

解説



Review

温熱間鍛造型の寿命向上

小森 誠

Life Time Improvement of Warm-Hot Forging Die

Makoto Komori

Synopsis

The life time of warm-hot forging die recently tends to become shorter though it's originally very short comparing with that of other material processing. It is big impact, therefore, on productivity, economy and earth environment to improve die life.

To improve die life, we have to make sure its reason and to consider its dispersion. We also have to make sure its damage mode in case it causes life out. We should examine rather life total cost in economical study and consider die material resource circulation for earth environment.

From the points to reduce die life total cost and to consider resource circulation, we build up a base of "no-break-die" by optimizing die material and its heat treatment, and then prolong the die life by applying surface modification or partially reinforcing with special materials. It becomes more important to challenge boldly difficult technical subjects with cross-fuctional collaboration of various brains not only from persons concerned in die industry but also from other fields.

1. はじめに

自動車のエンジン、足回り部品などの高強度が要求される素形材を Fig.1 に示すが、これらは温熱間鍛造工法でつくられる。高温に加熱された金属材料を鍛造加工する金型は、繰返し大きな熱的、機械的負荷を受けるため、元来、寿命が他工法の金型に比べて極端に短い、近年さらに短くなる傾向がある。

クルマの燃費向上のために鍛造品の高強度化、軽量化の取組が加速しているが¹⁾、このことは金型の摩耗許容量をさらに狭めて短寿命化を招いている。また高強度化を実現させる鍛造材の採用は金型への熱的、機械的負荷を増大させる場合がある。生産コストを下げるとともに、生産時のエネルギー消費を抑えて CO₂ 排出量を削減するために、鍛造歩留り向上や熱処理工程削減などの取組が進んでいるが¹⁾、金型への負荷を増大させる傾向が強い。すなわち、温熱間鍛造型は地球に優しい素形材を安いコストでつくる中で、これまで以上に、熱的、応力的に過酷な使い方に晒されるようになって来た。

一方、日産自動車㈱（以下、当社という）は、リサイクルしやすいクルマの設計や、工場で発生する廃棄物の削減と再資源化など、クルマのライフサイクルのあらゆる段階で、限りある貴重な資源を有効活用し、資源の効果的な循環を推進する取組を行っている²⁾。具体的には、リデュース（発生抑制）・リユース（部品として再使用する）・リサイクル（材料として再利用する）の 3R 活動をさらに推進している。

近年の BRIC's 諸国の台頭により、地球規模での資源循環のバランスが急速に崩れつつあるが、その代表例の一つがレアメタルの需給逼迫による価格高騰である。ニッケル、モリブデン、タングステン、バナジウムなどレアメタルを大量に含む型材を使用する温熱間金型の資源循環について考える必要も出てきている。

こうした背景の中で、本稿では温熱間鍛造型の寿命向上の考え方と事例について触れながら、低コストで地球に優しく型寿命を向上させる型材と表面改質技術について考えてみる。

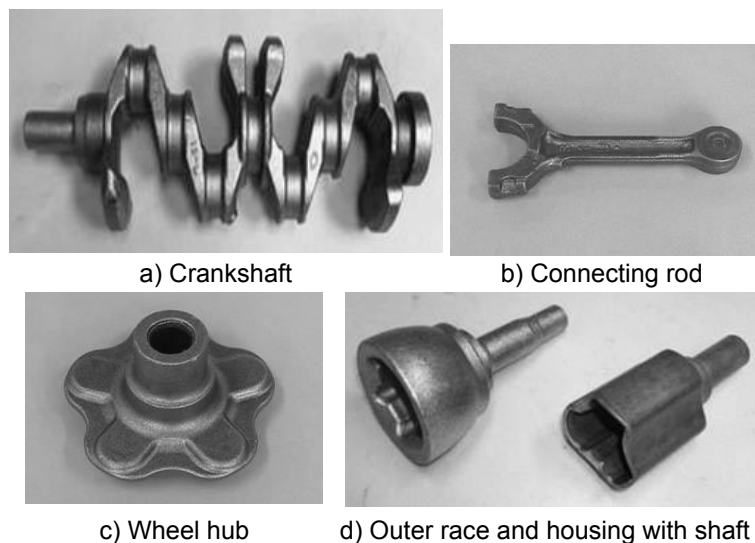


Fig.1. Forged products.

2. 型寿命向上の考え方

2. 1 型寿命とは

温熱間鍛造型の寿命は他工法に比べて短い。稼動1シフトも金型が持たず、金型の交換作業がシフト中に発生する場合があるほどである。生産を続けるには同一の金型を量産する体制を有することが必須である。このため、型寿命を向上させることは生産性、経済性の観点から、鍛造品のコストダウンに非常にインパクトがある。

型寿命は Fig.2 に示すように4つの観点から決められる。

- (1) 生産ロットの終了
- (2) 生産性低下
- (3) 安全性確保
- (4) 品質確保

まず(1)を詳細に説明する。生産ロットが終了した時点で金型の損傷状況がチェックされる。その痛み具合から次の生産ロットもその金型が使えると判断されれば、さらに使い続けるが、次の生産ロットの途中で金型の交換が必要と判断されれば、生産性確保の観点から、その金型は寿命となる場合が多い。

(2)～(4)は、プレス機械、ワーク、潤滑剤、搬送装置、金型などの何が原因かを明確にする必要がある。金型要因の場合、金型の損傷が原因となる場合が多い。(2)は金型が損傷して、ワークがはりつきやすくなってノックアウトができない、ワークが跳ねる、自動搬送機が運んでくれなくなるなどの不具合が出てしまうことである。(3)は経験上、これ以上使い続けると金型が破損して、

その破損した金型をプレスが鍛造してしまう可能性があるから、壊れる前に金型を交換してしまおうという場合である。そして、(4)は金型の損傷が進むことにより、鍛造品の寸法規格、外観規格を外れてしまう場合である。

型寿命を改善する場合、まず、何が原因で型寿命となったのかを明確にすることが重要である。

また、型寿命は大きくばらつくことを考慮しなければならない。Fig.3にある精密熱間鍛造型の寿命分布を示す。この型は平均約6700ショットの型寿命であるといえるが、寿命分布を見ると、ばらつきが非常に大きいことが分かる。損傷モード別に分布を分けると、割れと摩耗が混在することが分かる。従って、損傷現象を良く把握した上で効果的な対策を取ることが非常に重要である。また、数10%程度の寿命改善では、元のばらつきの範囲である可能性もあり、統計的な効果検証が必要である。

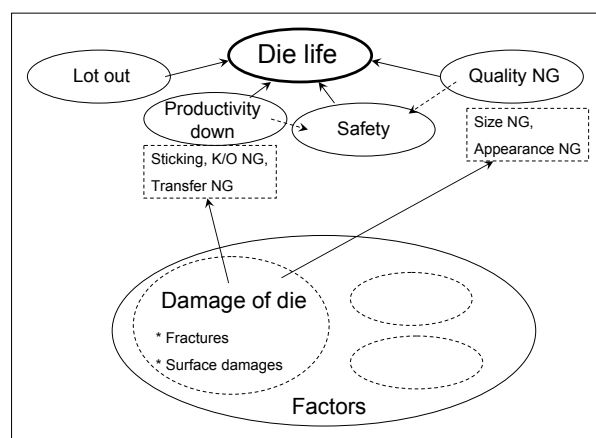


Fig.2. Die life factors.

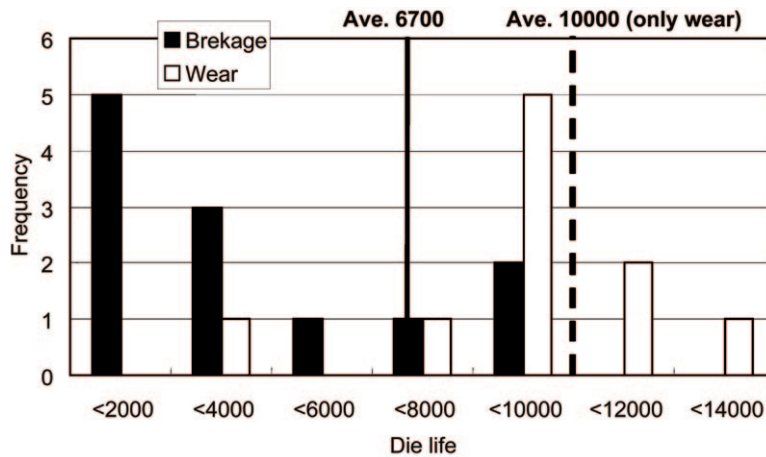
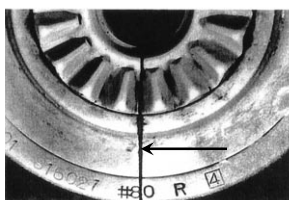


Fig.3. Die life distribution.

2. 2 損傷現象³⁾

温熱間鍛造型の損傷には、大きく破損と表面損傷に分けられる。

破損には、Fig.4(a)に示すような大割れ、Fig.4(b)に示すような折損などがある。破損は生産途中に突然発生してしまい、生産を停止させねばならず、必ず撲滅しなければならない。破損の理由としては、ワークのロケート不具合などの理由により金型に過大な応力が掛かってしまうイレギュラーな場合と、後に述べるヒートクラックや低サイクル疲労クラックが進展して、急速破壊に繋がってしまう場合がある。一般的には、金型の硬さを下げたり、高靱性の型材へ変更したりして対策する。



(a) Split



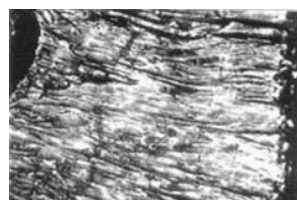
(b) Breakage

Fig.4. Die fractures.

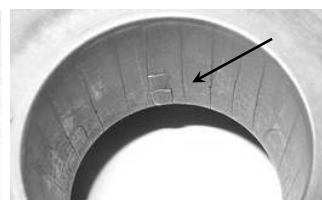
表面損傷には、摩耗、ヒートクラック、低サイクル疲労クラック、エロージョン、剥離などがある。

摩耗は、ワークとのひっかき、凝着により金型表面が消失していく現象である。Fig.5(a)にその外観の例を示す。型摩耗した部分の鍛造品寸法がプラスになり、代わりに他の部位が欠肉してしまう不良を引き起こす。面圧、ワークとの接触時間、ワークのすべり量によりさまざまな摩耗形態を示す。一般的に温熱間鍛造型の金型表層部は高温に晒されて軟化するため摩耗が著しく速い。金型の硬さを上げる、高温強度の高い型材へ変更する、表面改質を適用するなどの対策がとられる。

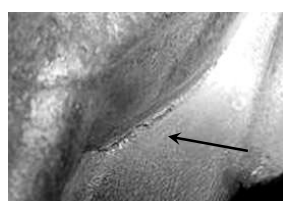
ヒートクラックは繰返しの熱応力によって発生する。Fig.5(b)にその外観の例を示す。金型表層部は、鍛造加工時には高温のワークからの伝達熱およびワークと金型との摩擦熱により昇温され、鍛造品取り出し時には、潤滑離型材の噴霧により冷却されるという熱サイクルを受ける。この熱サイクルは金型表層部に熱応力を発生させ、ヒートクラックを引き起こす。このヒートクラックは製品に転写されてキズになってしまう。金型の硬さを上げ



(a) Wear



(b) Heat crack



(c) Low cycle fatigue crack



(d) Erosion



(e) Flake-off

Fig.5. Die surface damages.

る、高強度高靱性材へ変更するなどの対策がとられる。窒化をした金型の場合、化合物層をなくする、拡散層を薄くする対策が有効な場合がある。

低サイクル疲労クラックは、繰返しの機械的応力負荷により、型の隅R部などの応力集中部に発生、進展する。Fig.5(c)にその外観の例を示す。クラックが進展して開口してしまったり、クラック起点部が欠けてしまったりすると、そこにワークの肉が入り込んでしまって製品キズとなってしまう。金型の硬さを上げる、金属組織が均一で高清潔な疲労強度の高い型材へ変更するなどの対策がとられる。

エロージョンは潤滑離型剤に起因するものである。Fig.5(d)にその外観の例を示す。ワークの成形を助け、離型を促すとともに、金型を冷却して金型の軟化を抑制するために、潤滑離型剤は温熱間鍛造工法には必要不可欠である。この潤滑離型剤は白色系、黒鉛系などいろいろな種類のものが適用されており、金型に適量を噴霧すると乾いて良好な潤滑機能を発揮する。しかし、潤滑離型剤が乾ききらずに型に残存したままワークが型内に入ってくると、行き場を失った潤滑離型剤が気化と同時に型の表層をえぐってしまう。このエロージョンに対しては、型材や表面改質変更による撲滅は困難であり、潤滑離型剤の噴霧量の最適化とともに、どうしても型に残ってしまう場合には、細穴やスリットを型内に設けて（エアベントという）気化した潤滑離型剤の逃げ道を作る対策が有効である。

剥離は窒化処理をした金型に起こりやすい現象である。Fig.5(e)にその外観の例を示す。近年の鍛造品のニヤネットシェイプ化と金型への負荷の増大は、窒化処理した金型の損傷形態を変化させてきている。摩耗許容量はぐんと狭くなり、窒化深さよりも浅くなっていく傾向にあり、窒化層内の損傷が型寿命決定要因になるケースが増えてきている。また、高面圧成形により、硬くて脆い窒化層が剥離して、却って摩耗が加速するケースも出てきている。そうした場合、窒化処理を廃止して、その代わりに型材をできるだけ高硬度で使用する方策が有効な場合もある。

このようにいろいろな損傷現象があるが、一つの金型の中でも部位によって違う損傷が観察されることが多い。従って、理想的には必要な部位に必要な機能を有する材料が配置された金型が望ましい。

2.3 経済性

素形材のグローバル競争力確保のために、鍛造品の製造コスト低減は必須である。製造コスト低減は、材料歩留り向上、エネルギー費低減、生産性の向上、金型に起因するコストの低減活動の総合力で決まる。

ここで金型に起因するコストとは、イニシャルに掛かる製作費のみならず、型の補修や保全、管理にかかるコスト、リシンクや転用、溶接肉盛などによる中古型のリユース費用などのランニングコストも含むべきである。金型が生まれてから寿命を全うするまでに掛かった費用を、生涯生産した製品数（＝生涯型寿命）で割った金額を「型ライフサイクルコスト」とすると、イニシャルの製作費が高くても生涯寿命が長い金型がトータルで見て経済的である場合が多い。また適切なタイミングで適切な補修をすると、生涯型寿命を延長できる場合が多く、金型の保全・運用のしくみの最適化がコスト低減の重要な切り口であることが分かってきている。

一方、鍛造品の製造コスト低減においては、生産性向上、不良率低減、鍛造歩留り向上の方が圧倒的に大きなオポチュニティがある。生産性の中で、型に関係する指標として、型故障強度率がある。これは金型に起因する生産停止時間を生産負荷時間で除したものである。生産ロット中の金型交換は生産性を著しく悪化させる。そこで、生産ロット数より短命である金型の撲滅と、生産ロット数の保障、ロバストな自動搬送などが型故障強度率を低減させるための課題である。一般的に、型故障強度率を低減させようとする、損傷の進んだ金型を使いたくなくなるため、型ライフサイクルコストが悪化する傾向にある。加えて、不良率低減、鍛造歩留り向上の取組は、概して、金型への応力負荷を高めるので型ライフサイクルコストを悪化させやすい。

これらのトレードオフとなる事象群を高いレベルで成立させてこそ競争力が高まる。そこで、生産性向上、不良率低減、鍛造歩留り向上を徹底的に推し進めて、型をいじめぬきながら、かつ型ライフサイクルコストを下げる活動を、Fig.6に示すように型ライフサイクルコスト低減活動と称して、これを実現する総合的で革新的な技術開発が今まさに必要となってきた。

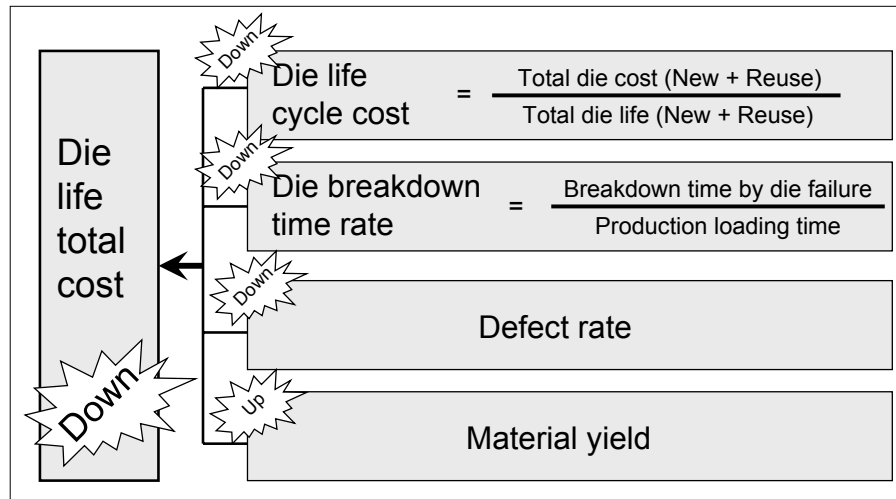


Fig.6. Die life total cost.

2. 4 資源循環

温熱間鍛造は金型を大量に必要とする工法である。レアメタルを大量に含む型材の資源循環について、今できることから考えておく必要があると考える。

Fig.7 に型材の3Rのコンセプトを示す。

— Reduce (リデュース)：型寿命向上により型使用量をリデュース，型材に含まれるレアメタルをリデュース

— Reuse (リユース)：型の大割れを撲滅して，溶接補修，リシンク，転用で型材をリユース

— Recycle (リサイクル)：使い終わった金型を分別して鉄鋼メーカーへ返却，再溶解してリサイクル

この資源循環を考慮した型材の選択は，型材のコストを低減させるために，結果的に型ライフサイクルコストも低減させることとなる。

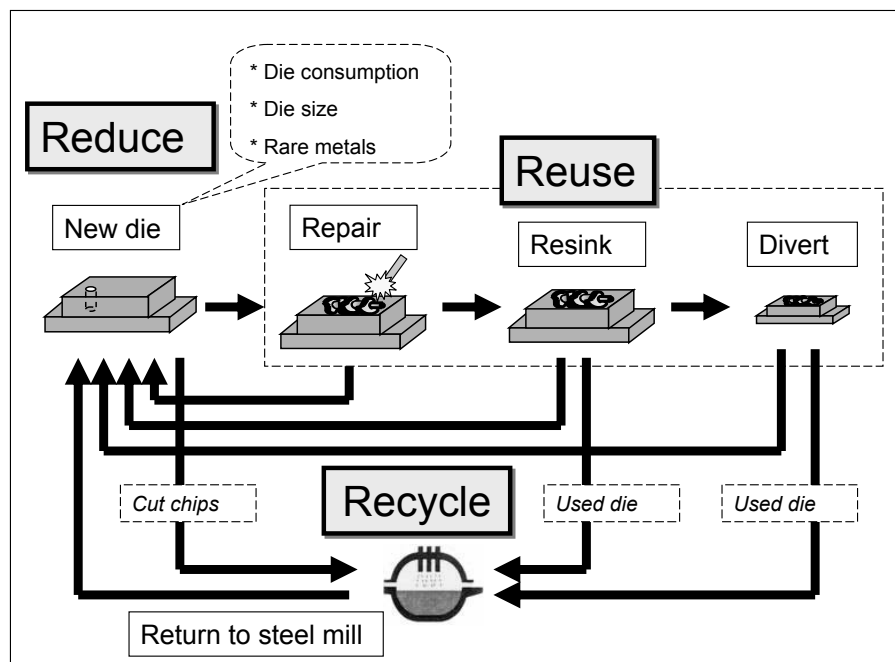


Fig.7. 3R concept of die material.

3. 型寿命向上の事例紹介

3. 1 型材

従来、型材に求められる特性は、耐摩耗性と耐割れ性の高度な両立であったといえる。その基本思想に基づきさまざまな高性能材が開発され、適用が進み、温熱間鍛造を進展させて来た^{4), 5)}。しかし、さらに高度な要求に対応するためには、従来のように型材のみでこの両者を高度に兼備するには限界が来つつあるようだ。

型ライフトータルコスト低減と資源循環の考え方からは、型材に最も求められるニーズは、ずばり「型が大割れしないこと」である。型の大割れは、型故障強度率、型ライフトータルコストの両者を悪化させる。また、型材のリユースができなくなる。そこで、型材に耐割れ性を優先させ、耐摩耗性は表面改質などの部分強化に期待する考え方が現実的な解となってきた。

ホイールハブの熱間鍛造型の寿命分布を Fig.8 に示す。この金型の寿命は大きくばらついていることが分かる。平均寿命は約 15000 ショットであり、平均の生産ロットは 9000 ショットである。型寿命要因は大割れが主流である。ここで大きな問題は、平均生産ロットを打てない型が実に 10 数 % 発生しているということである。つまり連続生産中に突発的に型の大割れが発生して、金型交換を余儀なくされているということである。この平均生産ロットより寿命の低い金型の撲滅が最優先課題である。

対策を立てるに当たって損傷した金型の調査を実施した。Fig.9 に破面を示すが、これより低サイクル疲労クラックの発生→進展→急速破壊の過程を経て大割れしていることが分かり、Fig.10 に示すような低サイクル疲労強度の高い型材⁶⁾の選択と、破壊靱性を高めるため低硬度化の対策を採った。対策後の金型の損傷現象と寿命分布を Fig.11 に示すが、対策後は大割れの割合が減少するとともに、最低でも平均生産ロット以上の型寿命が確保でき、平均寿命は 2 倍以上に向上した。

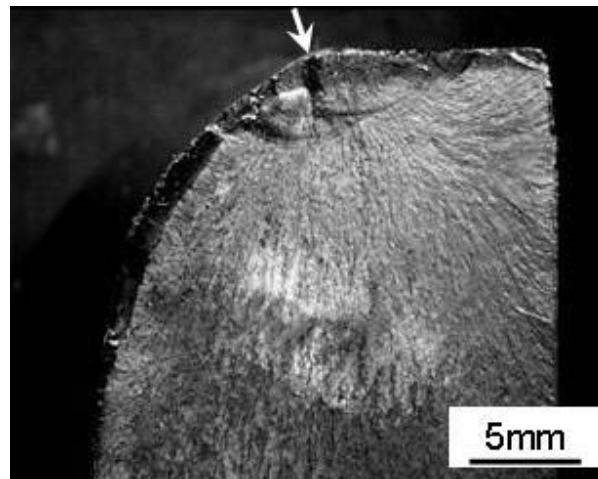


Fig.9. Fractured surface of broken wheel hub die.

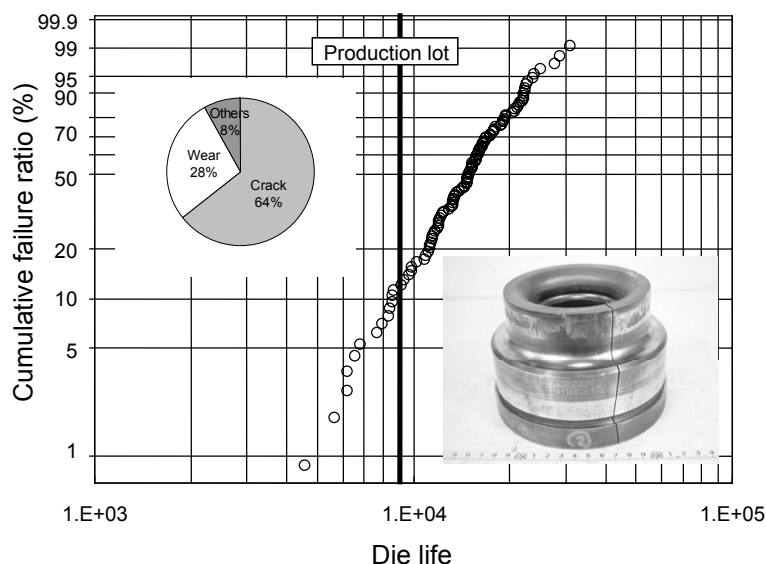


Fig.8. Die life distribution of wheel hub dies before improvement.

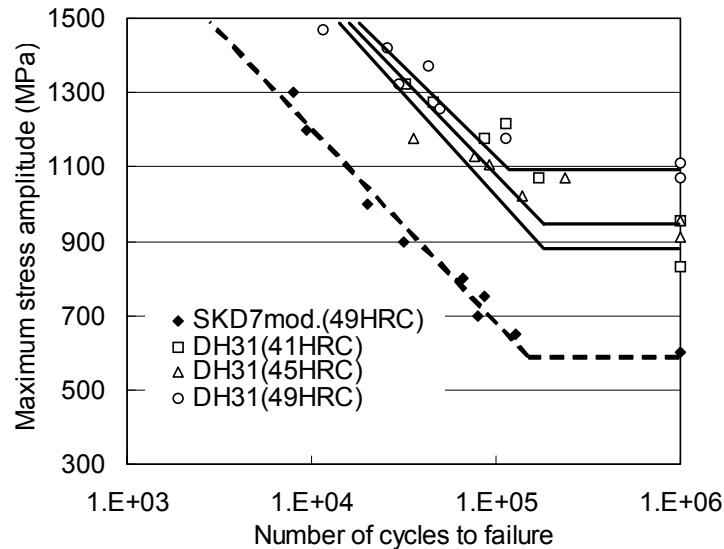


Fig.10. S-N curve of DH31 vs. SKD7 mod.

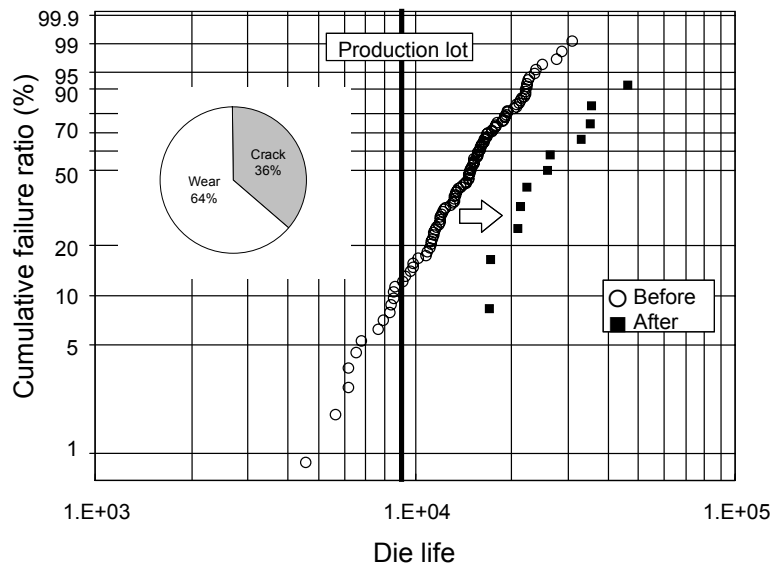


Fig.11. Die life distribution of wheel hub dies after improvement.

大割れしないと、型材のリユースが可能となる。割れが入っても浅い場合は、割れ部のみを除去して溶接肉盛りしたり、全体を面下げ(リシンク)してスペーサーを入れたり、サイズの一回り小さい金型へ加工し直して使ったり(転用)して、リユースができる。本例では、溶接肉盛でリユースすることにより生涯寿命は3倍以上に向上することができた。この場合、溶接肉盛り費用は新たに金型をつくるよりも安いので型ライフサイクルコストは飛躍的に低減できた。併せて、資源循環を推進できた。

金型が割れないことを最優先に考えると、型材自体をよりシンプルに考えることもできる。これまで、耐磨耗性と靱性の両立を型材のみで解決するために、製造方

法の革新と高合金化が進んできた。つまり、モリブデン、タングステン、バナジウムなどのレアメタルを多用する方向に進み、高合金化に伴う靱性の劣化を ESR や粉末冶金などの製造工程の革新により補ってきた。しかし、近年のレアメタルの需給逼迫の観点から、この一辺倒な方策にもメスを入れる時期が来たといえるのではないだろうか。すなわち、低合金化しても必要特性を維持する、あるいは向上させる地球環境に優しい技術開発も必要とされている。

Fig.12 に SKD61 のシリコンとバナジウムを低減した低合金熱間工具鋼 DHAZ の疲労強度⁷⁾を示すが、これは低合金化しても特性が向上している事例であり、このような地球環境に優しい型材の適用も進んできている。

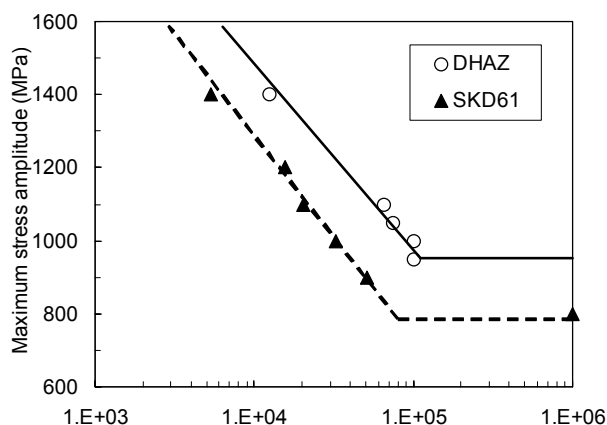


Fig.12. S-N curve of DHAZ vs. SKD61.

金型の熱処理に求められるニーズも、やはり「型が大割れしないこと」である。熱処理の中でも焼入れ工程は、型の耐割れ性に影響を及ぼす。Fig.13は焼入れ温度と靱性の関係の一例⁸⁾だが、焼入れ温度を下げて耐割れ性を向上させる方策が一般化してきている。Fig.14は焼入れ冷却速度と靱性の関係の一例であるが、通常窒素ガス焼入れ、あるいは衝風焼入れして用いるSKD61を油焼入れなどの冷却速度の速い焼入れ方法を採用することによって靱性が大きく向上することが分かる。この方策により、型が大割れしない金型を比較的低コスト、低資源で得ることが可能である。例えば、靱性に優れた高合金鋼を採用していた領域に、SKD61のような低合金鋼を高速焼入れして使って、レアメタルのリデュースを図ることも可能となる。

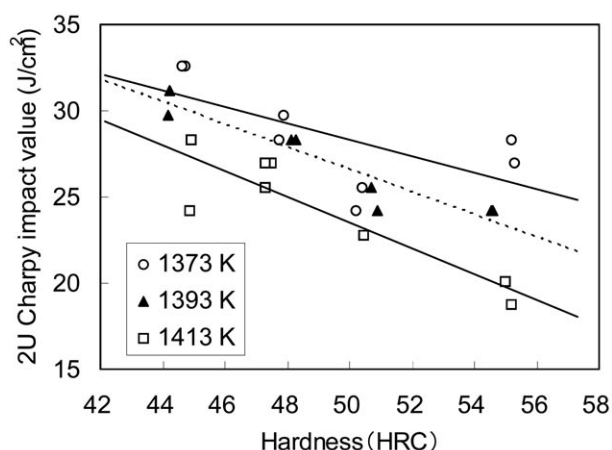


Fig.13. Effect of austenitizing temperature on toughness of DRM1.

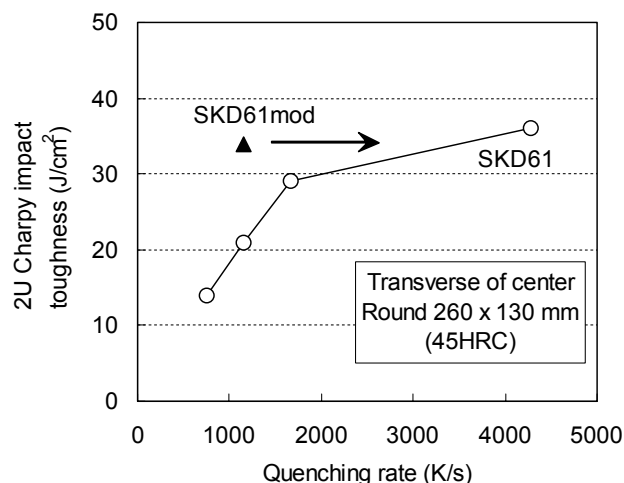


Fig.14. Effect of quenching rate on toughness of SKD61.

3. 2 表面改質

大割れが抑制されれば、次に潰すべき型寿命要因は表面損傷である。特定部位の損傷が寿命を左右することになるため、望ましくは、その部位のみを強化したいが、現状では、窒化などの表面改質技術により、金型の表面全体を強化する技術が現実的である。

比較的低コストで表面のみ耐摩耗性を向上させることのできる窒化処理は、温熱間鍛造型の表面改質法として広く普及して来た。しかし、近年の金型への負荷の増大に伴い、窒化処理ではカバーできない領域が拡大しているのも事実である。特に硬さ、耐熱温度が窒化処理以上のものが求められている。工具鋼に窒化した場合、表層部の硬さは約1100 HVが最高である。また窒化処理は拡散処理の一種であるため、母材が熱で軟化するとともに窒化層も軟化してしまう。

そこで、近年では最表層のみでも高い硬さを保持するべく、窒化処理後にPVDにより硬質皮膜を形成させた複合処理の適用が進んできている。Fig.15に各種PVDコーティング膜の高温加熱後の硬さを示すが、温熱間鍛造型へは、高温加熱後も硬さが高く、密着性に比較的に優れたCrN系などのPVDコーティング膜を最表面に形成させることが多い⁹⁾。Fig.16は、コンロッド鍛造品の寸法変化を示すが、従来の窒化処理では生産初期から金型の摩耗速度が速く、500ショットで寸法が大きくプラスになっていたが、窒化+PVDの複合処理を適用することにより、8000ショット近くまで寸法が比較的に安定するようになった。

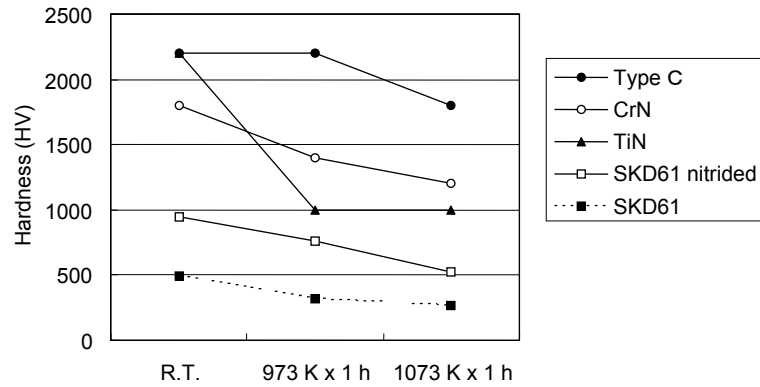


Fig.15. Coating layer hardness after heating.

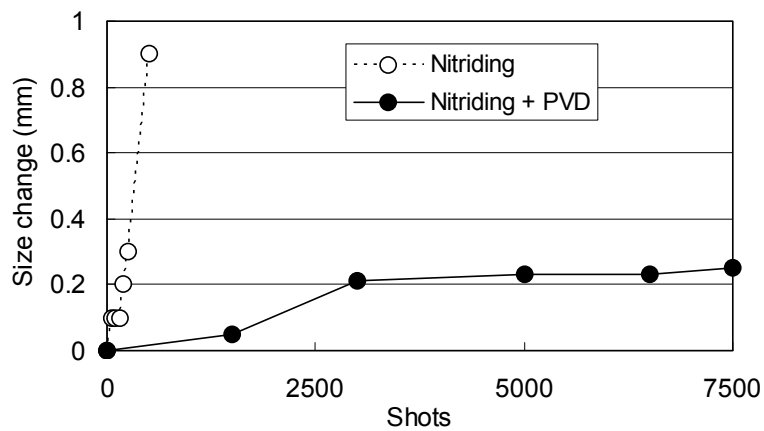


Fig.16. Size change of forged conn-rod material.



(a) Fe base alloy overlaid



(b) Ni base super alloy overlaid

Fig.17. Appearance of crankshaft die flash land.

金型表層部の熱影響が比較的浅い場合は、前述のように窒化 + PVD の複合処理のような表面改質法が有効であるが、熱影響層が深い場合はより深い改質層が必要である。しかし、例えば、浸炭法は処理温度が高温のため金型が歪んでしまうため使用できない。また溶射は鍛造の衝撃で剥がれてしまう。そこで肉盛やインサート化により異種材料を必要な部位に配置することが現実的な手段として挙げられる。

部分強化材は金型の損傷現象に応じて選択するが、例

えばバリ出し鍛造のフラッシュランドのような場合は Ni 基超耐熱合金が有効である¹⁰⁾。Fig.17 に同じショット数鍛造後に Fe 基合金を肉盛した場合と Ni 基超耐熱合金を肉盛した場合の外観の比較を示すが、後者は摩耗が抑制されていることが一目瞭然である。ただし Ni 基超耐熱合金は、熱間強度は非常に優れるが、硬さが低い、ヒートクラックが発生しやすいといった弱点から適用が限定されており、これらを改善した部分強化材料の開発が望まれる。

また、異種材料を必要部位に容易に接合できる技術が低コストで実現するようになれば、部分強化はもっと普及して温間、熱間鍛造金型の世界をドラスチックに変えるに違いない。

4. おわりに

人とクルマと自然の共生をめざして

Sincere Eco-Innovator

当社の環境理念である「人とクルマと自然の共生」は私たちが描く理想の社会像である。地球と将来の世代のために、資源循環を考慮した地球に優しいものづくりを通じて、人とクルマと自然の共生を誠実かつ積極的に考えていくことが必要である。

温熱間鍛造型の寿命向上へ向けて確実に技術は進歩してきている。型ライフサイクルコスト低減と地球環境への配慮は当たり前の中で、今後さらに型寿命向上をとりこんでいくには、従来の既成概念を捨てたブレークスルーした技術革新も必要である。今後は型材メーカ、ユーザ、金型周辺分野の仲間はもちろん、違った分野の知恵と工夫もクロスファンクショナルにコラボレーションして、技術課題を果敢にチャレンジして解決していくことが重要だと考える。

(文 献)

- 1) 日本塑性加工学会 鍛造分科会編：わかりやすい鍛造加工，日刊工業新聞社，2005，165.
- 2) 宍戸和也：日本学術振興会素材プロセッシング第69委員会，2006.
- 3) 浜崎敬一：第76回塑性加工学講座，1999，174.
- 4) 清永欣吾：工具鋼，(社)日本鉄鋼協会，2000.
- 5) 並木邦夫：はじめての金型材料，工業調査会，2006.
- 6) 塩田哲郎，井上幸一郎，太田明男，安居英則，小森 誠：型技術者会議2005，154.
- 7) 五味伸幸，森川秀人，太田明男，小森 誠：型技術者会議2007，210.
- 8) 森川秀人，塩田哲郎，松苗宏樹，小森 誠：型技術者会議2007，208.
- 9) 渡部清彦：素形材，46（2005），5，17.
- 10) Michael Joest, 藤原美昭訳：鍛造技法，78（1999），7.