

プラスチックCAE技術の活用 — 衝撃解析を中心に —

住友化学株式会社

樹脂開発センター

筒 瀨 雅 明
廣 田 知 生
丹 羽 康 仁
島 崎 泰

Application of Plastics CAE: Focusing on Impact Analysis

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Plastics Technical Center

Masaaki TSUTSUBUCHI
Tomoo HIROTA
Yasuhito NIWA
Tai SHIMASAKI

To review recent topics on impact analysis in the field of plastics, this report outlines the application trends and analysis techniques followed by an explanation of the characteristic physical properties of resins which may be the key points for their practical application. First we introduce how we predict yield stress under a wide range of temperatures and strain rates. Second, for the elastic-plastic model, we explain that it may be appropriate to consider dependence of yield stress on stress state and volume increase due to craze generation. Finally, we show how fracture behavior depends on temperature and strain rate.

はじめに

CAE (Computer Aided Engineering) は製品の設計・開発において幅広くコンピュータを活用するという概念¹⁾として、1980年までにDr. Jason R. Lemonによって提唱されたといわれている。その後、コンピュータの進歩と合わせて広く普及した。

各種製造業における共通の課題には、製品の開発期間の短縮、開発・製造コストの低減、製品の品質、性能の向上、環境問題や安全問題への対応がある。CAEはこれらの課題を達成するための基本エンジニアリング技術の一つとして用いられている²⁾。プラスチック分野でもCAEは金型設計、製品設計等に幅広く活用されている。プラスチック分野でのCAEを特に、プラスチックCAEと呼んでいる。

当社はCAEという言葉が現れたばかりの1981年からCAE技術を活用し、プラスチック構造体の性能検討と成形加工性検討の両面で検討を進めてきた³⁾⁻⁶⁾。前者については、当初、プラスチック構造体の変形特性、振動・音響特性等の検討を行っていたが、その後、衝撃特性の検討に幅を広げ現在に至っている。一方、後者については、射出成形分野およびその周辺分野^{7), 8)}

を中心に検討してきたが、現在では押出成形分野の検討も行っている⁹⁾。

振動・音響解析については恒温恒湿槽付き加振機や半無響室 (Fig. 1 (a)) を用いた実験も行っている。また、衝撃解析に関しては高速引張試験機で高速条件での引張特性を測定するとともに大型衝撃試験機 (Fig. 1 (b)) を用いた実用試験によるCAE解析結果の検証も行っている。

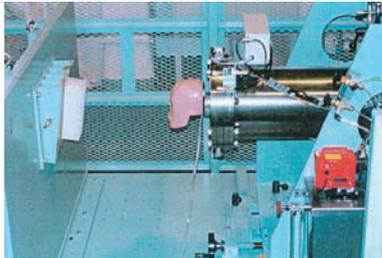
2000年頃までにCAO (Computer Aided Optimization) が進歩し実用化が進んでいった際に、CAOをプラスチックCAEに適用するための検討を行い、有用性を示してきた²⁾。CAOはコンピュータを利用した設計の自動化、最適化、統合化技術であり、プラスチック製品開発期間の大幅な短縮、効率化、さらに品質・性能の向上に有用である。

従来のプラスチックCAEは材料物性を入力して、プラスチック製品の性能や成形性に関する結果を得るという形であったが、最近ではポリマー構造や樹脂組成をもとに材料物性を求める検討も進めている¹⁰⁾。当社では前者を製品設計CAE、後者を高分子材料設計CAEと呼んでいる (Fig. 2)。

本稿においては、樹脂分野での衝撃解析に関し、活

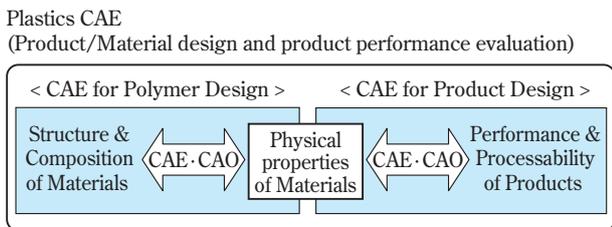


(a) Semi-anechoic chamber



(b) Impact testing machine

Fig. 1 Experimental facilities for Plastics CAE



* CAE: Computer Aided Engineering
CAO: Computer Aided Optimization

Fig. 2 Plastics CAE system

用動向、解析技術を概観した後、衝撃解析を活用する上で著者らがキーポイントと考えている材料物性の特徴について説明する。また、当社での活用状況についても簡単に触れる。

衝撃解析について

1. 樹脂分野での衝撃解析の活用動向

衝撃解析とは衝撃的な負荷がかかる現象のシミュレーションであり、自動車、船舶、飛行機等の衝突性能の予測などに用いられてきた。樹脂分野では、自動車用樹脂部品の衝突性能や、携帯電話等のモバイル機器が落下した際の耐衝撃性、ゴルフ用クラブやテニスラケット等のスポーツ器具の衝突特性等を検討した例が見られる。

衝撃解析が適用されている自動車用樹脂部品の例としては、ドアトリム、ドア周辺の支柱に取り付けられるピラーガーニッシュ、運転席前面のインストルメントパネルなどの内装部品やバンパーカバーなどの外装部品がある。

これらの部品については、大きな強度を有する必要がない一方で、乗員保護や歩行者保護の観点から、衝突時の人体の損傷を防止する緩衝性能が求められることが多い。このような要求に対し樹脂部品では、リブ構造やボス構造等で形状剛性を調整することにより、緩衝性能を満たすことがある。その際、衝撃解析を活用することにより、部品の設計を効率化している^{11)~16)}。

また、インストルメントパネルについてはエアコンやカーオーディオなどを組み合わせた状態での性能を予測する必要があるため、このような状態での衝撃解析の検討も行われている¹⁷⁾。

樹脂材料においては変形速度によって降伏応力等の材料物性が大きく変化するため、応力と歪みの関係に歪み速度依存性を考慮した材料モデルが用いられている^{18), 19)}。また、破壊後の変形挙動がエネルギー吸収機構に大きく影響する場合もあるため、部品によっては、破壊モデルを組み込んだ解析も行われている^{20)~23)}。さらに、歩行者保護を想定した衝撃解析等においては、衝突後に樹脂部品が形状を復元する際の反発力を精度よく再現する必要があるため、変形量ごとの復元性の変化を、復元時の弾性率の変化としてモデル化している例もある^{24), 25)}。

また自動車部品では、エアバッグを格納する樹脂製エアバッグカバーの展開挙動を衝撃解析で検討した事例も見られる。この事例では材料物性の温度(-40℃~90℃)や歪み速度への依存性を考慮し、破壊判定に破断歪みを用いた解析が行われている²⁶⁾。

モバイル機器の落下解析では、実験では把握できない極めて短い時間の現象を評価することを目的とした検討が行われている。材料物性の歪み速度依存性や破壊条件を考慮しなくても、衝突直後に筐体や基板にかかる衝撃荷重や歪み等を精度高く評価できている^{27)~29)}。

スポーツ器具の衝突解析では、ボールとの衝突挙動に注目した検討が行われている。スポーツ器具の材料モデルには単純な線形弾性体を使用されているケース³⁰⁾が見られるが、ボールの材料モデルには反発挙動を精度よく解析できるモデルが使われる。例えば中実構造のゴルフボール用の材料モデルには粘弾性挙動を考慮³¹⁾した超弾性体モデル^{32), 33)}が、中空構造のテニスボール用の材料モデルにはボール内の空気の状態方程式を考慮したモデル³⁴⁾等が用いられている。

2. 解析技術の概観

著者らは衝撃解析を行うにあたり市販ソフトであるLS-DYNA®を主に活用している。LS-DYNA®は1976年にアメリカのローレンスリバモア国立研究所で開発されたDYNA3Dをベースに開発された製品であり1987年に販売が開始された。

外力などが負荷された際に構造物に発生する変形や

歪み、応力を評価する解析を構造解析といい、構造解析のうち衝撃的な荷重を受ける現象の解析を衝撃解析と呼ぶ。構造解析の支配方程式は、力の釣合いの式(加速度を考慮する場合には運動方程式)、歪みの連続性を表す適合条件式および応力と歪みの関係を表す構成方程式であり、いずれも時間や空間座標に関する微分方程式である。

構造解析では、連続的な時間や空間を分割(離散化)することで、微分方程式を計算機で取り扱える代数方程式に変換し、得られた多元連立方程式を数値計算する。微分方程式の空間に関する離散化方法には主に有限要素法が用いられており、時間に関する離散化方法には差分法が用いられている。

(1) 陰解法と陽解法

時間の離散化方法は、陰解法と陽解法の二種類に分類できる。求めようとする時刻の変数(変形量、歪み、応力等)は、後者では直前の時刻の変数を用いて計算できるが、前者では求めようとする時刻の変数と直前の時刻の変数が記述された連立方程式を解く必要がある。支配方程式を離散化した連立方程式の連立数は膨大な数となることが多いため、一般に各時刻での計算については、連立方程式の数値計算が不要な陽解法の方が遥かに高速である。衝撃解析では考慮すべき時間が短いため陽解法がよく活用されている。

一方、陽解法では、数値的に安定な解を得る為の条件を満たす必要がある。この条件(必要条件)をCourant条件という。次元空間におけるCourant条件を(1)式に示す。

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 C はCourant数、 u は音速、 Δt は時間の刻み幅、 Δx は空間の刻み幅を表す。

一方、音速 u は密度 ρ 、縦弾性係数 E を用いて $u = \sqrt{E/\rho}$ であるため、(1)式は(2)式のように変形できる。

$$\Delta t \leq \Delta x \sqrt{\rho/E} \quad (2)$$

ポリプロピレンを想定し $E = 1.5\text{GPa}$ 、 $\rho = 900\text{kg/m}^3$ とし、 $\Delta x = 0.001\text{m}$ とすると、 $\Delta t \leq 0.77$ マイクロ秒となり Δt は非常に小さい値であることがわかる。衝撃波の影響が小さいケースでは計算上の密度を大きくして時間の刻み幅を大きくする手法が用いられる(マスキング)。しかしながら、破壊現象の計算においては衝撃波の影響が大きいケースが多いと考えられるためマスキングの適用は慎重に行う必要がある。

これに対して、陰解法ではCourant条件に束縛されないため、時間の刻み幅をある程度大きくできる。大規

模並列計算が普及すれば衝撃解析においても陰解法を用いるほうが計算時間の観点で有利になる可能性もあるが、限られたケースでしか陰解法の適用例は見られない³⁵⁾。

LS-DYNA[®]は当初は陽解法専用のソフトであったが、現在は陰解法での計算も行うことができる。

(2) ソリッドモデルとシェルモデル

有限要素法による空間の離散化では、対象形状を単純な形状に分割する。忠実に離散化する場合には六面体や四面体等の立体要素を用いて対象形状をモデル化する。このようなモデルをソリッドモデルと呼ぶ。以下では要素の頂点のような空間の分割に用いる点を離散化点と呼ぶ。

樹脂部品は、板状の形状の組み合わせで構成され、厚みが部品寸法に比べて小さいことが多い。そのため厚み方向の空間の離散化を省略することが多く、三角形や四角形などの平面要素を用いて対象形状をモデル化することが多い。このようなモデルをシェルモデルと呼ぶ。シェルモデルでは厚みをモデル形状ではなく数値で定義するため、離散化点を少なくでき、計算負荷を小さくすることができる。なお、通常、シェルモデルは板状形状の中立面(厚み方向の中央の面)に作成する。

陽解法では、板状の形状にソリッドモデルを用いて厚み方向の空間を離散化すると、要素厚み方向の寸法が小さくなるために(1)式の Δx が小さくなり時間の刻み幅が小さくなることが多い。シェルモデルを用いれば、厚み方向のCourant条件を考慮する必要が無いため、時間の刻み幅の低下を抑制できる。

一方、板状の形状の組み合わせでは表現できないケースや、変形前に中立面に垂直な断面上に存在した点が、変形後には中立面に垂直な断面上から移動するケースではシェルモデルを適用することができず、ソリッドモデルを使用する必要がある。後述する落錘衝撃試験の衝撃解析は後者に該当する。

(3) 流体—構造連成解析

衝撃解析の分野では流体—構造連成(Fluid Structure Interaction: FSI)解析がよく行われている。

連続体力学では、物質を連続的な点(物質点)の集合として取り扱う。構造解析では離散化点に物質点を用いることが多い。このような手法をLagrange法と呼ぶ。Lagrange法では変形とともに離散化点が移動する。一方、流体解析では離散化点を空間中の特定の位置に固定する人が多い。このような手法をEuler法と呼ぶ。

これらに対し、ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)法は離散化点を物質点か空間中の特定の位置のどちらかに一致させるのではなく任意に設定する手法である。ALE法は、流体と構造体の境界面の変形や流体

表面の変形に合わせて、流体の計算領域を逐次設定するために用いられることがある。

流体－構造連成解析では流体の圧力と構造体の変形の相互作用を考慮する。通常、流体をEuler法あるいはALE法で、構造体をLagrange法で計算し境界でカップリングする。

3. 材料物性の特徴

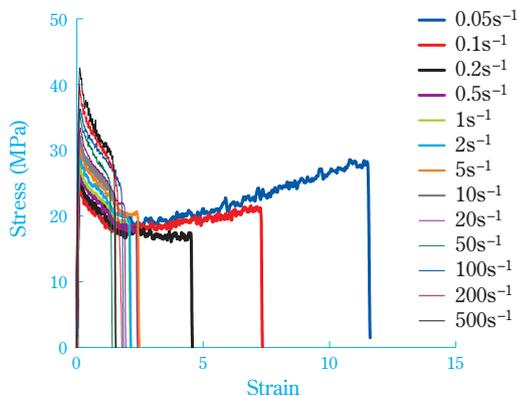
以下で紹介する事例はポリプロピレン系樹脂を対象に検討したものである。なお、本稿で示す測定結果については、特に記述が無い限り応力と歪みは公称値であり、歪み速度は試験機の設定速度から算出した公称値である。

(1) 変形挙動

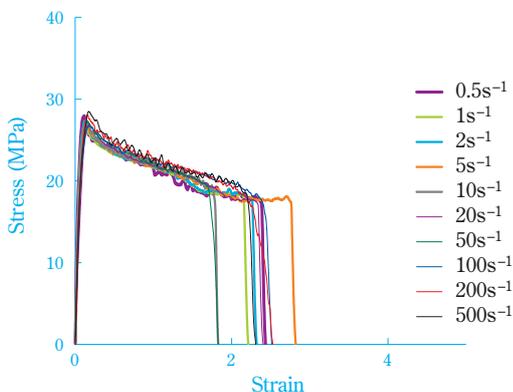
樹脂材料の材料物性は歪み速度により変化するが、引張特性の歪み速度依存性は(3)式によりスケールリング可能であるとされている³⁶⁾。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)^n, \quad \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)^{-n} \quad (3)$$

ここで σ_1 、 σ_2 は応力、 ϵ_1 、 ϵ_2 は歪み、 $\dot{\epsilon}_1$ 、 $\dot{\epsilon}_2$ は歪み速度、 n は定数を表す。また下付き添え字は測定条件を表す。



(a) Original data



(b) Superposed data by the scaling rule

Fig. 3 Tensile testing results: Relationship between nominal stress and nominal strain

(3) 式が公称応力と公称歪みの関係に対しても成立すると仮定してスケールリングの検討を行った結果をFig. 3に示す。本検討に用いたグレードについては、概ね $0.5s^{-1}$ 以上で、(3)式を用いたスケールリングが可能であった。

また、(4)式³⁷⁾を用いれば、引張試験データを簡便に平滑化できると考えている。

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, \theta) = E_0(\dot{\epsilon}, \theta) \frac{1}{w(\dot{\epsilon}, \theta)} [1 - e^{-w(\dot{\epsilon}, \theta)\epsilon}] e^{h(\dot{\epsilon}, \theta)\epsilon^2} \quad (4)$$

ここで、 σ は応力、 θ は温度、 ϵ は歪み、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、 E_0 は弾性率、 w は粘弾性係数、 h は歪み硬化係数を表す。

(4)式は真応力と真歪みの関係に対して用いることができる式であるため、Fig. 3に示したような測定データを真歪みに換算して利用する。Fig. 3(a)のデータを歪み速度を変化させた場合、温度を変化させた場合ともに、歪みがあまり大きくない領域では、 E_0 、 w 、 h を適切に決めることによって(4)式で表すことができた。

(2) 弾塑性モデル

本来、結晶性樹脂は結晶と非晶が混在しているため非常に複雑な挙動を示す³⁸⁾が、現状ではその挙動をモデル化できる構成式が確定していないことや、計算時間や材料物性測定時間など実用上の問題もあり近似的な表現を行うことが好ましい。そのため、結晶性樹脂材料に対しても金属材料と同様の弾塑性モデルがしばしば用いられてきた。

① 降伏応力の歪み速度・温度依存性

物体に加えた外力を取り除いた際に完全にもとの状態に戻る性質を弾性と呼ぶ。一方、外力を取り除いても永久変形が残る性質を塑性と呼び、塑性変形が生じる応力のことを降伏応力と呼ぶ。

弾塑性モデルは降伏応力以下では弾性、降伏応力を超えると塑性を考慮するモデルである。

著者らは通常、弾性を線形弾性（応力と歪みが比例）として取り扱ってきたが、樹脂材料の材料物性は歪み速度依存性が大きいため、衝撃解析においては降伏応力の歪み速度依存性を重視してきた。

降伏応力の歪み速度依存性を考慮するにあたって、従来はCowper-Symonds式（(5)式）を用いてきたが測定速度範囲の制限から歪み速度依存性の精度を高めることが難しかった。

$$\sigma_y = \sigma_{0y} [1 + (\dot{\epsilon}/C)^{1/p}] \quad (5)$$

ここで、 σ_y は降伏応力、 σ_{0y} は静的降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、 C 、 p は材料定数を表す。

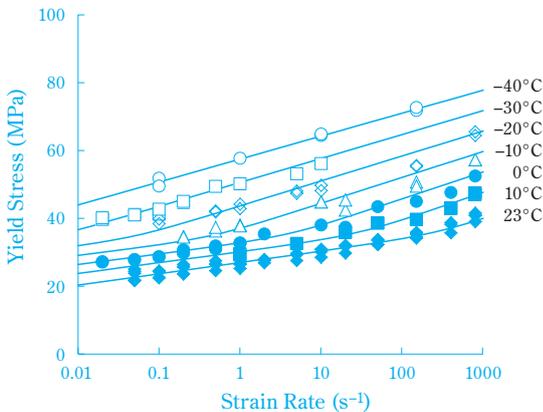
一方、降伏応力を温度と歪み速度の関数として表現できる式としてEyring理論に基づく(6)式がある³⁹⁾。降伏現象は非線形流動のEyring理論を用いて表現できる。非線形流動のEyring理論は応力により流動のポテンシャルエネルギー障壁が非対称となる(活性化する)ため特定方向への流動が起こるといえるものである。この際、流動の上流側のポテンシャルエネルギー障壁が $V_p^* \sigma_y$ だけ高くなり、下流側のポテンシャルエネルギー障壁が $V_p^* \sigma_y$ だけ低くなると考える。(6)式には活性化過程が二つ考慮されており、PC, PMMA, PPなどに対して有効であるとされている。

$$\frac{\sigma_y}{T} = \sum_{p=\alpha,\beta} \frac{R}{V_p^*} \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0,p}^*} \right) \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}_{0,p}^* = \dot{\epsilon}_{0,p} \exp \left(-\frac{\Delta U_p}{RT} \right)$$

ここで、 σ_y は降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、 $\dot{\epsilon}_{0,p}^*$ は速度定数、 T は温度、 R は気体定数、 V_p^* は活性化体積、 ΔU_p は活性化エネルギーを表す。

各種速度、温度で測定した引張試験結果に対して、(6)式を用いて降伏応力の回帰を行った結果を示す(Fig. 4)。なお、Fig. 4では試験中の引張速度の変化を考慮して歪み速度を算出した。(6)式を用いることにより幅広い温度条件、歪み速度条件で降伏応力を予測することができた。



Plots: Experimental data
Curves: Eq.6

Fig. 4 Dependence of yield nominal stress on temperature and nominal strain rate

② 降伏条件

金属材料を中心に適用例が多いvon Misesの降伏条件は、金属材料の降伏応力が静水圧に殆ど依存しないことを利用して、(7)式のように定義されている(偏差応力の第二不変量が降伏応力を超えると降伏)。von Misesの降伏条件は、物理的には単位体積あたりのせん断歪みエネルギーが限界を越える応力を指しており、静

水圧のみが作用している状態では物質は降伏しないと考えられている。

$$\frac{1}{2} \{ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \} \geq \sigma_y^2 \quad (7)$$

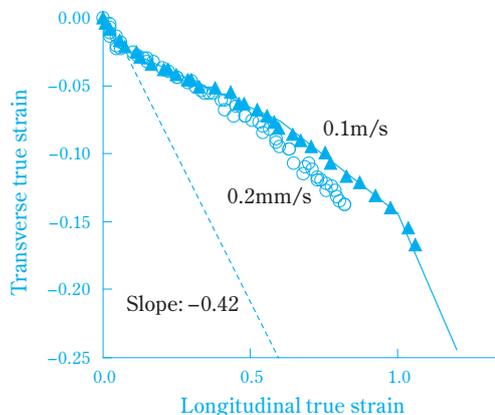
ここで σ_y は降伏応力、 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} は法線応力の各成分、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} はせん断応力の各成分を表す。

しかしながら、樹脂材料は一軸・二軸の引張・圧縮およびせん断などの応力状態の違いで降伏条件が異なる「静水圧依存性」⁴⁰⁾を有するため、静水圧に依存しないvon Misesの降伏条件を用いたのでは解析精度が十分ではない場合がある。

そこで最近では、弾塑性モデルをベースにしながらも、樹脂材料の複雑な特性をできるだけ正確に表現できるように、一軸・二軸の引張・圧縮およびせん断などの各応力状態を考慮した複雑な降伏曲面を定義できる材料モデル²⁵⁾が注目されている。この材料モデルでは、降伏点以降で発生するクレイズに含まれるボイドの効果を考慮できる。ボイドが発生すると体積が増加するとともに応力が低下する。前者を塑性ポアソン比、後者をダメージ関数として、塑性歪みの関数として定義できる。

③ 塑性ポアソン比およびダメージ関数

塑性変形中のポアソン比を調べるため、引張試験中の引張方向の真歪み(縦歪み: ϵ_L)と引張方向に垂直な方向の真歪み(横歪み: ϵ_T)の関係を画像解析で測定した(Fig. 5)。大変形域に定義を拡大したポアソン比($-d\epsilon_T/d\epsilon_L$, Fig. 5における傾きに負号を乗じた値)は塑性域に入った直後と思われる領域で著しく小さくなった。これは、デジタル画像相関法(Digital Image Correlation Method; DICM)での測定事例⁴¹⁾と同様の挙動であったが、Fig. 5では歪みが大きくなるに従って、ポアソン比が上昇する傾向が見られた。また文献⁴²⁾と



Parallel part length of the specimen: 57mm

Fig. 5 Relationship between transverse true strain and longitudinal true strain

同様、塑性ポアソン比の歪み速度依存性は小さいことが示唆された。

塑性域でポアソン比が小さくなる現象は、クレイズが発生しつつ変形が進行したため、試験片の体積が増加した（すなわち幅があまり減らなかった）ことによって生じたものと考えられる⁴³⁾。

塑性ポアソン比は、引張試験における、塑性歪み速度の引張方向に垂直な方向の成分 ($\dot{\epsilon}_{pT}$) と引張方向の成分 ($\dot{\epsilon}_{pL}$) の比に負号を乗じた値 ($-\dot{\epsilon}_{pT}/\dot{\epsilon}_{pL}$) として定義されるが、ここでは上記の塑性域でのポアソン比との差は小さいと考えた。

従来の弾塑性モデルでは、塑性変形時は体積不変を仮定して、塑性ポアソン比を0.5とすることが多かったが、樹脂材料は塑性ポアソン比が小さいという特徴を考慮した方がよいものと考えられる。

ダメージ関数については、物体の変形中に増加した体積は、変形中に発生したボイドの体積に相当すると仮定して、以下のように推定した。Fig. 6において、直方体の上下方向に引張力 F を加えた際に、引張方向に垂直な面の見かけの面積が S になったとする。見かけの面積 S はボイドの面積 S_v を含むため、ボイドの発生を考慮した応力 σ_d と材料自体に負荷される応力 σ_p の関係は(8)式となる。

$$F = \sigma_d \times S = \sigma_p \times (S - S_v) \quad (8)$$

材料自体の面積と見かけの面積の比が両者の体積の比と等しいことを考慮すると、材料自体の体積は変化しないため、ダメージ関数 d は体積増分 ΔV と初期の体積 V_0 を用いて、(9)式⁴⁴⁾で算出できる。

$$d = 1 - \sigma_d / \sigma_p = 1 - (S - S_v) / S = 1 - 1 / (1 + \Delta V / V_0) \quad (9)$$

さらに、塑性ポアソン比に基づく見掛けの体積変化からダメージ関数の値を推定することにより、ダメージ関数の値と塑性歪みの関係を得ることができる。

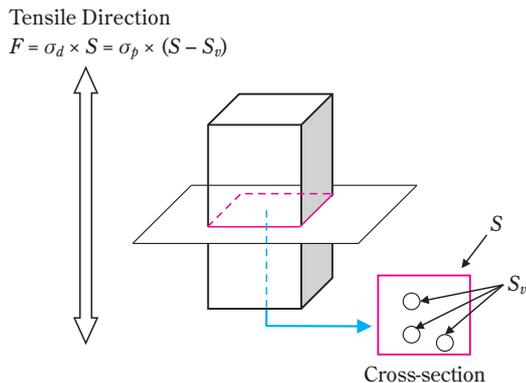


Fig. 6 Stress of damaged material

(3) 破壊挙動

ポリプロピレン系樹脂を用いた引張試験では、公称の破断歪みと歪み速度の関係は概ね多直線近似できた (Fig. 7)。そこで、各直線部分を高速側から順に領域A～領域Dとし破壊時の変形状態を調べたところ、引張試験中に試験片の一部がくびれる現象（ネッキング）と関連付けて分類することができた (Table 1)。

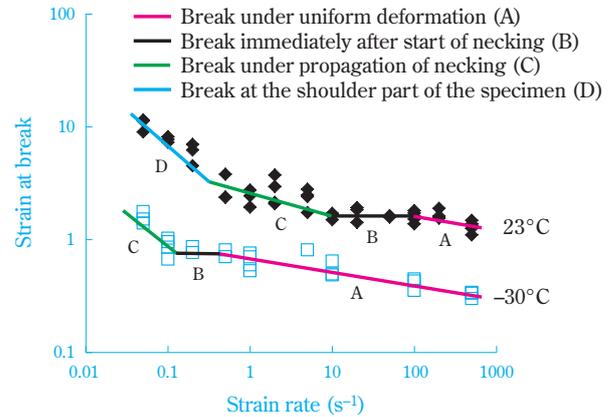


Fig. 7 Relationship between nominal strain at break and nominal strain rate

Table 1 Break behavior of the specimen at tensile testing

Region	Break behavior	Temperature	Nominal strain rate
A	Break under uniform deformation	Low	High
B	Break immediately after start of necking	↓	↓
C	Break under propagation of necking		
D	Break at the shoulder part of the specimen	High	Low

ネッキング発生前（領域A）に破壊した試験に関しては、各温度とも両対数グラフ上でほぼ同じ傾きであったため、実験結果の低温側のデータを高速側に、高温側のデータを低速側に移動して-10°Cで測定したデータに重ねて整理した (Fig. 8)。

ポリエチレンの破壊特性についての時間-温度換算因子 (a_T) がWLF式 ((10)式) に従うことが示されている⁴⁵⁾。本系でも時間-温度換算則を用いることができる可能性があるものと考えている。

$$\log a_T = \frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (10)$$

ここで、 T は温度、 T_{ref} は参照温度、 C_1 、 C_2 は定数を表す。

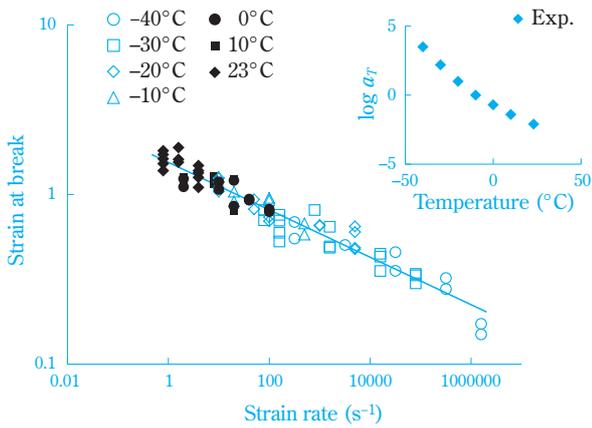


Fig. 8 Results of time-temperature superposition in region A

23°Cで比較すると、降伏点の公称歪みは0.2程度であったが、ネッキング発生前破壊時の公称歪みは1以上 (Fig. 7) であり、降伏点とネッキング開始点は大幅に異なっていた。また降伏点からネッキング開始点までの間、平行部幅は殆ど変化しておらず、サンプルの白化の様子からもクレイズが生成したものと考えられる。延性破壊においてクレイズは重要な役割を果たしていると思われる。

著者らは、上記の検討結果に基づき、降伏後、ネッキング発生前に破壊する速度・温度条件で破断塑性歪みと歪み速度の関係を求めて衝撃解析時の破壊挙動予測に用いることが多い。更に高い精度で破壊挙動を予測するためには、画像解析等を併用することが好ましいと考えている。

一方、志澤らはクレイズ依存性弾粘塑性構成式を用いて破壊予測を行っている⁴⁶⁾。クレイズについては、塑性歪みの増加と共に増加し、低歪み速度ほど進展速度が大きく、分子鎖配向領域では成長が停止するものとしてモデル化されている。本手法を用いることで、せん断帯 (線状に歪みが局所化した領域) 上のクレイズ集中領域が、くびれの伝播に伴ってクレイズ密度の上昇と共に引張方向へ伝播していく現象を再現し、くびれの進行端部におけるせん断帯方向への破断を予測できることが報告されている。

4. 当社での衝撃解析事例

1990年代初頭より行ってきた衝撃解析の適用検討について概略を述べる。自動車部品や家電部品などには耐衝撃性能が求められていることが多い。特に自動車部品については乗員を保護するためのエネルギー吸収性能が各国の法規で定められている。エネルギー吸収性能は部品形状と材料物性の双方によって決まるため、プラスチックCAE技術を活用して両者を加味した部品性能を予測できることが好ましい。

(1) 構造体の衝撃解析

当社での衝撃解析の適用検討は、当初自動車部品への適用を念頭に行ってきた。1990年代半ばごろまでは、部品が破壊しない範囲での検討を行った。その後、エネルギー吸収リブ構造に対して破壊を考慮できる手法を用いた。当時はコンピュータの性能が低かったこともあり、破断塑性歪みを定数として取り扱ったが、実用レベルでの精度を得ることができた (Fig. 9)。

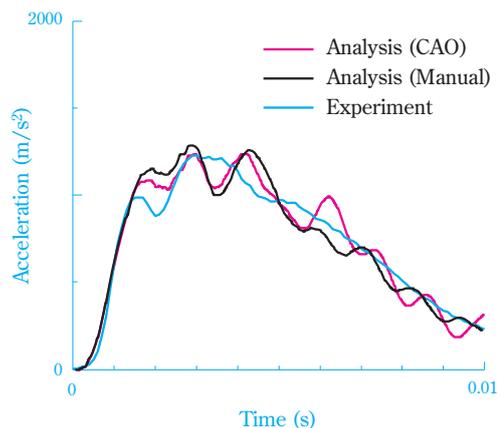
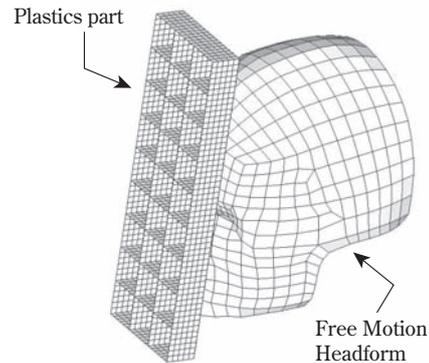


Fig. 9 Example of simulation of impact test for rib box parts

この破断塑性歪みについては、所定の評価サンプルを用いた衝突試験結果と、破断塑性歪みをパラメータとして仮決めした衝突試験の再現解析結果とを比較し、両者の変形挙動が一致するように決定した。この操作については、CAO技術を適用することで、自動的に行うことができる。具体的には、設計変数は衝撃解析に用いる破断塑性歪みとし、評価関数は、試験結果と解析結果の加速度-時間曲線の同一時間での加速度差の二乗の時間平均値とし、評価関数が最小となる設計変数を求める最適化を行った。なお、最適化アルゴリズムには近似手法であるResponse Surface Methodと勾配法ベースのModified Method of Feasible Directionsの組みあわせを用いた⁴⁷⁾。

CAO技術については、品質工学的手法の適用検討も

実施しており、衝突体の衝突位置のバラツキを考慮した衝撃吸収性能の最適化検討⁴⁸⁾を行った。

また、射出発泡成形品やガラス長繊維強化ポリプロピレンを用いた射出成形品についても衝撃解析方法の検討を行い、衝突試験での発生荷重について概ね実験を反映する結果を得た。

(2) 流体－構造連成衝撃解析

流体－構造連成解析については、液体入り容器（ボトルやスタンディングパウチ等）の落下試験、エアバッグカバーの（仮想）展開試験の衝撃解析を行った。

詰め替え用の洗剤等の容器として使用されているスタンディングパウチは、側面部分は二枚のフィルム貼り合せて作成し、底面部分は側面部分に一枚のフィルムを貼り合わせる構成となっている。加熱融着（ヒートシール）法を用いて貼り合わせる際のヒートシール強度が不十分な場合、落下時にヒートシール部が剥離することがある。

ヒートシール強度が不十分な場合のヒートシール強度に相当する接着強度を用いてスタンディングパウチの落下試験の衝撃解析を行ったところ、実験と同様、ヒートシール部が剥離する結果となった（Fig. 10）。

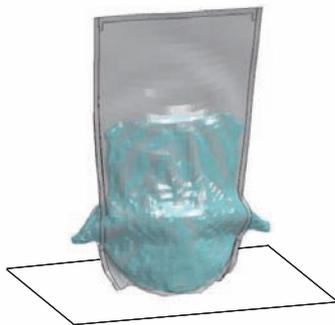
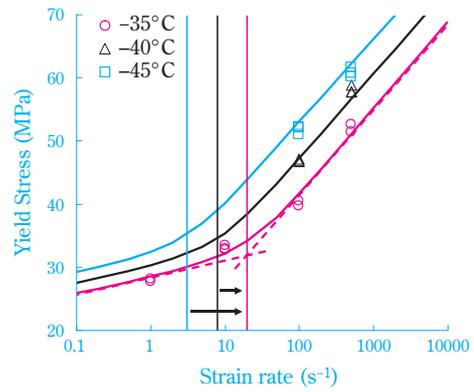


Fig. 10 Example of drop impact analysis for the standing-pouch

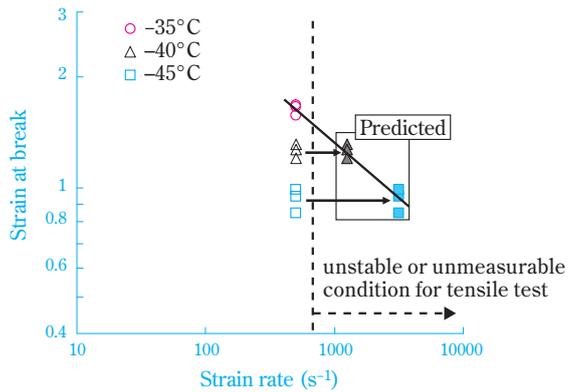
エアバッグを収納する部品であるエアバッグカバーにはティアラインと呼ばれる溝状の薄肉部分があり、エアバッグ展開時にはティアラインが破断しカバーの扉部が開く。エアバッグカバーは低温においても展開時に扉部が飛散しない性能であることが好ましいため、低温での（仮想）展開試験の衝撃解析を試みた。

低温伸びが大きい材料では領域A（Table 1）の低速側端部が高速引張試験機の測定速度上限値に近づき領域Aでの歪み速度依存性を得ることが難しい。

降伏応力のフィッティングに用いた(6)式は二項から成り立っているため、降伏応力の歪み速度依存性を表す曲線に屈曲点が存在する（Fig. 11 (a)）。この屈曲点は温度とともに左右に移動するため、左右の移動量



(a) Dependence of nominal yield stress on nominal strain rate



(b) Dependence of nominal strain at break on nominal strain rate

Fig. 11 Determination of failure characteristics

の時間－温度換算因子が破断特性の時間－温度換算因子と一致すると仮定し、複数温度での測定値を用いて公称の破断歪みの歪み速度依存性を推定した（Fig. 11 (b)）。

低温性能に差がある二種類の材料について、上述した破断歪みの歪み速度依存性データを公称歪みから真歪み相当の値に簡易的に換算して、エアバッグカバーの（仮想）展開試験の衝撃解析に適用した。当社所有のテスト型形状にて、試験温度を-35°Cとして衝撃解析を行ったところ、低温性能に劣る材料のみ、エアバッグカバーの扉部が飛散した（Fig. 12）。

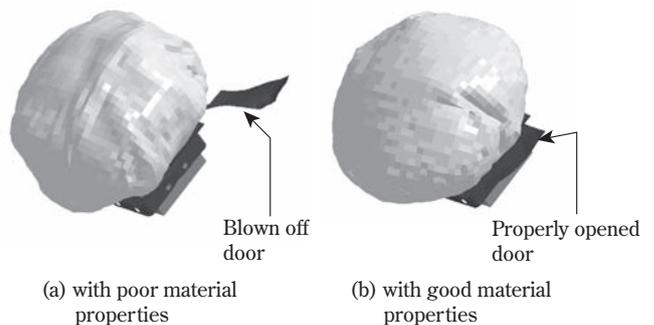


Fig. 12 Airbag cover deployment test analysis result

(3) 弾塑性モデル精度向上の効果

弾塑性モデルを用いてFig 13に示す落錘衝撃試験の衝撃解析を行った。

材料モデルには、降伏応力の静水圧依存性、塑性ポアソン比およびダメージ関数を考慮した材料モデル (Model A) と、von Misesの降伏条件を用い、降伏以降の塑性ポアソン比は0.5とし、ダメージ関数を考慮しない従来型の材料モデル (Model B) を用いた。衝撃解析に用いる応力-歪み曲線は、両材料モデルとも高速引張試験の解析結果が実験結果に破断しない範囲で一致するように決定した。有限要素モデルには二次元軸対称モデル (ソリッドモデルの一種) を用いた。

落錘衝撃試験の衝撃解析結果をFig. 14に示す。従来型のModel Bを用いた場合に比べModel Aを用いた場合には実験データの予測精度が上がっていることがわかる。

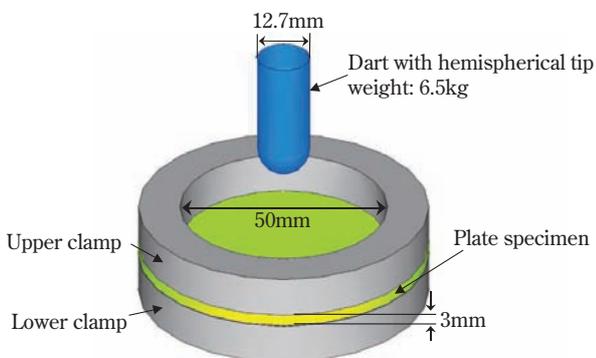


Fig. 13 Schematic diagram of CAE analysis model for the falling weight impact test

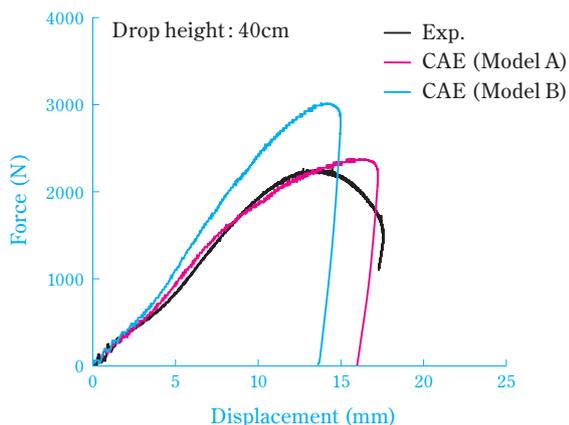


Fig. 14 Comparison of experimental result and CAE predictions for the falling weight impact test

5. 今後の展望

降伏点以降の挙動はゴム弾性を仮定すると説明できるという報告⁴⁹⁾や、ゴムの一軸変形挙動と (伸長) 結晶化・融解挙動の関係を論じた報告⁵⁰⁾もあり、樹脂分

野の衝撃解析にあたっては塑性変形中のゴム弾性挙動や結晶形態の変化なども考慮することが好ましいと思われる。また、ポリマーには伸ばされるとエントロピーが減少するために発熱するという特徴 (Gough-Joule効果)⁵¹⁾があることに加え、塑性変形による発熱もあり、今後更に現実的な衝撃解析を行うためには温度変化を加味することが欠かせないものと思われる。

一方、昨今、マルチスケールシミュレーションが注目されている。結晶性樹脂には結晶と非晶が混在しているため、混在系の構造や変形をマクロスケールの構造解析に反映させるための手法が検討されており^{52), 53)}、実用化が期待されている。

また、数値計算手法については、亀裂進展を精度高く検討できる拡張有限要素法 (XFEM)⁵⁴⁾、メッシュを用いないが故に大変形現象の計算に向いている粒子法⁵⁵⁾が注目されており、プラスチックCAEへの活用が期待されている。

おわりに

コンピュータの性能が急速に向上し、計算できる規模が拡大した結果、部品形状を詳細に入力することは比較的容易になった。計算時間的な側面も考慮し簡略化していた材料モデルについても、少しずつではあるが詳細なモデルが使われようとしている。当社でも将来的には製品設計CAEと高分子材料設計CAEを融合したいと考えている。

引用文献

- 1) J. R. Lemon, S. K. Tolani and A. L. Klosterman, *CAD-Fachgespräch*, **1980**, 161 (1980).
- 2) 東川 芳晃, 広田 知生, 永岡 真一, 住友化学, **2004-II**, 15 (2004).
- 3) 梶井 捷平, 東川 芳晃, 左海 登志雄, 菊地 利注, 白井 信裕, 住友化学, **1984-II**, 70 (1984).
- 4) 長田 誠, 菊地 利注, 中村 之人, 東川 芳晃, 原 孚尚, 住友化学, **1992-II**, 68 (1992).
- 5) 東川 芳晃, 東 賢一, 筒淵 雅明, 榎木 毅, 下條 盛康, 住友化学, **1995-I**, 75 (1995).
- 6) 永野 聡, 山内 宏泰, 平川 学, 住友化学, **2001-II**, 13 (2001).
- 7) M. Tsutsubuchi, T. Kitayama, Y. Togawa, T. Nishio and, H. Kutschera, *Intern. Polym. Process.*, **15** (3), 313 (2000).
- 8) 永岡 真一, 筒淵 雅明, 東川 芳晃, 成形加工シンポジウム'98, **1998**, 39.
- 9) 森川 誠, 梶谷 泰士, 城本 征治, 住友化学, **2009-I**, 4 (2009).

- 10) 宮崎 洋介, 成形加工, **22**(10), 531 (2010).
- 11) M. Walter, H. Chladek and A. Huß, *4th European LS-DYNA Users Conference*, **2003**, G-1-15.
- 12) I. Lupea, J. Comier and S. Shah, *8th International LS-DYNA Users Conference*, **2004**, 5-57.
- 13) T. Yeo and J. Park, *2003 ABAQUS Users' Conference*, **2003**.
- 14) T. Goel and N. Stander, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **198**, 2137 (2009).
- 15) M. Keranen, S. Krishnaraj, K. Kulkarni, L. Lu, R. Thyagarajan and V. Ganesan, *SAE Technical Paper*, 2005-01-1221 (2005).
- 16) C. J. Ribeiro, J.C. Viana, F.Vilaça and J. Azenha, *Plastics, Rubber and Composites*, **35**, 253 (2006).
- 17) A. Malladi, Saifuddin and G. Gadekar, *SAE Technical Paper*, 2011-26-0014 (2011).
- 18) 安野 富之, 市村 悦男, 谷口 隆一, 田中 新也, 吉田 眞素夫, 自動車技術会学術講演会前刷集, **No.99-98**, 9 (1998).
- 19) 近藤 高廣, 安木 剛, 自動車技術会学術講演会前刷集, **No.31-99**, 13 (1999).
- 20) 金井 大, 下 克巳, 竹内 一裕, 河野 克巧, 菅沼 浩, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集, **2006**, 217.
- 21) 前 博行, 日本機械学会機械材料・材料加工部門ニューズレター, **32**, 15 (2006).
- 22) J. M. Lorenzo, *SAE Technical Paper*, 1999-01-0433 (1999).
- 23) K. Lee, T. Yeo, S. Park, H. A. Gese and H. Dell, *SAE Technical Paper*, 2008-01-1116 (2008).
- 24) P.A. Du Bois, M. Koesesters, T. Frank and S. Kolling, *3. LS-DYNA Anwenderforum*, **2004**, C-I-1.
- 25) P.A. Du Bois, S. Kolling, M. Koesters and T. Frank, *International Journal of Impact Engineering*, **32**, 725 (2006).
- 26) M. C. H. Lee and G. E. Novak, *SAE Technical Paper*, 2006-01-1187 (2006).
- 27) 伊藤 順子, 李 欣増, 高田 志郎, 宮崎 政行, 西村 浩之, 宮下 達哉, 計算力学講演会講演論文集, **2000**, 525.
- 28) D. Yu, J. B. Kwak, S. Park and J. Lee, *Microelectronics Reliability*, **50**, 1028 (2010).
- 29) K. H. Low, A. Yang, K.H. Hoon, X. Zhang, J. K. T. Lim and K. L. Lim, *Advances in Engineering Software*, **32**, 683 (2001).
- 30) T. Allen, J. Hart, J. Spurr, S. Haake and S. Goodwill, *Procedia Engineering*, **2**, 3275 (2010).
- 31) A. W. Pugh, R. Hamilton, D. H. Nash and S. R. Otto, *Procedia Engineering*, **2**, 3231 (2010).
- 32) 田中 克昌, 寺西 幸弘, 宇治橋 貞幸, 日本機械学会論文集C編, **76**(772), 3343 (2010).
- 33) W. Petersen and J. McPhee, *Sports Eng.*, **12**(2), 77 (2010).
- 34) 神田 芳文, 日本機械学会論文集C編, **65**(638), 3890 (1999).
- 35) 秋葉 博, 柴田 良教, シミュレーション, **25**(4), 34 (2006).
- 36) 松岡 峻朗, 「高分子の緩和現象 理論、実験とコンピュータでみる工学的性質の基礎」, 第1刷, 市原 祥次訳, 講談社サイエンティフィク (1995), p. 172.
- 37) W. Michaeli, M. Glißmann, *Polymer Testing*, **20**(5), 591.
- 38) 富田 佳宏, 材料, **57**(3), 209 (2008) .
- 39) E.T.J. Klompen, L.E. Govaert, *Mech. Time-depend. Mater.*, **3**, 49 (1999).
- 40) 佐野村 幸夫, 材料, **50**(9), 968 (2001).
- 41) F. Grytten, H. Daiyan, M. Polanco-Loria and S. Dumoulin, *Polymer Testing*, **28**(6), 653 (2009).
- 42) V. Delhay, A. H. Clausen, F. Moussy, R.Othman and O.S.Hopperstad, *International Journal of Impact Engineering*, **38**(4), 208 (2011).
- 43) 佐々木 章仁, 黒田 充紀, 成形加工シンポジア'05, **2005**, 189.
- 44) M. Nutini and M. Vitali, *7. LS-DYNA Anwenderforum*, **2008**, D-I-11.
- 45) 新田 晃平, 石風呂 高志, 高分子加工, **51**(6), 251 (2002).
- 46) 高橋 順一, 山本 敏治, 志澤 一之, 計算力学講演会講演論文集, **2006**, 391.
- 47) 東川 芳晃, 広田 知生, 長田 誠, 矢部 徹, 成形加工'01, **2001**, 35.
- 48) 広田 知生, 宮口 幸人, 筒瀬 雅明, 東川 芳晃, 成形加工シンポジア'06, **2006**, 233.
- 49) R. N. Haward, *J. Polym. Sci. Part B: Polymer Physics*, **45**, 1090 (2007).
- 50) 宮本 嘉久, 日本ゴム協会誌, **77**(1), 12 (2004).
- 51) 村橋 俊介, 藤田 博, 野櫻 俊一, 「高分子化学」, 第3版, 共立出版 (1983), p. 288.
- 52) I. Doghri, 「Mechanics of Deformable Solids, Linear and Nonlinear Analytical and Computational Aspects」, Springer (2000), p.519.
- 53) 内田 真, 多田 直哉, 富田 佳宏, 日本機械学会論文集A編, **77**(778), 902 (2011).
- 54) N. Moës, J. Dolbow, and T. Belytschko, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **46**(1), 131 (1999).
- 55) 酒井 讓, 山下 彰彦, 日本機械学会論文集A編, **67**(659), 1093 (2001).



筒渕 雅明
Masaaki TSUTSUBUCHI

住友化学株式会社
樹脂開発センター
主席研究員



丹羽 康仁
Yasuhito NIWA

住友化学株式会社
樹脂開発センター
研究員



廣田 知生
Tomoo HIROTA

住友化学株式会社
樹脂開発センター
主席研究員



島崎 泰
Tai SHIMASAKI

住友化学株式会社
樹脂開発センター
研究員