

素形材・製造／開発における数値シミュレーション

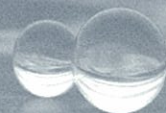
素形材の製造／開発、とくに鋳鍛造分野では、高品質・高性能化のニーズにこたえるための新製品・新技術開発が活発に行われ、企業間の競争もより一層の厳しさを増している。

いっぽう、近年のコンピュータの高速化に伴い、有限要素法を中心とした数値計算技術は急速に発展し、変形解析や温度解析などが実用的に行えるようになってきた。すなわち、鍛造加工に関する現象を理論的なモデルとして近似する、数値シミュレーション技術が、鍛造工程設計上の種々の問題解決に対し十分に力を発揮できる環境が整いつつある。さらに鍛造加工では、数値シミュレーションによる絞り込みと試作実験検証により、試作期間の短縮やコストダウン化が可能になった。

また、従来肉眼では観察できなかった材料内部で起こっている事象を、数値シミュレーションを用いてビジュアル化することにより、鍛造加工分野の経験や勘といった技能領域とみられていた従来型の鍛造技術に新しい方向性を与えつつある。近年では数値シミュレーションの成果が実用的な鍛造方案設計に貢献し、工業的にも大いに認められるようになってきた。

ここでは、数値シミュレーション技術による材料内部の状態の予測の例として、クランク軸やローターなどの大型鋼塊のマイクロキャビティの閉塞技術や、航空機部品向けチタン合金の端面割れの改善、さらに、自動車部品用のアルミ合金鍛造時の品質確保に関する事例について紹介する。

D



シミュレーション技術による、材料内部の状態の予測

D-1

大型鋼塊のマイクロキャビティの閉塞

大型鋼塊では、造塊時に不可避免的にマイクロキャビティが発生する。このマイクロキャビティを閉塞（以下、圧着）させることが、発電機用の大型ローター材のように高品質を要求される材料では必須であり、多くの研究がなされてきた。

80年代になると、有限要素法と実験から圧着の敷居値を求めようとする試みがなされ、相当ひずみでの整理や、相当応力と相当ひずみの積の整理を経て、相当応力で規格化した静水圧応力と塑性ひずみの積で、内部欠陥の圧着（閉塞）が評価できるという方法が提案され、成果を得た。

たとえば、荒木ら¹⁾によれば、鋼塊の圧着は

$$Q = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{P}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}$$

ここで

$\bar{\epsilon}$ ：相当塑性ひずみ

$\bar{\sigma}$ ：相当応力

P：静水圧応力

で表されるQ値が0.6を超えると圧着することを粉末焼結体を用いた実験で確認している。

しかし、この敷居値は一般化平面ひずみ剛塑性有限要素法（拡張2次元モデル）を用いて定式化したものであり、2次元化が可能な場合に適用は限定された。

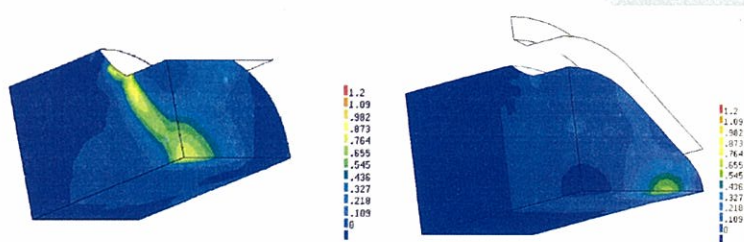
現実の鍛造では据えこみなど、ごく一部を除いては3次元問題であり、圧着の敷居値の3次元への拡張が必要であった。

具体的には、平金敷とV金敷を用いる実際の鍛造で、本当に必要な位置に圧着効果があるのかといった課題の解決が必要であった。

近年の有限要素法による塑性加工の3次元解析技術の発達で、これを可能にした。

たとえば、平金敷とV金敷の違いや、鍛伸時の金敷のかけ幅の効果などの可視化により、鍛造方案そのものの良し悪しの確認が可能になった。

平金敷とV金敷による圧着の位置の差を第1図に示す。



(a) 平金敷

(b) V金敷

第1図 金敷の違いによる鍛錬位置の変化

この例では、平金敷では鋼塊中心に、V金敷では鋼塊の表面に圧着効果があり、これらを適当に組み合わせることにより、鋼塊全体の圧着が可能であることを示している。

チタン合金の端面割れの改善

チタン合金の材質改善をおこなうため、従来は β 鍛造したものを $\alpha + \beta$ 領域で鍛造してひずみを与え、さらに β 温度直上まで加熱して、結晶粒を微細化する β 処理と呼ばれるプロセスをとっていた。近年、より生産性を向上させるため、 β 処理を省略する鍛造方式がとられてきているが、この方法は、材料に適切にひずみを与えることが必須で、条件によっては、鍛造時に端面に微細な内部割れを発生させてしまうことがある。

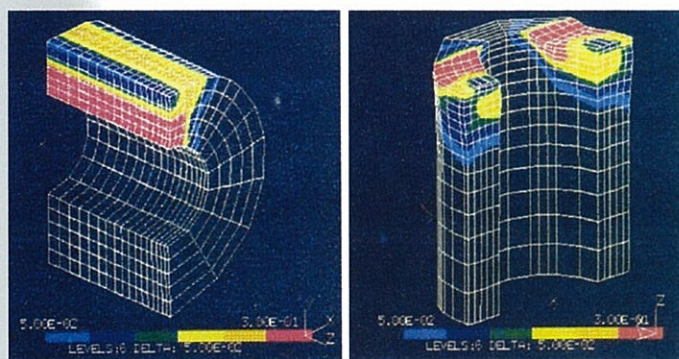
1)荒木ら、第36回塑性加工連合講演会講演論文集、(1985)p.401

また、この微細割れは表面に露出しなことも多いため、後工程の超音波探傷検査や蛍光浸透探傷で発見される厄介なものであった。

これを改善するため、端面をコバ押しすれば良いことが経験的に明らかになっているが、非定常変形であるため定量化するのが難しく、試作により試行錯誤的に条件を決めていた。

これに有限要素法を適用して鍛造時変形を解析した結果、相当ひずみが3次元的に予測できるため、試作をせずに工程設計できるとともに、金敷のかけ方など付加的な知見も得られ、工程改善に多大な効果を発揮した。

リング鍛造→コバ押しの解析の例を第2図に示す。



a) リング鍛造

b) コバ押し

第2図 鍛造時の相当ひずみの分布

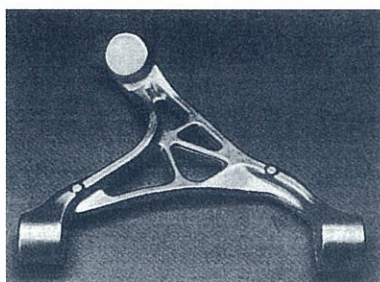
以上のように、有限要素法による3次元の大変形問題が、実用レベルで扱えるようになったことにより、材料内部の状態を予測して必要最低限の加工の付与や、プロセス省略をおこなうことが可能となり、材料特性を維持してコストダウンをおこなうことができるようになった。

メカニカルプレスによる自動車部品の熱間鍛造

自動車の軽量化が指向される中で、重要鍛造部品にアルミニウム合金を採用することが実用化されてきた。

第3図に自動車用足回部品の一例を示す。

この部品は、メカニカルプレスにより高速で鍛造するために、加工発熱による温度上昇を考慮して加熱温度と鍛造速度を適正に決める必要がある。このために伝熱問題と連成した変形解析を用いて



第3図 自動車用足回部品

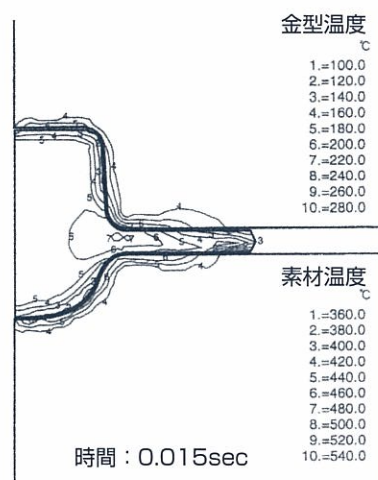
高ひずみ速度域での変形抵抗式および摩擦係数の決定を行った。

これに基づいて、実際の鍛造材の特定断面で変形解析を行い、第4図のような変形過程における温度分布の変化を調べた。

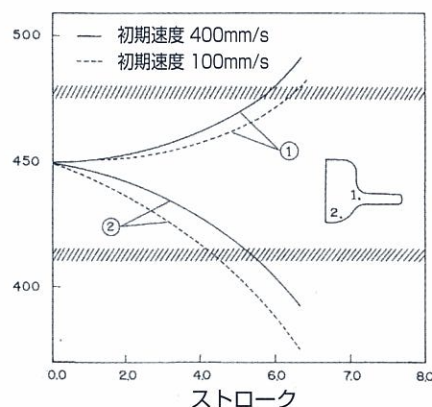
材料側が支配する温度範囲は固定しており、その位置においてストロークに対する温度経路を適正化することが、鍛造材の品質を確保する一つの条件となる。

自動車用足回部品の場合、第5図に示すように鍛造プレスのラム速度の違いによって、同じ素材加熱温度でも断面内温度の最高点および最低点における温度変化が異なることがわかる。

すなわち、初期温度や鍛造速度の設定が不適切な場合には、結晶粒粗大化などの問題が生じる。過剰な温度上昇の防止や欠陥発生を防ぐための素材形状設計、金型設計、鍛造速度設定には、熱連成解析が役立ち、品質確保と生産性向上の両立が図られる。



第4図 自動車用足回部品の鍛造時の温度分布



第5図 自動車用足回部品の断面内温度の最高点と最低点における温度変化

本報では、鍛造加工への3次元大変形解析や熱連成解析の適用に関し、実用的な解析事例について述べた。本技術に関わる方々に多少なりとも参考になれば幸いである。

[エンジニアリングメカニクス事業部 構造技術部 佐藤隆夫・金丸信夫]