

氏 名	Kim 金	E 二	Gon 坤
授与学位	工 学 博 士		
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 25 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻		
学位論文題目	繊維強化高分子複合材料の成形における繊維の分離 と配向に関する研究		
指導教官	東北大学教授 北條 英典		
論文審査委員	東北大学教授 北條 英典	東北大学教授 小林 陵二	
	東北大学教授 高橋 裕男		

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

高分子材料（プラスチック）を母材とし、これを繊維で強化した繊維強化高分子複合材料の成形品の諸特性は、繊維の量や形態によって支配される。この材料を成形する場合の大きな問題点は成形に伴うプラスチックと繊維の分離および繊維の配向によって、成形品が不均質となり、成形品の強度や特性にバラツキが生じることである。したがって、この分離・配向を成形条件や材料と関連させて明確にし、さらに分離・配向を制御することが、優れた成形品を得る上で極めて重要である。しかし、これまで成形加工に関する報告は少なく、僅かに成形性に及ぼす加工温度の影響や深絞り性に関する報告がある程度であって、分離・配向に関する系統的な研究はまったく行われていないといつてよい。

そこで本研究は成形中におけるプラスチックと繊維の分離および繊維の配向を理論的、実験的に明らかにし、適正加工条件の決定、適正部品設計、あるいは複合材料の材料設計に対する指針を与えることを目的とする。

### 第 2 章 成形に伴う不均質性の生成

本章では、粘度と成形荷重について論じた。すなわち長繊維強化プラスチック複合板は、流動に伴う分離・配向を生じるため、粘度の測定が困難で測定例も見あたらない。そこで分離・配向によ

って成形品内に生じる不均質性を表す尺度として不均質度を定義し、板面垂直方向の平板圧縮(円板の圧縮および矩形板の平面歪圧縮)によって、不均質度のある範囲では材料を擬塑性流体として扱い、流動成形中の粘度を測定することができることを示し、各種条件下での粘度測定に初めて成功した(図1)。さらに不均質度と成形荷重、成形圧力の関係について実験的に検討し、材料を擬塑性流体として取り扱えない領域での荷重降下率と不均質性の関係について考察し、不均質度が大きくなると、全流動抵抗に占める繊維の流動抵抗の比率が大きくなることを明らかにした。

### 第3章 分離に関する理論解析と実験

長繊維強化プラスチック複合材料が等温で流れる場合について、プラスチックと繊維の分離を表す理論式を導いた。すなわち、流れは固液混相流とし、繊維を球または円柱と仮定して繊維に作用する抗力と相互拘束力の釣り合いから繊維の分離を表す分離方程式を導き、分離のしやすさを示す分離係数を提案した。分離係数を使って、平板圧縮のさいに生じるプラスチックと繊維との平均分離距離( $S_{mf}/k_s$ )を計算し、これと実験との対比により、本理論が妥当であることを示した(図2)。さらに圧縮比が大きくなれば、繊維の分離距離も大きくなること、圧縮速度( $\dot{h}$ )が小さくなれば、繊維の分離距離も大きくなり、ある速度以下では急に大きくなること、繊維の分離距離が大きくなれば、成形品の不均質性は大きくなること、などが明らかになった。

### 第4章 前方押し出しにおける分離

第3章で導いた理論を押し出し加工に適用し、分離係数( $k_{sp}$ )、充填率( $\phi$ )、押し出し圧力に及ぼす材料、成形速度( $v_c'$ )、成形温度( $T$ )、ダイス入口( $R_0$ )の形状などの影響について検討し、次のような結果を得た。

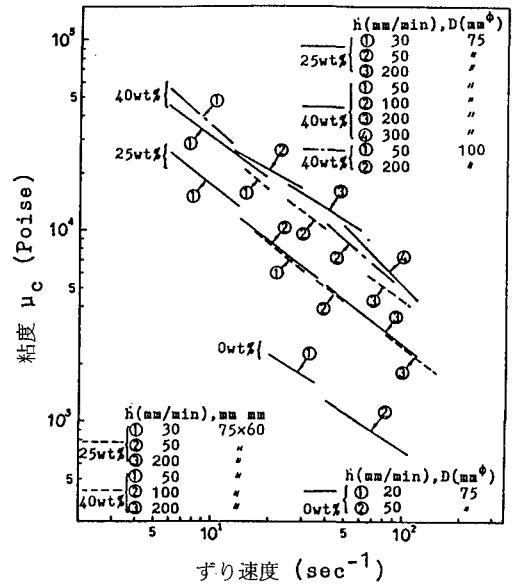


図1 ずり速度と粘度  
(試料形状, 繊維含有率, 繊維長の影響)

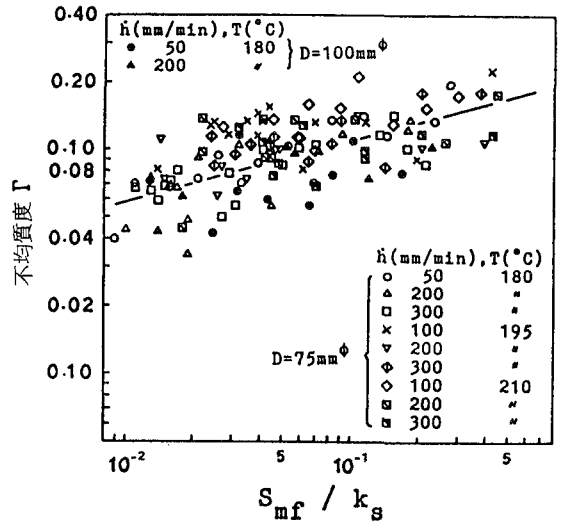


図2 繊維の分離距離と不均質度  
(球と仮定, 円板圧縮, 40 wt%)

(1) 成形速度が増加すれば、充填率は上昇する。すなわち、分離は少なくなる (図3)。

(2) 分離係数および繊維押し出し圧力は成形速度が増加すれば上昇する。またダイス入口形状によって、強く影響されるが本実験の範囲では温度の影響は認められない。

(3) 押し出し圧力にはダイス入口半径が強く影響する。

(4) 成形速度がある速度以下になるとダイス入口部分の繊維含有率比は急に上昇する。

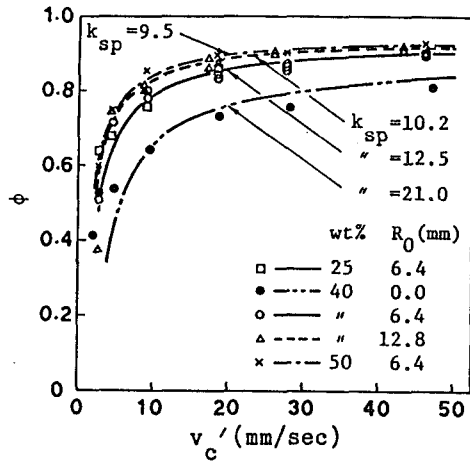


図3 理論曲線と実験値の比較  
(球と仮定, 成形温度: 180°C)

### 第5章 平板圧縮における繊維含有率の分布

分離方程式を使って、一次元流れである矩形板の平面歪圧縮成形および二次元流れの円板圧縮成形の場合

についての移動距離を求めて繊維含有率分布を計算し、実験結果と比較した。さらに、この繊維含有率分布に及ぼす成形条件および金型温度の影響について検討した。得られた主な結果は次のようである。

(1) 繊維含有率分布の理論値は実験とよい一致を見た (図4)。

(2) 繊維含有率の分布に及ぼす金型温度の影響は小さい。

(3) 圧縮比および分離係数が大きくなるほど、圧縮速度が小さくなるほど、不均質度は大きくなる。

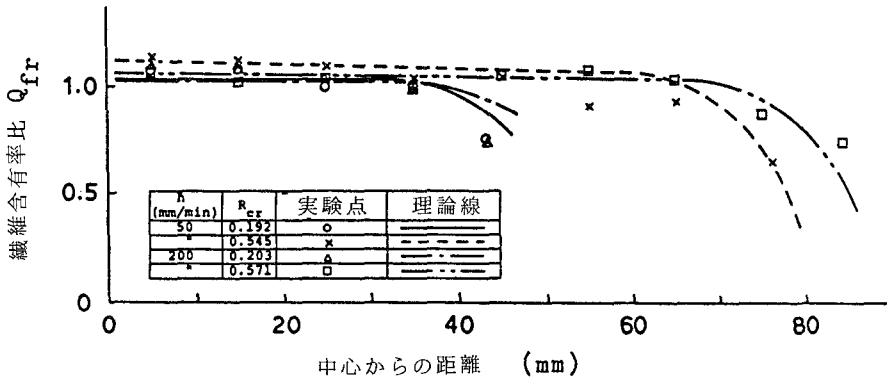


図4 矩形板の圧縮成形における繊維含有率比  
(球と仮定, 成形温度: 180°C, 分離係数: 7.0)

### 第6章 後方押し出しにおける繊維含有率の分布

二次元平面歪後方押し出しの場合の繊維含有率分布について検討した。すなわち、材料を擬塑性流体として成形品内の流動速度分布を有限要素法によって求め、これと分離方程式から成形品の繊維含有率分布を計算し、実験と比較検討し、次のような結果を得た。

(1) 成形品の繊維含有率分布の計算値は、実験とよい一致を見た。

- (2) 成形速度が非常に遅い場合には、分離が激しく生じ、粘度も大きくなって成形荷重が急に大きくなる。
- (3) 押し出し品の底部の繊維含有率は、ある成形速度になって急に上昇する。
- (4) 成形速度が上昇すれば、繊維含有率の不均質性は少なくなる。

## 第7章 配向に関する理論解析と実験

材料の流動に伴う繊維の配向について論じた。すなわち、長繊維の相互拘束力に基づく回転抵抗を表す回転抵抗係数 ( $H_r$ ) の導入を提案して繊維の配向を表す理論式を導き、その妥当性を検討した。さらにこの回転抵抗係数と分離係数との関係について調べた。主な結果は次のようである。

- (1) 繊維の回転に対抗する抵抗トルクを表す回転抵抗係数を導入することによって成形中の繊維の配向を表す理論式を導き、実験と極めてよい一致が見られ、本理論が妥当であることが示された (図5)。
- (2) 回転抵抗係数と分離係数との間には強い相関関係がある。
- (3) 配向角は圧縮比が大きく、回転抵抗係数が小さいほど大きくなる。

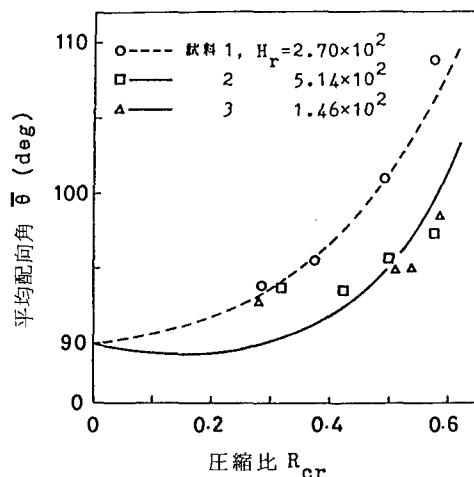


図5 圧縮比と平均配向角  
(実験と理論の比較, 打点は実験値)

## 第8章 分離・配向を伴う成形におけるフローフロント

任意の形状を持つ成形品の圧縮成形中におけるフローフロントを、分離と配向によって生じる材料の粘度の変化とその異方性を考慮に入れて、計算する方法を提案し、実験と対比してその妥当性を検証し、さらにフローフロントに及ぼす分離・配向の影響を理論的に検討し、次の結果を得た。

- (1) フローフロントの分離・配向を考慮した理論式を提案し、圧縮成形に適用して実験とよい一致をみた (図6)。
- (2) 本実験で使った材料の範囲の分離係数・回転抵抗係数の値ではフローフロントの形状、成形荷重、圧力の変化は小さい。

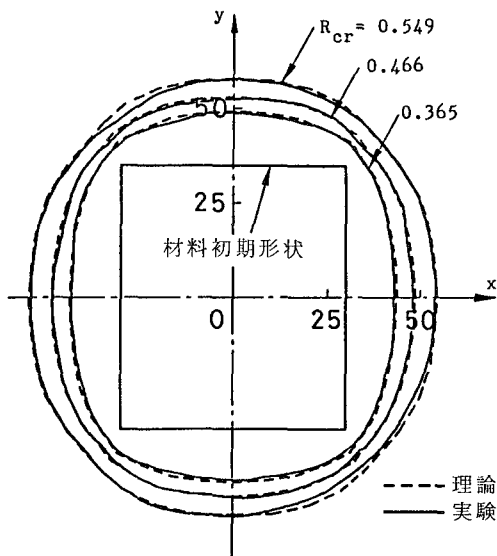


図6 フローフロントの実験と理論の比較  
(18.7 wt%)

(3) フローフロントに及ぼす異方性の影響は大きい。

## 第 9 章 結 論

本章は結論であり，第 2 章から第 8 章において得られた結果を要約して述べた。以上より，分離・配向を支配する基本パラメータが明らかになり，適正加工条件の決定，適正部品設計，複合材料の材料設計などを行うための指針を与えるものとして有用であると考えられる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

繊維強化高分子複合材料を成形する場合の大きな問題は、成形に伴うプラスチックと繊維の分離や繊維の配向によって、成形品が不均質になり、成形品の強度や特性にバラツキが生じることである。本論文はこの繊維の分離や配向を制御し、優れた成形品を得ることをねらいとして、成形中の分離・配向を材料、成形条件と関連させて理論的、実験的に明らかにしたものであり、全編9章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、分離によって生じる成形品の各部分における繊維含有率の変化の尺度として不均質度を定義し、板面垂直方向の平板圧縮によって、不均質度のある範囲では材料を擬塑性流体として流動成形中の粘度を測定できることを明らかにし、各種条件下での粘度測定に初めて成功している。

第3章では、成形中の材料の流動を固液混相流として扱い、プラスチックと繊維の分離を表す理論式を導き、分離のしやすさを表す尺度として分離係数を提案し、更に分離係数を使って、平板圧縮のさいに生じるプラスチックと繊維との平均分離距離を計算し、これと実験との対比により、本理論が妥当であることを示している。これは重要な提案である。

第4章では第3章で導いた理論を前方押し出しの場合の繊維充満率に適用し、成形速度、成形温度、ダイス入口の形状の充満率に及ぼす影響を明らかにしている。

第5章では、平板および円板を圧縮成形する場合について、成形品の繊維含有率分布をさきの理論を用いて計算するとともに実験的に検討し、圧縮比および分離係数が大きいほど、圧縮速度が小さくなるほど不均質度が大きくなるなどの有益な知見を得ている。

第6章では、後方押し出しの場合の繊維含有率分布について検討している。すなわち有限要素法によって複雑な形状の部品の繊維含有率を計算する方法を初めて確立している。

第7章では、流動中の繊維の流体抵抗による回転力と、繊維間の摩擦力や絡みによる相互拘束力との釣合から回転角が決まるものとして、配向を表す理論式を導き、矩形板の圧縮成形に適用して本理論の妥当性を示している。また配向しにくさを表す回転抵抗係数を提案しており、これらは有用な知見である。

第8章では、任意の二次元形状を持つ成形品の圧縮成形中におけるフローフロントを、分離・配向によって生じる材料の粘度の変化とその異方性を考慮に入れて計算する方法を提案し、圧縮成形に適用して実験と比較検討し、本理論により極めて流動状況を良く表現できることを示している。これは重要な成果である。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、繊維の分離と配向を支配する基本パラメータを明らかにしており、適正加工条件の決定、適正部品設計、複合材料の材料設計などを行うための有用な指針を提案したもので、機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。