

**報 告****薄肉大型樹脂部品の高精度そり予測CAEの開発**西郷 栄人<sup>\*1</sup>, 山田 和慶<sup>\*2</sup>**The Development of High-Accuracy Warpage Analysis CAE for Large, Thin Plastic Parts**Yoshihito Saigo<sup>\*1</sup>, Kazumichi Yamada<sup>\*2</sup>**要 旨**

本報では、高精度なそり予測CAEを実現させるために、予測手法を開発した事例を報告する。そのアプローチとして、射出成形を射出・保圧・冷却／取出しの3つのステップに分け、それぞれの過程でのメカニズムから材料物性のそりへの影響を考慮する方法が妥当と考えられる。しかし、メカニズムは完全に解明されておらず、予測CAEで使用する理論式も精度を欠いたものとなっている。そこで我々は、理論での不正確さに対し、そのメカニズムが発現しやすいテストピース実験での実測データを用いて、解析値を修正する手法を採用した。その結果、当社で生産される薄肉大型樹脂部品の射出成形時のそりを高精度に解析する手法を開発した。

**Abstract**

This paper presents an improved CAE method for highaccuracy warpage analysis. The physical properties of the materials that affect warpage are examined, considering the mechanisms at work in each of the three steps of the injection molding process: injection, pressure holding, and cooling/ejection. When a theoretical mechanism is not fully understood and measurements are inaccurate, correction is made based on the measurement values of large, thin parts. This paper describes both the analysis and application from more than two years of study using the new CAE method.

<sup>\*1</sup> Yoshihito Saigo 技術管理部 技術電算室

<sup>\*2</sup> Kazumichi Yamada 技術管理部 技術電算室

## 1. はじめに

近年、お客様の求める車をいかに早く市場に投入できるかが重要となってきており、インパネ・バンパ等の樹脂部品においても部品開発期間短縮が必要となってきている。このため、CAEを活用し、最適な「形状の設計」「金型仕様設定」により、金型完成と同時に良品成形が可能となる図面完成度の向上に取り組んでいる。しかし、建付け不良(図1-1)や組付け作業性の阻害要因となる射出成形品のそりに関しては予測精度が低く実用的でない為、金型完成後に追加の対策が必要で期間短縮を阻害している。

そりの予測技術に関しては世界的にもまだ研究段階であり<sup>1), 2)</sup>、商用ソフトによるテストピース製品に関するベンチマーク結果でも、そりの方向すら逆転するケースも見うけられる程度のレベル(図1-2)<sup>3)</sup>である。当社で生産される樹脂部品は、一般に流動長が長く、薄肉で、且つ製品形状が複雑で肉厚分布も存在することから、製品各部での圧力分布や温度分布が広範囲に変化するため、テストピースや小物部品よりそり予測精度には不利と考えられるが、試行的計算結果でも同様な傾向であった。

そこで、薄肉大型樹脂部品にも実用可能なそり予測手法の確立を目標に、そりに関する調査・研究・実験を進め、高精度なそり予測手法の開発に着手した。

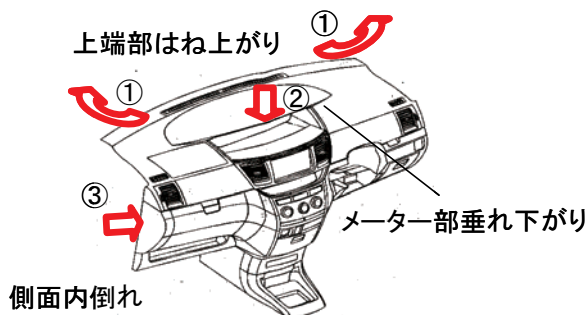


図1-1 インパネの建付け不良

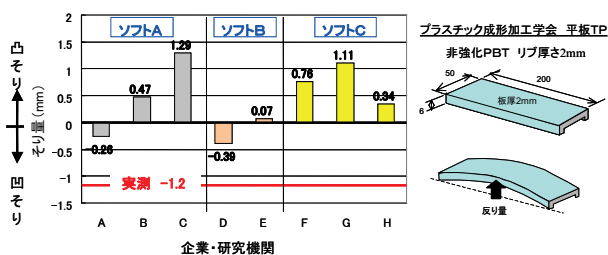


図1-2 そり予測レベルのベンチマーク結果

## 2. 精度向上への検討・開発

### 2-1. 精度向上に対する考え方

射出成形における製品のそりは、成形品各部の収縮率が異なることで発生すると考えられている。一例として、円盤形状をした製品に、中央部と円周外側で異なる収縮率を与えた場合のそりを、仮想的に計算してみる(図2-1)。中央部の収縮率が小さい場合はお椀型、逆に、中央部が小さい場合は鞍型にと、変形後の形状が全く異なる変形となることが確認された。

つまり、この製品各部の収縮率を精度よく予測することで、そりの予測精度は向上すると考えられる。

ここで、収縮率が決定されるメカニズムを考えるのが良いが、世の中の計測・観察技術の不足もあり、収縮率が決定されるメカニズムは現在も完全な理論として完成されていない。例えば、メカニズムとして、射出成形中の樹脂の肉厚方向の温度分布や密度分布や高分子配向などが挙げられる。さらに、計算で使用する樹脂材料の物性値(熱伝導度・比熱・密度など)も、実際の成形と同じ条件では取得出来ていない。

そこで、我々は現有の物性値を使って理論の不詳な収縮率の予測精度を向上する方法として、「現在の解析ソフトによって計算される収縮率を実験で得られた収縮率を利用して補正する方法」を採用することにした。

また、樹脂材料や製品サイズの依存性が懸念される為、今回の検討ではタルク(珪酸マグネシウムを主成分とする薄片状の固体添加物)含有ポリプロピレンを材料とする薄肉大型製品を対象を絞った。

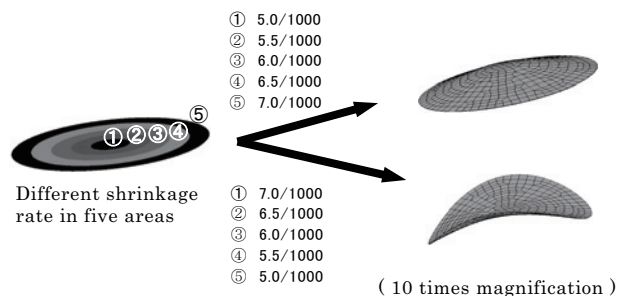


図2-1 収縮率の分布を与えた仮想そり解析

2-2. 収縮率の予測精度向上

対象製品が大型である為、実験に用いるテストピースは大型であることが望ましいが、実験や測定の手配が困難な為大型のテストピース(図2-2;以下、大型TP)と小型のテストピース(図2-3;以下、小型TP)を併用することとした。

ここで、大型の製品と小型の製品との違いを考察すると、以下のような相違点が考えられる。

- (i) 流動長
- (ii) 圧力分布
- (iii) 射出率(1秒当りの樹脂射出量)

上記の相違点により、以下の様な収縮率への相違のメカニズムが推定される。

- (i) 樹脂流動中はせん断応力により高分子・添加物が配向するが、流動長の違いにより配向の程度に差異が発生
- (ii) 製品末端部にヒケ(凹み)が生じないように末端部へは製品の大小に関係なく、同程度の保持圧が必要とされる。しかし、大型TPではゲート部を小型TPより高圧にしないと圧力が伝播しない。そのため、製品内部には小型TPより広範囲に渡る圧力分布が存在することの差異が発生
- (iii) 製品サイズが異なる為、大型TPでは単位時間に多くの樹脂を射出する。その為、せん断発熱が小型TPのものより大きくなり、樹脂温が高くなることの差異が発生

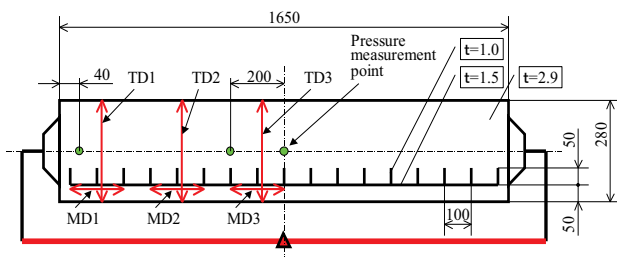


図2-2 大型テストピース

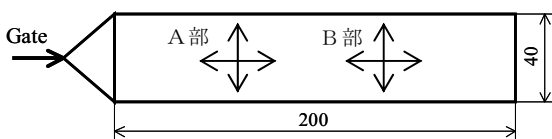


図2-3 小型テストピース

まず、大型TPと小型TPとで、上記差異が収縮率の差異として発現するかを確認した。しかしながら、結果は圧力の高低による収縮率の差異は見られるが、大型TPの高圧部・低圧部と高圧・低圧の成形条件で成形した小型TPの収縮率に差異は見られなかった。従って、小型TPにて、大型製品を模した圧力を成形条件で再現することにより、ラボ実験・検討は可能である事が判った。

そこで、詳細検討を小型TPでの様々な成形条件(表2-1)によって実施した。

詳細な実験による収縮率の実測と既存CAEとの差異調査の結果、以下の事象がCAEには反映されにくいことが判明した。

- (I) 充填時の樹脂流動方向に対する、収縮率の差異(流動方向の方が直行方向より、収縮率が小)
- (II) 保持圧力に対する収縮率の変化(保持圧変化に対し、CAEの収縮率変化が大)

上記、2項目についてCAEの計算中の補正式を新たにソフトへ導入した。その結果、CAEによる収縮率の予測精度が大幅に向上する事が出来た。

(図2-4)

表2-1 小型TPの成形条件

樹脂温度 (°C)	220, 235, 240, 250
金型温度 (°C)	30, 40, 50
充填時間 (秒)	0.4, 0.5, 0.6, 1.0, 9.0
保持時間 (秒)	15, 20
冷却時間 (秒)	5, 15, 20, 30, 40
保持圧力 (MPa)	10, 22, 38, 50

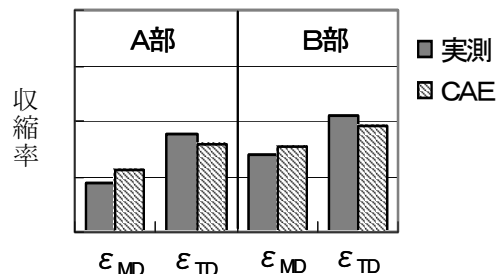


図2-4 大型平板テストピースにおける収縮率検証

そこで、そり予測精度を確認したところ、平坦部の予測精度は大幅に向上したものの、特定の部位、すなわち、コーナ部では十分にそり変形量を予測できないことが判った。(図2-5)

したがって、今後はコーナ部のそり変形のマカニズムの解明を通じ、その予測精度の向上検討を行ったので以下に記述する。

### 2-3. 角部の倒れ変形の予測精度向上

一般にコーナ部の倒れは、内側の冷却性が悪くコーナ部内外の温度差による収縮差が原因と考えられていた。(図2-6)そして、推定原因に基づき解析上での収縮差を過剰に算出して実測値へと合せ込む手法が採られてきた<sup>4)</sup>。

しかし、コーナ部内外での温度差を設定した熱応力解析を実施したところ、コーナ部の倒れは実測の約1/10(0.5°)であった。この解析と実測の差は、従来の一般的な知見では説明できないため、再度コーナ部の倒れにはどのような要因が影響を与えるのかを詳細に調査し、マカニズムの明確化に取り組んだ。

従来より、コーナ部の倒れはコーナ部の薄肉化で対策するという固有技術的知見から「形状要因」が寄与していることも加味し、断面がL字型の検討型(図2-7)で約100水準(表2-2)に渡り実験し、倒れ角度の測定を行った。

その結果、倒れ角度は金型の内外温度差に相関する結果を得た。(図2-8)

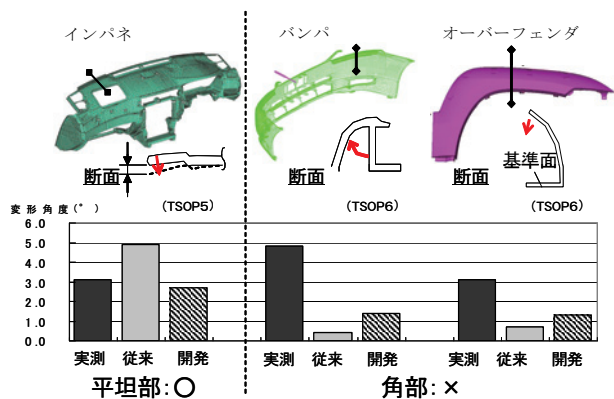


図2-5 そり検証結果(取り組みの成果)

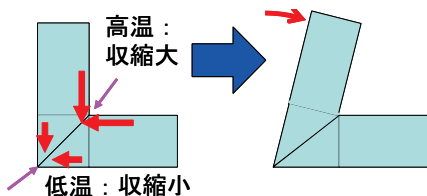


図2-6 角部の変形概念図(従来知見)

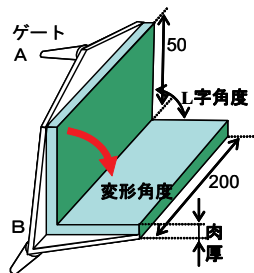


図2-7 L字型の検討型

表2-2 実験条件

成形条件	樹脂温度(°C)	220、240
	固定型/可動型 冷却水温度(°C)	20/20、20/40、 40/20
	保持圧(MPa)	26、43、63
	射出速度(cc/sec)	25、150、275
形状	ゲート位置	A(コーナに垂直)、 B(平行)
	L字角度(°)	60°、90°、120°
	板厚(mm)	2、3、4

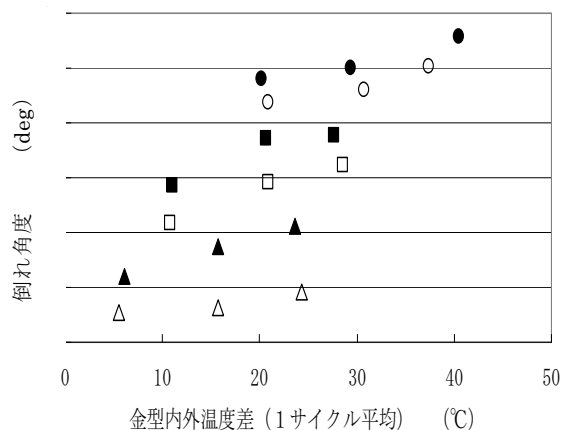


図2-8 倒れ角度と金型の内外温度差との相関

しかし、この結果は以前の検討と同じ知見でしかない為、今回は統計的な手法による要因の寄与を確認する事とした。その結果、「配向」・「温度」・「圧力」よりも「肉厚」の寄与度が大きいという知見を得た。(図2-9)

そこで、「肉厚に比例して角部の倒れ量が増加する」ことに着目し、この新たな知見のモデル化を試み、いくつかの仮説の提起、モデル化、試行・検証を行い、新たなモデル(図2-10)により現象を説明できることを見出した。

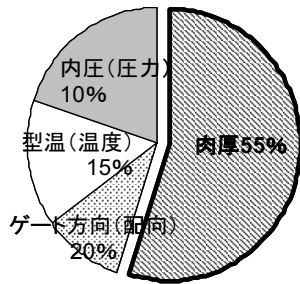


図2-9 L字検討型における  
コーナ部の倒れの寄与度

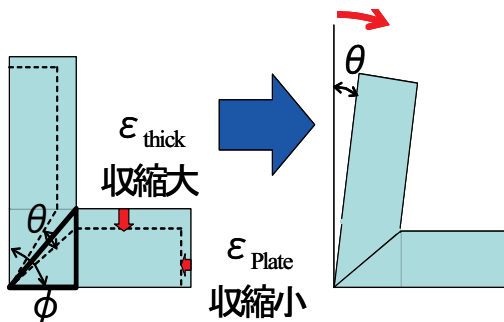


図2-10 肉厚方向収縮による角部の倒れ

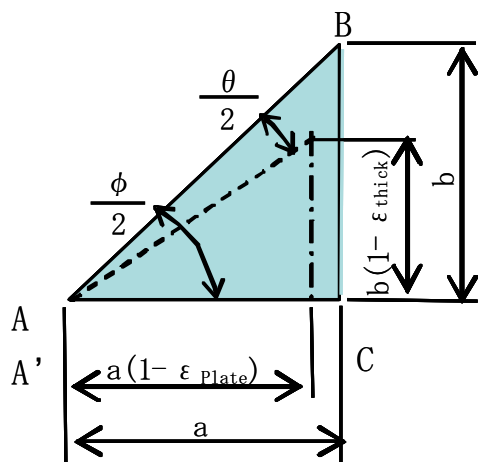


図2-11 肉厚方向収縮モデルの定式化

それは「平面方向の収縮ひずみ ( $\epsilon_{plate}$ ) と肉厚方向の収縮ひずみ ( $\epsilon_{thick}$ ) に差がある場合、図2-10 右の破線部の台形状となり、接続部は収縮後もその連続性を維持するために、一定角度  $\theta$  だけ内側に倒れる」というモデルである。これは、図2-10 のコーナ部の三角形状での変形挙動に着目して図2-11 のように形状を定義すると、式(2-2)のように表せる。

$$\begin{cases} \Delta A'B'C' \text{より} \\ \tan\left(\frac{\phi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) = \frac{b(1 - \epsilon_{thick})}{a(1 - \epsilon_{plate})} \\ \Delta ABC \text{より} \\ \tan\frac{\phi}{2} = \frac{b}{a} \end{cases}$$

$$\therefore \theta = \phi - 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{(1 - \epsilon_{thick})}{(1 - \epsilon_{plate})} \cdot \tan \frac{\phi}{2} \right\}$$

式(2-2)

ここで、材料の特性に着目し、肉厚方向の収縮が大きくなるメカニズムを考察した。今回評価した材料には板状のタルクが混合されており、これらは成形時に樹脂のせん断力により平面方向に配向することが透過型電顕写真により確認できた。

(図2-12) つまり冷却過程において、樹脂中の高分子成分は収縮するが、タルクは線膨張係数が小さくほとんど収縮しない為、成形品は平面方向の収縮が抑制され、肉厚方向に大きな収縮率となることが説明できる。

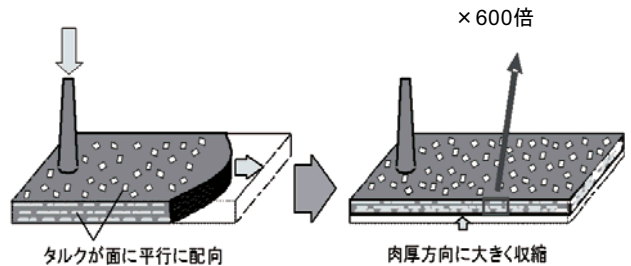


図2-12 タルクの配向

肉厚の収縮率測定は、収縮量が数十 $\mu\text{m}$ である上に射出時に金型にタワミが発生するため、現在信頼できる報告データは無い<sup>5)</sup>が、樹脂材料メーカへのヒアリング調査では2~10倍程度の収縮率が報告されており、この現象を裏付けるものとなっている。

以上より肉厚方向の収縮モデルをソフトに反映させることで、小物部品よりも精度向上に不利な大物部品のそり予測精度を大幅に向上させる事が可能となった。(図2-13)

### 3. 開発結果の検証

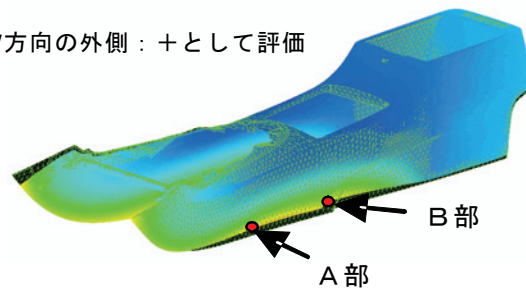
開発結果のn増し検証として、樹脂と形状が大きく異なるコンソールボックスとセンターピラーにて精度検証を行った(図3-1, 3-2)。

両製品共に従来ソフトでは定性的にもそり変形を予測できていないが、開発ソフトではいずれも実測値との誤差は1.0mm以内となっている。

この結果から本予測手法の汎用性が高いことが確認できたと考えられる。

なお、本開発で新たに導入した物性値は、今回の実験検討を基に、必要最小限で物性値を測定可能なように測定手法を標準化した。

W方向の外側：+として評価



材料：TSOP5

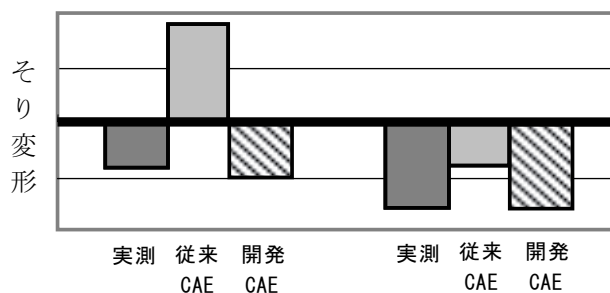
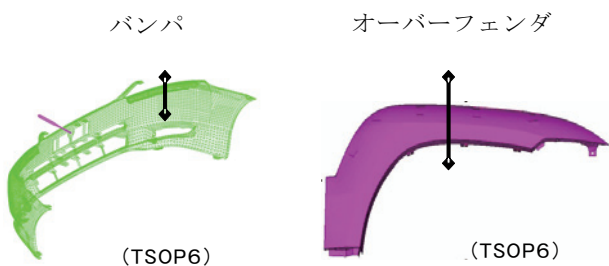


図3-1 コンソールのカール変形量検証結果



断面

断面

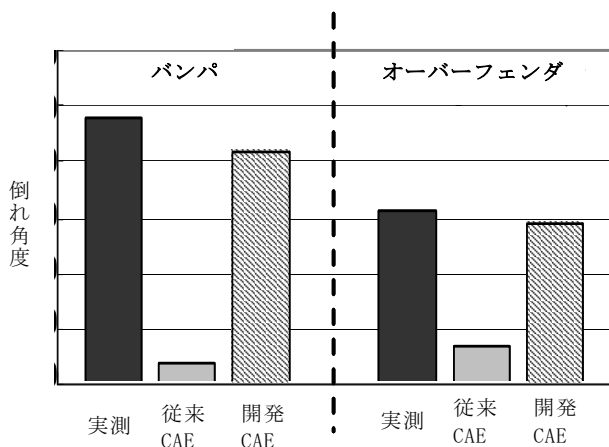
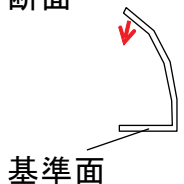


図2-13 そり検証結果(取り組みの成果)

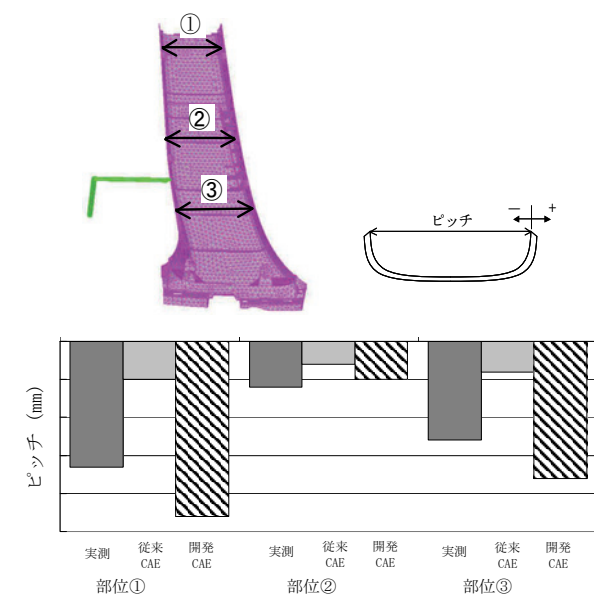


図3-2 センターピラーのカール変形量検証結果

#### 4. まとめ

今回の開発では、未解明な収縮に関する理論に対し、テストピースによる実験データを用いて解析の補正をする手法をとることと、倒れ変形を肉厚方向の収縮による新しいメカニズムを考案した。その結果、高精度なそり予測を可能とするソフトを開発した。

精度向上が困難な大物樹脂部品における高い予測精度は世界トップレベルと考えられる。特に、肉厚方向の収縮モデルを射出成形解析ソフトに導入したこと（表4-1）は世界初である（特許出願済み）。

現在は、当開発ソフトを実務にて利用し、数多くの製品の解析を実施している。また、本開発はタルク含有ポリプロピレンにて検討したが、原理は他樹脂へも適用可能と考えられる。

表4-1 各ソフトにおけるそり要因の  
取り組み状況

	配向要因	圧力要因	温度要因	肉厚収縮
ソフトA	○		○	
ソフトB		○	○	
ソフトC			○	
開発	○	○	○	○

#### 謝辞

なお本開発は、トヨタグループ5社での共同開発にて基礎開発を行い、さらに東レとともにソフト開発を進めた共同研究であり、トヨタ自動車株式会社、株式会社デンソー、トヨタ紡織株式会社、関東自動車工業株式会社、ならびに東レエンジニアリング株式会社の関係各位へ厚く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 鎌田ら：成形加工Vol.11 No.7 627, No.8 716, No.10 856
- 2) 山部ら：成形加工 '97 317-318 (1997)
- 3) 山部ら：成形加工 Vol.14 No.11 690-705 (2002)
- 4) 山田ら：豊田合成技報, Vol.44, No.1 20-25,(2002)
- 5) G.TITOMANLIOら：Polym.Eng.Sci.,38,254(1998)