

## 板状粒子分散材料の透水性シミュレーション

松岡孝明

## Numerical Simulation of Water Diffusivity through Polymer Filled with Plate-like Particles

Takaaki Matsuoka

## 要 旨

ナイロン6-粘土ハイブリッド（NCH）の水バリア性が優れている理由を明らかにするために、NCHを板状粒子分散系の複合材料と見なして、NCH内における水の拡散挙動を有限要素法により数値解析した。NCH内において粘土は $100 \times 100 \times 1$ nmの板状粒子として分散している。板状粒子が分散していない場合の拡散係数に対して分散している場合の比率、すなわち

相対拡散率について計算結果を実験結果と比較した。その結果、両者はよく一致した。計算機シミュレーションによって、NCHの水バリア性は、粘土の体積分率、寸法、配向、配列に依存しており、主に板状粒子として高度に配向した粘土の障害物効果によって向上していることを明らかにした。

## Abstract

Diffusion behavior of water through a composite filled with plate-like particles was numerically analyzed using the finite element method to examine the excellent water barrier property of nylon-6/clay hybrid (NCH). In NCH, the clay was dispersed as  $100\% \sim 100\% \sim 1$  nm plates. The calculated results were compared with experimental ones with regard to relative diffusivity, which is defined as the ratio of

the diffusion coefficient of NCH to that of nylon 6. This comparison gave good agreement between them. The computer simulation demonstrated that the water barrier property of NCH depended on the volume fraction, size, orientation, and placement of the clay; and that it is mainly increased by the obstacle effect of highly oriented clayey plates.

## キーワード

有限要素法, 水バリア性, 数値計算, 拡散係数, 板状粒子, 複合材料, ナイロン6, 粘土, 配向

## 1. はじめに

物質の中に異種の粒子を充てんした粒子分散系複合材料は材料として多くの用途に使用されている。高分子材料では、強度向上のためにガラス繊維やカーボン繊維など複合した繊維強化樹脂、剛性や耐熱性向上のためにタルクや炭カルを充てんした無機複合樹脂などが挙げられる。これらの粒子の大きさはミクロンメートル単位のものであるが、最近では、ナノメートル単位の微粒子を用いたナノ複合材料が注目され、性能面だけでなく機能面での新規な特性が期待されている。一方、地球環境の保全および資源の有効利用を目指すリサイクルの観点からも材料の複合化はますます重要な技術になっている。そのため、粒子分散系複合材料の開発を支援する計算機支援技術の開発と確立を進めている。

最近、ナイロン6に層状粘土鉱物の一種であるモンモリロナイトを分散させたナイロン6-粘土ハイブリッド（以後NCHと記す）が開発され<sup>1)</sup>、自動車部品に実用されている。粘土はナノメートル単位の板状微粒子となって分散しており、いわばナノ複合材料とも言える。NCHは射出成形が可能で、その特性は通常のナイロン6に比べて強度、弾性、耐熱性に優れ、さらに機能面では水バリア性が著しく向上している<sup>2)</sup>。

バリア性は、気体および液体が物質内に溶解し、物質内を拡散し、透過することに関連する特性で、粒子分散系複合材料の透過率について粒子の障害物効果による理論モデルが提案されている<sup>3, 4)</sup>。しかし、理論モデルではNCHの水バリア性向上を十分に説明できておらず、ナイロン6とモンモリロナイトとが化学結合していることから、ナイロン6の結晶構造変化によるマトリックス自体の拡散係数の低下も大きな要因の一つであると考えられている。

そこで、NCHの水バリア性を粘土すなわち板状粒子の障害物効果だけで予測できないか調べるために、ナイロン6すなわちマトリックス内における水の拡散挙動を有限要素法を用いて数値解析した<sup>5)</sup>。

## 2. 理論

### 2.1 近似モデル

液体または気体は、物質中に溶解して濃度分布を与え、濃度分布に応じて拡散し、物質を透過する。前者は溶解度係数によって、後者は拡散係数によって表さ

れ、透過率は両者の積で与えられる。ここでは溶解を考えないで、拡散だけによる透過を考える。粒子分散系複合材料に充てんされている粒子は拡散に対して障害物となり、とくに板状粒子の場合はその効果が顕著であると言われている<sup>6)</sup>。

粒子分散系複合材料における板状粒子（以後、板状粒子分散系複合材料だけを対象とするので、簡略にしてそれぞれ単に複合材料および粒子と記す）の障害物効果の機構をFig. 1に示す。マトリックスの中に粒子が存在することによりマクロな透過性は低下するが、これは図からわかるように拡散経路の曲がりにより拡散経路が長くなる、また拡散に有効なマトリックスの断面積が小さくなるためである。このような透過性の低下を複合材料の拡散係数とマトリックスの拡散係数との比をもって表すこととし、これを相対拡散率として次式で定義する。

$$D^* = D_c / D_m \quad (1)$$

$D_c$  ; 複合材料の拡散係数

$D_m$  ; マトリックスの拡散係数

相対拡散率について、Nielsenは次の近似式を提案している<sup>3)</sup>。

$$D^* = V_m / \{ 1 + (0.5a / d) V_f \} \quad (2)$$

$V_m$  ; マトリックスの体積分率

$V_f$  ; 粒子の体積分率

$a$  ; 粒子の幅

$d$  ; 粒子の厚さ

一方、Barrerは薄い板状粒子の場合について近似的に次式を導いている<sup>4)</sup>。

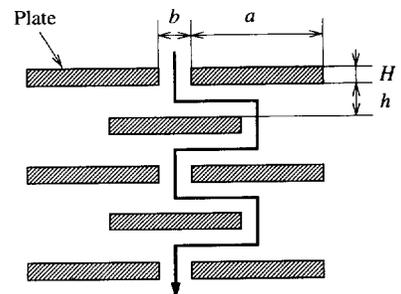


Fig. 1 Schematic representation of a diffusion path through a polymer filled with plate-like particles.

$$D^* = 2hb(2a+b) / \{(a+b)^2(2h+a)\} \quad (3)$$

$b$  ; 拡散に対して直交方向の粒子間隔

$h$  ; 拡散方向への粒子間隔

ただし  $b < a$  である。この式は、透過性が粒子の寸法および配向だけでなく、粒子の並び方にも依存することを示している。

## 2.2 拡散方程式

水がほかの物質中を拡散する挙動は、Fickの第2法則による拡散方程式によって記述される<sup>7)</sup>。

$$\partial C / \partial t = \text{div} (D \text{grad} C) \quad (4)$$

$C$  ; 濃度

$D$  ; 拡散係数

$t$  ; 時間

一般に複合材料のマクロな物性としての拡散係数などには異方性が認められるが、この多くは粒子の配向など分散構造に起因するものである。粒子は不透透性でマトリックス内だけを水が拡散し、その拡散係数が等方で濃度に依存しないとすると、二次元定常状態において式(4)は次式になる。

$$D_m (\partial^2 C / \partial x^2 + \partial^2 C / \partial y^2) = 0 \quad (5)$$

$x-y$  ; 二次元直交座標

この方程式を規定の濃度あるいは透過量の境界条件のもとで種々の粒子分散構造について解くことにより、粒子分散構造が透過性に及ぼす効果を明らかにすることができる。

## 2.3 有限要素法

粒子の分散構造を考慮して式(5)を解析的に解くことは困難である。そこで、有限要素法を用いて数値解析する。有限要素法では解析すべき領域を微小な有限要素で分割して表現することから、粒子の分散構造を解析領域の形状として忠実に考慮することができる。式(5)はラプラス方程式と呼ばれるもので、有限要素法による数値解法は古くから確立されている<sup>8)</sup>。具体的な理論展開および計算手順などは文献に詳しいのでここでの説明は省略する。

## 3. 実験

JIS-K7209の規格に従い、射出成形したNCHのダンベル状試験片を沸騰水中に侵漬し吸水実験を行った。初期過程におけるFickの第2法則の解より拡散係数 $D_c$ は次式で求められる。

$$D_c = M(t) H \pi^{1/2} / \{M(\infty) t^{1/2}\} \quad (6)$$

$M(t)$  ; 時刻 $t$ における吸水率

$M(\infty)$  ; 平衡吸水率

$H$  ; 試験片の厚さ

ナイロン6(宇部興産製1013B)およびモンモリロナイトを0.9, 2.2, 3.4vol%で充てんしたNCHの拡散係数の実験値をTable 1に示す。体積でわずか2.2%の粘土が充てんされているだけでNCHの相対拡散率は1/3以下に低下した。

## 4. 計算方法

### 4.1 解析モデル

NCHの射出成形品内で、粘土はおよそ厚さ1nm、幅100nmの板となり、成形品表面に面配向している<sup>2)</sup>。そこで、解析においてはNCH内の粘土と同じ大きさの粒子を考えた。

粒子が規則正しく整列して配向している場合(モデルAとする)と不規則で配列している場合(モデルBとする)について解析モデルを作成した。

#### 4.1.1 モデルA(規則配列モデル)

モデルAでは先に述べた近似モデルと同じように考え、Fig. 2に示す規則的な配列状態を仮定した。粒子配列を横から見た図で、粒子は紙面および成形品の厚さ方向の $y$ 軸に垂直である。また、粒子は上下および左右方向にそれぞれ一定の間隔で配列しており、水は図の上から下に向かって拡散する。左右方向の粒子間隔は粒子幅の半分とし、上下方向の間隔は粒子の体積分率に依存する。解析領域は図中の一点鎖線で囲む範囲とした。解析領域の幅は粒子配列の左右対称性から

Table 1 Experimental relative diffusivity of water through nylon 6 and NCH.

Polymer	Clay <sup>*1</sup> contents V (vol%)	Diffusion coefficients D (cm <sup>2</sup> /s)	Relative diffusivity D <sub>c</sub> / D <sub>m</sub> (-) <sup>*2</sup>
Nylon 6	0	5.39 × 10 <sup>-7</sup>	1.00
NCH2	0.9	3.17 × 10 <sup>-7</sup>	0.59
NCH5	2.2	1.59 × 10 <sup>-7</sup>	0.29
NCH8	3.4	0.89 × 10 <sup>-7</sup>	0.17

\*1 Clay : montmorillonite

\*2 D<sub>c</sub> / D<sub>m</sub> = (D of NCH) / (D of nylon 6)

粒子幅の1.5倍とし、解析領域の高さは粒子の体積分率の影響を調べられるように粒子幅の10倍をとり1000nmとした。

粒子の体積分率を変えて、解析領域内の粒子の配列状態と有限要素分割を併せてFig. 3に示す。体積分率は解析領域における粒子の数と対応している。二次元解析であることから、解析領域における粒子の面積分率をもって体積分率とした。粒子は不透過性であるとして、粒子が存在している部分は拡大図に示すようにすき間を設けて要素分割した。有限要素分割は三角形要素を用いて行い、粒子数72の場合に最大で要素数は1628、節点数は1560である。粒子幅は20から1500nmまで変化させた。

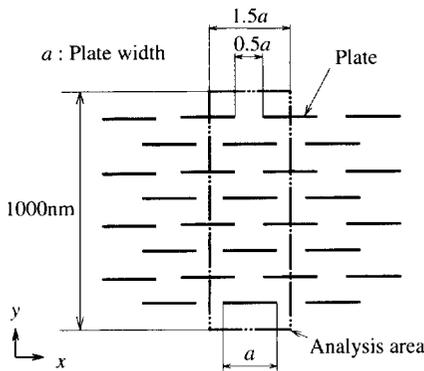


Fig. 2 Regularly arranged model (model A).

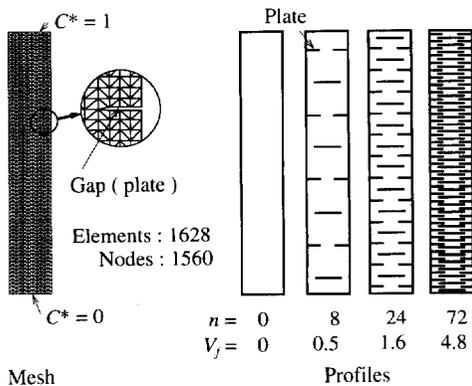


Fig. 3 Finite element mesh and plate arrangements for model A.

#### 4.1.2 モデルB (不規則配列モデル)

粒子の不規則配列モデルをFig. 4に示す。水の拡散方向を図の上から下に向かうものとして、粒子が拡散方向に対して垂直に配向している場合（直交配向）、ランダムに配向している場合（ランダム配向）、平行に配向している場合（平行配向）についてモデル化した。成形品の全領域について解析することは計算機的能力から困難であるので、一辺の長さが粒子幅の10倍、すなわち1000nmの正方形領域を解析領域とした。モデルAと同様に、図中の線分が粒子を表している。粒子の体積分率は2.2%の実験にあわせて2.18%とした。これを解析領域における粒子の面積分率とすると、解析領域内の粒子の数は218となる。

解析モデルは以下の手順で作成した。ランダム配向モデルは、計算機にて発生させた疑似乱数を粒子左端のx座標、y座標、粒子の配向方向へと順に割り当て任意の1枚の粒子の位置を決めた。この際に、すでに配置されている粒子に重なる場合はその配置は無効とし、新たな疑似乱数を用いた。また、解析領域から外に出る粒子は左右辺および上下辺で周期境界を仮定してモデル化した。例えば、粒子の一部が解析領域の右辺から領域外に出た場合、その出た部分を左辺の同じ高さから解析領域内に入れて配置した。任意の粒子の配置が完了すれば、次に別の粒子を同様にして配置した。こうして解析領域内に所定の数の粒子がすべて配置されるまで、この手順を繰り返した。直交配向モデルは、粒子の配向方向がx方向に固定されることから配向方向への疑似乱数の割り当てを除いて、ほかはランダム配向モデルの作成と同じ手順で作成した。平行配向モデルは直交配向モデルを時計回りに90度回転させたものである。また、相対拡散率を求めるために、ナイロ

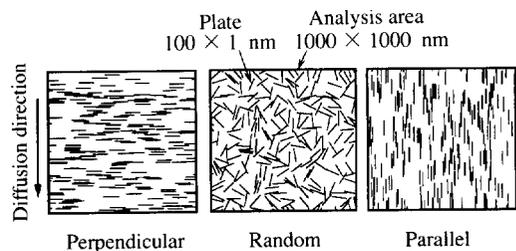


Fig. 4 Irregularly arranged model (model B).

ン6自体の計算結果も必要になるので、同じ解析領域で粒子が無い場合のモデル(無粒子モデル)も作成した。

有限要素分割図をランダム配向の場合を一例にして Fig. 5 に示す。三角形要素で要素数は3865、節点数は2715である。モデルAと同様に粒子は不透過性であるとして、粒子部分には粒子に対応する1nmのすき間を設けた。ほかの配向モデルも同様にほぼ同じ規模の有限要素分割を行った。

#### 4.2 解析条件

解析条件として解析領域の上辺および下辺における濃度を規定し、解析領域内における水の濃度を次式により無次元化した。

$$C^* = (C - C_2) / (C_1 - C_2) \quad (7)$$

$C^*$ : 無次元濃度

$C_1$ : 上辺の濃度

$C_2$ : 下辺の濃度

したがって、境界条件として上辺の無次元濃度は $C^* = 1$ 、下辺では $C^* = 0$ となる。以後は、とくに断らない限り濃度は無次元濃度を意味するものとする。左右辺の境界条件は、モデルAの場合、対称境界であることから辺に垂直方向すなわち $x$ 方向の濃度勾配は0とし、モデルBでは周期境界により左辺と右辺の同じ高さの濃度は等しいとした。

各要素の拡散係数を1として解析を行い、すべてのモデルについて下辺から流出する全透過量(これは上辺から流入する全透過量でもある)を求めた。モデルAおよびBのそれぞれに粒子がない場合の全透過量の値 $Q_m$ に対して粒子がある場合の値 $Q_c$ との比をとれば、先に定義した相対拡散率が求められる。

$$D^* = Q_c / Q_m \quad (8)$$

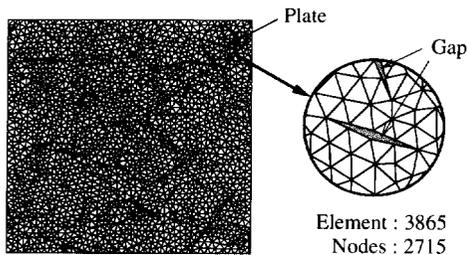


Fig. 5 Finite element mesh for the random orientation of model B.

#### 4.3 使用ハードとソフト

解析モデルの作成と計算結果のカラーグラフィック表示には、ハードとしてエンジニアリングワークステーション(IBM6100)、ソフトとして有限要素解析プリポストプロセッサ(IBM/CAEDS)を用いた。解析計算およびプロット図出力には、汎用大型計算機(IBM3090)および当所で開発した射出成形解析プログラム(IMAP)<sup>9)</sup>を周期境界条件を扱えるように改良して用いた。

### 5. 計算結果

#### 5.1 濃度分布と拡散速度分布

モデルAについて粒子幅が100nmの場合を例にして、濃度分布の計算結果を等高線図(等濃度線図)にして Fig. 6 に示す。等濃度線の細線間隔は0.02、太線間隔は0.1である。境界条件の設定により、濃度は上辺において1、下辺において0である。粒子数0すなわち粒子がない場合の等濃度線は上下辺に平行で等間隔になっている。粒子数すなわち体積分率が少ない場合は、粒子間の上下間隔より左右間隔が狭いことから、左右の粒子間で等濃度線が密になる。等濃度線が密になる箇所では濃度勾配が大きいことがわかる。体積分率が増加すると、左右間隔よりも上下間隔が狭くなり、等濃度線は粒子に直交するようになる。

同じ条件で拡散速度分布を Fig. 7 に示す。矢印は拡散の方向と速度を表す。速度の大きさは任意スケールで粒子がない場合に対する相対的な大小関係を示す。なお、粒子がない場合の矢印はすべて同じ大きさである。

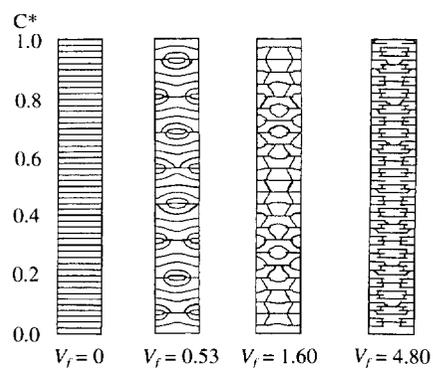


Fig. 6 Calculated concentration contours for model A with plates 100nm in width.

る。拡散は濃度勾配によって生じることから、矢印方向は等濃度線に直交しており、矢印の大きさは等濃度線の疎密に対応している。粒子の存在によって粒子を迂回するような拡散状態が見られる。さらに粒子の体積分率が増加すると粒子が重なっている箇所だけを左右に迂回しながら拡散するようになり、拡散に寄与しない箇所が生じてくる。このように、粒子の障害物効果により、拡散経路が長くなる、また通過幅が狭くなることにより拡散速度が低下する様子がよくわかる。

5.2 体積分率と相対拡散率

粒子の体積分率と相対拡散率との関係をFig. 8に示す。相対拡散率は、粒子の体積分率が低い範囲では、

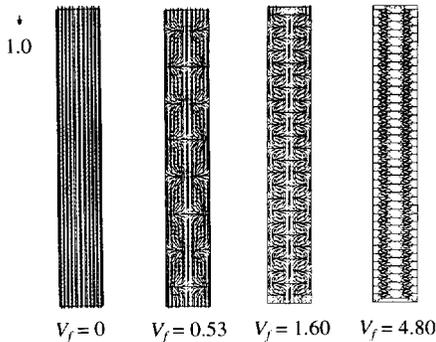


Fig. 7 Calculated diffusion rates for model A with plates 100nm in width.

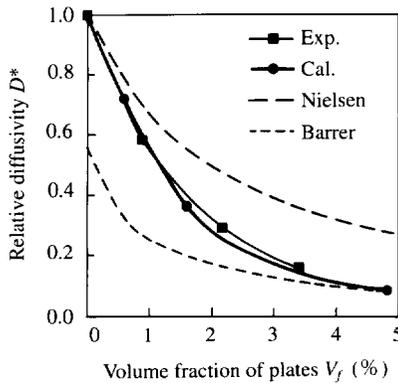


Fig. 8 Comparison of relative diffusivity calculated using model A with experimental and theoretical results.

体積分率が増加するほど大きく減少するが、体積分率が高くなるとさほど減少せず、0に漸近する。計算値は実験値とよく一致している。一方、Nielsenの理論値は実験値ほど相対拡散率が低下しておらず差異が見られる。これは、理論式では障害物によって経路長が長くなる効果は考慮されているが、流路幅が狭くなる効果が考慮されていないことによるものと思われる。逆に、モデルAと同じ配列を仮定してBarrerの式から求めた理論値は体積分率の低いところで実験値より大幅に下回っており、式で拡散に有効な流路幅を過小に見積もっているためである。

ここで、計算値が実験値とよく一致していると先に述べたが、これは一致するように粒子間隔を仮定した結果であって、NCH内の粘土がモデルAの配列状態にあることを意味するものではない。しかし、有限要素法解析によって粘土の障害物効果が正当に評価され、NCHの水バリア性は、粘土の配向や配列を考慮した粘土の障害物効果で説明できるものであることは言える。

この結果から、有限要素法が板状粒子分散系複合材料の拡散係数の解析に有効であり、NCHの水バリア性を板状粒子分散系の扱いで説明できることがわかった。

5.3 粒子幅と相対拡散率

粒子幅と相対拡散率との関係の計算結果をFig. 9に示す。粒子幅の対数と相対拡散率との関係は逆S字形になっており、粒子幅が大きいほど相対拡散率は低下する。体積分率が高くなると、相対拡散率が低下することは前述の通りであるが、逆S字カーブがほぼ同じ形で粒子幅の小さい側に移動していることが図からわ

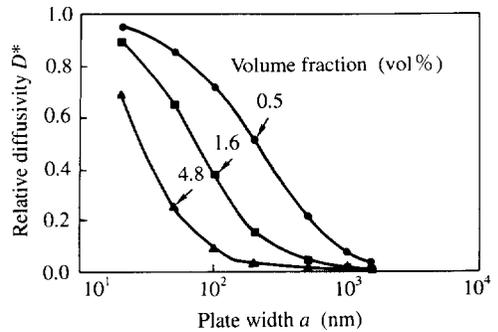


Fig. 9 Calculated relative diffusivity against the plate width for model A.

かる。粒子幅が大きい場合には、低い体積分率で相対拡散率を低下できる、すなわち水バリア性を向上させることができる。

粘土にはヘクトナイト、サポナイト、モンモリロナイト、マイカなどの種類があり、粘土幅はこの順に約25から1000nmに大きくなっている。同じ体積分率で比較すると、ヘクトナイト、サポナイトではモンモリロナイトほど水バリア性を向上させることはできず、マイカではモンモリロナイト以上に水バリア性を向上させることが予測される。

Fig. 9の結果を整理して、粒子幅と体積分率の積と相対拡散率との関係をプロットしたのがFig. 10である。粒子幅、体積分率、相対拡散率についてこれらを一つの関係で表すことができ、積の対数と相対拡散率との間には、相対拡散率が0.1から0.9の範囲内で逆比例の直線関係が得られた。すなわち、この範囲内で粒子幅を倍にすることは体積分率を倍にすることと相対拡散率に対して同等の効果を有していることがわかる。

#### 5.4 粒子配向と相対拡散率

モデルBにおける濃度の計算結果のカラーグラフィックス表示を撮影した写真をFig. 11に示す。赤色から青色に向かって濃度が1から0に変化していることを表している。拡散方法と平行に粒子が配向している場合、濃度分布はきれいな層状となり、粒子がない場合と変わらない。ランダム配向では、色の境が凹凸になっていることから層状の濃度分布にかなりの乱れが生じていることがわかる。この乱れは後述する連続な拡

散経路の形成によるものと考えられる。直交配向になると、層状の濃度分布に乱れはあるものの、乱れの程度はランダム配向より小さくなっている。連続な拡散経路が形成されずに不連続になっているためである。

同様にして拡散速度の計算結果の写真をFig. 12に示す。青色から赤色に向かって、その箇所の拡散速度が速くなっていることを表す。単位は任意スケールで速度の相対的な大小関係を表す。平行配向の場合は、拡散速度は速く、全面でほぼ一様である。これは粒子がない場合と大差なく、粒子の影響はほとんど見られない。ランダム配向では、拡散に対する粒子の障害物

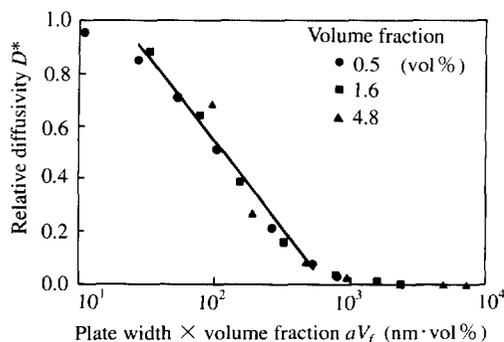


Fig. 10 Relation between the logarithmic value of the product of plate width and volume fraction and the relative diffusivity.

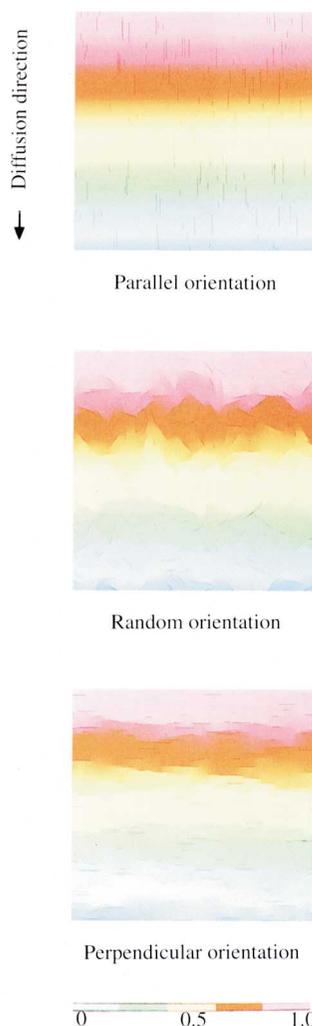


Fig. 11 Calculated concentrations for model B.

効果により拡散速度に分布が生じる。局所的には拡散速度の速い箇所も見られ、上から下へ蛇行した連続な拡散経路が形成されている。しかし、平均的には拡散速度が低下している。直交配向では、拡散にほとんど寄与しない領域が生じ、拡散経路は不連続となり、全体的な拡散速度はさらに低下している。よって、直交配向では、ランダム配向の場合より粒子の障害物効果がより顕著になっていることがわかる。

粒子配向と相対拡散率との関係をFig. 13に示す。横軸の配向パラメータ $f_p$ は配向の度合いを表す指標で

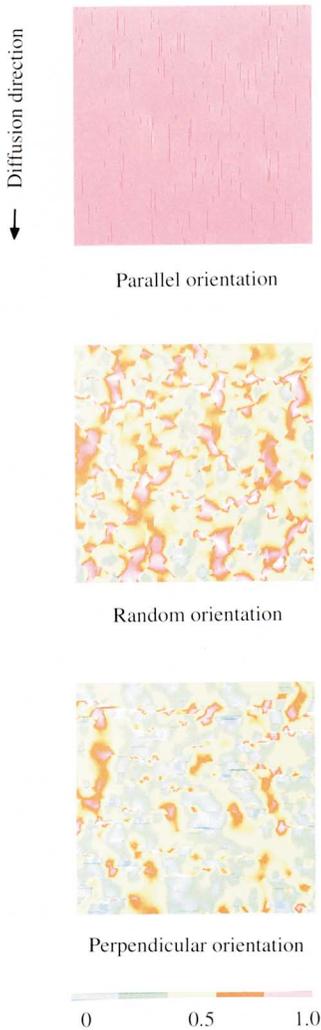


Fig. 12 Calculated diffusion rates for model B.

次式で定義される。

$$f_p = 2 \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \cos^2 \phi_i - 1 \tag{9}$$

$n$ : 粒子の数

$\phi$ : 拡散方向に対する粒子の配向角

配向パラメータは-1から1の値をとり、直交配向の場合は-1、ランダム配向で0、平行配向で1になる。

平行配向の場合の相対拡散率はほぼ1であり、粒子による拡散係数の変化は見られない。一方、ランダム配向、直交配向へと拡散方向と交差する粒子が増すに従い、相対拡散率は低下する。粒子の体積分率が同じであっても、粒子の配向状態によって相対拡散率が大きく変化することがわかる。

### 6. 考察

板状粒子分散系複合材料の相対拡散率について、モデルAのように規則的に粒子を配列させた場合の計算値は実験値とよく一致しているが、モデルBの直交配向モデルの計算値は実験値より大きい。両モデルとも粒子の配向方向は同じであるが、モデルAに対してモデルBの直交配向モデルでは粒子同士の位置関係がランダムになっていることが相違点である。このことから相対拡散率は配向方向だけでなく、粘土の配列など粘土同士の位置関係にも依存していると言える。

NCH内のナイロン6は粘土と化学的に結合しており、マトリクスであるナイロン6に結晶状態などの変化が起きていることも考えられている。しかしながら、

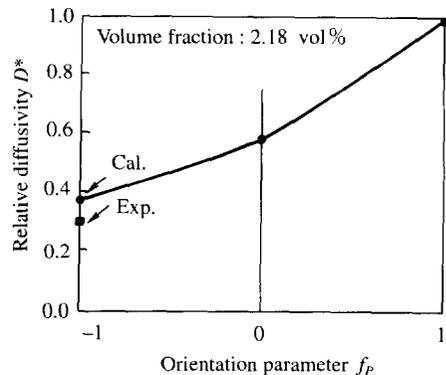


Fig. 13 Relative diffusivity against the orientation parameter.

粘土の障害物効果だけを取り入れた今回の有限要素法解析の計算結果が実験結果とよく対応していることから、マトリックス自体の変化に起因する要因はNCHの水バリア性向上に関して二次的なもので、水バリア性向上の主要因は粘土の障害物効果であると言える。すなわち、NCHの水バリア性が優れているのは、モンモリロナイト単位結晶層となって多数の粘土が板状粒子として分散し、それらが射出成形品表面に平行すなわち拡散方向に直交して配向していることにより、拡散経路を長くする、また流路幅を狭くする粒子の障害物効果が十分に発揮されていることによるものと考えられる。

## 7. まとめ

板状粒子分散系複合材料における水の拡散挙動を有限要素法によって数値解析し、板状粒子が相対拡散率に及ぼす効果を検討した。モデルAについて相対拡散率と粒子の体積分率との関係に関する計算結果はNCHの実験結果とよく一致した。その結果、有限要素法解析は有効であり以下のことがわかった。

- (1) 相対拡散率は粒子の体積分率が増すほど低下する。特に体積分率が低い範囲でその効果は大である。
- (2) 粒子幅が大きいほど相対拡散率は小さくなる。相対拡散率は、粒子幅が大きい場合にはわずかな体積分率で大きく低下するが、粒子幅が小さい場合にはかなり体積分率を増やさないと低下しない。
- (3) 相対拡散率は体積分率と粒子幅の積の対数に反比例する。体積分率を倍にすることと粒子幅を倍にすることは相対拡散率に対して同等な効果を示す。
- (4) 体積分率および粒子幅が同じであっても、粒子配向によって相対拡散率は大きく変化する。拡散方向に対する粒子の配向パラメータが小さいほど、すなわち粒子が拡散方向に直交する割合が多いほど相対拡散率は低下する。
- (5) NCHの水バリア性が優れているのは、モンモリロナイト単位結晶層となって多数の粘土が板状粒子として分散し、それらが射出成形品表面に平行すなわち拡散方向に直交して配向していることにより、拡散経路を長くする、また流路幅を狭くする粒子の障害物効果が十分に発揮されていることによるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) Okada, A., Kawasumi, M., Usuki, A., Kojima, Y., Kurauchi, T. and Kamigaito, O.: "Nylon6-Clay Hybrid", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 174(1990), 45
- 2) 小島由継, 岡田茜, 臼杵有光, 川角昌弥, 倉内紀雄, 上垣外修己: "ナイロン6-粘土ハイブリッドのガスバリア性", マテリアルライフ, 5-1/2(1993), 13
- 3) Manson, J. A. and Sperling, L. H.: Polymer Blends and Composites, (1976), 410, Plenum Press, New York
- 4) Barrer, R. M.: Diffusion in Polymers, Ed. by Crank, J. and Park, G. S., (1968), 165, Academic Press, London
- 5) 松岡孝明, 東智美, 小島由継: "ナイロン6-粘土ハイブリッドにおける水の拡散挙動の数値解析", 高分子論文集, 50-5(1993), 326
- 6) 高分子と水分, 高分子学会・高分子と水に関する委員会編, (1972), 85, 幸書房
- 7) 辻田義治: "高分子膜の拡散特性", 高分子, 39-9(1990), 658
- 8) フェナー, R. T.: 有限要素法の実際, 加川幸雄訳, (1980), 38, サイエンス社
- 9) 松岡孝明, 高昌淳一, 井上良徳, 高橋秀郎: "射出成形充填・保圧・冷却過程における樹脂流動挙動のシミュレーション", 高分子論文集, 48-3(1991), 137

## 著者紹介



松岡孝明 Takaaki Matsuoka

生年: 1951年。

所属: 高分子加工研究室。

分野: 高分子・有機材料の計算機シミュレーション。高分子成形加工のCAE。

学会等: 日本機械学会, 高分子学会, 日本レオロジー学会, The Polymer Processing society, The Society of Plastics Engineers 会員。

工学博士。