



Title	寒冷地における高断熱建物の室内温熱環境と暖房エネルギー消費量の特性に関する実態調査研究
Author(s)	菊田, 弘輝; Kikuta, Koki; 絵内, 正道 他
Citation	日本建築学会環境系論文集, 599, 39-46
Issue Date	2006-01-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50474
Rights	日本建築学会、本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
Type	journal article
File Information	AIJ.599.39-46.pdf



寒冷地における高断熱建物の室内温熱環境と暖房エネルギー消費量 の特性に関する実態調査研究

A STUDY ON QUALITIES OF INDOOR THERMAL ENVIRONMENT AND HEATING ENERGY CONSUMPTION FOR HIGHLY INSULATED BUILDINGS IN COLD REGIONS

菊田 弘輝*, 絵内 正道**, 羽山 広文***, 森 太郎****

*Koki KIKUTA, Masamichi ENAI, Hirofumi HAYAMA
and Taro MORI*

The aim of this study is to verify qualities of indoor thermal environment and heating energy consumption through this research on highly insulated buildings introduced reduction systems of fresh air load in cold regions. The research objects are two government offices for outside insulated RC buildings newly built in Obihiro City and Hakodate City. We consider the temperature characteristics on effects of high heat insulation and thermal storage in buildings, and the heating systems and control techniques on operations for highly insulated buildings. Also we consider the effects of energy reduction and usefulness on introductions of reduction systems of fresh air load. Based on what we have learned through this research, we discuss the subjects and suggestions for highly insulated buildings in cold regions.

Keywords: *Highly insulated building, Reduction system of fresh air load, Indoor thermal environment, Heating energy consumption*
高断熱建物, 外気負荷低減システム, 室内温熱環境, 暖房エネルギー消費量

1. はじめに

寒冷地における外断熱建物に関する実態調査はこれまでも行われており、室内温熱環境の改善、エネルギーの有効利用、構造躯体の長寿命化等に効果的であることが検証されてきた^{1)~5)}。平成11年3月、省エネルギー関連法案における「建築物に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断の基準」⁶⁾が告示改正されて、PAL基準値(事務所)は300 [MJ/m²・year]以下に義務付けられた。また、平成15年4月、北海道地域における官庁施設を適用範囲として、「外断熱建物に関する性能基準」⁷⁾が制定された。

現在、道内の官庁施設では、PAL基準値の3割削減程度に相当する建物の高断熱化が徐々に浸透しつつあり、従前よりも外皮負荷は小さくなっている。そのため、外気温の低い寒冷地では、特に建物全体に占める外気負荷の比率が高くなり、負荷比率の様相も大きく変化している。実際に現段階で運用されている高断熱建物においては、外気負荷低減システムを導入する動きが高まっており、実測調査による性能評価が必要である。

本論の目的は、寒冷地における外気負荷低減システムを導入した高断熱建物の実測調査を通じて、室内温熱環境と暖房エネルギー消費量の特性を検証することである。主に、①建物の高断熱効果と躯体の蓄熱効果に関わる温度特性について、②高断熱建物の運用状況に関わる暖房システムと制御手法について、③外気負荷低減システムの導入に

関わるエネルギー削減効果と有用性について検討する。①~③で得られた知見を踏まえ、寒冷地における高断熱建物の課題や提案について考察する。

2. 実測調査の概要

2.1 施設の概要

平成15年、道内でも比較的寒冷な帯広市と温暖な函館市に新設されたRC造外断熱の官庁施設2件を調査対象とした。測定期間は平成16年1月中旬~2月下旬である。地域性の違いとして、平年の冬期の最深積雪は帯広市の方が高く、積雪量は函館市の方が多い。

施設の概要を表1、空調設備システムを図1に示す。帯広A庁舎の延べ床面積は1846 [m²]で、外壁仕様にRC造外断熱の通気層工法が採用されている。本施設の特徴は、南壁面に大きなガラス面を有すること、1階のロビー・事務室と2階の事務室を繋ぐ吹き抜け空間を有すること等が挙げられる。空気調和方式はパッケージエアコン・ダクト併用方式で、主要な熱源機器は灯油エンジンヒートポンプである。外気負荷低減システムには、顕熱交換器による排熱回収(以下、顕熱回収)とCO₂センサーを用いた外気量制御システム(以下、CO₂制御)が導入されている。図1に示したレタンチャンパー内にCO₂濃度発信器及びデジタルCO₂濃度指示調節計が組み込まれており、室内の環境基準に合うように、自動制御でダンパー開度の調節が行われている。

* 北海道大学大学院工学研究科 博士後期課程
** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博
*** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)
**** 国立釧路工業高等専門学校 助教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.
Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Kushiro National College of Technology, Dr. Eng.

函館B庁舎の延べ床面積は4045[m²]で、外壁仕様にRC造外断熱の通気層工法が採用されており、屋根スラブにも通気層が設けられている。本施設の特徴は、時期に応じて来庁者数に変動を有すること、帯広A庁舎に比べて外壁面に占めるガラス面の比率が低く、PAL基準値の3割削減程度に相当する断熱性能であること等が挙げられる。空調和方式はファンコイルユニット・ダクト併用方式で、主要な熱源機器は空気熱源ヒートポンプである。外気負荷低減システムには、全熱交換器による排熱回収(以下、全熱回収)とCO₂制御が導入されている。図1に示したACU-1・4・5の空調機3台に全熱交換器、ACU-6以外の空調機5台にCO₂センサーが組込まれている。

2.2 測定項目と測定位置

測定項目と測定位置を表2に示す。各地域の気象データを屋外データとして使用し、函館B庁舎のみ一部で中央監視データを使用した。また、空気温湿度や躯体温度や暖房エネルギー消費量(帯広A庁舎: 灯油消費量、函館B庁舎: 熱源熱量)以外に、外気負荷低減システムの特性に関わるものとして、熱交換器廻りの温湿度やダンパー開度も測定項目としている。

3. 実測調査の結果

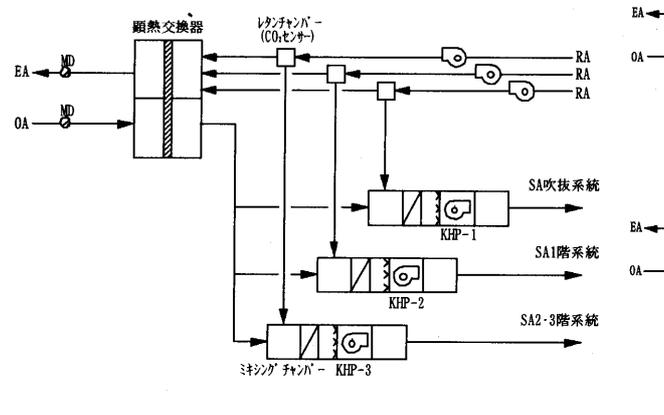
3.1 建物の高断熱効果と躯体の蓄熱効果

1) 外気温と水平面全日射量

外気温と水平面全日射量の推移を図2に示す。帯広A庁舎では、最低気温が-20℃以下に達し、測定期間中の平均外気温は-7.1℃で標準偏差は5.1℃となった。函館B庁舎では、帯広A庁舎に比べて日変動幅が小さく、測定期間中の平均外気温は0.0℃で標準偏差は3.7℃となった。水平面全日射量が少ない日は曇天日(雪・雨)に相当し、快晴日は帯広A庁舎の方が多かったと判断できる。

表1 施設の概要

帯広A庁舎 北海道帯広市 1846m ² (3階建て)	函館B庁舎 北海道函館市 4045m ² (4階建て)
RC造外断熱、通気層工法、GW100(mm)、G2kg/m ²	RC造外断熱、通気層工法、FP板150(mm)
パッケージエアコン・ダクト併用方式	ファンコイルユニット・ダクト併用方式
灯油エンジンヒートポンプ6台 定格出力: 計278.7[kWh] ⇒灯油消費量: 計28.8[L/h]	空気熱源ヒートポンプ2台 定格出力: 計292[kWh] ⇒熱源熱量: 計1051.2[MJ/h]
顕熱交換器(KHP-1・2・3): 9740[m ³ /h]	ACU-1: 3230[m ³ /h], ACU-2: 2150[m ³ /h] ACU-3: 2440[m ³ /h], ACU-4: 1320[m ³ /h] ACU-5: 1110[m ³ /h], ACU-6: 4040[m ³ /h]
灯油エンジンヒートポンプ式空調機 顕熱交換器による排熱回収 CO ₂ センサーを用いた外気量制御システム 南壁面に大きなガラス面、吹き抜け空間 261.6[MJ/m ² ・year]	ユニット形空調機 全熱交換器による排熱回収 CO ₂ センサーを用いた外気量制御システム 時期に応じて来庁者数に変動 200.0[MJ/m ² ・year]



2) 室内の温度特性

屋外・空調室・非空調室の温度変動を図3、温度特性を表3に示す。表3に示した2/1(日)~2/7(土)を代表的な1週間とした。帯広A庁舎(土日閉庁)では、1~2月の厳寒期であっても、空調開始時(8:00)の空調室の温度(以下、室温)は常時15℃以上となった。断熱不足の建物とは対照的に、建物の高断熱効果や躯体の蓄熱効果やヒートブリッジの解消等による高断熱建物の特徴が現れていた。

2/2(月)の空調開始時(8:00)の室温は、土日の空調停止も相まって約16.5℃となったが、執務開始時(9:00)の室温は21.5℃に達した。これまで外断熱を採用すると、躯体の熱容量が増大するので、「冷えにくく暖まりにくい」という考え⁸⁾があった。だが実際は、1時間程度の予熱運転であっても、十分に快適な室内温熱環境が得られることが明らかになった。このことから、外断熱に代表される高断熱建物は「一度暖まると冷えにくく暖まりやすい」という考え⁹⁾が適当であることが分かった。

函館B庁舎(日曜閉庁)では、夜間の室温低下の緩和によって、空調開始時(7:00)の室温は20℃程度に保持されており、室温が20~25℃で非空調室温が20℃~22℃の範囲に収まっていた。また、執務時間帯の平均室温は約24℃で、帯広A庁舎とほぼ同等であった。内部取得熱(日射、機器・照明、人体等)の影響が相対的に大きくなる高断熱建物であっても、室温変動は緩やかな曲線(変動幅: 約1℃)を示し、非常に安定していた。

3) 建物の断熱効果

建物の断熱性能はガラス面積が少ない函館B庁舎の方が小さく、内外温度差は帯広A庁舎の方が大きい。従って、暖房エネルギー消費の原単位の差異を理解した上で、X軸に内外温度差、Y軸に非空調室温の散布図によって、建物の断熱効果を検証した。

表2 測定項目と測定位置

平成16年1月17日~2月12日(27日間)		平成16年2月1日~2月27日(27日間)	
屋外(温湿度)	帯広測候所	屋外(温湿度)	中央監視
水平面全日射量	帯広測候所	水平面全日射量	函館海洋気象台
空調室(温湿度)	2階事務室 2階階段室	空調室(温湿度)	2階事務室 2階男子トイレ
非空調室		非空調室	
通気層内 断熱材表面 境界面 室内側表面	2階北壁	通気層内 境界面 躯体内 室内側表面	2階東壁
		スラブ内	屋根(中央監視) 3階床(中央監視)
顕熱交換器廻り(温湿度)	OA・EA各2点	全熱交換器廻り(温湿度)	ACU-1~4・5
空調機廻り(温湿度)	KHP-1~3のRA・MA・SA	空調機廻り(温湿度)	ACU-1~6(中央監視) ACU-1~5(中央監視)
灯油消費量	灯油供給装置検針盤	熱源熱量・運転状況	中央監視
電力消費量	分電盤	電力消費量	分電盤

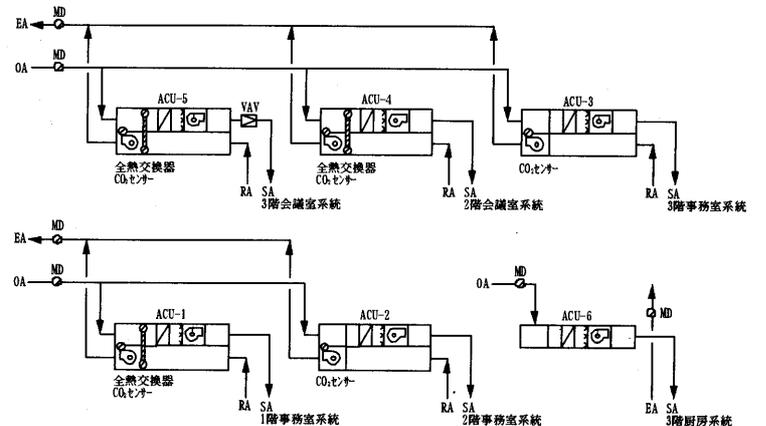


図1 空調設備システム(左: 帯広A庁舎, 右: 函館B庁舎)

内外温度差と非空調室温の散布図を図4に示す。帯広A庁舎では、非空調室温が18℃前後で内外温度差は20～40℃の範囲に、函館B庁舎では、非空調室温が21℃前後で内外温度差は12～32℃の範囲に収まっていた。内外温度差が22℃の場合、非空調室温の差は函館B庁舎の方が4～5℃程度高かった。非空調室は間仕切り壁面積と外壁面積の多少に影響されるため、同じ条件下として比較したところ、建物の断熱性能はそのまま断熱効果となって現れていた。

4) 外壁躯体とスラブの蓄熱効果

外断熱の特徴である躯体の蓄熱効果を外壁躯体とスラブ内の温度特性を基に検証した。外壁躯体の測定位置は、施設の特徴から中間階の北壁面(帯広A庁舎)と東壁面(函館B庁舎)を選択した。また、スラブ内の測定位置は、屋根と3階床(函館B庁舎)を選択した。

外壁躯体の測定位置を図5、外壁躯体の温度変動を図6、スラブ内の温度変動を図7に示す。躯体の蓄熱効果の理想は、空調運転時に吸熱し、空調停止時に放熱することによって、夜間の室温低下を緩和し、翌朝の立ち上がり負荷を軽減することである。だが実際は、両施設共に1日を通じて室内側表面温度<室温の温度勾配となっており、空調の停止時間帯でも室内への放熱は見込めなかった。更に、屋根スラブは外壁躯体に比べて断熱厚さが50[mm]厚かった分、温度は高目であったが、常に屋根スラブ内温度<室温の温度勾配となっており、外壁躯体と同様に放熱側として機能する時間帯はなかった。

これまで外断熱を採用すると、内断熱に比べて外壁躯体や屋根スラブの熱容量が増大するので、室温変動の緩和が取り上げられていたが、その蓄熱効果はそれ程大きく期待できないことが明らかになった。対

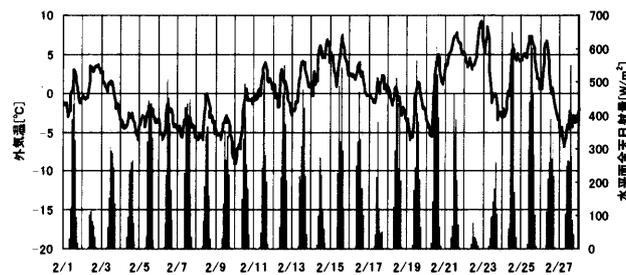
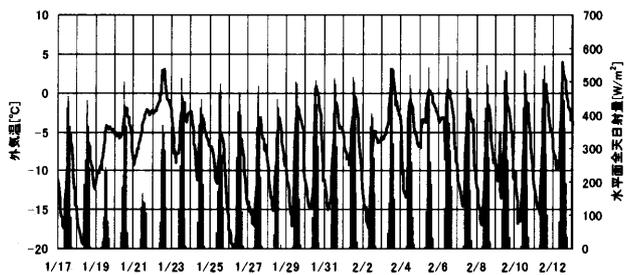


図2 外気温と水平面全日射量の推移(左: 帯広A庁舎, 右: 函館B庁舎)

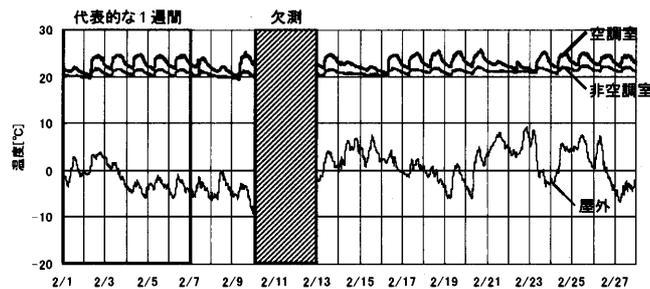
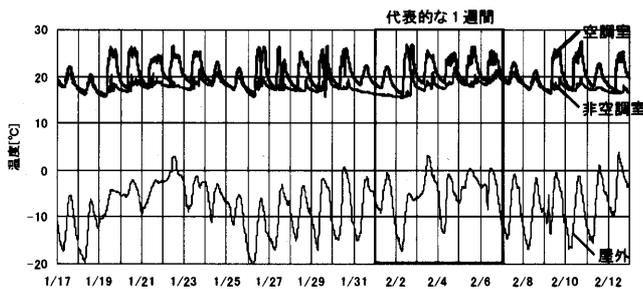


図3 屋外・空調室・非空調室の温度変動(左: 帯広A庁舎, 右: 函館B庁舎)

表3 屋外・空調室・非空調室の温度特性

	3.1	26.7	21.8	26.7	25.6	24.9	26.4	25.6
帯広A庁舎	-17.4	16.2	15.5	21.5	22.2	22.4	21.7	22.5
	-5.5	21.2	18.1	5.2	3.4	2.5	4.7	3.1
函館B庁舎	3.8	24.9	21.8	24.5	24.6	24.9	24.5	24.6
	-6.0	20.3	19.7	23.1	24.0	23.9	23.8	23.8
	-1.9	22.9	20.8	1.4	0.6	1.0	0.7	0.8

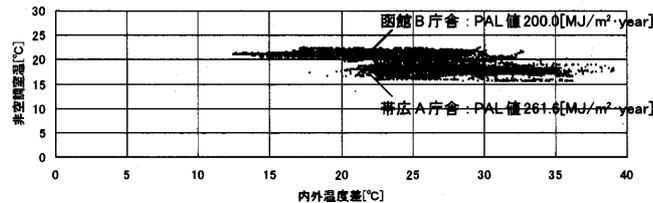


図4 内外温度差と非空調室温の散布図

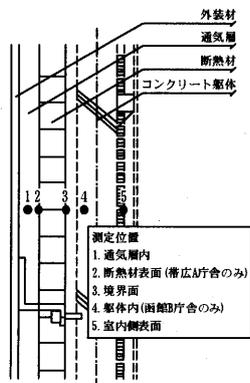


図5 外壁躯体の測定位置

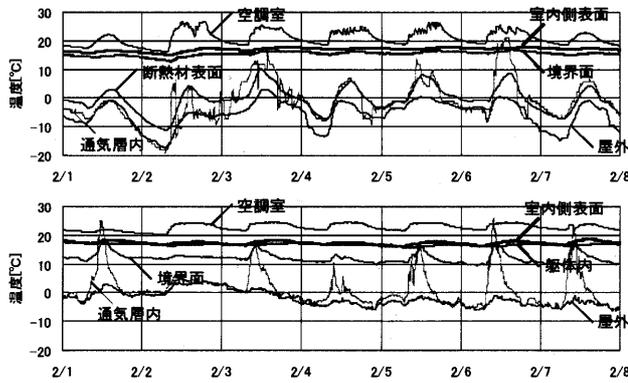


図6 外壁躯体の温度変動
(上: 帯広A庁舎, 下: 函館B庁舎)

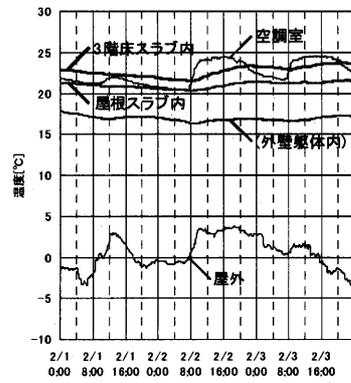


図7 スラブ内の温度変動
(函館B庁舎)

照的に、3階床スラブ内温度は、空調開始約1時間後に室温を下回り、空調停止約45分後に上回る状況から、床スラブ全体で吸放熱を繰り返していたと判断できる。断熱厚さの増加やヒートブリッジの解消等が可能となる外断熱¹⁾²⁾では、外壁躯体や屋根スラブから屋外への熱流出が減少する。このことから、夜間に外気導入を停止した場合に最も大きくなるガラス面から屋外への熱流出に対して、より有効に床スラブの蓄熱効果が機能すると考えられる。

3.2 高断熱建物の運用状況

1) 暖房エネルギー消費量と室温変動の関係

両施設共に高断熱建物における新しい熱負荷計算法として、空気調和・衛生工学会北海道支部が提案した平均負荷計算法⁷⁾⁹⁾を用い、熱源機器容量を計画・設計している。

帯広A庁舎においては、灯油供給装置検針盤が2台設置されており、合計した灯油消費量を暖房エネルギー消費量とした。ただし、その検針盤は灯油タンクからレバラーに供給した量を表示しており、厳密には灯油消費量と一致しないため、瞬間値ではなく積算値で扱うことによって、一致しているものと仮定した。函館B庁舎においては、中央監視データがあるため、温水流量と往還温度差から算出した熱源熱量を暖房エネルギー消費量とした。

暖房エネルギー消費量と室温変動を図8、立ち上がり時の熱源熱量と室温変動を図9に示す。帯広A庁舎では、朝方と夕方大きい出力パターンとなっており、2/2(月)の灯油消費量は他の平日に比べて2倍の約250[L/day]であった。灯油エンジンヒートポンプ6台の定格運転時の灯油消費量は691.2[L/day](=28.8[L/h]×24[h/day])と推定できるので、全負荷相当運転時間で検証すると、熱源機器の稼働状況は約40%であった。また、2/2(月)の朝方には一時的にピーク運転と

なる不合理な運転が行われており、サーモ制御時に室温変動(最大値:26.7℃, 変動幅:5.2℃)が生じていた。

函館B庁舎では、朝方に大きく夕方に小さい典型的な出力パターンとなっており、2/2(月)の熱源熱量は他の平日に比べて1.5倍の約7500[MJ/day]であった。立ち上がり負荷特性で検証すると、2/2(月)の空調開始1時間後(8:00)に、熱源熱量は一時的に175.2[MJ/10min](=1051.2[MJ/h]/6)となっており、空気熱源ヒートポンプ2台がピーク運転していた。執務時間帯になると熱源熱量は減少しており、空調開始時(7:00)から正午までの積算熱源熱量は、2/2(月)と2/4(水)との間で約25%の差(2/2(月):3746[MJ], 2/4(水):2821[MJ])が生じていた。また、暖房システムと制御手法が合理的に計画されることによって、快適な室内温熱環境が得られることも同時に確認された。

2) 実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較

計画・設計に用いた設計用内外温度差と実測で得られた内外温度差は、必ずしも一致する訳ではない。このことを踏まえ、測定期間中の実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較から、平均負荷計算法の妥当性を検証した。

実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較を図10、図10に示した直線の算定条件と算定式を表4に示す。設計時と同様に11時間運転の熱源機器平均出力を算定し、帯広A庁舎は1/17~2/12のうち13日間(1/17~1/23欠測)、函館B庁舎は2/1~2/27(2/10~2/12欠測)のうち19日間をプロットした。また、図10に示した直線から、実際の熱源機器容量(A1, B1)が平均負荷計算法から算出した熱源機器容量(A2, B2)よりも大きいことが分かる。

ここで重要なのは、最寒期における日積算の暖房エネルギー消費量の多くが、灰色の点群<A2, 黒色の点群<B2であったということであ

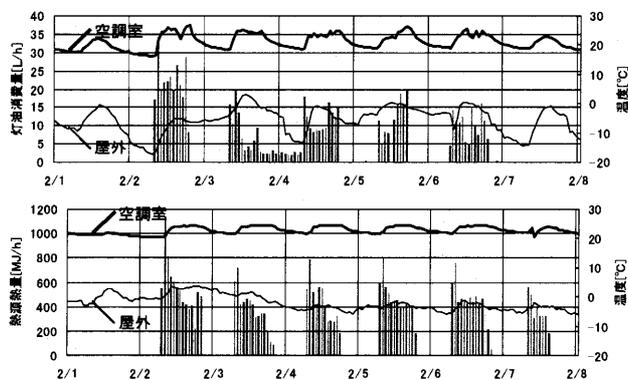


図8 暖房エネルギー消費量と室温変動
(上: 帯広A庁舎, 下: 函館B庁舎)

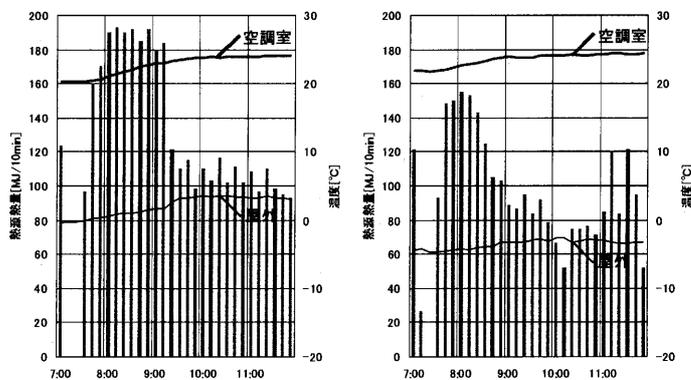


図9 立ち上がり時の熱源熱量と室温変動
(函館B庁舎, 左: 2/2(月), 右: 2/4(水))

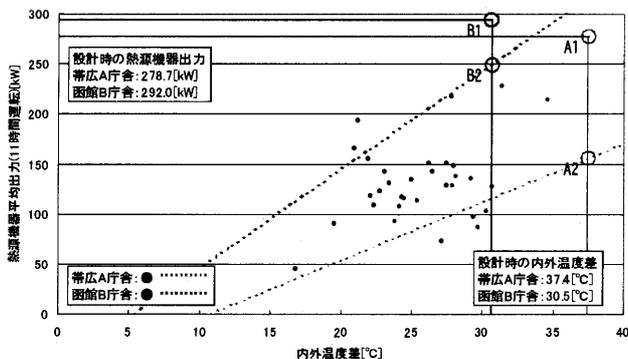


図10 実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較

表4 図10に示した直線の算定条件と算定式

屋外・室内条件	外気温: t_o	-15.4℃	8.5℃
	室温: t_i	22.0℃	
暖房エネルギー消費量: H_h	内外温度差	37.4℃	30.5℃
	外皮負荷	585.6 [kWh/day]	891.0 [kWh/day]
内部取得熱量: H_g	外皮負荷	1118.8 [kWh/day]	1835.8 [kWh/day]
	日射取得熱量	窓面積×透過日射量(地域・方位)×遮蔽係数(0.46)	
備考	照明・機器発熱量	15 [W/m ²]×室面積[m ²]×点灯・稼働時間[h]	
	人体発熱量	116 [W/人]×在室人員[人]×在室時間[h]	
備考	外皮・外気負荷	設計計算書より	
	室面積	1643 [m ²] (空調面積より)	2804 [m ²] (空調面積より)
	点灯・稼働時間	8 [h]	
	在室人員	職員70 [人], 外来者92 [人], 職員162 [人]	
	在室時間	職員8 [h], 外来者7 [h], 職員8 [h]	
直線の傾き=総合熱負荷率[kW/K] = $(t_i - t_o) / (H_h + H_g) / 11$			
X軸の切片=自然温度差℃ = $(H_g / 11 \times t_i + H_h / 11 \times t_o) / (H_h + H_g) / 11 - t_o = (H_g \times t_i + H_h \times t_o) / (H_h + H_g) - t_o$			

る。つまり、平均負荷計算法から算出した熱源機器容量 (A2, B2) であっても、過小にならないことを意味している。ただし、帯広B庁舎の一部で灰色の点群 > A2 となっており、その要因として、月曜日であったことや大きな熱源機器容量 (A1) であったこと等が挙げられる。

現段階では、平均負荷計算法を適用する際に、ある程度安全側に配慮されており、特に南壁面に大きなガラス面を有する帯広A庁舎では、大きな熱源機器容量で計画・設計された可能性がある。室内温熱環境と暖房エネルギー消費量の特性から判断すると、設定室温や運転方法を含めた適切な制御手法による運用は、寒冷地における高断熱建物にとっても重要であり、平均負荷計算法の妥当性もそのことが前提条件であると考えられる。

3.3 外気負荷低減システムの特性

1) 熱交換器廻りの運用状況と排熱回収効率

熱交換器廻りの測定位置を図11、ダンパー開度を図12、熱交換器廻りの温度変動を図13、空調機廻りの温度変動を図14に示す。実測で得られた温湿度データから比エンタルピ (i [kJ/kg]) を算出し、排熱回収効率を算定した^{10) 11)}。ただし、帯広A庁舎は顕熱交換器を導入しているため、比エンタルピから潜熱を除いた顕熱成分で評価した。排熱回収効率の算定式は、 $((i_{EA_pre} - i_{EA_post}) / (i_{EA_pre} - i_{OA_pre}))$ となるが、函館B庁舎は i_{OA_pre} ではなく、OAとRAがミキシングした i_{MA_pre} に置き換えた算定式となる。

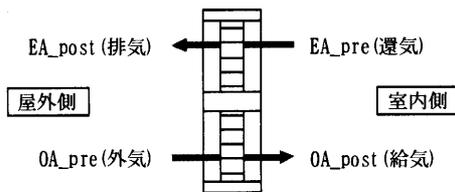


図11 熱交換器廻りの測定位置

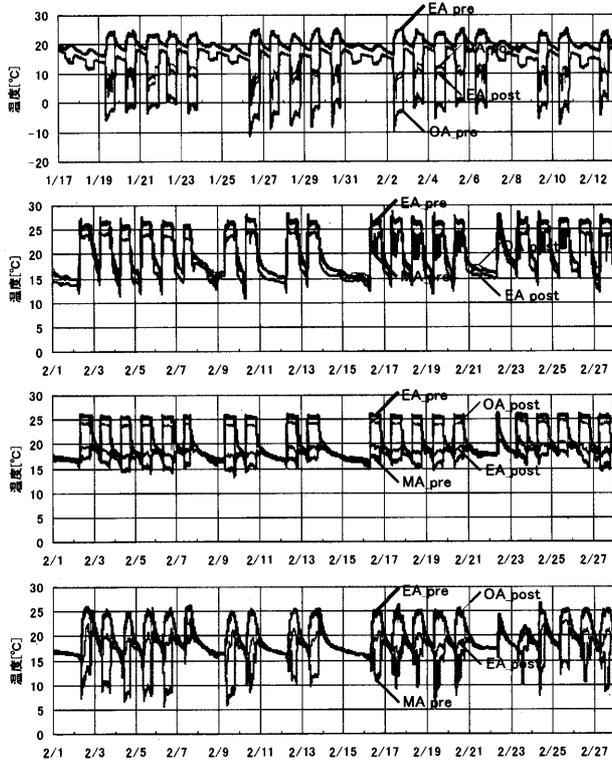


図13 熱交換器廻りの温度変動
(上から順に、帯広A庁舎、函館B庁舎 (ACU-1, 4, 5))

排熱回収効率の推移を図15に示す。回転式の熱交換器が採用されており、排熱回収効率の諸元値は、帯広A庁舎の顕熱交換器の場合で0.50以上、函館B庁舎の全熱交換器の場合で0.50 (ACU-1)、0.70 (ACU-4・5) となっていた。外気負荷の削減効果を検証する上で、排熱回収効率から排熱回収量を算出するが、図15に示した排熱回収効率の算定値は、諸元値に達する性能であったものの、時間帯に応じて大きく変動していた。そのため、排熱回収効率の算定値は、帯広A庁舎の顕熱交換器の場合で0.55、函館B庁舎の全熱交換器の場合で0.35 (ACU-1)、0.60 (ACU-4) と判断した。また、ACU-5の算定値は大きく変動しており、その時間帯が図12に示したダンパー開度 (30から100へ) の切り替わった時間帯と対応していた。おそらく外気導入量に変動が生じ、排熱回収効率の算定式 $((i_{EA_pre} - i_{EA_post}) / (i_{EA_pre} - i_{MA_pre}))$ の i_{MA_pre} の部分が影響を受けて、算定値がばらついたと考えられる。従って、熱交換器の仕様や多少のばらつきを踏まえた上で、ACU-5の算定値をACU-4と同様に0.60と判断した。

2) 外皮・外気負荷の算出方法及び積算値

外気負荷 [J] の算出は、 $(\text{比重} [\text{kg}/\text{m}^3] \times \text{外気導入量} [\text{m}^3] \times (\text{空調室の比エンタルピ} [\text{J}/\text{kg}] - \text{屋外の比エンタルピ} [\text{J}/\text{kg}]))$ とした。帯広A庁舎においては、CO₂制御による効果検証で必要となる外気導入量の状況が把握できず、表1に示した9740 [m³/h] (定風量) を用いた。外皮負荷 [J] の算出は、暖房エネルギー消費量 (帯広A庁舎: 灯油消費量、函館B庁

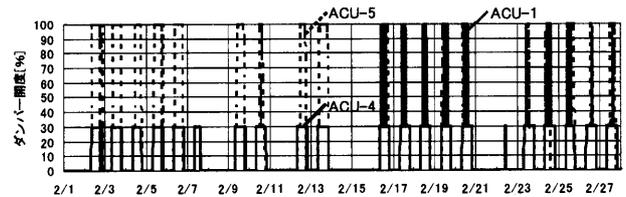


図12 ダンパー開度 (函館B庁舎 (ACU-1・4・5))

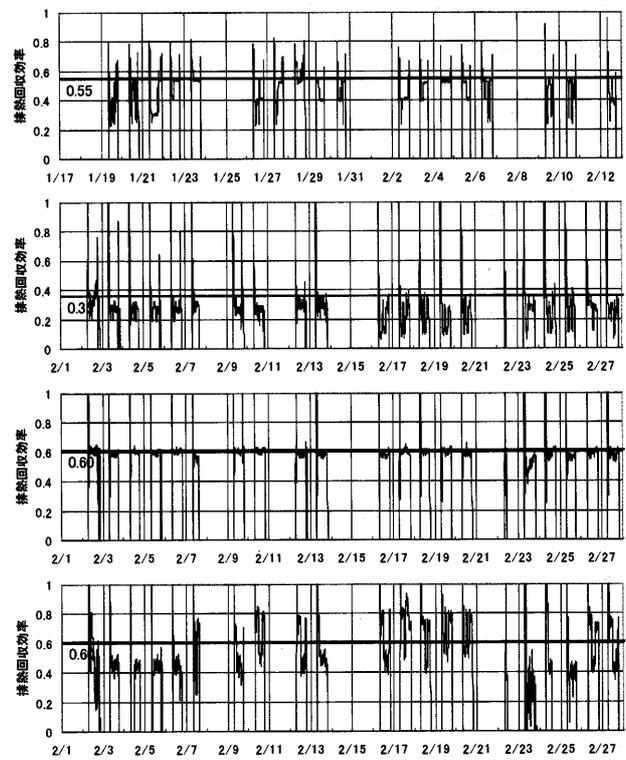


図15 排熱回収効率の推移
(上から順に、帯広A庁舎、函館B庁舎 (ACU-1, 4, 5))

舎：熱源熱量)から、算出した外気負荷を差し引いたもの(外気導入に関わる負荷以外=室内負荷)とした¹⁰⁾¹¹⁾。

日積算、時間積算の外皮・外気負荷を図16、図17に示す。帯広A庁舎の日積算の外皮負荷は月曜日に最も多くなり、他の平日に比べて2倍程度の約6000 [MJ/day]と曜日格差が顕著であった。逆に、外気負荷は1500~2000 [MJ/day]と安定しており、負荷比率は外皮負荷が多い日で外皮負荷：外気負荷=3:1、少ない日で外皮負荷：外気負荷=3:2となった。

函館B庁舎の日積算の外皮負荷は同じく月曜日に最も多くなり、外気温が高くなる2月下旬には曜日格差が小さくなった。また、外気負荷は2000 [MJ/day]程度と安定しており、負荷比率は2月上旬で外皮負荷：外気負荷=2:1、2月下旬で外皮負荷：外気負荷=1:1となった。時間積算でも同様の傾向を示し、14:00以降になると、1時間当りの外気負荷は150 [MJ/h]まで半減していた。これは、在室人員の増減に伴って外気導入量に変動が生じたからではなく、外調に組み込まれた制御の影響によるものである。

3) 外皮・外気負荷の原単位

建物の断熱性能はそのまま断熱効果となって現れていることが確認されたが、外皮・外気負荷に分けて、両施設の暖房エネルギー消費の原単位を比較し、建物の断熱効果について検討を加えた。

内外温度差と暖房エネルギー消費の原単位の散布図を図18に示す。暖房エネルギー消費の原単位は、日積算の外皮・外気負荷 [MJ/day] を空調面積 [m²] (帯広A庁舎：1643 [m²]、函館B庁舎：2804 [m²]) で除して

単位換算 [W/m²] したものである。外気負荷の近似直線は22℃付近で交差しており、熱損失係数に相当する直線の傾き(帯広A庁舎：1.82 [W/m²·K]、函館B庁舎：0.45 [W/m²·K])から外気負荷の原単位が定まった。対照的に、外気負荷の近似直線の傾きはほぼ等しく、内外温度差に対応した共通の外気負荷の原単位が定まった。

4) 外気負荷の削減効果

建物の高断熱化によって、外気温の低い寒冷地では、特に外気負荷の比率が高くなり、負荷比率の様相は大きく変化する。そのため、熱回収やCO₂制御に代表される外気負荷低減システムに関わるエネルギー削減効果と有用性について把握する必要がある。以下に示した評価方法で、それぞれの効果を検証した。

① 全熱回収による効果検証

⇒排熱回収効率から排熱回収量を算出して評価

② CO₂制御による効果検証

⇒変風量方式と定風量方式との外気負荷の差を算出して評価

CO₂濃度の推移を図19に示す。ACU-1~4に導入されたCO₂制御の参考基準値は800 [ppm]で、その推移が基準値以下に収まっていたことから、適切に作動していたと推測される。因みに、ACU-5の参考基準値は記されていない。しかし、ACU-1~5の全てにおいて、外気導入時のダンパー開度は800 [ppm]を境にして30 [%]から100 [%]へ切り替わっていた。従って、時期に応じて来庁舎数に変動を有し、外気導入量の設計値が高目に計画・設計された函館B庁舎では、CO₂制御による外気負荷の削減効果が大きく期待される。

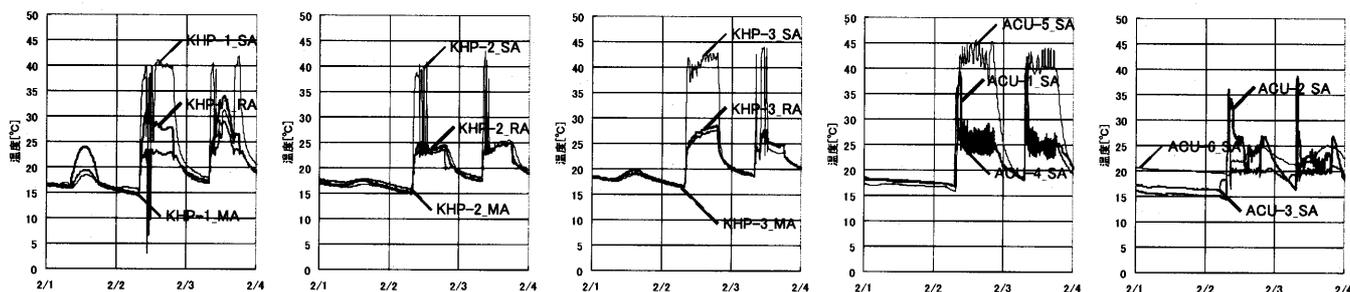


図14 空調機回りの温度変動(左から順に、帯広A庁舎(KHP-1・2・3)、函館B庁舎(ACU-1・4・5、2・3・6))

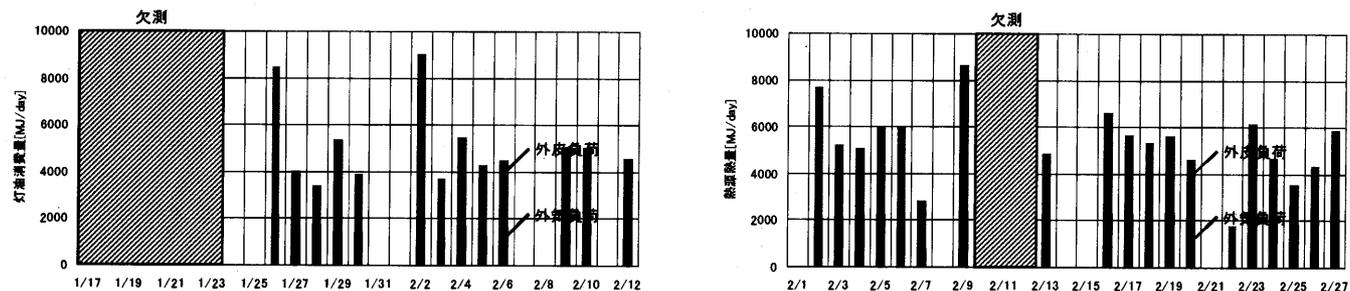


図16 日積算の外皮・外気負荷(左：帯広A庁舎、右：函館B庁舎)

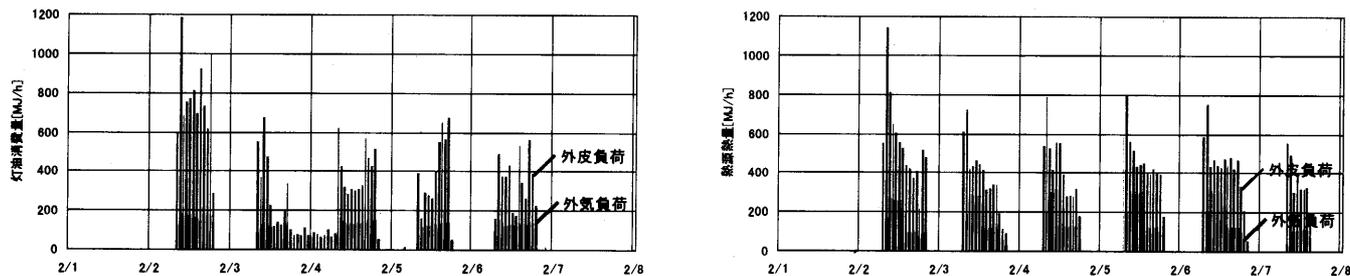


図17 時間積算の外皮・外気負荷(左：帯広A庁舎、右：函館B庁舎)

外皮・外気負荷の比率とエネルギー削減効果を図20に示す。X軸に代表的な1週間における週積算の暖房エネルギー消費量を示した。また、Y軸に①外気負荷低減システムを導入しない場合、②顕熱回収を導入した場合、③CO₂制御を導入した場合、④全熱回収とCO₂制御を併用した場合を示し、横棒グラフで表記した¹²⁾。ただし、帯広A庁舎はCO₂制御による効果検証ができないため、③と④は省く。

帯広A庁舎では、①外気負荷低減システムを導入しない場合、負荷比率は外皮負荷：外気負荷=5:5となった。②顕熱回収を導入した場合、排熱回収効率が0.55であったので、負荷削減率は全体で26%（外気負荷成分で54%削減）となった。ここで重要なのは、全熱負荷に占める外皮負荷が小さいにも関わらず、負荷比率が外皮負荷：外気負荷=7:3となり、外気負荷の比率が約20%低減されたことである。

函館B庁舎では、①外気負荷低減システムを導入しない場合、負荷比率は外皮負荷：外気負荷=4:6となった。②全熱回収を導入した場合、外気負荷の約50%（ACU-1・4・5）しか熱回収の対象にならず、負荷削減率は全体で14%（外気負荷成分で23%削減）に留まった。しかし、③CO₂制御を導入した場合、高目に計画・設計された外気導入量の設計値に対して、効率よく制御されたので、負荷削減率は全体で35%（外気負荷成分で56%削減）に増大した。更に、④全熱回収とCO₂制御を併用した場合、CO₂制御による変風量方式となるために排気量が少なくなり、全熱交換器における排熱回収量も少なくなった。ただし、負荷削減率は最大で41%（外気負荷成分で67%削減）に達し、外気負荷低減システムの併用による有用性が実証された。その結果、負荷比率は外皮負荷：外気負荷=6:4となり、外気負荷の比率が半分以上に低減されることが分かった。

内断熱ではなく外断熱だからといって、必ずしも直接的に外気負荷の削減に繋がる訳ではないが、現状の負荷比率の様相に対して、外気負荷低減システムが大きく寄与していた。その結果、特に寒冷地という地域性も相まって、外気負荷は相対量・絶対量で大きく削減できることが明らかになった。今後はできる限り全系統で排熱を回収し、機能に応じて外気導入量を制御していくことが、寒冷地における高断熱建物にとっても必要となってくる。

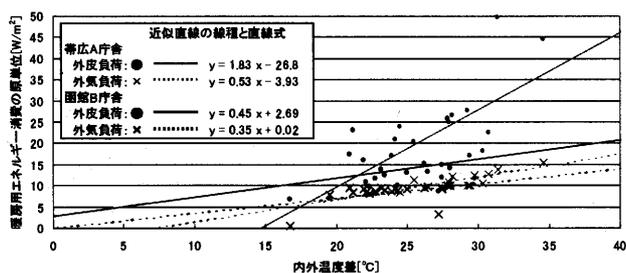


図18 内外温度差と暖房用エネルギー消費の原単位の散布図

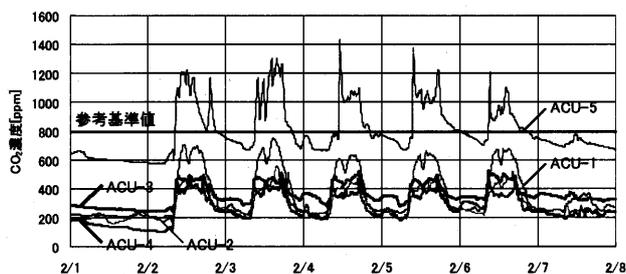


図19 CO₂濃度の推移(函館B庁舎)

4. まとめ

寒冷地における外気負荷低減システムを導入した高断熱建物の実測調査を通じて、室内温熱環境と暖房エネルギー消費量の特徴を検証し、①建物の高断熱効果と躯体の蓄熱効果に関わる温度特性について、②高断熱建物の運用状況に関わる暖房システムと制御手法について、③外気負荷低減システムの導入に関わるエネルギー削減効果と有用性について検討した。①～③で得られた知見を以下にまとめる。

1) 建物の高断熱効果に関わる温度特性

内部取得熱(日射、機器・照明、人体等)の影響が相対的に大きくなる高断熱建物であっても、室温変動は緩やかな曲線(変動幅:約1℃)を示し、非常に安定していた【函館B庁舎】。また、2/2(月)の空調開始時(8:00)の室温は、土日の空調停止も相まって約16.5℃となったが、執務開始時(9:00)の室温は21.5℃に達し、1時間程度の予熱運転であっても、十分に快適な室内温熱環境が得られることが明らかになった【帯広A庁舎】。このことから、外断熱に代表される高断熱建物は「一度暖まると冷えにくく暖まりやすい」という考えが適当であることが分かった。

2) 躯体の蓄熱効果に関わる温度特性

3階床スラブ内温度は、空調開始約1時間後に室温を下回り、空調停止約45分後に上回る状況から、床スラブ全体で吸放熱を繰り返していたと判断できる【函館B庁舎】。断熱厚さの増加やヒートブリッジの解消等が可能となる外断熱では、より有効に床スラブの蓄熱効果が機能することを示した。対照的に、これまで外断熱を採用すると、内断熱に比べて外壁躯体や屋根スラブの熱容量が増大するので、室温変動の

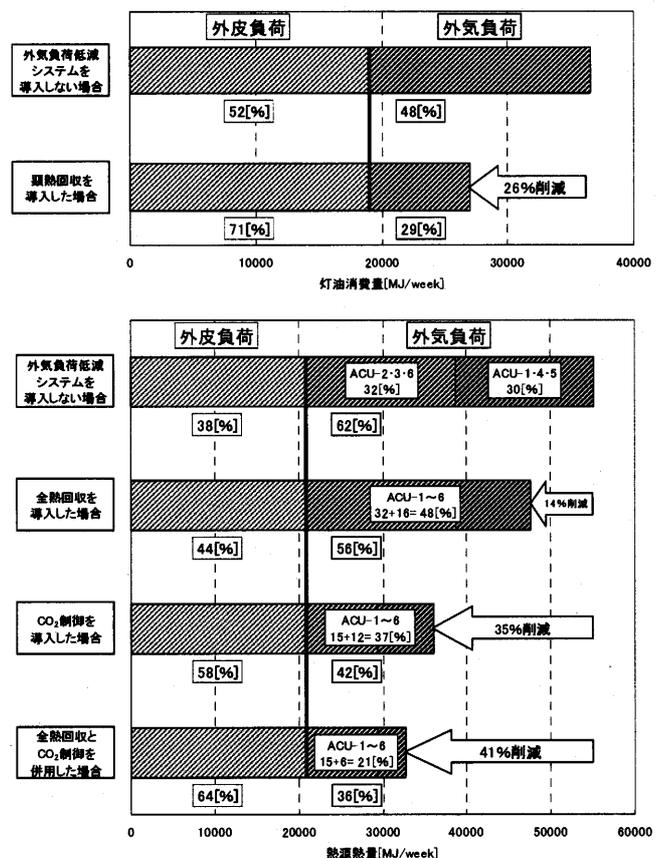


図20 外皮・外気負荷の比率とエネルギー削減効果 (上:帯広A庁舎, 下:函館B庁舎)

緩和が取り上げられていたが、その蓄熱効果はそれ程大きく期待できないことが明らかになった。

3) 高断熱建物の運用状況に関わる暖房システムと制御手法

月曜日の朝方には一時的にピーク運転となる不合理な運転が行われており、サーモ制御時に室温変動(最大値:26.7℃, 変動幅:5.2℃)が生じていた【帯広A庁舎】。また、暖房システムと制御手法が合理的に計画されることによって、快適な室内温熱環境が得られることも同時に確認された【函館B庁舎】。実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較から、設定室温や運転方法を含めた適切な制御手法による運用は、寒冷地における高断熱建物にとっても重要であり、平均負荷計算法の妥当性もそのことが前提条件であることを示した。

4) 外気負荷低減システムの導入に関わるエネルギー削減効果と有用性

外気負荷の削減率は最大で41%に達し、外気負荷低減システムの併用(熱回収とCO₂制御)による有用性が実証された【函館B庁舎】。内断熱ではなく外断熱だからといって、必ずしも直接的に外気負荷の削減に繋がる訳ではない。しかし、現状の負荷比率の様相に対して、外気負荷低減システムが大きく寄与し、外気負荷は相対量・絶対量で大きく削減できることが明らかになった。

屋外と室内がより明確に区分される高断熱建物では、従前よりも空調室と非空調室の間の熱的な差異は希薄になってくる。全室空調化の傾向が高まるにつれて、各室間の温度むらは小さくなる一方、空調面積は増大する。そのため、建物の高断熱効果や躯体の蓄熱・蓄冷効果を的確に理解した上で、高断熱建物に相応しい暖冷房システムや制御手法の提案が重要となってくる。今後の予定として、建築の立場と設備の立場の双方から省エネルギー化を図っていくため、水方式による搬送動力が少なく直接熱伝導が可能な配管理設型の躯体蓄熱暖冷房システムについて報告する予定である。

【謝辞】

本調査は、2003年度住友財団環境研究助成、課題研究「積雪寒冷都市における環境共生と適正な資源循環のためのシステム技術に関する

研究」(代表:絵内正道)の一環として行われたものである。実測調査やまとめに際し、社団法人公共建築協会、北海道開発局営繕部、株式会社ドーコンには多大なご協力を頂いた。記して感謝する。

【参考文献】

- 1) 荒谷登, 絵内正道, 鈴木憲三他: 1991年版 外断熱工法ハンドブック, 北海道外断熱工法協議会
- 2) 荒谷登, 絵内正道, 鈴木憲三, 福島明他: RC造外断熱工法ハンドブック 2003年度版, 北海道外断熱建築協議会
- 3) 坂本敏一: 事務所建築における外断熱建物の実施例(その1. 札幌における実施例), 日本建築学会北海道支部研究報告集 計画系 No. 57, pp. 17-20, 1984. 3
- 4) 榊原秀幸, 荒谷登, 絵内正道: 外断熱建物の夏季の温度環境比較測定結果, 日本建築学会北海道支部研究報告集 計画系 No. 57, pp. 45-48, 1984. 3
- 5) 横山智恵, 絵内正道, 羽山広文, 森太郎: 外断熱改修によるRC造建物の温熱環境改善効果と空調設備容量の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 76, pp. 225-228, 2003. 6
- 6) 省エネルギーハンドブック編集委員会: 住宅・建築 省エネルギーハンドブック 2002, 財団法人 住宅・建築 省エネルギー機構
- 7) 社団法人 公共建築協会: 外断熱建物に関する性能基準及び同解説 平成15年版, 社団法人 公共建築協会
- 8) 外断熱工法技術マニュアル検討委員会: よくわかる! 外断熱工法 北海道における外断熱RC建築の普及に向けて, 北海道建設部建築指導課, 平成17年3月
- 9) 空気調和・衛生工学会北海道支部・設備技術研究会「実用レベルの外断熱建物の熱負荷計算法の策定」小委員会: 実用レベルの外断熱建物の熱負荷計算法 1998年度~1999年度版
- 10) 社団法人 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧[第13版] 1基礎篇, 社団法人 空気調和・衛生工学会
- 11) 社団法人 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧[第13版] 3空気調和設備設計篇, 社団法人 空気調和・衛生工学会
- 12) 志保井隆, 山本繁: 寒冷地における環境負荷低減技術の有効性に関する研究—高断熱建物における全熱交換器及び外気導入量制御の効果について—, 第48回(平成16年度)北海道開発局技術研究発表会, 環-21, 2005. 2
- 13) 社団法人 公共建築協会: 外断熱建物に関する評価手法検討資料作成業務(その2) 外断熱工法改修施設の効果の検証とデータ等のとりまとめ業務 平成14年度報告書, 社団法人 公共建築協会, 平成15年3月
- 14) 社団法人 公共建築協会: 外断熱建物に関する評価手法検討資料作成その2業務(その2), 社団法人 公共建築協会, 平成16年3月
- 15) 菊田弘輝, 絵内正道, 羽山広文, 森太郎: 外気負荷低減システムを導入した高断熱建物のエネルギー削減効果について, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 78, pp. 189-192, 2005. 7
- 16) 菊田弘輝, 絵内正道, 羽山広文, 森太郎: 寒冷地における高断熱建物の温熱環境とエネルギー消費量に関する実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学II, pp. 1107-1110, 2005. 9

(2005年4月20日原稿受理, 2005年9月21日採用決定)