一般財団法人新潟県建設技術センター

令和元年度 研究助成事業報告書

雪国の防災・減災を目指した屋根雪荷重のリアルタイム診断技術 に関する事業

> 新潟工科大学 涌井将貴 東京大学 伊山潤 防災科学技術研究所 本吉弘岐

1. 本事業の背景と目的

急な大雪や積雪後の降雨により、想定以上の荷重 が作用した結果、建築物の損傷、屋根の崩落といっ た被害事例が報告されている^{1),2)}。また、平成25年 ~31年の7年間における全国で発生した雪による死 亡者の内訳を図1に示す³⁾。図1より、雪下ろし等、 除雪作業中の事故、あるいは倒壊した家屋の下敷き の合計が全体の7割以上となっている。こういった 死亡事故や建物の被害は、積雪深による屋根雪質量 の評価、雪下ろしの必要性の判断が困難であること が原因の1つとして考えらえる。以上から、屋根に 作用する積雪荷重を適切に評価することで、その情 報を管理者がリアルタイムで確認し、雪下ろし実施 や建物の安全性を判断するのに利用できることが望 まれる。

そこで本事業では、IoT技術を活用し、従来より も安価なセンサを建築物に設置し、計測データを蓄 積、解析することで、屋根上積雪荷重をリアルタイ ムで診断する技術開発を目指す。



2. 研究方法

2.1 固有振動数による屋根上積雪質量の推定方法

建築物の固有振動数*f*は、建物の質量*m*と剛性*k*から、次式によって算出される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

図2に示すように、(a)積雪なしと比べて(b)積雪時 には屋根上に作用する質量が増加し、振動系の質量 も増加することで、固有振動数の値はそれに応じて 小さくなることが予想される。すなわち、剛性は変 化せず、屋根上の積雪によって、建物の質量のみが 変化すると仮定した場合、固有振動数の変化を追跡 することで、積雪質量を推定できるものと予想され る。

積雪時の建物質量を m'とすると、(1)式より積雪 時の固有振動数 f'は、

$$f' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m'}} \tag{2}$$

となる。(1)、(2)式より積雪前後での振動数比は、

$$\frac{f'}{f} = \sqrt{\frac{m}{m'}} \tag{3}$$

である。ここで、屋根上積雪質量を *m*_{snow} とする と、

$$' = m + m_{\rm snow} \tag{4}$$

であるから、(3)、(4)式より屋根雪質量 m_{snow} は、

m

$$m_{\rm snow} = \left\{ \left(\frac{f}{f'}\right)^2 - 1 \right\} m \tag{5}$$

として求められる。すなわち、(5)式から屋根雪質量 を推定するには、振動数fで振動する際に有効とな る建物の質量mと、積雪前後での振動数を把握する 必要がある。



2.2 加速度計測による固有振動数の算出方法

あらかじめ対象建物に加速度計を設置し、常時微動を計測する。計測した加速度時刻歴記録を高速 フーリエ変換(FFT)し、フーリエスペクトルを算 出する。算出したフーリエスペクトルから、最も小 さい卓越振動数を選択する。選択した卓越振動数を その時点での固有振動数とする。

2.3 計測対象建物と計測システム概要

本研究では、計測対象建物として、①木造試験小 屋、②木造倉庫、③鉄骨造体育館の3種類の建物を 対象とした。冬期前にあらかじめ対象建物に加速度 計を設置し、計測データをリアルタイムでサーバー 用 PC に蓄積する。全ての建物で使用する加速度計 の図面と写真を図3に示す。加速度計は、比較的価 格が安価である MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)型加速度センサ ADXL355 と Raspberry Pi Zero WH を組み合わせた構成となっており、収納用 のケースを製作した。ADXL355 は3軸計測が可能な 加速度センサであり、計測した加速度記録を1時間 ごとに Raspberry Pi Zero WH からネットワーク経由 でデータサーバ用の PC に転送する設定となってい る。サンプリング周波数は 125Hz、測定レンジは ±1.5G、時刻同期は Network Time Protocol (NTP) に よって行った。以降、加速度計あるいは MEMS 型加 速度計といった場合は、この製作した加速度計を指 すこととする。また、計測システムとして、計測対 象建物ごとに、加速度計、サーバ用 PC1 台、および 無線ルータ1台が必要となる。



図3 加速度計

3. 木造試験小屋

3.1 建物概要

計測対象とする木造試験小屋は、新潟県長岡市に ある防災科学技術研究所雪氷防災研究センターに設 置された、屋根雪に関する実測を目的とした計測用 の小屋である。図4に示すように、梁間(EW)方向 が2間、桁行(NS)方向が1間、軒までの高さが 2,000mmとなっており、3寸勾配の切妻屋根を持 つ。図5(a)あるように、屋根を含む小屋組と軸組は 縁が切ってあり、4隅の柱の上に荷重計を設置し、 小屋組の質量を計測できるようになっている。な お、図面から算出した試験小屋の質量は、小屋組が 655kg、軸組が522kgとなっている。ただし、雨どい や竣工後に設置した各種計測器や設置に必要な治具 の重さは含まれていない。

3.2 土のうを用いた事前計測

3.2.1 計測概要

冬期前の事前計測として、土のうを用いた実証実 験を行った。固有振動数を算出するため、図 5(a)に 示すように、小屋組中央の梁上に加速度計を1台設 置した。さらに今回実施した事前計測では、製作し た加速度計の計測精度を評価するため、高精度の サーボ型加速度計(株式会社共和電業:ASQ-D-1) も設置し、計測した。サーボ型加速度計は、1台で 計測可能な方向が1方向のみであるため、NS 方 向、EW 方向、UD(鉛直)方向の3軸方向を計測す るために3台設置している。また、垂木の変形角を 計測することを目的として、図 5(b)に示すように、 北側から2本目の垂木両端の側面に1台づつ、計4 台の加速度計を設置した。

3.2.2 計測計画

1 袋当たり 10kg の土のうを 64 袋用意し、図 6 に示 すような 7 パターンの土のう載荷状況ごとに常時微 動計測を実施した。パターン 1 から順に 15 分間の常 時微動を計測する。なお、パターン 1、7 はどちらも 土のうなしであるが、土のう載荷前と後での比較と して、別のパターンとした。図 7 に土のうを載せた 様子を示す。



図4 建物概要





(a)外観(b)屋根上図 7 土のう載荷の様子

3.2.3 パターンごとの振動数変化

パターンごとに計測した常時微動計測結果から、 算出した固有振動数をまとめたものを表1に示す。 なお、ここでは、MEMS型加速度計とサーボ型加速 度計のNS方向のみのを比較することとした。

表1より、加速度センサの種類によらず、土のう の質量が増加すると、それに応じて振動数が減少す ることが確認できた。また、サーボ型と MEMS 型で 振動数に大きな差は生じておらず、MEMS 型加速度 計でも十分な精度で計測可能であることがわかっ た。一方で、どちらのセンサにおいても、パターン 1よりもパターン7の振動数が低下していることが わかった。パターン1とパターン7はどちらも土の うを載せていない状況であるものの、試験小屋に荷 重が作用する前後で、試験小屋の剛性に影響を与え た可能性が考えられる。今後より詳細な検証が必要 である。

3.2.4 建物質量と屋根上質量の推定

第2.1節で述べたように、本事業で提案する手法 で屋根雪質量を推定するためには、積雪前の振動数 で振動する際に有効となる建物の質量を把握してお く必要がある。一般的に、図2に示したような1質 点系に置換する場合、建物高さの半分より上部の質 量を有効質量mとして考慮する。今回の試験小屋の 場合、図面の情報から算出した質量は、小屋組が 655kg、軸組が522kgであるから、質量mは916kgと なる。

ここで、(5)式を建物質量 m について解くと、

$$m = \frac{m_{\text{snow}}}{\left\{ \left(\frac{f}{f'}\right)^2 - 1 \right\}}$$
(6)

となる。すなわち、屋根雪質量 m_{snow} が既知であれ ば、建物の質量 m が推定できる。表1の結果を基 に、 m_{snow} を土のう質量として、(6)式から建物質量 mを推定する。パターン1の際の振動数を積雪前の 振動数fとして、建物質量を推定した結果を表2に 示す。

表2より、パターンごとの推定質量の平均値はどちらも1,000kg程度となっており、図面から算出した質量916kgよりも1割ほど過大評価となってい

る。しかし、木材の含水率や竣工後の各種計測器や 治具の質量を考慮すると、誤差は5%程度ではない かと考えられる。今回の試験小屋では、一般的な建 物質量の算出方法で問題はないものと思われる。

また、サーボ型、MEMS型ともに、土のうの載荷 パターンが等分布配置であるパターン3、6の方が偏 分布配置であるパターン2、4、5よりも推定質量が 大きくなる傾向にある。特に、最も西側と東側で土 のうの質量差が大きくなるパターン4では、推定質 量が最も小さくなっている。すなわち、屋根上に作 用する質量に偏りが生じると、剛性あるいは振動 モードに影響を与える可能性が考えられる。そのた め、積雪なしの状況を等分布と考えると、建物質量 はパターン3とパターン6の推定値の平均によって 定めることが妥当と考えられる。そこで、建物質量 をパターン3、6の平均値として、屋根上の土のう質 量を推定した結果を図8に示す。横軸を実際に載せ た土のうの質量、縦軸を(5)式により推定した土のう の質量とし、破線は±10%の範囲を示す。

図8より、おおよそ誤差は10%以内に収まってい るが、荷重が最も偏っているパターン4は大きく過 大評価となっている。偏分布荷重は過大評価となる 傾向を示しているが、このことは偏分布荷重では、 等分布荷重と比べて構造的に不利となる場合がある ことを考えると、雪下ろしを判断する指標としては 安全側の評価といえる。また、サーボ型よりも計測 精度が劣ると予想された MEMS 型センサでも、提案 手法によって屋根上に作用する質量を推定するのに 十分な性能であることがわかった。

表1 パターンごとの振動数変化

パターン	土のう 質量(kg)	NS 方向の サーボ型 f	振動数(Hz) MEMS型f.	振動数比 <i>f_m/f_s</i>
1	0	14.43	14.30	0.99
2	160	13.40	13.25	0.99
3	320	12.85	12.63	0.98
4	320	12.37	12.23	0.99
5	480	11.83	11.70	0.99
6	640	11.40	11.24	0.99
7	0	14.26	14.15	0.99

表2 建物質量の推定結果

パターン	土のう哲豊(1-a)	推定質量(kg)			
	上の7頁里(Kg)	サーボ型	MEMS 型		
2	160	998	972		
3	320	1,223	1,140		
4	320	887	873		
5	480	985	973		
6	640	1,062	1,038		
全位	体の平均値	1,031	999		
パターン	ン3、6の平均値	1,143	1,089		



3.3 冬期中の計測

3.3.1 計測概要

前述の第3.2節の結果より、製作した MEMS 型加速度計でも十分に屋根上質量を推定可能であることがわかったため、冬期中の計測においては、MEMS型加速度計の計測結果のみで検証する。冬期中の計測としては、2019年12月23日から計測を開始した。しかし、2020年2月11日午前6時頃に計測が停止し、計測再開が2月14日午前10時頃となったため、その間は計測データが存在しない。

3.3.2 計測結果

ここでは、2019年12月27日から2020年2月29 日までの梁上に設置した加速度計によって計測され た各方向の加速度記録を、2の16乗(=65、536) のデータ数(およそ9分)でフーリエスペクトルを 算出し、ウィンドウ幅0.3HzのParzenウィンドウで 平滑化後、卓越振動数を求め、それを固有振動数と した。なお、フーリエスペクトルにおいて、明確な ピークが判断できな場合は無視することとした。固 有振動数の時間変化を図9に示す。横軸が日時、縦 軸が振動数を示しており、プロットが存在しない期 間があるのは前述したように、計測が停止していた ためである。

図9より、NS(桁行)方向とEW(梁間)方向 に ついてはばらつきが小さいものの、UD(鉛直)方向 ではばらつきが大きい。ただし、どの方向において も、振動数が減少し、その後増加するような振動数 の時間変化の傾向は概ね一致している。ここで、各 計測方向で基準となる振動数fを定め、振動数比 flf'の時間変化を比較する。基準となる振動数f は、積雪が生じていない 2019年12月27日の1日分 のデータの平均として算出することとした。算出し た基準振動数を表3に、振動数比 flf'の時間変化 を図 10に示す。

図 10 において、図 9 と同様に NS 方向と EW 方向

に比べて UD 方向ではばらつきが大きいことがわか る。一方、振動数比の時間変化は計測方向によらず 同様の傾向を示しており、屋根上積雪量の変化に応 じて振動数が変化しているものと予想される。そこ で、2019年12月27日から2020年1月10日の期間 において、(5)式により推定した屋根上積雪質量、お よび荷重計による計測結果を図11に示す。なお、ど ちらの値も屋根の水平投影面積で除し、単位面積あ たりの質量としている。比較資料として、雪氷防災 研究センター内の露場で計測された地上積雪質量も 併せて示す。



表3 基準となる振動数f

計測方向	振動数f(Hz)
NS(桁行)方向	14.13
EW(梁間)方向	19.91
UD(鉛直)方向	27.75



図10 振動数比 f/f'の時間変化



図11より、計測方向ごとにばらつきはあるものの 推定質量は、荷重計による計測結果と同様の傾向を 示している。NS方向は、荷重計と比較して過小評価 となっており、むしろ地上積雪質量との相関が強 い。一方で、EW方向とUD方向は、NS方向に比べ るとばらつきが大きく、荷重計よりも過大評価とな る傾向がある。計測方向によって、適切な建物質量 が異なる可能性が考えられる。

また、地上積雪質量がゼロとなる1月7日以降に おいても、荷重計の値がゼロとなっていない。実際 に1月11日以降において、屋根上の積雪がゼロと なったにもかかわらず、荷重計の値はゼロとなって いないことがわかっている。荷重計に一定以上の値 が長期間作用すると、正しく除荷されていない可能 性が考えられる。荷重計の計測結果について、今後 検証が必要である。

4. 木造倉庫

4.1 建物概要

対象建物は、新潟県十日町市にある2階建ての木 造倉庫である。図12に倉庫の概要を示す。屋根は3 寸勾配の切妻で、妻面が東西方向を向いている。屋 根面は梁間方向が3,970mm、桁行方向が5,840mmで あるため、屋根面の水平投影面積は約22.2m²とな る。



4.2 計測概要

4.2.1 加速度計測

図 12 に示すように、加速度計を計3箇所、土 台、2 階床、屋根組の小梁に1台ずつ設置した。計 測器は2019年12月26日夕方から稼働し、現在まで 計測を継続している。しかし、無線ルータとサーバ 用 PC のネットワークの接続状況が悪く、無線接続 期間中において、何度か計測が停止する事態が生じ た。そのため、2020年2月11日から、ルータと PC を有線で接続した。有線接続にしてからは、計測が 停止する事態は生じていない。

4.2.2 屋根上積雪量の計測

この建物については、加速度だけでなく、屋根上 の積雪量の計測も行った。神室型スノーサンプラー (直径 5cm)を使用し、積雪深と雪の質量を、屋根 上の積雪状況に応じて複数回計測した。

4.3 計測結果

4.3.1 スノーサンプラーによる積雪量

スノーサンプラーによる積雪量の計測では、1度 の計測において、複数箇所でのサンプリングを実施 した。サンプリング位置を図13に、計測結果を表4 にそれぞれ示す。図13の丸数字は計測日ごのサンプ リング位置を示しており、表4の丸数字と一致して いる。積雪深と雪質量はサンプラーによって計測し た数値であり、平均積雪深と平均雪質量はサンプリ ング位置の平均である。また、雪質量は、(平均雪質 量×屋根面積/サンプラー面積)で算出した屋根上積雪 質量であり、雪密度は雪質量を屋根面積と平均積雪 深で除した値である。また、雪の状態として、屋根 上の積雪がゼロの状態から降雪し、その後すぐに計 測した場合は新雪、しばらく経過した、あるいは屋 根上に積雪がある状態から降雪が生じた場合は、融 雪としている。



表4より、降雪後すぐに計測し、雪状態が新雪に 近かった計測日(No.1、7)では、雪密度が100(kg/m³) 以下となっており、おおよそ新雪の雪密度となって いる。一方、その他の計測日では、120~250(kg/m³) の範囲で値がばらついており、融雪や圧密、降雪に より時々刻々と変化していることが観察できる。今 冬のサンプリングでは、雪密度が300(kg/m³)以上と なる計測日はなかったものの、No.3とNo.5の計測 日では、積雪深が2倍程度異なるにもかかわらず、 雪質量は同程度となっており、積雪深のみでは屋根 雪の質量を正確に評価することはできないことがわ かる。

また、サンプリング位置を屋根面の北側と南側で 分けて平均積雪深を算出した結果を図 14 に示す。図

No #+300 P		積雪深(m)			雪重量(g)			平均積雪深	平均雪重量	雪重量	雪密度	프라이슈 삼방		
		1	2	3	4	1	2	3	4	(m)	(g)	(kg)	(kg/m³)	当1人思
1	2020/02/06	0.45	0.45			70	82			0.450	76.0	859.6	86.0	新雪
2	2020/02/07	0.35	0.3	0.45		97	73	90		0.367	86.7	980.2	120.4	融雪
3	2020/02/10	0.55	0.65			147	146			0.600	146.5	1,656.9	124.4	融雪
4	2020/02/11	0.55	0.58	0.65		126	185	166		0.593	159.0	1,798.3	136.5	融雪
5	2020/02/14	0.25	0.3	0.35		132	128	181		0.300	147.0	1,662.6	249.6	融雪
6	2020/02/19	0.3	0.25	0.3		78	74	102		0.283	84.7	957.6	152.2	融雪
7	2020/02/28	0.2	0.2	0.2	0.2	18	40	22	37	0.200	29.3	330.8	74.5	新雪

表4 積雪量の計測結果

14より、南側に比べて北側の積雪深が大きい傾向が わかる。南側は北側に比べて日射量が多く、融雪が 進むため、北側よりも積雪深が小さくなるものと考 えられる。ただし、今冬は積雪量が少なかったた め、あまり多くの計測が行えなかったことや、屋根 面には勾配があること、屋根面を乱さないよう軒近 くしかサンプリングできなかったこと、などにより 計測上の誤差がある程度は含まれれているものと思 われる。今後も引き続き計測を行い、データを蓄積 していく必要がある。



4.3.2 加速度計測による振動数の時間変化

ここでは、2019年12月27日から2020年2月29 日までの小屋組の小梁に設置した加速度計で計測された記録についてのみ検証する。第3章の試験小屋 と同様に、各方向の加速度記録を2の16乗(= 65、536)のデータ数(およそ9分)でフーリエスペ クトルを算出し、ウィンドウ幅0.3HzのParzenウィ ンドウで平滑化後、卓越振動数を求め、それを固有 振動数とした。なお、フーリエスペクトルにおい て、明確なピークが判断できな場合は無視すること とした。各方向の固有振動数の時間変化を図15に示 す。横軸が日時、縦軸が振動数を示しており、プ ロットが存在しない期間があるのは前述したよう に、計測が停止していたためである。

図 15 より、NS(梁間)方向については、おおよ

そ 5Hz 以下で変化しており、ばらつきが小さい。一 方、EW(桁行)方向、UD(鉛直)方向の順に振動 数のばらつきが大きくなっていく。ただし、どの方 向においても、振動数が減少し、その後増加する時 間変化は概ね一致した傾向を示している。第3章の 試験小屋と同様、各計測方向で基準となる振動数fを定め、振動数比 f/f'の時間変化を比較する。基 準となる振動数fは、積雪が生じていない 2019 年 12 月 27 日の1日分のデータの平均として算出すること とした。算出した基準振動数を表 5 に、振動数比 f/f'の時間変化を図 16 に示す。



図15 固有振動数の時間変化

表5 基準となる振動数 f

計測方向	振動数f(Hz)		
NS(梁間)方向	4.47		
EW(桁行)方向	10.55		
UD(鉛直)方向	23.63		

図16において、図15と同様にNS→EW→UDの順 でばらつきが大きいことがわかる。一方で振動数比 の変化は計測方向にかかわらず同様の傾向を示して おり、屋根上積雪量の変化に応じて振動数が変化し ているものと予想される。また、1月4日前後での 振動数比では、NS方向が最も小さく、EW方向と UD方向は概ね同程度の値となっている。一方、2月 8日~2月15日の期間においては、振動数比の最大 値は、EW方向が最も大きく、NS方向とUD方向は 同程度の値となっている。計測方向による影響は今 後より詳細に検討する必要がある。



4.4 屋根上積雪質量の推定

屋根雪質量の推定にあたり、第3章と同様、建物 質量を算出する。建物質量の算出には、屋根上に作 用する質量が等分布と考えられる計測データを用い る。表4より、屋根上積雪状況が新雪であり、積雪 分布に偏りが少ないと考えられる No.1 と No.7 の雪 質量を用いて建物質量 mを推定する。(6)式を用いた 建物質量の推定結果を表6に示す。なお、固有振動 数f'は、サンプリングした計測時間の直近のデータ を用いた。表6より、どちらの計測日の結果でも建 物質量は同程度の値となったため、建物質量 mは 1,266kg とする。ここで、推定した建物質量 mと基 準となる振動数fを用いて、最も振動数比のばらつ きが小さい NS 方向の計測結果を用いて屋根雪質量 を推定する。

表6 建物質量の推定結果

No	計測日	固有振動数 f'(Hz)	建物質量 m(kg)
1	2020/02/06	3.45	1,265.6
7	2020/02/28	3.98	1,266.4

推定した屋根雪質量とサンプラーによる雪質量を 図17に示す。併せて、比較参考として、対象建物か ら最も近いアメダスの観測地点における積雪深を示 す⁴)。図17より、推定した屋根雪質量とサンプラー の数値は概ね一致しており、地上積雪深の増減とも 同様の傾向を示していることから、提案手法によっ て十分な精度で評価できている。しかし、サンプ ラーによる計測回数が少ないこともあり、評価精度 向上に向けて、サンプラーの計測回数の増加や屋根 上の積雪状況の記録を取る必要がある。また、NS 方 向以外の計測記録や、2 階床および土台に設置した 加速度計による計測記録を活用することで、精度向 上や偏分布の把握など今後の課題としたい。



5. 鉄骨造体育館

5.1 建物概要

対象体育館は、新潟県柏崎市の高田コミュニティ センターおよび南鯖石コミュニティセンターに併設 される鉄骨造体育館とした(以下、体育館1、体育 館2とする)。それぞれの体育館の外観・内観の写 真を図18に示す。どちらも基礎が鉄筋コンクリート (RC)造、上部構造が鉄骨造からなるSタイプの架 構形式であり、桁行方向がブレース構造、梁間方向 が山形ラーメン構造、屋根は3寸勾配となってい る。体育館1は1983年に竣工し、2005年にステー ジなどの増築工事が行われている。体育館2 は、1974年に竣工し、2013年に改修工事が行われて いる。



(c)体育館2 外観

観 (d)体育館2 内観 図 18 体育館写真

5.2 固有値解析

計測実施にあたり、事前検討および計測結果との 比較検証のため、固有値解析を行った。各体育館の 設計図面から、一貫構造計算ソフトウェア SuperBuild/SS7によって図19に示すような解析モデ ルを作成し、作成した解析モデルを3D・ DynamicPRO/SS21に取り込んで固有値解析を行っ た。どちらの体育館も露出柱脚であるため、柱脚は 回転バネとしてモデル化されている。ここでは、柱 脚を回転バネとした場合と固定とした場合の2種類 について解析を行った。表7に固有値解析結果を示 す。表7より、どちらの体育館も柱脚を回転バネと した場合よりも固定とした場合の方が振動数が大き くなっている。梁間方向が桁行方向よりも増加する 割合が大きいのは、桁行方向はブレース構造である ため、柱脚の固定度の影響が少ないためだと考えら れる。

表7 固有值解析結果(Hz)

	体育	館1	体育館2		
方向	柱脚回転 バネ	柱脚固定	柱脚回転 バネ	柱脚固定	
梁間	2.58	4.29	3.12	5.01	
桁行	3.49	3.75	7.14	7.28	

5.3 計測概要

図20に示すように、各体育館とも、梁間方向の中 央1構面を対象として、柱頭2箇所、1F床1箇所の 計3箇所に加速時計を設置し、柱4断面、梁6断面 に1断面あたり4枚の半導体ひずみゲージを貼付し た。ひずみゲージは、ひずみ基板と Raspberry Pi Zero WH を組み合わせた計測装置に接続されてお り、1つの断面を計測するのに1台必要となる。 データの蓄積方法は加速度計と同様、ネットワーク 接続により、サーバ用 PC にデータが転送される。



5.4 加速度計測結果による振動数の時間変化

ここでは、今冬において、ある程度積雪が生じた 体育館2についてのみ検証する。2019年12月1日か ら2020年2月20日まの期間において、柱頭2箇所 (acc1、acc2とする)に設置された加速度計で計測 された記録を、第3章の試験小屋と同様、各方向の 加速度記録を2の16乗(=65、536)のデータ数 (およそ9分)でフーリエスペクトルを算出し、 ウィンドウ幅 0.3Hz の Parzen ウィンドウで平滑化 後、卓越振動数を求め、それを固有振動数とした。 なお、フーリエスペクトルにおいて、明確なピーク が判断できな場合は無視することとした。各方向の 固有振動数の時間変化を図21に示す。横軸が日時、 縦軸が振動数を示しており、2020年1月31日18時 ~2月6日17時の期間は電気系のトラブルのため、 計測が停止し、データが計測されていない。

図 21 より、acc1、acc2 ともに同様の傾向を示して おり、梁間方向が最もばらつきが小さく、一方で鉛 直方向はばらつきが大きく、傾向が観察できない結 果となった。梁間方向および桁行方向においては、 振動数が減少し、その後増加する時間変化は概ね一 致した傾向となっている。



第3章の試験小屋と同様、各計測方向で基準となる振動数fを定め、振動数比 f/f'の時間変化を比較する。基準となる振動数fは、積雪が生じていない 2019年12月1日から3日分のデータの平均として算出することとした。なお、鉛直方向はばらつきが大きすぎたため、ここでは検討しない。算出した基準振動数を表8に、振動数比 f/f'の時間変化を図22に示す。

表8 基準となる振動数f(Hz)

計測方向	acc1	acc2
梁間	4.99	4.99
桁行	9.20	8.90

表8より、計測位置によらず、梁間方向は同じ振 動数となっており、固有値解析結果と比較すると、 柱脚固定での解析結果と同程度の値となっている。 一方、桁行方向は acc1 と acc2 で 3%程度の誤差が生 じており、固有値解析結果と比較すると、20%程 度、過大となっている。解析では、壁や胴差などの 非構造部材をモデル化していないことが原因の1つ として考えられる。また、図 22 より、振動数比の時 間変化では、計測位置および計測方向によらず、同 様の傾向を示している。梁間方向は桁行方向よりも ばらつきが小さく、ラーメン構造の梁間方向では、 固有振動数は安定するが、ブレース構造の桁行方向 は、安定しないという傾向を示唆している。



5.5 屋根上積雪質量の推定

5.5.1 建物質量の算出

(5)式を用いて屋根上積雪質量を推定するにあたり、体育館2の建物質量mを算出する。まずは小地 震時のひずみ計測記録を用いて曲げモーメントを計 算し、そこから水平剛性kを算出する。曲げモーメ ントの計算に用いたのは、2020年2月12日19時37 分頃に福島県沖を震源とする地震時の計測記録であ る。算出された梁間構面の水平1mmあたりの曲げ モーメント図を図23に示す。なお、柱頭の加速度応 答の最大値も併せて示している。図23の曲げモーメ ント図から求めた水平剛性kは4.85[kN/mm]とな り、他の梁間構面も同様の水平剛性と仮定すると、 地震応答時の振動数fが4.67[Hz]であることから、質 量はおよそ39.43tonとなる。第5.2節で設計図面か ら作成した解析モデルにより計算された質量が 40.36tonとなっており、同程度の値となっている。



5.5.2 屋根上積雪質量の推定結果

前項で推定した建物質量と表8で示した基準とな る振動数から、(5)式を用いて屋根上積雪質量を推定 する。第5.4節の結果から、振動数比の時間変化が 安定している梁間方向の計測結果のみを用いて、推 定した屋根上積雪質量を図24に示す。比較資料とし て、体育館2から最も近い柏崎市内の観測地点にお ける積雪深も示している⁵。なお、観測地点と体育 館2は直線距離でおよそ3.5km離れている。

図24より、加速度計の設置位置によらず、推定し た屋根雪質量は、地上積雪深の増減と同様の傾向を 示している。一方で、12月5日~12月10日の期間 では、積雪深の最大値は 17cm、屋根雪質量が 22ton 程度であるが、2月8日から2月13日の期間では、 積雪深の最大値が19cm、屋根雪質量が14ton 程度と なっており、地上積雪深と屋根雪質量が比例関係に ないことがわかる。また、2月18日近辺では、地上 積雪深はゼロであるにもかかわらず、推定した屋根 雪質量は7ton程度となっており、過大評価となって いる。観測地点の積雪深と屋根上の積雪深にどの程 度の相関があるか不明であること、積雪深と積雪質 量は必ずしも比例関係にないことから、必ずしも推 定結果が誤っているとは言えない。以上より、地上 積雪深と推定した屋根雪質量に一定の相関があるこ とは認められるものの、屋根上の積雪量を実測でき ないため、これ以上の検証は困難である。推定精度 の検証のためにも、屋根上積雪量を実測することが 今後の課題である。



6. まとめ

本事業では、屋根雪質量のリアルタイム診断技術 の開発を目的とし、IoT 技術を活用した電子デバイ スを用いた長期間のモニタリングを複数の建物にお いて実施した。得られた知見を以下に示す。

- 比較的安価な MEMS 加速度センサによる計 測であっても、木造、鉄骨造に関わらず、屋 根上の質量増加に伴い、固有振動数が変化す ることが確認できた。
- 同一の建物であっても、計測方向により振動 数の時間変化におけるばらつきの大きさが異 なる。剛性が低い、すなわち固有振動数が小

さい振動方向では、ばらつきが小さく、固有 振動数が大きい振動方向では、ばらつきが大 きくなる傾向にある。このことは今後より詳 細な検証が必要となるが、高次モードによる 振動数が卓越した場合に、卓越振動数が想定 した1次モード振動数と異なってしまうこと が原因の1つと考えられる。

- 提案手法により推定した屋根雪質量は、ス ノーサンプラーによる計測結果と比較して、 同程度の値となっており、良好な精度で評価 可能であることがわかった。
- 一方で、屋根上の積雪量を直接計測できない 建物においては、推定した屋根雪質量と地上 積雪深に一定の相関がみられたものの、推定 精度の検証が困難である。
- 実際の建物を対象とした長期的な計測である ため、様々な原因で計測システムが停止する 事態や、計測データのエラーが生じており、 より安定した計測システムの構築やネット ワークによる監視システムが必要である。

謝辞

本事業では、木造試験小屋の計測にあたり、防災 科学技術研究所雪氷防災研究センター、新潟工科大 学風・流体工学研究センターに多大なご協力をいた だきました。ここに記して深甚なる謝意を表しま す。また、木造倉庫の計測にあたり、

新英鉄筋、鉄骨造体育館の計測にあたり、両コミュ ニティセンターの皆様に多大なご協力をいただきま した。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1)「雪の重みで旧工場倒壊」、「雪でアーケード 10 メートル 崩落」、新潟日報、2018.2.10.
- 2) 社会資本整備審議会 建築分科会 建築物等事故・災害対 策部会、建築物の雪害対策について報告書、2014.10.
- 総務省消防庁 災害情報一 覧、https://www.fdma.go.jp/disaster/info/、最終閲覧日時 2020.3.3 9:36.
- 4)気象庁ホームページ、http://www.jma.go.jp/jma/index.html、 最終閲覧日時 2020.3.5 11:25.
- 5) 柏崎市ホームページ「雪に関する情報」、https://www.city.kashiwazaki.lg.jp/bosai_bohan_shobo/b osai/kishojoho/12473.html、最終閲覧日時 2020.3.5 11:25.