

特 集 1  
研 究 解 説

## 薄板積層による立体創成

——レーザ切断板積層金型からラピッドプロトタイピングまで——

Free Form Manufacturing by Thin Sheets Lamination

——From Laser Cut Sheet Laminated Tool to Rapid Prototyping——

中 川 威 雄\*

Takeo NAKAGAWA

薄鋼板をレーザ切断して積層することにより立体形状をもつ金型を創成する方法は、試作用のプレス成形金型に活用されている。最近同じ考え方で CAD と組み合わせ試作品や木型の製作する方法に発展している。本報ではこれらの研究開発の経過を概説する。

### 1. はじめに

レーザ加工機が機械部品の加工手段と登場して以来30年以上を経過し、すでに切断、溶接、肉盛り、表面焼き入れ等に広く活用されている。言うまでもなく、この中でレーザによる切断加工が最も一般的である。レーザ切断が、他の板材の切断加工法に比較して高精度の切断が高速にしかも自動的に行えるためである。それまでの板材の複雑形状の輪郭切断は糸鋸加工によるか、わざわざプレス型をつくって打ち抜くか、あるいは時間がかかるワイヤ放電加工を使用する以外に方法がなかったのである。

レーザ加工が工具製作に活用された例は、図1のような紙や革などを打ち抜くスチール・ルール型のベースの木製積層合板の溝加工が最初である。この溝はそれまで糸鋸で加工されていたものであるが、一気にレーザ加工に変わり、スチール・ルール型の生産の合理化に大きな貢献をしている。次に工具製作に活用された例は自動車車体成形用のト

リム型の製作をあげることができる。これは、薄鋼板を第1絞りをを行った後、次工程でトリム型を使って輪郭切断や穴あけを行うが、トリム型の切断輪郭の決定は、第1絞りをを行った後試行錯誤で切断してみた結果を基にして決める。この工程にレーザ切断は有効であり、初期には3軸制御のレーザ加工機であったが、現在では多軸のロボットが使われることが多くなった。多軸制御のレーザ加工機は上記のような試作段階にとどまらず、図2のような多品種少量生産のプレス加工におけるトリム工程を代行することも行われるようになってきている。

筆者らは、1980年以前よりこのレーザ切断技術を利用して直接立体形状をつくり、型の生産に活用しようという研究開発を行ってきた。その基本的構想は、まず高精度に薄鋼板をレーザ切断し、それを積層することにより立体的な型を創成しようというものである。3次元CADデータを基にして板の輪郭を直接切断する高度に進んだCAD/CAMシステムが構築できるところに特徴がある。このよ

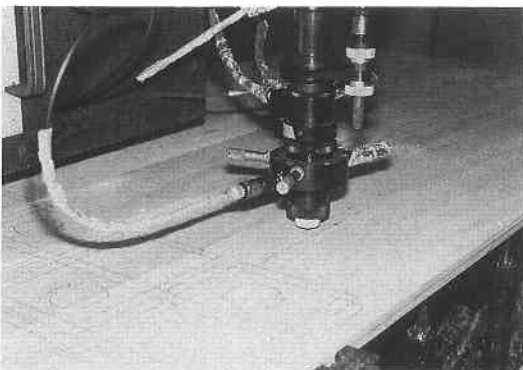


図1 紙型抜き型用ダイボードのレーザによる溝切断

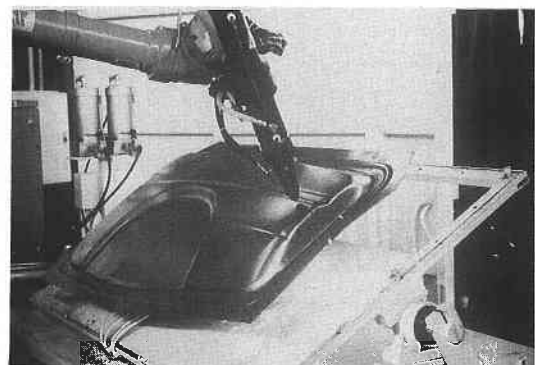


図2 多軸制御レーザ加工機によるプレス部品のトリム加工

\*東京大学生産技術研究所 第2部

うな考え方は一部の産業界に受け入れられ、今では生産に活用されることになっている。本報では、筆者らがこれまで行ってきた研究を紹介すると共に、この技術を型製作に应用している実例を紹介する。

## 2. 積層打ち抜き型

プレス打ち抜き型では抜き輪郭形状はワイヤカット放電加工によって製作されることが多い。ワイヤカット放電加工は焼き入れ材や超合金のような硬質厚板を高精度に輪郭切断できる特徴より、打ち抜き型の製作においては必要不可欠なものとなっている。ワイヤカット放電加工の欠点を挙げるとすれば加工に比較的長時間を要することである。一方 CO<sub>2</sub> レーザ加工においては、高出力でしかもエネルギー集中度の高い加工機が出現し、鋼板などを高精度に切断できるようになってきた。レーザ切断をワイヤカット放電加工のように活用すれば、打ち抜き型が製作できるはずであり、そのような考え方のもとにレーザカット積層打ち抜き型が開発された<sup>1),2)</sup>。

図3に示す金型は、積層打ち抜き型の型構造を示す例で、打ち抜き輪郭のみならず出来るだけ多くの箇所をレーザ切断を活用し、それを積層する構造をとっている。図4はこのようにして試作された打ち抜き型の例を示す。これらの打ち抜き型の試作により以下のような結果が得られている。

①レーザ切断板の精度：打ち抜き型は上下の切り刃間のクリアランスを板厚の数%~10%に保つ必要があり、また上下の型の位置合わせがレーザ切断精度によって決まることもあり、レーザ切断精度が不足すれば抜き型には適用できない。レーザ切断精度はレーザビームの形態によっても決まるが、加工機のテーブル送りまたはレーザヘッドの送り精度によっても大きな影響を受ける。フライス盤と同じ工

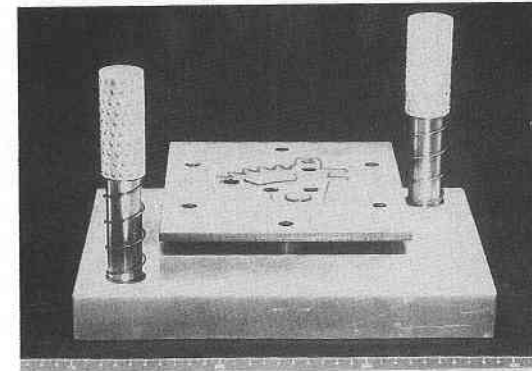
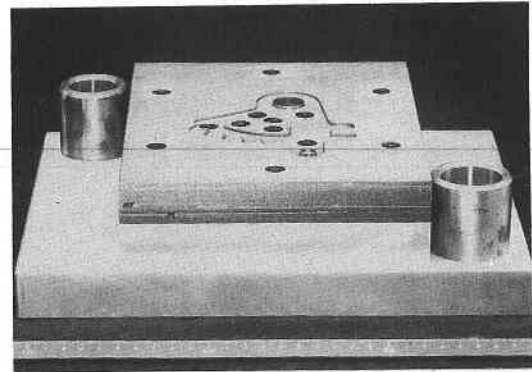


図4 レーザ切断による総抜き形式の積層抜き型

作機械を本体に使用したレーザ加工機では、この点フライス加工並の精度を得ることができ、通常の打ち抜き型用にはほぼ十分な精度を得ることができる。

この他精度を低下させる要因に、被加工材である鋼板の切断中に生ずる温度上昇による熱膨張がある。この値は打ち抜き輪郭寸法が大きくなると無視できない程大きくなるが、上下型の輪郭形状をほぼ同一の輪郭切断プログラムで切断する限り、類似した熱膨張変形をするので型合わせは比較的精度良く行える。レーザ加工機の中には、切断部分の鋼板に噴霧させた水をかけて冷却する方法があるが、この方式を採用すれば熱膨張の問題はほとんど解決される。

しかしながらレーザ切断板の精度は、一般的にはワイヤカット放電加工機より劣るので極薄板のようにクリアランスがマイクロオーダーを要するものは精度の限界を越える。被加工材の板厚が0.5mm以上であれば、抜き型のクリアランスも5/100mm程度なので、現在のレーザ切断の精度により抜き型製作は可能となる。

②切刃寿命：レーザ切断面には熱影響域が存在する。打ち抜き型製作の場合には、この領域を切刃硬度の上昇と切刃の耐摩耗性向上に利用できる。もちろん切刃寿命を伸ばすためには、使用する鋼板の選択が重要である。切断部分は溶融に近い状態となった後空冷されており、一種の焼き入れがなされている。しかし軟鋼板では切刃部分の硬度上昇は不十分であり、また焼き入れ鋼板を切断したのでは、脆

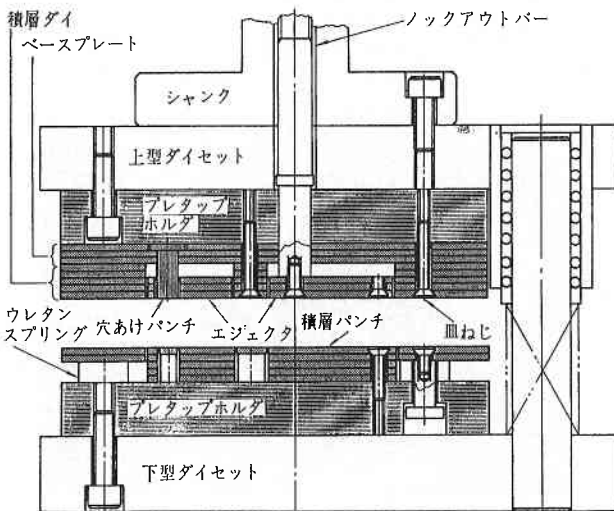


図3 レーザ切断板を積層した抜き型の構造

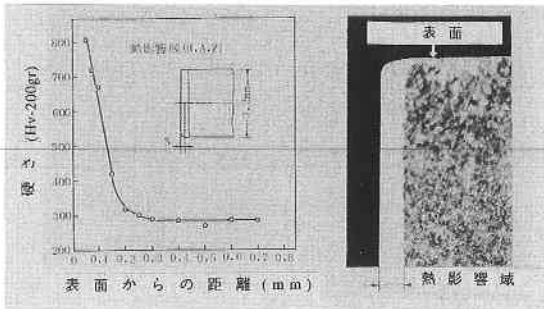


図5 レーザ切断による熱影響域の硬度上昇 (SK5, 3.2mm)

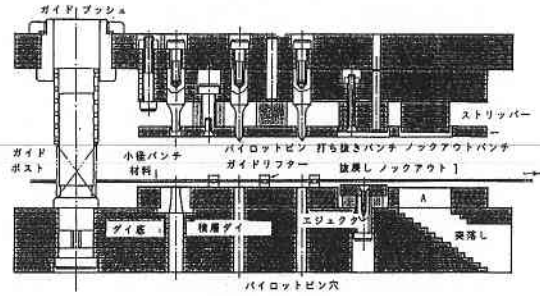


図6 試作順送型の構造

化してシャープな凸部輪郭では打ち抜き時に刃こぼれを起こす。そのため、工具鋼の成分をもった末焼き入れの鋼板を切刃として使用するのが適当であることがわかっている。図5は切刃の部分の断面組織写真であり、切断面の薄層が硬質のマルテンサイト組織となっており、内部は十分な靱性をもつ2層構造となっている。

このような工具による打ち抜き寿命試験の結果、耐磨耗性に関しては通常の工具鋼工具と遜色がないことが判明しており、多量生産型にも十分活用し得ることがわかった。さらに、切刃が摩耗した時点で、従来型のように再研磨して使用するよりも、スペアの切刃をもつ鋼板と取り替えて使用した方が簡便であることもわかっている。

③打ち抜き品の寸法精度：打ち抜き品の寸法精度は、打ち抜き型の寸法精度で決まる。したがって打ち抜き品の寸法精度はレーザ切断精度と同等であり、これを上回ることはできない。試作品や少量生産ではレーザ切断による板材部品が広く利用されていることからみても、レーザ切断品と同等の精度であれば精度的に満足できる分野は少なくないと思われる。

④輪郭形状の限界と対策：細い穴を打ち抜く場合のパンチをレーザ切断で製作することは困難である。この場合は標準パンチを使用するなど、別途にパンチを製作しこれを組み付ける構造をとる。このときこのパンチの位置決めおよび固定する鋼板もレーザ切断板によって製作する。

また、細いスリット加工のパンチまたは細長い突起部のダイスについては、積層鋼板の固定や相互の鋼板の結合に困難な場合があり、上記のパンチ同様に通常法で製作した工具を入れ子として組み付けなければならない場合がある。この考えを発展させれば、順送打ち抜き型も製作可能である<sup>3)</sup>。図6に順送打ち抜き型の構造を示し、図7は試作した順送打ち抜き型の写真である。ここで穴あけパンチは標準品を使用している。

⑤型製作期間の短縮とコストダウン：この方法で打ち抜き型の製作期間を短縮しコストダウンをはかるには、設計と加工を標準化し、出来るだけレーザ切断加工を多用するこ

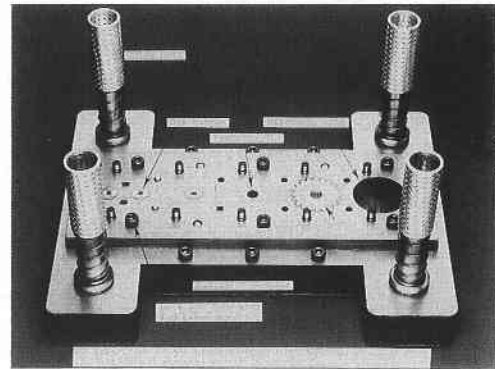
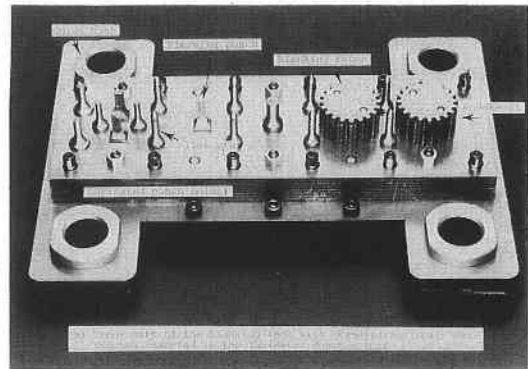


図7 試作順送型の外観

とである。切削加工や放電加工品の入れ子を出来るだけ少なくし、必要な型構成部品の大半をレーザ切断品で占めるようにする。さらに、型厚を大きくして多くのレーザ切断板を使用するのではなく、出来るだけ全体の型厚を薄くし、また各板厚はなるべく厚くする設計にすることも有効である。さらに、レーザ切断鋼板のスクラップ側をストリッパプレートやエジェクター板に使用するなど工夫を加えることも有効である。さらに、鋼板の固定用にネジ止めではなく、かしめや接着、簡単な溶接を利用することも有効である。このようにして得られる打ち抜き型は従来型に比較して製作時間とコストの点で30%~60%の合理化をはかることが可能である。

⑥適用範囲：本来レーザ切断鋼板積層打ち抜き型は試作品

や多品種少量生産型として開発されたものである。しかし、これらの打ち抜きはタレットパンチプレスやレーザ加工機の普及と共に、だんだんと打ち抜き型が使用されなくなっている。そのため、この打ち抜き型は中量および大量生産型としてしか存在意味がなくなっている。また小物の打ち抜き型では、ワイヤカット放電加工機による型製作も短時間に低コストで生産出来る。したがって中・大物部品の打ち抜き型が対象となる。

### 3. プレス成形型

レーザ切断鋼板を積層することにより、打ち抜き型以外の各種プレス成形型が製作できる<sup>4)</sup>。たとえば曲げ型の例では同じ形状に切断した板を単に積層しねじにより締結して型が完成する。

一般的な3次元形状のプレス成形型は、図8のように3次元CADデータより2次元スライスデータを求め、その輪郭データにより鋼板を切断して積層する方法をとる。鋼板にはあらかじめ、鋼板相互の位置決めのためのピン用の穴およびボルト締め時のボルトの頭のスペース等をレーザで切断しておく。図9に示す深絞り成形用プレス金型を試作した結果、以下のような事項が明らかとなった。

- ①成形型の強度：絞り成形では加圧力は主として板厚方向に作用するので、実際に成形を行っても工具の強度上の問題は生じない。また、成形工具にかかる負荷も低いので工具の耐久性の問題は生じない。
- ②段差の除去：段差は後工程で切削により除去しなければならない。工具底面に自由曲面を持つ工具の場合は段差除去のための平滑化切削はNC加工を必要とする。しかし、多くのプレス成形用工具は底は平面であり、ダイスまたはパンチ肩部のみ平滑化が必要となる。肩部の丸味つけ加工はハンドグラインダによる手加工によっても比較的簡単な作業であり、この方法の長所を損なう程度のものではない。
- ③通常型との比較：レーザ切断板を積層した構造をもつこ

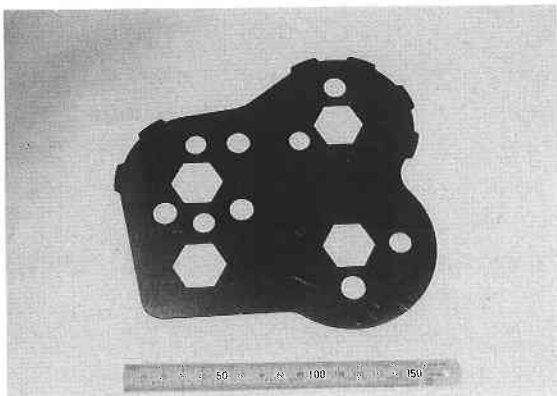


図8 2次元スライスデータよりレーザ切断された積層用鋼板

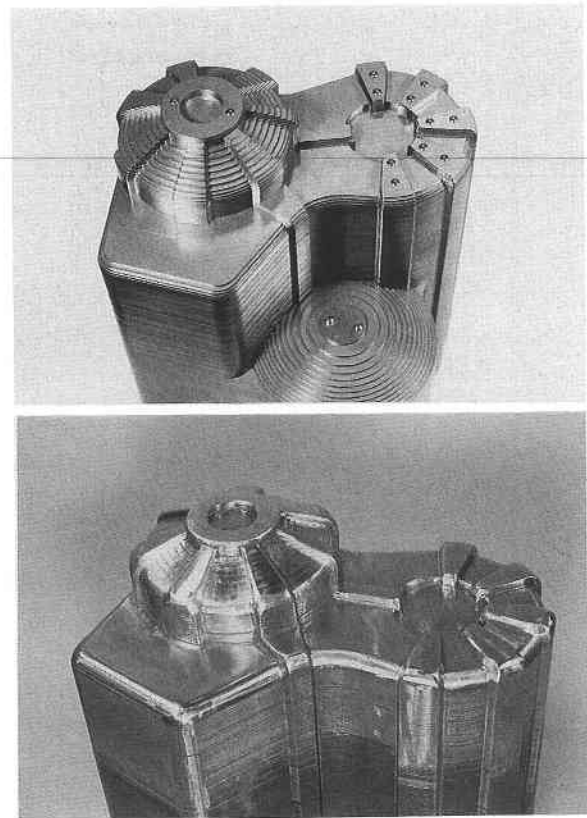


図9 レーザ切断板積層による深絞り成形用金型  
(上：切断後積層，下：肩部R仕上げ)

種のプレス成形型も、金型が迅速にかつ低価格で生産できる特徴をもつ。深い長いパンチの加工や、大物の金型の加工にも長時間を要するので、この積層金型の利点を発揮できる。

④プレス成形金型の問題点：積層構造であるためしわ押さえ圧を均一にするため高い剛性を要する金型、絞りビードを要する金型、しごき加工用の金型等には不向きである。

⑤実用例：プレス成形型の分野では、この積層金型を試作品用のプレス金型に導入し成功している例がある。図10はその金型の写真であり、前述の予測に反し、浅絞りの成形金型に用いられている。板の固定をピンのカシメで行っており、肩部の切削はマシニングセンタに専用工具をつけて加工している。また、細かいパンチ等は入れ子方式をとっている。図11に種々の生産データを示す。

### 4. 拡散接合を行った温度制御射出成形型

レーザ切断金属板の積層金型をプラスチック射出成形型やダイカスト型に利用するには板同士の完全な接合を必要とする。金属板同士を接合するには、ロウ付け法と拡散接合法が存在する。しかしロウ付け法ではロウ材と金属板の間には材料差があり、みがき仕上げ後の表面に何らかの欠陥が現れる危険性があるため拡散接合を行って射出成形型

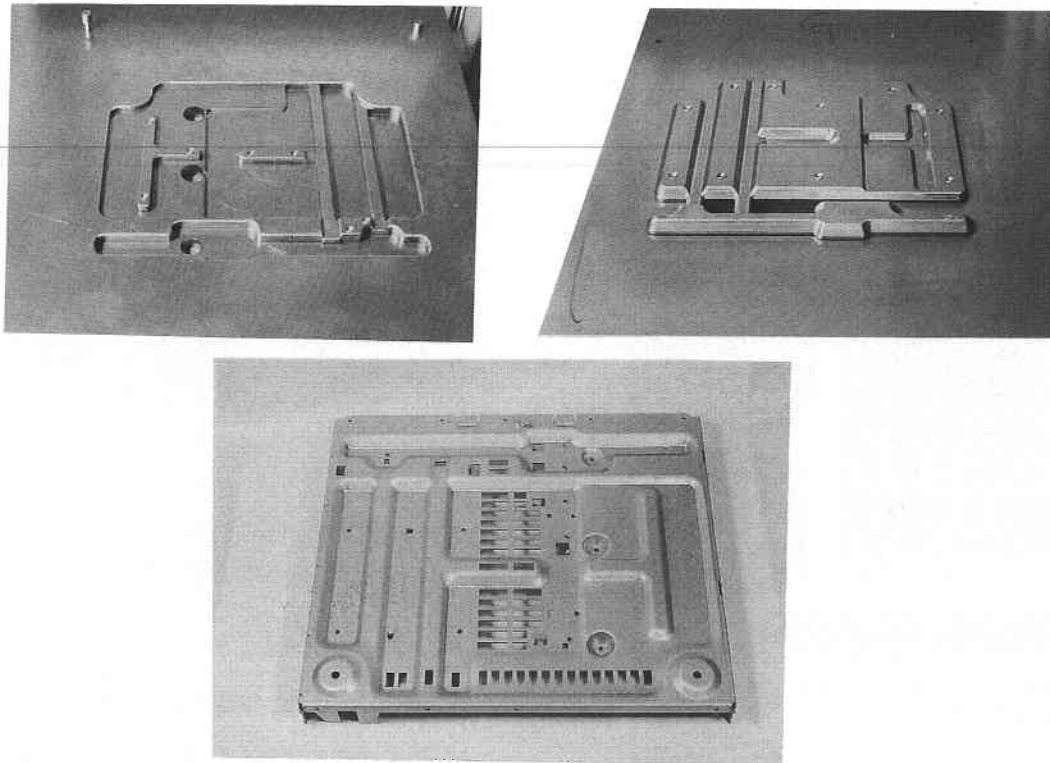


図10 レーザ切断積層金型と成形品 (花井エンジニアリング)

部品名	AV 製品 ケース	
使用材	板厚 3 mm t、SPC 軟鋼 板	
レーザ加工機	500W または 1000W	
部品納入	1 週間 以内	
型製作時間	2 日間 (設計含む)	
内訳	{ 設計 4hr レーザ加工 1hr フライス加工 3hr 組立て 0.5hr	
型製作コスト	20 万円	

図11 レーザ切断金型の生産データの例

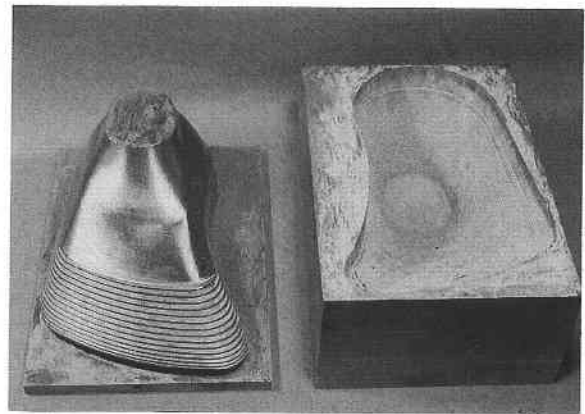


図12 積層鋼板の拡散接合体 (一部分表面平滑化切削)

の試作を行った<sup>5),6)</sup>。図12は鋼板の拡散接合体を示したものである。このような自由曲面をもつ金型部品は後加工でNC加工により段差を除去しなければならない。この接合された金型の最大の特徴は、図13のように冷却用配管を自在に行える点である。図14に試作した射出成形型とABS成形品を示すが、これらの結果をまとめると以下の通りである。

①接合方法：拡散接合による鋼板の接合部のみがき後の境界は目視されず、また射出成形された製品に境界が現れる

こともなかった。このことから、より簡便なロウ付け接合による積層でも射出成形型は製作できるとの見通しが得られた。なお参考までに例示すると、図15はロウ付け法で製作した機械部品の例である。

②射出成形性：冷却配管の効果で射出成形後の冷却速度が早いため、成形サイクルを高められることが明らかとなった。しかし、ここで試験を行った射出成形品の形状や肉厚は、成形サイクルの増加効果を確認するには必ずしも適当ではなく、もっと厚肉部をもつ成形品を選択すべきであった。

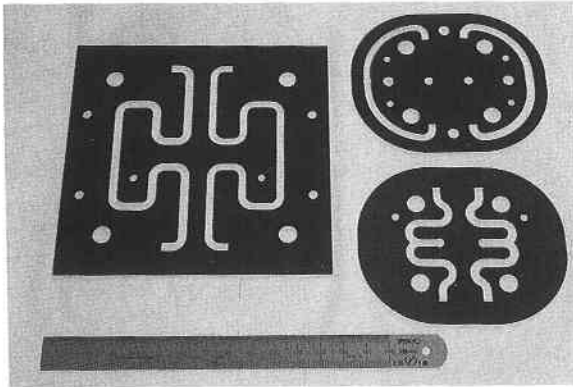
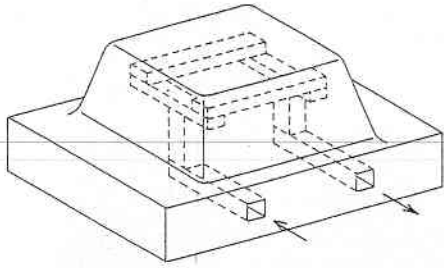


図13 鋼板の拡散接合により型表面に接近した冷却流路をもつ金型

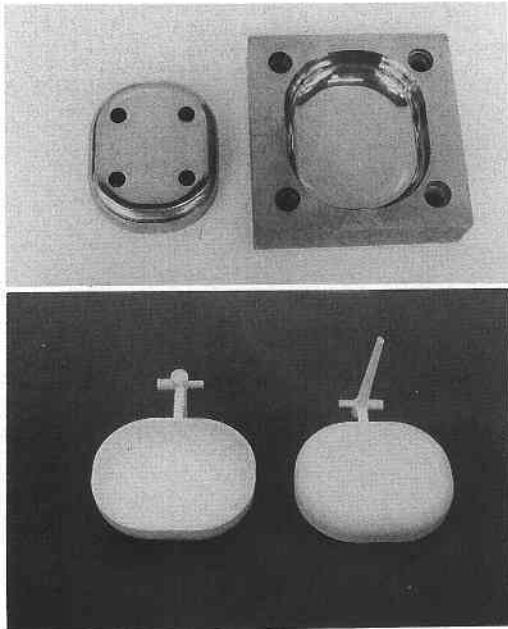


図14 試作した射出成形金型と ABS 成形品

③適用範囲：プラスチック射出成形型は、他の金型に比較して接合工程があり、しかも金型表面全体にわたって平滑面を必要とするので、後加工の切削仕上げ加工は避けられない。そのため、前述の各種金型のように金型製作時間の短縮とコストダウンを目的に積層金型を採用すべきではない。あくまでも温度制御の金型として活用すべきであろう。したがって、成形サイクルを上げるか精度向上を目的とす

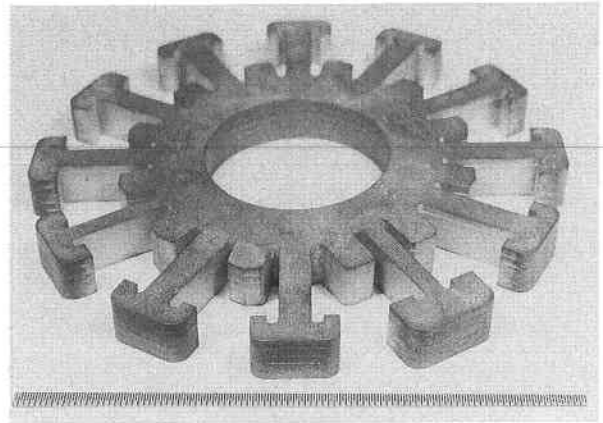


図15 ロウ付け法で製作した機械部品例

る高機能の金型用が適用範囲であろう。また射出成形型の一部の必要箇所だけにこの積層構造体を入れ子として使うことも考えられる。さらに、型材としても熱伝導の良好なアルミ板や銅合金板を使用することも考えられる。

### 5. 鑄造用木型モデル

鑄造用の砂型や中子を製作する木型や模型を同様な方法で製作することができる<sup>7)</sup>。図16と図17は原材料に木製合板を使って試作した木型である。この場合段差の平滑化は必ずしも除去加工に頼ることなく谷部を埋めることによっても可能である。

### 6. 紙積層法によるラピッドプロトタイピング

前述の方法と同様な考え方によるラピッドプロトタイピング機が米国で1990年に市販されるようになった。図18にそのシステムを示すが、板材に薄い紙を利用し、段差の除去の手間を省いている。またこの紙は接着剤が塗布されているため、完全な自動生産が出来るようになっていた。また3次元CADデータから2次元スライスデータの取り出しも自動的に行うことができていた。

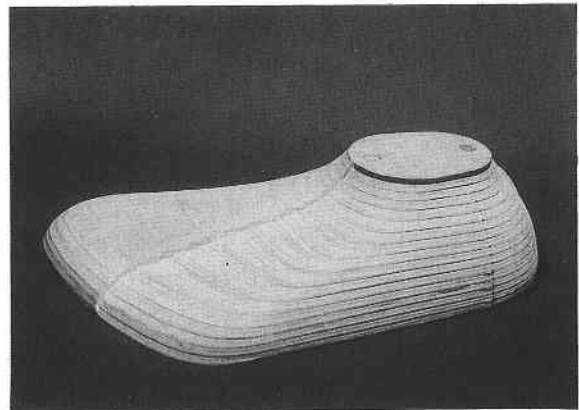


図16 薄板積層法による木型模型

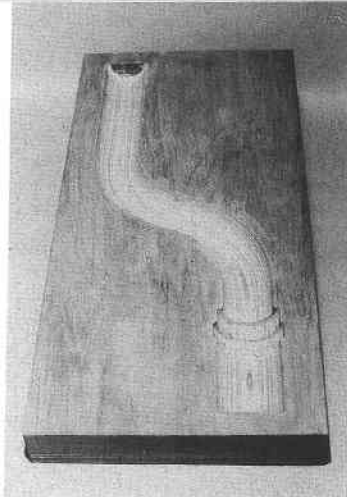
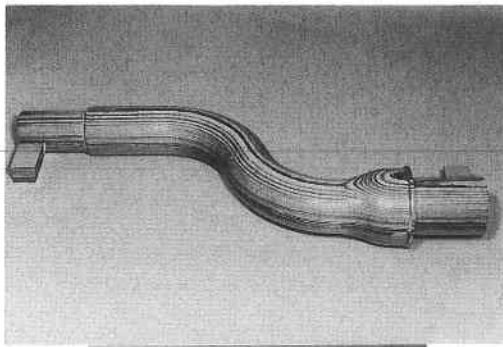


図17 薄板積層法による木型模型

また、1994年になり日本でも同様な原理を用いたラピッドプロトタイプ機が開発されている。この機種は図19のようにコピー機に熱圧着プレスと切断機構を連ねたものであり、切断はレーザー加工でなくナイフ刃によっている。接着はコピー用トナーを活用し、接着面はCADデータから求

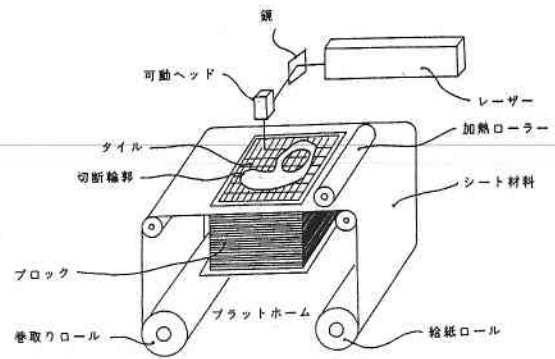


図18 レーザ切断紙積層法によるラピッドプロトタイプングシステム (HELISYS)

めている。また、この機種では普通紙が使用できる。これらのラピッドプロトタイプングの機械は主として鑄造用模型製作に活用されている。

### 7. お わ り に

筆者がレーザー切断鋼板による積層金型の開発研究を開始したのは今から15年以上も前である。以上述べてきたように、この考え方はプレス成型の製作に取り入れられ、また、最近のラピッドプロトタイプングにも生かされている。さらに近い将来冷却配管をもつ射出成型にも活用される時代が来ることを願っている。なお、本研究開発は東京大学生産技術研究所中川研究室で行われたものであり、当時の在籍者の鈴木清氏（現日本工業大学教授）、横井秀俊氏（現東京大学生産技術研究所助教授）、国枝正典氏（現東京農工大助教授）らとの共同研究である。

(1994年10月3日受理)

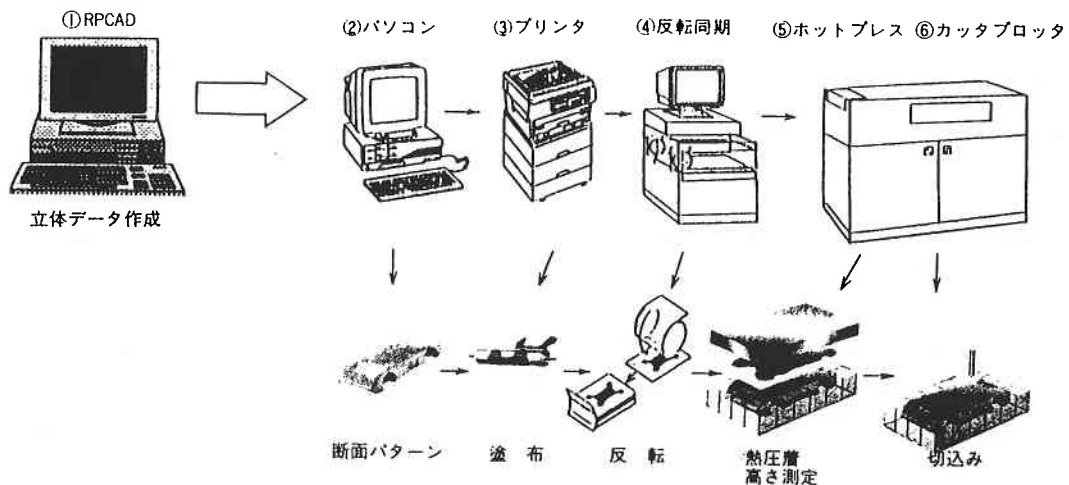


図19 ナイフ刃切断紙積層法によるラピッドプロトタイプングシステム (KIRA)

## 参 考 文 献

- 1) T. Nakagawa, K. Suzuki, H. Noguchi; Application of Laser Beam Machining into the Manufacturing of Blanking Tool; Proc. of 4th ICTP Tokyo, 820-825, (1980-8)
- 2) T. Nakagawa, K. Suzuki, K. Sakaue; Laser Cut Blanking Tool, Bulletin of JSPE 17-1, 45-46, (1983-3)
- 3) H. Yokoi, T. Suzuki, K. Suzuki, T. Nakagawa; Manufacturing of Blanking Tool and its Die-set by Laminating Laser-cut Steel Sheets; Proc. 12th NAMRC, 372-378, (1984-5)
- 4) M. Kunieda, T. Nakagawa; Development of Laminated Drawing Dies by Laser Cutting, Bull. of JSPE, 18-4, (1984-12), 353-354
- 5) T. Nakagawa, M. Kunieda, S-D Liu; Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Dufusion Bonding, Proc. 25th Int'l MTDR Conf. 505-510, (1985-4)
- 6) 松村周介, 山本洋一; 薄板積層プラスチック金型の試作, 素形材センター研究調査報告書317, 43-52, (1985-8)
- 7) 田口貞一, 北野隼男, 井出治之; 薄板積層による木型模型の試作, 素形材センター研究調査報告書317, 31-41, (1985-5)