール）という。また1990年頃より直流インバータ電源も採用されるようになった。この電源では商用周波数の交流を整流して直流を作り、インバータにより高周波交流に変換する。そして整流器付き溶接トランスで直流に戻して溶接に供する。溶接電流の調整には一般に、溶接トランスの一次側に電流を供給する時間幅を変える。これはパルス幅変調（Pulse Width Modulation：PWM）方式と呼ばれる。

単相交流電源を用いたポータブルスポット溶接機では、図4<sup>18)</sup>に示すように、ガンと溶接トランスが分離されたものが普通である。溶接電流は別置きされた溶接トランスから二次ケーブルでロボットに搭載されたガンに供給される。この方式では二次ケーブルに流れる溶接電流が大電流となることからケーブルが太くなる。このためロボットの動きを制約する。またケーブルが破断する不具合が発生し易い。さらにふところの大きな溶接機ではインダクタンス（交流での電気抵抗のうち、電磁誘導に起因する部分で、電流の急激な変化を抑制する）が大きくなり、短時間に大電流を流すことは不得手である。

インバータ方式では溶接トランスに高周波電流が供給されるため、溶接トランスを小さくできる。このため溶接トランスを溶接ガンと一体化してロボットに搭載できる。この方式では電源と溶接ガンとの間の電流を低く抑えられることから一次ケーブルを細くでき、ケーブルの切断不具合がなくな

る。こうした事情からガン・トランス一体型溶接機はロボットによる溶接工程で急速に普及した。さらに直流で溶接することから、溶接ガンのふところ深さに左右されないで溶接できる。高周波でトランスを小さくできるのは、鉄心を通る磁束密度が周波数に反比例して小さくなるためである。

電極の加圧には従来、空圧または油圧が使われてきた。ACサーボモータを用いた電動加圧式溶接ガン（以下、サーボガン）は1995年頃から実用化された<sup>18)</sup>。モータの回転量、回転速度で電極の位置や移動速度を決定でき、回転トルクで加圧力を制御できる。このサーボガンをロボットと協調制御することによりサイクルタイムの短縮が可能となる。ガンに開放・加圧動作をさせながらガンを移動させることができる<sup>19)</sup>ためである。また電極をソフトにワークにあてることが可能で、打撃音がなくなり作業環境が大幅に改善される。

### 4.3 抵抗スポット溶接現象の詳細

鋼板に電流が流れるとジュール熱が発生する。電流制御の場合、単位時間あたりの発熱密度 $q$ は、固有抵抗 $\rho$ と電流密度 $i$ の2乗の積で求められる。全電流値を $I$ 、電流が流れる領域の直径（通電径）を $d_c$ とすると、図5に示す発熱密度の表式が得られる<sup>16), p29</sup>。この式は発熱密度が電気抵抗の1乗、電流値の2乗に比例する一方、通電径には4乗で反比例することを示している。連続した溶接で電極先端が広がり易いめっき

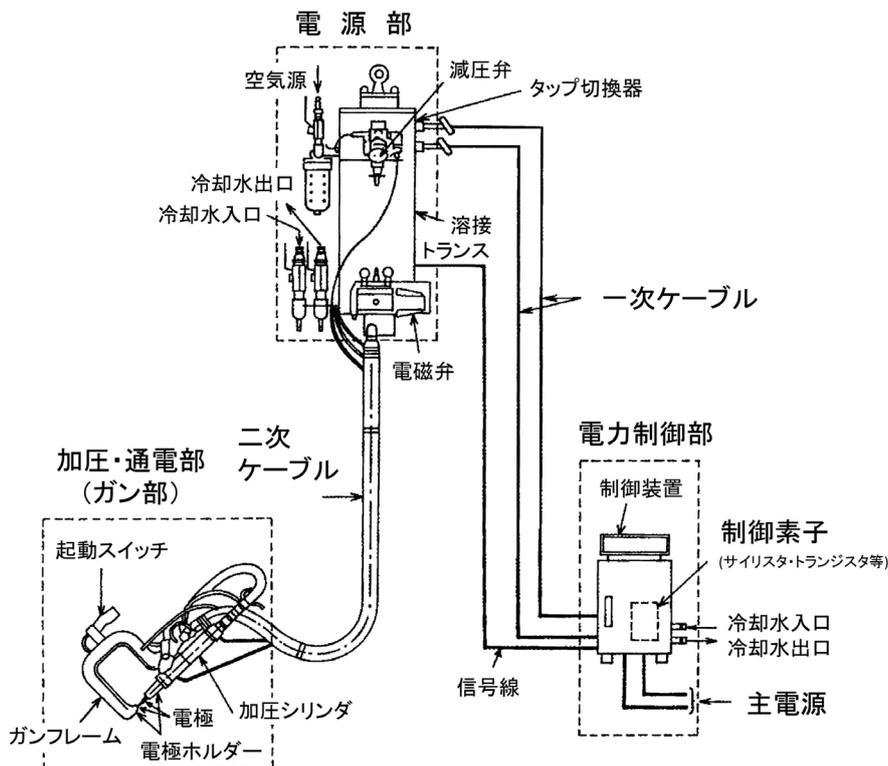


図4 ガン・トランス分離型溶接ガン<sup>18)</sup>

鋼板の溶接で、電極管理が重要となる所以である。

通電が始まるとコロナボンドとナゲットが成長する。通常コロナボンドはナゲットより先に成長し、溶接中に熔融金属が鋼板間に吹き出すこと（中散りの発生）を防ぐ。しかし溶接電流を高くしすぎると図6<sup>20), p35</sup>に示すように、ナゲットの成長がコロナボンドの成長に追いつき、散りが発生しやすくなる。

鋼板間に隙間（以下、板隙）があると散りが発生しやすくなる。これは板隙があるとコロナボンドによる熔融池の保持能力が低下するためと報告されている<sup>21)</sup>。

図5に示した発熱密度の式において固有抵抗は温度に依存し、高温ほど高くなってナゲットの形成を助ける。また固有抵抗はSi、Al、Mn、Crといった化学成分に依存する<sup>20), p88</sup>。高強度鋼板では合金元素の添加量が多い。このため高強度鋼板の固有抵抗は軟鋼板に比べて高く、ナゲットが形成されやすい傾向になる。

接触抵抗 $R_c$ は加圧力 $P$ 、鋼板の降伏強度 $\sigma_y$ とともに固有抵抗 $\rho$ に依存し、 $R_c = (\rho/2)\sqrt{3\sigma_y/P}$ と表される<sup>16), p19</sup>。従って高強度鋼板では軟鋼板に比べ接触抵抗も高くなる。

通電径は $d_c = \sqrt{8P/\pi\sigma_y}$ <sup>16), p27</sup>と表される。このため発熱密度は降伏強度の自乗に比例して高くなる。

以上述べたように高強度鋼板では抵抗の高さや通電径の狭さからナゲットが形成されやすく、中散りが発生しやすい。すなわち適正電流範囲が狭い傾向になる。ここで適正電流範囲は必要とする最小ナゲット径が得られる電流値から、散り

$$q = \rho i^2 \propto \frac{\rho I^2}{d_c^4}$$

$q$ : 発熱密度     $I$ : 全電流  
 $\rho$ : 固有抵抗     $d_c$ : 通電径  
 $i$ : 電流密度

図5 発熱密度の支配因子

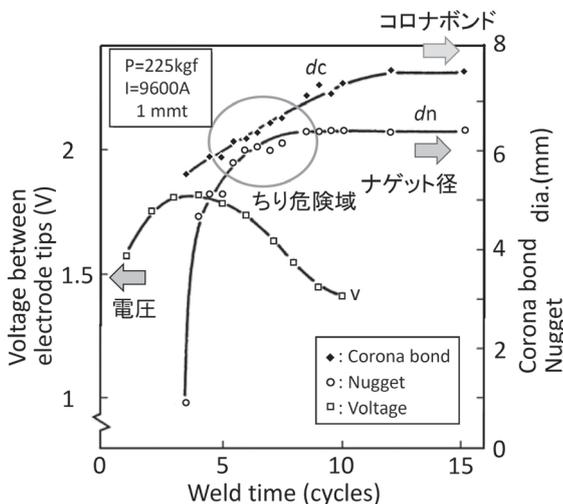


図6 高電流でのコロナボンドの成長遅れ<sup>20), p35</sup>

が発生する電流値までの電流範囲である。

通電径を確保するために下限加圧力に $P_{HT}^{lower} = \sqrt{\sigma_{HT}/\sigma_{MS}} \cdot P_{MS}$ 、上限加圧力に $P_{HT}^{upper} = (\sigma_{HS}/\sigma_{MS}) \cdot P_{MS}$ を考えれば良いことが提案されている<sup>16), p232</sup>。ここで $P_{HS}$ および $P_{MS}$ はそれぞれ高強度鋼板の場合と軟鋼板の場合の加圧力である。また $\sigma_{HT}$ および $\sigma_{MS}$ は、それぞれ高強度鋼板および軟鋼板の引張強さ（軟鋼の場合300MPaと設定する）、あるいは降伏強度と引張強さの平均とする。但しこれらの式に従うと厚手高強度鋼板の溶接に必要な電極加圧力がかなり高くなってしまふ。

加圧力を十分に確保できない場合、通電方法が工夫される。すなわち、通電時間を長めにして電流値を抑制する、アップスロープや予備通電を行って本通電の前に鋼板間をなじませる、多段通電により通電初期のナゲット成長速度を緩和することが有効である<sup>22)</sup>。

#### 4.4 高強度鋼板の抵抗スポット溶接

##### 4.4.1 溶接部の組織と硬さ

図7<sup>23)</sup>は、590MPa級鋼板（t 1.6 mm）2枚板組で直径 $3.5\sqrt{t}$ のナゲットを形成した場合の温度履歴実測値である。ここでナゲット径および板厚 $t$ はmm単位での数値であり、世界的に使われている慣用表記である。図7より、変態を左右する800°Cから500°Cまでの冷却時間 $t_{8/5}$ は0.12 s程度であると読み取れる。この計測例では冷え切るまで電極を保持しているため冷却時間が極端に短くなっている。数値シミュレーションにより980MPa級鋼板（t 1.4 mm）2枚板組のナゲットの冷却時間を推定した。その結果、保持時間が0.1 sの場合、熔融境界より1 mmのナゲットの $t_{8/5}$ は約0.6 sであった。

焼入れ後 1.5 GPa級となるHS鋼板の950°Cからの連続冷却変態（CCT：Continuous Cooling Transformation）曲線図が報告されている<sup>12)</sup>。それによると0.6 s程度の $t_{8/5}$ ではこの鋼のスポット溶接部はマルテンサイトになると推定される。マルテンサイトの硬さ $H_M$ は炭素量 $C$ のみで決まり、 $H_M =$

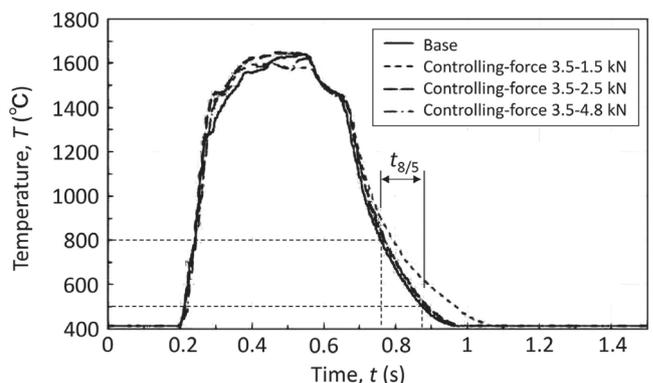


図7 スポット溶接ナゲットの温度履歴<sup>23)</sup>

884 C (1-0.3C<sup>2</sup>) + 294で推定される<sup>24)</sup>。0.22% Cの1.5 GPa級HS鋼のマルテンサイトの硬さは486と推定されるが、この値は実測値<sup>25)</sup>と良い一致を示す。

#### 4.4.2 高強度鋼板スポット溶接継手の強度

スポット溶接継手の引張強度は、引張せん断試験 (JIS Z 3136)、十字引張試験 (JIS Z 3137) で評価されることが多い。剥離強度の試験方法として他に、L字継手ピール試験やU字継手ピール試験がある。継手強度の鋼種依存性について幾つか報告されている<sup>26,27)</sup>。それらによると引張せん断強さ (Tensile Shear Strength : TSS) は母材の引張強さとともに上昇するものの、十字引張強さ (Cross tension strength : CTS) は800MPa付近より低下する傾向がみられる。

図8<sup>28)</sup>に示すように、十字引張試験ではナゲットが小さいときに界面破断となり易く、ナゲットが大きくなると部分プラグ破断あるいはプラグ破断となる。また鋼板強度や板厚が増すほどプラグ破断し難くなる。

図9<sup>28)</sup>に示すように破断はナゲットや溶融境界付近で生じ、CTSはそれら部位の材質に支配される。これら部位はA<sub>cs</sub>点以上にまで加熱された後、急速に冷却された部位で、成分のみによって機械的特性が決まる部位である。同じ剥離試験であるピール試験において破断形式が炭素当量とPおよびS量で整理できることが報告されており、ナゲットが硬くかつ偏析元素が多い場合にナゲット内破断し易いと解釈されている<sup>27)</sup>。

#### 4.4.3 十字引張試験における破断機構

十字引張試験での破断現象について、破壊力学に基づいた検討がなされた<sup>28,29)</sup>。貞末ら<sup>28)</sup>は980MPa鋼 (0.133C-1.59Si-2.29Mn、t1.6 mm) 継手の十字引張試験を行い、CTSと破断形態のナゲット径依存性を調べた。その結果が先に示した図8、図9である。3√t継手では1 kNの載荷でコロナボンド部が

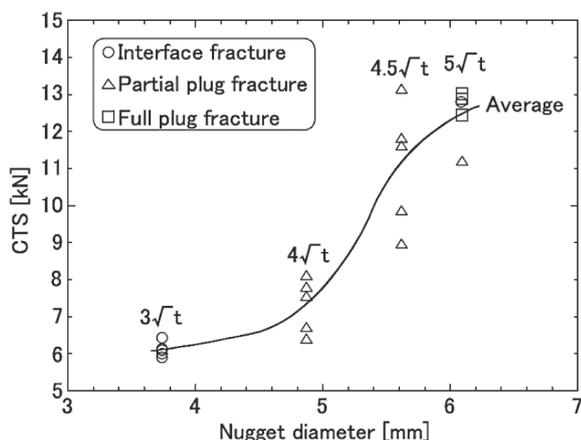


図8 ナゲット径によるCTSおよび破断形式の変化<sup>28)</sup>

剥離し、き裂がナゲット内に300 μm程度進展した。このき裂は荷重がCTSの6.09kN近傍になると急速にナゲット内に進展し、継手が脆性破壊したという。そこでこのき裂進展に対応する破壊パラメータとしてモード I の応力拡大係数が適切と考えた。これに対し5√tの継手では7kNで板厚方向の延性き裂が発生し、荷重の増加とともに12.8kNにおいてプラグ破断となった。そこでパラメータとして相当塑性歪みが有効と考えた。

貞末らは十字継手の1/4継手モデルを用いて弾塑性数値解析を行った。図10<sup>28)</sup>に示すように3√tではコロナボンドを、5√tではHAZのはみ出したコロナボンドを持つモデルである。十字引張試験をシミュレーションし、3√t継手の破断は、引張初期に入ったき裂先端の応力拡大係数が116MPa√mに達すると生じ、5√tの試験片では歪み集中部の相当塑性歪みが0.34に達すると延性き裂が発生すると考えれば実験結果と整合することを示した。なお0.34という値は厚鋼材や溶接金属の値に比べて低く、今後検証すべきとしている。

一方渡辺ら<sup>29)</sup>は破壊パラメータとしてき裂進展駆動力Jを採用し、これがナゲット端部の破壊靱性値J<sub>e</sub>に達するとき裂が進展すると考えた。き裂進展駆動力は仮想き裂がある場合とない場合のポテンシャルエネルギーの差から算出する。この解析では低荷重で剥離するコロナボンドは圧接されていないものとしている。

渡辺らの計算によると、引張荷重の増加とともに溶融境界において界面方向および板厚方向のき裂進展駆動力が増加する。またナゲット径が大きくなると、き裂方向に関わらず駆動力は低下する。そして図11<sup>29)</sup>に示すように、界面方向へのき裂進展駆動力に比べ、板厚方向への駆動力の方が高くな

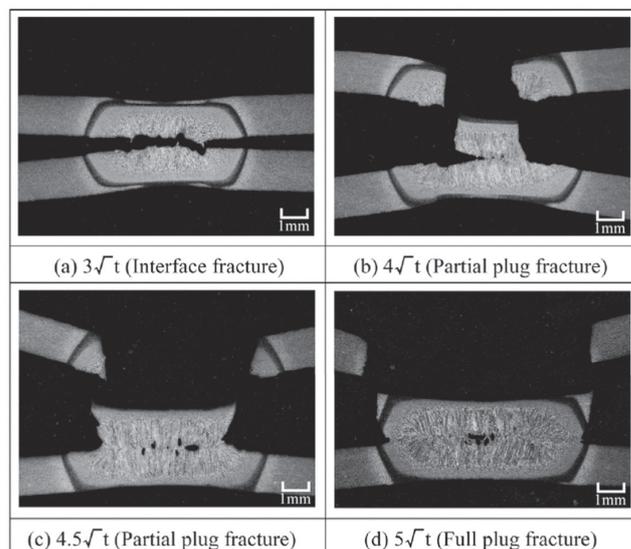


図9 各種破断形式での破断部断面<sup>28)</sup>

る。これは実験的にナゲット径が大きくなるとプラグ破断となりやすい傾向と対応する。また板厚が厚くなるとき裂進展駆動力が低下することを示し、CTSが高くなることに対応する結果を報告している<sup>30)</sup>。

渡辺らはさらにナゲットの破壊靱性値も測定している<sup>31)</sup>。その値は貞末ら<sup>28)</sup>の報告している0.133C材の応力拡大係数( $K_{Ic}$ )と概ね一致する。また石田ら<sup>32)</sup>は破壊靱性値のナゲット内での異方性を調べ、ナゲット内では界面方向より板厚方

向の方が小さいことを報告している。これは部分プラグが生成されることの一因と考えられる。

## 5 スポット溶接継手の剥離強度向上技術

以上の報告は高強度鋼板継手で高いCTSを得るためにはナゲットを大きくすること、ナゲットおよびナゲット近傍の破壊靱性値を高くすることが必要であることを示している。

### 5.1 CTSに影響を与える因子

CTSは保持時間が長くなると低下する。若林ら<sup>33)</sup>は0.2C、 $t$  1.4mmの980MPa級鋼板を種々の保持時間で溶接し、これを確認している。破断形式は保持時間0.2sまではプラグ破断であったが、0.4s以降は部分プラグ破断となり、またプラグ率が低下した。溶融境界から1mmのナゲット組織は図12<sup>33)</sup>に示すように、保持時間によって炭化物の析出量に違いが認められた。この違いは $M_s$ 点以下の冷却速度の違いに起因し

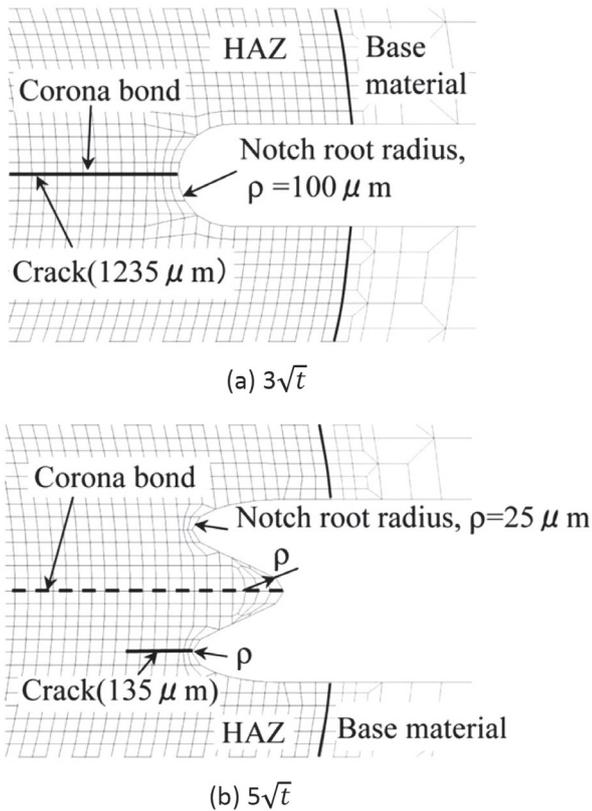


図10 十字引張試験における破断現象の数値解析モデル<sup>28)</sup>  
 (a)  $3\sqrt{t}$  コロナボンド先端  
 (b)  $5\sqrt{t}$  コロナボンド先端

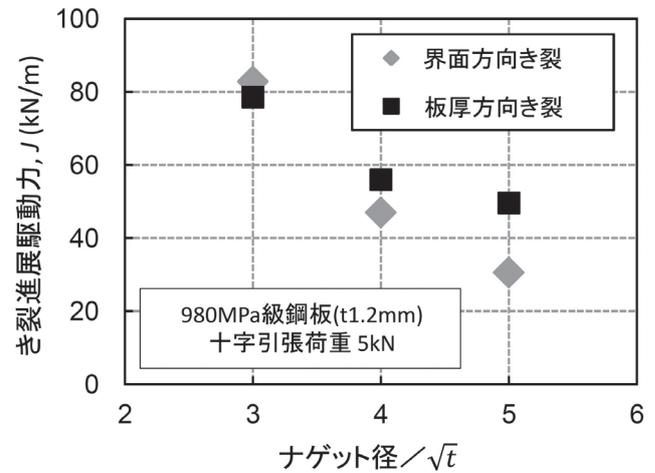


図11 ナゲット径とき裂進展駆動力の変化<sup>29)</sup>

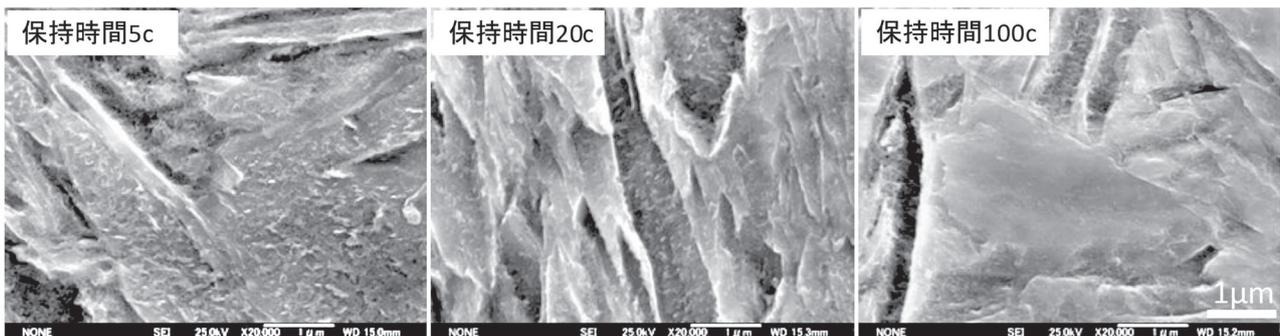


図12 保持時間によるナゲット組織の変化<sup>33)</sup>

てオートテンパ程度が変化したためであると考えられた。

岡田ら<sup>34)</sup>は各種自動車用鋼板のL字継手で剥離強度を評価した。高強度鋼板では保持時間1.0sで焼入れた場合に比べ、塗装焼付に相当する170℃、20minの熱処理を施すと剥離強度が高くなることを報告している。これは焼戻しによるナゲットの靱性向上によるものとしている。さらに0.15Cの鋼板でP量を変えて剥離強度を調べ、Pが凝固偏析している場合には塗装焼き付けの熱処理をしても剥離強度を変えられなかったという<sup>35)</sup>。峰松ら<sup>36)</sup>は引張破断破面のナゲットとコロナボンド境界の塑性変形領域の元素分析を行い、Pが局所的に偏析していることを報告している。さらに古迫ら<sup>37)</sup>はL字継手の途中除荷引張試験後の断面観察を行い、凝固偏析によりナゲットが破壊しやすいことを確認している。

これらの報告より、高強度鋼板スポット溶接継手の破断形式や剥離強度は焼戻し状態や凝固偏析状態の影響を受けると考えられる。

## 5.2 後通電による偏析緩和

大きなナゲットを前提とし、ナゲット形成後、冷却時間において再び通電すること（以下、後通電と表記する）によって継手の剥離強度を積極的に向上することができる。

数サイクルの冷却時間後に短い後通電を行うことで偏析元素を拡散させ、溶接金属の靱性改善を行う手法が短時間偏析緩和後通電である。この手法では板厚に応じて0.04s~0.12s程度の冷却時間を設け、溶接電流の90%程度の電流を0.1s~0.2s間通電する。浜谷ら<sup>38)</sup>はこの後通電により、1.5GPa級HS鋼板継手のCTSが向上することを示した。一方谷口ら<sup>39,40)</sup>も通電パターンは違うものの、後通電によりCTSが向上することを報告している。CTSが向上する理由として図13に示す

ようにPの凝固偏析緩和によるナゲット端部の靱性向上<sup>38,41)</sup>があげられる。

後通電を行うと軟化領域が拡大する。軟化領域があるところが「ばね」として働き、外力を分散してナゲットに伝えることで応力集中を低減させる効果が期待される。しかしこれによるCTS向上効果は小さい<sup>27,42,43)</sup>。一方岡田ら<sup>44)</sup>は短時間での溶接によりナゲット端近くに軟化が生じる場合、通常条件に比べCTSが40%近く向上したことを報告している。この結果は軟化領域の有無がCTSに影響を与えるのではなく、その位置が大事であることを示している。

古迫ら<sup>45)</sup>は熱伝導方程式を用いて凝固偏析緩和に必要な後通電時間を検討している。すなわち後通電時間は鋼板が厚いほど長くする必要があり、板厚比の2乗から3乗に比例させる必要がある。

渡辺ら<sup>31)</sup>は1.5GPa級HS鋼板 (t2.0mm) のスポット溶接部より試験片を切り出し、鋼板界面方向の破壊靱性値を測定した。そして後通電を施して凝固偏析が緩和されると、確かに破壊靱性値 ( $J_c$ ) が向上したことを確認している。また若林ら<sup>46)</sup>は後通電有無の十字継手をそれぞれ30体作成し、後通電によりCTSの平均値が向上するとともに標準偏差が小さくなることを報告している。

## 5.3 オートテンパの促進

図14<sup>15)</sup>は3鋼種の継手の十字引張試験後の破断部断面を示す。鋼A (0.08C) では後通電をしなくてもプラグ破断になる。鋼B (0.18C) では前節の短時間後通電を行うことによってプラグ破断となった。しかし鋼C (0.21C) では短時間の後通電では十分な効果が得られなかった。しかし図15<sup>47)</sup>に示すように、後通電時間を長くすることによってCTSを50%程度向

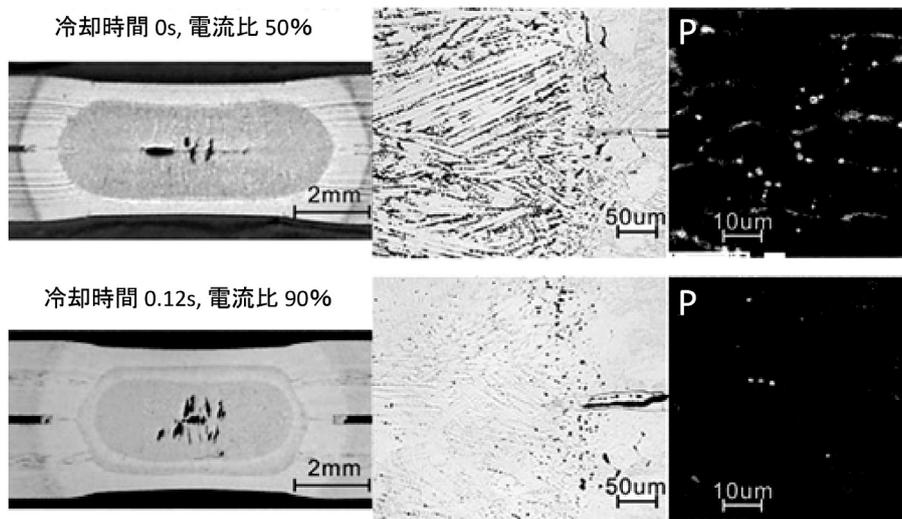
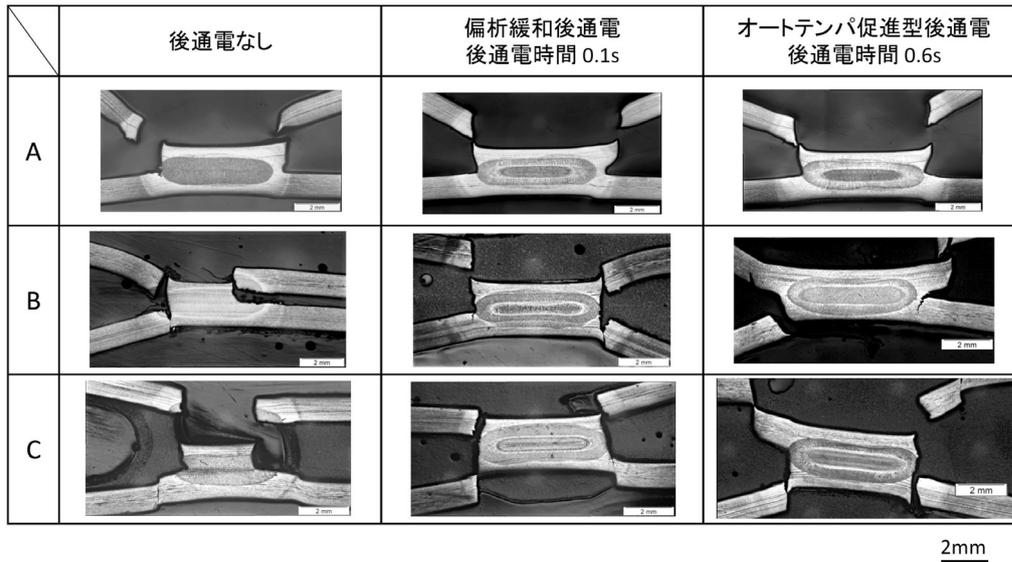
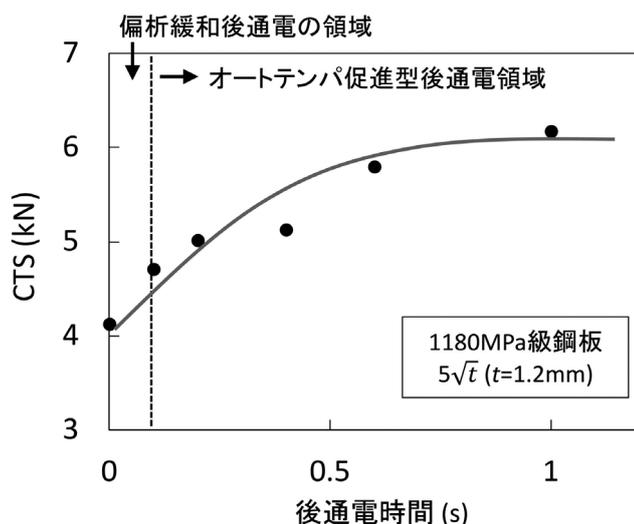


図13 短時間後通電による凝固偏析の緩和効果<sup>38)</sup>

図14 鋼種と後通電方法による破断形式の変化<sup>15)</sup>図15 後通電時間の延長によるCTSの向上<sup>47)</sup>

上させることができた。鋼Cについてスポット溶接部の組織を調べたところ、0.1sの後通電では後通電なしと明確な違いは認められないが、0.6sの後通電では炭化物の析出量が明らかに増えていた<sup>47,48)</sup>。旧 $\gamma$ 粒径が大きくなることから、この現象は長めの後通電によってMs点が上昇し、オートテンパが促進された結果と考えられた。その結果HAZの靱性が向上して図14に示したように延性的なプラグ破断となり、かつCTSが向上したと考えられる。この短時間冷却・中時間後通電によるオートテンパ促進型の後通電法は、偏析緩和後通電だけではCTSの向上が十分ではない、CやMn等の添加元素量が多い場合に有効である。

#### 5.4 テンパ処理による剥離強度の向上

テンパ処理後通電は古くから知られた手法である。本通電終了後、十分長い冷却時間を設けて電極抜熱により溶接部を焼入れ、その後通電して溶接部を焼戻す。冷却に比較的時間が必要となるが、ナゲットを大きくしても剥離強度が高くない材料に対して大きな効果が得られる。

## 6 おわりに

本稿では、スポット溶接について要約して紹介した。アーク溶接、レーザー溶接および摩擦攪拌接合については西山記念技術講座のテキストをご覧ください。幸いです。

#### 参考文献

- 1) 松井仁志：溶接学会誌, 69 (2000) 8, 622.
- 2) 浜田真司監修：季刊新日鉄住金, 8 (2014), 6.
- 3) 樋口健治：自動車技術, 41 (1987) 1, 19.
- 4) 林央：58 (2017) 673, 99.
- 5) 岸田宏司：ふえらむ, 2 (1997) 9, 679.
- 6) 秋末治, 羽田隆司：新日鉄技報, 354 (1994), 1.
- 7) 高橋学：鉄と鋼, 100 (2014) 1, 82.
- 8) 上西朗弘：溶接学会誌, 82 (2013) 7, 32.
- 9) 橋本俊一：自動車技術, 54 (2000) 1, 39.
- 10) 勝倉誠人：工業材料, 55 (2007) 6, 44.
- 11) 樽井大志：溶接学会誌, 84 (2015) 6, 458.
- 12) 末広正芳, 真木純, 楠見和久, 大神正浩, 宮腰寿拓：新日鉄技報, 378 (2003), 15.
- 13) 鈴木貴之：素形材, 55 (2014) 7, 2.

- 14) 佐藤登：表面技術, 44 (1993) 10, 795.
- 15) 鳥塚史郎, 高木節雄, 瀬沼武秀：しなやかで強い鉄鋼材料, エヌ・ティ・エス, (2016), 271.
- 16) 松山欽一, 高橋靖雄, 長谷川和芳：抵抗溶接の基礎と実際, 産報出版, (2011), 228, 29, 19, 27, 232.
- 17) 抵抗溶接教育ポスター, 日本溶接協会・電気溶接機部会編, (1994)
- 18) 近藤正恒：溶接学会誌, 79 (2010) 8, 750.
- 19) 瀬渡賢：溶接学会誌, 72 (2003) 7, 575.
- 20) 溶接学会 軽構造接合加工研究委員会：薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接, 産報出版, (2008), 35, 88.
- 21) 松井翔, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 99 (2016), 28.
- 22) 棕本厚司, 新明高史, 菊池陵, 福本学, 内原正人, 福井清之：溶接講概, 79 (2006), 382.
- 23) 西田貴之, 伊與田宗慶：溶接講概, 98 (2016), 144.
- 24) 百合岡信孝：溶接学会誌, 61 (1992) 4, 288.
- 25) 楠見和久, 真木純, 及川初彦, 末広正芳：溶接学会誌, 78 (2009) 6, 537.
- 26) 及川初彦, 村山元, 崎山達也, 高橋靖雄, 石川忠：新日鉄技報, 385 (2006), 36.
- 27) 池田倫正：溶接学会誌, 84 (2015) 6, 441.
- 28) 貞末照輝, 伊木聡, 谷口公一, 池田倫正, 大井健次：溶接学会論文集, 32 (2014) 2, 64.
- 29) 渡辺史徳, 古迫誠司, 浜谷秀樹, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接構造シンポジウム2011講演論文集, (2011), 271.
- 30) 渡辺史徳, 古迫誠司, 若林千智, 宮崎康信, 上田秀樹, 野瀬哲郎：溶接講概, 93 (2013), 324.
- 31) 渡辺史徳, 古迫誠司, 若林千智, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接講概, 92 (2013), 168.
- 32) 石田欽也, 宮崎康信, 渡辺史徳：溶接講概, 100 (2017), 38.
- 33) 若林千智, 渡辺史徳, 岡田 徹, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 92 (2013), 74.
- 34) 岡田徹, 内原正人, 福井清之, Sullivan Smith, Nick den Uijl, Tony van der Veldt：溶接講概, 83 (2008), 4.
- 35) 岡田徹, 内原正人, 福井清之, Sullivan Smith, Nick den Uijl, Tony van der Veldt：溶接講概, 86 (2010), 106.
- 36) 峰松伸行, 澤西央海, 小椋智, 廣瀬明夫, 谷口公一, 池田倫正, 大井健次, 安田功一：溶接講概, 91 (2012), 300.
- 37) 古迫誠司, 宮崎康信, 濱谷秀樹, 秋庭義明：溶接学会論文集, 33 (2015) 2, 133.
- 38) 浜谷秀樹, 渡辺史徳, 宮崎康信, 田中智仁, 真木純, 及川初彦, 野瀬哲郎：溶接講概, 89 (2011), 44.
- 39) 谷口公一, 沖田泰明, 池田倫正, 遠藤茂：溶接講概, 87 (2010), 96.
- 40) 谷口公一, 松田広志, 池田倫正, 大井健次：溶接学会論文集, 32 (2014) 3, 164.
- 41) 谷口公一, 池田倫正, 遠藤茂：溶接講概, 90 (2012), 240.
- 42) 谷口公一, 貞末照輝, 伊木聡, 池田倫正, 遠藤茂：溶接講概, 89 (2011), 4.
- 43) 渡辺史徳, 古迫誠司, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接講概, 90 (2012), 238.
- 44) 岡田徹, 上田秀樹, 泰山正則, 内原正人, 福井清之：溶接講概, 90 (2012), 226.
- 45) 古迫誠司, 宮崎康信, 濱谷秀樹, 秋庭義明：溶接学会論文集, 33 (2015) 2, 160.
- 46) 若林千智, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 95 (2014), 338.
- 47) 若林千智, 泰山正則, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 96 (2015), 38.
- 48) C. Wakabayashi, S. Fyruako and Y. Miyazaki：Science and Technology of Welding and Joining, 20 (2015) 6, 468.

(2019年5月21日受付)

## 第229・230回西山記念技術講座「鋼材の性能を引き出す溶接技術の最先端」テキスト販売中

本稿の講演が掲載された上記テキスト(会員7,047円(税別))を販売しています。

ご注文方法は、本会ホームページでご確認いただくか、下記お問い合わせ先にご連絡下さい。

<https://www.isij.or.jp/publication/books/purchase/>

お問い合わせ先：レタープレス(株) 書籍販売事業部 稲留(高橋、加清)

TEL：03-5817-8617 FAX：03-5817-8618 E-mail：subsals@letterpress.co.jp

## 会員へのお知らせ目次

行事等予定	651頁
総合	
第29回日本金属学会・日本鉄鋼協会奨学賞の推薦校募集要項	654頁
「鉄と鋼」第107巻第12号特集号「インフラ構造物の経年劣化に対する維持管理の最適化に向けて」原稿募集のご案内	654頁
「鉄と鋼」第108巻第8号特集号「高纯净度合金鋼溶製」原稿募集のご案内	655頁
「ISIJ International」特集号「Lamellar structure in structural metallic material and its mechanical property (構造用金属材料における層状組織とその力学特性)」原稿募集のご案内	655頁
「ISIJ International」特集号「Advanced Carbon Utilization Technologies and Processes for Sustainably Prosperous Society (持続可能な豊かな社会のための先進炭素利用技術とプロセス)」原稿募集のご案内	656頁
人材募集案内	656頁
ブックレビュー	659頁
次号目次案内	657頁
会員欄 (入会者・死亡退会者一覧)	659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。行事等の詳細は、本会ホームページ、★印はイベントカレンダーリンク先URLをご参照ください。他団体主催の行事は中止や延期になっていることもありますので、主催者等にご確認願います。

	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
<b>2020年10月</b>			
1, 2日	鉄鋼工学セミナー「精錬プロセス解析専科」(大阪)＜中止＞	日本鉄鋼協会	日本製鉄(株) 太田光彦 Tel. 0479-46-5510 ohta.2hx.mitsuhiko@jp.nipponsteel.com
2日	★第2回粉末冶金入門講座(愛知)	粉体粉末冶金協会	事務局 Tel. 075-721-3650 info@jspm.or.jp
2日	関東地区 2021年「鉄鋼技能功績賞」受賞候補者の推薦募集締切(8号532頁)	日本鉄鋼協会	総務グループ Tel. 03-3669-5931
6日	第72回白石記念講座「進化するポリマー -自動車における金属材料との共存共栄-」(東京 6号367頁)＜延期＞	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
9日	★第83回技術セミナー(東京)＜延期＞	腐食防食学会	Tel. 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp
13日	★第4回EBSD法による損傷評価講習会(京都)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimur@jsms.jp
13, 14日	★第13回材料の衝撃問題シンポジウム《オンライン開催》	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimur@jsms.jp
13～16日	★第6回材料WEEK(京都)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimur@jsms.jp
14日	第241回西山記念技術講座「最近の電気炉技術の進歩—平成30年間を振り返る—」(大阪 6号368頁)＜延期＞	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
15日	★第16回フラクトグラフィシンポジウム《オンライン開催》	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimur@jsms.jp
15日	★センシング技術応用セミナー～いよいよ実用化段階！～AIを用いた応用技術の動向と展望(大阪)	センシング技術応用研究会	Tel. 0725-51-2534 sstj@dantai.tri-osaka.jp
14, 15日	★第48回日本ガスタービン学会定期講演会《オンライン開催》	日本ガスタービン学会	日本ガスタービン学会事務局 Tel. 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org
15, 16日	鉄鋼工学セミナー「凝固専科」(福岡)＜中止＞	日本鉄鋼協会	JFEスチール(株) 外石圭吾 Tel. 084-945-3615 k-toishi@jfe-steel.co.jp
16, 17日	★第83回塑性加工技術フォーラム《オンライン開催》	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
19～21日	第28回鉄鋼工学アドバンスセミナー(千葉)＜中止＞	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
21～23日	★「研究者、技術者のための、応用数学」～科学、工学に活かす数理的思考～《オンライン開催》	神奈川県立産業技術総合研究所(KISTEC)	Tel. 044-819-2033 ed@newkast.or.jp
22日	第242回西山記念技術講座「最近の電気炉技術の進歩—平成30年間を振り返る—」(東京 6号368頁)＜延期＞	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
22, 23日	★第168回塑性加工工学講座《オンライン開催》	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
26, 27日	★第240回塑性加工技術セミナー《オンライン開催》	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
26～28日	★第67回材料と環境討論会《オンライン開催》	腐食防食学会	Tel. 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp

	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
27, 28日	★第57回石炭科学会議《オンライン開催》	日本エネルギー学会	網沢洋二 Tel. 03-3834-6456 sekitan57sanka@jie.or.jp
27~30日	○CUUTE-1 The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment (奈良) <2021年12月14~17日に延期>	日本鉄鋼協会	CUUTE-1組織委員会 cuute-1@nta.co.jp
27~30日	★知能化プレス加工技術“スマートなものづくり”のための基礎理論から深層学習の適用可能性までを知る(東京)	神奈川県立産業技術総合研究所 (KISTEC)	Tel. 044-819-2033 ed@newkast.or.jp
28日	★「現場の硬さ試験」講習会《オンライン開催》	日本材料試験技術協会	Tel. 03-5289-7885 info@mtraj.jp
28, 29日	★第56回X線分析討論会《オンライン開催》	日本分析化学会X線分析研究懇談会	大阪市立大学複合先端研究機構 吉田朋子・山本宗昭 Tel. 06-6605-3627 tyoshida@osarina.osaka-cu.ac.jp
28~30日	★第41回日本熱物性シンポジウム《オンライン開催》	日本熱物性学会	日本熱物性学会事務局 Tel. 086-251-8046 jstp@okayama-u.ac.jp
30日	[ISIJ International]特集号「Development and Comprehension of Novel Experimental Technology for High Temperature Processing (高温プロセスのための新規実験技術の開発と解釈)」原稿募集締切(3号182頁)	日本鉄鋼協会	九州大学 大野光一郎 Tel. 092-802-2938 ohno.ko-ichiro.084@m.kyushu-u.ac.jp
<b>2020年11月</b>			
11月5日	第29回日本金属学会・日本鉄鋼協会奨学賞の推薦校募集締切(本号654頁)	日本金属学会 日本鉄鋼協会	日本金属学会 奨学賞係 Tel. 022-223-3685 gaffair@jim.or.jp
5, 6日	★第14回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム-SDGsを目指す電磁波エネルギー応用研究と研究者の未来を拓く-《オンライン開催》	日本電磁波エネルギー応用学会	事務局 佐藤 Tel. 03-3414-4554 office@jemea.org
6日	★第93回レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 宮智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
6~8日	★軽金属学会第139回秋期大会《オンライン開催》	軽金属学会	Tel. 03-3538-0232 jilm1951@jilm.or.jp
8~11日	★第49回結晶成長国内会議(JCCG-49)《オンライン開催》	日本結晶成長学会	JCCG-49担当 Tel. 070-5047-3339 jccg-49@jacg.jp
9~11日	★日本中性子科学会第20回年会《オンライン開催》	日本中性子科学会	Tel. 029-282-0040 jsns2020@imr.tohoku.ac.jp
11~13日	修士・博士学生向け「第14回学生鉄鋼セミナー 材料コース」(広島) <中止>	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
12, 13日	★第46回腐食防食入門講習会(東京) <中止>	腐食防食学会	Tel. 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp
14, 15日	★第71回塑性加工連合講演会《オンライン開催》	日本塑性加工学会	湖辺淳子 Tel. 03-3435-8301 fuchibe@jstp.or.jp
16日	[ISIJ International] 特集号「Recent Progress in Inclusion/Precipitate Engineering (介在物/析出物エンジニアリングにおける最近の進歩)」原稿募集締切(12号822頁)	日本鉄鋼協会	富山大学 小野英樹 Tel. 076-445-6876 ono@sus.u-toyama.ac.jp
16~19日	ISSS-2020 The 6th International Symposium on Steel Science (京都) <2021年11月15~18日に延期>	日本鉄鋼協会	豊橋技術科学大学 戸高義一 todaka@me.tut.ac.jp
17日	★エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム2020 (EcoDePS 2020)《オンライン開催》	エコデザイン学会連合	事務局(イトレイ(株)) Tel. 080-1315-3632 secretariat@ecodenet.com
18~20日	★国際粉体工業展東京2020(東京)	日本粉体工業技術協会	(株)シー・エヌ・ティ Tel. 03-5297-8855 info2020@powtex.com
19~21日	★日本表面真空学会学術講演会《オンライン開催》	日本表面真空学会	Tel. 03-3812-0266 taikai2020@jvss.jp
21, 22日	★第63回自動制御連合講演会《オンライン開催》	計測自動制御学会	富山大学 平田研二 Tel. 03-3292-0314 rengo63@sice.or.jp
26日	★第2回粉末冶金基礎講座(京都)	粉体粉末冶金協会	事務局 Tel. 075-721-3650 info@jspm.or.jp
26~12月1日	★2020合同WEB討論会 ~第52回溶融塩科学討論会、第44回電解技術討論会・ソーダ工業技術討論会、第40回水素エネルギー協会大会~《オンライン開催》	合同討論会実行委員会(水素エネルギー協会、電解科学技術委員会、溶融塩委員会)	水素エネルギー協会大会事務局 Tel. 045-339-3872 2020hess-ecs@hess.jp
26, 27日	鉄鋼工学セミナー「材質制御専科」(東京 9号593頁 申込締切10月23日)	日本鉄鋼協会	日本製鉄(株) 明石透 Tel. 070-3914-4741 akashi.m5b.tohru@jp.nipponsteel.com
27日	★第2回粉末冶金実用講座(京都)	粉体粉末冶金協会	事務局 Tel. 075-721-3650 info@jspm.or.jp

	行事(開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
27日	★SHIBUYA QWS東京大学イベント「材料分野におけるSDGsシンポジウム」@渋谷QWS+ライブストーリーミング配信(東京)	東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX金属寄付ユニット)	岡部研究室 シンポジウム事務局 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
<b>2020年12月</b>			
1, 2日	★第30回傾斜機能材料シンポジウム(徳島)	傾斜機能材料研究会	長谷崎和洋 Tel. 088-656-7373 hasezaki@tokushima-u.ac.jp
2~4日	修士・博士学生向け「第14回学生鉄鋼セミナー 製鉄・製鋼(資源・環境・エネルギー)コース」(兵庫)〈中止〉	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-3669-5933
2~4日	★高機能金属展(千葉)	リードエグジビジョンジャパン(株)	弟子丸英樹 Tel. 03-3349-8568 deshimaruh@reedexpo.co.jp
2~4日	★第61回高圧討論会《オンライン開催》	日本高圧力学会	事務局 Tel. 070-5545-3188 touronkai61@highpressure.jp
3, 4日	★第58回高温強度シンポジウム(和歌山)(予定)	日本材料学会	Tel. 075-761-5321 jimuj@jsms.jp
17, 18日	★第54回X線材料強度に関するシンポジウム《オンライン開催》	日本材料学会	事務局 Tel. 075-761-5321 jimuj@jsms.jp
<b>2021年1月</b>			
8日	★第94回レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 宮壽智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
23日	★第26回高専シンポジウムin Yonago《オンライン開催》	高専シンポジウム協議会	高専シンポジウム実行委員会 Tel. 0859-24-5160 office365@kosensympo.onmicrosoft.com
<b>2021年2月</b>			
1~9日	★第51回2021計測制御技術会議《オンライン開催》	日本能率協会	Tel. 03-3434-1401 tech-con@jma.or.jp
24, 25日	★第10回 次世代ものづくり基盤技術産業展-TECH Biz EXPO 2021-(愛知)	名古屋市国際見本市委員会	Tel. 052-735-4831
28日	[ISIJ International] 特集号「Advanced Carbon Utilization Technologies and Processes for Sustainably Prosperous Society」原稿募集締切(10号661頁)〈2022年2月28日締切に延長〉	日本鉄鋼協会	北海道大学 能村貴宏 Tel. 011-706-6842 nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp
28~3月4日	★第19回材料の集合組織に関する国際会議(ICOTOM19)(大阪)	ICOTOM19実行委員会	info@icotom19.com
<b>2021年3月</b>			
12日	★第95回レアメタル研究会(東京)	東京大学生産技術研究所	岡部徹研究室 宮壽智子 Tel. 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp
31日	「鉄と鋼」第107巻第12号特集号「インフラ構造物の経年劣化に対する維持管理の最適化に向けて」原稿募集締切(本号654頁)	日本鉄鋼協会	北海道大学 坂入正敏 Tel. 011-706-7111 msakairi@eng.hokudai.ac.jp
<b>2021年4月</b>			
30日	[ISIJ International] 特集号「Lamellar structure in structural metallic material and its mechanical property (構造用金属材料における層状組織とその力学特性)」原稿募集締切(本号655頁)	日本鉄鋼協会	国立研究開発法人物質・材料研究機構 木村勇次 Tel. 029-859-2123 kimura.yuuji@nims.go.jp
<b>2021年6月</b>			
14~18日	★5th ESTAD(European Steel Technology and Application Days) The Brewery Conference Centre Stockholm, Sweden	Jernkontoret	Bo Larsson Tel. +46 18 67 10 34 estad2021@akademikonferens.se
<b>2021年11月</b>			
15~18日	ISSS-2021 The 6th International Symposium on Steel Science(京都)	日本鉄鋼協会	豊橋技術科学大学 戸高義一 todaka@me.tut.ac.jp
28日~12月2日	★The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(香川)	日本表面真空学会	事務局 上村恵美子 Tel. 03-3812-0266 iss9@jvss.jp
30日	「鉄と鋼」第108巻第8号特集号「高純度合金鋼溶製」原稿募集締切(本号655頁)	日本鉄鋼協会	東北大学 三木貴博 Tel. 022-795-7307 miki@material.tohoku.ac.jp
<b>2021年12月</b>			
14~17日	○CUUTE-1 The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment(奈良)	日本鉄鋼協会	CUUTE-1組織委員会 cuute-1@nta.co.jp
<b>2022年2月</b>			
28日	[ISIJ International] 特集号「Advanced Carbon Utilization Technologies and Processes for Sustainably Prosperous Society (持続可能な豊かな社会のための先進炭素利用技術とプロセス)」原稿募集締切(本号656頁)	日本鉄鋼協会	北海道大学 能村貴宏 Tel. 011-706-6842 nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp

# 総合

## 第29回日本金属学会・日本鉄鋼協会奨学賞の 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いたします。

下記要項によりご応募下さい。

### 奨学賞募集要項

#### 1. 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。

#### 2. 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。

#### 3. 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。
- ・下記の全国大学材料関係教室協議会の参加大学には、推薦校の資格が与えられます。

#### 4. 手続き：所定の応募用紙（本会HPよりダウンロードできます）により必要事項を記入の上、ご応募下さい。

#### 5. 応募締切：2020年11月5日（木）

#### 6. 申込問合先：

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32  
（公社）日本金属学会 奨学賞係  
TEL. 022-223-3685 FAX. 022-223-6312  
Email: gaffair@jim.or.jp

#### 7. 2020年全国大学材料関係教室協議会の参加大学（35校）

大学名			
1	北海道大学	19	香川大学
2	室蘭工業大学	20	愛媛大学
3	岩手大学	21	九州大学
4	秋田大学	22	九州工業大学
5	東北大学	23	長崎大学
6	茨城大学	24	熊本大学
7	筑波大学	25	大阪府立大学
8	東京大学	26	兵庫県立大学
9	東京工業大学	27	千葉工業大学
10	横浜国立大学	28	東京理科大学
11	長岡技術科学大学	29	芝浦工業大学
12	富山大学	30	東海大学
13	豊橋技術科学大学	31	金沢工業大学
14	名古屋大学	32	関西大学
15	名古屋工業大学	33	近畿大学
16	京都大学	34	早稲田大学
17	大阪大学	35	群馬大学
18	島根大学		

## 「鉄と鋼」第107巻第12号特集号「インフラ構造物の経年劣化に対する維持管理の最適化に向けて」原稿募集のご案内（投稿締切日：2021年3月31日）

社会インフラの戦略的な維持管理や補修・更新が求められています。鋼構造社会インフラの長寿命化や維持管理コストの低減は、機能低下を引き起こす腐食部位の環境と腐食速度を把握し、環境改善等の適切な補修・更新を実施することで実現されます。そのため、様々な環境における腐食に関する研究や環境センシング、それらに基づく数理解析が実施されています。

本会においても「腐食劣化解析に基づく鋼構造物維持の最適化」研究会が設立され、活発に研究が行われています。そこで本特集号では、鋼構造物の長寿命化や維持管理を目的として実施され、まとめられた最新の基礎・応用に関する成果論文ならびにレビュー論文を広く募集し、インフラ構造物の経年劣化に対する維持管理の最適化に関する最新の貴重な情報源を構築することを目的とします。

なお、本特集号は、「腐食劣化解析に基づく鋼構造物維持の最適化」研究会の研究成果を広く発信する場にもさせて頂くことを申し添えます。

1. **スコープ**：様々な環境における腐食挙動解析や電気化学計測、環境センシング技術、数理解析法を含めた鋼構造物維持の最適化に関する最新の研究を広く取り上げる。
2. **投稿締切**：2021年3月31日（水）必着  
（締切日を過ぎて投稿された原稿は通常の投稿原稿として受け付けます）
3. **発刊予定**：「鉄と鋼」Vol.107, No.12（2021年12月1日発刊）
4. **投稿規定、審査方法**：投稿規定は、本会Webサイト掲載の「鉄と鋼」投稿規程、執筆要領をご参照ください。  
<https://www.isij.or.jp/Teikikanko/0816.pdf>  
<https://www.isij.or.jp/Teikikanko/0817.pdf>  
審査は通常の審査方法に準拠します。
5. **企画世話人・問合せ先**：坂入正敏 北海道大学大学院工学研究院 准教授  
TEL. 011-706-7111 E-mail: msakairi@eng.hokudai.ac.jp
6. **原稿送付先**：下記サイトの電子投稿画面からご投稿ください。  
<http://mc.manuscriptcentral.com/tetsutohagane>  
電子投稿の操作に関しご不明の点は、本会編集グループにご連絡ください。  
(TEL. 03-3669-5933 E-mail: editol@isij.or.jp)

**「鉄と鋼」第108巻第8号特集号「高纯净度合金鋼溶製」原稿募集のご案内（投稿締切日：2021年11月30日）**

合金鋼は優れた特性を有し、幅広い鉄鋼材料に使用されており、例えばステンレス、耐熱鋼、ハイテン材、工具鋼などが挙げられます。合金鋼を溶製する際の挙動は、普通鋼の溶製と異なることが多く、高纯净度の合金鋼を溶製するためには、精錬工程中の諸現象を理解し、プロセスを制御することが必要です。しかしながら、普通鋼と比較すると生産量が少なく成分系が複雑となり、共通のプラットフォームを構築しにくいことから、本会において研究会活動・討論会活動は、長く行われてきませんでした。そのような状況の中で、「スラグ・介在物制御による高纯净度クロム鋼溶製」研究会（高温プロセス部会）が3年間活動してきました。

本号はその研究会の成果報告はもちろんのこと、高纯净度合金鋼溶製に関する研究成果を取りまとめ、本会や日本およびアジア地域の鉄鋼業を発展させることを目的として企画いたしました。該当分野の原稿を広く募集いたしますので、奮ってご応募ください。

1. **スコープ**：高纯净度合金鋼溶製に関する研究論文、寄書、レビューを募ります。
2. **投稿締切**：2021年11月30日（火）必着  
（締切日を過ぎて投稿された原稿は通常の投稿原稿として受け付けます）
3. **発行予定**：「鉄と鋼」Vol. 108, No. 8（2022年8月1日発行）
4. **投稿規程、審査方法**：投稿規定は、本会ホームページ掲載の「鉄と鋼」投稿規程、執筆要領をご参照ください。  
<https://www.isij.or.jp/Teikikanko/0816.pdf>  
<https://www.isij.or.jp/Teikikanko/0817.pdf>  
審査は通常の審査方法に準拠します。
5. **企画世話人・問合せ先**：三木 貴博 東北大学 大学院工学研究科 准教授  
TEL. 022-795-7307、E-mail: miki@material.tohoku.ac.jp
6. **原稿送付先**：下記サイトの電子投稿画面からご投稿ください。  
<http://mc.manuscriptcentral.com/tetsutohagane>  
電子投稿の操作に関し、ご不明の点は、本会編集グループにご連絡ください。  
(Tel. 03-3669-5933 E-mail: editol@isij.or.jp)

**「ISIJ International」特集号「Lamellar structure in structural metallic material and its mechanical property（構造用金属材料における層状組織とその力学特性）」原稿募集のご案内**

鉄鋼材料のパーライト組織やラスマルテンサイト組織に代表される層状組織は、これまでに構造金属材料に広く活用されてきた。例えば、パーライト組織を冷間伸線加工して得られるピアノ線は鉄鋼材料の中で最も高い引張強さを有し耐遅れ破壊特性にも優れる。また、近年では組織解析技術や計算科学の著しい進歩により様々な層状組織の特徴やその形成機構、ならびに層状組織を有する構造用金属材料の力学特性の発現機構も明らかになってきた。したがって、得られた知見をまとめて、材料開発にフィードバックすることは有効である。

そこで、本特集号では、パーライト組織やラスマルテンサイト組織に限らず、凝固、熱処理、加工などで形成される様々な層状組織（積層組織を含む）の形成機構や制御手法、キャラクターゼーション、力学特性などをまとめた最新の基礎・応用研究の成果論文ならびにレビュー論文を広く募集する。これにより、高性能な構造用金属材料の開発や応用に寄与する最新で貴重な情報源を提供することを目的とする。

1. **スコープ**：層状組織（積層組織を含む）の形成機構や制御手法、キャラクターゼーション、力学特性ならびにこれらの応用に関する論文、ノート、レビューを募ります。
2. **投稿締切**：2021年4月30日（金）必着  
（締切日を過ぎて投稿された原稿は通常の投稿原稿として受け付けます）
3. **発行予定**：「ISIJ International」Vol.62（2022年），No.2（2022年2月発行）
4. **投稿規程、審査方法**：投稿規程は論文誌投稿規程（本会ホームページ<http://www.isijint.net/jp/submission/>）をご参照下さい。  
審査は通常の審査方法に準拠します。
5. **企画世話人・問合せ先**：木村 勇次 国立研究開発法人物質・材料研究機構 主席研究員  
TEL/FAX. 029-859-2123、E-mail: kimura.yuuji@nims.go.jp
6. **原稿送付先**：下記サイトの電子投稿画面からご投稿ください。  
<http://mc.manuscriptcentral.com/isijint>  
電子投稿の操作に関し、ご不明の点は、本会編集グループにご連絡ください。  
(Tel. 03-3669-5933 E-mail: editol@isij.or.jp)

## 「ISIJ International」特集号「Advanced Carbon Utilization Technologies and Processes for Sustainably Prosperous Society (持続可能な豊かな社会のための先進炭素利用技術とプロセス)」原稿募集のご案内

(特集号発行およびスケジュールが変更となりました。下線部分が変更となります。)

国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出を地球温暖化の要因と捉え、2014 年に気温上昇 2.0℃ 以下抑制、さらに 2018 年には 1.5℃ 以下抑制のより厳しい措置を提言している。日本政府は IPCC に呼応し 2050 年 CO<sub>2</sub> 排出削減 80% を提示している。日本の鉄鋼業をはじめ製造業部門は世界最高の省エネルギー、CO<sub>2</sub> 排出抑制を実現している。しかし、引き続きの活動には時代の要請に応じたさらなる低炭素化が求められている。

炭素エネルギーはエクセルギーが高く産業の効率的な操作のためのエネルギー源として必須であり、CO<sub>2</sub> 排出抑制に応じた炭素資源の革新的な有効利用技術が重要と予想される。そこで、本特集では鉄鋼業、化学産業ならびに製造業の炭素資源の究極的な利活用をゴールとして、国内外の知を結集し、新たな低炭素技術、低炭素プロセスの展開の指針提示を目的に企画する。トピックスとしては製鉄業ならびに製造業等における炭素資源の利活用技術、利活用プロセス、CO<sub>2</sub> 回収、CO<sub>2</sub> 資源化による一酸化炭素、炭素、メタン、炭化水素等の製造、産業利用。プロセス全体を包括した炭素エネルギーシステム評価、ライフサイクル評価を包含する。日本の鉄鋼業、化学産業は炭素資源の有効利用には知見が深く、世界をリードしており、低炭素分野の技術進展に対して貢献することが期待される。本特集号では、上記に関する最新の研究成果やレビュー論文等を幅広く募集する。なお一般公募論文に加えて、本特集号では第 1 回地球環境のための炭素の究極利用技術に関するシンポジウム (CUUTE-1, The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment) (2021 年 12 月 14 日～17 日開催) で発表された優れた論文についても投稿を勧誘する。

1. **スコープ**：鉄鋼業、化学産業ならびに製造業の炭素資源の究極的な利活用をゴールに国内外の知を結集し、新たな技術展開の指針を提示することを目的に企画する。低炭素製鉄プロセスおよび産業プロセス、低炭素エネルギープロセス、CO<sub>2</sub> 回収、CO<sub>2</sub> 利活用、CO<sub>2</sub> 再資源化、カーボンニュートラル技術、低炭素システム評価・ライフサイクル評価、これに関する最新の研究を広く取り上げる。
2. **投稿締切**：2022 年 2 月 28 日 (月) 必着  
(締切日を過ぎて投稿された原稿は通常の投稿原稿として受け取ります)
3. **発行予定**：「ISIJ International」Vol.62 (2022 年) No.12 (2022 年 12 月発行)
4. **投稿規程、審査方法**：投稿規程は論文誌投稿規程 (本会ホームページ <http://www.isijint.net/jp/submission/>) をご参照下さい。審査は通常の審査方法に準拠します。
5. **企画世話人・問合せ先**：能村 貴宏・北海道大学エネルギー・マテリアル融合領域研究センター・准教授  
Phone: 011-706-6842, Fax: 011-726-0731, Email: nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp
6. **原稿送付先**：下記サイトの電子投稿画面からご投稿ください。  
<http://mc.manuscriptcentral.com/isijint>  
電子投稿の操作に関し、ご不明の点は、本会編集グループにご連絡ください。  
(Tel. 03-3669-5933 E-mail: editol@isij.or.jp)

## 人材募集案内

### 九州大学 大学院総合理工学研究院 物質科学部門 教授または准教授公募

**募集人員**：教授または准教授 1 名

**所 属**：九州大学 大学院総合理工学研究院 物質科学部門  
固体材料物性工学講座 材料構造制御学研究分野

**研究分野**：金属材料あるいは金属をベースとする複合材料の研究分野において、その固体材料の物性と構造およびそれらの制御に関する研究を実験、材料計算科学、あるいは両面から精力的に推進できる方。

**応募資格**：博士あるいは Ph. D. の学位を有すること。

**着任時期**：採用決定後のできるだけ早い時期。

**勤務形態**：常勤

**応募締切**：2020年11月2日 (月) 必着

**問合せ先**：〒816-858 福岡県春日市春日公園6-1

九州大学 大学院総合理工学研究院 物質科学部門  
教授 波多 聡

Phone：092-583-7580

E-mail：hata.satoshi.207@m.kyushu-u.ac.jp

**備 考**：詳細は、以下のホームページを参照ください。

<http://kobo.jimu.kyushu-u.ac.jp/pdf/20200812185617.pdf>

**次号目次案内**

\* 定期刊行物の掲載記事及び題目は変更になる場合があります。

**ふらむ Vol.25 (2020) No.11 掲載記事**

**Techno Scope**

金属組織の新しい観察方法

**連携記事**

X線トモグラフィーの最近の進歩と動向  
..... 戸田裕之、他(九州大学)

材料研究で活躍する3D光学顕微鏡  
..... 中山 誠((株) 中山電機)

EBSD法とIn-Situ加熱ステージの組合せによる鉄鋼材料組織変化の直接観察  
..... 鈴木清一((株)TSLソリューションズ)

**展望**

金属組織の新しい観察方法に関する今後の展望について  
..... 杉山昌章(大阪大学)

**入門講座**

**インフォマティクス入門-3**

材料工学における機械学習による順解析と逆解析  
..... 足立吉隆、他(名古屋大学)

**躍動**

組織シミュレーションと材料パラメータ推定  
..... 塚田祐貴(名古屋大学)

**解説**

FIB-SEMシリアルセクションング法による鉄鋼材料の3次元解析  
..... 金子賢治(九州大学)、他

鉄鋼材料の原子プローブ解析の現状  
..... 張 咏杰、他(東北大学)

**「鉄と鋼」 Vol.106 (2020) No.11 掲載記事**

**論文**

**鑄造・凝固**

真空下鑄包み法による鋼塊マクロ偏析防止技術の開発  
..... 磯部浩一

**力学特性**

コバルト含有高クロムフェライト鋼のクリープ強度と磁気特性の関係  
..... 山崎重人、他

SCM440鋼のギガサイクル疲労特性に及ぼすMnSの影響  
..... 古谷佳之

**物理的性質**

ベイズ推定による低温時効挙動からのフェライト中の炭素固溶限の評価  
..... 木下恵介、他

Si添加オーステナイト系ステンレス鋼における積層欠陥エネルギーに及ぼす窒素添加の影響  
..... 河原康仁、他

Direct-fitting/modified Williamson-Hall (DF/mWH) 法を用いた低炭素焼戻しマルテンサイト鋼の転位密度解析  
..... 増村拓朗、他

電気抵抗測定法によるマルテンサイト中の固溶炭素量の評価  
..... 増村拓朗、他

**境界領域**

Fe粒子分散ムライト複合セラミックスの自己治癒効果に対する熱処理温度の影響  
..... 丸岡大佑、他

**社会・環境**

硫酸あるいは硝酸溶液添加時のCaあるいはMgの水酸化物から調製したCaあるいはMg含有水溶液の緩衝作用  
..... 横山誠二、他

電気炉ガスと塩化カルシウムの反応による亜鉛の回収  
..... 佐藤広志、他

**寄書**

**分析・解析**

フェライト鋼におけるヤング率と弾性スティフネスの関係  
..... 高木節雄、他

**ISIJ International Vol.60 (2020) No.11 掲載記事**

**Regular Articles**

**Fundamentals of High Temperature Processes**

Solid-liquid interfacial energy for Fe-Cr alloy under temperature gradient from molecular dynamics simulation	K. Ueno <i>et al.</i>
Surface tension calculation of molten slag in SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO-MgO-FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> systems based on a statistical modelling approach	N. Wang <i>et al.</i>
Effect of steel-refractory reactions on removal of arsenic from molten steel with lanthanum addition	H. Wang <i>et al.</i>
Pre-reduction behaviour of manganese ores in H <sub>2</sub> and CO containing gases	D. Ngoy <i>et al.</i>

- Effect of sulfur in slag on dynamic change behavior of liquid iron/molten slag interfacial tension M. Suzuki *et al.*  
 Chemical thermodynamic insights on rare-earth magnet sludge recycling M.- E. Wagner *et al.*
- Ironmaking**
- Effect of titanomagnetite ironsand coal composite hot briquette on softening-melting performance of mixed burden under simulated blast furnace conditions J. Tang *et al.*  
 Phase composition and formation mechanism of slag crust in blast furnace H. Ma *et al.*  
 Reaction behaviors of various agglomerates in reducing the temperature of the thermal reserve zone of the blast furnace K. Higuchi *et al.*  
 Granulation behavior of an iron ore sintering mixture containing high grade pellet feed with different specific surface V. Oliveira *et al.*  
 Dissection investigation of forming process of titanium compounds layer in the blast furnace hearth K. Gao *et al.*  
 Reaction behaviors of mixed burdens consisting of pellets and sintered ores in an experimental blast furnace K. Higuchi *et al.*  
 Comprehensive technologies for iron ore sintering with a bed height of 1000mm to improve sinter quality, enhance productivity and reduce fuel consumption J. Zhang *et al.*  
 Influence of basicity on the viscosity and crystallization characteristics of chromium-containing high-titanium slag J. Ma *et al.*
- Steelmaking**
- A general model for solutes activity interaction parameters in dilute metallic solutions T. Ju *et al.*  
 Crystallization control for fluorine-free mold fluxes: effect of Na<sub>2</sub>O content on non-isothermal melt crystallization kinetics Q. Shu *et al.*  
 In situ phase analysis during self-sintering of BOS filter cake for improved recycling R. Longbottom *et al.*  
 Inclusion characteristic in tinsplate steel in rh refining and kinetics limitation of calcium transfer by refining slag X. Li *et al.*
- Casting and Solidification**
- Solidification Behavior of Ti-6Al-4V Alloy H. Mizukami *et al.*  
 Microstructure evolution and mechanical properties improvement in magnetic-controlled electroslag remelted bearing steel Q. Li *et al.*
- Instrumentation, Control and System Engineering**
- Fuel ratio optimization of blast furnace based on data mining X. Zhai *et al.*
- Forming Processing and Thermomechanical Treatment**
- Experimental and numerical investigation of the vibration characteristics in a hot plate rolling mill based on multibody dynamics L. Lim *et al.*  
 Numerical analysis for jet impingement and heat transfer law of self-excited pulsed nozzle F. Zhang *et al.*  
 Enhanced homogeneity of a flat-rolled wire in twinning-induced plasticity steel using the pass schedule design J.-K. Hwang
- Welding and Joining**
- Numerical modeling of the inclusion behavior during ac flash butt welding M. I. H. Siddiqui *et al.*
- Surface Treatment and Corrosion**
- Effects of solid-solute v on the phosphatability of hot-rolled steel sheets S. Furuya *et al.*  
 Relationship between morphology of Mn oxides simulated by ion plating and phosphatability of Mn-added high-strength cold-rolled steel sheets H. Masuoka *et al.*  
 Effect of microstructure at coating layer on fatigue strength in hot-dip galvanized steel K. Hasegawa *et al.*  
 Influence of soil particle size, covering thickness, and pH on soil corrosion of carbon steel R. Hirata *et al.*
- Transformations and Microstructures**
- Role of inclusion, microstructure and texture evolution in soft magnetic properties of Fe-6.9 wt%Si alloy with yttrium doping G. Cai *et al.*  
 Effects of concentrations of micro-alloying elements and hot-forging temperature on austenite grain structure formed during carburization of case-hardening steel G. Saito *et al.*  
 Recrystallization behavior and formation of  $\{411\}<148>$  grain from  $\alpha$ -fiber grains in heavily cold-rolled Fe-3%Si alloy M. Yasuda *et al.*
- Mechanical Properties**
- Heat treatment effect on the microstructure and tribological behaviour of a High Chromium Cast Iron with 0.6% of Niobium L. Faria *et al.*  
 Crack propagation behavior of impact fracture in case hardening steel subjected to combined heat treatment with excess vacuum carburizing and subsequent induction hardening K. Okada *et al.*  
 Microstructure, mechanical properties and wear resistance of low alloy abrasion resistant martensitic steel reinforced with TiC particles L. Huang *et al.*  
 Mechanism behind the onset of delamination in wire-drawn pearlitic steels M. Tanaka *et al.*  
 Availability of opal photonic crystal films for visualizing heterogeneous strain evolution in steels: Example of Lüders deformation Z. Yang *et al.*  
 Improvement of rigidity of super invar cast steel via austenite recrystallization induced by martensitic reversion N. Sakaguchi *et al.*

**New Materials and Processes**

Development of Fe-P-C-Cu immiscible amorphous alloys with liquid phase separation

T. Nagase *et al.*

**Note**

**Fundamentals of High Temperature Processes**

Application of electroextraction in removing copper from molten iron

Z. Lu *et al.*

会員欄

新規入会

岩田 圭一郎  
上平 明弘  
大石 輝希  
奥嶋 浩二  
川嶋 祐介

清村 一樹  
楠 銀河  
黒田 知暉  
砂場 敏行  
多賀 公則

高下 陽右  
坪田 英司  
中田 康  
中野 将  
中原 健

南波 正敏  
西 遥平  
朴 賢祐  
畠山 友孝  
半田 大朗

久田 光夫  
広瀬 尚史  
堀 功雅  
溝口 友樹

ご冥福をお祈り  
申し上げます。  
永浜 洋

**ブックレビュー**

**プラズマ分光法による環境試料の分析  
—ICP, DCP, MIP分析の基礎と実例—**

宮崎 章・藤森英治・田中 敦・吉永 淳 著  
(株)アグネ技術センター 2020年2月発行  
B5版並製 264頁 定価 5,600円+税

Tel.03-3409-5329 ISBN: 978-4-86707-000-0 C3043

本書は、日本鉄鋼協会に關係する技術者や研究者には ICPとして馴染みのあるプラズマ発光分析法を一つの手法として、様々なプラズマ分光法全般に關して基礎と実例の観点からまとめたものである。主に環境無機物質の分析をターゲットとしており、製鉄所において測定されている水質、土壌のみならず、生体試料などの測定方法についての解説がされている。また、本書では、それぞれの手法の実

測結果も同時に掲載されており、水質に關する測定結果の一例としては、日本における河川や温泉などの水質結果がまとめられている。今後、分析に従事する技術者のみならず、測定を依頼する関係者も一読することによって、新たな技術開発のヒントが隠されているかもしれない書籍の一つである。

(JFEスチール(株) スチール研究所 環境プロセス研究部 堤康一)

## 編集後記

本号で海外貨物鉄道を支えるレール材料が紹介されています。「鉄道」の文字を見ますと「鉄」の「道」であり「鉄」の重要性が現れた表現となっています。各国での「鉄道」の用語を調べてみると、蒸気機関が発明された英国では「railway」で軌道に注目した用語となっていますが、鉄道が早期から発展した欧州においては、フランスで「chemin de fer」、ドイツで「Eisenbahn」、イタリアで「ferrovie」、スペインで「ferroviario」と表現され、いずれも「鉄の道」であり、また、中国でも「鐵路」と表現されています。多くの国で「鉄の道」との表現で、鉄道システムにおいて鉄のレール材の重要性

に注目した用語であることが分かります。なお、本紙の名称「ふえらむ」も日本鉄鋼協会のホームページにも記載の通り、ラテン語の鉄「Ferrum」が語源となっています。(https://www.isij.or.jp/journal/ferrum/)

本号では過酷な条件の海外貨物鉄道輸送を支えるレール材が紹介されていますが、日本の優れた鉄鋼技術が日本のみならず世界の社会基盤を支えていることをあらためて認識することができます。新型コロナウイルスの影響で新たな生活様式が進んでいます、社会生活・社会基盤を支える日本の鉄鋼技術が継続して発展していくことを期待します。(H.T.)

### 会報委員会 (五十音順)

委員長	足立 吉隆 (名古屋大学)		
副委員長	堤 康一 (JFEスチール (株))		
委員	赤松 聡 (日本製鉄 (株))	新井 宏忠 (八戸工業高等専門学校)	植田 滋 (東北大学)
	小林 能直 (東京工業大学)	佐藤 克明 (日鉄鋼板 (株))	諏訪 晴彦 (摂南大学)
	高谷 英明 (三菱重工業 (株))	鷹野 利公 (産業技術総合研究所)	寺田 大将 (千葉工業大学)
	戸田 佳明 (物質・材料研究機構)	永山 宏智 (愛知製鋼 (株))	難波 茂信 ((株) 神戸製鋼所)
	平井更之右 (ダイハツ工業 (株))	水野 建次 (日本冶金工業 (株))	矢野 正樹 (日本製鉄 (株))
	山口 広 (JFEスチール (株))	山本 和巳 (大同特殊鋼 (株))	吉田 健吾 (静岡大学)

### ふえらむ 定価 (本体価格2,000円+税)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan : Unit Price ¥2,000

2020年9月25日印刷納本、2020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 業務執行理事・専務理事 脇本真也

Tel : 03-3669-5933 Fax : 03-3669-5934 (共通)

印刷所 東京都文京区本駒込3-9-3 (株) トライ

### ©COPYRIGHT 2020 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いません。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

M/A、エネルギー関連材料、機能性セラミックス、環境リサイクル、電気電子材料等の開発に不可欠な

# ドイツ フリッチュ社製遊星型ボールミル

## “NANO領域” PREMIUM LINE P-7.



容器がセットされる様子。

明日の遊星型ボールミルはこれだ。

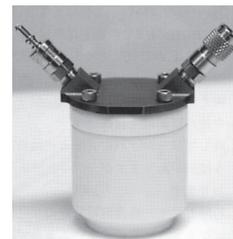
### 特色

1. 弊社Classic Line P-7と比べて250%の粉碎パワーUP  
自転：公転比率：1：-2, MAX 1,100/2,200rpm  
粉碎エネルギー：MAX 94G(Classic Line P-7では46G)
2. 容器を本体に内蔵。  
外部に飛び出す危険性は皆無に。
3. 容器のサイズは20, 45,  
80ccの3種類。  
雰囲気制御容器も多数用意。
4. 容器のセット、取り出しも  
極めて容易に。



## CLASSIC LINE 遊星型ボールミル P-4, P-5, P-6, P-7

premium lineと並んで従来どおりの  
遊星型ボールミルトリオも併せて  
ご提供いたします。



CLASSIC LINE 雰囲気制御容器一例

自転公転比率を  
意のままに



P-4

遊星型ボールミルの  
パイオニア



P-5/4

フリッチュ社の技術で  
容器1個で遊星型に



P-6

微量の試料を  
対象に



P-7

- 通常の容器、雰囲気制御容器ともボールも含めて次ぎの材質を御使用いただけます。メノー、アルミナ、ジルコニア、チッカ珪素、ステンレス、クロム、タングステンカーバイト、プラスチックポリアミド
- 容器のサイズ。500, 250, 80, 45, 12cc。
- 乾式のみならず湿式での粉碎が可能。またISO9001, TUEV, CE等の国際安全基準をクリアー

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

## フリッチュ・ジャパン株式会社

本社 〒231-0023 横浜市中区山下町252  
大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-2-7  
福岡営業所 〒819-0022 福岡市西区福重5-4-2

info@fritsch.co.jp <http://www.fritsch.co.jp>

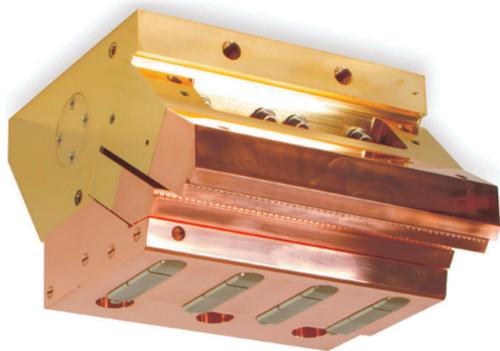
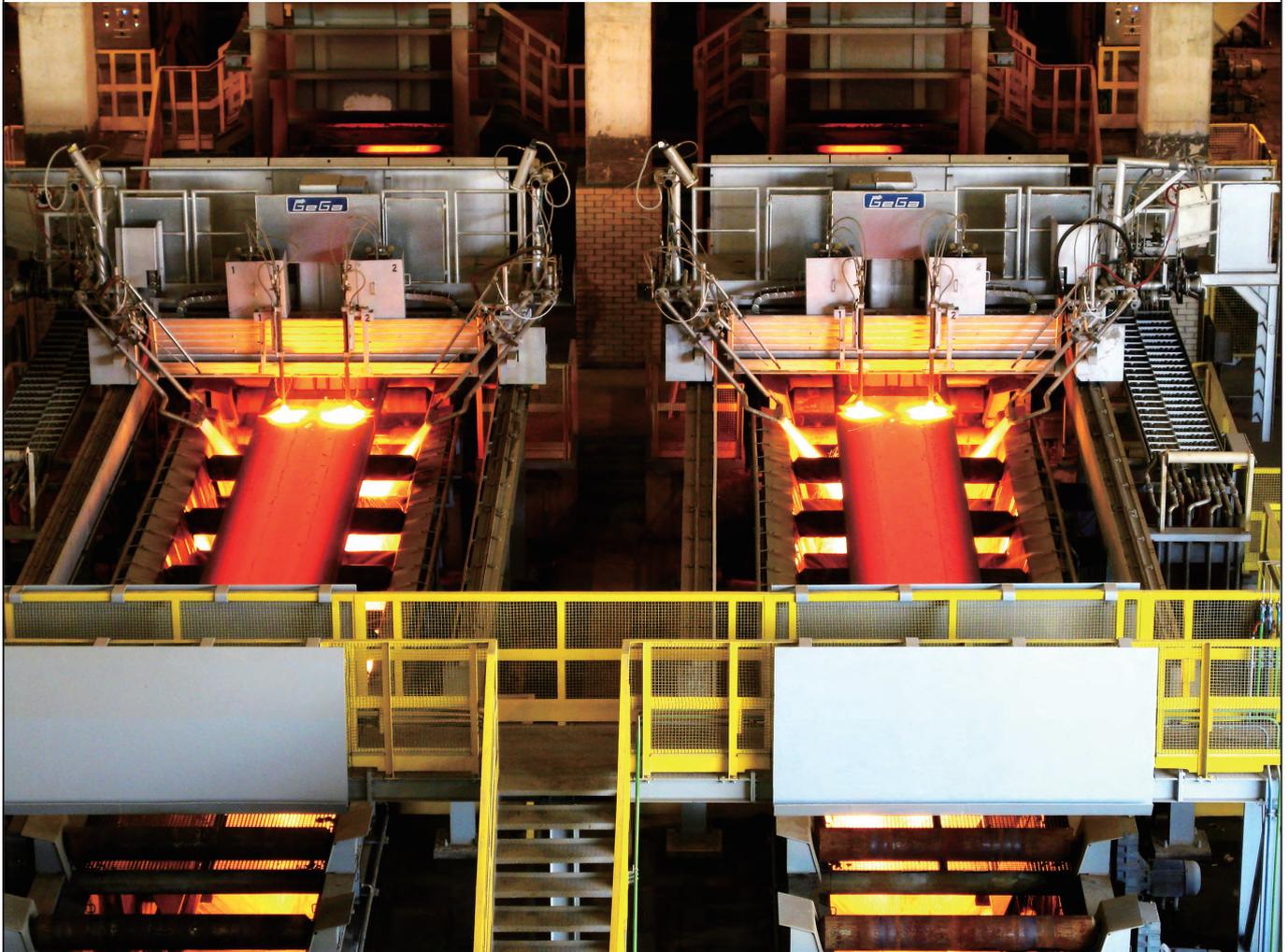
Tel (045)641-8550 Fax (045)641-8364

Tel (06)6390-0520 Fax (06)6390-0521

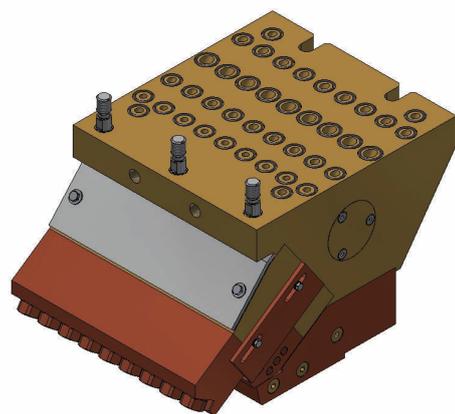
Tel (092)707-6131 Fax (092)707-6131



# AMT-GEGA社製 連鑄用熱間切断装置



従来の多孔式溶剤ユニット



メンテ性に優れた六角ノズルヘッド



AMT Germany社の総販売代理店

**株式会社 トライメート**

〒194-0023 東京都町田市旭町1-6-11 コスモ・ミツイ  
PHONE: 042-727-2813 TELEFAX: 042-723-0803  
E-mail: trimates@blue.ocn.ne.jp