

総括

Summary

特殊鋼におけるデジタルエンジニアリング技術の現状

五十川幸宏*

Current Status of Digital Engineering Technology in Special Steel Manufacturing Process

Sachihiro Isogawa

Synopsis

In this review, the digital engineering technology in the special steel manufacturing process and its application is described.

- 1) Simulation technology concerning flow of molten metal from ladle through tundish to continuous casting
- 2) Multi-pass rolling system for steel bar and prediction of grain size change in SUS430
- 3) Prediction of freckle defect in INCONEL718 VAR Ingot and controlling of grain size through cogging of Ingot
- 4) Grain size control of INCONEL718 during incremental forging
- 5) Prediction of grain size and strength in micro alloyed steel through controlled forging
- 6) Simulation technology in quenching process of tool steel

1. はじめに

近年, CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering) や CAT (Computer Aided Testing), ネットワークを中心にしたデジタルエンジニアリングの進歩は目覚しく, 日本の製造業に深く浸透してきた。この新しい技術は, 各企業においては製品設計から生産までの時間を大幅に短縮し, 顧客のニーズをスピーディーに製品としての形に具現化する欠かせないツールとして認識されている。

たとえば, IT (Information Technology) と MT (Manufacturing Technology) の融合によりデザイン・設計→試作→金型設計・製作を高速ネットワークで結んだ一気通貫体制により, 携帯電話の金型製作に要する期間を従来の数か月からわずか 10 日前後までに短縮しているという。

部材の製造プロセスにおけるデジタルエンジニアリ

ング技術が最も早くから利用された分野は, 航空機部品の製造分野である。有限要素法を用いて, あらかじめ組織制御された素材から, 超塑性変形を利用して複雑な形状を NNS (Near Net Shape) で造り, 切削加工代を低減するとともに, 形状予測と強度予測により必要な部位の組織を保証する技術として用いられた。

一方, 板, 棒鋼などの素材が最終部材に加工されるプロセスは, 個々の加工技術の発展とそれらの加工技術を組み合わせた統合プロセスにおいてコンピュータ技術を駆使したデジタルエンジニアリング技術^{1),2)}が高度に発展して, 自動車などの開発期間を大幅に短縮している。

特殊鋼は, 大きく分類して構造用鋼, ステンレス鋼などのように, 比較的的大量生産されるものから, 耐熱鋼, チタン合金, 工具鋼のように特殊用途に使われるものがある。特殊鋼における大量生産方式は, 普通鋼の場合と同様に, 現在では連続铸造が一般的である。たとえば, 構造用鋼はその歯車や軸受に使用される清

浄鋼や、切削性を付与する機能鋼などに分けることができる。耐熱鋼，チタン合金，工具鋼などは強度を付与するための析出物の制御と熱処理を組み合わせた特殊な造りこみ技術が求められる。

特殊鋼におけるデジタルエンジニアリングとは，素材として組織，機械的性質の造りこみ，そしてそれが製品として使用されるときに性質を最大限に引き出す機能を造りこむ技術であり，素材から製品までの造りこみ技術の研究にはCAE技術が必要不可欠となっている。本稿では，特殊鋼素材の製造プロセスから顧客の製造プロセスを通じた部材の製造まで，デジタルエンジニアリング技術がどのように利用されているかを概説する。

2. デジタルエンジニアリングの特殊鋼量産技術への適用

2. 1 特殊鋼の量産製造プロセス

顧客での部品の信頼性および生産性向上を目的とした特殊鋼の棒鋼・線材への品質要求はますます高まっている。自動車部品に多く使用される構造用鋼には，介在物を積極的に活用し被削性を向上させた高機能快削鋼や，介在物を極限まで低減した高潔浄鋼がある。1982年に

当社知多工場において特殊鋼の量産プロセスとして初めて，AF-LF-RH-CC(ELVAC)プロセスを導入³⁾して以来，本複合プロセスは各社で採用され量産特殊鋼製鋼プロセスとして定着した。Fig.1は，構造用鋼に代表される鋼を溶解，精錬， casting， 圧延， 検査する一連のプロセスを示す。顧客の要請に応えるために，数値計算を駆使して溶解から連続 casting まで一連のラインの中で高機能化，高潔浄化のための操業技術改善に取り組み，構造用鋼の高品質化に対応してきた。

2. 2 連続 casting プロセスへの数値計算の適用

溶解・精錬された溶鋼は取鋼で運搬され，取鋼底部からタンディッシュに注入され，同時にタンディッシュ底部にある複数のノズル出口から各ストランドへと流出する。連続 casting におけるタンディッシュ内の溶鋼温度の変動は鋼中非金属介在物の浮上分離機能や低熱によるノズル詰まり， casting 時のブレイクアウトなどの操業トラブルの危険性が増す。そこで，タンディッシュ内の溶鋼表面をプラズマ加熱した時の溶鋼温度の変化⁴⁾や，同時にFig.2に示すタンディッシュ内の溶鋼流動から介在物の浮上分離の可能性⁵⁾を検討している。

タンディッシュから浸漬ノズルを通じて連続 casting 機のモールドに注がれる溶鋼は，ノズル孔の配置や角度によ

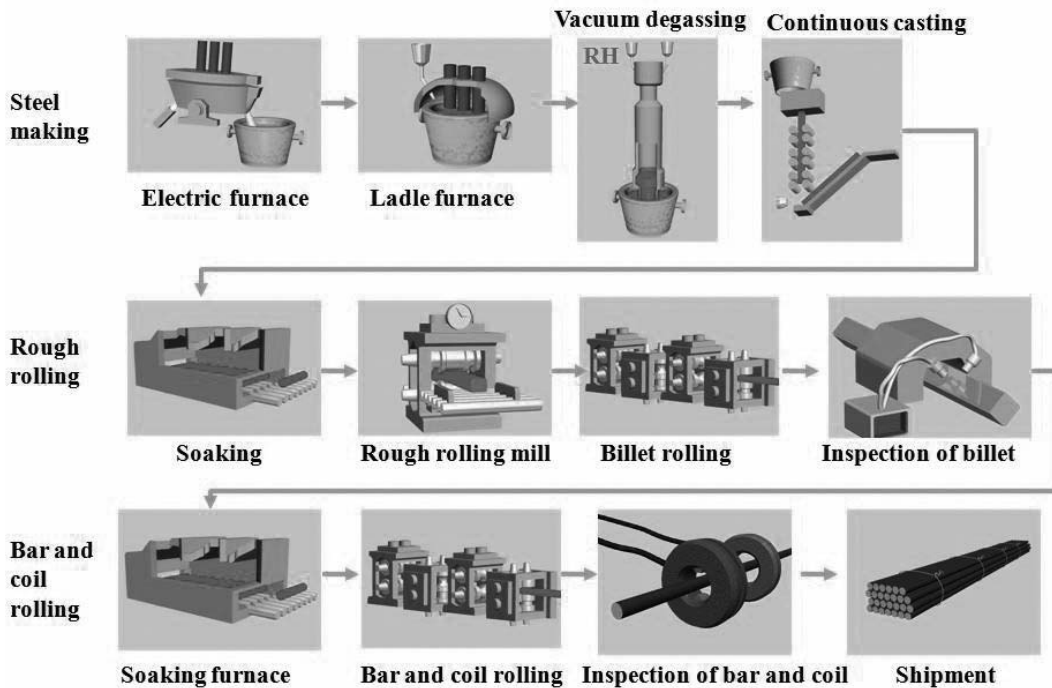


Fig.1. Manufacturing process for gears.

り溶鋼の流れや温度が大きく変化する。Fig.3は、矩形モールド形状に対して浸漬ノズルの深さやノズル孔の配置などを変化させたときの溶鋼流動と温度の一例である。モールド面への溶鋼の衝突による湯面変動および湯流れ、モールドとの伝熱による温度低下などを総合的に判断して最適な浸漬ノズル形状を求めている。

モールド内で冷却された溶鋼の凝固過程で、引き抜き速度や冷却速度の組合せで中心部キャビティや中心偏析などの中心性状の悪化が懸念され、ロールによる適正な圧下位置と量により中心部の偏析改善⁶⁾を試みている。上記に述べた各プロセスは、個別に解析したものであるが、取鋼からタンディッシュを通してモールドまで連続して流れる溶鋼が、最終凝固したときの影響まで取り扱えると、製造される casting びレットの品質管理、および次の圧延工程に溶解・凝固特性が casting 素材に与える影響を連続して評価できることになる。

2. 3 圧延プロセス

特殊鋼鋼材の品質を量産時に造りこむ技術として、圧延は極めて重要なプロセスである。棒鋼・線材（棒線）圧延においては、構造用鋼・軸受鋼などの二次加工における原低や製品の高品位化の手段として圧延材の軟質化による熱処理省略や結晶粒の微細化による高強度化などの研究が精力的に行われてきた。特殊鋼の棒線は、鋼種ごとに異なる孔型を用いて、パス間では45度回転させながら圧延されている。高度な圧延制御技術を開発するために、剛塑性有限要素法をベースとした熱連成解析が可能な特殊鋼の専用圧延シミュレータ「Fast-Rolling System」⁷⁾を制作した。専用孔型を一度登録しておく、後は種々の組合せにより20パスほどの連続圧延ラインが3次元モデルにて60分以内で解析できる。

たとえば、冷間加工性に優れ、鍛造や深絞り加工に用いられるフェライト系ステンレス鋼 SUS430 は、結晶粒

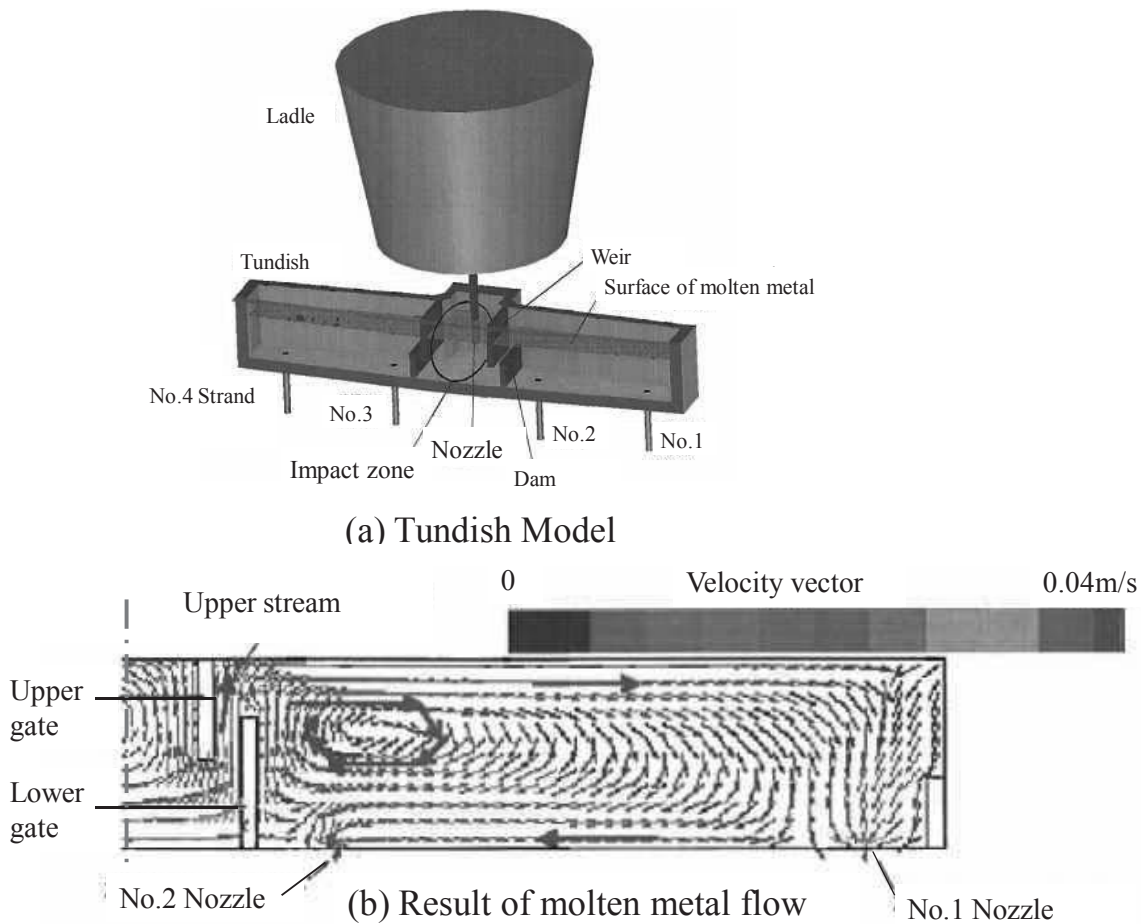


Fig.2. Analysis of molten metal flow in tundish.

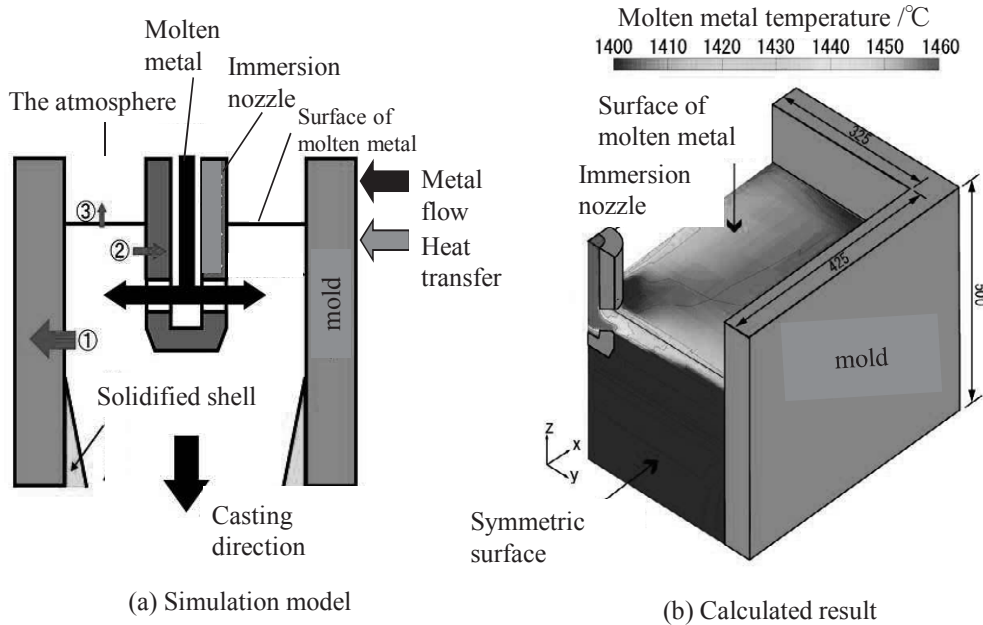


Fig.3. Mold flow simulation in Continuous Casting.

が粗いと靱性が低下して低温域での加工時に問題が生ずる。そこで、圧延シミュレータによって細粒化プロセスを検証した。Fig.4(a)は、対象とする圧延ラインを示す。Fig.4 (b)に初期加熱温度と中間加熱温度を変化させ、連続18パス加工後の温度と結晶粒の変化を予測した結果⁸⁾を示す。改善後の中心部の温度と平均粒径および再結晶率は粗列後のインターバル時間中に細粒化し、第2中間列後段では再結晶が完了し、粒成長に移行する段階であった。実機ラインにて試験圧延を行い、結晶粒径を45%ほど細粒化している。

3. デジタルエンジニアリングの耐熱鋼、工具鋼への適用

3. 1 製造プロセス

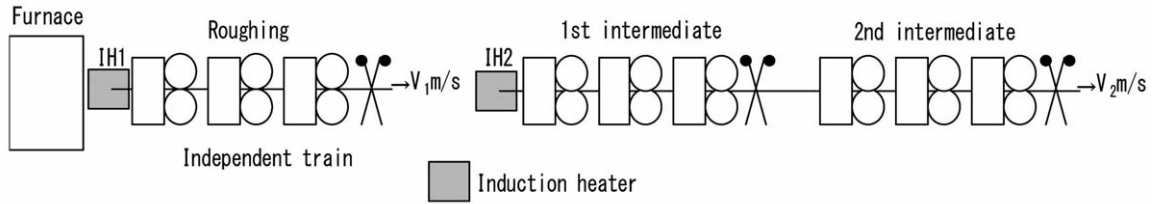
INCONEL718 (以後、IN718と記す) タービンディスクに代表される耐熱鋼の製造プロセスを Fig.5 に示す。真空誘導炉 (VIF) で溶解後鑄造された鋼塊は、真空アーク炉 (VAR) にて再溶解される。そして分塊・鍛伸された後、必要な長さに切断されディスク状に仕上

げ鍛造される。その後、熱処理、機械加工、検査を経て製品となる。工具鋼の場合、多くは大気中にて溶解され、必要に応じてVAR (Vacuum Arc Remelting) やESR (Electro-Slag Remelting) などの再溶解が適用される。

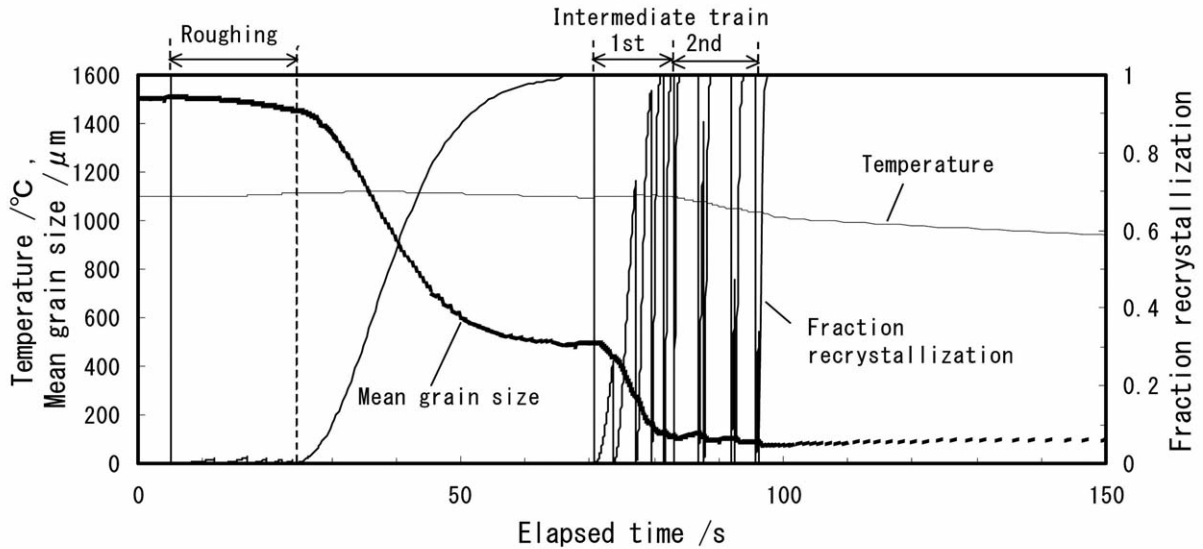
鍛造は、最大7000トンのプレスを用いて鍛造加工、圧延用鋼片の製造や直接に最終製品を成形する。この時に、鋼塊の粗大な凝固組織を分断・微細化させたり、中心部の偏析軽減、微細な欠陥の圧着を行う。

3. 2 溶解、精錬、鑄造プロセスへの適用

航空機エンジンやランドベース・ガスタービンの大型化にともない、Ni基超合金のVARおよびESR鋼塊の大型化が望まれている。しかし、再溶解時に発生するマクロ偏析 (フレッケル欠陥) が発生し、鋼塊径の制約や溶解能率の低下につながる恐れがある。一般的に、フレッケル欠陥が発生する溶解速度の変化と溶鋼プール深さの変化を制御することにより健全な鋼塊を作ることができる。そこで、横型一方向凝固試験機にて欠陥が発生するIN718の臨界凝固条件を求め、実操業を模擬した計算シミュレーション⁹⁾により最適な操



(a) Outline of hot rolling line.



(b) Simulation of rolling temperature and grain size during multi-pass rolling.

Fig.4. Prediction of grain size in caliber-rolling 3-D Fast-Rolling System.

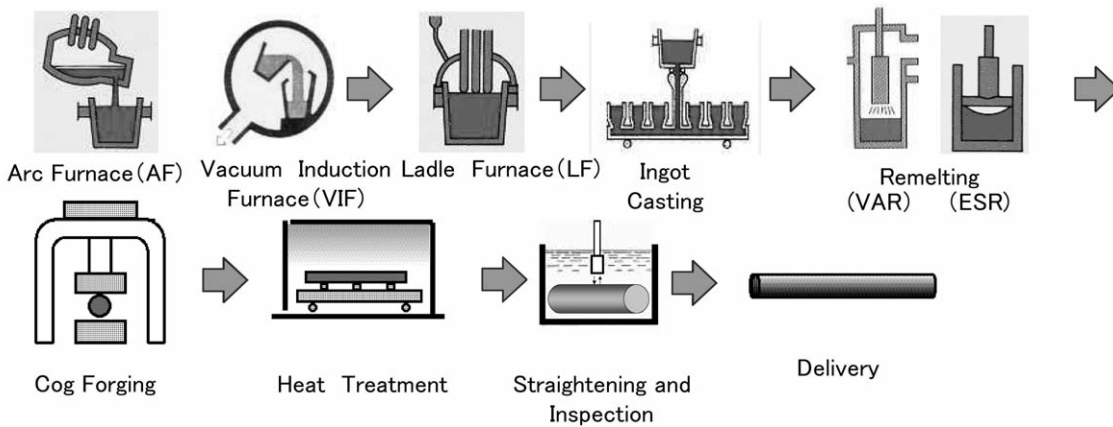


Fig.5. Production process for high alloys and tool steels.

業条件を得ることができる。フレッケル欠陥発生強度の指標として修正 Rayleigh 数 Ra^* を求め、この値が 25 以上で欠陥の発生確率が高いことが基礎試験で判明している。Fig.6 は VAR 実験条件を凝固解析モ

デルを使用して計算したプール形状を実鋼塊と比較したものである。予測した鋼塊のフレッケル発生位置は、実体とよく一致している。

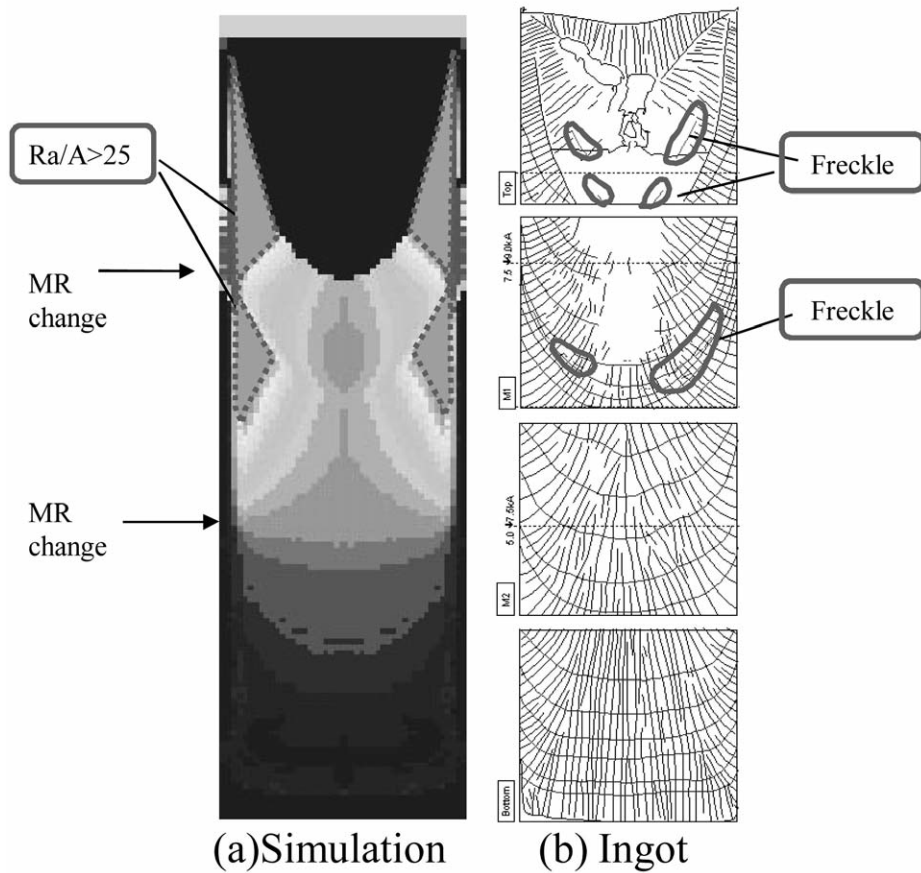


Fig.6. Comparison of calculated modified Rayleigh number and freckle defects by experiment.

3. 3 鍛伸加工による素材製造プロセスへの適用

Ni 基耐熱合金のビレットを均一微細化組織に造りこむことは、型打ち鍛造されるディスクのデットメタル部における粒径を保障する上で重要である。最適な製造方案は、経験に依存した工程設計と工業的な試行錯誤の繰返しにより達成されていたが、数値解析の適用によってあらかじめ加工後の粒径などを予測して試作に望むことにより、多大な時間と費用の節約が可能となっている。

そこで、VAR により再溶解されたφ550のIN718鋼塊を鍛伸とラジアル鍛造の組合せによりφ195のビレットに成形する工程にプロセスモデリング技術を適用し組織の予測^{10) 11)}を試みた。Fig.7は最終的に顧客が型打ち鍛造する場合を模擬したビレットの製造工程を示す。鍛伸工程における粗成形とそれに続くラジアル鍛造による仕上げ工程において組織を造りこみ、型打ち鍛造と切削加工の組合せで製品を作ることになる。Fig.8は、ラジアル鍛造

加工中のビレット断面の中心から表層への結晶粒サイズの過渡的な変化を示す。鍛造後の横断面マイクロ組織と計算結果を比較すると、Fig.8(b)に示すように、中心部からR/2部にかけての組織は計算結果とよく一致している。

3. 4 部材の製造プロセスへの適用

3. 4. 1 産業用および航空機部品への適用

大同特殊鋼(株)では、耐熱合金のビレット製造技術とは別に、二次溶解された鋼塊から直接切削加工前のディスクなどの部材を製造可能な回転鍛造法 RUM (Rotating Upsetting Method) を開発している。ここでは、型鍛造時に生ずる組織の不均一を避けるために据込み鍛造法と逐次回転鍛造法を併用して結晶粒度と機械的な特性の均一化を図っている。

Fig.9は、IN718材の加工時に析出するδ相(Ni₃Nb)を利用した据込み後の回転鍛造成形プロセス^{12) 13)}を示す。加工前にフィルム状のδ相を析出処理し、その後の

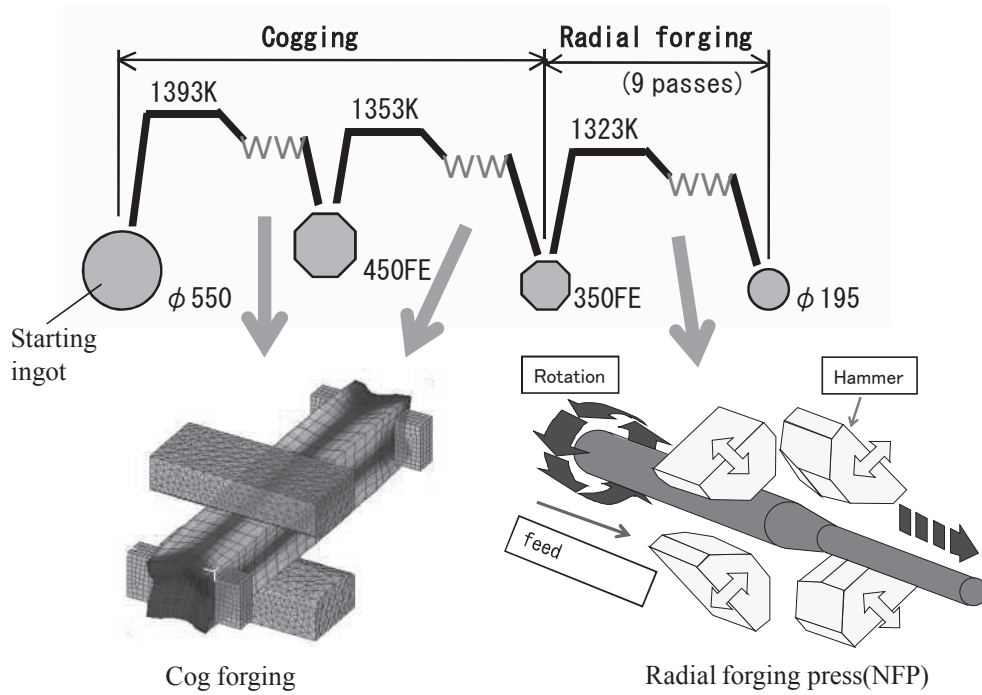
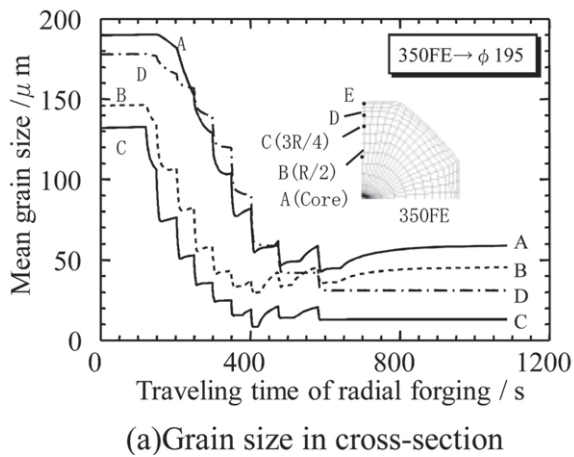
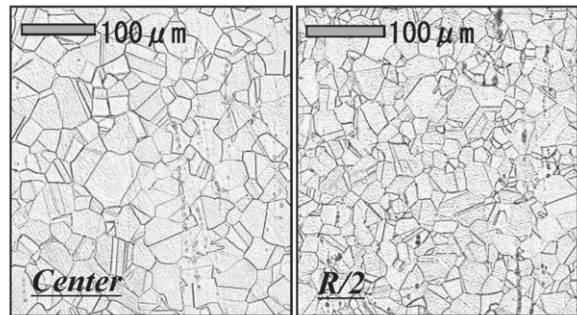


Fig.7. Design of cog and radial forging process.



(a) Grain size in cross-section



(b) Microstructure in cross-section

Fig.8. Transition of grain size in radial forging.

加工中に δ 相を分断・微細化することにより加工時の結晶粒の成長を抑制することが可能となる。ディスクの鍛造成形工程は、上パンチは固定で下型が回転することにより逐次成形を可能としている。シミュレーションによ

る結果では、Fig.10に示すように、鍛造後に δ 相を利用した回転成形により極めて微細な組織が得られ、溶体化処理後は微細で均一な組織が得られた。

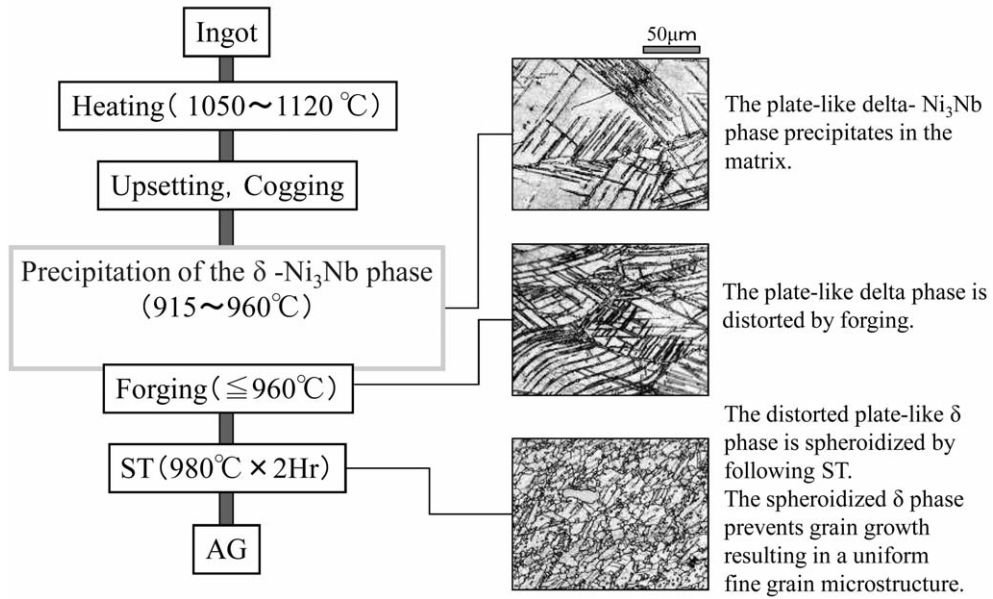


Fig.9. Ultra refining process (Advanced δ process).

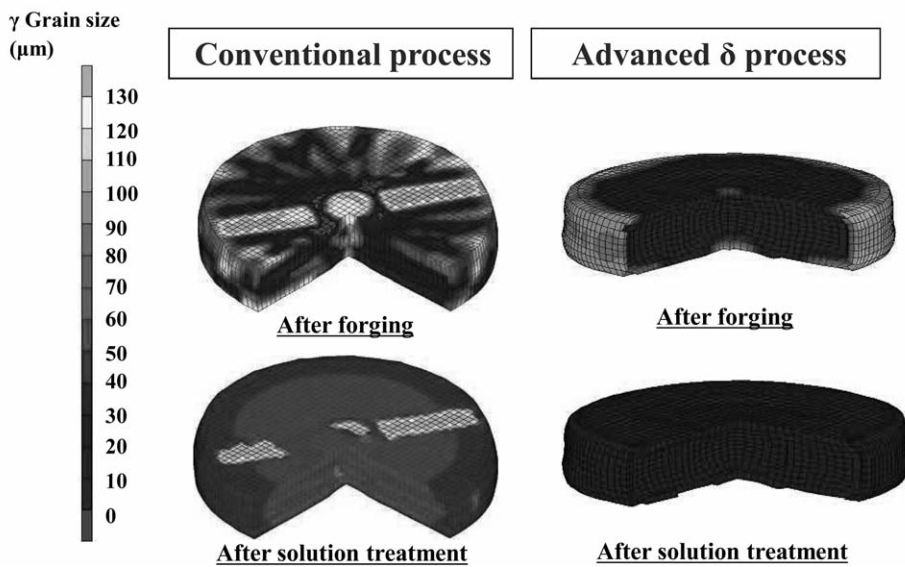


Fig.10. Comparison of grain size distribution after two incremental forging processes.

4. 鍛造加工による部材加工のデジタルエンジニアリング技術

4. 1 鍛造加工におけるD/B構築

FEMによる鍛造加工のシミュレーションを行う際に必ず必要なデータベースD/Bとして、Fig.11に示すよ

うに被加工材の変形抵抗、皮膜・潤滑剤の摩擦係数、および接触界面での熱伝達率などがある。

加工を受ける材料は必ず加工発熱があること、および加工速度の依存性があるため、変形抵抗のD/Bは、等温度・等ひずみ速度が必要となる。

加工を受ける材料と工具(金型)との間に発生する摩擦条件を温度と面圧に対して精度良く推定し、数値計算によるメタルフローの正確な予測が可能である。塑性加

工のように非常に大きな表面拡大に対応可能な、スパイクテスト法¹⁴⁾、テーパカップ試験法¹⁵⁾を開発し、特定被膜の表面拡大に応じた摩擦係数の算出まで可能としている。

熱間加工時の組織変化を計算で求める場合のD/Bで

は、均一な据込み加工を達成するために、ラストゲアエフの円柱圧縮試験法を採用した。Fig.12に示すように種々の材料に対して温度、ひずみ速度を自由に変えて、加工度と組織の関係を表すD/Bを蓄積し、最終的には組織から得られる硬さおよび強度の関係に結び付けている。

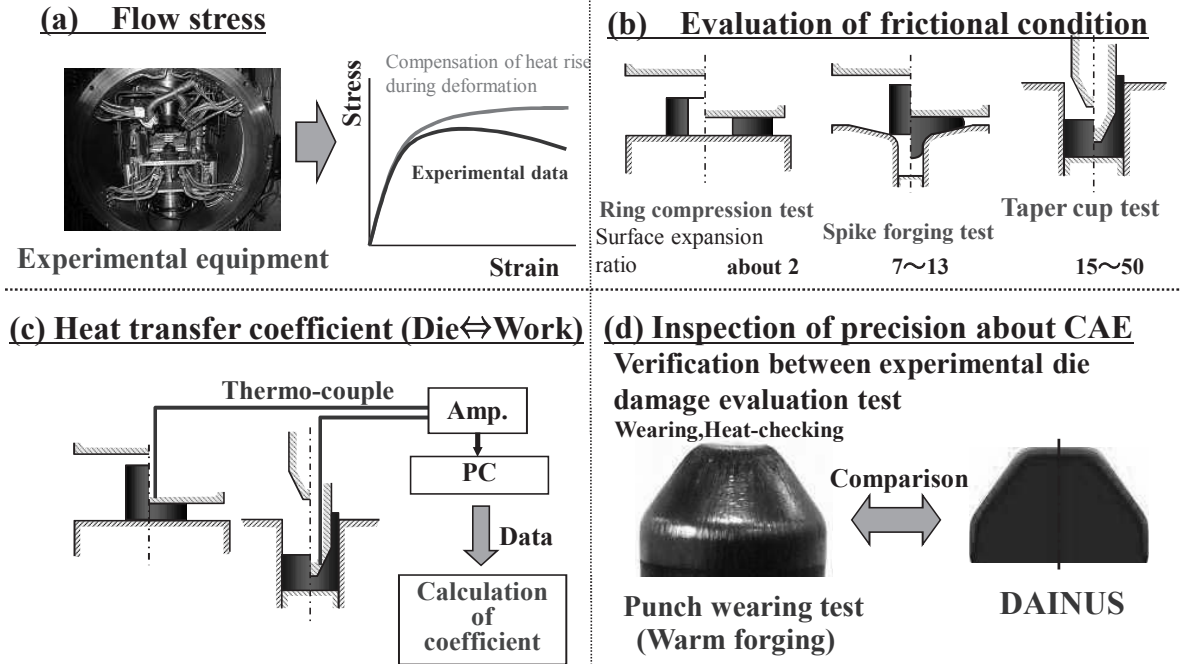


Fig.11. Evaluation system to support DAINUS system.

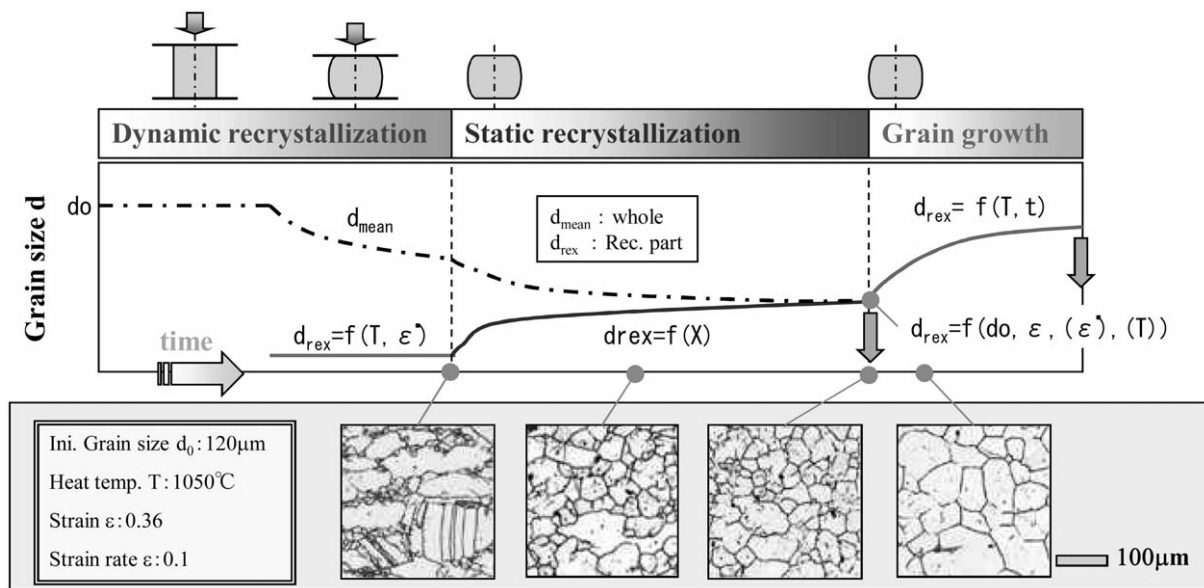


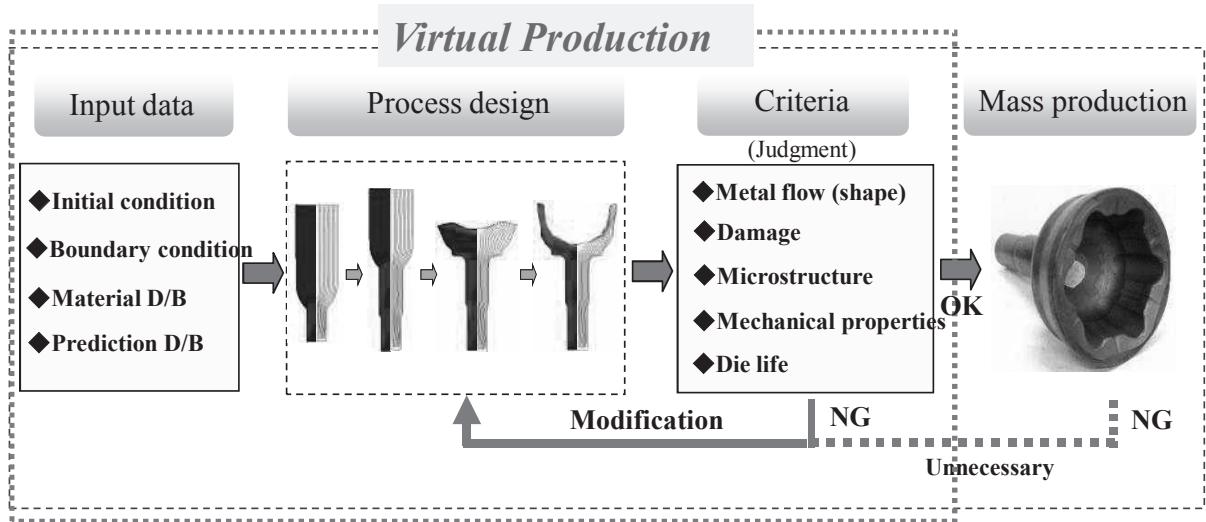
Fig.12. DAINUS-grain: Microstructure prediction module.

4. 2 温・熱間鍛造部品への適用

鍛造加工における数値シミュレーションの活用は、DAINUS (DAIDo NUmerical Simulation System)を用いて、Fig.13に示すように、最終的に量産加工するまでの加工プロセスを数値シミュレーションにより事前に検討し、最適な工程設計を可能としている。CAE技術を駆

使して、量産に繋がる工程設計案を2~3案作り、量産試作に進むことになる。バーチャルなシミュレーションにより試行錯誤の実験の廃止、量産化までの多大な費用と時間を削減可能である。数値計算結果からは、製品の断面内硬さや組織、強度が推定できるので、部品設計時の品質保証の手段としても用いられる。

鍛造用非調質鋼を被加工材(材料)として、Fig.14に



- “Try and Error” experiments in manufacturing line are needless.
- Optimum process design to get aimed property and cost of component is possible.

Fig.13. Practical use of DAINUS to manufacturing process.

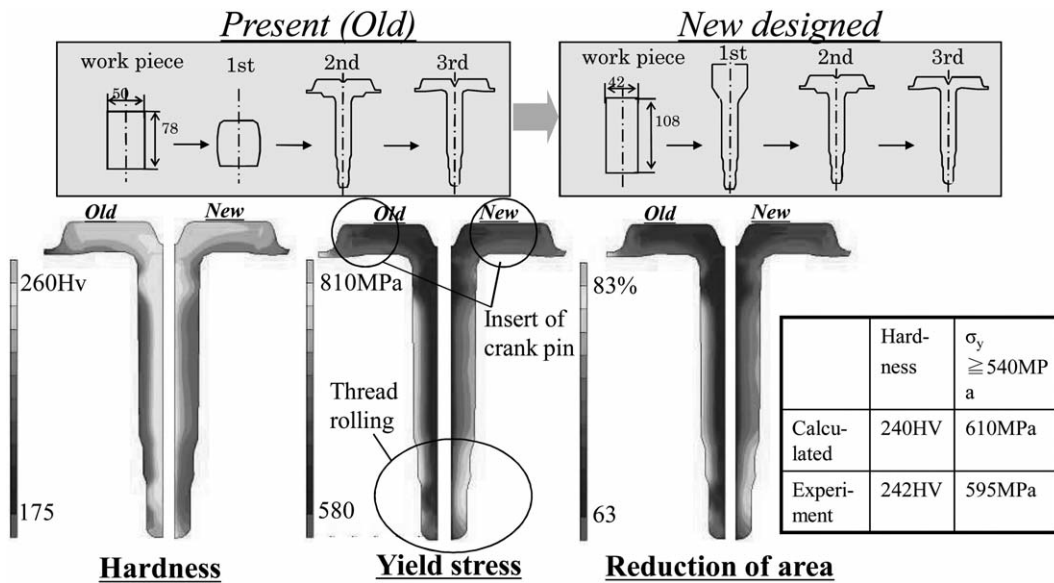


Fig.14. Forging operation design and estimation of microstructure.

示す新・旧工程に従い3工程を連続解析し、フランジ付きシャフトを成形する例¹⁶⁾を示す。従来工程の解析結果および実鍛造結果より軸部の強度（硬さ）が低くばらつきが大きかった。そこで、第1工程の据込みを押し出し工程に変更して解析し、図（軸対称部品であり、製品中心に対して、左が旧工程、右が新工程）に示すように、新工程では従来に比べて硬さや強度分布は比較的均一で高い強度分布が得られた。その結果、鍛造ままでフランジ部に嵌合させるクランクピンの締め付けトルクのアップと転造される軸部の軟質化が図れると予想された。なお硬さ、強度などの推定は、目的とする材料の組織の構成方程式を実験的に求め、加工を受ける鋼の結晶粒の成長、再結晶挙動、軟化などのデータベースをもとに計算されている。

4. 3 鍛造・ダイカスト金型の設計・製作

鍛造やダイカストに用いられる金型は、溶解・鋳造から最終熱処理を経て用いられ、それまでの加工プロセスの履歴を組織の中に引き継ぐ。したがって、それぞれの製造プロセスにおいて性能に与える影響を明確にしながら造りこむことが求められる。Fig.15は、工具材料を溶解から製品金型の製作まで、数値シミュレーション

をツールとしてスルーでバーチャルにもの造りを考えるシステムを示した。3.2から3.3において、素材鋼塊を溶解・鋳造し鍛伸する場合の組織の造り込み技術を示した。ダイカスト金型のように、その後切削加工を経て製造される複雑ブロック形状の金型は、仕上げ加工前の熱処理により最終的な強度と靱性が決定される。Fig.16は、最終熱処理時の冷却方法の違いによる組織や変形の違いを焼入れ熱処理シミュレーションで予測した結果を示している。金型の変形を抑え、必要な部位に必要な組織と強度が付与されるような最適な冷却プロセスを計算機上でバーチャルに予測できる。

紙面の都合で紹介できないが、ダイカストや鍛造に用いられる金型は、実使用条件にあわせた加工シミュレーションを行い、摩耗やヒートクラックの発生状況、疲労破壊寿命が予測¹⁷⁾できる段階まできている。

5. おわりに

特殊鋼製造におけるデジタルエンジニアリングの核となる数値シミュレーション技術は、溶解・凝固、圧延、鍛造、切削、熱処理など一連の工程が繋がることによって、生産準備段階でバーチャルファクトリを用いて生産ラインの生産性を評価し、設計への後戻り作業を最小と









Process	CAE corresponding to processing technology
Melting Solidification 	Simulation of Ingot solidification <Under development> Solidification velocity, prediction of casting defect and segregation
Forging Cooling 	Simulation of microstructure Distribution of temp., strain and pressure welding of casting defect Simulation of cooling after forging Prediction of precipitations 
Machining 	Simulation of machining <Under development> Deformation resistance, friction, ductile fracture theory and simulation theory 
Heat - treatment Surface-coating 	Simulation of heat treatment Optimum cooling rate and deformation of dies 
Products 	Simulation of tool damage <i>DAINUS-life</i> For die casting, hot and warm and cold tools Thermo-mechanical analysis, heat check, metal flow of tool etc.

Fig.15. Process Simulation for Tool Materials.

する最適な製造法などを選択できるとともに、製造から出荷に至るまでの製造コストと品質の評価が可能となる。計算機上での仮想生産は、製品の開発期間を著しく短縮することができる。

Fig.17に示すように、特殊鋼における製品の品質と性能は、溶解からはじまる生まれ（組織のDNA）の影響を最終製品に引き継ぐため、バーチャルな生産においても、すべてのプロセスを有機的に結びつけた統合シミュレーションシステムが必要となる。溶鋼から固体へどのような力学的因子を引き継がせるかの課題も大

きい。現実のシステム作りは中途であるが、全プロセスのなかの圧延+鍛造加工+熱処理という限られたプロセスにおける仮想生産により製品の品質確認、金型寿命予測、鍛造機械の仕様設定など幅広い範囲の生産パラメータを決めたり、製品の品質のばらつきまで予測を可能にする段階である。この段階でも、材料、金型、皮膜・潤滑などに関わる幅広いデータを実験により蓄積することが必要であり、これらのデータの精度が数値シミュレーションの成否の鍵を握ると考える。

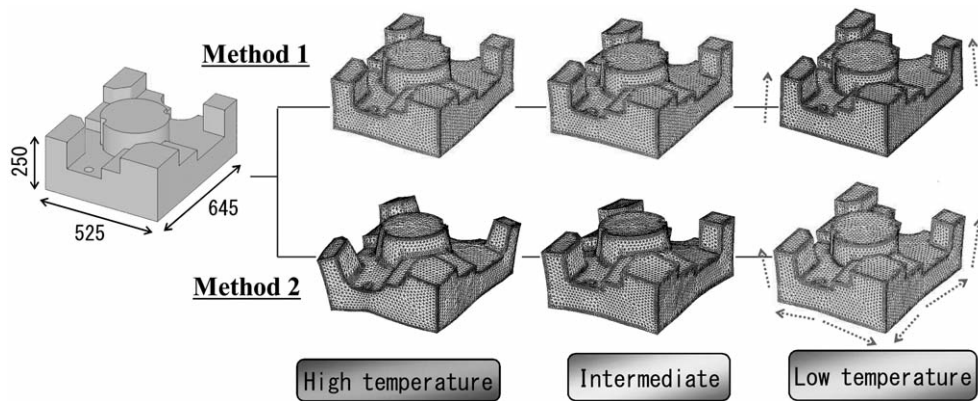


Fig.16. Simulation of die cast tool contour during quenching.

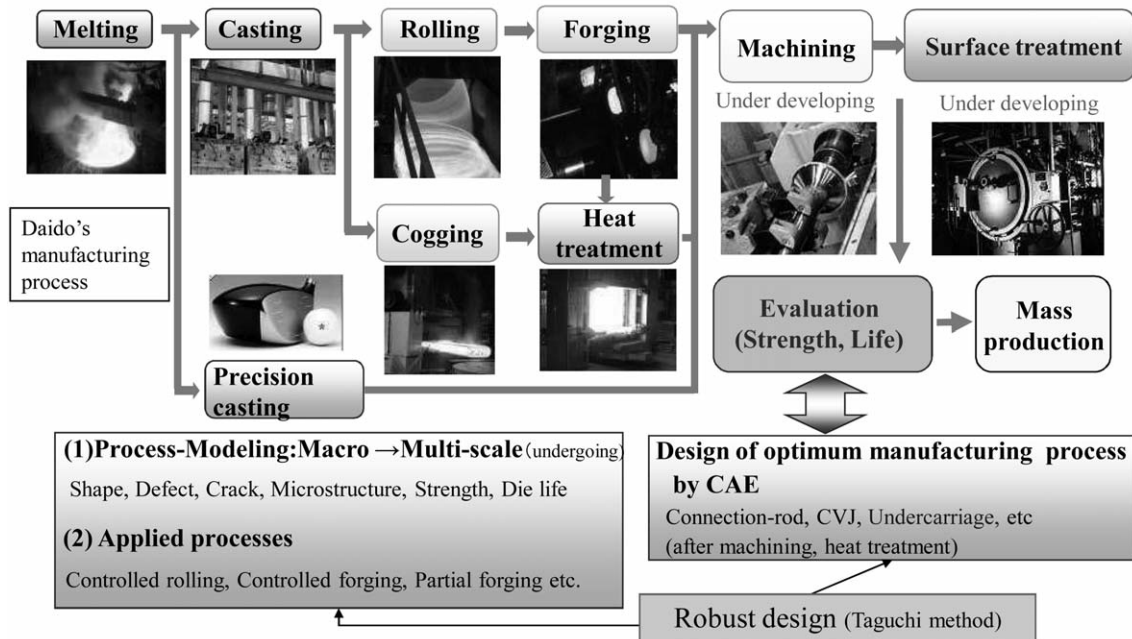


Fig.17. Forefront of manufacturing process by Digital Engineering.

(文献)

- 1) 瀧田康登：精密工学誌，72（2006），180.
- 2) 藤川真一郎：第105回塑性加工学講座「鍛造加工の基礎と応用」，（2007），35.
- 3) 畠山卓三：電気製鋼，70（1999），17.
- 4) 迫間保弘，鹿嶋忠幸，新貝元，電気製鋼，70（1999），157.
- 5) 諏澤寛源，2000年STREAMユーザ会資料.
- 6) 第104回特殊鋼部会資料，大断面部ルームCCにおけるステンレス鋼製造技術.
- 7) 佐古崇，山下雅司，電気製鋼，73（2002），189.
- 8) 平野伸和，藤原正尚，吉田広明，五十川幸宏：電気製鋼，76（2005），87.
- 9) 守田浩貴，鈴木寿穂：電気製鋼，74（2003），5.
- 10) 五十川幸宏，鈴木義人，上原紀興：電気製鋼，63（1992），119.
- 11) 河野正道，五十川幸宏：平成12年度塑性加工春季講論集，（2000），179.
- 12) 河野正道，五十川幸宏，中澤卓也：平成13年度塑性加工春季講論集，（2001），83.
- 13) H.Yoshida, T.Hatta, T.Hironaka, S.Isogawa and H.Sekiguchi: NUMIFORM' 07（2007），987.
- 14) S.Isogawa, A.Kimura, and Y.Tozawa：CIRP Ann., 42（1992），1,263.
- 15) 伊藤樹一，吉田広明，五十川幸宏，土井善久，堂田邦明：塑性と加工，48（2007），303.
- 16) 加生茂寛，吉田広明，五十川幸宏，吉田佳典，湯川伸樹，石川孝司：平成14年度年度塑性加工春季講論集，（2002），207.
- 17) T.Okajima, S.Ito, H.Yoshida, S.Isogawa and T.Ishikawa: ICTP2008（2008），2101.