

建物外壁の融雪-凍結予測モデルの開発

大塚 清敏 田畑 侑一

Snow Melting and Freezing Prediction Method of Building Exterior

Kiyotoshi Otsuka Yuichi Tabata

Abstract

A method of evaluating the melting and freezing of snow pack adhering to building exteriors is presented. The falling of hardened snow and ice from building walls can damage objects existing below; therefore, this is problematic especially in cities situated outside snow-rich regions. The formation of hardened and/or icy snow is profoundly related to the metamorphosing processes of the adhered snow. The present method is based on heat balance calculations of snow packs including solar and infrared radiation, sensible and latent heat fluxes, and melting and freezing, as the heat budget components. Through a calculation of heat budgets of snow packs on the building walls of a simple 3-D building model, large differences in the melting or freezing conditions among the directions of the walls are found. They affect the length of the remaining snow and/or the formation of icicles. As to measures against snow in the changing climate are also mentioned briefly.

概要

建物外壁への着雪の残存や氷柱発生の把握への適用を目的として、外壁への着雪の融雪・凍結を行う数値計算手法の構築を行った。着雪の落下は時として落雪被害の原因となるが、着雪後の気象状況の推移により凍結固化したものが最も被害が大きい。落雪の対策では、残雪や固化の生じやすい箇所を適切に把握する必要がある。本研究は着雪後の雪の変質過程に主に着目している。本手法は日射、赤外放射、風による顕熱・潜熱流を考慮して、外壁の着雪や積雪の熱収支、融解、凍結を計算する。ここでは単純化された3次元建物モデルに対して、東京の実際の気象データを入力条件として外壁に置かれた雪の熱収支・融雪・凍結過程の計算を行った。その結果、日の当たる建物では外壁の方位により熱収支状態に顕著な差異が出ることが示された。こうした方法により、残雪の変質過程の予測がより確実なものとなった。また、近年気候温暖化の途上にあるが、そのような変化する気候に対し、積雪の長期的な変化の特徴と対策についても簡単に述べる。

1. はじめに

多雪地域ではない都市域でも、高層建物の増加により、特に1990年代以降、建物外壁に付着した雪の落下被害回避への関心が寄せられるようになってきた。この問題の特徴は、多雪地域の屋根雪荷重のように、長期間の積雪量など雪の積算的な属性ではなく、1回の降雪事象でも発生し得る点にある。さらに、雪に対する経験の少ない地域においてむしろ問題となりやすい¹⁾。

外壁からの落雪では、雨水や融雪水を含む湿り雪が凍結して固化したものの落下が最も注意すべきものである。そのため、雪の凍結や固化は、気象条件による雪と周囲との間の熱交換が深く関係する。雪の対策を検討するには、建物への着雪や積雪において、そうした雪の変質の生じやすい条件や部位などの推定を適切に行う必要がある。筆者らは、これまで建物外壁の着雪の予測を試みてきた²⁾。しかし、雪の融解や凍結等の変質はむしろ着雪後の状態変化である。そこで本研究では、雪の熱収支計算に基づいて、融雪・凍結の予測方法の構築を行った。本論文ではその概要と解析結果の一部を示す。

ところで、雪の問題は気候の温暖化との関連で、将来

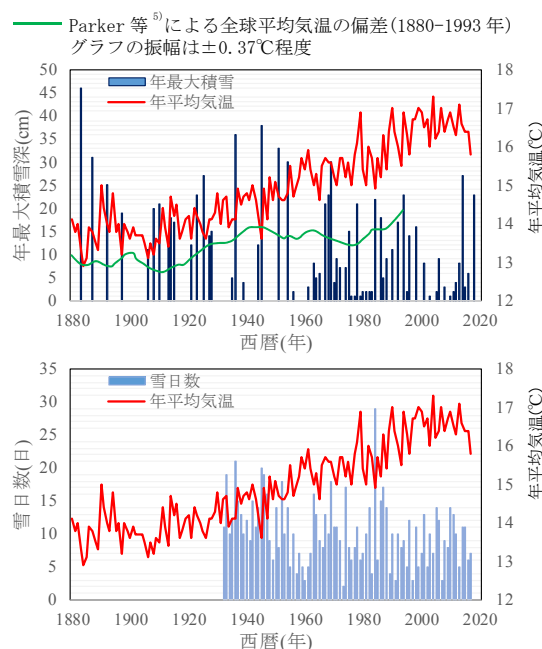


Fig. 1 東京の雪の長期的推移 (1876-2018)
Long-Term Variations of Snow in Tokyo

的な降雪の量、分布、時期、雪質等への影響が、北海道など多雪地域で大きな関心事となっている³⁾。都市域における落雪の問題でも、温暖化が降雪の減少につながれば、対策の面では有利なこともある。しかしながら、東京で2014年に積雪27cmの降雪事象が2月に2回発生し、2018年1月にも積雪23cmを記録するなど、最近50年間においても積雪深さで2位(2回)と4位がここ5年間で生じている。そこで、融雪・凍結予測に進む前に、一例として東京および北海道の雪の長期的な動向を簡単に見ておく。

2. 東京および北海道の積雪の長期的変化

気象庁のデータ⁴⁾による東京の年最大積雪深、雪日数、年平均気温をFig. 1に示す。気温と年最大積雪深は1880年以降、雪日数は1931年以降である。1961年以前については、記録が残っていないものがあるものの、主要な大雪事象はとらえられていると考えられ、長期的な変化のひとつの目安を与えるものである。そのため、ここに示すことにした。気象庁(当時は中央气象台)が1875年に観測を開始して以来の最大深積雪は、1883年の46cmで1945年の38cmがこれに次ぐ。気温は、都市化の影響も含んでいるものの、長期的には明らかに上昇傾向である。年最大積雪深は、数十年のスケールで緩やかな増減があるようにも見えるが、最近50年間では、増加あるいは減少傾向は明らかではない。また、降雪日数は、長期的に漸減の傾向がわずかにあるようにも見える。1930年代後半から50年代にかけ、30cmを超える大雪が4回記録されているが、1940年代は世界的には、その前後の時期と比べ気温の高い時期とされており⁵⁾(Fig.1に併記)、両者の関係性は明白ではないものの興味ある事象である。

次に北海道の主要都市の1962年以降の年最大積雪と雪日数の経年変化をFig. 2に示す。北海道は将来の温暖化により、現在よりも液水分の多い重い雪への雪質変化、降雪量の変化などが懸念されている。東京などのような落雪の問題が北海道でも問題となってくる可能性がある。Fig. 2の都市は、任意的であるが、日本海側(札幌、稚内)、および太平洋側(浦河・帯広・釧路)を選んだものである。積雪も雪日数も、当該期間内ではほぼ横ばいで推移しているが、積雪において、帯広が特に1990年代後半以降僅かに増加傾向にあるようにも見える。帯広は日高山脈の東にあり、雪の増加は太平洋側からもたらされる降雪と推察されるが、気圧配置など降雪の成因の変化の可能性が示唆される。

ここでは、東京と北海道の雪の長期的な傾向を、年最大積雪深と雪日数に限って見たが、気温の上昇傾向に呼応するような明白な増減傾向は認められなかった。しかしながら、2014年の関東の大雪の続発のような事例もあり、想定を広く持つことが大切と考えられる。

3. 融雪・固化予測手法

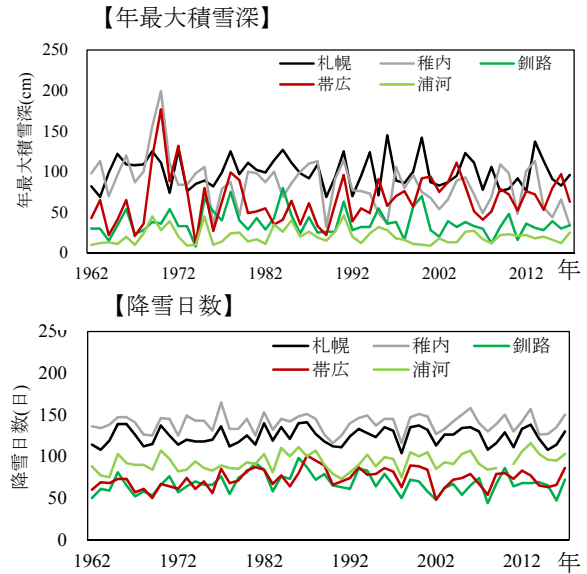


Fig. 2 北海道の主要都市の積雪の推移
Long Term Variations of Snow at Several Cities in Hokkaido

3.1 融解や凍結などの雪の変質と気象条件

雪の凍結固化が発生しやすい、気象状況の変化の代表的な例をFig. 3に示す。東京管区気象台の1992年1月31日から2月3日の4日間のデータに基づいている。気温は、1月31日は未明の最高気温7℃から単調に下がり、同日19時頃以降は+1℃前後で翌朝7時頃まで推移している。その間降水は昼前から始まり、15時から雪となり翌1日朝まで続いた。積雪は2月1日午前7時に最大の18cmとなった。2月1日の気温は午前8時過ぎから上がり始め14時の日中の最高気温は5℃をやや上回った。その後夕刻に向かって気温が下がるとともに、雲量が急速に減少して天気回復し、1日深夜、2日未明から朝にかけて0℃前後で推移している。この間雲量はほぼ0であり風速も3m/s未満と弱く夜間の放射冷却に好適な気象状況が整った。さらに2月3日はほぼ終日にわたり、雲量が0の快晴であり、日中の最高気温も8℃近くに達している。積雪深は2月1日の午前を除いて3~6時間間隔の観測となっているが、ほぼ単調に減少している。ただ、2月4日になっても積雪は5cm以上ある。

Fig.3にはこうした気象状態において生じ得る、建物外壁突起への積雪の状態変化が概念的に示してある。気象状況との対応は図中の矢印で示してある。降雪後2月1日の午後には気温が5℃程度まで上昇、それによる融雪が起こるが、積雪量が多いため雪は解け切らず、夕刻から翌朝(2月2日)にかけての夜間は快晴による強い放射冷却で、気温は0℃近辺にあり、1日午後の融雪で融雪水を含む雪は容易に凍る。2日は雲量0の快晴のまま日射を受けることになり、雪は再び解け始めるが、一度凍結した雪の融雪は傾斜面上にそれらがある場合には滑落しやすくなる。

Fig. 3に示した例は、雪の凍結、再融雪ののち落雪にいたる代表的な例であるが、日当たりが悪く雪が長時間残

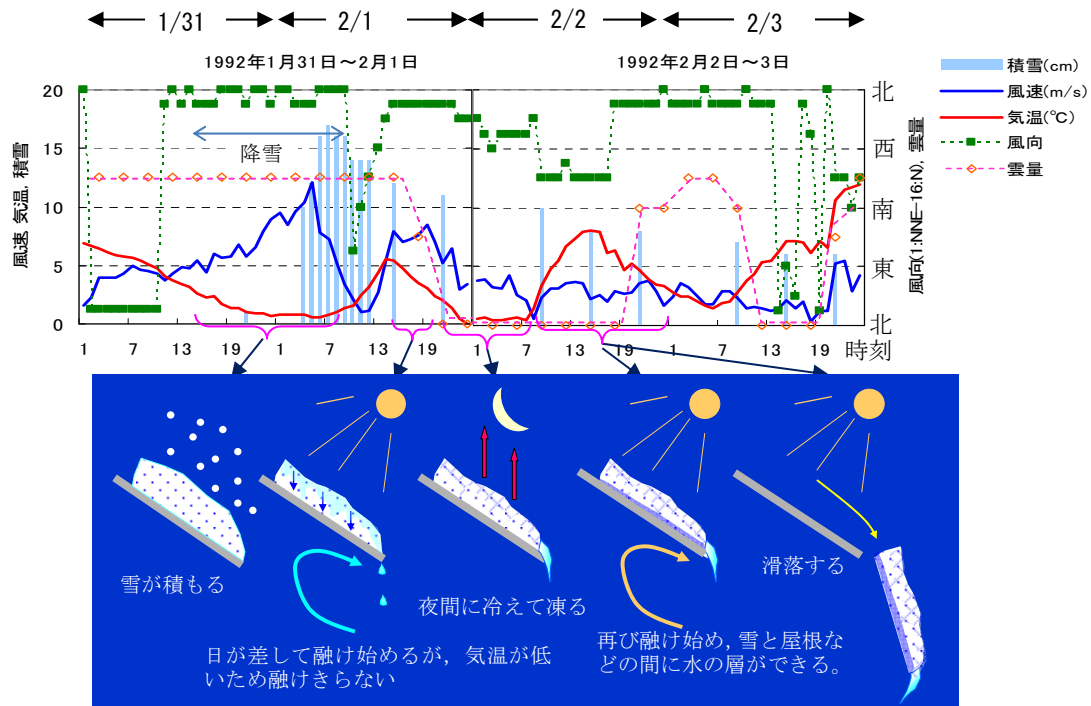


Fig. 3 残雪の凍結や固化をもたらす代表的な天気象状況の推移
One of the Typical Transitions of Meteorological Conditions Favorable for Hardening of Snow Pack

る個所ではこうした雪の凍結固化が生じやすい。落雪の対策を検討する際には、凍結の生じやすい箇所や頻度を適切に見積もる必要がある。

3.2 積雪の熱収支とその計算

建物外壁の雪の熱収支には、Fig. 4に示すように風や温度差・湿度差による大気との間の顕熱・潜熱交換、日射(直達日射, 散乱日射), 大気や周囲の地物との間の赤外放射など放射による熱交換, 積雪の蓄熱, 融解・凍結等の相変化が関係する。積雪の熱バランスを付録Aの式(A.1)に示す。雪の融解や凍結を計算するには、これらの各熱収支項を見積もる必要がある。残雪や積雪の固化を考えると、日当たりの影響は重要である。建物外壁の場合、壁の方位や、その建物自身の影に入るなどして、外壁の部位の違いによって日照の違いが大きくなる可能性がある。そのため、ここでは近似的ではあるものの、建物の3次元モデルを用いることで、それらを考慮することにした。放射の扱いについては、第3.3節で概要を紹介する。

降雪による質量増加および熱収支計算による融解、積雪表面での昇華などによる質量減少、冷却による凍結を計算する。ここで述べた雪の質量収支の計算の過程は、Fig. 5のブロック図のようにまとめられる。

融解や凍結には相変化潜熱が介在するが、水の固一液の相変化潜熱は0°Cで約335.2kJ/kgである。この潜熱の値は氷に対するものであるが、氷と空気との混合物である雪に対して、この値を直接的に使用することの妥当性を見るために、小型の模型を用いた融雪実験を行った。模型は内壁を断熱したチャンパーで、その上面に500mm×500mmで厚さ3mmのアルミ板で蓋をしたものである。

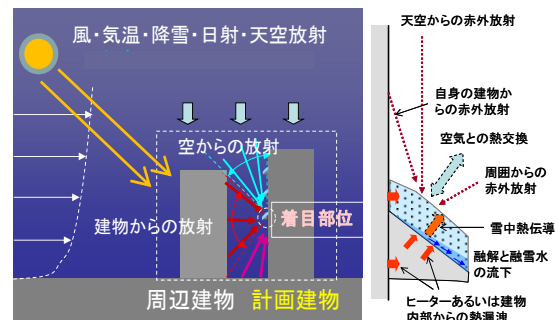


Fig. 4 外壁の雪の熱収支の諸過程
Processes Associated with Heat Budget of Snow Packs on Building Exteriors

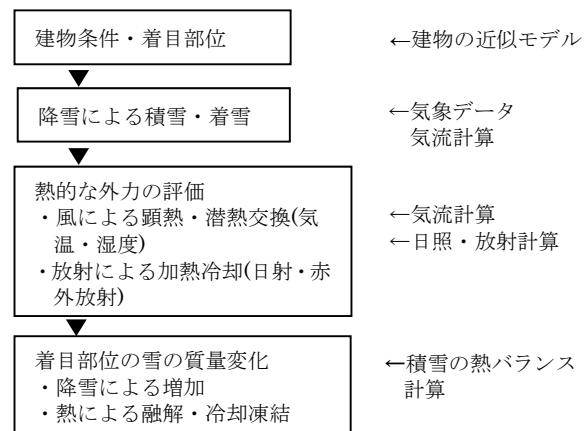


Fig. 5 融雪凍結の予測の考え方と手順
Block Diagram of Processes of Snow Melting and Freezing Calculation

アルミの裏面には面ヒーターが貼付しており、アルミ表面を内側から加熱できる。ヒーターのさらに裏面(チャンパー側)には断熱材(t10mm)が貼付しており、ヒーターの熱が効率よくアルミ表面に供給されるようにした。ヒーターの出力を 300kW/m^2 相当とし、アルミ面上に人工雪を5cmの厚さに積雪させ、模型の傾斜を 15° , 30° , 45° として融雪水の流出速度を調べた。実験は(独)防災科学技術研究所新庄雪氷実験棟の恒温室を使用した。雪は、結晶系、凍結水滴(同研究所で、それぞれタイプA、タイプBと呼称)の2種類あるうち結晶系の雪(タイプA)で、冷凍庫(-20°C)に保管されていたものを篩で積雪させた。ヒーターの加熱による融雪水流出の時間変化を実験状況の写真と合わせてFig. 6に示す。傾斜が 15° の角度の試験体では、 30° , 45° と比べて流出開始が遅れるが、いったん流出し始めると、他の角度とほぼ同様の速さで流出している。Fig. 6の下図は、融雪水流出を単位面積あたり、1時間あたりに換算したものであるが、2時間経過後は、各試験体の流出量は図中の赤破線の周りにある。融雪水の流出は積雪層内での水路のでき方等により、ある程度のばらつきは unavoidable であるが、実験ではおよそ、 $3\text{kg/m}^2/\text{h}$ 程度が得られた。氷の相変化潜熱とヒーター出力から得られる時間融雪量は約 $3.2\text{kg/m}^2/\text{h}$ なので、非常によい近似で 335.2kJ/kg の相変化潜熱値を用いてもよいことが示された。実験に用いた人工雪は自然の雪に近いものであるため、自然雪にもここで確認されたことは適用できると考えられ、そのため融雪・凍結の潜熱としてこの値をそのまま用いることにする。

3.3 日射を含む放射環境の解析

前述のような日当たりの良否の違いに重要性があることから、計画建物がある程度以上の精度で近似した3次元の建物モデルを用いる必要がある。但し、屋外の雪の熱収支が対象であることから、放射はブロードバンド(全波長域積分型)で扱い、室内照明などの光環境評価における光解析手法よりもかなり粗い扱いとした。

3次元建物形状は3角形ポリゴンを用いて再現する。外壁細部の再現性を高める事が可能である。各面への日射の照射の有無(日陰範囲)は対象とするポリゴンと太陽とを結ぶ線が、他のポリゴンを横切る回数が0の場合に日が当たるとした。他のポリゴン表面からの放射についても同様である。着目するポリゴンに対し、両者間(ポリゴンの重心間)の視線が、それら以外の他のポリゴンを横切る回数が0の場合に、着目するポリゴンから見えていると判別する(付録B参照)。

天空からの放射は、対象とする建物や街区を囲むように天球を想定し、天球を方位角、高度角による分割を行い天球の各要素からの放射も扱えるようにしてある。太陽の動きや太陽光の大気分子や水蒸気による減衰はPielke⁶⁾に、日射の天空光分布は井川⁷⁾の方法をコーディングしたものを用いた。建物モデルと日影の状況を1月15日15時の太陽位置についてFig. 7に示す。Fig. 7には合

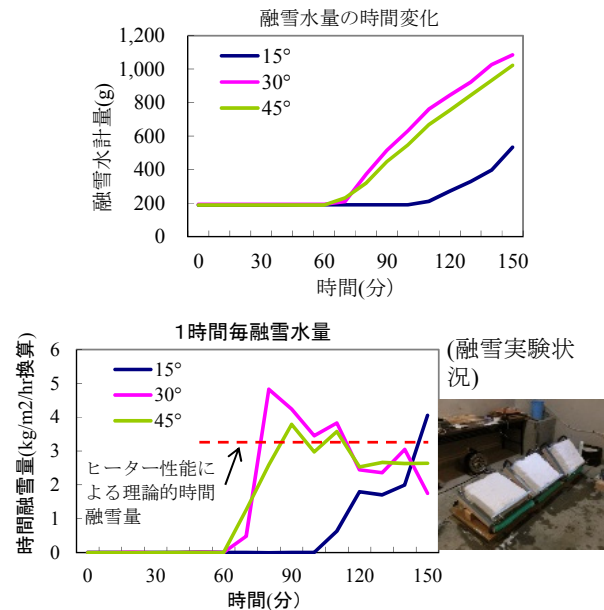


Fig. 6 ヒーターによる融雪水の流出量
Out Flow Rates of Melt Water of Snow by an Electric Heater (300W/m^2)

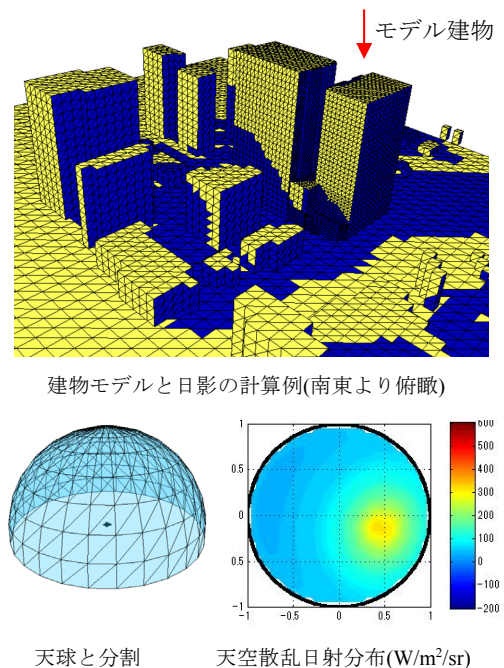


Fig. 7 日影計算例、及び天球、天空散乱光分布計算例
Examples of Shadow Distribution around a Model Building (red arrow), Sky Globe, and Diffusive Solar Radiation

せて天球および天空光計算例も併記してある。

3.4 着雪の融解・凍結のケーススタディ

Fig. 7に示されたモデル建物(Fig. 7矢印)および周辺街区を想定した場合について、Fig. 3に示される気象条件(1992年1月31日～2月3日)の推移を外力として、着雪の融解・凍結(氷柱発生)の予測解析を行った。モデル建物は高さ165mで、矩形の形で最もよく見られる規模とした。

ここでは、外壁に設けた参照点(白破線)に置かれた雪(本研究では熱的には1層とした)に対し熱収支計算を行って、凍結(氷柱発生)頻度の予測を試みた。

Fig. 8は、天候の回復した2月2日の日平均の建物表面の放射収支である。赤外放射の計算においては、建物表面は単純化して気温と同じ温度とした。南向きの外壁面は、日当たりがよく、冬季の低い太陽高度では、面への入射角が大きくなるため、正の放射収支を示す赤い色となっている。一方、日当たりの悪い北向きの外壁面は、負の放射収支を示す青い色である。図中の白い破線は、後に凍結頻度予測を行う参照点の並びで、高さ方向に11レベルである。東向きは朝、西向きは夕方の太陽光をそれぞれ受けるため、南北面の中間的な値である。

Fig. 8に示された白破線の最上位置における、東西南北各面の日射の時間変化をFig. 9に示す。それぞれの点が日陰に入る時間を反映した変化をしている。日陰に入った場合は、天空からの散乱日射のみが当たるとした。周囲の他の建物からの日射の反射は今回は考慮していない。Fig. 9と同じ参照点について、気温、雪温、雪量(単位面積当たり)の時間変化をFig. 10に示す。雪が0°Cで熱収支がプラスの場合、氷雪温が0°Cに保たれたまま融解が進むとした。雪が解け切らずに、熱収支がマイナスになると、0°Cを保ったまま潜熱を放出し凍結する。こうした条件では、固化や氷柱(つらら)発生が起こる。Fig. 10にはこ

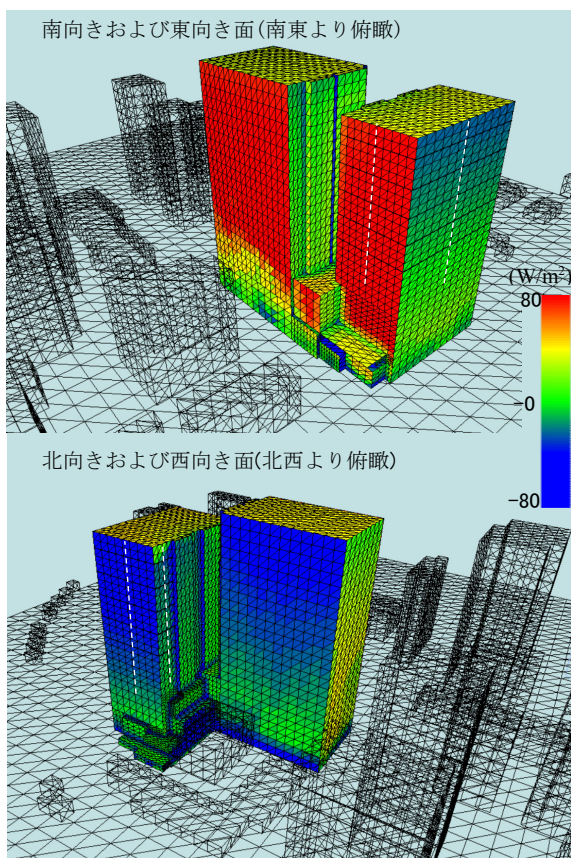


Fig. 8 外壁の日平均放射収支(白破線は本文参照)
Daily Radiation Balance of Outside Walls and Roofs

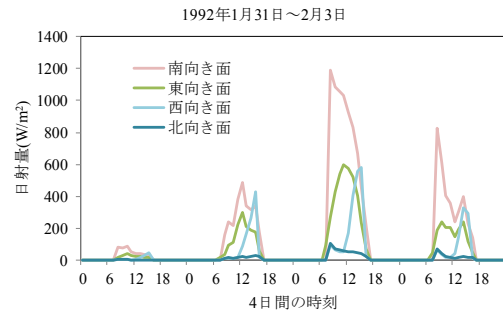


Fig.9 各方位を向いた壁面(高度160m)の日射
Solar Incidences on Walls Faced Four Directions

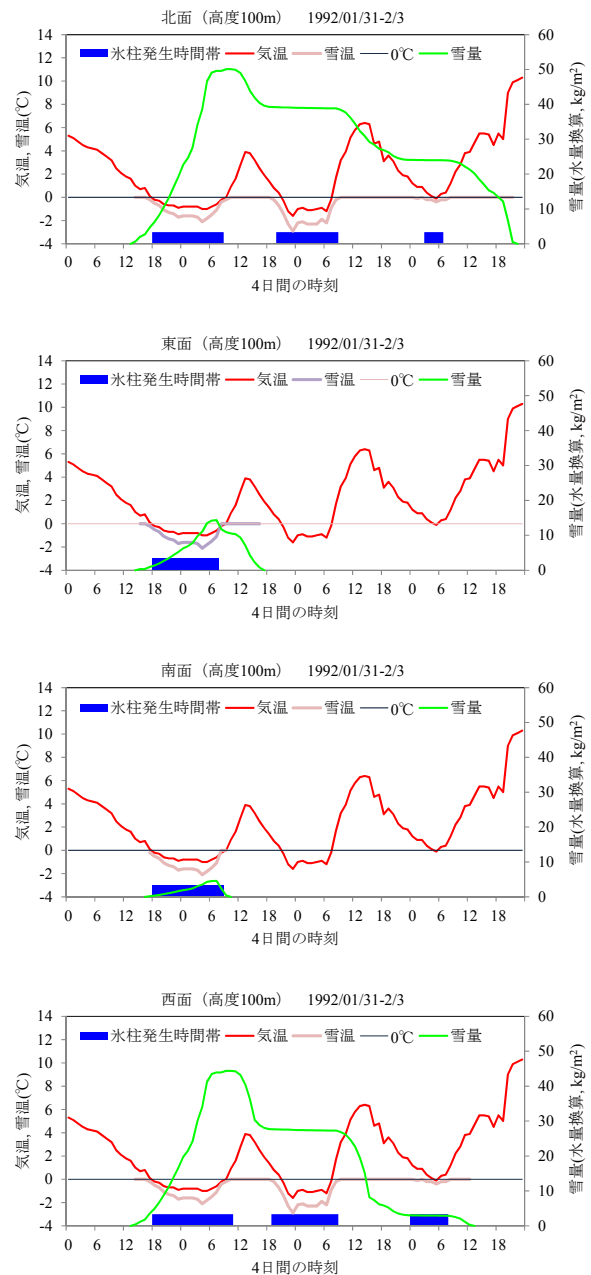


Fig. 10 気温、雪温、雪量、氷柱有無の予測結果
Simulated Time Series of Snow Masses, Snow
Temperatures and Icicle Formation Indices

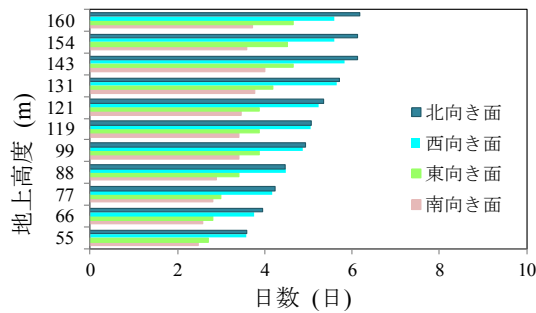


Fig.11 凍結雪(氷柱含む)の年間発生日数(1991-2007)
Predicted Annual Frequencies Ice Formation

の条件が満足された場合の氷柱発生として記されている。本論文では触れなかったが、外壁への着雪量は、今回は簡易的に、田畑等²⁾に示された方法による、矩形建物外壁への雪粒子の衝突率の方位間の比率をもとに設定した。北向き面は着雪が多く、日当たりが悪いため、雪の残存が3日以上ある。南面は、降雪の止んだ日の午後に融け切っている。雪の温度は気温よりやや低い水分の蒸発潜熱によるものである。Fig. 11には、Fig. 8の白破線上の参照点全てについて、Fig. 10と同様の計算で求められた凍結発生(氷柱発生)頻度を1年間あたりの日数で示している。気象庁観測位置の移動前の1991年～2007年の16年間について、降雪のあった日全てについてFig. 10と同様の計算を行ったものである。高度160mでは、いずれの方位でも高度50mより1.5～1.8倍程度の年間発生日数である。また、北面、西面が南面、東面より頻度は高いものの、日当たりの差から想像されるより差が小さい。これは、方位には無関係に同一高度ではほぼ同じである気温も、凍結には大きく効くからである。ただ、Fig. 11では、1日に1時間でも氷柱発生条件を満足すると1日としてカウントしているため、氷柱残存の総時間数(図示はしていない)よりも方位間の差が小さくなったことも関係している。

4. まとめ

高層建物の落雪対策と関連して、着雪後の雪の変質・固化に深く関係する融雪・凍結の予測手法の考え方とケーススタディの結果を示した。合わせて温暖化しつつある気候下での雪の長期的な変動について、簡単な考察を行った。以下のようにまとめられる。

- 1) 融雪凍結の計算においては、雪に対しても氷の相変化潜熱の値を実効値として用いてもよいことが実験で示された。
- 2) 3次元の建物モデルを用いることで、建物外壁への日当たりへの建物影響を直接的に扱うことができ、凍結や氷柱発生の予測の合理性が高められた。
- 3) 気象庁の雪の長期間の年最大積雪深や雪日数には、気温の上昇傾向に呼応した、体系的な増減の傾向は明瞭ではない。当面、温暖化に関係なく降雪の可能性があると見える。今後の降雪環境について

は降雪量だけでなく雪質の変化等、多くの視点からその変化を見ていく必要がある。

本研究の方法は、将来の変化した気候条件にも適用可能な汎用性を有していることを付記しておく。

謝辞

融雪実験では、防災科学技術研究所雪氷防災センター新庄雪氷環境実験棟の望月氏、大川氏には実験遂行でご支援いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 大塚清敏：建物外壁からの落雪対策の留意点，日本雪工学会誌2018-4, Vol. 34, No. 2, pp. 68-74, 2018.4
- 2) 田畑侑一，大塚清敏：建物外壁着雪分布予測のための数値シミュレーション，大林組技術研究所報，No. 79, 2015.12
- 3) 中村一樹，佐藤知徳，山中康裕，西村浩一：雪質変質モデルSNOWPACKを用いた地球温暖化による雪質変化推定の試み，北海道の雪氷，No.30, pp. 123-126, 2011.
- 4) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，「2018.5.30閲覧」
- 5) D. P. Parker, P. D. Jones, C. K. Folland, and A. Bevan : Interdecadal changes of surface temperature since the nineteenth century, J. Geophys. Res., vol. 99, No. D7, pp. 14373-14399, 1994.7
- 6) R. A. Pielke: Mesoscale Meteorological Modelling, Academic Press, pp. 212-214, 1984
- 7) 井川憲男，中村洋，古賀康子，古城真也，藤井俊一：全ての天空状態の天空輝度分布を表す全天候型輝度分布モデル，日本建築学会計画系論文集，第508号，pp. 1-8, 1998.6

付録 A 積雪層の熱収支

単一の様積雪層(比熱 C (J/kg/K)，質量 M (kg)，温度 T (K))の熱収支式は、雪のアルベドを α ，入射日射を S ，大気や周囲からの赤外放射を I ，空気との間の顕熱および潜熱の交換を H ， LH とすると次式となる。 σ はStefan-Boltzman定数， ϵ は赤外射出率である。熱流の単位は全て W/m^2 である。

$$CM \frac{dT}{dt} = (1 - \alpha)S + \epsilon(I - \sigma T^4) + H + LE \quad (A.1)$$

付録B 放射計算の考え方

本研究では、着目するポリゴンに入射する他のポリゴンからの放射は、ポリゴン相互の形態係数を求めた上で、互いに見えているものに対して総和をとることで求めた。太陽放射計算では、他のポリゴンからの反射は無視した。