

Materia Japan

- ミニ特集「金属製造プロセスへの粒子法の応用」
- 金属材料の非線形弾性定数評価
- 入門講座 測定の不確かさ評価について
—4.不確かさの活用—
- 秋期講演大会プログラム(別冊付録)

まてりあ

Vol.54 MTERE2 54 (9) 431~490 (2015)

2015 **9**

JSX-1000S

X-ray fluorescence spectrometer



元素分析のスマートソリューション

ElementEye

スマートFP法による定量分析

- バルクFP法 / 薄膜FP法
- 自動バランス成分 ●自動厚み補正

全元素高感度分析

- ショートパス光学系
- 高感度フィルター



各種ソリューションアプリの提供

- 簡易金属ソリューション ●Snめっきスクリーニング
- 簡易有機物ソリューション ●Niメッキスクリーニング
- 簡易酸化物ソリューション ●ハロゲンスクリーニング
- RoHSスクリーニング

1 全エネルギー範囲高感度検出

- SDDを採用したショートパス光学系
- 高感度フィルター:重金属元素(CI~U)の高感度検出
- 排気ユニット:軽元素(F~Cl)の高感度検出

2 スマートFP法

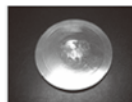
- バルク試料から薄膜試料の定量分析が可能
- 高感度フィルターを利用しての数10ppmレベルの低濃度元素の検出(検量線の作成不要)
- バランス成分の自動設定が可能 樹脂や食品の分析が容易

3 ソリューションアプリの提供

目的の測定を実現するためにレシピをボタン化し、煩わしい条件の設定不要な簡単高精度分析を提供

簡易金属分析ソリューションによる測定例

金属でも同色同形となると種類を正確に判断することが難しくなります。専門家であれば一見あるいは感触で金属種を判別することは容易なのですが、鋼種判定となると簡単にはいきません。このような場合にスマートFP法を利用すると迅速簡便に鋼種を判断することができます。



試料はCr、Fe、Niが主成分であることからステンレス系の合金であることが判断でき、それらの組成からSUS304系の合金であることが分かります。

成分	認証値 (mass%)	分析結果 (mass%)
Si	0.72	0.7
Cr	18.35	18.3
Mn	1.53	1.5
Fe	69.6	70.0
Ni	8.67	8.6
Cu	0.316	0.3
Nb	0.052	0.05
Mo	0.41	0.4

日本電子株式会社 本社・昭島製作所 東京都昭島市武蔵野3-1-2 TEL(042)543-1111

<http://www.jeol.co.jp/>

営業企画室 東京都千代田区大手町2-1-1 TEL(03)6262-3560 | 西日本ソリューションセンター 大阪市淀川区西中島5-14-5 TEL(06)6305-0121

■東京 電子光学機器営業グループ TEL(03)6262-3581 | 分析機器営業グループ TEL(03)6262-3582 | 産業機器営業部 TEL(03)6262-3570
半導体機器営業室 TEL(042)528-3491 | 医用機器営業グループ TEL(03)6262-3583

■札幌 TEL(011)726-9680 | ■仙台 TEL(022)222-3324 | ■筑波 TEL(029)856-3220 | ■横浜 TEL(045)474-2181 | ■名古屋 TEL(052)581-1406

■大阪 TEL(06)6304-3941 | ■広島 TEL(082)221-2500 | ■高松 TEL(087)821-0053 | ■福岡 TEL(092)411-2381



2015
Vol.54
No.9

まてりあ

◎ 会告原稿締切：毎月1日



翌月号(1日発行)掲載です。

- 支部行事：shibu@jim.or.jp
- 本会記事：stevent@jim.or.jp
- 掲 示 板：materia@jim.or.jp

ミニ特集「金属製造プロセスへの粒子法の応用」

企画にあたって 奥村圭二	431
Euler-Lagrange 法による高炉モデル 夏井俊悟 菊地竜也 鈴木亮輔	432
粒子法を用いた金属精錬プロセスの解析 伊藤公久	436
金属製造プロセスにおける流動・凝固現象の連成解析 平田直哉 安斎浩一	440
粒子法による摩擦攪拌接合現象のモデル化 宮坂史和	444
流動現象への粒子法の応用 角田和彦	449

最近の研究	共鳴振動を利用した金属材料の非線形弾性定数評価への取り組み 垂水竜一	454
	<small>鳴り響く金属材料の音色から、私達はその力学特性をどこまで聞き分けることができるのか？ 共鳴振動現象の本質を理解してその工学的応用を進める、著者等の最新の研究成果を紹介。</small>	

入門講座	測定の不確かさ評価について —4. 不確かさの活用— 城野克広	462
	<small>測定の不確かさとは何か？ どう評価し、どう使うのか？ 100回以上の講師経験を持つ著者による事前知識不要の入門的解説。(全4回)</small>	

新進気鋭	水蒸気による複合酸化物の促進固相合成—グリーン・プロセッシングの新提案— 小澤隆弘	466
-------------	--	-----

談話室	研究室の立ち上げから現在に至るまで 岩瀬謙二	471
------------	------------------------------	-----

委員会だより	ランチョンミーティングの紹介—金属材料分野での多様なキャリアパス— 梅津理恵	472
---------------	---	-----

本会記事	会告	473	次号予告	484
	支部行事	477	材料系学協会情報コーナー	484
	掲示板	477	新入会員	484
	書評	480	PRICM9のお知らせ	484
	会誌・欧文誌9号目次	481	行事カレンダー	485

付録	2015年秋期講演大会プログラム	別冊
-----------	------------------------	----

表紙デザイン：北野 玲
複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合においては、その必要はありません。(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です。)

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
FAX 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp http://www.jaacc.jp/
複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、直接本会へご連絡下さい。

どこにもないモノへの挑戦

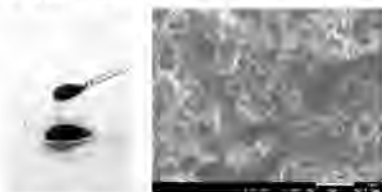
TOYO TANSO
Inspiration for Innovation

製品情報はこちらへ ▶ www.toyotanso.co.jp/Products/

CNovel™ クノーベル™

細孔径を自由に制御できる多孔質炭素

- “連通メソ孔”を有する特徴的な構造
- ナノスケールでテイラーメイド可能な細孔径



【用途例】
・薬剤精製時の不純物除去
・脱色・脱臭
・カラムの充填剤

CNovel™の詳細はこちらへ



サンプルキットのご購入は
こちらへ



KLASTA MATE™ クラスタターメイト™

ナノカーボンやDLC成膜用の
蒸発源として使用可能な金属-炭素複合材

- 炭素材料中に各種金属を均一分散可能

【製品例】



【用途例】

ナノカーボン製造用電極
DLC（ダイヤモンドライクカーボン）成膜用ターゲット

KLASTA MATE™の詳細は
こちらへ



東洋炭素 クノーベル



東洋炭素株式会社

【本社】〒555-0011 大阪市西淀川区竹島5-7-12 Tel 06-6472-5842 Fax 06-6472-6011 www.toyotanso.co.jp

日本金属学会発行誌 広告のご案内

まてりあ（会報）

前付）1色1P ￥100,000 1/2P ￥60,000

後付）1色1P ￥95,000 1/2P ￥55,000

※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

春・秋期講演大会プログラム

後付）1色1P ￥70,000 1/2P ￥40,000

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル

TEL(03)3546-1337 FAX(03)3546-6306

E-mail info@meihosha.co.jp HP www.meihosha.co.jp

TEST 2015 JAPAN TESTING TECHNOLOGY SHOW 2015

第13回総合試験機器展

2015年9月16日(水)～18日(金) 東京ビッグサイト 西ホール

<http://www.jtma.jp>

入場無料

【開催概要】

会 期：2015年9月16日(水)～18日(金) 10:00～17:00
 会 場：東京ビッグサイト[東京国際展示場]西ホール
 主 催：日本試験機工業会
 後 援：経済産業省
 特別協力：フジサンケイ ビジネスアイ
 併催事業：開催記念セミナー
 同時開催：センサエキスポジャパン2015、測定計測展、セラミックス&ガラス技術展2015(相互入場)



【出展内容】

- ◇材料試験機
- ◇構造物試験機
- ◇動力・釣合い試験機
- ◇環境試験装置
- ◇振動・衝撃試験機
- ◇非破壊検査・試験機
- ◇画像入力、画像処理、画像解析、3次元計測
- ◇受託試験・委託試験・レンタル・校正業務
- ◇計測評価・その他試験機
- ◇試験解析ソフト、試験分析、HILS

協賛団体 認定・検定機関ゾーン

「見せる信頼～確かな品質」を開催テーマに掲げる本展示会では、日本の品質を支える技術・製品として試験機の重要性を訴求していきます。

その取組みの一環として、試験機の確かさを維持する為の校正サービスおよび重要性に焦点をあてた主催者企画「協賛団体 認定・検定機関ゾーン」を設けます。



開催記念セミナー【聴講無料、事前予約制(8月上旬～公式サイトにて)】

9月16日(水)	K1 10:15～11:00 硬さ試験の基礎と規格の動向
	日本試験機工業会 材料試験技術委員会 硬さ試験分科会
	K2 11:45～12:30 高分子材料の加工性評価試験
9月17日(木)	日本試験機工業会 材料試験技術委員会 疲れ・靱性試験分科会
	K3 13:45～14:30 機械的衝撃および落下試験の基礎
	日本試験機工業会 環境装置技術委員会 機械環境分科会
9月18日(金)	S1 15:15～16:00 JTM K12恒温槽の構成ガイドラインとJCSS対応について
	日本試験機工業会 環境装置技術委員会 気象環境分科会
	K4 10:15～11:00 物づくりにおける静的試験の役割
9月17日(木)	日本試験機工業会 材料試験技術委員会 静的強度試験分科会
	K5 11:45～12:30 屋外暴露と各種促進耐候性試験の相関性評価
	日本試験機工業会 環境装置技術委員会 耐候性分科会
9月18日(金)	K6 13:45～14:30 腐食試験と規格
	日本試験機工業会 環境装置技術委員会 腐食環境分科会
	S2 15:15～16:00 日本試験機工業会・校正分科会が実施するJCSS技能試験
9月17日(木)	日本試験機工業会 材料試験技術委員会 校正分科会
	K7 10:15～11:00 疲労試験の基礎
	日本試験機工業会 材料試験技術委員会 疲れ・靱性試験分科会
9月18日(金)	K8 11:45～12:30 気象環境試験の基礎
	日本試験機工業会 環境装置技術委員会 気象環境分科会
	K9 13:45～14:30 振動試験の動向
日本試験機工業会 環境装置技術委員会 機械環境分科会	

【展示会に関する問い合わせ先】

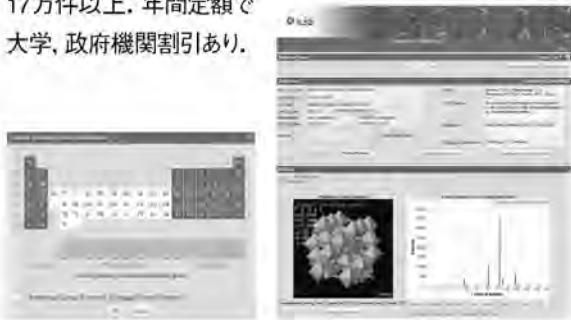
(株)シー・エヌ・ティ 担当：岩崎・吉田

Tel. 03-5297-8855 Fax. 03-5294-0909 E-mail: test2015@cnt-inc.co.jp

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

無機結晶構造データベース ICSD

FIZ-K/NIST作成の無機化合物の結晶構造データベース。リガク社PDXLを含む他社製品とのリンクがあり、誘電体、超伝導体、セラミックスを始めとする材料開発に幅広く活用。検索結果は、3D表示、CIF出力可。原子間距離、角度、粉末回折パターンの計算ソフト付。特徴として、ICDDのPDF番号からの検索も可能。収録件数は17万件以上。年間定額で大学、政府機関割引あり。



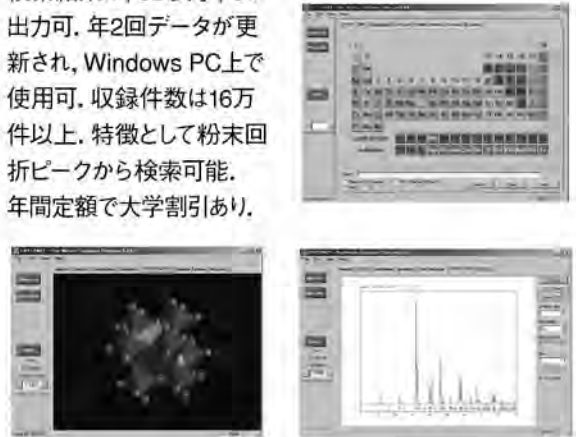
化学情報協会 科学データ情報室

〒113-0021 東京都文京区本駒込6-25-4 中居ビル
TEL 03-5978-3622 FAX 03-5978-3600
<http://www.jaici.or.jp> e-mail: crystal@jaici.or.jp

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

金属結晶構造データベース CRYSTMET

Toth Information Systems社作成の金属、合金、金属間化合物の結晶構造データベース。合金ベースの触媒、金属、セラミックス皮膜など、先端材料の研究開発で活用。検索結果は、3D表示、CIF出力可。年2回データが更新され、Windows PC上で使用可。収録件数は16万件以上。特徴として粉末回折ピークから検索可能。年間定額で大学割引あり。



化学情報協会 科学データ情報室

〒113-0021 東京都文京区本駒込6-25-4 中居ビル
TEL 03-5978-3622 FAX 03-5978-3600
<http://www.jaici.or.jp> e-mail: crystal@jaici.or.jp

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

ガラス物性データベース SciGlass 7.7



- ガラス
230,000件の酸化ガラス、14,000件のハロゲン化ガラス、28,000件のカルコゲナイドガラスなど計約360,000件のガラス
- 物性
1,000,000件以上の実測値と合成法、測定法の情報
- 物性推測計算
100通り以上の推算法で16種類の物性を推測。実測値との比較プロット。
- 最適ガラスの検索
- 光学スペクトルデータ(UV、NIR)

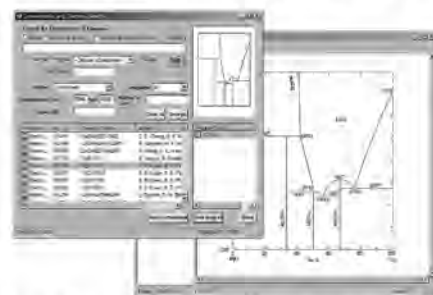
定価(税別)
¥700,000(一般)
¥400,000(教育)

株式会社 デジタルデータマネジメント

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町1-11-8 紅萌ビル
TEL 03-5641-1771 FAX 03-5641-1772
<http://www.ddmcorp.com>

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

25,000件のセラミックス状態図データベース ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams, Version 4.0



定価(税別)
¥160,000
(シングルユーザー)

(American Ceramic Society)

- 検索条件
- 成分系、元素記号
 - 著者、出典誌名、出版年
 - 状態図番号

- データ表示
- ◆モル百分率 ↔ 重量百分率
 - ◆Lever rule計算
 - ◆ズームアップ/ズームダウン
 - ◆状態図をBMPまたはWMFとして保存

データソース

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

株式会社 デジタルデータマネジメント

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町1-11-8 紅萌ビル
TEL 03-5641-1771 FAX 03-5641-1772
<http://www.ddmcorp.com>

Goodfellow

www.goodfellow-japan.jp

研究開発向け材料サプライヤー

グッドフェロー日本代表事務所
〒105-0003 東京都港区西新橋2-7-4 CJビル7F
Tel: 03-5579-9285 Fax: 03-5579-9291
info-jp@goodfellow.com

【代理店一覧】

株ニューメタルスエンドケミカルスコーポレーション
www.newmetals.co.jp Tel: 03-3231-8600

仁木工芸株
www.nikiglass.co.jp Tel: 03-3456-4700

和光純薬工業株
www.wako-chem.co.jp Tel: 0120-052-099

株ジャパンメタルサービス
www.jpn-ms.co.jp Tel: 048-920-3200

・最新プレスリリース「複雑な形状の高熱伝導部品を可能にするセラミックを提供開始」

ON-LINE CATALOGUE



8万点取扱い



小ロット



即配達



カスタムオーダー



金属加熱装置は日新技研にお任せ下さい!



金属合金の作製に最適!
手軽に鑄込める鑄造機構にも対応!

【超小型真空アーク溶解装置 傾角鑄造機構付】



金属粉末の作製に最適!
各種アトマイズ装置に対応!

【超小型ガスアトマイズ装置】

- 次世代の材料開発装置及びEB装置の製造販売をしております。
- 装置の事でお困りの際にはお気軽にお問い合わせ下さい。

技 日新技研株式会社

【営業品目】 ●単結晶作製装置 ●新材料開発装置 ●高周波電源
●電子ビーム(電源及び電子銃) ●各種実験装置 ●各種生産装置

〒358-0032 埼玉県入間市狭山ヶ原碑の前384
TEL.04(2935)1411(代) FAX.04(2935)1390
URL <http://www.nissin-giken.co.jp>

新素材力学特性装置の開発専門メーカー“日本テクノプラス”が他社にない装置で最先端の科学研究および新素材開発のお手伝いをいたします。

従来測定できなかった試料の測定や新たな機能を追加、そして特殊な粘弾性測定、X線回折周辺装置などの物性研究分野でもお手伝いを始めます。

研究室に1台は必須の装置です。

自由共振式ヤング率、内部摩擦測定装置 JE-RT JG-RT

非接触加振、非接触検出と共振に誤差を与える要素が皆無に近く、誰が測定しても高精度、迅速測定、対応できる材質や試料形状、寸法が広範囲と使いやすく最も真値に近い室温ヤング率を測定できる装置です。

JE-RT or JG-RT : 250 万円～

JE-RT+JG : 400 万円～



最も安定して容易に高温測定できる装置です。

高温弾性率等同時測定装置 EG-HT

独自の測定機構で高温時に生じる難共振状態でも安定した測定ができる装置です。

多機能です。

ヤング率、剛性率、ポアソン比算出、内部摩擦

温度依存性

ひずみ依存性

経時依存性

EG-HT(1200°C)
1,250 万円～



弾性定数 C_{ij} から弾性率を求め、異方性材料の測定への道を広げ、最先端研究を大きく前進できます。

電磁共振式弾性率・弾性定数測定装置 CC II-HT

弾性定数(弾性スティフネス C_{ij})から弾性率を求めるので異方性材料の測定ができ、サイズが5mm程度の直方体や円柱という小試料で測定できるので、新素材研究がいち早く進みます。

CC II-RT

600 万円～

CC II-HT(1200°C)

1,700 万円～



小エネルギーで大きな仕事を行う共振を利用して新素材開発時の薄板試料で、最先端研究を大きく前進できます。

共振式薄板疲労試験装置 RF-RT

試験中にヤング率の変化を計測するので、疲労過程が観測できます。

ギガサイクルも短期間で試験できます。

発熱がほとんどありません

試験の再現性がよいです。

静音、小型、小電力、安価と画期的な装置です。

RF-RT

250 万円～

RF-HT(200°C)

350 万円～



科研費では広く新素材力学特性試験装置として請求可能です。

小さな巨人 **日本テクノプラス株式会社**

〒532-0012 大阪市淀川区木川東 3-5-21 第3丸善ビル

E-mail ntp@nihon-tp.com

Home page : <http://www.nihon-tp.com>

弊社の営業活動は、学会中心出展・広告、そして名刺交換やお問合せ等いただいた方、もしくはメルマガ申込みいただいた方に不定期発行の性能や機能技術や測定技術、基礎技術記載した技術メルマガ「NTP 便り」送付のみです。

企画にあたって

奥村圭二*

我が国の基幹産業である鉄鋼業は、現在、世界最高水準の技術で鉄を製造している。一方で、多量なエネルギーを消費しており、CO₂排出量は産業全体の約4割を占めている。鉄鋼業においてはCO₂の排出は不可避であるが、鉄は年間1億トン以上も生産されており、その生産量の多さから、エネルギー効率化や使用燃料の削減、技術改善によりCO₂の排出量を大きく削減することができる。政府はCO₂などの温暖化ガスの排出量を2030年までに2013年比で26%減らす目標案を公表した。より一層の省エネルギー、省資源が産業界に課せられることとなった。このことから、高効率な金属製造プロセスおよび高機能な金属材料の製造が志向されており、それに対する様々な研究がなされている。

金属の製造過程で起こる様々な現象を詳しく理解するアプローチとして、数値シミュレーションがある。図1は数値シミュレーション法を分類した図である。現象を記述する方程式を立てて、それを数値的に解くという手法は、従来は、有限差分法や有限要素法のような格子法で行われてきた。しかし、計算領域を設定して格子(計算メッシュ)を作成し、固定された計算点の範囲内での収束計算であるため、気-液界面のように界面が大きく変形または液体が分裂するような現象はシミュレートすることが難しいとされてきた。それに対して、粒子法は格子分割することなしに、連続体の運動を有限の数の粒子の運動として解析する手法である。前述の格子法はオイラー的に現象をとらえているのに対して、粒子法はラグランジュ的に現象をとらえている。連続体を構成する粒子各々の運動を独立してみているので、複雑に変化する境界面の問題に容易に適用できる利点がある。また、近年のコンピュータの進歩により、負荷の大きい計算が従来に比べて短時間で計算できるようになったことも粒子数の多い計算を可能にした。このような理由により、粒子法は様々な分野で注目され、金属製造プロセスに適用した研究も行われている。

本ミニ特集では、金属製錬から凝固、溶接プロセスへ粒子法を適用した研究について4件の解説記事の執筆を依頼した。この4件の記事は、金属製造プロセスの上工程から下工程への物流を意識して構成した。また、金属関連以外からも1件執筆をいただいた。夏井俊吾助教、菊地竜也准教授、鈴木亮輔教授(北大)には製鋳プロセスにおける高炉内装入物の運動解析について解説いただいた。伊藤公久教授(早大)には金属精錬過程における大変形を伴う異相界面への粒子法の適用例と今後の展望について解説いただいた。平田直哉助教、安斎浩一教授(東北大)には熔融金属の流動および凝固現象を連成した系への適用例を解説いただいた。宮坂史和准教

数値シミュレーション法

粒子法(ラグランジュ型)

MPS法(Moving Particle Semi-implicit)

SPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)

SPAM法(Smoothed Particle Applied Mechanics)

個別要素法(Distinct Element Method)

格子法(オイラー型)

有限要素法(Finite Difference Method)

有限体積法(Finite Volume Method)

有限要素法(Finite Element Method)

図1 数値シミュレーション法の分類。

授(阪大)には摩擦攪拌接合現象への粒子法の適用について解説いただいた。このように金属製造の各要素プロセスにおける流動を伴う現象への粒子法の応用について概観する。また、金属製造とは異なる分野においての研究紹介として、角田和彦教授(日大)には水柱崩壊流れや液封入式真空ポンプ内流れのような界面が大きく変形する系への適用例について解説いただいた。

本企画が金属製造プロセスにおける新たなシミュレーション手法の発展と、読者の今後の研究開発の一助となれば幸いである。

最後に、執筆をお引き受けいただいた先生方に改めて御礼申し上げます。また、本企画にあたりご協力いただきました第2分科の皆様がこの場を借りて厚く御礼申し上げます。



奥村圭二

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1988年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了
1988年 名古屋大学大学院工学研究科助手
2003年 名古屋工業大学大学院工学研究科准教授
専門分野：金属生産工学
◎熔融金属からの不純物の除去、リサイクル、超音波材料プロセッシングの研究に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

* 名古屋工業大学准教授；大学院工学研究科(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Preface for Special Issue on Applications of Particle Method for Metal Production Processes; Keiji Okumura (Department of Materials Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya)

Keywords: simulation, numerical analysis, particle method, Lagrangian, metal production

2015年7月16日受理[doi:10.2320/materia.54.431]

Euler-Lagrange 法による高炉モデル

夏井俊悟¹⁾ 菊地竜也²⁾ 鈴木亮輔³⁾

1. はじめに

製鉄プロセスは、炭素を還元材として鉄鉱石の熔融・還元を行う工程である。現在の主な製鉄用高炉は内容積 3000~5000 m³ の大型円筒容器で、これを満たす焼結鉱、コークスの充填層に加熱空気を通気する。図 1 に高炉内の流れを模式的に示す。炉内では、炉頂から装入された原料から、羽口付近の raceway と呼ばれるコークス燃焼帯まで約 500~2800 K と幅広い温度分布が生じる。したがって、コークスのガス化や融着帯での鉱石熔融の相変化、化学反応に伴う組成不均一性、粉体の発生など多くの原因によってプロセス中は固気液相が混在する系となる。

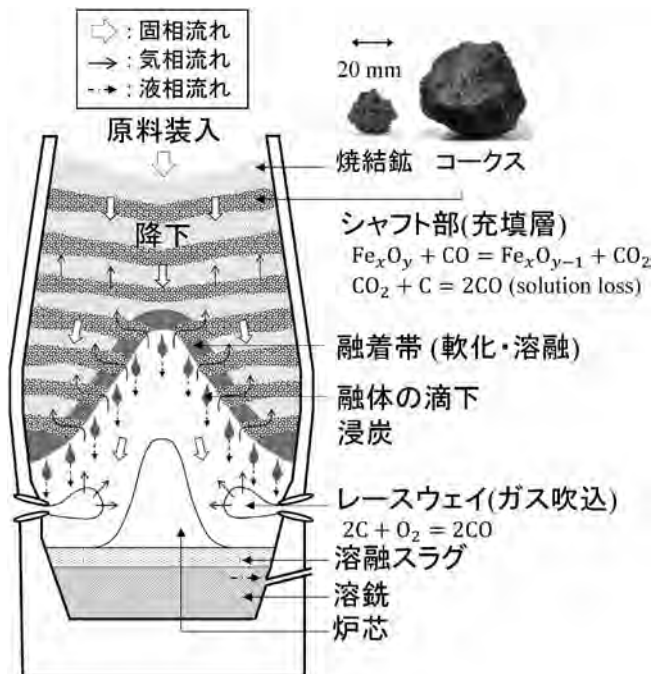


図 1 製鉄用高炉プロセスにおける各相の流れ。

近年では、CO₂ 排出量削減のために製鉄プロセス設計の見直しが図られ、主たる方策として低コークス比操業、還元材の水素置換、高反応性原料の使用が提案されてきた⁽¹⁾。これらの方法は熱力学的には CO₂ 排出量削減が可能だが、炉内通気性や温度・反応場にも大きな影響を与えることが予想されている。炉内の流れに停滞が生じてしまうと操業は成り立たない。CO₂ 排出量削減のためには炉内変化に対応する技術開発が同時に求められる。

適切な操業設計指針を得るため、数値解析を用いた非経験的な移動現象モデルが炉内現象予測に重要な役割を担ってきた。最近では、粒子を用いたシミュレーションの応用研究によって、離散的な固体運動や自由表面流れという従来取り扱いが困難であった現象の直接解析が実用的になってきた(例えば文献⁽²⁾)。固体粒子運動の計算方法である離散要素法 (DEM)⁽³⁾、およびその数値流体力学との連成手法⁽⁴⁾、また本特集号の記事にあるメッシュフリー粒子法を用いることで、今までブラックボックスとされてきた炉内のモデリングや、直接的な数値実験の試みがなされている。今後の高炉の単位操作と物理量との新たな関係性を見出すことが期待される。本報では、DEM を中心に固気相の運動量、熱、物質移動を同時に解析する Euler-Lagrange 法によるモデルを対象とした紹介する。

2. DEM による固体粒子運動シミュレーション

高炉を特徴付ける原料の充填層構造は、数億個の粒子から形成され、これらによって炉内の流れが制御されると言っても過言ではない。充填構造を微視的観点で検討するために、個々の粒子運動を時間積分して考える。この立場では粒状体としての特性が顕在化するため、充填層を連続流体として近似しない。一般に固体粒子の運動は、並進および回転運動の運動方程式を支配方程式に外力項を付加して与えられる。運動の素過程を物理機構の面から理解するには、粒子同士の干渉を記述する必要がある。DEM は、粒子間の若干の重なり

* 北海道大学大学院工学研究院材料科学部門；1)助教 2)准教授 3)教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
Blast Furnace Modeling by Euler-Lagrange Method; Shungo Natsui, Tatsuya Kikuchi and Ryosuke O. Suzuki (Faculty of Engineering Hokkaido University, Sapporo)
Keywords: ironmaking blast furnace, discrete element method, Euler-Lagrange coupling method, packed bed, decreased coke ratio, pressure drop, reduction rate
2015年5月7日受理[doi:10.2320/materia.54.432]

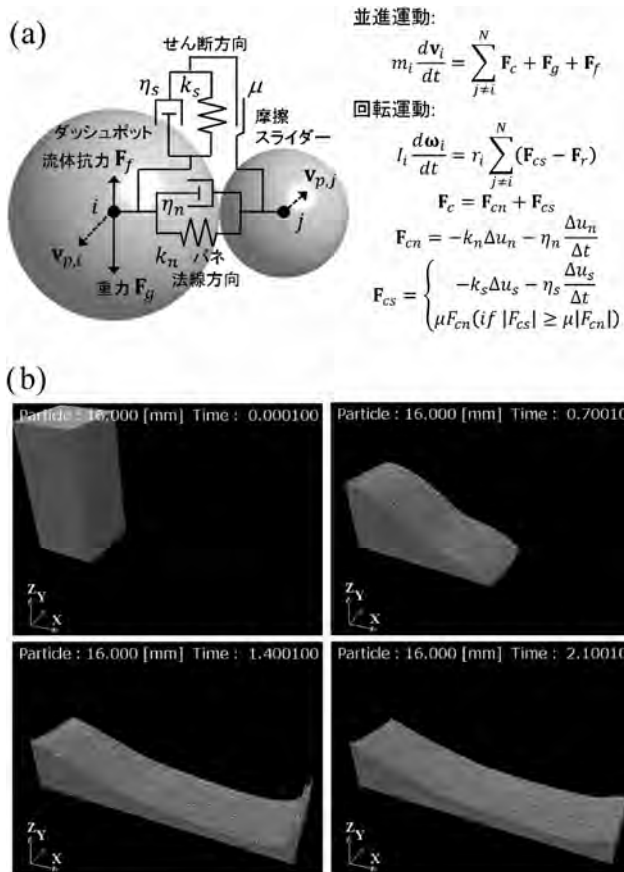


図2 DEMによる粒状体シミュレーション。(a) Heltzの理論に基づいた弾性接触モデル、(b)粒状体で構成されるダム崩壊計算例。

から粒子間反発力を与え、粒子群を構成する個々の粒子座標を時間発展的(非定常)に決定していく方法である。接触二粒子間にはバネとダッシュポットおよび摩擦スライダーが並列して接続されており、適切な各定数を与えることによって正確に粒子群の挙動を追跡できる。これらは Heltz の弾性接触理論⁽³⁾に基づいて、粒子の Young 率、Poisson 比から与えることが可能である。図2に粒子間に働く接触力の模式図と計算例を示す。このように DEM では連続流体や固体とも異なる粒状体運動がシームレスに再現される。

3. Euler-Lagrange 法による固気相運動量・熱・物質移動モデル

次に、固気二相流のモデリング手法をご紹介したい。固気流れを記述するには、流れに対して視点を固定する方法と動く視点による方法がある。流れている領域の1点に着目し、その位置における物理量の時間に対する変化を観察するのは Euler の方法、流体を流れる要素群ととらえ、それらの動きを観察するのは Lagrange の方法と呼ばれる。差分法や有限要素法などの空間をメッシュで分割する方法は Euler 的、DEM などの粒子法は Lagrange 的である。高炉モデルは、個々の固体粒子運動を計算メッシュ内で連続流体として近似

して解析するモデルが主流であり、セル内の気相率(空隙率)から固気相の流れと固気間運動量交換を共通の計算セルで独立に解く。このアプローチは、Euler-Euler 法と呼ばれる。ひとつのセルに2つの流体が存在するので two-fluid モデルともよばれ、気相中の固体粒子群をひとつの流体と見なすことで、混相流体が気相と粒子相から成る流体の2つから成り立っていると考える。粒子相であっても流体と見なすため、粒子数がどれほど多くても計算負荷には無関係かつ定常解析が可能であるため、計算コストが低い。しかしながら、粒子群の運動方程式は流体と同様に Navier-Stokes 式の形で誘導されるため、個々の粒子の変動が平均化されてしまい、粒状体としての特性は無視される。また粒径分布や粒子間応力の取扱いが極めて複雑で困難となる短所がある。

一方、計算時間の問題から取り扱うことのできる粒子数が限られてしまうが、個々の粒子の周りの流れを精密に求め、流体だけでなく粒子の運動も基礎方程式のみで計算する方法が提案されている。複数の相が存在する流れの記述に Euler と Lagrange の二つの視点を連成するのが Euler-Lagrange 法と呼ばれる方法である。つまり粒子運動は前述の DEM を用いて解き、流体運動は計算セルを用いた SIMPLE 法などを用いて解く。この直接解法のアプローチでは、粒子周りの詳細な流れを計算するためには粒子よりも小さな計算セルを用いる必要があるが、現在のスパコンを用いた大規模演算でも計算領域がかなり限定される。一般には、計算負荷低減のため粒子よりも大きい寸法を有する計算セル内で、別途流体抵抗モデルのような付加的なモデルを導入する方法がとられる(メゾスコピックモデルと称する)。この方法は、セル内の粒子情報を平均化するにもかかわらず、充填構造特性をかなり反映することができ、プロセス全体の分布を予測したいという工業的なニーズから広く用いられるようになってきた。

高炉の場合、粒子群が充填層を構成しながら下方へゆっくりと移動し、その間隙を気相が満たしながら流れるとき、同時に伝熱と物質移動が生じる。著者らは、メゾスコピックモデルを用いた高炉の熱・物質移動解析を実施した⁽⁵⁾。図3にその模式図とモデル式を示す。熱移動に関して、粒子間接触伝熱、対流伝熱、放射伝熱に反応熱を同時に考慮できる。また、固気間の化学反応はすべて1次反応と仮定して、鉍石還元には多界面未反応核モデル、コークスガス化には不均一触媒反応モデルをそれぞれ適用する。本モデルによって空間に固定した格子中で粒子の偏在と時間変化、これによる空間的不均一性を直接評価することが可能となる。

Euler-Euler 法は汎用で扱いやすく、かつ十分にマクロ的な分布情報が得られるのならば、わざわざ格子スケールで局所相平均する Euler-Lagrange 法で粒子毎に計算し、熱や物質移動を計算する必要は無いのではないかと疑問を持たれるかもしれない。しかし、粒子配置が変われば対流が、対流が変われば粒子反応速度が、反応速度が変われば温度が変化するというように運動量・熱量・物質量は相互に依存し合っている。Euler-Lagrange 法は、粒子毎の物性の変化に柔軟に

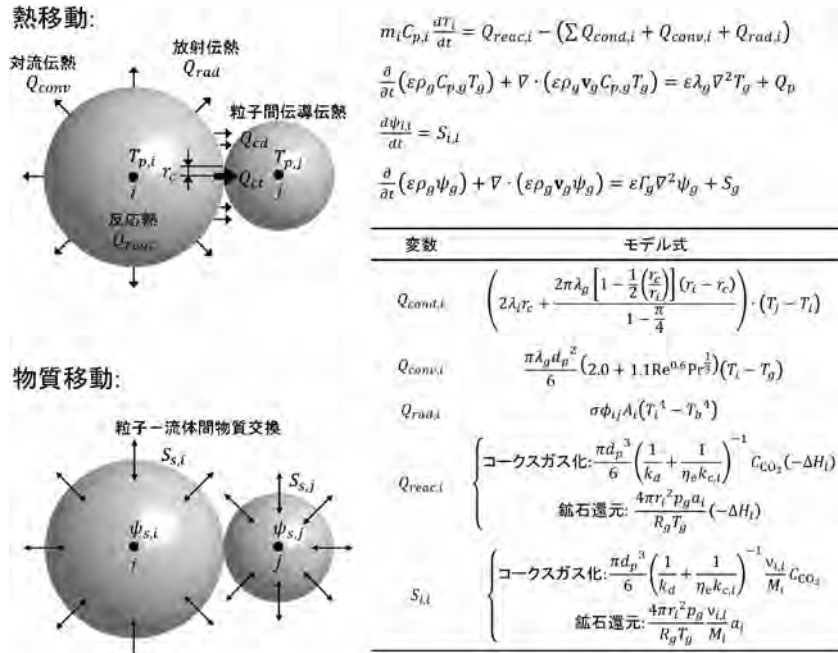


図3 Euler-Lagrange法に基づく熱および物質移動モデル。

対応でき、今後、高反応性コークスの使用や原料品位変化を直接モデル化可能であるため、炉内現象への影響を直接検討するために重要な役割を果たすと考えられる。

4. Euler-Lagrange法による高炉解析の例

さて、本節では著者らが行ってきた具体的な高炉解析の例をご紹介します。まず、充填層を形成する粒子群をDEMによって解析した例を図4に示す。装入された原料粒子群は、単純に層状構造を形成するだけでなく、装入時の転動、降下に起因した変動、および異なる粒径に起因した percolation が同時に生じている。また、充填層下部では法線応力が大きい粒子のネットワーク構造が表れており、特に raceway 上部でアーチ状の応力場が炉内全体の荷重を支える形態をとる。炉下部においても荷重のかからない粒子の存在が興味深い。raceway 付近のすべりを伴う粒子によってその周りの応力場が支配され、非線形性の強い流れが誘起される。そのためコークス圧壊強度を超える可能性がある 2.0 MPa 以上の応力を示す粒子が存在する。応力場の不均一性は粒子粗視化近似の影響、すなわち実験での粒径分布を再現していないため未だ検証の余地があるものの、炉内通気性に影響を与えるコークス圧壊による粉化量を議論できる可能性を示している。

メソスコピックモデルによって解析した気相分布を図5に示す。図5(a), (b)に示すように、装入された粒子群との相互作用によって、炉頂の気相流れが中心方向へ変化する。著者らは、この効果によって安息角が低下、結果として炉芯高さが低下する結果を得ている⁽⁶⁾。温度、気相濃度はさらに複雑で、鉱石還元の発熱反応とコークスガス化による吸熱反応、さらには輻射と対流場が影響し合った結果である。対流

伝熱は反応熱に比べて小さいが、上部へ向かう気相の流れに沿った温度分布となっているのが興味深い。気流が滞ると反応速度も低下するため、粒子配置は間接的に反応速度に影響する。このことは周・径方向の不均一性が無視できない可能性を示しており、高反応性原料を用いる場合には三次元的な配置を考慮した操業設計が重要であると考えられる。粒子配置を変化させた場合の相対還元率分布を図6に示す。図6(a)に示す層状構造では、流れの影響から高さ方向上部ほど、また径方向に壁方向ほど還元率が高い。コークス層へ侵入した鉱石の還元率はそれほど高くなく、CO分率増加による還元への影響感度は低い。鉱石層内は均一ではなく、高い反応率を有する粒子が所々存在する。一方、図6(b)に示す粒子混合構造では、明らかな反応率不均一性が見られる。これは異粒径混合によって粒子間温度勾配が大きくなったことが理由であり、安定な低炭素操業には粒子単位での温度制御が求められるだろう。しかし、粒子周りの流れ構造は局所相平均するメソスコピックモデルより小さいスケールで変動する報告がなされており⁽⁷⁾、本モデルでは空間解像度が不十分であるため、前述の直接解法によって本法との力学関係を明らかにしていく必要がある。

5. おわりに

Euler-Lagrange法を中心に最近の高炉プロセスモデルの一例をご紹介します。DEMに各素過程の物理的意味付けを与えることで現象に直感的なモデルが構築されてきている。DEMの宿命的な課題としては、粒子を真球と仮定しているため凹凸を含む本質的な原料形状は表現できないことである。これに対して複数の計算点を相対位置が固定された剛体

粒子法を用いた金属精錬プロセスの解析

伊藤 公久*

1. はじめに

鉄鋼・非鉄金属製造における金属精錬プロセスを取り上げてみても、それらは長い歴史と様々な技術の積み重ねの上に築かれたものであるため、現行プロセスのさらなる改良や革新的プロセスの開発は、非常に困難な仕事であるように思われる。しかし、原材料の多様化やCO₂排出量削減、省エネルギー、副生物の利材化といった様々な要求に対して、迅速に対応できる技術開発の重要性が増しているのもまた事実であり、金属精錬に携わる技術者・研究者は、あらゆる手法を駆使してこの問題に立ち向かわなくてはならない。

金属精錬プロセスにおける精錬反応の解析と制御を行うためには、まず精錬反応の最終到達目標の値を熱力学計算によって求めるのが一般的であり、多くの先人の努力と研究によって、十分に確立された手法となっている。一方、各時刻における精錬反応の経過は、速度論を用いることによって記述することができる。多くの場合、金属精錬炉内の状況を連続的に観察・測定することはできないので、実際には適当なモデル化を行って速度論的解析が行われる。速度論のモデルに用いる輸送係数や反応速度定数は、実験・計算によって与えることができるが、最大の問題は、炉内における各相の動きや接触状況、特に反応界面積の正確な見積もりが非常に困難なことである。金属精錬プロセスのような高温系では実験上の問題もあり、コールドモデルが利用されることが多いが、表面張力の大きな熔融金属が介在する系における界面積を十分に推定できてはいない。計算機能力の向上と相まって著しく発達してきた計算流体力学(CFD)は、この問題を解決するための強力な手段となり得るものと期待できる。

精錬炉内では、気・液・固の異なる相が大きく変形しながらその接触状況を変化させているため、従来の格子法を用いた計算では、数多くの困難が伴ってきた。これに対して、近年発達してきた粒子法 (particle method) は、界面の大変形を伴う流れを比較的容易に扱うことができるという特徴を持っているので、精錬反応の解析に応用できる有望な手法とい

うことができる。

本稿では、高温における気体-液体-固体間の精錬反応解析のために重要となる、異相間界面の記述を中心に、金属精錬プロセス解析における粒子法応用の可能性について述べてみたいと思う。なお、鉄鋼精錬解析への具体的な応用については筆者による解説⁽¹⁾を参照されたい。

2. 各種の粒子法について

ここでは、精錬プロセス解析に用いられている様々な粒子法について、SPH法を中心に、簡単にその概要と特徴を解説する。

(1) MPS法

近年広く用いられている代表的な粒子法であるMPS (Moving Particle Semi-implicit)法は、越塚ら⁽²⁾⁽³⁾によって提案された計算法であり、非圧縮性流体を対象としている。

流体計算の基礎式は、式(1)で表されるNavier-Stokes方程式であり、右辺第1項は圧力項、第2項が粘性項、第3項が外力項である。外力項には、重力加速度や表面張力、界面張力などが入る。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 u + F \quad (1)$$

なおここで、 u 、 ρ 、 P 、 μ 、 F は、それぞれ速度、密度、圧力、粘性係数、外力を表している。

MPS法の詳細については、別の文献⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を参照していただきたいが、特徴として以下の4点を挙げておく。

①圧縮性流体を対象としている。②式(1)中の微分演算子に対して、独自の粒子間相互作用モデルを用いている。③その名が示す通り、半陰解法を用いている。

(2) SPH法

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法は、当初宇宙物理学分野で開発された計算法⁽⁵⁾⁽⁶⁾であり、圧縮性流体に対応したシミュレーション手法である。空間内の位置 x に評価

* 早稲田大学教授；基幹理工学部応用数理学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
Analysis of Metal Refining Processes by Using a Particle Method; Kimihisa Itoh (Department of Applied Mathematics, School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University, Tokyo)
Keywords: metal refining, rate process, particle method, SPH method, SPAM method, CFD, interfacial tension, reaction interface
2015年5月11日受理[doi:10.2320/materia.54.436]

点(ここでは粒子とよぶ)を考えたとき、粒子位置における物理量 $f(x)$ は式(2)で書くことができる。

$$f(x) = \int f(x') \delta(x-x') dx' \quad (2)$$

ここで $\delta(x)$ はデルタ関数である。

粒子を中心とした影響半径 h 内の空間中に物理量が連続的に分布していると考え、その分布関数をカーネル関数 W と呼ぶ。カーネル関数は、①極限がデルタ関数である、②規格化されている、③影響半径 h の外では0である、という3つの条件を満たす必要があり、様々な種類の関数が提案されているが、代表的なものとして式(3)で与えられる Lucy型⁽⁵⁾のカーネル関数が広く使われている。ここで r は粒子からの距離である。

$$W(r, h) = \frac{5}{\pi h^2} \left(1 + 3\frac{r}{h}\right) \left(1 - \frac{r}{h}\right)^3 \quad (3)$$

カーネル関数 W を用いて、粒子位置で物理量 $f(x)$ を離散化すると、近似式(4)が得られる。

$$f(x) = \int f(x') W(x-x', h) dx' \cong \sum_{j=1}^N f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} W(x-x_j, h) \quad (4)$$

ここで x_j は、 j 番目の粒子位置であり、 h はカーネルの影響半径、 m_j と ρ_j は、それぞれ j 番目の粒子位置における質量と密度である。

さらに、式(4)の勾配を求めることによって、物理量 $f(x)$ の勾配を式(5)で近似することができる。

$$\nabla f(x) \cong - \sum_{j=1}^N f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \nabla W(x-x_j, h) \quad (5)$$

SPH法では、MPS法と異なり、スカラー関数の勾配を求めるには、カーネル関数の微分を行うだけでよいことが、式(5)から理解できる。

SPH法においては、空間は粒子によって離散化されているが、粒子位置で指定された物理量はカーネルによって影響半径内の空間に滑らかに分布しているので、それらを重ね合わせて得られる物理量 $f(x)$ は連続体の物理量になっている。したがって前述したように SPH法における粒子は、実体のある流体粒子ではなく、評価点にすぎないことに注意が必要である。

SPH法は元来、圧縮性流体に対応したシミュレーション手法であるが、非圧縮性流体への適用が Monaghan ら⁽⁷⁾によって提唱されている。これは密度変化に対して強い圧力変化をさせる状態方程式を導入することによって、疑似的な非圧縮性流体として数値解析を行うものである。SPH法は陽解法であるため、同じ計算機的能力であれば、MPS法に比べて計算速度が大きいという利点を持っている。

(3) SPAM 法

Hoover らはより一般性と自由度の高い運動方程式を提唱し、この手法が流体と固体の複雑な力学的変形に応用できることを示して、SPAM (Smoothed Particle Applied Mechanics) と名付けた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。SPAM法では、SPH法と同

様、カーネル関数(重み関数)を用いた計算を行うが、ラグランジュ形式の連続体力学の問題を解くことを目的としているため、一般化された運動方程式(6)が与えられている。

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} &= m \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\sigma}{\rho^2} \right)_i + \left(\frac{\sigma}{\rho^2} \right)_j \right] \cdot \nabla_i W(x_i - x_j, h) \\ &= -m \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{P}{\rho^2} \right)_i + \left(\frac{P}{\rho^2} \right)_j \right] \cdot \nabla_i W(x_i - x_j, h) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)は、第 i 番目の粒子の速度変化が、影響半径内にあるすべての粒子(j)からの力を含んだ運動方程式で表されることを示している。なお、添え字 i, j はそれぞれ粒子 i, j を表し、 σ は応力テンソル、 P は圧力テンソル($\sigma = -P$)である。基礎方程式として Navier-Stokes 方程式(1)を選択すれば、SPH法に帰着するが、例えば流体の粘性の記述に別の物理モデルを採用することができれば、ラプラシアン(2)の計算を必要としないシミュレーションも可能である。また、表面張力や界面張力は2体間ポテンシャルに組み込む形で表現することができる⁽⁹⁾。

3. 精錬プロセス解析への応用例

(1) 溶融鉄浴へのメタル、スラグの流下

スラグ-メタル間反応解析のための界面積評価の試みとして、MPS法を用いた溶融スラグの溶鉄への衝突シミュレーションを2次元で行った⁽¹⁰⁾。水槽に水および油を流下・衝突させるシミュレーションでは、水モデル実験と良い一致を示すことができたので、溶鉄-スラグの各物性値を用いてシミュレーションを実行した。

1873 Kにおいて溶鉄浴に高炉スラグおよび転炉スラグを流入させた場合のスラグ-メタル界面形状の変化を計算したところ、流入速度の増加に伴って進入距離は増大し、転炉スラグの侵入距離が高炉スラグの約1.5倍程度になることが明らかとなった。また転炉スラグの場合、スラグ-メタル間の界面積は、流入速度が0.5 m/sから0.9 m/sまで増大にしたがって、静的なスラグ-メタル界面の1.2倍から1.6倍まで増加することが予想された。

(2) 溶融鉄浴への CaO 粒子の打ち込み

溶融金属中への粉体吹込み技術は、鉄鋼分野では溶銑処理、底吹転炉、二次精錬で、また非鉄分野ではMIプロセスで実用化され、関連する研究も数多く報告されている。しかし基礎研究のほとんどが水モデルを用いているため、濡れ性の乏しい粒子が表面張力の大きな溶融金属中へ侵入する際の挙動に関する知見はほとんど得られていない。そこで、固体粒子が溶融金属に侵入する様子をSPH法によるシミュレーションを用いて推定した⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。

粒子侵入のシミュレーションにおいては、固体-溶鉄間の界面張力の評価が重要となる。界面を連続体と考えた場合には、界面の曲率と各位置における法線ベクトルとを求め、界面(表面)張力によって流体に与えられる力を計算する方法を

取る。しかし、乱れた界面や粒子数が少ない場合には代表点の数が十分ではないために、計算が破綻してしまう。

次の式(7)は、よく知られているヤングの式であり、 γ_{ls} は液体-固体間、 γ_{gs} は気体-固体間、 γ_{gl} は気体-液体間の界面張力、 θ は接触角である。

$$\gamma_{ls} - \gamma_{gs} + \gamma_{gl} \cos \theta = 0 \quad (7)$$

しばしば式(7)を水平方向の力の釣り合いで説明している例を見かけるが、式(7)は界面張力を界面自由エネルギーと考えて、熱力学的平衡条件から導出されるものである⁽¹⁴⁾。三重点における力の釣り合いを考えた場合には、鉛直方向の力は釣り合っていないように見える。実は鉛直方向の成分 $\gamma_{gs} \sin \theta$ は、固体表面の局所における大きな応力と釣り合っていると考えられる⁽¹⁵⁾が、そのことに触れられている場合は少ない。

上述の議論に立てば、液体粒子に働く力を記述するためには、表面張力といったマクロな物理量を用いるよりも、個々の粒子間の力を考慮したモデルを用いるのが適切であると考えられる。粒子法において界面張力を扱ったモデルは数多く報告されている⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾が、MPS法において、粒子間ポテンシャルを用いたモデルがいくつか報告されている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。これらのモデルを参考にして、スケールの変化によらず正確に引力と斥力を表現するために、無次元距離 $q (= \frac{r}{h})$ の関数としてポテンシャル $\phi(q)$ を、式(8)で定義した⁽¹³⁾。

$$\phi(q) = C \left(\frac{q^3}{3} - \frac{(h+d)q^2}{2h} + \frac{d}{h} q \right) \quad (8)$$

式(9)によって求められた界面張力 F_{inter} を支配方程式である Navier-Stokes 方程式(1)の外力項に加えることで、シミュレーションを行うことができる。

$$F_{inter} = \frac{1}{2} (\cos \theta + 1) \cdot \Sigma \phi(q)' \cdot \frac{\vec{r}}{|r|} \quad (9)$$

なおここで、 θ は接触角、 d は初期に配置された粒子(代表点)間距離、 C はポテンシャル係数であり、 $\phi(q)'$ はポテンシャルの微分、 \vec{r} はベクトルを表している。

この界面張力モデルを用いて、粒子初速度 18 m/s で、直径 $d_p = 2.0$ mm のポリスチレン球 ($\theta = 91^\circ$, $\rho = 0.974$ g/cm³) を水槽に打ち込んだ際の 3次元シミュレーションの結果を図1に示す。衝突時のキャビティー生成やその後の気泡の侵入挙動など、実際の水モデル実験⁽²⁰⁾と非常に良い一致を示した。

同様の界面張力モデルを用いて、溶鉄浴への CaO 粒子の打ち込みの 2次元シミュレーションを行った。初速度 10 m/s で、直径 1 cm の CaO 粒子 ($\theta = 110^\circ$, $\rho = 3.34$ g/cm³) を打ち込んだ場合には、衝突によって直径約 4.4 cm のキャビティーが生じ、最大侵入深さは約 2.2 cm と計算された。一方、紛体吹込みを模擬し、直径 2.0 mm の CaO 粒子複数個を初速度 20 m/s で打ち込んだ場合の計算結果を図2に示す。粒子直径が減少した結果、初速度が2倍になっても、CaO 粒子はほぼその直径程度しか溶融鉄中に侵入しないという結果が得られた。

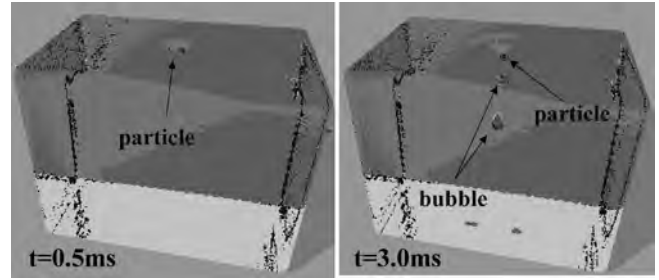


図1 水浴に打ち込まれたポリスチレン球の3次元シミュレーション(初速度 18 m/s, 粒子直径=2.0 mm, 粒子密度 0.974 g/cm³, 接触角91°).

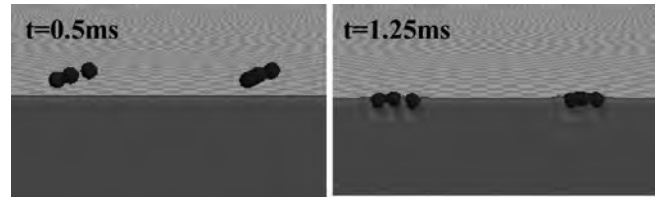


図2 溶鉄浴に打ち込まれた CaO 粒子の2次元シミュレーション(初速度 20 m/s, 粒子直径 2.0 mm, 粒子密度 3.34 g/cm³, 接触角110°).

(3) スラゲーメタルの混合

スラゲーメタル反応の解析においては、2相間の界面の挙動を時間の関数として記述し、その面積を算出することが最も重要である。このためには、界面近くに存在するスラグ粒子-メタル粒子間に働く力を正確に記述し、それを運動方程式に組み込むことが必要となる。そこで、界面近くで相互作用するスラゲーメタル両相の粒子に対して、前述した SPAM 運動方程式(6)を用い、それ以外の同種の液体粒子間の計算に関しては、Navier-Stokes 方程式(1)を用いたハイブリッドモデルの構築を試みた。このモデルを用いて、スラゲーメタル系を模した油-水2相系についてのシミュレーションを行った⁽²¹⁾。なお、油-水粒子間の相互作用力は、Fowkesモデル⁽²²⁾を用いて評価した。計算と同一の条件下での荒木ら⁽²³⁾による実験結果との比較を行ったところ、十分に実験結果を再現できることを確認した。実際のスラゲーメタル系においても、適切な2体間ポテンシャルを設定することで、本モデルの適用が可能となるが、最適なポテンシャルパラメータを導出するためには、高温系における界面張力データの実測が不可欠である。

4. 今後の展望

金属精錬プロセスでは、高速の気流やガスジェットが利用されている場合が多い。たとえば、鉄鋼精錬における転炉プロセスでは、音速を超える酸素ジェットが鋼浴に吹きつけられるため、ガスと浴との相互作用によって生成するキャビティーや液滴の評価が非常に重要である。

粒子法における気液 2 相流の計算においては, 気体と液体の密度が 10^3 のオーダーで異なることに加えて, 気体粒子と液体粒子の速度が著しく異なるため, 実際に計算を行うことは困難であった. この問題を解決するため, メッシュ法と粒子法とを結合させたハイブリッド粒子法が開発されている⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾. また, スラグ, メタル粒子に加えて気体粒子を導入し, ガス流通時の 2 融体流動をシミュレーションした結果も報告されている⁽²⁶⁾. しかしながら, 音速に近い速度のガスジェットと液体の相互作用に関するシミュレーションはまだ十分に達成されてはおらず, 今後の発展が期待される.

今までの議論は, ニュートン流体を対象とした計算に関してのものであったが, 材料科学一般への応用を考えれば, 特にソフトマターを中心に, 非ニュートン流体に関する計算が重要になってくるものと思われる. 非ニュートン流体に対しても粒子法の応用は幾つか試みられており, 特にビンガム流体に関しては SPH 法を用いた計算⁽²⁷⁾や, MPS 法を用いた津波の解析⁽²⁸⁾などが報告されている. 鉄鋼精錬プロセスでは, マルチフェイズフラックスと呼ばれる固液共存スラグの活用によって, 高速かつ高効率の精錬が指向されているが, その反応機構の詳細や制御方法については多くの課題が存在している. 助永ら⁽²⁹⁾は, マルチフェイズフラックスでは, 固相の体積分率 30% 以上の系において, ビンガム流体の挙動が出現することを報告しており, 精錬プロセスの解析においても, 非ニュートン流体への粒子法の応用が今後重要になってくるものと思われる.

粒子法は近年目覚ましく発展し, その適用範囲も大きく広がって来た. 材料科学の様々な分野において, 解析ツールとしての粒子法の活用がさらに進展していくと思われるが, 計算法の厳密な数学的裏付けなどの基礎的な問題が今後解明され, その信頼性が高まっていくことを期待している. 粒子法のユーザーの一人である我々金属精錬の研究者は, 対象となる現象についての正しい物理的・化学的理解を怠らず, 慎重に粒子法の適用を進めることが肝要であろう.

最後に, 本稿を纏めるに当たり文献収集や図面作成に助力いただいた, 早稲田大学大学院生 中野美枝子君並びに坪井真広君に, 深く感謝申し上げます.

文 献

(1) 伊藤公久 : ふえらむ, **19**(2014), 809–813.
(2) 越塚誠一 : 粒子法, 丸善, 東京, (2005).

(3) 越塚誠一 : 粒子法シミュレーション, 培風館, 東京, (2008).
(4) 平田直哉 : ふえらむ, **19**(2014), 781–787.
(5) L. B. Lucy: *Astronomical Journal*, **82**(1977), 1013–1024.
(6) J. J. Monaghan: *Computer Physics Communication*, **48**(1988), 89–96.
(7) J. J. Monaghan: *Journal of Computational Physics*, **110**(1994), 399–406.
(8) W. G. Hoover and C. G. Hoover: *Computing in Science and Engineering*, **3**(2001), 78–85.
(9) W. G. Hoover: 粒子法による力学, 森北出版, 東京, (2008).
(10) M. Asai, H. Niijo and K. Ito: *ISIJ International*, **49**(2009), 178–181.
(11) 森 正樹, 財前航介, 若林貴士, 伊藤公久, 宮田政樹 : *CAMP-ISIJ*, **25**(2012), 991.
(12) 栃木隆宏, 藤谷俊祐, 森 正樹, 伊藤公久, 宮田政樹 : *CAMP-ISIJ*, **25**(2012), 992.
(13) 中野美枝子, 伊藤公久 : *CAMP-ISIJ*, **27**(2014), PS-12.
(14) A. W. Adamson: *Physical Chemistry of Surfaces 5th edition*, John Wiley and Sons, New York, (1990), 385.
(15) J. N. Israelachvili : *分子間力と表面力 第 3 版*, 朝倉書店, 東京, (2013), 375.
(16) 石井英二, 杉村泰介 : *日本機械学会論文集 B*, **78**(2012), 1710–1725.
(17) 本郷卓也 : *日本機械学会東北支部第 45 期秋季講演会*, (2009), 85.
(18) M. Kondo, S. Koshizuka and M. Takimoto: *Transaction of JSCES*, paper number 20070028, (2007).
(19) S. Natui, R. Soda, T. Kon, S. Ueda, J. Kano, R. Inoue and T. Ariyama: *Mater. Trans.*, **53**(2012), 662–670.
(20) J. G. Lee and M. Tokuda: *Trans. ISIJ*, **28**(1988), 278–287.
(21) 財前航介, 伊藤公久 : *CAMP-ISIJ*, **26**(2013), PS-5.
(22) F. M. Fowkes: *Ind. Eng. Chem.*, **56**(1964), 40–52.
(23) 荒木 健, 越村俊一 : *土木学会論文集 B2*, **66**(2010), 66–70.
(24) 石井英二, 石川 亨, 田辺好之 : *Thermal Science & Engineering*, **14**(2006), 51–59.
(25) 田中伸厚, 西村 健, 渡辺史紀, 森 治嗣 : *日本機械学会論文集 B*, **76**(2010), 124–126.
(26) S. Natsui, H. Takai, T. Kumagai, T. Kikuchi and R. Suzuki: *Mater. Trans.*, **55**(2014), 1707–1715.
(27) T. Capone, A. Panizzo and J. J. Monaghan: *Journal of Hydraulic Research*, **48**(2010), 80–84.
(28) 五十里洋行, 後藤仁志, 新井智之 : *土木学会論文集 B2*, **68**(2012), I_066–I_070.
(29) 助永壮平, 春木慎一郎, 山岡由宗, 齊藤敬高, 中島邦彦 : *鉄と鋼*, **95**(2009), 807–812.



伊藤公久

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1983年 3 月 東京大学大学院工学系研究科金属工学専攻 博士課程修了
1983年 4 月 東北大学選鉱製錬研究所 助手
1991年 4 月 早稲田大学理工学部材料工学科 助教授
1996年 4 月 早稲田大学理工学部物質開発工学科 教授
2007年 4 月 現職
専門分野 : 高温物理化学, 数理物質工学
◎日本刀のデジタルアーカイブや古代製鉄法の研究も
行っています。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

金属製造プロセスにおける 流動・凝固現象の連成解析

平田直哉¹⁾ 安齋浩一²⁾

1. 緒言

鋳造法は金属材料を液相線以上まで加熱して液体状態(溶湯)とした後に、鋳型へ注湯することで製品を成形する金属製造プロセスである。鋳造プロセス中は流動・伝熱・凝固・偏析・変形や化学反応といった様々な現象が生じ相互作用するため、現在利用されている金属製造プロセスのなかでも最も複雑なプロセスのひとつといえる。

高品質の鋳造製品を歩留まり良く安価・高速に製造するためには、プロセス中に生じている現象を正しく理解し、適切に制御する必要がある。しかし、鋳造プロセスでは様々な複合現象が相互作用している上、高温かつ不透明な鋳型の中での凝固プロセスであるため、観察や測定が困難であることが多く、未だ理解が十分ではない点が多い。そのような中で、コンピュータを用いた数値解析⁽¹⁾による現象理解および製造条件検討は、現在では欠かせない技術となっている。

本報では、このような複合現象の考慮が不可欠な鋳造プロセス解析に対して従来用いられてきた手法における課題と、粒子法⁽²⁾を用いた取り組みを紹介する。なお、本報では従来多く用いられてきたオイラー系格子法を「従来法」と呼び、特に断りのない場合は有限差分法や有限体積法を示す。一方、ラグランジュ系メッシュレス法(特に連続体を離散化するための手法のひとつ)のことを「粒子法」と呼ぶことにする。

2. 物質の移動を伴う複合現象の解析

現在、従来法を基にした鋳造解析ソフトウェアは既に商品化されており、湯流れ解析、凝固解析および熱応力解析などがパッケージ化されている⁽³⁾。その多くは、湯流れ解析中の潜熱放出を考慮した伝熱解析や、凝固収縮に対する溶湯補給を考慮した引け巣予測、湯流れ・凝固解析後の温度分布を利用した変形予測のように、様々な現象の相互作用を考慮した解析が可能である。

本来であればできるだけ多くの現象を同時に扱い、相互作用を考慮した解析を行うことが理想である。しかし、実際は上に挙げたように高々2~3現象の相互作用を考慮する程度に止まっている。これは、主として従来法がオイラー系の解析手法を基にしていることに起因する。従来法では空間を離散化した「入れ物」を計算要素として用いる。この「入れ物」は、有限差分法や有限体積法では「格子」や「セル」などと呼ばれる。一般の有限要素法においても「節点」と「要素」を用いて同様の「入れ物」を定義する。各解析手法毎に様々な形状の要素が考案されているが、いずれの場合もまずは解析対象領域内に有限個の要素を配置し、その中にどのような情報を記録し、計算するかを定義する。要素内には物質の存在形態や量、温度、圧力、速度などの情報が記録されており、支配方程式を満足するように近隣要素との間で計算が行われる。従来法では、一般に特定の近隣要素との間に相互作用の計算が定義されるため、要素の位置を大きく移動・変形させることはほとんどない。そのため、流動解析のように物質が大きく移動する現象を扱う際は、要素そのものを移動させるのではなく、要素内に何らかの方法で定義した物質の存在情報(要素内の充填率など)を変化させて移動を表現する。このように、従来法では物質の移動そのものが間接的な手法によって表現されるため、移動を伴う複合現象を扱うプログラムは複雑化し、連成させる現象を増やすごとにその複雑さは増大する。

一方で、粒子法は物質そのものを離散化し計算要素とする。物質の存在は要素の存在で表され、通常はある一定質量を有する代表点として定義される。なお「粒子法」という名の通り球形を用いて要素が可視化される例が多いため、球形要素と誤解されることが多いが、一般的な粒子法において要素はあくまで連続体の代表点であり、形状情報は有しない。また物質の移動は要素の移動として直接的に表現するので、隣接要素は時間により変化する場合がある。そのため、粒子法では任意の要素間における相互作用計算が、各支配方程式に対して定義される。従って、任意の要素間に任意の支配方程式を適用することが可能であり、様々な複合現象を記

* 東北大学大学院工学研究科; 1)助教, 2)教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-1009)
Coupling Simulation of Flow and Solidification Phenomena for Manufacturing Processes of Metal Products; Naoya Hirata* and Koichi Anzai* (Department of Metallurgy, Tohoku University, Sendai)
Keywords: casting, flow simulation, solidification simulation, coupling simulation, particle method
2015年5月7日受理[doi:10.2320/materia.54.440]

述するのが従来法に比べ極めて容易な手法といえる。

このような粒子法の利点を生かした解析例として、以下に鋳造時の引け巣形成過程直接解析、および遠心鋳造における流動・凝固連成解析の例を示す。

3. 引け巣の形成過程の直接解析⁽⁴⁾

鋳造において代表的な欠陥に「引け巣」が挙げられる。これは金属が凝固する際に生じる収縮によって、鋳物内部もしくは外部に空洞や凹みが現れる欠陥である。時には空隙同士が連結することで強度や信頼性の低下を招いたり、気密性が損なわれるなど、製品品質に及ぼす影響が大きいため、その予測が極めて重要な鋳造欠陥のひとつである。

引け巣の主な発生原因は凝固収縮である。しかし、その発生箇所や形態の予測、およびその直接解析は難しく、従来法では鋳物の局所的な温度勾配や冷却速度を算出し、なんらかのパラメータを用いて間接的に評価することが多い。まず、伝熱を考慮した流動解析を行い、得られた温度分布を引け巣予測機能を有する凝固解析に引き渡して行う、という方法が採られることがほとんどである。しかし、実際は注湯中も薄肉部や端部は凝固が開始している可能性が高く、その凝固収縮が湯回りや最終的な鋳物の形状、温度分布、さらにはその後の変形に影響する可能性がある。

ここでは、注湯中に進行する凝固が、最終的な引け巣形状に及ぼす影響を粒子法により直接解析した例を示す。図1および図2は、高さ0.1 m、直径0.04 mの円柱の上に高さ0.1 m、直径0.03 mの円柱を積み上げた形の純アルミニウム鋳

物を、鋳鉄鋳型を用いて鋳造した場合の解析結果である。色は固相率を示しており、見やすさのため鋳物中央断面図を示している。また図1は4 sで注湯した場合、図2は同じ鋳型に14 sかけて注湯した場合である。図1は速やかに注湯したため、注湯完了後に全体的に凝固殻が成長している。その結果、鋳物内に大きな深い引け巣が生じている。一方図2は時間をかけて注湯したため、注湯している最中にも鋳物下部では凝固殻成長および凝固収縮が生じており、結果として凝固の指向性が強まり、引け巣は図1の場合よりも小さくなった。図3は最終的な引け巣形状を実験結果と比較したものである。計算結果はレイトレーシングソフト POV-Ray⁽⁵⁾を用いて可視化した。注湯速度による引け巣形状の違いだけではなく、最終的に得られた鋳物の高さの違いも良く再現できている。

ここで示した結果は、粒子法による伝熱・凝固解析と流動解析を連成させ、固相率増加による密度増加(すなわち要素が代表する体積の減少)を考慮したのみの単純な解析によるものである。従来法では一般に流動解析の結果を用いて凝固・引け巣予測解析を行うため、注湯中の凝固の指向性といった過渡現象の取扱いは困難である。一方で、粒子法では基本的にすべての解析を連成し同時に時間進行させるため、注湯中に生じる凝固殻の成長が、湯流れや伝熱等に及ぼす影響を同時に考慮することが容易である⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。今後、変形解析などを導入することで、鋳型への拘束や割れへの影響の予測も期待できる⁽¹²⁾。また収縮だけではなく膨張も同じアルゴリズムで取り扱うことが可能なため、球状黒鉛鋳鉄の膨張と

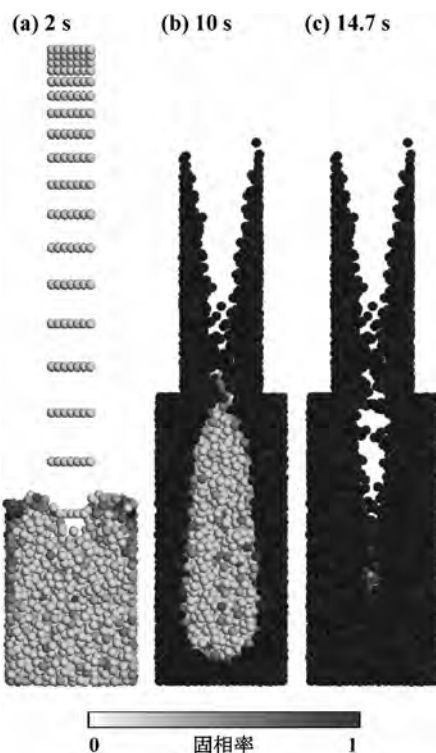


図1 凝固の進行と引け巣形成の解析結果： $t_{\text{pour}} = 4 \text{ s}$ 。

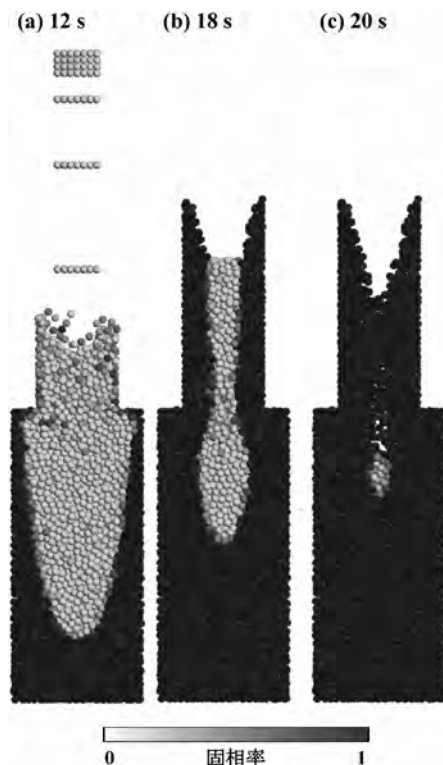


図2 凝固の進行と引け巣形成の解析結果： $t_{\text{pour}} = 14 \text{ s}$ 。

(a) 実験結果 ($t_{pour} = 4s$) (b) 計算結果 ($t_{pour} = 4s$) (c) 実験結果 ($t_{pour} = 14s$) (d) 計算結果 ($t_{pour} = 14s$)

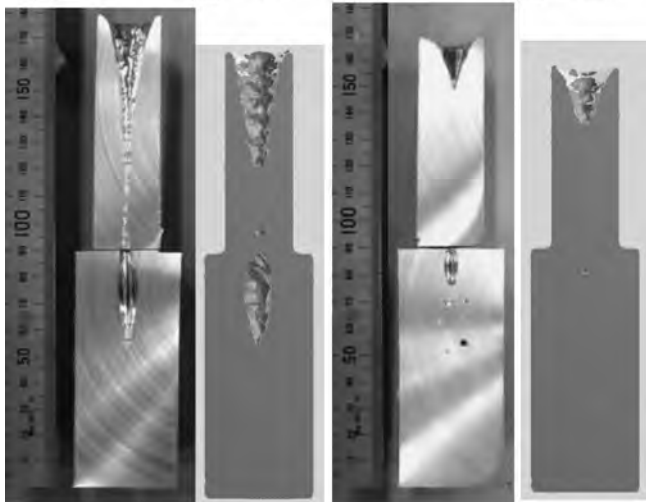


図3 粒子法による引け巣形状解析の可視化結果と、対応する実験結果の比較。

鑄型強度の関係を考慮することで、内部に生じる引け巣予測の高精度化なども期待されている。

4. 遠心鑄造の湯流れ・凝固解析⁽¹³⁾

次に、遠心鑄造の湯流れ・凝固解析例を示す。遠心鑄造は鑄型を高速回転させながら、その内側に溶湯を鑄込む鑄造法で、様々な長尺パイプ形状製品の製造に用いられている。引け巣の少ない緻密な鑄塊が得られる一方で、ラミネーション偏析といった欠陥がしばしば問題となる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。遠心鑄造品に生じる偏析欠陥は、自由表面のゆらぎや円周方向のせん断力による等軸晶の動きに起因すると考えられているが、実験におけるその場観察が困難なことなどから、水や透明有機物を用いた可視化実験が行われている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。一方で、実際の鑄物に近い物性値を用いた場合の挙動を予測するために、近年コンピュータを用いた数値解析によるアプローチも試みられているが⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾、なかでも回転する鑄型を直接表現することができ、凝固をはじめとする複合現象解析に適する粒子法が注目されている。ここでは、高速回転する鑄型に鑄鉄を鑄込んだ際の様子を解析した例を示す。

図4に凝固解析結果を示す。半径0.1mの時計回りに回転する鑄型に、充填率約50%となるように鑄鉄を鑄込んだ場合である。表示要素は溶湯要素であり、色は固相率を示している。従来法では回転する鑄型を直接表現するには複雑なプログラムが必要になるため、それに加えて凝固殻の成長を考慮することは極めて困難であるが、粒子法では鑄型要素を実際に空間内で回転させるだけで遠心鑄造プロセスを表現できる。なお今回示した結果はあくまで温度情報に基づいた固相率表示であり、固相率が1の要素に対して他の溶湯要素と同様に流動解析を適用しているが、溶湯が凝固するに伴い鑄型との相対位置を維持しながら回転する様子も、粒子法に

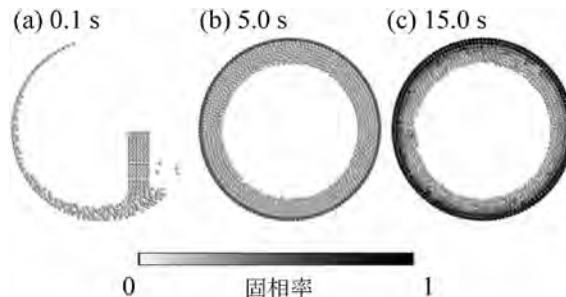


図4 遠心鑄造時の凝固殻成長解析結果。

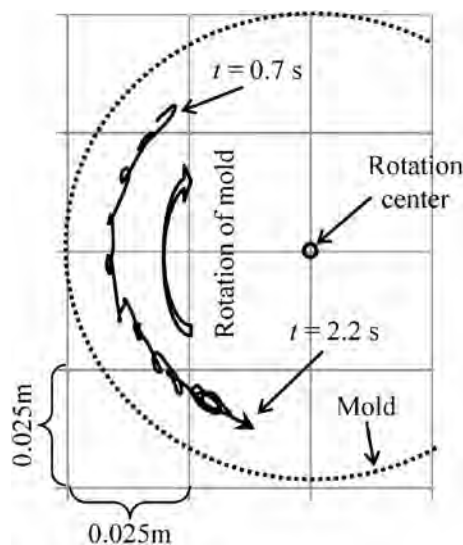


図5 回転する鑄型に対するある溶湯要素の相対位置の軌跡。

よれば直接的なモデル化が可能である⁽²¹⁾。

また、粒子法では物質の移動は要素の移動そのもので表されることから、特定の要素の追跡も容易である。図5はある溶湯要素の鑄型に対する相対位置を追跡した結果を示している。注湯完了直後の不規則な表面の揺らぎが落ち着く0.7sから2.2sまでの1.5s間の要素の軌跡を表しており、反時計回り(すなわち鑄型の回転に対し遅れる方向)に動いていることがわかる。これは江阪らの等軸晶の追跡を観察した実験⁽¹⁶⁾でも同様の報告がされており、本手法がある粒子の追跡に対しても有効であることを示している。ただし、前述のように粒子法における粒子はあくまで連続体の代表点であり、江阪らが報告した条件下では、溶湯は全体的にニュートン流体的挙動を示すため、本手法においても要素そのものの追跡のみにより妥当な結果を得ることができたことに注意が必要である。また今回示した結果は凝固収縮を考慮していない結果であるが、密度の温度や相変態に対する依存性を定義するだけで容易に導入可能であることは前述の通りである。凝固が進行するにつれ、固相の剛体(もしくは粘弾塑性体)としての挙動も考慮する必要があるが、そのような詳細な固相挙動に関する解析手法の開発は今後の課題である。

粒子法による摩擦攪拌接合現象のモデル化

宮坂史和*

1. はじめに

近年目覚ましく発展している、溶接・接合プロセスの一つにFSW(摩擦攪拌接合)が挙げられる。本プロセスは、ツールと呼ばれるピンを接合線上に回転させながら挿入し移動させることにより、ツール周辺の材料を塑性流動させることにより接合を完了する手法である。本プロセスの最大のメリットとして接合部の溶融を伴わないため、接合部への入熱を低く保つことができ、接合後の熱変形を小さく抑えることが可能であることが挙げられる。また、接合部の材料組成の変化も最小限にとどめられることもメリットの一つである。この様な特徴を有するFSWであるが、現在は主に軟化温度の低いアルミニウム合金を中心に利用されており、ロケットや新幹線を対象に実用展開が進み、近年は自動車への適用も進んでいる。さらに、鉄鋼材料への展開も進んでおり、今後も様々な分野への応用展開が期待されている。

本プロセスは、従来の接合プロセスと比較して多くのメリットを有しているものの、その接合メカニズムに関しては、未知の部分が多く残されており、実施工上で試行錯誤を繰り返して最適な接合条件を求めなければいけないといった課題も残されている。本プロセスの理解が困難な原因の一つに接合中の接合部の計測が困難であることが挙げられる。一部X線透過装置を用いて接合中の金属の流動を計測する技術も開発されているが、大掛かりな設備が必要であり実施工に手軽に応用するのは困難である。この様な問題を解決する手段の一つに、モデル解析がある。筆者らはこれまでにFSWに対して粒子法を用いたシミュレーションモデルの開発を進めてきており、定性的ではあるがシミュレーション結果から、その接合メカニズムに対する説明が可能になりつつある。本稿では、筆者らが開発を進めている粒子法によるFSWシミュレーションモデルの紹介と今後の展望に関して述べる。

2. MPS法

粒子法は、近年のコンピュータ技術の目覚ましい発展とともに様々な分野への適用が検討されている。従来から数値計

算手法としてよく用いられている有限要素法や有限差分法は格子法と呼ばれ、空間を格子によって分割し、その格子に物理量を変数として割り当て計算をする。一方非格子法に分類される粒子法は、それらとは違い格子を用いない。その代わりに計算点を物理量とともに移動する粒子として連続体を離散化する。粒子法にも様々な離散化手法があるが、主だった手法としては、MPS法(Moving Particle Semi-implicit Method)⁽¹⁾とSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics Method)⁽²⁾がある。今回紹介するFSWシミュレーションモデルについてはMPS法を適用したモデルとなっている。

粒子法の大きな特徴として計算格子を用いないことを述べたが、このことが支配方程式に大きな違いをもたらす。連続体の挙動を記述するときに、オイラー法(格子有:有限差分法,有限要素法等)とラグランジュ法(非格子:粒子法)があり、ラグランジュ法では計算点が物体の移動・変形とともに移動するため、移流項を考慮する必要がなくなる。式(1)、(2)にオイラー法とラグランジュ法によるナビエ-ストークス方程式を示す。

(オイラー法)

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + (\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \nabla) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\rho} \nabla P(\mathbf{x}, t) + \nu \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

(ラグランジュ法)

$$\frac{D \mathbf{u}(\mathbf{X}, t)}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P(\mathbf{X}, t) + \nu \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{X}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{X}, t) \quad (2)$$

\mathbf{u} : 速度, P : 圧力, \mathbf{g} : 外力, ρ : 密度, ν : 動粘性係数。

有限要素法や有限差分法では、式(1)左辺第二項の移流項の取り扱いに注意が必要であり、この項の取り扱い手法が解析結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。特に自由表面や界面を有するような流体の表面(界面)挙動を記述する手法が色々と提案(VOF法, Level Set法等)されている。一方粒子法では、この様な問題がないため、大変形を伴うような自由表面を有する流体の解析に非常に向いた手法であるといえる。

次にMPS法の基本的な計算手順について説明する。MPS法では式(2)で示されるような支配方程式を離散化す

* 大阪大学准教授; 大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Numerical Simulation of FSW Employing Particle Method; Fumikazu Miyasaka (Department of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita)

Keywords: FSW(friction stir welding), particle method, mesh free, numerical simulation, onion ring

2015年5月3日受理[doi:10.2320/materia.54.444]

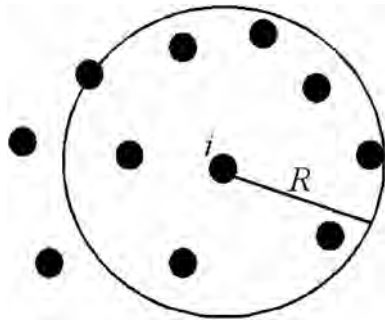


図1 粒子の影響半径.

る際に、各微分演算子(勾配・発散・ラプラシアン)に対し、それぞれ粒子間相互作用モデルを用意し、これらを適用する。具体的には重み関数式(3)を用いて、各粒子間相互作用モデルを記述する。式(3)の R は図1に示すように、相互作用を起こす粒子間距離であり、各粒子はそれぞれこの半径内の粒子からのみ影響を受けるとして計算する。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{R}{r} - 1 & (0 \leq r \leq R) \\ 0 & (R < r) \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{Dp}{Dt} = 0 \quad (4)$$

続いて非圧縮性流体の計算アルゴリズムに関して簡単に説明する。非圧縮性流体に対する支配方程式は、式(2)のナビエ-ストークスの方程式と式(4)に示す連続の式である。まず初期の粒子位置・粒子速度・圧力分布から式(2)の粘性項及び外力項を陽的に解くことにより、仮の粒子位置・粒子速度を得る。ここで得られる粒子の分布は式(4)の連続の式を満たさない。そこで、ここで得られた粒子位置・粒子速度に対して式(4)を満足するように、圧力項を用いて修正を図る。この手順を順次繰り返すことによって計算が進んでいく。

3. FSW シミュレーションモデル

FSWは金属の塑性流動を取り扱う必要があり、そのモデル化の際に様々な仮定を設けることが必要となる。今回紹介するモデルでは母材金属を高粘性流体であると仮定してモデル化している。

またFSWプロセスにおいては熱伝導は非常に重要な因子であり、モデル解析上塑性流動域の決定に大きな影響を及ぼす。今回のモデルで使用する熱伝導方程式を式(5)に示す。

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q_h}{\rho C_p} \quad (5)$$

C_p : 比熱, k : 熱伝導率, T : 温度, Q_h : 単位体積当たりの発熱量

この方程式にも式(2)と同様に移流項は入っていない。また、 Q_h に関しては後述する。

FSWプロセスにおける塑性流動を模擬するために、式

表1 材料物性.

Material	A1100
Density [kg/m ³]	2710
Thermal conductivity [W/m·K]	234
Specific heat [J/Kg·K]	900
α [MPa ⁻¹]	0.045
A	exp(24.67)
n	5.66
Q	158300

表2 計算条件.

Time interval [sec]	1e-4
Initial minimum particle distance [mm]	0.5
Number of particles	70759
Density of tool [kg/m ³]	7850
Specific heat of tool [J/Kg·K]	460
Thermal conductivity of tool [W/m·K]	24
Traverse speed of tool [mm/min]	500
Rotation speed of tool [rpm]	500
Tilt angle of tool [deg.]	3
Pitch of tread on probe [mm]	0.7

(2)の動粘性係数(ν)の分布を求める必要がある。一般に、この動粘性係数は材料の温度と相当ひずみ速度の関数として表現される。金属の動粘性係数は以下の式で表現される⁽³⁾。

$$\eta = \frac{\sigma(\dot{\epsilon}, T)}{3\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (7)$$

η : 粘性係数, $\dot{\epsilon}$ 相当ひずみ速度, σ : 相当流動応力, T : 温度

各計算点における相当ひずみ速度は、各時刻における流動速度から以下の式のように求めることができる。

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

ここで求められた相当ひずみ速度から式(6)を用いて粘性係数を求めることができる。ただし、相当流動応力は式(6)からもわかる通り相当ひずみ速度と温度の関数となっており、これは材料物性に依存する。本モデルでは、この関数を以下の様に近似する⁽³⁾。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

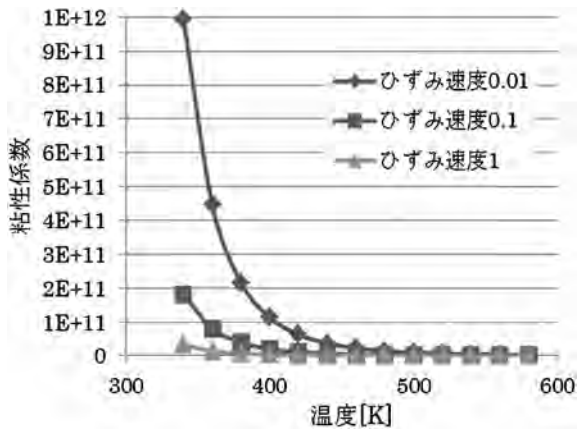


図2 粘性係数の温度・ひずみ速度依存性.

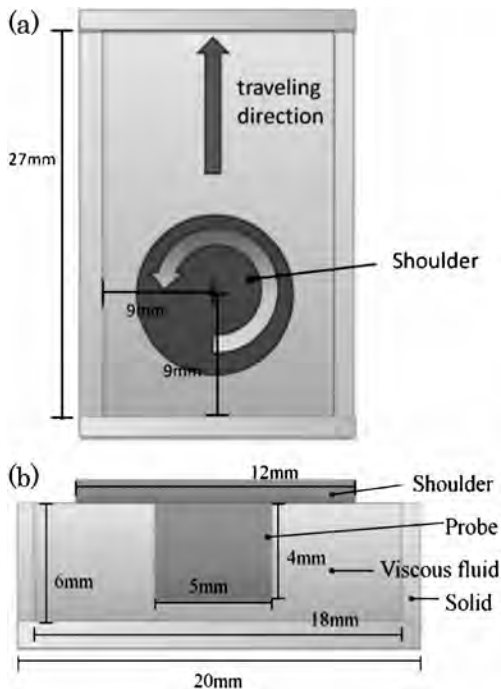


図3 計算モデル. (a)上面図 (b)断面図(正面方向).

$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

R : 気体定数, α, A, n, Q : 材料定数.

本モデルでは, 対象材料を A1100 を想定し, 使用した材料定数 α, A, n, Q を表 1 にまとめる. また表 2 には計算条件を示す. 図 2 に粘性係数の変化を示す. このグラフからわかる通り, 粘性係数は温度の上昇とともに急激に減少し, さらにひずみ速度の増加とともに減少する.

FSW プロセス中の発熱として今モデルでは, 摩擦による発熱ではなく塑性ひずみによる発熱モデルを考える. 本モデルでは式 (12) に示す通り, 塑性ひずみによる発生するエネルギーの 90% が発熱に使われると仮定した.

$$Q_h = \sigma \dot{\varepsilon} \times 0.9 \quad (12)$$

また, ツール-材料間の摩擦に関しては考慮に入っていない

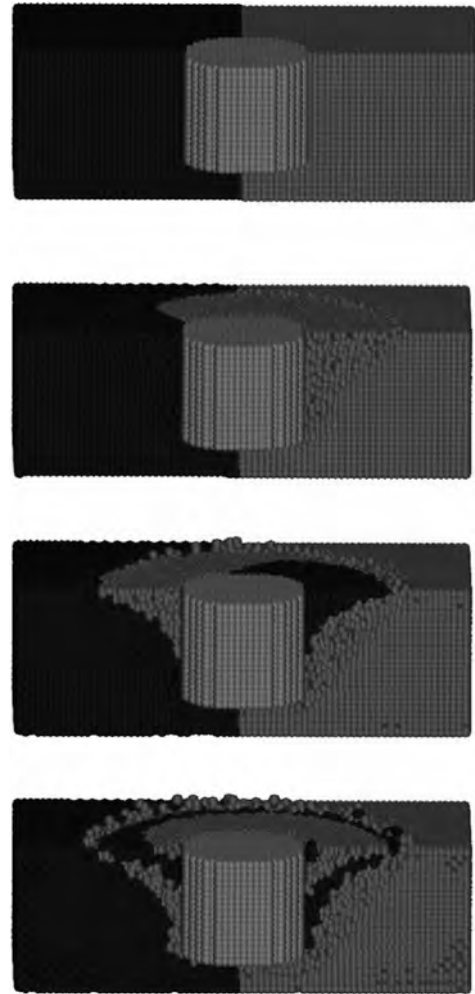


図4 スポット FSW 計算例.

が, ツール表面の境界条件として, ツールに接触する粒子に強制的にツールと同じ回転速度を与えている. さらに, プロブの形状効果として M4 のねじのピッチ (0.7 mm) 分の下向きの流れも強制的に発生させている.

4. 計算結果

図 3 に計算モデルを示す. 前述した通り本シミュレーションモデルは, 金属を高粘性の流体であると仮定している. そこで計算モデルは, 固体容器の中に非常に粘性の高い流体を入れることにより材料を模擬している. 図 4 にスポット FSW の計算結果を示す. 本図はツール中心位置における横断面図であり, 母材は溶接線の左右の初期位置で色分けしている. ツールのショルダー部は非表示である. これを見てわかるようにツールの回転とともに母材温度が上昇し流動域が広がり, 左右の材料が層状に攪拌されていく様子がわかる. 特にショルダー直下では攪拌速度が速いため流動域が広がっているのに対して, プロブ先端では流動域が狭くなっていることがわかる. 今回の計算例では, 接合部材を左右とも同材にしているが, 左右部材の物性値を変更することは容易で

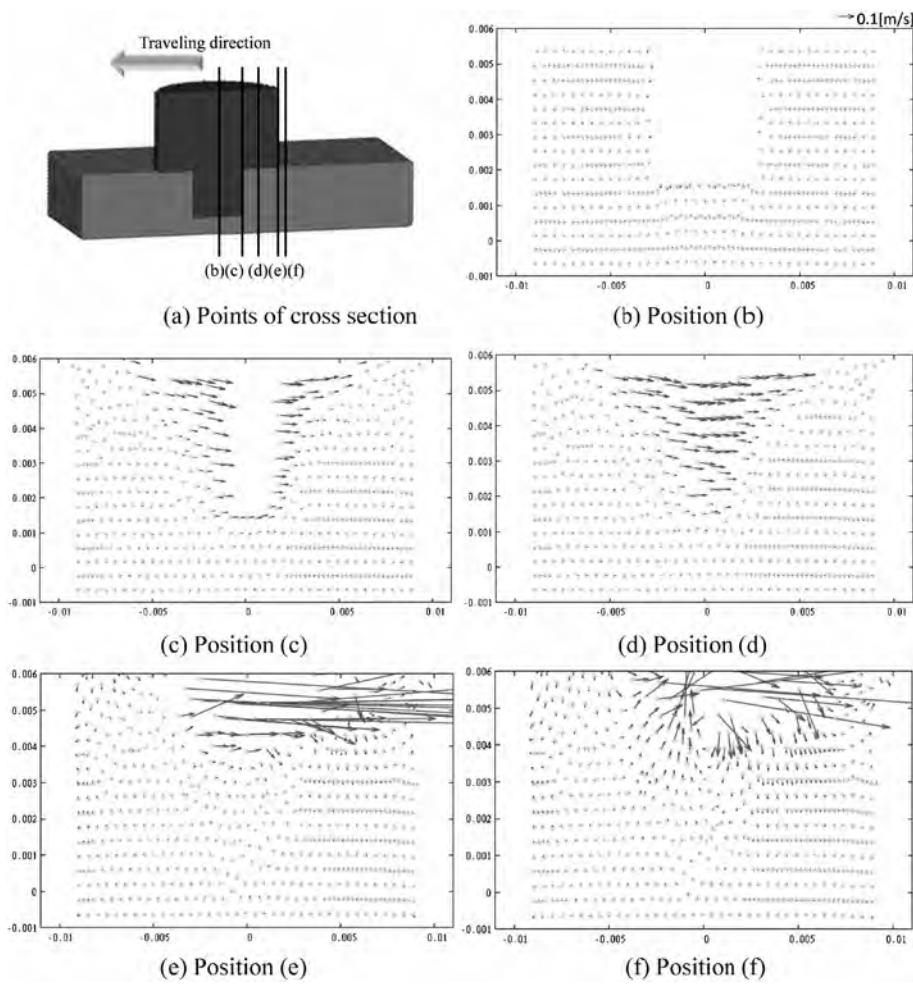


図5 ツール周辺の流れ分布.

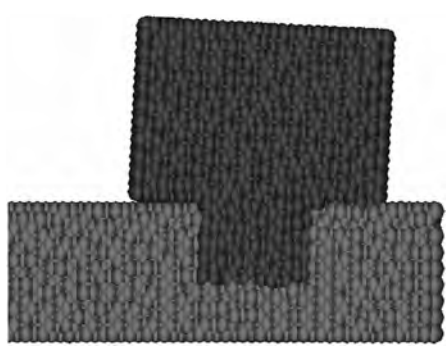


図6 ツールの傾斜.

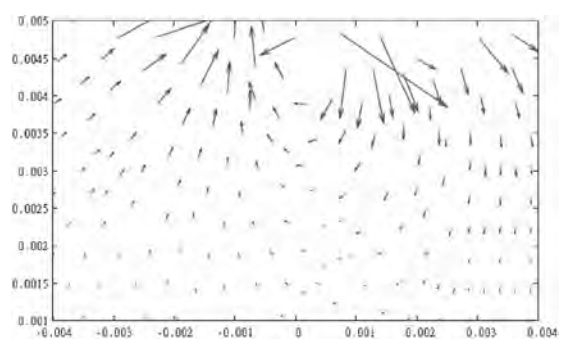


図7 ツール後方ショルダー直下の流速.

あり、異材接合への応用も可能である。図5にツール周りの材料の流動速度分布を示す。各断面は図5(a)に示す通りであり、主にツール進行方向後方の速度分布を示している。その際、ツールは図6に示すように後退角(3°)を取っている。この速度分布を見てまずわかることは、ツール中心断面(b)の位置では紙面垂直方向の流れが強く、紙面平行方向の流れはほとんど見られない。ツールの後方に行くにつれてツールの回転方向に平行な流れがみられるようになり、続いてツール回転方向に対して垂直な流れがみられるようになる。この

部分の流れは複雑であるため、図5(f)のショルダー直下を拡大した図を図7に示す。この図を見てわかる通り、ツール後方のショルダー直下では循環流が発生しており、これが、オニオンリング形成の主たる要因ではないかと考えられる。

5. ま と め

本稿では、粒子法の簡単な説明とそれを摩擦攪拌接合に適用した事例に関して述べた。粒子法を摩擦攪拌接合に適用す

るメリットとして特に挙げられるのが、支配方程式をラグランジュ系で解くため、計算点自身が各種物性値を保持しながら移動するため、オイラー系で必要となる移流項計算の必要がないことが挙げられる。この特徴は、大きく変動する自由表面を持つ流体の挙動や、多相混合流の解析に非常に適しているといえる。粒子法は、これまでに表現が困難であった現象解析を可能にする手法であり、複雑な溶接メカニズムを明らかにすることが可能であると考えられ、今後コンピュータ技術の向上とともに発展して行くことが予想される。特に摩擦攪拌接合に対しては、従来のオイラー法によるシミュレーション比べて内部の流動現象を視覚的に捉えやすく、現象を理解する上で非常に有用なツールになり得ると考えられる。特に異材接合に対しても、二つの材料が混合・攪拌される様子にとらえやすく、ツール形状が攪拌現象に与える影響やオニオンリングの形成機構等、FSW特有の現象解明に役立つことが期待される。

本シミュレーションモデルの今後の展開として、現在材料を高粘性流体であると仮定してモデル化しているが、これを弾塑性体として取り扱うことが挙げられる。弾塑性体として取り扱うことにより、プロセス中に発生する欠陥や接合後に

母材内部に発生する応力等、接合品質を決定する重要な現象の予測が可能となり、本モデルを通してより深い現象の理解が期待される。

文 献

- (1) 越塚誠一：粒子法，計算力学レクチャーシリーズ，丸善，(2005)．
- (2) W. G. Hoover：粒子法による力学-連続体シミュレーションへの展開，森北出版，(2008)．
- (3) T. Sheppard and A. Jackson: Mater. Sci. Tech., 13(1997), 203-209.



宮坂史和

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

2006年 大阪大学大学院工学研究科 工学博士学位取得

1995年4月-1998年5月 韓クボタ

1998年6月-2009年12月 大阪大学助手

2010年1月-2013年3月 大阪大学大学院 工学研究科 講師

2013年4月- 現職

専門分野：加工プロセスのモデル化、熱電磁流体シミュレーション

◎溶接・接合現象のモデル化および熱電磁流体現象を利用したデバイスの開発。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

流動現象への粒子法の応用

角 田 和 彦*

1. はじめに

粒子法は、差分法や有限要素法といった格子や要素を用いた数値解析法とは異なり、速度や圧力を保持しながら移動する粒子を用いて物体の挙動を計算するメッシュレス法である。そのため、格子法で行う煩雑なメッシュ作成の手間を必要としないという特徴がある。また、粒子法は完全ラグランジュ法であることから移流項の離散化を行わないため、移流項により生じる数値拡散が発生しないという特徴も有する。代表的な粒子法として、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法⁽¹⁾⁽²⁾とMPS (Moving Particle Semi-implicit) 法⁽³⁾⁻⁽⁵⁾がある。SPH法は基本的には圧縮性流れの計算手法であり、主に宇宙物理学の分野で使用されてきた。その後、SPH法は非圧縮性流れへの適用もされてきている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、MPS法は、粒子法に非圧縮性流れの計算アルゴリズムを組み込んだ手法である。SPH法、およびMPS法ともに液体表面や界面の大きな挙動を伴う解析に優れているため、最近では液体表面流れや混相流等の解析に広く利用されている。しかしながら、特に標準的なMPS粒子法シミュレーションでは、圧力に関するポアソン方程式を解く際に、擬似的な圧力振動解が発生することが知られている。その擬似的振動の発生原因の一つとして、特異性を有するカーネル関数の採用が挙げられる。

本稿では、流動現象に関する粒子法の適用、特に流動に伴って液体表面が大きく変動するような場合のコンピュータシミュレーション技術および解析事例について解説する。

2. 粒子法

ここでは、流動現象に関する粒子法の解析例として、SPH法及びMPS法について概説する。

(1) 支配方程式

流動現象の数値モデルとして知られている粘性流体の運動は、以下のNavier-Stokes方程式に適当な初期条件と境界条件を伴って支配されている。

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} p_{,i} + \Theta_i + f_i \quad \text{in } T \times \Omega \quad (1)$$

ただし、 Ω は空間領域、 T は時間間隔、 u_i は速度ベクトル成分、 p は圧力、 ρ は密度、 Θ_i は粘性項、 f_i は外力項、および D/Dt はラグランジュ微分を表す。

(2) SPH法

SPH法⁽¹⁾⁽²⁾に関する定式化として、ある関数 $f(x)$ と滑らかなカーネル関数 $W(x, r_c)$ を用いて、以下のように積分表現することができる。

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', r_c) dx' \quad (2)$$

ただし、 r_c は影響半径を表し(図1参照)、以下の正規化された条件を満足する。

$$\int_{\Omega} W(x-x', r_c) dx' = 1 \quad (3)$$

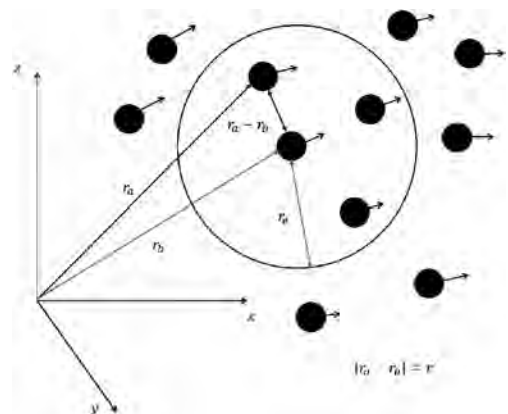


図1 粒子間相互作用モデル。

* 日本大学教授；生産工学部数理情報工学科(〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1)
 Applications of Particle Methods to Fluid-flow Phenomena; Kazuhiko Kakuda (Department of Mathematical Information Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Narashino)
 Keywords: *particle method, sph (smoothed particle hydrodynamics), mps (moving particle semi-implicit), fluid-flow, collapse of a water column, liquid ring pump, rotating impeller*
 2015年5月7日受理[doi:10.2320/materia.54.449]

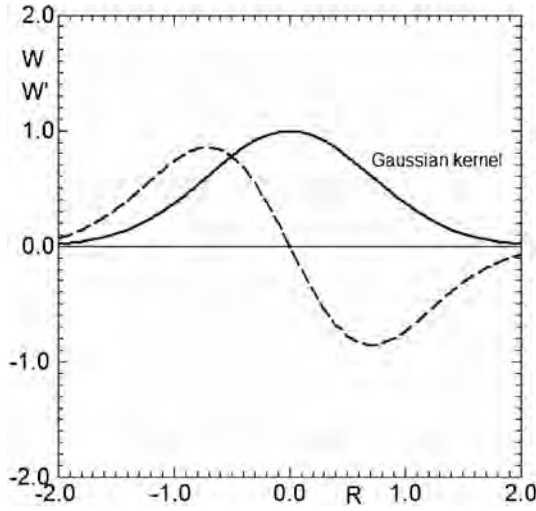


図2 Gaussian関数とその微分量.

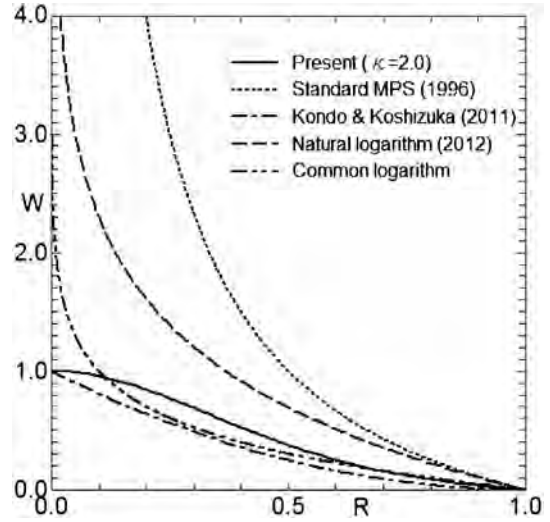


図3 種々のカーネル関数分布.

ここで、カーネル関数 $W(x, r_e)$ には、一般的に Gaussian 関数(図2参照: $R=r/r_e$)、3次以上の Spline 関数等が使用されている⁽⁸⁾。

式(2)の粒子 a での近似式(あるいは、離散化式)は次式で与えられる。

$$\langle f(x_a) \rangle = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} f(x_b) W_{ab} \quad (4)$$

ただし、 m_b と ρ_b は、それぞれ粒子 b での質量と密度を表し、および、 $W_{ab} = W(x_a - x_b, r_e)$ と表される。

また、2つの粒子 a と b 間に対する粒子 a での発散モデルは、次式のように表現することができる。

$$\langle \nabla \cdot f(x_a) \rangle = - \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} f(x_b) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

ただし、 ∇ は勾配ベクトルを表す。

(3) MPS 法

MPS 法は、上述の SPH 法のようにある関数の積分表現をするのではなく、カーネル関数(あるいは、重み関数)を用い支配方程式に現れる勾配、発散、ラプラシアン等に関して、図1の粒子間相互作用モデルを用意し、ある関数を直接、離散化するアプローチである⁽³⁾。

例えば、粒子 a での粒子数密度 $\langle n \rangle_a$ は次式のように表現される。

$$\langle n \rangle_a = \sum_{b \neq a} w(|r_b - r_a|) \quad (6)$$

ただし、 $w(r)$ はカーネル関数(あるいは、重み関数)であり、標準的な MPS 法では次式を用いる。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e - r}{r_e} - 1 & (0 < r < r_e) \\ 0 & (r \leq r_e) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)の関数は粒子間距離 $r=0$ で特異性を有しているが、他にも対数型関数⁽⁹⁾や特異性を含まない関数等⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾が採用され(図3参照)、それらの適用性が調べられている。

また、粒子 a での勾配モデルとラプラシアンモデルはそれぞれ以下のように与えられる。

$$\langle \nabla \phi \rangle_a = \frac{d}{n^0} \sum_{b \neq a} \left[\frac{\phi_b - \phi_a}{|r_b - r_a|^2} (r_b - r_a) w(|r_b - r_a|) \right] \quad (8)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_a = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{b \neq a} [(\phi_b - \phi_a) w(|r_b - r_a|)] \quad (9)$$

ただし、 d は次元数、 n^0 は初期配置での粒子数密度、 ϕ_a と ϕ_b はそれぞれ粒子 a と b のスカラー関数、および λ は統計的分散の増加を解析解と一致させるための係数を表す。

MPS 法では圧力の空間的および時間的変動が激しい事が報告されているため、近藤・越塚らによって圧力の時間方向への高精度安定化手法が提案されている⁽⁵⁾。この手法は、既に非圧縮粘性流体解析でも多く見受けられる考え方であり、特に、圧力の基となる密度変化に関する解の精度を向上させた手法といえる。圧力計算に関する標準的 MPS 法では式(10)を用い、また、その時間方向への高精度安定化手法は式(11)のように与えられる。

$$\frac{1}{\rho^0} \langle \nabla^2 p^{k+1} \rangle_a = - \frac{1}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle_a - n^0}{n^0} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho^0} \langle \nabla^2 p^{k+1} \rangle_a = - \frac{\langle n^* \rangle_a - 2\langle n^k \rangle_a + \langle n^{k-1} \rangle_a}{n^0 \Delta t^2} - \frac{\beta \langle n^k \rangle_a - \langle n^{k-1} \rangle_a}{\Delta t n^0 \Delta t} - \frac{\gamma \langle n^k \rangle_a - n^0}{\Delta t^2 n^0} \quad (11)$$

ただし、 $\beta (=0.5)$ と $\gamma (=0.05)$ は安定化パラメータ、 k は k -時刻ステップ、 n^* は粒子移動後の仮粒子数密度を表す。

3. 数値解析例

これまで展開してきた粒子法解析の妥当性および適用性を検証するために、具体的な解析例として、水柱崩壊流れ間

題⁽¹¹⁾(あるいは, ダム崩壊流れ問題)および液封式真空ポンプ内流れの問題⁽¹²⁾に関する実験データ等との比較検討を行う。

(1) 水柱崩壊流れ問題

この問題では, 種々のカーネル関数に対する SPH 法および MPS 法解析の有効性および適用性を実験値⁽¹¹⁾との比較を通して検証する。図 4 に, それぞれ 2 次元および 3 次元の計算モデルを示す。また, 計算に利用した諸量は表 1 に示す。

図 5 および図 6 には, 種々のカーネル関数を用いた SPH 法による 2 次元および 3 次元計算モデルにおける粒子/流速挙動の結果をそれぞれ示す。同時刻 ($t=0.6$ s)におけるこれらの解析結果を見ても同様な挙動が得られていることが分かる。また, 2 次元および 3 次元 MPS 法による粒子/圧力挙動の結果は, それぞれ図 7 および図 8 に示される。標準的カーネル関数を用いた場合以外, 圧力分布の擬似的な振動が

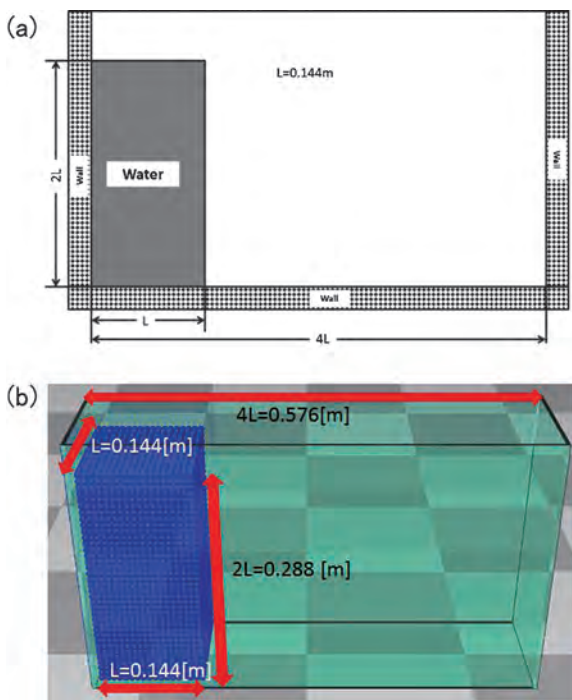


図 4 水柱崩壊流れ問題.
(a) 2次元計算モデル (b) 3次元計算モデル

表 1 計算諸量.

解析手法	解析次元	粒子数	動粘性係数 (m ² /s)	初期密度 (kg/m ³)	重力加速度 (m/s ²)	初期粒子間隔 (m)
SPH	2次元	1,559	0.3	1000.0	9.8	0.008
	3次元	37,668	0.3			
MPS	2次元	1,632	1.E-06			
	3次元	75,744	1.E-06			

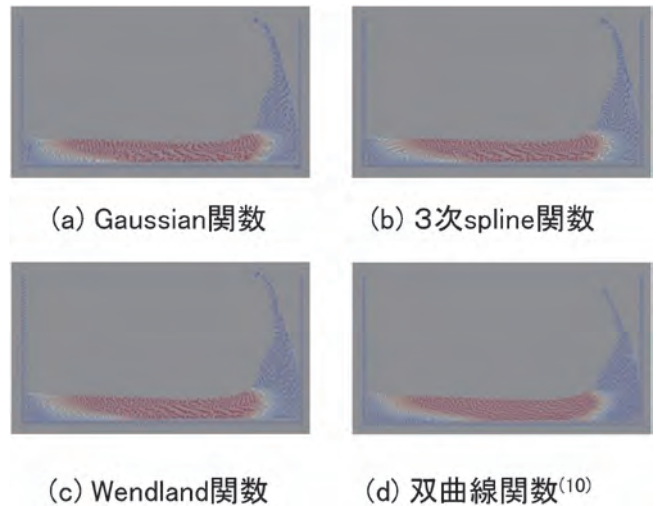


図 5 時刻 $t=0.6$ s での粒子/流速挙動(2次元 SPH).

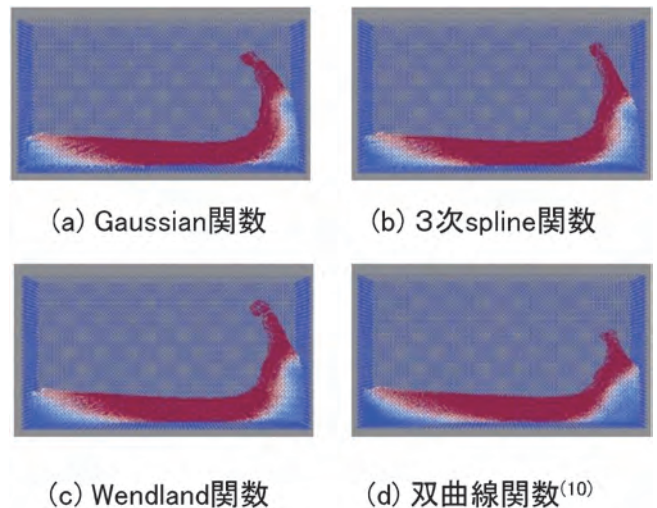
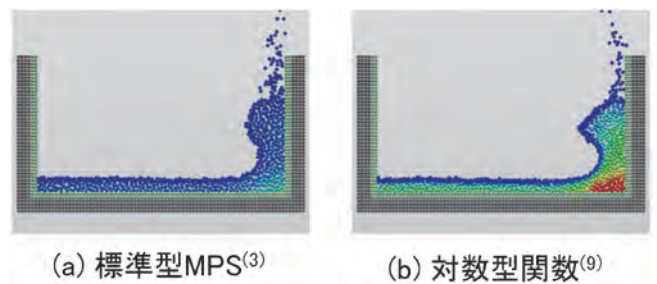
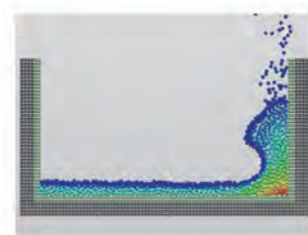


図 6 時刻 $t=0.6$ s での粒子/流速挙動(3次元 SPH).



(a) 標準型MPS⁽³⁾ (b) 対数型関数⁽⁹⁾



(c) 双曲線関数⁽¹⁰⁾

図 7 時刻 $t=0.6$ s での粒子/圧力挙動(2次元 MPS).

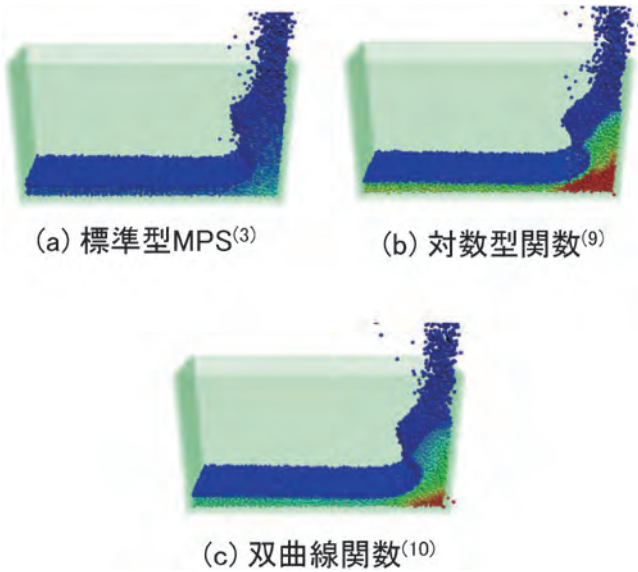


図8 時刻 $t=0.6$ s での粒子/圧力挙動(3次元MPS).

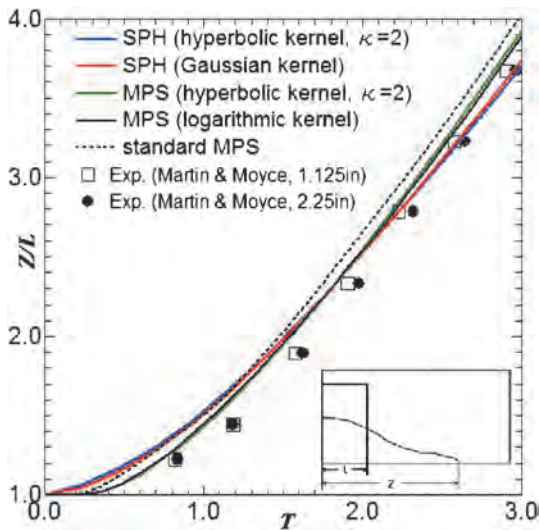


図9 水柱先端位置の実験値との比較(2次元モデル).

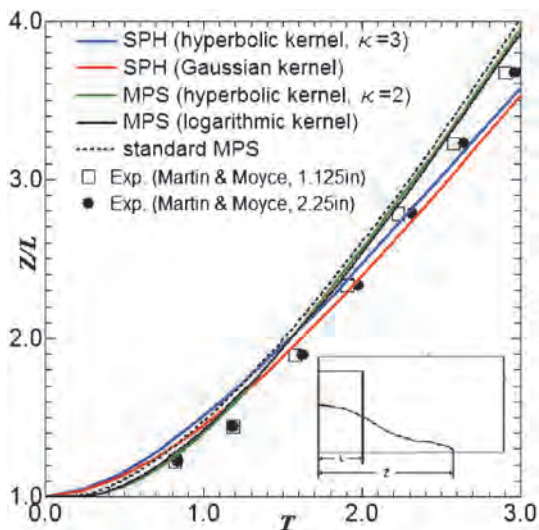


図10 水柱先端位置の実験値との比較(3次元モデル).

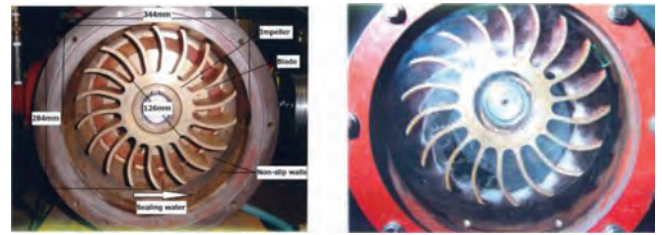


図11 実験モデルとウォーターリング形成.

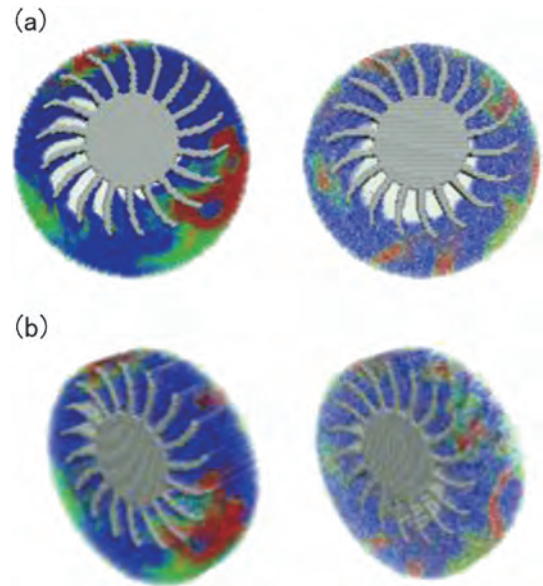


図12 各時刻での粒子/圧力挙動(3次元MPS).
 (a) 2次元表示 ($t=15$ ms(左図); $t=400$ ms(右図))
 (b) 3次元表示 ($t=15$ ms(左図); $t=400$ ms(右図))

抑制されていることが分かる. 図9, 10にそれぞれ2次元および3次元モデルでの水柱が崩壊した右先端の進行を実験値⁽¹¹⁾と比較している. 標準型MPS法解析の結果(点線)を除いて, 良好な結果が得られている. なお, 両図において $T=t\sqrt{2g/L}$ である.

(2) 液封式真空ポンプ内流れの問題

この問題では, 偏心を伴う羽根車の回転によってポンプ内にウォーターリングが形成されるという興味深い現象が知られている(図11参照). この問題に関し, 圧力安定化MPS法⁽¹²⁾による3次元解析の粒子/圧力挙動の結果を図12に示す. 時間の経過によってウォーターリングが形成され, 実験データとの定性的な一致が見られる. なお, 粒子数は211, 212で, 羽根車の回転速度は2400 rpmと設定している.

4. おわりに

本稿では, 液面が大きく変動するような場合の流動現象に関する粒子法の適用として, SPH法とMPS法の概説および数値解析例を展開してきた. これらの粒子法解析の妥当性

共鳴振動を利用した金属材料の 非線形弾性定数評価への取り組み

垂水 竜一*

1. はじめに

単結晶金属材料の持つ共鳴周波数から三次弾性定数(非線形弾性定数)を評価することを目的として, 著者等は非線形弾性体に対する二つの共鳴振動理論(非線形共鳴振動理論⁽¹⁾⁽²⁾と準線形共鳴振動理論⁽³⁾)を構築した. 本稿ではその成果について紹介したい. 理論の基本的な設計方針は Rayleigh⁽⁴⁾と Ritz⁽⁵⁾⁽⁶⁾による線形共鳴振動理論の一般化であり, 数学的な基盤としては変分法と群論を用いている. 紙面の都合で研究の全てを取り上げることはできないが, 一方で, これから金属材料の共鳴振動問題を取り扱う本稿が, 通常の金属材料研究紹介とは趣が異なることはよく承知している. そのため, 研究の詳細についてはひとまず第3節以降へ先送りとし, 次節ではまず著者が本研究に着手した動機について詳しく説明する. なお, 本稿で使用する数学的表現の中には必ずしも一般的でないものが含まれている. これは煩雑・冗長な説明を避けるための処置であり, 必要に応じて原論文⁽¹⁾⁻⁽³⁾をご参照頂ければ無用な混乱は起こらないと考えるが, この点については予めご了承頂けると幸いである.

2. 研究背景と目的

(1) 弾性理論

1678年の Robert Hooke によるフックの法則の発見以降, 弾性理論は Bernoulli, Euler, Navier, Cauchy といった巨人達の手でその骨格が建設された. こうした取り組みの一つの到達点は応力の平衡方程式であろう. これは弾性体 Ω 内では応力テンソルの発散がゼロとする局所化された偏微分方程式で⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾, ひずみエネルギー密度 W を導入して構成式を確

定すると, 変位 u_i に対する2階の線形偏微分方程式として次のように表される.

$$\frac{\partial^2 W}{\partial u_{i,j} \partial u_{k,l}} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = 0 \quad (1)$$

この楕円型微分方程式は, $\partial\Omega$ 上の境界条件を適切に設定することで well-posed される. 変分法の立場から見ると, 式(1)は弾性体の全エネルギー汎関数に対する Euler-Lagrange 方程式であり, 弾性体に生じる変位はこの汎関数を最小化する関数として特徴付けられる⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾. 前近代に築かれたこうした線形弾性理論(古典弾性理論)の基本的な枠組みが, 今日における固体材料の力学特性研究の基盤となっていることは周知の通りである.

20世紀に入ると, Cosserat, Truesdell, Ericksen, Eshelby, Eringen, Ball 等によって非古典的な弾性理論の構築が進められる. その流れの中で重視される概念の一つが客観性公理である. いま三次元ユークリッド空間内で立方体領域を占有する弾性体を $\Omega = \{x_i | 0 < x_i < 1, i = 1, 2, 3\}$ とする. この弾性体を x_3 軸を中心に角度 θ 反時計回りに回転させ, 回転後の弾性体を Ω^θ , 内部座標を x_i^θ , その勾配を $F_{ij} = \partial x_i^\theta / \partial x_j$ とする. このとき, 剛体回転行列 R_{ij} を用いた一次変換によって $x_i^\theta = R_{ij} x_j$ が成立する. 一方, 定義より変位は $u_i = x_i^\theta - x_i$ である. したがって, この弾性体に生じる Cauchy のひずみテンソル ϵ_{ij} は次のように表される.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) = \begin{pmatrix} \cos \theta - 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta - 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

いま Ω は等方体と仮定して構成式を $\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij}$ と表せば, 式(2)から導かれる応力テンソル σ_{ij} はその垂直成分が $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 2(\lambda + \mu)(\cos \theta - 1)$, $\sigma_{33} = 2\lambda(\cos \theta - 1)$ となり, 一般にはゼロとならない. すなわち, 剛体回転させた弾性体

* 大阪大学准教授; 大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Theoretical Foundations of Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy; Ryuichi Tarumi (Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

Keywords: elastic constants, resonant ultrasound spectroscopy, nonlinear elasticity, calculus of variations, Ritz method, quasiharmonic approximation

2015年5月1日受理[doi:10.2320/materia.54.454]

Ω^0 の内部には、本来存在するはずのない応力が発生する。一体何が起きたのだろうか？通常、物理量はそれを観測する座標系によらず不変であることが要請されている(客観性公理)。この例では、座標系ではなく観測対象を相対回転させて問題を単純化した。操作の本質は変わらない。この問題は、線形弾性理論の構成式が客観性を欠くことに起因する。線形弾性理論で用いられる無限小変形近似はその処方箋として働くが、本来は構成式の客観性回復を考えるべきであろう。

客観性公理を満足した等方弾性体の構成式の一般形は、Rivlin-Ericksen の表現定理としてまとめられている⁽⁷⁾。しかしながら、金属材料は一般に結晶構造に応じた異方性を有するため、等方体の構成式が本質的な意味で有用なケースは限定的である。異方性を有する金属材料を取り扱う際に都合が良いのは次のひずみエネルギー密度 W である⁽¹¹⁾。

$$W = \frac{1}{2} C_{ijkl} E_{ij} E_{kl} + \frac{1}{6} C_{ijklmn} E_{ij} E_{kl} E_{mn} + O(E_{ij}^4) \quad (3)$$

ここで E_{ij} は次式で表される Green-Lagrange ひずみテンソルである。

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j}) \quad (4)$$

式(3)において、 C_{ijkl} は二次弾性定数(線形弾性定数)、 C_{ijklmn} は三次弾性定数(非線形弾性定数)と呼ばれている。ここで式(3)の右辺第二項は力学的非線形項と呼ばれており、物理的には原子間相互作用の非調和性を表している。一方、式(4)のひずみテンソル E_{ij} は Cauchy のひずみテンソル ϵ_{ij} が幾何学的非線形項 $u_{k,i} u_{k,j}/2$ によって修正されており、これが客観性の回復をもたらしている。式(3)に関連して強調しておきたいのは次の二点である。第一は、このひずみエネルギー密度 W には二つの非線形性(力学的非線形性と幾何学的非線形性)が含まれている点であり、第二は、これらの非線形性は無限小変形近似下では高次微小量として消失し、その結果、従来の線形弾性理論のひずみエネルギー密度 $W^{Lin} = (1/2) C_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl}$ が導かれる点である。この意味で、式(3)は線形弾性理論から非線形弾性理論への自然な拡張と考えられる。

(2) 線形共鳴振動理論

20世紀に差しかかる頃、本稿に関連したもう一つの理論が構築されている。それが Rayleigh と Ritz による線形共鳴振動理論である。Rayleigh は共鳴振動によって弾性体に生じる変位の関数形を仮定し、これを基に計算したひずみエネルギーと運動エネルギーの比(Rayleigh 商)から共鳴周波数を推定した⁽⁴⁾。これに対して、Ritz は未知の変位を既知の完備系関数列で展開し、最小作用の原理(ハミルトンの原理)に基づいてその展開係数を決定する、いわゆる Ritz 法を考案してこの理論を完成させた⁽⁵⁾⁽⁶⁾(Ritz 法を Rayleigh-Ritz 法と呼ぶ文献も存在するが、この方法に Rayleigh の名を冠するのは恐らく適切ではない⁽¹²⁾)。

Rayleigh と Ritz が構築した線形共鳴振動理論を用いれば、単結晶金属材料の形状 L_i 、密度 ρ 、および二次弾性定数 C_{ijkl} を与えることで、その材料の共鳴周波数 ω_i を計算する

ことができる。1970年代に入ると、Demarest がこの理論を応用した新しい二次弾性定数計測法を考案した⁽¹³⁾。これは材料の形状 L_i 、密度 ρ 、および共鳴周波数 ω_i を実験計測し、得られた ω_i を再現できるよう計算に用いる C_{ijkl} を最適化することで、その材料の持つ全ての独立な C_{ijkl} を決定する方法である。線形共鳴振動理論を逆解析的に応用する Demarest のアイデアは、その後、Ohno, Migliori, Ogi 等の手によって理論・計測法の両面から整備され、今日の超音波共鳴法として確立されている⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾。超音波共鳴法を用いれば、1つの単結晶材料に対する1度のスペクトル計測から、その材料の持つ全ての独立な C_{ijkl} を高精度に決定することができる。著者の知る限り、超音波共鳴法は現行の C_{ijkl} 計測法の中でも最も優れた方法と考えられる。

(3) 研究目的

著者は、学位取得後は超音波共鳴法を用いた金属・セラミックス材料の C_{ijkl} 計測を進めてきたが、次第に線形共鳴振動理論の抱える原理的な問題が顕在化し、それを無視できなくなった。それは、上記の二つの非線形性に関連した次の問題である。

- [1] 線形共鳴振動理論では、構成式に線形弾性理論を用いている。したがって、この理論が描く共鳴振動現象は客観性公理を満たしていない。客観性公理の成否は物理学の原理・原則に関わる本質的な問題である。それでは、構成式に幾何学的非線形項を取り入れて客観性公理を回復させた本来の共鳴振動現象には、従来の線形理論では見落とされてきた本質的な相違点が現れるだろうか？
- [2] 本来、固体材料の共鳴振動には僅かながら非線形効果が含まれている。そのため、共鳴周波数を高精度に計測・逆解析すれば、原理的には三次弾性定数 C_{ijklmn} の計測も可能である。それにも関わらず、現行の超音波共鳴法の計測対象が二次弾性定数 C_{ijkl} に限られているのは、構成式に力学的非線形項が含まれないことによる。それでは、共鳴周波数から C_{ijklmn} を評価するためには、従来の理論をどのように修正すれば良いのだろうか？

従来の線形共鳴振動理論の構成式に二つの非線形性を取り入れ、これを非線形弾性体の共鳴振動理論として一般化することは、上記の二つの問題に答える唯一の方法と思われた。これが、著者が本研究に着手した動機である。結果的に二つの理論(非線形共鳴振動理論⁽¹⁾⁽²⁾と準線形共鳴振動理論⁽³⁾)を構築したが、前者が問題[1]に対する、そして後者が問題[2]に対する著者なりの回答である。

3. 非線形共鳴振動理論

(1) 基礎理論

簡単のため、本節では参照状態において長方形形状を持った一様な二次元 St. Venant-Kirchhoff 型弾性体 $\Omega = \{x_i | L_i < x_i < L_i, i=1, 2\}$ を考える。この弾性体の構成式は、式(3)のひずみエネルギー密度 W から力学的非線形項を消去し、また二次弾性定数を線形等方弾性体と同じくラメ定数を用い

て $C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu \delta_{ik} \delta_{jl} + \mu \delta_{il} \delta_{jk}$ と表すことで得られる。

いま、共鳴振動によって Ω 内に生じる変位を $u_i = u_i(x_i, t)$ とおけば、運動エネルギー密度 T は次のように書くことができる。

$$T = \frac{1}{2} \rho (u_{1,t}^2 + u_{2,t}^2) \quad (5)$$

これにより Ω のラグランジアン密度 $L = T - W$ が確定する。次に、 ω を任意の実数として長さ不定の時間領域 $t \in (0, 2\pi/\omega)$ を設定し、 L を領域 $\Omega \times (0, 2\pi/\omega)$ 上で積分すれば、この弾性体の作用積分は変位 u_i の汎関数 $I[u_i]$ として次のように表すことができる。

$$I[u_i] = \int_0^{2\pi/\omega} \int_{\Omega} L dV dt \quad (6)$$

ここで解析対象の弾性体は最小作用の原理を満たすため、まず作用汎関数 $I[u_i]$ の第一変分から Euler-Lagrange 方程式と自然な境界条件を導出し、解(変位 u_i)の持つ基本的な性質を明らかにする。このためには式(6)の第一変分が必要となるが、この計算の際には時間領域が不定であることに注意が必要である。すなわち、この問題は可変領域上で定義された変分問題であり、第一変分の計算には従属変数 u_i と独立変数 t を同時に微小変換する必要がある。すなわち、

$$t \rightarrow t + \alpha \varphi + o(\alpha), \quad (7)$$

$$u_i \rightarrow u_i + \alpha \psi_i(x_i, t, u_i, u_{i,j}) + o(\alpha) \quad (8)$$

ここで φ は任意の定数、 $\psi_i = \psi_i(x_i, t, u_i, u_{i,j})$ は任意の関数であり、 α は微小な任意定数である。この変換により得られる $I[u_i]$ の第一変分 δI は次のようにまとめられる⁽¹⁹⁾。

$$\delta I = - \int_0^{2\pi/\omega} \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial u_{i,t}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial L}{\partial u_{i,j}} \right) \bar{\psi}_i - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial u_{i,t}} \bar{\psi}_i + L \varphi \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial L}{\partial u_{i,t}} \bar{\psi}_i \right) \right] dV dt \quad (9)$$

ここで $\bar{\psi}_i = \psi_i - u_{i,t} \varphi$ である。次に最小作用の原理に従って停留条件 $\delta I = 0$ を課すと、その必要条件から次の Euler-Lagrange 方程式が導かれる。

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial u_{i,j} \partial u_{k,l}} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} = 0 \quad (10)$$

いま共鳴振動による変位 u_i は十分小さいと仮定すると、係数テンソル $\partial^2 W / \partial u_{i,j} \partial u_{k,l}$ は強楕円条件⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾を満足し、したがって式(10)は非線形の波動方程式を与える。一方、時間軸上の自然な境界条件として次の結果が導かれる。

$$u_{1,t} |_{t=0} = u_{2,t} |_{t=2\pi/\omega} = 0 \quad (11)$$

$$L |_{t=0} = L |_{t=2\pi/\omega} = 0 \quad (12)$$

式(11)は Ω 内の変位速度が時間領域の両端で消失することを意味している。これと波動方程式の持つ基本的な性質から、解は $t=0$ を中心とした時間反転対称性を持つと考えられる。一方、式(12)からは解の時間周期性が要請される。さらに、空間方向に対する自然な境界条件から、弾性体の表面 $\partial \Omega$ 上では Piola-Kirchhoff の応力ベクトルが消失する。これが共鳴振動変位 u_i が満たすべき条件である。

(2) Ritz 法による数値計算

式(10)で表された非線形波動方程式の解を求めるために

は、上記の自然な境界条件に加えて変位の初期条件も必要となるが、これは不明で事前に与えることはできない。そこで本研究では、Ritz 法に基づく直接解法によってこの変分問題を数値的に解く。まず自然な境界条件より、 Ω 内に生じる変位は時刻 $t=0$ に対する時間反転対称性と、 $\Delta t = 2\pi/\omega$ なる時間周期性を備えた定在波と考えられるため、本研究では変位 u_i を次の形式で展開する。

$$u_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N a_{1,m,n} \phi_1(x_1, x_2, m) \cos(n\omega t) \quad (13)$$

$$u_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N a_{2,m,n} \phi_2(x_1, x_2, m) \cos(n\omega t) \quad (14)$$

ここで ϕ_1 と ϕ_2 は離散的なフーリエ級数によって構成されており、 $a_{i,m,n}$ はその未知係数である⁽¹⁾⁽²⁾。時間依存項には ω とその整数倍の角振動数を持った余弦関数(同位相)を用いる。このように近似した変位関数を式(6)へ代入して積分を解析的に実行後、停留条件より $\partial I / \partial a_{i,m,n} = 0$ を課せば、未知係数 $a_{i,m,n}$ の数と同じ次元の非線形代数方程式が導かれる。更に変位関数の L^2 ノルムを導入して $\|u_i\|_{L^2} = \text{const.}$ と束縛すれば、方程式系が閉じる。

こうして導かれた非線形代数方程式を解析的に解くことは困難である。そこで、まずひずみエネルギー密度 W を線形化して問題を従来の線形共鳴振動理論に一致させ、解くべき代数方程式を線形固有値問題に帰着させる。その結果、固有値(L^2 ノルムに対する未定定数)から共鳴周波数が、対応する固有ベクトルから変位関数の未知係数が求められる。こうして得られた線形解を初期推定値とし、Newton 法による収束計算を用いてこの問題(非線形代数方程式)の解を求めた。なお具体的な数値計算条件は次の通りである： $\rho=1, \lambda=1, \mu=0.33, L_1=1.1, L_2=0.9, \|u_i\|_{L^2}=0.05$, 基底関数の全自由度 $\chi=1,568$ 。

(3) 解析方法：点群と既約表現

線形弾性体の共鳴振動は、群論(点群と既約表現)を用いた対称性解析によってユニークに分類することができる⁽²⁰⁾。この背景には、物質の示す巨視的な物性が点群によって記述されることを要請するノイマンの原理(結晶物理学の基本原則)が存在する⁽²¹⁾⁽²²⁾。点群を用いた共鳴振動対称性の解析は本稿において中心的な役割を果たすため、ここではその基本的な考え方について説明したい。

いま解析対象とする弾性体 Ω は長方形形状を持つことから、これを不変に保つ対称操作は、 E (恒等操作)、 C_2 (π 回転操作)、および、 σ_x と σ_y (x 面と y 面に対する鏡映操作)の4種類であり、その集合は点群 $C_{2v} = \{E, C_2, \sigma_x, \sigma_y\}$ を構成する⁽²³⁾。この点群は表1に示すキャラクターテーブルを有しており、ここから A_1, A_2, B_1, B_2 と表される4つの既約表現が導かれる。これらの既約表現はそれぞれ異なる射影演算子 P を有しており($P^{A_1} = (E + C_2 + \sigma_y + \sigma_x)/4$, $P^{A_2} = (E + C_2 - \sigma_y - \sigma_x)/4$ など)、これを式(13)、(14)の変位関数に作用させると、各既約表現の対称性を満たす関数のみが project-out され、その集合が表現の基底を作る。これを線形代数の立場から見ると、基底の一次変換に伴う表現行列の同値変換が、

表1 点群 C_{2v} のキャラクターテーブル.

	E	C_2	σ_y	σ_x
A_1	1	1	1	1
A_2	1	1	-1	-1
B_1	1	-1	1	-1
B_2	1	-1	-1	1

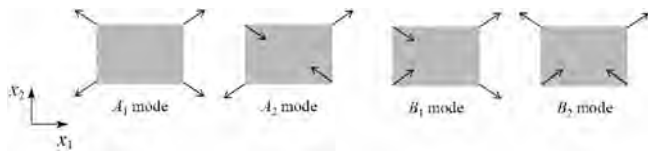


図1 4つの既約表現が表す共鳴振動対称性.

4つの小行列へのブロック対角化となることを意味している.

図1に4つの既約表現が表す共鳴振動対称性を模式的に示す. ここで A_1 は共鳴振動によって対称性が低下しない全対称モードと呼ばれており, 共鳴振動によって対称性が低下する他の3つのモードとは性質が異なっている. A_2 はせん断変形型の振動モードであり, B_1 と B_2 は曲げ変形型の振動モードである. これら4つの共鳴振動モードは対応する既約表現が1次元であるために縮退がなく, また従来の線形共鳴振動理論ではそれぞれ異なる不変部分空間を張ることから, 互いに直交して相互作用はない.

(4) 数値計算結果

図2に数値計算によって得られた非線形共鳴振動の一例を示す. ここで図2(a)は A_1' -3モードを表している. この計算結果は次の過程で求めている. まず従来の線形共鳴振動理論を用いて A_1 -3モード (A_1 対称性の中で共鳴周波数が下から3番目のモード)の共鳴周波数と共鳴振動変位を求め, 次にこれを初期推定値として非線形連立代数方程式へ代入し, 最後にその近傍でNewton法による収束計算によって求解した. この図では, 基準時刻 $t=0$ から半周期後までの振動パターンを示しているが, 残る半周期は $t=0$ に対する時間反転より直ちに導かれる. 図中の(a)は非線形共鳴振動を表しているが, 式(13), (14)より明らかのように, この変位には角振動数の異なる4種類の変位成分 ($n=0\sim 3$)が含まれている. そこで, これらの成分を n 値に応じて書き出したものが同図の(b)~(e)である. 換言すると, (b)~(e)の総和が(a)である(変位の表示倍率は n 値毎に適宜調整している). 図において, (c)は(a)に含まれる $n=1$ の調和振動成分を表すが, この振動形状と(a)の非線形振動の形状が類似していることから, この非線形共鳴振動では調和振動成分が支配的である. (b) $n=0$ の静止成分と(d) $n=2$ の二次高調和成分, および(e) $n=3$ の三次高調和成分は何れも弾性体の非線形性によって生じており, 従来の線形共鳴振動理論では現れない本質的な相違点である. 次に共鳴振動対称性について考える. 図より明らかのように, (b)~(e)の各成分は全

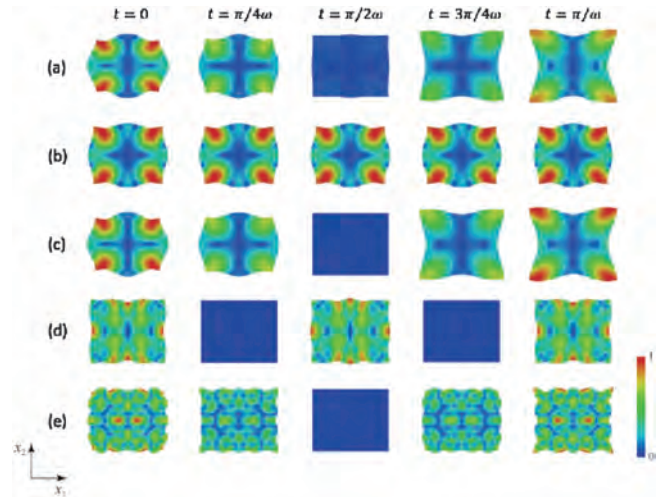


図2 (a) A_1' -3モードの非線形共鳴振動. (b)~(e)は(a)に含まれる変位成分を表しており, それぞれ角振動数 ω の係数が(b) $n=0$, (c) $n=1$, (d) $n=2$, (e) $n=3$ に対応している. 右端のカラースケールは規格化された変位の L^2 ノルム値を表す.

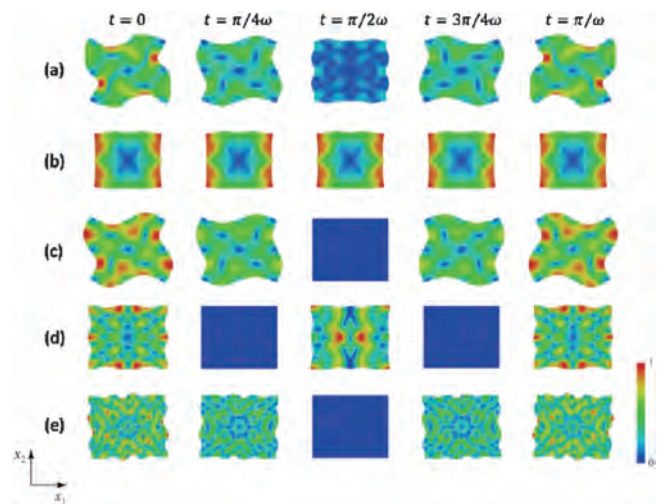


図3 (a) A_2' -3モードの非線形共鳴振動. (b)~(e)は(a)に含まれる変位成分を表しており, それぞれ角振動数 ω の係数が(b) $n=0$, (c) $n=1$, (d) $n=2$, (e) $n=3$ に対応している. 右端のカラースケールは規格化された変位の L^2 ノルム値を表す.

ての時刻で A_1 対称性を有しており, したがってその重ね合わせの(a)もまた全時刻で A_1 対称性を持っている. この結果は, 従来の点群と既約表現に基づく対称性の予測結果と完全に一致しており, また解析を行った他の全ての A_1' 系モードについても成立している.

同様の解析を A_2' -3モードに対して行った結果を図3に示す. ここで図(a)~(e)は図2と同様の意味を有している. 図を見ると, (a)に示された非線形共鳴振動は(c)に示された $n=1$ の調和振動成分に類似しており, したがってこのモードでも調和振動成分が支配的である. 次に振動対称性について考えると, n が奇数となる(c) $n=1$ と(e) $n=3$ につい

ては、ほぼ全ての時刻において A_2 対称性を持つことが確認できるが、時刻 $t = \pi/2\omega$ では何れも共鳴振動変位が消失し、例外的に A_1 対称性が現れている。一方で、驚くべきことに、 n が偶数となる (b) $n=0$ と (d) $n=2$ の変位成分を見ると、その対称性は全時刻で A_1 であり、 A_2 対称性は現れない。すなわち、 A_2-3 モードの非線形共鳴振動には、 A_2 対称性と A_1 対称性という二つの異なる対称性(既約表現)が含まれており、その選択は n 値のパリティ(偶奇性)に依存している。無論、これらの結果は、解析を行った全ての A_2 系モードについて成立している。また、同様の解析を B_1 系モードおよび B_2 系モードに対して行った結果、 A_2 系モードと本質的に同様の傾向が確認された。すなわち、 n が奇数のときには線形共鳴振動と同一の振動対称性が現れ (B_1 系では B_1 対称性、 B_2 系では B_2 対称性)、逆に n 値が偶数のときには何れも A_1 対称性が現れる⁽¹⁾⁽²⁾。

(5) 考察：磁性点群とカラー対称性

従来の線形共鳴振動理論では $n=1$ の調和振動のみが発現し、その対称性は点群 C_{2v} が持つ 4 つの既約表現によって分類されてきた(この解析法では、時刻 $t = \pi/2\omega$ で瞬間的に A_1 対称性が現れる点については説明できない)。これに対して、本研究で得られた非線形弾性体の共鳴振動変位には、 $n=0$ の静止成分と、 $n=2, 3$ の高調和成分が含まれている。さらに、 A_2 系、 B_1 系および B_2 系モードでは、非調和成分の対称性が n 値に応じて交代出現している。これらの結果は、点群と既約表現に基づく従来の解析法では説明することができない。この、まるでパズルのような共鳴振動対称性は、どのように理解すれば良いのだろうか? 著者はこの問題を次の過程で考察した。まず非線形共鳴振動モードの計算結果とノイマン原理との整合性について考える。先述の通り、この原理は共鳴振動対称性が点群の枠組み内で記述されることを要請するが、本研究の計算結果は次の理由でこの原理には違反していない。上記のように、 A_1 対称性は全対称とも呼ばれており、それ自体は弾性体の持つ点群対称性を変化(低下)させない。そのため、例えば図3では A_2 対称性と A_1 対称性が同時に現れるが、両者を重ね合わせた非線形共鳴振動は A_2 対称性を有しており、これは従来の既約表現に従っている。 B_1 系および B_2 系モードについても同様の状況が成り立っており、図2については全ての変位成分が A_1 対称性を有している。

この考察は、従来の解析方法は最も根本的な意味では誤っておらず、むしろ何らかの意味で不完全であることを示唆している。次にこの不完全性の起源について考えると、それはほぼ自明で、問題は時間軸上での対称操作の不足にある。先述の通り、 n 値のパリティは変位の時間依存性に関する性質である。一方、点群 C_{2v} の元は空間軸に対する対称操作のみから構成され、時間軸上の対称操作は含まない。位置 x_i と時間 t が変位 u_i に対して互いに独立な変数である以上、点群 C_{2v} から解の時間依存性に関する情報を直接引き出すことはできない。最後に、この現象を数値計算結果から考えると、現象の説明に必要な群は、 A_1 系モードと他の 3 系統の

モードを本質的に区別する必要があり、さらに後者については、 n 値に応じて変化する二種類の射影演算子を持つことが必要となる。

これらを手掛かりとして既存の群を調べた結果、たどり着いたのが磁性点群である⁽²⁴⁾。磁性点群は、従来の点群に時間反転演算子 \hat{T} を導入して一般化した群の概念である。いま弾性体が属する点群 C_{2v} を位数 2 で剰余類分解し、次に時間反転演算子 \hat{T} を E を含まない部分群にかけて両者の和を取ると、次に示す 3 種類の群が導かれる。

$$C_{2v}(C_2) = \{E, C_2\} + \hat{T}\{\sigma_x, \sigma_y\}, \quad (15)$$

$$C_{2v}(C_x) = \{E, \sigma_x\} + \hat{T}\{C_2, \sigma_y\}, \quad (16)$$

$$C_{2v}(C_y) = \{E, \sigma_y\} + \hat{T}\{C_2, \sigma_x\}, \quad (17)$$

これらはいずれも二色(白色と黒色)の磁性点群と呼ばれており、 $\hat{T}\{\cdot, \cdot\}$ によって表された対称操作はカラー対称性と呼ばれている。これに対して、従来の点群 C_{2v} は磁性点群の表記法を用いると

$$C_{2v}(C_{2v}) = \{E, C_2, \sigma_x, \sigma_y\} \quad (18)$$

と表される。これは単色(白色か黒色)の磁性点群と呼ばれており、式(15)~(17)に示された二色の磁性点群とは明示的に区別されている。

次に時間反転演算子 \hat{T} の役割を定める。図4に本解析で用いた共鳴振動変位の時間依存性を示す。作用汎関数に対する自然な境界条件から、 $n=1\sim 3$ で表される 3 つの余弦関数は全て同位相である。そのため、共鳴振動変位は時刻 $t=0$ に対する時間反転対称性を有しており、したがって \hat{T} の時間反転軸を $t=0$ としても有意な結果は得られない。そこで改めて図4を眺めると、従来の解析法で不備のあった時刻 $t = \pi/2\omega$ (図中の $t=0.25$) が興味深い特徴を持つことに気付く。この時刻では n が奇数の余弦関数は値が消失するため、ここを中心に時間を反転させると振幅もまた反転する。これに対して、 n が偶数の余弦関数はこの時刻で最大振幅を取っており、ここを中心に時間を反転させても振幅は不変である。そこで、演算子 \hat{T} の時間反転軸を $t = \pi/2\omega$ と設定すれば、その役割は n 値に応じて次のように変化する。

$$\hat{T} = \begin{cases} 1 & : n = \text{偶数} (n=0, 2) \\ -1 & : n = \text{奇数} (n=1, 3) \end{cases}, \quad (19)$$

このように定義した時間反転演算子 \hat{T} を用いて磁性点群 C_{2v}

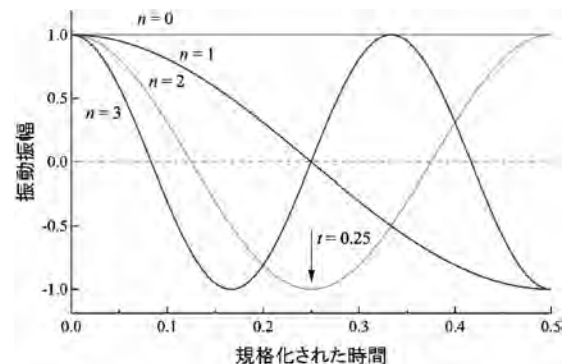


図4 共鳴振動変位に用いられる 4 つの余弦関数の時間変化。

(C_2)の射影演算子を考えると、 n が奇数の変位関数に対しては $P^{\text{Odd}} = (E + C_2 - \sigma_x - \sigma_y)/4$ となって既約表現 A_2 の射影演算子が得られるのに対して、 n が偶数の変位関数に対しては $P^{\text{Even}} = (E + C_2 + \sigma_x + \sigma_y)/4$ となって既約表現 A_1 の射影演算子が導かれる。この結果は、非線形共鳴振動の対称性が n 値のパリティに応じて二つの既約表現 (A_2 と A_1) を持つことを意味している。換言すると、カラー対称性を備えた二色の磁性点群 $C_{2v}(C_2)$ は、 A_2 系モード (図3) に対する数値計算結果を説明することができる。

全く同様の解析は、磁性点群 $C_{2v}(C_x)$ 、および $C_{2v}(C_y)$ についても成立しており、これらの磁性点群から得られた射影演算子は、それぞれ B_1' 系および B_2' 系モードに対する数値計算結果を説明することができる。一方、式(18)で表された単色の磁性点群 $C_{2v}(C_{2v})$ は時間反転演算子 \hat{T} を含まないため、その射影演算子は n 値によらず常に $P = (E + C_2 + \sigma_x + \sigma_y)/4$ である。この結果、共鳴振動は n 値のパリティによらず常に A_1 対称性を持つことになる。このように A_1' 系モードの特殊性は、磁性点群 $C_{2v}(C_{2v})$ の単色性と、他の三つの磁性点群の二色性の差として自然に説明できる。無論、上記の解析結果は変位成分を $n=1$ のみに限定した場合についても成立しており、この意味で磁性点群を用いた解析法は、点群・既約表現による従来の解析法を包含している。さらに付け加えると、時刻 $t = \pi/2\omega$ では時間反転演算子 \hat{T} は常に恒等操作を表すため、この時刻では全ての磁性点群において n 値によらず常に $\hat{T}=1$ となる。その結果、この時刻における射影演算子は全ての振動モードで A_1 対称性となり、従来理論の不備(時刻 $t = \pi/2\omega$ で瞬間的に A_1 対称性が現れる)についても補完することができる。

(6) 検証：分子振動の Acoustic Overtone モデル

式(15)~(18)に示した4種類の磁性点群を用いれば、非線形共鳴振動の対称性を矛盾なく説明できるが、その妥当性については客観的な検証が必須である。本研究では、この検証に既存の分子振動理論を用いることにした。点群と既約表現を用いた解析は様々な分野で利用されているが、分子振動解析はその代表例の一つである。詳細は省略するが、この研究分野では量子力学的な摂動理論に基づいた非線形の分子振動解析モデル (Acoustic Overtone モデル) が構築されている⁽²⁵⁾。本稿では、このモデルから導かれる非線形分子振動の対称性を、著者等の磁性点群による対称性の予測結果と比較したい。

いま点群 C_{2v} に属する分子を考え、その内部では周波数 ω を持つ A_2 対称性のフォノンが励起されていると仮定する。このフォノンの振動振幅を増大させると、非線形分子振動モード (Overtone モード) が励起されるが、Acoustic Overtone モデルによると、その周波数は ω の和 (2ω) で、対称性は既約表現の直積 ($\Gamma_\omega \otimes \Gamma_\omega$) として表される。これを表1を用いて計算すると、 $\Gamma_\omega \otimes \Gamma_\omega = 1_E + 1_{C_2} + 1_{\sigma_x} + 1_{\sigma_y}$ となって A_1 対称性が現れる。さらに解析を進めて三次の Overtone モードについて考えると、その周波数は 3ω 、対称性は $\Gamma_\omega \otimes \Gamma_\omega \otimes \Gamma_\omega = 1_E + 1_{C_2} - 1_{\sigma_x} - 1_{\sigma_y}$ となってもとの A_2 対称性へ戻る。こ

の操作は繰り返し続けることができるが、結果は二つの対称性の交代出現となる。すなわち、奇数次の Overtone モードでは ω の係数が奇数で対称性は A_2 となり、偶数時の Overtone モードでは ω の係数が偶数で対称性は A_1 となる。全く同様の解析は B_1 対称性と B_2 対称性を持つフォノンから出発しても成立する。一方、 A_1 対称性から出発すると直積は $\Gamma_\omega \otimes \Gamma_\omega = (1_E + 1_{C_2} + 1_{\sigma_x} + 1_{\sigma_y})$ となり、Overtone モードの対称性は ω の係数に依らず常に A_1 である。これより明らかに、Acoustic Overtone モデルを用いた非線形分子振動の対称性解析結果は、著者等の磁性点群に基づく解析結果と完全に一致する。この結果は、非線形共鳴振動理論と磁性点群によるその解析法の妥当性を裏付けるとともに、非線形分子振動現象の解析に磁性点群が有効であることを示唆している。

5. 準線形共鳴振動理論

(1) 基礎理論

上記の非線形共鳴振動理論では、金属材料の共鳴周波数が振動振幅依存性を持つことを予測しており⁽¹⁾、これを計測・逆解析すれば、原理的には全ての三次の弾性定数を決定することができる。しかしながら、実験で得られる共鳴周波数の振動振幅依存性は極めて微小であり、またこの理論は数値計算コストが高いため解析対象は二次元・等方弾性体に限定されている。そこで研究戦略を変更し、新しく作り直したものが準線形共鳴振動理論である⁽³⁾。この理論では、弾性体には外部から一様な静水圧が負荷されることを想定し、これによって生じる共鳴周波数の圧力依存性を計測・逆解析することで、三次弾性定数を求めることを基本戦略としている(実際、高圧下での共鳴周波数計測は可能である⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾)。

いま弾性体は $\Omega = \{x_i | -L_i < x_i < L_i, i = 1, 2, 3\}$ なる直方体形状を持ち、そのひずみエネルギー密度は式(3)で表されるとする。また、外部静水圧のポテンシャルエネルギーには Dead Load 条件を課し、全エネルギー汎関数を次のように修正する。

$$W[u_i] = \int_{\Omega} W dV - \int_{\partial\Omega} \langle g_i, u_i \rangle dA \quad (20)$$

ここで $\langle g_i, u_i \rangle$ は外力ベクトル g_i と変位 u_i の内積を表しており、その表面 $\partial\Omega$ 上での積分が外力のポテンシャルエネルギー変化となる。この修正項を発散定理を用いて体積積分に変換すれば、この弾性体の作用汎関数(式(6))には外力の効果 $g \operatorname{div} u_i$ が null Lagrangian として追加される。

(2) Ritz 法に基づく数値解析

準線形共鳴振動理論では、その数値解析において様々な工夫を施しているが⁽³⁾、ここでは計算コストの大幅な削減につながった変位関数の展開方法についてのみ説明する。この理論では、弾性体に生じる変位は角振動数 ω の調和振動と、外部静水圧によって生じる静的で一様な変位のみ限定し、変位関数を次の形式で近似する。

$$u_i = \alpha x_i + \sum_{s=1}^S a_{i,s} \phi_s(x_1, x_2, x_3) \cos \omega t \quad (21)$$

ここで右辺第一項が一様変位，第二項が調和振動項である． α は弾性体に生じる圧縮率に相当する． α 値は外部静水圧 g_i と体積弾性率 B によって定まるが， α と g_i の同時指定は構成式への干渉となるため， α は調和振動の係数 $a_{i,s}$ と同様に未知数とする． ϕ_s は完備系関数列を表すが，本研究では共鳴周波数の計算精度が高い次のルジャンドル多項式を用いる．

$$\phi_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2 L_3}} \bar{P}_{k_s} \left(\frac{x_1}{L_1} \right) \bar{P}_{l_s} \left(\frac{x_2}{L_2} \right) \bar{P}_{m_s} \left(\frac{x_3}{L_3} \right), \quad (22)$$

$$\bar{P}_s(x) = \sqrt{\frac{2s+1}{2}} \frac{1}{2^s s!} \frac{d^s}{dx^s} (x^2-1)^s. \quad (23)$$

式(21)で表された変位では，一様な体積変化項と調和振動項が非線形相互作用を起こし，その結果，共鳴周波数 ω が α に比例して(すなわち外部静水圧 g_i に比例して)変化する．無論， $g_i=0$ で得られる共鳴周波数 ω は従来の線形共鳴振動理論のそれと結果と一致しており，この意味で本理論は，従来理論の高圧領域への自然な拡張となっている．

この解析法の持つ二つの特徴について説明しておきたい．

第一は共鳴振動対称性である．外力 g_i による一様な体積変化 αx_i は全対称であり，これを先の点群 C_{2v} を用いて表現すると既約表現は A_1 ，時間依存性は $n=0$ (パリティは偶)である．一方，調和振動項 $a_{i,s} \phi_s \cos \omega t$ は A_1 から B_2 までの4つの既約表現を表現可能であり，その時間依存性は $n=1$ (パリティは奇)である．磁性点群に従うと，これら二種類の変位は重ね合っ一つの非線形振動モードを作ることができる．第二の特徴は，物性物理学における準調和近似との類似性である．この近似ではフォノンの振動数が体積に依存すると仮定し，その度合いをグリューナイズン定数によって表現している．弾性体の共鳴振動はフォノンの長波長極限に他ならず，したがって式(21)の変位は準調和近似に相当する．

(3) 数値計算結果とその検証

準線形共鳴振動理論を用いると，直方体形状を有した金属材料のサイズと密度，および二次と三次の弾性定数を設定することで，共鳴周波数とその静水圧依存性を計算することができる．参考のため，Mgの全対称共鳴振動モード (A'_g モード) に対して行った1次～4次まで共鳴周波数の圧力依存性を図5(a)に示す(この数値計算条件は次の通りである： $L_1=9.0$, $L_2=10.0$, $L_3=11.0$ (mm), $\rho=1.738$ (g/cm³), 基底関数の自由度は $\chi=8,234$, 弾性定数は文献(28)を参照)．この結果から明らかなように，共鳴周波数は圧力に対して線形に変化しており，その勾配は共鳴振動モードによって大きく異なる．残念ながら，共鳴周波数の圧力依存性が実験的に計測された材料は少なく，それを用いて本計算結果の定量的な検証を行うことはできない．そこで，グリューナイズン定数を利用して計算結果の間接的な検証を行うことにした．

一般に，角振動数 ω_i のフォノンのグリューナイズン定数 γ_i は次のように表すことができる．

$$\gamma_i = -\frac{d \ln \omega_i}{d \ln V} = -\frac{V}{\omega_i} \frac{d\omega_i}{dP} \frac{dP}{dV} = -\frac{d\phi_i}{d\omega_i} B \quad (24)$$

ここで $\phi_i = (d\omega_i/dP) \omega_i$ は準線形共鳴振動理論を用いて計算可能な共鳴周波数の圧力依存性であり， B は体積弾性率である．この関係式を用いれば，計算で得られた ϕ_i をグリューナイズン定数 γ_i へ変換することができる．そこで，Mgの1次から2400次までの共鳴振動モードについて γ_i を計算した結果を図5(b)に示す．図を見ると，低周波数側で γ_i は大きくばらつくものの，高周波数側では一定値へ収束する傾向が伺える．この収束値を決定するため，2400個の γ_i を次の関数で最小二乗近似した．

$$\gamma = \gamma^\infty + D_1 \exp\left(-\frac{\omega - \omega_0}{\tau_1}\right) + D_2 \exp\left(-\frac{\omega - \omega_0}{\tau_2}\right) \quad (25)$$

その結果，高周波数極限值として $\gamma^\infty=1.48$ を得た．

準線形共鳴振動理論によって得られた極限值 γ^∞ は，熱力学的な意味でのグリューナイズン定数 γ と解釈することができる⁽³⁾．そこで本研究では，Bruggerの方法⁽²⁹⁾を用いて主要な金属元素の γ を計算し，得られた結果を γ^∞ と比較した(図6)．この図は縦軸に準線形共鳴振動理論により得られた γ^∞ を，横軸に Brugger の理論により得られた γ をプロットしている．図中の実線は切片をゼロで固定した最小二乗近似直線であり，その勾配は約0.97となった．このように，元素によって γ と γ^∞ の間に若干の相違が認められるものの，両者の計算結果は概ね一致すると考えて良い．この結果は，準

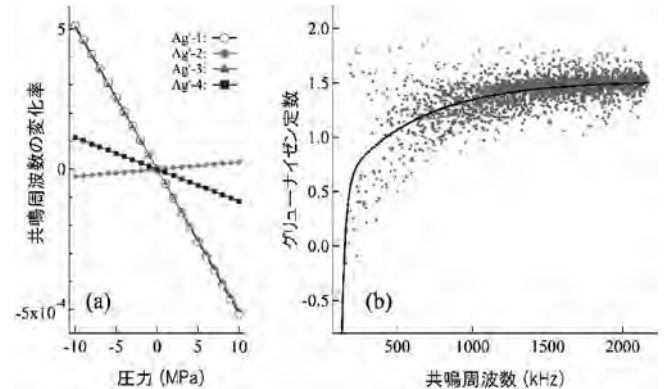


図5 Mg単結晶をモデルとした(a)共鳴周波数の圧力依存性，および(b)グリューナイズン定数の共鳴周波数依存性．

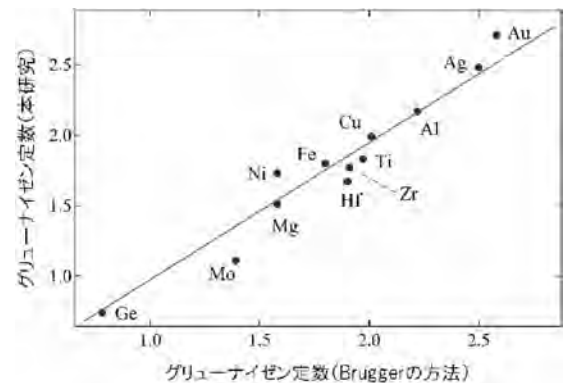


図6 本研究と Brugger の方法によって得られたグリューナイズン定数の比較．

測定の不確かさ評価について

—4. 不確かさの活用—

城野 克広*

はじめに

これまで4回に渡り、測定の不確かさについて解説しております。前回まで「不確かさとは何か」と「不確かさの算出手順」についてお話しして参りました。最終回である今回は「不確かさの活用」についてお話ししていきます。最後に、全体を振り返ることができるように、演習問題も準備しました。

4.1 拡張不確かさ

この連載の初回に以下のような問題を提起しました。

弊社にとりまして重要なお客様である山田様が来社されます。12時50分から13時10分の間に受付にいらっしゃる確率が95%とのこと。お待たせするわけには行きません。私の時計のずれが5分以内である確率は95%です。この時計で何時何分になるまでに昼ご飯を食べ終え、受付に行けば、95%以上の確率で山田様をお待たせせず済むでしょうか？

初回に述べたように、この数字からだけでは、答は分かりません。しかし、不確かさ評価で使われるいくつかの約束を用いることで、この問題に一応の解を与えることができます。

一番のポイントは3.2節でお話した「正規分布で、95%という確率と幅の大きさが分かっているときには、その半幅を2で割ると標準偏差になる」ということです。厳密には、上の情報には一切正規分布ということは示されていません。その一方で、誤差というものが正規分布しやすいということは3.2節でお話した通りです。このため、不確かさの評価では

95%の信頼の水準を持つ区間が与えられている場合、正規分布を用いることが多いのです。

山田様の来所時刻には、12時50分から13時10分という幅があります。この幅の半分である10分を2で割ったものは5分です。すなわち、山田様の来所時刻には13時ぴったりを中心として、5分の標準偏差を持つ正規分布に従うと考えることとなります。同じく、私が受付に着く時刻は時計の示す時刻を中心として、2.5分という標準偏差を持つ正規分布に従うと考えることとなります。

ここから、ちょっとややこしいので、じっくり考えてみてください。山田様が13時の X 分前に受付にいらっしゃると思います。私が受付に着く時刻は、時計の指す時刻が13時の Y 分前のときとします。一方で、そのときの正しい時刻は、13時の Z 分前とします。 X, Y, Z はプラスの値になることも、マイナスの値になることもあります。 $X = -2$ の場合は、山田様が13時2分にいらっしゃるということです。

もちろん、私が13時よりどれだけ早く着いたか(Z)が、山田様のそれ(X)よりも大きいならば、私は山田様よりも先に受付に着くこととなります。つまり、「 Z から X を引いたもの $=Z-X$ 」が、プラスになっていれば、山田様をお待たせしないということとなります。

山田様がいらっしゃる時刻は13時を中心にその前後です。私が受付に着く時刻は時計の指している時刻、つまり13時の Y 分前を中心に、その前後ということとなります。ですから、私と山田様の受付への到着時間の差の平均は Y 分ということとなります。例えば、時計が12時58分を指しているときに私が受付に到着するならば、到着時刻の差は平均としては2分ということ。すなわち、「 $Z-X$ 」の平均は Y なのです。さて、標準偏差はどうでしょう。

ここには2つの不確かさの要因があります。2.1節で述

* 産業技術総合研究所；物質計測標準研究部門主任研究員(〒305-8565 つくば市東1-1-1)
 Things about Measurement Uncertainty —4. How to Applicate It?—; Katsuhiro Shirono(National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Tsukuba)
 Keywords: *Uncertainty, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*
 2014年12月10日受理[doi:10.2320/materia.54.462]

べたように、こういうときには、「2乗して足す」ということを思い出して下さい。すなわち、山田様の到着時刻の標準偏差5分と、時計の時刻のずれの標準偏差の2.5分を2乗して足して、正の平方根を取ります。これは、およそ5.6分ということになります。

「 $Z-X$ 」の分布を正規分布とすると、その中心は Y 、標準偏差は5.6となります。図4.1(a)を見ると分かるように、 Y が9.2のとき、「 $Z-X$ 」がマイナスになる確率は5%ということになります。

詰まるところ、私は13時の9.2分=9分12秒前、つまり12時50分48秒より前に受付に行けば、山田様をお待たせしない確率が95%以上となるわけです。不確かさのルールをうまく使うことで、まずまず納得感のある解にたどり着くことが出来たと言ってよいのではないのでしょうか。

この例でもそうであるように、不確かさを使って何かを知りたいとなると、ある確率に対応するずれを知りたいということになるのではないのでしょうか。今回は95%という確率に対応するずれである9分12秒という値を知りたいという問題だったと考えることもできます。

このようなことを見込んで、確率と結び付けられたずれのことを**拡張不確かさ**と呼びます。大抵の場合、その確率は90%とか、95%とか、99%という100%に近い大きな確率となります。(もっと言うと、ほとんどの場合は95%ですが…それについては次節にて。)ですから、拡張不確かさは標準偏差よりも大きな値になります。

今回の場合、図4.1(a)に見るように、「ゼロ～無限大」という区間と95%という確率に対応しています。これはこれで、一応成立はしています。しかし、現実には平均を中心に左右対称の区間を考えたい場合が多いと言えます。今回の例でも、早く着きすぎて、昼ご飯の時間が削られるという損失も考えられます。図4.1(b)に「平均±9分12秒」という左右対称の区間を描きました。これは、左右のリスクを5%ずつ

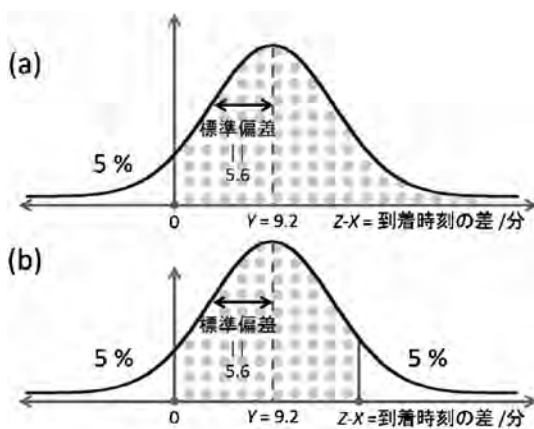


図4.1 時計の指す時刻が13時の9.2(= Y)分前の時、受付に着いたときの、私と山田様の到着時刻の差 ($Z-X$)の分布(正規分布を仮定)。(a)到着時刻の差がマイナスになる確率は5%。(b)9.2分±9.2分(0分から18.4分)の間に90%の値が含まれている。

考慮し、90%の確率に対応した区間となります。拡張不確かさが左右対称の場合、「拡張不確かさは9分12秒である」という言い回しをよくします。

ちなみに、標準偏差に対応する不確かさは**標準不確かさ**と呼びます。これまでは、標準偏差と不確かさというのは、同じようなものかのようにお話してきましたので、混乱させてしまうかも知れません。不確かさには計算に便利な標準不確かさと、活用を考えたときに便利な拡張不確かさがあります。また、標準不確かさと拡張不確かさの比(=拡張不確かさ/標準不確かさ)を**包含係数**と言います。

包含係数は、確率に応じて変わります。一方で、実のところ、95%という確率に対応して、包含係数は2とすることが極めて多いと言えます。この理由は次節で説明します。

4.2 技能試験と不確かさ

不確かさを何に使うかの一例は4.1節でお示しましたが、ちょっと現実味のない応用でした。きちんとしたものをご紹介しましょう。もっとも重要な応用は、**技能試験**でしょう。技能試験とは、ある測定機関の測定した値と、別の測定機関が測定した値が同じ値になっているかどうかを確認することです。この測定は、同一の測定対象物に対して行われるものです。(図4.2)

測定の精度管理には、内部精度管理と外部精度管理があると言われます。内部精度管理とは、測定機関の内部のみで完結する精度管理のことです。例えば、測定マニュアルを整備したり、測定者の教育・研修を行ったりすることです。値がよく分かっている測定対象(標準物質)を測定することで、自分の測定方法の妥当性を確認することも含みます。

一方の外部精度管理は、技能試験の結果に基づいて、測定プロセスを改善する管理の仕方です。内部精度管理において標準物質を使ったのとは異なり、技能試験では値がよく分からないものと比較することが前提にあります。このため、より実物に近い測定対象について、測定パフォーマンスの評価が可能になります。

話そのものは、単純かと思います。同じものを、違う人が測って同じになれば、うまく行っているような気がしますし、そうでなければうまく行っていない気がします。ただ、その評価をするときに、「どの程度、値がそろっていたらうまく行っていると言えるのか?」という問題があります。この場面で、不確かさを使うというわけです。

典型的な技能試験の形態の一つは、2試験所間の比較です。このとき、ある測定機関の実力的の方が、もう一つの測定機関の実力よりも高いことが想定して行います。この技能試験は、実力が低いとされる機関のために実施されるということになります。実力が高いとされる測定機関の測定値を X_{ref} 、評価対象の測定機関の測定値を X_{lab} とします。 X_{ref} と X_{lab} の95%の確率に対応する拡張不確かさを U_{ref} と U_{lab} とします。つまり、「 $X_{ref} \pm U_{ref}$ 」および「 $X_{lab} \pm U_{lab}$ 」という区間が、それぞれに95%という確率に対応するというこ

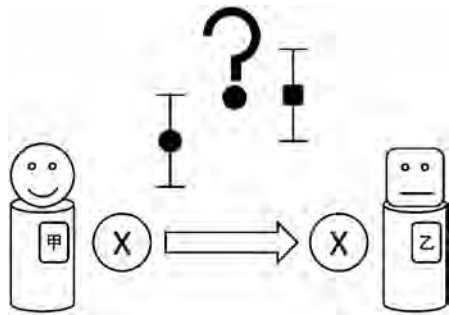


図4.2 技能試験では、同じものを別の機関で測定したときの結果から、測定のパフォーマンスを確かめる。瓶に小分けした試料など、厳密に同じものではなく、同じ値が出ると思われる試料を配布して、一斉に測定することもある。

です。

これらの値を用いて、以下の E_n 数と呼ばれるスコアを計算します： $E_n = (X_{lab} - X_{ref}) / \sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}$ 。測定機関の認定の分野では、 E_n 数の絶対値が1以下であれば、この技能試験における測定機関のパフォーマンスは「満足」であるというのが、一定の基準となっています⁽¹⁾。1を超えた場合には、「不満足」と評価されます。記号がたくさん出てきてしまって申し訳ありませんが、よく見てみれば、計算はそれほど複雑なものではないと思います。

ここで言う「満足」というのは、もちろん、不確かさが十分に小さいという意味ではありません。決定した不確かさの評価と、実際の測定の結果のかい離が妥当な範囲で、測定プロセスがよくコントロールされているということです。実際に、十分に小さい不確かさかどうかは、定量化された不確かさの大小から直接に判断することになります。

技能試験は、様々な団体で実施されています[†]。ただし、不確かさを使わない技能試験の評価方法もあり、そちらの方がよく行われているというのが現状です。不確かさの情報をうまく使った技能試験データの解析は、現在進行形の研究課題とも言えます。

4・1節に述べた95%という確率に対応して、包含係数を2とすることが極めて多いのは、測定の不確かさを活用する先が、事実上、技能試験であるためだと思います。技能試験では95%の拡張不確かさ以外は使われらないと言ってよいでしょう。

4.3 許容差と不確かさ

不確かさの活用ということを考えると、必ず出てくる話題が、許容差と不確かさの関係です。

[†] 読者の皆様が関連しそうなもので、民間の認定団体が主催する技能試験のWebサイトを紹介しておきます：公益財団法人日本適合性認定協会 技能試験の提供、http://www.jab.or.jp/service/proficiency_testing/ (2014年12月1日最終確認)。金属の化学分析、硬さ試験、引張試験の技能試験を提供しています。ただし、これらの技能試験では、不確かさを使わない評価方法が行われています。不確かさの妥当性確認は各自行うということになるでしょう。

例えば、あるせんべい屋で、一袋100gのせんべいを売ることを考えます。このとき、実際の一袋の内容量は95g~105gに入るように管理したいとします。許容差というのは、狙いの100gからどのくらいずれていてもよいかという値のことです。この場合の許容差は5gです^{**}。

さて、普通の人には、はかりにせんべいを乗せたときの表示値が95g~105gに入っているものを100gと称して売れば、狙い通りの品質管理ができていると考えることでしょう。しかし、ここまでこの入門講座を読み進められてきた皆様には、違う考えをお持ちであって欲しいところです。

皆様に目を付けていただきたいのは、はかりが示した値がずれているかも知れないということです。はかりが示した値が本当の値からどのくらいずれているか？これが、測定の不確かさです。図4.3に示す通り、不確かさを考えると、はかりの表示値のみに着目しても、狙い通りの品質管理ができないのです。

この問題については、色々なアプローチが可能です。しかし、もっともシンプルなのは、許容差に対して、不確かさが無視できるほど小さいという状況を考えることです。不確かさがほぼゼロとみなせるならば、はかりの表示が95g~105gのときに、そのせんべいを一袋として売れば、ほぼ狙い通りの品質管理ができていると言えましょう。

すると問題は「不確かさが許容差よりどのくらい小さければ、無視できるほど小さいと言えるか？」ということになります。ここに私なりの結論を述べましょう。それは、ケタ違いに小さい、つまり、10倍小さければ、無視できるということです。今回の場合、許容差が5gですから、測定の標準不確かさが0.5gより小さければ、無視してよいということです。

この問題について述べた文書で有名なものには、ANSI (米国国家規格協会)/NCSL Z 540.3⁽²⁾があります。その中で

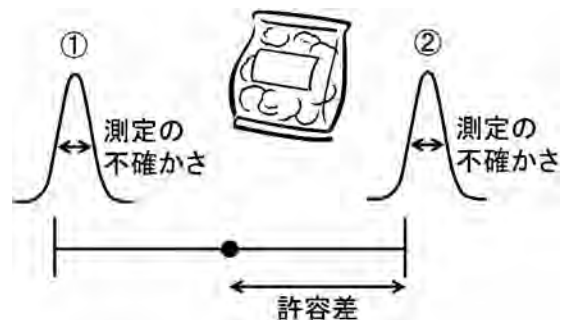


図4.3 許容差と不確かさの関係。平均が許容差の範囲内でも、測定の不確かさのために、測定値は許容差外にはみ出してしまふことがある(①)。逆に、平均が許容差の範囲外でも、測定値が許容差内に入ってしまうこともある(②)。このような誤りを無視できる不確かさとは？

^{**} せんべいを例にしておきながら何ですが、これは日本の商品量目制度とは何の関係もない話だということは、悪しからずご了承下さい。

は、「許容差」と「測定のずれ」が4対1くらいの関係であればよからうということが書いてあります。この4対1を導くのに、厳密な数字に基づいた検討があったとは思えません。むしろ、このくらいが現場の相場感として、納得のいくものなのだろうと理解しています。

ANSI/NCCL Z 540.3を理解するためのハンドブック^③によれば、「測定のずれ」は95%の信頼の水準に対応する区間と言いかえられます。正規分布を想定するならば、標準偏差の2倍ということですね。つまり、許容差と測定の標準不確かさの2倍の比が4対1ならば、不確かさは無視して良いと解釈できそうです。ということは、許容差が測定の標準不確かさの8倍が目安になるということです。私としては、8も10も変わらんだろうし、きりがよいという理由で、10倍と考えています。かなり大ざっぱな話なので、より厳密に扱いたい方はANSI/NCCL Z 540.3やハンドブックにあたることをお勧めします。

ただし、ANSIはアメリカ合衆国の規格であり、国際規格でも日本の規格でもありません。この許容差と不確かさの問題に関しては、今後、不確かさの普及に伴って、研究やルール作りが進んでいくようにも思います。実際の測定をされている皆様、測定されたモノを使っている皆様に、それぞれの場で適切な不確かさの使い方というものを、是非ご提案していただきたいと思っています。

4.4 おわりに

ようやく、この入門講座のゴールです。ここまでお付き合い下さりありがとうございました。なるべく平易に解説するよう努めたつもりではありますが、分からない部分もあると思います。特に、専門外であるために、金属の測定の具体的なお話は全くできませんでした。ご質問などありましたら、直接筆者(k.shirono@aist.go.jp)にご連絡下さい。

最後に、全体を通した事例のご紹介をしていないので、下に演習問題を付します。ちょっと難しいですけども、前号までの内容もご覧になりながら、ご確認ください。

演習問題

ばねの伸びから物体Xの質量を測定し、その不確かさを求める。下の(A)～(E)に入る数値を答えよ。ただし、最終的に2桁の不確かさを報告するため、途中の計算では3桁を残している。

使用するばねについて、伸び1cm当たりの質量は、97g～103gの範囲であると分かっている。このばねを用いて、物体Xを3回吊りし、伸び3.80cm, 4.00cm, 4.20cmを得た。

ばねの伸びを質量に変換する係数(伸び1cmあたりの質量)は97g/cm～103g/cmである。この係数について、他の

情報がないため、100g/cm±3g/cmの一様分布を考える。係数の値100g/cmに対して、標準不確かさは3/(A)g/cm=1.73g/cmと定まる。

ばねの伸びの平均値は4.00cmである。3回の測定結果の平均値からのずれは、-0.20cm, 0.00cm, +0.20cmである。これらのずれの2乗和を(測定回数-1)の2で割って、正の平方根を取った0.200cmは一つの測定値の標準偏差である。平均値の標準偏差はこの0.200cmをさらに(B)で割ったもので、0.115cmとなる。

伸びと質量の変換係数100g/cmとばねの伸びの平均値4.00cmを掛け、測定対象量である物体Aの質量の測定値400gが求まる。変換係数に対する感度係数は4.00cmである。これを標準不確かさ1.73g/cmに掛けて得られる6.92gは、物体Xの質量の不確かさの1つの要因となる。また、ばねの伸びの平均値に対する感度係数は(C)g/cmである。これを標準不確かさ0.115cmに掛けて得られる11.5gは、同じく、物体Xの質量の不確かさの1つの要因となる。

ここに、2つの不確かさ要因があり、その標準不確かさは6.92gと11.5gである。測定対象量である質量の標準不確かさは、これらを(D)乗して、足して、正の平方根を取ったものである。これを計算すると13.4gとなる。

この測定対象量の値の分布は厳密には複雑なものである。しかし、それを正規分布に近似するならば、標準不確かさ13.4gを(E)倍して、およそ95%の信頼の水準に対応する拡張不確かさを26.8gと求めることができる。最終的な不確かさの報告は多くても2桁で十分であるから、3桁目を四捨五入し、27gとする。

以上のことから、物体Xの質量の測定値は400g、その95%の信頼の水準に対応する拡張不確かさは27gと報告する。(完)

文 献

- (1) JIS Q 17043:2011, 適合性評価―技能試験に対する一般要求事項。
- (2) ANSI/NCCL Z 540.3:2006, Requirements for the calibration of measuring and test equipment.
- (3) NCCL International, Handbook for the application of ANSI/NCCL Z 540.3-2006—Requirements for the calibration of measuring and test equipment, (2009).



城野克広

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 2007年 東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了
 2009年 産業技術総合研究所 研究員
 2013年3月・現職
 専門分野: 不確かさの評価の技術開発・比較試験の統計処理
 ©活動内容などは下記 Web サイトをご覧ください。
 (<https://staff.aist.go.jp/k.shirono/>)
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

解答 A: $\sqrt{3}$, B: $\sqrt{3}$, C: 100, D: 2, E: 2

水蒸気による複合酸化物の促進固相合成 —グリーン・プロセッシングの新提案—

小澤 隆 弘*

1. はじめに

非金属無機材料であるセラミックスは、鉄などの金属材料、プラスチックなどの有機高分子材料と並んで、現代社会の発展にとって必要不可欠な工業材料である。セラミックスは古くから美術工芸品や陶磁器として親しまれ、最近では、その特有の耐熱性、電氣的絶縁性・半導性、誘電性、化学的安定性などの性質から、電気、光学、医療、エネルギー、環境など多岐に渡る分野で利用されている。

セラミックス、特に複合酸化物の粉体合成法としては、高温下でのイオン拡散を利用した固相反応法が広く用いられている。固相反応法では、酸化物や炭酸塩などの原料粉体を混合し、高温で焼成することにより、目的組成の複合酸化物粉体を得ることができる。この手法は液相あるいは気相からの合成法と比較して、安価で簡便なことから、研究室規模での少量多品種合成法として、あるいは工業的規模での大量合成法として利用されている。しかし、固体内でのイオン拡散は一般に非常に遅く、反応の律速段階となる。そのため、イオンの固体内相互拡散を加速させるためには高温、長時間での焼成が必要となる。したがって、固相反応法はエネルギー消費の大きな合成プロセスと言える。また、このような焼成条件下では合成粒子の粗大化や凝集を引き起こし、粉体合成以後のセラミックス製造プロセスにおいて多大な影響を及ぼす。そのため、固相反応プロセスにおける焼成温度の低温化が望まれている。

固相反応を促進させ、焼成温度を低温化させるアプローチとして、原料粉体の微粒子化(イオンの拡散距離の減少)⁽¹⁾⁽²⁾、表面活性化(表面エネルギーの増大)⁽³⁾⁽⁴⁾、混合粉

体の均質化(反応接触点の増大)⁽⁵⁾が行われている。これら原料粉体からの低温化アプローチに対し、著者らは固相反応場に着目し、焼成雰囲気から焼成温度の低温化を試みた。固相反応による複合酸化物粉体の合成は、金属イオンの価数制御を必要とする場合を除き、多くは大気雰囲気下(空气中、1気圧)で行われる。そのため、空気中に含まれる成分でありながら、反応場に存在する水蒸気を考慮する機会は少ないのではないだろうか。著者らはあえて固相反応場に多量の水蒸気を導入し、1気圧の水蒸気雰囲気下で複合酸化物粉体の合成を行ったところ、空気中での焼成と比較して、固相反応が大幅に促進されることを見出した⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。

金属材料分野では水蒸気酸化として敬遠される水蒸気であるが、セラミックス分野では有用な焼成雰囲気となり得る可能性を秘めている。本稿では、これまでに得られた水蒸気による複合酸化物粉体の反応促進効果について紹介する。なお、詳細な反応機構は解明されていないものの、水蒸気が高温下での固体内あるいは固体間での反応に影響を及ぼしていることを鑑み、本論文では「水蒸気固相反応法」と命名し、簡便なグリーン・プロセッシング(低環境負荷型合成法)として利用されるよう提案する。

2. 水蒸気固相反応法

図1に実験装置の概略図を示す。本装置は大きく3つに分けられ、水を供給する送液ポンプ、供給された水を水蒸気に変換する蒸発器、固相反応を行う管状炉で構成される。本研究では、水(水蒸気)の流通経路は送液ポンプから管状炉まで1本のステンレス鋼製の細管で繋がっており、蒸発器で加熱された水蒸気が直接管状炉内に導入される仕組みとなっ

* 大阪大学接合科学研究所; 助教(〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘11-1)
Accelerated Solid-State Synthesis of Complex Oxides by Water Vapor -A New Proposal for Green Processing-; Takahiro Kozawa (Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Ibaraki)
Keywords: water vapor, solid-state reaction, complex oxide, ceramic powder, accelerated synthesis, green processing
2015年2月19日受理[doi:10.2320/materia.54.466]

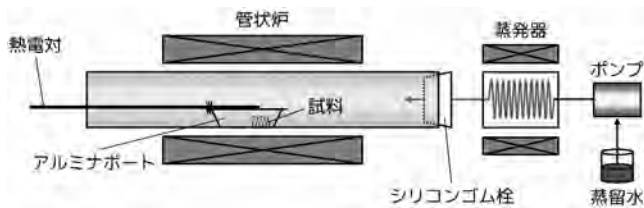


図1 実験装置概略図.

ている．そのため，キャリアガスは不要となり，管状炉内を1気圧の水蒸気雰囲気にする事ができる⁽⁶⁾⁽⁷⁾．また，水蒸気分圧を制御する際には，管状炉手前の構成を変更し，空気などのキャリアガスを恒温槽内の水中でバブリングさせ炉内に導入することで，所定温度下での飽和水蒸気圧に設定することができる⁽¹⁰⁾．このように，実験装置自体はシンプルであるため，既存設備への適用が容易に行えることも本手法の特長の一つである．

3. ケイ酸カルシウムの低温合成

ケイ酸カルシウム(CaSiO_3 , Ca_2SiO_4)はセメント原料や耐火断熱用ケイカル板として使用される重要な複合酸化物である．本章では， CaCO_3 と非晶質 SiO_2 を原料粉体に用いた Ca_2SiO_4 の固相合成⁽⁶⁾について紹介する．

CaCO_3 と非晶質 SiO_2 の原料粉体はボールミルにより，6 hの乾式混合を行った．得られた混合粉体は図1に示した実験装置を用いて，空気中および水蒸気中で2 h焼成した．図2に600°Cから800°Cまでの各焼成温度で得られた生成物の粉末X線回折(XRD)パターンを示す．空気中での焼成では，600°Cから目的の Ca_2SiO_4 が生成したものの，原料の CaCO_3 に起因する回折ピークが700°Cまで残存した．単相の Ca_2SiO_4 粉体を得るためには，焼成温度800°Cが必要であった．一方，水蒸気中では，単相の Ca_2SiO_4 粉体が650°Cの焼成で得られた．反応場に水蒸気を導入するだけで， Ca_2SiO_4 粉体の合成温度を150°C低温化させることができた．また，両雰囲気下で合成された Ca_2SiO_4 粒子の比表面積換算径はどちらも約140 nmであり，空気中焼成と同等の粉体が，水蒸気中ではより低温で合成できることがわかった．

図2より，原料の CaCO_3 と生成物の Ca_2SiO_4 の回折ピーク強度比を比べると， CaCO_3 の分解が水蒸気中では低温から進行していることが示唆された．そこで， CaCO_3 の熱分解反応に対する水蒸気の影響を調査した．図3には，650°Cにおける空気中および水蒸気中での CaCO_3 の分解率を示す．分解率はXRD分析による CaCO_3 の(104)および CaO の(200)回折線の積分強度比から半定量的に算出した．その結果，空気中では約9 hで CaCO_3 が CaO と CO_2 に分解したのに対し，水蒸気中ではわずか2 hで分解が完了した．したがって， CaCO_3 の分解が水蒸気によって促進され，短時間で CaO を生成することが示された．水蒸気雰囲気下での CaCO_3 の熱分解促進機構について，Wangらは CaCO_3 に吸

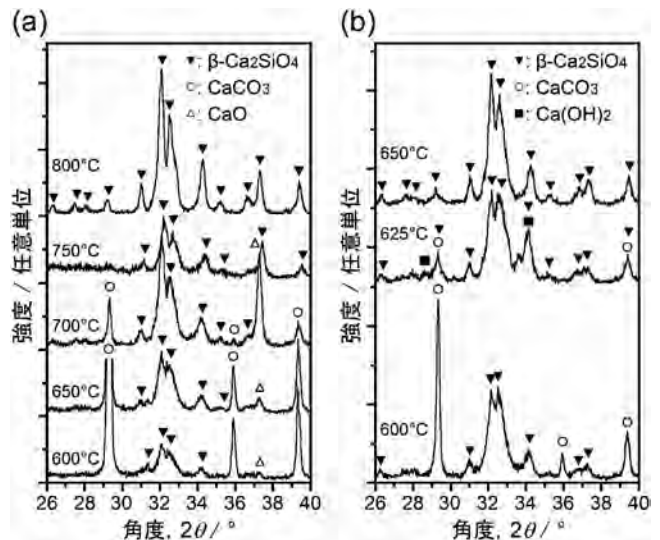


図2 生成物のXRD測定結果($2\text{CaCO}_3\text{-SiO}_2$, 2 h) : (a) 空気中, (b) 水蒸気中.

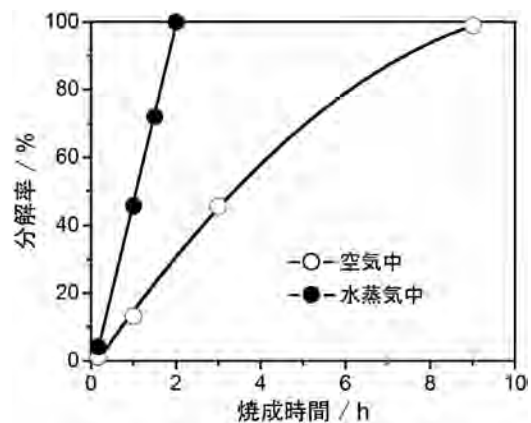


図3 650°Cにおける CaCO_3 の分解率.

着した水蒸気が Ca-CO_3 結合を弱めると示唆している⁽¹¹⁾．また最近では，小嶋らも水蒸気含有空気の通気による CaCO_3 の脱炭酸促進を報告しており，その反応速度と水蒸気量との関係を見出している⁽¹²⁾．

CaCO_3 の熱分解が水蒸気によって促進されたことで，引き続き SiO_2 との固相反応による Ca_2SiO_4 の生成が低温から生じたと考えられる． Ca_2SiO_4 の他， CaSiO_3 の固相合成においても水蒸気による促進効果が認められ，水蒸気量の増大とともに CaSiO_3 の生成が加速されることを報告している⁽⁹⁾．また，カルシウム以外のアルカリ土類ケイ酸塩の固相合成についても同様に，水蒸気による生成促進効果を見出している．

4. BaTiO_3 の低温合成とその生成促進機構

本章では，機能性材料の一つである BaTiO_3 の低温固相合成について示す． BaTiO_3 は誘電体材料の代表的な複合酸化物

物であり、共沈法や水熱法などの溶液法により高品質な粉体が合成されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかし、廃液処理や多段階でのプロセスから、より環境負荷の小さな合成プロセスの構築が求められている。そのため、水蒸気固相反応法により低温、短時間でBaTiO₃粉体が合成できれば、その工業的価値は大きいものと考えられる。そこで、水蒸気雰囲気下でのBaTiO₃の固相合成を行い、水蒸気による生成促進効果を検証した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

BaCO₃およびルチル型TiO₂を原料粉体として使用し、これら原料粉体はボールミルで乾式混合した。得られた混合粉体の走査型電子顕微鏡(SEM)写真を図4に示す。各原料粉体のSEM観察では、BaCO₃は長さ3 μm程度の柱状粒子、TiO₂は数百nmの微粒子であった。ボールミルによって得られたBaCO₃-TiO₂混合粉体中には、BaCO₃柱状粒子が残存している様子が観察され、均質性に乏しい試料であることがわかった。通常、このような不均質な混合粉体は固相反応に不向きとされているが、本研究ではこのBaCO₃-TiO₂混合粉体を用いて、BaTiO₃の固相合成に及ぼす水蒸気の影響を検討した。

750°C、2 hの焼成において、空气中、N₂フロー中、水蒸気中で得られた各生成物のXRDパターンを図5に示す。空气中およびN₂フロー中では、ほぼ原料に起因した回折ピークが検出され、BaTiO₃の生成はごく僅かであった。一方、水蒸気中での焼成ではBaTiO₃がほぼ単相で得られており、

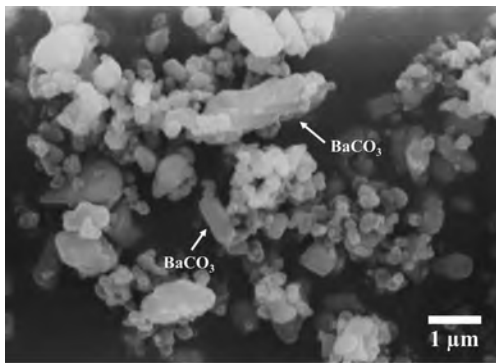


図4 BaCO₃-TiO₂混合粉体のSEM像。

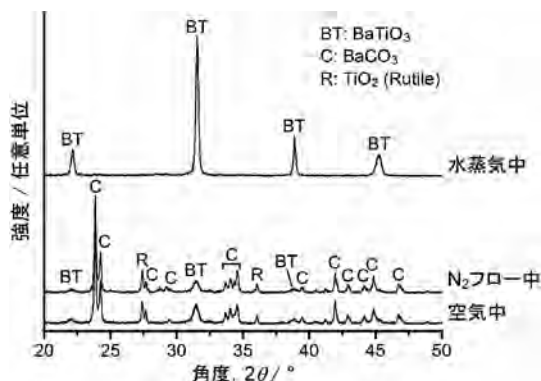


図5 生成物のXRD測定結果(BaCO₃-TiO₂, 750°C, 2 h)。

BaCO₃-TiO₂系の固相反応においても水蒸気が反応を大幅に促進させることを明らかにした。水蒸気促進効果を速度論的に解析するため、BaTiO₃の生成率を空气中および水蒸気中で比較した。図6に、XRDの内部標準法によって算出した各焼成条件下でのBaTiO₃の生成率を示す。空气中での焼成では、750°C、12 hの焼成において生成率は50%未満であり、未反応の原料が多量に残存した。一方、水蒸気中での焼成では、650°Cの比較的低温条件下であってもBaTiO₃の生成率は高く、水蒸気導入による反応促進効果が顕著に見られた。

各焼成条件下で得られたBaTiO₃の生成率から、種々の反応速度式 $f(\alpha) = kt$ (k : 速度定数, t : 焼成時間)を検討した結果、両雰囲気下とも、次式で示されるイオンの拡散を律速反応と仮定したValensi-Carter式⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾に最も適合することがわかった。

$$\frac{z - [1 + (z-1)\alpha]^{2/3} - (z-1)(1-\alpha)^{2/3}}{z-1} = kt \quad (1)$$

ここで、 z は反応物の単位体積あたりに生成した生成物の体積を、 α は生成率を示す。式(1)を適用し、アレニウスプロットから見かけの活性化エネルギーを算出したところ、空气中焼成では 361 ± 20 kJ/mol、水蒸気中焼成では 142 ± 17 kJ/molであった。水蒸気を導入するだけで、BaTiO₃の生成反応における見かけの活性化エネルギーが大幅に低下することがわかった。

固相反応によるBaTiO₃の生成を加速させる水蒸気作用として、著者らは次の4つの促進機構を提案している⁽⁷⁾⁽⁸⁾：
(i) BaCO₃の熱分解促進、(ii) Ba(OH)₂の生成と気相輸送、(iii) TiO₂粒子表面の結合切断、(iv) 空孔形成によるイオンの拡散促進。各促進機構についての詳細は文献を参照して頂き、本稿では(ii)および(iii)に関する水蒸気作用について示す。

まず、水蒸気雰囲気下での気相輸送について述べる。多くの固相反応過程において、酸化物の蒸発や蒸気圧の高い水酸化物の形成により、それらが気相を介して反応物に輸送されることが知られている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。本研究では、図4に示した不均質な混合粉体を使用したにも関わらず、単相のBaTiO₃が水蒸気の導入により低温、短時間で得られている。そのた

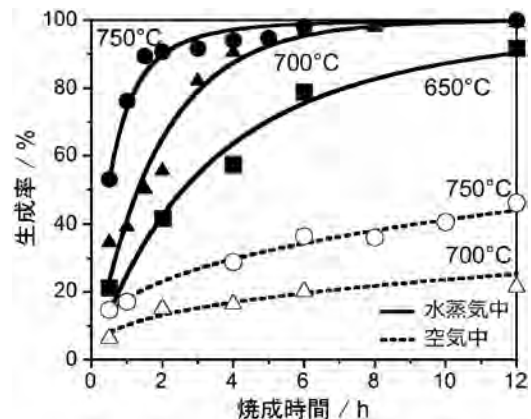


図6 各焼成条件下におけるBaTiO₃の生成率。

め、気相を介した物質移動による反応接触点の増加が水蒸気雰囲気下で起きている可能性がある。そこで、BaCO₃の熱分解によって生じるBaOが雰囲気中の水蒸気と反応し、Ba(OH)₂を形成すると仮定する。1気圧(0.1 MPa)の水蒸気雰囲気下におけるBa(OH)₂の蒸気圧を計算したところ、800°Cでは9.2×10⁻⁷ MPa、1000°Cでは1.8×10⁻⁵ MPaであった。他のアルカリ土類金属水酸化物の蒸気圧と比較して、3-6桁高い値を示した。そのため、水蒸気雰囲気下では蒸気圧の高いBa(OH)₂が形成され、気相を介してTiO₂粒子表面へ輸送されると考えられる。

焼成時の気相輸送を実証するため、BaCO₃とTiO₂からなる2層のペレットを作製し、水蒸気雰囲気下で焼成を行った。図7に、焼成後のペレット外観写真と生成物のXRDパターンを示す。焼成後、TiO₂ペレット上に存在したBaCO₃はほぼ消失し、TiO₂ペレット側面やPt板上には堆積物が観察された。TiO₂ペレット側面に堆積した生成物のXRD分析から、少量のBa(OH)₂・8H₂Oが同定された。また、Pt板上の堆積物からはBaCO₃が検出された。Pt板上のBaCO₃はBa(OH)₂またはBaOが焼成後に炭酸化したものと考えられる。一方、空気中での焼成では、上部のBaCO₃ペレットが収縮するのみで、Ba(OH)₂に起因した回折ピークは検出されなかった。本実験から、水蒸気雰囲気下でのBa種の気相輸送を間接的に実証することができた。

次に、TiO₂粒子表面での反応を考える。水蒸気は酸化物粒子表面に吸着し、水酸基を形成させることが知られている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。つまり、TiO₂粒子表面では下記の反応が起こると予想される。



固相反応によるBaTiO₃の生成過程において、Ba²⁺やO²⁻イオンはTiO₂あるいはBaTiO₃構造内を拡散する⁽²¹⁾。そのため、TiO₂粒子上での表面水酸基の形成により、Ba²⁺やO²⁻イオンの拡散障壁は低下すると考えられ、実際に、水蒸気雰囲気下での見かけの活性化エネルギー低下に繋がったと推察される。

また、著者らは次のようにも考えている。ルチル型TiO₂は中心にTi⁴⁺イオンを配した酸素八面体が稜共有した結晶構造をとり、一方、BaTiO₃は酸素八面体が頂点共有したペ

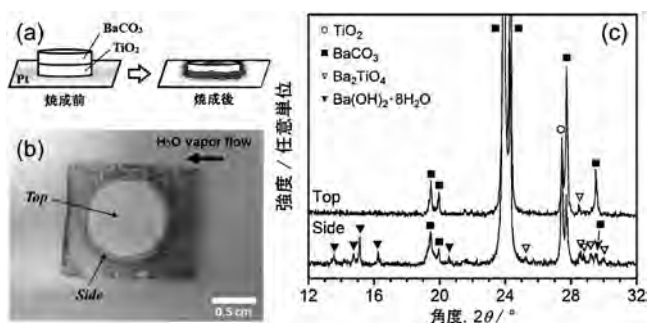


図7 水蒸気雰囲気下でのBaCO₃/TiO₂ペレットの焼成(800°C, 2h): (a) 焼成前後の模式図, (b) 焼成後の外観写真, (c) 焼成後のXRDパターン。

ロブスカイト構造をとっている。水蒸気による表面結合の切断により、TiO₂結晶構造内の酸素八面体は一時的に頂点共有となる。そのため、BaTiO₃への結晶再配列が水蒸気雰囲気下で進行しやすくなるのではないかと考えている。

(ii)や(iii)の促進機構では、雰囲気中の水蒸気が生成物であるBaTiO₃結晶構造内に取り込まれることが予想される。具体的には、蒸気圧の高いBa(OH)₂が形成される場合、TiO₂粒子上に輸送されるBaOの酸素の一部は雰囲気中の水蒸気酸素に由来する可能性がある。また、上記式(2)に示したように、一時的にTiO₂粒子表面上で形成された水酸基が結晶再配列に伴い、再び水蒸気として脱離する場合、水蒸気酸素がBaTiO₃結晶構造内に留まる可能性がある。そこで、同位体で置換されたH₂¹⁸Oを用いてBaTiO₃の固相合成を行い、構造内に取り込まれる¹⁸Oの同定を試みた。H₂¹⁸O蒸気中での焼成で得られたBaTiO₃の¹⁸O濃度を図8に示す。¹⁸O濃度は二次イオン質量分析計(SIMS)によって算出した。標識化されていないH₂O蒸気中で得られたBaTiO₃結晶構造内の¹⁸O濃度は、自然界に存在する¹⁸Oの存在比と一致した。一方、H₂¹⁸O蒸気中で得られたBaTiO₃構造内には多量の¹⁸Oが取り込まれていることを確認した。雰囲気中の水蒸気が固相反応を促進させ、さらには生成物中に取り込まれることを明らかにした。

著者らはBaTiO₃の生成を加速させる4つの促進機構を提案しているが、現時点においてどの反応素過程が大きく寄与しているかは未解明である。一方、第2章では炭酸塩の熱分解促進に伴うケイ酸カルシウムの低温合成を示したが、SiO₂への水蒸気作用もTiO₂と同様に起こる可能性があると考えている。水蒸気によるSi-O-Si結合の切断は古くから知られており⁽¹⁹⁾、ケイ酸塩の生成促進にも寄与すると推察される。個々の反応素過程の解析は今後必要であるが、雰囲気中の水蒸気が固体内、固体間に複合的に作用することで固相反応が促進され、低温、短時間で複合酸化物粉体が合成できると考えている。

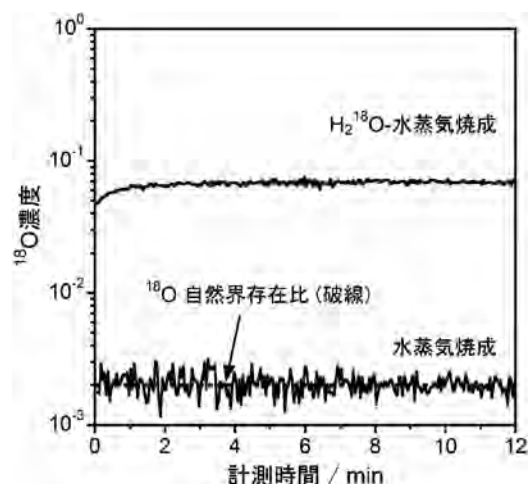


図8 SIMSによるBaTiO₃構造内の¹⁸O分析。

5. 水蒸気固相反応法の今後の展開

本稿で紹介したように、反応場に水蒸気を導入するだけで固相反応が加速され、合成温度の低温化が達成された。将来的には、高温下での水蒸気作用をより明確に捉え、水蒸気固相反応法でしか合成できない機能性材料の創出に繋げていきたいと考えている。特に、水蒸気雰囲気下での気相輸送や酸素の取り込みは、新材料創出の手掛かりになるのではないかと期待している。

加えて、高温下での水蒸気反応を利用した新しい粉体プロセス技術の開発にも取り組む予定である。これまで著者らは、形態制御された酸化物粒子の合成⁽²²⁾や有害廃棄物(フロン、アスベスト)の無害化⁽²³⁾⁽²⁴⁾に対して水蒸気導入を応用してきた。中でも、アスベスト含有廃棄物の無害化処理には固相反応を促進させる水蒸気作用を利用した。人体に有害なアスベスト(繊維状水和ケイ酸塩鉱物)とセメント成分との固相反応が水蒸気雰囲気下で促進されたことから、従来の熔融処理で要した1500°C以上の処理温度を800°C程度まで低温化させることに成功した⁽²⁴⁾。今後は、材料合成・変換や微細構造制御に対して水蒸気反応の可能性を拡げていく予定である。水蒸気固相反応場が新たなグリーン・プロセッシングとして認知され、広く利用されることを期待する。

最後に、本稿で紹介した一連の研究を遂行するにあたり、始終懇切丁寧な御指導、御鞭撻を賜った高知大学理学部附属水熱化学実験所 柳澤和道教授に厚く感謝の意を表します。また、大阪大学接合科学研究所 内藤牧男教授には、本研究に対して粉体工学の観点から御助言を頂き、粉体材料設計へ発展させる機会を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。またこの度、まてりあ「新進気鋭」に寄稿する機会を与えて頂いた関係者各位に深く感謝申し上げます。

本研究は、科学研究費補助金(特別研究員奨励費、挑戦的萌芽研究)、笹川科学研究助成、新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援を受けて遂行された。ここに記して謝意を示す。

文 献

- (1) D. F. K. Hennings, B. S. Schreinemacher and H. Schreinemacher: J. Am. Ceram. Soc., **84**(2001), 2777-2782.
(2) M. T. Buscaglia, M. Bassoli, V. Buscaglia and R. Alessio: J.

- Am. Ceram. Soc., **88**(2005), 2374-2379.
(3) L. B. Kong, J. Ma, H. Huang, R. F. Zhang and W. X. Que: J. Alloys Compd., **337**(2002), 226-230.
(4) Y. Yokogawa, M. Toriyama, Y. Kawamoto, T. Suzuki, K. Nishizawa, F. Nagata and M. R. Mucalo: Chem. Lett., **25**(1996), 91-92.
(5) M. T. Buscaglia, M. Bassoli, V. Buscaglia and R. Vormberg: J. Am. Ceram. Soc., **91**(2008), 2862-2869.
(6) T. Kozawa, A. Onda and K. Yanagisawa: Chem. Lett., **38**(2009), 476-477.
(7) T. Kozawa, A. Onda and K. Yanagisawa: J. Eur. Ceram. Soc., **29**(2009), 3259-3264.
(8) T. Kozawa, A. Onda and K. Yanagisawa: J. Eur. Ceram. Soc., **30**(2010), 3435-3443.
(9) T. Kozawa, K. Yanagisawa, A. Yoshida, A. Onda and Y. Suzuki: J. Ceram. Soc. Jpn., **121**(2013), 103-105.
(10) T. Kozawa, K. Yanagisawa and Y. Suzuki: J. Ceram. Soc. Jpn., **121**(2013), 308-312.
(11) Y. Wang and W. J. Thomson: Chem. Eng. Sci., **50**(1995), 1373-1382.
(12) 小嶋芳行, 芹沢玲央, 梅垣哲士: J. Soc. Inorg. Mater. Jpn., **21**(2014), 286-291.
(13) G. J. Choi, S. K. Lee, K. J. Woo, K. K. Koo and Y. S. Cho: Chem. Mater., **10**(1998), 4104-4113.
(14) H. Xu and L. Gao: J. Am. Ceram. Soc., **86**(2003), 203-205.
(15) R. E. Carter: J. Chem. Phys., **34**(1961), 2010-2015.
(16) J. R. Frade and M. Cable: J. Am. Ceram. Soc., **75**(1992), 1949-1957.
(17) A. Ubaldini, V. Buscaglia, C. Uliana, G. Costa and M. Ferretti: J. Am. Ceram. Soc., **86**(2003), 19-25.
(18) V. Buscaglia, M. T. Buscaglia, L. Giordano, A. Martinelli, M. Viviani and C. Bottino: Solid State Ionics, **146**(2002), 257-271.
(19) F. E. Wagstaff and K. J. Richards: J. Am. Ceram. Soc., **49**(1966), 118-121.
(20) K. J. D. MacKenzie: Trans. J. Brit. Ceram. Soc., **74**(1975), 127-134.
(21) A. Beauger, J. C. Mutin and J. C. Niepce: J. Mater. Sci., **18**(1983), 3041-3046.
(22) T. Kozawa, A. Onda, K. Yanagisawa, A. Kishi and Y. Masuda: J. Solid State Chem., **184**(2011), 589-596.
(23) K. Yanagisawa, T. Kozawa, A. Onda, M. Kanazawa, J. Shinohara, T. Takanami and M. Shiraiishi: J. Hazard. Mater., **163**(2009), 593-599.
(24) T. Kozawa, A. Onda, K. Yanagisawa, O. Chiba, H. Ishiwata and T. Takanami: J. Ceram. Soc. Jpn., **118**(2010), 1199-1201.



小澤隆弘

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2012年3月 高知大学大学院総合人間自然科学研究科
博士課程修了
2011年4月-2012年11月
日本学術振興会特別研究員(DC2, PD)
2012年11月 大阪大学接合科学研究所特任研究員
2014年4月 現職
専門分野: 材料科学
◎主にリチウムイオン電池用正極材料の合成や新規材
料合成プロセスの開発に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

談話室

研究室の立ち上げから 現在に至るまで

茨城大学准教授；
工学部マテリアル工学科 岩瀬 謙二

茨城大学工学部に異動して3年目を迎えたこともあり、研究室の立ち上げから現在に至るまで振り返るつもりで執筆することにしました。

茨城大学工学部は8学科(機械工学科, 生体分子工学科, マテリアル工学科, 電気電子工学科, メディア通信工学科, 情報工学科, 都市システム工学科, 知能システム工学科), 大学院理工学研究科博士前期課程は, 9専攻(理学専攻, 機械工学専攻, 物質工学専攻, 電気電子工学専攻, メディア通信工学専攻, 都市システム工学専攻, 情報工学専攻, 知能システム工学専攻, 応用粒子線科学専攻)で構成されています。私は学部ではマテリアル工学科, 大学院は物質工学専攻に所属しています。マテリアル工学科では今年度からJA-BEE認定を受け, 教育研究活動が活発になっています。工学部の教員組織は, 他の多くの大学とは異なる大講座制が用いられています。教員1人が1研究室を運営しますが, 採用されたばかりの若手教員は指導的な立場の教授と共同で研究室を運営する学科もあります。私が工学部に赴任した当時は, ゼロから研究室を立ち上げたため, 苦労したことが懐かしく感じられます。

研究室での教育活動について, 1年目からこれまでの変化を振り返ってみたいと思います。1年目は学部4年生3人でスタートしました。同じ学科の先生の協力もあって, 机, パソコンを準備し学生居室が4月に整いました。薬品登録や実験室分電盤の工事等があり, 実験室の整備が7月に始まりました。8月中は実験装置の立ち上げに集中し, 9月から実験が可能な環境が整いました。学部と大学院の授業準備も重なり, 忙しい毎日が続いていたように感じます。2年目は修士課程1人, 学部4年生3人でスタートしました。1年目の反省を踏まえ, ゼミの内容を変更しました。研究発表および議論に時間を割くようにしました。各学生のスキルアップは感じていましたが, まだまだ改善点が多いことが分かりました。3年目は修士課程4名, 学部4年生2名でスタートしました。ゼミの内容を改善し, 物事を深く考え自らの考えで行動できる人材育成を主目的にしました。教科書としてアカデミックスキルズ(佐藤望等, 慶應義塾大学出版会)を用い, グループワーク, 情報の探し方・整理の仕方, 文章の書き方, プレゼンテーションの方法等のスキルアップ向上に努めました。企業出身のコーディネーターの協力によって, 就職活動から就職後に至るまでのキャリア教育についての講義も実施しました。新たな取り組みによって, 学生自身が反省・自己分析し見違えるような顔つき, 生活態度に変化しました。数ヶ月程度の取り組みでこれ程学生が変わるとは予想し



図1 高周波誘導溶解実験の様子。

ていなかったため, 指導教員としては嬉しい誤算です。

次に研究活動について紹介したいと思います。岩瀬研では金属材料の特性と構造・組織との相関に注目した研究を展開しています。具体的には, 1. 水素吸蔵合金の水素吸蔵放出過程における結晶構造変化と吸蔵放出特性について, 2. 強塑性加工によるAl合金の組織変化と力学的特性について, をテーマにしています。水素吸蔵合金は, 希土類-Ni系超格子合金を研究対象にしています。これまで $RNi_{3-3.8}$ ($R=La, Pr, Nd, Gd$)の二元系合金に注目してきました。水素吸蔵放出過程の結晶構造変化を明らかにするために, X線・中性子その場観察測定(In-situ測定)を中心に研究を展開してきました。水素吸蔵放出過程を回折実験によって捉え, 幾つかの新規水素化物相を発見するに至りました。Al合金の研究については, 強塑性加工としてECAP(Equal-Channel Angular Pressing)を用いています。加工後の力学的特性変化に注目し, 引張試験中の格子ひずみや組織変化をIn-situ中性子散乱によって研究しています。どちらのテーマも合金溶解(図1参照)→特性評価→構造・組織解析に至るまで一貫して実施しています。高周波誘導溶解による試料作製は, 材料研究の最初の一步であるため, 重要であると考えています。地の利を活かして, 近隣の東海村J-PARCの中性子ビームを利用した実験も展開しています。水素吸蔵合金に吸蔵された水素の原子位置や引張試験中のAl合金内部の格子ひずみ測定にはとても有効な実験手法です。

大学は教育と研究を展開する場です。今まで述べてきたような学生のスキルアップや普段の過ごし方の意識を変化させることが物事を深く考え自らの考えで行動できる人への近道であり, 良い研究成果へ繋がると信じています。研究室の学生は卒業研究や修論研究を行い, 研究成果を求められます。今後は人材育成と研究成果の両立を目指した研究室を展開していきたいと考えています。

今回の執筆依頼により, 異動後の自分を振り返る良い機会が得られたことに感謝します。

(2015年6月18日受理)[doi:10.2320/materia.54.471]

(連絡先: 〒316-8511 日立中成沢 4-12-1)

ランチョンミーティングの紹介 —金属材料分野での多様なキャリアパス—

2015年3月20日(金)

東北大学金属材料研究所；特任准教授

梅津理恵

男女共同参画委員会では、日本金属学会、日本鉄鋼協会合同で、2006年3月の春期・春季大会において、学会期間中の託児室設置を開始し、2007年3月より共同で委員会活動を行うようになりました。その後、シンポジウムの開催、「女子高生夏の学校」に参加等、金属材料分野で男女ともに活躍できる環境を作るための活動も行っています。委員会は年に2回、学会期間中に開催し、現在、日本鉄鋼協会から7名、日本金属学会から13名の計20名で構成されています。ランチョンミーティングは2009年3月より春期・春季大会の最終日の昼休みに開催してきており、金属・材料工学を学び、様々な分野の企業や大学で仕事をする先輩方にキャリアの積み方、プライベートと仕事の両立などについて講演をお願いします。「金属材料分野での多様なキャリアパス」と題したこの会も、2015年春期・春季講演大会で第7回目となり、今までに9名の講師をお呼びしてきました。今回は、TMS Young Leaderとして金属学会に参加したワシントン州立大学・Associate Prof. Qizhen Li(タイトル“Women Scientists and Engineers in USA”)とエイチシースタルク社・テクニカルマーケティング・アジア・マネジャーの宮下直子氏(“Strength as being a Female Workforce in Technical Field—Personal point of view”)のお二人に講演をして頂きました。

Dr. Liは中国で修士号を取得後に博士課程進学の際に渡米。オハイオ州立大学で材料工学の分野で博士の学位を取得後、ノースウェスタン大学で博士付研究員、ネバダ州立大学で助教・准教授、そして現在の所属、というようにアカデミックの分野で着々とキャリアを積んできました。金属学会の講演では「カーボンナノチューブ強化Mg複合材料の組織観察」に関する講演をされましたが、こちらのランチョンミーティングでは、科学者だけではなく、理系の技術者も含めたアメリカにおける男女共同参画の現状についてお話し頂きました。

ワシントン州立大学における学生数や教員、技術職員に占める女性の具体的な数値の紹介があり、大学ではポジティブアクション等の導入があるものの、上位職になるにつれ女性の割合が減少するという、日本と共通の問題を抱えていることが伺えました。しかしながら、米国においては単に男女共同

Being Female is advantage

- Minority = Stand-out
- Different views/ideas = Unique thinker
- Communicative = Good at Networking
- Emotional (in a good way) = Positive mood maker
- Flexible = Opened to challenges
- Good at organizing things = Team player, Management skill, Leadership
- Capable of multi-tasking = Balancing Career and Personal Life

図1 宮下直子氏からのメッセージ(女性であることの強み)。



図2 講演後の Dr. Li(右)と宮下直子氏。

参画に関する問題だけでなく、人種や宗教等の背景も絡むことから状況はより複雑であることが浮き彫りとなりました。

宮下直子氏は高校卒業と同時に渡米し、ワシントン州立大学で化学を専攻して修士号を取得後、ゼロックス社の研究所で研究者として職に就き、ドイツへ渡るまでの11年間をアメリカで過ごしたとのこと。ドイツでは次なる目標として博士号取得を掲げ、目標達成後はエイチシースタルクに入社し、研究開発部門の責任者として計9年間をドイツで過ごし、2014年東京支店に異動というように実にグローバルな経歴の持ち主です。自分の目標を掲げるとすぐさまそれに向かって行動する宮下氏は非常にポジティブで、何事にも前向きに取り組んでいる姿が伺えました。講演では仕事をする上で女性であることの有利な点を掲げ(図1)、大いに励まされました。また、アメリカとドイツの男女共同参画に対する考え方や社会的構造の違いなどの話があり、とても興味深い内容でした。最後に、国内に限らず、海外でも日本女性がどんどん活躍してほしい、とのメッセージがありました。

なお、今回のランチョンミーティングの参加者は全部で20名。うち男性5名、女性15名。一般会員13名、学生会員7名という内訳です。金属学会・鉄鋼協会内でもランチョンミーティングの活動はだいぶ定着してきたように感じますが、今後は男性学生会員にも奮ってご参加願います。

* 日本鉄鋼協会「ふえらむ」Vol. 20 No. 9にも同時掲載。

(連絡先：〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

(2015年7月1日受理[doi:10.2320/materia.54.472])

本 会 記 事

会 告	平成27年度第1回臨時社員総会開催案内	473
	会費自動振替制度のご案内	473
	2015年秋期講演大会ご案内ならびに参加申込みについて	473
	第5回女性会員のつどい開催	474
	2016年春期講演大会外国人特別講演および招待講演募集	474
	第39回技術開発賞「新技術・新製品」記事募集	474
	第66回金属組織写真賞作品募集	474
	金属学会セミナー	474
	研究集会	475
	欧文誌編集委員会からのお知らせ	476
支部行事		477
材料系学協会情報コーナー		484
掲示板		477
新入会員		484
会誌・欧文誌9号目次		481
PRICM9のお知らせ		484
次号予告		484
行事カレンダー		485

事務局 渉外・国際関係: secgnl@jim.or.jp
 会員サービス全般: account@jim.or.jp
 会費・各種支払: member@jim.or.jp
 刊行物申込み: ordering@jim.or.jp
 セミナー・シンポジウム参加申込み: meeting@jim.or.jp
 講演大会: annualm@jim.or.jp
 総務・各種賞: gaffair@jim.or.jp
 学術情報サービス全般: secgnl@jim.or.jp
 分科会: stevent@jim.or.jp
 まてりあ・広告: materia@jim.or.jp
 会誌・欧文誌: editjt@jim.or.jp

公益社団法人日本金属学会
 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
 TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312
<http://jim.or.jp/>

- ・ご連絡先住所変更等の手続きは、本会ホームページ[\[会員マイページ\]](#)からできます。
- ・投稿規程、刊行案内、入会申込は、ホームページをご利用下さい。

- ・会告原稿締切: 毎月1日で、翌月号掲載です。
- ・掲示板は、ホームページにも掲載しております。

会 告 (ホームページもご参照下さい)

平成27年度第1回臨時社員総会開催案内

平成27年度第1回臨時社員総会を、下記のように開催いたします。
 社員総会の構成員は法人法上の社員である「代議員」となります。
 会長 福富洋志

日 時 2015年10月5日(月) 13:40～
 場 所 エッサム神田ホール(東京都千代田区神田鍛冶町3-2-2
 ☎ 03-3292-5936)
 議 案 報告事項 本会の最近の運営状況の件
 協議事項 第1号議案 名誉員推薦の件
 第2号議案 会員に関する規程改訂の件

会費の自動振替制度のご案内

2016年度会費自動振替制度のご案内を下記の通り申し上げます。
 前もって、お手続きを宜しくお願いいたします。

ホームページ: 会員制度のご案内 → 年会費・論文誌購読費の価格・お支払方法について → 会費自動振替制度のご案内

2016年会費自動払込申込締切 2015年10月9日(金)
 問合せ・申込書送付先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
 (公社)日本金属学会 会員サービス係 宛
 ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
 E-mail: member@jim.or.jp



2015年秋期(第157回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて

会 期 2015年9月16日(水)～9月18日(金)
 場 所 九州大学伊都キャンパス(〒819-0395 福岡市西区元岡744)
 懇親会 2015年9月16日(水) 19:00～21:00
 場 所 ホテル日航福岡(〒812-0011 福岡市博多区博多駅前2-18-25)

*事前予約は、8月10日(月)で締切りしました。
 ◆大会参加費(講演概要集 DVD 代含む)※年会費とは異なります。
 参加費・講演概要集 DVD・懇親会の消費税扱いについては、ホームページ(一覧表 PDF)をご参照下さい。

会 員 資 格	当日申込 (大会会場受付・現金払いのみ)
正員・前維持員会社社員・鉄鋼協会会員	10,000円
学生会員	6,500円
非会員 一般	20,000円
非会員 学生(大学院生含む)	15,000円

◆懇親会費(消費税込み)

	当日申込 (懇親会会場受付・現金払いのみ)
一般	10,000円
同伴者(ご夫人またはご主人)	5,000円

◆講演概要集 DVDのみ購入する場合

(※講演発表・聴講するためには、大会参加申込みが必要です。)
 件名を「2015年秋期講演大会講演概要集 DVD 購入申込」とし、
 ①申込者氏名②会員資格(会員番号も併記)③申込数④住所をご記入の上、E-mail: ordering@jim.or.jp 宛にお申込み下さい。
 9月2日の発行後、請求書を添えて送付いたします。

会員価: 本体3,810円+税 定価: 本体10,000円+税 送料: 360円

参加申込・問合せ

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
 (公社)日本金属学会 ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
 (各ご連絡・お申込は、FAXでも可)
 E-mail: annual@jim.or.jp

**日本金属学会・日本鉄鋼協会
 第5回女性会員のつどい**

主催 日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画委員会
日時 2015年9月18日(金) 12:00~13:00
会場 九州大学伊都キャンパスセンター 2号館 4階(2408)
 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
内容 女性会員の交流・人脈作り。キャリアデザイン意見交換。
 仕事場や上司・部下への困ったこと等本音トーク。学会への
 要望。などなど
参加資格 金属学会・鉄鋼協会女性参加者。学生さん、子連れも
 welcome♪
参加申込 申込みは不要です。直接、会場へお越し下さい。
持ち物 弁当、飲み物は持参をお願いします。
 この「つどい」に参加して、静かな部屋でゆっくり語り合
 いましょう♪♪♪
問合せ先 梅津理恵(東北大学) E-mail: rieume@imr.tohoku.ac.jp

**2016年春期講演大会の外国人特別講演
 および招待講演募集**

春秋講演大会における外国人研究者による特別講演と招待講演については会員からの推薦のもとに、毎年6月と12月に開催される国際学術交流委員会において審議採択いたし、講演実施細目については講演大会委員会で決定いたします。2016年春期講演大会における特別講演と招待講演を募集いたしますので、下記要領によりご推薦下さい。

1. 特別講演

- 講演者：著名な外国人研究者とする。
- 講演時間：30分(討論10分)
- 採択件数：3~4件
- 滞在費補助：10,000円
- その他：大会参加費免除、懇親会招待

2. 招待講演

- 講演者：有益な講演が期待される国内に滞在する外国人研究者とする。
- 講演時間：15分(討論5分)
- 採択件数：5件程度
- 滞在費補助：なし
- その他：大会参加費免除

3. 推薦用紙

所定様式(ホームページからダウンロード下さい)により、下記メールアドレス宛に「外国人特別講演推薦」と明記し、お送り下さい。送信後2~3日過ぎても受理メールの無い場合は、お問合せ下さい。

4. 推薦書提出期日 2015年11月20日(金)**5. 照会・推薦書提出先**

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
 (公社)日本金属学会 国際学術交流委員会宛
 ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
 E-mail: gaffair@jim.or.jp

第39回技術開発賞「新技術・新製品」記事募集

応募締切 2015年10月30日(金)
賞の名称 第39回公益社団法人日本金属学会技術開発賞
賞の対象 まてりあ「新技術・新製品」記事に掲載された記事が選考対象となります。

原稿問合せ まてりあ係 E-mail: materia@jim.or.jp

技術開発賞の問合せ先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
 (公社)日本金属学会各賞係
 ☎ 022-223-3685 E-mail: gaffair@jim.or.jp

詳細 まてりあ 8号418頁

第66回金属組織写真賞作品募集

応募締切 2015年10月20日(火)
賞の名称 第66回公益社団法人日本金属学会金属組織写真賞
募集部門 1. 光学顕微鏡部門
 2. 走査電子顕微鏡部門(分析, EBSD等を含む)
 3. 透過電子顕微鏡部門(STEM, 分析等を含む)
 4. 顕微鏡関連部門(FIM, APFIM, AFM, X線CT等)
注: 光学顕微鏡と透過電子顕微鏡写真, 走査電子顕微鏡と透過電子顕微鏡写真等の組写真を応募する場合、応募者が最も適切と判断する部門を選択すること。

提出要領 ①印刷物: 写真作品と説明書は別々の用紙に作成し、印刷物として郵送する。

②電子データ: 写真作品と説明書の電子データを別途メール添付で提出する。メールの題名は「金属組織写真賞応募」とする。

送付・問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
 (公社)日本金属学会 金属組織写真賞係
 ☎ 022-223-3685 E-mail: gaffair@jim.or.jp

詳細 まてりあ 8号419頁

金属学会セミナー
**半導体における点欠陥と拡散
 —基礎と最先端デバイス—**

[協賛予定] 応用物理学会, 電子情報通信学会, IEEE EDS, 日本鉄鋼協会, 日本材料学会, 日本MRS, 日本物理学会

LSI等のSi系素子, パワートランジスタや発光ダイオード等の化合物素子においては不純物の拡散制御や結晶欠陥密度の低減は素子特性の制御上, 非常に重要である。本セミナーにおいては, 点欠陥, 拡散の基礎を学ぶと共に, 研究開発途上の実デバイスにおいてそれらの事象が如何ほど重要であるかについて明らかにする。尚, 今回の企画は前年度に引き続きセミナー・シンポジウム委員会が主体となって提案するものである。

(企画世話人 兵庫県立大 松尾直人, 大阪府立大 沼倉 宏, 東工大 小林能直)

日時 2015年11月12日(木) 9:35~17:10
場所 東京工業大学大岡山キャンパス 西9号館1階コラボレーションルーム

(アクセス: 東京急行大井町線/目黒線「大岡山駅」徒歩3分)
募集定員 50名

受講料(消費税込)

受講資格	事前申込	当日申込
正員	12,000円	15,000円
学生	5,000円	6,000円
非会員	15,000円	20,000円

(本会前維持員会社社員, 協賛学協会会員は会員扱い. 学生は会員, 非会員の区別なし)

申込要領 E-mail で meeting@jim.or.jp 宛お申し込み下さい.

申込項目は以下のとおりです.

- ①送信 subject に「セミナー：半導体における点欠陥と拡散—基礎と最先端デバイス—」と記入,
- ②氏名・年齢,
- ③会員・非会員・学生の区別(本会会員は会員番号も④勤務先・所属, ⑤通信先住所(テキスト等送付先と電話番号)申込受理確認の E-mail を返信します.

事前申込締切 2015年11月4日(水)着信

テキストの送付 開催10日前後までに発行送付の予定です. 事前に申し込まれた方にはテキストが出来次第参加証等関係資料とともにお送りいたします.

受講料払込方法 お申込受理後, 請求書を送付いたします.

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー参加係

E-mail: meeting@jim.or.jp

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

プログラム

- 9:35~9:40 はじめに
セミナー・シンポジウム委員会/兵庫県立大 松尾直人
- 9:40~10:40 点欠陥の物理 東北大 米永一郎
- 10:40~11:40 拡散の基礎 慶応義塾大 植松真司
- 11:40~13:00 一昼食—
- 13:00~14:00 GaN 系デバイスにおける結晶欠陥の影響
福井大 塩島謙次
- 14:00~15:00 高性能 Ge 薄膜トランジスタの現状と展望
東芝/産総研 白田宏治
- 15:00~15:10 一休憩—
- 15:10~16:10 クラスタイオンビームナノ加工の現状と展望
兵庫県立大 豊田紀章
- 16:10~17:10 軟 X 線照射ドーピングの現状と展望
兵庫県立大 部家 彰

研究集会

研究会 No. 67

第5回 結晶と組織の配向制御による材料高性能化研究会 参加募集

まてりあ第54巻第5号会告で講演募集しました「結晶と組織の配向制御による材料高性能化研究会」を下記の通り開催いたします. 今回が5年間活動してきた本研究会の最終講演会となります. 結晶方位分布と微細組織にご興味のある方はふるってご参加下さい. なお, 本研究会は軽金属学会「加工と熱処理による優先方位制御研究会」との共催により行います.

開催日 2015年10月8日(木)~9日(金)

場所 黒部市宇奈月国際会館「セレネ」会議室 A

(〒938-0282 黒部市宇奈月温泉 6-3)

☎ 0765-62-2000 http://www.unazuki.org/selene/

北陸新幹線「黒部宇奈月温泉」駅で下車し富山地方鉄道「新黒部」駅から乗車, または「富山きときと空港」から

富山駅に移動し富山地方鉄道「電鉄富山」駅から乗車, 「宇奈月温泉」駅下車, 駅から約150 m

参加費 資料代として当日1,000円をお支払い下さい(学生は無料).

懇親会 10月8日 宇奈月麦酒館(☎ 0765-65-2277, 下立(おりたて)駅から約300 m)

下記のフィール宇奈月から送迎バスあり 会費4,500円

宿泊 10月8日 フィール宇奈月(☎ 0765-62-9520, 宇奈月温泉駅から徒歩約1分)

和室6畳またはツインベッド室1名使用(朝食付)7,020円 計11室

和室8畳2名使用(朝食付)7,020円, 1名使用(朝食付)7,560円 計16室

申込方法 氏名, 所属, 連絡先(TEL・E-mail)を明記の上, 9月30日(水)までに下記世話人宛にご連絡下さい. 正式な参加申込書をお送りしますので, ご記入の上, ご返送願います. ただし, 研究会のみのお申込(懇親会不参加, 宿泊不要)に限り, 当日でも参加可能です. なお, 10月5日以降の宿泊取消は上記宿泊施設に直接ご連絡下さい.

申込先 〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科マテリアル工学分野

井上博史

☎ 072-254-9316 FAX 072-254-9912

E-mail: inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp

10月8日(木)

13:05~13:15 開会の挨拶 世話人代表 大阪府大 井上博史

13:15~14:00 (1)【特別講演】集合組織制御による非鉄金属板材の成形性向上
大阪府大 井上博史

14:00~14:30 (2) 均質化結晶塑性有限要素解析によるアルミニウム合金の変形挙動の検証と塑性加工解析への応用
岡山大 ○上森 武, 多田直哉, 中田隼矢, 広島大 藤井健斗, 吉田総仁

日本工業大 瀧澤英男, MSC. Software 成田 忍

14:30~15:00 (3) Al-1 mass%Mn 合金の高温単軸圧縮変形による集合組織形成
横浜国大 ○岡安和人, 福富洋志

—休憩—

15:10~15:40 (4) Al-Zn-Mg-Cu 合金の超塑性変形中の結晶粒内方位変化
宇都宮大 ○高山善匡, 君島栄三, 渡部英男

15:40~16:10 (5) Cu-Ni-Si 系合金における10%引張変形後の方位分裂と初期結晶方位
古河電工 ○金子 洋, 大阪府大 井上博史

九大 森川龍哉, 田中将己, 東田賢二

16:10~16:40 (6) 引張り変形初期段階における結晶方位変化の観察
TSL ソリューションズ 鈴木清一

16:40~17:10 (7) 超耐熱 Ni 合金における残留応力測定および結晶方位測定
リガク ○横山亮一, 菊池哲夫, 上エ地義徳

18:30~20:30 懇親会(宿泊施設-懇親会会場間 送迎バス)

10月9日(金)

9:30~10:00 (8) 異方性粒界の基での結晶粒粗大化シミュレーション
東大 名誉教授 伊藤邦夫

10:00~10:30 (9) 放射光を利用した金属材料の平面ひずみ変形における内部不均一変形の評価
豊橋技科大 ○小林正和, 三浦博己

10:30~11:00 (10) iMATERIA における Time-Of-Flight 型中性子回折を利用した迅速バルク集合組織測定手法
茨城大フロンティア応用原子科学研究センター ○小貫祐介, 星川晃範,

佐藤成男, 石垣 徹, 徐 平光

- 11:00~11:30 (1) 中マンガン鋼板の集合組織制御による高機能化
東北大 ○石川智也, 奥田金晴, 貝沼亮介
——昼食——
- 13:00~13:30 (2) BCC系鋼板における冷延変形微視組織の発達
九大 ○森川龍哉, 東田賢二
- 13:30~14:00 (3) ステンレス鋼強圧延材のヘテロナノ構造と機械
的特性 豊橋技科大 ○三浦博己, 小林正和,
新日鐵住金 杉浦夏子, 吉永直樹
- 14:00~14:30 (4) フェライト系ステンレス鋼板の変形組織と再結
晶に及ぼす冷間圧延前の1パスECAPの影響
同志社大 ○宮本博之, 藤原 弘, 足立光明,
新日鐵住金ステンレス 秦野正治
- 14:30~15:00 (5) 熱延鋼板における圧延・変態集合組織の定量予
測およびその検証
新日鐵住金 ○田中泰明,
日鉄住金テクノロジー 富田俊郎
RWTH Aachen, Volker Mohles
- 15:00~15:05 閉会の挨拶 世話人 宇都宮大 高山善匡

研究会 No. 71

第3回グリーンエネルギー材料の マルチスケール創製研究会(沖縄)開催案内

本研究会は、材料科学の立場から長期的-短期的視野に立って新規グリーンエネルギー変換システム用材料の創製とともに、従来技術の高効率化を実現するための方策について研究を推進していくことを目的として設立されました。平成20年度-24年度に活動した「格子欠陥制御工学研究会」の実績を踏まえ、ナノからマイクロレベルにおける微細組織のキャラクタリゼーションとその制御、さらにミリから実寸レベルにおける階層構造化技術や材料特性の評価など、グリーンエネルギー材料に対するマルチスケール創製の設計原理の確立に向けた議論を行いたいと思います。昨年に引き続き、下記の要領で第3回研究会を開催致しますので奮ってご参加下さい。特に、博士課程の大学院生、ポスドク等の若手研究者の皆さんのご発表を奨励致します。多くの皆様のご参加を心よりお待ちしております。

日時 2015年11月5日(木)~7日(土)

※5日は夕方からの基調講演と交流会、研究発表会は、6日、7日です。7日は午前中にて閉会の予定です。

場所 ウェルネスリゾート沖縄休暇センター ユインチホテル南
城(〒901-1412 南城市佐敷数字新里1688)

☎ 098-947-0111, URL: <http://www.yuinch.jp/index.html>

参加費 5,000円(宿泊費は別途)

定員 40名

発表 申込締切 2015年10月9日(金)

1件につき30分発表15分質疑応答。

大学院生・ポスドク等若手研究者の方々は、Distinguished Paper Award for Young Scientistsの対象となります。

参加 申込締切 2015年10月9日(金)

申込先方法 申込みフォーム(<http://www.msre.kumamoto-u.ac.jp/~mice/green/>)に必要事項を記入の上、下記世話人宛にE-mailにてお申込下さい。

申込先 (世話人)吉見享祐 東北大学大学院工学研究科

☎/FAX 022-795-7324

E-mail: yoshimi@material.tohoku.ac.jp

欧文誌編集委員会からのお知らせ

Recent Progress in Thermoelectrics -New Analyses and New Materials- (Thermoelectric Conversion Materials IX)

(熱電材料研究の新展開 -新しい物性解析技術と新材料-)

化石燃料の枯渇問題、地球温暖化ガス排出問題、東日本大震災に端を発する原発停止に伴うエネルギー供給問題など深刻な社会問題を緩和する技術として、廃熱から電力を生み出せる熱電発電が注目されている。既存の熱電材料が高価で希少な元素が主成分であったため、現在、安価で環境に負荷を与えない元素から構成させる高性能熱電材料の研究が盛んに行われている。研究が盛んに行われることで、近年、熱電物性に関する新たな解析手法や、新しい熱電材料が次々に開発されている。

そこで、社会的にも重要な意義を有し、近年における発展が著しい熱電材料開発研究を、Materials Transactionsにおいて特集する。

日本は熱電材料研究における一大拠点であることを考慮すると、数多くの優れた研究成果をとりまとめることが可能になり、本特集は、日本のみならず海外の研究者にも注目されると期待される。

同様の内容の和文特集を日本金属学会誌の11月号に出版予定であるが、その特集に解説論文や学術論文を投稿した著者らにも、本特集号に投稿していただく予定であり、また、毎年Materials Transactionsに特集号を発行している日本熱電学会との共同出版とすることで、より多くの論文を集めることができ、充実した特集号となることが期待される。

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 57巻7号(2016年7月発行)に予定しております。多数ご寄稿下さいますようお願いいたします。

実施予定号: 第57巻第7号(2016年)

原稿締切日: 2016年1月6日

Frontier Researches Related to Nano/Microstructure, Microstructure Control and Mechanical Properties of Materials

(微細組織, 組織制御, 力学的性質に関する材料研究最前線)

金属材料の物理的性質は組織に強く依存することがよく知られており、構造・機能材料の更なる発展のための組織制御の重要性が増しており、強加工法などの新規材料プロセスの研究が一層進められている。また、近年、TEMやEBSDなどの各種分析機器の性能が長足に進歩している上、ナノ・マイクロレベルの材料試験法やその場観察法も格段に進歩している。および、第一原理計算やフェーズフィールド法などの計算手法も大きく進歩している。これらの背景のもと、金属材料のナノ・マイクロ構造と機械的性質との関係についてより詳細にわかるようになってきた。本特集号では、金属材料のみならず、セラミックスや複合材料も対象とし、これらナノ・マイクロ構造と機械的性質の関係に関する最新の研究成果をまとめ、本分野の更なる進歩を加速したい。なお、本特集号の一部は、同内容の和文誌特集号(2015)「微細組織, 組織制御, 力学的性質に関する材料研究最前線」掲載論文の英訳である。

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 57巻8号(2016年8月発行)に予定しております。多数ご寄稿下さいますようお願いいたします。

実施予定号: 第57巻第8号(2016年)

原稿締切日: 2016年2月1日

- 投稿に際しては、日本金属学会欧文誌投稿の手引・執筆要領(本会 Web ページ)に従うこと。
- 通常の投稿論文と同様の審査過程を経て、編集委員会で採否を決定する。
- 著者は、投稿・掲載費用をご負担願います。(別刷50部寄贈)。

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
 (公社)日本金属学会 欧文誌編集委員会
<http://jim.or.jp/>
 ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
 E-mail: editjt@jim.or.jp

掲 示 板

〈公募類記事〉
 無料掲載：募集人員、締切日、問合せのみ掲載。
 有料掲載：1/4頁(700~800文字)程度。
 ・「まてりあ」とホームページに掲載；15,000円＋税
 ・ホームページのみ掲載；10,000円＋税
 〈その他の記事〉 原則として有料掲載。
 ・原稿締切：掲載号：毎月1日締切で翌月号1回掲載
 ・原稿提出方法：電子メールとFAX 両方(受け取りメールの確認をして下さい)
 ・原稿送信先：FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

支部行事



第54回 材質制御研究会 —材料と光科学の接点—

近年、超短パルスレーザーの普及に代表されるように、光科学・技術の進展が著しく、従来と比べて容易に材料と光の相互作用を研究できる時代が幕を開けつつあります。今年2015年は国連の定める「国際光年」にあたることもあり、「材料と光科学の接点」をテーマに以下の研究会を企画しました。本研究会においては、ラマン散乱分光法による材料表面の分析や、フェムト秒レーザーを用いた材料加工、レーザーを応用した SiC 上への電極形成に関する分野の第一線で活躍しておられる4人の研究者をお招きし、最近の研究成果についてご紹介いただきます。

日 時 2015年9月25日(金)
 場 所 徳島大学 常三島キャンパス(徳島市南常三島町 2-1)
 会 場 工学部機械棟 M613(ゼミ室 5)
<http://www.tokushima-u.ac.jp/access/>

プログラム

14:00~14:05 開会挨拶 徳島大 岡田達也
 座長 岡田達也(徳島大)
 14:05~14:45 ラマン散乱分光法による固体表面の構造評価 秋田大 山口 誠
 14:45~15:25 フェムト秒レーザーによる金属ナノアプレーションの基礎物理とその応用 京大 橋田昌樹
 15:25~15:35 休憩
 座長 山口 誠(秋田大)
 15:35~16:15 フェムト秒レーザー照射による SiC 上へのオーミック電極作製の可能性 徳島大 富田卓朗
 16:15~16:55 レーザアニールを用いた SiC 上コンタクト電極形成 三菱電機 中西洋介

参加申込 氏名・所属・連絡先(E-mail)を明記の上、9月18日までにE-mailにて下記へお申し込み下さい。

参加費 無 料
 申込・問合せ先 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 岡田達也
 ☎ 088-656-7362
 E-mail: tatsuya-okada@tokushima-u.ac.jp

◇国立大学法人 岩手大学理工学部 教員公募◇

職名及び人員 教授 1名

所属学科等名

- 物理・材料理工学科(理工学部)
 (理工学部物理・材料理工学科は、平成28年度の全学改組により設置予定の学科です。当該学部改組における文部科学省の認可結果等が当該公募の採用条件等に影響することはありません。)

- 金型・鋳造工学専攻(博士前期課程)
- フロンティア物質機能工学専攻(博士後期課程)

専門分野 材料加工学(鋳造工学、接合工学等の材料加工プロセス分野)

担当授業科目(学部)：基礎ゼミナール、金属構造材料学、接合工学、専門英語セミナー等

(大学院)：計測・分析技術特論、鋳型造型技術実習、鋳物製造評価実習、検査分析実習等

- 応募資格
- (1) 博士の学位を有する者
 - (2) 国籍は問わないが、日本語で教育と大学運営に対応できる者
 - (3) 地方大学の現状を理解して教育・研究および大学運営に対応できる者

岩手大学は男女共同参画を推進しています(<http://www.iwate-u.ac.jp/gender/>)。男女共同参画社会基本法の趣旨に則り、教育、研究、地域貢献等の業績および人物の評価において、同等と認められる場合には女性を優先します。

採用予定日 2016年4月1日以降

任 期 なし

- 提出書類
- (1) 履歴書(写真貼付, 所属学会, E-mail アドレス記載)
 - (2) 研究業績リスト(著書, 学術論文, 国際会議論文, 講演発表論文, 特許, 報告などに分類して記載)
 - (3) 主要な学術論文別刷(5編以内, コピー可)
 - (4) 科学研究費等外部資金取得と受賞歴状況の一覧
 - (5) 研究業績の概要(A4用紙2枚程度)
 - (6) 着任後の教育と研究に対する抱負(A4用紙2枚程度)
 - (7) 応募者について問い合わせ可能な方2名の氏名, 所属, 連絡先

応募締切日 2015年10月30日(金) 必着

応募書類の提出先

〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5
 国立大学法人 岩手大学工学部マテリアル工学科
 学科長 鎌田康寛

※封筒の表に「物理・材料理工学科教員応募書類在中」と朱書きし、簡易書留で送付して下さい。なお、ご提出いただいた書類は返却致しませんので、予めご了承下さい。

その他 必要な場合に面接を実施する。

問合せ先 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5

国立大学法人 岩手大学工学部マテリアル工学科
 平塚真人

☎ 019-621-6319 E-mail: hiratsuka@iwate-u.ac.jp

◇東北大学大学院工学研究科 教員 公募◇

公募人員 准教授1名(任期7年, 再任可)
所 属 材料システム工学専攻 生体材料システム学講座 医用材料工学分野
専門分野 金属やセラミックスを中心とした生体材料分野において表面・組織・構造制御などを利用した材料開発, 製造プロセスや特性評価に関する教育と研究を行う
応募資格 博士の学位を有し, 当該分野の教育・研究に意欲があり, 日本語と英語で講義のできる方
担当授業科目 学部: 材料物理化学, 材料科学総合学実験等, 大学院(前期)応用生体材料工学等, (後期)生体材料システム学特別研修等

公募締切 2015年9月30日(水)

着任時期 2016年4月1日(金)

提出書類 (1)履歴書, (2)学位論文題目, (3)研究業績概要(A4版2枚以内)と主要論文5編の別刷り(コピー可), (4)研究業績リスト(学術論文, 参考論文, 著書, 特許(出願件数: 申請中を含む, 登録件数, 主要特許10件前後のリスト等), (5)獲得外部研究資金(科研費等)一覧(大学や公的な研究機関に所属の場合), (6)受賞, (7)招待講演等, (8)教育業績(担当科目等), (9)所属学会, (10)学会活動歴(委員会等), (11)研究活動, (12)社会活動等に関する一覧表, (13)今後の研究計画(A4版2枚以内), (14)教育活動に関する抱負(A4版2枚以内), (15)照会可能な方2名の氏名と連絡先, (16)応募者の連絡先(マテリアル・開発系ホームページ (<http://www.material.tohoku.ac.jp/news/jobs.html>))上に掲載した「公募提出書類作成の注意点」に留意して書類を作成すること)

書類送付先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02
 東北大学大学院工学研究科
 マテリアル・開発系長 杉本 諭

問合せ先 材料システム工学専攻長 成島尚之
 ☎/FAX 022-795-7294
 E-mail: narut@material.tohoku.ac.jp

※封筒に「教員公募(材料システム工学専攻 医用材料工学分野 准教授)」と朱書きし, 郵送の場合は書留とすること。なお, 応募書類は返却いたしませんのでご了承下さい。

※東北大学は男女共同参画を積極的に推進しています。詳細は大学ホームページをご覧ください。

◇東北大学大学院工学研究科 教員 公募◇

公募人員 准教授1名(任期7年, 再任可)
所 属 知能デバイス材料学専攻 ナノ材料物性学講座 強度材料物性学分野
専門分野 高強度材料, 耐熱材料など広い意味での構造材料の創製と高機能化, 変形・強化機構などに関する教育と研究を行う
応募資格 博士の学位を有し, 当該分野の教育・研究に意欲があり, 日本語と英語で講義のできる方
担当授業科目 学部: 材料強度学, 構造材料学等, 大学院(前期)応用構造材料学等, (後期)ナノ材料物性学特別研究等

公募締切 2015年9月30日(水)

着任時期 2016年4月1日(金)

提出書類 (1)履歴書, (2)学位論文題目, (3)研究業績概要(A4版2枚以内)と主要論文5編の別刷り(コピー可), (4)研究業績リスト(学術論文, 参考論文, 著書, 特許(出願件数: 申請中を含む, 登録件数, 主要特許10件前後のリスト(特許出願・公開・公告No, 発明者氏名, 発明題目))等), (5)獲得外部研究資金(科研費等)一覧(大学や公的な

研究機関に所属の場合), (6)受賞, (7)招待講演等, (8)教育業績(担当科目等), (9)所属学会, (10)学会活動歴(委員会等), (11)研究活動, (12)社会活動等に関する一覧表, (13)今後の研究計画(A4版2枚以内), (14)教育活動に関する抱負(A4版2枚以内), (15)照会可能な方2名の氏名と連絡先, (16)応募者の連絡先(マテリアル・開発系のホームページ (<http://www.material.tohoku.ac.jp/news/jobs.html>))上に掲載した「公募提出書類作成の注意点」に留意して書類を作成すること)

書類送付先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02
 東北大学大学院工学研究科
 マテリアル・開発系長 杉本 諭

問合せ先 知能デバイス材料学専攻長 武藤 泉
 ☎/FAX 022-795-7298

E-mail: mutoi@material.tohoku.ac.jp

※封筒に「教員公募(知能デバイス材料学専攻 強度材料物性学分野 准教授)」と朱書きし, 郵送の場合は書留とすること。なお, 応募書類は返却いたしませんのでご了承下さい。

※東北大学は男女共同参画を積極的に推進しています。詳細は大学ホームページをご覧ください。

◇公立大学法人 兵庫県立大学大学院工学研究科 教授 公募◇

募集人員 教授1名

(兵庫県立大学では男女共同参画を推進していますので女性研究者の応募を歓迎します。)

所 属 大学院工学研究科 材料・放射光工学専攻

専門分野 生体関連材料工学分野(半導体, 金属, 等の材料研究, あるいは, 材料のプロセス, 評価研究が対象であり, 将来的に医工学応用, 医療応用が可能な分野。)

教育担当 大学院: <博士前期>材料物理工学, 生体材料応用工学, 材料工学特別演習
 <博士後期>加工システム学講義, 信頼性材料工学セミナー

学 部: マテリアル科学への招待, 現代物理学, 固体物理学関連科目, 生体材料学, 卒業研究

応募資格 博士の学位を有し, 上記専門分野の博士後期過程の教育と研究指導ができる方

着任時期 2016年4月1日

応募書類 1. 履歴書(写真貼付, 学歴は高等学校卒業以降, 職歴, 賞罰等): 様式1
 2. 研究業績(著書, 論文等): 様式2および主要論文別刷り(10編まで, コピー可)
 3. 教育歴および学会・社会における活動等: 様式3
 4. これまでの主要な研究概要(2,000字程度): 様式4
 5. 教育・研究・社会貢献それぞれの抱負(3,000字程度): 様式5
 6. 推薦書1通または応募者に対して意見を伺える方2名の氏名・役職と連絡先を記載した書類

応募締切 2015年10月2日(金)(必着)

選考方法 書類審査および面接(模擬授業を含む)による。

書類提出先 〒671-2280 兵庫県姫路市書写2167
 兵庫県立大学姫路工学キャンパス 総務課気付
 大学院工学研究科長 山崎 徹 宛

※封筒に「材料・放射光工学専攻 教授 応募書類在中」と朱書きし, 簡易書留で送付すること。応募書類は原則として返却しません。

問合せ先 材料・放射光工学専攻 材料工学部門
 松尾直人 ☎ 079-267-4907
 E-mail: koubo164@eng.u-hyogo.ac.jp

◇兵庫県立大学大学院工学研究科 教員 公募◇

募集人員 准教授1名

(兵庫県立大学では男女共同参画を推進していますので、女性研究者の応募を歓迎します。)

所属 大学院工学研究科 化学工学専攻 表面エネルギー化学研究グループ(八重真治教授, 福室直樹助教 在籍)

専門分野 電気化学を基盤とし、次世代水素エネルギーをはじめとする環境エネルギー分野および高度生産加工技術分野における機能性物質創成と表面工学を教育・研究分野として担当できる方

教育担当 大学院:〈博士前期〉固体表面工学Ⅱ, 物質エネルギー工学特別演習Ⅰ・Ⅱ, 環境エネルギー工学特別演習Ⅰ・Ⅱ
〈博士後期〉材料製造学講究, 材料製造学セミナー

学部: 物質創成工学Ⅲ(応用電気化学), 構造解析学, 化学実験, 物理学実験, 化学工学実験, 科学英語, 卒業研究, (この他に全学共通教育を担当いただく可能性があります)

応募資格 博士の学位を有し、上記専門分野の教育と研究に熱意と意欲があり、博士後期課程の教育研究指導ができる方

着任時期 2016年4月1日

応募書類 1.履歴書(写真貼付, 学歴は高等学校卒業以降, 職歴, 賞罰等): 様式1
2.研究業績(著書, 論文等): 様式2 および主要論文別刷り(10編まで, コピー可)
3.教育歴および学会・社会における活動等: 様式3
4.これまでの主要な研究概要(2,000字程度): 様式4
5.教育・研究への抱負(2,000字程度): 様式5
6.推薦書1通または応募者に対して意見を伺える方2名の氏名・役職と連絡先を記載した書類

応募締切 2015年10月2日(金)必着

選考方法 書類審査および面接による

書類提出先 〒671-2280 兵庫県姫路市書写2167

兵庫県立大学姫路工学キャンパス 総務課気付
大学院工学研究科長 山崎 徹 宛

*封筒に「化学工学専攻 表面エネルギー化学 准教授 応募書類 在中」と朱書きし, 簡易書留で送付すること。応募書類は原則として返却しません。

問合せ先 化学工学専攻 森下政夫

☎ 079-267-4913

E-mail: koubo165@eng.u-hyogo.ac.jp

公募の URL:

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/outline/koubo/index.html>

福岡工業大学工学部 教員 公募

募集 生命環境科学科 物理学教員 1名

締切日 2015年10月16日(金)

問合せ先 福岡工業大学 工学部 生命環境科学科
学科長 永田純一

E-mail: j-nagata@fit.ac.jp

http://www.fit.ac.jp/daigaku/koubo/kyoin_kobo/kyoin_seimei_20151016

集 会

◇レアメタル研究会◇

■主 催: レアメタル研究会

主宰者: 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹

協 力: (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)

共 催: 東京大学マテリアル工学セミナー, 他

協 賛: (一社)軽金属学会, (一社)資源・素材学会, (一社)新金属協会, (公社)日本化学会, (公社)日本金属学会, (一社)日本チタン協会, (一社)日本鉄鋼協会 (五十音順)

■開催会場: 東京大学生産技術研究所 An棟2F コンベンションホール
〒153-8505 目黒区駒場4-6-1

(最寄り駅: 駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)

■参加登録・お問い合わせ: 岡部研 学術支援専門職員 宮崎智子
E-mail: tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp

〈平成27年度 レアメタル研究会の予定〉(2015.7.30現在)

■ 第67回 2015年9月18日(金) (第2回)

■ 第68回 2015年11月27日(金) (第3回)

■ 第69回 2016年1月8日(金) (第4回)

★貴金属シンポジウム(第3回)+新年会★(合同開催)

■ 第70回 2016年3月11日(金)(平成27年度 最終回)

■第67回 2015年9月18日(金)15:00~ An棟2F コンベンションホール

テーマ: 走るレアメタル, 働くレアメタル

時 間: 午後3:00~

講 演:

・自動車に使用される希少資源とその使用量削減に向けたトヨタの取り組み(60分)

トヨタ自動車株式会社 材料技術統括室 主査 野田克敏 講師

・走るレアメタル, 働くレアメタルについて(仮)(45分)

東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹 講師

・希土類(レアアース)産業の過去・現在・未来 ~自動車・ロボット産業などへの貢献~(仮)(60分)

株式会社 三徳 代表取締役社長 岡田 力 講師

午後6:30~ 研究交流会・意見交換会 (An棟2F ホワイエ)

■第68回 2015年11月27日(金)15:00~ An棟2F コンベンションホール

テーマ: 未来材料: チタン

時 間: 午後3:00~

講 演:

・チタン産業の過去・現在・未来(仮)(60分)

東邦チタニウム株式会社 チタン生産本部 本部長 小瀬村 晋 講師

・チタンのリサイクルの現状と課題について(45分)

東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹 講師

・チタン製錬の革新に向けた挑戦(60分)

京都大学 工学研究科 材料工学専攻 教授 宇田哲也 講師

午後6:30~ 研究交流会・意見交換会 (An棟2F ホワイエ)

レアメタル研究会ホームページ

http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html

★備考: 関連研究会

〈米国版レアメタル研究会(RMW)のご案内〉

Workshop on Reactive Metal Processing (Reactive Metal Workshop)

■RMW11 February 19 (Fri)-20 (Sat), 2016, Cambridge, MIT

<http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/core-to-core/rmw/>

◇公益財団法人近藤育英会平成27年度研究助成募集◇

当財団では「炭素材料」に関する研究助成募集を行っております。
 応募資格・要綱等、詳細につきましては、下記 URL より財団のホームページ 研究助成募集要綱をご覧ください。

助成対象 「炭素材料」に関する基礎研究及び応用研究。
助成額 一件最高100万円。
応募方法 所定の申請書(下記 URL よりダウンロード)に必要事項を記載の上、事務局まで郵送及び電子ファイルによるデータ送信。

募集期間 2015年9月1日～10月31日(郵送・データ送信ともに必着)。
詳細情報 <http://www.kondo-zaidan.or.jp/>
申請先・問合せ先 〒555-0011 大阪市西淀川区竹島 5-7-12
 東洋炭素株式会社内
 公益財団法人近藤育英会 事務局
 ☎ 06-6472-5838 FAX 06-6472-6007
 E-mail: info@kondo-zaidan.or.jp



状態図・七話

西澤泰二

各種材料の組織制御のための基本情報は状態図に求められるが、1970年代から始まった熱力学を駆使した計算法の著しい発展によって、それまで実験だけに頼って行われてきた状態図研究は大きな躍進を遂げた。本書はこの熱力学の視点から各種の状態図を解説したもので、一話ごとに特徴ある状態図が取り上げられ、その選評が述べられている。七話の具体的内容は、FeC系状態図の誕生、H₂OとFeとCの超高圧状態図、ジュラルミンの状態図、計算状態図の源流、多元系化合物の状態図、金属基・複合系の状態図、2元系状態図・特選となっており、身近な材料で観察される興味深い現象が、初学者にもわかるように平易に解説されている。いずれの話題も、熱力学に対する深い洞察と卓越した図的解釈によって本質に迫る独自の方法を確立した著者にして初めて解説できるもので、科学を思考することの楽しさ、学問をすることの喜びが随所に溢れた良書である。

現代物理学の2つの大きな潮流である熱力学と量子力学の違い

は、熱力学が物質の巨視的性質から電子や原子が示すミクロな挙動を推定するのに対して、量子力学は電子の重なりから物質の巨視的性質を考える点にあるとも言えるかもしれない。現代はどちらかといえば後者の学問体系が主流となっているように見える。これに対して熱力学は古典という捉えられ方でとかく敬遠されがちであり、著者ご自身もところどころで“置いてきぼり”、“老兵”などご自分の手法を謙遜されている。しかし本書は、読者に熱力学という学問の普遍性を確信させるのに十分余りある内容をもっており、一人でも多くの研究者が著者の手法に学ぼうとすることがあるならば、このアンソロジーに込めた著者の願いは達せられたのではないかと思う。状態図の初学者のみならず、功なり名を遂げられた第一線の研究者の方々にも是非ご一読をお勧めしたい。

(東北大学多元物質科学研究所 大谷博司)

[2015年 A5判 2400円+税 アグネ技術センター]



書籍紹介

産業用 3D プリンターの最新技術・材料・応用事例

山口修一 監修

B5 287頁 シーエムシー 定価(本体8,000円)+税

論文

L1₀ 型 FePtRh 規則合金薄膜の磁気相転移と格子歪みとの相関

長谷川 崇 木村詩織 虻川卓憲
Albert A. Valiullin Aleksandr S. Kamzin
Craig Barton Thomas Thomson 石尾俊二

溶融塩処理によるナノ光触媒薄膜の作製と高機能化

高屋駿介 春日翔多 関 蘇軍 宮澤康平
吉田浩之 魯 云

Ti_{50-x}Ni_{40+x}Cu_{10.0} 合金におけるマルテンサイト変態の Ni 組成依存性

木村雄太 許 晶 大森俊洋 貝沼亮介

Co 過剰 Co-Fe 合金急冷薄帯における磁気特性に及ぼす熱処理効果

木村奈津子 久保田 健 山本貴久
福岡修太 古屋泰文

fcc 鉄(111)表面近傍での空孔形成における水素原子の影響

國貞雄治 坂口紀史

雰囲気制御 IH-FPP (AIH-FPP) を用いた Fe-Al 金属間化合物の形成とその応用

亀山雄高 竹嶋隼人 小茂鳥 潤 村澤功基

Ti-Nb 合金における焼入れマルテンサイトの変形に伴う結晶構造と材料特性の変化

万谷義和 竹元嘉利

Ti-10Mo-7Al 合金の熱処理に伴う相変態挙動

井尻政孝 竹元嘉利

Materials Transactions 掲載論文

—Special Issue on Nanostructured Functional Materials and Their Applications—

PREFACE Hoang Nam Nhat, Pham Duc Thang, Tomoyuki Yamamoto and Masato Yoshiya

Magnetic Materials

Magnetocaloric Effect in La_{0.7}Ca_{0.25}Ba_{0.05}MnO₃ Nanocrystals Exhibiting the Crossover of First- and Second-Order Magnetic Phase Transformation

Tran Dang Thanh, Dinh Chi Linh,
Hoang Thanh Van, Thi Anh Ho, Tien Van Manh,
Le Viet Bau, The-Long Phan and Seng-Cho Yu

First Order Magnetization Process in Polycrystalline Perovskite Manganite

Giang H. Bach, Oanh K. T. Nguyen,
Chinh V. Nguyen and Cong T. Bach

Spin-Transfer Torque Switching at Ultra Low Current Densities

Johannes Christian Leutenantsmeyer, Vladyslav Zbarsky,
Marvin von der Ehe, Steffen Wittrock, Patrick Peretzki,
Henning Schuhmann, Andy Thomas, Karsten Rott,
Günter Reiss, Tae Hee Kim, Michael Seibt and
Markus Münzenberg

Magnetic Behaviors of Arrays of Co-Ni-P Nanorod: Effects of Applied Magnetic Field

Luu Van Thiem, Pham Duc Thang, Dang Duc Dung,
Le Tuan Tu and CheolGi Kim

Critical Behavior of La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ Nanoparticles

T. A. Ho, T. D. Thanh, T. V. Manh, T. O. Ho,
P. D. Thang, T. L. Phan and S. C. Yu

Effect of Cerium Doping on Crystal Structure and Magnetic Properties of La_{1-y}Ce_yFe_{11.44}Si_{1.56} Compounds

Do Thi Kim Anh, Vuong Van Hiep,
Makio Kurisu, Dinh Van Chau and Hoang Nam Nhat

Room-Temperature Ferromagnetism in Nickel-Doped Wide Band Gap Ferroelectric Bi_{0.5}K_{0.5}TiO₃ Nanocrystals

Duong Van Thiet, Do Duc Cuong,
Luong Huu Bac, Le Viet Cuong, Ha Dang Khoa,
Sunglae Cho, Nguyen Hoang Tuan and Dang Duc Dung

Functional Oxide Materials

Atomistic Analyses of Competition between Site-Selective Segregation and Association of Point Defects at Grain Boundary in Y₂O₃-Doped ZrO₂

T. Yokoi, M. Yoshiya and H. Yasuda

Stability of 12CaO·7Al₂O₃ Crystal under High-Pressure: Experimental and First-Principles Approaches

Hidenobu Murata, Masashi Miyakawa,
Isao Tanaka and Takashi Taniguchi

Ni₂O₃ Decoration of WO₃ Thin Film for High Sensitivity NH₃ Gas Sensor

Nguyen Minh Vuong,
Tran Nam Trung, Truong Thi Hien, Nguyen Duc Chinh,
Nguyen Duc Quang, Dongsuk Lee, Dahye Kim,
The-Long Phan and Dojin Kim

Physical Properties of Sol-Gel Lead Nickel Titanate Powder Pb(Ti_{1-x}Ni_x)O₃

Le Thi Mai Oanh, Danh Bich Do and Nguyen Van Minh

Large Electrical Resistance Variation at Low Temperature in Transition Metal-Doped Ge Single Crystals

Jiyoun Choi, Jeongyong Choi, Sungyool Choi,
Jongphil Kim and Sunglae Cho

Investigation of the Influence of Singly and Dually Doping Effect on Scattering Mechanisms and Thermoelectric Properties of Perovskite-Type STO

Trinh Quang Thong, Le Thi Thu Huong and
Nguyen Trong Tinh

Ferroelectric and Piezoelectric Properties of Lead-Free BCT-xBZT Solid Solutions

Dang Anh Tuan, Nguyen Trong Tinh, Vo Thanh Tung and
Truong Van Chuong

Dielectric Relaxation of Ba_{1-x}Ca_xTiO₃ (x=0.0-0.3)

Le Van Hong, Nguyen Van Khien and Truong Van Chuong

Microstructural and Ferroelectric Properties of Bi_{0.5}(Na,K)_{0.5}TiO₃-Based Modified by Bi_{0.5}Li_{0.5}TiO₃ Lead-Free Piezoelectric Ceramics

D. D. Dung, D. V. Thiet, N. V. Quyet,
L. H. Bac and S. Cho

Nano Materials

Stable Gold Carbide Nanostructures

Nguyen Khac Thuan, Vuong Van Hiep, Do Thi Kim Anh
and Hoang Nam Nhat

Flexible and Transparent Conducting ZZO/Ag/ ZZO Multilayer Grown by Sputtering at Room Temperature

Jung Hsiang Lee, Li Shu Tu,
Kuo Chi Dai, Bo Rui Jhang and Bo Yuan Li

Molecular Dynamics Simulations of the Nucleo- tides and Metallic Nanoparticles Interaction on a Carbon Nanotube Matrix

M. A. Khusenov, E. B. Dushanov and Kh. T. Kholmurodov

Fabrication of Mn-Bi Nanoparticles by High Energy Ball Milling

Nguyen Mau Lam, Tran Minh Thi, Pham Thi Thanh,
Nguyen Hai Yen and Nguyen Huy Dan

Pt- and Ag-Decorated Carbon Nanotube Network Layers for Enhanced NH₃ Gas Sensitivity at Room Temperature

Nguyen Q. Lich, Tran P. Thanh,
Duong V. Truong, Pham T. Kien, Nguyen C. Tu,
Luong H. Bac, Dang D. Vuong, Nguyen D. Chien and
Nguyen H. Lam

Kinetics of CO Oxidation over Pt-Modified CuO Nanocatalysts

Luu C. Loc, Nguyen Tri, Hoang T. Cuong and Ha C. Anh

The Dependence of a Quantum Acoustoelectric Current on Some Qualities in a Cylindrical Quan- tum Wire with an Infinite Potential GaAs/GaAsAl Nguyen Vu Nhan, Nguyen Van Nghia and Nguyen Van Hieu

Optical Materials

Crystal Structure and Photoluminescence Proper- ties of Eu-Doped Y₂O₃ Nanoparticles Prepared by Mechanical Milling

T. L. Phan, D. N. Chung, P. D. Thang, P. T. Huyen,
T. V. Manh, T. A. Ho, T. D. Thanh, N. M. Vuong,
B. W. Lee and S. C. Yu

Judd-Ofelt Analysis of Eu³⁺ Emission in TiO₂ Anatase Nanoparticles

Mikhail G. Brik, Željka M. Antić, Katarina Vuković and
Miroslav D. Dramićanin

Luminescence Properties of Ce/Tb/Sm Co-Doped Tellurite Glass for White Leds Application

Tran Thi Hong, Pham Duc Huyen Yen, Vu Xuan Quang and
Phan Tien Dung

Synthesis and Optical Characterization of Samari- um Doped Lanthanum Orthophosphate Nanowires

Le Van Vu, Duong Thi Mai Huong, Vu Thi Hai Yen and
Nguyen Ngoc Long

Soft-Matter

Quantum Chemical Study of the 1:1 Complex bet- ween Ferrocene and Zinc Porphyrin, a Building- Block of Charge-Transfer Molecular Materials

Fabio Pichierri, Akiko Sekine and Tomoyuki Yamamoto

Fabrication of Solid Contact Ion Selective Elec- trode for Mercury (II) Using Conductive Polymer Membrane

Pham Thi Ngoc Mai and Phan Tri Hoa

Sorting and Trapping Human Cells Using a Matrix of Square Micro-Magnets

L. V. Cuong, N. X. Nghia and P. D. Thang

Magnetic Poly(Vinylsulfonic-co-Divinylbenzene) Catalysts for Direct Conversion of Cellulose into 5- Hydroxymethylfurfural Using Ionic Liquids

Trung-Dzung Nguyen, Huy-Du Nguyen,
Phuong-Tung Nguyen and Hoang-Duy Nguyen

Analysis and Computational Materials Science

Retrieval of Interatomic Separation from High- Order Harmonic Spectra Using the Electron Inter- ference Effect

Cam-Tu Le, Van-Hung Hoang,
Ngoc-Ty Nguyen and Van-Hoang Le

In Situ Measurements of Work Function of Indium Tin Oxide after UV/Ozone Treatment

Daisuke Yamashita, Atsushi Ishizaki and
Tomoyuki Yamamoto

Ab-Initio Multiplet Calculations of Fe-L_{2,3} X-ray Absorption Spectra in LiFePO₄ and FePO₄

Hidekazu Ikeno

First Principles Calculation of Thermal Expansion of Carbon and Boron Nitrides Based on Quasi-Har- monic Approximation

Tetsuya Tohei, Hak-Sung Lee and Yuichi Ikuhara

Local Environment Analysis of Na Ions in β -Trical- cium Phosphate by X-ray Absorption Near-Edge Structure Measurements and First-Principles Cal- culations

Kazuhiko Kawabata, Tomoyuki Yamamoto
and Akihiko Kitada

Interface Energies of Hetero- and Homo-Phase Boundaries and Their Impact on δ - γ Massive-Like Phase Transformations in Carbon Steel

Masato Yoshiya, Kenta Nakajima, Manabu Watanabe,
Nobufumi Ueshima, Tomoya Nagira and Hideyuki Yasuda

Concurrent γ -Phase Nucleation as a Possible Mechanism of δ - γ Massive-like Phase Transfor- mation in Carbon Steel: Numerical Analysis Based on Effective Interface Energy

Masato Yoshiya,
Manabu Watanabe, Kenta Nakajima, Nobufumi Ueshima,
Koki Hashimoto, Tomoya Nagira and Hideyuki Yasuda

Yet Another Marked Difference among Impurities as Modifier Elements for Refinement of Eutectic Si in Al-Si Alloys

Yosuke Suzuki-Yamamoto,
Ryota Ozaki, Masato Yoshiya, Tomoya Nagira and
Hideyuki Yasuda

Magnetic Structure of Mn Films on Cu₃Au(100) Revealed by Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy

Achiri Tange, Chunlei Gao,
Chen-Tien Chiang, Minn-Tsong Lin, Wulf Wulfhekel and
Jürgen Kirschner

—Regular Articles—

Materials Physics

Simulation of the Magnetic Hysteresis Loop in Ferrimagnetism

Morishige Yoneda, Shuji Obata and
Masaaki Niwa

Phase Transformation and Properties of Fe-Cr-Co Alloys with Low Cobalt Content

Qiuzhi Gao, Minglong Gong, Yingling Wang, Fu Qu and Jianeng Huang

Acoustic Emission Measurements on Metal-Hydrogenation Process by Using Electrochemical Charging Cell

Jiaxiang Piao, Hiroya Shoji, Takahiro Murakami, Ryousuke Shiina and Shuji Harada

Mechanics of Materials

Analysis of Non-Monotonic Temperature Behavior of the Coefficient of Thermal Expansion in Fe-Ni Alloys Studied by First-Principles Cluster Variation Method

Ryo Yamada, Ying Chen and Tetsuo Mohri

Evaluation of the Tensile Strength of Electron Beam Irradiated Powdered Ultra High Molecular Weight-Polyethylene (UHMWPE) Prior to Sintering

Masae Kanda, Tiana Deplancke, Olivier Lame, Yoshitake Nishi and Jean-Yves Cavaille

Materials Chemistry

Ability of Hydroxyapatite Synthesized from Waste Oyster Shells to Remove Fluoride Ions

Sota Terasaka, Masanobu Kamitakahara, Taishi Yokoi and Hideaki Matsubara

Diffusivity and Solubility of Cu in a Reactor Pressure Vessel Steel Studied by Atom Probe Tomography

Masaki Shimodaira, Takeshi Toyama, Fumihiko Takahama, Naoki Ebisawa, Yasuko Nozawa, Yasuo Shimizu, Koji Inoue and Yasuyoshi Nagai

Effects of Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI) on Adhesive Force of Peeling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Polymer (CFRP) and Polytetrafluoroethylene (PTFE)

Chisato Kubo, Masae Kanda and Yoshitake Nishi

Materials Processing

Investigation of the Microstructure and Corrosion Properties of Friction Stir Processed Cast NiAl Bronze

Yuting Lv, Liqiang Wang, Xiaoyan Xu, Yuanfei Han and Weijie Lu

Effects of Reheating Temperature and Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Thixoforged ZW21 Alloy

Ti Jun Chen, Hui Guo, Ying Ma and Yuan Hao

Engineering Materials and Their Applications

Microstructural Evaluation of $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-Mo_2C-xNbC-Ni$ Cermets

Hiroyuki Hosokawa, Kiyotaka Katou, Koji Shimojima, Ryoichi Furushima and Akihiro Matsumoto

Microstructure and Mechanical Properties of Large-Scale Ingots of the Zr-1Mo Alloy

Maki Ashida, Tomohiro Sugimoto, Naoyuki Nomura, Yusuke Tsutsumi, Peng Chen, Hisashi Doi and Takao Hanawa

Radiation Defects Formed in Ion-Irradiated 316L Stainless Steel Model Alloys with Different Si Additions

Dongyue Chen, Kenta Murakami, Kenji Dohi, Kenji Nishida, Naoki Soneda, Zhengcao Li, Li Liu and Naoto Sekimura

Influence of Nb Addition on Phase Constitution and Mechanical Properties of Biomedical Ti-Zr Based Alloys

Yusuke Hisata, Equo Kobayashi and Tatsuo Sato

Relation between n -Value and Critical Current in Filamentary and Coated Superconducting Tapes with Tensile Stress-Induced Cracks

Shojiro Ochiai, Hiroshi Okuda, Masahiro Fujimoto and Kozo Osamura

Environment

Sand Cementation Test using Plant-Derived Urease and Calcium Phosphate Compound

R. A. N. Dilrukshi, Jun Watanabe and Satoru Kawasaki

Substance Flow Analysis of Indium in Taiwan

Tien-Chin Chang, Feng-Chi Yen and Wen-Hong Xu

Fundamental Studies on a Recycling System for Precious and Rare Metals Using a Propylene Carbonate Solvent Containing $CuBr_2$ and KBr

Kana Umehara and Yasunari Matsuno

—Express Regular Articles—

Microstructures and Mechanical Properties of 440C Stainless Steel Strengthened with TaC via Vacuum Sintering and Heat Treatments

Kuo-Tsung Huang, Shih-Hsien Chang, Chih-Kai Wang and Jhewm-Kuang Chen

Effects of Heat Treatment and Extrusion on Microstructure and Properties of A390 Alloy Hollow Billet Fabricated via DC Casting

Kesheng Zuo, Haitao Zhang, Ke Qin, Xing Han, Bo Shao and Jianzhong Cui

Electrochemical Corrosion Behavior of AISI 409L Stainless Steel Aluminized by Hot-Dip Coating Method in Automotive Exhaust Gas Solution

Min-Jun Kim, Seok-Ho Woo and Jung-Gu Kim

—Rapid Publications—

Improvement of Riser Efficiency Using High-Intensity Ultrasonic Treatment in A356 Alloy

Sang-Soo Shin, Woo-Chun Kim, Kyou-Hyun Kim and Jeong-Wook Park

Effect of Zn Content and Solution Treatment on Damping Capacities of Mg-Zn Casting Alloys

Joong-Hwan Jun

Editor's Announcement

Announcement



まてりあ 第54巻 第10号 予告

〈プロジェクト研究報告〉「SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)/革新的設計生産技術
三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証プロジェクトの活動紹介」

〔新進気鋭〕 強磁性材料の磁場中平衡状態図……………三井好古

—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。

“材料系学協会情報コーナー”

〈軽金属 第65巻9号(9月30日発行)〉

解説 先端アルミニウム材料創製のための電気化学からのアプローチ—軽金属奨学会平成25年度統合的先端研究の成果—/世利修美・小野幸子・春名 匠・阿相英孝・西本明生

解説特集 「航空・宇宙産業を支える軽金属」

航空機用軽金属材料の動向と課題/平 博仁
日本における航空機用アルミニウム合金開発の歴史—零戦からボーイング777まで—/吉田英雄
航空機用アルミニウム合金開発の最近の動向/吉田英雄・林 稔・則包一成
航空宇宙機器におけるアルミニウム材料とその加工技術/高橋孝幸
航空機向けチタン合金とその鍛造技術/長田 卓
航空機実装化を目指した KUMADAI マグネシウム合金の研究開発/河村能人
マグネシウム合金の航空機適用/榎本清志

〈溶射 第52巻第3号 2015年7月〉

技術論文 亜鉛溶射皮膜の表面に形成した腐食生成物による炭素鋼の防食機構/高谷泰之, 戸越健一郎, 進藤亮太, 原田良夫

速報論文 コールドスプレー皮膜の密着強度に与える基材加熱温度の影響/吉田知聖, 渡邊悠太, 山田基宏, 福本昌宏

特集 コールドスプレー法による酸化チタン成膜のための粉末材料/山田基宏, 福本昌宏

解説 溶射管理士資格認定試験 問題と解説(第2回)

—他—

〈ふえらむ Vol 20 (2015) No.9〉

展望 産学連携-1 国家プロジェクトにおける産学連携の役割/能見利彦

入門講座 鋳鉄鋳物は安定系共晶反応を伴って凝固する—ねずみ鋳鉄品(FC)/球状黒鉛鋳鉄品(FCD)/旗手 稔

解説 ミクロ・マクロ偏析制御研究会の活動と成果の概要/江坂久雄

—他—



(2015年6月25日～2015年7月23日)

正 員

白山 栄 東京大学

夏井 俊 悟 北海道大学

山田 遥 平 株式会社神戸製鋼所

学 生 員

小田 尋 美 東京大学

外国学生会員

To-Cheng Liu National Taipei University of Technology



PRICM9(第9回環太平洋先端材料とプロセッシング国際会議)のお知らせ

開催日: 2016年8月1日(月)～8月5日(金)

場 所: 国立京都国際会館(京都市左京区宝ヶ池)

情 報: website <http://web.apollon.nta.co.jp/PRICM9/>は本会ホームページのトップページからもアクセス
できます。8月17日に website を更新し, 2nd Circular を公開しました。

Abstract Submission 締切: 2015年11月1日(日)

問合せ先: E-mail: pricm_9@nta.co.jp

行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
9月				
1～2	第31回分析電子顕微鏡討論会(幕張メッセ)	日本顕微鏡学会・村上(九大)	TEL 092-802-3497 murakami@nucl.kyushu-u.ac.jp http://eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp/bunseki2015/	
1～3	第9回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール(静岡)	応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会・静岡大(松井)	TEL 053-478-1064 matsui.makoto@shizuoka.ac.jp http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/PE_SS_2015/	7.30 定員 60名
1～3	第17回日本感性工学会大会(文化学園大)	日本感性工学会・上野	TEL 03-3666-8000 jske17@jske.org http://www.jske.org/	事前 7.17
1～4	第55回真空夏季大学(掛川)	日本真空学会・佐久間	TEL 03-3431-4395 ofc-vs@vacuum-jp.org http://www.vacuum-jp.org/	7.31
2～3	第45回初心者のための有限要素法講習会(演習付き)第2部(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/	8.7 定員 45名
2～4	平成27年度工学教育研究講演会(九大)	日本工学教育協会・川上	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp	5.7
5	セラミックス大学2015(CEPRO2015)(工学院大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp	定員 120名
6	2015年度計算力学技術者(CAE技術者)の資格認定試験「上級アナリスト」(東京)	日本機械学会・石澤	TEL 03-5360-3506 caenintei@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm	
6～11	XVIII International Sol-Gel Conference (Sol-Gel 2015) (Kyoto)	ISGS & J. Sol-Gel Society	TEL 075-753-2925 solgel2015@kuchem.kyoto-u.ac.jp http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/solgel2015/	
7～11	12th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM) 2015(東大)	ICSAM2015・北薊(首都大東京)	TEL 042-585-8679 kitazono@tmu.ac.jp	
8～9	キンク研究会「平成27年度研究交流会」(福岡)	No.75研究会・石川(九大中島研)	nk-a-ishikawa@mms.kyushu-u.ac.jp	8.7
8～10	平成27年度資源・素材関係学協会合同秋季大会(愛媛大)	資源・素材学会	info@mmij.or.jp https://confit.atlas.jp/guide/event/mmij2015b/top	
9～10	第43回日本ガスタービン学会(米子)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
10～11	平成27年度軽金属基礎技術講座「アルミニウムの製造技術」(掛川)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	定員 40名
11	第315回塑性加工シンポジウム「ハイブリッド車、電気自動車に貢献できる塑性加工」(刈谷)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 100名
11	サマースクール2015in東京「非線形有限要素法による弾塑性解析の理論と実践」(中央大)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jsces.org http://www.jsces.org/	8.7
13～14	SPring-8 シンポジウム2015「放射光が先導するグリーンイノベーションへグローバルな視点からの発信～」(九大)	SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC) 他	SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC) 事務局 TEL 0791-58-0970 users@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/2015/sp8sympo2015	
14～15	第25回格子欠陥フォーラム「材料の強化と劣化のサイエンス」(阪大)	日本物理学会・領域10「格子欠陥・ナノ構造」分科・君塚(阪大)	TEL 06-6850-6196 kimizuka@me.es.osaka-u.ac.jp http://www.r10.div.jps.or.jp/	
16～17	第37回安全工学セミナー開催(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 http://www.jsse.or.jp jsse-2004@nifty.com	
16～18	第28回秋季シンポジウム(富山大)	日本セラミックス協会・山口	TEL 03-3362-5232 fall28@cersj.org http://www.ceramic.or.jp/ig-syuki/28th/	
16～18	日本金属学会秋期講演大会(九州大学伊都キャンパス)(本号473頁)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312	
16～20	国際トライボロジー会議 東京 2015 (ITC TOKYO 2015)(東京理科大)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 http://itc2015.com/	
17	第3回エレクトロニクス薄膜材料研究会「電子・情報・エネルギー素子と機能材料の最近の研究」(九大)(8号416頁)	研究会 No.69・松尾(兵庫県立大)	FAX 079-267-4907 nmatsuo@eng.u-hyogo.ac.jp	9.11
17～18	2015年度技術者継続教育「基礎コース」講習会(神戸)	日本マリンエンジニアリング学会	TEL 03-3539-5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
18	日本金属学会・日本鉄鋼協会 第5回女性会員のつどい(九大)(本号474頁)	日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画合同委員会・梅津(東北大)	rieume@imr.tohoku.ac.jp	
18	平成27年度秋期全国大学材料関係教室協議会(九大)(8号416頁)	全国大学材料関係教室協議会	東田賢二・九大	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
18	第67回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号479頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
18~19	第40回復合材料シンポジウム(金沢工大)	日本複合材料学会	TEL 076-274-9255 nakada@neptune.kanazawa-it.ac.jp	
25	第212回塑性加工技術セミナー(プロセッシング計算力学分科会 第50回セミナー)「微視的情報を得るための数値解析法とそれによる材料加工解析」(東大生産研)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 90名
24~25	第6回社会人のための表面科学ベーシック講座(東京理科大)	日本表面科学会	TEL 03-3812-0266 shomu@sss.org http://www.sss.org	定員 70名
24~26	第39回結晶成長討論会(大津)	日本結晶成長学会・安部	TEL 03-5950-4741 jacg@words-smile.com http://www.jacg.jp/jacg/japanese/frame_main/13/toronkai_39/index.html	
25	第51回 学際領域セミナー 基本から考えるリチウムイオン二次電池(東京)	電気化学会関東支部	TEL 03-3234-4213 ikezuki@electrochem.jp	
25	第54回 材質制御研究会— 材料と光科学の接点—(徳島大)(本号477頁)	中国四国支部・岡田(徳島大)	TEL 088-656-7362 tatsuya-okada@tokushima-u.ac.jp	
26~27	2015年度 JCOM 若手シンポジウム(長野軽井沢)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 JCOM2015wakate@jsms.jp http://compo.jsms.jp/	
28	第183回腐食防食シンポジウム「アルミニウム合金およびアルミニウム合金製品の環境劣化挙動とその評価法・防止策」(中央大)	腐食防食協会	TEL 03-3815-1161	
28	本多光太郎記念講演会(名大)(8号420頁)	東海支部	tookai@numse.nagoya-u.ac.jp	定員 180名 9.14
29	腐食防食部門委員会第306回例会(大阪)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp	
10月				
2	本多記念講演会—金研100周年を前にして—「今に生きる本多イズム」(仙台)(8号420頁)	公益財団法人本多記念会・佐藤(事務長)	TEL 022-215-2868 ma-sato@imr.tohoku.ac.jp	
5	平成27年度第1回臨時社員総会(東京)(本号473頁)	日本金属学会・斎藤	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312	
5~6	第142回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用~応用編~」(名大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
5~8	Asia Steel International Conference 2015(Asia Steel 2015)(横浜)	日本鉄鋼協会	asiasteel2015@issjp.com http://www.asiasteel2015.com	
6	第68回技術セミナー~極値統計解析による材料の腐食寿命予測~(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp http://www.jcorr.or.jp/annai.html	定員 40名
8	関西支部第28回技術研修会「高強度材成形のための金型技術の変遷と現状~金型の表面処理と寿命予測~」(明石)	日本塑性加工学会 関西支部	TEL 090-9280-0383 kansai@jstp.or.jp	9.15
8~9	第5回結晶と組織の配向制御による材料高性能化研究会(黒部)(本号475頁)	研究会 No. 67・井上(大阪府立大)	TEL 072-254-9316 FAX 072-254-9912 inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp	申込 9.30
8~9	第10回高崎量子応用研究シンポジウム~暮らしに役立つ量子ビーム~(高崎)	日本原子力研究開発機構	TEL 027-346-9651 taka-sympo@jaea.go.jp http://www.taka.jaea.go.jp/	
8~10	第51回熱測定討論会(東京電機大)	日本熱測定学会	TEL 03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com http://chem.ru.dendai.ac.jp/jccta51/	参加予約 9.11
10	セラミックス大学2015(CEPRO2015)(東京大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp	定員 120名
12~16	9th International Conference on Reactive Plasmas and 68th Gaseous Electronics Conference/33rd Symposium on Processing Plasmas (HAWAII)	応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会	ICRP-9 Conference Office icrp9@intergroup.co.jp +81-52-581-3241	
13~14	第17回破壊力学シンポジウム(京都)	日本材料学会	FAX 075-761-5325 http://www.jsms.jp/	
13~17	第1回材料 WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 http://jsms.jp/jsmsweek/kaikoku2.htm	
14	第223回西山記念技術講座「表面処理鋼板の技術展開」(東京)	日本鉄鋼協会・楢岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mulvnm2m	
14~15	機械材料・材料加工技術講演会(広島大)	日本機械学会・荒木	TEL 03-5360-3506 araki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/mpd/	
14~15	第24回初心者のための疲労設計講習会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp	定員 40名
14~16	第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR2015)(東京)	日本学術会議・小阪(日本機械学会)	TEL 03-5360-3505 http://www.jsme.or.jp/conference/jcossar2015/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
15~16	講習会「もう一度学ぶ機械材料学」機械・製造技術者のための基礎講座-(東京)	日本機械学会・荒木	TEL 03-5360-3506 araki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/mpd/	定員 60名
15~16	2015年度技術者継続教育「基礎コース」講習会(神戸)	日本マリンエンジニアリング学会	TEL 03-3539-5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
16~17	第63回塑性加工技術フォーラム「金型の寿命向上に向けた最新技術」(諏訪)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 70名
17	第14回 機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム(京都)	日本材料学会	FAX 075-761-5325 design14@jsms.jp http://www.jsms.jp	講演 7.3
19~21	第45回結晶成長国内会議(NCCG-45)(北大)	日本結晶成長学会・安部	TEL 03-5950-4741 jacg@words-smile.com http://www.jacg.jp/jacg/japanese/frame_main/18/nccg-45/index2015.html	参加 9.18
19~20	第9回状態図・熱力学セミナー(東京)(8号420頁)	日本学術振興会産学協力研究委員会 合金状態図第172委員会・梶原(東工大)	TEL 045-924-5635 kajihara@materia.titech.ac.jp	
19~21	第36回日本熱物性シンポジウム(東北大)	日本熱物性学会	TEL 022-217-5277 jstp@microheat.ifs.tohoku.ac.jp http://www.jstp2015.com/	
20	早稲田大学各務記念材料技術研究所オープンセミナー(早大)	早稲田大学各務記念材料技術研究所	TEL 03-3203-4782 zaikenjimu@list.waseda.jp http://www.waseda.jp/zaiken/index.html	定員 150名
20~21	第60回表面科学基礎講座(阪大)	日本表面科学会	TEL 03-3812-0266 shomu@sss.jp.org http://www.sss.jp.org	10.14
21	第224回西山記念技術講座「表面処理鋼板の技術展開」(大阪)	日本鉄鋼協会・樋岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mulvnlm2m	
22~23	第37回安全工学セミナー開催(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	
23	第8回腐食・防食セミナー「各種産業分野における局部腐食の最前線-現象と対策」(大阪大)	腐食防食学会関西支部・春名(関西大)	TEL 06-6368-1121 haruna@kansai-u.ac.jp	
25~30	第10回新物質及び新デバイスのための原子レベルキャラクタリゼーションに関する国際シンポジウム(松江)	日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会・永富(旭化成)	TEL 0545-62-3248 alc15@jsps141.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp http://alc.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/alc15/	
26~28	第85回マリンエンジニアリング学術講演会(富山)	日本マリンエンジニアリング学会	TEL 03-3539-5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	講演 6.25
28~29	第47回溶融塩化学討論会(神戸大)	電気化学会溶融塩委員会・水畑(神戸)	TEL 078-803-6186 mizuhata@kobe-u.ac.jp http://msc.electrochem.jp/	
29	第64回塑性加工技術フォーラム「復興支援企画 医工連携の現状と課題」(いわき)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 100名
29~30	第51回 X線分析討論会(姫路)	日本分析化学会 X線分析研究懇談会・村松	TEL 079-267-4929 murama@eng.u-hyogo.ac.jp	
29~31	第66回塑性加工連合講演会(いわき)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
11月				
1~4	The 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (10th ISEM '15-Matsue) (松江)	日本実験力学会・小林(新潟大)	office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp TEL 025-368-9310 http://jsem.jp/	
2~3	日本銅学会第55回講演大会(阪大)	日本銅学会	TEL 03-3836-8801 kazu@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/	
5~7	第3回グリーンエネルギー材料のマルチスケール創製研究会(沖縄)(本号476頁)	研究会 No. 71・吉見(東北大)	TEL/FAX 022-795-7324 yoshimi@material.tohoku.ac.jp http://www.msre.kumamoto-u.ac.jp/~mice/green/	申込 10.9
5~7	第36回 超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム(韓国・釜山)	超音波エレクトロニクス協会・小野寺(東工大)	TEL 045-924-5598 onodera@iuse.or.jp http://www.use-jp.org	事前申込 10.21
6	日本希土類学会第33回講演会(東京)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/lecture.html	
10~12	第56回高圧討論会(新潟)	日本高圧力学会	TEL 070-5658-7626 touronkai56@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/56forum/	講演 7.17
11	第18回ミレニアム・サイエンス・フォーラム(東京)	ミレニアム・サイエンス・フォーラム	TEL 03-6732-8966 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
11~13	The Joint Conference of HSLA Steels 2015, Microalloying 2015, OES 2015 (Hangzhou, Zhejiang Province, P. R. CHINA)	CSM,CAE (The Chinese Society for Metals Mr. WANG Lei and Mrs. LIU Fang)	Tel +86-10-65211205 or 65211206 Fax +86-10-65124122 hslasteels2015@csme.org.cn	
12	金属セミナー「半導体における点欠陥と拡散—基礎と最先端デバイス」(東京)(本号474頁)	日本金属学会・越前会	☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp	事前申込 11.4
13	第67回白石記念講座「新しい世紀の形態計量学—数学と鉄鋼研究のコラボレーション—」(早大)	日本鉄鋼協会・栖岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/muwuv846u	
13~15	第23回機械材料・材料加工技術講演会(広島大)	日本機械学会・荒木	TEL 03-5360-3506 araki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/conference/mpdconf15/	
13~15	第1回日本機械学会イノベーション講演会(広島大)	日本機械学会・泰(名大)	TEL 052-789-5223 yuhaseb@mech.nagoya-u.ac.jp http://www.jsme.or.jp/conference/mpdconf15/	
14	セラミックス大学2015(CEPRO2015)(上智大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp	定員 120名
16~18	第28回国際超電導シンポジウム(ISS2015)(東京)	国際超電導産業技術研究センター	TEL 044-850-1612 iss@istec.or.jp http://www.istec.or.jp/ISS	
18~19	第37回安全工学セミナー開催(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	
19~20	第20回アコースティック・エミッション総合コンファレンス(名古屋)	日本非破壊検査協会・中村	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	参加 10.16
21~22	軽金属学会第129回秋期大会(日本大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 jilm1951@jilm.or.jp http://www.jilm.or.jp/	予約申込 10.15
24~27	第2回東アジア顕微鏡学会議(EAMC2)(姫路)	日本顕微鏡学会他	TEL 03-5389-6640 eamc2@microscopy.or.jp http://www.eamc2.org/	
25~27	第41回固体イオニクス討論会(北大)	日本固体イオニクス学会・幅崎(北大)	http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/elechem/41thsolidionics/	
27	第68回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号479頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
27~29	ISETS '15エコトピア科学に関する国際シンポジウム2015(名大)	名古屋大学エコトピア科学研究所・和久(名大内山研)	FAX 052-789-4219 m-waku@esi.nagoya-u.ac.jp http://www.esi.nagoya-u.ac.jp/h/isets15/	
12月				
1~3	2015年真空・表面科学合同講演会 第35回表面科学学術講演会・第56回真空に関する連合講演会(つくば)	日本表面科学会, 日本真空学会	taikai15@sss.org http://www.sssj.org ofc-vs@vacuum-jp.org http://www.vacuum-jp.org/	
2	第20回資源循環型ものづくりシンポジウム(名古屋)	第20回資源循環型ものづくりシンポジウム実行委員会	TEL 052-736-5680 ims@nipc.or.jp	
2~4	第42回炭素材料学会年会(関西大)	炭素材料学会	FAX 03-3368-2827 tanso-desk@bunken.co.jp	講演 8.17
2~4	EcoDesign 2015国際会議(9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing)(東京)	エコデザイン学会連合他・高橋(東大)	TEL 03-5841-6499 ecodesign2015_secretariat@ecodenet.com	
3~4	第23回新粉末冶金入門講座(京都産業大)	粉体粉末冶金協会	TEL 075-721-3650 inoue@jspm.or.jp	11.20
3~4	電気加工学会全国大会(2015)(徳島)	電気加工学会・溝渕(徳島大)	TEL 088-656-9741 a-mizobuchi@tokushima-u.ac.jp http://www.jsme.or.jp/	
10~11	第53回高温強度シンポジウム(七尾)	日本材料学会	FAX 075-761-5325 http://www.jsms.jp/	
18~20	TWENTY-FOURTH International Symposium on PROCESSING AND FABRICATION OF ADVANCED MATERIALS [PFAM XXIV] (12.18-20) (Osaka university)	Kansai University・Prof. Ikeda (Kansai Univ.)	http://pfam24.jp/	
19	平成27年度 高専女子フォーラム in 東北(仙台)	国立高等専門学校他	TEL 022-391-5537 gakumu@sendai-nct.ac.jp http://www.kosen-k.go.jp/kosengirl/jyoshi-forum/	
19	2015年度計算力学技術者(CAE技術者)の資格認定「1・2級」試験・講習会(東京)	日本機械学会・石澤	TEL 03-5360-3506 caenintei@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/cmnteintei.htm	
23	平成27年度 高専女子フォーラム in 関西(明石)	国立高等専門学校機構他	TEL 078-946-6017 soumu.jim@akashi.ac.jp http://www.kosen-k.go.jp/kosengirl/jyoshi-forum/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
1月(2016年)				
7~8	第54回 セラミックス基礎科学討論会(佐賀)	日本セラミックス協会 基礎科学部会・渡(佐賀大)	TEL 0952-28-8683 jimukyoku-54@ce.saga-u.ac.jp http://kiso54.chem.saga-u.ac.jp/	
8	第69回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号479頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
14~15	第37回安全工学セミナー開催(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	
23	第21回高専シンポジウム in 香川(丸亀)	高専シンポジウム協議会, 香川高等専門学校	TEL 0875-83-8506 esyomu@t.kagawa-nct.ac.jp http://www2.es.kagawa-nct.ac.jp/sympo21/	
2月				
15	KAST 教育講座「走査型プローブ顕微鏡の最新活用術」(川崎)	神奈川科学技術アカデミー	TEL 044-819-2033 takagi@newkast.or.jp	定員 20名
3月				
11	第70回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号479頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
21	平成27年度 高専女子フォーラム in 九州沖縄(北九州)	国立高等専門学校機構他	TEL 093-964-7200 s-soumu@kct.ac.jp http://www.kosen-k.go.jp/kosengirl/jyoshi-forum/	
23~25	日本金属学会春期講演大会(東京理科大学葛飾キャンパス)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312	
8月				
1~5	第9回環太平洋先端材料とプロセス国際会議(PRICM9)(京都)	日本金属学会・梶原	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 pricm_9@nta.co.jp http://web.apollon.nta.co.jp/PRICM9/	Abstract 11.1
9月				
5~9	第5回 ICFSMA'16 国際会議(強磁性形状記憶材料に関する国際会議)(仙台)	第5回 ICFSMA'16 国際会議組織委員会・大森(東北大)	TEL 022-795-7323 icfsma@material.tohoku.ac.jp http://www.material.tohoku.ac.jp/~icfsma/	事前予約 6.30
11月				
1~4	The 11th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (11th ISEM '16-Ho Chi Minh)(Vietnam)	日本実験力学会・小林(新潟大)	nmtam@hcmut.edu.vn TEL +84-8-38-647-256 ext. 5590 http://www.jsem.jp/	

2015, 2016年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

委員長	御手洗容子						
副委員長	大塚 誠						
委員	赤瀬善太郎	浅野耕太	池田賢一	池田大亮	石本卓也	上田恭介	
	梅津理恵	大津直史	大野直子	大場洋次郎	大森俊洋	北村一浩	
	小泉雄一郎	齊藤敬高	佐藤和久	佐藤幸生	下島康嗣	下田一哉	
	杉浦夏子	芹澤 愛	千星 聡	染川英俊	高橋 淳	高林宏之	
	滝沢 聡	竹田 修	武田雅敏	田中真悟	田中秀明	田中康弘	
	多根正和	田村友幸	垂水竜一	堤 祐介	寺田大将	寺西 亮	
	戸高義一	中村貴宏	長谷川誠	畠山賢彦	藤枝 俊	府山伸行	
	堀内寿晃	堀部陽一	本間智之	松尾元彰	水本将之	宮岡裕樹	
	村石信二	森戸春彦	山下良之	山田高広	山室佐益	横田智之	
	湯蓋邦夫	吉矢真人	和田 武	渡辺博行			

まてりあ 第54巻 第9号 (2015) 定価(本体1,700円+税) ¥120円

年間機関購読料金52,400円(税・送料込)

発行所 公益社団法人日本金属学会

発行日 2015年9月1日

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

発行人 山村英明

TEL 022-223-3685

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

FAX 022-223-6312

発売所 丸善株式会社

郵便振替口座 02210-2-5592

〒105-0022 東京都港区海岸 1-9-18

日本金属学会会報「まてりあ」への投稿について

会報「まてりあ」をより多くの皆様にご活用していただけるよう投稿記事を歓迎いたします。
投稿規程、執筆要項および下記要領によりご投稿下さい。

～会報編集委員会～

(1) 種別(規定掲載頁)(規定字数内)

- 1. 入門講座**(4頁)(9,340字)
金属のみならずセラミックス、高分子を含めた材料一般に関して境界領域の材料や物づくりの実際などの講義を通して広く会員に情報を提供する。
- 2. 講義ノート**(6頁)(14,500字)
材料に関係する基礎学問分野についてわかりやすく講義してもらう。
- 3. プロムナード**(4頁)(9,340字)
金属・材料に関する話題にかぎらず、社会、経済、歴史などを含む多くの分野からの「比較的短くて分かりやすく」「会員が教養として知って置くべき事柄」「提言」「トピックス的な話題」など。
- 4. 解説**(7頁)(17,100字)
新しい特定の問題を取り上げて、専門外の会員にも分かるように解説したもので、さらに勉強しようとする人のために参考となる文献も示しておく。
- 5. 最近の研究**(8頁)(19,700字)
最近の重要な研究のうち、比較的せまい範囲のテーマを取り上げて、国内外の最近の研究成果を紹介する。各分野の現状、現在の問題点などを取り上げて、総括的に分かり易く記述したもので、その分野の研究を進める上で参考となる内容とする。
- 6. 技術資料**(8頁)(19,700字)
直接実務に利用できるもので、実際に行う場合に必要となる条件、装置の説明、あるいは技術的データの収集等により参考資料として役立つもの。
- 7. 集録**(9頁)(22,300字)
文献を主眼として問題点を論じ、批判するもので今後の方針を示唆することをねらいとする。文献のみを集録し解説を行うものも含む。
- 8. 実学講座**(4頁)(9,340字)
特許取得、ベンチャー企業の設立、研究開発マネジメント、教育法、学習法などについて記事にする。
- 9. 材料科学のバイオニアたち**(5頁)(11,900字)
材料科学に携わった先人たちの偉業を紹介する。
- 10. 新進気鋭**(4頁)(9,340字)
“はばたく”は大学院修士課程修了者以上を対象とし、ここでは30歳前後の若手研究者を対象として研究・仕事の紹介と将来展望について紹介してもらう。執筆は単独名とする。
- 11. 材料教育**(4頁)(9,340字)
材料教育に関する話題。
- 12. トピックス(制限頁;2頁)**(4,150字)
最近の情報を手短かに紹介するもので、話題は限定しない。
- 13. 物性・技術データ最前線**(4頁)(9,340字)
形式は問わず、情報は少なくとも、多く読者が必要とするタイムリーな最新の物性、技術データを紹介する。
- 14. 材料ニュース**(2頁)(4,150字)
新聞で発表された材料関連ニュースを新聞内容よりは詳しくできるだけ迅速に記事にする。
- 15. プロジェクト研究報告(有料)(原則35頁)**
特定研究A、B、未来開拓、戦略基礎などの公的資金補助によるプロジェクト研究成果を有料掲載する。

- 16. 産官学交差点**(1頁)(2,200字)
材料に関係した産官学の情報交流の場を設ける。
- 17. 材料発ベンチャー**(2頁)(4,150字)
材料関連ベンチャー企業の経験者に経験談等を記事にしてもらう。
- 18. 新技術・新製品裏話**(2頁)(4,150字)
金属学会新技術・新製品技術開発賞を獲得したグループに開発にあたっての苦労、裏話を紹介してもらう。
- 19. 談話室**(1頁)(2,200字)
気軽な意見の発表、学会に対する質疑応答、情報交換等。
- 20. はばたく**(1頁)(2,200字)
大学院生など新鋭の方々が、著者自身の研究への取り組み方などについて述べる。
- 21. 紹介**(1頁)(2,200字)
組織変更・改革、産業界の動向その他。
- 22. 国際学会だより**(1頁)(2,200字)
- 23. 研究室紹介**(1～2頁)(2,200～4,700字)
- 24. 委員会だより**

(2) 投稿の方法

- 種別の1～15については、執筆要項に定める方法で作成し、制限頁以内にまとめた原稿とその論文または記事のねらい(200字～300字)をフォーマット用紙に記述して会報編集委員会までご送信下さい。審議の上、受付の可否を決定します。
- 種別の16～24については、執筆要項に定める方法で作成し、制限頁以内にまとめた原稿をお送り下さい。但し、原稿の採否や掲載号は会報編集委員会にご一任下さい。

(3) 投稿の要件

- 和文であり論文又は記事として未投稿、未掲載でかつオリジナリティがあること、規定頁を超えないこと、金属とその関連材料の学術および科学技術の発展に寄与するものであること等、ホームページに掲載している会報投稿規程を参照して下さい。

(4) 著作権の帰属

- 会報に投稿された論文および記事の著作権は、この法人の著作権規程により、この法人に帰属します。

(5) その他留意事項

- 原稿は、専門外の読者にも分かるようにご執筆下さい。
- 原稿は、会報編集委員会にて審査いたします。その結果、場合によっては掲載をお断りする場合があります。また、掲載号等についても、本編集委員会が決定いたします。
- 図表の引用に関しては、著作権者への転載許可手続きを著者ご自身で行ってください。
- 詳細は会報投稿規程をご覧ください。

(6) 会報投稿規程と執筆要項

- ホームページ：[「まてりあ」](#) → まてりあへの投稿 をご覧ください。

(7) 原稿送付・問合せ先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
公益社団法人日本金属学会 会報編集委員会
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

高純度 GfG

最高温度2,800℃

純度5PPM以下

汚れや飛散のないカーボン材料

■真空、高温炉内材料一式

■炉内部品取替工事

■炭素繊維高温材料

- カーボンヒーター
- 炭素繊維断熱材
- 炉内サポート治具
- 機械用カーボン
- 連続鑄造ノズル
- ホットゾーン改修工事



メカニカルカーボン工業株式会社

本社・工場：〒247-0061 神奈川県鎌倉市台 5-3-25 TEL.0467(45)0101 FAX.0467(43)1680代

事業所：東京 03(5733)8601 大阪 06(6586)4411 福岡 092(626)8745

周南 0834(82)0311 松山 0899(72)4860 郡山 024(962)9155

工場：広見工場 0895(46)0250 野村工場 0894(72)3625 新潟工場 0254(44)1185

http://www.mechanical-carbon.co.jp E-mail : mck@mechanical-carbon.co.jp

超精密転写樹脂 —0.1 μm以下の転写精度—

【シリコン樹脂 プロビルノボ】

【光硬化型樹脂 テクノビット2220】



- 適度な弾力を持ち複雑な形状の転写に最適
- 反応時の温度上昇が全くない
- 5分以下の硬化時間
- パテタイプ（ゴム状）、注射器タイプ（低粘度）の2種類
- 機械部品の磨耗測定や複製用のモールドなど多彩な用途に



- 約40秒で完全硬化（ブルーライト照射）
- 微細構造の転写に最適
- 硬さがあり折れ曲がらない
- 硬化時間が周囲温度に依存しない（0℃～50℃）
- コーティングなしでSEM観察が可能

株式会社
NM ニューメタルスエンドケミカルス
コーポレーション 機械部

本社 〒104-0031 東京都中央区京橋1-2-5(京橋TDビル)
電話 03-5202-5620 FAX 03-3271-5860

大阪支店 〒541-0041 大阪市中央区北浜2-5-23(小寺プラザビル)
電話 06-6202-5108(代) FAX 06-6223-0987



Solutions in Milling & Sieving

100th years of innovation



レッチェ ボールミル研究支援キャンペーン 機器本体価格の最大25%OFF

2015年、おかげさまでレッチェは創立100周年を迎えました。これまで、乳鉢を用いて手作業で行っていた前処理粉碎を、世界で初めて自動化したモルターグラインダーは当時、画期的なイノベーションでした。創立から今日に至るまで、レッチェは絶えずイノベーションを繰り返し、実験用粉碎機、ふるい振とう機、粉体周辺機器のリーディングカンパニーとして世界中のお客様にお使い頂ける様になりました。昨年は100年のイノベーションを象徴する全く新しいタイプのボールミル、高エネルギーボールミルE_{max}を発売しました。これもひとえに、お客様のご愛顧の賜物と、心より感謝申し上げる次第です。

お客様に長年のご愛顧への感謝の気持ちと、新しいイノベーションが生まれる事を願い、「100周年記念 レッチェボールミル 研究支援キャンペーン」を行います。

対象機器

- 高エネルギーボールミル E_{max}
- 遊星ボールミル PM シリーズ全モデル
- 凍結粉碎機クライオミル

機器本体価格の最大25%のクーポンお値引き

(キャンペーン実施期間：
2015年6月22日～2016年3月15日)

※台数に限りがございます。
※対象アクセサリを同時ご購入の場合に適用



ヴァーダー・サイエンティフィック株式会社 (旧社名 株式会社レッチェ)

本社 (ショールーム) 〒160-0022 東京都新宿区新宿5-8-8
TEL:03-5367-2651 FAX:03-5367-2652 email: info@verder-scientific.co.jp
大阪営業所 TEL:06-6534-0621 FAX:06-6534-0622

www.retsch.jp