

商品開発における 衝撃シミュレーション技術の活用

Practical Use of Shock Simulation Technology for Product Development

要 旨

富士ゼロックスでは商品開発の出来るだけ早い段階からシミュレーション技術を活用して、物流試験に必要な製品強度や包装品質を十分作り込み、試作機で物流品質を作り込む物流試験から、物流品質を保証する物流試験への変革を目標に活動を進めた。

落下衝撃シミュレーション技術を確立するために、まず発泡ポリスチレンなどの動的な材料特性を計測した。次にテストピースを用いて落下実験を行い、衝撃加速度の測定を行った。その後、この落下実験と同内容のシミュレーションを行い、その結果が実験値と一致するように品質工学を用いた解析パラメータの合わせ込みを行い、解析精度の向上を図った。

本稿では、衝撃シミュレーションの技術開発手法について述べると共に、製品強度及び発泡ポリスチレンを用いた包装設計に、衝撃シミュレーション技術を適用した事例について述べた。

Abstract

Fuji Xerox built the product strength and the package quality for physical distribution tests into products by utilizing simulation technology at the earliest possible development period. This has promoted the innovative change of physical distribution tests, from a test for quality building in prototype to one for quality assurance.

To establish the drop shock simulation technology, firstly dynamic material character such as expanded polystyrene was measured. Next shock acceleration was measured by a drop test with the test piece. After that, a simulation test same contents as the drop test was performed and its simulation parameter was adjusted by quality engineering so that the simulation value is coincident with the experimental value. As a result, the improvement of the simulation accuracy was accomplished.

This report describes the development method for our drop shock simulation technology and the example that applied the simulation technology to packaging engineering using product strength and expanded polystyrene.

執筆者

榎本 殖安 (Shigeyasu Enomoto)
須藤 敏之 (Toshiyuki Suto)
津田 高治 (Koji Tsuda)
吉田 孝明 (Takaaki Yoshida)

モノ作り技術本部 試作部 (Product System Engineering)

1. 緒言

工場から出荷される商品は、輸送過程において様々な振動・衝撃にさらされるが、お客様に商品が不具合無く届けられるように、あらかじめ試作機を用いて振動・衝撃試験などの物流試験が行われている。

試作機が完成してから実機試験を中心とした物流品質の作り込みが行われ、ほぼ完成機に近い試作機で不具合が発見されると、構造上の制約から大幅な変更を伴う対策が打てないことや、その対策に十分な時間が確保できないという問題がしばしば生じていた。又、試験と試作を繰り返すことによる試作期間と試作費用の増加など目に見える損失だけではなく、輸送方法など物流環境の変化に対して、ロバスト性の低い商品が作られてしまうという問題が潜在していた。

そこで、図1に示す様に、富士ゼロックスでは商品開発の出来るだけ早い段階から、衝撃シミュレーション技術を活用し、物流試験に必要な製品強度や包装品質を十分作り込むことによって、試作機で物流品質を作り込む物流試験から、物流品質を保証する物流試験への変革を目標に活動を進めた。

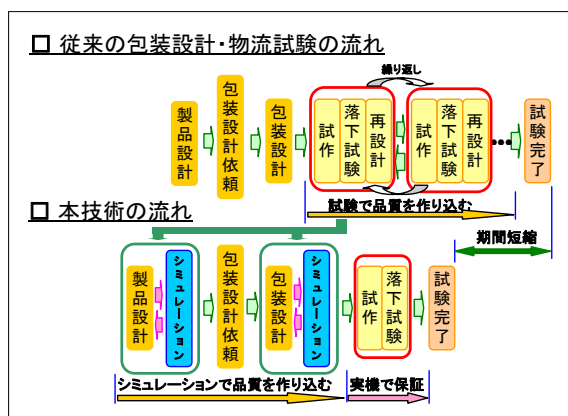


図1. 従来技術と本技術の比較
Comparison of the conventional technology and this technology

2. 材料物性値の計測技術

衝撃シミュレーションは、落下衝撃などの高速領域で生じる塑性変形量や応力計算を行うために、動的な材料物性値の取得が必要となる。静的な物性値は、材料便覧やカタログから比較的容易に入手できるが、動的な物性値はその目

的に応じて自前で計測する必要がある。基本的な材料物性値として、単軸引張り試験による応力-ひずみ線図を取得するが、多くの材料はひずみ速度による変形応力が変化（ひずみ速度依存性）する性質を有していることから、高速引張り試験機などの設備を用いて取得することになる。

商品の材料構成は金属、樹脂、ガラスなどが使用され、一方、包装材料では発泡材料、段ボール、木材など様々な材料が使用されているが、ここでは包装材料として多く使用されている発泡ポリスチレンと、当社商品の筐体部品に多く用いられている冷間圧延鋼材の応力-ひずみ線図の計測技術について述べる。

2.1 発泡ポリスチレン

ブタンなどの炭化水素系ガスを発泡剤として閉じ込めた直径1mm程度のポリスチレンビーズを原材料として用い、これをスチームで加熱し金型内で所定の倍率に発泡させて製造される発泡ポリスチレン（EPS）は、緩衝性能が高く成形性も良好で安価であることから緩衝材料として広く一般に使用されている。

当社では、発泡倍率20~80倍の発泡ポリスチレンを使用しているため、これらについて圧縮側および引張り側の材料特性を測定した。その際、圧縮特性については、ひずみ速度による特性の変化を考慮し、落下衝撃時に近い条件である動特性の測定を行った。ここで計測した発泡ポリスチレンの動的な公称応力-公称ひずみ線図を図2に示した。この応力-ひずみ線図は、写真1に示した緩衝特性試験機を用い、発泡ポリスチレン試験片に加速度センサーを取付けた錘を落下させ、そのときに発生した加速度と試験片のひずみ量を計測して取得した。図2から判るように、圧縮側の特性は非線形で90%程度の大きなひずみまで許容され、大きく圧縮されても圧縮直交方向の面積は増大しない、すなわちポアソン比がほぼゼロであるという特性も持つ。

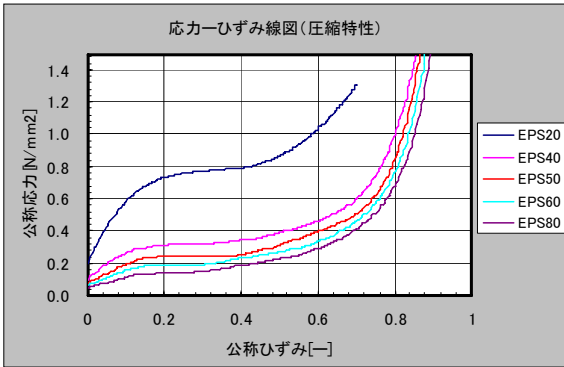


図 2. EPS の応力-ひずみ線図
Stress strain curves for expanded polystyrene



写真 1. 緩衝特性試験機¹⁾
Buffer characteristic test machine

2.2 冷間圧延鋼材

主な商品の筐体には冷間圧延鋼材 (SPCC) が用いられ、様々な機械加工により製作されている。この材料は他の金属に比較してひずみ速度依存性が大きい材料とされている。そこで、応力-ひずみ線図の計測においては、低速度領域でのひずみ速度はそれぞれ 10^{-3} 、 10^{-1}sec^{-1} の一般的な静的引張り試験機で、高速度領域のひずみ速度 10^3sec^{-1} ではワンバー方式の高速引張り試験機を用いて計測を行った。計測したデータは、Swift 型の加工硬化則と Cowper-Symonds 型のひずみ速度モデルを仮定した(1)式の構成則を用いて近似した。(図 3)

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = F(\epsilon + \epsilon_0)^n \{1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/p}\} \quad (1)$$

ただし
 σ : 相当塑性応力

ϵ : 初期相当塑性ひずみ、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度
 ϵ_0 : 相当塑性ひずみ
 F : 塑性係数
 n : 加工硬化係数
 D, ρ : 材料固有定数

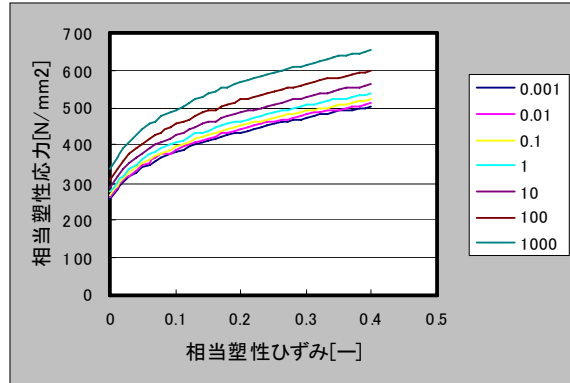


図 3. SPCC の応力-ひずみ線図
Equivalent plastic stress strain curves for cold-rolled steel sheet

3. コリレーションの実施

前章で説明したように、衝撃シミュレーションに必要な応力-ひずみ線図は単軸引張り試験等で取得が可能であるが、良好な解析精度を得るためには動特性として計測の難しい物性の特定や境界条件の設定作業が必要となる。そこで、簡単なテストピースを用いて落下実験を行い、テストピースが落下した時に発生する、加速度値、緩衝材の収缩量や割れがシミュレーション評価と一致するように、計測の難しい物性の特定や境界条件を求めた。ここでは、発泡ポリスチレンを用いた衝撃シミュレーションのコリレーション事例を示した。

3.1 テストピースによる落下現象の把握

当社の製品落下試験では、平面落下および角、稜方向の落下を行うため、それを考慮し、平面落下用テストピースと稜落下用テストピースのそれぞれを製作した。写真 2 には平面落下用テストピースの写真を示した。落下実験は等価落下試験機を使用し、加速度センサーを用いて落下時にアルミブロックに発生する衝撃加速度を、非接触変位計を用いて発泡ポリスチレンの変形によって生じるアルミブロックの上下方向の変位をそれぞれ計測した。計測した加速度データを図 4 に示した。

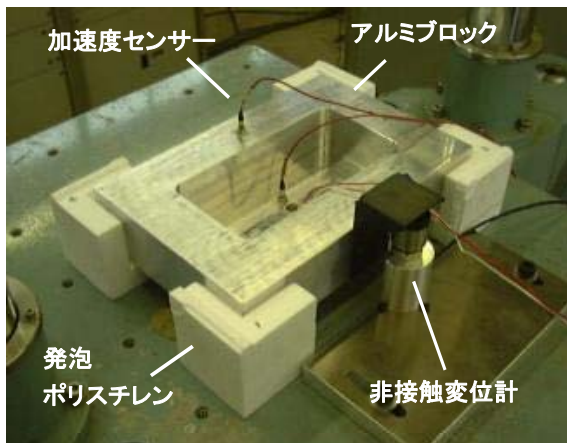


写真 2. テストピースによる落下実験
Drop examination by the test piece

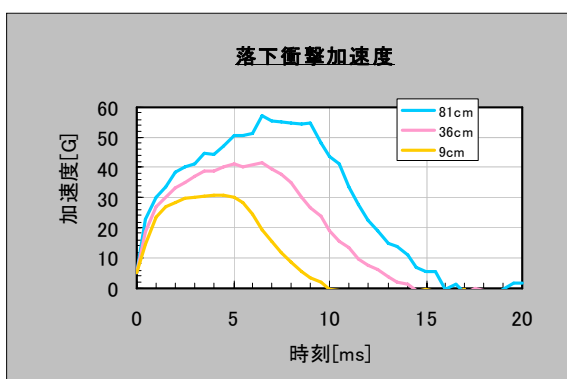


図 4. 落下高さと加速度値の関係
Relation between drop height and an acceleration value

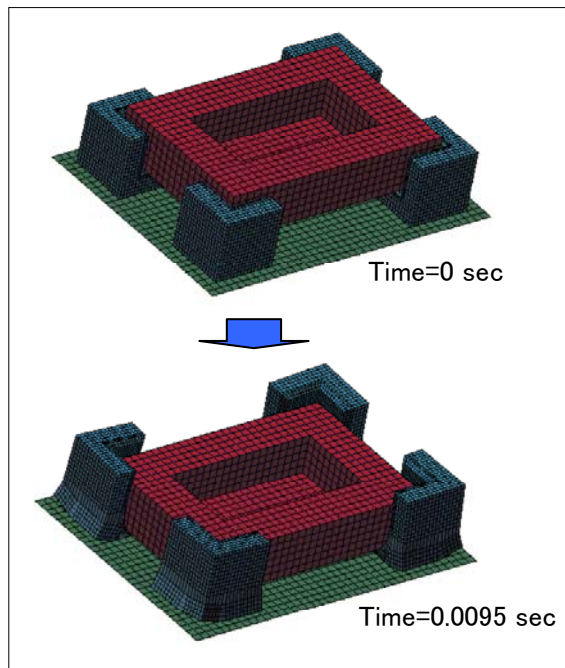


図 5. 落下試験のシミュレーションモデル
Simulation model of a drop test

シミュレーションパラメータを選定して行った確認実験結果を図 7 に示した。加速度ピーク値に実験と解析値で約 10% の差はあるが、加速度値及び加速度プロファイルがほぼ一致するシミュレーションパラメータを設定することが出来た。

3.2 シミュレーションモデルの作成

次に、図 5 に示すメッシュモデルを作成し、汎用シミュレーションソフトウェアを用いて落下実験の衝撃シミュレーションを行った。シミュレーションに必要なパラメータは、前章で計測した圧縮特性、引張り特性以外に引張りヤング率、引張り破断応力、摩擦係数、除荷係数、接触係数などを用いるが、初期値として一般的な値を用いてシミュレーションを行った。その結果、衝撃加速度は実験値と解析値で大きく乖離が生じてしまうことが確認できたので、品質工学を用いてシミュレーションパラメータの合わせ込みを行うことにした。

3.3 シミュレーションパラメータの合わせ込み

落下試験で計測した加速度プロファイルとシミュレーション結果を合わせ込むために、標準 SN 比を用いた L18 直交実験 (図 6) を実施した。直交実験より得られた SN 比、感度からシ

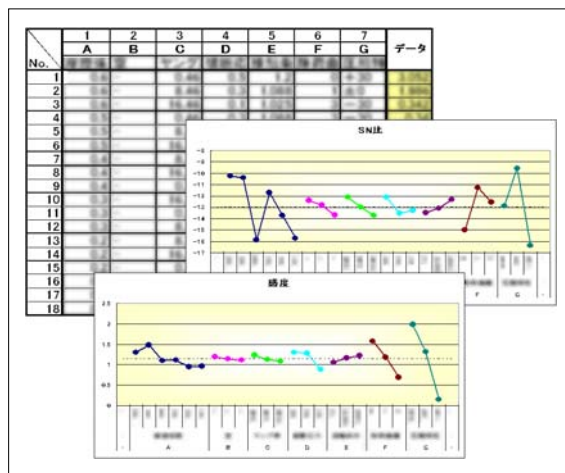


図 6. シミュレーションパラメータの要因効果図
Factorial effects of simulation parameter

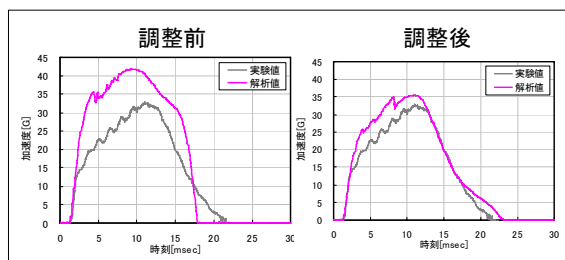


図 7. 調整前後の加速度プロファイル
Acceleration profile before and behind adjustment

又、加速度値と同様に、緩衝材の収縮量も一致することを確認した。

4. 衝撃シミュレーション技術の適用事例

本事例は、'07年11月に市場導入された商品「DocuCentre-III C3300/C2200」の開発から物流試験評価までの期間で行った衝撃シミュレーションの一部を示した。活動期間中のシミュレーション件数は45件で、その内訳は製品強度シミュレーション30件、包装シミュレーション15件となっている。これは、包装設計の容易さは、衝撃に対する製品強度レベルによって大きく左右されるため、開発段階から参画して包装設計に必要な製品強度を製品設計者と共に作り上げている。表1に、本商品に適用した物流試験条件の一部を示した。

この物流試験基準は、富士ゼロックス技術標準として登録されており、国内外で生産されている全ての商品に対して適用し、この物流試験基準に合格することが市場導入の必須条件となっている。

以下表1に、衝撃シミュレーションの事例を示す。

表1. 落下試験条件(質量>60kg)
Drop test conditions (Mass>60kg)

	衝撃方向	試験方法	値
1	底面	自由落下	150mm
2	底面角、稜	回転落下	150mm
3	側面	水平衝撃	4.8km/h

4.1 筐体の強度シミュレーション

本事例は、水平方向の製品強度解析を示す。製品構成上、現像ユニット等を横から挿入する構造となるため、剛性を担う筐体には大きな開口部が設けられ、水平方向の衝撃に対して脆弱性を有している。商品の低コスト化を実現するためには、極力厚みの薄い材料構成で商品化を実現する必要がある。一方、工場から出荷される商品には輸送工程で様々な衝撃を受けることから、包装による衝撃からの保護を行うが、製品強度が脆弱であればあるほど緩衝性能の高い包装設計を行う必要があり、包装費用の増加や輸送効率低下に伴う輸送費用が増加することになる。

ここでは、本商品の質量、大きさを考慮して商品の目標強度を32Gと設定して衝撃シミュレーションによる評価と改善を繰り返し行った。図8に水平衝撃の応力コンター図と筐体寸法の変位を示す。その結果、筐体に使用している冷間圧延鋼材の厚みを増やすことなく、部品に設けたリブの高さの改善や、部品取り付け時に用いるネジ本数の最適化などによって、目標とする製品強度を達成することが出来た。

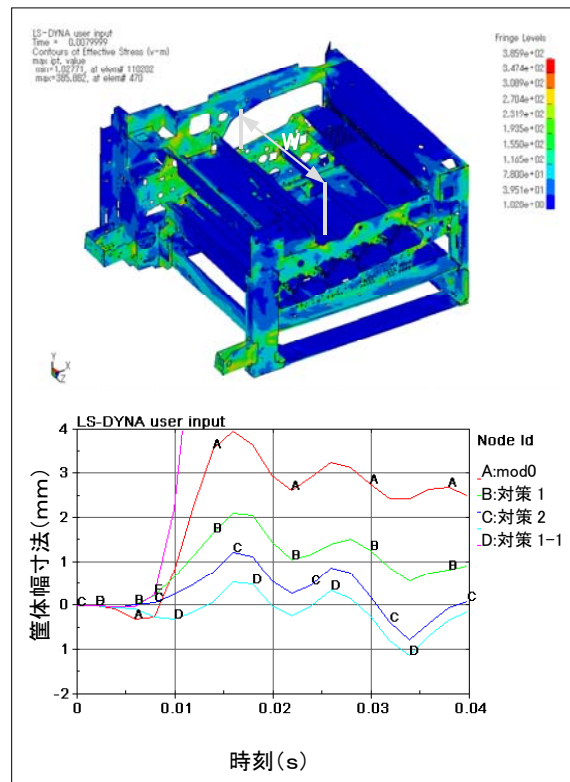


図8. 水平衝撃解析の応力コンター図と筐体幅(W)の変位
Stress contour figure of a horizontal impact analysis and displacement of frame width (W)

4.2 LPHの強度シミュレーション

本商品は、感光体ドラムに画像を書き込む装置としてLEDプリントヘッド方式が採用されている。この方式は、LEDプリントヘッドを介して感光体ドラムにイメージを書き込む機能を有しており、LEDプリントヘッドと感光体ドラムの相対位置関係が画質に大きな影響を与えるため、衝撃による相対位置関係にズレが生じないことが重要となる。そこで、感光体ドラムとLEDプリントヘッドとの相対位置関係に寄与している部品が衝撃による塑性変形することなく、十分な剛性が確保されているかを検証した事例

である。

まず、モデル化に際しては、対象となるLEDプリントヘッド部のみを作成し、そのフレーム取り付け箇所に衝撃を加えることで現象を表現した。剛性の検証は、それぞれの構成部品に生ずる応力分布（図9）を調べ、その値が部品材料の降伏応力を超えていないかを確認することで行った。この事例では、発生応力が降伏応力を下回り、また部品の変形量も微小だったため、LEDプリントヘッドの各部品が十分な強度を有していることが確認できた。

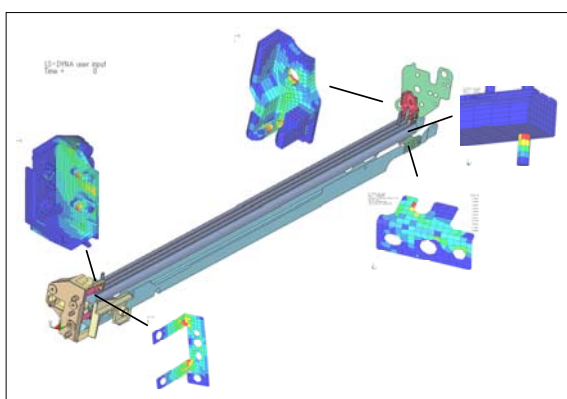


図9. LPH 構成部品の応力コンター図
Stress contour figure of LPH component parts

4.3 包装設計の緩衝シミュレーション

本事例では、木製パレット及び発泡ポリスチレンで構成された段ボール包装の底面落下解析を示す。包装のシミュレーション評価は、落下時に発生する加速度値が製品強度目標値の32Gを満たしているか、モデル化された部品に塑性変形が生じていないかを中心に評価を行っている。更に、1) 緩衝材の収縮量、2) 落下時の製品の傾き、3) 緩衝材の割れ深さを併せて評価している。1)、2) は商品を支える緩衝パッドの面積が適正になっているかを判断しており、落下時に4箇所がほぼ同量だけ収縮するように設計する必要がある。又、発泡ポリスチレンの公称応力-公称ひずみ線図（図1）で示すように、緩衝材に収縮量が70%を超えると急激に加速値が増加してしまうため、収縮量の確認も重要となる。通常、包装設計では緩衝材の適正収縮量を50%と設計しており、落下高さに対するロバスト性を考慮した評価を行っている。以上、全ての評価項目が目標値を満たすように、シミュレーションを複数回繰り返し行い、包装

設計品質の作り込みを行った。

図10に底面落下シミュレーションのひずみコンター図を示したが、筐体のA部に塑性変形が生じることが確認された。その原因は、図11より、塑性変形を起こした筐体の受け部（B部）が壁と独立しているため、圧縮方向の剛性が低くなり、結果としてC部の剛性が高くなり、C部と接触する筐体を押し上げてしまうことで、塑性変形を生じさせていると判断し、図12示す対策を実施した。圧縮剛性が弱いと判断したB部は、壁部と連続構造として剛性を高くし、更に、C部では筐体の脆弱部を受ける構造となるため、幅35mmを削除して緩衝パッドからの反力を軽減する構造とした。図13に改善効果を示したが、筐体の高剛性部分であるD部を受けて衝撃を緩衝させることによって、筐体に塑性変形を起こすことの無い緩衝パッド形状を作りこむことができた。

包装落下試験では底面落下以外に、様々な姿勢での落下が想定された試験が行われるが、シミュレーションを用いることによって多くの工数をかけることなく角落下や回転落下などの落下条件での検証が可能で、緩衝パッドの厚み、受け面積の検討や緩衝パッドからの反力による製品の塑性変形などが時々刻々と変化する様子が可視化されることにより、実機試験では観測困難な現象の把握が容易となり、問題点が判明した場合には迅速に効果的な対策を実施することができる。

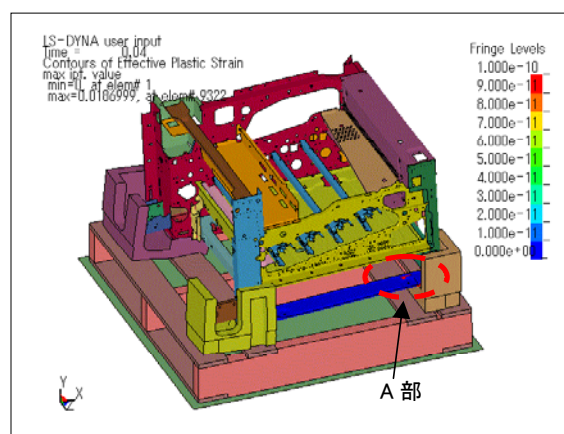


図10. 底面落下解析のひずみコンター図
Strain contour figure of bottom drop analysis

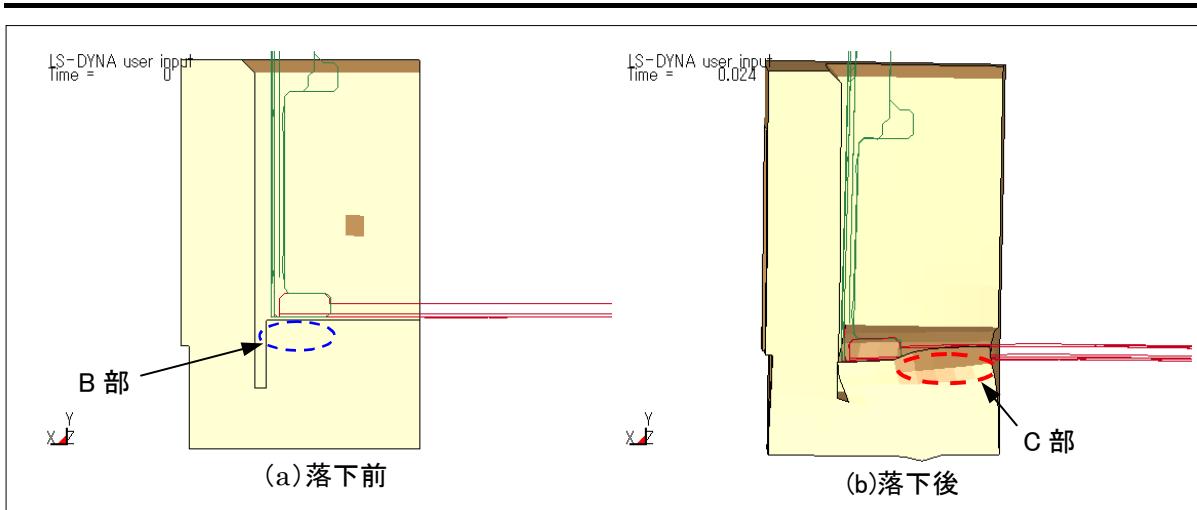


図 11. A 部の緩衝パッドの変形
Transformation of the buffering pad of the A section

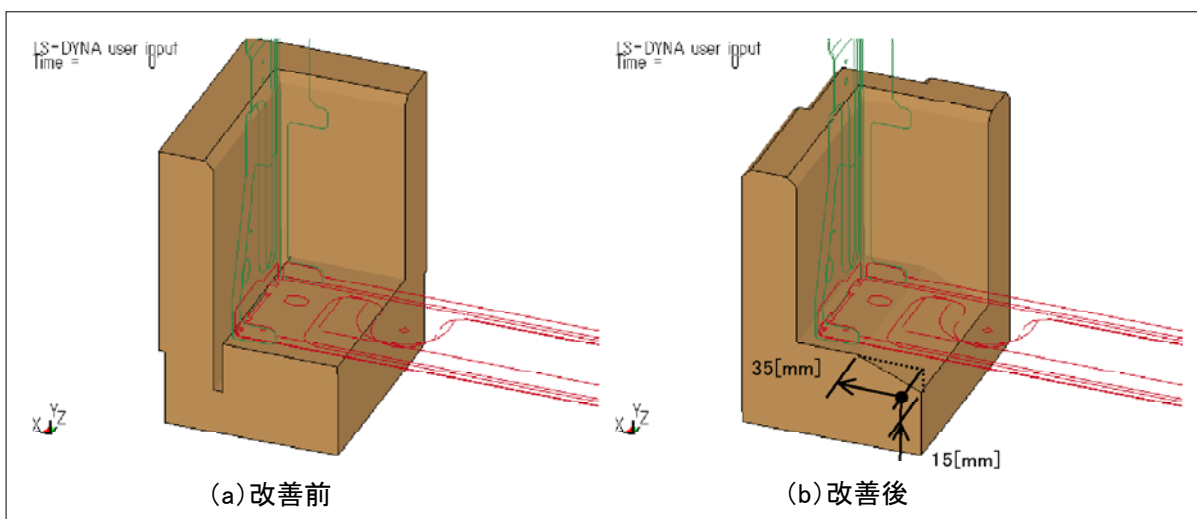


図 12. 緩衝パッドの形状改善
Form improvement of a buffering pad

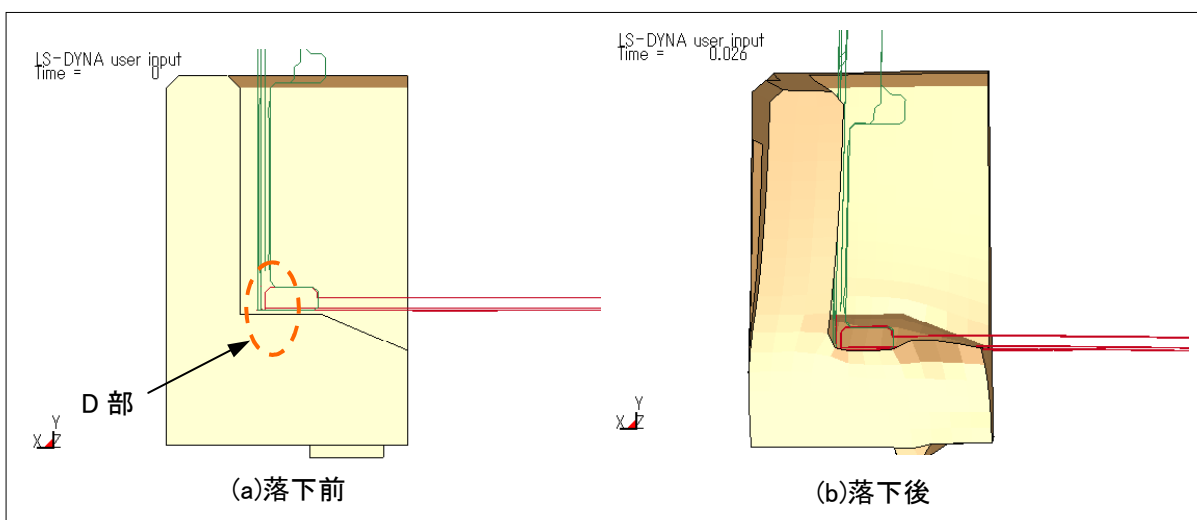


図 13. 改善後の緩衝状態
Buffer state after an improvement

5. 物流試験結果

試作機を用いての物流試験結果を写真3に示した。水平衝撃試験において、筐体の一部に変形が生じる不具合が発生したが、これ以外で変形などの問題は無く、シミュレーション評価の有効性が確認された。

この変形を生じさせた部品は、開発段階において、筐体剛性への寄与度が低い部品と判断してモデル化が省略されており、シミュレーション評価が行われていなかったことが原因となっている。

このような問題を防止するためには、シミュレーションのモデル化率を増やす必要があるが、それに伴ってシミュレーションに要する時間が長くなり、解析結果の確認を遅らせてしまう事になるので、シミュレーションを行う際に、どこまでモデル化を行うかサーバの計算能力と併せて検討が必要となる。

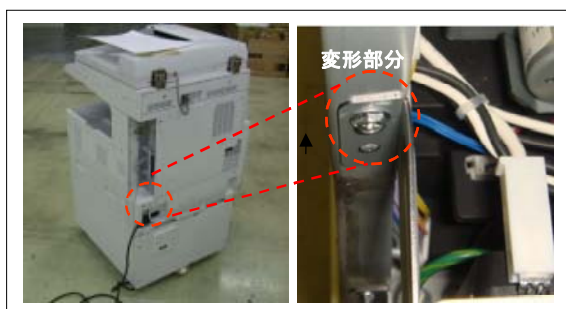


写真3. 物流試験結果
Physical distribution test result

6. 結び

本報では、製品強度及び緩衝材を用いた商品包装設計の衝撃シミュレーション事例について述べた。現在ではこの衝撃シミュレーション技術を、全ての商品の筐体構造設計や包装設計に適用し、衝撃に対する筐体構造や包装構造の適正化が可能となってきている。

今後、環境負荷低減の要求から、商品の軽量化設計や包材使用量の抑制が求められることから、より精度の高いシミュレーション技術が求められている。その分野の1つとして、様々な落下姿勢に対する衝撃シミュレーション技術の獲得が挙げられる。例えば段ボール包装では、底面落下では段ボール自体の緩衝性能が極めて小さいた

め、シミュレーションに用いる物性値もさほど重要ではないが、角・稜落下では緩衝材の保護機能を有しているため、精度よく緩衝材の割れをシミュレーション評価するためには段ボールの適正な物性値を把握する必要がある、段ボール物性値の同定技術開発に取り組んでいる。

7. 参考文献

- 1) 豊田 寛 . 包装用緩衝材料の緩衝特性試験と計測 . CARTON・BOX . 1998/ 1 . p156-161
- 2) 榎本、津田 . 包装設計への落下衝撃シミュレーション技術の適用 . 包装技術 .Vol.41,No.9, p741-744
- 3) LS-DYNA は Livermore Software Technology Corporation の登録商標です。

筆者紹介

須藤 敏之
専門分野：シミュレーションメカ

津田 高治
専門分野：シミュレーションメカ

吉田 孝明
専門分野：包装設計

榎本 殖安
専門分野：シミュレーションメカ