

エンジンカバーの内そり予測

山田 和慶^{*1}, 西郷 栄人^{*2}, 田中 宏尚^{*3}

Inner Warpage Prediction of Corner Parts for Engine Cover

Kazumichi Yamada^{*1}, Yoshihito Saigo^{*2}, Hironao Tanaka^{*3}

要 旨

樹脂の射出成形品のコーナー部は内そり変形が発生する。この変形に対し、現在活用している薄板理論の射出成形解析の予測精度は低い。

ここではエンジンカバーの内そり現象に対し、薄板理論の射出成形解析と2次元断面の熱伝導解析を組み合わせて実施することにより定量的に内そり量を予測する手法を構築したので報告する。

Abstract

The inner warpage occurs at corner parts of plastic injection molding. Injection molding analysis using shell theory in current application does not predict the deformation quantity in accurately.

This report describes a prediction procedure for the inner warpage of engine cover. The precise prediction was established by conducting combination analysis of injection molding of shell theory and thermal conduction of cross section at the corner parts.

^{*1} Kazumichi Yamada 技術企画部 技術電算室

^{*2} Yoshihito Saigo 技術企画部 技術電算室

^{*3} Hironao Tanaka 機能部品事業部 機能部品技術部

1. はじめに

現在、射出成形解析に薄板製品用に開発された解析ソフトを活用¹⁻³⁾しており、解析要素タイプとして、シェル要素を用いている。その解析では平板形状のシェル要素をつぎ合わせてモデル化しているため、コーナー部あるいはリブの付け根のように平板では正確に形状を表現できない部分の解析誤差は大きい。よって、その影響が支配的な諸現象を予測することは困難である。

エンジンカバーにおける立ち壁の内そり現象はコーナー部の影響が強く、射出成形解析による予測精度は不十分である。解析を試みたとしても、ほとんど内倒れはしないという結果が導かれる。

この打開策の1つとして3次元(ソリッド)解析化が挙げられる。近年、3次元射出成形解析ソフト⁴⁾も市販されているが、計算機的能力上、エンジンカバーのように薄板物の製品については適用が困難と言える。

本報ではエンジンカバーの内そり現象に対し、現在活用中の汎用射出成形解析ソフトC-MOLD(シェル要素対応)と構造解析ソフトABAQUSを組み合わせ内そり量を定量的に予測する手法を構築したので報告する。

2. 内そり現象に対する考え方

内そり現象は図1に示すコーナー部断面において、金型取出し後に収縮する部分が板厚中心より内側に分布するために発生すると考えられている。金型取出し後の収縮部が板厚中心より内側に分布する理由としては、コーナー部外側は金型と接触している面積が大きいのにに対して、内側との接触面積は小さく、熱が逃げにくいいため、冷却途中では樹脂温度の高温部が内側に分布することが要因と思われる。また、金型温度も外側に比べて内側の方が高くなるのが通例であり、これも内そり現象を助長するものと思われる。



図1. コーナー部の内そり現象メカニズム

3. 内そり検討型による実験検討

3-1. 内そり検討型

予測精度確保のため、信頼性の高い実験データが必要であるので、内そり検討型を作製し、実験を行った。内そり検討型(成形品概寸法:250×180×80, t=2.5)の概略図を図2に示す。可動型の内そり評価部にあたる部分は入れ子仕様となっており、熱拡散率(=熱伝導率/(密度×比熱))の異なる銅、あるいはアルミに置き換えることが可能な仕様となっている。なお、その他の金型材質は鉄である。また、検証のため、温度センサーを2箇所設置してある。

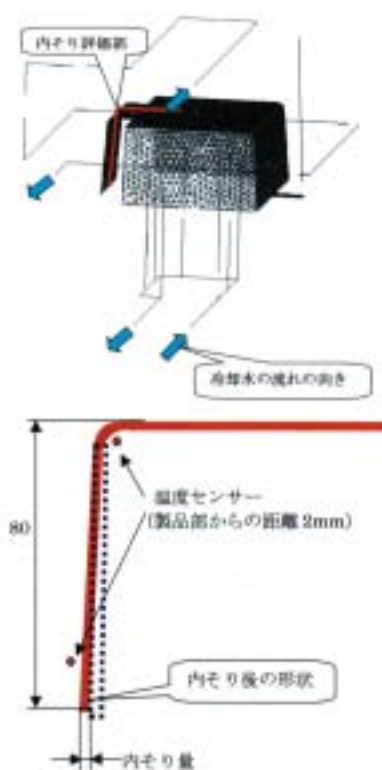


図2. 内そり検討型概略図(上)拡大図(下)

3-2. 成形条件

固定型、可動型の金型温度差が内そりに与える影響を調査するために、固定型、可動型の冷却水温度に差をつけて実験した。成形条件を表1に示す。また、圧力が内そり量に及ぼす影響を調査するために、金型材質鉄の冷却水温度70°C/70°C(固定型/可動型)の条件に対して、保圧を5MPa上げた条件での実験も実施した。

使用した樹脂(PA6)と金型材の物性値を表2,3に示す。

表1. 成形条件

	条件1	条件2	条件3
樹脂	PA6	←	←
樹脂温度 (°C)	250	←	←
充填時間 (秒)	1.2	←	←
保圧時間 (秒)	5.0	←	←
冷却時間 (秒)	23.5	←	←
保持圧力 (MPa)	40.0(45.0) ⁽¹⁾	←	←
給付/74時間 (秒)	50.0	←	←
冷却水温度 (°C)	固定型	90	80
	可動型	700	50

注) 圧力影響調査条件

表2. 樹脂の物性値

項目	PA6			
ヤング率 (Pa)	4.00×10^9			
ポアソン比	0.34			
体積膨張率 (1/K)	5.49×10^{-4}			
密度 (kg/m ³)	1190			
固化温度 (°C)	225			
熱伝導率 (W/mK)	0.228			
比熱 (J/kgK)	24	1328	44	3384
	48	1435	55	3523
(温度 (°C), 比熱)	190	2193	170	2884
	194	3173	188	4573
	192	4863	203	2848
	227	2214	270	2285
析出後の体積 (Cryst-WLP)	0.45393	1.7919×10^4	7.3833×10^4	
	0.21422	0.0000	0.1255	0.1460
PVTモデルの係数 (2項式Fit)	486.15	6.7884×10^4	0.00085788	
	4.673×10^{-4}	1.2901×10^4	0.0028945	
$\beta_0(K), \beta_1(K), \beta_2(K), \beta_3(K)$	0.00081745	4.2048×10^{-4}	1.1603×10^4	
$\beta_4(K), \beta_5(K), \beta_6(K), \beta_7(K)$	0.0048418	4.1096×10^{-4}	0.10421	
	5.8098×10^4			

表3. 金型材の物性値

	鉄	銅	アルミ
密度 (kg/m ³)	7830	8400	2700
比熱 (J/kgK)	464	416	879
熱伝導率 (W/mK)	50	150	175
熱膨張率 (m/m/°C)	1.38×10^{-5}	4.29×10^{-5}	7.37×10^{-5}

3-3. 実験結果

実験結果を表4および図3に示す、これより以下のことがわかった。

- ①成形開始時の金型温度差と内そり量は相関あり
- ②内そり量に及ぼす圧力の影響は小さい
- ③冷却水に温度差をつけることは内そり防止に有効
- ④コーナー部内側入れ子に高熱伝散率材を使用することは内そり現象の抑制に有効 (影響度合い: ③<④)

表4. 温度計測結果と内そり量実測結果

入れ子材質	冷却水温度 (°C)		コーナー部の金型表面温度 (°C)			内そり量 (mm)
	固定型	可動型	固定型	可動型	固定-可動	
鉄	70.0	70.0	87.6	96.3	-8.6	0.3
	90.0	50.0	93.3	99.1	-5.8	0.1
銅	70.0	70.0	84.8	88.6	-3.8	0.0
	80.0	50.0	86.9	88.6	-1.8	-0.1
アルミ	70.0	70.0	84.4	87.7	-3.3	0.0
	80.0	50.0	86.5	87.9	-1.5	-0.1

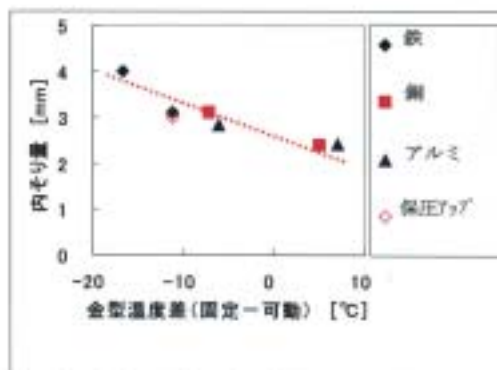


図3. 成形開始時温度差と内そり量との関係

4. 現状予測レベル調査

表1~3の成形条件・物性値にて、そり解析を実施した。なお、解析メッシュは図2を参照(要素数: 5661, 節点数: 3011)。

解析結果の例として、固定型と可動型の金型表面温度差の分布を図4に示す。また、コーナー部の固定型と可動型の金型表面温度、差、内そり量を表5に示す。解析結果の金型温度差、解析結果と実測の内そり量との関係を図5に示す。なお、ここでの金型冷却解析の結果は1サイクル中での時間的平均値である。

これより以下のことがわかった。

- ① 射出成形解析から得られる内そり量は非常に小さく、定性的にも一致していない (逆そりモードあり)
- ② 金型温度解析結果 (金型温度差) と実測の内そり量は相関あり

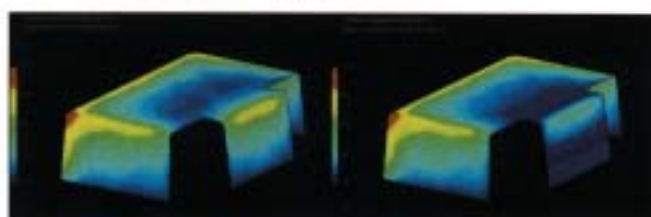


図4. 射出成形解析結果 (金型温度差分布) (左: 鉄, 右: 銅入れ子)

表5. 解析結果 (金型温度と内そり量)

入れ子材質	冷却水温度 (°C)		コーナー部の金型表面温度 (°C)			内そり量 (mm)
	固定型	可動型	固定型	可動型	固定-可動	
鉄	70.0	70.0	87.6	96.3	-8.6	0.3
	90.0	50.0	93.3	99.1	-5.8	0.1
銅	70.0	70.0	84.8	88.6	-3.8	0.0
	80.0	50.0	86.9	88.6	-1.8	-0.1
アルミ	70.0	70.0	84.4	87.7	-3.3	0.0
	80.0	50.0	86.5	87.9	-1.5	-0.1

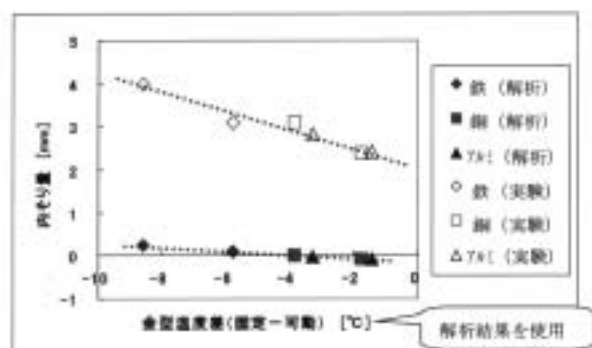


図5. 金型温度差と内そり量との関係

5. 内そり予測技術検討

5-1. 内そり予測モデル

前章の結果から内そり現象には圧力の影響が小さく、射出成形解析ソフトの金型冷却解析結果と相関があることが確認できた。よって、射出成形解析の結果を用いて金型表面温度分布と充填完了時の樹脂の温度分布を、構造解析ソフトによる熱伝導解析の境界条件および初期温度条件に適用することとした。解析の流れを図6に示す。



図6. 内そり予測モデルの解析の流れ

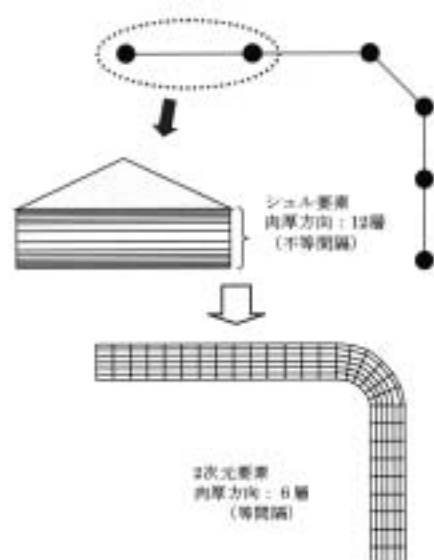


図7. 使用要素のコーナー部断面視

(上: 射出成形解析, 下: 熱伝導, 熱応力解析)

また、解析メッシュとしては射出成形解析では3角形シェル要素を使用し、熱伝導解析および熱応力解析では2次元要素を使用することとした(図7参照)。つまり、内そり予測モデルは2次元断面モデルとした。このことよりこの予測モデルの適用範囲はL形状が続く部位を持つ製品(エンジンカバー、インストルメントパネル等)となる。

5-2. 解析手順

射出成形解析から熱伝導解析へのデータ変換は新たに変換プログラムを作成して対応した。図7(上)に示すように、今回使用した射出成形解析のシェル要素は不等間隔の12層で構成され、樹脂温度データは節点データであり、板厚方向に13個存在する。また、金型表面温度データは表と裏で2個存在する。これらの温度データを熱伝導解析用の板厚方向に等間隔の6層で分割したメッシュの節点に初期温度として与え、金型表面温度データについては境界条件として与える。なお、節点の位置が一致しない場合には、それぞれの座標の関係から補間して与えることとした。このデータ変換の入出力情報を表6に示す。

解析手順を以下に示す。

- ①射出成形解析
- ②データ変換プログラムを動かし、熱伝導解析の入力ファイルを作成
- ③熱伝導解析
- ④熱伝導解析結果よりコーナー部の樹脂温度が転移(結晶化)温度以下になった時間を確認。
- ⑤熱応力解析用インプットデータの作成
- ⑥熱応力解析

表6. データ変換のファイル入出力情報

ファイル内容	入出力	備 考
射出成形解析メッシュデータ	入力	・要素、節点情報の読み込み
充填解析結果	入力	・充填完了時の樹脂温度の読み込み ・肉厚方向の樹脂温度出力必要
金型冷却解析結果	入力	・固定型と可動型の表面温度の読み込み
材料物性データ	入力	・熱伝導解析用に自動変換
内そり予測部位の要素情報	入力	・対象部位の要素番号の読み込み
内そり予測部位の節点情報	入力	・節点の関係の読み込み ・解析対象範囲の端点の節点番号 ・コーナー直エンドの節点番号
熱伝導解析メッシュデータ	入力	・要素、節点情報の読み込み
熱伝導解析入力データ	出力	・熱伝導解析用入力データの書き込み ・熱伝導解析用入力データの書き込み
熱応力解析入力データ	出力	・熱応力解析用入力データの書き込み ・熱応力解析用入力データの書き込み

5-3. 解析結果

射出成形解析については、前章と同じ解析結果

である。その解析結果を用いて充填完了時の樹脂温度分布を熱伝導解析の初期温度として、変換した結果を図8に示す。また、最終的な内そり解析結果を図9に示す。今回の全条件に対する解析結果を図10に示す。これより解析結果は実測結果よりも内そり量が小さく、金型温度差が小さいところでは解析結果の内そり量はゼロに近づくが、実測では2mm以上の内そり量であり、本解析手法により内そり量が予測できているとはいえない。

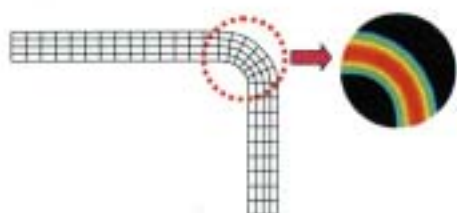


図8. 熱伝導解析用初期温度分布



図9. そり解析結果出力例

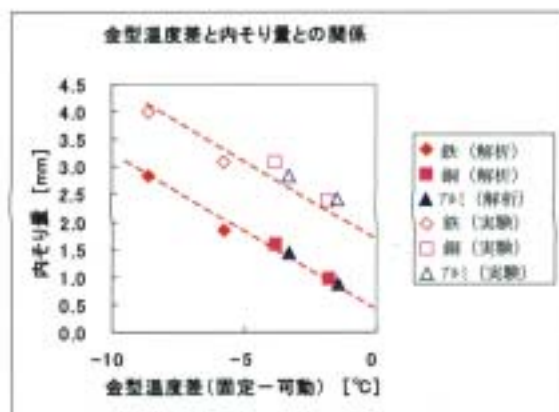


図10. 解析結果と実測結果の比較

5-4. 解析精度の向上

“金型温度差がゼロ”の場合について考える。金型温度差とは固定型と可動型の1サイクル中の平均温度の差のことである。しかし、金型温度は時間的に変化するものであり、固定型と可動型の温度差も時間的に変化する。また、金型の温度

変化は可動型の方が大きいと思われる。それは形状因子によるもので、可動型は樹脂から熱をもらうときは温度が上がりやすく、金型が開いて空気に接触するときは温度が下がりやすいからである(図1参照)。

つまり、金型温度差がない場合でも実際は成形の初期では可動型の方が固定型よりも高いと考えられる。こういった現象を解析するには緻密な非定常の熱伝導解析をする必要があるが、現在の計算機能力では実用的な解析とはならない。ここではこの現象を擬似的に表現することとし、図11のようにコーナー部からの距離とその部分での樹脂と金型間の熱伝達係数をパラメータとして変更することにより、表現できるかどうかの検討を行った。

パラメータを最適化した結果、コーナー部からの距離を10mm、熱伝達係数を $2,500[W/(m \cdot K)]$ (一般部は $25,000$)とするとよいことがわかった。また、実測結果との比較を図12に示す。

これより解析による予測誤差は最大値でも0.3mmとなり、実測結果とよい一致をみた。

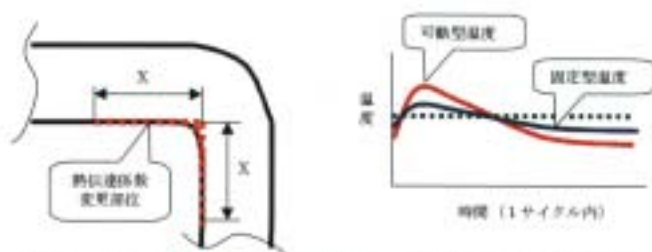


図11. 熱伝達係数変更部位と金型温度変化の例

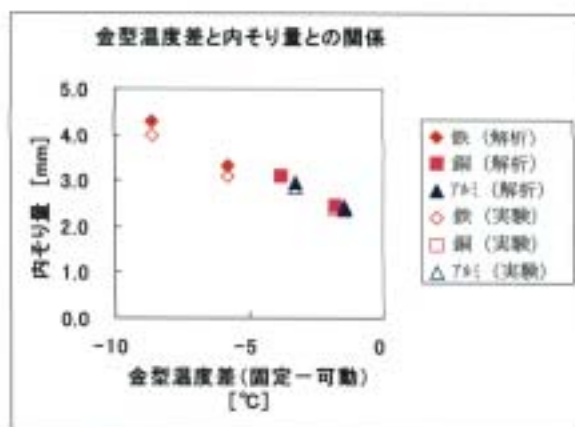


図12. 解析結果と実測結果の比較

6. エンジンカバーでの検証

本予測手法により実際のエンジンカバーの内そり量を予測する。樹脂物性データを表7に示す。

解析モデルおよび内そり量評価部を図13に示す。解析結果を図14に示す。内そり量については実測：1.0mmに対し、解析：0.7mmであり、誤差0.3mmであった。これより解析結果は実際とよい一致をみた。

表7. 樹脂の物性値 (PP)

樹脂	PP			
ヤング率 (Pa)	2.8 × 10 ⁹			
ポアソン比	0.29			
熱膨張係数 (1/K)	3.1 × 10 ⁻⁴			
密度 (kg/m ³)	925			
ガラス転移温度 (°C)	132			
熱伝導率 (W/mK)	70	0.4241	110	0.2848
(単位 (°C)・熱伝導率)	130	0.2383	180	0.2230
比熱 (J/kgK)	30	1641	80	1688
	110	2040	116	2253
	120	2809	124	10080
	126	14130	130	3873
132	3230	134	1927	
180	1941	229	1978	
弾性率の係数 (Cross-WLF)	0.41444	0.6653	0.0287 × 10 ⁻¹¹	203.15
$\ln(-\ln(1-0.5(1-L))L)$	0.00000	22.647	51.690	
PVTモデルの係数 (2 変数Tm)	429.15	8.5000 × 10 ⁻²	0.0010812	8.5000 × 10 ⁻²
Hs(K)h0(K)h1m,h1a,h7(m)h2g)	8.3750 × 10 ³	0.0057790	0.00099000	4.1430 × 10 ³
H2m,h2v(m)h3g,h3m,h3v(Pa),h3a,h3a1(K)	2.3983 × 10 ⁸	0.0003001	0.00013477	0.15819

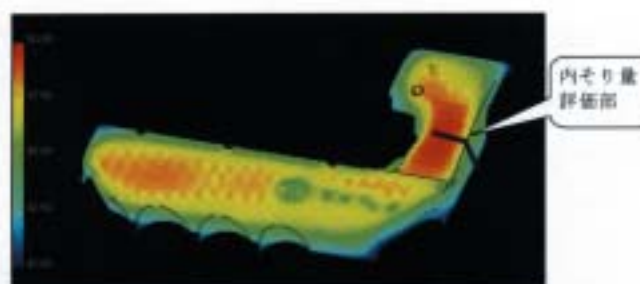


図13. 射出成形解析結果 (取出時樹脂温度)

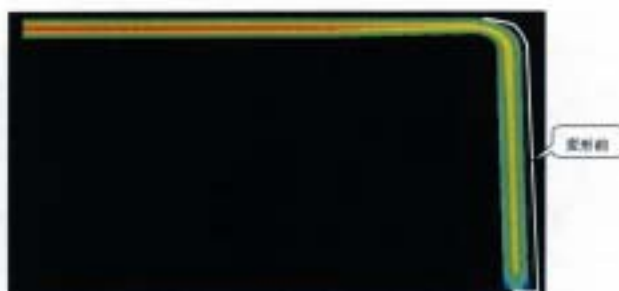


図14. そり解析結果 (変形と応力分布)

7. まとめ

現行の射出成形解析ソフトではコーナー部の内そり量の予測精度が低いことから、汎用射出成形解析ソフトと構造解析ソフトを組み合わせることで内そり量を予測できるようにした。本検討の中でわかったことを以下にまとめる。

- ・検討型による実験により、内そり現象はコーナー部の固定型と可動型の金型温度差が主要因であることがわかった。
- ・射出成形解析ソフトの金型冷却解析結果と実際の内そり量に相関があることがわかった。
- ・射出成形解析ソフトの金型冷却解析結果および充填解析結果を構造解析ソフトの入力データとすると、内そり量は実際に近づくが、予測精度は低い。
- ・成形サイクル中の金型温度変化を考慮し、可動型コーナー部の熱伝達係数を固定型部より低くすることにより定量的に内そり量を予測できることがわかった。

参考文献

- 1) 川北幸男, 成形加工, 8(1), 29(1996)
- 2) 杉浦弘, 豊田合成技報, 35, 25(1993)
- 3) 牛田洋子, プラスチックス, 47(1), 46(1993)
- 4) プラスチック成形加工学会, 第47回講演会資料