



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼研究との出会い Encounter of Steel Research

山中晃徳
Akinori Yamanaka

東京農工大学大学院
工学研究院 先端機械システム部門
准教授

1 はじめに

「躍動」を執筆する機会を頂戴し、猪突猛進のごとく進んできた研究生活をふと立ち止まり振り返ってみたところ、鉄鋼研究に関わって10年が経とうとしている。これまでの研究生生活を非常に多くの方々に支えられて送ってこられた幸せを感じると同時に、鉄鋼材料の何を理解できたと言うのであろうかと自戒の念も込み上げてくる。これは鉄鋼研究が奥深く、その面白さゆえに研究者を強く惹きつける反面、鉄鋼材料で見られる複雑な現象は10年では到底理解できるものではないことを示しているようにも感じる。したがって、本稿で筆者の研究内容を読者の皆様に紹介させて頂くには、時期早々ではないかと考え、最小限にとどめたい。それよりも、折角の機会であるので、筆者が鉄鋼研究に微力ながらも携わることになった経緯と、多くの方々にご指導頂きながら進めてきた研究活動を振り返りつつ、今後進むべき道を考えてみたい。

2 鉄鋼研究との出会いと縁

筆者の鉄鋼研究との出会いは、神戸大学工学部機械工学科において富田佳宏先生の研究室に配属されたときである。富田先生の研究室では、TRIP鋼を対象とした研究¹⁻³⁾が行われており、TRIP鋼で生じる加工誘起変態挙動と力学挙動のモデリングに興味を持ち、鉄鋼材料に関する卒業論文研究を始めた。研究を進めるうち、鉄鋼材料に関する様々な文献を読めば読むほど、目の前に広がっている自分の知らない世界に胸が高鳴ったのを覚えている。また筆者は、人生は出会いと縁の連続であると考えているが、筆者の先祖が鎌倉時代の刀工であることも、鉄鋼研究に興味を抱いた一因である。このような縁で、この頃とりわけ興味を持った論文が、京都大学名誉教授 井上達雄先生の日本刀の焼入れ過程のシミュレーションに関する論文⁴⁾である。井上先生は、日本刀の焼入れ

過程において日本刀の美しさの一つである「そり」が生じる様を有限要素法を用いた数値シミュレーションにより再現されており、この論文を読んだ筆者は、鉄鋼材料の相変態挙動や変形挙動のモデリングに関する研究にさらに強い関心を持つことになった。いま考えてみれば、この頃からすでに鉄鋼研究に強い縁を感じ、そして奥深い鉄鋼研究にのめり込みはじめたように思う。

3 フェーズフィールド法との出会い

2005年に神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程（修士課程）に進学してすぐに、富田先生に鉄鋼材料の相変態挙動のシミュレーション方法としてフェーズフィールド法を研究してはどうかとのご指導を頂いた。富田研究室には当時、同大学海事科学部の高木知弘先生（現 京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科 准教授）が共同研究者として定期的に訪問されていた。このような縁に恵まれ、高木先生とフェーズフィールド法を用いた鉄鋼材料の固相変態による組織形成シミュレーションに関する研究を開始することになった。フェーズフィールド法は、1993年に小林亮先生（現 広島大学大学院理学研究科 教授）が凝固過程におけるデンドライト形成過程を数値シミュレーションにより非常に美しく再現された⁵⁾のを契機に、現在では材料中の組織形成過程の強力なシミュレーション方法として広く知られている。筆者がフェーズフィールド法に関する研究を始めたころには、フェーズフィールド法の教科書はほとんど無く、当時物質・材料研究機構の小山敏幸先生（現 名古屋大学大学院工学研究科 教授）の「ふえらむ」の解説論文⁶⁻⁹⁾を大変参考とさせて頂いた。現在では、教科書¹⁰⁻¹³⁾も出版され、フェーズフィールド法を研究しやすい環境になったと思う。

大学院に在籍中の研究では、将来的には鉄鋼材料の複相組織のモデリングを行いたいと考えていたため、フェーズ

フィールド法を用いて鉄鋼材料の基本構成組織であるフェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイトのモデリングとシミュレーションに取り組むことにした。

フェライト相形成のモデリングについては、2元合金凝固のフェーズフィールドモデルを基礎とするFe-C合金のオーステナイト→フェライト ($\gamma \rightarrow \alpha$) 変態のフェーズフィールドモデル^{14,15)}を用いて、図1に示すような強い界面異方性により粒界に沿って形成するフェライト (Allotriomorph フェライト) からオーステナイト粒内へとプレート形状で形成するフェライト相 (Widmanstätten フェライト) への形態変化シミュレーションを行った¹⁶⁾。図1中の u_c は炭素濃度変数であり、炭素のモル分率 x_c と $u_c = x_c / (1 - x_c)$ で関係づけられる。Widmanstätten フェライトやAcicular フェライトなどプレート形状のフェライト相の形成メカニズムは、Fe原子の拡散を伴う拡散型変態¹⁷⁾ またはFe原子の拡散を伴わず結晶構造の変化により進行するせん断型変態¹⁷⁾ のどちらの説もあるが、本研究では拡散型変態により形成すると考えてモデリングを行った。今後、せん断型変態またはその両方のメカニズムでプレート形状のフェライト相の形成過程をフェーズフィールド法でモデリングできれば大変興味深い。

続いて、多結晶オーステナイト相での $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態のマルチフェーズフィールドモデリングに関する研究を行った¹⁸⁾。こ

れは現在も精力的に研究を行っているテーマである。特に、塑性変形したオーステナイト相からフェライト相が核形成し、成長する過程をモデリングするために、結晶塑性有限要素法や結晶塑性高速フーリエ変換法とマルチフェーズフィールド法を組み合わせたシミュレーションモデルの構築を行っている¹⁹⁾。図2は、マルチフェーズフィールド法による $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態のシミュレーション結果である²⁰⁾。しかしながら、筆者の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態のフェーズフィールドモデリングに関する研究では、Fe-C2元合金のみを扱ってきた。しかし、実用の鉄鋼材料のほとんどは多元合金であり、特にMnやSiなどの置換型合金元素が変態挙動に及ぼす影響は大きく、多元合金鋼の拡散型相変態挙動の理解を難しくしている。そこで最近では、マルチフェーズフィールド法と合金熱力学データベースであるThermo-calc²¹⁾との連携計算方法やフェライト/オーステナイト界面での合金元素の分配挙動に関する研究に取り組んでおり、Fe-C-Mn合金やFe-C-Mn-Si合金における $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態挙動のマルチフェーズフィールドシミュレーションの結果を報告している²²⁾。本研究では、マルチフェーズフィールドモデルによりMnやSiなどの置換型合金元素の拡散を伴わずC原子の拡散のみを伴うパラ平衡やC原子の拡散に律速された変態挙動を示す不分配局所平衡などの様々な変態モード²³⁾を統一的に表現し、かつ組織形成過程を記述したいと考えているが、フェーズフィールド法に特有の拡散界面の厚さによる影響と界面領域での濃度分配の計算方法が今後の研究で取り組むべき課題である。

マルテンサイト変態のフェーズフィールドモデリングに関する研究では、Wang²⁴⁾が提案するフェーズフィールドモデルを基礎とし、マルテンサイト変態で生じる変態ひずみを緩和するメカニズムとして自己緩和 (複数バリエーションの形成) のみならず塑性緩和を考慮できる弾塑性フェーズフィールドモデルを構築した^{25,26)}。さらに、塑性緩和においてすべり変形を考慮することで、より精度の良いマルテンサイト組織形成シミュレーションができないかと考え、結晶塑性フェーズフィールドモデルの構築²⁷⁾とマルテンサイト変態への適用を進めている (図3)。

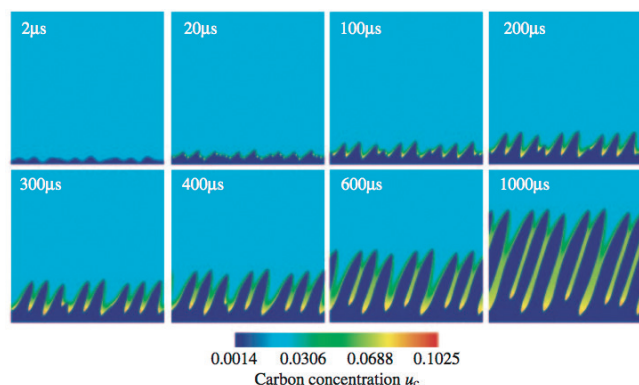


図1 Allotriomorph フェライトから形成するWidmanstätten フェライト相のフェーズフィールドシミュレーション結果¹⁶⁾

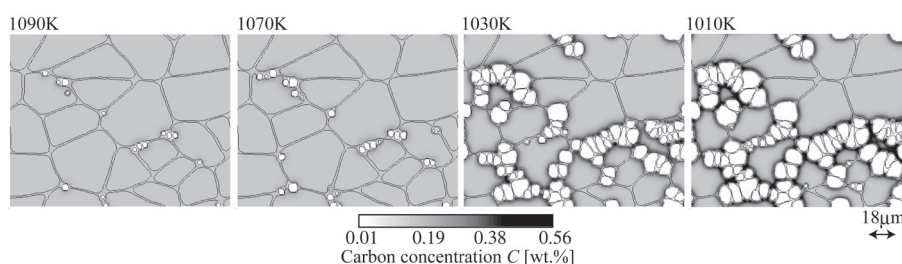


図2 連続冷却過程における加工されたオーステナイト相におけるフェライト相形成のマルチフェーズフィールドシミュレーション結果²⁰⁾

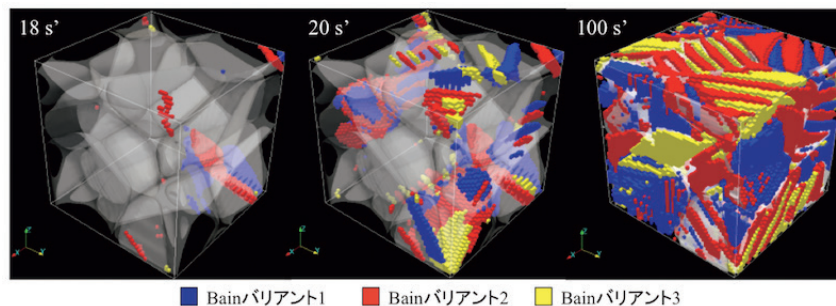


図3 結晶塑性フェーズフィールドモデルによるマルテンサイト変態による組織形成過程のシミュレーション

4 日本鉄鋼協会で得た経験と研究者への道

フェーズフィールド法による鉄鋼材料の組織形成シミュレーションは、組織形態情報（組織のmorphology）を計算できる点で筆者を惹きつけ、大学院生の時にはフェーズフィールドモデルの構築、プログラミング、シミュレーションの実施に没頭できた。このフェーズフィールド法の研究を継続し、自らの職業にしたいと思うようになったのは、2006年から材料の組織と特性部会と創形創質部会の「計算工学による組織と特性予測技術研究会」（主査：岡山大学教授 瀬沼武秀先生）²⁸⁾に参加させて頂けるようになったことが大きい。最初は、冨田先生の勧めで勉強のため一人で参加させて頂き、当時まだ修士1年生であった筆者は、第一線の研究者ばかりが集う研究会（それも本研究会は合宿形式であった）に戦々恐々の思いで参加していたのを覚えている。しかし、機械系の大学院生という身分ながら、研究会を通じて鉄鋼研究の最先端を目の当たりにできたこと、多くの方々に懇切丁寧に直接ご指導を頂く機会を得たからこそ、筆者が迷うことなく鉄鋼研究者としての道を進むことができたのだと思う。

計算工学研究会は、2010年まで4年間にわたり活動され、その狙いは組織材質予測の総合一貫モデルの構築²⁸⁾であった。研究会でなされていた議論からフェーズフィールド法で得られる組織形態情報から力学特性を予測する計算手法に着目し、均質化法に基づく弾塑性・結晶塑性有限要素法による組織イメージベースの変形挙動解析に関する研究を行うに至った²⁹⁾。図4は、マルチフェーズフィールド法で得られる組織形態情報を用いたDual-phase鋼の引張・圧縮変形挙動解析の一例である³⁰⁾。筆者は、計算工学研究会が活動中の2008年に学位を取得したが、フェーズフィールド法による鉄鋼材料の組織形成シミュレーションと組織形態情報に基づく力学特性評価が学位論文のテーマとなり、この10年間の研究テーマとなった。

学位取得後は、東京工業大学 吉野雅彦先生の研究室で助

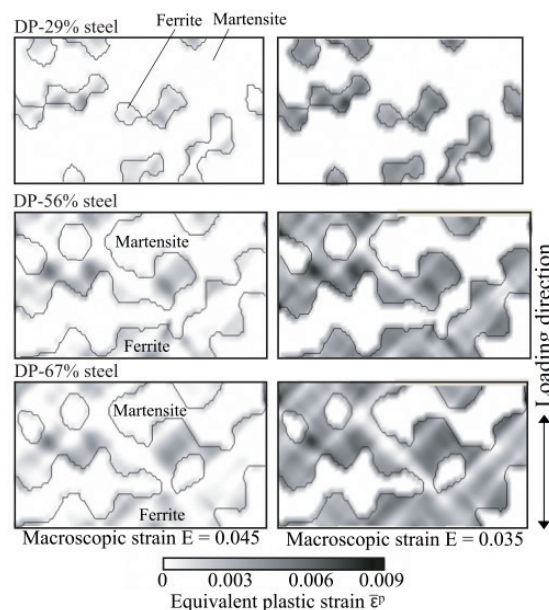


図4 マルチフェーズフィールド法で得られた組織形態情報を用いたDP鋼の弾塑性変形挙動解析³⁰⁾

教として奉職させて頂くこととなった。東工大でもフェーズフィールド法の研究は継続させて頂くことができ、その後も「計算工学による組織と特性予測技術研究会II」（主査：小山敏幸先生）³¹⁾、「鉄鋼インフォマティク研究会」（主査：鹿児島大学教授 足立吉隆先生）と継続して、鉄鋼材料の組織形成や力学特性、変形挙動とその予測技術に関する研究会に参加させて頂いている。これまで参加した研究会で頂いたご恩を返すためにも、鉄鋼協会講演大会や研究会を通じて学生に鉄鋼研究の面白さを伝えたいと願っている。

5 現在そして今後

2012年からは東京農工大学大学院において現職に就き、自らの研究室で個性豊かな学生諸君とともに七転八倒しながらも研究活動を行っている。現所属でも、上記で紹介したフェーズフィールド法による材料組織形成シミュレーショ

ンは主な研究テーマとして注力している。最近では、実験的アプローチでも材料組織の3次元形態情報も比較的容易に取得できるようになってきていることから、GPUを用いたフェーズフィールド法の3次元計算の高速化³²⁾やスーパーコンピュータを用いた大規模3次元計算の研究³³⁾も進めている。さらに、同大学の桑原利彦先生に常に激励を頂きながら、銅板やアルミニウム合金板材の変形挙動のみならず成形性までも材料組織情報から高精度に予測したいと思い、均質化法や結晶塑性有限要素法の研究による数値材料試験や板材成形シミュレーションの研究を精力的に行っている³⁴⁾。

冒頭でも述べたように、これまでの研究生活は、非常に多くの先生方、研究者の皆様とのご縁に恵まれ、また支えられて進めることができた。また、興味のままに、自由奔放に研究活動を進めることができたことは、大変有り難いことである。恐らく、筆者の研究で目指すところ、すなわち鉄鋼材料の組織と力学特性を高精度に予測するための数値シミュレーション技術の研究は、進むべき道として間違えていないだろう。しかしその反面、この10年で本当に何か世の中に立つような研究ができたであろうか、また鉄鋼材料で生じる現象の何を理解しシミュレーションで高精度に再現できたと言えるのであろうかと思う。本稿は、いささか反省文のようになってしまったが、今後もまた多くの方々にご指導を賜りながら、より良い研究、より世の中に貢献できる研究ができるように精進したい。

参考文献

- 1) 富田佳宏, 原田陽雄, 岩本剛: 日本機械学会論文集A編, 60 (1994), 1652.
- 2) Y.Tomita and T.Iwamoto: Int.J.Mech.Sci., 37 (1995), 1295.
- 3) Y.Tomita and T.Iwamoto: Int.J.Mech.Sci., 43 (2001), 2017.
- 4) 井上達雄: 材料, 42 (1993), 1469.
- 5) R.Kobayashi: Physica D, 63 (1993), 410.
- 6) 小山敏幸: ふえらむ, 9 (2004), 240.
- 7) 小山敏幸: ふえらむ, 9 (2004), 301.
- 8) 小山敏幸: ふえらむ, 9 (2004), 376.
- 9) 小山敏幸: ふえらむ, 9 (2004), 497.
- 10) 高木知弘, 山中晃徳: フェーズフィールド法 数値シミュレーションによる材料組織設計, 養賢堂, (2012)
- 11) 小山敏幸, 高木知弘: フェーズフィールド法入門 (計算力学レクチャーコース), 丸善出版, (2013)
- 12) 小山敏幸: 材料設計計算工学 計算組織学編 - フェーズフィールド法による組織形成最適 (材料学シリーズ), 内田老鶴圃, (2011)
- 13) 小山敏幸, 塚田祐貴: 材料組織弾性学と組織形成 - フェーズフィールド微視的弾性論の基礎と応用, 内田老鶴圃, (2012)
- 14) I.Loginova, J.Odqvist, G.Amberg and J.Ågren: Acta Mater., 51 (2003), 1327.
- 15) I.Loginova, J.Ågren and G.Amberg: Acta Mater., 52 (2004), 4055.
- 16) A.Yamanaka, T.Takaki and Y.Tomita: Mater.Trans., 47 (2006), 2725.
- 17) 谷野満, 鈴木茂: 鉄鋼材料の科学 鉄に凝縮されたテクノロジー, 内田老鶴圃, (2001)
- 18) A.Yamanaka, T.Takaki and Y.Tomita: J.Crystal Growth, 310 (2008), 1337.
- 19) A.Yamanaka, T.Takaki and Y.Tomita: ISIJ Int., 52 (2012), 659.
- 20) 山中晃徳, 高木知弘: 材料とプロセス, 24 (2011), 742.
- 21) <http://www.thermocalc.com>
- 22) 瀬川正仁, 山中晃徳: 材料とプロセス, 27 (2014), 913.
- 23) 榎本正人: 金属の相変態 材料組織の科学入門, 内田老鶴圃, (2000)
- 24) Y.Wang and A.G.Khachaturyan: Acta Mater., 45 (1997), 759.
- 25) A.Yamanaka, T.Takaki and Y.Tomita: Mater.Sci.Eng.A, 491 (2008), 378.
- 26) A.Yamanaka, T.Takaki and Y.Tomita: Int.J.Mech.Sci., 52 (2010), 245.
- 27) 山中晃徳, 高木知弘, 富田佳宏: 日本機械学会論文集A編, 75 (2009), 1794.
- 28) 計算工学による組織と特性予測技術の最前線, 日本鉄鋼協会, 平成22年5月.
- 29) A.Yamanaka, T.Takaki and Y.Tomita: Mater.Sci.Eng.A, 480 (2008), 244.
- 30) A.Yamanaka and T.Takaki: Int.J.Auto.Tech., 7 (2013), 16.
- 31) 計算工学による組織と特性予測技術II研究会最終報告書, 日本鉄鋼協会, 平成25年4月.
- 32) A.Yamanaka, T.Aoki, S.Ogawa and T.Takaki: J.Crystal Growth, 318 (2008), 40.
- 33) 岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之: 日本計算工学会論文集, 2013 (2013), 20130018.
- 34) 橋本圭右, 山中晃徳, 川口順平, 櫻井健夫, 桑原利彦: 軽金属, 65 (2015), 196.

(2015年10月21日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

神戸大学 名誉教授

富田 佳宏

新進気鋭の山中晃徳先生（学生時代からの付き合いであり、以後はいつものように君付けで呼ぶことにする）による「躍動」の記事へのコメント役を依頼を受け、学生時代から近い存在であったので、適切性にいささか疑問を感じつつ、引き受けることとしたが、内容の偏りは避けがたくご容赦願いたい。

私が主宰していた固体力学研究室では、力学を通じて事象の本質を解明すること以外に研究課題の設定に制約はなく、自由な研究推進を奨励していた。事実、研究室には常時内外の新進気鋭の研究者が滞在し、ポテンシャルの高い学生が集まって切磋琢磨して研究する雰囲気があった。山中君は卒業研究から、課題とする研究に関係する学問領域を広範多岐にわたり熱心に学び、考え、自身で納得して研究を進める姿勢を貫いていたように思う。初めて参加した国際会議での筆頭者としての口頭発表は、座長をはじめ参加者から高く評価されるとともに、修士課程1年生であることに驚きをもたれた思い出がある。学生るとき既に、機械工学にとどまらない幅広い学会活動を行っており、自身の研究は、鉄鋼の組織形成の理解に新たな方向を示す可能性を有することを確認したようである。

「躍動」に記載されているように、大学院修了後も、材料の微視組織の影響を強く受ける材料の強度や機能な

どの高度化のために、一連の加工プロセスで生じる力学場が組織形成におよぼす影響を考慮しつつ創生される微視組織と材料の力学特性を一貫して評価することの必要性を強く感じており、それを可能とするPhase-field法に注目して研究に邁進している。さらに現在も、材料の微視組織形成および形態発展モデルの構築、および結晶塑性論や均質化法と連成させたシミュレーション手法を開発して、組織形成メカニズムの解明および組織設計基盤の開発に携わっている。さらなる高機能化をもたらす新たな材料設計法の確立を目指して鋭意研究を展開しており、今後の機械工学や材料工学の関連分野の発展に大きく貢献することを期待したい。

まだまだ若く、本人の言を借りると、猪突猛進しているところであるが、自身の経験を活かしつつ、後進の指導・育成のスタイルの確立と、すでに実践している問題意識を共有できる専門分野を異にする研究者も含めたグローバルな協調が重要であり、その成果が楽しみである。有限要素法に草創期から関わってきたものとして、その発展期の各界からの期待と熱気を今Phase-field法に感じている。今後の研究には紆余曲折も予想されるが、それを克服して、関連の研究が、物づくりの根幹を支える基盤研究となり一層発展することを念じて筆を置く。

新日鐵住金(株) 顧問

潮田 浩作

山中先生と私の出会いは、計算工学会第Ⅰ期(2006)でした。先生は、未だ神戸大学大学院機械系修士課程の学生でしたが、初印象は逞しい若手研究者でした。Phase Field (PF) 法を用いた鋼の変態組織（フェライトからマルテンサイトまで）および組織ベースの特性予測技術について、富田先生のご指導のもとまさに猛進されていました。高木知弘先生（京都工繊大）と共同で推進された加工組織と再結晶の連成解析にも魅了されました。修士から博士学位取得までを3年6ヶ月で修了するという快挙を成し遂げられたのもうなずけるご活躍ぶりでした。

産業界における実験屋の私も大いに刺激を受け、神戸大学に押しかけ金属組織の実態や計算材料科学への期待を中心に、皆様と議論させていただいたことを覚えています。

先生は学生の頃から鉄に対する熱い思いに満ち溢れ、研究会のメンバーとも真摯に交流されていました。鉄鋼研究の奥の深さを再認識され、謙虚かつ果敢に研究に取り組む姿は美しいと思います。ご先祖が鎌倉時代の刀工で、見事にそのDNAを800年以上も受け継いでおられるのには感服しました。

学位取得後、東工大助教、そして東京農工大准教授としてPF法を中心に広く活躍され、また熱心に学生をご

指導されている様子を見て頼もしく思っています。その中でも、熱間圧延時の未再結晶オーステナイト(γ)の不均一加工組織の予測、それをベースとした加工 γ からのフェライト(α)の形成および炭素の分配を結晶塑性有限要素法(CP-FEM)と $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態のマルチフェーズフィールド法(MPF)を連成したモデルにより一貫で組織予測する研究は挑戦的で、将来の方向性を示唆しています。さらに、集合組織に基づき板成形(桑原先生と連携)までを評価するモデルや結晶塑性高速フーリエ変換法(CP-FFT)による3Dでの変形解析は期待が大了。

最近の計算機や情報科学および解析技術の進歩は著しく、これらを融合した新展開が期待されています。米国でのMGI (Materials Genome Initiative) もその一例です。鉄鋼協会でも計算工学会Ⅰ期に続き、Ⅱ期(PF)、Ⅲ期(鉄鋼インフォマティクス)と活動が継続中です。山中先生には、日本独自の流れを是非作って欲しいと思います。計算科学や情報科学のみに頼ることなく、実験との連携や基礎研究まで遡った特徴ある取り組みにより新しい研究領域の開拓を期待します。そして、次代を担うアカデミアの代表研究者として本分野をリードしていただきたいと思います。