

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25249082

研究課題名(和文) 積雪シミュレーションを用いた除雪エネルギーゼロの北方型スマート街区の開発

研究課題名(英文) The Study of Developments to Winter City Smart Block Design with Free Energy of Snow Cleaning using Snow Simulations

研究代表者

瀬戸口 剛 (SETOGUCHI, TSUYOSHI)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：20226674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：積雪寒冷都市において風雪環境を改善することにより屋外除雪エネルギーを最小化し、屋内建築エネルギーと一体化した「北方型スマート街区」を開発した。風洞実験装置を用いた風雪シミュレーションにより、積雪寒冷都市である札幌都心部を対象に、街区空間形態の違いによる、冬季の屋外歩行空間における積雪の歩行への影響を評価し、歩道と車道を含めた屋外公共空間における積雪量と、その除雪エネルギー量を示した。さらに、街区空間形態ごとに街区内の屋内建築エネルギー量を把握し、屋内と屋外を合わせた街区全体のエネルギー消費量を低減する北方型スマート街区の空間像として、基壇部型高層建築の有用性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Author developed “Northern Smart Block Model” which reduce both the snow cleaning energy and the building consumption energy in the snowy and cold cities. On the snow and wind simulations using wind tunnel, author evaluated the pedestrian environments on the pedestrian public spaces in winter season for downtown Sapporo City, and simulated the snow accumulation and snow cleaning energy on the pedestrian public spaces. At the result, author developed and cleared the effectiveness of “Low-rise Podium and Tower Building” as “Northern Smart Block Model” which reduce the both snow cleaning energy and building consumption energy.

研究分野：都市計画・都市デザイン

キーワード：都市デザイン 積雪寒冷都市 風雪シミュレーション 北方型スマート街区 コンパクトシティ 積雪実測調査 屋外利用行動 デザインガイドライン

1. 研究開始当初の背景

都市デザインにおいて、地域の気候に配慮した快適な都市環境の創出は重要な課題である。特に積雪寒冷都市では、冬の寒さや積雪のため温暖地域とは異なるデザインアプローチが必要である。また近年、エネルギー消費を低減するサステナブルな都市づくりが目指されており、都市エネルギーの視点を組み込んだ都市空間像が求められる。

2. 研究の目的

本研究は、積雪寒冷都市において風雪環境を改善することにより、除雪エネルギーを最小化し、屋内建築エネルギーと一体化した街区空間像である、「北方型スマート街区」を開発することを目的とする。具体的には、風洞実験装置を用いた風雪シミュレーションにより、積雪寒冷都市である札幌都心部を対象に、街区空間形態の違いによる、冬季の屋外歩行空間における積雪の歩行への影響を評価するとともに、歩道と車道を含めた屋外公共空間における積雪量を把握し、それらの除雪に要するエネルギー量を把握する。一方で、街区空間形態ごとに街区内の屋内建築エネルギー量を把握し、屋内と屋外を合わせた街区全体のエネルギー消費量を低減する北方型スマート街区を開発し、その空間像を明らかにする。本研究の成果は、冬季の寒さや積雪が深刻な世界の積雪寒冷都市において、風雪環境を改善し、スマートシティを実現する上で、理論的な合理性と、具体的な手法を明らかにすることに貢献する。

3. 研究の方法

風雪シミュレーションには、北方建築総合研究所所有の回流型風洞装置を用いた。この装置の概要を図1に示す。測定部の断面は幅150cm、高さ70cm、測定洞の長さは7.0mである。雪の堆積を再現するために、模擬雪を測定部風上の粉体供給ノズルから、コンプレッサーによる圧搾空気を用いて風路内に供給している。模擬雪には北海道の雪に近似した安息角を示す活性白土(含水率8.5%、平均粒子径約20 μ m、安息角48~51 $^{\circ}$)を使用した。模擬雪の供給については、毎回一定量を供給し、供給速度は480g/min、一回あたりの総供給量を10kgとした。模擬雪の堆積深はトラバース装置にレーザ変位計を付けて計測した。風雪シミュレーションでは活性白土の模擬雪

10kgを20.8分間にわたり降雪させた。これは日降雪7cmが1週間降り続けることに相当する。本研究では、主に札幌都心部の市街地を対象とするため、1日に相当する実験時間

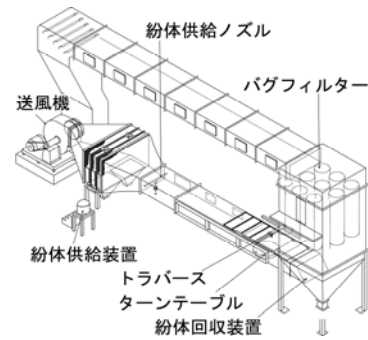


図1 風洞実験装置
(北方建築総合研究所)

である2.98分では、模擬雪の堆積量が少なく測定器の誤差が生じる可能性が高い。そこで、測定に耐えられる模擬雪の堆積が平均で1mm程度になるよう、実験想定を7倍して1週間とし、実験時間20.8分で風雪シミュレーションを行った。そのうえで、実験結果より得られた模擬雪の堆積量を7で割り、1日当たりの堆雪量として考察を行った。ここで、日降雪量7cmは札幌市において、過去5年間でみた1cm以上の降雪日の平均降雪量になる。なお、実験結果においては、1日当たりの積雪量に換算して得られた結果に基づいて、歩行障害や交通障害を考察した。

4. 研究成果

(1) 風雪シミュレーションを用いた高層高容積街区の空間像「北方型スマート街区」
都心部の高層高容積街区を対象に、4つの街区空間形態モデルを示して風雪シミュレーションを行い、街区空間形態の違いによる屋外公共空間の風雪環境への影響と、除雪エネルギーの違いを明らかにした(図2)。

① 街区空間形態の更新パターン

現在の札幌都心部に存在する高層高容積

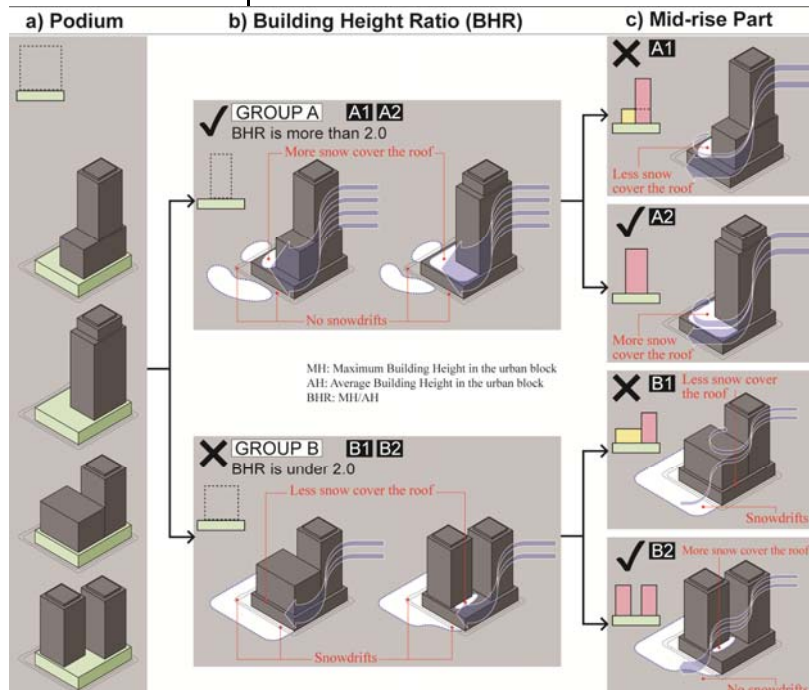


図2 高層高容積街区の北方型スマート街区空間形態検討

街区の街区空間形態の分析を基に、4つの形態ボリュームデザイン検討モデル（A1型、A2型、B1型、B2型）を計画した。グループAは建築高さ比率2.0以上、グループBは建築高さ比率2.0未満。グループ1は中層部を含む街区、グループ2は含まない街区である。検討モデルの容積率は1000%で統一し、低層基壇部の形状は同様としている。

②風雪環境評価・除雪エネルギー分析

a) 建築高さ比率：グループAのように建築高さ比率の大きい形態ボリュームデザインは、公共空間の風雪環境を向上させ、除雪エネルギー量を低減する。これは、建築高さ比率が大きい街区では、街区内建築物が高いために、地上の雪を吹き払う高層部からの吹き降ろしが増加するとともに、低層基壇部の屋根面積が大きいために、低層基壇部の屋根への積雪が増加して、地上での積雪量や大きな雪の吹きだまりが低減するためである。

b) グループAにおける中層部の有無：中層部の無い街区空間形態は、公共空間の雪の吹きだまりが少なく、除雪エネルギー量を低減する。これは、中層部が無いことで低層基壇部の屋根面積がより大きくなるため、そこでの積雪が増加し、地上での積雪が低減されるためである。

c) グループBにおける中層部の有無：グループAの場合と同様に、中層部が有る街区空間形態は、公共空間における雪の吹きだまりが増加し、除雪エネルギー量も増加する。

以上4つの更新パターンを比較し、建築高さ比率2.0以上の突出した高層部があり、中層部の無いA2型がもっとも望ましい街区空間形態であることを明らかにした。

(2) 風雪シミュレーションを用いた北方型スマート街区の空間形態とエネルギー消費

札幌都心部の大規模な再開発の動きがある高層高容積街区として、北3西4街区と北2西4街区を選定し、風雪シミュレーションにより、街区空間形態と冬季の屋外公共空間の環境、街区の消費エネルギーと除雪エネルギーの関係を明らかにした。

① 3つの街区空間形態の検討モデル

街区の開発方針の違いと、屋外公共空間における風雪の影響を明らかにするため、現状の対象街区内の建築物を再現した「現況街区」と、2つの異なる開発方針に基づいて建築物を更新する「高層共同型街区」「超高層一体型街区」の、合計3つのモデルを計画した。

② 風雪シミュレーション評価 (図3)

a) 「現況街区」と比較して、容積率を増加し高層建築物に更新した街区空間形態の「高層共同型街区」「超高層一体型街区」は、地上部の風速を上昇させるが、風による歩行環境の顕著な悪化は見られない。一方、屋外公共空間の積雪状況には大きな影響を与える。

b) 「高層共同型街区」「超高層一体型街区」は、「現況街区」に比べ、地上部の風速を増加させ、雪の吹きだまりの範囲を縮小し、雪の吹き払いの範囲を増加する。一方、卓越風に対して

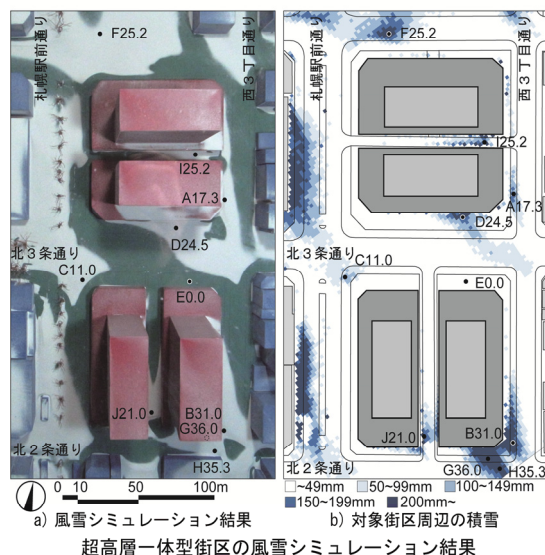
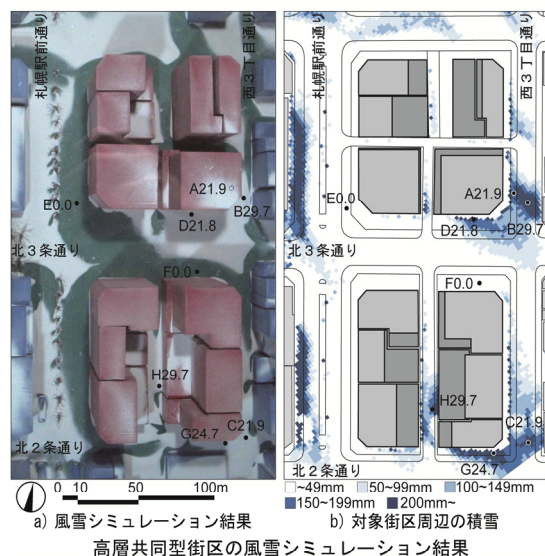
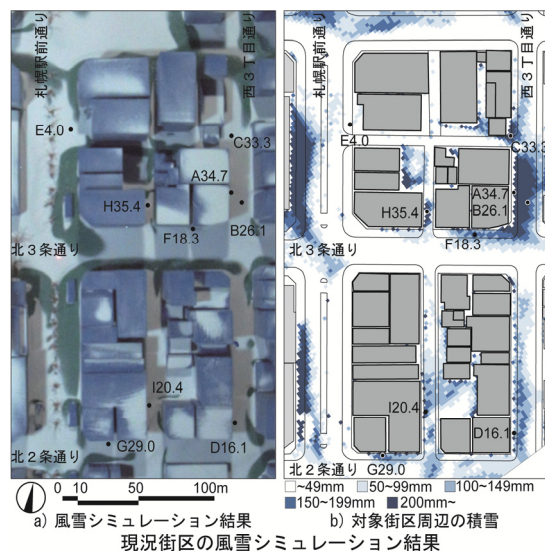


図3 検討モデルの風雪シミュレーション結果

表1 街区消費エネルギーと除雪エネルギー

	単位	高層共同型	超高層一体型
①合計建築物基準 E	GJ/年	455,964.7	468,042.9
②冬季の合計建築物基準 E	GJ	135,128.3	138,707.8
③冬季1日の合計建築物基準 E	GJ/日	1,501.4	1,541.2
④街区消費 E = (②+除雪E)	GJ/日	1,675.7	1,681.2
⑤街区消費 E に対する除雪Eの割合	%	10.4	8.3

建築物の風下側の隅角部に雪の吹きだまりを形成する。これは、高層建築により地上に吹き降ろす風が、増加して雪を吹き払うとともに、建築物高さや壁面を統一したことで街区空間形態の凹凸が減少し、風の乱れが抑制されたためと考えられる。

c)「高層共同型街区」「超高層一体型街区」ともに、通り沿いのオープンスペース(OS)に雪の吹きだまりが形成されたが、「現況街区」に比べて、北3条通り歩道上の雪の吹きだまりは減少した。

d)「高層共同型街区」に比べて「超高層一体型街区」の方が、より雪の吹きだまりを減少させる。これは、超高層建築物の高層部から吹き降ろす風がより増加して、雪の吹き払いが増えたことや、中高層部をセットバックしたことで、低層基壇部の屋根面に積雪し、歩道上の積雪を減少させたためと考えられる。

③街区内建築物と除雪エネルギー量の比較

風雪シミュレーションの結果から、除雪に要するエネルギー量(除雪E)と二酸化炭素排出量(除雪CO2)を算出し、街区内建築物の消費エネルギーと比較した。除雪Eは「現況街区」で274.6GJ/日、「高層共同型街区」で174.3GJ/日、「超高層一体型街区」で140.0GJ/日である。「現況街区」に比べて除雪Eは、「高層共同型街区」は37%、「超高層一体型街区」は49%低減し、「超高層一体型街区」の除雪Eは、「高層共同型街区」に比べて20%低減することを明らかにした。

次に街区内建築物の消費エネルギーを、2016年省エネルギー基準における基準一次エネルギー消費量(建物基準E)より示した。

その結果、街区空間形態ごとの冬季1日に消費する街区消費Eは、「高層共同型街区」で1,675.7GJ/日、「超高層一体型街区」で1,681.2GJ/日である。街区消費Eに対する除雪Eの割合は、「高層共同型街区」で10.4%、「超高層一体型街区」で8.3%である。除雪Eは、冬季の街区消費Eの約1割に相当し、その割合は建築物の省エネルギー化が進むほど増大する。除雪Eは街区空間形態の影響を受けることから、積雪寒冷都市における「北方型スマート街区」の構築には、街区空間形態と除雪Eを把握し、デザインプロセスに組み込むことが重要である。

(3)風雪シミュレーションを用いた融雪負荷と建物熱負荷を低減する街区空間形態

積雪寒冷都市の都心部において高容積街区に必要で、札幌都心部唯一の都市計画広場である北3条広場(以下、広場)と、隣接するMビルとNビルを対象に、街区空間形態と消費エネルギーの関係を明示し、建築の配置や形態により、雪の吹きだまりと除雪エネルギー量を低減する街区空間形態を開発した。

①検討する街区空間形態(図4)

STEP1では、Mビルの高層部形状について、II高層部を板状にして高さを抑え、外皮面積を縮小し、建物熱負荷(以下、熱負荷)を低減するタイプと、III高層部をより高く塔状にし

て雪の吹き払い範囲を増加させ、風雪の影響と融雪負荷を低減するタイプの、街区空間形態を検討した。STEP2では、STEP1で優れた「高層部塔状型」を基本に、Mビルの、IV基壇部を縮小し、日射による融雪を増加する、街区空間形態を検討した。STEP3では、STEP2でも優れた「高層部塔状型」を基本に、Nビルの高層部形状を検討した。V建築物足元の風速を低減するため、高層部の高さを抑え、板状にして外皮面積を縮小するタイプ、VI塔状の高層部を風上側に配置し、風下の基壇部に積雪させるタイプ、VII風雪の影響と融雪負荷を低減するため、塔状の高層部を風下側に配置し、雪の吹き払い範囲を増加させるタイプの、街区空間形態を検討した。各モデルの容積率、用途別延べ床面積、窓面積率、素材仕様は、現況と同様とした。

②融雪負荷・熱負荷の分析(図5)

検討モデルで風雪シミュレーションを行い、その結果から融雪負荷を把握した。一方、建築物の消費エネルギーとして、冬期1日当たりの熱負荷を算出した。外皮の熱損失量から建築物の各面が受ける、冬至の日射取得量(直達日射量+天空日射量)を引いた値を熱負荷とした。以下の2点を明らかにした。

a)形態検討における融雪負荷の重要性：融雪負荷は、建物熱負荷の約3割に相当し、断熱性能が向上するほど割合は増大する。融雪負荷は街区空間形態に影響されるため、建築物の空間形態検討は非常に重要である。

b)風雪の影響や除雪エネルギーを低減する街区空間形態：ア)高層部をより高く塔状にすると、風下側への吹き下ろしが増加して、吹き払い範囲が広がるため、地上部の雪の吹きだまりと融雪負荷を低減できる。イ)高層部の高さを抑え板状にすると、日射取得量が増加し外皮の熱損失量が減少するため熱負荷を低減できるが、地上部の吹きだまりと融雪

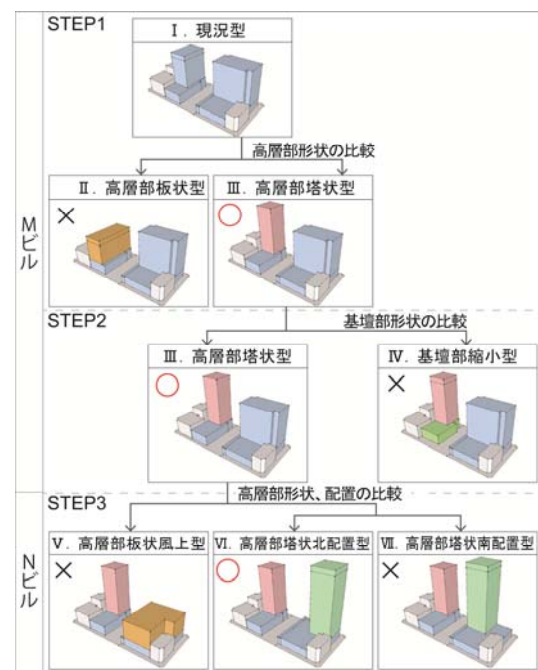


図4「北方型スマート街区」検討フロー

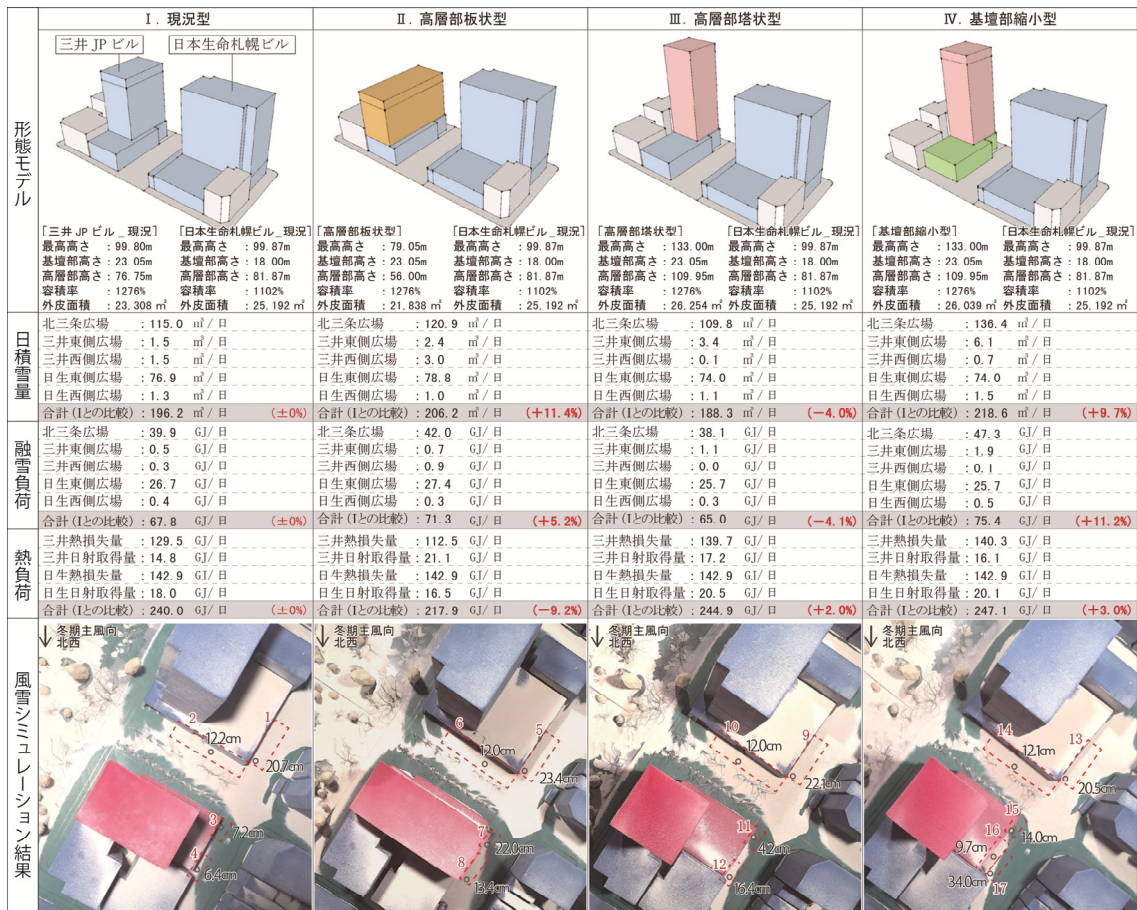


図5 風雪シミュレーションによる融雪負荷分析と外皮熱負荷分析の結果

負荷は増大する。り)隣接する建築物の基壇部壁面を揃えると、風速が乱れず、建築物足元の吹きだまりと融雪負荷を低減できる。え)高層部を風上に配置すると、風下側の基壇部上に風雪が吹き下ろすため、地上部の積雪量が減少し、吹きだまりと融雪負荷を低減できる。

以上より、風雪の影響や融雪負荷を低減する「北方型スマート街区」は、塔状の高層部を街区の風上側に配置し、隣接する建築物と基壇部壁面を揃えた形態を明示した(図5)。

(4) 積雪寒冷都市における都心オープンスペースの空間構成と利用行動

本研究の「北方型スマート街区」とは、積雪寒冷都市において風雪環境の改善により、除雪エネルギーを最小化し、屋内建築エネルギーも低減する街区空間形態である(図6)。風雪シミュレーションを用いて街区空間形態を検討するとともに、年間の屋外調査を行い、屋外OSの利用実態を把握し、屋外環境と利用行動の関係を明らかにした。

① 寒冷移行期の利用行動

寒冷移行期については、着座行動に着目し、空間構成の異なる6つのOSを対象に調査し、以下5点を明らかにした。ア)気温20℃程度以上の温暖期では、着座行動が多く屋外環境の影響は少ない。イ)気温5℃程度を下回る積雪期では、着座行動がほぼ見られなくなる。ウ)気温5~20℃程度の寒冷移行期では、着座行動は減少するが、日射や風速の影響が大きい。エ)日向の多いOSでは、気温が低下して

も着座組数の減少が抑えられる。オ)風の弱いOSでは、気温が低下しても着座時間の減少が抑えられ、着座行動が維持されやすい。

② 積雪期の利用行動

積雪期に北3条広場において、積雪状況と利用行動を調査した(図7)。その結果、歩行に関しては積雪が障害となるため、主要な出入口や最短経路では除雪が必要である。一方、積雪の写真撮影する立止りが増加し、雪遊びという冬季の新たな利用行動も確認され、OS内での積雪がオープンスペースでの滞留行動を促す要素となる。したがって、積雪寒冷都市のOSでは、必要歩行線と滞留行動を行うエリアを適切に計画し、人が滞留しやすい部分では、積雪を部分的に残して

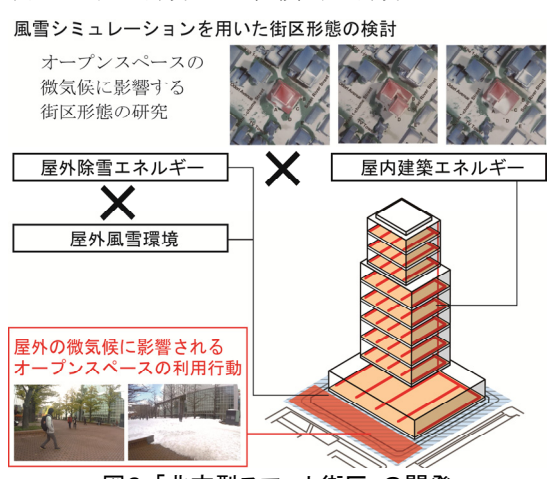


図6 「北方型スマート街区」の開発

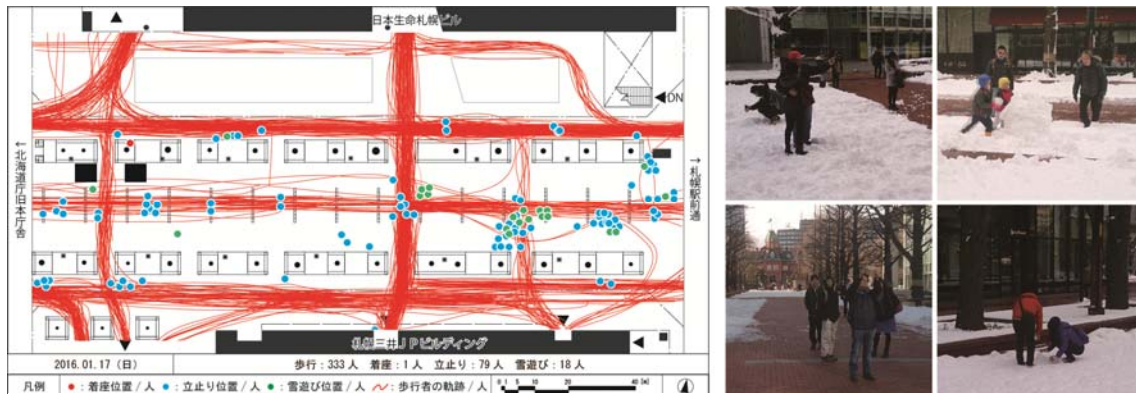


図7 北3条広場における積雪期の利用行動

雪遊びを誘導するなど、積雪寒冷都市に特有の新たな利用行動を促すことが重要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① Minori Kusaka, Tsuyoshi Setoguchi, Norihiro Watanabe, Zhiming Guo and Anasutasiia Paukaev. Human Behavior in Downtown Public Spaces during Cooling Periods in Winter Cities, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 査読有 Vol. 12, 2018, p.1-10
DOI: 10.17265/1934-7359/2018.01.001
- ② Norihiro Watanabe, Tsuyoshi Setoguchi, Kosuke Maeda, Daiki Iwakuni, Zhiming Guo and Takuya Tsutsumi. Sustainable Block Design Process for High-Rise and High-Density Districts with Snow and Wind Simulations for Winter Cities, *Sustainability*, 査読有 Vol. 9, No. 11, 2132, 2017
DOI: 10.3390/su9112132
- ③ 渡部典大、瀬戸口剛、松山倫之、郭芷銘、堤拓哉：積雪寒冷都市における風雪シミュレーションを用いたスマート街区の空間形態とエネルギー消費、*日本建築学会計画系論文集*、査読有、Vol. 82, No. 733, 2016, p.735-744
DOI: 10.3130/aija.82.735

その他5編

〔学会発表〕(計11件)

- ① 岩国大貴、瀬戸口剛、佐藤勇人、堤拓哉：積雪寒冷都市における冬期の都心オープンスペースの利用行動とデザインガイドライン—積雪寒冷都市における都市デザイン その16—、*日本建築学会学術講演梗概集*、2017、p.1387-1390、2017.07
- ② 横山翔太、瀬戸口剛、松山倫之、日下みのり、堤拓哉：風雪シミュレーションを用いた新市庁舎建設計画プロセスの開発—積雪寒冷都市における都市デザイン その12—、*日本建築学会学術講演梗概集*、2016、p.873-874、2016.08

その他9編

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬戸口 剛 (SETOGUCHI, Tsuyoshi)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：20226674

(2) 研究分担者

- ① 堤 拓哉 (TSUTSUMI, Takuya)
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・主査
研究者番号：40462345
- ② 羽山 広文 (HAYAMA, Hirofumi)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：80301935

③ 石井 旭 (ISHI, Akira)

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・研究主任
研究者番号：30635529

④ 松村 博文 (MATSUMURA, Hirohumi)

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・部長
研究者番号：90462324

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

渡部 典大 (WATANABE, Norihiro)
郭 芷銘 (GUO, Zhiming)
横山 翔太 (YOKOYAMA, Shota)
日下 みのり (KUSAKA, Minori)
佐藤 勇人 (SATO, Hayato)
長谷川 怜史 (HASEGAWA, Satoshi)
岩国 大貴 (IWAKUNI, Daiki)
松山 倫之 (MATSUYAMA, Tomoyuki)
前田 孝輔 (MAEDA, Kosuke)
高梨 潤 (TAKANASHI, Jun)
佐藤 公哉 (SATO, Koya)