

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「食品包装機械のフィルムに傷をつけない衛生的な袋成型型の  
最適設計と製造法」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社キャンパスクリエイト



**第1章 研究開発の概要**

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	4
1-3	成果概要	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	8

**第2章 本論**

2-1	包装シートに傷を発生させない高精度な型形状を作製する 解析/設計の研究開発[設計]	9
2-2	高精度な型作製のデータ作成システムの研究開発 [設計生産統合データ]	16
2-3	高精度で合理的な型作製の研究開発[生産]	20
2-4	型上でシートを変形させ滑らせる時に発生するシート応力の 解析方法の研究開発[型性能の評価]	23
2-5	新機構包装機の研究開発 [新開発]	27

**第3章 全体総括**

3-1	複数年の研究開発成果	33
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	33

## 第1章 研究開発の概要

本支援事業では、食品の包装機械（シート状のフィルムを円筒状の袋に折曲げて袋とし、中にお菓子などの食品を詰める装置）の包装シートを折曲げ成形する型の形状の最適設計と製造方法を確立する。現状では型の作製は技術者のノウハウと熟練者の技能を頼りに試行錯誤で作製しているため、精度面で限界があり、高精度の型を解析計算により求める技術が必要になっている。

ここでは包装機の型を初めて実用的に解析で作成できる方法を開発し、生産型を製造する技術確立を目指している。この解析はエネルギー最小原理に基づく有限要素法（FEM）を用いて、フィルムの型形状を求めるものである。この対象に対しては、既存のFEM技術では解が発散して解決できないため、FEMを用いた新解析法の実用化に取り組み、プロセスを力制御と変位制御の2段階において解析する方法をほぼ確立した。また解析データと形状のCADデータを統合するデータシステムを作成し、実用化を図った。また、本支援事業で研究した設計手法を基に、高精度で合理的な型作製方法を検討する。ここでは解析・設計・製造の新しい方式が可能であり、この統合プロセスを提案する。

さらにNC加工、RP（Rapid Prototyping）の実用化検討を実施する。

また本事業の技術で高精度の型設計/製造が可能となったので、これを活用して以下を企画する。

- ・シール部分まで含めた高精度の型を実用化する。従来技術ではシール部まで検討することができなかった。
- ・高精度の包装型を生かした包装機を企画し、小型で軽量の包装機を検討する。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 「高度化指針」に基づく研究背景

本研究開発は、「高度化指針」に定める「金型に係る技術に関する事項」の中の、「高度化・微細化」「軽量化」「小型化」「短納期化」「低コスト化」を目標としている。

#### 川下業者の抱える課題及びニーズ

包装機械はシート状のフィルムを円筒状の袋に折曲げ袋とし、中にお菓子などの食品を詰める装置である。この技術面の課題は包装フィルムを折曲げ成形する型の形状である。包装機械は、フィルムを内側と外側の型でガイドして折り曲げ円筒状の袋に成形する。内側の型は包装される製品に接触するために、これを廃止できると安全・衛生上で画期的であり、小型で軽量の生産性の高い包装機となる。このためには高精度の型が必要であるが、現状では作製できない。型の作製は技術者のノウハウと熟練者の技能を頼りに試行錯誤で何度も作製しているため、試作をせずに高精度の型を解析計算により求める技術が必要になっている。

##### ・高精度化・微細化

昨今、中国における、食品への異物混入事件などにより、食品の安全・衛生に注目が集まっている。包装業界へは、包装フィルムに傷を発生させない安全な設備（鍵は成型型）への要求が高まっている。このため型の包装品質の技術的評価としてフィルムに発生する応力解析も必要になっている。

##### ・軽量化、小型化

包装フィルムの傷防止のために内型と外型が必要であり、大型で重くなっている。包装する食品毎に取替えが必要であるが、大型で重い型の取替えは、女性作業員には困難である。現在では内型を省略した小型化した包装型は実用化されていない。

### ・短納期化、低コスト化

型は食品毎に数多く必要だが、試行錯誤で、実機で確認/修正を繰り返して作製するので納期は1ヶ月以上である。型製造の合理的プロセスが確立していないため、新たな袋形状など変化している市場ニーズに対して、対応が困難になっている。またコスト低減が現状では困難である。

#### 1-1-2 研究開発の背景及び当該分野における研究開発動向

欧米では包装構造の理論の研究が始まっているが、計算できるのは簡単な型形状の一部分に限定され、シール部分の形状などは設計する手法がない。また型の精度の評価方法も明らかになっていない。ここで平成21年度補正予算事業の中で、包装型の新しい計算法とフィルムに発生する応力を解析する新しい評価方法を確立した。この新手法は海外の包装の学会でも注目を集めており、他では実施していない新しい手法であることが確認できている。

包装業界は経験を主体に型を作製している段階である。また、型をCAD-CAMの技術で合理的に作製するシステムも存在しない。ここで独自の合理的な型設計手法を開発すれば、技術的先行ができ、日本のメーカーは再び国際的に進出できるものと思われる。

尚、包装機械は大きな市場であり、米国、ドイツでは多額の輸出製品となっている。従来は日本の競争力が強く、輸出していたが、この10数年で逆転し、輸入量が増加している状況である。

#### 1-1-3 研究目的及び目標

##### [研究目的]

食品などの包装機械は包装フィルムに傷をつけないことが安全・衛生上、重要である。包装袋を成形する型は食品毎に交換するため、この型の軽量・小型・低コスト化が必要である。また変化する市場要求から短納期化が要求されている。そのため、包装の高精度な型の設計技術と、低コスト・短納期化を可能とする製造法技術が必要になる。

本研究開発の目的は、現在手作りしている包装の型を解析により高精度の型形状の作製を行い、データはCAD面に変換し、NC加工、RP(Rapid Prototyping)で短納期化を実現し、高精度で小型軽量な成形型を商品化することである。

本年度は有限要素法(FEM)を用いて、フィルムの型形状を求めた解析データと形状のCADデータを統合し、実用化を図る。具体的な目標はこのデータ統合システム作成である。ここでは解析・設計・製造の新しい方式が可能であり、業務構造が改革できる。この統合プロセス案の作成も目標とする。

またNC加工、RPの特性を明確にすることができたので、本年度は生産型としての商品化検討を実施し、実用化を図る。商品としての重点品質の確認が目標である。

また本事業の技術を活用して次の項目を企画する。

- ① シール部分まで一体の最適構造の型を実用化する。目標はシール部分の形状決定とネック部分の形状決定である。
- ② 高精度の包装型を生かした包装機を企画する。目標は小型/軽量である。

##### [研究目標]

1. 包装シートに傷を発生させない理想的な型形状を作成する解析/設計の研究開発 [設計]

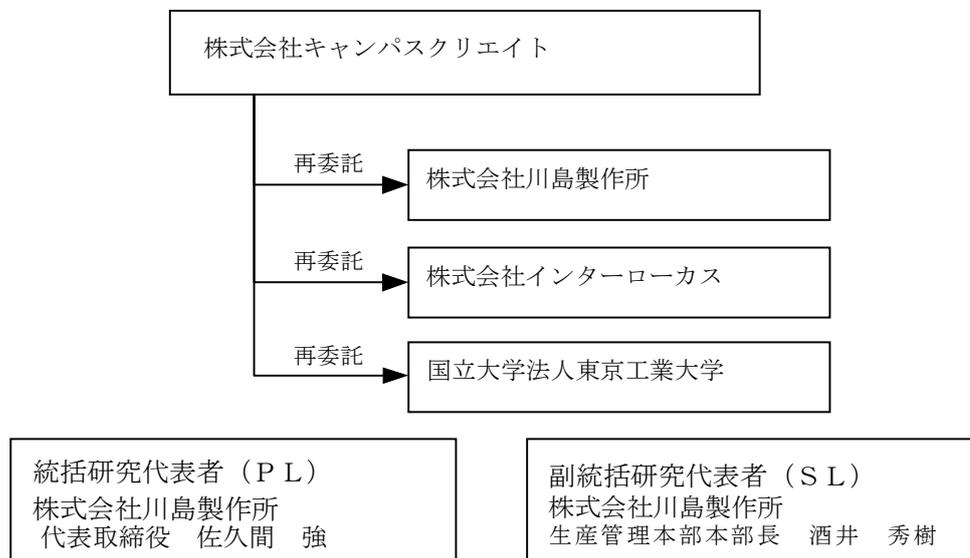
#### 1-1 解析の実用化と解析プロセスの自動化

目標：①解析プロセスの確立②自動プログラム化(半日に短縮)

- 1-2 型形状の重要なパラメータの定量評価の明確化  
目標：形状の主要なパラメータの設計指針と重要なパラメータの設計基準書の完成
- 1-3 高精度の型の実現  
目標：①型の評価で応力を 1/2 以下にすること②安定した解析方法をまとめること
  
- 2. 高精度な型作製のデータ作成システムの研究開発[設計生産統合データ]
  - 2-1 解析・設計・製造のデータを一元化し計画段階から評価まで検討するプロセスの研究  
目標：データ統合システム
  - 2-2 計算プロセスの自動計算化  
目標：CAE-CAD-CAMの処理時間の短縮（半日に短縮）
  
- 3. 高精度で合理的な型作製の研究開発[生産]
  - 3-1 NC加工による型の作製  
目標：耐久性実用性の検討（重点性能の検討が目的）
  - 3-2 RPによる型の作製  
目標：①試作品の応用範囲検討②耐久性実用性の検討
  - 3-3 3Dプリンタによる試作型の作製  
目標：試作品の応用範囲検討
  - 3-4 商品化の検討  
目標：生産型としての商品化検討
  
- 4. 型上でシートを変形させ滑らせる時に発生するシート応力の解析方法の研究開発[型性能の評価]
  - 4-1 解析プロセスの確立と自動化  
目標：①解析プロセスの確立②自動化
  - 2-4-2 既存型の情報の収集  
目標：既存型の調査
  
- 5. 新包装機の研究開発[新開発]
  - 5-1 高精度の型の設計/作製  
目標：2倍の精度の型の設計/製造
  - 5-2 新形状の型の開発  
目標：①シール部分までの一体の最適構造の検討②円筒以外の最適形状の検討
  - 5-3 商品化(企画)  
目標：①DRと試作評価②企画・設計
  - 5-4 設計まとめ  
目標：①試作②#2デザインレビューと試作品評価③生産検討

## 1-2 研究体制

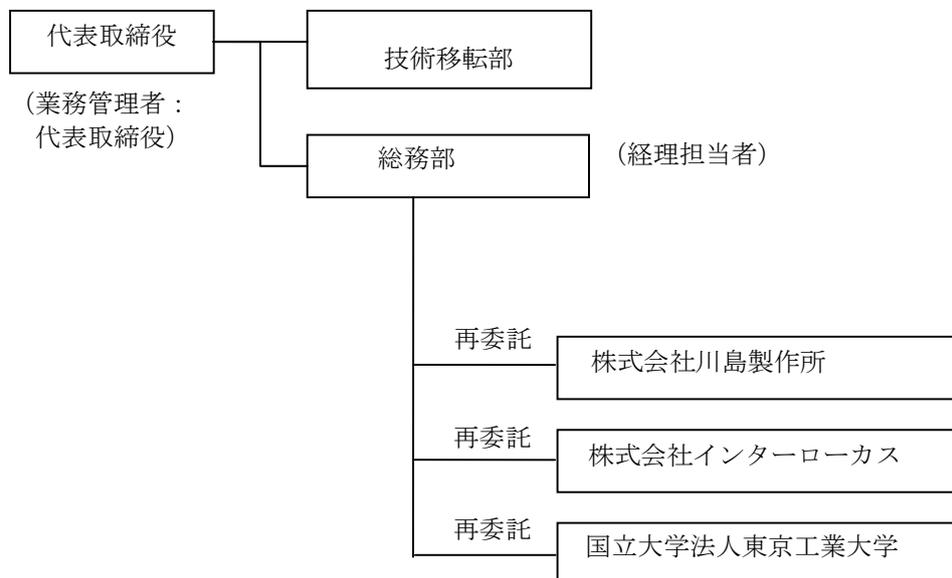
### 1-2-1 研究組織



### 1-2-2 管理体制

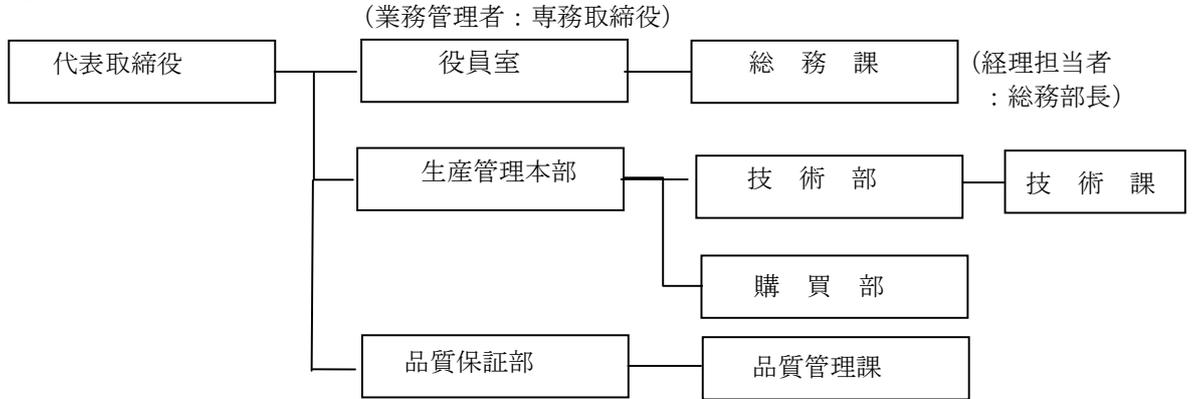
#### ①事業管理者

[株式会社キャンパスクリエイト]

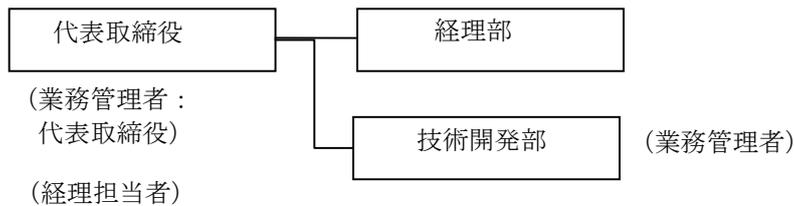


② 再委託先

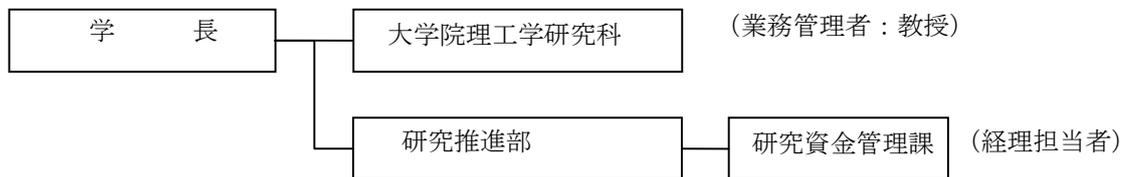
[株式会社川島製作所]



[株式会社インターローカス]



[国立大学法人東京工業大学]



1-2-3 管理者および研究者氏名

【事業管理者】株式会社キャンパスクリエイト

(経理担当者) 総務部 グループリーダー 川崎 和美

(業務管理者) 代表取締役 安田 耕平

(管理員) 総務部 ゼネラルマネージャー 阿部 則晴

技術移転部 産学官連携コーディネータ 野崎 絢子

技術移転部 園田 直美

総務部 柏崎 あや子

【再委託先】

株式会社川島製作所

(経理担当者) 総務部 総務部長 清水 明彦

(業務管理者) 専務取締役 多島 昭三

(研究員) 代表取締役 佐久間 強

生産管理本部長 酒井 秀樹

生産管理本部 購買部長 上遠野 一美

	生産管理本部	技術部長	伊早坂 嗣
	生産管理本部	技術部技術課	紙谷 定晃
	品質保証部	品質管理課	中川 佳光
株式会社インターローカス			
(経理担当者)	代表取締役	篠田 淳一	
(業務管理者)	代表取締役	篠田 淳一	
	技術開発部	福田 水穂	
(研究員)	代表取締役	篠田 淳一	
	技術開発部	福田 水穂	
	技術開発部	藤田 晃子	
国立大学法人東京工業大学			
(経理担当者)	研究推進部	研究資金管理課長	滝澤 重道
(業務管理者)	大学院理工学研究科	教授	萩原 一郎
(研究員)	大学院理工学研究科	教授	萩原 一郎

### 1-3 成果概要

#### 1. 包装シートに傷を発生させない理想的な型形状を作成する解析/設計の研究開発[設計]

##### 1-1 解析の実用化と解析プロセスの自動化

ここでは包装機の型を初めて実用的に解析で作成し、生産型を製造する技術を扱った。先ず従来の技術を最先端まで調査して本研究の狙いを確認し、本支援事業の技術が最も実用的で有用な研究であることを確認した。FEMを用いた新解析方法をほぼ確立した。これを解析の各ステップの自動化と安定した解析法を研究し、解析システムの実用化と合理化を図った。

##### 1-2 型形状の重要なパラメータの定量評価の明確化

型の形状を作成する設計指針を検討する。平成21年度から bending curve (折曲線) の決定方法を検討している。平成22年度までに、この bending curve の主要なパラメータの定量評価の設計基準を検討し、ほぼ業務フローを作成することができた。平成23年度は業務を検討し修正を加え、新しい解析方法に最も適した作成方法をまとめ、設計基準書を改善した。

##### 1-3 高精度の型の実現

包装型の精度に関して、目標としていたフィルムに発生する応力の1/2以下を達成できた。これにより、いままで経験と実績に頼っていた設計が、解析で実施できるようになった。更に安定した解析手法を検討した。

#### 2. 高精度な型作製のデータ作成システムの研究開発[設計生産統合データ]

##### 2-1 解析・設計・製造のデータを一元化し計画段階から評価まで検討するプロセスの研究

解析・設計・製造に各ステージにおいて、データ構造がそれぞれ異なるためデータ相互のやり取りがスムーズに行えない。ここでは、データを一元化することについての検討し、不都合を解消した。包装機の形状を形成するために用いられる FEM メッシュは、四角形のメッシュであり、容易に三角形メッシュに変更できることから、三角形メッシュを基に RP 用のデータまで三角形メッシュで統一することが出来た。また NC 用の CAD データを三角形メッシュで統一することも検討し、CAD データをそのまま用いることを定めた。

##### 2-2 計算プロセスの自動計算化

本支援事業では新しい解析方法を確立できたが、これは一般の汎用プログラムの処理に比べ

ると格段に複雑なプロセスとなっている。ここではこのプロセスを自動的に動かすためのプログラムリストとインプットデータを半日で作成する事が出来る手順を作成した。これを基に解析は自動計算が可能となり、大幅な処理時間の短縮が可能となった。

またこの解析結果を用いれば、包装機の型モデルの高精度なCADデータを作成することが可能である。ここではMagicsによる処理例を纏め、一連の処理を実施し、CAE-CAD-CAMの総合的な処理時間の短縮の見通しを得る事ができた。

### 3. 高精度で合理的な型作製の研究開発[生産]

#### 3-1 NC 加工による型の作製

解析による設計データから NC による加工を実施する一連のデータ処理と実際の加工を実施した。平成 22 年度までの試作において課題のあった、工具逃げの処理などを改善して解析から製造に直結する検討を実施し、試作品を包装機に搭載して実用性を評価した。この一連の作業は CAE-CAD-CAM の既存技術で処理できるため、試作・評価・製品化に有効であることが確認できた。

#### 3-2 RP による型の作製

RP による型の試作は形状の検討に対して有効であり、これまで数多くの試作を行った。さらに包装機に搭載して包装型の性能や実用性の検証も行う事ができた。ただし、使用している RP 機械は入門機であり、分解能の不足からシャープエッジ部分が十分に作成できず、一部が欠落した。また大きい型では、型を分割する必要がある。検討結果、高性能の大型の RP 機械を用いれば、包装型として活用可能であることが分かった。

#### 3-3 3D プリンタによる試作型の作製

既存設備の 3D プリンタは NC 加工・RP に比べて試作スピードが速く、安価なことから、包装型の試作に活用する事を検討したが、平成 22 年度までの研究から、フィルムの馴染み性、型性能等の詳細な評価には適さないことが判明した。このため、この項目の研究を終了し、試作/製造の検討は NC 加工、RP で行うことを決めた。

#### 3-4 商品化の検討

NC、RP、3D プリンタともに解析データから一連の流れで作製でき、試作品として有効であることが分かった。NC、RP は性能や実用性の確認を包装機に搭載して実施でき、更に生産型としての課題も明らかにすることができた。3D プリンタは安価で短時間に試作が可能であり、形状確認に適する。ただし、性能確認ができず、強度も不足して実用性が無いことが明らかになった。NC、RP では作製時間、エッジ部の耐久性、型全体の強度と重量などの特性を明らかにして、商品化を図っていく。

### 4 型上でシートを変形させ滑らせる時に発生するシート応力の解析方法の研究開発[型性能の評価]

#### 4-1 解析プロセスの確立と自動化

フィルムが型の上をすべる境界条件は特殊であり、本支援事業では新たな bending curve の境界条件を平成 21 年度に提案した。平成 22 年度はこの精度を保証する解析方法を検討し、実用的な分割の範囲で解析できることを明らかにした。平成 23 年度は、この具体的な解析方法を明らかにして解析を容易にした。また、この解析法の誤差の検証を行い、解析結果に解析上の余分な誤差を与えないことを明らかにした。目標としていた型の精度は『現状より誤差が 1/2 となる精度向上』であったが、本解析法の型はこれを大幅に上回る精度であることを明らかに

することが出来た。

#### 4-2 既存型の情報の収集

他社の型を含め既存型の情報を収集するベンチマーキングは重要であり、研究テーマとして調査を進めた。存在する型を計測して型の精度を検討する方法は昨年度までに開発した。ただし、本支援事業で試作した型の実力は既存型のレベルを大幅に凌駕しているため、既存型が参考とならない事態が発生した。これは本解析の型が目標を超えて高精度になったためであり、平成 23 年度では既存型の調査は研究開発スケジュールの表から除外した。解析の型から十分な情報が得られるので、この研究テーマは完了とした。なお文献調査からも参考になる型の情報を発見できていない。

### 5. 新包装機の研究開発[新開発]

#### 5-1 高精度の型の設計/作製

本支援事業の解析手法によって、高精度の型を安定的に設計できることを確認した。平成 23 年度は背面処理の方法を検討しこの効果を纏めた。これは安定的に解析する重要な鍵であり、この検討も追加して高精度の包装型の設計方法を確立した。

#### 5-2 新形状の型の開発

本支援事業の解析方法はシール部分まで含めた最適構造を検討できることが特徴である。平成 23 年度は、可背面角度の少ない厳しい条件の包装型に対するシール構造を検討した。ここでは安定して解析できるシール構造を検討し、実用性の高い高精度の設計法を確立した。なお当初の予定では円筒形状だけでは十分な最適構造は得られないと推定していたが、円筒形状でも目的としている精度の包装型の設計が達成できたので、円筒以外の最適形状の検討は中断した。

#### 5-3 商品化(企画)

高性能の包装型を利用した新機構の包装機を開発を実施した。包装型全体の課題と新構造の包装をデザインレビューで検討した。この結果、技術面で課題となるのはフィルムの引っ張り機構であることが分かった。先ず解析によるシミュレーションを実施し、平成 23 年度では、新機構の包装機の商品化企画を実施した。

#### 5-4 設計まとめ

高性能の包装型を設計する指針をまとめ、新機構の包装機解析シミュレーションで確認し、企画検討を実施した。平成 23 年度ではデザインレビューを増やし、具体的に構想案を作成して企画し、新構造の包装型の設計を進捗させることが出来た。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社キャンパスクリエイト

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1 電気通信大学産学官連携センター

T E L : 042-490-5734 F A X : 042-490-5727

担 当 : 野崎 絢子 E-mail : nozaki@campuscreate.com

## 第2章 本論

本支援事業は平成21年度から活動しており、全体の計画書の研究項目に従い記述する。

### 2-1 包装シートに傷を発生させない理想的な型形状を作成する解析/設計の研究開発 [設計]

#### 2-1-1 解析の実用化と解析プロセスの自動化

ここでは包装機の型を初めて実用的に解析で作成し、生産型を製造する技術を扱った。先ず従来の技術を最先端まで調査して本研究の狙いを確認し、本支援事業の技術が最も実用的で有用な研究であることを確認した。FEMを用いた新解析方法をほぼ確立した。これを解析の各ステップの自動化と安定した解析法を研究し、解析システムの実用化と合理化を図った。

##### 1) 目的

- ① 解析プロセスの確立
- ② 自動プログラム化【半日に短縮が目標】---本件は2-2-2節で纏めて扱う。

##### 2) 従来技術のまとめ

###### ・包装機械の構造

我々が購入する製品の多くは、装飾や保護のために包装されている。その中でも特に日常生活において多く目にする包装は、スナックなどを包む袋である。これらの製品は図1-1-1のような包装機械で包装される。まず、リール(1)に巻かれた平面状の包装用フィルム(2)が成型型(3)に運ばれ、滑らかに成型型(3)の上を滑り、反転して製品を封入できるように筒状(4)になる。(5)はフィルムを縦方向にシーム溶着する部分である。対象製品(6)は上から袋に封入され、最後に横方向にもシーム溶着(7)され、(8)で切り離される。このような直立型包装機械の最も重要な機構は成型型(3)である。この成型型(3)の例を(5)のシーム溶接側から見た写真を示す。フィルムは型に沿って移動し、反転して円筒状に変形する。本報では包装用フィルムをフィルム、成型型を型と呼ぶ。

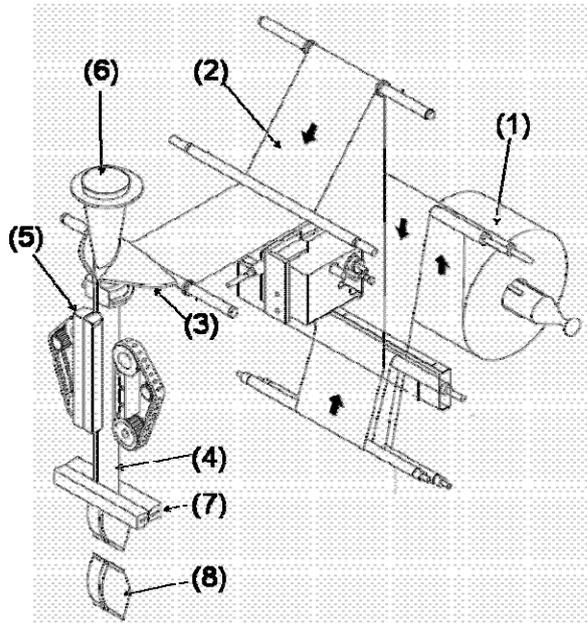
###### ・従来の成型型の設計

初期の型生成の試みは Monsees<sup>(1)</sup>により行われた。彼は図1-1-2のような平板から、平板上の曲線を折り線として折ることで型を作る方法を示した。平板の曲げ剛性を弱め、折り線周りに折りやすくするために図1-1-2の Bending curve (折り線) に沿ってV字形の溝をつくり、折り線より下部を円筒状に丸め、上部を反転させて図1-1-2の右側の型形状を得ている。しかしこの方法では、型自体が折り線の周りで歪むため、実際に成型型を作る際、折り線周りでフィルムに歪みが発生する。また、折紙のような材料と異なり曲げ剛性のある実際の材料を用いると成型型の幾何的形狀を正しく作成する事は困難な作業となる。

次にMot<sup>(2)</sup>やZhou<sup>(3)(4)</sup>らによって提案された方法は、型の表面形状を幾何学に基づいて定義する方法である。しかし、フィルムを縦方向にシーム溶着する部分(本報では溶着部と呼ぶ)はモデル化できていない。

次に微分幾何学に基づいて、型の表面形状を求める方法は、Boersma<sup>(5)</sup>がまず円の断面形状を持つモデル、次にMcPherson<sup>(6)</sup>が長方形の断面形状を有するモデルに対して、折曲線に制約があるが、数学的に幾何形状を提示している。これらの方法においては型の肩部は、可展面を成すという仮定のもとにつくられている。可展面は、面が伸縮しないで平面に展開することができる曲面であり、3次元空間上で、ガウス曲率が0である曲面として定義される。可展面においては、ruling lineが面全体で直線となる。ruling lineは、平面に対する垂直ベクトルが等しい点をつなぎ合わせて形成される線分である。図1-1-3のモデルは直線のruling lineで作成されている。しかし、これらのモデルも従来と同様にシーム溶着部は作成できていない。図1-1-2にMonseesの方法で一枚の紙から作ったシーム溶着部を有する型形状のモデ

ルを示す。これらからもシーム溶接部分は直線のruling lineでは表せないことを示している。



forming collar

図 1-1-1 包装機械(A vertical form, fill and seal machine)

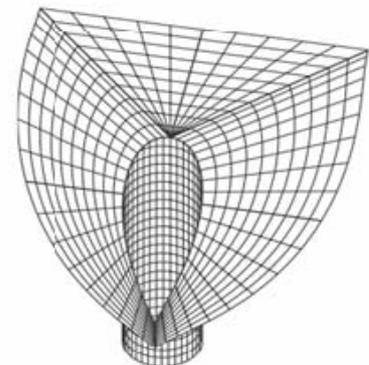
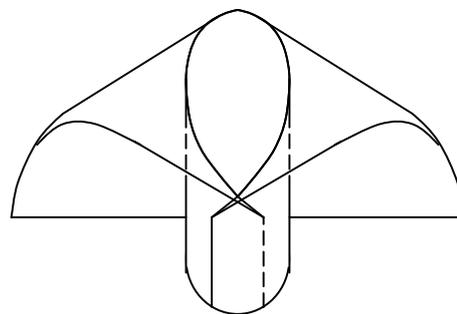
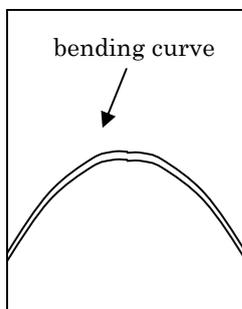


図 1-1-2 包装型Forming collar by Monsees<sup>(1)</sup>

図 1-1-3 型モデルModel of Boersma<sup>(5)</sup>

### 3)FEM を用いた成形型の作成の基本手順\_大型計算機に適応した解析

#### ・FEMを用いた成形型

平成21年度から解析を検討し、ほぼ技術面の課題は解決できた。ここでは型のモデルを以下に定めた。型を平面のフィルムから折曲げて作成すると仮定した。図1-1-4に示す様に平面に記述するbending curveで分け、下側は円筒に折曲げ変形させ、上側はcollar(型表面)に折曲げ変形させる。ここでbending curveは両者に共通であり円筒に転写した形態となる。

以下ここでの解析方法を具体的に示す。図1-1-4は平面状のフィルムをbending curveに沿って切り離したものである。型を形成する際、上部はcollar、下部は筒状となる。まず、図1-1-4の平面状フィルムの下部を、円筒形状にする。平面状のFlattened Bending curveは円筒面上の3次元の

bending curveとなる。この円筒面上の折り線の座標は、collar端面の形状であり、図1-1-4の上のFlattened collar (フィルムに相当)をcollarとしての型に変形させる時の目標となる位置である。この位置を境界条件として変形させるとcollarとなる平面の図1-1-4のFlattened collarは円筒に接近した形状に変形する。ここでは包装型とするために図1-1-2に示す様に形状を円筒面から外側に反転させて折曲げた形状を作成する。下側の筒状部の形状は厳密に定義できる。円筒部分は変形しない部分であり円筒の形状を幾何的に表現すれば十分である。したがって有限要素モデルを作成して、変形形状を計算するのはcollarに限定される。

左右対称なcollar形状については半分だけをモデル化する。図1-1-5にメッシュ分割した右半分のモデルを示す。要素は四角形シェル要素 (NASTRANのCQUAD4要素)を用いる。メッシュは変形量の大きな折り線部、すなわち図1-1-5における下部のカーブ部分は重要であり、ここは細かに分割を行う。この例では節点数は791点、要素数は650要素である。

ここで型形状を作成する面 (フィルム) の材料は線形弾性材料を用いる。この対象とする変形は、材料力学的に線形であるが荷重と変位の関係は非線形、すなわち幾何学的非線形である。

・境界条件を用いた成形型の作成方法

まず変形をFEMによって解析する一般的な方法を図1-1-6に示す。(a)は最初の形状で(b)が目的の変形形状である。(c)は変位を境界条件として与えて計算する方法で(d)は力を境界条件として与える方法である。

(c)の方法は途中段階を定義できないために、形状が座屈のように途中で形状が反転する場合には使用できない。また大変形を扱うときには、変位を境界条件として与えると、中間の形状や荷重などの条件を求めることが形状によっては不可能になるので注意が必要である。

これに対して(d)は途中の変形状態を考慮した計算ができるために、解析プロセスを作成することが可能である。ただし、最終形状を得るための適切な力の大きさの検討が必要である。また、力の方向も形状の変化に伴って刻々と変化させなければならない。

今回の課題は図1-1-4で示すように、形状が途中で反転する大きな折曲げの変形課題であり、変位の境界条件をそのまま使用することができない。

ここでは、対象とする包装型のモデルに対して、力と変位の境界条件を組み合わせる新しい方法を提案した。

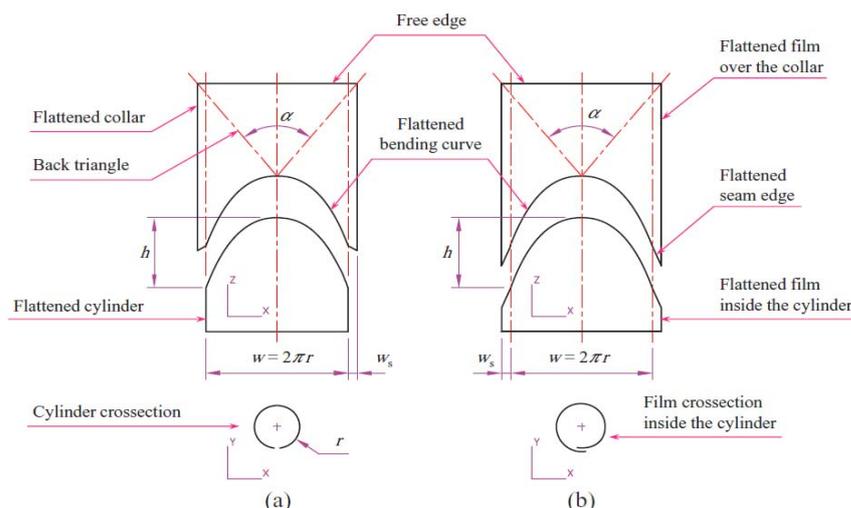


図1-1-4 展開図

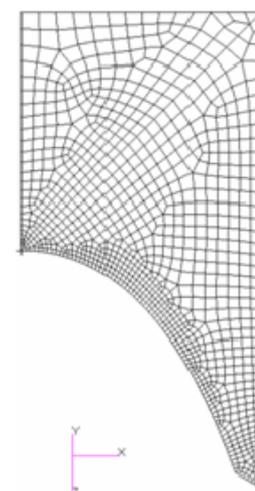


図1-1-5 FEM モデル

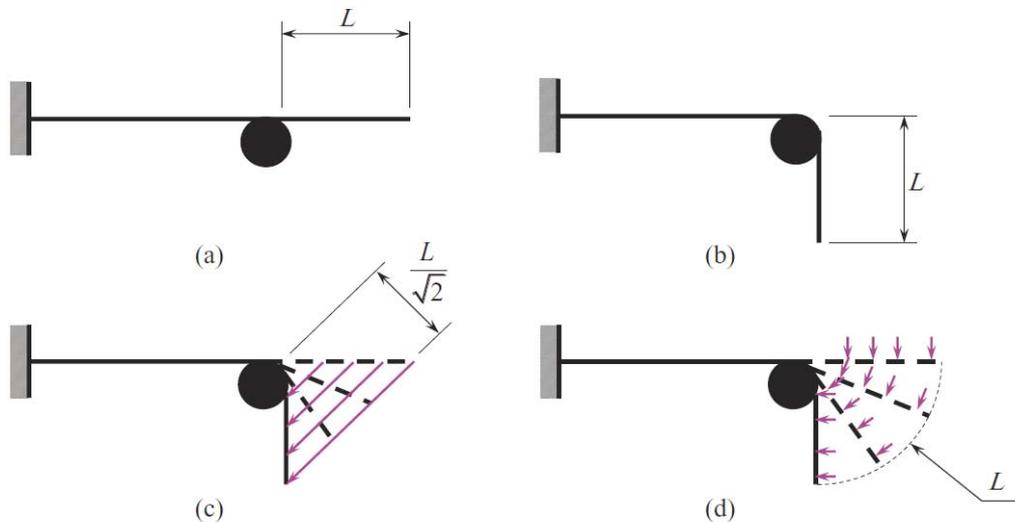


図 1-1-6 境界条件 (a) Initial shape (b) Target deformed shape (c) Forming using displacement boundary condition (d) Forming using force boundary condition

## 2-1-2 型形状の重要なパラメータの定量評価の明確化

型の形状を作成する設計指針を検討する。平成 21 年度から bending curve (折曲線) の決定方法を検討している。平成 22 年度までに、この bending curve の主要なパラメータの定量評価の設計基準を検討し、ほぼ業務フローを作成することができた。平成 23 年度は業務を検討し修正を加え、新しい解析方法に最も適した作成方法をまとめ、設計基準書を改善した。

### 1) 目的

形状の主要なパラメータの設計指針をまとめ、重要なパラメータの設計基準書を完成させる。

### 2) bending curve (折曲線) パラメータの検討

#### 2)-1 bending curve (折曲線) のエルミート曲線による定義

成型型の形状は、折線形状や高さ、円筒半径など各種パラメータにより決定されるが、それぞれのパラメータが成型型の形状にどのように影響するか、それぞれのパラメータのとりうる値の範囲等は明らかにされていない。フィルムに傷をつけない成型型の最適形状を得るためには、パラメータスタディが不可欠である。パラメータスタディを通して、各種パラメータの成型型への影響をとらえることで成型型設計の指針を得る。

ただし、ここで目的とするパラメータは形状そのものであり、この形状で評価しても型作成の設計指針にすることができない。ここでは形状を決定する bending curve (折曲線) の形状を決定するパラメータに課題を置換える。

bending curve (折曲線) の形状から正確に型を作成するとすれば、bending curve (折曲線) の形状を決定するパラメータの最適化を設計指針として置換えることができる。この方法で実施すれば bending curve (折曲線) の形状を決定するパラメータの選べる範囲が明確になり、設計上便利と判断して変更した。

ここで、bending curve 形状を決めるパラメータを選択する。これは、フィルムは成型型上をす

べる際折線部分で最も大きい応力にさらされるため、折線形状が成型の良し悪しを決定付ける最も重要なパラメータとなるからである。成型型にとって折線形状の変化が、成型型の形状に直結する、具体的には円筒の高さやカラー部と円筒との角度  $\theta$  (図 1-2-1) に直接影響するからである。

曲線の表現には3次のパラメトリック関数、エルミート曲線を用いる。エルミート曲線は、セグメントの両端点とそこでの導関数が与えられたときに、それらを補間するものとして定義された曲線である。エルミート曲線は、通常、パラメータ区間  $[0, 1]$  において定義される多項式曲線となる。3次エルミート曲線は、端点  $p_0(x_0, y_0)$ ,  $p_1(x_1, y_1)$  とそこでの接ベクトル  $v_0(\alpha_0, \beta_0)$ ,  $v_1(\alpha_1, \beta_1)$  によって定められる。

表現式は以下のようになる。

$$x(0) = x_0, x(1) = x_1, x'(0) = \alpha_0, x'(1) = \alpha_1 \quad (1.2.1)$$

$$y(0) = y_0, y(1) = y_1, y'(0) = \beta_0, y'(1) = \beta_1 \quad (1.2.2)$$

$$x(t) = [2(x_0 - x_1) + (\alpha_0 + \alpha_1)]t^3 + [3(x_1 - x_0) - (\alpha_1 + 2\alpha_0)]t^2 + \alpha_0 t + x_0 \quad (1.2.3)$$

$$y(t) = [2(y_0 - y_1) + (\beta_0 + \beta_1)]t^3 + [3(y_1 - y_0) - (\beta_1 + 2\beta_0)]t^2 + \beta_0 t + y_0 \quad (1.2.4)$$

このような式であらわされる Hermite 曲線を本研究対象である型の折り線部分の曲線を表すのに用いる。このとき図 1-2-2 に示すように、機構的条件からいくつかのパラメータについては固定して考えることができる。なお、値の単位は[m]とした。

また、形状の条件から4つの各パラメータの範囲は以下となる。

$$0 \leq t \leq 1 \quad (1.2.5)$$

$$\alpha_1, \alpha_0 > 0 \quad (1.2.6)$$

$$y_1, \beta_1 < 0 \quad (1.2.7)$$

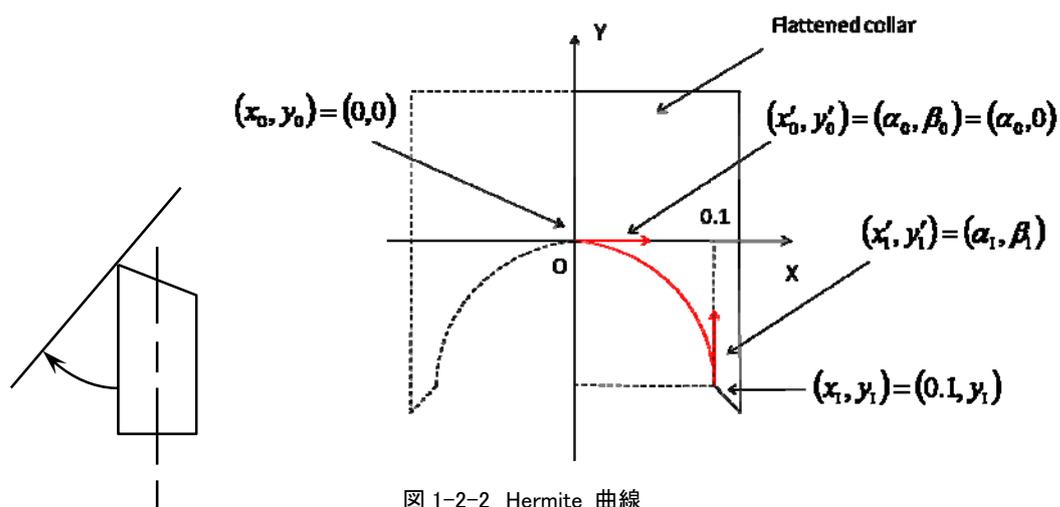


図 1-2-2 Hermite 曲線

## 2)-2 型の高さを表す $y_1$ に対する $\theta$ の変化

ここでは、カラー部と円筒との角度  $\theta$  が、 $y_1, \alpha_0, \alpha_1, \beta_1$  に対してどのように変化するかを明らかにする。カラー部と円筒との角度  $\theta$  は型を包装機械に取り付ける際の機構的制約の関係から非常に重要なパラメータの1つである。

まずは型の高さを表す  $y_1$  のパラメータスタディを実施する。

$\alpha_0=2, \alpha_1=0.1, \beta_1=1.1$  とし、 $y_1$  を  $-1.6 \sim -1.1$  まで変化させたときのエルミート曲線の形状（すなわち折り線形状）を図 1-2-3 に示し、 $\theta$  の変化をみた結果を図 1-2-4 に示す。

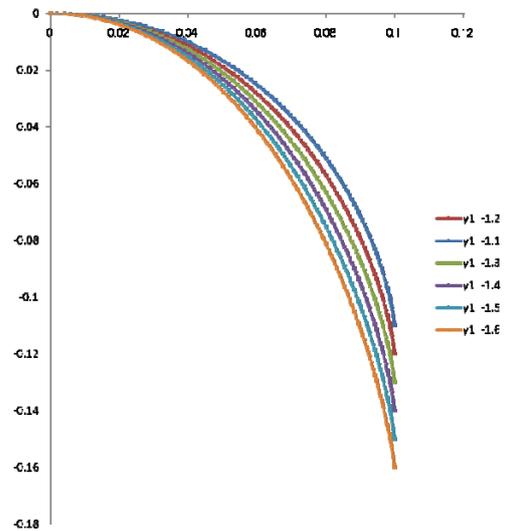


図 1-2-3 Hermite 曲線  $y_1$  に対する変化

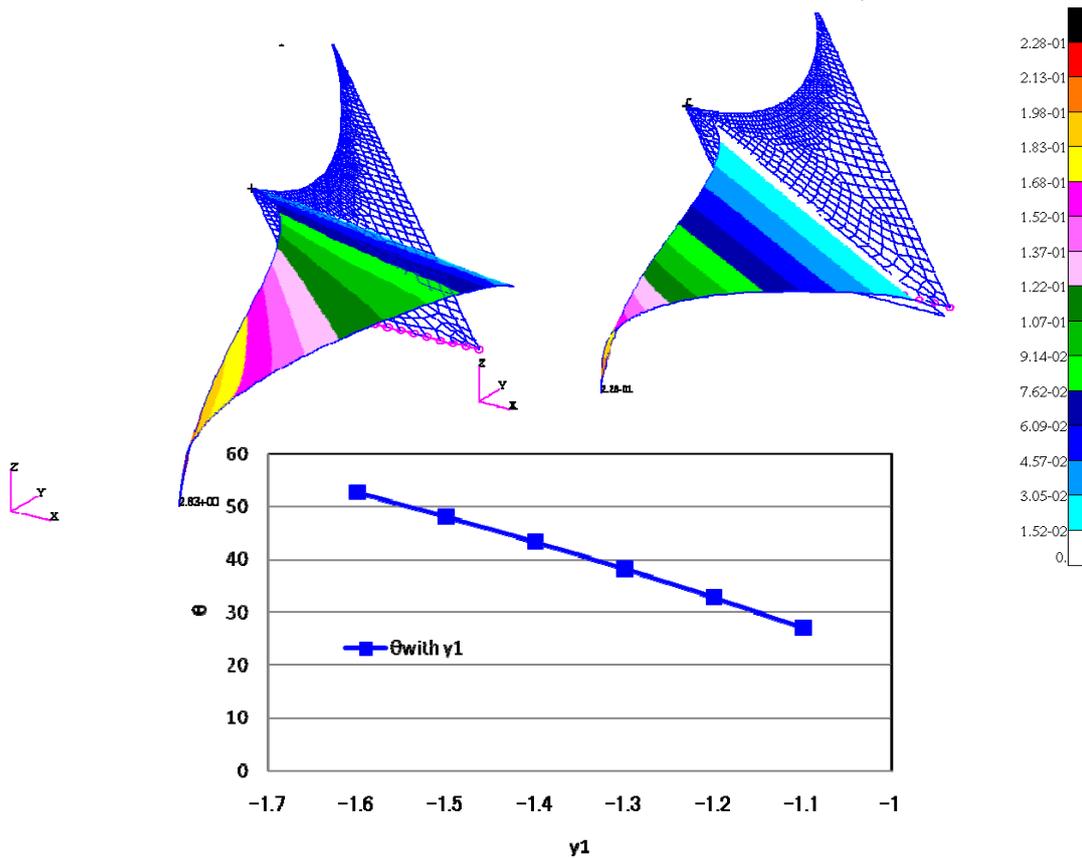


図 1-2-4  $\theta$  と  $y_1$  関係

(a)および(b)はそれぞれ  $y_1 = 1.1$ ,  $y_1 = 1.6$  のときの型形状を示す。青い線であらわされた平面は変形前の形状で初期状態は  $\theta=30^\circ$  である。

グラフから  $y_1$  の増加(すなわち型の高さの増加)に反比例して  $\theta$  が減少することが分かった。

以上のような結果から、曲線のパラメータ  $y_1$  に対して  $\theta$  は線形的に変化することがわかった。この様にしてbending curve (折曲線) の主要なパラメータの設計基準書を作成した。

### 3)型作成の解析を実施する時の背面角度の初期条件

これは解析を安定させるために重要であり、解析の実用化に向けて背面角度(型上部と円筒との角度)に対する設計基準を見直した。本件は平成22年度に検討し、包装型を作成する条件である初期背面角度の許容する角度範囲は広く、30度以上であることを既に明らかにしている。また円筒形状の可展面の型で検討すると初期背面角度設定の設定上の自由度は、30度以上存在することも証明した。

平成23年度に更に厳しい背面角度15度や20度のシリーズの検討を実施し、30度シリーズより、包装型作成上で厳しい課題が有ることが明らかになった。これは折り曲げ量が増えるので、物理的に厳しくなると考えられる。

この結果を受け、設計基準書を以下の様に変更する事とした。この後の解析は全て以下の新設計基準に従い、安定した解析を実施した。

・背面角度の初期設定の設計基準：

- ① 背面角度の許容値の範囲が狭いため、初期設定値は最終的な背面角度に近い値とする。
- ② 1<sup>st</sup> step :一度シーム部分を含まない解析モデルで背面角度を計算する。
- ③ 2<sup>nd</sup> step :1<sup>st</sup>step で得られた背面角度を初期値として再計算する。通常これで最後まで計算できる。もし途中で発散したら、②に戻り繰り返す。

## 2-1-3 高精度の型の実現

包装型の精度に関して、目標としていたフィルムに発生する応力の1/2以下を達成できた。これにより、いままで経験と実績に頼っていた設計が解析で実施できる様になった。更に安定した解析手法を検討した。

### 1)目的

- ① 型の評価で、応力を1/2以下にすること。(平成22年度までに解決済み)
- ② 安定した解析方法をまとめること。

### 2)ruling line を用いた精度の評価の完成

平成21年度の活動によってruling lineを用いた解析精度の評価方法を提案することができた。その後の活動でこの妥当性が確認でき、現在ではこれをベースとしている。ここではruling lineによる精度の評価方法をまとめる。

既存の方法においては、型は可展面を成すという仮定のもとにつくられている。このため直線のruling lineから型を作成している。ところが従来の方法ではruling lineを合理的に決定するのが困難であり、また現実の型はruling lineから逸脱する部分があるためruling lineに頼った解析では型設計の実用性は困難になっている。

本支援事業で実施しているFEMによる解析では、可展面の仮定を用いずに型を設計している。しかし、可展面を仮定できる形状をFEMで解析すると、本解析で可展面の条件を加えていないにもかかわらず、可展面に近い形状が自動的に得られることが以下から確認できる。

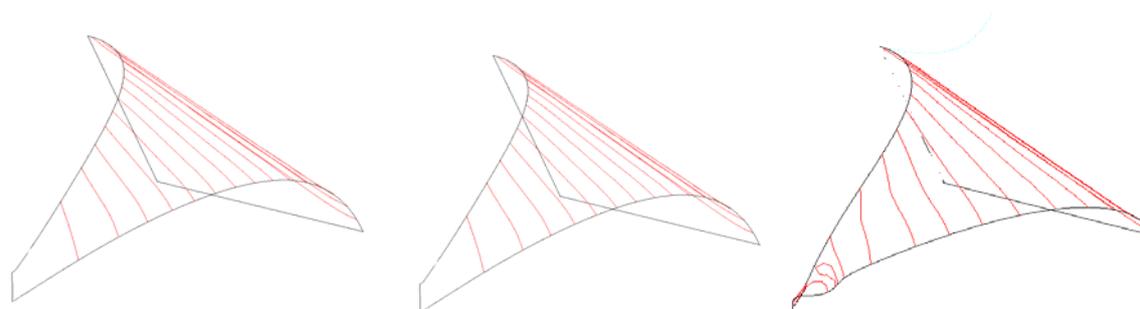
ここでは、FEM解析で得られた型の形状から逆にruling lineを計算して図1-3-2に各々示す。ここで可展面が可能な(b)のruling lineは直線であり、これから、FEM解析で得られた図13-2

(b)は、ほぼ可展面の形状であることを示している。

ただし端面ではruling lineのゆがみが多少見られる。これはruling line計算時の高次の補完誤差によるものであり、ギブス現象（Gibbs phenomenon）と考えられる。

この端面の影響は分割数を増大すれば減少する。またruling lineは平滑なcollar曲面を計算するのには直接用いないため、型の精度に直接影響しない。このためFEMを活用した本研究の重大な欠陥にはならないと考えられる。

また、(c)のシーム溶着部を有するモデルのように複雑な形状を有する型においては、特にシーム溶着部付近のruling lineは単純な直線にならないことがわかる。このため(c)のような複雑形状は既存の可展面の仮定を用いる型の設計手法では解析が困難であったが、本研究の手法は柔軟性が高く、適応範囲が広いことが明らかである。



(a) Forming collar with straight edge (b) Forming collar with triangular plane (c) Forming collar with seam  
図1-3-2 ルーリングライン(ruling line)

## 2-2 高精度な型作製のデータ作成システムの研究開発[設計生産統合データ]

高精度の型の解析が可能となったので、ここでは解析・設計・製造のデータを一元化の検討を実施した。また解析計算のプロセスを研究し、本年度はこの自動化プロセスを動かすためのプログラムリストとインプットデータを作成する手順を作成した。また解析結果を簡易に3次元の試作データにする手順を示す。下記2-2-1示す様に、解析・設計・製造のデータの一元化は設備や仕事の流れによって最適値が異なるが、試作データを作る中で最適形態を模索中である。

### 2-2-1 解析・設計・製造のデータを一元化し計画段階から評価まで検討するプロセスの研究

解析・設計・製造の各ステージにおいて、データ構造がそれぞれ異なるためデータ相互のやり取りがスムーズに行えない。ここでは、データを一元化することについて検討し、不都合を解消した。包装機の形状を形成するために用いられるFEMメッシュは、四角形のメッシュであり、容易に三角形メッシュに変更できることから、三角形メッシュを基にRP用のデータまで三角形メッシュで統一することが出来た。またNC用のCADデータを三角形メッシュで統一することも検討し、CADデータをそのまま用いることを定めた。

#### 1)目的

データ統合システム

#### 2)FEMデータとRP用データの一元化

解析・設計・製造のデータの一元化に関して、まず、解析においては、解析ソルバーの独自

のデータフォーマットが用意されている。その中で形状データは、解析の種類に応じて、ビーム、三角形、四角形、四面体、五面体、六面体などの要素の集合および節点の座標データによって表現される。また、設計においては、データはいわゆる CAD データによって表現される。ここで、CAD データとは、CAD アプリケーションが独自に持っているデータ形式もあるが、異種の CAD アプリケーション間でのデータのやり取りをする際に、CAD アプリケーションごとに異なる形状表現方法に起因して、形状の欠損という問題が発生することがある。そのため、IGES (Initial Graphics Exchange Specification) や 3 次元データだけではなく、製品のあらゆる情報を表現するためのデータフォーマットである STEP (STandard for the Exchange of Product model data) などの標準フォーマット (中間ファイルとも呼ばれる) が考えられてきたが、それでも尚、精度の問題などがあり、面がうまく繋がらないなどの問題も発生している。また、製造に関しては、RP には、三角形によって形状を表現することができる STL (STereo Lithography) データが利用され、また、NC に対しては、IGES などの CAD データが利用されている。

ここで、包装機の表面形状を表現することに関しては、解析の場合、三角形メッシュまたは四角形メッシュが用いられ、しかも、CAD アプリケーションにおいても、CAD データを STL 形式でエクスポートすることができるため、三角形メッシュ、特に STL 形式のデータを共通のデータ形式として利用することが考えられる。STL データは、基本的に、一つの三角形に対して、三つの頂点座標およびそれに付随する法線ベクトルによって記述される。そのため、FEM などのメッシュの表現形式とは異なり、一つの頂点座標がデータ内に複数回現れる。従って、これを ASCII 形式で保存するとファイルサイズが大きくなるという欠点がある。一方、STL にはバイナリー形式も用意されている。バイナリー-STL ファイルは 80 バイトの任意の文字列で開始される (通常内容は無視されるが、ASCII 形式との区別のため、ASCII 形式のヘッダーにある solid の文字で始まってはならない)。次に 4 バイトの整数でファイルに含まれる三角形の枚数が示され、その後、それぞれの三角形のデータが枚数分続き、終了コードは特になく、最後の三角形のデータを示した後、単純終了する。それぞれの三角形に関しては、12 個の 32 ビット浮動小数点で示される。ASCII 形式の STL ファイルと同様に、最初に三角形の法線ベクトル (3 個)、次に三角形の各座標 (3x3=9 個) が Z/Y/Z の順番で示される。そのため、ASCII 形式に比較してバイナリー形式では、ファイルサイズを減らせるという利点がある。しかしながら、バイナリー形式は、ASCII 形式に比べて、取り扱いが少々面倒であり、サポートしていないアプリケーションソフトもあるということと、プロジェクトに現れる包装機モデルを ASCII 形式の STL データで表現をした場合、十分 PC で扱えるファイルサイズになっているため、これらの理由から ASCII 形式の STL データを採用することにした。

### 3) STL データと NC 用データとの一元化の検討

次に、CAD データと STL 形式のデータとの一元化についての検討を行った。CAD データは、幾何学的には、NURBS や Bezier などの滑らかな曲面形式によって記述されているが、少なくとも画面上では、細かい三角形の集合として表現されている。そのため、粗い三角形メッシュを細かく分割していくと、考えている形状を見た目上には (画面では解像度の限界があるため) 滑らかな曲面として表現することができる。その考え方を利用して生まれたのが、CG の世界で利用されているサブディビジョン法である。これに加えて、リフティングサブディビジョン法を利用すれば、粗いメッシュから細かいメッシュへ、細かいメッシュから粗いメッシュへと必要な解像度に合わせて自由に行き来ができるため便利である。一般にメッシュの三角形要素に対して、ただ単に辺を 2 分割していくのでは、メッシュが細かくなるだけで、滑らかさは向上しない。そのため、サブディビジョン法では、特殊な分割方法を採用して形状の滑らかさを保証し

ている。サブディビジョン法には、大きく分けて、補間法と近似法の2種類がある。補間法では、細分割をする際に今までに生成されてきた節点はその位置を変えない。一方、近似法では、一回の細分割ですべての頂点座標の位置が修正される。補間法、近似法の代表的な方法は、それぞれ、Modified Butterfly スキーム、Loop スキームである。近似法では、自由度がある分形状を滑らかにしやすいが、解析で生成された、モデルの形状の基礎となる節点の座標値を変えてしまうため、ここでは、補間法である Modified Butterfly スキームについての検討を行った。一般的に言って、三角形メッシュはそれぞれの要素が正三角形になっていることが望ましい。平面上でこれを考えると一つの頂点に対して6つの三角形要素が接続していることになる。Modified Butterfly スキームにおいては、前述したような6つの三角形要素が接続する節点を通常点と呼び、それ以外の節点を異常点と呼んでいる。通常点と異常点では処理の仕方が異なる。また、通常点に比べて、異常点での滑らかさが若干劣るということが知られている。実際にサブディビジョンの Modified Butterfly スキームを、包装機のモデルに適用しその結果を検討したが、異常点において理論的にいえる滑らかさは保証されているものの、形状的に特異性（丸まった角点の様になっている）が現れてしまうことがわかったため、全てを三角形の STL データで表現するのではなく、一部は IGES 形式による CAD データを用いる必要があるという結論に至った。

### 2-2-2 計算プロセスの自動計算化

本支援事業では新しい解析方法を確立できたが、これは一般の汎用プログラムの処理に比べると格段に複雑なプロセスとなっている。ここではこのプロセスを自動的に動かすためのプログラムリストとインプットデータを半日で作成する事が出来る手順を作成した。これを基に解析は自動計算が可能となり、大幅な処理時間の短縮が可能となった。

またこの解析結果を用いれば、包装機の型モデルの高精度な CAD データを作成することが可能である。ここでは Magics による処理例を纏め、一連の処理を実施し、CAE-CAD-CAM の総合的な処理時間の短縮の見通しを得る事ができた。

#### 1)目的

CAE-CAD-CAM の処理時間の短縮【半日に短縮】

#### 2)作成予定の包装型の平面展開図から解析用有限要素法のデータ形式に変換の手順

以下の手順を補助ソフトを用いて実施する。先ず作成予定の包装型の平面展開図をここでは solidworks を用いて読み込む。図 2-2-1 は平面展開図の CAD データであり、単位系を mm とする。これは対称モデルであり、右半分を残し、他は全て消去する。さらに型を2個の要素に分ける。上の三角形を part2、下側の型を part1 とする。これを図 2-2-2 の様に要素分割する。この図から bending curve を取り出し図 2-2-3 の関係から円筒面に投影した bending curve を計算し target beam として定義する。更に境界条件を定めて追加する。これを図 2-2-4 に示す。最後に背面角度（進入角度）をここでは 15 度に定義し、図面を回転させる。この結果を図 2-2-5 に示す。これを用いて短時間に必要なデータを作成する。

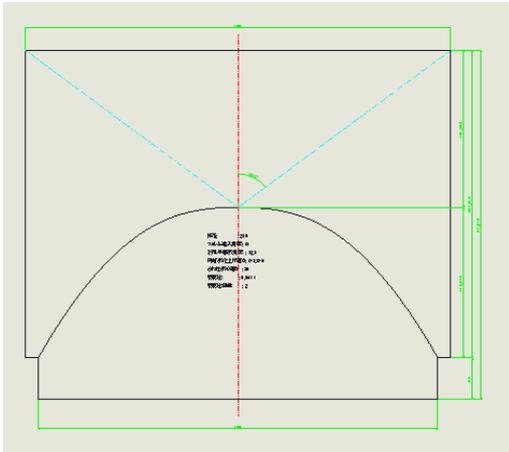


図 2-2-1 作成する型の平面図

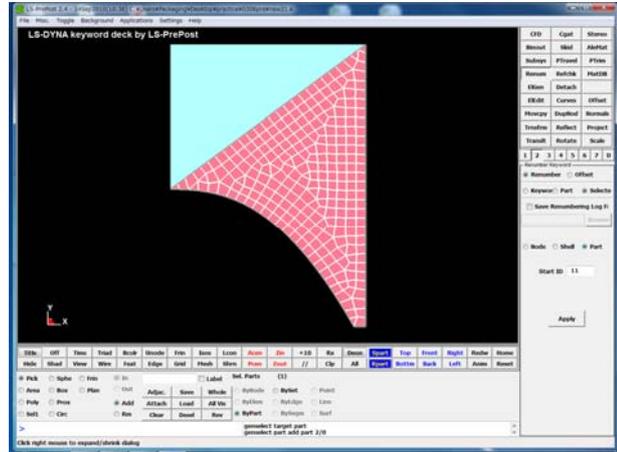


図 2-2-2 要素分割

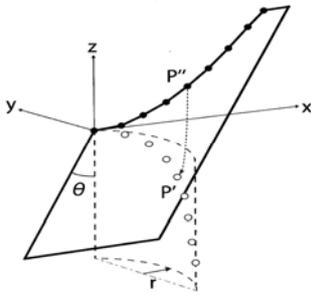


図2-2-3 bending curveとtarget beamの関係

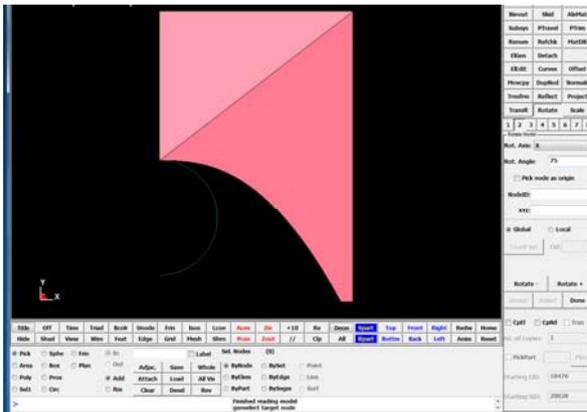


図 2-2-4 target beamと境界条件の追加

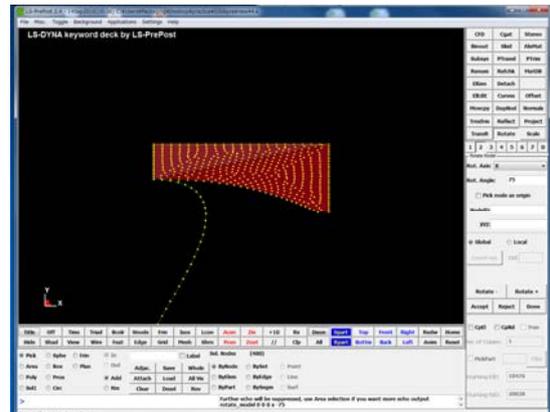


図 2-2-5 背面角度 15 度に回転

### 3)解析結果のRP試作データ作成の手順

本支援事業の解析はこの結果を用いて、包装機の型モデルの高精度なCADデータを作成することが可能である。この手順を示す。このプロセスは各種の方式が存在し、ここではMagicsによる処理例を示す。図2-2-6では不要部分の削除する作業を示す。図2-2-7ではこれを中空の物

体に変え、さらに対称形状にコピーして全体の形状を作成する。これを原型としてRPのデータを作成する。

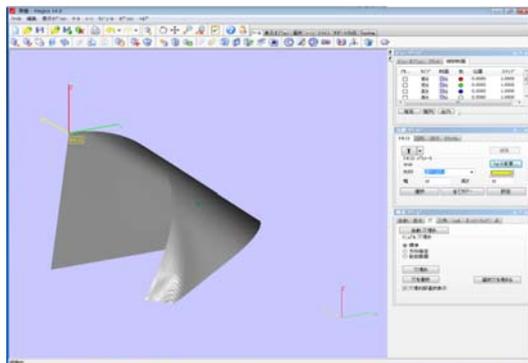


図2-2-6 不要部分の削除

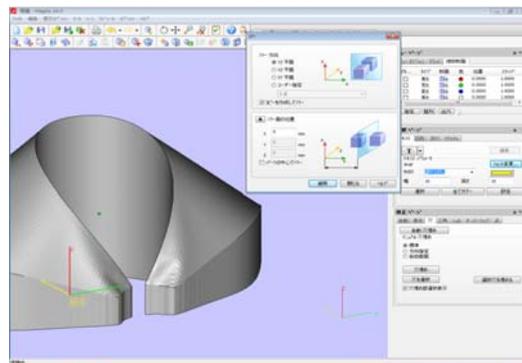


図2-2-7 中空の形状に変化

## 2-3 高精度で合理的な型作製の研究開発[生産]

### 2-3-1 NC加工による型の作製

解析による設計データからNCによる加工を実施する一連のデータ処理と実際の加工を実施した。平成22年度までの試作において課題のあった、工具逃げの処理などを改善して解析から製造に直結する検討を実施し、試作品を包装機に搭載して実用性を評価した。この一連の作業はCAE-CAD-CAMの既存技術で処理できるため、試作・評価・製品化に有効であることが確認できた。

#### 1) 目的

耐久性実用性の検討【重点性能の検討が目的】

#### 2) 実施内容

商品化を視野に製作時間やコストなどの検討を行う。設計データを用いて、加工データをCAD/CAMシステムを使用し変換し、NC加工し、実機での試作型の検証を行った。

##### 2)-1 NC加工による型作製

2-1節の解析方法によって型を作成し、2-2節の方法でCAD/CAM用のデータに変換して設計型形状を作成した。これを図3-1-1に示す。

ここでは包装機に取り付けて型の性能や実用性を検討する為に、取付けのフランジのCADデータを作成して図3-1-1の型と合成した。これを図3-1-2に示す。加工は協力会社に依頼し、図3-1-3、図3-1-4に示す試作品を作成した。曲面部の反射光の形状を見て分かる通り、きれいな直線状に光が映りこんでいる。これは余計な凹凸がなく滑らかな曲面を形成している事を示している。また、すべて機械加工されており、機械加工が難しいとされている合わせ部も図3-1-5、図3-1-6に示すとおり、ヤスリ等による手仕上げは行われていない。

NC加工の試作型を実機に組み込み引張りテストを行った結果を図3-1-4に示す。ここでは解析で得られた設計データから加工データの作成し、NC加工を実施し、一連のデータ処理と実際の加工を実施した。これは現在確立しているCAE-CAD-CAMの技術で処理できるため、試作・評価・製品化には有効であることを確認できた。

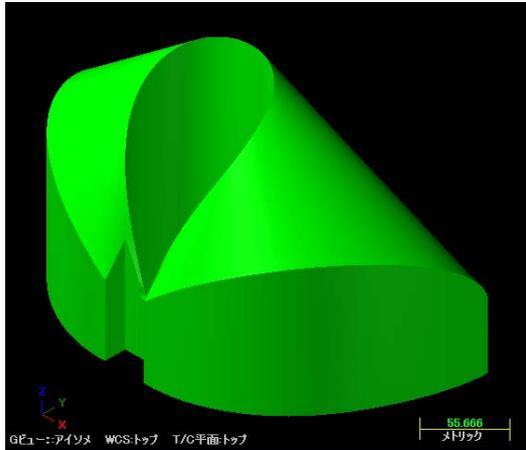


図 3-1-1 設計データ

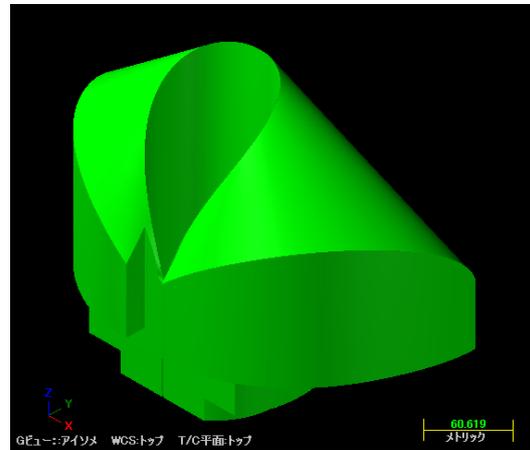


図 3-1-2 フランジを合成

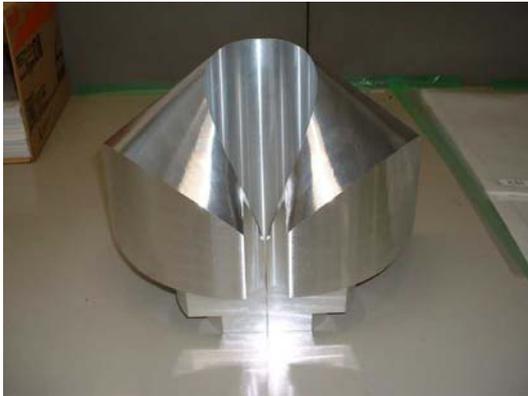


図 3-1-3 加工した試作品(正面)



図 3-1-4 包装機での稼働状態

### 2-3-2 RPによる型の作製

RPによる型の試作は形状の検討に対して有効であり、これまで数多くの試作を行ってきた。さらに包装機に搭載して包装型の性能や実用性の検証も行う事ができた。ただし、使用しているRP機械は入門機であり、分解能の不足からシャープエッジ部分が十分に作成できず、一部が欠落した。また大きい型では、型を分割する必要がある。検討結果、高性能の大型のRP機械を用いれば、包装型として活用可能であることが分かった。

#### 1)目的

- ① 試作品の応用範囲検討
- ② 耐久性実用性の検討

#### 2)RPでの型の作製と性能確認\_進入角度の違いによる形状検討

包装型は多くの構造があり、シール部の検討などの確認のため、多数作成した。ここではRP製の樹脂製の型を作製し軽量な型作製の研究開発を行い、フィルム材質、張力による差異も明らかにした。これを図 3-2-1 に示す。まずここで問題になったのは bending curve のシャープエッジが再現出来ないことである。中央部分には大きな凹が発生している。また RP 機械のサイ

ズが小さく、大きい包装型では2分割する必要があり、分割面に発生する凹凸が課題となった。これを包装機で試験した結果を図3-2-2に示す。



図 3-2-1RP 試作型 54-02

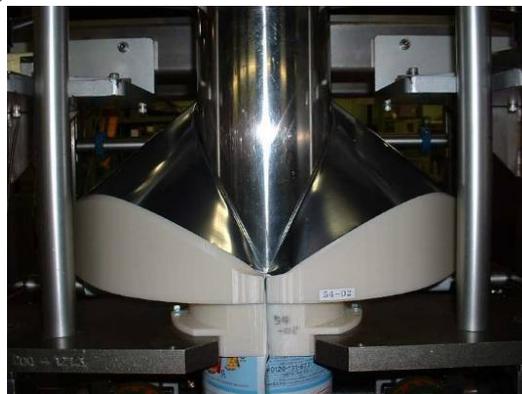


図 3-2-2RP 試作型の試験 54-02

### 2-3-3 3Dプリンタによる試作型の作製

既存設備の3DプリンタはNC加工・RPに比べて試作スピードが速く、安価なことから、包装型の試作に活用する事を検討したが、平成22年度までの研究から、フィルムの馴染み性、型性能等の詳細な評価には適さないことが判明した。このため、この項目の研究を終了し、試作/製造の検討はNC加工、RPで行うことを決めた。

#### 1) 目的

試作品の応用範囲検討

#### 2) 応用範囲の検討

ここでは鋳造による樹脂型作成を検討した。平成21年度では鋳造型を3次元プリンタで作製することを検討したが精度が不十分で、シャープエッジが作成できないことが判明した。平成22年度からは鋳造の検討は止めて、直接の型の検討に特化した。

また3次元プリンタは石膏製であり、重く、割れる不具合がある。このため中空の型を作製したが、強度が不足して型として使えない事が明らかになった。また包装機に搭載するためのフランジの強度が不足して、短時間の包装作業であっても包装機で試験できないことが明らかになった。

シール部一体の新形状型90\_sealRPの初期検討として、3次元プリンタで試作例を図3-3-1に示す。ここでは形状の検討に留まった。



図3-3-1 シール部一体の新形状型90\_sealRPの初期検討

#### 2-3-4 商品化の検討

NC、RP、3Dプリンタともに解析データから一連の流れで作製でき、試作品として有効であることが分かった。NC、RPは性能や実用性の確認を包装機に搭載して実施でき、更に生産型としての課題も明らかにすることができた。3Dプリンタは安価で短時間に試作が可能であり、形状確認に適する。ただし、性能確認ができず、強度も不足して実用性が無いことが明らかになった。

NC、RPでは作製時間、エッジ部の耐久性、型全体の強度と重量などの特性を明らかにして、商品化を図っていく。

##### 1)目的

###### ①生産型としての商品化検討

##### 2)検討内容

型作製の特徴を2-3-1、2-3-2、2-3-3の節で検討し、型の要求に応じて生産する方式を検討した。

NCでは作製できる成形型の大きさに制限はないが、加工時間の長さや重量が問題になる。素材の材質や形状を検討する必要がある。使用工具をうまく選定すれば機械加工のみで仕上げの必要性が低いことが判明した。

RPでは作製できる成形型の大きさに制限がある。また、エッジ部の耐摩耗性にも課題が残っている。造形時間の長さについては、構造上短縮は難しいと考えられる。RPは試作品として実用性まで確認できるため優れている。ただし商品化の面では2-3-2で検討した課題の解決が鍵となる。

3Dプリンタは材料が石膏であり強度・精度共に問題があるため、形状評価に使えるだけであり、包装型の作製手段として適合しないことを明らかにした。

NC、RPともに解析データから一連の流れで作製でき、形状評価の試作には有効なことは確認できた。加工時間・軽量化・エッジ部の耐摩耗性などの特性を明らかにして、商品化を図る。

#### 2-4 型上でシートを変形させ滑らせる時に発生するシート応力の解析方法の研究開発 [型性能の評価]

##### 2-4-1 解析プロセスの確立と自動化

フィルムが型の上をすべる境界条件は特殊であり、本支援事業では新たな bending curve の境界条件を平成21年度に提案した。平成22年度はこの精度を保証する解析方法を検討し、実用的な分割の範囲で解析できることを明らかにした。平成23年度は、この具体的な解析方法を明らかにして解析を容易にした。また、この解析法の誤差の検証を行い、解析結果に解析上の余分な誤差を与えないことを明らかにした。目標としていた型の精度は『現状より誤差が1/2となる精度向上』であったが、本解析法の型はこれを大幅に上回る精度であることを明らかにすることが出来た。

##### 1)目的

###### ①解析プロセスの確立

###### ②自動化

##### 2)成形型によってフィルムに発生する応力解析手法の明確化

以下本年度まとめた応力解析手法を簡単に記述する。フィルムは型の前後で張力を加えて成形型の上で折り曲げられ、円筒形状に成形される。包装では成形型で折り曲げる時に発生するフィルムの傷が課題になる。この傷の発生は、張力の変動するフィルム送りの開始と停止時に

は顕著になる。また現状の成型型ではサイドシール部分を連続的に成形する適切な成型型が無い  
ため、シール近くに課題となる傷が発生する事が多い。

型の重要な性能はフィルムに傷を発生させない事である。これらはフィルムを型上で引く時  
にフィルム面の局部に発生する応力が高くなった結果であると考えられる。ここでは型の上の  
フィルムの応力状態を解析して、成型型の精度を評価することを試みており、評価法が課題と  
なっていた。ここで評価の指数を『フィルム各点の応力／平均応力』の応力倍率として明確に  
評価することとした。平均応力はフィルムに加えている張力を平面上のフィルムに加えて発生  
する応力である。成型型上に置いてフィルムに張力を加えると、折曲げ線 (bending curve) 近  
くなどで応力が増大する。この応力倍率が全ての点で1に近い値であれば理想の成型型と考え  
られる。

図 4-1-1 に成型型と成型型に沿うフィルムの応力解析モデルの概念図を示す。ここでは成型  
型は剛体と考え、フィルムはこの表面に沿って作成される。フィルムは成型型に沿って曲がる  
機構であるため、境界条件として、フィルムは型から垂直抗力だけを受けると仮定する。この  
抗力に直交する面にフィルムは自由に動ける条件とする。成型型とフィルムの間のフリクショ  
ンは0と仮定する。

bending curve の部分はフィルムの前後の面の角度から垂直抗力の方向を計算する。図 4-1-1  
の例では bending curve の前後で同一の条件であるため、垂直抗力の方向は2等分の方向となる。  
bending curve の接点においても、この方向から垂直抗力を受けると仮定し、この面と垂直な面  
は拘束のない自由な面とする。この境界条件によってフィルムは成型型面内上を自由に移動す  
ることが可能となる。

ここでは成型型に沿うフィルムの有限要素法の解析モデルを考える。この要素は変位が連続  
しているが、角度は非連続である。このため接点に関連する要素の垂直方向を計算し、接点に  
おける要素の影響度を考慮した加重平均によって接点を代表する垂直方向とした。接点での要  
素の影響度の計算は色々な方法が考えられるが、ここでは接点の垂直方向に抗力を受けると仮  
定する。

具体的に解析する為には要素毎に式で提示する必要がある。ここでは4つの要素が関わる接  
点の例を、図 4-1-2 に示す。ここでは垂直ベクトルは式 4-1-1 で示すことができる。接点によ  
って関連する要素数が異なるが、全ての接点で同様に定義することができる。bending curve の様  
に急激に形状が変化する部位も同様に定義することが出来る。

$$\vec{Z} = \frac{\vec{Z}_1\theta_1 + \vec{Z}_2\theta_2 + \vec{Z}_3\theta_3 + \vec{Z}_4\theta_4}{|\vec{Z}_1\theta_1 + \vec{Z}_2\theta_2 + \vec{Z}_3\theta_3 + \vec{Z}_4\theta_4|} \quad (4-1-1)$$

ここで、

$$\vec{Z}_1 = \frac{\vec{a}_1 \times \vec{b}_1}{|\vec{a}_1 \times \vec{b}_1|}, \vec{Z}_2 = \frac{\vec{a}_2 \times \vec{b}_2}{|\vec{a}_2 \times \vec{b}_2|}, \vec{Z}_3 = \frac{\vec{a}_3 \times \vec{b}_3}{|\vec{a}_3 \times \vec{b}_3|}, \vec{Z}_4 = \frac{\vec{a}_4 \times \vec{b}_4}{|\vec{a}_4 \times \vec{b}_4|}, \quad (4-1-2)$$

$$\cos\theta_1 = \frac{\vec{a}_1 \cdot \vec{b}_1}{|\vec{a}_1| |\vec{b}_1|}, \cos\theta_2 = \frac{\vec{a}_2 \cdot \vec{b}_2}{|\vec{a}_2| |\vec{b}_2|}, \cos\theta_3 = \frac{\vec{a}_3 \cdot \vec{b}_3}{|\vec{a}_3| |\vec{b}_3|}, \cos\theta_4 = \frac{\vec{a}_4 \cdot \vec{b}_4}{|\vec{a}_4| |\vec{b}_4|}$$

この様に、接点で反力を計算する方式を採用すると、接点の垂直方向を計算する必要があるた  
め、要素分割の影響を直接受ける。荒い分割では分割の影響が強くなる欠点があり、要素分割  
は形状に応じて細かに設定する必要がある。この影響による精度を以下に検討し、ここで提案

している式で十分な精度が得られることを確認した。

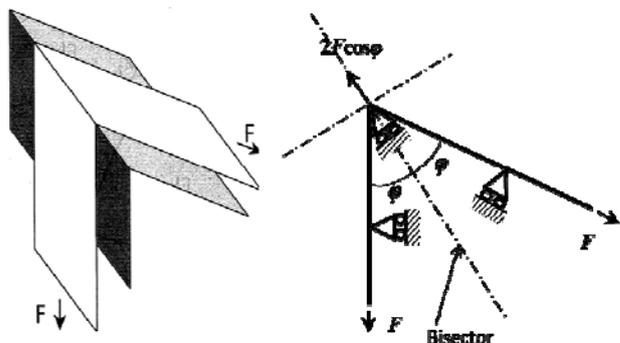


図 4-1-1 境界条件のモデリング

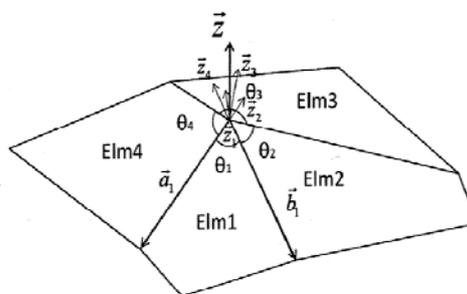


図 4-1-2 接点に置ける垂直抗力の計算

### 3) 成型型におけるフィルムの応力

まず現在広く使われている成型型の形状測定と、フィルムの応力解析を既に行っているもので比較として示す。なお、ここで用いた成型型は、他の成型型と同様にサイドシール部分に近い部分が存在しないので、形状を延長して型形状を創っている。

図4-1-3にこの結果を示す。結果はbending curve部分の応力が他の部分に比べて高くなっている。これは成型型が十分な可展面ではなく、フィルムを折り曲げている部位で高い応力を発生していることを示している。またサイドシールの部分は大きな応力を発生している。現在の成型型は、サイドシール部分の型形状がなく、包装机ではフィルムは型の制約を離れて、自由に折れ曲がっているが実態である。このため多くの場合で、フィルムが振動し、フィルム面に傷が生じることが多い。フィルムの応力解析では、サイドシールとその近辺部分が無いとフィルムの応力を計算することができない。このため図4-1-3のモデルでは他の部分から推定してサイドシール部分の型形状を作成している。

図4-1-4は本プロジェクトで提案している解析方法で作成した成型型を用いてフィルムの応力を計算した例である。この成型型では、bending curve近くでも応力集中をほとんど発生しておらず、周りの平均応力に近いレベルに留まっている。このため、フィルムに傷等を発生させないで成形できる成型型であることを示している。この解析例ではサイドシール部分まで連続して成型型を有限要素法で作成しているが、この成型型が上手くフィルムをガイドして、応力集中の発生を防止している事を示している。

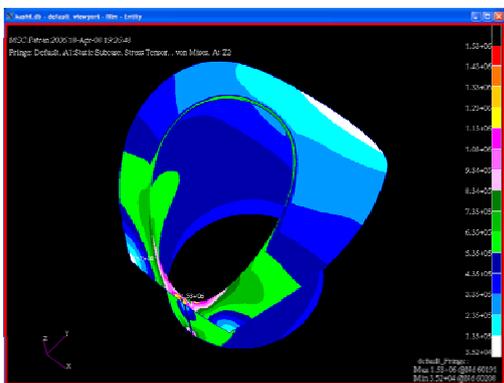


図4-1-3 現行の型で発生するフィルム応力

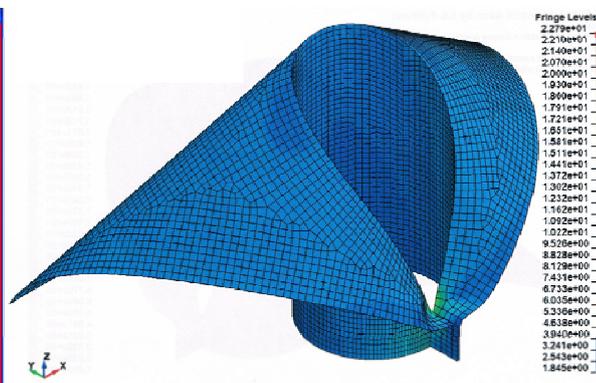


図4-1-4 本解析法の型で発生するフィルム応力

#### 4)本解析法の精度の検証

まず本解析は成形型上を滑って変形するモデルであるため、要素接点の垂直抗力を計算する方式となる。要素の垂直抗力は要素間で非連続であり、要素分割の影響が大きい。まずは要素分割の影響を確認する。図4-1-4は円周上を100分割したモデルであり、図4-1-5は円周方向に30分割と70分割したモデルの例を示す。ここでは対称条件を用いて右側だけで計算している。図4-1-5の右図はbending curve上の応力と分割数の関係を示す。荒い分割では精度が劣り、円周上を100分割したモデルでは誤差が少ない結果に示している。この誤差のレベルは基準となる形状のモデルで次に検証する。なおここで用いた円周上で100分割のモデルの細かさであれば、CADで詳細な形状を作成できる。またこの細かさの要素分割であれば、小型パソコンで計算処理が可能である。

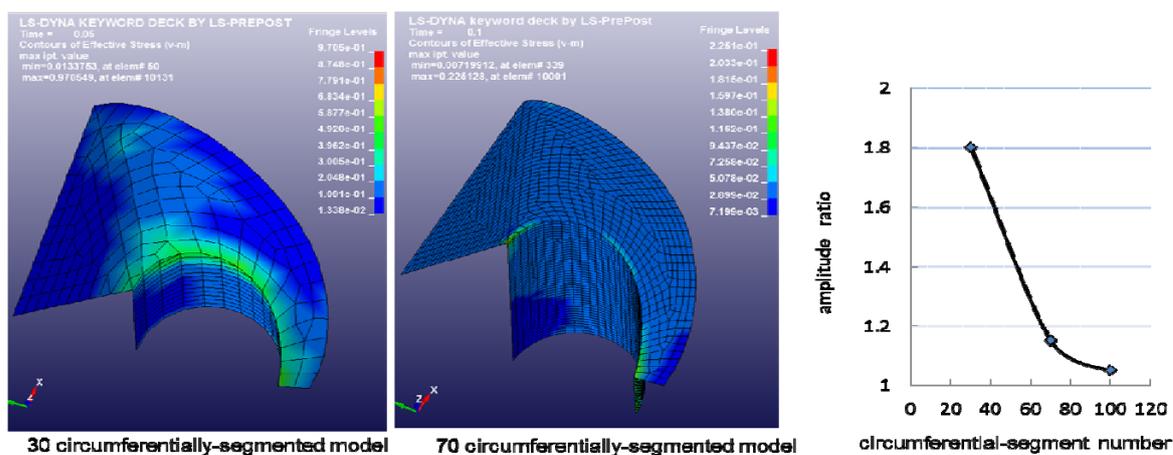


図4-1-5 有限要素法モデルにおける要素分割の影響

#### 2-4-2 既存型の情報の収集

他社の型を含め既存型の情報を収集するベンチマーキングは重要であり、研究テーマとして調査を進めた。存在する型を計測して型の精度を検討する方法は昨年度までに開発した。ただし、本支援事業で試作した型の実力は既存型のレベルを大幅に凌駕しているため、既存型が参考とならない事態が発生した。これは本解析の型が目標を超えて高精度になったためであり、平成23年度では既存型の調査は研究開発スケジュールの表から除外した。

解析の型から十分な情報が得られるので、この研究テーマは完了とした。なお文献調査からも参考になる型の情報を発見できていない。

## 2-5 新包装機の研究開発[新開発]

### 2-5-1 高精度の型の設計/作製

本支援事業の解析手法によって、高精度の型を安定的に設計できることを確認した。平成23年度は背面処理の方法を検討しこの効果を纏めた。これは安定的に解析する重要な鍵であり、この検討も追加して高精度の包装型の設計方法を確立した。

#### 1) 目的

2倍の精度の型の設計/製造

#### 2) 型の背面部の境界条件の決定

フィルムは、初期状態では平面であり、型の端面（直線形状）において型と接触する。その後型形状に沿って変形する。型はフィルムを反転させて折り曲げる。従来は型の背面部は3角形の平面形状であり背面部で曲げる構造であった。ただし、可展面にするにはこの三角形が小さいほど良い事は折紙の理論から判明しているため、ここでは背面三角形の影響を明らかにする。3通りの型の背面部の形状を検討する。

図5-1-1は背面部分を平面に固定する条件を最小限にするAモデルである。これはフィルムを受ける端面を直線に仮定する。これは平面状態のフィルムを最初に受ける部分として最低限の境界条件のモデルとなる。また対称面は対称の条件と直線の条件に限定する。この2項目以外の境界条件を加えない。すなわち背面部分に平面の境界条件を与えない。これに対して図5-1-2のBモデルは、従来通りに三角形の平面部分を保持する。三角形部分が平面を保つように境界条件を定義する。図5-1-3のCモデルはこの中間であり、平面を仮定する三角形の面積を低減する。この場合、三角形を仮定していない端面では少し湾曲する。この分だけ平面の仮定の規制が軽減出来ていると考えられる。

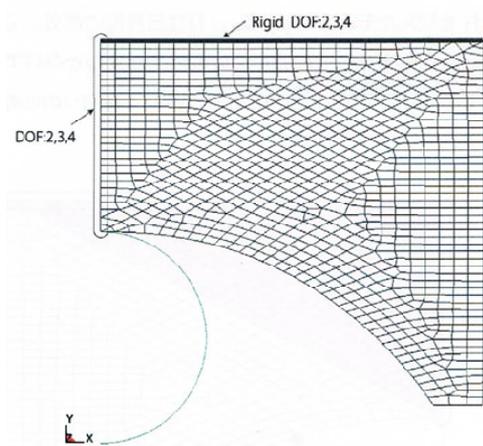


図2-3 境界条件 (モデルA)

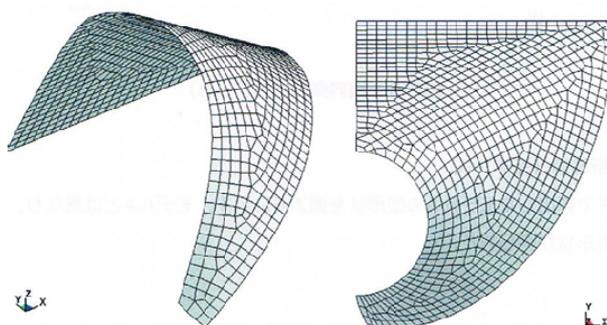


図2-4 解析結果 (モデルA)

図5-1-1 背面の平面固定条件を最小にしたAモデルの境界条件と解析結果

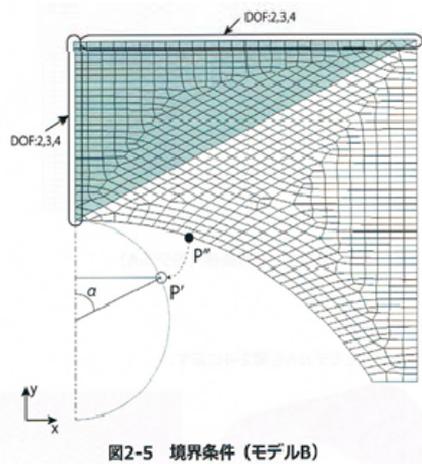


図2-5 境界条件 (モデルB)

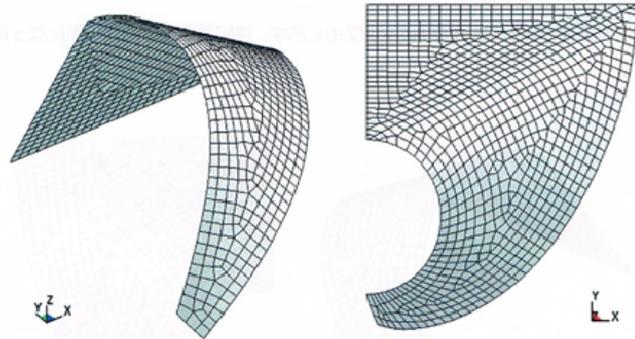


図2-6 解析結果 (モデルB)

図 5-1-2 背面の平面固定条件を背面三角形に全て適応した B モデルの境界条件と解析結果

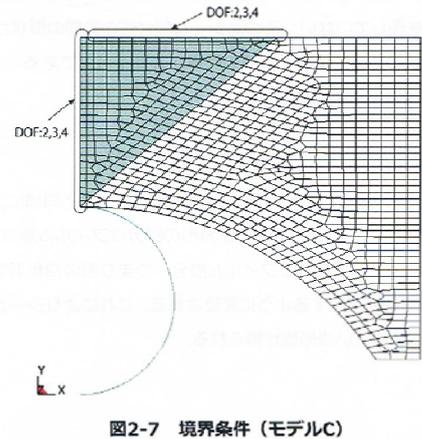


図2-7 境界条件 (モデルC)

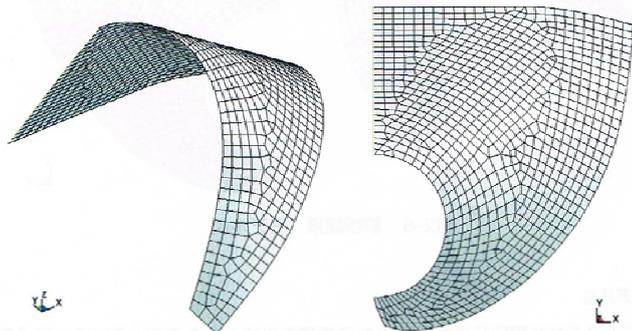


図2-8 解析結果 (モデルC)

図 5-1-3 背面の平面固定条件の背面三角形を小さくした C モデルの境界条件と解析結果

これらのモデルの応力を 2-4-1 節の解析法と比較すると A モデルの包装型ではフィルムに発生する応力が低い事が分かる。これに対して C モデルの包装型では全域で発生応力が高くなっている。これらから背面部分の拘束条件を増すと、理想的な形状からかい離することを示しており、折紙の理屈に合っていることがわかる。

また B モデルの包装型では A モデルに近い特性が得られている。これからも平面を仮定する三角形の面積が少ないとフィルム応力の低減に効果が大きい事が明らかである。

## 2-5-2 新形状の型の開発

本支援事業の解析方法はシール部分まで含めた最適構造を検討できることが特徴である。平成 23 年度は、可背面角度の少ない厳しい条件の包装型に対するシール構造を検討した。ここでは安定して解析できるシール構造を検討し、実用性の高い高精度の設計法を確立した。なお当初の予定では円筒形状だけでは十分な最適構造は得られないと推定していたが、円筒形状でも目的としている精度の包装型の設計を達成したので、円筒以外の最適形状の検討は中断した。

## 1)目的

- ① シール部分までの一体の最適構造の検討
- ② 円筒以外の最適形状の検討

## 2)シール部分までの一体の最適構造の型の作製

現在存在する型はシール近辺を省略しているため、シールに近いフィルムの下端では型はフィルムをガイドしていない。このため型製作時には、フィルムがシール近辺で振動している。本支援事業の解析方法の利点は非可展面でも、決められた条件内で最適な形状を計算できる事であり、シール構造も型と一体として解析出来る事を明らかにしている。

ここでは更に背面角度の少ない厳しい条件の包装型を検討し、高精度の包装型を広く安定して設計できる方法を明らかにする。

なおフィルム形状はシール構造によって形状が反転する必要があり、包装型上部とシール構造部分を接続する面を移動して折曲がり円筒等の袋形状になる。この包装型上部とフィルムの溶着構造であるシール部分は、これらはどの様に分割しても可展面にはならない。

### (1)背面角度 15 度シリーズの型におけるシール構造を含む解析法の課題

ここでは 2-1-1 節の方法により、背面角度の少ない厳しい形状でも解析が可能となった。ただしシールを含んだ包装型を解析すると皺が発生して包装型を作成することが困難となる事が多い。これは背面部分の条件の厳しさと、非可展面に成る厳しいシール部分の影響が重なって課題を発生すると考えられる。ここでは 2-1-1 節の背面角度の初期値を正しく設定する方法で行った場合、円筒部分の変形までは課題が少ない。

但し、更にシール部分の 1 節点を円筒側端の円筒面に変形させると図 5-2-1 に示す様に大きな皺が発生する。これから、円筒部分相当のカラー部分とこれから鋭角に曲がるシール部分とのつなぎ部分が課題であることが分かる。

ここでの皺の発生は背面角度が少なく、平面三角形の広い今回の型で初めて発生した。30 度シリーズでは設定している背面三角形の面積がここでのモデルより少ない。このため可展面との遊離の度合いが少なく、皺が発生しなかったものと推論できる。安定した解析法とするために、今回の厳しい型形状で皺を発生させない方法を検討し、設計標準とする。

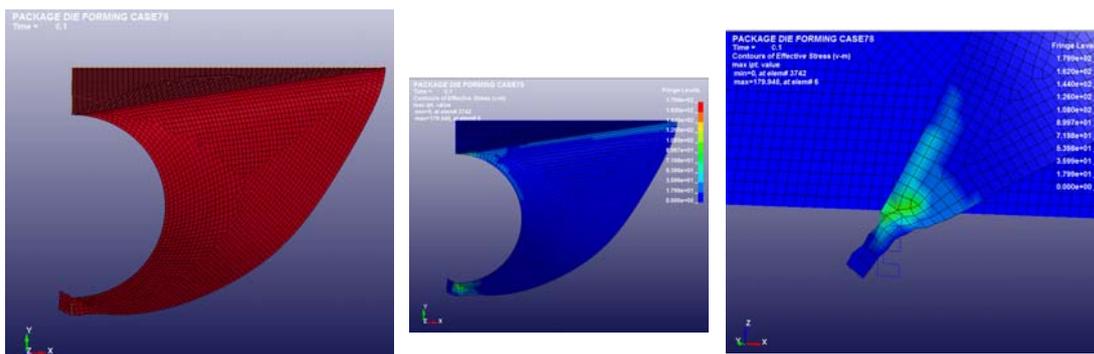


図 5-2-1 円筒部分+ シール部分 1 節点を变形させた時の解析

### (1) 解析上の工夫

まずは円筒部相当のカラー部分とシール部分が鋭く交わる部分の対策をおこなった。この両者の交差部の節点とその前後の節点 3 点の変位条件を緩和した。この結果を図 5-2-2 に示す。これは図 5-2-1 に相当する変形条件であるが、皺や凹みが全く発生していないことが明らかで

ある。応力のレベルは一桁以上低い。この部分の変位規制は形状が定まってから実施する方式とした。

次に課題になるのはシール部分である。シール部分は厳密に円筒に直角の平面に規制される。カラー部分から鋭く変形するために、強い力を加えて平面にしている。このために、フィルムに影響が発生する。背面角度の少ない厳しい型ではこれが理由で皺や凹みの変形が生じる。

ここではシール部分の節点を一個飛ばしに変形させる方式を考案した。形状が安定してから飛ばした接点を変形させれば最終的な形状を得る事が出来る。図 5-2-3 にこの結果を示す。これは型の正面からの図であり、シール面の平面は確保しながら皺のない型形状が得られている事を示している。

以上の工夫を加えれば厳しい条件の包装型でも、安定した解析が可能な事を明らかにした。

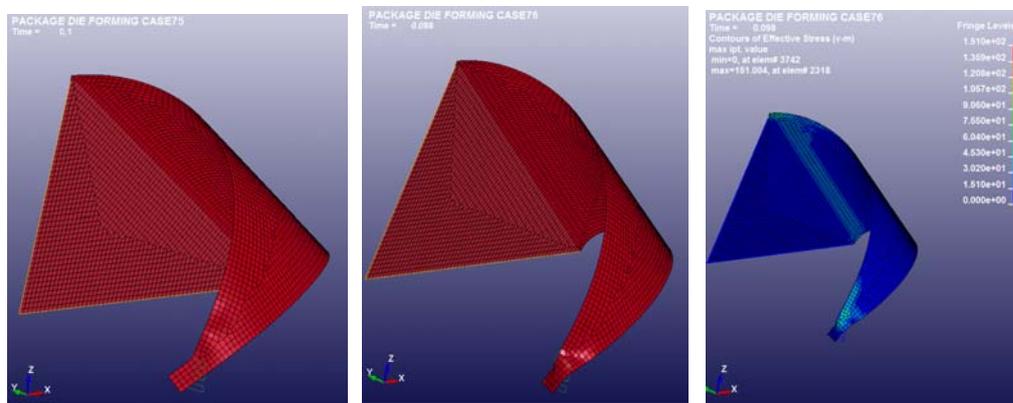


図 5-2-2 カラー部分とシール部分の交差点の変位条件の緩和による型形状の向上

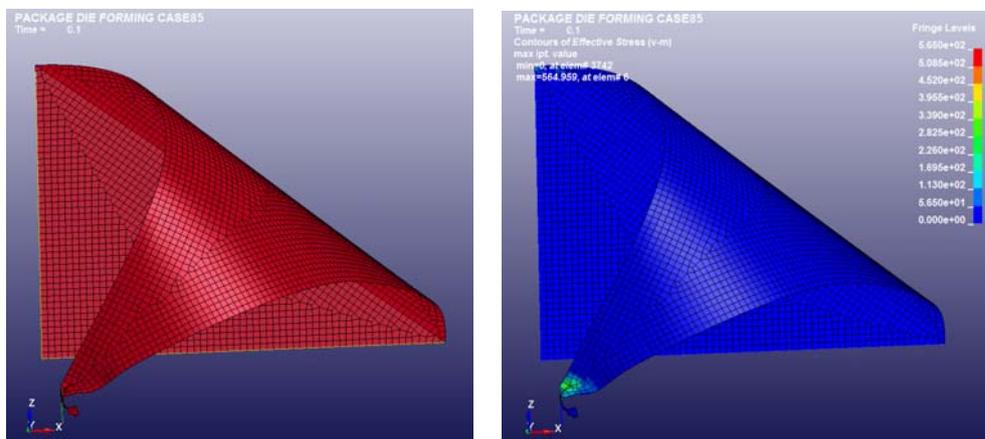


図 5-2-3 シール部分の平面化条件の緩和による型形状の向上

### 2-5-3 商品化(企画)

高性能の包装型を利用した新機構の包装機の開発を実施した。包装型全体の課題と新構造の包装をデザインレビューで検討した。この結果、技術面で課題となるのはフィルムの引っ張り機構であることが分かった。先ず解析によるシミュレーションを実施し、平成23年度では、新機構の包装機の商品化企画を実施した。

#### 1) 目標

- ① DR と試作評価
- ② 企画・設計

#### 2) 張力機構の影響のシミュレーション確認

包装型全体の課題をデザインレビューで検討し、フィルムの引っ張り機構のために包装型が大きくなっていることが判明した。各種の課題が存在するが、課題はフィルムの張力機構であった。ここでフィルムは型の下側で2本のベルトコンベアで引かれる。この面は型の下側にあり、図1-1-1に示す様に外型と内型によって規制されている。厚肉のシェル構造ではカスチュリアーノの定理によって、折曲げられる *bending curve* から離れた距離に存在するベルトコンベアは影響しない。ここではカスチュリアーノの定理が適応できない薄膜のフィルムを課題としているので、張力の影響を解析シミュレーションによって検討した。

図5-3-1左は現行の型全体のサイズをモデル化したものである。実際の型は長く、張力を与えるベルトコンベアは図に示す様な低い位置に存在する。ここではベルトコンベアを直線で近似してベルトコンベア部で局部的に張力を与える影響を明らかにする。図5-3-2はこの型の上をフィルムが滑る時に発生する応力を示す。ここでは側面図の応力が前後方向に差異が生じている。これは、前側にシールがあり、前後方向で張力が均一でない事を示しており、型の下部で均一の応力を示す線がV字になっている。これはベルトコンベアを模擬した直線部分を中心にして応力が発生していることを示している。ただし型の上部では均一に近づいている。上部ではほぼ同一の応力状況に変わることを示している。

カラー部分の応力の発生には影響を与えていないと判断できる。以上から現行のベルトコンベアによって張力を加える方法は線上の面積のない状況でも問題ないと推論できる。また位置はカラー上面に近くても問題無いと判断できる。

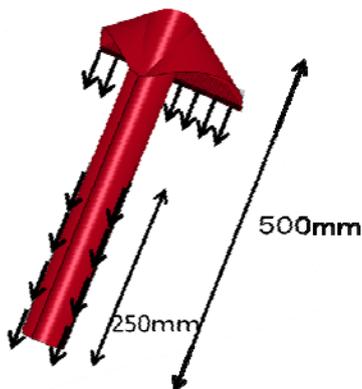


図 5-3-1 張力の影響の検討のための全型のモデル化

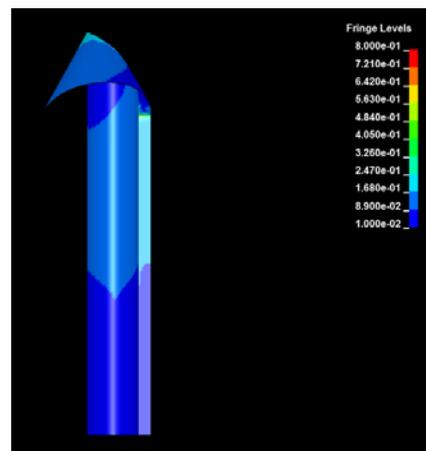


図 5-3-2 型上をフィルムが変形し滑る時の応力

### 3) 新包装機械の構想

DR を実施し、以下の項目毎に検討して以下纏めた。これを基に構想をまとめた。

- ① 包装機械のスペックは KBF-6150X を基本ベースと決定した。
- ② 最大折径、最大袋長さを決定した。
- ③ 製品投入口から成型型下端までの寸法は変更しないことを決定した。
- ④ 縦シールは成型型背貼り合わせ目のタイプを決定した。
- ⑤ フィルム送り機構は広く検討する事を決定した。
- ⑥ 円筒下部のヒゲはそのまま採用する事を決定した。
- ⑦ 横シール下の搬出部の高さを決定した。
- ⑧ 本体高さの低い包装機械を考慮して目標を決定した。
- ⑨ 製品の破損防止・舞い上がりや横シールでの底抜け防止などの目標を決定した。
- ⑩ 交換の容易さ・保管場所のサイズの目標値を決定した。

#### 2-5-4 設計まとめ

高性能の包装型を設計する指針をまとめ、新機構の包装機解析シミュレーションで確認し、企画検討を実施した。平成 23 年度ではデザインレビューを増やし、具体的に構想案を作成して企画し、新構造の包装型の設計を進捗させることが出来た。

##### 1) 目的

- ① 試作
- ② # 2 デザインレビューと試作品評価
- ③ 生産検討

##### 2) 企画

デザインレビューを実施し、2-5-3 節に示す構想を検討した。これにより具体的に新機構の包装機械の企画を進めた。

## 第3章 全体総括

### 3-1 複数年の研究開発成果

本支援事業は研究を5項目に分け、各々高い目標を掲げて実施し、高い成果を達成することができた。研究テーマに沿って、個別に記述する。

#### 【1】 包装シートに傷を発生させない理想的な型形状を作成する

##### 解析/設計の研究開発[設計]

ここでは包装機の型を解析だけで作成する、世界で初めての実用的技術を研究した。まず、従来の技術を最先端まで調査して本研究の狙いを確認し、本支援事業の技術が最も実用的で有用な研究であることを確認し、開始した。平成22年度までにFEMを用いた新解析方法を可能にした。また小型のパソコンで解析が可能ないように新しい解析方法を加えた。平成23年度は解析手順の各ステップの自動化と安定した解析法を研究し、解析システムの実用化と合理化を図った。

#### 【2】 高精度な型作製のデータ作成システムの研究開発[設計生産統合データ]

高精度の型の解析が可能となったが、この解析方法は複雑であり、汎用プログラムでは処理できない内容である。このため解析方法を先ず自動化した。本年度は更に自動化プログラムを動かす処理方法と関連プログラムを開発して実用化を図った。さらにここでは解析・設計・製造のデータの一元化検討を実施した。

#### 【3】 高精度で合理的な型作製の研究開発[生産]

本解析による有限要素法のデータはCADデータに変換が可能である。本支援事業では3次元プロッタ/NC/RP(ラピッドプロトタイプング)を検討し、幅広く試作して、解析データから設計/試作/製造に結び付ける検討を実施した。3次元プロッタは限界があり、NC/RPが有望であることを明らかにした。

#### 【4】 型上でシートを変形させ滑らせる時に発生する

##### シート応力の解析方法の研究開発[型性能の評価]

シート(フィルム)が型の上をすべる型の境界条件は特殊であり、本支援事業では新たなbending curve(折曲げ線)の境界条件を平成21年度に提案した。平成22年度はこの精度を保証する解析方法を検討し、実用的な分割の範囲で解析できることを明らかにした。平成23年度は、この具体的な解析方法を明らかにして解析を容易にした。目標としていた型の精度は『現状より誤差が1/2となる精度向上』であったが、本解析法の型はこれを大幅に上回る精度を実現することが出来た。

#### 【5】 新包装機の研究開発[新開発]

本支援事業の解析で高精度の型を安定的に設計できることを明らかにすることができた。平成23年度は背面処理の方法や、シール構造を検討し、安定的に解析できる高精度の包装型の設計方法を確立した。この高精度の型を活用した新構造の包装型の企画を検討した。

### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

一連の研究の結果、残された課題と事業化の展開には以下が重要と考えられる。

#### 1. 解析でアシストする物作り技術の推進による技術力の向上

手作業では実際の金属や樹脂を自由に折曲げることにはできないが本解析上は自由であり、解析でアシストする新たな物作りが実現できる。解析では複雑な形状も作成可能であり、bending curve(折曲げ線)や作成条件を詳細に検討することが出来る。これによって解析-机上検討-必要に応じ短時間の試作-検証という新たな方式が可能になった。

この解析でアシストする物作り技術を数多く実践し、技術力を高め、ノウハウ/知恵を深めることが有効と考えられる。これによって固有技術が向上し、高い技術競争力が得られると期待できる。

## 2. CAD, CAM, CAE で直結した効率のよい型製造技術の構築による産業競争力の向上

従来の手作りの方式に比べて、解析から CAD, CAM に適したデータを使用しているため、構想-設計-生産までを一連の仕事として扱うことができる。

本支援事業の方式を発展させると、現行の開発/設計/試作/製造の方法と大幅に異なるものとなる。これは大きな発展のチャンスであるが、仕事の全域で大きく変化が発生する為、これが実施上の障壁と考えられる。この大きな変化の中で課題を発生させない為の新たな研究が必要と考えられる。

## 3. 高性能の型を活用した新しい包装機の開発

高精度の型を用いた新しい包装機の開発が容易になると考えられる。

解析でアシストする物作りは日本人技術者気質に適していると考えられ、日本が最高の技術力を獲得することが期待できる。またこの技術で包装業界全体が活性化することが予測できる。

自由に型を作成できる利点を生かし、世界中に型を供給する新しいビジネスが期待できる。日本で新しい包装型と包装機の新規を開発し、世界の市場に日本の技術力を問うことを期待したい。

### 参考文献

- (1) C. E. Monsees and F. H. Cooper. Tube former and method of making same. In *United States Patent Office*, number 2940408 (1960)
- (2) E. Mot. The “shoulderproblem” of forming, filling and closing machines for pouches. *Appl. Sci. Res.*, 27:1–13,1973
- (3) Y.-J. Zhou and Z.-W. Wang. Study on rhomb shoulders in packaging machines. *Packaging Tech. Sci.*, 17:287–294,2004.
- (4) Y.-J. Zhou and X.-M. Qian. Non-centrosymmetric sectionforming shoulders in packaging machines. *Packaging Tech Sci.*, 19:97–104, 2006.
- (5) J. Boersma and J. Molenaar. Geometry of the shoulder of a packaging machine. *SIAM Rev.*, 37(3):406–422, 1995.
- (6) C. J. McPherson, G. Mullineux, C. Berry, B. J. Hicks, and A. J. Medland. Design of forming shoulders with complex Cross-sections. *Packaging Tech. Sci.*, 18:199–206, 2005.
- (7) B. J. Hicks, A. J. Medland, and G. Mullineux. A constraint based approach to the modelling and analysis of packaging machines. *Packaging Tech. Sci.*, 14(5):209–226, 2001.
- (8) C. J. McPherson, G. Mullineux, C. Berry, B. J. Hicks, and A. J. Medland. The performance envelope of forming shoulders and implications for design and manufacture. In *Proc. Institution Mech. Engineers*, volume 218 of *Part B: J. Eng. Manufacture*, pages 925–934, 2004.
- (9) B. Hicks, G. Mullineux, J. Matthews, and T. Medland. Towards an integrated CAD/CAM process for the production of forming shoulders with exact geometry. In *Proc. Institution Mech. Engineers*, volume 221 of *Part B: J. Eng. Manufacture*, pages 1521–1531, 2007.
- (10) 森村浩明, 濃沼義典, Ahmed DESOKI, 萩原一郎: 包装機械における成形型の設計の検証, 日本機械学会論文集(C編) 2010年 5月
- (11) A.Desoki, H.Morimura, I.Hagiwara: General Design of the Forming Collar of the Vertical Form, Fill and Seal Packaging Machine Using the Finite Element Method, *Packaging Technology and Science, Packag. Technol. Sci.* 2010 DOI:10.1002/pts.919
- (12) 森村浩明, 寺島佳希, 萩原一郎: 包装機によってフィルムを成形する時に発生する応力解析, 日本機械学会論文集(C編) 2012年 5月