

# 特集 複合磁性材料の強磁性化に及ぼす加工発熱の影響\*

## Effect of Temperature Increase during Plastic Deformation on Ferromagnetic Property of Composite Magnetic Material

杉山 聡  
Satoshi SUGIYAMA

竹ノ内省一  
Syouichi TAKENOUCHI

石川孝司  
Takashi ISHIKAWA

中西広吉  
Koukichi NAKANISHI

青山文宣  
Fuminori AOYAMA

In press-forming of ferromagnetic/nonmagnetic composite material, an effective process for determining ferromagnetic property was developed using deformation-induced martensitic transformation. In a fixed-temperature compression test, the incidence of deformation-induced martensite was investigated, and measured values were expressed as a sigmoid function. The sigmoid function was introduced into the FEM analysis.

During the ironing process, the distribution of effective strain, the distribution of working temperature and the incidence of deformation-induced martensite were calculated, and the ferromagnetic level was predicted to correspond to the incidence of deformation-induced martensite. Based on this experimental assessment, drawing was quite effective for obtaining strong ferromagnetic property compared to ironing. A magnetic flux density B<sub>4K</sub> (induction at H of 4000A/m) of 0.5T was achieved by drawing under cooling die.

**Key Words** : Material property, Ferromagnetic property, Composite magnetic material, Ironing, Drawing, Deformation-induced martensitic transformation

### 1. 緒言

電磁弁など磁気回路を有する製品は、磁路を構成する強磁性部品、磁路を遮断する非磁性部品からなる。従来強磁性、非磁性の部品は各々部品加工されて溶接、かしめなどによって一体化<sup>1)</sup>していた。今回非磁性のオーステナイト系ステンレス鋼に低コストなプレス加工で加工誘起マルテンサイト変態させることで全体を強磁性化する。一部を高周波熱処理で非磁性に戻すことで、非磁性部と強磁性部が共存する一体成形部品(複合磁性材料)を得る。製品の小型化、気密信頼性向上、工程短縮が図れる複合磁性材料の製造プロセスをFig. 1に示す。

マルテンサイト生成率に影響を及ぼす主たる因子と

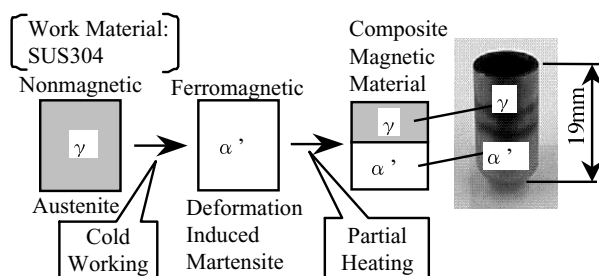


Fig. 1 Composite magnetic material

して、ひずみ、温度、応力場<sup>2)</sup>があり、本報では圧縮場を主体とした加工における、温度と強磁性レベルの関係を考察する。

強磁性組織である加工誘起マルテンサイトを多く発生させる手段として、磁気目盛りロッドの作製にみられるような引抜き加工、ステンレスのばね鋼<sup>3)</sup>にばね性を持たせる圧延加工などがある。板厚を圧下して大きなひずみを付与する加工方法が研究されてきた。

プレスではしごきが板厚を圧下する加工に相当し、より低温下でより多く板厚を圧下するほど加工誘起マルテンサイトが多く発生することが知られている。

しかし材料内部に発生する塑性自己発熱と、材料表面に発生する摩擦発熱によって、加工中のワーク温度は上昇し、加工誘起マルテンサイト生成率は激減する。塑性自己発熱はひずみを加える必要がある以上避けられない。そこで摩擦発熱が加工面圧に依存する点に着目し、面圧の大きいしごきから、板厚を圧下せず径を縮小する絞りへの工法の転換を図る。

金型トライ期間・費用の低減および加工技術の向上を目的として、数値シミュレーションを開発し、加工工程の事前評価、方向付けを試みる。各恒温条件下での単軸圧縮試験により、ひずみと加工誘起マルテンサイト生成率を求めた。求めたデータを熱・変形連成解

\* (社)日本塑性加工学会の了解を得て、“塑性と加工”第41巻第469号(2000.2)より一部加筆して転載

析に反映し，加工中のワーク温度と加工誘起マルテンサイト生成率を求め，強磁性レベルを予測した．量産仕様の設備において実験を行ない，加工中のワーク温度，強磁性レベルを実測し評価した．

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

供試材の化学組成は，オーステナイトの安定度を示す平山の当量<sup>4)</sup>を指標に決定した．平山の当量が大きくなるとオーステナイトが安定し，小さくなるとマルテンサイトが安定する．強磁性および非磁性の双方の性能を確保するため，オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 をベースにして，平山の当量を 20.5 から 21.5 の範囲に設定し供試材 A および B の化学組成の調整を行った．供試材の組成を Table 1 に示す．

Table 1 Chemical composition of work material (mass %)

Material SUS304	C	Cr	Ni	Fe
Type A	0.026	17.8	8.28	Bal.
Type B	0.033	18.0	8.50	Bal.

### 2.2 恒温条件下での単軸圧縮試験

単軸圧縮試験条件を Table 2 に示す．供試材 A の熱間スラブ圧延材から，ワイヤーカットで 12.0 × 18.0mm の大きさに加工し，真空度 10<sup>-3</sup> Pa 以下，温度 1370K で 7.20ks で保持することによって固溶化熱処理を施し非磁性とした．恒温圧縮試験は油浴中での一定温度下での繰り返し潤滑法とした．

ひずみ速度は 10<sup>-3</sup> 以下とし発熱の影響を排除した．試験温度は 275, 300, 325, 350, 373K の各一定条件とした．加工誘起マルテンサイト生成率 ( $V_m$ ) は FERITSCOPE (商品名, Fischer 社製) を用いて測定し，これを別途作成した X 線回折による加工誘起マルテンサイト生成率測定値と FERITSCOPE 測定値との校正曲線により求めた<sup>2)</sup>．

Table 2 Condition of compression test

Material	Type A
Specimen size	12.0 × 18.0mm
Strain rate	< 10 <sup>-3</sup>
Test temperature	273K, 300K, 325K, 350K, 373K

### 2.3 実験方法

供試材 B の組成からなる冷間圧延材を汎用プレス機，量産型で連続絞り加工を行い，直後のワーク温度を熱電対で測定した．110ton クランクトランスファプレスを使用し，室内は一定温度で管理した．トランスファフィンガに熱電対を設置し，各ショットごとにワーク温度を測定した．

打ち始めは 10 個おきに，ワーク温度が安定した後は 200 個おきに，加工個数の合計が 5000 個に達するまで測定を続けた．同間隔でワークのサンプリングを行い，B-H トレースで磁束密度 B 4K を測定し，強磁性レベルを求めた．

## 3. 解析方法

### 3.1 熱・変形連成解析

2. 2 項で求めたデータを，品川らが提案した式(1)<sup>1)</sup> のシグモイド関数形に変換し，有限要素法による熱・変形連成解析でしごき加工後の加工誘起マルテンサイト生成率を求める．

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_m}{d} &= \frac{4S_1}{S_2^2} (V_m + \frac{S_2 S_3}{4S_1}) \chi (S_2 - V_m) \\ S_i &= \frac{a_i \exp(b_i T + c_i)}{1 + \exp(b_i T + c_i)} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで  $V_m$  は加工誘起マルテンサイト生成率 (生成比, 0  $V_m$  1),  $T$  はワーク温度 ( ),  $a_i, b_i, c_i$  は非線形最小自乗法で求めた定数,  $dV_m/d$  は単位相当ひずみあたりの加工誘起マルテンサイト生成率 (生成速度) を示す．

Fig. 2 に熱・変形連成解析によるマルテンサイト生成率予測の流れを示す．

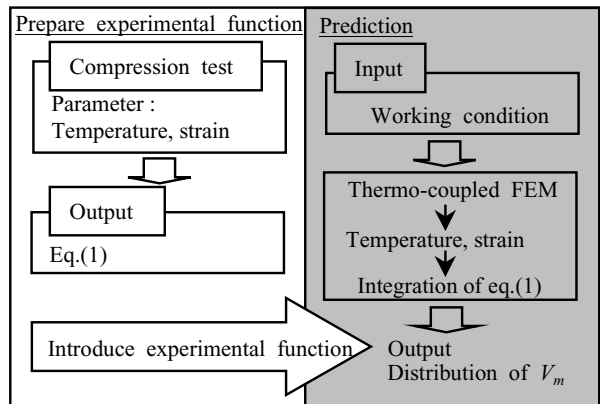
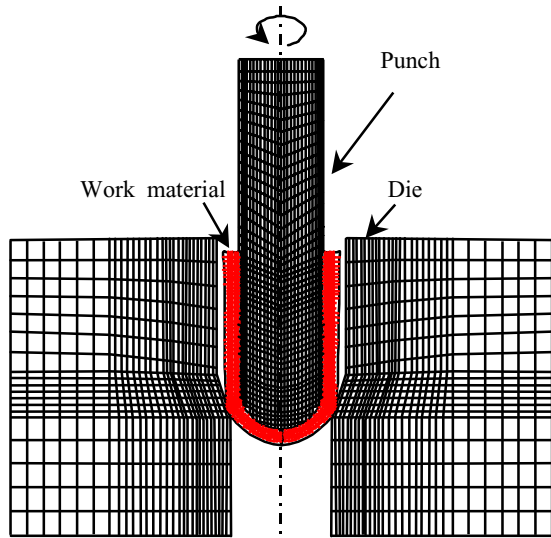


Fig. 2 Flow for the prediction of volume fraction of martensite

### 3.2 解析方法

解析モデルをFig. 3に示す．モデルはしごき前のワークがカップ形状であることから軸対称モデルとする．しごき前の内径は 7mm一定，側壁の板厚はカップ底側を1.07mm，開放側端部を1.49mmとし，開放側に近いほど板厚が厚くなる形状とした．しごき型のクリアランスは0.8mmで設定し，しごきの加工速度は，44.6mm/s一定とした．

摩擦条件はクーロン摩擦則を採用し，その係数は摩擦試験での測定結果より0.11で設定した．ワークと型との間の界面熱伝達係数は，しごきを伴う高面圧を想定して $100\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ とした<sup>6)</sup>．変形抵抗は圧縮試験で求めた測定値を各試験温度ごとにn乗硬化式で近似する．



Initial thickness of cup wall : Bottom side : 1.07mm  
 Opening side: 1.49mm  
 Ironing clearance: 0.80mm  
 Coefficient of friction: 0.110  
 Punch head speed: 44.6mm/s (Constant)  
 Heat transfer coefficient:  $100\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$  (Work-Die)  
 Atmospheric temperature: 295K  
 Energy conversion coefficient: 0.9

Fig. 3 Simulation model for ironing

各ステップ毎（1回のステップはパンチストロークで0.01mm以下に設定）にひずみと温度から求めた変形抵抗増分値を近似式から求め積算した．ただし各温度とも相当ひずみ0.06までは変形抵抗を316MPa一定として扱った．雰囲気温度は295Kで設定し，エネルギー変換効率は0.9とした．その他熱物性値は温度依存を考慮した

解析結果として温度分布，反力，相当ひずみ，加工

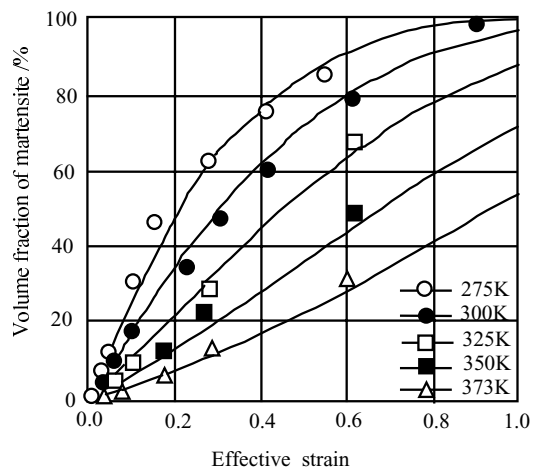
誘起マルテンサイト生成率を出力する．磁界の強さ  $H=4000\text{A}/\text{m}$  のときの磁束密度  $B4\text{K(T)}$  を強磁性レベルの尺度とした． $B-H$ トレーサで測定した  $B4\text{K}$  測定値と加工誘起マルテンサイト生成率測定値の校正曲線を基に，マルテンサイト生成率を磁束密度  $B4\text{K}$  へ変換し強磁性レベルを予測する．同じ加工条件で実験を行い，解析値と比較する．

### 4. 結果および考察

#### 4.1 恒温圧縮試験での加工誘起マルテンサイト生成率

Fig. 4に供試材Aの恒温圧縮試験での加工誘起マルテンサイト生成率の測定結果を示す．供試材Aの化学組成から計算で求めた  $M_s$  点は163K， $M_{d30}$  点は336Kであり，ひずみによる加工誘起変態は主にこの範囲の温度で発生する．

マルテンサイト生成前のオーステナイトの自由エネルギーは温度が下がるほど上昇するため，マルテンサイト自由エネルギーとのエネルギーギャップが縮小し，ひずみによる加工誘起変態が発生しやすい<sup>7)</sup>． $M_s$  点以下の温度域まで冷却するとオーステナイトとマルテンサイトの自由エネルギーが逆転し，ひずみを加えなくてもある程度の比率で変態は進行する．また  $M_{d30}$  点を越え，ある雰囲気温度まで上昇すると，ひずみを加えてもマルテンサイトが生成しない  $M_d$  点に到達する．



$$\begin{aligned} a1 &= 0.83770 & b1 &= 0.0022163 & c1 &= -0.056077 \\ a2 &= 1.0237 & b2 &= 0.047715 & c2 &= 9.7927 \\ a3 &= 5.5175 & b3 &= -0.028224 & c3 &= 0.045619 \end{aligned}$$

Fig. 4 Effect of strain and temperature on volume fraction of martensite and fitting parameters in Eq.(1) of material type A (Experimental results)

Fig. 4でのひずみが0から0.4の範囲において、ひずみの増加にほぼ比例して加工誘起マルテンサイト生成率も上昇する。また圧縮試験温度が275Kから373Kにおいて温度が低くなるほど、同じひずみで加工誘起マルテンサイトは多く発生する。ひずみが0.4から1.0にかけてはひずみの増加に従って、加工誘起マルテンサイト生成率も上昇するが、その上昇率は徐々に低下する。

今回試験を実施した供試材Aは、373Kの高温域においても加工誘起マルテンサイトを生成することが判明し、計算値Md30と実測値Mdの差が大きいことがわかった。式(1)のシグモイド関数に各温度条件での試験値を代入し、求めた係数 $a_1 \sim c_3$ と、その係数によって作成した曲線をFig. 4に示す。加工誘起マルテンサイト生成率をシグモイド関数に変換したところ、約10%の誤差でデータが近似できることがわかった。

また、求めたシグモイド曲線より、275Kでの加工誘起マルテンサイト生成率の飽和量は、ほぼ100%に到達することが予測できる。ただし実際の部品加工において、氷点下近傍の温度域で1.0を越える大きなひずみを与えることは、材料の延性不足、設備・金型装置が大規模となり実施困難である。極限の強磁性レベルを得るには、温度、ひずみ以外の応力場にも着目し、制御する必要があると考えられる。

Fig. 5に供試材Aでの恒温圧縮試験での变形抵抗測定結果を示す。雰囲気温度が上昇するほど、マルテンサイト生成率が減少するため、变形抵抗も縮小する。

実際の加工では塑性自己発熱が大きいとマルテンサ

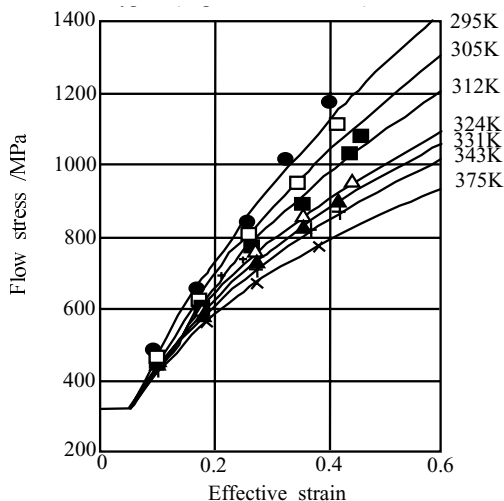


Fig. 5 Flow curve of material type A (Experimental results)

イトが生成しにくくなり、温間加工状態になって变形抵抗が減少する。Fig. 5の測定値をn乗硬化則に従って、解析での材料物性値に近似し入力した。

4.2 熱・变形連成解析による強磁性レベル予測

Fig. 4, Fig. 5で求めた実験式を熱・变形連成解析に代入し、しごき加工中の温度分布、ひずみ分布、加工誘起マルテンサイト生成率を求めた結果をFig. 6, Fig. 7に示す。

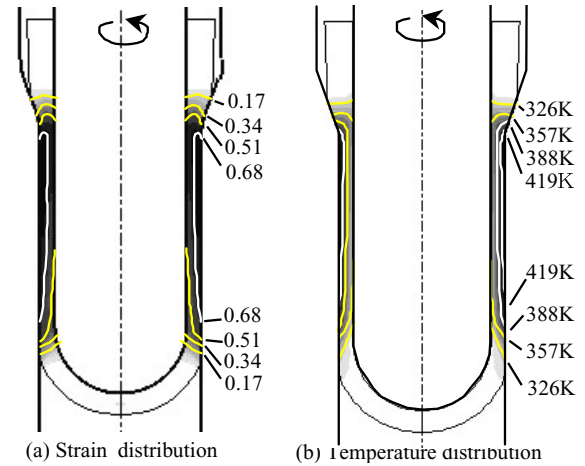


Fig. 6 Distribution of strain and temperature in ironing (Calculated results)

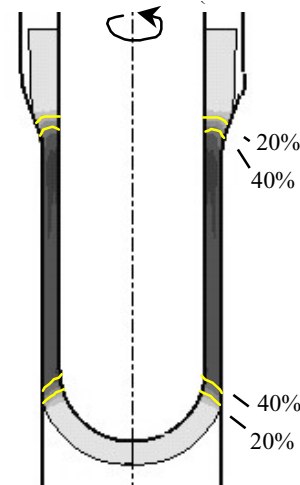


Fig. 7 Volume fraction of martensite in ironing (Calculated results)

Fig. 6の(a)は、しごきで発生する相当ひずみ分布を示す。開口部に近いほどしごき率が大きくなるようモデルを作成してあるため、底面より開口部の方がひずみが大きく0.5から0.8の範囲でひずみ分布をもつ。また板厚方向のせん断変形によりパンチ側よりダイ側の方がひずみが大きい。

Fig. 6の(b)は、しごき加工中の温度分布を示す。塑性自己発熱によって、ひずみに応じて温度も上昇する。加えて摩擦発熱によりダイと接触する表面が著しく温度上昇する。

Fig. 7にマルテンサイト生成率の分布を示す。Fig. 4の圧縮試験ではマルテンサイトはひずみに対応して増加するが、Fig. 7のしごきではひずみ増加しても生成率は増加しない。全域に40%から50%のマルテンサイトが平均して発生する。しごきの表面は700~750MPaの面圧を受けるため、型との摩擦発熱が増大し、加工表面温度は450Kまで上昇する。Fig. 4での圧縮試験結果では雰囲気温度295Kでひずみ0.4から0.6では、60%から80%のマルテンサイトが生成されるのに対し、Fig. 7では温度上昇によって生成に寄与しないひずみが多いため、生成率が低くなったと考えられる。

次に同加工条件にて実験を行い、解析との整合性を検証した結果をFig. 8に示す。しごき加工中の表面温は解析値が450Kに対し、実験値は410Kとやや低めである。実験値がやや低めなのは、加工後に熱電対で温度を測定するため、数秒のタイムラグにより温度が下がったためと考える。次に図には示していないが、実験で作製したサンプルのマルテンサイトをX線で測定したところ、40%前後での生成率とほぼ解析と同様の数値を得ることができた。次に解析で求めた加工誘起マルテンサイト生成率を校正曲線を基に、磁束密度 $B_4K$ を求めたところ、0.29Tの強磁性レベルが期待できることが分かった。実験で作製したFig. 1のサンプルで、底面より10mm位置を測定した値は0.25Tであり、解析値と比べてやや低めだが、実験の事前検討として活用できる範囲の誤差と考えた。

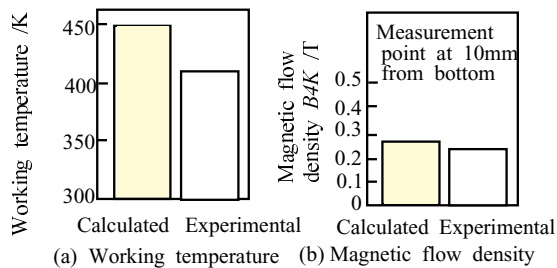
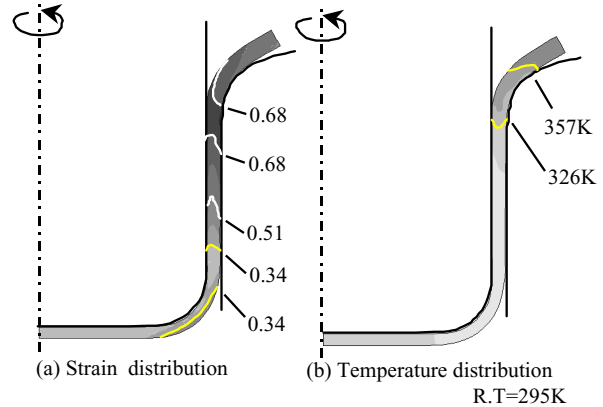


Fig. 8 Comparison of temperature and magnetic flow density in ironing between measurement and FEM analysis (material type A)

#### 4.3 しごき・絞りでの強磁性レベル比較

絞りも同様に熱・変形連成解析を行った。Fig. 9に

示すように、表面温度は360Kであり、しごきと比較してひずみが同レベルにも関わらず、90K程度低いことが明らかになった。また絞りの表面は400~500MPaの面圧を受けることも判明した。



Initial thickness : 1.20mm ,  
Drawing die clearance: 1.20mm

Drawing ratio : 2.18 , Coefficient of friction : 0.110

Fig. 9 Distribution of strain and temperature in drawing  
(Calculated results)

絞りは、板厚を圧下せず径の縮小によってひずみを加えるため、面圧が小さく摩擦発熱が抑制される。低い温度で加工が可能のため、変態量が多く高い強磁性レベルを得ることが期待できる。実験で絞りでの加工温度を測定した。加工後のワーク温度は340Kであり、測定までのタイムラグにより解析値の360Kに比べやや低めだった。

Fig. 10に絞り加工中の加工誘起マルテンサイト生成率を求めた結果を示す。しごきではFig. 7に示すようにマルテンサイトが40%から50%生成するのに対して、絞りでは60%から70%生成することが判明した。

Fig. 11に供試材Bでひずみ0.4での実験において、しごきと絞り（内径 10.6から 7.2mmの絞り）での温度および磁束密度 $B_4K$ を求めた結果を示す。

Fig. 11(a)より絞りがしごきより加工中のワーク温度が低い結果が得られた。Fig. 11(b)より強磁性レベルがしごきが0.1Tなのに対し絞りは0.26Tであることを確認した。

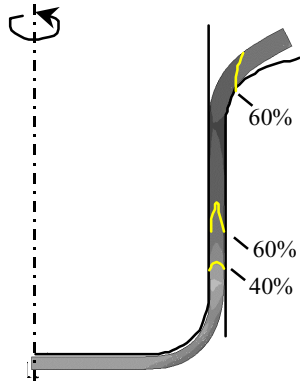


Fig. 10 Volume fraction of martensite in drawing  
( Calculated results )

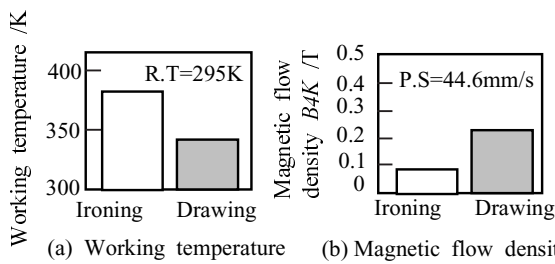


Fig. 11 Comparison of temperature and magnetic flow density between ironing and drawing in material type B ( Experimental results )

以上より強磁性化を促進するには、摩擦発熱抑制効果の高い絞り加工が有利と考える。なお Fig. 8(b) の供試材Aは0.25Tに対し、Fig. 11(b)の供試材Bが0.1Tと低いのは、供試材Bはカーボン、クロム、ニッケルが多く、オーステナイトが安定しているためと考える。

4.4 量産機での連続絞り

Fig. 12 に量産機での連続絞りを含めた複合磁性材料の製造工程を示す。製品の要求特性より強磁性レベルB4Kの目標は0.3Tで設定した。Fig. 13 , Fig. 14 に供試材Bで多工程の連続絞りをした時の温度を測定した結果を示す。

単発加工に対し多工程での連続加工によって絞り最終工程で20K温度が上昇し、更に連続加工することで金型の温度上昇によって、80個絞り加工した後では、さらに30Kか40Kまで温度が上昇した。その後はワーク温度が均衡し5000個までほとんど温度変化は見られなかった。

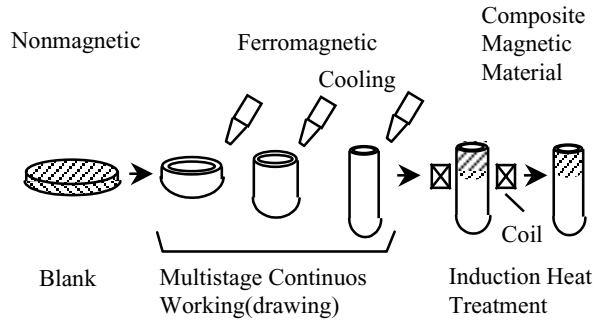


Fig. 12 Composite magnetic material production process  
Ferromagnetic level  $\geq 0.3T$

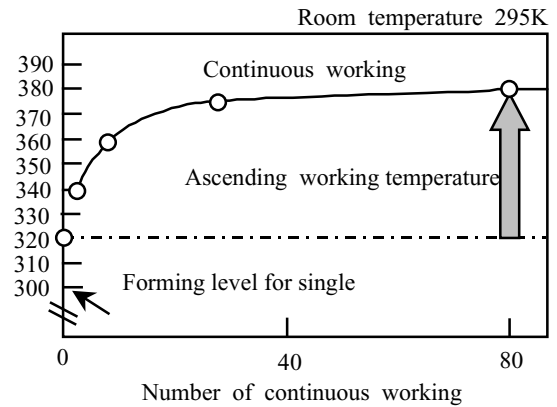


Fig. 13 Ascending working temperature under continuous working in material type B ( Experimental results )

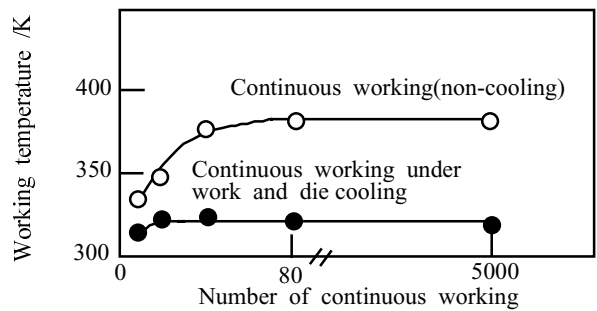


Fig. 14 Temperature change during continuous drawing in material type B ( Experimental results )

Fig. 15 に強磁性レベルB4Kを測定した結果を示す(測定値の一部を省略)。Fig. 14より打始めから連続絞りが80個までは340Kから380Kへ徐々に温度が上昇することで、強磁性レベルは0.50Tから0.10T以下に急激に減少する。塑性自己発熱によってワークに蓄積した熱が、型に伝熱し型温が上昇する。そこで強制冷却法により、冷却装置でワークに蓄積した熱と、型に伝熱した熱を取除きながら加工を行った。

その結果，ワーク温度を340K一定に保つことで，50Tの強磁性レベルを維持することが可能となった．連続絞り加工5000個まで性能が変化せず0.5Tを維持することを確認した．

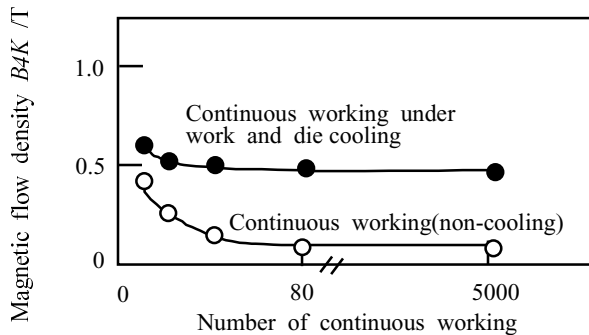


Fig. 15 Ferromagnetic level during continuous drawing drawing in material type B (Experimental results)

### 5. 結言

加工誘起マルテンサイト変態を利用した複合磁性部材のプレス工程において，強磁性化に有利な加工方法を考察した．圧縮試験で加工誘起マルテンサイト生成率を求めシグモイド関数形に変換して解析に反映した．

解析でしごきでの加工誘起マルテンサイト生成率を求め，ワーク温度，強磁性レベルについて解析値と実

験値の比較を行い，ほぼ一致することを確認した．実験で絞りがしごきより強磁性化に有利であることを明らかにし，ワーク，型の熱を強制的に取除きながら連続絞り加工することで，量産機で0.5Tの強磁性レベルを達成した．

同手法を電磁弁に適用し，数百万個以上生産するに至っている．材料ロット・季節間変動を通じて0.5Tの強磁性レベルを安定して確保している．最後に圧縮試験に協力した三加学君(名大院生)，実験に協力した(株)野口製作所殿に感謝します．

### <参考文献>

- 1) 町田輝史：第142回塑性加工シンポジウム(1992)，1-10．
- 2) 三加学・細野和広・湯川伸樹・片岡正宏・石川孝司・杉山聡：平8 塑加春講論，(1996)，40-41．
- 3) 浅川基男・須田忠三・高祖正志・塚本孝：塑性と加工，30-347(1989)，1593-1599．
- 4) 平山俊成：日本金属学会誌，5-35(1971)，447-451．
- 5) 品川一成・西川裕之・石川孝司・細井祐三：鉄と鋼，76-3(1990)，462-468．
- 6) 中西広吉・野々山史男・澤村政敏・団野敦：塑性と加工，37-421(1996)，207-212．
- 7) 竹内伸・井野博満・古林英一：金属材料の物理，(1992)，72-77，日刊工業新聞社

< 著 者 >



杉山 聡  
(すぎやま さとし)

生産技術開発部  
プレス・塑性加工に関する生産技術開発に従事。



中西 広吉  
(なかにし こうきち)

(株)豊田中央研究所  
材料1部 加工基盤研究室 研究員  
工学博士  
塑性加工，特に鍛造加工のコンピュータ支援技術に関する研究開発に従事



竹ノ内 省一  
(たけのうち しょういち)

生産技術開発部  
塑性加工に関する生産技術開発に従事。



青山 文宣  
(あおやま ふみのり)

情報企画部  
強度・塑性加工分野におけるコンピュータシミュレーション手法の開発・適用化に従事。



石川 孝司  
(いしかわ たかし)

名古屋大学大学院工学研究科  
材料プロセス学専攻教授 工学博士  
塑性加工学，特に鍛造・圧延加工の高精度化，高品質化に関する研究に従事。