SiC 連続繊維強化 Al プリフォームワイヤの開発

今井 義一*, 市川 宏*, 石川 敏功*

1. はじめに

繊維強化金属 (FRM) の普及の遅れは製造法の困難さと高コストが主因で、特に長繊維タイプにおいては著しい。FRM 製造の主要な要素技術は複合化と賦形化であり、この両者を同時に満足させ得る成形方法はごく一部の限られた方法とならざるを得ない。そこで複合化と賦形化を分けて考え、既に複合化された成形用中間素材 (プリフォーム) が実現すれば、後加工として賦形化だけすればよい。その結果、適用できる成形方法の選択や成形品の寸法・形状の自由度は一段と大きくなる。それゆえ、最も基本的な材料形態であるとしてワイヤ状の、既に複合化されたプリフォーム線材を開発することを開発目標とした。

なお、本研究開発の一部は、“次世代産業基盤技術研究開発制度”による国家プロジェクト (以下、「次世代プロジェクト」と表記) の成果^{1,2)}である。

2. 製法概要

強化繊維には、比強度・比弾性率が高く、耐熱性・耐酸化性に優れ、金属との適合性 (compatibility) も比較的良い、バランスのとれた繊維として国産技術の SiC 連続繊維 (商品名ニカロン) を採用した。また、マトリックス金属は汎用で比較的扱いやすい Al 系とした。繊維を侵食する Si や Mg、脆性凝固組織をつくりやすい Cu や Fe などを含まない純 Al をベースとし、一部 Al-Ni 系を採用した。細径 (14 μm) で多繊維タイプ (500 本/ヤーン) の連続繊維なので無数の狭い繊維間隔に完全に Al を浸透・複合化させること、また繊維とマトリックスとの界面反応を抑制することがポイントである。そこで、効率や品質安定性が高いと予想される連続式の溶融金属浸透法を採用した。

製造プロセスを要約すると、ポビンから引き出したヤーンを加熱炉中を通して熱分解性のサイジング剤 (集束剤) を除去して繊維表面を清浄にするとともに開繊性を

十分に上げる。つぎに溶融 Al 浴中を通糸させながら溶融 Al を繊維間隙に完全に浸透・複合化させ、次いでノズルを通して繊維を連続的に引上げドラム上に巻き取る、というものである³⁾。

3. 特性

界面反応を抑制するために、操作上できる限り溶湯温度を低く、通糸速度を大きくすることは有効であった。強度向上のための繊維体積含有率 (V_f) の増大にはノズル孔径を絞ることによって達成された。これらの結果、図 1 にみられるように、 V_f が約 0.3~0.5 の範囲で、複合則 (ROM) に則った高強度を発現できた³⁾。表 1 に代表的特性を示すが、在来の構造材料と比較して軽量で比強度・比剛性に優れている。図 2 の高温特性からも Al や Ti 合金、さらに他の Al 基 FRM に比べ高温強度が優れているのがわかる。SiC/純 Al 系では高温域で強度低下しているが、高温処理後の室温強度に低下が見られなかったことから高温でのマトリックスの塑性変形能によるものと判断し、マトリックスの耐熱性を向上させた。すなわち、溶融金属浸透法には極めて合理的な方法として、一方向凝固共晶合金の Al-5.7 Ni 合金組成を採用した。これは、いわゆる “*in situ composite*” であり、Al-Al₃Ni 共晶相には超微細な繊維状の Al₃Ni 金属間化合物が密集して形成され、SiC 繊維間隙を埋めていた。図 3 と図 4 にその様子を示す。その結果、図 2 にみられるように 450°C の高温でも Al-Ni 系は室温強度を保持していた⁴⁾。また、400°C なら 1,000 時間以上の耐熱安定性を有していた^{5,6)}。

4. 成形・応用性

こうして得られたプリフォームワイヤを中間素材として FRM の成形を試みた。まずホットプレス成形では、540°C-50 MPa-15 分の条件でプリフォームワイヤの強度を損なうことなく平板を成形し得た⁷⁾。ホットプレスでは平板以外にも強化繊維が細径でしなやかなので湾曲材や屈曲材が得られた。また、「次世代プロジェクト」では、図 5 にみられるように、低融点の Al-Si 系 (A-2017) 箔をワイヤ層間に挿入するシートインサート成形

* Yoshikazu IMAI, Hiroshi ICHIKAWA and Toshikatsu ISHIKAWA: 日本カーボン株式会社 (221 横浜市神奈川区新浦島町 1-1)

法も易成形化の一法として開発された⁸⁾。熱間ロール成形では長尺のシートを得、さらにこれを用いてL字型のコンクラッド材を成形し得て、桁材等への可能性を知った⁹⁾。HIP 成形では異型材への試みとしてパイプ材を成形し得た。

次いでプリフォームワイヤ自身を強化材とみなして、

図 1 繊維体積含有率 V_f と SiC (ニカロン)/Al プリフォームワイヤの引張り強さの関係 (図中の D は単位のデニール)

図 2 各種 Al 基 FRM 等の高温引張り強さの比較

表 1 SiC (ニカロン)/Al プリフォーム・ワイヤと代表的構造材料の特性比較

合 金		密 度 g/cm ³	弾 性 率 GPa	引張り強さ MPa	比 強 度 10 ⁸ cm	比弾性率 10 ⁸ cm
AISI4340 (Ni-Cr-Mo 鋼)		8.0	200	1,760	2.2	2.5
Al7475 (超々ジュラルミン)		2.7	70	570	2.1	2.6
Ti-6Al-4V (チタン合金)		4.4	110	1,290	2.9	2.5
INCO718 (Ni 基超合金)		8.2	210	1,430	1.8	2.5
17-7PH (ステンレス鋼)		7.8	200	1,340	1.7	2.5
ニカロン/Al プリフォームワイヤ	V_f 50%	2.6	140	1,500	5.7	5.0
	V_f 40%	2.6	120	1,200	4.6	4.6

図 3 SiC (ニカロン)/Al-5.7Ni 系プリフォームワイヤの内部組織 (浅いエッチング後の断面 SEM 写真)

白い小さな斑点が Al-Al₃Ni 共晶相の Al₃Ni

図 4 SiC (ニカロン)/Al-5.7Ni 系プリフォームワイヤの内部組織 (深くエッチング後の断面 SEM 写真)

マトリックス中に微細な繊維状の Al₃Ni が密集している。

図5 SiC (ニカロン)/Al プリフォームワイヤおよびそれを用いた「次世代プロジェクト」の成形体例

シートは熱間ロール法 (富士重工業成形),
パネルは熱間プレス法 (三菱重工業成形)

ワイヤを集束したり, 強化を要する部位にのみ配位して鋳造を行い, 部分強化複合材料とする応用法も有効であった¹⁰⁾. 図6はその一例でカーエアコンのシリンダブロックである. 強化の必要なシリンダ部 (4箇所) だけにパイプ状にしたワイヤを配位してダイキャストしたものである.

これから, 開発ワイヤを利用することによってこれまで FRM の実用化を阻害していた諸要素——複雑形状や大型材が困難, 生産性が低い, コスト高——を克服する可能性を得たと言える.

5. おわりに

(1) SiC 連続繊維 (ニカロン) で Al を強化したワイヤ状のコンポジットを熔融金属浸透法によって作製得た. 適正条件では強化繊維の強度を十分に発現し得た.

(2) 耐熱性向上のために, マトリックスを *in situ* 一方向凝固共晶合金の Al-Ni 系にし, 450°C でも強度低下のないワイヤを得た.

(3) 成形用中間素材としての開発ワイヤの有用性を評価したところ, 各種の成形法で種々の FRM 成形が可能であった.

(4) 図7のようなスポーツ用具分野での実用化は既に実現している. 一方, 宇宙航空分野での活用の検討調査も進められており¹¹⁾, またエネルギー, ロボット等をはじめ民生分野での応用開発も幅広く進められているので, 開発ワイヤを利用した FRM の本格的実用化もさして遠くないと期待される.

図6 カーエアコン用シリンダブロック成形品

SiC (ニカロン)/Al プリフォームワイヤをシリンダ部 (4箇所) に部分的に強化した Al 基 FRM (改良ダイキャスト成形法による.)

図7 SiC (ニカロン)/Al プリフォームワイヤを活用した市販スポーツ用具 (バドミントンラケット) の例

参考文献

- 1) 次世代複合材料技術ハンドブック, 日本規格協会 (1990), p. 355-378.
- 2) Y. Imai, H. Ichikawa & T. Ishikawa: *Proc. 20th Inter. SAMPE Tech. Conf.* (1988), pp. 1-12.
- 3) 今井義一, 田中義和, 市川 宏, 石川敏功: 鉄と鋼, **75**, 9 (1989), 1555-1562.
- 4) 今井義一, 田中義和, 市川 宏, 石川敏功: 日本金属学会誌, **53**, 10 (1989), 1068-1076.
- 5) 今井義一, 武田道夫, 市川 宏, 石川敏功: 軽金属, **40**, 3 (1990), 202-208.
- 6) 今井義一, 植村恵治, 市川 宏, 石川敏功: 軽金属, **40**, 3 (1990), 195-201.
- 7) 今井義一, 田中義和, 市川 宏, 石川敏功: 鉄と鋼, **76**, 3 (1990), 391-398.

- 8) 藤原 力：第6回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料技術予稿集，（財）次世代金属・複合材料研究開発協会（1989），p. 385.
- 9) 梶原俊夫：同上（1989），p. 395.
- 10) 今井義一：繊維機械学会誌，43, 5（1990），11-22.
- 11) 昭和63年度複合材料次世代技術動向調査研究（下），日本機械工業連合会（1989.3）.