

複合材料の機械的強度に及ぼす粒径と粒度分布の影響

山崎堯右・山崎重明*・宮地豊房・保田栄造
(農学部 機械工学研究室 ・ *文理学部 化学教室)

Effect of Grain Size and its Distribution on Mechanical Strength of Composite Material

Takasuke YAMASAKI, Jumei YAMASAKI*, Toyofusa MIYADI
and Eizo YASUDA

Laboratory of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture

* *Laboratory of Chemistry, Faculty of Literature and Science*

Abstract : On reviewing the past, scarcely find out the effect of grain size and its distribution on ultimate strength. In this paper, we describe the experimental results of these effects on compression, bending and Charpy impact strengths, especially in the case of utilizing the typical composite material made of paraffin-Emery as the most simple brittle model which would be fractured only at intergrains and not at intragrain. As the results of them, Petch's tendency was found to be the characteristics of such a materials.

緒 言

凍土、鉄鋼材料、近年における S. A. P. その他にみられる複合材料は単一相よりはるかに機械的強度が優れていることから、その基礎的な機構を追求することは重要である。しかし一般に分散する粒子と母材の組合せは複雑なため、その各々の破壊に対する挙動も一律ではない。またその結合状態も色々の Case があろう。ここでは、粒子と母材の間が単に機械的接触のみであって、さらに母相と粒子の両者が破壊するような複雑な現象を避け、単に母相のみが破壊する場合を基本的な複合材料の組合せの一つと考えてとりあげた。

粒子の形状係数は多少問題が残るが、極端に粒子の強度が大きい例として研磨材のエメリを選び、母材としてのなじみと取り扱いの上からパラフィンを使用した。結果的には、低温では、非常に望ましいモデルとしての脆性を示している。

実験方法と材料

以下使用する記号をここで定義する。

A : テストピース断面	[cm ²]
b : 曲げ試験用テストピース幅	[cm]
d : 粒径 (ただしここではふるい目びらきとする)	[μ]
h : 曲げ試験用テストピース高さ	[cm]
l : 曲げ試験機支点間距離	[cm]
M : 最大曲げモーメント	[kg · cm]
P : 最大荷重	[kg]
R : 衝撃試験機ハンマの重心半径	[m]
T : 時定数	[分]

U : シャルピ衝撃値	$[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2]$
V : テストピース容積	$[\text{cm}^3]$
V_1 : パラフィンの占める容積	$[\text{cm}^3]$
V_2 : エメリの占める容積	$[\text{cm}^3]$
V_f : エメリの占める混合割合	$[-]$
W_a : テストピース重量	$[\text{gr}]$
W : 衝撃試験機ハンマ重量	$[\text{kg}]$
α : ハンマのテスト前の振上角度	$[\text{度}]$
β : ハンマの打撃後余勢で振よった角度	$[\text{度}]$
γ_1 : パラフィンの比重量	$[\text{g}/\text{cm}^3]$
γ_2 : エメリの比重量	$[\text{g}/\text{cm}^3]$
σ : エメリ粒子の標準偏差	$[\mu]$
σ_b : 曲げ強度	$[\text{kg}/\text{cm}^2]$
σ_c : 圧縮強度	$[\text{kg}/\text{cm}^2]$

実験材料には、緒言で述べたごとく、母相のみで破壊する脆性材料で、テストピースの製作上常温付近で溶け、混ぜあわせよく、互に親和性があり、安価で、かつ空隙の生じないものとして、パラフィンとエメリを使用した。両者の概要は次の通りである。

- (1) パラフィン：供試パラフィンの実測の結果、比重量 $0.890 \text{ gr}/\text{cm}^3$ 、融点 $55^\circ\text{C} \sim 56^\circ\text{C}$ でパラフィンのみの破壊に対する強度は図12, 13, 14に示す。
- (2) エメリ：使用したものは宇治電化学製トサエメリ・エキストラであって、細粒の銑鉍状の研磨材であり、磁鉄鉍、赤鉄鉍、石英などが混じっている。供試材は、 SiO_2 8.0~22.0, Fe_2O_3 4.0~16.0, Al_2O_3 62%以上のものであった。なお、エメリの比重量は実容積測定装置によった。

本実験に使用したエメリのふるい通過百分率による粒度分布曲線は図1に示す通りである。なお図1中、曲線1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11は前記会社の製品のままのものであって、曲線4, 9, 10, 12, 13はそれらを2から4種混合して作成したものである。

電熱機にて水槽中の容器でとかしたパラフィンにエメリを適量混入攪拌したものを、テストピース仕上り寸法より2から3 cm 大きいめの型枠に静かに流しこみ、自然放熱したのち、沈澱した下部よりの層を規定寸法のテストピースに削りだした。型枠はガラス板で仕切ったものを油紙でおお

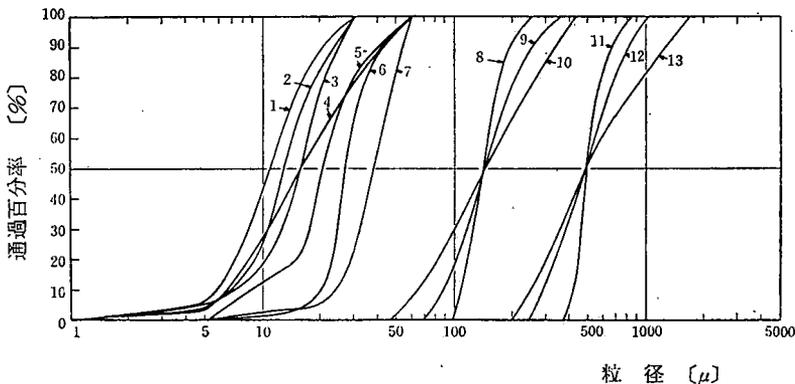


Fig. 1. エメリの粒度曲線
Size Distribution of Emery

い直方形にセロファンテープで固定したものである。混ぜ合わせるエメリとパラフィンの量は多少粒径によってもことなるが、ほゞエメリの量が容積にして、全体の45%以上になれば混合しにくくなり、25%以下になるとエメリが沈澱するので、その間の混合割合で、図1の粒度分布のものについて、各々混合割合を変えて4個づつ作成した。なお、混合割合は後述する。テストピースは1日を経て充分に冷却を行ったのち、型枠を取りはずし、1週間以上経過した後、形削り盤によって、定まった寸法に序々に少ずつゆっくり削りとり、残留歪の影響のないようところがけた。

圧縮試験については、島津万能試験機 (Type RH-30, 最大 30 tw) に加圧板をはさみ、荷重速度を 1.44 mm/分、試験温度 10.5°C~13.5°C の条件で行った。テストピースの寸法は高さ 65±1 mm, 縦横 35±1 mm である。衝撃試験は同じく島津製作所のシャルピ型衝撃試験機である。試験温度は 10°C~10.5°C, α=90° に統一した。テストピースの寸法は高さ 25±1 mm, 幅 30±1 mm, 長さは 70±2 mm とし、切り欠きは設けなかった。曲げ試験については、コンクリート用ミハエリス二重テコ形の丸東製作所製の曲げ試験機によった。試験温度は 9.4°C~10.5°C で行った。この場合エッジがテストピースにくい込むので、厚さ 1 mm, 幅 1 cm, 長さはテストピース幅の 35mm のジュラルミン板をテストピースと圧子との間にはさみ試験した。テストピースの寸法は h が 40

Table. I

種 類	長さ [mm]	幅 [mm]
曲げ試験用	160	40
圧縮試験用	70	40
衝撃試験用	70	40

±1 mm, 幅が 35±1 mm, 長さが 160±2 mm に仕上げた。

まづ最初に、パラフィンのみのテストピースにおける各強度の温度依存性を吟味した。すなわち、あらかじめパラフィンの圧縮、曲げ、衝

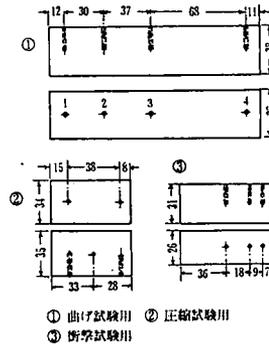


Fig. 2 温度検定用テストピースの熱電対の端子の位置

Thermo-couple Taps

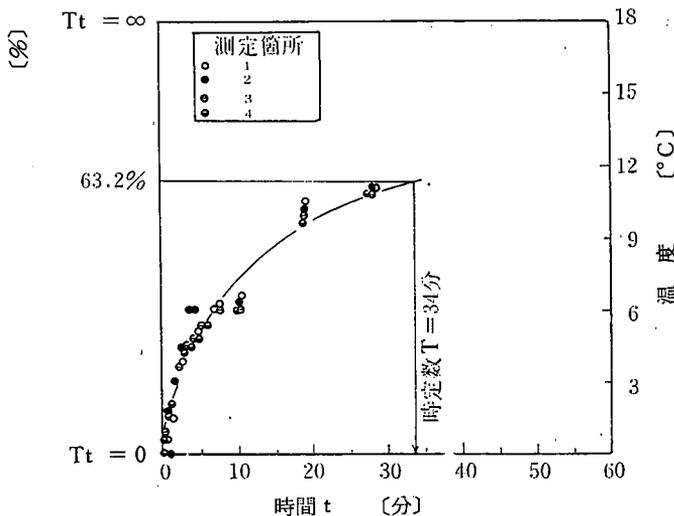


Fig. 3 パラフィンのみのテストピースにおける温度と時間の関係
Thermal Response of Specimens

撃試験の規定寸法に作られたテストピースの図2の個所に、銅コンスタンタンの熱電対の端子を埋めこみ、18°Cから0°Cの氷水の中に急に入れた場合および、氷水から18°Cの室温に急に变化させた場合について、各場所の応答を測定した結果、図3に示すごとく、時定数が略34分とえられ、場所による相異はあまりみられなかった。次に、各テストピースを冷蔵庫の0°Cの雰囲気および40°Cの湯の中に半時間以上放置したのち、取り出し、室温で圧縮、曲げ、衝撃試験を行ない、そのときの経過時間から図3の関係によってテストピースの平均温度を求めた。これらの結果を図4に示

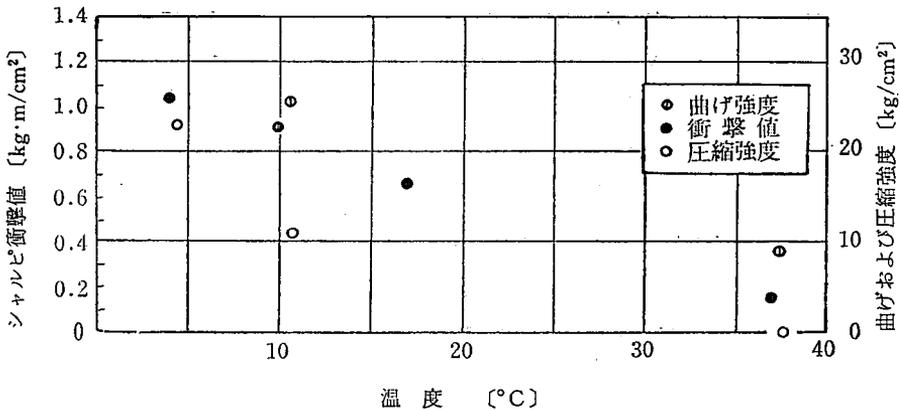
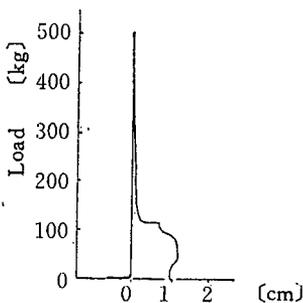


Fig. 4 パラフィンの強度の温度依存性
Effect of Temperature

す。これより、圧縮、曲げ、衝撃強さ共、温度が低いほど強い傾向を示している。このように温度の効果が著しいため、試験中の周囲の温度は±1.5°Cの変動以内におさえ、誤差を極力避けた。各々の強度は次式によった。すなわち $\sigma_b = M/Z$ 、ただし Z は断面係数で $bh^2/6$ とする。 $M = Pl/4$ 、 P は最大荷重である。また、 $\sigma_c = P/A$ 、 $U = WR (\cos \beta - \cos \alpha) / A$ 、(この場合 $R = 0.75$ m) の関係にあり、その他の試験方法の詳細は金属の場合に準じた。

実 験 結 果

以上の手順によって、試験を行った結果、たとえば圧縮試験の図5の例のように、荷重と変位の関係はほとんど直線で破壊にいたり、完全な脆性の挙動を示した。



A length in the direction of compression

Fig. 5 伸び荷重線図
Compression Test Diagram

写真1, 2, 3は曲げ試験、圧縮試験、衝撃試験を行った後のテストピースの破面の形状である。写真1, 2, 3において、横の列は混合したエメリの粒径の大小を示し、左より右に図1の曲線の No. 13, 12, 11, …… No. 1の順となり、写真で右に行くほど粒径は微細になっている。縦の列は同一の粒径でエメリの混合割合のことなるテストピースである。

これらのことにより、本実験の温度の雰囲気では、各テストピースとも、脆性破壊としての破面の特徴が認められる。

次に、エメリの混合割合のちがいをみるため

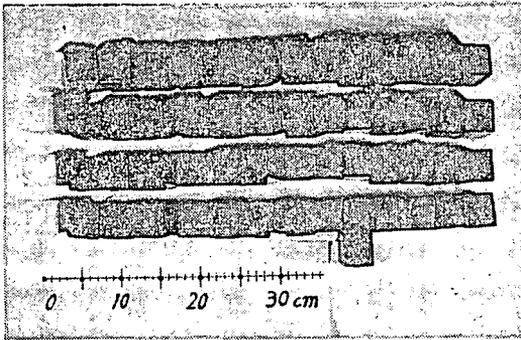


Photo. 1 Specimens in Bending Test

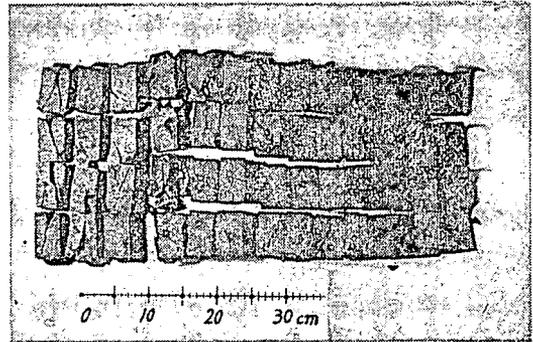


Photo. 2 Specimens in Compression Test

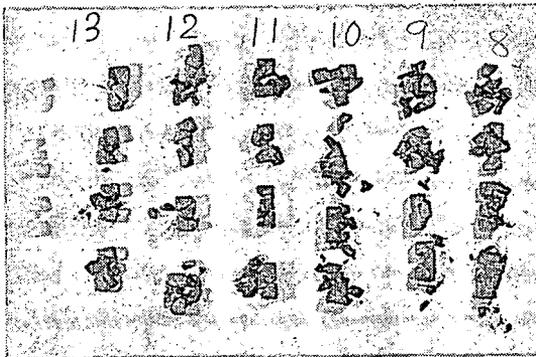
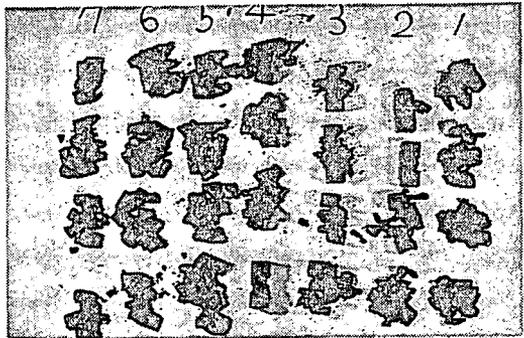


Photo. 3 Specimens in Impact Test



に、仕上がったテストピースの重量 W_a (gr) と容積 V (cm³) を測定することによって、次式からエメリの混合割合 V_f を求めた。すなわち、

$$V_2 = (W_a - \gamma_1 V) / (\gamma_2 - \gamma_1)$$

$$V_1 = (-W_a + \gamma_2 V) / (\gamma_2 - \gamma_1)$$

$$\therefore V_f = (V_2 / V) \times 100 \quad (\%)$$

図6, 図7, 図8は圧縮, 曲げ, 衝撃強さと前述の方法によって求めたエメリの混合割合との関係を, 各粒径別に示したもので, パラメーターとしてエメリ粒度分布の標準偏差をあらわした。図6, 図7, 図8より各強さとも, 粒径によっては多少の傾向がみられるが, 全体的にみれば, 本実験の範囲ではちがいが無いようである。

次に, エメリの粒度分布の粒のそろい具合, すなわち標準偏差を変えた場合を調べた。

エメリの粒度分布を決定する図1において, 50%の粒径が等しく, かつ分布のことなる曲線 No. 3, 4, 8 と No. 8, 9, 10, または, No. 11, 12, 13の組み合わせについて, 各々標準偏差を求め, 粒径別に圧縮強さ, 曲げ強さ, およびシャルピの衝撃値と標準偏差の関係を求めた。

図9, 図10, 図11はこの混合割合をパラメーターに示したものである。これについても同様に, 多少のばらつきがあるものの, 粒径の分布はこの程度ではあまり効いてこないと思われる。

最後に, エメリの50%粒径を横軸に各々の強さを図示すれば, 図12, 図13, 図14の傾向となる。いずれの場合も多少のばらつきはあるが, 粒径の小さくなるほど著しく強くなる傾向が認められる。これらの関係を両時数にプロットしてみると, 圧縮試験と曲げ試験による結果はいずれも $\sigma \propto d^{-1/2}$ で, 衝撃値は $\sigma \propto d^{-1/5}$ の傾向を示すことがわかった。

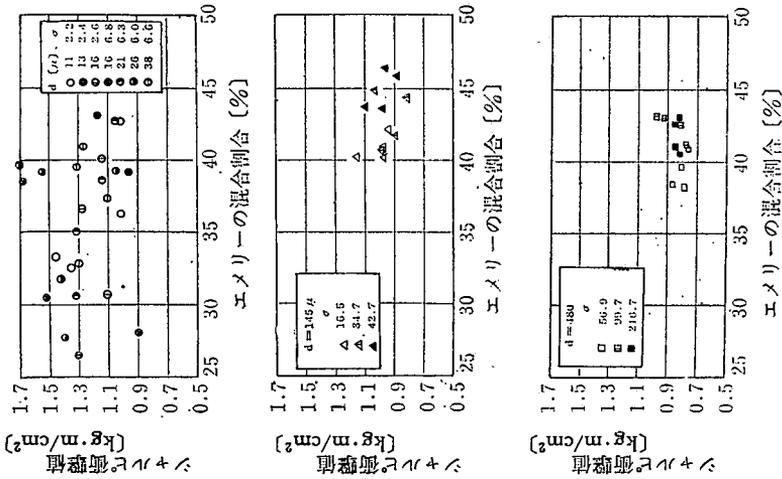


Fig. 6 シャールピ衝撃値とエメリー混合割合の関係
Absorbed Energy for Different Mixing Ratio

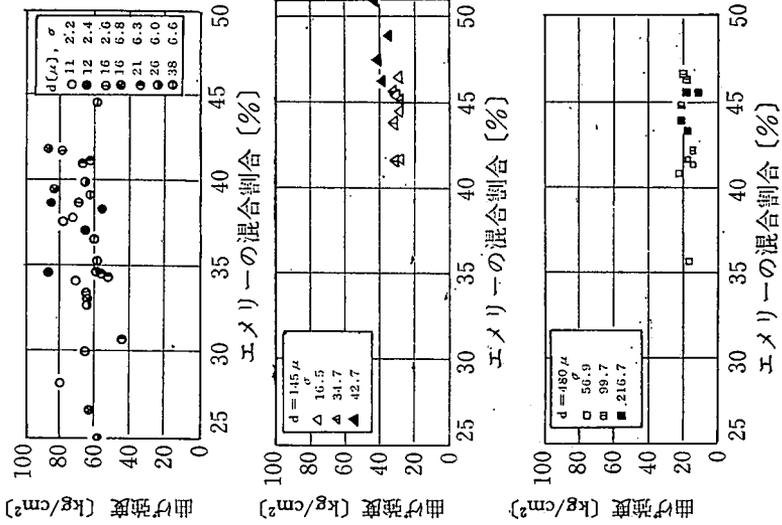


Fig. 7 曲げ強度とエメリー混合割合の関係
Bending Strength for Different Mixing Ratio

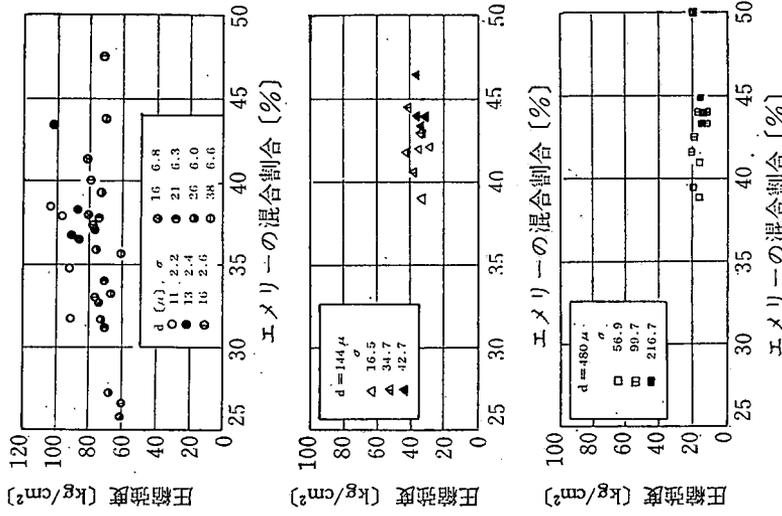


Fig. 8 圧縮強度とエメリー混合割合の関係
Compressive Strength for Different Mixing Ratio

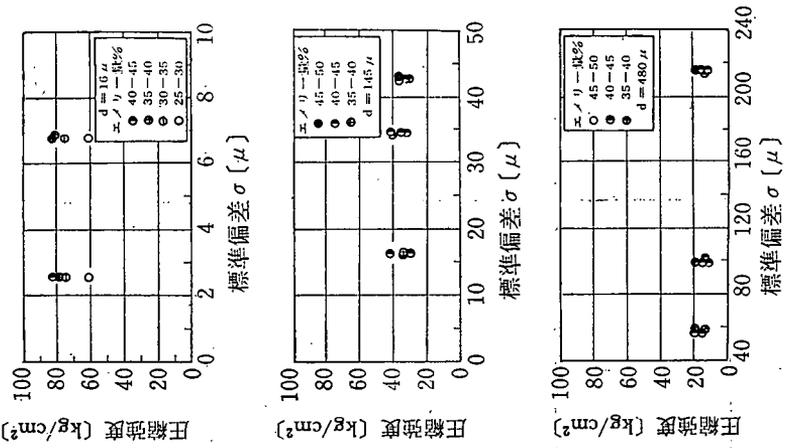


Fig. 11 圧縮強度と標準偏差の関係
Compressive Strength for Different Standard Deviation in Grain Size

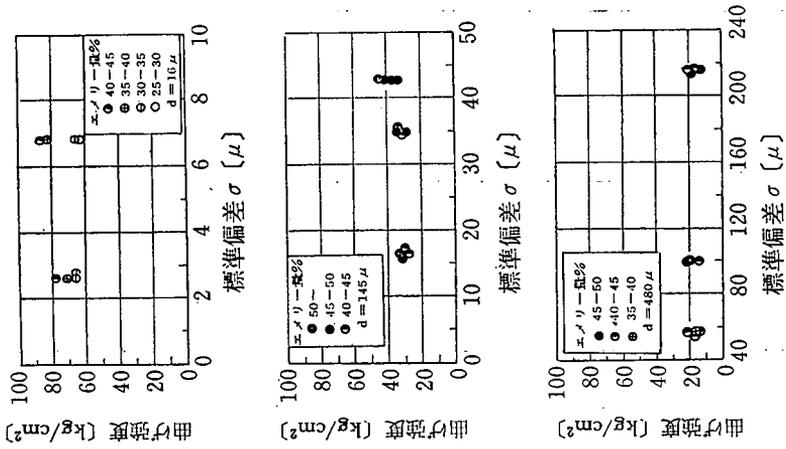


Fig. 10 曲げ強度と標準偏差の関係
Bending Strength for Different Standard Deviation in Grain Size

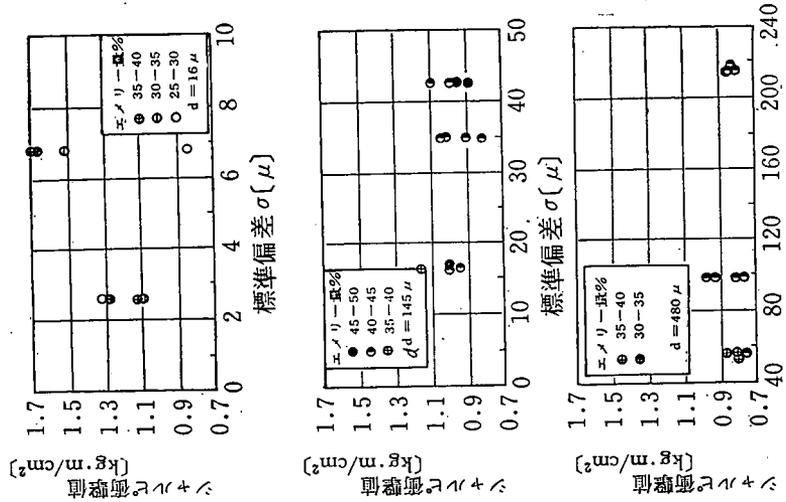


Fig. 9 シャルピ衝撃値と標準偏差の関係
Absorbed Energy for Different Standard Deviation in Grain Size

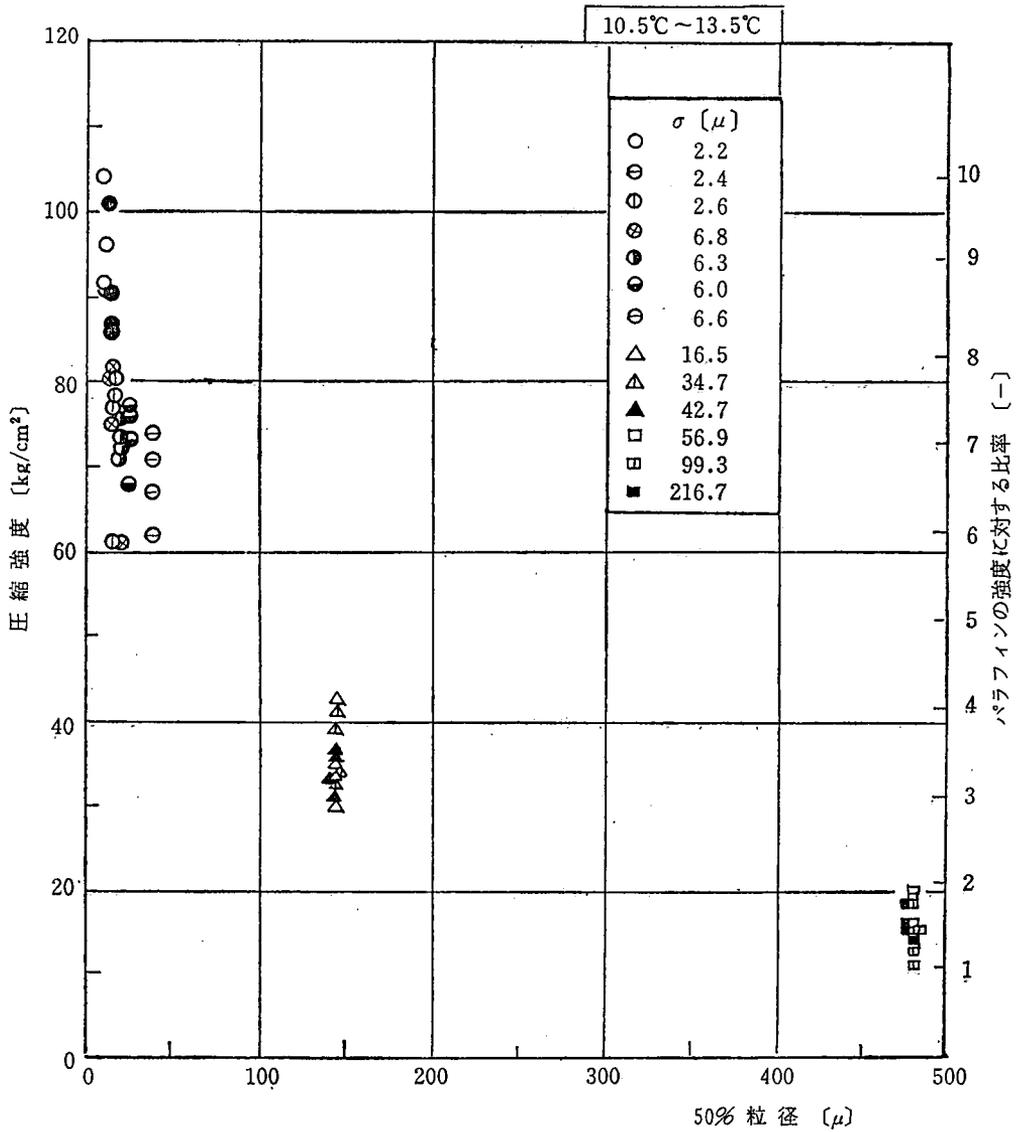


Fig. 12 50% 粒径と圧縮強度の関係
 Effect of 50% Grain Dia. on the Ultimate Strength in Compression Test

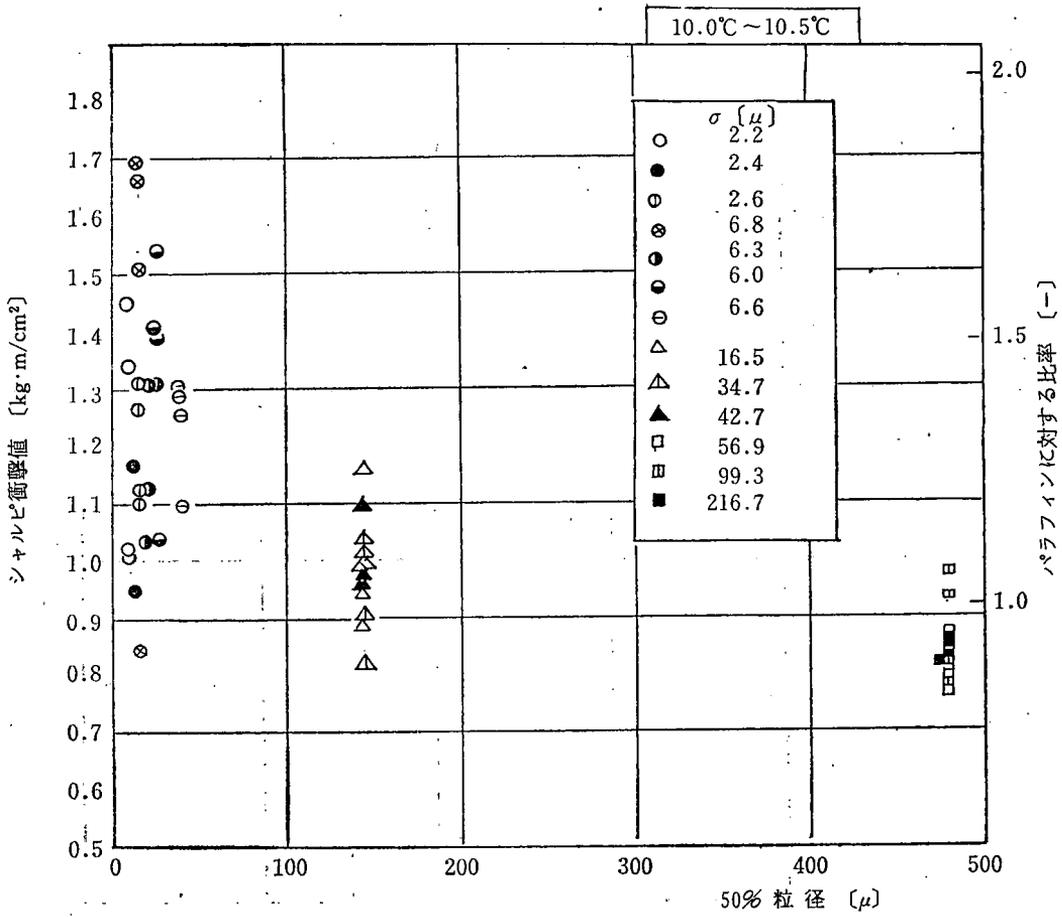


Fig. 13 50%粒径とシャルピ衝撃値の関係
Effect of 50% Grain Dia. on the Absorbed Energy in Charpy Test

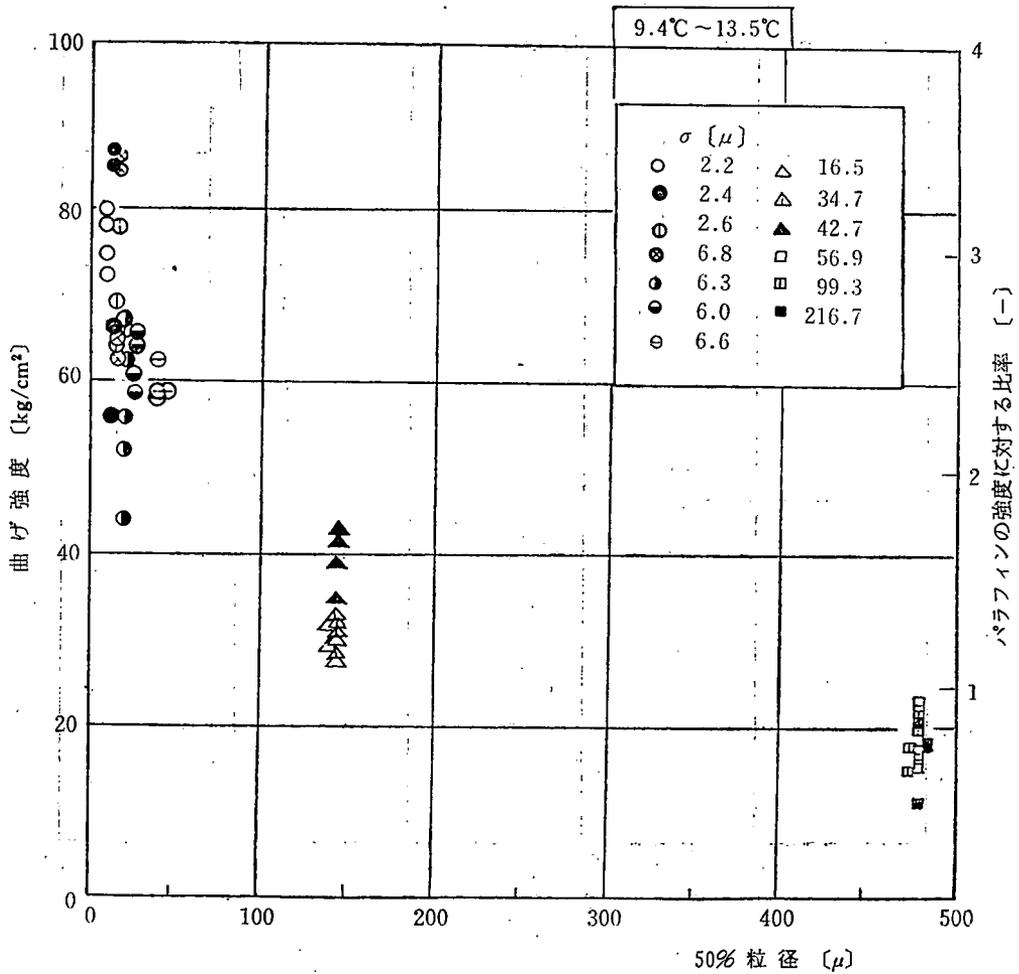


Fig. 14 50% 粒径と曲げ強度の関係
Effect of 50% Grain Dia. on the Bending Strength

これらの傾向は Petch によって知られている分散強化型複合材料の一般の傾向と一致する。

結 論

以上の実験より次の諸点が明らかとなった。

- i) 分散強化型複合材料のモデルとして、供試材料は極めて良好である。
- ii) 粒径の小さくなるにつれて、強さが極めて増大する傾向は Petch⁽⁵⁾ による粒界、母材両者の破断する事例と一致しており、この傾向は母材の破壊の特徴が主体をなしていると考えられる。
- iii) 本実験の範囲の粒度分布、母材との割合では機械的強度に大きな差異を与えず、50%粒径を代表寸法として採用できる。

今後は、粒径を小さくしていった、どこ迄強度が増加するかを追求したい。

丁度、懸濁液中での光の透過、音波の吸収についてはよく知られているように限界があり、最終

的に無限に小さく均一相に近づけば、単一の材料の性質を示す筈であって、材料中を伝播するエネルギーの分散の挙動の統一的な機構に支配されているものとする。

文 献

- 1) 高橋, 日本機械学会誌, Vol. 71, No. 593, 821 (1968)
- 2) 梅川, 日本機械学会誌, Vol. 70, No. 576, 90 (1967)
- 3) 久保, 永渡, 中川, 早川, 粉体, 丸善出版, 昭和41年第4刷, pp. 233
- 4) 宇治電化学工業K. K. トサエメリ規根
- 5) Petch, N. J., J. Iron and Steel Inst., 174 (1953), 25
- 6) 山崎ほか, 日本機械学会講演論文集, 16210(1969-8), 79-82.

(昭和47年9月30日受理)

