

金属短繊維と複合材料への応用

Short Length Metal Fiber and Its Application to Composite Materials

中川 威雄*
Takeo NAKAGAWA

当所複合材料技術センターで開発されたびびり振動切削法は、金属短繊維の新しい製造法として実用化された。同時にこの繊維は複合材料用基材として利用されることとなり、このところこの繊維を使った新しい複合材料が続々と開発されている。新複合材料は金属、プラスチックからセラミック材料に至る広範囲にわたっており工業用新素材として注目を浴びているものも少なくない。

1. はじめに

最近技術革新の推進に材料技術が重要であることが再認識され、各方面で新材料とその応用の開発が活発に行われている。新材料の中心をなすものは、なんといっても複合材料であり、さまざまな材料の複合化により、新しい機能をもった複合材料が次々と生み出されている。

びびり振動切削による金属短繊維も複合材料用の基材として用いられているが、従来の繊維が長繊維でしかも非金属であるのに対し、短繊維で金属であるため、複合材料の用途もおのずと異なったものとなっている。従来の複合材料が強度向上を目的とするのに対し、この金属短繊維を用いた複合材料は特殊機能を付与した複合材料が考えられており、応用面では興味あるものが多い。本稿ではびびり振動切削による金属短繊維と複合材料への応用例について概説する。

2. 繊維強化複合材料

複合材料は異種の材料を組み合わせることであり、それぞれの材料の特長を生かした形で使用する材料であるが、繊維強化複合材料と粒子分散強化複合材料に大別される。強化繊維に優れたものが登場したこともあり、繊維強化複合材料が最も重要な複合材料として扱われている。使用される繊維基材としては、ガラス、セラミック、炭素等の無機繊維とアラミド繊維などの有機繊維が代表的なものであるが、これらの繊維はいずれも微細な直径をもつ長繊維でその強度が極めて高い特徴をもつ。これらの繊維は母材である高分子、軽合金、セラミックス等の一般工業用材料に混入され補強するのであるが、実際には繊維で補強するというより、繊維を上記材料で固めたといったほうが適切な感じの材料である。すなわち、繊維だけでは形状を保持しえないので、それぞれの用途

に応じて高分子、軽合金、セラミックスを結合材として種々の形状に成形したものである。したがって長繊維により補強された複合材料は、繊維強度そのものを示すことよりその強度も極めて高いものとなる。

一方粒子分散強化複合材料は、このような強化は期待しえないので、引張り強さというより、粒子そのものの硬さを利用しもつぱら耐摩耗性を向上させた材料として利用されている。補強繊維が短繊維の場合は、繊維補強とはいうものの補強効果は急激に失われ粒子分散複合材料の特性に近づく。いわば、繊維強化と粒子強化の中間の性質を示す複合材料といえよう。

3. 金属繊維とその製造法

複合材料用繊維として主に使われるのは、無機と有機材料の非金属繊維であり、これまで金属繊維が使用される例はほとんどなかった。これは非金属が繊維化することにより極端な強度上昇を示し、金属以上の強度をもつうえ、比較的軽量で複合材料用基材として優れた特性をもっているためである。一方金属繊維を複合材料強化用と考えた場合、元来が高強度材とはいえ繊維化することによる強度上昇はほとんど期待できず、また重量の点でも重いものが多く複合材料に適しているとはいえない。さらに金属材料の繊維化は、非金属材料に比べて技術的に困難な面が多く、繊維品質や価格の点でも問題がある。

現在金属長繊維の中で複合材料にも用いられるものは、ステンレス繊維とタングステン繊維である。タングステン繊維は電球のフィラメントに使われる細線であるが、タングステン線を心材として複合材料用ボロン繊維が作られている。純粋な金属繊維といえるものはステンレス繊維であろう。ステンレス繊維は耐熱織布、金網、フィルター用に開発されたものであるが、かなりの高強度をもつ繊維であるため複合材料としての利用が期待さ

* 東京大学生産技術研究所 第2部

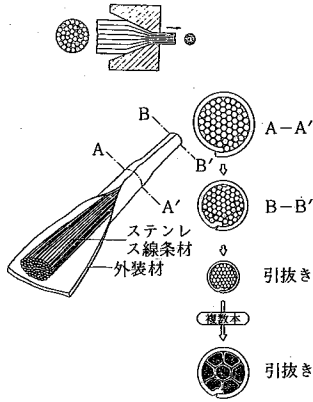


図1 束引きによるステンレス繊維の製造(日本精線)

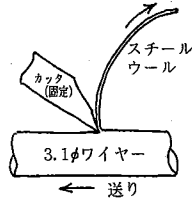


図2 スチールウールの製造法(日本スチールウール)

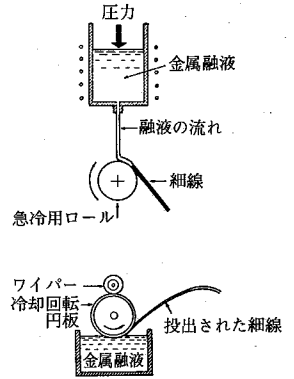


図3 溶融金属からの金属繊維の製造(Battelleの研究所)

れていた。最近自動車エンジンのアルミ製コネクティングロッドのロッド部にステンレス繊維の束として混入使用された。この製品はステンレス繊維が本格的複合材料に使用されたという点と、また長繊維を使ったFRMが重要な自動車部品に使用されたという点で極めて意味のある応用例である。

ステンレス繊維は他の金属細線と同じく塑性加工の線引き法によって製造される¹⁾。この引き抜き法は超合金やダイヤモンド製の細い穴のあいたダイスの中を繰返し通してだんだんと細くしていくものであるが、直径 $10\mu\text{m}$ 以下のステンレス繊維となると、繊維の切断の恐れも出てくる。また細線の場合は引き抜き回数の増大による製造コストの上昇を抑える意味もあって、図1のような束引き法によって製造されている。このとき用いられる外装材の鋼板は線引き後化学処理によって除去される。束引きされたステンレス鋼繊維はトウと呼ばれ多数本が束となった状態で得られるが、直径は $8\sim 15\mu\text{m}$ で六角形断面をしており、その引張り強さは加工硬化のため $150\sim 250\text{kgf/mm}^2$ にも上昇している。その他複合材料用の金属長繊維としては、メタライズドファイバーと呼ばれる非金属繊維表面に金属コーティングをしたものがある。これはガラス繊維にアルミまたは銀のコーティングをしたもので、主としてプラスチック材料に混入し導電性を付与するために使われる。

金属短繊維の代表的なものはひげ結晶と呼ばれるウィスカーであるが、実際には金属ウィスカーが複合材料に使われたという報告は聞かれない。ウィスカー自体は高強度を示してもそれが短繊維では有効に生かせないとか、アスペクト比が大き過ぎて分散性が悪いといった生産技術上の問題もあるのが原因ではないかと予想される。短繊維の間には金属タワシに使われるスチールウールを切断したものもあり、これはディスクブレーキのパッド材に使用されている。スチールウールは鋼線材か

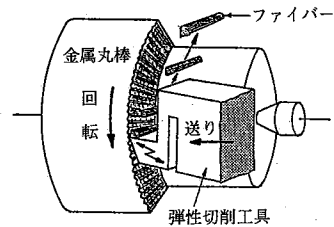


図4 びびり振動切削による金属短繊維の製造原理⁴⁾

ら図2のように切削工具で削り出したものである。このほか図3のように溶融金属から直接細線を得る方法も行われている。ディスクに切れ目をつけておけば金属短繊維を得ることができる。

4. びびり振動切削法

特殊な機能をもった複合材料用として金属繊維の要望があるにもかかわらず、当時材質やコストの面で十分対応できていない状態であった。筆者らは以前にコンクリート補強用鋼短繊維をフライス切削法により製造する技術を開発した²⁾。その後微細金属短繊維の製造法を開発するため、切削工具を超音波振動させ流れ型切屑を分断させる方法や、旋削におけるせん断型切屑によって繊維を製造する方法の研究³⁾を進めていた。後者の研究の過程で工具にびびり振動が発生すると、微細な金属短繊維状の切屑が生成することを実験的に見だし、以下に述べるびびり振動切削法の研究⁴⁾が開始された。

びびり振動切削法による金属短繊維の製造法の原理を図4に示す。びびり振動は被加工面の性状を劣化させるため極めて有害なものとされ、これまでびびり振動を防ぐための研究が数多くなされている。この方法はこのびびり振動を逆に積極的に利用しようとするものである。通常切削のびびりでは被加工材側の振動が問題とされるが、ここでは刃物側のびびり振動を利用する。超硬刃物を板バネ状のシャンクで保持し、シャンクの厚さと長さ

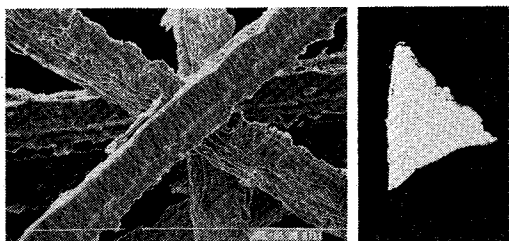


図5 びびり振動切削による金属短繊維(左:表面,右:断面)

を変えることにより固有振動数を調整する。刃物は適当な切削条件ではシャンクの固有振動数で振動し、その振動に応じて刃物が被加工材に食い込み、その度に繊維状の切屑を削り出す。びびり振動切削法による金属短繊維の製造法の特徴をまとめると以下ようになる。

- ① 切削加工の可能な材料ならば、金属・非金属を問わず、どんな材料でも短繊維化することができる。
- ② 繊維太さは切削速度と工具の送り、繊維長さは切刃の寸法を変えることにより、任意に選択できる。今のところ換算直径で $20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ 、長さで $0.5\text{mm}\sim 250\text{mm}$ の繊維が製造できている。
- ③ 工具の振動はほぼ固有振動数と一致して一定であり、被加工面に生じた凹凸を切刃が一定の位相ずれを保ちながら切削除去するので、常に一定寸法のバラツキの少ない短繊維が得られる。
- ④ 繊維の外観と断面は図5に示すように、三角形断面と起伏に富んだ表面をもち、複合材料として利用した場合の付着性に優れている。
- ⑤ 刃物が損傷していない限り、繊維長手方向には切欠きが存在しないので、母材の強度をそのまま残している。繊維自体は切削時の塑性変形で大きく加工硬化し、場合によっては繊維の引張り強度を増している。
- ⑥ 湿式で切削を行った場合、振動ごとに切刃が被加工材から離れ切刃の潤滑が十分に行われるため、切刃の摩擦が減少し、刃物寿命がかえって長くなる。スロウアウェイチップの8面全部を使用していることもあり、生産コストに占める工具費は比較的少ない。
- ⑦ 工具振動数はおおよそ 5000Hz であるため、毎秒 5000 本の繊維が製造できる。通常1チップは4本取りであるため、バイト1本で 20000 本/秒の生産が行える。実際の生産ではこのバイトを同時に6本～20本並べており、20本バイト法の場合には 40 万本/秒の生産速度となり、かなりの高生産性が達成できる。

5. 金属繊維の特徴

金属繊維は複合材料用原料として用いた場合、他の非金属繊維と比較して以下のような特徴をもつ。

- 1) 高弾性：非金属繊維の欠点として金属と比べて低弾性率であることがしばしば指摘される。金属繊維は高

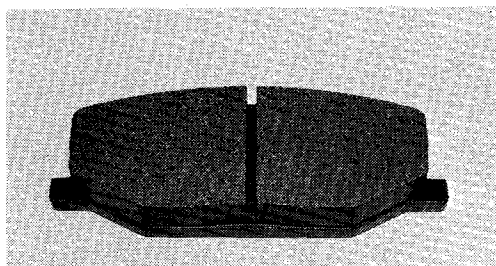


図6 金属短繊維が混入されたディスクブレーキパッド(アイシン精機)

弾性材であるため高剛性の複合材料が製造できる。

- 2) 可撓性：無機繊維の多くは高強度ではあるが脆性的である。金属繊維はかなりの延性があり、繊維を混入して混練しても折れる心配がなくまた複合材料にかなりの可撓性をもたすことができる。
- 3) 耐摩耗性：非金属繊維の多くは高強度ではあるが、必ずしも耐摩耗性が高いとはいえない。金属繊維では材質によってはかなりの耐摩耗性が期待できる。
- 4) 導電性：非金属繊維は炭素繊維を除いて導電性を持たないが、金属繊維は良好な導電性をもつ。また、金属繊維には磁性を付与することもできる。
- 5) 伝熱性：非金属繊維の伝熱性は低く、母材がプラスチックのときなど複合材料の熱伝導率が低くて問題となることがある。金属繊維は良好な熱伝導性をしている。
- 6) ぬれ性：繊維と母地との付着強度は極めて重要である。非金属繊維に比べ、金属繊維の付着性(ぬれ性)は良好である。
- 7) 焼結性：非金属繊維の焼結性は必ずしも十分とはいえないし、また焼結温度に昇温することによりせつかくの繊維強度が低下することも多い。金属繊維の焼結性は良好であり、高温によって劣化することも少ない。
- 8) 振動特性：金属材は非金属と異なる振動特性をもつ。金属繊維の適当なものを選択すれば音や振動に対して特別な特性をもった複合材料ができる。

6. 金属短繊維を用いた複合材料

びびり振動切削法による金属短繊維は前述の数々の特徴をもっており、これを利用した複合材料が数多く開発され、そのいくつかはすでに実用化されている。これまでに開発され実用化された複合材料を中心として母地ごとに分類してまとめてみよう。

6.1 プラスチック系複合材料

1) ディスクブレーキパッド

自動車用ディスクブレーキパッド材は、これまで石綿をフェノール樹脂で固めたものが使われていた。しかし環境汚染の問題より、石綿に替わる繊維材料としてびびり振動切削法により作られた軟鋼の短繊維が混入されはじめた。これはセミメタリックパッドとも呼ばれており、

耐摩耗性が向上し寿命は数倍となっている。現在、製造されている金属短繊維のうち量的にはこのパッド材に使用されている量が最も多い。

2) 耐摩耗プラスチック部品

金属短繊維を混入したプラスチックは射出成形が可能であり、プラスチック機械部品が製造できる。金属繊維を混入することにより剛性と耐摩耗性を向上させたプラスチック部品が作られている。この場合耐摩耗性と耐焼付性の良好な銅合金繊維が使われる。

3) 耐熱性プラスチック部品

金属繊維を混入したプラスチックは熱伝導性が向上するため、プラスチック部品内で発生する熱をより早く伝導放熱することができ、結果としてプラスチック部品の耐熱性を上げることができる。

4) 電磁波シールド材料⁵⁾

プラスチックに混入する金属短繊維の量を体積で7~8%とすると繊維どうしが接触し導電性を持つこととなる。この導電性プラスチックは現在、電磁波公害(EMI)として問題となっているデジタル電子機器のシールド材料として用いることができる。この材料は通常のプラスチック材料と同じく射出成形が可能であることに特徴を示す。黄銅短繊維を混入したシールド用プラスチックは、他のフィラーを混入したものより種々の特性が優れ、最近、実用に供されるようになった。EMIの規制強化と共に将来最も有望なシールド材として極めて大きな需要が期待されている。図7は2層成形法により内

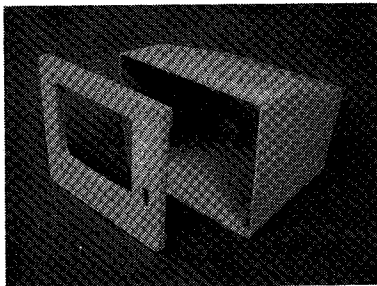


図7 金属短繊維を混入した導電性プラスチックの射出成形管体(2層成形品、アロン化成)



図9 金属短繊維混入広帯域電磁波吸収板(日本電気)

壁のみシールド材を射出成形したきょう体である。また当然のことながらこの材料は電波の反射板として用いることもできる。

5) 静電防止床材⁶⁾

化学物質を扱う場所では、床材にたまる静電気の放電により火災の危険があるが、床材に導電性をもたせることにより滞電を防ぐことができる。図8はアルミニウム金属短繊維を混入することにより導電性を持たせた床材で、特殊な施工により繊維をたたせているので床材が摩耗しても長期にわたって滞電を防止できる。この床材はすでに病院や化学実験室に幾つかの施工例があらわれている。

6) 面発熱体

導電性プラスチックに電流を流せば任意の形状の面発熱体が製造できる。この材料に関しては耐久性等を含めてまだ検討中である。

7) 電波吸収体

フェライト粉末を樹脂またはゴムで固めた材料は電波吸収体であるが、これに金属短繊維を混入した図9のような電波吸収板が日本電気(株)で開発された。

図10のように全体は2層になっており裏面層に黄銅短繊維をいれ全体として薄いにもかかわらず広帯域の優

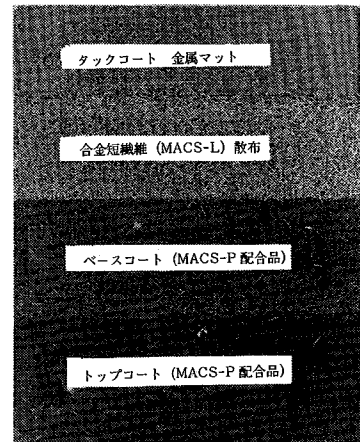


図8 静電気の滞電を防ぐ導電性床材(日本ケミカル建設)⁹⁾

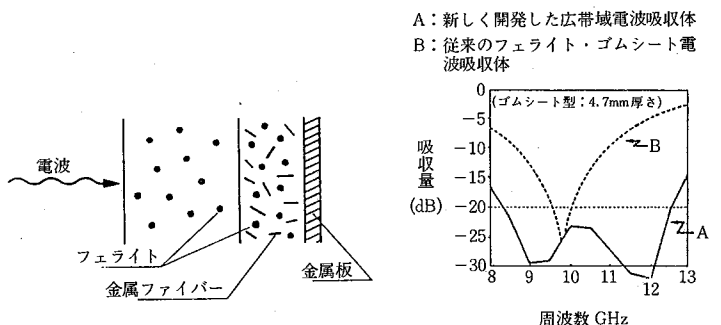


図10 電波吸収体の構造図と特性(日本電気)

れた電波吸収能力を持っている。本四架橋のために開発されたものであるが、船のレーダのゴースト対策としてマスト等にはり付けて使用されている。

6.2 金属系複合材料

1) 多孔質金属フィルター⁷⁾

複合材料とはいえないが、金属短繊維を固めて焼結すれば接触点部分が接合され、比較的高い強度を持つ多孔質材料が製造できる。粉末からの多孔質材よりはるかに高い気孔率を持たせることができる。図 11 のようなステンレス短繊維の薄板状多孔質材は化学機械用フィルターとして用いられている。

2) FRM⁸⁾

短繊維を固めたものにアルミ等の溶融軽合金を押し込んだものは一種の繊維強化金属 (FRM) である。耐摩耗性、耐焼付性、剛性の向上、耐熱性の向上等がはかれ、長繊維強化材とは異なった特性をもつ FRM となる。図 12 はステンレス短繊維成形体に高圧鋳造法によりアルミ合金をしみ込ませた FRM である。ダイカストによる鋳造等と組み合わせて手軽に製造できるので、将来、有望な複合材として期待されている。

3) 自己潤滑性複合材料⁹⁾

金属短繊維の圧縮成形体は内部に空孔が多いにもかかわらず繊維どうしのからまりがあって高い強度を示す。この空孔に多量の異粒子を保持できる性質を持っている。球状黒鉛鋳鉄またはブロンズ短繊維に黒鉛を保持させれば自己潤滑材を製造することができる。図 13 は鋳鉄中に体積で 38% の黒鉛を混入したものであるが、ねずみ鋳鉄並みの強度を持っている。この材料は焼付きを起こ

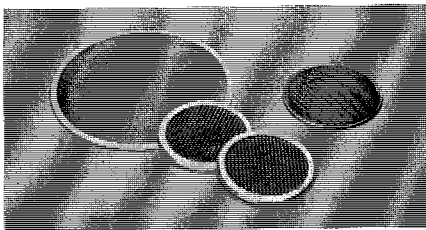


図 11 多孔質金属繊維フィルター(東京製綱)

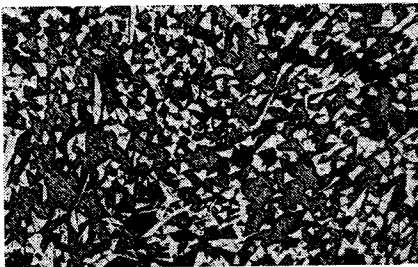


図 12 金属短繊維を混入した FRM⁸⁾(地はアルミ合金、白いのは繊維断面)

さないで真空中、高温中、または無給油での軸受材として使用できる。また塗型不要の鋳造金型や、耐焼付性を持つ金型として使用できる可能性もある。

4) 鋳鉄ファイバーボンドダイヤモンド砥石

上記の黒鉛の代わりにダイヤモンド砥石を使えば鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石が製造でき、ダイヤモンドの集中度として 200 以上のものが可能となる。この砥石を使えば図 14 のようにニューセラミックス材料や超硬合金などこれまで困難といわれた硬脆材を切削工作機械により砥石の摩耗が少ない状態で、高能率にクーリーブレード研削できることがわかり、大きな注目を集めている。

5) 電池用電極材料

電池用触媒であるニッケルの表面積を増すため繊維化することにより、性能を向上させることができる。ニッケル-カドミウム電池として使用されようとしている。

6.3 セラミック系複合材料

1) 鋼繊維補強モルタルコンクリート¹⁰⁾

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) と同様びびり振動切削による金属短繊維によっても図 15 のようにモルタルやコンクリートを補強することができる。

プレス加工用コンクリート型を鋼短繊維で補強することによりシャープなコーナー部の割れを防止できる。

2) 鋼繊維補強セラミック

耐熱用炉材に鋼またはステンレス短繊維を混入させることにより耐久性を向上させることができる。すでに鋼連続鋳造のノズル部近傍の耐熱セラミック材に使用され大きな効果をあげている。

3) 通気性セラミック型¹¹⁾

金属-セラミック粉の焼結体が通気性を持つことを利用して図 16 のような成形型が開発されたが、この型を補強するためステンレス短繊維が使われている。この通気性セラミック型はすでにプラスチックの真空成形等に用いられ、将来、広く普及するものと期待されている。

7. おわりに

筆者らは金属短繊維を用いた複合材料も存在するはずであるとの予測のもとに、びびり振動切削法による金属短繊維の製造法を開発した。しかも初めからびびり振動

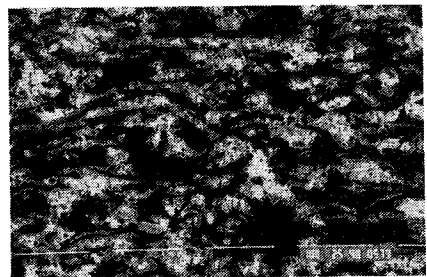


図 13 多量の黒鉛を含む鋳鉄地自己潤滑複合材料⁹⁾

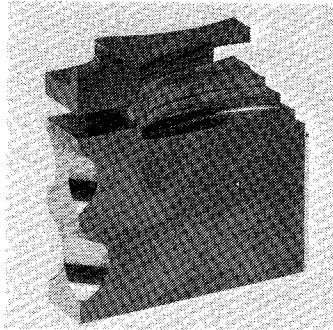


図 14 鑄鉄ファイバーボンド砥石によるクリープフィード研削(左:アルミナセラミックの研削状況, 右:超硬合金)



図 15 鋼短繊維でモルタルを補強したものの曲げ破壊試験片¹⁰⁾

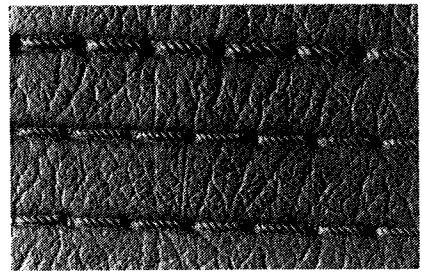
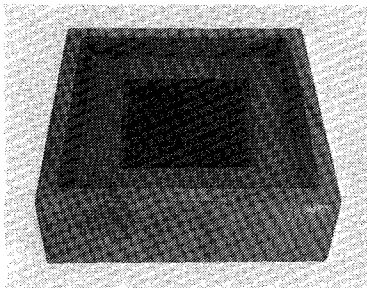


図 16 ステンレス短繊維で補強された金属-セラミック焼結型(左)とプラスチック真空成形品の表面(右)¹¹⁾

を利用することを意図したわけではなく、いわば実験中の偶然の発見より生まれたものである。金属短繊維の製造技術を確立するための研究を進めると共に、その複合材料への用途開発の研究もあわせて行った。その間実際に繊維製造メーカーが数社現れるに及んで、全国的規模で推進された。

この用途開発はまだ進行中である。挫折したものもかなりあったが予想外に大きく発展しそうなものも多く出現している。また金属短繊維そのものより、それを使った複合材料のほうが世の中にはるかに大きな影響を与えていることもわかった。同時に金属短繊維のように新材料のための基礎材料を生み出すことが、いかに重要かつ重大なものであるかを身につまされている。現在の展開状況を見ると金属短繊維を利用した複合材料の発展はまだ端緒についたばかりであり、これからの発展は無限である。今後とも研究開発面で大いに努力したいと思っている。

(1985年9月30日受理)

参考文献

- 1) 中川威雄, 柳沢 章, 鈴木 清: 金属繊維の製造と応用, 繊維学会誌 VOL.39, NO.4, (1983-4)121-127
- 2) 中川威雄, 内田貴之, 鈴木 清: New manufacturing process of steel fiber for reinforced concrete, Proc. of the 1978 Int'l Conf. on Composite Materials, (1978-4) 189-208

- 3) 中川威雄, 鈴木 清, 小山浩幸: せん断型チップ発生を利用した旋削による黄銅短繊維の製造, 生産研究 VOL.32, NO.3, (1980-3)88-91
- 4) 中川威雄, 鈴木 清, 植松哲太郎, 小山浩幸: びびり振動切削による金属短繊維の製造, 精密機械 VOL.47, NO.11, (1981-11)85-91
- 5) 中川威雄, 柳沢 章, 鈴木 清: Conductive plastics mixed with metal fiber, Proc. of ICCM-IV, (1982-10) 1037-1044
- 6) 杉沢実, 中川威雄: 金属短繊維を混入させた導電性・難燃性プラスチック床材, 複合材料研究連合研究発表会, (1984-11)73-75
- 7) 鈴木 清, 中川威雄: 切削繊維を利用した金属多孔質体, 工業材料 VOL.30, NO.10, (1982-10)104-108
- 8) 中川威雄, 野口裕之: 溶湯鍛造による金属短繊維混入FRMの製造, 日本鉄鋼協会第109回講演大会, (1985-4) 478
- 9) 李世欽, 鈴木 清, 中川威雄: 繊維冶金による鑄鉄-黒鉛系自己潤滑材の製造, 粉体粉末冶金秋季講演会概要集, (1984-11)18-19
- 10) 柳沢 章, 中川威雄: モルタル補強用鋼短繊維の開発とその強化特性, 生産研究 VOL.33, NO.6, (1981-6)
- 11) 柳沢 章, 野口裕之, 中川威雄: 通気性セラミック型によるプラスチックの真空成形, 生産研究 VOL.36, NO.2, (1984-2)82-85