一般社団法人日本溶接協会　溶接情報センター
WE-COM 溶接技術者交流会
WE-COMマガジン
第27号（2018年1月発行）

特集：ここまで見える！アーク溶接の可視化シミュレーション

溶接冶金現象のシミュレーション

大阪大学大学院工学研究科
才田　一幸

1. はじめに

近年のコンピュータの進歩、発展はめざましく、コンピュータ援用による革新的溶接・接合技術は、多くの製造現場で実用的に適用されるに至っている。また、コンピュータの発展は、溶接・接合に関する学理の解明に対しても多くの恩恵をもたらし、これまでは不可能であった高速かつ大規模計算が可能となり、多くの現象が複雑に関与する溶接・接合現象の定量的解析に絶大な威力を発揮している。溶接・接合に関わる材料科学分野もその例外でなく、計算機シミュレーション技術は、溶接・接合部の欠陥発生や継手特性に密接に関連する材料挙動を定量的に解析したり、高度に制御する上で、必要不可欠なツールとなっている。また、計算機シミュレーション技術は、材料学的現象の解析・理解のみならず、教育・啓発への活用、プロセス・材料の最適化に対しても、非常に重要なアプローチ手法として認識されている。さらに、ごく最近のコンピュータ技術の急速な進歩により、新しい解析手法の提案・適用や、これまで困難であった詳細解析や大規模解析が行えるようになり、解析結果もフルカラー画像や動画など理解しやすい形式で表示する技術（可視化）も進歩してきている。本稿では、溶接冶金現象の計算機シミュレーションの基本原理について概説するとともに、そのシミュレーション事例を紹介する。なお、本稿で使用した専門的な用語（*印）に関しては、末尾の脚注に簡単な説明を付した。

2. シミュレーションの基本原理

溶接冶金現象の一般的なシミュレーション手順を**図 1** に示す。まず、対象とする溶接冶金現象について、等温過程・均熱場における冶金現象をシミュレートし、これに溶接過程の熱サイクル・温度場の情報を加味して、非等温過程・温度場における冶金現象のシミュレーションに拡張する。これらに材料定数や初期値などの入力データを代入して溶接冶金現象を計算し、その結果を可視化するなどして出力する手順となる。等温過程・均熱場における材料挙動のシミュレーションには様々な手法があるが、その詳細は別稿[1)]などを参考にされたい。

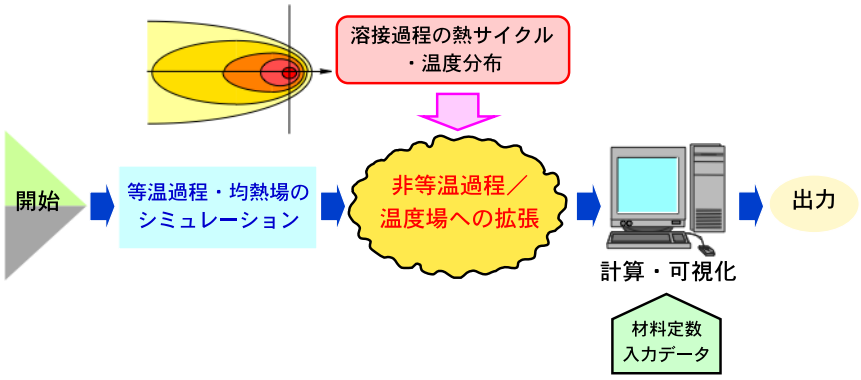


図 1　溶接冶金現象のシミュレーション手順

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved。

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

溶接・接合部の温度解析結果をもとに溶接・接合部における材料挙動を解析するためには、等温・均熱状態における材料挙動解析を非等温過程・温度場に拡張することが必要である。この拡張方法にもいくつかの手法があるが、多くの場合、熱伝導解析結果に基づき、空間的離散化*し、増分法や加算則を用いる解析手法が適用されており、比較的簡便で、かつ、精度の高い解析が可能とされている。

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

3. シミュレーション・ソフトウェア

等温過程・均熱場における材料挙動のシミュレーション・ソフトウェアの中には、いくつか公開あるいは市販されているものもあるが、溶接冶金現象のシミュレーション・ソフトウェアに関しては、考慮すべき現象や挙動が複雑で、いずれも研究者が独自開発したソフト（ハウス・コード）を用いているのが現状である。しかしながら、ごく最近、国家プロジェクトなどにより、溶接部性能保証のための統合シミュレーション技術の開発が進められており、構築されたソフトウェアの一部は、公開・利用が検討されている。

4. シミュレーション事例

(1) 溶接・接合部組織形成および予測

モンテカルロ法*と熱力学計算（Thermo-Calc）の連成解析（ハイブリッドモデル）による溶接部組織形成シミュレーション例を**図 2**[2)]に示す。柱状晶が溶接熱影響部から最大温度勾配方向に沿ってエピタキシャル成長し、溶融池を追うように成長する様子が再現され、実溶接部組織とよく対応することが示されている。

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

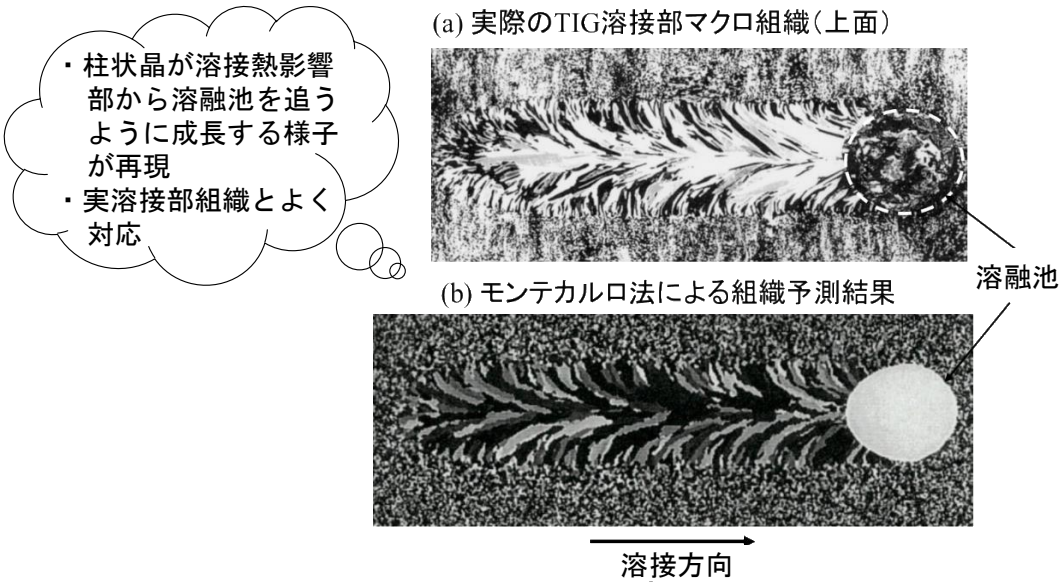


図 2　モンテカルロ法と Thermo-Calc の連成解析による
炭素鋼溶接部の組織形成シミュレーション事例

また、フェーズフィールド（Phase Field）法*による溶接部の組織予測シミュレーション例を**図 3**[3)]に示す。温度降下に伴い、デンドライト樹間の液相／δ 相境界に γ 相が析出し成長する様子が再現できており、残留 δ フェライトは初晶 δ デンドライトの形状に対応することが示されている。

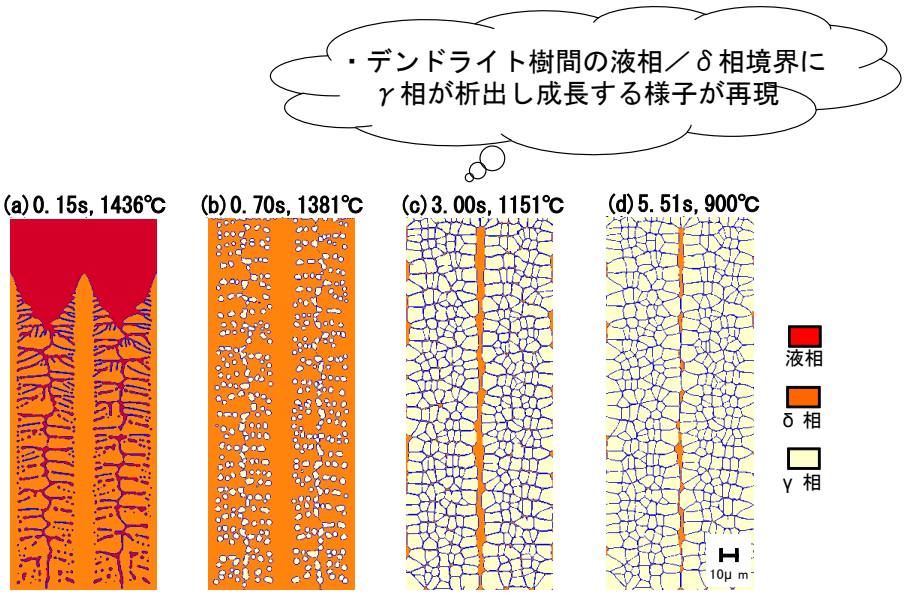


図 3　Phase Field 法による SUS304 溶接部の組織予測シミュレーション事例

二相ステンレス鋼多層盛溶接部におけるフェライト／オーステナイト変態が速度論*的解析と熱伝導解析を組み合わせた手法により予測されている。3 層 4 パスの多層盛溶接（溶加材は母材と同一組成と仮定）を対象に、溶接部におけるオーステナイト量を予測した例を**図 4**[4)]に示す。溶接金属および溶接熱影響部のオーステナイト量が低下した領域の一部は、次層パスの溶接熱影響により、オーステナイト量が回復していることがわかる。特に、リーン二相ステンレス鋼ではビード下領域のオーステナイト量が母材同等に増加するが、標準二相ステンレス鋼では、オーステナイト相の固溶が速く、その後の再析出が遅いため、ビード下領域のオーステナイト量が母材同等まで回復しないことが予測される。

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

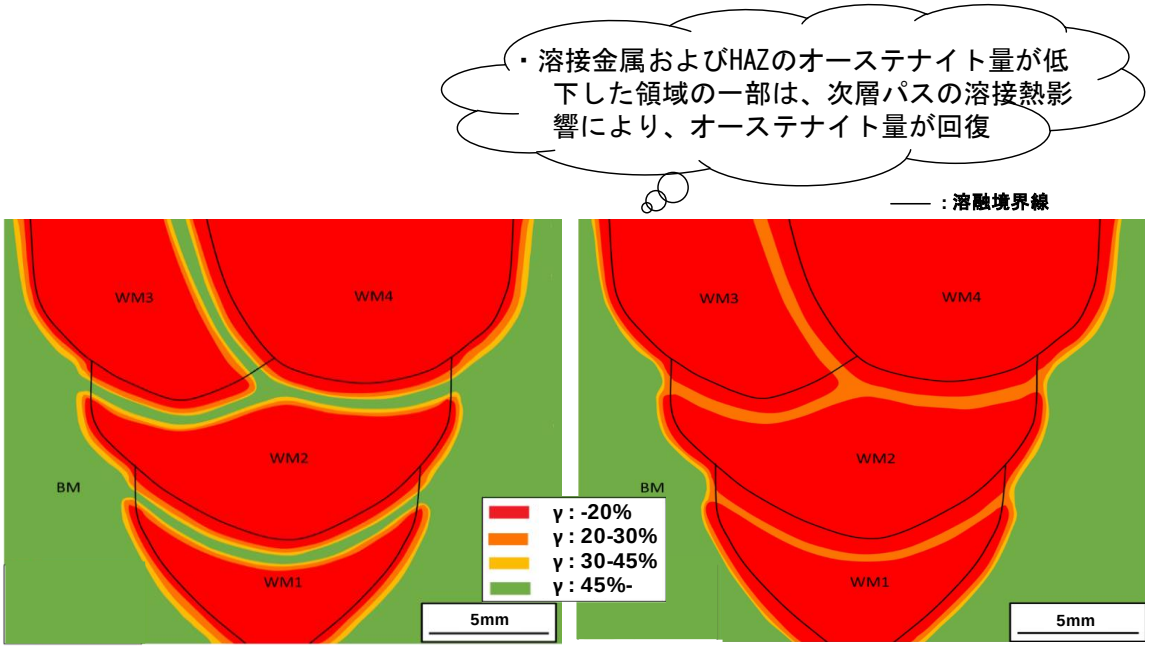


図 4　リーン二相および標準二相ステンレス鋼多層盛溶接部における相変態予測シミュレーション事例

純 Ni 溶接熱影響部の再結晶・粒成長状況をモンテカルロ法により予測した結果の一例を図 5[5]に示す。アーク（ティグ）溶接部では広範囲にわたり再結晶し、結晶粒が成長しているが（影部分）、レーザ溶接部では、再結晶・粒成長がかなり抑制されていることがわかる。

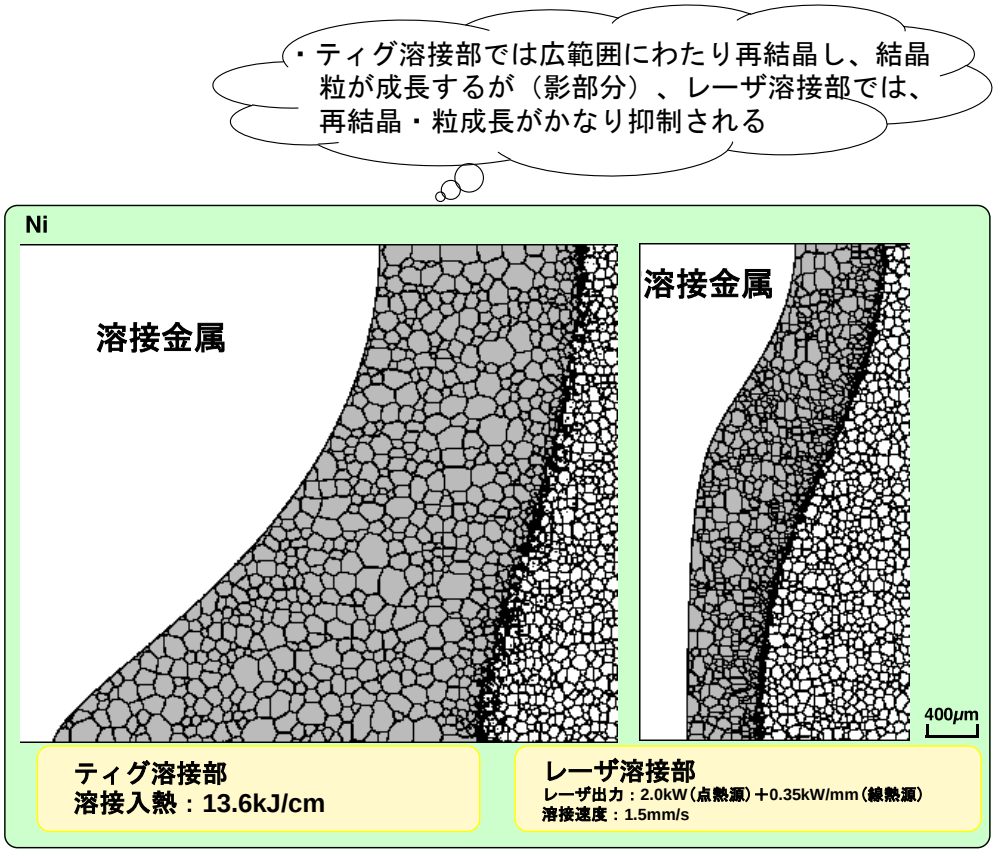


図 5　純 Ni 溶接熱影響部における再結晶挙動の予測シミュレーション事例（モンテカルロ法）

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

(2) 高温割れシミュレーション

ステンレス鋼レーザ溶接部の凝固割れ感受性・割れ発生予測シミュレーション例を**図 6**[6]に示す。過冷理論／凝固偏析理論に基づき、凝固割れ感受性（凝固脆性温度域：BTR）を予測するとともに、応力・ひずみ解析（熱弾塑性 FEM 解析）により、ひずみ曲線を推定し、両者の対応関係（交差の有無）により、凝固割れ発生が予測可能であることが示されている。

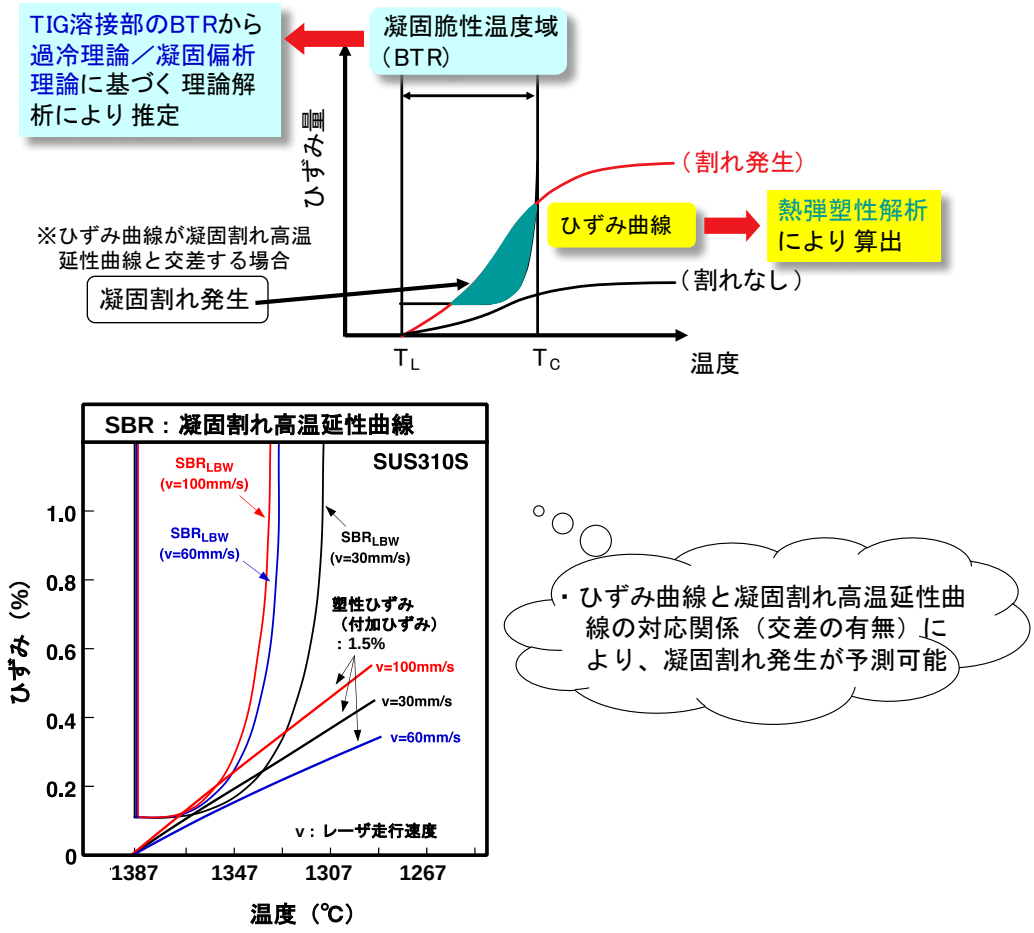


図 6　ステンレス鋼レーザ溶接部の凝固割れ感受性
・割れ発生予測シミュレーション事例

また、冶金＋力学融合モデルによるステンレス鋼レーザ溶接部の高温割れ（凝固割れ）のシミュレーション例を**図 7**[7]に示す。溶接の進行に伴い溶融池後方の凝固脆性温度相当域から割れが発生し、その後、割れが進展していき最終的に停止している様子が確認できる。このように、冶金＋力学融合モデルにより、高温割れの発生→伝播→停止の一連の過程が予測可能であることがわかる。

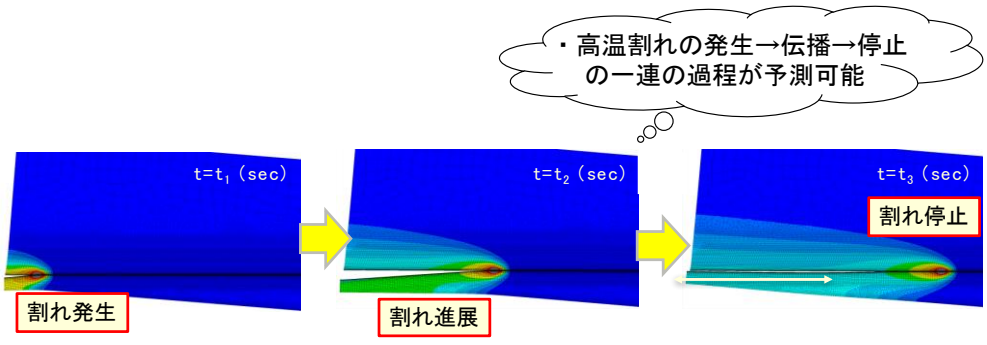


図 7　冶金＋力学融合モデルによるステンレス鋼レーザ溶接部の
高温割れシミュレーション事例

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

(3) 溶接・接合部の特性予測

ニューラルネットワーク*による低合金鋼多層盛溶接熱影響部における硬さおよびじん性予測シミュレーション例を**図 8**[8)]に示す。また、**図 9**[8)]に低合金鋼多層盛溶接熱影響部における硬さ分布の計算値と実測値を比較して示す。両者はおおむね一致していることがわかる。このように、多層盛溶接過程の熱伝導解析(多重熱サイクル計算)とニューラルネットワーク計算を組み合わせることにより、多層盛溶接熱影響部の硬さ分布およびじん性分布を可視化予測できることが示されている。

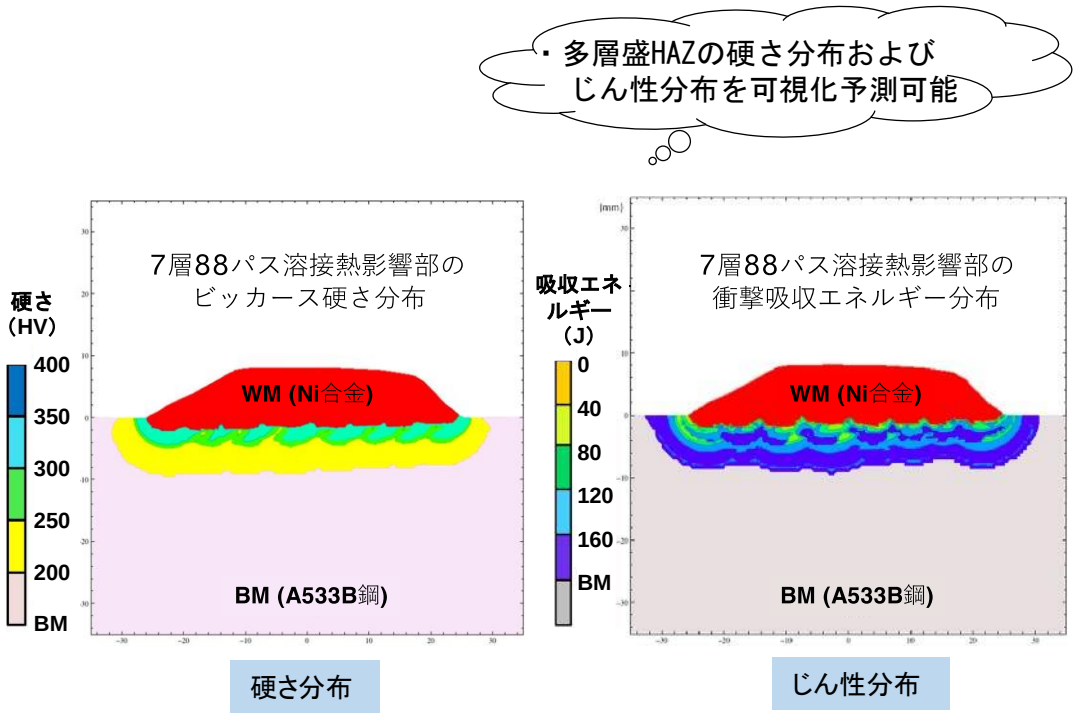


図 8　ニューラルネットワークによる低合金鋼多層盛溶接熱影響部における硬さ・じん性予測事例

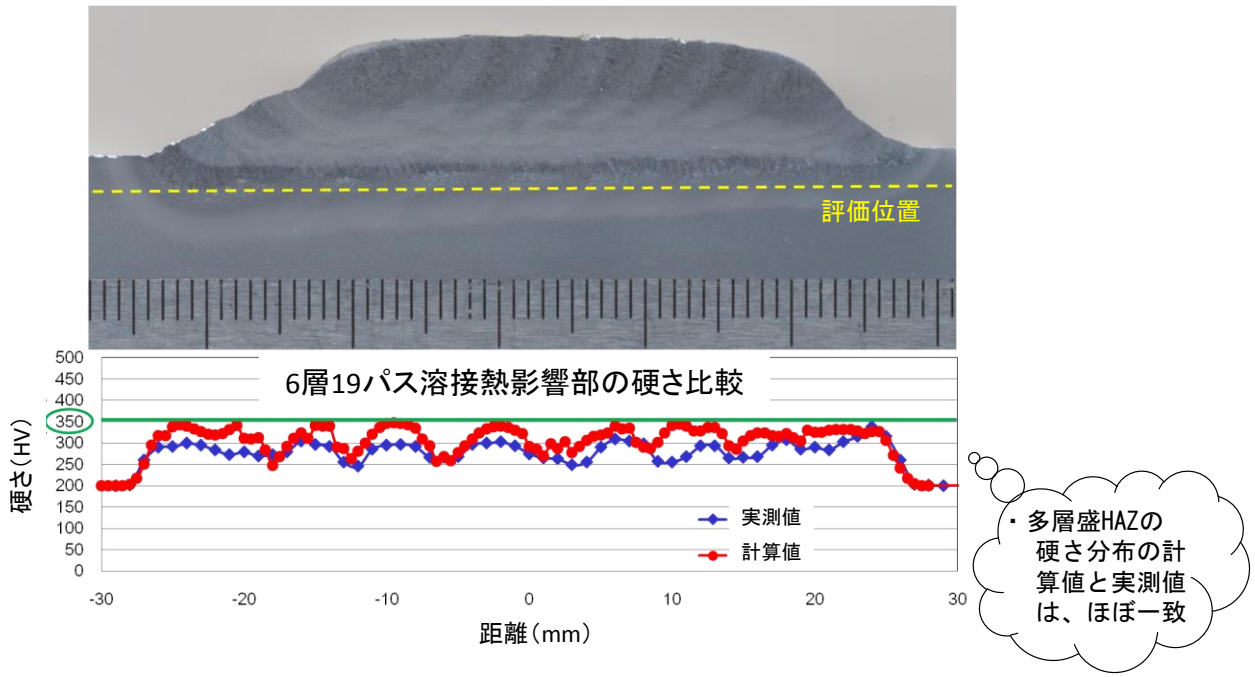


図 9　低合金鋼多層盛溶接熱影響部における硬さ分布の計算値と実測値の比較

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

また、析出・相分解および脆化予測として、二相ステンレス鋼多層盛溶接部（溶加材は母材と同一組成と仮定）における σ 相析出および σ 相脆化予測シミュレーション例を**図 10**[9]に示す。σ 相析出温度域（827～1027℃）に複数回加熱された領域で σ 相析出および σ 相脆化が生じるが、溶接金属における σ 相析出および σ 相脆化の程度は母材溶接熱影響部に比べて軽微であることが予測された。フェライト系ステンレス鋼（Fe-30Cr-2Mo）溶接部のスピノーダル分解および 475℃脆化予測シミュレーション例を**図 11**[10]に示す。等温過程のみならず非等温過程におけるステンレス鋼のスピノーダル分解挙動の解析が行われ、スピノーダル分解過程の組織形成が可視化できている。また、図(b)に示すように、非線形拡散方程式＋析出硬化理論を組み合わせることにより 475℃脆化予測が可能となり、溶接入熱が大きくなるに伴い、HAZ における 475℃脆化の程度が顕著となる傾向が示されている。

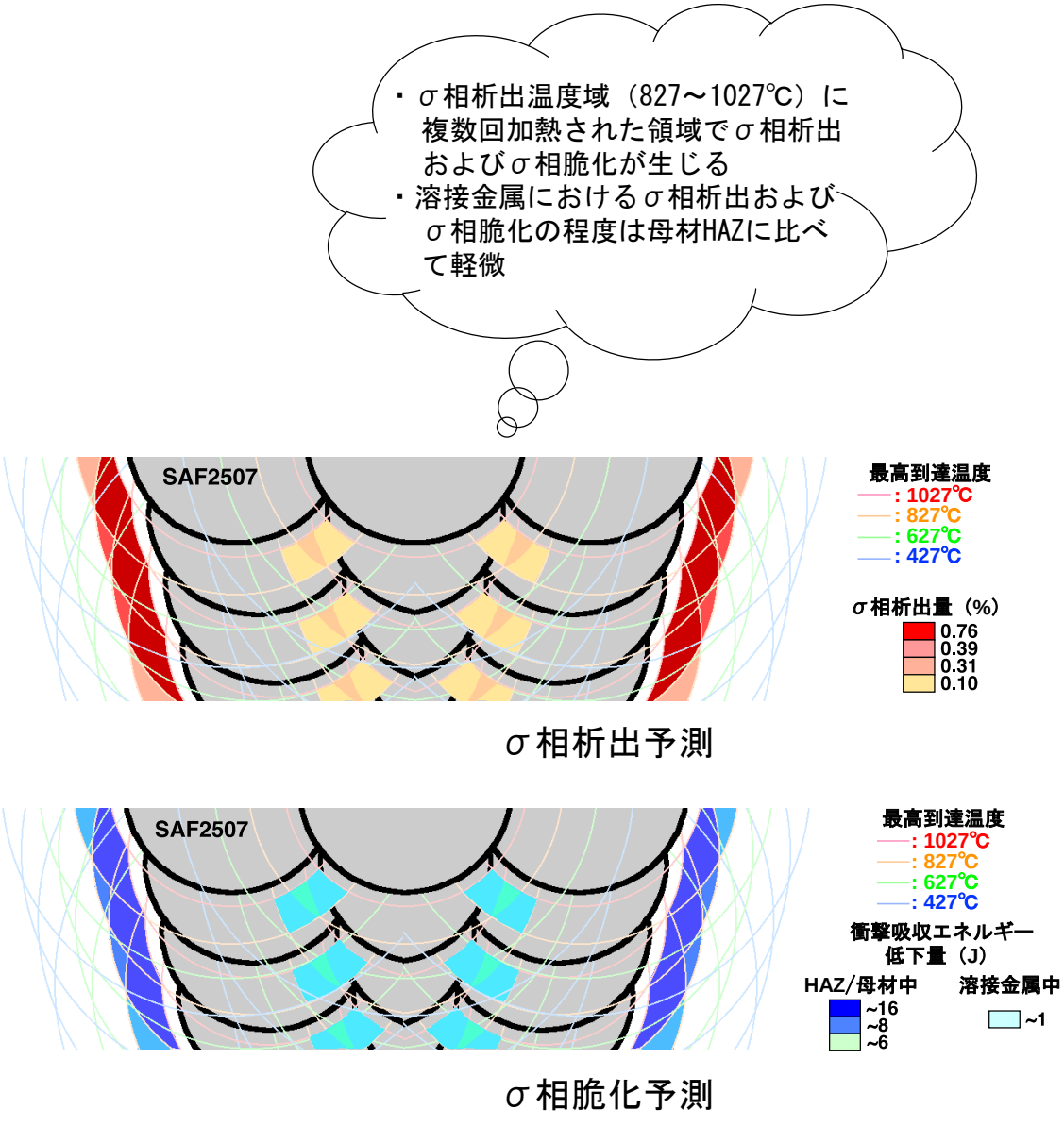
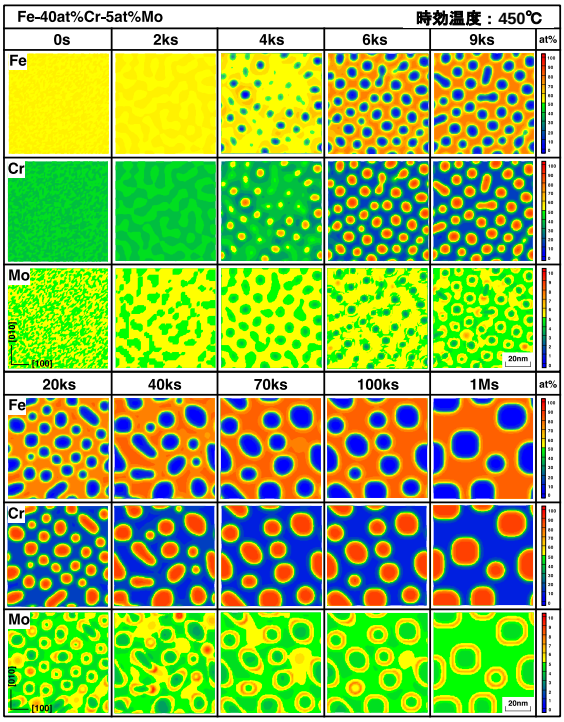


図 10　二相ステンレス鋼多層盛溶接部の σ 相析出および σ 相脆化予測シミュレーション事例

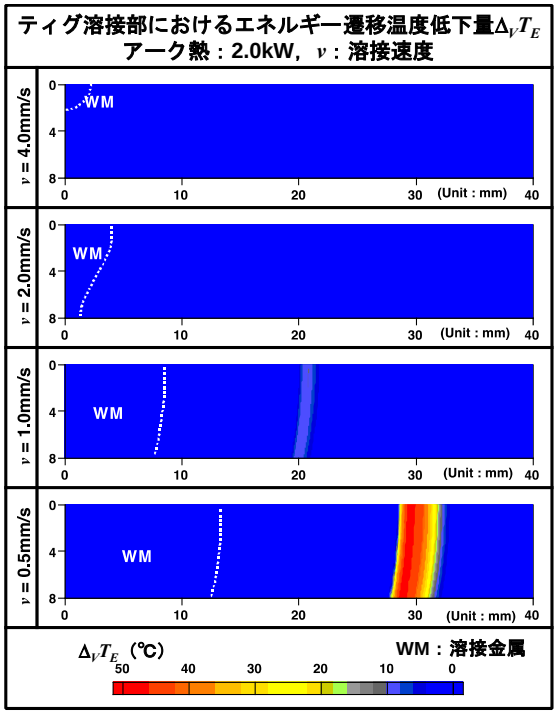
Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

・スピノーダル分解過程の組織形成が可視化可能



（a）スピノーダル分解挙動（等温過程）

・溶接入熱が大きくなるに伴い、HAZにおける475℃脆化の程度が顕著



（b）溶接部の 475℃脆化予測

図 11　フェライト系ステンレス鋼（Fe-30Cr-2Mo）溶接部のスピノーダル分解および 475℃脆化予測シミュレーション事例

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

一方、ステンレス鋼（SUS304）レーザ溶接熱影響部における鋭敏化（Cr 炭化物核生成・析出）予測シミュレーション例を**図 12**[11]に示す。なお、λ 値は Cr 炭化物の核生成状況を示す指標（核生成率）である。最高到達温度が約 650～900℃となる溶接金属に平行な熱影響部の領域において、耐食性が劣化している様子（ウェルドディケイ）が確認され、その傾向は溶接速度が遅くなるに伴い顕著になることが予測されている。

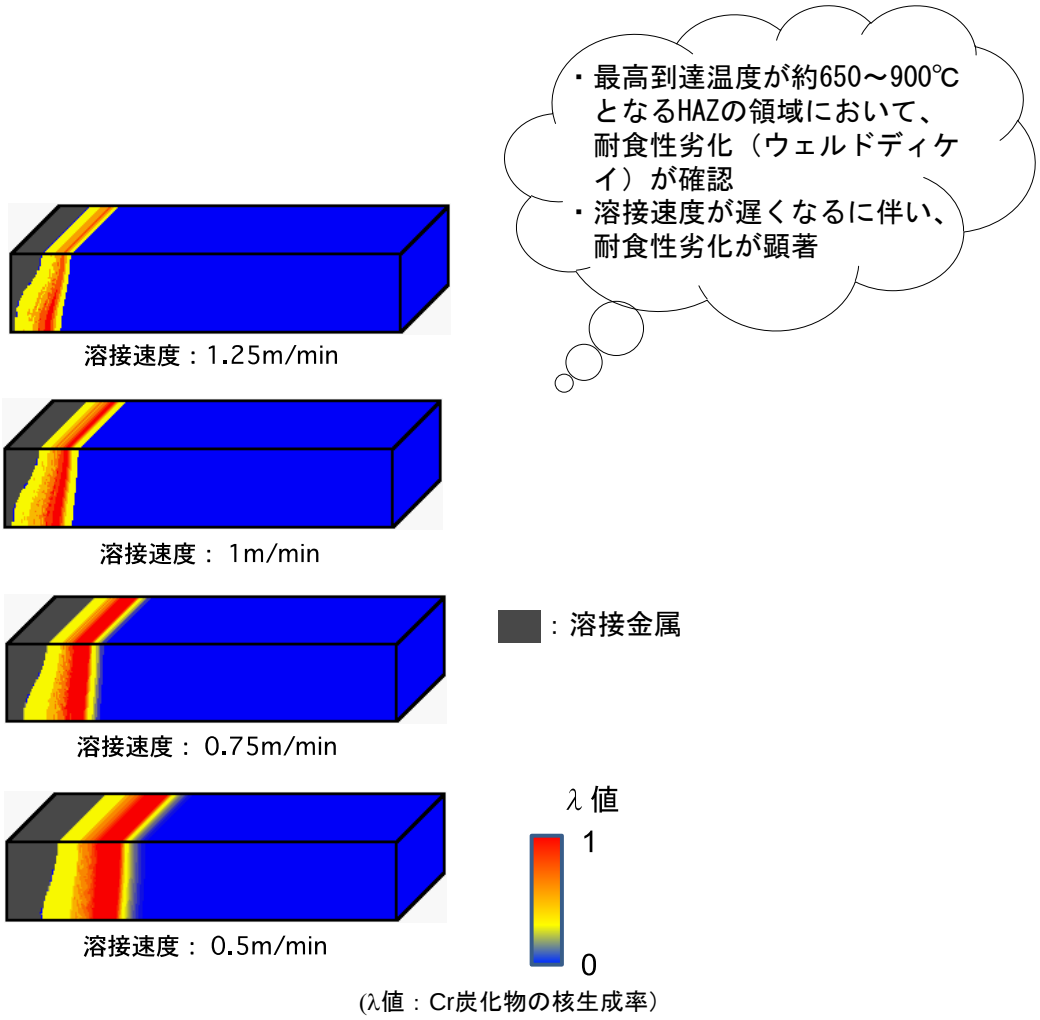


図 12　ステンレス鋼（SUS304）レーザ溶接部における
鋭敏化予測シミュレーション事例

凝固偏析シミュレーションに基づき、SUS316L ステンレス鋼溶接金属（デンドライトセル）における耐孔食性（PRE マップ）を予測した例を**図 13**[12]に示す。なお、FA モードではセル中央部が δ、セル境界部が γ に、AF モードではセル中央部が γ、セル境界部が δ に相当する。溶接金属の凝固セルにおける PRE 値は、AF モードではセル中央部で、FA モードではセル境界部において低下していることがわかる。また、いずれの凝固モードでも、PRE 値は δ/γ 境界で最大となっており、この傾向は溶接速度が大きいほど、また、AF モードより FA モードで顕著となることが予測されている。

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

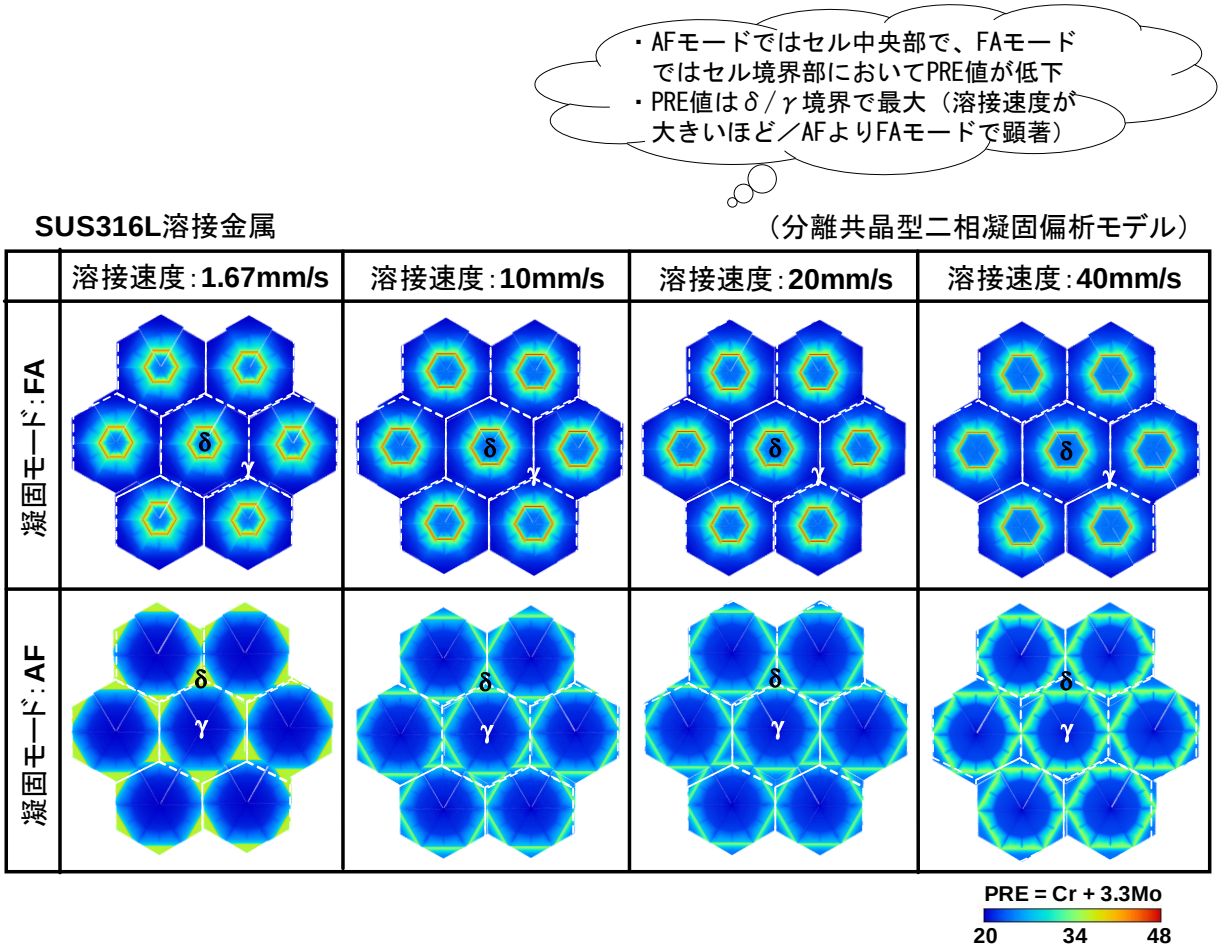


図 13　SUS316L ステンレス鋼溶接金属（デンドライトセル）における耐孔食性予測シミュレーション事例

5. シミュレーションの今後の課題

近年、溶接冶金現象のシミュレーションに関する現状がまとめられ [13]、溶接・接合における材料学的現象の解明・理解に大きく貢献していることが述べられている。しかしながら、現時点でのシミュレーションの今後の課題としては、適用理論式の確立（適用範囲の拡大）、材料定数（物性値）の充実、連成問題への展開、非平衡・準安定状態の取り扱い、などが挙げられる。これらの課題を克服しつつ、溶接冶金現象のシミュレーションが一層進展することを期待したい。

参考文献

1）才田，西本： 溶接学会誌，81-2 (2012), 76.

2）野上，小関，福田： 日本金属学会報，42 (2003), 731.

3）福元，井上： 溶接学会論文集，29 (2011), 197.

4）才田，大西，田辺，小椋，西本，及川： 溶接冶金研究委員会資料，WM-2327-14 (2014).

5）西本，才田，鳥居，大重： 溶接学会論文集，21-2 (2003), 256.

6）才田，西嶋，荻原，西本： 溶接学会論文集，31-2 (2013), 157.

7）柴原，原田，生島： 溶接学会全国大会講演概要，97 (2015), 50.

8） L.Yu, M.Sasa, K.Ohnishi, M.Kameyama, S.Hirano, N.Chigusa, T.Sera, K.Saida, M.Mochizuki and K.Nishimoto: Quart.J.JWS, 31 (2013), 173s.

9）K.Nishimoto, K.Saida and O.Katsuyama: Welding in the World, 50-3/4 (2006), 13.

10）K.Nishimoto, K.Saida and H.Ohshige: Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6, ed. by H.Cerjak, Maney Publishing (2002), 365.

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

11）才田，井上，小椋，森，柴柳，柴原： 溶接学会誌，86-1 (2017), 42.
12）未公表データ.
13）溶接冶金研究委員会編： 溶接学会技術資料 No.16「溶接冶金現象のシミュレーションと可視化」, (2016).

脚注

- 離散化：連続的な情報や物理量を、一定の量や間隔で区切った非連続的な値で表すこと。構造計算で構造物を細かく格子状に区分けすることなどを指し、コンピュータによるデータの取り扱いや計算が容易になる。
- モンテカルロ法：シミュレーションや数値計算で、大量の乱数を条件式に当てはめて問題の近似解を求める方法。
- フェーズフィールド（Phase Field）法：フェーズフィールド法は、熱力学的に評価された界面駆動力により、多相および多結晶で構成されたミクロ組織の時間変化を計算する手法である。メゾスケール（数nm～1mmくらい）における材料内部組織形成を直接計算できる現象論的なシミュレーション法として、1990年代に入り急速に進展してきた。
- 速度論（反応速度論）：反応進行度の時間変化（速度）に関する学問分野のひとつである。反応速度の測定により反応速度式を求め、その内容を検討することによって化学反応の機構を調査したり、進行状況を定量的に評価できる。これに対して熱力学は主として平衡を扱う分野であり、反応の進行や機構の解釈には不適である。
- ニューラルネットワーク：神経回路網と訳され、人間の脳の神経回路の仕組み（情報処理の働き）を模した数学モデルである。コンピュータに学習能力を持たせることにより、様々な問題を解決するためのアプローチが可能である。

＜略歴＞

才 田 一 幸（さいだ　かずよし）

1983 年	大阪大学　工学部　溶接工学科　卒業
1985 年	大阪大学　大学院　工学研究科　溶接工学専攻　博士前期課程　修了
1985 年	大阪大学　工学部　助手
1991 年	学位（工学博士）　取得
自 1991 年 4 月	
至 1992 年 5 月	カナダ・トロント大学客員研究員（冶金・材料科学科）
1996 年	大阪大学　工学部　講師
1997 年	大阪大学　工学部　助教授
1998 年	大阪大学　大学院　工学研究科　助教授
自 2004 年 8 月	
至 2004 年 9 月	フィンランド工学研究センター（VTT）客員研究員
2007 年	大阪大学　大学院　工学研究科　准教授
2012 年	大阪大学　大学院　工学研究科　教授
	現在に至る

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.