

アルミニウムにおける計算材料技術の発展とその産業利用

岩村 信吾*

Development of Computational Material Engineering and Industrial Application on Aluminum Fabrication

Shingo Iwamura*

Keywords: ICME, microstructure modeling, aluminum

1. はじめに

アルミニウムの工業生産が開始されて以来、凝固、加工硬化、回復/再結晶、固溶/析出などの冶金理論に基づいた組織制御技術により、多様なアルミニウム合金が開発されてきた。また、この新材料開発に併せて、TEM (transmission electron microscope) やSEM-EBSP (scanning electron microscope-electron backscatter diffraction pattern) など、理論の検証を行うための実験技術も進歩してきた。しかしながら、工業製品の複雑な製造プロセスを検討する際には、トライ&エラーに頼らざるを得ないのが常であった。この状況に変化が現れたのは、1970年代にコンピュータの利用が始まってからである。コンピュータを利用することで、複雑な加工熱履歴で製造される工業製品に冶金理論を適用する道が開けた。初期の検討は、実験式による単純な予測から始まったが、約40年間の研究を経て、近年では多種の冶金理論(加工硬化、再結晶、固溶/析出)を組み合わせた総合的な計算モデルが開発されるに至っている^{1), 2)}。

このような予測技術の発展は、金属組織のみに限ったものではない。他にも、計算状態図による合金設計、FEM (finite element method) による空間情報を含めた計算、機械的性質の予測モデルなど、計算による予測技術は様々な方面から開発が進んでいる。さらに、これらの技術を組み合わせて使うことで、製造工程から製品特性までを総合的に予測・設計することができる。近年では、この研究分野は統合計算材料技術(ICME: integrated computational material

engineering)として広がりを見せている³⁾。

本報では、まず組織予測技術の歴史と概要を解説し、さらにはそれを用いた広義のICMEの現状と今後の展望について述べる。

2. 組織予測技術

2.1 金属組織研究の小史

近年提案されている組織予測モデルは、個々の冶金現象(加工硬化、再結晶、固溶/析出)を組み合わせた"Physics-Based Model"が主流である。したがって、予測技術の開発には、まず基本原理の理解が必要である。ここでは、各分野の技術の発展を金属組織研究の略年表(**Table 1**)に沿って簡単に紹介する。

(1) 実験手法

冶金研究において最も重要な実験手法は、1853年にSorbyによって開発された光学顕微鏡による金属組織観察であろう。これにより、金属材料が単一の塊ではなく、複雑なマイクロ組織を持つことが認識され、金属組織の研究が始まった。さらに、示差熱分析、電気抵抗測定、比熱測定、X線回折法などの実験手法により、金属組織が材料特性に影響を及ぼすことが明らかになってきた。そのような物性値と金属組織の相関を研究する分野は、物理冶金学と呼ばれるに至った。1930年代になると、電子線を用いた観察装置としてTEMとSEMが開発された。TEMの性能向上に伴い、X線回折法などの間接的な手法でしか確認できなかったGPゾーンや転位を観察することが可能になった。SEMはEBSDと組み合わせられ、集合組織と再結晶を関連付け

* (株)UACJ 技術研究開発所 名古屋センター 第三部
No.3 Department, Nagoya Center, Research & Development Division, UACJ Corporation

Table 1 Research progress in material science.

Experimental technique	Thermodynamics (Phase diagram)	Precipitation	Recrystallization	Work hardening
1853 Sorby: Microstructure observation	1873 Gibbs: Thermo dynamics	1855 Fick: Diffusion law	1829 Savart: Softening by annealing	
1887 le Chatelier: DTA	1889 Arrhenius: Thermal activation law	1906 Wilm: Age hardening		
1912 Laue&Bragg: X-ray diffraction		1926 Volmer&Webber: Nucleation theory		1926 Bailey: Work hardening
1931 Ruska: TEM	1936 Hansen: Phase diagram	1935 Becker: Nucleation theory	1937 Jhonson&Meal: JMAK equation on boundary	(1930's -Bailey, Orowan, Taylor: Dislocation theory)
1935 Knoll: SEM		1937 Guinier&Preston: G.P. zone	1948 Mclean: Solute segregation theory	1946 Orowan: Orowan mechanism
		1949 Zener: Growth law	1948 Zener&Smith: Zener pinning	1953 Cottrell: Cottrell atmosphere
(1950's - Commercial SEM)	(1970's - CALPHAD)	1960 Wagner: Ostwald ripening		
(1960's - Commercial TEM)		1961 Chan&Hilliard: Spinodal decomposition		1976 Kocks: MTS mode
1984 Dingley: SEM-EBSD	1991 Hillert: ThermoCalc	1982 Kempman&Wagner: KWN model		1996 Nes: MMP model
				2000 Gottstein: 3IVM model

る重要な実験手法として発達した。

このような観察・測定技術により得られる実材料の組織情報は、理論の発展をもたらしてきた。組織予測技術に対しても同様で、2000年以降も様々な実験手法（例えば三次元アトムプローブ法、陽電子消滅法、放射光X線回折法、熱起電力測定など）が確立され、既にこれらの手法を計算に組み込んだ組織予測モデルも報告されている。

(2) 熱力学・状態図

1800年代の産業革命の際、蒸気機関の研究を軸に熱力学が発達した。これをミクロ組織に適用したGibbsの熱力学は、例えば析出核生成や再結晶速度論など、様々な冶金現象を考察するベースとなっている⁴⁾。また、Gibbsの熱力学は状態図研究に繋がり、1800年代後半から実験状態図の研究が盛んに行われ、1936年にはHansenの状態図集にまとめられるに至った。ただし、元素の組み合わせは無限にあるため、実験による状態図研究はせいぜい4元系合金までであった。この状況は、1970年代以降に計算状態図の研究が始まることで打開された。特に、1991年に公表されたThermoCalc⁵⁾により、計算状態図の有用性は広く認知されるようになった。現在では、FactSage, ThermoSuite, Pandat, CaTCalcなど、多種の市販ソフトウェアにより状態図計算が可能となっている⁶⁾。

(3) 再結晶

焼鈍により軟化するという現象そのものは古くから知られていたが、再結晶が速度論としてまとめられたのは、1937年に提唱されたJMAK式 (Johnson-Mehl-Avrami-Klomagorov equation)^{7), 8)}が最初であった。再結晶の研究は核生成と粒界移動を主に議論されたが、いずれにも影響するのが固溶/析出状態である。粗大

な粒子は変形の局所化により核生成を促進するはたらき (PSN: particle stimulated nucleation⁹⁾) が、固溶元素あるいは微細粒子は粒界移動を抑制するはたらき (Solute drag¹⁰⁾, Zener pinning¹¹⁾) が見出されている¹²⁾。また、再結晶の駆動力となるのは加工により形成する下部組織である。したがって、再結晶挙動の検討は、加工組織や固溶/析出組織との相互作用を考えることが必要であった。

(4) 固溶/析出

固溶析出の研究は、1906年のWilmによるジュラルミンの時効硬化の発見から始まった。それ以降、2度にわたる世界大戦で航空機用高強度アルミ合金が求められたこともあり、固溶/析出の研究は理論・開発双方から盛んにおこなわれた。理論面では、VolmerとWeber¹³⁾ およびBecker¹⁴⁾ らにより提唱された古典的核生成理論と、Zener^{15), 16)} の粒子成長理論が重要である。その後、スピノーダル分解¹⁷⁾ や、粒子粗大化理論 (LSW: Lifshitz-Slizofo-Wagner 理論^{18), 19)}) などが提唱された。近年では、6000系合金、7000系合金などを中心に、析出物の前駆段階であるクラスターの研究が多く行われている^{20), 21)}。

(5) 加工硬化

加工硬化は、冶金現象の中で発展が遅れている分野である。転位の存在や挙動については、1930年代から転位論として理論化されていた²²⁾。1950年代になると、HirshらによってTEMによる転位の直接観察が行われた。そのような転位単体の挙動の理解は進んできたが、より実践的な現象である加工硬化に結び付く段階に難しさがあった。すなわち、加工中におこる動的回復や、加工に伴う下部組織、すなわち転位-転位セル-サブグレインの発達の取り扱いである。動的回復

に関しては、1972年にKocksにより提案されたMTP (mechanical threshold strength) モデル以降に進展がみられるが、下部組織の発達については、未だ統一的な見解は固まっていないのが現状である¹⁾。

2.2 冶金理論のモデル化

前項に述べたように、各々の冶金現象は古くから多くの検討が行われ、理解と定式化が進歩してきた。その後、これら冶金理論に基づいた数値モデル化が試みられてきた。個々の冶金現象の代表的な計算手法を以下に示す。

(1) 再結晶

Cellular Automaton法²⁴⁾は、ミクロ組織を微小要素に分割し、各要素の時間的发展を求めるモデルである。

Fig. 1に示すように、各要素を再結晶組織か加工組織かで区別し、加工組織の要素を再結晶組織に書き換えることで再結晶の進行を表現する。この時の書き換え確率は、簡単なモデルではアレニウスタイプの熱活性化確率により与えられるが、近年の高度化したモデルでは、再結晶の駆動力や粒界移動速度など、物理冶金に即した再結晶速度論で書き換え確率が計算される²⁴⁾。同様に、Phase-Field法²⁵⁾も微小要素に分割して計算する方法である。この手法では、各要素には再結晶率が与えられ、再結晶速度論に基づいて再結晶率の時間変化が計算される。いずれの方法も3次元の空間軸を持つため、例えば加工方向に伸長したパンケーキ状の再結晶粒など、空間的な情報を表現するのに優れている。一方、広大な空間を準備すると計算に長時間を要するため、統計的に十分な結果を得るのが難しい。

Vertex法²⁷⁾は、組織中に存在する亜粒界や粒界が構成する4重点の安定性を計算し、4重点がどう移動していくかを求めるモデルである (Fig. 2)。4重点が合体す

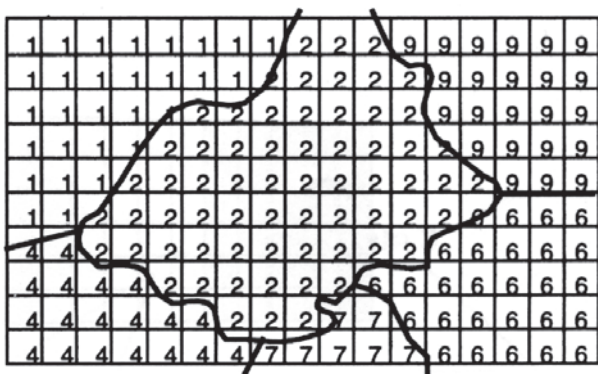


Fig. 1 Microstructure representation in the cellular automaton.¹²⁾ Cells with same integer compose one grain.

ることにより、結晶粒界が減少し、より安定な組織に近づいていく。このモデルにおいては、初期の加工組織を亜粒界の集合体としてとらえ、亜粒界の移動の積み重ねが、最終的に再結晶組織へと発展する。4重点の座標計算のみなので、前述のCellular Automaton法などよりも計算量は少ないが、物理的な意味を捉えにくいという欠点もある。

JMAK方程式^{7), 8)}は最も古典的であるが、その簡便さから、利用例は多い。JMAK法は、組織中に一定数の再結晶核を与え、それぞれの核の時間的成長を計算していく方法であるが、他の再結晶粒との重なり合い (Hard Impingement) を拡張体積の概念を用いて表現することが特徴である。一つの式のみで反応の開始から終了までを記述できるという簡便さが最大の長所であるが、全ての結晶粒が同じサイズと成長速度を持ち、均一に析出するという単純な仮定に基づいているので、全体の反応量や平均サイズといった、簡単な情報しか得られない。それでも、取り扱いが難しいHard Impingementを平易に計算できるというメリットは大きく、工業的なモデルに多く利用されている。この場合、核生成数や再結晶粒の成長速度は、物理冶金に基づいて、PSN, Solute drag, Zener pinningなどを組み込んで計算するのが主流である²⁸⁾。

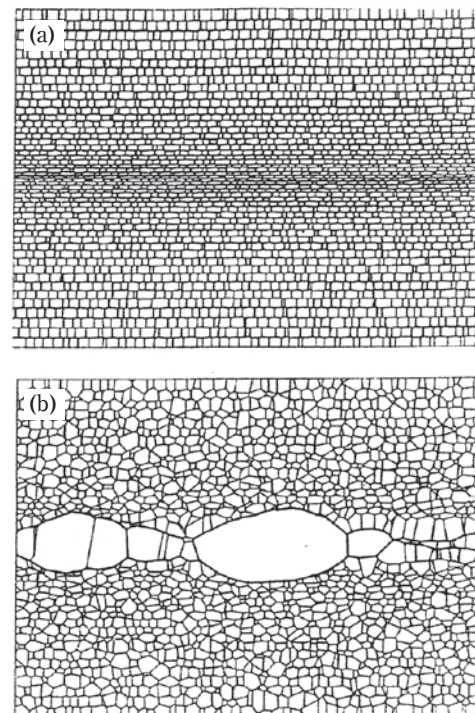


Fig. 2 Recrystallization from transition band calculated by the vertex model, (a) initial state composed of subgrains, (b) partial recrystallized microstructure after annealing.²⁷⁾

(2) 固溶/析出

熱処理に伴う固溶/析出状態の推移を計算する方法としては、スケールが小さい順に、第一原理計算²⁹⁾、分子動力学法、Phase-Field法^{25), 26)}、KWN法 (Kampmann-Wagner Numerical method)^{31), 32)}、JMAK方程式^{7), 8)}などがある。これらのうち、第一原理計算と分子動力学法は、原子オーダーの現象を記述できる一方、計算量が多く、予測できる空間・時間の範囲に限られる。したがって、これらは工業目的よりも、原理原則を求めるアカデミックなアプローチの研究に用いられることが多い。固溶/析出におけるPhase-Field法は、2Dあるいは3Dの計算空間に溶質濃度分布を与え、系全体が安定になる過程の時間的发展を計算する (Fig. 3)。空間座標下での計算なので、例えば粒子の形状などの幾何学的な検討ができるが、その分計算量が多く、広範囲におよぶ現象を記述するには不向きである。

KWN法は、固溶/析出の基礎的な理論を用いて、粒子サイズ分布 (PSD: Particle Size Distribution) の時間的发展を計算する方法である (Fig. 4)。この方法は空間座標を持たず、材料全体の粒子の分散状態を計算するため、統計的な粒子サイズ分布が求められる上に、計算時間も遥かに短い。また、固溶/析出の基礎理論に基づく方法であるため、挙動の理解やモデルの応用もしやすい。後述するように、近年の工業的な検討例ではKWN法の利用例が多く報告されている。一方、粒子数の空間的バラツキや粒子形状など、幾何学的情報を含めるのが難しいことが短所である。

JMAK方程式も析出予測に利用されることが多かったが、析出反応においては粒子のサイズ因子が重要であるため、平均情報しか取り扱えないJMAK法はむしろ実験式という位置づけであろう。

(3) 加工硬化

結晶粒や析出物が球という単純な形状で近似できるのに対し、線である転位は幾何学的に複雑である。ま

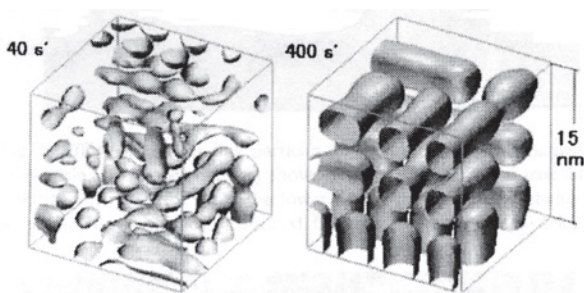


Fig. 3 3D-simulations of the phase decomposition of Fe-30at%Mo alloy aged at 773K.²⁶⁾

た、加工量の増加に伴い、転位が絡み合っ転位セルになり、さらには動的回復によりサブグレインになるという変化をたどる。すなわち、各ステージに応じた速度論を使い分けねば定量的に考えることはできない。このような難しさが、加工硬化の理解とモデル化を妨げている。そのため、総合モデルの中で加工硬化挙動の予測を行う際には、いわゆるn乗硬化則に類する実験式を用いて平易に予測する研究者も多い。

一方、加工硬化のモデル化の試みも行われている。1972年にKocksらは、転位、セル、サブグレインなどが混在する加工組織を全て総転位密度として捉え、加工による増加と動的回復による現象を記述するMTPモデル³³⁾を提案した。特に、動的回復は温度と時間によって起こるのではなく、歪速度と加工量によって起こるというアイデアが画期的であった。この考え方は後の加工硬化モデルにも引き継がれている。中でもNesらのMMP (microstructure metal plasticity) モデル³⁴⁾は、加工硬化のステージごとに異なる取り扱いを適用し、応力ひずみ曲線の記述を試みている (Fig. 5)。また、Gottsteinらの3IVM (three internal variables model)^{35), 36)}は、転位の移動を素過程とし、可動転位、セル内の不動転位、セル壁の不動転位の3種類の転位の密度を計算している (Fig. 6)。いずれにせよ、研究者によって取り扱いが異なっており、世界標準と言えるような方法は未だ確立されていないようである。以上のように、物理冶金に即した加工硬化モデルは研究途上にある。

2.3 組織予測技術の発展

再結晶、固溶/析出、加工硬化といった個々の冶金現象は、まず実験的に発見・確認され、次いで理論的・

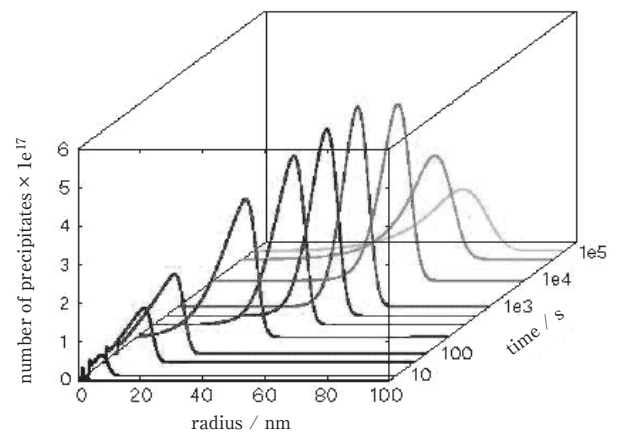


Fig. 4 Calculated evolution of the particle size distribution (PSD) during isothermal holding at 500°C in an Al-3003 alloy (after heating at 20°C /s)²⁾

定式化され、さらにモデル化がすすめられてきた。モデル化の利点のひとつとして、複数のモデルを組み合わせることで、それぞれの冶金現象の相互作用を考慮し、金属組織を総合的に考察できるようになることが挙げられる。例えば、加工組織は再結晶の駆動力となり、再結晶の速度論には固溶/析出状態が影響し、加工組織中の転位やサブグレイン粒界は不均一析出サイトとなる。このような複合的な相互作用は、実材料では常に起こることであるが、組織予測モデルの開発によって、はじめて検討できるようになった。もうひとつの利点は、多パス熱延、熱間押出、熱間鍛造など、複雑な製造プロセスに対応できるようになったことである。従来の冶金理論は工業生産には定性的にしか利用されていなかったことが問題であったが、モデル化によって定量的に検討できる素地が整い、ようやく本格的に産業と繋がる筋道ができたと言えるだろう。

3. ICME: 材質予測技術の工業利用

前章で組織予測技術について解説したが、コンピュータを用いた予測技術は、様々な方面、例えば計算状態図、FEM、材料特性予測モデルから開発が進められている。これらを組み合わせて計算することで、温度や歪などの製造条件から金属組織を予測し、さらに強度や成形性などの製品特性を検討することができる。この研究分野はICMEと呼称され、近年、活発に研究されている。ここでは、ICMEの現状と今後の展望を述べる。

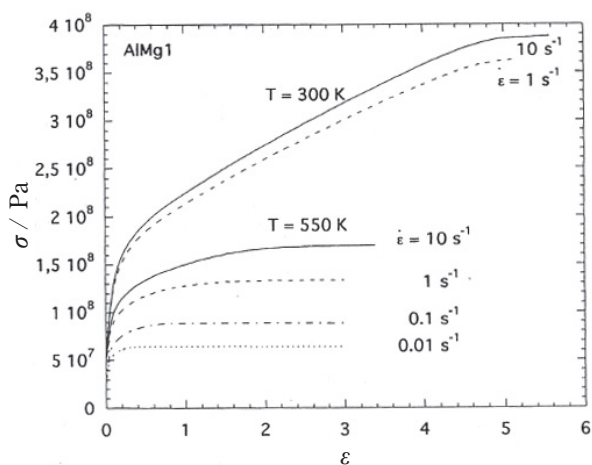


Fig. 5 Stress-strain curve of an Al-1.0Mg calculated by using the MMP model at various temperatures and strain rate.³⁴⁾

3.1 ICMEの狙いと研究動向

工業製品の開発においては、目指す製品特性を得るために、合金成分と製造工程の最適な組み合わせを模索することが行われる。また、これら製造プロセスと製品特性の仲立ちをするのが金属組織である。この一連の流れをFig. 7に示す。従来、このような製品開発の流れは、ラボと実機での試作評価による実験的検討および冶金理論に基づく考察の積み重ねが主であった。この手法は基本的に今後も変わらないと思われるが、「コンピュータによる検討」という第三の手法を加えることで、開発の質と速度を向上させることができる。これがICMEの狙いである。

最も成功を収めているのが、合金成分の検討方法である。Thermo-Calc⁵⁾を始めとした多元系合金の計算状態図を利用することで、工業的な複雑な合金成分でも平衡相や溶解温度などの予測が可能となった。この方法は既に商用化され、学術的にも工業的にも広く受け入れられている。続く圧延、押出、鍛造などのプロセス検討においては、FEMが有効に活用されている¹⁾。

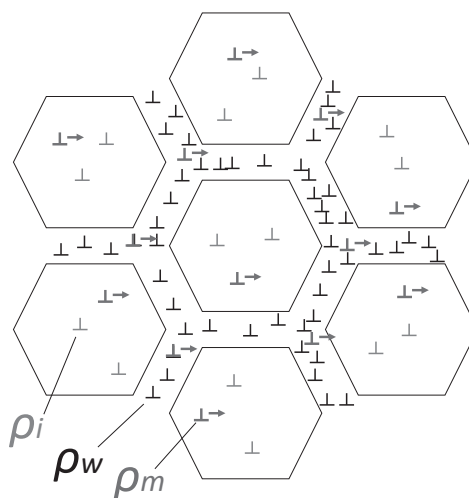


Fig. 6 Schematic drawing of the arrangement of the three dislocation classes considered in 3IVM: mobile dislocation (ρ_m), immobile dislocation in the cell wall (ρ_i) and immobile dislocation in the cell walls (ρ_w).³⁵⁾

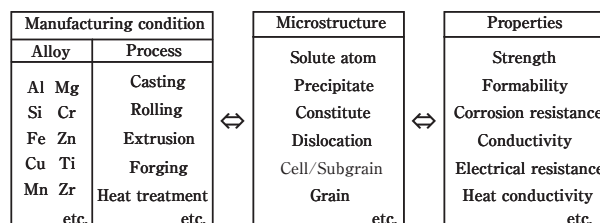


Fig. 7 Linkage of material development.

材料内の形状、変形量、熱量の分布を計算することで、荷重や加工発熱の予測が可能となり、品質や生産性の向上に利用できる。また、FEMにより得た材料内のひずみ量や温度のマクロ的な分布は、前述の組織予測技術を適用することで、材料内の各位置での組織予測に展開できる。また、近年では、転位論に基づく加工硬化特性や集合組織など、素材そのものの金属組織を組み込んだFEM計算も行われている。以上のようにして求められた金属組織に基づき、製品特性のシミュレーション計算が行われる。将来的には各種特性に波及していくと思われるが、現在は構造材料の設計上重要な強度や成形性に関する検討が多いようである。

3.2 ICMEの利用例

続いて、ICMEを工業生産に活用した検討例を示す。いずれの例も、実製品の課題をターゲットにした検討例であることが伺える。

(1) 圧延のスループロセスモデル

Englerら³⁷⁾により、飲料缶ボディ材に用いられる3104板材のスループロセスモデリングが報告されている。まず、均質化処理においては、熱力学データベースとリンクした析出モデルを用いて、 α -Al₁₂(Mn, Fe)₃Siおよび β -Al₆(Mn, Fe)の体積率および分散状態が予測された。続く熱間圧延においては、FEMによって表層から中心にかけての歪量、歪速度および温度が求められ、均質化処理で形成する固溶/析出状態と併せて、再結晶速度が計算された。特に、4タンデムの仕上熱延においては、圧延速度や入側温度がパス間再結晶に及ぼす影響が検討されている(Fig. 8)。タンデム熱延のパス間での金属組織は、実験的に調査することが非常に難しく、ICMEが有効に活用されている例と言える。

また、このモデルは集合組織計算を含み、冷延板の耳率予測にも結晶塑性FEMが行われている。合金成分や製造工程など、実機製造に即した条件になっており、実生産に活用されていることが伺える検討例である。

(2) 押出コスト計算

Myhrら³⁸⁾から、3000系合金押出材について、金属組織、特性に加え、製造コストを同時に予測するモデル“PRO²™ (Product and Process Optimization)”が報告されている。PRO²™を用いることで、様々な製造条件で製品特性とトータルコストを予測し、その中から特性・コスト両面から最適な条件を選ぶことができる(Fig. 9)。これら製品特性やコスト計算は、金属組織に基づいて予測される。例えばFig. 9に示すように、押出速度は粒子数密度の関数として表されている。PRO²™のシステム概略図(Fig. 10)には、顧客の希望に対して最適な解を探索するためのツールというコンセプトが現れている。

(3) 破壊挙動の予測

引張強さは素材の代表的な強度を示す極めて重要な製品特性であるにもかかわらず、予測が難しいとされてきた。引張強さを予測するためには、引張試験片の局所的なくびれや、それに伴う破断の起点と進展を考慮しなければならないためである。この問題に関して、Sandia National Laboratoryでは、ICMEによる破壊挙動の予測が試みられている³⁹⁾。様々な形状の引き裂き試験を行い、FEM解析と組み合わせ、破断の起点の発生と進展経路をモデリングした。破断挙動のモデリングに基づき、引張試験のFEM解析を行い、耐力のみならず、引張強さや破断伸びの予測に成功している(Fig. 11)。この破断挙動のモデリングは、他の事例にも適用されている。例えば、部品形状での破断予測に

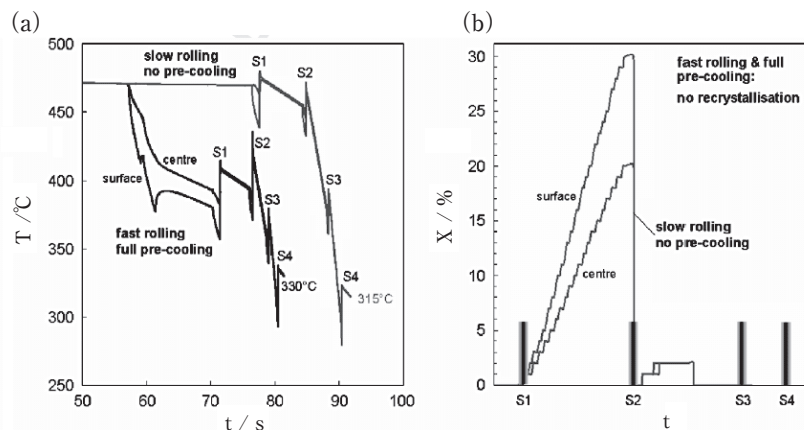


Fig. 8 Simulation of a four-stand tandem mill for two different operating conditions.³⁷⁾ Development of (a) temperature, T , and (b) recrystallized volume fraction, $X(t)$, during process time, t . Labels S1, . . . , S4 denote the rolling passes on stands 1 to 4.

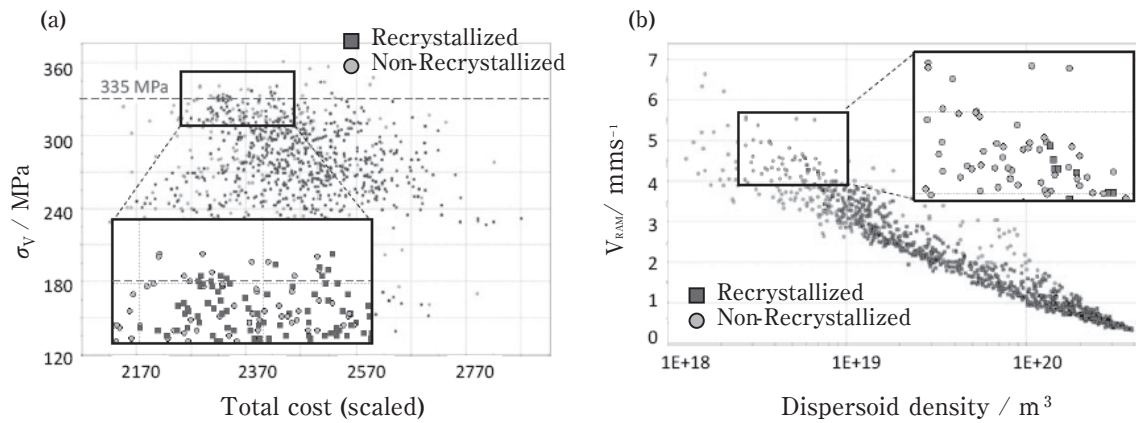


Fig. 9 Example of the calculated results by PRO²™³⁸⁾ (a) Predicted yield stress (σ_y) as a function of the total cost, which includes material and extrusion costs. (b) Predicted ram speed (v_{RAM}) as a function of dispersoid density.

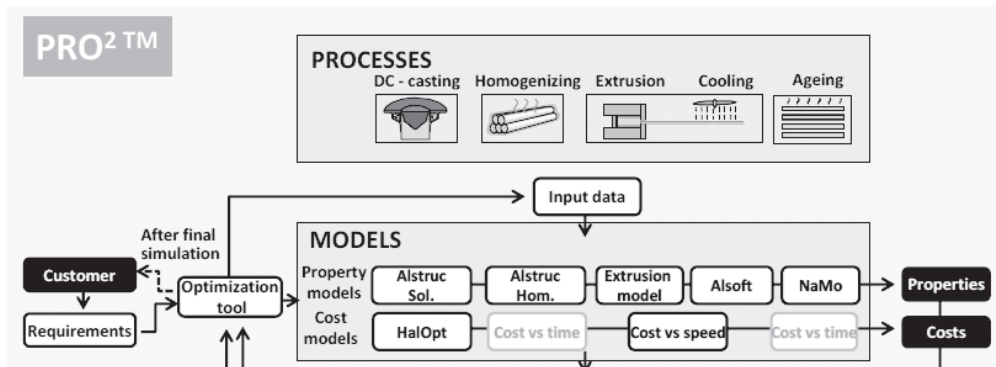


Fig. 10 Outline of the simulation concept in PRO²™³⁸⁾

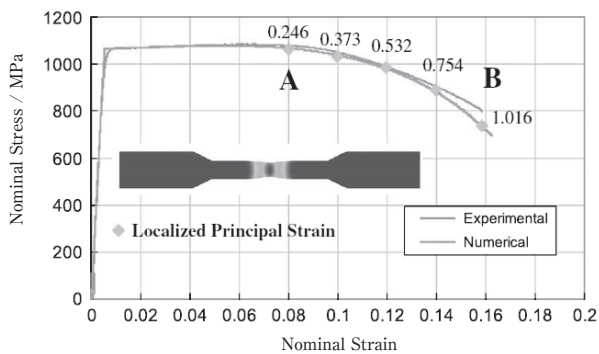


Fig. 11 Nominal stress-strain curve in consideration of stress localization.³⁹⁾ Curve exhibits a noticeable change in slope after 0.08 nominal strain (point A) by necking effect and ruptures at nominal strain of 0.16 (point B).

においては、第一原理計算や分子動力学法といった原子オーダーの転位モデリングで単結晶の結晶塑性を計算し、それをデータベースとして多結晶のFEM計算に結

晶塑性を導入し、破断限界を検討している。

この一連の取り組みは広範囲にわたる研究であり、研究メンバーが多い。参画する研究者は、(原子、単結晶、多結晶、部品) × (プロセス、構造、特性、パフォーマンス) のセグメントで分けられたチームに所属し、役割分担を確認しながら研究全体の整合性がとられている。

3.3 近年のICMEの研究動向

ICMEの研究は欧州と米国で意欲的に進められてきた。特に、2000年～2004年に欧州で実施された共同研究プロジェクト (VIR [*]^{1), 2), 3), 40)} にて、大きな発展を遂げた。VIR [*] は、約20億円の予算で、欧州のアルミニウム業界をけん引する大学・研究機関・企業が集結したプロジェクトである。プロジェクトは、 casting, 加工熱処理 (圧延, 押出), 製品特性 (成形性) を検討する3つのグループから構成された。また、企業と大学がパートナーシップを組み、各テーマの解決に当たった

(Table 2)。構築された各工程の組織予測モデルを連結することで、鋳造から製品までの金属組織の変化を、さらには製品特性までを一貫して予測できるスループロセスモデルとなった。結果、VIR [*] プロジェクトにより、ICMEは飛躍的な発展を遂げた。

また、米国でも2011年から素材戦略プロジェクト(MGI: Material Genome Initiative)が進められている。本プロジェクトは米国企業が現在の2倍のスピードで先端材料を発見・開発・製造・導入することを可能にする研究、訓練、インフラに1億ドル強を投資する米国政府のプランであり、2012年7月にはホワイトハウスでキックオフミーティングが開催されている。ひとつの開発に対し、発見-開発-最適化-統合-検証-製造-展開という一連の開発ステップを行う従来型の開発に対し、MGIでは、実験-理論-計算を統合することによって円環的な開発スタイルへの転換を目指している(Fig. 12)⁴¹⁾。その他、インドの素材戦略プロジェクトでも、ICMEを軸にした研究体制の整備が目的として挙げられている⁴¹⁾。このようにICMEは国際的に重要度を増しており、それに伴い、ICMEに特化した国際会議も始まっている³⁹⁾。

3.4 ICMEがもたらすもの

欧州のVIR [*] と米国MGIは、いずれもICMEの発展とそれによる工業技術の進歩が主目的としているが、プロジェクトにより得られる波及効果³⁾についても類似点が多くみられる。ICMEは理論を工業生産に適用する試みであるというのが要点である。

これまでのアルミニウムの研究開発は、原理・原則の解明については大学などの研究機関が、製品を作るための実践的な検討は企業の開発従事者が主に行ってきたのに対し、VIR [*] プロジェクトでは、大学と企業がペアを組んで共通の課題に取り組む(Table 2)ことで、両者の知識共有を深めることに成功した。特に、このパートナーシップが“Extraordinary Collaborative”な雰囲気²⁾の中でなされたことは重要である。この取り組みを通して培った欧州のパートナーシップは、プ

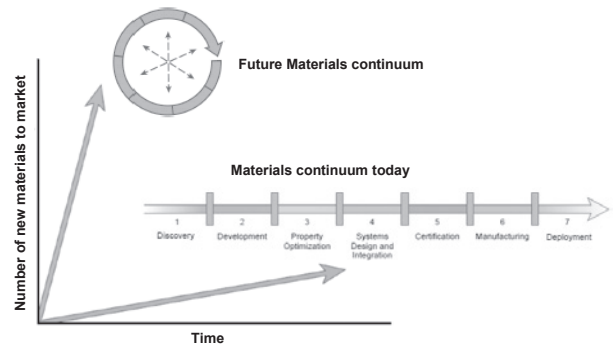


Fig. 12 Change in development scheme proposed in MGI.⁴¹⁾

ロジェクトが終了した後も続いており、活発に共同研究が行われている。米国のMGIやインドの国家プロジェクト⁴¹⁾でも類似のパートナー関係構築が謳われており、VIR*の成功例に続けという意図が読み取れる。また、いずれのプロジェクトにも共通してみられる狙いが、人材育成である。産学の連携は、互いに不足する情報を交換する場となり、よりハイブリットな研究者が養成される土壌となる。また、ICMEは基礎理論の集合体でもあるので、初学者が理論を学ぶ教育プログラムとしても有効に機能する。例えば、2000年ごろから欧州の企業と大学が中心となってオンライン学習システム“AluMATTER”が整備されている⁴²⁾。金属の基礎から加工や接合まで幅広くカバーしており、欧米やインドなどから、年間40万人、1日1500人が利用している。また、高度な計算には、より高度な実験情報が必要となるので、ICMEの注力は、必然的に研究設備の拡充と高機能化という研究インフラ整備を促す。ひいては、実験的研究のレベルアップも期待されている。

以上のように、ICMEの研究を推進することで、技術的なメリットだけではなく、多方面での波及効果が期待されている。

4. おわりに

ICMEは、企業の産業活動と大学の研究活動を繋ぐ

Table 2 The VIR [*] industry and academic partnerships and their main activities.³⁾

Industrial R&D	Main activities		Academic partner	Main activities
Corus	PSC, lab/plant rolling (TPM)	⇔	NIMR	Microchemistry (TEP)
Alcan	Characterization, FEM simulation	⇔	IMPETUS	FEM simulation
Pechiney	Characterization (particles)	⇔	EMSE	Particlebreak-up
SAPA	Characterization (recrystallization)	⇔	SIMR	Characterization
Hydro	Simulation, experiments (extrusion)	⇔	NTNU	AlFlow / AlSoft (TPM)
VAW	Simulation, experiments (TPM)	⇔	IMM	3IVM, GIA, StaRT (TPM)
		⇔	IBF	FEM simulation, interface
Raytek	Temperature sensor (proto type)	⇔	(Uni. Brandenburg)	New temperature sensor

分野である。古くから培われてきた理論を工業生産に展開することがICMEの主目的であるが、その他にも、産学連携の強化、研究インフラの整備、産業と理論に精通した人材の育成など、波及効果は幅広い。そのようなことから、今、世界で多くの研究者が本分野に集まり始めていることは自然な流れであるように思われる。ICMEは、学問と工業を結びつける研究分野として、今後も発展していくものと思われる。

参考文献

- 1) J. Hirsch: Virtual Fabrication of Aluminum Products, VCH, (2006).
- 2) Aluminum, **80** (2004) VIR[*] conference 2004 special edition
- 3) J. Hirsch and K. F. Karhausen: 1st World Congress on ICME, TMS, (2014), 203-210.
- 4) 西沢泰二：ミクロ組織の熱力学, 日本金属学会 (2005).
- 5) Thermo-Calc: <http://www.thermocalc.com/>
- 6) 阿部太一：材料設計計算工学 計算熱力学編, 内田老鶴園 (2011).
- 7) W. A. Johnson and R. F. Mehl: Trans. ALME, **135** (1939), 416-458.
- 8) M. Avrami: J. Chem. Phys., **7** (1939), 1103-1112.
- 9) M. Ferry and F. J. Humphreys: Acta Met., **44** (1996), 3089-3103.
- 10) K. Luecke and K. Detert: Acta Met., **5** (1957), 628-637.
- 11) C. Zener: Trans. Met. Soc. AIME, **175** (1948), 15-51.
- 12) F. J. Humphreys and M. Hatherly: Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier, (1995).
- 13) M. Volmer and A. Weber: Z. Phys. Chem., **119** (1926), 277-301.
- 14) R. Becker: Ann. Phys., **24** (1935), 719-752.
- 15) C. Zener: J. App. Phys., **20** (1949), 950-953.
- 16) H. B. Aaron and G. R. Kotler: J. Appl. Phys., **41** (1970), 4404-4410.
- 17) J. W. Cahn: Acta Mat., **9** (1961), 795-801.
- 18) C. Wagner: Electrochem, **65** (1961), 581-591.
- 19) I. M. Lifshitz and V. V. Slyozov: Phys. Chem. Solids, **19** (1961), 35-50.
- 20) 例えば, 山田健太郎, 里 達雄, 神尾彰彦: 軽金属, **51** (2001), 215-221.
- 21) 例 え ば, C. R. Hutchinson, F. Geuser, Y. Chen and A. Deschamps: Acta Met., **74** (2014), 96-109.
- 22) 木村 宏: 材料強度の原子論, 日本金属学会, (2005).
- 23) 小林正和: 軽金属, **54** (2004), 159-165.
- 24) C. Schaefer: Ph. D thesis, RWTH Aachen, (2011).
- 25) V. Tikare, E. A. Holm, D. Fan and L. Q. Chen: Acta Met., **47** (1999), 363-371.
- 26) T. Miyazaki, T. Komiya and T. Kozakai: Mat.Sci.Eng., **A312** (2001), 38-49.
- 27) F. J. Humphreys: Mat. Sci. Tech., **8** (1992), 135.
- 28) H. E. Vante, T. Furu, R. Ørsund and E. Nes: Acta Met., **44** (1996), 4463-4473.
- 29) 例えば, 上杉徳照, 東 健司: 軽金属, **54** (2004), 82-89.
- 30) D. Fan, S. P. Chen, L. Q. Chen and P. W. Voorhees: Acta Met., **50** (2002), 1895-1907.
- 31) R. Kampmann and R. Wagner: Mat. Sci. Tech., **5** (1991), 213-303.
- 32) O. R. Myhr and Ø. Grong: Acta Mat., **48** (2000), 1605-1615.

- 33) U. F. Kocks: J. Eng. Mat. Tech, Trans. ASME, **77** (1976), 76-86.
- 34) K. Marthinsen and E. Nes: Materials Science and Technology **17** (2001), 376-388.
- 35) F. Roters, D. Raabe and G. Gottstein: Acta Met., **48** (2000), 4181-4189.
- 36) V. S. S. Prasad: Ph. D thesis, RWTH Aachen, (2007).
- 37) O. Engler, L. Löchte and J. Hirsch: Acta Met., **55** (2007), 5449-5463.
- 38) O. R. Myhr, R. Østhus and T. Furu: Mat. Sci. Forum, **794-796** (2014), 676-681.
- 39) B. L. Boyce et al.: Int. J. Fract., **186** (2014), 5-68.
- 40) 岩村信吾: 住友軽金属技報, **54** (2013), 243-249.
- 41) TMS2014, 2014 Materials and Manufacturing Innovation (2014).
- 42) AluMATTER: <http://aluminium.matter.org.uk/>



岩村 信吾 (Shingo Iwamura)

(株)UACJ 技術研究開発所 名古屋センター
第三部