

特殊鋼

2017
Vol.66 No.4

7

The Special Steel

特集／特殊鋼の進化を支えるシミュレーション技術



特殊鋼

| 7 | 目次 2017

【編集委員】

委員長	井上幸一郎 (大同特殊鋼)
副委員長	甘利 圭右 (平井)
委員	杉本 淳 (愛知製鋼)
〃	増田 智一 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	浜田 貴成 (新日鐵住金)
〃	宮崎 貴大 (大同特殊鋼)
〃	赤見 大樹 (日新製鋼)
〃	正能 久晴 (日本金属)
〃	殿村 剛志 (日本高周波鋼業)
〃	戸塚 覚 (日本冶金工業)
〃	安藤 光浩 (日立金属)
〃	福田 方勝 (三菱製鋼)
〃	阿部 泰 (青山特殊鋼)
〃	池田 正秋 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	岡崎誠一郎 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	金原 茂 (竹内ハガネ商行)
〃	渡辺 豊文 (中川特殊鋼)

【特集／特殊鋼の進化を支えるシミュレーション技術】

I. 総論

特殊鋼におけるシミュレーション技術	大同特殊鋼(株) 木村 利光	3
-------------------	----------------	---

II. 塑性加工とシミュレーション

1. 熱間鍛造		
—エンジン部品へのシミュレーション活用—	愛知製鋼(株) 花田 健	7
2. 冷間鍛造		
—鍛造シミュレーションを活用した 冷鍛金型の寿命予測—	(株)ヤマナカゴーキン 金 秀英	11

III. 熱処理とシミュレーション

1. 浸炭焼入れ		
—浸炭歯車の熱処理歪予測—	日産自動車 杉本 剛 日産自動車 藤川真一郎	15
2. 高周波焼入れシミュレーション (変形、残留応力)	高周波熱錬(株) 堀野 孝	20

IV. 切削加工とシミュレーション

1. 切削加工シミュレーションと切削条件の最適設計	(株)神戸製鋼所 赤澤 浩一 (株)神戸製鋼所 嘉村 浩之	24
2. 切削シミュレーションと切削工具	三菱マテリアル(株) 高橋 秀史	29

V. 溶接・接合とシミュレーション

—溶接・接合部の材料挙動シミュレーション、 組織予測と特性予測—	大阪大学 才田 一幸	33
-------------------------------------	------------	----

VI. フェーズフィールド法と特性計算の新潮流

	名古屋大学 小山 敏幸	36
--	-------------	----

VII. 会員会社のシミュレーション技術

熱流体シミュレーション技術	愛知製鋼(株) 村瀬 博典	40
---------------	---------------	----

板鍛造のシミュレーション	新日鐵住金(株) 水村 正昭	
.....	新日鐵住金(株) 吉川 伸麻	42
	日鉄住金テクノロジー(株) 山本 修治	
条件一発出しを実現する真空浸炭シミュレーション	大同特殊鋼(株) 井上 圭介	44
YSSヤスキハガネを支えるCAEソリューションCMAP	日立金属(株) 斉藤 直人	46
“特集”編集後記.....	愛知製鋼(株) 杉本 淳	61

●「ご挨拶」.....	一般社団法人特殊鋼倶楽部 会長 石黒 武	1
-------------	----------------------	---

●一人一題：「私の趣味（自転車）」.....	(株)カムス 小金澤秀男	2
------------------------	--------------	---

■業界の動き		48
▲特殊鋼統計資料		51
★倶楽部だより（平成29年4月1日～5月31日）.....		55
☆特殊鋼倶楽部の動き		57
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧		60

特集／「特殊鋼の進化を支えるシミュレーション技術」編集小委員会構成メンバー

役 名	氏 名	会 社 名	役 職 名
小委員長	杉本 淳	愛 知 製 鋼 (株)	品質保証部お客様品質・技術室 主査
委 員	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	軸受営業部 軸受CS室長
〃	宮崎 貴大	大 同 特 殊 鋼 (株)	特殊鋼ソリューション部 東京第一ソリューション室 室長
〃	戸塚 覚	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 部長
〃	福田 方勝	三 菱 製 鋼 (株)	技術管理部長
〃	金原 茂	(株)竹内ハガネ商行	技術部長
〃	甘利 圭右	(株) 平 井	常務取締役

「ご挨拶」

一般社団法人特殊鋼倶楽部 会長 いし ぐろ 石 黒 たけし 武



平成29年5月の一般社団法人特殊鋼倶楽部第36回定時総会、理事会で、前任の藤岡愛知製鋼株式会社社長の後を受け、会長に選任されました大同特殊鋼株式会社社長の石黒武です。

ご案内のとおり、特殊鋼は、最先端技術の「粋」です。鉄鋼材料の中で独特の高い機能を有する材料で、粗鋼生産の20%を占め、自動車をはじめとする輸送機器や産業機械、建設機械、工作機械等幅広い産業分野の中核部品材料として使われています。特殊鋼は、自動車等の性能・安全性を支える重要保安部品に必須であるのみならず、最終製品や部品の製造工程における性能やコスト削減の鍵を握る加工性をも左右し、我が国の製造業の競争力の根本を支える重要な素材です。また家庭においてもキッチンや家庭器具では広くステンレス鋼が使われるなど国民経済生活と密接な関わり合いを持つもので、特殊鋼業のレベルが国民経済を支えています。

平成28年度の特殊鋼生産（熱間圧延鋼材ベース）は、前年度比4.4%増の1,966万トンで増加に転じました。国内向け特殊鋼生産は約1,300万トンで前年度比1.1%増、輸出向け特殊鋼生産は約660万トンで前年度比10.9%増、29年度第1四半期（4－6月期）の特殊鋼生産計画は497万トンで前年同期比5.2%と足元は上向きですが、今後については予断を許さない状況です。

自動車をはじめとする需要業界は、国内の人口減少・高齢化、IoT・AI・ビッグデータ活用等による第4次産業革命、エネルギー・環境革命などを受けて大きく変化しています。また、世界の特

殊鋼需要は伸長が期待されていますが、過剰生産能力を背景に、世界各国・地域でアンチダンピング等の輸入制限措置が多発しています。

こうした状況に対応していくためには、個社レベルでは対応が難しい課題もあり、特殊鋼倶楽部は、そのような課題に対し役立つ存在でありたいと思います。具体的には、通商摩擦の未然防止・早期解決に向けた官民一体の取組、政府が積極的に推進している未来志向型の取引慣行に向けての活動、人材確保育成や特殊鋼認知度向上を目指した活動、市場開拓調査や海外調査などが挙げられます。

特殊鋼倶楽部は、昭和27年5月16日に設立され、今年で65周年、私は15代目の会長となります。特殊鋼流通の円滑化と需要の拡大という共通目標達成に向けた、メーカー、販売業者両者の懇談、協議機関として結成されました。メーカーと販売業者が平等の資格の合同組織であり、我が国の産業団体でも海外の鉄鋼団体でもあまり例を見ないユニークな組織です。

現在の特殊鋼業界は、メーカーと販売業者の偉大なる諸先輩方が、倶楽部創立の精神の下、高い志をもち、確たる信念をもって尽力してきた賜物です。この築き上げてきたレガシーに、もう一段磨きをかけ、更なる発展を実現していくためには、特殊鋼業界の直面する課題に対して、メーカー、流通を通じ、会員が連携、協力して取り組んでいくことが必要と考えております。そのための基盤を特殊鋼倶楽部として提供すべく努力してまいりますので、皆様からの特殊鋼倶楽部及びその会員各社へのご支援をお願い申し上げます。

一人一題

「私の趣味（自転車）」

（株）カムス 常務取締役
営業本部長 かねざわ ひで お
小金澤 秀 男



私の趣味といっても人に紹介・自慢できるようなものはなく、家族や人に聞かれたりしたときは、「仕事」とか「お酒」とかといっていました。

もちろん「仕事」も「お酒」も大好きではありますが、なんだか情けないものです。

私は、元々体を動かすことが好きであり、若いときには、野球・ソフトボール・サッカーなどを、それなりに楽しくやってきましたが、数年前からは、練習や試合日程、体力的にもついていけずに（戦力外通告）だんだんと足も遠のいていってしまいました。

そんな時、あるお客さんと雑談をしていたら「自転車」の話題になり、大変盛り上がりました。その方は定期的にロードレースに参加するほど本格的に取り組んでおられ、私にも是非参加するように勧められました。私もかつて学生時代にはウィンタースポーツのトレーニングに「自転車」を取り入れるなど経験はあったものの、相当にキツかったとの想いしかなく、あまり乗り気にはなれず曖昧な返事をしていました。そうこうしているうちに新車に買い換えたとのことで、不要となったロードバイク（フレームとタイヤ）が届けられました。もう後には引けない状況（仕事の注文も欲しかったので…）となり、ハンドル・ペダル・サドル・ヘルメット・スーツ等を買揃え、ボチボチと始めることにしました。

私の拠点である群馬県、太田市近郊も、北は渡良瀬川、南は利根川の河川沿いにサイクリングロードが整備されています。近年はサイクリングブームということもあり、休日にはたくさんの愛好者の方と逢うことができます。

当初は、ロードレース参加を目標に、毎朝出勤前に乗るなどかなりハードなスケジュールでやってはみたものの（案の定）そう長くは続かず、転倒して怪我をしたり腰痛になったりで挫折してしまいました。暫くの休養（自転車の修理）を経て再開することにしましたが、そこで目標を「レース参加」→「自転車を楽しむ＝ポタリング（散走）」に変えて、天気の良い休日、気の向いた時に乗るという事にしました。そうすると、今までは走行距離や走行速度ばかりを気にしていた気が付いていなかったコース途中にある名所や素晴らしい景観が楽しめるようになりました。河川敷には、多くの運動公園やグラウンド、ゴルフ場、ラジコン場、グライダー練習場などがあり、休憩しながら試合見学や、ゴルフ場でのギャラリーになって、自分のスイングチェックなどをしています。グライダーの離着陸や飛行などを観ていると壮快な気分にもなります。

ロードレース参加のため「練習しないといけない」というストレスから解放され、以前より楽しく自転車に乗ることを楽しめています。

その効果かどうかはよくわかりませんが、勝手に思っています。

- ・走行中は、常に先の道路状況や前後・左右に注意を払うことが必要で意識を集中できる。（ストレス解消・脳の活性化）
- ・全身が鍛えられ、体幹バランスが良くなった。ゴルフではボールが真直ぐ飛ぶようになり、飛距離も若い時に戻りつつある。（スコアは進歩がないですが）

効果は保証しませんが、興味のある方は是非お勧めです。

〔（一社）特殊鋼倶楽部 工具鋼分科会長〕

特殊鋼の進化を支える シミュレーション技術

I. 総 論

特殊鋼におけるシミュレーション技術

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 プロセス研究部 木村 利光

まえがき

シミュレーションは日常生活で当たり前のように使われる時代になり、レベルの高さに驚かされる事が増えてきました。ある目的地まで移動する際、スマートフォンのシミュレーションソフトによって電車の乗り換えや自動車のルートが示され、到着時刻から交通費の比較、さらには移動先到着時の天気予報までわかります。囲碁・将棋界では

シミュレーションソフトが歴々のプロ棋士を負かし、ソフトで学びインターネット通信で対局を積んだ“実戦歴の浅い若手”の活躍が日々報道されています。

本特集号のⅡ～Ⅴ章では進歩目覚ましいシミュレーション技術について、図1に示す特殊鋼プロセスの<ユーザーのプロセス>にあたる鍛造、切削、浸炭、高周波焼入れ、溶接への適用事例が紹介されています。Ⅰ章では浸炭を例にとってシ

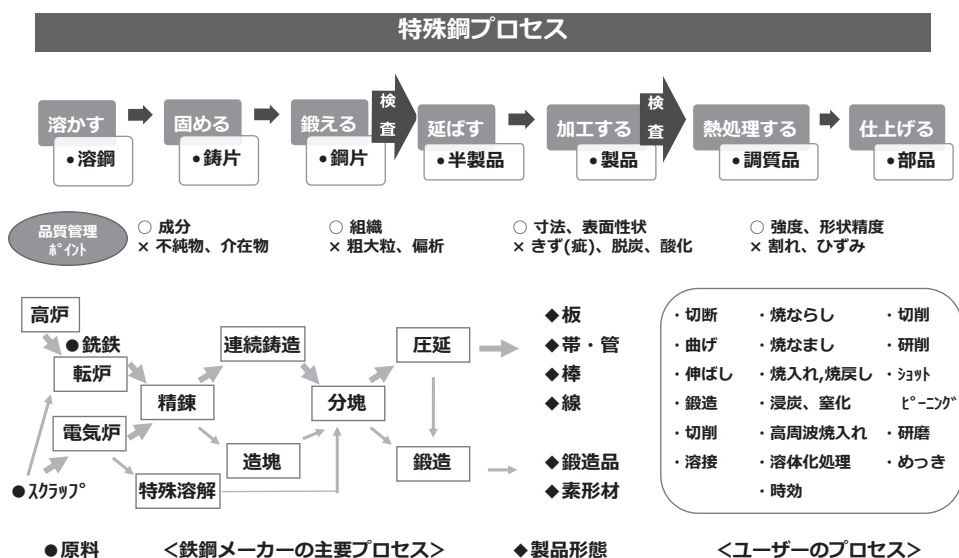


図 1 特殊鋼メーカーとユーザーのプロセス

ミュレーションの意義を説明し、上工程にあたる「鉄鋼メーカーの主要プロセス」におけるシミュレーション技術開発の方向性を解説します。

◇ シミュレーションの意義

あらためて、シミュレーションとは実プロセスで起こる現象を実験や計算で模擬することです。これにより現象の基本となるメカニズムや原理に対する理解を深め、起こり得る結果を予測することが可能になります。シミュレーションの方法としては図2のように実験と計算があり、前者であれば試験片、装置、条件環境が、後者であれば入力データ、計算機（コンピューター）、計算式が必要です。計算機の処理能力が著しく向上した今日では得られた結果を動画などで視覚的に表現でき

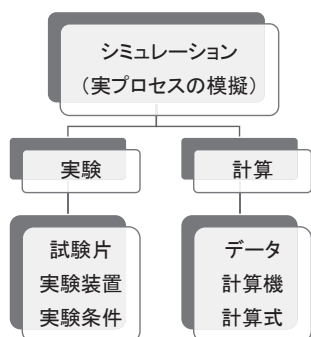


図 2 実プロセスをシミュレーションするための実験と計算

ることと相まって、計算シミュレーションの結果に期待をかけがちです。しかし、計算式のベースは実験で得られた結果と実験条件との関連を表す法則や関係式であり、実験条件の範囲で式の適用範囲が決まることを理解して計算シミュレーションの精度や適用限界を見極めておくことが大切です。

特殊鋼ユーザーのプロセスである浸炭焼入れを例にとり、シミュレーションの意義を考えましょう。浸炭焼入れはSCr420やSCM420などの機械構造用鋼（通称、肌焼鋼）製の部品を高温で加熱し、浸炭雰囲気の中で炭素を鋼表面から鋼中へと侵入・拡散処理させた後、焼入れする熱処理です。高い強度とともに形状精度が求められる自動車の動力伝達部品、歯車やシャフトの表面硬化熱処理として利用されています。

これらの部品は高強度化や軽量化を目的に材質や部品形状の改良や新製品の開発が進められています。浸炭焼入れ後の部品強度や形状に及ぼす仕様・設計変更の影響を、変更の度に量産工場の浸炭焼入れ炉を用いた試作によって確認することはコストと時間がかかります。実験や計算のシミュレーションで確認作業を行えば試作コストの削減と検討期間の短縮を図ることができます。

浸炭焼入れプロセスの場合、図3のように浸炭、拡散、焼入れ工程のサブ・プロセスに分けて、注目する特性（成分、組織、形状、強度）と浸炭条件との関連を実験で明らかにして関係式を作成し

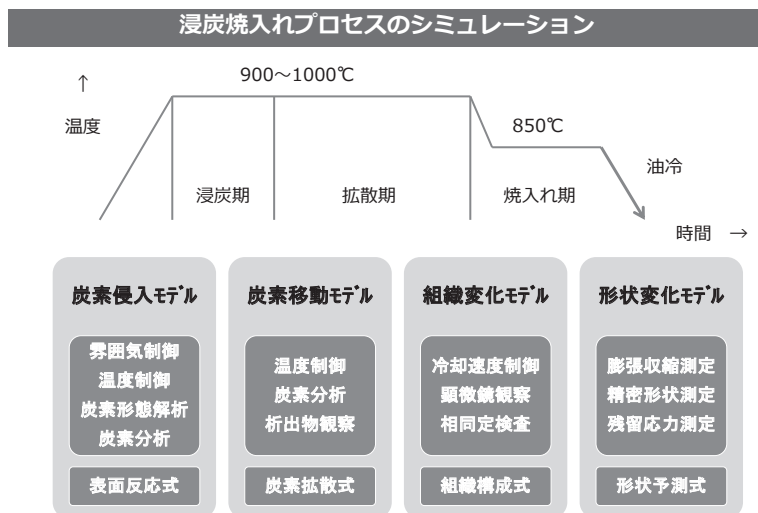


図 3 浸炭焼入れプロセスを構成するサブ・プロセス

ます。なお実験は実験装置と操作のための設計・設備・安全環境などの要素技術と、結果評価のための計測・観察・分析などの要素技術で支えられ、すべてが揃って質の良いデータを採取可能になります。先例の無い要素技術を粘り強く構築する力とデータ解析で新たな法則や関係式を発見する力、これらが特殊鋼メーカーの研究開発者に求められ腕の見せ所になります。

サブ・プロセスを連結することでプロセスモデルは完成します。Ⅲ章では特殊鋼ユーザーから浸炭歯車の形状変化における熱処理ひずみのシミュレーション予測事例が、Ⅶ章の各社事例では真空浸炭時の炭素侵入・拡散モデルが紹介されています。

◇ 特殊鋼製造プロセスにおけるシミュレーション

2004年の本誌「特殊鋼に寄与するシミュレーション」特集号においては、図1の鉄鋼メーカーの主要プロセスの内で製銑、精錬、連続铸造、圧延プロセスのシミュレーションが解説されました。ここでシミュレーションによって知りたい情報は図1に示した品質管理ポイントの、成分、不純物、

介在物、組織、結晶粒、偏析、寸法形状、表面性状、強度、形状精度です。大同特殊鋼では図4のように、铸造、鍛造、切削加工、熱処理へとシミュレーションの適用範囲を広げています。

一般に溶解・精錬、铸造・凝固、圧延・鍛造などの特殊鋼製造では大型設備を使用するため、プロセスを模擬するための実験と計算は規模が大きくなります。溶鋼を対象とした実験では生産設備の数分の1サイズの水モデル装置を、鍛造実験では数百トンクラスのプレスを用いることがあります。他方、計算シミュレーションを行うために各社は計算機や計算ソフトを自前で拡充してきましたが、今以上に大量データを高速処理する計算環境を整えるには莫大なコストがかかります。今後は情報セキュリティの確かさも勘案して、インターネット通信と計算環境を提供するクラウドサービスの利用が進んでいくでしょう。

計算シミュレーションの開発には大きな流れがあります。一つ目は図4中の課題に示すように、主要プロセスのシミュレーションを繋ぎ合わせるシミュレーションの連成です。たとえば図1の特殊鋼プロセスでインゴットに铸造する造塊プロセスと、インゴットをプレスで成形する分塊プロセス

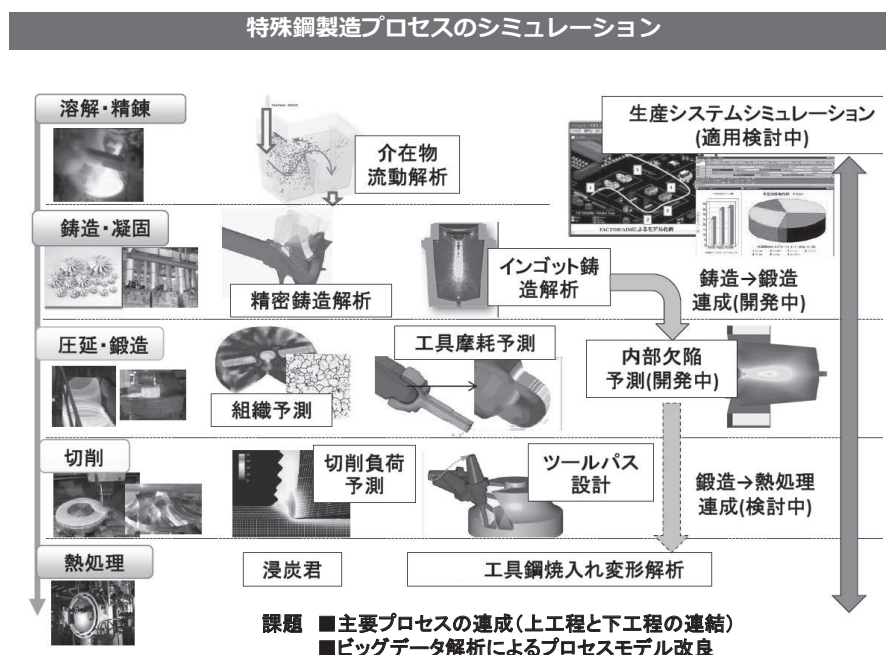


図 4 特殊鋼製造プロセスへのシミュレーション適用状況

スとの連成があります。まず計算シミュレーションで造塊時のインゴット内の粗大凝固組織、偏析、ザクと呼ばれる空隙などの組織、成分、欠陥の分布を予測します。これらを次工程である分塊プロセスの材料情報として与えて、分塊条件の変更に伴う材料因子の変化を計算で予測するものです。複数のプロセスにまたがる課題に対し、各プロセスでの解決アクションの有効性を一貫通貫で見積もることで、設備仕様や工程設計の最適化を効率的に検討できるものと期待されています。

二つ目は製造中に起こる組織変化をシミュレーションで正確に捉えようとする流れです。計算法の一つであるフェーズフィールド法によって結晶粒の粒成長挙動を計算した結果を図5に示します。平均の粒径サイズは同じであっても、サイズの揃った整粒材（①粒度分布：中）とサイズのばらつく混粒材（②粒度分布：広い）では、加熱保持中に粒成長挙動が異なり混粒材で異常に成長する粒が現れます。圧延や鍛造後に熱処理を行う場合、圧延や鍛造後に組織ばらつきがあると熱処理中に異常組織（粗大粒）を生じ易くなることが知られ

ており、計算結果はこれを再現しています。ミクロ組織の変化を精度よく予測できるようになれば、組織変化に影響する各工程での制御ポイントを明確にすることができます。この他、凝固組織形成、成分偏析、析出物成長など材料特性を決める組織因子についての研究も進められています。

本分野の研究は日本の大学が先端を走っており、VI章で名古屋大学の小山先生がフェーズフィールド法の新しい動向を解説されていますので参照ください。

◇ 今後の展望

製造プロセスのシミュレーション開発では、ビッグデータやディープラーニングなどの人工知能と呼ばれる技術を利用する時代に入りました。

ビッグデータ解析では、製造ラインの計測機器から大量に採取した操業データと製品の検査・品質情報との解析を通して、品質に対する操業因子の影響を表す関係式が作られます。製造ラインそのものをシミュレーションの対象にしてしまおうということです。ディープラーニング機能を備えたシミュレーションソフトは、良品が得られた操業実績を学習して、コンピューター自らが関係式の中身を改良し、製造の実態に応じてインラインで細やかな操業条件を提示します。提示された通りにロボットやシステムが設備を動かし、高品質な製品が製造ラインから生み出されて行く。バーチャルリアリティーのように製造現場をシミュレーションで可視化する技術も技能伝承や作業効率化のツールとなっています。

これらは他の産業の製造ラインでは現実のものになりつつあります。特殊鋼の製造においては、法則や関係式から実プロセスを再現してきたシミュレーション技術を活かすとともに、人工知能が製造ラインから統計処理して求めた最適案も取り入れながら技術と品質を高めていくことになるでしょう。シミュレーション開発を担う若手の研究開発者と技術者に柔軟、かつ大胆なアクションを期待しています。

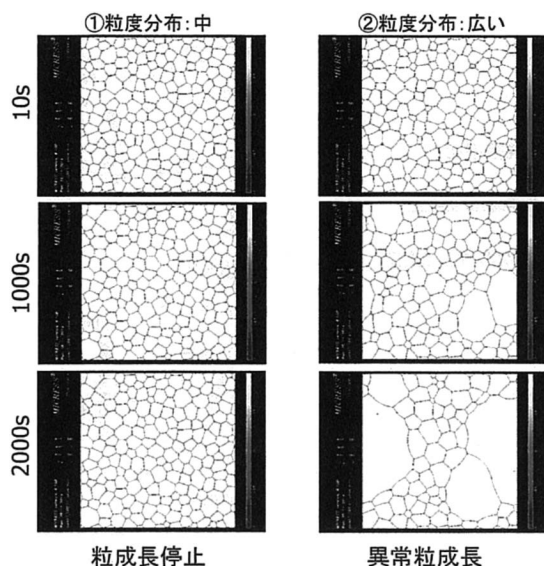


図 5 フェーズフィールド法による結晶粒の成長挙動予測

Ⅱ．塑性加工とシミュレーション

1．熱間鍛造

—エンジン部品へのシミュレーション活用—

愛知製鋼(株) はな だ たけし
生技開発部 花 田 健

まえがき

地球温暖化対策や環境負荷物質の排出規制等を受け自動車に対する燃費向上要求は年々厳しくなっている。その対応としてエンジン部品には、低燃費化に向けた軽量化が求められており、設計検討にシミュレーション技術が活用されている。

主なエンジン部品には、クランクシャフト、コンロッド、バルブ等があるが、本報では、クランクシャフトを例に、製品設計及び工程設計へのシミュレーション活用の取組みについて紹介する。

クランクシャフトへの軽量化、低振動を両立する要求は高度化すると共に、納期面でも顧客の形状案（出図）を受けてから鍛造量産化までの更なる期間短縮への要望が強い。

このような顧客ニーズに対し、製品設計段階から、製品設計要件に加え鍛造の工程設計要件（造り易さ）を織込んだ形状の早期提案、軽量化提案レベルの高度化に向け、シミュレーションを活用し取組んでいる（図1）。

製品設計、工程設計への主なシミュレーション活用例を図2に示す。シミュレーションの具体的

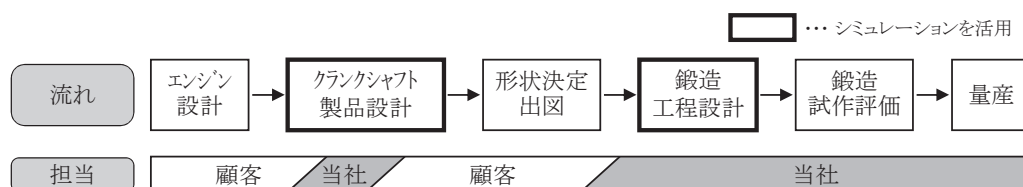


図 1 エンジン設計から量産までの流れイメージ¹⁾

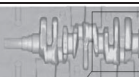
クランクシャフトへの要件		No.	シミュレーション項目	設計課題	
製品設計	軽量化	①	強度・剛性解析	・成形性考慮し、強度と軽量化を両立する形状検討	
	静粛性	②	機構解析 (振動解析)	・成形性考慮し、振動低減と軽量化を両立する形状検討	
	造り易さ	③	熱・歪解析	・成形性考慮し、熱歪低減と軽量化を両立する形状検討	
工程設計	低コスト化	④	成形解析	・試作回数低減に向けた成形性のバーチャル評価	
	リードタイム短縮	⑤	強度解析	・金型の割れ防止に向けたプレス時の金型強度解析	

図 2 設計課題へのシミュレーションの活用

な活用状況について以降で説明する。

◇ 製品設計へのシミュレーション活用

クランクシャフト製品設計の詳細フローを図3に示す。以前より、製品設計段階から製品機能を満足し、造り易さを織込んだ形状提案（SE活動）を行っている。製品機能の検討は、以前は静的な強度・剛性解析のみであったが、現在は機構解析によるNV評価も行うことで、より高機能な製品形状の提案に取り組んでいる。

以降に、強度・剛性解析及び機構解析の取組み内容について説明する。

1. 強度・剛性解析

クランクシャフトは燃焼による爆発力と往復運動部（ピストン、コンロッド）の慣性力を繰り返し受けるため、静的強度に加え疲労強度が必要な部品である（図4）²⁾。

クランクシャフトの最弱部位はピン部軸隅R部（フィレット部）であり、疲労強度を向上するには、この部位の強化が重要である。フィレット部

の強化策には、圧縮残留応力を付与するフィレットロールやショットピーニング、表面を硬化する高周波焼入れや軟窒化処理が採用されている。

一方、軽量化のために例えばクランクシャフトのショルダ部（ピンとジャーナル間）の肉厚を薄くした場合、剛性低下によりフィレット部の応力が増加し、強度不足が懸念される。

疲労強度と軽量化を両立する形状の早期提案に向け、強度・剛性解析を活用している。

図5に、軽量化設計を行ったクランクシャフトについての強度評価結果の例（爆発力負荷時の最大主応力分布）を示す。

本形状においてフィレット部の応力は許容範囲内にあることが確認でき、軽量化と造り易さの両立の目処付けができた。

2. 機構解析（振動評価）

エンジン内に組み込まれるクランクシャフトは、様々な部品と連結されるため、燃焼によって受ける荷重以外にも、ピストン、コンロッドといった往復部品がもたらす慣性力や、自身の回転運動に

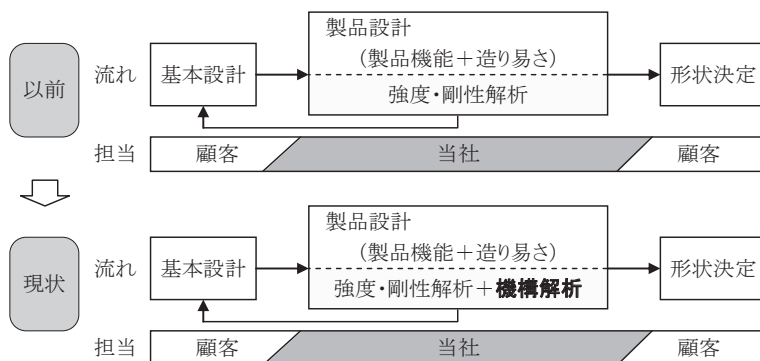


図 3 クランクシャフト製品設計から出図までの流れイメージ

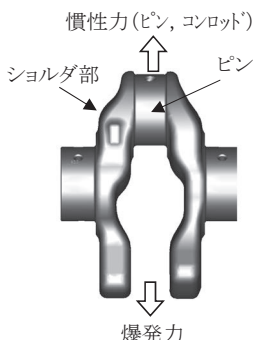


図 4 クランクシャフトへの負荷荷重

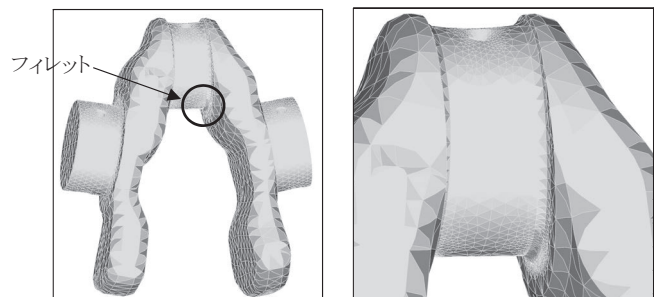


図 5 クランクシャフト強度・剛性解析の実施例（変形誇張図）

よる回転慣性力など、実用状態では種々の荷重が刻一刻と、クランクシャフトに影響を及ぼす。

そのため、強度や剛性、焼付性など、エンジンの信頼性を正確に評価するために、エンジン実機を再現した機構解析が有用である。

弊社では、機構解析を活用することで、実用状態を踏まえた軽量化を検討することが可能となり、昨今高まる軽量化ニーズに対し、機能と軽量化の最適化を実現している。

◇ 工程設計へのシミュレーション活用

クランクシャフト鍛造工程設計へのシミュレーション活用例として、鍛造試作回数低減のための成形解析及び金型割れ防止のための金型強度解析の取組みについて説明する。

1. 成形解析

クランクシャフトの鍛造工程設計の詳細フローを図7に示す。

鍛造の試作回数低減、開発期間短縮に向け、成形解析を活用している。以前は計算機の処理性能が低いためインラインでの評価には使用されていなかったが、最近は計算機及びソフトの性能が向上し、開発フロー内での解析評価が可能となっている。

クランクシャフトの成形解析の実施例を図8に示す。事前に鍛造工程：荒地～仕上の解析により、工程毎の肉張り性、キズの有無、バリの出方、成形荷重等の評価を実施し、試作前に最適な鍛造条件の検討を行っている。その結果、試作回数削減を実現している。

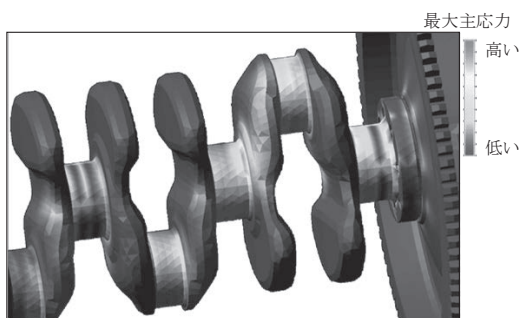
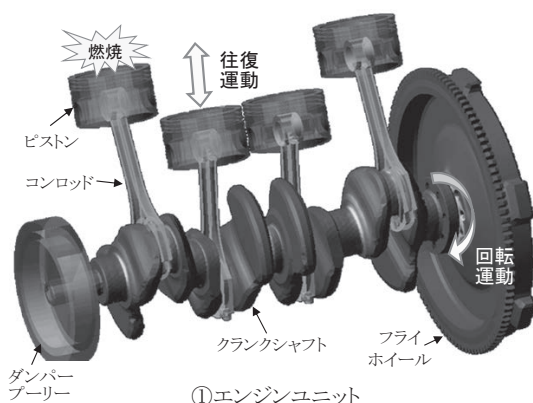


図 6 クランクシャフト動解析の実施例

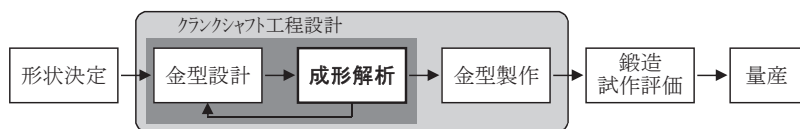


図 7 クランクシャフト鍛造工程設計から量産化までの流れイメージ

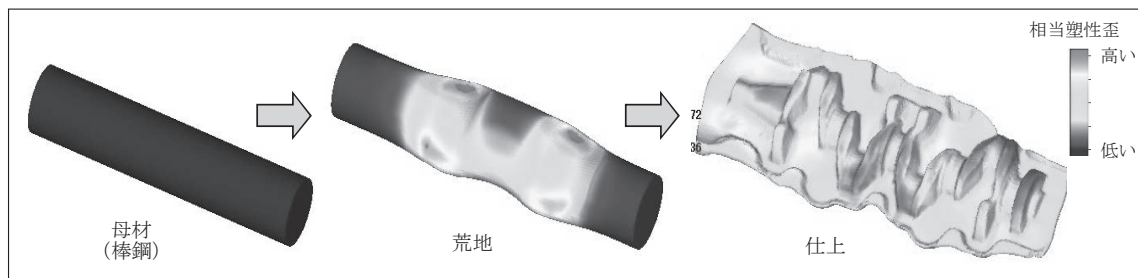


図 8 クランクシャフト鍛造成形解析の実施例

2. 金型強度解析（割れ防止）

金型寿命の主な要因に割れ、摩耗があり、割れが生じた場合は型修正はできず廃却となり、コスト高の要因となる。そのため、強度的に余裕のないクランクシャフト品番の金型強度の事前評価、又は割れ発生品番の原因調査に強度解析を活用している。

金型の割れは、インプレッション（型彫部）底のR部のような応力集中部に主に発生する。

図9に、割れが発生したクランクシャフト用の金型の例を示す³⁾。割れは矢印で示す部位に生じた。

当初の強度解析は鍛造下死点の発生応力で評価しており、割れる程の大きな応力は見られなかった。

そのため、成形初期～下死点（圧下完了）までの変形、応力を順に確認したところ、材料が左右の溝に充満するタイミングが異なることが判明した。金型溝の壁を充満が遅い側へ曲げる力が働き、根元に大きな応力が発生する事がわかった（図10）。このため、左右の充満タイミングが合うよ

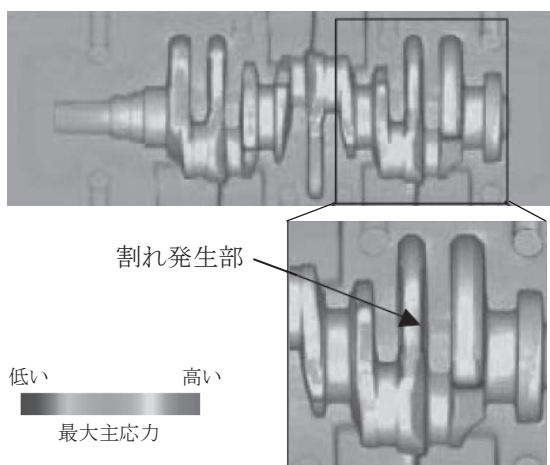


図9 V6クランクシャフト用金型（解析例）³⁾

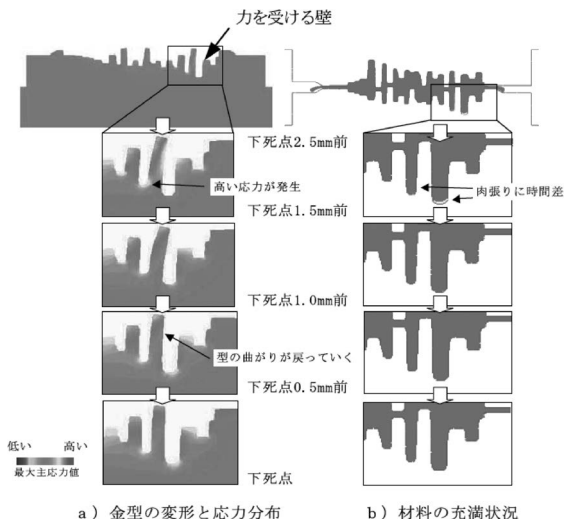


図10 応力分布と変形の関係³⁾

うな設計に変更することで、応力を低減し割れを防止できた³⁾。

むすび

クランクシャフトを例にとりあげ、製品設計では、強度、機構等のシミュレーションを活用し、造り易さと共に顧客要求も満たす形状提案の取組みを紹介した。また、工程設計では、成形、強度等のシミュレーションを活用し、試作回数の削減、型割れ防止を図った取組みを紹介した。

今後も、多くの自動車部品に対して、お客様に満足頂ける商品を提供するため、技術課題にシミュレーションを適用いたします。

参考文献

- 1) 明壁資浩、中村征仁：愛鋼技報19巻1号（2001）、18
- 2) 例えば、基礎・理論編：自動車技術ハンドブック、220
- 3) 大脇進、新里喜孝：愛鋼技報24巻1号（2006）、11

2. 冷間鍛造

—鍛造シミュレーションを活用した 冷鍛金型の寿命予測—

(株)ヤマナカゴーキン 新商品開発室 室長 金 秀 英

◇ 金型の寿命改善に向けた鍛造シミュレーションの役割

最近の冷間鍛造を取り巻く状況は、製品形状の複雑化や機能の複合化が進み、高精度・高強度な金型が望まれる一方で、グローバル化による金型の激しいコスト競争にさらされる環境となっている。国内外の様々なニーズへの対応等として取るべき手段は少なくないが、金型の高性能・高付加価値化の提案は最も効果的と考えられる。金型の寿命向上による差別化への取組として、シミュレーションによる寿命予測技術を紹介する。

冷間鍛造金型の様々な寿命パターンの中で、成形中に発生する金型の応力分布に起因した疲労破壊は、典型的な寿命パターンの一つである。しかし、冷間鍛造金型の疲労寿命は様々な要因が複雑に関与しているため、定量的に予測することは難しいとされている。現状では、金型の応力負荷を正確に評価して低減する設計改善を施すことで金型の寿命を向上する取り組みは設計現場で幅広く行われているが、鍛造金型の寿命を定量的に予測して活用する取り組みの実施例はまだ少ない。本稿では、現状を踏まえた評価技術および定量的予

測への取組について述べる。

鍛造工程における金型の応力負荷を評価する手法として、鍛造シミュレーションと連携した金型応力解析技法が活用されてきた。図1は鍛造シミュレーションを活用した冷間鍛造金型の寿命向上の取り組み事例を示したものである。設計の初期段階では、基本設計及び過去の類似品を参考にして進められるが、金型寿命に関するリスクを可能な限り回避するために、設計案に対する「妥当性検討」を目的としたシミュレーションを行っている。成形解析の結果から得られた成形荷重と鍛造品の面圧分布から金型の負荷状態を間接的に推測した評価となるが、実際に金型を製作する前に金型の寿命に関する問題を把握し対処することで、短寿命のリスクを減らした金型設計を実現している。

現状の設計案に対して「短寿命の原因究明」を目的として、シミュレーションによる実態確認を行うケースでは、実機トライから得られる情報（成形荷重、金型の破損状態、鍛造品の状態など）と合わせてシミュレーション結果の分析を行うことで、金型寿命に大きく影響する因子（応力分布、温度等）を絞り込む。またその際には実機の割れ発生状況がシミュレーションで再現確認できるこ

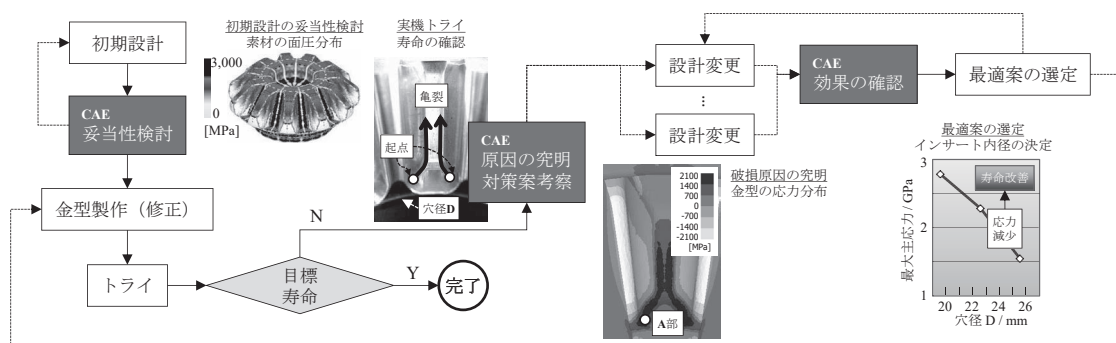


図 1 ベベルギヤ閉塞鍛造における金型寿命向上の取り組み

とを示すことも重要となる。この事例では、初期設計段階の想定より短い寿命でインサートの歯面底から割れが発生し、歯面底のR部に沿って進展して破損に至っており、シミュレーションの結果から割れ発生部の起点で最も高い引張応力が作用していることが確認できた。その結果から、割れ発生部での引張応力が金型破損の直接的な原因であることがわかった。

寿命改善には、短寿命となる原因の排除や影響の低減が方針となる。複数の設計変更案をシミュレーションによって比較することで「最適案の選定」が行われる。選定した最適案の正確な寿命を求めることは難しいが、現状の設計案と比較してどちらが優位な金型かを知ることができる。対策案の良否を確認するために様々な設計変数を変更しながら複数の金型応力解析を実施したところ、インサートの内径を変更することによって、危険部位における引張応力が減少することを確認できた。この結果を金型の設計に適用することにより、金型への負荷を低減して、金型寿命の向上を実現した。

ここで挙げた「妥当性検討」→「原因の究明」→「最適案の選定」のプロセスは、金型の寿命問題のみではなく一般的な鍛造工程の設計開発を進める上でシミュレーションを適用するポイントであり、トライ＆エラーの低減と目標寿命を達成するまでの設計改善の期間短縮に大きく寄与すると考える。

◇ 鍛造シミュレーションを活用した金型の寿命予測技術

前述した評価手法の目的は応力集中に起因する疲労破壊がもたらす金型の短寿命の解消であり、金型に高い負荷のかかる冷間鍛造においては、重要なチェック項目として位置づけられている。しかし、実際に量産で使用される金型の疲労破壊に対する数値的な評価（応力、寿命数など）に関しては取扱いの複雑さから困難な面があり、数値解析技術を用いての予測結果は実像の結果と絶対値で整合する精度にまでは至っていない。冷間鍛造金型の寿命に影響する因子は、鍛造工程設計および金型設計以外にも、加工条件、鍛造素材、作業者のスキル、金型の品質など、実作業に関連した数値解析による予測のためのインプット情報以外

の様々な要因の関与があるため、金型寿命の定量的な予測を困難にしている。しかし、最近、冷間鍛造金型の寿命予測に向けた研究も幾つか報告され^{1)~5)}、なかでも河原ら¹⁾については多様な負荷条件における疲労特性を評価する実用的な方法として、また早川ら²⁾については損傷力学と有限要素法を組み合わせた高度な数値解析モデルを用いた局所的な損傷・破壊予測技法として、今後の進展が注目される。当社では、軸力引張圧縮疲労試験および4点曲げ疲労試験の2種類の疲労試験を用いて超硬合金の疲労寿命特性を調査し、応力-寿命疲労分析理論（Stress-life fatigue analysis）に基づいた金型寿命を評価する疲労寿命予測システムの開発を行った。ここでは金型設計に適用した事例を含めて取り組み内容を紹介する。

応力-寿命疲労分析理論に基づいた金型寿命予測技法では、金型の初期状態および最大負荷状態での応力を数値解析で求め、応力振幅（ $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2$ ）および平均応力（ $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$ ）を算出する、一方、金型材料の疲労試験結果から得られた応力-寿命線図に、式（1）および平均応力の影響を反映する式（2）の関係を当てはめることで寿命数を予測する。

$$\sigma_{ar} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 (\text{Goodman}), \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} = 1 (\text{Morrow}) \quad (2)$$

ここで、 N_f は寿命、 σ_{ar} は $\sigma_m = 0$ の場合の応力振幅、 σ'_f と b はそれぞれ材料の疲労強度係数および疲労強度指数、また σ_u は材料の引張強さである。

式（1）と式（2）を用いた金型寿命予測モデルを構築するためには、金型材の疲労特性を把握する必要がある。ここでは、代表的な冷間鍛造用金型材である超硬合金の疲労寿命特性として、軸力引張圧縮疲労試験および4点曲げ疲労試験の2種類の疲労試験を実施した。図2に軸力引張圧縮疲労試験および4点曲げ疲労試験の条件とその結果、また疲労寿命特性のモデリング過程を示す。試験片の表面状態は鍛造金型と同様な表面粗さ条件を満たすように仕上げた。また、軸力引張圧縮疲労試験では実際の鍛造過程における金型の応力変動に対応できるよう、応力変動の平均値（以下、平均応力）を変更しながら複数の応力振幅条件に

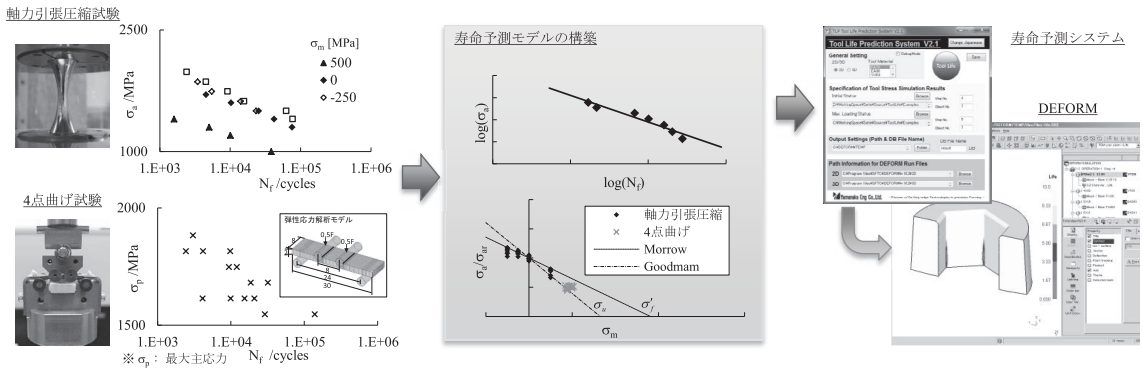


図 2 応力-寿命疲労分析理論を用いた寿命予測システムの概要

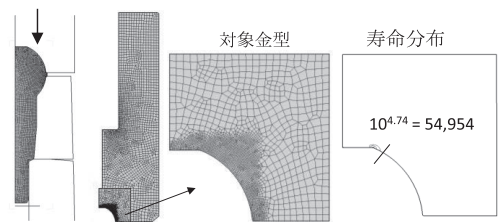
対して試験を実施した。試験結果から得られた応力-寿命 (S-N) データから、同じ平均応力条件下において対数軸上で線形に近い傾向が得られていることがわかる。また、同じ応力振幅条件であっても、圧縮の平均応力条件の場合に比べて引張の平均応力条件下の寿命変動幅が大きいといった平均応力の変化によって疲労寿命に影響することが示された。4点曲げ疲労試験に関しては、単軸応力と異なることから弾性有限要素解析モデルに試験と同じ荷重負荷となる境界条件を適用して解析を実施し、試験片の応力分布を正確に算出して、得られた引張応力分布を用いることで応力-寿命 (S-N) データをまとめた。

金型は組付け時に初期応力分布を有するため最大負荷時の応力分布と合わせて導いた応力振幅 σ_p とその平均応力 σ_m を入力パラメータとして、軸力引張圧縮疲労試験の結果から式(1)の係数 σ'_f と b を決定している。なお、軸力引張圧縮疲労試験と曲げ疲労試験から求めた応力振幅と平均応力の関係を、引張の平均応力下ではGoodmanの式、また、圧縮の平均応力下ではMorrowの式に近似して寿命を求める取扱がなされている。

具体的な寿命予測の活用として、汎用有限要素解析ソフト (ここではDEFORMを使用) の金型応力解析から得られた結果をもとに、この寿命予測モデルから寿命数を分布として算出し、ポストプロセッサにより可視化する寿命予測システムを開発した。

図3に本寿命予測システムを用いた寿命予測結果の例を示す^{4), 5)}。金型の寿命が分布として表示され、短寿命となる危険部位およびその寿命数の評価

ボールスタッド成形金型の寿命予測事例⁴⁾



ベベルギヤの冷間閉塞鍛造金型の寿命予測事例⁵⁾

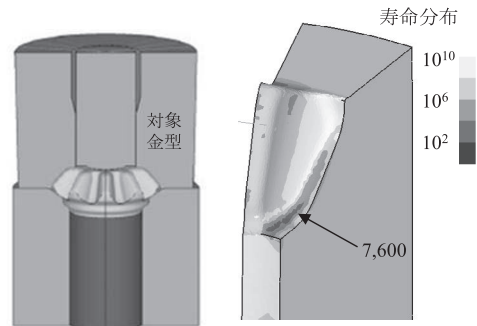


図 3 金型寿命予測システムを用いた寿命予測事例^{4), 5)}

が行われている。最初に示したボールスタッド成形工程における金型寿命予測事例では、ボール形状上部の角部で約900MPa程度の応力振幅と引張の平均応力が現れると評価されており、この情報をもとに予測した寿命数は約55,000となった。実機のカン型寿命が平均約6万回程度であり、さらに亀裂の発生位置も予測結果と一致していることから、予測モデルの妥当性が確認できた例となっている。

また一方、ベベルギヤの冷間閉塞鍛造における金型寿命予測の事例では、応力振幅および平均応

力の分布から歯底部で高い応力負荷がかかっていることが確認でき、その部分での金型寿命は最も短いと予測されている。実際の金型の破損との比較では、破損位置と破壊形態はよく対応が取れているが、寿命数については実際の平均寿命数10,000回に対して1,000~7,000回と低い予測結果となっている。有限要素分割の影響、つまり数値解析から求められる応力の数値誤差がここでは主な原因ではないかと見られている。

◇ 現状の課題と今後の展望

冷間鍛造金型の疲労寿命予測技術の実活用については、まだ限定的なアイテムへの適用に留まっているのが実状である。鍛造シミュレーションおよび寿命予測理論の技術的な発展はもちろんだが、金型の寿命予測における信頼度を高めるために最も基本となる部分は金型材に応じた適切な材料物性値の使用である。特に疲労寿命評価においては、S-Nデータ等の疲労寿命特性データの確保が必須だが、測定器や費用負担の問題から中々取り揃えることができない現状がある。コストを抑えた試験方法や素材メーカーからデータ提供などの協力が望まれる。また、鍛造生産現場においても、金型寿命のパラツキを低減できる環境改善が必要であり、特に金型負荷を計測できるモニタリングシステムの開発や金型寿命判定基準や採取データの一元化などができる環境の整備により、金型寿命

予測技術を有効に活用できると考える。

一方、最近 Industrie 4.0 や IoT (Internet of Things) といった新しいものづくりの考え方が胎動しはじめ、センサーを積極的に活用したモニタリング技術による工程の見える化や異常状態の定量的な評価などが注目されている。モニタリング技術と鍛造シミュレーションのシナジー効果を有効に活用することで金型の寿命予測精度を向上させる取り組みのコンセプトを図4に示す。センサーから取得した計測場所の負荷状態の情報と金型の応力解析結果から得られた応力分布の情報を組み合わせることにより、疲労破壊の危険部位における実際の応力負荷の変化をより正確に把握することで、金型寿命予測における画期的な精度の向上が期待できる。また、統計的なデータ処理および分析技法を適用することで、生産現場における不確定的な要素の影響を含めた総合的な金型寿命評価を可能とする環境の構築も実現できると考える。

参考文献

- 1) 河原淳二・松本良・森章司・小坂田宏造：60回塑加連講論、(2009)、295-296
- 2) 早川邦夫・中村保・田中繁一：塑性と加工、43-497 (2002)、546-550
- 3) Meidert, M., Walter, C. & Pohlandt, K.: Proc. 6th Int. Tooling Conference, (2002)、10-13
- 4) S. Y. Kim, S. Kubota, M. Yamanaka: Steel Research Int. 81 (2010)、294.
- 5) 金秀英：塑性と加工、56-650 (2015)、181-185

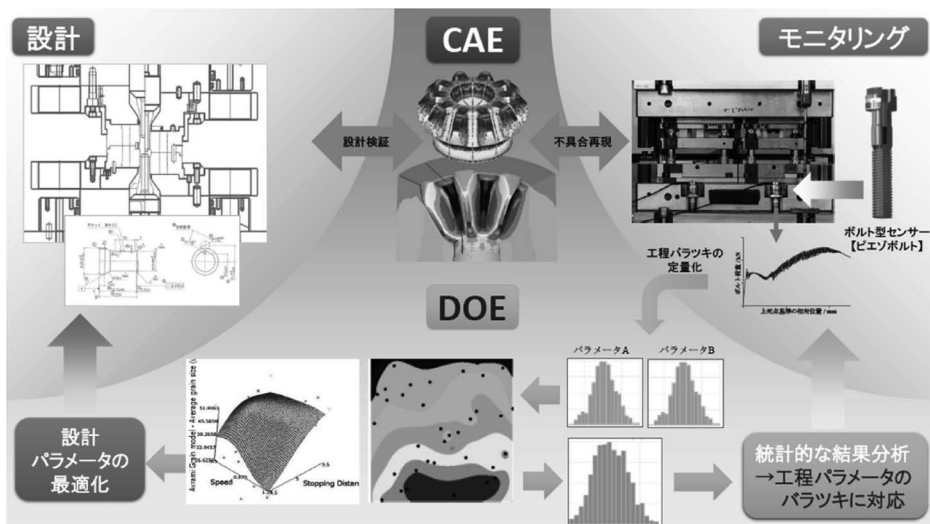


図 4 モニタリングの活用による金型寿命予測精度の向上のコンセプト

Ⅲ．熱処理とシミュレーション

1．浸炭焼入れ

—浸炭歯車の熱処理歪予測—

日産自動車 カスタマーパフォーマンス すぎもと つよし
& CAE・実験技術開発本部 材料技術部 杉 本 剛

日産自動車 パワートレイン生産技術本部 ふじかわ しんいちろう
パワートレイン技術企画部 エキスパートリーダー 藤 川 眞一郎

◇ 緒 言

焼入れに代表される熱処理ひずみは、熱処理工程での工業的な問題となっており、その解決には種々の実験的、実生産的な対策が講じられてきた。近年の数値解析技術は、この熱処理ひずみの予測のために年々改良が加えられている。古くは、1961年にSachsらがリングギヤの焼入れひずみについて線膨張係数の違いや形状的な因子による簡易的なモデルでメカニズムを説明した¹⁾。

1973年には、井上らが有限要素法を用いて、熱収縮、変態膨張、組織の違いによる応力差を総合的に解析してひずみを求め丸棒試験片を用いた実験値との比較を行った²⁾。1976年には、利岡が有限要素法を用いて、マルテンサイト一相、マルテンサイトとベイナイトの二相のケースについて焼入れひずみを有限要素法で解析しその有効性を検証した³⁾。同年に橋本らは有限要素法を用いて円柱の焼入れ後の残留応力と変形の解析を行った⁴⁾。

1990年代になると、多様な熱処理変形に関する解析が紹介されている^{5)~7)}。リング形状に関する高周波焼入れ、クランクシャフトの高周波焼入れシミュレーション、また加熱工程での磁場解析にもシミュレーションが適用されるようになった。2000年代になるとTTT曲線をデータベースとしたシミュレーション、同様に様々な材料の特性をデータベース化したシミュレーションも提案された^{8)~10)}。また熱流体解析を組み合わせた熱処理シミュレーションも報告されている¹¹⁾。

有本らは2002年に、キー溝の付いた丸棒の変形について、塑性ひずみ、弾性ひずみに分解したひ

ずみ解析を提案している¹²⁾。近年では焼き割れに関するシミュレーション手法も提案されている^{13)、14)}。このように複雑な焼入れ現象を解析する技術は年々複雑な解析手法が組み合わされた形で進化してきている。

しかしながら実際に複雑な形状の部品を量産で焼入れする工程について、現象及び変形を精度よく解析するに至っていない。それは、油焼入れでは焼入れ中に高温の部品による油の沸騰とそれによる蒸気膜が部品の表面を複雑に覆う現象があるためである。筆者らはこれら熱伝達率の変化に着目し新たなシミュレーション手法を提案した。

また油焼入れに代わるガス焼入れに関しても熱流体解析を連動したシミュレーション手法を開発した。本報告では、手法を提案し、実際の熱処理品質向上につなげた事例について報告したい。

◇ 油焼入れのシミュレーション¹⁴⁾

油焼入れは雰囲気熱処理における最も一般的な焼入方法であり、広く実施されている。しかし、焼入時の冷却現象は蒸気膜崩落現象を含んでいるため複雑かつ繰返し再現性が低く、完全には解明されていない。このため、現在も油焼入れでのひずみ低減や安定化に関する多数の研究がおこなわれている。

ひずみ低減をする場合、主要なひずみ制御因子である油の熱伝達率を明確にする必要がある。油焼入時の熱伝達率は部品の形状、焼入条件等によって大きく変化するため、シミュレーションにて熱処理ひずみを予測するにはこれらの因子と熱伝達率を紐付ける必要がある。近年では油剤や流

速によって熱伝達率をデータベース化する活動や¹⁵⁾、混相流解析により焼入時の沸騰現象を考慮して熱伝達率を導出しようとする動きもある。

初期の熱処理シミュレーションでは全体が均一に冷却されると仮定した境界条件を付与した解析がなされていた⁴⁾。図1は筆者らによるはず歯車で部品表面の部位により異なる熱伝達率を付与し解析を実施した例である¹⁶⁾。これにより実測値と予測値の誤差を低減でき、熱処理シミュレーションにおいて部位により異なる熱伝達率を設定する必要性を示した。

熱処理ひずみには多くの要因があるが、すべての要因を反映したシミュレーションを実現するためには、浸炭雰囲気流体解析、材料物性データベースの精度向上や材料物性値予測シミュレーション等の技術が必要であり、技術的、また計算機能力の観点からまだ可能とはなっていない。しかし、この中でも焼入れ条件・焼入れ設備及びジ

グの影響は比較的大きいと考えられ、これらを考慮したシミュレーションの研究が始まっている¹⁷⁾。

筆者らは、これらの部位による熱伝達率の違いをデータベース化し、硬さの予測精度を検討した。結果を図2に示す。部品の面を角度、エッジ部からの距離で分割しそれぞれに熱伝達率を与えることで硬さの予測誤差は0.105mmとなった。

現状では流体の特性等を一部データベース化し、そのデータを用いて熱処理ひずみ・硬さ等を求めていくことが通常の流れとなっている。(一社)熱処理技術協会の熱処理シミュレーション実用化研究部会ではデータベース化、適切なシミュレーションの実施方法の検討が進められている¹⁷⁾。

◇ ガス焼入れのシミュレーション

近年、低ひずみ、ひずみばらつき低減及び環境負荷の低減のためにガス焼入れが普及し始めている¹⁵⁾。ガス焼入れでは蒸気膜崩落が無いため、冷

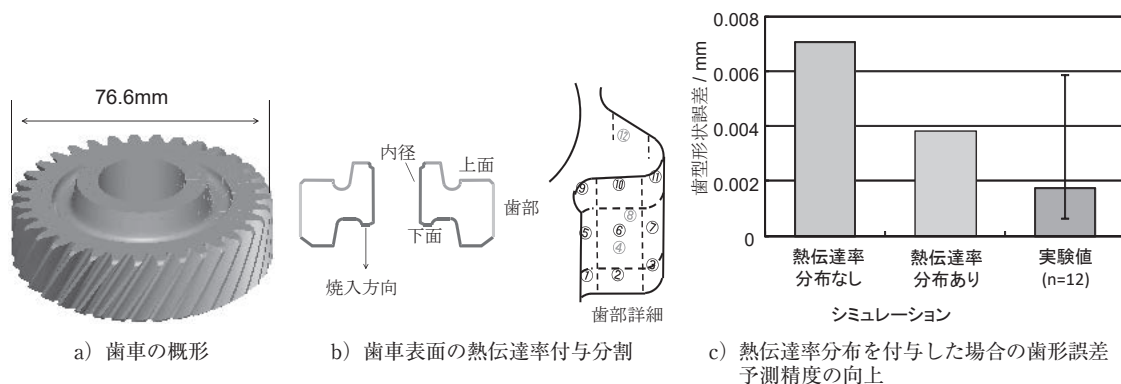


図 1 はずば歯車の歪予測における熱伝達率分布付与の効果

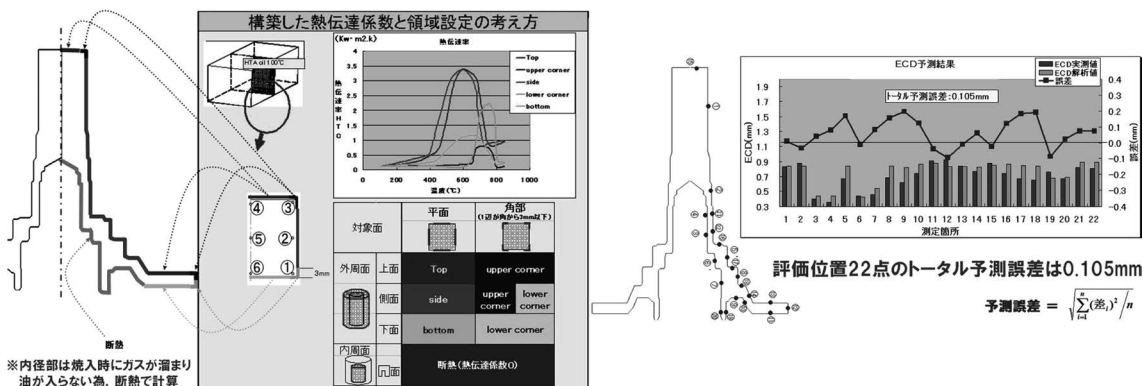
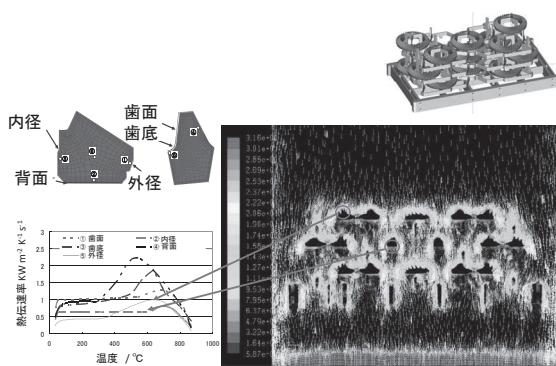
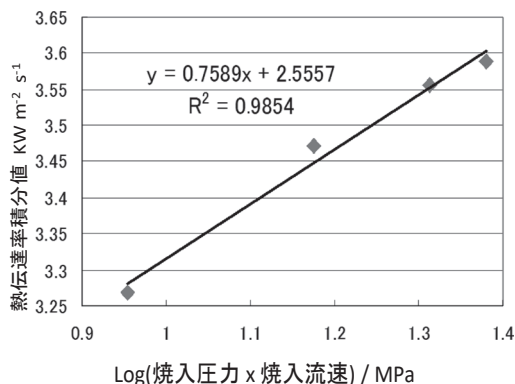


図 2 熱伝達率値のデータベース化と品質予測精度の向上



各部位での実測熱伝達率 流体解析の様子



実測熱伝達率と解析で求めたガスの流れの相関

図 3 ガスの流れと冷却量の相関

却の繰返し安定性が高い。しかし、冷媒の密度が低い事、沸騰による潜熱冷却が期待できない事により、冷却速度を向上させ焼き入れ能力を確保することが課題になる。また、冷却速度の流速依存性が高く流体の粘度が油に較べて低いため、流れの影になる部分の冷却が遅くなる傾向にある。加えて、同じ理由で流れ中に擾乱が起きるため、擾乱の制御が安定した焼入れには必要不可欠である。

一方、ガス冷却では沸騰現象が無い場合、流体解析による冷却特性の予測精度が高いと考えられる。

図3は筆者らが実施した実部品における流体解析による流速・圧力の計算結果と冷却曲線から実測した熱伝達率の相関を調査した結果である。流速、圧力と熱伝達率の相関係数は $R^2=0.9854$ となり非常に良い相関を示した。

これは、流体解析と熱処理シミュレーションを組み合わせることでガス焼入れの条件を基に熱処理シミュレーションを用い熱処理ひずみ・熱処理品質を予測できる可能性を示している。

◇ ひずみ低減事例

1. 油焼入れにおけるひずみ低減技術

熱処理シミュレーションを用い、熱処理条件を導出することで低ひずみ化を実現した事例を紹介する。

図4左上に今回用いたハイポイドギヤの形状を示す。本ハイポイドギヤでは背面の平面度や内径の真円度が低下する楕円変形が日常的に発生して

おり、楕円変形及びそのバラツキの低減はハイポイドギヤの生産における重要な課題である。

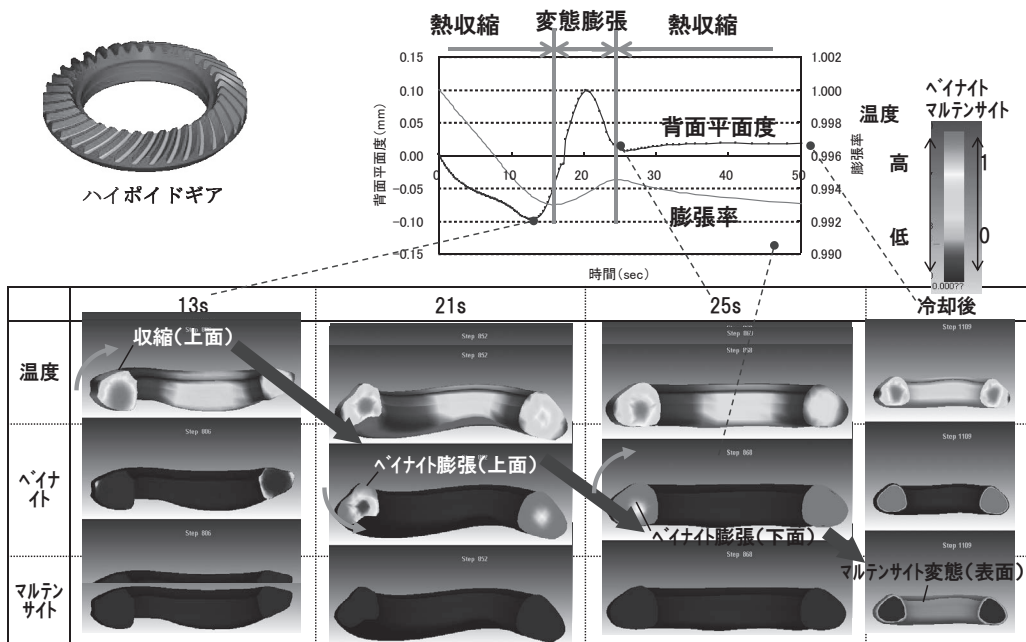
焼入中の冷却状態を実測し、シミュレーションモデルに付与することで本ハイポイドギヤのひずみが発生する過程を時間を追って出力した結果を図4に示す。焼入れ開始当初は熱収縮が発生し、加熱前から見た膨張率は減少する。その後、18秒後付近よりベイナイトが発生し、膨張率の減少は停止する。

この時、ベイナイト変態のタイミング差によって背面平面度は大きく悪化する。その後、冷却に従って温度が均一になることで背面平面度の数値は小さくなるが、ベイナイト変態時の塑性変形が残留するため、背面は完全に平面には戻らず、最終状態での背面平面度悪化を起す。一般に熱処理ひずみの主要因と言われているマルテンサイト変態は、このギヤの場合ほぼ均一に起こり主要なひずみ要因とはなっていない。

日産自動車ではこの解析事例を基に、焼入開始後のあるタイミングで油槽攪拌条件を変更することで熱処理ひずみ低減につながる条件出しを実施し、量産工程における熱処理ひずみ、熱処理品質・生産性（積載量等）を両立する条件を見出し、操業条件に落とし込んだ。

2. ガス焼入れにおける冷却バラツキ低減技術

ガス焼入れではガスの流れを適切に制御することで品質の向上につなげることが出来る。筆者らがシミュレーションを用いて品質のばらつきを低減した例を示す。



⇒周方向の冷却速度差による熱収縮、ベイナイト膨張のタイミング差により歪み発生

図 4 油焼入れにおけるハイポイドギアの変形の様子

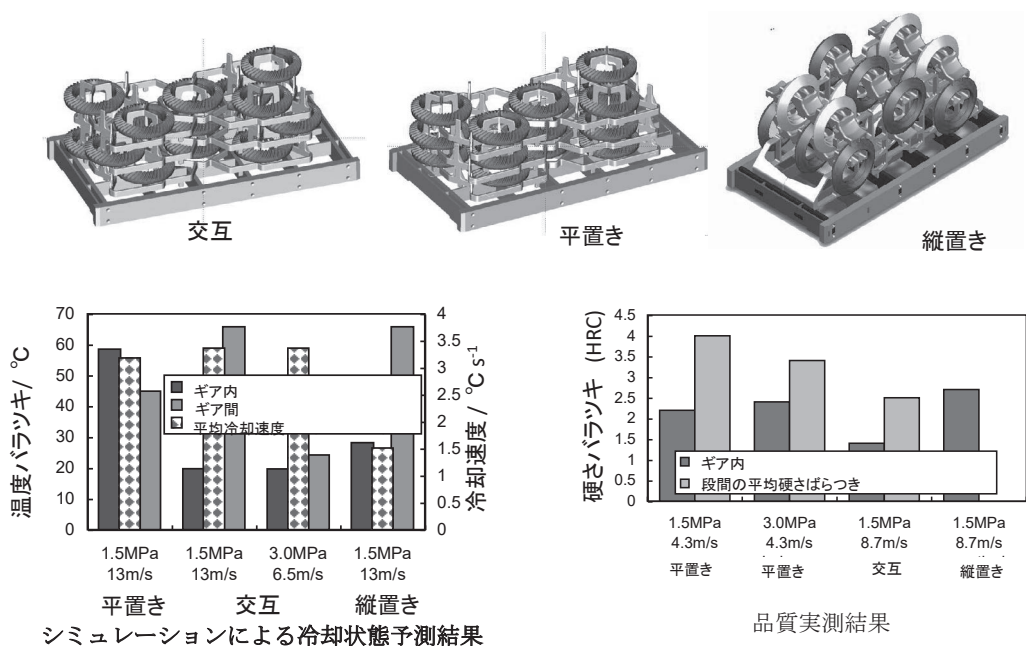


図 5 ガス焼入れにおける冷却状態の最適化の事例

図5に示す荷姿で、焼入れガス流速・圧力を変更することで冷却の品質が変化するかを、流体解析にて検討した。結果、交互で3.0MPa 6.5m/sの

焼入れ条件で流れ解析にて冷却速度が均一になった、荷姿が水平、圧力3.0MPa、6.5m/sの条件では冷却速度、実際に硬さを実験にて調査した結果を

みても硬さがより均一になっていることがわかる。

◇ 結 言

熱処理の品質要因は非常に多岐に渡っている。このため、熱処理の品質を改善する手法は高度技能者、熟練技術者の経験に頼るところが多く、学術的に整理理解されているとは言い難い状態であった。

本論文では油焼入れにおける熱伝達率の部位への依存性を考慮してひずみの予測精度を向上させた。ガス焼入れでも同様に部位による依存性を考慮することで精度が向上することが示された。

1990年代後半より計算機技術の向上により、熱処理の諸現象をシミュレーションにて可視化することが現実的になってきた。

熱処理の諸現象をプロセスに分解し、それぞれを逐次シミュレーションに置き換え、シミュレーションを現象可視化ツールとして用いることで熱処理ひずみ・品質の形成に関する理解が深まると考える。

現在では、現実に近い規模の解析が可能となってきたことにより、実操業で起こる現象を解析上で再現させることが現実になってきた。

本稿ではシミュレーションを用いて熱処理の諸現象を解明する手法の一例を紹介した。

今後はシミュレーションの結果の妥当性評価、結果を実操業の条件に反映させる方法等を標準化が進み、熱処理シミュレーションを用いて熱処理

の総合的な改善に繋がる方策に発展していくと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Sachs, K, Metal Treat. Drop Forg., 28, 281 (1961)、281-287
- 2) 井上達雄・田中喜久昭：材料、22-218 (1973)、218-223
- 3) 利岡靖継：鉄と鋼、62-13 (1976)、1756-1766
- 4) 橋本真一・井上達雄・山田敏弘：材料、27-296 (1977)、422-426
- 5) 有本享三・生田文昭・井上達雄：熱処理、34-6 (1994)、332-338
- 6) 猪狩敏秀・紀博徳・森田鴻司・下河内寛子：三菱重工技報、35-4 (1998)、306-309
- 7) 生田文昭・堀野孝・井上達雄：材料、47-9 (1998)、892-898
- 8) Arimoto, K., Huang, D., Lambert, D. and Wu, W. T.: Proc. of the 20th ASM Heat Treating Society Conference, 1 (2000)、737-746
- 9) 岡村和夫：溶接学会誌、72-8 (2003)、603
- 10) 井上達雄・森本吉浩：材料、52-10 (2003)、1192-1197
- 11) 大木力：NTN Technical Review、69 (2001)、61-68
- 12) 有本享三・奈良崎道治：熱処理、42-5 (2002)、346-352
- 13) Arimoto, K., Ikuta, F., Horino, T., Tamura, S., Narazaki, M. and Mikita, Y.: Trans. Mater. And Heat Treat., 25-5 (2004)、486-493
- 14) 内田富士夫・後藤正治・進藤亮悦・永田新：鑄造工学、77-7 (2005)、437-444
- 15) 奈良崎道治：NACHI TECHNICAL REPORT、15 A1 (2008)、1-12
- 16) 杉本剛、渡邊陽一：60th日本熱処理技術協会講演大会講演概要集、(2005)、3-4
- 17) 杉本剛、谷口光一、市谷克実、下里吉計、奈良崎道治、町哲司、園部勝、杉浦良憲、木島秀彌：熱処理、55 (2016)、30-36

2. 高周波焼入れシミュレーション (変形、残留応力)

高周波熱錬(株) 堀 野 孝
研究開発本部

ま え が き

高周波焼入れは、誘導加熱（IH: Induction Heating）による急速加熱と、噴射冷却を主とする急速冷却を組み合わせた表面硬化熱処理法である。短時間加熱や部分焼入れ、表面焼入れによる高い圧縮残留応力の付与、単品処理による自動インライン化が可能などの優れた特徴を有し、自動車や建設機械、工作機械等の鉄鋼部品の耐摩耗性や耐疲労強度の向上を目的として使用されている。また、電気エネルギーによる直接加熱であるためエネルギー効率が良く、経済的で環境に優しい熱処理法¹⁾として適用範囲が拡大しつつある。

高周波焼入れで生じる熱処理変形や残留応力は、製品の最終品質や性能、後工程の切削加工コストに大きな影響を与えるが、近年の省資源・省エネルギーを目指した部品の小型・軽量化のため、さらなる高品質化が求められている。このような状況の中で、近年の数値解析技術とコンピュータ処理性能の著しい進歩、発展により、コンピュータによる高周波焼入れシミュレーションが普及しており、加熱コイル設計や最適な熱処理条件の検討などに活用されている。

本稿では、『磁場－熱伝導－金属組織－弾塑性（応力／ひずみ）』の連成解析を用いた高周波焼入れシミュレーションの概要と熱処理変形、残留応力の予測および活用事例について紹介する。

◇ 高周波焼入れシミュレーションの構成

1. 高周波焼入れシミュレーションの手法

高周波焼入れシミュレーションでは、加熱冷却時の温度変化や金属組織変化、変形量などを数値解析手法の一つである有限要素法（FEM: Finite Element Method）にて求める。図1に、高周波

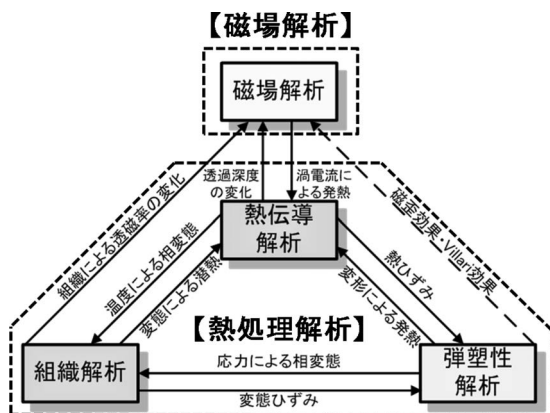


図 1 高周波焼入れシミュレーション連成解析図

焼入れシミュレーションの連成解析図を示す。高周波焼入れのシミュレーション・システム²⁾は、分野別に4つの解析モジュールから構成されており、これらのモジュールを連成させながら実行する複雑なシステムとなっている。各解析モジュールと、そこから得られる主な結果を、以下に示す。

- (1) 磁場解析：磁束密度、うず電流、発熱密度
- (2) 熱伝導解析：温度
- (3) 組織解析：金属組織、硬さ
- (4) 弾塑性解析：応力、ひずみ量

それぞれの解析モジュールは相互に影響しあうため、微小時間ごとにモジュール間でデータの送受信を行いながら逐次計算する必要がある。熱処理変形と残留応力は、弾塑性の解析モジュールを用いて求めるが、熱ひずみ、変態ひずみを求める熱伝導解析、組織解析の解析モジュールから大きな影響を受ける。これら3つの解析モジュール間には上記以外にも強い相互作用があるので、「熱処理解析」として統一的に取り扱って実行する³⁾。

加熱過程では、磁場解析にて被加熱物での発熱分布と発熱密度量を決定する必要がある。磁場解

析に必要な物性値は温度依存性が非常に強いので、一定間隔ごとに磁場と熱処理を交互に解析を行い、相互にデータの送受信を行う方法を採用している。

2. 磁場解析の手法

磁場解析の基本式は、Maxwellの電磁方程式と物質の磁気関係式により導かれる。領域内に導体が存在し、それにうず電流が流れる場合には、磁気ベクトルポテンシャル A [Tm] および電気スカラーポテンシャル ϕ [V] を導入すれば、式 (1) に示す $A-\phi$ 法の基本方程式が得られる⁴⁾。

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\text{rot}A\right)=J_0-\sigma\frac{\partial A}{\partial t}-\sigma\text{grad}\phi \quad (1)$$

ここで、 μ : 透磁率 [H/m]、 J : 電流密度 [A/m²]、 σ : 導電率 [A/m] である。

電流が時間的に正弦波であると仮定し、時間微分の項を複素数近似すれば交流定常解析 ($j\omega$ 法) として一度に解くことができる。式 (1) の基礎方程式を解析領域全体にわたって有限要素法にて解くことで、空間中の磁束密度や被加熱物のうず電流分布や発熱分布などを求められる。

3. 熱処理解析の手法

相変態モデルは、フェライトやパーライトなどの拡散型変態については式 (2) に示す TTT (Time-Temperature-Transformation) 線図に基づく Jonson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) 式を、マルテンサイトの無拡散変態については式 (3) に示す Koistinen-Marburger 式を使用する。

$$\xi_i=1-\exp(-kt^n) \quad (2)$$

ここで、 ξ_i : 拡散型変態での体積分率、 k と n : 拡散型変態特性に対する材料パラメータである。

$$\xi_M=1-\exp\{-k(M_S-T)\} \quad (3)$$

ここで、 ξ_M : 無拡散型変態での体積分率、 k : 実験データに基づく係数、 M_S : マルテンサイト変態の開始温度である。

一方、オーステナイト変態では、昇温速度により変態開始および終了温度が平衡状態図よりも 50℃ から 100℃ 高くなるので、TTA (Time-Temperature-Austenitization) 線図に基づく JMAK 式を使用する。

4. 熱処理変形とひずみの関係

熱処理中の部品内部の微小領域では、時刻 t において式 (4) に示すひずみの釣合式が成立する⁵⁾。

$${}^t\varepsilon_{ij}={}^t\varepsilon_{ij}^E+{}^t\varepsilon_{ij}^{TH}+{}^t\varepsilon_{ij}^{TR}+{}^t\varepsilon_{ij}^P+{}^t\varepsilon_{ij}^{TP} \quad (4)$$

ここで、 ${}^t\varepsilon_{ij}^E$: 弾性ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$: 熱ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$: 変態ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^P$: 塑性ひずみ、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$: 変態塑性ひずみである。

${}^t\varepsilon_{ij}$ は全ひずみで実際の変形を示すものであり、弾性ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^E$ は実際の応力と直接の関係がある。

シミュレーション結果から得られる式 (4) の各ひずみ量を時系列で調査することで、熱処理変形と残留応力の発生メカニズムが解明可能である。

◇ シミュレーションに必要なデータベース

1. 材料特性データ

前述の 4 つの解析モジュールごとに、多くの材料特性データが必要となる。また、常温から 1000℃ 程度までの幅広い温度範囲がシミュレーション対象であるため、温度依存性を考慮した金属組織ごとの材料物性データが必要となる。

磁場解析では導電率や比透磁率などの電磁気的特性、熱処理解析では熱伝導率や比熱などの熱物性値、弾塑性解析ではヤング率や降伏強度などの機械的性質、そして組織解析ではマルテンサイト変態開始温度や等温変態図などの相変態特性を用意する必要がある。

2. 冷却特性 (熱伝達率) データ

高周波焼入れでは噴射冷却を主として使用しているが、一般的に浸漬冷却に比べて冷却能が高く、ばらつきが少ない特徴がある。冷却過程を解析するためには、FEM モデルの冷却部表面に熱的境界条件として熱伝達率を設定する。熱伝達率は、冷却媒体や流量、液温などにより大きく変化するとともに温度に関して非線形であるため、シミュレーションの実用性を向上させるためには、冷却状況によって適切な値を設定する必要がある。

◇ シミュレーションの活用方法

表 1 に高周波焼入れシミュレーションの活用方法を示す。加熱コイル形状や電源仕様、加熱冷却条件など高周波焼入設備に関する内容をコンピュータのみで検討が可能のため、実物試作回数の低減や設計期間の短縮、さらなる熱処理品質の向上などに活用している。特に加熱コイルの場合、従来は熟練した技術を持つ技術者が長年の経験に基づいてトライ・アンド・エラーで形状設計を行ってきたが、シミュレーションの活用により加熱コイ

表 1 高周波焼入れシミュレーション活用方法

1. シミュレーション活用方法
＜高周波焼入れの設計・予測ツールとして活用＞
(1) 合理化、効率化：試作回数の低減や設計期間の短縮
(2) 熱処理品質向上：最適な熱処理条件（低変形）の検討
(3) メカニズム解明：熱処理変形や残留応力の発生要因
(4) 不具合事前回避：発生原因の特定、回避策の検討
2. 検討可能な内容
(1) 設備設計：電源容量、周波数、加熱方式、冷却方式
(2) 加熱コイル設計：コイル形状、コア形状、回路定数
(3) 冷却ジャケット設計：ジャケット長さ、噴射角度
(4) 熱処理条件：加熱時間、冷却時間、冷却媒体
(5) 熱処理品質：変形量、残留応力、金属組織、硬さ

ル製作後の修正工数が大きく減少し、設計・製作リードタイムの短縮が実現できている。

◇ シミュレーションの活用事例

1. 焼入変形と残留応力の予測

自動車部品であるハブベアリング外輪を対象に、高周波焼入れする際に生じる変形および残留応力の検討を目的として、高周波焼入れシミュレーション事例を紹介する。

ハブベアリング外輪は薄肉のリング形状部品であり、その内径の軌道面を高周波焼入れすることで、転がり疲労強度を向上させている。本モデルでは、部品内側に加熱コイルを配置し、周波数50kHz、加熱時間7秒にて軌道面を約1000℃まで昇温した後、直ちにポリマー冷却剤による噴射冷却を行い軌道面の表面焼入れを行った。

図2(a)に示す2次元断面のFEMモデルを用

いて高周波焼入れシミュレーションを実施した。

図2(b)に加熱終了時における部品断面の温度分布を、図2(c)と(d)、(e)には冷却終了時の焼入れパターンと円周方向の残留応力分布、焼入変形量を示す。

軌道面表面では、表面焼入れにより円周方向に-500MPa程度の圧縮残留応力が発生しており、焼入変形として薄肉である部品端部が厚肉の中央部よりも半径方向により膨張する結果となった。焼入変形は、冷却中に軌道面がマルテンサイト変態する際に体積膨張したことが原因であることが、シミュレーションから明らかになった。

2. 焼入変形量の低減策検討

高周波焼入れシミュレーション結果を分析することで、焼入変形の発生メカニズムを明らかにし、焼入れパターンを変化させることなく変形量低減策を検討した事例⁶⁾を紹介する。

本件の対象は、外径φ100mm、内径φ25mm、高さ24mm、材質はS45C材のリング部品である。図3(a)に示すように加熱コイルを外側に配置し、周波数30kHz、加熱時間4秒、回転数663rpmにて外径面を980℃に昇温した後、水噴射冷却することで外径面から約2mm深さまで焼入れした。

図3(b)に示す2次元断面のFEMモデルにて、前述の加熱・冷却条件にて高周波焼入れシミュレーションを実施した。冷却過程は、外径面に熱的境界条件として熱伝達率20,000W/(m²・K)の一定値を与えて解析を行った。

図3(c)に、シミュレーションから得られた焼入れ後の変形図を示す。三角マークの頂点は内外径

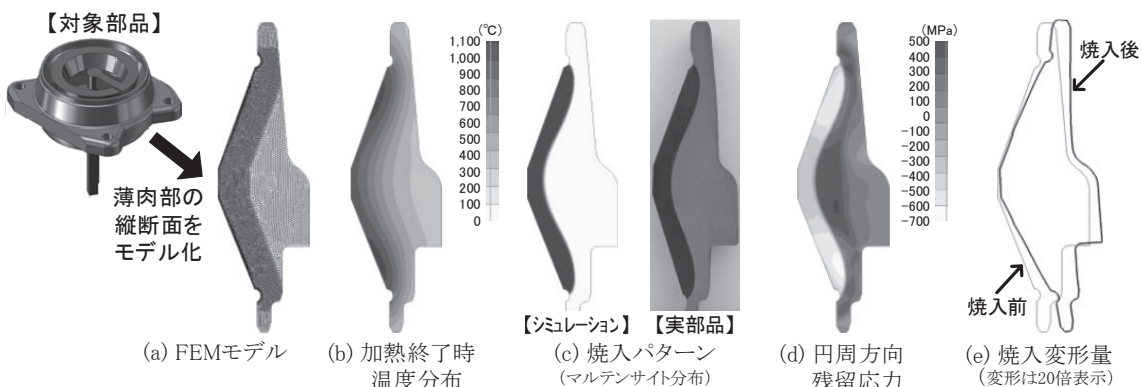


図 2 ハブベアリング外輪内面の高周波焼入れシミュレーション結果

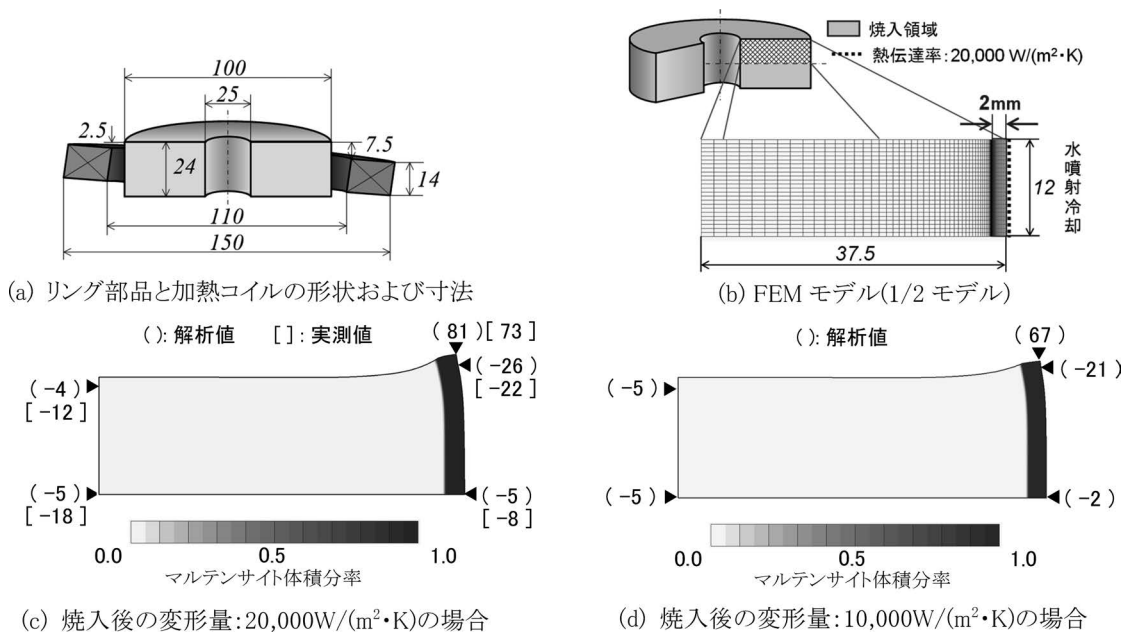


図 3 リング部品の高周波焼入れシミュレーション結果：変形とマルテンサイト分布

部と高さの変化のシミュレーション結果を示しており、() と [] 内の数値 (単位: μm) はそれぞれシミュレーションと実測による変形量である。

実測結果とシミュレーション結果には良い一致が見られ、全体的な変形の傾向としては、半径方向の変形量は少ないが、外径部が中心軸方向に大きく膨張しており、外径部上面にかなりの反りが見られた。そこで、外径部の変形量を低減させるべく、シミュレーション結果から得られた各ひずみ量を分析した。その結果、外径部上面の変形原因は、マルテンサイト変態による体積膨張だけでなく、強冷却による塑性変形にあることがわかった。そこで、塑性変形量の低減による低変形化を目的に、外径面の熱伝達率を $20,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ から $10,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ に変更し、マルテンサイト分布を変化させることなく冷却速度を低下させることにより、図 3 (d) に示すように外径部上面の変形量が 17% 低減できることがわかった。

むすび

コンピュータによる高周波焼入れシミュレーションは、加熱コイル設計や最適な加熱冷却条件の検討だけでなく、高周波焼入れ後の変形量や残留

応力の予測ツールとして既に実用化されている。さらにシミュレーション結果から得られた応力や各ひずみ量などを分析することで、焼入変形の低減策検討や新技術開発、不具合の事前想定と対策などに幅広く活用することが可能である。

今後、さらにシミュレーション結果の信頼性を上げるためには、材料特性データの充実や熱伝達率のデータベース化、前工程および前組織を考慮した熱処理解析などが必要である。

参考文献

- 1) 川崎一博、三阪佳孝、生田文昭：熱処理、50、4、pp. 368-376、(2010)
- 2) 堀野孝、生田文昭：エレクトロヒート、141、pp. 47-52、(2005)
- 3) Inoue, T., Arimoto, K. and Ju, D. Y.: Proc. 1st Int. Quenching and Control of Distortion, ASM International, pp. 205-212、(1992)
- 4) 高橋則雄：三次元有限要素法 磁場解析技術の基礎、オーム社、(2006)
- 5) Arimoto, K., Horino, T., Ikuta, F., Jin, C., Tamura, S. and Narazaki, M.: 1th International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, pp. 425-435、(2005)
- 6) Horino, T., Ikuta, F., Arimoto, K., Jin, C. and Tamura, S.: 1th International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, pp. 203-212、(2005)

Ⅳ．切削加工とシミュレーション

1．切削加工シミュレーションと

切削条件の最適設計

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 加工技術研究室 **あか ざわ こう いち**
赤 澤 浩 一

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 加工技術研究室 **か むら ひろ ゆき**
嘉 村 浩 之

まえがき

今日までに工業製品に対するニーズの多様化、ライフサイクルの短期化、高度化、個性化が進み、一方では新興国における量産工業化がますます進んでいることから、国内での多品種中・少量生産の割合が全体の70%以上を占めていると言われていいる。こうした状況において、競争力の確保、強化を推し進めていくためには、より削りにくい被削材料において、複雑な形状の機械部品、金型などを効率的に。かつ高品質に少量生産することを可能とする加工技術の開発がますます重要となっている。

一般的な部品製造プロセスではまず、部品の形状設計が行われる。その後、使用される工具や加工経路、切削条件が決定され、CAM (computer-aided manufacturing) によりNCプログラムが作製されて工作機械により実際に加工が行われる。現状、高度なCAMソフトウェアを使用したとしても、工具の選択、加工経路、切削条件の設計はデータベースや経験、勘に基づいて作業者が決定しなくてはならない。このため、設計された加工プロセスが常に最適である保証はなく、実際には量産段階の前に試加工が実施され、加工精度、加工面品質、生産性が検証され、必要に応じてNCプログラムに修正が加えられる。大量生産や製造期間が長い場合はこれらの改善ループを機能させることが可能であるが、多品種少量生産ではいかに試加工回数を減らして迅速に完成度の高い量産工程を立ち上げるかが効率化のポイントとなる。こ

れを実現するためには、技能者の経験や勘に頼らず、理論的アプローチにより切削加工プロセスを最適化することが重要となる。ここでは、切削条件や工具形状および工具材と被削材の材料特性などから、工具摩耗、びびり振動などの重要な加工現象を予測する技術について紹介する。さらに、その予測技術を応用して、加工効率を最大化する切削条件の設計方法について紹介する。

◇ 工具摩耗のシミュレーション

切削加工により工具摩耗が進行すると、工具刃先の丸み増大に伴う仕上げ面粗さの増加や刃先の減退による加工誤差が生じる。また、極度に摩耗した工具の使用は、過大な切削抵抗を生じさせ、工具および工作物を損傷する可能性がある。こうしたことから工具摩耗量の予測は、切削条件の最適設計や工程の自動化において重要な技術となる。工具摩耗は図1に示すように、機械（アプレシブ）

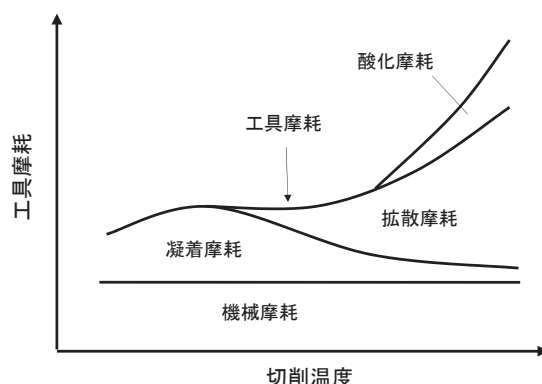


図 1 各摩耗メカニズムと切削温度の関係

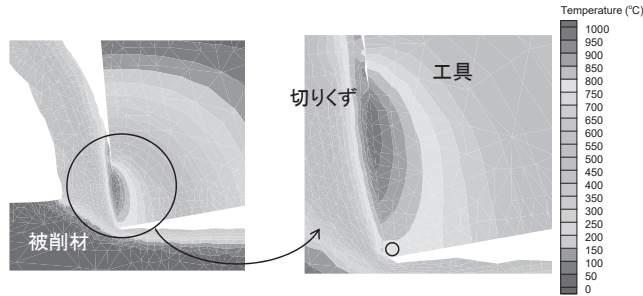


図 2 切削温度の解析結果 (S45C材)

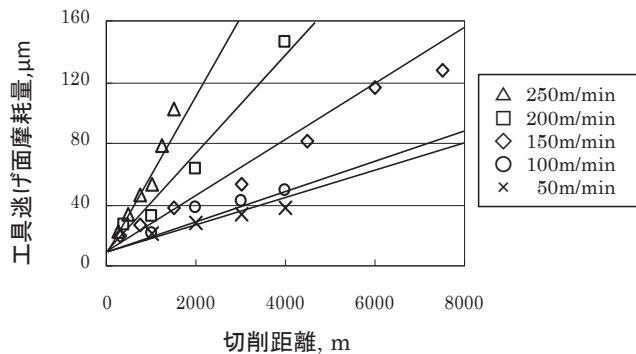


図 3 工具摩耗の予測値と実測値の比較

摩耗、拡散摩耗、酸化摩耗などに分類されるが、摩耗の予測には工具刃先温度と摩耗量の関係を知ることが必要となる。工具刃先の温度測定は高度な実験設備が必要となるため、本稿では、有限要素法解析による刃先温度の予測と工具摩耗の計算モデルを組み合わせることによる実用的な工具摩耗予測方法を紹介する。

図 1 に示されるように、工具摩耗量は切削温度の影響を指数的に受けることが知られている。そこで我々は、新たに幅広い切削条件下で工具摩耗の予測が可能な工具摩耗予測モデルとして、次式で表されるモデルを提案している¹⁾。

$$dW = dL \cdot C_1 \cdot H_w / H_t + dL \cdot C_2 \cdot \exp(-C_3 / \text{temp}) \quad (1)$$

本モデルは第 1 項がアブレシブ摩耗のモデル、第 2 項が拡散摩耗モデルとなっている。ここで、 dW は摩耗量、 dL は切削距離、 H_w は被削材、 H_t は工具材のそれぞれの切削温度条件下での硬さを表している。 C_1 、 C_2 、 C_3 はそれぞれ影響係数であり、ともに切削試験により同定される。一方、測定の困難な工具刃先の温度は、市販の温度連成 FEM 解析ソフト (伊藤忠テクノソリューションズ

社製 ADVANT EDGE 2D) を使用し、前述の摩耗予測モデルの入力値とした。解析結果の一例として、S45C 材における刃先温度の解析結果を図 2 に示す。さらに、被削材として S45C 材の高温強度 (降伏応力)、工具材として超硬 P 種材の高温硬度を測定し、モデル化した結果を下式に示す。

$$H_w = 3110 \cdot \exp(-0.00538 \cdot \text{temp}) \quad (2)$$

$$H_t = -13.5 \cdot \text{temp} + 17100 \quad (3)$$

モデル係数 C_1 、 C_2 、 C_3 は数条件で予備実験を行い同定した。その結果、 C_1 は 0.628、 C_2 は 114000、 C_3 は 11900 となった。この工具摩耗モデルにより、工具摩耗量を算出した結果を図 3 に示す。図では、測定値をマークで、予測値を実線で示している。図から提案するモデルにより、切削条件にかかわらず工具摩耗を精度良く予測できていることがわかる。この摩耗モデルから逆に、所定の摩耗量となるように切削条件 (切削温度) を設計することが可能となる。

◇ びびり振動のシミュレーション

切削加工中に工具や非加工物の剛性不足により、

びびり振動と呼ばれる加工振動が発生することがある。びびり振動が発生すると仕上げ面性状が悪化し、場合により工具が破損することがある。びびり振動が発生した場合には、送り速度や切り込み量を小さくしたり、工具回転数を低く設定することにより加工負荷を低減させ、振動を抑制することが一般的に行われている。ただし、こうした回避策は加工効率向上の大きな阻害要因となる。本稿では、エンドミル加工において、理論的手法によりびびり振動の発生臨界条件を予測し、実加工の前にびびり振動を抑制した高効率加工条件の設計を可能とする手法を紹介する。

エンドミル加工では工具や非加工物の自由振動により被削材と工具は相対的に振動しながら加工を行っているため、図4に示すように周期的に切り取り厚さが変化する。前加工面と現加工面の位相差により切り取り厚さが変動すると切削負荷が増大する。この切削負荷の増大により振動振幅も増大し、次の切れ刃通過時にさらに大きな切り取り厚さの変動となる。前加工時の軌跡と現在の軌跡に位相差が生じ、切り取り厚さの変動振幅が一定値を超えると自励びびり振動が発生する。一方、工具の自由振動と回転周期が一致すれば、両軌跡の位相差がゼロになり、切り取り厚さの変動も無くなり、びびり振動は発生しにくくなる²⁾。この状態を実現するには、工具の回転周期を調整することにより、工具振動と回転周期を同期させることが有効である。そのためには、工具の振動特性を明らかにする必要があるが、ここではインパルス応答法により測定することとした。

びびり振動発生条件予測のシミュレーション結果として、アルミ合金（A5052）を超硬エンドミル（直径63mm、刃数3枚、突出し250mm、溝加工）で加工する場合の計算結果を紹介する。まず、工具の振動特性の測定では、エンドミル工具を加工機に取付け、主軸－工具系の振動特性をインパルス応答法により測定した。測定の結果を表1に示す。また、ここでは、この主軸－工具系の振動系に対し外力として作用する切削抵抗は別途切削シミュレーションによる計算値を使用する。Y. Altintasらの手法に基づき、外力の周波数、つまり工具の回転数を変化させて、回転数ごとにびびり振動発生臨界切込み量を算出すると図5に示す

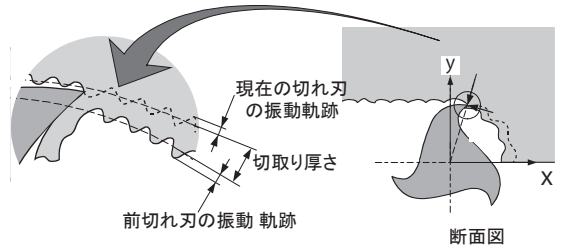


図 4 自励びびり振動の発生メカニズム

表 1 動特性の測定結果

	m, kg	c, N・s/m	k, N/m
X軸方向	2.20	702	33700000
Y軸方向	2.67	809	44600000

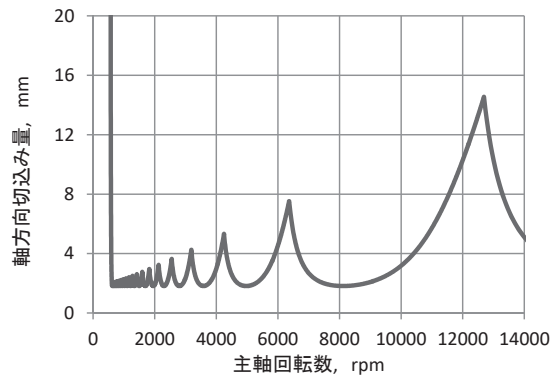


図 5 びびり振動臨界条件の予測結果

ような線図となる。図中では、曲線より上の領域でびびり振動が発生することを表している。縦軸にはエンドミルの軸方向切込み量、すなわち加工量に相関する加工条件パラメータをとっており、主軸回転数の変化により限界加工量が周期的に増減することがわかる。ここで注目されるのは、主軸回転数を6400rpm、12600rpm付近に非常に大きな安定領域が存在することであり、今回対象としたエンドミル加工では、予め主軸回転数をこの安定条件領域に設定することにより、びびり振動の抑制と高効率切削の両立を実現できることになる。

◇ 切削加工シミュレーションを活用した切削条件の最適設計

これまでに切削加工シミュレーションによる工具摩耗およびびびり振動の予測技術について紹介

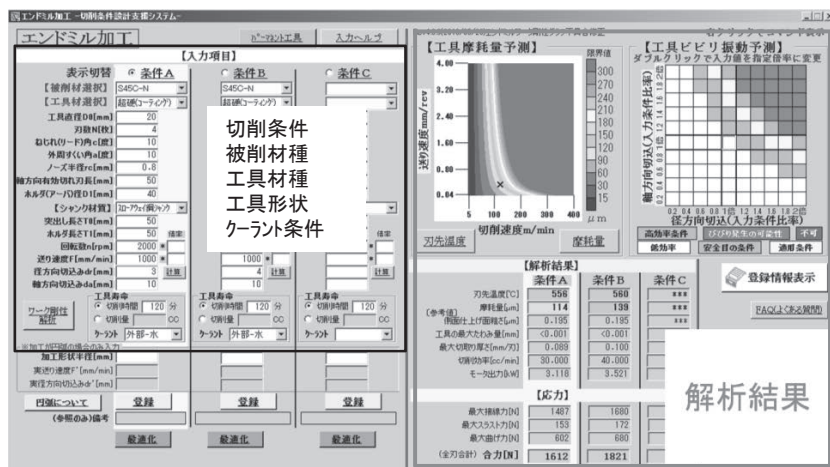


図 6 切削条件最適設計技術の概要

した。これらの予測技術を活用することにより、切削条件を実際の加工の前により良い条件に設計することが可能となる。しかしながら、実際の条件設計に実用化することは容易とは言えず、場合によっては、扱う技術者により設計される条件にばらつきが生じる可能性がある。そこで我々は、切削シミュレーションを活用した切削条件の最適設計をより簡便に行うことができる「切削条件最適設計システム」を開発した。開発システムのインターフェイス画面を図6に示す。図ではエンドミル加工の条件設計時の画面を示している。画面左側では、工具形状や切削条件を入力するが、データベースから数値を呼び出すことも可能としている。また、画面右側はシミュレーション結果を表示しており、特に切削条件設計に際し、重要な工具摩耗とびびり振動の発生条件の予測結果はグラフ化して表示させている。切削条件の設計者は、画面左側に加工する被削材種、使用したい工具の形状と標準の切削条件を入力する。そうすれば、画面右側に所定の時間もしくは除去体積を加工後の工具摩耗の予測値とびびり振動の発生有無の予測結果などが表示される。

ここで、工具摩耗の予測結果に着目してみる。図7に加工時間2時間後の切削速度と切取り厚さの変化に対する工具摩耗量の予測結果を示している。現状の条件を仮に切削速度125m/min、最大切取り厚さ0.35mm（×印）とする。工具寿命とする摩耗量を300μmとすれば、白線で示す切削条件

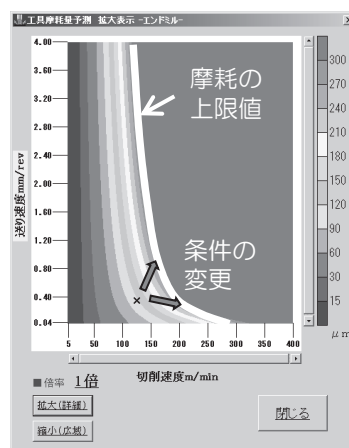


図 7 工具摩耗シミュレーションに基づく切削条件設計

まで切り込み量や送り速度、切削速度を増加させることができることを示している。作業者は線上の切削条件の中でもっとも効率的な条件を選択すればよいことになる。

次に、びびり振動の予測結果に着目してみる。図8に使用工具におけるびびり振動の予測結果を示している。グラフの中心が入力した切削条件（切り込み量）の予測結果を示しており、縦軸、横軸はそれぞれ軸方向、径方向切り込み量の変化を示している。赤色がびびり振動が発生することを表しており、それ以外の色はびびり振動が発生しない。このグラフから現行条件ではびびり振動は発生せず、さらに切り込み量を軸方向切込み、径

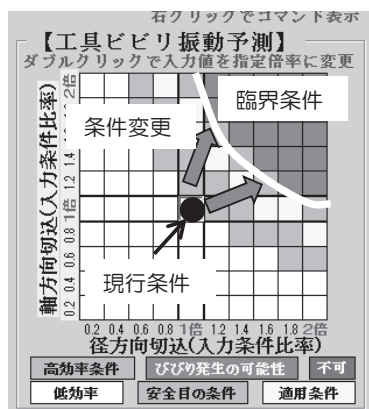


図 8 びり振動シミュレーションに基づく切削条件設計

方向切込みをそれぞれ1.4倍程度まで増やすことが可能であることが視覚的に理解できる。作業者はこのグラフを活用することにより、切り込み量をびり振動の臨界条件まで増加させることが可能となる。

さらに、これらの予測技術を活用することにより、切削条件や工具形状などを最適化することも可能となる。所定の工具寿命を満足し、かつ、びり振動の発生がなく、切削効率が最大化する切

削条件、工具形状の組み合わせを本システムにより、自動的に探索／導出することができるようになる。

むすび

本稿では、実際に切削加工を行う前に、工具摩耗やびり振動などの切削加工シミュレーションを活用して、切削条件を最適設計する取り組みについて紹介した。現在ではこれらと並行して、IoTやビッグデータ活用と言ったように、加工中のさまざまなプロセスデータを取得/収集し、切削加工プロセスをよりよい状態にコントロールする手法が盛んに検討されている。今後、シミュレーションにより事前検討とプロセスデータを活用したインプロセスでの改善の両側からの取り組みにより、難削材料において複雑形状の難加工部品をより効率的にかつより高品質に加工できるようになるものと考えられる。

参考文献

- 1) 赤澤浩一、尾崎勝彦、社本英二：切削条件と被削材成分を考慮した工具摩耗予測システムの開発、精密工学会論文集、75、3 (2009) 396
- 2) Y. Altintas, E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, Annals of the CIRP, 44, 1 (1995) 357

2. 切削シミュレーションと切削工具

三菱マテリアル(株) 加工事業カンパニー 開発本部 加工技術センター センター長補佐 **高橋秀史**

まえがき

近年、切削加工を取り巻く環境は、高度化、多様化している。その要因としては、被削材の難削化、およびグローバル化の進行により、コストダウン競争と諸外国の切削加工技術の向上による技術的な差別化の必要性など多岐にわたっていることが挙げられる。また、切削加工現場には、熟練作業員や職人など、経験豊富な人材の減少が起っており、技術伝承の側面から、切削加工で生じる様々な現象を数値化して、若手作業員へ伝えることの必要性が増してきている。

弊社の顧客となる切削加工メーカー（以下、ユーザー）も同様の環境下となっており、切削工具メーカーに求めるニーズは、単に工具製品の性能にとどまらず、切削加工に関連した周辺の技術に関するソリューションの提供など、多岐にわたっている。

そのようなユーザーのニーズに応えるためには、切削加工に関する諸現象に関して、シミュレーション技術を駆使して、数値化を行い、定性的、定量的な評価を行うことで、切削工具の高性能化を図ることに加えて、ユーザーの状況に応じたソ

リューションの提供が不可欠となっている。

弊社では、20年ほど前から、工具の高性能化、工具開発のフロントローディング化を期したシミュレーションによる工具開発に着手し、様々な新製品を発売してきた。

そして現在では、切削工具へのシミュレーションの活用は、長年取り組んでいる工具開発での活用に加えて、ユーザーへのソリューション提供へと進化させている。

本稿では、弊社の切削工具・切削加工に関わるシミュレーションの取り組み内容を、工具開発とユーザーへのソリューション提供の大きく2つに分類して述べる。

◇ 工具開発におけるシミュレーション

1. 構造シミュレーション、切削シミュレーション

構造シミュレーション、切削シミュレーションは、工具の耐久性や加工品質の向上、生産性の向上などを目的に行われる。主なシミュレーション手法としては有限要素法が挙げられ、様々なCAEベンダーが優れたソフトウェアを多数市場に販売している。弊社では、これらのソフトウェアを、



図 1 切削工具開発におけるシミュレーション

これから示す各取り組み内容に活用している。

図1に概略を示すが、工具開発における構造シミュレーションは、目的に応じて大きく3つに分類される。

- ①ホルダ本体の変形、振動、応力などを求める（構造線形シミュレーション）。
- ②工具の締結、インサート（切れ刃に相当する部分を含む交換部材）の締結など、接触を伴うシミュレーションで保持力や締結力を求める（構造非線形シミュレーション）。
- ③切削加工で生じる切りくず形状、切削温度、切削力などを求める（材料・構造非線形シミュレーション）。

弊社ではこれまでに、①から順に工具開発への適用を行い、現在では比較的難易度の高い②や③の非線形問題を扱うシミュレーションも可能となった。

構造線形シミュレーションの①では、切削抵抗がかかった際の応力やたわみなどをシミュレーションにより評価し、壊れにくい、精度がよいといった工具の高品質化を達成するために用いられる。

構造非線形シミュレーションの②では、インサート保持の安定性や、ホルダの保持力確保など、アセンブリ状態の工具の性能評価に用いられる。

②に材料非線形シミュレーションを加えた③では、切削試験では測定が困難なもの（例えば刃先の応力や刃先の温度など）、あるいは切削試験を行う前の検証において、切削加工で生じる諸現象をシミュレーションによって求めることにより、工具開発に役立てている。

2. 流体シミュレーション

切削加工の際に用いられるクーラント（切削油）は大きく2点の効能がある。

①冷却性能

切削中に生じる切削熱を吸収し、切削温度を下げ、工具の長寿命化や被削材への熱の影響を少なくする。

②潤滑性能

工具と被削材の界面での潤滑性を上げることで、被削材の仕上げ面品位をよくする。

これらの効能により、クーラントを使用することは、コストダウンや加工品質に大きく寄与する

ため、切削加工において重要なファクターとなる。

工具の高性能化の要望に伴い、弊社では、クーラントの効能を最大限に発揮するために、より適したクーラント供給を可能にすることを目的とした、流体シミュレーションを活用した工具開発に取り組んでいる。

図2に、流体シミュレーションを適用し、開発を行った工具の一例を示す。本例は、ノズルから噴射されたクーラントが、切削温度が高温となるインサートの刃先先端へ、無駄なく効率的に供給できるように流体シミュレーションを適用したものである。

シミュレーションの手順としては、工作機械のクーラントの圧力を元にして、工具内部のクーラント流れを求めたのち、ノズルから噴射されるクーラント状態のシミュレーションを行い、工具刃先へのクーラント流量などを求める。こうすることで、刃先近傍に到達するクーラントの数値化が可能となり、冷却性能の指標として活用することができる。

本手法を用いることで、工具寿命の延長、切削条件の高能率化において、従来の工具よりも、優れた性能を有する工具の開発に成功¹⁾し、ユーザーでのコストダウンに寄与できる製品を提供することが可能となった。

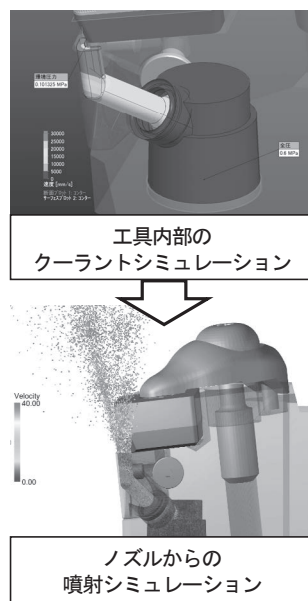


図2 流体シミュレーションの応用例

◇ ソリューション提供におけるシミュレーション

1. 切削負荷シミュレーション

ユーザーが製品を切削加工で加工し、最終製品形状に仕上げるためには、様々な加工方法や、工具を用いて行う。特に、ツールパスと呼ばれる工具の軌跡を決める場合には、工具メーカーから提供される推奨の切削条件や、ユーザーの機械設備の状況や被削材の形状、あるいは、切削加工の経験などで行っているケースが主である。

ユーザーにおいては、切削加工時間や工具費等が製品のコストにかかっており、製品の価格競争力、収益力を上げるためには、切削加工のコストダウンは日常的な改善課題となっている。

弊社では、ユーザーの課題解決を図るべく、数年前から、切削負荷の可視化により負荷を均一化することで、加工安定性と加工能率向上を図り、コストダウンを達成するためのソリューション提供を行っている。

概略を図3に示すが、手順としては下記となる。

目標とする形状に加工するために必要なツールパス、切削条件をベースに、切削抵抗の算出を行う。図3のケースでは、切削抵抗の大小が認められる。

次に、許容可能な切削抵抗値に均一になるよう

に、特に加工時間に影響する送り速度をコントロールすることで、全体的な加工時間の短縮を図ることができる。また、本例では送り速度のみの変更を行っているが、切削抵抗の差が大きい場合にはツールパスそのものの変更を行う場合もある。

このように、切削抵抗の可視化を行うことで、負荷を均一化するための切削条件を選定し、本手法による加工時間の短縮を図ることで、ユーザーのコストダウンに寄与している。

2. 被削材クランプシミュレーション

被削材を加工する際には、工作機械の中に被削材をクランプ（保持）する必要がある。この被削材のクランプは大変重要であり、クランプの優劣が、切削加工で製作された製品品質の良し悪しに直結する。

具体的には、被削材のクランプ状態が悪く、クランプ剛性が低い場合には、切削中にビビリ振動が生じやすくなるため、仕上げ面性状が悪くなることや、工具の欠損などが生じる恐れがある。また、切削抵抗により被削材がたわみ、所定の寸法、幾何公差を満足しえない恐れがある。さらに悪い状況としては、切削抵抗によって、被削材が飛んでしまうといった状況も想定され、そのようなケースでは機械が破損、故障してしまうことも考えられる。

上記の問題点は、逆の視点で見ると、クラ

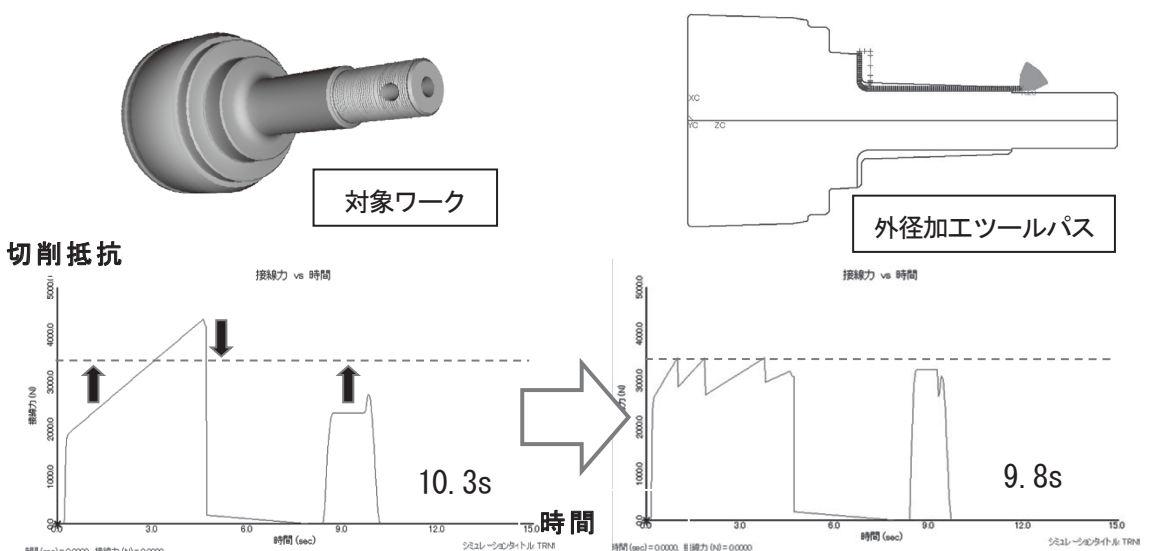


図 3 切削負荷シミュレーション

ンプ剛性を上げることができれば、ビビリ振動が起きにくく、仕上げ面品位も良くすることができ、さらに被削材の変形を抑えることで、寸法、幾何公差を狙いの値に上げることができる。また、被削材の十分なクランプ剛性は、切削加工作業の安全性の確保につながり、必要不可欠なものである。

ところが、近年の被削材形状は複雑化しているため、十分なクランプ剛性を即座に満足することが大変難しくなっている。切削加工で問題を生じさせないクランプ剛性を満足するクランプ力、クランプ位置を決めるためには、トライアンドエ

ラーで行う必要があり、大変な労力がかかっている。

以上のような課題から、被削材のクランプ剛性について、シミュレーションを用いて検討したいといったユーザーニーズが大変増えてきている。

切削工具メーカーである弊社は、工具メーカーの利点を生かし、前述した切削シミュレーションと被削材クランプシミュレーションを融合し、切削時に生じる切削抵抗を入力条件として、被削材の変形や剛性をシミュレーションするといったソリューションを提供し、被削材のクランプに使用する治具の選定やクランプ箇所、あるいはツールパスに至るまで、一段高いレベルでの品質を実現するための切削加工ソリューションを提供している（図4）。

むすび

以上、大きく2つの分野に分けて、弊社の切削シミュレーションと切削工具について述べてきた。切削加工を取り巻く環境は、今後、さらにグローバル化が進み、より一層の切削工具の高性能化、切削加工のコストダウン、高品質化を追求することになるであろう。また、切削加工を熟知した人材も年々減少すると考えられ、切削加工における現象の数値化の要求もますます高まってくると思われる。

弊社では、本稿で説明した切削工具に関連する様々な角度からのシミュレーション技術を進化、発展させ、今後さらに高度化、複雑化すると思われるこれからの市場ニーズに、的確に 대응していく所存である。

参考文献

- 1) 高橋秀史：次世代クーラント技術「ジェットテック」、機械と工具、2016年3月号、pp. 62-65

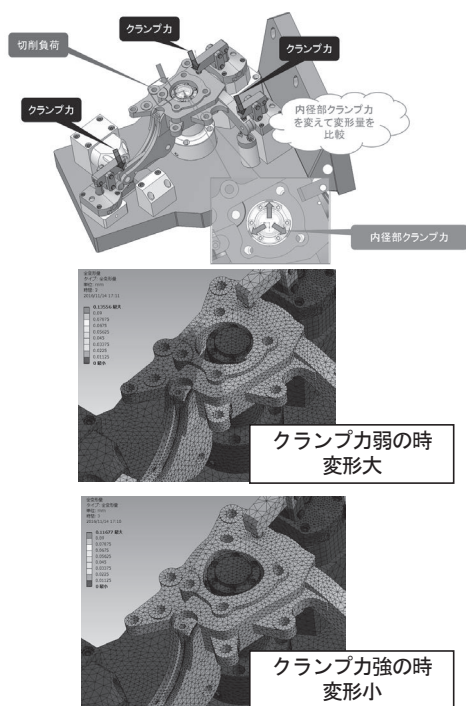


図 4 被削材クランプシミュレーション
治具モデル：株式会社オーケーエス様ご提供

V. 溶接・接合とシミュレーション

—溶接・接合部の材料挙動シミュレーション、 組織予測と特性予測—

大阪大学大学院工学研究科 さい だ かず よし
マテリアル生産科学専攻 教授 **才 田 一 幸**

まえがき

近年のコンピュータの進歩、発展はめざましく、コンピュータ援用による革新的溶接・接合技術は、多くの製造現場で実用的に適用されるに至っている。また、コンピュータの発展は、溶接・接合に関する学理の解明に対しても多くの恩恵をもたらし、これまでは不可能であった高速かつ大規模計算が可能となり、多くの現象が複雑に関与する溶接・接合現象の定量的解析に絶大な威力を発揮している。溶接・接合に関わる材料科学分野もその例外でなく、計算機シミュレーション技術は、溶接・接合部の欠陥発生や継手特性に密接に関連する材料挙動を定量的に解析したり、高度に制御する上で、必要不可欠なツールとなっている。溶接・接合の材料科学分野におけるモデリングおよびシミュレーション研究は、定量的取り扱い→モデリング→計算機シミュレーション→可視化→最適化へと発展してきているが、計算機シミュレーション技術は、材料学的現象の解析・理解のみならず、教育・啓発への活用、プロセス・材料の最適化に対しても、非常に重要なアプローチ手法として認識されている。さらに、ごく最近のコンピュータ技術の急速な進歩により、新しい解析手法の提案・適用や、これまで困難であった詳細解析や大規模解析が行えるようになり、解析結果もフルカラー画像や動画など理解しやすい形式で表示する技術（可視化）も進歩してきている。

本稿では、溶接・接合部の材料挙動のシミュレーション研究として、溶接・接合部の組織予測および特性予測の動向について紹介する。

◇ 溶接・接合部の材料挙動シミュレーションの目的および一般的手法

溶接・接合における材料学的現象のシミュレーション研究は、①溶接・接合部の高信頼性化やコスト低減を目指したプロセスパラメータの最適化、②材料挙動や特性変化の理解を通じた溶接・接合技術の啓発・知識伝承、③溶接・接合欠陥発生・特性劣化の機構解明、④長期間使用時の特性予測、などを目的として行われている。

溶接・接合部の材料挙動を理解するためには、まず、溶接・接合過程における熱サイクルや温度分布を知ることが必要である。溶接・接合プロセスには多くの物理現象が含まれるため、溶接・接合方法や熱源の種類、材質や継手形状などにより、溶接・接合部の熱サイクルや温度分布が微妙に変化する。このため、溶接・接合過程における温度変化や分布を厳密に求めることは一般に困難とされるが、固相状態での温度を解析するための近似的な取り扱いとしては、Fickの熱伝導方程式を基礎式とした定常あるいは非定常熱伝導解析が有効である。これに対して、熔融・凝固過程（液相状態）での温度を正確に解析する有効な手法は確立されておらず、熱伝導解析を外挿的に適用しているのが現状である。

溶接・接合部の温度解析結果をもとに溶接・接合部における材料挙動を解析するためには、等温・均熱状態における材料挙動解析を非等温過程および温度場（溶接・接合過程の熱サイクル・温度場）に拡張することが必要である。等温過程の材料挙動解析を非等温過程へ拡張する方法としては、①現象論方程式（支配方程式）に温度依存性を追加、②微小等温過程に分割して増分法や加算

則を適用、③データベース応用による推定、などが考えられる。また、温度場への拡張方法としては、①熱伝導解析と連成、②微小均熱領域に分割（空間的離散化）、などが挙げられる。これまでの検討の多くでは、熱伝導解析結果に基づき、空間的離散化し、増分法や加算則を用いる解析手法が適用されており、比較的簡便で、かつ、精度の高い解析が可能とされている。

実際の溶接・接合部における材料挙動（組織変化や特性変化など）は、温度以外にも、流動や応力・歪みなどの影響も受けることから、溶接・接合部における材料挙動のより精密な可視化理解のためには、熱伝導解析のみならず、流体解析や応力・歪み解析を材料挙動解析と連成して解析する必要がある。連成解析で注意すべき点は、各解析間の解析スケールの大きな差異である。すなわち、材料挙動の多くは金属組織オーダー（ μm 以下）で生じるのに対して、流動挙動や応力・歪み挙動の解析では計算機容量の観点から、解析オーダーをかなり大きく（mm程度に）せざるを得ない。したがって、多くの連成解析ではマイクロ・マクロ連成やズーミングなどの手法を導入することが必要となる。

◇ シミュレーション研究のトピックス

1. 溶接・接合部組織形成および予測

モンテカルロ法と熱力学計算（Thermo-Calc）の連成解析（ハイブリッドモデル）による溶接部組織形成シミュレーション例を図1¹⁾に示す。柱状晶が溶接熱影響部から最大温度勾配方向に沿ってエピタキシャル成長し、溶融池を追うように成

長する様子が再現され、実溶接部組織とよく対応することが示されている。

リーニ二相および標準二相ステンレス鋼多層盛溶接部におけるフェライト／オーステナイト変態を速度論的解析と熱伝導解析を組み合わせた手法により予測した。3層4パスの多層盛溶接（溶加材は母材と同一組成と仮定）を対象に、溶接部におけるオーステナイト量を予測した例を図2²⁾に示す。溶接金属および溶接熱影響部中のオーステナイト量が低下した領域の一部は、次層パスの溶接熱影響により、オーステナイト量が回復していることがわかる。特に、リーニ二相ステンレス鋼ではビード下領域のオーステナイト量が母材同等に増加するが、標準二相ステンレス鋼では、オー

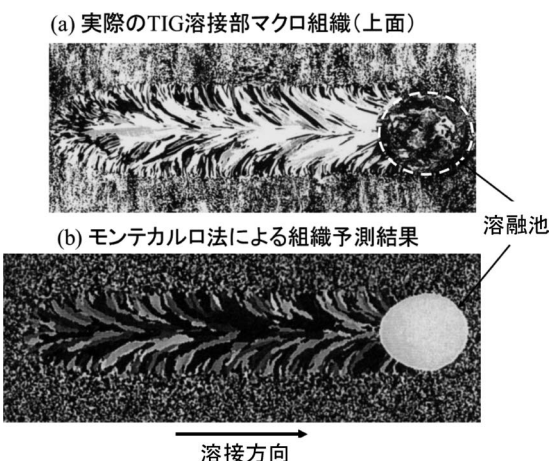


図 1 モンテカルロ法とThermo-Calcの連成解析による炭素鋼溶接部の組織形成シミュレーション事例

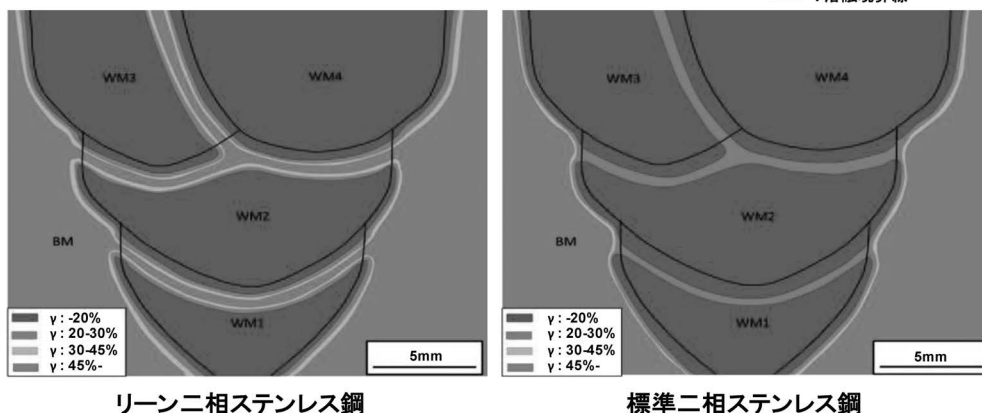


図 2 リーニ二相および標準二相ステンレス鋼多層盛溶接部における相変態予測シミュレーション事例

ステナイト固溶速度が大きく析出速度が小さいため、ビード下領域のオーステナイト量が母材同等まで回復しないことが予測される。

2. 高温割れシミュレーション

過冷理論／凝固偏析理論による凝固割れ感受性（凝固割れの延性曲線）と、応力・ひずみ解析（熱弾塑性FEM解析）によるひずみ曲線の対応関係に基づき、溶接部における高温割れ（凝固割れ）の発生を予測した。冶金＋力学融合モデルによるステンレス鋼レーザ溶接部の高温割れ（凝固割れ）のシミュレーション例を図3³⁾に示す。溶接の進行に伴い溶融池後方の凝固脆性温度相当域から割れが発生し、その後、割れが進展していき最終的に停止している様子が確認できる。このように、冶金＋力学融合モデルにより、高温割れの発生→伝播→停止の一連の過程が予測可能であることがわかる。

3. 溶接・接合部の特性予測

ニューラルネットワークによる低合金鋼多層盛溶接熱影響部における硬さおよび靱性予測シミュレーション例を図4⁴⁾に示す。多層盛溶接過程の熱伝導解析（多重熱サイクル計算）とニューラルネットワーク計算を組み合わせることにより、多

層盛溶接熱影響部の硬さ分布および靱性分布を可視化予測できることが示されている。

◇ シミュレーション研究の今後の課題

溶接・接合における材料学的現象のシミュレーション研究の今後の課題としては、学術面では、①適用理論式の確立（適用範囲の拡大）、②材料定数（物性値）の充実、③連成問題への展開、④非平衡・準安定状態の取り扱い、応用面では、①特性／欠陥予測とその制御への拡張、②材料設計への応用、③プロセスパラメータ最適化へのアプローチ、④教育・啓発への応用（可視化理解）、などが挙げられる。これらの課題を克服しつつ、シミュレーション研究が一層進展することを期待したい。

参考文献

- 1) 野上、小関、福田：日本金属学会報、42 (2003)、731
- 2) 才田：溶接学会技術資料No. 16「溶接冶金現象のシミュレーションと可視化」、(2016)、118
- 3) 柴原、原田、生島：溶接学会全国大会講演概要、97 (2015)、50
- 4) L. Yu, M. Sasa, K. Ohnishi, M. Kameyama, S. Hirano, N. Chigusa, T. Sera, K. Saida, M. Mochizuki and K. Nishimoto: Quart. J. JWS, 31 (2013)、173s

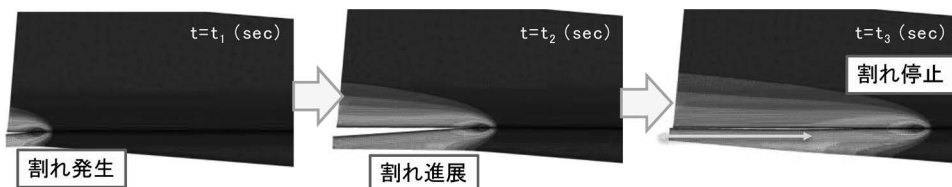


図 3 冶金＋力学融合モデルによるステンレス鋼レーザ溶接部の高温割れシミュレーション事例

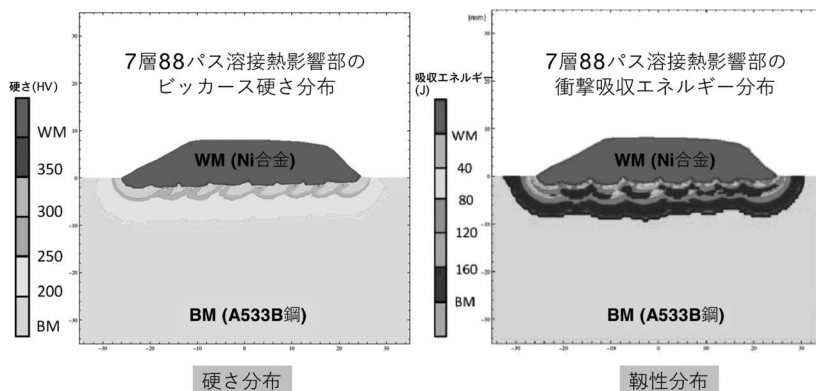


図 4 ベイジアンニューラルネットワークによる低合金鋼多層盛溶接熱影響部における硬さ・靱性予測事例

VI. フェーズフィールド法と特性計算の新潮流

名古屋大学大学院工学研究科 教授 こ やま とし ゆき
小 山 敏 幸

ま え が き

近年のマテリアルズインフォマティクスの台頭の下、材料設計・開発におけるキーテクノロジーとして“材料組織”の効率的最適化が改めて注目度を増している^{1)~5)}。材料組織とは、顕微鏡で観察されるメソスケール（およそ数nm~数百 μ m程度）の不均一パターンであり、そのパターン内の構成要素（相）の分率・サイズ・形態が、機械的・熱的・電気的・磁氣的・化学的特性等々、各種機能の発現に影響を及ぼす。したがって、メソスケールの組織形成をいかに正しく理解し制御するかが、多くの材料開発・設計の主要課題であり、シミュレーション分野では、材料の組織・特性を高い精度で予測し、部材やデバイスの設計指針を短期間で絞り込む研究の重要度が拡大している。この実現のため、現在、データサイエンス分野で培われた最適化手法を材料工学に援用する試みが全世界的な流れとなっている。すなわち、理論・実験・シミュレーションを、データサイエンスのノウハウにて縦横に結び付け、材料開発手順の自由度を多軸的に拡大する新たな方法論の構築が大きな潮流である。以下では、フェーズフィールド法の近年の動き、組織と特性計算に関するトピックスを取り上げるとともに、データサイエンスと材料研究の今後について説明する。なお分野が広大であり、かつ紙面が限られるため図の掲載は見送った。興味ある方は、概当箇所の参考文献やURLをご参照いただきたい。

◇ フェーズフィールド法における新潮流

材料組織を扱う計算法には、フェーズフィールド法、モンテカルロ法、セルオートマトン法などがある⁶⁾。この中でも特にフェーズフィールド法は材料組織における広範な諸現象をモデル化するスタンダードとして定着した感がある^{7)~11)}。フェーズフィールド法は主にメソスコピックな材

料組織形成を扱う手法であるため、第一原理計算から得られるナノスケールの知見と、有限要素法などのマクロスケールの部材性能設計とを結ぶ、いわゆるスケールブリッジングにおいて重要な役割を果たすと期待されている。

フェーズフィールド法自体の発展も現在絶え間なく続いている。従来、局所平衡を前提とした解析が主流であったが、近年非平衡状態をも考慮した新手法が提案された^{12), 13)}。非平衡フェーズフィールド法と呼ばれるこの新手法は、これまでの局所平衡の解を自動的に含んでおり、かつ計算手法が従来のアルゴリズムに比較して、よりシンプルなものとなっているため、今後、大きく広がる可能性を秘めている。他方、化学反応を直接考慮した組織形成の計算手法も最近提案され、電池等の化学反応を含む現象も直接扱うことが出来るようになりつつある^{14), 15)}。さらに計算理論自体の大きな進展として、全自由エネルギー汎関数を用いた従来の解析を超えた、グランドポテンシャルを用いた新解析法も提案された。これは発展方程式の基軸変数を示量変数から示教変数に変換した手法であり、希薄合金における拡散など、従来法で解析困難であった分野を高精度に解析する道を拓いた¹⁶⁾。また近年、凝固の大規模分子動力学シミュレーション、デンドライト成長の計算理論の超高精度化、およびその超大規模フェーズフィールドシミュレーションを連携させた超大規模高精度マルチスケール計算が、わが国にて大きく進展している¹⁷⁾。2011年に東工大のスパコンTSUBAME 2.0を用いたデンドライト成長のフェーズフィールドシミュレーションがGordon Bell賞・特別賞を受賞¹⁸⁾したが、この発展形に位置づけられる研究であり、世界的評価も高く、日本が世界をリードする分野の一つとなっている。他方、フェーズフィールド法のソフト開発では、ACCESS e.V社の商用ソフトMICRESSや、ルール大学のフリーソフトOpenPhaseなど、ドイツが大きく先行している²⁾。

◇ フェーズフィールド法と特性計算の連携

材料開発において重要な柱は、(1) 単相の物質定数の解析、(2) 組織形成の解析、および(3) 特性の解析であろう。(1) は第一原理計算および原子・分子シミュレーションを活用した、格子定数、弾性定数、界面エネルギー密度などの物質定数の推定、および平衡状態図の熱力学的データベース構築である(第一原理状態図計算も含む)。(2) はフェーズフィールド法を軸足に、材料における各種の内部組織形成の定量的モデル化である。(3) は(1)と(2)にて集積された相と組織の情報を境界条件とした材料特性予測であり、例えばイメージベース解析の例として、力学特性では均質化法¹⁹⁾や改良型セカント法^{20)、21)}、また磁気特性ではマイクロマグネティクス解析²²⁾などがある。トポロジー最適化²³⁾も近年大きく進展している分野で、特に3Dプリンターによる実験との連携により、実験とシミュレーションの双方からの最適組織の検証が可能になりつつある。上記(1)~(3)を相互かつ柔軟に連携させることが重要である。学術的な観点からは、すぐにマルチスケール・マルチフィジックスの視点で上記(1)~(3)を有機的に統合することを考えがちであるが、短期的にはこの方向性は効率的ではない。短期的に目に見える成果が期待できるのは、“有機的統合”ではなく“ブリッジ的連携”であり、世界的にも材料工学の研究はこちらにシフトした²⁾。(1)~(3)はすでに個別の分野を確立しているので、それぞれの手法のインプットおよびアウトプットの連携をまず考えることが明らかに早道である。

◇ データサイエンスと材料工学

以上の背景の下、現在、大きなパラダイムシフトが到来している。材料工学におけるデータサイエンス・インフォマティクスの活用である。まず工学における開発研究の観点からインフォマティクスを定義しておこう。インフォマティクスとは「探索や最適化の圧倒的高効率化を実現する手法論(知りたいことに、迅速・効率的にたどり着く方法論)」である。ビッグデータを活用したインフォマティクスが威力を発揮できる必要条件是以下の4つにまとめられる。(1) 観測/実験データの高精

度化、大容量化、共有化。(2) 理論とシミュレーションの高度化(データ間を縦横に結ぶパーツの充実)、(3) 機械学習手法の高度化・実用化(数学手法の整備と計算機能力の向上)、および(4) 人材育成。材料工学分野の近年の発展を眺めると、材料の計測・分析機器の発展、および理論・シミュレーションによる解析手法の進展に伴い、これら4条件が整い始めた。気象やインターネット分野ほどの日常的なビッグデータ取得には至っていないが、当該分野の研究開発に手をかけられる段階に到達したと理解してさしつかえないであろう。以下ではデータサイエンスと材料工学の将来展望について私見を述べさせていただく。

1. 逆問題によるパラメータ推定

材料工学では、各種の構成式や理論・シミュレーション内には、必ずと言ってよいほど、値が明確でない材料パラメータが存在する。機械学習^{24)~27)}は逆問題に関する数学手法の宝庫(各種フィルタ法、アジョイント法、近似ベイズ、MCMC、…)であるので、逆問題式に材料パラメータ値を推定することは非常に有効である。特に実験測定装置の高度化とシミュレーション手法の拡大は、逆問題解析の可能性を大きく後押ししている。シミュレーション結果は実験で測定できる量である場合が多いので、両者が一致する確率を用いて計算内で用いた各種定数値の尤度をベイズ推定する手法は、材料工学に多大な恩恵をもたらす。

2. 特性に関する因子分析・感度解析

材料開発の主目的の一つは特性の最適化であるが、特性に影響する諸因子が極めて多種多様である場合が多い(スケール・履歴・プロセスなど全てが影響する)。通常、特性を支配する因子は複数存在し、条件によってその重要度が入り替わることもある。したがって、特性に影響する因子の優先順位と個々の因子の特性に及ぼす寄与率(感度)を、迅速かつ定量的に知る方法論の確立は、材料開発の根本的課題であろう。さて逆解析は、パラメータ値と結果を結びつける方法論であるので、パラメータ値の変化による特性の変動も同時に解析できる。当然ながら、パラメータ値の微小変化で特性が大変動する場合、そのパラメータは主要な因子であろう。つまり逆解析は因子分析・感度解析を内包している。

3. 仮想スクリーニング

仮想スクリーニング²⁸⁾は、計算が重いが高精度の高いシミュレーションが存在する分野で大きな威力を発揮する。手順は以下のとおりである。(1) まず精度の高いシミュレーションを、代表的なパラメータセットについて実行し、出力と入力とのデータセットを作成する(多いほどよい)。(2) これらを学習能力の高い軽いニューラルネットワーク²⁴⁾に学習させ、シミュレーションの簡易コピーを作成する。(3) 学習済ニューラルネットワークにて目的候補を広域探索し、候補を選出する。(3) 得られた候補に対して、再度、元の正確なシミュレーション(重い計算)で結果を確認する。なお簡易システム自体が得られる点も当然ながら利点である。

4. データ認識・分類の精度・操作性向上

これは最適化対象の自由度が大きい場合の問題である。鉄鋼材料組織などはその典型で、パーライト、ベイナイト、マルテンサイトといっても、それぞれに多様な形態が存在し、現在においても、これら組織を完全に識別する数学的指標は無い(通常、光学顕微鏡等で、目で見て判断している)。材料組織の最適化を実現する場合、対象が明確に定義されなければ、精緻な最適化が不可能なことは自明であろう。もちろん平均的な最適化は可能であるが、次世代の先進材料に対する精緻な制御には不十分である。問題の根源は、複雑・多様な材料組織の画像認識の問題であるが、この問題は、機械学習における画像認識技術の発展²⁹⁾によってほぼ解消された。したがって、相変態・析出組織、変形組織、再結晶組織、結晶方位組織、など適用対象は無限であり、かつ学習による各種ノイズ除去・データの自動認識向上も加わり、材料組織の最適化効率とその精度アップが恩恵をもたらす分野ははかり知れない。

5. 検量線(現象論・理論・計算)の非線形内挿

検量線の非線形精緻化の問題である。深層学習により、多変数・非線形な検量線の精緻化を進め、超空間における領域分離を容易に解析できるようにすることは有益である。たとえば、Ms点、キュリー点、および破壊靱性などを、2,000くらいのパラメータ空間で、容易かつ精緻に非線形近似できたら、材料のスクリーニングに革命が起こるかもしれない。

6. 必要なデータの識別

いわゆるデータの重要度の選別である。ビッグデータそのものを自在に操るノウハウは重要であるが、求める結果に対して、必要なデータと無意味なデータを識別する手法も重要である。インフォマティクスにおける手法としてはスパース学習²⁴⁾が典型例であろう。ラッソ解析はペナルティー項のパラメータ空間における軸上を効果的に活用して不要なデータをそぎ落とす有益な手法であるが、スパース学習で最も重要な部分は、評価関数(名称が分野によって異なるが、たとえば二乗誤差を計算する部分が対応)内の“材料モデル”である。理由は簡単で、神技のような「材料モデル」が確立されていればデータは不要である(すべて計算で出せばよい、究極のスパースモデルである)。したがって、材料工学の観点からは注力すべきはまず材料モデル側であり、それを補助する役割が、スパース学習である点を強調しておきたい。

7. 不要なデータや間接データの重要性

インフォマティクスは基本的には探索・最適化の手法であり、特にビッグデータの存在下で大きな威力を発揮する。重要なパラダイムシフトは、これまで不要と思われていたデータが意味を持つことである。材料開発の実験で思いがけない結果が出なかった場合、通常そのデータが活用されることは稀である。しかし最適化の特徴空間を構成する際、最適解近傍のデータはもちろん必要であるが、最適解からある程度離れたデータも必要である(これが無いと最適解であることが機械学習で決められない)。さらに間接的な実験情報(実験装置自体の温度や試験時の音など)も、プロセス最適化の観点からは、データ同化の対象になり得る。つまり、これまであまり注目されてこなかった情報が、探索・最適化において貴重なデータとなる可能性が浮上した。材料設計・プロセス設計の方向性に本質的な変革が生まれる可能性が高く興味深い。

むすび

材料開発は、本質的に、複雑な現象の最適化の色彩が強いので、やはり将来的に試行錯誤的開発手法が消えることは無いであろう。しかし試行錯誤の効率を向上させることはできる。特にデータサイエンスの機械学習は、この効率を一気に高め

る新しいツール群であり、まさに材料設計の基本的アプローチが新しいステージに入りつつあるように思われる。材料の中でも群を抜いて複雑な内部組織を持つ「特殊鋼」の分野は、この恩恵を最も享受できる分野かもしれない。

参考文献

- 1) 研究開発の俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野 (2015年)、(<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-05.pdf>、2017年5月現在)
- 2) 研究開発の俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野 (2017年)、(<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/FR/CRDS-FY2016-FR-05.pdf>、2017年5月現在)
- 3) Modeling Across Scales: A Roadmapping Study for Connecting Materials Models and Simulations Across Length and Time Scales (www.tms.org/multiscalestudy、2017年5月現在)
- 4) K. Rajan (編著)、“Informatics for Materials Science and Engineering”、Elsevier、(2013)
- 5) “Microstructure Informatics in Process-Structure-Property Relations”、MRS Bulletin、41 (2016)
- 6) D. Raabe (著)、酒井信介、泉聡志 (訳) : 「コンピュータ材料科学」、森北出版、(2004)
- 7) 小山敏幸 : 「材料設計計算工学 (計算組織学編)」、内田老鶴圃、(2011)
- 8) 小山敏幸、塚田祐貴 : 「材料組織弾性学と組織形成」、内田老鶴圃、(2012)
- 9) 高木知弘、山中見徳 : 「フェーズフィールド法」、養賢堂、(2012)
- 10) 小山敏幸、高木知弘 : 「フェーズフィールド法入門」、丸善、(2013)
- 11) 新家光雄 (編)、足立吉隆、小山敏幸 (著) : 「3D材料組織・特性解析の基礎と応用」、内田老鶴圃、(2014)
- 12) Steinbach, L. Zhang and M. Plapp, Acta Materialia, 60 (2012)、2689-2701
- 13) 小山敏幸、塚田祐貴、阿部太一、小林能直 : 日本金属学会誌、81 (2017)、43-48
- 14) L. Liang, Y. Qi, F. Xue, S. Bhattacharya, S. J. Harris and L. -Q. Chen, Phys. Rev., E, 86 (2012)、051609
- 15) S. Yamakawa, H. Yamasaki, T. Koyama and R. Asahi: Solid State Ionics, 262 (2014)、56-60
- 16) L. T. Mushongera, M. Fleck, J. Kundin, Y. Wang and H. Emmerich, Acta Materialia, 93 (2015)、60-72
- 17) Y. Shibuta, M. Ohno and T. Takaki, JOM, 64 (2015)、1793-1804
- 18) たとえば、(<http://www.gsic.titech.ac.jp/sites/default/files/gordonbell.pdf>、2017年5月現在)
- 19) 寺田賢二郎、菊池昇 : 「均質化法入門」、丸善、(2003)
- 20) 小山敏幸 : 鉄と鋼、97 (2011)、212-220
- 21) T. Koyama: ISIJ International, 52 (2012)、723-728
- 22) T. Koyama: SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS, 9 (2008)、013006
- 23) 西脇眞二、泉井一浩、菊池昇 : 「トポロジー最適化」、丸善、(2013)
- 24) 杉山将 : 「イラストで学ぶ機械学習」、講談社、(2013)
- 25) 樋口知之 (編著) : 「データ同化入門 (予測と発見の科学)」、朝倉書店、(2011)
- 26) 淡路敏之、池田元美、石川洋一、蒲地政文 : 「データ同化一観測・実験とモデルを融合するイノベーション」、京都大学学術出版会、(2009)
- 27) たとえば、機械学習プロフェッショナルシリーズ、講談社
- 28) たとえば、(http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2015/documents/151113_1/01.pdf、2017年5月現在)、材料探索にける仮想スクリーニングの活用
- 29) 岡谷貴之 : 深層学習 (機械学習プロフェッショナルシリーズ)、講談社、(2015)

VII. 会員会社のシミュレーション技術

■ 愛知製鋼㈱

熱流体シミュレーション技術

ま え が き

特殊鋼の製造プロセスにおける数値シミュレーション技術は、熱処理・塑性加工など材料に着目した適用が広く進められており、当社でも多くの工程に適用している。計算機性能の向上により、材料だけでなくその回りを包む水や空気などの流体を考慮したシミュレーションも現実的となっている。

上記時流の変化から、当社では特殊鋼製造プロセスの周辺で起こる流れの解析や、溶融金属の流動・その凝固解析への取り組みを推進している。以下に熱流体シミュレーションの適用箇所やその事例について概説する。

◇ 適用箇所

特殊鋼製造プロセスにおける熱流体シミュレーション適用箇所の例を表1に示す。

原材料を溶解し得られる溶鋼は流動するため熱流体解析を適用することが出来る。電気炉内の溶鋼は攪拌・加熱が行われ、その流動と温度分布を予測することは重要となる。

溶鋼凝固過程の予測にも熱流体シミュレーションが適用される。鑄片のマクロな凝固形態を把握

表 1 熱流体シミュレーションの主な適用箇所

工程	適用箇所	解析対象	概要
製鋼	電気炉	溶鋼流動	電気炉内溶鋼の流動と温度分布予測
		溶鋼温度	
		攪拌ガス流動	
鑄造	タンディッシュ	溶鋼流動	タンディッシュ内溶鋼の流動と温度分布予測
		溶鋼温度	
		介在物流動	
	連続鑄造機 鑄造鑄型	凝固時間	連続鑄造ビレット・鑄造鑄型内の凝固予測
		温度分布 引け果	
圧延 鍛造	加熱炉	炉内温度分布	加熱炉内のガス流動と温度分布予測
		バーナー燃焼	
	金型	金型温度分布	鍛造金型の冷却による金型温度予測

することで、その後の圧延工程の設計や、塑性加工シミュレーション活用への効果が期待される。

加熱炉内部の温度分布を予測することは熱処理シミュレーションの精度向上に貢献する。炉内の伝熱は輻射が支配的であるが、高品質な製品性能を追求するためには熱流体シミュレーション結果が必要となる。

◇ 適用事例

ここでは当社における熱流体シミュレーションを適用した改善事例を紹介する。

精錬工程にて成分・温度を調整した溶鋼は取鍋にて連続鑄造工程へと運ばれる。タンディッシュと呼ばれる一次貯蔵容器が取鍋の溶鋼を受けた後、タンディッシュから連続鑄造鑄型へと溶鋼が注ぎ込まれる。タンディッシュは取鍋が空になり交換を行う際にバフファとして機能し連続的な操業を可能とする役割がある。異鋼種への切り替え時にはタンディッシュ内の溶鋼を空とする。

異鋼種切り替え時の取鍋からタンディッシュへの溶鋼注入直後に、まれに溶鋼が凝固し、連続鑄造鑄型への溶鋼注入ノズル詰まりが発生していた。溶鋼注入ノズル詰まりの発生箇所は、タンディッシュの外側に位置するストランドに集中していた(図1の1、3ストランド)。

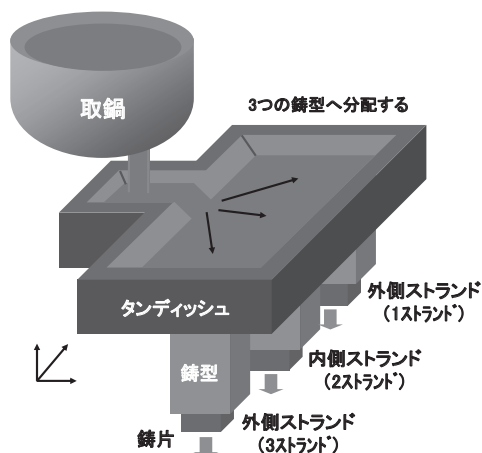


図 1 連続鑄造機の概要
(当社 No. 3 ブルーム連続鑄造機)

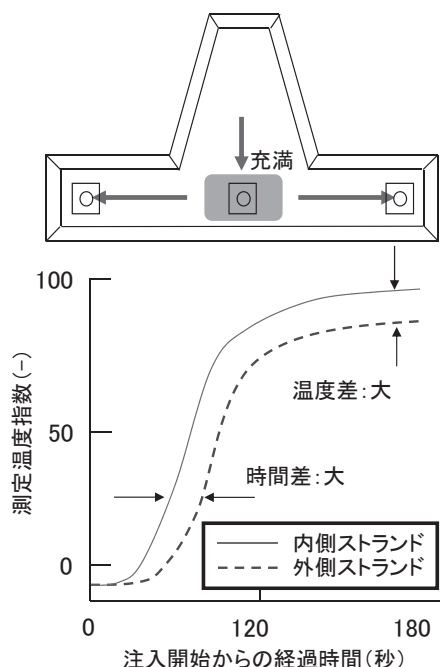


図 2 注入開始直後の溶鋼流動と温度変化（現状）

そこでタンディッシュ内部の温度分布と溶鋼の流れを把握するため、ストランド周辺の溶鋼温度実測および熱流体シミュレーションを実施した。

現状のタンディッシュ形状では、内側ストランド周辺から温度が上昇し、外側ストランドの温度上昇が遅いことが実測結果から確認出来た（図2の下グラフ）。

実機での溶鋼流動を観察することは困難であるため、熱流体シミュレーションを実施したところ同様の温度変化が確認でき、内側ストランド周辺に溶鋼が充填された後、外側ストランド周辺に溶鋼が広がっている流動結果が得られた（図2の上）。

熱流体シミュレーション結果および実測結果から、溶鋼注入初期は外側ストランドへの溶鋼供給が遅れ、それにより内外ストランド間の温度差が発生していると考えた。

内側ストランドは保温される位置にあるため、外側ストランド周辺へ優先的に溶鋼を送り込み素早く温度上昇させることで外側ストランドの溶鋼注入ノズル詰まり防止効果が見込まれる。

そこで熱流体シミュレーションを用いて外側ストランドへ優先的に溶鋼を送り込むタンディッ

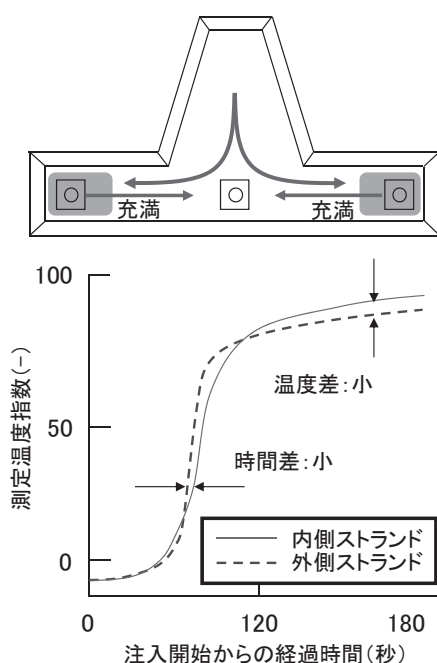


図 3 注入開始直後の溶鋼流動と温度変化（改善案）

シュ内部構造を検討した（図3の上）。

改善形状のシミュレーション結果では、外側ストランド周辺の温度が現状より高くなった。溶鋼がタンディッシュ底面を這う距離を長くし、内側ストランドの温度を現状より低くすることで内外ストランド間の温度差も低減させた（図3の下グラフ）。実測結果でも同様の結果が得られた。これは各ストランド間の casting speed を統一させる効果があり、製造条件をより最適化することが出来る。

むすび

特殊鋼製造プロセスに熱流体シミュレーションを適用することで、観察が困難な現象の可視化や定量評価を実施することが出来る。また、熱流体シミュレーション結果を他のシミュレーションへと適用することにより、材料シミュレーション全体の精度向上が見込まれる。

限られた実測結果からシミュレーション結果の信頼性を評価するには、計測方法・計測技術の開発が重要となるため、その取り組みも進めている。

〔愛知製鋼株式会社 生技開発部 村瀬 博典〕

板鍛造のシミュレーション

まえがき

地球温暖化防止の観点から自動車の燃費向上に対する要求はますます高まる一方、コスト競争も激化している。このような背景の下、トランスミッション部品等では軽量化、一体化、ネットシェイプ化が必要とされるが、プレス成形と鍛造を融合した板鍛造はそのニーズに対して非常に有効な成形法であり、適用部品は拡大している^{1)、2)}。板鍛造用の材料には中・厚板の高炭素鋼板³⁾が多く使われるが、成形シミュレーションの精度は、入力する鋼板の材料特性に依存するといっても過言ではない。本報では、板材から大ひずみ域の材料特性を取得する方法と板厚断面内の異方性を考慮した解析手法に関して述べる。

◇ 大ひずみ域の材料特性

板鍛造は板厚を積極的に制御し、局所的な増減肉を実現する成形法である。板鍛造を用いた工程設計や新しい成形法の開発にはFEM解析が有効であるが、その解析に入力する材料特性が成形荷重などの予測精度に影響を及ぼす。一般に、プレス成形の解析では引張試験から得られる応力-ひずみ関係を数式化して用いるが、測定範囲外のひずみに対しては外挿して用いる。プレス成形で導入される塑性ひずみはせいぜい0.5程度のため、この手法でも十分な解析精度が得られる。しかし、板鍛造では局所的な塑性ひずみが1.0以上に達するため、引張試験で得られる応力-ひずみ線図を外挿した曲線では実際の応力-ひずみ関係と乖離することが懸念される。バルク材では大ひずみ域（塑性ひずみ1.0以上）まで応力-ひずみ関係を測定する場合、端面拘束圧縮試験⁴⁾を用いることが多いが、鋼板への適用は試験片サイズの点で困難が伴う。そこで当社では鋼板の応力-ひずみ関係を大ひずみ域まで測定する手法として単純せん断試験と圧延を組み合わせた方法を開発した⁵⁾。単純せん断試験には、図1に示す試験片を用いてせん断応力とせん断ひずみの関係を得る。せん断応力-せん断ひずみ関係のままでは成形解析に使用できないため、式(1)および式(2)を用いて相当応力-相当塑性ひずみ関係に変換する。

$$\bar{\sigma} = \kappa \sigma_s \quad (1)$$

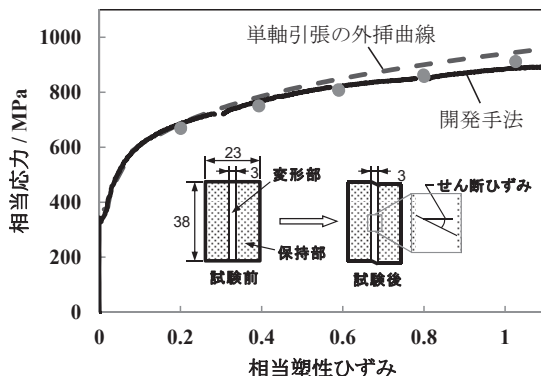


図1 圧延+繰返し単純せん断試験により得られた応力-ひずみ関係

$$d\bar{\epsilon}^p = \frac{1}{\kappa} d\epsilon_s^p \quad (2)$$

ここで σ_s 、 ϵ_s はせん断応力およびせん断ひずみ、 κ は材料定数を示す。

単純せん断試験では変形量が大きくなると試験片エッジ部分で不均一変形や亀裂が生じるため、1回のせん断試験で得られる相当塑性ひずみは約0.5であるが、①圧延で予ひずみを加えた後にせん断試験を行う、②相当塑性ひずみ約0.3ごとに試験片のエッジを切り落として繰返し単純せん断試験を行う、ことで大ひずみ域までの応力-ひずみ関係の測定が可能となる。

開発した圧延+繰返し単純せん断試験の妥当性を検証するため、端面拘束圧縮試験との比較を行った例を図1に示す。供試材はS55C球状化焼鈍材の棒鋼(φ55)である。単軸引張試験では相当塑性ひずみ約0.2が応力ひずみ関係の測定限界であったが、本手法を用いることで相当塑性ひずみ約1.0までの測定が可能となり、端面拘束圧縮試験結果とも良く一致する結果が得られた。また、単軸引張試験の結果を外挿した応力-ひずみ関係と本手法の応力-ひずみ関係を比較すると、単軸引張試験の外挿曲線が相当塑性ひずみ約1.0で60MPa(7%)程度高い相当応力を示している。板鍛造ではさらに大きな塑性ひずみでの応力-ひずみ関係が重要となるため、本手法を用いることで解析精度が向上すると考えられる。

◇ 板厚断面内の異方性を考慮した解析

面内異方性を有する薄鋼板からカップを絞り成形するとカップの口縁部に耳とよばれる局所的な突起が発生する。円筒絞りの耳に及ぼす面内異方性の影響については、板厚の薄い鋼板を対象に検討された例⁶⁾は多いが、板厚が比較的厚い鋼板に

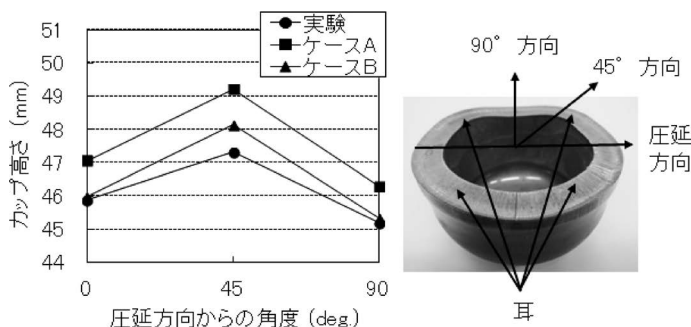


図 2 カップの耳およびカップ高さの実験および解析結果

については、面内異方性のみならず板厚断面内の異方性も影響すると考えられる。

図2は、直径105mm、板厚9.9mmの熱延銅板を用いて直径76mmに円筒絞りを行った例であるが、圧延方向から45°方向に耳が生じた。

日本工業規格JIS Z 2254⁷⁾により熱延銅板の塑性ひずみ比を求めた。圧延方向に対して平行、45°および90°方向の塑性ひずみ比は、それぞれ0.67、0.92および0.74であり、面内異方性を有する。この方法では板厚断面内の異方性を求めることができないので寺野らの方法⁸⁾を用いた。すなわち、銅板より切り出した立方体の試験片を用いて圧縮試験を行い、板厚断面内を含む塑性ひずみ比を求めた。

FEM解析には、異方性の取扱いが可能な式(3)に示すHillの二次異方性降伏条件式を用いた。

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{3}{2(F+G+H)} \left\{ F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \right\} \quad (3)$$

$\bar{\sigma}$: 相当応力、 σ : 垂直応力、 τ : セン断応力、 x : 圧延方向、 y : 幅方向、 z : 厚さ方向

JIS Z 2254で得た塑性ひずみ比より式(3)の異方性パラメータを計算すると $F=1.35$ 、 $G=1.49$ 、 $H=1.0$ 、 $L=3.0$ 、 $M=3.0$ 、 $N=4.04$ (以下、ケースAと呼ぶ)となる。寺野の方法で得た塑性ひずみ比よりパラメータを計算すると $F=1.23$ 、 $G=1.39$ 、 $H=1.0$ 、 $L=4.12$ 、 $M=4.90$ 、 $N=3.88$ (以下、ケースBと呼ぶ)となる。なお、等方性の場合、 $F=G=H=1$ 、 $L=M=N=3$ である。図2に円筒絞り後のカップ高さの実験と解析結果を示す。ケースAの解析結果は、45°方向にてカップ高さが大き

くなる傾向を再現しているが、実験値より大きい。一方、ケースBの解析結果は実験結果と比較的に良く一致している。ケースBではパンチ肩部での板厚が実験結果と比較的に良く一致するが、ケースAではパンチ肩部の板厚が実験結果より小さく、その結果カップ高さが大きくなる。パンチ肩R部にて被加工材は板厚に垂直な断面内でせん断変形を受ける。ケースAにおいては、そのせん断変形に影響するパラメータMおよびNの値が、ケースBのそれらの値より小さいので、せん断応力成分による材料の加工硬化が小さく、ひずみが集中しやすくなるため、板厚が小さくなったと思われる。

以上述べたように、板厚が比較的大きい銅板の深絞り解析の精度を上げるためには、面内異方性に加えて板厚断面内の異方性も考慮する必要がある。

むすび

冒頭述べたように、板鍛造は現在の自動車分野において非常に期待の大きい成形法といえるが、シミュレーションを行うには板鍛造特有の課題がある。本報で紹介した手法が、今後の当該成形法のさらなる発展に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴木敬: 塑性と加工、第51巻第594号、pp. 633-637 (2010)
- 2) 横井道治: 塑性と加工、第51巻第594号、pp. 638-641 (2010)
- 3) 橋本浩二ら: プレス技術、第50巻第2号、pp. 33-37 (2012)
- 4) K. Osakada: Ann. C. I. R. P., Vol. 30, No. 1, pp. 135-138 (1981)
- 5) 吉川伸麻ら: 平成27年度塑性加工春季講演会、pp. 269-270 (2015)
- 6) プレス成形難易ハンドブック第2版、日刊工業新聞社
- 7) 日本工業規格: JIS Z 2254、薄板金属材料の塑性ひずみ比試験方法
- 8) 寺野元規ら: 平成18年度塑性加工春季講演会、pp. 337-338 (2006)

〔新日鐵住金(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 利用技術研究部 上席主幹研究員 水村 正昭〕

〔新日鐵住金(株) 技術開発本部 八幡技術研究部 吉川 伸麻〕

〔日鉄住金テクノロジー(株) 八幡事業所 TACセンター 室長 山本 修治〕

条件一発出しを実現する 真空浸炭シミュレーション

まえがき

機械部品の表面強化熱処理として広く適用されている浸炭処理においてガス浸炭から真空浸炭への置き換えが急速に進んでいる。CO₂ガス排出抑制といった環境面、及び、低ランニングコスト等多くのメリットがあるためである¹⁾。しかし、真空浸炭ではガス浸炭処理に用いられるCP (Carbon Potential) の概念の適用が困難で、代わりに飽和値調整法とも呼ばれるガス流量、時間を制御する方法が用いられるが、これらの条件を勘や経験だけで的確に求めようとすれば大変な時間と労力が必要となっていた。そこで、当社では真空浸炭メカニズムを解明し、そのメカニズムに基づき新しい真空浸炭シミュレーションを開発した。本シミュレーションにより、浸炭条件（以下、レシピ

という）の決定にかかる手間が大幅に抑制可能となっている。

◇ 真空浸炭およびシミュレーションメカニズム

当社にて、真空浸炭における表面の炭素濃度や炭化物量を決定するメカニズムについて実験的に検討した結果、真空浸炭中の表面では黒鉛と鋼材の局所平衡が成立しており、炭化物の存在を考慮して拡散方程式を解くことで炭素濃度を精度良く計算することが可能であることを明らかにしている。詳しくは参考文献2)をお読みいただきたい。

◇ 真空浸炭シミュレーション

真空浸炭では処理品の表面積に対し適正な流量の浸炭ガスを流さないと、部分的な浸炭抜けや煤の過剰発生などの不具合を招くため、ガス量の設定が重要となる。図1にソフトウェアの表示画面を示す。①鋼材成分、②処理品の表面積、③狙いの炭素プロファイル（表面炭素濃度、浸炭深さ）を入力すると、上記メカニズムに基づくシミュ

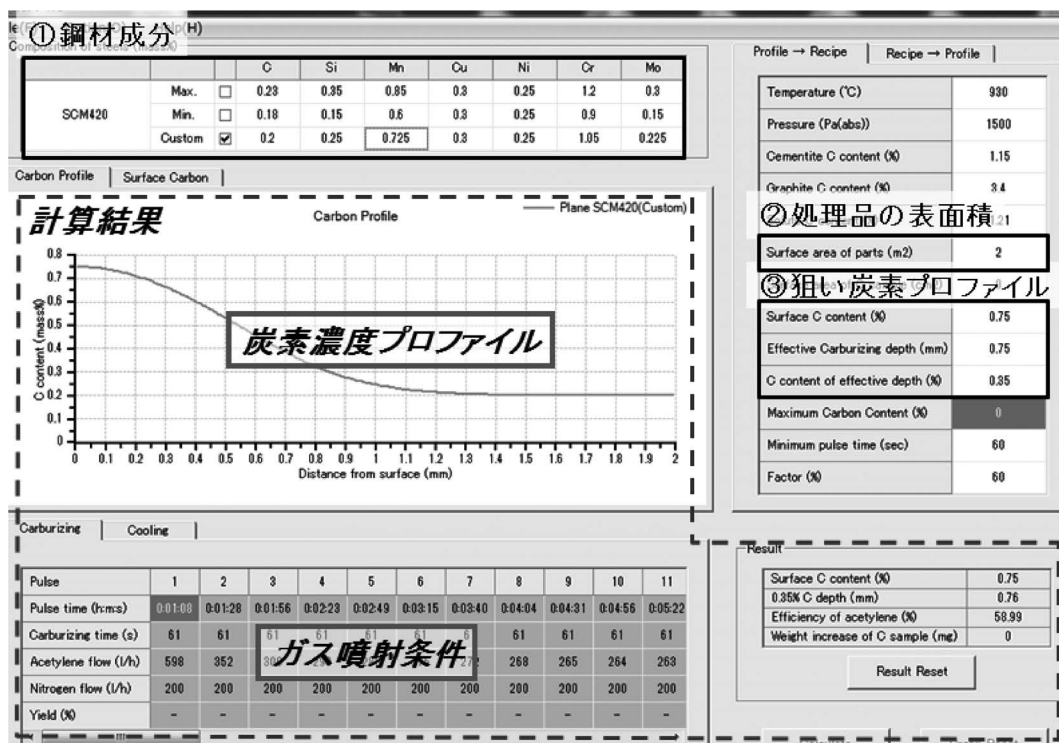


図 1 真空浸炭シミュレーター「浸炭くん」の処理条件計算画面

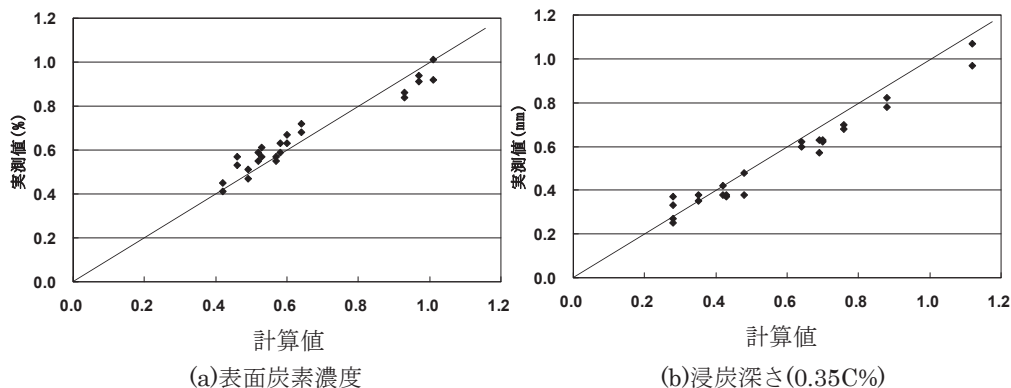


図 2 浸炭シミュレーション計算値と実測値の比較

レーションにより、ガス投入量・時間・パルス回数などが出力される。対象となる鋼材の化学成分は自由設定もできるため、JIS鋼はもちろん当社独自鋼種にも適用可能である。また、真空浸炭では歯車の歯先や端部のエッジ部に過剰浸炭が発生することで強度低下するという問題がある³⁾。本シミュレーターでは、エッジ角度や曲率を入力する(図1とは別画面)ことで各部の炭素濃度を計算できるため、エッジ部が狙いの炭素濃度になるよう条件を調整することで過剰浸炭しない浸炭条件を算出可能である。

シミュレーションの精度を検証するために、表面炭素濃度および浸炭深さ(炭素濃度が0.35%と

なる表層からの距離)について計算値と実測値を比較した結果を図2に示す⁴⁾。計算値と比べて実測値は最大約20%のばらつきはあるものの、これだけの精度があれば1、2回程度のテスト処理で狙い通りのレシピを決定できるものと考えている。

参考文献

- 1) 田中辰実：電気製鋼、84 (2013)、123
- 2) 森田敏之ら：鉄と鋼、92 (2006)、268
- 3) 森田敏之ら：鉄と鋼、96 (2010)、400
- 4) 設備紹介：電気製鋼、77 (2006)、1、97

〔大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 いのうえ けいすけ〕
 特殊鋼研究部 構造材料第二研究室 室長 井上 圭介

YSSヤスキハガネを支える CAEソリューションCMAP

まえがき

当社は、特殊鋼事業におけるブランド「YSSヤスキハガネ」を世界に向けて発信しており、ブランドステートメント「OUR HERITAGE, YOUR ADVANTAGE 日本独創の系譜を、世界のイノベーションへ」の下、金型・工具・刃物材料、自動車部品、エレクトロニクス材料、航空機・エネルギー材料など、多岐にわたる製品を展開している。さらに、お客様の要求に応えるために、高級特殊鋼という製品（素材）だけでなく、熱処理・表面処理・加工技術・設計技術等のトータルソリューションとして提供を進めている。その中で、

デジタル・エンジニアリング、シミュレーションなどを強化し、CAEソリューションCMAPとしてまとめている（図1）。

CMAP は Computer aided engineering for Materials And Processes、すなわち、材料と製造プロセスの開発を支援するCAEを意味しており、理論に基づき数値モデルを作成し、生産の現場で起きる事象をコンピュータによって再現することにより、精緻な『理論』と現場の『ものづくり』の橋渡しをめざすものである。また、見えない現象、測定できない物理量を可視化し、最適設計の提案を可能にし、お客様の課題解決をサポートすることを目的としている。さらに、当社内でも積極的に活用し、製品開発の効率化と製造プロセスの最適化を進めている。

◇ CMAPの枠組み

図2にCMAPの枠組みと適用分野を示す。当社

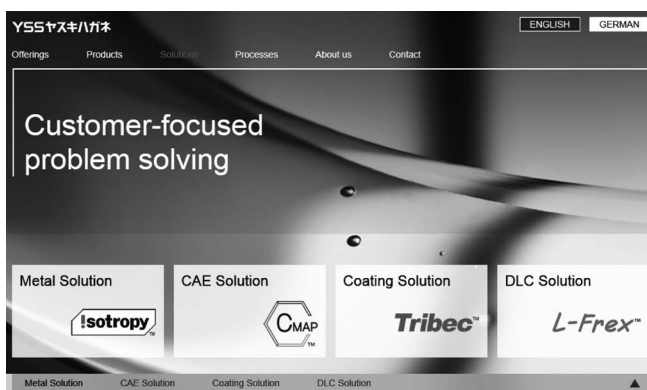


図 1 YSSヤスキハガネを支えるCAEソリューションCMAP
(<http://www.hitachi-metals.co.jp/yss/oursolution.html>)



図 2 CMAPの枠組みと適用分野

の製品の製造プロセスの流れに沿って、溶解・鋳造、熱間加工、冷間加工、熱処理などがCAEの対象となる。また、材料の組織や特性を予測することや、材料（合金）設計自体もCAEとして捉えている。

CMAFで用いるシミュレーションソフトウェアは市販品が中心であるが、対象とする物理現象には、相変態、相変化や、様々な物理現象の連成、温度や変形に対する非線形挙動などが関わっており、モデル化や材料データベースなどに当社の独自性を加えている。

それらを支える技術として、熱力学、流体力学、塑性加工（材料力学）、材料工学（金属学）などに加えて、計算工学（ソフトウェア技術）が重要である。また、シミュレーションの妥当性を確認し結果を評価するために、温度、荷重、形状、組織などに関し、実験、計測技術も強化している。

◇ CMAFの事例

以下に、CMAFの具体的な適用事例について概説する。

- (1) 溶解・鋳造：伝熱・熱流体解析をベースに、潜熱などを含めた凝固モデルを用いて、鋳造時の温度変化や引け巣、欠陥の予測を行う。融点近傍の物性値やインゴットと鋳型の間の熱抵抗や鋳型外への熱伝達係数の設定などにノウハウが必要である。顧客ソリューションとして、ダイカスト鋳造のシミュレーションに基づいた提案活動も行っている。
- (2) 熱間加工：各種製品形状を作るための鍛造、圧延など、熱間での塑性加工のシミュレーションを剛塑性解析プログラムを用いて行い、加工荷重の推定や加工方案の適正化をはかっている。加工中の放熱と加工に伴う温度上昇（ビルドアップ）など、伝熱解析と連成した解析である。加工後の形状、ひずみ分布だけでなく、結晶組織などの材料特性の予測も重要な課題である。
- (3) 冷間加工：圧延、伸線などの塑性加工のシミュレーションを、弾塑性解析や剛塑性解析で行っている。長さ方向の寸法に対して、横方向（幅、厚さ）の寸法が極めて小

さいため、有限要素法における要素が扁平形状になりがちであり、精度の確保のために、はり理論や圧延理論など、解析的な手法との組み合わせも検討している。また、所要荷重の推定やロール、ダイスなどの加工治具の強度的な検討も行っている。

- (4) 熱処理：工具鋼材料に関する顧客ソリューションとして、金型を熱処理する際の冷却時間（伝熱）、発生応力分布、組織、ひずみなどの予測シミュレーションを行っている。温度、相変化、変形が相互に関わる物理現象であり、連成問題としてのシミュレーション手法を構築中である。また、当社の製造プロセスの中では加工の各段階で様々な熱処理が行われており、炉内、炉外や冷却設備内での材料の温度変化の予測から、炉温設定や加熱時間、冷却時間の設定を行っている。
- (5) 組織予測：合金設計には、熱力学に基づくシミュレーションを行っている。また、結晶粒度予測式を用いて、鍛造などの塑性加工に伴う再結晶の予測などを行っている。最近では、フェーズフィールド法を積極的に活用しており、熱処理時の温度や冷却速度が析出相に及ぼす影響などを検討できるようになりつつある。

むすび

当社におけるCAEソリューションCMAFの概要について述べた。市販のシミュレーションソフトを活用することによりCAE技術の立ち上げを加速すると共に、材料DBやモデル化手法に独自性を加えて、計算機上での実プロセスの再現を目指している。また、実験、計測技術の開発や人材育成も含めて、当社のCAEであるCMAFの強化、活用を進めている。

「YSS」「ヤスキハガネ」「OUR HERITAGE, YOUR ADVANTAGE」「日本の独創の系譜を、世界のイノベーションへ」「」「」「Tribec」「L-Frex」は日立金属(株)の登録商標です。

〔日立金属(株) 冶金研究所 さいとう なおと 齊藤 直人〕
主 管 研 究 員

業界のうごき

佐藤商事が新中期経営計画を策定 「商流革新、商材発掘」に重点

佐藤商事は新3カ年中期経営計画を策定した。「商流の革新」と「商材の発掘」を基軸に据え、既存商流から新たなニーズを取り込むとともに、新たな商材を見出しながら市場環境の変化に迅速に対応する。3年間で約60億円の投資を計画し、国内インフラ整備、海外拠点拡大や管理システム強化を図る。

最終19年度の連結業績目標は売上高2千億円、営業利益38億円。60億円投資には、段階的に進めてきた神奈川コイルセンターの移転・拡張（18年10月稼働開始予定、総額45億円）関連のうち27億円、富山支店移転・拡張関連6億円などが含まれる。

「自ら考え判断、実行できる人材の育成」「グローバルかつプロフェッショナルな人材の確保」にも取り組む。商流の革新と商材の発掘では、鋼材を納めている加工メーカーやユーザーの製品を販売し、鋼材販売と相乗効果で伸ばすことにも取り組む。

(5月11日)

大洋商事の海外事業が拡大基調 海外子会社の売上高100億円超へ

大洋商事は今期（18年1月期）単独決算で売上高410億円、営業利益8億円への増収増益を目指す。連結決算は行っていないが、海外子会社全体の売上高は初めて100億円を超える見通し。海外子会社向けの売上高は今期約50億円の見込みで、単独決算の増収要因の一つになる。

海外子会社は中国2社、韓国1社、タイ2社の計5社。最近も中国で切断加工・在庫拠点を移転・拡張し、タイで熱間鍛造合併を稼働開始するなど、積極的な事業投資を実行。自動車向け素形材の販売も拡大している。

タイのサイアム大洋商事はレムチャバン港の近隣に事務所を開設し、5月1日から乙仲業務（通関業務）を開始した。自社の輸出入に関わる通関業務を行うだけでなく、他社からの受託にも力を入れていく。女性社員のアパソーン・モンコルフォンさん（ニックネームはティックさん）が通関士の資格を取得したのを機に、社内に取り込む。

(5月8日)

大和特殊鋼、韓国に子会社設立 韓国材を国内販売、中印へ輸出も

大和特殊鋼は韓国に100%出資の現地法人を設立した。韓国のステンレス材料を韓国国内および中国やインドなどに販売していく。当面、年間8億円の売上高を目指す。06年から韓国ローカルのステンレス流通と取引を開始し、ステンレス薄板のヒモ付きなど韓国国内の取引が着実に伸びていることを受け、現地法人を設立した。

社名は「Daiwa Special Steel Korea」。仁川国際空港近くで、韓国政府から経済自由地域に指定されている松島国際都市に事務所を設けている。資本金は2億ウォン（約2,000万円）で、4月10日に設立。4月25日に現地で開所式を行い、社長には同社社員の尹柱東氏が就任。同社国際営業部長の齊藤良二氏、現地スタッフの計4人体制で本格的に業務を開始した。

国際営業部は15年開設で、日系を含めた海外企業の日本材手当てをサポートするとともに、ASTM、ASMEなど海外規格材を国内ユーザーに供給している。

(5月1日)

特殊鋼機、大同特殊鋼と工具鋼で連携 九州北部のストックヤードに

特殊鋼機は4月から大同特殊鋼の工具鋼の九州北部におけるストックヤード業務を開始した。従来、その

役割を担っていた会社が撤退し、大同特殊鋼からの要請もあり、工具鋼の本格在庫を始めた。同社は近年、販売の新たな柱を探していたため、思惑が一致した格好。倉庫を再編することでスペースを確保。これまで約100トンだった工具鋼の在庫を約300トンに拡大した。

第1倉庫と第2倉庫を連結して「工具鋼倉庫」として立ち上げる一方、第3倉庫を「本社倉庫」に再編。工具鋼以外の構造用鋼などは本社倉庫に移して、レイアウトを一新した。

両倉庫とも、鋸盤4基体制にし、荷役設備として28トンクレーンを配備した。当面の在庫量は、撤退した会社から譲り受けた約160トン、大同DMソリューションの九州北営業倉庫（福岡県朝倉市）から移管した約40トンを含む約300トン。

(5月19日)

名古屋特殊鋼、独社の代理店に 金型補修事業を本格化

名古屋特殊鋼は金型補修事業を本格化し、顧客サービスの強化を図る。ドイツの溶接棒メーカー、Capilla社と販売代理店契約を締結して、同社製品を用いた補修溶接をスタートした。素材調達からメンテナンスまでの一貫体制を武器に、金型関連事業の拡大を目指す。

名古屋特殊鋼は材料や熱処理といった金型に関するノウハウを生かし、約3年前から使用後の金型を溶接して再利用する、補修溶接の事業化に向けた取り組みに着手。山陽特殊製鋼の評価機関の協力の下、溶接棒メーカーや研究者などとの共同開発を進め、15年から販売を開始した。

対象となる製品は鍛造用、ダイカスト用、プレス用金型。本社工場のほか北海道、インドネシアなど各拠点に加工設備を整え、専属スタッフを2～3人配置した。

業界のうごき

当面は補修溶接した金型の販売に特化する方針。Capilla社の溶接棒の日本国内販売も開始する。(4月20日)

ハヤカワカンパニー、タイに鍛造工場 東南ア、米向け拡販狙う

ハヤカワカンパニーは4月に海外生産プロジェクトを発足し、タイでの工場開設に向けた計画を始動した。子会社で熱間鍛造品の製造、販売を手掛ける菱栄金属の現地工場を立ち上げ、早ければ年内に稼働を開始する。グループ初の海外工場で、東南アジア、米国向け供給や新規ユーザーの開拓を図る。

ハヤカワグループは昨年10月、持ち株会社のハヤカワが三菱マテリアルから菱栄金属の全株式を取得。子会社化して自動車、トラック、トラクター向けの高精度ベベルギア(駆動系製品)をはじめとする精密熱間鍛造事業に参入するなど、機能強化に注力している。

菱栄金属の売上高のうち、およそ3割が海外ユーザー関連。農機具需要が高い東南アジア向けが約7割を占める。拠点開設地、設立形態などに関する具体的検討を進め、早ければ年内にも鍛造品生産を始める。

(4月26日)

阪和興業とJOGMEC、クロム権益拡大 南ア・サマンコールに270億円出資

阪和興業は、子会社の日本南ア・クロムに対し、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)と共同で約270億円の第三者割当増資を実行した。南ア・クロムは今回の調達金で南アフリカの合金鉄メーカー、サマンコール・クロム・ホールディングスの株式20%を取得する予定。阪和興業は南ア・クロムとともに、最大で年40万トンのフェロクロムを日本向けに供給できる権利を得る。

サマンコールは、世界のクロム資

源の過半があるとされる南ア北部・ブッシュフェルト地域に複数の鉱区を所有する。ステンレス向けフェロクロムでは世界大手3社の一角。阪和興業は05年から出資参画し、17年3月末時点の出資比率は9%。

南ア・クロムに対する出資比率は阪和興業50.1%、JOGMEC49.9%となった。サマンコールへの阪和の出資比率は間接分も含めて19.02%になる見込み。

(5月1日)

藤田商事、大型複合加工機を導入 浦安機械加工センターに2台

藤田商事は、浦安機械加工センターに大型複合加工機2台を導入し、このほど本稼働を開始した。特殊鋼棒鋼(構造用鋼)の加工販売強化の一環で、大物部品の高精度加工を効率的に行う体制を構築するため、複合旋盤と複合フライス盤を導入した。投資額は1億1千万円。

浦安機械加工センターではCNC旋盤加工、BTA深穴加工などを行い、産業機械向けなどに納入している。近年は切断加工品、機械加工品に対する顧客ニーズが強まり、必要に応じて熱処理・鍛造まで一括でコーディネートできる流通の機能が重視されるようになっている。この対応策の一環で自社工場における生産性向上、高精度化を進める。

外注加工を含めたQCD強化も重要課題。各営業拠点の外注対応を一元管理する取り組みを5月にスタートし、ネットワークを有効に生かす仕組み作りを行っていく。

(5月15日)

メタルワンのインドネシア合併 鈴秀工業が資本参加、品質向上狙う

メタルワンのインドネシアの棒線二次加工子会社「IWWI」が、鈴秀工業を引受先とする第三者割当増資を実施し、新たに鈴秀工業が出資パートナー(出資比率2.97%)に加

わった。IWWIは2006年から鈴秀工業の技術支援を受け、昨年から出向者の増員対応も得ており、さらなる品質向上を狙いに同社との関係を深める。

IWWIは1971年設立の線材二次加工メーカーで、CH鋼線、磨棒鋼、ピアノ線、高炭素線材製品などを生産する。タンゲラン市で40年以上にわたり棒線加工事業を行い、インドネシアの四輪車・二輪車関連需要拡大を受け、15年にプカシ工場を開設。両工場合わせた年産能力98,000トンに対して現状は5~6割稼働だが、CH鋼線を中心に最適生産・販売体制を構築し、四輪車部品向けの厳しい品質管理対応力を備えることにより、需要増に合わせた拡大戦略を推進する。

(5月22日)

愛知製鋼と日本発条が共同開発 高強度板ばね用鋼、靱性も両立

愛知製鋼は高強度板ばね用鋼「AUP30NS」を日本発条と共同開発した。トラック・サスペンションの板ばね枚数を削減することなどにより、自動車の大きな軽量化・燃費改善につながる。独自の成分設計と、チタン炭窒化物の析出制御による組織の微細化などにより、世界最高レベルの強度を持ちながら優れた靱性を実現した。すでに一部車種での採用が決定しており、今後、海外での採用実績拡大にも期待している。

愛知製鋼は、日本発条と共同で10年がかりで研究開発を進めた。製造は愛知製鋼知多工場で行う。国内特許は取得済みで、海外は申請中で一部取得済み。

自動車メーカー各社は、省燃費、軽量化に向け部品単位での研究開発にしのぎを削っているが、日本国内だけでなく海外でも軽量化ニーズは高まっており、両社ではグローバル市場での実績拡大を目指す。(4月18日)

山陽特殊製鋼が新中期経営計画 3年間で500億円投資

山陽特殊製鋼は19年度を最終年度とする新中期経営計画を発表した。主力の軸受鋼や、海外展開を拡大している素形材、金属粉末など特殊材の「グローバル・ブランド化」を進めて、最終年度の売上高1,500億円、経常利益135億円、ROS 9%、ROE 7%、D/Eレシオ0.2などを目標とする。

第2棒線工場のボトルネック解消、物流の整流化、AIやIoT活用による自動化・効率化など生産構造改革で競争力を高め、事業基盤の一層の強化を図る。鋼材事業および非鋼材事業の収益安定化、品質・コスト競争力の強化など8項目の重点施策を進める。設備投資では生産構造改革など戦略投資250億円を含め、3年間で500億円を投じる。

素形材では、今夏にメキシコ工場を稼働させるなど、国内外で6拠点を展開している。今後は軸受鋼など鋼材や特殊材も合わせて、「山陽ブランド」のグローバル・ブランド化を加速する。

(5月1日)

新日鉄住金、小倉の高炉休止で 三菱製鋼室蘭特殊鋼へ委託生産拡大

新日鉄住金と三菱製鋼は、北海道・室蘭地区における特殊鋼棒線の生産・技術提携を拡大する。新日鉄住金が三菱製鋼室蘭特殊鋼（MSR）へのビレット生産委託を拡大するとともに、新たに自動車用のビレット生産委託も行う。品質確保のための技術供与や協力関係も深化する。MSRによる自己株取得を通じて、新日鉄住金はMSRに対する出資比率を現行20%から10月予定で30%に引き上げる。

20年度末の新日鉄住金・八幡製鉄所小倉地区での高炉休止を控えて、新日鉄住金は室蘭製鉄所で鉄源供給基地としての基盤強化を進めている。

この一環で三菱製鋼との提携を強化する。MSRは高品位の大断面ブルーム連続鍛造設備と分塊圧延機を活用し、増量要請に応える。

MSRのビレット生産能力は月約10万トンで、現状はビレット中心に月約4万トンを新日鉄住金から受託生産している。

(5月1日)

大同特殊鋼、知多で製鋼合理化 特殊ステンレス鋼など、40億円投資

大同特殊鋼は知多工場のエネルギー効率向上を狙いに、特殊ステンレス鋼などを製造する製鋼プロセスで合理化投資を行う。約40億円を投じ、溶鋼物流の整流化、連続鍛造機の加熱装置更新などを実施し、連铸比率とエネルギー効率の向上を図る。19年初に稼働する計画。

同社は中長期の省エネルギー目標として全社で「30年までに10%以上のエネルギー削減（13年度比）」を策定。13年には第1弾として、最新鋭の150トン電気炉導入をはじめとする製鋼合理化を実施した。

今回はまず製鋼工場内の物流設備の刷新を実施。溶鋼搬送時間を短縮し、エネルギーロス低減を図る。また連铸機のタンディッシュ予熱、加熱装置の更新（鍛造時の温度コントロール性の向上）やエネルギー転換を行う。特殊ステンレス鋼を連铸で製造できる体制となり、消費エネルギーの大幅低減と生産能力拡大、安定的な量産プロセスが実現する。

(5月23日)

日本冶金が新3カ年計画を策定 設備投資280億円、高機能材拡販

日本冶金工業は3カ年中期経営計画を策定した。高機能材（ニッケルを20%以上含有する高ニッケル合金のフラット製品）でアジアトップの地位を確立し、国内ステンレス市場で構造変化に対応した体制整備を進める。3年間の設備投資計画は減価

償却費の2倍超の280億円。このうち戦略投資（製造プロセス革新、川崎製造所リフレッシュ）に150億円を投じる。最終19年度に連結経常利益70億円（16年度28億円）を目指す。

高機能材事業ではQCD競争力向上により製品ポートフォリオ改革を推進。中国・南京鋼鉄との合弁事業は今年末に本格スタートする。中国を中心とするアジアやロシア、中東など新興国市場で営業強化を図る。

ステンレス事業の再構築では、休止設備（熱間焼鈍酸洗設備1基、ゼンジミア冷間圧延機1基）の再稼働で冷延設備能力を増強する。老朽化した厚板精整設備のリプレイスも検討する。

(5月10日)

日立金属、電子・電池材事業を強化 子会社統合、クラッド材で増産投資

日立金属はクラッド材事業の強化を狙いに完全子会社2社を合併させる。18年4月1日付で伸銅事業のSHカッププロダクツとクラッド材事業の日立金属ネオマテリアルを統合する。これに先立ち、7月にSHカップを電線材料カンパニーから特殊鋼カンパニーに移管し、10月に営業体制を統合する。クラッド材の増産対応ではSHカップ・本社工場にラインを新設し、18年度下期に稼働開始する。

統合新会社は「日立金属ネオマテリアル」。統合時の売上高規模は約600億円で従業員は約1千人。日立金属グループ会社では米ワウパカ社に次ぐ従業員規模になる。SHカップ・本社工場は土浦工場に改称する。

伸銅と高合金という違いはあるが、両社は溶解や圧延など共通する技術基盤を持つ。SHカップはリードフレーム材、ターゲット材など日立金属・安来工場と共通の顧客基盤を持つ製品も多数手掛ける。

(5月29日)

文責：(株)鉄鋼新聞社

特殊鋼統計資料

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼種別

(単位：t)

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 合金鋼		ばね鋼	軸 受 鋼	ス テ ン レ ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他			
’15 暦 年	247,346	4,645,724	3,564,630	8,210,354	431,529	986,169	2,755,748	615,811	4,953,652	674,565	10,417,474	18,875,174	
’16 暦 年	242,925	4,713,936	3,593,009	8,306,945	411,650	939,192	2,784,129	590,795	5,485,686	676,186	10,887,638	19,437,508	
’15 年 度	241,082	4,638,379	3,487,357	8,125,736	421,420	962,553	2,725,384	593,245	5,048,694	694,055	10,445,351	18,812,169	
’16 年 度	246,763	4,786,841	3,677,564	8,464,405	424,465	951,774	2,803,875	602,844	5,496,896	657,374	10,937,228	19,648,396	
’16. 4- 6月	60,482	1,141,891	901,829	2,043,720	105,905	236,311	670,371	152,548	1,274,279	176,142	2,615,556	4,719,758	
7- 9月	61,195	1,169,049	880,846	2,049,895	101,698	229,877	712,086	146,293	1,358,925	175,081	2,723,960	4,835,050	
10-12月	60,131	1,234,367	940,870	2,175,237	106,184	245,853	703,815	152,582	1,507,606	141,162	2,857,202	5,092,570	
’17. 1- 3月	64,955	1,241,534	954,019	2,195,553	110,678	239,733	717,603	151,421	1,356,086	164,989	2,740,510	5,001,018	
’16年 3月	20,751	402,565	304,614	707,179	34,553	81,835	226,702	47,924	449,132	68,739	908,885	1,636,815	
4月	20,509	371,936	284,602	656,538	33,144	72,342	208,460	41,618	389,380	60,765	805,709	1,482,756	
5月	20,690	392,171	315,565	707,736	38,470	82,279	231,127	55,849	476,560	55,996	940,281	1,668,707	
6月	19,283	377,784	301,662	679,446	34,291	81,690	230,784	55,081	408,339	59,381	869,566	1,568,295	
7月	19,655	408,897	311,084	719,981	36,239	83,038	237,034	50,919	424,758	54,748	886,736	1,626,372	
8月	18,634	365,393	260,879	626,272	33,735	69,444	229,562	48,684	437,022	68,397	886,845	1,531,750	
9月	22,906	394,759	308,883	703,642	31,724	77,395	245,490	46,690	497,145	51,936	950,380	1,676,928	
10月	20,549	407,234	312,835	720,069	37,585	83,172	238,329	47,459	535,872	49,990	992,407	1,733,025	
11月	18,433	402,961	311,059	714,020	37,089	80,548	225,357	54,963	463,212	45,569	906,738	1,639,191	
12月	21,149	424,172	316,976	741,148	31,510	82,133	240,129	50,160	508,522	45,603	958,057	1,720,354	
’17年 1月	19,468	408,964	301,672	710,636	34,927	74,618	239,578	47,258	458,011	58,149	912,541	1,642,645	
2月	21,372	397,944	310,858	708,802	35,718	79,301	232,919	50,822	417,401	47,934	864,095	1,594,269	
3月	24,115	434,626	341,489	776,115	40,033	85,814	245,106	53,341	480,674	58,906	963,874	1,764,104	
4月	20,766	413,194	320,583	733,777	34,000	82,220	245,262	50,063	505,150	60,497	977,192	1,731,735	
前 月 比	86.1	95.1	93.9	94.5	84.9	95.8	100.1	93.9	105.1	102.7	101.4	98.2	
前年同月比	101.3	111.1	112.6	111.8	102.6	113.7	117.7	120.3	129.7	99.6	121.3	116.8	

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

形状別

(単位：t)

年 月	形 鋼	棒 鋼	管 材	線 材	鋼 板	鋼 帯	合 計
'15 暦年	270,761	5,828,923	1,081,718	4,123,192	1,508,876	6,073,343	18,886,813
'16 暦年	r 309,707	r 5,756,252	r 989,696	r 4,173,511	r 2,001,827	6,218,161	r 19,449,154
'15 年度	269,744	5,701,404	1,009,207	4,171,024	1,580,711	6,091,727	18,823,817
'16 年度	313,559	5,917,546	984,067	4,202,470	1,954,496	6,287,894	19,660,032
'16. 4- 6月	64,455	1,452,764	r 243,736	1,020,021	426,323	1,515,372	r 4,722,671
7- 9月	r 70,392	r 1,419,521	235,702	r 1,053,026	505,042	1,554,264	r 4,837,947
10-12月	92,847	1,511,581	257,522	1,038,676	r 612,602	1,582,255	r 5,095,483
'17. 1- 3月	85,865	1,533,680	247,107	1,090,747	410,529	1,636,003	5,003,931
'16年 3月	30,211	500,063	74,469	372,263	138,378	522,412	1,637,796
4月	28,306	461,199	77,545	331,767	108,276	476,634	1,483,727
5月	17,578	499,109	85,861	347,689	159,389	560,052	1,669,678
6月	18,571	492,456	r 80,330	340,565	158,658	478,686	r 1,569,266
7月	19,171	512,102	77,483	r 364,211	147,560	506,816	r 1,627,343
8月	22,947	405,498	74,800	r 356,235	152,181	521,060	r 1,532,721
9月	r 28,274	r 501,921	83,419	r 332,580	205,301	526,388	r 1,677,883
10月	47,381	500,006	93,949	350,625	203,637	538,398	1,733,996
11月	21,757	501,641	73,282	346,353	184,156	512,973	1,640,162
12月	23,709	509,934	90,291	341,698	r 224,809	530,884	r 1,721,325
'17年 1月	30,982	480,915	83,690	357,774	137,122	553,133	1,643,616
2月	35,274	495,365	79,459	348,387	116,286	520,469	1,595,240
3月	19,609	557,400	83,958	384,586	157,121	562,401	1,765,075
4月	22,545	509,877	98,030	347,221	182,910	572,123	1,732,706
前 月 比	115.0	91.5	116.8	90.3	116.4	101.7	98.2
前年同月比	79.6	110.6	126.4	104.7	168.9	120.0	116.8

出所：『経済産業省生産動態統計』から作成。

特殊鋼鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)

(単位:t)

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス レ ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他	計	
'15 暦 年	315,222	3,799,665	4,044,736	7,844,401	251,940	451,168	3,015,291	172,597	122,078	35,288	4,048,362	12,207,985
'16 暦 年	318,284	3,793,728	4,159,973	7,953,701	249,025	502,736	3,043,035	167,359	100,734	40,543	4,103,432	12,375,417
'15 年 度	319,413	3,811,785	4,049,269	7,861,054	265,198	443,260	3,005,738	169,510	114,666	35,504	4,033,876	12,214,343
'16 年 度	317,816	3,843,693	4,224,447	8,068,140	255,982	531,825	3,063,505	170,660	95,118	43,717	4,160,807	12,546,763
'16年 8月	24,511	294,207	335,572	629,779	19,677	40,224	244,661	12,445	7,045	3,011	327,063	981,353
9月	26,691	319,571	350,595	670,166	22,155	44,253	269,838	14,588	6,690	4,102	361,626	1,058,483
10月	27,026	323,739	351,228	674,967	20,091	45,889	258,254	13,248	7,822	4,156	349,460	1,051,453
11月	27,598	327,455	354,966	682,421	22,487	47,041	257,600	14,510	8,280	3,582	353,500	1,063,519
12月	25,254	321,491	352,053	673,544	20,563	46,163	253,014	14,600	7,317	3,698	345,355	1,044,153
'17年 1月	24,926	319,931	351,369	671,300	20,781	44,160	253,961	14,440	6,935	3,204	343,481	1,039,707
2月	26,977	328,542	357,768	686,310	21,288	46,268	259,330	14,777	6,849	3,900	352,412	1,065,699
3月	29,332	353,245	372,614	725,859	26,471	47,699	269,547	16,784	7,390	5,074	372,965	1,128,156
4月	27,565	343,276	380,465	723,741	26,245	45,654	259,451	15,239	6,614	4,124	357,327	1,108,633
前 月 比	94.0	97.2	102.1	99.7	99.1	95.7	96.3	90.8	89.5	81.3	95.8	98.3
前年同月比	104.5	109.2	108.7	109.0	129.8	106.1	104.9	115.6	71.3	138.3	106.4	108.0

出所: 経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から作成。

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移

(単位:t)

年 月	工 具 鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス レ ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他			
’15 暦 年	8,514	219,348	126,553	345,901	26,641	37,142	126,895	26,973	173,408	26,569	417,628	772,043	
’16 暦 年	6,840	239,158	136,648	375,806	23,596	36,680	122,241	27,149	191,633	26,245	427,544	810,190	
’15 年 度	6,741	212,593	129,143	341,736	25,337	35,403	107,219	24,867	151,569	34,374	378,769	727,246	
’16 年 度	7,525	214,217	129,129	343,346	27,751	31,790	109,641	27,312	185,309	31,761	413,564	764,435	
’16年 8月	8,399	236,148	142,859	379,007	32,170	32,650	122,606	31,361	174,678	46,840	440,305	827,711	
	9月	9,457	244,310	139,352	383,662	24,745	35,009	121,784	25,600	160,916	34,502	402,556	795,675
	10月	8,109	239,292	137,912	377,204	28,416	35,078	115,799	27,310	184,631	30,540	421,774	807,087
	11月	7,385	228,513	136,701	365,214	26,434	33,138	121,877	28,367	151,869	24,103	385,788	758,387
’17年 12月	6,840	239,158	136,648	375,806	23,596	36,680	122,241	27,149	191,633	26,245	427,544	810,190	
	1月	6,808	242,970	141,420	384,390	27,815	33,479	123,177	28,474	161,260	36,480	410,685	801,883
	2月	7,135	235,450	142,803	378,253	28,428	31,698	112,660	31,008	187,722	34,706	426,222	811,610
	3月	7,525	214,217	129,129	343,346	27,751	31,790	109,641	27,312	185,309	31,761	413,564	764,435
4月	7,434	224,046	130,207	354,253	26,038	33,527	111,499	26,168	199,473	37,309	434,014	795,701	
前 月 比	98.8	104.6	100.8	103.2	93.8	105.5	101.7	95.8	107.6	117.5	104.9	104.1	
前年同月比	94.6	100.1	100.5	100.2	92.4	100.6	101.9	101.1	127.8	89.1	109.9	105.2	

出所: 経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位:t)

年 月	工 具 鋼	構 造 用 鋼				特 殊 用 途 鋼						計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス レ ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他			
' 15 暦 年	61,896	202,211	146,758	348,969	13,423	52,972	134,135	11,968	11,624	1,683	225,805	636,670	
' 16 暦 年	58,237	187,464	141,858	329,322	14,527	58,916	129,697	11,828	10,737	1,619	227,324	614,883	
' 15 年 度	61,699	200,931	139,603	340,534	13,258	53,426	135,679	14,121	11,473	1,763	229,720	631,953	
' 16 年 度	57,869	190,684	145,813	336,497	20,955	59,768	141,859	11,460	10,537	2,252	246,831	641,197	
' 16年	8月	60,637	197,439	147,882	345,321	12,625	66,207	130,820	14,089	10,310	1,242	235,293	641,251
	9月	60,554	192,445	149,157	341,602	13,843	64,543	135,130	13,606	10,119	1,666	238,907	641,063
	10月	58,947	190,328	146,710	337,038	14,009	62,515	133,971	13,287	10,427	1,627	235,836	631,821
	11月	58,511	185,720	143,032	328,752	13,075	60,971	131,913	12,718	10,671	1,777	231,125	618,388
	12月	58,237	187,464	141,858	329,322	14,527	58,916	129,697	11,828	10,737	1,619	227,324	614,883
' 17年	1月	59,379	193,670	143,167	336,837	13,980	57,900	130,719	12,960	11,070	1,953	228,582	624,798
	2月	58,504	184,541	147,177	331,718	13,581	58,284	129,812	12,287	10,684	2,143	226,791	617,013
	3月	57,869	190,684	145,813	336,497	20,955	59,768	141,859	11,460	10,537	2,252	246,831	641,197
	4月	57,974	188,976	142,393	331,369	21,153	58,394	131,420	10,372	10,274	2,121	233,734	623,077
前 月 比	100.2	99.1	97.7	98.5	100.9	97.7	92.6	90.5	97.5	94.2	94.7	97.2	
前年同月比	96.5	93.7	98.8	95.8	173.0	92.9	99.4	75.1	93.0	129.1	100.0	97.4	

出所: 経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から作成。

特殊鋼鋼材の輸出入推移

輸 出

(単位: t)

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼				そ の 他 の 鋼			特殊鋼 鋼材合計
		機械構造 用炭素鋼	構造用 合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス鋼	ピアノ 線 材	計	高炭素鋼	その他 合金鋼	計	
'15 暦 年	57,172	445,437	540,719	986,156	188,707	1,052,226	129,239	1,370,172	11,388	5,291,875	5,303,263	7,716,762
'16 暦 年	43,539	412,511	530,319	942,830	182,238	1,015,301	146,993	1,344,532	10,111	6,088,581	6,098,693	8,429,594
'15 年 度	39,898	415,754	516,291	932,045	186,774	1,009,763	141,761	1,338,299	10,648	5,375,453	5,386,101	7,696,343
'16 年 度	44,566	429,869	558,646	988,515	188,175	1,022,853	137,846	1,348,875	9,298	6,153,677	6,162,974	8,544,929
'16年 7月	3,753	36,067	46,943	83,010	18,173	92,306	11,862	122,341	1,235	551,506	552,741	761,846
8月	3,039	34,908	41,643	76,551	15,884	84,221	14,234	114,338	710	537,722	538,433	732,361
9月	2,956	33,816	41,977	75,793	13,508	92,543	12,038	118,089	1,127	548,881	550,008	746,846
10月	3,679	37,046	48,104	85,149	17,747	90,269	10,098	118,114	913	548,009	548,921	755,864
11月	3,417	40,396	41,884	82,280	12,606	78,386	11,405	102,397	620	526,766	527,386	715,480
12月	3,401	39,858	46,312	86,169	15,791	90,869	8,256	114,916	728	505,044	505,773	710,260
'17年 1月	2,921	31,803	37,228	69,030	14,487	72,576	9,026	96,089	547	552,107	552,654	720,694
2月	4,134	38,863	48,797	87,660	15,411	87,763	11,658	114,832	344	472,116	472,460	679,085
3月	3,880	41,015	62,538	103,553	18,135	91,438	12,455	122,028	564	537,062	537,626	767,087
4月	3,989	35,949	51,035	86,983	15,497	83,931	12,251	111,679	527	443,250	443,777	646,427
前 月 比	102.8	87.6	81.6	84.0	85.5	91.8	98.4	91.5	93.3	82.5	82.5	84.3
前年同月比	55.4	106.0	99.4	102.0	96.9	102.1	96.4	100.7	69.5	108.0	108.0	105.2

出所: 財務省関税局『貿易統計』から作成。

輸 入

(単位: t)

年 月	工具鋼	ばね鋼	ス テ ン レ ス 鋼						快削鋼	その他の鋼			特殊鋼 鋼材合計
			形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管	計		高炭素鋼	合金鋼	計	
'15 暦 年	3,699	4,890	524	13,359	10,752	135,755	13,244	173,634	64	18,660	774,060	792,720	975,009
'16 暦 年	3,441	3,369	666	10,616	11,054	172,316	14,549	209,200	70	16,478	857,976	874,454	1,090,534
'15 年 度	3,663	5,131	566	12,821	10,742	149,710	13,631	187,471	70	17,640	826,552	844,192	1,040,527
'16 年 度	3,179	3,551	643	11,306	11,294	173,146	14,752	211,141	64	15,748	767,618	783,366	1,001,302
'16年 7月	265	254	32	1,001	764	11,755	1,457	15,009	-	754	51,706	52,461	67,988
8月	313	314	51	778	735	10,698	1,150	13,412	23	2,177	94,890	97,067	111,128
9月	232	352	38	832	884	12,053	1,071	14,878	-	414	72,990	73,403	88,865
10月	231	327	47	1,142	1,131	18,641	1,202	22,164	21	1,079	78,567	79,647	102,389
11月	241	267	56	1,115	754	16,578	1,163	19,666	-	2,398	62,581	64,979	85,153
12月	329	227	127	896	1,007	16,256	1,188	19,474	4	675	81,708	82,383	102,418
'17年 1月	296	351	43	1,182	960	13,001	1,364	16,551	-	1,374	63,852	65,226	82,423
2月	326	228	21	1,086	1,269	16,570	824	19,770	3	491	35,654	36,144	56,471
3月	164	386	103	932	801	17,270	1,474	20,579	9	1,097	40,160	41,257	62,396
p 4月	326	203	26	978	812	14,700	1,612	18,129	1	769	55,109	55,878	74,536
前 月 比	198.4	52.7	25.4	104.9	101.4	85.1	109.4	88.1	5.5	70.1	137.2	135.4	119.5
前年同月比	124.7	80.4	75.9	123.9	77.7	119.9	140.8	118.7	-	46.2	69.6	69.1	77.1

出所: 財務省関税局『貿易統計』から作成。

(注) p: 速報値

関連産業指標推移

(単位: 台)

(単位: 億円)

年 月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新 車 登 録・ 軽自動車販売		建設機械生産		産業車輛生産		機 械 受注額	産業機械 受注額	工作機械 受注額
	うち トラック	うち トラック	うち トラック	うち トラック	うち トラック	うち トラック	ブル ドーザ	パワー ショベル	フォーク リフト	ショベル トラック			
'15 暦 年	9,278,321	1,309,749	4,578,078	466,776	5,046,510	817,234	-	r 165,495	115,473	r 11,447	100,891	54,189	14,806
'16 暦 年	9,204,696	1,201,067	4,634,097	383,959	r 4,970,258	r 808,302	-	r 154,214	r 109,243	r 10,437	102,600	56,089	12,500
'15 年 度	9,187,599	1,279,403	4,582,525	447,339	4,937,734	808,174	-	r 158,900	114,320	r 11,124	101,838	54,576	13,990
'16 年 度	9,357,376	1,192,683	4,636,454	373,097	5,077,903	818,858	-	159,765	109,887	10,553	102,314	50,944	12,893
'16年 7月	807,247	105,568	413,619	33,263	415,605	66,167	-	r 13,108	9,487	r 891	8,932	2,854	1,044
8月	658,602	89,083	327,291	27,186	336,661	56,150	-	r 12,288	8,322	r 778	8,406	3,107	981
9月	840,990	106,153	435,028	36,131	476,769	78,207	-	r 14,402	10,497	r 1,046	8,432	4,849	1,029
10月	781,253	95,104	423,480	27,727	378,740	62,917	-	r 13,656	9,575	r 1,071	8,721	3,175	939
11月	840,439	100,163	422,981	27,828	417,600	74,731	-	r 13,471	10,059	r 1,043	8,478	4,372	1,079
12月	781,484	91,370	422,836	30,380	397,534	63,386	-	r 13,312	8,767	r 816	8,660	7,128	1,119
'17年 1月	761,248	92,992	316,125	23,169	401,650	57,282	-	12,929	8,113	693	8,379	3,391	1,037
2月	r 850,944	r 106,030	375,556	31,152	r 484,725	69,999	-	14,083	8,978	789	8,505	3,222	1,112
3月	929,963	112,344	419,546	38,611	691,374	104,789	-	15,492	10,411	994	8,623	8,226	1,427
4月	749,087	99,646	371,827	27,432	354,750	56,329	-	14,351	8,976	878	8,359	2,440	1,337
前 月 比	80.6	88.7	88.6	71.0	51.3	53.8	-	92.6	86.2	88.3	96.9	29.7	93.7
前年同月比	116.3	112.7	100.7	81.7	109.2	103.5	-	117.6	118.3	106.2	103.6	86.7	134.7

出所: 四輪自動車生産・四輪完成車輸出は(一社)日本自動車工業会『自動車統計月報』、

新車登録は(一社)日本自動車販売協会連合会『新車・月別販売台数(登録車)』、

軽自動車販売は(一社)全国軽自動車協会連合会『軽四輪車新車販売確報』、

建設機械生産・産業車輛生産は『経済産業省生産動態統計』、

機械受注額は内閣府『機械受注統計調査』、産業機械受注額は(一社)日本産業機械工業会『産業機械受注状況』、

工作機械受注額は(一社)日本工作機械工業会『受注実績調査』

(注) r: 訂正值

特殊鋼需給統計総括表

2 0 1 7 年 4 月 分

鋼種別	月 別		実 数 (t)	前 月 比 (%)	前 年 同月比(%)	2015年基準 指 数(%)
	項 目					
工 具 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		20,766	86.1	101.3	100.7
	鋼 材 輸 入 実 績		326	198.4	124.7	105.7
	販 売 業 者	受 入 計	27,670	96.4	111.8	102.5
		販 売 計	27,565	94.0	104.5	104.9
		うち消費者向	19,818	91.3	103.5	104.8
		在 庫 計	57,974	100.2	96.5	98.2
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績		3,989	102.8	55.4	83.7
	生 産 者 工 場 在 庫		7,434	98.8	94.6	89.6
	総 在 庫		65,408	100.0	96.2	97.1
	構 造 用 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		733,777	94.5	111.8
鋼 材 輸 入 実 績		28,623	99.4	61.1	82.5	
販 売 業 者		受 入 計	718,613	98.4	107.4	109.9
		販 売 計	723,741	99.7	109.0	110.7
		うち消費者向	471,219	100.5	102.7	107.3
		在 庫 計	331,369	98.5	95.8	94.2
鋼 材 輸 出 船 積 実 績		86,983	84.0	102.0	105.8	
生 産 者 工 場 在 庫		354,253	103.2	100.2	101.3	
総 在 庫		685,622	100.9	100.5	97.7	
ば ね 鋼		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		34,000	84.9	102.6
	鋼 材 輸 入 実 績		203	52.7	80.4	49.9
	販 売 業 者	受 入 計	26,443	78.1	137.7	124.8
		販 売 計	26,245	99.1	129.8	125.0
		うち消費者向	4,012	95.1	91.7	86.3
		在 庫 計	21,153	100.9	173.0	173.3
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績		15,497	85.5	96.9	98.5
	生 産 者 工 場 在 庫		26,038	93.8	92.4	100.8
	総 在 庫		47,191	96.9	116.8	124.1
	ス テ ン レ ス 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		245,262	100.1	117.7
鋼 材 輸 入 実 績		18,129	88.1	118.7	125.3	
販 売 業 者		受 入 計	249,012	88.4	102.1	99.3
		販 売 計	259,451	96.3	104.9	103.3
		うち消費者向	57,127	93.7	103.2	102.2
		在 庫 計	131,420	92.6	99.4	96.1
鋼 材 輸 出 船 積 実 績		83,931	91.8	102.1	95.7	
生 産 者 工 場 在 庫		111,499	101.7	101.9	96.8	
総 在 庫		242,919	96.6	100.5	96.4	
快 削 鋼		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		50,063	93.9	120.3
	販 売 業 者	受 入 計	14,151	88.7	109.9	100.1
		販 売 計	15,239	90.8	115.6	106.0
		うち消費者向	13,995	89.8	88.0	100.5
		在 庫 計	10,372	90.5	75.1	76.6
	生 産 者 工 場 在 庫		26,168	95.8	101.1	94.3
	総 在 庫		36,540	94.2	92.0	88.5
高 抗 張 力 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		505,150	105.1	129.7	122.4
	販 売 業 者	受 入 計	6,351	87.7	71.8	61.8
		販 売 計	6,614	89.5	71.3	65.0
		うち消費者向	4,883	90.0	69.0	72.8
		在 庫 計	10,274	97.5	93.0	93.7
	生 産 者 工 場 在 庫		199,473	107.6	127.8	105.2
	総 在 庫		209,747	107.1	125.5	104.6
そ の 他	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		142,717	98.6	107.2	103.1
	販 売 業 者	受 入 計	48,273	88.8	87.2	119.1
		販 売 計	49,778	94.3	108.2	122.8
		うち消費者向	35,057	93.1	83.3	95.4
		在 庫 計	60,515	97.6	93.8	113.9
	生 産 者 工 場 在 庫		70,836	111.5	94.2	102.4
	総 在 庫		131,351	104.6	94.0	107.4
特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産 合 計		1,731,735	98.2	116.8	110.1
	鋼 材 輸 入 実 績 計		74,536	119.5	77.1	91.7
	販 売 業 者	受 入 計	1,090,513	94.6	105.4	107.2
		販 売 計	1,108,633	98.3	108.0	109.0
		うち消費者向	606,111	98.6	101.1	105.2
		在 庫 計	623,077	97.2	97.4	97.7
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		646,427	84.3	105.2	100.5
	生 産 者 工 場 在 庫		795,701	104.1	105.2	101.3
	総 在 庫		1,418,778	165.7	101.7	99.7

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』、

それ以外は経済産業省『経済産業省生産動態統計』、『鉄鋼生産内訳月報』、但し総在庫は特殊鋼倶楽部で計算

- (注) 1.鋼材輸入実績は速報値を掲載。構造用鋼の鋼材輸入実績とは高炭素鋼の棒鋼及び合金鋼の棒鋼、線材を加算したもの。
2.総在庫とは販売業者在庫に生産者工場在庫を加算したもの。生産者工場在庫は熱間圧延鋼材のみで、冷間圧延鋼材及び鋼管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれを含まない。

倶楽部だより

(平成29年4月1日～5月31日)

総会（5月26日）

- ①平成28年度事業報告について
- ②平成28年度決算報告について
- ③平成28年度公益目的支出計画実施報告について
- ④役員改選について

理事会（書面）（5月11日）

- ①平成28年度事業報告について
- ②平成28年度決算報告について
- ③平成28年度公益目的支出計画実施報告について
- ④役員改選について
- ⑤第45回東京モーターショウ協賛について
- ⑥第36回定時総会招集について

運営委員会総務・財務分科会（書面）（5月10日）

- ①平成28年度事業報告について
- ②平成28年度決算報告について
- ③平成28年度公益目的支出計画実施報告について
- ④役員改選について
- ⑤第45回東京モーターショウ協賛について

海外委員会

- ・専門部会（4月26日）
「欧米の特殊鋼需給動向」調査の最終報告書（案）について

市場開拓調査委員会

- ・特殊鋼PR展示アドホックWG
高機能金属展に参加（4月5～7日）
- ・高機能金属展参加の反省会（5月17日）

編集委員会

- ・本委員会（5月12日）
 - ①7月号特集「流通各社の紹介」（仮題）の編集方針、内容の確認
 - ②1月号以降の特集テーマ選定

人材確保育成委員会

- ・本委員会（4月11日）
 - ①業界紹介パンフレット最終原稿案の検討
 - ②特殊鋼紹介映像コンテンツ案の検討
 - ③平成29年度工場見学会付新人（東日本ブ

ロック地区）研修講座

- ④平成28年度ビジネスパーソン研修講座の実施報告
- ⑤今後の予定

- ・平成29年度工場見学会付新人（東日本ブロック地区）研修講座（4月18日、19日）

流通委員会

- ・本委員会（5月9日）
 - ①未来志向型の取引慣行に向けて
 - ②今後の流通委員会の活動方針について
- ・構造用鋼分科会（5月31日）
 - ①未来志向型の取引慣行に向けて
 - ②今後の流通委員会構造用鋼分科会の活動方針について
- ・説明会（4月6日）
「平成29年度第1・四半期の特殊鋼需要見通し」
講師：経済産業省製造産業局金属課課長補佐 岡田 治 氏
参加者：31名

[大阪支部]

- 2団体共催説明会（4月10日）
「平成29年度第1・四半期の特殊鋼需要見通し」
講師：経済産業省製造産業局金属課計画係長 佐藤 淳一 氏
参加者：47名

運営委員会（5月23日）

- ①平成28年度事業・収支報告
- ②平成29年度事業計画（案）・収支予算（案）
- ③役員人事

平成28年度会計監査（5月23日）

[名古屋支部]

- 運営委員会（4月25日）
 - ①平成28年度事業報告（案）・決算報告（案）について

②平成29年度事業計画（案）・収支予算（案）
について

③平成29～30年度役員改選（案）について

④第48回名古屋支部総会について

⑤その他報告事項

部会

ステンレス鋼部会（4月12日）

工具鋼部会（4月19日）

構造用鋼部会（4月21日）

二団体共催：新入社員研修（4月26日）

①愛知製鋼(株)知多工場見学

②講義Ⅰ：特殊鋼の知識

講 師：愛知製鋼(株) 松井 達哉 氏

③講義Ⅱ：社会人としての基礎マナー

講 師：キャプラン(株) 時久 麗香 氏

受講者 59名



特殊鋼倶楽部の動き

「第4回高機能金属展」に2年連続参加

当倶楽部は、去る4月5日～7日、東京ビッグサイトにて開催の「第4回高機能金属展」の協賛団体となるとともに以下のように参加しました。

特殊鋼倶楽部ブースの展示

当倶楽部ブースには、事務局と会員企業から自社製品PRを目的とした小山鋼材(株)、中川特殊鋼(株)、ヤマト特殊鋼(株)の3社がブース内同時出展し、各社とも積極的なPR活動を実施しました。内外の色々な業種の方に立ち寄って頂きました。会員企業からは、藤岡会長（愛知製鋼(株) 取締役社長）、富永副会長（山陽特殊製鋼(株) 専務取締役東京支社長）等の方々に訪問頂きました。特殊鋼PRの意義がありましたが、まだまだ改善の余地があると思っています。昨年と同様に業界紙で報道される等良いPRとなったと思います。

当倶楽部の会員企業からも、愛知製鋼(株)、(株)神戸製鋼所、山陽特殊製鋼(株)、JFEスチール(株)、JX金属(株)、新日鐵住金(株)、大同特殊鋼(株)、日新製鋼(株)、日本精線(株)、(株)UEX、大和特殊鋼(株)の計11社が出展されました。

以下に、会場写真を掲載いたします。



【会場の様子（東京ビッグサイト）】

「平成29年工場見学付新人（東日本ブロック地区）研修講座」を開催しました

去る4月18日（火）、19日（水）、特殊鋼倶楽部と全日本特殊鋼流通協会共催で初めて平成29年度工場見学付新人（東日本ブロック地区）研修講座を開催しました（受講者数：35名）。

【スケジュール】

- 4月18日 10：00～17：00 特殊鋼販売技士 入門編 講師：浜小路氏
17：00～18：00 特殊鋼流通 先輩からのメッセージ
【問屋】「特殊鋼営業マンへのメッセージ」
碓井鋼材(株) 田村氏
【商社】「変化の時～入口と出口 特殊鋼の魅力」
(株)メタルワン 船倉氏
18：00～20：00 親睦会
4月19日 13：00～16：30 大同特殊鋼(株)知多工場見学会

特殊鋼販売技士入門編では、特殊鋼の基礎知識について講師の声に耳を傾けながら熱心に学んでいました。

特殊鋼流通先輩からのメッセージでは、参加者からは「働くために必要なことを聞いた」「時代の変化が良く理解できた」等の感想を頂きました。

工場見学は、訪問先である大同特殊鋼(株)福利厚生施設さつき館に到着後、2階会議室にて羽田販売管理室長より同社永井副工場長、野口生産管理室長のご紹介があり、ご挨拶を頂きました。工場紹介DVDを見た後、2班に分かれて見学に入りました。

現場では、製鋼工場では150t電気炉の装入・通電及び連続铸造設備を間近で見た後、分塊工場、小型圧延工場（圧延、製品置場）を見学し、さつき館会議室にて非常に活発に質疑応答を行いました。羽田販売管理室長より閉会の挨拶があり、同社工場の見学を終了しました。

見学先の感想では、「150t電気炉の溶解、スクラップ装入場面はすごい迫力があり驚いた」「パネル説明を受けた後、現場を見る順序であったため非常に理解し易かった」「小型圧延では4回チャンスがあることが印象に残った」等の感想を頂きました。

全体を通しては、「座学で学んだことを踏まえた上で工場見学会に参加したことで理解が深まった」「親睦会等でつながりを広げることができた」等の感想を頂きました。

参加された方々にはアンケートを実施させて頂き、貴重なご意見をありがとうございました。次回工場見学付新人研修講座に是非とも生かしたいと思います。

最後に、特殊鋼倶楽部会員企業のために貴重な機会を与えていただいた特殊鋼販売技士入門編の講師の方、特殊鋼流通の先輩メッセージ頂いた講師の方及び大同特殊鋼(株)知多工場の関係者の方々に感謝を申し上げて、工場見学付新人（東日本ブロック地区）研修講座の報告といたします。

なお、当日資料（商社：「変化の時～入口と出口 特殊鋼の魅力」）は、会員専用ページの会員専用イベントに掲載しています。

以下に、写真を掲載します。



【碓井東京支部長の挨拶】



【特殊鋼販売技士 入門編 講演の様子】



【問屋 先輩からのメッセージ講演の様子】



【商社 先輩からのメッセージ講演の様子】



【永井副工場長の挨拶 大同特殊鋼(株)知多工場殿】



【工場見学会の様子】

一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧

(社名は50音順)

【会 員 数】		【販売業者会員】		
(正 会 員)		愛 鋼 (株)	大 同 興 業 (株)	(株) 平 井
製造業者	24社	青 山 特 殊 鋼 (株)	大同DMソリューション(株)	(株) フ ク オ カ
販売業者	100社	浅 井 産 業 (株)	大 洋 商 事 (株)	藤 田 商 事 (株)
合 計	124社	東 金 属 (株)	大 和 興 業 (株)	古 池 鋼 業 (株)
【製造業者会員】		新 井 ハ ガ ネ (株)	大 和 特 殊 鋼 (株)	(株) プ ル ー タ ス
愛 知 製 鋼 (株)		栗 井 鋼 商 事 (株)	(株) 竹 内 ハ ガ ネ 商 行	(株) 堀 田 ハ ガ ネ
		伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株)	孟 鋼 鉄 (株)	(株) マクシスコーポレーション
秋 山 精 鋼 (株)		伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株)	田 島 ス チ ー ル (株)	松 井 鋼 材 (株)
(株) 川 口 金 属 加 工		井 上 特 殊 鋼 (株)	辰 巳 屋 興 業 (株)	三 沢 興 産 (株)
(株) 神 戸 製 鋼 所		(株) U E X	千 曲 鋼 材 (株)	三 井 物 産 (株)
合 同 製 鐵 (株)		碓 井 鋼 材 (株)	(株) テ ク ノ タ ジ マ	三 井 物 産 ス チ ー ル (株)
山 陽 特 殊 製 鋼 (株)		ウ メ ト ク (株)	(株) 鐵 鋼 社	(株) メ タ ル ワ ン
J F E ス チ ー ル (株)		扇 鋼 材 (株)	デルタステール(株)	(株) メタルワンチューブラー
J X 金 属 (株)		岡 谷 鋼 機 (株)	東京貿易マテリアル(株)	(株) メタルワン特殊鋼
下 村 特 殊 精 工 (株)		カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株)	(株) 東 信 鋼 鉄	森 寅 鋼 業 (株)
新 日 鐵 住 金 (株)		兼 松 (株)	特 殊 鋼 機 (株)	(株) 山 一 ハ ガ ネ
新日鐵住金ステンレス(株)		兼松トレーディング(株)	豊 田 通 商 (株)	山 進 産 業 (株)
大 同 特 殊 鋼 (株)		(株) カ ム ス	中 川 特 殊 鋼 (株)	ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株)
高 砂 鐵 工 (株)		(株) カ ワ イ ス チ ー ル	中 野 ハ ガ ネ (株)	山 野 鋼 材 (株)
東 北 特 殊 鋼 (株)		川 本 鋼 材 (株)	永 田 鋼 材 (株)	陽 鋼 物 産 (株)
日 新 製 鋼 (株)		北 島 鋼 材 (株)	名 古 屋 特 殊 鋼 (株)	菱 光 特 殊 鋼 (株)
日 本 金 属 (株)		ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株)	ナ ス 物 産 (株)	渡 辺 ハ ガ ネ (株)
日 本 高 周 波 鋼 業 (株)		ケ ー ・ ア ン ド ・ アイ 特 殊 管 販 売 (株)	南 海 鋼 材 (株)	
日 本 精 線 (株)		小 山 鋼 材 (株)	日 金 ス チ ー ル (株)	
日 本 冶 金 工 業 (株)		佐 久 間 特 殊 鋼 (株)	日 鉄 住 金 物 産 (株)	
日 立 金 属 (株)		櫻 井 鋼 鐵 (株)	日鉄住金物産特殊鋼西日本(株)	
(株) 不 二 越		佐 藤 商 事 (株)	日 本 金 型 材 (株)	
三 菱 製 鋼 (株)		サ ハ シ 特 殊 鋼 (株)	ノ ボ ル 鋼 鉄 (株)	
ヤマシンスチール(株)		(株) 三 悦	野 村 鋼 機 (株)	
理 研 製 鋼 (株)		三 協 鋼 鐵 (株)	白 鷺 特 殊 鋼 (株)	
		三 京 物 産 (株)	橋 本 鋼 (株)	
		三 興 鋼 材 (株)	(株) 長 谷 川 ハ ガ ネ 店	
		三 和 特 殊 鋼 (株)	(株) ハ ヤ カ ワ カ ン パ ニ ー	
		J F E 商 事 (株)	林 田 特 殊 鋼 材 (株)	
		芝 本 産 業 (株)	阪 神 特 殊 鋼 (株)	
		清 水 金 属 (株)	阪 和 興 業 (株)	
		清 水 鋼 鐵 (株)	日 立 金 属 商 事 (株)	
		神 鋼 商 事 (株)	日 立 金 属 工 具 鋼 (株)	
		住 友 商 事 (株)	(株) 日 立 ハ イ テ ク ノ ロ ジ ー	

“特集” 編集後記

今回の特集は「特殊鋼の進化を支えるシミュレーション技術」です。シミュレーション技術に関する特集は、2004年7月号以来となり、13年ぶりの特集となります。前回の特集では、合金設計、精錬、鋳造、圧延といった、特殊鋼鋼材の製造プロセスに関わるシミュレーション技術が主体でしたが、今回は前回特集との差別化をはかるため、特殊鋼鋼材を加工、熱処理する特殊鋼ユーザーの実務に直結する分野に焦点を当てることになりました。塑性加工（熱間鍛造、冷間鍛造）、熱処理（浸炭、高周波焼入）、切削加工（切削条件、工具）、溶接・接合といった、特殊鋼の主要な加工、熱処理プロセスに関わるシミュレーション技術を網羅した特集となったと思います。なお、主要分野を網羅するにあたっては執筆者をご紹介いただくなど多くの方々にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。

本特集では、各分野のシミュレーション技術について、そのねらい（高機能化、開発期間短縮、現象解明 etc.）や特徴、および適用事例について

シミュレーション結果の図をまじえて紹介いただくなどして、各分野でシミュレーションがどのように活用されているかを理解いただけるのではと思います。また、金属材料の組織、特性に関するシミュレーション技術として、予測モデルとして発展しているフェーズフィールド法の動向、データサイエンスと材料研究の今後についても解説いただいております。また、特殊鋼ユーザーの方々にとって極めて興味深い特集となったのではと思います。

今回の特集を通じて、日本の特殊鋼の進化に対してシミュレーション技術が重要な役割を果たしていることを読者の方々にご理解いただければ幸いです。

最後になりましたが、ご多忙の中、本特集にご寄稿をいただきました執筆者の皆様、また編集委員および事務局の皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

〔愛知製鋼㈱ 品質保証部 すぎもと 杉本 あつし〕
お客様品質・技術室

特 集／会員流通各社の紹介

I. まえがき

II. 流通各社の紹介

11月号特集予定…軸受

特 殊 鋼

第 66 卷 第 4 号

© 2 0 1 7 年 7 月

平成29年6月25日 印 刷

平成29年7月1日 発 行

定 価 1,230円 送 料 100円

1年 国内7,300円（送料共）

発 行 所

一般社団法人 特殊鋼倶楽部

Special Steel Association of Japan

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3丁目2番10号 鉄鋼会館

電 話 03(3669)2081・2082

ホームページURL <http://www.tokushuko.or.jp>

編集発行人 小 澤 純 夫

印 刷 人 増 田 達 朗

印 刷 所 レタープレス株式会社

本誌に掲載されたすべての内容は、一般社団法人 特殊鋼倶楽部の許可なく転載・複写することはできません。