

論文・解説

32

樹脂部品の熱収縮現象解明と CAE 予測技術開発 Investigation on Heat Shrink Phenomena of Plastic Parts and Development of CAE Methodology

井上 実*1

Minoru Inoue

藤 和久*4

Kazuhisa To

平本 健治*2

Kenji Hiramoto

西村 賢治*5

Kenji Nishimura

高田 幸次*3

Kouji Takata

要約

樹脂は金属と比べて温度変化に伴う変形現象が顕著に見られるため、樹脂部品設計において熱変形への配慮が不可欠である。この際、樹脂では金属では見られない「熱収縮」という現象を考慮しなければならないが、従来からの線膨張係数による熱応力解析では「熱収縮」現象は再現できなかった。

そこでまず樹脂の材料試験を実施し「熱収縮」現象や発生しやすい条件等を明らかにした。そして線膨張係数について異方性を有し昇温時と室温戻し時では別経路の関数表現を採用するとともに、加えて部品製造時の残留応力を考慮することによって、簡易かつ開発の早期段階でも適用可能な「熱収縮」現象を予測できる CAE 技術を開発した。

Summary

As plastics, compared with metals, show remarkable sensitivity to deformation with temperature changes, much consideration needs to be given to thermal deformation in designing plastic parts. In so doing, "heat shrinkage" phenomena, which are not observed in metals, need to be taken into consideration. However, the conventional FEM methodology using the coefficient of linear expansion, which is applicable to metal parts, cannot reproduce "heat shrinkage" phenomena.

In response, material tests by specimen were conducted to investigate and clarify the phenomena regarding the "heat shrinkage". Then a CAE methodology was developed so that the "heat shrinkage" phenomena could be predicted by dealing with the anisotropic different coefficients of linear expansion by function as well as the residual stress, which can be used in early design stage.

1. はじめに

自動車において樹脂は金属と並ぶ中心的構成材料である。射出成形により自由な形状を短時間・安価に製造でき、比重が1程度と低い点などから、内外装領域においてポリプロピレンを中心とする樹脂が広く活用されている。Fig. 1 には代表的な乗用車における内外装部品の構成重量比率を示す。樹脂類は約半分の46%を占めている。近年の環境・省資源の観点から、金属から樹脂への置換や樹脂部品の最適化による軽量化は、今後も一層重要性を増している。

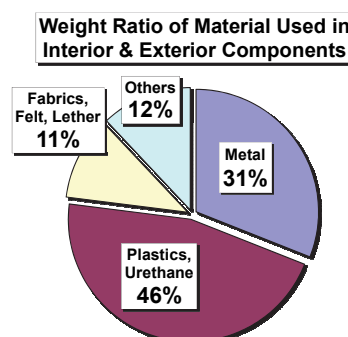


Fig. 1 Weight Ratio of Materials Used in Interior & Exterior Components

*1, 3, 5 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*2, 4 技術研究所
Technical Research Center

内外装領域の部品開発において、金属と比べて樹脂は熱に対する変形・強度問題に検討・配慮を必要とする。鋼板では常用温度域で材料物性値はほとんど変化せず熱伸びも小さいが（線膨張係数は多くの場合樹脂の1/3から1/10程度）、樹脂では温度に対する材料物性変化が顕著で熱伸びが大きい。例えば代表的物性値のヤング率は、100℃では室温の1/5程度にまで低下するものも見られる。

また線膨張係数に10倍程度の差があるということは、温度によって金属部品と樹脂部品との間で相対的な位置変化が生じ、変形・異音・干渉・見栄え等の原因となる。このため、開発の早い段階から変形状態を正確に把握して固定方法や隙・干渉に配慮した設計を行う必要がある。

加えて樹脂では加熱・冷却サイクルを繰り返すと初期状態から長さが小さくなる「熱収縮」現象が観察されるため、熱収縮量も考慮する必要がある。しかし一般的な線膨張係数を定数として扱う熱応力解析では、「熱収縮」現象をとらえられないという問題があった⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

そこでリフトゲートトリムに使われているポリプロピレン樹脂について試験片による特性試験を行い、まず「熱収縮」現象を明らかにした。そして分析および計測結果に基づき線膨張係数を単なる定数から関数表現とし「熱収縮」現象をとらえられるようにした。更に従来から指摘されていた樹脂部品製造時の残留応力⁽⁵⁾を考慮し、リフトゲートトリムの平均残留応力を推定することで熱収縮量を精度良く机上予測できるようにした。以下にその概要を述べる。

2. 材料試験による現象解明

2.1 熱変形に影響を及ぼす材料特性

樹脂部品の熱変形は、①熱膨張差により生じる熱応力による塑性変形、②高温保持に起因するクリープ変形、③樹脂の結晶再配列および分子配向緩和による「熱収縮」の3因子により生じると考えられる。そこで、弾塑性特性に加えクリープ特性および熱収縮特性を考慮することが必要である。

2.2 材料特性の測定

(1) クリープ特性

JIS K7115 に準拠し25℃、80℃、100℃で試験を行った。各温度につき3水準の荷重を負荷し、測定を行った。80℃の結果をFig.2に示す。

(2) 熱収縮特性

異方性を考慮するため、樹脂の流れ（MD）方向／流れと直角（TD）方向それぞれの試験片（φ5×10）を作成し、熱機械分析装置（Thermomechanical Ana-

lyzer）を用いて、試験片を加熱・冷却した際の変形量を測定した。測定は室温→120℃→60℃→室温の加熱・冷却を3サイクル繰り返した。その1例としてMD方向の測定結果をFig.3に示す。1サイクル目の昇温時のみ異なる変形を示し、それ以降は同じ変形を繰り返している。更に、1サイクル目の最高温度を変えて収縮量を測定した結果をFig.4に示す。これらのことから、収縮現象は初回昇温時の温度に大きく依存すると考えられる。

Fig.5にMD方向およびTD方向の収縮量を示す（N=4の平均）。本供試材ではMD方向の収縮量がTD方向の収縮量よりも大きいことが分かった。

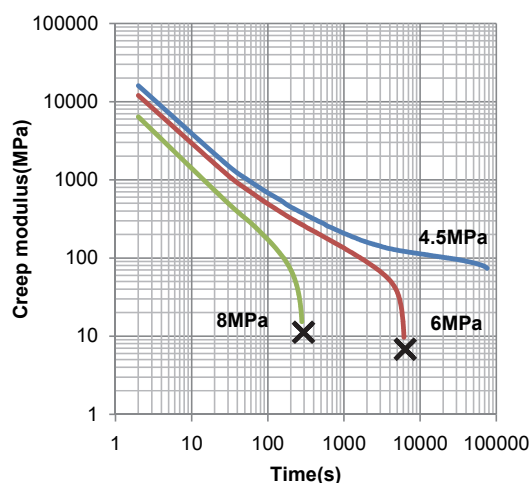


Fig. 2 Result of Creep Tests at 80°C

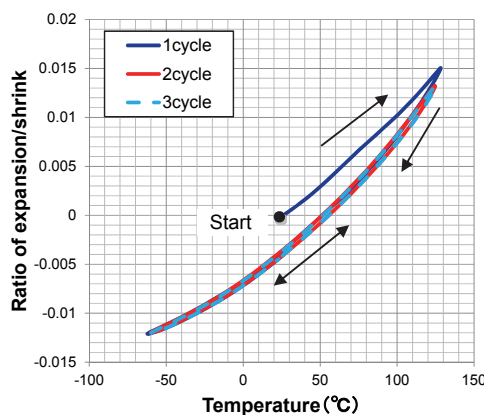


Fig. 3 Thermal Expansion & Shrink in Heat Cycle

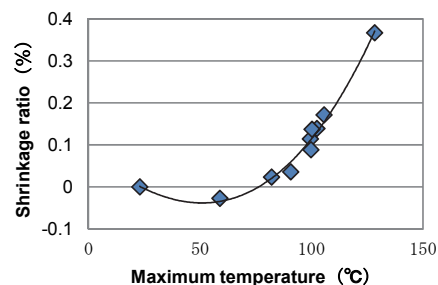


Fig. 4 Relationship between Maximum Temperature and Shrinkage

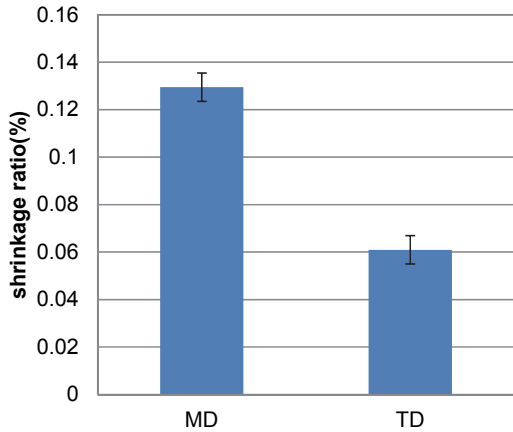


Fig. 5 Comparison of Heat Shrinkage in Direction

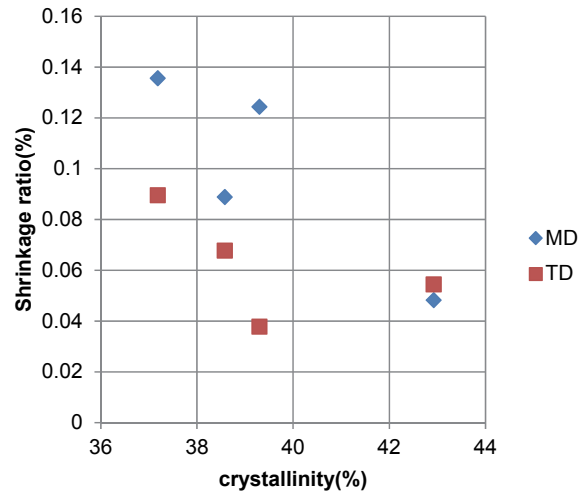


Fig. 8 Relationship between Crystallinity and Shrinkage

2.3 熱収縮現象

一般的に樹脂の熱収縮は以下の 2 つの要因で生じると考えられている。

- ① 結晶化の進展 (Fig. 6)
 - ② MD 方向に引き伸ばされた分子鎖の緩和 (Fig. 7)
- そこで、①について結晶化度と収縮量の関係を調査するため、示差走査熱量測定 (Differential scanning calorimetry) を用いて結晶化度の測定を行った。結晶化度と収縮量の関係を Fig. 8 に示す。結晶化度が低いほど収縮量は大きくなり、結晶化が収縮に影響を及ぼしていることが分かる。

また、②については、今後検証を行う予定である。

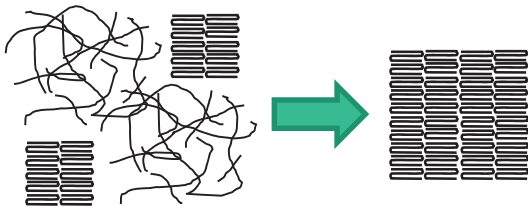


Fig. 6 Mechanism of Heat Shrinkage I: Growth of Crystallization

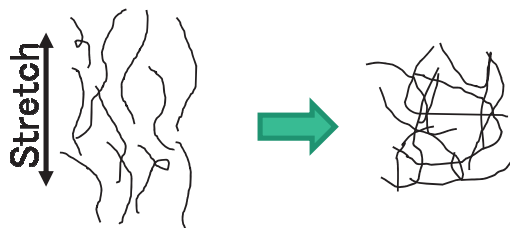


Fig. 7 Mechanism of Heat Shrinkage II: Relaxation of Molecular Chain Orientation

3. 熱収縮 CAE の開発

2.2 の測定結果を非線形構造解析ソフト ABAQUS に組み込み、簡単な形状で検証を行った。

クリープ特性は式(1)のひずみ硬化則を用い、温度ごとに材料定数 A,n,m を決定した。

$$\dot{\epsilon}^{cr} = (A\sigma^n [(m+1)\epsilon^{cr}]^m)^{\frac{1}{m+1}} \quad \dots(1)$$

$\dot{\epsilon}^{cr}$: クリープひずみ速度
 ϵ^{cr} : クリープひずみ
 σ : 相当応力
 A, n, m : 材料定数

熱収縮特性は既存ソルバでは計算できないため、線膨張係数を温度とサイクルの関数としてユーザサブルーチンで定義した。

検証は Fig. 9 に示す簡単な形状の試験片で加熱前後の変形量を測定し、解析結果と比較した。測定部位は矢印方向の変位である。

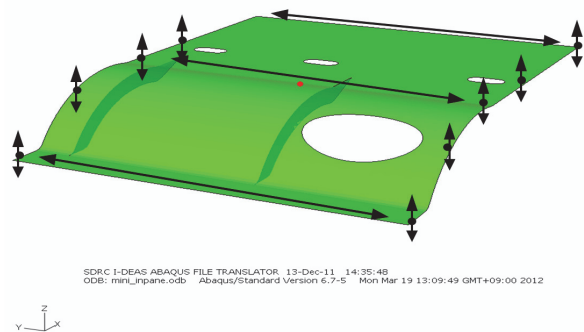


Fig.9 Validation Model

その結果を Fig. 10 に示す。図中の破線は実測値：計算値=1:1 となる線であり、これに近づくほど精度が良いことを表している。熱収縮を考慮することで、精度を大幅に改善できることを確認できた。また、クリープ変形は熱収縮にはあまり影響しないことが分かった。

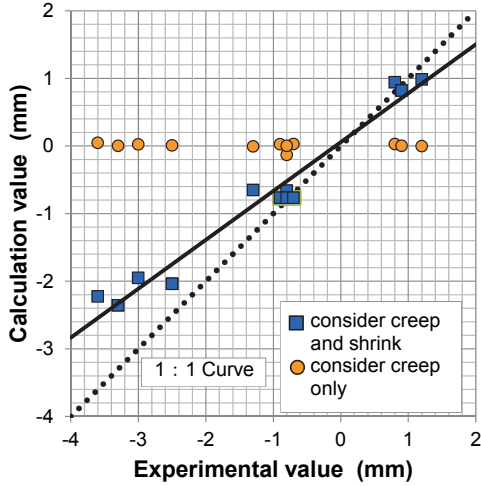


Fig.10 Comparison of Heat Shrinkage between Calculation and Experiment

4. 実部品での精度検証

4.1 実部品での精度評価

続いて前章で開発した手法を実部品に適用し精度検証を行った。対象部品としては熱収縮が時に観察される大型内装部品であるリフトゲートトリムロアとした。A 車から D 車までの 4 車種 11 か所について、Fig. 11 に示すような、トリム上の計測点間左右方向長さを、初期の室温時 (L0) と室温から高温にした後室温に戻した時点 (L1) で比較し、その差 (L0-L1) を熱収縮量として比較した。Table 1 には A 車から D 車の各テスト条件および計測された熱収縮量 (L0-L1) を示す。

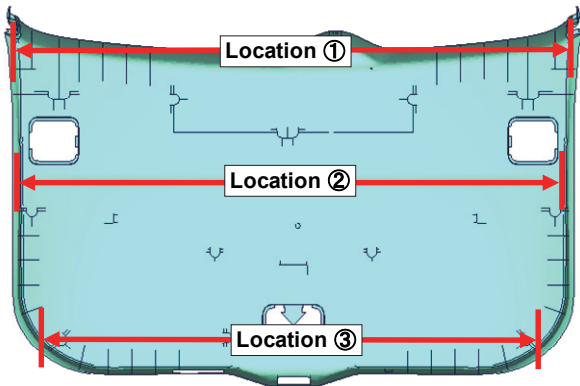


Fig. 11 Heat Shrink Evaluation of Vehicle-A

解析評価において温度はトリム全体で一様分布と仮定し、3 章結果に基づき、線膨張係数は異方性まで考慮しクリープは考慮していない。線膨張係数の異方性

方向定義に関しては、厳密には金型設計に基づく樹脂流動解析結果をそのまま構造解析モデルに導入することが望ましいが、今回は射出成形の際、溶けた樹脂は注入ゲート位置から放射状に拡散する方向に流れるものと考えて、ゲート位置に円筒座標系を定義し、その半径方向を MD 方向に、円周方向を TD 方向に割り当てた。Fig. 12 から Fig. 14 には C 車における本解析で得られた温度ごとの変形状態を示す。

Table 1 Test Condition and Heat Shrinkage

Vehicle	Location of Evaluation	Evaluation by Actual Tests	
		(mm)	Test Conditions
A	①	4.7	RT→90°C→RT
	②	3.8	Unit Test
	③	5.5	
B	①	1.5	RT→70°C→RT, Unit Test
C	①	3.7	RT→100°C→RT
	②	3.9	
	③	3.8	Unit Test
	④	2.9	
D	①	2.5	RT→70°C→RT
	②	1.5	
	③	2.5	Vehicle Test

RT:Room Temperature

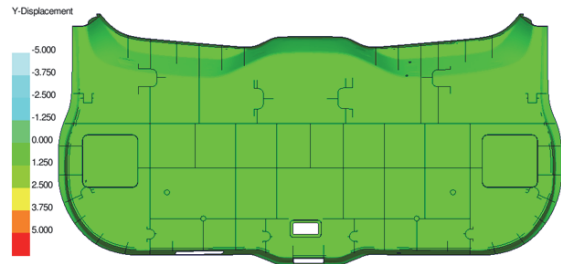


Fig. 12 Initial State at Room Temperature

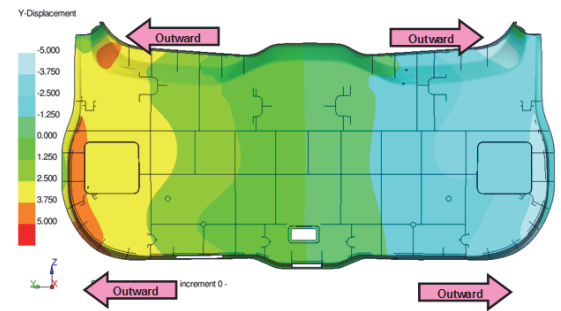


Fig. 13 State at the Maximum Temperature

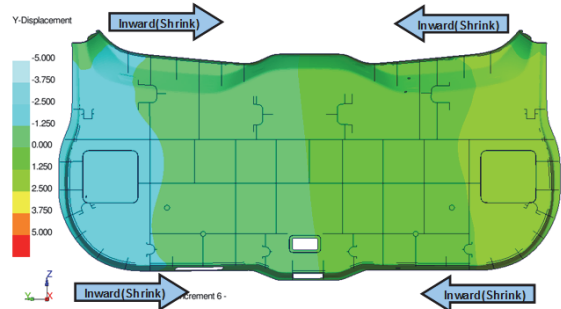


Fig. 14 Final State at Room Temperature

Fig. 12 は計算開始時の室温状態であり、全域緑色(変形なし)を示している。Fig. 13 は、Fig. 12 の室温状態から温度を上げ、Table 1 に示す車種ごとの最高温度に達した時点の状態を示す。最後の Fig. 14 は Fig. 13 の車種ごと最高温度から室温に戻した時の状態を示す。Fig. 14 を見ると、高温から室温に戻した状態では、初期状態に比べて左右部分が内側に移動する状態を示しており、熱収縮が実部品でも解析上とらえられていることを示している。C 車の場合で左右それぞれ 1.25mm 以上の移動が観察されている。

Table 2 には、各測定位置における熱収縮量の解析値および実車で計測された収縮量を 100%とした場合の比率を示している。解析で確かに熱収縮がとらえられているものの、その熱収縮量は 9%~95%とばらついており 11 点平均でも 55%となっている。3 章の簡易形状での結果も、計算結果は実測値に対して 75%と少なめの予測値となっており絶対値予測には不十分である。

Table 2 Heat Shrinkage Predicted by CAE

Vehicle	Location of Evaluation	Actual Tests	CAE	
			(mm)	Prediction(%)
A	①	4.7	1.2	25%
	②	3.8	2.0	52%
	③	5.5	3.2	59%
B	①	1.5	1.0	68%
C	①	3.7	0.3	9%
	②	3.9	2.3	58%
	③	3.8	3.2	83%
	④	2.9	2.7	95%
D	①	2.5	1.1	46%
	②	1.5	1.1	76%
	③	2.5	0.8	33%
Mean Value				55%

4.2 製品製造時の残留応力の考慮

前節の結果を受けて、線膨張係数を異方性とし温度とサイクルの関数として考慮することに加え、従来その影響が十分検討されていなかった射出成形による製造時に部品内部に残る残留応力^⑤の考慮と、その値の適値同定を次に行った。

製造時の部品内部に残る残留応力値も型法案・製造条件等、また部位によって異なるのが妥当であり、従ってこの残留応力を厳密に把握するには、流動方向と同様に樹脂流動解析が必要となるが、残留応力についても今回簡易な検討が可能となるように、射出成形されたリフトゲートトリム内には一様に面内引張応力が生じる(せん断応力は 0)と仮定した。そして残留応力値については、塑性変形が発生するような大きな値ではなく、線形変形範囲の値であると考えられることから、1 から 5MPa まで変化させ A 車から D 車の 4 車種に関して最も再現性の高い残留応力値を求める手順を取った。Table 3 には、一様残留応力値を初期状態としてモデル全体に付加して熱収縮解析を行っ

て得られた熱収縮量の実測値に対する比率を示す。

Table 3 Effect of Added Residual Stress

Vehicle	Location of Evaluation	CAE					
		ORTHO TROPIC					
		Residual Stress 0MPa	Residual Stress 1MPa	Residual Stress 2MPa	Residual Stress 3MPa	Residual Stress 4MPa	Residual Stress 5MPa
A	①	25%	34%	44%	54%	66%	77%
	②	52%	67%	81%	96%	110%	125%
	③	59%	68%	78%	87%	97%	107%
B	①	68%	94%	119%	144%	169%	194%
	②	9%	18%	27%	35%	43%	52%
C	①	58%	72%	86%	100%	114%	128%
	②	83%	96%	109%	122%	135%	148%
	③	95%	109%	122%	136%	150%	164%
	④	46%	70%	95%	120%	145%	170%
D	①	76%	99%	123%	146%	168%	187%
	②	33%	52%	71%	90%	107%	123%
	③	55%	71%	87%	103%	119%	134%
Mean Value							

Table 3 より、リフトゲートトリムについては 3MPa の残留応力を付加すると A 車から D 車の 4 車種 11 か所平均として最も実測に近い予測値(実測値の 103%)が得られた。詳細に見ると車種や評価位置により最適な残留応力値が 1MPa から 4MPa の範囲でばらつきを持っていることが Table 3 から確認できる。これらは解析条件として付加した温度条件(一様分布)や局所的な線膨張係数の方向定義の誤差、また車種による形状・大きさの差から型設計/製造条件(保圧・保圧時間等)が異なる結果として平均残留応力にばらつきがあることによるものと考えられる。また 3MPa という値は、リフトゲートトリム用の一般ポリプロピレンで考えると室温での降伏応力(13MPa)より低く線形範囲内で、ひずみ値は 0.22%に対応している。

なおこの平均残留応力値は、部品によって異なるのが妥当であり、ピラートリムなどへの適用では同様手法により同定・決定することが必要となる。

4.3 残留応力の影響

一方 Table 3 からは、残留応力値が 1MPa 変わるだけで熱収縮量が 15%程度変化しており、熱収縮に対する残留応力値の影響・感度が大きいことも分かる。

Fig. 15 と Fig. 16 に、11 点の評価位置における最高温度時伸び量および熱収縮量と、残留応力との関係を示す。

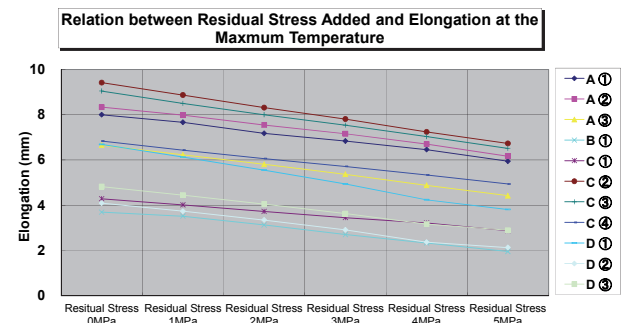


Fig. 15 Elongation at the Maximum Temperature

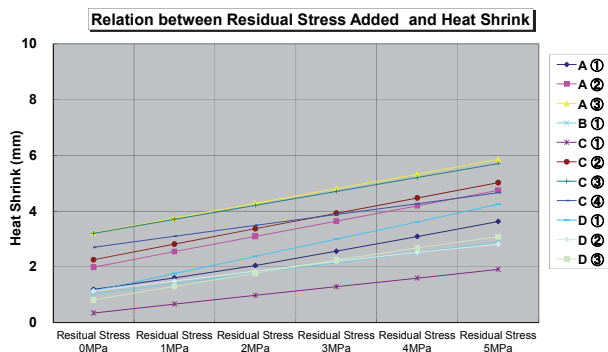


Fig. 16 Heat Shrinkage at Room Temperature

残留応力値が大きくなるほど、Fig. 15 から最高温度時の伸び量は減少し、Fig. 16 から室温戻し後の熱収縮量は増加することが分かる。これは残留応力が温度上昇の際に開放され、熱伸び量を抑制させる効果を持つことを示している。そして逆に熱収縮量に対しては増加させる影響を与えることを示している。

樹脂部品の熱変形に対しては、過去の開発経験を参考にして、対象部品がどの程度の残留応力を持ちうるかを想定して設計することが必要である。

5. 結論

リフトゲートトリムに使われているポリプロピレン樹脂の熱収縮現象に関して、材料試験による計測・現象分析と解析技術の検討・開発を行った。その結果、以下の成果・知見を得た。

- (1) 熱収縮現象は室温から高温、そして室温に戻す加熱・冷却サイクルの初回に発生し、2 回目以降は同じ変形経路を取る。
- (2) 熱収縮量は、最高温度や結晶化度によって変化し、異方性がある。流れ方向 (MD) の方が直交方向 (TD) よりも熱収縮量は大きい。また熱収縮に対してはクリープの影響は小さい。
- (3) 非線形構造解析ソフト ABAQUS を用いて熱収縮量を予測できる解析手法を確立した。本手法は、線膨張係数について異方性を有し昇温時と室温戻し時では別経路の関数表現を採用するとともに、残留応力を考慮する特徴を有する。今回検討したリフトゲートトリムの場合、平均残留応力値として 3MPa を用いることで最も実測値に近づいた。なお本手法では、異方性定義および残留応力値に経験値・同定値を用いることから、型設計が未完了の開発の早期段階でも適用可能である。
- (4) 残留応力が高いほど、高温時の熱伸び量は小さくなり、室温戻し後の熱収縮量は大きくなる。

本手法は、現在ではリフトゲートトリム用以外のポリプロピレン樹脂や他の内装部品にも展開しており、適用車種・部品数の拡大により解析精度の改善を図りつつ、図面品質の向上に寄与している。

参考文献

- (1) 石鍋ほか：PET フィルムのガラス転移温度近傍での力学挙動と熱収縮の有限要素解析，日本機械学会論文集中 (A 編)，78 巻，785 号，pp.81-94 (2012)
- (2) 高原ほか：樹脂物性を考慮した大型樹脂部品の熱変形 FEM，トヨタテクニカルレビュー，Vol.52 No.2, pp.90-95 (2002)
- (3) 藤本ほか：新型「日野デュトロ」開発における樹脂 CAE の取り組み，日野技報，No.63，pp.52-57 (2012)
- (4) X. Chen et al. : Numerical Analysis of Thermal Growth of Cast Aluminum Engine Components, SAE Technical paper, 2008-01-1419 (2008)
- (5) 本間精一：プラスチックの実用強さと耐久性 11, プラスチックス，VOL.55 No.8, pp.87-97 (2004)

■ 著 者 ■



井上 実



平本 健治



高田 幸次



藤 和久



西村 賢治