

再生プラスチックの成形技術に関する研究

萩原 義人・上條 幹人・大内 英俊*

Study on Molding Technology of Recycled Plastics

Yoshihito HAGIHARA, Mikito KAMJO and Hidetoshi OUCHI

要 約

加工工程廃プラスチック (PP, ABS, PC) の再生材をバージン材へ 0, 10, 20, 30, 40, 50% 混合したときの強度 (引張強さおよび曲げ強さ), 硬度, 表面粗さ, 耐候性の試験を行った。

その結果, 強度, 表面粗さおよび耐候性は再生材の混合率によってほとんど影響されなかったが, 硬さは, PP および ABS で僅かに差が生じた。

また, プラスチック射出成形における最適条件を確立するため, 市販プログラムの中で代用可能な 2 次元非定常の流動解析プログラムの開発を正方形内および形状を変化させて行った。

種々のプログラムに応じた条件を入力することで良好な解析結果が得られたが, 現状のプログラムでは 3 次元的流れの解析ができるまでに至らなかった。

1. 緒 言

近年, プラスチック製品は, 衣・食・住のみならず多方面で欠かすことの出来ない必需品となっている。しかし, それに伴うプラスチック廃棄物の増大は, これらの燃焼処理における有害なガスの発生や不法投棄のため, 環境に悪影響をおよぼしている。

一方, プラスチック関連企業では, 廃プラスチックの減量化を図るため, 加工工程から発生するスプル, ランナおよび不良品等を再生材として用いているが, バージン材への混合割合によっては, 成形不良や強度劣化などを起こし信頼性をそこねる。

そこで, 自動車, 家庭電気製品等で大量に使用されているポリプロピレン (PP), AV・OA 機器, 日用雑貨など幅広い分野で使用されているアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン (ABS), 耐衝撃性, 透明性, 寸法安定性などで優れているポリカーボネート (PC) の 3 種類の樹脂について, それぞれの再生材の混合割合を変えた試験片を作製し, それらの物理的特性を評価した。

また, プラスチック成形における充填不良やウエルドラインの発生, 変形, そりなどの問題解決を目的として, 市販プログラムの中で代用可能な 2 次元非定常の流動解析プログラムの開発も行った。

2. 実験方法

2-1 試験片の作成

使用した樹脂材料は, PP が (株) グランドポリマー製のグランドポリプロ, ABS が三井東圧化学(株)製のサンタック, PC が帝人化成(株)製のバンライトである。

まず, バージン材を射出成形機 (H 精樹脂製の 75t 型) を用いて, 図 1 に示すような引張および曲げ試験片を作製した。次に, 再生材をバージン材へ 10, 20, 30, 40, 50% 混入し, 各樹脂材料につき 6 種類の試験片を作製した。各試験片作製時の成形条件は表 1 に示す。

2-2 試験片の評価

試験片の評価は強度 (引張強さおよび曲げ強さ), 硬さ, 粗さ, 耐候性試験の結果に基づいて行い, 使用した試験機器および試験条件は表 2 に示す。

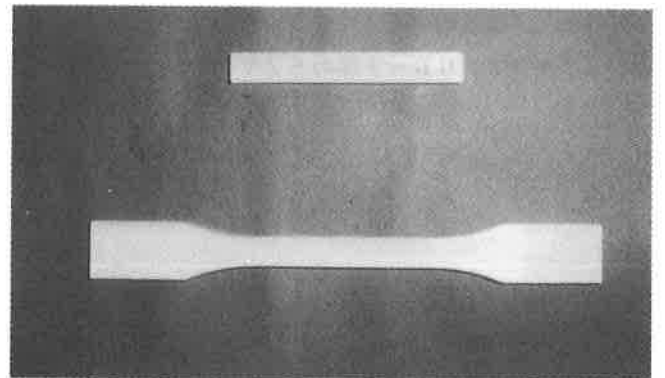


図 1. 試験片

*山梨大学 工学部機械システム工学科

表1 試験片作製条件

樹脂材料	PP	ABS	PC
乾燥温度 (°C)	—	85	120
乾燥時間 (h)	—	4	5
樹脂温度 (°C)	190~210	200~220	280~350
金型温度 (°C)	60	60	120

表2 評価試験機器と試験条件

試験項目	試験機器	試験条件
強度試験	材料試験機 UCT-30T	引張試験 試験速度 10mm/min
		曲げ試験 試験速度 2mm/min 支点間距離 60mm
硬さ試験	ロックウェル硬 度計 ARK-A	圧子 径6.35mmの鋼球 基準荷重 98N 試験荷重 588N
粗さ試験	表面粗さ測定器 SE-3F	触針先端半径 2μm 測定力 0.7mN
耐候性試験	サンシャインウ ェザーメーター WEL-SUN-HC (H)	試験時間 500h 光源 サンシャインカーボン アーク灯 降雨条件 60分間中12分 先降り運転

3. 実験結果および考察

3-1 再生材混合率と強度

PP, ABS, PCのバージン材の試験片およびバージン材へ再生材を10~50%混合した試験片の引張および曲げ強さをそれぞれ図2~4に示す。

PP試験片の引張強さ(図2)は再生材混合率の増加に伴い減少するが、曲げ強さには変化が見られなかった。

一方、ABS(図3)、PC(図4)の場合は、試験片の引張強さ、曲げ強さも再生材の混合率が50%までならば強度にはほとんど影響のないことが分かった。

3-2 再生材混合率と硬さ

PP, ABS, PCのバージン材へ再生材を混合したときの試験片の硬度試験結果を図5~7に示す。

PP(図5)は再生材の混合率が10%増加するごとに、硬さは1HRL程度ずつ低下する。この原因としては、再生材が成形時に加熱され、バージン材より分子量が低下しているためと考えられるが、この値は測定誤差の範囲内であり、

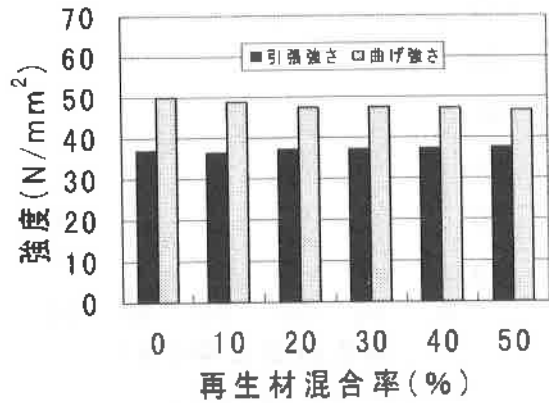


図2 PPの引張強さと曲げ強さ

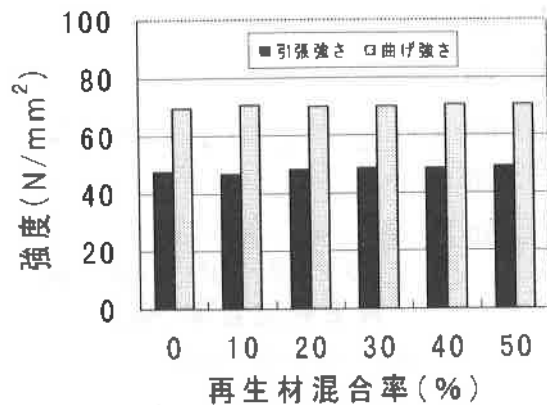


図3 ABSの引張強さと曲げ強さ

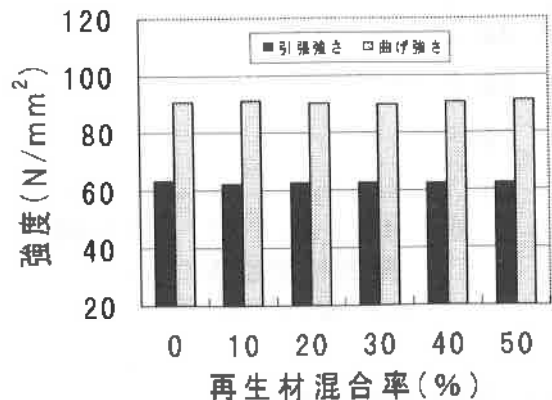


図4 PCの引張強さと曲げ強さ

一概にバージン材へ再生材を混合したことによる影響だけとは考えられない。

ABSの硬さ(図6)は、再生材混合率が20%までわずかに低下するが、バージン材のみの試験片と再生材混合率40、50%の試験片の硬さはほぼ同じ値であった。

PCの硬さ(図7)は、再生材を50%まで混合しても低下は全く見られなかった。

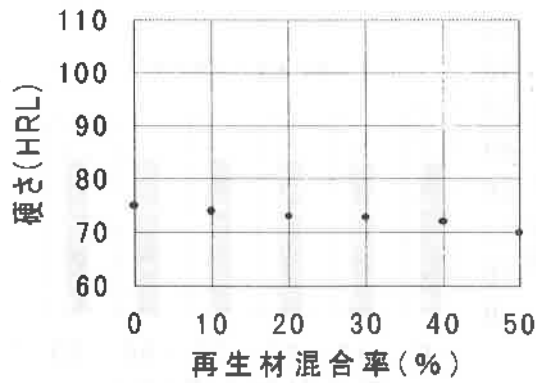


図5 PPの硬さ変化

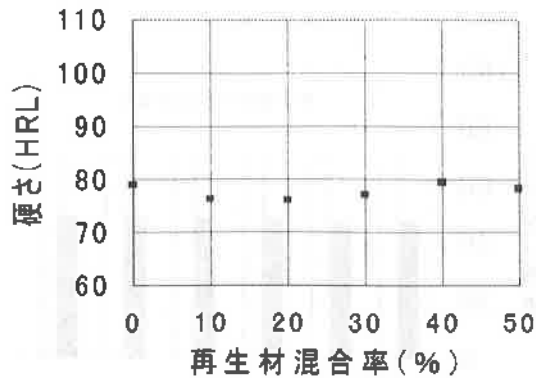


図6 ABSの硬さ変化

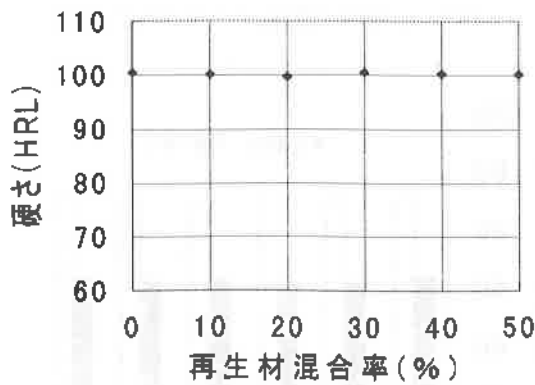


図7 PCの硬さ変化

3-3 再生材混合率と表面粗さ

PP, ABS, PCのバージン材へ再生材を混合したときの表面粗さを表3に示す。

PP, ABS, PCとも、各試験片の表面粗さ(表3)にほとんど差が見られず、バージン材へ再生材を50%まで混合

表3 再生材混合率に伴う表面粗さの変化(単位: μm)

再生材混合率	0%	10%	20%	30%	40%	50%
P P	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
A B S	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
P C	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02

しても粗さに悪影響がでるほどではないと推測される。

3-4 各樹脂試験片の耐候性

通常、プラスチックは可視光線を吸収することで着色するが、PP(図8)、ABS(図9)、PC(図10)の耐候性試験を行った結果、各樹脂とも表面全域に渡っての変色であり、バージン材および再生材の混合率による明らかな差は見られなかった。

また、プラスチックは射出成形時に加熱され成形性、強度、硬度、耐熱性等の物性値が低下する。劣化する原因は、加熱時に樹脂材料が酸化され、その反応が進むことでポリマー中の分子鎖が切れて、結果的に分子量が低下するためである。しかし、本実験の結果のように、1度射出成形を行った後の再生材では、再生材を混合した場合、硬度はPP, ABSでわずかに差がみられたものの、強度、粗さ、耐候性については、差がなかったのは、その成形品の物性値が顕著に影響されるほど分子量の低下がなかったものと推測される。

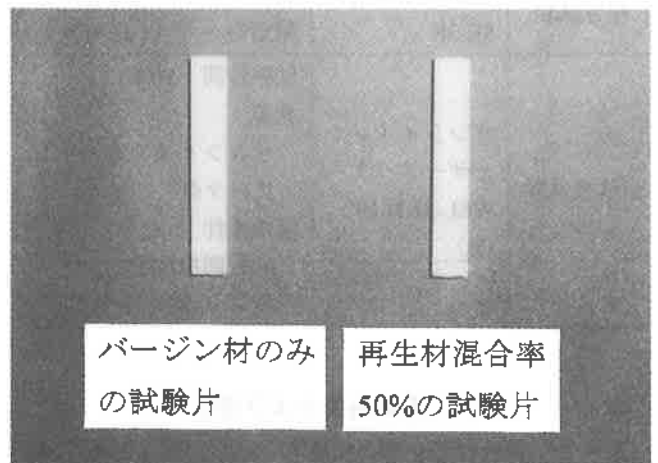


図8 PPの耐候性

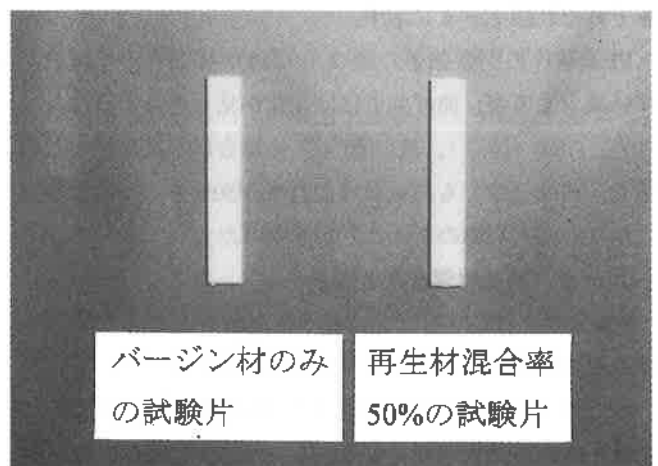


図9 ABSの耐候性

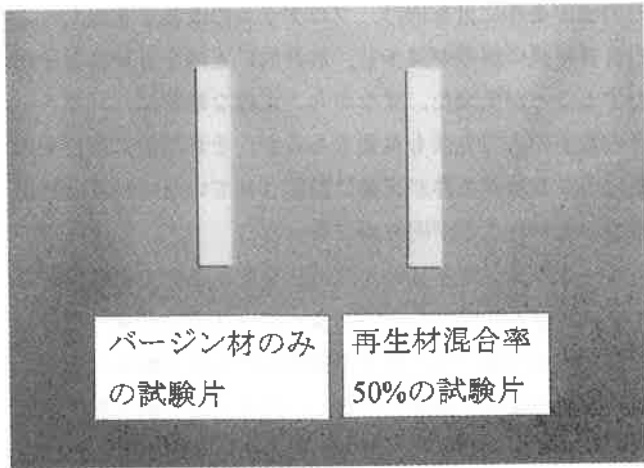


図10 PCの耐候性

4. 流動解析プログラムの開発

4-1 解析方法

4-1-1 流れ関数-渦度法による解析

正方形キャビティ内の非圧縮性2次元流れについての解析を流れ関数 (ϕ) - 渦度 (ω) 法¹⁾で行った。プログラムの構成は、図11 (11-1) である。最初にGRIDで格子 (キャビティ内形状) を作成し、DATAで計算に必要なパラメータを読み込んだ。入力するパラメータとしては、時間ステップ数 (NSTEPS)、反復回数 (ISTEP0)、レイノル

ズ数 (RE)、解析時間 (DT)、緩和係数 (CONST) である。次にINITで流れ関数、および渦度の初期値を与え、PSIでまず流れ関数に関するポアソン方程式 (式1) を反復法で解き、続いてOMEGAにおいて渦度輸送方程式 (式2) をFTCS法で解いた。そして、BCで流れ関数および渦度の境界条件を与えて、OUTPで計算結果を出力させた。ただし、後々、正方形だけでなく任意形状の領域でも方程式が解けるようにプログラムを構成した。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\omega \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \\ = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

4-1-2 速度-圧力法による解析

プラスチック射出成形の流動解析において、重要な要因となる速度および圧力の初期値が入力出来るプログラムにするため、4-1-1と同様な形状、および流れについての解析を速度 (u, v) - 圧力 (p)²⁾法で行った。プログラムの構成は図11 (11-2) である。METまでは流れ関数-渦度法の解析プログラムと同じであり、INIT2で速度および圧力の初期値を与え、RHSで圧力のポアソン方程式 (式3) の右辺の計算を行った。次にPRSで圧力のポアソン方程式を反復法で解き、PRSBCで圧力の境界条件を与えた。そして、NSにおいてNS方程式 (式4) をFTCS法で解き、BC2で速度の境界条件を与え、最後にOUTP2で計算結果を出力させた。

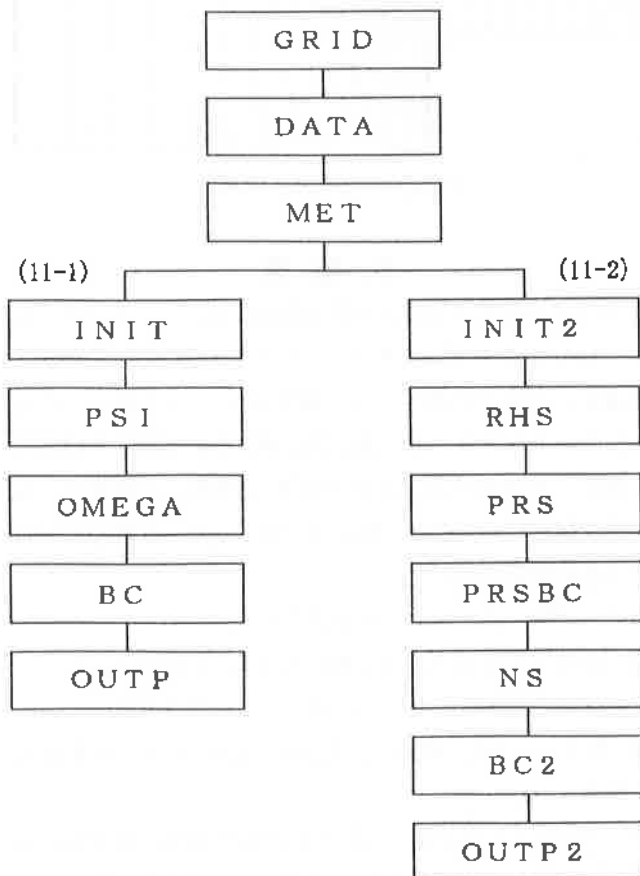


図11 解析プログラムのフローチャート

$$\begin{aligned} \Delta p^n = & \left[\left(\frac{\partial u^n}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u^n}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v^n}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v^n}{\partial y} \right)^2 \right] \\ & + \frac{D^n}{\Delta t} - \frac{\partial D^n}{\partial x} - \frac{\partial D^n}{\partial y} + \frac{1}{Re} \Delta D^n \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ = - \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right] + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

4-1-3 キャビティ内形状を変化させての解析

速度 (u, v) - 圧力 (p) 法のままで、キャビティ内の形状を変化させて解法を行った。また、プログラム構成は、図11 (11-2) のプログラムと同様であるが、必要に応じて GRID, PRSBC, BC 2 の3箇所に改良を施した。

4-2 解析結果および考察

4-2-1 流れ関数-渦度法による解析結果

プログラム作成後、計算の正確さを確認するため、流れ関数、および渦度の初期値として図12, 13のようなクエット流 (6), およびポアズイユ流れ⁶⁾の数值を与えた。解析途中、プログラムにいくつかの不良箇所が発見されたが徐々に改良を施し、最終的に正確な計算結果を出力することが出来た。また、計算に必要なパラメータの入力において DT, NSTEP, ISTEP 0 をそれぞれ少しずつ変化させて解析を行うと計算結果に誤差が出ることから、解析において、これら3つの数値の設定がかなり重要であることが明らかとなった。

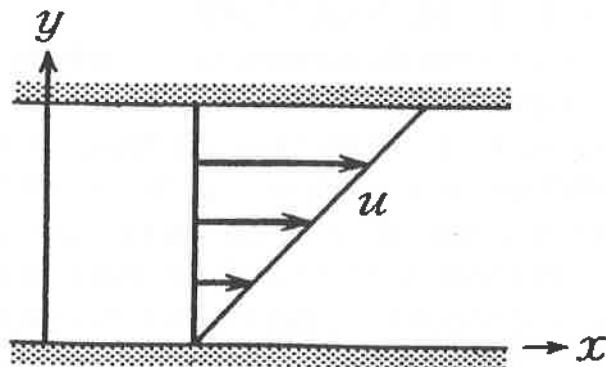


図12 クエット流れ

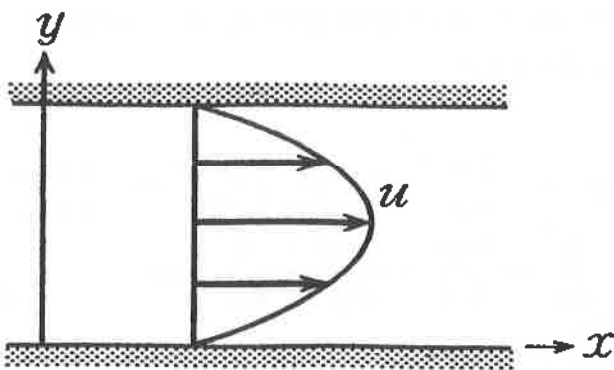


図13 ポアズイユ流れ

4-2-2 速度-圧力法による解析結果

プログラム作成後、4-2-1と同様に速度および圧力の初期値としてクエット流およびポアズイユ流れの数值を与え、解析したところ、クエット流に関しては、計算結果の誤差が減少することはなかった。そこで、速度および圧

力の境界条件に目を向け、プログラムの改良を重ねたところ計算結果の誤差が減少し、最終的に正確な計算結果を出力することが出来た。すなわち、正確な解析は、パラメータの数値の入力方法も重要であるが、それ以前に解析上の要因となる境界条件が正確に設定されていなければ計算出来ないということが明らかになった。

4-2-3 キャビティ内形状を変化させての解析結果

プログラム作成において、4-2-1および4-2-2で得た結果に基づき、格子が変化することで困難となった境界条件の設定に注意したが、パラメータの値を変化させても、解析途中でプログラムが終了する現象が生じた。この原因としては、パラメータおよび境界条件以外にキャビティ内形状が変わったことによる格子点間隔の不均一性が考えられた。そこで、格子データを出力させたところ、図14に示したように格子点の間隔が非常にばらついていることが分かり、格子点間隔を出来るだけ均一に改良したところ徐々に計算結果の誤差が減少し、良好な結果を得ることが出来た。

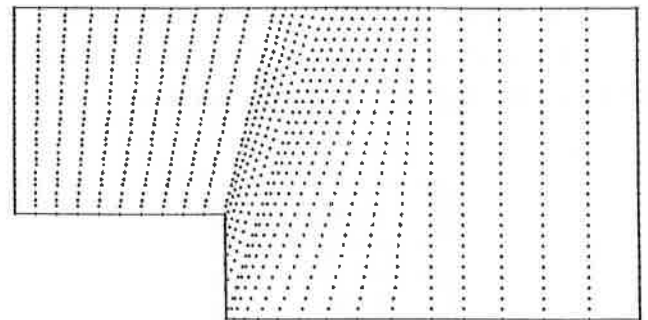


図14 キャビティ内形状

5. 結言

県内プラスチック関連企業で使用が多い、ポリプロピレン (PP)、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン (ABS)、ポリカーボネート (PC) のバージン材へ、それぞれの再生材を 0, 10, 20, 30, 40, 50% 混合した試験片の強度 (引張強さおよび曲げ強さ)、硬度、表面粗さ、耐候性試験を行い、その評価と2次元非定常の流動解析プログラムの開発を行った。

その結果、以下のことが確認された。

- (1) 強度 (引張強さおよび曲げ強さ)、表面粗さ、および耐候性は再生材の混合率にほとんど影響されない。
- (2) 硬度は、PP, ABSで、混合率の違いによりわずかな差がみられた。
- (3) 1度だけの射出成形で得られた再生材は、成形品の物性値に顕著な悪影響をおよぼすほど、分子量の低下はないと推測される。

(4) 正方形キャビティ内における非圧縮性2次元流れの流れ関数 (ψ) - 渦度 (ω) 法および速度 (u, v) - 圧力 (p) 法による解析は、その種々のプログラムに応じたパラメータ、境界条件を入力することで正確な計算結果が得られる。

今後は、3次元流れに対応させることのできるヘレ・シヨウ流れの解法⁶⁾を用い、その解法を既製のプログラムに活用していくことを検討する。

最後に、本研究を行うにあたり、ご協力いただきました(株)ミナミ製作所、および県内プラスチック関連企業の方々、また山梨県中小企業人材開発センターに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本分析化学会・高分子分析研究懇談会編：高分子分析ハンドブック，紀伊國屋書店（1995）11
- 2) 萩原義人，上條幹人：山梨県工業技術センター研究報告，10（1996）100
- 3) 栗原福次：プラスチックの劣化，日刊工業新聞社（1970）1
- 4) 実用プラスチック事典 編集委員会編：実用プラスチック事典，産業調査会（1993）29，102，359
- 5) 数値流体力学編集委員会編：非圧縮性流体解析，東京大学出版会（1995）130
- 6) 安藤常世：流体の力学，培風館（1990）79，81，82