

プラスチック射出成形シミュレーション技術の開発

Development of a Simulation Method for Injection Molding

プラスチック成形の高速化によるコスト低減や、金型形状の最適化による不良品の低減を図るために、プラスチック射出成形時の流動シミュレーション技術の開発が強く望まれていた。この要求にこたえるために、熔融プラスチックのように粘度が速度こう配に依存する非ニュートン流体で、かつ粘度の高い流体についても、三次元体系の非定常状態について、有限要素法を用いて高速・高精度でシミュレーションできる技術を開発した。本解析技術を模擬流体および実プラスチックを用いた実験で検証するとともに、自動車用クーラーユニットケースの流動シミュレーションに適用して、その有効性を確認した。これにより、射出成形での金型形状や成形条件などの最適化が数値シミュレーションで可能となった。

山川正剛* Masanori Yamakawa
寒河江勝彦* Katsuhiko Sagae
小泉 眞* Makoto Koizumi
井上孝太郎** Kôtarô Inoue

1 緒 言

プラスチック成形の高速化、極限に近い薄肉の成形、試作回数の削減、開発期間の短縮および開発費の低減を図るうえで、従来の経験と勘に代わるプラスチック射出成形時の流動シミュレーション技術の開発が強く望まれていた。熔融プラスチックは粘度が流体の速度こう配によって変化し、水、空気、油などの粘度が速度こう配に依存しない一般の流体と比べて流れの挙動が著しく異なる。流体力学の分野では前者を非ニュートン流体、後者をニュートン流体と呼び区別している。熔融プラスチックは粘度がニュートン流体に比べ数万倍高く、温度による粘度の変化も大きい。また、実際の解析では、流動する自由液面の位置を精度よく求める必要があるため、従来のニュートン流体の解析技術をそのまま適用することはできない。そこで、熔融プラスチックで代表される非ニュートン流体を対象として、有限要素法を用いた三次元熱流動解析技術を開発した。

本論文では、開発したプラスチック流動シミュレーション技術の特徴について述べるとともに、その適用例を紹介する。

2 プラスチック成形の概要

プラスチック成形品は、軽量でしかも加工性に優れているため、家電・情報通信機器・自動車・玩(がん)具など適用分野が拡大している。プラスチックは有機高分子化合物を主体とし、通常、常温では固体であるが、熱・圧力などの作用で熔融し、自由に成形できる。プラスチックは、その硬化特性

の違いによって熱硬化性と熱可塑性の2種に大別できる。熱硬化性プラスチックは加圧・加熱により化学反応して硬化し、非可逆であるのに対して、熱可塑性プラスチックは加熱により軟化、冷却により硬化する。

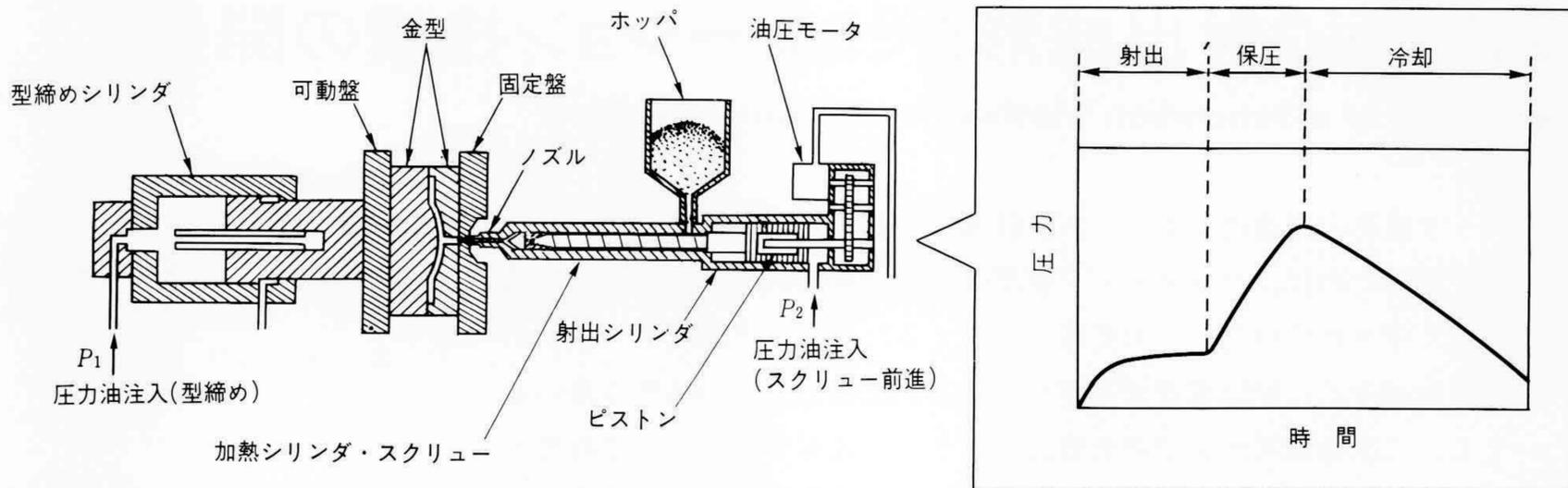
成形加工は可塑化の段階(溶かす)、賦形の段階(流す)、冷却の段階(固める)の3段階を経過する。この過程をプラスチック射出成形を例にとり、図1のスクリー式射出装置の場合について具体的に示す¹⁾。樹脂はスクリーの回転により混練されながら、シリンダ先端に送られる。その際、樹脂は加熱シリンダ外周のヒータにより加熱されるとともに、混練作用による摩擦熱も加わって熔融状態となり、ノズルから金型内に高圧のもとに射出される。射出後は、冷却固化時の収縮によるひけ巣をなくすため、射出圧力より20~30%低い圧力で一定時間保持する保圧過程に入る。保圧後、成形品の温度が下がるまで冷却し、成形品を取り出す。これが1サイクルの成形工程である。各過程を特徴づけるものが、同図中に示した成形中の圧力変化を示すグラフである。本研究では、プラスチック生産量の80%を占める熱可塑性プラスチックの射出成形時の流動シミュレーションを対象としている。

3 数値解析手法

3.1 基礎式とその特徴

熔融プラスチックのような高粘性の非ニュートン流体の流れは、次の特徴を持つ。

* 日立製作所 エネルギー研究所 ** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士



注：廣恵，外 著「プラスチック射出成形入門」日刊工業新聞社 p.122¹⁾

図1 スクリュー式射出装置 スクリュー式射出装置の例である。図中のグラフは成形中の圧力変化を示す。

- (1) 粘度が速度場や温度場に依存する強い非線形性を示し、ニュートン流体である水、空気などと比較してその値および変化が $10^2 \sim 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ と大きい。
- (2) 熱伝導率、比熱は水と同程度なので、プラントル数が $10^3 \sim 10^5$ と非常に大きい。
- (3) 自由液面の移動、合流を伴う場合が多い。

上記(1)の特徴から、粘度の非線形性に対しては粘度が速度こう配の n 乗に比例する指数則モデルを適用する。また、高粘度であることから流れ場のレイノルズ数は1以下となり、運動方程式の移流項は無視できる。エネルギー式では高粘度によるせん断発熱が無視できず、さらに特徴(2)から移流項を考慮する必要がある。また、特徴(3)から、流動状態が時間的に変化する非定常流を取り扱う必要がある。したがって、基礎式は図2に示すようになる。

3.2 数値解析手法

複雑な三次元体系にも適用できるように、有限要素法を用いることにした。また、プラスチック射出成形の分野では、成形品は薄肉平板で構成されるシェル構造物となる場合が多い。そこで、三次元解析プログラムのほかに、シェルの厚さ方向を解析解を用いてモデル化した擬似三次元解析プログラムも開発して、入力データの作成を容易にし、かつ計算時間も実用範囲内に抑えるようにくふうした。使用した有限要素は、三次元が六面体および三角柱要素、擬似三次元が三角形要素である。

(1) 運動方程式の解法²⁾

運動方程式を解く際には、粘度の強い非線形性による解の不安定性と、高粘度であるために生じる計算時間の増大が問題となる。前者に対しては、粘度を変数とすることで対応する。後者に対しては、時間ステップが大きくとれる解法として、Fractional-Step法³⁾の一種である流速修正法とRRK法(Rational Runge-Kutta Method: 有理ルンゲクッタ法)⁴⁾を組み合わせた準陽解法を用いた。このスキームでは第1段階

基礎式	低レイノルズ数, 高ペクレ数の流れ
	<ul style="list-style-type: none"> ● 連続の式: $V_j, j=0$ ● 運動方程式: $\frac{\rho V_i, t - \sigma_{ij, j}}{\text{時間項}} = 0$ (粘性項) ● エネルギー式: $\rho C_p (T, t + V_j T, j) = (k T, j) + \sigma_{ij} \cdot e_{ij}$ (時間項 移流項 熱伝導項 せん断発熱項) ● 構成方程式: $\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + 2\eta (T, e_{ij}^{n-1}) \cdot e_{ij}$ (圧力項 せん断応力項) <p>ただし、V_j: 流速ベクトル, σ_{ij}: 応力テンソル T: 温度, P: 圧力, η: 粘度 e_{ij}: ひずみ速度テンソル, n: 指数</p>

図2 基礎式とその特徴 高粘性の指数則流体の基礎式を示す。コンマ付き添字は偏微分を表し、一つの項で同一の添字が現れる場合は、その和をとる総和規約を適用する。

で流速を陽解法で求め、第2段階で圧力、流速を補正していく。この際、通常陽解法では安定条件の制約から時間ステップを大きくできないため、熔融プラスチックのように流体の速度依存性を示す指数 n が1以下となる指数則流体に対しても、無条件安定となるRRK法を適用した²⁾。これにより、計算時間を一桁(けた)以上短縮することができた。

(2) エネルギー式の解法

温度場を計算するためのエネルギー式では、図2の基礎式に示した移流項が支配的となる。そこで、拡散項と移流項をおのおの分離して、前者にRRK法を、後者に日立製作所が開発した特性曲線法を拡張した流跡積分法⁵⁾を適用した。流跡積分法は、移流計算に対し無条件安定であり、かつ数値拡散も一次風上差分形の解法と比べて小さい。このように、方程式

を分離して各項に適した解法を適用することによって、計算精度を向上することができた。

(3) 自由液面の移動解析

自由表面を持つ流れの解法には、有限要素法および差分法を用いた種々の方法が提案されている。ここでは、複雑な三次元体系内の流れへの適用を考えて、SOLA-VOF (Solution Algorithm-Volume of Fraction Method) 法⁶⁾を独自に改良した方法を用いた。この手法では液体と気体のように物性の異なる流体の流れを連立して解析する二流体モデルを用い、二つの流体の1メッシュ内の占有率を仮想的なマーカーの分布から計算し、自由液面の位置を決定する。マーカー発生を自由液面近傍に限定することにより、マーカー計算の計算容量、計算時間を減らして効率的に計算できるようにした。

以上の解法の概略をまとめて図3に示す。同図中の1サイクルの計算は、1時間ステップの計算手順であり、この計算手順を解析終了時間まで繰り返して解を求める。

4 実験との比較

4.1 模擬流体を用いた検証

実験装置のフロー線図を図4に示す。実験装置はテストセクション、循環ポンプ、流量計、圧力計で構成している。試験流体は容積形ポンプによって、流量計、圧力計を介して一定流量(1.6~6.7 l/min)でテストセクションに送り込まれる。テストセクションは、縦200 mm×横100 mm×厚さ4.5 mmの亚克力製の透明な平行平板である。流速分布の測定に関しては、プローブ形の流量計では局所流速しか測定できず、しかも流れを擾(じょう)乱するため、日立製作所⁷⁾で開発した非

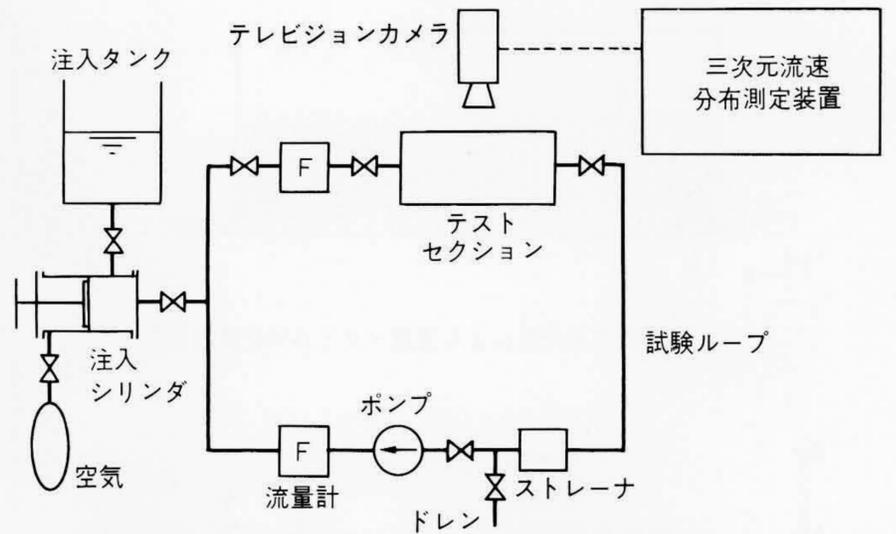


図4 実験装置の概要 供試流体はポンプにより循環される。テストセクションは透明な亚克力製で、流速の可視化測定が可能である。

接触形の三次元流速分布測定システムを用いた。このシステムでは、トレーサ粒子で流れ場を可視化し、テレビジョンカメラで撮影した映像からリアルタイムで作成した流跡画像を解析して、流れ場の流速分布を求める。

供試流体には、非ニュートンの特性を示すデンプン水溶液を用いた。実験は供試流体にトレーサ粒子として直径1 mmのポリスチレン粒子を混入し、常温でポンプにより装置内を一定流量で循環させた。テストセクション上部から、その流況をテレビジョンカメラで撮影し、実験終了後直ちに供試流体を取り出して、回転粘度計によってその粘度を測定した。供試流体であるデンプン水溶液はデンプンの質量比によって粘度が変わる。実験に用いた流体は流量1.8 l/min、3%水溶液のとき次式で表せる。

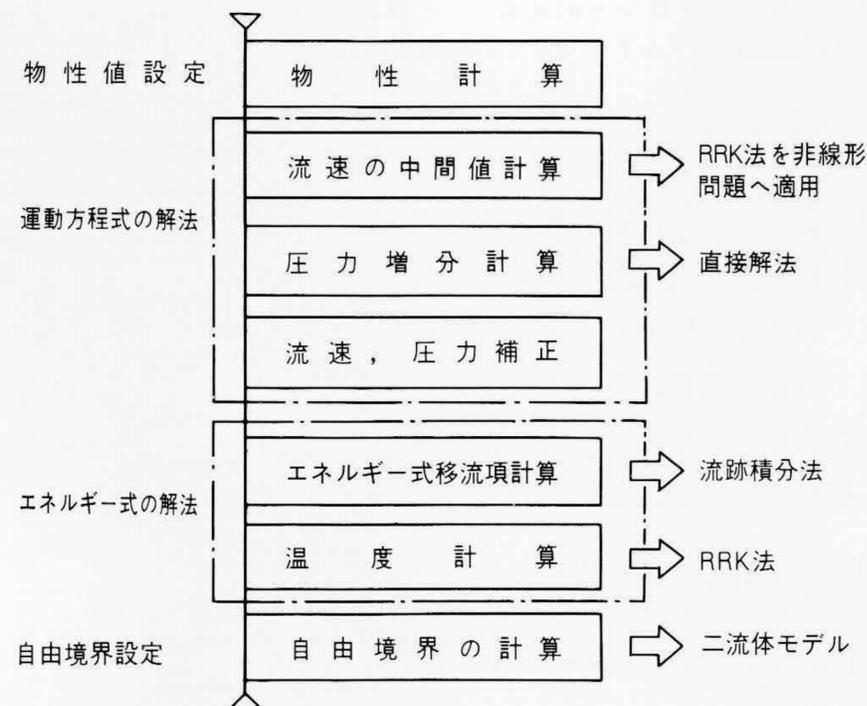
$$\eta = 1.0\gamma^{-0.51} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$$

ここで、 γ はひずみ速度である。流速分布の測定誤差は5%以内である。

流速分布について、実験値と計算値を比較した。擬似三次元プログラムによる計算結果を図5(a)に示す。同図は、計算体系の対称性を利用して $\frac{1}{2}$ 領域について、定常状態の流速分布を求めたものである。変化の激しい入口近傍のA-A'とB-B'断面について、実験値と計算値との比較を同図(b)に示す。計算値は実線で、実験値は●印および▲印で示してある。計算値と実験値との差は7%以内である。

4.2 プラスチックを用いた検証

実プラスチックを用いて、メルトフロントの移動についての擬似三次元プログラムによる計算を検証した。実験に用いた金型を図6に示す。この金型は底板に比べて側壁のほうが板厚が厚く、また側壁上部にいくほど板厚が厚くなる場所に特徴がある。したがって、ゲートから流入した溶融プラスチックは充てんが進むに連れて、側壁のほうの流れが先に進む流動様相を示す。実験に使用したプラスチックはポリアセタール樹脂(ジュラコンM90-02)で、実験条件は同図中に示し



注：略語説明 RRK法(Rational Runge-Kutta Method)

図3 概略計算手順 図に示した計算手順は1サイクルのフローであり、各時刻ごとにこの計算手順を繰り返す。

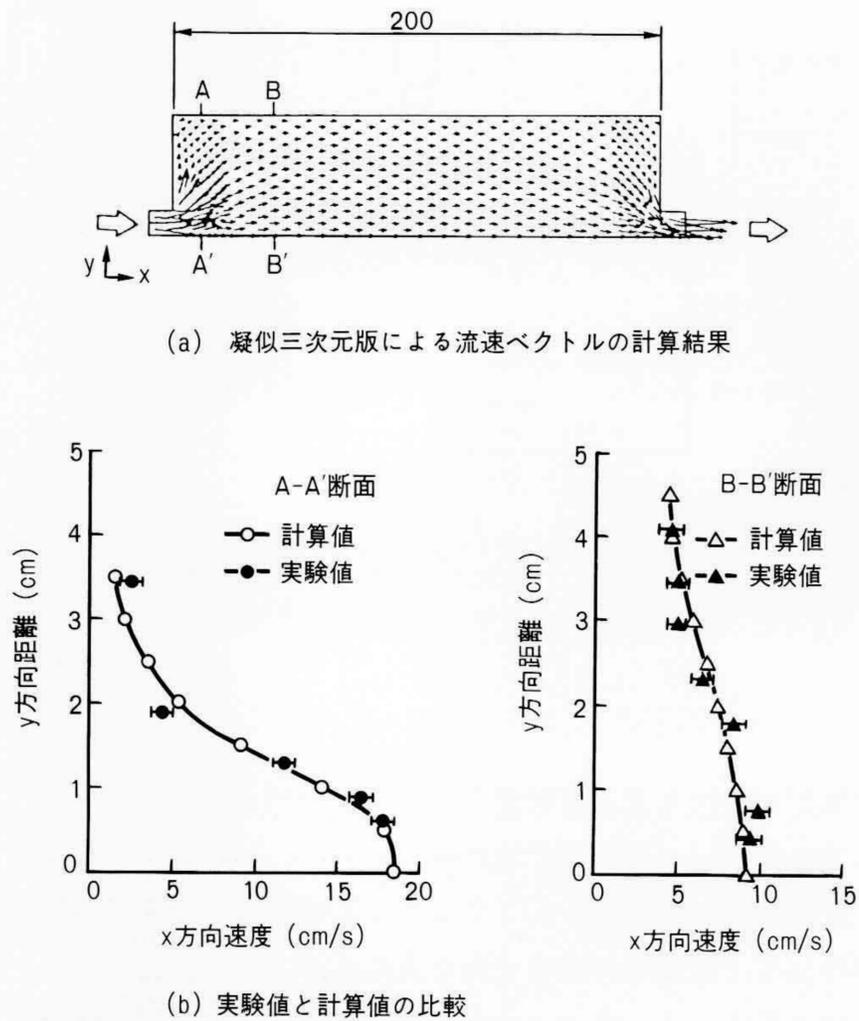


図5 実験値と計算値の比較 流速変化の激しいA-A', B-B'断面の定常状態の流速分布について比較している。

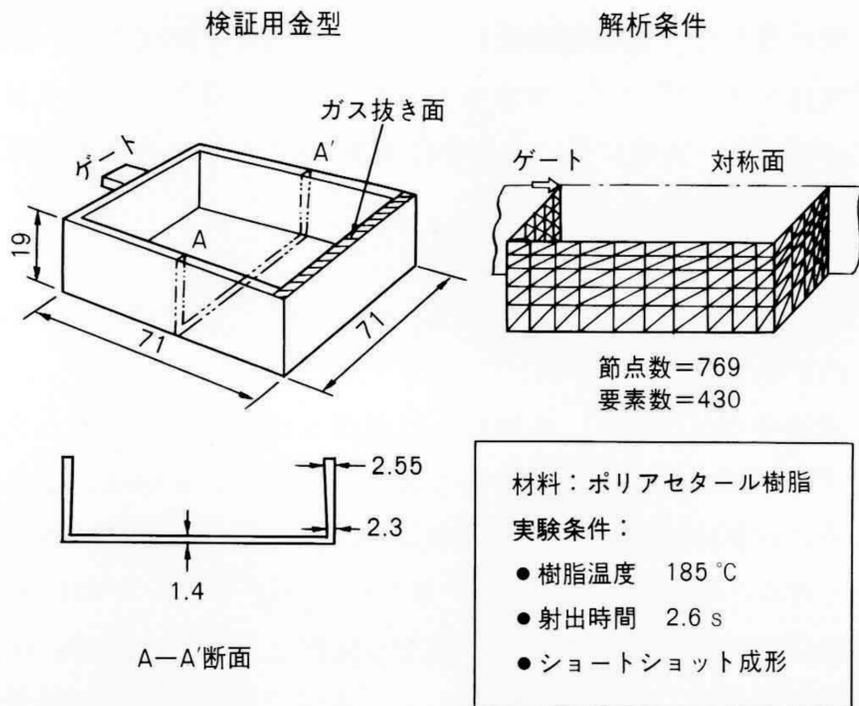


図6 検証用金型と解析条件 検証用金型は板厚が局所的に異なるのが特徴で、金型内の流れに大きな影響を与える。

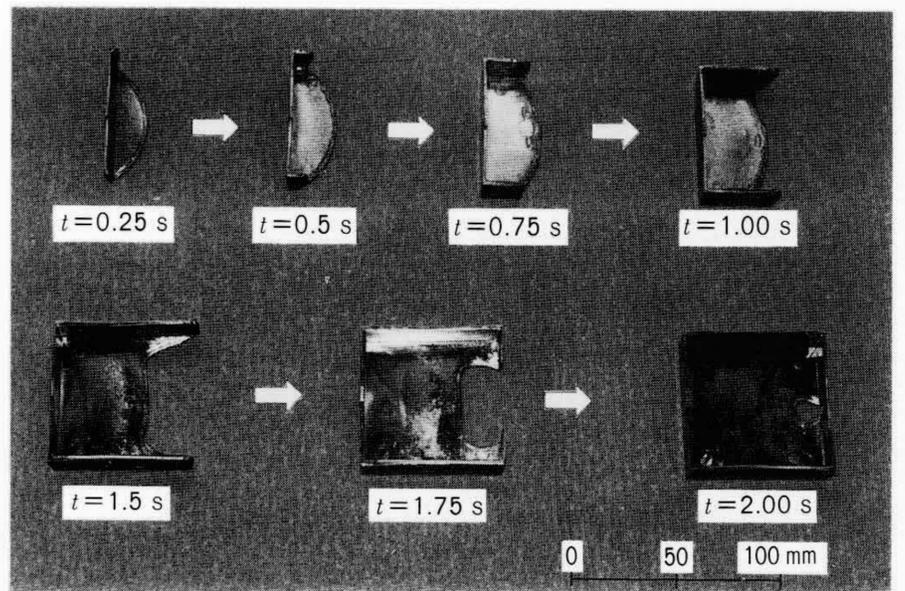


図7 ショートショット成形実験結果 板厚の影響により、時間の経過とともに側壁側が先に充てんされることがわかる。

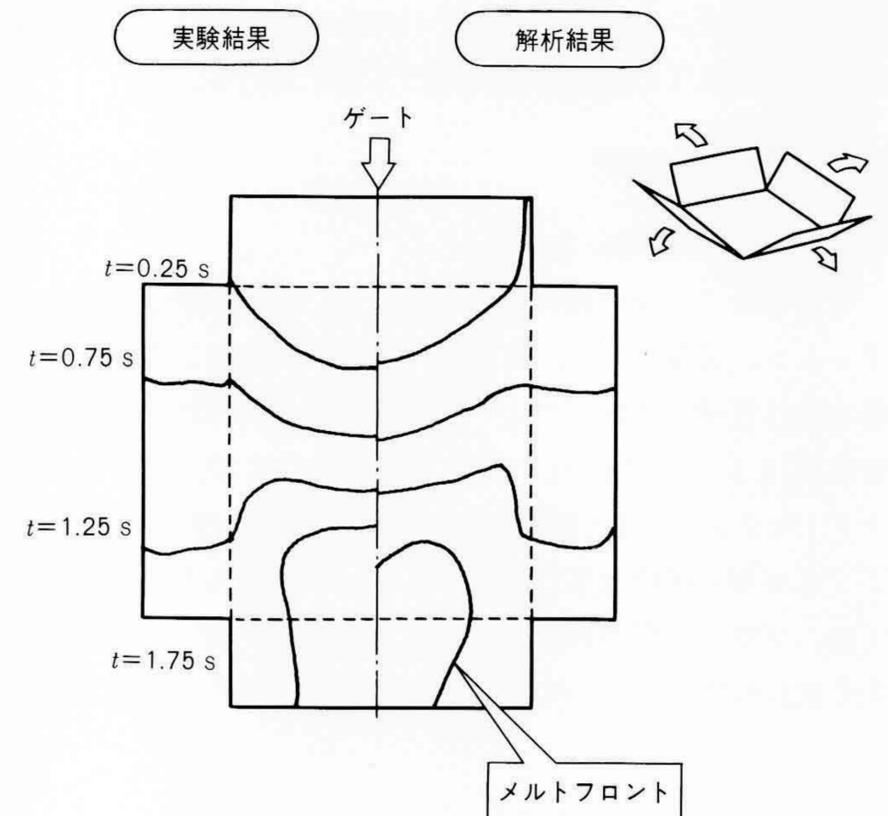


図8 メルトフロントの比較 左側が実験結果、右側が解析結果である。各時刻のメルトフロントの位置を重ねて表示してある。

進むことが実験的にも明らかとなった。

計算体系は対称性を利用して $\frac{1}{2}$ 領域とした。実験値と計算値との比較を図8に示す。左側が実験結果で、右側が計算結果である。結果は各時刻のメルトフロントの位置を示したものであり、充てん直前の1.75秒時の結果に若干差異が認められるものの、他の結果はよく一致している。

5 実製品への適用

5.1 自動車用クーラーユニットケースへの適用

自動車用クーラーユニットケースに適用した例を述べる。解析モデルと主な解析条件を図9に示す。ゲートは1点であり、使用樹脂はタルク20%入りのポリプロピレン(KF 2070

TW)である。解析対象の中央部は波形形状の曲面部であるが、解析モデルではこの部分を体積一定の条件の下に平面で近似した。図10に示すショートショット成形実験の結果と計算結果を、メルトフロントの移動パターンについて比較した。各時刻の充てん状況を重ね書きした結果を図11(a)に、最終時刻の圧力分布を同図(b)におおのカラー表示して示す。各時刻のメルトフロントの位置を同時にカラー表示したことによって、樹脂の合流によるウェルドラインが発生しないことがわかる。3秒後の実験結果と計算結果の比較を図12に示す。メ

ルトフロントの移動パターンはよく一致しており、メルトフロントの移動距離は5%以内で一致した。

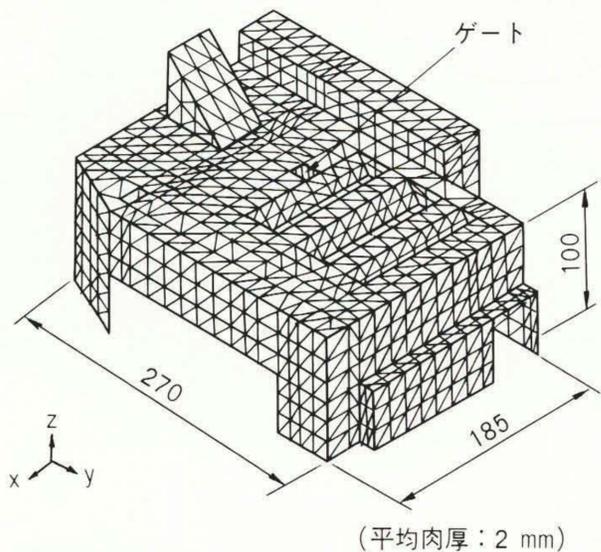
5.2 プラスチックレンズへの適用

三次元解析プログラムを凹レンズの成形シミュレーションに応用した例について述べる。計算体系と計算条件を図13に示す。図14に示した計算結果は、おのおの0.1秒、0.3秒時の流速分布と圧力分布を示している。時間の経過とともに流動抵抗の小さい周辺部が回り込むように流れていくようすがわかる。

6 結 言

溶融プラスチックのような非ニュートン流体の三次元熱流動シミュレーション技術を開発した。本解析技術を自動車用

(a) 解析体系



(b) 解析条件

節点数	4,579
材 料	●ポリプロピレン(タルク30%入り)
実験条件	●樹脂温度 250℃ ●充てん時間 5s ●ショートショット成形

図9 自動車用クーラーユニットケースへの適用
中央部の波形形状は曲面であるが、平面で近似してある。

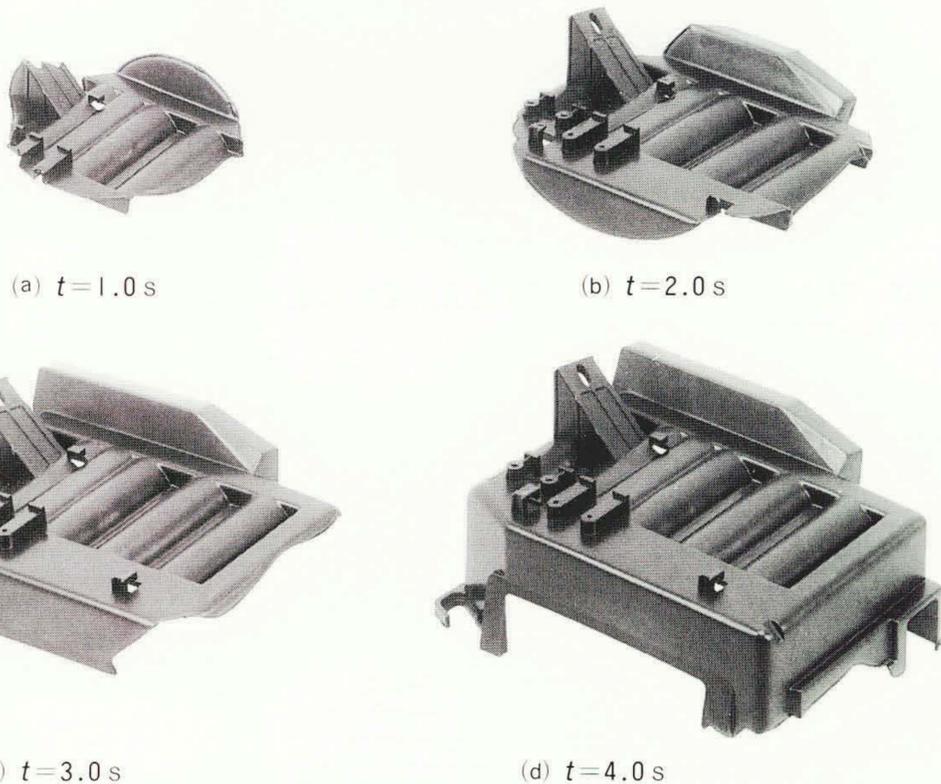
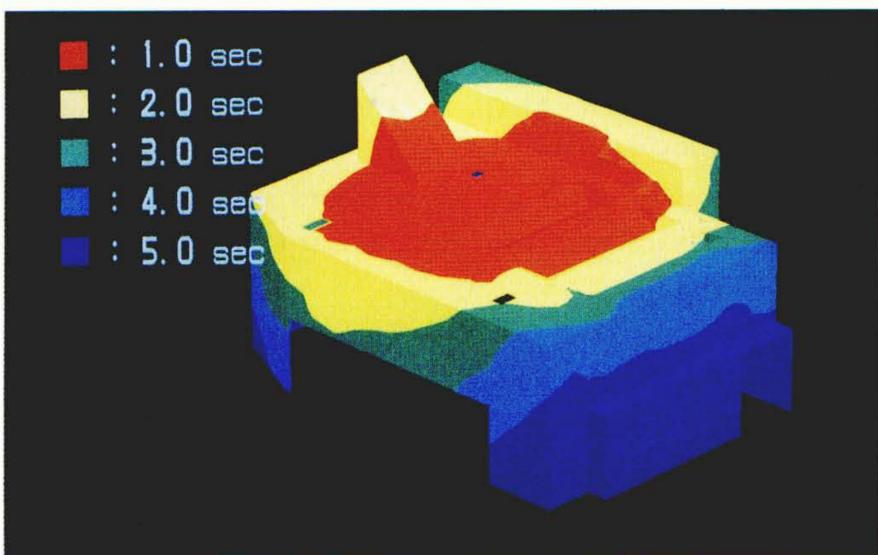
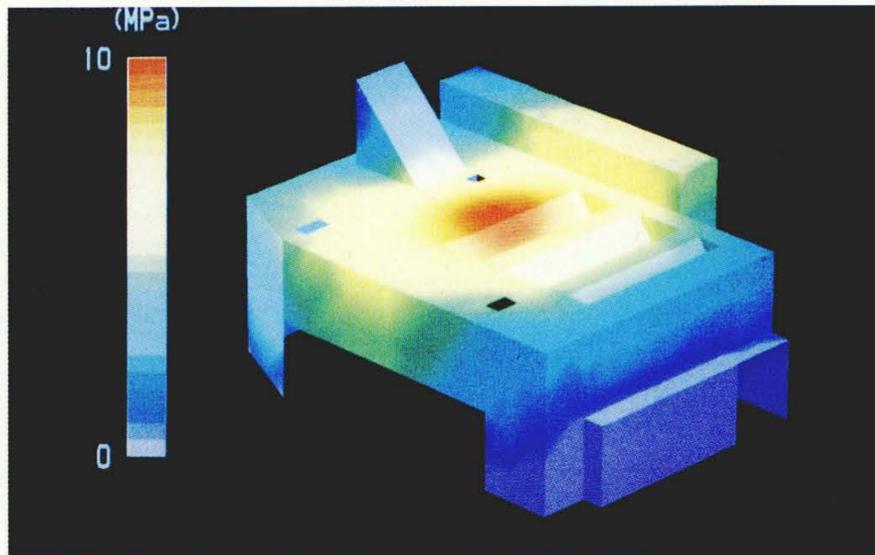


図10 ショートショット成形実験の結果 ショートショット成形によるメルトフロントの移動実験を示す。中央ゲートから等方的に溶融プラスチックが広がっていくようすがわかる。



(a) 各時刻の充てん状況

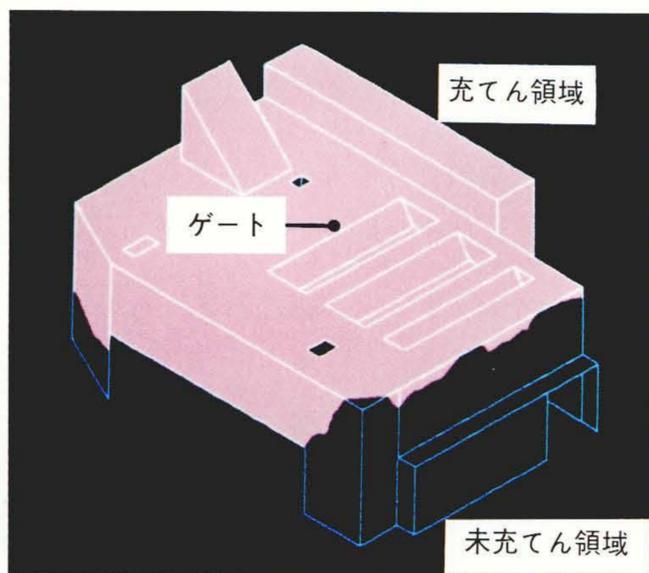


(b) 充てん終了時の圧力分布

図11 計算結果のカラー表示 (a)は各時刻の充てん状況を表す。境界がメルトフロントである。



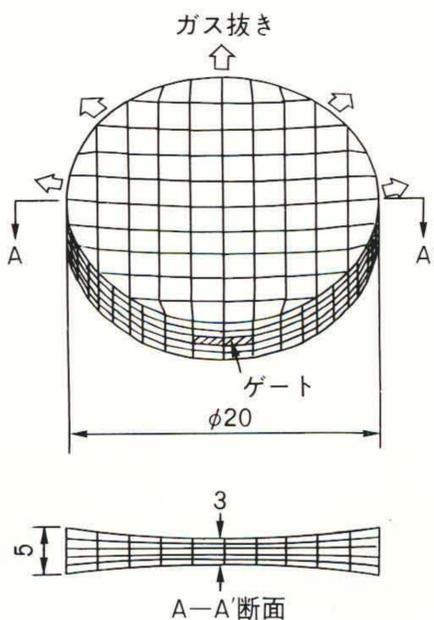
(a) ショートショット結果



(b) 計算結果

図12 充てん3秒後の実験結果と計算結果の比較 充てん3秒後のメルトフロントの位置を示す。

(a) 解析体系



(b) 解析条件

節点数 440	物性値
温度 200℃	●密度 = 1,000 kg/m ³
	●粘度 = $\eta_0 \cdot r^{n-1} \text{Pa}\cdot\text{s}$
	ただし, $\eta_0 = 1,000$
	$n = 0.5$

図13 三次元解析プログラムによる計算例 凹レンズ形状に対して、三次元解析を実施した例である。使用した物性値は仮想的なものである。

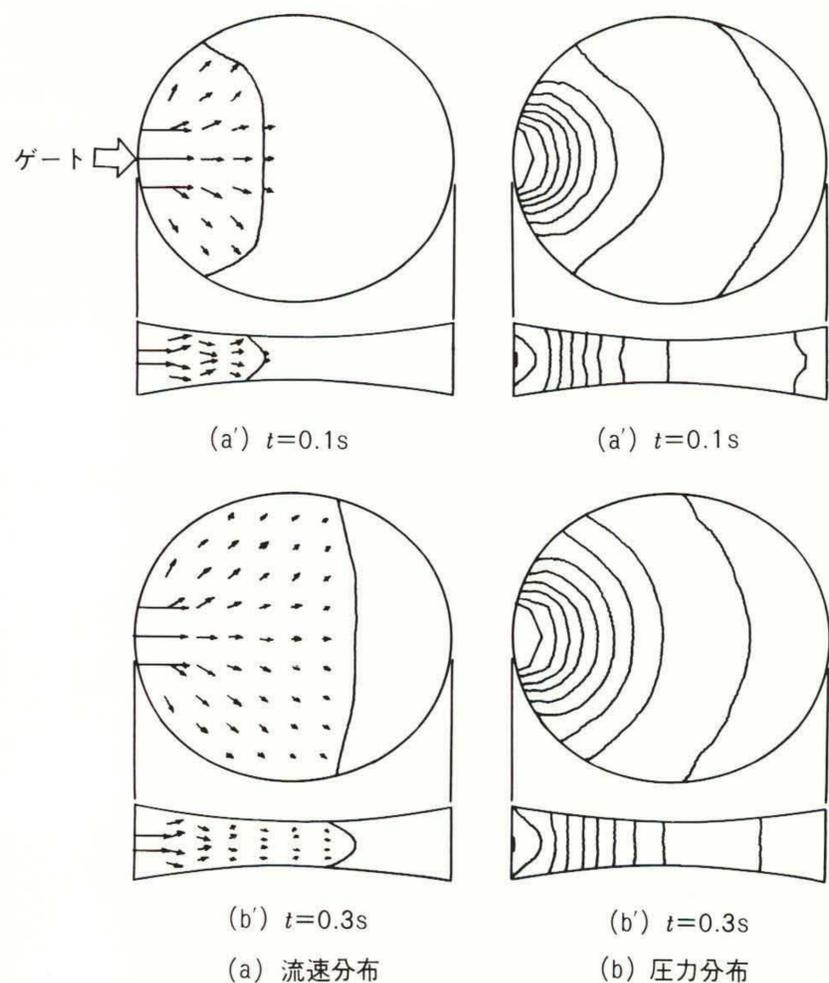


図14 三次元計算結果 周辺部が厚いために、時間の経過とともに周辺部が回り込む流れとなっている。

クーラーユニットケースの流動シミュレーションへ適用し、その有効性を示した。これにより、射出成形での金型形状・プラスチック注入口・射出成形条件などの最適化が、数値シミュレーションによって可能となった。

参考文献

- 1) 廣恵, 外: プラスチック成形加工入門, 日刊工業新聞社, 121~123(昭54-5)
- 2) 寒河江, 外: 高粘性非ニュートン流体の数値解法(第1報指数則流体の2次元非定常解析), 日立地方講演会論文集, 505, 132(1987)
- 3) J. Donea, et al.: Finite Element Solution of The Unsteady Navier-Stokes Equations by a Fractional Step Method, Comput. Meth. in Appl. Mech. and Engng., 30, 53~70(1982)
- 4) A. Wambecq: Rational Runge-Kutta Method for Solving System of Ordinary Differential Equation, Computing, 20, 241~260(1978)
- 5) M. Koizumi, et al.: A New Time Integration Method for Convection Diffusion Equations, Comput. Meth. '86, Proc. of ICCM, Vol.2, VII 207~212(1986)
- 6) C. W. Hirt, et al.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comput. Phys., 39, 201~225(1971)
- 7) 山川, 外: TVカメラを用いた三次元流速分布測定システムの開発, 流れの可視化, Vol.6, No.22, 109~114(1986)