

熱間鍛造における金型寿命向上への取り組み

中溝 利尚*1・笠井 貴之*1・高須 一郎*2

Appropriate tool design for improvement of die life due to
reduce both mechanical and thermal load in hot forging
Toshifusa Nakamizo, Takayuki Kasai and Ichiro Takasu

Synopsis: Demand of cost reduction for forging parts becomes severe in these days. Its cost is greatly influenced by tool life. Thus, making tool life long is one of important technological subjects. Factors that determine tool life are mainly both mechanical load and thermal load at forging. It is necessary for improvement of tool life to estimate these factors quantitatively. In this article, these factors are examined by using computer aided analysis about forward and backward extrusion at hot forging. In the result, appropriate tool design and cooling system were introduced with tool load reduction. Then, the actual tool designed by this procedure had three times longer life comparing with conventional one.

Key words: hot die forging; tool life; mechanical load; thermal load; CAE; FEM; forward and backward extrusion; accumulated friction energy; friction heat; fluid analysis; deformation analysis; thermal analysis; heat check.

1. 緒言

素形材製造技術の中でも特に鍛造技術は、複雑形状部品を大量に経済的に生産できる技術として、主に自動車産業とともに成長してきた。しかし、近年の急激な経済状態の変化や、海外生産への移行、ほかの塑性加工技術の発達などを背景として、鍛造品を取り巻く環境はますます厳しいものとなっている。特に、大幅なコスト低減、製品の高機能化、短納期化などへの要求がますます高まっている。

このようなニーズに応えるため、材料歩留の向上、切削工程の簡略化を目的として、ニアネットシェイプあるいはネットシェイプ成形といった精密鍛造による加工工程の効率化が急速に進みつつある。しかし、このような精密鍛造化への動きは、金型に作用する応力、摩耗負荷あるいは熱的負荷を大きくするため、金型寿命の低下がしばしば発生し、問題となる場合がある。

金型寿命の向上は、トータルコストの低減や成形性向上の観点から、常に要求される技術課題であり、金型表面処理、潤滑剤、工程設計など様々な角度からの改善が考えられる。これらの実施例については、学会報告などでも多々見受けられ、現在では、総括した寿命予測システムの構築まで研究が進んでいる例^{1)~4)}もある。

特に熱間鍛造における金型寿命は冷間鍛造の場合に比べ

て短く、割れ、摩耗あるいは塑性変形といった金型損傷が発生する。これらの金型損傷の原因としては、面圧・すべり速度などの機械的な因子と、被加工材からの熱流入、加工発熱あるいは摩擦発熱といった熱的な因子が考えられる。よって、金型寿命向上を実現するためには、機械的負荷および熱的負荷という2つの負荷を低減させることが必要である。そこで本稿では、熱間鍛造でのギア素形材（前後方押し出し形状）を取り上げ、CAE解析を用いて金型におよぼす機械的負荷および熱的負荷を検討し、金型寿命向上のための方策を考案した。

2. 金型の損傷形態と発生原因

2.1 金型の損傷形態

熱間鍛造において、金型の損傷形態は、摩耗、割れおよび塑性変形の3つの形態に分類できる。Fig1に金型損傷形態とその影響因子について示す。

摩耗には引っかき摩耗、凝着摩耗などが、割れには過荷重による早期割れと、サイクル荷重および熱負荷による疲労破壊がある。熱間鍛造の場合、サイクル的な熱流入を原因としたヒートチェックによる割れが問題となる場合が多い。また高温下での長時間負荷によるクリープ変形、高い熱負荷によって金型角部の降伏点が低下し塑性変形を生じ

*1 技術研究所 プロセス開発グループ

*2 技術研究所 プロセス開発グループ長, PhD

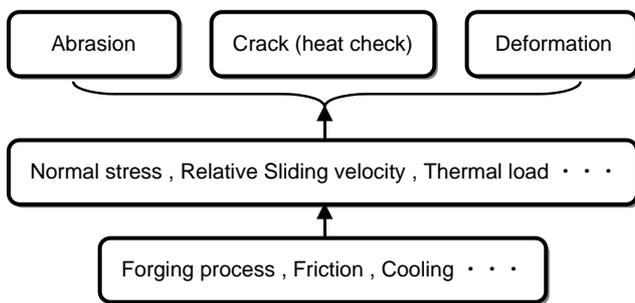


Fig.1. Tool damage form and it's factors

るなどの損傷形態がある⁵⁾。

熱間鍛造の場合、損傷形態の発生割合としては、約7割が摩耗によるとの報告⁶⁾もある。

2・2 金型損傷への影響因子

上述のように金型の損傷は種々の形態があるが、損傷を引き起こす負荷因子として、大きく分類すると機械的負荷と熱的負荷に区分することが可能である。前者については被加工材から受ける面圧と金型 - 被加工材間の相対すべり速度等が挙げられ工具摩耗や塑性変形を引き起こす。また後者については、金型 - 被加工材間の摩擦発熱、被加工材からの熱伝達およびヒートチェックなどが挙げられ金型強度の低下や熱衝撃による割れを引き起こすと考えられる。つまり、熱的負荷は金型強度の低下および熱疲労などの影響をもたらす、機械的負荷は金型損傷進展の駆動力として作用する。

熱間鍛造においては、熱的負荷と機械的負荷の影響が組み合わさり損傷が発生する。具体的には、熱的負荷により金型強度が低下し、さらに軟化した金型に機械的負荷が加えられて摩耗が発生するといった損傷プロセスが考えられる。

2・2・1 機械的負荷

被加工材が金型に及ぼす機械的負荷として、金型表面に対する面圧およびすべり速度が挙げられる。これらの機械的負荷を要因として金型損傷が発生するという知見もあ

り、これらの機械的負荷を定量的に見積もり、その絶対量を低減することは、金型寿命を向上するための有効な手段である。

ただし現場においては、機械的負荷を鍛造荷重という加工系全体に対する巨視的な値でしか可視化できない。鍛造荷重は金型負荷を評価する1つの指標ではあるが、金型コーナー部などの局所的な金型負荷を判断する指標としては不十分である。特に、金型の寿命は、コーナー部分での摩耗や変形など局所的なケースによるものが多いことから、局所的な金型負荷の程度を見積もり評価する必要が生じる。

このような局所的な金型負荷を見積もる際には、CAE解析が有効な手段となり得る。Fig2に、CAE解析から得られた面圧およびすべり速度の一例を示すが、この例では金型段付部上面における面圧および滑り速度が高いことが確認できる。このように、CAE解析により金型の局所的な負荷を定量的に見積もることができ、またその経時変化を得ることも可能である。

2・2・2 熱的負荷

熱間鍛造と冷間鍛造に用いる金型の寿命を比較すると、その違いは歴然としており、一般的に、冷間鍛造では数万ショット~数十万ショットといった高寿命であるのに対し、熱間鍛造では数千ショット~数万ショット程度である。この寿命の極端な相違には熱的負荷の影響も大きいと考えられる。

熱的負荷には、被加工材からの熱伝達と摩擦発熱が挙げられる。前者については、被加工材温度および加工発熱量が大きく影響をおよぼし、後者については金型表面での面圧、すべり速度および摩擦係数との関連が大きい。

3. ギア素形材への適用

3・1 鍛造設備と生産条件

当社関連会社で製造している熱間鍛造製ギア素形材（前

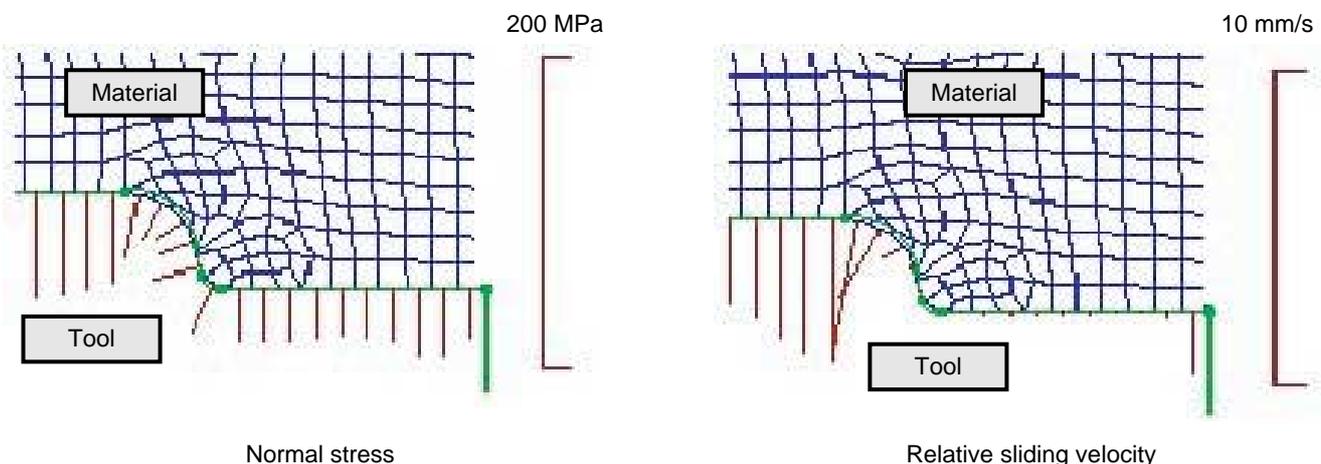


Fig.2. Example of normal stress and relative sliding velocity

後方押し出し形状)は、他の部品に比べて金型寿命が著しく短く、コストや生産性の点で問題となっていた。

本報では、本部品についてCAE解析を利用し、金型寿命向上の方策を考案した。

本部品を製造しているプレス機は横型高速鍛造機(フォーマー)であり、軸対称部品からギアなどの複雑形状部品を製造している。また構造上、高速でのトランスファが可能であるため、80個/分と高効率の加工が行える。被加工材は、高周波誘導加熱により1100 程度まで加熱し、切断・据込・成形の各工程を経て最終形状を得る。潤滑剤は、離型剤としての役割の他に、金型へ噴霧することで冷却剤としての役目も果たしている。

Fig3にギア素形材の鍛造工程図を示す。φ36の素材を、第1工程にて据込み、第2工程にて前後方押し出し形状へと加工を行う。なお、第2工程は閉塞鍛造である。被加工材の鋼種はSCR420、金型の鋼種はQHZである。QHZは当社開発鋼で、摩耗、ヒートチェックの発生を防止するため高温強度を向上させ、割れ、欠け防止のために靱性を改善した、熱間・温間鍛造用セミアイス鋼である。

この金型は内部に冷却水が流れる構造となっており、金型内部で冷却水を還流させることにより、型温度の上昇を抑制している。また、潤滑剤を含んだ冷却水が金型下面より入り、金型上部にて射水されることにより、外面からの冷却および潤滑の役目を果たしている。

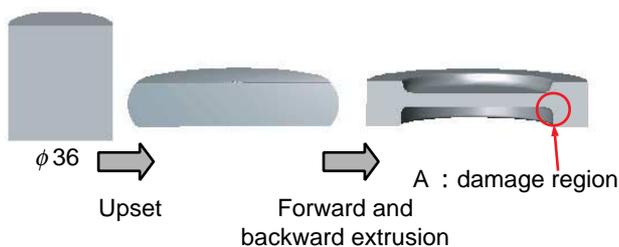


Fig.3. Forging process

3・2 金型損傷の実態、および損傷原因

本部品の金型における損傷はFig3のA部に対応するダイスコーナー部において発生し、金型寿命は他の部品に比しても非常に短かった。金型の外観を調査したところ、金型全面にヒートチェックが発生しており、材料流動が最も大きく、熱影響を受けやすいと思われるコーナー部分が摩耗・変形し、初期の形状を保っていないことが判明した。このような金型のコーナー部分、特にコーナーRが小さい箇所は、大きな熱的負荷を受けやすく、材料流動による摩擦すべりの影響も大きいと考えられ、必然的に損傷が発生しやすい場所と思われる。損傷発生部位については、損傷のほとんどはR部、コーナー部分で発生しているとの報告⁶⁾もある。

以上のことから当該金型の損傷メカニズムは、i) 高温の被加工材が繰り返し接触することによる熱疲労、ii) 金型の熱軟化、iii) 鍛造時の面圧、すべり速度の急激な上昇による局所変形が考えられ、これらの機械的・熱的負荷要因が合わさり、型軟化による局所的な塑性変形が発生し、早期に損傷が発生したと推察される。

4. 解析方法

4・1 CAE解析モデル

上述のように推測される損傷原因から、金型寿命向上のためには機械的負荷および熱的負荷のそれぞれを低減させる必要があると考えられる。機械的負荷の低減には金型形状の変更、熱的負荷の低減には冷却系の変更ならびに摩擦発熱の低減が対策方法として挙げられる。そこで第2工程の前後方押し出し加工に着目し、CAE解析を用いて対策方法の最適条件について検討を行った。

この機械的負荷および熱的負荷を算出するため、Fig4のようなモデルで解析を行った。まず、材料変形解析を行い、局所的な面圧・すべり速度などの機械的負荷を算出し、『累積摩擦仕事量』にて評価を行った。次に、金型温度解析により熱的負荷を算出するが、ここで熱的負荷には、前述の通り加工発熱、摩擦発熱ならびに冷却水による抜熱の影響が考えられる。そこで、材料変形解析から得られた仕事量を熱量に変換して伝熱解析に盛り込み、摩擦発熱の影響として温度解析に反映させた。冷却水による抜熱に関しては、流体解析にて内部冷却水の流速を算出し、伝熱解析に反映させた。このように、材料変形解析、金型温度解析および流体解析を駆使し、高精度な鍛造工程の再現を試みた。

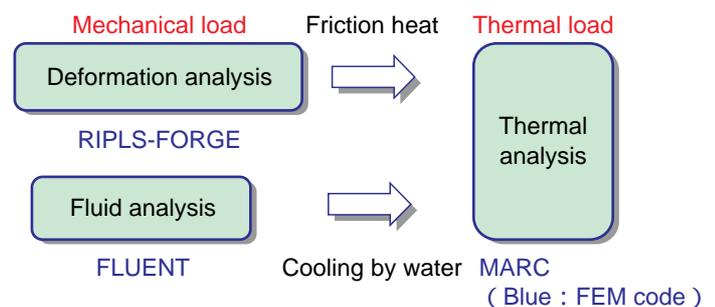


Fig.4. CAE Analysis Model

4・2 機械的負荷

機械的負荷を定量的に把握するため、小坂田らの開発した二次元剛塑性FEMコード「RIPLS-FORGE」⁷⁾を用い、材料変形解析を行った。当該部品は軸対称形状であるため、Fig5に示すような解析領域でモデル化を行った。

本報では、CAE解析を駆使して得られた結果をもとに、

機械的負荷を評価する指標として式(1)で表される『累積摩擦仕事量 ψ 』^{8), 9)}を算出し、金型寿命向上の検討を行った。Fig6に式(1)に用いた変数に関する模式図を示すが、面圧Pにより発生する摩擦力と接点のすべり速度との積を、時間積分した値であり、鍛造加工中に被加工材が、金型の単位面積あたりに与えた仕事量を意味する。

$$\psi = \mu PVdt \quad \dots (1)$$

μ : Coulomb friction coefficient P : Normal stress
V : Relative Sliding velocity dt : Contact time

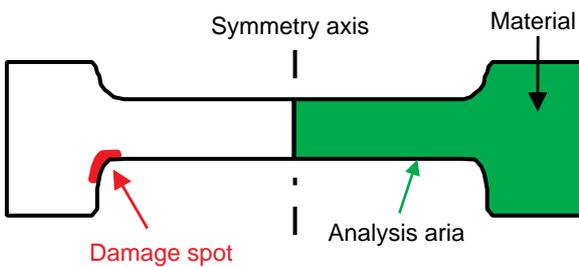


Fig.5. Deformation analysis model

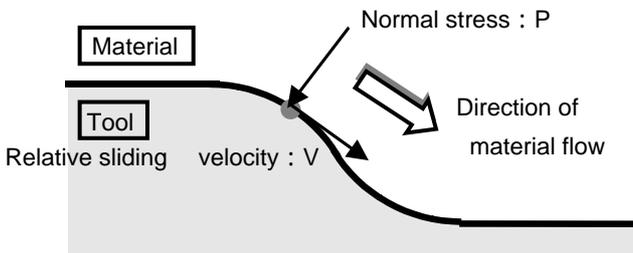


Fig.6. Schematic diagram of accumulated friction energy

Table1にCAE解析条件を示す。現場での誘導加熱炉の抽出温度が1100 °Cであったため、解析で用いた変形抵抗には、SCR420の1100 °Cに相当する値を用いた。また、金型と被加工材との摩擦係数を決定するため、実鋼とCAEとのメタルフローの比較を行った。その結果をFig7に示すが、クーロン摩擦係数を0.3とした場合に、両者のメタルフローが良く一致することが分かった。

Table1. Deformation analysis conditions

FEM code	RIPLS-FORGE
Flow stress /MPa	$\sigma = 79.4 \dot{\epsilon}^{0.097}$
Initial number of mesh	500
Coulomb friction coefficient	0.3
Stroke speed /mm·s ⁻¹	560

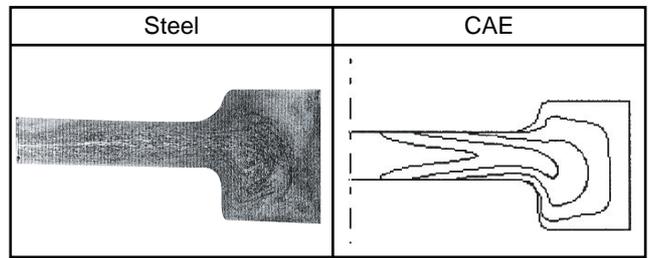


Fig.7. Comparison of Steel and CAE metal flow

以上の条件にてCAE解析を行い、金型への機械的負荷の低減を目的に、損傷部近傍の金型形状の最適化について検討を行った。金型損傷部であるダイスコーナーにおける材料挙動に最も影響を及ぼすと考えられる。Fig8に示す、押し出し高さH (mm)、テーパ角 θ (deg)、コーナーR (mm)の3つの項目について、Table2に示す範囲で変化させて、機械的負荷に及ぼす影響について調査した。

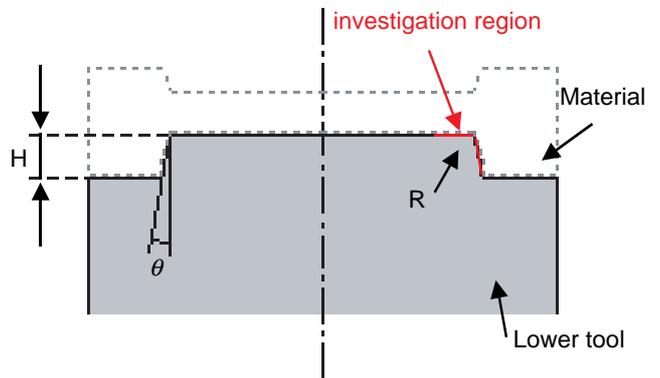


Fig.8. Shape parameters and investigation region

Table2. Shape parameters

Extrusion height H /mm	3 , 4, 5
Taper angle θ /deg	2 , 3, 5
Corner round R /mm	1, 2 , 3

Bold : normal condition

4・3 熱的負荷

次に、熱的負荷を算出するため、被加工材からの熱流入、内部冷却水による抜熱、および摩擦発熱を評価した。今回の事例では、損傷部が局部的に高温となり型軟化が発生し、金型の損傷を助長した可能性がある。そこで熱的負荷の低減を目的に、金型冷却系の最適化について検討を行った。

本報では、摩擦発熱については、上述した『累積摩擦仕事量 ψ 』が損失することなく全て発熱に利用されたものとして摩擦仕事を熱量に換算して熱的負荷を算出した。また、本報で使用したダイセットは、パンチ内部に冷却水が流れる構造を有しており、冷却水による抜熱効果も考慮した。

Fig9に示すように金型冷却系に大きく影響を及ぼすと考

えられる，冷却水圧力P (MPa)，送り管径D₁ (mm)，射水管径D₂ (mm) の3つの項目について，Table3に示す条件で検討を行い，金型最高温度を比較することで，熱的負荷に及ぼす影響について評価を行った。

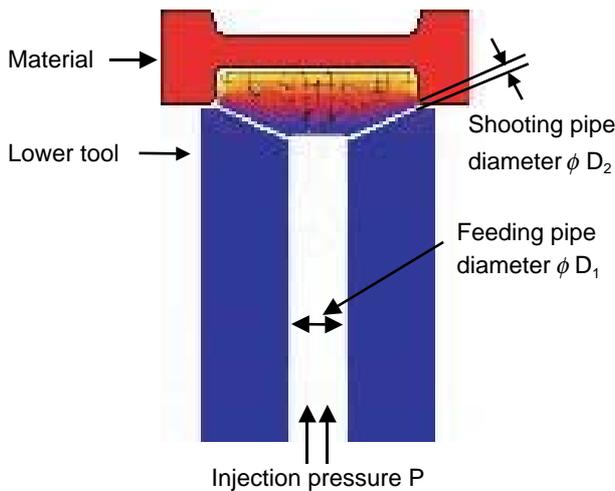


Fig.9. Thermal analysis Model

4・3・1 金型 - 冷却水の熱伝達率の決定

冷却水は，Fig10の金型下部より入水圧力を受け，送り管内へと流入する。そして，射水管より金型表面へと射水され金型を冷却する役割を果たしている。金型の熱的負荷を算出するためには，金型と冷却水との熱伝達を考慮しなければならない。金型と冷却水との熱伝達率は，式2¹⁰⁾に示すように，内部冷却水の流速と水温，および冷却水と金型の接触面積により決定した。

$$h = (2.20 + 0.03t_b) \times 10^4 \frac{M^{0.8}}{d^{0.2}} \dots (2)$$

h : Heat conductance

t_b : temperature of cooling water

M : Amount of water d : Diameter of pipe

ここで，冷却水の流速は，冷却水圧力，送り管径，および射水管径に依存するため，簡便に見積もることは困難である。そこで流体解析により，金型内部での冷却水流速分布を求めた。ここで，Fig10に示すように，金型内部での射水管の配置は30°毎に放射状に配置された構造を有しているため，周期対称性を考慮して3次元モデルで解析を行った。解析条件はTable4の通りである。流体解析には，

「Fluent」を用いた。

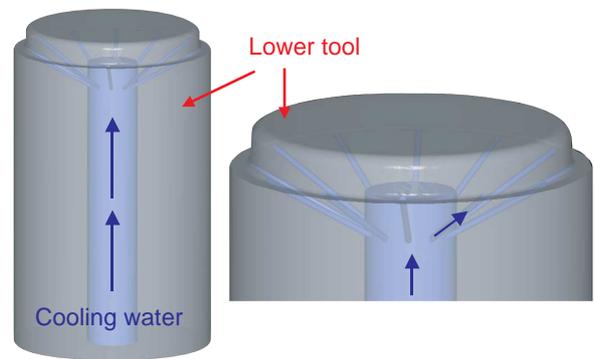


Fig.10. Overview of cooling water pipe

Table4. Fluid analysis conditions

Analysis model	3-Dimension
Turbulence model	k-ε model (used default value)
Fluid Density /kg · m ⁻³	998.2
Viscosity /kg · (m · s) ⁻¹	0.001
Gravity /m · s ⁻²	9.8

4・3・2 摩擦発熱量の見積もり

更に，熱的負荷の要因と考えられる摩擦発熱の影響を検討した。材料変形解析にて得られた結果から，金型表面に働いている累積摩擦仕事量ψを算出した。この摩擦仕事量が全て摩擦発熱に費やされるとし，この仕事量を熱量に換算し，解析ではこの熱量を金型との接触面における熱流束として境界条件に与えるといったモデル化を行った。

4・3・3 金型温度分布の予測

熱的負荷の解析（金型伝熱解析）については，汎用解析コード「MARC」を用いた。金型形状の周期対称性から，Fig11に示す30°領域を取り出した1/12モデルにて，被加工材からの熱流入に加え，冷却水による抜熱および摩擦発熱を考慮した解析を行った。

ここで鍛造サイクルが80個/分と非常に高速なため，1100 一定の被加工材が金型上面に常に接触している状態として解析を行った。また金型損傷が発生した時期は鍛造数量が1,000個のオーダーであるため，金型温度は定常になっていると考えられる。そのため解析では系の温度が

Table3. Thermal analysis conditions

	normal	Pressure up	Feeding pipe diameter up	Shooting pipe diameter up
Injection pressure P /MPa	0.392	0.784	0.392	0.392
Feeding pipe diameter φ D ₁ /mm	14	14	21	14
Shooting pipe diameter φ D ₂ /mm	1	1	1	2

定常状態となった状態における結果を参照した。Table5に金型伝熱解析条件を示す。

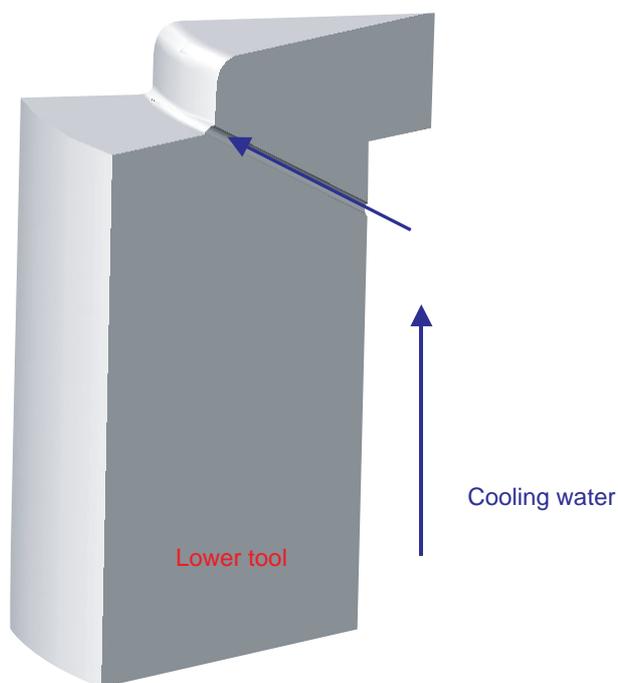


Fig.11. Overview of thermal analysis model

Table5. Thermal analysis conditions

Analysis model	30deg-region (1/12 model)
Material temperature /	1100
Initial temperature of tool /	30
Conductivity / $J \cdot (m \cdot s)^{-1}$	33.49
Specific heat / $J \cdot (kg)^{-1}$	627.90
Material - Flame heat conductance / $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	3348.80

5. 解析結果

5.1 機械的負荷

金型形状を変化させたときの、損傷部近傍での累積摩擦仕事量 ψ の計算結果を、Fig12 ~ 14に示す。累積摩擦仕事量 ψ は、押し高さHを現状より減少させると減少する傾向にあり、またテーパ角 θ およびコーナーRを現状より増加させることによっても減少する傾向にあることが分かった。

このことはダイスコナー部近傍での材料流動と関連がある。つまり押し高さHを小さくすると被加工材との接触時間が短くなり、テーパ角 θ およびコーナーRを大きくするとコーナー部での材料流動が良好になり材料から受ける面圧が小さくなるため、累積摩擦仕事量 ψ が低減すると考えられる。

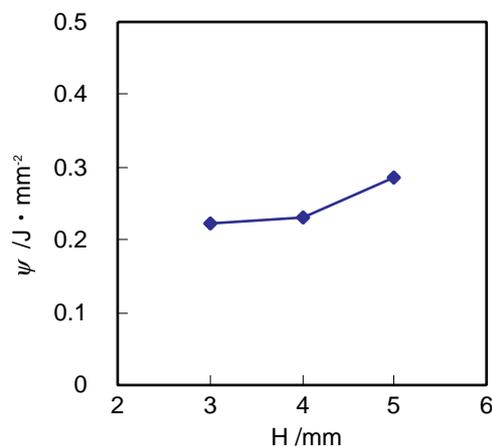


Fig.12. Relationship between H and ψ

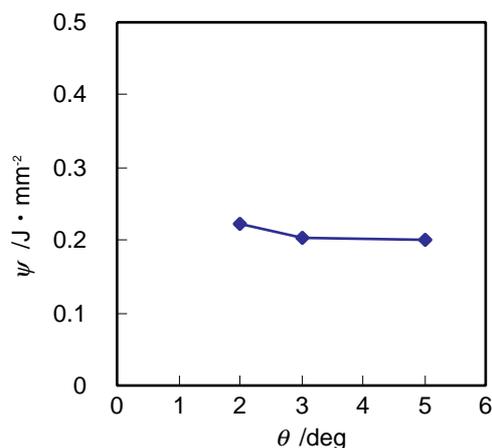


Fig.13. Relationship between θ and ψ

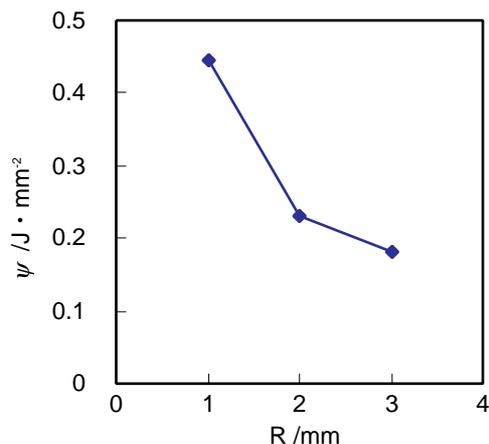


Fig.14. Relationship between R and ψ

この結果より機械的負荷を低減させるためには、高さ $H = 3$ (mm)、テーパ角 $\theta = 5$ (deg)、コーナー $R = 3$ (mm) が最適金型形状と分かった。この最適条件の金型形状について解析を行い、現状の累積摩擦仕事量 ψ の比較を行った結果、Fig15に示すように現状よりも39%程度摩擦仕事を低減できることが判明した。これにより金型損傷進展力である機械的負荷が低減することから、金型寿命は

向上すると推測される。また機械的負荷が小さくなることは、摩擦による発熱量も小さくなることを意味するため、熱的負荷の低減効果も期待できる。

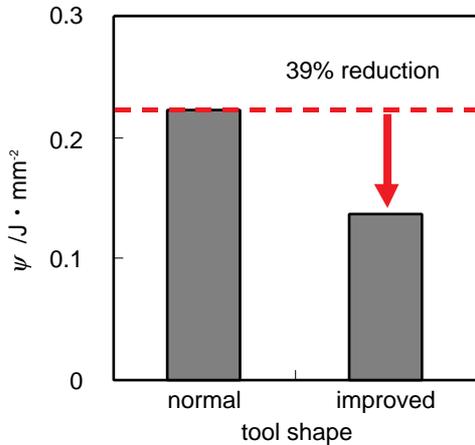


Fig.15. ψ reduction due to tool shape improvement

5・2 熱的負荷

Table6に流体解析により得られた、射水管出口における流速 ω と熱伝達率 h の関係を示す。この結果から、射水管径を増加させる条件が射水管出口における流速を最も速くすることができ、その結果、金型 材料間の熱伝達率を最も向上することができることが分かった。このことは式(3)から分かることだが、射水管径の断面積の増加に伴って冷却水の流量が増加し、金型と冷却水との熱交換率が向上したことに起因している。

伝熱解析結果の一例をFig16に示す。最高温度を示す部位はダイスコーナー部であり、実機での損傷部分と一致する。この結果から、損傷が発生した箇所は冷却水による抜熱を受けにくく、被加工材からの熱が蓄積されやすい部位であることが分かる。

被加工材よりの熱流入と、冷却水による抜熱を考慮した結果をFig17に示す。ここでは、摩擦発熱の効果は考慮していない。また、金型最高温度を比較すると、射水管径を現状の2倍にした条件の場合、冷却効果が最も高く、約60の温度低下が期待される。

一方、摩擦条件を考慮した伝熱解析結果をFig18に示す。金型を従来形状から前節で述べた最適金型形状に変更した場合、約15の温度低下が見込まれる。さらに、この最

適金型形状に加えて、冷却系に改善を施した場合、現状より約75の温度低下が期待される。また、この結果から、今回の事例の場合、温度低下に関する寄与率としては、冷却系の改善の方が効果は大きいと判明した。

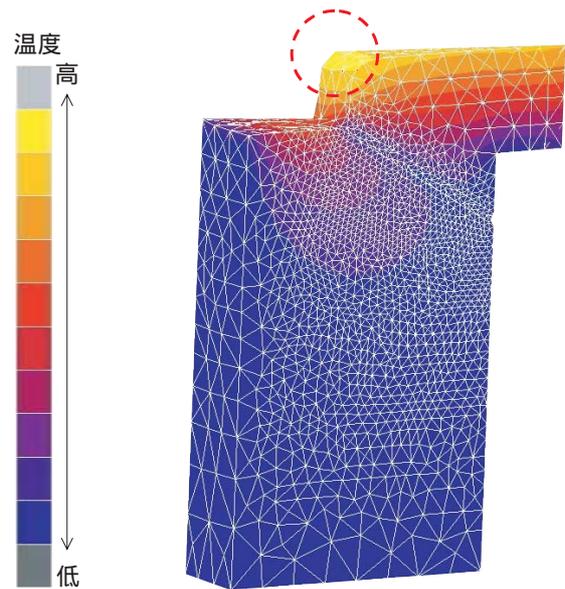


Fig.16. Thermal distribution of lower tool

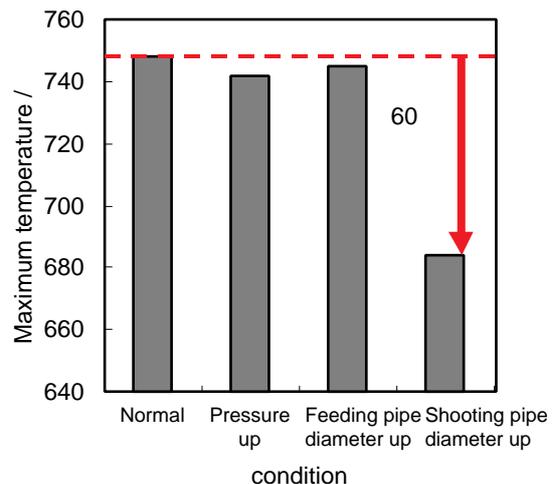


Fig.17. Result of thermal analysis without friction heat

Table6. Result of fluid analysis

	normal	Pressure up	Feeding pipe diameter up	Shooting pipe diameter up
Shooting velocity $\omega/m \cdot s^{-1}$	15.6	22.3	14.6	18.3
Material - Tool heat conductance $h / 10^3 \cdot J \cdot m^{-2} \cdot ^{-1} \cdot s^{-1}$	60.7	80.8	57.8	182.1

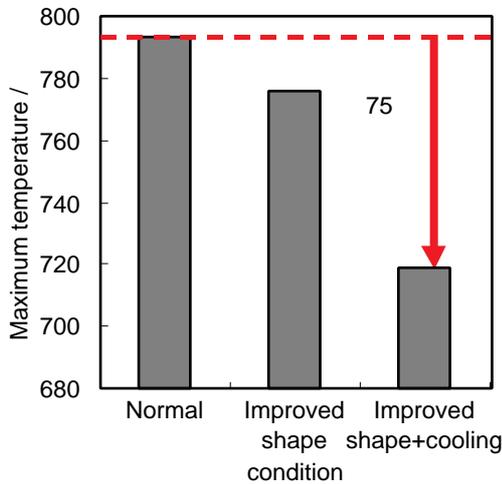


Fig.18. Result of thermal analysis with friction heat

6. テスト鍛造による確認

以上の結果から、金型形状変更により機械的負荷よりも熱的負荷の低減率が大きく改善効果が期待できること、具体的には射水管径を現状より2倍に増加させることで熱的負荷を大幅に低減できることがわかった。実際、金型表面形状を変更するよりも金型射水管径を変更する方が簡便であり、テストでは射水管径のみを変更した。射水管の変更の際には、金型の加工性および強度の点から管径に制限があるため、管径を現状の1.3倍に変更した金型にてテストを実施した。その結果、従来と比較して約3倍の金型寿命を得ることができた。

7. 結言

金型寿命向上を目的として、CAE解析を用いて金型に作用する機械的負荷と熱的負荷の検討を行い、現状工程よりも機械的負荷および熱的負荷を低減できる最適な金型現状および冷却系を見出すことができた。その結果、負荷低減

率、工程変更の簡便性、および金型加工性・強度の観点から、射水管径を変更する方策がリーズナブルであることがわかり、射水管径を従来比1.3倍としてテスト鍛造を行った結果、現状工程と比較して約3倍の金型寿命を得ることができた。

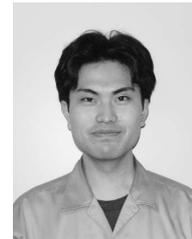
文献

- 1) 松井宗久, 田中利秋, 土屋能成, 中西広吉, 鈴木寿之, 野上芳和, 鈴木敏孝: 第32回塑性加工春季講演会論文集(2001), 73.
- 2) 土屋能成, 中西広吉, 田中利秋, 松井宗久, 明石忠雄, 鈴木寿之, 野上芳和: 第32回塑性加工春季講演会論文集(2001), 75.
- 3) 鈴木寿之, 野上芳和, 鈴木敏孝, 中西広吉, 土屋能成, 中西利秋, 松井宗久: 第32回塑性加工春季講演会論文集(2001), 77.
- 4) 藤川真一郎, 石原章, 樹村勝正, 伊澤昌敏, 小豆島章: 第51回塑性加工連合講演会論文集(2000), 167.
- 5) 辻井信博: 山陽特殊製鋼技報, 4(2000), 65.
- 6) 鍛造技術研究所, 素形材センター: 鍛造用金型寿命向上 調査研究報告書(1996), 3.
- 7) 森謙一郎, 鳥進, 小坂田宏造: 日本機学会論文集, 45(1979) No.396, 965.
- 8) 中溝利尚, 高須一郎, 笠井貴之: 第51回塑性加工連合講演会論文集(2000), 169.
- 9) 吉田忠継, 尾崎勝彦, 中崎盛彦, 矢野正和, 笠原義夫: 山陽特殊製鋼技報, 3(1996), 25.
- 10) 日本機学会: 伝熱工学資料 改訂第2版, 27.

著者



中溝 利尚



笠井 貴之



高須 一郎