

# 材料と構造の新しい展開 知的材料・構造について

江川 幸一\*

Koichi EGAWA

New Development of Materials・Structures  
— Intelligent Materials・Structures —

## 1 インテリジェント (知能) 材料・構造とはなにか

大英百科辞典の科学と未来年鑑 (1990年) に知的材料 (Smart Materials) として“完成したインテリジェント材料 (構造) は人体に類似した機能を持つものである”と記されている。この新しく出現した材料と構造に関するコンセプトは一見きわめて漠然としているが、その影響する範囲はきわめて広く、またその内容は革新的である。すなわちこの年鑑の解説に見るように人体を1つの理想的なモデルと見做して、材料や構造にその機能を持たせようとする考え方なのである。したがってその根底にある思想は“人体も1つの構造である”ということ、これを逆転して考えれば構造も1つの生体でありうるということになり、人体と同じ機能を持った材料や構造、例えば航空機 (図1参照) を作って行こうとする動きとなって表われてくるのである。したがってこのコンセプトを適用できる範囲はきわめて広く、単に工業用材料や構造物にとどまらず、生体、バイオ、医療 (薬品)、高分子、金属材料、航空・宇宙、機械、土木・建築構造物などに及ぶのである。

さて、このように広い応用範囲を含む概念は近々5年ほど前に出現したものであるため、その用語も定義もきちん

と定まっていないうし、その基本的な概念と応用技術の目標とがごちゃごちゃになって人々に断片的に理解されているのが現状である。そこでこの概念の包含する広い領域から機械構造物と同用材料に範囲を限定してこれを知的材料・構造 (Smart Materials・Structures) と名付け、この分野で研究を進展させてゆこうとする動きが、まず米国の大学の機械工学、航空・宇宙工学の教授方や航空・宇宙産業の研究者の間から生れてきた。ここで彼等が使用している定義と用語を見てみよう。図2に示すのはジェット推進研究所 (現在では宇宙構造物について多くの研究が行なわれている) のWadaらによって示されたもので<sup>3)</sup>、ここでいう可動構造とはシステムの状態や特性を変えることのできるアクチュエータを持つ構造 (材料) で、次の検知構造とは外界の変化や刺激を感知する機能をそれ自身が持つ構造、これら2つの機能を合わせ持つ構造が3の制御構造で、4と5の能動構造も知的構造もいずれも制御構造の1つとしてここでは定義されている。能動構造は外部環境の変化を検知した後の構造としての対応が能動的すなわち、外部刺激によって発生した構造の変化を積極的に抑制して、構造を元の状態に戻していく、例えば大振幅振動を急速にダンピングする能力を持つ構造で、知能構造は検知と制御能力が一層優れていて、しかもそれらの機能要素が構造機能を損

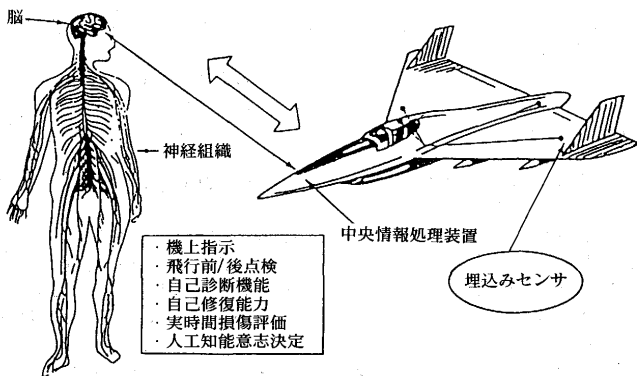


図1 生体と同じ機能を持つ航空機<sup>2)</sup>

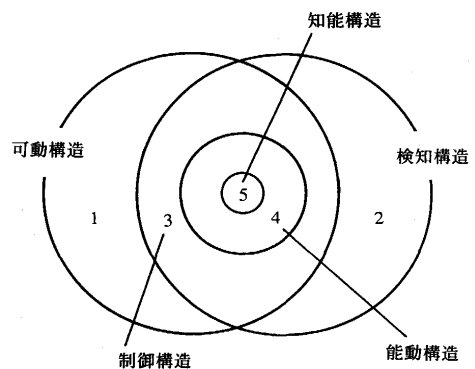


図2 インテリジェント構造の定義(Wadaら)

平成5年8月31日受付 平成5年10月8日受理 (Received on Aug. 31, 1993; Accepted on Oct. 8, 1993) (依頼展望)

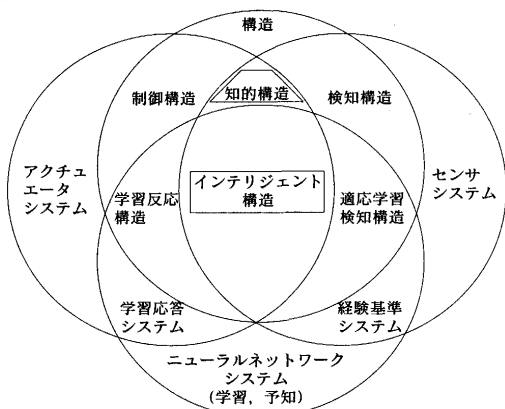
\*元航空宇宙技術研究所室長 (Formerly National Aerospace Laboratory, 2-17-24 Ebisu Shibuya-ku 150)

Key words: intelligent structure; smart structure; smart structural design; health monitoring; material development.

なうことなく構造内に分布して階層的に連結され、その制御もきわめて細部にわたって行うことのできる、いわば完成された能動構造とされている。類似の図による定義がカナダのトロント大学航空研究所のMeasuresによってなされている<sup>4)</sup>。これは図3に示すもので、インテリジェント構造としては円外に示す老化、任務遂行、予知、生存(サバイバル)、記憶、学習、進化、補修、最適化、成長、診断の機能を持つ点が知的構造(Smart Structure)と異なるものとされている。したがってここでのインテリジェント構造の定義は、この概念における構造が持つ究極の姿を示すもので、それが実現されるのは容易なことではない。

以上3つの概念の定義からも分るように、定義自体にまだ確定したものは無く、したがってその用語もIntelligent Material (Structure以下同じ)、Smart Material, Intelligent Material Systems and Structures, Adaptive Structuresとさまざま、和名もそれに伴って様々な呼ばれ方をしているのが実状である。これらの用語の意味するところはそれを提唱する人々により少しずつニュアンスが異なるが、まず、ここで述べた概念を指すものと理解してよい。

さて、この定義によれば材料あるいは構造がインテリジェント化(スマート化)するとはその生体化に他ならないから、例えば構造を考えると骨髄(母材)として複合材料、筋肉システムとしてアクチュエータ、神経系として分布形センサ網、脳(制御系)として人工ニューラルネットワークなどが考えられるのである。すると①神経および筋肉として作用するセンサとアクチュエータにはどのようなものがあるか、これらを内包する母材はどのような材料特性のものか、また母材にどのようにしてセンサとアクチュエータを内包させるかがまず問題となってくる。次に②スマート化の目的、すなわちどのような現象に対して自己適応のできる構造とするのか、が問題として浮び上がってくる。例えば振動制御、損傷制御、熱や光の流入制御、変形制御などが考えられる。さらに③材料・構造の内包する制御シ



インテリジェント構造の持つ機能：劣化判定、任務遂行、予知、生存、記憶、学習、進化、補修、最適化、診断、成長

図3 インテリジェント構造の定義(Measures)

テム全体を考えれば、その構造と応答特性が問題となる。以上をまとめると知的構造に関する構成要素別の開発(研究)分野は表1に示すようになる。

## 2 開発研究の進め方

機械構造物(土木・建築構造物含む)と同用材料に範囲を限定して材料・構造のスマート化を進めることを考えてみよう。いま一例として材料の損傷制御を目的としてセンサとアクチュエータを選定し、これらの母材への取り込みを考える。ここでのスマート化実現のための行き方としては、

(1)材料自身の構成要素にその機能を付与する、すなわち、原子・分子あるいはそれらの集合体を巧みに組立て構成することによって、材料に損傷が発生した場合に、材料自体がこれを検知し、自己修復する機能を与える、いわゆるアトムスコピックな方法

(2)材料の中にセンサとアクチュエータを埋没させて、材料や構造部材のスマート化を計る方法、が考えられる。これらはいずれも材料技術であり、これがこの新しい概念のキーテクノロジーとなっているのである。この二つの行き方では前者が新材料を創製することによってスマート化を実現する方法で、金属材料の薄膜や高分子材料について多くの研究がなされている。これに対して後者の行き方は現存する母材、センサおよびアクチュエータを使用して、目的とする機能の付与を材料・構造に行なってゆこうとする、マクロ的な、ハイブリッドな方法である。前者の行き方の一例として、図4、5に示すように金属材料中

表1 知的構造の構成要素別開発(研究)分野

- (1) 使用しうるセンサの種類とその特性、ならびに特性の改善法
- (2) 使用しうるアクチュエータの種類とその特性、ならびに特性の改善法
- (3) 使用しうるダンパの種類とその特性、ならびに特性の改善法
- (4) 使用しうる母材の種類とその特性、ならびに特性の改善法
- (5) センサとアクチュエータの母材への取込法
- (6) 母材とセンサ/アクチュエータの相互干渉、ならびにセンサ/アクチュエータを含む母材の強度評価法
- (7) プロセッサを含むシステム全体の構成法、システム全体の感知および応答特性、ならびにそれらの改善法

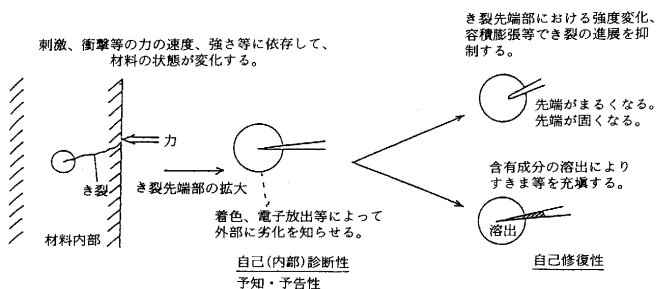


図4 インテリジェント材料の概念の一例<sup>5)</sup>

に強度特性を低下させない大きさ（例えば1 $\mu$ mほど）の微粒子を混入して、これが破壊時に音波を発生することによりき裂を検知する、あるいは相変態を起す物質や酸化を助長する物質を満して、すべり変形やき裂を抑制し、修復することが提案されている<sup>5)6)</sup>。後者の例としては図6に見るようにき裂近傍に形状記憶合金(SMA)ワイヤを埋没させて、き裂先端の大ひずみ発生をその抵抗変化より検知し、同時にそのSMAワイヤに電流を流してワイヤの形状回復に伴って発生する圧縮力をそこに作用させ、ひずみを減少させてき裂の進展を阻止することが考えられている。この行き方を一層進展させたものとして試験片のノッチ部に圧電セラミック(PZT)を接着し、ノッチ部に作用する動的負荷荷重を低減して損傷の進展を抑制し、寿命の延伸を計ることが提案されている<sup>8)</sup>。

ここでの(1)の行き方をインテリジェント材料の創製、(2)の行き方をスマート(知的)構造設計とする考え方もある<sup>9)</sup>。これによれば材料開発はまず素材があつて構造材料となり、それが耐摩耗、耐熱といった受動的な機能材料へと発展し、さらに光が当たればそれを電気エネルギーに変えるような能動的機能を持つところまで発展してきた。構

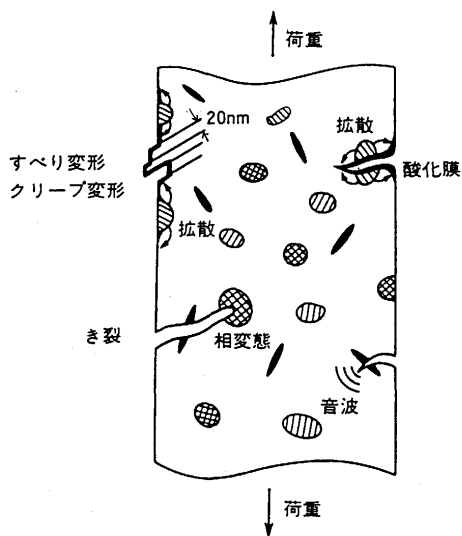


図5 インテリジェント材料の概念(松岡)

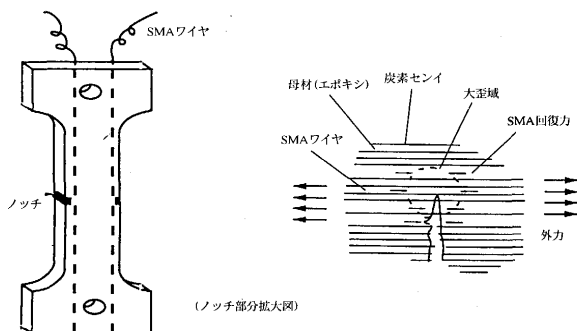


図6 スマート化による損傷制御の例

造的には鉄は鉄、セラミックスはセラミックスというような分離形から金属とセラミックス、半導体と有機物というような混合形(ハイブリッド)となり、やがて異物質間の境界が不明となる融合形(モノリシック)になって行くであろうと推測する。材料中に組込まれたソフトウェアはファームウェアと言われるが、材料中に占めるこの割合が次第に大きくなって究極的には生体になって行くのである。したがって、この考え方によれば材料の今までの開発過程を一層推し進めた究極のフォームとしてインテリジェント材料、すなわち生体の機能を持つ材料を創製しようという行き方、すなわち(1)の立場が出てくるのである。これをハイテクノロジーの立場から見るとIC、超LSIの技術の進展に伴って、センサ層、論理回路層、メモリ層を積み重ねた構造の「インテリジェント素子」の開発が考えられ、一方、イオン加工技術、レーザ加工技術などを使用して原子・分子のレベルで人工的に機能性極薄多層膜を製作し、各中間層の結合状態も制御して材料内で設計に基づく情報伝達機構を構築することも考えられている(図7参照)。

スマート(知的)構造設計は、ここでの分類(2)に捕われることなく進展している。すなわち米国においてインテリジェント構造あるいはスマート、アダプティブ構造と称して行なわれている研究は、ほとんど全て人工的な筋肉すなわちアクチュエータと神経すなわちセンサを構造部材(母材)内に埋め込み、これらを頭脳であるマイクロプロセッサに結合して、構造のスマート化すなわち多機能化(究極的には生体化)を計っているのである。現在センサとして着目されているのは光ファイバセンサである。これは受感線と参照線とからなる形式が一般的で、受感線の機械的・熱的変形を二つの線からの反射光で作る干渉縞から検出するため線状のセンサとなる可能性があり(現在最も普及している電気抵抗ひずみゲージは点状センサ)、さらに電磁場に不感、信号伝達が高速・多重、形状は極細で安価な利点

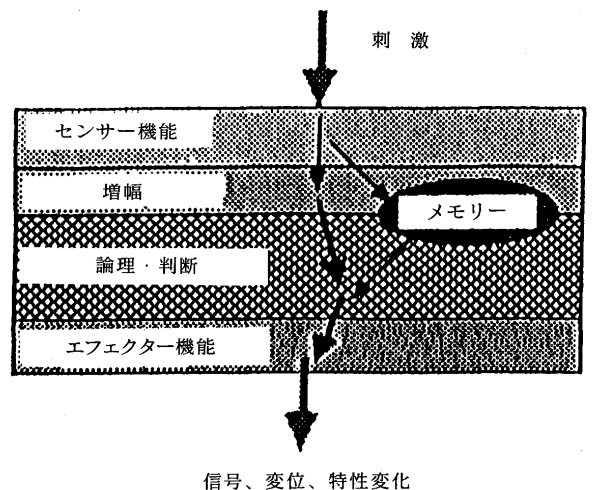


図7 インテリジェント材料創製のための1つの行き方<sup>9)</sup>

がある<sup>10)</sup>。実用化研究も盛んで図8に見るようにF-15戦闘機の構造強度試験で静ひずみおよび動ひずみ測定が行なわれた事例が報告されている<sup>11)</sup>。また温度測定に関しては1 km 当たり10m以内の誤差で、かなりの精度で温度が求められるようになっており、これも絶対値測定でなく、かなりの長さにあたる常態からの変化を求める目的に対してはきわめて有望であり、しかもこれを折り返して格子状とすれば、粗いが面測定が可能となるのである。これを航空機に適用する場合の例として図9に示す光ファイバ監視形知的航空機が考えられている。これは全機の構造の健全性と破壊の原因となる大ひずみ発生部分の発見および火災発生の検出を行なおうとするもので、航空機の操縦系統の光ファイバ化(フライバイ・ライト)と合せて、搭載電算機により一括処理しようとするものである。

一方アクチュエータは表2に示す4つが有力な候補となっている。圧電セラミックスは高応答で低歪出力、形状記憶合金は低応答で高歪出力の特徴がある。前者の応用例としてはヘリコプター回転翼の能動的な振動制御を行なうため、複合材で製作される回転翼の1枚の内に0.2mm厚のPZTの薄片を多数埋没して、異常振動をアクティブに制御する研究が行なわれている<sup>12)</sup>。後者の応用例は既に図6で示した他に多くの実用的な研究が行なわれている<sup>13)</sup>。磁歪材料は磁

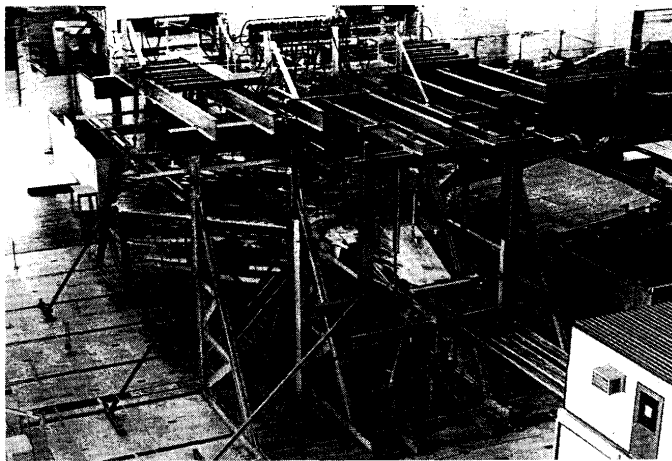


図8 F-15機の構造試験<sup>11)</sup>

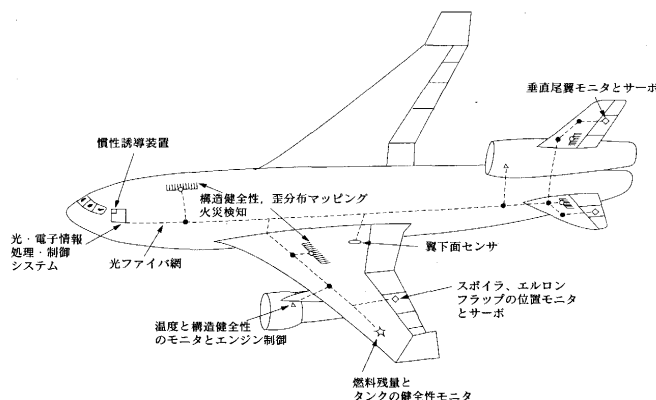


図9 光ファイバ監視形知的航空機概念

表2 知的構造に使用されるセンサとアクチュエータ

センサ	
1. 光ファイバセンサおよび光ファイバの破損による位置評定	
アクチュエータ	
1. 圧電セラミックス (電歪材料)	高応答アクチュエータ
2. 形状記憶合金	低応答大歪出力アクチュエータ
3. 磁歪材料	リード線接続不用
4. 電気粘性流体 (ダンパ材料)	高応答、粘性変化 (ER流体)

場を作用させることによりアクチュエータ機能を発揮させるので、これには電圧や電流を加えるためのリード線が不用となる特徴がある。このため磁歪材料を粉末化して母材内に広く分散させ、変形制御や剛性制御を行ないううえに、アクチュエータを作用させるために大電流を要しない利点がある。このため電源装置が小型・軽量となるので、特に航空・宇宙への応用について着目されている。ER流体はダンパ材料で、与える電場の強さにより粘性が変化するため、可変ショックアブソーバやエンジン・マウントへの応用が試みられている。

さて、これらのセンサとアクチュエータを取込む母材として現在考えられている材料は繊維強化複合材料とコンクリートである。二つの材料は取扱う分野が機械工学(産業)と土木・建築工学(産業)と異なるため、現在共通の接点はないが、前者では航空機、宇宙構造物、船舶へ応用を目的として研究が進められている。この動向は米国で始まり、近年ヨーロッパの主要な航空研究所や航空機製造会社へと拡がり、日本でも若干の動きがあるようである。知的構造物の概念を全て盛り込んだ構造物がその究極の目標となっているとはいえ、この概念の応用技術開発の1つとして、航空機やヘリコプターおよび宇宙構造物の振動抑制、翼面や船体形状の空気や水に対する抵抗を最小とするように行なう最適化制御、ミサイルの尾翼の形状を変化させて行なう操縦制御、宇宙搭載アンテナの指向性を高めるための位置(変形)の精密制御などが研究されている。また、この概念から派生して出現したヘルスマonitoring(健全性監視)は、航空機の誕生から廃却までにあたってその健全性をモニタし、損傷の発生→警告発信→飛行可能条件の指示、また→損傷箇所的位置と程度の指示→修理箇所の指示を行って飛行の安全性と保守・点検作業の迅速化とコスト低減を高め、部材の劣化、交換の指示も行なうなど、機体構造に関してのスマート化の一つの在り方を示している。さらに複合材中へのセンサとアクチュエータの埋没法、相互干渉すなわち埋没されたセンサとアクチュエータの感度と出力特性の変化ならびに母材側の強度特性の変化などが研究されている。

一方、土木・建築構造物では橋梁の振動ひずみのモニタ、地震による損傷の緩和法、劣化の評定法などを目的とする研究が行なわれている。劣化の評定はいわば従来から行な

われてきた保守検査を一步進めたものとして捉えることができるが、ここに損傷発生箇所の位置評定技術を持ち込むことはきわめて有用である。すなわち航空機での研究が進んでいる光ファイバによる損傷位置評定が、高架高速道路、トンネル、橋梁などに適用できれば、今まで一定期間毎に人間が行なってきた目視や超音波試験に代って、無人で常時監視ができ、しかも結果がきわめて迅速に収集、判定できる上に、点でなく線あるいは格子で監視箇所を拡大構成できる利点がある。

以上のことから、“生体と同じ機能を持つ材料や構造物”という新しい概念から発生した各種の応用技術の開発が目下ものすごい勢いで進行していることがお分かりいただけたことと思う。

### 3 おわりに ——日本での開発研究の進め方——

インテリジェント材料・構造という全く新しい革新的な概念について説明してきたが、これの応用技術（あるいは実用化研究）の開発についての事例として航空関連が多く出てきたことに気が付かれたことと思う。航空・宇宙技術は時代の先端を行くものであるから当然である、とも考えられようが、この概念が米国で創案され、研究も米国を先頭にして進展していることに注意しなければいけない。米国の研究・開発に関してはその費用が軍とNASAおよびその関連の産業界から拠出されることが多いので、そのテーマも航空・宇宙に偏りがちとなり、その成果を通して研究動向を探る我々の眼も、これが研究の全てと見なす傾向がある。一例としてこの概念の船舶・海洋技術への応用として行われている研究を見ると、①海底ケーブルおよびパイプラインの健全性監視、②潜水艦の最適船形をとるための

形状変化、③流体ノイズの低減、④健全性監視で、①以外は全て潜水艦に関係した研究となっている。

一方、我が国ではその産業構造が米国と異なり、金属、自動車、家庭電気製品、電子部品、精密部品、精密機器などのような民生品主体となっている。したがって我々のように研究や開発に従事する者が注意しなければならない事の一つは、米国の研究動向をそのまま直輸入して研究開発を進めるのではなく、この知的材料・構造の概念を十分理解した上で、日本でこれをどのように展開し、また適用して行くかを深く考えねばならぬことである。例えば健全性監視形航空機概念を自動車やクルーザに適用することの可否とその採算性について考えることが我々には必要とされるのである。

### 文 献

- 1) M.V.Gandhi and B.S.Thompson : Smart Materials, Encyclopedia Britanica Science · Future Year Book, (1990), p.162
- 2) T.G.Gerardi : J. of Intelligent Material Systems and Structures, 1-2 (1990), p.375
- 3) B.K.Wada, J.L.Fanson and E.F.Clawley : 同上, 1-2 (1990), p.157
- 4) R.M.Measures : Advances Toward Fiber Optic Based Smart Structures, Optical Engineering, 31-1 (1992), p.34
- 5) “環境条件に知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質・材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について(諮問13号)に対する答申”の概要, 科学技術庁材料開発推進室 (1989)
- 6) 松岡三郎 : 工業材料, 39-6 (1991), p.115
- 7) S.Li : Report Intelligence (ヴァージニア工科大学), 2-1 (1991), p.5
- 8) 同上, 2-2 (1991), p.4
- 9) 高木俊宜 : 新素材, 4-8 (1993), p.51
- 10) 例えば “S.H.Smith, A.A.Bioarski and D.G.Rider : Exp. Techniques, March/April (1992), p.25
- 11) K.A.Murphy : Lightnews (ヴァージニア工科大学), Winter Issue, (1991), p.6
- 12) J.S.Sirkis : 機械の研究, 46-1 (1994), p.33
- 13) 古屋泰文 : 新素材, 4-8 (1993), p.63