

長繊維強化プラスチック複合材料の 精密プレス成形性に関する研究

東京電機大学 工学部 精密機械工学科

教授 阿高松男

(平成3年度研究開発助成 AF-91024)

1. 研究の目的と背景

長繊維強化熱可塑性プラスチック複合材料（以下長繊維FRTPと略称する）の精密プレス成形では、成成品精度・強度の向上、異方性の制御が最大の問題であって、そのための材料開発と加工技術の改善が強力に進められている。

著者らはこれまでに、上記問題の支配要因が材料の成形流動に伴う繊維とマトリクスの分離および繊維の配向にあると観点から、分離・配向と加工条件の関係を市販材料について理論的・実験的に調べ、かなり明らかにしてきた。^{1)~12)}

本研究はこれを更に進めて、強化材の形態（繊維形状、からみ状態、配向など）および流路の状態とがマトリクスの分離および繊維の配向に及ぼす影響を実験的に明らかにし、材料設計と材料評価を行うための基礎資料を与えることを目的とする。

2. 実験の方法

(1) 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。負荷装置は変位制御型の圧縮・引張り試験機である。金型には熱電対を取り付け、温調機を用いて金型の温度を190°C制御した。使用した金型の平面図およびポンチの側面図を図2に示した。

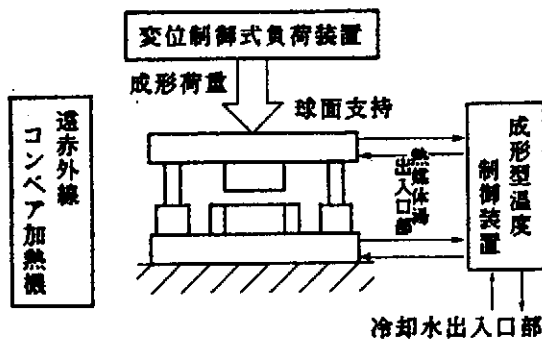


図1 実験装置の概要

(2) 使用した材料

表1に使用した材料を示した。すなわち、Xシートは長繊維強化材がスワール状になっているが、ラデ

イトおよびKPシートは直線状の短繊維（長さ13mm）がばらばらに混じりあっている。

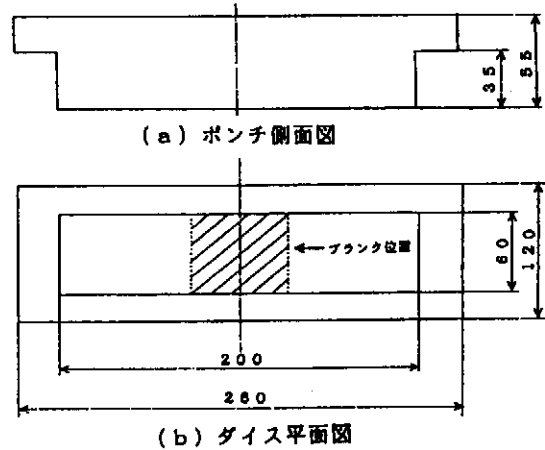


図2 使用した金型

表1 使用した材料

試料名 (商品名)	材-1 (ラデライト)	材-2 (Xシート)	材-3 (KPシート)
色	白	黒	白
組成	ポリプロピレン60%		ガラス繊維40%
	直線状短繊維 (繊維長13mm)	スワール状 長繊維	直線状短繊維 (繊維長13mm)
ガラス繊維径	1.3 μm		
厚さ (mm)	3.8	3.8	3.6
比重	1.21	1.20	1.20
引張強さ (MPa)	11.0	8.0	9.0

(3) 実験の方法

実験条件を表2に示した。すなわち、材料をハンドソーで小片に切断し、それをやすりで矩形体（60*30 mm）に仕上げて試料（ブランク）とした。遠赤外線コンベア加熱装置でブランクを加熱し、加熱した金型に取り付け、変位制御型の圧縮・引張り試験機で、圧縮速度、ストロークを制御して圧縮実験をした。その後傷つけないように離型する。完成した成成品の引張り強さ、ガラス繊維の含有率分布、配向角分布を測定し

た。また、ガラス繊維の含有率の測定は、図3のように中心線から10mmづつ均等に切断した小片を燃焼させ、成形前後の重量比をもってガラス繊維の含有率とした。ガラス繊維の配向角分布は軟X線写真による測定を試みた。

表2 実験条件

ブランク寸法 (mm) ※ (成形前)	60×30
遠赤外線コンベア 加熱温度 (°C)	190±10
ブランク加熱時間 (分)	約 10
金型温度 (°C)	190±10
圧縮速度 (mm/min)	10, 100, 500, 1000
成形後のブランクの厚さ (mm)	1.0±0.15

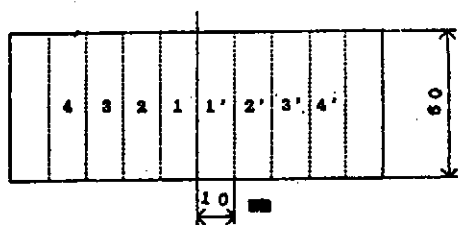


図3 含有率測定用試験片

3. 実験結果および考察

(1) ガラス繊維含有率

図4～6に各材料のガラス繊維含有率の測定結果を示した。縦軸にガラス繊維含有率を%表示で示し、横軸は試験片の採取箇所を示した。図4にXシートの実験結果を示し、図5にはラデライトの実験結果を示した。なお、ラデライトとKPシートは略同様な結果であった。直線状の短繊維を含んだラデライトおよびKPシートでは図2に示したような直線溝では比較的繊維が流れやすく、試験片全体に略均一に分布している。一方、スワール状の長繊維を含んだXシートでは試験片中央部に繊維が残留し易いが、圧縮速度を上げていくと試験片両端部のガラス繊維含有率が上昇する。これは圧縮速度を上げていくと、中央部から両端への材料の流れが強くなり、それに引きつられて繊維が移動するためと考えられる。

図6は圧縮速度1000mm/minの場合の各材料のガラス繊維含有率の測定結果を示した。明らかに、Xシートのみが特異な現象を示していることが分かる。恐らくXシートの場合、両端部の材料強度が低下していることが考えられる。

(2) 引張り強さ

試験片の各箇所での引張り強さを求めた結果を図7

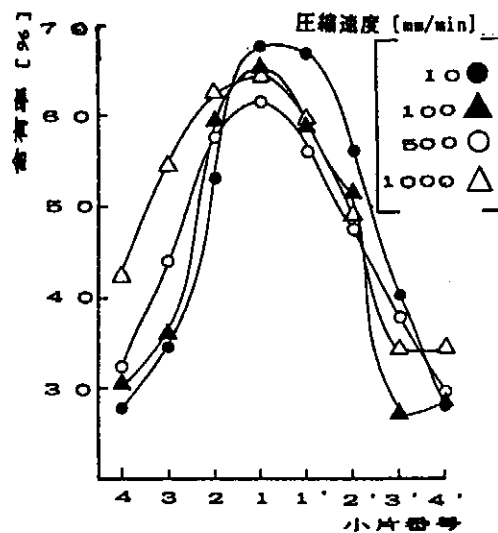


図4 Xシートのガラス繊維含有率分布

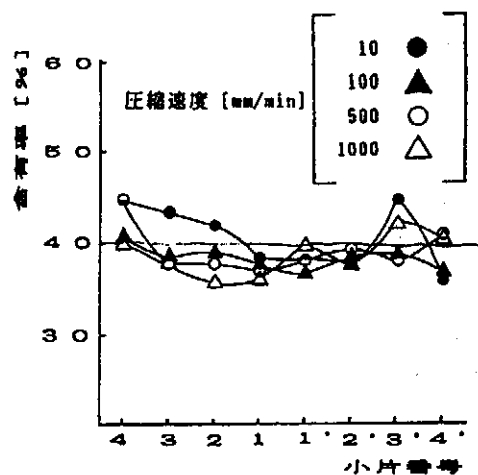


図5 ラデライトのガラス繊維含有率分布

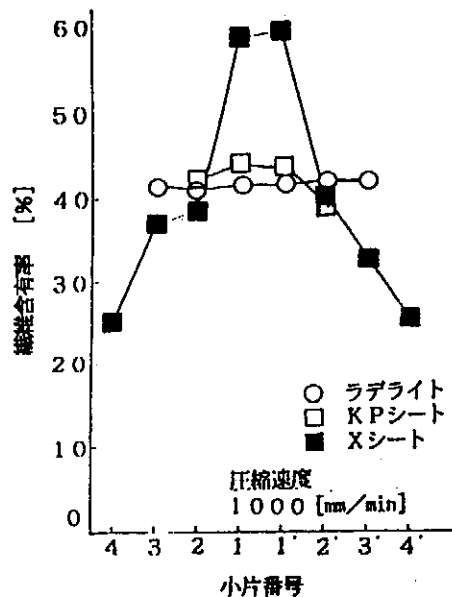
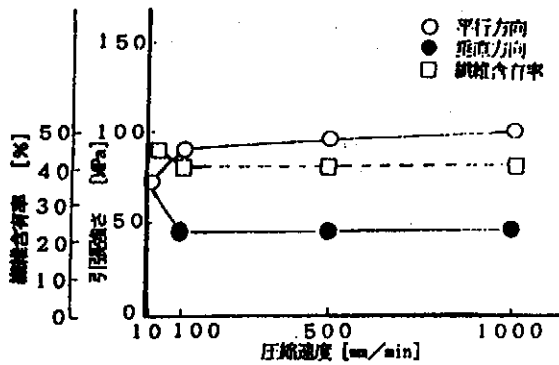


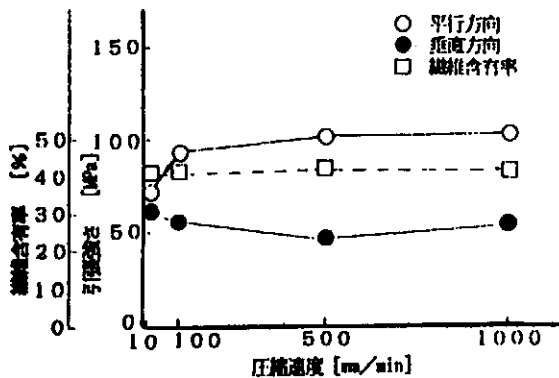
図6 各材料のガラス繊維含有率分布

～8に示した。引張り強さには方向性がでるものと考えられるので、図2の金型の長手方向、即ち材料の流れの方向を平行方向と呼び、それに直角の方向を垂直

方向と呼んで、それぞれの引張り強さを○印および●印で示した。図7にラデライトの場合の実験結果を示し、図8にXシートの場合の実験結果を示した。この

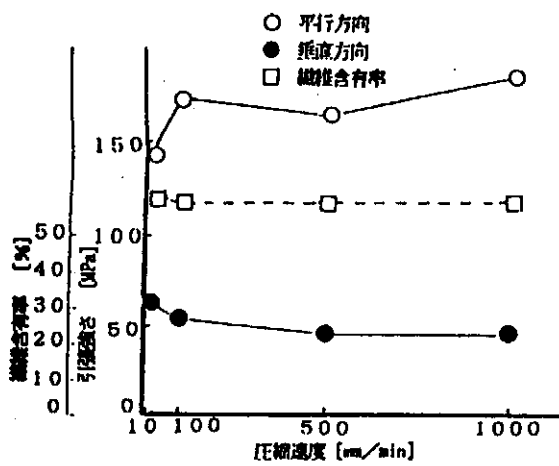


(a) 中心部

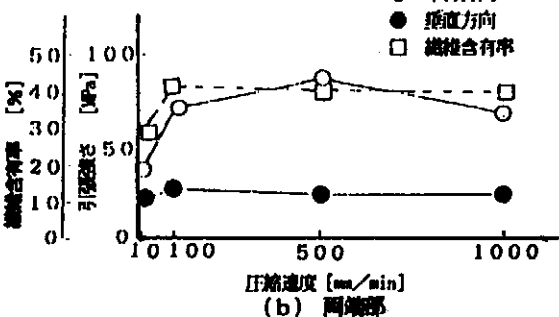


(b) 両端部

図7 ラデライトの引張り強さおよびガラス繊維含有率と圧縮速度との関係



(a) 中心部



(b) 両端部

図8 Xシートの引張り強さおよびガラス繊維含有率と圧縮速度との関係

場合も、KPシートについてはラデライトの場合と同様の結果となった。図中には参考のためにガラス繊維含有率も示した。

図より、ラデライトとXシートのいずれもが平行方向の引張り強さが垂直方向の引張り強さよりも大きく異方性を示すことが分かった。これは材料の流れの方向にガラス繊維の方位が揃い易いと思われる。また、Xシートでは中央部と両端部とで引張り強さが極端に異なっているのは、明らかにガラス繊維含有率の差である。逆に、直線状の短繊維を含んだラデライトおよびKPシートでは圧縮速度に関係なく、引張り強さは安定している。

(3) 流路の影響

上記(1)、(2)は材料の流れが一方向でしかも比較的干渉をしない場合であったが、材料の流れが干渉を起こす場合の挙動を調べるために、以下の様な実験をした。すなわち、図9に示したように円形の金型に、図中に斜線で示したリング状のブランクを使用し、前記と同様の圧縮実験を行った。さらに、ガラス繊維含有率は図11に示したように中心角45°の扇型を切り出し、半径方向に10mmの長さごとに測定した。そして外側から番号を付けた。

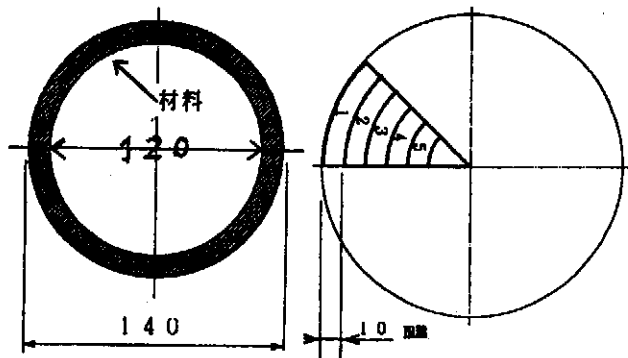


図9 リング状ブランク

図10 繊維含有率測定箇所

その測定結果を図11~13に示した。すなわち、図11から順にラデライト、KPシート、Xシートの測定結果である。この場合は、材料の流れが中心に向かうため、流れがお互いに干渉しあう結果としてガラス繊維含有率はばらついている。図11はラデライトの場合の測定結果である。圧縮速度100mm/minの時以外は繊維含有率は最外周が最も大きく、その内側は殆ど均一になっている。図12はKPシートの場合の測定結果である。、特異な点を除けば繊維含有率は中心に向かって一樣に小さくなっている。図13はXシートの場合の測定結果である。この場合は繊維含有率はかなりばらついている。特に、圧縮速度が10mm/minの場合には変化が大きい。拡散流の直線溝の場合に比較して、この場

合は収縮流で流れに干渉が起き易いためと考えられる。それでも、直線状の短繊維を含むラテライトおよびKPシートの場合、収縮流であっても条件によってはガラス繊維含有率を均一にすることは可能であると思われる。

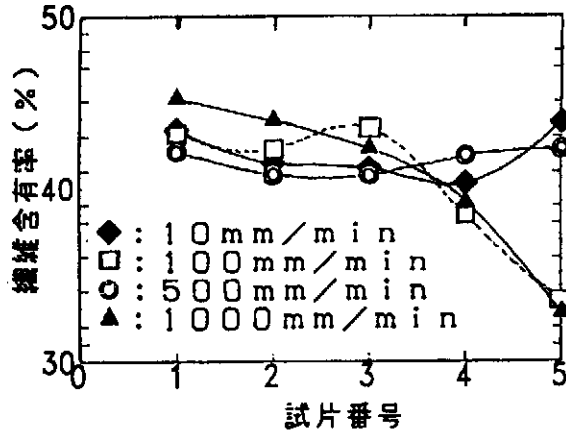


図11 ラテライトの繊維繊維含有率

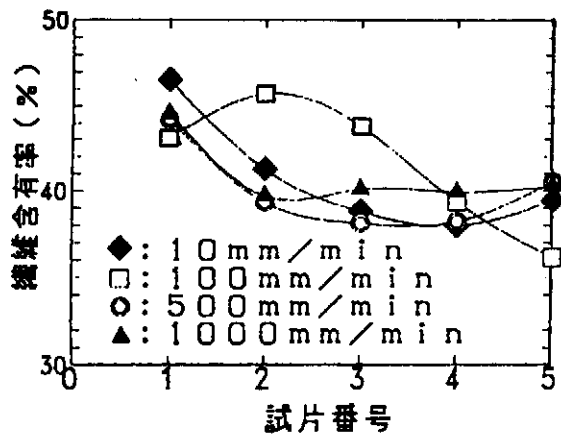


図12 KPシートの繊維繊維含有率

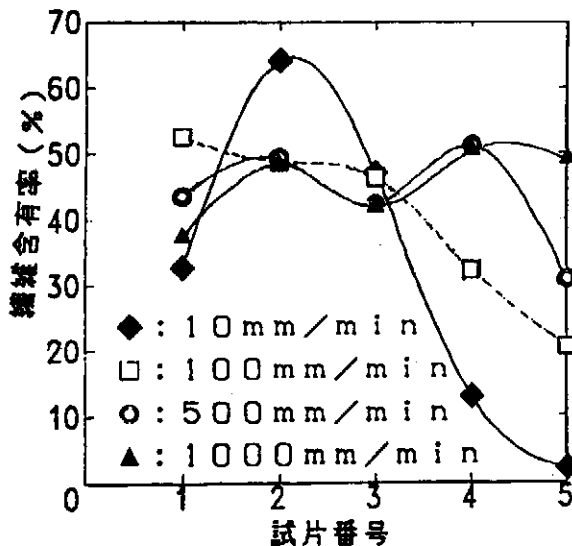


図13 Xシートの繊維繊維含有率

4. 繊維配向角分布の簡易測定法

成形品のガラス繊維の繊維配向角分布がどのような式で表示されるかを明らかにしておくことは、材料設計、成形条件の決定や成形品の力学的特性などを予測する上で重要である。

山田らは、直線繊維が2次元にランダムに配向した集合体のパラレルレイド型変形後の繊維配向角分布 $f(\theta)$ を次のように表示した。¹³⁾

$$f(\theta) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{1-J}{1+J} \cos^2 \theta + \frac{1-J}{1+J} \sin^2 \theta} \quad (1)$$

ここで、 J はStein によって定義された配向関数であり、¹⁴⁾

$$J = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \theta f(\theta) d\theta - 1 \quad (2)$$

$J=1$ で繊維が一方向配列、 $J=0$ でランダム配列、 $J=-1$ で $J=1$ の方向に対して $\pi/2$ 方向の一方向配列である。

しかし、各繊維の配向角を実際に測定することは、正確ではあるが多くの労力を必要とするので、測定法としては望ましくない。個々の繊維が識別できる対象については、簡単に配向角を測定できる交点計数法が古から用いられている。¹⁵⁾ この方法は、被測定対象上に置いた走査線と繊維との交点数によって配向角分布を求めるものである。すなわち、走査線の単位長さ当たりの交点数 $N(a)$ は次式で示される。

$$N(a) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\sin(\theta - a)| f(\theta) d\theta \quad (3)$$

ここで、 a は走査線角度を示す。

(3)式を(1)式に代入すると $N(a)$ は J で表されるので、 $N(a)$ を測定すれば、 J が決定される。(1)、(2)式の J と区別するために $N(a)$ から求めた J は J_M と表記する。

ガラス繊維の配向状態を軟X線写真により撮影した一例(図14)を用いて、この交点計数法が使用できるかどうかを検討した。すなわち、図中の中心線を含む直径50mmの円内におけるガラス繊維の配向分布を角度測定法と交点計数法とで測定した結果を図15に示した。角度測定法から求めた J は0.40、交点計数法からも求めた J_M' は0.42となった。ただし、 J_M' は繊維の重なりの影響が最も少ない配向主軸方向の $N(a)'$ から求めた J_M を示す。図より、繊維の重なりが少ない試料では交点計数法は極めて有効である。繊維の重なりが多い場合の処理法は今後の課題である。

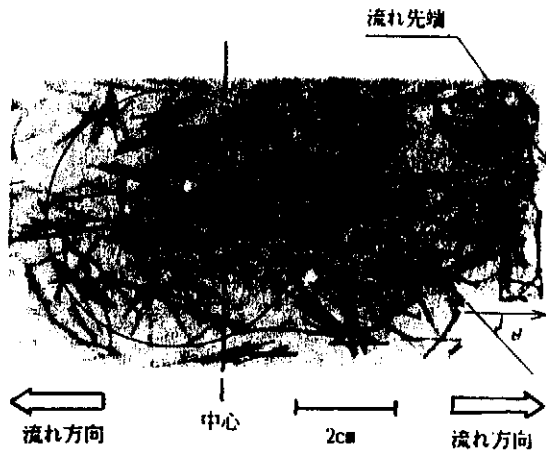


図14 軟X線写真で撮影した繊維配向状態 (圧縮比Rcr = 0.36の場合)

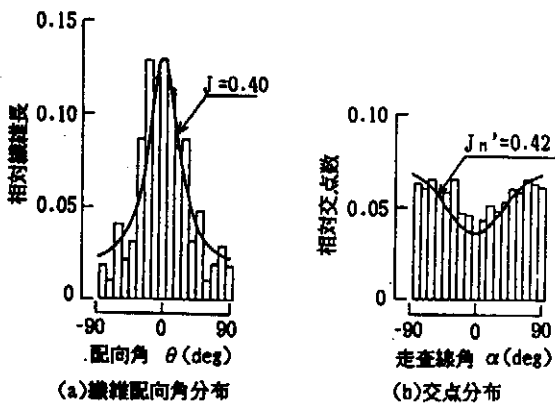


図15 角度測定法と交点計数法の計測結果の比較

5. 圧縮比と配向分布との関係

前述の第3項では圧縮比をRcr=0.73一定にした場合の実験結果であったが、その場合ラデライト、KPシートでは圧縮速度を変化させても繊維の含有率、引張り強度は略一定しており、繊維の配向も一方向に揃っていることが確認されている。

ここでは、図2の金型を用いてラデライトを圧縮加工し、圧縮比の相違と繊維の配向分布との関係を求めた。ただし、圧縮速度は20mm/minで実験した。

図16は圧縮比Rcrと配向関数 J_M' との関係を示す。繊維が流れに沿って抵抗なしに配向する場合は、圧縮に伴い配向する筈であるが、図に示すように圧縮比が約0.4までは配向の進行は僅かである。繊維をある方向に揃えるためには大きな圧縮比が必要であることが分かる。

図17は圧縮比と引張り強度の関係を示した。強度はブランクの引張り強度で割って無次元表示した。すなわち、流れの方向(平行方向)の引張り強度を σ_L 、流れと直角の方向(垂直方向)の引張り強度を σ_T 、ブランクの引張り強度を σ_0 とした。繊維の配向主軸

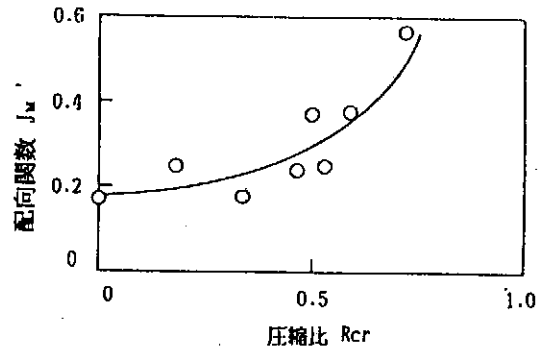


図16 圧縮比Rcrと配向関数 J_M' との関係

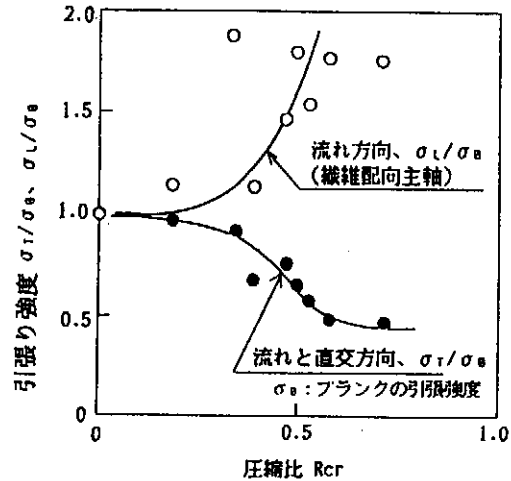


図17 圧縮比と引張り強度の関係

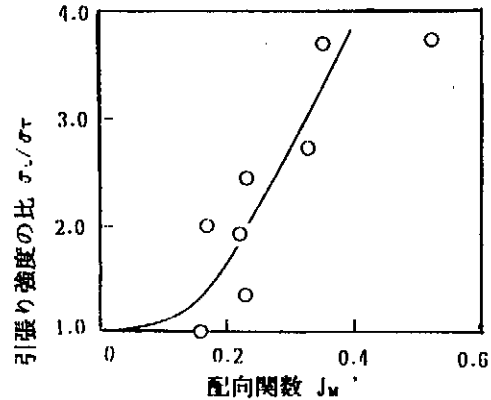


図18 配向関数 J_M' と引張り強度の比 (σ_L / σ_T) の関係

は平行方向であり、平行方向の引張り強度は大きくなり、繊維の配向方向と直角な垂直方向の引張り強度は小さくなる。使用した材料のラデライトは、圧縮比が約0.4以上で強度に大きな異方性を生ずることが分かる。ここで、配向関数 J_M' と引張り強度の比 (σ_L / σ_T) の関係を示したのが図18である。図より、ラデライトは配向関数 J_M' が0.2以上で引張り強度の異方性が顕著になることが分かる。以上のように配向関数 J_M' は、配向程度の指標として使用できることが明らかになった。

6. 結言

以上の実験で明らかになったことを箇条書きにして示すと、

- 1) 直線状の短繊維強化材では圧縮比をある値以上にすれば、繊維の配向を一方向に揃えることは可能である。これは、圧縮速度に影響されない。
- 2) 長繊維の場合、繊維の配向を一方向に揃えることは困難であるが、圧縮比・圧縮速度を大きくすれば、ある程度繊維の配向を揃えることはできる。
- 3) 繊維の配向を一方向に揃えるに従って引張り強度に大きな異方性を生ずる。
- 4) 繊維の配向の程度は交点計数法で簡単に把握ができ、配向関数 J_m' を用いて定量化ができる。ただし、繊維に重なりのある場合の処理法についてはまだ問題がある。
- 5) 最後に、材料の流れが拡散流の場合には繊維の配向を揃えるのは比較的容易であるが、収縮流のように流れが互いに干渉する場合には繊維を均一に配分することさえ困難である。したがって、流路の設計は拡散流が主体になるようにすべきである。

今後、さらにこの異方性が成形品の性能にどのような影響を及ぼすか、また成形性についてはどうかなどの検討を行い、複合材料の材料設計・材料評価の指針を明確にして行きたい。

謝 辞

本研究にご理解を頂き、研究助成によりご協力頂いた天田金属加工機械技術振興財団に謝意を表します。

参考文献

- 1) 北条英典, 玉川規一, 矢口仁, 池田輝明: 34回塑加連講論, (1983), 357
- 2) 北条英典, 金二坤, 玉川規一: 35回塑加連講論, (1984), 433
- 3) 北条英典, 金二坤, 玉川規一: *ibid.* (1984), 437
- 4) 北条英典, 金二坤, 玉川規一, 矢口仁: 36回塑加連講論, (1985), 599
- 5) 同上: *ibid.*, (1985), 603
- 6) 同上: *ibid.*, (1985), 607
- 7) 北条英典, 金二坤, 玉川規一, 太田順一朗, 田尻順一: 昭61年塑加講論, (1986), 503
- 8) 北条英典, 金二坤, 玉川規一, 小野寺勤: 36回塑加連講論, (1986), 207
- 9) 同上: *ibid.*, (1986), 211
- 10) 北条英典, 金二坤, 小野寺勤, 金錫瀬, 矢口仁: 昭62年塑加講論, (1987), 23

- 11) 矢口仁, 北条英典, 鬼海秀夫, 玉川規一, 越本勝: 39回塑加連講論, (1988), 259
- 12) 同上: *ibid.*, (1988), 263
- 13) 山田, 堀川: 繊維機械学会誌, 37-12, (1984), T201
- 14) R. S. STEIN: *J. of Appl. Phys.*, 35-1, (1964), 42
- 15) R. T. Dehoff, F. N. Rhines: *Quantitative Microscopy*, McGraw Hill Book Co., (1968)

最後に「長繊維強化プラスチック複合材料の精密プレス成形性に関する研究」への助成は、故北条英典教授に対してなされたものでありますが、故北条教授が平成7年にご逝去なされましたので、阿高松男教授に執筆していただきました。

(天田財団事務局)