

## 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

正会員 ○菊田 弘輝<sup>\*1</sup> 同 絵内 正道<sup>\*2</sup>  
同 羽山 広文<sup>\*3</sup> 同 森 太郎<sup>\*4</sup>

高断熱建物 温熱環境 エネルギー消費量  
外気負荷低減システム

## 1. はじめに

現在、官庁施設を対象に「外断熱建物の性能確保に関する基本的事項」<sup>1)</sup>が定められており、外断熱に代表される高断熱建物の普及が期待されている。寒冷地における高断熱建物の実態調査はこれまでも行われており、外断熱工法は室内環境の改善、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いる<sup>2)3)</sup>。

近年の動向を見ると、平成11年3月に省エネ法の「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」<sup>4)</sup>が改正され、PAL基準値(事務所)は300[MJ/m<sup>2</sup>・year]以下に義務付けられた。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高断熱建物が普及しつつあり、建物全体に占める外皮負荷の比率は低くなってきている。その結果、外気負荷の比率が相対的に高くなってきたことで、負荷比率の様相も変化してきている。

こうした背景を踏まえ、道内の官庁施設では、外気負荷低減システムを導入する動きが高まっており、今後は高断熱建物に相応しい設備設計や制御手法の提案が益々重要となってきた。そのため、実際に運用されている高断熱建物を対象にした実測調査を通じ、性能評価を行う必要がある。

本調査の目的は、外気負荷低減システムを導入した、寒冷地における高断熱建物の蓄熱効果とエネルギー削減効果を検証することである。本論では、①建物の断熱効果や躯体の蓄熱効果に関わる温度特性について、②外気負荷低減システム導入によるエネルギー削減効果と有用性について考察する。また、熱源熱量(暖房用エネルギー消費量)と室温変動の関係、実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較から、③高断熱建物の運用に関わる設備設計や制御手法について考察する。実測で得られた知見を踏まえ、今後の高断熱建物における課題や提案について取り上げる。

## 2. 実測調査の概要

## 2.1 施設の概要

平成15年に北海道函館市に新しく建設されたRC造外断熱の官庁施設の実測調査を行った。本調査の測定期間は平成16年2月1日～2月27日(27日間)である。

施設の概要を表1、測定項目と測定位置を表2に示す。延べ床面積は4045[m<sup>2</sup>]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、時期によって来庁者数に変動があること、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(PAL値:200.0[MJ/m<sup>2</sup>・year])に相当する断熱性能であること等が挙げられる。空調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として全熱交換器による排熱回収(以下、全熱回収)とCO<sub>2</sub>センサーを用いた外気量制御システム(以下、CO<sub>2</sub>制御)が導入されている。

CO<sub>2</sub>制御の流れを補足すると、まずレタンチャンバー内のCO<sub>2</sub>濃度発信器及びデジタルCO<sub>2</sub>濃度指示調節計によって還気空気のCO<sub>2</sub>濃度が感知される。それが室内の環境基準に合うように、自動制御によってダンパー開度の調節が行われる。本施設の外気導入量の設計値は、来庁舎数の多い時期に合わせて配慮されていることから、CO<sub>2</sub>制御による外気負荷の削減が期待される。

## 2.2 空調設備システムと外気導入

空調設備システムを図1に示す。本施設の外気導入は、ACU-1～6系統の空調機6台によって行われる。ACU-6以外の空調機5台にCO<sub>2</sub>制御、ACU-1・4・5の空調機3台に全熱交換器が組込まれている。外気導入されたOAは、各空調機に再循環したRAの一部と混合(ACU-6は対象外)した後に、熱交換(ACU-2・3・6は対象外)や加熱・冷却されて室内へ送風される。

## 3. 実測調査の結果

## 3.1 高断熱建物の断熱効果と蓄熱効果

寒冷地における高断熱建物の温度特性について取り上げ、1)では建物の断熱効果について、2)～3)では躯体の蓄熱効果について考察する。

## 1) 室内の温度変動と温度特性

屋外・空調室・非空調室の温度変動、温度特性を図2、表3に示す。温度特性においては、2/1(日)～2/7(土)をその代表的な1週間として取り上げた。

表1 施設の概要

所在	北海道函館市
延べ床面積	4045[m <sup>2</sup> ](4階建て)
外壁仕様	RC造外断熱、通気層工法、GW100[mm](32kg/m <sup>3</sup> )
屋根仕様	RC造外断熱、通気層工法、FP板150[mm]
空調方式	ファンコイルユニット・ダクト併用方式、PC方式
熱源機器	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]
外気導入量の設計値[m <sup>3</sup> /h]	ACU-1:3230、ACU-2:2150、ACU-3:2440 ACU-4:1320、ACU-5:1110、ACU-6:4040
特徴	ユニット形空調機 全熱交換器による排熱回収 CO <sub>2</sub> センサーを用いた外気量制御システム 時期によって来庁者数に変動
PAL値	200.0[MJ/m <sup>2</sup> ・year]

Result of Survey on Thermal Environment and Energy Consumption for Highly Insulated Buildings in Cold Regions

KIKUTA Koki, ENAI Masamichi, HAYAMA Hirofumi and MORI Taro

本施設は日曜日のみ空調停止であったが、室温は20～25℃、非空調室温は20℃～22℃の範囲に収まっており、空調開始時(7:00)の室温は20℃程度に保持された。このことから、建物の高断熱化によって寒冷地で行われてきた執務時間外の凍結防止用運転も不要となる可能性が出てきた。また、執務開始時(9:00)の室温は23℃を超え、1～2時間程度の予熱運転によって快適な温度環境が得られることが明らかになった。これまで外断熱を採用すると、躯体の熱容量が増大するため、「暖まりにくく冷えにくい」という考えがあった。だが実際は、夜間の室温低下は緩和され、翌日の執務開始時(9:00)の室温から判断すると、「一度暖まると冷めにくく暖まりやすい」という考えが適していることを確認した<sup>5)</sup>。

代表的な1週間における執務時間帯の平均室温は約24℃であったが、変動幅は約1.0℃と小さかった。高断熱建物では、内部取得熱(日射、機器・照明、人体等)の影響は相対的に大きくなるが、室温変動は安定していた。このことから、本施設においては高い断熱性能によって外界条件の影響が抑制され、同時に空調設備システムが合理的に計画されていたと判断できる。

2) 外壁躯体の蓄熱効果

外断熱の特徴の1つである躯体の蓄熱効果を外壁躯体の温度特性から検証する。東西方位の外壁面が主であるので、測定位置は中間階の東壁面を選択した。

外壁躯体の測定位置、温度変動を図3、図4に示す。空調開始と共に室内側表面温度は上昇し、時間的に少し遅れて躯体内温度が上昇した。この時間的遅れは外断熱の特徴であり、外壁躯体は空調運転時に吸熱側であった。躯体は

空調運転時に吸熱し、空調停止時に放熱することで、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働きがある。だが実際は、1日を通じて室温の方が高いために夜間の外壁躯体からの放熱は生じておらず、外壁躯体の蓄熱効果は期待できなかった。これまで外断熱を採用すると、外壁躯体の熱容量の増大によって室温変動の緩和が取り上げられていたが、それ程大きな緩和要因になっていないことが明らかになった。

3) スラブの蓄熱効果

次に、躯体の蓄熱効果をスラブ内の温度特性から検証する。測定位置は外壁躯体と同様に屋外に面する屋根スラブ内と、その影響が少ない中間階に位置する3階床スラブ内を選択した。

スラブ内の温度変動を図5に示す。外壁躯体に比べて屋根スラブの断熱材厚はさらに50[mm]厚かったため、熱抵抗が増大した分だけ温度は高目であった。しかし、常に屋根スラブ内温度<室温という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。

3階床スラブ内温度は、平日ではおおよそ空調開始1時間後に室温を上回り、空調停止45分後に下回った。このことは、床スラブ全体が吸放熱を繰り返し、躯体の蓄熱効果が期待できることを意味している。夜間に外気導入を停止すると、最も熱流出の大きい部位は熱抵抗の小さいガラス面となる。そのため、このガラス面からの熱流出と外壁躯体や屋根スラブからの熱流出を補う熱源に相当するものとして、床スラブの蓄熱が挙げられる。このことから、高断熱建物に相応しい設備設計を目指す場合、今後は床スラブの蓄熱効果を利用した提案が重要となってくる。

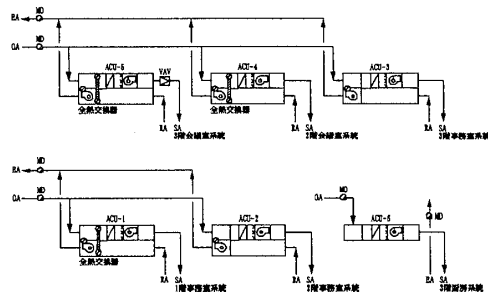


図1 空調設備システム

表2 測定項目と測定位置

測定項目	測定位置
屋外(温湿度)	中央監視データ
水平面全天日射量	函館海洋気象台
空調室(温湿度)	2階事務室
非空調室	2階男子トイレ
通気層内	
境界面	2階東壁
躯体内	
室内側表面	
スラブ内	屋根(中央監視データ) 3階床(中央監視データ)
全熱交換器廻り(温湿度)	ACU-1・4・5
空調機廻り(温湿度)	ACU-1～6(中央監視データ)
ダンパー開度	ACU-1～5(中央監視データ)
熱源熱量・運転状況	中央監視データ
電力消費量	分電盤

表3 屋外・空調室・非空調室の温度特性

測定項目	2/1(日)～2/7(土)		非空調室
	空調室	屋外	
最高値	24.9	21.8	
最低値	20.3	19.7	
平均値	22.9	20.8	
	3.8		21.8
	-6.0		19.7
	-1.9		20.8
	24.5	24.6	24.6
	23.1	24.0	23.8
	1.4	0.6	0.8

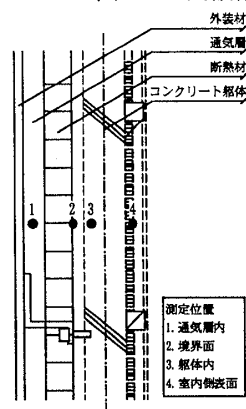


図3 外壁躯体の測定位置

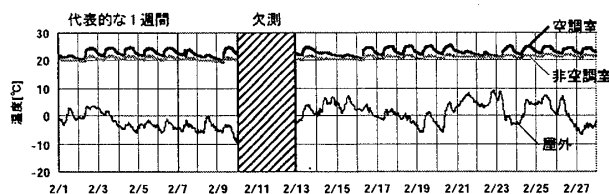


図2 屋外・空調室・非空調室の温度変動

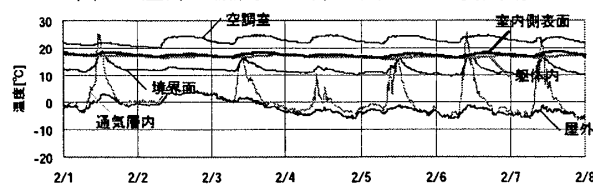


図4 外壁躯体の温度変動



図5 スラブ内の温度変動

### 3.2 高断熱建物の運用状況

#### 1) 熱源熱量と室温変動の関係

熱源熱量の実態を把握するため、時間毎の積算値における時系列グラフから検証する。熱源機器は、高断熱建物の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<sup>6)</sup>を用いて設備容量を計画・設計している。

熱源熱量と室温変動を図6、立ち上がり時の熱源熱量と室温変動を図7に示す。熱源熱量の消費状況は、朝方に大きく夕方に小さい典型的な出力パターンとなり、2/2(月)の熱源熱量は、他の平日に比べて約1.5倍であった。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ことを確認した。執務時間帯になると熱源熱量は減少したが、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)では約25%の差が生じていた。本施設は断熱効果と蓄熱効果に優れており、同時に空調設備システムが合理的に計画されていた。ここで重要なのは、適切な制御手法による運用こそが、高断熱建物の特性(省エネ性、室内の快適性)の有効活用に繋がってくるということである。

#### 2) 実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較

平均負荷計算法の妥当性を検証するため、測定期間中の実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較を行う。実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較を図8に示す。暖房負荷が生じた日は、2/1~2/27(2/10~2/12欠測)のうち19日間となった。設計時と同様に11時間運転で熱源機器平均出力を算定した。

ここで重要なのは、最寒期の暖房負荷の多くが、点群<H2>であったということである。これは、平均負荷計算法から算出した設備容量でも過小にならないことを意味している。現段階で平均負荷計算法を適用する際に、ある程度の

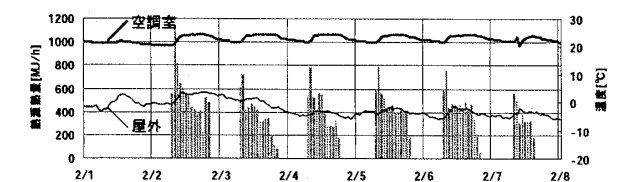


図6 熱源熱量と室温変動

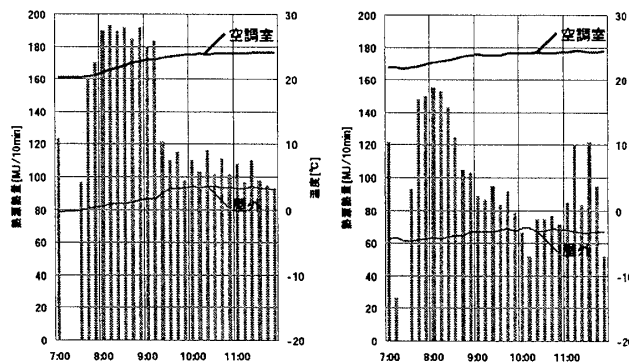


図7 立ち上がり時の熱源熱量と室温変動  
(左:2/2(月), 右:2/4(水))

安全側に配慮した大きな出力容量(H1)で設置されている状況であった。しかし、適切な制御手法を取り入れることで、高断熱建物に相応しい熱負荷計算として平均負荷計算法の妥当性が認知されるに違いない。

### 3.3 外気負荷の削減効果

#### 1) 全熱交換器の排熱回収効率

高断熱建物に外気負荷低減システムを導入した場合、どの程度の外気負荷の削減効果が得られるかを検証するため、全熱交換器廻りの温湿度データよりエンタルピを算出し、排熱回収効率を算定したところ、0.35(ACU-1)、0.60(ACU-4・5)であった。

#### 2) 外皮・外気負荷の算出方法と積算値

外気負荷[J]の算出は、(比重[kg/m<sup>3</sup>]×外気導入量[m<sup>3</sup>]×(空調室エンタルピ[J/kg]-屋外エンタルピ[J/kg]))として行った。外皮負荷[J]の算出は、熱源熱量から算出した外気負荷を差し引いたもの(外気導入で発生する暖房負荷以外)として行った。

外皮・外気負荷を図9に示す。日積算の外気負荷は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、外気負荷は安定して2000[MJ/day]程度であったことから、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、1時間当りの外気負荷が14:00以降になると、150[MJ/h]にまで半減していた。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) 外気負荷低減システムの効果検証

建物の高断熱化によって外気負荷の比率は相対的に高くなることから、外気温の低い寒冷地においてはその特徴が

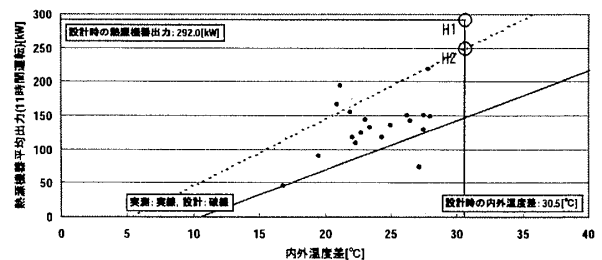


図8 実測暖房負荷と設計暖房負荷との比較

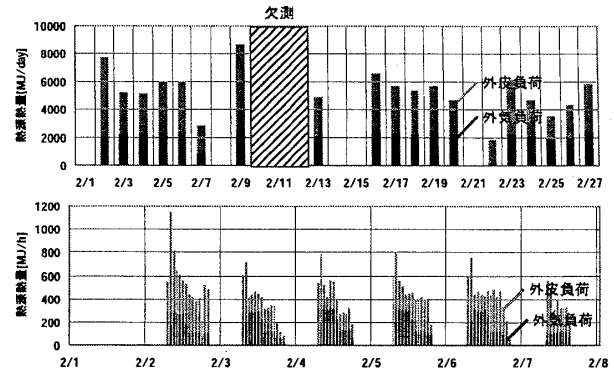


図9 外皮・外気負荷(上:日積算, 下:時間積算)

顕著となる。そこで、全熱回収やCO<sub>2</sub>制御に代表される外気負荷低減システム導入によるエネルギー削減効果と有用性を検証する。

外皮・外気負荷の比率とエネルギー削減効果を図10に示す。①外気負荷低減システムを採用しない場合、負荷比率は外皮負荷：外気負荷=4:6となった。②全熱回収を採用した場合、外気負荷の50% (ACU-1・4・5)しか熱回収の対象とならないため、削減率は14% (外気負荷成分で23%削減)に留まった。③CO<sub>2</sub>制御を採用した場合、変風量方式によって外気導入量が制御され、削減率は全体で35% (外気負荷成分で56%削減)に増大した。これは、在室人員が比較的多くなる前の時期であり、高目に計画された設計値に対して外気導入量が効率よく制御されていたからである。更に④全熱回収とCO<sub>2</sub>制御を併用した場合、CO<sub>2</sub>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。しかし、削減率は全体で41% (外気負荷成分で67%削減)となり、外気負荷低減システム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、建物の高断熱化によって外気負荷の比率は半分以下に低下された。

寒冷地という地域性も相まって、外気負荷低減システムが絶対的・相対的な外気負荷の削減に大きく寄与することを示した。だが実際は、全システムで熱回収している訳ではなく、他にも時間・時期によって在室人員が比較的多くなるような施設では、外気導入量の設計値は高目に計画・設計されていた。今後はできる限り全システムに近い形で熱回収し、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。

#### 4. まとめ

外気負荷低減システムを導入した、寒冷地における高断熱建物の実測調査から得られた知見を以下にまとめる。

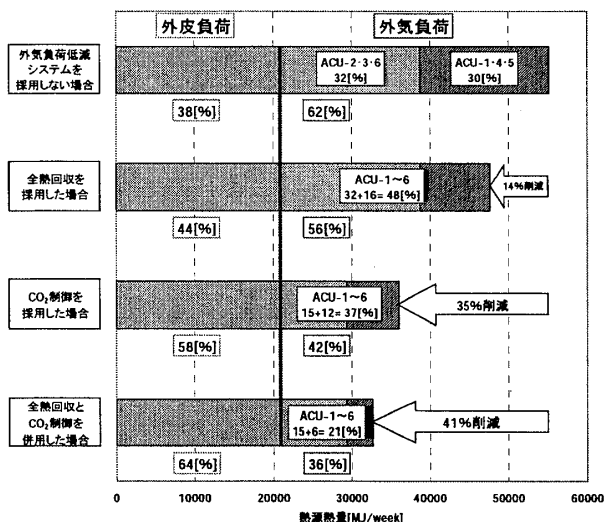


図10 外皮・外気負荷の比率とエネルギー削減効果

\*1 北海道大学大学院工学研究科 博士後期課程  
 \*2 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博  
 \*3 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)  
 \*4 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.

#### 1) 建物の断熱効果に関わる温度特性

外断熱を採用すると、夜間の室温低下は緩和され、1~2時間程度の予熱運転によって快適な温度環境が得られることが明らかになった。外断熱は、「暖まりにくく冷えにくい」のではなく、「一度暖まると冷めにくく暖まりやすい」ということを示した。

#### 2) 躯体の蓄熱効果に関わる温度特性

外断熱を採用すると、外壁躯体や屋根スラブの熱容量の増大によって室温変動の緩和が取り上げられていたが、それ以上に床スラブの蓄熱効果が大きく期待できることが明らかになった。

#### 3) 高断熱建物の運用に関わる設備設計や制御手法

高断熱建物の特性(省エネ性、室内の快適性)を有効活用する上で、適切な制御手法による運用が重要となる。また、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もそのことが前提条件であることを指摘した。

#### 4) 外気負荷低減システム導入によるエネルギー削減効果

外気負荷低減システム併用による有用性が実証された。寒冷地における建物の高断熱化によって負荷比率の様相は大きく変化するため、外気負荷低減システムを導入や工夫をしていくことで、エネルギー削減効果は一段と高まることが明らかになった。

ここで重要なのは、建築の立場(高断熱)と設備の立場(外気負荷低減システム)の双方から負荷を抑制し、両者を組み合わせていくことである。このことを全ての建物に適用し、更なる省エネルギー化を図っていくことが時代に即した提案であり、今後は平均負荷計算法も含めて高断熱建物に相応しい設備設計や制御手法を提案していく必要がある。

#### 【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。測定やまとめに際し、社団法人公共建築協会、北海道開発局営繕部、株式会社ドゥ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) 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
- 2) 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
- 3) 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 No. 76, pp. 225-228, 2003. 6
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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