

CAO 技術を用いた プラスチック製品設計

住友化学(株) 石油化学品研究所
東川 芳 晃
広田 知 生
永岡 真 一

Plastic Product Design using CAO (Computer Aided Optimization) Technique

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Petrochemicals Research Laboratory
Yoshiaki TOGAWA
Tomoo HIROTA
Shinichi NAGAOKA

Plastic CAE (Computer Aided Engineering) is used as indispensable technology in the plastic product design today. However, by integrating CAE technology and the CAO (Computer Aided Optimization) technology in which utilization has started, the automatic optimal design of a plastic product is attained and much more shortening the period of a product design, reducing development cost, and improving the quality and the performance of a product can be expected. Moreover, it becomes the powerful support technology of material development. In this paper, the outline of the integrated technology of the plastics CAE and CAO that we have developed, some application examples, and the integrated design optimization system for the plastic products of our company are described.

はじめに

プラスチックは、自動車、家電、AV機器の部品や食品、包装容器等種々の用途に使用されている。現在、これら各種製造業において共通の課題は、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である。今日、プラスチックCAE (Computer Aided Engineering) 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利用されている。

一方、近年の計算機の飛躍的な進歩とソフトウェア技術の発展により、CAO (Computer Aided Optimization) 技術^{1), 2)}が進歩し実用レベルに達したことにより、各種製造業において最近実用化されはじめた。実用的な汎用のCAO支援ソフトウェアが上市されたことにより³⁾、プラスチック製品設計にも利用できるようになった。CAOはコンピュータを利用した設計の自動化、最適化、統合化技術である。CAO技術と従来のCAE技術を統合することにより、手作業の繰り返しであったCAEによる設計最適化作業は

自動化され、また作業者の知識、経験、スキルによる設計品質の差も少なくなり、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・性能の向上が期待できる。

プラスチックCAE技術は、1980年代の第1世代(黎明期～発展期)、1990年代の第2世代(成熟期)を経て、2000年代に入りCAOによるCAEの自動化、最適化、統合化の時代(第3世代)へと進化した。

当社においては、2000年より第3世代のプラスチックCAEの技術構築を進めている。本稿においては、これら当社の技術の開発状況について紹介する。

プラスチックCAE技術

CAEとは、「製品の開発・設計プロセスにおいて、工学的手法を用いた解析・シミュレーションをコンピュータが支援すること」である⁴⁾。

プラスチックCAE (Computer Aided Engineering) は、プラスチック製品開発において、製品・金型設計、成形加工さらに製品性能評価の各段階で使

用される。

プラスチックCAEは、従来金属材料用に開発されたメカニカルCAEと、高分子材料専用に関係された各種成形加工CAEから構成されている。メカニカルCAEは、静的、動的な機械的特性を評価する構造解析や衝撃解析、振動解析等の技術があるが、高分子材料への利用技術を開発する必要がある。一方、成形加工CAEには、射出成形、ブロー成形、押出成形ほか各種成形加工専用のソフトウェアが開発されている。これらを用いて、成形過程における高分子材料の溶融、冷却、固化の状態変化の挙動、履歴、さらにはこれら賦形履歴をもとに、成形後の製品の外觀や品質、性能を予測することができる。

当社においては、過去20数年間、成形加工の基盤技術の一つとして、プラスチックCAE技術の開発を行い、顧客の製品・金型設計、成形不良現象の原因究明と対策等の支援、当社の材料開発の支援、当社および関連会社のプラスチック製品開発支援に適用してきた^{5)~8)}。当社のプラスチックCAEシステムをFig. 1に示す。

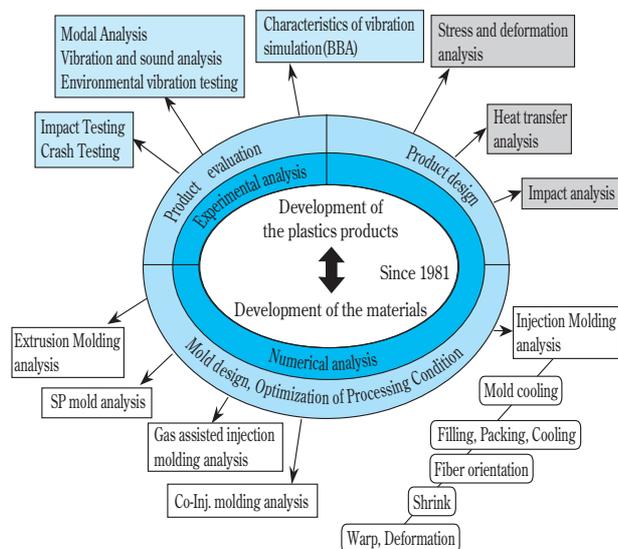


Fig. 1 Plastic-CAE System in Sumitomo Chemical

CAO 技術と最適設計

現在、最適設計時の主流となっている有限要素法などのCAE解析ソフトと最適化ソフトを組み合わせた最適化検討のスタートは、1980年頃の自動車の軽量化検討においてである⁹⁾。以来、20年余の間に最適化解析技術と最適化ソフト両面の進歩により、このCAOを用いた最適設計技術は大きく進歩した。

CAO技術は、従来製品開発において、CAE技術を用いて、仮想試作、仮想試験を行い、結果を評価

し、目標性能が得られるまで、人間の判断と手作業により解析モデルの修正、解析、評価を繰り返していた設計の最適化作業を、コンピュータ・ソフトが人間に代わってCAE解析を実行し結果を判断し、目標性能が得られるまで自動で最適化作業を行う技術である。さらに各種CAEを統合することにより、実際の製品の総合的な性能最適化の場合に必要な複合領域の最適化¹⁰⁾も可能となる。その概念図をFig. 2に示す。

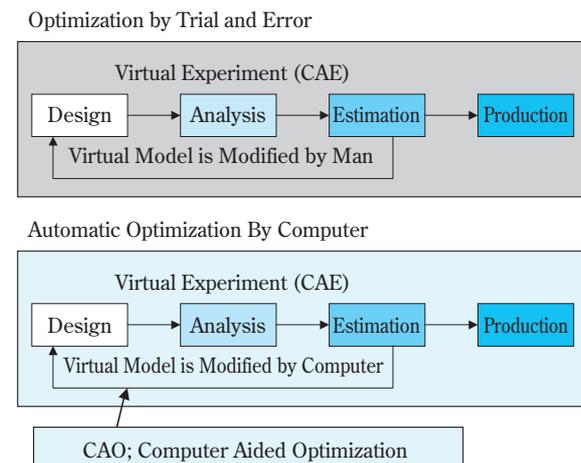


Fig. 2 Comparison of CAE Approach and CAO Approach in a Product Design

1. 最適設計問題¹²⁾

一般に最適化問題は、与えられた制約条件のもとで、目的関数と呼ばれる望ましさの尺度を表す関数が最小または最大となるような決定変数の値を見つけるという数学モデルとして定式化できる¹¹⁾。

最適設計問題では、一般に目的関数、制約条件式、および設計変数（決定変数）から構成され、以下のように定式化される。

$$\text{目的関数: } f(\vec{x}) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } g_j(\vec{x}) \leq 0 \quad (j = 1 \sim m) \quad (2)$$

$$h_k(\vec{x}) = 0 \quad (k = 1 \sim m') \quad (3)$$

$$\vec{x}^L \leq \vec{x} \leq \vec{x}^U \quad (4)$$

$$\text{設計変数: } \vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \quad (5)$$

このとき、問題は制約条件式(2)~(4)を満足し、式(1)の目的関数を最小にするような式(5)の設計変数の決定と定義される。nは設計変数の数、mは不等号制約条件式の数、m'は統合制約条件式の数である。上記の問題は、目的関数に(-)を掛ければ最大化問題となり、また不等号制約条件に(-)を掛ければ不等号の向きを逆に考えることができる。

最適設計問題を構成する目的関数、制約条件、設

Table 1 Classification of Optimization

Objective Function	Number	Uni-Objective		Multi-Objective
	Type	Functional		Numerical
Constraint Condition	Existence	Constraint		Unconstraint
	Type	Functional		Numerical
Design Variable	Type	Continuous	Discrete	Mixed

計変数の分類を Table. 1 に示す。

2. 最適化手法の種類^{13), 14)}

最適化を実施するには、最適化対象の特性や設計変数・目的関数の種類、最適化に要する時間等を考慮する必要がある。具体的には、例えば、最適化における解空間が非線形である場合、多峰性なのか単峰性なのか、設計変数を連続値で扱うのか離散値で扱うのかあるいは記号として扱うのか、どのような制約条件が設定されるのか、目標性能が単数なのか複数なのか、目標性能に品質工学的な考えを反映させるのか、解析1回当たりに必要な時間はどれくらいか、等が挙げられる。

最適化手法は数理的手法(Numerical Optimization Technique)と探索的手法(Exploratory Technique)の2つに大別される。用途別に分類した最適化手法を Table. 2 に示す。なお、Table. 2 に示した最適化手法の内、焼き鈍し法(Simulated Annealing)と遺

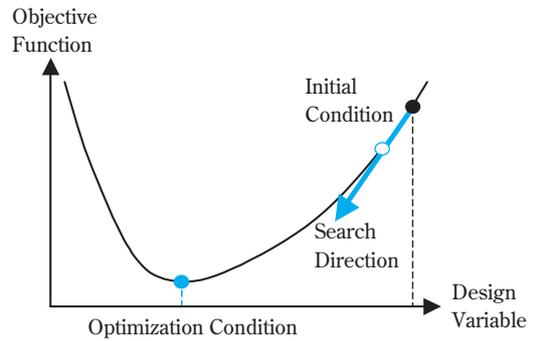


Fig. 3 Schematic Diagram of Numerical Optimization

伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)が探索的手法であり、その他は数理的手法である。

数理的手法の基本的な考え方である勾配法の解探索のイメージを Fig. 3 に示す。

数理的手法は、現在注目している設計変数の周りの勾配(感度)から最適化方向を決定して、設計変数を逐次変更する方法である。数理的手法は、解空間が単峰性である場合には精度の良い最適解が得られるが、多峰性の解空間を最適化する場合には、局所的な解に陥って、大局的な最適化が得られないことが多い。そこで、最適化対象が多峰性であることが予測される場合には探索的手法を用いる。

探索的手法である焼き鈍し法の解探索のイメージを Fig. 4 に示す。

Table 2 Optimization Techniques

			Complexity of Objective Function and Constraint Condition		
			Uni-Modal Function		Multi-Modal Function
			Linear Function	Non-Linear Function	
Continuity of Parameter Space	Continuous Parameter	Real	<ul style="list-style-type: none"> • Sequential Linear Programming • Successive Approximation Method • Method of Feasible Directions • Modified Method of Feasible Directions 	<ul style="list-style-type: none"> • Sequential Linear Programming • Sequential Quadratic Programming • Method of Feasible Directions • Modified Method of Feasible Directions • Exterior Penalty • Hooke-Jeeves Direct Search Method • Generalized Reduced Gradient 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulated Annealing • Genetic Algorithm • (Successive Approximation Method) • (Mixed Integer Optimization)
		Integer	<ul style="list-style-type: none"> • Hooke-Jeeves Direct Search Method • Successive Approximation Method • Mixed Integer Optimization • Simulated Annealing • (Genetic Algorithm) 		
	Discrete Parameter	Symbol	<ul style="list-style-type: none"> • Simulated Annealing • Genetic Algorithm • (Successive Approximation Method) • (Mixed Integer Optimization) 		

Blue Character : Numerical Optimization Technique

Red Character : Exploratory Technique

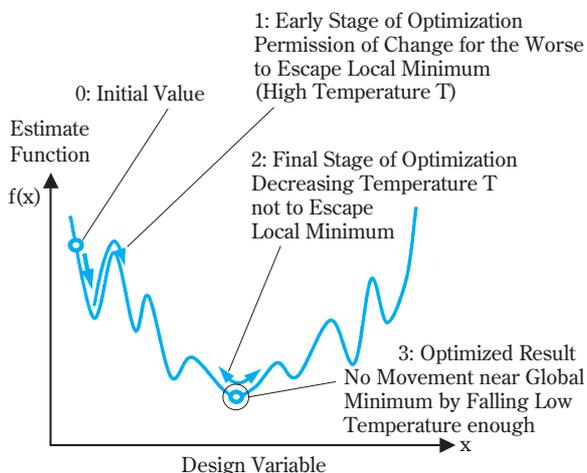


Fig. 4 Schematic Diagram of Simulated Annealing

焼き鈍し法は、金属が焼き鈍される物理現象をモデル化した手法で、目的関数の良くなる設計変数を探しつつ、適当な確率で解の改悪も許すことを特徴としている。なお、解の改悪を許す確率は最適化初期には高くし、終盤には低くするようにして最適解が得られるようにしている。

実際の最適化では、目的関数の取り扱い方により、さらに多目的最適化や品質工学の手法の考え方を組み合わせたり、最適化に要する時間の面から近似モデルを組み合わせたりするなどして実施される。

近似モデルとしてよく用いられる応答曲面法 (Response Surface Model) の流れを Fig. 5 に示す。

応答曲面法では、事前にいくつかのサンプル点の解析を実施し、それを用いて二次関数等の応答曲面を作成する。最適化は応答曲面上で実施する。得ら

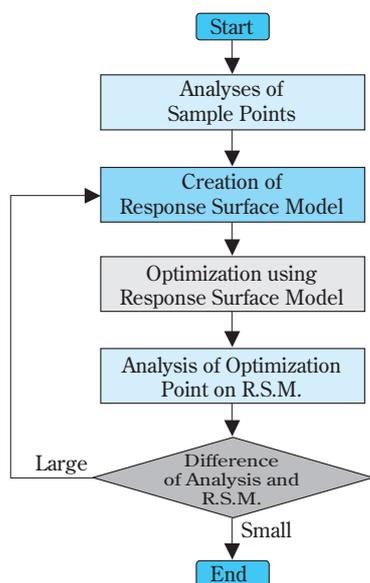


Fig. 5 Flowchart of Response Surface Model (R.S.M.: Response Surface Model)

れた最適解の設計変数を用いた解析解と応答曲面の最適解との差が十分小さくなければ応答曲面の最適解をサンプル点に加えて応答曲面を作り直して最適化を実行する。この操作を解析解と応答曲面の最適解との差が十分小さくなるまで繰り返す。

3. プラスチック製品の最適設計問題

プラスチック製品の性能や品質は、材料と製品デザインおよび成形加工の3つの要素が複雑に絡み合っている⁶⁾。材料では機械的性質、熱的性質およびレオロジー特性である。製品デザインでは形状および構造である。成形加工では、金型構造と成形条件である。製品設計においては、これら3つの要素を考慮しながら製品デザインを最適化する必要がある。即ち、プラスチックの製品設計は、これらの各要素を同時に考慮しながら最適化を行う複合領域の最適化問題である。当社では従来、Fig. 1のCAEシステムを用い、CAE解析の担当者自身が、解析、評価、修正を繰り返すことにより製品設計最適化を実施してきた。

複合領域の最適化機能をもつ商用のCAO支援ソフトウェア“iSIGHT”(Engineous Software, Inc. USA)が1994に米国で開発され、1998年末に日本でも上市された³⁾。当社は、本ソフトウェアがプラスチック製品の最適設計問題にも有効であることを事前検討により確認し、2000年に導入した。以降、第2世代のプラスチックCAE技術を第3世代の技術に進化させるべく、従来構築してきたCAE技術とCAO技術との統合化技術検討を実施している。

現在、主要CAE技術に関する自動最適化技術を確立し、またこれらCAE技術を統合した複合領域の自動最適化技術についても確立している。現在は、さらにこれら最適化作業の効率化、単純化を行うため、GUI (Graphical User Interface) 上でCAOの専門知

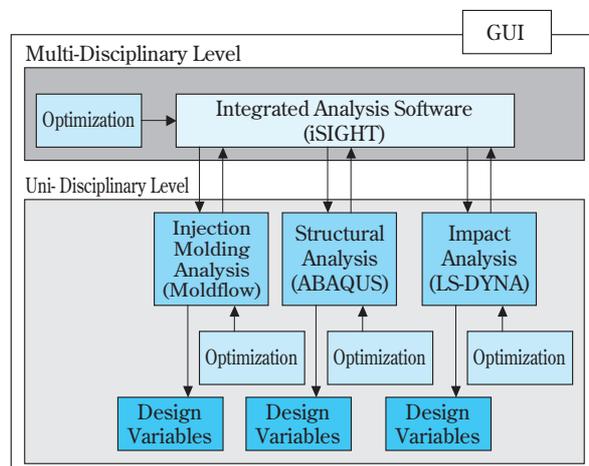


Fig. 6 SUMIKA Integrated Design Optimization System for Plastic Product (SIDOS)

識がなくても最適化作業ができる住化統合プラスチック製品最適設計システム (SIDOS) を開発中である。

Fig. 6 にSIDOS の概略を示す。

CAO 技術のプラスチック製品設計への適用事例

CAO 技術のプラスチック製品設計への適用としては、プラスチック製品に求められる機能 (剛性、衝撃吸収特性、振動特性等) に対し最適な性能が得るように製品構造面の設計に適用する場合と、構造面での設計が確定したプラスチック製品において、必要とされる成形面の品質 (ウェルド位置、変形反り量等) や成形上の制約 (型締め力、サイクルタイム等) を達成するように金型構造の設計や成形条件の最適化に適用する場合に大別される。

実際の製品設計に CAO 技術を適用していくうえでの重要な点として以下の 2 つが挙げられる。1 つは、いかにして最適化対象における設計項目を設計変数として抽出するかと、もう 1 つは、いかにして最適化対象の性能を数値化し、目的関数として設定するかである。以下、これら 2 点については、プラスチック製品設計への適用事例の中で紹介する。なお、本事例の CAE 解析では Fig. 6 に示す各ソルバーを用いた。

1. 自動車内装部品設計への最適化技術の適用

(1) 自動車内装部品に求められる衝撃吸収性能

自動車の内装部品としてのプラスチック製品は、形状の自由度、重量やコスト面で多用されている一方で、事故時の乗員頭部の二次衝突 (車室内衝突) に対し十分な緩衝性能を保有されることが求められている。たとえば、National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA : アメリカ高速道路交通安全局) が規定している Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) 201U なる基準においては、Fig. 7 に示されるような部位において、頭部が二次衝突しても損傷が発生しない十分な緩衝性能が必要となる¹⁵⁾。

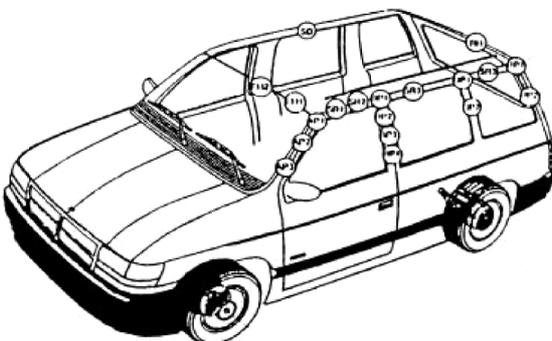


Fig. 7 Typical Target Location of Interior Parts for FMVSS201U

FMVSS201U における緩衝性能の評価では、対象となる内装部品を、自動車のボディに取り付けた状態で、質量 4.54kg の Free Motion Headform (FMH : ダミー人形の頭部) を、乗員着座時の頭部位置の方向から速度 6.7m/s で衝突させ、その際の衝突時の FMH 重心で測定された合成加速度 $a(t)$ と時間の関係から (6) 式、(7) 式によって算出される HIC (d) を用いて実施されている^{16)~18)}。(Fig. 8)

$$HIC = \text{Max} [(t_2 - t_1) \{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \}^{2.5}] \quad (6)$$

(where $t_2 - t_1 \leq 36m \text{ sec}$)

$$HIC(d) = HIC \times 0.75446 + 166.4 \quad (7)$$

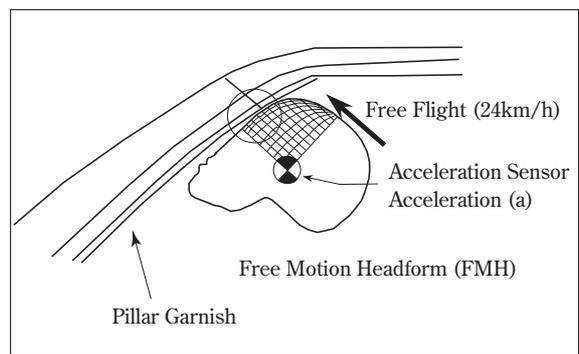


Fig. 8 Method of Impact Test (FMVSS201U)

(2) 構造最適化

緩衝性能が要求されるプラスチック製部品においては、衝突時の衝撃エネルギー吸収機能を実現する方法の一つとして、部品の裏側に設けられたリブ構造体が用いられることが多い。部品全体の剛性や変形挙動 (変形量と反発力の関係) をリブ部の板厚や位置あるいはリブ間隔を調整することで、必要な衝撃吸収機能を得られるように設計することができる^{16), 18)}。

このようなリブ構造を設計変数としてリブ間隔を選択する場合、リブ間隔の修正によりリブ数が増減して、形状モデルの位相が変化してしまう。一方、一般に用いられている位相最適化技術を適用しようとしても、目的関数が静的な構造解析における応力や歪エネルギーに限られており、HIC (d) のような動的な解析から得られる複雑な値を選択することができない、位相最適化技術は部品の任意部位を削除していくため規則正しい形状を最適化することができない等の面から、本事例のようなリブ構造体へ適用することは実質的に不可能である¹⁹⁾。

このような自動車内装部品のリブ構造に対しては、モデル作成ソフトのマクロ機能を利用することにより、自動最適設計が可能となる。具体的には、リブ 1 間隔分のリブ構造を作成するマクロプログラムを準備し、

このプログラムを、全体のリブ構造を構成するのに必要な数だけ繰り返すことにより、任意のリブ数からなるリブ構造の自動作成を実施した。

本事例の最適設計で実施したモデル自動作成の手順（基準モデル読込、基準位置での縦リブ作成、1ピッチ分ずれた位置での縦リブ作成、基準位置での横リブ作成、1ピッチ分ずれた位置での横リブ作成、リブ部の接合条件・接触条件の設定、内装部品とFMHの位置設定、解析用入力ファイルの保存： 、 は必要に応じて繰り返す）の流れをFig. 9に示す^{20), 21)}。

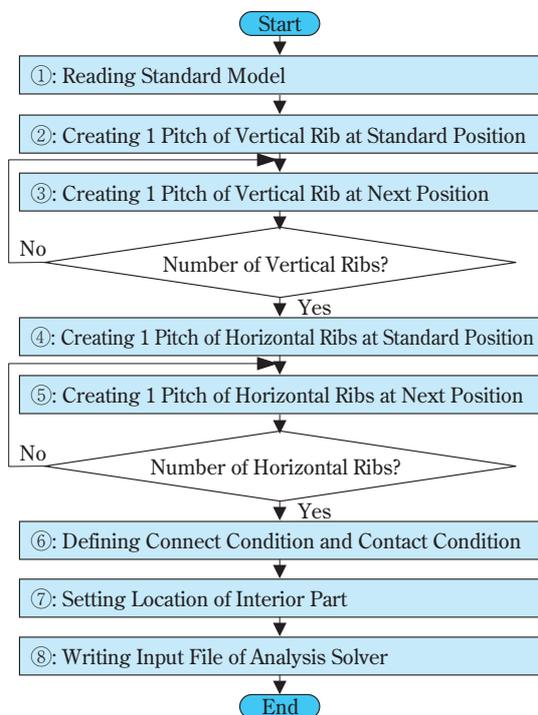


Fig. 9 Flowchart of Creating Analysis Model

解析に用いた3種類の耐衝撃ポリプロピレンの材料特性をTable. 3に示す。材料の歪み速度依存性は、降伏応力において、(8)式に示すCowper-Symonds式を適用することで考慮した^{19), 22)}。

Table 3 Material Properties

Materials		A	B	C
Young's Modulus	[MPa]	863	2420	863
Specific Gravity	[-]	0.90	1.08	0.90
Poison Ratio	[-]	0.40	0.40	0.40
Static Yield Stress	[MPa]	19.6	23.9	19.6
Failure Plastic Strain	[%]	40.0	8.0	8.0
Cowper-Symonds Parameter				
C	[1/s]	2.80	170	2.80
P	[-]	9.87	4.56	9.87

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \times \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (8)$$

σ_y : 降伏応力、 σ_{y0} : 静的降伏応力、
 $\dot{\epsilon}$: 歪み速度、 C, P : パラメータ

設計対象として、リブ部の縦リブ (Fig. 10の縦方向リブ) の位置と横リブ (Fig. 10の横方向リブ) の位置とリブ間隔を選択した。従って、縦リブを規定する設計変数を、縦リブを含む平面がxy面となす直線が設計範囲内にある線分の始点と終点のy座標 (T1、T2) と縦リブを含む平面がyz面でy軸となす角度 (Th) の3変数とし、横リブを規定する設計変数を、横リブの基準位置と設計範囲のyz面に平行な部分とのx方向の距離 (R1) と横リブの間隔 (R2) の2変数として合計5つの設計変数とした。(Fig. 11)

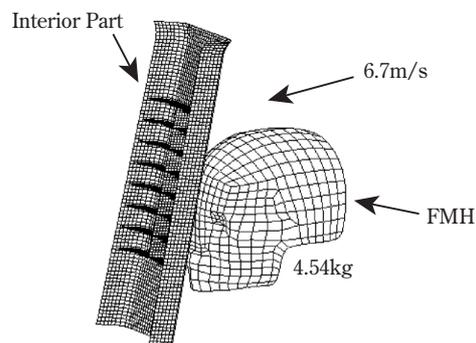


Fig. 10 Simulation Model of FMH and Interior Part

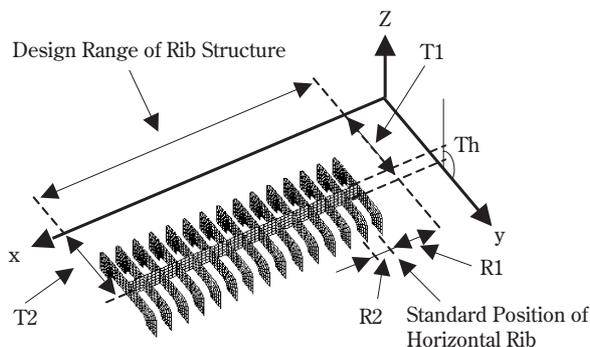


Fig. 11 Design Variables of Rib Structure

また、目的関数は解析モデルのFMH重心の加速度と(1)式、(2)式を用いて算出するHIC (d)としている。最適化手法はResponse Surface ModelとModified Method of Feasible Directionsの組み合わせを用いた。

本事例の結果としては、弾性率と降伏応力が大きく、破断塑性歪みが小さい材料Bを用いてリブ形状を最適化した内装部品が最も優れた衝撃吸収性能を示す

ことがわかる。材料 B の初期形状の内装部品では HIC (d) が 1000 を超えていたが、リップ形状の最適化によって、横リップピッチが狭くなり、縦リップ位置を FMH 衝突位置に近づいた結果、HIC (d) が 600 未満まで低下し、性能が向上している。(Fig. 12)

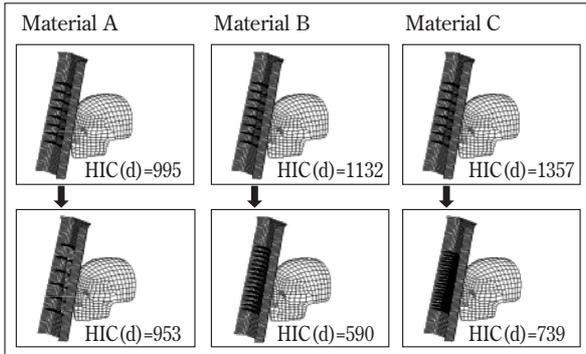


Fig. 12 Results of Optimization

2. 射出成形型設計への最適化技術の適用

(1) ウェルド位置の制御

現在、自動車・家電などのプラスチック部品の多くが射出成形法により成形されているが、その中の大型部品は型締め力低減の観点から多点ゲート配置の金型設計となることが多い。また、製品機能やデザイン性の面からプラスチック部品にはしばしば開口部がもうけられる。このような多点のゲートから注入された樹脂の流れや、設けられた開口部で分割された樹脂の流れが、合流する部分にはウェルドラインと呼ばれる線上のむらが発生する。(Fig. 13)

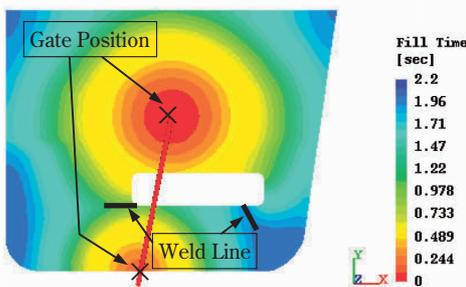


Fig. 13 Flow Pattern and Weld Line

このようなウェルドラインは、外観上の不良現象として扱われるだけでなく、その合流部分での機械的強度が劣ることから、できるだけ排除するか、あるいは部品全体として、できるだけ影響の少ない部分に発生させるようにゲート・ランナー部を設計することとなる。

ウェルドラインを排除あるいは目標の位置に発生させるように、CAE を用いてゲート・ランナー部を設

計する場合、通常は目視にてその発生状況を判断するが、CAO 技術を用いて自動設計するには、ウェルドラインの発生状況を数値化し、目的関数として設定することが必要となる。

本事例では、ウェルドライン発生領域を分割し、各領域に重み付けすることで数値化を可能とした。

検討に用いたプラスチック部品は中央部に開口部を持つ、幅 1000mm、長さ 800mm の平板であって、2.0mm ~ 3.5mm 厚み分布を有している。またゲートはセンターおよびサイドの 2 点ゲートとなっている。(Fig. 14)

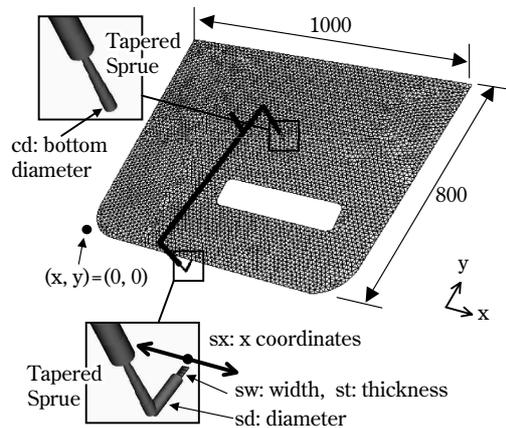


Fig. 14 Simulation Model of Plastic Part

プラスチック部品の成形に使用する材料は MFR が 30 (g/10 分, 230) のポリプロピレン樹脂で、成形条件は、樹脂温度を 210 、金型温度を 40 、射出時間を 2 秒に設定した。

本事例においては、センターゲートの位置を固定し、サイドゲートの位置と各ゲートの寸法を設計対象とした。具体的には、設計変数を、サイドゲート部のゲート位置 x 座標 sx、ランド幅 sw、ランド厚み st、ランナー径 sd、センターゲート部のゲート径 cd の 5 変数とした。(Fig. 14)

本事例では、ウェルドラインが所定の位置におさまりつつ、型締め力を低くできる金型の設計を目的として、目的関数を射出成形解析より得られる型締め力とウェルド発生位置より算出したウェルド評価値との線形和とした。このウェルド評価値は、Fig. 15 に示

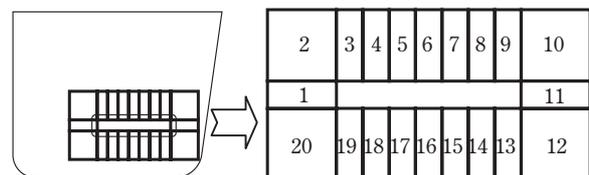
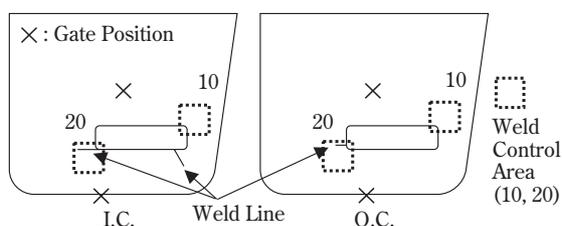


Fig. 15 Definition of Areas for Weld Evaluation

す1～20の領域毎に設定した重み付け係数と、各領域で検出されたウェルド発生数との積の総和として定義した。

重み付け係数は、ウェルドを発生させたい領域(10, 20)の係数を1、その領域から最も離れた領域(5, 15)の係数を2500とし、各領域に1～2500の係数をステップ状に与えている。^{23), 24)}

本事例では、センターゲート部の寸法をほとんど変えずに、サイドゲートの位置を右側に70mm程度移動し、サイドゲート部の各寸法を増加させることにより、領域10,20以外でのウェルド発生を無くし、型締力を初期の6割以下まで低減することができる結果が得られた。(Fig. 16、Table. 4)



(I.C.: Initial Condition, O.C.: Optimized Condition)

Fig. 16 Comparison of the Result Before and After Optimization

Table 4 Comparison of the Result Before and After Optimization

		I.C.	O.C.
sx	[mm]	400	471
sw	[mm]	5.0	7.5
st	[mm]	1.0	1.7
sd	[mm]	8.0	11.0
cd	[mm]	8.0	8.1
clamp	[ton]	1532	857
weld	[-]	10008	4
obj.	[-]	11540	861

clamp : Value of Clamping Force

weld : Value of Weld Evaluation

obj. : Value of Objective Function

I.C. : Initial Condition

O.C. : Optimized Condition

なお、最適化は、初期条件で左側に発生したウェルドラインを領域20内に維持させたまま右側のウェルドラインを領域10内へ移動させる方向で設計変数の変更を進めていたが、その移動する過程でウェルドラインが消失する結果となった。

(2) 反り・変形の低減

射出成形によって成形されたプラスチック部品は成

形条件によって、取り出し後に変形・反りが発生し金型寸法から大きく逸脱することがある。その対策として、たとえば冷却時間を延長すればよいことが知られているが、一方で成形サイクルタイムが長くなり生産性が低くなってしまふ。ここでは、このような相反する要求に対する成形条件の最適化にCAO技術を適用した事例を紹介する。

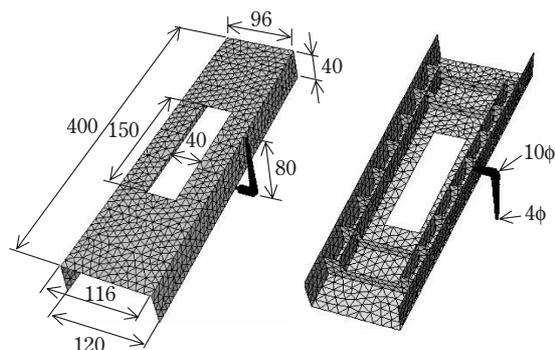


Fig. 17 Simulation Model of Plastic Part

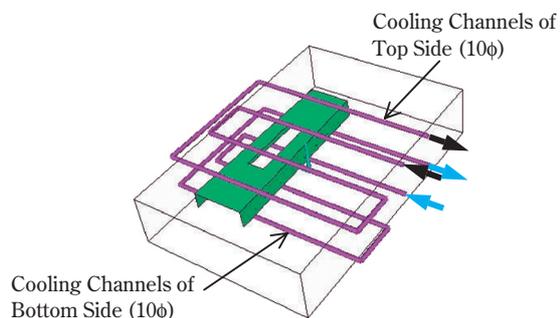
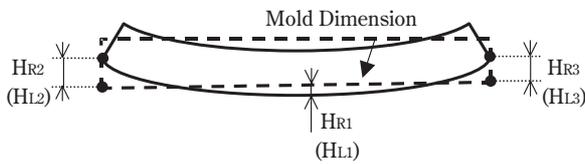


Fig. 18 Cooling System of Injection Mold

本事例におけるプラスチック部品の形状モデルをFig. 17に、金型冷却配管をFig. 18に示す。

成形材料としてはMFRが30 (g/10分, 230)のポリプロピレン樹脂を用いた。成形条件の内、樹脂温度 M_T 、固定側/可動側の金型冷却水温度 W_{T1} / W_{T2} 、保圧時間 P_T を設計変数とした。その他の成形条件は、射出時間を3秒に、保圧を最大射出圧の80%に、取り出し時の成形品の表面温度を75 に設定した。また、冷却時間は成形品の表面温度が75 に到達し、かつ樹脂の固化率が100%となるように決定した。

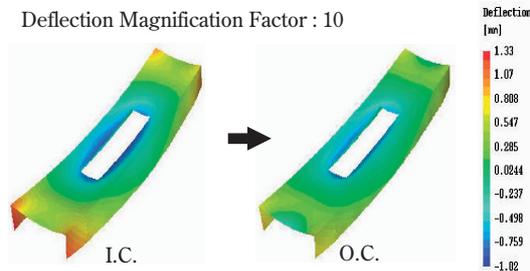
目的関数は、ゲート側の側面と、反ゲート側の側面の型抜き方向の反り量の和 D (Fig. 19) と、サイクルタイム T との線形和 $3(D/D_0) + (T/T_0)$ とした (D_0, T_0 は初期値)。なお、本事例では、反り量の低減を優先させるため、反り量和には成形サイクルに対し3倍の重み付けを行っている。



Total Warpage : $D = HR + HL$
 Gate Side : $HR = HR1 + \max(HR2, HR3)$
 Opposite Side of Gate: $HL = HL1 + \max(HL2, HL3)$

Fig. 19 Definition of Total Warpage

初期条件に対し、樹脂温度と固定側の冷却水温度を下げ、可動側の冷却水温度を上げて、保圧時間を延長することで、反り量は約 40 % 低減し、かつ成形サイクルが約 15 % 短縮する結果を得た。(Fig. 20、Table. 5)



(I.C. : Initial Condition, O.C. : Optimized Condition)

Fig. 20 Comparison of the Result Before and After Optimization

Table 5 Comparison of the Result Before and After Optimization

		I.C.	O.C.
M_T	[°C]	220	210
W_{T1}	[°C]	40	21
W_{T2}	[°C]	40	49
P_r	[sec]	6.0	7.8
D	[mm]	2.9	1.8
T	[sec]	48.1	40.7
obj.	[-]	4.0	2.7

obj. : Value of Objective Function

I.C. : Initial Condition

O.C. : Optimized Condition

3. 射出成形品の構造と成形の複合領域最適化技術

これまでに、紹介した事例では、設計対象の性能は単一種類の解析（衝撃解析又は射出成形解析）にて評価してきたが、実際の製品においては、複数種類の解析にてその製品の総合的な性能を評価した上で、その構造を決定する必要がある。ここでは、自動車内装部品において、緩衝性能と製品剛性と成形性との3つの性能を同時に最適設計した事例を紹介する。

緩衝性能は、衝撃解析から得られる HIC (d) を用いて評価し、製品剛性は、取り付け部の中間位置へ 100N の荷重を負荷した際の変位を構造解析から得た値を用いて評価し、成形性は、射出成形解析から得た型締め力を用いて評価した。なお、解析精度の面から、衝撃解析と構造解析の形状モデルは四角形要素を用い、射出成形解析の形状モデルは三角形要素を用いた。(Fig. 21)

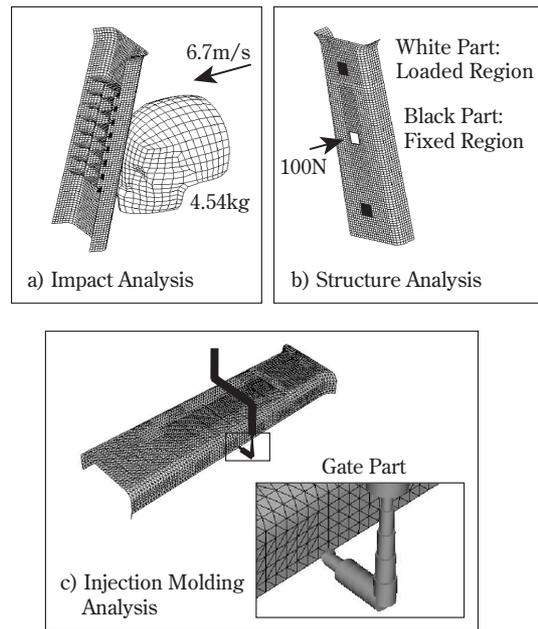


Fig. 21 Simulation Models

本事例での設計変数としては、横リブの基準位置 (R1) とリブ間隔 (R2) とし、目的関数は HIC (d) 値 H と荷重負荷時の変形量 D と射出成形時の型締め力 C の線形和とした。

なお、H は基準値の 1000 で、D はピラーの厚みの 1/10 の 3mm で、C は想定成形機の最大型締め力 50ton にて無次元化した。

Table 6 Comparison of the Result Before and After Optimization

		I.C.	O.C.
R1	[mm]	10.0	14.2
R2	[mm]	50.0	29.7
H	[-]	956	737
D	[mm]	1.59	1.25
C	[ton]	28.4	28.2
obj.	[-]	2.06	1.72

obj. : Value of Objective Function

I.C. : Initial Condition

O.C. : Optimized Condition

最適化によりリブ間隔を狭くすることでHIC (d) が下がり、剛性がやや向上する結果が得られた。(Table. 6)

4. 住化統合プラスチック製品最適設計システム (SIDOS) への取組み

これまでの述べてきたCAO 技術の適用事例では、設計変数、目的関数、拘束条件、最適化手法を設定するだけでなく、最適化支援ソフトとCAE ソフトとのデータの受け渡し、設計変数の解析モデルへの反映、解析結果を数値化して目的関数とする仕組み等のインターフェース (I/F) 部分の設定が必要となる。

そこで我々は、実際の業務に本技術を適用する際にこのような設定を意識せず、簡便に最適化計算が実行できるような住化統合プラスチック製品最適設計システム (SIDOS) を開発している。ここでは、その中の単領域最適化機能を担う、最適化支援ソフト iSIGHT と衝撃解析ソフト LS-DYNA とを組み合わせたシステムについて紹介する。

本システムはPC 上のExcel をベースとしており、Fig. 22 に示すとおり、最適化上の設定項目については iSIGHT の入力ファイルを自動設定し、I/F 部分については必要な I/F を選択するかあるいは標準の I/F を修正することで、簡易に最適化計算ができること

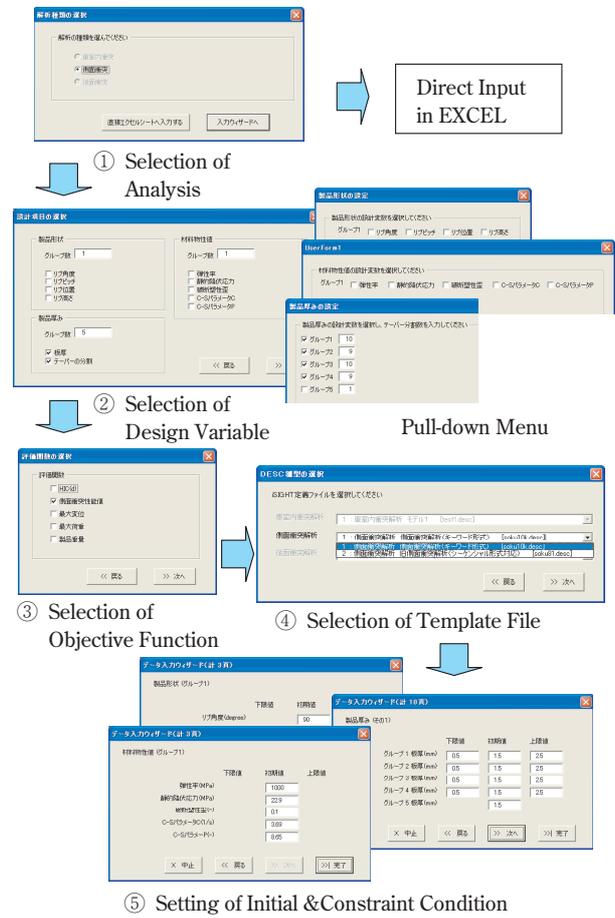


Fig. 24 Flow of Setting for Optimization

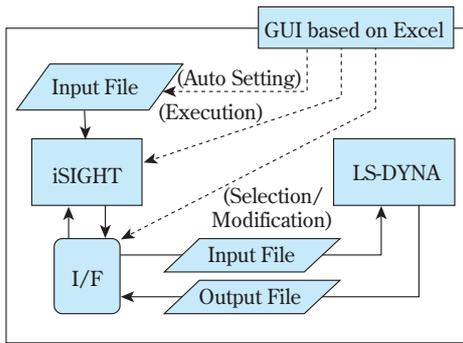


Fig. 22 Schematic Diagram of System

を目的としている。また最適化上の設定項目や I/F の設定終了後には、このシステムから直接最適化計算を実行させることが可能となっている。

Excel からの入力画面を Fig. 23 に示す。セルに表示された製品形状、製品厚み、材料物性の中から設計変数を / x で選択し、それぞれの拘束条件 (下限値 / 上限値) と初期条件を設定することができる。

また、右上部のボタンから入力ウィザードを立ち上げると、Fig. 24 に示すような流れで、各種設定を実施することが可能となる。

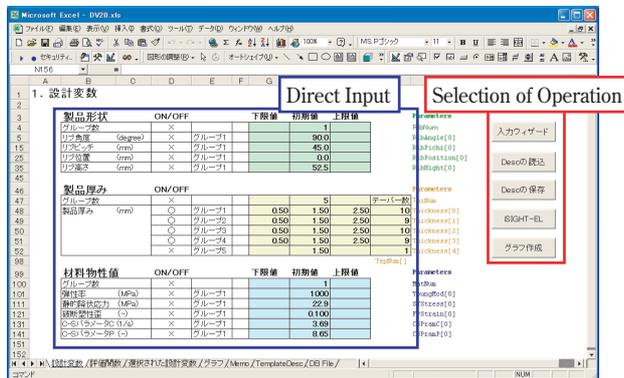


Fig. 23 Input Form of Design Variables

おわりに

現在、プラスチックCAE は、プラスチック部品や製品の開発に必須の技術として使用されている。本技術は、CAO 技術と統合することにより、さらに強力な製品設計技術となり、第2世代の技術から第3世代の技術に進化した。CAO 技術を用いることにより、第2世代の技術では時間を要した製品の仕様を満たす材料物性最適化 (逆設計) のスピードアップが可能となり、材料開発に対する有力な支援技術となった。また本稿では省略したが、製品構造と材料物性の同時最適化も可能であり、製品の品質、性能をより一

層向上させることができるようになった^{25), 26)}。第3世代の技術は、来るべき第4世代の技術（現在開発途上にある高分子材料設計CAE技術との統合により、材料物性を介して分子構造から製品物性を予測し、逆に製品物性から最適な分子構造を予測する技術）に不可欠な技術であると考えられる。

筆者らは、本稿で述べた第3世代の技術の活用、横展開ならびに、本技術の更なる深化・拡充を推進すると共に、第4世代の技術開発を進めていく予定である。

引用文献

- 1) P. Y. Papalamos and D. J. Wide: "Principles of Optimal Design", Cambridge University Press, 40 - 42 (2000)
- 2) 日経メカニカル: 1994.6.27, P36
- 3) CAO フロンティア '99 資料: Engineous Japan Inc. (1999.11.30)
- 4) 相沢, 前川編: "CAE 新製品開発・設計支援コンピュータ・ツール", 共立出版, 2 (1988)
- 5) 榭井, 東川, 左海, 菊地, 白井: 住友化学, 1984-, 70 - 86 (1984)
- 6) 長田, 菊地, 中村, 東川, 原: 住友化学, 1992-, 68 - 86 (1992)
- 7) 東川, 東, 筒淵, 榭木, 下條: 住友化学, 1995-, 75 - 86 (1995)
- 8) 永野, 山内, 平川: 住友化学, 2001-, 13 - 19 (2001)
- 9) 山川編: "最適設計ハンドブック", 朝倉書店, 297 (2003)
- 10) 山川編: "最適設計ハンドブック", 朝倉書店, 80 (2003)
- 11) 茨木, 福島: "最適化の手法", 共立出版, 1 (1998)
- 12) 山川編: "最適設計ハンドブック", 朝倉書店, 6 - 7 (2003)
- 13) iSIGHT Version 6.0 Reference Guide, Engineous Software, Inc., June 2001
- 14) CAO キャンパス iSIGHT 中級コーステキスト: Engineous Japan Inc. (2002.3)
- 15) Helen A. Rychlewski, Jessica A. Cronkhite and Michael J. Smith: SAE Paper No. 1999-01-0434
- 16) Gajanan V. Gandhe and Louis Lorenzo, Yoshinori Noritake: SAE paper No.970161 (1997)
- 17) 近藤 高廣, 安木 剛: 社団法人自動車技術会 学術講演会前刷集 No.31-99 pp.13 - 16. (1999)
- 18) James M. Lorenzo: SAE Paper No. 1999-01-0433
- 19) 東川, 広田, 矢部, 筒淵: 成形加工シンポジア'00, 11 (2000)
- 20) 広田, 東川: 成形加工 '02, 151 (2002)
- 21) Yoshiaki Togawa and Tomoo Hirota: The 8th Japan International SAMPE Symposium, 613 - 616 (2003)
- 22) 東川, 広田, 長田, 矢部: 成形加工 '01, 35 (2001)
- 23) 東川, 広田, 永岡: 成形加工 '03, 331 (2003)
- 24) Shinichi Nagaoka, Tomoo Hirota and Yoshiaki Togawa: SPE ANTEC 2004, 3438-3442 (2004)
- 25) 広田, 東川: 成形加工シンポジア'02, 263 (2002)
- 26) Tomoo Hirota and Yoshiaki Togawa: SPE ANTEC 2002, 2578-2581 (2002)

PROFILE



東川 芳晃
Yoshiaki TOGAWA

住友化学株式会社
石油化学品研究所
リサーチフェロー



永岡 真一
Shinichi NAGAOKA

住友化学株式会社
石油化学品研究所
研究員



広田 知生
Tomoo HIROTA

住友化学株式会社
石油化学品研究所
主任研究員