

21世紀に向けた熱間鍛造技術の展望

Viewpoints of Hot Forging Technology toward 21st Century

西口 勝/Masaru Nishiguchi・関西製造所 専門部長

要 約

最近のニーズの多様化・国際化・地球環境保全の流れのなかで、軽量・高機能化（形状複雑・組織改良等）と同時に低コスト化および開発期間短縮の要求は厳しい。ここ5～6年を振り返ると、熱間鍛造技術はこれらの動向に呼応して、安定した品質を維持しつつ、プロセスおよび歩留り合理化を含めた一層の高生産性・高精度化（ニヤネットシェイプ）・設計高度化等の新技術を着実に進展させている。

当解説は、これら取り組みのキーテクノロジーとなるトライボロジー技術とコンピュータ支援技術を主体に、それら新技術の成果事例を紹介した。また、残された課題から見えてくる必要な新技術につきその展望を述べた。

Synopsis

Recently, society's demands based on diversified needs, fierce international competition and the need to protect the environment have made it necessary for hot forging products to incorporate significant benefits such as lower production costs and shorter product development time, in addition to improving performance and reducing weight.

Over the last five years, new forging technologies have been developed and brought into use, improving productivity, tightening manufacturing tolerances and enabling die design processes with high quality. Key technologies such as tribology and CAE make valuable contributions to these improvements, and their applications are introduced in this paper, which also describes new concepts for the technologies required for the problems remaining to be solved.

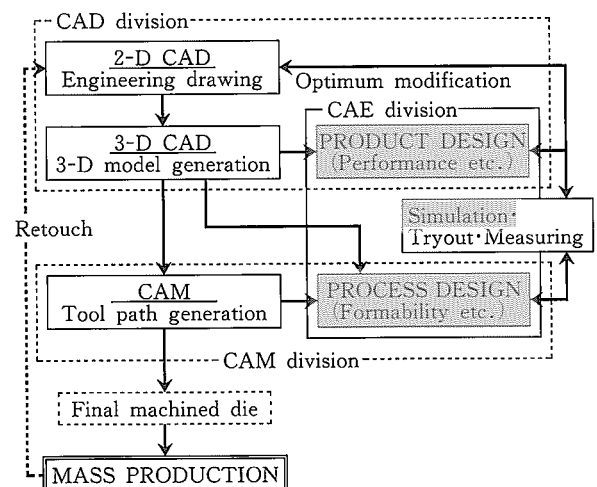
1. はじめに

熱間鍛造技術は一定以上の強度・剛性・精度を与えかつ低コストで生産する方法（したがって一部の機械加工を許容）として、信頼性が要求される輸送関連（車・鉄道・航空機等）の機器部品や各種素材材等の加工に幅広く利用されている。

近年、ユーザーニーズの多様化・地球環境保全（省エネルギー・リサイクル・クリーン排ガス等）の観点から、鍛造品の多くは軽量コンパクト化かつ高効率・機能化（形状複雑・組織改良等）の方向にある。併せて、後工程での機械加工ライン合理化（加工代削減や完全自動化等）のため、高精度化が従来よりも一層求められている。更に最近では、アジアの攻勢とともに国際競争へ突入しており、鍛造メーカー各社は間接費も含めた大幅なコストダウンと併せ、自らの提案力を強化して開発・生産準備期間等のリードタイム短縮へも精力的に取り組みつづける。

それらのなかで、鍛造の精度向上と高生産性への追求は当然の流れである。また一方、コンカレントエンジニアリングとして自動車等各社に導入が進んでいる部品構成データ管理システム PDM (Product Data Management) に

呼応して、第1図に示す3次元CAD (Computer Aided Design)/CAM (Computer Aided Manufacturing)/CAE (Computer Aided Engineering) システム拡充による大幅なリードタイム短縮への取り組みも時代の趨勢と云える。



第1図 CAD/CAMとCAEの関係

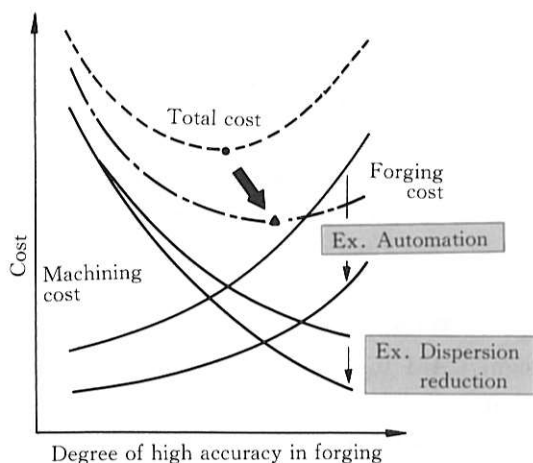
Fig.1 Relationships between CAE and CAD/CAM

解説

本解説では、これら取り組みのキーとなるトライボロジ一技術と CAE 技術を主体に、それら新技術の成果事例を紹介すると同時に、残された課題から見えてくる新たな対応技術につきその展望を述べる。

2. 高精度化と高生産性追求

一般に鍛造品の精度向上を狙えば、第2図¹⁾に示すように機械加工工数の低減・仕上げ歩留りの向上等により製品コストは下がる。しかし生産量の増加を期待できないなかで、当然ながら型工具・設備等の精度追求により鍛造コストはアップし、トータルコストは上昇の傾向にある。したがって生産システム全体としてのコスト改善を考え、図中の太い矢印で示す方向で鍛造精度を追求していくことが重要である。そのためには精度向上に必要な型工具・設備等の新規投資と絡め、例えば、ライン別多品種生産方式からライン統合への高効率自動化（物流合理化・段取り替え迅速化を含む）や、閉塞鍛造採用による省プロセス化等の高生産性追求に併せて取り組むことが必要である。



第2図 鍛造部品の高精度化¹⁾

Fig.2 Improvement of accuracy of forging parts

初めにこの高生産性追求技術にポイントを当て、ブレークスルー技術につき最近の二つの事例を紹介する。

2-1 熱間鍛造における高生産性追求技術

2-1-1 型鍛造の高速化

写真1は、1991年当社に導入されたV型高機能クランク軸等を生産する65 000kN 高速型鍛造プレスの順次鍛造状況（曲げ打ち→荒打ち→仕上げ打ち→バリ抜き）であり、従来2基の60 000kN プレスラインを2倍の生産速度にして1基生産体制にライン統合化をはかったものである。本プレスラインは品質安定と製品精度向上を目指し、かつ多品種少ロット生産に対応すべく次世代を先取りしたFAシステム化率50%以上の全自動型鍛造システムであり、世界に類を見ない高生産性²⁾（3 700ton/月）を達成している。

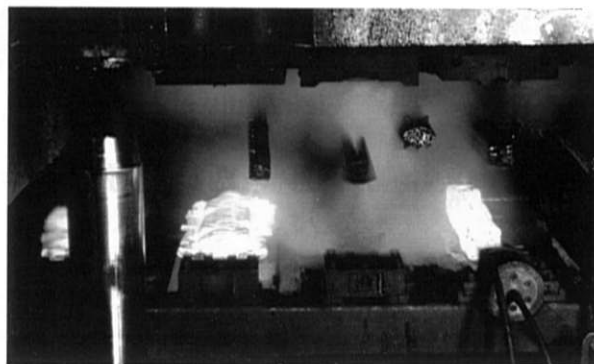


写真1 65 000kN 高速型鍛造機によるクランク軸生産

Photo 1 Crankshafts production by 65 000kN

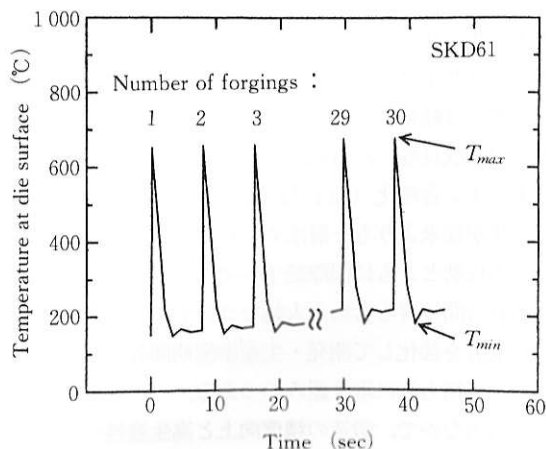
high-speed die forging press

しかし、完全自動高速化技術には操業ソフト面で、

- 1) 型への多大な局所的熱負荷と過酷な冷却に伴う型き裂進展・変形および型密着の多発トラブル
- 2) 型内荒地位置不安定化による品質トラブル

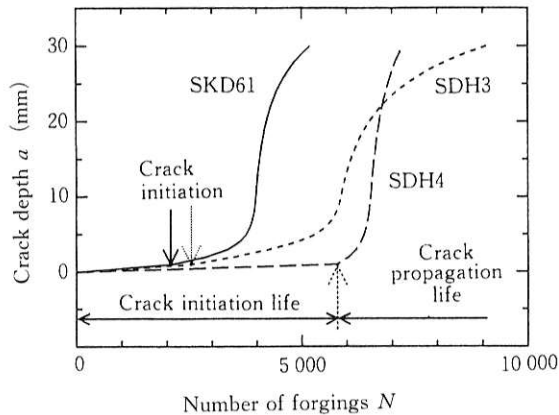
の課題をはらみ、なかでも解決策としてトライボロジ一技術の向上に全力投球がなされた。

第3図は初期温度150℃のタクトタイム8sec/個（素材温度1130℃）における直列4気筒クランク軸用金型の伝熱解析による型表面温度推移例³⁾である。金型表面温度は鍛造本数とともに増加し、約30本目位で一定となるが、急冷による温度差は約500℃にまで達し、型への大きな熱応力が作用する。この対応策として、き裂発生・き裂進展解析モデルが構築され、第4図に示すような所定のき裂深さまでに至る鍛造回数を推定する型寿命評価式³⁾が新たに開発された。この評価式を活用して破壊靱性値に優れた新材質SDH3（3Cr-1.5Mo-0.2V-Ni系）が開発され、大物品高速化に対応したクランク軸金型の長寿命化（SKD61の約1.5倍）がはかられた。なお、小物品では耐磨耗性重視の高温強度に優れた新材質SDH4（4Cr-1.5Mo-0.6V-Ni系）が推奨される。



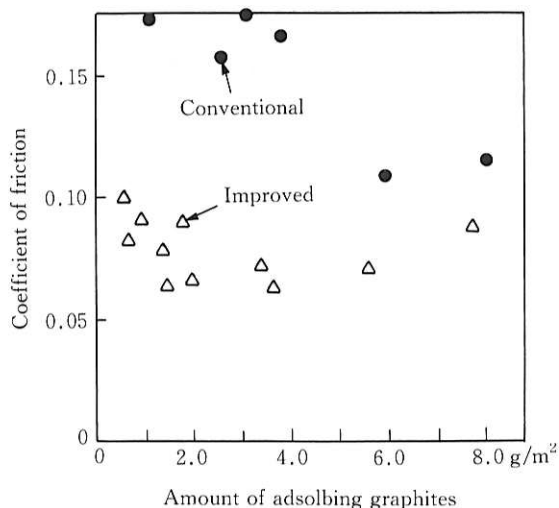
第3図 伝熱解析による金型表面温度の計算例

Fig.3 Sample result of die surface temperature analyzed numerically



第4図 鍛造本数に伴う型き裂深さの変化予測
Fig.4 Predicted relationships between crack depth and number of forgings

一方、型密着を防止する潤滑技術として、入熱過大・抜熱不足等起因する型温度上昇の抑制技術と潤滑剤付着不足・耐密着性不足等起因する潤滑膜切れの防止技術の追求が行われた。潤滑剤としては、薄い黒鉛潤滑濃度ほど型冷却に効果があるが、わずか4 sec/cycleの間に深い型彫り面へ潤滑膜厚を一定量確保するには限界がある。そこで第5図に示すように薄い膜厚でも耐密着性に優れる潤滑剤（黒鉛粒子の分散性改善）⁴⁾が開発され、適正な型温度管理の実現により型密着が抑制された。このトライボロジー技術の追求により併せて得られた型および潤滑剤の原単位改善効果はそれぞれ30、65%に達する。



第5図 摩擦係数に及ぼす潤滑剤付着量の影響
Fig.5 Effect of lubricant amount on coefficient of friction

2-1-2 自由鍛造の高速化

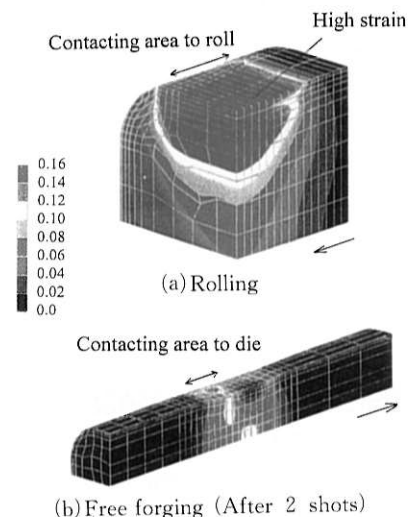
写真2は、各種設備にて従来生産していた付加価値の高い特殊管用ビレットを一ヶ所で集中生産すべく、1995年当社に導入された15 000kN 水平対向型超高速自由鍛造機の外観である。石川島播磨重工業㈱にて開発された油圧+メ



写真2 15 000kN 水平対向型超高速自由鍛造機の外観
Photo 2 General view of 15 000kN SFP (Superhigh-speed Free-forging Press) moving horizontally dies

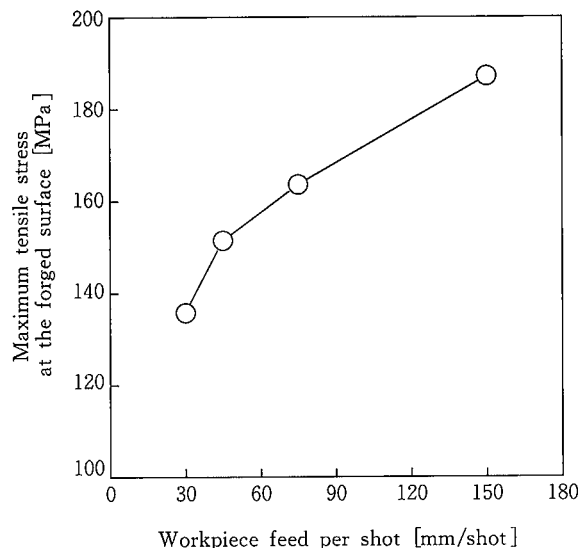
カ動作原理⁵⁾と2台マニピュレータ/プレス自動連携の数値制御および工具迅速交換装置により、世界で初めて従来油圧プレスの倍近い ton/Hr を実現し、高稼働率にてステンレス鋼等多品種ビレットの銅塊1ヒート鍛造化、品質安定化および高精度化に効果を上げている。

ところで完全自動高速化技術に、変形能が劣るステンレス鋼等の銅塊圧下スケジュールを組み込む場合、銅塊表面性状のバラツキもあり現象の理解が難しく、圧下思想が確立されていなかった。鍛造初期割れに対し変形能を考えて鍛造速度は油圧プレス並（歪速度0.05~0.10）で送り量をアップするのか、逆に送り量は油圧プレス並で鍛造速度を上げる方が得策なのか、この問題は自由鍛造の3次元CAE解析により解決された。一般に自由鍛造は、第6図に示すように圧延に比べ中心に大きな歪が加わり組織が微細化する反面、表層は微細化が促進されにくい。すなわち材料送り量を上げすぎると低歪域が残る、また表面に作用する引張り応力も増大することにより⁶⁾（第7図）、割れが発



第6図 分塊圧延と高速自由鍛造の相当歪分布比較
Fig.6 Comparison of effective strains between blooming and high-speed free forging

生し易い。また、オーステナイト系組織の場合、動的再結晶が起きるまで変形抵抗は上昇し⁷⁾、高応力下で粗大粒界に沿ってき裂が進展し易い。高合金では難しいが、通常のオーステナイト系ステンレス鋼では動的再結晶促進による延性改善⁷⁾が鍛造割れ抑制のポイントとなる。



第7図 自由鍛造の圧下面引張り応力に及ぼす材料送り量低減の効果

Fig.7 Effect of workpiece feed per shot on the maximum tensile stress at forged surface

動的再結晶割合 X_{dyn} の評価式としては、(1)式の予測モデルが提案されている⁸⁾。

$$X_{dyn} = 1 - \exp \left[-0.693 \cdot \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ただし、

$$\epsilon_c = 3.92 \cdot 10^{-4} \cdot d_0^{0.5} \cdot Z^{0.15-0.175}$$

$$Z = \bar{\epsilon} \cdot \exp \left(Q/RT \right)$$

$$\epsilon_{0.5} = 1.114 \cdot 10^{-3} \cdot d_0^{0.28} \cdot \dot{\epsilon}^{0.05} \exp \left(6420/T \right)$$

ϵ : 材料内部歪 ϵ_c : 限界歪 d_0 : 初期粒径

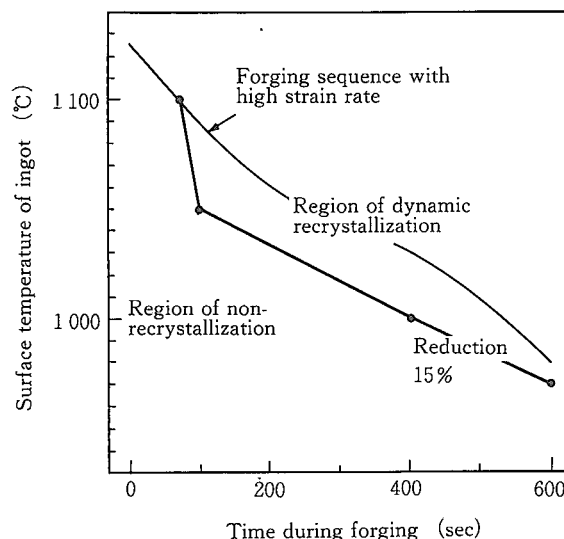
Z : Zener-Hollomon パラメータ $\dot{\epsilon}$: 歪速度

T : 材料温度

(1)式によれば、歪速度UPによる温度降下抑制の方が鋼塊表層の再結晶化促進に有効である。第8図は高歪速度圧下パスにより表層を再結晶域で鍛造した一例である。

2-2 熱間鍛造における高精度化技術

熱間鍛造品の精度を左右させる因子は素材・型・設備・作業条件等であるが、型製作・設備の精度さえ得られれば製品精度の確保はそれほど難しいことではない。むしろ、継続的に再現性良く同じものを多量に作ることに、経時変化(摩擦を含む型変形・材料温度分布等)を引きずる熱間が故の精密化の難しさを持つ。したがって、熱間鍛造の高精度



第8図 高歪速度圧下スケジュールによる組織制御

Fig.8 Microstructure controlling by the forging sequence with high strain rate

化のポイントは再現性の確保に集約され、型製作・設備の精度向上を大前提として、型変形・摩擦抑制、材料変形量制御および寸法管理精度向上をとることが重要である⁴⁾。

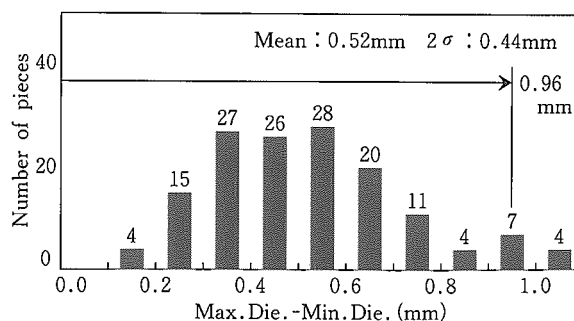
2-2-1 高精度化のための型変形・摩擦抑制

初めに型変形・摩擦抑制の対策については、型温および型表面粗さ制御に最大限の注力が求められる。高温強度の高い型材を選び、高精度に表面を仕上げるほど摩擦発熱による型への負荷が軽減するが⁴⁾、型表面層の理論的な現象解析⁹⁾が進めば、型軟化によるグレ変形も含めそれぞれの型負荷状況にあった効果的な対策・制御が実現できる。

2-2-2 高精度化のための材料変形量制御

熱間鍛造の精度再現性を阻害する最大の要因は、型温度・潤滑ムラ、荒地不安定等による材料の不均一変形や、整形時の引張り作用による寸法形状崩れ等である。一層の高精度化追求には、積極的な材料変形量制御への取り組みが重要であり、以下にその代表事例を紹介する。

(1)逐次成形による材料変形量制御: 逐次成形の一例として、第9図は入口から出口へ逐次幅拘束するVR金敷¹⁰⁾開発によるステンレス鋼鍛造丸棒の高真円度化例で

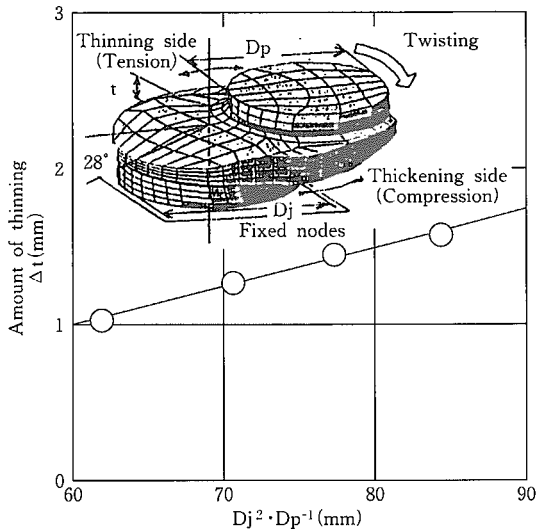


第9図 逐次幅拘束金敷による鍛造丸棒の高真円度化

Fig.9 Accuracy improvement of forging billets by round tup reduced width gradually

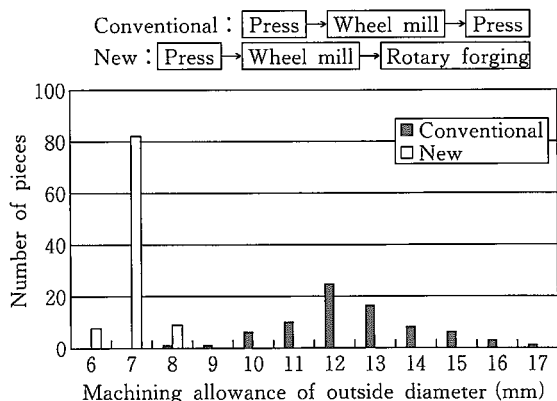
あり、バラツキ精度の点で通常圧延材を越える。

(2) CAE 活用による材料変形量制御： CAE の活用例は多いが、第10図は、クランク軸の熱間振り整形時に発生するアーム減肉量を仕上げ型へ事前折り込みするための型設計基準線¹¹⁾である。3D-FEM の積極活用によって、寸法変化量を図面に正確に反映することが可能となり、熱間鍛造品の寸法精度確保に寄与している。



第10図 クランク軸振り時のアーム減肉量予測
Fig.10 Prediction of the amount of crankshaft arm thinning after twisted

(3) 複合鍛造による材料変形量制御： 回転鍛造との組み合わせ¹²⁾や歯車鍛造など冷間あるいは温間サイジングとの組み合わせ¹³⁾による複合鍛造化の例は多い。第11図は、鉄道用車輪鍛造に7000kN 回転鍛造機を回転整形として組み合わせた例であり、機械加工前鍛造品の外径精度が複合鍛造により大幅に改善¹³⁾されている。更に温間鍛造化により JIS9級の精度追求は可能であろう。



第11図 新旧プロセスでの車輪外径取り代の比較
Fig.11 Comparison of machining allowances of wheels with producing by new & conventional process

(4) 分流鍛造による材料変形量制御： 型への充填精度が厳しい歯車鍛造では、低面圧加工原理¹⁴⁾を利用して冷間での型充填を促進させる分流鍛造（一方的材料流れで面

圧が急増する時点で、形状精度を要しない部分への材料流れを許容した低面圧加工法)の開発¹⁵⁾が進んでいる。今後は、大容量プレスを導入することなしに、大物熱間鍛造品の高精度化技術にも応用が進むものと予想される。

3 リードタイム短縮とムダ・ムラ削減への取り組み

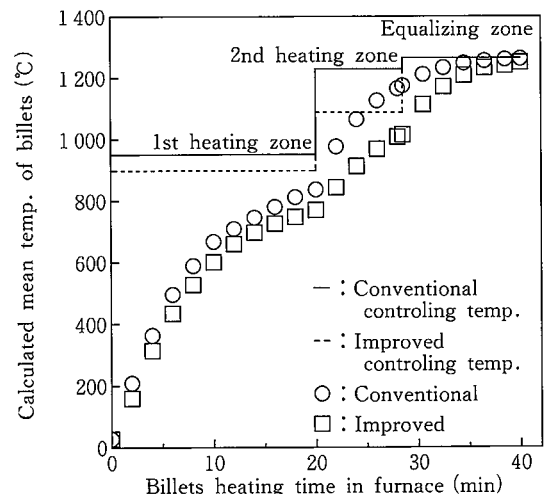
最近、大幅なリードタイム短縮をねらい、調達・開発・設計・製造までの手続きを並列で処理することを目的に、PDM, 3次元 CAD/CAM/CAE等を活用したコンカレントエンジニアリングが注目されている。スムーズな量産立ち上げをねらい、設計上のあらゆる問題点を事前につぶすシステム作りである。しかし、多くのネットワークを介して膨大なデータ量を高速に処理するため、システム構築の投資額もばかにならない。更に現実には、多品種対応増大によりかえって生産非効率を発生させ得るし、設備トラブルを含めた操業条件のムラによる品質起因の保留材や追加工程材等の長期滞留の方が、むしろリードタイム短縮の大きな阻害要因になり得る。リードタイム短縮への投資効果を最大限に発揮させるためには、フレキシブル生産システムへの対応と日常のムダ・ムラ削減追求に併せて取り組むことが重要である。

3-1 熱間鍛造におけるムダ・ムラ低減技術

日常的なコスト合理化につながるムダ・ムラ低減への取り組みを支援する技術として、CAEの役割は大きい。外乱を含む現場試作の試行錯誤（開発費と期間増大）から、モデル実験に代わる事前評価法として、具体的な改善策を提案できる効果は大きい。以下に2, 3の実例を示す。

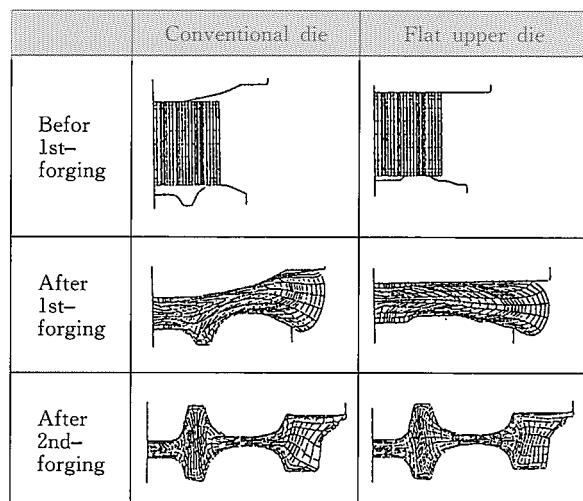
3-1-1 ムダ低減技術

第12図は、クランク軸型鍛造ラインの加熱炉設定温度を



第12図 ビレット加熱パターンの最適化
Fig.12 Optimization of heating patterns for billets

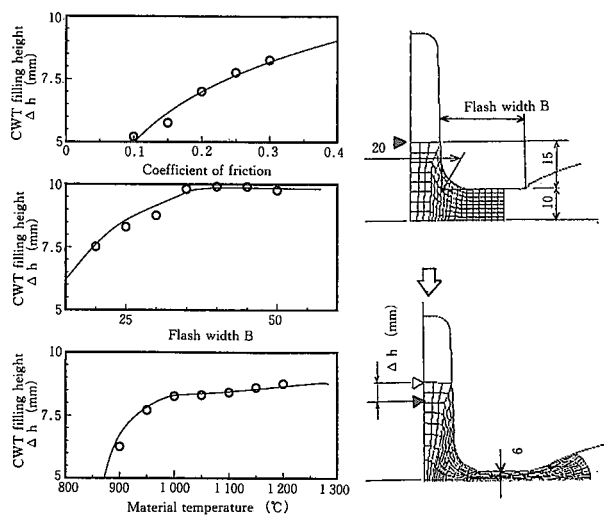
品種別最適化追求によりスケールロス低減、第13図は車輪鍛造ラインの荒地形状簡素化により型費削減¹⁶⁾を当社工場技術者にて進めた例である。



第13図 車輪鍛造における荒地形状の簡略化設計
Fig.13 Simplified blocker design on hot-forging of wheels for railway vehicles

3-1-2 ムラ低減技術

熱間鍛造での疵・欠肉・曲がり等の品質ムラは、時々素材も含めた鍛造条件変動により後工程での手入れ等整備工数を増大させる。実ラインではどうしても変動因子が重なるので、各変動因子の影響度を見積もるには、CAEが強力な武器となる。第14図はクランク軸型鍛造の肉盛り上げ加工における鍛造条件の影響を平面歪モデルでCWT (Counter WeigT)断面につき評価した例であり、摩擦変動抑制が一番重要であることを明らかにしている。このほか、熱間工具鋼用丸棒の自由鍛造において品質・能率を最大限に確保するための金数テーパ角の最適化¹⁷⁾等、2次元



第14図 クランク軸 CWT 断面の肉盛り上げ量に及ぼす鍛造条件の影響 (2D-FEM モデル)
Fig.14 Effects of die-forging conditions on filling amount of CWT section of crankshaft (2D-FEM)

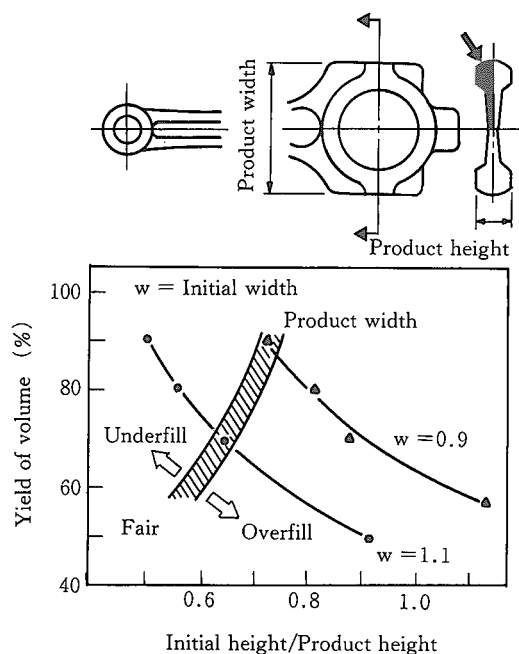
CAEを駆使し変動代として設計に織り込むべきメタルフローの指標が、色々紹介されつつある。

3-2 熱間鍛造におけるリードタイム短縮技術

種々複雑形状を鍛造する新規品設計においては、熟練設計者の経験に基づいた設計基準をベースに、プロセス・型形状・成形パス等を類推し、試作からスタートして試行錯誤を経て量産へ移すケースが多い。この設計基準が、冒頭第1図に示したCAEで的確に評価できれば、類似対象品に対して一発必中に近い設計が可能となり、型形状・成形パス等手直し回数を減らしてCAMとの同時併行処理により、準備期間の大幅な短縮と試作費・型修正費の最小化を実現させる。以下にその事例を示す。

3-2-1 荒地形状最適化の設計基準整備

第15図は、2次元CAEにより疵・欠肉を防止する適正な素材高さを求めた、Ti合金コンロッド鍛造の設計基準線¹⁸⁾であり、試作提供品の開発期間短縮に効果を上げた。



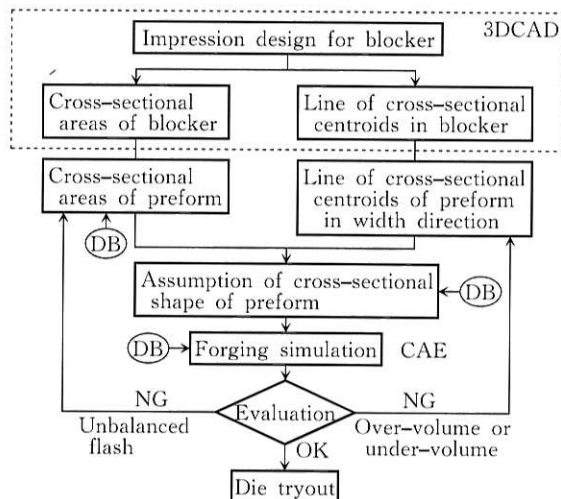
第15図 コンロッド鍛造における最適歩留り設計
Fig.15 Optimized preform design on connecting rod forging

3-2-2 鍛造工程設計支援システムの構築

最近国内自動車メーカーにてリードタイム短縮をねらい、本格的な3次元CAD/CAEシステムが実現された。2次元FEM化ベースで設計基準の類型細分化および計算要素の自動分割/再分割がエキスパートシステムの活用によりなされ(第16図¹⁹⁾)、熱鍛足廻り部品設計においてリードタイム短縮40%、歩留り向上33%、型寿命2倍を達成させている。なお設計者の工程設計時間が2倍に増えた点(第17図¹⁹⁾)は今後の課題であるが、従来並に抑制できれば実

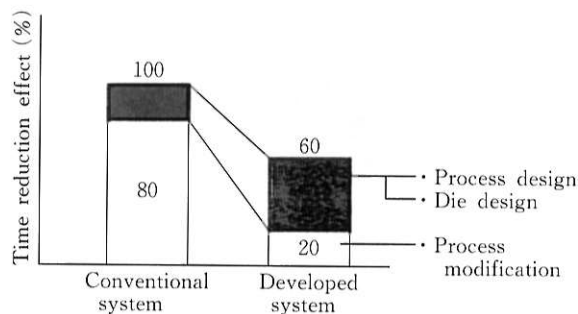
60%のリードタイム短縮が実現する。

当社ではクランク軸鍛造につき、最大公約数的な1次元の設計基準線を用いたエキスパートCAD開発により、設計工期の約25%短縮を実現している²⁰⁾。しかし、現状の設計基準線だけでは最適設計におのずと限界が生じ、現在、設計基準線の精度向上をねらって、塑性変形理論に基づく3次元CAEとの連携による現状知識ベースシステムとの融合を進めている。以下にその3次元CAEシステムへの取り組み状況につき述べてみたい。



第16図 型鍛造工程設計の流れ¹⁹⁾

Fig.16 Flow chart of process design for die-forging



第17図 生産準備時間の変化¹⁹⁾

Fig.17 Change of start-up time for production

4. 3次元CAE化の課題と今後への期待

鍛造技術における現在のCAE利用状況は、軸対称の冷間鍛造品を中心に設計者の道具として普及しつつある。CAEを利用するうえで重要なことは実際の現象に近似的に合うように入力境界条件を調整後、条件を変え解決したい事象を評価することである。市販2次元解析ツールにより、従来の実験に代わり事象の内部情報可視化、事象の解剖(コマ送り・追跡・影響度等)および事象の予測評価等

に活用が進んでいる。しかし、複雑形状(現場での手直し多)の3次元鍛造品に対しては、リードタイム短縮の効果が大きいにもかかわらず、以下の理由により実用的な3次元解析ツールの開発が遅れている。

(1)3次元工具/材料入力データの作成時間大

(2)自動要素再分割法が未確立

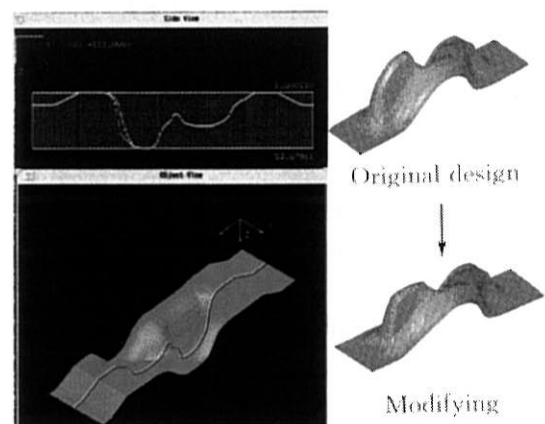
(工具の材料への食い込みおよび要素のゆがみ大で解析精度悪化、かつ計算中断)

(3)素材と型の接触判定処理複雑かつ判定時間大(材料の工具離脱、工具要素乗り換え等頻発)

(4)要素数アップとともに連立方程式求解の時間大

4-1 本格的3次元CAEシステムの構築

前述の課題に対処すべくまず(1)につき、3次元測定による点群データ処理(スムージング・ノイズ処理、面パッチ生成)および設計が容易になった3次元CADデータの活用、更には第18図に示す形状部分修正システムの開発により障壁をなくした。



第18図 型断面形状の部分修正設計システムの開発

Fig.18 Development of the die design system with transverse shape modified partially

(2)、(3)の問題については、エッジ自動抽出と要素分割の分布関数導入、要素つぶれ量や食い込み量の定量評価等地道な取り組み^{21)、22)}により第19図に示す3次元の自動要素再分割法を完成させた。ところで(4)は、より形状が複雑な上下非対称形状への展開をはかるうえで、大きなネックとなっている。

すなわち、熱間鍛造のCAEに使うシミュレーションモデルとして、弾性変形を無視した剛塑性有限要素法に、圧縮特性法を用いた(2)式の非線形多元連立方程式²³⁾を利用して

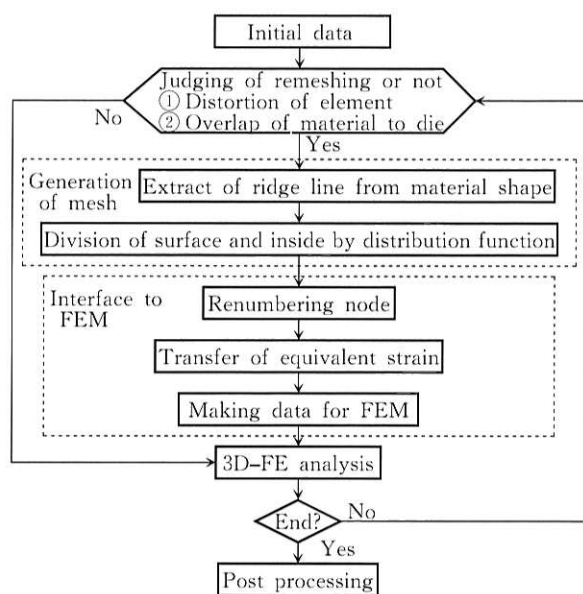
$$[A(U)]\{U\} = \{F\} \quad (2)$$

$$\{\epsilon\} = [B]\{U\} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (4)$$

ここで、

$$[A(U)] : \text{剛性マトリックス} = \sum_v [B]^T [D] [B] dv$$



第19図 3次元自動要素再分割法の構成

Fig.19 Flow diagram of 3D-auto remeshing

[U]: 全体の節点速度ベクトル, {Ue}: 要素の節点速度ベクトル

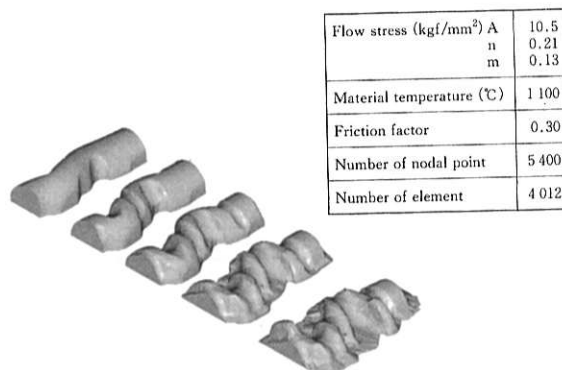
{F}: 素材内部で0, 素材表面で節点外力になるベクトル

[B], [D]: 各構成式の係数マトリックス

通常, 近似的にニュートン・ラプソン法等で線形化し, 直接解法によって繰り返し解く形で各要素の歪 ε ・応力 σ を求める. この場合, 節点数の増加に対して節点速度だけでなく剛性マトリックスのバンド幅も増加するため, 要素数1000以上では計算時間が指数的に増加し, 求解が数日以上を超えてしまうのである.

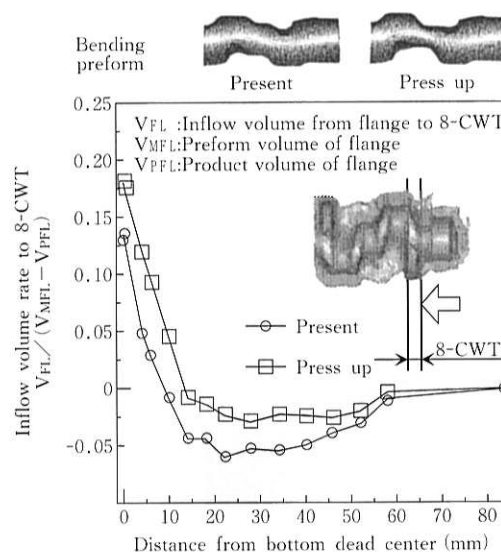
これに対処すべく, 時間短縮に実績があるオイラー要素を用いた動的陽解法(運動方程式を各質点ごとに解く方法)を, コンロッド鍛造解析に適用する試みがなされ成果を挙げつつある²⁴⁾. しかし全体的な力の釣り合いを満足していないため, 形状が急変する複雑形状の鍛造解析に対しては, 解の精度に不安定さを残している. 最近この問題を解決すべく, 対角マトリックスを用いた剛塑性FEM²⁵⁾が提案された. 今後の課題はこの活用も含め, 並列計算処理等計算の高速化を推進することである.

以上をベースに, 第20図に示す当社開発の3次元鍛造解析システムを完成させ, 第21図の4気筒クランク軸の鍛造シミュレーションにほぼ成功した. 第22図は詳細の設計基準を構築していくうえでの解析例である.



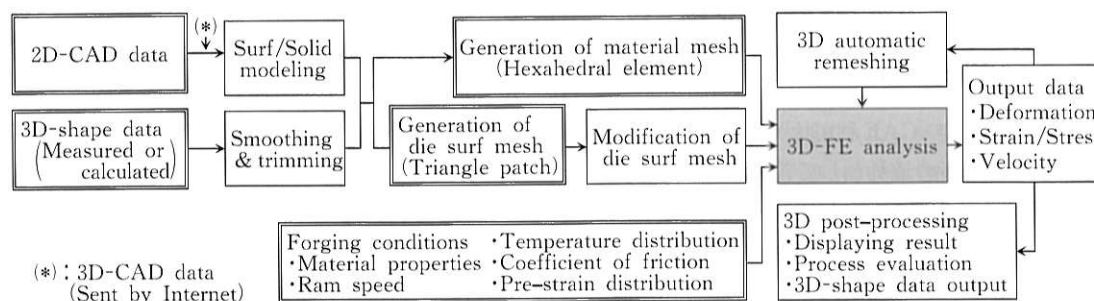
第21図 3D-CAE(1/4モデル)による4気筒クランク軸の荒打ち変形過程の予測

Fig.21 Predicted rough-forging metal flow of 4cycle-crankshaft by using 3-D CAE(1/4 model)



第22図 曲げ形状が荒打ち時のCWT流入体積割合に及ぼす影響(4気筒クランク軸モデル)

Fig.22 Effect of the bending preforms on CWT inflow volume rate in rough-forging (4cycle-crankshaft model)



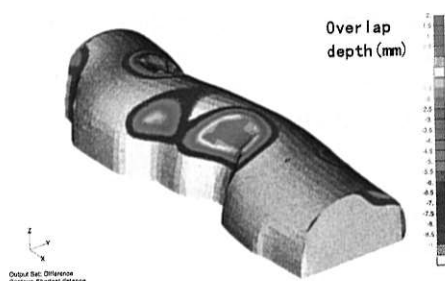
第20図 クランク軸鍛造用3次元CAEシステムの構築

Fig.20 3-D CAE system for crankshaft forging developed by SUMITOMO METALS

4-2 3次元CAEへの期待

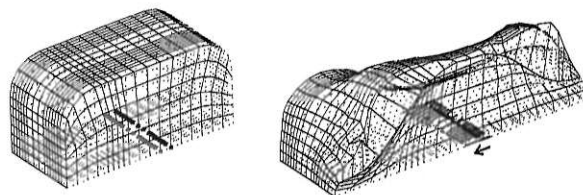
当社がねらう3次元CAEは、生産性と品質を的確に評価する詳細な設計基準を構築することである。トータルとしての効率を考えれば、設計者はこれらの詳細な設計基準線（ガイドライン）を利用しながら、最適化の方向を見極め総合的な設計判断（ねらい）を下し、CAEによるチェックを経て最適化をはかることが望ましい。3次元シミュレーション精度を上げバーチャル成形機をCAEに求めたとしても、それは実機に代わりコンピュータがただ結果を出すだけである。試作費や準備期間は少し改善されるけれども、最適化がなされるまで従来と同じく入力条件を変えてコンピュータ上での試打ちが続き、むしろ従来よりも必要以上に設計者の設計時間を増大させる（CAEは結果から原因への対策提示は不得手）。3次元熱間鍛造につきコンピュータのみで全最適化設計を求めることは、最適化アルゴリズムの未整備かつ計算能力からみてもまだ当分先のことであろう。

今後のCAEの展開としては、第23図に示すような型内の荒地安定化に関する解析、第24図の機能を利用した内部メタルフロー制御、更には加工発熱を考慮した鍛造温度域に入れるための材料加熱温度適正化²⁶⁾や高合金材料で研究が進んでいる粗粒抑制制御²⁷⁾等現場鍛造条件の適正化へ向けての活用および下工程の整備工数軽減の観点からの寸法精度解析が活発化するものと予想される。



第23図 荒地の型当たり解析

Fig.23 Relationships between die and preform on stability



第24図 鍛造時の内部メタルフロー解析

Fig.24 Evaluation of the internal metal flow with tracing points during forging

5. 今後の熱間鍛造技術の取り組み

21世紀に向けて、国際化・型も含めた物流簡素化・地球環境対応も考え、熱間鍛造品の動向を眺めてみると、「量的拡大が頭打ちのなかで、小口対応の多様の製品を低コストで高効率短納期生産できるシステム」と「更なる薄肉・複雑形状・精密加工化の追求のなかで、工具・材料への熱負荷が増大した生産システムでの徹底したバラツキ排除」の技術が強く求められる。これらを解決する方策として、

- (1) ミニマムのライン設備での変種・変量に対応したフレキシブル成形生産システム
- (2) 徹底した省型・省型彫り化をはかる設計工夫
- (3) 寸法精度も含めた品質におよぼす変動因子の制御等の開発が進むものと考えられる。

これらの検討ツールとしてCAEは必須であり、また自動化・知能化による高能率生産が可能なフレキシブル成形生産システムとしては、異なる専用成形機を統合した複合加工化（例えば、ディスクとリング両方を加工できるディスクリングミル²⁸⁾や、最近インクリメンタルフォーミングとして注目されるNC成形加工機（CAEにより工具軌跡用CAMデータ作成）による高速逐次精密成形²⁹⁾、これとは逆のハンドリングロボット（CAEによりマニピュレータ軌跡用CAMデータ作成）によるフレキシブル逐次加工³⁰⁾等の開発が更に加速される。

いずれにしても将来のものの作りは、デジタル生産システムが主流になっていることは間違いない。コンピュータによるモデリングシミュレーションは隆盛を極め、バーチャル生産システムによる事前評価が当たり前となっている。そこでは効率化を求め世界各地に散らばるCAD、CAE、CAM担当部署からインターネットを介してデータが仮想工場に集められ、設計-生産-搬送-保守-管理までの全コストが事前に評価され、販売先の現地量産工場にて生産性追求・準備時間短縮・技能レスにより徹底したコスト低減・品質安定化・短納期化が実現されているであろう。

6. おわりに

最近、予想を越えたコンピュータの飛躍的な高性能化と低コスト化、解析手法の進展に動かされて、CAEの適用技術が着実に広がりつつある。今後も生産合理化と品質安定化、更には新製品短期量産化をはかるキー技術として、工場技術者も入った一層のCAE活用に期待したい。



西口 勝/Masaru Nishiguchi

関西製造所 専門部長

(問合せ先：06(466)9661)

参考文献

- 1) 水谷 巖：精密鍛造システムの最近の動向，塑性と加工，30-343 (1989)，p.1082
- 2) 秋田昌毅，森田浩二，西口 勝，久保 亮：クランクシャフトの高生産システムの開発，住友金属，47-1 (1995)，p.85
- 3) 宮原光雄，野元賢一，海野正英，灘羅知曉，黒川八寿男，岡田康孝：住友金属，48-2 (1996)，p.76
- 4) 西口 勝：熱間鍛造の高速・精密化への課題，第172回塑性加工シンポジウム，(1997)，p.21，塑性加工学会
- 5) 小幡俊彦：鍛造機，特開平2-229638
- 6) Kenji Tamura, and Junpei Tajima : Finite Element Analysis of High Speed Free Forging, Proc., Plasticity' 97, (1997), p.41
- 7) 牧 正志，田村今男：鋼の熱間加工の金属学，日本金属学会報，19-2 (1980)，p.69
- 8) 石川孝司：鍛造における材質予測と制御，電気製鋼，66-3 (1995)，p.186
- 9) 済木弘行：高温精密鍛造と熱負荷，鍛造分科学会第61回研究集会資料，(1996)，p.1，塑性加工学会
- 10) 田嶋淳平，西口 勝，田村憲司：丸溝金敷を用いた丸鋼片の熱間鍛造方法，特願平9-230796
- 11) 田村憲司，肥田安雄，福安富彦，西口 勝，秋山雅義：3次元 FEM を核とした振り加工最適化のための型設計手法の開発と実用化，塑性と加工，36-419 (1995)，p.1385
- 12) 下田政博，東 龍一郎，中野正人：回転鍛造による最近の精密鍛造例，鍛造技報，61 (1995)，p.40
- 13) 岡方義剣，福安富彦，藤村隆志：最近の鉄道車輪の製造技術，塑性と加工，37-429 (1996)，p.1017
- 14) 近藤一義，大賀喬一：分流方式による精密冷間歯車鍛造法の開発，塑性と加工，27-300 (1986)，p.121
- 15) 大賀喬一，村越文夫，安藤弘行，三吉宏治，今藤一義：分流方式による実用歯形製品の冷間精密型鍛造加工の研究，46回塑加講論，(1995)，p.257
- 16) 山田将之，田村憲司，山口晴生，山田健夫：塑性加工プロセスの解析，住友金属，47-3 (1995)，p.59
- 17) Katsuyuki Yamamoto : Forging technique to prevent cracks in the long round bar analyzed by FEM, 13th International Forgemasters Meeting, I (1997), p.115
- 18) 植田洋史，小倉 豊，福安富彦：I 断面を有する型鍛造品の型設計，42回塑加講論，(1991)，p.401
- 19) 矢野裕司：自動車鍛造部品におけるコンピュータ支援技術の活用，塑性と加工，37-431 (1996)，p.1252
- 20) 濱崎敦，小林勇策：当社の自動車用型鍛造品への取り組み，住友金属，48-4 (1996)，p.49
- 21) 近藤健次，上田秀樹，田村憲司，福安富彦，小林正貴，末広祥三，西口 勝：3次元 FEM シミュレーションを用いた型鍛造の金型設計，H 8 春塑加講論，(1996)，p.184 & p.186
- 22) 田村憲司，小林正貴，近藤健次，福安富彦：3次元剛塑性 FEM によるクランク軸鍛造工程の解析，47回塑加講論，(1996)，p.301
- 23) 小坂田宏造：剛塑性有限要素法の概要，第15回塑性加工研修会，(1981)，p.1，塑性加工学会
- 24) 木原茂文，森 洋志，木下 篤，シェリーフ・ラシッド，西山三郎，浅野幸治：GRADE/FORGE による鍛造シミュレーション，46回塑加講論，(1995)，p.265
- 25) 吉村英徳，森謙一郎，小坂田宏造：対角マトリックスを用いた3次元剛塑性有限要素法，48回塑加講論，(1997)，p.57
- 26) 金丸信夫，津田 統，中尾正和，豊島史郎，長谷川 淳：アルミニウム合金の高速鍛造における熱連成変形解析，神戸製鋼技報，44-1 (1994)，p.43
- 27) A.J.Brand, K.Karhausen, and R.Kopp: Microstructural simulation of nickel base alloy Inconel 718 production of turbine discs, Material Science and Tech., 12-963 (1996), p.963
- 28) 大森舜二，谷本楯夫：ディスクリング成形機，塑性と加工，25-279 (1984)，p.272
- 29) 中村敬一，渡辺 忍，熊田文勝，川田陽一，黒梅弘嗣：タービン翼の局部逐次鍛造技術，塑性と加工，35-406 (1994)，p.1270
- 30) Reiner Kopp, Thilo Beckmam and, Werner Wolf: Manufacturing complex open-die-forgings using a robot based flexible forging centre, 13th International Forgemasters Meeting, I (1997), p.145