

((株)神戸製鋼所材料開発センター 武村 厚ほか)

Ti 合金製部品の Near net shape 化と高強度化を図るため、Near β 合金と恒温鍛造の組合せが注目されている。そこで、Ti-17, Ti-10-2-3, Ti-6-4 合金の恒温鍛造材の特性を比較し、組織的観点から製造条件の最適化を検討した。Ti-17 と Ti-10-2-3 合金は Ti-6-4 合金に比べて α 相量が少なく細かいため、少ない加工度で容易に微細等軸化する。そのため、加工により延性は向上するが、逆に破壊靱性は低下しやすい傾向にあるので、加工度は靱性の低下を考慮して選定すべきであると指摘した。

この発表に対して、恒温鍛造中の再結晶挙動やその後の冷却中の α 相の析出挙動、また加工度と靱性との関係の考え方などについて討論された。

(討38) Ti-6Al-4V 合金の超塑性に及ぼす合金元素の影響

(日本鋼管(株)中央研究所 小川 厚ほか)

Ti-6Al-4V 合金に β 安定化元素である Fe, Ni, Cr, Co を添加することにより、超塑性特性を著しく改善でき、またベース材より低い温度で超塑性を示した。これらの理由として、 β 変態点が低下することに伴い α 相の再結晶温度が低下し、その粒径が微細であること、そして最適な α 相体積率を低い温度で得られることなどに起因することを報告した。

この発表に対して、超塑性特性に及ぼす添加元素の拡散速度、 α 相の体積率や β 相の変態能の影響などについて討論された。

(討39) チタンの高温塩化物溶液中での耐隙間腐食性に及ぼす合金元素の効果

(住友金属工業(株)総合技術研究所 北山司郎ほか)

高温海水中で使用した純チタンの管-管板すきまで腐食が経験されたことから、チタンの高温塩化物溶液中での耐すき腐食性に及ぼす微量元素の単独および複合添加の効果について、高温すき腐食試験と沸騰塩酸試験で検討した。その結果、Pd 単独添加と Pd-Co 複合添加で耐すき腐食性改善効果が認められた。

この発表に対して、Pd は不動態化に寄与し、Co はその補助的役割をもつという Pd-Co 複合添加の効果などについて討論された。

(討40) 快削純チタン及び快削チタン合金の被削性

(大同特殊鋼(株)中央研究所 中村貞行ほか)

硫黄と希土類元素を複合添加することにより、純チタンとチタン合金の被削性を大幅に改善できることを示し、その改善機構について考察した。純チタン、Ti-3Al-2V および Ti-6Al-4V 合金に粒状の希土類元素硫化物が析出するように硫黄と希土類元素を添加すると工具寿命が改善される。これは希土類元素硫化物の存在により、鋸歯状の切りくずが発達し、そして切削力が減少し、切削温度が低下するためであると考察した。

この発表に対して、工具に Ti が付着すること、切削抵抗の変動および鋸歯状切りくずのせん断角などの問題について討論された。

以上、各講演ごとに報告と討論の内容を概説したが、本討論会全体を通して次のような課題が指摘された。

まず、変形や相変態挙動の基礎的研究、特に合金元素効果と変形における双晶の役割の解明の必要性がくり返し強調された。次に、組織と諸特性との関連性については、 $\alpha+\beta$ 型合金では等軸 α と針状 α 組織の背反する影響の問題にはほぼ集約できるという感じをうけたが、 β 型合金ではまだ不明の点が極めて多い。例えば、結晶粒径の影響という最も基本的な点についても、まだ共通の認識が得られる段階に達していない。さらに、各種の Near net shape 技術の適用により、機械的性質が大きく変化する可能性のあることも指摘された。これは加工による組織変化に起因するもので、基本的には組織と特性の関連性に含まれる課題であろう。

本討論会では一見多様な分野の研究が報告されたが、それぞれの局面での組織調整、ひいては材質制御という共通した内容を含んでおり、有意義な討論を行うことができた。そして、今後いつそうデータが蓄積され、多様な現れ方をする現象の整理が進み、基本に係わる理解が深まることを期待したい。

最後に、講演者をはじめ本討論会に参加いただき熱心に討論していただいた方々に深く感謝して、概要報告を終える。

IV. 圧延解析はどこまで進んだか

座長 大同工業大学

戸澤 康 壽

副座長 新日本製鉄(株)第三技術研究所

松本 紘 美

20~30 年前に見られた顕著な圧延技術の進歩は、長手方向での板厚精度の向上であるが、これに果たした理論解析の役割は特にわが国の場合極めて大きい。その後の技術的課題は圧延板のクラウン形状ならびに平坦度の改善向上に向けられた。そしてここでも解析的研究の成果は新しい形式の圧延機の開発や操業条件の改善といった形で具体化されてきている。このように圧延の分野で解析の果たす役割は大きく、したがって解析の進歩状況からこれからの技術の進歩が予測できるといつても過言でないかもしれない。今回の討論会では、問題解析に近付きつつある板圧延での形状の解析、近年ようやく対象とされるようになってきた型材圧延の解析、そして今後の発展に期待したい圧延材質に関するシミュレーションが取り上げられた。

(討41) 古典的解析法による板圧延の 3 次元解析

(名古屋大学工学部 石川孝司ほか)

圧延板のクラウン・エッジドロップなど板プロフィールや、中伸び・耳伸びなど板形状に関する問題を解明するためには、被圧延材の幅方向流れなど3次元変形と同時にロールの弾性変形も考慮して解析する必要がある。被圧延材の変形解析には古典的なスラブ法を3次元に拡張した数値解析法を用い、ロールの変形解析を一つの系として解くことによつて板プロフィールを求めることができる。大型実機ミルへの適用例、オフセンター及びキャンパーの解析例、板の幅方向での変形不同を考慮に入れたサーマルクラウンの計算例など示した。さらに圧延板の平坦度不良に対しては、上記解析結果を利用しFEMによつて座屈発生限界及び座屈後の板形状を求めている。

FEM全盛の感があるが、板圧延での変形解析にはあえてそれを使う必要はなく、本解析法で種々の問題が有効に解明できるとの意見が述べられた。

(討42) 板圧延における2次元理論拡張モデルと3次元解析との比較

(新日本製鉄(株)第三技術研究所 松本紘美ほか)

板状・クラウンの問題を解析するための被圧延材変形のモデル化として、2次元理論の拡張による方法と、3次元解析による方法とを比較した。2次元理論拡張モデルでは長さ方向の釣り合い方程式の解として平面歪み圧延理論の解を用い、幅方向の釣り合い方程式を近似積分して、幅方向歪みが長さ方向応力の幅方向2階微分に比例するとして定式化したものである。張力分布の発生機構として従来の張力フィードバックモデルは3次元モデルと一見全く異なっているが、実は剛塑性モデルとしても実質的に同じであり、3次元モデルによる解釈と整合する。

平均張力の影響が考慮されていないのではないかとの質問があつたが、講演者は(1)境界での自由端条件との関係で方程式系に反映される、(2)圧延荷重が変わるためロール変形が変わることによつて考慮されていると回答していた。

(討43) 平圧延におけるワークロールの変形解析へのBEMの応用

(東京大学工学部 木原諄二ほか)

FEMより短い計算時間で解が得られる境界要素法(BEM)について、軸対象物体の非軸対称問題を精度よく解析できるように定式化に工夫し、圧延ロールの変形解析に適用した計算結果を示した。そして従来の解析解と比較してロール扁平変形が小さい値を示している。また板幅がロールバレル長に近い場合にも解析解ではその考慮はされないが、BEMではその影響を定量的に表し得た。ロールのたわみ変形について、ロール軸心と母線とで形状が異なることを計算例として示した。

これらの計算結果に対して、果たしてどのような解析方法が真実に近いものであるかとの質問も出されたが、

やはり実測値と対比して検討する必要がある。またFEMについても同様のことが言えるが、要素の分割方法などによつても数値計算結果は変化するので、実用段階はまだ先と言えよう。

(討44) 圧延及び矯正工程における薄板の形状シミュレーション

((株)神戸製鋼所機械研究所 前田恭志ほか)

リードフレームなどの高精度薄板製品に対する主な生産プロセスである20段圧延機による圧延工程とテンションレベラによる矯正工程を対象として、板形状に対する数値解析の結果を示した。圧延工程についてはロールの弾性変形のほか熱変形も考慮しており、圧延中の板形状変化が予測できるシミュレーションモデルを開発し、このモデルを用いて自動制御システムを構築した。矯正工程については板反りに対するシミュレーションモデルを開発し、ロール配列の影響を明らかにするとともに最適インターメッシュの設定を可能にした。そして圧延・矯正両工程を通しての最適な操業条件を計算により決定できるようにした。

基礎となる個々の解析はともかくとして、オンラインでこれらの計算が実行できるように工夫したことに意義があるとの意見が述べられた。

(討45) 弾塑性有限要素法による圧延における応力・変形解析

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 鐘田征雄ほか)

増分法(Updated Lagrange法)に基づく弾塑性有限要素法を用いて、平面歪み条件での通常圧延及び上下非対称圧延の解析を行い、その問題点を紹介した。定常状態を解析するためには、先端の噛み込み時点から非定常解析を行い、十分長時間圧延した状態を求める。通常圧延では摩擦係数によつてスティッキング領域が変わることが再現できる。非対称圧延時の上下そりはすべり線場解と定性的に一致する結果が得られる。問題点として、(1)増分法による誤差の累積を避けるため1ステップでの変位増分を小さくする必要があること、(2)非対称圧延の場合に異常変形解(Hour glass)が発生することをあげた。

Hour glassの発生について討論があり、講演者から「多自由度の要素を用いるのがよい」というProf. LEEの見解が紹介された。剛塑性法の場合はHour glassの問題は生じないという意見があつた。

(討46) 圧延加工における汎用3次元FEMシミュレーション

(京都工芸繊維大学 森謙一郎ほか)

剛塑性有限要素法による圧延の3次元解析のための汎用プログラムを開発した。定常状態の解を求めるためには各収束過程で非定常変形解析を行い、定常条件が満足されるまで境界形状を修正する方法をとる。計算例として、フラットロールによる板圧延、エッジング圧延、棒

材の圧延，H形材の圧延における変形形状，相当歪み速度分布，ロールとの接触状況を示した。H形材の圧延ではロールとの接触状態が複雑であり，もつと要素分割を細かくとることが望ましい。いずれも3次元変形挙動を示しており，このような3次元解析が有用である。

剛塑性解析の原理的な問題点として，剛塑性境界の判別，及び解の唯一性に関する質問があつたが，実際の計算では問題ないとの回答であつた。理論的根拠は十分明確ではないが実用に供せる段階になつてきたと思われる。

(討47) 剛塑性有限要素法による圧延の3次元変形のシミュレーション

(川崎製鉄(株)水島製鉄所 二階堂英幸ほか)

解析法の妥当性をスクエア・ダイア圧延のシミュレーション結果と実験とを比較して示した後，本法をスラブ幅圧下のためのサイジングプレスの設計開発に応用した内容が報告された。幅圧下に伴う板厚の増加はダイ角度が大きくなると板端部に集中する。幅圧下効率はダイ角度が大きく，また板幅の広い方が悪い。Vロール圧下と比較してサイジングプレスの方が有利である。このように本法で圧延における変形を正しく予測できる。ただしプレス荷重は板幅が広いほど小さくなると予測していたが，実機では板幅依存性はなかつた。

定常状態の解を求めるためには仮定した流線が得られた速度場と一致するように修正することが必要であるがその方法に対する質問があつた。十分な討論時間がなかつたが近似的な方法で行っている。特に入側の接触開始点の決定には工夫が必要である。

(討48) エネルギー法と最近の三次元変形の解析

(東京工業大学 加藤和典ほか)

圧延の剛塑性解析のためにエネルギー法と有限要素法の特徴を生かした混合法を説明した。エネルギー法は経験に基づいて速度場パターンを選定することによつて未知数の数が少ないわりには実際の変形をほぼ正しく表せる。一方局部的に不均一な変形を生じる所では有限要素法と同様の要素分割による速度場の自由度を与えればよい。またエネルギー法的な速度パターンもいくつかの典型的な変形の重ね合せとして表現することができる。こうして孔形圧延の解析において，有限要素法に比べてはるかに少ない自由度で，しかも実際に問題になる局所的不均一変形のある場合にも実験と整合する結果が得られる。

この方法は適当な速度パターンの選定，およびどの部分に自由度を多く与えるか等について熟練を要するため汎用化は難しいという意見が出された。一定の変形パターンを持つ問題に限定して各条件の影響を調べる等，目的に応じて応用することが考えられる。

(討49) 複合数値解析法による孔形圧延のシミュレーション

(東京大学生産技術研究所 柳本 潤ほか)

定常塑性加工問題解析のために，剛塑性 FEM とスラブ法との混合法による3次元変形解析法を説明した。これは剛塑性 FEM で3次元変形を忠実に解こうとすると，計算機容量および計算時間が多く必要であることを解決するために，長さ方向の各断面内で長さ方向速度が均一であるという拘束を設けるものである。こうすることによつて変形計算を上流から下流に逐次追つてゆくことができ著しく計算効率上がる。応用例として各種孔形圧延の解析結果が示され，実験結果と比較された。

講演時間の制約のため，同一断面内の各スラブ間の変形バランスや，上流から下流に計算を進めてゆく方法が十分説明できず，本法の特徴が理解されにくかつたように思う。断面内で速度の分布を認める方法が話題になり，その場合でも上流から逐次計算を進めるというのが本法の特徴であるとの回答であつた。

(討50) 温度連成およびパス間ひずみ累積を考慮した熱間圧延解析

(新日本製鉄(株)第三技術研究所 浜渦修一ほか)

圧延中に材料は，変形発熱・摩擦発熱や熱の伝導・放散のため不均一な温度変化が生じ，また変形や温度変化のために材料組織の変化も生じる。これらの変化は材料の変形抵抗に差を生じさせ，従つてひずみ状態も変化する。このような観点から，これらの要因を連成させて解析し，圧延による材質の変化の推定が可能なことを示した。この解析で中心をなすものは組織変化の定式化であり，これを用いて2次元剛塑性有限要素法で変形解析を，2次元有限要素法で温度解析を行つた。

組織変化に及ぼすひずみ・ひずみ速度・温度の影響はそれらの経時的組合せによつても変化するので，ここで使用されたモデルは完全なものとは言えないが，いずれにしても先駆的研究であり，正に圧延解析はここまで進んだと言えよう。

(討51) 温度を連成した熱間圧延における材料の変形解析

(東京大学工学部 相澤龍彦ほか)

剛塑性有限要素法による変形解析と境界要素法による非定常温度解析とを組み合わせた熱間圧延問題の解析法を示した。そして2次元解析法を適用して孔形圧延のシミュレーションを行つた結果を例示した。

ここに提示された手法は一つの新しい試みであり，具体的な問題の解析にどの程度利用されるかは今後の問題であろう。

最後に，本討論会はわが国の圧延解析の現状を知るうえで誠に有意義であつたが，これはすなわち世界の現状でもあるので，もつと十分な討論時間がほしかつた。これだけの内容を半日でこなすのは所詮無理であつたが，講演者をはじめ討論者も要領よく話をされ，密度の極めて濃い討論会であつた。参加下さつた各位も含め，あら

ためて御礼申し上げる。

V. 先端材料のキャラクタリゼーション

座 長 東京大学工学部

合 志 陽 一

副座長 新日本製鉄(株)分析研究センター

松 尾 宗 次

今日の材料開発はその機能特性と組成・構造・組織・界面との相互関連理解への依存度を増しつつあり、このような関連を解析評価する材料キャラクタリゼーションが、後追いとしてでなく、開発とあいまつて展開されねばならない。本討論会では各種材料の開発あるいは高機能化のために果たしたキャラクタリゼーションの成果および材料特性支配要因の有効なキャラクタリゼーション手法について討論を深め、今後の新材料開発の有効な進展に寄与できる場となるように企画された。

まず最初の二つの講演は酸化物超伝導物質の解析であった。同時に金属学会でも超伝導のセッションが開催されていたために、聴衆の少ないことが懸念されたが会場いつぱいの来聴者があり、関心の高さがうかがえた。今後の研究開発の方向として、精細なキャラクタリゼーションをもとにして基本的な物性支配要因を解明し、新たな展開をはかろうとする動きにあることが察せられる。

(討52) 高温酸化物超伝導物質の状態分析

(新日本製鉄(株)分析研究センター 橋口栄弘ほか)

この講演では種々の解析手法を駆使した酸化物超伝導物質の状態分析結果が報告された。XPS による解析からは銅の原子価の他に酸素の原子価にも言及された。従来の状態分析がカチオン分析に偏りすぎて、アニオン分析がないがしろにされてきたことを警告するものとして注目された。またこの発表を契機として、このような観点での解析の重要性が認識されることを期待する旨の提言が会場からもなされた。さらにマイクロオージェ分析による酸化物の微細構造との対比による組成分析、および水素気流中加熱抽出法 (HHE) による酸素の結晶中での占有位置ごとの分析の可能性に関して熱心なディスカッションがなされた。

(討53) 高温超電導性銅酸化物の構造解析

(新日本製鉄(株)分析研究センター 木村正雄ほか)

この発表では銅酸化物の酸素濃度と結晶構造 (正方晶・斜方晶) との関連が X 線回折および XANES を用いて調べられている。酸素の濃度・存在状態は加熱温度と冷却条件あるいは水素気流中加熱により変化を与えた。X 線回折では粉末回折図形を Rietveld 法により解析処理し、正方晶・斜方晶の混合相の分離と特定格子点における酸素原子の占有度を解析した。注目される事実

は正方晶・斜方晶の共存状態では斜方結晶の b/a 比が、単相状態よりも 1.0 に近いことである。これは酸素原子の完全な長範囲規則度を安定に形成していないことを示す。このように超電導性銅酸化物においては、酸素原子の規則配列にかなりの変動・不均一性が存在しており、それが超電導特性に影響していると考えられる。X 線回折と XANES の解析結果をあわせて解釈すると、正方晶では直線 2 配位の Cu^+ 、斜方晶では平面 4 配位の Cu^{+2} と Cu^{+3} の中間状態で、 $\text{Cu}^{+2}-\text{Cu}^{+3}$ の Resonance valence bond が推定されると結論された。討論においては、前講演とあわせて Cu^+-O^- の存在が興味の対象となつた。

次のテーマは金属間化合物に関するものである。先端材料の中で金属間化合物は金属とセラミックスとの中間に位し、機能材料として多くの可能性を秘めている。とくに超耐熱性構造材料として注目を集めつつある TiAl 系の特性改善の方法を、高度なキャラクタリゼーションにより見いだしていこうとするアプローチが報告された。

(討54) Mn 添加 TiAl 金属間化合物のマイクロキャラクタリゼーション

(新日本製鉄(株)分析研究センター 花村年裕ほか)

TiAl 金属間化合物では Mn 添加により室温の延性向上に顕著な効果のあることが知られている。本研究ではその Mn 添加効果を、超高压電子顕微鏡およびアトムプローブ電界イオン顕微鏡を用いて解析し、Mn 添加により双晶が安定化し、双晶変形が塑性変形能を高めていることを確認した。その機構として双晶界面に Mn 原子が偏析して安定な双晶構造をつくり、また双晶が欠陥を生じることなく交差しながら変形が進行できることが示された。この双晶構造が鑄造状態から存在する点に質疑があり、正方晶の TiAl では凝固時の粒成長過程で内部歪みが発生し、それを解消するために双晶が形成されるであろうとの回答があつた。

つづく 2 件の講演では材料定量評価方法の開発あるいは改良をおこない、それを各種材料に適用した結果が報告された。

(討55) レーザーラマン分光法による各種材料のキャラクタリゼーション

(日本鋼管(株)中央研究所 千野 淳ほか)

レーザーラマン分光法を用いて、窒化けい素の焼結時の分解挙動およびポリエチレンフィルムの配向性が調べられた。またコークスのラマンスペクトルをマルチチャンネル検出器により多数測定し、その解析結果から高炉内におけるコークスの熱履歴を推定した例も報告された。コークスのラマン分光の具体的な測定条件さらにラマン分光光度計のハード面での問題点について討論がなされた。

(討56) 元素濃度スペクトル法による組織の定量化