

博士論文

製造コストダウンのためのシミュレーション技術の  
応用に関する研究

工学部機械工学科修士課程機械造形工学専攻  
生産システム論 水田博幸 0424004

117041-03

横浜国立大学  
1997

①

鍛造品コストダウンのためのシミュレーション技術の  
応用に関する研究

博士論文

横浜国立大学工学研究科博士課程後期生産工学専攻  
生産システム講座 小豆島研究室 94D4004

藤川真一郎

\*\*\*\*\*

横浜国立大学  
1997

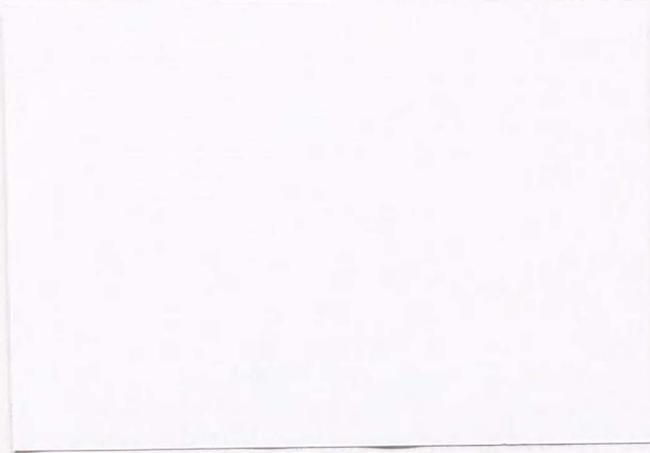
## 論文抄録

横浜国立大学工学研究科博士課程後期生産工学専攻  
生産システム講座 小豆島研究室 94D4004 藤川真一郎

表題: 鍛造品コストダウンのためのシミュレーション技術の応用に関する研究

自動車の鍛造部品は、その強靱な性質から、自動車の安全に必要な強度を要求される構造要素に用いられている重要な部品である。鍛造品の競合工法として、鑄造、焼結、プレス部品などがあるが、各技術分野の発展に伴い、鍛造品の比率を維持、あるいは向上していくためには、常にコストダウンにつながる技術開発が必要となる。鍛造品の原価構成から考えて、直接材料費、金型費、仕損費の低減が、全体のコストダウンに大きな比重を占める3つの要素となっている。これらの原価低減手法を立案するためには、従来、多くの試作を行い、試行錯誤を繰り返し、資源と時間をかけるのが現状であった。著者は、実機で行う試作の資源と時間を削減するため、またひいては鍛造品のコストダウンにつなげるための鍛造シミュレーション技術を適用し、実用レベルにするための研究を行った。

直接材料費の低減に関しては、アルミニウム鍛造において安価な鑄造材を用いるための新工法である鑄造鍛造法を確立するために、最適鑄造粗材形状を決定するのに FEM 解析で密度変化の推定を行った。また、クランクシャフト材料歩留りの向上のため、プラスチック実験を行い、新しい材料節減法の条件決定につなげた。金型費低減のためには、FEM 解析で、金型の寿命向上の方策を立案した。また仕損費低減では、欠陥発生メカニズムを FEM 解析、あるいは、プラスチック実験で解明し、得られた知識を映像化してエキスパートシステムを構築し、データベース化することができた。これは、仕損費低減のみならず、さまざまな原価低減活動を推進するためのツールとしても有用となることが分かった。これらの研究から、鍛造品コストダウンに関する、実機、プラスチック、コンピュータの各シミュレーション技術の使い分けについて述べていく。



査読論文

Fujikawa, S., Kitamura, Y., Shimamura, S., "Application of Numerical Methods to the Casting/Forging Process", *J. of Material Processing Technology*, 27, 1991., P93-110

Fujikawa, S., Ishii, K., "Diagnostic Expert Systems for Defects in Forged Parts", *J. of Intelligent Manufacturing*, 6, 1995, P163-173

Fujikawa, S., Ishihara, A., "Development of Expert Systems for Forging Processes", *JSAE Review*, 18, April, 1997 (投稿中)

Fujikawa, S., Azushima, A., "Simulation of Defect Generation in Hot Forging Processes for Development of the Expert System for Diagnosing Defects", *J. of Material Processing Technology* (投稿中)

出版文献

藤川、島村、「ニア・ネット・シェイプの現状と課題」、特殊鋼、38巻、1989年12月、P7-10

藤川、島村他、「鍛造コンロッドIセクション疵発生に関する一考察」、塑性加工春季講演会講演論文集、1991年5月、1巻、P573-576

池田、桐本、藤川他、「鍛造シミュレータの開発」、塑性加工春季講演会講演論文集、1992年10月1-3日、1巻、P293-296

Fujikawa, S., Kitamura, Y., Shimamura, S., "Application of a Numerical Method to the Casting/Forging Process", *UNFORMTECHNIK*, 26, 1992., P271-276 (German)

Fujikawa, S., Yoshioka, H., Nishiyama, S., "Cold and Warm Forging Applications in the Automotive Industry", *J. of Material Processing Technology*, 35, 1992., P317-342.

Fujikawa, S., Ishii, K., "Diagnostics Expert System for Defects in Forged Parts", *the Proceedings of AIENG VIII*, 2, 1993., P163-178

藤川、西山、「米国における鍛造エキスパートシステムについて」、鍛造技報、19巻、1994年10月、P20-34

藤川、石原、大崎、「鍛造エキスパートシステムの開発」、日産技報、35号、1994年10月、P103-111

木下、ラシッド、西山、藤川、木原、「3次元鍛造シミュレーションの紹介」、型技術、10巻、1995年7月、P74-75

藤川、樹村、「鍛造金型の寿命解析とその予測-CAE手法と比例ハザードモデルの利用-」、第25回日科技連信頼性・保全性シンポジウム、1995年7月、P251-256

藤川、石原、「鍛造エキスパートシステムの開発」、自動車技術、49巻、1995年11月、P62-67

藤川、西山、樹村、「CAE 及び信頼性手法による鍛造金型の寿命解析」、塑性加工春季講演会講演論文集、1996年5月、1巻、P208-209

吉田、藤川他、「クランクシャフト材料歩留り向上への一方策（その1）モデル実験による検討」、型技術、1996年7月、11巻、P110-111

西村、藤川他、「クランクシャフト材料歩留り向上への一方策（その2）数値解析による検討」、型技術、1996年7月、11巻、P112-113

#### 発表及び講演

藤川、「ホットホーマによる高速精密熱間鍛造」、日本塑性加工学会鍛造分科会高温精密理論班集会、1989年11月13日、東京

藤川、島村他、「鍛造コンロッドIセクション疵発生に関する一考察」、塑性加工春季講演会、1991年5月10-12日、東京

Fujikawa, S., Kitamura, Y., Shimamura, S., "Application of a Numerical Methods to the Casting/Forging Process", Metal Forming: Application of Plasticity and Numerical Methods, An International Symposium in Honor of Professor Shiro Kobayashi, August 15-17, 1991, Palo Alto, California, USA

Fujikawa, S., Yoshioka, H., Nishiyama, S., "Cold and Warm Forging Applications in the Automotive Industry", Cold and Warm Forging Technology 1992, October 27-28, 1992, Columbus, OH, USA

Fujikawa, S., Ishii, K., "Diagnostics Expert System for Defects in Forged Parts", AIENG VIII, July 1-3, 1993, Toulouse, France

Fujikawa, S., Altan, T., "Diagnostics Expert System for Defects in Forged Parts", ICFG Meeting, September 12-14, 1993, Osaka, Japan

藤川、「省力化のための自動化装置の経済性-鍛造ロボット-」、第22回鍛造実務講座「鍛造加工の経済性向上に関する最新の考え方」、1994年3月24-25日、宇都宮

藤川、「FEMによる鍛造疵解析」、日本塑性加工学会鍛造分科会精密鍛造理論班集会、1994年6月8日、名古屋

藤川、「鍛造欠陥生成解析とエキスパートシステム構築」、第16回アルミニウム鍛造講座、1994年6月17日、東京

藤川、樹村、「鍛造金型の寿命解析とその予測-CAE手法と比例ハザードモデルの利用-」、第25回日科技連信頼性・保全性シンポジウム、1995年7月、東京

藤川、西山、樹村、「CAE及び信頼性手法による鍛造金型の寿命解析」、塑性加工春季講演会、1996年5月、名古屋

藤川、「熱間鍛造金型の寿命解析」、日本塑性加工学会鍛造分科会工具表面研究班集会、1996年11月28日、京都

目次

抄録 .....	II
履歴 .....	III
略号リスト.....	IX

章 .....

章 .....	ページ
I. 緒言	
1.1 背景 .....	1
1.2 著者と鍛造及びシミュレーション技術との関わり .....	7
1.3 研究の目的 .....	12
参考文献 .....	14
II. 鍛造シミュレーションのためのツール	
2.1 緒言 .....	16
2.2 鍛造シミュレータの開発 .....	18
2.3 プラスティシシミュレーション .....	23
2.4 FEMシミュレーション .....	28
参考文献 .....	31
III. アルミニウム鑄造鍛造へのFEMシミュレーションの適用	
3.1 緒言 .....	32
3.2 アルミニウム鑄造鍛造工法 .....	32
3.3 ナックルアームによる実験 .....	34
3.4 鑄造鍛造シミュレーション .....	43
3.5 鑄造鍛造工法における最適プリフォーム形状の検討 .....	47
3.6 結言 .....	50
参考文献 .....	51

IV. 鍛造品材料節減のためのシミュレーション適用	
4.1 緒言 .....	52
4.2 クランクシャフトの鍛造 .....	52
4.3 モデル実験とFEM解析 .....	54
4.4 まとめ .....	61
参考文献 .....	62
V. 鍛造欠陥シミュレーションと診断システムの開発	
5.1 緒言 .....	63
5.2 コンロッドのフロースルー欠陥に関する研究 .....	64
5.2 クランクシャフトカウンターウェイト疵の解析 .....	79
5.3 鍛造欠陥診断システム (FORDIA) .....	83
参考文献 .....	105
VI. 鍛造金型寿命向上のためのシミュレーション適用	
6.1 緒言 .....	107
6.2 信頼性手法の適用 .....	113
6.3 FEMによる金型応力解析のための実験 .....	119
6.4 フロントホイールハブ型寿命向上へのFEMの適用 .....	130
6.5 金型寿命予測 .....	135
6.6 まとめと今後の課題 .....	138
参考文献 .....	139
VII. 結論と展望	
7.1 結論 .....	141
7.2 展望 .....	143
謝辞 .....	146
参考文献 .....	146
付録	
鍛造欠陥診断システム (FORDIA) 取扱説明 .....	147
鍛造欠陥診断システム (FORDIA) 主要プログラム .....	164
鍛造欠陥の体系 .....	171

略号リスト

第2章

$F(x)$	変位に対する荷重曲線
$v(x)$	変位に対するラムスライド速度
$v_0$	ラムスライドの初期速度
$m$	ラムスライド質量

第3章

$I_1$	応力の1次不変量
$J_2$	偏差応力の2次の不変量
$A, B$	相対密度の関数
$\sigma$	垂直応力 (添字は方向)
$\tau$	剪断応力 (添字は方向)

第5章

$A_1$	第一粗地のI-セクション部断面積
$A_2$	第二粗地のI-セクション部断面積
$L_1$	フラッシュランド部断面積
$G_2$	ガッター部断面積
$E$	ガッター余裕量
$E_i$	$i$ 番目の結果の事象
$F_j$	$j$ 番目の事実 (Fact)
$P(E_i)$	結果 $E_i$ の起こる確率
$P(E_i F_j)$	$F_j$ が明らかになった際の $E_i$ の起こる確率
$P(F_j E_i)$	$E_i$ の条件の元に $F_j$ の起こる確率
$m$	事実の総数
$n$	結論 (Event) 総数
$k_1$	選ばれた事実
$\beta$	学習修正率
$Pp$	修正前確率
$\delta$	クロネッカの $\delta$
$\gamma$	修正重み

第 6 章

$f(t)$	寿命分布の確率密度関数
$R(t)$	信頼度関数
$F(t)$	累積故障率関数
$\lambda(t)$	故障率関数
$\mu$	平均寿命 (MTBF)
$\eta$	累積故障率 63% のときの寿命、尺度のパラメータ
$m$	形状のパラメータ
$\gamma$	位置のパラメータ
$\mu$	摩擦係数
$\sigma$	応力、変形抵抗
$\epsilon$	ひずみ

## 第1章

### 緒言

#### 1. 1 背景

##### 1. 1. 1 鍛造とは

鍛造の歴史は古く青銅器時代（約4,000年前）にさかのぼり、鉄の鍛造を始めたのは、3千数百年前と推定され、古代より中世にかけて体系され18、19世紀にはスチームを動力としたハンマーが出現して、近代鍛造の基礎が確立されたと言われている。

我が国においては1909年にフランスからボードハンマーを、また1911年には、ベルトハンマーが軍の工場に設置されたのが機械式鍛造機の初めといわれ、第一次、第二次世界大戦を経て設備、技術の両面にわたり進歩を続けた。

自動車産業の大量生産方式は、鍛造部品の需要を拡大し、鍛造機械の機能向上、自動化による量産方式の確立、さらには鍛造部品に対するニーズの変化に即応した冷間・温間鍛造の出現などにより今日に至っている。

自動車用鍛造部品は、機能部品として多くの部分に使用されているが、鑄造部品あるいは板金プレス部品に置き換わったものもあり、現在では強度を必要とする部分、あるいは機械加工が困難な形状部品等に使用されているのが実態である。特に1950年代には在来工法の熱間鍛造に加えて冷間鍛造法が導入され、自動車部品への採用も図られ、また1960年代に入ると両工法の利点を兼ね備えた温間鍛造法も開発されて最近自動車部品にも活用されるようになってきている。

鍛造とは、鋼材あるいは非鉄金属材料を、プレスを用いて金型により塑性加工する工法である。鋳造に比べて、鍛流線を包含することにより、一般により強度の高い製品を得ることが出来る。また板金プレス品に比べると、厚みが可変のために自由度の高い形状を得ることが出来る。これら粉末焼結や、樹脂成形など素形材工法の中では、鍛造は主流の工法であるが、お互いに競合する関係があり、常にコストダウンへの技術開発が必要とされる状況にある。

鍛造温度により、3つの工法に分けられる。熱間鍛造は、金属の再結晶温度以上での加工を指すが、鋼の場合は通常約1200℃付近の鍛造温度となる。材料を加熱しないで鍛造する方法を冷間鍛造と称している。その中間の温度域での鍛造は、温間鍛造と呼ばれるが、実用上800℃～900℃を指すことが多い。

現在は熱間、冷間、温間の各鍛造工法が混在すると同時に、各工法の組み合わせ工法も実用化されて鍛造部品の高精度化がはかられている。この動きは、機械加工取代を削減するニアネットシェーブ、あるいは鍛造品の黒皮肌をそのまま使用するネットシェーブという言葉にも現れており、それぞれの鍛造でも年々スリム化が加速されている。

材料費	設備償却費	金型費	労務費	操業用材	エネルギー費	仕損費
-----	-------	-----	-----	------	--------	-----

図1-1 鍛造部品の原価構成

### 1. 1. 2 鍛造品のコストダウン

鍛造、鋳造、板金プレス、粉末成形、樹脂射出成形、切削といった部品成形工法は、常に競合関係にあり、その改善を怠ったものは、脱落していく立場に置かれている。そこで常にコストダウンの方策が繰り返されている。この動きは、終わりのない活動であり、年々加速されていくことになる。

一般的な鍛造部品の原価構成を、図 1-1 に示す。主な項目について次に述べる。

#### (1) 直接材料費

直接材料費とは、製品の一部に使用される材料のことで、鍛造の場合は投入する鋼材のことを指す。鋼材は、鉄鋼メーカーで精錬、鋳造、圧延され棒鋼を成形するため材料そのもののコストダウンは、鉄鋼メーカーマターとなるが、鍛造技術者の直接材料費低減の方法としては、材料歩留り向上が上げられる。材料歩留りとは、投入した材料重量に対する製品重量の比率を指す。鍛造金型設計、特に予備成形形状の工夫により、この材料歩留り向上を図ることが可能となる。

#### (2) 設備償却費

部品 1 個当たりにかかる設備費は、総投資額を償却年数中の生産個数で割った数字である。現在生産中の部品のコストダウンには、この原価は直接関係はない。しかし、設備を購入するときに、いかに安い設備、あるいは適切な設備を購入するかが問題となる。

#### (3) 金型費

鍛造金型は、成形する材料よりも充分に高い強度が要求されるため、またそれを加工するために、硬い切削工具が必要なため、非常に高価なものとなる。金型費そのもののコストダウンと共に、部品 1 個当たりの価格は、型寿命に大きく左右されるため、この寿命の向上がコストダウンの大きな鍵を握っている。

#### (4) 労務費

一般に鍛造加工の生産性は、高速な故に高い。従って他工法に比べて、労務費の比率は比較的低い。設備の高速化と自動化による省人によって、この費用のコストダウンは達成できる。また、鍛造後の熱処理の省略等、工程の省略によっても達成される。稼働率の向上もこの数値を左右するので、金型交換時間の短縮なども労務費のコストダウンに寄与する。

(5) 操業用材費

鍛造の場合、金型潤滑剤がこれにあたる。廉価材の使用や、使用量の最小化によりコストダウンは達成される。

(6) エネルギー費

熱間鍛造の場合、莫大な電気代を使用するので、この比率は高い。直接材料を低減すると、この費用は比例的に少なくなる。また鍛造後の熱処理にも灯油費がかかるが、熱処理工程の省略は、このエネルギー費の低減に寄与する。

(7) 仕損費

不良品の廃却による損失費用である。鋳造品に比較して通常原価構成上はほとんど無視できるのがこの仕損費であるが、品質が確立されていない部品では、大きなウェイトを占める。

1. 1. 3 鍛造シミュレーション技術と鍛造品のコストダウン

鍛造シミュレーション技術については、その詳細は第2章にて述べるが、大別して次に述べる3つに分けられる。

(1) 実材料シミュレーション

鍛造シミュレータと呼ばれる、プレスモーションのシミュレータを用いて、実物のシミュレーションを行う方法。通常、プレスモーションが可変であり、多くのタイプのパターンを再現できる。設備購入仕様の最適化などに効果がある。また鋼材の基礎データを取得するなどの同条件の実験に多用される。

(2) プラスティシンによるモデル実験

プラスティシン（英国の商標）と呼ばれる、熱間の鋼の挙動のシミュレーション専用

の粘土を用いて、樹脂の金型によって行う方法である。金型が樹脂製のため、型形状変更が容易であり、試作回数の低減などに効果がある。

### (3) コンピュータシミュレーション

FEMの進歩により、コンピュータ上での鍛造シミュレーションができるようになった。現在、2次元、軸対称形状を対象としたものが主流である。3次元は開発段階であり、解法は確立されているものの、型形状や予備成形形状の入力に多大な工数を必要とするのが現状である。

大きく分けて、弾塑性変形を仮定したものと、剛塑性変形を仮定したものに分かれる。通常、鍛造のような大変形の問題には後者が用いられる。本論文で用いたソフトウェアは、米国パッテル研究所が開発した「DEFORM」というプログラムであるが、これも剛塑性有限要素法のプログラムである。

これらの鍛造シミュレーション技術により、さまざまな鍛造品コストダウンへの取り組みが続けられてきた。

古くは、滑り線場法、スラブ法などが極簡単な、鍛造の問題に適用されてきた[1~5]。しかし、形状の単純化という制約が多く、実用的なものとは言い難かった。

上界法は鍛造に適用する例が1980年代にはいつてから目立ってきた。濟木らは、上界法を用いて、熱間鍛造における2次元材料流動の解析を行った[6]。また木内らは上界法を発展させ、鍛造用解析手法UBETを開発し、比較的単純な形状の鍛造品の解析に用いた[7~10]。

この1980年代の初めから、剛塑性有限要素法による鍛造シミュレーションも開発されてきた。UCパークレーの小林教授の流れを組むグループからは、ALPIDの開発が進められた[11]。このALPIDを用いた鍛造への適用例もいくつか報告されている[12~14]。一方日本でも、小坂田らのグループが剛塑性有限要素法を用いた鍛造シミュレータの開発を行った[15, 16]。

この剛塑性有限要素法とは違う流れに、境界要素法の適用がある。木原らは、弾/粘

塑性問題へのBEMの適用を試みた[17]。また落合らは鍛造用金型の温度、熱応力解析を試みた[18]。しかしこの手法は、鍛造などの被加工材の変形に適用するにはその後の研究は続かなかった。

1980年代の後半になると、この剛塑性有限要素法を用いた鍛造変形への適用が盛んになる。豊島ら神戸製鋼のグループはNASKAという剛塑性有限要素法プログラムを開発し、ボス付きディスク[19]、ブーリ部品と段付き棒の5段フォーマ部品[20]、軸受け鋼中空リング[21]、厚肉球殻の絞り成形[22]など鍛造への適用を図った。

1990年代にはいると剛塑性有限要素法の特殊な適用法が報告されている。ALPIDから発展したDEFORM[23]というプログラムを用いて、ダメージバリュー評価や密度変化解析などさまざまな解析が報告されている[24, 25]。

また3次元への適用も盛んになった。フランスのChenotらは、FORGE3というプログラムを開発し、スパイダースライドの鍛造の3次元変形のシミュレーションを行った[26]。また、クランクシャフトの予備成形の3次元シミュレーション結果なども報告されている[27]。1990年代にはいりコンピュータの高速化にともない、いよいよシミュレーション技術が実用化されてきた。

一方のプラスチックシミュレーションは、古くからある技術であり、方法そのものは1950年代から使われているものである[28~30]。粟野らは、1960年代に球や段付き軸の熱間転造法や型鍛造の変形過程観察に用いた[31, 32]。また春日らは、1960年代後半から、1970年代にかけてH型の鍛造型内における材料挙動の観察に用いた[33, 34]。Altanらは、モデル実験での加工荷重から目的とする荷重の推定方法を考案した[35]。

1970年代にはいると、クランクシャフトの材料歩留り向上を目的としてモデル実験が行われた[36]。また閉塞鍛造のシミュレーションにも用いられた[37]。1980年代では、リップ付きディスクの鍛造のプリフォーム形状の決定のための実験に用いられた[38]。

その後は、FEMが隆盛になり、プラスチックによるモデル実験は、FEM実験の確認に使われることが多くなった[24]。しかしながらFEM 3次元解析が実用化一歩手前の現状では、複雑な3次元形状のシミュレーションではまだまだ有効と思われる。

## 1. 2 著者と鍛造及びシミュレーション技術との関わり

著者は、16年前の1981年に日産自動車（株）に入社し、以来一貫して自動車部品製造のための鍛造技術業務に従事している。従ってこの技術への関わりが深く、今回の論文作成を機会にいままでの業績をまとめる意味も含めて、冒頭のようなテーマを設定した。鍛造シミュレーション技術との関わりは、この16年間の内でも日が浅く、主な業績は1989年以降ということになる。従ってそれ以前にも意識の中では、鍛造工場での日常の業務ともう少し理論的なアプローチを近づけたい気持ちはあったものの、立場上開発的な仕事ができしたのは1989年以降ということになる。

鍛造技術は1980年代に、シミュレーションの重要性が提案され始めたものの、現実には、勘と経験に頼っているのが実状であった。1980年代後半になってコンピュータ技術が目覚ましい進歩を続けると、今まで計算時間やハンドリング等がネックとなっていたFEMの利用が活発となった[39]。著者が入社以来8年間を鍛造工場の現場で暮らし、シミュレーション技術の有用性を肌で感じた後、この分野の開発業務に転じたのは、まさにこの時期であり、業務上適時的な移行であったと感じている。またシミュレーション技術には欠かせない現場での経験的知識というものが、8年間の間に著者自身の中に蓄積していたことは非常に幸運であった。このため鍛造シミュレーション技術の動向は、偶然にも著者の歩んできた道と連動している部分が大いいため、背景として述べるには特異な例になるかもしれないが、敢えて著者個人の道程を振り返ってみたい。

著者は1981年に入社後、リアアクスルシャフトという後輪駆動車の熱間及び冷間鍛造で成形する部品の担当になったのを皮切りに、コンロッド、ファイナルギア、リバースギア、コンロッドキャップ、スパイダースライド、フロントホイールハブ、ナックルスピンドル、クランクシャフト等の主力部品の担当を担当した。部品の担当は代わったものの、この間の業務としては、新部品の立ち上げ、これに伴う新ラインの設置、そして鍛造部品の原価低減の活動である。このうち最も重要な活動は、最後の部品原価の低減であり、鍛造エンジニアの仕事を表現すれば、「いかに鍛造部品を、品質を落とさ

ずに安くつくるか?」に尽きると言っても過言ではない。著者が実際に手がけてきた、この原価低減活動のいくつかを紹介しよう。

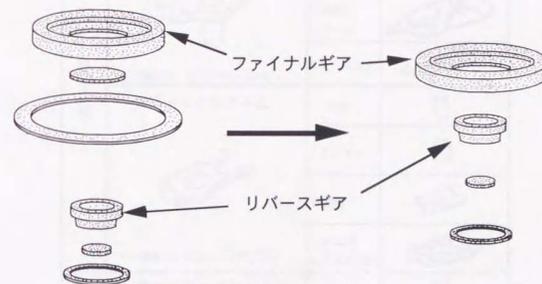


図1-2 密閉親子取り鍛造

1982年には、ファイナルギア、リバースギアというトランスミッションの部品の担当になった。当時、ファイナルギアは3000トンプレスで、リバースギアは1000トンプレスで、それぞれ別々に生産されていた。サイズ的にリバースギアがファイナルギアの中央にすっぽりと収まることから、2部品同時の鍛造で、いわゆる親子取りを行うことになった(図1-2)。ついでに外バリを廃止し、密閉鍛造を実施することにより、大幅な直接材料の低減と労務費の削減を図った。

1983年には各種部品の金型寿命向上活動、1984年にはクランクシャフトを中心とした直接材料原低活動を行ったが、これらと並行して、1983年から1985年にかけては、大型ナックルスピンドルの自動化という大きなテーマがあり、これに従事した。これは、図1-3が示すようにナックルアームとナックルスピンドルという2部品を一体化して、直接材料の低減を図ると共に、ロボットを用いて労務費の低減を図るものである。鍛造ロボットを図1-4に示す。鍛造作業にロボットを用いてライン全体を自動化するのは、日本で初めての試みであった。

		鍛造方法	部品形状
旧工程	 別体ナックルスピンドル <二個取り 5000トンプレス>	材料	
		1.ロール成形 2.ベンディング	
		3.粗地 4.仕上げ	
		5.トリミング	
		別体ナックルアーム	材料
1.アブセット			
2.粗地			
3.仕上げ 4.トリミング			
新工程	 一体ナックルスピンドル <一個取り 3000トンプレス>	材料	
		1.アブセット	
		2.粗地	
		3.仕上げ 4.トリミング	

図1-3 ナックルスピンドル一体化による原価低減

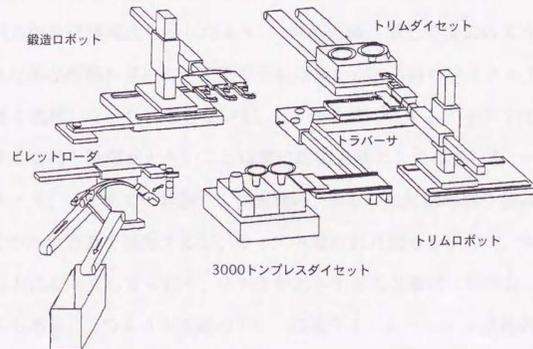


図1-4 鍛造ロボット

1986年には、クランクシャフトのバリを切断するという、特殊な工法に従事した(図1-5)。これは、鍛造工程につきもののスクラップの物流を改善するもので、原価構成上、外注作業の低減として効果の大きいものであった。

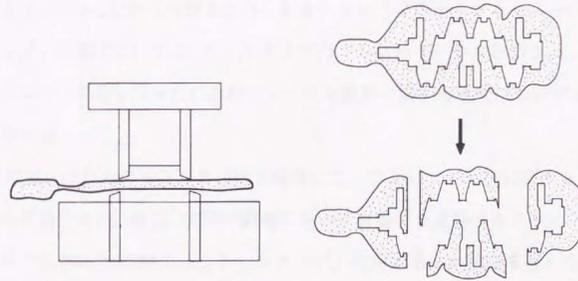


図1-5 クランクシャフト鍛造バリ切断

1987年には、本格的な非調質鋼の採用を行った。非調質鋼はバナジウム鋼を用い、これをクランクシャフトに適用し、エネルギー費の削減、在庫の縮小、リードタイムの短縮、熱処理工程省略による労務費低減等を図った。

これらの活動は、著者の主な原価活動に関する初期8年間の活動である。図1-1で典型的な鍛造部品の原価構成比を示したように、原価低減に関してはこのように攻めどころが多く、また部品種類も多いため定型の活動は無いが、活動のサイクル上で、効果のあることは速く処理しなければならないが、各原価低減に関するアイデアの検証というものに投入する資源と時間が大きいことは常に問題意識として存在した。一つの原価低減の目的があつて、いままでの経験や、他業種の、あるいは外部の取り組みに関する情報から、いくつかの方策を提案するが、やってみなければ解らないので、実際に開発時間や費用が莫大になってしまったり、リスクが大きすぎると事前に判断し、あきらめてしまうケースもある。このような意識の中に、鍛造シミュレーション技術の利用に関するニーズを常に感じていたのは事実であった。

1989年には、これらのニーズに対して、インフラストラクチャの整備を開始した。

シミュレーションを3つのタイプに分けた。即ち、実機でのシミュレーション、プラスチックというシミュレーション用の粘土を用いたモデル実験、そしてコンピュータシミュレーションである。これらの3つのタイプのシミュレーションが可能な体制作りを目指し、実験室の構築に従事した。特に実機シミュレーションは、実際の試作が生産設備を用いることから、なかなか機会が得られないという発想からかなりニーズの高いものではあるが、機構については、多くのタイプのプレスモーションのシミュレーションが行えるよう、開発を行った。これらツールの整備に関する研究については、第2章で詳細を述べる。

1990年には、これらのインフラ技術を利用して、コンロッドの疵に関するシミュレーションを実施した。これは、実際の鍛造において典型的な疵発生メカニズムについて、プラスチックとFEMシミュレーションが、有用であるか検証を行ったものである。この活動は、1996年まで継続して開発した鍛造欠陥診断システムの基礎となっているので、第5章に詳細を述べる。

1991年には、FEMの特殊な用途として、新しく開発したアルミニウム鋳造鍛造工法の密度変化シミュレーションを行ったのでこれについては、第3章で述べる。

1994年には、クランクシャフトの材料歩留り向上という大きなテーマを与えられ、3次元では複雑な故、FEMシミュレーションでなく敢えてプラスチックのシミュレーションを用いて、新しい直接材料低減技術の開発を行ったので、これについて第4章で報告する。

最後に、1995年に行った鍛造金型の寿命向上に関する研究では、実機シミュレーションとFEMの弾性体と塑性体の連成シミュレーションの比較を行い、金型寿命向上につなげた例を第6章で報告する。

シミュレーション技術は、それ自体は目的ではなく手段である。著者は、シミュレーション技術そのものは何も開発していないが、現場のエンジニアとして実際に使えるものにするためにはどうしたらよいかを主眼に研究してきた。また、シミュレーションを行った例をワークステーションのハードディスクの中に眠らせておくことは場当たり的な対応となってしまうことから、これを簡単な形で有効利用できる体制を作るために、

エキスパートシステムの開発を行った。シミュレーションの結果を他人に分かり易い形で表現するために、マルチメディア技術を用いた。これについては、第5章で述べる。

### 1. 3 研究の目的

前節で述べたように、本研究は、第3章から第6章までの、4つの研究から構成されている。概要を以下に述べる。

#### (1) アルミニウム鋳造鍛造へのFEMシミュレーションの適用 (第3章)

アルミニウム鍛造は素材が鋳造インゴットに比べ高価なため、プリフォームを鋳造で作成し、それを直接鍛造するという工法の開発を行った。この開発途上で、鍛造後の強度を保証するものは、鋳造品に含まれる微小な空孔をいかに鍛造でつぶすか、という命題である。著者はDEFORMという剛塑性有限要素法のプログラムを用いて、密度変化解析を行い、このシミュレーションが鋳造鍛造工法のプリフォーム形状を決定するのに貴重な情報が得られることを確認した。この密度変化シミュレーション方法について述べる。

#### (2) 鍛造品材料節減のためのシミュレーション適用 (第4章)

クランクシャフトのような複雑な3次元変形のコンピュータシミュレーションは、開発途上にある。著者は、クランクシャフト全体の鍛造シミュレーションにプラスチックによるモデル実験を用い、必要な部分的な2次元解析をコンピュータで行うことにより、新しいクランクシャフト鍛造の材料歩留り手法を確立したのでこれについて述べる。

#### (3) 鍛造欠陥シミュレーションと診断システムの開発 (第5章)

鍛造欠陥発生メカニズムは、長年鍛造に親しんだベテランのエンジニアが体得できるものであり、担当者の担当年数の比較的短い大会社などでは、同じトラブルを再発す

る可能性がある。鍛造欠陥の生成メカニズムについてFEMシミュレーションとプラスチックのモデル実験を比較することにより、FEMが有効なシミュレーションであることを確認し、さまざまなパターン欠陥発生シミュレーションを実施した。これを知識データベースとしたエキスパートシステムを開発したのでこの内容について述べる。

(4) 鍛造金型寿命向上のためのシミュレーション適用 (第6章)

鍛造品の中で、鍛造金型費の割合は高く、鍛造品の原価低減には、型寿命向上が重要なアプローチとなる。著者は、鍛造シミュレーションを用い、合わせて信頼性工学手法で、金型寿命のバラツキを考慮した原価低減シミュレーションのアプローチを考案した。本アプローチにおける改善金型寿命の予測方法も考案したのでこれについて述べる。

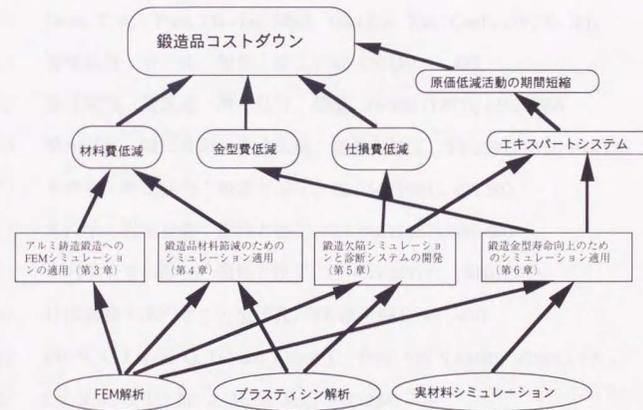


図 1-6 研究と目的とツールの関係

これら4つの研究は、いずれも鍛造部品のコスト低減を目的としており、またいずれも、鍛造シミュレーション技術を応用している。これらを図式化すると、図 1-6 のとおりとなる。

このように、鍛造のシミュレーション技術は、実際に効果を出し始めており、この業界にとって今後有用なツールとして他工法に対して競争力を付ける有用なツールとしてさらなる開発が望まれている。そんな今後の活動に少しでもこの研究が役立てば幸いである。

#### 参考文献

- 1) Kudo, H. : Proc. 10th Japan National Congress for Appl. Mech., (1960), 145.
- 2) Brill, K. : *Werkstattstech.*, 53-10 (1963), 537.
- 3) Dean, T. A. : Proc. 11th Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., (1970), 761.
- 4) 高橋裕男・村上礼：塑性と加工、12-120 (1971), 437.
- 5) 春日保男・堤成晃・濟木弘行：機論, 39-320 (1973), 1352-1366
- 6) 濟木弘行・関口良昭・志水末房：塑性と加工、23-253 (1982), 168-176
- 7) 木内学・村田良美：塑性と加工、22-244 (1981), 495-502
- 8) 木内学・村田良美：塑性と加工、22-246 (1981), 689-696
- 9) 木内学・重田澄夫：塑性と加工、22-251 (1981), 1208-1214
- 10) 村田良美・木内学：生産研究、33-12 (1981), 477-480
- 11) Oh, S. I., Lahoti, G. D., and Altan, T. : Proc. 9th NAMRC, (1981), 83.
- 12) Oh, S. I., S. I. : *Int. J. Mech. Sci.*, 24 (1984), 479
- 13) Oh, S. I., Lahoti, G. D., and Altan, T. : *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, (1982), 145, Pineridge Press
- 14) Wu, W. T., Oh, S. I., and Altan, T. : Proc. 12th NAMRC, (1984), 213.
- 15) 小坂田・坊・森：第34回塑加連講論、(1983)、531-534
- 16) 小坂田・坊・真鍋：第35回塑加連講論、(1984)、41-44
- 17) 木原・告野・石井：第34回塑加連講論、(1983)、313-316

- 18) 落合・山本：第35回塑加連講論、(1984)、85-88
- 19) 金丸・津田・松下・古田・岩井：塑性と加工、32-368 (1991)、1160
- 20) 安部・川崎・松下・高橋：R&D神戸製鋼技報、41-3 (1991)、91
- 21) 竹越・西沢・今井・実成・津田・松下：塑性と加工、(1990)、1400
- 22) 森賀・津田・豊島・松下・安井・石外：材料プロセス、1-5 (1988)、1375
- 23) Oh, S. I., Wu, W. T., and Vedhanayagam, A. : *J. Material Processing Technology*, 27 (1991) 25-42
- 24) Altan, T. and Knoerr, M. : *J. Material Processing Technology*, 35 (1992) 275-302
- 25) Fujikawa, S., Kitamura, Y., and Shimamura, S. : *J. Material Processing Technology*, 275 (1991) 93-110
- 26) Coupez, T., Soyris, N., and Chenot, J. : *J. Material Processing Technology*, 275 (1991) 119-133
- 27) 木下、ラシッド、西山、藤川、木原：型技術、10-7 (1995)、74-75
- 28) Green, A. P. : *Phil. Mag., Ser. 7*, 42-327(1951), 365.
- 29) Cook, P. M. : *Metal Treatment & Drop Forging*, 20 (1953-11), 541.
- 30) 栗野：塑性と加工、1-3 (1960)、203.
- 31) 栗野・落合：名工大報告、7-10 (1958)、709.
- 32) 栗野・団野：塑性と加工、9-88 (1968)、285.
- 33) 堤：塑性と加工、13-133 (1972)、147.
- 34) 春日・堤・済木：機講論、723-3 (1972-3)、67.
- 35) Altan, T., Henning, H. J., and Sabroff, A. M. : ASME Paper No. 69-WA/Prod-9 (1969)
- 36) 西口：昭和50年度塑加連講論、(1975)、281-284
- 37) 和田林・山本・藤本：大阪府立工業技術研究所報告、73 (1978)、38.
- 38) 松下・荒木・佐藤：第34回塑加連講論、(1983)、491-494
- 39) Walters, J. : *J. Material Processing Technology*, 27 (1991) 43-51

## 第2章

### 鍛造シミュレーションのためのツール

#### 2.1 緒言

近年、さまざまな技術分野において、CAE技術の発展に伴いシミュレーション技術の適用が盛んになっている。鍛造技術分野においても、剛塑性有限要素法の理論の定式化に伴い、従来カン、コツに頼っていた生産技術からコンピュータにより変形を予測し、鍛造新部品、新工法開発の期間短縮等を目的とした、総合的なCAE技術が発展しつつある。我々自動車部品鍛造技術者にとっても、このシミュレーション技術が、鍛造技術の理論化、標準化にとって必要であることと、部品設計部門とのサイマルテニアスエンジニアリング活動に必要であると考え、その開発体制を整えてきた。ここでは、その基礎となるツールについて述べることにする。

一般的に言って「鍛造シミュレータ」という用語は、実際にシミュレーションを行うための、どの種類の装置に関しても用いられている。実際のプレスの場合もあるし、コンピュータ上のソフトウェアを指す場合もある。ここで言う「ツール」とは双方を含む。我々が考えているシミュレータには、大きく分けて3つの種類のものがある。一つは、実機で金属を加工するシミュレータである。二つ目は、鍛造で特殊なものであるがプラスチックという、熱間の塑性加工のために用いられているシミュレーション用の粘土を用いたものである。三つ目は、コンピュータ上の有限要素法によるシミュレーションである。もちろん有限要素法でなくても、上解法、UBET、滑り線場法など他の解法も、

このコンピュータシミュレーションの範疇に入るであろう。

この3つは、それぞれの特徴があり、守備範囲に若干の差がある。実材料のシミュレーションは、実際に生産で用いられているプレスをシミュレートするためのものであるが、一般的には、能力が実機よりも小さいため、部品の大きさを小さめに設定する必要がある。従って、あまり大きさが異なると体積効果に変形上無視できない場合に、適用範囲外となってしまう。また小さいモデルを作ることが、より費用がかかる場合には、本来の目的である、開発費用の低減の目的にそぐわないケースも出てくる。しかしその他の条件では、実際に所有していない機械のシミュレーションができることや、温度範囲などにも制約が無く、生産上のスケジュールも気にする必要がないので、有効利用できるという特徴もある。

プラスチックは、一般的に熱間鍛造のシミュレーションしかできないといわれている。しかし表面の滑りを良くするためにワセリン等を用いて、冷間鍛造に適用した例なども報告されている[1]。しかしながら冷間鍛造品形状は比較的単純な形状なので、プラスチックシミュレーションに対するニーズは低い。このプラスチックによるシミュレーションは、いろんな複雑な形状を適用できるので、クランクシャフトの鍛造などのシミュレーションで、3次元FEMではまだまだ不便なものに関しては利用する価値が大いにある。

コンピュータのシミュレーションでは、3次元の開発が進んでいるが、形状の入力等に多大な工数を要するので、現状では2次元や軸対称の問題で盛んに利用されている。

一般的な、3つのシミュレーションの適用範囲を図示すると、図2-1のようになる。この図は、縦軸に対象となる鍛造工法の加工温度、横軸に鍛造部品の形状複雑度を示している。

本章では、この3つの手法を紹介するが、実材料シミュレーションに関しては著者らが開発したので、その開発過程と簡単な適用事例について述べる。プラスチックとコンピュータシミュレーションに関しては、本研究に共通して用いたインフラストラクチャーについて紹介する。

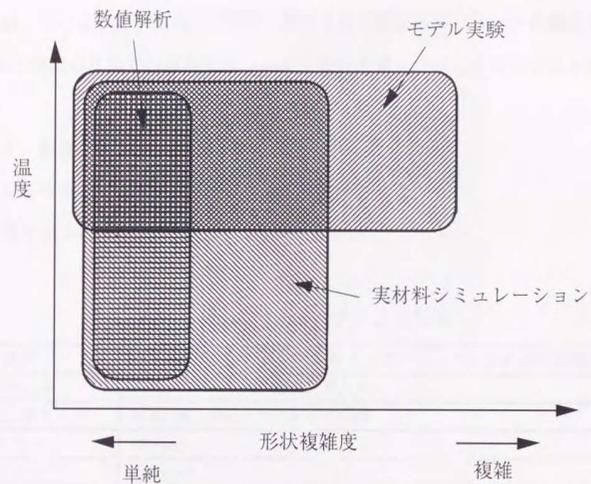


図 2-1 シミュレーション適用範囲

## 2. 2 鍛造シミュレータの開発 [2]

個々の鍛造品に対する最適な鍛造条件の決定、あるいは被鍛造材の成形性、変形抵抗等の基礎的なデータの収集に当たっては、一般的に種々のスライドモーションを有する鍛造プレスを使用するか、あるいはプラスチック等を用いたモデル実験を行っている。最近の鍛造では、FMS化への要求が益々高まる傾向にあり、このような実験による試行錯誤が時間的に許されなくなっている。

コンピュータによる鍛造プロセスのシミュレーションが近年盛んに試みられ、一部ではほぼ確立されているが、金型潤滑、金型温度などの境界条件によるバラツキが大きく、その適用が制限されている。

このような境界下で、機能的には実用生産設備と同等の性能を有し、かつシミュレータとして基礎的なデータの収集もできる鍛造シミュレータが求められている。

ここでは、このような状況の中で設計、製作された鍛造シミュレータの概要を紹介する。さらに、同様の設備で行ったアルミニウム合金の鍛造性の比較評価結果を報告する。

## 2. 2. 1 鍛造シミュレータの概要

### (1) プレス本体

主要仕様を表 2-1、外観図を図 2-2 に各々に示す。

表 2-1 鍛造シミュレータの主要仕様

型式	HCF-500 整型ストレートサイドプッシュダウン式油圧型鍛造プレス
制御方式	アキュムレータ駆動サーボ方式
加圧能力	5000 kN (油圧 17 MPa において)
デイルイト	890 mm
ストローク	290 mm
スライド下面寸法	RL 800 × FB 800 mm
スライド加圧速度	3~250 mm/s
メインポンプ	185 l/min × 21 MPa
メインポンプ	75 kw × 6 P

本鍛造シミュレータにより被鍛造材の変形抵抗、変形能、摩擦係数、温度特性等及び型鍛造時の充満率、きず、割れ等の鍛造成形特性を精度良く測定する必要がある。そのため、次に示す点に注意して本設備を開発した。

- |                   |  |
|-------------------|--|
| 1) フレーム           | 剛性の強度の確保   |
| 2) スライド位置<br>検出装置 | フレームの伸び及びスライドの圧縮<br>変形による誤差の考慮                   |
| 3) 荷重測定           | 熱、スケール対策、プレス作動油温及び鍛造成<br>型時の加圧方向に対する<br>背圧の影響の防止 |
| 4) 金型予熱装置         | 鍛造品の精度、表面性状等に影響を防止するた<br>めの金型温度の再現性の確保。          |



図 2-2 鍛造シミュレータ外観図

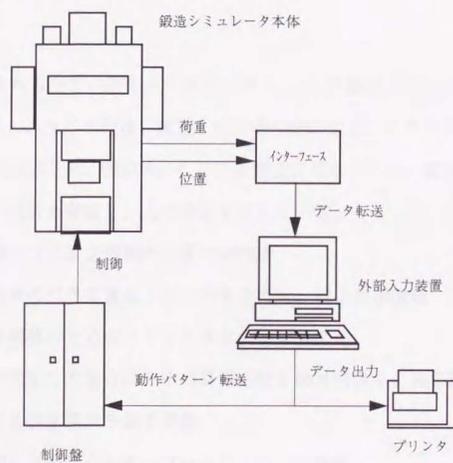


図 2-3 鍛造シミュレータ制御図

## (2) 油圧システム

本設備の駆動源の特徴は省エネ、省スペースを考慮し、アキュムレータ方式及び最大流量 4400 リットル/min の大流量サーボバルブによりスライドの各種作動モーションを設定通りに制御している点である。

## (3) 制御システム

システムのハードはシーケンサ、パーソナルコンピュータ、マイクロコンピュータから構成されている (図 2-3)。システムの制御サンプリング周期は、高応答性が要求されているため 1 ms とした。バネ、質量系をモデル化して系の応答性を検討し、次のような補償及び制御方法を付加している。

- 1) 速度フィードフォワード補償
- 2) 差圧補償
- 3) 学習補償
- 4) 不感帯補償
- 5) 待ち制御

## (4) 操作性

本設備に適用される全ての運転モードのパターンは、対話式にパーソナルコンピュータから設定される。スライド位置、荷重、圧力等の測定値は、リアルタイムでパーソナルコンピュータに転送され、測定後、CRT画面上に表示される。測定対象、測定条件、及び測定データの解析を考慮し、次の機能を有している。

- 1) 測定サンプリング周期の任意設定機能
- 2) 測定結果のCRT画面上での任意な拡大、縮小表示機能
- 3) データ編集のためのファイルメンテナンス機能
- 4) 異常が発生した場合に、その異常部位と異常内容をCRT画面上に表示する異常表示モニタ機能
- 5) 測定データのプリンタ、プロッタへの出力機能

## 2. 2. 2 本機の特徴

本鍛造シミュレータは、油圧プレスではあるが上記の機構により、そのストロークモーションが、自由に細かく制御できるため、鍛造プレスとしてさまざまなタイプのプレスをシミュレートできる(図2-4)。鍛造プレスでは、(1)ストロークが決まっている機械式プレス、(2)最大荷重が決まっている油圧プレス、(3)エネルギーが決まっているスクリュープレスやハンマーの3つのタイプのプレスがあるが、いままでのシミュレータでは、最初の2種類のプレスのシミュレーションのみが可能であったが、(3)のエネルギータイプのシミュレーションも可能にした。

荷重と微小ストロークを瞬時に(1ms)計測し、最初に想定したエネルギーから減算を繰り返し、制御することによってエネルギータイプのシミュレーションを可能にしたのが、本機の大きな特徴である。

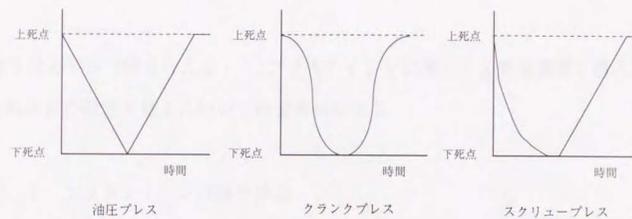


図2-4 プレス種類によるストロークパターン

下降中のラムスライドの上死点からの距離  $x$  に対して、次の瞬間の速度を式(2-1)により計算し、新たなラムスライド速度として設定しラムスライド加工パターンを作っていく方式である。

$$v(x) = \left( v_0^2 - \frac{2}{m} \int_0^x F(x) \cdot dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 (2-1)}$$

$F(x)$  ; 変位に対する荷重曲線

$v_0$  ; ラムスライドの初期速度

$m$  ; ラムスライド質量

### 2. 2. 3 まとめ

本鍛造シミュレータは、実機に近いシミュレーションが得られるので、サイズ効果が無視できる場合は、ミニチュアモデルを用いた実験に効果的と思われる。また、設備投資を検討する場合、どのようなタイプのプレスを購入したらよいかは、比較検討が難しいが、本機を用いればシミュレーションが可能となる。また数値解析シミュレーションの精度を向上するために、計算に用いる鍛造基礎特性を収集する必要があり、データベースを構築するため実材料を用いた試験が必要となるがこれにも用いることができる。

著者は、後に金型の応力解析を行う際に、計算機シミュレーションの結果検証に本機を用いたので、第6章にて詳細を報告する。

## 2. 3 プラスティシンシミュレーション

著者らはモデル実験を行えるよう、プラスティシンに関する必要な設備を購入設置した。それぞれの設備と粘土について概要を紹介する。

### 2. 3. 1 プラスティシン試料の作成

プラスティシンとは、鋼の熱間変形に応力-ひずみ関係が相似している油粘土材料で英国の Harbutts' Plasticine 社により製造されている。別に製作した木型、樹脂型を用いて試作をすることにより熱間鍛造のシミュレーションが可能となる。素材形状と型形状を比較的自由に換えられるので、繰り返し試行錯誤を必要とする技術開発には、その期間短縮に大きな効果がある。

図2-5に試料作成方法を示す。購入したプラスティシンは、所定の形状に加工する必要があるが、鍛造には円柱ビレットが使用されることが多いので、円柱状に成形する押出機が必要となる。ここで、重要なのは、プラスティシン内部に気泡があってはならないことである。脱気、混練、押出を同時に行うために真空土練機(図2-6)を購入した。

真空土練機の出口に、所定の径のダイスを付けておけば、求める径のビレットを作成

できる。角材や板材が必要な場合は、別に圧延加工が必要である。図2-7に圧延機を示す。

所定のシミュレーション性能を持たせるため、時効が必要であるが、一定の温度環境下での時効が必要となるので、時効炉（図2-8）を用意した。

積層材を用いる場合は、時効前に別の工程が必要となる。積層材は色の異なった2種類のプラスティシンを交互に積層させて作るもので、これにより変形中の塑性流動が観察しやすくなる。圧延等で板状に成形し、切断、圧着そして時効が必要となる。

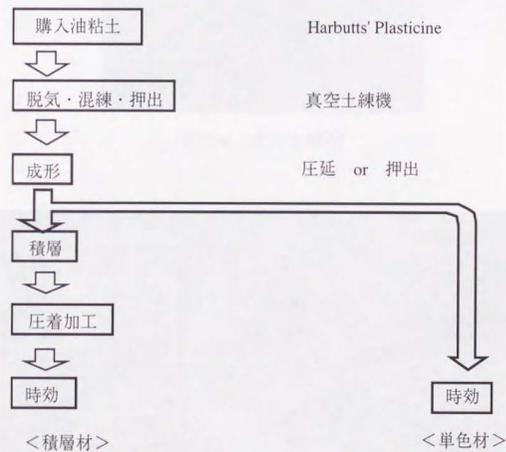


図2-5 プラスティシン試料作成方法

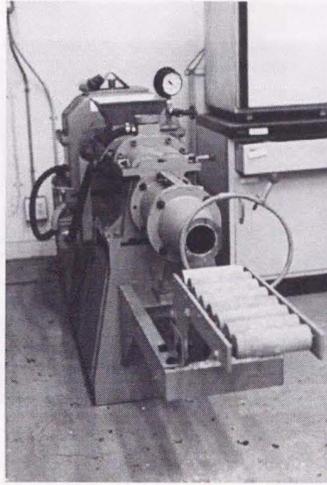


图 2-6 真空土練機

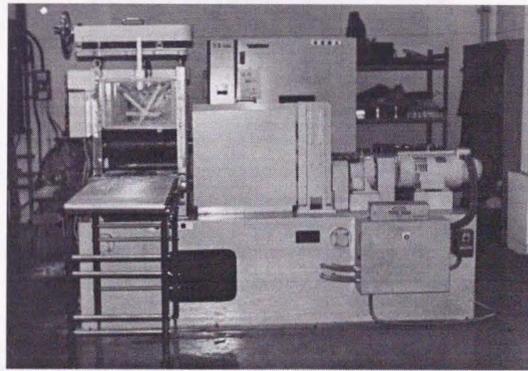


图 2-7 压延機



図 2-8 恒温炉

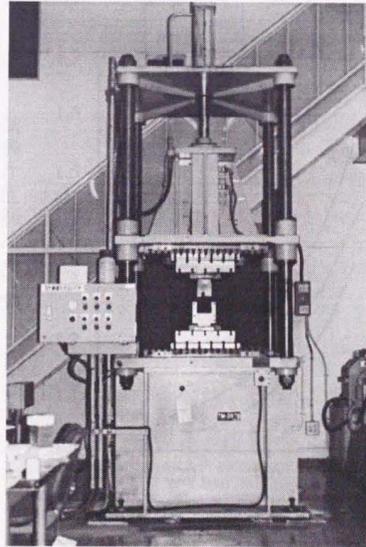


図 2-9 10トン油圧プレス

### 2. 3. 2 プラスティシンの成形

成形プレスは他の実験の用途に用いていた 10 トンの油圧プレスを手入れし、移設を行った。(図 2-9) ストロークは 500mm で 100mm/s の定速プレスである。

#### (1) 材料特性

プラスティシンは鋼の熱間塑性変形に相似する特性を持っている。恒温層の保持温度、保持時間をパラメータとして圧縮の応力ひずみ線図に近くなる条件を探し、温度 20℃、保持時間 24 時間を得た。

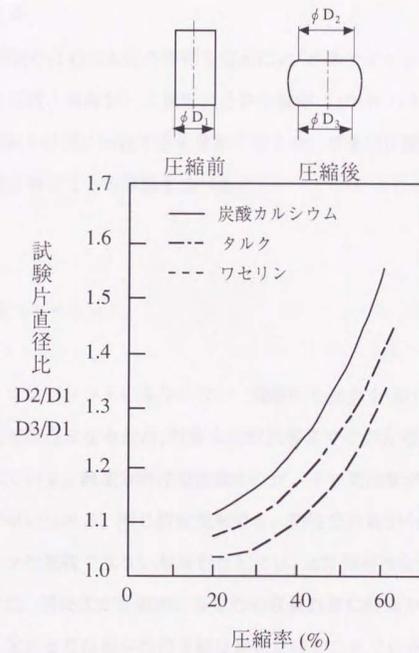


図 2-7 プラスティシン圧縮試験

## (2) 潤滑剤と潤滑特性 [3, 4]

図 2-10 に示す圧縮試験により、炭酸カルシウム ( $\mu=0.3\sim 0.6$ )、ボロンナイトライド ( $\mu=0.3\sim 0.95$ )、ワセリン ( $\mu=0.02\sim 0.08$ ) の 3 種類の潤滑剤について摩擦係数を得た。

離型性は、炭酸カルシウム、ボロンナイトライド (タルク) については良好であるが、ワセリンについては悪い。

### 2. 3. 3 まとめ

著者はモデル実験のために上記の体制を整えた。プラスティシン材料の作成に必要な設備 (土練機、圧延機、恒温炉) と成形に必要な設備 (10 トン油圧プレス) を導入することにより、実験を容易に実施できる体制を整えた。本研究に関する実験結果については、第 4 章、第 5 章にてその詳細を述べる。

### 2. 4 FEM シミュレーション

有限要素法は、コンピュータの進歩に伴い、飛躍的な進歩を遂げてきた。特に弾性変形の場合は構成式が線形になるため、計算も比較的容易でその分複雑な 3 次元形状の変形解析を可能としている。鍛造分野は塑性変形だが、その変形量が大きいため、通常剛塑性有限要素法が用いられる。同じ塑性変形でも、塑性変形量が小さく、弾性変形によるスプリングバックが無視できない板成形などには、通常弾塑性変形解析が用いられる。この剛塑性解析では、構成式が非線形になるため収束計算に時間がかかり、実用レベルでは対象形状が 2 次元または軸対称の単純な形状に限定されていた。現在では、計算機の飛躍的な高速化により 3 次元シミュレーションが実用可能な範囲に近づきつつある。しかし、計算は速くなくても、複雑形状の部品の金型形状や予備成形形状を定義するの

に莫大な工数がかかってしまうので、まだ実用段階とは言い難い。

著者は、この剛塑性有限要素法のソフトウェアのベンチマークを経て、鍛造分野に適合するものとして米国 Scientific Forming Technology 社開発のプログラム「DEFORM」を購入、使用することにした。本節では、この DEFORM の紹介を行う。

#### 2. 4. 1 DEFORM [5]

DEFORM の初期開発は、1970 年代に米国カリフォルニア州 UC バークレー校の小林教授並びに C.H.Lee 博士により行われた。同研究は、世界最大の民間委託研究機関である米国バツェル記念研究所の S.I.Oh 博士に引き継がれ、鍛造用途の汎用有限要素プログラムである ALPID (Analysis of Large Plastic Incremental Deformation) として製品化された。その後、同製品の開発、販売、サポートは、Scientific Forming Technology 社に移管され現在に至っている。

材料の変形挙動の解析を行う DEFORM は、解析エンジン、プリプロセッサ、ポストプロセッサ及び自動リメッシング機能より構成されている。概要を以下に示す。

##### (1) 解析エンジン

最新の有限要素法を活用して、材料の等温や非等温的な変形や熱伝導の解析を行う。材料モデルとしては以下のものがある。

- ・ 塑性変形に関わる剛塑性や剛粘塑性モデル
- ・ 金型の応力計算に関わる線形熱弾性モデル
- ・ 粉末成形に関わる多孔質 (porous) 材料

インターフェースモデルは、任意の物体の間の接触を取り扱うことが可能である。(塑性体-剛体、塑性体-弾性体、弾性体-弾性体及び塑性体-塑性体等) このようなモデルに基づく DEFORM のシミュレーションエンジンの特徴は以下の通りである。

- ・金型を剛体としても変形する物体としても扱うことが出来る。
- ・必要に応じて、座標、径、直線や曲線等を利用して自由に金型形状を作成できる。
- ・金型の荷重は、金型速度、荷重またはエネルギー等により自由にコントロールできる。
- ・円形の金型の場合、回転挙動を設定することが出来る。
- ・ワークピースの流れ応力の設定には、応力、ひずみ速度や温度を利用することが出来る。
- ・Coulomb と定常剪断係数の両方のタイプの摩擦係数が取り扱える。
- ・物体間の界面の熱伝導係数は、時間や接触圧の関数として定義できる。

### (2) プリプロセッサ及びポストプロセッサ

DEFORM は、プリプロセッサ及びポストプロセッサを完備している。プリプロセッサによりインタラクティブにデータの入力を行ったり入力データを様々な方法で検討することが出来る。

ポストプロセッサは、必要とする解析結果をインタラクティブに表示する。例えば有限要素メッシュ、ひずみ、ひずみ速度、温度やダメージファクタ、速度ベクトル及び荷重-変位曲線等のグラフィカルな表示を行う。また、FLOWNET、ポイントトラッキングといった有用な機能も付いている。FLOWNET により、任意の変形段階にある物体上に規定したパターンが時間進展につれて変形する過程を追跡することが出来る。またポイントトラッキング機能により、解析過程を通じて材料上の1点の経過する熱機械的履歴を検討する事もできる。

### (3) 自動メッシュ生成機能及びリメッシング

メッシュの生成は非常に手間を要する作業である。DEFORM では、最適メッシュ密度の分布を自動的に見出し、メッシュを再生成する機能を有している。従って従来のようなメッシュを詳細に設定する煩雑な手続きが必要なくなった。このためシミュレーションの効率が向上した。

#### 2. 4. 2 まとめ

著者は、解析のため上記の体制を整えた。DEFORM の購入にあたっては、他のプログラムとのベンチマークも行った後、購入を決定した。DEFORM のユーザーミーティングは、鍛造各社が集合し、ユーザの立場から必要な機能を論議し、修正要望を出していき、年々バージョンアップされている。本研究に関する解析事例については、第3章、第4章、第5章、第6章、全ての研究に関してこの DEFORM を用いたので逐次紹介する。

#### 参考文献

- 1) Altan, T. and Knoerr, M. : *Journal of Material Processing Technology*, 35(1992), 275-302
- 2) 池田・田渡・桐本・藤川・鳥村：第43回塑加連講論、1 (1992)、293-296
- 3) 栗野・団野：塑性と加工、13-141 (1972-10) 768-775
- 4) 小野・五十嵐・岩澤・田中：第33回塑加連講論 (1982) 391-394
- 5) Oh, S. I., Wu, W. T., and Vedhanayagam, A. : *J. Material Processing Technology*, 27 (1991) 25-42

## 第3章

### アルミニウム鋳造鍛造へのFEMシミュレーションの適用

#### 3.1 緒言

本研究の主目的である鍛造品のコストダウンでは、鍛造工法の内側だけでの努力ではなく、他の工法と競合しながらも、お互いの工法の欠点を補い合うような最適な組み合わせも進めていかなければならない。そこで近年自動車部品の製造技術における工法の複合化が注目されつつある。著者もその複合方法の一つであるアルミニウム鋳造鍛造工法の開発に取り組んだ。この新しいプロセスは、機械加工前の粗材の製法として鋳造により製造されたプリフォームを鍛造する工法のことである。

実験の結果、この工法において高い強度と伸びを得るためには鍛造工程において鋳造粗材に存在する微小空腔を完全につぶすことが非常に重要であることがわかった。そこで著者はバッチル研究所による鍛造解析用プログラム「DEFORM」を用い、ちょうど粉末鍛造の場合とおなじように、この鍛造中の鋳造プリフォームの密度変化の解析を行った。この結果は実験結果と良く一致した。このシミュレーションを用い、著者は鋳造鍛造工法に適したプリフォーム形状を設計することができ、鍛造後に欠陥のない製品を低コストで得ることができたので以下に報告する[1]。

### 3.2 アルミニウム鍛造鍛造工法

自動車部品への軽量化の要求は年々高まってきている。この中で材料的にはいままでも鉄、鋼を使用していた部品をアルミニウムに置き換える動きが顕著である。鍛造分野ではアルミニウム鍛造という工法がその意味で注目されている。しかし鍛造における鉄からアルミニウムへの置き換えの流れに比べると、アルミニウム鍛造の採用はそれほど顕著ではない。その大きな理由としてアルミニウム鍛造が工法的に原価が高いという問題がある。これは通常アルミニウム鍛造に使用する材料が展伸材と呼ばれるもので、一次加工として押出加工、焼鈍をされており高価な材料であること、また部品形状によっては工程が長い加工費が高い、材料歩留りが悪いなどの理由によるところが大きい。

しかしながらアルミニウム鍛造品は鋳造品に比べ、強度、伸びに代表される機械的性質が優れており、自動車の設計者にとっては捨てがたい魅力がある。もしアルミニウム鍛造品の原価が下がればその用途は飛躍的に拡大される可能性を秘めている。

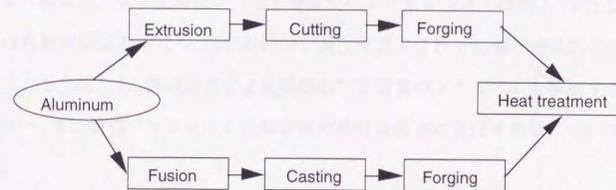


図3-1 鍛造工程と鋳造鍛造工程の比較

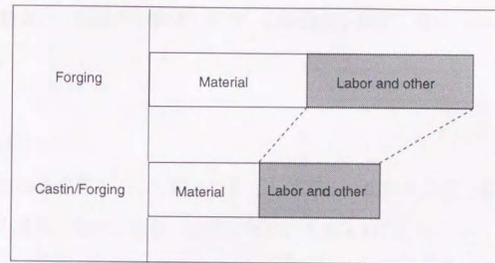


図3-2 鍛造工程、鋳造鍛造工程の原価比較

そこで近年注目されてきたのが、鋳造鍛造という複合工法の採用である[2,3]。この工法は、鍛造の素材に展伸材を用いるかわりに鋳造によって製造されたプリフォームを1工程の鍛造で仕上げる工法で、これを用いれば鍛造工法の良い機械的性質を落とさずに原価を下げる事が期待されている。

従来の鍛造工程と鋳造鍛造工程の比較について図3-1に示す。また原価構成比較グラフを図3-2に示す。鋳造加工、が純増となるが、展伸材が鋳造終了後の原価を上回っており、また鍛造加工費も工程数が少なくなるためトータルコストは約2/3となる。

著者は自動車部品の中でも、特に高い伸び特性を要求される足廻り部品にこの工法を用いることを主眼とし、鋳造鍛造による機械的性質改善のメカニズムを解明するために実験を行い、また鋳造プリフォーム形状が機械的性質改善に及ぼす影響について解析を行った。

### 3.3 ナックルアームによる実験

アルミニウム鋳造品を鍛造することにより、機械的性質がどう変化するか調べることを目的として、ナックルアームと呼ばれる自動車の足廻り部品を使用して試作・実験を行った。通常このナックルアームという部品は合金鋼を用い生産しているが、今回はその生産型を用いアルミニウム鍛造の試作を行った。

これにより casting 後、鍛造後の密度、耐力、引張強度、伸び、硬度、組織の変化を調査した。

### 3. 3. 1 試作条件

材料は通常自動車足廻り部品用 casting 材料として広く用いられている AC4C H を使用した。成分の規格と実際に試作に使用したものを表 3-1 に示す。

表 3-1 AC4CH の化学組成

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Cr	Al
Standard	6.5-7.5	<0.2	<0.2	<0.1	0.2-0.4	<0.1	<0.05	<0.2	<0.05	Rest
Sample	6.52	0.13	0.01	0.004	0.22	0.008	0.005	0.14	0.001	Rest

工程は図 3-3 に示すように AC4C H を砂型 casting し、冷却後再加熱し約 400℃ にて仕上げ鍛造した (図 3-4)。鍛造後、熱間状態で トリミング し T6 処理を実施した。引張試験用サンプルはそれぞれの工程 (casting、鍛造、T6 処理) 後取り出したが、鍛造 T6 後との比較のため casting 後 T6 処理したサンプルも取得した。

casting 品バリエーションとしては、鍛造時の鍛錬比の影響を見るため casting 品の厚さを 3 種類用意した (表 3-2)。

引張試験片の取り出し位置は図 3-5 に示すように A、B 2ヶ所とした。以上の組み合わせについてそれぞれ 3 本づつのサンプルをとり、合計 96 本の引張試験を行った (表 3-3)。

引張試験片形状は図 3-6 に示すものを用いた。

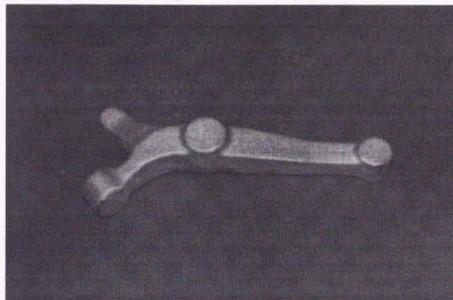


図3-3 鋳造ナックルアーム

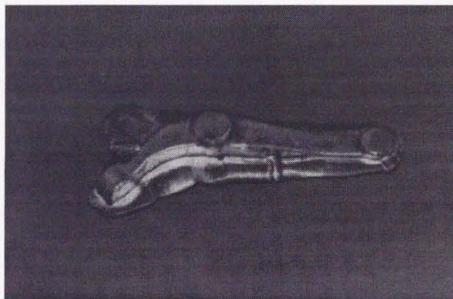


図3-4 鍛造ナックルアーム

表 3-2 鋳造品厚さと鍛練比（鍛造後厚さ；16mm）

Normal thickness ( mm )	20	26	32
Forging ratio	1.25	1.63	2.00

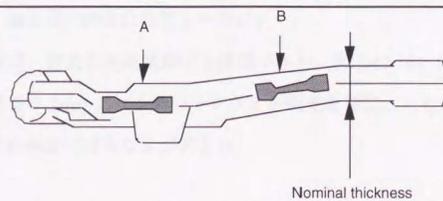


図3-5 引張試験片切り出し位置

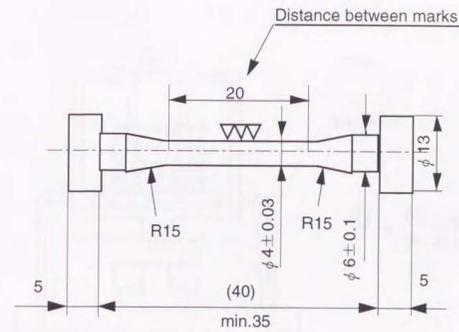


図 3-6 引張試験片形状

### 3. 3. 2 密度調査結果

3種類の鋳造品の密度、およびそれぞれを鍛造した後の部品の密度を測定した。密度測定器は図 3-7 に示すものを使用した。図 3-8 が鋳造品厚さに対する鋳造品の密度を示したものである。鋳造品厚さが厚いほど、密度が低い、すなわち空腔を多く含んでいることがわかる。これは鋳型の断面積が小さいほど押し湯の重力による単位断面積あたりの圧力が大きくなり、空腔が発生しにくいためと考えられる。

図 3-9 は鍛造による密度変化を示したものである。密度の異なる 3 種類の鋳造品はいずれも鍛造後 AC4C 材の理論密度と考えられる  $2.68\text{g}/\text{cm}^3$  にまでほぼ達しており空腔が完全につぶされていることがわかる。

図 3-10、図 3-11 は、標準寸法厚さ 32mm の鋳造品の、鋳造後、鍛造後それぞれの断面を示したものである。鋳造後の断面ではほぼ均等に分散した空腔が観察される（黒い斑点の部分）が、鍛造後の断面には見られない。

この空腔の存在は、断面の硬度試験でも確認できた。図 3-12 は、標準寸法 32mm 品の断面の端から端まで 2mm ピッチでロックウェル硬度を測定したものであるが、鋳造後は空腔があるため硬度のばらつきが大きい。

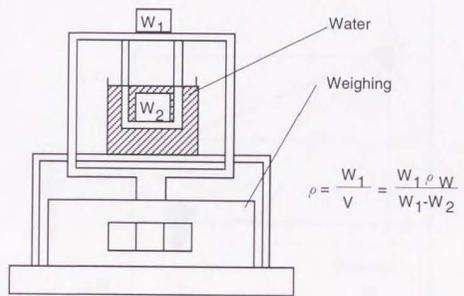


図 3-7 密度測定機

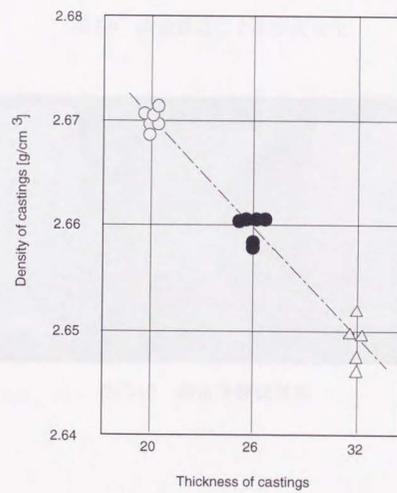


図 3-8 鋳造品の密度と厚さの関係

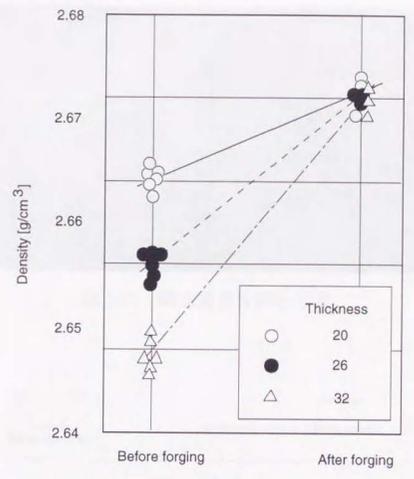


図 3-9 铸造鍛造による密度変化

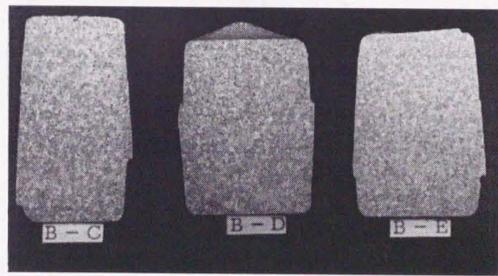


図 3-10 铸造後断面写真

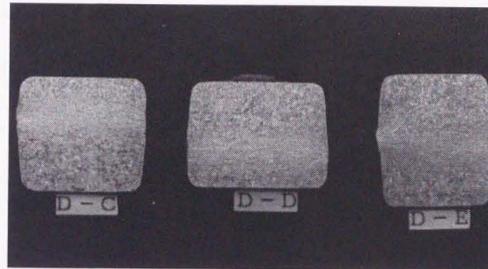


図 3-11 鑄造鍛造後断面写真

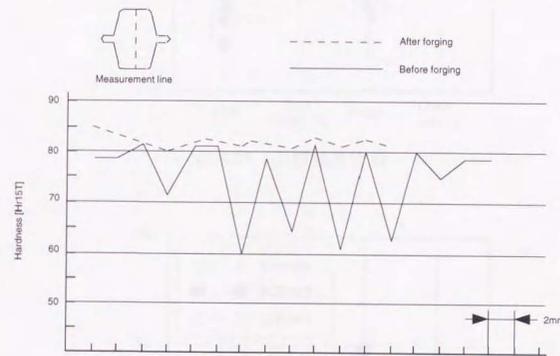


図 3-12 断面上の硬度比較

### 3. 3. 3 引張試験結果

引張強度、伸びの試験結果を図 3-13、図 3-14 に示す。鍛造によって引張強度は約 16%、伸びが 73% 向上した。(各工程 T6 処理の後の比較)

鍛錬比による引張強度、伸びの変化を図 3-15 に示す。この範囲の圧下率ではいずれも鍛錬比による影響は少ないことが認められる。

相対密度と引張強度、伸びの関係を図 3-16 に示すが、機械的性質は相対密度と共に改善されるというよりも、空腔が存在するかしないかに依存している傾向がある。

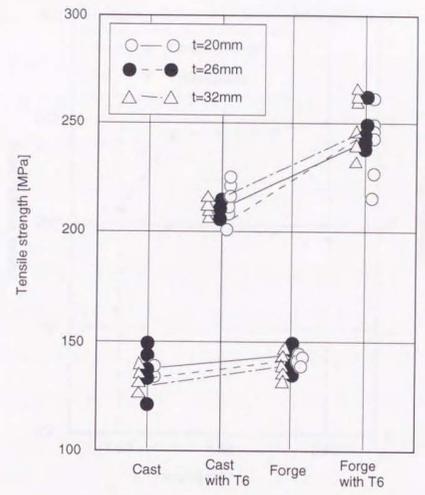


図 3-13 引張強度比較

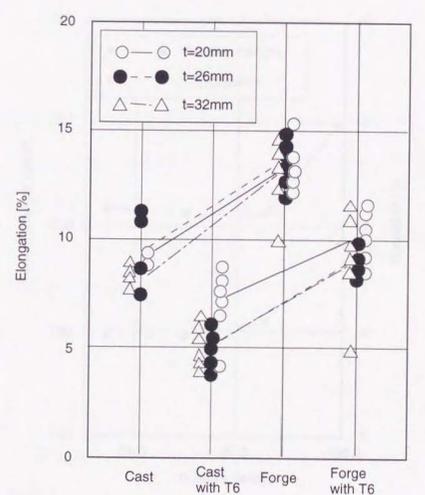


図 3-14 伸び比較

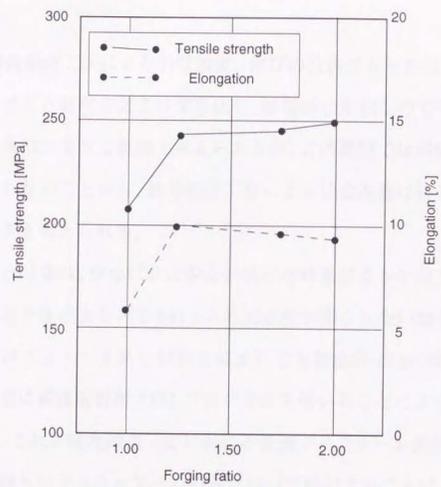


図3-15 鍛造比と機械的性質の関係

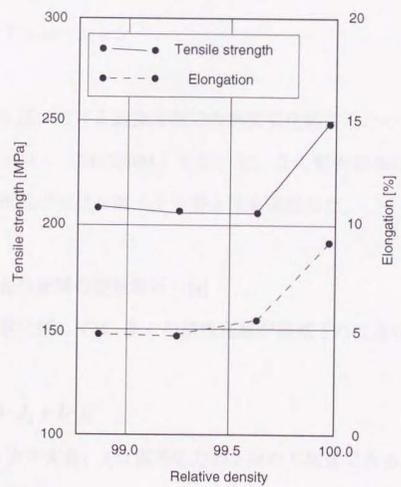


図3-16 相対密度と機械的性質の関係

### 3. 3. 3 考察

アルミニウム鑄造鍛造工法により引張強度、伸びの改善がみられた。鑄造鍛造工法では圧下率を上昇させると材料歩留まりが悪化し、原価的に不利なので今回実験に選定した圧下率範囲は工業的に妥当な範囲と考えられるが、この範囲では鍛錬比を上げても機械的性質が改善されないことから、鑄造鍛造工法による強度改善は鑄造品における空腔の消去が重要であると考えられる。

鍛造時におけるバリ量は、少なければ少ないほど材料歩留まりが向上し原価的には有利となる。しかし圧下量が少ないと100%の相対密度が得られない場合もある。また鑄造プリフォーム形状によっても同じ材料歩留まりでも鍛造終了後の密度に差を生じる可能性もある。著者は鍛造解析用 FEM プログラムを用いることにより塑性変形中の密度変化解析を行い、これが鑄造鍛造工法における最適プリフォーム形状の決定に有用であるかを、今回実験したナックルアームの例について検討することにした。

### 3. 4 鑄造鍛造シミュレーション

著者は、鑄造鍛造工法における鍛造工程での密度変化解析のため、バツテル研究所開発の鍛造解析用プログラム「DEFORM」を用いた。この解析結果に対し鑄造鍛造試作を同条件で実施し、密度の変化を調べその整合性を確認した。

#### 3. 4. 1 空腔を含む金属の塑性解析 [4]

粉末金属の降伏関数に関しては、多くの塑性理論が提案されてきたがその形は次のようになる。[5, 6, 7]

$$f(\sigma_{ij}) = A \cdot J_2 + B \cdot I_1^2 \quad \text{式 (3-1)}$$

ここで、 $I_1$ は応力の1次不変量、 $J_2$ は偏差応力の2次の不変量である。A、Bは相対密度の関数となる。それぞれの不変量は次のように定義される。

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad \text{式 (3-2)}$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)$$

式 (3-3)

したがって降伏条件式は以下ようになる。

$$f(\sigma_{ij}) = A \left[ \frac{1}{6} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \} + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] + B(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2$$

式 (3-4)

A、Bに関しては実験にて相対密度との関係を求めその値が使われている。

「DEFORM」では、この粉末金属に対する理論式に基づき微小空腔を含む金属の塑性変形解析が可能なのでこれをアルミニウム鋳造鍛造に適用することにした。

### 3. 4. 2 アルミニウム鋳造鍛造へのFEMシミュレーションの適用

最初に行ったナックルアームの形状についてシミュレーションを行うことにした。ナックルアームの中央部の断面に着目し、この断面に関しては、断面の大きさに対して長手方向の長さが十分に長く、鍛造変形中の長手方向の材料流動が少ないと考えられるのでほぼ平面ひずみの条件が成立すると仮定し、平面ひずみ条件にて密度変化の解析を実施した。また空腔は同一断面に一樣に分散しているものと仮定した。

初期の相対密度は実験にて求めた微小空腔率 0.40%をもとに、99.60%とした。図 3-17が、実際の変形と解析上の格子変形を比較したものである。

図 3-18 は、解析により求めた密度変化を示したものである。

ナックルアームの圧下率を細かく変え、密度調査し解析結果と比較したのが図 3-19である。実験結果と解析結果はよく一致した。

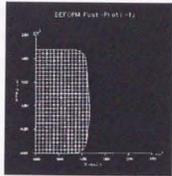
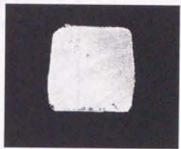
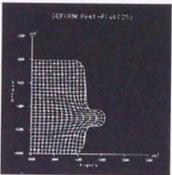
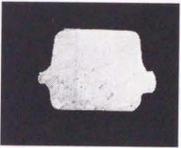
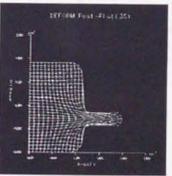
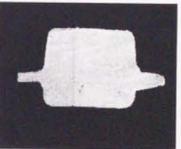
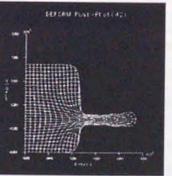
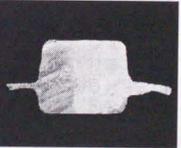
Reduction in height	Deformation by FEM simulation	Deformation by experiment
0.0		
2.0		
3.0		
4.0		

図 3-17 FEM 解析シミュレーション結果と実際の断面変形

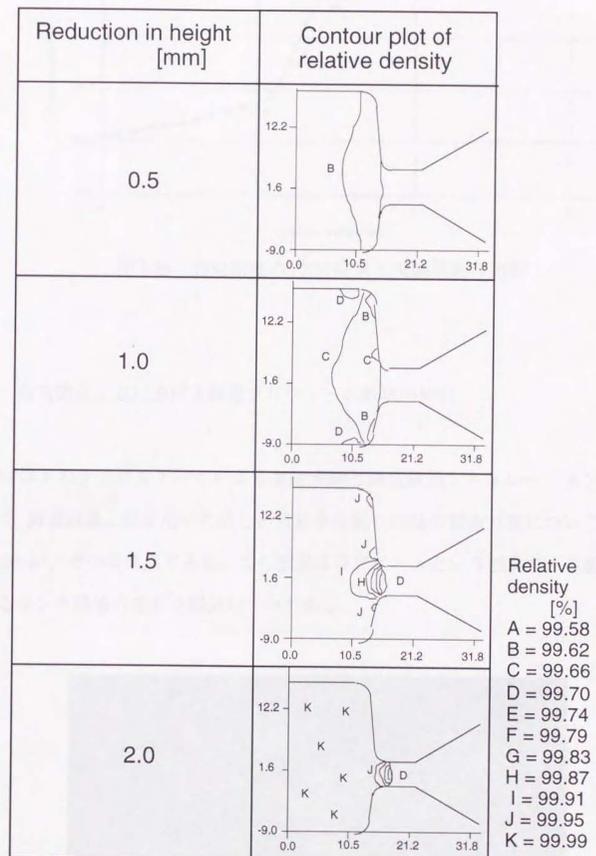


図 3-18 FEM による密度変化解析

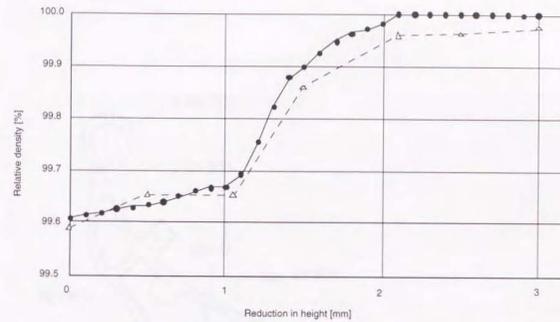


図3-19 相対密度のFEM結果と実験結果の比較

### 3. 5 鋳造鍛造工法における最適プリフォーム形状の検討

著者は以上のナックルアームによる基礎実験と鋳造鍛造シミュレーションの結果をふまえて、鋳造鍛造工法を用いた新しい自動車足廻り部品の製造方案について検討した。

図3-20が、その新部品である。この部品はロアアームという部品で、自動車の前輪を支えるリンク構造の重要な部品の一つである。

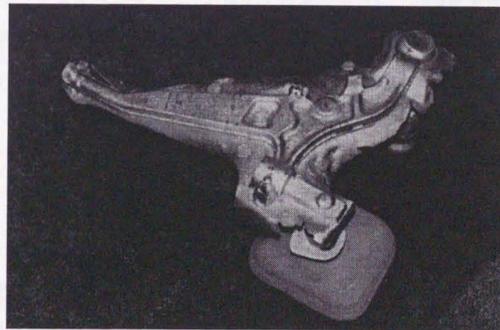


図3-20 鋳造後のロアアーム

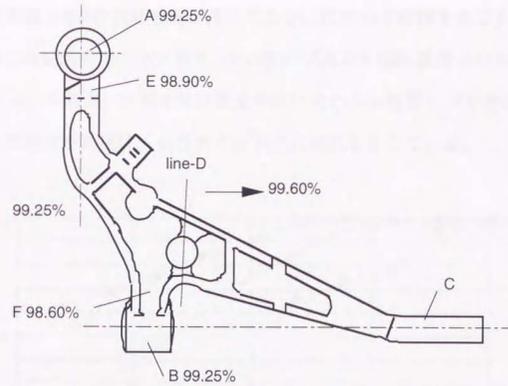


図 3-21 ロアーム铸造後の相対密度分布

最初にナックルアームの実験で用いた铸造プリフォーム形状と同じような考え方で、鍛造後の形状に対して均等に5mmだけ厚いプリフォーム形状を铸造した。铸造方法は砂型の重力铸造である。

ナックルアームの実験では、部品形状の断面積に大きな差がなかったため、1つの部品の密度のばらつきは大きくなかった。ロアームの場合は、各部断面積にかなりの差があるため、部分的に密度が異なることが予想された。

各部の断面の密度を示したのが図3-21である。A部は湯口とつながり、B部は押し湯と接続されている。D線で仕切られている両側の部分は、密度に大きな差がある。C部を含む部分は、99.60%という比較的高い密度を有する部分となっている。逆にA、B部を含む領域は、相対密度が99.25%と、低い。特にE、Fは、相対密度がそれぞれ98.90%、98.60%と極端に低くなっている。ナックルアームは形状が単純であったので、部品全体に渡って密度が一様であったが、ロアームの場合は、部分的に厚みがさまざまであり、铸造中の溶湯の経路も複雑であるため、相対密度は変化に富んでいる。このように一つの製品中に、密度が変化している、即ち空孔の分布が様々である場合は、密度の低

い領域をどう改善するかが重要なポイントとなる。

著者は、この密度の低い部分の鍛造シミュレーションを行い、プリフォーム形状をどうすれば、鍛造後 100%の相対密度が得られるか、について検討することにした。鍛造後の相対密度の低い部分である F 部と、高い部分である C 部の鍛造中の密度変化を比較したのが、図 3-22 である。C 部は元の密度が高いため早い時期に相対密度 100%に達しているが、逆の理由で F 部は、そのタイミングに遅れを生じている。

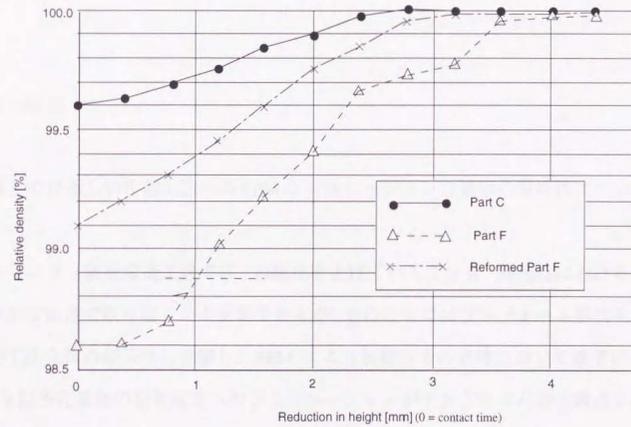


図 3-22 ロアアーム各部の鍛造時密度変化

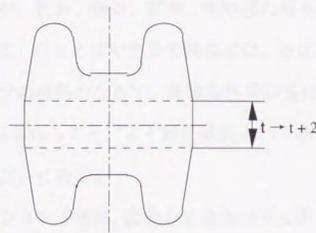


図 3-23 推奨されたロアアーム断面形状

F部近傍について、このようなシミュレーションを図3-23に示すパラメータ $t$ を変化させて、繰り返し行った。元の厚みに2を加えたところ、相対密度100%に達する時期は、図3-22に示すように改善された。このように密度の低い部分のプリフォームの厚みを増加させることは、相対密度の改善に有用である上に、鑄造工程においても溶湯の流れがスムーズになるので製造条件を改良することが出来る。

上記のように本製品の鑄造鍛造工程において、シミュレーションを適用することにより、品質の向上を達成することが可能となった。

### 3. 6 結言

本論文では新しい生産工法へのFEMシミュレーションの適用の有用性について述べた。

アルミニウム鑄造鍛造工法では、鍛錬比を上げていくよりも、鑄造品における微小空腔をいかに鍛造で取り除くかが重要であるが、そのためにはプリフォーム形状をどうするか工法全体の経済性に影響し、FEMによる解析はその意味において重要になってくる。今回多孔質体の塑性変形へのシミュレーションがアルミニウム鑄造鍛造工法にも適用できることが分かった。

アルミニウム鑄造鍛造という工法は実際に生産に用いられている例も少なく、研究も本格的にはされていないが、材料、鑄造、鍛造、熱処理の組み合わせも多く、可能性の大きい工法だと考えられる。たとえばいままでは鑄造では、内部欠陥が出易いため鑄造材として成立しなかった成分の材料のなかで、機械的性質が良好等、機能的に優れた材料が、鍛造で内部欠陥がつぶされることにより鑄造鍛造という新しい工法において再び注目されるという可能性は大いにある。

このようにシミュレーション手法は、鍛造の原価低減手法の重要なツールとして今後ますます注目されることになるであろう。

参考文献

- 1) Fujikawa, S., Kitamura, Y., and Shimamura, S. : *J. Material Processing Technology*, 275 (1991) 93-110
- 2) Komatsu, S., Yahata, S., Fukui, K., and Tokoshi, T. : SAE Technical Paper Series, (1989) 890554
- 3) Dean, T. A. : 3rd International Conference on Technology of Plasticity, (1990) M608
- 4) Kobayashi, S., Oh, S. I., and Altan, T. : *Metal Forming and the Finite-Element Method* 1989 Oxford University Press, P244
- 5) Kuhn, H. A., and Downey, C. L. Jr. : *Int. J. Powder Metal.*, 14 (1971) 15
- 6) Creen, R. J. : *Int. J. Mech. Sci.* 14 (1972) 215
- 7) Shima, S., and Oyane, M. : *Int. J. Mech. Sci.*, 18 (1976) 285

## 第4章

### 鍛造品材料節減のためのシミュレーション適用

#### 4.1 緒言

自動車部品の中でも製品重量が重く、材料歩留り向上がコスト低減に大きく寄与するクランクシャフトは、昨今の低価格化の時代の流れの中で材料歩留りの向上の要求はますます強まっている。しかし、熱間鍛造、とくにクランクシャフトはあまり解析手法が適用された例は少なく[1]、まだまだ勘と経験に頼るところが大きく、試行錯誤による試作を繰り返して材料歩留り向上を進めているのが現状であった。

著者はクランクシャフトの材料歩留り向上に対し、プラスチックを用いたモデル実験によるシミュレーションと FEM を用いた解析を行い、原価低減方策の確立と、開発期間の短縮を図ることができた[2, 3]。

#### 4.2 クランクシャフトの鍛造

クランクシャフトは自動車鍛造部品の中で、最重量級の部品であり、鍛造品の全直材発生高の中でも大きなウェイトを占めている(図 4-1)。工程は、購入した鋼材を、切断し、約 1200℃に加熱してロール工程にて、材料のボリューム配分を行う。その後、6000トンから 8000トン級のプレスで、ベンダー、粗地、仕上の鍛造を行い、最後にト

リミングが行われる（図 4-2）。この時発生するバリはスクラップとなってしまう、いかにこの発生を抑えるかが、直接材料費低減の鍵を握っている。本研究は、このバリを極力抑えるための方策を探るため、主にプラスチックによるモデル実験を用い、必要な 2 次元解析を FEM を用いて行ったので以下に報告する。

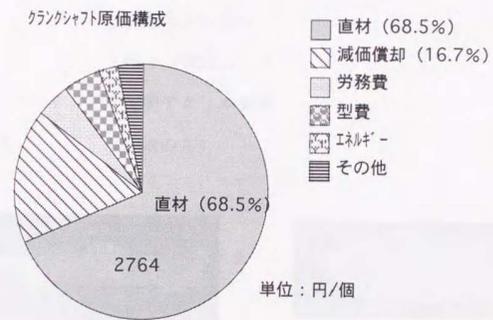


図 4-1 クランクシャフト原価構成

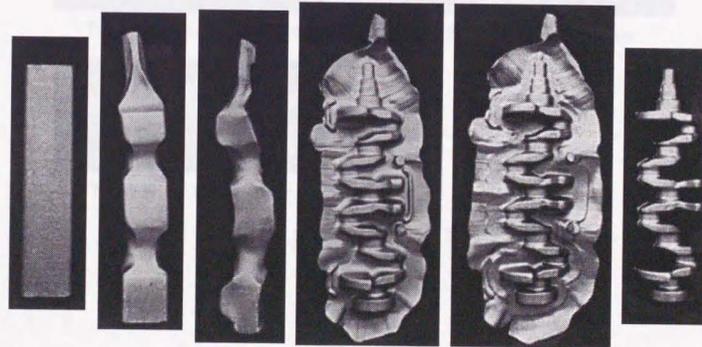


図 4-2 クランクシャフト工程図

#### 4.3 モデル実験とFEM解析

##### 4.3.1 実験条件

実験条件を以下に示す。

モデル材料	: プラスティシン (塑性加工シミュレーション用粘土)
潤滑剤	: 炭酸カルシウム
使用プレス	: 10トン油圧プレス
型材料	: 透明アクリル樹脂
モデルサイズ	: 実物の2/3

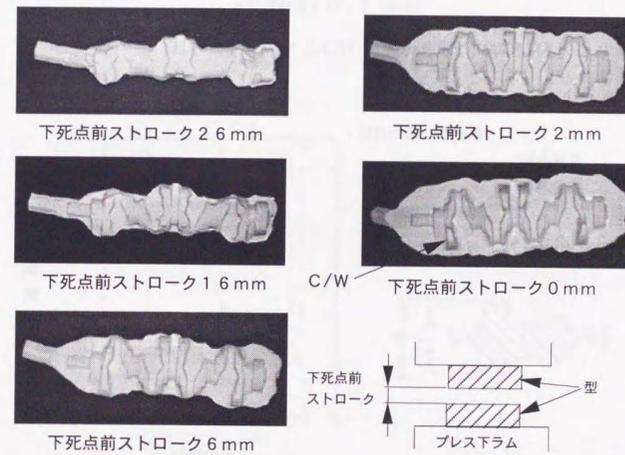


図4-3 プラスティシン成形過程

##### 4.3.2 実験結果

###### (1) 成形シミュレーション結果

図4-3にストローク毎の成形過程を示す。また、図4-4にカウンターウェイト (C/W) 高さ、成形荷重と下死点前ストロークの関係を示す。図4-4よりカウンターウェイト高

さと成形荷重は、あるストロークを境に急激に上昇し始めており、カウンターウェイトの充満タイミングと荷重上昇タイミングは一致していることがわかる。

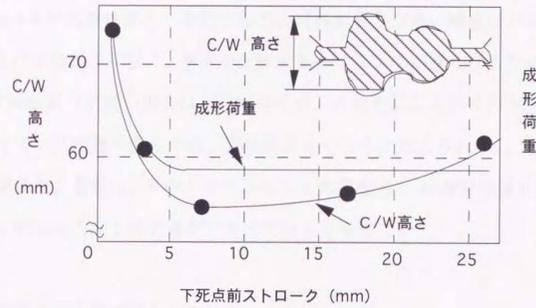


図4-4 成形ストロークとC/W高さ、成形荷重の関係

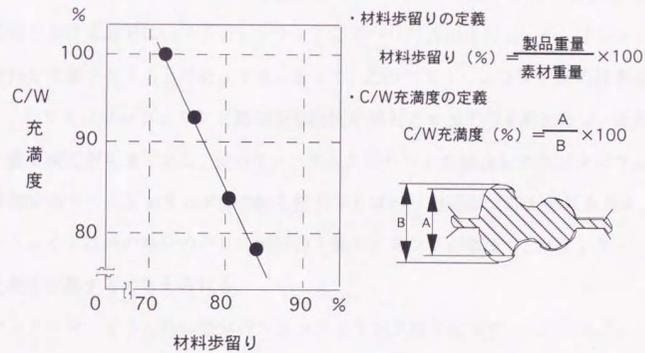


図4-5 材料歩留りとC/W充満度の関係

図4-3より、このストローク付近の成形状態を見ると、バリが製品全体から出始めた時点であることがわかる。よって、カウンターウェイトが充満し始めるのは、バリが型により充分加圧され、荷重が上昇し始める時点であると考えられる。

図4-5に材料歩留りとカウンターウェイト充満度を示す。ここでの材料歩留り

とカウンターウェイト充満度の定義も図 4-5 に示す。図 4-5 より、材料歩留りが高い場合はカウンターウェイト充満度は低く、材料歩留りが低い場合はカウンターウェイト充満度が高いことがわかる。

図 4-3、図 4-4 の実験結果より考察すると、材料歩留りが高い場合はバリの出が少なく、型によるバリの加圧が弱く、荷重が上昇するタイミングが遅くなるため充満度が低くなるが、材料歩留りが低い場合はバリが多く出るため型によるバリの加圧が強まり、荷重上昇タイミングが速くなるため、充満度がよくなると考えられる。

以上の結果より、著者は、カウンターウェイト充満度向上 (=材料歩留り向上) には、型によるバリの加圧力向上の方策が不可欠であると考えた。

#### (2) 材料歩留り向上の方策とその結果

一般的に、鍛造型には製品形状を持つインプレッション部と、バリの加圧部であるフラッシュランド部、その外側にバリを逃がすためのガッター部がある (図 4-6)。バリ出し鍛造における成形は、フラッシュランド部でバリの流出を抑え、インプレッション内に材料を充満させることで成立する。よって、このフラッシュランド部の投影面積を増やし、バリとフラッシュランド部の変形抵抗を増大させ加圧力を高めれば、より少ないバリ量で成形が可能である。従って、クランクシャフトの場合もカウンターウェイト以外の部分のフラッシュランド部の幅を拡大すればバリの流出は抑えられるため、カウンターウェイト以外の部分のバリの加圧力上昇タイミングが早まり、カウンターウェイトの充満度改善すると考えられる。

カウンターウェイト以外の部分のフラッシュランド幅を拡大することにした。

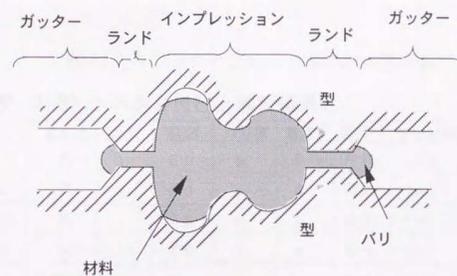


図 4-6 金型断面図

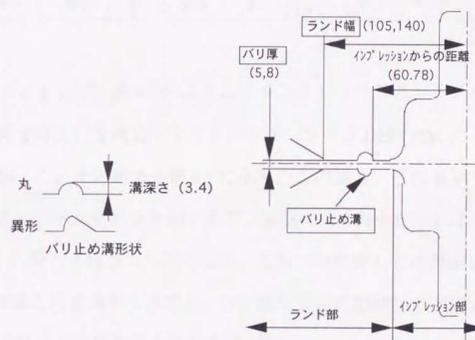


図 4-7 カウンターウェイト実験計画の各因子図

#### 4. 3. 3 FEMによるフラッシュランド形状の決定

モデル実験型を数種類用意して、最適なフラッシュランド形状を決定するシミュレーションも可能であるが、実機型よりは安いとはいえ、極力投資と時間を節約したいという考えより、FEMと実験計画法による解析数の減少をはかる手法を用い、解析を行った。

フラッシュランドの構成要件のなかで成形性に影響を及ぼす可能性のある因子を上げ、(図 4-7) これらに適当と思われる水準を決定し、表 4-1 のように直交表に割り付けを行った。

表4-1 カウンターウェイト実験計画直交表

直交表 (L8) への割り付けと解析結果

	溝形状	溝数	距離	バリ厚	溝深さ	溝付け	ランド幅	C/W肉上がり
ケース1	丸	1	60	5	3	片方	105	183.35
ケース2	丸	1	60	8	4	両方	140	170.86
ケース3	丸	2	78	5	3	両方	140	187.36
ケース4	丸	2	78	8	4	片方	105	173.48
ケース5	異形	1	78	5	4	片方	140	185.51
ケース6	異形	1	78	8	3	両方	105	172.33
ケース7	異形	2	60	5	4	両方	105	180.51
ケース8	異形	2	60	8	3	片方	140	172.72

この各ケースにおいて、図4-7のようにクランクシャフトのカウンターウェイト部を想定した近似体を考え、2次元シミュレーションソフト DEFORM により成形シミュレーションを実施した。その結果を表4-1に示す。この場合、「肉上がり」と「荷重」をアウトプットとし、それぞれを評価するが、実際には「肉上がり」は大きいほど好ましいが、「荷重」に関してはプレス機の能力、金型への負荷などの理由により制約が生じる。この点を考慮した最適解を決定し、この情報を元に型設計を実施することにより、短期間において良好な結果を得ることができた。

この結果、最も差のあった2組のFEM解析結果について図4-8に示す。

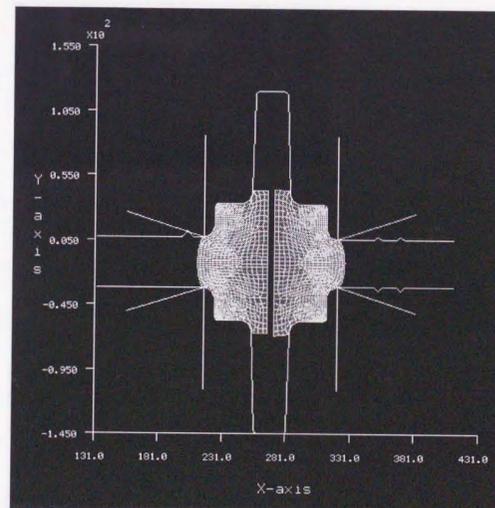
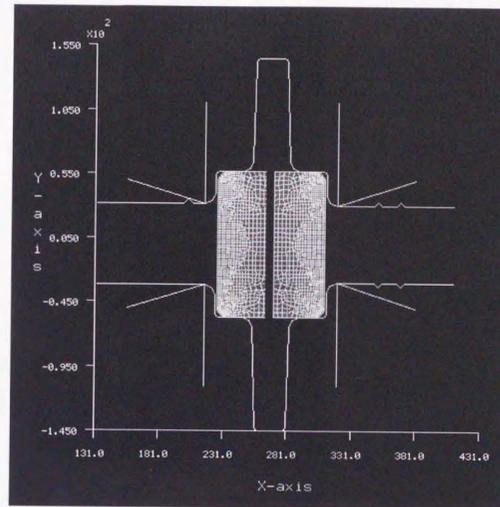


図4-8 カウンターウェイトのFEM解析結果(1)

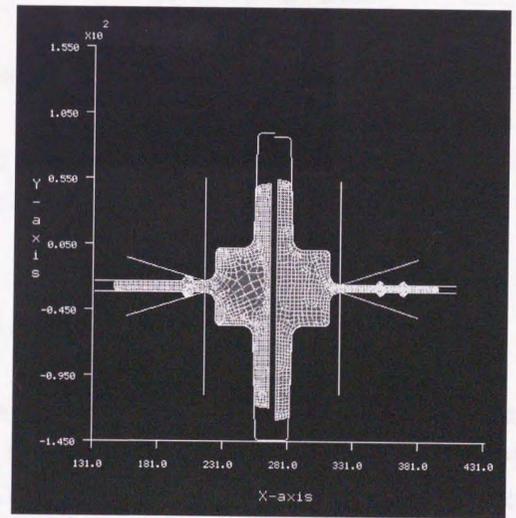
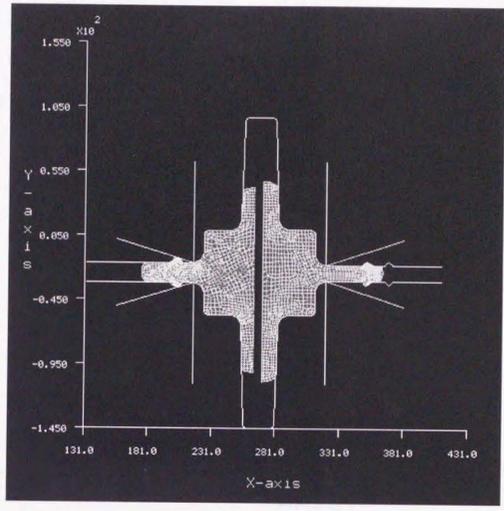


図4-8 カウンターウェイトのFEM解析結果(2)

これにより決定したフラッシュランド形状を用いた型を使用した場合の、材料歩留りとカウンターウェイト充満度の関係を図4-9に示す。この図より、フラッシュランド部を拡大する前と比べ、各材料歩留りでカウンターウェイト充満度が改善されているのがわかる。

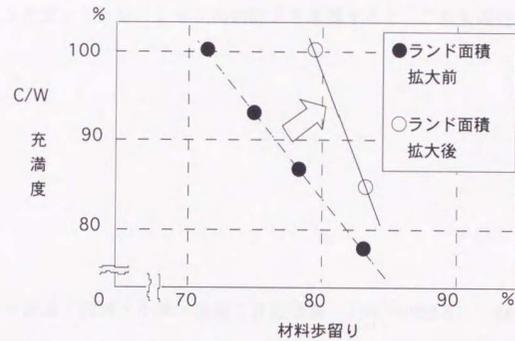


図4-9 材料歩留り改善図

この時、10トン油圧プレスでの測定圧力と、従来の形状での測定圧力を比較することによって、現行の3000トンの荷重に対して、比較案は4200トンまで上昇するであろう事が予測できた。プレス能力が6000トンあることから問題なしと判断し、実施移行することができた。

#### 4.4 まとめ

モデル実験とFEM解析手法を用いることにより、新しい材料低減手法を見いだすことができた。従来の試行錯誤による試作を繰り返した場合に比べ、開発期間、開発コストとも約40%削減することができた。また、モデル実験での荷重データから、実際の成形荷重の予測も可能であった。

3次元計算機シミュレーションの実用化が今一步のこの段階では、モデル実験が、熱間鍛造品、特にクランクシャフトのような複雑形状をもつ鍛造部品の材料歩留り向上を進める上で、現在、有効な手段であることを示唆していると思われる。また、部分的な材料の流れを、2次元のものと仮定することにより、有用なシミュレーション情報を引き出すのは、3次元シミュレーションの煩雑さを考慮すると、これも有効な方法と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 板谷・伊藤・西村・小林・後藤：住友金属、35-2（1983-6）、248-260
- 2) 吉田・藤川・西村・西山：型技術、11-8（1996-7）、110-111
- 3) 西村・藤川・吉田・樹村・木下：型技術、11-8（1996-7）、112-113

## 第5章

### 鍛造欠陥シミュレーションと診断システムの開発

#### 5.1 緒言

鍛造欠陥の問題は、鍛造エンジニアにとって必須の科目となる。本研究の題目が鍛造品のコストダウンを上げていて、なぜこの欠陥の問題がなお大きなウェイトを占めているか疑問に感じる向きもあるかもしれない。すなわち、欠陥とは、鍛造品の品質の問題であって、コストとは関係ないのではないか？という単純な疑問のことである。しかしながら、まず単純に考えると、欠陥品は不良品であり、廃却せねばならず、コストにはねかえるということ。しかし、もっと大きな影響があるのである。それは、原価低減活動につきものの、金型変更の際の問題である。直接材料費を低減する、あるいは、型寿命を向上させて、型費を低減する、というのは、鍛造品原価構成上、原価低減への2大アプローチとなる。このアプローチに対して、限界の設計が求められるが、この時必ず問題となるのが、欠陥をいかに発生させないか、というスキルである。

冒頭いったように、鍛造エンジニアは、この問題に必ず衝突する。いかに標準化した設計手法であっても、完璧には避けて通れないのがこの道である。著者の経験からも、工場時代の毎日が、この問題との格闘であったといっても過言ではない。

著者は、このニーズに対応するため、欠陥発生シミュレーションを皮切りに、多くの解析を実施し、加えて、それを未経験者のための教育システムにつなげるための研究を行った。ここに最初のシステムが完成したので報告する。

## 5. 2 コンロッドのフロースルー欠陥に関する研究 [1]

### 5. 2. 2 緒言

塑性加工の代表的工法として今なお自動車の機能部品を中心とする部品製造の代表的工法である熱間鍛造については、冷間鍛造と比較して、形状が複雑な部品が多いこと、型との熱問題が煩雑なことなどからあまり解析手法が適用される分野ではなかった。複雑形状の鍛造に対して、2次元や軸対称の場を部分的に仮定して解析を行うことが推奨されているが、積極的に取り組まれているとは言えず、まだまだ経験に頼ることが大きいのが現状である。確かに熱間鍛造に対する解析的な取り組みは現状では非常に難しいことなのだが、現場の技術者にとっては効率的な対応を取るためには、少しでも進めておかなければならないのもまた事実であると思われる。

今回著者は熱間鍛造における欠陥生成問題についてプラステイション実験、FEM解析によるシミュレーションを用いて解析を試みたのでここに報告する。

### 5. 2. 3 コンロッドの鍛造

コンロッドは自動車の鍛造部品のなかでクランクシャフトとともに代表的な部品であり、かつ自動車部品としても最も重要な部品のひとつである。

図5-1にその鍛造工程を示す。まず1200℃に加熱されたバー材を1工程目で背切り鍛造し、2工程にて第一粗地の鍛造を行う。3工程は第二粗地で4工程が仕上げ鍛造である仕上げ鍛造を終えた製品は5工程目でトリミングされる。

今回著者がとりあげるのは現場で「油疵」と呼ばれている欠陥で、図5-2に示すように、コンロッドのI-セクション部の内側に長手方向に沿って発生する疵のことである。図5-3、図5-4にこのフロースルー欠陥の写真を示す。



図 5-1 コンロッド鍛造工程図

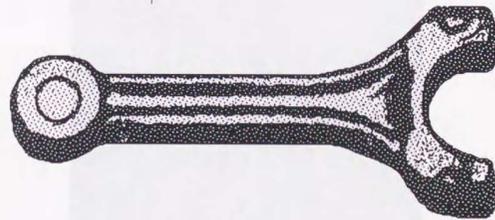
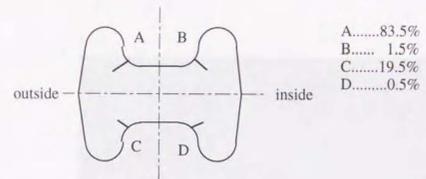


図 5-2 コンロッドフロースルー図

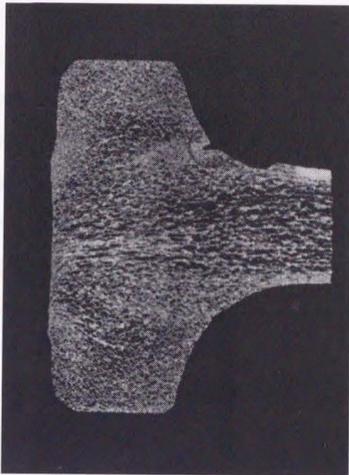


図5-3 コンロッドI-セクション断面図 (フロースルー)

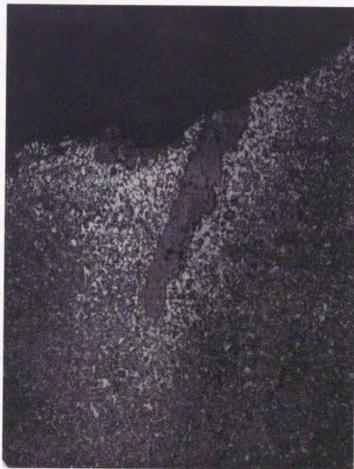


図5-4 フロースルー部マイクロ写真

#### 5. 2. 4 コンロッド I-セクション疵

まず疵の位置であるが、図5-2に示すように平行に2個並んでいるI-セクションの内側Rのうち、型中心から遠い側に多くはいつていることがわかる。また上下型にわけるとやはり圧倒的に上型にはいる確率が高い。また、工程別では第二粗地鍛造時にはいることが多いことが調査で明らかになった。

コンロッドのI-セクションに発生する疵は、現場で「油疵」と呼ばれ、その名前が示す通り離型剤は黒鉛を用いているが熱間鍛造の離型剤は従来油性潤滑剤が用いられていたため、このような名前が残っている。すなわち型の潤滑状態がよいときに疵がはいりやすいことがわかる。

もう一つの要因としては、I-セクションのリブの内側のRの大きさがあげられる。型が新しい時は所定のRがついているが、型摩耗が進行するにつれてウェブが削り取られこの部分がとがってくる(図5-5)。このとがった状態を放置して生産を続けていると、大量の不良が発生することが確認された。作業者はこの場合作業を中断し、とがった部分にRをつけるべく型補修を行う。

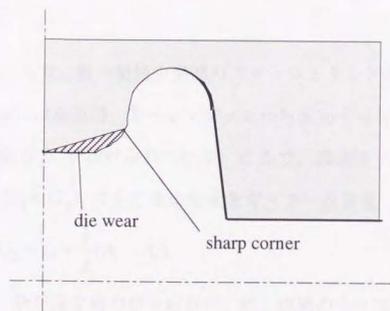


図5-5 摩耗によるコーナー部鋭利化

以上2つは作業者が制御し得る要因である。3番目の要因は型設計の問題である。著者らは部品毎に疵の発生率に差があることに着目し、型設計上のパラメータで疵の発生に影響のありそうなものをチェックした。その結果、第2粗地鍛造時に、I-セクシヨ

ンの外側にフラッシュアウトされる材料の流動量が多いほど疵発生率が高いことがわかった。

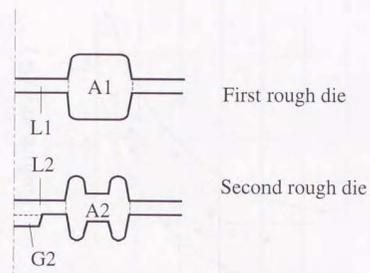


図5-6 第一粗地・第二粗地Iセクション断面図

#### 5. 2. 5 第二粗地鍛造時のフラッシュアウト量の問題

図5-6に第一粗地と第二粗地のIセクション部断面を示す。第一粗地の $(A_1)$ は、第二粗地の断面積 $(A_2)$ よりも少し大きめに設定されている。従って第二粗地鍛造時にはIセクション両側にそれぞれ単位長さあたり、

$$\frac{1}{2}(A_1 - A_2)$$

の量の流出が生じる。一方、第一粗地中央部のフラッシュランド部(断面積 $L_1$ )に対し、第二粗地の中央部には鍛造時、Iセクションから流出する材料を受け入れるためのガッター部(断面積 $G_2$ )が設けられている。ここで、鍛造終了時、第二粗地中央部(キャビテイ面積： $L_2 + G_2$ )に生じる余裕量をガッター余裕量 $(E)$ とすれば、

$$E = L_2 + G_2 - L_1 - \frac{1}{2}(A_1 - A_2) \quad \text{式(5-1)}$$

となる。このガッター余裕量が負の値を取れば、第二粗地の中央部には材料がプレスの下死点の前で充填され、その後Iセクション外側へ逆流することになる。

著者は当社で鍛造しているコンロッドの主力部品についてこの $E$ の値を調べ、加えて過去3ヶ月間の疵発生率を調査しこれをプロットした(図5-7)。図が示すようにこのガッター余裕量を大きく取れば疵発生が防止できることを示唆している。

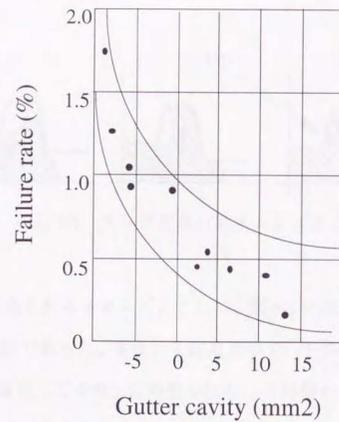


図5-7 ガッターキャビティと疵発生率の関係

著者は疵発生率の高い部品についてこの型設計上の対策を実施し大幅な品質向上を達成することが出来た。

#### 5. 2. 5 疵発生メカニズム

疵対策として効果があったのは主に以下3点である。

- (1) 離型剤の塗布量を必要最小限にし鍛造時の潤滑状態を悪くする。
- (2) 型摩耗によるリップ付け根Rの最小化を防ぐため、型補修により必要なR形状を保つ。
- (3) 型設計上、第二粗地の中央部ガッター余裕量を極力大きく設定する。

対策さえ加えれば効果を上げることが可能であるが、なぜ上記の対策が疵防止に効果があるのか解明されれば、コンロッドの鍛造に限らず熱間鍛造に対する普遍的な対策を考えることが出来るだろう

著者はまず疵生成についての変形挙動がどのようなものかを仮定することにした。コンロッドに限らず、この種の疵は、リップとウエブから構成される鍛造品に生じる代表的

な外部欠陥である。

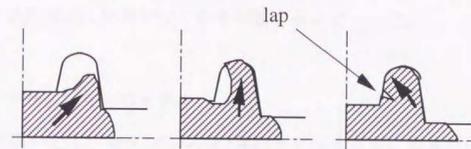


図 5-8 ラップ欠陥の発生メカニズム

通常この種の疵が生成されるメカニズムとして、図 5-8 に示すような生成過程によるものとするのが一般的であった。すなわち鍛造途中で、中央から外側へ材料流動が大きく、リブ外側の壁に衝突してから、この壁を伝わって外側からリブ部が充填されるために内側に巻き込み疵を生じるという考えである。(以下この考え方を仮説 1 と呼称する。)

これに対し、もう一つの考え方がある。これはリブが一旦充填された後、ウエブ部の材料がリブの下をすりぬけて外に出ようとし、それによりウエブ表層の材料が滑り込み、疵が生じるという説である。(図 5-9、以下これを仮説 2 とする。)

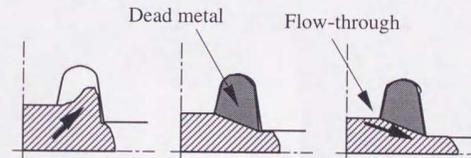


図 5-9 フロースルー欠陥の発生メカニズム

この二つの説は実際にどちらも有り得る事なのだが、実際に生産現場で、実物でこの疵のはいり方を検証するのは極めて困難なのである。というのは、疵生成の過程が下死点近傍のストロークわずか 1 mm、時間にして 0.01~0.02 秒の瞬間の間に終了してしまう現象であり、その間での詳細なサンプル取得が困難であるからである。

そこで著者は、2つの変形挙動についてプラスチックによるモデル実験及び有限要素法による2次元解析を行い、前述の3つの疵生成に影響のあるパラメータについて、どちらかの仮説が合理的に説明がつかを判断することにした。

#### 5. 2. 6 I-セクションのモデル

図5-10に今回用いたI-セクションの1/4のモデルを示す。大きさは実物の10倍である。FEM解析もこの形状を用いた。前述の3つのパラメータを表5-1のような条件で比較することにした。

モデル実験では、試料の奥行きを20mmとし前後をセルロイド板で押さえZ方向の動きを拘束することにより平面ひずみ条件とした。潤滑剤については、ワセリンと炭酸カルシウムを使用することにより、2条件の潤滑状態を設定した。前述のガッター余裕量の不足から来る外側への流動量に差を与えるため、図5-10における左側の先、すなわちI-セクション中心線のX座標を右へずらし、X軸マイナス方向の流れを生じさせるようにした。

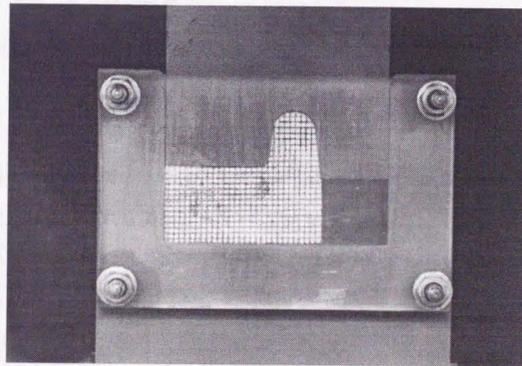


図5-10 モデル実験型

表 5-1 実験条件表

Parameters		Model Experiment	the FEM
Lubrication	Good	Vaseline Lubrication	m= 0.0
	Bad	Calcium soda	m= 0.2
Root Radius	Sharp	R = 0	R = 0
	Small	R = 5	R = 5
	Large	R = 10	R = 10
Flow	None	CC = 50	Rate = 0
	Little	CC = 65	Rate = 50
	Much	CC = 80	Rate = 100

CC = Center coordinate

FEM 解析では、BATTELLE 研究所のソフト「DEFORM」を用い Z=0 として 2 次元問題として取り扱った。外側への流動量については I-セクション中心線の境界条件で X 軸マイナス方向へ速度をもたせることによりこのシミュレーションを行う。

#### 5. 2. 7 実験および解析結果

条件別の疵発生状況を表 5-2 に示す。疵が発生した条件は、限られた。まず、潤滑条件が良好で、型のコーナー R が 0 で、かつ外側への流れがある場合に疵が発生した。これは、モデル実験、FEM 解析とも、結果は一致した。

次に、潤滑条件が良好で、型のコーナー R が小さい場合にも、外側への流れが大きいときは疵が発生した。これも実験結果と FEM 結果が一致した。

唯一、結果が異なったのは、潤滑状態が悪く、コーナー R が 0 で、外側への流れが大きいときである。

表 5-2 組み合わせによる疵発生状況

Parameters			Before filling		After filling	
Lub'n	Radius	Flow	Exp.	FEM	Exp.	FEM
Good	None	None	O	O	O	O
		Little	O	O	X	X
		Much	O	O	X	X
	Small	None	O	O	O	O
		Little	O	O	O	O
		Much	O	O	X	X
	Large	None	O	O	O	O
		Little	O	O	O	O
		Much	O	O	O	O
Bad	None	None	O	O	O	O
		Little	O	O	O	O
		Much	O	O	O	X
	Small	None	O	O	O	O
		Little	O	O	O	O
		Much	O	O	O	O
	Large	None	O	O	O	O
		Little	O	O	O	O
		Much	O	O	O	O

O = No defect

X = Defect

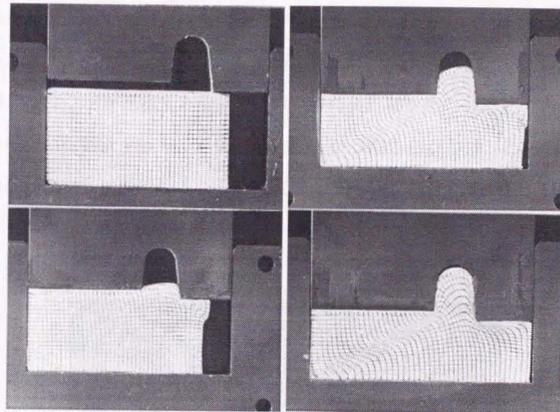


図 5-11 モデル実験による材料充填過程

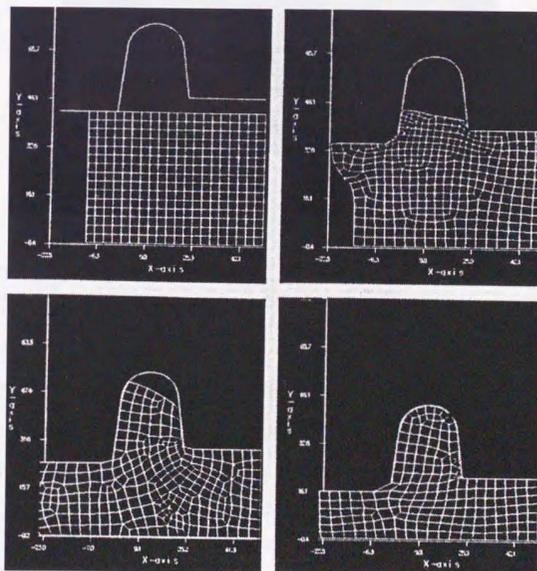


図 5-12 FEM による材料充填過程

前述の仮説1、すなわち疵発生がリブ充填中の巻き込みによって発生するという仮説については、プラスティシン実験およびFEM解析とも疵発生は皆無であった。

実際の鍛造ではリブが充填する前は、外側への材料流動が少ない時期であるから、実際には起こらない流動量を与えても疵が発生しなかったことから、ほぼこの説による疵発生は考えられないと判断される。モデル実験とFEMによるリブ充填の様子はそれぞれ図5-11、図5-12に示す。

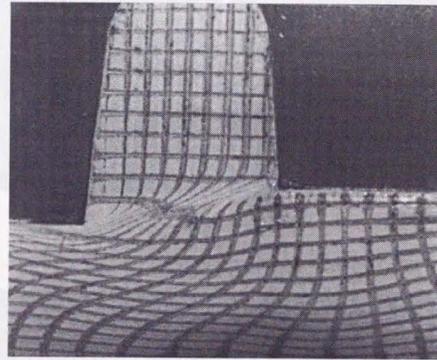


図5-13 プラスティシンによるフロースルー

仮説2による結果は、実験および解析ともに1つの組み合わせを除いて一致した。いずれも3条件について疵が発生しやすいことが確認できた。図5-13にプラスティシンの疵発生時の格子線を示す。デットメタルと流動部の境界が明確でこの境界線にそってウェブ表層が引き込まれている様子が良く分かる。図5-14にFEM解析による疵引き込みの様子をリブ付け根部分の拡大により示す。また図5-15にそのときの各格子点の速度成分を示す。リブ部はほとんど速度成分をもっていないが、わずかに渦巻状態の動きが見られる。

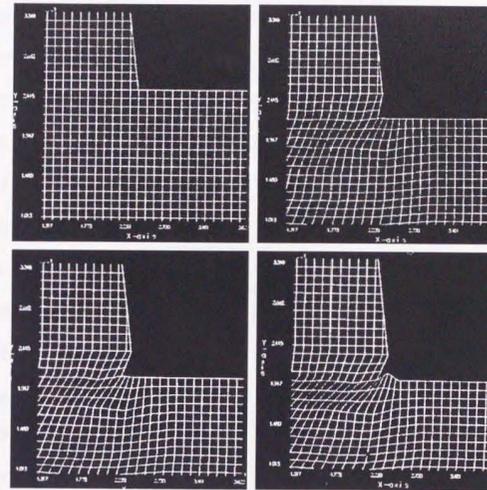


図 5-14 FEMによるフロースルー発生過程

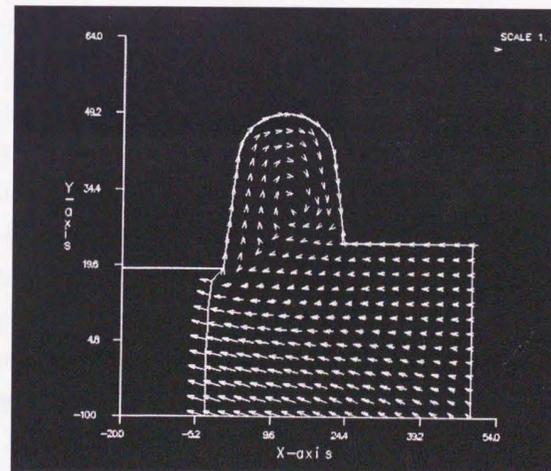


図 5-15 材料内部フロー

### 5. 2. 8 結果に対する考察

今回の実験では、コンロッドの典型的な疵であるI-セクション疵の生成メカニズムについて解析した。鍛造工程の最終の生成メカニズムは、肉眼で観察できないため従来は、推定でメカニズムが語られていたが、今回の実験とFEMシミュレーションにより、これが明らかになった。図5-8に見られるようなラップ型と図5-9のフロースルー型の2つの考え方があったが、この手のウェブ・リップ構造の2次元的な条件では、後者のメカニズムが支配するようである。

実験あるいはFEM解析で選んだ3つの条件は、この疵の発生に大きく関係している。3つの条件とは、

- (1) 余剰体積
- (2) 型潤滑条件
- (3) ウェブフィレットRの大きさ

である。

余剰体積とは、成形に最低必要な体積に対して投入する体積の余剰分を言っている。余剰体積が0であると、まず成形は完全とはならずいわゆる欠肉(Underfill)という欠陥が生じる。フロースルー型の欠陥は、成形完了から生成が開始されるので、この余剰体積が大きいと確率的に疵発生が高くなると思われる。デッドメタルゾーンが成形される、即ち成形が完全に完了する時点で鍛造が終了するような状態では、このフロースルー型の欠陥は発生し得ないことになる。今回の結果は、この余剰体積を小さくすれば欠陥を回避できるという型設計上の基本則を語っていると言える。

次に型潤滑条件であるが、摩擦係数が極端に小さい場合にこの疵が発生しやすい。通常熱間鍛造では、材料と金型は滑りを発生せず、表層部分は成形中に移動しない。しかしながら潤滑剤が溜まっていた場合などは、希にこの滑りが発生する。フロースルーの場合も、経験的に潤滑条件の極めて良い場合に発生しやすく、この考え方を裏付けている。

最後のフィレット部の半径の大きさであるが、小さい場合ほど疵発生が顕著である結果が得られている。これは、図5-16に見られるような滑り線場を想定して考えてみよ

う。[2,3,4]

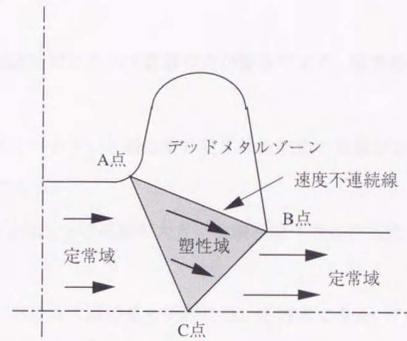


図 5-16 コンロッド断面における塑性流れ

コンロッドのI-セクション断面の塑性流れを、図5-16のように中心から外側への押出問題のように解釈する。この場合リブ部がデッドメタル領域となり、ABC部の塑性域三角形が想定できる。単純な押出問題では、左から右に向かって流れが一定となり、A点からB点に生じる速度不連続線に沿って滑りが生じる。即ち、A点を起点に欠陥が発生することになる。しかしながらこのケースは単純な押出問題ではなく、上型が縦方向の中心線に接近する鍛造問題であるので、図5-16で想定した各領域は、次の瞬間に異なった領域を示すことになる。即ち、欠陥の起点となるA点が少しずれる。従ってA点から疵が入り込もうとするが、次の瞬間にA点は、フィレットRに沿ってリブの方向に向かってずれるために、引き込みは発生しないことになる。しかしながらフィレットRが0、即ちA点が尖っている場合は、A点自体の移動が発生せず、疵の起点となってしまう。従ってフィレットR0の場合、このフロースルー疵が発生しやすい事が推定できる。

#### 5. 2. 9 まとめ

実験および解析の結果から疵の発生メカニズムはほぼ次のようであることが分かる。

- (1) 疵が発生しはじめる時期は、リブ充填以降である。

(2) 疵はウエブ上にあった点がデッドメタルと流動部の境界線に沿って中に引き込まれ生じる。

(3) 潤滑条件が良好だとウエブ表層の点が動きやすく、境界線への滑り込みが容易である。

(4) リブ付け根Rが小さいと鍛造中の境界線の起点の移動が少なく、境界線への滑り込みが容易である。

(5) 外側(-X方向)への流動が大きいと境界線への点の移動速度が速く滑り込みが容易である。

今回は熱間鍛造における欠陥の発生問題について考えてみた。プラスティシンのモデル実験とFEMによる解析いずれについても、生産現場で問題となっている現象のシミュレーションが可能であった。今回得られた知見は単にコンロッドの場合だけの問題ではなくリブウエブ構造をもつ部品のさまざまな鍛造に応用できる情報として貴重であると考えている。

### 5. 3 クランクシャフトカウンターウェイト疵の解析

#### 5. 3. 1 緒言

前節のコンロッドの疵のケースは、2次元で処理できるため、プラスティシンのモデル実験とFEMシミュレーションは比較的容易に行うことができた。今節では、複雑な3次元流動による疵のシミュレーションをプラスティシンによるモデル実験で確認した例を紹介する。

#### 5. 3. 2 実験条件

実験条件を以下に示す。

モデル材料 : プラスティシン (塑性加工シミュレーション用粘土)

潤滑剤 : 炭酸カルシウム

使用プレス	: 10トン油圧プレス
型材料	: 透明アクリル樹脂
モデルサイズ	: 実物の2/3

### 5.3.3 実験結果

クランクシャフトのカウンターウェイト外周にはいる疵のメカニズムは、従来から判然としなかったが、本実験により明確となった。疵の生成過程を図5-17に示す。

図5-17は、中央カウンターウェイト2枚の外周にはいる捲れ込み疵の生成過程を示している。これは、クランクシャフトの粗地成形での疵であるが、前工程であるベンダー（曲げ）材の中央部に、粗地型カウンターウェイト間の壁が突き刺さり、その両サイドが盛り上がり、その盛り上がった部分が外側に倒れ込み、疵が発生する。

### 5.3.4 まとめ

このような複雑な3次元の疵生成メカニズムは、現状FEMで解析するのに多大の工数と投資が必要となる。したがってプラスチック実験は我々に重要な情報を提供してくれる。また、後に述べるエキスパートシステムに、この写真をアニメ化してデータベースとして保存できるので知識の共有化が可能となる。このような疵の生成過程は、言葉で表現しにくいので、写真アニメーションはメカニズムの理解に有用となると思われる。

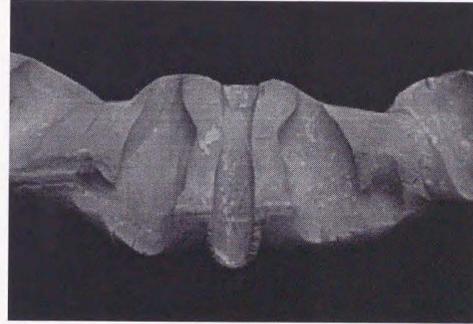
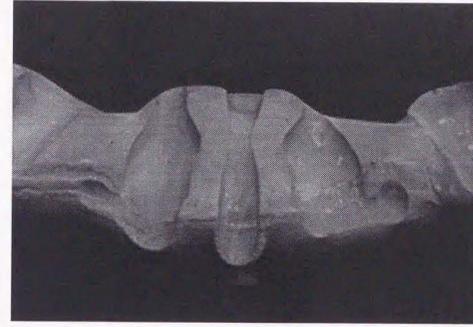


図5-17 カウンターウェイト外周疵生成過程（1）



図5-17 カウンターウェイト外周形成過程(2)

#### 5. 4. 鍛造欠陥診断システム (FORDIA) [5]

近年、様々な産業分野へのエキスパートシステムの開発が盛んに行われている。鍛造分野への適用も、特に冷間鍛造の分野を中心に試みられている。しかしながら熱間鍛造分野への適用はほとんど行われていない。

鍛造は高い加圧力やエネルギーによって金型を用いて金属を所定の形状に成形する加工法の一つで、加工温度にしたがって熱間鍛造と冷間鍛造とに分けられる。冷間鍛造は室温で、熱間鍛造は約 1200℃近辺の温度で行われる鍛造である。通常冷間鍛造では比較的単純な形状が適用されるため、理論的解析が適用しやすい。これに比べて熱間鍛造では、形状が複雑な上、温度の影響が大きいため解析の適用が遅れている分野である。したがってこの分野では部品、型、プロセスに関する専門家の経験的知識に頼る部分が多い。本研究が熱間鍛造に向けられる背景には、このような事実がある。

熱間鍛造技術者は、生産部品に発生する欠陥を撲滅することに日々努めている。しかしながら、熱間鍛造中に生じる欠陥については、その生成メカニズムが明確になっていない。欠陥生成のパターンはさまざまで、多くの要因に拠るところが多い。欠陥は部品の形状、発生箇所にも左右される。専門家の中にも、どのように疵が生成されるかを直感的に説明し得る人がいるが、生成のメカニズムと的確な対処法を特定するのは容易ではない。結果として一握りの専門家によって、経験的知識が寡占される傾向がある。

もし鍛造型設計が完全に標準化されて実際のプロセスの現象を制御できる状態であれば、鍛造品に疵が生じることは考えられない。しかしながら疵発生の条件は極めて複雑である。疵発生要因は型設計だけでなく、潤滑状態、粗地の位置決め、あるいは材料の被加工性能等さまざまな生産条件にも依存している。言い替えば、最適な型設計が全ての疵の問題を解決してくれるわけではない。この事実は、疵生成の原因を明確化し、型設計へのフィードバックをするための診断システムの開発を促すものである。

##### 5. 4. 1 従来の研究

診断型エキスパートシステムの研究は多数報告されている。MYCIN はバイズの確率を医療診断に利用して開発した診断エキスパートシステムとして有名である[6]。医療

分野では多くのエキスパートシステムが開発されている。なぜなら、病気の兆候と原因の関係は非常に複雑であり、この推論には多大の経験が必要となる。この分野のエキスパートシステムの開発には多くの報告があり[7]、その多くがベイジアン・ネットワークを利用している。

その他の技術分野でも、ベイズの理論を用いた多くのエキスパートシステムがある。Agogino はミリング機械のモニタリングと制御にベイズの推論エンジンを使用している[8]。他には原子力工学[9] やプロセス・マネージメント[10] に適用した例がある。

鍛造分野ではいくつかの適用例で部品設計に人工知能技術が使われている。オハイオ州立大学は、冷間鍛造品の部品および工程設計のための知識ベースのシステムを開発した[11]。小坂田らはニューラル・ネットワークを使った冷間鍛造エキスパートシステムを開発した[12]。その他、冷間鍛造設計の知識ベースエキスパートシステムの開発例が多く報告されている[13]。本村[14] は軸対称の熱間鍛造部品ヘファジー理論を適用した。それらのほとんどは、工程設計の最適化を目的としている。

このように一般の診断型システム、あるいは鍛造設計への適用は盛んであるが、鍛造欠陥を対象とした診断型システムは開発が試みられたことがほとんど無い。前述したように、鍛造技術者にとって欠陥と部品や部品設計のパラメータの関係を知ることは有用である。この情報は部品および型設計技術者の生産部品の品質改善活動に寄与するものである。

#### 5. 4. 2 研究のアプローチ方法

本研究の第一の狙いは、熱間鍛造品の欠陥の診断システムを開発することである。実際のプログラムの構築の前に、欠陥とその原因との関係を明確にする必要がある。このため著者らは、5. 2 節及び5. 3 節に示したように経験に基づく知識と有限要素法の計算による知識の集約を実施することにした。

第二の狙いは、一般的な診断型エキスパートシステムを構築することである。このためベイズの確率理論の適用を行い、鍛造分野だけでなく他のさまざまな工学分野の品質問題に適用できるようにする。このシステムはベイズの確率を用いて確信度計算の共通の定式化と学習システムを内蔵するものとなる。

#### 5. 4. 3 FORDIA のコンセプト

"FORDIA"は、Forging Defect Diagnostic Systemの略称で、いままで鍛造技術専門家に委ねられていた鍛造疵に関する原因の推定ととその生成メカニズムのグラフィック表示を行うことを目的とする診断システムである。このシステムは、従来その原因が経験的な判断に委ねられており、なかなか素人には理解できないことがらに関して、使用者が容易に理解できるものを目指している。

鍛造現場では、鍛造作業者あるいは鍛造技術者が工程中あるいは工程後に欠陥を発見し、いつ、どのように、どうして欠陥が発生したかを推定する場面に出くわすことがよくある。欠陥の生成過程を直接観察することは不可能なので、それを推定することのみ許される。原因を推定するには、部品の種類、部品の表面上での欠陥の発生位置、欠陥の深さ、形状、欠陥品の割合等の情報が必要となる。情報が多ければ多いほど、原因をより正確に推定することができる。このコンピュータによる推定は人間の専門家が必要とするような情報を同様に必要とする。

本システムの名前は"FORDIA"であり、鍛造欠陥診断システムの略称である。図5-18はプログラムの構造を示している。最上部は情報入力の部分である。ベイズの推論は入力された情報を元にそれぞれの欠陥のカテゴリの確信度を導く。2段目の部分はベイズの推論システムと呼ぶべき部分である。3段目は知識ベースのアプローチを用いた原因と対策の推論部分である。この推論は入力情報の組み合わせによるものである。システムのアウトプットは主に有限要素解析の結果をアニメーション表示したものとなっている。有限要素解析には剛塑性解析用の市販コード"DEFORM"[15]を使用した。最終段は学習システムであり、実際の結果がわかっていた場合はこれによって基礎確率を更新することができる。

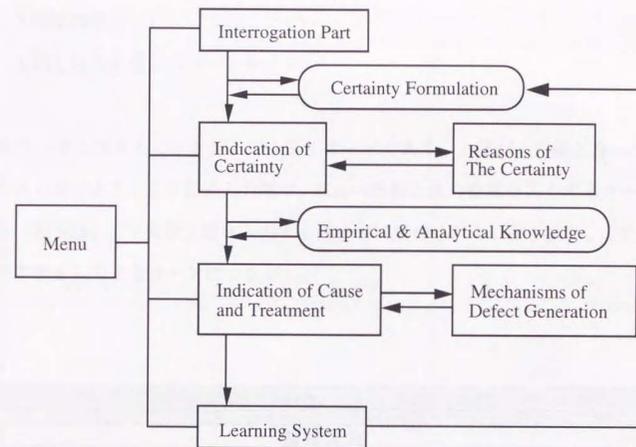


図 5-18 FORDIA の構造

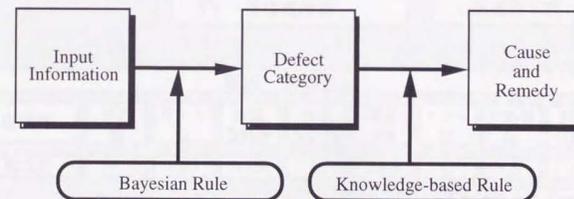


図 5-19 FORDIA の流れ

図 5-19 は、ここで提案する診断システムの全体の流れを示している。

本システム (FORDIA) は以下の情報入力が可能である。

- 1) 部品の種類
- 2) 欠陥の位置
- 3) 工程の種類および欠陥が発見された工程
- 4) 欠陥の性状 (深さ、開いているか閉じているか、脱炭しているか否か、等)

- 5) 欠陥品の割合
- 6) 欠陥を含む生産品のロットサイズ

図 5-20 は、本システムのエンジン部を示すカードである。上部が入力部となっており、3つの入力部がある。左が部品入力部で、部品の種類と疵の位置を入力するカードにつながる（図 5-21）。中央が工程を入力するカードに接続される（図 5-22）。また右は、欠陥の性状を入力するカードにつながる。

欠陥診断システム

---

**情報入力**

PARTS

PROCESSES

PROPERTIES

確信度計算

基礎確率表

---

**原因・対策推定**

疵種類	材料	ロール	鍛造	鍛造	鍛造	トリム	熱処理	打痕
疵種類	疵	疵	型設計	型製作	作業	疵	疵	引かき
確信度	26.1	19.3	34.4	0	20.3	0	0	0

DRAW PIE CHART

学習

MAIN MENU

GO PREVIOUS

GO NEXT

FORDIA

図 5-20 エンジンカード

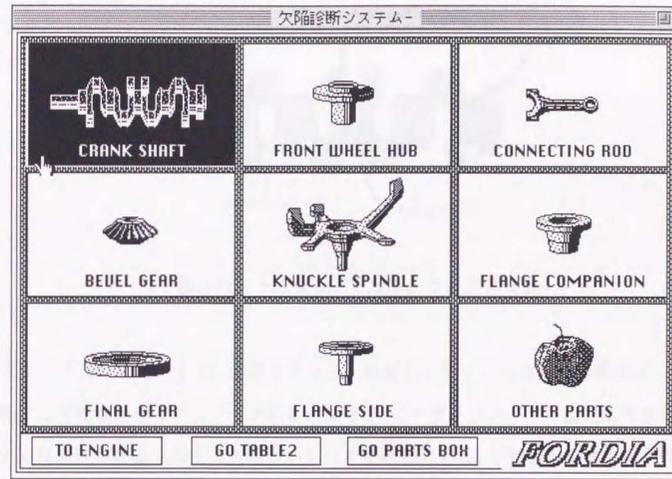


図 5-21 部品選択カード

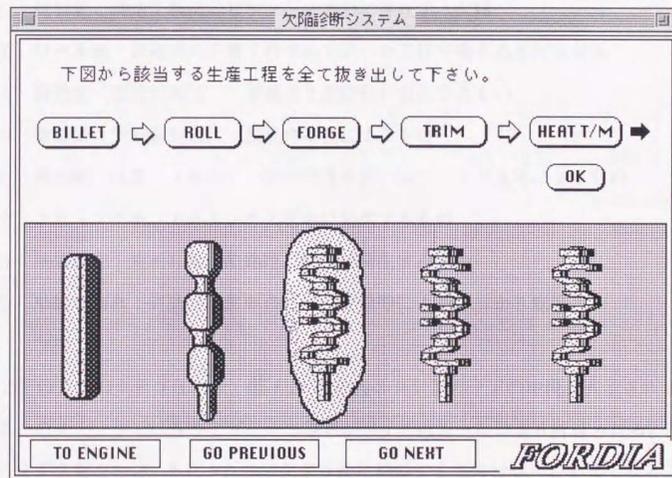


図 5-22 工程選択カード

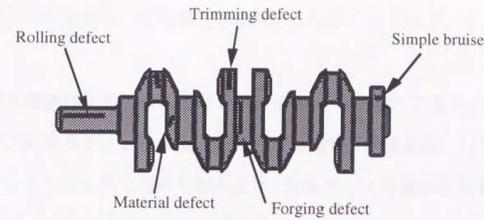


図 5-23 クランクシャフトの主な鍛造欠陥

本システムは 2 ステップの診断からなる。最初のステップは欠陥の分類推定である。欠陥には何種類かのカテゴリーがある。図 5-23 にクランクシャフト鍛造品の表面に発生する可能性がある典型的な欠陥のいくつかを示している。分類はおおまかに以下のように分かれる。

- 1) 材料疵：鍛造工程前のビレットにすでに存在する欠陥
- 2) ロール疵：鍛造前の予備工程であるロール工程で巻き込まれる欠陥
- 3) 鍛造疵（型設計起因）：不適當な型設計に起因するもの
- 4) 鍛造疵（型不良起因）：型製作不良によるもの
- 5) 鍛造疵（作業ミス起因）：潤滑剤量不良、ロケート不良等によるもの
- 6) トリミング疵：トリミング工程中に発生するもの
- 7) 熱処理疵：焼割れ等、熱処理工程中に発生するもの
- 8) 単純な割れ：鍛造品移動中の打痕、設備等によるひっかき疵等

上記の 8 つのカテゴリーは、図 5-20 の推論エンジンカードの中段に表示される。この第一のステップでは各カテゴリーの確率がベイズのルールにより計算される。そのためにもまず必要なのは、それぞれの結果が兆候に対応する条件付確率が必要となる。ここではこの既知であるべき確率を「基礎確率」と呼ぶことにする。基礎確率のうちいくつかは理論的に決定され得るが、その他は経験的な情報から決定される。不確かな経験的

基礎確率は学習システムによって更新されるが、これについては5.4.4節にて述べる。

2ステップ目の推論は欠陥の原因と対策の検索のためのものである。このステップは鍛造技術者の専門的知識を必要とする。入力された情報(状況証拠)にしたがって、システムは知識ベースから必要な指示を取り出す。知識ベースは鍛造技術者の経験的知識[16]と有限要素法(FEM)解析によって得られた解析的データからなるものである。提案されたシステムは原因と結果表示のため画像情報(動画)を取り込む。また前節で紹介したプラスチックのモデル実験の結果も連続写真のデータとして格納することができる。この結果の表示方法は診断結果を説明するのに文字や定量的な表現に比べてより効果的なものである。

システムはMacintoshに対応しており、プログラミングツールとしてHyperCardを使用している。知識部の有限要素法解析結果はワークステーション上で剛塑性有限要素法の市販コード"DEFORM"を使用して作成し、後にMacintoshへ転送した。システムの詳細は、付録I「FORDIAの取扱説明」、主要プログラムは、付録II「FORDIA主要プログラム」を参照されたい。

#### 5.4.4 推論方法

本研究はベイズの確率を用いて独自の方法を採用している。本節は、「鍛造欠陥診断システム(FORDIA)」を開発するに当たって用いた基礎式について説明するものである。

推論における確信度はいくつかの事実(Fact)とそれらの性質によって決定されるものである。それぞれの事実は結論であるカテゴリーのそれぞれに確率を与えるものである。その確率は理論的な検証や経験的な過去のデータの統計解析より決定されるものである。ここで簡単な例を用いてこの考え方を説明する。例えば2つの結論と1つの事実を以下のように設定することにしよう。

結論1: その人物は男である

結論 2：その人物は女である

事実 1：その人物の髪は長い

この場合、これだけの事実だけでは結論を決定づけることはできない。なぜならたとえ髪が長くても人物が男の可能性もあるからである。しかしながらこの人物が女である可能性は高いといえる。

ここで  $P(E_i)$  を各性別の可能性 ( $i=1-n, n=2$ ) とし、 $F_j$  を  $j$  番目の事実 (Fact) とする。 $F_1$  はここで「髪が長い」という事実を表す。また  $P(E_i|F_j)$  は  $F_j$  が明らかになった際の  $E_i$  の起こる確率を意味する。これは条件付確率と呼ばれる。同様に  $P(F_j|E_i)$  は、 $E_i$  の条件の元に  $F_j$  の起こる確率と言い表せる。ベイズの定理を用いると  $P(F_j|E_i)$  は以下のように表せる。

$$P(E_i|F_j) = \frac{P(E_i) \cdot P(F_j|E_i)}{\sum_{i=1}^n (P(E_i) \cdot P(F_j|E_i))} \quad \text{式 (5-2)}$$

次に事実が 2 個あった場合はどうなるか。2 番目として次の事実を追加する。

事実 2：人物はスカートをはいている

この事実はやはりその人物が女であることを強くサポートする。

ここで次の式を得る。

$$P(F_1, F_2|E_i) = P(F_1|F_2, E_i) \cdot P(F_2|E_i) \quad \text{式 (5-3)}$$

もし  $F_1$  が  $F_2$  から独立であるならば、

$$P(F_1|F_2, E_i) = P(F_1|E_i) \quad \text{式 (5-4)}$$

$$P(F_1, F_2|E_i) = P(F_1|E_i) \cdot P(F_2|E_i) \quad \text{式 (5-5)}$$

この結果、式 (5-2) は、 $F_1$  と  $F_2$  が互いに独立であるという条件で以下ようになる。

$$P(E_i|F_1, F_2) = \frac{P(E_i) \cdot P(F_1|E_i) \cdot P(F_2|E_i)}{\sum_{i=1}^n (P(E_i) \cdot P(F_1|E_i) \cdot P(F_2|E_i))} \quad \text{式 (5-6)}$$

事実の数をさらに増やして一般的な形とすると次式のようなになる。ここで  $m$  を事実の総数、 $n$  を結論 (Event) の総数とする。

$$\begin{aligned}
P(E_i | F_1, F_2, \dots, F_m) &= \frac{P(E_i) \cdot P(F_1 | E_i) \cdots P(F_m | E_i)}{\sum_{j=1}^n (P(E_j) \cdot P(F_1 | E_j) \cdots P(F_m | E_j))} \\
&= \frac{P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j | E_i)}{\sum_{j=1}^n (P(E_j) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j | E_j))} \quad \text{式 (5-7)}
\end{aligned}$$

式 (5-7) から  $F_j$  の確信度を得ることができる。ここで結論  $i$  に関する全ての条件付確率が既知であれば、事実  $j$  を確認した上での結論  $i$  の確率を求めることができる。言い替えると、確信度を得るためには全ての条件付確率が必要となる。

これを疵のカテゴリーを決定する推論に使用してみよう。例えば、図 5-23 のクランクシャフトの例でギアシャフト部分に疵が発生したとしよう。その他の情報は一切ないとすると、与えられた情報は、「クランクシャフトという部品のギアシャフト部に疵が発生した。」という文章に置き換えられる。

この場合、専門家は「それは多分ロール工程ではいった疵だ。」と判断する。彼がこう発言する裏には、そういった経験があるからである。「多分」を「おそらく」、「もしかしたら」、あるいは「ほぼ間違いなく」という表現に置き換えることによってその確信度の変化を表すことができる。

このシステムでは結論として「何パーセントの確率でその疵がロール工程に起因する物である。」という言い方をしている。この確信度の計算に式 (5-6) を用いたのがこのシステムの特徴である。

$E$  は一つの結論を表し、 $F$  は確認された事実を表す。ここでは、

$E_1$ ; この疵はロール工程に起因するものである。

$E_2$ ; この疵はロール工程に起因しないものである。

$F$ ; クランクシャフトのギアシャフトにはいった疵である。

となる。各条件付き確率を文章で表すと以下のようなになる。

$P(E_i | F)$ ; クランクシャフトで疵がギアシャフトにはいつているという事実を基に、この疵がロール工程に起因するものであると言える確率

$P(F | E_i)$ ; 疵がロール工程で発生した場合に、クランクシャフトのギアシャフト部分に発生する確率

$P(E_i)$ ; 疵がロール工程に起因するものである確率

$P(FE_i)$ や  $P(E_i)$  (以下このような確率を基礎確率と呼ぶことにする。) は、過去のデータやインタビューから得ることができる。図 5-24 に得られた基礎確率のマトリックスを示す。これによって式 (5-6) を用いて未知である  $P(E_i, F)$  を求めることができる。

FORDIA MAIN									
PROBABILITY TABLE									
Interrogations	Mtrl	Roll	F-DD	F-DM	F-OP	Trim	Heat	Crack	
Average	10	5	25	10	15	5	20	10	
Unknown	100	100	100	100	100	100	100	100	
Type	Open	10	10	10	10	10	70	10	100
	Closed	90	90	90	90	90	30	90	0
Depth (mm)	> 0.3	50	60	50	25	20	50	70	50
	< 0.3	50	40	50	75	80	50	30	50
Decarburized	Yes	100	100	100	100	100	100	0	100
	No	0	0	0	0	0	0	100	0
Unique to the die	Yes	10	20	5	100	30	30	10	30
	No	90	80	95	0	70	70	90	70
Defect Ratio(%)	>80	40	15	50	50	15	15	60	15
	10<, <80	30	35	35	35	35	35	30	35
	<10	30	50	15	15	50	60	10	50

TO ENGINE    GO PREVIOUS    GO NEXT    FORDIA

図 5-24 基礎確率マトリックス

より正確なデータを用いるためには、経験的確率は常時修正される必要がある。ひとつの条件の組み合わせの事例で、真の結論が明らかになった場合、確率データを更新することができる。その際必要となるパラメータは、旧データに対する新データの重みづけのためのものである。これを重み  $\beta$  とする。仮に正しい結論を  $E$  とし、選ばれた事実を  $k_1$  としよう。システムは選ばれた事実を対象として、次式にしたがって見かけの基礎確率を修正していく。

$k = k_1$  の場合、

$$P(F_j(k)|E_i) = \frac{P_p(F_j(k)|E_i) + \beta}{1 + \beta} \quad \text{式 (5-8)}$$

$k \neq k_1$  の場合、

$$P(F_j(k)|E_i) = \frac{P_p(F_j(k)|E_i)}{1 + \beta} \quad \text{式 (5-9)}$$

$k_1 = 0$  の場合、

$$P(F_j(k)|E_i) = P_p(F_j(k)|E_i) \quad \text{式 (5-10)}$$

$\beta$  = 学習修正率、 $P_p$  = 修正前確率

これらの式をまとめて、

$$P(F_j(k)|E_i) = \frac{P_p(F_j(k)|E_i) + \beta \cdot \delta_{k,k_1} \cdot (1 - \delta_{2k_1,k_1})}{1 + \beta \cdot (1 - \delta_{2k_1,k_1})} \quad \text{式 (5-11)}$$

同様にもう一つの修正重み  $\gamma$  を用いて平均確率を修正する式を求めると次式のようなになる。

$$P(E_i) = \frac{P_p(E_i) + \gamma \cdot \delta_{k,k_1}}{1 + \gamma} \quad \text{式 (5-12)}$$

これで求める確信度を式 (5-7) から得ることができ、また式 (5-11) と式 (5-12) より基礎確率を更新する学習が可能となる。

#### 5. 4. 5 知識部

疵のカテゴリの推定を終えると、ユーザはそれぞれのカテゴリに対応した原因と処置の説明をカードの提示によって見ることができる。(図 5-25) ここでは基本的に文章による説明がされているが、これをサポートする意味で、疵生成のメカニズムに関する有限要素法の解析結果を見ることが可能である。これはあらかじめワークステーションで計算された結果が映像としてデータベース化されて本システムに蓄えられているものである。現在有限要素法による解析例は約 60 あり、入力情報に従って、必要なグラフィックのカードを呼び出す。変形の再現はアニメーション形式になっており、疵の発生メカニズムが可視的に確認することができる。(図 5-26)

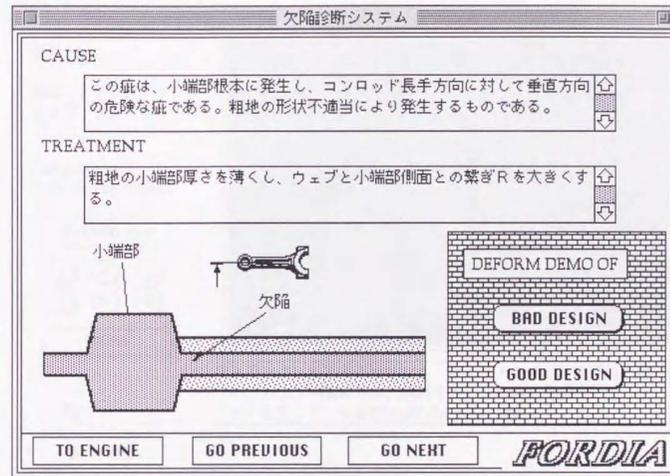


図 5-25 原因と対策カード

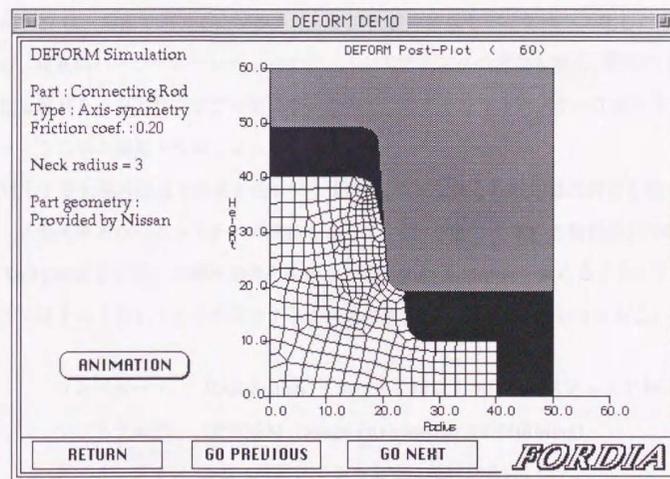


図 5-26 FEM 結果アニメーションカード

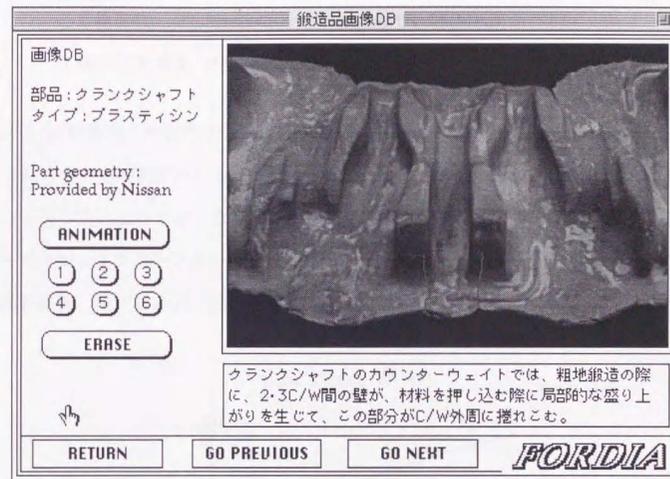


図 5-27 プラスティシン実験結果表示カード

図 5-27 は、前節で紹介したプラスティシン実験の結果をデータベース化したものである。現在のパーソナルコンピュータは、ハードディスクの容量も増え、映像のデジタル化も容易なハンドリングで可能になったのでこのようなマルチメディア型のエキスパートシステム構築も容易になった。

対応する欠陥の原因と結果を表示する仕組みは、解析知識と経験知識の両方を扱う知識ベース型エキスパートシステムの構造をとっている。著者は金属成形解析用の市販コード"DEFORM"を使用して解析知識を集めた。現在 60 以上の事例を集めることができた。ここではそのうちいくつかを紹介する。共通の解析条件は以下のとおりである。

コンピュータ VAX Station (オハイオ州立大学生産システム工学科)  
 ソフトウェア DEFORM (Design Environment for FORMing)  
 デイメンジョン 2-D (平面ひずみあるいは軸対称条件)  
 温度 1200° c、定温条件

金型 剛体

応力線形状  $\text{Stress}=200*\text{Strain-rate}^{**}0.25(\text{MPa})$

プレス加工速度 100 mm/Second (直線運動)

図 5-28 に使用した応力-ひずみ線図を示す。

これらの共通解析条件のもと、数々の鍛造欠陥生成シミュレーションを FEM 解析を用いて行った。ここでは、その中から、クランクシャフト・ジャーナル疵、コンロッド I-セクションフロースルー疵、コンロッド小端部打ち込み疵、ファイナルギアプレート部座屈疵、吸い込み疵、について紹介する。

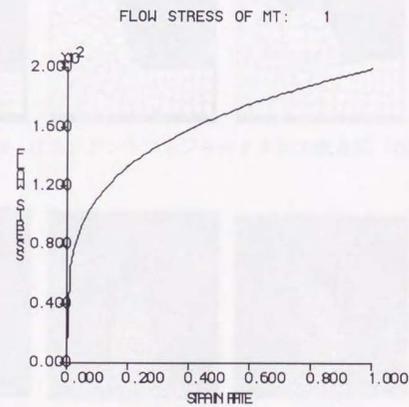


図 5-28 応力-ひずみ線図

(1) クランクシャフト・ジャーナル疵

図 5-29 はジャーナルの表面に発生するラップ (かぶさり) 疵を示している。体積過多の粗地の一部が、仕上げ型のエッジによってカウンターウェイトの付け根に移動するが、この変形中に粗地の隅 R が小さい場合にこれがジャーナルの表面に折り込まれる。この疵を回避するためには、この部分の R を大きくする必要がある。

図 5-29 は、前工程である粗地のカウンターウェイト付けねRが3と小さい値であるのに、改善案はこのRを10とした。この結果図 5-30 に示すようにこの欠陥を回避することができた例である。

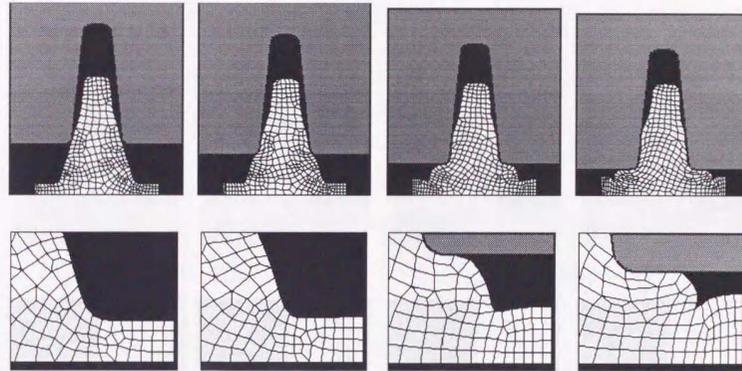


図 5-29 クランクシャフトジャーナル疵生成過程 (粗地 R=3)

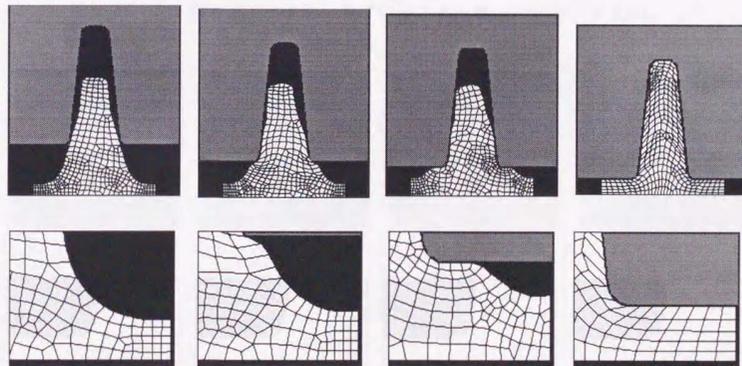


図 5-30 クランクシャフトジャーナル疵回避 (粗地 R=10)

(2) コンロッドI-セクションフロースルー疵

図5-31はコネクティングロッドにおけるフロースルー疵生成のメカニズムを示している。基本的にリップの付け根のコーナーが尖っており、潤滑が十分すぎる場合にこのような疵が生じる。ここにRがあるか、また潤滑条件が悪い場合にこの種の疵を避けることができる。図5-32は、R付加のケースである。

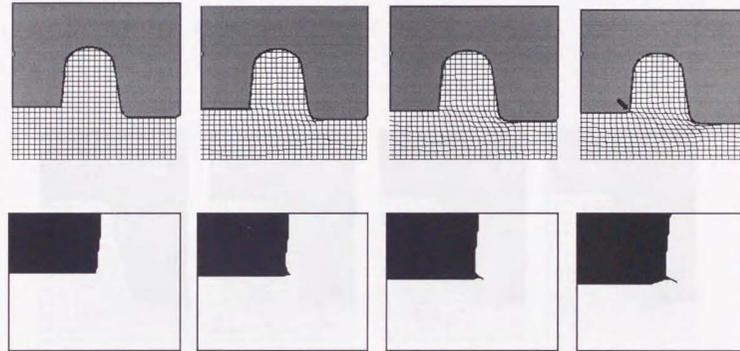


図5-31 コンロッドI-セクションフロースルー疵 (フィレット R=0)

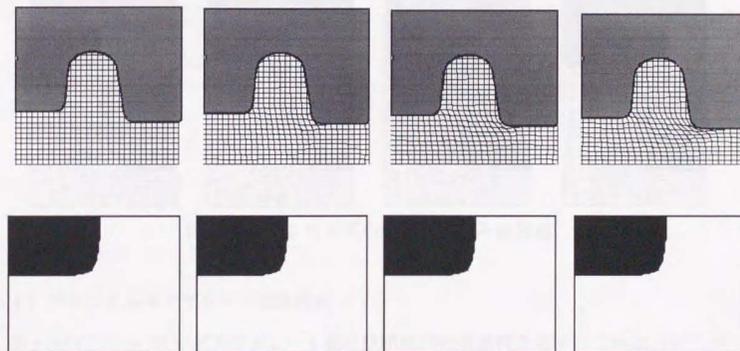


図5-32 コンロッドI-セクションフロースルー疵回避 (フィレット R=1)

### (3) コンロッド小端部打ち込み疵

図5-33は、コンロッドの小端部の打ち込み疵である。この原因と対策カードは、図5-25に示した。FEMシミュレーションのアニメーションデータベースのイメージは、図5-26に示している。ここに記したように、プリフォーム形状のテーパ部が仕上型形状に対して膨らんでいるため、仕上鍛造の早いタイミングで粗地と仕上型が接触を開始するため、テーパ部の材料がそぎ取られるようになりウェブ部に打ち込まれているのがわかる。この回避には、粗地の形状を接触タイミングが遅れるように改良することが重要である。(図5-34)

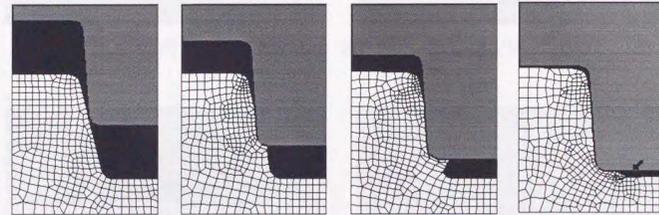


図5-33 コンロッド小端部打ち込み疵

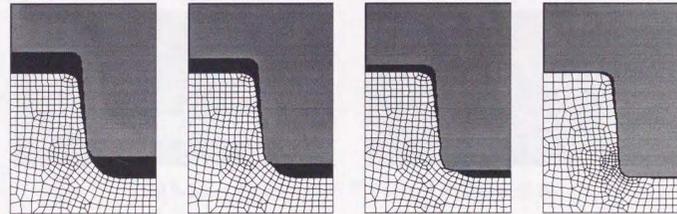


図5-34 コンロッド小端部打ち込み疵回避

### (4) ファイナルギアプレート部座屈疵

図5-35にファイナルギアのプレート部の座屈疵の生成過程を示す。これは、プリフォームの外周リング部のボリュームが大きいため、中心に向かう流れが大きいと、ウェブプレート部のプリフォームの厚みが小さいために起こるものである。これを回避するためには、プリフォームの外周リング部のボリュームを減らす必要がある。(図5-36)

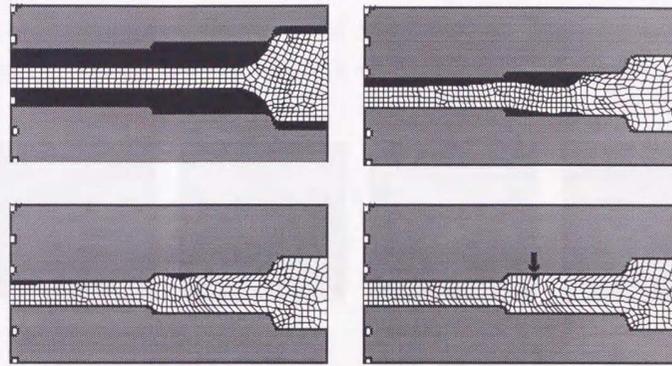


図 5-35 ファイナルギアプレート部座屈疵

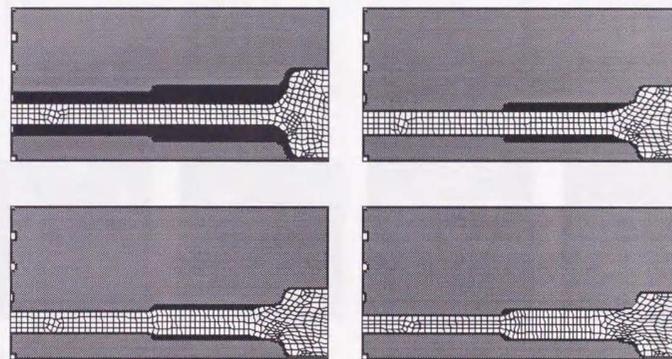


図 5-36 ファイナルギアプレート部座屈疵回避

(5) 吸い込み (Suck-in) 疵

これはサイドフランジの鍛造時にフランジ表面のセンター付近に、引き込まれる疵の生成シミュレーションを示している。フランジの上面中心点から、軸中心線に沿って材料の中に吸い込まれていくので、この種の欠陥を吸い込み疵と呼んでいる。これは主にアブセットされたピレットの長さ/直径比 (L/D) に起因するものである。この比が同じ場合は、摩擦係数が結果に影響する。L/D 比が非常に低い場合は図 5-37 に見られるよ

うにきわめて細い垂直の吸い込み疵が発生する。この場合疵の深さは4mm以上に達する。L/D比が十分に高い場合は、この疵は避けることができる。(図5-38、図5-39) 摩擦係数が高い場合は、ビレットの形状因子にかかわらず疵は発生しない。(図5-40)

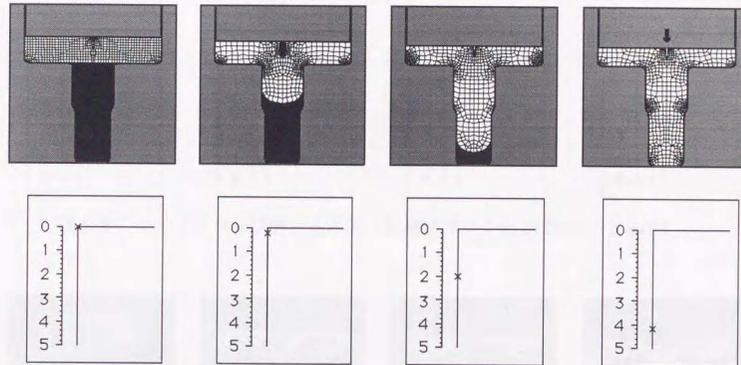


図5-37 サイドフランジ吸い込み疵 (初期ブランク厚15.7mm、 $\mu=0.0$ )

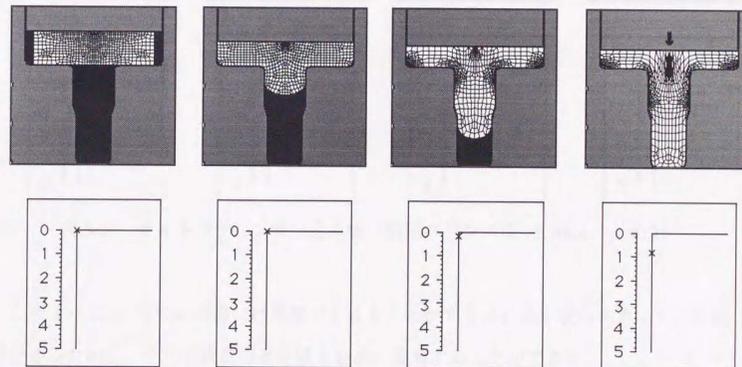


図5-38 サイドフランジ吸い込み疵 (初期ブランク厚20.0mm、 $\mu=0.0$ )

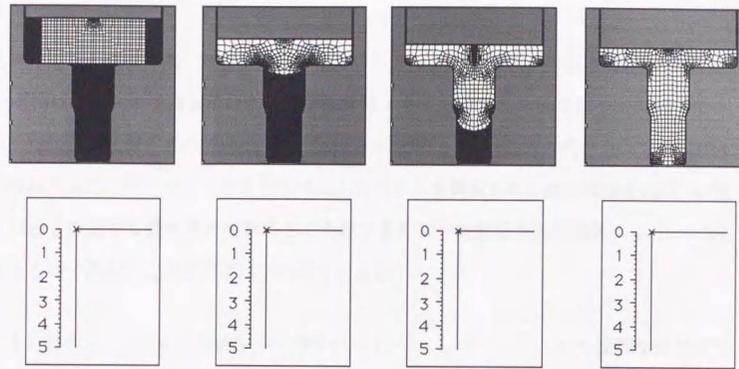


図 5-39 サイドフランジ吸い込み疵 (初期ブランク厚 27.0mm、 $\mu=0.0$ )

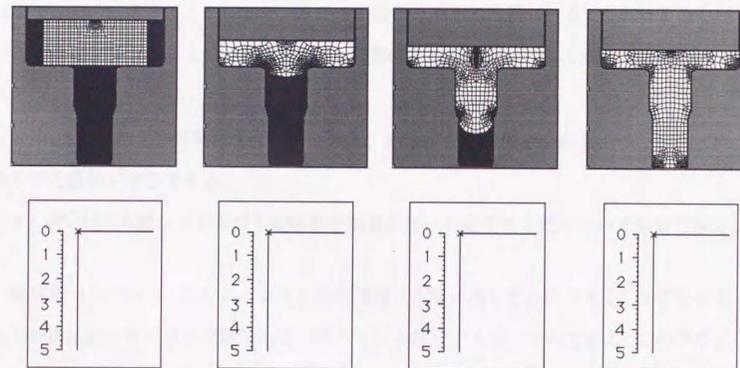


図 5-40 サイドフランジ吸い込み疵 (初期ブランク厚 15.7mm、 $\mu=0.2$ )

このようにユーザは、実際には現場でも見ることができない疵生成のメカニズムを体験できるように、その生成原因と対策を容易に理解することができる。

一方本システムは、FEM では解析不能な経験的知識もサポートしており、数値解析的あるいは経験的両方の知識部を持っており、必要な知識にアクセスできるようになっている。経験的知識については付録Ⅲを参照のこと。

#### 5. 4. 6 結言

本稿はベイズの推論を用いた鍛造欠陥診断エキスパートシステムについて述べてきた。特に著者はベイズの定理に基づく推論方式を開発した。この方式を用いて FORDIA と呼ばれるハイパーカードのエキスパートシステムを開発した。基本的な方式は、お互いに独立の充分な量の事実を集めることができれば一般的な生産用診断システムに使えるものである。この方式は以下の利点がある。

- (1) 簡易さ：公式化が単純なので通常のベイジアン・ネットワークの複雑な条件的プログラミングを行わなくてすむ。単純さゆえ他の適用例への変換が容易である。
- (2) 正確さ：ベイズの積算型のアプローチなので、一つの事実他の全ての有力な証拠(事実)を否定することが可能で、結果が正確な確率として得られる。これは重みを用いた和算型評価システムには無い特徴で、実際の専門家による診断の推論に近いものである。
- (3) 兆候の結果への属性：各因子、事実、兆候がどの程度その結果につながっているかが定量的に把握できる。
- (4) 適応性：学習システムが基礎確率を事実に従って更新するだけなので単純である。

熱間鍛造の分野は、このような人工知能適用に非常に適した分野である。なぜなら現在の技術活動が専門家の経験的知識に頼っている部分が多いからである。このプロジェクトでは経験的知識に加えて、有限要素法による解析的知識も扱っている。これによって現工程のフィールドのデータとエンジニアリングデザインを結び付ける有用なツールを完成することができた。このシステムの特徴的なところは、結果のグラフィック表示にある。結果はグラフィック表示されアニメ化されているので欠陥の生成メカニズムの理解を簡易化することが可能である。

現システムは統計的に独立の因子のみ扱うことができる。多くの場合、因子は交互作用が存在し、独立でない。著者は各因子間の相関係数を用いることによって非独立型因子を扱える単純な確信度計算の方法を開発中である。一例を上げるならば、もし相関係

数が0であれば、2因子間は独立であるといえ、定式化を変更する必要はない。1あるいは-1ならば、公式の修正は容易である。問題はこの中間に値がある場合である。この中間値の交互作用をシステムティックに扱えれば、真にアダプティブな診断システムの構築は可能となる。

他に実用的なシステムとするためには、さまざまな現場の知識をいれる必要がある。学習システムの実用化試験で、真の基礎確率を収集することが重要であろう。

本システムは主に鍛造部門のエキスパートシステムのプロトタイプとして開発した物で、今後鍛造全般のシステムとして拡張する予定である。今後は、品質の改善のみならず、鍛造品の原価構成上重要な位置を占める型費の低減などに効果のあるシステムの開発を目指している。

#### 参考文献

- 1) 藤川、佐藤、桐本、吉田、島村：「鍛造コンロッドIセクション疵発生に関する一考察」、塑性加工春季講演会講演論文集、1(1991)、573-576
- 2) Johnson, M. and Kudo, H. : The mechanics of metal extrusion
- 3) 工藤英明：塑性学、145-193
- 4) Rowe, : Elements of metalworking theory, 65-105
- 5) Fujikawa, S., and Ishii, K. : "Diagnostic Expert Systems for Defects in Forged Parts, Proceeding of AIENG '93, 2 (1993), 163- 178.
- 6) Shortliffe, E. H. and Buchanan, B. G. : "A model of Inexact Reasoning in Medicine," *Mathematical Bioscience* 23 (1975), 351-379.
- 7) Graham, J. H. and Espinosa, A., : "Computer Assisted Analysis of Electromyographic Data in Diagnosis of Low Back Pain," Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 3 (1989), 1118-1123

- 8) Agogino, A. M., Russell, S., and Guha, R. : "Sensor Fusion Using Influence Diagrams and Reasoning by Analogy : Application to Milling Machine Monitoring and Control." *Artificial Intelligence in Engineering: Diagnostics and Learning (Computational Mechanics Publications, Southampton)*, (1988), 333-358.
- 9) Kaplan, S., Katar, A., Epstein, S. A., Bley, D. C., and Emerson, M. A. : "COPILOT. A PC-based Expert System for Reactor Operational Assistance Using a Bayesian Diagnostic Module," *Reliability Engineering & System Safety*, 30(1990), 219-237.
- 10) Guamo, S. B. : "Diagnostic Models for Engineering Process Management. A Critical Review of Objectives, Constraints and Applicable Tools," *Reliability Engineering & System Safety*, 30(1990), 21-50.
- 11) Sevenler, K., Kim, H., and Altan, T. : "Computer Applications in Cold Forging - Determination of the Processing Sequence and Die Design," Proceedings of 8th International Cold Forging Congress., (1990), 209-221.
- 12) Osakada, K., Kado, T. and Yang, G. B. : "Application of AI Technique to Process Planning of Cold Forging," Proceedings of CIRP., 37, (1988), 239-242.
- 13) Azushima, A. and Kawaguchi, N. : "The Expert System Using a Personal Computer for Cold Forging Sequence Designing", the proceedings of 43rd JSTP conference, 1.(1992), 461-464
- 14) Motomura, M., Ohashi, T. and Otsubo, T. : "Automatic Process Designing of Axisymmetric Hot Forgings," the proceedings of 42nd JSTP conference, 1(1992), 451-454.
- 15) Oh, S.I., Wu, W.T., Tang, J.P., and Vedhanayagam, A. "Capabilities and Applications of FEM code DEFORM: The Perspective of the Developer," *J. of Material Processing Technology*, 27(1991), 25-42.
- 16) Altan, T., Boulger, F. W., Becker, J. R., Akgerman, N. and Henning, H. J. : Forging Equipment, Materials, and Practices., 1973 (Metals and Ceramics Information Center., Columbus, OH.)

## 第6章

### 鍛造金型寿命向上のためのシミュレーション適用

#### 6.1 緒言

鍛造品原価に対する金型経費の比率は約20%に達しており、コスト低減の重要な攻めどころとして認識されてきている。この間、型寿命向上に関する試みは行われているものの、CAE手法や信頼性手法によるシステムティックな取り組みは、あまり行われていなかった。また、新しい部品の設定時、見積原価を算出しなければならないが、形状がいままでの部品と異なる場合、生産立ち上がり後の標準型寿命の設定が難しく、期待通りの原価に納まらないケースもある。鍛造技術分野では、この現行部品の型寿命に関する解析手法の確立と、新部品の型寿命予測技術の確立が大きな課題となっている。

それに伴い使用する金型も量産体制で対処している。標準型寿命は、過去の類似形状の部品の型寿命の平均値で設定しているが、本来その部品形状に対しての標準型寿命はどうあるべきか、といった観点で設定しているわけではない。どの金型が改善余地が大きいのか、という問題は解決できておらず、金型補充上、在庫の少ないものや、類似形状の部品群の中から金型寿命平均値の比較的低いものなどを改善の対象にしてしまうケースが多かった。

今回、鍛造シミュレーション技術を鍛造金型の寿命改善に適用するにあたって、信頼性手法を組み合わせて効率的な取り組みを試みた。また、改善後の寿命予測も合わせて行ったのでこの研究について述べることにする。

### 6. 1. 1 鍛造金型寿命改善に関する従来の研究

1980年代から数値解析手法が、鍛造分野に適用され始めたが、最初は荷重予測、変形の解析、欠陥の解析等が主であった[1]。鍛造金型の寿命向上というテーマは、鍛造技術者、塑性加工学関係者にとって大変興味深いものであった。この解析手法が型寿命向上というテーマにまだ適用が開始されていないころは、主に金型材料の高寿命化、あるいは表面効果処理による高寿命化等が命題となり、実験主体の取り組みが行われていた[2]。

1980年代の後半からは、FEMなど数値解析手法が、鍛造金型寿命の改善に用いられるケースが見られ始めた。平井らは、1986年にFEMを用いて冷間鍛造ダイの内径に生ずる応力集中に及ぼすダイシュリンクリングの形状の影響を解析し、工具寿命延長に関する提案を行った[3]。Verdanらは、1987年に鍛造用FEMプログラムであるALPIDを使用して、据え込み加工におけるダイス摩耗の解析を行った[4]。

しかし、金型寿命向上のための数値解析を用いた研究は、1990年代になり顕著になる。Doegeらは、1990年に熱間鍛造における摩擦摩耗プロセスにアドヒージョンに関する理論を適用した[5,6]。Knoerrらは、1992年に冷間鍛造パンチの破損にFEMによる応力解析を適用し、応力軽減のパンチ形状を提案した[7,8]。また、Geigerらは、1992年に金属成形型における疲労クラック発生シミュレーションへのエネルギーベースのアプローチを試みた[9,10,11]。長尾らは、1994年に鍛造冷間部品である自動車の等速ジョイント部品の金型応力解析をDEFORMを用いて解析した[12]。これらの金型の応力解析を中心とした研究は、現在も盛んである。

これに対して、金型寿命の予測に関する研究も行われるようになった。Engelらは、1995年に冷間鍛造金型の寿命解析に、ばらつきを考慮した方法を試みている[13]。この考え方は著者のアプローチに通ずる考え方である[14,15]。一方、熱間鍛造金型の摩耗予測に関する研究もPainerらによって1996年に行われている[16]。

### 6. 1. 2 鍛造金型の寿命タイプとアプローチ

鍛造金型の寿命の迎え型には、大きく分けて二つのタイプがある。図6-1は、この典型的な二つのタイプ、即ち、摩耗と割れ（破損）を示している。

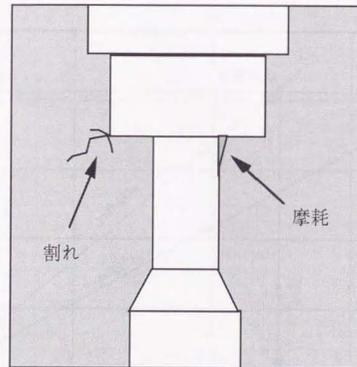


図6-1 鍛造金型寿命の2つのタイプ

摩耗は、金型表面上の材料流動が激しい部位に生じやすい。この現象は一般に、面圧と材料の移動距離の関数になるという報告がされている[16]。金型表面上の剪断力を減ずるという方策が有効であるが、熱の影響も少なくない。著者は、この摩耗量の測定については、計測が困難と判断し、ワークの重量の推移を計って相対的な摩耗量と判断し、現場での実験を行ったことがある。部品は、コネクティングロッドを用い、標準型寿命50,000個であったので、1,000打毎にサンプリングし、重量推移を見た。図6-2は、2つの潤滑剤で、相対摩耗量を評価したものである。摩耗量は、鍛造打数にほぼ比例することがわかった。リング圧縮試験の結果、潤滑剤Aの摩擦係数が0.20、潤滑剤Bの摩擦係数が0.28であった。このことから、熱間鍛造においては、摩擦係数が低い方が、滑りを発生しやすく、摩耗が促進されることがわかった。熱間鍛造は、一般的に材料と金型表面が固着しながら変形する工法であるので、このような現象が起こる。これに対し冷間鍛造は、燐酸塩皮膜処理などを行って、材料と金型を相対的に滑らせることによって変形させるので、摩擦係数と摩耗量の関係は、全く逆になることが予想される。い

ずれにしても摩耗は、条件が一定であれば鍛造一打当たりの摩耗量が、大きく変化することは考えられないので、安定的な寿命が期待できる。

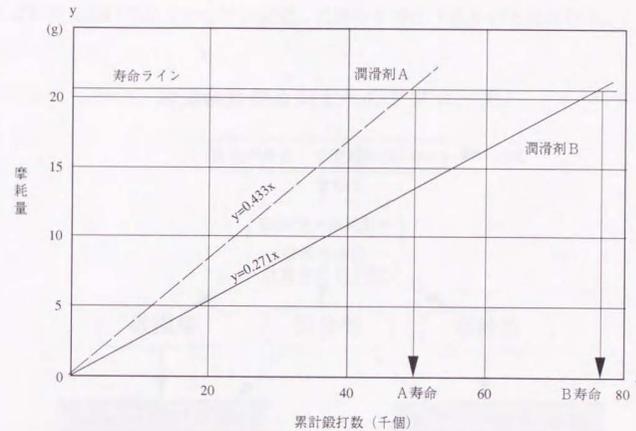


図 6-2 コンロッドの潤滑剤別摩耗量推移

破損に関しては、この寿命の安定化はあまり期待できない。割れは入力の変動的な要素が大きく、疲労破壊の要素もあるため、寿命予測が極めて難しい。著者は現場データに対して、信頼性解析を試みたが、不安定な寿命であることがわかった。これについては次節で詳細を述べる。理論的な疲労破壊であれば、一定の寿命が期待できるが、現場ではそのような理想的な条件は期待できないので、現実的な寿命予測は困難である。これは、熱入力のばらつきや、鍛造品の材料のばらつき、あるいは金型材料の強度のばらつき等が作用して、疲労破壊に影響を与えると思われる累積ダメージが変動するためであると思われる。

一般に、破損は図 6-1 で示したように、金型のフィレット部に発生することが多い。これは応力集中により、局所的に相対的に強度の低い部分ができるためである。したがってこの小さい半径部の型製作のでき如何によっても応力集中係数が大きく変動する可能性がある。

摩耗が進行する部分は、一般的に金型側から見れば凸の部分に多く、熱間鍛造においては、フラッシュが出る部分、すなわちフラッシュランドの部分が多く、形状的に複雑でない、一打一打の入力がばらついても、寿命全般にわたるトータルの入力がそれほど大きくばらつくわけではないので、安定した寿命を構成するものと思われる。

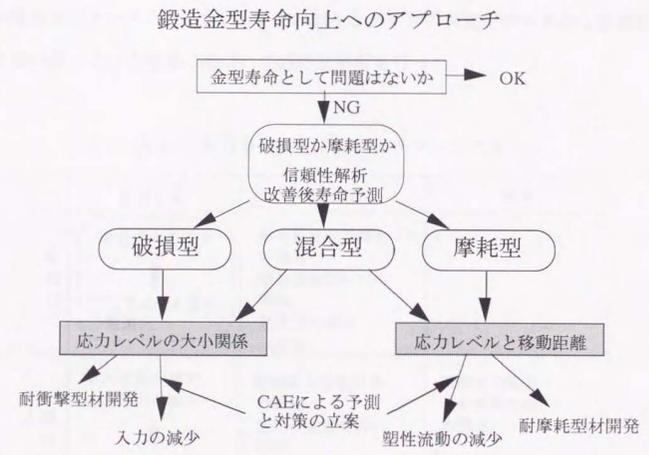


図6-3 金型寿命向上アプローチ

著者は、それを検証するために現場データの多くを解析し、この型寿命のタイプを確定するための方策を考案した。寿命改善には、この2つのタイプの内、破損型をターゲットとする方が、効果が期待できるためこれに、FEM解析を組み合わせることにより、改善の手順を考案した。本章のテーマであるこのアプローチを図式化すると図6-3のようになる。

まず現在の金型寿命が標準的なものであるかどうかという判定が必要になる。これは、あくまでもいままでの標準データとの比較で行う必要がある。あるいは、類似部品の一番寿命が長く、安定しているものを標準とする方法もある。

これでOKなら、型寿命改善の必要がない。次のアプローチは前述した、摩耗型か、破損型かという命題である。これは両極端の例であるが境界はわかりにくい。現場作業者の観察による判断で、ある程度データの的に判断することができるが、個人の判断の差もあるし、複合型の場合は判定しにくい。複合型とは、新型の時は、強度的に十分であり、破損する確率はほぼ0に等しいが、金型表面が摩耗により劣化していくと、破損の確率が増加するケースのことをいう。このようなタイプの判定をデータから定量的に判断できないか、という課題に基づいて信頼性解析を行った。

表6-1 金型寿命向上アプローチマトリクス

	被加工材	加工材	境界
破損型	鍛造応力の減少 ↓ プリフォーム形状の最適化	耐衝撃性金型材料の開発 耐熱性金型材料の開発 熱入力減少(冷却)	
摩耗型	材料流動の減少 鍛造応力の減少 ↓ プリフォーム形状の最適化	耐摩耗性金型材料の開発 耐熱性金型材料の開発 熱入力減少(冷却)	潤滑剤の減少(必要最小限、均等化)

この結果、破損型、摩耗型、そして混合型のある程度の定量的評価のためのデータ解析上の指標を得ることができた。これによって、破損型の寿命改善が比較的容易なため、取り組みのターゲットを絞ることができる。破損型は、鍛造中の型表面応力分布の中で、高い部分の対策を考えることで、寿命改善の可能性が高まる。これにFEMシミュレーションを用いれば、対策の信頼性を高めることができる。表6-1に総合的な型寿命延長の取り組みのためのマトリクスを示す。列側には、被加工材(材料)、加工材(金型)、境界、行側には破損型、摩耗型の分類を設定した。加工材の開発は、とにかく耐割れ性の向上、耐摩耗性の向上を狙った金型材料開発の命題であるので、著者のような鍛造サイドの技術者のテーマとはなりにくい。本研究では、このマトリクスの左上、即ち、破

損型の金型寿命の向上を、被加工材の対策で狙うところに焦点を置いている。

## 6. 2 信頼性手法の適用

図6-3に示したように、寿命タイプの定量的評価およびターゲットの選定のために、信頼性工学手法を採用することにした。本節ではこれについて述べる。

### 6. 2. 1 信頼性解析の基礎

信頼度  $R(t)$  とは、「ある機器またはシステムが、ある定められた条件の下で、あらかじめ定められた動作時間の間、その目的を適切に達成することができる確率」として定義される。

寿命は通常、時間の関数である。(鍛造金型の場合はショット数となる。) 寿命分布の確率密度関数を  $f(t)$  とすると、あるシステムが  $t$  時間以上故障しない確率は、信頼度として

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad \text{式 (6-1)}$$

である。一方分布関数は、

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad \text{式 (6-2)}$$

であるから

$$R(t) = 1 - F(t) \quad \text{式 (6-3)}$$

という関係がある。この  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$  の関係を図示すると、図6-4のようになる。

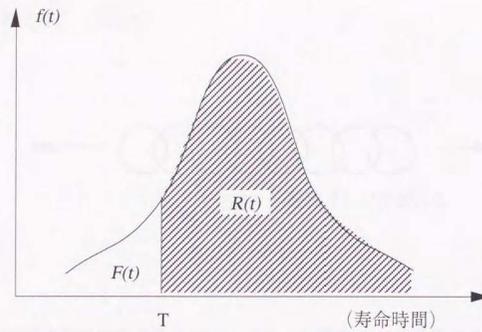


図 6-4 確率密度関数グラフ

故障率  $\lambda(t)$  は、 $t$  までシステムが実働し続けたという条件のもとで、 $t$  より  $t + \Delta t$  の間に故障する確率を求め、 $\Delta t$  で除したものの  $\Delta t \rightarrow 0$  の極限值である。定義により、

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{f(t)dt}{\int_0^{\infty} f(x)dx}$$

$$= \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad \text{式 (6-4)}$$

となり、式 (6-4) より

$$F(T) = 1 - e^{-\int_0^T \lambda(t)dt} \quad \text{式 (6-5)}$$

$$R(T) = e^{-\int_0^T \lambda(t)dt} \quad \text{式 (6-6)}$$

を導くことができる。

平均寿命 (MTBF)  $\mu$  は、下式で定義される。

$$\mu = \int_0^{\infty} x \cdot f(x)dx \quad \text{式 (6-7)}$$

$$= [-x\{1 - F(x)\}]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} \{1 - F(x)\}dx$$

$$= \int_0^{\infty} \{1 - F(x)\}dx \quad \text{式 (6-8)}$$

$$= \int_0^{\infty} R(x)dx \quad \text{式 (6-9)}$$

Weibull は 1951 年、以下の考え方によりこのワイブル分布を導入した。リングでき

たチェーンを考える。(図6-5)

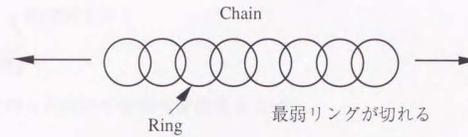


図6-5 チェーン

一つのリングの強さの分布関数を  $F(x)$  とする。  $n$  個のリングからなるチェーンが切れない確率は、

$$\{1 - F(x)\}^n$$

である。ここで

$$1 - F(x) = R(x) = e^{-\phi(x)}$$

とおくと、

$$\{1 - F(x)\}^n = e^{-n\phi(x)}$$

と書け、個数  $n$  が自然な形で取り入れられる。ここで  $\phi(x)$  は下記の特徴が要求される。

$\phi(x)$  は増加関数である。

$\phi(x)$  は、  $x \geq x_0$  のとき、  $\phi(x) > 0$

$x < x_0$  のとき、  $\phi(x) = 0$  となる。

このような条件を満足する関数として、次のような関数がある。

$$\phi(x) = \frac{(x - \gamma)^m}{\alpha} \quad \text{式 (6-10)}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{(x - \gamma)^m}{\alpha}} \quad \text{式 (6-11)}$$

$$f(x) = \frac{m}{\alpha} (x - \gamma)^{m-1} \cdot e^{-\frac{(x - \gamma)^m}{\alpha}} \quad \text{但し } x \geq \gamma$$

$$f(x) = 0 \quad \text{但し } x < \gamma \quad \text{式 (6-12)}$$

以上の考え方により新しい分布が導入された。これをワイブル分布という。この式は、寿命  $x$  に対して故障する確率を示した確率密度関数である。特に  $m=1$  の場合は指数分布

と同一になる。ここで

$$F(\eta) = 1 - e^{-1} \approx 0.63$$

であるような、 $\eta$ を設定すると、

$$\eta = \alpha_m^{-1}$$

であるので、この $\eta$ を用いて信頼度関数をもとめる。

$$\begin{aligned} R(t) &= \int_0^{\infty} f(x) dx \\ &= e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \end{aligned} \quad \text{式 (6-13)}$$

一方、累積分布関数は

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \quad \text{式 (6-14)}$$

となる。さらに故障率関数は、

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{f(t)}{1 - F(t)} \\ &= \frac{m}{\eta^m} (t - \gamma)^{m-1} \end{aligned} \quad \text{式 (6-15)}$$

ここで、

$\eta$  : 尺度のパラメータ

$m$  : 形状のパラメータ

$\gamma$  : 位置のパラメータ

とそれぞれ呼ばれる。ここで特に重要なパラメータは $m$ であり、次のような物理的意味を持っている。

$m > 1$  : 摩耗故障 (時間の経過と共に増加)

$m = 1$  : 偶発故障 (時間に関わらず故障確率が一定)

$m < 1$  : 初期故障 (時間の経過と共に減少)

本研究では、鍛造金型の寿命解析にこの形状パラメータ $m$ を比較することにした。

最後に平均寿命であるが、式 (6-7) より、次のようになる。

$$\mu = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx$$

$$= \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \quad \text{式 (6-16)}$$

ここで

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} \cdot e^{-x} dx \quad \text{式 (6-17)}$$

### 6. 2. 2 ワイブル解析によるターゲットの選定

部品群にこだわらず現状の型寿命について、広範囲にワイブル型累積ハザード紙へのプロットを行った。その結果、多くの部品について打点が直線上に乗ることが分かった。一例を図6-6に示す。

部品形状により、平均値はもちろん異なるが、プロットの形状を示す形状パラメータ ( $m$  値) も大きくばらついている。部品毎の形状パラメータ ( $m$  値) の比較を、図6-7に示す。

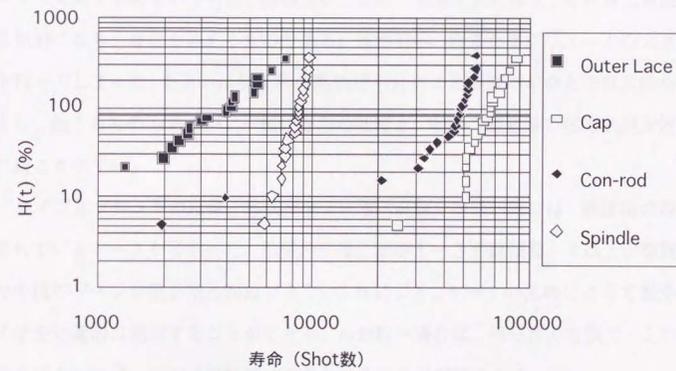


図6-6 鍛造金型寿命のハザード解析

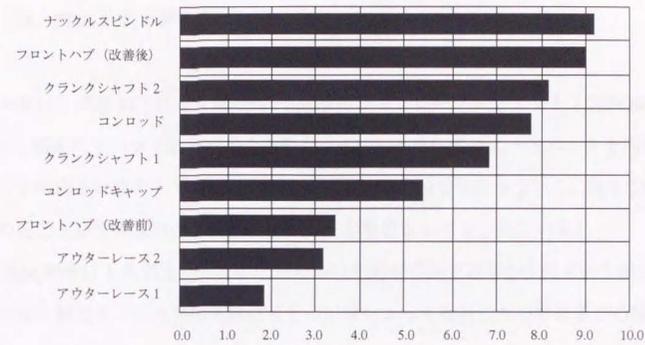


図6-7 鍛造金型部品別形状パラメータ (m値) 比較

鍛造金型の寿命を迎える形態には大別して摩耗型と破損型の2種類が考えられ、現場データにはどちらの型で寿命となったかが明記されている。摩耗型は、金型表面が摩耗により減少するために、製品寸法が大きくなり、製品形状規格を上回ったところで鍛造ロットを終了するものである。破損型は、金型に亀裂が入るなど、それ以上鍛造不可能な状態になり、寿命を迎えるものである。破損型は、たまたまボリュームの大きな材料を打ってしまった、あるいは型材料の熱処理不良による硬度不足などの偶発的な要因により、起こるものもあるが、一般に金型の強度と、実際の鍛造時の応力状態が近い場合に起こりやすい。

ワイブルプロットの結果、形状パラメータ (m 値) の低い物には、破損型の寿命が含まれているケースが多かった。数値的には、m が 1 ~ 3 が破損型、7 以上が摩耗型、その中間のゾーンが混合型と判断できた。これにより、データの処理によって型寿命のタイプを定量的に把握することができる。m が低い場合は、何らかの方策で、この破損要因を抑え込めば、分布は摩耗型に改善されることが期待される。

本改善については、FEM で応力解析を行い、対応策を考える手順であるが、これには鍛造用剛塑性有限要素法プログラムの DEFORM を用いた。このため DEFORM の材料の塑性変形と金型の弾性変形の連成解析の解析の信頼度を確認するために実験との比較を行った。

### 6.3 FEMによる金型応力解析のための実験

当社は、米国SFT社より鍛造用FEM解析シミュレーションソフト「DEFORM」を導入し、現実のデータと計算結果を比較し、ソフト改良へのフィードバックを同社と行い、ソフトの向上に協力しており、鍛造工程設計等への適用を行っている。現在では金型表面の応力、ひずみ状態のシミュレーションが可能なレベルにきている。

FEM解析による鍛造型表面の応力分布の予測が可能であるかを代表的な鍛造工法である前方押出及び後方押出実験結果との比較によって検討したので以下この検証実験について結果を報告する。

#### 6.3.1 500トン鍛造シミュレータによる実験

第2章で紹介した500トン鍛造シミュレータを用いて、前方押出及び後方押出実験を行った。鍛造時の荷重、及び金型に発生する応力ひずみを測定するために、ラムスライド一定降下速度100mm/secの冷間鍛造を行った。図6-8は、実験概要を示している。前方押出型は、図6-9のようにシミュレーションプレスにセットされており、荷重測定はプレスのロードセルによる荷重を記録した。型に発生するひずみは、パンチ及びダイにストレインゲージを取り付け、動ひずみ計を使用して行った。

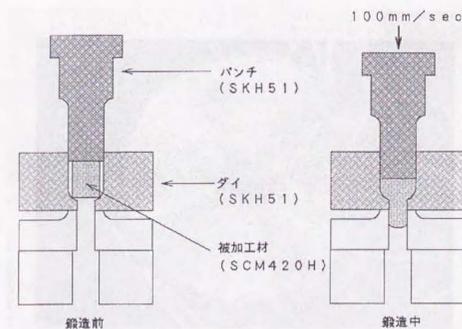


図6-8 前方押出実験

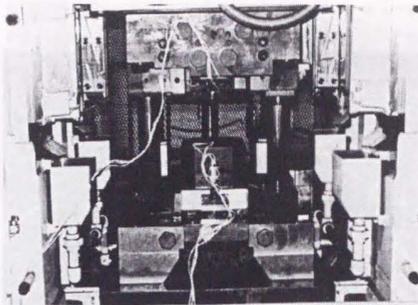


図 6-9 前方押出実験ダイセット

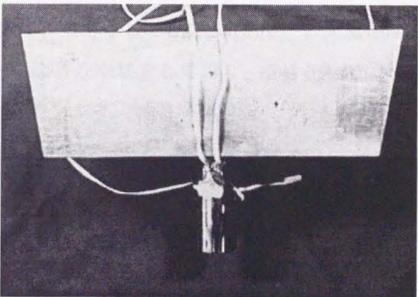


図 6-10 前方押出実験用パンチ

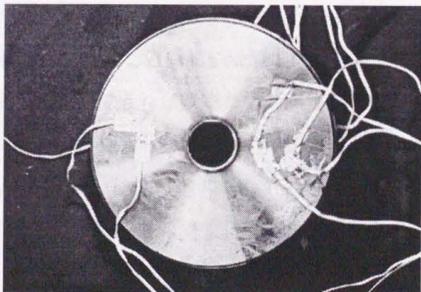


図 6-11 (a) 前方押出実験用ダイ (表側)

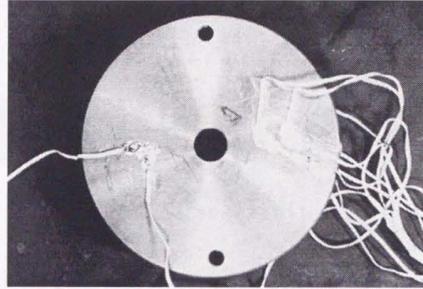


図 6-11 (b) 前方押出実験用ダイ (裏側)

図 6-10 のパンチは、型材として SKH51 を用い、先端径は  $\phi 31.5$  とした。ダイは、図 6-11 に示すような形状をしており、型材として同じ SKH51 を用い、表面にセラミックコーティング (TiN) を施した。内径  $\phi 32$  からしぼり  $\phi 25$  へ断面減少率 39% の前方押出を行った。被加工材に SCM420H を用い、 $\phi 30$ 、長さ 45 mm の円柱状に機械加工し、鍛造潤滑のための燐酸塩皮膜処理を行った。

一方、後方押出実験であるが、図 6-12 に、後方押出実験の概要を示す。図 6-13 に型のセット状況を示す。図 6-14 のパンチは型材に SKH51 を用い、先端径は  $\phi 20$  とした。ダイは図 6-15 に示すような形状をしており、型材に SKH51 を用い、表面処理 (TiN) を施した。ダイの内径は  $\phi 32$  とし、断面減少率 39% の後方押出を行った。被加工材は前方押出と同じく、SCM420H を用い、 $\phi 30$ 、長さ 30 mm の円柱状に機械加工し、同じく燐酸塩皮膜処理を行った。

金型表面のひずみを計測できれば問題ないが、実際には被加工材が干渉するため、パンチについては、勘合しない部分の 2 箇所にはずみゲージを貼り、ダイについては、 $\phi 80$ 、 $\phi 100$ 、 $\phi 120$  の部分の対向する各 2 箇所にはずみゲージを貼り鍛造ストローク全体にわたってひずみを計測した。

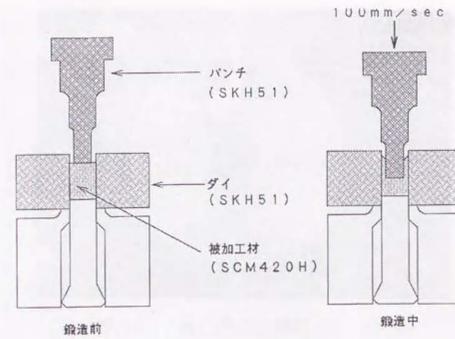


図 6-12 後方押出実験

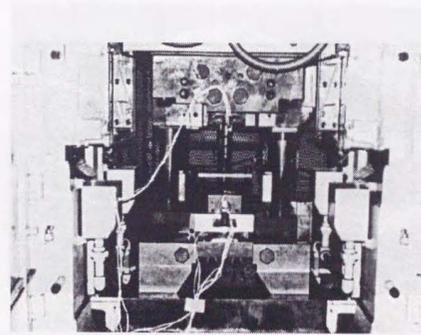


図 6-13 後方押出実験ダイセット

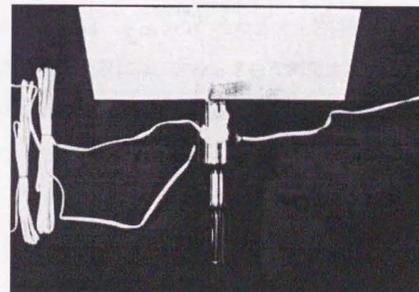


図 6-14 後方押出実験用パンチ

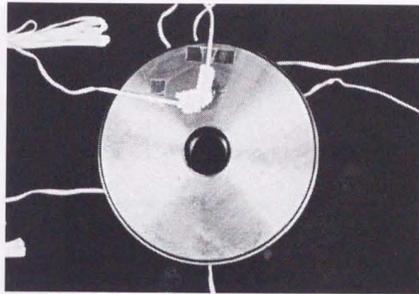


図 6-15 (a) 後方押出実験用ダイ (表側)

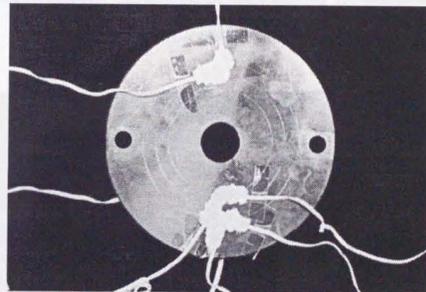


図 6-15 (b) 後方押出実験用ダイ (裏側)

### 6. 3. 2 FEM による被加工材塑性変形と金型弾性変形の連成解析

有限要素法による解析には、米国 SFTC 社の 2 次元鍛造解析用プログラム DEFORM を用いた。被加工材の変形過程には、非線形を扱う剛塑性解析、金型の応力等の解析には弾性解析を用いた。計算結果から得られる具体的な出力項目は、塑性及び弾性体の変形形状、荷重-ストローク線図、速度分布、応力・ひずみ・ひずみ速度分布、材料の流動奇跡 (ポイントトラッキング)、格子変形 (フローネット) 等である。

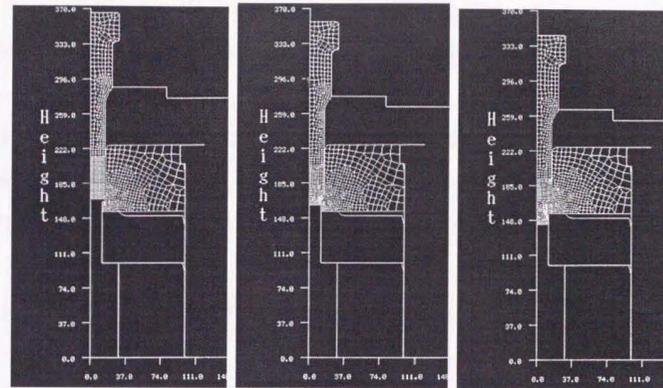


図 6-16 前方押出 FEM 解析結果

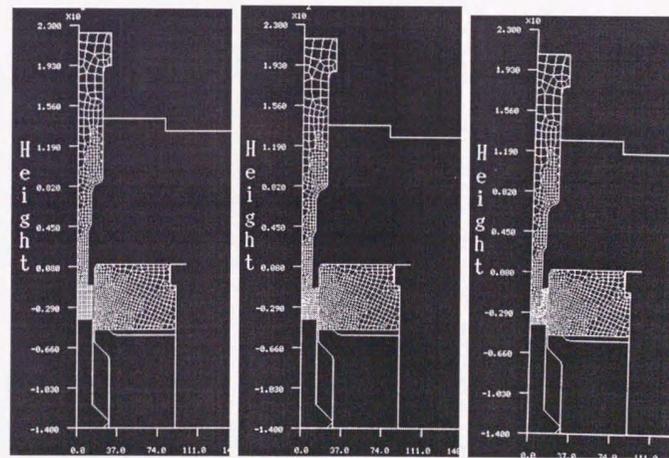


図 6-17 後方押出 FEM 解析結果

今回の表面応力解析では、2次元の軸対称問題とし、図 6-16（前方押出）、図 6-17（後方押出）に示すように、被加工材を剛塑性体、パンチ及びびダイを弾性体と定義した。被加工材の室温での等温変形解析と同時にパンチ・ダイの弾性解析を行った。

### 6. 3. 3 実験結果とFEM解析結果との比較

荷重、表面応力ひずみ、被加工材形状について実験結果とFEM解析結果の比較を行った。

まず前方押出結果について述べる。図6-18に摩擦係数を3条件に振り解析を行った荷重-ストローク線図を示す。このとき被加工材の変形抵抗式を式(6-18)とし、摩擦係数 $\mu = 0.03, 0.06, 0.10$ の3条件で解析を行った。

$$\sigma = 200 \varepsilon^{0.1} + 600 \quad (\text{Mpa}) \quad \text{式 (6-18)}$$

ここで摩擦係数によりグラフの傾きが変化することがわかった。この曲線の曲率より、摩擦係数としては0.06が近いのではないかと推定された。

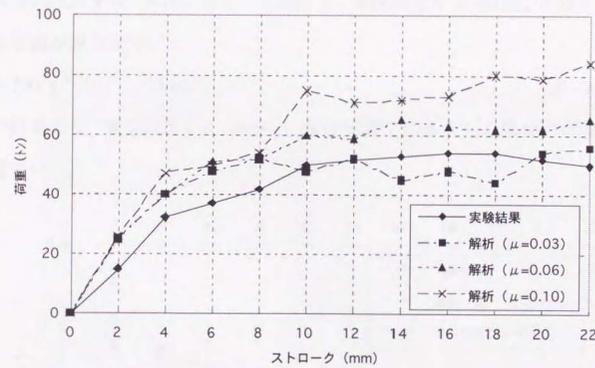


図6-18 前方押出実験荷重ストローク線図

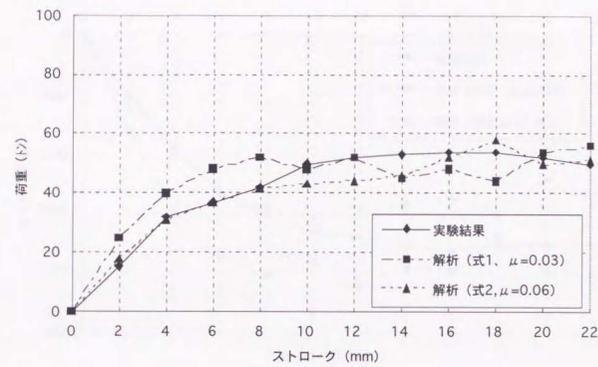


図6-19 前方押出実験荷重ストローク線図

次に変形抵抗を式(6-19)のように置いて、摩擦係数を $\mu = 0.03, 0.06$ と置いたときの結果を図6-19に示す。

$$\sigma = 700 \varepsilon^{0.1} \quad (\text{Mpa}) \quad \text{式(6-19)}$$

以上の結果から、変形抵抗を式(6-19)、摩擦係数を0.06とした場合が実験結果での荷重に近づいた。

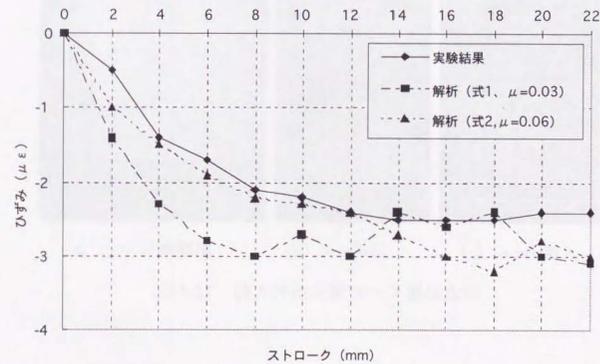


図6-20 前方押出実験パンチ軸方向のひずみ

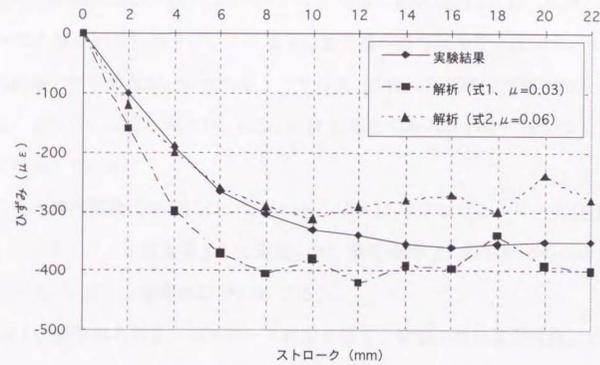


図 6-21 前方押出実験ダイ裏側 (φ 80) 半径方向ひずみ

図 6-20 にパンチ軸方向のひずみを示す。正が引張方向、負が圧縮方向を示す。

図 6-21 にダイ裏側の直径 φ 80 の位置での半径方向のひずみを示す。

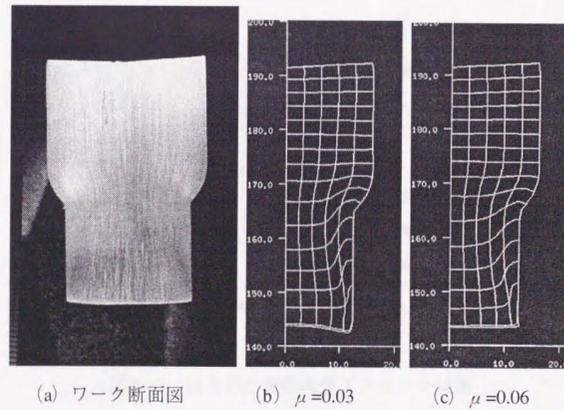


図 6-22 前方押出実験ワーク形状比較

図 6-22(a) に鍛造実験後の被加工材形状を示す。軸先端が凸形状になっているのが観察される。図 6-22(b) は、式 (6-18) 及び摩擦係数 0.03 を用いたときの形状の解析結果を示

す。このとき軸先端は凹形状になっている。同様に図 6-22(c)は、式 (6-19) 及び摩擦係数 0.06 での解析結果を示すが、この場合は軸先端が凸形状を示している。したがって、荷重の結果、形状の比較、いずれをとっても式 (6-19) 及び摩擦係数 0.06 を選ぶと、結果が良く合うといえる。図 6-19、6-20、6-21 ともこの組み合わせの値がよく一致していることを示している。

次に後方押出実験の場合について述べる。図 6-17 で示したように、被加工材を剛塑性体、パンチ・ダイを弾性体として定義した。解析条件は、前方押出の場合と同様に変形抵抗が式 (6-19)、摩擦係数が 0.06 である。

図 6-23 に鍛造時の荷重—ストローク線図を示す。被加工材の変形抵抗に式 (6-19) を用いることにより、ストロークが 6.0 mm までの荷重が実験結果に近づいている。

図 6-24 にパンチ軸方向のひずみを示す。正が引張方向を負が圧縮方向を示す。荷重と同様に、ストロークが 6.0 mm までの荷重が実験結果に近づいている。

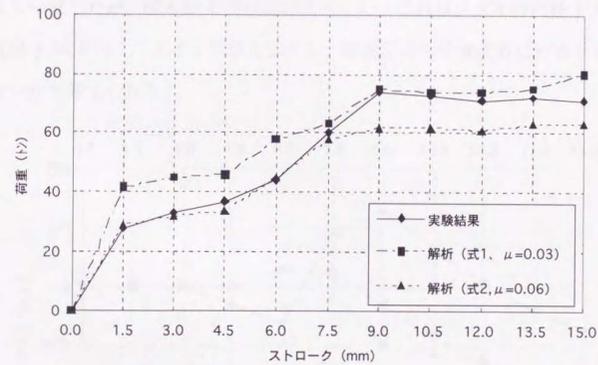


図 6-23 後方押出実験荷重ストローク線図

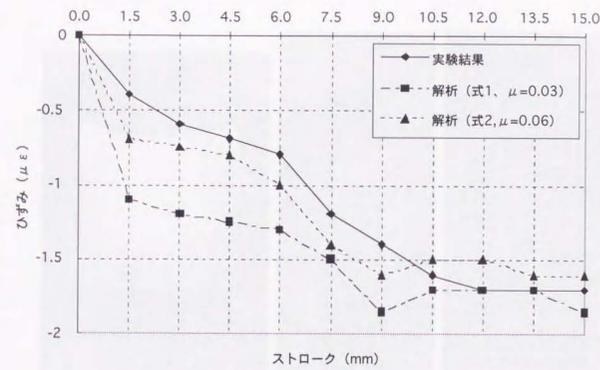


図 6-24 後方押出実験パンチ軸方向ひずみ

図 6-25 にダイ裏側直径  $\phi 80$  の位置での半径方向のひずみを示す。図 6-23、6-24 は比較的よく一致したが、図 6-25 では誤差が拡大した。これは、ダイの内径  $\phi 32$  と被加工材の直径  $\phi 30$  とのクリアランスがあるため、被加工材の位置決めに片寄りがあったのではないかと考えられる。

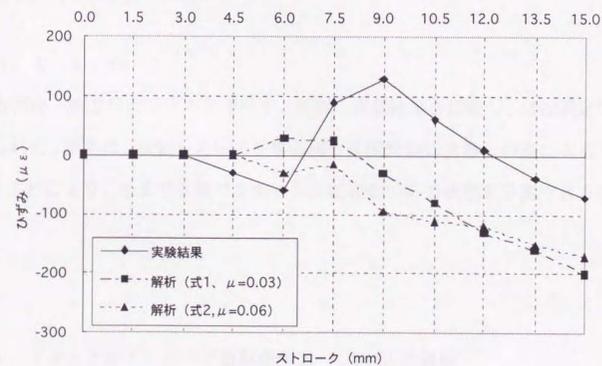


図 6-25 後方押出実験ダイ裏側 ( $\phi 80$ ) 半径方向ひずみ

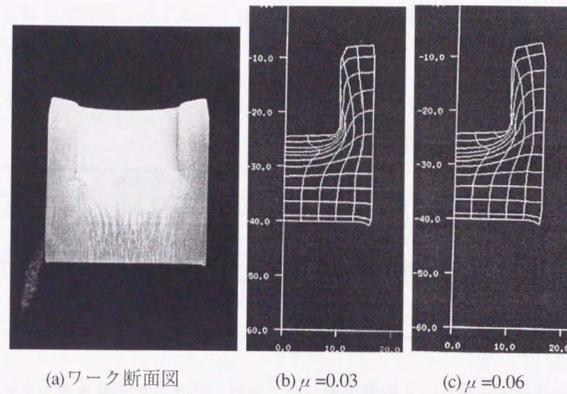


図 6-26 後方押出実験ワーク形状比較

図 6-26(a)に鍛造実験後の被加工材形状を示す。図 6-26(b)は、被加工材の変形抵抗が式 (6-18)、摩擦係数 0.03 での解析結果を示す。図 6-26(c)は、被加工材の変形抵抗が式 (6-19)、摩擦係数 0.06 での解析結果を示す。この場合も形状的には、わずかではあるが、後者の方が実験結果に近い。

#### 6. 3. 4 まとめ

前方押出・後方押出モデルを用いて、解析・実験結果を比較し、ほぼ満足できる結果が得られた。誤差は、仮定した応力ひずみ線と摩擦係数の実際との差によるものと思われる。これにより、今まで予測でなかった金型表面の応力状態を予測できることがわかった。

### 6. 4 フロントホイールハブ型寿命向上への FEM の適用

#### 6. 4. 1 破損型寿命向上へのアプローチ

金型破損は、鍛造中の応力レベルと金型の強度の間で、それぞれのばらつきにより大小関係が逆転した瞬間に起こると考えられる。破損を回避するには、表6-2の4通りのアプローチが考えられる。

表6-2 金型破損回避の方策例

	改善種類	方策例	問題点
ばらつきの縮小	1. 鍛造応力ばらつきの縮小	金型セッティングの芯出し等	工程能力上の限界
	2. 金型強度ばらつきの減少	熱処理条件の安定化等	工程能力上の限界
強度差の拡大	3. 鍛造応力の減少	局所的な大応力の回避	計測不可能
	4. 金型強度向上	型材料の高級化 材料の硬度ダウン	型費アップ 摩耗とのトレードオフ

どのアプローチを採用するかは、現状、型の降伏強度と、鍛造の応力レベル（局所的な最大値）との差がどの程度であるかを認識する必要がある。前節で述べたように、FEMである程度、金型表面の応力状態を見積もれるようになったので、これを利用して、実際の金型の鍛造評価が可能となり、応力レベルを減ずる方策をシミュレーションで確認することによって、型寿命向上の対策が促進できる。

#### 6. 4. 2 フロントホイールハブの解析

フロントホイールハブの鍛造工程は、材料、つぶし工程、粗地工程、仕上げ工程、トリミングの順である。型寿命を律しているのは仕上げ工程の型であり、寿命を迎えた仕上げ型は粗地型とセットで廃却するが、基本的に仕上げ型が使用できない状況になるのが先である。図6-27に、廃却となった仕上げ型の写真を示す。

FEM解析は、この仕上げ型形状を元に行った。1ステップ0.1mmのストロークを設定し、合計100ステップのシミュレーションを実施した。被加工材は、SCM材の1200℃の条件で、既知の応力ひずみ線図を用い、被加工材形状は所定の粗地形状を入力した。塑性変形挙動は、剛塑性体とした。加工材である金型は、通常のダイス鋼（SKD60相当）とし、弾性変形に関する機械的性質を設定した。図6-28に、最終ステップでの金型断面の相当応力分布を示す。

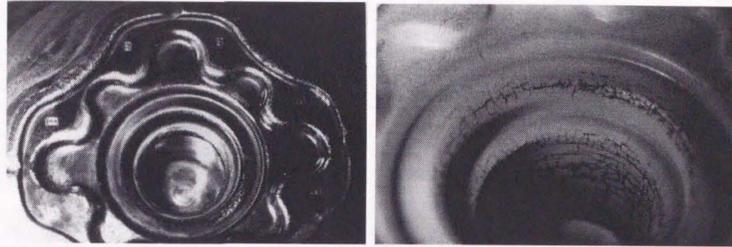


図6-27 ハブ仕上げ型（左）と軸部亀裂（右）

相当応力の最大値は、この部品の軸付け根部分にあたるところで、約1250MPaにも上る応力がかかっていることが判明した。実際に寿命を迎えた金型を観察すると、この部分はかなり荒れており、位置的に大きな応力が発生していることは想像していた。ダイス鋼の引張強度は熱間鍛造中の温度下で約1300MPaと推定され、前述のように、金型の許容応力と、実際加工に必要な応力が接近しており、各応力のばらつきにより破損を引き起こしているという想定が成り立つと思われる。

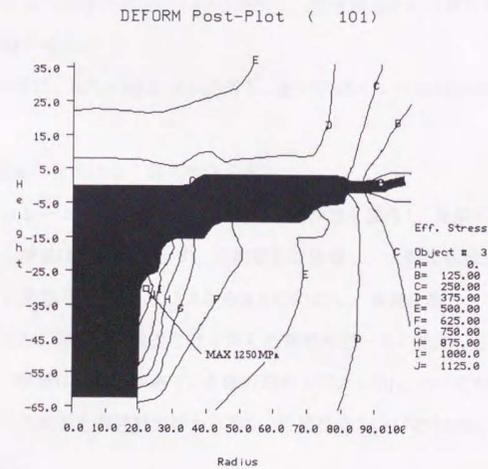


図6-28 フロントハブ金型応力分布図

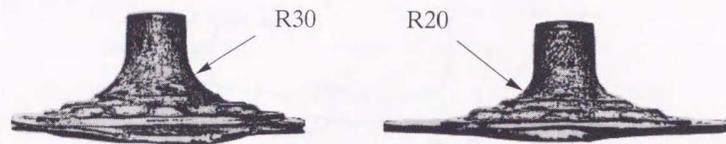


図6-29 フロントハブ粗地形状の改良

#### 6. 4. 3 フロントホイールハブ金型破損対策

著者は、このシミュレーションによって得られた金型断面の最大応力値を下げるために、実際に可能な対策として、粗地形状の軸付け根部分のRの大きさを30Rから20Rに変更する対策を立案した。(図6-29)狙いは、応力のかかる部分のボリュームの削減と、仕上げ型へのロケートを深くして仕上げ型でのストロークを短くし、全体の塑性流動量を減らすことである。懸念されたのは、ボリューム不足による仕上げ鍛造での欠肉であるが、これらをシミュレーションにて確認することにした。

シミュレーション条件は前出のものと同様で、粗地型形状のみ変更した。この結果、以下の結果が得られた。

- (1) 最大応力値は、1070MPaレベルに落ち、狙いの応力レベルの差の拡大がはかれる。  
(図6-30)
- (2) 欠肉や欠陥の発生はなく鍛造が行える。

以上のシミュレーション結果をふまえ実際に試作型を製作し、長期にわたりトライアルを実施した。結果は図6-31に示す。平均寿命は倍増し、大幅な効果が得られた。m値も、図6-30にも示したように、3.4から8.9に向上し、鍛造金型として安定した値にすることができた。当初は、破損だけを抑えた効果を狙っていたが、応力レベルを低下させることで、摩耗にも効果があり、全体の寿命レベルの向上につながった。現在では、このシミュレーションを型設計当初から行い、新部品立ち上げの初期からの寿命安定化に使用している。

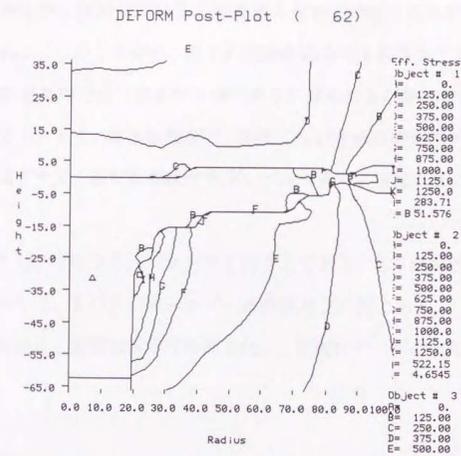


図 6-30 粗地型変更後の金型応力分布

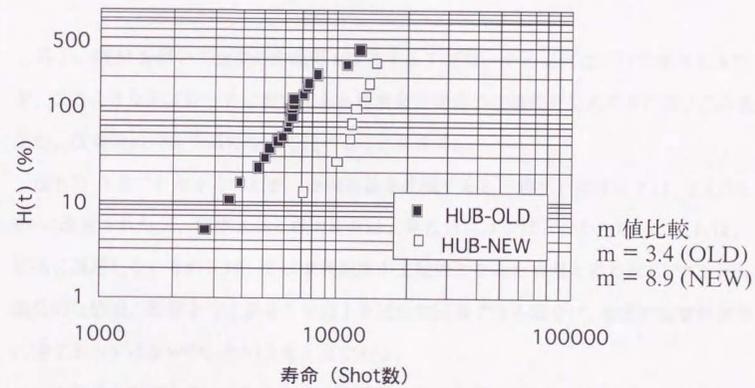


図 6-31 フロントハブ型寿命改善前後比較

#### 6. 4. 4 鍛造FEM手法の問題点と今後

ここに示した例のように、通常計測不可能な金型表面の応力状態等を調べる場合、FEM手法は有用なツールとなる。鍛造金型は高価であり、実験のバリエーションを設

けるのに問題があるが、FEMによりある程度組み合わせの絞り込みができるのが経済的な面で有利である。しかしながら、以下の問題があるのも押さえておく必要がある。

(1) 同一の設定条件では、解答が一つであり、ばらつきが評価できない。

(2) 計算パラメータで、摩擦係数など、実際どういう値なのか不明確なものがある。

(3) 現状では2次元、軸対称形状が実用レベルであり、複雑形状のもの解析は非経済的。

(1)については、ばらつくパラメータを押さえておき、上下限評価をする必要がある。(2)については、まだまだデータベースの整理が必要である。(3)は、計算機の性能向上も必要だが、複雑形状定義の簡易化と、型製作データの流用も考慮する必要がある。

## 6.5 金型寿命予測

以上、FEMを用いて金型寿命改善を実施するアプローチと事例について述べてきたが、このようなアプローチにおいてある程度金型寿命の改善代を見込めるので、この金型の、改善後の寿命予測について述べることにする。

図6-31を見てもわかるのだが、改善前後を比較すると、形状パラメータは、3.4から8.9に改善されたが、期待される最大寿命は、見た目にはさほど変わらない。これは、破損に遭遇しないものに対しては摩耗故障が支配的となるためだと思われる。すなわち、偶発的な破損に影響を与えるような因子を完全に回避できる場合に、理想的な摩耗寿命に達するのではないか、という考え方である。

この性質を利用して、このような破損因子をつぶしていく、というアプローチにおいて、改善後の金型寿命を予測することができるのではないか、という発想から、金型寿命予測式を導くことにした。

図6-32に示すように、フロントハブの寿命改善の事例で考えると、改善前の累積故障率の関数  $F_o(t)$  (添字 O; Old) と改善後の累積故障率  $F_N(t)$  (添字 N; New) のワイブ

ル確率紙上の2直線の交点が、理想的な期待寿命  $t_i$  (添字 i; ideal) とする。この場合、 $F(t_i) = 0.99$  となった。

この仮定より、改善後の金型寿命を予測することができる。改善前の寿命は、現場データから吸い上げることにする。この寿命分布の累積故障率関数  $F(t)$  は、ワイブル分布に従うものとする。

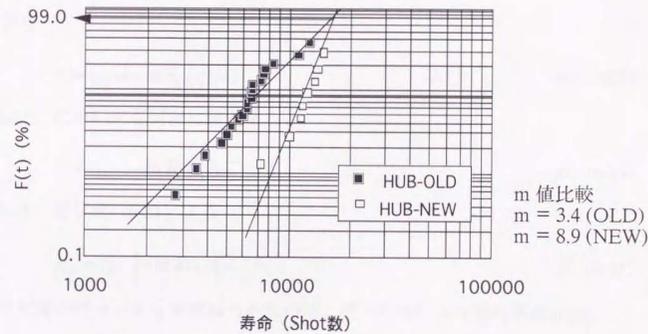


図 6-32 金型寿命予測概念図

形状パラメータはそれぞれ  $m_o$ 、 $m_N$ 、尺度パラメータは、 $\eta_o$ 、 $\eta_N$ 、とし、位置パラメータ  $\gamma$  はいずれの場合も 0 と定める。改善前後について、累積故障率関数は、式 (6-14) より、上記の定数を用いて、

$$F_o(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta_o}\right)^{m_o}} \quad \text{式 (6-20)}$$

$$F_N(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta_N}\right)^{m_N}} \quad \text{式 (6-21)}$$

と表せる。 $m_o$ 、 $\eta_o$  は、データより既知数となる。 $m_N$  は、図 6-7 に示すように、またフロントハブの寿命解析でもわかったが、鍛造金型の摩耗故障タイプのこの形状パラメータの値は、9 前後が期待できる。ここでは、既知数とする。求めたいのは、 $\eta_N$  ということになる。

まず、式 (6-20) の  $t$  に  $t_i$  を代入する。

$$F_O(t_i) = 1 - e^{-\left(\frac{t_i}{\eta_0}\right)^{m_0}}$$

$$e^{-\left(\frac{t_i}{\eta_0}\right)^{m_0}} = 1 - F_O(t_i)$$

$$e^{-\left(\frac{t_i}{\eta_0}\right)^{m_0}} = R_O(t_i)$$

ここで両辺の対数をとって

$$-\left(\frac{t_i}{\eta_0}\right)^{m_0} = \ln R_O(t_i)$$

これより

$$t_i = \eta_0 \cdot (-\ln R_O(t_i))^{\frac{1}{m_0}} \quad \text{式 (6-22)}$$

式 (6-21) についても同様に展開すると、

$$t_i = \eta_N \cdot (-\ln R_O(t_i))^{\frac{1}{m_N}} \quad \text{式 (6-23)}$$

式 (6-22) 及び式 (6-23) より

$$\eta_N = \eta_0 \cdot \left[ -\ln R(t_i) \right]^{\left( \frac{1}{m_0} - \frac{1}{m_N} \right)} \quad \text{式 (6-24)}$$

これで尺度パラメータ  $\eta$  が求められたので、式 (6-16) より平均寿命  $\mu$  は、

$$\mu_N = \eta_N \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_N} + 1\right) \quad \text{式 (6-25)}$$

これに式 (6-24) を代入し、

$$\mu_N = \eta_0 \cdot \left[ -\ln R(t_i) \right]^{\left( \frac{1}{m_0} - \frac{1}{m_N} \right)} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_N} + 1\right) \quad \text{式 (6-26)}$$

式 (6-25) と同様に、

$$\mu_O = \eta_0 \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_0} + 1\right) \quad \text{式 (6-27)}$$

これを  $\eta_0$  について解き、式 (6-26) に代入すると

$$\mu_N = \mu_O \cdot \left[ -\ln R(t_i) \right]^{\left( \frac{1}{m_0} - \frac{1}{m_N} \right)} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_N} + 1\right) \cdot \left[ \Gamma\left(\frac{1}{m_0} + 1\right) \right]^{-1} \quad \text{式 (6-28)}$$

となり、寿命予測式が得られた。図 6-7 に示した多部品の実績より、改善後の  $m$  値は、

9 前後が期待できるので、 $R(t_i) = 0.01$  とあわせて上式に代入して整理すると、

$$\mu_N = 0.947\mu_o \cdot 4.605^{\frac{1}{m_o} - \frac{1}{9}} \cdot \left[ \Gamma\left(\frac{1}{m_o} + 1\right) \right]^{-1} \quad \text{式 (6-29)}$$

本式が、求める寿命予測式である。式 (6-29) を変形し、新旧の金型寿命の比を求めると、次式のように、この比は、 $m_o$ だけの関数となる。

$$\frac{\mu_N}{\mu_o} = 0.947 \cdot 4.605^{\frac{1}{m_o} - \frac{1}{9}} \cdot \left[ \Gamma\left(\frac{1}{m_o} + 1\right) \right]^{-1} \quad \text{式 (6-30)}$$

この比と、 $m_o$ の関係をグラフ化すると図6-33のようになる。

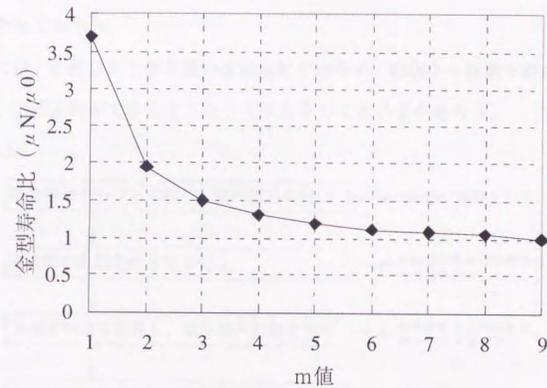


図6-33  $m$ 値による金型寿命比

図6-33より、例えば現在の金型寿命分布の形状パラメータ ( $m$ 値) が3のものは、この改善後寿命が約1.5倍に延びることが予測される。

式 (6-30) を用いれば、現状ある金型寿命改善の対象が、シミュレーションを用いて取り組む経済的な価値があるかを判断するときや、取り組みのターゲットを選定する際に有用であると思われる。

## 6.6 まとめと今後の課題

以上、鍛造金型の寿命向上、寿命予測についての取り組みに関して述べてきた。型寿命延長には、まず本来解決すべき偶発的な割れに対する方策を適用し、寿命安定化の後に、摩耗進度の遅延化を適用するアプローチが推奨される。

図6-34で、本章で提案した金型寿命向上のアプローチ手順を示す。

安定度の分析と、寿命予測に関して信頼性手法を適用し、対応策立案のために金型と材料の挙動のシミュレーションを行うことは、今後の寿命向上活動には欠かせないアプローチとなるであろう。

将来的には、生産立ち上がり後の改善活動ではなく、初期から最適な寿命が保証されるような、工程設計ができるようなシステムをつくる必要があるだろう。

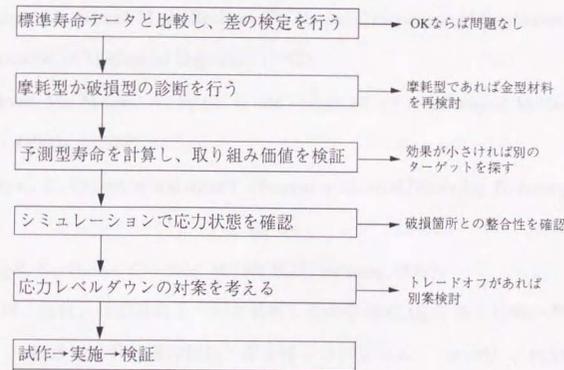


図6-34 金型寿命解析手順

### 参考文献

- 1) Altan, T.: 塑性と加工、23-253 (1982-2)、113-119

- 2) 山田、清野：塑性と加工、23-261 (1982-10)、997-1004
- 3) Hirai, T., Katayama, T., and Hawkyard, J. B. : proc. Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., 26(1986), 433-436
- 4) Vardan, O. C., Bagchi, A., and Altan, T. : *Manuf. Technol. Rev.*, (1987), 386-393
- 5) Doege, E., Groche, P. and Bobke, T. : *Advd Technol. of Plastisity(Japan)*, 1(1990), 27-32
- 6) Doege, E., Naegele, H., and Schliephake, U. : *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B*, 2-208(1994), 111-119
- 7) Knoerr, M., Lange, K. and Altan, T. : *Trans. NAMRI/SME*, Vol.XX, (1992), 53-60
- 8) Lange, K., Hettig, A. and Knoerr, M. : *Journal of Material Processing Technology*, 35(1992), 495-513
- 9) Geiger, M. and Hansel, M. : proc. of 25th ICFG meeting, (1992)
- 10) Geiger, M., Hansel, M. and Rebham, T. : *Journal of Engineering Manufacture*, Part B, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, (1992)
- 11) Hansel, M., Mesner, A., Engel, U. and Geiger, M. : *Computational Methods in Fracture Mechanics* (1992), 263-282
- 12) Nagao, Y., Knoerr, M. and Altan T. : *Journal of Material Processing Technology*, 46(1994), 73-85
- 13) Engel, U., Hinsel, C. : Proc. of 28th ICFG meeting, (1995)
- 14) 藤川、樹村、「鍛造金型の寿命解析とその予測-CAE手法と比例ハザードモデルの利用-」、第25回日科技連信頼性・保全性シンポジウム、(1995)、P251-256
- 15) 藤川、西山、樹村、「CAE及び信頼性手法による鍛造金型の寿命解析」、塑性加工春季講演会講演論文集、1996年5月、1巻、P208-209
- 16) Painter, B., Shivpuri, R. and Altan, T. : *Journal of Material Processing Technology*, 59(1996), 132-143
- 17) 日科技連：信頼性データの解析、文祥堂(1968) 4-16

## 第7章

### 結論と展望

#### 7.1 結論

自動車の鍛造部品は、その強靱な性質から、自動車の安全に必要な強度を要求される構造要素に用いられている重要な部品である。鍛造品の競合工法として、鋳造、焼結、プレス部品などがあるが、各技術分野の発展に伴い、鍛造品の比率を維持、あるいは向上していくためには、常にコストダウンにつながる技術開発が必要となる。鍛造品の原価構成から考えて、直接材料費、金型費、仕損費の低減が、全体のコストダウンに大きな比重を占める3つの要素となっている。これらの原価低減手法を立案するためには、従来、多くの試作を行い、試行錯誤を繰り返し、資源と時間をかけるのが現状であった。著者は、実機で行う試作の資源と時間を削減するため、またひいては鍛造品のコストダウンにつなげるための鍛造シミュレーション技術を適用し、実用レベルにするための研究を行った。

直接材料費の低減に関しては、アルミニウム鍛造において安価な鋳造材を用いるための新工法である鋳造鍛造法を確立するために、最適鋳造粗材形状を決定するのに FEM 解析で密度変化の推定を行った。アルミニウム鋳造品でプリフォームを製作し、それを鍛造することによってどれくらい機械的性質が改善されるかを確認するための基礎実験を行ったが、鍛造による機械的性質の向上に、鋳造欠陥の消滅が大きく貢献していることがわかった。この鋳造欠陥の消滅のシミュレーションが剛塑性有限要素法を用いて

予測できることを確認したため、実際に鋳造鍛造工法を新部品に適用する際に、このシミュレーション技術を応用することができた。

また、クランクシャフト材料歩留りの向上のため、プラスティシン実験を行い、新しい材料節減法の条件決定につなげた。クランクシャフトのような鍛造品の中で複雑な形状を持ち、3次元的な材料流動を引き起こす部品については、古典的な方法であるが、プラスティシンによるモデル実験が、まだまだ有用であることを確認できた。これにより開発した、フラッシュランド形状の変更は実際に大きな材料歩留り向上の効果を上げることができた。ここでは、プラスティシンシミュレーションの組み合わせを減らすためにFEMを用いたことと、実験計画法を用い、FEMシミュレーション自体の組み合わせを減らすことによって研究リードタイムの短縮をはかることもできた。

仕損費低減では、欠陥発生メカニズムをFEM解析、あるいは、プラスティシン実験で解明し、得られた知識を映像化してエキスパートシステムを構築し、データベース化することができた。プラスティシンの変形がある程度、熱間鍛造の材料挙動のシミュレーションに有用であることから、これをFEMの解析の信頼度の確認のために使用した。FEMにより様々な欠陥発生過程のメカニズム解明につなげることができた。またプラスティシンのモデル実験も3次元的な変形の立証に有用であったが、これを映像のデータベース化することができ、多くの人の共有の財産にすることができたことが大きかったように思う。これらのデータベース化は仕損費低減のみならず、さまざまな原価低減活動を推進するためのツールとしても有用となることが分かった。すなわち、材料歩留り向上や金型費低減のための主力の活動として型設計の変更が伴うことが多いが、必ず付きまとうのが、鍛造欠陥という問題である。そのため、本当は原価低減に有効な方策であるにも関わらず、仕損の増大であきらめてしまうケースも、設計則の標準化のためにデータベースがあれば、このような原価低減活動の援助になることが考えられるからである。

最後に金型費低減のために、FEM解析で、金型の寿命向上の方策を立案した。前章の欠陥解析のFEMの信頼度検証には、プラスティシンによるモデル実験を利用したが、この金型寿命向上のためのFEMシミュレーションの信頼度検証には、著者の開発した

鍛造シミュレータを用いた。金型のひずみ計測を行うことにより、FEM との結果比較を行うことができた。ここでは、金型寿命改善のための新しいアプローチを提案した。このアプローチは、金型寿命のばらつきに注目し、信頼性工学手法を用いることにより行うものである。このアプローチにおいて、改善後の寿命予測の方法も提案することができた。

著者は、鍛造サイドの技術者として、シミュレーション技術を使用するための研究を行った。どのような分野でも、その専門家がこれらのシミュレーション技術をどのように適用していけばよいかを、考えて使用しなければ、実際の効果を生むことは難しいと思われる。特にシミュレーション技術は、実際に起こる現象をかなり特化して、理想的な状態を仮定する場合が多い。それぞれのシミュレーションに何を無視して、何を考慮しなければならないかを、つねに見極めていかなければならないだろう。

鍛造分野へのシミュレーション技術の適用は、1990年代に入ってからようやく民間ベースで取り組まれ始めたばかりの歴史の浅い応用技術である。今後も難題にむかい改善していかなければならない部分も多く、需要も旺盛になると思われる。今後の進む方向について少し議論する必要があると思われるので、本研究の最後に私見を述べることにする。

## 7. 2 展望

鍛造のシミュレーション技術は、単純な円柱の圧縮から始まり、いまでは複雑な3次元形状のコンピュータシミュレーションが取り組まれているようになるまで急速な発展が見られる。図7-1は、著者が共同で研究を行ったクランクシャフトのベンディングの3次元シミュレーション結果である[1]。計算機の進歩と共に、いずれこの手の解析の計算時間は、大幅に短縮されるであろう。

一番のネックになると思われるのが金型形状と、プリフォーム形状の入力である。金型形状は、CAMで行われているデータがそのまま使えるような工夫をすれば、比較的

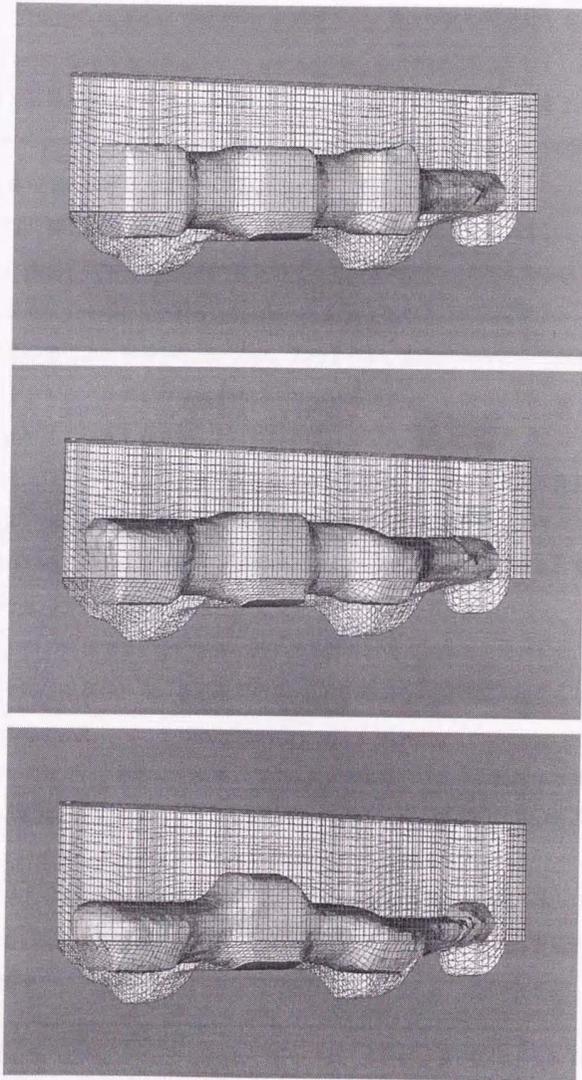


図7-1 クランクシャフトベンディングシミュレーション

容易かもしれない。しかし、プリフォームは難しい。最も単純な形状になるまで、上流工程にさかのぼり全てのシミュレーションを実施しなければならない。また現行行われているのと異なるプリフォーム形状のシミュレーションを行うのが、通常であるので、現行のCAMデータも使えない場合が多いと思われる。このような入力の問題をどうするかを意識していかなければならない。

この問題に関して著者が考えているのは、実際の金型に粘土を用いて、自分が考えている形状に修正し、3次元測定機でトレースして、3次元データ化する方法である。金型を削る方向はできないが、どちらかという和金型を盛る方向の需要が大きいためあまり気にする必要はないと思われる。また、このような、実際にあるような金型を想定して、バーチャルリアリティの手法を用い、コンピュータ上で、削ったり、盛ったりできる技術も出てくるかもしれない。

金型のシミュレーションは、繰り返しによる変形のシミュレーションが開発される可能性がある。第6章の図6-2でしめたような摩耗の進行速度のデータベースがあれば、寿命予測のためのシミュレーションが可能になるかもしれない。熱履歴なども大いに関係ありそうなので、複合の繰り返しシミュレーションが必要と思われる。

同じく金型の解析では、近い将来、圧入型の解析が盛んになるとと思われる。圧入代の可変性はすでに提案されている命題である[2,3]が、最適な可変型圧入代をもとめるのは興味深い問題である。

一般的な問題では、第6章で提案したように、やはりバラツキの処理が可能な方が望ましい。諸条件の現実的なバラツキをデータベースとして、確率的に高い方の変形を選んでイタレーションを進めるようなものが登場してくるかもしれない。

いずれにしても、試行錯誤を無くするというニーズは今後も強まると思われるので、現場技術者のニーズを確認しながら、シミュレーション開発が行われ、実用的なものが次々と登場することを期待して、本研究の結びとしたい。

## 謝辞

本論文の作成にあたっては、適切なご指導を数多くいただいた、担当教授の横浜国立大学工学部生産システム講座の小豆島明先生に深く感謝いたします。また、博士論文審査の副査の先生、三村宏教授、白鳥正樹教授、高木純一郎教授、于強助教授には、論文審査の際にたいへんお世話になったことをここに感謝いたします。

また、横浜国立大学名誉教授の工藤先生には、暖かい助言をいただき有り難うございました。会社に勤めながらの、研究に深い理解を頂いた会社上司の方々に、感謝致します。応援してくれた家族、素子、絵梨子、諒にお礼します。

## 参考文献

- 1) 西村・藤川・吉田・樹村・木下：型技術、11-8（1996-7）、112-113
- 2) Hirai, T., Katayama, T., and Hawkyard, J. B. : proc. Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., 26(1986), 433-436
- 3) Nagao, Y., Knoerr, M. and Altan T. : *Journal of Material Processing Technology*, 46(1994), 73-85



## 鍛造欠陥診断システム (FORDIA)

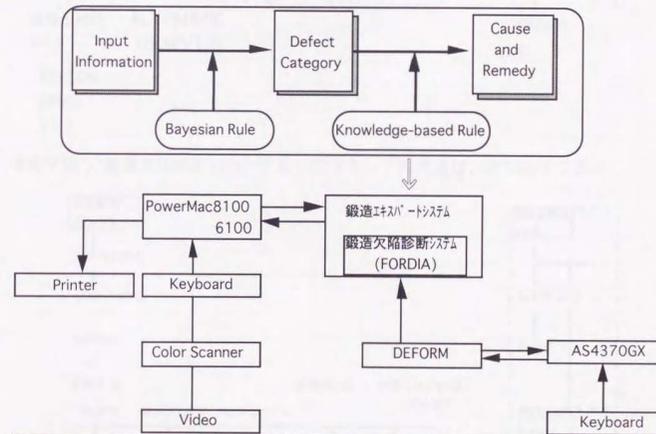
### 1. システムの概要

#### 1.1. システムの目的

本システムの目的は、以下の点の実現を目指して開発されている。

- 1) いままで鍛造技術者専門家に委ねられていた鍛造疵に関する原因の推定とその生成メカニズムのグラフィック表示を行う。
- 2) 型設計、およびライン業務のノウハウを集約し、経験的知識と数値解析的知識を備える知識保存型のエキスパートシステム。
- 3) 素人でも専門家並の知識を簡単に修得する。  
これにより、鍛造技術者の知識を共有化し、型設計製作品質の向上、型費の低減を目指す。

#### 1.2. システムの構成



#### 1.3. システムの基本条件

本システムは、次のことを基本条件として設計されている。

- 1) 欠陥の原因を推定するには、以下のような作業の流れがあり、作業は矢印の方向に進む。  
前回のデータを消去 → 欠陥の情報入力 → 欠陥のカテゴリ分類推定  
→ 欠陥の原因と対策の検索 → 原因と処置の説明表示  
→ メカニズム表示  
→ 各カテゴリの確率がグラフ表示 → 基礎確率の学習システム

2)各作業は、流れの途中から開始することが出来る。ただし、以下の条件が満足されていなければならない。

- (1) "前回のデータを消去しますか?"の質問で"NO"を入力しなければならない。
  - (2) 開始する作業から上流の作業は終了してなければならない。
  - (3) 開始する作業から下流の作業は、未作業でなければならない。
- もし、(3)が満たされていない場合で作業を途中から開始する場合には、開始する作業から下流の作業結果を無効にする必要がある。

2. データ

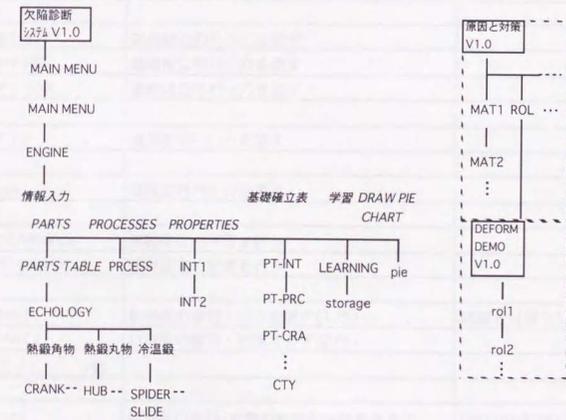
2.1. データ

鍛造エキスパートシステムで使用するスタックの構造は、以下の通りである。

FORDIA V1.0



本仕様書で扱う"鍛造欠陥診断システム"で取り扱うカードの構造は、次の通りである。



次ページにカード一覧表を記述する。カード名称、機能はそれを参照されたい。

鍛造欠陥診断システムのカード構成

(各カードは、ボタン、フィールド、バックグラウンドよりなる。)

カード名称	機 能	備 考
MAIN MENU	診断システムの開始、終了	欠陥診断システムV1.0
ENGINE	確信度計算、確信度表示	
ECHOLOGY	鍛造部品の工法を選択する	
熱鍛角物	熱間角物の PARTS TABLE	
熱鍛丸物	熱間丸物の PARTS TABLE	
冷温鍛	冷温鍛部品のPARTS TABLE	
CRANK SHAFT	Crank shaft 欠陥の位置を表す	
HUB	Front wheel Hub 欠陥の位置を表す	
SIDE FLANGE	SIDE FLANGE 欠陥の位置を表す	
CONNECTING ROD	CONNECTING ROD 欠陥の位置を表す	
SIDE GEAR	SIDE GEAR 欠陥の位置を表す	
KNUKLE SPINDLE	KNUKLE SPINDLE 欠陥の位置を表す	
FINAL GEAR	FINAL GEAR 欠陥の位置を表す	
⋮	他	
PROCESS	工程の種類、欠陥が発見された工程を表す	
INT1	欠陥の性状を表す	
INT2	欠陥品の割合、欠陥を含むロットサイズを表す	
PT-INT	基礎確立のマトリクスを表す	
PT-PRC	基礎確立のマトリクスを表す	
PT-CRA	基礎確立のマトリクスを表す	
CTY	確信度のマトリクスを表す	
pie	確信度の円グラフを表す	
LEARNING	基礎確立の学習を行う	
STORAGE	基礎確立の変更を行う	
MAT1	材料疵の原因・対策を表す(1/5)	原因と対策 V1.0
MAT2	材料疵の原因・対策を表す(2/5)	
⋮	他	
rol1	材料疵の原因・対策の数値解析結果を表す	DEFORM DEMOV1.0
rol2	材料疵の原因・対策の数値解析結果を表す	
⋮	他	

## 2.2. 解析データ

鍛造欠陥診断システムでは、原因・対策カードから疵発生のメカニズムに関する有限要素法の解析結果を見ることが可能である。これらは、あらかじめワークステーションで計算された結果が映像としてスタック"DEFORM DEMO V1.0"に蓄えられている。解析例は約 50 あり、以下のものがある。

DB Name	Parts Name	Note	備考
con3.DB	Connecting Rod	Closed die forging	
cra2.DB	Crank Shaft	Counter Weight/block die fillet-r=3(CRA-WGT bad design)	
cra3.DB	Crank Shaft	Counter Weight/block die fillet-r=10(CRA-WGT good design)	
i-1.DB	Connecting Rod	Open die/Rid inside/Sharp corner/Low friction(CON-RBI bad design)	
i-1.FN	Connecting Rod	ditto(flow net)	
i-2.DB	Connecting Rod	Open die/Rid inside/Sharp corner/High friction(CON-RBI good design)	
i-2.FN	Connecting Rod	ditto(flow net)	
i-3.DB	Connecting Rod	Open die/Rid inside/Fillet-r=1/Low friction(CON-RBI good design)	
suck-old.DB	Flange Side	Plain strain/Low friction	
roll.DB	General	Rolling process simulation(ROL mechanism)	
suck-in.DB	Flange Side	Low friction/Initial thickness=15/Initial diameter=80	
suck-2.DB	Flange Side	Low friction/Initial thickness=20/Initial diameter=70	
suck-3.DB	Flange Side	High friction/Initial thickness=15/Initial diameter=80	
suck-4.DB	Flange Side	Low friction/Initial thickness=27/Initial diameter=60	
rib.DB	Flange Side	Low friction/Fillet radius=0	
rib.FN	Flange Side	ditto(flow net)	
rib2.DB	Flange Side	Low friction/Fillet radius=1.0	
rib2.FN	Flange Side	ditto(flow net)	
knuckle.DB	Knuckle Spindle	High friction	
knuckle2.DB	Knuckle Spindle	Low friction/Narrow entrance	
knuckle3.DB	Knuckle Spindle	Low friction/Wide entrance	
buckle104.DB	General	Width of billet=8/Width of container=24/Friction=0.02	
buckle105.DB	General	Width of billet=8/Width of container=22/Friction=0.02	
t1.DB	General	Low friction 0.00 Typical suck-in defect	
flash1.DB	General	Vertical burr caused by closed block die forging	
flash2.DB	Knuckle Spindle	Inside flash	
flash3.DB	Knuckle Spindle	Outside flash	
gearmidbo.DB	Bevel Gear	Both pushing	
gearmidup.DB	Bevel Gear	Top pushing/Die corner R=2	
gearmid2.DB	Bevel Gear	Bottom pushing	
gear4.DB	Bevel Gear	Top pushing/Die corner R=4	
final2.DB	Final Gear	Friction coef.=0.20/small outer ring	
final3.DB	Final Gear	Friction coef.=0.20/large outer ring	
knock.DB	General	Friction coef.=0.20/long knock pin	
knock2.DB	General	Friction coef.=0.20/short knock pin	
heatcheck.DB	General	Friction coef.=0.20	
underfill.DB	General	Friction coef.=0.20	
hub2.DB	Front Wheel	Friction coef.=0.20/Billet corner tracking	
neck.DB	Connecting Rod	Friction coef.=0.20/Neck radius=3	
neck2.DB	Connecting Rod	Friction coef.=0.20/Neck radius=10	
coldshut.DB	General	Friction coef.=0.20	
coldshut2.DB	General	Friction coef.=0.00	
trim.DB	General	Trimming/Friction coef.=0.20	
pierce.DB	General	Piercing/Friction coef.=0.20	
dead3.DB	General	Deadmetal formation/Friction coef.=0.20/Long billet	
dead0500d.DB	General	Deadmetal formation/Friction coef.=0.20/Short billet	

### 2.3. システム・パラメタ

鍛造欠陥の原因を推定するには、部品の種類、部品の表面上での欠陥の発生位置、欠陥の深さ形状、欠陥品の割合等の情報が必要となる。

情報が多ければ多いほど、原因をより正確に推定することが出来る。

本システムは以下の情報入力が可能である。

No.	情 報	パラメータ
1	部品の種類	part
2	欠陥の位置	prtloc 他
3	工程の種類	prc 他
4	欠陥が発見された工程	btw 他
5	欠陥の性状 開いているか閉じているか	typ 他
6	深さ	dep 他
7	脱炭しているか否か	dec 他
8	欠陥品の割合	pct 他
9	欠陥を含む生産品のロットサイズ	unq 他

### 3. コマンド

#### 3.1. コマンド体系

鍛造欠陥診断システム	MAIN MENU	バックグラウンドボタン
	GO PREVIOUS	
	GO NEXT	
	TO ENGINE	
	ENGINE	各カード上のボタン
	RETURN	
	AUTOMATIC TOUR	MAIN MENU
	PRESENTATION	
	FORGING IMAGE	
	LICENSE NOTES	
	TO MAIN MENU	
	START SYSTEM	
	END SYSTEM	
	PARTS	ENGINE
	PROCESSES	
	PROPERTIES	
	確信度計算	
	基礎確立表	
	疵種類	
	材料疵	
	:	
	確信度	
	cty-mtl	
	:	
	DRAW PIE CHART	
	学習	
	MTL	LEARNING
	:	
	LEARNING	
	RESET	
	FIX	ECHOLOGY
	熱鍛角物	
	熱鍛丸物	
	冷温鍛	
	ECHOLOGY	熱鍛角物
	CRANK SHAFT	(PARTS TABLE)
	:	
	OTHER	
	TO 熱鍛角物	CRANK SHAFT
	Gear shaft	
	Other location	
	:	
	Billet	PROCESS
	:	
	OK	
	B-R	
	:	
	UNKNOWN	
	MODIFY	
	END	
	疵	INT1(質問事項)
	脱炭している	
	:	
	不明	
	OK	
	ANIMATION	MAT1(原因と対策 V1.0)
	MECHANISM	
	BAD DESIGN	
	GOOD DESIGN	
	:	
	TRIM	
	PIERCE	
	RETURN	

3.2. 専用コマンドの機能

ボタン名称	機能	備考
MAIN MENU	MAIN MENUに移動する	バックラウンド
GO PREVIOUS	前のカードに移動する	
GO NEXT	次のカードに移動する	
TO ENGINE	ENGINEに移動する	
ENGINE	ENGINEに移動する	
RETURN	移動前のカードに戻る	
AUTOMATIC TOUR	AUTOMATIC TOURを実行	MAIN MENU
PRESENTATION	プレゼンを実行	
FORGING IMAGE	FORGING IMAGEを実行	
LICENSE NOTES	Licenseを表示	
TO MAIN MENU	MAIN MENUに移動する	
START SYSTEMS	欠陥診断システムを開始する	
END SYSTEMS	欠陥診断システム、HyperCardを終了する	
PARTS	ECHOLOGYへ移動する	ENGINE
PROCESSES	PRCへ移動する	
PROPERTIES	INT1へ移動する	
確信度計算	確信度を計算する	
基礎確立表	RT-INTへ移動する	
疵種類	-	
材料疵	"最初から材料に入った疵"を表す	
:		
確信度	CTYへ移動する	
cty-mtl	MAT1へ移動する	
cty-rol	ROLへ移動する	
cty-fdd	それぞれの原因・対策カードへ移動する	
:		
DRAW PIE CHART	pieへ移動する	
学習	LEARNINGへ移動する	
frame	確信度の円グラフを描く	pie
grow	確信度の円グラフを描く	
Legend	確信度の円グラフを描く	
growLegend	確信度の円グラフを描く	

3.2. 専用コマンドの機能

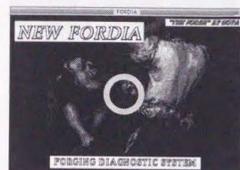
ボタン名称	機能	備考
MTL	カテゴリ-MTLを選択	LEARNING
:		
LEARNING	基礎確率の学習	
RESET	学習前の基礎確率に初期化	
FIX	strageに移動	
CONFIRM	基礎確率の変更	strage
TO LERANING	Learningに移動	
熱鍛角物	熱鍛角物PARTS TABLEに移動	ECHOLOGY
熱鍛丸物	熱鍛丸物PARTS TABLEに移動	
冷温鍛	冷温鍛 PARTS TABLEに移動	
ECHOLOGY	ECHOLOGYに移動	熱鍛角物
CRANK SHAFT	CRANK SHAFTを入力	
FRONT WHEEL HUB	FRONT WHEEL HUBを入力	
:		
OTHER	-	
TO 熱鍛角物	熱鍛角物に移動	CRANK SHAFT
pick this mark	-	
Other location	欠陥の位置"Other location"を入力	
Gear Shaft	欠陥の位置"Gear Shaft"を入力	
Arm	欠陥の位置"Arm"を入力	
Journal	欠陥の位置"Journal"を入力	
Pin	欠陥の位置"Pin"を入力	
Flange	欠陥の位置"Flange"を入力	
Counter Weight	欠陥の位置"Counter Weight"を入力	
:		
pictBillet	-	PROCESS
pictRoll	-	
pictForge	-	
pictTrim	-	
pictHeart	-	
Billet	工程"Billet"を入力	
Roll	工程"Roll"を入力	
FORGE	工程"FORGE"を入力	
TRIM	工程"TRIM"を入力	
HEAT T/M	工程"HEAT T/M"を入力	
OK	工程入力終了. 欠陥を発見した工程の入力	

3.2. 専用コマンドの機能

ボタン名称	機能	備考
B-R	欠陥を発見した工程"BILLET"後を入力	PRC
R-F	欠陥を発見した工程"ROLL"後を入力	
F-T	欠陥を発見した工程"FORGE"後を入力	
T-H	欠陥を発見した工程"TRIM"後を入力	
H-	欠陥を発見した工程"HEAT T/M"を入力	
UNKNOWN	欠陥を発見した工程"不明"後を入力	
MODIFY	工程入力から入力をやり直す	
END	ENGINEへ移動	
疵	"開いている欠陥"を入力	INT1
割れ	"閉じている欠陥"を入力	
不明	"不明"を入力	
New Button	0.1~9.9の間で+0.1	
New Button	0.1~9.9の間で-0.1	
Unknown4	欠陥の深さ"不明"を入力	
OK	欠陥の深さの値を入力	
脱炭している	"脱炭している"を入力	INT2
脱炭していない	"脱炭していない"を入力	
未調査	"未調査"を入力	
Yes q3	"欠陥が型番号に決まって出る"を入力	
No q3	"欠陥が型番号に決まって出ない"を入力	
Unknown q3	"不明"を入力	
New Button	0~10は+1、10~100は+5	
New Button	0~10は-1、10~100は-5	
OK	欠陥発生率の値を入力	
Unknown q3	欠陥発生率"不明"を入力	
ANIMATION	欠陥発生メカニズムのアニメーションを表す	MAT1
MECHANISM	欠陥発生メカニズムのアニメーションを表す	
RETURN	原因・対策カードに戻る	
BAD DESIGN	悪い鍛造型設計のメカニズムを表す	
GOOD DESIGN	良い鍛造型設計のメカニズムを表す	
BAD DIE	悪い鍛造型制作のメカニズムを表す	
GOOD DIE	良い鍛造型制作のメカニズムを表す	
BAD OPE.	悪い鍛造作業のメカニズムを表す	
GOOD OPE.	良い鍛造作業のメカニズムを表す	
TRIM	トリム疵のメカニズムを表す	
PIERCE	ピアス疵のメカニズムを表す	

### 3.4. 専用コマンドの基本操作

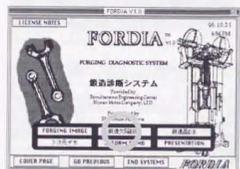
基本的なコマンド（作業）の流れを以下に示す。  
情報入力順番は、どれが先でも良い。



① 欠陥診断システムの  
オープニング画面  
任意の位置を  
クリック



⑥ 部品の工法を選択  
"鍛造角物"ボタン他  
をクリック



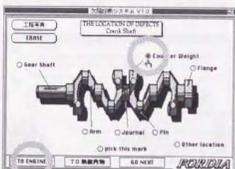
② "鍛造欠陥診断"  
ボタンの位置を  
クリック



⑦ 鍛造角物の  
PARTS MENUから  
目的の部品選択  
"Crank Shaft"  
ボタンをクリック



③ "START SYSTEM"  
ボタンの位置でクリック



⑧ 欠陥発生位置を選択  
"CounterWeight"  
ボタンをクリック  
  
"TO ENGINE"ボタンを  
クリックし⑤主画面に  
戻る



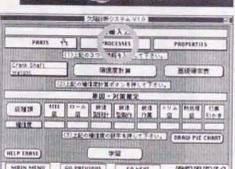
④ 新たな部品で実行  
する場合"Yes"  
前回の部品の条件を  
変更する場合"No"  
の位置をクリック



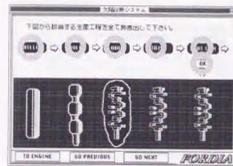
⑧-1 "工程写真"  
ボタンがあるものは、  
クリックすることにより  
部品の工程写真を  
表示出来る。  
写真を消す場合は、  
"ERASE"ボタンを  
クリックする。



⑤ 欠陥診断システムの  
主画面"ENGINE"  
部品を選択する場合  
"PARTS"ボタンを  
クリック



⑨ 部品の生産工程入力  
⑤上"PROCESSES"  
ボタンをクリック



⑩ 部品の生産に関わる工程のボタンを全てクリックする。その後"OK"ボタンをクリックする



⑪ 欠陥を発見した工程を選択。HEAT T/M後の場合"H-"ボタンをクリック。"END"ボタンで主画面に戻る



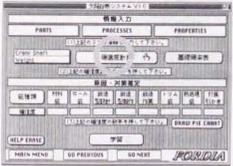
⑫ 欠陥の状態を入力。主画面上"PROPERTIES"ボタンをクリック



⑬ 欠陥の種類に合うボタンをクリック。欠陥の深さを入力後"OK"ボタンをクリック。"GO NEXT"ボタンで次の条件を入力



⑭ 脱炭の状態、決まった型番に発生するか、欠陥の発生率を入力後"GO ENGINE"ボタンをクリックし主画面に戻る



⑮ 全ての情報を入力後"確信度計算"ボタンをクリックする



⑯ 疵種類の確信度を計算中の画面



⑰ 疵種類の確信度を計算後の画面。疵種類の項目のボタンをクリックすることにより疵種類の説明を見ることが出来る

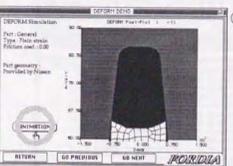


⑱ "OK"ボタンで⑰に戻る

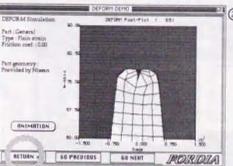
⑰上確信度の数値をクリックするとその疵種類に対する疵の原因と対策が表示される



⑲ 鍛造型製作に対する疵の原因と対策の例。⑲上"MECHANISM"ボタンをクリックすると数値解析で得られた欠陥生成メカニズムが表示される



⑳ 欠陥生成過程の動画表示。"ANIMATION"ボタンをクリックすると生成過程が動画表示される



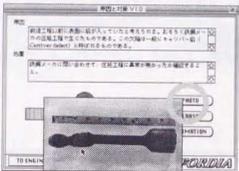
㉑の続き。"RETURN"ボタンで⑲原因と対策へ戻る。



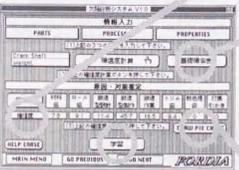
原因と対策画面状  
"ア ラスティング"  
"PHOTO"  
"画像データベース"ボタンが  
有るものは疵の写真、  
びりびり実験の写真等  
見ることが出来る



②-1  
アラスティングによる  
びりびり実験で再現され  
た欠陥の写真  
"ANIMATION"ボタンを  
クリックすると動画表示  
される  
"RETURN"ボタンで  
原因対策に戻る



②-2  
材料疵の  
原因と対策例  
"PHOTO"ボタンで  
疵の写真が表示  
される



① ①主画面の上  
のボタンの機能  
今回の診断結果を  
各入力条件の基礎  
確率へフィードバック  
する場合"学習"  
ボタンをクリックする

③-1  
"確信度"ボタン  
今回の入力条件  
での基礎確率と  
確信度の計算結果  
を表示する。

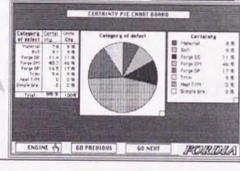
Part No.	Min	Max	P20	P50	P80	Time	Check
Location	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Power	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pressure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Type	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Depth	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Direction	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Location	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Category	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

③-2  
"基礎確率表"  
ボタン入力項目  
毎の基礎確率を  
表示する

入力項目	確率
位置	0.00
電力	0.00
圧力	0.00
種類	0.00
深さ	0.00
方向	0.00
位置	0.00
位置	0.00

③-2の続き

入力項目	確率
位置	0.00
電力	0.00
圧力	0.00
種類	0.00
深さ	0.00
方向	0.00
位置	0.00
位置	0.00





#### 4. 主要アルゴリズム

##### 4.1. カテゴリー推論

疵に関する情報をもとに、その疵のカテゴリーを決定する推論には、確率論を用いたベイズの方法を採用することにした。例えば、クランクシャフトの例でギアシャフト部分に疵が発生したとしよう。その他の情報は一切ないとすると、与えられた情報は、「クランクシャフトという部品のギアシャフト部に疵が発生した。」という文章に置き換えられる。この場合、専門家は「それは多分ロール工程ではいった疵だ。」と判断する。彼がこう発言する裏は、そういった経験があるからである。「多分」を「おそらく」、「もしかしたら」、あるいは「ほぼ間違いなく」という表現に置き換えることによって、その確信度の変化を表すことができる。このシステムでは結論として「何パーセントの確率でその疵がロール工程に起因する物である。」という言い方をする事にしている。この確信度の計算にベイズの式を用いたのがこのシステムの特徴である。

$$P(E_i | F) = \frac{P(E_i) \cdot P(F_j | E_i)}{\sum_{i=1}^n (P(E_i) \cdot P(F_j | E_i))} \quad (1)$$

上式はベイズの条件付き確率に関する公式である。Eは一つの結論を表し、Fは確認された事実を表す。ここでは、

E1；この疵はロール工程に起因するものである。

E2；この疵はロール工程に起因しないものである。

F；クランクシャフトのギアシャフトにはいった疵である。となる。各条件付き確率を文章で表すと以下のようになる。

P(E1|F)；クランクシャフトで疵がギアシャフトにはいつているという事実を基に、この疵がロール工程に起因するものであると言える確率

P(F|E1)；疵がロール工程で発生した場合に、クランクシャフトのギアシャフト部分に発生する確率

P(E1)；疵がロール工程に起因するものである確率

P(F|E1)やP(E1)（以下このような確率を基礎確率と呼ぶことにする。）は、過去のデータやインタビューから得ることができる。図1に得られた基礎確率のマトリックスを示す。これによって(1)式を用いて未知であるP(E1|F)を求めることができる。複数のお互いに独立な事実を扱えるように、式(1)から次式を導き本システムに採用することにした。

$$P(E_i | F_1, F_2, F_3, \dots, F_m) = \frac{P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j | E_i)}{\sum_{i=1}^n (P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j | E_i))} \quad (2)$$

欠陥診断システム									
PROBABILITY TABLE									
入力情報	Mtrl	Roll	F-DD	F-DM	F-OP	Trim	Heat	Crack	
平均	10	5	25	10	15	5	20	10	
未知	100	100	100	100	100	100	100	100	
応力種	引	10	10	10	10	10	70	10	
	圧	90	90	90	90	90	30	90	
寸法 (mm)	>0.3	50	60	50	75	20	30	70	
	<0.3	50	40	50	75	80	50	30	
粗度	Yes	100	100	100	100	100	0	100	
	No	0	0	0	0	0	100	0	
型番	Yes	10	20	5	100	30	30	10	
	No	90	80	95	0	70	70	90	
保存	>80	40	15	50	50	15	15	60	
	10<=80	30	35	35	35	35	30	35	
圧発生率 (%)	<10	30	50	15	15	60	10	50	
	>10	70	50	85	85	40	90	50	
TO ENGINE								GO PREVIOUS	GO NEXT
								FORIDIA	

欠陥診断システム									
PROBABILITY TABLE									
部品及び場所	Mtrl	Roll	F-DD	F-DM	F-OP	Trim	Heat	Crack	
G-Shaft	Arm	20	70	10	15	15	20	20	
	Weight	15	5	20	15	15	10	15	
Crank Shaft	Journal	15	5	20	15	15	10	20	
	Pin	15	5	20	15	15	10	5	
Flange	Other	5	5	10	15	15	20	30	
	Other	5	5	5	10	10	5	5	
Top	Other	20	0	25	30	25	20	15	
	Other	25	0	30	20	10	20	20	
Front Wheel Hub	Other	25	0	5	5	25	20	15	
	Other	20	0	25	30	25	15	15	
Edge	Other	5	0	10	10	10	20	10	
	Other	5	0	5	5	5	5	5	
TO ENGINE								GO PREVIOUS	GO NEXT
								FORIDIA	

図1 基礎確率の例

#### 4.2. 学習

$$P(E_i | F_1, F_2, F_3, \dots, F_m) = \frac{P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j | E_i)}{\sum_{i=1}^n (P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j | E_i))} \quad (2)$$

右辺の既知の基礎確率項  $P(F_j | E_i)$  は、論理的に正しい数値もあるが、あいまいなものもある。これについては内容が逐次更新されるように学習システムを採用することにした。学習は次式に従って行うようにした。

$$P(F_j(k) | E_i) = \frac{P_p(F_j(k) | E_i) + \beta \cdot \delta_{k, k_1} \cdot (1 - \delta_{2k_1, k_1})}{1 + \beta \cdot (1 - \delta_{2k_1, k_1})} \quad (3)$$

$\beta$  = 学習修正率、 $P_p$  = 修正前確率

ここで  $\beta$  は学習修正率と呼び、修正時の対象データ数 (通常は 1 個) の過去のデータ数に対する比率をさす。

$k$  は事実  $j$  ( $F_j$ ) の中で選択され得る番号を指し、 $k_1$  は  $k$  のうち実際にそのとき選ばれた番号を示す。

学習システムはあいまいな基礎確率の数値を、真の値に近づけることができるので、基礎確率のうち未知の物に対しては適当な初期値をいれておいてシステムをスタートすることができる。

欠陥診断システムV1.0での"学習"操作方法

- (1) 確信度計算後の画面で"学習"ボタンをクリックする。(図2)
- (2) "LEARNING TABLE"画面が表示される。(図3)
- (3) 原因と対策が実物の欠陥の原因と対策に一致しかつり項目を入力する。  
例えば鍛造型設計の場合"F-DM"をクリックする。
- (4) 次に"LEARNING"ボタンをクリックすると基礎確率が更新される。
- (5) 訂正する場合は、"RESET"ボタンをクリックすると直前の基礎確率の値に戻る。

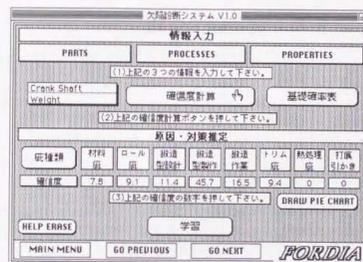


図2 確信度計算後の画面図

部品名		Crank Shaft						
	Mtrl	Roll	F-DD	F-13	F-OP	Trim	Heat	Check
平均	10	5	25	10	15	5	20	10
場所	Weight	15	5	15	15	15	20	10
工程	BRPTH	15	37.5	15	15	15	23.1	25
発生場所	H	100	100	100	100	100	100	100
型	Closed	60	60	60	60	60	30	60
深さ	Deep	50	60	50	25	20	50	70
縦溝	Yes	100	100	100	100	100	100	0
型に起因	Yes	10	20	5	100	30	30	10
NG率(%)	80>=10	30	35	35	35	35	35	30
Certainty		7.8	9.1	11.4	45.7	16.5	9.4	0
平均確正率		0.01						
一般確正率		0.05						

3 学習(LEARNING TABLE)画面

付録 II

鍛造欠陥診断システム (FORDIA) 主要プログラム

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.

FORDIAはオブジェクト指向のプログラミングツールHyperCardを用いてプログラミングされている。以下に主要プログラムを示す。これは、疵の Kategorii の推定確率を示す確信度の計算と学習システムのプログラムである。

(1) 確信度計算プログラム

```
on certainty
  set cursor to watch
  picture "thinking", PICT, rect, false
  --set globalLoc of window "thinking" to "290,160"
  set globalLoc of window "thinking" to "205,97"
  set visible of cd fld "thinking" to true
  set visible of window "thinking" to true
  put "考え中、ちょっと待ってて" into cd fld "thinking"
  wait 1 second
  global prtRow,prt1, prt2, prt3, prt4, prt5, prt6, prt7, prt8, prt
  global prcRow,prc1, prc2, prc3, prc4, prc5, prc6, prc7, prc8, prc
  global btwRow,btw1, btw2, btw3, btw4, btw5, btw6, btw7, btw8, btw
  global typRow,typ1, typ2, typ3, typ4, typ5, typ6, typ7, typ8, typ
  global depRow,dep1, dep2, dep3, dep4, dep5, dep6, dep7, dep8, dep
  global decRow,dec1, dec2, dec3, dec4, dec5, dec6, dec7, dec8, dec
  global unqRow,unq1, unq2, unq3, unq4, unq5, unq6, unq7, unq8, unq
  global pctRow,pct1, pct2, pct3, pct4, pct5, pct6, pct7, pct8, pct
  global aveRow,ave1, ave2, ave3, ave4, ave5, ave6, ave7, ave8, ave
  global ctyRow,cty1, cty2, cty3, cty4, cty5, cty6, cty7, cty8
  global loc, ct1, ct2, ct3, ctdd, ctdm, ctop, trim, ctrm, lo, part,
  partLocation, prtloc
  set lockScreen to true
  go to cd "PT-INT"
  put cd field "AVE1" into ave1
  put cd field "AVE2" into ave2
  put cd field "AVE3" into ave3
  put cd field "AVE4" into ave4
  put cd field "AVE5" into ave5
  put cd field "AVE6" into ave6
  put cd field "AVE7" into ave7
```

```

put cd field "AVE8" into ave8
go to cd "ENGINE"
put ave1 & "," & ave2 & "," & ave3 & "," & ave4 & "," & ave5 & "," & ave6
& "," & ave7 & "," & ave8 into aveRow
put prt1 & "," & prt2 & "," & prt3 & "," & prt4 & "," & prt5 & "," & prt6
& "," & prt7 & "," & prt8 into prtRow
put prc1 & "," & prc2 & "," & prc3 & "," & prc4 & "," & prc5 & "," & prc6
& "," & prc7 & "," & prc8 into prcRow
put btw1 & "," & btw2 & "," & btw3 & "," & btw4 & "," & btw5 & "," & btw6
& "," & btw7 & "," & btw8 into btwRow
put typ1 & "," & typ2 & "," & typ3 & "," & typ4 & "," & typ5 & "," & typ6
& "," & typ7 & "," & typ8 into typRow
put dep1 & "," & dep2 & "," & dep3 & "," & dep4 & "," & dep5 & "," & dep6
& "," & dep7 & "," & dep8 into depRow
put dec1 & "," & dec2 & "," & dec3 & "," & dec4 & "," & dec5 & "," & dec6
& "," & dec7 & "," & dec8 into decRow
put unq1 & "," & unq2 & "," & unq3 & "," & unq4 & "," & unq5 & "," & unq6
& "," & unq7 & "," & unq8 into unqRow
put pct1 & "," & pct2 & "," & pct3 & "," & pct4 & "," & pct5 & "," & pct6
& "," & pct7 & "," & pct8 into pctRow
put (ave1 * prt1 * prc1 * btw1 * typ1 * dep1 * dec1 * unq1 * pct1) into mul1
put (ave2 * prt2 * prc2 * btw2 * typ2 * dep2 * dec2 * unq2 * pct2) into mul2
put (ave3 * prt3 * prc3 * btw3 * typ3 * dep3 * dec3 * unq3 * pct3) into mul3
put (ave4 * prt4 * prc4 * btw4 * typ4 * dep4 * dec4 * unq4 * pct4) into mul4
put (ave5 * prt5 * prc5 * btw5 * typ5 * dep5 * dec5 * unq5 * pct5) into mul5
put (ave6 * prt6 * prc6 * btw6 * typ6 * dep6 * dec6 * unq6 * pct6) into mul6
put (ave7 * prt7 * prc7 * btw7 * typ7 * dep7 * dec7 * unq7 * pct7) into mul7
put (ave8 * prt8 * prc8 * btw8 * typ8 * dep8 * dec8 * unq8 * pct8) into mul8
put (mul1 + mul2 + mul3 + mul4 + mul5 + mul6 + mul7 + mul8) into total
if total = 0 then
  put 0 into cty1
  put 0 into cty2
  put 0 into cty3
  put 0 into cty4
  put 0 into cty5
  put 0 into cty6

```

```

    put 0 into cty7
    put 0 into cty8
else
    put (round ((mul1 / total) * 1000)) / 10 into cty1
    put (round ((mul2 / total) * 1000)) / 10 into cty2
    put (round ((mul3 / total) * 1000)) / 10 into cty3
    put (round ((mul4 / total) * 1000)) / 10 into cty4
    put (round ((mul5 / total) * 1000)) / 10 into cty5
    put (round ((mul6 / total) * 1000)) / 10 into cty6
    put (round ((mul7 / total) * 1000)) / 10 into cty7
    put (round ((mul8 / total) * 1000)) / 10 into cty8
end if
set lockScreen to false
put "今、確信度が分かりました" into cd fld thinking
wait 1 second
set lockScreen to true
go to cd "CTY"
put ct1 into ctdd
put ct2 into ctdm
put ct3 into ctcp
if (prtloc is "CON-RBI") and (hilite of btn "ROLL" of cd "PROCESS" is false)
then
    put "FLS-RIB-FDD" into ct1
    put "FLS-RIB-FDM" into ct2
    put "FLS-RIB-FOP" into ct3
    put "FLS-RIB-FDD" into ctdd
    put "FLS-RIB-FDM" into ctdm
    put "FLS-RIB-FOP" into ctcp
end if
if (prtloc is "CON-RBI") and (hilite of btn "ROLL" of cd "PROCESS" is true)
then
    put "CON-RBI-FDD" into ct1
    put "CON-RBI-FDM" into ct2
    put "CON-RBI-FOP" into ct3
    put "CON-RBI-FDD" into ctdd
    put "CON-RBI-FDM" into ctdm

```

```

    put "CON-RBI-FOP" into ctop
end if
put trim into ctrm
put lo into loc
put part into prt
put prtloc into partLocation
putField --Handler for putting the values into each field
go to cd "engine"
set lockScreen to false
put "原因と対策も分かりましたよ" into cd fld thinking
wait 1 second
set lockScreen to true
go to cd "LEARNING"
putField
go to cd "ENGINE"
put prt into first line of cd fld "あ"
put lo into second line of cd fld "あ"
set lockScreen to false
put cty1 into cd field "MTL"
put cty2 into cd field "ROL"
put cty3 into cd field "FDD"
put cty4 into cd field "FDM"
put cty5 into cd field "FOP"
put cty6 into cd field "TRM"
put cty7 into cd field "HTM"
put cty8 into cd field "BRS"
if total = 0 then
    answer "All possibilities are denied. Your choice has something wrong. Please check again!"
end if
put empty into cd fld "thinking"
set visible of cd fld "thinking" to false
close window "thinking"
end certainty

```

(2) 学習システムプログラム

```
on mouseUp
  global cat
  if (cat is empty) then
    answer "最初にカテゴリーボタンの一つを押して下さい"
  else
    if cd fld ("CTY" & cat) is 0 then
      answer "可能性は理論的に否定されました。学習はできません。"
    else
      global aveRow,prtRow,prcRow,btwRow,typRow,depRow,decRow,unqRow,pctRow
      global mtl,rol,fdd,fdm,fop,trm,htm,brs,catRow,amr,gmr
      put mtl & "," & rol & "," & fdd & "," & fdm & "," & fop & "," & trm
      & "," & htm & "," & brs into catRow
      put cd fld "amr" into amr
      put cd fld "gmr" into gmr
      repeat with i = 1 to 8
        put (item i of aveRow + amr * item i of catRow * 100) / (1 + amr) into a
        put (round(a * 10)) / 10 into a
        put a into cd fld ("AVE" & i)
      end repeat
      global typ,dep,dec,unq,pct
      put cat into i
      put (item i of prtRow + gmr * 100) / (1 + gmr) into a
      put (round(a * 10)) / 10 into a
      put a into cd fld ("PRT" & i)
      if typ is not ? then
        put (item i of typRow + gmr * 100) / (1 + gmr) into a
        put (round(a * 10)) / 10 into a
        put a into cd fld ("TYP" & i)
      end if
      if dep is not ? then
        put (item i of depRow + gmr * 100) / (1 + gmr) into a
        put (round(a * 10)) / 10 into a
        put a into cd fld ("DEP" & i)
```

```

end if
if dec is not ? then
  put (item i of decRow + gmr * 100) / (1 + gmr) into a
  put (round(a * 10)) / 10 into a
  put a into cd fld ("DEC" & i)
end if
if unq is not ? then
  put (item i of unqRow + gmr * 100) / (1 + gmr) into a
  put (round(a * 10)) / 10 into a
  put a into cd fld ("UNQ" & i)
end if
if pct is not ? then
  put (item i of pctRow + gmr * 100) / (1 + gmr) into a
  put (round(a * 10)) / 10 into a
  put a into cd fld ("PCT" & i)
end if
put 0 into c
repeat with i = 1 to 8
  put (cd fld ("AVE" & i) * cd fld ("PRT" & i) * cd fld ("PRC" & i) *
  cd fld ("BTW" & i) * cd fld ("TYP" & i) * cd fld ("DEP" & i) *
  cd fld ("DEC" & i) * cd fld ("UNQ" & i) * cd fld ("PCT" & i))
  into a
  add a to c
  put a into item i of b
end repeat
repeat with i = 1 to 8
  put (round((item i of b) * 1000 / c)) / 10 into cd fld ("CTY" & i)
end repeat
end if
end if
end mouseUp

```

付録 III

鍛造欠陥の体系

欠陥の種類	発生原因	検査方法	対策
表面欠陥	材料の表面状態	目視検査	材料の選定
表面欠陥	加熱時の酸化	目視検査	加熱時間の調整
表面欠陥	冷却時の割れ	目視検査	冷却速度の調整
内部欠陥	材料の組織	超音波検査	材料の選定
内部欠陥	加熱時の割れ	超音波検査	加熱時間の調整
内部欠陥	冷却時の割れ	超音波検査	冷却速度の調整
内部欠陥	材料の組織	放射線検査	材料の選定
内部欠陥	加熱時の割れ	放射線検査	加熱時間の調整
内部欠陥	冷却時の割れ	放射線検査	冷却速度の調整
内部欠陥	材料の組織	磁気探傷	材料の選定
内部欠陥	加熱時の割れ	磁気探傷	加熱時間の調整
内部欠陥	冷却時の割れ	磁気探傷	冷却速度の調整

(1) 鍛造欠陥の体系

今までの経験と、文献等から、鍛造欠陥を体系化した。

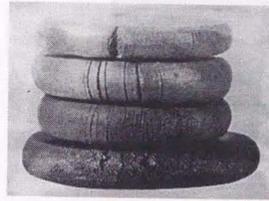
分類		欠陥名		備考	英語名		
形状欠陥	変形	鍛造	寸法不良	設計不良・温度不良	dimensional error		
			型ズレ		mismatch		
			欠肉		underfill		
			余肉		puff		
			偏心		eccentricity		
			バリ残り		residual flash		
		トリム	反り		warping		
			肉引け				
		焼き入れ	偏トリム		eccentric trimming		
			歪み		distortion		
		搬送	曲がり		curve		
			ねじれ		twist		
		割れ・疵	剪断欠陥	内部割れ	シェvron欠陥	カビ割れ	chevron crack
					もみ割れ		forging crack
	マンネスマン穴				クロスロウ	Mannesman hole	
	外部割れ			材料割れ		material crack	
				切断割れ		shear crack	
				焼き割れ		quenching crack	
	塑性変形欠陥		材料	カリバー疵	圧延ロウによる捲れ疵	caliber defect	
				ロール	ロール疵	rolling defect	
				鍛造	かぶさり疵	overlap, lap	
			トリム	より疵		cold shut fold	
				引き込み疵	(フロース)	flow through	
				吸い込み疵		suck-in defect	
	搬送		かじり疵		galling		
			油疵		lubricant defect		
			返りバリ		burr		
	結合欠陥		当て疵	バリかじり		over trimming	
				当て疵		bruise	
				スケール疵		scale pit	
	重量欠陥	結合欠陥	打ち込み疵				
			かき疵	型の剥離を打ち込む	fouling		
重量規格外							
材質欠陥	組織不良	バランス不良					
		脱炭		decarburization			
	硬度不良	成分不良 (異材)					
		オーバーヒート	(ハートニング)	over heat, burning			

## (2) JISによる鍛造欠陥用語

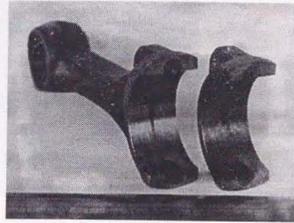
番号	用語	定義	対応英語(参考)
8001	割れ	いろいろな原因によって、鍛造品に生じた裂け目の総称。	crack
8002	焼割れ	焼入れの際に、焼入れ応力によって生じた割れ。	quenching crack
8003	きっ甲割れ	鍛造品の表面に現れる比較的浅いかめの甲状の割れ。加熱条件が不適当で、特に銅、すずなどの不純物が結晶粒界に析出するために生じた割れ。 備考：きっ(亀)甲割れと表記してもよい。	crazing
8004	もみ割れ	伸ばし作業において、加工度が材質、加熱温度に対して、大きすぎる場合中心部付近に沿って発生する割れ。	forging crack
8005	置割れ	鍛造又は鍛造後に焼入れ若しくは焼戻した鍛造品を、大気中に放置した状態で生じた割れ。 備考：自然割れともいう。	season crack delayed failure
8006	急熱割れ	材料を急激に加熱する際、温度不均一によって発生した内部応力による割れ。	rapid heating crack
8007	急冷割れ	加熱した材料を急激に冷却する際、温度不均一によって発生した内部応力による割れ。	rapid cooling crack
8008	切断割れ	材料を切断する際、切断面上に生じた割れ。	
8009	ガス切断割れ	材料をガス切断する際、急熱、急冷によって表面応力が発生し、そのために生じた割れ。	gas cutting crack
8010	トリミング割れ	ばり抜きの際、鍛造品を切断したために生じた割れ。	
8011	シェvron割れ	冷間鍛造において、延性の低い材料を小さな断面減少率で前方押し出すときに、押し出し材中心部に発生するくの字形の内部割れ。	chevron crack
8012	油きず	離型剤として使用した油分又はおがくずが爆発して、鍛造品の表面に生じたきず。	
8013	当てきず	鍛造品が他の製品、器具などと接触、落下などしたことによって表面に生じたきず。	bruise
8014	かぶさりきず	鍛造品の表面に生じた肉のかぶさり。段落差の甚だしい異径軸の隅肉部などに生じやすい。	overlap
8015	かじりきず	鍛造品の一部が金型によってかじり取られて生じたきず。	galling
8016	ヘアクラック	主として鋼中の水素の発生圧力などによって、偏析帯又は介在物に沿って生じた毛状の割れ。	hair crack
8017	しわきず	鍛造品の表面に現れるしわ状のきず。	cold shut fold, wrinkle
8018	スケールきず	鍛造品の表面にスケールが打ち込まれて生じたくぼみ。	scale defect, scale pit
8019	打込みきず	鍛造品の表面に異物が打ち込まれて生じたくぼみ。	
8020	ロールきず	型鍛造において、丸め作業をするときに生じたきず。	rolling defect
8021	材料きず	鍛造品の表面又は内部に材料の製造過程等で発生した欠陥が残存したために生じたきず。	
8022	かききず	工具と材料との焼付きによって生じた鍛造品のきず。	fouling

番号	用語	定義	対応英語(参考)
8023	偏析きず	主として大形鍛造品において偏析部一次晶粒界に沿って現れる毛割れ状のきず。	segregation crack
8024	砂かみ	耐火物又はスラグが鋼塊表層部へ融着したり、機械的に混入することによって生じたきず。砂きずと比較して、一般に形状は大きく局部的に群集して存在することが多い。	sand inclusion
8025	オーバーヒート	材料の諸性が損傷されるほどの高温まで材料が過熱されること。	over heat
8026	バーニング	過熱のため粒界が溶け始めたり、酸化されたり又は異常な組織が生じるなどによって回復不可能となった欠陥。	burning
8027	脱炭	炭素と反応する雰囲気の中で鉄鋼を加熱したとき、表面から炭素が失われた現象。 備考：JIS G 0201 参照	decarburization
8028	ばり残り	ばりの抜き残り。	residual flash
8029	ばりかじり	鍛造品の本体に食い込んで、ばりが抜かれた状態。	over trimming
8030	ばり返り	ばりが完全に切れず、その一部が折れ曲がって鍛造品に残った状態。	burr
8031	偏肉	鍛造品の断面の厚さの片寄り。	
8032	偏心	鍛造品の形状の中心の偏り。	eccentricity
8033	型ずれ	上下金型の心違いによって生じた鍛造品の食違い。	mismatch
8034	ひずみ	主として鍛造後の熱的取扱いに起因する鍛造品の所定寸法・形状からの偏り。	distortion
8035	反り	鍛造品の表面基準面からの偏り。 備考：JIS B 0415 参照	warping
8036	ねじれ	鍛造品の基準軸に対するある部分の角度のずれ。	twist
8037	寸法不良	鍛造品の厚さ、幅、長さ、隅、角部寸法の公差外れ。	dimensional error
8038	欠肉	鍛造図面寸法に対する厚さ、太さ、丸みなどの不足。	underfill
8039	だれ	工具などを押し込むことによって生じた材料の引け。	shear drop, roll over

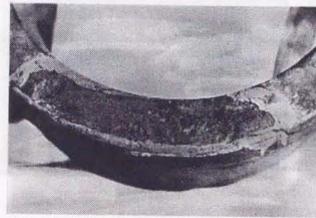
(3) 主な鍛造欠陥写真集



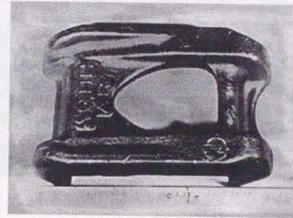
材料疵 (座屈割れ)



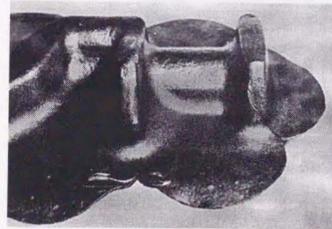
材料疵 (パーティング割れ)



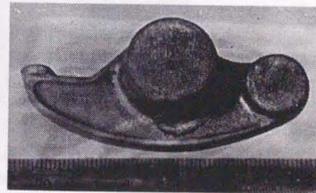
スケール疵



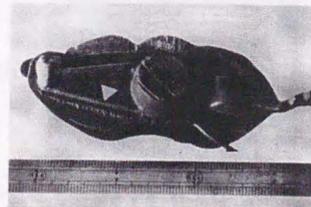
スケール疵



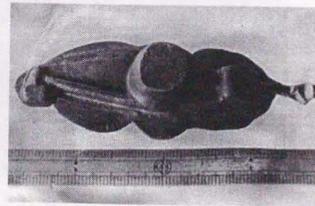
しわ疵



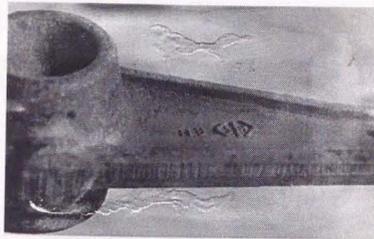
かぶさり疵



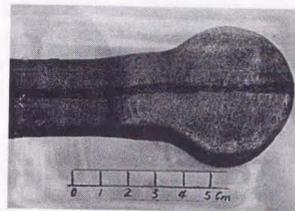
打ち込み疵



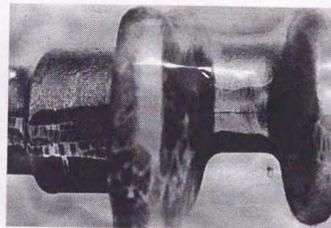
かじり疵



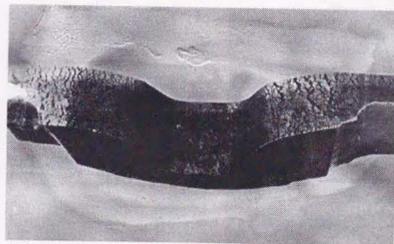
油斑



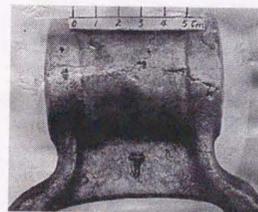
割れ斑



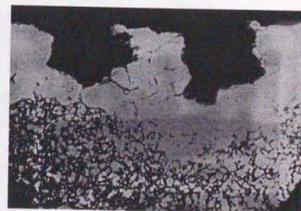
型ズレ



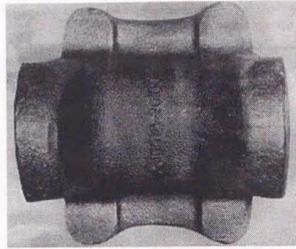
亀甲割れ



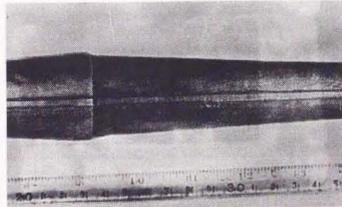
焼きすぎ (オーバーヒート)



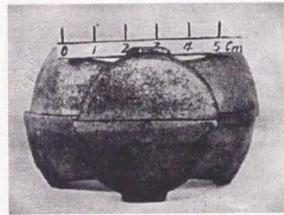
脱炭



肌荒れ



焼き割れ



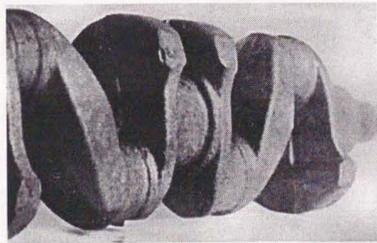
型ズレ



偏心



ねじれ



欠肉

