



入門講座

素材を形に～素材の加工方法～3

鍛造加工の基礎と応用

Foundation and Application of Forging Process

柿本英樹

(株) 神戸製鋼所 技術開発本部
材料研究所 主任研究員

Hideki Kakimoto

1 はじめに

「鍛造」とは「工具、金型などを用いて固体材料の一部又は全体を圧縮または打撃することによって成形及び鍛錬を行うこと」とJIS¹⁾に記載されている。鍛造は6000年以上の歴史を持つ技術であり、方法も用途も広く漠然としているため、その範囲は極めて広範で内容は非常に多岐に渡る²⁾。

原始的には、鑄造などにより製造していた金属をハンマー

などで叩いて延ばし、より強度の高い武器や農耕具を製造した。6000年前のエジプトやメソポタミヤで自然の金や銀を人間が石のようなハンマーで叩いて加工（鍛造）したと言われている。

現代では手作業の代わりに、機械式のハンマーやプレスによる鍛造加工が行われ、数千トンのプレス機による大型タービンの主軸といった大きな製品から、数ミリ単位の精密な機械部品まで、様々な製品が造られている。表1は鍛造の歴史

表1 鍛造の歴史

時代	年代	外国	日本
銅器時代	前 4000	{石器による自然産金, 銀, 銅の冷間自由鍛造 (エジプト, メソポタミア)}	《縄文時代前期》
	前 3500	{青銅の熱間自由鍛造, 板材の製造, [木製の出土 (エジプト)], [鉄の精練]}	
	前 2500	{海綿鉄の鍛練による練鉄製造, 熱間鍛接鉄出土 (エジプト)}	
鉄器時代	前 1500	練鉄の炭化物出土 (ギリシャ)	《縄文時代後期》
	前 1000	{ロータリースエージング用金敷の出土 (フランス), エンボシングパンチの出土 (中欧)}	
ギリシャ時代	前 700	{エレクトロン貨幣冷間半密閉型手打ち鍛造品出土 (地中海域)}	鍛冶滓と鉄斧頭出土 (福岡県)
ローマ帝国時代	前 300	{熱間型入れ鍛造された鉄あぶみ出土 (オーストリア), 黄銅合金}	《弥生時代前期》 [鑄造青銅たく量産]
	0	{量産鍛造工場, 奴隷による脚力ドロップハンマー(ローマ), 金貨の圧印}	{鉄の中, 日製武器, 工具, 農機具鍛造品出土}
西ローマ帝国滅亡	400		《弥生時代後期》 国産鉄大刀出土 (熊本県)
神聖ローマ帝国	800		日本刀鍛造技術の進歩
東ローマ帝国滅亡	1300	人力レバーばね式ドロップハンマー	
ルネッサンス産業革命	1400	水力カムレバー式ドロップハンマー	日本刀の明国への大量輸出
	1500	水力カムばね加速式ドロップハンマー	種子島鉄砲伝来とその量産
第一次世界大戦	1600		《戦国時代, 徳川幕府》
	1800	蒸気ドロップハンマー, ボルト冷間ヘッディング	蒸気ドロップハンマー輸入
第二次世界大戦	1850	スズ, 鉛容器人力ねじプレス冷間後方押し	《明治維新》, プレス輸入
	1900	黄銅管冷間前方押し (アメリカ)	
	1920	アルミ容器のメカプレス冷間後方押し (アメリカ)	
	1930	鋼冷間押し用リン酸塩皮膜法 (ドイツ)	
	1940	鋼冷間鍛造の企業化 (アメリカ)	1万t水圧プレス稼動
	1950	クロスローリング, 溶湯鍛造	鋼葉炭, 自転車部品冷間鍛造
	1960	揺動鍛造, 粉末鍛造	{鋼製自動車部品冷間鍛造, 開塞鍛造, 温間鍛造}
	1970		{600tインゴット自由鍛造, ニアネットシェイプ鍛造}
	1980		背圧鍛造, 歯車鍛造

出典：第105回塑性加工学講座「鍛造加工の基礎と応用」, 日本塑性加工学会, (2007), p.1

を概説したものである³⁾。

鍛造には「鍛錬」という材質改善が含まれており、一般的に、金属を鍛造加工すると素材内部の空洞が閉鎖して欠陥がなくなるとともに、結晶が微細化・均質化されるため、強度・靱性が高まるなど機械的性質が改善される。

本報では、鍛造加工の基礎としていろいろな鍛造方法を分類し、それぞれの特徴を述べた後に、代表的な鍛造方法について解説する。

従来からノウハウによって培われた技能に加えて数値計算により種々の検討を行う取り組みが1980年代から、有限要素法を用いた塑性加工計算の発展とともに盛んになってきた。近年では、鍛造荷重や形状の予測など広く有限要素法を用いた鍛造CAEが活用されている。本報でも、鍛造CAEについて概説するとともに、その応用として数値計算による材質予測を用いた鍛造部品の機械的性質の予測への適用例を紹介する。

2 鍛造加工の基礎²⁾

2.1 鍛造品の用途

鍛造品の種類として、統計上では「鍛鋼品」と「鍛工品」に分けられている。「鍛鋼品」は鋼の熱間自由鍛造品で、船舶のディーゼル機関、減速機部品、鉄道の車軸、圧延ロールなどが主な例であり、生産量は59万トン(2016年)⁴⁾である。一方、「鍛工品」は、熱間自由鍛造以外の工法で製造された品物である。この内、鋼の熱間鍛造品の約6割は大量生産の自動車エンジン関係品で、産業・土木建設機械用がこれに続いている。なお、「鍛工品」の生産量は221万トン(2016年)⁴⁾である。

「鍛工品」の中で、「冷・温間鍛造品」はボルト、ナット、軸受球、ころなどによって占められており、その他の主として

自動車に用いられる種々の形状部品も含めて、年間13万トン程度作られている。図1⁵⁾は乗用車1台あたりの冷鍛品の使用量の推移を示した図である。自動車産業で用いられている鍛造品の内で熱間鍛造品は80%近くを示す製造方法であるが、現在でも「熱間鍛造品」から「冷・温間鍛造品」へ移行しつつある。これは、後工程省略(機械加工・熱処理など)によるコストダウンを目的として複雑形状の冷間鍛造化の開発が進んだためである。また、主な非鉄鍛造品は自動車産業、レジャー産業を中心用途としたアルミニウム合金鍛造品であり、今後、自動車軽量化などによって生産量が増加すると考えられる。

図2は2015年における主要各国の鍛工品の生産量を比較したものであり、中国・ドイツ・インド・日本・米国の生産量が多いことがわかる。

熱間・温間・冷間鍛造を含め鍛工品の最大ユーザは自動車産業であり、特に日本の場合には鍛造製品の70%以上を占めている。

2.2 鍛造加工の分類

鍛造加工の分類として、作業温度による分類・変形形態による分類・変形動態による分類・工具形式または運動方式による分類²⁾が挙げられている。表2に各分類とその特徴を示す。以下によく使われる代表的な分類でのメリット・デメリットを記載する。

2.2.1 作業温度による分類

作業温度による分類としては、「熱間鍛造」・「冷間鍛造」・「温間鍛造」などに分けられる。

「熱間鍛造」では、鍛造素材を再結晶温度以上の高温に加熱することにより、変形抵抗の低下と延性の向上が得られる。このため、室温では硬く鍛造装置や金型に過大な負荷がかかる材料に対しても、大型製品の加工、大変形・複雑形状への加工が可能になる。また、この大変形と熱により、铸造組織

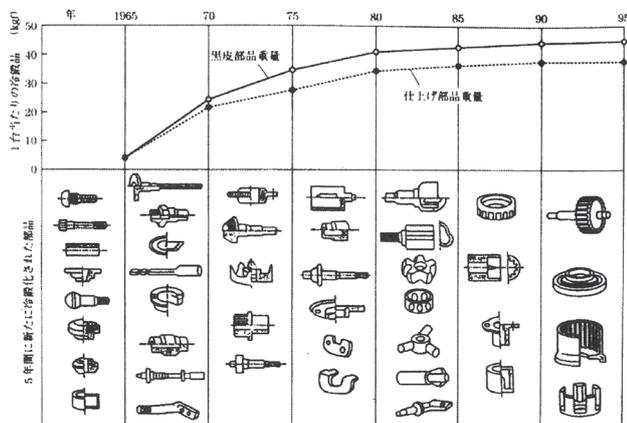


図1 乗用車1台あたりに使用されている冷間鍛造部品
出典:第105回塑性加工学講座「鍛造加工の基礎と応用」,
日本塑性加工学会,(2007),p.2

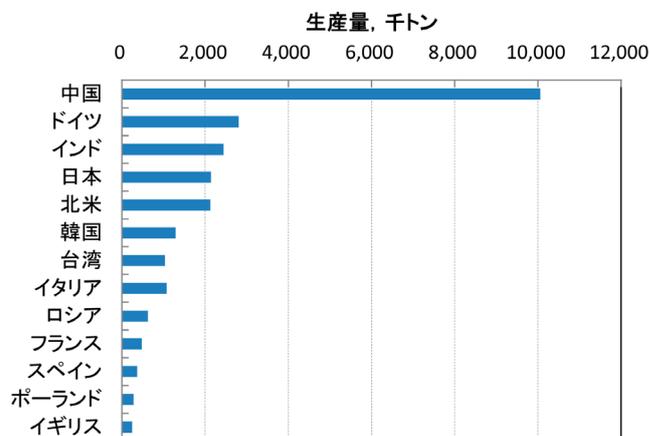


図2 主要各国における鍛工品生産量(出所:一般社団法人日本鍛造協会調査,2015年)

表2 各分類とその特徴

分類方法	名称	特徴
作業温度による分類	熱間鍛造	材料を加熱し、再結晶温度以上、固相線温度未満の温度範囲で行う鍛造
	冷間鍛造	積極的に材料を加熱しないで、室温または室温に近い温度で行う鍛造
	温間鍛造	通常の熱間鍛造と冷間鍛造との中間の温度で行う鍛造
	恒温鍛造	素材の冷却、昇温を防ぐために加熱金型を用いた鍛造
	溶湯または液-固相鍛造	合金材料の液相と固相の共存する温度域において、型によって加圧成形する鍛造
変形形態による分類	直接圧縮鍛造	素材の全体または部分を工具によって加圧する方向に縮め、それと直角方向に寸法を広げる加工 例) 据え込み、ヘッドイング、つば出し
	間接圧縮鍛造	工具の加圧によって、加圧方向と直角または斜め方向の材料拘束工具面から横方向の反力を受け、それによって材料が加圧方向に伸ばされる加工 例) 押出
	直接-間接組合せ圧縮鍛造	一作業中に両者が組み合わさっている加工 例) 型鍛造・押出-据え込み、ギャザリング
変形動態による分類	同一場所1回加圧鍛造	素材から一度に目的とする鍛造品を成形する加工 例) 据え込み
	同一場所繰返し加圧鍛造	同一工具による繰返し打撃を加えて成形する加工 例) ハンマー鍛造
	異場所断続加圧鍛造	材料の局部を順々に断続的に加圧する加工 例) 伸ばし作業、穴広げ
	異場所連続加圧鍛造	材料の局部を順々に加圧する作業であるが、加工部分の移行が連続的な加工 例) ロール鍛造、リングローリング
工具形式または運動方式による分類	自由鍛造	表面形状が平面あるいは単純曲面をした汎用工具を用い、素材または工具を移動、回転させてあちこちを断続的に加圧する加工
	型鍛造	鍛造品の表面形状・寸法に合わせた型をもつ工具すなわち「金型」によって、素材表面の大部分を加圧あるいは拘束して成形する加工
	回転鍛造	回転もしくは揺動する工具を用いる加工

や偏析帯・晶析物が幾何学的に微細化される。冶金現象としては偏析成分の拡散、鍛造中・鍛造後の再結晶、変態、析出物の形成などの組織変化により材料の機械的特性（強度・延性）が向上する。さらには、鍛造時に形成された素材内部の空隙が押しつぶされて内部欠陥が無くなり健全な製品となる。他方、熱間鍛造のデメリットとして、冷間鍛造に比べて加熱により材料表面の酸化被膜が形成されること、高い熱負荷のために生じる工具表面のだれ・摩耗が発生することなどにより、寸法精度や表面性状が劣ることが挙げられる。さらに、作業環境も、輻射熱、スケールや潤滑剤の飛散などがあり良好とは言えない。

「冷間鍛造」は、素材を常温のまま加工する方法であり、一般的に高い寸法精度と良好な表面性状が得られる。このため、冷間鍛造後は仕上げ加工（機械加工等）が不要で、研削だけの場合も多く、加工コストが低い。一方、鍛造材料は、冷間鍛造の荷重を減らす（金型への負荷を減らす）ためには柔らかい材料が望まれ、変形能としても高い物（延性の高い成分・組織、表面欠陥や内部欠陥などの破壊の起点が少ない）が要求される。

「温間鍛造」は、上記した両者の長所を取り入れるため、材料加熱温度を常温以上、再結晶温度以下として鍛造を行う。

2.2.2 工具形式または運動方式による分類

工具形式または運動方式による分類では、「自由鍛造」・「型鍛造」・「回転鍛造」などに分けられる。

「自由鍛造」では、工具と被加工材の接触表面形状が平面あるいは曲面をした汎用工具を使用し、被加工材または工具を移動・回転させて断続的に加圧する加工方法である。加工された鍛造品は角柱形状や円柱形状など比較的単純な部品の加工が行われる。汎用的な形状の工具で加工が行われており、大型品を鍛造する場合によく使用される。

「型鍛造」は、鍛造品の外形形状・寸法に合わせた「金型」によって、素材表面の大部分を加圧あるいは変形を拘束して成形する加工であり、良好な製品寸法が得られる反面、高い成形荷重が必要で、金型に高い応力が作用するとともにプレス装置にも高い負荷がかかる。また、最終段階において、材料を「ばり」として製品から流動させることにより鍛造荷重を抑えながら充満性を向上させた半密閉鍛造、上下金型の隙間がなくなるまで金型全体で材料を圧縮する密閉鍛造などがある。

「回転鍛造」は、回転もしくは揺動する工具を用いる加工方法であり、部分的な成形が行われる。このため、鍛造荷重を低減しながら、良好な寸法精度が得られる反面、工具を駆動させるための複雑な装置機構が要求される。ネジ成形などに使用されることが多い。

2.3 鍛造用材料

鍛造用材料としては、部品の製造工程の合理化やコストダウンのための材料特性が求められている。一般的に、荒地鍛造から仕上げ鍛造などに、複数の工程を経て部品形状に鍛造される。そのため、工程の省略や工程の設計が容易になる変

形抵抗が低くて加工性に優れた材料特性が望まれる。他方、製品としては高強度材料が要求される。このため、自動車や建設機械のエンジン部品、動力伝達部品および足廻り部品の多くは、高い強度と寸法精度が要求されるため、特殊鋼を用いた熱間鍛造で形状を作った後、鍛造後に熱処理により強度を上げるとともに、その後の機械加工により寸法精度を上げて製造されている。コストダウンとしては、これらの熱処理や機械加工を省略する目的で、熱間鍛造のみで加工可能な非調質鋼の拡大が望まれている。部品の最終機能（機械的特性、電磁特性など）と製品形状が決まれば、使用する材料の種類や鍛造法、鍛造前の熱処理法、鍛造後の熱処理法が過去の類似部品の例を参考に絞り込まれる。

自由鍛造によって作られる大型鍛鋼部品は、電気炉等で成分調整されたインゴット（鋳塊）から作られている。鍛鋼品用鋼材としては、炭素鋼鍛鋼品（SF340など）、圧力容器用炭素鋼鍛鋼品などがある。

他方、一般的な鍛造用材料は鋳造材を圧延により棒鋼や線材まで一次加工し、コイル状態などで出荷される。その後、二次加工メーカーなどで一次素材（コイル状）を矯正し、鍛造品に必要な重量の素材を切断した後、所望の形状に鍛造する。鍛造用鋼材としては、JISに規定されている機械構造用炭素鋼（S10Cなど）や機械構造用合金鋼（SCr420、SCM420など）などが多く使用されている。

2.4 鍛造加工のための周辺技術

2.4.1 鍛造用潤滑剤

近年では、鍛造形状のニアネット化により鍛造形状の複雑化、高精度化、さらには表面の高品質化が求められるようになってきている。ニアネット化のためには、金型を使用する必要があり、金型を使用すると鍛造荷重が飛躍的に増加する。また、金型の使用により材料と焼付きが発生し、表面品質が悪化する可能性がある。これらの課題に対して潤滑剤の選定は重要となる。

鍛造用潤滑剤には素材に塗布する場合と金型に塗布する場合がある。素材に塗布する場合は、主に冷間鍛造で、金型に潤滑剤を塗布する場合は主に熱間鍛造で使用されている。

冷間鍛造では、表面積拡大比は10倍を超え、局部的には数GPaにもなる接触圧力下で金型表面と被加工材加工面に相対的な滑りが生じる。また、熱間鍛造に比べて熱影響が少ないものの、加工時の加工発熱と摩擦熱により、生じる熱は数百度にもなる。このような状況下で、潤滑皮膜には優れた耐熱性が要求されることになる。また、大きな塑性流動で形成される新生面でも潤滑性を保持していること、高い変形抵抗による素材と金型の面圧が大きくなることも考慮して、潤滑皮膜の密着性や追従性、高い皮膜強度が必要となる。

一般的に最も広範囲に用いられているのが通常ボンデ潤滑と呼ばれている、リン酸塩被膜と石けん系潤滑剤を組み合わせた潤滑方法で、材料と化学反応させてその表面に緻密リン酸塩結晶を晶出する化成処理と、その上層に石けん潤滑剤もしくは固体潤滑剤などを付与する潤滑処理との組み合わせにより得られる。

他方、温・熱間鍛造用潤滑剤に求められる特性を表3に示す。熱間鍛造では素材を高温に加熱するため、素材表面の酸化スケールの発生が多い上に金型への熱的影響が大きい。そのため、金型を冷却する必要があると同時に素材と金型の直接接触を防止し、なおかつ摩擦係数を低下させることによって金型への負荷をできるだけ減らす必要がある。このため、同表に示すように塗布時にムラにならないようにできるだけ均一に塗布する必要があり、さらに、金型の冷却性も重要な要素となる。

現在、主流となりつつある白色系潤滑剤は水分を多く含んでいる。金型の熱によって乾燥するとき、水分蒸発の速度ができるだけ早い方がサイクルタイムの面で有利であるため、乾燥速度も重要となる。また、潤滑成分が必要量付着しなくてはならないため、有効成分量や液の粘度を調整する必要がある。さらに加工時には形成された乾燥皮膜が素材と金型の直接接触を防止する必要があるため、高温でも皮膜が分解されないように耐熱性が必要となる上に、高温においても高潤滑性能を示さねばならない。

以上のように潤滑剤に求められる特性は非常に多いため、これを十分に考慮しながら鍛造条件にあった潤滑剤を選択しなければならぬ。さらに、各種鍛造工程において最適な潤滑剤の選定には、コストダウン（鍛造工程および潤滑剤自身）と共に、地球環境への考慮や作業環境を改善することも重要な検討事項である。

2.4.2 その他周辺技術

鍛造用金型に関しては、上記の潤滑技術以外にも熱的・機械的な高負荷対策として種々の検討がなされている。生産コストの低減として、鍛造材の高精度化や鍛造加工のサイクルタイムの短縮が求められており、これに伴い金型への負荷が過酷になっている。特に、金型は高価であるため、金型の寿命向上（耐摩耗、耐疲労破壊等）が求められている。金型寿命

表3 温・熱間鍛造用潤滑剤における求められる特性

塗布	乾燥	鍛造加工
①均一塗布性	①乾燥性	①皮膜耐熱性
②濡れ性	②皮膜保持性	②高温潤滑性
③付着性	③均一皮膜性	
④冷却性	④皮膜密着性	

に影響を及ぼす因子として、型形状、作業条件など様々なものがあり、型材質は強度・硬さ・靱性・耐摩耗性が上げられる。これらを総合的に検討し、型材質を判断する必要がある。さらに、耐摩耗性や耐焼き付き性に優れ、長寿命な金型を実現するためには表面処理が必須である。最近では環境負荷を低減する観点からも表面処理を活用した潤滑剤の使用量低減や、ドライ加工を試行する動きがある。

さらに、加工機械（プレス機）についても、加工機械の特徴を理解し、加工方法に最適な鍛造機械を選ぶことは非常に重要である。従来の代表的なプレスは生産性に優れる機械プレス（メカプレ）と汎用性に優れる油圧プレスである。機械プレスは、フライホイールの回転運動を金型の上下運動に変換する構造のため、金型速度が速く、連続操業が可能である。反面、金型の最下点（下死点）は機械的に決まるため、少量多品種の製造には向かない。他方、油圧プレスは油圧シリンダーにより金型を上下に動かし、変位計や荷重計（シリンダー圧力）により製品毎の調整が容易である反面、金型の昇降速度は限定的であり、大量生産に向かない。近年では、サーボ技術の活用により、機械プレスによる金型速度の高速化とサーボシリンダーを併用して位置・荷重制御が可能なサーボプレスが開発され、さらなる高機能化と高精度化が実現されている。

3 鍛造CAEの基礎³⁾

近年、計算機の能力向上とともに、計算機によって実際に起こっている各種の現象を再現しようとするコンピュータシミュレーションが盛んに行われ、CAE (computer aided engineering) システムとして利用される傾向にある。シミュレーション技術を塑性加工に応用すると、設計や研究開発に必要な情報を短時間で得ることができ、多品種少量生産、省コスト、高品質・高精度化に対して有力なツールとなる。鍛造のようなバルク加工では、加工中の素材の塑性変形、温度分布、工具の弾性変形などをシミュレーションしようとする試みが活発に行われている。塑性変形をシミュレーションする方法として、スラブ法、上界法、すべり線場法などの古典的解法と、有限要素法を用いた数値解析法がある。古典的解法は変形挙動を単純化しないと解が求まらないため、実製品の鍛造のように大きな形状変化を起こす複雑形状部品には適用が困難であり、有限要素法を用いた数値解析法が適用されている。有限要素法は物体を多数の要素に分割して計算する方法で、要素分割は3角形、4角形、4面体、6面体などの単純な形状で定義され、形状関数として要素分割の格子上的座標と微分方程式が結び付けられている。要素内に存在する積分点（要素内に1点のみの場合や複数点を有した高次のものなど種々の要素が存在する）で微分方程式が満足される。この

ように単純形状の複合体として方程式が機械的に定義できるため、複雑な幾何学形状や境界条件を表現しやすい特徴がある。以下に、鍛造加工における有限要素法を用いた数値シミュレーション技術について簡単に述べる。

3.1 有限要素法 (FEM) の特徴⁶⁾

バルク加工における素材の変形形状・温度分布、工具の弾性変形を精度よくシミュレーションするためにFEMが応用されている。塑性変形をシミュレーションするためのFEMには、弾塑性FEMと剛塑性FEMがある。弾塑性FEMではひずみ増分が応力と応力増分で計算されるのに対して、剛塑性FEMではひずみ増分が応力だけで決まる。

図3に有限要素法の歴史を示す。弾塑性FEMにおいては、1960年代の後半に弾性FEMからの拡張として微小変形理論による定式化⁷⁻⁹⁾が導かれ、その後1970年代に大変形理論に基づいて定式化¹⁰⁾が拡張された。弾塑性FEMは素材を弾塑性体として計算を行う方法であり、負荷時の塑性変形だけでなく除荷時の弾性変形も計算できる。しかしながら、この方法では変形段階毎に応力の増分を求めて加え合わせているため、1回の変形量を非常に小さくする必要があり、計算時間が長くなる。

剛塑性FEMは、素材の弾性変形を無視して素材を剛塑性体として取り扱う方法である。剛塑性FEMも1960年代の後半に上界法を汎用化させるものとして定式化¹¹⁾がなされた。その後、体積一定条件の取り扱いおよび応力計算の方法として、ラグランジュ乗数法¹²⁾、ペナルティ法¹³⁾、圧縮特性法¹⁴⁾が提案されている。鍛造のようなバルク加工では、素材は比較的大きな塑性変形を受けるため、素材のわずかな弾性変形を無視しても良い場合が多い。剛塑性FEMでは変形段階毎に応力が直接計算されるため、1回の変形量を比較的大きくすることができる。

このように剛塑性FEMは実用的な方法で、鍛造加工の数値シミュレーションによく用いられている。

上記したように、FEMは計算機を用いた数値解析法で計算機の発達と共に重要性が高まっている。FEMのバルク加工への応用における利点は次の通りである。

- ・素材が変形する形状を精度よくモデル化できる。

年	
～1960年	弾性有限要素法：航空機の設計
1960年代	弾塑性：微小変形理論 剛塑性：平面応力
1970年代	弾塑性：大変形理論 剛塑性：ラグランジュ乗数法、ペナルティ法、圧縮特性法
1980年代	各種加工法への適用：摩擦、接触問題、定常変形
1990年代以降	実加工への応用：鍛造、圧延、押出、引き抜き 市販ソフトウェアの機能充実：プリ・ポスト

図3 有限要素法の歴史

- ・工具・素材の形状および材料特性を変化させることが容易である。
- ・素材内部の材料流動、応力・ひずみ分布が求まる。
- ・試行錯誤実験を減らすことができ、コストが低減できる。

また、FEMシミュレーションでは以下のような情報が得られ、工程設計に利用されている。

- ① 変形形状：製品形状・金型への充満予測、素材形状決定、折れ込み疵など欠陥予測
- ② 加工荷重：加工機械の選定
- ③ 金型接触面圧：金型の摩耗・焼付き・割れの予測
- ④ 加工の応力・ひずみ分布：被加工材の割れ予測
- ⑤ 加工後のひずみ・残留応力分布：製品の強度分布

3.2 FEMに使用する物性値・境界条件

鍛造における数値シミュレーションでは材料特性と摩擦特性は特に重要な項目であり、ここでは、これらの説明を行う。

3.2.1 材料特性

材料特性として、ここでは特に変形抵抗について記述する。変形抵抗曲線は引張試験あるいは圧縮試験を行うことにより、図4のような応力-ひずみ曲線が得られる。一般的な冷間材は降伏点を超えると塑性変形が生じ、さらに加工硬化により応力が大きくなる。この降伏点を超えた塑性変形時の応力を対数ひずみとの関係にまとめたものを変形抵抗曲線と呼ぶ。この変形抵抗曲線に間違った値を用いると形状や荷重が実態と大きく乖離する可能性がある。

変形抵抗曲線を指数関数で近似したn乗硬化則の形で表される場合が多い。

$$\bar{\sigma} = F \cdot \bar{\epsilon}^n$$

nは加工硬化指数 (n値)、Fは塑性係数 (F値) である。

また、熱間のようにひずみ速度依存性を考慮する場合は次のような式で近似する。

$$\bar{\sigma} = F \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m$$

mは速度感受性指数 (m値) である。一般に、変形抵抗の測定には引張試験、均一圧縮試験、拘束圧縮試験などの各材料

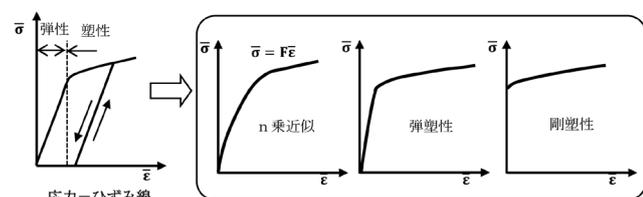


図4 材料特性

試験が用いられる。

変形抵抗曲線の測定の問題点として、熱間自由鍛造では高温保持された状態で逐次鍛造されるため、鍛造中の転位の回復・再結晶などにより材料が軟化する。このため、1回の引張・圧縮により大きなひずみを与える変形抵抗の測定結果から求めた変形抵抗データを用いると十分な形状・荷重予測精度が得られない課題があった。そこで、逐次加工中の軟化現象を考慮した荷重予測精度向上の取り組み¹⁵⁾がなされている。

さらに、引張試験や圧縮試験では測定可能なひずみは0.2~1.4程度しか得られない。一方、鍛造加工ではひずみが2以上になることは珍しくない。このような場合、上記の式を活用して外挿した値を用いることが多いが、最近ではひずみを10程度まで実測した例¹⁶⁾も報告されている。

3.2.2 摩擦特性

前述したように実鍛造では素材あるいは金型に潤滑剤を塗布し、素材との金型との直接接触を防止している。FEMを活用し、鍛造荷重や形状を高精度に予測するためには、境界条件 (摩擦係数) を定義する必要がある。

FEMで一般に採用されている代表的な摩擦則は、クーロン摩擦則とせん断摩擦則である。

一般的に冷間鍛造のような変形抵抗の高い場合にはクーロン摩擦則、熱間鍛造のように変形抵抗の低い場合にはせん断摩擦則を使用することが多い。

$$\text{クーロン摩擦則} : F_T = -\mu |F_N| t$$

$$\text{せん断摩擦則} : F_T = -m' k t = -m' \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} t$$

F_T は接触点における接触力の接線方向成分、 F_N は法線方向成分、 μ は摩擦係数、 t はすべり方向を表すベクトル、 m' はせん断摩擦係数、 k はせん断降伏応力、 $\bar{\sigma}$ は一軸の変形抵抗である。なお、摩擦係数の測定法はリング圧縮試験の他、数多くの方法が提案されており、表4に各摩擦係数の目安を示す。

3.3 鍛造加工のモデル化⁶⁾

鍛造加工では、変形とともに素材形状が変化する。さらに、金型と材料の接触状態も変化する非定常変形である。このため有限要素法でも、金型の動きに伴って時間毎の力の釣り合いと材料の変形による金型との幾何学的関係による境界条

表4 各摩擦係数

クーロン摩擦則	冷間鍛造	$\mu = 0.02 \sim 0.15$
	熱間鍛造	$\mu = 0.05 \sim 0.2$
摩擦せん断則	冷間鍛造	$m' = 0.07 \sim 0.2$
	熱間鍛造	$m' = 0.1 \sim 0.4$

件の変化を時間ステップに応じて解いていくことになる。材料は、この時間ステップ毎にひずみが増えるので、変形要素ごとにひずみが蓄積し、このひずみ量に基づき材料は不均一な加工硬化を示す。また、各要素に作用したひずみに応じて加工発熱が起こると共に、要素間は熱伝導により温度が変化し、金型と材料との接触面の変化や雰囲気温度との熱のやりとりによる熱伝達が材料温度を決定する。このような材料内部の温度が必要な時は、塑性変形解析と熱解析を連成して解く方法も行われている。このような温度解析も行う場合は、材料内部は不均一な温度分布となり、この温度分布が原因で変形抵抗も変化する。

近年では、このような温度分布、ひずみ分布、ひずみ速度分布から材料組織への影響をモデル化し、鍛造荷重や変形形状の高精度化のみならず、最終製品の組織・機械的特性の分布を予測する試みもなされている。

一例として、図5に円柱材の据え込み加工の解析例を示す。このような単純な加工においても大きなひずみや応力の分布が生じ、それらが刻々と変化していることがわかる。また、素材の表面がバルジ変形し、金型に接触するフォールディングも生じている。

材料の塑性変形による加工発熱および金型との接触面における摩擦発熱により素材の温度は上昇する。熱拡散より加工速度が速い場合には、顕著に不均一な温度分布を示す。図6に据え込み速度が温度分布に及ぼす影響を示すが、同図に示

すように加工時間が長い場合には、発生した熱がかなり金型側に逃げる。これに対して加工時間が短い場合には素材の温度はかなり上昇するとともに、金型との接触時間が短いため、金型側にはあまり深く熱が到達していないことがわかる。

4 数値シミュレーション技術の活用例^{17,18)}

ここでは、鍛造加工の応用として数値シミュレーション技術を用いた材質予測技術について記載する。

鍛造と加工熱処理プロセスを組み合わせた制御鍛造とは、機械的特性(引張強度、降伏強度、伸び、絞り、靱性、延性)の向上を目的とするプロセスであり、ここでは非調質鋼の強靱化の試みを紹介する。プロセス設計の考え方は、鍛造温度と冷却速度をコントロールすることでフェライト・パーライト組織を微細化し機械的性質を向上させる点にある。図7に概略図を示す。Ar₃点以上、再結晶温度前後の温度域で鍛造を行い、その後、冷却制御によりフェライト・パーライト組織とする。

非調質鋼に対する材質予測モデルは、熱間圧延組織予測モデル式¹⁹⁾を元に構築され、対象成分系における均一圧縮試験により組織予測に必要な各種パラメータを活用している。鍛造前の初期オーステナイト粒径をベースにして、鍛造後の動的再結晶粒径およびその分率の計算式、鍛造後の静的再結晶粒径と分率およびその後の粒成長の計算式、フェライト+パーライト変態によるフェライトおよびパーライトの粒径と分率の計算式、およびその組織から硬さ、引張強度、降伏強度および延性を予測する式からなっている。それらの予測式をFEMに組み込んだ材質予測システムを作成し、実際の熱間鍛造によるその精度を確認している。図8にその計算フローチャートを示す。なお、数値シミュレーションには

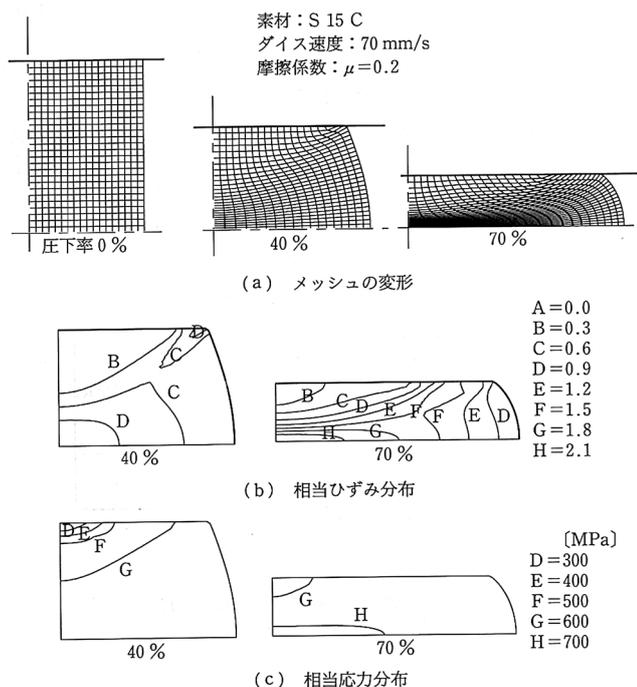


図5 円柱材の据え込み加工の解析例
 出典：静的解法FEM—バルク加工，日本塑性加工学会編，(2003)，p.138

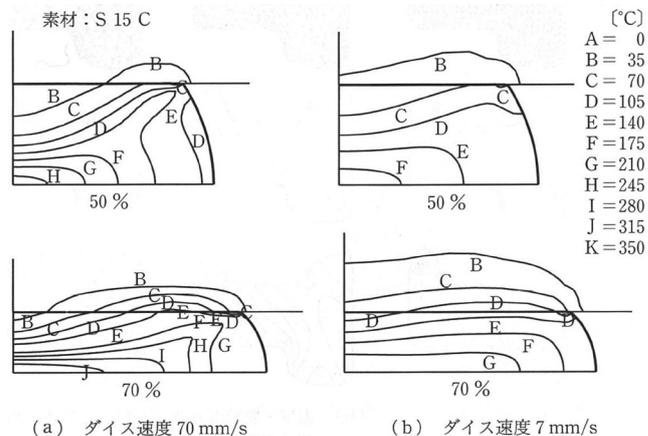


図6 据え込み速度が温度分布に及ぼす影響
 出典：静的解法FEM—バルク加工，日本塑性加工学会編，(2003)，p.139

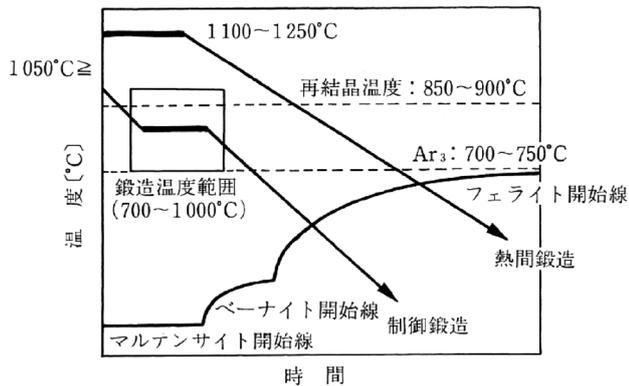


図7 制御鍛造プロセスの温度履歴 (CCT線図)
出典：静的解法FEM—バルク加工, 日本塑性加工学会編, (2003), p.112

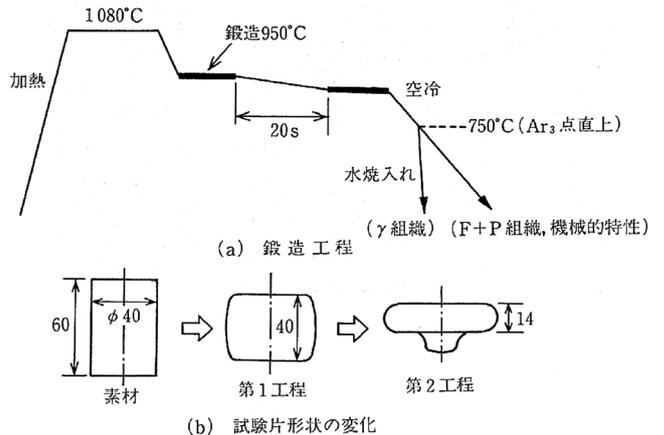


図9 材質予測システムの精度検証実験
出典：静的解法FEM—バルク加工, 日本塑性加工学会編, (2003), p.115

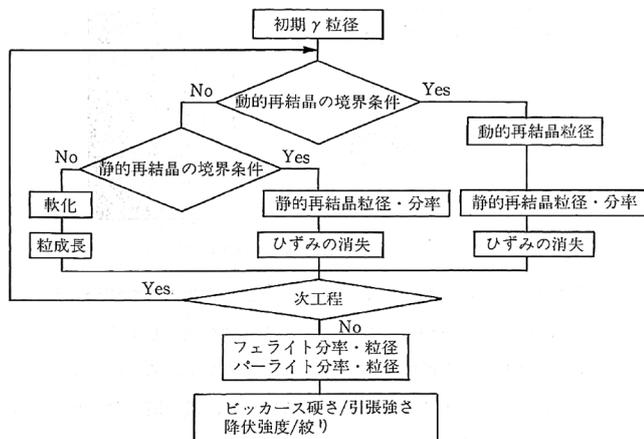


図8 材質予測システムのフローチャート
出典：静的解法FEM—バルク加工, 日本塑性加工学会編, (2003), p.114

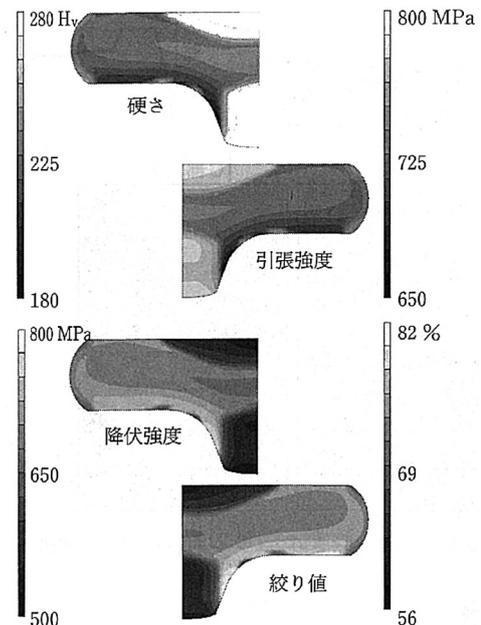


図10 機械的性質計算結果
出典：静的解法FEM—バルク加工, 日本塑性加工学会編, (2003), p.118

MARC/AutoForge3.1-SP1が活用されている。

図9に数値シミュレーションの妥当性の検証するために実施した鍛造手順(工程)を示す。この工程はバナジウム非調質鋼を対象に2工程でスパイク形状に鍛造するものである。図10は、最終製品における機械的性質分布の計算結果(硬さ・引張強度・降伏強度・絞り)を示す。一例として、図11に硬さの計算値と実測値を比較したものを示す。本結果から両者は良く一致しており、この予測システムが実際の使用に耐えうるもので、実部品への適用が期待されている。

5 まとめ

鍛造加工の基礎と応用と題し、鍛造加工に関する概略を解説した。鍛造加工は、人類が古代から実施してきた金属加工法であり、その技術要素としては材料の変形挙動だけでなく、目的の形状を作るための工程や金型の設計方法、潤滑や

金型材料、加工設備や加工手段など広範囲の知識とノウハウが必要な製造技術の集合体である。

今回本文で記載した内容以外にも製品品質(内部・表面欠陥の防止)・金型設計製作・生産ライン・生産システムおよび後工程(機械加工・熱処理・検査)などがあり、鍛造製品を作り出すためには重要な技術で、紙面上すべてを紹介することができない。

鍛造加工を科学的に理解する上では力学の基礎的な理解が重要で、工程設計や新しいプロセスの開発、問題点の解明、対応策の検討などを理論的に行うためには避けて通れない。

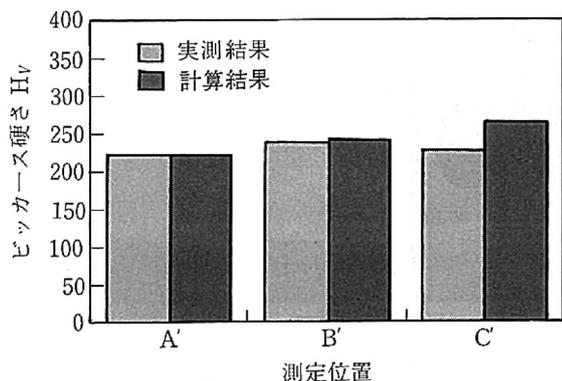


図11 ピッカース硬さに関する実測値との比較
出典：静的解法FEM—バルク加工，日本塑性加工学会編，(2003)，p.118

他方、本文で紹介した鍛造CAEは、コンピュータ能力の向上とGUIの改善により、誰もが使えるようになりつつある。しかしながら、そのソフトは多くが市販プログラムで、ソフトウェアの中身がブラックボックス化した状態での利用が多くなってきている。また、間違った入力値を用いても結果が出てしまうため、その妥当性を判断できる基礎的な塑性力学の知識に基づく支配因子の理解・考察はますます重要となっている。

これらの点を踏まえてCAEを正しく使いこなすことで、鍛造工程設計や金型設計段階で仮想的に検討を行うことができ、設計の効率化が期待できる。また、今後懸念される労働人口の減少に対して経験の浅い若手の設計者と熟練設計者間の技能格差を小さくし、誰もが鍛造設計を行えるツールとして非常に重要である。鍛造品の多様化と高精度化の要求、開発コストおよび開発期間の短縮がますます大きな課題になると考えられ、これからも鍛造技術へのCAE活用が期待される。

参考文献

- 1) 日本興業標準調査会：JIS鍛造加工用語，JISB0112 (1994)
- 2) 塑性加工技術シリーズ4 鍛造，日本塑性加工学会編，(1995)
- 3) 石川孝司：第105回塑性加工学講座，日本塑性加工学会，(2007)，1.
- 4) 鈴木太，関山祐介，太田大介，北村憲彦：素形材，58 (2017)，42.
- 5) わかりやすい鍛造加工，日本塑性加工学会鍛造分科会編，日刊工業新聞社.
- 6) 静的解法FEM—バルク加工，日本塑性加工学会編，(2003)
- 7) P.V.Marcial and I.P.King：Int. J. Mech. Sci., 9 (1967)，143.
- 8) Y.Yamada, N.Yoshimura and T.Sakurai：Int. J. Mech. Sci., 10 (1968)，343.
- 9) O.C.Zienkiewicz, S.Valliappan and I.P.King：Int. J. Num. Meth. Eng., 1 (1969)，75.
- 10) R.M.McMeeking and J.R.Rice：Int. J. Solids Structures, 11 (1975)，601.
- 11) D.J.Hayes and P.V.Marcial：Int. J. Mech. Sci., 9 (1967)，245.
- 12) C.H.Lee and S.Kobayashi：ASME, Ser. B, 95 (1973)，865.
- 13) O.C.Zienkiewicz and P.N.Godbole：J. Strain Analysis, 10 (1975)，180.
- 14) K.Osakada, J.Nakano and K.Mori：Int. J. Mech. Sci., 24 (1982)，459.
- 15) 櫻井信吾，森加奈恵，岡島琢磨，吉田広明，木村利光：第63回塑性加工連合講演会，(2012)，3.
- 16) 与語康宏，澤村政敏，岩田徳利，石川孝司：平成29年塑性加工春季講演会，(2017)，269.
- 17) 吉田広明，五十川幸宏，金子義典，与語康宏，石川孝司：塑性と加工，43 (2002)，619.
- 18) 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：第52回塑性加工連合講演会論文集，9 (2001)，8.
- 19) 矢田浩：塑性と加工，28 (1987)，418.

(2017年8月7日受付)