

メタルフロー(塑性流動結合法)の研究と 応用製品開発

Research on the "METAL FLOW" (Combination by Plastic Flow) and Development of Its Applied Products

金属材料の塑性流動を応用した新しいメタルフロー(塑性流動結合法)を開発した。この結合技術は、ねじ締め、リベットかしめ、溶接などに比較し、異種金属を高精度で、しかも、省エネルギー、小形・軽量に結合できる特長がある。結合のプロセスは、2種類の円筒状の部品の外・内周、下面を治具で固定し、硬いほうの金属の内周に溝を刻み、軟らかいほうの金属を金型で上から局部加圧し、溝部に材料を塑性流動させて結合するものである。特に溝数を2~3個とし、更にローレット加工を加えた高強度メタルフローは、溶接と同等以上の機械的強度をもち、振動・回転変動の激しい分野への応用を広げた。メタルフローに適した高精度・省エネルギー形の油圧プレス機を併せて開発、実用化した。

金丸尚信* Hisanobu Kanamaru

東海林 昭* Akira Tōkairin

立見 榮男* Hideo Tatsumi

神山高樹* Takaki Kamiyama

佐用耕作* Kōsaku Sayō

1 緒 言

メタルフロー(塑性流動結合法)は、金属材料の塑性理論を応用した新しい概念の結合技術である。それは、自動車部品など量産部品の高強度・省エネルギー・省資源形の結合手段として注目されている。

結合するという作業は、機械部品を作る上で欠かせない。ねじ締め、リベットかしめ、溶接など、いろいろな結合方法が目的に応じて使われている。これらの結合方法は技術的にも安定して広く普及しているが、材料結合の目的から見れば一長一短があって問題点も多い。

例えば、ボルトとナットを使うねじ締めは、振動の大きな箇所では緩むおそれがある。リベットかしめは、結合面が完全に密着せず、また、リベット頭部が突出するとか、部品点数や組立工数が多いなど、ねじ締め同様の欠点もある。

溶接は結合部分の強度も大きく、余分な部品もいらぬが、異種金属の溶接には材料の制約があり、結合後の精度に問題が起きやすい。また、電気やガスを多量に使うため、量産品製造の場合は省エネルギーの観点から好ましくない。

十分に信頼性が高く精度が良く、余分な部品や手数を要せず、しかも省エネルギー・省資源的というような結合方法は、まだ機械製造の現場に存在していなかった。

以上述べたような結合技術の現状を打開するため、塑性流動に注目し、メタルフローを開発した。

2 メタルフローの基礎研究

2.1 基礎理論

メタルフローは、塑性理論「トレスカ(TRESCA)の変形条件」¹⁾が根拠になっている。図1(a)は3軸応力図を示したものである。ここで、トレスカの変形条件は、次式で表わされる。その変形は、最小主応力の方向に変形する。

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq K_f$$

ここに σ_1 : 最大主応力 (kgf/mm²)

σ_3 : 最小主応力 (kgf/mm²)

K_f : 変形抵抗 (kgf/mm²)

図1(b)は、メタルフローの応力図を示したもので、最小主応力 σ_3 の方向、すなわち結合溝部に変形する。結合溝に充填させるにはかなりの大きな主応力 σ_1 を加えなければならない。一般的に σ_1 は、変形抵抗 K_f の4~6倍の応力が必要となる。

2.2 メタルフローの原理

メタルフローの構成は、2部材の結合と3部材の結合とに大別できるが、その原理は同一である。図2(a)は、2部材の結合の原理を示したもので、A、B2種類の円筒状の部品が、外周、内周及び下面を治具で固定されている。部品AはBよりも硬い金属で、その内周に沿った溝が刻まれている。金型で上から圧力を加えると、部品Bの金属は、部品Aの溝の部分に流れ込むような変形を起こす。同図(b)は、3部材の結合の構成を示したもので、部品Aと部品Cを電磁的にしゃ断したい場合や、部品A、Cの双方が伸びの少ない材料から構成される場合に利用できる。

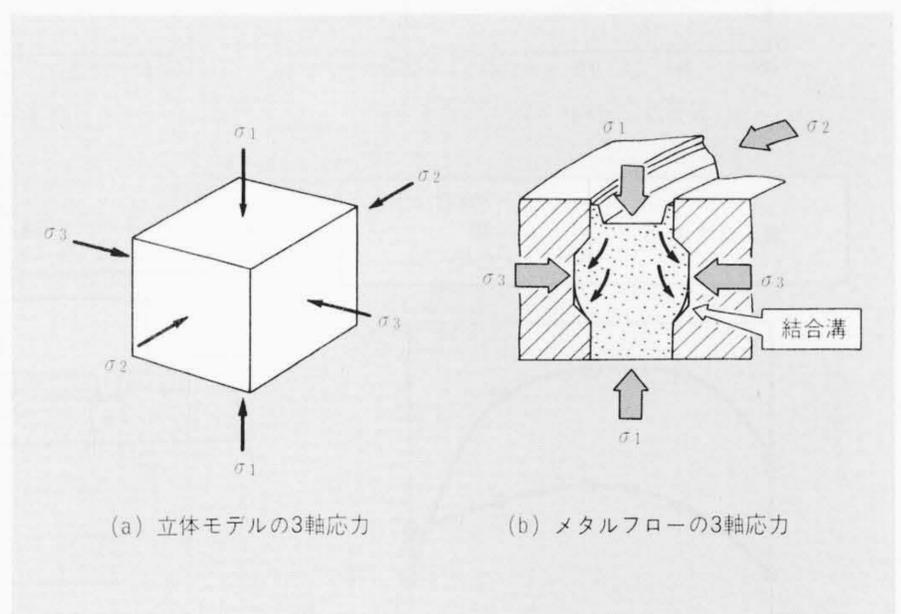


図1 トレスカ(TRESCA)の変形条件 (最大主応力 σ_1 -最小主応力 σ_3)が材料の変形抵抗 K_f を越えると、最小主応力 σ_3 の方向に変形する。

* 日立製作所佐和工場

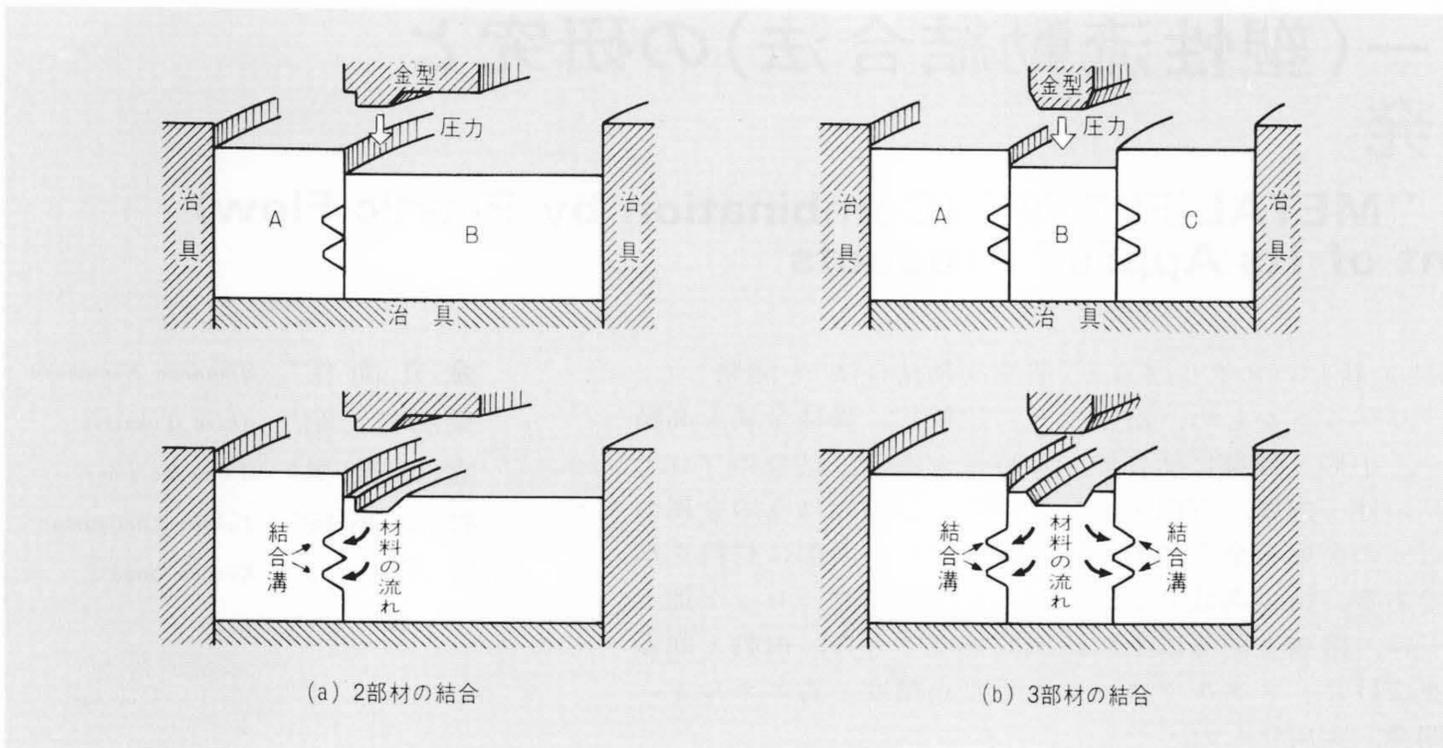


図2 メタルフローの原理 部品の外周、内周及び下面が治具で固定され、硬いほうの部品の内周に溝が刻まれており、金型で上から圧力を加える。

メタルフローによると、軟鋼と焼入鋼、超硬鋼と軟鋼、鉄と銅及びアルミなど、様々な組合せの材料の結合ができる。

2.3 基礎実験

溝の中に材料を塑性流動させることは比較的たやすいが、溝に充満させるには、溝形状の選定が重要である。図3は、3部材の結合の標準供試品による機械的強度を示したもので

ある。部品A、部品Cは軟鋼(SPHD)を、部品Bは銅(OFC-1/2H)を使用し、4章で後述する油圧プレス機(80tf)で加圧したものである。加圧力、溝深さ、溝角、溝入口寸法とねじりトルク及び抜き力の関係を示している。この結果、加圧力 $P=(5\sim6)K_f$ 、溝深さ $\beta=0.3\sim0.6\text{mm}$ 、溝角 $\alpha=45$ 度、溝入口寸法 $S=1/4 T_0\sim3/4 T_0$ が望ましいことが判明した。

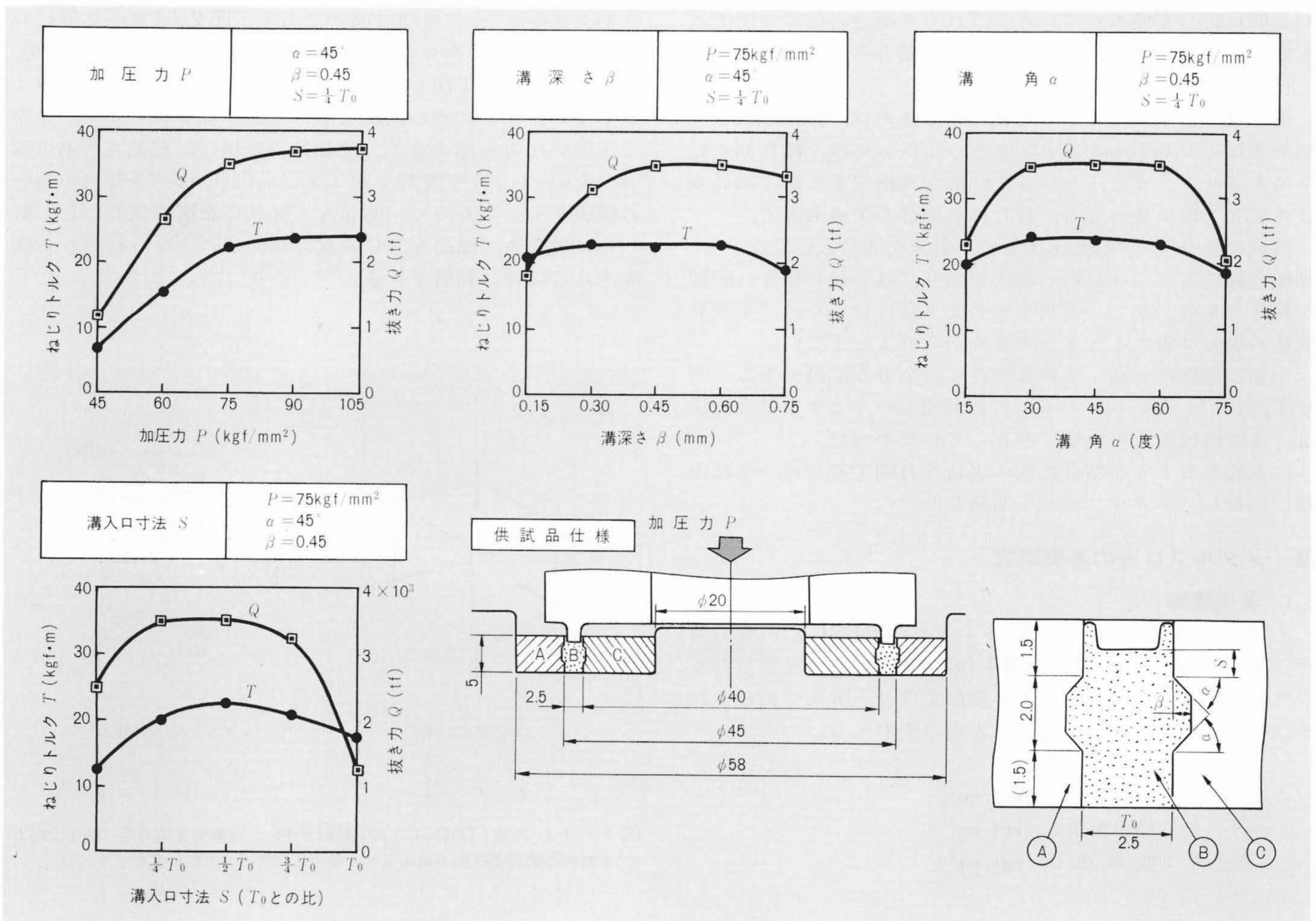


図3 メタルフローの機械的強度 加圧力、溝形状及び溝入口寸法には、各々最適範囲がある。

3 高強度メタルフロー技術

より過酷な機械的使用条件、すなわち高振動、高トルク、高温(熱ショック)などに耐える高強度メタルフロー技術の確立がぜひ必要であり研究を行なった。

3.1 供試品仕様と実験方法

供試品仕様を図4に示す。2部材の結合をモデルとし、結合円板の材料にSPHD (SAE1006)、被結合軸の材料にSCM21, SCM3を使用した。結合溝の形状は、先の実験で得られた溝深さ $\beta=0.6\text{mm}$ 、溝角 $\alpha=45$ 度とし溝数を1~4個設け、更に溝部にローレットを刻み込んだ形とした。

油圧プレス機は後述の省エネルギー形の80tfプレスを採用し、各々の供試品のねじりトルク、抜き力を試験した。併せて、結合円板と被結合軸の硬さ、ねじりトルクの関係を試験した。

3.2 結合の変形過程

結合溝数2個の場合の変形過程を分析するため、3部材の

結合をモデルに結合部材をゴム(ピュアラバー)製とした結合モデル装置を製作した。開口部を押し型により徐々に加圧し、ゴムが変形する過程を示したのが図5である。その過程で、押し型に近い結合溝のほうが先に充満していることが分かる。これは、結合部材(ゴム)と被結合部材の境界面に生ずる摩擦損失の影響と考えられる。

3.3 被結合軸の溝数と強度の関係

図6に溝数と強度の関係を示す。これによると、溝数2個と3個の場合にねじりトルク、軸方向抜き力は共に最高の値を示し、ねじりトルクは、溝数が1個の場合の1.8倍、抜き力は1.6倍に強度が向上する。溝数2~3個の場合は1個の場合に比べて結合接触面積が増加し、更に材料の流れ込む体積が減少するので結合させる主応力が増加し、確実な塑性結合になるものと考えられる。

一方、溝数が4個になると材料の流れ込む抵抗が増加し過ぎて、下方の溝に材料が流れ込まず不完全な結合となり、強度が低下するものとする。

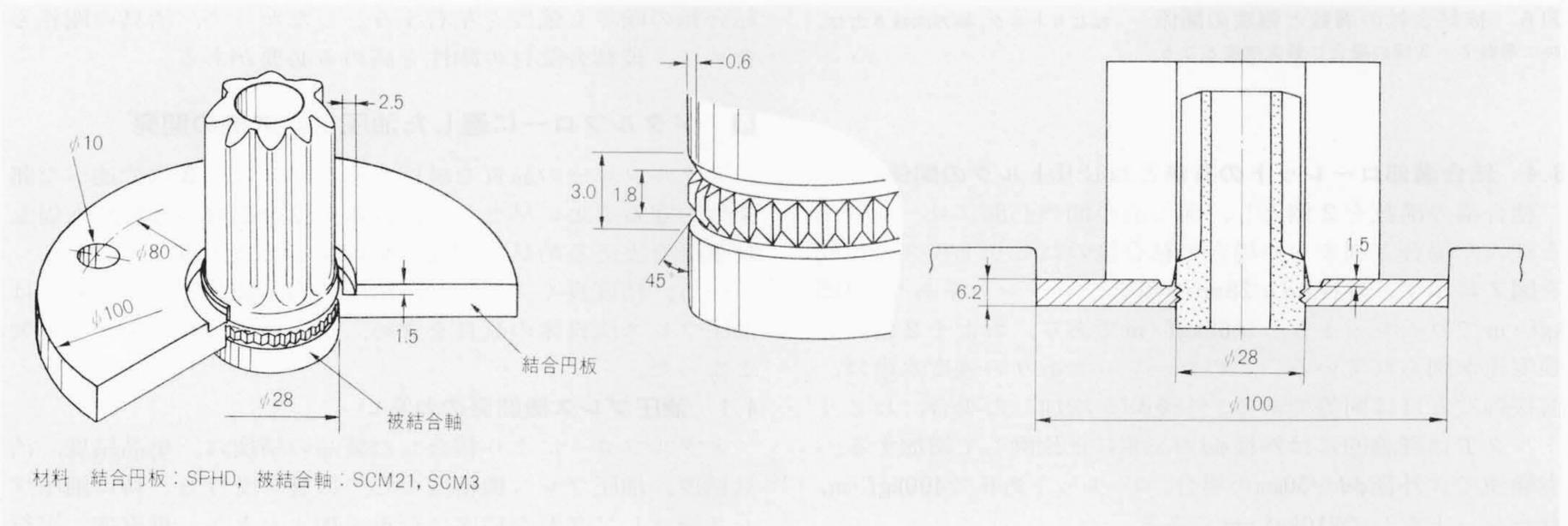


図4 供試品仕様と実験方法 結合溝数1~4個を変化させ、ねじりトルク、抜き力の影響を試験した。更に強度を向上させるため、溝部にローレットを刻んで試験した。

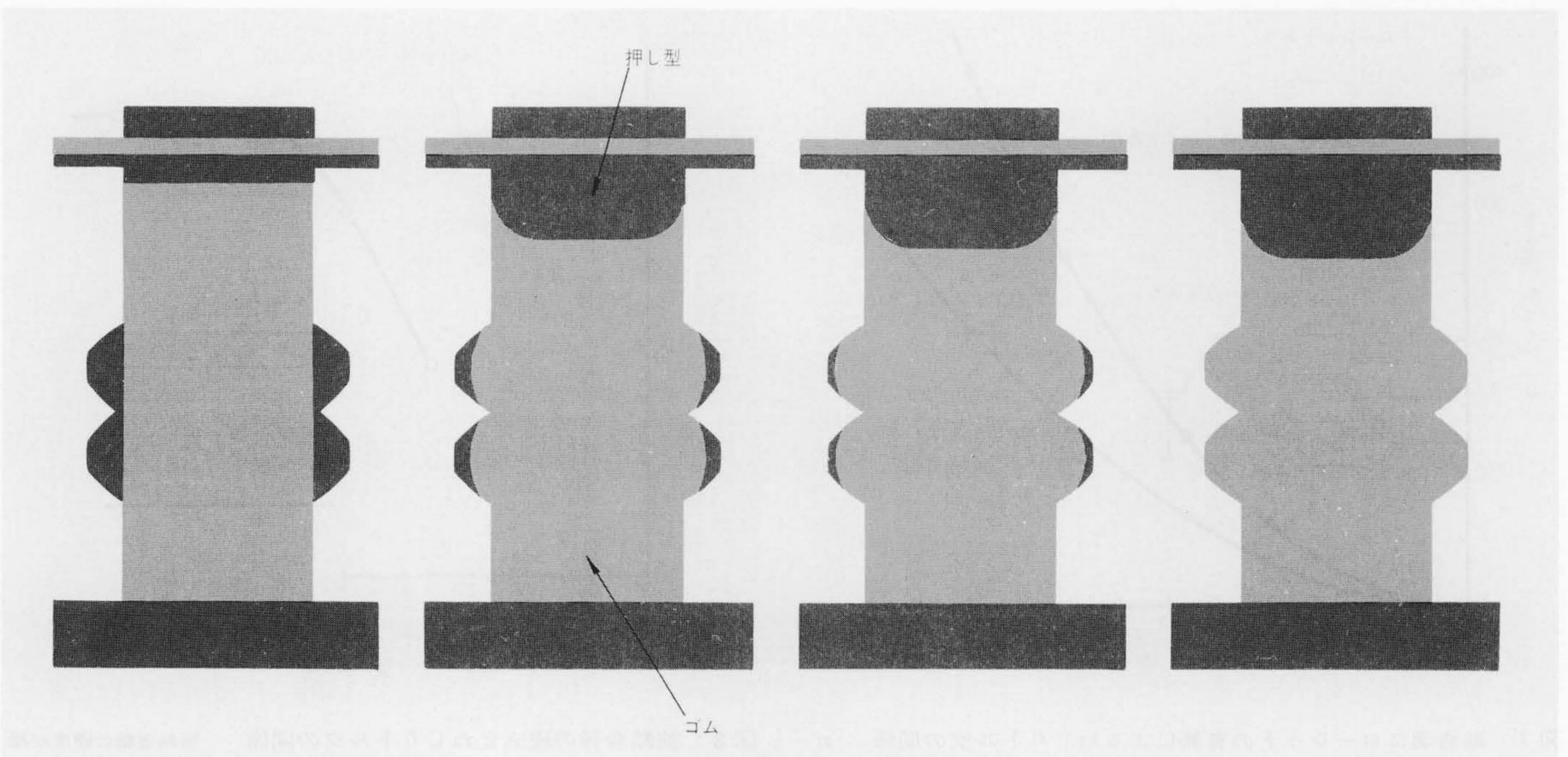


図5 結合の変形過程 結合溝数24個の場合の変形過程を示す。押し型(上部)に近いほうの溝から充満されているのが分かる。

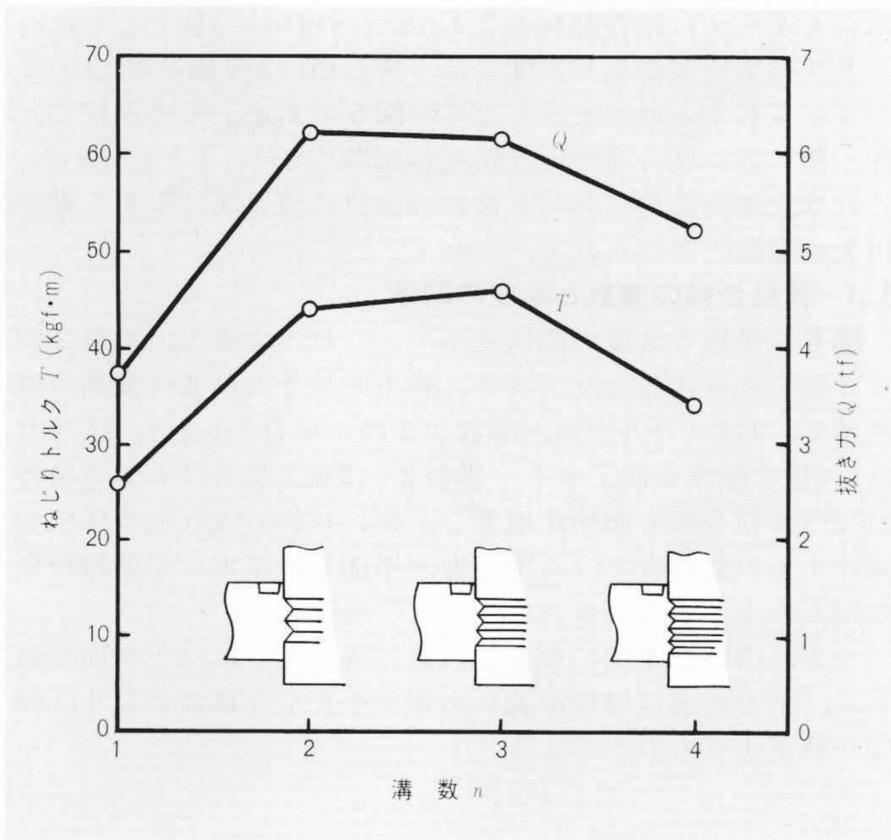


図6 被結合軸の溝数と強度の関係 ねじりトルク、軸方向抜き力は、共に溝数2～3個の場合に最大強度となる。

3.4 結合溝部ローレットの有無とねじりトルクの関係

結合溝の溝数を2個とし、溝と溝の間の凸部にローレットを刻んだ場合と刻まない場合の結合後のねじりトルクの比較を図7に示す。外径 ϕd が28mmの場合、ローレットありは125kgf·mでローレットなしは65kgf·mであり、およそ2倍の高強度化が図られている。このローレットありの強度水準は、溶接強度とほぼ同等である。外径 ϕd が増加した場合、ねじりトルク T は理論的には外径 ϕd の二乗に正比例して増加する。実験値では外径 ϕd が50mmの場合、ローレットありで400kgf·m、ローレットなしで210kgf·mである。

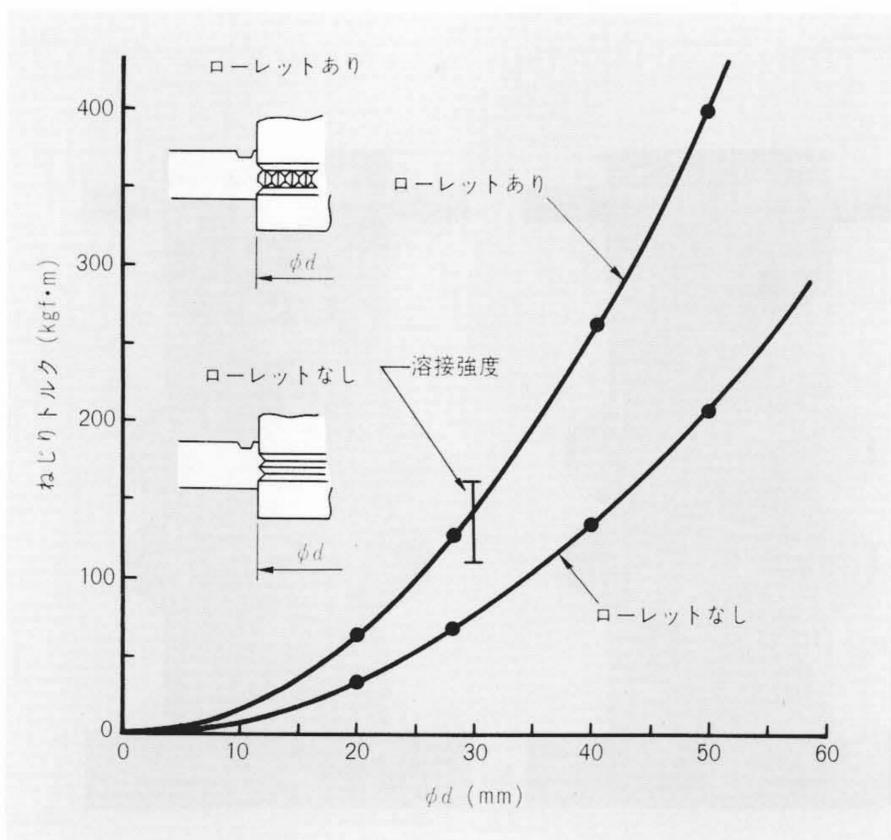


図7 結合溝にローレットの有無によるねじりトルクの関係 ローレットを付けた場合、ローレットなしに対し2倍のねじりトルクをもち、溶接と同等の強度が得られる。

以上、3.3、3.4で述べた実験及び理論的な概算によると、軸方向抜き力 Q 、ねじりトルク T 共に結合円板材質の機械的強度の影響がみられる。しかし、被結合軸の剛性もメタルフローの強度を支配する要因となる。次にその実験結果を示す。

3.5 被結合軸の硬さとねじりトルクの関係

被結合軸の硬さとねじりトルクを図8に示す。被結合軸は材料にSCM21、SCM3を使用し、硬さはHrB86、HrC23、HrC38及びHrC59の4段階とし、結合円板はSPHDの硬さHrB58と一定した。その結果、HrB86は $T = 55\text{kgf}\cdot\text{m}$ 、HrC38は $T = 120\text{kgf}\cdot\text{m}$ とトルクの差は65kgf·mであり、硬さの差により大きく T は変化する。HrC38以上の硬さになると T は一定となっている。この原因として被結合軸の硬さが十分な値以上に維持されれば、被結合軸の変形がなくなり、この結果、加圧応力が分散されずに結合円板の塑性変形部に集中し結合されるためと考えられる。

以上の高強度メタルフローの条件を総合すると、次のようになる。まず、溝の数は2～3個がよい。また、溝間の凸部にローレットを刻むことにより、2倍のねじりトルクが可能となり、溶接と同等水準の機械的強度が得られる。また、被結合軸の硬さも強度を左右する。したがって、治具の剛性も含めて、被結合部材の剛性を高める必要がある。

4 メタルフローに適した油圧プレス機の開発

メタルフローの品質を維持するためには、3章で述べた諸条件を守ることに尽きるが、特に被結合部材の外周、内周及び下面を支える治具の剛性を維持することが重要である。

一方、精度良くプレスし、精度の高い製品を得るためには油圧プレス機自体の改良を含め、新しいアプローチが不可欠となった。

4.1 油圧プレス機開発のねらい

メタルフローにより結合した製品の精度は、単品精度、治具精度、油圧プレス機精度などの影響を受ける。特に油圧プレス機として必要な精度は荷重を加えたとき、垂直度、平行

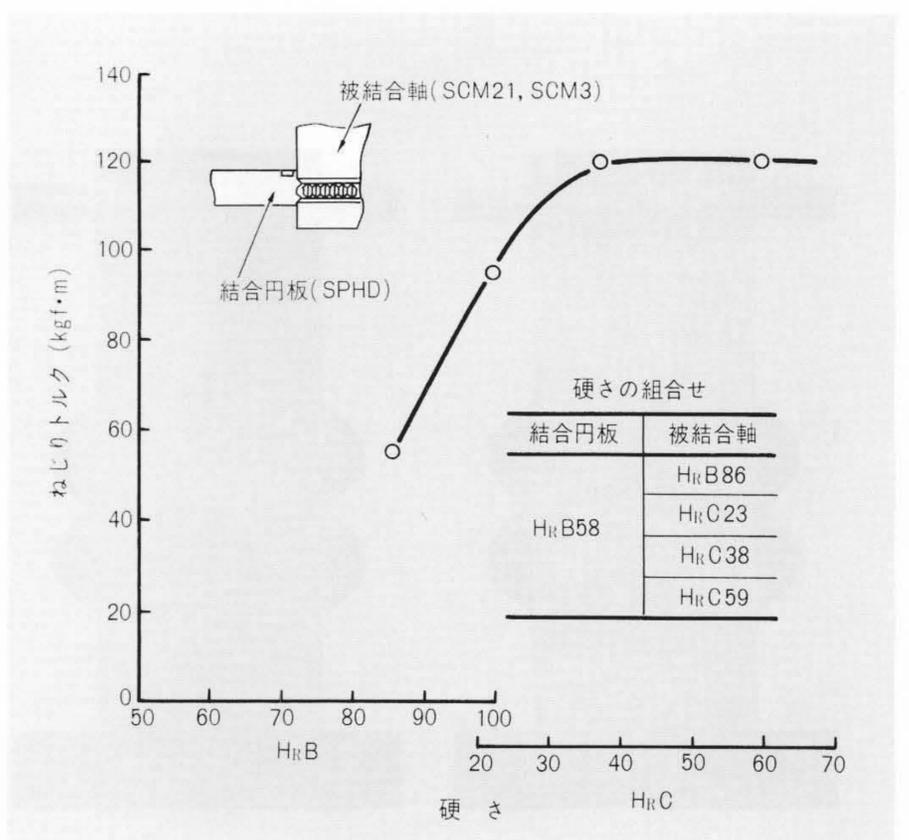


図8 被結合軸の硬さとねじりトルクの関係 被結合軸の硬度が増すとねじりトルクは増加するが、硬さHrC38以上になると飽和する。

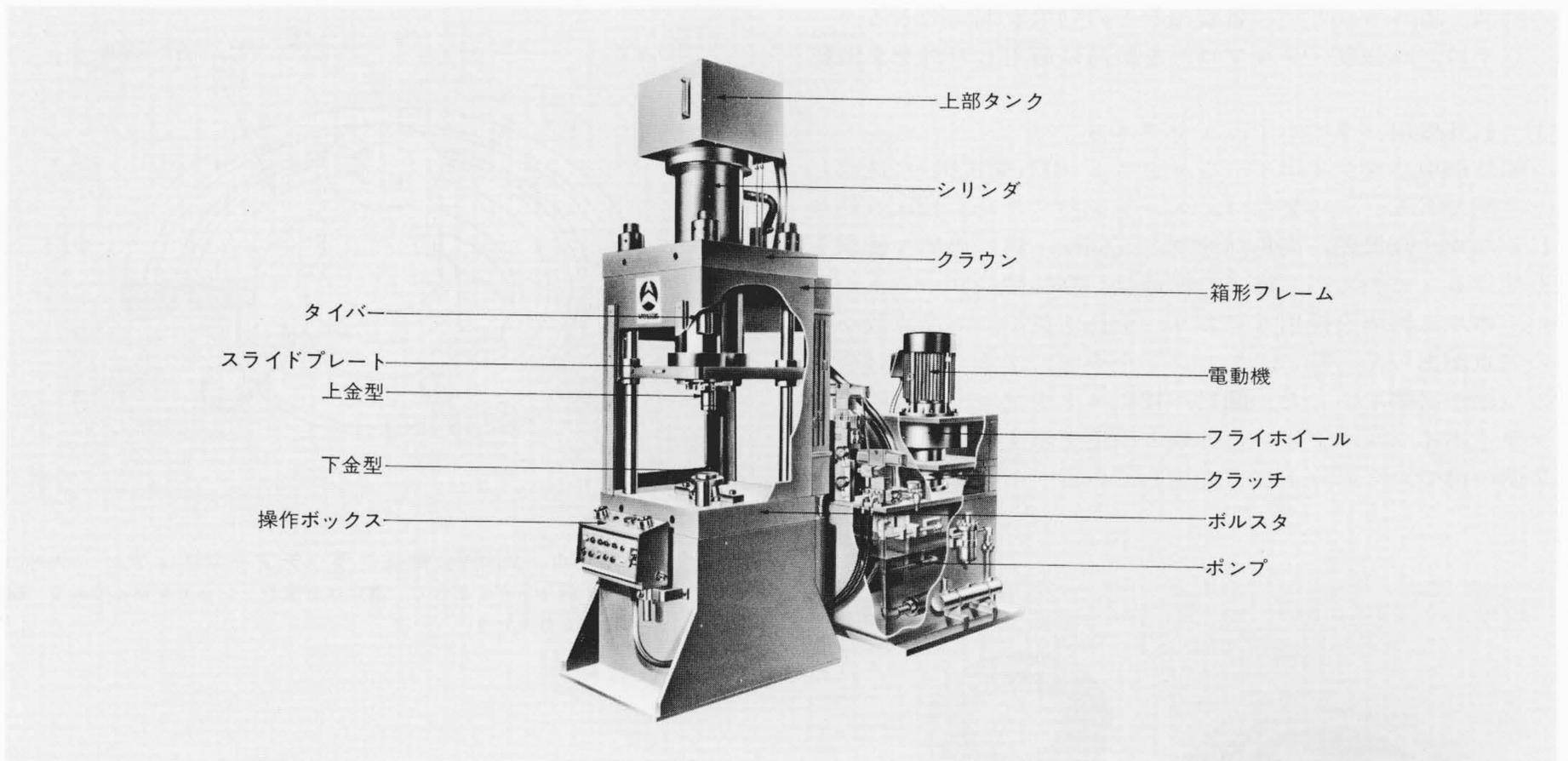


図9 高精度油圧プレス構造 プレス本体は高剛性、高精度及びコンパクトタイプの箱形フレームをタイバーで締め付ける構造である。油圧発生装置は、フライホイール内蔵形で省エネルギー30%、電動機容量 $\frac{1}{3}$ に減少できる。

度とも0.02/200mmの精度を要求される。従来の非対称構造のプレス機では、強大な応力が加わると、わずかではあるが、プレス機自体に偏ったひずみが生ずるため、メタルフローの実現に必要な精度を得ることはできない。このネックを解決するために、新しい設計思想に基づき、図9に示す高精度油圧プレス機を開発した。

4.2 特徴

(1) プレス機本体

- (a) 箱形フレームとタイバーの組合せにより、縦剛性と横剛性が向上し、プレス精度が飛躍的に向上し、サイズも従来同種プレス機の $\frac{1}{2}$ 以下となる。
- (b) タイバーをガイドにしたスライド方式のため、金型ダイセットを兼用でき、段取り時間の短縮が可能で小形化できる。
- (c) 左右前後が対称構造のため、動的精度(片開き)が従来の同種プレス機に比べて約2倍向上する。
- (d) クラウンをシリンダの上部材と兼用するため、機械重量が $\frac{1}{2}$ に低減する。

(2) 油圧発生装置

- (a) フライホイールの採用²⁾により、電動機容量は従来方式の $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ に減少し、省エネルギータイプの油圧発生装置となる。
- (b) クラッチによる間欠運転を併設のため、電動機の消費電力を30%節約が可能となる。
- (c) ポンプを油タンク内に内蔵しており、クラッチの採用と合わせて、運転騒音が低い。

フライホイール内蔵の効果事例を図10に示す。実際のメタルフロー及び塑性加工作業は、プレス1ストローク中の下死点付近で仕事をする。ストロークの大半は、部品に接するまでのアプローチとリターンに使用されている。したがって、加工に必要な大きなエネルギーは瞬時に発生すればよいことが分かる。本装置では、そのエネルギーの蓄積をフライホイールで行なっている。

5 製品適用例

メタルフローは構造設計分野で、構造の簡素化、部品点数の削減及び小形・軽量化が可能であり、また、部品加工法をより簡素な方法に置換し、これらをメタルフローで一体化することもできる。

一方、異種金属を同心状に結合できる特徴点を生かした新しい設計が可能となる。性能、品質の向上、トータルコスト

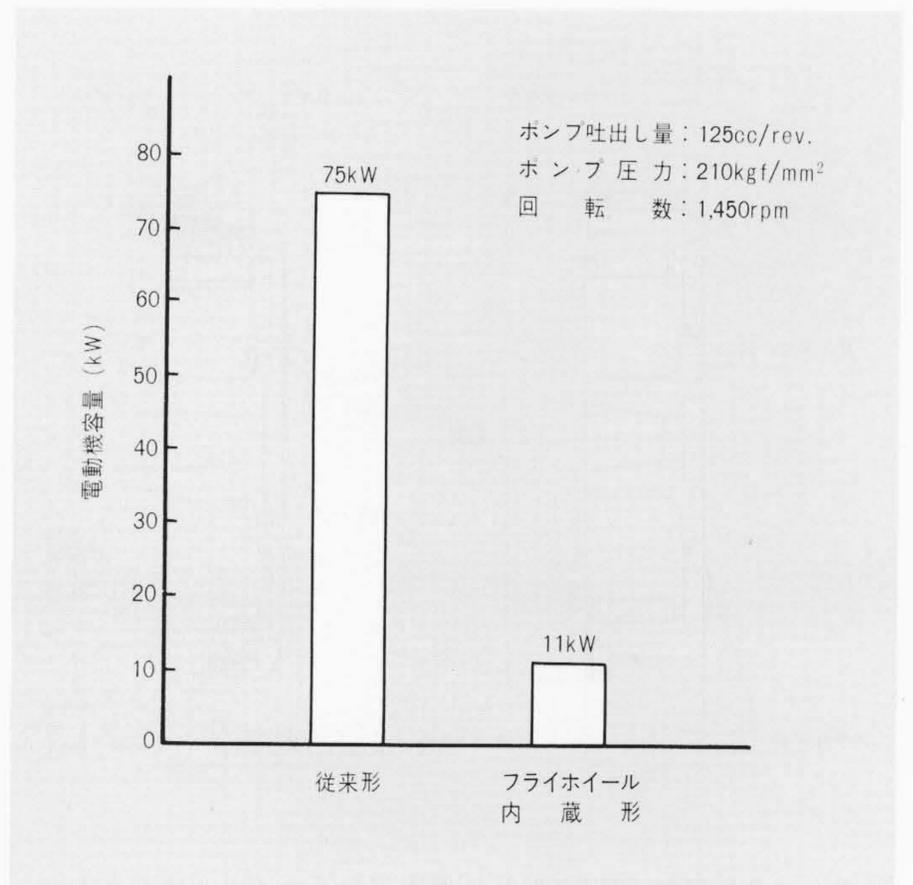


図10 フライホイール内蔵形油圧発生装置の電動機容量 メタルフロー及び塑性加工作業を対象に、電動機容量は従来の75kWから11kWに低減できる。

の削減、省エネルギー・省資源などの効果が期待できる。

以下に、高強度メタルフローを製品に適用した例を2例紹介する。

(1) 船外機用フライホイールマグネット

船外機用のフライホイールマグネット(磁石発電機)に適用した事例である。この製品は、エンジンのクランク軸に直結されるため、高振動、高角加速度、高回転、更に過酷な衝撃をも受ける。このため、従来の構造は、高強度のリベットかしめ、ボルト締めを採用しており、全長が長く、部品点数が多い欠点があった。特に、エンジンを小形にするためには全長の短縮が必要であった。図11、12にメタルフローを適用したフライホイールマグネットの外観と構造を示す。溝の仕様は、2個の溝でローレット加工を施している。センタピース、ホ

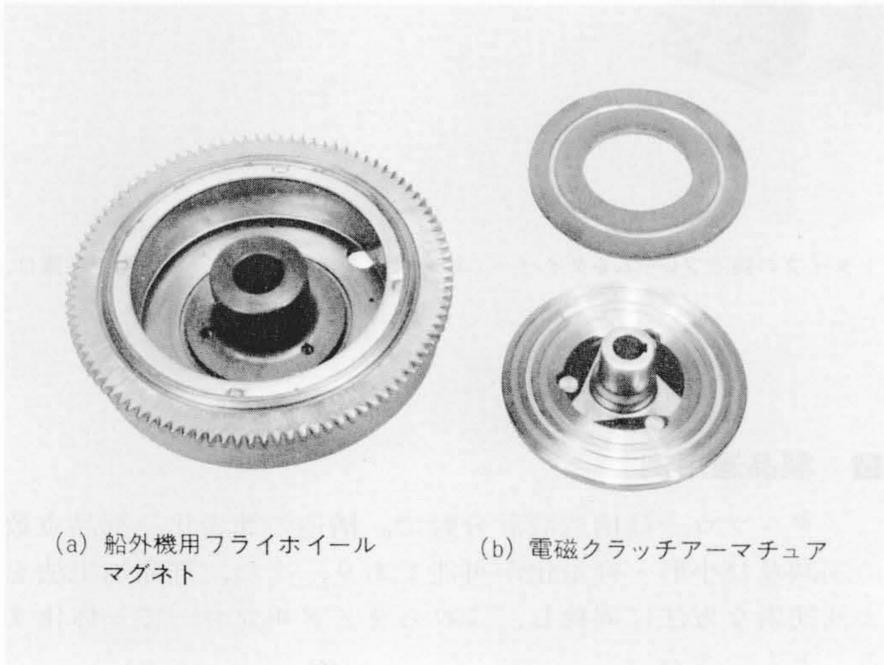


図11 メタルフロー応用例 (a)のフライホイールでは、センタピースとホイール、ホイールとリングギヤを、(b)の電磁クラッチアーマチュアでは内外の磁極板を銅リングでそれぞれ結合している。右上は素材を示す。

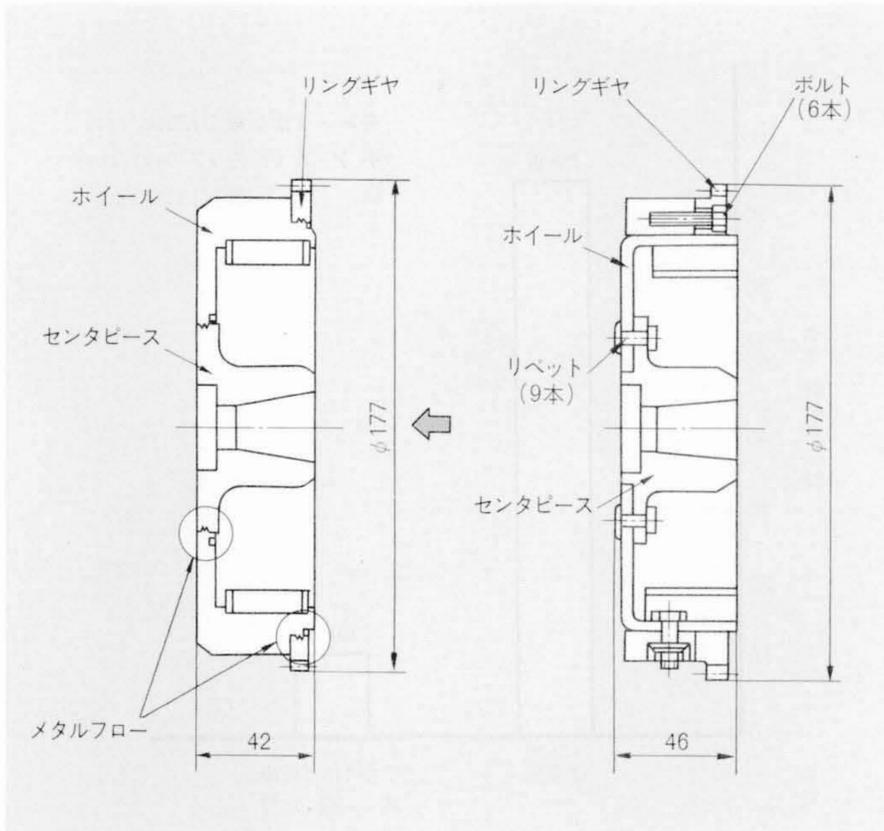


図12 メタルフロー応用例(船外機用フライホイールマグネット) 従来品(右)では、9本のリベットと6本のボルトで固定している。メタルフロー(左)では、2箇所同時の結合で3部品を一体化している。全長は46mmから42mmに短縮された。

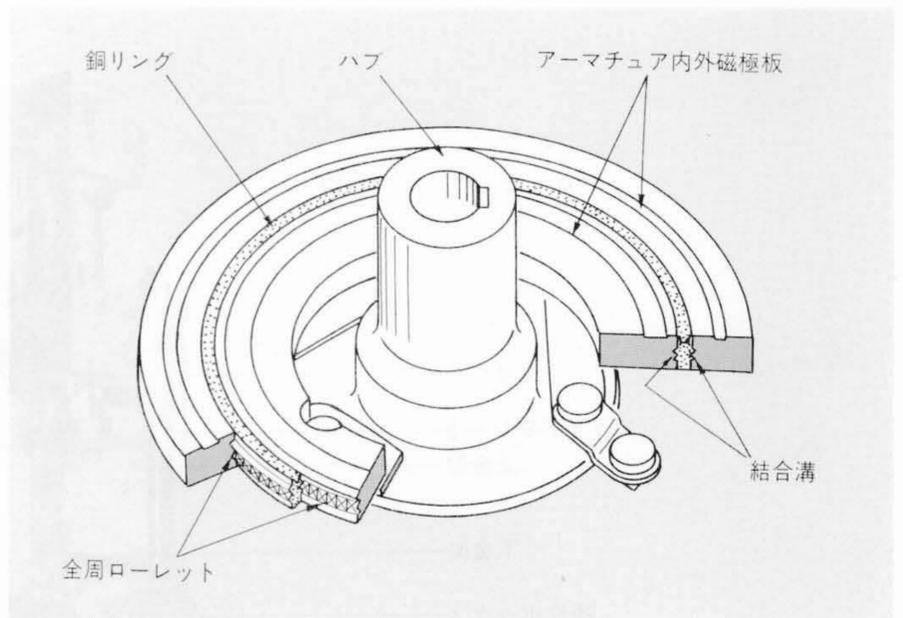


図13 メタルフロー応用例(電磁クラッチアーマチュア) 内外の磁極板を非磁性の銅リングで結合し、溝には全周ローレットが刻んである。磁気漏洩が15%低減されている。

イール、リングギヤの3部品は、材質は異なるが、いずれも鉄系で内外2箇所を同時に結合している。全長は10%短縮でき、信頼性は従来と同等以上である。

(2) カーエアコン圧縮機用電磁クラッチ

メタルフローを適用した電磁クラッチのアーマチュアの外観及び素材を図11に、断面構造を図13に示す。この事例は、図13に示すように内外の磁極板を非磁性材の銅リングで結合したもので、内外の磁極板間の漏れ磁束はほぼ完全にしゃ断される。従来のアーマチュアは、内外の磁極板間は同一材料の細かいリブで結合されていたため、漏れ磁束はリブに集中し、15%程度の損失が生じていた。

本事例のメタルフローの溝仕様は、(1)項と同等である。信頼性の面では、圧縮機異常時のアーマチュア異常高温にも十分耐える水準にある。製品の重量でおよそ20%、全長で15%の短縮が可能となった。

6 結 言

終わりに、以上をまとめて次に述べる。

- (1) 金属材料の塑性流動を応用した新しい結合技術を開発した。このメタルフロー(塑性流動結合法)は、高強度、省エネルギー及び省資源形の結合手段である。
- (2) メタルフローは、異種金属の結合が可能である。
- (3) 高強度メタルフローの溝形状は、溝数が2~3個で、溝間の凸部にローレットを刻んだものが最適である。ローレットありのものは、なしのものに対して2倍のねじりトルクをもち、溶接とほぼ同等の機械的強度である。
- (4) メタルフローに適した高剛性・高精度で、かつコンパクトな油圧プレス機を併せて開発した。また、フライホイールを内蔵した省電力形の油圧発生装置を開発した。
- (5) 高強度メタルフローの製品適用を進め、船外機用フライホイールマグネット、カーエアコン圧縮機用電磁クラッチなどで10~15%の小形化が図られた。

参考文献

- 1) 五弓：金属塑性加工の計算(上・下)、p. 22~28、コロナ社(昭40-6)
- 2) 中田：プレス理論と実際、p. 14~23、コロナ社(昭48-2)