

積雪寒冷条件を踏まえたデータセンターの 設計に関する基礎的検討

Basic Research on Design of Data Center based on Snow and Cold Condition

堤 拓哉¹⁾、月館 司²⁾、下ノ菌 慧³⁾
Takuya Tsutsumi¹⁾, Tsukasa Tsukidate²⁾, Kei Shimonosono³⁾

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

Northern Regional Building Research Institute
Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

¹⁾地域研究部環境防災グループ主査 ²⁾ 建築研究部建築システムグループ主任主査 ³⁾ 地域研究部環境防災グループ研究職員

¹⁾ Chief of Disaster Prevention and Environment Group ²⁾ Chief of Building Engineering System Group ³⁾ Researcher of Disaster Prevention and Environment Group

概 要 Abstract

積雪寒冷条件を踏まえたデータセンターの設計に関する基礎的検討 Basic Research on Design of Data Center based on Snow and Cold Condition

堤 拓哉¹⁾、月館 司²⁾、下ノ菌 慧³⁾
Takuya Tsutsumi¹⁾, Tsukasa Tsukidate²⁾, Kei Shimonosono³⁾

キーワード : データセンター、冷暖房負荷、積雪寒冷条件、外気冷房、融雪
Keywords : Data center, Cooling and heating load, Snow and cold condition,
Outdoor air-cooling, Snow melting

1. 研究概要

1) 研究の背景

国内 IT 産業ではデータセンターの施設需要が増加しているが、冷房用空調は、データセンターの設備コストおよび消費電力のそれぞれ 3 割程度を占めることが施設運用上の課題となっている。冷涼な気候で雪のある北海道では、外気等を用いて冷房に係るコストを削減するデータセンターの建設が可能であり、データセンターの誘致活動が積極的に進められている。

2) 研究の目的

外気等の利用による冷房や排熱による融雪など積雪寒冷条件を踏まえたデータセンターの設計に関する基礎的知見を整備する。

2. 研究内容

1) 構造形式の検討 (H29 年度)

- ・ねらい：北海道のデータセンターに適した構造形式を検討する。
- ・試験項目等：外力設定

2) データセンターの内外装仕様、空調設備、排熱による融雪の検討 (H29～30 年度)

- ・ねらい：北海道に適したデータセンターの内外装仕様、空調方式を数値解析等により明らかにする。
また、排熱を利用した融雪の有効性について検討する。
- ・試験項目等：文献調査、温熱解析、融雪の数値解析

3. 研究成果

1) 構造形式の検討

- ・日本建築学会荷重指針・同解説の雪荷重設定法に基づき建物屋根形状別に屋根形状係数の試算を行い、アーチ屋根は陸屋根よりも、風による偏分布の影響が大きく、降雪がなく吹きだまりが発生する条件において、雪荷重の影響が大きくなることを明らかにした。

2) データセンターの内外装仕様、空調設備、排熱による融雪の検討

- ・積雪寒冷地のデータセンターに必要な外皮性能について、拡張アメダス標準年の毎時刻データを用いた定常計算により評価し、建物が受ける日射量によって冷房負荷が変わるため屋根の断熱性能を上げるこ

¹⁾ 北方建築総合研究所地域研究部環境防災グループ主査 ²⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ主任主査 ³⁾ 北方建築総合研究所地域研究部環境防災グループ研究職員

¹⁾ Chief of Disaster Prevention and Environment Group, Northern Regional Building Research Institute ²⁾ Chief of Building Engineering System Group, Northern Regional Building Research Institute ³⁾ Researcher of Disaster Prevention and Environment Group, Northern Regional Building Research Institute

とが効果的であること、結露防止には 熱貫流率 $2.5\text{W/m}^2\text{K}$ 程度の断熱性能で十分であることを明らかにした。

- ・外気冷房の導入効果について、外気冷房を導入すると建物の断熱性能の影響は小さいこと（図 1）、北海道のいずれの地点においても外気冷房が有効で、本州よりも優位性があること（図 2）、省エネルギー化には、断熱性能の向上よりも、外気冷房の導入と機器の高効率化が効果的であることを明らかにした。また、建物形状が空調に及ぼす影響について CFD 解析を行い、ドーム型の断面形状は矩形に比べ、コールドアイルのキャッピング効果（熱気と冷気の分離）を得やすいことが分かった（図 3）。
- ・データセンターの排熱による冬期間の融雪シミュレーションを行ったところ、冷房負荷の 50%程度を処理する条件では、冷房負荷 1kW 当たり $3\sim 4\text{ m}^2$ 程度の融雪が可能であることが分かった（図 4）。

< 具体的データ >

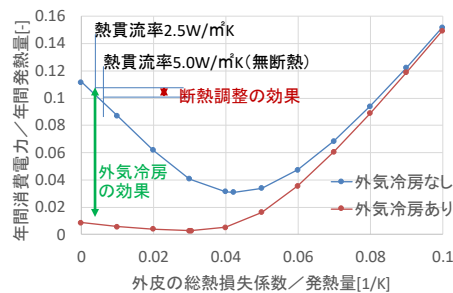


図 1 外気冷房の有無による年間消費電力の比較（美唄、日射吸収率 0.2 の条件）

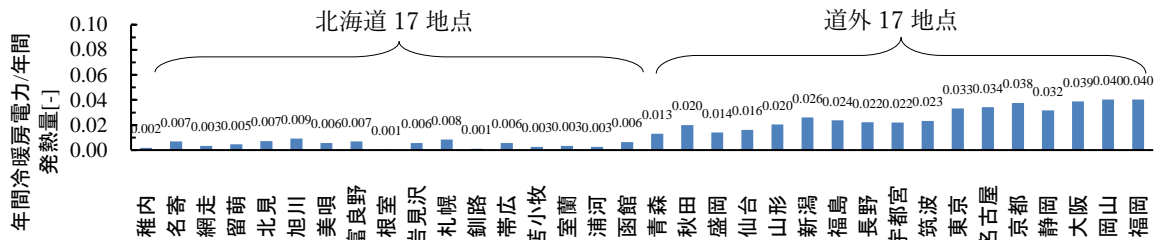


図 2 地点別の年間冷暖房電力の試算結果

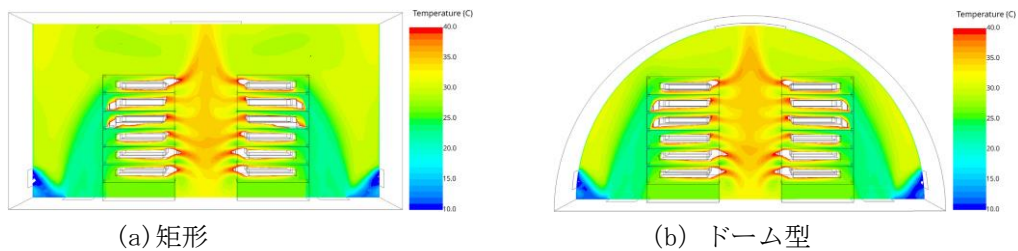


図 3 建物形状が空調に及ぼす影響に関する解析結果

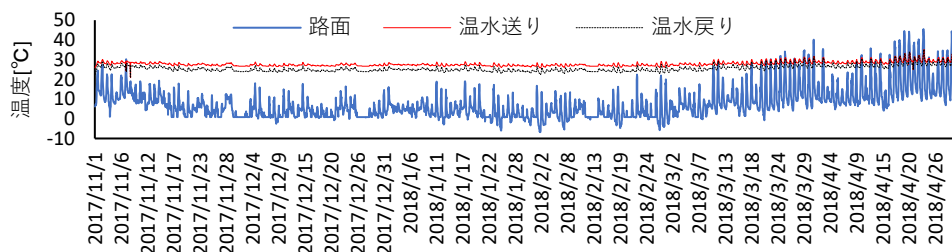


図 4 排熱による融雪に関するシミュレーション結果（美唄市 2017 年 11 月から 2018 年 4 月）

4. 今後の見通し

研究成果は道内自治体等への情報提供やデータセンター整備構想に対する技術支援において活用する。

目 次

1. はじめに	
(1) 研究の背景と目的.....	1
(2) 研究項目	1
2. 構造形式の検討	
(1) 本章の目的と検討項目.....	1
(2) 外力設定の検討	1
3. データセンターの内外装仕様、空調設備、排熱による融雪の検討	
(1) 本章の目的.....	3
(2) 積雪寒冷地のデータセンターに必要な外皮性能.....	3
(3) 外気冷房の導入効果	6
(4) 建物形状が空調に及ぼす影響.....	6
(5) データセンターの排熱による融雪	8
5. まとめ.....	13

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

国内 IT 産業ではデータセンターの施設需要が増加しているが、既往のデータセンターは冷房用空調設備が建設コストおよび消費電力のおよそ 3 割を占めることが施設運用上の課題である（図 1-1）¹⁾。冷涼な気候で積雪のある北海道では、外気等を用いて冷房に係るコストを削減するデータセンターの建設が可能であるため、データセンターの誘致活動を積極的に進めている（図 1-2）^{2)~4)}。一方で、北海道におけるデータセンターの建設は都市部や沿岸部の限られた地域以外では進んでいない状況にある。

本研究は、外気等の利用による冷房や排熱による融雪など積雪寒冷条件を踏まえたデータセンターの設計に関する基礎的知見を整備することを目的としている。

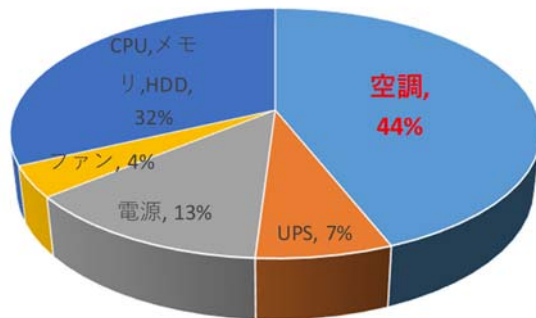


図 1-1 データセンターにおける消費電力¹⁾

ホワイトデータセンター（WDC）

コンセプト① 広大な北海道の特性を生かした、再生エネルギーを積極活用したエネルギー自立型DC
コンセプト② 6次化（熱を核とした3次産業誘致→1次産業と2次産業の創出）
コンセプト③ データセンターの冷熱利用が、美瑛市の雪国快適生活を実現

美瑛WDCドレッジ運用イメージ

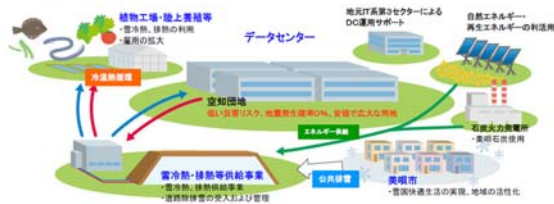


図 1-2 WDC（ホワイトデータセンター）構想³⁾

(2) 研究項目

研究項目は以下の 1)、2) である。なお、研究項目 2) において、外気冷房を導入した場合、建物の断熱等の躯体性能がデータセンターの最適仕様に及ぼす影響が小さいことが明らかとなったため、研究項目 1) 構造形式の検討は平成 29 年度で検討終了し、平成 30 年度に予定していた構造仕様の検討、構造解析は実施しないこととした。本報告書で

は、研究項目 1) に関し平成 29 年度の検討結果のみを掲載する。

1) 構造形式の検討（H29 年度）

- ・ねらい：北海道のデータセンターに適した構造形式を検討する。

- ・試験項目等：外力設定

2) データセンターの内外装仕様、空調設備、排熱による融雪の検討（H29～30 年度）

- ・ねらい：北海道に適したデータセンターの内外装仕様、空調方式を数値解析等により明らかにする。また排熱を利用した融雪の有効性について検討する。

- ・試験項目等：文献調査、温熱解析、融雪の数値解析

[参考文献]

- 1) 総務省：地球温暖化問題への対応に向けた ICT 政策に関する研究会報告書，pp. 54-55，2007. 4
- 2) 北海道経済部：北海道データセンター立地ガイド，2008. 4
- 3) 美瑛市：WDC（ホワイトデータセンター）構想，
<http://www.city.bibai.hokkaido.jp/jyumin/docs/2015090100125/>
- 4) 岩内町，共和町，泊村，神恵内村：岩宇地域のデータセンター立地について，2011. 2，<http://www.town.kyowa.hokkaido.jp/files/ganuyutu.pdf>

2. 構造形式の検討

(1) 本章の目的と検討項目

データセンターは内部にサーバー格納するラックを多数設置するため内部に大空間が必要であるほか、効率的な空調のため、冷たい空気が流れるエリア（コールドアイル）とサーバーから排熱された熱い空気が流れるエリア（ホットアイル）を物理的に区画する必要がある。また、大部分が多雪区域である北海道においては、積雪荷重への対応も重要である。本章ではデータセンターに適した構造形式について基礎的な検討を行う。

(2) 外力設定の検討

ここでは、ラックを多数設置する大空間の確保に適した鉄骨造を想定し、鉄骨造の構造設計において支配的な荷重となる積雪荷重の設定に必要な屋根形状係数の試算を行う。積雪荷重は地上積雪重量（垂直積雪量と積雪の単位重量の積）に屋根形状係数を

乗じて算定され、地上積雪重量は立地場所の降積雪、屋根形状係数は屋根形状および風速に基づき算定する係数である。

屋根形状係数の検討モデルには、パラペットのある陸屋根とアーチ屋根（屋根の最上端と最下端の勾配 20° ）を設定し、屋根形状の違いが積雪荷重に及ぼす影響を検討する（図 2-1）。屋根形状係数の算定条件を表 2-1 に示す。地上積雪重量に乘じる屋根形状係数 μ は、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」の算定法に基づき^{1), 2)}、吹きだまりの影響や屋根雪の滑動を勘案した上で、基本となる屋根形状係数 μ_b 、風による偏分布の屋根形状係数 μ_d 、屋根雪の滑動による屋根形状係数 μ_s を加除して求めた。立地場所は北海道美唄市とし、気象庁の気象統計によれば 1, 2 月の平均風速の平年値は 2.2m/s である。検討モデルを対象とした屋根形状係数の算定結果を図 2-2、図 2-3 に示す。陸屋根の屋根形状係数については、勾配が 0° であるため、屋根雪の滑動に関する屋根形状係数 μ_s を考慮しない。陸屋根における吹きだまりが無い場合の屋根形状係数は 0.8（地上積雪の 0.8 倍）であるが（図 2-2(a)）、吹きだまりがある場合の屋根形状係数は、パラペット付近において 1.0 となり、屋根の端部で積雪荷重が大きくなる（図 2-2(b)）。

アーチ屋根の屋根形状係数については、吹きだまりも降雪も無い条件では、屋根形状係数は 0.85 であるが（図 2-3(a)）、吹きだまりと降雪がある条件では、屋根風上側は 0 もしくは 0.3、屋根風下側が 0.55 となり（図 2-3(b)）、積雪荷重は陸屋根と比べ小さくなる。一方、吹きだまりがあり降雪が無い条件になると、屋根風上側の屋根形状係数は 0.3、屋根風下側は 1.4 になり（図 2-3(c)）、大きな偏荷重が想定される。以上からアーチ屋根など勾配を有する屋根形状を採用する際は、降雪障害が生じない設計上の配慮が求められる。

なお、屋根形状係数は建物内からの漏熱による融雪を考慮していない条件で検討していることから、安全側と言える。

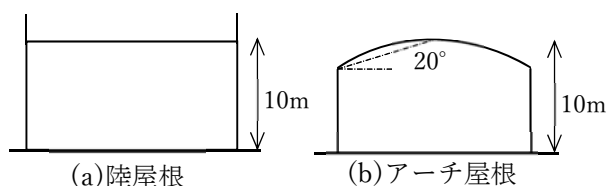


図 2-1 屋根形状係数の検討モデル

表 2-1 屋根形状係数の算定条件^{1), 2)}

項 目	内 容
立地場所	美唄市
1, 2 月の平均風速 (H=10m)	2.2m/s
基本となる屋根形状係数 μ_b	風速と屋根勾配から算定
風による偏分布に関する屋根形状係数 μ_d	吹きだまりの影響について実測等を参考に算定
屋根雪の滑動に関する屋根形状係数 μ_s	屋根勾配から算定

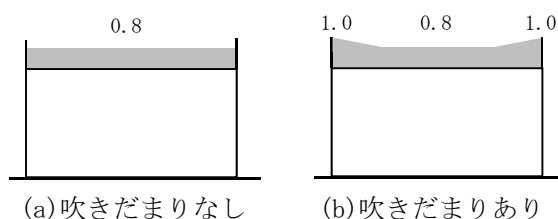


図 2-2 陸屋根（パラペットあり）の屋根形状係数

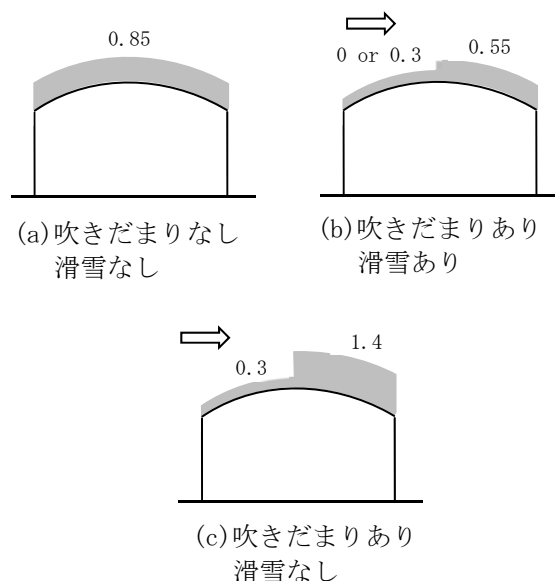


図 2-3 アーチ屋根の屋根形状係数

[参考文献]

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp. 232-239，2015. 2
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針を活かす設計資料 1，pp. 134-158，2016. 2

3. データセンターの内外装仕様、空調設備、排熱による融雪の検討

(1) 本章の目的

本章では、北海道に適したデータセンターの内外装仕様、空調方式を数値解析等により明らかにする。また排熱を利用した融雪の有効性について検討する。本章における検討項目は、下記の4項目である。

- 1) 積雪寒冷地のデータセンターに必要な外皮性能
- 2) 外気冷房の導入効果
- 3) 建物形状が空調に及ぼす影響
- 4) データセンターの排熱による融雪

1) では、北海道の外気温とサーバーからの発熱が多いデータセンターの室内温度を踏まえた外皮性能について検討する。2) では、北海道の気候特性を踏まえ、本州地域より優位性が高い冷房方式である外気冷房の導入効果について検討する。3) では、外気冷房を導入する際の建物形状の効果について基礎的な検討を行う。4) ではデータセンターの排熱利用に関し、どの程度の面積まで融雪可能かを検討する。

(2) 積雪寒冷地のデータセンターに必要な外皮性能

1) 計算概要

本節では、米国 ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) 規格¹⁾のクラス A1 の許容温度 15~32℃を維持するために必要な暖冷房負荷または暖冷房エネルギーを最小にする外皮性能を明らかにする。

計算方法は、拡張アメダス標準年の毎時刻データを用いた定常計算であり²⁾、発熱量は24時間一定として式3-1に示す熱収支式を用いて、冷暖房負荷を求めた。

$$Q=H+K\sum r_i (SAT_i-\theta_R) \quad (3-1)$$

Q: 冷暖房負荷

H: 発熱量 (サーバー等)

K: 外皮の総熱損失係数

r_i : ある部位 i (外壁、屋根) の熱損失の割合

SAT_i : ある部位の相当外気温

θ_R : 暖房または冷房設定室温

上限室温 32℃において Q が正值、下限室温 15℃において Q が負値の場合に冷房負荷、暖房負荷となる。換気は外調機で室温まで加熱・冷却されると仮定し、室暖冷房負荷にはカウントしない。また、熱

交換器を用いた間接的な外気冷房を導入し、除去熱量不足分を冷水コイルで除去するシステムについて、外気との熱交換量を式3-2で算出する。

$$Q_{ex}=GC\eta(\theta_R-\theta_0) \quad (3-2)$$

Q_{ex} : 外気による除去熱量

G: 風量 (サーバー発熱量を温度差 10K で処理するための風量とする)

C: 空気の比熱

θ_0 : 外気温

冷房で除去しなければならない熱量 (装置負荷) は式3-3で表される。

$$Q_c=Q-Q_{ex} \quad (3-3)$$

ヒートポンプで冷房を行うことを想定し、冷房および暖房時の電力消費 E は、カルノーサイクルをベースにした式3-4式3-5で推定する。

○冷房

$$E=Q_c \cdot C (\theta_c - \theta_e) / (\theta_e + 273) \quad (3-4)$$

Q_c : 冷房装置負荷

C: 係数 (0.5)

θ_e : 蒸発器温度 (=冷水温度-5℃)

θ_c : 凝縮器温度 (=外気温+5℃)

○暖房

$$E=Q_h \cdot C (\theta_c - \theta_e) / (\theta_c + 273) \quad (3-5)$$

Q_h : 暖房装置負荷

C: 係数 (0.5)

θ_c : 凝縮器温度 (=温水温度+5℃)

θ_e : 蒸発器温度 (=外気温-5℃)

冷水温度は7℃、温水温度は45℃とする。外気温 8.5℃以下ではフリークーリングとし、COP は 12 と仮定した。計算では、冷暖房負荷の合計または冷暖房消費電力の合計が最小となる外皮の総熱損失係数 K を求める。屋根 (水平面) および東西南北の4壁面 (垂直面) について、すべての熱コンダクタンス (熱貫流率と面積の積) が等しい条件 (各部位の $r_i=0.2$) を設定した。床は空調空気の供給スペースとなることが多いため、熱損失を計算しない。対象地を北海道美唄市として計算を行った。

2) 外気冷房を導入しない条件での計算結果

外気冷房を導入しない条件で、屋根および外壁の日射吸収率を 0.2 とした場合の計算結果を図3-1~3-3、日射吸収率を 0.8 とした場合の計算結果を図3-4~3-6に示す。

日射吸収率が 0.2 の場合、年間冷暖房負荷は、発熱量当たりの熱損失係数が 0.05 付近で最小となり (図3-1)、年間電力消費量は、発熱量当たりの熱

損失係数が 0.04 付近で最小（図 3-2）、最大冷房負荷、最大冷房電力は熱損失係数の影響をあまり受けて、最大暖房負荷、最大暖房電力は熱損失係数が小さいほど小さい結果となった（図 3-3）。

日射吸収率が 0.8 の場合、年間冷暖房負荷、年間電力消費量は日射吸収率 0.2 の場合よりやや大きくなるが、最小となる熱損失係数は日射吸収率 0.2 の場合とほとんど差がない（図 3-4、図 3-5）。最大冷房負荷、最大冷房電力、最大暖房負荷、最大暖房電力は、いずれも熱損失係数が小さいほど小さい。

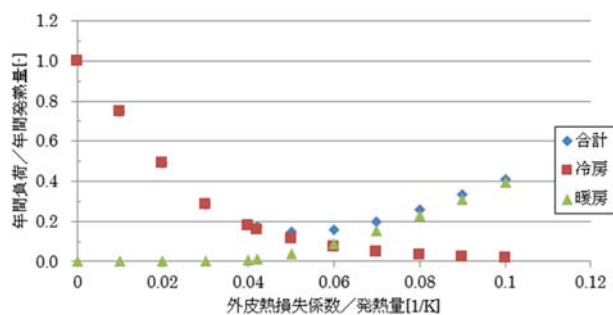


図 3-1 年間冷暖房負荷
(外気冷房なし、日射吸収率 0.2)

3) 外気冷房を導入する条件での計算結果

外気冷房を導入する条件で、屋根および外壁の日射吸収率を 0.2 とした場合の計算結果を図 3-7～3-9、日射吸収率を 0.8 とした場合の計算結果を図 3-10～3-12 に示す。外気冷房を導入すると外気冷房を導入しない場合と比べて、冷房負荷、冷房消費電力が大幅に削減されている。日射吸収率が 0.2 の場合、年間冷暖房負荷、年間電力消費量は、発熱量当たりの熱損失係数が 0.03 付近で最小となるが、熱損失係数がそれより小さい範囲では、熱損失係数の影響は

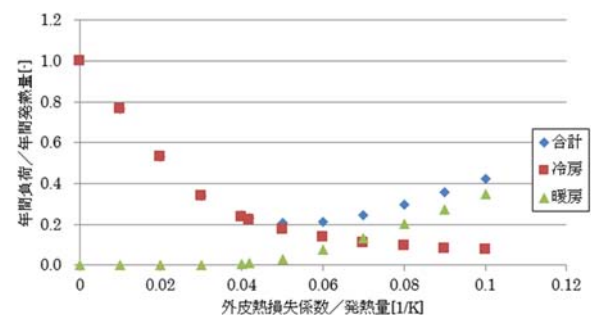


図 3-4 年間冷暖房負荷
(外気冷房なし、日射吸収率 0.8)

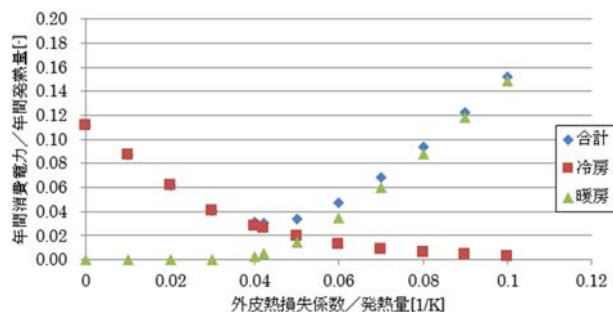


図 3-2 年間消費電力
(外気冷房なし、日射吸収率 0.2)

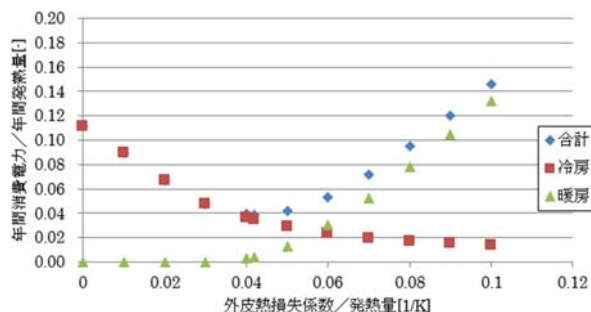


図 3-5 年間消費電力
(外気冷房なし、日射吸収率 0.8)

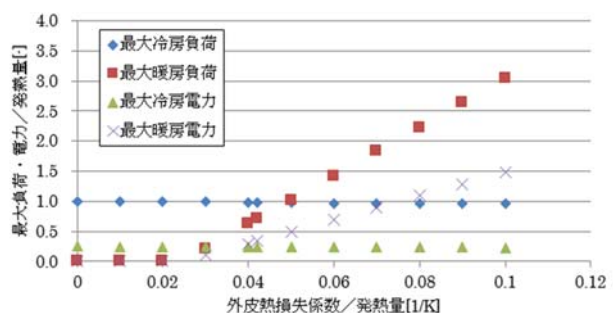


図 3-3 最大冷暖房負荷、最大冷暖房電力
(外気冷房なし、日射吸収率 0.2)

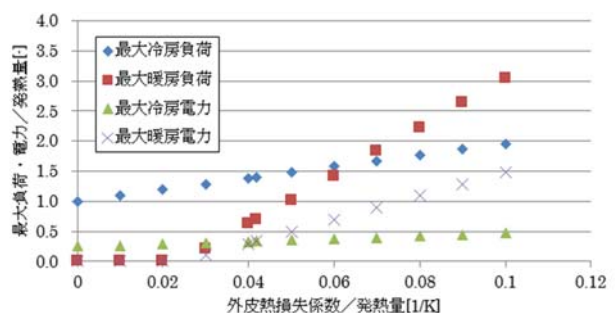


図 3-6 最大冷暖房負荷、最大冷暖房電力
(外気冷房なし、日射吸収率 0.8)

小さい（図 3-7、図 3-8）。最大冷房負荷、最大冷房電力は熱損失係数の影響をあまり受けず、最大暖房負荷、最大暖房電力は熱損失係数が小さいほど小さい（図 3-9）。

日射吸収率が 0.8 の場合、年間冷暖房負荷、年間電力消費量は日射吸収率 0.2 の場合よりやや大きくなるが（図 3-10、図 3-11）、最小となる熱損失係数は日射吸収率 0.2 の場合とほとんど差がない。最大

冷房負荷、最大冷房電力、最大暖房負荷、最大暖房電力は、熱損失係数が小さいほど小さい（図 3-12）。図 3-13 に日射吸収率 0.8 の場合における屋根の熱損失係数と最大冷房負荷の関係を示す。図 3-13 に示すように熱損失係数が小さくなるほど、最大冷房負荷が減少しており、屋根の断熱性能を上げることがデータセンターの冷房負荷削減に効果的である。

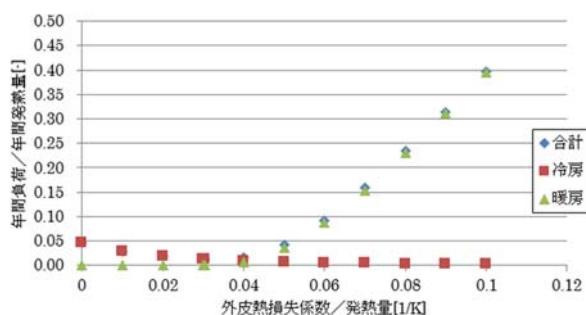


図 3-7 年間冷暖房負荷
(外気冷房あり、日射吸収率 0.2)

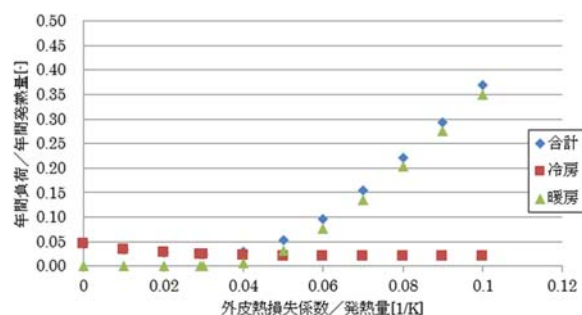


図 3-10 年間冷暖房負荷
(外気冷房あり、日射吸収率 0.8)

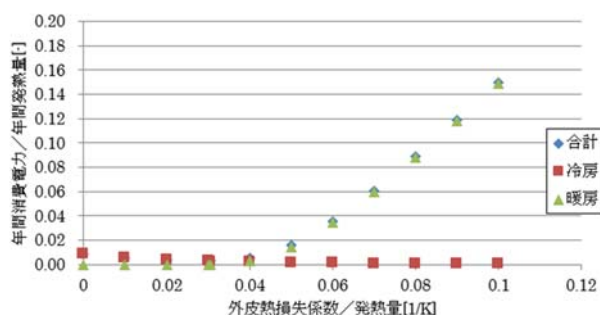


図 3-8 年間消費電力
(外気冷房あり、日射吸収率 0.2)

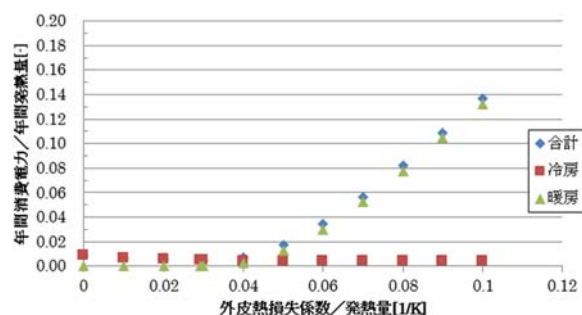


図 3-11 年間消費電力
(外気冷房あり、日射吸収率 0.8)

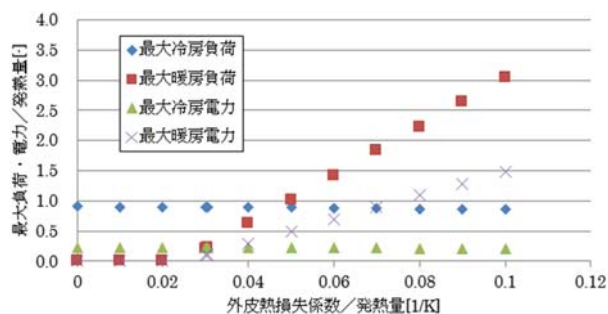


図 3-9 最大冷暖房負荷、最大冷暖房電力
(外気冷房あり、日射吸収率 0.2)

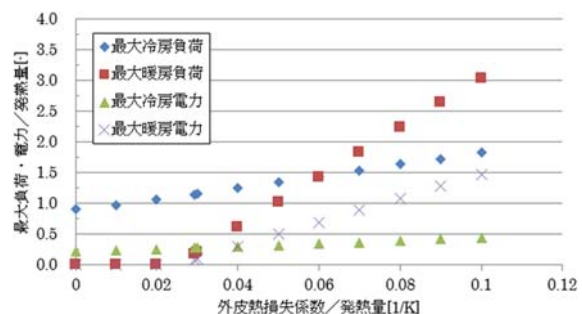


図 3-12 最大冷暖房負荷、最大冷暖房電力
(外気冷房あり、日射吸収率 0.8)

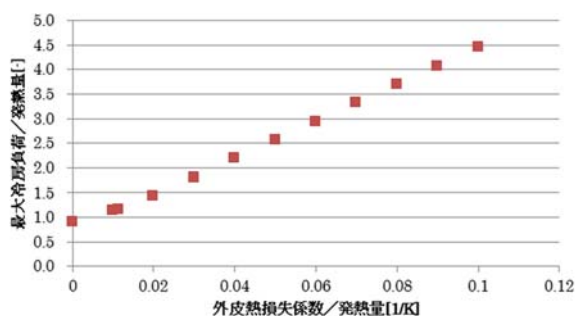


図 3-13 屋根の熱損失係数と最大冷房負荷の関係
(外気冷房あり、日射吸収率 0.8)

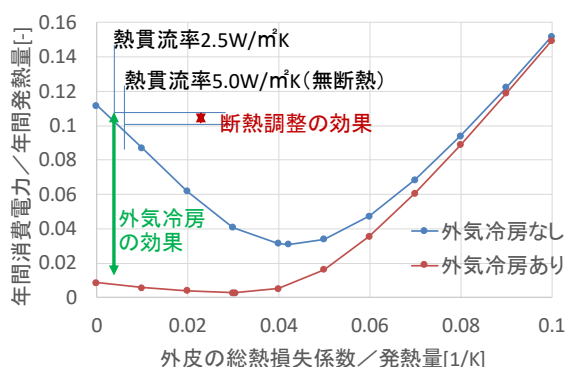


図 3-14 断熱調整と外気冷房の効果の比較

図 3-14 に断熱調整による年間消費電力の削減効果と外気冷房を導入することによる削減効果との比較を示す。図 3-14 に示すように、外気冷房の導入は断熱調整に比べ、大幅に年間消費電力の削減効果が高く、データセンターの消費電力削減には、躯体性能の向上よりも、外気冷房の導入が効果的である。

(3) 外気冷房の導入効果

前節において外気冷房の導入がデータセンターの冷房負荷および冷房電力削減に大きな効果があることが明らかになった。本節では、外気冷房導入における北海道の優位性を明らかにすることを目的に、道内 17 地点、道外 17 地点における年間冷暖房電力を比較した。計算方法は前節と同様である。

図 3-15 に躯体性能を熱損失係数 0.01W/K、日射吸収率 0.2 とし、外気冷房を導入した場合の各地点の年間冷暖房電力の計算結果を示す。北海道のいずれの地点においても外気冷房が有効で、本州よりも優位性があることが分かる。北海道 17 地点で冷暖房電力が最も大きい旭川は、道外 17 地点で最も小さい青森よりも約 30%電力消費が少なく、東京よりも約 70% 少ない。

(4) 建物形状が空調に及ぼす影響

1) 検討概要

データセンターでは、効率的な空調のため、冷たい空気が流れるエリア（コールドアイル）とサーバーから排熱された熱い空気が流れるエリア（ホットアイル）を物理的に区画する「キャッピング」という空調方式が用いられるようになっている^{3),4)}。キャッピングを採用した室内では、コールドアイル内が囲まれているため、サーバーの排気の回り込みが抑制され、空調機が停止しても室温上昇が緩やかになり、空調機の故障時や停電時の信頼性が高くなる⁵⁾。

本節では外気冷房の導入と躯体コスト軽減のため、簡易な外皮と間仕切りの無い室内構成によるデータ

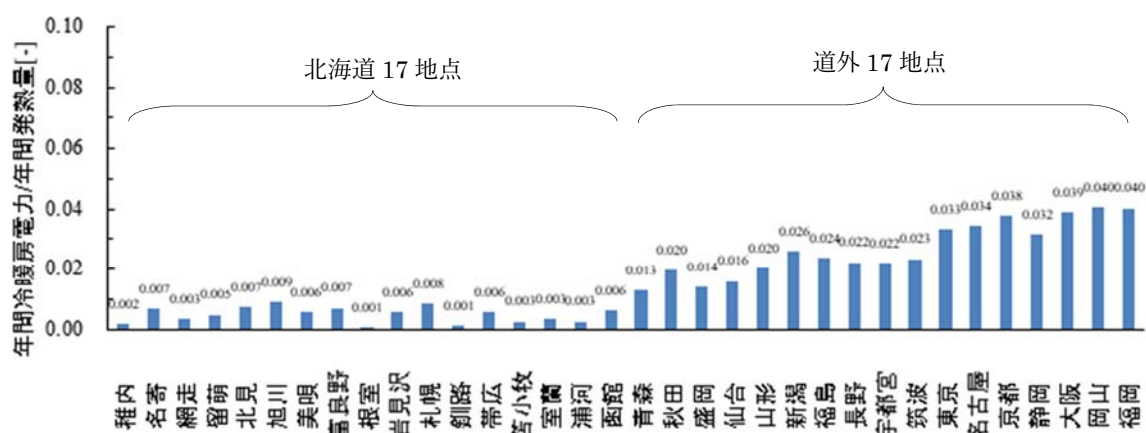


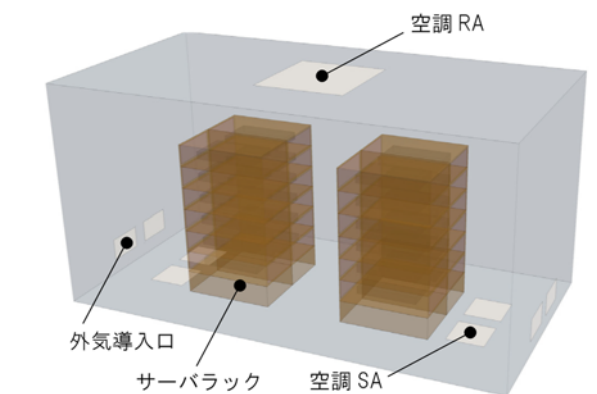
図 3-15 外気冷房を導入した場合の年間冷暖房電力の比較
(熱損失係数 0.01W/K、日射吸収率 0.2)

センターを想定し、建物形状が室内の気流および温度分布に及ぼす影響について、CFD（Computational Fluid Dynamics）による基礎的な検討を行った。

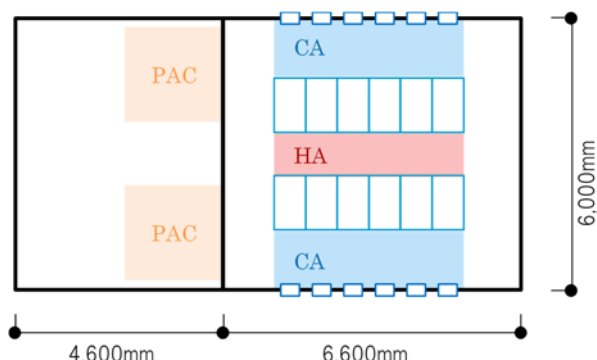
2) 解析方法

解析に用いた CFD コードは Siemens 社の STAR-CCM+ である。計算モデルを図 3-16 に示す。空調は床吹き型パッケージエアコン（以降、PAC）を用いることとし、外気導入も行い、室内を冷却する。建物の形状は「矩形型」、「ドーム型」の 2 種類とし、2 ラック×2 列のサーバー室を解析対象とした。

計算条件を表 3-1 に示す。計算条件はデータセンターを対象とした既往研究³⁾を参考に設定した。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ を用い、外気温度は 10°C とし、導入量を 300CMH とする。SA 温度は 17°C 、SA 風量は 6,400CMH とした。空調の SA-RA 温度差は 10K を想定し、設定する発熱量 24kW は空調＋外気冷房のみで処理できるように設定した。屋根の熱貫流率は、簡易な仕様を想定し、合板 1 枚程度の熱貫流率 $4.36\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ とした。



(b) CFD のモデル（矩形型）



CA : コールドアイル(Cold Aisle), HA : ホットアイル(Hot Aisle),
PAC : パッケージエアコン, RA : 空調戻り空気(Return Air), SA :
空調吹き出し空気(Supply Air)

(a) 平面図

図 3-16 計算モデル

表 3-1 計算条件

計算コード	STAR-CCM+	
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$	
メッシュ	種類	ポリヘドラルメッシュ
	数	矩形 267,946cells ドーム型 285,824cells
外気	温度	10°C
	導入量	300CMH
空調	吹き出し温度	23°C
	吹き出し風量	6,400CMH
発熱密度	約 $1.3\text{kW}/\text{m}^2$ （発熱量 24kW , 床面積 18.6m^2 ）	
サーバーラック	段数・台数	6 段・4 台
	発熱量	$6\text{kW}/\text{rack}$
屋根熱貫流率	$4.36\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	

3) 解析結果

図 3-17 にラック内の温度の分布を示す。矩形型のラック平均温度は 33.8°C 、ドーム型のラック平均温度は 33.4°C であり、ドーム型の方が若干、低くなっており、ラック最上部において両者の温度差が最も大きい。

矩形型の気流および温度分布を図 3-18、ドーム型の気流および温度分布を図 3-19 に示す。床から吹き出された空調気流は、矩形型では一部直接、空調戻り空気 (RA) となっているが、ドーム型ではラックと屋根の隙間が小さくなるキャッピングの効果により直接 RA となる空気量が少なくなっている。ドーム型のラック最上部の温度が低下した要因として、曲面形状によるコールドアイル (CA) のキャッピング効果が挙げられる。

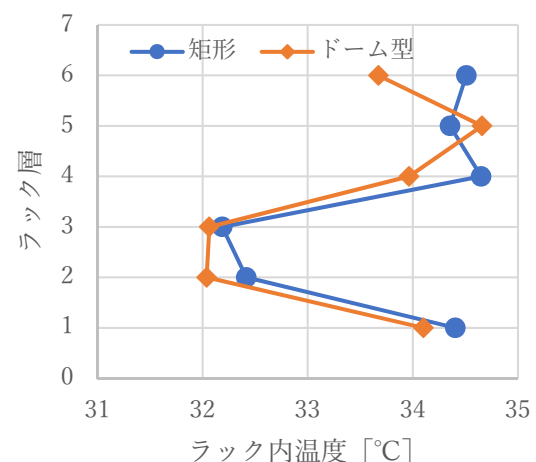


図 3-17 ラック内の温度分布

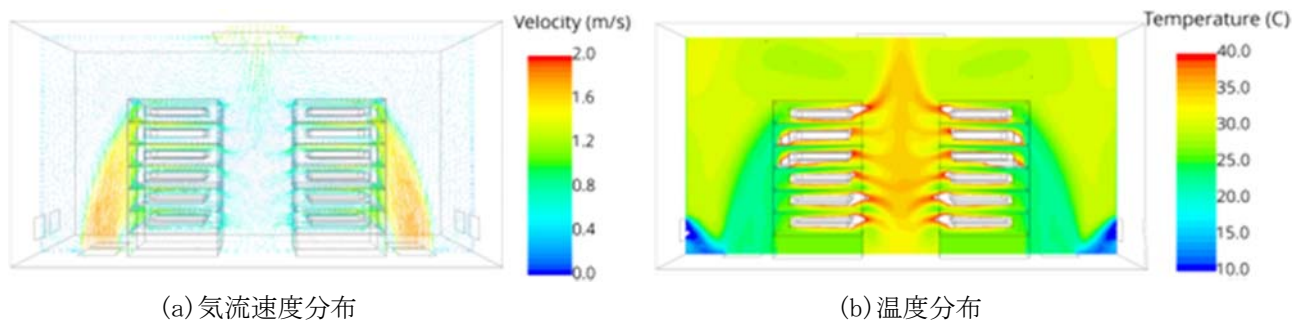


図 3-18 矩形型の解析結果

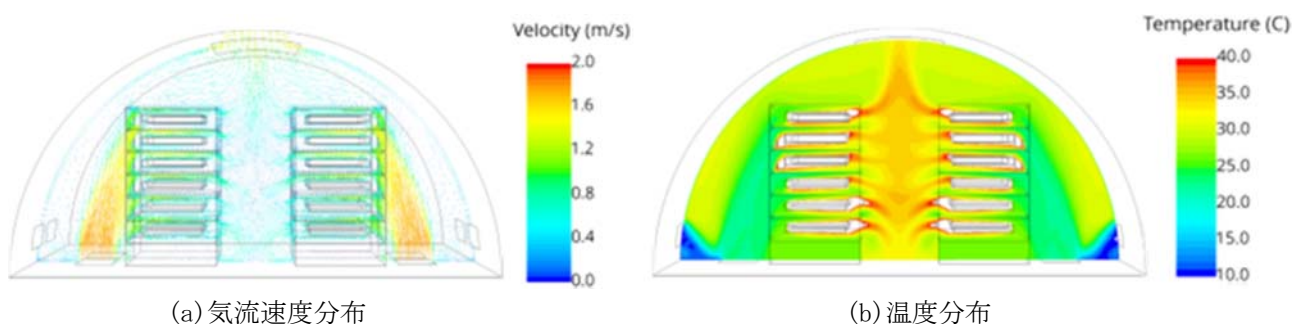


図 3-19 ドーム型の解析結果

（５）データセンターの排熱による融雪

1) 検討概要

データセンターからは、大量に設置されたサーバーの発熱に伴い、大量の熱が排出される。このため、排熱の農業施設での利用、暖冷房利用が模索されている^{例えば 6)}。本節では、データセンターの排熱の融雪利用の可能性について検討する。融雪の利用先として、施設の維持管理に伴う除雪の負担軽減などが挙げられる。

2) 排熱による融雪システム

データセンターは年間を通じて冷房が必要なため、省エネルギー化にはフリークーリングが有効とされている。フリークーリングは、外気温（湿球温度）が低いときに、冷却塔で冷房用の冷水を得るのが一般的であるが、地中熱ヒートポンプでは地盤との熱交換により冷水を得ており、また、前節で検討した外気冷房もフリークーリングと呼ばれることがある。ここでは、フリークーリングにおいて、単に大気や地中へ放熱するのではなく、ロードヒーティングとして融雪に活用するシステムを検討する。

フリークーリングによる融雪システムの模式図を図 3-20 に示す。データセンターの空気を冷却する熱

交換コイルを設け、不凍液を温め、融雪に利用する。

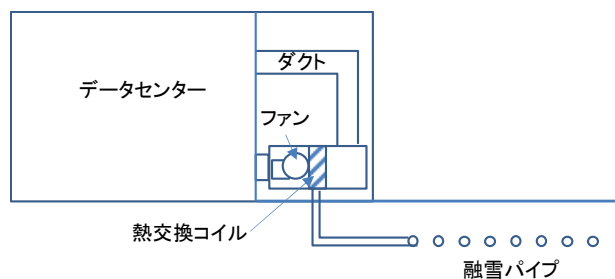


図 3-20 排熱による融雪システム

放熱が十分でない場合には、外気冷房または冷凍機による冷房が必要である。フリークーリング用のコイルを組み込んだ空調機があるように、これらのバックアップ用機器を融雪用熱交換コイルと直列に配置し、制御することも考えられるが、ここでは融雪利用の可能性を明確にするため別系統（並列設置）として検討を進める。

熱交換コイルや融雪面積など機器・システムの仕様は冷房負荷 1kW を基準に設定する。サーバーの発熱量は 1 ラック当たり 5～8kW 前後あり、データセンターの床面積 1 m² 当たり少なくとも 1～2kW の冷房負荷になる。したがって、ここで基準とする冷房負

荷 1kW は床面積 1 m²以下に相当する負荷である。

空調風量は冷房負荷を温度差 10K で処理することを想定し、冷房負荷 1kW 当たり 300m³/h とし、冷却用循環水（不凍液）流量は温度差 5K で処理することを想定し、175L/h（水換算）とする。熱交換コイルの伝熱係数（面積と熱通過率の積）は冷房負荷 1kW 当たり 50～200W/K とする。

熱交換コイルの伝熱係数をパラメータとして、循環水入口温度と熱交換量の関係を図 3-21 に示す。ここで、熱交換コイルは向流熱交換として扱い、空気の入口温度は、データセンターに関する ASHRAE 規格のクラス A1 の上限温度である 32℃とした。

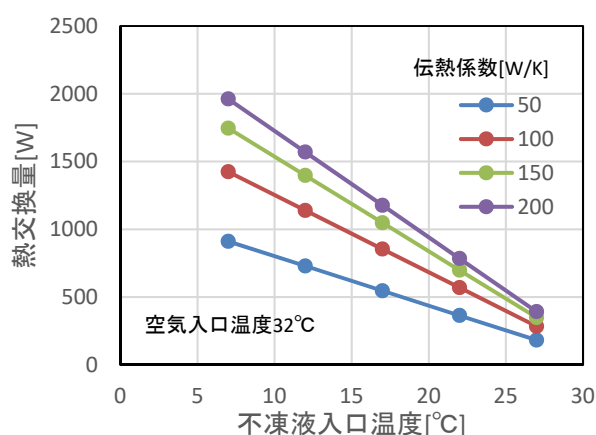


図 3-21 循環水入口温度と熱交換量の関係

上記の設定では、1kW 熱交換するためには、循環水入口温度は 17℃以下である必要がある。一方、融雪には循環水温度が高いほど良いので、融雪能力を高めるにはコイルの伝熱面積を増やす必要がある。融雪能力をあまり求めず、冷房を中心に考えるのであれば、水温が低くても放熱できるように、融雪面積を増やすことも考えられる。

3) 解析方法

過去の研究で開発したロードヒーティングのシミュレーションプログラムに上記の熱交換コイルを組み込み、冬期間の融雪シミュレーションを行う⁷⁾。

解析モデルを図 3-22 に示す。配管の埋設深さは 85 mm、配管ピッチは 150 mm、配管径は 13A とした。モデルの両側面および下面は断熱境界とする。使用する熱物性値は、既往研究を参考に表 3-2 のように設定した⁷⁾。解析の対象地は美唄市とした。気象データは 2017 年 11 月から 2018 年 4 月の美唄の気象庁データを用いる。気象庁データには日射量がないが、日照時間・太陽高度・降雪などから水平面日射量を

推定する。また、観測値のない夜間放射量は 52W/m²一定、相対湿度は 70%一定と仮定した。使用した気象データの外気温、水平面日射量、降水量、風速を図 3-23 に示す。外気温 2℃以上の降水を雨、0～2℃を湿り雪、0℃以下を乾き雪とした。風速は地表付近を想定し、観測値に 0.5 を乗じて補正した。

主目的がデータセンターの連続的な冷房であるため、融雪のための細かな制御は行わず、外気温 15℃以下において連続運転とした。計算時間間隔は 0.1 時間である。

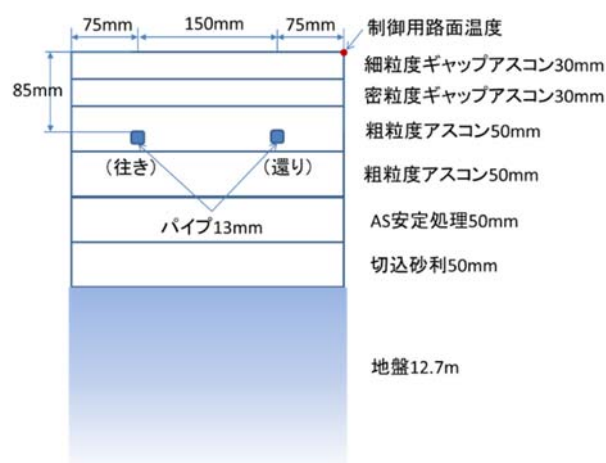


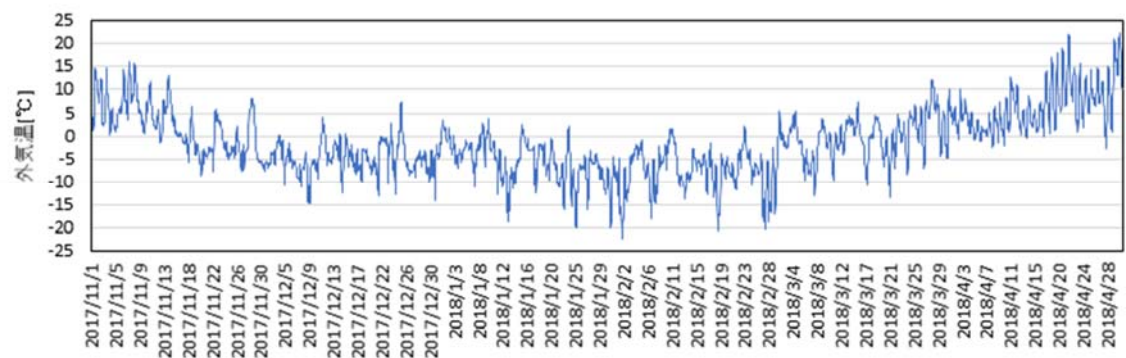
図 3-22 解析モデル

表 3-2 熱物性値⁷⁾

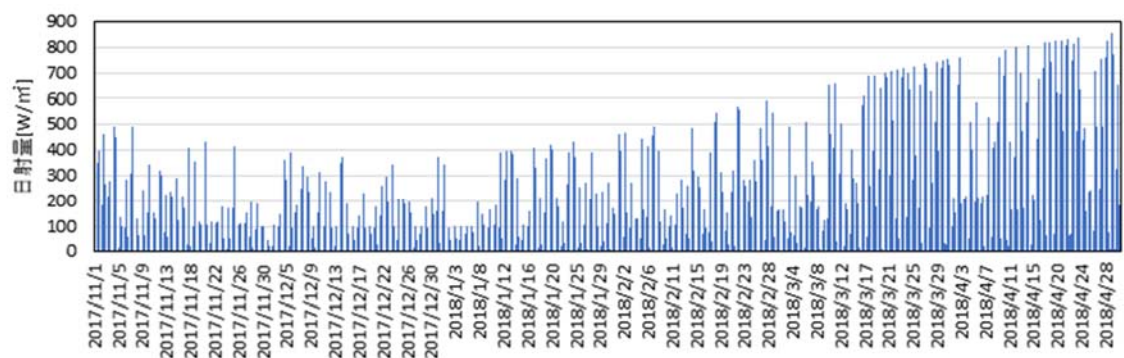
名 称	熱伝導率 [W/mK]	体積比熱 [kJ/m ³ K]
細粒度ギャップアスコン	1.0	1934
密粒度ギャップアスコン	1.0	1934
粗粒度アスコン	1.0	1934
アスファルト安定処理層	0.81	1934
切込砂利	0.7	1934
地盤	1.05	3340

4) 解析結果

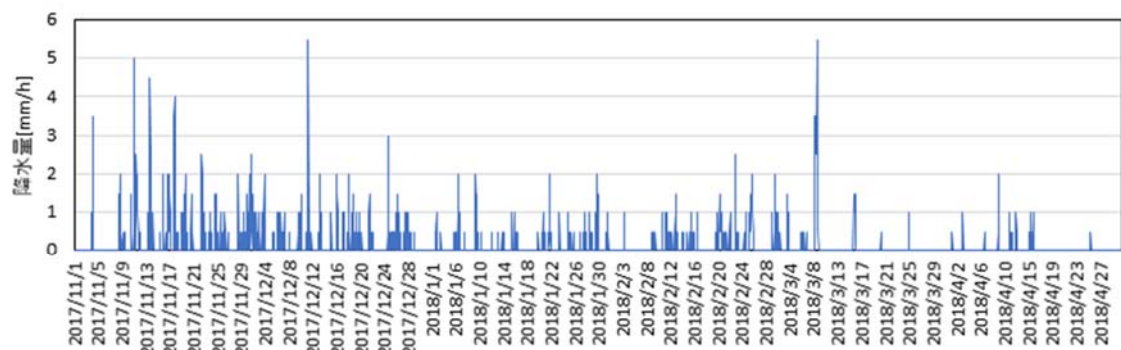
融雪面積 3 m²、熱交換コイルの伝熱係数 150W/K（いずれも冷房負荷 1kW 当たり）の条件における、路面および循環水温度を図 3-24 に、排熱を融雪に用いた際の積雪深を図 3-25 に、パイプ放熱量を図 3-26 に示す。路面温度は積雪がある場合、0～1℃程度であるが、積雪がなく冷え込んだ日には -5℃以下になり、4 月など気温が高く日射がある日には 40℃程度に達



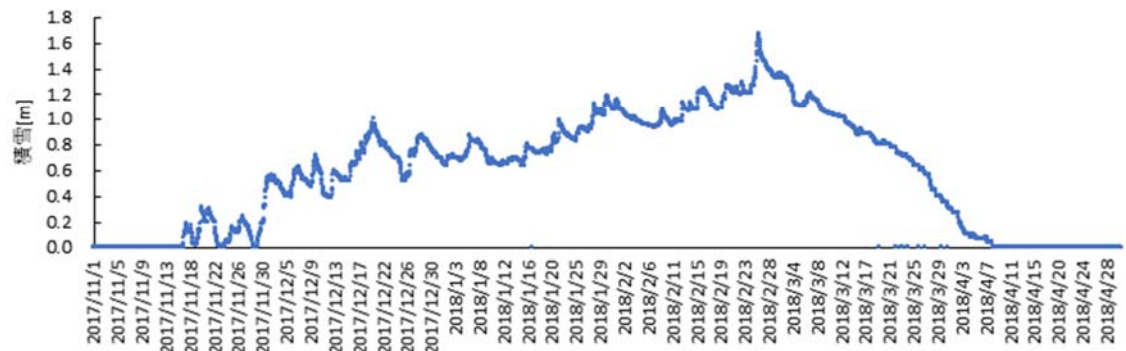
(a) 外気温



(b) 日射量



(c) 降水量



(d) 積雪深

図 3-23 解析に用いた気象データ (美咲市)

している。循環水温度は変動が小さく概ね 25～28℃である。積雪は最大で 4 cm 程度である。パイプ放熱量は 11 月中旬から 3 月上旬までは 500W 以上であるが、4 月には 200～300W 前後まで低下している。融雪面積 1 m² 当たりの放熱量は最大で 200W/m² 程度である。

熱交換コイルの伝熱係数 150W/K のときの融雪面積と期間平均放熱量の関係を図 3-27 に、積雪時間との関係を図 3-28 に示す。融雪面積が大きいほど期間

平均放熱量は大きくなり、6 m² では 0.75kW と、冷房負荷の 75% を処理できる。ただし、融雪面積 1 m² 当たりの期間平均放熱量は融雪面積が大きいほど小さくなる。そのため、積雪時間をみると、3 cm 以上の積雪時間は融雪面積 1 m² のとき 0.8 時間であるが、6 m² では 40.9 時間に増加している。

熱交換コイルの伝熱係数、融雪面積、期間平均循環水温度（融雪パイプ戻り・熱交換コイル入口）、期間平均パイプ放熱量の関係を図 3-29 に示す。

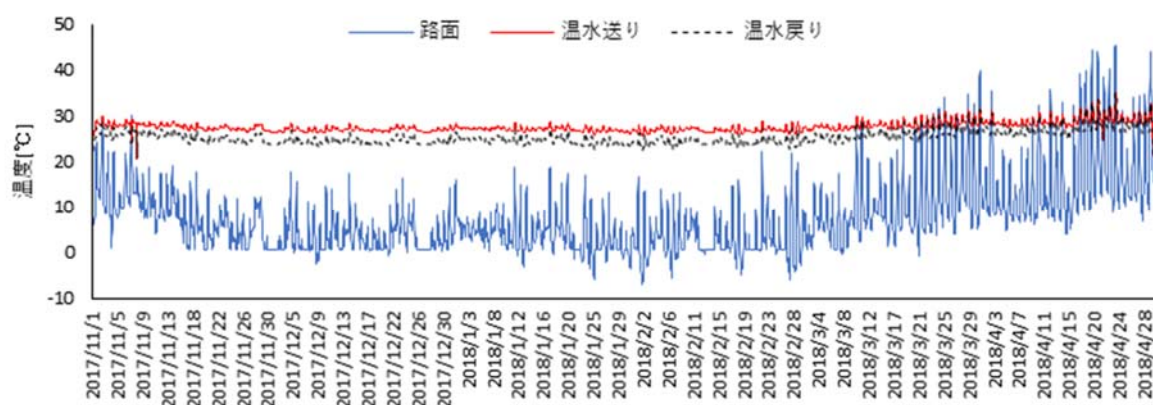


図 3-24 路面および循環水温度

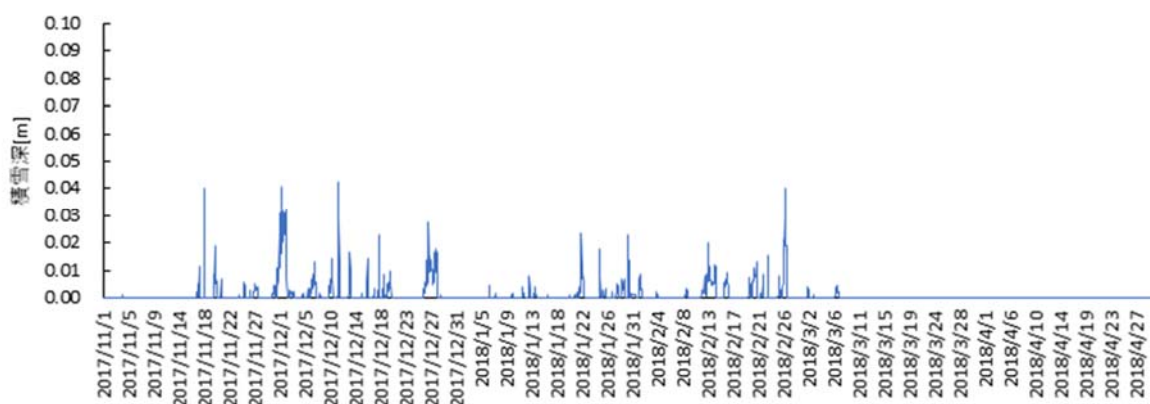


図 3-25 排熱を融雪に用いた際の積雪深

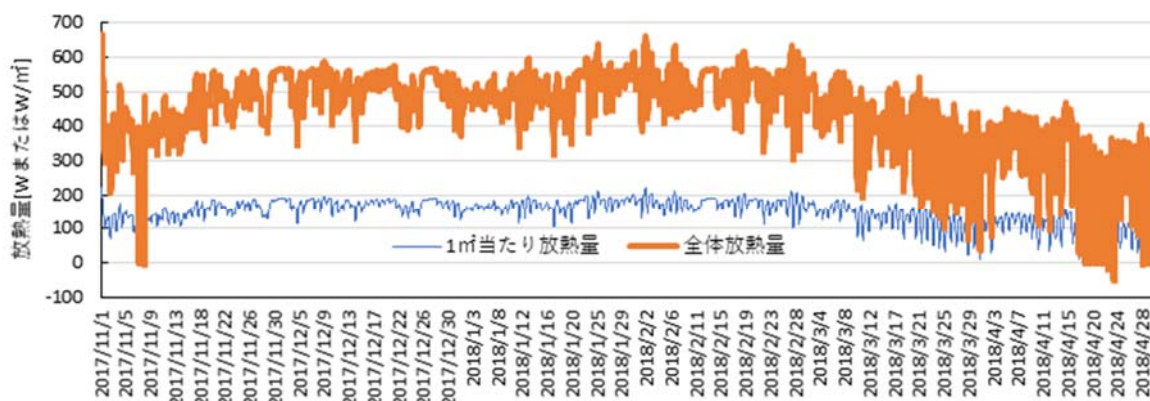


図 3-26 パイプ放熱量

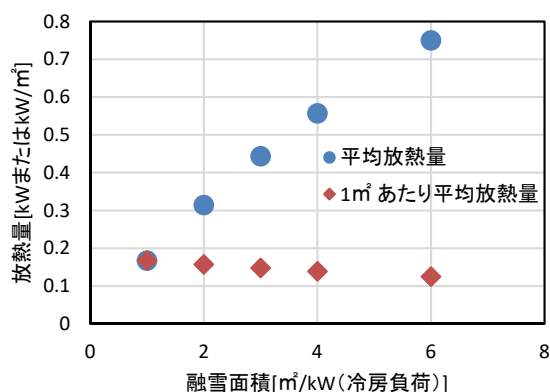


図 3-27 融雪面積と期間平均放熱量との関係

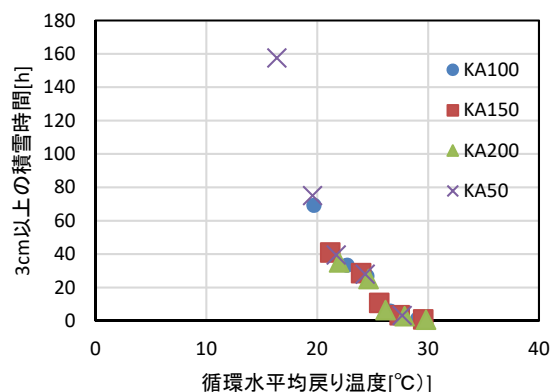


図 3-30 期間平均循環水温度と積雪時間との関係

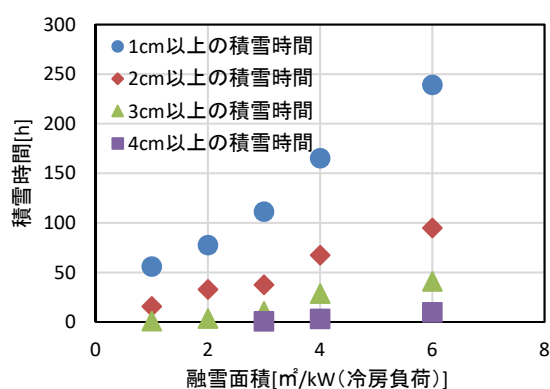


図 3-28 融雪面積と積雪時間との関係

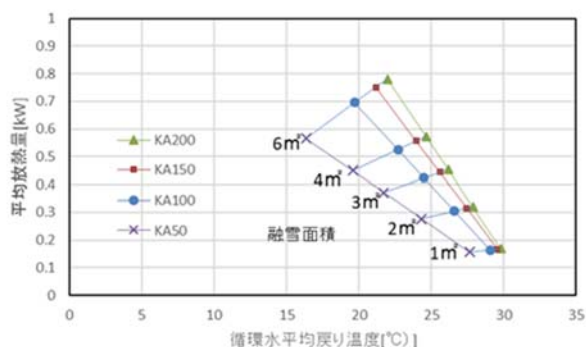


図 3-29 熱交換コイルの伝熱係数、融雪面積、期間平均循環水温度、期間平均パイプ放熱量の関係

循環水温度は、融雪面積が大きいほど、熱交換コイルの伝熱係数が小さいほど低くなり、融雪面積が大きいほど伝熱係数の影響が大きくなっている。パイプ放熱量は、融雪面積が大きいほど、伝熱係数が大きいほど大きくなり、融雪面積が大きいほど伝熱係数の影響が大きくなっている。したがって、パイプ放熱量を増やすためには、融雪面積を大きくする

だけでなく、熱交換コイルの伝熱面積も大きくする必要がある。期間平均循環水温度と積雪時間との関係を図 3-30 に示す。積雪時間は、熱交換コイルの伝熱係数にかかわらず、循環水温度によって決まることがわかる。

これらの結果を用いると、たとえば、融雪の設計条件として、1cm 以上の積雪時間を 100 時間、3cm 以上の積雪時間を 20 時間以内とすれば、循環水温度は 25°C 以上必要である。その場合、冷房負荷 1kW 当たり、必要な熱交換コイルの伝熱係数は 150W/K 程度で、融雪面積は 3～4 m²程度が限界であり、この条件では、冷房負荷の 50%程度を処理できると考えられる。

[参考文献]

- 1) American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers: 2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments - Expanded Data Center Classes and Usage Guidance, 2011
- 2) 日本学会：拡張アメダス気象データ，2005. 8
- 3) 諏訪好英：データセンター向けにおける空調気流方式の高効率化に関する研究，日本建築学会環境系論文集，No. 663，pp. 501-508，2011. 5
- 4) 諏訪好英，土屋貴史：データセンター向け空調気流方式の高効率化を目的とした縮小模型実験，日本建築学会環境系論文集，No. 675，pp. 365-374，2012. 5
- 5) 日本データセンター協会：データセンターにおける節電対策マニュアル，pp. 36-37，2012. 6
- 6) 相澤直樹，柴田克彦，池田昌弘，松岡茂登：抜本的低炭素化に向けたデータセンター用空調システムの開発(第2報)廃熱利用システムの運転状況，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 345-348，2015. 9

7) 月館司, 富田和彦: ロードヒーティングの期間融雪負荷シミュレーション, 空気調和・衛生工学会 論文集, No. 61, pp. 57-65, 1996

4. まとめ

外気等の利用による冷房や排熱による融雪など積雪寒冷条件を踏まえたデータセンターの設計に関する基礎的知見を整備することを目的として検討を行い、以下の知見が得られた。

(1) 構造形式の検討

- 1) 日本建築学会荷重指針・同解説の雪荷重設定法に基づき建物屋根形状別に屋根形状係数の試算を行ったところ、アーチ屋根は陸屋根よりも、風による偏分布の影響が大きく、滑雪がなく吹きだまりが発生する条件において、雪荷重の影響が大きくなる。

(2) データセンターの内外装仕様、空調設備、排熱による融雪の検討

- 1) 拡張アメダス標準年の毎時刻データを用いた定常計算による評価によれば、建物が受ける日射量によって冷房負荷が変わるため、屋根の断熱性能を上げることが効果的であり、熱貫流率 $2.5\text{W/m}^2\text{K}$ 程度の断熱性能で結露防止が可能である。
- 2) 外気冷房の導入効果について、外気冷房を導入すると建物の断熱性能の影響は小さく、北海道のいずれの地点においても外気冷房が有効で、本州よりも優位性がある。
- 3) 建物形状が空調に及ぼす影響に関する CFD 解析によれば、ドーム型の断面形状は矩形に比べ、コールドアイルのキャッピング効果（熱気と冷気の分離）を得やすい。
- 4) データセンターの排熱による冬期間の融雪シミュレーションによれば、冷房負荷の 50% 程度を処理する条件では、冷房負荷 1kW 当たり $3\sim 4\text{m}^2$ 程度の融雪が可能である。

研究成果は、道内自治体等への情報提供やデータセンター整備構想に対する技術支援において活用する。