

## 3D プリンターを活用した風洞試験モデルの開発

### —ビジネスジェット機開発における先駆的な取り組み—

重谷秀夫\*

## Wind Tunnel Test Model using Additive Manufacturing.

### — Pioneer work for Business jet development —

Hideo Omotani, Tokyo Fluid Research Co.,Ltd

#### 1. 緒 論

1990年代半ばに実用化された光造形法の流れを汲む現在の3Dプリンティングは、昨年来の米国での普及を受け、モノ作り分野における潜在的な可能性について日本国内でも大きな反響を呼んでいる。

2000年に筆者が関わったビジネスジェット機(以下H-Jetと記す)開発においても、風洞試験モデル開発に光造形法を活用することにより、開発期間の短縮と共に空力計測の効率化を図ることが出来た。

本稿では、18年間の風洞試験モデル開発における光造形の活用法を実例を挙げて説明し、その成果と課題、および光造形で実験装置を設計する際の注意点を示し、新たな空力試験方法創出の可能性について述べる。

#### 2. 3Dプリント開発の経緯と現状

##### 2.1 積層造形法が辿った軌跡

光造形を始めとする積層造形法が実用化され、世に出て来たのは1995年頃であり、国内でも研究機関や自動車会社、重工各社で試作に使用する研究が始まった。

筆者が在籍した自動車会社では、新たな試みとしてビジネスジェット機の開発に着手することとなり、その風洞試験モデルの試作に活用する試みを始めた。

しかし、当時の材料は吸湿性が高く、造形後3カ月ほど経つと変形が発生し、データの再現性が重要となる風洞試験モデルには不向きな試作法である事が判明したため、当時の航空宇宙技術研究所(現 JAXA)や重工各社では光造形の風洞試験モデルへの適用から撤退した。

H-Jetプロジェクトでは、航空機開発に遅れて参入したこともあり、光造形の設計自由度や短期試作性を諦め難く、当時の光造形メーカーの技術者と協調し、経時変化の無い材料の開発を依頼し、光造形法の取組みを継続していた。

その結果、2000年に第2世代と言うべき新しい材料が開発され、吸湿による経時変化も少なく、実用に耐え得る品質となった。

2000年はちょうどH-Jetプロジェクトの開発スタートと重なり、光造形法を見限った競合他社に対し、ほぼ独占的な使用が可能となったため、風洞試験モデルの開発に集中的に投入することが出来た。その結果、H-Jetプロジェクトの初期開発期間は大幅に短縮され、開発から3年で初フライトを可能とする大きな要因となった。

2003年12月3日、H-Jetプロジェクトはライト兄弟が飛んでからちょうど100年目の同じ日、同じ米国ノースカロライナ州で、初フライトを成功させることが出来た。

##### 2.2 遅れて来た積層造形法の時代

航空宇宙機開発の試作においては、第2世代の光造形材料が開発されたにもかかわらず経時変化に対する偏見が残り、2000年代に入ってもあまり使用されることが無かったが、当時の携帯電話開発市場においては短期試作性が注目され、大いに活用された。これによって光造形法は市場において継続的に進化が進み、主に携帯電話市場のニーズから、ゴムのような柔らかい材質や、透明性の高いもの、靱性の高いものまで開発された。

しかしその後も航空宇宙業界や自動車業界では光造形法を試作に使用する試みが進まず、これは海外でも同じ状況で、2010年初旬JETROの支援を受け、NASA Ames研究所の複数の研究者に聞き取りを行った時点でも“聞いてはいるが使ったことは無い”と言う状況であった。

光造形を始めとする積層造形法が再び脚光を浴びるのは2010年に積層造形法に関する一部の特許が切れ、造形機の開発が容易になった頃からであり、2012年、クリ

\* 東京流研株式会社

(〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-7-4 明産富士ビル 2階, E-mail: omotani@tokyoryuken.com)

ス・アンダーソンの「Makers」<sup>1)</sup>が出版されると、一気にブームに火が付きつた。

その後、米国では3Dプリンターとして大きな進化を遂げ、昨年2012年末のオバマ大統領の一般教書演説で取上げられてからは、日本国内でも大きな反響を呼ぶこととなり、今年に入ってからメディアで取り上げられない日は無いほどのブームとなった。

国内外の製造業者はこぞで3Dプリンターの開発に乗り出し、短期間にきわめて多くの商品が開発され、それに合わせてさまざまなセミナーが催されるようになり、今日では「バブル」と呼ばれるまでの活況を呈している。

2.3 市場における3Dプリンターの期待度

米国のコンサルティング会社であるガートナー社<sup>2)</sup>は、1995年以来、どのような新技術が世に現れ、如何に推移しているかを示す「ハイブサイクル」(Hype Cycle for Emerging Technologies)を毎年発表しているが、その中で3Dプリンターは2012年7月現在、最も世の期待を集める技術として紹介されている。翻って現在の状況を考えると、このハイブサイクル通りの“過度な期待”状況が生まれているのが分かる。

ハイブサイクルを Fig.1 に示す。

2.4 実用的な3Dプリンター選定の目安

市場を見まわすと、さまざまな3Dプリンターが上市

されており、まさに百花繚乱と言った状況であるが、では、全てが風洞試験モデル製作に使用可能なレベルかと言うと残念ながらそうではなく、造形物の大きさ、使用出来る材料の物性、造形精度の点から、やはり上級機種に絞られる。

この点、国内で造形を請け負う複数のメーカー担当者に聞き取りを行った結果、大雑把な目安として¥500万以上の3Dプリンターであれば風洞試験モデルに使用可能な品質の造形が可能と言うのが通説となっている。

安価なモデルが多数市場に出てきているなか、選定に迷う場合は造形機の金額を目安にするのも一つの方法であると思われる。

2.5 既存加工法に対する優位点

風洞試験モデルの製作にはこれまで木や樹脂、金属の切削加工が主に用いられており、製造期間も長く、コストもかかるのが常であった。風洞試験期間の50%はモデル製作に費やされると言うのが通説であり、データ生産性の低さが課題となっていた。

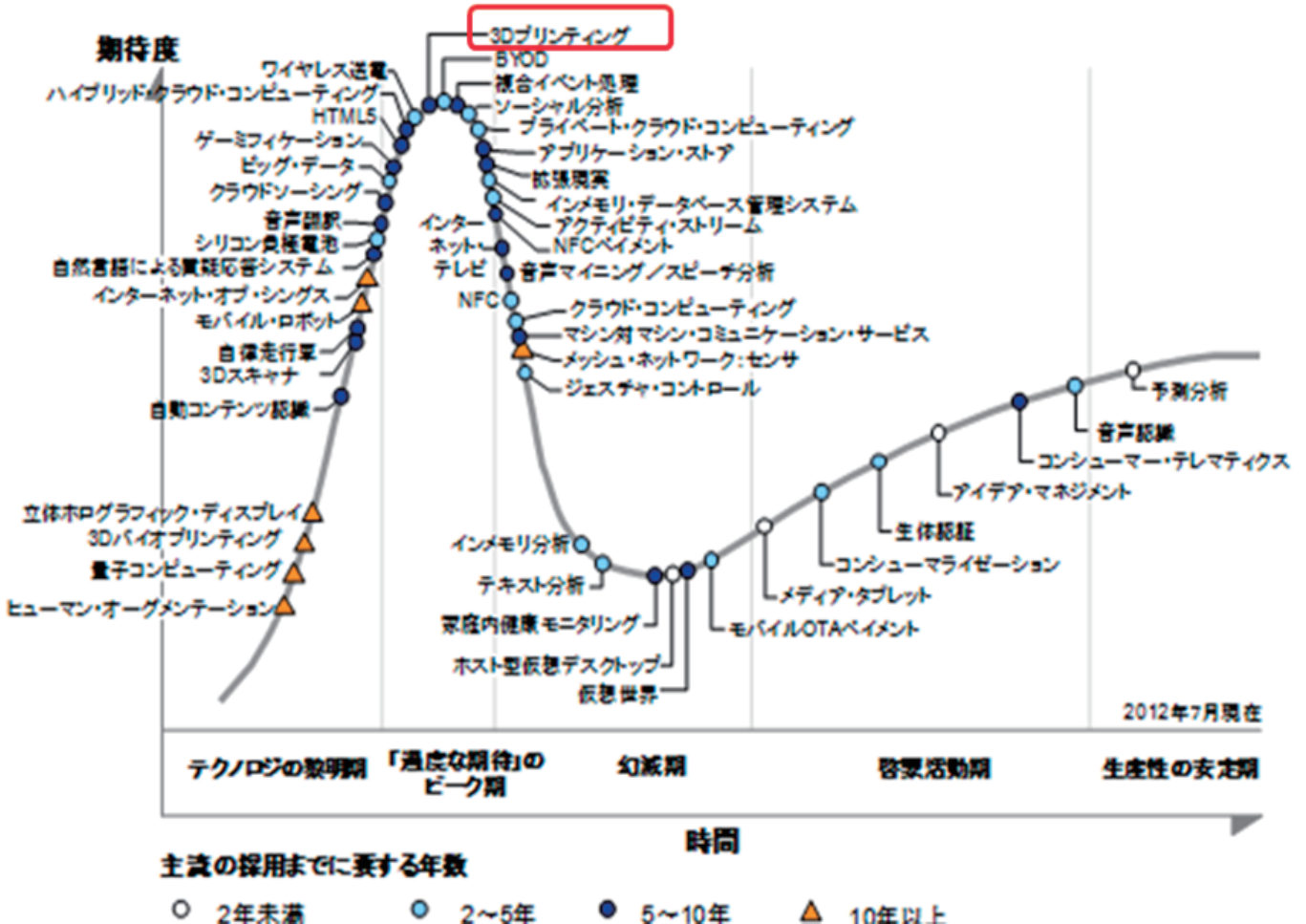


Fig.1 Hype Cycle for Emerging Technologies.

CFD (Computational Fluid Dynamics) はその点を補うために発達してきた技術であり、計算機能力の劇的な進化に支えられて大きな成果を修めつつあるが、現行の計算機でも1ケース当たりの計算時間がかかりかかるという課題がある。対して風洞試験では、いったん試験が始まってしまえば一気に多くのデータを取得可能であるため、モデル製作期間の課題さえ解決出来れば、風洞試験は今後も空力開発の有効な手法で有り続ける。

そしてこの課題を解決する手段が光造形や3Dプリントなどの積層造形法である。

積層造形によって風洞試験モデルの開発期間を短縮化出来れば、最近 JAXA 等から提唱されつつある空力実験 (EFD : Experimental Fluid Dynamics) と CFD の融合<sup>3)</sup> もより効率化が可能と思われる。

## 2.6 既存工法か積層造形法かの判断について

既存の工法から出発して積層造形法に行きついた経験から、製作期間はもちろん、3次元設計が可能な設計自由度の高さ、軽量性 (比重 1.2)、コストの点で優れており、一度慣れてしまうと旧来の工法に戻る気がしない。

ただ、強度・剛性面では金属に劣るため、設計要求の中で、特に剛性が重視される場合は、積層造形が不利となる。したがって、既存工法か積層造形かを定める際のポイントを一つ上げるとすれば、

それは剛性要件とすることになる。

もちろん、金属スパーとの組み合わせや、リブ・ストリンガーの設定が容易であるため、設計努力によるカバーが可能である。

## 2.7 光造形と3Dプリンターの使い分け

3Dプリンターという呼称はここ1年ほどで出てきたもので、それまでは光造形 (Stereo Lithography) という呼称が一般的であった。いずれも積層造形を示すものであるが、では何が異なるのか。使い分けの指針はどう設定するかという疑問が生ずる。

これは造形物の大きさで決まる。

小型部品は3Dプリンター、大型部品は光造形というのが大まかな仕切りで、具体的には3Dプリンターは手のひらサイズ、光造形は抱えられるサイズ (500mm 立方) と言うのが目安である。

では、更に大型部品の造形はどうするかとなると、小分けにして造形した部品を接着して大型化する手法が一般的で、その際、接着には母材と同じ紫外線硬化型の樹脂が用いられ、接着面に含浸させて通常の造形と同じ紫外線を照射して硬化させるため、接着面と他の部分との強度的な差はほとんどない。これは部品を様々な破壊方法で実際に壊してみ確認した。

また、使用可能な材料の選択性と言う点からも光造形の方が有利である。

3Dプリンター用の材料はコイル状に成形され、カートリッジに納めて供給されているが、今のところ選べる種類は少なく、透明性の高い材料もほとんどない。対して光造形は国内では2社から10種類ほどの材料がライ

ナップされており、透明性、強度、耐熱性、柔軟性など、さまざまな特性を持つ材料が選べる。

また、光造形材料は市場で20年間磨かれてきたと言う実績も信頼性の面から無視できない

光造形材料のサンプルを Fig.2.7.1. に示す



Fig.2.7.1 Stereo lithography material.

ただし、米国では金属材料を3Dプリントできる造形機の開発が進んでおり、これまでの粉末造形+焼結工程による焼結加工の前段階としての積層造形では無く、ダイレクトに金属を造形可能な3Dプリンターが実用化されれば、材料選択面での優位性は一気に3Dプリンターに傾く可能性が高い。

現状、多くの技術者が金属の3Dプリンターの実現を待ち望んでおり、これが可能となれば、アンダーカットや中空部品など設計自由度が飛躍的に高まり、まさに製造業の革命となるものと思われる。

## 2.8 材料の物性と実力

2.7 で述べた通り、光造形法では各社から様々な特徴をもつ材料が開発され、物性表も公開されているが、積層造形の特性により、かなりばらつく傾向にある。これは荷重方向と積層方向との相関性によるものと考えられ、物性表に示された値を用いて強度解析を行っても精度が期待できない場合もある。従って、シビアな条件下ではクーボン材による事前の物性試験が必要である。

現在、弊社東京流研では、光造形法の強度解析精度の向上を目指し、SOLIZE Products 株式会社 (旧インクス社)<sup>4)</sup> と共同で様々な形状に対する物性の評価を行っており、データベースを作成中である。

光造形材料の物性表の1例を Table 2.8.1 に示す。

## 2.9 造形精度

積層造形の場合、精度はレーザー径 (光造形)、あるいは樹脂吐出ノズル径 (3Dプリンター) と、造形ピッチの細かさで決まる。

レーザー径は一般的に  $\Phi 0.1\text{mm}$  であり、樹脂吐出ノズル径も同様であるが、最新の3Dプリンターでは  $\Phi 0.05\text{mm}$  のものも出てきており、造形ピッチを整合させることで、小型・高精度部品の造形では3Dプリンターの方が有効なケースも増えてきている。

Fig.2.9.1 に3Dプリンターによる製作例を示す。



Fig.2.9.1 Fan model made with 3D printer.

ただし、当然のことながらレーザー径（ノズル径）を絞れば1積層辺りの硬化時間が増えるし、造形ピッチ（縦方向のステップ）を細かくすると縦方向の積層時間が増え、造形時間が増大し、結果的にコストがかかることとなるため、精度を重視する場合は、コストとのバランスを考慮することが重要である。

### 2.10 3Dプリンターの課題（ソフト面の遅れ）

メディアで注目を集める3Dプリンターではあるが、3Dプリンターという装置を示す事が一般的であり、ソフト面となる運用方法に目を留める人は極めて少ない。

例えて言う、パソコンの有用性が認知されて多くのハードが開発されたが、OSを始めとしたソフトの開発が忘れられていると言う状況であり、機械の性能の高さばかりが衆目を集め、運用まで気が回らないと言う状況になっている。

3Dプリンターを使いこなすソフトとは、具体的に言うと3D-CADであるが、3次元形状を自在にデータ化出来る操作への習熟は言うまでもなく、積層造形に特化したノウハウの知悉とその適切な投入も欠かせない。

基本的なところでは中空構造にする場合の板厚や、造形可能な最少板厚の制限からくるシャープエッジ部寸法（翼後縁など）、閉塞を起こさない圧力配管の曲げR、金属部品挿入部やインロー部の寸法公差、形状交差部のフィレット仕様などがあり、往々にして設計の初歩段階で迷いが生じ、データ作成に時間がかかることが多い。

効率的な3Dプリント技術の推進には、ハードの目覚ましい進化に応じた設計技術面の工夫が欠かせず、設計ノウハウを集めた設計指針の作成などの推進が今後の大きな課題と感じている

## 3. H-Jet プロジェクトでの活用

### 3.1 光造形法導入の初期段階

H-Jet プロジェクト開発では先行プロジェクトの段階から風洞試験モデルの製作に光造形を多用していた。

最初の光造形部品は1995年に製作した主翼フラッター試験用のエルロンであった。1/3スケールであるためエルロンはスパン長400mm、コード長100mmほどの小さな部品であるが、内部にマスバランスや支持機構を

設ける必要があり、比較的複雑な構造が要求されていた。

当初はCFRPをウェットレイアップした部品を接着して製作したが、製作に時間がかかるのと、寸法精度の低さから改善を検討していたところ、光造形法の実用化を知り、採用の検討を行った。

光造形へのトライを当時の責任者に提言すると、樹脂部品は前例がないことと、未知の製造法に対する不信感とで強い反対を受けたが、重ねて説得して許可を得、製作を実施した。

結果、製作期間は1/6に削減、精度も全てを一体で造形したため、小部品の組み上げとは1ヶタ上の高精度で、しかもコストを半減することができた。

### 3.2 光造形部品の展開

その後、徐々に仕様箇所が増え、通常使用していた1/6スケールの全機モデルにもフラップ、ラダー、エレベーター、各翼タブ、垂直安定板、水平安定板と、使用箇所が増え、胴体も骨組以外全て光造形となり、ランディングギアも金属粉末造形で製作、主翼基本部分のみ剛性を考慮してアルミ切削で残すこととなった。

### 3.3 3次元設計性を活かした機能的な工夫

光造形を導入した当初はアルミ合金から光造形樹脂への材料置換が主であったが、それでもアルミの機械加工では不可能な内部の機能的な造形や中空化による軽量化は、風洞試験の効率向上に大いに役立った。

最も印象的だったのは小型遷音速フラッターモデルの開発で、マスプロパティの調整上、軽量化と剛性の両立の必要性から、それまでCFRPを用いて製作していたが、型を起こして作った部品を組み立てて主翼を作ると、熟練の技能者でも翼素間の段差が1~2mm発生し、凹凸状となって空力荷重の練成には有害であった。

この翼素製作に光造形法を用いた結果、段差は0.2mm以下となり、完成した翼素をスパー上に並べて見事に翼素間の形状が揃ったのを見たときは、大いに感動した。フラッターモデルの写真をFig.3.3.1に示す

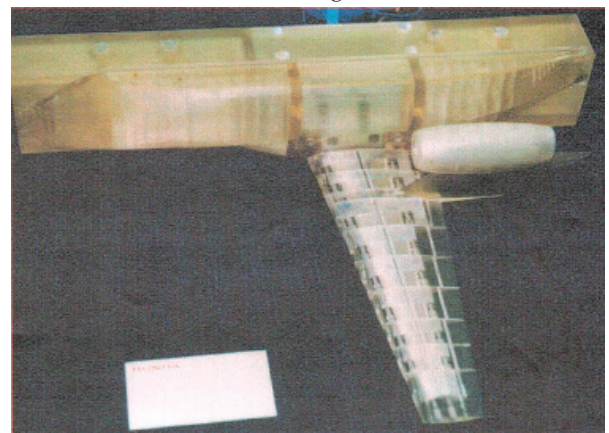


Fig.3.3.1 Flutter test model (wing length 450mm) .

このフラッターモデルでは翼素重量がそれまでのCFRPモデルに対し、1/3ほどに軽量化出来たため、その分適切な位置に集中してマスバランスをセットすることが可能となり、飛躍的に精度が向上し、試験も良い成

果を上げることが出来た。その成果を 2004 年の AIAA にて発表し、使用した光造形のモデルを展示したところ、大きな反響を頂き、実現しなかったが、空軍の技術将校からモデル製作の依頼も頂いた。

AIAA 資料を Fig 3.3.2 に示す

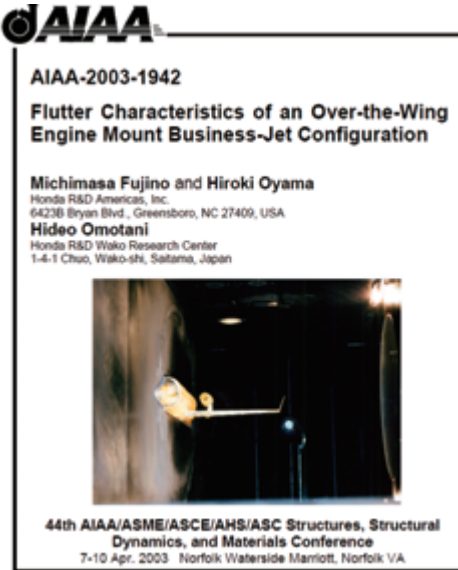


Fig.3.3.2 AIAA document

### 3.4 多点圧力計測への応用

2000 年に行った遷音速フラッター試験では、航技研（現 JAXA）の小型フラッター風洞を借用することになり、初めての風洞借用と言うこともあって、まず流れの特性を把握するため、ダミーモデルを用いた主翼面上の多点圧力計測を行うこととなった。

旧来の手法では主翼表面上に細い溝を加工し、 $\Phi 2\text{mm}$  程度の金属パイプを複数埋め込んで先端に圧力孔を設け、表面を流れる気流の圧力を測るのが一般的であった。

この方法では供試体の表面積で溝を入れる面積が制限される（計測孔数 $\times$ 表面積 $\div$ 溝幅）ため、小翼では多点の圧力計測が困難であり、また計測孔の数に比例して製作費も嵩むという難点があった。

これに対し、光造形では翼内部に多数の配管データをレイアウトしておけばそのまま造形出来るので、飛躍的に計測孔の数を増やす事が可能となった。配管数が増えても造形時間はほとんど変わらないため、モデル製作費用は比較的安く抑えられる。ただし、配管を多数通すためのレイアウト工数はかかる。

また、これまで加工上不可能であった翼後縁等、板厚  $0.7\text{mm}$  以下の部分にも圧力孔の設定が可能となる。

この方法は非常に効果的で、その後エンジンのインレットディストーション試験など、多くの風洞試験において活用されることとなった。

多点圧力計測用の翼モデルの例を Fig.3.4.1 に示す

また、水流における試験においても有効で、新型ポンプの内部流れの圧力分布計測試験、及び可視化試験用として今年、開発を行い、現在中国の精華大学にて試験を実施中である。ポンプモデルの写真を Fig.3.4.2 に示す。

なお、この光造形法による多点圧力計測圧力手法はその後国際特許として成立した。

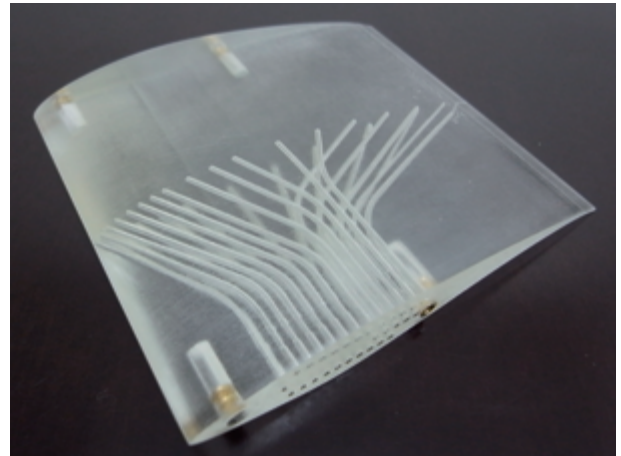


Fig.3.4.1 Wind tunnel model for pressure measuring.

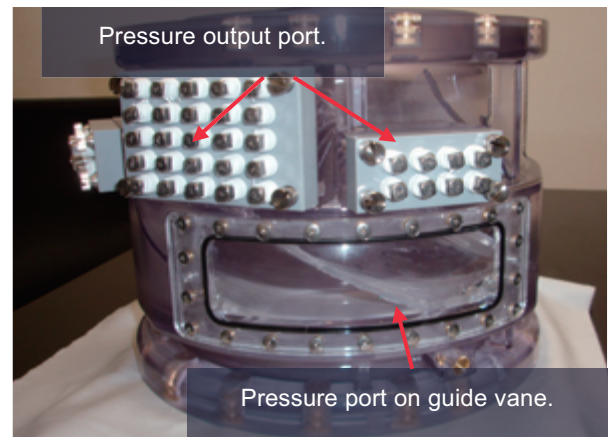


Fig.3.4.2 Stereo lithography pump Model  
(Pressure distribution measurement test)

### 3.5 光造形を採用した成果

H-Jet プロジェクト風洞試験に光造形法を適用した成果はいろいろあるが、主に以下の点で効果的であった。

- ① モデル製作期間の短縮
- ② モデル製作費用の低減
- ③ 計測効率の向上

まず、①に関しては  $1/6$  スケール全機モデルで最も大きな部品であった胴体前方のノーズ部品を例に挙げると、先行モデル開発の時点では鋳造による素材製作から始めて 6 か月かかっていたが、光造形法に換えることによって 1 ヶ月で製作することが出来るようになり、製作期間は  $1/6$  に短縮できた。

②の費用の点であるが、光造形への置換だけだとおよそ 20%の低減となり、部品点数の削減効果を勘案するとトータルで 40%の低減効果があった。

③の計測効率に関しては、多点圧力計測モデルを例に挙げると、従来のおよそ 2 倍の計測数が達成できた。

フラッター試験ではその日の試験結果に基づいて改良した部品を即日手配・造形し、翌日は新部品に組み替えて試験を行うと言う方法で、従来のフラッター試験に比べ、同じ期間で 5 倍以上のデータ数を得ることが出来た。

風洞試験モデルの基本構造として金属の骨組み+光造形の外形部品としていたため、外形の仕様変更による部品の追加製作が短期で済み、また軽量であるため試験中の形態変更も容易であった点も挙げておきたい。

### 3.6 海外でも可能な光造形部品の調達

1998年から海外でも頻繁に風洞試験を行った。

その際の不安は部品が破損した場合の調達であったが、米国の西海岸であればほぼ問題無い事が分かった。

実際、モデル形態変更の際に一部の大型部品が破損するトラブルがあったが、シアトル市近郊の業者 MODEL WERKS 社<sup>5)</sup> で問題無く調達が可能であった。

3次元 CAD による設計データを持参していたため、スムーズに造形が出来、仕上げも風洞試験モデルを扱う業者であったため、十分満足できるレベルであった。

現地の大学関係者の話では、米国西海岸にはそのような業者が5社ほどあると言う事であったが、ボーイングを始めとした航空宇宙関連の研究拠点が複数あることから、現在ではもっと増えていることと思われる。

### 3.7 斬新な空力開発構想

H-Jet プロジェクトにおいては、風洞試験グループ、CFD グループ、飛行試験グループの3つのグループを担当していたため、それらの成果を有効に統合し得る空力開発の新たな在り方を模索していた。

当時のプロジェクト責任者と相談しながら、EFD と CFD に RFD (Real Flight data) を加え、現場、現実、現物を重視する企業ポリシーに基づく独自の空力開発手法の確立を目指していたが、認定業務の拡大に追われて最後まで見届けられなかったことが心残りである。

## 4. 技術課題への対応

### 4.1 構造設計における信頼性向上

2.7 でも触れたが、積層造形で製作された部材は、造形時の積層条件、レーザー径等の条件によって物性がばらつく事が知られており、正確な物性値の把握が出来ておらず、そのせいもあって ISO や JIS における標準化も未だなされていないのが実情である。

効率的な設計には事前の強度解析は必須であるため、解析に要する物性値の正確な把握が欠かせず、今後は代表的な造形形態を絞り込み、クーポンテストを行って物性データベースを構築することが急務と考えている。

このような地道な作業はユーザーと造形メーカーとの協調によって促される性質のものであり、物性データベースの構築を目指した関係者の連携を望みたい。

### 4.2 耐熱性の向上

自動車開発の現場では既にインテークマニフォールドを光造形で製作し、実際にエンジンに取り付けて可視化による吸気特性の把握を行っている。その際問題になるのが光造形材料の耐熱性であり、現状最も高い耐熱性を有する材料でも 80°C 程度であるため、このような高温環境下での試験投入には制限が大きい。

耐熱性が更に高くなり、100°C を超えるようになると、

更に様々な分野で活用することが出来るし、120°C をクリアできると、後述するように複合材のコア材としてオートクレーブによるキュアが可能となる。

開発現場からの要求に応じ、材料メーカーは耐熱性向上に注力しており、近日中に高い耐熱性を持った材料の上市と、新たな活用法の確立が期待されている。

### 4.3 大型化

現状の光造形機では1部品の造形限界が500mm 立法である。

市場の大型化への要求は高いが、レーザー焦点距離の問題や樹脂材料コストの問題が関連するため、なかなか大型化が進まない。

一時期、造形テーブルの1辺が1000mm 以上の造形機が開発されたが、これは基本技術の改善によるものではなく、2台の造形機を結合する構想のものであったため、造形時間的に接着による大型化に比べてメリットが得られず、市場に受け入れられなかった経緯がある。

また、仮にマルチレーザー化によって高速で500mm × 1000mm までスキャンが可能となっても、現状500mm 角のバケットを一杯にするのにキロ単価 ¥26000 の材料だと ¥400 万近い投資が必要であり、1辺が倍の1000mm になれば材料費で ¥800 万となる。地震や人為的ミスで廃棄されるような事態を考えると、安易なバケットの大型化も困難であり、材料費の低価格化も併せて進めないと解決できない問題である。

実際の風洞試験モデル開発においては当然500mm 角以上の部品も存在するが、これはほとんどが分割造形した部品の接着であり、前述したように通常の造形と変わらない強度が得られるため、ごく一般的な大型化の手段となっている。

## 5. 光造形の特性を活かした取り組み

### 5.1 3次元ハニカムによる構造材の実現

ハニカムサンドイッチパネルは航空宇宙機や競技車両など、多くの分野で活用されている比剛性の高い構造材であるが、曲面での成形が困難であることは意外と知られていない。

これはハニカムコアの製造法から生ずる性質によるもので、一辺を曲げようとする、他辺が逆方向に反ってしまい、任意の様な曲面への成形が非常に困難である。

簡易実験の写真を Fig.5.1.1 に示す

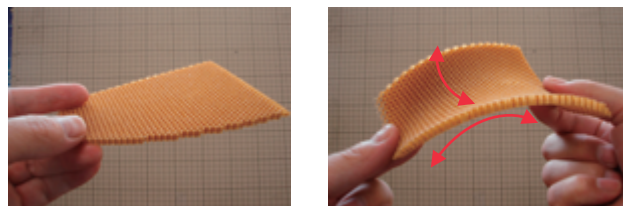


Fig.5.1.1 Honeycomb core Bending test (Aramid honeycomb).

そのため、予め必要な曲率に沿ってハニカムコアに切

削加工を施したり、圧縮成型を行ったりする方法が実施されているが、コストや精度の面で課題が多い。

このような課題に対して光造形を用いると、曲面ハニカムコアは比較的容易に実現が可能である。

光造形で製作したハニカムコアの写真を Fig5.1.2 に示す

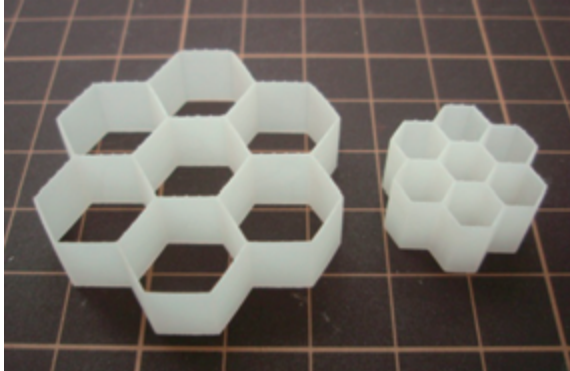


Fig.5.1.2 Stereo lithography honeycomb core.

弊社東京流研では 2009 年から光造形による曲面ハニカムコアの開発を始め、2010 年に特許を申請している。

現在はハニカムコア形状に造形した場合の光造形樹脂の物性値を把握するため、圧縮、せん断、引張りについて荷重試験を行い、データベースを作成中であり、そのデータベースを活用した高精度の強度・剛性解析を実現する目的を立てることが出来た。

更に、光造形製ハニカムを用いた曲面サンドイッチパネル実現のトライとして、光造形ハニカムコアに CFRP プリプレグを積層し、オートクレーブでキュアを行った。

その結果、コアのクラッシュも無く、良好な成形となり、曲面サンドイッチパネル実現への一歩を踏み出すことが出来た。

光造形による曲面ハニカムコアを用いた、3次元サンドイッチパネルのイメージを Fig 5.1.3 に示す

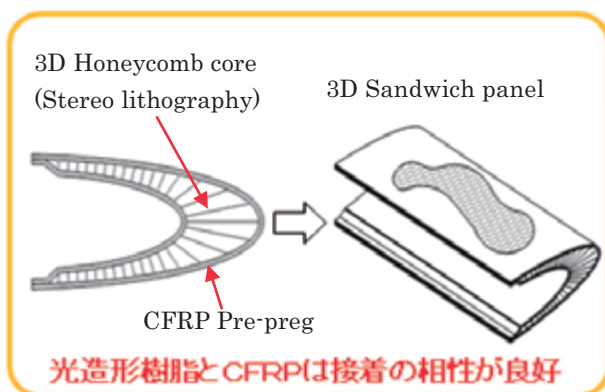


Fig.5.1.3 Image of 3D sandwich panel

キュアに先立ち、光造形ハニカムコアに熱処理を施した。この処理により通常 80℃の耐熱性を 120℃まで引き上げることができ、120℃硬化型プリプレグとの適性を得ることが出来たことが成功の要因として挙げられる

今後、更に実用性の向上を進め、様々な分野に提案して行く予定である。

## 5.2 可視化手法の考察

積層造形の特長として内部構造の多層化が容易であることが挙げられる。

この特長を用いて内部を多層化し、それを格子状に区切って多数のセルを有する翼モデルを風洞試験に投入し、表面圧力の変化に伴う各セルの体積変化を計測すれば、表面の流れを一切乱さず、表面流れの多点圧力分布を計測することが可能となるため、遷移点の計測などに有効と思われる。

また、多点圧力計測への対応が容易な特長を活かし、表面圧力を内部に導くだけでなく、モデル内の配管を通して内部からトレーサーを吹き出すような可視化法も容易に実現可能であり、従来の類似した方法に比べ、複数の配管を集合する、あるいは逆に 1 本の配管を分配することも容易であり、更に吹き出し孔の形状は円形に限らず、スリット状やポラスにすることも可能である。

光造形や 3D プリンターの特性を把握することにより、これまでに無かった様々な可視化手法が可能になると思われる。

## 6. 積層造形の設計技術向上への貢献

### 6.1 3Dプリンター&光造形設計セミナーの開催

ハードの急激な進化に追随し、設計技術の向上を目的として、これまでの経験を盛り込んだ実践的な設計法を提案するセミナーを始めた。

国内の大手光造形メーカー 2 社 (SOLIZE Products 株式会社、シーメット株式会社<sup>6)</sup>) に御提携頂き、講義と同時に実際にその場でサンプル造形を行う事で理解を深めることと、造形メーカーの現場での経験をフィードバックすることを特長とするセミナーである。

シーメット株式会社からは積層造形に精通されている講師をお招きし、市場を取り巻く概況から現場の実情まで、興味深い講義を行って頂いた。

第 1 回は 7 月末に東京にて開催し、初めての試みであるため少数の技術者、研究者を対象として実施した。

今後も微力ながら設計技術の向上に貢献できるよう、同様の試みを続けて行く予定である。

### 6.2 造形メーカーとのコラボレーション

1990 年代後半の経時変形の無い材料開発が造形メーカーとの技術的な連携の始まりであったが、前述のセミナーのように様々なかたちで連携を継続している。

今後重要となる、積層造形樹脂の物性データベース構築というテーマにあたってはより連携を強化する必要がある、既に今年度から SOLIZE Products 株式会社と協調しながら推進中である。

また、ハニカムより有効な多面体充填構造とそのデータ作成、及び積層造形方法については今後検討を進めて行く予定である。

## 7. まとめ

3Dプリンターの普及によって積層造形法に光が当たるようになってきた機会を捉え、H-Jet 開発当時から18年間の経験を基にした積層造形の実例を紹介し、新たな空力試験法の創出を促す事を目的に本稿を作成した。

ビジネスジェット開発における風洞試験モデルへの適用では主に以下の成果が得られた。

- ① モデル製作期間：1/6以下の期間に短縮
- ② モデル製作費用：40%の削減が可能
- ③ 計測効率の向上：多点圧力計測で2倍の効率化

また、積層造形を用いた空力試験から得られた知見、及び課題の一例を以下にまとめる

- ① 既存工法に比べ、設計自由度、短期試作性、軽量性等の点で優位であるが、モデルの剛性・強度向上が課題となる。
- ② 光造形と3Dプリントの使い分けは、手のひらサイズまでが3Dプリント、それ以上は光造形と言う大きさによる判断が現実的であるが、今後は更に大型部品の造形が望まれる。
- ③ 遷音速フラッターテストモデルへの適用では、旧工法に比べ翼素間の寸法誤差が1/10、翼素重量が1/3となり、即日試作による期日の短期化も可能となった。
- ④ 多点圧力計測モデルでは、容易に内部配管のレイアウトが行えることから、より多くの計測点を有するモデルを比較的安価に製作可能である。  
レイアウト工数を低減可能な3DCAD上のアプリケーション開発が課題。
- ⑤ 米国でも国内と同品質の光造形部品が製作可能であり、現地調達が可能であるが、品質保持のための国際標準化の推進が不可欠である

新たな試みとして実施中の光造形ハニカムコアを用いた複合材の開発では、120℃硬化タイプのプリプレグによるオートクレーブのキュアに成功し、これまでに無かった3次曲面のサンドイッチパネル実現の目途が立った。

現時点の技術的な課題には概ね対応法が得られているが、それらのノウハウを熟知した設計者が極めて少ない事が今後の3Dプリント技術、及び積層造形技術発展の大きな課題と感じており、この課題解決のために技術セミナーによるノウハウ公開への取り組みを開始した。

今後、更に光造形を中心とした空力試験技術の開発を進めるとともに、3次元ハニカムを活用して、比剛性が高く、曲面成形が可能な複合材の開発に注力し、新たなモビリティ用構造材の開発に努める所存である。

## 謝辞

本稿で述べた知見の多くは前職において担当した業務から得られた経験が基になっており、未熟な技術者であった筆者を、積層造形のように未確立でリスクの大きな技術にトライさせる自由な研究環境が用意されていたことに敬意を表す。また、積極的に積層造形の設計技術

を採用し、多くの手間をかけてより良い技術に練磨するためのご指導を頂いたJAXAの方々に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Chris Anderson: Makers, Crown Business, First edition (October 2, 2012).
- 2) Hype Cycle 2012: Gartner Inc. <http://www.gartner.com/>
- 3) 渡辺重哉、口石滋、加藤裕之、青山剛史、村上桂一、橋本敦、藤田直行、岩宮敏幸、松尾祐一：“JAXAにおけるEFD/CFD融合に向けた試み”，第40回流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2008論文集。
- 4) SOLIZE Products 株式会社：  
<https://www.solize-group.com/products/company/>
- 5) MODEL WERKS Inc.：<http://www.modelwerks.com/>
- 6) シーメット株式会社：<http://www.cmet.co.jp/>



Table 2.8.1 Physical property of stereo lithography resin.

| 樹脂名称  |                     | SL5510  | SL5530  | SL7545                | SL7810  | SL7870  | Accura Bluestone  | DuraForm PA   | DuraForm GF   | DuraForm EX   | DuraForm Flex   |
|-------|---------------------|---|---|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 樹脂特性  |                     | 高精密   | 高耐熱   | 換油性・PP相当              | 高耐欠け・ABS相当  | 透明・高耐性  | 高耐熱・高耐性   | ナイロン粉末  | ガラス入りナイロン粉末   | ナイロン粉末  | エラストマー粉末  |
| 用途    |                     | 設計データの検証、チタインモデル<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 前部ウイングサブプル<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 鋳造性・PP相当<br>鋳造性・PP相当  | 設計データの検証、チタインモデル<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 可視化モデル<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 高剛性モデル<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 鋳造性・チタイン粉末<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 鋳造性・チタイン粉末<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 鋳造性・チタイン粉末<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い | 鋳造性・チタイン粉末<br>UVによる80分ポスト・UVによる60分ポスト・UVによる40分ポスト・UVによる20分ポスト・UVによる10分ポスト<br>ストキャブ +80 トキユア ④の取扱い |
| 測定項目  |                     | 測定方法  | 測定方法  | 測定方法                  | 測定方法  | 測定方法  | 測定方法  | 測定方法  | 測定方法  | 測定方法  | 測定方法  |
| 外観    |                     | 無色透明  | 無色透明  | 無色透明                  | 白色(PP+チタニウム)  | 透明  | 黄色  | 黒白色   | 灰色  | 黒白色   | 黒白色   |
| 比重    | ASTM D 2240         | 1.19g/ml  | 1.19g/ml  | 1.15g/ml              | 1.13g/ml  | 1.13g/cm <sup>3</sup>   | 1.70g/cm <sup>3</sup>   | 0.98g/ml(ASTM D4164)  | 0.84g/ml(ASTM D4164)  | 0.93g/ml(ASTM D4164)  | 0.44g/ml(ASTM D4164)  |
| 弾性率   | ASTM D 790          | 180MPa  | 180MPa  | 300MPa                | 210MPa  | 180MPa  | 1200~1800psi  | -   | -   | -   | -   |
| 弾性率   | ASTM D 790          | 4.1~4.3mla  | 5.5mla (SLA1000)  | 6.6mla                | 5.6mla (SLA1000)  | 7.2mla  | 4.1mla  | -   | -   | -   | -   |
| 引張強度  | ASTM D 638          | 11.2~11.6ml/cm <sup>2</sup>   | 7.3ml/cm <sup>2</sup> (SLA1000)   | 9.6ml/cm <sup>2</sup> | 9.3ml/cm <sup>2</sup> (SLA1000)   | 10.1ml/cm <sup>2</sup>  | 6.8ml/cm <sup>2</sup>   | -   | -   | -   | -   |
| 引張強度  | ASTM D 638          | 0.1, 0.15mm   | 0.1, 0.15mm   | 0.05, 0.1, 0.15mm     | 0.1, 0.15mm   | 0.1, 0.15mm   | 0.1mm   | 0.1mm   | 0.1mm   | 0.1mm   | 0.1mm   |
| 引張伸び  | ASTM D 2240         | 86  | 88  | 79                    | 86  | 86  | 82  | 73  | 77  | 74  | Shore A 40~75   |
| 弾性率   | ASTM D 790          | 3.05GPa   | 2.97~3.92GPa  | 1.310~1.930GPa        | 1.800~2.400GPa  | 1.900~2.400GPa  | 8.300~8.900MPa  | 1.387MPa  | 3.10MPa   | 1.91MPa   | 8.8MPa  |
| 弾性率   | ASTM D 790          | 98MPa   | 109~120MPa  | 50~55MPa              | 55~72MPa  | 60~78MPa  | 154~164MPa  | 48MPa   | 37MPa   | 48MPa   | -   |
| 引張強度  | ASTM D 638          | 3.28MPa   | 2.854~3.130MPa  | 1.400~1.900MPa        | 1.800~2.400MPa  | 1.800~2.400MPa  | 7.600~11.700MPa   | 1.88MPa   | 4.08MPa   | 1.87MPa   | 7.MPa   |
| 引張強度  | ASTM D 638          | 77MPa   | 57~93MPa  | 35~40MPa              | 35~51MPa  | 38~51MPa  | 66~89MPa  | 43MPa   | 27MPa   | 48MPa   | 1.8MPa  |
| 引張伸び  | ASTM D 638          | 5.4%  | 2.7~4.4%  | 12~21%                | 10~18%  | 10~14%  | 1.4~2.4%  | 14%   | 1.6%  | 47%   | 10%   |
| 引張伸び  | ASTM D 2240         | 21.1/m  | 21.1/m  | 28~38.1/m             | 44~61.1/m   | 50~55.1/m   | 13~17.1/m   | 32.1/m  | 41.1/m  | 74.1/m  | -   |
| 引張伸び  | ASTM D 648 80/120MP | 62°C  | 67°C  | 46~50°C               | 51°C  | 50°C  | 66~66°C   | 180°C   | 179°C   | 186°C   | -   |
| 引張伸び  | ASTM D 648 81/120MP | 53°C  | 66°C  | 43~48°C               | 46~50°C   | 50°C  | 65°C  | 95°C  | 154°C   | 46°C  | -   |
| 引張伸び  | DMA, E*Peak         | 66°C  | 82°C  | 50°C                  | 67°C  | 67°C  | 71~83°C   | -   | -   | -   | -   |
| 引張伸び  | TMA(T>T)            | 84x10-6/°C  | 84x10-6/°C  | 89x10-6/°C            | 89x10-6/°C  | 89x10-6/°C  | 33~44x10-7/°C   | -   | -   | -   | -   |
| 引張伸び  | TMA(T>T)            | 18x10-6/°C  | 18x10-6/°C  | 17x10-6/°C            | 17x10-6/°C  | 17x10-6/°C  | 81~88x10-7/°C   | -   | -   | -   | -   |
| 熱伝導率  |                     | 0.181W/m-K  | 0.179W/m-K  | -                     | -   | -   | -   | 0.20W/m-K   | 0.67W/m-K   | 0.51W/m-K   | -   |
| 熱伝導率  |                     | 4.3x10 <sup>-4</sup> cal/sec-cm <sup>2</sup> °C   | 4.3x10 <sup>-4</sup> cal/sec-cm <sup>2</sup> °C   | -                     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 体積膨張率 | ISO 11357 (熱)       | 3.1x10 <sup>-4</sup> Q-cm   | 1.7x10 <sup>-4</sup> Q-cm   | -                     | -   | -   | -   | 5.9x10 <sup>-4</sup> Q-cm   | 3.2x10 <sup>-4</sup> Q-cm   | 1.3x10 <sup>-4</sup> Q-cm   | 1.3x10 <sup>-4</sup> Q-cm   |
| 体積膨張率 | ISO 11357 (熱)       | 2.6x10 <sup>-4</sup> Q  | 1.9x10 <sup>-4</sup> Q  | -                     | -   | -   | -   | 7.0x10 <sup>-4</sup> Q  | 3.2x10 <sup>-4</sup> Q  | 4.9x10 <sup>-4</sup> Q  | 1.1x10 <sup>-4</sup> Q  |
| 体積膨張率 | ASTM D 237 (熱)      | 1.25g/cm <sup>3</sup>   | 1.25g/cm <sup>3</sup>   | 1.19g/cm <sup>3</sup> | 1.16g/cm <sup>3</sup>   | 1.19g/cm <sup>3</sup>   | 1.79g/cm <sup>3</sup>   | 1.09g/cm <sup>3</sup>   | 1.46g/cm <sup>3</sup>   | 1.07g/cm <sup>3</sup>   | -   |
| 比重    |                     | -   | -   | -                     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |