指はさみ事故の予防に向けた科学的アプローチ

多 田 充 徳^{1†}

¹ 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター

要旨 ここ数年、子供の指はさみ事故に関する報道を耳にすることが多くなってきた。指はさみ事故の特徴として、原因となる製品が我々の身の回りに当たり前のよう存在すること、そしてそれにも関わらず安全性に関する指針や基準が必ずしも確立されていないことを挙げることができる。このような背景もあり、近年では指はさみ事故の検証や予防を目的としたダミー実験や数値シミュレーションが行われている。本稿では、国内外の消費者機関で行われたベビーカーやシュレッダーに関する調査研究の内容と、それらから得られた知見を概説する。また、我々が現在進めている指はさみ事故の検証・予防のための取り組みを解説すると共に、それを建具による指はさみ事故の分析へと応用した事例を紹介する。

キーワード：指はさみ、ダミー実験、数値シミュレーション、事故事例収集

1. はじめに

ここ数年、子供の指はさみ事故に関する報道を耳にすることが多くなってきた。今までは保護者が自身の過失・注意不足と思い込んでしまい顕在化することが少なかった事例が、消費者意識の高まりに伴い事故として認識されるようになってきたことがその一因であろう。例えば、シュレッダー¹⁾による幼児の指切断事故や折りたたみベビーカー²⁾・折りたたみイス^{3,4)}による乳幼児の指はさみ事故については記憶に新しいところである。また、重篤な事故には至らないにせよ、室内の建具に指をはさみ痛い思いをした経験がある人は乳幼児に限らず少なからずいるはずである。

指はさみ事故の特徴として、原因となる製品が我々の身の回りに当たり前のよう存在すること、そしてそれにも関わらず、安全性に関する指針や基準が必ずしも確立されていないことを挙げることができる。即ち、現状では日常生活空間のいたる所に指はさみ事故の危険が潜んでいるのである。どのような事例においても最悪の場合には切断という重篤な怪我になり得ることが指はさみ事故の恐ろしい点である。このため、早急な対策・対応が望まれる。しかし、製品の正しい使い方を指導・啓発するだけでは問題の根本的な解決にはならない。この種の事故の多くが偶発的に、そして、突発的に発生しているからである。

このような背景もあり、近年では国内外の消費者機関で指はさみ事故の検証や予防を目的としたダミー実験^{5,6,7)}や数値シミュレーション⁸⁾が行われている。これらは、指は

さみ事故の重大性とその予防の重要性が認識されつつあることを示すものである。筆者らも、事故の根本的な予防には科学的なアプローチが不可欠であるとの認識から、同様にその検証と予防を目的とした研究を進めている⁹⁾。即ち、事故の原因を科学的に分析し、怪我を予防もしくは緩和するために必要な基準を明確にすることで、エビデンスに基づいた製品の設計・製造を実現するための取り組みである。

本稿では、国民生活センターが行ったベビーカーに関する調査研究⁶⁾や米国消費者製品安全委員会が行ったシュレッダーに関する調査研究⁵⁾の内容と、それらから得られた知見を概説する。また、我々が現在進めている指はさみ事故の検証・予防のための取り組みを解説すると共に、それを建具による指はさみ事故の分析へと応用した事例を紹介する。

2. 関連する取り組み

2006年に公表されたシュレッダーによる指切断事故¹⁾と、2007年に公表された折りたたみベビーカーによる指はさみ事故²⁾は、身の回りにある意外な危険を浮き彫りにすると同時に、日本社会に大きな衝撃を与えた。図1に1997年4月から2007年8月までに発生した指はさみ事故の内訳を示す。ただし、この図1は参考文献³⁾が集計したデータをもとに作成したものである。これらはあくまでPIO-NETに登録されている事例であり、潜在的な事故件数はさらに多いと推測される。

この図1から明らかな様に、シュレッダーやベビーカーのみならず、身の回りにある様々な工業製品が指はさみ事故を引き起こす要因となる。また、ほとんどの製品において切断に至った事例があることから、指はさみ事故の潜在的な危険性を伺い知ることができる。このような背景もあ

2008年12月5日受付

[†]〒135-0064 東京都江東区青海 2-41-6

産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター

多田 充徳

Tel: 03-3599-8260 Fax: 03-5530-2066

E-mail: m.tada@aist.go.jp

り、近年では国内外で指はさみ事故の検証や予防を目的とした調査研究が行われている。本節では、その中から国民生活センターが行ったベビーカーに関する調査研究⁶⁾と米国消費者製品安全委員会が行ったシュレッダーに関する調査研究⁶⁾について概説する。

2.1 ベビーカー（国民生活センター）

折りたたみベビーカーによる指はさみ事故の発生を受け、国民生活センターでは指はさみの防止や怪我の軽減に効果的なベビーカーの構造に関する検討を行うと共に、調査の結果を消費者に対して開示した⁶⁾。この調査研究は、(1)ベビーカーの使用実態や指はさみ事故の実情を知るためのアンケート、(2)ダミーを用いたベビーカー構造の評価の2項目から構成されている。特に後者では、9種類のベビーカーを準備して、ダミーを用いたアクセシビリティの確認やはさみ力の推定を行った。なお、この研究で用いられたダミー

図1 1997年4月から2007年8月までに発生した指はさみ事故
(参考文献³⁾より一部改編した上で作成)

図2 事故予防のための科学的アプローチ

とは直径7mmの樹脂製丸棒であり、その変形の大小からはさみ力を推定できる。

アンケート調査の結果、殆どの人が高い頻度でベビーカーを使用しているにも関わらず、3割程度の人が指はさみ事故の危険性を認識していないことが分かった。また、1割程度の人が軽度の怪我を負った経験があることも見逃すことができない事実である。一方、怪我の軽減に効果的な構造としては以下の2点を指摘した。(i)はさみ部の曲率を大きくすることで局所的に力が集中しないようにすること、(ii)はさみ部同士が密着しないようにオフセットを設けること。これらは我々の直感に反することのない妥当な結果である。

また、これと時期を同じくして製品安全協会では、折りたたみ部の安全性に関する規定をSG基準1.2¹⁰⁾に盛り込むために、学識経験者や検査機関委員を中心とした検討を行っている⁷⁾。

2.2 シュレッダー（米国消費者製品安全委員会）

米国でも家庭用シュレッダーによる指切断事故が問題となった。これを受けて、米国消費者製品安全委員会(U.S.Consumer Product Safety Commission)が事故の分析を行い、2004年にその結果を報告書としてまとめた⁵⁾。この報告書は大きく分けて、(1)事故情報の収集と分析、(2)シュレッダーに関する安全規格の評価、(3)小売店で入手可能なシュレッダーの評価の3項目から構成されている。特に最後の項目では10種類のシュレッダーを準備して、機能と寸法の異なる14種類のダミーを用いた危険部位へのアクセシビリティの確認を行った。

この報告書には、いくつかの重要な提言が記載されている。具体的には、(i)15ヶ月から30ヶ月の子供に対する怪我のリスクが最も高いこと、そして、そのリスクがシュレッダー開口部のデザインに依存すること、(ii)現在の安全規格で規定されているアクセシビリティ確認用のダミーでは子供に対するリスクを検出できないこと、(iii)シュレッダー開口部のデザインがダミーを押し入れるために必要な力を決定することである。また、前記(3)の評価において、ポリウレタン製の変形可能なダミーを用いた場合が最もシュレッダーの機構にアクセスし易かったという事実は、ダミーの材質を決定する上で示唆に富む。

以上の報告を受けて、2006年には米国・カナダの共通規格(UL/CSA 60950-1)が改訂され、シュレッダーに係る追加要求事項が規定された^{11,12)}。また、日本でもシュレッダーの安全対策を見直す必要があるとの認識から、これに準じた規格の改訂を行うと共に、ガイドラインとしてもまとめられた¹³⁾。この規格の骨子となったのが新たなダミーの導入である。欧米人とは体型の異なる日本人を対象としたアクセシビリティの確認を行うため、人間生活工学研究センターがまとめた身体特性データ¹⁴⁾を基に、その寸法に関する妥当性の検証も行われた^{11,12)}。

3. 事故予防のための科学的アプローチ

事故の原因を科学的に分析し、怪我を予防もしくは緩和するために必要な基準を明確にすることで、エビデンスに基づいた製品の設計・製造を実現することが我々の目的である。本節では、建具による指はさみを例にその概要を説明する。

3.1 概要

2節で概説した様に、国内外のいくつかの消費者機関において指はさみ事故に関する調査研究が行われた^{5,6)}。その結果、指はさみ事故における危険要因が徐々に明らかになってきた。しかし、従来の調査研究ではそれらを排除もしくは改善することで安全性がどの程度向上するのかについてはほとんど触れられていない。

我々はこの問題に対して科学的にアプローチする。具体的には、製品のデザインと指に加わる負荷の関係、そして指に加わる負荷と指に発生する怪我の関係を明らかにする。また、安全性を簡便に評価するための手法も提案する。なお、建具におけるデザインとは、例えば、エッジの面取り、戸板と戸枠の隙間、戸板の質量、戸板の速度のように、設計者がコントロール可能なパラメータを指す。

図2に取り組みの概要を示す。我々は、ダミー実験、数値シミュレーション、そして、事故事例収集を相補的に実施する。ここで重要なことは、それぞれから得られた結果や事例をデザイン空間にマッピングすることで、相互に比較できるようにする点にある。

左上に位置するのがダミー実験である。この実験の主たる目的は、実際に発生する物理現象を正確に記録することである。ただし、実体を用いた実験であるため、試行数を増やすことが難しい。一方、右上に位置するのがダミーシミュレーションである。ダミー実験の結果と比較することで(図中矢印1)、シミュレーション条件の妥当性を検証できる。また、コンピュータ内で仮想的に行われる実験であるため、デザイン空間内で網羅的に実施できる。

右下に位置するのが、ダミーシミュレーションと同様にデザイン空間内で網羅的に実施する人体シミュレーションである。なお、このシミュレーションを行うにあたり、指の形状¹⁵⁾・材料特性¹⁶⁾・摩擦特性¹⁷⁾を個人ごとにモデル化する技術を独自に開発した。最後に、左下に位置するのが事故事例収集である。収集した事例を生体シミュレーションの結果と比較することで(図中矢印2)、応力や歪みのようなコンピュータで計算した物理量と、実際に生体に発生する怪我を関係付けることができる。また、多くの事故事例を収集することで、重篤な怪我が発生し得るデザインの危険領域を明らかにすることもできる。

以上のような方法で指はさみ事故にアプローチすることで、製品のデザインと負荷、そして、負荷と怪我を相互に関係付けるマップを作成できる。このマップは、製品の安全性を評価したり、より安全な製品を設計する際に役立つ。ある製品に対するダミー実験を行い、その結果に対応する怪我の具合をマップから読み取ることで前者を、現状よりも安全なデザインをマップから読み取ることで後者を実現できるからである。このように、マップを作成することで製品の安全性を簡便に評価できるようになる。

3.2 提案するダミー

前述の通り、ダミー実験の目的とは事故に伴う物理現象を記録すること、そしてそれをシミュレーション結果と比較することでその妥当性を検証することの2点である。例えば、力センサに軟組織の被覆を施したリアルなダミーを作成した場合、計測可能な部位が限られるだけでなく、怪我の主因である応力集中を計測できないという問題がある。また、構造が複雑になるためダミーシミュレーションのためのモデルの作成が難しいという問題も生じる。分布型圧力センサの使用も考えられるが、現状では応力集中を計測可能なほど高分解能な製品が存在しない。

我々の取り組みで使用するダミーには、どの部位でも応力集中と等価な情報を計測可能であること、そして、簡便な構造を有することの2点が要求される。そこで、金属の塑性変形を利用したダミーを提案する。これは手指大の鉛パイプであり、部位に関わらず指はさみに伴う物理現象を塑性変形として記録できるという特徴を持つ。また、単なる金属製のパイプであるため、その変形挙動をシミュレーションすることも極めて容易である。図3に我々の取り組みで使用するダミーの外観を示す。

4. 事例紹介: 建具の安全性解析

前節では、ダミー実験、数値シミュレーション、そして、事故事例収集を併用した指はさみ事故の分析手法と鉛の塑性変形を利用したダミーを紹介した。本節では、それらの応用事例として、建具による指はさみ事故の分析を紹介する。

図3 ダミー実験の結果: 初速度が異なる建具に対する変形の様子(図中の丸印が変形部)

表1 ダミーシミュレーションに用いた建具の条件

デザイン要素	条件
面取り (C 面)	0,1,2,3,4,5 (6 条件)
隙間 (mm)	3,5,7,9 (4 条件)
質量 (kg)	10,20,30,40,50,60 (6 条件)
速度 (rad/sec)	0.2,0.6,1.0 (3 条件)

4.1 ダミー実験

実験に使用したダミーを図3に示す。これは外径10mm、内径6mm、長さ50mmの鉛パイプである。このダミーを使用すれば、部位に関わらず指はさみに伴う物理現象を塑性変形として記録できる。実験には戸枠の面取りがC4、戸板と戸枠の隙間が4mm、戸板の質量が14kgである一般的な屋内用建具を使用した。また、ダミーがはさまれる瞬間の戸板の速度を Visualeyze (Phoenix Technologies Inc.) を用いて計測した。図3の左下から順番に0.22, 0.41, 0.58rad/secで閉じる建具にはさまれたダミーである。速度が速くなるほど変形も大きくなることが分かる。

4.2 ダミーシミュレーション

建具のデザインに対するダミーの変形を明らかにするために、表1に列挙する全432条件の建具に対してダミーシミュレーション(有限要素解析)を行った。なお、有限要素解析のソルバには ABAQUS (Dassault Systemes Corp.) を使用した。また、これに先立ちダミー実験と同じ条件の建具に対するシミュレーションを行い、計算した変形の再現精度を検証することで、シミュレーション環境の妥当性を確認した。

図4にダミーモデルが建具にはさまれ変形する様子、図5

図4 ダミーシミュレーションの結果：ダミーモデルが変形する様子

図5 ダミーシミュレーションの結果：変形したダミーの外形と断面

に変形したダミーの外形と断面を示す。また、図6にダミーの変形をデザイン空間にマッピングした例を示す。ただし、同図(a)が面取りがC3で隙間が3mmの建具において、質量と速度が変化する時の変形を、(b)が質量が50kgで速度が1.0rad/secの建具において、面取りと隙間が変化する時の変形を表す。なお、ダミーの変形とは図5に示すようにダミーに対して建具が食い込んだ深さである。つまり、この値が大きいほどダミーが大きく変形することを意味する。

図6(a)より、質量と速度が増加するに従いダミーの変形も大きくなることが分かる。これは、いずれの条件においても戸板の運動エネルギーが増加することを考えると容易に理解できる。一方、同図(b)より、面取りの大小がダミーの変形にあまり影響を与えない(ただし、隙間が狭い場合には面取りを大きくすることで変形が若干小さくなる)こと、そして、隙間が広くなるに従いダミーの変形が小さくなることが分かる。

前者は直感に反する結果であるが、これは戸枠側だけを面取りしたことに起因する。つまり、戸板と戸枠のどちらか一方を面取りするだけでは、安全性の向上には結びつかない可能性が高い。一方、後者は隙間を大きくすれば安全

(a) 面取り : C3, 隙間 : 3mm

(b) 質量 : 50kg, 速度 : 1.0rad/sec

図6 ダミーシミュレーションの結果：建具のデザインに対するダミー変形の分布

表2 生体シミュレーションに用いた建具の条件

デザイン要素	標準条件	面取り条件	隙間条件
面取り (C 面)	1	5	1
隙間 (mm)	3	3	9
質量 (kg)	10	10	10
速度 (rad/sec)	0.2	0.2	0.2

性が向上することを示唆する。しかし、広すぎる隙間では建具としての機能を損なうことは明らかであり、実際には安全性と機能性のバランスを考慮し、最適な隙間を決定する必要がある。また、これらの知見は国民生活センターがまとめた提言⁶⁾と矛盾しない。

以上のように、鉛パイプで構成された単純なダミーを用いるため、その変形挙動を十分な精度でシミュレーションできる。また、安全性との相関が高いと考えられる変形状態を記録できるため、その大小をデザイン空間にマッピングするだけで、建具のデザインに対する安全性の変化を可視化できる。なお、ダミーの変形と安全性（指内部の最大応力値）との相関については、生体シミュレーションについて説明する次節で検討する。

4.3 生体シミュレーション

建具のデザインに対する指の変形を明らかにするために、表2に示す3条件の建具に対して生体シミュレーションを

行った（図7）。標準条件に対して面取りを大きくしたものを面取り条件、隙間を広くしたものを隙間条件と呼ぶ。また、使用したソルバは、4.2のものと同一である。

図8に、それぞれの条件におけるシミュレーションの結果を示す。この図では皮膚組織内部の最大主歪みの分布をカラーマップを用いて可視化した。いずれの条件においても、爪下部で歪みが最大となることが分かった。これは、怪我が爪下部から発生することを示唆する。一方、図9にそれぞれの条件における最大主応力を示す。4.2で説明したダミーの変形と比較した結果、それらの大小に相関があることが分かった。つまり、ダミーの変形が大きくなるほど、皮膚組織内部の最大主応力が大きくなる。これは、図6に示した変形の分布を安全性の分布とみなしても差し支えないことを示唆する。

以上のように、生体シミュレーションを実施することで、指はさみに伴い皮膚組織内部に生じる物理現象を詳細に検討できるようになる。3.1ではデザイン空間内で網羅的な生体シミュレーションを行うと書いたが、ダミーシミュレーションに比べ計算コストが劇的に増大するため、現状では数解析を実施するにとどまっている。指はさみに伴い皮膚組織が大変形することがコスト増大の主要因であるが、今後はこのような大変形・接触解析を効率的に行うための手法を構築する必要もある。

4.4 事故事例収集

4.1から4.3にダミー実験と数値シミュレーションについて説明した。これらの結果だけでも建具のデザインに対する変形や応力の分布を可視化し、異なるデザイン間で安全性の相対的な比較を行うことができる。しかし、そのデザインで実際にどのような怪我を負う可能性があるのかを予想することはできない。シミュレーションの結果で得られる情報は、歪みや応力のような物理量だからである。これを補うために必要になるのが事故事例収集である。つまり、事故事例をデザイン空間にマッピングすることで、物理量と怪我の対応付けが出来るようになる。

現在、手の整形外科と協力体制を構築することで、事故

図7 生体シミュレーションの結果：指モデルが変形する様子

図8 生体シミュレーションの結果：建具のデザインに対する最大主歪みの分布

図9 生体シミュレーションの結果：建具のデザインに対する最大主応力の変化

事例の効率的な収集を試みている。既にいくつかの事例を収集済みであるが、本稿では紙幅の都合よりその詳細については割愛する。

5. おわりに

本稿では、国内外の消費者機関が実施したベビーカーやシュレッターに関する調査研究の内容を概説した。また、建具における指はさみを例にエビデンスに基づいた製品の設計・製造を実現するための取り組みについて解説した。これは、ダミー実験、数値シミュレーション、そして、事故事例収集を相補的に実施するものであり、ダミーには塑性変形する鉛パイプを使用する。

このような方法で指はさみ事故の予防に向けて科学的にアプローチすることで、製品のデザイン、負荷、そして、怪我を相互に関係付けるマップを作成できる。このマップは、製品の安全性を評価したり、より安全な製品を設計する際に役立つ。今後は生体シミュレーションと事故事例収集を中心に研究を進める。そして、事故を予防もしくは緩和するために必要な基準を明確にすることで、エビデンスに基づいた安全な製品設計を実現する。

参考文献

- 1) 経済産業省：家庭用の紙用シュレッターによる幼児の指切断事故の再発防止について、<http://www.meti.go.jp/press/20060823001/20060823001.html>, (2006).
- 2) 国民生活センター：乳幼児がベビーカーに手指を挟み、あわや切断!, http://www.kokusen.go.jp/soudan_now/data/babycar_jiko.html, (2007).
- 3) 東京都生活文化スポーツ局：折りたたみ椅子等の安全確保について、<http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2008/03/20i3r100.htm>, (2008).
- 4) 東京都生活文化スポーツ局：折りたたみ椅子等による事故防止啓発リーフレット及びポスターを作成しました。<http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2008/08/20i8s400.htm>, (2008).

- 5) U. S. Consumer Product Safety Commission: An evaluation of finger injuries associated with home document(paper) shredder machines. Cpsc-es-0501, (2004).
- 6) 国民生活センター：折りたたみ式ベビーカーの安全性－折りたたみ可動部分の安全の考え方を中心に－, http://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20080306_1.html, (2008).
- 7) 製品安全協会：乳母車の折り畳み時の幼児指挟み対応について（第二報）, <http://www.sg-mark.org/OSIRASE/babycar20080304.pdf>, (2008).
- 8) 吉田宏昭ほか：有限要素解析を用いた指切断事故の分析, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp.1P1-J24, (2008).
- 9) 多田充徳ほか：塑性変形を利用した手指ダミー－製品の安全性検証のために－第20回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.423-424, (2008).
- 10) 財団法人製品安全協会：乳母車の認定基準及び基準確認方法, (2004).
- 11) 電気用品調査委員会：文書細断機の可動部の保護等に関する技術基準検討報告書, (2006).
- 12) 電気安全環境研究所技術規格部：文書細断機（シュレッター）技術基準改正案について, JET Report, Vol. 33, pp.8-9, (2007).
- 13) 社団法人ビジネス機械・情報システム産業協会, 社団法人全日本文具協会：シュレッター可動部の安全に関するガイドライン第2版, (2007).
- 14) 社団法人人間生活工学研究センター：子どもの身体特性に基づく機械製品の安全対策設計指針に関する調査研究報告書, (2006).
- 15) M. Tada, et al: Generating subject-specific FE modelsof fingertip with the use of MR volume registration, In Proceedings of Eurohaptics 2006, pp. 99-104, (2006).
- 16) M. Tada, et al. Iterative FE analysis for non-invasive material modeling of a fingertip with layered structure, In Proceedings of Eurohaptics 2006, pp.187-194,(2006).
- 17) M. Tada, et al: How does a fingertip slip? –visualizing partial slippage for modeling of contacct mechanics–, In Proceedings of Eurohaptics 2006, pp.415-420, (2006).

多田 充徳（ただ みつなり）

2002年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学先攻修了。博士（工学）。同年より産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターCREST研究員。2004年より同研究所研究員（現職）。製品設計のための指機能のモデル

化と、そのコンピュータシミュレーションに従事。計測自動制御学会、電子情報通信学会、日本機械学会などの会員。