

# ブロー成形の可視化とシミュレーション

## Direct Observation and Simulation of Blow Molding Process

今村伸二<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 金田勉<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 九島行正<sup>\*<sup>(2)</sup></sup>  
 Shinji IMAMURA Tsutomu KANETA Kosei KUSHIMA

### 抄 録

ブロー成形プロセスにおいて、パリソン（円筒状樹脂）を金型内部から直接観察する手法を開発した。この手法でパリソン内部にファイバースコープを挿入し、パリソンの挙動を直接観察した。吹込み過程において、パリソンの金型表面における滑りはほとんどの場合無く、パリソンの変形は金型と接触しない部分で起きることを確認した。また、パリソンの破れは、金型との非接触部パリソンが引き延ばされて起きる現象であることを直接観察した。伝熱現象については、パリソンと成形品の表面温度変化から界面の熱伝達率を算出し、金型とパリソンの界面における熱伝達率は100~260W/m<sup>2</sup>Kと算出された。上記の実験結果に基づいて、汎用構造解析プログラム(ABAQUS)で吹込み過程をシミュレーションした。シミュレーションで予測した肉厚分布は、実験結果と極めて良く一致した。

### Abstract

A method of directly observing parison from the inside of mold in blow molding process has been developed, in which a fiberscope is inserted in the parison to observe directly its deformation. It was confirmed that, during blowing the parison which is of resin material, any slip between the parison and the mold was not observed in almost all cases, and the parison's deformation takes place only in the area where the parison is free from contacting the mold. It was also directly observed that the blowout of the parison was caused by stretching it which was not contacting with the mold. With regard to heat transferring, the heat transfer coefficient was calculated from the values of changes in temperature at the parison before mold closing and at the surface of its molded part after mold opening, and its was estimated to be between 100 and 260 W/m<sup>2</sup>K. On the basis of the results of observation, the blowing process was simulated using a general purpose FEM program (ABAQUS). The thickness distribution thus computed of a molded part of the parison was in good agreement with the experimental results.

### 1. 緒 言

ブロー成形法は、二重壁構造や形状の自由度を活かして軽量高剛性や複雑形状の製品を成形できるため、自動車、輸送機器、OA機器等の大型構造部品、機能部品等の成形法として近年注目されている<sup>1,2)</sup>。この成形法は、円筒状に押し出された樹脂（パリソン）に金型内で空気を吹込んで成形する方法である（図1参照）。金型内で空気を吹込みパリソンの自由表面を変化させる成形法であり、形状制御、肉厚制御が困難であることがこの方法の欠点である。このため、ブロー成形のほうが、射出成形より製品設計や成形の支援技術としてCAE（コンピュータを使った解析技術：Computer Aided Engineering）の必要性が高いと考えられる。しかしながら、成形時の金型内パリソンの挙動及び変形のメカニズム等は、これまで明らかにされていない部分が多く、CAE技術の開発と利用は、現在、射出成形に比べてかなり遅れている。

このような中で、近年のブロー成形品の市場の拡大と製品の大型化、複雑化、高機能化、納期短縮化等のニーズに対応するため、CAEによる製品開発、成形支援が必要になり、その開発に力が注がれて

いる<sup>3)</sup>。

著者らは、この成形プロセスを明らかにするため、パリソンを内部から直接観察する手法<sup>4)</sup>（可視化技術）を開発し、金型表面での滑り（金型表面でパリソンに滑りがあるかないかで肉厚分布がほとんど決まってしまうので、これはCAE開発で最も重要な現象である）や破れ等の幾つかの挙動を解明した。なお、これまでガラス型によ

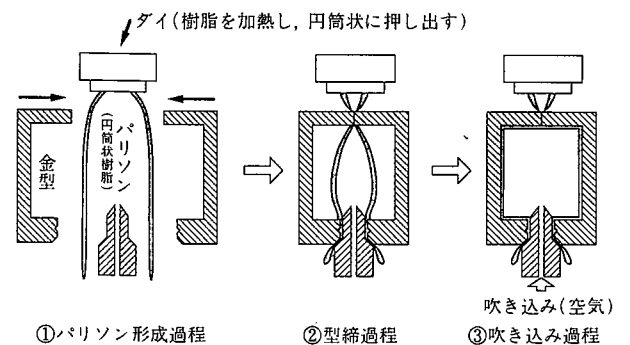


図1 ブロー成形概念図(断面図)

<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 技術開発本部 先端技術研究所 化学研究部 主任研究員

<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 技術開発本部 先端技術研究所 化学研究部 主幹研究員 工博

る実験例はあった<sup>8,9)</sup>が、この場合、パリソンとガラスの接触では摩擦係数等に差があるため、金型内とは違う現象が起きる可能性がある。一方、パリソンと金型間の熱伝達率等の伝熱現象についても実験した<sup>7)</sup>。

これらの可視化、伝熱の実験で得られた結果に基づいて、これまで報告されている粘弾性・2次元モデル<sup>8,9)</sup>や弾性モデル<sup>10-13)</sup>ではなく、これまでほとんど報告例のない粘弾性・3次元モデル(最も高精度と考えられる)を用いたシミュレーションを行った<sup>14-18)</sup>。なお、このシミュレーションの詳細は別報<sup>19)</sup>に譲る。

## 2. 実験

### 2.1 ブロー成形の可視化

#### 2.1.1 実験方法

成形プロセスの可視化にあたっては、金型内でのパリソン挙動の直接観察を実施した。金型内でのパリソンの挙動を明らかにするため、金型内にファイバースコープ(内視鏡)を挿入し、金型の内側からパリソン内部を直接観察できるようにした(図2参照)。このファイバースコープは、ガラス管でシールしてあり、吹込み圧力がかわらず、上下移動と回転ができる構造とした。

実験は、樹脂としてポリプロピレン(PP)を用い、パリソン外表面に格子状の簡易マーキングを行い、吹込みノズルから空気を吹込んでパリソンの滑り等の挙動を観察した(図3参照)。なお、成形品は、胴体が直方体のボトル(製品形状:直方体部分=300×190×140

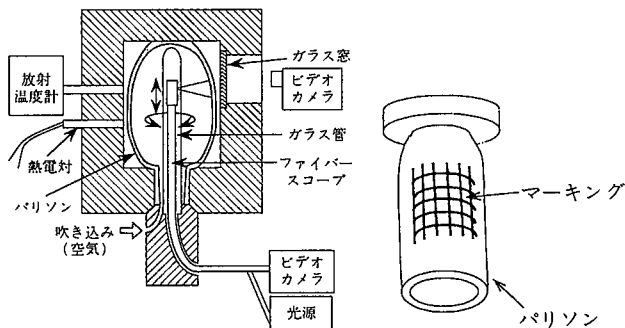


図2 ブロー成形可視化装置(断面図)

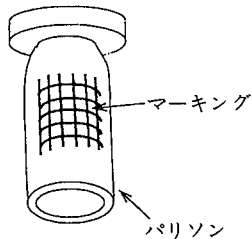


図3 格子状マーキング

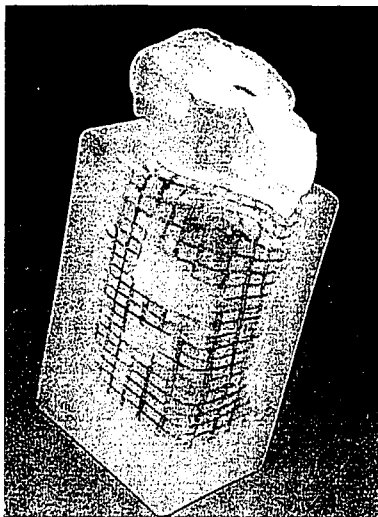


写真1 直方体ボトル成形品

mm)とした(写真1参照)。

#### 2.1.2 実験結果及び考察

吹込み過程において図4に示されるようにパリソンが金型内壁に接触する前後のパリソン表面の格子状マーク(図3参照)の移動を観察した。金型内ファイバースコープによる観察では接触後の移動量は、写真2に示されるように極めて小さかった(成形温度200°C、金型温度20°C、吹込み速度0.015Nm<sup>3</sup>/s、圧力0.25MPa)。このことから、吹込み過程における金型表面でのパリソンの滑りは、ほとんどの場合無視できる程度で、極めて小さいことが明らかになった。又、金型内にシリコン油、機械油、ステアリン酸等を塗っても、滑りはほとんどの場合観察されなかった。

これまでほとんどのブロー成形シミュレーションの報告例<sup>8-13)</sup>が、

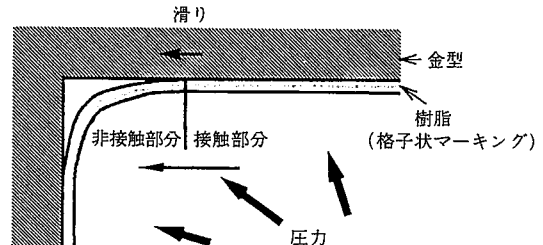


図4 滑りの概念図

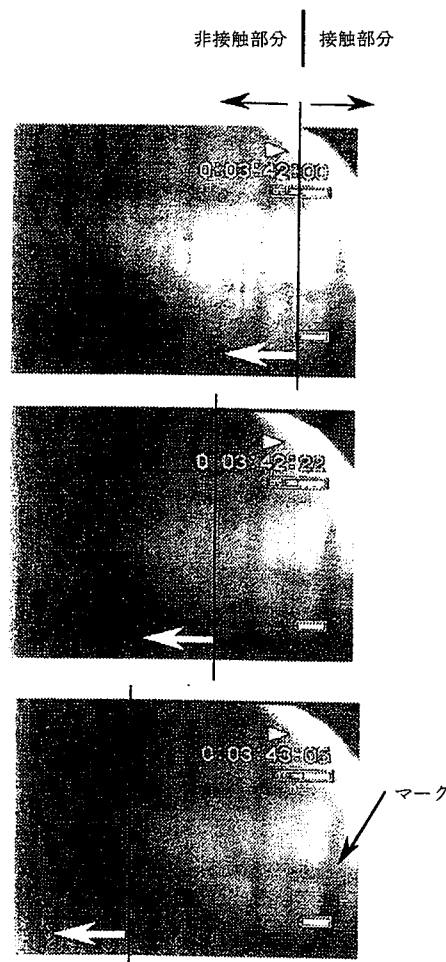


写真2 パリソン(樹脂)の滑りの実験結果(ファイバースコープ)

樹脂と金型間の接触を完全固着として扱っていたが、この実験で初めて完全固着の裏付けが得られたといえる。

## 2.2 ブロー成形における伝熱現象

### 2.2.1 実験方法

初めに、パリソン形成過程における伝熱現象を確認するため、パリソンを一定量押し出し、この状態で赤外線放射温度計でパリソンの外表面温度の経時変化を測定した。写真1に示した直方体ボルト金型を用い、吹込み圧力0.5MPaで冷却時間を変えてブロー成形を行い、型開き直後からの成形品の表面温度の経時変化を赤外線放射温度計を用いて測定した。

### 2.2.2 解析方法

熱伝達の評価指標として、界面の熱伝達率  $h$  を求めた。

$$Q = h(T_h - T_c)A \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $Q$ ：移動する熱量、 $T_h$ ：高温側の温度、 $T_c$ ：低温側の温度、 $A$ ：表面積である。(1)式における  $h$  に対応する樹脂と空気界面の熱伝達率  $h_a$  及び樹脂と金型界面の熱伝達率  $h_m$  を求めた。

ここでは、非定常1次元の伝熱解析結果と実験結果とのフィッティングにより熱伝達率を算出した。

### 2.2.3 実験結果及び考察

パリソン形成過程における実験、計算の結果、パリソンと空気の界面の熱伝達率は、 $h_a = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$  で、パリソン外表面温度の経時変化の測定値と解析値がほぼ一致した(図5参照)。この熱伝達率の値は、室内の平板表面での熱伝達率の文献値<sup>20)</sup> とほぼ同じであった。吹込み・冷却過程においては、成形品は厚さ方向に温度分布を持ち、成形品の冷却時間が短いとき、樹脂内部の温度は外表面温度(金型側)に比べ高く、成形品の表面温度は型開き以降上昇する結果が得られた(冷却時間が短いときには外表面しか冷えていない)。

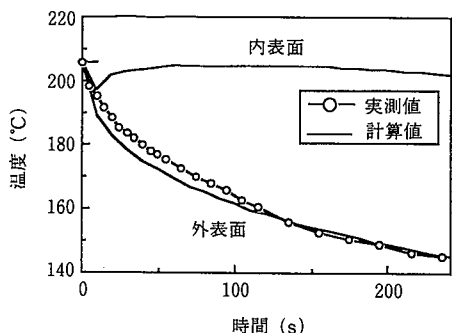


図5 パリソン外表面温度の経時変化 (パリソン形成過程)

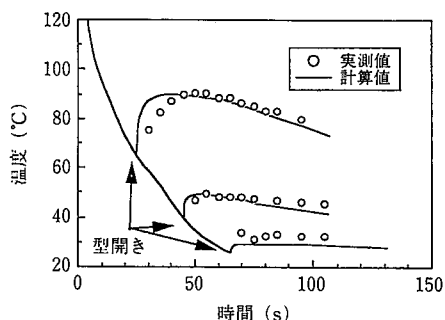


図6 成形品外表面温度の経時変化 (吹き込み・冷却過程)

樹脂としてPPを用いた場合の結果を図6に示す。幾つかの異なる条件の実験から計算した結果、内表面と空気との熱伝達率  $h_a = 20 \sim 90 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、外表面と金型との熱伝達率  $h_m = 100 \sim 260 \text{ W/m}^2\text{K}$  となることが分かった。しかし、図6の実験における成形品の外表面温度の上昇は、計算値と完全に一致させることはできなかった。これは、成形品内の空気の流動状態(流速等)が成形中に変化するため、空気との熱伝達率  $h_a$  も変化し、一定の熱伝達率では完全にフィッティングできないことが、原因の一つである(図7参照)。このことから、空気との熱伝達率  $h_a$  は吹込み時間(成形品内の空気の流速変化)、吹込み圧力及び流量、製品の形状、吹込みノズルの形状等で変化すると考えられる。また、金型との熱伝達率  $h_m$  についても樹脂の種類、吹込み圧力、樹脂の表面性状等により多少変化すると考えられる。

ここで算出した樹脂・空気界面の熱伝達率  $h_a$  を用いてパリソンの厚さ平均温度変化を計算すると温度変化は小さく、型締め・吹込み過程(今回実験ではブローアップまで2秒程度)では等温で解析してもよいことが分かった。

また、射出成形では樹脂・金型界面の熱伝達率  $h_m$  は、一般に  $1000 \sim 30000 \text{ W/m}^2\text{K}$  程度の値が用いられており、ブロー成形は射出成形と比べ成形品の冷却が遅いことが分かる。この最大の原因は、射出成形では最大圧力が100MPaの桁であるのに対して、ブロー成形では1MPa以下で2桁程度の差があり、金型と樹脂の接触状況が違うことである。

## 3. 解析 (ブロー成形 CAE)

### 3.1 解析方法

ブロー成形の可視化、熱伝達の実験で得られた成果に基づいて、これまでほとんど報告されていない粘弾性・3次元モデル(最も高精度)で吹込み過程のシミュレーションを実施した。なお、解析には汎用構造解析ソフト(ABAQUS)を用いた。

成形品：写真1の直方体ボルト

解析モデル：3次元モデル(シェル)、1/8をモデル化(対称を考慮、底部を想定)

初期条件：直径100mm、厚さ5mmで均一なパリソン(実成形で測定)

樹脂：HDPE(高密度ポリエチレン)

樹脂物性：粘弾性<sup>21)</sup>(一般化Maxwell Model)

等温：樹脂温度190°C(吹込み時間内のパリソンの温度変化量は小さく、等温と仮定)

樹脂と金型の接触条件：摩擦係数 =  $0 \sim \infty$  (完全滑り～完全固着)

### 3.2 解析結果

図8に型締め・吹込み過程におけるパリソンの変形のシミュレ-

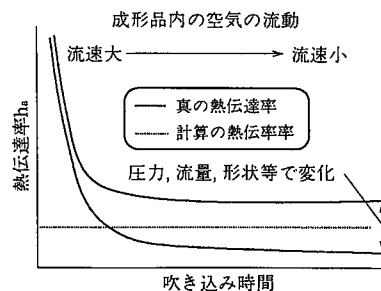


図7 吹き込み過程の空気との熱伝達率  $h_a$  の経時変化

シミュレーション結果を示す。また、図9にシミュレーションで得られた成形品の肉厚分布と実験結果の肉厚分布を示す。摩擦係数を1以上にするとシミュレーションの肉厚分布は、実際の成形品の肉厚分布と極めて良い一致を見た（摩擦係数1以上では大きな差はなかった）。

このことから可視化、熱伝達の実験から得られた解析条件に基づいて型締め・吹込み過程をシミュレーションすることにより、型締め直前のパリソンの状態（形状、肉厚、温度）と金型形状から製品の肉厚分布を精度良く予測できることが分かった。

#### 4. 結 言

ブロー成形の可視化、熱伝達現象の実験・解析を行い、これらの結果に基づいて型締め・吹込み過程のシミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- 1) 型締め・吹込み過程においてパリソンの変形を内側から直接観察し、金型と樹脂の表面における滑りは極めて小さく、ほとんどの場合滑らないことを明らかにした。
- 2) ブロー成形の熱伝達現象の解析及び実験により、樹脂と金型、樹脂と空気界面の熱伝達率を算出した。
- 3) 以上の結果を基に、粘弾性・3次元モデルで型締め・吹込み過程のシミュレーションを実施し、摩擦係数1以上で成形品の肉厚分布を精度良く予測できた。

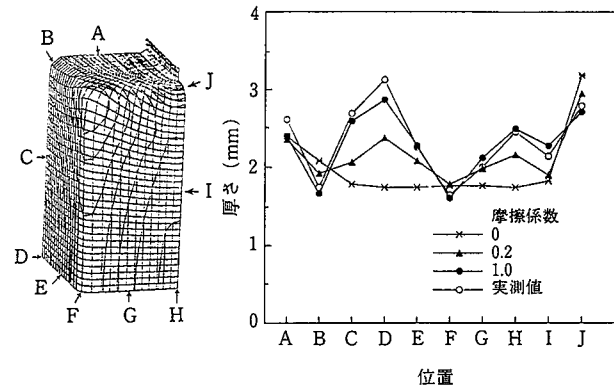


図9 成形品肉厚分布の実験結果と解析の比較

#### 5. おわりに

これまで、型締め・吹込み過程における成形プロセスの解明とシミュレーションについて述べてきた。なお、今回記述しなかったが、パリソン形成過程についても、現在、共同開発<sup>22,23)</sup> (SIMBLOW)を進めている(図10参照)。ブロー成形シミュレーションについては、近い将来、高精度のCAEが開発されて、製品設計や成形の支援技術

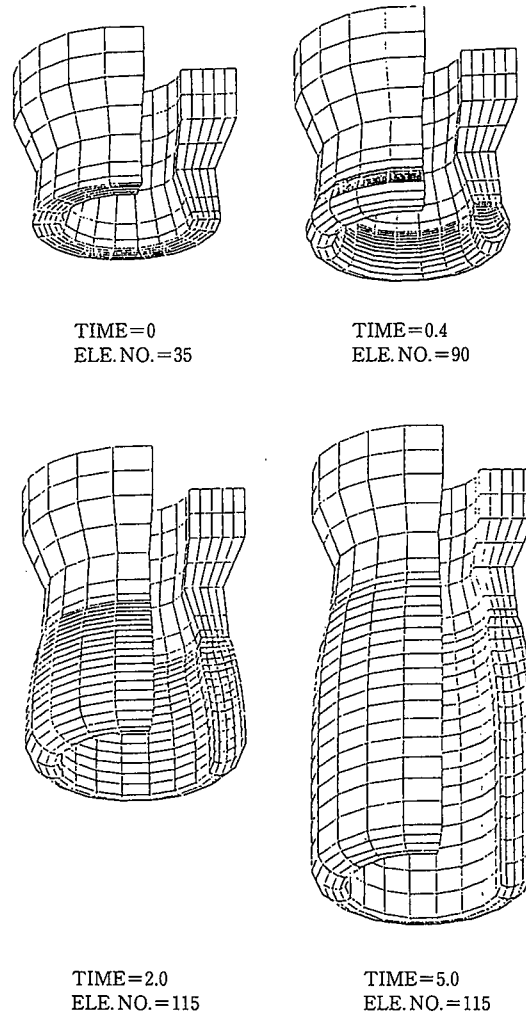


図10 パリソン形成過程のシミュレーション

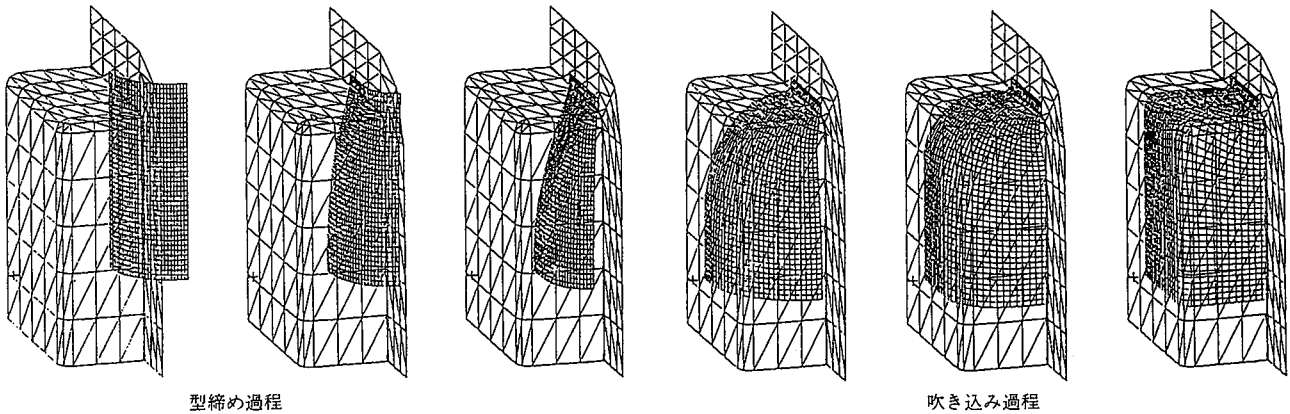


図8 型締め・吹き込み過程のシミュレーション

として現状の射出成形 CAE と同様に活用されるようになると予測される。

また、著者らのもう一つの目的は、新成形プロセスの開発にある。例えば、ASM ブロー成形<sup>24,25)</sup> (図11参照) は、プロセス解明を行いながら著者らが開発を行ってきた成形法である。この成形法は、成形品の周方向に異なる2種の樹脂を分割して配置することのできる成形法であり、このような多層ブロー、3次元ブロー等のブロー成

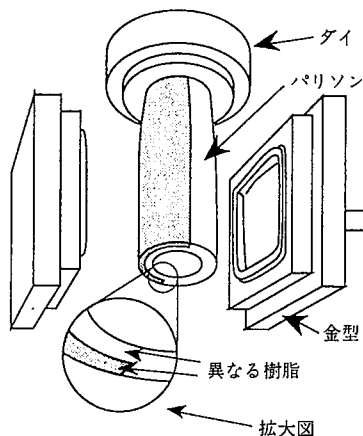


図11 ASM ブロー成形の概念図

形技術の高度化は、今後ますます加速していくと考えられる。これと並行して要求される成形品についても高度化（大型化、複雑化、高機能化等）していくと推測され、プロセス解明の技術とシミュレーション技術は、更に重要になっていくと考えられる。

## 謝 辞

本稿において実験、解析のご指導を頂いた山形大学 工学部 物質工学科 小山清人教授、(株)日本触媒 戸来稔雄取締役(元 新日本製鐵 技術開発本部 先端技術研究所 高分子加工研究センター所長) に対しお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 大田彰：ブロー成形技術。技術情報会, 1991, 178p
- 2) 大田彰：工業材料。36(16), 45(1988)。
- 3) 小山清人：プラスチック。40(3), 57(1992)
- 4) 今村伸二 ほか：成形加工'93。55(1993)
- 5) 深瀬久彦 ほか：石川島播磨技報。15(1), 12(1975)
- 6) 深瀬久彦 ほか：日本機械学会論文集。41(351), 3077(1975)
- 7) 金田勉 ほか：成形加工'93。57(1993)
- 8) 山部昌 ほか：成形加工。2(1), 15(1990)
- 9) 清水紀弘 ほか：成形加工'93。51(1993)
- 10) 渡辺一彦 ほか：成形加工'94。203(1994)
- 11) 田中太 ほか：成形加工。4(9), 245(1991)
- 12) deLorenzi, H.G., Taylor, C.A., Int. Polym. Process. 8, 365(1993)
- 13) deLorenzi, H.G. et al.: "Finite Element Simulation of Thermoforming and Blow Molding", Modeling of Polymer Processing. A.I. Isayev (Ed.), Hanser Publishers, 1991, 157p
- 14) 今村伸二：プラスチック成形加工学会第16回講演会テキスト。1993, 17p
- 15) 金田勉 ほか：成形加工'94。201(1994)
- 16) 今村伸二 ほか：成形加工'94。203(1994)
- 17) 今村伸二 ほか：プラスチックエージ。40(11), 94(1993)
- 18) 今村伸二 ほか：成形加工。6(11), 797(1994)
- 19) 今村伸二 ほか：合成樹脂。41(1), 47(1995)
- 20) 甲藤好郎：伝熱概論。養賢堂, 1986, 23p
- 21) 小山清人：レオロジーとその測定および応用。技術情報協会, 1993, 59p
- 22) 谷藤真一郎 ほか：プラスチック成形技術。10(8), 9(1993)
- 23) 谷藤真一郎 ほか：成形加工'94。201(1994)
- 24) 大田彰：工業材料。42(12), 56(1994)
- 25) 大田彰 ほか：新日鉄技報。(354), 65(1994)