特集

子どもの安全とバイオメカニズム総論 ー子どもの事故の現状と工学的アプローチー

持丸 正明^{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 子どもの死亡原因の第1位である不慮の事故を低減するための工学的アプローチの必要性について述べる。事故の中でも、危険が潜在的であり、かつ、命に関わる重篤な傷害を引き起こす恐れのある「ハザード」をいかに発見して、いかにして取り除くかについて、病院を基点に網羅的に事故情報を集め、それらを知識化して、環境や製品の改善につなげるという「安全知識循環型社会」の考え方について述べる。これを形づくる工学的研究として、病院を基点にした事故サーベイランス技術、子どもの体形・行動の計測、子どもシミュレータによる事故原因究明の研究について概要を紹介する。また、これらの知識を、安全規格、商品開発、子どもや両親への啓蒙というかたちで社会に循環させる取り組みについて紹介する。

キーワード：傷害予防、予防医療、デジタルヒューマン、人間計測、行動計測

1. 子どもの命を脅かすもの

子どもの事故に関する記事が新聞紙面やテレビニュースで数多く取り上げられるようになってきた。遊具からの転落、エスカレータや回転ドアでの挟まれ事故、プールでの事故など、日常生活における人工物との関わりの中で、子どもが重篤な傷害を受けたり、命を失ったりすることがあるということはよく知られるようになった。これらの報道を見聞きすれば、それは痛ましいことであると思われ、責任の所在がどこなのかと言うことに関心が行くのも自然である。一方で、これらの事故と似たような事故が過去に繰り返されてきたことはあまり知られていない。たとえば、埼玉県のパールで7歳の女の子が吸い込み口（パールの排水口）に吸い込まれ命を落とした事故は記憶に新しいであろう。この事故は大々的に報道され、多くの人々の関心を喚起したが、パール排水口に体が吸い付けられて溺死するという事故が、それまでの20年間で繰り返して起きていて、60名もの尊い命を奪ってきたことについてはほとんど知られていない。

表1に、人口動態統計¹⁾からわかる子どもの死亡事故要因の順位を示す。先天的な疾患での死亡数が多い0歳児を除けば、子どもの死亡事故要因に「不慮の事故」が多いことがわかる。無論、これは公衆衛生が行き届いた先進国の証であると言える。先進国では、どこでも子どもの死亡事故要因として不慮の事故が多くなっている。しかしながら、

表1 子どもの死亡事故要因の順位

年齢	第1位	第2位	第3位	第4位	第5位
0歳	先天奇形等	呼吸障害等	乳幼児突然死症候群	不慮の事故 125人	出血性障害等
1～4歳	不慮の事故 177人	先天奇形等	悪性新生物	心疾患	肺炎
5～9歳	不慮の事故 151人	悪性新生物	肺炎	先天奇形等	心疾患
10～14歳	不慮の事故 125人	悪性新生物	自殺	心疾患	先天奇形等
15～19歳	不慮の事故 537人	自殺	悪性新生物	心疾患	先天奇形等

(2007年人口動態統計)

人口比率に対する死亡者数で見ると、日本は先進国の中でも最下位レベルである。子どもが漸減しているにもかかわらず、死亡事故件数は顕著に減っているわけではなく、また、「不慮の事故」も20年間変わらず死亡要因の第1位の位置を守り続けている。すなわち、ずっと以前から、小さな子どもの命を脅かしているものは日常生活における人工物との関わりの中で起きる事故であり、それに対してとられてきた対策は、残念ながらほとんど奏功していないということである。

なぜか？

第一に、事故に関わった人の責任を追及し注意を喚起するアプローチばかりで、事故に関わる人工物に潜在する原因を究明し設計を変更するというアプローチが希薄だったことが挙げられる。第二には、軽微な傷害につながる危険性（リスク）と、潜在的で重篤な傷害につながる危険性（ハザード）が混同されていたことがある。これらの事故の状況と傷害の情報を網羅的に蓄積する仕組みがなく、科学的なアプローチが十分にとられてこなかったことが第三の要因である。

2008年11月27日受付

[†]〒135-0062 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

持丸 正明

Tel: 03-3599-8194 Fax: 03-5530-2066

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

2. 事故に学ぶ

筆者が、研究者として、はじめて子どもの事故に関わったのは、1999年3月であった。筆者の友人の弁護士が、神奈川県藤沢市で発生した箱ブランコ事故の民事訴訟を引き受けていて、筆者自身が原告（ケガをした子ども）側の視点で科学的見地からの意見書を出すというかたちで関わった。一審の横浜地裁の結果はほぼ全面勝訴であったが、その後の東京高裁で逆転敗訴。憲法判断を伴わないため最高裁でも棄却され、2003年に敗訴が確定した²⁾。

当時、世論も含めて「子どもの遊び方が悪い」「親の監督不行届である」という意見が多かった。世間の関心は、人の責任の追及に向かい、人工物に内在する事故原因に向かわなかったのである。また「子どもは危ない環境において、危機回避能力を学ばせるべきだ」という意見も多かった。これを否定するわけではない。ただ、危機回避能力を学ぶには、火傷や擦り傷を起こす「リスク」があればよい。「ハザード」で命を失っては、学習できようはずがない。

世論や裁判官の考えを変えられなかったのは、筆者が箱ブランコ事故の「ハザード」を的確に伝えられなかったことに起因する。箱ブランコでどうして重篤な傷害が発生するのか？傷害は箱ブランコに友達を乗せて、外からブランコを押していた子どもに発生しやすい。ぼんやりと立っていたところにブランコが揺れ戻ってきてぶつかった、のではない。ブランコを押していたときに足をすべらせて転倒したところに、ブランコが揺れ戻ってきたのである。箱ブランコはがっしりとした構造物で、子どもを乗せたときの

揺動部の重量は0.5トンにもなる。この揺動部と地面の隙間にくさびのように挟まれて、構造的に圧縮されることで重大な傷害となる（図1）。筆者が関わった案件は大腿骨頭頸部骨折であったが、全国では死亡事例も数多くある。大人でも容易に気がつかない潜在的な危険性——まさしく「ハザード」である。どうしたらハザードを取り除けるか。箱ブランコについての答えは簡単である。揺動部と床面の隙間を十分に——たとえば350mmにすれば、子どもは挟まらない。筆者は、このことを意見書に論理的に記述したつもりであったが、裁判官にも世間にも十分なメッセージとして伝わらなかったことが敗因であったと反省している。

裁判は負けたが、この後、箱ブランコの撤去は急速に進んだ。当時3万機あった公園の箱ブランコは、現在、2千機を数えるほどまで減っている。これでよかったのか？残念ながら、そうではないだろう。撤去という決断の是非については議論しない。ただ、撤去という決断をするときに、事故要因を理解した上で決断したかどうかが重要である。もし、事故が起きたときの責任を回避するために撤去したのだとしたら、それは寂しい。確かに、箱ブランコでの事故は繰り返されないだろう。しかし、箱ブランコではない、やはり揺動部と地面の隙間の狭い、重くてがっしりした構造を持つ新しい遊具を設置するかも知れない。これは「事故からの学習」として賢いものとは思えない。

3. 事故情報を集め、原因を知り、対策をする

軽微な傷害は個人が学習することでよい。しかし、社会の中で繰り返される重篤な傷害は、社会が学習していなくてはならない。命を失った子どもに「次は気をつけようね」と言っても始まらない。事故情報を網羅的に集め、それをきちんと分析して原因を究明した上で、適切な対策を施し、その成果を事故情報を通じて検証するサイクルを築くことこそが、社会の学習と言えるのではないだろうか。

われわれはこのような改善サイクルを持つ社会を「安全知識循環型社会」と呼んでいる。経済産業省の支援を受け、この安全知識循環型社会を構築するためのモデル事業を行っている（図2）。事故が発生したらその情報を網羅的に収集する仕組みが必要である。社会が学習すべき事故は、すなわち重篤な傷害をおこした事故であるので、これは病院を基点に収集するのがもっとも合理的である。米国やオーストラリアでは、Emergency Roomを基点とした事故情報収集の仕組みができあがっている。残念ながら、日本ではまだこのような仕組みはないが、われわれは成育医療センターの協力を得て、モデルケースとして事故情報収集を開始した。病院では傷害情報はしっかり記録するが、傷害が発生したときの事故状況に関する情報はきちんと記録していない。これを患者と向き合いながら簡便に入力できるWebベースのソフトウェアを開発し、傷害と状況の両方の情報を蓄積できるようにした。1年間で5千件を超える事故データが

図1 箱形ブランコの事故例

図2 安全知識循環型の社会

蓄積された。

このデータから、どのような事故が多いか、どのような傷害が多いか、あるいはどのような製品が事故を多発させているかという頻度情報を出すことは容易である。先に述べた米国やオーストラリアでも、主にそのような統計処理をして社会に発信している。しかし、これでは「箱ブランコの事故が多いから、撤去する」というのと同じである。事故件数ではなく、できるだけ事故の原因に立ち入らなくてはならない。われわれは、事故に関わった製品の特徴、事故発生場所と時刻、子どもの年齢から発生しやすい傷害を予測する確率ネットワークベースの推論モデルを開発した。こういう特徴を持った製品を、この年齢の子どもが使うときにはこんな傷害が発生しやすいということを予見的に知ることができる。これらの取り組みについては、西田氏の解説を御覧いただきたい。

より詳細に事故原因を特定するには、事故事例ごとに分析をする必要がある。人体のマルチボディモデル、有限要素モデルを用いた転落や指挟みのシミュレーションによって、事故の状況を再現するための研究を行っている。これらのシミュレーションによれば、単に事故状況を再現して

原因を特定するだけでなく、環境（製品）に対策を施した場合の効果も定量的に評価することができる。このような確率推論モデルやデジタルヒューマンシミュレーションによって、事故情報というデータは安全知識というコンテンツに昇華する。これらをメーカーや施設管理者に提示してハザードを取り除いた環境・製品開発につなげたり、危険性を子どもや両親に提示して注意を促すことで、安全知識が社会に循環することになる。

3. 子どもを守るためにバイオメカニズムになにができるか

子どもの傷害予防は、予防医療の観点から小児科学など医学領域で長く取り組まれてきた。これらの分野では、傷害調査、事故件数調査などのアプローチが多く、定量的な計測と計算論モデルに基づく工学的アプローチはほとんどなされていなかった。子どもの傷害予防を工学的に扱うということは、すなわち、子どもと環境（製品）の関わり方を定量的に知ること、重篤な傷害に繋がった事例を定量的に分析し原因を究明すること、そして原因に対する対策の効果を定量的に予測すること、その対策に基づいて実際に環境（製品）をデザインすることである。このような工学的アプローチを駆動するものとして、先に述べた事故情報収集と知識化のサイクルが働くことになる。

3.1 子どもの体を知る

件数の多い事故は、転落、溺死（風呂）、誤嚥、指挟みなどである。これらの事故原因の多くは子どもの体の寸法と強く関係している。子どもがよじ登れる高さ、風呂桶の中に転落するときの重心位置、飲み込めるものの大きさと喉の大きさ、指の太さや長さなど。大人の体の寸法や、さまざまな姿勢の時の手の届く範囲などの機能寸法は、工業製品設計のために公的機関で収集され公開されている。これに対して、子どもの人体寸法データが少なかったのは、データの計測の困難性による。じっとしていられない子どもたちの機嫌をとりながら、体に触って寸法を測ることも難しいが、それ以上に、子どもにやる気を出させて「できるだけ手の届く範囲」を計測するには相応の工夫が要る。大人であれば計測の趣旨を理解して努力してくれるが、子どもではそうはいかない。子どもが自然と努力してしまうような道具立てが必要になる。また、逆にその道具立てが日常生活での危険を誘発するのでもよくない。たとえば、ベランダの柵を模した実験装置で、どの程度の柵までよじ登れるかを計測した場合、家に帰って実際によじ登ってみてしまうかも知れない。それでも、近年、これらの困難性を越えて貴重な子どもの人体寸法データを収集する研究が行われた。詳細は八藤後氏の解説記事を御覧いただきたい。また、(社)人間生活工学研究センターも(社)日本機械工業連合会の委託を受けて計測したデータを公開している(図3)³⁾。

図3 (社)人間生活工学研究センターの子ども寸法データベース

図4 子どもの行動シミュレータ

3.2 子どもの行動を知る

子どもの体の寸法に対して危険性のあるサイズの製品（手をつつまめる，飲み込める，よじ登れる）があったとしても，それが必ず事故に繋がるわけではない．きっかけとなる子どもの行動があつてはじめて事故が発現するのである．子どもが周辺の環境に対してどのように行動を発現するのかについては，目視観察による行動分析研究が中心であり，定量的なアプローチが乏しかった．われわれは，日常生活空間で自然に行動する子どもや両親，ものの位置情報を計測する超音波センサシステムを開発し，それを実験住宅に取り付けて子どもが遊んでいるときの行動データを収集した．そのデータから，子どもがどの程度近傍のものに関心を示し，行動が変容するかを明らかにするとともに，子どもの行動遷移を確率的に生成する行動シミュレータを開発した（図4）．これらの研究の詳細については，西田氏の解説記事を御覧いただきたい．

3.3 事故の原因を探る

事故の危険要因である人体寸法と製品サイズの関係が明らかになり，事故のきっかけである子どもの行動特性がモ

デル化できたとしても，実際の事故データそのものを分析していかなければ事故原因は特定できないし，実際に事故を低減し傷害を予防することもできない．人体寸法の計測や行動特性計測は実験環境で進められるが，事故データの収集や分析には実社会でのフィールドワークが不可欠である．われわれは病院やメディア，自治体，事故に遭われたご家族の方々の協力を得て，現場検証を含めた事故分析研究を行っている．

病院で収集される事故情報には，事故のある程度の状況データと結果として身体が被った傷害データが記録されている．残念ながら，一般的には事故が発生した状況はあまり明瞭ではない．けがをした子ども本人はほとんど記憶がないし，お友達も気が動転してよくわからない．親はみていない．つまり，環境と結果と大まかな状況（けがをした時刻，一緒に遊んでいたお友達，そのとき身につけていたものなど）がわかる程度であり，これだけの情報から事故の原因につながる詳細な事故態様を再現するのは難しい．ここに，デジタルヒューマンモデルが役立つ．たとえば，遊具からの転落事故であれば，実際に事故に関連した遊具の3次元構造をデジタルモデル化し，また，実際に傷害を被った子どもの体形から子どもの体を再現するデジタルヒューマンモデルを構成する．その上で，想定されるさまざまな条件で転落をシミュレーションすることで，実際の事故結果（人体損傷部位，転落後の体位など）と合致する事故態様を見つけ出すというアプローチである．人体の損傷をできるだけ詳細に再現するためには，剛体リンクモデル（マルチボディモデル）だけでは不十分であり，生体組織構造を精密に再現し，内部応力まで計算できる有限要素モデルが必要となる（図5）．ここでは，指先の有限要素モデルによる指挟み事故解析（多田氏），全身のマルチボディモデルと頭部の有限要素モデルを組み合わせた転落解析（宮崎氏）の研究を解説いただくとともに，これらの有限要素解析や子どもダミーの元となる子どもの材料特性・傷害値の推定方法と自動車衝突解析の研究を水野氏に解説いただく．

図5 子どもの人体有限要素モデル（上：指，下：頭部）

3.4 対策の効果を予測する

事故原因が特定できれば、それらに対して、なんらかの対策を講じることができる。この対策が有効であるかどうか、定量的な検証研究が不可欠である。それをもってはじめて、安全対策を広く普及するに至るのである。検証研究としては、安全対策を実際の現場に施して、事故発生件数などの変化を調査するという介入調査型のアプローチがとられてきた。たとえば、公園の遊具設置面に衝撃緩衝材料を敷き詰める以前と以後の事故発生件数と傷害重篤度を調査した論文がある。ただし、衝撃緩衝材料が敷かれることで、子どもの遊び方が過激になる、より多くの子どもが遊ぶようになるなど、現場介入によって安全性以外にもさまざまなものが変わり、それらが事故発生件数に影響を及ぼしてしまうという問題があった。なにより、実際に現場に介入して、数ヶ月調査を続けると有効性に関するデータが得られないため、事前評価に適さない。それ故、さまざまな対策案について有効性を定量的に比較することが困難であった。デジタルヒューマンモデルによるシミュレーションは、この問題を解決する。環境や製品の形状を変更したときの状況でシミュレーションを行うことで、人体に働く衝撃の低減度合いを定量的に予測評価できる。ここでは、ドアの指挟みに対する対策効果（多田氏）、遊具からの転落に対する対策効果（宮崎氏）について解説いただく。

4. 安全知識循環型の社会へ向けて

子どもの事故情報を病院基点で網羅的に収集し、それらを予測可能な統計モデルとして知識化するとともに、重篤な事故についてデジタルヒューマンモデルを用いたシミュレーションによって原因を特定し、対策の効果を定量評価する。この取り組みの先には、子どもの傷害予防のための安全基準づくり（標準化）、子どもの傷害予防に考慮した新しい安全商品開発、そして、子どもや両親に向けた情報発信が必要となる。社会がこのような事故情報収集－知識化－対策（標準化・安全商品開発・啓蒙）－有効性確認（＝事故情報収集）というサイクルを持つことが、すなわち、安全知識が循環する社会と言うことである。

子どもの傷害予防のための安全基準づくりという点では、残念ながら日本は国際的に後れをとっていると言わざるを得ない。欧州では遊具の安全や衣服の引きヒモに関する安全基準がEN（欧州標準）としていち早く標準化されている。米国ではCPSC（米国消費者製品安全委員会）が事故事例と実態調査に基づいてさまざまなガイドラインを出しているほか、ASTM（米国材料試験協会）という非営利団体で欧州と同様の安全規格を制定している。残念ながら、これらに対応するJIS（日本工業規格）は未整備である⁴⁾。ただ、省庁も手をこまねているわけではなく、国土交通省は2008年8月に「都市公園における遊具の安全確保に関する指針(改訂版)」を提示している。この改訂版の中で、遊具設置面の

安全確保についても触れられており、「遊具は、硬い設置面には配置せず、必要に応じて設置面への落下に対する衝撃の緩和措置についても検討する」と記載されている。これは改訂版であらたに付記された箇所であり、事故事例の蓄積や転落シミュレーション研究の成果が指針として反映されたかたちとなっている。また、独立行政法人国民生活センターが多発する事故事例を分析した上で、注意喚起やガイドラインの作成を行っている。本特集・研究解説の多田氏の手法などを援用して、折りたたみ式ベビーカーの指挟みに関する安全対策の取り組みを、国民生活センターの松本氏より事例解説としてご紹介いただく。財団法人製品安全協会でも、安全評価試験方法の確立やSGマークの付与などの取り組みを進めており、JIS規格の遅れを、省庁や非営利団体のガイドラインなどの取り組みによって補完しているかたちである。昨今では、業界団体も積極的に安全ガイドラインに取り組みは始めている。子ども用の衣服について首回りの引きヒモが引っかかり、くびが締まってしまふという事故が発生しているが、これに対して、全日本婦人子供服工業組合連合会は2008年7月に「安全指針」を提案している。

このような非営利団体や業界団体の取り組みに後押しされるかたちで、安全知識を商品開発に活かすための取り組みも加速しはじめている。ここでは、特定非営利活動法人キッズデザイン協議会の取り組みを紹介したい。同協議会は、次世代を担う子どもたちが、安全に安心して暮らせる社会作りをグランドチャレンジとして掲げている。そのための具体的アクションとして、企業・団体が自主的に業種を超えて集い合う場を形成し、子どもの事故情報収集・分析、子どもの身体・行動の計測・分析などを行いつつ、その成果を活用した「子ども目線での製品・コンテンツのデザイン開発」を推進するとしている。本稿執筆時点で、企業59社、非営利法人など8団体、14の地方自治体が参画している。さまざまな研究会活動を通じて、会員同士で情報収集・分析を進めるとともに、キッズデザイン賞という表彰制度を創設し、事故に学び、子どもたちの安全・安心に貢献し、創造性を育むような製品・サービス・事業のデザインに対して顕彰を行っている。受賞した賞品・サービスには「キッズデザインマーク(図6)」の使用が認められる。新しい安全・安心のブランドとして、キッズデザイン市場の創成に繋がって欲しいと思っている。安全・安心な社会は、国家が税金をかけて実現するだけでなく、資本主義社会の仕組みの中でより良い製品が正当な評価を受けて普及していく仕組みを創り出すことが必要だからである。なお、キッズデザイン賞は、単に安全と言うだけでなく、子どもが創造性を持って楽しくチャレンジすることにも重点を置いている。子どもの創造性を育むチャレンジと、重篤な傷害を予防することは必ずしも相反しない。本特集では、そのひとつの事例として、キッズデザイン賞受賞展示会である「キッズデザ

図6 キッズデザイン賞ロゴマーク

イン博」に出品した遊具の開発について、開発元の丹青社の方に事例解説をお願いした。この遊具は、子どもがのぼって遊ぶ遊具でありながら、足や手をかけるところにロードセルを内蔵していて、子どもがのぼるときの力や姿勢を計測できるような仕掛けを持っている。子どもに楽しんでもらいながら、子どもがよじ登る条件を知るための計測を実施しているのである。

安全知識を社会に循環させ、社会が学習するということは、国や企業だけが学習し、安全な環境作り・ものづくりに知識を活用するということだけに留まらない。それらを使う子どもや、見守る親もまた社会の構成要素であり、彼等にも安全知識を知ってもらう必要がある。技術的な取り組みとして、デジタルヒューマンモデルを用いて事故シナリオを簡便にCGコンテンツとして可視化するための研究を進めている。このような技術をベースに制作されたCGコンテンツは、(株)ベネッセの会員向けサイトのほか、経済産業省の事業成果配信 Web サイトからも閲覧できるようになっている。

5. 子どもの傷害予防工学へのいざない

従来、社会学や医学統計的なアプローチで取り組まれてきた「子どもの傷害予防研究」に、定量計測とモデル化という工学的アプローチを加えることで、事故の情報を安全知識に昇華させて社会に循環させるという構想が少しずつ具現化し始めてきたと感じている。もちろん、未解決の問題が数多く残されている。そこには、子どもの人体、運動、発達の計測とモデル化、さらには、子どもを含む環境の安全制御というバイオメカニズムの研究要素を見出すことができる。未解決の問題があり、それを解決する技術

分野があるにも関わらず、子どもの傷害予防工学に関わる研究者の数は少ない。子どもを対象とした実験の困難性、子どものデータ入手の困難性が障壁になっていると感じている。これらの障壁を乗り越えるには、機関や分野を超えた研究連携が有効であると考えている。産総研デジタルヒューマン研究センターでは、子どもの傷害予防工学を推進するための研究連携体としてCIPEC（子どもの傷害予防工学カウンスル）を立ち上げている。ここでは、大学などの研究者だけでなく、病院、地方自治体、マスメディア、産業界の方々と広範な連携をとり、データの共有や技術交流、事例分析から対策の提言などの活動を行っている。本特集では、このCIPECに関わる研究者の方々から、子どもの傷害予防工学の研究や、その知見を活かした商品開発について解説いただいた。本特集を読んで、子どもをまもり育むための工学的研究に関心を持っていいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 19 年 人口動態統計月報年計（概数）の概況，<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai07/toukei7.html>, (2008).
- 2) 箱ブランコ裁判を考える会編：危ない箱ブランコはかたづけて！，現代書館，(2004).
- 3) (社) 人間生活工学研究センター：子どもの身体寸法データベース，<http://www.hql.jp/database/>, (2007).
- 4) 河内まき子，持丸正明：乳幼児の人体寸法計測に関する調査と提言，産総研 RIO データベース，<http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/kids/>, 20-26, (2005).

持丸 正明（もちまる まさあき）
1993 年慶應義塾大学大学院理工学研究科生体医工学専攻 博士課程修了。同年、博士（工学）。同年、工業技術院生命工学工業技術研究所入所。組織改編により、2001 年産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ。2003 年よりデジタルヒューマン研究センター 副センター長。人間の形状・運動の計測とコンピュータモデル化、および、その産業応用に関する研究に従事。IEEE, SAE, 人間工学会などの会員。