

## ISIJ International 掲載記事概要

ISIJ International, Vol. 32 (1992), No. 3  
掲載記事概要

Special Issue on Recent Advances in Modelling on  
Microstructural Evolution and Properties of Steels

Recrystallization, Grain Growth and Precipitation

A model for the recovery and recrystallization of hot de-  
formed austenite considering structural heterogeneity

By G. ANAN *et al.*

多パス熱間加工中の組織の不均一を考慮したオーステナイトの回復・再結晶モデルを開発した。従来のモデルは各パス直前で粒径や転位密度を平均化するのでこれらの分布を考慮できない。本モデルでは、鋼をたくさんの要素に分割した。各要素の組織は均一で粒径や転位密度は互いに異なり、組織全体の粒径や転位密度の分布は全要素の粒径や転位密度の分布で表現できる。このため従来でできなかった粒径や転位密度の分布も予測できた。2パスの熱間圧縮テストにより検証実験も行った。要素の数は予測精度と計算時間を考慮して 100 個と決めた。本モデルと従来モデルによる再結晶率の予測結果から、熱間加工前に部分的に鋼が再結晶している場合は本モデルを使用すべきである。例として熱延ミルの後段パスや厚板の圧延があげられる。

Monte Carlo simulation of grain growth

By Y. SAITO *et al.*

モンテカルロ法により二次元の粒成長を予測した。本シミュレーションでは粒界エネルギーの異方性を考慮したが、等方的な場合と比べて粒径分布および角形分布が広がった。粒界エネルギーの異方性により、粒界の Wetting を生じ、異常粒成長が起こり、粒径分布が広がる。分散粒子の粒成長に対する影響をシミュレートしたが、ピン止めされた粒の平均粒径は分散粒子の体積分率の  $-1/2$  乗に比例すること、ピン止めされた粒の粒径分布は分散粒子のない場合と比較すると狭くなっていることが明らかとなった。結晶粒構造について解析し、 $n$  角形の平均粒径は角形  $n$  に比例し、隣接した粒間の角形相関については Aboav-Weaire 則に一致すること、また結晶粒構造に対する粒界エネルギーの異方性の影響は小さいことを明らかにした。モンテカルロステップと実時間を対応させ、純鉄の粒成長挙動を予測し、実験結果に基づく経験式とよく一致することを確認した。

Generalized Nb (C,N) precipitation model applicable to  
extra low carbon steel

By S. AKAMATSU *et al.*

C 量の異なる鋼種を用いてオーステナイト域での Nb (C,N) の等温析出挙動を調査した。実験結果から析出の過飽和度が同程度でも、極低碳素鋼成分系での析出挙動はより C 量の高い成分系での挙動に比べて早く、析出物粒径も同時間より大きくなることが確かめられた。次にこのような挙動の差異を説明し得る析出機構の解明とそのモデル化を行った。モデル化の際にはオーステナイト/Nb(C,N) 界面に局所平衡が成り立つと仮定し、古典的核生成理論・成長理論にこれを適用した。本研究により鋼中での MC 型析出の Kinetics には析出物構成元素の積だけではなく、その M/C 比も大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

Computer model for prediction of carbonitride precipita-  
tion during hot working in Nb-Ti bearing HSLA steels

By S. OKAGUCHI *et al.*

Nb, Ti を単独あるいは複合添加した鋼において熱間加工中に生ずる炭窒化物を理論的に予測する方法を検討した。本モデルは複合炭窒化物の溶解度と析出の駆動力を計算する熱力学モデルと熱間加工中の転位密度変化を計算する熱間加工モデルおよび析出の核生成・成長速度を計算し、析出物の体積分率・粒子径変化を予測する析出モデルより構成されている。Nb-Ti 複合添加鋼中の析出物は複合析出物の形成により、加工熱処理条件による析出挙動（析出量、析出

開始時間）の変化が、Nb, Ti 各単独添加鋼中の析出物に比較して大きい。本モデルの予測値は複合および単独添加鋼中の析出挙動とよい一致が得られた。

Transformation

Computer simulations of diffusional reactions in complex  
steels

By J. AGRÉN

The development of software package DICTRA for simulation of diffusional reactions in multicomponent alloys and a databank for multicomponent diffusivities is described. Applications concerning heat treatment of low-alloy steels and martensitic stainless steels are discussed.

Prediction of TTT-diagram of proeutectoid ferrite reac-  
tion in iron alloys from diffusion growth theory

By M. ENOMOTO

鉄合金の初析フェライト変態の TTT-ダイアグラム（等温変態線図）をシミュレートする計算機モデルを開発した。フェライト核の潜伏時間を変態開始時間とした。母相中の溶質原子の拡散方程式を準静的近似で解くことによって、未変態オーステナイトにおける溶質原子の濃縮の効果を取り扱った。平面（一次元）成長と球状界面（三次元）の成長を取り扱った。このモデルは等温保持中のフェライト変態の基本的特長を再現でき、合金組成とオーステナイト粒径が与えられれば、近似的ではあるが迅速に TTT-ダイアグラムを予測できる。

Computer modeling of phase transformation from work-  
hardened austenite

By M. UMEMOTO *et al.*

制御圧延制御冷却の加工熱処理中に起こる相変態をシミュレートするコンピュータープログラムを作成した。このプログラムは金属物理学を可能な限り盛り込んでいる。本論文では基本的な速度式の導出を説明した。等温変態については、オーステナイトからのポリゴナルフェライト、ウィドマンステッテンフェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイトへの変態が述べられた。 $\alpha/\gamma$  界面面積の理論的推量方法が詳細に論じられた。連続冷却が連続する温度での短時間の等温保持の集合と仮定して、上述の変態生成物について連続冷却変態の速度式が核生成成長過程として導かれた。オーステナイトの加工硬化の相変態に対する影響が、ポリゴナルフェライトの核生成と成長速度について詳細に述べられた。最後にオーステナイトの加工硬化のパーライトとベイナイト変態に対する影響が議論された。

Mathematical mode coupling phase transformations and  
temperature evolutions in steels

By S. DENIS *et al.*

A mathematical model for calculating phase transformations in steels during fast heating and cooling is presented. It is based on a rule of additivity. The isothermal kinetics are modelled by Johnson Mehl Avrami law. The model describes the kinetics of austenitization during heating, the state of austenite at the end of heating (carbon content, grain size), the kinetics of transformations during cooling, the final microstructure and hardness. The model is worked out firstly on dilatometric specimens without thermal gradients in order to validate the modelling and the input data. Then the application of the model to massive cylinders heated up and cooled down with high thermal gradients is presented.

Mathematical modelling of transformation in Nb micro-  
alloyed steels

By K. J. LEE *et al.*

Thermodynamic and kinetic modelling was performed to describe the decomposition of austenite and the pre-

precipitation of alloy carbides in Nb microalloyed steels. Phase analysis of the Fe-C-Mn and the Fe-C-Nb systems was carried out considering local and paraequilibrium, their nucleation behavior (matrix/grain boundary) and the shear energy during transformation. From the analysis, local and paraequilibrium transformation temperatures of each phase, the Gibbs energy changes for nucleation and compositions of elements at the phase boundary were derived. The transformation kinetics were formulated using classical nucleation and growth theories. Both local and paraequilibrium conditions were considered to evaluate the partitioning of Mn during growth. The calculated TTT, CCT diagrams and the volume fraction of each phase were compared with the experimental results, and the most probable behaviours of  $\gamma/\alpha$  transformation and NbC precipitation in Nb steels were discussed.

### Mechanical Properties

#### Influence of microstructure on yielding behavior of heavy gauge high strength steel plates

By N. SHIKANAI *et al.*

近年、鉄骨建築物のボックス柱用鋼として、引張強度 600 N/mm<sup>2</sup> 級の低降伏比厚肉高張力鋼が使用されるようになってきている。鋼の降伏比はミクロ組織と密接な関連があり、フェライトを含む複合組織を得ることで低降伏比化が達成できる。低降伏比と高強度を同時に得るための特殊熱処理を行った厚鋼板の組織は、ベイナイト等の中間組織を含む複雑な組織である。本報告では、複合組織を有する低降伏比厚肉高張力鋼の降伏挙動に及ぼす組織の影響を二次元有限要素法により解析し、低降伏比厚肉高張力鋼に適した組織を明確にした結果を報告する。組織解析は、組織形態、組織分率、各組織の強度特性の降伏比に及ぼす影響を、単純化した 8 種類の二相組織モデルに基づいて実施した。次に、より実際の厚鋼板の組織に近いモデルとして中間組織を含む三相組織モデルを用いて解析し、複合組織鋼の降伏挙動を制御するための指針を明らかにした。さらに、解析結果から示された軟質相への歪みの集中に関しても検証実験を行い、歪み集中を確認した。

#### Prediction of mechanical properties of multi-phase steels based on stress-strain curves

By Y. TOMOTA *et al.*

熱延多相混合組織鋼の機械的性質を応力-ひずみ曲線を基に予測する方法を提案する。従来行われている化学組成、製造プロセス因子と性質の関係を回帰式で求める方法とは異なり、応力-ひずみ曲線の解析と応用から良く用いられる機械的性質、すなわち降伏強さ、引張強さ、均一伸び、全伸び、およびビッカース硬さを系統的に予測する。混合組織鋼の応力-ひずみ曲線は構成物のそれとひずみ分配率から計算する。フェライト、ベイナイト、パーライト、およびマルテンサイトの各構成相の変形は Swift の式で近似した。ひずみ分配率の物理的意味について、既存の 2 相材料の変形理論との比較から検討した。組織形態を反映できる塑性緩和の評価方法がこの方法の難点であり、その解決の試みについて示した。

### Integrated Models and Applications

#### A technology for the prediction and control of microstructural changes and mechanical properties in steel (Review)

By O. KWON

Computer modelling of microstructural changes and the relationships between microstructure and mechanical properties of hot rolled steel products has been under active development in the research community. A new technology emerges from the modelling studies, attempting to predict the microstructural changes

occurring during hot rolling and cooling of steels and to control their mechanical properties so that production is carried out under the optimum processing condition. This computer aided prediction and control technology is practiced using the mathematical models based on physical metallurgy. The model describes quantitatively the transformation behaviors during hot working and cooling, such as recrystallization, grain growth, precipitation and phase transition from austenite to ferrite. It also clarifies the relations existing among the processing condition, microstructure and the final mechanical properties. Various models of alloyed steels as well as plain carbon steels have been developed for the last 10 years. It has been expected that the models would widely be applied to practice in the steel industry in the near future and make a great contribution to quality control and process optimization. Some prospect areas where the models are applied are guarantee of mechanical properties throughout the coil length, elimination of tensile tests, decrease in property variation, automatic resetting of processing conditions, save in alloys, and developing new process control models. However, in order to meet this expectation, there are many obstacles to be cleared with regard to model refining, strengthening mechanism, failure mode and sensor development. It was also suggested that a close cooperation among researchers and engineers from different disciplines would be indispensable to accomplish the goal.

#### Modelling microstructure and its effects during multi-pass hot rolling

By J. H. BEYNON *et al.*

By collaborative work the Sheffield Leicester Integrated Model for Microstructural Evolution in Rolling (SLIMMER) has been developed for hot rolling of flat products. The background physical metallurgy is presented together with the expressions used to describe microstructure evolution for a range of ferrous and non-ferrous metals. The finite difference thermal model at the heart of SLIMMER computes heat loss to air, descalers, rolls and water cooling while allowing for oxidation and deformation heating. The use of temperature compensated time enables isothermally determined equations for microstructure evolution to be applied to practical non-isothermal conditions. Rolling loads and torques are calculated using Sims theory with an accurate prediction of mean flow stress. Examples of rolling niobium microalloyed steel plate and the effect of initial grain size illustrate the capabilities and the effect of initial grain size illustrate the capabilities of SLIMMER and show some of the validation of the predictions.

#### Modelling of microstructure evaluation during recrystallization controlled

By T. SIWECKI

The static recrystallization characteristics (grain size, kinetics) have been established for Ti-V-(Nb) austenites and used as the basis for a theoretical evaluation of microstructural evolution during hot rolling of plate. In this context, particular attention has been focussed on so-called recrystallization controlled rolling, whereby a fine as-rolled ferrite grain size is obtained *via* transformation from an austenite which has been substantially grain refined *via* static recrystal-

lization. The model is shown to forecast a behaviour which is in acceptable accord with practical plate-rolling experience. Furthermore, the rolling model has been used in a systematic theoretical investigation of the effect of principal rolling variables on the degree of microstructural refinement during processing of Ti-V-(Nb) steels via recrystallization controlled rolling.

#### Prediction of microstructure distribution in the through-thickness direction during and after hot rolling in carbon steels

By S. NANBA *et al.*

オーステナイト ( $\gamma$ ) の再結晶に関する数学モデルと歪み解析、温度解析の計算機シミュレーションを組み合わせて、板厚方向の  $\gamma$  結晶粒径の予測を行った。板厚方向の  $\gamma$  結晶粒径の分布は、低炭素鋼を用い、実験室での 1 パスあるいは 2 パス圧延により調査した。

熱間加工シミュレーターによる圧縮試験の結果から求められた動的再結晶の臨界歪み、動的及び静的再結晶粒、動的及び静的再結晶分率、動的及び静的再結晶後の粒成長に関する数学モデルによりオーステナイト組織が予測された。有限要素法と差分法で計算された温度は鋼板の中心部及び板厚 1/4 部の測温結果と良く一致した。板厚方向の結晶粒径分布は初期結晶粒径及び 20~40% の圧下率の時増大した。計算機シミュレーションによる粒径分布は 30~40% の圧下率の圧延実験結果と良く一致した。しかしながら、50% 以上の圧力率では、計算値は実測値より小さかった。この相違は動的再結晶分率の増加と共に大きくなるので、動的再結晶分率に関する数学モデルを改善する必要がある。

#### Computer modelling for the prediction of microstructure development and mechanical properties of HSLA steel plates

By A. KERN *et al.*

Computer models for the simulation of grain size development during thermomechanical rolling and the resulting strength properties have been developed for the prediction of the material properties of microalloyed HSLA steel plates. The main input variables for calculations are steel composition, deformation-time-temperature schedule during rolling and cooling rate after rolling. A comparison of calculated and experimentally determined grain sizes as well as strength properties shows a good consistency. The models can therefore efficiently support the development of new steels and the planning of altered production conditions.

#### Modelling of microstructural evolution and mechanical properties of steel plates produced by Thermo-Mechanical Control Process

By A. YOSHIE *et al.*

厚鋼板の加工熱処理 (TMCP: Thermo-Mechanical Control Process) 工程における金属組織に変化および材質を予測する目的で数式モデルを作成した。本モデルは、「加熱」、「圧延」、「冷却」および「組織-材質」の副モデルから構成されている。本モデルの特徴は以下の 2 点である。

① TMCP による組織微細化の原因である「加工オーステナイトの粒内に生ずるフェライトの変態挙動」を考慮した。粒内変態の主たる核生成サイトが加工オーステナイト中の転位であると仮定することにより、粒内フェライトの核生成速度を転位密度の関数として定式化した。

② TMCP による材質設計に必須である「微量添加元素の影響」を考慮した。加熱中のオーステナイト粒成長の抑制、圧延再結晶の抑制、フェライト変態の抑制等の諸効果を微量元素量の関数として定式化した。本モデルによる計算結果は試験圧延機・冷却装置を用いて製造した TMCP 厚鋼板の組織・材質の実測値と良い対応を示した。

#### Integrated model for microstructural evolution and prop-

#### erties of steel plates manufactured in production line

By Y. WATANABE *et al.*

ラボ実験に基づいて構築した理論モデルを拡張することにより、実機での厚鋼板製造における冶金現象および最終的な組織・材質を予測する一貫材質予測モデルを作成した。モデルは製造各工程での冶金現象を逐次計算する冶金モデル群と、それらの計算に必要な鋼板の温度や歪み分布を計算するプロセスモデル群とから構成されている。本モデルを実生産ラインに適用した結果、①圧延途中の鋼板を高速切断後急冷して観察した圧延オーステナイト粒径はモデル計算値と非常に良く対応すること、②圧延後放冷または加速冷却を施した鋼板ともフェライト主体組織となる場合には組織・材質のモデルによる予測は十分な精度を有することなどから、モデルの妥当性と同時に十分な実用性を有することが確認された。

#### Computer simulation of microstructural evolution in thermomechanical processing of steel plates

By Y. SAITO *et al.*

熱力学と古典的核形成・成長理論に基づいたコンピュータシミュレーションを開発した。モデルは、加熱時における  $\gamma$  粒成長、炭窒化物の粗大化および溶解、圧延時における再結晶・粒成長、炭窒化物析出、オーステナイト→フェライト変態といった加工熱処理における組織変化を記述する数式モデル群から構成されている。開発したモデルを用いて Nb 含有鋼の制御圧延・加速冷却時における組織変化 (変態後の組織分率とフェライト粒径) に及ぼす化学組成 (C, Mn) および製造条件 (圧延条件・冷却条件) の影響に関するシミュレーションを行った。C と Mn 量の増加により第 2 相分率が増加し、フェライト粒径が微細化すること、低 C 低 Mn 鋼と高 C 高 Mn 鋼では組織変化に及ぼす製造条件の影響の程度が異なり、高 C 高 Mn 鋼では圧延・冷却条件の変動により組織因子が大きく変化するが、低 C 低 Mn 鋼での組織に及ぼす圧延・冷却条件の影響は小さいことが明らかになった。

#### Mathematical model for predicting microstructural evolution and mechanical properties of hot strips (Review)

By T. SENUMA *et al.*

鋼のホットストリップ圧延における材質予測制御技術の発展の経緯および現状について整理した。

本技術の中核は熱間圧延工程の組織変化および熱延板の材質を予測する数学的モデルで、加熱組織予測モデル、熱間加工組織予測モデル、変態組織予測モデル、析出予測モデル、組織-材質予測モデルの各要素モデルより構成されている。

本報では、各要素モデルが対象にしているホットストリップ圧延の冶金現象を検討し、モデリングの基本的な考え方および留意点を紹介した。

また、最後にホットストリップ圧延の材質予測制御技術の将来について展望した。

#### Application of mathematical model for predicting microstructural evolution to high carbon steels

By M. SUEHIRO *et al.*

炭素を 0.3% 以上含む亜共析鋼 (高炭素鋼) は冷却中の変態による発熱量が大きいので冷却中の温度が上昇する傾向があり、高炭素鋼を連続熱延工程で製造する場合この現象が冷却のコントロールを難しくする。この点を解消するためには冷却中の温度履歴を正確に予測することが必要となるが、それには冷却中の変態進行の予測が最も重要となる。著者らは低炭素鋼の変態進行を予測するモデルを既に開発しているが、このモデルでは低炭素鋼で重要となるフェライト変態は詳細に取り扱っているものの、高炭素鋼で重要となるパーライト変態の取扱いは不十分であった。本論文においては亜共析鋼のパーライト変態を詳細に取り扱うことのできる変態予測モデルの開発を行うとともに、このモデルを 2 次元有限要素法による温度予測モデルと変態発

## ISIJ International 掲載記事概要/編集後記

熱を通して結合することで正確な冷却温度履歴の予測を可能とした。さらに、本モデルを用い 0.5 mass% C 熱延鋼板の熱間圧延後の冷却条件の検討を行った。

**Application of mathematical modelling to hot rolling and controlled cooling of wire rods and bars** By E. ANELLI

A set of integrated mathematical models for simulating hot rolling and controlled cooling of wire rods and bars has been developed through extensive laboratory research work and validation against carefully monitored results from industrial mill.

Experimental tests have been carried out on C-Mn and eutectoid steels, selected as representative for the

various applications of wire rods and bars.

Static and dynamic recrystallization of austenite, fraction of transformed austenite, final microstructures and mechanical properties are all calculated by modelling physical phenomena and using quantitative relationships between the microstructural and kinetics parameters and the process variables, *i. e.* strain, strain rate, temperature and time.

The models have been applied to predict the microstructure evolution during hot rolling by investigating the effect of working conditions and recrystallization mechanisms on the formation of heterogeneous austenitic microstructures.

会員には「鉄と鋼」あるいは「ISIJ International」のいずれかを毎号無料で配布いたします。「鉄と鋼」と「ISIJ International」の両誌希望の会員には、特別料金 5 000 円の追加で両誌が配布されます。

## ● 編集後記 ●

2月号をお届けします。本号がお手元に届く頃、日本の景気の見通しは明るくなり始めているでしょうか。ゴルバチョフ氏退陣後の旧ソビエト連邦の独立諸国は安定化に向かって着実に歩み始めているでしょうか。

さて、今月号は解説 3 件、製精錬関係論文 9 件、加工・材料・分析関係論文 8 件の構成でお届けいたします。いずれも基礎研究の論文が多くなっています。

ところで、査読にあたって修正意見が 1 ページ以上になる原稿はそれだけで返却の候補といわれていますが、少しでも良い論文となって掲載されるよう丁寧な査読が行われているようです。査読にできるだけ負荷がかからないようにも配慮されて、ご投稿をお願いします。

ご承知のように本誌は 2 年ほど前から、より魅力ある会誌とすべく数々の改革に取り組んでいます。投稿から掲載までの期間の短縮、ISIJ 情報ネットワークの新設と記事の集約およびモニター委員の参加、現場技術報告の新設など、編集、紙面の改革に取り組んでいます。お手元に届く「鉄と鋼」誌が少しずつ変わってきているのにお気づきでしょうか。今後さらに講義記事の掲載、ISIJ 情報ネットワークの編集への各支部の参画の計画も進めています。B5 判から A4 判への変更、表紙デザインの一新も近づいています。

「鉄と鋼」誌編集委員会は会員へのサービスを念頭に着実に未来に向かって歩んでいます。会員の皆様にも積極的にご意見をお寄せいただくなど、ご協力をお願いいたします。

(T. F.)