

建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性の
制御による融雪法の提案

Proposal of snow melting method by using the
thermal radiation characteristics of the building
skin and the control of the reflection-oriented
characteristics of the solar radiation

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部 北方建築総合研究所

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性の制御による融雪法の提案 Proposal of snow melting method by using the thermal radiation characteristics of the building skin and the control of the reflection-oriented characteristics of the solar radiation

堤 拓哉¹⁾、月舘 司²⁾、阿部 佑平³⁾
Takuya Tsutsumi*, Tsukasa Tsukidate**, Yuhei Abe***

キーワード : 融雪法、建物外皮、熱放射特性、反射指向特性

Keywords : *Melting method, Building skin, Thermal radiation characteristic, Reflection-oriented characteristic*

1. 研究概要

1) 研究の背景

近年、首都圏の高層建築物では室内環境改善や意匠性の向上を目的に庇やルーバーなど多様な外装部材が用いられるようになっており、これらの外装部材からの落雪による事故が懸念されている。建物を含む積雪地の放射環境については、積雪期には無雪期とは全く異なる放射環境が形成されることが示されており、建物外皮からの放射熱が融雪に寄与する可能性が既往研究から示唆されている。しかしながら建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性を利用し外装材周りの融雪をする技術に関する研究は未だ行われていない。

2) 研究の目的

落雪事故の原因となる恐れのある高層建築物の外装部材など雪処理の困難な部位に堆積した積雪を建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性を利用し融雪する新たな手法の提案を目的とする。

3. 研究内容

1) 文献調査による基礎データの整理 (H25-26 年度)

- ・ねらい：外装材の反射特性などの知見およびデータの収集
- ・試験項目等：文献調査

2) 建物外皮の放射特性の測定 (H25～27 年度)

- ・ねらい：建物外皮の放射特性を把握する。
- ・試験項目等：放射測定

3) 外装部材の融雪に関するモデル実験 (H26～27 年度)

- ・ねらい：外装部材における融雪状況を把握する
- ・試験項目等：モデル実験

¹⁾ 環境研究部環境グループ 主査 ²⁾ 環境研究部環境グループ 主幹 ³⁾ 地域研究部居住防災グループ 研究職員

*Chief Coordinator. Environment Group, Environmental Research Division **Senior Research Manager. Environment Group, Environmental Research Division ***Researcher. Residential Planning and Disaster Management Group, Regional Research Division

4) 熱放射特性を利用した融雪法の検討 (H26~27 年度)

- ・ねらい：融雪法の有効性を検討する
- ・試験項目等：放射解析等

3. 研究成果

1) 文献調査による基礎データの整理

塗料の波長別反射特性など数値解析等に必要データを整理した。

2) 建物外皮の放射特性の測定

放射収支計を用いて、日射反射の特性が異なる試験体を対象に短波放射および長波放射を測定し、放射特性に関するデータを取得した(図1)。

3) 外装部材の融雪に関するモデル実験

屋外でのモデル実験により、壁面の日射反射率の違いが外装部材(庇)の融雪に及ぼす影響を検討し、8ケースのデータを取得すると共に、熱放射および反射特性を利用した融雪法の有効性を確認した(図2)。降雪量20cm以上の条件で日射反射率の影響が顕著に見られ、庇の上に堆積した積雪の融雪時間の差は最大で50時間以上あった(表1)。

4) 熱放射特性を利用した融雪法の検討

建物外装を対象とした放射解析を行い、融雪の促進に有効な仕様を検討した。放射解析の結果、庇裏面の日射吸収率は大きい方が良く、積雪が少ないときの日射の吸収を考慮すると、庇表面の日射吸収率は大きい方が良いことが分かった。また、庇裏面の日射吸収率が大きいときは壁面の日射吸収率が小さい(反射率が大きい)ほど、融雪能力が大きくなり、長波長放射による伝熱は、対流放熱による熱損失が発生するため、反射日射による伝熱方式に比べ劣ることが分かった(図3)。

4. 今後の見通し

超高層建築物等の外装材における雪対策の基礎資料として技術相談等において活用を図る。また、実用化に向けた検討を進める。

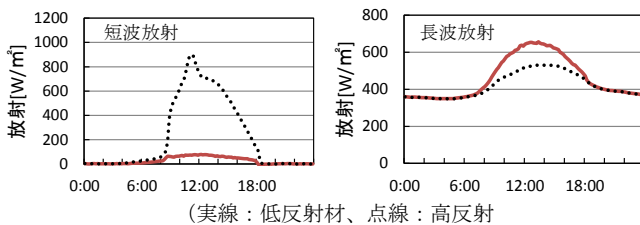


図1 外装の反射特性と放射特性との関係

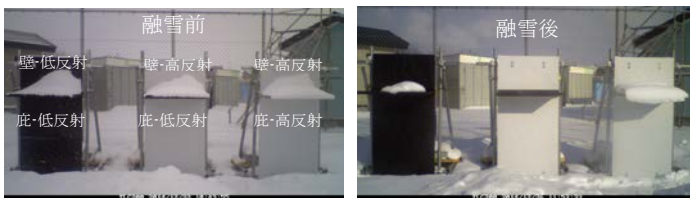


図2 モデル実験による融雪状況

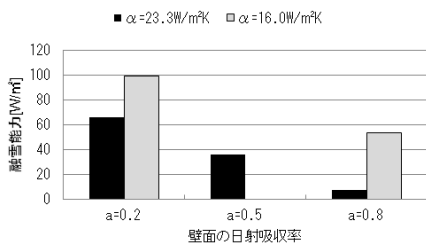


図3 壁面の日射吸収率と融雪能力の関係

表1 モデル実験による融雪時間の比較

No.	日付	降雪量 [cm]	平均気温 [°C]	仕様 (壁-庇)	融雪開始時刻 融雪終了時刻	融雪時間
01	2014/11/14	20	-0.7	高反射-高反射	2014/11/14 07:00 2014/11/19 14:25	127h25
				高反射-低反射	2014/11/14 07:00 2014/11/17 11:55	76h55
				低反射-低反射	2014/11/14 07:00 2014/11/17 13:05	78h05
02	2014/12/17	25	-1.7	高反射-高反射	2014/12/17 07:00 2014/12/20 16:45	80h45
				高反射-低反射	2014/12/17 07:00 2014/12/20 11:23	76h23
				低反射-低反射	2014/12/17 07:00 2014/12/20 11:53	78h53
03	2014/12/22	32	-6.7	高反射-高反射	2014/12/22 07:00 全て融雪せず	—
				高反射-低反射	2014/12/26 12:02 2014/12/22 07:00	101h02
				低反射-低反射	2014/12/22 07:00 2014/12/28 12:39	144h39
04	2014/12/31	14	-8.2	高反射-高反射	2015/01/01 07:00 全て融雪せず	—
				高反射-低反射	2015/01/01 07:00 2015/01/12:44	5h44
				低反射-低反射	2015/01/01 07:00 2015/01/12:04	5h04
05	2015/01/08	28	-1.9	高反射-高反射	2015/01/08 09:00 2015/01/12:35	102h35
				高反射-低反射	2015/01/08 09:00 2015/01/11 12:47	75h47
				低反射-低反射	2015/02/24 12:48 2015/02/24 07:00	5h10
06	2015/02/24	10	-1.3	高反射-高反射	2015/02/24 11:18 2015/02/24 07:00	4h18
				高反射-低反射	2015/02/24 11:08 2015/02/24 07:00	4h08
				低反射-低反射	2015/03/02 10:00 2015/03/05 11:13	73h13
07	2015/03/02	14	-0.6	高反射-高反射	2015/03/02 10:00 2015/03/03 13:03	27h03
				高反射-低反射	2015/03/02 10:00 2015/03/03 12:53	26h53
				低反射-低反射	2015/03/12 07:00 2015/03/13 14:03	31h03
08	2015/03/12	19	-1.2	高反射-高反射	2015/03/12 07:00 2015/03/12 11:31	4h31
				高反射-低反射	2015/03/12 07:00 2015/03/12 11:11	5h11
				低反射-低反射	2015/03/12 07:00 2015/03/12 11:11	5h11

目 次

1.	はじめに1
2.	文献調査による基礎データの整理2
3.	建物外皮の放射特性の測定3
4.	外装部材の融雪に関するモデル実験9
5.	熱放射特性を利用した融雪法の検討14
6.	まとめ16

1. はじめに

(1) 研究の背景

近年、首都圏の高層建築物では室内環境改善や意匠性の向上を目的に庇やルーバーなど多様な外装部材が用いられるようになってきている(写真1-1)。これらの外装部材からの落雪事故が度々起きており¹⁾、特に2014年2月に関東甲信地方が大雪に見舞われて以降、外装部材の雪対策の必要性が高まっている。

空隙のあるルーバーなどの外装部材には一定程度の雪が堆積する事が実験等により示されているが²⁾、雪対策に関する技術的資料は十分に整備されておらず、JASS14カーテンウォール工事において融雪設備の設置に関する僅かな記載があるのみである³⁾。首都圏の大雪は10年に一度程度の周期で発生しているため、融雪設備の稼働機会が極めて少なく、その間のメンテナンスや設備更新も必要など、信頼性の確保や省エネルギー性に課題が残る。このため融雪設備に依存しない、外装材の雪対策に関する技術開発が必要とされている(写真1-2)。

建物を含む積雪地の放射環境については、積雪期には無雪期とは全く異なる放射環境が形成されることが示されており(図1-1)⁴⁾、建物外皮からの放射熱が融雪に寄与する可能性が既往研究から示唆されている⁵⁾。しかしながら建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性を利用し外装材周りの融雪を行う技術に関する研究は未だ行われていない。



写真1-1 外装部材(庇、ルーバー)の例
(北方建築総合研究所)



写真1-2 人力や設備による対応が困難な例

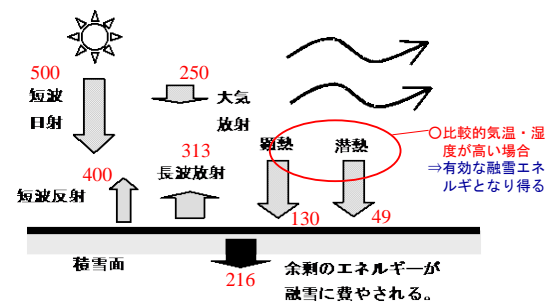


図1-1 積雪面の放射環境⁴⁾

(2) 研究の目的

落雪事故の原因となる恐れのある高層建築物の外装部材など雪処理の困難な部位に堆積した積雪を建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性を利用し融雪する新たな手法の提案を目的とする(図1-2)。

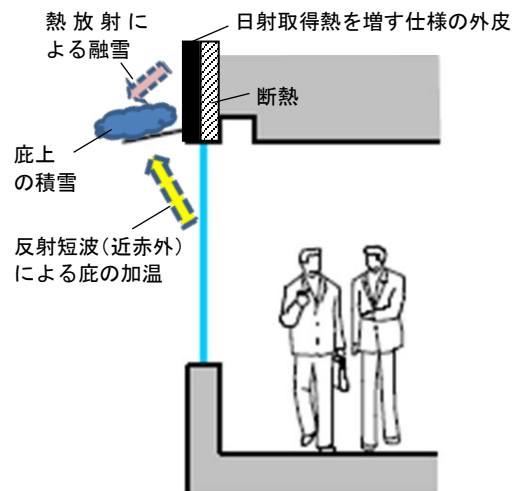


図1-2 検討する融雪法の概念図

(3) 研究内容

研究内容は下記の4項目である。

- 1) 文献調査による基礎データの整理
 - ・ねらい：外装材の反射特性などの知見およびデータの収集
 - ・試験項目等：文献調査
- 2) 建物外皮の放射特性の測定
 - ・ねらい：建物外皮の放射特性を把握する。
 - ・試験項目等：放射測定
- 3) 外装部材の融雪に関するモデル実験
 - ・ねらい：外装部材における融雪状況を把握する
 - ・試験項目等：モデル実験
- 4) 熱放射特性を利用した融雪法の検討
 - ・ねらい：融雪に有効な仕様を検討する。
 - ・試験項目等：放射解析等

[参考文献]

- 1) 苫米地司, 千葉隆弘: 建築設計において考慮しなければならない着雪・冠雪について, 「建築設計と雪」の問題を考える, 日本建築学会構造運営委員会(荷重・雪荷重)パネルディスカッション資料, pp18-21, 2006.10
- 2) 堤拓哉, 佐藤威, 苫米地司, 千葉隆弘: 建物外壁に設置されるルーバー庇の積雪性状に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, pp.59-62, 2010
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, JASS14 カーテンウォール工事, p124, 2012.2
- 4) Akashi Mochida1, Yoshihide Tominaga, Hiroshi Yoshino, Kiyoshi Sasaki, Makiko Ohba: Numerical Study on Thermal Effects of Cold and High-albedo Surfaces Covered with Snow in Outdoor Environments, Journal of Asian architecture and building engineering, Vol.1, No.1, pp.175-182, 2002
- 5) 深澤大輔: 通気融雪工法に関する研究, 日本雪工学大会論文報告集, No.19, pp.73-74, 2002.

2. 文献調査による基礎データの整理

(1) 外装材の反射特性

文献調査により、材料・一般塗料、高反射塗料の分光反射率のデータを整理した。表2-1は外装材として一般に用いられている各種材料の反射率の例である¹⁾。白色あるいは鏡面状の材料の反射率は高く、濃色系の材料の反射率は低い。

表2-2は、市販されている高反射塗料の反射率の測定結果の例である²⁾。白色はいずれの試験体でも可視光域で100%近い反射率となっており製品による差は小さい。一方、黒色では日射反射率が0.1~0.4程度、灰色では0.2~0.6程度となり、製品によるバラつきが多い。これらの差は表面温度等に影響すると考えられる。

融雪法を検討する上で、材料の表面温度を上げ融雪する部位には濃色系の材料を選定し、融雪する部材の日射取得を増進させるには反射率の高い材料を壁面上において適切に配置する必要がある。

表2-1 材料反射率¹⁾

特性	材料	反射率 (%)
正反射性材料	アルミ電解研磨面	90~95
	アルミ	70~75
	透明ガラス	10~12
	黒色ガラス	5
拡散性材料	亜鉛引鉄板	30~40
	すりガラス	15~25
	白色ペイント一般	70~85
	濃色ペイント一般	15~40
	木材板張(新)	40~55
	木材板張(旧)	10~30
	木材オイルステイン	10~20
	白色タイル	70~80
	石材一般	25~50
	コンクリート	20~30
	白壁一般	55~75
濃色壁一般	15~25	

表 2-2 高反射塗料の反射率²⁾

試験体	日射反射率 (-)			半球放射率 (-)		
	白色	黒色	灰色	白色	黒色	灰色
①	0.841	0.159	0.384	0.910	0.912	0.909
②	0.827	0.379	0.576	0.878	0.879	0.884
③	0.890	0.252	0.526	0.879	0.893	0.875
④	0.894	0.221	0.524	0.877	0.900	0.880
⑤	0.848	0.262	0.550	0.857	0.897	0.865
⑥	0.861	0.252	0.222	0.884	0.895	0.890
⑦	0.887	0.410	0.564	0.883	0.894	0.882
⑧	0.876	0.379	0.581	0.907	0.913	0.918
⑨	0.846	0.488	0.616	0.899	0.913	0.896
⑩	0.879	0.344	0.554	0.913	0.921	0.917
⑪	0.819	0.230	0.494	0.883	0.882	0.875
⑫	0.850	0.249	0.496	0.890	0.893	0.894
⑬	0.856	0.437	0.583	0.915	0.914	0.902
⑭	0.809	0.196	0.363	0.916	0.920	0.916
⑮	0.867	—	—	0.883	—	—
⑯	0.780	—	—	0.914	—	—
⑰	0.836	0.084	0.421	0.919	0.917	0.917
⑱	0.842	0.241	0.394	0.922	0.921	0.915
⑲	0.873	0.242	0.501	0.858	0.884	0.895
⑳	0.894	0.040	0.252	0.877	0.900	0.880
㉑	0.890	0.252	0.526	0.879	0.893	0.875
比較用	0.878	0.040	—	0.875	0.886	—

×長さ 900mm) であり、黒色の底表面はカラーアルミスプレー (艶消黒) で塗装した。試験体は北海道旭川市にある北方建築総合研究所の敷地内に設置した。試験体の設置状況を写真 3-4 に示す。試験体は壁面が南面を向くように設置した。

表 3-1 試験体の仕様

名称	壁面	庇
No. 1	低反射 (黒色)	低反射 (黒色)
No. 2	高反射 (白色)	低反射 (黒色)
No. 3	高反射 (白色)	高反射 (黒色)



写真 3-1 試験体 No. 1 (壁：低反射、庇：低反射)

[参考文献]

- 1) 日本建築学会：建築学体系 (室内環境計画), No. 22, 1969
- 2) 藤本哲夫, 岡田朋和, 近藤靖史：高反射塗料の日射反射特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No. 601, pp. 35-41, 2006. 3

3. 建物外皮の放射特性の測定

(1) 測定概要

外装部材の色の違いが放射環境に及ぼす影響を調べるため、庇を模した試験体を対象に放射測定を行った。試験体の仕様を表 3-1 に示す。試験体 No. 1 は全面黒色で反射率の低い仕様 (写真 3-1)、試験体 No. 2 は壁面が白色の高反射、庇が黒色の低反射の仕様 (写真 3-2)、試験体 No. 3 は、一般的な全面白色の高反射の仕様とした (写真 3-3)。壁面の表面材はアルミガラスクロス (黒色：黒艶消色、白色：シルキーホワイト) で、庇はアルミ製の既製品 (出幅 500

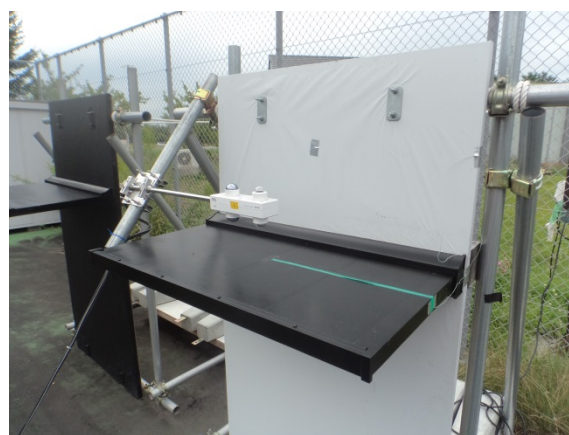


写真 3-2 試験体 No. 2 (壁：高反射、庇：低反射)



写真 3-3 試験体 No. 3 (壁：高反射、底：高反射)



写真 3-4 試験体の設置状況

放射環境の測定には放射収支計（英弘精機社製 4成分放射計 MR-60）を用い、壁面から 25cm、底から 10cm の位置に設置した（写真 3-2、写真 3-3）。底上の短波放射（上・下）、長波放射（上・下）を同時に 2 体ずつ測定した。測定期間は 2015 年 5 月 26～8 月 28 日であり、サンプリング間隔は 10 秒である。

（2）測定結果

1) 試験体 No. 1 と No. 2 の比較

試験体 No. 1（壁：低反射、底：低反射）と No. 2（壁：高反射、底：低反射）の上側短波放射の比較を図 3-1、下側短波放射の比較を図 3-2 に示す。

図 3-1 および図 3-2 によれば上側短波放射は試験体 No. 2 が試験体 No. 1 よりも 9%大きく、下側短波放射は試験体 No. 2 が試験体 No. 1 よりも 14%大きい。これは壁面反射率の違いによる反射日射の影響であり、No. 2 の壁面が高反射であるため、短波放射が No. 1 よりも多くなったことによる。

長波放射の上側および下側の測定結果を図 3-3、図 3-4 に示す。長波放射については上側、下側ともに差はみられない。これは底上の長波放射の収支には、底の反射率の影響が大きく、壁面の反射率の違いに起因する壁面からの長波放射の影響が、底の上ではさほど大きくないことを示唆している。

図 3-5 に短波放射の収支量、図 3-6 に長波放射の収支量、図 3-7 に全放射収支量の比較を示す。なお放射収支量は下式により算出した。

$$\text{短波放射収支量} = \text{上側短波放射} - \text{下側短波放射}$$

$$\text{長波放射収支量} = \text{上側長波放射} - \text{下側長波放射}$$

$$\begin{aligned} \text{放射収支量} = & (\text{上側短波放射} + \text{上側長波放射}) \\ & - (\text{下側短波放射} + \text{下側長波放射}) \end{aligned}$$

図 3-5～3-7 によれば、融雪に影響を与える底上の放射収支は No. 1 に比べ No. 2 の方が大きくなっており、壁面の仕様変化により底上における放射環境が変化することが分かった。

晴天時の代表日（2015. 6. 1）における測定結果を図 3-8～3-11 に示す。代表日（晴天時）において、長波放射に大きな差はないが（図 3-10、図 3-11）、午後になると壁面の仕様の違いにより短波放射に差が生じている（図 3-8、図 3-9）。この時間帯の短波放射の違いにより、融雪状況に差が出ると考える。

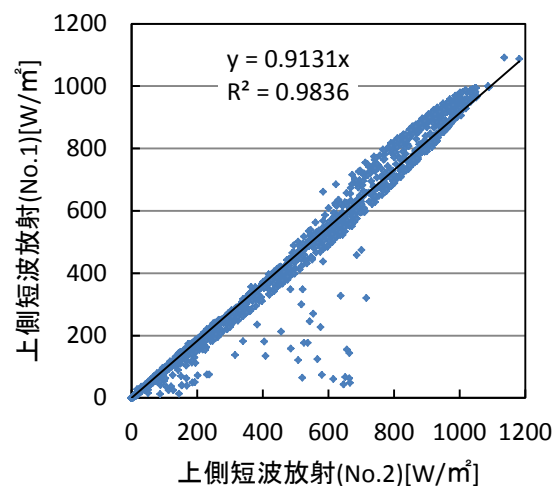


図 3-1 上側短波放射の測定結果（No. 1、No. 2）

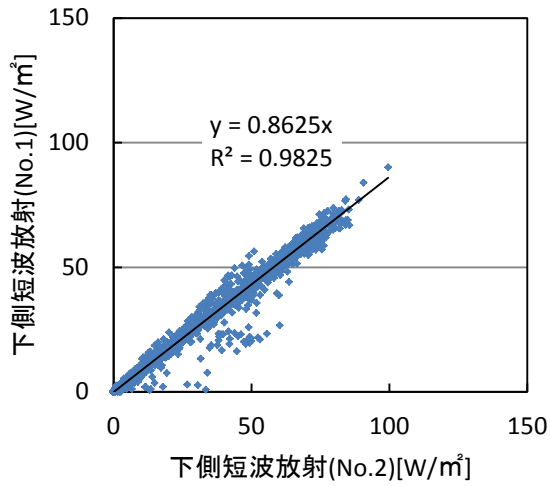


図 3-2 下側短波放射の測定結果 (No. 1、No. 2)

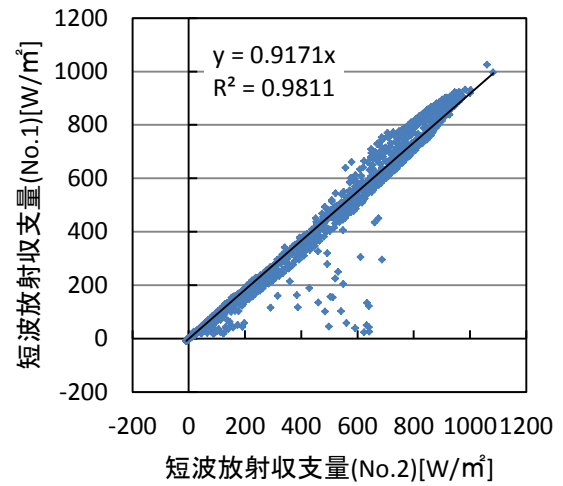


図 3-5 短波放射収支量の比較 (No. 1、No. 2)

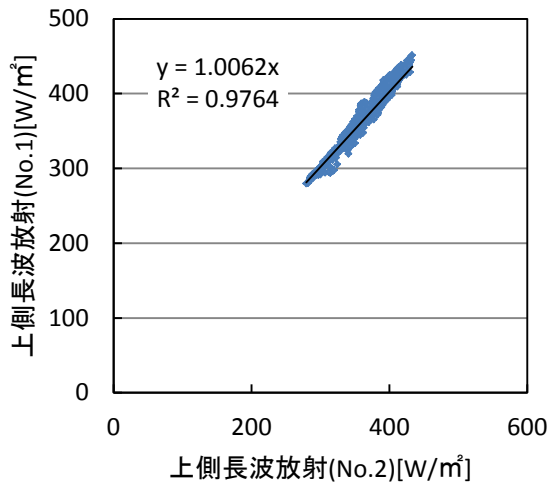


図 3-3 上側長波放射の測定結果 (No. 1、No. 2)

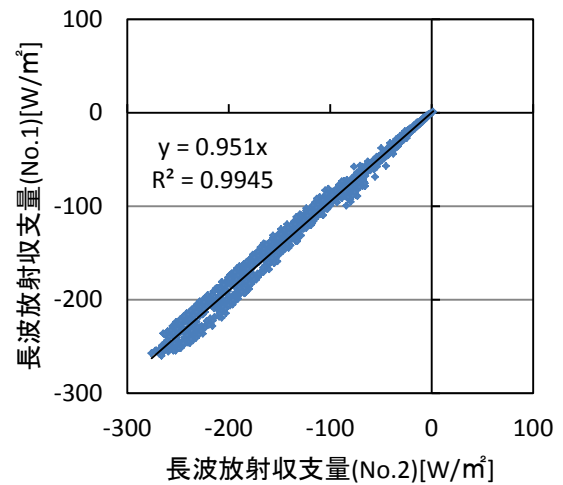


図 3-6 長波放射収支量の比較 (No. 1、No. 2)

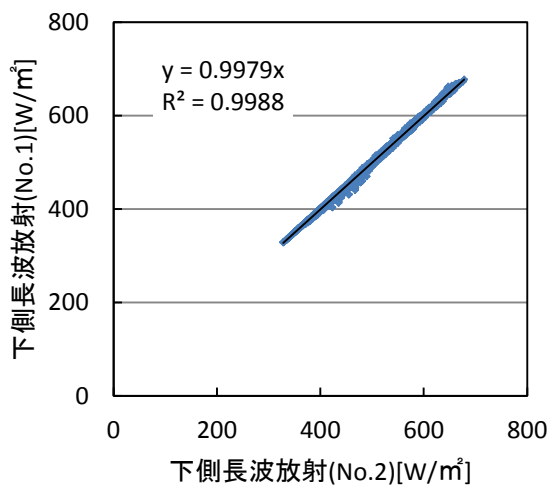


図 3-4 下側長波放射の測定結果 (No. 1、No. 2)

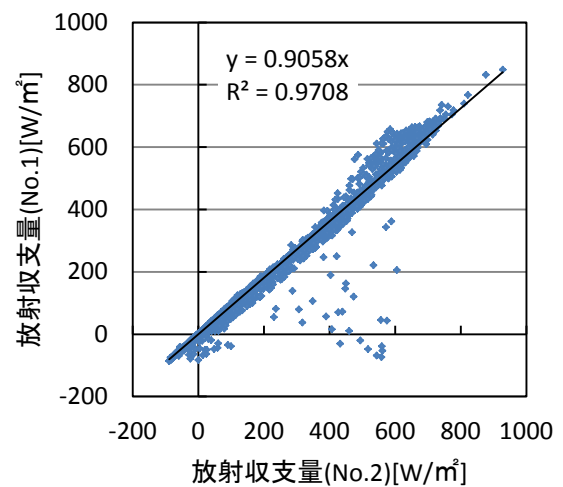
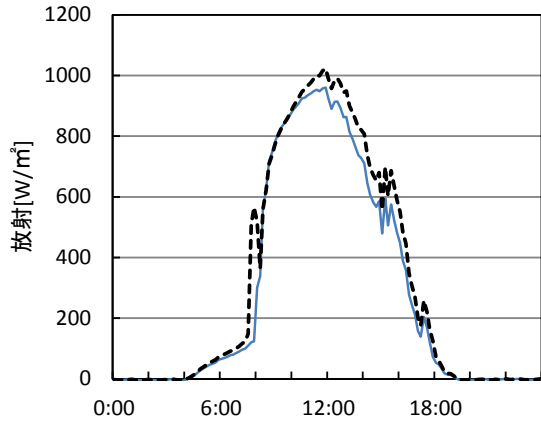
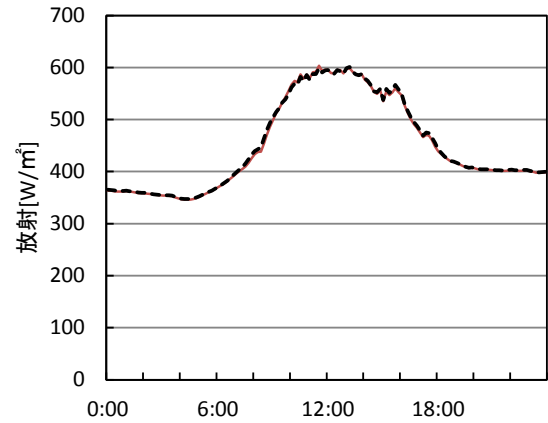


図 3-7 放射収支量の比較 (No. 1、No. 2)



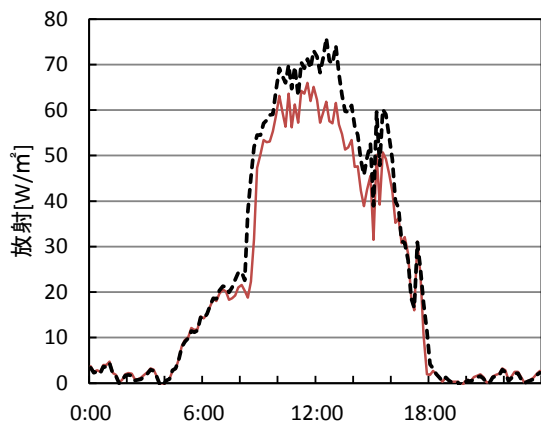
— 上側短波放射(No.1) - - - 上側短波放射(No.2)

図 3-8 代表日における上側短波放射の比較
(No. 1、No. 2)



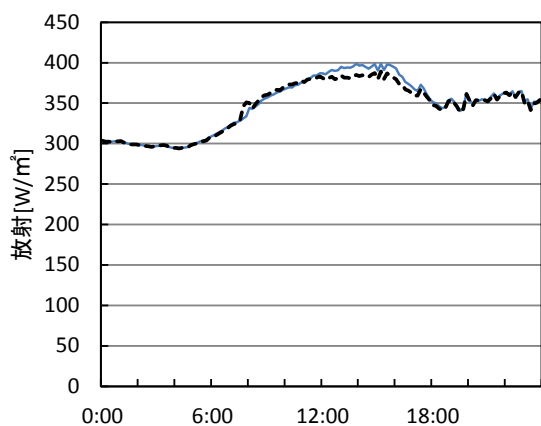
— 下側長波放射(No.1) - - - 下側長波放射(No.2)

図 3-11 代表日における下側長波放射の比較
(No. 1、No. 2)



— 下側短波放射(No.1) - - - 下側短波放射(No.2)

図 3-9 代表日における下側短波放射の比較
(No. 1、No. 2)



— 上側長波放射(No.1) - - - 上側長波放射(No.2)

図 3-10 代表日における上側長波放射の比較
(No. 1、No. 2)

2) 試験体 No. 2 と No. 3 の比較

試験体 No. 2 (壁：高反射、底：低反射) と No. 3 (壁：高反射、底：高反射) の上側短波放射の比較を図 3-12、下側短波放射の比較を図 3-13 に示す。

図 3-12 および図 3-13 によれば上側短波放射は試験体 No. 2 と試験体 No. 3 に差はないが、下側短波放射は試験体 No. 3 が試験体 No. 2 よりも 9 倍程度大きい。これは底の反射率の違いが大きく影響しており、No. 3 の底の反射率が高いためである。

図 3-14、3-15 長波放射の上側、下側の測定結果を示す。上側長波放射に差は見られないが、下側長波放射では放射量が大きくなるに従い No. 2 が大きくなる傾向を示し $500\text{W}/\text{m}^2$ を超えると 2 割程度大きくなる。これは No. 3 に比べ No. 2 の底の温度が日射により温かくなっていることを示している。

図 3-16～図 3-18 に放射収支量の比較を示す。No. 2 と No. 3 の仕様の違いは底の色のみであるが、放射収支量は 4 倍程度 No. 2 が大きく異なり、外装部材の仕様の違いにより放射環境が大きく変わることが示されている。

晴天時の代表日 (2015. 7. 9) における測定結果を図 3-19～3-22 に示す。代表日 (晴天時) において、上側短波放射、上側長波放射に大きな差はないが (図 3-19、図 3-21)、日中に下側短波放射および下側長波放射の差が大きくなっている (図 3-20、22)。これは、反射率の高い底 (No. 3) では日射反射が大きいものの、底の表面温度は No. 2 に比べ高くないことを示している。

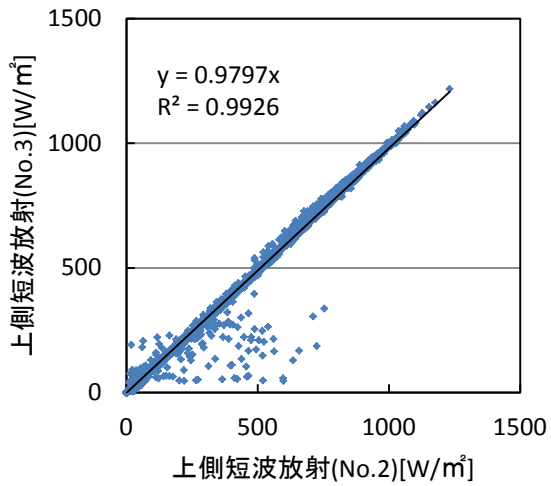


図 3-12 上側短波放射の測定結果 (No. 2、No. 3)

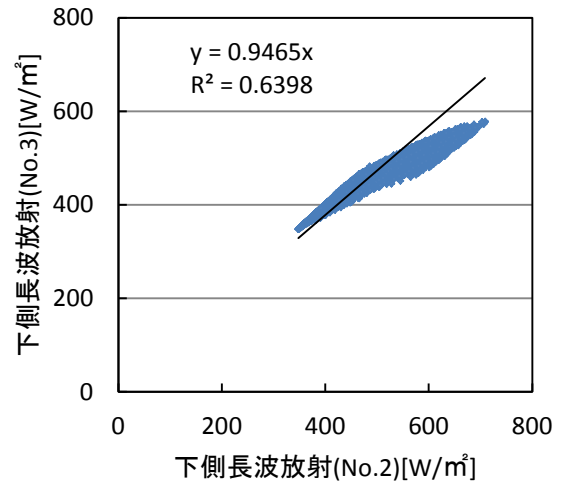


図 3-15 下側長波放射の測定結果 (No. 2、No. 3)

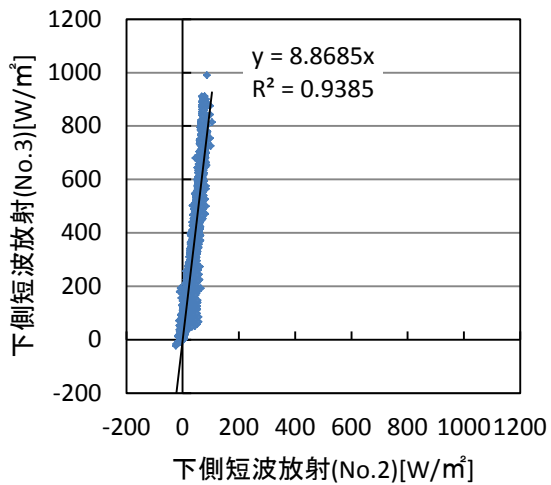


図 3-13 下側短波放射の測定結果 (No. 2、No. 3)

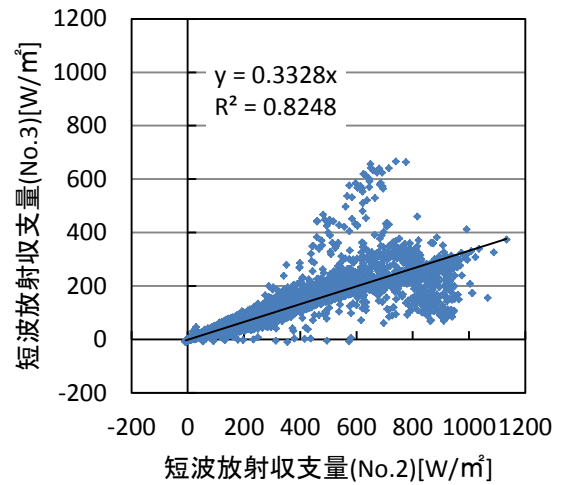


図 3-16 短波放射収支量の比較 (No. 2、No. 3)

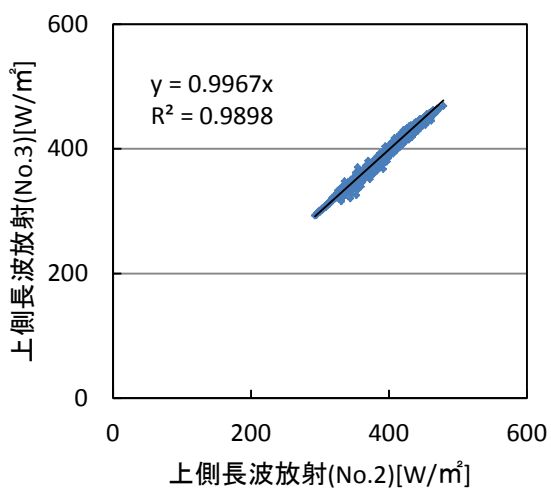


図 3-14 上側長波放射の測定結果 (No. 2、No. 3)

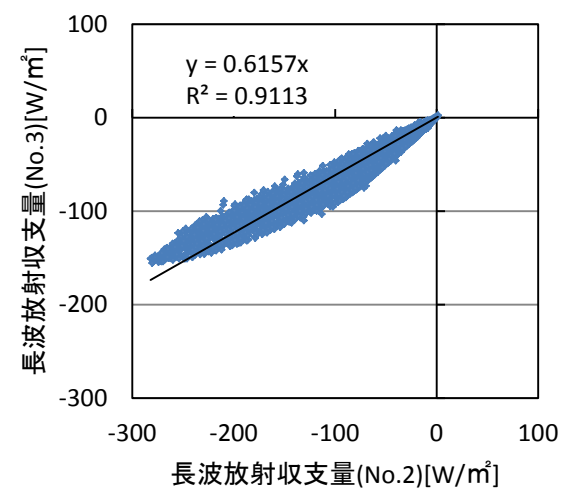


図 3-17 長波放射収支量の比較 (No. 2、No. 3)

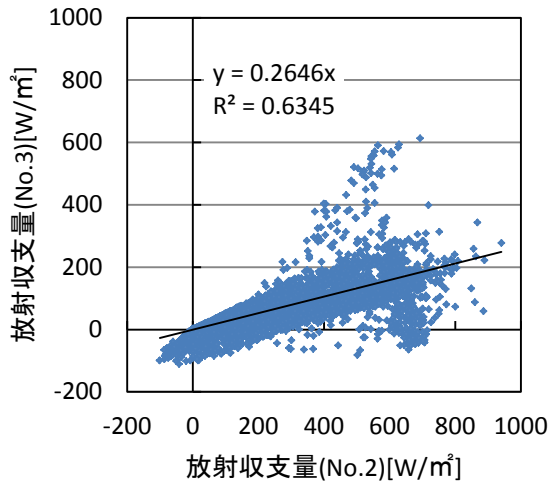


図 3-18 放射収支量の比較 (No. 2、No. 3)

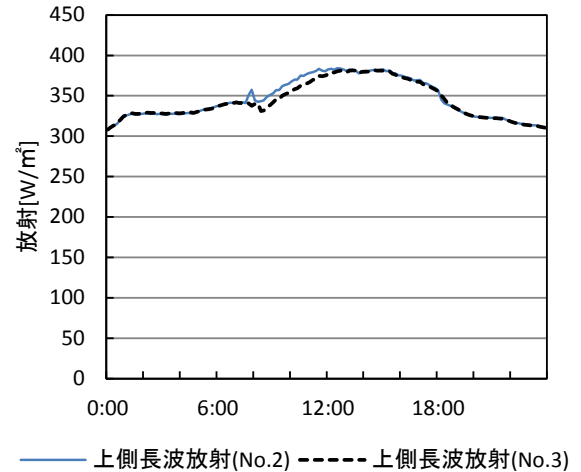


図 3-21 代表日における上側長波放射の比較 (No. 2、No. 3)

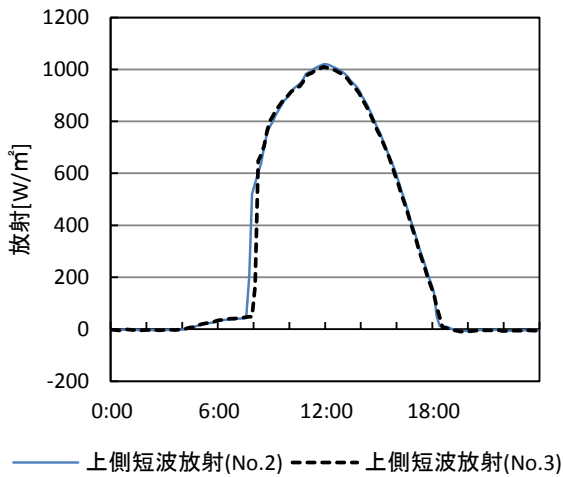


図 3-19 代表日における上側短波放射の比較 (No. 2、No. 3)

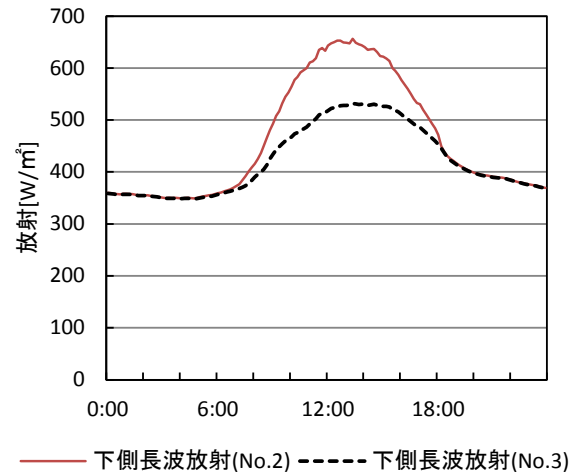


図 3-22 代表日における下側長波放射の比較 (No. 2、No. 3)

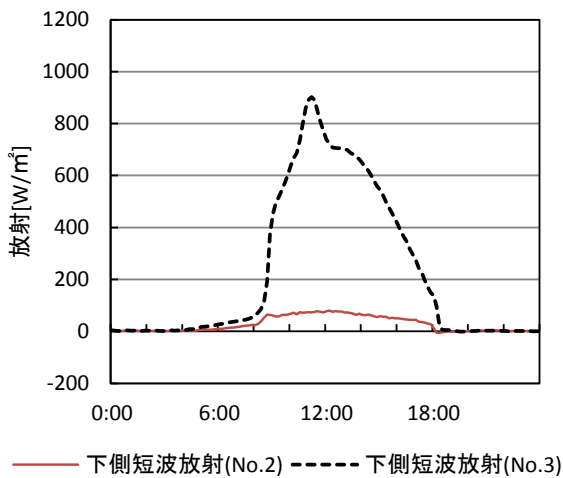


図 3-20 代表日における下側短波放射の比較 (No. 2、No. 3)

(3) 放射特性の比較

測定結果を基に外装部材の仕様の違いによる放射特性をまとめると表 3-2 のようになる。試験体 No. 1 のように低反射の材料で全て構成すると、短波放射の寄与は小さくなるが、融雪に最も影響する長波放射（下側）は大きくなる。一方、全て高反射の材料で構成すると (No. 3)、短波放射は大きくなるが、長波放射は小さくなり、融雪面では不利になる。低反射の材料と高反射の材料を組み合わせた仕様にする と短波放射も確保しつつ、長波放射も大きくなる。

次章以降は、これら仕様の違いによる放射特性の変化を踏まえ、融雪実験、数値解析による検討を行う。

表 3-2 仕様の違いによる放射特性の比較

概念図 実線(太線):日射 実線(細線):短波放射 点線:長波放射		試験体No.1	試験体No.2	試験体No.3
短波放射	上側	少ない	多い	多い
	下側	少ない	少ない	多い
長波放射	上側	標準	標準	標準
	下側	多い	多い	少ない

4. 外装部材の融雪に関するモデル実験

本章では、外装部材における融雪状況を把握するためモデル実験による検討を行う。最初に、実建物（北方建築総合研究所庁舎）の庇を対象とした融雪状況の観測を実施し、外装部材の積雪と融雪に関する基礎的知見を得た。次に仕様の異なる外装部材の試験体を用いたモデル実験を行い、仕様の違いが融雪状況に及ぼす影響を実験的に確認した。

(1) 実建物の庇を対象とした観測

1) 観測の概要

観測対象は北海道旭川市に建つ北方建築総合研究所の4Fに取り付けられている庇とした(写真4-1)。



写真 4-1 対象建物

庇が設置されている方位は南南西、庇の出の長さは1600mm、水勾配は1/50、外壁および庇の表面はアルミメッキ仕上げである(写真4-2)。外壁面は断熱

されており室内側からの伝熱による影響は殆どない。観測では、外壁の表面温度を測定するとともに庇上および庇先端部の状況をインターバルカメラにより1時間間隔で記録した。観測期間は2013年11月27日から2014年3月31日までである。気象データは気象庁アメダスおよび敷地内の気象観測システムによる計測値を用いた。

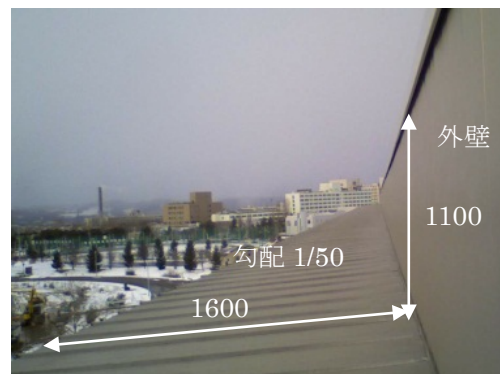


写真 4-2 庇の外観

2) 観測結果

① 庇上の積雪状況

地上および庇上の積雪深の推移を図4-1に示す。地上積雪深および降雪量はアメダスによる値であり、庇上の積雪深はインターバルカメラの撮影画像から推定した。11月下旬から12月上旬までの積雪前半では地上積雪深と庇上積雪深の差は大きくないが(写真4-3)、12月上旬以降は庇上積雪深の値は地上積雪深に比べかなり小さくなり、最深積雪深時(2014/02/01)においては、両者の差は約3倍となった(写真4-4)。これは、庇付近の風速は地表面に

比べ速く、雪が風により吹き払われ堆積する量が少ないことに加え、外壁面の日射取得に伴う輻射熱による融雪が影響しているためと考える。底上の積雪は12月19日にゼロになったが、12月27日から3月22日までは増減しつつ底上に積雪がある状態が長期に渡り続いた。

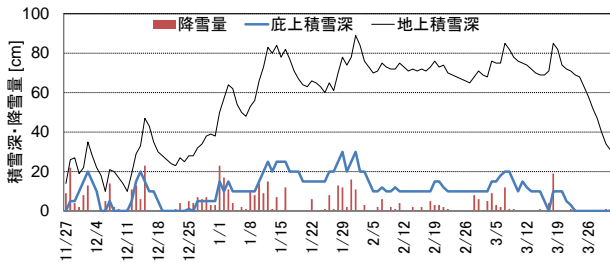


図 4-1 地上および底上の積雪深の推移

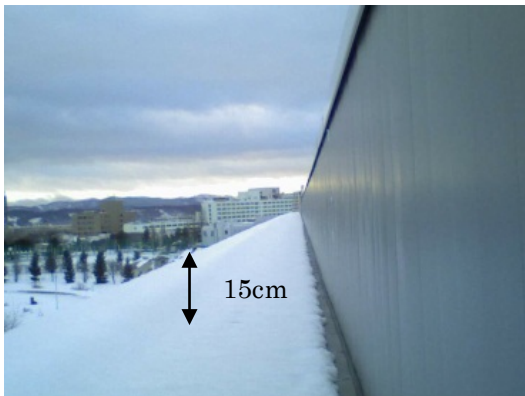


写真 4-3 積雪期前半の状況 (2014/12/16)



写真 4-4 最深積雪深時の状況 (2014/02/01)

4-2 をみると、全天日射量が増加すると表面温度が上昇する傾向がみられ、日中 (8:00~16:00) において外気温が 0°C 程度であっても外壁の表面温度は 20~50°C まで上昇している状況が確認できる。図 4-3 に示すように 3/9 から 3/14 にかけて表面温度が上昇している外壁付近において特に融雪が進行している状況にある。以上の観測結果から、外壁から底への熱伝導の影響も考えられるものの、実建物においても壁面からの輻射により底上の積雪が融雪することが確認された。

一方、日射の無い夜間では表面温度はほぼ外気温と同程度になっており (図 4-2)、庇の端部 (水下側) において融雪水による氷柱が形成された。氷柱は日の当たる日中に落下し夜間に再度形成される状況を繰り返していた。また融雪期後半の 3 月下旬には氷板状になった底上の積雪が滑動によりせり出す状況がみられ、庇先端から落雪した (写真 4-5)。以上のように日射による外壁面の表面温度の上昇は底上の融雪と庇端部における氷柱および氷板形成に大きく影響している。

庇等において融雪を促す仕様にする際は、外気条件や融雪水の処理に配慮する必要があり、氷板化した氷のせり出しを防ぐために雪止め等の設置が必要であるほか、氷柱による問題が生じないように、落下しても問題とならない平面計画にする必要がある。



写真 4-5 氷板化した積雪のせり出し (2014/3/21 16:00)

② 気象条件と底上の融雪状況との関係

2014/03/09 から 2014/03/14 までの外気温と日射量ならびに外装表面温度の推移を図 4-2、その間の底上の積雪状況および融雪状況を図 4-3 に示す。図

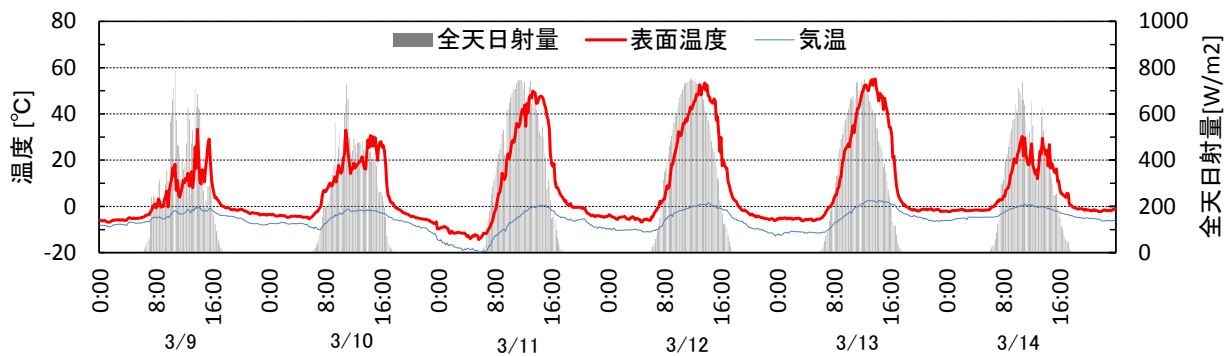


図 4-2 全天日射量、気温、表面温度の推移 (3月9～14日)



図 4-3 庇上の積雪状況・融雪状況の推移 (3月9～14日)

(2) 庇の融雪に関するモデル実験

1) 実験概要

モデル実験で用いる試験体は3章における放射環境の測定対象と同一の外壁と庇を模した試験体(表3-1)であり、壁面および庇が黒色の低反射の仕様、壁面が高反射で庇が低反射の仕様、壁面および庇が高反射の仕様の3種類である。

融雪のモデル実験は北方建築総合研究所の敷地内で2014年11月～2015年3月にかけて実施した。試験体の設置状況を写真4-6に示す。試験体は壁面が南面を向くように設置し、試験体の積雪状況および融雪状況をインターバルカメラを用いて10分間隔で記録した。



写真 4-6 モデル実験における試験体の設置状況

2) 実験結果

モデル実験実施期間において、庇上に融雪が起きたのは8回確認された。融雪状況を写真4-7～4-14、気象状況および融雪時間の一覧を表4-1に示す。融雪が完了した目安は庇上の積雪が全て無くなった状態とした。表4-1によれば、壁面が高反射で庇が低反射の仕様の融雪時間が最も早いケースが4ケース、壁面および庇が低反射の仕様が早いケースが4ケースで同数であった。降雪量20cm以上の条件(4回)をみると、壁面が高反射で庇が低反射の仕様における融雪時間が短くなるケースが多い。

一般的な仕様である壁面および庇が高反射の仕様との融雪時間の差は最大で50時間以上あった(2014/11/14)。

以上から、外装の仕様の違いが融雪時間に差をもたらすことが確認された。黒色で統一した仕様と低反射と高反射を組み合わせた仕様では、ほぼ同様の融雪性能であったが、降雪量が20cm以上の条件では、低反射と高反射を組み合わせた仕様の融雪時間が短くなるケースが多い結果となった。

次章では融雪状況の差をもたらす要因について放射解析により検討する。



(a) 融雪前



(a) 融雪前



(b) 融雪後

写真 4-7 2014/11/14 のケース



(b) 融雪後

写真 4-9 2014/12/22 のケース



(a) 融雪前



(a) 融雪前



(b) 融雪後

写真 4-8 2014/12/17 のケース



(b) 融雪後

写真 4-10 2014/12/31 のケース



(a) 融雪前



(b) 融雪後

写真 4-11 2015/1/8 のケース



(a) 融雪前



(b) 融雪後

写真 4-13 2015/3/2 のケース



(a) 融雪前



(b) 融雪後

写真 4-12 2015/2/24 のケース



(a) 融雪前



(b) 融雪後

写真 4-14 2015/3/12 のケース

表 4-1 融雪状況の一覧

No.	日付	降雪量 [cm]	平均気温 [°C]	仕様 (壁-庇)	融雪開始時刻 融雪終了時刻	融雪時間
01	2014/11/14	20	-0.7	高反射-高反射	2014/11/14/07:00 2014/11/19/14:25	127h25
				高反射-低反射	2014/11/14/07:00 2014/11/17/11:55	76h55
				低反射-低反射	2014/11/14/07:00 2014/11/17/13:05	78h05
02	2014/12/17	25	-1.7	高反射-高反射	2014/12/17/07:00 2014/12/20/16:45	80h45
				高反射-低反射	2014/12/17/07:00 2014/12/20/11:23	76h23
				低反射-低反射	2014/12/17/07:00 2014/12/20/11:53	78h53
03	2014/12/22	32	-6.7	高反射-高反射	2014/12/22/07:00 全て融雪せず	—
				高反射-低反射	2014/12/22/07:00 2014/12/26/12:02	101h02
				低反射-低反射	2014/12/22/07:00 2014/12/28/12:39	144h39
04	2014/12/31	14	-8.2	高反射-高反射	2015/01/01/07:00 全て融雪せず	—
				高反射-低反射	2015/01/01/07:00 2015/01/01/12:44	5h44
				低反射-低反射	2015/01/01/07:00 2015/01/01/12:04	5h04
05	2015/01/08	28	-1.9	高反射-高反射	2015/01/08/09:00 全て融雪せず	—
				高反射-低反射	2015/01/08/09:00 2015/01/12/15:35	102h35
				低反射-低反射	2015/01/08/09:00 2015/01/11/12:47	75h47
06	2015/02/24	10	-1.3	高反射-高反射	2015/02/24/07:00 2015/02/24/12:48	5h10
				高反射-低反射	2015/02/24/07:00 2015/02/24/11:18	4h18
				低反射-低反射	2015/02/24/07:00 2015/02/24/11:08	4h08
07	2015/03/02	14	-0.6	高反射-高反射	2015/03/02/10:00 2015/03/05/11:13	73h13
				高反射-低反射	2015/03/02/10:00 2015/03/03/13:03	27h03
				低反射-低反射	2015/03/02/10:00 2015/03/03/12:53	26h53
08	2015/03/12	19	-1.2	高反射-高反射	2015/03/12/7:00 2015/03/13/14:03	31h03
				高反射-低反射	2015/03/12/7:00 2015/03/12/11:31	4h31
				低反射-低反射	2015/03/12/7:00 2015/03/12/12:11	5h11

5. 熱放射特性を利用した融雪法の検討

本章では3章における放射特性の測定結果、4章におけるモデル実験の結果を踏まえ、放射解析により建物外装の融雪の促進に有効な仕様の検討を行う。

(1) 解析方法

図5-1に示す壁面に庇があるモデルを解析対象とした。庇の出幅は0.3m、勾配は10°とし、庇が上下に1、2、5、10m間隔で壁面に設置されている仕様を検討した。計算条件を表5-1に示す。外気温は-2℃、室温は20℃、ルーバーに積雪がある条件とした。

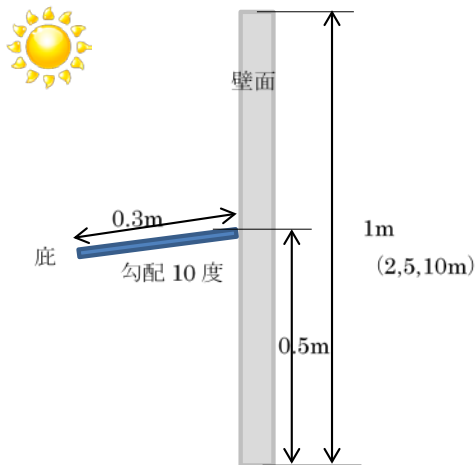


図5-1 解析モデル

表5-1 解析条件

項目	条件
外気温	-2℃
室温	20℃
壁の熱貫流率	0.3W/m ² K
ルーバーの日射吸収率	0.1(ルーバーに積雪)
太陽高度	23.8度
法線面直達日射量	500W/m ²
水平面天空日射	100W/m ² K
実効放射量	50W/m ²

解析では壁面を高さ方向に20分割し、ルーバーとの放射熱授受を計算し、ルーバーの熱収支から融雪能力を(5-1)式より算出した。解析モデルの上下は循環境界条件とし、1m(または2、5、10m)間隔でルーバーがあるとす。各面は完全拡散と仮定した。ルーバーは金属を想定し、厚み方向の熱抵抗は無視する。

$$M = S + R_w - R_s - C \quad (5-1)$$

ここで、M: 融雪能力

S: 庇が吸収する日射量の合計

R_w: 庇が吸収する長波長放射量の合計

R_s: 庇から天空への長波長放射量(庇と他の建物の放射授受は0と仮定)

C: 庇からの対流放熱量

(2) 解析結果

1) 壁面の日射吸収率と壁面温度の関係

壁面の日射吸収率(a)を0.2、0.5、0.8と変化させ、外表面の総合熱伝達率(α)は23.3W/m²Kとした。

解析結果を図5-2に示す。庇の反射日射により庇上方の壁面温度が高く、影となる下方の壁面温度が低い。日射吸収率の大きいほど壁面温度は高くなり、庇への長波長放射熱量は多くなる。

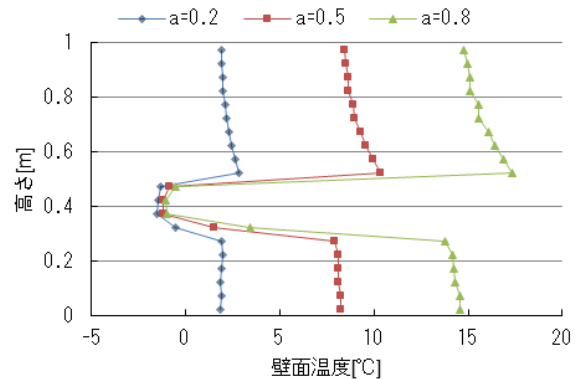


図5-2 壁面の日射吸収率と壁面温度の関係

2) 壁面の日射吸収率と融雪能力の関係

庇裏面の日射吸収率を0.8した場合の解析結果を図5-3に示す。外表面の総合熱伝達率(α)は23.3W/m²Kおよび16.0W/m²Kとした。解析の結果、壁面の日射吸収率が小さい(反射率が大きい)ほど、庇の融雪能力は大きくなり、熱伝達率が小さいほど空気への放熱が減少するため、融雪能力は大きくなる。

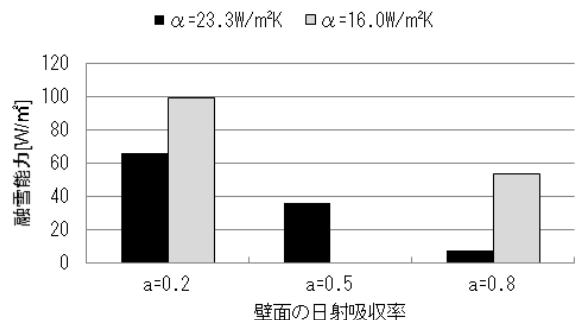


図5-3 壁面の日射吸収率と融雪能力の関係

3) 壁面および庇裏面の日射吸収率の影響

外表面の総合熱伝達率(α)を $16\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ した場合は解析結果を図 5-4 に示す。庇裏面の日射吸収率が大きいほど融雪能力は大きくなる。庇裏面の日射吸収率が大きいときは壁面の日射吸収率が小さい(反射率が大きい)ほど、融雪能力が大きくなる。

庇裏面の日射吸収率が小さい場合には、長波長放射による吸収熱量の割合が大きくなるため、壁面の日射吸収率が大きい(壁面温度が高い)ほど融雪能力が大きくなる。

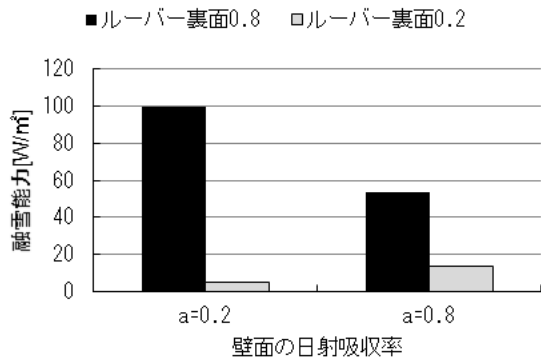


図 5-4 壁面および庇の日射吸収率と融雪能力の関係

4) 庇の上下の設置間隔の影響

外表面の総合熱伝達率(α)を $23.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、壁面の日射吸収率 0.2、庇裏面の日射吸収率 0.8 とした場合は解析結果を図 5-5 に示す。庇間隔が大きくなると融雪能力は小さくなる。これは下の庇(雪面)からの反射日射の受熱量が小さくなる(形態係数が小さくなる)ためである。

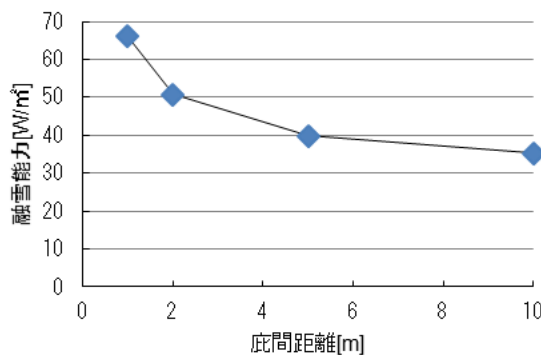


図 5-5 庇間隔と融雪能力の関係

5) 融雪能力の高い仕様に関する考察

以上の解析を踏まえると、庇裏面の日射吸収率は

大きい方が良い。また、積雪が少ないときの日射の吸収を考慮すると、庇表面の日射吸収率も大きい方が良い。これは4章のモデルにおける庇を黒色とした仕様である。

庇裏面の日射吸収率を大きくする場合、壁面の日射吸収率は小さい(反射率が大きい)方が良い。これは4章のモデル実験における壁面を白色とした仕様に該当する。

一方、庇裏面の日射吸収率を大きくできない場合には、壁面の日射吸収率を大きくし、長波長による伝熱を促進することも考えられるが、反射日射を利用する(庇裏面の日射吸収率が大きい)場合よりも融雪能力は小さい。なぜなら、長波長放射による伝熱は、対流放熱による熱損失が発生するためである。

6. まとめ

落雪事故の原因となる恐れのある高層建築物の外装部材など雪処理の困難な部位に堆積した積雪を建物外皮の熱放射特性および日射の反射指向特性を利用し融雪する新たな手法の提案を目的として、モデル実験、放射解析等による検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 屋外でのモデル実験により、壁面の日射反射率の違いが外装部材(庇)の融雪に及ぼす影響を検討し、熱放射および反射特性を利用した融雪法の有効性を確認した。庇の日射吸収率を増した仕様と反射率の高い仕様を比較すると、庇の上に堆積した積雪の融雪時間の差は最大で50時間以上あった。
- 2) 放射解析の結果、庇の日射吸収率と壁面の反射率を高めた仕様の融雪能力が最も高いことが分かった。

以上の検討結果を踏まえ、超高層建築物等の外装材における雪対策の基礎資料として技術相談等において活用を図る。また、実用化に向けた検討を進める。

[謝辞]

本研究は JSPS 科研費 25630242(挑戦的萌芽研究、代表者：堤拓哉)の助成を受け実施したものです。