

豪雪時における伝統的木造2階建家屋の倒壊挙動

Collapse behavior of traditional wooden house during heavy snow

池本敏和*¹, 北浦 勝*², 宮島昌克*³, 村田 晶*¹,
Toshikazu Ikemoto, Masaru Kitaura, Masakatsu Miyajima, Akira Murata,
清野純史*⁴, 古川愛子*⁵
Junji Kiyono and Aiko Furukawa

* 博士(工学), 金沢大学助教, 理工学域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*² 工学博士, 金沢大学名誉教授, 理工学域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*³ 工学博士, 金沢大学教授, 理工学域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*⁴ 工学博士, 京都大学大学院工学研究科教授 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

*⁵ 博士(工学), 九州大学大学院工学研究院助教 建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

This study aims safety of a traditional wooden house in heavy snow fall area. In the center part of heavy snow area, there were a few kind of damage by the snow. We investigated a behavior of the house for a damage type. It is also discussed that the damage house was related to the reconstruction before a few year ago. We carried out experimental study on behavior of the wooden houses under heavy snow fall. We also conducted to collapse shape and collapse loading value for the specimen. Moreover, the model can be applied to the experimental data by using the 3 DEM. The results of the numerical method show a similar tendency with the damage distribution.

Key Words : *safety of a traditional wooden house, heavy snow fall, 3DEM*

キーワード : 伝統的木造家屋の安全性, 豪雪, 3次元個別要素法

1. はじめに

日本の北国では、豪雪によって毎年多くの死傷者が生じている。日本では、約8割の人々が木造家屋に居住し、生活している。近年、高齢化社会へと返還していくなかで、地方の雪国の人口の多くは伝統的木造2階建家屋に住み、安全に暮らすためには屋根雪下ろしなどの労力を強いられているのが現状である。

一方、豪雪時の家屋倒壊の研究はほとんど行われておらず、高橋らは屋根雪の地震時挙動に関する研究を行っているにすぎない¹⁾。

平成18年(1月5日)豪雪によって木造家屋(住家)が倒壊し、尊い命を失った。このとき、最も近い観測点での積雪量は158cmであった。倒壊後しばらくしてから積雪の密度を調査し、約4kN/m²の荷重が屋根に作用していたことがわかった。住家は木造軸組み2階建て、2階床面積は約96m²、屋根勾配は約35度であった。軒先の90cmを考慮すると、屋根全体には約240kNの重量が作用していたことになる。

本調査では、全壊家屋(住家)において測定できる範囲内で、家屋の幅・奥行き・高さ、柱や梁の幅・長さ・高さ、柱の中心間隔、軒先長さなどを測定した。6月5日の調査でも全壊家屋は、ほぼ倒壊直後と変わらぬ状態で残されていた。倒壊直後の全壊家屋の状況写真と6月5日の調査で得られた梁の高さより、倒壊時の屋根上の積雪量は約62cmであること、屋根上の雪の状況を見ると、上下で2層に分かれていることがわかった。また、住家の大屋根(棟木)が外れており、2階床の一部の損壊が大きいことが明らかになった。さらに、家屋正面の右側に破損材木が散在していたことに破壊の特徴が見受けられた。周辺の住家においても軒先が損壊していたことから、屋根には相当の重量が作用していたと考えられる。以上のことから、破壊過程がわかりやすい3次元個別要素法を用い解析を行ったところ、雪の重さに耐え切れず接合部で木材が折損し、小屋組みが落下したものと考えられる。

そこで本研究では、単純な骨組み構造模型から破壊過

程までを追うことのできる3次元個別要素法解析を用いて、豪雪時の家屋の破壊挙動について検討を行った。このとき、2階床の損傷の有無を剛性の低下に置き換えて

両者を比較し、損傷の有無による破壊メカニズムの変化についても検討する。

表1 近年の雪による石川県内の被害状況

災害年(期間)	人的被害(人)		住家被害(棟)					備考
	死者	負傷者	全壊	半壊	一部損壊	床上浸水	床下浸水	
昭和38年(38.1-38.3)	24	151	131	405	13,583	64	776	県対策本部設置
昭和52年(51.12-52.3)	5	56	11	15	704	5	35	
昭和56年(55.12-56.3)	3	60	16	12	619		138	県対策本部設置
昭和59年(59.1-59.3)	1	33	1	2	60			県対策本部設置
昭和61年(60.12-61.3)	3	40			47	1	69	
平成13年(13.1)	5	137		1	13		1	
平成18年(17.1-2)	5	24	1		3	1	6	

2. 木造家屋被害

2.1 石川県内の豪雪被害状況

石川県内の昭和38年(38豪雪)以降の被害状況を表1にまとめた²⁾⁻⁴⁾。昭和38年、56年の被害が全体的に大きいことが分かる。また、平成13年を除き最近の人的被害数が少ない、これらの多くは屋根雪下ろしによる高齢者の被害事例が目立った。昭和59年以降、家屋の倒壊による被害事例は極めて少なく、今後屋根雪下ろしを考えていく上での貴重な資料といえる。



写真5 2階屋根から見た内部



写真6 倒壊過程の予想



写真1 倒壊風景(右前より)



写真2 解雪時の被害状況



写真7 近所の軒先倒壊と積雪状況



図1 倒壊家屋の復元図

2-2 家屋被害の部材を用いたパラメータの設定

倒壊した建物は昭和19年に地元の建築業者によって建てられた。その後、倒壊した一部の個所において増改築を行っている(写真1,2,図1)⁵⁾。

倒壊家屋の主人は親と祖母を亡くし、深い悲しみと責任を感じているためか当時の状況をあまり詳しく説明してくれない。そこで、我々の把握できる限りのデータを周辺地域の支所や踏査調査から明らかにした。

また、主人の許可のもと倒壊した家屋から木材を切り出し(写真3)、実験によって解析に必要なパラメータの設定を行った。



写真3 実験用木材



写真4 倒壊時の積雪状況と被害

なお、主な構造材料や倒壊時の屋根の積雪状況はほぼ均一に分布しており、屋根の勾配に大きな偏りはなかったと考えられる。また、主人一家は数十Km離れた市街

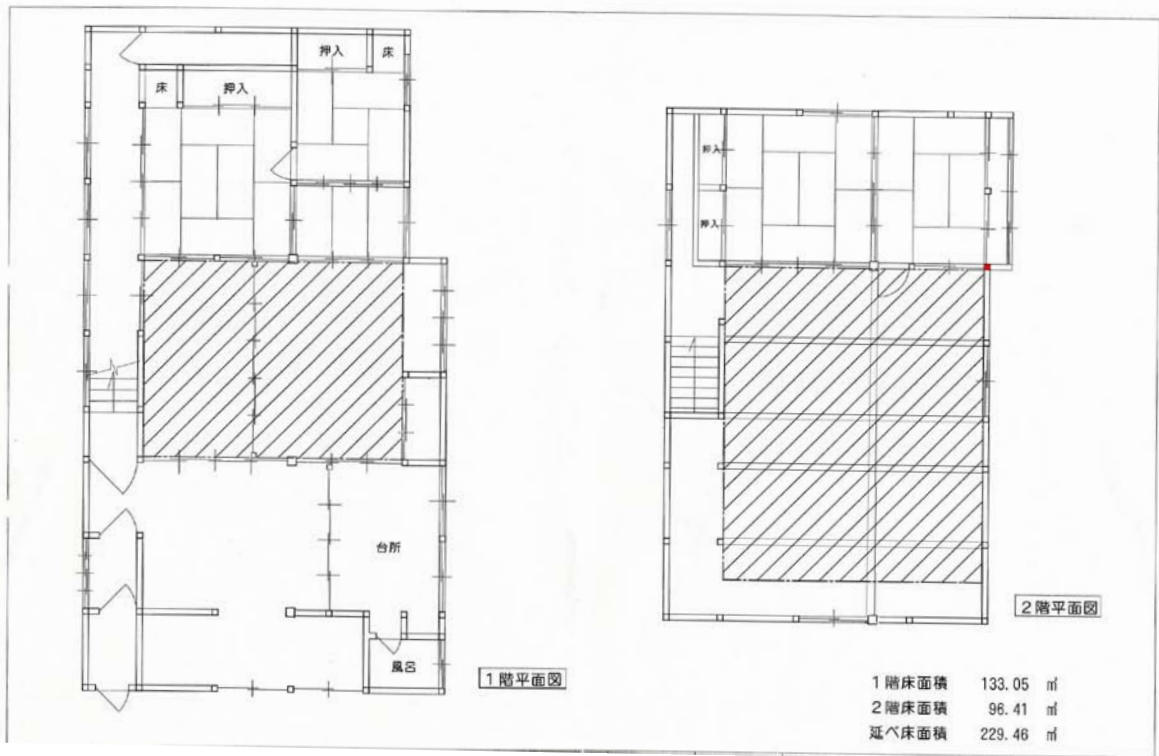


図2 倒壊家屋の復元1階、2階の平面図（ハッチ部分は吹き抜け箇所）

地に新たに住居を構え、高齢者のみがこの住居に暮らしていた。正月には、家族が家を訪れ軒先のみ雪下ろしを済ましており、今度の土日の降雪状況によって新たに屋根下ろしの有無を決定する予定だった。ちなみに家屋倒壊時の屋根雪の状態は、上下2層に分かれていた（写真4実線部分）。2層の分かれ目を実線で表した。崩壊の様子を写真5、6に、近所の軒先破損事例を写真7に示す。

ちなみに隣家（裏）では、全ての屋根雪下ろしがなされていたために、構造、屋根勾配や築年数がほぼ似ていたものの積雪による倒壊をまぬがれた。

踏査調査の結果、倒壊家屋は図2の平面構成になっており、柱や梁の主要部材の幅寸法は20cmであった。使われていた「かすがい」も普通サイズで、錆がかなり進行していたことが分かった。また、屋根の積雪密度は直接計測したところ表2のようであった⁶⁾。

写真5、6より仮定すると、以下のようなことが考えられる。

- 1) 屋根雪の重みに耐え切れず、柱が折れて抜け落ちたために2階上部が崩落した。
- 2) 屋根雪の重みに耐え切れず、屋根が崩落したときに柱も抜け落ちた。

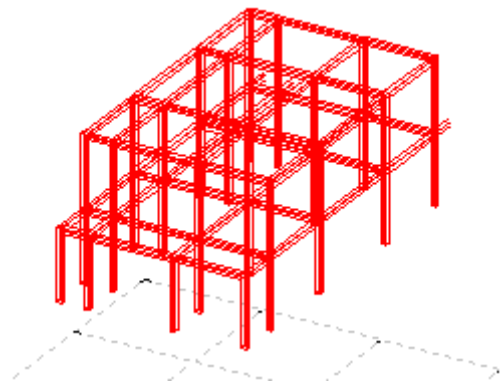


図3 家屋の要素モデル

表3 屋根雪の諸元

積雪部	深さ	単位体積重量
上部層	32cm	3kN/m ³
下部層	30cm	5kN/m ³

3. 3次元個別要素解析

このことを検証するために、解析には3次元個別要素法（以下3DEM）を使用する⁷⁾。3DEMを用いたのは、崩壊後の部材の変位や落下位置の推定にはこの解析方法が最も妥当と考えたためである。

3DEMでは、構造部材を直方剛体要素として扱う。

解析初期の段階では、各要素は接合部で連結しており、集合体としての挙動を示す。強い力が作用すると連結が切れ、各要素は離散体としての挙動を示す。各要素間には、仮想のばねとダッシュポットがあり、要素に作用する力はこれらのばねを通じて伝達される。構造物モデルの上部から、積雪モデルとして鉛直荷重を作用させ、木造家屋が積雪によりどのような挙動で倒壊するのか、という解析を行う。解析に用いた要素モデルを図3に示す。解析手順を以下に示す。

- 実際に倒壊した家屋をモデルとして解析を行う。
- 解析では、実際よりも部材数を減らし、壁量などの強度を考えないため、部材の断面積はすべて $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ でモデル化する。
- 要素の密度は、ヒノキの乾燥重量を参考にして、 $0.33 \text{ (MN/m}^3\text{)}$ 、基礎の密度は、コンクリートの平均密度を参考にして $2.1 \text{ (MN/m}^3\text{)}$ とした。
- 屋根は考えずに、2階までの解析を行った。
今回のモデルでは、軒部分の部材はモデル化せず、被害が想定された部分をモデル化し、それ以外は要素に荷重を作用させることで、モデル化を行っている。

個々の要素ごとに独立した2階常微分の運動方程式を立て、これを差分近似して時間領域で暫進的に解くことにより要素の挙動を求め、その集合体として構造物の動的挙動を解析する。1自由度系の振動方程式より、ばね定数は $k = m\omega^2$ 、減衰定数は $c = 2mh\omega$ で決定する。要素間のばねは並列として計算する。ここで、 m は質量、 ω は固有円振動数、 h は系の減衰定数である。合成ばねのばね定数は以下のように求める。

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (1)$$

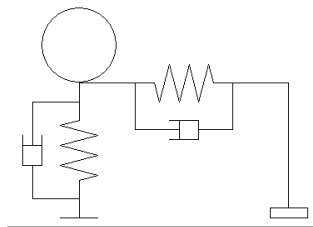


図4 要素ばねモデル

今回の解析では、前述の木材要素実験とほぼその深さを測定し、ばねは 100mm 離れたら切れることとし、ばね強さは合成ばねのばね定数の $1 \sim 10\%$ で決定する。

仮定したばねや家屋のパラメータを変化させたり、崩壊モードの異なる解析を行い、ここでは上記に述べた2仮定における解析モデルの検討を行った。最初に部材間強度を一定にした場合、これは改築などを行わなかった場合に相当する。先の部材実験においても、一端破断した接合部を再度実験したときには、金物補強を施しても2割程度の強度低下が見られた。

経年劣化を考慮するとさらに強度は低下する可能性が高い。また、対象とした家屋は築後65年も経過しているため、壁構面の強度は考慮しないこととした。

4. 解析結果

解析結果を図5に4段階の時間を取り出し示した。この場合には、柱の変形が家屋の内側に大きく表れており、70秒から80秒の間に2階部分が完全に圧壊に至っており、実際の内部の崩壊の様子と調和的である。しかし、家屋の正面右側への崩壊木材が見られず、実際の崩壊状況と異なっているところもある。

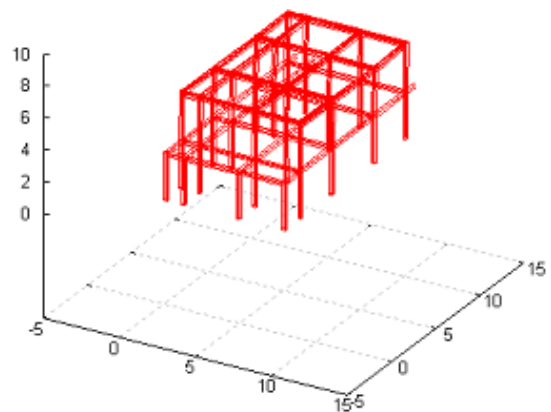


図5 解析結果 (通常モデル 30秒)

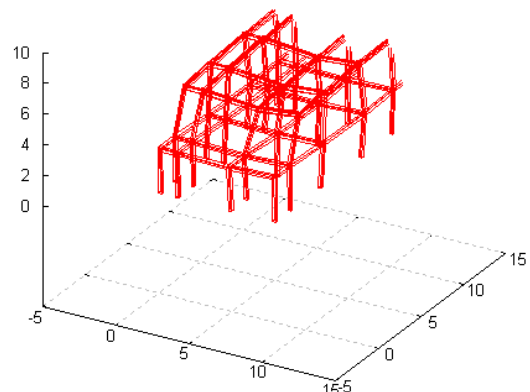


図5 解析結果 (通常モデル 70秒)

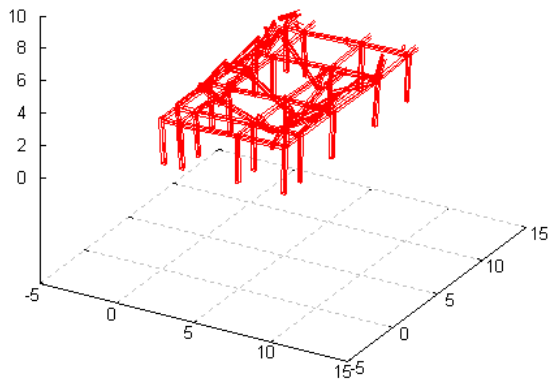


図5 解析結果 (通常モデル 80秒)

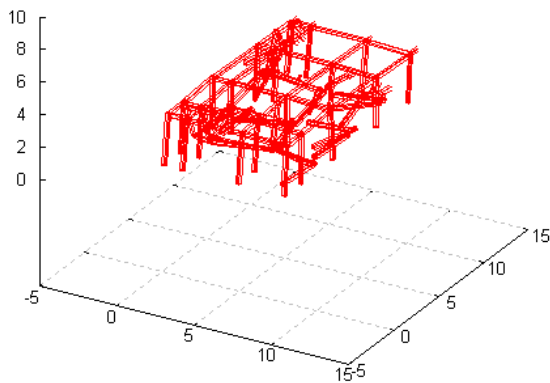


図5 解析結果 (通常モデル 90秒)

雪荷重を一気に作用され、後は家屋の抵抗強度にもたせているので、実際の崩壊に至った時間は分からないが、隣家の住人の話によるとひび割れのような音の後、1分間くらいでドンとした大きな音がしたことから、崩壊証言の時間が少しずれていると考えられる。

また、解析結果からは明確ではないが、この接合部は完全なピン結合や剛結合ではなく、その中間程度の剛性を持っている。また、ロッキング現象などの表現も表すことができる。しかしモデルの要素自身が剛体なので、構造がしっかりしているときには、全体として剛結合の挙動に近く見える。これは昔、梁に砂袋を載せて荷重—変位の測定を行ったときに、モーメント・スプリングを用いて木材の接合部をモデル化したことからヒントを得て、どちらにも偏らないようなモデルとして考えた。

したがって、このモデルの崩壊過程には若干の差異が現れていることから、家屋の材料間の強度が均質では、実際の被害のような現象は現れないものと考えられる。

先にも述べたが、この家屋では新築後に洗濯物干し場を兼ねたテラスの改築を行っている。この際、部材を切り、再接合してテラス部分を増設したことが、業者の証言から分かった。

そこで本研究では、この部材間の要素剛性を3割程度低下させ、後は前の解析仮定と変えずに解析を行った。

その結果を図6に示す。時間30秒まではほぼ変形が見られない。しかし通常モデルが70秒での挙動に対し、改築モデルでは、50秒から両者の変形性能に顕著な差を見ることができる。また後者のモデルでは、60秒には2階部分の完全な崩壊が現れており、解析時間70秒においては、部材が右側にも飛び散り、実際の崩壊に似た現象が見取れる。

特に、家屋正面の右側に部材が散乱している様子は、積雪が無くなった時期に現地調査したときの様子と極めて調和的であり、崩壊時間もほぼ証言と合致している。

残念ではあるが、改築するとき、もう少し部材間の強度を上げ、ステンレス金物のような劣化のない接合材を使用していたならば(当時は一般用建築材料でとして、鉄の「かすがい」が使われていた。)このような惨事は防げたかもしれない。

この解析には、多くの仮定が含まれており、必ずしも妥当でない部分があるかもしれない。しかしながら、実際に崩壊した事例を基に、出来るだけ詳細に調査し、家屋モデルの崩壊過程を再現出来たことは意義のあるものと考えられる。このような事例を多数解析を行うことで、

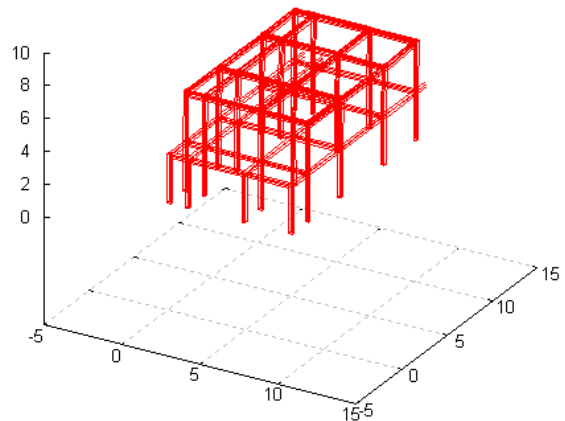


図6 解析結果 (改築モデル 30秒)

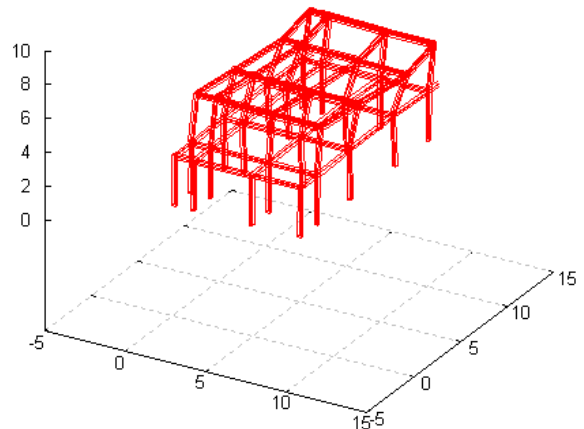


図6 解析結果 (改築モデル 50秒)

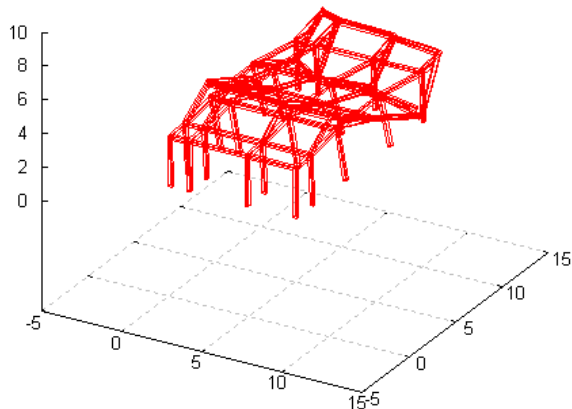


図6 解析結果（改築モデル 60秒）

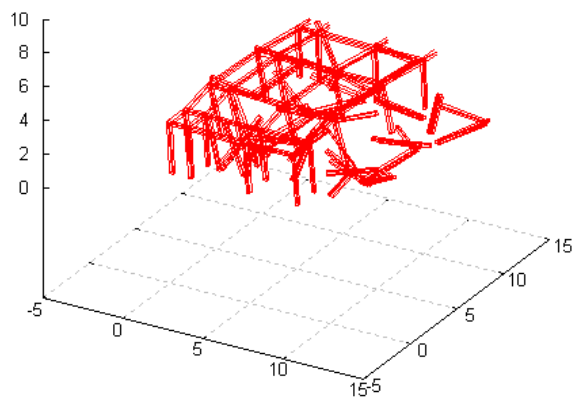


図6 解析結果（改築モデル 70秒）

本解析の妥当性を検討できるものと考えている。一方、人的被害が発生した家屋の被害データは収集しにくい状況になりつつある。これは「個人情報保護法」によるデメリットであるともいえる。このことを留意した上でデータの集積が行われることが、この調査結果からも感じとれた。情報開示によって進む研究分野が多数存在することを念頭において、関係者へは情報開示に努めていただけるように努力していただけることを願っている。

5. まとめ

本研究では、簡単な骨組み構造モデルから3DEM解析を用いて、大雪時の家屋の破壊挙動について検討を行った。このとき、実際の被害事例と比較し、部材間の損傷の有無による家屋の破壊メカニズムの変化について検討した。得られた成果を要約する以下のようなものである。

2. では、倒壊した建物から把握できる限りのデータを周辺地域の支所や踏査調査から明らかにした。主人の許可のもと倒壊した家屋から木材を切り出し、実験に

よって解析に必要なパラメータの設定を行った。また、屋根上の積雪に関する情報を推定した。

3. では、3DEMの構造部材を直方剛体要素として扱い、各要素間には、仮想のばねとダッシュポットがあり、要素に作用する力はこれらのばねを通じて伝達されることを説明した。また、構造物モデルや解析手順を示した。

4. では、本解析で得られた結果をまとめた。そこで、家屋の改築モデルと非改築モデルの差異を比較して、両者の崩壊挙動のシミュレーションを行った。その結果、改築モデルの脆弱性が明らかになった。

5. では、本研究の全体を簡単にまとめた。このことから、急速に進む高齢化社会の伝統的木道家屋における積雪の安全性を見直す必要性を示唆することができる。なぜなら、本文は現在の核家族化した雪国の深刻な問題を提唱しており、伝統的木道家屋に住む高齢者へは現行の建築基準法の雪荷重の低減係数は危険な数値と考えるべきかもしれない。

謝辞

本研究を実施するにあたり、本学元学生の金子 愛さんにご協力いただきました。また、貴重な資料をいただきました支所の克雪係ならびに実験材料を提供していただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林卓照, 高橋 徹, 高梨 一: 個別要素法による屋根雪の滑動と破断の再現と応答性状, 雪氷研究大会講演概要集, C4-012, p. 226, 2008.
- 2) 気象庁: 平成18年豪雪,
<http://www.data.kishou.go.jp/bosai/report/2005/200512/gousetsu18.html>
- 3) ほっとほくりく: 平成18年豪雪特集,
http://www2.hokurikutei.or.jp/backnum/h18_gousetsu/document/02.html
- 4) 内閣府: 平成18年豪雪による被害状況などについて(第9報), 内閣府, pp. 1-6, 2006.
- 5) 池本敏和, 北浦勝, 宮島昌克: 石川県の被害, 雪工学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 132-133, 2006.
- 6) 石川県消防防災課: 平成17年12月からの大雪・暴風雪に関する被害状況について, pp. 1-2, 2006.
- 7) 清野純史, 原口裕子, 古川愛子: 個別要素法による地震時の建物倒壊と内部空間被災度について, JCOOSSAR 2003 論文集 [W1-04A 論文], pp. 39-76, 2003.

(2009年8月7日受付)