

樹脂射出成形解析の最近の進歩

解説

一柳 高時*・中 裕之*2

Recent Progress of Analytical Technique about Injection Molding Processes

Takashi ICHIYANAGI and Hiroyuki NAKA

1. はじめに

樹脂成形法の中の代表的プロセスの一つに、射出成形法があげられる。射出成形法の各工程を大別すると、熔融樹脂を金型内に射出注入する充填工程、冷却に伴う熱収縮を見込んで過圧縮する保圧工程、及び金型自身の持つ大きい熱容量を利用して成形品を冷却する冷却工程に分けられる。以上の各工程を巧みに制御して、表面及び形状精度の優れた成形品を効率的に生産する金型設計の努力が続けられてきた。例えば、手持ちの成形機の射出能力を越える成形圧を必要とする金型の改造・設計変更や、複数の樹脂流の合流部に生じるウェルド位置の予測とコントロール、金型内への樹脂流入口であるゲートの点数とその配置、成形サイクル短縮化を図る効率的金型温調回路設計等に、金型技術者の長年の経験と勤が必要とされてきた。

しかしながら、近年のコンピューターの発達と併せて、OA 機器を主体とする家電・自動車部品等の新たな需要構造の変革の中で、高精度・高品質・高効率の射出成形が強く求められるようになった。これを受けて、金型内の樹脂流れや温度履歴等を解析シミュレーションすることによって具現化し、より正確な情報を得ようとする取組が 10 数年前から盛んに行われるようになり、現在その研究の一部は、実際の金型設計へ適用され、多くの効果をあげるに至っている。

本稿では、射出成形にまつわる種々の研究に注目し、その取組内容及び成果について紹介し、併せて将来技術の展望を行いたいと考える。

2. 材料評価技術

樹脂射出成形工程にまつわる種々の現象を解明しようとするとき、樹脂特有の材料物性を正確に把握する必要がある。まず、流動解析を行うときに不可欠となる非

ニュートン流動特性に関しては、粘度 η が、せん断速度 $\dot{\gamma}$ のべき乗に比例するという、べき乗則を基本とし、これに温度依存項を考慮するのが通常である¹⁾。その一般形は式(1)に表現される。

$$\eta = C\dot{\gamma}^{n-1} \exp(T_a/T) \dots\dots\dots (1)$$

ここで C, n, T_a が樹脂固有の材料定数で、 T は任意の樹脂温度を示す。また、 B, T_b, C, n の 4 定数を用いたモデルとして、

$$\eta = \frac{\eta_0(T)}{1 + C(\eta_0\dot{\gamma})^{1-n}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_0(T) = B \exp(T_b/T) \dots\dots\dots (3)$$

も提唱されている²⁾。式(1)の中の材料定数を求めるための手法も種々提案されているが、図1に示すように、一定温度で熔融させた樹脂を円筒状または矩形のノズルから流出させ、その時の温度・圧力を測定することからモデル化した関係式を用いて η vs $\dot{\gamma}$ 曲線を得る手法が最も一般的と言える^{3)~7)}。また、LORD らの研究では、ポリカーボネート樹脂に関して、粘度の圧力依存性が陽に作用することが確認され、圧力依存項の考慮により流動解析精度が向上したとの報告⁸⁾も見られる(図2参照)。しかし、ここで用いられる材料特性評価手法のモ

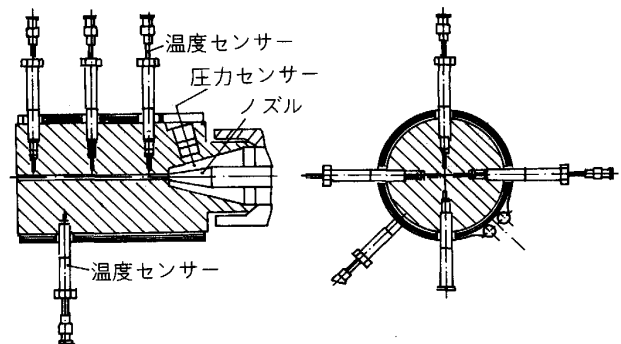


図1 樹脂粘度特性の代表的測定例

昭和 62 年 8 月 3 日受付 (Received Aug. 3, 1987) (依頼解説)

* 松下電器産業(株)生産技術本部 副参事 (Production Engineering Lab., Matsushita Electric Ind. Co. LTD., 2-7 Matsuba-cho Kadoma Osaka 571)

*2 松下電器産業(株)生産技術本部 技師 (Production Engineering Lab., Matsushita Electric Ind. Co. LTD.)

Key words: plastics; injection molding; dimensional accuracy; metall mold; flow analysis; simulation; mathematical model; optimization; reinforced plastics; defect.

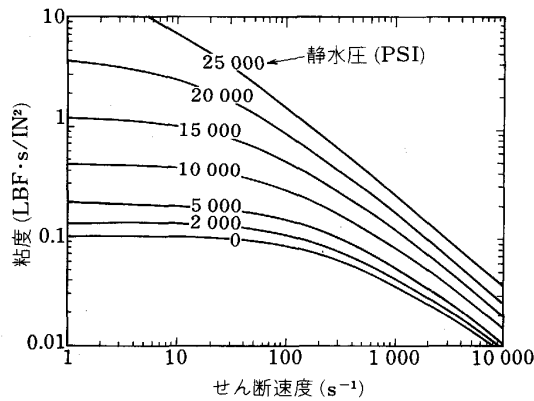


図2 せん断速度対粘度の圧力依存効果 (ポリカーボネート)

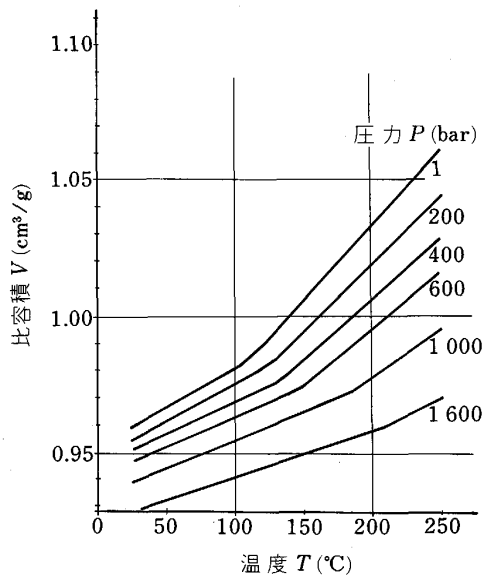


図3 P-V-T特性曲線の例 (ABS樹脂)

デルは、実際の金型における樹脂温度や流動状態と厳密には異なっており、以上をふまえた評価技術の確立が課題として残されている。

一方、充填後の保圧、冷却収縮・ひけ、反り等の現象を考察するとき、樹脂の圧縮特性の把握が不可欠となる。樹脂の圧縮性に関しては、SPENCER, GILMORE ら⁹⁾¹⁰⁾が式(4)に示す状態方程式を提示して以来、種々の樹脂への適用が研究されている^{9)~18)}。

$$(P + \pi_i)(v - w) = R_m(T + 273) \dots\dots\dots (4)$$

ここで P, v, T は、おのおの圧力、体積、温度を指し、 π_i, w, R_m は材料に依存する定数である。特に MAXWELL ら¹¹⁾は、樹脂の圧縮性が加圧速度に依存し得ることを示し、山口・大柳ら¹²⁾は静水圧効果に関する研究も行っている。また、種々の実験データを体系的にまとめた総合データ資料¹³⁾も見うけられる(図3参照)。ただし、これらのデータは、最大圧力がおおむね、高々 1500~2000 kgf/cm² 程度に限られており、これを超え

る圧力領域に対する特性に関しては、実験の困難さもあいまつて、いまだデータが十分そろっていない状況にある。従つて、射出圧縮成形等の高圧成形を取り扱う解析においては、まず樹脂の高圧条件特性から把握する必要がある。

3. 充填工程解析

金型内の樹脂流動挙動を正確にシミュレーションすることにより、樹脂流れを適正化し、合理的金型設計に反映させようという試みから流動解析の研究が始められた。現在、樹脂射出成形の全工程の中で最も解析技術的に完成度が高い分野であり、実際の金型設計に適用される種々の効果を発揮している^{19)~44)}。解析においては、一般的に成形品形状の肉厚が相対的に薄いことから、Hele-Shaw 流れ¹⁹⁾を仮定し、ニュートン流体に関する運動方程式、エネルギー保存式と流れの連続条件を考えた基礎式が用いられている。

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + \eta \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 z を肉厚方向とし、これに直交する $x-y$ 平面での流速を V_x, V_y とする。また ρ, C_p, K はおのおの樹脂の密度、比熱、熱伝導率である。樹脂粘度の材料非線形性については、計算過程で刻々更新される速度場に基づいて修正することにより考慮される。流動解析で特徴的な点は、式(7)で示すエネルギー方程式である。流速に乗つて運ばれる熱移流項を除くと、熱伝導に関しては金型壁への放熱のみを考える。これは成形時の Fountain effect (噴水効果) を盛り込んだ仮定である。Fountain effect は、ゲート部から供給される溶融樹脂が壁と接触する部分でのみ固化し、その他は次々に流れの先端へ送り出されて停滞しない性質を指して言う。その自由表面の流動挙動に関して GOGOS ら⁴⁵⁾、KAMAL ら⁴⁶⁾ が MAC 法を用いた解析を、また MAVRIDIS ら⁴⁷⁾ が有限要素法を用いた解析を行つている(図4,5参照)。

また、特に成形品肉厚が薄く、射出速度が大きい成形条件下では、せん断発熱が無視できなくなるため、式(7)右辺第2項を入れる場合が多い。以上式(5)~(8)から解を導く方法として、WANG, HIEBER らの提唱する有限要素法²⁾の概念を用いた解法²⁾と、TADMOR らが提唱する FAN 法 (Flow Analysis Network Method)³¹⁾ とに大別される。以下にこれらの解析手法を用いて実際の金型設計へ適用された事例を紹介する。

ウェルド位置予測を目的として、コンピューターキーボード³⁹⁾(図6参照)やスピーカーボックスに、成形品肉厚の最適化を目的としてヒーター部品に、ランナーバランスを目的としてコネクタのファミリー成形⁴⁰⁾に、その他ゲート位置の最適化とゲート点数削減を目的として、掃除機天板(図7参照)、エアコン、テレビキャビネッ

ト、ビデオテープカセット等に適用されている。これらの解析結果は、ショートショットした検証実験から得られるフローパターンと良い一致を示す²⁾(図8参照)ほか、先に述べた粘度評価式を正確に評価することで、成形圧力値についても、誤差±10%以内程度に抑えられることが確認されている。また、純理論の見地を離れて、実用を主眼とした図式解法⁴⁸⁾⁻⁵¹⁾や、経験則に基づくデータベースを主体とした、独自の流動解析ソフト³⁷⁾も実用に供されている。更に、樹脂流動現象を詳細に解析しようとする試みも種々行われ、薄肉キャビティ解析における境界条件の与え方に関して KAMAL ら⁵²⁾, KRUEGER ら⁵³⁾, RYAN ら⁵⁴⁾の研究、矩形キャビティにおけるメルトフロント位置と上流、下流流れとの相関性に関す

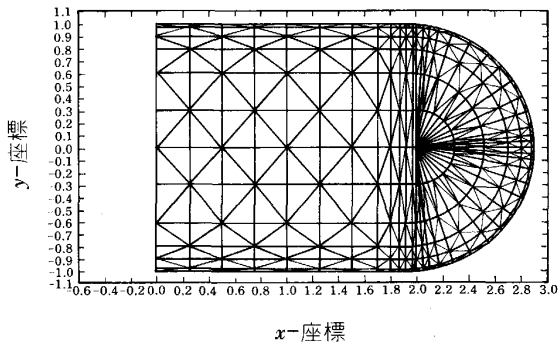


図4 平行平板のメルトフロント部の有限要素メッシュ切り

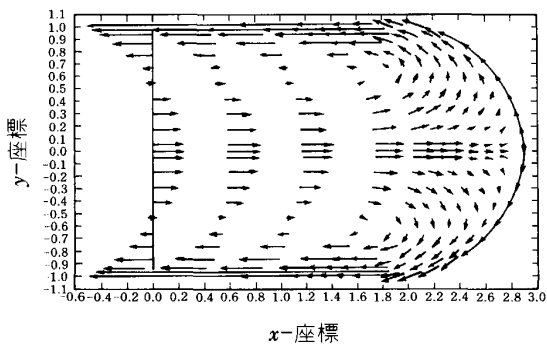


図5 平行平板のメルトフロント部の樹脂流れ解析結果

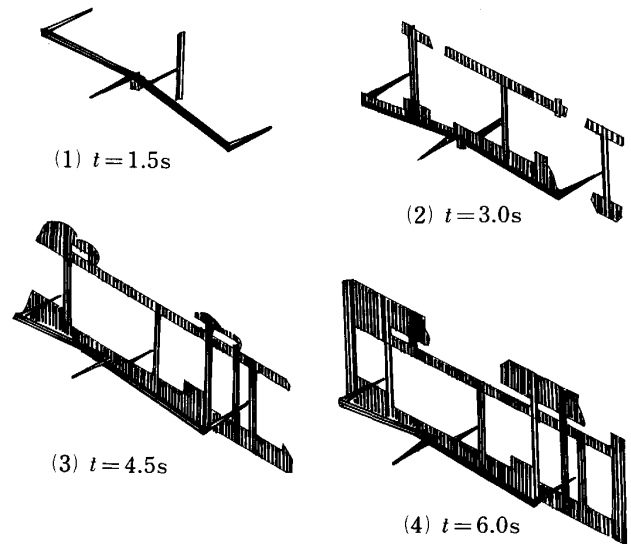


図6 解析で求められたコンピューターキーボードの充填パターン

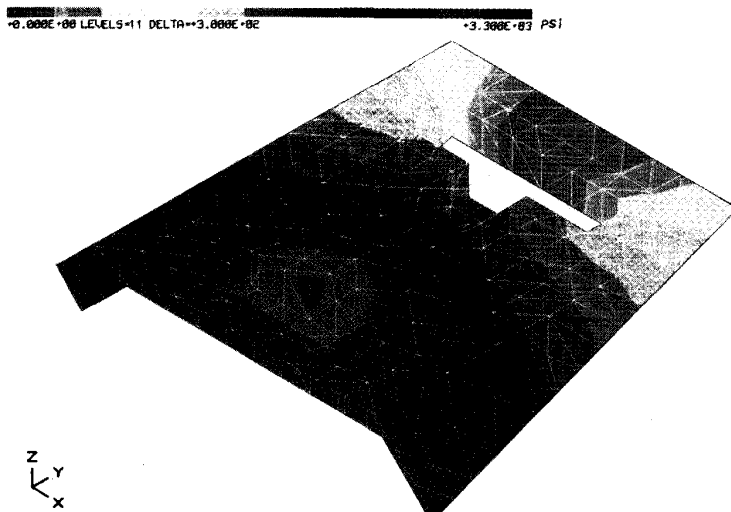
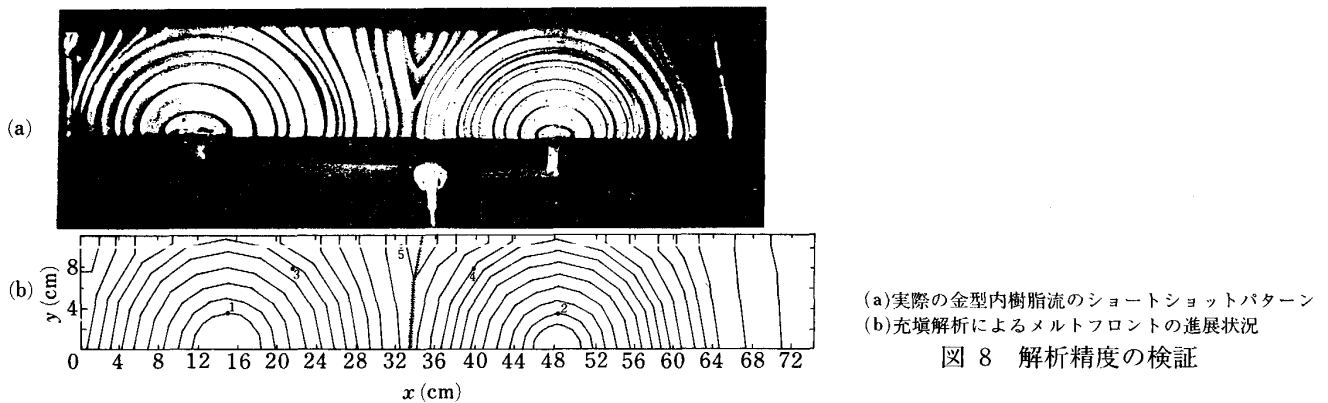


図7 掃除機天板パネルの充填解析結果(圧力分布)



(a)実際の金型内樹脂流のショートショットパターン
(b)充填解析によるメルトフロントの進展状況

図 8 解析精度の検証

る SoH ら⁵⁵⁾の研究, 結晶ポリマーの凝固潜熱を考慮した流動モデルに関する藤井ら⁵⁶⁾の研究, 結晶性ポリマーの平行キャピティ内の固相発達にステファン解を用いた近似計算例⁵⁷⁾, 注入ポリマー先端と共に動く座標系に物理モデルを適用した研究例⁵⁸⁾等が見られる。

一方, 現行の樹脂流動解析における最大の問題点は, その温度分布計算結果が信頼性に乏しい点にある。原因として, 先述の式(7)の記述に厳密性が不足しているためと考えられる。今後これらの問題に対する取扱い手法が確立されることで, より正確な流動解析が実現するほか, 特異な流動挙動として, ヘジテーション, ジェッティングや, ガス抜きを考慮した流動解析も実用化されることが期待される。

4. 保圧工程解析

流動解析が, 金型内に樹脂を充填できるか否かを判断するために用いられるのに対し, 保圧工程以降の解析は, 主としてでき上がった成形品の形状・精度がいかに確保できるかを最大の関心事とする点で視点を異にする。保圧工程の解析は, 充填工程に比べ研究例が少なく, 今後の課題も多い。歴史的には KAMAL, KENIG ら⁵⁹⁾⁶⁰⁾がメルトの進展を射出圧と型内平均圧との差に比例するという仮定を適用したのが最初で, その後種々の解法や初期・境界条件の与え方が検討⁶¹⁾⁶²⁾され, ニュートン流体に Spencer-Gilmore 式を適用したディスクキャピティ解析例⁶³⁾も見られる。ここでは, 平板解析に適用した CHUNG⁶⁴⁾の例を示す。保圧工程では, 樹脂の変形速度が小さいためニュートン流体としての取扱いをし, 更に肉厚方向の速度・圧力・密度を平均化した等温流れに関して以下の連続・運動方程式を用いる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{U} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{V} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \eta \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

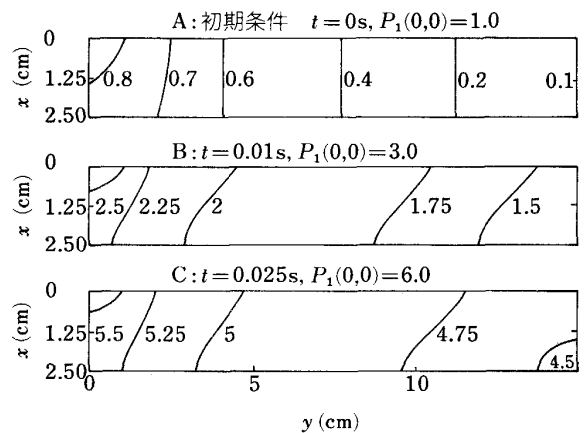


図 9 保圧解析による非定常状態での等圧線出力 (y軸対称モデル)

ここで, \bar{U} , \bar{V} はおのおの x , y 方向への平均流速である。上記の式(9)~(11)から, $2h$ をキャピティ肉厚として

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{h^2 \rho}{3\eta} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) - \frac{h^2}{3\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

が得られ, 式(12)の圧力 P を Spencer-Gilmore 式により密度 ρ の関数として記述することにより圧縮性を考慮し, Saul'yev 差分法⁶⁵⁾を用いて保圧工程をシミュレートしている。結果例を図9に示す。

この分野では, 今後変形速度の影響や, 周辺固化による固液混相状態の記述等をふまえた高精度の解析が期待される。

5. 収縮・ひけ・配向解析

成形品の形状精度を考えるうえで重要な点は, 成形品の冷却収縮に伴う変形の評価法である。保圧工程完了後, 樹脂は金型に対し熱を放出しつつ冷却収縮する。この時点で冷却速度が成形品の部分によつて異なるとき不均一な収縮によつてひけや反りあるいは残留応力が発生する。このうちひけは, リブやボス部を裏に持つ成形品表

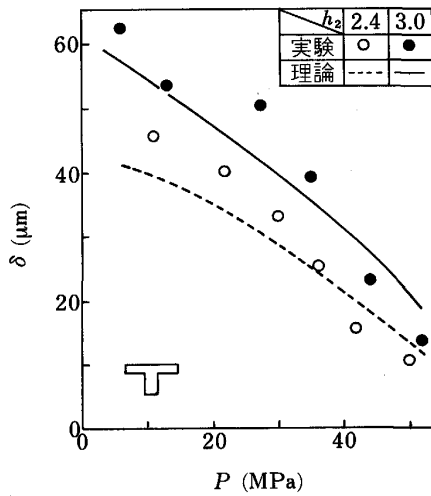


図 10 圧力 P によるひげ量 δ の変化

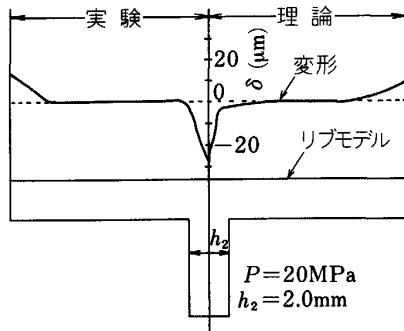
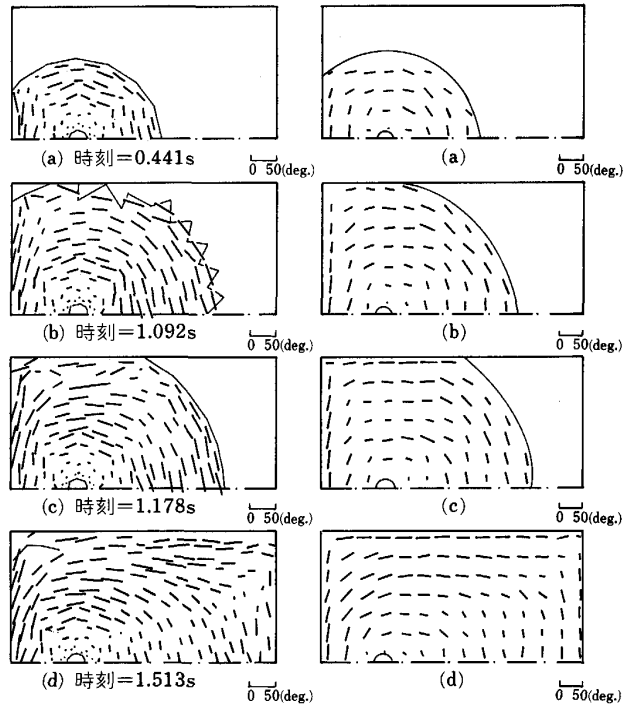


図 11 リブ天板上のひげ解析

面に局部的に生じる凹みを指して言う。ひげの定量化に対する試みは、丸山ら⁶⁶⁾によつて実験検討を主とした取組が報告されているが、最近著者らによつて、非常伝熱問題と、樹脂の圧縮性及び相変態を考慮した弾塑性応力歪み解析手法が提案された^{67)~69)}。図 10, 11 には、リブ天板上のひげに関し、成形(保圧)圧 P ・リブ厚さ h_2 がひげ量 δ に及ぼす影響について検討した実測と解析結果の比較を示す。一方、冷却固化が周囲において十分行われた後、内部の高温樹脂が冷却収縮する場合には、ひげにかわつてポイドと呼ばれる空孔が成形品内に生じる。ポイドの発生に関しては、TITOMANLIO ら⁷⁰⁾の研究がある。また、金型の冷却のアンバランスや、成形品形状の熱容量の大幅なかたよりによつて生じる熱応力に関しては、有限要素法により熱弾性解析を行つた RIGDAHL⁷¹⁾、MENGES ら⁷²⁾の報告が見られる。

成形品の種々の形状不良に関しては、上記の熱的要因によるものの他に、充填中の流れ場に起因して生じる高分子の配向によるものも考えられる。高分子の配向が生じると、材料の機械的性質が異方性を呈することにより反り等の変形が発生する。BALLMAN ら⁷³⁾は、射出成形過程での分子配向の定量化研究の中で、固化後の配向パ



解析から得られたファイバー配向 トレーサーを用いたファイバー配向実測データ

図 12 ファイバー配向の解析事例

ターンが、せん断力とブラウン運動との相反効果から生じることを見出した。また、ガラス繊維等を樹脂に混入させ、材料強度を向上させることを目的とした FRP (Fiber Reinforced Plastics) に関しても、ガラス繊維の配向特性を解析する手法が研究されている⁷⁴⁾⁷⁵⁾。図 12 に平井ら⁷⁵⁾による結果を例示する。基本的な考え方として、ガラス繊維の存在が流体の流れ場に対し影響を及ぼさないという仮定を置き、まず流れ場を単独に解くことで求められる速度こう配テンソル、うず度テンソル等を算出し、これによつて一定半径、長さを有するモデル化したファイバー要素が受ける流体力を予測し、ファイバーの向きを求める⁷⁶⁾。ファイバーの初期配向を仮定するかわりに、任意の配向角を設定し、これを統計処理する手法が多く用いられている。

6. 冷却工程解析

効率成形の観点に立つと、充填が完了された樹脂はすみやかに金型から取り出され、次の射出ができる状態になることが、サイクルタイム短縮を達成するために望ましい。従つて、成形品に対し、均一かつ敏速に吸熱を可能とする金型温調溝構造並びにその配置が重要視される。金型及び樹脂を含めた伝熱解析は、フーリエの法則に基づいた熱伝導方程式と対流熱伝達の関係式が用いられ、その解法も必要に応じて、差分法、有限要素法、境界要素法等が使い分けられている。冷却解析単独での研究報告例^{77)~79)}は少ない。図 13 には、冷却水管配置の

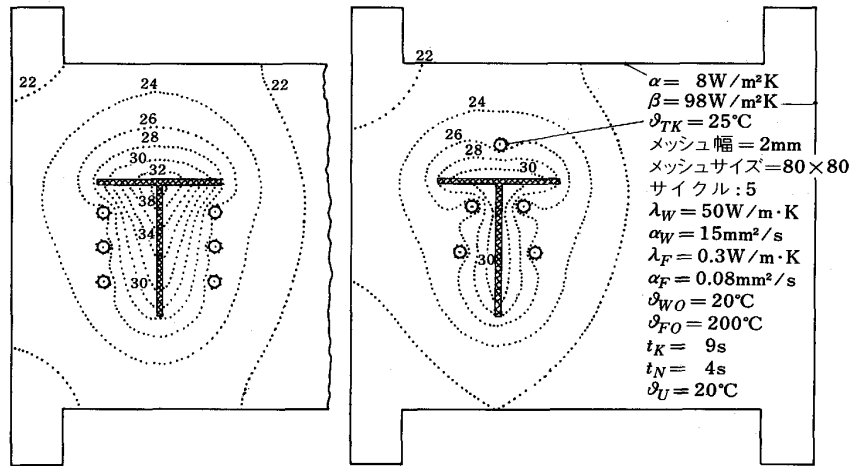


図 13 冷却用の金型温調溝を変化した時の等温線分布

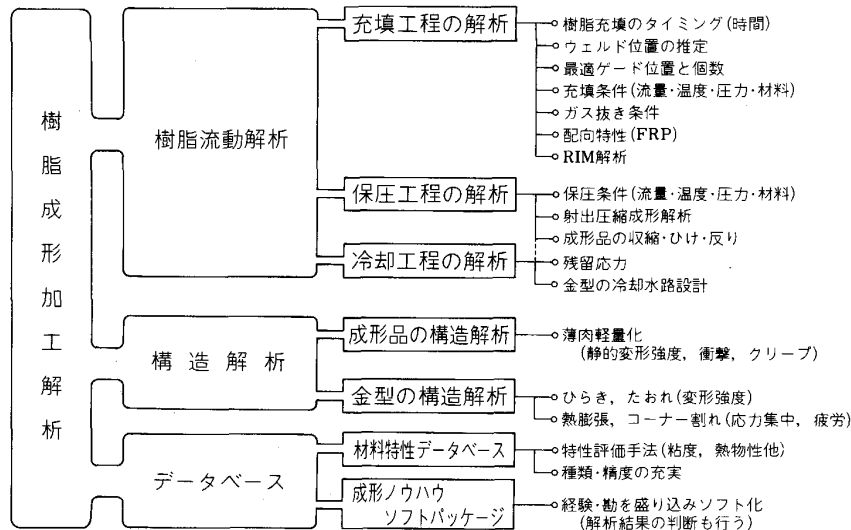


図 14 松下電器産業(株)の「樹脂成形加工解析」システム構想

差による温度分布解析例⁷⁹⁾を示す。

7. ま と め

以上射出成形にまつわる諸現象に関する研究事例について概説したが、松下電器産業(株)においても、樹脂成形のトータルな解析シミュレーションシステムの構築を目指して取り組んでいる。図 14 にシステム構想を示す。本システムの第 1 の特徴は、樹脂の射出から成形品取り出しまでの全プロセスを一貫して解析できる点にある。昨今の動向から樹脂成形品に対する高精度化、表面性等外観性重視、強度向上化への要求が高まる中で、成形過程での流れ・熱・応力ひずみの履歴や、時には、金型変形の影響をも総合的に把握することで、従来以上に厳密かつ限界を狙った成形技術の確立が期待できる。更に、過去にない新しい成形法に関するアイデアの可能性検討が机上評価できるようになろう。第 2 の特徴は、独自の材料評価技術とそれに基づく各種データベースの構築にある。先に述べたとおり、材料特性は解析精度を左右す

る最大のポイントと言つても過言ではない。従つて解の精度を保証するデータ評価手法の確立と、データベースの充実が重要と言える。更に、第 3 の特徴として、本システムは、射出成形に限らず、他の成形法あるいは樹脂以外の材料に関する解析をも可能とするよう配慮されている点あげられる。具体的には、射出圧縮成形法や反応射出成形法 (RIM) 等への応用や、ガラス、金属材料等への適用が考えられる。

以上のシステムは、金型設計製作 CAD/CAM システムとリンクされてより効率的に運営される。最終的な姿として、AI (人工知能) を導入し、無人化した金型解析設計と金型加工の実現も夢では無いと考えられる。

文 献

- 1) C. A. HIEBER, L. S. SOCHA, S. F. SHEN, K. K. WANG and A. I. ISAYEV: Polym. Eng. Sci., **23** (1983) 1, p. 20
- 2) K. K. WANG, S. F. SHEN, C. COHEN, C. A. HIEBER, T. H. KWON and R. C. RICKETSON: Progress Report No. 11 (1985), p. 10 [Cornell Injection Molding Project., Cornell Univ. New York]

- 3) H. W. COX, C. C. MENTZER and R. C. CUSTER: *Polym. Eng. Sci.*, **24** (1984) 7, p. 501
- 4) G. EHRMANN, G. ROBENS and M. H. WAGNER: *Kunststoffe*, **64** (1974), p. 463
- 5) R. KOHLER: *Kunststoffe*, **68** (1978), p. 367
- 6) F. RAMSTEINER: *Kunststoffe*, **61** (1971), p. 12
- 7) R. J. CROWSON, A. J. SCOTT and D. W. SAUNDERS: *Polym. Eng. Sci.*, **21** (1981) 12, p. 748
- 8) H. A. LORD: *SPE Tech. Pap. Reg. Tec. Conf.* (1977), p. 16.1
- 9) R. S. SPENCER and G. D. GILMORE: *J. Appl. Phys.*, **21** (1950), p. 523
- 10) R. S. SPENCER and G. D. GILMORE: *J. Colloid Sci.*, **6** (1951), p. 118
- 11) B. MAXWELL and S. MATSUOKA: *SPE J.*, **13** (1957), p. 27
- 12) 大柳 康, 山口章三郎: *日本レオロジー学会誌*, **3** (1975) 2, p. 64
- 13) VDMA, *Kenndaten für die Verarbeitung Thermoplastischer Kunststoffe, Thermodynamik*, 1 (1979) [Carl Hanser Verlag, München]
- 14) G. MENGES and P. THIENEL: *Polym. Eng. Sci.*, **17** (1977) 10, p. 758
- 15) V. H. KARL: *Kunststoffe*, **68** (1978), p. 247
- 16) P. THIENEL, L. SCHMIDT and V. BOGATZ: *Maschinen markt, Würzburg*, **84** (1978), p. 1735
- 17) P. ZOLLER, P. BOLLI, E. HERSCHE and U. FOPPA: *Kunststoffe*, **66** (1976), p. 363
- 18) G. MENGES and P. THIENEL: *Kunststoffe*, **65** (1975), p. 696
- 19) H. SCHLICHTING: *Boundary Layer Theory* (1979), p. 123 [McGRAW-Hill]
- 20) G. TITOMANLIO: *Polym. Eng. Sci.*, **22** (1982) 5, p. 324
- 21) B. VERGNES, P. SAILLARD and J. F. AGASSANT: *Polym. Eng. Sci.*, **24** (1984) 12, p. 980
- 22) A. Y. MALKIN, L. I. SHERYSHEVA and S. G. KULICHIKHIN: *Polym. Eng. Sci.*, **23** (1983) 15, p. 804
- 23) M. GRMELA: *Polym. Eng. Sci.*, **24** (1984) 9, p. 673
- 24) M. R. KAMAL and P. G. LAFLEUR: *Polym. Eng. Sci.*, **22** (1982) 17, p. 1066
- 25) G. SORNBERGER, B. VERGNES and J. F. AGASSANT: *Polym. Eng. Sci.*, **26** (1986) 7, p. 455
- 26) M. R. KAMAL and S. KENIG: *Polym. Eng. Sci.*, **12** (1972) 4, p. 294
- 27) J. L. WHITE and H. B. DEE: *Polym. Eng. Sci.*, **14** (1974) 3, p. 212
- 28) G. WÜBKEN, H. BANGERT and L. SCHMIDT: *Kunststoffe*, **74** (1984), p. 46
- 29) J. L. WHITE: *Polym. Eng. Sci.*, **15** (1975) 1, p. 44
- 30) J. F. STEVENSON, C. A. HIEBER, A. GALEKOY and K. K. WANG: *SPE Tech. Pap. Annu. Tech. Conf.*, **22** (1976), p. 282
- 31) E. BROYER, C. GUTFINGER and Z. TADMOR: *Trans. Soc. Rheol.*, **19** (1975) 3, p. 423
- 32) P. THIENEL and G. MENGES: *Polym. Eng. Sci.*, **18** (1978) 4, p. 314
- 33) Y. KUO and M. R. KAMAL: *AICHE J.*, **22** (1976) 4, p. 661
- 34) G. WILLIAMS and H. A. LORD: *SPE Tech. Pap. Annu. Tech. Conf.*, **22** (1976), p. 289
- 35) H. A. LORD and G. WILLIAMS: *SPE Tech. Pap. Annu. Tech. Conf.*, **22** (1976), p. 307
- 36) L. R. SCHMIDT: *Polym. Eng. Sci.*, **14** (1974) 11, p. 797
- 37) 堤 健一: *PIXEL (図形処理情報センター編)*, **30** (1985), p. 91
- 38) M. H. NAITOVE: *Plastics Technology* (1984), p. 74
- 39) 後藤輝正, 飯塚邦彦, 宮本雅之, 久保 登, 逢坂正義, 佐原謙一, 馬渡恭三郎, 西岡郁夫: *シャープ技報*, **34** (1986), p. 63
- 40) 石和正幸, 松沢宇高, 山口 晃, 田村尚久: *古河電工時報*, **77** (1986), p. 11
- 41) 田中豊喜: *プラスチックス*, **37** (1986) 12, p. 32
- 42) 高橋秀郎: *プラスチックス*, **32** (1981) 2, p. 61
- 43) 後藤輝正: *プラスチックス*, **37** (1986) 12, p. 45
- 44) 田中豊喜, 須賀康雄: *日経メカニカル別刷* (1985) 10月号, p. 144
- 45) C. G. GOGOS and C. F. HUANG: *Polym. Eng. Sci.*, **26** (1986) 20, p. 1457
- 46) M. R. KAMAL, E. CHU, P. G. LAFLEUR and M. E. RYAN: *Polym. Eng. Sci.*, **26** (1986) 3, p. 190
- 47) H. MAVRIDIS, A. N. HRYMAK and J. VLACHOPOULOS: *Polym. Eng. Sci.*, **26** (1986) 7, p. 449
- 48) H. BANGERT: *Kunststoffe*, **75** (1985), p. 335
- 49) J. F. STEVENSON: *Polym. Eng. Sci.*, **18** (1978) 7, p. 577
- 50) A. MORONI, A. FERRARIO and A. CASALE: *Conf. Polym. Rheol. Plast. Process* (1976), p. 207
- 51) J. F. STEVENSON, R. A. HAUPTFLEISH and C. A. HIEBER: *Plastic Engineering*, **32** (1976) 12, p. 34
- 52) M. R. KAMAL, Y. KUO and P. H. DOAN: *Polym. Eng. Sci.*, **15** (1975) 12, p. 863
- 53) W. L. KRUEGER and Z. TADMOR: *Polym. Eng. Sci.*, **20** (1980), p. 426
- 54) M. E. RYAN and T. S. CHUNG: *Polym. Eng. Sci.*, **20** (1980), p. 642
- 55) S. K. SOH and C. J. CHANG: *Polym. Eng. Sci.*, **26** (1986) 12, p. 893
- 56) 藤井 哲, 辻 俊博: *日機論*, **43** (1977), p. 3337
- 57) N. I. BASOV and I. I. FELIPCHUK: *Heat Trans. Soviet Res.*, **4** (1972) 2, p. 94
- 58) D. H. HARRY and R. G. PARRETT: *Polym. Eng. Sci.*, **10** (1970) 4, p. 209
- 59) M. R. KAMAL and S. KENIG: *Polym. Eng. Sci.*, **12** (1972), p. 294
- 60) M. R. KAMAL and S. KENIG: *Polym. Eng. Sci.*, **12** (1972), p. 302
- 61) Y. KUO and M. R. KAMAL: *Proc. Int. Conf. Polym. Processing* (1977), p. 329
- 62) T. S. CHUNG and M. E. RYAN: *Polym. Eng. Sci.*, **21** (1981), p. 271
- 63) T. S. CHUNG and Y. IDE: *J. Appl. Polym. Sci.*, **28** (1983), p. 2999
- 64) T. S. CHUNG: *Polym. Eng. Sci.*, **25** (1985) 11, p. 772
- 65) V. K. SAUL'YEV: *Integration of Equation of Parabolic Type by the Method of Nets* (1964) [Macmillan, New York]
- 66) 丸山照法, 日部 恒: *高分子論文集*, **38** (1981) 4, p. 275
- 67) 一柳高時, 中 裕之, 剣持加津衛: *日機論*, **53** (1987) 485, p. 148
- 68) 中 裕之, 一柳高時, 剣持加津衛: *日機論*, **53** (1987) 485, p. 153
- 69) H. NAKA, T. ICHIYANAGI and K. KENMOCHI: *JSME Int. Jour.*, **30** (1987) 265, p. 1060
- 70) G. TITOMANLIO, S. PICCAROLO and G. MARRUCCI: *Polym. Eng. Sci.*, **25** (1985) 2, p. 91
- 71) M. RIGDAHL: *Intern. J. Polymetric Mater.*, **5** (1976), p. 43
- 72) G. MENGES, A. DIERKES, L. SCHMIDT and E. WINKEL: *Soc. Plast. Eng. Annu. Tech. Conf.*, **38** (1980), p. 300
- 73) R. L. BALLMAN and H. L. TOOR: *Modern Plastics*, **38** (1960), p. 113

-
- 74) *M. SANOU, B. CHUNG and C. COHEN*: *Polym. Eng. Sci.*, **25** (1985) 16, p. 1008
- 75) 平井恒夫, 片山伝生, 平井三友, 米田 慎: *材料*, **34** (1985), p. 256
- 76) *G. B. JEFFERY*: *Proc. Roy. Soc.*, **A102** (1922), p. 161
- 77) *R. F. HOST and H. R. OSMERS*: *SPE Tech. Pap. Annu. Tech. Conf.*, **24** (1978), p. 77
- 78) *K. K. WANG, S. F. SHEN, C. COHEN, C. A. HIEBER, T. H. KWON and R. C. RICKETSON*: *Progress Report No. 11* (1985), p. 208 [Cornell Injection Molding Project., Cornell Univ. New York]
- 79) *G. WÜBKEN, H. BANGERT and L. SCHMIDT*: *Kunststoffe*, **74** (1984), p. 46
-