

© 1989 ISIJ

解 説

セラミックス whisker および短繊維強化
アルミニウム合金複合材料

藤 田 米 章*

Fabrication and Characteristics of Ceramic Whisker and Short Fiber
Reinforced Aluminum Alloys

Yoneaki FUJITA

1. はじめに

金属基複合材料は、その強化材の形態により、長繊維強化型、whisker や短繊維強化型、および粒子強化型に分類できる。このなかで、whisker や短繊維強化複合材料の特性は、おおまかに言えば、長繊維強化複合材料と粒子強化複合材料の中間的なものといえるが、

- 1) 強化材価格が長繊維に比べ安価である。
 - 2) 複合化プロセスとして、溶湯鍛造法や粉末冶金法など多量生産に適した手法が利用できる。
 - 3) さらに通常の金属材料と同様な塑性加工が適用できる。
- など工業的に有利な点が多い。そのため長繊維強化複合材料が宇宙航空分野を中心として用途開発がなされているのに対し、whisker や短繊維強化複合材料は一般の自動車、電機部品などで、比強度、比弾性、また耐摩耗性、低熱膨張性などが要求される部品への適用可能性が

高いと期待され、実用化へ向けての研究開発が活発に行われている状況にある^{1)~6)}。

筆者らもまた、このような材料の実用化に向けて開発研究を進めているが^{7)~9)}、ここでは SiC whisker や Al₂O₃-SiO₂ 短繊維で強化したアルミニウム合金複合材料を中心として、その製造方法と特性について紹介するとともに、特に複合化や塑性加工など製造技術上の課題、および複合材の材料設計上の課題と将来の展望について述べる。

2. セラミックス whisker および短繊維

市販されている代表的なセラミックス whisker および短繊維の種類とその特性を表1に示す。セラミックス whisker としては、SiC のほか Si₃N₄ や C, K₂O · 6TiO₂ などの whisker があり、短繊維としては、Al₂O₃-SiO₂ 繊維が多い。whisker の寸法は、いずれも直径 0.1~1 μm、長さ 5~200 μm 程度であるが、

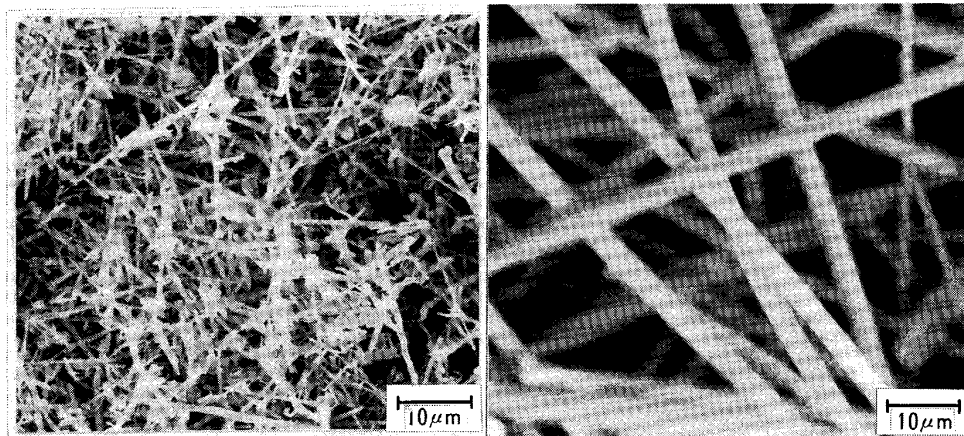
表 1 代表的なセラミックス whisker、短繊維とその特性

種 類	寸 法		密 度 (g/cm ³)	強 度 (GPa)	弾性率 (GPa)	製 造 メ ー カ ー	備 考
	直径(μm)	長さ(μm)					
whisker β-SiC α-SiC α-Si ₃ N ₄ C K ₂ O·6TiO ₂	0.1~1 平均0.6 0.1~0.6 0.1~1.0 0.2~0.5	10~300 10~80 20~200 10~200 10~20	3.18~3.2 3.2 3.18 2.25 <3.3	3~20 13.7 7~21 >7	400~700 378 700~800 >274	東海カーボン、タテホ化学工業など アーク・ケミカル社 タテホ化学工業 日機装 大塚化学、チタン工業など	
短繊維 δ-Al ₂ O ₃ α-Al ₂ O ₃ 非晶質 アルミナ・シリカ	3 3 1.8~3		3.3~3.5 3.3~3.6 2.5~2.7	1.96 1.08 0.98~1.96	297 120	ICI, イソライト工業, 三菱化成など 電気化学工業, ニチアスなど	Al ₂ O ₃ : 96~97% · SiO ₂ : 3~4% Al ₂ O ₃ : 96~95% · SiO ₂ : 5~20% Al ₂ O ₃ : 48~49% · SiO ₂ : 5~51%

平成元年1月26日受付 (Received Jan. 26, 1989)

* NKK 中央研究所第一研究部加工チーム主査 工博 (Metals Department, Advanced Technology Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

Key words: metal matrix composite; ceramic whisker reinforced aluminum alloy; ceramic short-fiber reinforced aluminum alloy; squeeze casting; powder metallurgy; extrusion; rolling; physical property; mechanical property; wear resistance.



SiC ウイスキー $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 短繊維
 写真 1 SiC ウイスキーおよび $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 短繊維のSEM 写真

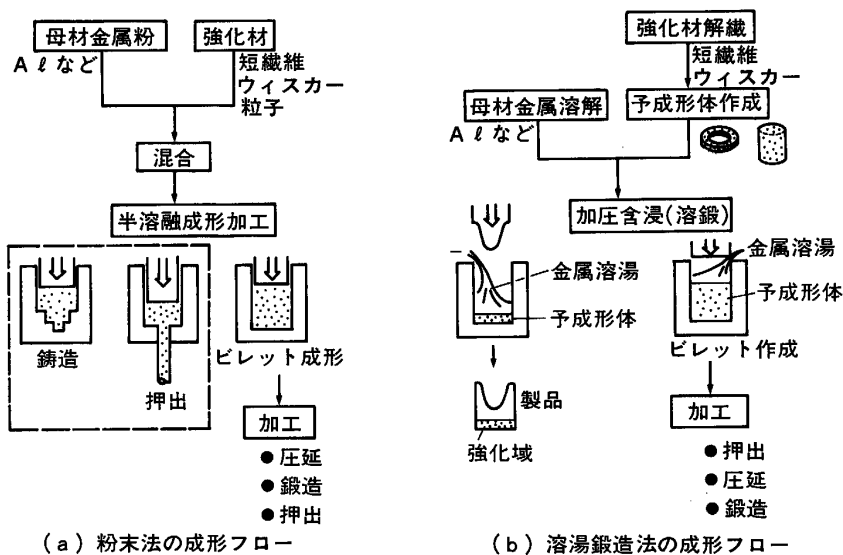


図 1 粉末法および溶湯鍛造法によるセラミックスウイスキーおよび短繊維強化複合材料の成形フロー

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 短繊維の直径は $\sim 3\ \mu\text{m}$ とやや太く、長さも mm オーダーと比較的長い。また引張強さ、弾性率などの機械的特性は、ウイスキーの方がやや高いようである。写真 1 に、SiC ウイスキーおよび $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 短繊維の SEM 写真を示す。SiC ウイスキーは直線的で細かく短く、互いにかみ合っているように見えるが、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 短繊維はやや太く長く、かつ互いのかみ合いが少ないようである。

3. 製造方法

セラミックスウイスキーおよび短繊維強化複合材の代表的な製造方法としては、図 1 に示す(a)粉末法、(b)溶湯鍛造法の二つがある。粉末法は、あらかじめ母材となるアルミニウム合金粉末と強化材であるウイスキーまたは短繊維を均一混合し、それをホットプレスまたは

HIP などにより固化成形する方法である。このときの技術的ポイントとしては、ウイスキーまたは短繊維と母材金属粉末をいかに均一に分散混合するかという点と、固化時の温度、圧力、時間などの条件が重要である。

一方、溶湯鍛造法は、あらかじめウイスキーまたは短繊維でプリフォームを作成、それを予熱し鑄型にセットしたところへ母材金属の溶湯を注ぎ、ポンチにより加圧しプリフォームの空隙に金属を含浸させる方法である。このとき、均質なプリフォームの作成、金属を含浸させる際のプリフォームおよび溶湯金属の温度や含浸圧、含浸温度などの成形条件、さらに溶湯とウイスキーや短繊維の反応制御が技術的なポイントとなる。

粉末法、溶湯鍛造法いずれの複合法によっても、複合材中のウイスキーまたは短繊維の分散状態や、得られる複合材の特性は、公表されている値をみるとほとんど

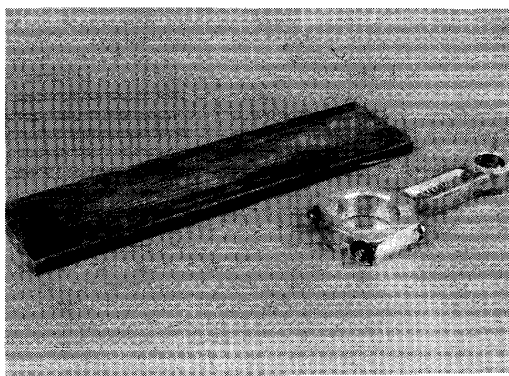


写真2 SiC ウィスカー強化 Al 合金複合材料の押しおよび鍛造品

変わらない¹⁰⁾。

先にも述べたように、ウィスカーまたは短繊維強化複合材は、長繊維強化複合材と違って、塑性加工できるのが大きな特徴であり、圧延、押し出し、鍛造品の例が報告されている¹¹⁾。写真2に、押し出しおよび鍛造により試作した例を示す。

ウィスカーや短繊維強化複合材を塑性加工すると、写真3に示すように、内部の強化材が加工時の流線にそって配向する。このときウィスカーの配向程度を調査すると図2に示すように押し出し材が最も配向程度が高く、圧延材は板厚方向にみると配向するものの圧延面からみるとほとんど配向していないことがわかる。後に紹介するが、この配向によって材料の異方向性が生じ、配向方向には、強度や弾性率などが一層向上することとなる。

4. ウィスカーおよび短繊維強化アルミニウム合金の特性

セラミックスウィスカーや短繊維は、一般に金属に比べ耐熱性があり、高い強度、剛性を持つとともに硬くて耐摩耗性に優れる反面、延靱性に劣るという機械的特性を持つ。また、物理的性質の面からみると、金属に比べ線膨張率が小さく熱伝導率や導電率に劣る傾向を有する。そのため、これらセラミックスウィスカーや短繊維を複合化したアルミニウム合金は、アルミニウム合金の特性に上記の諸特性が複合されたものとなる。表2は、SiC ウィスカーを20%の体積率で複合した6061アルミニウム合金の物理的および機械的特性を示したものである。母材のアルミニウム合金に比べ物理的特性としては、比熱と密度が大きくなる一方、熱伝導率、熱拡散率、線膨張率、導電率などが下がる。一方、機械的性質では、破断強度、0.2%耐力、縦弾性係数、硬度、抗析力、疲労強度が上昇する反面、破断伸び、シャルピー衝撃値、破壊靱性値などが減少している。また、耐摩耗性はピンオンディスク方式によりピンを複合材とし、無潤滑で試験した結果であるが、複合材の摩耗量は母材の約1/2

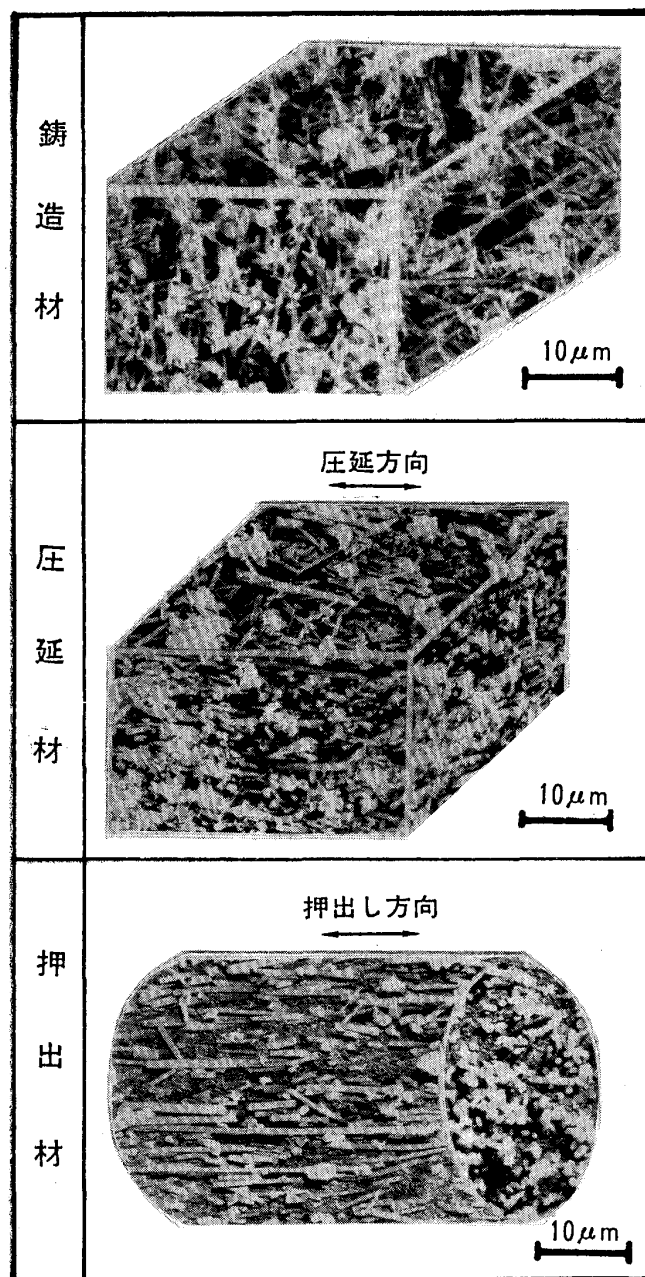


写真3 SiC ウィスカー強化アルミニウム合金の鋳造、圧延、押し出し材におけるウィスカー配向(写真は母材のアルミニウム合金をNaOH水溶液でディープエッチしたものをSEM撮影)

に減少している。

このような傾向から、ウィスカー短繊維強化アルミニウム合金複合材としては、200°C程度までの温度範囲で比強度、比剛性が要求される部品、部材、あるいは、温度変化が加わっても寸法の温度安定性が要求される部材、さらには、耐摩耗性の要求される部材などへの適用が有望と考えられる。

以下に得られる物理的特性および機械的特性のうち線膨張率、強度、弾性率および耐摩耗性についてもう少し

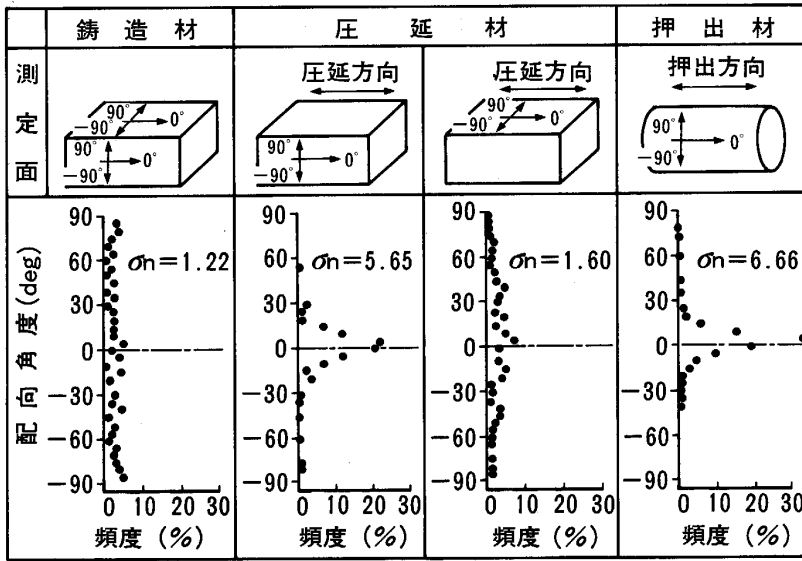


図 2 SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の casting, 圧延, 押し出し材のウイスキー配向状況

表 2 SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の物理的および機械的性質

特性		温度	6061 Al 母材	20% SiC _w /6061 Al
物理的性質	比熱 (J/g°C)	R. T. 200°C 400°C	0.051 0.053 0.055	0.063 0.072 0.076
	熱伝導率 (W/m°C)	R. T. 200°C 400°C	0.96×10^{-3} 0.93×10^{-3} 0.93×10^{-3}	0.84×10^{-3} 0.86×10^{-3} 0.84×10^{-3}
	熱拡散率 (m ² /s)	R. T. 200°C 400°C	6.7×10^3 6.7×10^3 6.3×10^3	5.3×10^3 4.9×10^3 4.4×10^3
	線膨張率 (10 ⁻⁶ /°C)	R. T. 200°C	24.9 27.0	13.0 19.0
	導電率 (標準銅 100%)	R. T.	45.6	29.8
	密度 (g/cm ³)	R. T.	2.7	2.8
機械的性質	引張強度 (MPa)	R. T. 200°C 400°C	325 252 41	500(563) 390(481) 80(67)
	0.2% 耐力 (MPa)	R. T. 200°C 400°C	300 231 33	430(452) 290(317) 51(51)
	伸び (%)	R. T. 200°C 400°C	29.0 32.7 56.9	1.4(5.3) 2.5(8.3) 7.5(28.0)
	縦弾性率 (MPa)	R. T. 200°C	7.0×10^4 6.2×10^4	10.5×10^4 9.8×10^4
	シャルピー衝撃値 (J/m ²)	R. T.	4.0×10^{-5}	0.50×10^{-5}
	破壊靱性値 K _{1c} (MPa·√m)	R. T.	219	161
	硬度 (HV) (HrB)	R. T.	110 61	170 86.5
	抗折力 (MPa)	R. T. 200°C	550 430	880 570
	疲労強度 [MPa(<i>n</i> =10 ⁷)]	R. T. 200°C	170 150	220 180
	摩耗量 (面圧=5 kg/cm ²) [mm(摺動距離=5 km)]	R. T.	0.95	0.48

注: () 内は押し出し材

詳しく述べる。

4.1 線膨張率

十分なアスペクト比を持ち、配向した強化材を含む複合材料の線膨張率は、強化材の体積率や母材金属と強化材の線膨張率および弾性率の関数として(1)式のようになる¹²⁾。

$$\alpha_c = \frac{(1 - V_f) \cdot \alpha_m \cdot E_m + V_f \cdot \alpha_f \cdot E_f}{(1 - V_f) \cdot E_m + V_f \cdot E_f} \quad \dots \quad (1)$$

α_c : 複合材の線膨張率

α_m : 母材金属の線膨張率

α_f : 強化材の線膨張率

E_m : 母材金属の弾性率

E_f : 強化材の弾性率

V_f : 強化材の体積率

この式からわかるように、複合材の線膨張率は、弾性率が高く、線膨張率の小さい強化材を複合化することにより、母材に比べ低下することとなる。

図 3 は、強化材体積率の線膨張率に及ぼす影響を、SiC ウイスキーおよび Al₂O₃-SiO₂ 短繊維で強化した AC8A 合金の場合について示したものである。実験点は、ウイスキーおよび短繊維がランダムに分散し配向していない状態のものであるが、強化材体積率の増加にとともに、線膨張率が明瞭に低下していることがわかる。また、同一の体積率では SiC ウイスキー強化複合材の方が線膨張率が小さくなっているが、これは SiC ウイスキーの方が Al₂O₃-SiO₂ 短繊維に比べ弾性率が高く線膨張率が小さいためと考えられる。図 4 は、SiC ウイスキーを複合化したアルミニウム合金を押し出し比 8 で押し出し、押し出し方向と押し出し垂直方向の線膨張率を測定した例であるが、ウイスキー配向の影響が線膨張率に大きな影響を与えることがわかる。

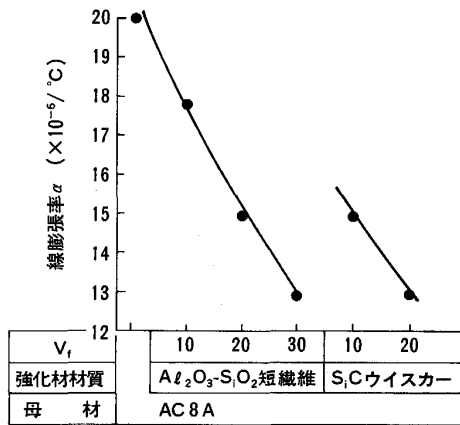


図3 強化材体積率の複合材線膨張率に及ぼす影響

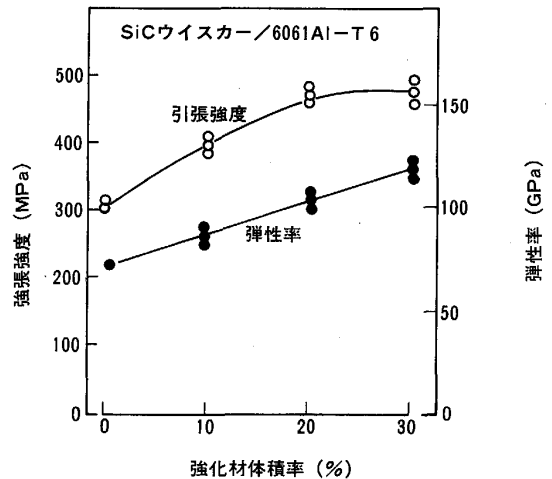


図5 SiC ウィスカー強化アルミニウム合金の強度と弾性率に及ぼす強化材体積率の影響

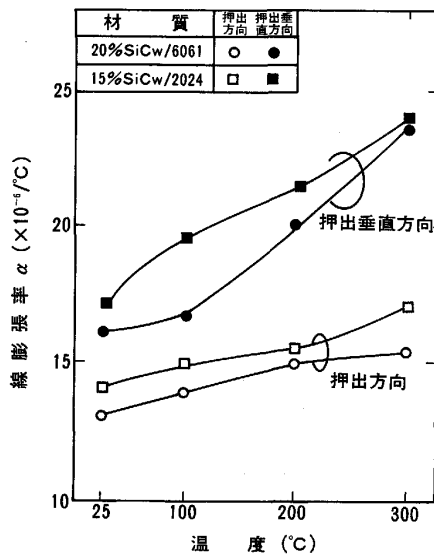


図4 SiC ウィスカー強化アルミニウム合金の線膨張率

このようにウィスカーや短繊維を複合化することによって母材金属の線膨張率をかなり広い範囲でコントロールすることができる。ちなみに、一般産業機械などには鉄鋼材料が多く使用されているが、これをアルミニウム合金で代替し、その軽量化をはかろうとすると、アルミニウム合金の熱膨張が問題となることが多い。ウィスカーや短繊維強化アルミニウム合金の低膨張率を生かした用途分野が今後期待される。

4.2 強度および弾性率

強度および弾性率は、金属基複合材料の諸特性のうち、その開発の当初から最も注目されてきたものであり、ウィスカーや短繊維強化アルミニウム合金複合材についても多くの報告がなされている。

強度および弾性率は、式(2)、(3)に示されるように、母材と強化材の強度や弾性率と、強化材の体積率や配向によって決定される¹³⁾。

$$\delta_c = \beta \cdot V_f \cdot \delta_f + (1 - V_f) \cdot \delta_m \dots\dots\dots (2)$$

$$E_c = \beta \cdot V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \dots\dots\dots (3)$$

δ_c : 複合材の強度

δ_f : 強化材の強度

δ_m : 金属母材の強度

E_c : 複合材の弾性率

E_f : 強化材の弾性率

E_m : 金属母材の弾性率

β : 強化材の配向に関する係数

(一次元配向の場合 $\beta = 1$, ランダム配向の場合 $\beta = 3/8$)

図5には、SiC ウィスカー強化アルミニウム合金において、強化材体積率の強度および弾性率に与える影響について示す。弾性率は、強化材の体積率に従って直線的に増加するものの、強度は体積率が30%を超えともはや増加せず、体積率の増加に応じて直線的に増加する長繊維複合材と異なった傾向を示す。

図6には、圧延や押し出しなどの塑性加工を加えた材料の強度変化を示す。加工による繊維の配向が最も著しい押し出し材において配向方向の強度が最も向上しており、若干の配向がみられる圧延材においても鋳造材に比べ強度が向上していることがわかる。ただし、配向方向と垂直方向の強度は、鋳造ままの材料に比べ低下するが、その度合いは長繊維強化材料に比べて少ない。

図7に SiC ウィスカー強化アルミニウム合金の高温引張試験結果を示す。引張強度、弾性率は約200°C付近までの範囲で母材の室温での値を上回り、複合化により耐熱性が大きく向上していることがわかる。しかし、長繊維強化複合材料と異なり、200°C付近以上になると軟化する傾向を示す。これは、この材料の耐熱性の限界を示すものであるが、一方その温度域で伸びが大きくなるため、熱間での塑性加工が可能になるというメリット

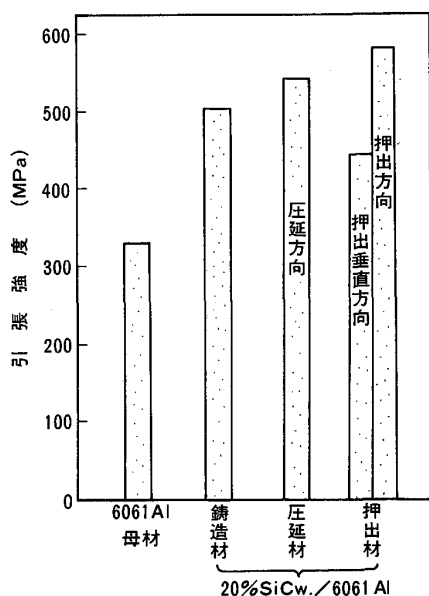


図 6 SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の塑性加工による強度変化 (T6 処理材)

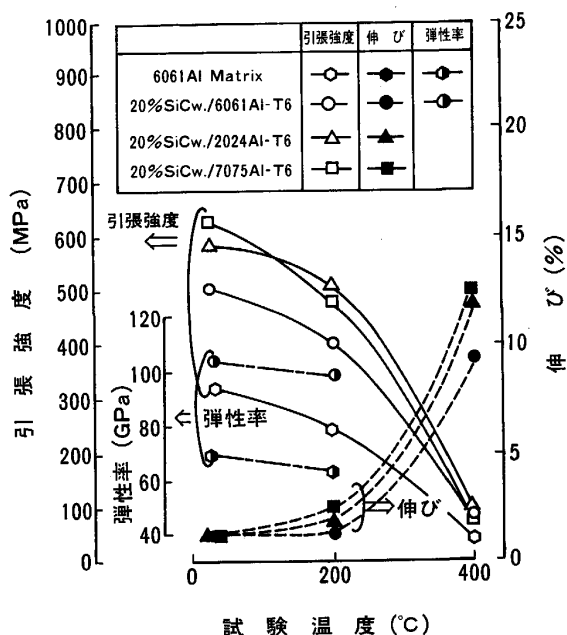


図 7 SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の高温引張特性

をもたらすこととなっている。

図 8 には SiC ウイスキー強化アルミニウム合金押し材の疲労試験結果の例を示す。強度と同様にウイスキー配向の影響が出ているものの、特に押し出し方向の疲労強度上昇が大きくなっている。なお、SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の比強度、比弾性を、チタン合金、アルミニウム合金などの競合材料と比較して表 3 に示す。比強度は、母材金属として、強度の高いアルミニウム合金 (例えば 2024 Al) を選ぶことによりほぼ Ti-6 Al-4 V 合金に匹敵するものが得られ、また比弾性は、Al-Li 合金をもしのぐ値が得られることがわかる。

4.3 耐摩耗性

硬度の高いセラミックスのウイスキーや短繊維を強化材として複合化させるため耐摩耗性が向上することが期待される。図 9 は、アムスラー摩耗試験機により、相手材を鋳鉄とし、潤滑状態で摩耗試験した結果を示したものである。SiC ウイスキー、 $Al_2O_3-SiO_2$ 短繊維で強化した複合材は、強化材の種類によらず強化材体積率の増加とともに摩耗量が減少し、体積率 20% ではほぼ鋳鉄レベルの耐摩耗性を得られることがわかる。ただし、耐摩耗性は、相手材、相対すべり速度、面圧などの他、潤滑条件によっても大きく変動することがあるため、使用条件によっては注意する必要がある。

なお、耐摩耗性が要求される用途には、相手材の摩耗

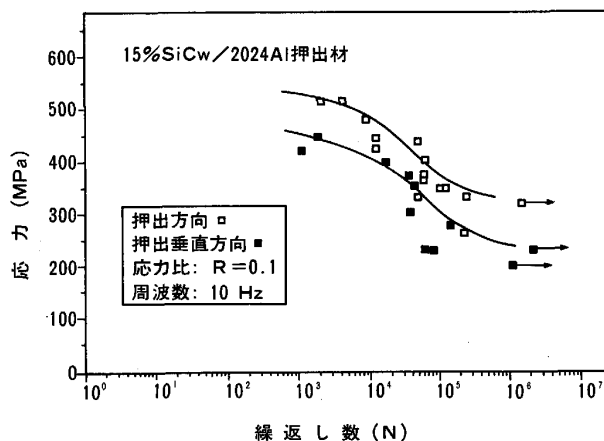
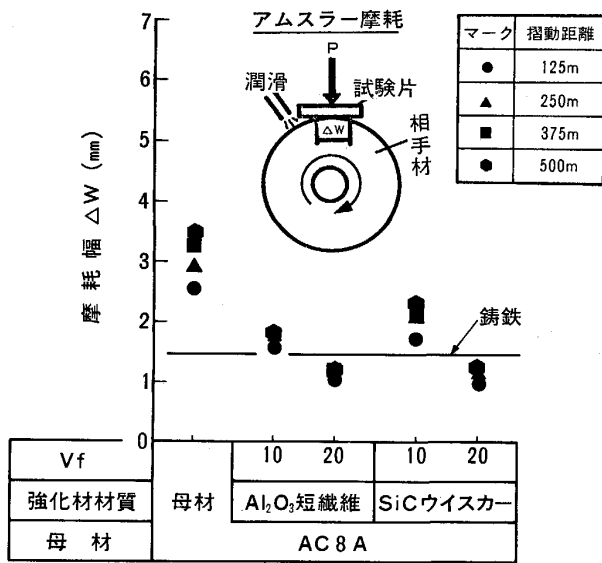


図 8 SiC ウイスキー強化アルミニウム合金押し材の疲労特性

表 3 SiC ウイスキー強化アルミニウム合金および競合材料の特性比較

	20% SiCw./6061Al	20% SiCw./2024Al	Al-Li	6-4Ti	C. P. Ti	6061Al
引張強度 (MPa) (比強度 $\times 10^3 m$)	560 (20)	700 (25)	530 (21)	1100 (25)	550 (12.5)	320 (12)
剛性 (GPa) (比剛性 $\times 10^6 m$)	110 (3.1)	110 (3.9)	80 (3.1)	114 (2.6)	108 (2.4)	70 (2.6)
伸び (%)	5.3	5.0	6	16	27	29
密度 (g/cm ³)	2.8	2.8	2.55	4.4	4.5	2.7



試験片形状: $3t \times 10w \times 16l$ 相手材材質: 共晶鋳鉄 (HRC 50)
 相手材形状: $10w \times \phi 40$ 摺動速度: $2m/s (100 r.p.m.)$ 潤滑: 冷凍機油
 測定方法: 摩耗幅 (ΔW) 摺動距離: 125, 250, 375, 500 m

図 9 アムスラー摩耗試験による SiC ウイスキーおよび Al₂O₃ 短繊維強化アルミニウム合金の摩耗幅

も極力抑制することを要求される場合が多い。そのような要求に答えるものとしては、K₂O·6TiO₂ ウイスキーを Al₂O₃ 短繊維と一緒に複合化させることにより、相手材も含めた耐摩耗性の向上がはかれるという興味深い報告³⁾もある。

5. 問題点と課題

セラミックウイスキーおよび短繊維強化アルミニウム合金は、先に述べたように優れた特性をもつものであるが、現在までのところ、実用化された部品は少ない。その理由としては、強化材の価格が長繊維に比べれば安いというもののまだ高いと言うことの他に、大量生産方式としての製造加工技術が確立されているとは言い難いこと、および複合材の特性が必ずしも設計者のニーズをバランス良く満足していないこと、によるところも大きいと考えられる。また、ユーザーである機械設計者が利用できるデータベースが少ないことも挙げられよう。

そこで、以下に複合材の製造加工技術および材料設計上の問題点と課題について述べてみたい。

5.1 製造加工技術の課題

5.1.1 複合化

先にも述べたように、ウイスキーや短繊維強化複合材の主な製造方法としては、粉末法と溶湯鍛造法がある。

粉末法の技術的課題としては、まずウイスキー、短繊維と金属粉末の均一混合および効率的な固化成形技術の確立が挙げられる。均一混合を達成するには、ウイス

カー、短繊維のからまりを解きほぐし、母材粉末と均一に混合することがポイントとなる。しかし、そのためには微細な金属粉末を準備しなければならず⁶⁾、また混合にも手間がかかり、コストは高いものとなる。

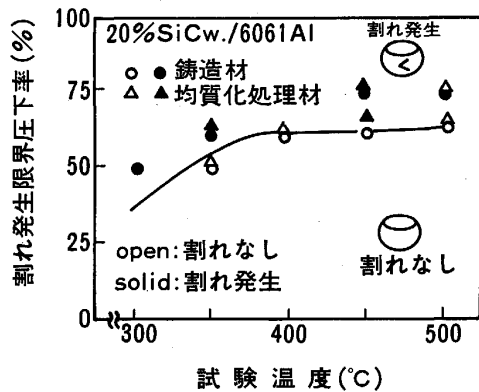
また、固化にあたっては、HIP を使った成形作業が最も確実とされているが、現状では、HIP 作業は時間もかかり、その製品は高価格なものとならざるを得ない。これらを解決するためには、強化材と母材金属を複合化した複合粉製造技術の開発や混合粉末を直接押し出したり鍛造したりして製品とする新しい成形加工技術の開発が重要と考えられる。

溶湯鍛造法における今後の技術課題は、複雑形状のプリフォーム成形技術、溶湯時の母材溶湯とウイスキーや短繊維の反応抑制、複合化時に発生すると考えられるプリフォームの変形や割れの抑制などである。現状では、強化プリフォームの形状は、リング状、円柱、矩形など単純なものが多いが、今後用途開発の拡大をはかるには多様な形状のプリフォームを成形する技術の確立が望まれる。また、均質な体積率を持つプリフォームを作ると同時に、他方、プリフォームの内部で体積率を変化させたような傾斜特性を持つプリフォーム成形技術も今後の課題であろう。

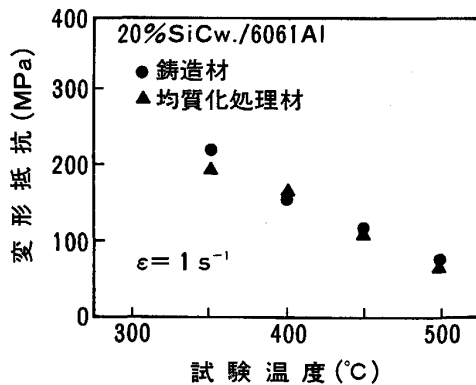
強化材と母材金属の反応については、カーボン繊維と Al 溶湯の反応がよく知られており、それを抑制するため高融点金属や TiC, SiC などのセラミックスをコーティングすることが試みられてきた¹⁴⁾。しかし、SiC ウイスキーや Al₂O₃-SiO₂ 短繊維でも、母材となるアルミニウム合金との反応が認められ、その安価な対応策が今後の課題と考えられる。

溶湯をプリフォーム中に含浸させる際に生じると考えられるプリフォームの変形や割れは、プリフォームの寸法が大きくなると生じやすい。この傾向は強化材の種類により多少異なり、SiC ウイスキーと Al₂O₃-SiO₂ 短繊維を比べると、SiC ウイスキープリフォームにおいて変形や、割れ発生が多く、Al₂O₃-SiO₂ 短繊維で少ない。この理由としては SiC ウイスキーの場合 Al₂O₃-SiO₂ 短繊維に比べ直径が約 1/30~1/3 と細いため、同じ体積率とした場合でも繊維間隔が狭くなり、溶湯の含浸に大きな力を必要としプリフォームに変形を生じやすくなっているためと考えられる。また、繊維長が短いためプリフォームの保形性が弱く、含浸時の高い圧力とあいまってプリフォームが割れやすくなっているものと考えられる。そのため、SiC ウイスキーに Al₂O₃-SiO₂ 短繊維をハイブリッド強化したプリフォームなども成形時の割れや変形を抑制するのに有効と考えられる。

成形時のプリフォームの変形を防止するには、溶湯が入りやすいように、プリフォームを予熱したり、型を予熱しておくことも必要であり、また含浸スピードも問題となる。今後、このような制御が可能な性能の良い金属



(a) 割れ発生限界圧下率



(b) 変形抵抗

図 10 SiC ウイスキー強化 6061 Al 合金の円柱圧縮試験による割れ発生限界圧下率と変形抵抗

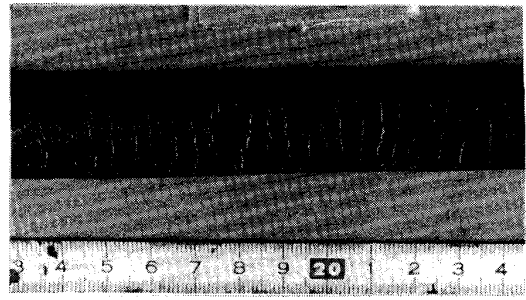
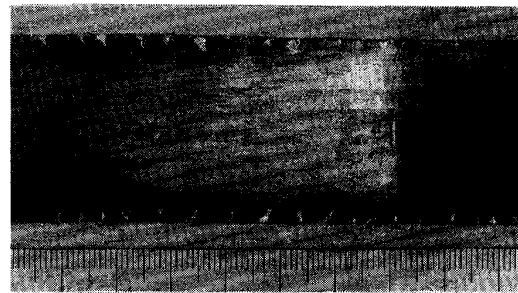
複合材専用成形機の設計製作も重要な課題である。

5.1.2 塑性加工

ウイスキーや短繊維強化アルミニウム合金の大きな特徴は、長繊維強化複合材料と異なり、通常の金属材料と同様に塑性加工できることであるが、その加工方法、条件についてはほとんど明らかにされていない。

図 10 に、円柱圧縮試験による、SiC ウイスキー強化 6061 Al 合金の割れ発生限界圧下率、および熱間変形抵抗に関する実験結果例⁶⁾を示す。割れ発生限界圧下率は試験温度の上昇とともに大きくなり、400°C 以上では 60% の圧下率でも割れが発生せず、この温度での塑性加工の可能性を示している。しかしながら、一般に塑性加工の対象となっている金属材料は、約 80% 以下の圧下率では割れが発生しないのが通常である。そのため、複合材を加工して健全な製品を得るためには当然ながら加工法の工夫が必要となる。

写真 4 に、 $Al_2O_3-SiO_2$ の短繊維強化アルミニウム合金の押し出し材および SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の圧延材に発生した欠陥の例を示す。押し出し材に発生する割れは、形態的にはアルミニウム合金を高温で押し出した際に発生するティアリングと良く似ている。現

(a) 熱間押し出し材 ($Al_2O_3-SiO_2$ 短繊維強化アルミニウム合金)

(b) 熱間圧延材 (SiC ウイスキー強化アルミニウム合金)

写真 4 ウイスキーおよび短繊維強化アルミニウム合金の押し出し材および圧延材に発生する欠陥例

在までのところ、SiC ウイスキー強化アルミニウム合金では押し出し温度、スピード、潤滑やダイス形状などの工夫により、単純な形状のものでは、ほとんど割れを発生させずに押し出し可能となっている。しかし、 $Al_2O_3-SiO_2$ 短繊維強化アルミニウム合金では、やや割れが発生しやすく、より高温での押し出し¹⁵⁾や加工性の良い純アルミニウムなどで被覆して押し出すなどの工夫が必要となるようである。

一方、圧延材に発生する割れは、難加工性の金属材料の圧延時に発生する割れの形態と同様で、写真のように板縁部に発生しやすい。この割れの防止には、途中パス間での焼鈍、圧延時の温度低下の防止、圧延時の側圧付加などの工夫が有効である。

また、鍛造においても割れが発生しないように、自由面の少なくなるような鍛造方案および潤滑剤の工夫が必要である。

塑性加工時の問題として割れの外に、ウイスキーや短繊維など強化材の損傷が懸念される。SiC ウイスキー強化アルミニウム合金の圧延材および押し出し材についてウイスキーの長さを測定したところ、双方とも平均 5 μm 程度の長さになっており、プリフォーム状態での長さ 16 μm に比べ約 1/3 になっている。また、繊維径が太い $Al_2O_3-SiO_2$ 短繊維の場合にはさらに損傷が著しいようである。このようなウイスキーや短繊維の損傷を少なくするためにも、加工方法条件などの工夫が今後さ

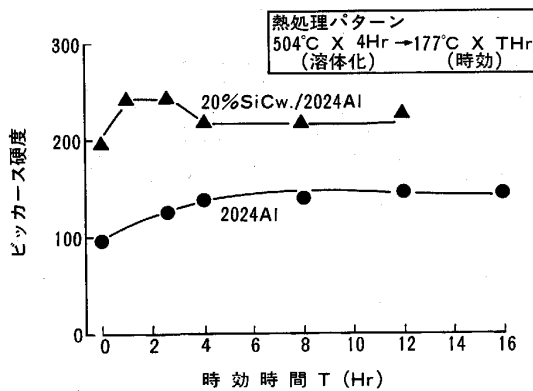


図 11 SiC ウィスカー強化 2024Al 合金を溶体化時効したときの時効時間と硬度変化

らに必要と考えられる。

5.1.3 切削, 切断, 溶接

金属基複合材料を部材や部品として製造する際に, 最終的な加工として, 切断や切削研磨さらに溶接が大きな問題となる。複合材の切断, 切削性は, ちょうど, 母材金属とセラミックスの中間程度となり, 工具等に工夫を要するものの, 必要な加工は可能である¹⁶⁾¹⁷⁾。しかしながら, 今後複合材料を幅広く製品化するには, それに適した安価な切断・切削法の開発が今後にも必要である。また溶接については, 報告もほとんどなく今後の研究課題といえる。

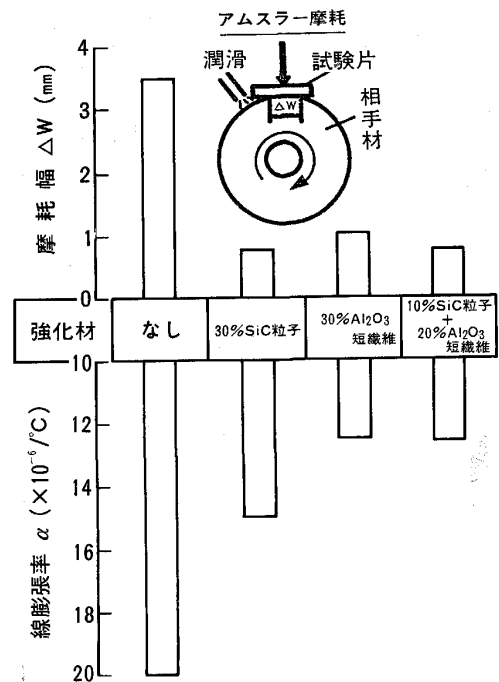
5.1.4 熱処理

アルミニウム合金基の複合材を溶体化時効させた際の時効時間と硬度変化挙動を母材となるアルミニウム合金と比較して図 11 に示す。母材合金に比べ短い時効時間で硬度が飽和する傾向が認められる。このように, 複合材では母材と異なる析出硬化挙動を示すことがあるため, その挙動の解明をはかるとともに, 実用化に際しては十分に注意して, 熱処理条件を決定する必要があると考えられる。

5.2 材料設計上の課題

セラミックスウィスカーや短繊維としては, 表 1 に示すように各種のものが市販され, これらを強化材としたアルミニウム合金も試作され, その材料特性について多くの研究結果が報告されている。

しかしながら, 現在までのところ, それらの報告は, 一種類の強化材を用いた材料系についてのものがほとんどである。一方, 現実に要求される材料としては, 例えば, 低熱膨張率と耐摩耗性, さらに比強度, 比弾性率, また磁性など各種の機械的および物理的特性のいくつかを兼ね備えたもの, あるいはその程度を適切なバランスで保有しているものが求められ, 既に報告されている単一材料による強化だけでは対応しきれないケースが多いと考えられる。本来, 複合材料は, このような多様な材料への要求に応えるべきものであり, 今後は, 現在まで



試験片形状: $3t \times 10w \times 16l$ 相手材材質: 共晶鋳鉄 (HRC 50)
相手材形状: $10w \times \phi 40$ 摺動速度: 2m/s (100 r.p.m.) 潤滑: 冷凍機油 測定方法: 摩耗幅 (ΔW) 摺動距離: 500 m

図 12 ハイブリッド強化による線膨張率および耐摩耗性の制御

の単一の強化材を用いた複合材料でなく, 各種の機能を持った強化材を組み合わせ, ハイブリッド強化した複合材料の設計が大いに必要になると考えられる。

例えば, 先に述べた, Al₂O₃ 短繊維と K₂O \cdot 6 TiO₂ ウィスカーをハイブリッド強化することにより, 耐摩耗性と相手材の損傷を小さくするという相矛盾するような特性を両立させた複合材料を得ることができるとの報告は, ハイブリッド設計の大きな可能性を示すものである。

また, 筆者らの得た結果であるが, 図 12 に, SiC の粒子と Al₂O₃-SiO₂ 短繊維でハイブリッド強化した材料の耐摩耗特性と線膨張率を示す。SiC 粒子と Al₂O₃-SiO₂ 短繊維を独立に強化したものに比べ, 耐摩耗性に優れかつ低熱膨張率の材料が得られているが, これは SiC 粒子による耐摩耗性向上効果と Al₂O₃-SiO₂ 短繊維の熱膨張率低減効果がうまくかみあって相乗効果を発揮したものと考えられる。また, コスト的にも Al₂O₃-SiO₂ 短繊維で強化したものより安価な SiC 粒子をハイブリッド化させることにより有利になっている。

ハイブリッド化は, そのアイデアとしては, 複合材の開発の当初からあるはずのものであるが, ウィスカーや短繊維など強化材の種類も少なかったことから, 実際的にはあまり研究されていなかった。しかし, ようやく各種の強化材が市販されるようになりつつあり, 今後は単一の材料により強化した複合材料の知見をベースにしつつ, それとはやや異なったものになると考えられるハイ

ブリッド強化における複合則，理論を早急に確立してゆくことが必要と考えられ，また，用途開発にも大きな意味を持ってくるものと考えられる。

なお，材料設計にあたっては，ウイスキーや短繊維などの強化材と母材となる金属溶湯の反応性や，濡れの改善なども重要なものとなる。これについては，先に述べたように，より安価な対応策の開発が今後の課題となろう。

6. おわりに

材料に要求される特性は，今後ますます高度，かつ複合的になるものと予想される。ここに述べたウイスキーや短繊維強化アルミニウム合金もそのような要求に応える可能性をもつ材料として，今後とも材料および用途開発を進めてゆきたいと考えている。

文 献

- 1) 吉田敏康: 工業材料, 36 (1988) 11, p. 58
- 2) 大内権一郎, 森本啓之: 工業材料, 36 (1988) 11, p. 41

- 3) 田中健一: 工業材料, 36 (1988) 11, p. 35
- 4) J. L. COOK and W. R. MOHN: Engineered Materials Handbook, COMPOSITES, 1 (1987), p. 896
- 5) M. W. TOAZ: Engineered Materials Handbook, COMPOSITES, 1 (1987), p. 902
- 6) 堂ノ本忠: 自動車技術, 37 (1983), p. 884
- 7) Y. FUJITA and H. FUKUMOTO: Proc. Int. Composite Materials, ICCM VI (1987), 2-340
- 8) 藤田米章, 福本 紀, 鎌田正誠, 高橋和秀: 鉄と鋼, 73 (1987), S665
- 9) 福本 紀, 遠山健一, 浜野秀光, 鈴木孝司, 藤田米章: 鉄と鋼, 73 (1987), S1494
- 10) 1988年版 新素材便覧 (1988), p. 386 [通産省資料調査部会]
- 11) 例えば, ARCO 社カタログ
- 12) R. A. SCHAPERY: J. Compos. Mater, 2 (1968), p. 380
- 13) 藤井太一, 座古 勝: 複合材料の破壊と力学 (1978), p. 13 [実教出版]
- 14) 小原嗣朗: 第 108・109 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1985), p. 25
- 15) 奥宮正洋, 恒川好樹, 新美 格, 尾崎 勤: 軽金属, 37 (1987), p. 285
- 16) 福永秀春: ツールエンジニア (1987) 10, p. 80
- 17) 熊谷信男: 機械と工具 (1988) 12, p. 47