

# 長周期パルス地震動による家具の転倒危険性に関する研究

## Study on Furniture Fall Risk by Long-Period Pulse Ground Motion

○花田 悠磨<sup>1</sup>, 村尾 修<sup>2</sup>, 目黒 公郎<sup>3</sup>  
Yuma HANATA<sup>1</sup>, Osamu MURAO<sup>2</sup>, and Kimiro MEGURO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院工学研究科修士課程

Master Course Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University

<sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所

International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

<sup>3</sup> 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, Tohoku University

For the first time in Japan, long-period pulse ground motion was observed when the 2016 Kumamoto Earthquake hit Nishihara Village. It may cause different behavior of furniture or buildings from well-known damage situations. This paper analyzes furniture fall risk in an office incurred by the long-period pulse ground motion using simulation. It cleared that the kinetic energy of the pulse reaches the highest point about 70 seconds earlier than of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, and suggested layout strategies to reduce personal injuries.

**Keywords** : 2011 Kumamoto Earthquake, 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, long-period pulse ground motion, Unity, office layout, kinetic energy

### 1. はじめに

#### (1) 研究の背景

2016年4月16日に熊本地震が発生し、地表面に約30kmにわたって断層が現れた。その近辺の西原村役場では長周期パルス<sup>1)</sup>が国内の直下型地震で初めて観測された。長周期パルスとは、周期3秒ほどの長周期の揺れが初動から一気に大きな変異を伴って発生する地震動のことで、地表面に活断層が現れた時に、そこから数キロの範囲で観測される<sup>1)</sup>。長周期パルスは瞬間的に大きな加速度を長い周期で発生させるため、固定周期の長い超高層建築物にも甚大な被害が及ぶと予想される。

熊本地震の際に熊本大学病院で観測された波形の最大変位は40cmほどであり、免震設計想定最大の揺れ幅であった。こうした長周期パルスが発生すると、免震装置を取り付けた建築物でさえも擁壁にぶつかり、崩壊する危険性がある。今後、長周期パルスが超高層ビルの立ち並ぶ大都市圏で発生したら、いまだ経験したことのないような被害が出るであろう。そのため、構造的な対策はもちろんのこと、室内においても安全対策についても検討する必要がある。

#### (2) 既往研究

地震時の家具転倒に関する既往研究では、家具の転倒率曲線<sup>2)</sup>、部屋の危険度評価<sup>3)</sup>、家具群のシミュレーション<sup>4), 5)</sup>等が挙げられるが、長周期パルスや時間の経過に関連したものはない。実際、地震を認識してから危険が及ぶまでにどれくらいの猶予があるのかについて、またどのような家具固定・配置が長周期パルスでも有効であるのかについて明らかにする必要がある。

#### (3) 研究の目的と方法

既往研究を踏まえ本研究では、物理演算・シミュレーションソフトを用いてオフィスの室内シミュレーション

を行い、長周期パルスの特徴を明らかにし、家具固定優先度、家具配置の危険度評価をすることを目的とする。

多くの家具転倒率をベースにした室内危険度の研究では、家具転倒の可否には言及しているが時間軸について考慮されていない。一方、家具群シミュレーションでは時間ごとの家具の挙動は明示されているが、危険性の定量的言及がされていない。また家具配置についての研究は少ない。本研究では、①家具転倒に時間軸を考慮する、②家具配置・固定について言及する、③長周期パルスを扱う、という3点を同時に行うことに新規性がある。

本研究では、①長周期パルス地震動の想定される仙台市の現状の調査、②シミュレーションの対象、パラメータ、入力地震波の設定、③入力地震波の作成、④出力データの設定、⑤シミュレーション、⑥分析の手順を踏む。

### 2. 仙台市における長周期パルスのリスク

長町一利府断層帯とは、仙台平野の西端に位置する活断層帯である。宮城県の宮城郡利府町から仙台市を経て柴田郡村田町にかけて、北東—南西方向に延びており、全長は30 km程度で西側が東側に隆起している逆断層である。まず、仙台市近郊の80mを超える建築物を地図上にプロットし、断層帯から等距離の範囲を示し比較した。すると80mを超える建物は34件あり、その内断層帯から5km圏内に33件とほぼ全数が含まれ、3km圏内でも29件と大半がこの長周期パルスを受けうる範囲にあることが分かった。

### 3. シミュレーションの設定

#### (1) シミュレーションの概要

シミュレーションはUnityを使って行う。UnityはNVIDIA PhysXという物理エンジンを通して物理特性を制御している。まずUnityで仮想のオフィスの部屋を3次元モデルで作成し、各種パラメータの設定を行う。一つ一つ

の家具に設定するパラメータは、コライダー、慣性テンソル、質量、寸法があり、物体-物体間では反発係数と動摩擦係数、静止摩擦係数を設定する。

### (2) 部屋の設定

部屋の形状寸法は、東北大学災害科学国際研究所の国際防災戦略研究室に基づき設定した。床7m×14mの平面で高さが2.8m、一部3.5m×7mが別途壁で区切られている。

### (3) 家具配置・固定の設定

家具の配置は一般的なオフィスを参考にして、対向式(図1)、同向式(図2)、卍型(図3)の3パターンを設定した。机と本棚の数は変更をしていない。

家具固定のレベルは3段階に設定した。レベル1は家具固定を1つも行わないパターン、レベル2は本棚のみ家具固定をしたパターン、そしてレベル3は本棚に加えて、デスク、収納箱、ロッカーを固定したパターンである。固定とは床と剛で接合されているものとして、床と同様に運動するものとした。

これらのパターンを配置パターンと固定レベルに従って表4のように分類した。

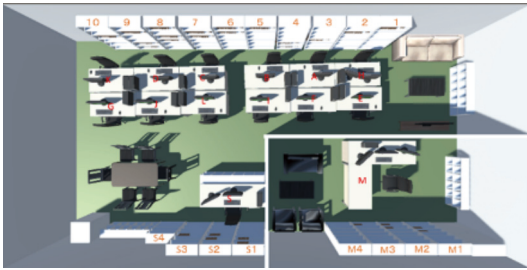


図1 対向式レイアウト

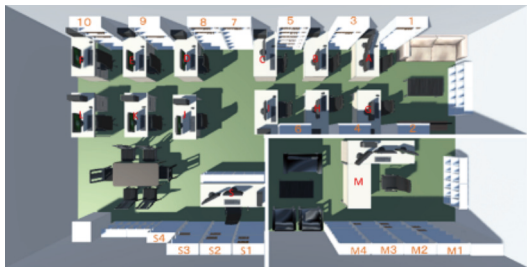


図2 同向式レイアウト

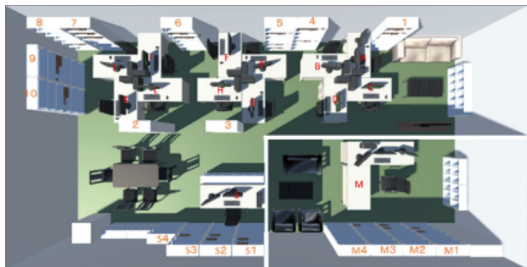


図3 卍型レイアウト

表1 部屋の設定の振り分け

		固定レベル		
		レベル1	レベル2	レベル3
形式	対向式レイアウト	A	B	C
	同向式レイアウト	D	E	F
	卍型レイアウト	G	H	I

### (4) 入力地震波の設定

入力地震応答波として、長周期パルスを含むとされている西原村小森で観測された2016年熊本地震の強震波形(以下、Ni)を用いた。また比較対象として、仙台市青葉区大倉で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の強震波形(以下、To)を用いた。それらの波形を20階建ての簡易的なS造一部RC造のモデルに入力して20階の応答波を得た(以下、Ni20とTo20)。20階建てのS造モデルの応答波を得るために、解析ソフトSNAPを用いた。ここで、Unityの部屋のX軸方向に応答波の南北方向を入力したものをNS、東西方向を入力したものをEWとする。

### (5) 出力データの設定

気象庁の震度階級では、震度2で大体の人が揺れを感じるため、震度2を基準に揺れを感じた時間を定めた。式[1]により、震度2の中央値すなわち計測震度1が2となる時の加速度aを算出すると3.39[gal]となる。加速度がこの値を超えた時間の合計が0.1秒に達した時点からの時間を「人が揺れを感じてからの時間」と定義した。

$$I = 2 \log a + 0.94 \quad [1]$$

家具ごとの危険度を測る指標の一つとして、スカラー量で比較のしやすい運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ を0.01秒ごとに出力する。また、人が揺れを感じてからのスナップ写真を1秒ごとに出力する。

## 4. シミュレーションの結果・分析

### (1) 部屋の運動エネルギー分析

部屋の運動エネルギーを設定した115個の家具の運動エネルギーの総和と定義する。揺れを感じ始めた時間から100秒後までを0.1秒刻みで観測し、観測した値の1秒ごとの最大値を図4から図7のようにグラフ化した。また部屋の運動エネルギーの最大値とその時刻を表2に示す。

対向式レイアウトに関して応答波ごとの最大値を比較すると、Niでは10.1kJ、Ni20で4.2kJ、Toで9.8kJ、To20で13.1kJとなっている。東北地方太平洋沖地震では地震動が増幅され、運動エネルギーが大きくなっていることが分かった。一方、熊本地震は増幅されていないことが分かる。これは、熊本地震が長周期パルスと同時に短周期の地震動も多く含んでいるためと考えられる。

部屋の運動エネルギーの最大値を比較すると、To20が最大で一番危険なように見える。しかし揺れを感じてから最大値が生じるまでの時間に圧倒的な差がある。NiとToを比較するとその差は68~70秒あり、第一波と比較しても21~23秒ほどある。最大値に大きな差がないにも関わらず、身を守るための動作をする時間の余裕に約18倍も差があることが分かった。

熊本地震のNiやNi20では揺れを感じ始めてから3秒程度しかないのが、健常者でも机の下にもぐることすら困難であることが想像できる。とくに本棚の危険物が飛来してくるような危険なエリアにいた場合には、損傷するリスクが非常に高くなる。机のレイアウトに関する最大値の平均を比較すると、対向式:並向式:卍型でNiが100:90:98、Ni20が100:81:106、Toが100:82:101、To20が100:80:89となった。これらの結果から、並向式配置が一番エネルギーを軽減できていることが分かった。しかし、これは机の配置とともに変更された本棚の影響が大きい可能性もある。とくに固定レベル3の場合にはNiにおいて対向式:並向式:卍型が100:104:107となっており、同向式のほうが部屋の運動エネルギーの最大値が高くなってい

る．そのため机の配置の仕方程度では危険度を著しく下げることは困難であることが考えられる．

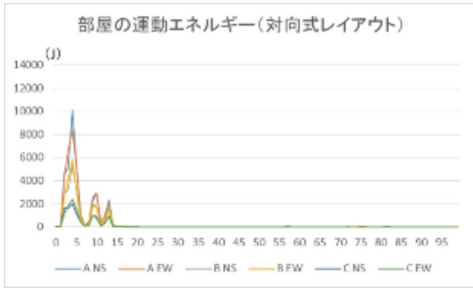


図4 Niの部屋の運動エネルギー

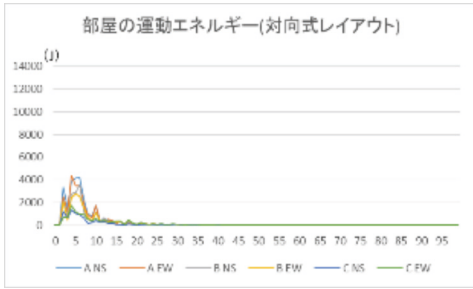


図5 Ni20に部屋の運動エネルギー

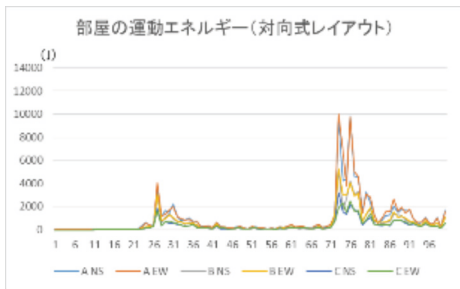


図6 Toの部屋の運動エネルギー

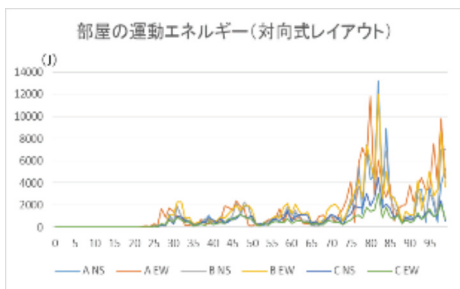


図7 To20に部屋の運動エネルギー

表2 部屋の運動エネルギーの最大値とその時刻

		Ni					
家具固定レベル		A NS	A EW	B NS	B EW	C NS	C EW
最大運動エネルギー(J)		10137.95	8349.707	5399.476	5917.832	2005.175	2491.333
時間(秒)		4	4	4	4	4	4
		To					
家具固定レベル		A NS	A EW	B NS	B EW	C NS	C EW
最大運動エネルギー(J)		9854.526	10015.47	5145.617	5364.216	3232.759	2546.358
時間(秒)		75	72	72	72	72	75
		Ni20					
家具固定レベル		A NS	A EW	B NS	B EW	C NS	C EW
最大運動エネルギー(J)		4230.007	4364.046	3552.361	2798.614	1370.752	1790.848
時間(秒)		6	4	6	5	4	4
		To20					
家具固定レベル		A NS	A EW	B NS	B EW	C NS	C EW
最大運動エネルギー(J)		13104.8	11818.46	11722.75	12015.15	4503.995	3047.438
時間(秒)		82	80	82	82	82	82

(2) 家具ごとの運動エネルギー分析

全ての応答波について115個の家具の運動エネルギーの最大値を比較した結果、無固定（固定レベル1）の時の運

動エネルギーは総じて、プリンター>重い戸棚、重い机、本棚、机>机付きの戸棚>テーブル>ソファ>コンピュータ、ソファ、TV>キャスター椅子>応接テーブル>モニター>軽い椅子>低い棚>本という順になった．プリンターは重量が重いわりにキャスターがついているので、エネルギーが高くなる．スナップ写真では、勢いよく近くのテーブルにぶつかっていることが分かった．プリンターを設置する際は特に固定が必要である．

(3) 波形分析

長周期パルス（Ni, Ni20）に関して、運動エネルギーの波形を刻み、時間を細かくすると頂点が2つあることが観察できた（図8）．部屋の運動エネルギーの波形の山の頂点2つの発生時刻とエネルギーを調べ、何倍になっているのかを計算した（表3）．固定レベル1で1.7倍、固定レベル2で1.5倍、固定レベル3で1.3倍になっていた．1つ目の運動エネルギーの頂点から平均で1.43秒後に、2つ目の運動エネルギーの頂点に来ることが分かった．防災上の観点からは、1つ目の頂点での初動の1.43秒前後にさらに大きなエネルギーが発生すること注意すべきである．

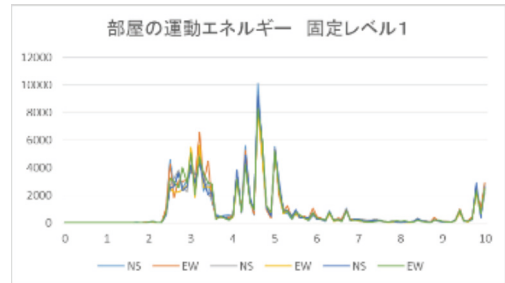


図8 部屋の運動エネルギーの最大値

表3 2つの頂点の発生時刻

レベル1	A		D		G	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW
1つ目時刻(T1)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3
1つ目運動エネルギー(K1)	5032.748	6616.898	4811.629	5626.783	4380.681	5069.4
2つ目時刻(T2)	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
2つ目運動エネルギー(K2)	10137.95	8349.707	9321.59	8164.969	9249.408	8321.974
T2-T1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6
K2/K1	2.014396	1.261876	1.937305	1.45109	2.111409	1.641609
T2-T1平均	1.433333					
K2/K1平均	1.736281					

(4) スナップ写真分析

危険性を概算するために負傷人数を1秒ごとにカウントする．「椅子の頭上に本棚や本が当たるか、机と壁に挟まれると負傷とする」と定義づけ、図9のようにスナップ写真による目視により判断した．分析の際はNSとEWのうち運動エネルギー総量の大きいほうを用いることにした．



図9 負傷者の判定

これを熊本地震のNiの9パターンに対して検証し（図10）、全人数はデスクに12人、Sデスクに1人、ミーティングテーブルに1人、Mデスクに1人、応接ソファにそれぞれ一人ずつで3人の計18人とする。

結果として最も安全と思われたのがIである。分析を行うに従い、配置の上で重視すべきポイントとして、前提として本棚を固定すること、つぎに本や本棚が落ちる位置に椅子を配置しないこと、退路をふさがないこと、そして袋小路や行き止まりにしないことが挙げられる。

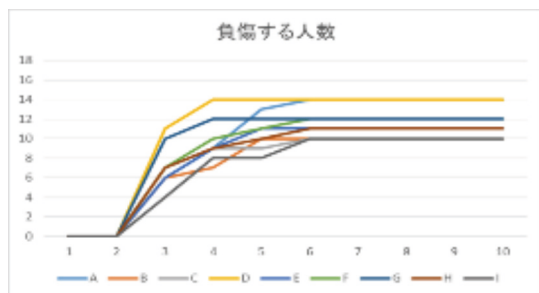


図10 負傷者人数の推移

## 5. 結論・今後の展開

### (1) 長周期パルスの特徴

家具の室内転倒シミュレーションを通して長周期パルスについて以下のことが明らかになった。

まず、長周期パルスは揺れを感じ始めてから、地上では4秒、20階では5秒ほどで部屋の運動エネルギーが最高値に達する地震波である。そして、長周期パルスによる部屋の運動エネルギーを分析すると2段階に分かれており、初めの運動エネルギーの頂点は、揺れを感じ始めてから約3.2秒で到達し、その初動から約1.4秒後に次の運動エネルギーの頂点がある。その運動エネルギーは家具無固定の場合は初めの頂点に比べ約1.7倍になり、部屋の運動エネルギーの最高値となることが多い。

また、部屋の運動エネルギーを比較すると、東北地方太平洋沖地震に比べて、最大のエネルギーを観測する間には68~70秒も差があり、第一波と比較しても21~23秒の差がある。しかし、これだけ時間差があるにも関わらず、長周期パルスの部屋のエネルギーの最高値は、東北地方太平洋沖地震の部屋の最大エネルギーと比較しても小さくない。また長周期であり、20階の部屋にも大きな被害を及ぼすことが確認できた。

### (2) 家具の固定優先度

家具の室内転倒シミュレーションを通し家具ごとの運動エネルギーを測定した結果、運動エネルギーの高いものを固定したほうが良いという前提に考慮した家具の固定優先度はプリンターが最も高かった。プリンターの運動エネルギーは極めて高くキャスターのままでは危険であった。本棚も大きな運動エネルギーを発生させるので固定したほうが良い。

### (3) 家具配置の危険度評価

家具のレイアウトは固定レベルを含めて9パターンで行い、スナップ写真分析を行った結果、最も安全と思われたのがIである。分析を行うにしたがって配置の上で重視すべきポイントは以下の事柄であることが分かった。

まずは、本や本棚が落ちる位置に椅子を配置しないことである。一見当たり前のことだが、特に長周期パルスの場合だと本棚を固定していたとしても、揺れははじめか

ら3秒で本が降ってくるのでこれが一番大切である。東北地方太平洋沖地震のような徐々に来る地震のみを想定していたならば、揺れ始めてからでも逃げることができるが、長周期パルスの場合本の危険性に気づいた時にはすでにぶつかっている。ゆえに本や本棚が落ちる位置に椅子を配置しないことが第一条件である。

次に退路をふさがないことである。机の固定がされていないと退路が机によって阻まれてしまい余震や火事による二次災害を助長しかねない。

加えて、前提であるが本棚を固定することである。本棚の運動エネルギーが高いことからわかるように頭などに当たると、死亡リスクが大幅に上がる。

さらに、席からの逃げ道を一方にしないことである。袋小路や行き止まりにすると机や落ちてきたものによって閉じ込められてしまう恐れがある。椅子からすぐ逃げられる場所に安全な場所を確保し、逃げた先に降ってきたもので怪我しないようにすることも大事である。

Iでは以上のポイントを守っているわけではないが比較的安全である。またFも本は降ってくるが机の固定により退避しやすいので比較的安全である。以上のルールを守った家具配置にすることで、安全性は高められる。

### (4) 今後の課題

本研究では家具個々や床に対して様々なパラメータを設定したが、任意で設定しているものが多く、シミュレーションの正確性を実験と比較していない。また、家具をすべて剛体として扱い、破壊や変形を考慮しないとしている。シミュレーションでは、配置パターンを3種類に設定し、机と本棚の配置を変更した。

今後の課題としては、シミュレーションの正確性を確認する実験を行い、パラメータの設定を行う必要がある。またUnityでは軟体を扱うことができないので、他のソフトを利用することも考えられる。

### 謝辞

本稿は、東北大学災害科学国際研究所平成29年度東北大学災害科学国際研究所共同研究「地域再生学に資する多次元統合可視化システムを用いた教育用コンテンツの開発」（代表：東京大学生産技術研究所 目黒公郎）の中で実施された研究報告である。記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) NHK スペシャル MEGACRISIS 巨大危機Ⅱ 第1集都市直下地震 新たな脅威, 2017.9
- 2) 金子美香, 林康裕 「剛体の転倒率曲線の提案」日本建築学会構造系論文集 第536号, 55-62, 2000年10月
- 3) 伊藤壮士, 村尾修 高齢者世帯における地震時の家具転倒危険性の実態に関する研究 地域安全学会論文集, No. 5, 2003. 11
- 4) 正月俊行, 翠川三郎, 大堀道広, 三浦弘之 超高層におけるオフィス内の家具群の地震時挙動シミュレーション 日本建築学会構造系論文集, 第620号, 2007. 10
- 5) 中島唯貴, 岡田成幸, 奥田幸平 人体動作と姿勢認識及び家具転倒軌跡判定による地震時室内3次元危険度評価システム 地域安全学会論文集, No27, 2015. 11