

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業
成形条件の最適化による厚肉中空成形用金型の開発

成果報告書

平成23年3月

委託者 沖縄総合事務局

委託先 株式会社トロピカルテクノセンター

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。

目 次

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 第1章 | 研究開発の概要 | |
| 1-1 | 研究開発の背景 | 1 |
| 1-2 | 研究開発の目標 | 3 |
| 1-3 | 研究体制 | 6 |
| 第2章 | 研究開発の内容 | |
| 2-1 | これまでの経緯 | 6 |
| 2-2 | 試作3（4点ゲートによる成形） | |
| 2-2-1 | 成形シミュレーション | 7 |
| 2-2-2 | 試作成形 | 10 |
| 2-3 | 試作4（回転の効果に関するシミュレーション） | |
| 2-3-1 | 成形シミュレーション | 11 |
| 2-3-2 | 金型構造 | 30 |
| 2-3-3 | 試作成形 | 32 |
| 2-4 | 試作5（中央1点ゲートによる成形） | |
| 2-4-1 | 成形シミュレーション | 36 |
| 2-4-2 | 金型構造 | 40 |
| 2-4-3 | 試作成形 | 40 |
| 第3章 | 全体総括 | |
| 3-1 | 複数年の研究開発成果 | 46 |

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景

金属材料価格の高騰に伴い、安価に高い剛性の得られる樹脂製品を簡単な構造体の部品として活用したいというニーズが増えてきた。例えば柱が少なく大規模な空間が確保できるトラス構造のジョイント部材は、通常、ネジ穴を加工した鋼球であるが、よりコストの安い樹脂材料への転換が求められている。トラス構造は屋根が大きく出来ることや自由に形状を構成できるという構造的なメリットがあるため、沖縄県内でも図1、2に示すように通路やアーケード街、多目的広場、給油所などの屋根構造に使われることが増えてきた。このようなトラス構造を安価な樹脂で製作することができれば、更に多くの需要が見込まれる。(一般的な鉄鋼製トラス構造の建築コストは3万円/m²、樹脂製ボールジョイントを使用すればコストを約3割削減することができる)



図1. トラス構造の活用例①



図2. トラス構造の活用例②

しかしながら樹脂製品の代表的な成形手法である射出成形(図3)は基本的に薄肉製品を対象としており、構造体の部品として求められる厚肉形状を成形することが困難である。これは厚肉になると、成形時の冷却速度のバラツキが大きくなり、ヒケ等の不良が発生するためである。

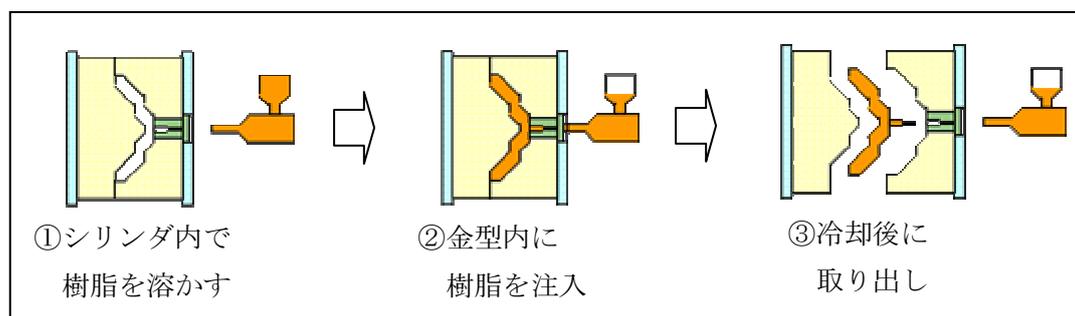


図3. 射出成形のプロセス

実際、本プロジェクトに参加している拓南伸線(株)をはじめとする研究プロジェクトチームでは、平成19年、射出成形の条件や成形形状を工夫することによりトラス構造の部品として用いる樹脂製ボールジョイントを開発したが、現状では図4のように成形品内

部の融合不良のため想定していた剛性の得られない場合も多く、一般の建築物に活用するためには、成形不良を少なくし剛性を高める必要のあることが分かっている。またトラス構造体を様々な用途で活用するためには、ユーザーの要求に応じて構成形状を自由に変更できることが望ましいが、開発した樹脂製ボールジョイントは、成形不良をなくすために形状変更を繰り返した結果、トラスバーの連結角度が変更出来ない構造となっており、構成できる形状のバリエーションが少ないといった課題も出てきた。



図4. 融合不良の例



図5. 剛性不足による破壊

厚肉部にヒケ等の不良が発生しやすいという射出成形の課題を解決するため、成形金型内に溶融樹脂を射出した後、不活性ガスを注入し中空部を成形するガスアシスト成形法（図6）が開発されてはいるが、この手法ではガスを注入するタイミングの設定が難しく、特に厚肉成形品においては中空部が偏ってしまい肉厚が不均一になりがちである。また肉厚を均等にするなら最大でも 10mm 程度の肉厚が限界だとされているため、成形品に高い剛性を求めることは難しい。

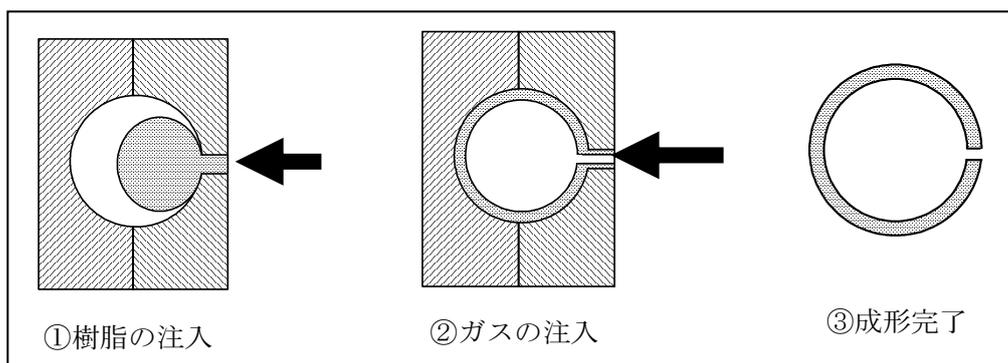


図6. ガスアシスト成形

10mm 以上の肉厚を持つ中空樹脂成形体を、ヒケ等の内部不良無く成形することができれば、前述のトラス構造のジョイント部材に限らず、多くの構造物の材料置換が可能

である。例えば、現在ガラス繊維入りナイロンを用いた樹脂ボルトとしては、M16（直径約 16mm）のものが市販されているが、それ以上のサイズは手に入らない。本研究で開発する厚肉中空成形技術を応用すれば、より大型の樹脂ボルトを作ることが可能となる。その他にも鋼管チャンネルや鋼管パイプなどを高強度樹脂チャンネルやパイプ等に置き換えることが可能だと考えている。

以上のように、川下製造業者では、構造体の部品として使用できる安価で剛性の高い樹脂部品を必要としているが、それに応える有望な成形手法だと考えられるガスアシスト成形法では偏肉の無い厚肉中空部品を成形することが難しいという現状がある。

1-2 研究開発の目標

従来のガスアシスト中空成形では、肉厚を均等にするなら最大でも 10mm 程度の肉厚が限界だとされているが、本研究では通常のガスアシスト成形に回転成形の要素を加え、ガスによる圧力及び回転による遠心力の作用により 35mm 程度の厚肉成形が可能な新しい技術を開発する。

このような従来に無い新しい機能を金型に付加するため、金型の設計段階でコンピュータによる成形シミュレーションや加工シミュレーションを駆使し、金型の冷却方法やゲート位置、ガス注入位置等の金型構造、ガス圧力や遠心力の効果等を考慮した成形条件について研究を行う。

【新技術】ガス圧と遠心力を用いた新しい成形技術

(1)最大肉厚 35mm を実現！

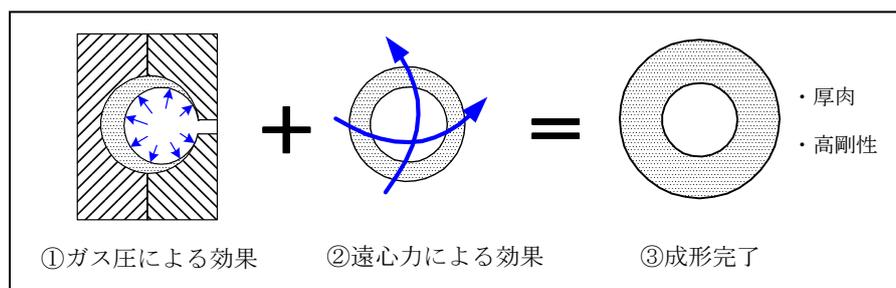


図7. 開発する成形技術

本研究では、金型の開発における設計、加工、成形の各段階に応じた3つのサブテーマを設定した。また各サブテーマの技術的目標値を以下のように定めた。

①金型設計手法の最適化

(1)ガス圧力と遠心力が作用する下での樹脂流動状態をシミュレーションにより予測する。

②厚肉中空成形用金型の開発

(1)ガスアシスト成形金型のコア部を回転させる機構を開発する。

③厚肉中空品の成形と評価

(1) 厚肉部が 35mm 程度の中空部品を偏肉、ヒケ巣なしに成形する。

平成 22 年度の各サブテーマの目標は、前年度までの成果を踏まえてそれぞれ次のように設定した。

① 金型設計手法の最適化

本項目では、実際に回転ガスアシスト成形を行った際、厚肉中空成形を不良無く行うため、成形金型のキャビティ内に充填される樹脂の挙動を予測する樹脂流動シミュレーションを行い、ゲート位置の最適化や注入するガスによる冷却効果を考慮した金型冷却手法を決定することを目的とする。

厚肉中空成形に関するシミュレーションを行うためには、キャビティ内に射出樹脂が飛び出すジェッティング現象などのような自由表面の大きな変化を伴う 3 次元流動を捉える必要があるため、VOF モデル (Volume of Fluid モデル) を活用し、固体伝熱と樹脂との熱連成、樹脂の溶融・凝固、温度に依存する表面張力と動的接触角などを考慮した 3 次元流動解析を行う。

平成 21 年度は、沖縄県工業技術センターにおいてガスアシスト成形に関する樹脂流動解析を行った結果、中空部が形成される条件として、ガス注入のタイミングや金型冷却の度合いが重要であることが示された。また使用する樹脂によって成形収縮率や流動性が異なることから、これまでのように主に強度的な観点から樹脂を選定するのではなく、成形性との兼ね合いで樹脂を考慮する必要もあることが分かった。

平成 22 年度は、引き続きガスアシスト成形において中空部の形成される条件を探ること、及び回転コアの影響を考慮するため遠心力下における樹脂挙動の解析を行う。またガスアシスト成形による試作品の評価を基に、金型構造の修正設計のための流動解析も実施する。

② 厚肉中空成形用金型の開発

本項目では、厚肉中空品 (肉厚 35mm 以上) を成形するための金型設計および製作を目的とする。

一般的な中空成形 (ガスアシスト成形) における最大肉厚は 10mm 程度だといわれているため、本研究では従来のガスアシスト成形に粉末回転成形の要素を取り入れ、厚肉中空品の成形に取り組む。

平成 21 年度はガスアシスト成形の試作結果を受け、金型修正を行った。ポリプロピレンを用いた一回目の試作成形では、中空部の形状が安定しなかった。ここでは、その原因

を樹脂注入ゲートとガス注入口がお互いに対向する位置にあったためだと考え、樹脂とガスが同じゲートから入る構造に変更した。その後の試作成形においても中空部が思うように形成できないことから、更に樹脂ゲート位置の変更、ガス漏れ防止構造等の工夫を行った。またコア回転機構については、通常のコア回転機構を用いた単軸回転機構を備えた金型の試作を行った。

平成22年度は引き続き試作成形の結果を受けて、金型構造の修正を行う。特にコア回転機構については、成形時の熱による金型膨張のため回転機構の調整が必要である。

③厚肉中空品の成形と評価

本項目では、通常のコアアシスト成形に回転成形の要素を組み合わせた新しい手法を用いて、肉厚35mm以上となる厚肉中空品の成形を目的とする。

平成21年度は、導入したガスアシスト装置を用いた中空成形を試みた。その結果、成形収縮率が大きく、比較的粘性も低いポリプロピレンを用いた場合は、中空形状が安定しないものの、ガスの注入圧力や注入時間によっては中空部の形成されることが分かった。

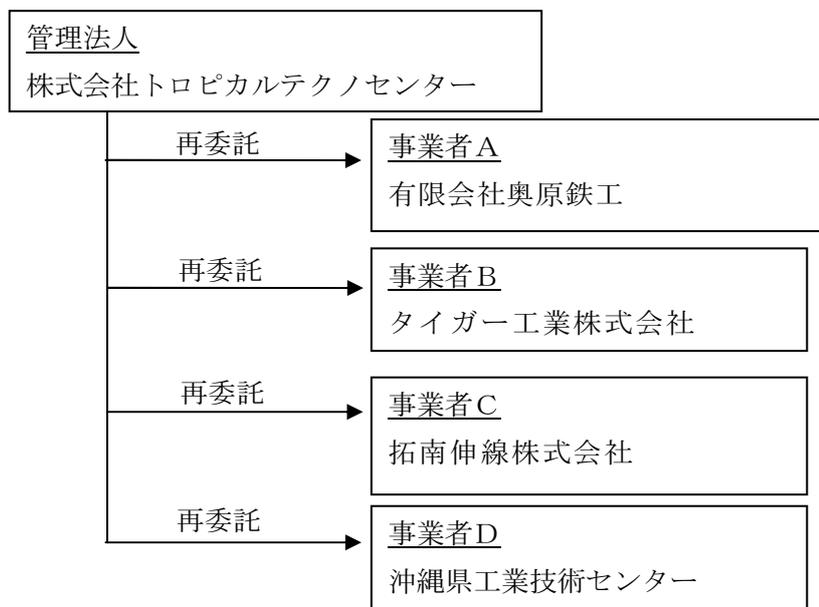
剛性の高いガラス繊維入りナイロンを用いた成形では、中空部の得られることは無く、球体の中心付近の樹脂密度が低い成形品（低密度中実品）が得られるのみであった。樹脂製ボールジョイントのユーザーである拓南伸線では、この低密度中実品を用いた引っ張り試験を行った。その結果、引っ張り強度約70MPaを確認した。

平成22年度は、引き続きガスアシストによる中空部形成のための試作成形、およびコア回転機能を持つ金型を用いた試作成形を行う。試作品については、ボールジョイントとしての活用を想定した引っ張り試験、耐久性試験を行う。

厚肉中空品の成形は、射出成形設備を備えたタイガー工業において行うが、成形時の条件については、サブテーマ1で行う成形シミュレーションと連携して最適化を図る。また成形品の評価は、樹脂製ボールジョイントのユーザーである拓南伸線が主に担当する。

1-3 研究体制

研究体制を以下に示す。株式会社トロピカルテクノセンターを管理法人とし、有限会社奥原鉄工、タイガー工業株式会社、拓南伸線株式会社、沖縄県工業技術センターが研究の実施機関となっている。



第2章 研究開発の内容

2-1 これまでの経緯

前年度までに3種類の金型を製作し中空品の試作成形に取り組んできた。

最初の金型（試作1と呼ぶ）では、ガスアシスト成形の基本的な条件を得る目的で直径60mmの球体をポリプロピレンで成形した。この金型では中空部が得られるものの、その形状を安定させることが困難であった。それは樹脂とガスの注入口が異なり、お互いに対向する位置にあったためだと考えた。

2番目の金型（試作2と呼ぶ）では、試作1を改良し樹脂とガスを同じ位置から注入する方式とした。また球体の直径も拓南伸線が求める実用的な大きさ（φ108mm）とし、使用する材料もガラス繊維が50%入ったナイロンとした。この金型では成形品を取り出した後、成形品の内部から熔融樹脂が吹き出すなどが発生し中空部を作ることができなかったが、金型内で十分冷却した後に取り出した成形品では、球体の表面近傍に高密度層を成形することができた。熔融樹脂が吹き出すのは、スプルー部分の樹脂が冷却固化するのに時間がかかるためである。

3番目の金型（試作3と呼ぶ）では、樹脂の吹き出しを防ぐため、再び樹脂とガスの注入口を別々に設けた。また樹脂冷却に多くの時間が必要であることから、ガス注入口に特殊なピンを設け、内部に高圧ガスを閉じこめた状態で金型外へ取り出せるような工夫を行

った。しかし試作成形では、ガスが全く入らないことが判明した。これはピン周りの樹脂が想像以上に早く固化しガスの流入を妨げるためであることも分かった。

これらの3種類の金型を図8～10に示す。

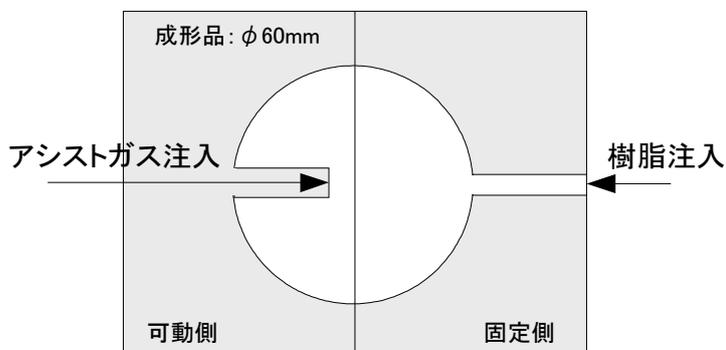


図8. 試作1の金型

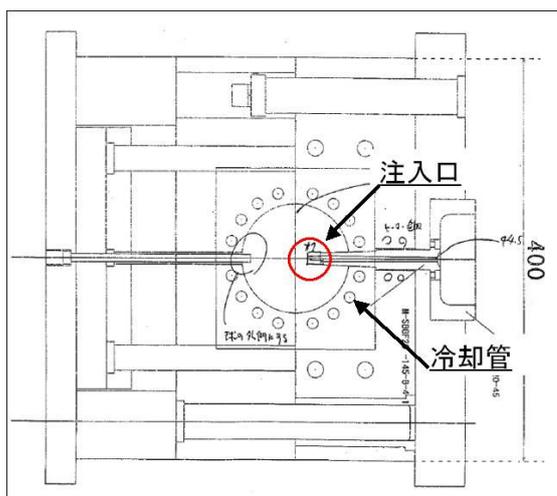


図9. 試作2の金型

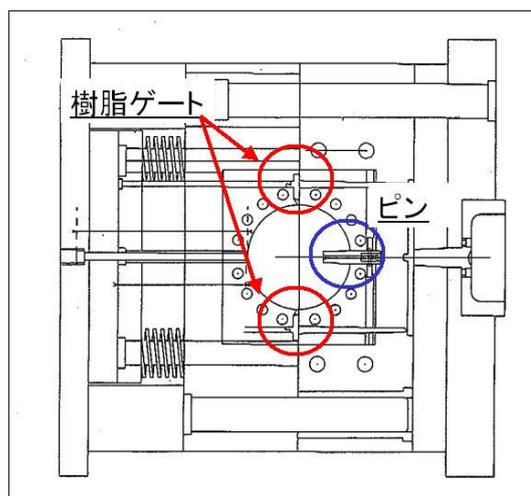


図10. 試作3の金型

これら3種類の金型とは別に、回転機構を備えた金型も製作した（試作4と呼ぶ）、回転金型による試作成形はH22年度に持ち越した。

本年度は、試作3による成形を再び試みることからスタートした。

2-2 試作3（4点ゲートによる成形）

2-2-1 成形シミュレーション

試作3の金型概略を図11に示す。ガスと樹脂の注入口を別々に用意し、樹脂の注入口を4箇所に分けたことが特徴である。ガスと樹脂の注入口が別々にあることで、成形品の取

り出し後に熔融樹脂が吹き出すなどの不具合を防いでいる。またガス注入口に特殊なピンを設け、内部にガスを閉じこめる構造とした。

成形シミュレーションの条件を表 1 に示す。

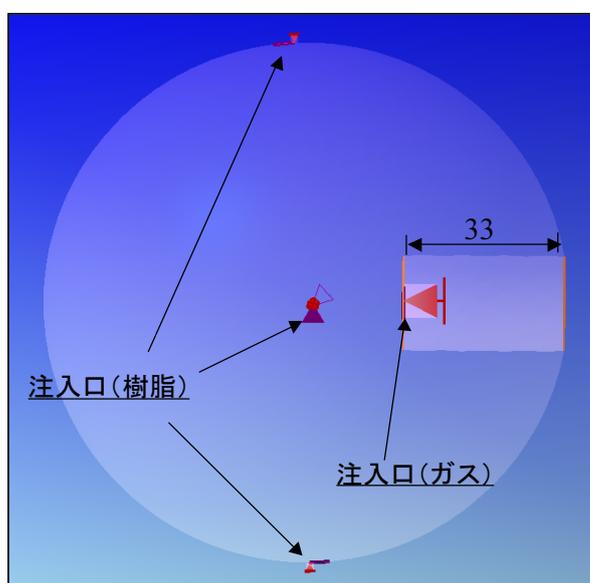


図 11. 解析モデル（試作 3）

表 1. 成形シミュレーションの条件（試作 3）

| | |
|---------|------------------------|
| 材料 | PA・GF50（ナイロンガラス繊維 50%） |
| ゲート直径 | 樹脂 1.5mm、ガス 7mm |
| 樹脂温度 | 280℃ |
| 金型温度 | 80℃ |
| 射出圧力 | 156MPa（最大射出圧力の 85%） |
| 窒素ガス温度 | 30℃ |
| 窒素ガス圧力 | 10kgf/cm ² |
| ガス圧保持時間 | 500 秒 |

試作 3 における樹脂充填の挙動は、樹脂ゲートが 4 箇所あることから、これまでの 2 つの金型に比較し複雑なものであった。次に樹脂充填終了時の温度分布を図 12 に示す（この図では上向きに重力が作用している）図の中心付近に見られる低温領域は、充填直後には空洞になっているところだと推測した。樹脂充填直後はまだ温度の高い部分がかかなり存在しているが、図 13 に示す型開き直前の温度分布では、金型温度が全体的に低下していることが分かる。型開き直前とは、樹脂充填後にガスによる保圧工程が終わり、製品を取り出す直前ということである。図 13 における低温領域の割合は、図 12 に比べ大きく変化していない。これはガス圧によって樹脂が押しつけられ中空部が広がる可能性が低いことを示

していると考えられる。型開き直前のスキン材料比を図 14 に示す。スキン材料比は、2つの射出材料（ここではナイロンと窒素ガス）の占める領域を表したもので、スキン材料比 1 の場合が樹脂、0 が窒素ガスになる。その間の値については、両者が混合した状態だと考えられるが解析ソフトではそれ以上の説明は無い。

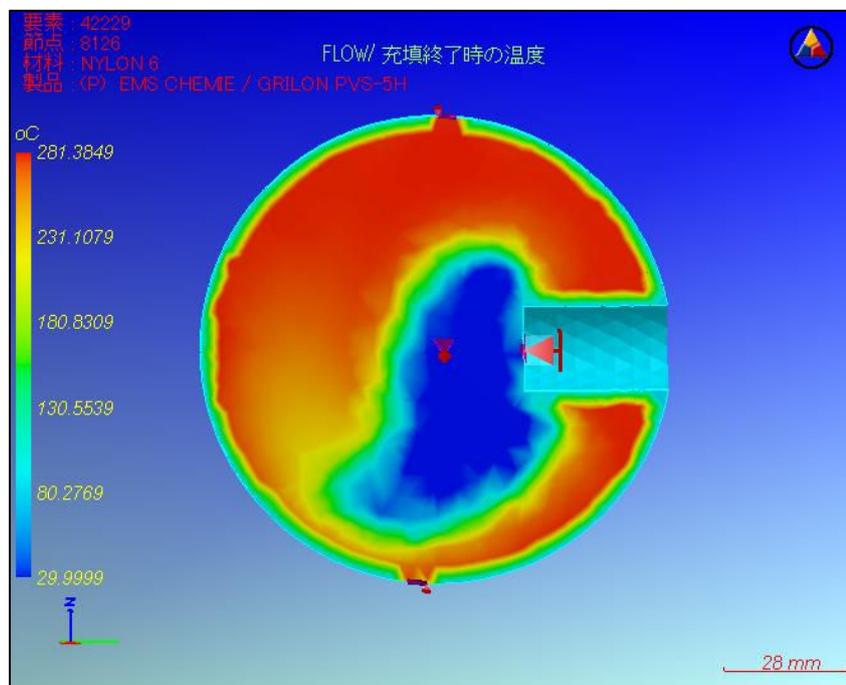


図 12.樹脂充填終了時の温度分布（試作 3）

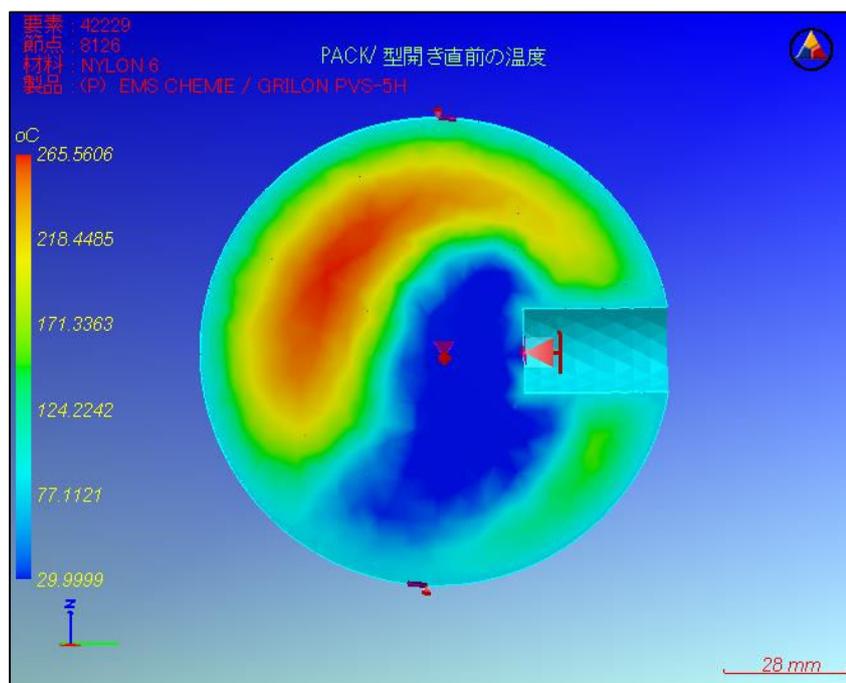


図 13.型開き直前の温度分布（試作 3）

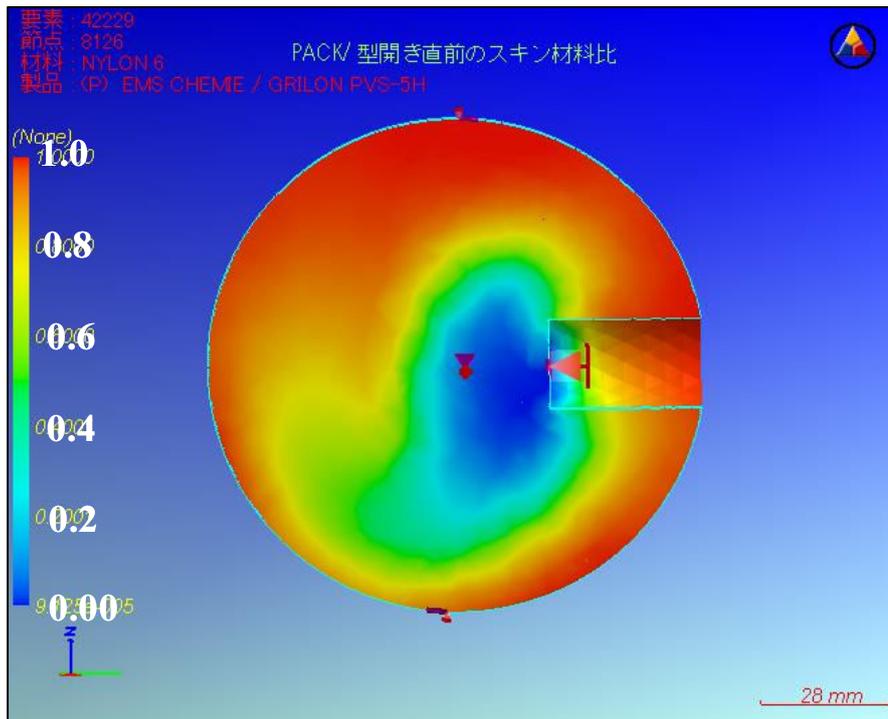


図 14. 型開き直前のスキン材料比（試作 3）

2-2-2 試作成形

前年度に行った試作では、中空部が全く形成されなかった。中空部が出来ない理由については、ガス注入用ピンの周囲にある樹脂が冷却固化したためガスが入らなかった可能性が最も高いが、成形シミュレーションにおいては中空部とも考えられる低温領域が示されていたことから、ガス圧の持続時間が短いため金型から取り出した後、中空部が消滅した可能性もあることが指摘された。ここでは、このような考察に基づきガスアシスト装置を改良することでガス注入時間を延長した成形を行った。試作成形の条件を表 2 に示す。

表 2. 成形条件（試作 3）

| | |
|---------|------------------------|
| 材料 | PA-GF50（ナイロンガラス繊維 50%） |
| ゲート直径 | 樹脂 1.5mm、ガス 7mm |
| 樹脂温度 | 280℃ |
| 金型温度 | 80℃ |
| 射出圧力 | 156MPa（最大射出圧力の 85%） |
| 窒素ガス温度 | 30℃ |
| 窒素ガス圧力 | 200kgf/cm ² |
| ガス圧保持時間 | 2000 秒 |

試作成形の結果を図 15 に示す。今回も残念ながら中空部を作ることができなかった。ガスの注入時間を大きく延長したが結果は前回と殆ど変わらなかった。またガス圧を大きくした場合でも結果は同様であった。



図 15.試作成形の結果（試作 3）

2-3 試作 4（回転による成形）

2-3-1 回転の効果に関するシミュレーション

金型のコアを回転させた場合の効果について流体シミュレーションにより検討した。解析に用いたのは汎用熱流体解析ソフト「FLUENT」である。金型のキャビティ形状を 2 次元で表現し、キャビティ内に流体を入れた状態で回転させ流体の動きを解析する。解析は非定常で行うため、基本的には、回転し始めからある程度時間の経過した後の状態まで調べることができる。

解析に用いた手法は、流体体積法 (VOF モデル) と呼ばれるものである。VOF モデルは、数値計算によって運動方程式の解を求めるとともに領域全体における各流体（ここでは流体と空気）の体積分率を追跡することができる。一般的には、噴射分散の予測、液体中の大気泡の挙動、ダム決壊後の液体の挙動、気液界面の定常および非定常追跡などに活用されている。解析でもちいた基本的な設定条件を表 3 に示す。

最初の解析では、計算が比較的容易な水を用いた。

表 3. 解析条件

| 設定項目 | 内容 |
|--------|----------|
| ソルバー | 分離型 |
| 空間 | 軸対称（渦あり） |
| 時間 | 非定常 |
| 混相流モデル | VOF |
| 乱流モデル | k-ε |
| 重力 | 考慮有り |
| 回転数 | 300rpm |

メッシュは解析領域の半分だけ作成し、渦流のある軸対称条件を用いて球形キャビティ全体を表現した。FLUENT の場合、軸対称条件を使うと回転軸は必ず X 軸となってしまうため、+X 方向へ重力を作用させ計算を行った。ポスト処理において解析結果を評価する場合は、メッシュを対称軸で折り返し、更に重力が-Y 方向になるようメッシュを回転させ表示した。キャビティの直径108mm、キャビティ内の流体が水の場合の解析メッシュを図16に示す。

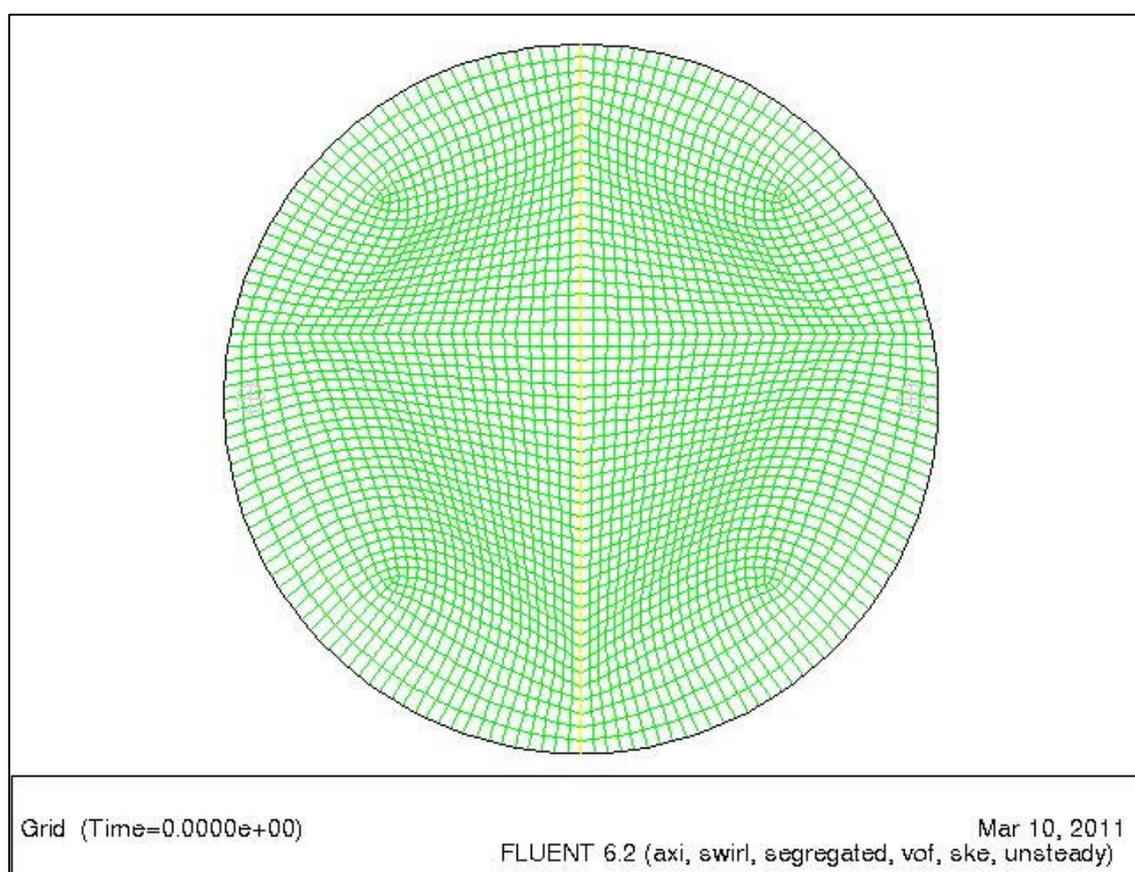


図 16 解析メッシュ

図 17 は、初期状態における流体の体積分率を表したコンター図である。体積分率は計算メッシュがどの流体によって占められているかを示すもので、水の場合 1.0 という値になる。図では赤色の部分が水、黄色が空気の領域を示している。水の体積はコアが回転し、その遠心力でキャビティ中央に球状の空間ができた場合に球体の直径が 66mm になるように設定している。非定常計算では、時間刻みの値を設定する必要がある。時間刻み量を大きくすると、短い解析時間で長時間の現象をシミュレートすることができるが、計算が発散する場合もあるため、計算の安定性との兼ね合いで決定する。ここでは時間刻み量を 0.0001 秒とした。図 17 では、コアの回転が始まる前なので、当然ながら水面は静止した状態である。図 18 には回転軸方向の速度の変化を示した。これは、解析中の流体の挙動をモニタするために設定した特定の位置における速度の変化を示している。この速度の変動は解析の

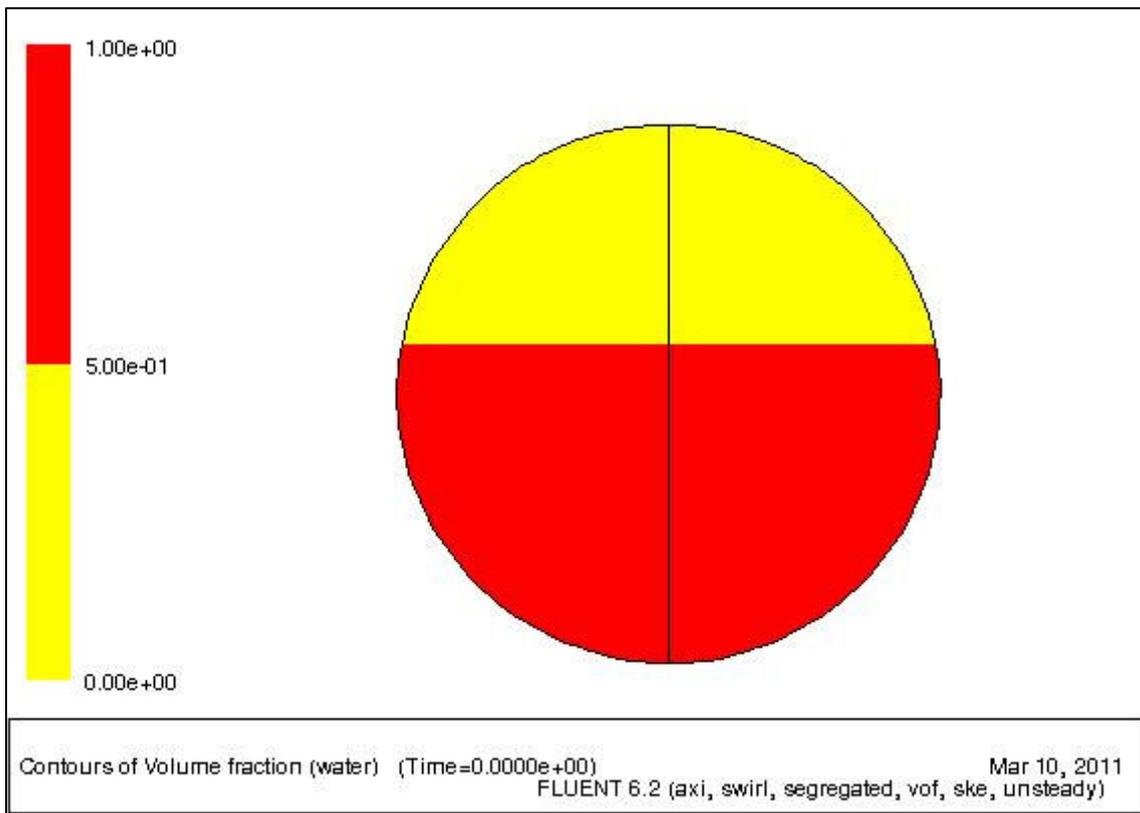


図 17 体積分率 (t=0 秒)

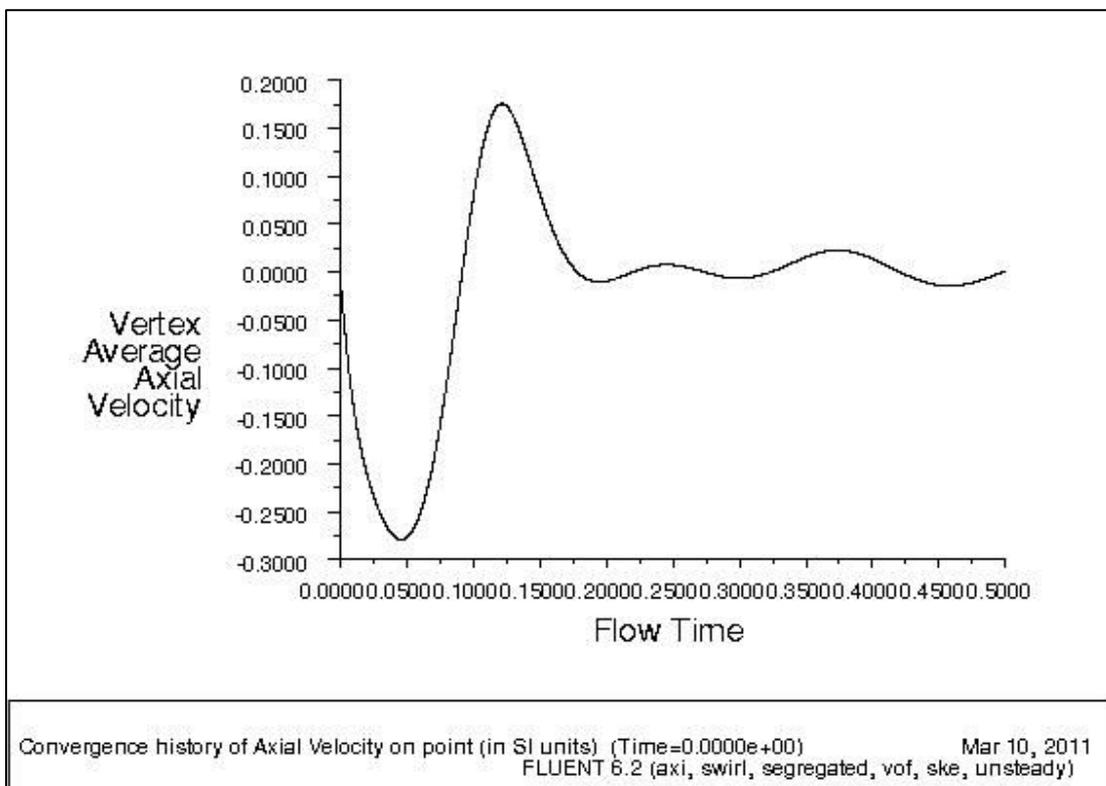


図 18 回転軸方向の速度変化 (モニタ用)

妥当性評価や解析時間の設定などに用いる。図 18 によると解析の初期段階で大きく変動していた速度は時間が経過するにつれ徐々に収束していくことが分かる。本解析では 0.5 秒経過後に解析を終了した。

図 19～24 には体積分率の時間変化を示す。

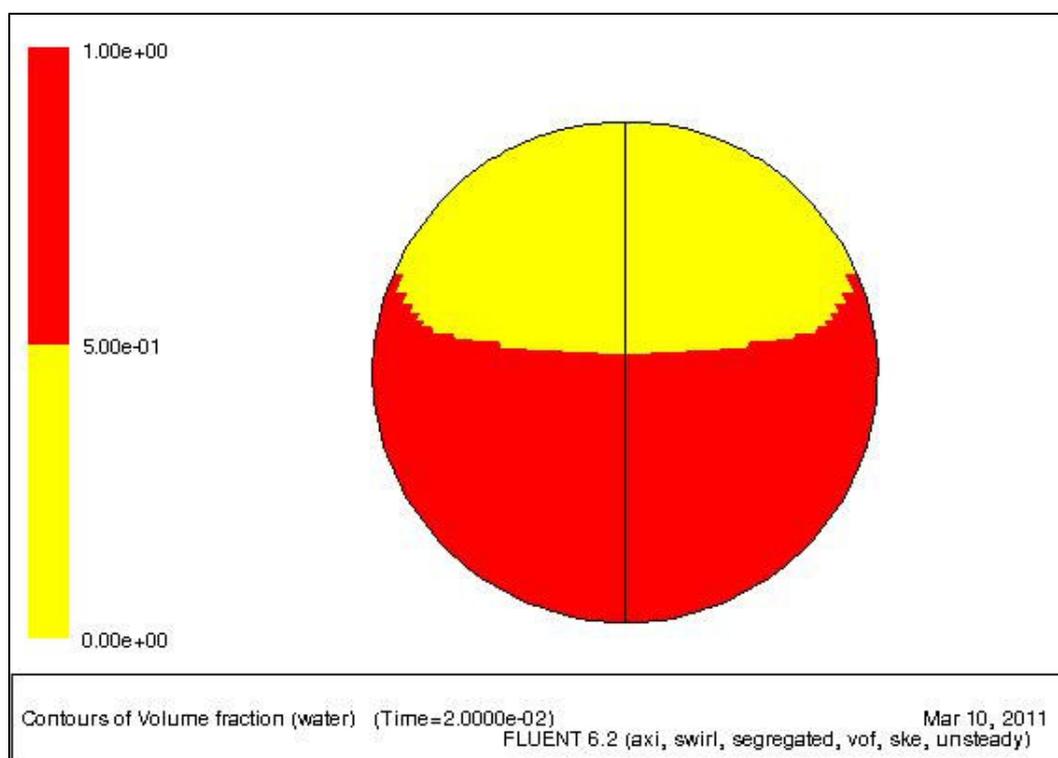


図 19 体積分率 (t=0.02 秒)

図 23 までの図は 0.02 秒間隔で表示しているが、図 24 は 0.5 秒後の様子となっている。また解析で半球部分のみについて行っており、解析結果は対称軸で折り返して表示している。時間の経過に伴い、キャビティ内壁に接する水面が遠心力の影響を受け徐々に上昇し、逆にキャビティ中心付近の水面は低下していることが分かる。0.1 秒以降では、水面の変化も少なくなり 0.5 秒後には殆ど水面形状は一定となる。図 18 の速度モニタ値では、0.2 秒以降での速度変動が小さくなることが示されており、キャビティ内の水面の変動も同様な経過になっていることが推測される。

図 25～27 にはキャビティ内に発生する空気および水のフローパターンを示す。図 25 のように回転が始まって初期の段階では、キャビティ中心付近の流れが重力により下方向へ引っ張られ、逆に壁面に沿った領域では、遠心力の影響で外方向および上方向へ押しやられていることが分かる。図 26 に示す 0.1 秒後のフローパターンでは、流れの方向が反転し、流れはキャビティの中心付近でゆっくりと上昇し、壁面に沿った領域では下向きに流れている。このような流れの反転は、それ以前のフローパターンの結果、水面が平衡位置より

もオーバーシュートしてしまったために生じるものである。それ以降のフローパターン(図27)では流れも殆ど無く、キャビティの回転に対して水面位置が安定した状態だと考えられる。

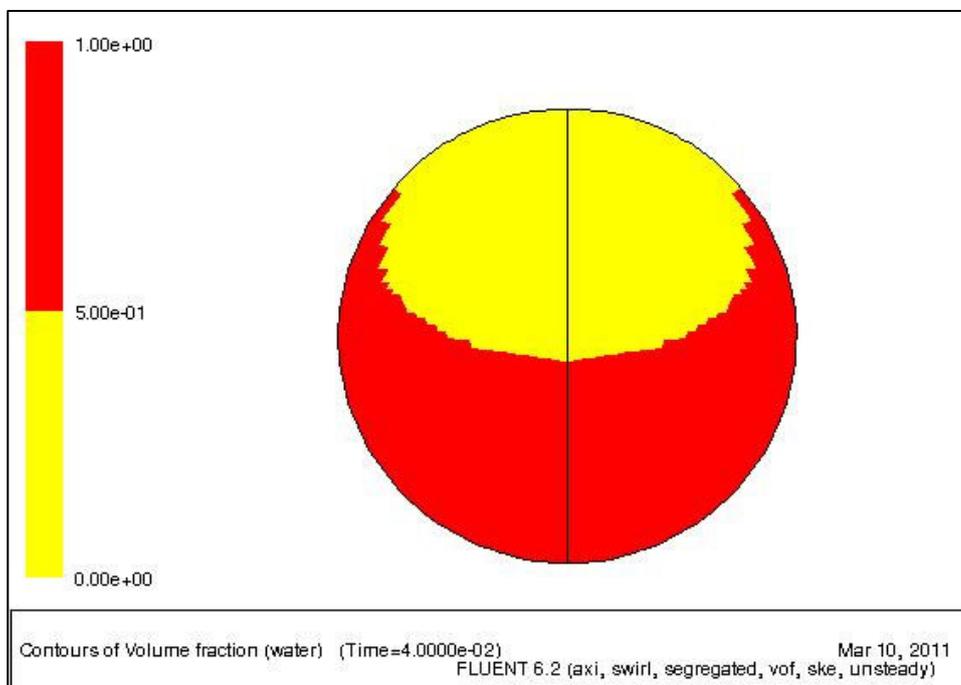


図 20 体積分率 (t=0.04 秒)

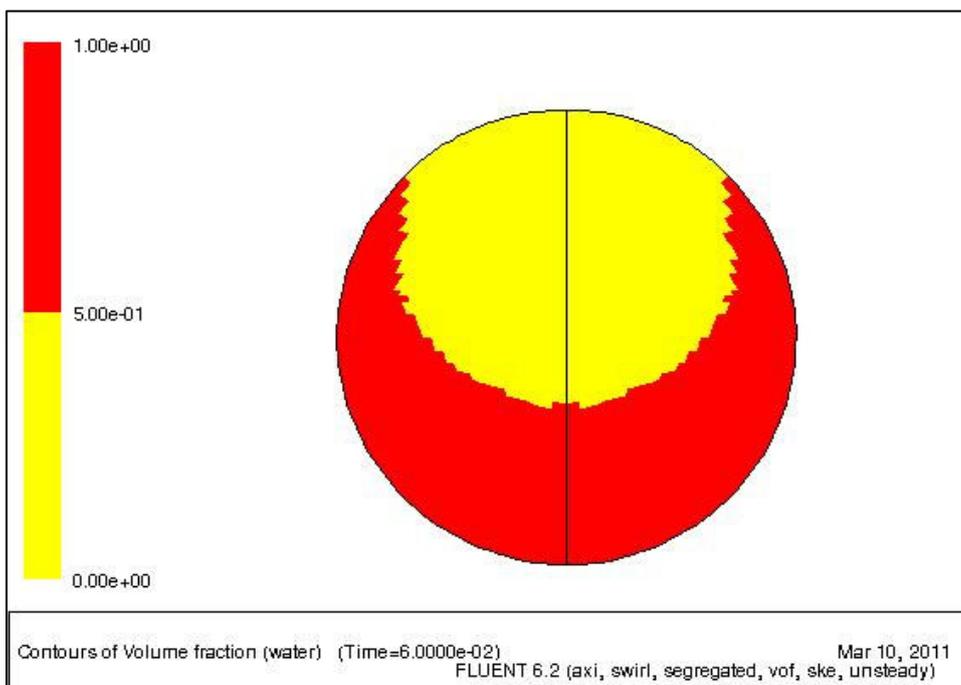


図 21 体積分率 (t=0.06 秒)

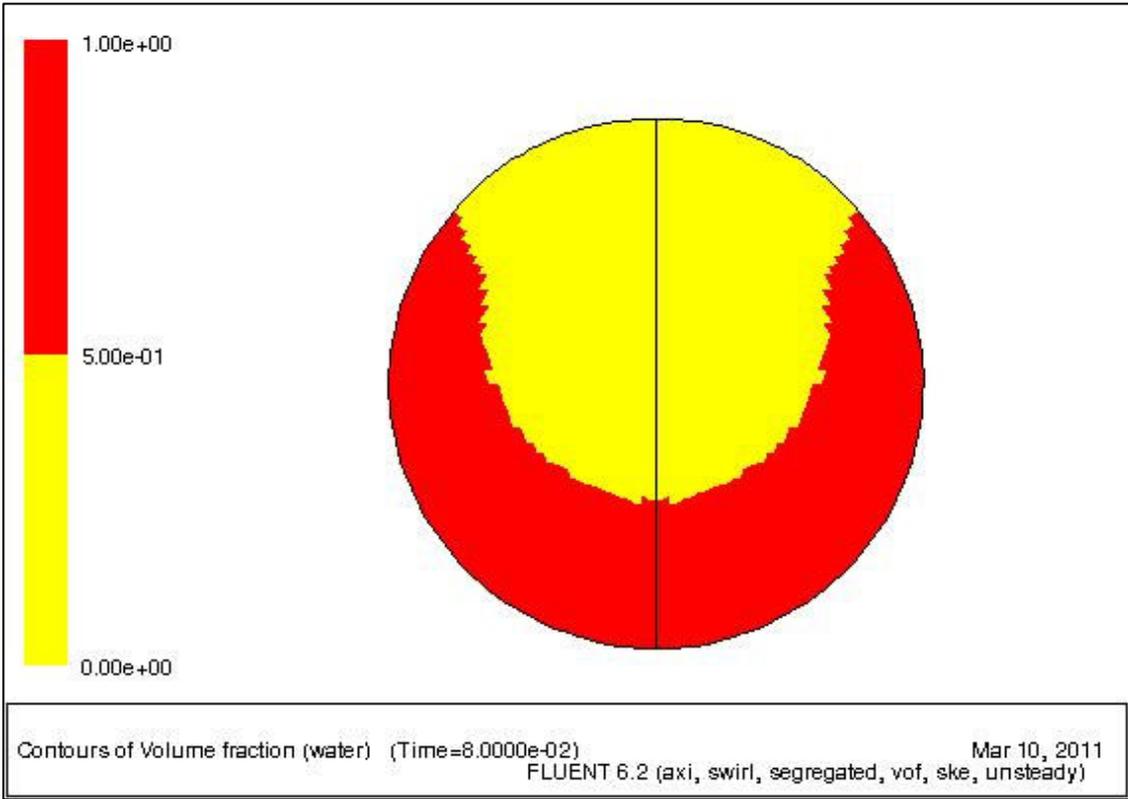


図 22 体積分率 (t=0.08 秒)

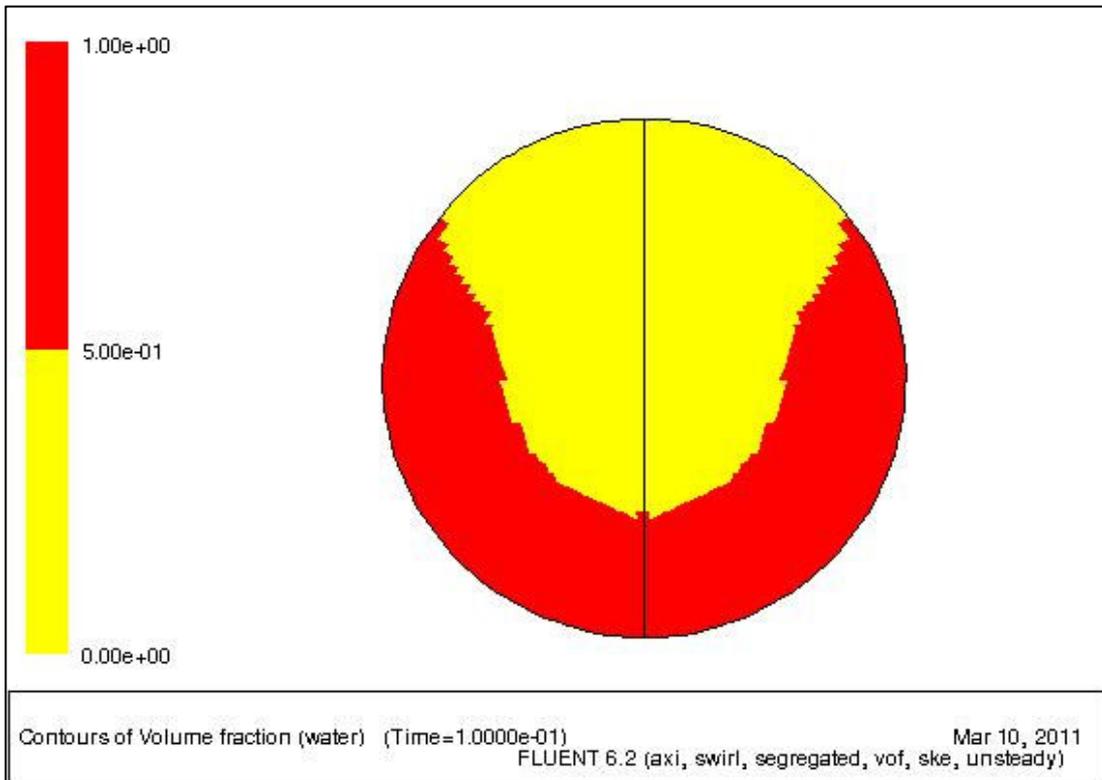


図 23 体積分率 (t=0.1 秒)

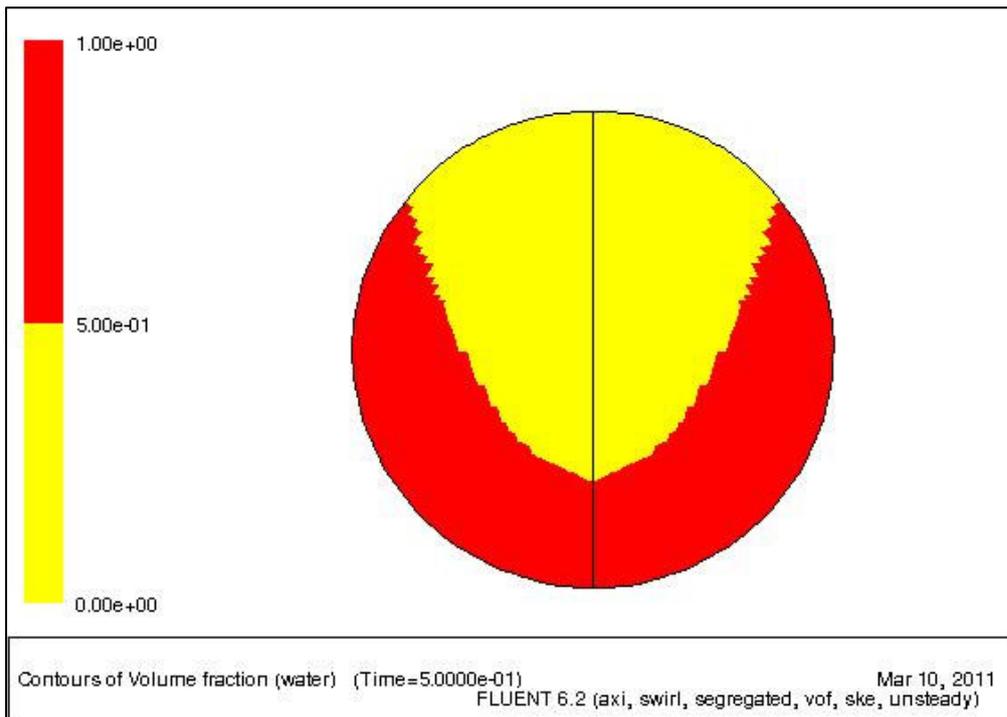


図 24 体積分率 (t=0.5 秒)

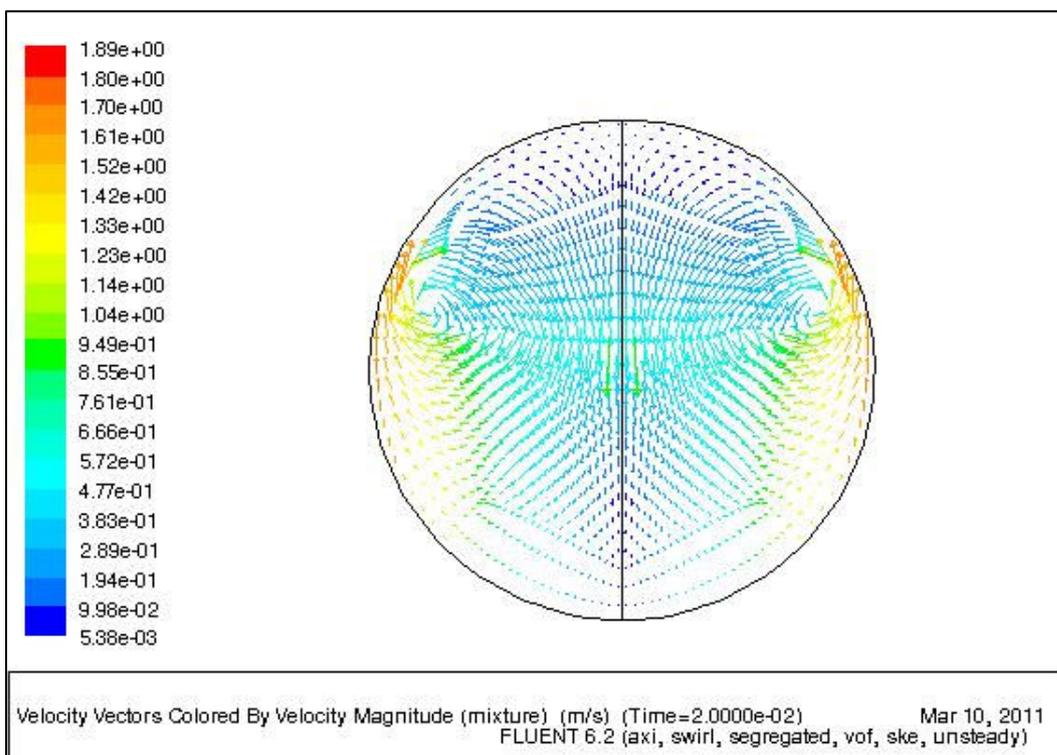


図 25 フローパターン (t=0.02 秒)

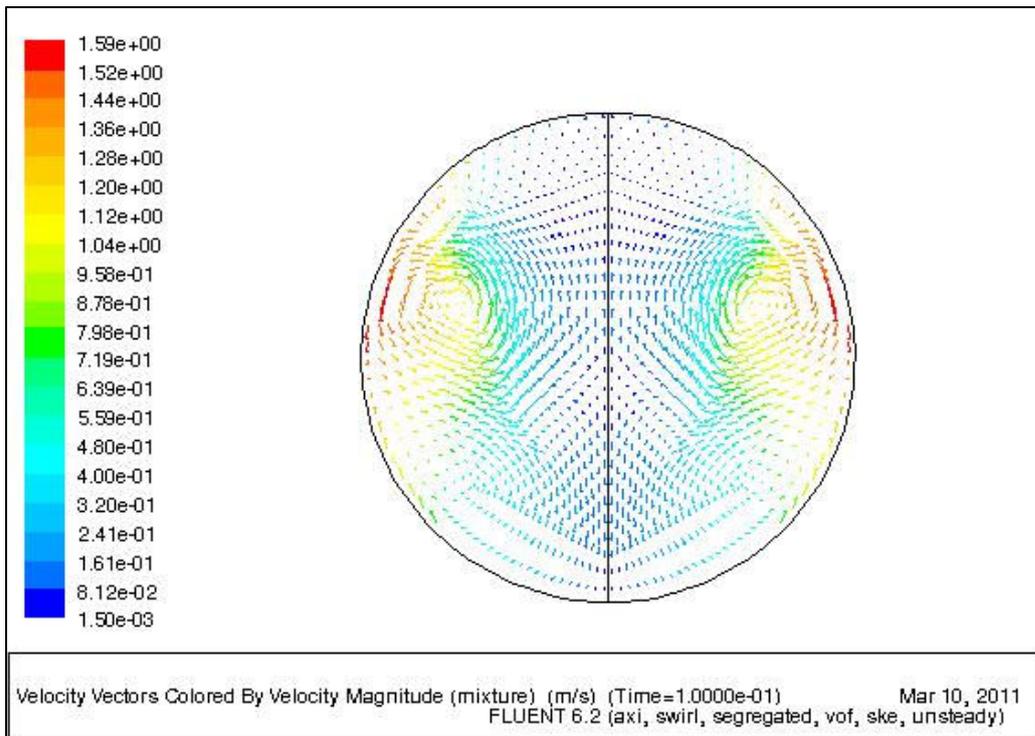


図 26 フローパターン (t=0.1 秒)

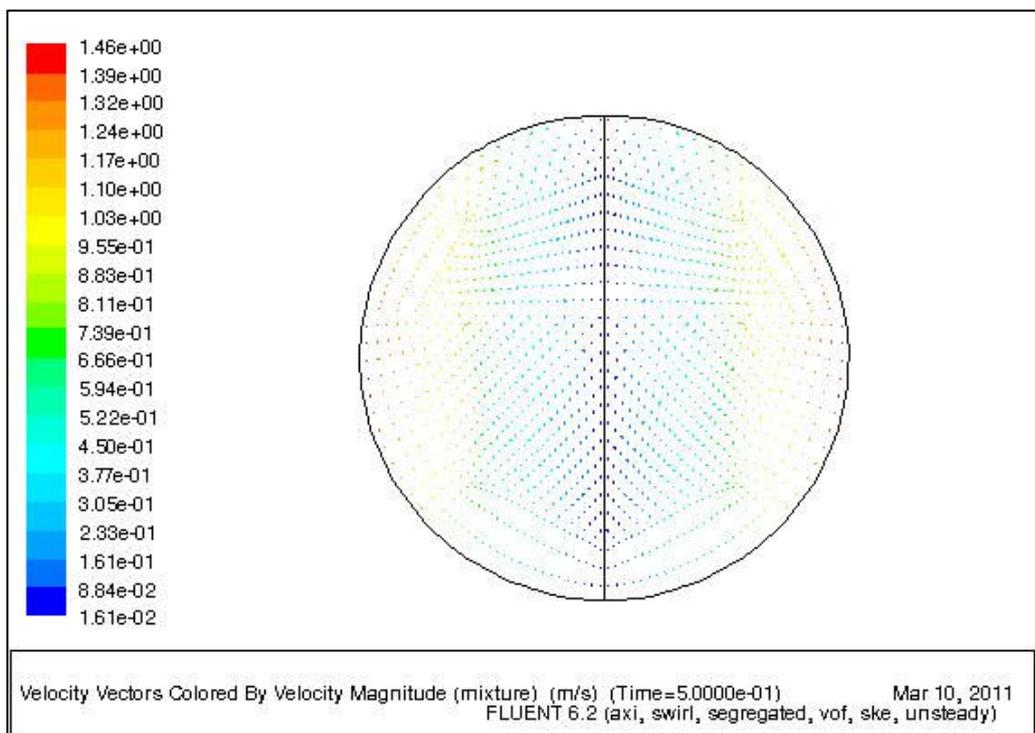


図 27 フローパターン (t=0.5 秒)

この解析の結果、キャビティ内の水を完全に側壁に押しやるには、より高い回転数が必要であることが分かったため、回転数を 1,500rpm にして再計算してみた。その結果を図 28～31 に示す。

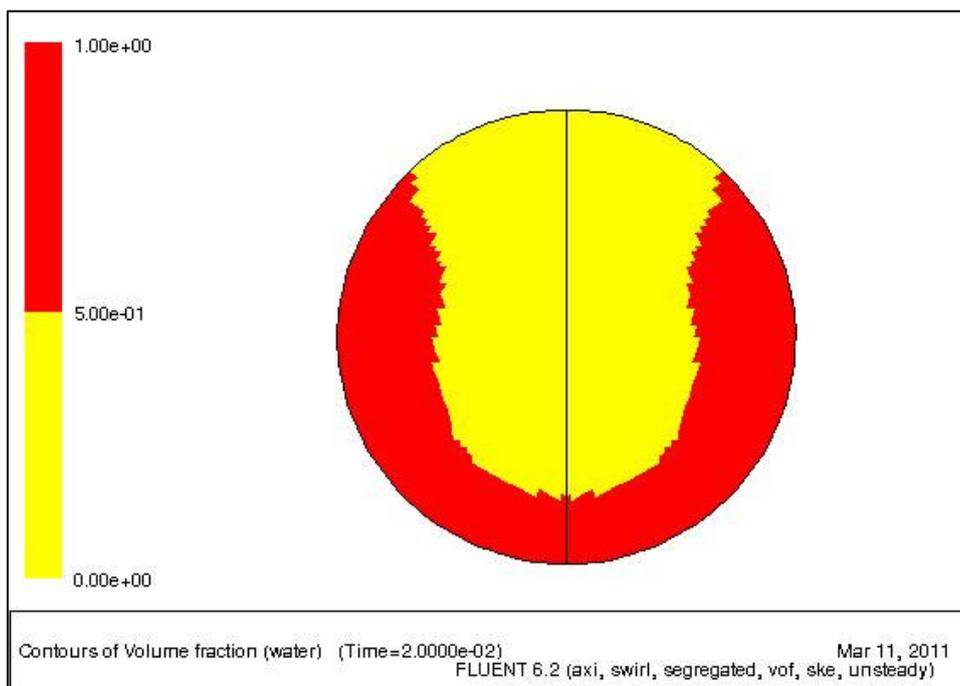


図 28 体積分率 (t=0.02 秒)

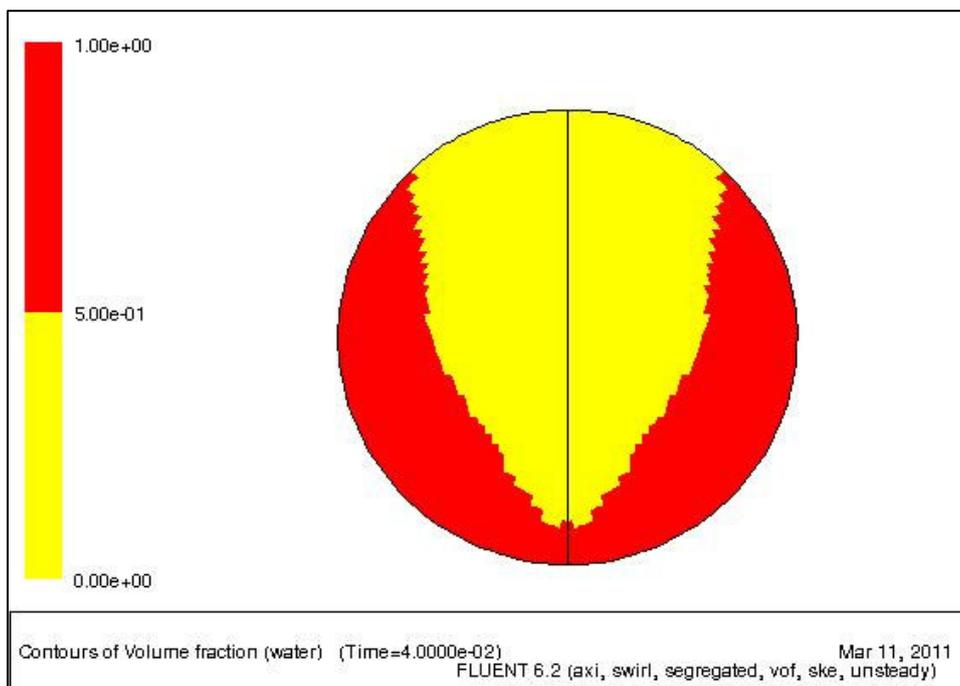


図 29 体積分率 (t=0.04 秒)

回転数 1,500rpm の場合、回転が始まって 0.02 秒後には早くもキャビティ中央付近の水面が大きく低下し、内壁に沿った流体は上側へ追いやられている。そして 0.5 秒後には流体が完全に左右の内壁に押しつけられた状態となった。図 31 の状態をキャビティ底面側から見た場合、内壁に押しつけられた流体は円環状になっていることが推測される。これまでの解析では Y 軸回りの回転を考慮したが、次にキャビティ中心から紙面に垂直な軸回りの回転を考慮した解析を行うことにした。

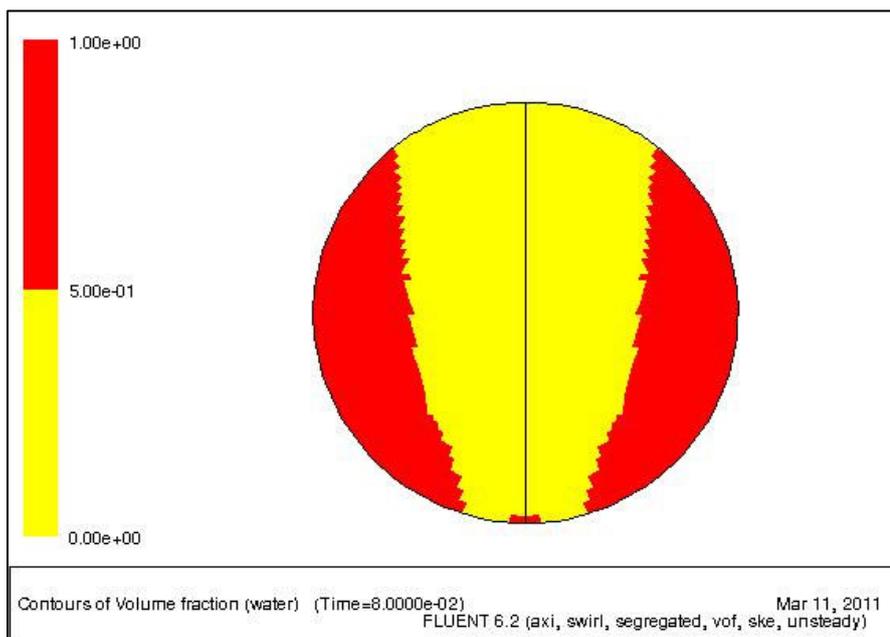


図 30 体積分率 (t=0.08 秒)

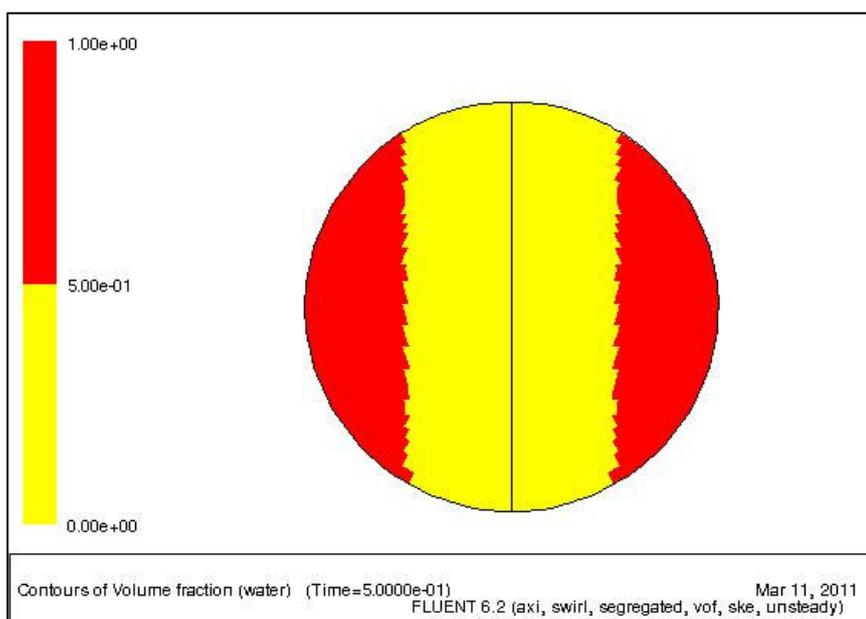


図 31 体積分率 (t=0.5 秒)

図 32 は前述のように回転軸を変更した解析におけるメッシュである。コア回転時の現象は非対称になるため今回はキャビティ全体に対してメッシュを作成している。対称軸の設定が無いことと、回転軸を変更したこと以外の条件は表 3 と同様である。回転は反時計回りに 300rpm である。

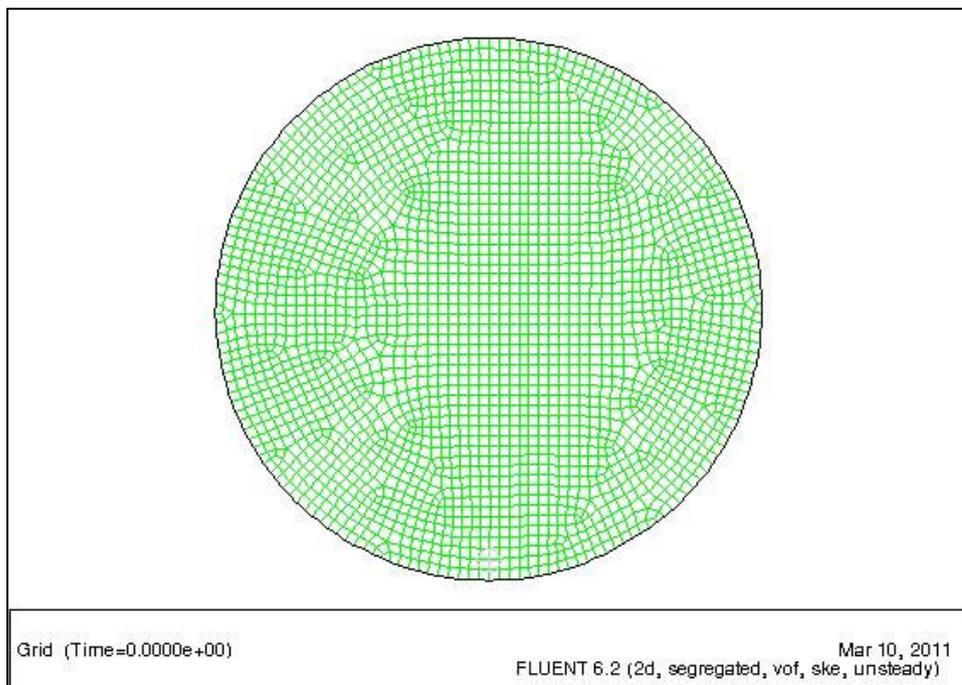


図 32 解析メッシュ（回転軸は球の中心から紙面に垂直な軸）

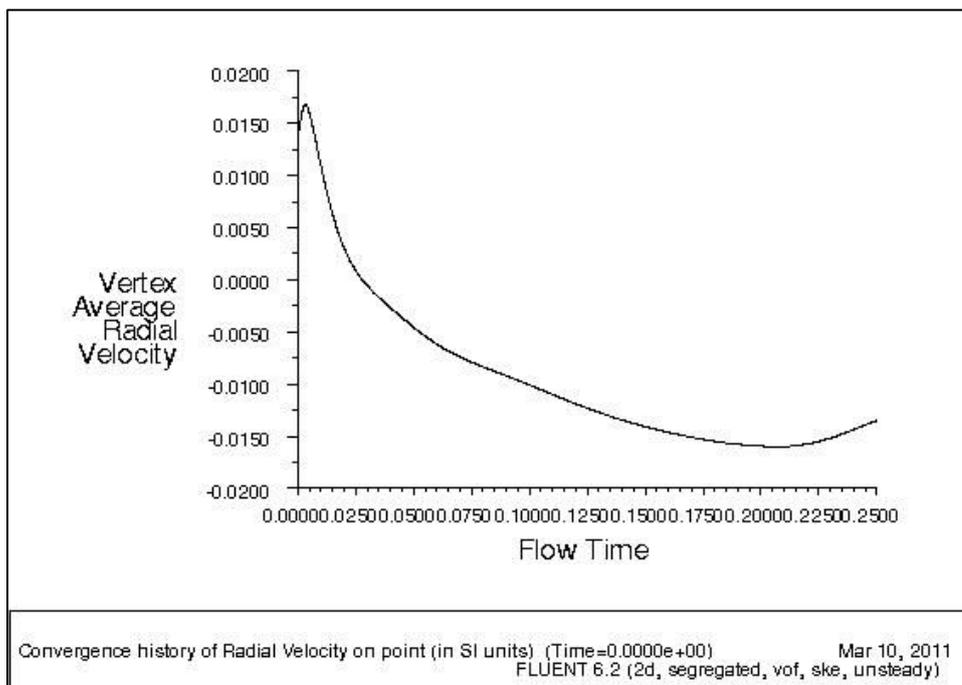


図 33 回転方向の速度（モニタ用）

解析の状況を確認するモニタ用の速度としては、回転方向の速度を用いた。図 33 に示すようにキャビティ内の流体がほぼ安定した時点で解析を止めている。

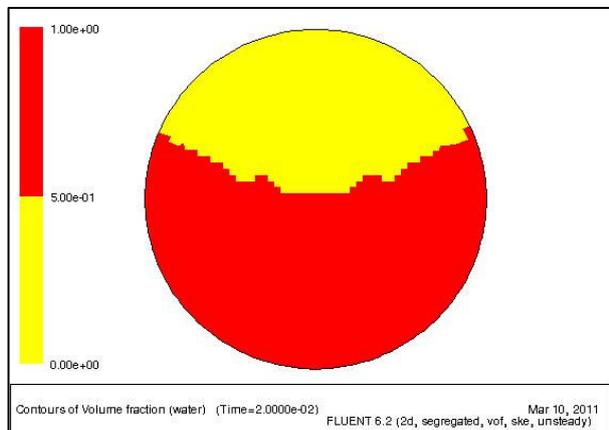


図 34 体積分率 (t=0.02 秒)

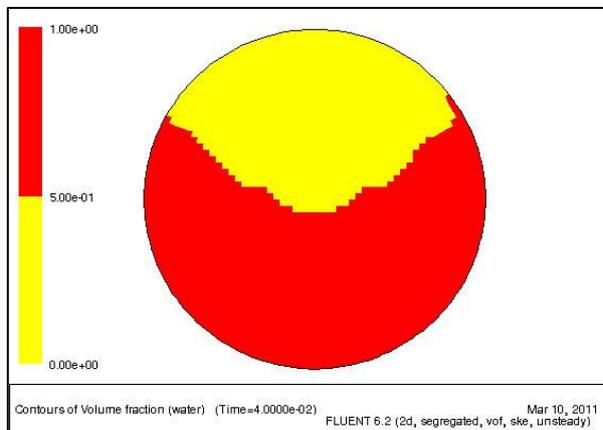


図 35 体積分率 (t=0.04 秒)

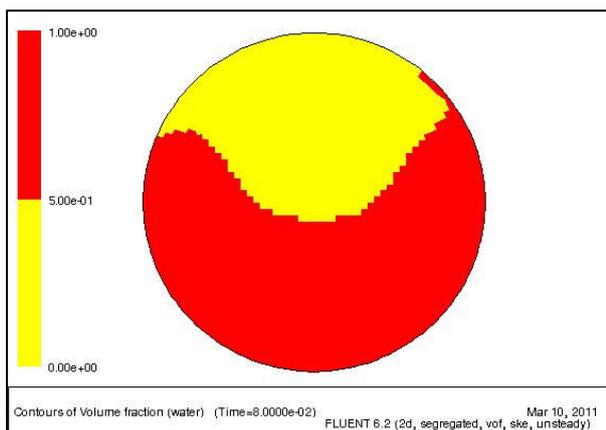


図 36 体積分率 (t=0.08 秒)

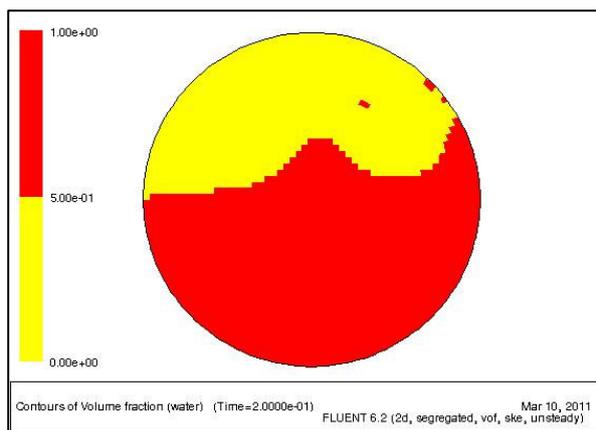


図 37 体積分率 (t=0.2 秒)

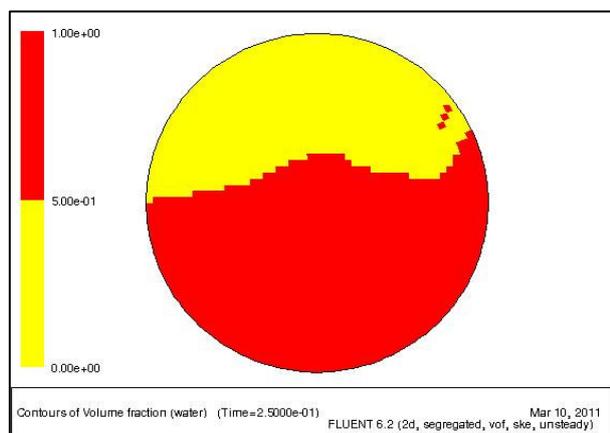


図 38 体積分率 (t=0.25 秒)

図 34～38 には体積分率のコンター図を示す。回転が始まり 0.04 秒頃までは水面の挙動が殆ど左右対称になっているが、それ以降は、徐々に右側の内壁に沿った領域が持ち上がり、左側は下がり気味になる。これは当然の事ながら、コアが反時計回りに回転することによる効果である。0.25 秒後の図では回転の効果が出ていないように思えるが、これ以降の時間においては、水面が僅かに上下に揺動するのみであった。水の場合、それほど摩擦や粘性が大きくないことから 300rpm 程度では、このような挙動しか確認できなかった。

図 39～44 にはフローパターンを示す。時間が経過するにつれて速度の大きなベクトルの発生する位置が反時計回りに移動していることが分かる。回転の始まった初期段階では、キャビティ内の流体は大きく動いているが、0.15 秒経過した段階での水の揺動はほぼ収まり、空気の対流が相対的に大きくなっている。0.2 秒経過すると、その空気の流れも小さくなる。これ以降の時間ではフローパターンに大きな変化は見られなかった。

このように水の場合は、コアを 300rpm で回転させても中空部を形成するには至らないことが分かった。次に回転数を 1,500rpm に変更し解析を行った。

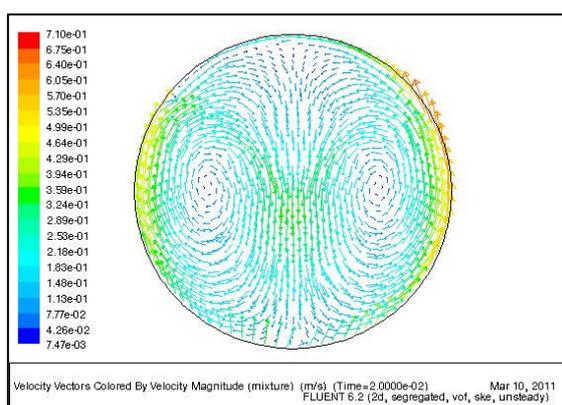


図 39 フローパターン (t=0.02 秒)

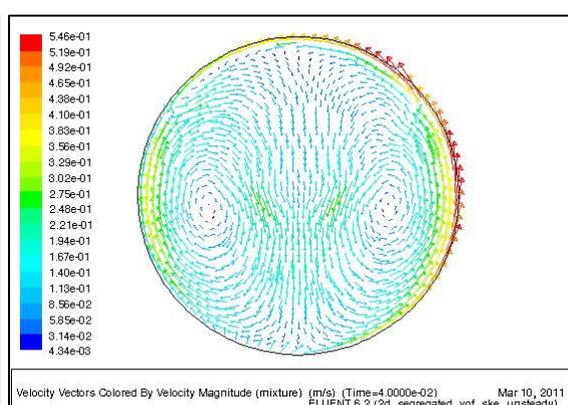


図 40 フローパターン (t=0.04 秒)

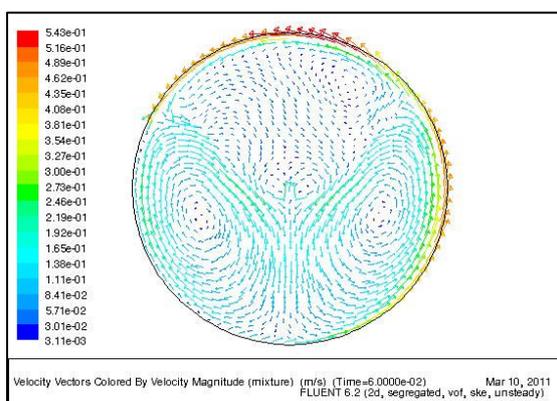


図 41 フローパターン (t=0.06 秒)

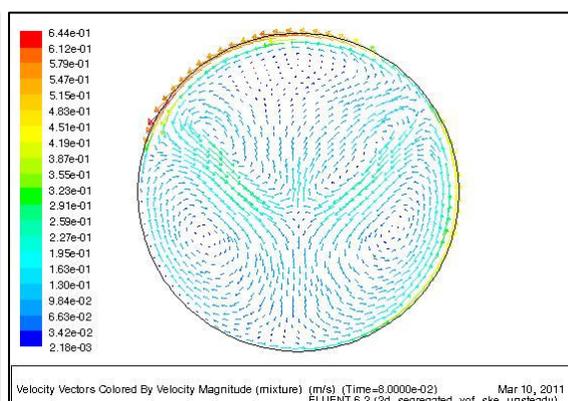


図 42 フローパターン (t=0.08 秒)

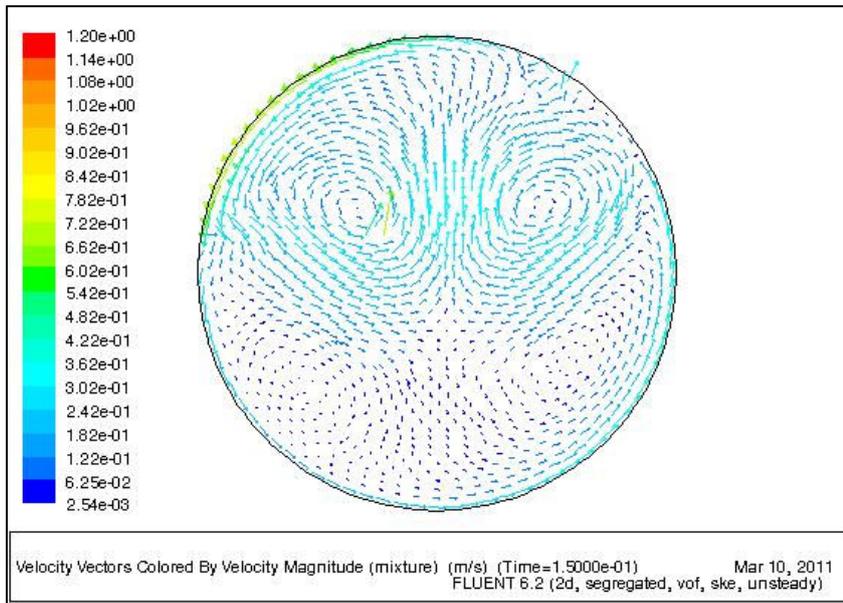


図 43 フローパターン (t=0.15 秒)

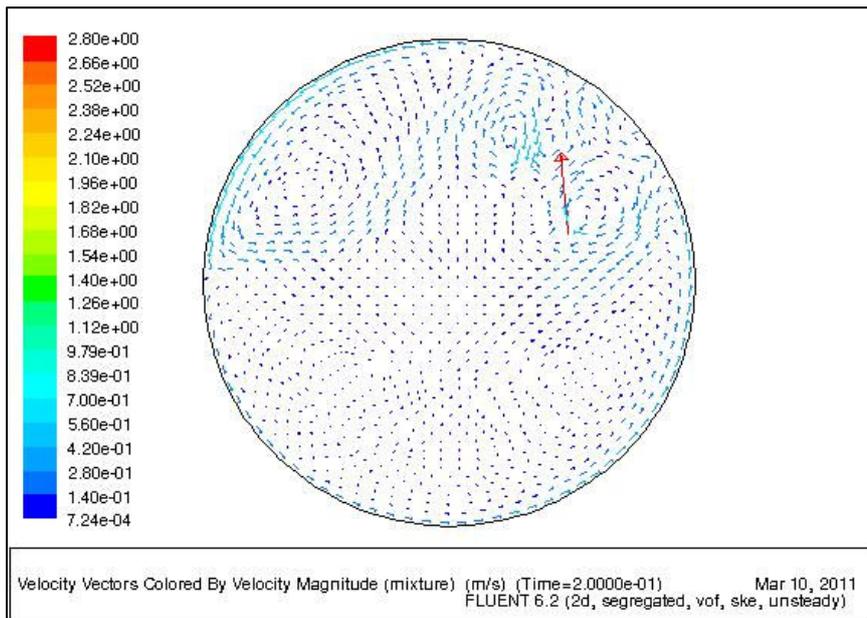


図 44 フローパターン (t=0.2 秒)

図 45～50 には回転数を 1,500rpm に変更した解析の結果を示す。回転が始まった直後から水面は大きく変動し、0.04 秒経過した時点で既に流体は円環状になりつつある。重力の影響で流体全体がキャビティ下部に偏りがちではあるが、0.5 秒経過後には、ほぼ中空に近い状態になっている。ただ図 50 は、前出した図 31 の状態を下側から見た場合に相当すると思われるため、回転による遠心力のみで 3 次元の球体を成形したい場合には、やはり回転軸を変えながら様々な角度でコア回転を行う必要がある。

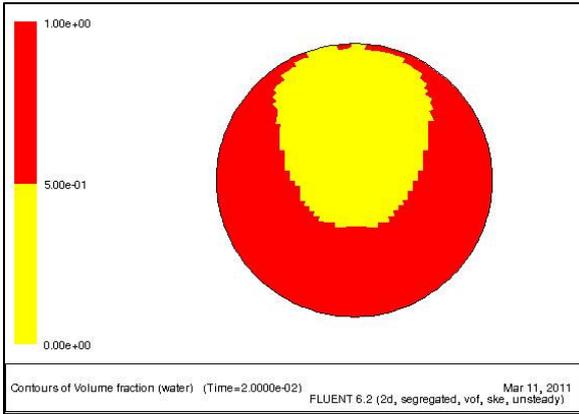


图 45 体積分率 (t=0.02 秒)

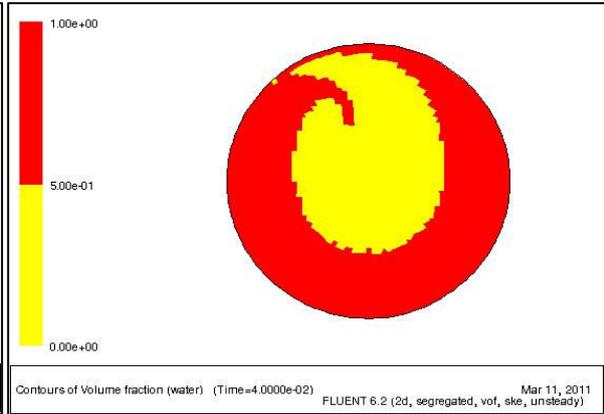


图 46 体積分率 (t=0.04 秒)

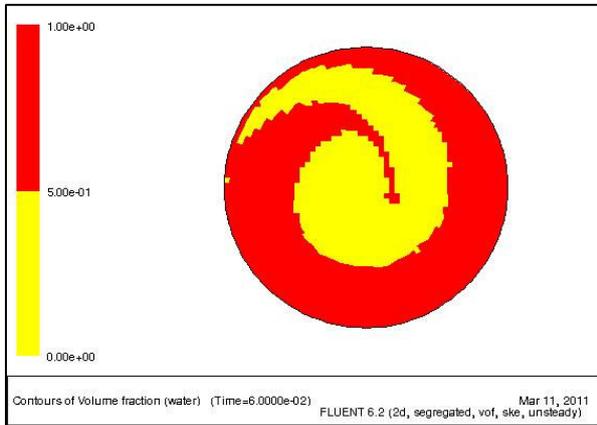


图 47 体積分率 (t=0.06 秒)

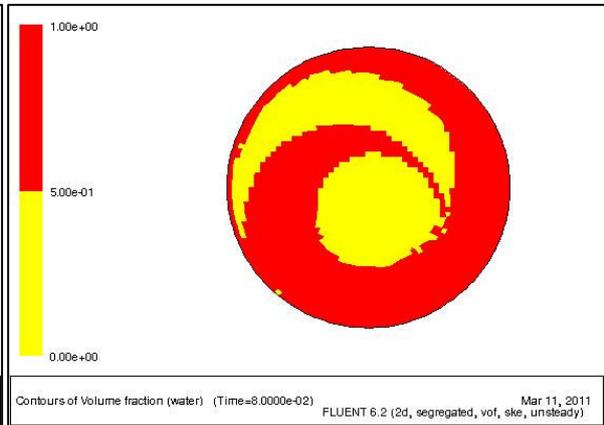


图 48 体積分率 (t=0.08 秒)

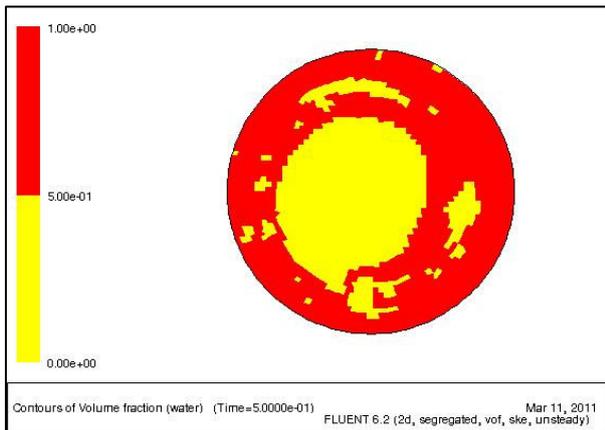


图 49 体積分率 (t=0.1 秒)

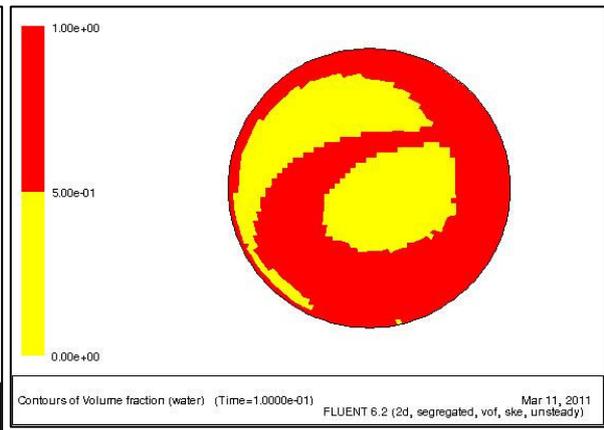


图 50 体積分率 (t=0.5 秒)

これまでの解析では、計算手法の妥当性を確認するため収束しやすく計算時間が短い「水」を解析に用いていたが、実際に成形で使用するガラス繊維が 50%含まれたナイロン（以下ナイロン GF50）では、当然ながら流体の挙動が異なることが予想される。これまでの解析によってメッシュや回転条件の与え方などの計算方法を確認することができたため、次に樹脂を用いた解析を実施することにした。樹脂の物性は環境温度によって著しく変化する。ナイロンのような熱可塑性プラスチックは、低温では固体のように見えるが、温度を徐々に上げていくとゆっくりと粘性を持った流体へと変化する。ナイロン GF50 の密度および粘性について図 51、52 に示す。ここでは、成形温度である 280℃の値として密度 0.736g/cc、粘性 243Pa・s をナイロン GF50 の物性値として用いることにした。

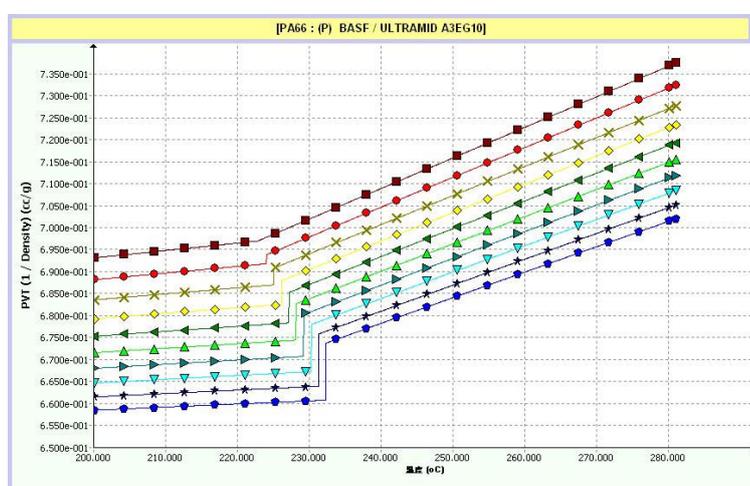


図 51 ナイロン GF50 の密度

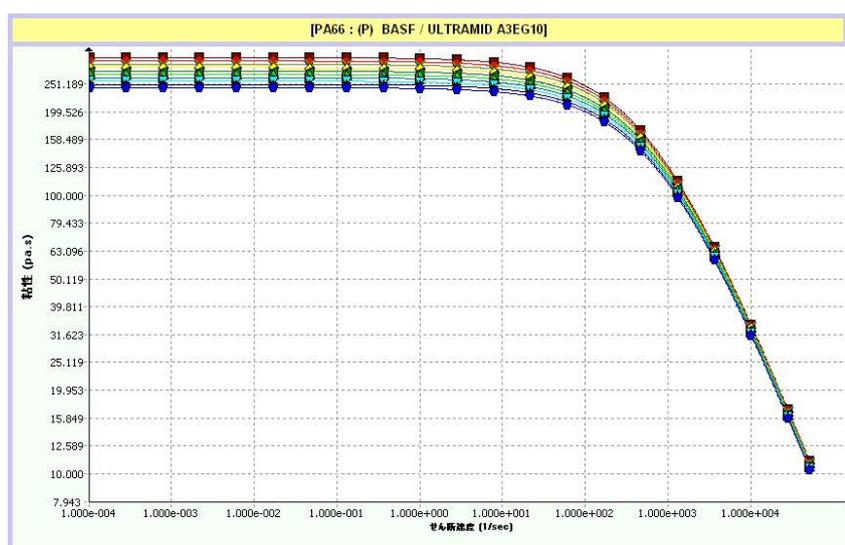


図 52 ナイロン GF50 の粘性

水を用いた解析では時間刻み量を 0.0001 秒としていたが、前述した樹脂の物性値を使った場合、この時間刻み量では計算が発散（収束しない）することが分かった。時間刻み量を徐々に細かくして検討した結果、時間刻み量を 1×10^{-7} 秒まで小さくしなければ結果が得られないことが分かった。これは 1 秒間の現象を解析するのに 1 千万回の時間ステップが必要ということである。今回の解析に使用しているパソコンでは、最大でも 1 時間に 2 万ステップしか計算できないため、単純に考えると 1 ケースの解析をするのに 20 日間必要だということになる。ここでは、様々な計算条件について解析を行い、成形条件について検討することが目的であるため、ナイロン GF50 そのものの物性値による計算は極短い現象についてのみ行った。図 53 は、ナイロン GF50 の物性値による計算結果を示したものである。図は円形キャビティの中心から紙面に垂直な軸回りに 300rpm で回転させた場合の結果である。僅か 0.0145 秒後には、このように大きく内部の樹脂が動いていることが分かる。水との大きな違いは、キャビティの回転と流体の挙動にタイムラグが殆ど無いことである。このため樹脂の場合は、水に比べてコアの回転数を小さくしても円環状になりやすいことが予想される。

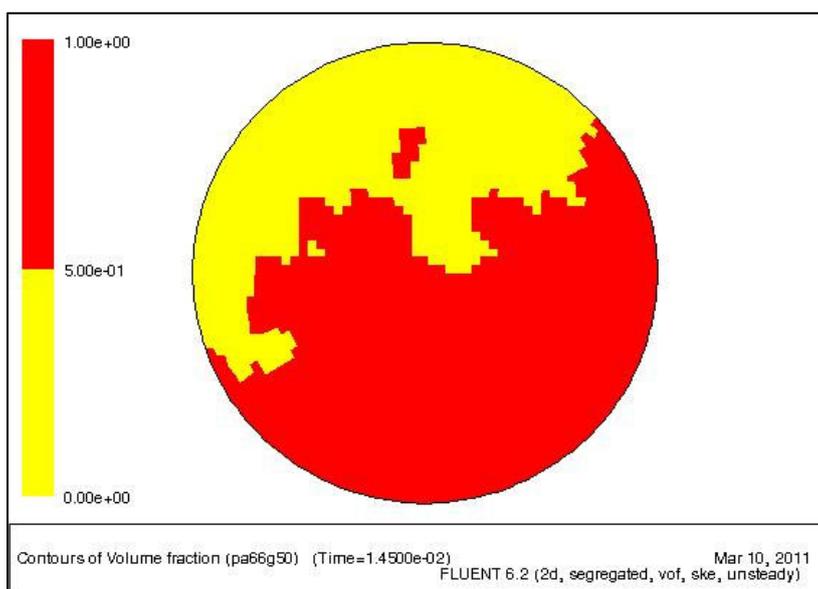


図 53 体積分率 ($t=0.0145$ 秒) (粘性係数 $243\text{Pa} \cdot \text{s}$)

粘性係数 $\mu = 243\text{Pa} \cdot \text{s}$ では計算時間が膨大になることから、ここでは粘性係数 μ を $1\text{Pa} \cdot \text{s}$ として解析を実行した。 $\mu = 1$ では時間刻み量を 1×10^{-5} 秒まで大きく設定することが可能である。水による解析では粘性係数 μ は 0.001 程度であったため $1\text{Pa} \cdot \text{s}$ でも 1000 倍の大きさであることから、粘性係数が大きくなった場合の効果を推測することが可能だと考える。

図 54～58 は、粘性係数が $1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 、回転数が 300rpm の場合の解析結果である。水で解析した場合の 1,500rpm に相当する結果が得られている。実際にナイロン GF50 で成形する

場合は、粘性が更に 1000 倍大きくなることから回転数を小さく設定することができると考
える。

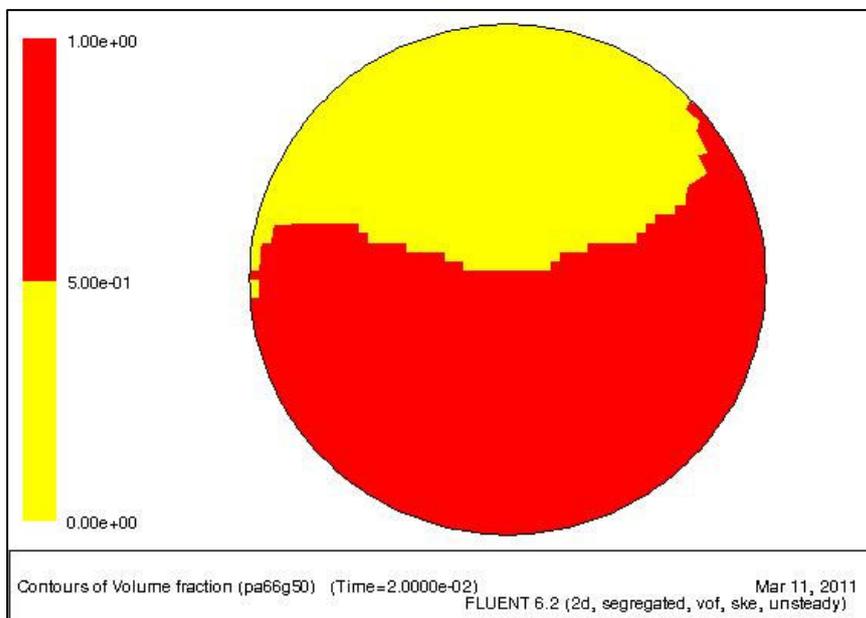


図 54 体積分率 ($t=0.02$ 秒) (粘性係数 $1\text{Pa} \cdot \text{s}$)

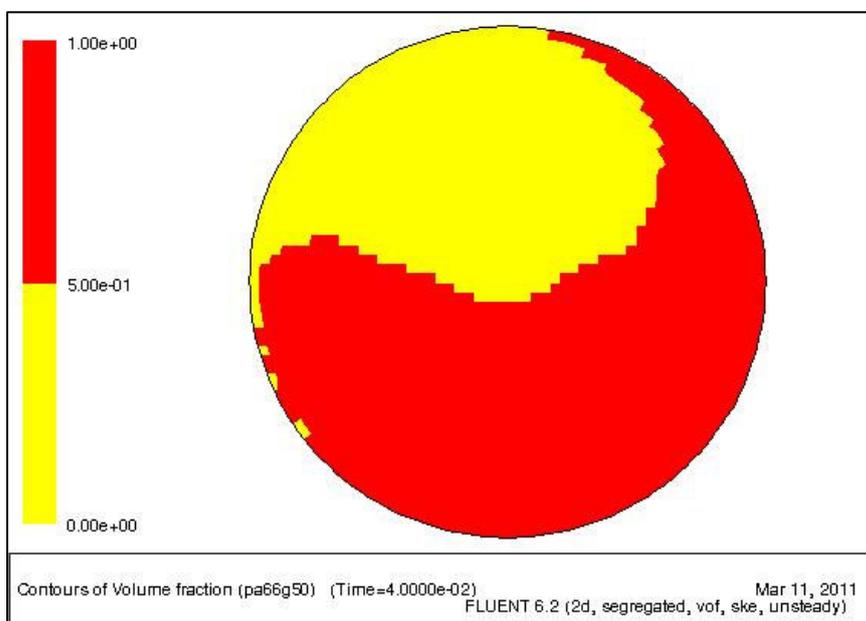


図 55 体積分率 ($t=0.04$ 秒) (粘性係数 $1\text{Pa} \cdot \text{s}$)

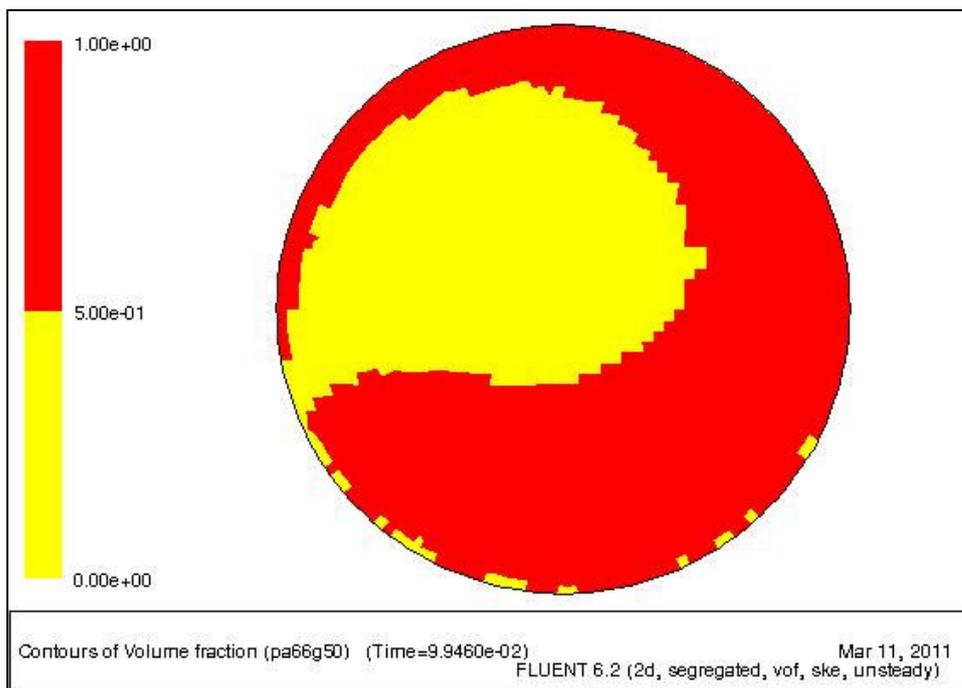


図 56 体積分率 (t=約 0.1 秒) (粘性係数 $1\text{Pa} \cdot \text{s}$)

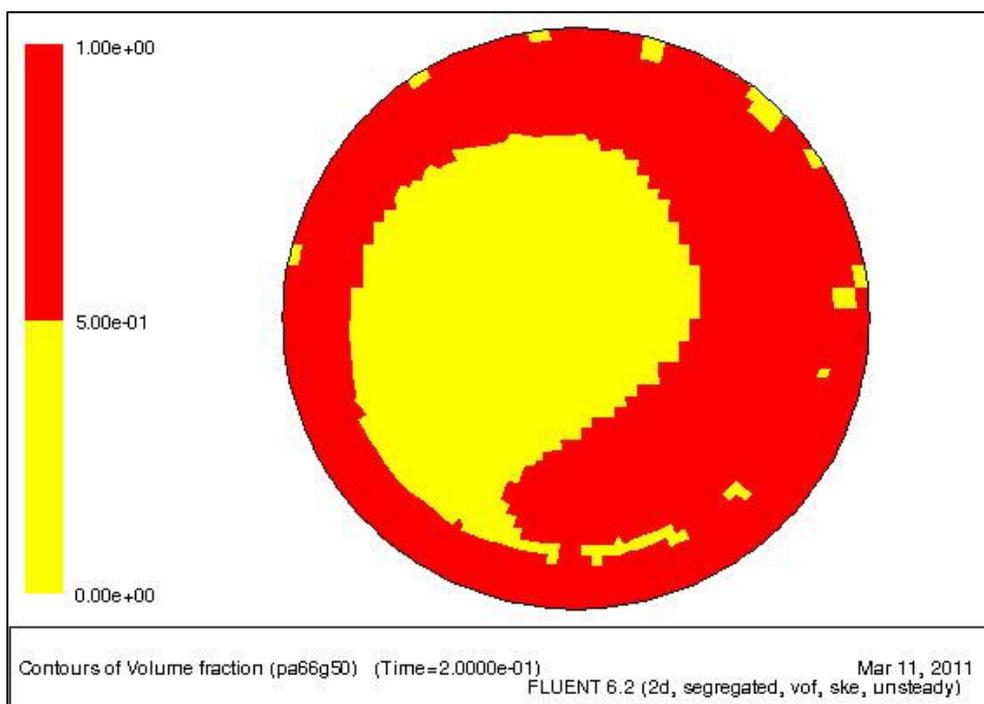


図 57 体積分率 (t=0.2 秒) (粘性係数 $1\text{Pa} \cdot \text{s}$)

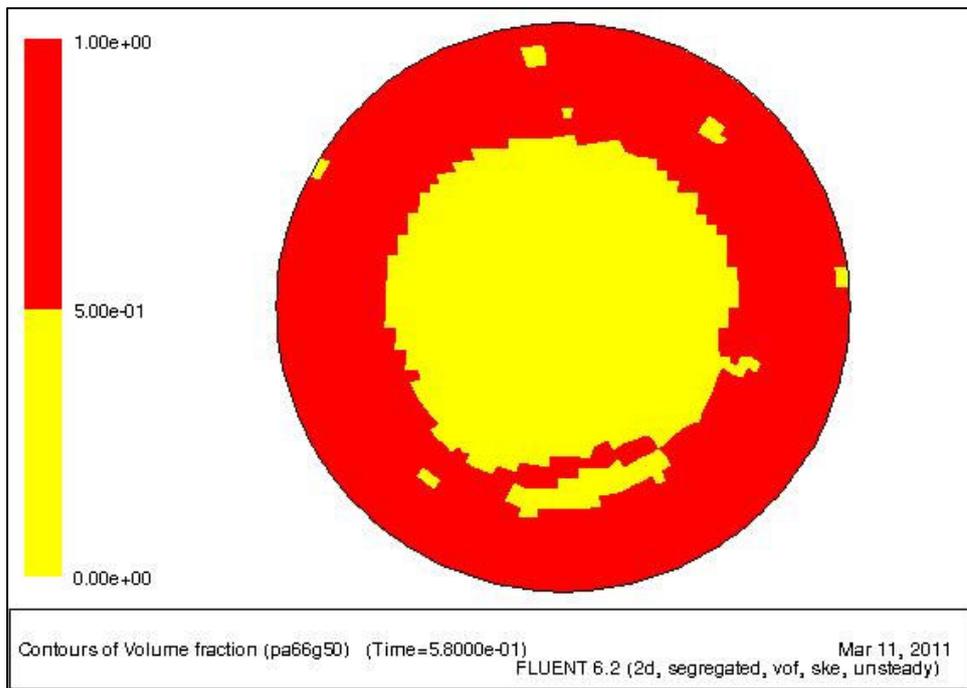


図 58 体積分率 (t=0.58 秒) (粘性係数 $1\text{Pa} \cdot \text{s}$)

2-3-2 金型構造

コア回転の機能を付加した金型について、その構造を図 59 に示す。回転するコアはベアリングによって支持している。またパーティング面は摩擦係数の小さなオイレスメタルを使用した。回転の動力は、金型外に用意したモーターから金型の可動側へチェーンにより伝える構造となっている。金型の固定側は射出ノズルの反対側に設けたバネにより可動側へ押しつけており、可動側との接触摩擦により回転するものとした。コアの回転数はモーターを

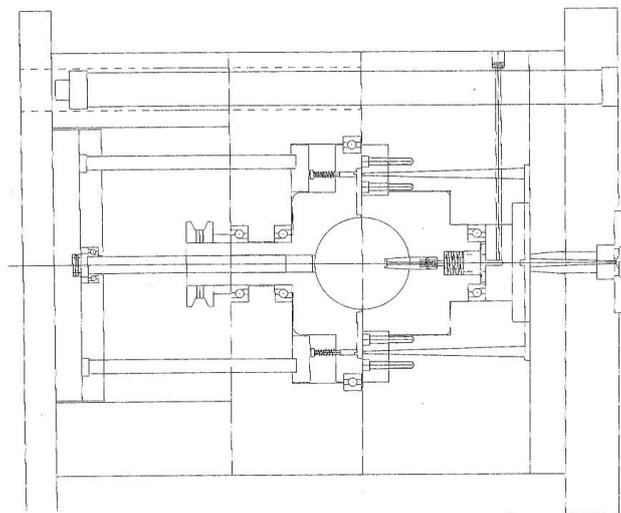


図 59 回転金型の構造概略

インバータ制御することで調整が可能である。また本金型は4点ゲートの試作 3 を基にして考えられており、スプルーとゲートはパーティング面を4分割した位置にある。ランナーを円環状に配置することで、コアがどの位置に停止しても樹脂が充填できる構造となっている。アシストガスは成形機のノズル部から注入する方式となっている。

モーターの容量は、当初 0.75kW であったが最初の試作成形時にトルク不足であることが分かったため 2.2kW へ変更している。モーターの定格回転数は 1,120rpm (60Hz)、回転ギア比は 4:1 である。また本研究の初期において構想のあったコア自体をモーターとする案では DD モーターを使用する予定であったが、その場合のモーター最大容量は 0.75kW であり回転トルクが不足してしまうことが明らかになった。

図 60 は回転金型を成形機に取り付け型を開いた状態である。可動側の下部に回転用モーターを備えている。図 61 は型閉じの状態である。

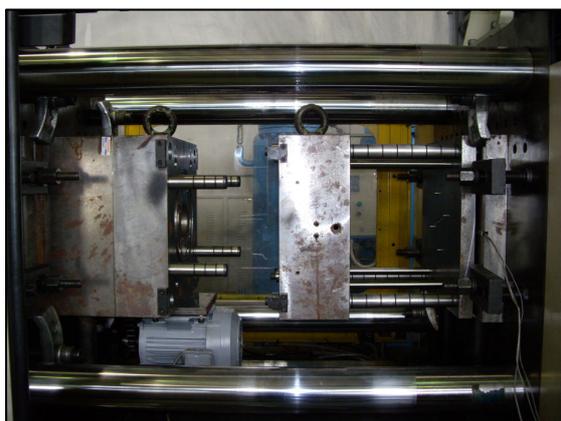


図 60 型開きの状態 (回転金型)

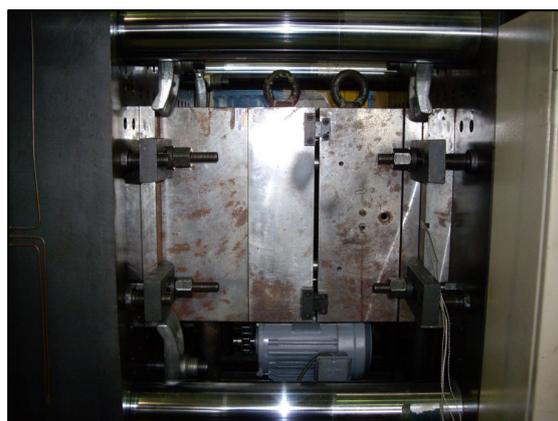


図 61 型閉じの状態 (回転金型)



図 62 可動側



図 63 固定側

図 62、63 には金型の可動側と固定側をそれぞれ示す。可動側の図では球形状のキャビティの周囲に円環状に配置されたランナーとサイド 4 点から入り込んでいるゲートが確認できる。

2-3-3 試作成形

回転金型による成形条件を表 4 に示す。インバータを用いて回転周波数を 10Hz ずつ増加させた。その時、コアの回転数は最少で 187rpm、最大で 1,120rpm となる。樹脂充填終了から 100 秒間経過した後にコアの回転を始めた。最初の実験においてセンター部からのガスが注入できないことが判明した。これは試作 3 の実験でもあったようにガスの逆流を防ぐために設けた金属製ピンの周囲において樹脂の硬化が予想以上に早く、ガスの流入を妨げたものと考えている。このようなことから、実験番号 2 からはガス注入の無い状態で、キャビティ内の樹脂に対する回転の効果を調べることにした。

表 4 回転金型における成形条件

| 実験番号 | インバータ周波数(Hz) | コア回転数(rpm) | 射出圧力(%) | 射出後回転開始までの時間 | コア回転時間 | ガスアシスト可否 |
|------|--------------|------------|---------|--------------|--------|----------|
| 1 | 0 | 0 | 85 | - | - | 否 |
| 2 | 10 | 187 | 85 | 100s | 600s | 否 |
| 3 | 20 | 373 | 85 | 100s | 600s | 否 |
| 4 | 30 | 560 | 85 | 100s | 600s | 否 |
| 5 | 40 | 747 | 95 | 100s | 600s | 否 |
| 6 | 50 | 933 | 95 | 100s | 600s | 否 |
| 7 | 60 | 1120 | 95 | NG | NG | NG |

図 64 は実験番号 1 での成形品である。断面の写真において白く見えている領域は密度の粗い部分であり、4 つのゲートに挟まれた領域以外は、このような白い領域となっている。濃い色の部分は比較的密度の高い部分である。成形品の中央部には気泡は殆ど無く、極小さな気泡が僅かに確認できる程度である。

図 65 は実験番号 2 での成形品である。樹脂の溶融度合いが非常に良く成形品全体の密度が高くなっている。断面の写真からは、球体の中央部において樹脂が外側に押しやられたことによる小さい気泡群が確認できる。回転数が低い状態ではあるが、それでも遠心力による効果が見られる。

図 66 は実験番号 3 における成形品である。樹脂の溶融度合いが悪く十分に溶けないまま充填された様になっている。全体的に密度が低く、ゲートに挟まれた領域のみ密度が高くなっている。

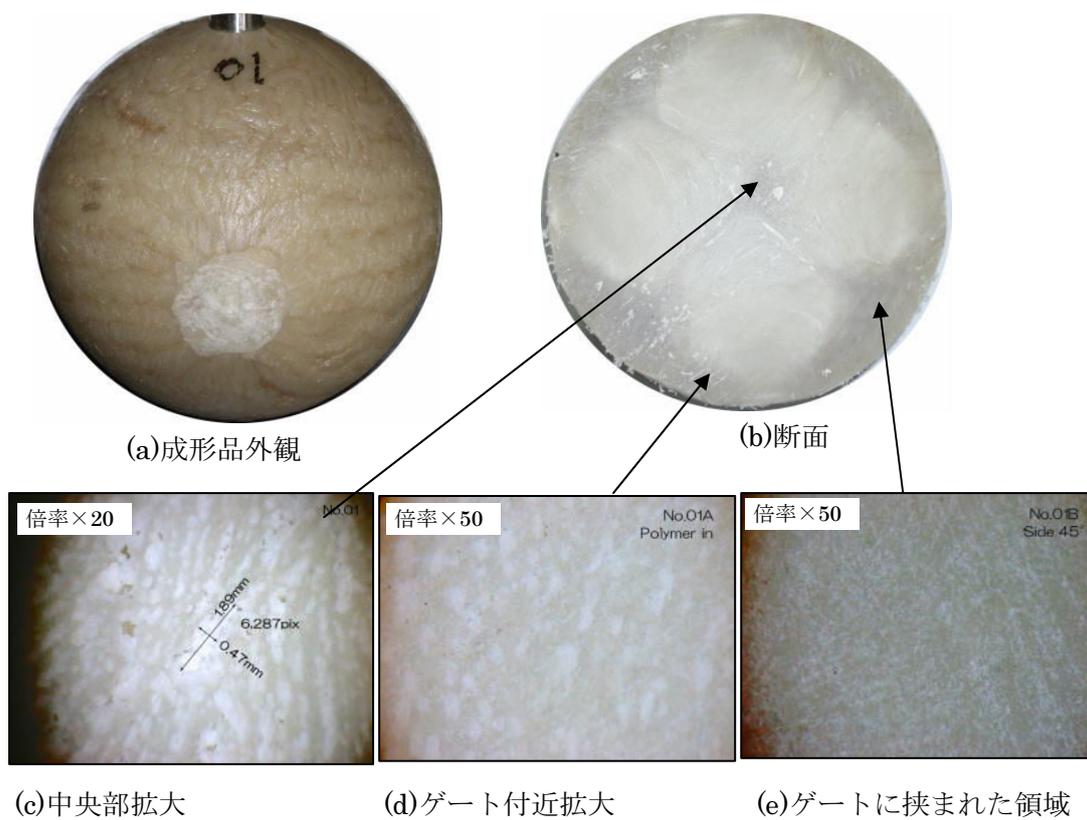


図 64 実験番号 1 における成形結果

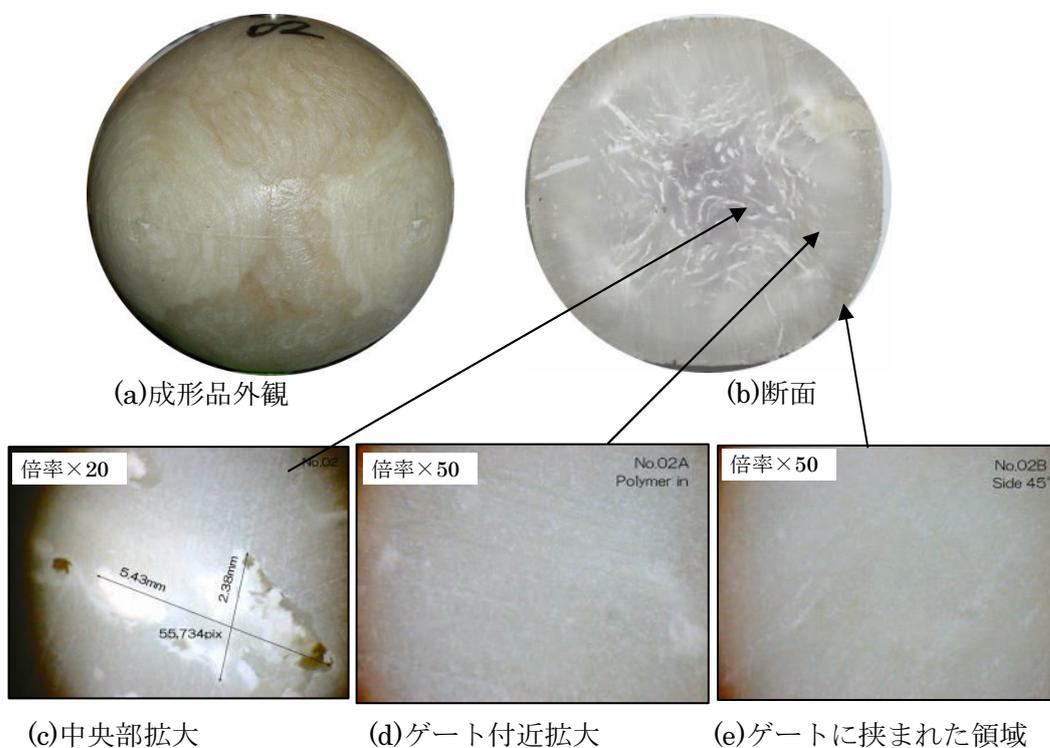


図 65 実験番号 2 における成形結果

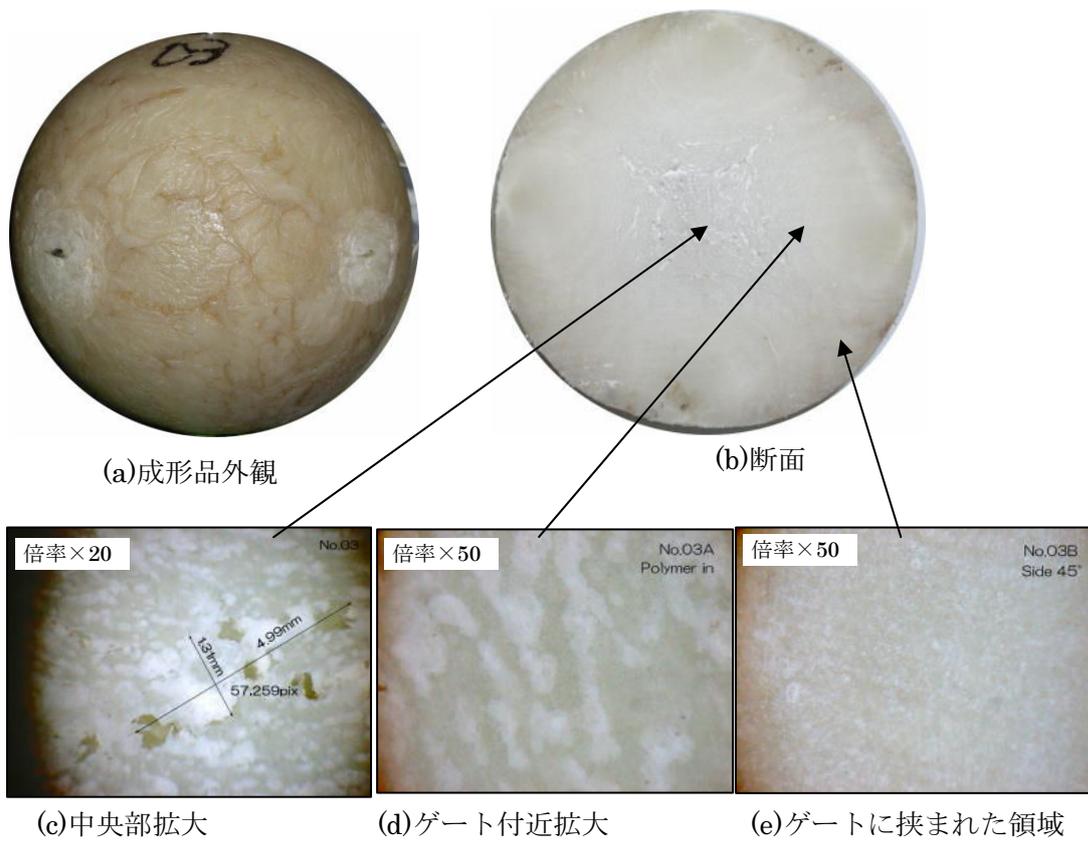


図 66 実験番号 3 における成形結果

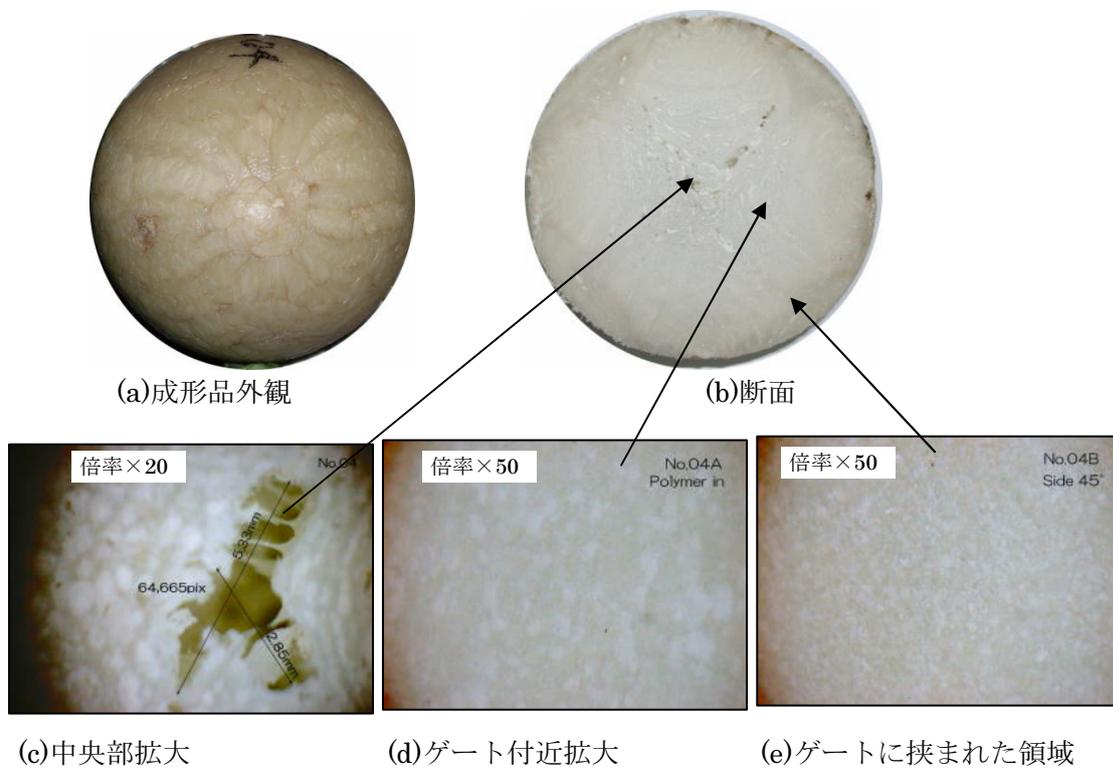


図 67 実験番号 4 における成形結果

図 67 は実験番号 4 における成形品である。成形品の中央部の密度が低く、外側になるにつれて高密度な領域が増えてきた。中心部に見られる気泡のサイズも大きくなり数も増えてきた。回転による成形品への影響が顕著に現れるようになった。

図 68 は実験番号 5 における成形品である。樹脂の充填圧力を 10%大きくした結果、回転による遠心力の効果とも相まって中心部の気泡が更に大きく殆ど巣の様になっていることが分かる。外側に見られる高密度層が大きくなっていることも確認できる。またこれまでの条件においては、ゲート部とゲートに挟まれた領域の様相は大きく異なっていたが、本条件ではその差が小さくなっていることも示されている。

図 69 は実験番号 6 における成形品である。更に回転数が上がった結果、樹脂が外側へ追いやられて中心部には大きな空洞が確認できる。これは多くの気泡が繋がった結果生じたものである。

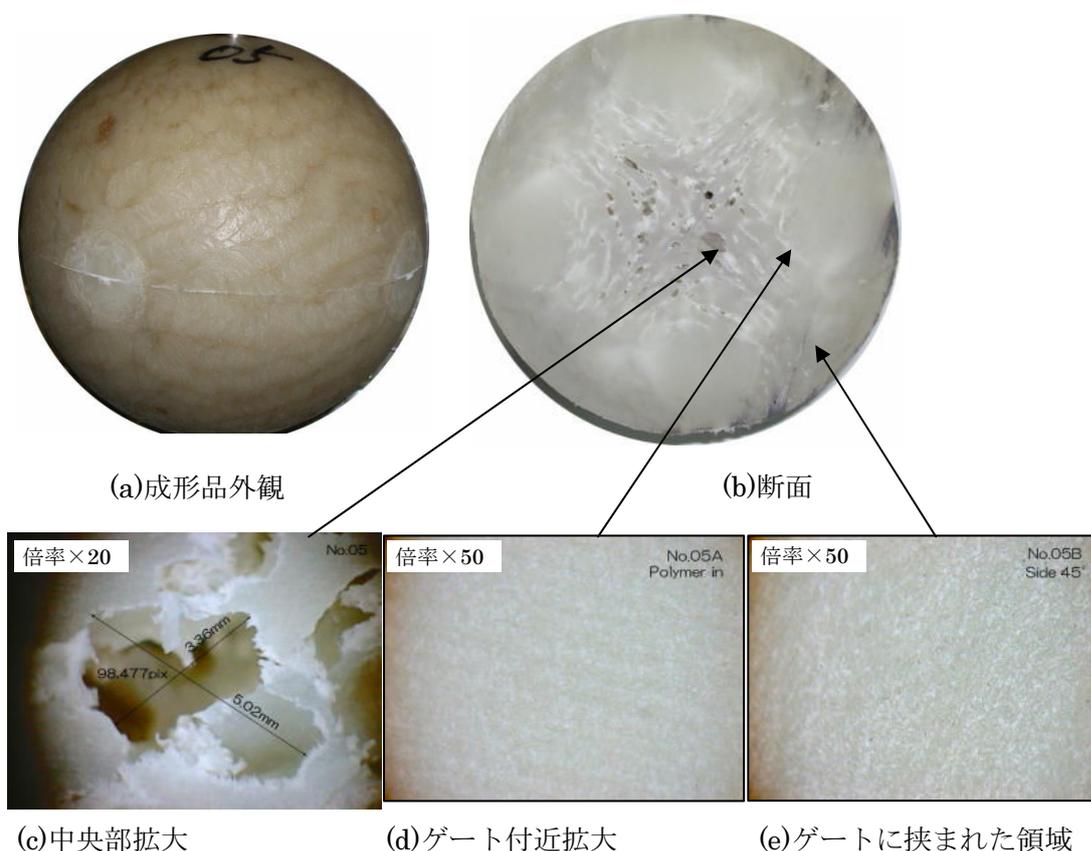


図 68 実験番号 2 における成形結果

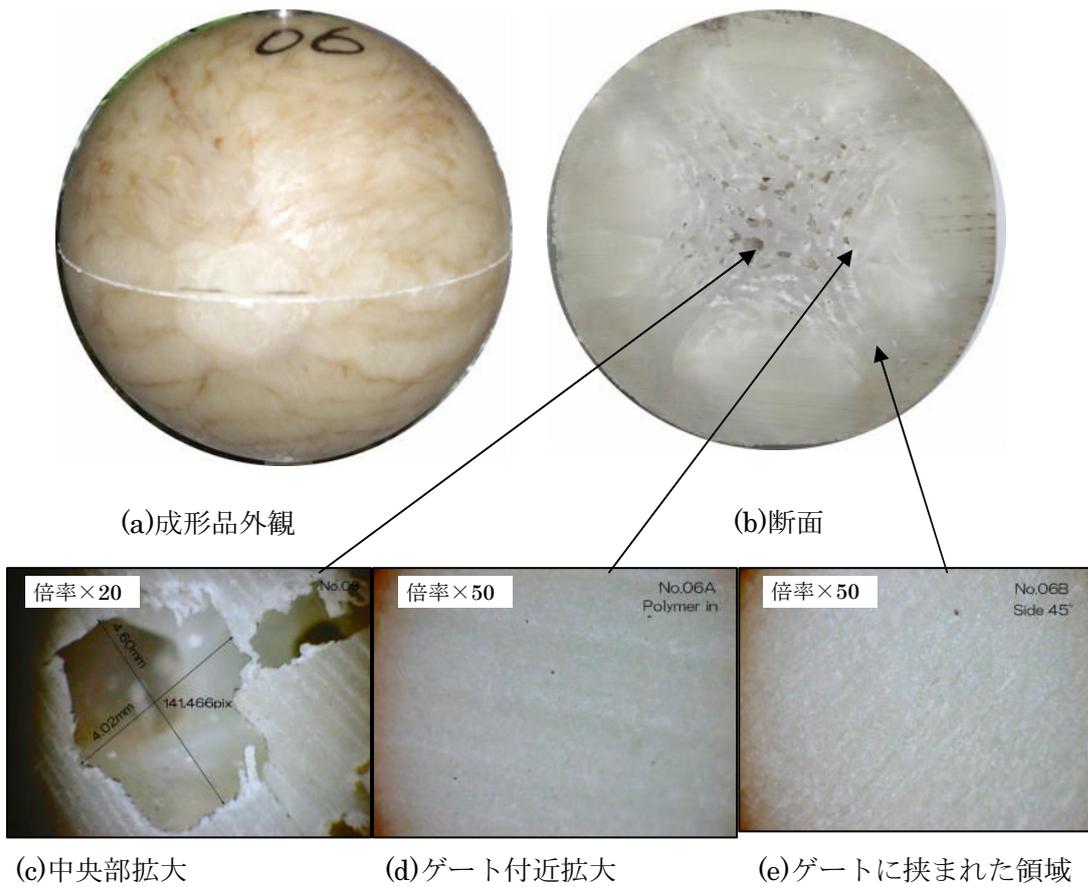


図 69 実験番号 2 における成形結果

2-4 試作 5 (中央 1 点ゲートによる成形)

2-4-1 成形シミュレーション

試作 5 の金型は、図 70 に示すように、樹脂とガスの注入口を金型の固定側に設けた構造となっている。これは前年度に製作した試作 2 の金型を改良したものである。試作 2 では、スプルー部に高温の樹脂溜まりが生じるため、成形品取り出し後にスプルーが根本から折れて内部の高温樹脂が吹き出してしまったが、金型内で十分な時間をおいて冷却し取り出した成形品には、ネジが加工で

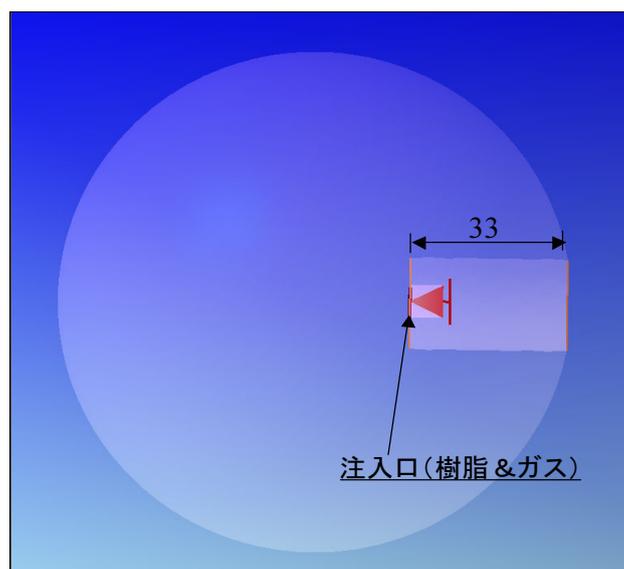


図 70 解析モデル(試作 5)

きるような高密度層を得ることができた。試作5では、これらのことを踏まえスプルーを早く冷却する構造を取り入れたものである。解析モデルとしては、試作2と殆ど同じでゲートの直径のみ異なっている。

試作5の成形シミュレーションは表5に示す成形条件を用いて行った。ゲート直径が小さくなったため窒素ガスの圧力は5MPaと試作2に比べ小さく設定した。

キャビティ内に樹脂が充填する過程について図71に示す。樹脂の充填される挙動は試作2と殆ど同じである。解析では重力が上向きに設定されており流れがその影響で若干上向きに射出されている。ゲート反対側領域への充填が遅れているため樹脂の温度分布に偏りの生じることが懸念される。

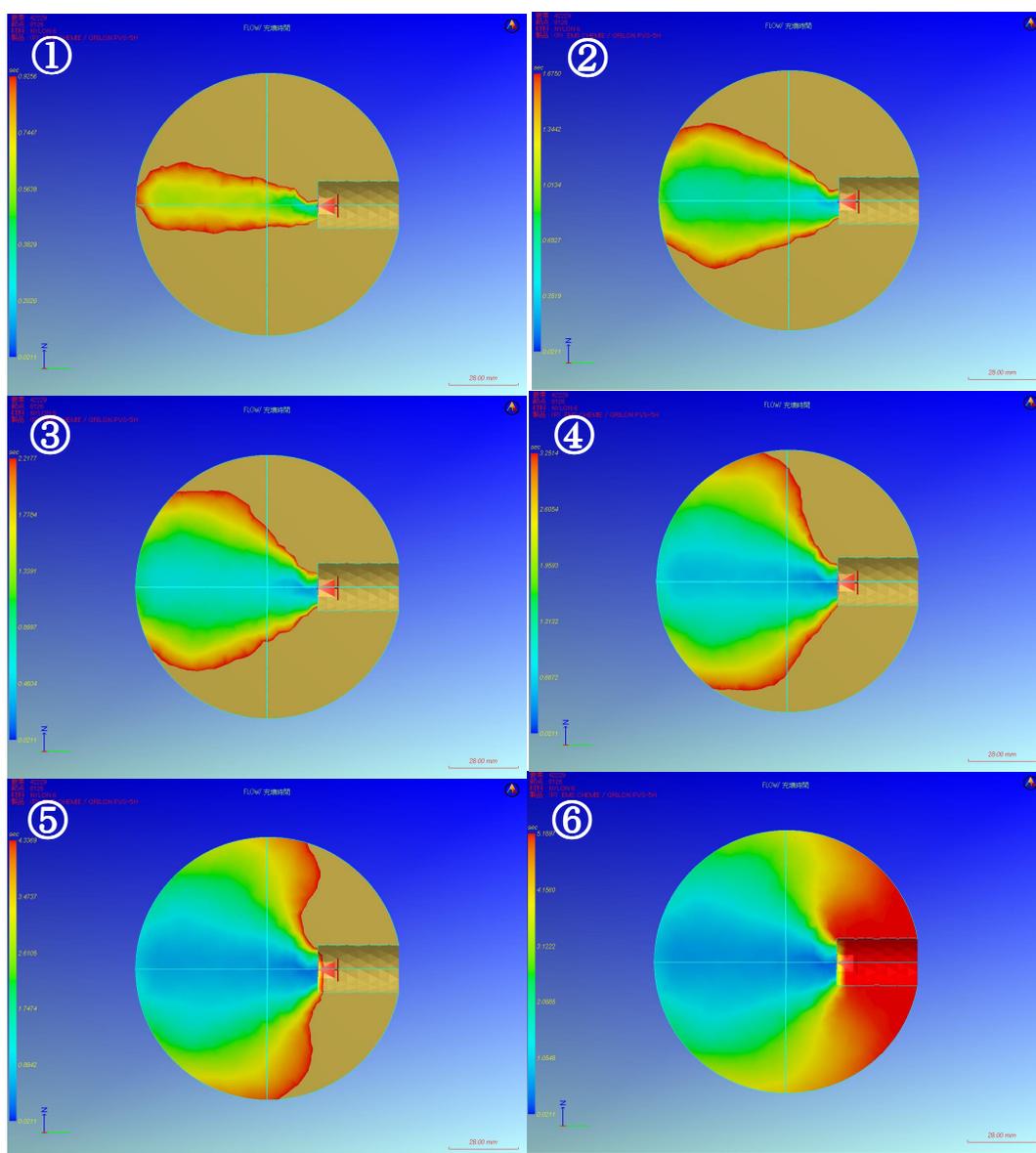


図 71 樹脂充填の様子（試作5：基本成形条件）

表 5. シミュレーションにおける成形条件（試作 5：基本条件）

| | |
|---------|------------------------|
| 材料 | PA-GF50（ナイロンガラス繊維 50%） |
| ゲート直径 | 3mm |
| 樹脂温度 | 280℃ |
| 金型温度 | 80℃ |
| 射出圧力 | 156MPa（最大射出圧力の 85%） |
| 窒素ガス温度 | 30℃ |
| 窒素ガス圧力 | 5MPa |
| ガス圧保持時間 | 500 秒 |

樹脂の充填完了時の温度分布を図 72 に示す。キャビティ表面に接する部分の温度は金型温度と同様に約 80℃であるが、充填時の樹脂温度が 280℃と高いために成形品中央部が非常に高温となっている。この樹脂を冷やさないで試作 2 と同じように内部の高温樹脂が吹き出すことが予想される。

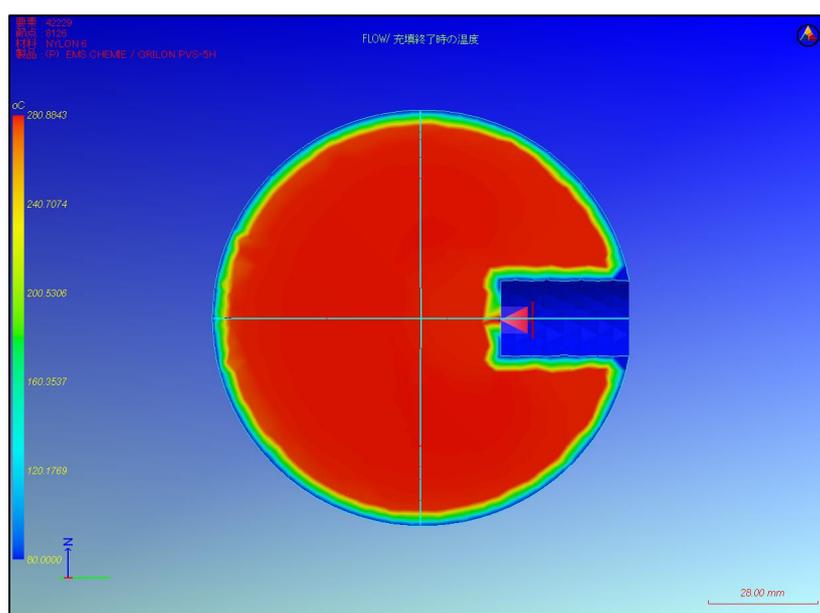


図 72 樹脂充填終了時の温度分布（試作 5）

図 73 には型開き直前の温度分布を示す。ガスによる冷却が中心付近に見られるが、ガス圧が 5MPa と小さいからか高温部がまだ多く残っている。図 74 には型開き直前の残留応力を示す。残留応力が大きい場合、製品取り出し後に変形する可能性が高くなる。図では成形機に最も近い部分の値が大きくなっており冷却構造などを設ける必要がある。

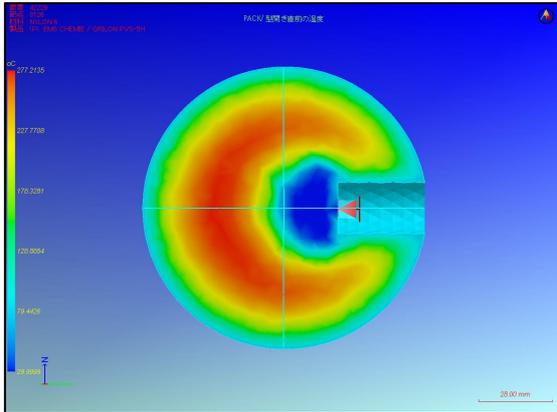


図 73 型開き直前の温度分布（試作 5）

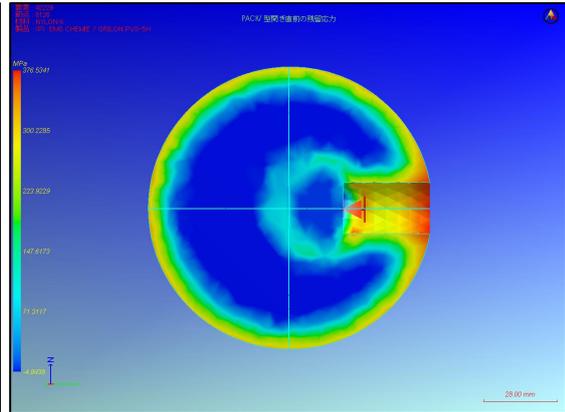


図 74 型開き直前の残留応力（試作 5）

図 75 には型開き直前のスキン材料比を示す。ガス圧は低いことやナイロンが硬いこともあり、ガス部の形状が小さくなっている。スキン材料比の最小値は殆ど 0 に近くガスのみが存在する中空部の形成される可能性がある。

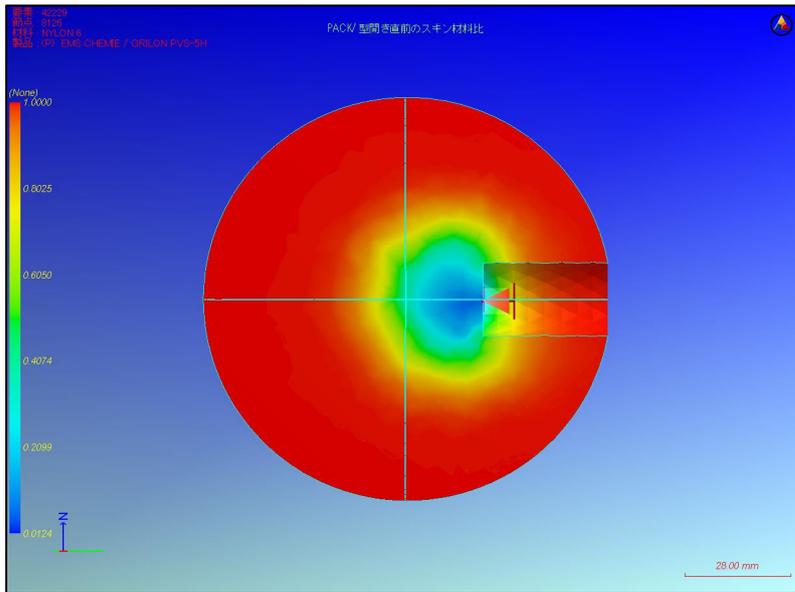


図 75 型開き直前のスキン材料比（試作 5）

2-4-2 金型構造

試作5の金型を図76に示す。スプルーを冷却するために通常の冷却管だけでなく、スプルー周囲に冷却水を循環させることができる構造とした。またゲート径を3mmと小さくすることで冷却時間を短縮し、成形品取り出し後にスプルーが外れないように工夫した。

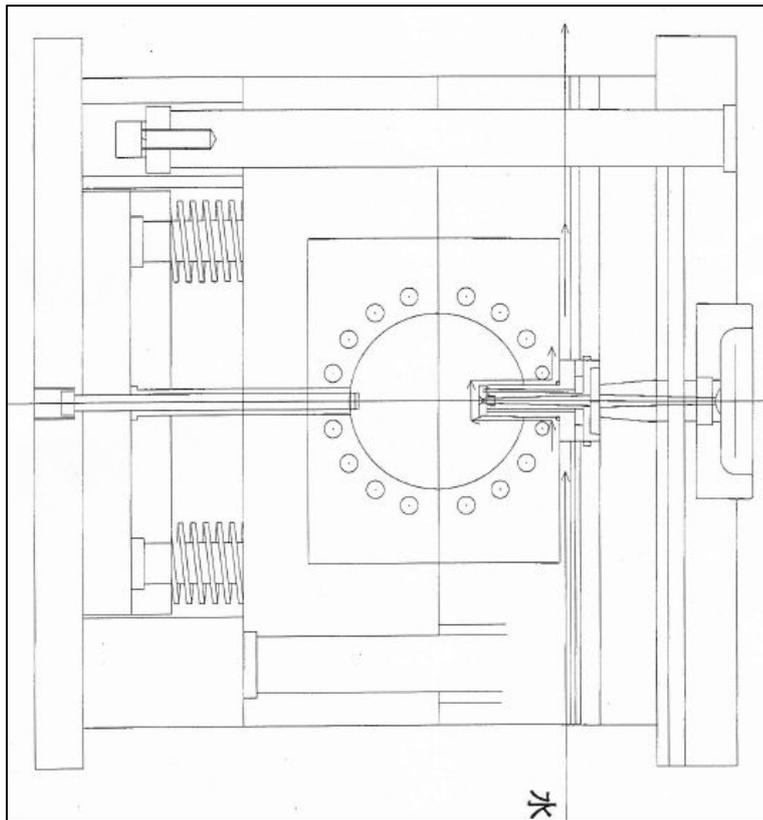


図76 金型の構造概略（試作5）

2-4-3 試作成形

試作5の金型による1回目の成形結果を図77に示す。樹脂の充填時間は5秒で、充填が完了した直後からガスの注入を開始している。ガス圧は25MPa(250bar)で十分な大きさがあると考えられるが、成形品には殆どガスが入っていないことが分かった。これは樹脂の充填時間が長いため、初期の段階でキャビティに注入された樹脂が既に硬化しガス流入を妨げたからだと考えている。また樹脂量がキャビティ容積に比べ少ない場合は、図78に示すように中空部が全く作られないことも分かった。これは、樹脂がスプルー部品の周囲に完全に充填されていないため生じた隙間からガスが漏れ出すためである。このように中空品を成形するためには樹脂が硬化しない段階でガスを注入すること、また樹脂量は成形品の外殻を成す部分の全体に行き渡る程度の量が最低でも必要であることが分かる。



| | | |
|------|-----|-----|
| 射出速度 | 85 | % |
| 保圧 | 無し | |
| ガス圧 | 250 | bar |
| ガス時間 | 300 | s |
| 冷却時間 | 400 | s |
| 樹脂温度 | - | °C |
| 金型温度 | 70 | °C |
| 充填時間 | 5 | s |
| 樹脂量 | 170 | 目盛り |



図 77 1 回目の成形結果 (試作 5)



図 78 樹脂量が足りない場合 (試作 5)

2 回目の成形結果を図 79 に示す。充填された樹脂が硬化する前にガスを入れる条件とした。またガスによる冷却時間を大きくし成形品内部に形成された中空部が崩れないようにした。成形結果では、中空部ができる場合もあれば、まったくガスの入った形跡が見られない場合もあった。しかしナイロン GF50 を使った成形で中空部ができたのは、これが初

めてであったことから、充填時間を更に短くした成形を実施した。図 80 は、樹脂充填が終了する 1 秒前からガスの注入を始めたものである。またガスの充填時間を 900 秒へ変更した。

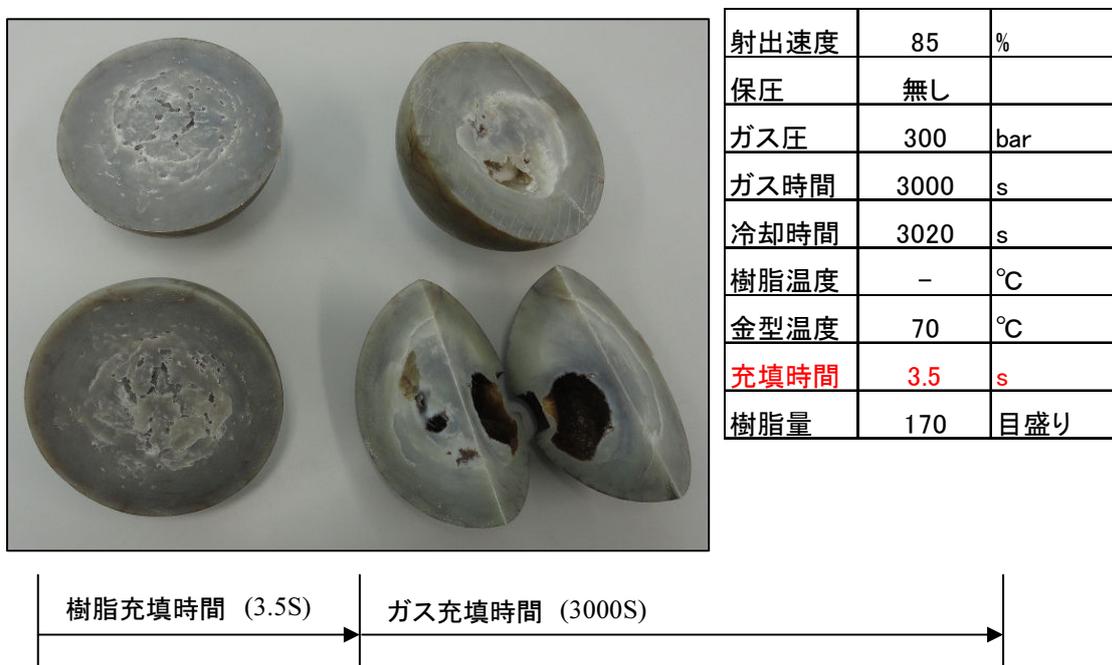


図 79 2 回目の成形結果 (試作 5)



図 80 3 回目の成形結果 (試作 5)

3回目の成形では、中空部のできる確率がかなり大きくなった。やはり樹脂の硬化状態とガス注入の微妙なタイミングによって中空部が形成されるかどうかが決まるようである。ここで3回目の成形条件で多くの実験を行い、形成される中空部の形状安定性を確認することにした。またガスの充填時間を実用的なレベルまで短縮することができるか検討した。3回目の成形条件で作られる中空部は、図 81,82 に示すように、形状を制御することが困難であった。重力の影響で樹脂はキャビティ下部に充填されるため、中空部はスプルーから斜め上部側に作られることが分かる。この中空部の形状は、試作3における成形シミュレーションにおいて得られていたスキン材料比(図 14)で見られる形状と似たものである。



図 81 3回目の成形結果(試作5)



図 82 3回目の成形結果(試作5)

ガスの充填時間を短くする試みはうまくいかなかった。図 83 はガスの充填時間を 300 秒とした場合の結果であるが、試作 2 であったように内部の溶融樹脂が流れ出てくることがあった。また樹脂の噴出が無い場合でも、成形品に作られる高密度層の厚みは薄くガスによる冷却が不十分で、ガス圧を抜いた直後に中空部が崩れてしまっていることが考えられる。また充填時間を 600 秒とした場合は、中空部はできないが高密度層が安定して形成されることが分かった。



図 83 ガス充填時間を短縮した場合(300s) (試作 5)



図 84 ガス充填時間を短縮した場合(600s) (試作 5)

図 84 の成形品には中空部は形成されなかったものの、得られた成形品の表面近傍は非常に密度が高く、ヒケや融合不良が殆ど見られない。ボールジョイントとして成形品を活用する場合、少なくともネジ加工を行う部分のみ不良無く成形されていれば十分であることから、やや不本意ではあるが、ここで得られた成形品を用いて一軸引っ張り試験を行った。

図 85 はネジ加工を行った部分を模式的に示したものである。この場合、ネジ長さは表面近傍の高密度層の厚みである 22~23mm となった。引っ張り試験の様子を図 86 に示す。成形品を半球状に加工し固定した。



図 85 ネジ加工部



図 86 引っ張り試験

引っ張り試験の結果を表 6 に示す。表にはガスアシストの無い、通常の射出成形によって製作した球体による結果も示してある。通常の射出成形では、内部及びネジ加工を行う表面近傍部にもヒケや融合不良などが多数存在する。使用した樹脂の物性値とネジ形状から算出した引っ張り強度は 75.8kN となるが、ガスアシスト有りでの成形品はその引っ張り強度と同等以上の結果が確認された。このようなことから、球体の中心にガスを吹き込むことで表面近傍を高密度に成形することが可能であるといえる。中空部は得られていないが、高密度層の厚さを増加させることができれば、ボールジョイントとして必要な 100kN の引っ張り強度も実現することが可能だと考えられる。

表 6 引っ張り試験の結果

| | ガスアシスト無し | ガスアシスト有り |
|----------|----------|----------|
| 引張強度(kN) | 58.0 | 87.8 |

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

3-1-1 サブテーマ1に関する内容

サブテーマ1「金型設計手法の最適化」では、ガスアシスト成形に関する樹脂流動解析および遠心力の影響下における樹脂の挙動解析を行い金型形状や種々の成形条件について検討を行った。

- ①中空部を球体の中心に形成するためには、アシストガスである窒素ガスの注入口は球形キャビティの表面ではなく中心付近とした方が良い。
- ②成形品がかなりの厚肉であるため、中心付近の樹脂温度は金型の冷却後も高い温度を示した。成形品の残留応力が懸念される。
- ③ナイロンはポリプロピレンに比べて硬いため、樹脂充填後直ぐにガスの注入を行った方が中空部を形成しやすい。
- ④樹脂が軟らかい状態にある場合、ガス圧を大きくするとガスは樹脂と混合した状態となる。
- ⑤ナイロン GF50のような粘性の高い材料では、コアの回転数をそれ程大きくしなくても(300rpm未満)キャビティ内の樹脂は中空形状に成り得る。
- ⑥粘性の高い材料を用いた非定常解析では、時間刻み量を細かく設定する必要があるため計算時間が膨大になる。

また、課題としては次の事が挙げられる。

- ①遠心力を考慮した解析ではキャビティ内の樹脂の粘性を一定としたが、実際には温度によって変化する粘性を表現する必要がある。

3-1-2 サブテーマ2に関する内容

サブテーマ2「厚肉中空成形用金型の開発」では、成形シミュレーションの結果や試作成形の作業と連携して金型構造の設計、製作を行うことができた。回転金型に関しては円環状に配置したランナーなどの工夫を行った。試作5の金型では、中空部が形成されるように、スプルー冷却構造やゲート部の工夫などを行った。

今回、試作3の金型構造に対して回転機構を付加したが、ガスアシスト成形で最も良い結果が得られたのは試作4の金型であった。今後の取り組みの中で、試作4の考え方を基に、回転機構を持つ金型を製作したい。

3-1-3 サブテーマ3に関する内容

サブテーマ3「厚肉中空品の成形と評価」では、5種類の金型を用いて中空品の成形に取り組んだ結果、次のようなことが明らかになった。

- ①樹脂とガスの注入口を同じとした場合、スプルー冷却を積極的に行い、ガス圧の持続時間を延長することで中空部を形成することができた。

- ②しかしながら、当初計画していた球状の中空部を得ることはできなかった。
- ③キャビティ容積に対して充填樹脂の容量が不足している場合は、スプルー部品と金型本体との隙間からガスが漏れ出す。樹脂の充填時には、成形品の外殻となる部分を如何に早く硬化させるかが重要になる。
- ④直径 108mm の球体の場合、中空部を得るためにはガス圧の持続時間を 900 秒程度にする必要がある。600 秒では、表面近傍が高密度層になった成形品が得られる。300 秒では内部の溶融樹脂が吹き出す。
- ⑤表面近傍が高密度層となった成形品では、高密度層では使用樹脂本来の強度が確認できたことから、長時間かけて中空部を形成するよりも、より短時間で高密度層のある成形品を作る方が実用的だと考える。
- ⑥回転機構を備えた金型における試作成形では、ガスを充填することはできなかったが、コアの回転数を大きくすることで、成形品の表面近傍における密度を高くできることや中心部の密度が減少することなどが確認できた。
- サブテーマ 3 において残された課題としては、ガスによる中空部が成形できた試作 4 の考え方を基に、新たに製作した回転金型による成形を行うことである。これについては、プロジェクト終了後、夏前頃までには実施したい。

