難加工金属材料の革新的生産システムに関する調査研究

斎藤　博[*]　相田　収平[**]　白川　正登[***]　佐藤　亨[****]　片山　聡[**]

Research of efficient production system on difficult-to-machine materials

SAITO Hiroshi[*], AIDA Shuhei[**], SHIRAKAWA Masato[***], SATO Toru[****] and KATAYAMA Satoshi[**]

抄　　録

近年，自動車，電子機器，光通信，生体材料などの各種分野において，製品の小型化，軽量化および高機能化の要求が高まるなかで，高強度材料，耐熱合金など難加工金属材料の検討，適用が進んでいる。一方，製造コストや生産工程を革新的に低減する生産システムは，ゼロエミッション化技術とも関連して産業界で強く要望されている。そこで，素形材加工の生産システムを対象に，ネットシェイプ加工技術，精密プレス加工技術およびその関連技術について調査研究を行った。

1. 緒　　言

環境問題などを背景に，自動車部品は，排ガス規制やハイブリッド化などに対応するため，小型化，軽量化，高機能化に加えてコスト削減が強く要求されており，製造コストや生産工程を革新的に低減する生産システムが要望されている。

製品を構成する部品は，材料に所望の形を与えて製造しているが，その手段には大きく３つの方法，すなわち除去加工（切削，研削，放電，レーザなど），付加加工（溶接，めっき，コーティングなど）および変形加工（鍛造，プレス，鋳造など）がある。このなかで変形加工は，素材に熱や力を加えて加工するもので「素形材加工」と称され，加工品は「素形材」と呼ばれる。素形材加工のなかでも変形加工は，母型を用意すれば複雑形状品も効率よく大量生産できるため，種々の部品製造に広く活用されている。さらに変形加工は，除去加工や付加加工に使用される素材の製造法としても活用されているので，素材に形を与える重要な手法と考えられる。

従来，日本が得意としていた変形加工（以下素形材加工）の基盤産業は，近年，高度加工装置とともに中国，東南アジアを中心とした海外にシフトしており，新潟県企業においても，本分野の加工に対する取り組みの遅れが懸念されている。よって，県内産業の重要な位置を占める本分野の生産システムに積極的に取り組み，技術の高度化を実現し，製品の高付加価値化および産業の活性化につなげることが急務である。

そこで，素形材加工の生産システムを対象に，ネットシェイプ加工技術，精密プレス加工技術およびその関連技術について調査研究を行った。

2. 関連産業・市場の動向と将来展望

日本の素形材産業は，工業統計・産業編（平成 14 年度）によれば出荷額 3.9 兆円，従業員数 17.7 万人，事業所数 7,300 事業所の規模である。さらに，金型など製造業，素形材生産機械，金属熱処理業などの素形材関連産業の規模は，出荷額 3.9 兆円，従業員数 23.0 万人，事業所数 14,000 事業所である。金属系素形材の生産額合計は，平成 2 年の 4.8 兆円をピークに減少，微

*　　下越技術支援センター
**　　研究開発センター
***　素材応用技術支援センター
****　上越技術支援センター

減増を繰り返してきたが，最近 2 年間は回復に向かっており，平成 16 年度は 3.8 兆円になっている。主要機械工業別の素形材の用途は，鍛造製品全体の出荷先は約 8 割が自動車産業と土木建設機械産業，一方，金属プレスの 7 割を自動車産業が占めており，製造コストの削減，品質および精度向上の要求は年々高くなっている。今後とも，技術開発を推進することにより，コスト競争力をつけることが需要拡大につながる。自動車部品の加工を行うには，高度な鍛造技術，プレス技術，鋳造技術などの基盤技術が要求され，新潟の技術力を活かすことができる領域であり，さらなる生産性の向上，品質の向上が望まれている。

3. 調査研究の結果

素形材を対象にした生産システムは，素形材加工技術の範囲が広く，加工精度も工業製品の種類により mm オーダから μm レベルまで広範囲である。今回の調査研究では，本県の産業構造，技術水準などを勘案し，自動車部品素材を中心に，主に冷間鍛造，鋳造技術（半溶融・半凝固加工）および精密プレス加工技術（サーボプレス）を対象に調査研究を行った。また，関連する重要技術として，シミュレーション技術，リサイクル技術についても調査した。

3.1 冷間鍛造

3.1.1 概要

冷間鍛造は，常温の素材を圧縮成形するため，温間鍛造，熱間鍛造と比較して寸法精度の良好な鍛造品が成形可能で，後工程の加工量も減少させることができる。鍛造と切削を組合せる場合，鍛造コストに比べ切削コストが大きいので，切削工程を削減して全生産コストを下げるように，製品に近い形状（ニアネットシェイプ）に鍛造する精密冷間鍛造方法が開発されてきた。最近では，さらに進んで，最終形状（ネットシェイプ）まで鍛造だけで加工することが求められるようになっている。切削加工の加工精度は，1μm 以下を達成しており，これにともないネットシェイプ精密鍛造では寸法精度 1～10μm の高精度加工を行うことが目標になる。しかし，現在の精密鍛造においては，20μm 程度の寸法精度が大量生産で保証できる限界であり，今後一層の技術開発が求められている。本調査研究では，自動車エンジン部品を想定した冷間鍛造品について，試作研究およびシミュレーション解析を行ったので概要を述べる。

3.1.2 冷間鍛造実験および加工品評価

自動車エンジン部品を模した製品（図 1）を対象に，（株）川崎製作所（三条市）において冷間鍛造実験を行った。製品材質は S15C，金型は超硬合金である。本製品は，県内 T 社が 2008 年排ガス規制対策部品として受注を開始しようとしているもので，切削加工での対応を検討している（実際の大きさは約 1/3）。

図 2 に実験結果を示す。比較的良好な冷間鍛

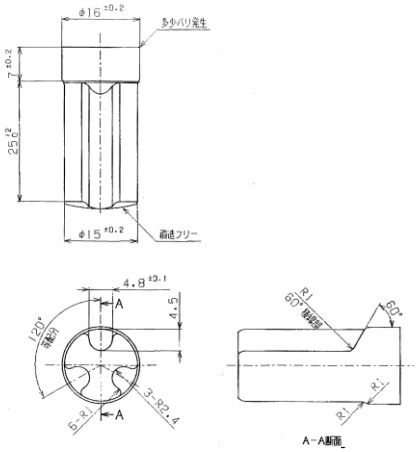


図 1　冷間鍛造部品

図 2　実験結果（製品およびコメント）

造が可能であったが，製品化にあたっては，軸方向の長さ精度，潤滑切れ，小 R 部精度などが課題になることが分かった。

3.1.3　冷間鍛造シミュレーション

前項の冷間鍛造実験を有限要素法解析による鍛造シミュレーション（MSC.SuperForge 使用）で評価した。図 3 に解析モデルを示す。材料は S15C とし，MSC.SuperForge の材料データベースに登録されている材料定数をそのまま用いた。金型は剛体とした。図 4 に充填状況を示す。下端部の状況は，実験と比較的近い結果を示している。また，図中囲み部に示すように，断面 A のほうが断面 B に比べて，ダイへの密着度が大きいことが分かる。これは鍛造上り形状において，断面 A のダイ側素材の押出される量が，同じ断面の中央素材や断面 B と比較して少ないことからも分かる。この差が実際にどの程度かによって，ダイへの付加状況や金型寿命を検討することが可能になるといえる。図 5 は降伏点応力分布図である。断面 A と B を比較すると，断面 B のダイ側素材の加工効果の度合いが大きいことが分かる。つまり，ダイ円周外側への素材の変形がしにくくなり，密着度が低くなると考えることができる。この結果は，図 4 に示した充填状況の結果を裏付けるものとなる。なお，今回の解析では金型は剛体としているが，剛体であっても金型壁面に発生する反力を調べることで，金型寿命をある程度予測することは可能である。

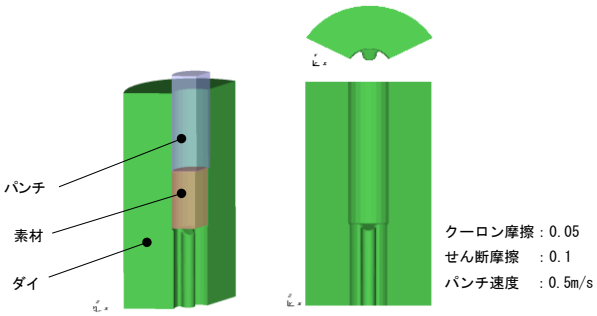


図 3　解析モデル

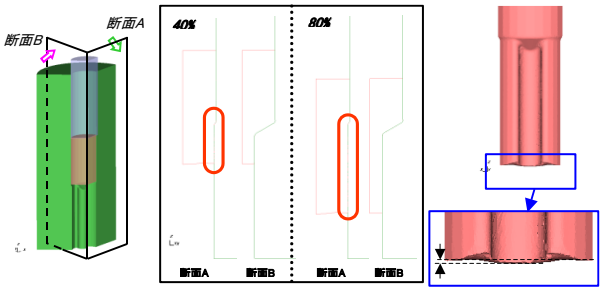


図 4　充填状況

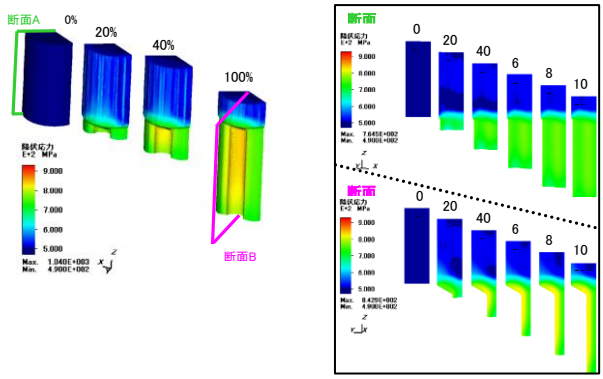


図 5　降伏点応力分布

3.2　半溶融・半凝固加工

3.2.1　概要

鋳造や鍛造などの素形材産業においては，国際的な価格競争と技術競争の厳しい環境におかれ，その衰退が危惧されるとともに，その革新的な生産プロセスの開発が急務とされている。その 1 プロセスとして，固体と液体が共存したシャーベット状態（固液共存状態）で加工を行う半溶融・半凝固加工が注目され，複雑形状部品のネットシェイプ・ニアネットシェイプ加工が期待されている。本調査では，軽金属および鉄系材料における半溶融・半凝固加工の現状について調査を行い，その可能性について検討を行った。

3.2.2　軽金属の半溶融・半凝固加工

ダイカストなどの軽金属鋳物製品は，従来，カバー類などの強度が重要視されない所に多く用いられてきたが，軽量化の波により，強度や靭性が要求される部品へと採用され始めている。このような中，ダイカスト品や鋳造品の品質，

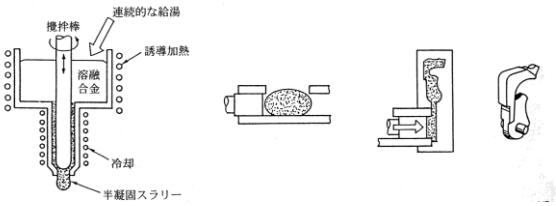


図 6　半凝固加工法（レオキャスト法）[1)]

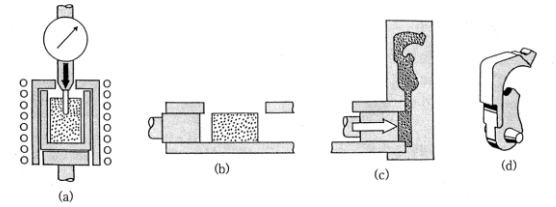


図 7　半溶融加工法（チクソキャスト法）[1)]

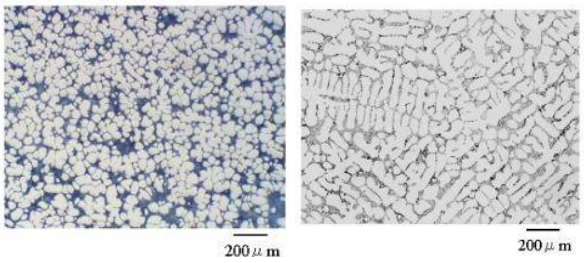
材質向上を目的として，半溶融・半凝固加工の研究が進められている。この半溶融・半凝固加工法は，1970 年代にアメリカ Massachusetts 工科大の Flemings らや東京大学生産技術研究所の木内らによって研究されはじめた技術であり，溶融金属中に固体金属粒（固相金属）が均一に分散した状態を作り，それを金型鋳造やダイカストなどで成形加工する方法である。

半凝固加工は，溶融金属を冷却しながら撹拌して，溶融金属中に球状の固相金属が均一に分散した半溶融スラリーを作り，これを直接成形する方法のことをいう[1)]（図 6 参照）。この攪拌方法としては，機械的攪拌のほか，電磁攪拌，機械振動，超音波振動などの種々の方法およびそれらの複合による方法が試みられている。一方，半溶融加工とは，固体金属を固液相共存温度まで加熱し，溶融した金属中に未溶融の固体金属粒が分散した状態で成形する方法のことをいう[1)]（図 7 参照）。実際には，前者のような「溶湯」→「半凝固スラリー」→「成形」の直結化は実用的プロセスとして難しく，半凝固スラリーを連続鋳造法により一度冷却凝固させて棒状素材とした後，切断してビレット化し，再加熱して半溶融化した後に，加工機に投入して成型する後者の方法が多く用いられてきた。これらの方法により作られた素形材は，通常の液体金属の成形に比べ，以下のような特徴を示すと言われている。

①成形時の凝固収縮が小さく，寸法精度が高い。
②粘性が高く，成形時のガス巻き込みが少なく，ガス欠陥が少ない。
③凝固組織が微細な粒状晶となるため，伸びなどの機械的特性が向上する。
④金型の狭小な部分への固相の充填性が良く，マクロ偏析が軽減される。
⑤金型などの加工工具への熱負荷が減少し寿命が向上する。
⑥変形抵抗が小さく，難加工材の成形が容易である。
⑦異種材料との混合が容易で，新しい複合材料を作ることができる。

3.2.3　半凝固金属製造技術

日立金属（株）では，縦型ダイカストマシンを用いて電磁撹拌ができるスリーブ内に電磁ポンプで直接溶湯を給湯し，冷却過程で初晶形状を粒状化したのち鋳込む半凝固ダイカスト法（SSM 製法）を開発した[2)]。この方法により，ビレットを必要としない加工が可能となり，ガスの混入量が少なく T6 処理，溶接が可能になった。金属組織写真を図 8 に示す[3)]。同方法により，重要保安部品である自動車のサスペンション部品が生産されている[3)]（図 9 参照）。



(a)一般アルミ鋳物　　(b)SSM 法

図 8　金属組織[3)]

図 9　SSM 法によるアルミダイカスト製サスペンション部品[3)]

宇部興産機械（株）は，溶湯から直接半凝固状態の金属スラリーを 1 ショット分ずつ容器内で作るニューレオキャスト法（NRC 法）を開発した[4]。融点に対する過熱度が 30℃未満の融点直上の結晶微細化剤 Ti が添加された溶湯を金属容器に静かに注湯し，液中に結晶核を発生させる。目標成形温度まで容器外部からエアブローにより所定の速度で冷却する。容器内部の半凝固スラリー各部位の温度を均一にするために，注湯直後の温度が低い，あるいは冷却しやすい部位をセラミックにより保温し，容器内のスラリー温度が目標値に近づいた段階で最終の温度調整のため，高周波誘導装置を使用する。このあいだ，容器内面において発生した結晶核を起点として球状結晶が液中に発生して成長する。機械的性質は熱間加工材に近いなどの報告がある。 収縮巣，偏析の発生が少ない，金属組織が細かい，酸化物の混入が少ないなどの優れた品質上の特徴を有すること，半凝固状態で成形するため高サイクルでの成形が可能であることから，低コストの成形法として自動車軽量化に対応できる方法と考えられている。

3. 2. 4　高融点金属の半溶融・半凝固加工

高融点金属の半溶融・半凝固加工は，（1）高温・高圧に耐える型材料に十分なものがない，（2）高温環境による成形加工機への負荷，（3）高温域での正確な温度制御や均一加熱が困難，などが問題となり，実用化された例はほとんど無い。材質的には，固液共存状態を安定して実現するために，液相線温度と固相線温度との差が数十℃以上あることが望ましく，そのため対象となりうる高融点金属は各種鋳鉄，高炭素鋼および高合金鋼に絞られる。

国内における半溶融・半凝固加工の事例を以下に紹介する。

・鋳鉄の半溶融ダイカスト法（チクソ成形）

虹技（株）では，鋳鉄の半溶融成形用ビレットの製造から半溶融ダイカスト，その後の熱処理までの一貫プロセスを開発している[5]。プロセスの概要は，連続鋳造法によるビレットの製造，ビレットの再加熱とダイカストマシンによる成形，最終工程で熱処理を施し完成となる。

水平連続鋳造法を用いることで，成分変動が小さく，微細均一な組織のビレットの製造が可能となったと報告されている。成形時には，ビレットを高周波誘導加熱により半溶融温度域に再加熱し，ダイカストマシンにて成形する。成形時の金型には，熱伝導性と強度に優れるベリリウム銅を用い，水冷を施すことで，熱応力が低減され，鋼製金型に比べ数倍以上の耐久性が得られている。

・遷移制御セミソリッド鋳造法

厳密には半溶融・半凝固加工とは若干異なるが，鋳鉄溶湯が液相から液相－固相共存状態になる過程を制御して，鋳造組織をセミソリッド化（遷移制御セミソリッド化）することにより鋳物の特性を向上させ，薄肉軽量鋳鉄鋳造品を対象とした鋳造技術である[6]。

同技術の実用化を目指し，戦略的基盤技術力強化事業（独立行政法人中小企業基盤整備機構法）「ロストフォーム法による鋳鉄の遷移制御セミソリッド鋳造法及びロストフォーム用金型技術に関する研究開発」（平成 15～17 年度，管理法人：財団法人素形材センター，研究参画企業・大学：三重可鍛工業（株），新東工業（株），ダイセン（株），大藤（株），名古屋大学）が行われている。同研究は，減圧補助機構をもつロストフォーム鋳型に，鋳鉄溶湯を通常（約 1,450℃）より 200℃程度低い遷移制御セ

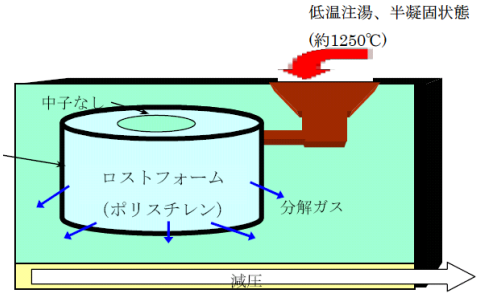


図 10　遷移制御セミソリッド鋳造法の概念[6]

ミソリッド温度領域で注湯して，ダクタイル鋳鉄異形管の肉厚を現行 10mm から 5mm まで薄肉化することを目標としている。低温で鋳造することにより湯流れ性が悪くなるため，金枠内を減圧し溶湯の湯流れ性を向上させることを目論むとともに，発泡模型が分解するときに発生するガスを金枠外に排出するなどの工夫がされている（図 10 参照）。

3.3　サーボプレス

国際的な競争の激化にともない，プレス加工分野においても，低コスト化と高付加価値化がキーワードとなっている。近年，注目を集めているサーボプレス機械は，CNC による自在なモーションコントロールや高精度の位置制御などによる，難加工材の高精度加工などを容易に実現できる可能性を持った，新しい概念のプレス機械である。従来のプレス機械（特にメカプレス）と比較した場合の大きな特長は，CNC による自在なスライドモーションが可能，スライド速度を自由に可変可能，下死点位置などの制御を高精度に設定できるなどである。また，特に抜き加工時に材料板厚の 85～90%のところで止めることにより，静音抜きが可能である。

なお，全国で 2000 台といわれるサーボプレス所有数（2006 年 1 月現在）に対して，県内は約 20 台（1%）と少なく，作業者の熟練技能に依存している状況がうかがえる。

3.4　シミュレーション

近年，ハードウェアの進歩にともない，製品開発・設計段階におけるシミュレーション技術導入が急速に進んでいる。コスト低減や短納期化の実現だけでなく，新技術開発の分野においてもシミュレーション技術は必須となってきているため，その最新技術動向を調査した。

3.4.1　強度シミュレーション

最近のソフト開発の傾向として特に顕著なのが，強度解析ソフトと 3 次元 CAD との親和性向上である。例えば，SolidWorks には有限要素法解析モジュール（CosmosWorks/Express）が標準で付属しており，部品単体の線形強度解析であれば構造解析ソフトを別途起動することなく SolidWorks 上のコマンドより実行することができる。汎用有限要素法解析ソフト ANSYS においても 3 次元 CAD との親和性を高めた GUI モジュール ANSYS Workbench が用意されている。SolidWorks とは違い，3 次元 CAD とは別に起動する必要があるが，ANSYS Mechanical などの ANSYS 本体の解析モジュールを活用することで，アセンブリモデルの接触問題や材料非線形問題，熱伝導解析を取り扱うことが可能となっている。従来の ANSYS GUI との大きな違いは，CAD モデルから接触面を自動認識する機能や設計変数による最適設計値を CAD モデルに反映させる機能を有する点である。ただし，これら 3 次元 CAD との親和性を高めた強度解析モジュールでは非等分布荷重の適用や時刻暦応答解析など，難易度の高い解析は行うことができない点に注意が必要である。

3.4.2　プレス加工シミュレーション

プレス加工シミュレーションは汎用有限要素法解析ソフトにおいても解析可能であるが，プリポストをプレス加工専用にカスタマイズされたソフトが発売されており，そちらを使うのが一般的である。準静的問題として扱うことができるようなプレス加工であれば，陰解法ソルバーでも解析可能であるが，ひずみ量が大きくなった場合に収束性が低下して解析が発散する傾向にあるため，これらのソフトの多くは解法に陽解法を採用している。陽解法は陰解法のように力の釣り合い方程式を解くのではなく運動方程式を解くため，計算が発散することがないという利点がある。その一方で，材料の減衰性や後述する時間ステップサイズの極微小化などの問題があり，求解には陰解法による解析とは違ったノウハウが必要となる。陽解法を採用するソフトのソルバーは LS-DYNA を用いるものと，

独自ソルバーを備えているものに大別される。どちらのソルバーを用いても，しわおよび割れの予測は実用レベルにあり，大手自動車関連企業では複数本のソフトを所有して使い分けているようである。特に，陰解法によりスプリングバック解析を行う場合には，陰解法ソルバーとの親和性の高い LS-DYNA が多く用いられるようである。プレス加工シミュレーションにおいて，最大の技術課題となっているのはスプリングバック解析の精度向上である。自動車用ドアパネルなど，高張力鋼板の大型製品プレス加工において，特に積極的な研究が進められているが，新規の製品形状に対する信頼度においてはまだ実用レベルに達していないのが現状である。

また，マグネシウム合金のような温度依存性の高い材料では，加工温度というのは重要な要素となる。熱との連成解析におけるスプリングバック解析は，板材開放時の放熱速度による材料定数変化も考慮せねばならず，従来以上に問題が複雑となり，非常に技術ハードルの高い課題であるといえる。

3.4.3　鍛造シミュレーション

鍛造シミュレーション専用ソフトとして国内で取り扱われている代表的な製品は MSC.SuperForge と DEFORM である。MSC.SuperForge は有限体積法，DEFORM は有限要素法を用いている。2 次元モデルの鍛造シミュレーションであれば，汎用有限要素法解析ソフト MSC.Marc，ANSYS，LS-DYNA などでも可能であるが，要素が異常変形した際の再メッシング機能を 3 次元モデルでも精度良く行える点において，上記 2 本のソフトは優れている。また，鍛造シミュレーションにおいては製品の完成形状予測だけではなく，鍛流線による欠肉・巻きこみの確認や金型寿命予測などを行うことも目的としているため，ポスト機能において，それらの確認を容易に行えることもソフト選定における重要な要素となる。鍛造シミュレーションで取り扱われる事例の多くは冷間鍛造である。熱間鍛造においてもシミュレーションに対するニーズは高いが，高温域の材料定数データベースの不足や伝熱効果などの技術課題を抱えており，実用レベルには達していない。

3.4.4　鋳造シミュレーション

鋳造シミュレーションにおける解析内容は，湯流れ解析（充填解析）と凝固解析に大別される。注湯位置や注湯圧力による流れ状態を確認するだけであれば，湯流れ解析だけで十分であるが，最終的な製品形状を予測するためには，冷却後のヒケなどを確認する必要があり，そのためには凝固解析が必須となる。

国内で使用されている鋳造シミュレーションソフトは，MAGMASOFT，Procast，JSCAST，ADSTEFAN などである。ソフト開発の傾向として，MAGMASOFT と Procast は構造解析ソフトとの連携強化，JSCAST は GUI のユーザ親和性向上，ADSTEFAN は大規模モデル（1 億メッシュ）の高速求解の開発に力を入れている。なお，鋳造シミュレーションは構造解析ベースのものに比べメッシュ数が多い（数十万～数千万メッシュ）のが普通であり，シミュレーション分野においてハードウェアのクラスタ化が最も進んでいる。そのため，ハードウェアが高価になり，中小企業への普及の障害となっている。

3.5　金属リサイクル

鉄，アルミニウムなどのベースメタルのリサイクルの大部分は希釈により行われている。すなわち，使用後，回収された金属を基成分のみに注目し，分離不能な添加成分を害にならない程度までバージン材などで希釈して使用する方法である。しかしながら，このような方法をとる場合，二次精錬の能力を超える多量の添加元素を含むものや，成分調整の困難なものはバージンメタルとは異なった用途に使われる。これに対し，合金の基成分も添加成分も含まれるすべての成分をその組成のまま再利用しようとするのが Alloy to Alloy である。すべての成分を

利用するという点では Alloy to Alloy がリサイクルの理想形ではあるが，実際には，再溶解時の成分移動など技術的な課題は多い。現状では，電線，鉛蓄電池などほぼ単一成分に近く組成の決まっているもの，工場内部の自家発生屑の再溶解などに限られている。

一方，レアメタルのリサイクルは，80%近くの高いリサイクル率を示すものから，ほとんどリサイクルされていないものまで様々であり，抽出によるリサイクルが技術的に困難であるものも多い。また，回収される形態もガラス，セラミックス，複合材，薄膜，積層構造，超微粉など様々である。

4. 結　　言

(1) 冷間鍛造は，温間鍛造，熱間鍛造と比較して寸法精度の良好な鍛造品が成形可能である。後工程の加工量も減少させることができるため，切削工程を削減して全生産コストを下げる取り組みが活発であり，製品に近い形状（ニアネットシェイプ）から，さらに進んで最終形状（ネットシェイプ）まで求められるようになっている。冷間鍛造機械（サーボプレスなど），潤滑剤，工法，熱処理，材料開発などを総合した開発が重要である。

(2) 鋳造，鍛造分野の素形材産業においては，国際的な価格競争と技術競争の厳しい環境におかれ，その革新的な生産プロセスの開発が急務である。解決手段の１つに半溶融・半凝固加工が注目されており，軽金属分野で適用が進んでいる。複雑形状部品のネットシェイプ加工が期待されているが，鉄系高融点金属において実用化された例はほとんど無く，今後の課題である。

(3) 低コスト化と高付加価値化に対応するためサーボプレス機械の導入が進んでいる。CNC による自在なモーションコントロールや高精度の位置制御などによる，難加工材の高精度加工などを容易に実現できる可能性がある。県内導入は約 20 台程度と推測される。ちなみに，全国での推定導入台数は 2006 年 1 月現在で約 2000 台と言われており，新潟県内導入台数は全国の約 1%という状況である。

(4) ハードウェアの進歩にともない，製品開発・設計段階におけるシミュレーション技術導入が急速に進んでいる。コスト低減や短納期化の実現だけでなく，新技術開発の分野においてもシミュレーション技術は必須となってきている。

(5) レアメタルは，80%近くの高いリサイクル率を示すものから，ほとんどリサイクルされていないものまで様々である。回収される形態もガラス，セラミックス，複合材，薄膜，積層構造，超微粉など様々であるが，今後レアメタルの需要はますます増加する傾向にあるとみられる。

参考文献

1) 岡野忍，金属便覧，2000，p972-974.
2) 原雅徳，小沢賢久，河野勝海，金内良夫，桜木秀偉，“新半凝固ダイカスト法によるアルミニウム合金サスペンション部品の開発”，素形材,42,12,2001,p13-18.
3) 日立金属株式会社ホームページ, http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod06/p06_02.html
4) 内田正志，古屋博幸，“コールドチャンバ・ダイカストマシンについて”，鋳造工学，75，6，2003，p428-434.
5) 虹技株式会社開発部，“鋳鉄の半溶融ダイカスト法”，素形材，46，1，2005，p9.
6) 蛭川遼治，塚本順夫，“「ロストフォーム法による鋳鉄の遷移制御セミソリッド鋳造法およびロストフォーム用金型技術に関する研究開発」の成果報告”，プレス技術，60，2，2005，p60-64.