

危機管理教訓に関するシミュレーション

— 徒然草の現代的解釈 —

Simulation of the Lesson in Risk and Crisis Management

— Modern Implication on Accident Prevention in Turezuregusa on
the Kamakura Ages —

関谷 正明¹⁾・嶋村 宗正²⁾

Masaaki SEKIYA and Munemasa SHIMAMURA

日本の危機管理の教訓である徒然草 第109段「高名の木のぼり」の内容に関し、リスクマネジメントの観点からシミュレーション解析することにより、現代的かつ数理科学的解釈を行った。科学技術的詳細シミュレーション解析方法として、木にのぼる人間を均一な一つの剛体と見なし、状態AとBの2つのパターンについてその下端部を中心として自由回転することにより墜落し、地面に達するまでの頭頂部の速度と角度を連続的に解析した。その結果、頭頂部の速度は頭頂部の初期地上高が変わっても変化しない領域があること、及びそのような領域において頭が真下を向いて地面に落下する可能性があることが分かった。頭部保護にとって大変厳しい衝突形態である頭が真下を向いて地面に接触する場合について、このような状況となる頭頂部の初期地上高は約2.5 m~4.5m(平均値3.5m)であった。また、地上付近でも転倒すると頭頂部の速度は、初期地上高が約2.5 m~4.5mの場合とほぼ同程度と、衝突時の角度は異なるものの大きな衝撃が作用し危険な状況になる可能性があることも分かった。この得られた数理科学的解析の視点と文献からの心理学分析の視点とを比較し、リスクマネジメントの観点から論考した。数理科学的に得られた地面衝突時と落下時の速度を客観的リスクとし、人間が通常高さが高ければ高いほど線形的に危険を感じる注意の基になる感覚を主観的リスクと見なすことにより、主観的リスクから客観的リスクを引いた差を行動生起リスク関数と定義した。この行動生起リスク関数の評価によれば、高い位置では人間は客観的リスク以上に危険と感ずるものの低い位置においては一旦起こした行動が予期する以上の厳しい傷害を受ける可能性があることが明らかとなった。これらの知見により、今回の科学技術的詳細シミュレーション解析手法が防災・安全教育分野において実践的に有効であり、しかも妥当性及び重要性を有する手法であることを確認した。

1) 千葉科学大学危機管理学部危機管理システム学科

Department of Risk and Crisis Management System, Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba Institute of Science

2) 千葉科学大学危機管理学部防災システム学科

Department of Disaster System Science, Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba Institute of Science

(2008年9月16日受付, 2009年1月7日受理)

1 はじめに

我々は千葉科学大学危機管理学部危機管理システム学科と防災システム学科にそれぞれ所属し、危機管理及び防災・安全に関する教育と研究等を行っている。最近の防災・安全に関する研究として、「製造業における防災・安全教育と技術伝承調査-防災・安全意識の調査-」¹⁾や「大学におけ

る防災教育-千葉科学大学の場合-」²⁾等がある。

本稿の目的は、危機管理及び防災・安全に関する教育分野のなかで危機管理教育の一環として、徒然草 第 109 段「高名の木のぼり」の内容を数理科学的視点により現代的に解釈する共同研究を行い、危機管理学部の学生に対し、日本に古くから伝わる危機管理の教訓を現代風に分かり易くかつ直感的にイメージし易いような教育効果を狙い、新しい手法を開発したことにある。

研究開始の背景として、著者の一人は 2007 年 9 月 7 日放送のフジテレビの金曜プレステーション「独占入手！未公開監視カメラ映像と最新報告書が語る…プリンセス・ダイアナ最後の瞬間～衝撃の死 10 年目の謎に迫る！」のインタビュー映像において、CG を用いたシミュレーション解析³⁾により 35 度の角度で衝突したことを推測し、この結果を解説した。もう一人の著者は、2007 年 10 月 19 日に在北京の日本大使館にて、「日本国における危機管理」を講演⁴⁾し、その中で日本における危機管理教訓の例として、鎌倉時代の 1330 年に吉田兼好が著した徒然草 第 109 段「高名の木のぼり」を紹介した。今回、共同研究として徒然草 第 109 段「高名の木のぼり」の内容を現代的に解釈するため、ダイアナ元妃の最後の衝撃死をシミュレーションしたのと同様の手法を用いて解析し、総合的かつ現代的解釈を加えたので、その結果の一部を報告する。

2 危機管理におけるリスク、ハザードと事故等の区別

2.1 災害、事故等の区別

災害とは英語⁵⁾で(a) disaster, an accident と訳されるが、一般的には(a) disaster の方が用いられている。事故は an accident と訳され、事件は an event, an incident 等と訳されている。また、incident は accident より小さな出来事であり、accident は思いがけない事故負傷や死を伴う不慮の出来事であり、event は数学・統計分野において(確率)事象、すなわち起こるか起こらないかが偶然によって支配される事からと説明⁶⁾されている。event は比較的重要なまたは注目すべき出来事、incident はあまり重要でない出来事で偶然、または重要な event に付随して起こったものと区別⁷⁾されている。また、event tree の場合の event とは、災害や事故の一連のプロセスにおいて枝分かれ時点での出来事を確率的に考えてそれぞれを事象⁸⁾と称している。今後は災害を disaster、大事故を accident、小事故を incident、事故や災害のプロセスを構成している要素・出来事を事象として event とする。

2.2 位置エネルギーに起因する墜落・転落災害のハザード、危害とリスク

阿久津⁹⁾はハザードと危害の類型化の中で、ハザードとはリスクを起こす原因であり危険性の原因(有害性)、つまりリスク構成要素¹⁰⁾と説明した。これに基づくと化学プラ

ントの設備構造に起因する作業条件的ハザードは位置エネルギー、運動エネルギー、生存条件(酸素、毒性ガス等)の 3 種類となる。今回、位置エネルギーに関するハザードの場合をシミュレーション解析することとした。

「労働災害分類の手引き」¹¹⁾によると、墜落・転落とは、「人が樹木、建築物、足場、機械、乗物、はしご、階段、斜面等から落ちること」をいう。なお、労働安全衛生規則の第 518 条に関する解釈例規では、勾配が 40 度以上の斜面上を転落することは、墜落に含まれるとされている。

一方、転倒とは、「人がほぼ同一平面上で転ぶ場合及びつまずきや滑りにより倒れた場合」をいい、労働安全衛生上、墜落・転落と明確に区別されている。

阿久津⁹⁾は位置エネルギーにより引き起こされる事故・災害の程度を明確に区別しているのので、これを参考にまとめたものを図 1 に示す。

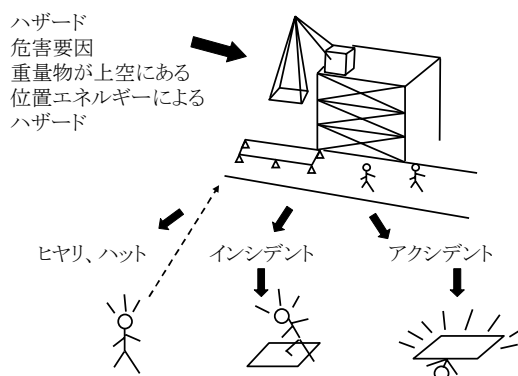


図 1 位置エネルギーによる事故・災害程度の区別

例えば、質量 100kg の鉄板が地面に置いてある場合は、その高低差は 1~3cm であり、滑った、転んだ、つまずいた程度の小事故(incident)にしかならない。しかし、この質量 100kg の鉄板がいったん高さ 10m までクレーンによって吊り上げられた場合には、 $100_{(kg)} \times g \times 10_{(m)} = 9,800_{(Nm)}$ のポテンシャルエネルギーとなり、眼下に行き交う通行人にとっては危険なハザードとなる。つまり通行人の立場から見ると、大きなリスクとなる。

3 徒然草における危機管理教訓について

3.1 徒然草における危機管理教訓と人材育成

福山¹²⁾は事故・災害からの教訓と人材育成に関し、化学会社での実践的経験と大学での教育経験に基づき、安全の哲学と安全教育等において安全であることを知る事の大切さを述べている。この中で防災の法則を 2 つ示している。

- ① 防災第一法則: 過去を顧みない者は過ちを繰り返す運命にある (He who ignores the past is condemned to repeat it)

- ② 防災第二法則: 未来を予見することが防災の成功の道である(Success in preventing loss is in anticipating the future)

これから、過去の教訓の大切さと、これを現代において分かりやすく解釈することの重要性が浮き上がってくる。

日本における危機管理教訓と技術伝承の例として、鎌倉時代の1330年に吉田兼好が著した徒然草 第109段「高名の木のぼり」¹³⁾が知られている。この意味する要点は、「失敗と言うものは難しいところよりもかえって易いところで起こしやすいものだ」という教訓である。

「高名の木のぼり」のあらすじ:

登場人物: 木のぼりの名手、弟子、私(吉田兼好)の3名:
木のぼりの名手といわれた男が、弟子を指示して高い木に登らせ梢をさらせた時、登った弟子がひどく危険に思われた間は何も言わなかった。しかし弟子が降りる時に、軒の高さ程になって初めて、「怪我をするな。気をつけて降りよ。」と言葉をかけた。私が木のぼりの名手に、「この程度の高さまで降りたからには、飛び降りることも出来るだろう。それなのに、何故そんなことを言うのですか。」と問うた。木のぼりの名手は、「そこが肝心なのです。目が回るような高さで枝も折れそうな間は、本人が気をつけているので何も言いませんでした。しかし怪我と言うものは、安全な所まで来てするものなのです。」と答えた。

3.2 「高名の木のぼり」における技術伝承

高名の木のぼりの内容を技術伝承及び技能継承の視点から考察する。久保田¹⁴⁾は団塊世代の技能継承問題を3つの視点で考え、継承すべき技能のレベル・内容、技能継承対象者の就業者数の分布、熟練習得課程での伝え方を調査し、OJT(on-the-job training: 職場内実地訓練)が基本であることを示している。第109段「高名の木のぼり」の内容を、この3つに当てはめると、

- ① 技能を伝える側として木のぼりの名手の視点
- ② 伝えられる側として登った男の視点
- ③ 伝え方として軒の高さの視点

となる。

①に関して、技術の伝承において木のぼりの名手が弟子にいかに行動すべきか、心理面に着目して伝えている点が興味深い。②に関してはOJTが行われていると理解できる。③に関して、なぜ軒の高さなのか、軒の高さから墜落するるとどのような状態になるかなど具体的な説明がなされた方が聞く者にとって、より理解しやすいと言える。これが意味するところは、鎌倉時代のプロである名人等が体験・事例を帰納的に会得した内容を現代において体系的かつ論理的に数理科学的手法により伝承していく方法論が重要になって来たといえる。

3.3 「高名の木のぼり」とリスク

最近、芳賀¹⁵⁾は心理学の視点より徒然草 第109段「高名の木のぼり」を採り上げ、墜落に対する警戒心と動作の注意深さの基である主観的リスクが木の高い所よりも低いところで大きく下がることにより自己のリスク管理目標水準である「ターゲットリスク」が低下する、すなわちこれを超えると墜落リスクが増大すると主張し、これを「高名の木のぼりの法則」として名付けた。このターゲットリスクは実際の行動を意思決定する場合の総合的な損失と利益との差であり、どのような行動の種類と程度においても一定であると考えている。一般的に、客観的リスクは低い高さほど低下し墜落に対する警戒心と動作の注意深さが少なくなるが、この客観的リスクの低下以上に主観的リスクが低下し、飛び降りても大丈夫という意識の方が勝ることによりリスクが増す危険性を指摘した。しかし、芳賀は客観的リスクの内容や高さによりどのように変化するかについて説明を行っていない。このような心理学の視点からの考察に対し、我々は数理科学的なシミュレーション解析手法を用い位置エネルギーと人間の墜落時の挙動に着目することにより、軒の高さが実際にどのくらいの高さであり、しかもその危険性は高さによってどのように変化するのか、さらには主観的リスクと客観的リスクの関係はどのような関係になっているのかという現代的な疑問に対し、科学技術と労働安全に関する危機管理の視点より解明することとした。

4 徒然草 第109段「高名の木のぼり」の危機管理シミュレーション解析手法

4.1 墜落解析プログラムの内容

4.1.1 墜落解析の状況

a) 墜落解析のイメージ図

「高名の木のぼり」において、高い木に登った男が降りてきて軒の高さにきたときに、人間が立木の枝部に腰掛け手で体を支えている状況を状態Aとした。これを図2示す。

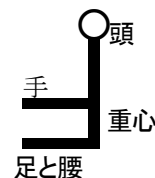


図2 人間が立木に腰掛けしがついている状態(A)

次に、図2と同様に高い木に登った男が降りてきて軒の高さにきたときに、人間が立木の枝部に足を乗せ立木に平行にしがついて手で体を支えている状況を状態Bとして図3示す。

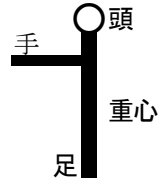


図3 人間が立木に平行にしがみついている状態(B)

b) 墜落状況の概要説明

状態Aと状態Bとも人間が手を木から離すと体は重力によって徐々に木から離れる。状態Aは木と接する腰部、状態Bは足部を回転中心として人間の体は回転し、体が地面と平行になったときには木から力を受けず、それ以後人間は自然落下するものとする。

人間の骨格は、骨と関節で成り立っており、特に頸椎や脊椎については多くの骨で構成されている。しかし、落下時に緊張が走り体が硬直するものとして、接地部から頭部にかけて一本の剛な棒と考えることができる。人間の体は部位により密度が異なる。よって、重心位置あるいは慣性二次モーメントは各部位の特徴を考慮して決定すべきである。しかし、本稿は墜落時の基本的な挙動を解析することを目的としたため、体重の分布は均一と考えて考察することとした。したがって、本解析では人間を均一な棒状物体として落下時の挙動を分析する。なお、最初に体を支えていた手の影響は無視し、さらに状態Aにおいては脚部の影響を無視して解析することとした。

4.1.2 モデルの概要

図4にモデルを示す。

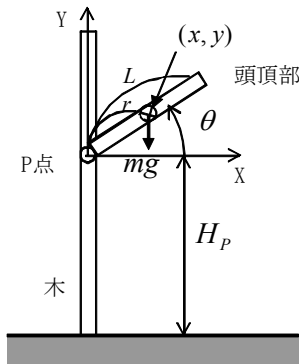


図4 モデル図

図4において、水平方向をX軸、鉛直(垂直)方向をY軸として、剛体の重心位置を (x, y) 、質量を m 、重心周りの慣性二次モーメントを I 、下端部から重心までの距離を r 、水平面であるX軸とのなす角を θ とする。このとき、剛体の運動エネルギーTは

$$T = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2}I \cdot \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \quad ①$$

と表される。ここで、 v_x 、 v_y は重心のX、Y方向速度である。

本解析において、剛体に作用する力は重力のみとしているので、重力による仮想仕事 δW は

$$\delta W = -mg \cdot \delta y \quad ②$$

である。ここで g は重力加速度である。 x, y, θ を一般化座標 q_i ($i=1,2,3$) とすると、ラグランジェの運動方程式

は q_i と一般化力 Q_i を用いて、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k \quad (k=1,2,3) \quad ③$$

と表される。ここで、

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt}$$

であり、一般化力は

$$Q_k = \frac{\partial W}{\partial q_k} \quad ④$$

と表される。

さて、墜落初期において剛体は立木との接触点を中心に回転するので、剛体の重心位置は θ を用いて次のように表すことができる。

$$x = r \cdot \cos \theta, \quad y = r \cdot \sin \theta \quad ⑤$$

よって、一般化座標は θ のみになる。このとき、式③を変形すると

$$(m \cdot r^2 + I) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + mg \cdot r \cdot \cos \theta = 0 \quad ⑥$$

と表される。

次に、剛体が木から離れた後の挙動について考える。空気抵抗などの力が作用しないとするので、純粋な自由落下として扱うことができる。しかし、Y軸方向の速度は重力加速度の影響を受けるので

$$\frac{dv_y}{dt} = -g \quad ⑦$$

と表される。ところで、X方向成分と回転成分については空気抵抗を無視するので、 v_x 、 $d\theta/dt$ については立木との

拘束を離れた瞬間における速度、 $v_x \cdot d\theta/dt$ がそのまま維持されるものとして挙動を解析すればよい。

4.1.3 計算に用いたデータ

平成 18 年における日本人の 17 歳男子¹⁰⁾の体格は、身長 170.9cm、体重 63.8kg、座高 91.7cm であった。これより、状態 A と状態 B に使用した人間モデルの寸法と質量を表 1 のように決めた。なお、慣性二次モーメントは質量が均等に分布しているとの仮定の下に次の式で計算して求めた。

$$I = \frac{1}{12} mL^2 \quad \text{⑧}$$

表 1 解析モデルに使用したデータ

	状態A	状態B
質量m (kg)	35	64
長さL (m)	0.92	1.7
重心までの距離r (m)	0.46	0.85
慣性二次モーメントI (kg・m ²)	2.47	15.41

解析は式⑧を数値積分すればよい。時間増分幅は 0.1 秒とした。また、剛体の初期位置は水平から 89 度と、ほぼ鉛直姿勢とした。

5. 解析結果

5.1 状態 A の場合

5.1.1 地面に腰を下ろしていた場合

地面に腰を下ろしていた姿勢で後ろに倒れた場合を解析した。挙動図を図 5 に示すが、約 1.28 秒後に頭頂部は速度 4.7m/s で地面に衝突する。図中○印は頭頂部、△印は腰部、×印は重心位置を示す。

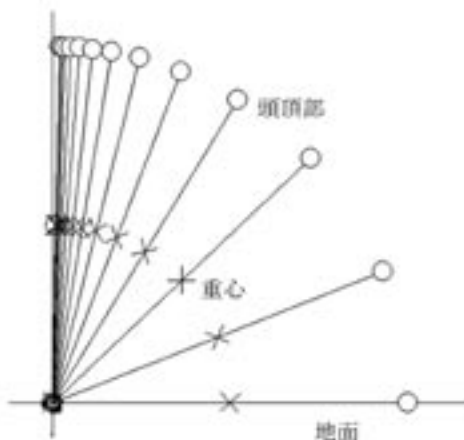


図 5 地面に腰を下ろしていた場合、状態 A

5.1.2 墜落時の挙動変化

墜落時の剛体の角度（姿勢）と速度を解析した。地上から 6.7m の位置に腰掛けていた人間が墜落した挙動図を図 6 に示す。この高さから墜落すると人間が地面に着地したときに腰部で接し、直立状態の姿勢になる。

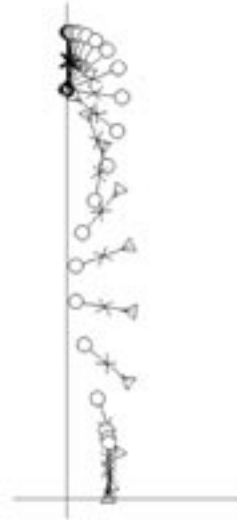


図 6 墜落時挙動図、状態 A の場合

5.1.3 地上高、角度と速度の関係

頭部の移動距離が 100m 程度と想定して解析した。頭頂部における鉛直方向の移動距離、鉛直方向の速度、人間の角度などの関係を図 7 に示す。

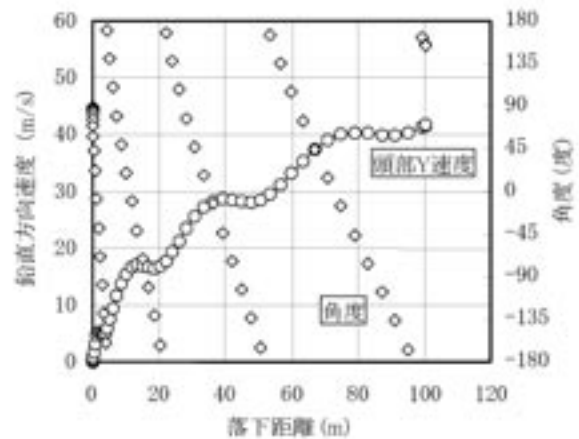


図 7 頭部の落下距離、鉛直方向速度、角度（姿勢）の関係、状態 A の場合

図 4 に見るように、墜落前における頭頂部の地上高 H_d は

$$H_d = H_p + L \quad \text{⑨}$$

であるので、図7の横軸に剛体長Lを加えた値は、頭頂部の初期地上高に相当する。逆に、長さLを減じた値は人間が懸掛している部分の地上高に相当する。

図7によれば、自由落下を始めた後は、3回転して落下し、頭頂部の落下距離が約100mになった時に、頭頂部の鉛直方向速度は約42m/sに達し、水平面となす人間の角度は154度とわずかに頭部を上に向けた姿勢で腰部から地面に衝突することが分かる。

頭部の落下距離が12mまでの範囲における剛体の角度と頭部の速度の関係を図8に示す。

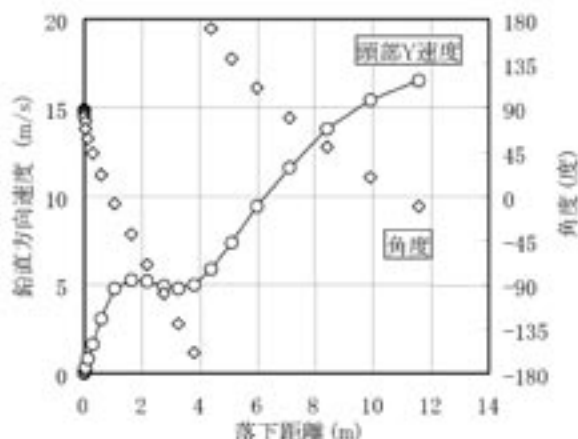


図8 頭部の落下距離、鉛直方向速度、角度（姿勢）の関係、状態Aの場合

頭部を真下に向けた最初の姿勢（角度が-90度の場合）は、頭部が約2.57m落下した場合であり、墜落を開始してから約1.67秒後、このときの頭頂部の速度は約5.0m/sであることが分かった。このように頭部を真下に向けた姿勢で地面に衝突する場合は、地上から約1.58mに懸掛墜落する場合に相当する。

5.2 状態Bの場合

5.2.1 地面に立っていた場合

地面に立っていた姿勢で後ろに倒れた場合を解析した。挙動図を図9に示すが、約1.75秒後に頭頂部は速度6.4m/sで地面に衝突する。図中○印は頭頂部、△印は足部、×印は重心位置を示す。

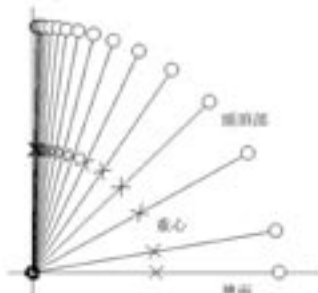


図9 地面に立っていた場合、状態B

5.2.2 墜落時の挙動変化

墜落時の剛体の角度（姿勢）と頭部の鉛直方向の速度を解析した。地上から11mの位置に足をのせ、直立していた場合の墜落時の挙動図を図10に示す。

地面との衝突時にほぼ直立状態で足の部分で着地した場合の挙動図である。

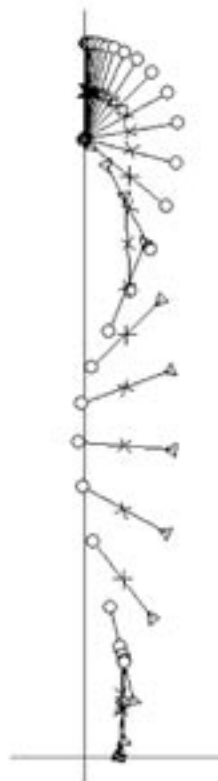


図10 墜落挙動図、状態Bの場合

5.2.3 地上高、角度と速度の関係

頭部の落下距離が100m程度の場合を解析した。頭頂部における鉛直方向の移動距離、鉛直方向の速度、人間の角度に着目してこれらの関係を図11に示す。

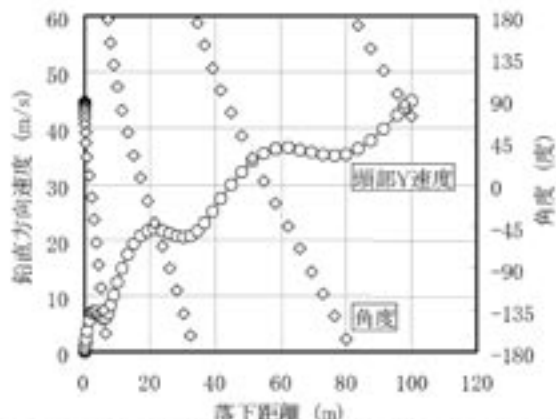


図11 頭部の落下距離、鉛直方向速度、角度（姿勢）の関係、状態Bの場合

自由落下を始めた後は、回転しながら落下し、3回の回転で頭頂部が約100m落下し、頭頂部の速度は約45m/sに達し、水平面となす人間の角度は73度と頭部を上に向けた姿勢になることがわかる。

頭部の落下距離が12mまでの範囲における頭部の速度と剛体の状況を図12に示す。

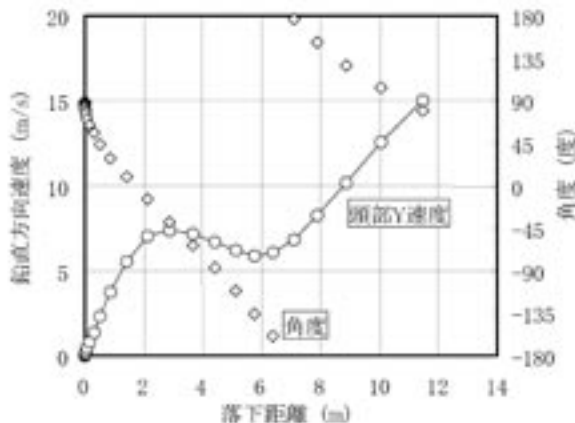


図12 頭部の落下距離、鉛直方向速度、角度（姿勢）の関係、状態Bの場合

頭部を真下に向けた最初の姿勢（角度が-90度の場合）は、頭部が約4.5m落下した場合であり、墜落を開始してから約2.21秒、このときの頭頂部の速度は約6.6m/sであることが分かった。

6 考察

6.1 「高名の木のぼり」における「軒の高さ」の解明

墜落した人間が受ける衝撃程度は、地面に接地したときの速度とともに、生命維持に重要な頭部の衝突形態の影響を受ける。地面との衝突時に人間にとってもっとも厳しい衝突形態は、頭が真下を向いた姿勢で衝突する場合であると考えられる。そこで、墜落を開始したあと、初めて真逆さま（角度が-90度の場合）になる場合を調べた結果を図13に示す。

状態Aのシミュレーション墜落解析によれば図13より、腰を下ろしている高さが地上、このとき頭頂部は地面から2.57mになるが、このような状態から墜落すると地面に衝突する瞬間に頭が真下を向いた状態になることがわかった。このとき、地面に衝突するまでの時間は約1.67秒、鉛直方向の速度は約5.0m/sであった。

一方、状態Bのシミュレーション墜落解析では、足をのせている高さが、このとき頭頂部は地上から4.5mであるが、このような状態から墜落すると頭を真下にして地面に衝突することがわかった。このとき、地面衝突までの時間は約2.21秒であり、鉛直方向の速度は約6.6m/sであった。

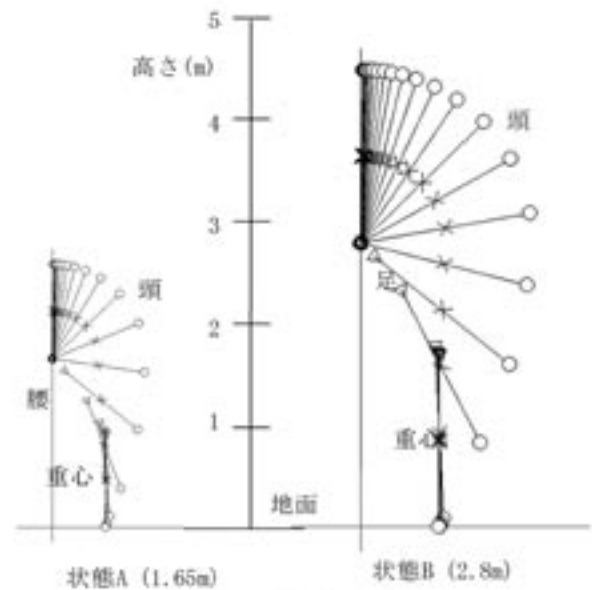


図13 頭が真下に接地する場合の挙動

このように状態Aにおける頭頂部の地上高は2.57m、状態Bにおける地上高は4.5mであることから、約2.5m～4.5m(平均値3.5m)が「高名の木のぼり」でいう「軒の高さ」になると考えられる。

実際に日本在来木造工法の2階建て家屋¹⁷⁾の場合、1階軒の高さ3.3m、2階軒の高さ6.0m(千葉県鎌ヶ谷市条例では2階軒の高さ7.0m以下)であることから、この状態Aと状態Bの墜落のシミュレーション解析の結果の妥当性が証明されたことになる。

また、中野¹⁸⁾は労働安全教育の立場から、墜落・転倒等の安全教育では、高低差の錯覚の影響に関し「ネコの目線で見ると」必要性を具体的に示している。すなわち「ネコの目線で見ると」必要性に関しては、1.8mのはしご兼用脚立の天板に靴を置き作業員(身長1.7m)が不安定な天板の上に乗った場合、頭頂部は床から3.5m(1.8+1.7=3.5m)の高さであることを想定し、床面衝突の恐ろしさを教育している。このようなことから、このシミュレーション解析の結果の重要性が支持される。

6.2 「軒の高さ」からの墜落の危険性について

地面に接するとき頭を真下にして墜落する場合に、そのときの衝突速度は状態Aの場合に5.1m/s、状態Bでは約6.6m/sと、状態Bの方が墜落のスタート位置が高いこととも相まって約1.3倍大きいことが分かった。

中野¹⁸⁾は墜落の恐ろしさに関して、人間の頭蓋骨の堅さはおおよそカボチャの硬さと同じといわれているため、実際にカボチャを4～5mの高さから硬い床面に落とすことにより、墜落の恐ろしさを理解させている。

なお、実際の災害が発生する可能性のある現場において、

墜落時のダメージ(リスクと言っても良い)を減らすために、危険な職種での産業用保護帽の着用が義務付けられている。

墜落用(墜落時保護用)の保護帽¹⁹⁾には、①衝撃を受けた時に保護帽が出来るだけ外力を吸収し、着用する人頭には弱い力しか伝達させないための衝撃吸収性と、②尖ったものが衝突した時に、着用する人頭を傷つけないための耐貫通性の2項がある。墜落用(墜落時保護用)ライナー付保護帽の衝撃吸収性試験の場合、JIS T-8131 では5kgの鉄平円板を1mの落下高さで落下させた時の伝達荷重は1,000kgf(=9,800N)以下等が要求されている。

6.3 高さと危険性の関係について

2.2 節で説明したように、ポテンシャルエネルギーがハザードとなり、その受け手に対しリスクが生じる。墜落の場合には自分自身の高さのポテンシャルエネルギーがハザードとなり、しかも墜落したときに自分自身が受け手としてリスクが生じる。すなわち墜落とは、人が重力による加速を受け衝突する現象である。この場合、どの程度の高さから墜落することが重大であるかを検討した。図8と図12に示した地面に衝突した瞬間の頭部の速度を分析するため併せて図14に再掲する。

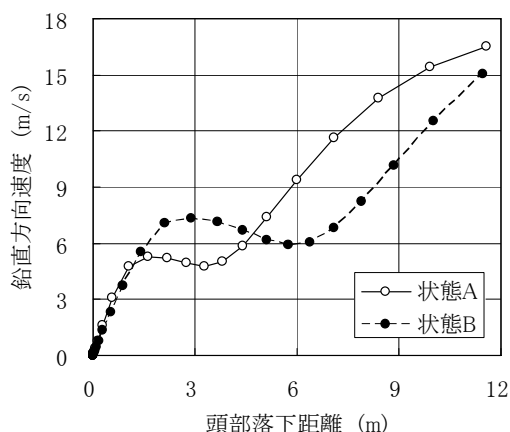


図14 頭部落下距離と鉛直方向速度

頭部を保護する上では、脚部で地面に接することが望ましい。5.1 節に示したように、状態Aにおいては6.7mの高さに腰掛けているときであり、このとき頭部の落下距離は6.7m、地面に衝突するときの速度は10.9m/sである。状態Bにおいては10.8mの位置に足をのせているときであり、頭部の落下距離は10.8m、衝突速度は13.9m/sであった。6.1 節では頭が真下になる衝突形態を分析したが、さらに体が回転しながら落下するため、頭が真下になった場合に比べて地面との衝突速度は状態Aでは約2.2倍、状態Bでは約2.1倍と高くなる。直立した姿勢で着地することは頭部保護の観点で望まれるもののエネルギーの観点では人間にとって厳しい状態と言える。

図14にみるように、状態A、状態Bとも鉛直方向速度が

一時的に停滞する領域がある。頭部が脚部よりも下にある姿勢が回転を伴う落下を続ける中で徐々に頭の方が高くなる傾向に向かう時期で、このような挙動のときに頭部の落下速度の増加が一時的に停滞する領域での現象である。これは、頭部の速度が剛体重心部の落下速度に重心を中心とした回転に伴う速度が加算され決定されるメカニズムによる。

この区間においては頭部の鉛直方向速度に大きな変化はないものの、頭部が地面と直接衝突する状況が起こっているため、頭部保護の観点にとっては厳しい衝突形態であるといえる。

5.1.1 節と5.2.1 節において、地面に座っている人あるいは立っている人がそのまま倒れた場合を解析した。状態Aにおいて頭部が地面と接触したときの速度は4.7m/s、状態Bでは6.4m/sであった。

さらに、高さ20cmの踏み台に腰掛けていた人が後ろにひっくり返った場合を解析した。頭部の初期地上高は1.12mであることから、頭部の落下距離は1.12mとなる。このとき、頭部の地面接触時の速度は4.9m/sであった。

次に、高さ20cmの踏み台の上に立っていた人がそのまま後ろにひっくり返った場合をシミュレーションするために、状態Bで足部の高さを0.2mとして解析した。頭部の初期地上高は1.9mであり、頭部の落下距離は1.9mとなる。このとき、頭部の地面接触時の速度は6.7m/sであった。

頭部が真下を向く場合の速度は状態Aでは5.0m/s、状態Bでは6.6m/sであったので、状態A、状態Bの分析とも、地面との衝突時の速度だけ考えるならば、わずかな高さであっても頭部が真下を向く場合とほぼ同程度の速度であることがわかる。地面となす角度は高さによって異なるため、頭部が受ける衝撃度に差はあるものの、衝突速度だけ考えれば、最も危険な条件の場合と変わらない。

状態Aと状態Bで鉛直方向速度が一時的に安定する領域に違いがある。状態Aで頭部落下距離が1.5m~4mであるのに対し、状態Bでは2m~8mである。これは、モデルの大きさ(寸法、質量および慣性二次モーメント)の違いによる影響である。

6.4 心理学的リスクと数理科学的リスクの関係について

6.4.1 客観的リスクと主観的リスクの区別

3.3 節で述べたように、心理学の視点では認知科学における警戒や注意のリスクを主観的リスクとすることができ。一方、純然たる客観的リスクは定義しがたく、一応メタ意識における客観的リスクを心理学上は客観的リスクという。したがって、純然たる客観的リスクは数理科学的のみで定義することとする。

「高名の木のぼり」の場合、木に登った人間の意識は低ければ危ないと感じる意識はないだろうが、高ければ高いほど怖い(危ない)と感じるであろうし、高さに対してそれ相

当の危なさ・怖さを感じるのではないかと考えられるので、この主観的リスクは高さと同様に比例すると仮定しても差し支えないと思われる。一方、数理科学的な客観的リスクは我々のシミュレーション解析から得られるのでこれをそのまま用い、「高名の木のぼり」の状態Aの場合において12m以下の墜落に関し詳細にシミュレーションしたケースに適用した結果を図15に示す。ここで千葉県鎌ヶ谷市条例では2階軒の高さ7.0m以下としているので、7.0m以上は危険であると仮定し、

主観的リスク > 客観的リスク
 が成り立つものとして、客観的リスクに対して接線を引き、これを主観的リスクとした。

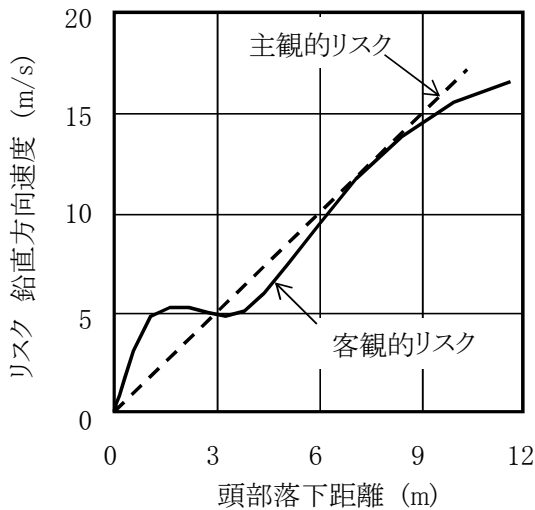


図15 客観的リスクと主観的リスク(状態A)

状態Aのデータを参考にして、図15の仮定は位置エネルギーに基づく客観的リスクと人間が感じる主観的リスクが7~8mの高さにおいて一致していると表現されていると見なすことができる。図15より、客観的リスクよりも主観的リスクが低ければ、実際の危険(客観リスクとしてよい)の大きさよりも人間は危険との認識がないということであり、一旦行動を起こすと重大な結果・危険状況を招く可能性があるということである。また、3m~7mあるいは8m以上の高さでは主観的リスクの方が客観的リスクよりも大きい。つまり、必要以上に怖さを感じる領域といえる。一方、3m以下の領域については客観的リスクのほうが大きいことから、安易に墜落した場合に、予想した以上の重大な結果・危険状況を招く可能性があることが示される。

6.4.2 行動生起リスク関数

図15に示した客観的リスクを3次元あるいは時間を加味した4次元と見なし自然現象と捉えることにより、横軸を高さの対数とし片対数で表示した結果を図16に示す。

図16より、高さが約7mの位置を境にほぼ2本の直線で近似できることが分かる。墜落を考えた場合に、7mを超えると客観的リスクの増加がその前の状態と大きく異なることが分かる。

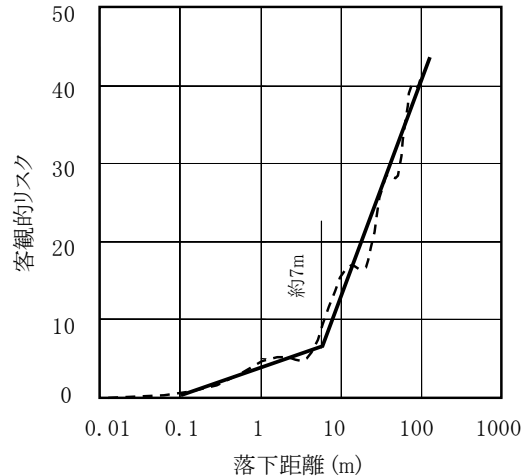


図16 客観的リスクの傾向(状態A)

状態Bについても分析を行うと同様の傾向を示し、変曲点は約9mであったので、平均値は約8mとなる。このように数理科学的な客観的リスクは指数関数において落下距離が約7~9mを変曲点として二つの勾配を有する直線で表されることが分かった。

これらのことから主観的リスクが落下距離に対し線形比例し、客観的リスクが指数関数的に減少することが分かったので、客観的リスクと主観的リスクの差である人間がやっつけられない行動を起こしたことにより発生するリスクの大きさそのものを行動生起リスク関数として定義する。

$$\text{主観的リスク} - \text{客観的リスク} = \text{行動生起リスク関数} \quad \text{⑩}$$

この行動生起リスク関数を図17に示す。

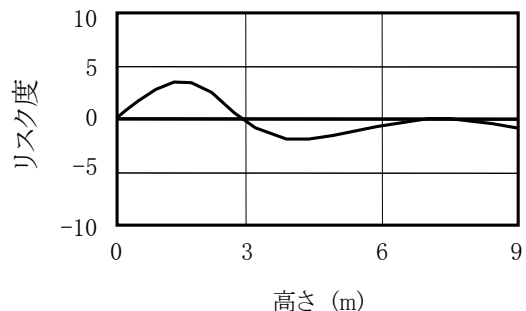


図17 行動生起リスク関数(状態A)

6.4.3 心理学的視点と数理科学的視点の比較

芳賀¹⁵⁾は心理学的視点から、「高名の木のぼりの法則」

として人間は低い高さでは主観的リスクを低く見積もり、そのために危険な行動を起こしやすいと主張した。我々の分析によれば、主観的リスクの問題というよりもむしろ客観的リスクの大きさを把握・評価できていないことにより、一旦行動を起こしたときに厳しい結果・状況を生む可能性をイメージできないためであることが分かった。つまり、事故・災害を低減・防止するためには数理科学的な知見を分かり易くかつ直感的に伝えるための方法・手法が重要であると考える。

本稿で用いたモデルは人間を均一な剛体と仮定した。突然に空中に浮いたような状況を考えれば恐怖によって体が硬直すると考えられ、今回の仮定を設定した不都合は少ないといえる。なお、高いところから墜落する場合には地面との着地に要する時間には余裕がある分、墜落時にさまざまな姿勢をとり得る可能性もあり、またそのために空気抵抗の影響を大きく受けることも考慮すべきと考えられる。なお、状態Aは腰掛けていた人間の墜落を想定したが、脚部の影響は考えていない。落下距離が低ければ、大きな影響は無視できるであろうと考えたためである。人間の体が地面に平行に落下するとしても、人間の体には凹凸があるため地面に接地する順番が生じる。このため、均一な剛体が地面に衝突した場合と異なる現象が起こることも考えられるが、衝突速度を評価するのであれば、均一な剛体とした仮定においても大きな問題は生じないと考えられる。人間の頭部は重く、手足は他の部位に比べて比較的軽い。そのため、慣性モーメントを現実に近い解析の必要性も考えられる。ただし、これらの解析・評価では頭頂部の鉛直方向速度で検討を行ったが、人間に対する衝撃は6.1節でも説明したように姿勢が影響するため、このような人間の有する各種属性を尺度・指標に入れて「行動生起リスク関数」を今後見直す必要がある。

7 まとめと今後の課題

今回、危機管理教育の一環として、日本に古くから伝わる危機管理の教訓の例である鎌倉時代の1330年に吉田兼好が著した徒然草第109段「高名の木のぼり」の内容に関し、学生に分かり易くかつ直感的なイメージを与える教育を行うため数理科学的視点により現代的に解釈するシミュレーション解析を行った。

木にのぼる人間を均一な一つの剛体として、木を支えていた手が離れた結果、剛体の下端部を支点にゆっくりと回転しながら墜落する状況を解析し、地面に落下するときの速度と角度に着目して分析した。腰で体を支えていた場合(状態A)と足で体を支えていた場合(状態B)の2通りについて解析した。

剛体の下端部が支持されたまま回転し、水平になった時点で自由落下に移ることから、自由落下中は、剛体は回転しながら落下する。頭頂部の鉛直方向速度成分は剛体の鉛

直方向速度成分と剛体の回転速度成分の合成であり、そのため必ずしも速度の大きさは頭頂部の落下距離によらない。

地面に衝突した時に頭部にとって最も厳しい衝突形態は、頭が真下になって接地する場合と考えられる。状態Aの場合に墜落前における頭部の地上高は約2.6m、地面との頭部衝突速度は5.0m/s、状態Bの場合は約4.5m、地面との衝突速度は6.6m/sであった。これより、「高名の木のぼり」にうたわれる「軒の高さ」とは約2.5m~4.5m(平均値3.5m)と考えられる。

地上にいる状態から転倒する場合あるいは地上から高さ20cmの踏み台に腰掛けていた人が後ろにひっくり返り転倒する場合を解析したところ、地面と衝突するときの速度は、頭部が真下を向いて地面に衝突する場合と大きな差がなく、わずかな高さであっても危険な状況が起こることを示した。

墜落したときに人間に作用する衝撃の厳しさが地面に衝突した速度の大きさによると仮定した場合に、この大きさを高さに対応する客観的リスクと捉えることができる。人間が怖い・危ないと感じる主観的リスクについては、高ければ高いほど強く感じると仮定し、高さに対してはほぼ線形とした。主観的リスクと客観的リスクの大きさが一致する高さがあると仮定することにより、「行動生起リスク関数」を導いた。この行動生起リスク関数によれば、ある程度高い位置では主観的リスクが客観的リスクより大きくなるものの、状態Aの場合に3m以下の高さについては主観的リスクの方が低くなっている。したがって、人間が一旦行動を起こした場合に危険性・リスク認識の理解度が低いことに起因して予期する以上の厳しい傷害を起こす可能性が生じることを強調した。

このように、日本の昔から言われている危機管理の教訓を採り上げ、防災安全分野における教育方法論として数理科学的視点から新しくシミュレーション解析手法を用いた教育の有効性かつ重要性を示すことが出来た。

今後、数理科学的視点のみならず心理学の視点等も含め、総合的な危機管理の立場から実践的な科学技術と労働安全分野における事例解析を行ない、大学教育の場における実践的防災・安全教育、さらには産業界における技術伝承等に繋げていく予定である。

8 謝辞

本研究の墜落シミュレーション実験を担当頂いた関谷研究室の4年次ゼミ生である吉岡千絵さんに感謝します。

引用文献

1) 関谷正明、粕川正光、「製造業における防災・安全教育と技術伝承調査-防災・安全意識の調査-」, 千葉科学大学紀要, No. 1, pp. 29-37, 2008.

- 2) 船倉武夫、小川信行、嶋村宗正、上北彰、井上安敏、「大学における防災教育-千葉科学大学の場合-」, 建築防災, No. 1, pp. 49-56, 2008.
- 3) 千葉科学大学ホームページ:
<http://www.cis.ac.jp/>
- 4) 人民網日本語版、「在北京日本大使館 2007 年 10 月 19 日(金)日本の危機管理を語る」2007 年 10 月 21 日:
http://www.people.ne.jp:80/2007/10/21/jp20071021_78406.html.
- 5) 研究社 新和英大辞典(第5版)、p. 842, p. 1042, p. 1140, p. 1781, 2003.
- 6) 研究社 新英和大辞典(第6版)、p. 1241, p. 14, 2006.
- 7) 研究社辞書編集部編、『研究社 英語類義語使い分け辞典』, p. 136, 2006.
- 8) 亀井利明監修、『基本 リスクマネジメント用語辞典』, p. 9, 同文館, 2004.
- 9) 阿久津東真、「化学プラントの労働安全とリスク-ハザードとリスクの定量的検討は可能か-」, セイフティーエンジニアリング, Vol. 33, No. 3, pp. 13-18, 2006.
- 10) 阿久津東真、(財)総合安全工学研究所 第168回化学安全セミナー(司会:関谷、2005年7月22日開催)「プラントの労働安全-IS012100とCEマーキング-機械安全(IS012100)とリスクマネジメント(OHSAS18001)の観点から-」, セイフティーエンジニアリング, Vol. 32, No. 3, p. 24, 2005.
- 11) 中央労働災害防止協会、「労働災害分類の手引き 第23版」, p. 64, 2003.
- 12) 福山郁生、セイフティーエンジニアリング, Vol. 30, No. 5, p. 24, 2004.
- 13) 吉澤真人、『徒然草』, pp. 205-208, 中道館, 2007.
- 14) 久保田章市、「団塊世代の引退による技能継承問題と雇用・人材育成」, 日本労働研究雑誌, No. 550/May, pp. 31-42, 2006.
- 15) 芳賀繁、「安全技術と人の心」, セイフティーエンジニアリング, Vol. 35, No. 3, pp. 16-20, 2008.
- 16) 文部科学省、学校保健統計調査(平成18年度).
- 17) 殖産住宅相互(株)の1986年在来木造工法2階建て家屋データによる.
- 18) 中野洋一、「ネコの目線で見ると」、『なくそう! 墜落・転落・転倒 第3版』, pp. 137-140, 中央労働災害防止協会, 2007.
- 19) 谷沢悦、「産業用保護帽の現状」, 『SE シリーズ 新工事の安全』, pp. 34-37, (財)総合安全工学研究所, 1995.

以上