解 説

スクイズキャストによる軽金属基複合材料の作製

福永 秀春*

Fabrication of light metal matrix composites
by squeeze casting

Hideharu FUKUNAGA*

1. 緒 言

無機繊維で強化されたアルミニウム合金やマグネシウム合金は中高温における比強度・比剛性にすぐれ、母材に比べ耐摩耗性は著しく良く、熱膨張率も低いなどの特徴がある。スクイズキャストによって製造されるこれら繊維強化金属（以下 FRM と記す）製品は、他の製造法による製品に比べ、生産性と造形性に著しくすぐれている。スクイズキャストによる FRM 製品の出現は、機械設計技術者に各種機械や装置の高性能・軽量化を実現する新しい解決法を与えつつある。

すでに FRM は、その特徴を生かして、いくつかの工業の用途に適用が試みられてきた。たとえば、真空特殊用途用ボルト¹⁾、直噴ディーゼルエンジン用ピストン^{2)~10)}、内燃機関のコネクティングロッド^{10),11)}、ジェットエンジンのファンブレード¹²⁾、ジェットエンジンのラジアルコンプレッサー用インペラー¹³⁾、銃身¹⁴⁾、ミサイルの案内システム¹⁵⁾、ヘリコプターのトランスミッションハウジング¹⁶⁾、宇宙ステーションのトラス¹⁷⁾、紡績機械部品¹⁸⁾、半導体素子¹⁹⁾への応用などである。

これらの部品の多くはスクイズキャストによって製造されている。ここでは、スクイズキャストによって健全な FRM を作るためのプロセスや基本的な製造因子の制御について述べる。

2. 軽金属基複合材料のスクイズキャスト小史

セラミック繊維を強化材として軽金属との複合材料を液相法によって製造した最初の報文は、E. G. Wolff らが1967年、ボロン繊維強化アルミニウムに適用した AFML 論文²⁰⁾にみることができる。1970年には、米国の Aerospace 社で、R. C. Rossi²¹⁾らが、母材のアルミニ

ウムの液相流動を利用して、炭素繊維強化アルミニウム複合材料を作ったことを報告している。しかし、いずれも液体浸透法であり、液体金属を圧搾して高圧を利用するという概念がなかった。著者の調査によれば、圧力を加えての FRM の製造方法を公表したのは、1971年、英国原子エネルギー庁の C. F. Old²²⁾らがカーボン繊維と複合材料応用国際会議に発表したのが最初である。今日のスクイズキャストの概念を正確に公表したのは、1974年、ドイツのドルニエル・システム有限会社の K. F. Sahm²³⁾であり、彼は SiC ウィスカー強化アルミニウム合金をスクイズキャスト法で作リ、ホットプレス法で作ったものよりもすぐれた強度を得たことを報告している。

わが国では昭和50年（1975年）にスクイズキャストによる複合材料製造法の特許出願²⁴⁾が見られる。セラミック繊維強化アルミニウムの製造にスクイズキャストをいち早く適用し、公表したのは昭和52年（1977年）、名工試の鈴木ら²⁵⁾の本会第52回春期大会講演報告であった。以来、このスクイズキャスト法はプロセス温度が固相法に比べて高いため、強化繊維との反応劣化が起りやすいという問題と常に直面しながらも、いくつかの大学・公立研究所および多数の会社で、研究され、改善されてきた。図1は本会春秋講演大会において FRM に関する発表のうち、スクイズキャストを扱った件数の年次経緯を示したものであるが、なお盛んに研究が進められていることを示す。今日、FRM 製品がスクイズキャストによって量産されているのは、まだわが国だけであり、筆者の欧米諸国見学や国際会議参加を通じて知る限り、スクイズキャストによる軽金属基複合材料製造技術はわが国が世界に先んじて発達してきたと思われる。

* 広島大学工学部第一類（機械系）（東広島市）。Faculty of Engineering, Hiroshima University (Higashihiroshima-shi, Hiroshima).

受理日：昭和63年8月8日

図1 軽金属学会講演大会におけるFRMとそのスクイズキャストに関する講演発表件数の経緯

3. スクイズキャストプロセス

スクイズキャストによってFRMを製造する方法を分類すると、直接法と間接法の2つがある。図2は直接スクイズキャストによるFRMの製造過程の概要を示し、図3および図4は間接スクイズキャストによるそれを示している。直接スクイズキャスト法では、溶湯は注湯されたときただちに繊維成形体に接するが、間接スクイズキャスト法では、溶湯は注湯後ラムまたはプランジャーの変位によって移動させられて、そのときはじめて繊維成形体と接触する点異なる。

直接・間接いずれのプロセスにおいても、まず300～600°Cに予熱された繊維成形体が、250～350°Cに加熱された金型の中にセットされる。続いて溶融アルミニウム合金やマグネシウム合金を注湯し、油圧駆動装置を用いて、金型キャビティおよび繊維成形体の空隙に加圧浸透させる。空隙が完全に充填されると溶湯圧力は上昇するが、スクイズキャスト法では500～1000気圧の圧力を加えたまま急速に凝固させてFRMを得る。

直接法ではランナーが不要なので、製品重量に対する溶融金属の歩留りが良い。しかし、溶湯の計量ばらつきが直接製品形状や寸法誤差に影響することが問題となる。間接法は金型形状がそのまま製品形状および寸法に転写されるが、余剰な溶湯がランナーおよび湯だまり(ビスケット)に残るため、溶湯の歩留りは悪くなる。なお、間接法ではワンショットで製品の複数個製作が容易に実施できるので、FRM製品の製造には間接法が有利である。

スクイズキャスト法は、他の方法に比較して、生産性および造形性にすぐれることによって特徴づけられる。加えて、溶湯に濡れにくい繊維成形体であっても、圧力浸透させることによってFRMを作ることができる。溶

図2 直接スクイズキャスト法、溶融金属は繊維成形体上に直接注がれる(T_f : 繊維成形体温度, T_a : 溶湯温度, p : 加圧圧力, V : ラム速度)

図3 縦型スクイズキャスト機を用いた間接スクイズキャスト法

a) 注湯とスクイズプロセス

b) 取り出しと離型剤のスプレープロセス

図4 横型スクイズキャスト機を用いた間接スクイズキャスト法

湯による繊維の反応劣化の問題は、プロセス条件を選択することによってある程度まで抑えることができる²⁶⁾。

スクイズキャストにおいては、制御しなければならないいくつかの製造因子がある。それらは、繊維成形体に接触する直前の溶湯温度(T_a)、繊維温度(T_f)、金型温度とその温度勾配、プランジャー速度(v)および最終加圧圧力(p)である。図5はこれら製造因子の典型

図5 スクイズキャスト過程を表した典型的な時間線図

的な時間変化を示すタイムチャートである。この図では、ランナーの充填速度は速く、浸透速度は遅くすること、浸透完了直後に高圧をかけることを示し、サイクルタイム全体に占める浸透時間は短く、凝固収縮を補うためプランジャは微動していることなどがわかる。それらの制御例については後述する。

4. 繊維成形体の製造法

スクイズキャストによってFRMを作るには、金型形状あるいは製品設計に基づく強化部位に適合する繊維成形体をあらかじめ製作しなければならない。これには長繊維の織物、あるいは縫い合せなどいろいろな工夫がこらされる。図6は短繊維の圧搾成形の一例を示したものである。ウィスカーは若干の結合剤を添加した水溶液とスラリー状にかくはんされ、穴のあいた金型にフィルターを敷いて、同図(c)のように圧搾して体積率を整え、しかる後に乾燥させてできあがる。重要な点はウィスカーを均一に分散させることと、溶湯の浸透過程に成形体の変形やつぶれの起こらないような強度を与えることである。一般的に言えば、繊維体積率が10%より低い場合、成形体の変形を伴わないで溶湯を浸透させることは困難である。注意しなければならないのは繊維成形体の変形は、いわゆる加圧圧力（最終圧力）によってひき起こされるのではなく、浸透速度によって発生する流体力学的圧力に主として依存することである。

藤田ら²⁷⁾は最近、スラリー中のウィスカーの小さいクラスターを除去するために、スラリーをフィルターでろ過し、さらにかくはん後のスラリーを脱気処理して圧搾法で繊維成形体を作り、シリコンカーバイドウィスカー

図6 圧搾法による短繊維成形体の製作法

強化6061複合材の破壊強度を26%向上させることに成功した。また、砥綿ら²⁸⁾によって連続繊維成形体の繊維と繊維の直接接触を避けるため、ウィスカーや粒子をブリッジにする手法が開発され、スクイズキャストによるFRMの強度上昇に効果的なことが見いだされた。

5. 繊維成形体中への溶湯の浸透に必要な圧力

浸透に要する圧力は、溶湯の流路が一樣な断面をもつ場合はハーゲン・ポワズユの式で、流路が一樣な断面でない開口流路である場合はダルシーの法則によって、それぞれ式(1)および(2)によって見積もることができる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -32\mu \cdot \bar{u} / d_f^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\mu \cdot u / K \quad (2)$$

ここで、

μ : 粘性係数

$\bar{u}$: 溶湯の平均浸透速度

d_f : 非円管の水力学的等価直径

そして、

u : 繊維成形体部に繊維がないと仮定したときの溶湯の平均流速 ($u = \bar{u}(1 - V_f)$)

K : 浸透係数

これらの式によれば、浸透速度が早いほど、また浸透距離が長いほど、浸透に必要な圧力は高くなる。簡単な計算によると、小物の通常のスクイズキャスト製造条件では、この圧力は5気圧以内である。一方、繊維間隙のような狭い流路の流れでは毛細管現象に抗する圧力を考える必要がある。この圧力は

$$p = 4\gamma_i / d_f \quad (3)$$

であらわされる^{23), 29)}。

ここで、

γ_i : 繊維と溶湯との界面エネルギー

d_f : 繊維の直径

である。ここでは接触角を180度と考えている。これは実際の値よりやや高めである。いま、シリコンカーバイド繊維 ($d_f = 13 \mu\text{m}$) とアルミニウム母材の繊維体積率38%の複合材に(3)式を適用すると、 $\gamma_i = 1450 \text{ erg/cm}^2$ とみなし、 $p = 4.5$ 気圧を得る。これは(1)又は(2)式で得られる圧力と同じオーダーであるから、考慮されなければな

らない。しかしながら、浸透に必要な圧力は合計して、高々10気圧程度であり、通常用いられる最終加圧圧力の500～1000気圧に比べて意外と低いと考えてよい。

6. 製造条件の選択

スクイズキャストによってFRMを製造するときには、いくつかの選択すべき製造条件がある。健全なFRMを製造するための方案と製造条件の間には、もちろん相関があるはずであるが、いくつかの試行錯誤を経て方案が決定すると、FRMの品質には4つの製造条件、すなわち、溶湯温度 T_a 、繊維温度 T_f 、浸透速度 u および最終加圧圧力 p が大きな影響を与える。いま、シリコンカーバイド繊維（商品名ニカロン、 SiC_{pcs} と記す）とアルミニウムについて、間接スクイズキャスト法で実験した結果³⁰⁾を示し、一般的な製造指針について述べてみたい。FRMの品質は組織検査および引張強さによって評価した。

6.1 溶湯温度と繊維温度

溶湯の温度 T_a と繊維の温度 T_f をそれぞれ変えて、FRMを作り、未複合部が認められなくて、かつ引張強さが最大となるようなFRMが得られる温度範囲を調べた。その温度を最適製造温度領域と名づけ、図7の斜線部で示す。実験と考察によればセラミック繊維強化軽金属の製造に、このような最適製造温度領域が存在するのは次のような理由による。

(1) 液相法を用いるかぎり、溶湯の温度はその融熔点以上でなければならない（直線①）。

(2) 溶湯温度と繊維温度が高すぎると、スクイズキャ

図7 間接スクイズキャスト法と引張試験評価によって決定された38% SiC_{pcs} /Alの最適製造温度領域（ $p=49\text{ MPa}$ ）。ここで Q は単位体積の複合材に導入されるエンタルピーを、 e_s は溶湯が流れるために確保されるべき最小間隙を示す

ストプロセス中に繊維と溶湯との反応劣化が進行し、高い引張強さが得られない。さきに述べたシリコンカーバイド/アルミニウム系の実験によれば、単位体積のFRMをつくるのに要する供給エンタルピー Q は、繊維体積率 $V_f=0.38$ のとき、 $Q \leq 355\text{ kcal/cm}^3$ であった（直線②）。組合せ系によってはこの限界は直線にならないかもしれないし、また Q の絶対値も変わるであろうが、十分に高い温度を適用すると反応劣化のため、健全なFRMが得られない温度限界が存在することが自然である。

(3) 溶湯温度と繊維温度が低すぎると溶湯は繊維の間を浸透することができない。それゆえ、溶湯温度と繊維温度は、複合素材が互いに熱交換したのちの混合温度が母材の融点もしくはそれ以上の温度を与える必要がある。かりに溶湯が浸透過程に潜熱を放出して繊維の表面に凝固層を形成したとしても、後続流のための最小流路を保証する温度が必要である。凝固層が発生するような温度条件のとき、凝固層はすべての繊維表面に均一な厚さで生成するものとし、流動する溶湯と繊維との熱交換に関する非定常問題を単純化して、次のように仮定すれば、後続流が流れる最小間隙 e_s は、 T_a と T_f のみの関数となり、計算することができる³⁰⁾。仮定の1は溶湯と繊維は熱交換後融点になり、溶湯は潜熱を放出して凝固層を生成するとしたときの e_{s1} 、仮定の2は繊維表面に接する一定量の溶湯のみが凝固することによって繊維を融点にまで加熱し、残りの溶湯は初期温度 T_a を保ったまま流れると考えたときの e_{s2} である。前者はきわめて低速の溶湯が繊維に接触する場合に、後者は高速の溶湯が繊維に接触した場合にそれぞれ比較的近いと考えられる。 T_a と T_f をそれぞれ変化させて複合材の製造実験を行い、その都度、 e_{s1} および e_{s2} を計算すると、 e_{s1} でいえば $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上を与えるような T_a と T_f が、また e_{s2} の計算によれば $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上を与えるような T_a と T_f が健全な複合材料を製造する温度条件となった（直線③'あるいは③）。これは製造温度条件の下限を与える。

なお、図7において斜線の温度範囲は、仮定の1に従って計算すると、繊維の表面に凝固した付着固相の割合として、0.1前後を与える。本プロセスでは繊維温度 T_f を溶湯の融点以下とすることを特徴とし、この場合、凝固相は繊維の表面に発生するのが自然と考えられるので、この晶出した固相が溶湯から繊維を保護する役目を果たした結果、複合材の強度を向上させる最適製造温度条件になると考えている。

図8はシリコンカーバイドウィスカー（ SiC_w と記す）と6061アルミニウム合金を直接スクイズキャストによって複合させ、その引張強さを調査した結果²⁷⁾である。この場合、比較的広い製造温度範囲にわたって強度の劣化

が見られない。すなわち最適製造温度領域は広い。主な理由はシリコンカーバイドウィスカーが6061溶湯に対し比較的安定なためであろう。このようなケースではやや高温側を選択する方が、FRMのマイクロ欠陥を減少させ、複合材の信頼性を向上させるのに役立つと思われる。

6.2 浸透速度

溶湯の浸透速度は次式で与えられる。

$$\bar{u} = A \cdot V / S(1 - V_f) \quad (4)$$

ここで、

A : スクイズキャスト機のプランジャー直径

V : プランジャー速度

S : 溶湯フロントの全面積

V_f : 繊維体積率

である。

浸透中の溶湯の圧力は $\bar{u}$ を用いて式(1)および(2)に関係づけられるので、浸透速度と浸透圧力を別々に制御することはできない。どちらか一方を制御目的として選ぶことになる。一般的にはプランジャー速度を制御する機械が多い。図9は浸透速度 $\bar{u}$ を1~5 cm/sに変えて製造したFRMの引張強さを調べたものである。通常この程度の浸透速度が用いられるが、試験した範囲で浸透速度は引張強さに影響を及ぼさない。このときレイノルズ数は高々100程度であり、ゆるやかな層流であるため溶湯の繊維成形体に及ぼす流体力学的相互作用は小さいからである。一方、20%体積率の短繊維成形体を20 cm/sの浸透速度で溶湯アルミニウムをスクイズキャストした実験では、著しく成形体が圧縮された。これは成形体の圧縮強さより溶湯の浸透圧力が大きくなったためである。繊維成形体の変形や圧潰が発生するときは、最終加圧圧力よりも、初期浸透速度を低めることに注意を要する必要がある。

6.3 最終加圧圧力

スクイズキャストの最終過程で溶湯に圧力をかけるのは、溶湯の凝固収縮を補うためと溶湯と金型界面での熱伝達を改善して溶湯を急速に凝固させるためである。どの程度の圧力を負荷すれば健全なFRMが得られるかを間接スクイズキャストによって調べたところ、図10に示すように、引張強さは加圧圧力24.5 MPa以上で、ほぼ同じであった。しかし破面のSEM観察を行ったところ、24.5 MPaではボイドが存在し、49 MPa以上でボイドは見られなくなった。したがって、49 MPa (500気圧)の最終加圧圧力を必要とすることになる。

さらに高い圧力をかけると繊維と母材との界面接合が改善されFRMの強度が上昇するかもしれない。Al-4%Cu合金母材のFRMは繊維のまわりに不都合な共晶が発達してFRMの強度が出ないが、高圧により複合

図8 直接スクイズキャストによって製造された、20%SiCw/6061-Al合金T6複合材の引張強さに及ぼす製造温度の影響 (左図において $T_a=800^\circ\text{C}$, 右図において $T_f=700^\circ\text{C}$)

図9 38%SiC_{pcs}/Al複合材の引張強さに及ぼす浸透速度の影響 (スクイズキャスト条件は図7に同じ)

図10 間接スクイズキャストによって作製された38%SiC_{pcs}/Al複合材の引張強さに及ぼす最終加圧圧力の影響

組織が改善されるかもしれない期待がかかる。シリコンカーバイド繊維(前出, SiC_{pcs})を用いて実験した結果を図11および図12に示す。それによると200 MPa (2040気圧)まで圧力を上げてFRMの強度は何んら向上しないし、複合組織も見れば改善は得られなかった。一

方, B. K. Prasad ら³¹⁾は, 圧力はカーボン粒子とアルミニウムとの界面結合に重要な効果をもたらすことを報告

している。これらを考え合わせると高い圧力は表面が粗い繊維や又は溶湯と濡れにくい繊維の場合, 効果があると思われる。

図13は直接スクイズキャスト法によってシリコンカーバイドウィスカーと6061アルミニウム合金のFRMを作り, その引張強さに及ぼす最終加圧圧力の影響を調べた

図11 とくに高圧を用いて作製された35%SiC_{pcs}/Al-4%Cu 複合材の引張強さ

図13 直接スクイズキャストによって製造された20%SiC_w/6061-T6 複合材の引張強さに及ぼす最終加圧圧力の影響

図12 高圧を用いて作製された35%SiC_{pcs}/Al-4%Cu 複合材のスクイズキャスト組織。とくに高圧をかけても通常スクイズキャスト組織(a)と変化がないことを示す。

図14 真空法と従来法によって製造された直接スクイズキャスト材 (30%SiC_w/Al) の曲げ強さとその分布の比較

ものである²⁷⁾。直接スクイズキャスト法では間接スクイズキャスト法より低い圧力で健全な FRM が製造されたと考えてよい。これはランナーがないために、圧力伝播が効率よく行われるためである。また、同図より100 MPaの有効圧力が作用しておれば、SiC_w/6061はブリスターを生じずに T6 熱処理が安全に行われたことを示している。

6.4 真空スクイズキャスト

繊維成形体中の空気は、スクイズキャスト過程で、まきこみなどの乱れがなく溶湯と置換されなければならない。通常のスクイズキャストでは、このことが完全に達成されたかどうか疑わしい。そこで、あらかじめ繊維成形体内の空気を排気した真空スクイズキャスト³²⁾を用いて、シリコンカーバイドウィスカー強化アルミニウム合金を製造し、強度やそのばらつきを通常スクイズキャストによるものと比較した。図14はその結果をワイブル確率紙上にプロットしたものである。これによると、真空スクイズキャストによって6%ほど強度が改善され、そのばらつきが小さくなることがわかった。これは事前の排気によって、浸透過程に形成されるであろうキャビティの数と寸法が減じるためである。したがって、真空スクイズキャスト法は、形状が複雑で、高信頼性を要求する FRM 製品に応用することが推奨される。

7. 結 言

本稿では FRM のスクイズキャスト過程における各種

因子について述べた。今やスクイズキャスト法は FRM 機械部品製造の最有力な手法になった。このプロセスについての基本的な製造指針はほぼ確立されたと思う。しかしながら、所望の部位に所望の方向に所望の量の繊維を配向する技術がないため最適設計思想が適用できない、また高力アルミニウム合金やマグネシウム合金を母材としてスクイズキャスト FRM を作ると複合弱化³³⁾したり、あるいは期待されるほど強度が出ないなど、解決すべき問題は多い。FRM が航空・宇宙へ応用されるばかりではなく、自動車など一般機械部品へ応用されることを切に望むが、そのためには今の無機繊維が高価であることこそす前に、スクイズキャスト FRM の信頼性に対する科学的理解を深め、その結果次には信頼性を向上させなければならぬ。このプロセスについて、さらに多くの研究と研究者間の協力が必要である。

参 考 文 献

- 1) T. Nisimura, A. Arai, M. Morita, H. Kashiwaya, K. Kiryu and T. Miyamoto: ECCM-1, Sep. 1985, Bordeaux, France, 628.
- 2) J. Dinwoodie: SAE Tech. Pap. Ser., No. SAE-870437 (1987), 1.
- 3) R. R. Bowles, D. L. Mancini and M. W. Toaz: *Manf. Eng.*, **98-5** (1987), 61.
- 4) F. K. Chi, R. D. Austen, R. D. Maier and T. W. Krucek: SAE Tech. Pap. Ser., No. SAE-870440 (1987), 1.
- 5) 菅沼徹哉, 田中淳夫: 日本機械学会誌, **90** (1987),

- 1289.
- 6) 米国特許 No. 4, 4587, 177 (May 6, 1986), *Light Met. Age*, **44**, No. 11-12, (1986), 29.
- 7) M. A. Howes: *J. Met.*, **38** (1986), 28.
- 8) K. Marsden: *J. Met.*, **37** (1985), 59.
- 9) M. W. Toaz: *Adv. Compos.*, (1985), 231.
- 10) 有田正司, 奥山敏樹, 細村建夫: 機械の研究, 39 (1987), 346.
- 11) F. Folgar, W. H. Krueger and J. G. Goree: *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **5** (1984), 643.
- 12) 正木彰樹: 日本ガスタービン学会誌, **14**-55 (1986), 14.
- 13) 中村敏則, 西山幸夫: 鉄と鋼, **73**-5 (1987) S662.
- 14) N. E. Doweling and R. B. Brown: PB Rep., No. PB-86-242252 (1986), 1.
- 15) Technologies: *Mod. Met.*, **43**-7 (1987), 160.
- 16) 金谷文善, 松井繁明, 熱田稔雄, 山田 猛: 川崎重工技報, **90** (1985-10) 1.
- 17) D. E. Bowles and D. R. Tenney: *SAMPE Tech. Conf.*, **18** (1986), 414.
- 18) 五味福夫, 宮本紀明: 日本鋳物協会第109回全国講演大会概要集, (1986), 72.
- 19) 国谷啓一, 荒川英夫, 阪上 正, 御法川斉, 明山健二, 坂本達事: 日本金属学会誌, **50** (1986), 583.
- 20) E. G. Wolff and R. J. Hill: AFML-TR-67-140 (1967) June, 1.
- 21) R. C. Rossi, R. T. Pepper and W. C. Riley: Presented at the 72nd Annual Meeting of American Ceramic Society, Philadelphia, May, 6 (1979).
- 22) B. W. Howlett, D. C. Minty and C. F. Old: International Conference on Carbon Fibers, their Composites and Applications, London, Feb. 2-7 (1971), Paper No. 14, 1.
- 23) K. F. Sahn: *Verbundwerkst. Tag.*, **1** (1974), 269.
- 24) 公開特許公報52-60222, 繊維強化金属の製造法 (1977-5公開)
- 25) 鈴木鎮夫, 白柳 格, 松原弘美, 井沢紀男: 軽金属学会第52回春期大会講演概要, (1977), 26.
- 26) 福永秀春, 合田公一: 日本金属学会誌, **49** (1985), 78.
- 27) Y. Fujita and H. Fukumoto: Proc. 2nd SAMPE, Japan (1987).
- 28) 砥綿真一, 生野元, 山田統一: 日本金属学会誌, **51** (1987), 248.
- 29) A. Mortensen and J. A. Cornie: *Metal. Trans. A*, **18** (1987), 1160.
- 30) 福永秀春, 栗山稔: 日本機械学会論文集, C, **47** (1981), 1207.
- 31) B. K. Prasad, T. K. Dan and P. K. Rohatgi: *J. Mater. Sci. Lett.*, **6** (1987), 1076.
- 32) H. Fukunaga, K. Goda, Y. Kurita and Y. Fujita: ICCM-6, **2** (1987), 2362.
- 33) 福永秀春: 機械の研究, **39** (1987), 908.