

レーザー加工を用いた薄板積層機械部品の作成に関する研究

中央大学 精密機械工学科

教授 井原透

(平成 11 年度研究開発助成 AF-99010)

キーワード：レーザー切削、積層機械部品、シミュレーション解析

1. 研究の目的と背景

近年、積層材の様々な利用方法が考えられている。例えば、軽量化や補強部品削減に効果があるため、自動車のボディなどに積層材を用いることが試みられている。しかしながら、積層材を一般的な機械部品に適用する場合、積層材内部の接着層の製造工程中での物理的挙動によっては、材料の寸法精度や強度に大きな違いが生じるので注意が必要である。

そこで、本研究では、レーザー切断を用いた場合の積層材における接着層の製造工程中の溶融挙動を調べることとした。接着層の製造工程は、通常、閉じた空間を持つ造形物の場合にはレーザー加工後に積層し、それ以外の場合には、高速化のために積層後に加工するという工程が採用される。本研究では、図 1 (d) に示すような歯車を対象とするので、積層後のレーザー加工を対象とする。なお、同図 1 は積層方向の設計例を示すが、同図 (b) は江戸時代の茶運人形に用いられている歯車の積層方向である。同図 (d) の試作歯車は同図 (a) の方向に積層したものとなっており、積層材が得意とする曲がり穴が明けられている。

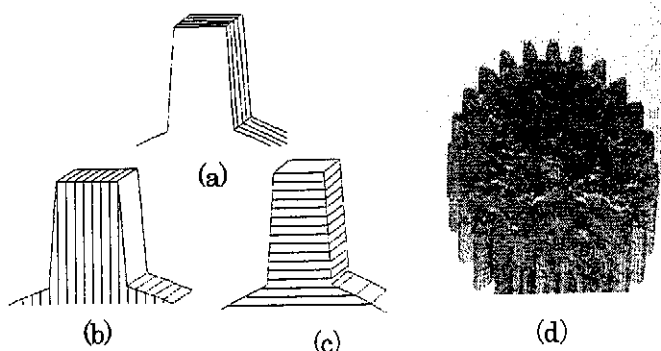


図 1. 積層機械部品

2. 研究方法

積層材は積層構造であるため通常の方法と異なる性質をもつ。強度面では層間強さが機械的強度に大きく影響し、寸法精度の面では接着層の流動によって垂直方向の寸法減少の起こることが予想される。

そこで、本研究で使用する積層材の破壊強度と寸法精

度が、接着層 (U アロイ) の物理的接合状況に影響されるかどうかを調べ、次いで、製造工程、すなわち、レーザー切断と積層接合時の接着層溶融金属の流動挙動と積層材の破壊強度と寸法精度との関係を考察し、さらに接着層溶融金属の流動挙動を知るために、レーザー加工時の溶融金属のアシストガスによる流動シミュレーションを開発して、最後に製造工程と接着層溶融金属の流動挙動との関連を確認する。

2. 1. 積層材の破壊強度

本研究で用いる積層材は、接着層の強度より母材 (鋼) の強度のほうがはるかに大きい。そのため各層間の接着力 (層間せん断強さ) は機械部品の強度に大きく影響する。そのため、機械部品の設計、強度向上のためには層間せん断強さを評価、検討する必要がある。

FRP のような積層材の層間せん断強さを求める方法として、破壊モードを考慮した三点曲げ試験が汎用化されている。ILSS (Inter Laminar Shearing Strength) 試験と呼ばれることも多い。この場合、荷重を加えると試験片には曲げ応力とせん断応力が生じる。曲げ応力の最大値はスパンに依存し、スパンが小さいほど同じ集中荷重に対し発生する応力は小さくなる。ここで、スパンと厚さの比 ($1/h$) によって試験片の破壊の様相 (破壊モード) がどのようになるか考えると、 $1/h$ の増加に伴い、せん断破壊、せん断曲げ混合破壊、曲げ破壊と変化し、それに伴い、荷重-たわみ線図も変化し破壊モードも変化する。したがって、三点曲げ試験片に生じる応力は破壊モードによって分けて議論する必要があることがわかる。

2. 2. 三点曲げ試験

積層材料は一般的にその特性が多岐にわたるため、同一の試験片形状や試験法では規定できない。そのため、材料試験法の標準化が著しく遅れている。これに対して、FRP の規格化は比較的進んでおり、積層材料でもこれらの方法を応用して試験する機会が多い。そこで、本研究で用いる積層材の三点曲げ試験方法は、主として J I S K 6911 に従うことにした。CFRP の三点曲げ試験では前述の $1/h=5$ とすると τ_{max}/σ_{max} の比は $1/10$ 以下であるとした仮定のもとで行われたことになる。

1/hの値を十分大きくとれば完全なせん断破壊とみなすことができる。この様な1/hの値は[ASTM D 2344]に規定されている。本研究ではこの方法を応用し積層鋼板の層間せん断強さを評価することにした。

2.3. 積層材の寸法精度

積層材の寸法精度は、積層方向に対し水平な方向(図1(c)の刃厚方向)では積層材を加工するレーザー切断機の精度に依存しており、接着層溶融金属の流出が無ければ高い精度の設計が可能である。しかしながら、積層方向に対し垂直な方向(図1(b)の刃厚方向)では精度が温度や圧力といった接合条件の影響を受けるので高い精度の設計ができない。これは、積層方向の寸法分解能が積層材の厚さに依存し、その厚さが接合温度とその維持時間、接合圧力によって変化し、その寸法変化時に生じる誤差(偏差)が大きいためである。

そこで、積層方向に対し垂直な方向の寸法精度を評価することを考える。

寸法はマイクロメータを用い、試験片である積層材の厚さを測定することによって行う。

積層用材料1枚あたりの厚さを知るために、45箇所を測定し、その平均値を積層用材料1枚あたりの厚さとする。

積層材は上述の積層用材料を10×10(mm)に切断し、10枚重ね合わせ、積層方向に対し垂直な方向に荷重をかけたものを炉に入れて接合し、試験片とする。

なお、荷重は、9.8×10²、29.4×10²、49.0×10²、98.0×10²(Pa)と4つの場合に分けた。

次いで、積層材の厚さを知るために、1枚につき9箇所の厚さを測定し、5枚あたりの平均値を求める。測定結果より、厚さ平均値h_{ave}、標準偏差σ、減少率dを求める。

なお、減少率dは次式で表される。

$$d = \frac{|h - h_{ave}|}{h} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

2.4. 溶融金属の流動シミュレーション

レーザーで金属を切断する場合、アシストガスによって溶融金属が流動するので、溶融金属の流動挙動を探るために、レーザー切断時のアシストガスの流れを解析することは非常に重要となる。つまり、アシストガスは溶融金属を除去し、酸素を供給・燃焼させながら切断溝と溶融金属の流動を形成する働きを持つので、溶融金属の動的挙動はアシストガスの流速により決定される。

そこでアシストガスの流れ、溶融金属の流れの計算に、汎用熱流体解析コード(ソフト名:phoenics)を用いて計算を行う。同コードは、有限体積法により質量、運動

量、エネルギー等の保存式を、定常または非定常計算で1~3次元空間において解くものである。具体的には、流れ場の質量・運動量・エネルギーなどの保存方程式が式(2)ですべて簡潔に表されることを利用している。つまり流れ場がどのように複雑であろうと同方程式を複数組み合わせることによって解を得ることに帰着させる形となっている。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}(\phi)) + S_{\phi} \quad \dots (2)$$

ここで、

- φ : 輸送量(従属変数)
- r : 相の体積分率(单相流の場合は1)
- u : 速度ベクトル
- Γ_φ : 交換係数(変数が熱の場合は温度拡散係数、濃度の場合は拡散係数)
- S_φ : 生成項
- ρ : 密度

式(2)を单相流(r=1)計算格子(コントロールボリューム)で積分すると、

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\rho\phi) + \text{div}(r(\rho u\phi - \Gamma_{\phi} \text{grad}(\phi))) = S_{\phi} \quad \dots (3)$$

この式(3)をガウスの積分定理を使って変形すると

$$\iiint_V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi - \Gamma_{\phi} \text{grad}(\phi)) \right] dV = \iiint_V S_{\phi} dV \quad \dots (4)$$

を得る。

同式に完全陰解法、ハイブリット法を適用し、線形化、離散化を行い、得られた離散化方程式を解く。

3. 研究成果

まず、積層材の破壊強度と寸法精度が、接着層の物理的接合状況に影響されるかどうかを調べた。

3.1. 破壊強度

三点曲げを行ったすべての試験片の破壊モードは層間せん断破壊であった。その代表例を図2に示す。

同図より各層の剥離していることが分かる。一見、剥離していないように見える部分も詳細に観察すると層のほとんどが剥離しており、接着している部分はわずかであることが分かる。破壊モードは明らかに層間せん断破壊である。つまり、この積層用材料は1/h=12~24の

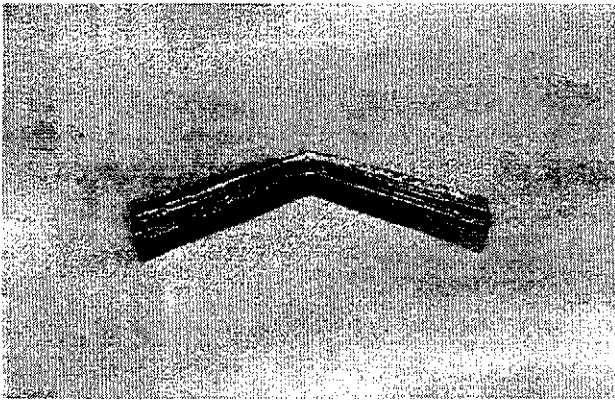


図2 試験片の破壊例 (L100×W20×h5)

範囲では層間せん断破壊を起こすと言える。この状態でのせん断応力は各層間の接着力と関係深い。CFRPのようにせん断強さに対して曲げ強さが極端に大きな材料ではせん断破壊は $l/h = 4 \sim 6$ のときに起こると規定されており、せん断強さに対して曲げ強さが大きければ、せん断破壊が起こるときの l/h の値は大きくなるとされる。本研究で用いた積層材は l/h の値がCFRPと比較して大変大きいことがわかるので、各層間の接着力が弱いと結論される。その原因として下記のものと考えられる。

- ①接着層の加熱温度及び加熱モードの影響
- ②積層用材料の母材の平面度及び表面粗さ
- ③母材/接着層の接着不良及び接着層流出
- ④接着層のせん断強度不足

①については、ここでは最高温度; 130°C × 加熱モード; 室温から最大温度まで 60 分、炉中で自然冷却 30 分であった。なお、接合圧力は 9.8×10^2 (Pa) とした。加熱時間、温度は接着層と母材の界面で生成される化合物の量に影響を与える。その生成量が少ない場合は強さに貢献するが、発達しすぎると強度低下につながる。

②の積層用材料母材の表面粗さは接着層の流動性に影響を与える。接着層の流動性が良くなれば母材と接着層の馴染みが良くなり接着力が増し、せん断強度が増す。同時に、母材の平面度は各層の接触面積に影響する。

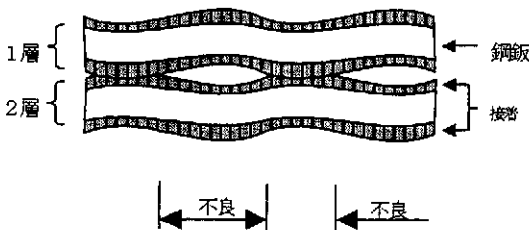


図3 各層の接触状態

本研究で用いた積層用材料の平面度は低く接着不良の原因となっている。この様子を図3に示す。この状態を解消するためには加熱時に高圧力をかけ、積層用材料の歪みを押さえればよい。

③については接着層表面の汚れや酸化膜あるいは接着層の熔融挙動に原因があると推測される。この場合、接着層と母材が馴染まず層間に気泡ができる場合がある。また接合時に外気が取り込まれて発生した気泡であれば、動き回りやがて層外へ排出される場合がある。これらの問題の解消には、積層用材料を溶着する前に表面を脱脂、酸洗し、適切な製造工程を選択することが必要である。

④については機械部品として使用される際に要求される強度に接着層のせん断強さが達していないということがある。一般的な接着層としては Sn-Pb ハンダがある。Sn-Pb ハンダの強さは 1.47×10^8 (Pa) であり、同値の改善を図ることが機械部品強度の向上につながる。

3. 2. 寸法精度

積層用材料 1 枚あたりの厚さ測定結果より試験片 1 枚あたりの平均厚さは 0.317 (mm) となった。また、試験片 1 枚あたりの厚さのばらつきは少ないことが分かった。

積層材の積層方向に対して垂直な方向の寸法分解能については、積層用材料 1 枚あたりの厚さを変えることにより上げることができる。しかしながら、積層用材料の 1 枚あたりの厚さを薄くすると積層枚数が増え、積層機械部品製造の最大の利点である製作効率が低下する。また、積層材を構成する母材 (一般的には鋼) の厚さの減少による強度の低下が考えられる。

図4は積層方向に対し垂直な方向の寸法精度を評価し

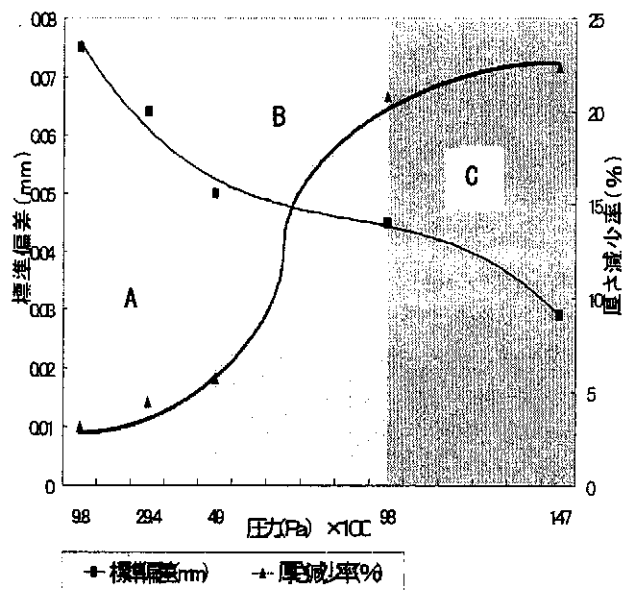


図4 接合圧力と積層材寸法精度

たものである。

同図から、接合圧力 (Pa) が増加するにつれて式(1)の厚さ減少率が増加し、標準偏差が減少していることが分かる。このことは、圧力を増加させると厚さが減少し、測定位置による厚さのバラつきが少なくなっていることを意味する。圧力は明らかに寸法精度に関係している。

さて、厚さ減少率曲線に注目すると、圧力が 49×10^2 (Pa) あたりから曲線の勾配が急になるが、圧力 98×10^2 (Pa) あたりから再び緩やかになり、最終的には減少率 23 (%) あたりに収束している。そこで、圧力 49×10^2 、 98×10^2 (Pa) を境にして同図のように3つの区間に分け、圧力 $9.8 \sim 49 \times 10^2$ (Pa) の区間をA区間、圧力 $49 \sim 98 \times 10^2$ (Pa) の区間をB区間、圧力 $98 \sim 147 \times 10^2$ (Pa) の区間をC区間とする。

A区間の試験片は接着層の流動もなく隙間が目立ち、層が浮いてしまっている個所もあるのに対して、B区間の試験片は側面に隙間はなく、接着層が層間からにじみ出ている。C区間の試験片はB区間の試験片よりはるかに接着層の流出量が多く、各層は完全に接着されている。

そこで、接着層の流動について考えると、本接着層は 90°C を超えると流れるのでこの時点で、図5のような力の釣り合いが生じる。

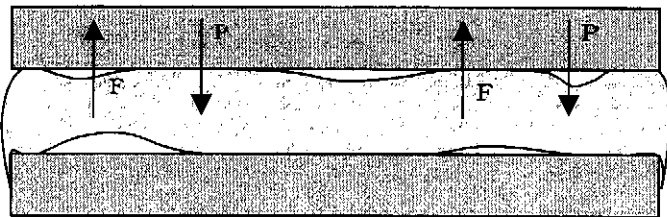


図5 母材と接着層との釣り合い

A区間では $P \leq F$ なので接着層の流動はなく層間に隙間ができる。B、C区間では $F \leq P$ なので接着層は母材に押し流され、接着層が流動し、流出すると考えられる。したがって、圧力 49×10^2 (Pa) 以上では接着層の浮力より圧力の方が大きくなるために接着層が流出するといえよう。

標準偏差曲線は前述した厚さ減少率曲線と同様に 49×10^2 、 98×10^2 (Pa) で変化が生じている。よってA区間では接着層の流動がないので、圧力による凹凸補正のみが行われる。B区間では接着層の流動が確認されているので、接着層が流動によって凹凸に流れこみ、これによって圧力による凹凸補正が補完される。C区間では圧力が高く、接着層の流動による流出量が多すぎ、かえって積層材に残存する接着層が僅かとなると考えられる。また、曲線の勾配はB区間がなめらかで、B区間の標準偏差の安定している(ロバスト性のある)ことが分かる。すなわち、B区間では接着層の流動によって凹凸に接着層が流れこみ、圧力よりも変位に依存した凹凸補正のなされて

いることが分かる。

以上から、寸法精度を良くするためには、接合条件を、厚さ減少率、標準偏差の両者の圧力依存性が少ない(ロバスト性の高い)、圧力 49×10^2 (Pa) か、 98×10^2 (Pa) 付近で行うのが好ましいということが分かる。しかしながら、強度について考えると、C区間の圧力 98×10^2 (Pa) 以上では接着層の流出量が多すぎ、接着層残存量不足による強度問題の発生する可能性が指摘されるので、本研究で用いた積層材では圧力 49×10^2 (Pa) 付近が、寸法精度、破壊強度の点から最適だと判断される。

以上をまとめるに、積層方向の寸法減少は接着層の流出が主な原因であり、寸法精度に関してロバスト性の高い製造工程条件がある。また、接着層の流動・流出による接着層の残存量低下が接着力の低下を招き、同接着力の低下は、機械部品の強度に影響を及ぼすと考えられる。

3.3. レーザー加工シミュレーション

レーザー切断工程における溶融金属の流動挙動を知るために、レーザー加工時の溶融金属のアシストガスによる流動シミュレーションを開発したので、同シミュレーション結果を示す。

3.3.1. アシストガスの流れ

アシストガスの流速は音速で与え、乱流モデルで解析した。これを下図に示す。

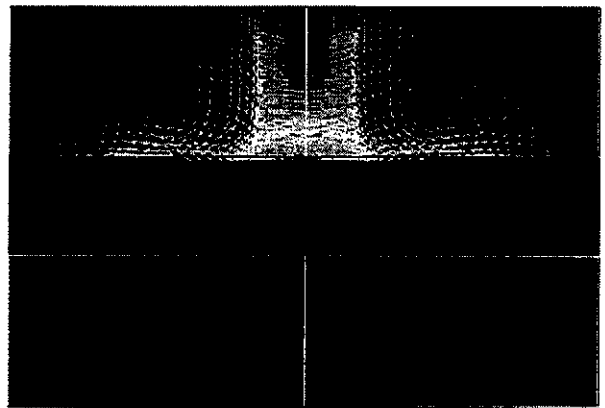


図6 アシストガスの流れ

流れのみを見ると観察すると、金属表面に沿って流れが出来ているのが分かる。この流れによって、レーザー光によって溶融した金属が流され、飛散される。

次いでピアシングの際のアシストガスの流れについて計算した。薄板 ($t = 1$ mm) の場合、 0.1 sほどで穴は貫通する。このときのアシストガスの流れを解析するために、一定時間たつと、要素を除去し、穴を形成するようなモデル化を行った。この結果は図7に示す。

同図によると、貫通後にアシストガスの流れは、下方へ向かうものと、金属の下面に沿って、流れていくものと

ある。下方へ向かう流れに運ばれた溶融金属は加工精度に悪影響を及ぼさないが、下面に沿って、運ばれた溶融金属はドロスとして付着し、加工精度に影響を及ぼすものと考えられる。

3.3.2. 溶融金属の流れ

下記の点を考慮し、有限体積法により、アシストガスによって運ばれる溶融金属の流れを計算した。

- ① レーザー入熱は照射面に発熱量を与える
- ② 金属部分（固相部分）は粘性を非常に高くする
- ③ 金属は融点以上となると溶融時の物性値を与える
- ④ 重力を考慮する
- ⑤ 乱流を考慮する
- ⑥ 蒸発を考慮する

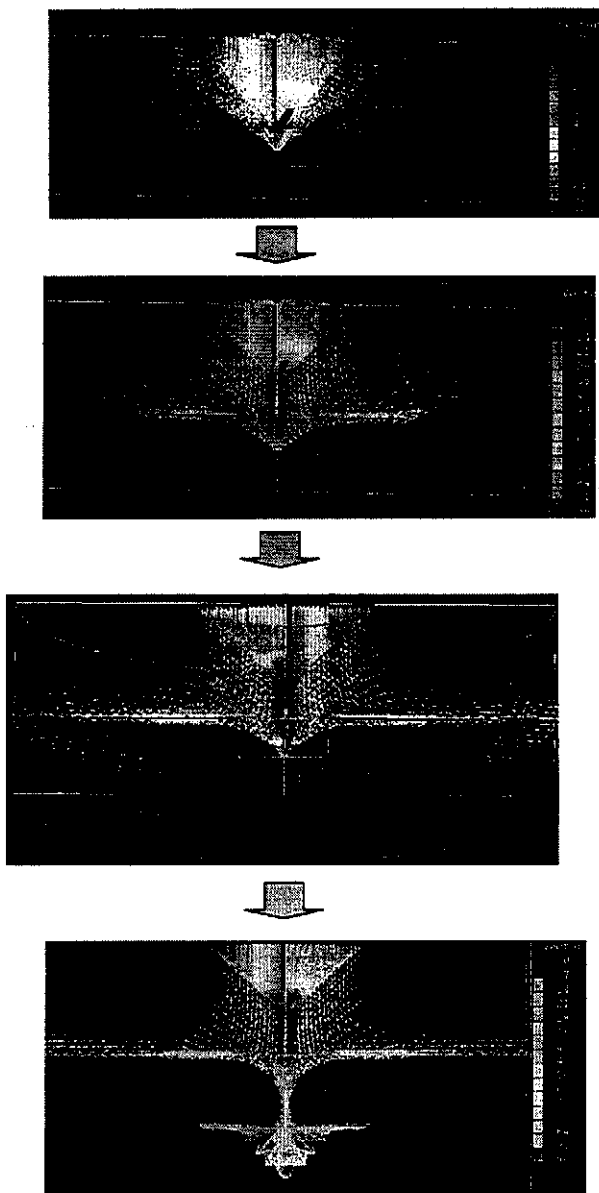


図7 ピアッシング時のアシストガスの流れ

計算結果を図8に示す。

同図は、まず、アシストガスの流れを作り出した後、レーザーを照射し、溶融金属の流れについて解析した結果を示している。これは金属にレーザーによる発熱を加えることで、熱が伝わり、融点に達したものはアシストガスによって流されていく様子を示す。その結果、溶融金属が穴の中からアシストガスにより押し出され、表面に盛り上がりが出てくる。図9の溶融金属が加工表面に堆積している観測結果と一致している。

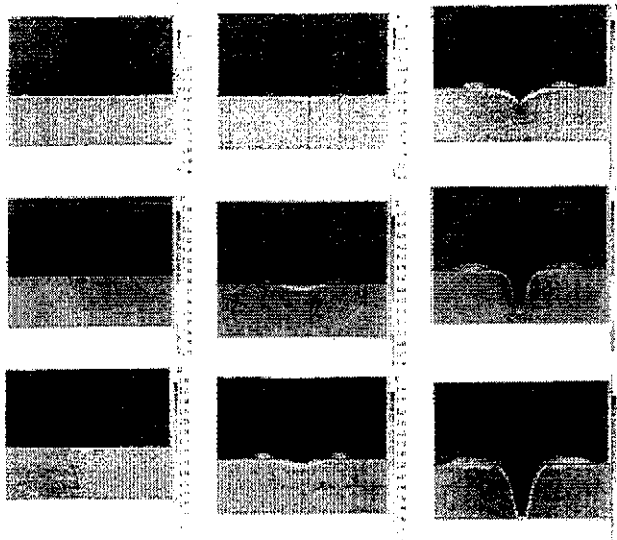


図8 溶融金属の流動解析結果



図9 SPHC材表面の溶融金属

4. 結び

- 1) 本研究で使用した積層材の破壊強度と寸法精度は、接着層の物理的接合状況に影響されるので、製造工程、すなわち、レーザー切断や接合時の接着層溶融金属の流動挙動が重要な要素となることが分かった。
- 2) 接着層溶融金属の初期流動により、母材との馴染みの改良、接着層内の気泡の排出が期待され、接着力は向上すると考えられる。

- 3) 接着層溶融金属の終期の流動により、寸法精度は良くなるが、接着金属の層間流出により、接着力は低減し、積層枚数の増加が必要となるので、製作効率は低下すると考えられる。
- 4) 接着層溶融金属の流動挙動を知るために、レーザー加工時の溶融金属のアシストガスによる流動シミュレーションを開発した。

参考文献

- 1) 宮入祐夫：複合材料入門－基礎と応用－、裳華房
- 2) 森田幹郎ほか：複合材料、日刊工業新聞社
- 3) 井原透ほか：レーザー切断を用いた薄鋼板積層造形物の評価、精密工学会秋季講演論文集(1999)12
- 4) 新井武二ほか：レーザーによる加工シミュレーション(第1報)、精密工学会春季講演論文集(2001)103