

## 剖検例に基づく転落事故時における頸部傷害予測

尾花 竜弥<sup>1)</sup>, 岩瀬 拓哉<sup>1)</sup>, 一杉 正仁<sup>2)</sup>  
 槇 徹雄<sup>3)</sup>, 櫻井 俊彰<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>東京都市大学大学院工学研究科

<sup>2)</sup>滋賀医科大学社会医学講座

<sup>3)</sup>東京都市大学工学部

(平成 30 年 5 月 31 日受付)

**要旨:**【目的】転落事故時における頭部打撲に伴う頸椎椎体骨折の発生リスクを予測するため、工学的知見から剖検例に基づく事故再現を行う。そして、転落高さによる頸椎椎体骨折リスクを推定し、初期診療に有効な知見を導き出す。【対象および方法】建設現場に設けられた柵から仰向けに転落し、コンクリート床に頭部および背部を打撲して死亡した男性の剖検所見を用いた。マルチボディダイナミクス解析(TASS International MADYMO R7.5)を用いて、ダミーとコンクリート床から構成されるマルチボディモデルを作成し、事故状況を再現した。さらに、再現された転落姿勢を正とし、転落事故時における頸椎椎体骨折リスクを推定するためロジスティック回帰分析を行った。【結果および考察】上体に対する頸部の角度 50 度かつダミー全身のピッチ角+10 度においてのみ、剖検所見と一致する結果が得られた。また、ロジスティック回帰分析の結果から転落高さが 1m における頸椎椎体骨折リスクは 44.2%、2m では 94.9% となり、7 つの頸椎椎体のうちいずれかが骨折することを示唆する結果となった。【結論】剖検所見に基づき、転落事故時の転落姿勢をマルチボディダイナミクス解析によって推定できることを明確化した。解析結果を基に行ったロジスティック回帰分析から、コンクリート床に転落した場合における転落高さ別の頸椎椎体骨折リスクカーブを明確化した。

(日職災医誌, 67:108—113, 2019)

### キーワード

剖検, 頸椎損傷, 転落

### はじめに

厚生労働省によると、平成 28 年中の労働災害(労災)における死亡者数は 928 人となっており、業種別では建設業が 294 人と最も多い<sup>1)</sup>。その建設業における労災死亡者数のうち、建設現場での転落事故による死亡者数が毎年 40% 前後と高い割合を占めている<sup>2)</sup>。また、平成 28 年中の建設現場における発生箇所別転落死亡者数をみると、建物の梁からの転落が 26 人で最も多く、次いで足場からの転落が 19 人である<sup>3)</sup>。近年、労災予防の取り組みで労災死亡者数が減少しているが、依然として建設現場における転落死亡事故が一定数発生していることから、その損傷実態を解明し、予防や救急医療に有用な情報を見出す必要がある。事故現場における救命率向上のため、日本では JPTEC (Japan Prehospital Trauma Evaluation and Care) や JATEC (Japan Advanced Trauma Evalu-

ation and Care) が導入されている。JPTEC では、まず外傷患者の脊椎損傷の有無を評価し、搬送途上の脊椎固定の必要性を判断している。転落事故における頸椎損傷リスクの予測が可能となれば、初期診療において有益な情報となり得る。

一般的な傷害予測手法として、実事故データベースに基づく手法とシミュレーション解析による手法の 2 つが挙げられる。実事故データベースに基づく手法は、質量ともに十分なデータベースに基づいて傷害に対する統計式を構築する手法であり、大量の実事故データベースの取得に多大な労力とコストを要する。また、受傷に至る過程の情報が反映されず、実事故データのみでは傷害予測を行うことは困難である。一方、シミュレーション解析による手法は、事故状況を短時間で模擬でき、受傷に至る過程の情報も取得可能である。

そこで本検討では、剖検によって明らかにされた人体

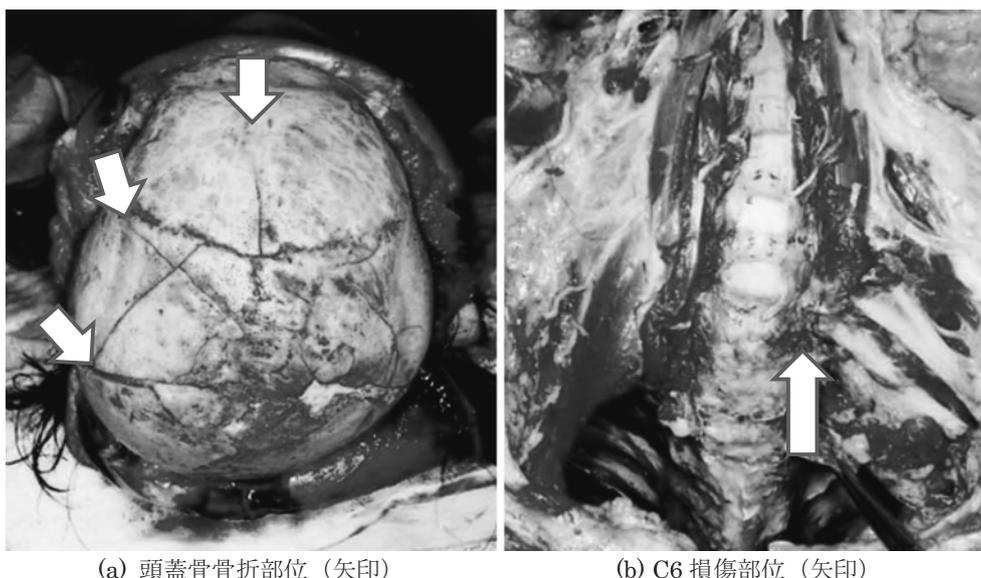


図1 頭蓋骨及び頸椎の骨折

損傷などに基づき、建設現場で実際に発生した転落事故の再現を行った。マルチボディダイナミクス解析(TASS International MADYMO R7.5)と検討フローを用いた分析により転落姿勢の推定を行った。さらに、目的変数を頸椎椎体骨折の有無、説明変数を転落高さとしてロジスティック回帰分析を行い、転落高さによる頸椎椎体骨折リスクカーブを求めた。本検討によって、転落事故時における頸椎椎体骨折の予測に関して有益な情報が得られたので報告する。

### 対象剖検例

#### 1) 事例の概要

死者：30歳代の男性。

事故状況：男性は倉庫内の壁の修復の際に使用していた棚の最上段に向かって登っていたところ、手を滑らせ約8mの高さからコンクリート床に転落した。作業中は安全帯を装着していたが棚の昇降時には未装着であった。この際、梯子等は使用せず、棚板や棚の鉄骨を足場にして登っていた。また、男性は転落時にヘルメットを着用していたが落下途中で脱落したため、コンクリート床接触時は未着用であった。男性は発見時、仰向けであった。

死因：頭頂部および背部への外力に基づく多発外傷。

#### 2) 剖検所見および損傷機序

頭頂部に表皮剥脱および皮膚変色を認め、直下に厚層な皮下出血および頭蓋骨陥没骨折が認められた(図1(a))。また、頭蓋骨を前後に2分する広範囲な骨折を伴い、骨折は頭蓋底に至っていた。さらに、骨折相当部位で広範囲な脳挫傷および外傷性くも膜下出血が認められた。脊椎では、第6頸椎椎体(C6)骨折(図1(b))および第7胸椎椎間板損傷が認められた。背部では、右肩

甲骨周辺に皮下出血があり、右背部の第4~7肋骨で1カ所ずつ、第8~9肋骨で2カ所ずつの骨折が認められた。

以上より、頭頂部に生じた頭蓋骨陥没骨折は頭頂部がコンクリート床に対しほぼ垂直に接触することで生じ、脊椎損傷はその際の頭頂部への外力に起因した上下方向の介達力によって生じたと考えられた。その後、背部を地面に強打し仰向けで発見された。剖検所見および損傷機序から、後述するフローに従って検討を行った。

### 対象および方法

事故再現には、マルチボディダイナミクス解析(TASS International MADYMO R7.5)を用いたコンピュータシミュレーションを使用した。

MADYMOとは、マルチボディダイナミクス解析によるコンピュータシミュレーションを行うことができる解析ソルバであり、自動車業界における事故解析に広く用いられている。人間の特性を再現した衝突用ダミーモデルを用いることで、スポーツ関連解析、乗り心地解析、バイオメカニクス研究など様々な事例解析が可能である。そのため、本研究ではMADYMOを解析ソルバとして採用した。

解析モデルは、衝突用ダミーモデルとコンクリート床モデルから構成される(図2)。衝突用ダミーモデルは歩行者モデルを使用した。

歩行者モデルは、身長1.74m、体重75.7kgとなっている。歩行者モデルの大きな特徴として、第1頸椎椎体(C1)から第5腰椎椎体(L5)にかけて24本の椎体の構造が再現されていることが挙げられる。これにより、転落事故時における頸椎、胸椎、腰椎の詳細な解析が可能となるため、本検討で用いるモデルとして採用した。ま

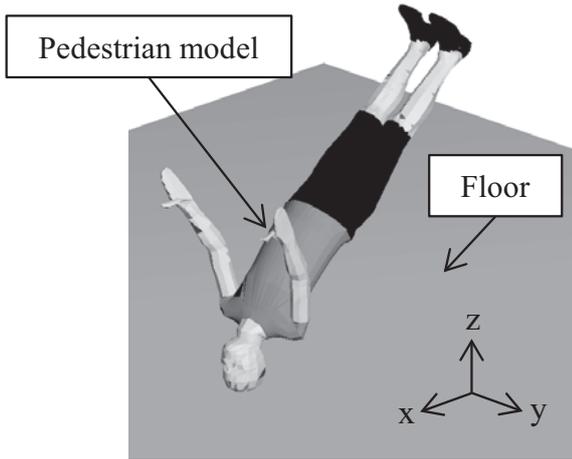


図2 本検討における解析モデル

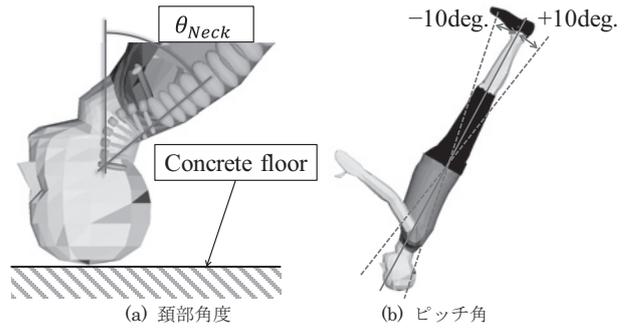
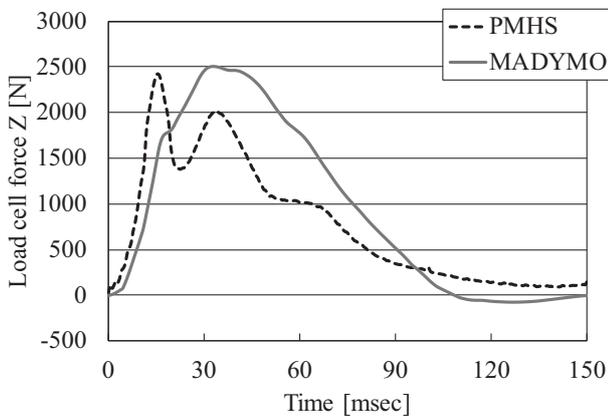
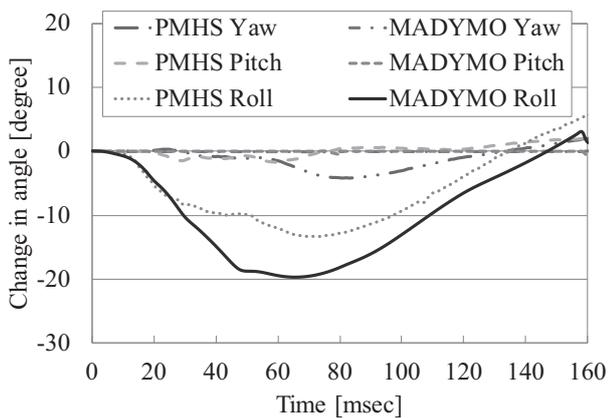


図4 姿勢推定シミュレーションにおける設定パラメータ



(a) 頭部荷重 (2.0 m/s)



(b) 第1胸椎椎体角度 (2.0 m/s)

図3 本検討における解析モデルと Post Mortem Human Subjects (PMHS) 試験結果<sup>4)</sup>の比較

た、歩行者モデルは、各椎体にかかる3軸方向荷重を算出することができる。本検討ではこのZ軸方向荷重を引張圧縮荷重とした。

1) モデルの妥当性確認

Robertsらが報告した Post Mortem Human Subjects

(PMHS) 試験<sup>4)</sup>を基に、歩行者モデルを頭頂部から2.0 m/sで剛体床に落下させた際の頭部荷重および第1胸椎椎体角度から妥当性を確認した。解析結果から、頭部荷重波形およびピーク値、第1胸椎椎体角度波形がPMHS試験と概ね一致しており、本検討で用いる解析モデルは妥当であると判断した(図3)。

2) パラメータ設定の予備検討

パラメータ設定の予備検討として、歩行者モデルを8 mの高さの棚から立位姿勢で自由落下させる解析を行った。その結果、初期落下姿勢から頭部衝突姿勢に至るまでに上体に対する頸部角度と歩行者モデル全身のピッチ角が変化していることから、パラメータを頸部角度とピッチ角の2つに選定した(図4)。また、剖検所見より男性がコンクリート床に仰向けで発見されたことから、頭頂部に頭蓋骨陥没骨折が生じていることから、頭頂部から転落したことを前提に解析した。

3) 解析条件

解析条件は頸部角度を10度間隔で0度から50度までの6水準とし、頸部角度1水準につきピッチ角を0度、-10度、10度の3水準設定し、全18条件とした。また、8mの高さから転落したことから頭部接触瞬間の歩行者モデルの速度を12.52m/sとした。歩行者モデルとコンクリート床モデル間の摩擦係数は自動車対歩行者事故の衝突解析に関する先行研究に基づき0.5とした<sup>5)</sup>。

4) 検討フロー

本検討で使用した検討フローを以下に詳説する(図5)。まず、剖検所見よりC6が骨折していることからC6にかかる引張圧縮荷重がC5にかかる引張圧縮荷重を上回っているか確認し、その条件を抽出する(Phase 1)。次に、Phase 1の条件を満たした解析条件の頭部荷重を分析する。剖検所見から頭部荷重の合成方向が頭蓋骨を前後に2分する方向、すなわち、頭部におけるZ軸方向荷重が支配的であるか否かを分析し(Phase 2)、この2条件を満たした解析条件を転落姿勢と推定した。

5) ロジスティック回帰分析による頸椎椎体骨折リスクの推定

推定された転落姿勢を正として、目的変数は頸椎椎体

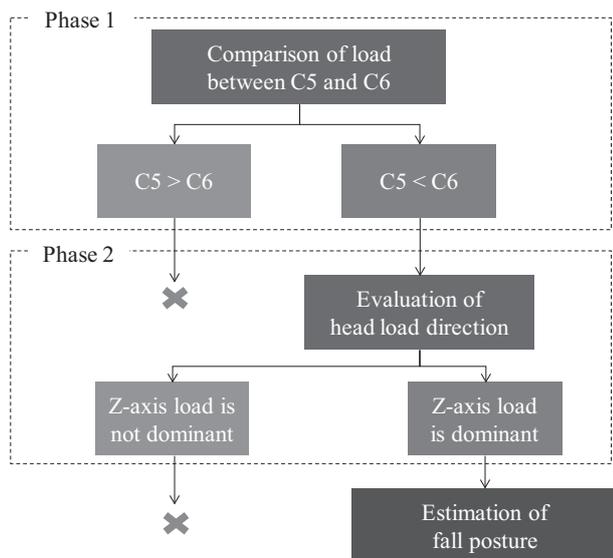


図5 検討フロー

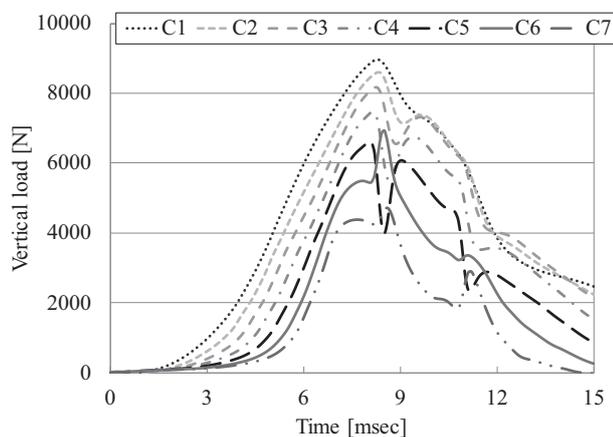


図6 転落時における頸椎椎体引張圧縮荷重

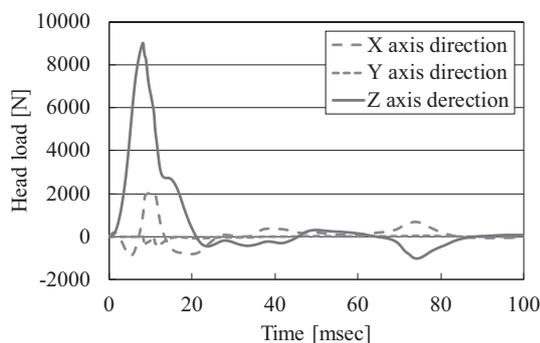


図7 転落時における頭部荷重

骨折の有無，説明変数は転落高さとし，ロジスティック回帰分析による頸椎椎体骨折リスクの推定を行った。転落高さは1m 間隔で1m から8m までの8水準の解析結果を使用した。骨折の有無は頸椎椎体の圧壊閾値4,090 N<sup>6)</sup>を超えるか否かで判断され，C1 からC7 までの7つの頸椎椎体いずれかが骨折した場合を1，いずれも骨折しない場合を0とした。以上から，統計解析用ソフトR3.2を用いて，転落高さによる頸椎椎体骨折リスクを求めた。

結果

頸部角度50度かつピッチ角+10度の条件のみで，C6にかかる引張圧縮荷重がC5にかかる引張圧縮荷重を上回った(図6)。まず，頭部接触後から8.4msecまではC1を支点とした頸部伸展が生じ，C1にかかる引張圧縮荷重が最も高くなった。その後8.5msecにおいてC6以外の引張圧縮荷重が急に減少し，C6の引張圧縮荷重がC5の引張圧縮荷重を上回った。なお，他の条件においては，一貫してC1からC7へと順に頸椎椎体引張圧縮荷重の最大値が小さくなる結果となった。

次に，検討フローに従い，前項の条件を満たした頸部角度50度かつピッチ角+10度の条件における頭部荷重を分析した(図7)。Z軸に対して頭部荷重の合成方向がどの程度傾斜しているか分析するため，頭部荷重の合成方向と頭部におけるZ軸に対する角度を求めた。その際，Y軸方向荷重は非常に小さいためZ軸方向荷重の最大値と，その際のX軸方向荷重を用いて求めた。その結果，Z軸に対して頭部荷重の合成方向が5.97度と小さいことから，Phase2の条件を満たした。

ロジスティック回帰分析の結果を表1に示す。転落高さと頸椎椎体骨折の有無の間に有意な関連を認めた(p<0.01)。ロジスティック回帰係数が正であるため，転落高さが高くなるにしたがって頸椎椎体骨折リスクは増加することを示している。得られたロジスティック回帰曲線(図8)から，転落高さ1mにおける頸椎椎体骨折リスクは44.2%，2mでは94.9%となり，7つの頸椎椎体のうちいずれかが骨折することを示唆する結果となった。

考察

これまで，転落事故に関する先行研究では頭部傷害に着目した事故再現，頭部傷害の発生リスク及び事故予防策の検討がされてきた<sup>7)~10)</sup>。しかし，転落事故における頸部損傷の有無についてあまり検討されておらず，頸部損傷を予測することは容易ではなかった。本検討では，全ての損傷状況が明らかとなっている剖検例をもとに詳細

表1 ロジスティック回帰分析結果

Factor	Logistic regression coefficient	Standard error	p value	Odds ratio
Fall height	3.162	1.069	0.00308	23.6

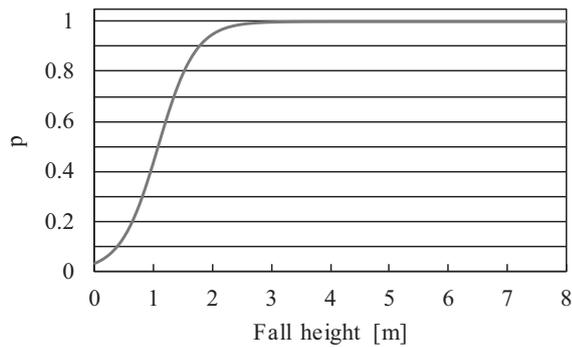


図8 ロジスティック回帰曲線

な事故状況を再現し、さらに再現した事故状況に加えロジスティック回帰分析を用いることで転落高さによる頸椎椎体骨折リスクの推定が可能であることを明確にした。

はじめに、検討フローの Phase1 および Phase2 を満たした条件について考察する。まず、頭部接触後に C1 を支点とした頸部伸展が生じることで各頸椎椎体に上下軸方向の引張圧縮荷重が負荷された。その後、頸部以下の質量によって C6 を支点とした頸部屈曲が生じたことにより、C6 が C5 と C7 に挟まれることで圧縮され、8.5msec において C6 のみの引張圧縮荷重が増加したと考えられる。

以上の結果から、頭頂部に入力された外力が頸部に伝達する過程において、外力入力点に近い頸椎椎体の引張圧縮荷重が高くなる傾向にあることがわかった。しかし、本例のようにある特定の頸椎椎体骨折を生じさせる要因として、頭部接触後の頸部屈曲伸展運動が考えられる。この頸部屈曲伸展運動に影響を与える因子は頸部角度とピッチ角であると考えられるが、頸部の側屈および回旋運動に影響を与えるであろう全身のロール角も影響因子として挙げられ、今後3つの角度を含めた検討が必要であると考えられる。

また、Z 軸に対して頭部荷重の合成方向が 5.97 度傾いていたことから、頭蓋骨を前後に 2 分する荷重が入力されたと考えられる。これは、Phase 2 の条件を満たしており、頸部角度 50 度かつピッチ角 +10 度の条件が転落姿勢であると推定した。

次に、ロジスティック回帰分析により得られた頸椎椎体骨折リスクについて考察する。ロジスティック回帰分析より転落高さ 1m において頸椎椎体骨折リスクが 44.2% と高いことから、本例のようにコンクリート床に対して頭頂部から転落した場合、頸椎損傷が生じている可能性が高いため、初期診療において頸椎及び頸髄損傷を念頭においた対応を行うべきと考える。

本研究の limitation として以下のことが考えられる。まず、今回得られた頸椎椎体骨折リスクカーブは、あくまで頸椎椎体の骨折を示唆するものであり、より確定的

なものとするには四肢の状態等も勘案しながら分析する必要があると思われる。また、本報では 1 剖検例のみを扱っているため、今後複数の剖検例を基に分析を行うことでより正確な傷害予測が可能となると思われる。検討フローや優先順位の再考や、分析条件を増やすことでより詳細な分析が可能となる。

以上より、詳細な剖検所見をもとに、工学的検討を加えることで転落事故による重症頭部外傷時における頸椎椎体骨折リスクが具体的に明らかになった。本検討結果は、労災における初期診療時の診断や必要な検査を選択する上で十分役立つと考える。すなわち、本検討結果が周知されれば、初期治療時に事故状況に関する情報を得た医師は、頸椎および頸髄損傷の合併を疑った検査や診療が円滑に行えると考える。また、転落による頸椎損傷は死亡に至らなくても重篤な後遺傷害を合併することがある。したがって、比較的低い位置での作業時にも安全帯の着用や労働者に対する転落事故リスクの周知といった転落予防策を徹底することが重要である。

利益相反：利益相反基準に該当無し

## 文 献

- 1) 厚生労働省：平成 28 年労働災害発生状況の分析等。 <http://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-11301130-Roudoukijunkyokuanzeniseibu-Anzenka/0000165169.pdf> (参照 2018-4-13)。
- 2) 全国仮設安全事業協同組合：建設労働災害の実情。建設業における労働災害死亡者数の推移。 [http://www.kasetsuanzen.or.jp/industrial\\_accident/fall.html](http://www.kasetsuanzen.or.jp/industrial_accident/fall.html) (参照 2018-3-23)。
- 3) 全国仮設安全事業協同組合：建設労働災害の実情。発生箇所別にみた「墜落」による労働災害死亡者数の推移。 [http://www.kasetsuanzen.or.jp/industrial\\_accident/fall.html](http://www.kasetsuanzen.or.jp/industrial_accident/fall.html) (参照 2018-3-23)。
- 4) Carolyn R, Jason RK: Injuries and kinematics: response of the cervical spine in inverted impacts, Proceedings of 24th international technical conference on the enhanced safety of vehicles. Paper No 15-0432: 1-27, 2015.
- 5) Liu XJ, Yang JK, Lovsund P: A study of influences of vehicle speed and front structure on pedestrian impact responses using mathematical models. Traffic Inj Prev 3 (1): 31-42, 2002.
- 6) 公益社団法人自動車技術会インパクトバイオメカニクス部門委員会：第 2 章 人体の構造、機能とその耐性 身体部位ごとの衝撃耐性 頸部・脊椎の衝撃耐性 傷害基準と傷害耐性、工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス。東京、公益社団法人自動車技術会、2006, pp 39-85.
- 7) 宮崎祐介：子どもの転倒・転落事故被害予防のためのコンピュータ・シミュレーション。バイオメカニクス学会誌 33 (1) : 29-34, 2009.
- 8) Deprey SM, Biedrzycki L, Klentz K: Identifying characteristics and outcomes that are associated with fall-related fatalities: multi-year retrospective summary of fall deaths in older adults from 2005-2012. Injury Epidemiology 4 (21): 1-10, 2017.

- 9) Friedland D, Brunton I, Potts J: Falls and traumatic brain injury in adults under the age of sixty. *J Community Health* 39 (1): 148—150, 2014.
- 10) 横山朋子, 一杉正仁, 本澤養樹, 他: 介護中の事故が関与した死亡例の検討. *日職災医誌* 52: 177—180, 2004.

別刷請求先 〒520-2192 滋賀県大津市瀬田月輪町  
滋賀医科大学社会医学講座法医学部門  
一杉 正仁

**Reprint request:**

Masahito Hitosugi  
Department of Legal Medicine, Shiga University of Medical  
Science, Tsukinowa, Seta, Otsu, Shiga, 520-2192, Japan

## Prediction of Cervical Injuries in Fall Accidents Based on Autopsy Findings

Tatsuya Obana<sup>1)</sup>, Takuya Iwabuchi<sup>1)</sup>, Masahito Hitosugi<sup>2)</sup>, Tetsuo Maki<sup>3)</sup> and Toshiaki Sakurai<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Engineering, Tokyo City University Graduate Division

<sup>2)</sup>Department of Legal Medicine, Shiga University of Medical Science

<sup>3)</sup>Faculty of Engineering, Tokyo City University

According to the investigation by the Ministry of Health, Labour and Welfare, the construction industry accounts for the highest rate (33.2%) of occurrences of fatal accidents. Fall accidents at construction site account for nearly 40% of all fatal accidents in the construction industry annually. Therefore, clarifying the detailed situation of falling is valuable to plan effective preventive measures. Furthermore, because predicting cervical spinal injuries in fall accidents is important for emergency care, information about the probability of experiencing cervical spinal injuries in falling may contribute to the medical field. The purposes of this study were to reappear a fatal fall accident and obtain the probability of developing cervical spinal fractures depending on fall height based on logistic regression analysis. Computer simulations using MADYMO 7.5 were performed with forensic autopsy findings in a fall accident in which a man had slipped off the scaffolding at a height of 8 m. The man suffered from skull vault and base fractures, cervical spinal fracture (C6), and rib fractures. To reconstruct the kinematics of the man based on his neck and pitch angle, the falling posture was clarified such that the neck angle was 50 degrees and pitch angle was a further 10 degrees. The obtained posture was well in accordance with that estimated from the autopsy findings. Based on logistic regression analysis, the fracture risk of the cervical spine is more than 50% at a fall height of 1.08 m. Injury prediction based on an autopsy case using MADYMO and logistic regression analysis can be useful to plan initial medical treatment.

(JJOMT, 67: 108—113, 2019)

—Key words—

autopsy, cervical spine injury, fall