北方型エコスクールを対象とした体育館の外皮性能向上に関する研究

高断熱化を図った体育館の断熱・気密性能の検証

BUILDING ENVELOPE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF GYMNASIUM
AT ECO-SCHOOLS IN COLD REGIONS

Thermal insulation and airtightness performance verification of gymnasium designed by high thermal insulation

菊田 弘輝*, 菊地 洋**, 青柳 志歩***, 羽山 広文****

Koki KIKUTA, Hiroshi KIKUCHI, Shiho AOYAGI
and Hirofumi HAYAMA

The aim of this study is to quantitatively clarify the effects of building envelope performance improvement of gymnasium at Eco-Schools in cold regions designed by high thermal insulation that will contribute to improvement of thermal comfort, reduction of heating energy consumption and strengthening of disaster prevention. In addition to the temperature characteristics of minimum room temperature and room temperature fluctuation rate, the performance values of equivalent leakage area including a confidence interval and air changes per hour at 50 Pa (ACH50) are mainly verified through a comparison with conventional gymnasiums.

Keywords: Gymnasium, High thermal insulation, Room temperature, Airtightness measurement, ACH50

体育館, 高断熱化, 室温, 気密測定, 漏気回数

1. はじめに

東日本大震災直後、622校の学校施設が収容避難場所としての機能を果たしていたが、電気や水の確保、暖房設備の不足等の課題が生じていた¹⁾。その後体育館の防災機能は日々強化され、防災倉庫、備蓄倉庫、トイレ、自家発電設備、浄水装置の設置が全国的に普及してきている²⁾。しかし、寒冷地の特に厳冬期の場合、暖房停止直後から体育館の室温は急激に低下し、翌朝の暖房開始直前に氷点下を下回るケースも依然多く存在し、根本的な解決には至っていない^{3),4)}。従って、授業や部活動、一般開放利用、災害対応のあらゆる場面を想定し、日常活動時及び緊急避難時の双方にとって人と環境にやさしく、防災+エネルギーの拠点としての体育館が今後求められる。

一方、環境を考慮した学校施設の整備推進に向けたエコスクールパイロット・モデル事業は1997年度から開始され、2016年3月現在で1,611校が認定されている⁵⁾。これまでに本事業に関連した既往研究として、須永らの全国アンケート調査による実態把握⁶⁾、高口らの住環境学習プログラムの開発⁷⁾等が挙げられる。また、著者らの地域性に配慮した北方型エコスクールの研究⁸⁾に関連し、現在に至るまでの北海道内112校のエコスクールを整理すると、東日本大震災をきっかけに「太陽光発電型」の割合が28%から74%へ大幅に増加している。「その他新エネルギー活用型」や「省エネルギー・省資源型」

の割合も30%前後増加し、従来までの「木材利用型」⁹⁾に限らず、断熱や換気対策により学校施設全体の省エネルギー化は着実に進んできているといえる (Fig.1)。

近年、北方型エコスクールの中でも体育館に着目した環境配慮設計が提案され、北海道内の地方中小都市では体育館内包型と呼ばれる学校施設計画が展開されている¹⁰⁾。平面計画上、体育館の外側にワークスペース、廊下、その外側に普通教室、特別教室、職員室が計画され、校舎棟が屋体棟を2辺あるいは3辺で囲むケースが多い。他にも人口約190万人の札幌市では防災上重要な寒さ対策として、寝袋、毛布、移動式灯油ストーブを数多く備蓄し、更に2011年6月に体育館の高断熱化への取り組みが示され、2014年度から実際に試行されている¹¹⁾。

これらの背景を踏まえ、本研究では熱的快適性の向上、暖房エネルギー消費量の削減、防災機能の強化に繋がる高断熱化を図った北方型エコスクールの体育館 (以下、高断熱型) を対象に、外皮性能に係る断熱・気密性能向上による効果を定量的に明らかにすることを目的とする。将来的に体育館の高断熱化を普及させるため、従来の体育館 (以下、標準型または旧標準型) との比較を行い、主に最低室温、室温変動率の温度特性に加え信頼区間も含めた総相当隙間面積、漏気回数の性能値について検証する。

* 北海道大学大学院工学研究院 助教・博士(工学)

** コーナー札幌株

*** 北海道大学大学院工学院 修士課程

**** 北海道大学大学院工学研究院 教授・博士(工学)

Assist. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

Kona Sapporo Co., Ltd.

Grad. Stud., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.

Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

2. 札幌市内小学校の体育館の現状調査

2.1 アンケート調査

高断熱化を図った体育館の断熱・気密性能の検証に先立ち、既往研究²⁾とは異なる趣旨で札幌市内小学校を対象に、暖房利用実態及び防寒対策の現状について調査する。東日本大震災から約半年後にアンケート用紙を配布し、発送日は2011年9月20日、回収期間は10月1日～31日、回収率は37%（206校中76校）である。なお、設問内容は多岐にわたるため、本研究では体育館に関連する設問のみを取り上げる。

最初に暖房時期について尋ねたところ、45校が10月中旬に開始し、33校が5月中旬に終了するとの回答が得られ、暖房期間は概ね7ヵ月間に亘っていたと判断できる。その際温度管理については主に教頭が担当し、全校朝会のような集会時ではなく、体育時の暖房設定温度は15℃、18℃、未回答、20℃の順に多く、普通教室に比べ全体的に分散する傾向を示した（Fig.2）。更に日常活動時及び緊急避難時それぞれの確保すべき最低室温を調査した結果、日常活動時には15℃以上に次いで10℃以上が多かった。一方、緊急避難時には食事や睡眠が主な行動であるため、20℃以上が最も多く、電気や燃料の確保に繋がる整備が必要に迫られている（Fig.3）。

Fig.1 Eco-Schools in Hokkaido

Fig.2 Heating temperature setting

Fig.4 Temperature management method in winter

Fig.6 Monthly heating energy consumption per floor area

Fig.3 Minimum room temperature

Fig.5 Dew condensation, molds and icicles

Fig.7 Heating consumption rate of gymnasium

冬季の温度管理方法としては暖房設定温度を変更することが圧倒的に多く、換気設備に関しては設置状況にもよるが、教職員が積極的に操作することは少なかった（Fig.4）。すなわち寒くなると暖房設定温度を上げる、逆に暑くなると窓や廊下側に通じる扉を開けることで、温度管理が為されていたと読み取れる。こうした管理方法は外気温や廊下側の温度にかかわらず、暑くなると頻繁に行われていた。最後に寒冷地特有の結露・カビ、つららの発生状況について尋ねたところ、天井付近の暖気溜まりや屋根の断熱不足が大きく影響し、特につららの発生頻度が高く、体育館の外皮性能向上による課題解決が一層望まれる（Fig.5）。

2.2 エネルギー調査

アンケート調査後、2011年3月11日を含む2010年度の月別に集計された光熱費データを用い、校舎棟単位、屋体棟単位で仕分けが可能な65校の暖房エネルギー消費特性について調査する。一次エネルギーに換算した上で、月間暖房エネルギー消費原単位の平均値をみると、暖房期間は2.1節と同様の約7ヵ月間であった。冬休み^{注1)}により開校日が少ない1月の消費原単位は小さく、2月にピークを迎えていた。また、標準偏差が大きく、2月で平均74MJ/m²・年に対して±30MJ/m²・年程度のばらつきがみられた。3月も校内行事の関係上、集会時の暖房設定温度で運用されることが多く、年間の消費原単位は校舎棟で平均165MJ/m²・年、屋体棟でその2倍に相当する平均344MJ/m²・年に及んでいた（Fig.6）。

一方、学校施設全体に占める体育館の暖房消費割合では規模、外皮性能、利用実態（一般開放利用も含む）がそれぞれ異なるため、全体の8割程度の体育館が20～40%の広範囲に分布し、10校が40%を上回る状況であった（Fig.7）。従って、体育館の高断熱化への取り組みは学校施設全体の省エネルギー化にとって必要不可欠であるといえる。

3. 調査対象校の概要

3.1 高断熱型の設計目標

体育館の概要をTable1に示す。札幌市内小学校4校の体育館を調査対象とする。先ずエコスクールに認定された高断熱型H校は2014年3月に竣工し、冬期災害時に体育館の暖房が停止しても、避難者からの発熱だけで最低限の室内環境を確保することを目標に掲げている。具体的には、外気温 -10°C の時の室温を 10°C 以上（室内外温度差 20°C 以上）に保つように設計されている。避難者からの発熱量は約 35kW （ $\approx 34.56\text{kW}=480\text{人}\times 72\text{W/人}$ ）を想定し、安全側に寄与する窓からの日射熱や照明・機器発熱については考慮せず、設計目標時の換気回数は0.1回/hを見込んでいる。

同様にエコスクールに認定され、比較対象となる標準型S校は2012年3月に竣工し、児童数が非常に多いため、延床面積は最も広く計画され、現標準仕様と同程度の外皮性能を有している。他にもFig.7の体育館暖房消費割合において、22%と低かった旧標準型I校、逆に52%と高かった旧標準型A校も比較対象とする。都市ガスによる温風暖房という点で共通しているが、H校とS校は2010年代のSRC造、I校とA校は1980年代のS造という点で異なっている。

今回、実際に運用している際の長期データを収集する制約上、体育館の1階壁際と2階キャットウォーク（CW）に各測定機器を設置し、温湿度及び CO_2 濃度測定を行う。また、放課後に実施例が少ない気密測定を行い、断熱・気密性能向上による効果を明らかにする（Table2）。なお、本研究では設計目標に関連する冬期データのみを取り上げる。

3.2 新旧体育館のエネルギー比較

H校の建て替え前後における暖房エネルギー消費特性を比較する。新体育館ではフェノールフォーム保温板（熱伝導率 $0.019\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）、Low-E複層ガラス（熱貫流率 $1.7\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、遮蔽係数0.69）によ

る高断熱化が図られている。それにより、4月を除く月間の消費原単位が半減し、年間の消費原単位は $230\text{MJ/m}^2\cdot\text{年}$ になり、これはFig.6で示した値の約3割減に相当する（Fig.8）。一方、新体育館のような高断熱型が省エネルギーに寄与するか否かはそれ以外の運用によるところも大きく、室内環境を含めた検証が必要である。ただし、一般的にエコスクール化により校舎棟の暖房面積が増加するといった状況は屋体棟では生じにくいと、省エネルギーに繋がる可能性は十分に高いと考えられる。

4. 断熱性能の検証

4.1 厳冬期の最低室温

断熱性能が大きく異なる調査対象校において、暖房停止直後からの程度の室温低下がみられるかを比較するため、厳冬期の最低室温について検証する。旧標準型I校とA校の場合、平日ならびに休日にかかわらず、間欠暖房に伴い室温変動は非常に大きく、暖房設定温度（I校 18°C 、A校 15°C ）に比べ室温が高めに推移していた。その後一般開放利用^{註2)}を終え、暖房を停止した途端、室温は急激に低下していた。典型的な暖まりやすく冷めやすいという特徴が表われ、2月上旬における厳冬期の最低室温はI校で 5°C 、A校で朝方に氷点下を記録していた（Fig.9 (a)）。

高断熱型H校と標準型S校の場合、室温は暖房設定温度 15°C 付近を推移し、その変動幅も小さかった。開校日の平均内外温度差はH校で 16.4°C 、S校で 15.1°C と僅か 1.3°C 差であったが、特にH校では朝方も含めて室温が 10°C を下回ることがなかった（Fig.9 (b)）。そこで、室温変動の小さいH校と大きいA校の上下温度差（2階室温 -1 階室温）を比較すると、床下吹出し+天井ダクト吸込み式^{註3)}のH校では2階南西面から日射熱が侵入する時間帯を除き、概ね1階室温が上回っていた。それに対し、天井ダクト吹出し+床下吸込み式^{註4)}で空調方

Table1 Overview of gymnasiums

型名	高断熱型	標準型	旧標準型	
建物名	H校	S校	I校	A校
所在地	札幌市白石区	札幌市中央区	札幌市手稲区	札幌市豊平区
竣工年	2014年	2011年(体育館2012年)	1987年	1984年
児童数(2014年度)	522名	847名	294名	195名
学級数(2014年度)	19学級	28学級	12学級	7学級
階数	地上4階	地下1階地上5階	地上3階	地上3階
屋体棟	延床面積	1,394[m ²]	1,738[m ²]	1,363[m ²]
	構造	SRC造	SRC(一部S造)	S造
	熱源種類	都市ガス		
	暖房設備	温風暖房		
	断熱仕様	外壁	フェノールフォーム保温板60[mm]	押出法ポリスチレンフォーム保温板30[mm](一部50[mm])
		屋根	硬質ウレタンフォーム保温板120[mm]	30[mm](一部50[mm])
開口部仕様	Low-E複層ガラス(アルゴンガス)	複層ガラス	合成樹脂発泡材120[mm]	木毛セメント板25[mm]
			単板ガラス(二重)	

Table2 Measurement items

型名	高断熱型	標準型	旧標準型	
建物名	H校	S校	I校	A校
測定期間	14/7/2～ 15/3/20 (262日間)	14/7/17～ 15/3/12 (239日間)	12/1/13～ 12/5/10 (119日間)	12/1/10～ 12/5/10 (122日間)
温湿度測定 (30分間隔)	1階壁際(長辺方向):4点 1階FL+200[mm]		1階壁際(長辺方向):1点 1階FL+2,200[mm]	
	2階CW(ステージ側):4点 1階FL+3,700[mm]		2階CW(ステージ側):1点 1階FL+4,000[mm]	
CO ₂ 濃度測定 (30分間隔)	2階CW(ステージ側):1点 1階FL+3,700[mm]		未測定	
気密測定	14/10/23	14/8/8	12/2/20	12/2/27

Fig.8 Heating energy consumption characteristics of gym H

式が異なるA校では天井付近に暖気溜まりの状況が続き、上下温度差の傾向に違いがみられた (Fig.9)。

4.2 室温変動率

調査対象校の断熱性能を比較するため、一般開放利用後22:00～翌6:00の室温変動率 $\delta^{13)}$ について検証する。暖房停止後の室温低下は減衰性を示し、その際外気温 θ_o のみ平均値一定と仮定する。以下に算定式 (式1) を示し、 $\theta_{i(t)}$ は t 秒後の室温である。

$$y = \frac{(\theta_{i(t)} - \bar{\theta}_o)}{(\theta_{i(0)} - \bar{\theta}_o)} = e^{-\delta t} \quad (1)$$

室温変動率は総合熱貫流率を熱容量で除した値であるため、断熱性が高いと総合熱貫流率は小さく、蓄熱性が高いと熱容量は大きくなることから、一般的に室温変動率は小さい方が望ましいとされる。外断熱+SRC造のH校は暖房立ち上がり時の即効性に劣るものの断熱・蓄熱性に優れ、暖房設備と換気設備が停止した際の室温変動率は 3×10^{-6} に対し、A校はその5倍以上に及んでいた。また、総合熱貫流率 (貫流損失+隙間風損失) や熱容量をそれぞれ同定するには至らないが、S校との比較でH校は現標準仕様の2倍以上の断熱性能を有していることが確認された (Fig.10)。

(a) Gym I and A

(b) Gym H and S

Fig.9 Room temperature fluctuation in severe winter

Fig.10 Room temperature fluctuation rate

4.3 冬の温湿度とCO₂濃度特性

H校とS校の室温の累積頻度分布曲線をFig.11に示す。厳冬期だけではなく、11月～翌年2月の4ヵ月間、開校日 (土日祝日及び冬休み除く) の1階室温を時間帯別で整理した。6:00～21:30において、S校では主に校内行事の日を除き、概ね10～15°Cの範囲で温度管理が為され、一時的に5°C付近まで低下していた。H校では15°C以上が全体の7割に達し、深夜から朝方を含めて10°C以上が常に確保されていた。これは従来の体育館では殆どみられず、断熱性能向上による効果が明らかになった。

H校とS校のCO₂濃度変化をFig.12に示す。2月開校日 (19日間) の6:00～21:30において、CO₂濃度を30分毎の箱ひげ図で整理した。H校には2つのピークが存在し、授業と一般開放利用がそれにあたるが、濃度変化は非常に小さかった。平均700ppm前後を安定的に推移し、学校環境衛生基準¹⁴⁾1,500ppm以下は常に満足していた。また、相対湿度とCO₂濃度の関係をみると、S校よりもH校の室温が高かったため、相対湿度は低めの傾向を示した。一時的に基準値30～80%の範囲から外れていたが、平均39.1%、最大52.6%の湿度環境が形成され、湿度感知連動運転は行われず、換気不足や過換気の状態は発生していなかった (Fig.13)。

Fig.11 Cumulative frequency distribution curve of room temperature in gym H and S

Fig.12 CO₂ concentration change in gym H and S

Fig.13 Relationship between relative humidity and CO₂ concentration in gym H and S

4.4 自然温度差

H校とS校の非暖房期間の室温変動をFig.14に示す。冬休みの特に年末年始に掛けて比較的長く暖房を停止していたが、H校では1月7日の暖房立ち上がり直前の自然室温は7℃台を維持していた。それに対し、3℃台まで低下していたS校では室温変動率が大きい。1月8日の暖房立ち上がり時間は比較的早かった。また、H校の暖房停止日の自然温度差は平均11.4℃で設計目標とは異なるが、窓からの日射熱のみを考慮した場合、日射熱ベースの室内外温度差がこの分だけ得られることを意味する。

4.5 設計目標

設計目標（人体発熱のみで室内外温度差20℃以上の確保）について検証するため、体育館に大勢の方々を避難させるまたは人体発熱に相当する熱量を投入する必要がある。そこで、収容避難場所として想定される灯油ストーブ使用による暖房効果の把握を踏まえ、人体発熱を灯油ストーブで模擬し、発熱量と室内外温度差の関係から簡易的に評価する方法を試みる。

冬休みの2015年1月9日、1月13日、1月15日の3日間、灯油ストーブ（最大発熱量6.59kW/台）の使用台数を6台、2台、8台と変更しながら、9:30～16:30の7時間に亘ってストーブを燃焼した。室温は使用台数に応じて緩やかに上昇し、その後安定していた（Fig.15）。特に8台使用では室温が15℃以上になり、その際安全に配慮してCO濃度、CO₂濃度を別途測定していたが、不完全燃焼は起こらず、16:30時点で2.4ppm、3,069ppmを記録していた。次に発熱量と室内外温度差との関係を表す上で、発熱量^(注5)については毎時、灯油ストーブ毎でばらつきが生じるため、室温が安定し始めた13:00～16:30の平均値、室内外温度差についても同時刻の平均値を使用した。その結果、避難者からの発熱量34.56kWによって確保できる人体発熱ベースの室内外温度差は19.1℃で概ね設計目標を達成していたと判断できる（Fig.16）。

Fig.14 Room temperature fluctuation during non-heating periods in gym H and S

Fig.15 Room temperature fluctuation during heating with stove

4.6 温熱快適性

従来よりも良好な室内環境が形成されていたが、実際に体育館の温熱快適性を把握するため、H校の新旧体育館いずれも利用経験がある5～6年生の計6クラスを対象に、冬期の体育時と集会時に分けて快適か不快か尋ねた^(注6)。回答数182名（男子99名、女子83名）に対し、男子は体育時、女子は集会時に快適（ほぼ快適だった、快適だった）と回答する割合が高かった。一方、不快（快適ではなかった、あまり快適ではなかった）と回答する主な理由として、女子29名が体育時に寒さ、男子21名が集会時に暑さを挙げていた。最終的に65%以上の児童が旧体育館よりも新体育館の方で暖かさを実感し、代謝量の異なる体育時と集会時の双方で快適と回答する児童は約55%であることがわかった（Fig.17）。

5. 気密性能の検証

5.1 気密測定の概要

建築基準法に係る天井高による必要換気回数の緩和により機械換気設備の容量0.1回/h（6.9m以上13.8m未満）が適用できる。しかし、機械換気設備が設置されていない場合や設置されていても運転できない場合が想定される。また、寒さが厳しく扉や窓が開けられず、実質的な換気が隙間風という場合も想定される。

一方、送風機による住宅等の気密性能試験方法にはISO 9972を参考に作成したJIS A 2201^(注7)がある。この規格は一般建築についても準じて適用できる。そこで、収容避難場所として指定される体育館で気密測定を行い、各性能値について検証する。その際従来の住宅気密測定器における送風機を最大4台まで同時に制御し、大規模空間で測定可能な工夫を施している（Table3）。SRC造のH校とS校では管径200mmφの整流筒を2台、S造のI校とA校では管径154mmφの整流筒を4台使用し、床下に通じるグレーチング、校舎棟と接続する扉等を目張りした状況で行っている（Fig.18）。

Fig.16 Relationship between calorific value and inside-outside temperature difference

Fig.17 Thermal comfort at physical education and meeting

5.2 総相当隙間面積と漏気回数

減圧法による気密測定を行い、圧力差 ΔP と通気量 Q （室内外温度差による補正後）の関係をプロットした（Fig.19）。プロット数は異なるが、これらの測定結果を用いて通気率 a 、隙間特性値 n 、総相当隙間面積 αA を算出する。以下に算定式（式2～5）を示し、 S_{xy} は共分散、 S_x は標準偏差、 ρ は密度である。

$$Q = a(\Delta P)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$y = \ln(a) + \left(\frac{1}{n}\right)x, x = \ln(\Delta P), y = \ln(Q) \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{S_{xy}}{S_x^2}, a = \exp\left[\bar{y} - \left(\frac{1}{n}\right)\bar{x}\right] \quad (4)$$

$$\alpha A = \frac{1}{0.36} a \left(\frac{\rho}{2}\right)^{\frac{1}{2}} (9.8)^{\frac{1}{n} - \frac{1}{2}}, \rho = \frac{353}{253 + \theta_0} \quad (5)$$

気密測定の結果をTable4に示す。圧力差1Pa時の1時間当たりの通気量を表す通気率が最も高かった旧標準型A校を基準にすると、旧標準

Table3 Specification of airtightness measurement device

送風機	最大風量	3,120/3,600[m³/h] (50/60[Hz])
	直径	320[mmφ]
	電源	単相100[V] (50/60[Hz])、最大出力時400[W]
	備考	最大4台同時運転可能
整流筒	寸法	管径200[mmφ]、全長330[mm] ※風量1,800/2,160[m³/h]
	※風量	管径154[mmφ]、全長280[mm] ※風量1,300/1,560[m³/h]
	50/60[Hz]	管径100[mmφ]、全長250[mm] ※風量 700/ 840[m³/h]
精度	圧力差	高精度微差圧計、±0.5[Pa]以内
	通気量	ピトー管による検出、±3[%]以内

Fig.18 Airtightness measurement of gym H and I

Fig.19 Relation of pressure difference and volume flow rate

Table4 Results on airtightness measurement

型名	高断熱型	標準型	旧標準型	
建物名	H校	S校	I校	A校
測定日	14/10/23	14/8/8	12/2/20	12/2/27
室温[°C]	17.8	25.7	13.0	12.6
外気温[°C]	9.1	26.5	-1.4	-4.1
外部風速[m/s]	1.0	2.1	3.4	3.9
通気率[m³/(h·Pa ^{1/n})]	176.0	243.7	1,050.5	1,288.4
隙間特性値[-]	1.22	1.26	1.70	1.54
総相当隙間面積[cm²]	805	1,014	2,886	4,066
漏気回数[回/h]	0.41	0.42	0.90	1.52

準型I校ではその18%減であったが、標準型S校では81%、高断熱型H校では86%まで減少していた。隙間の状態を表す隙間特性値は1～2の範囲に含まれ、H校とS校では1.25前後と小さく、I校とA校に比べそれぞれの隙間が極めて狭かったと判断できる。更に圧力差9.8Pa時の通気量から隙間と等価の単純開口の有効面積（総相当隙間面積）を算出した結果、H校では805cm²、I校では1,014cm²になり、これは最も大きかったA校の5分の1、4分の1程度に相当する。従って、断熱性能が異なるH校とS校において、ほぼ同程度の性能値であったことから、気密性能の違いとして、主に構造の種類や窓サッシの種類の違いが大きく影響していたと考えられる。一方、50Pa時の漏気回数で気密性能を表すと、H校とS校が約0.4回/hと非常に小さく、対照的にI校は約0.9回/h、A校は約1.5回/hと大きかった。同様に50Pa時のH校の外表面積当たり¹⁰⁾では1.68m³/h・m²で気密性能向上による効果が明らかになった。

5.3 信頼区間

次に総相当隙間面積の信頼区間（ステューデントのt分布の信頼限界）を算出する。以下に算定式（式6）を示し、 M は事象、 S_{Dm} は標準偏差、 P は確率である。

$$\alpha A \times \exp \left\{ \pm S_1 \frac{N-1}{N} S_x^2 + (\ln(9.8) - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} T(P_r, N-2) \quad (6)$$

確率0.90、0.95、0.99を想定し、もし確率0.95の場合、つまり95%の確率で測定データが出現するという場合の総相当隙間面積の範囲は、H校では推定値に対して±120cm²程度の幅（692～937cm²）になった。一方、S校では900～1,144cm²、I校では2,481～3,357cm²、A校では3,680～4,494cm²という結果が得られた¹⁷⁾（Fig.20）。

5.4 換気量

気密測定で得られた隙間が均等に分布していると仮定し、風力と温度差を駆動力とした換気量（漏気量）の推定を試みた^{17),18)}。簡易的に風向は長辺方向に対して垂直、風圧係数は風上側を+0.6、風下

Fig.20 Confidence interval of equivalent leakage area

Fig.21 Relation of wind velocity and volume flow rate

側を-0.4、隙間は長辺方向のみと仮定した。風上側と風下側をそれぞれ上下方向に0.5m間隔で20分割^{注3)}し、室内圧を変数とした収束計算を行い、隙間の影響による換気量を求めている。ちなみに、外部風速4m/s以上の場合、風上側の隙間からのみ流入し、風下側の隙間からのみ流出している状況であった。その結果、H校では約700～3,000m³/hに対し、I校では約2,600～10,600m³/hになり、I校の3m/s以下はH校の10m/sとほぼ同等であった（Fig.21）。推定された換気量に基づき、室内外温度差20℃での隙間風損失を算出し、H校では5.5～22.1kWであることが確認された。

6. まとめ

熱的快適性の向上、暖房エネルギー消費量の削減、防災機能の強化に繋がる高断熱化を図った北方型エコスクールの体育館を対象に、外皮性能に係る断熱・気密性能向上による効果を定量的に明らかにした。以下に得られた知見を示す。

- 1) 緊急避難時では食事や睡眠が主な行動であるため、確保すべき最低室温において、20℃以上が最も多かった。また、天井付近の暖気溜まりや屋根の断熱不足により特につららの発生頻度が高かった。
- 2) 屋体棟の年間暖房エネルギー消費原単位は344MJ/m²・年で校舎棟の2倍に相当し、学校施設全体に占める体育館の暖房消費割合では8割程度の体育館が20～40%の広範囲に分布していた。
- 3) 外断熱+SRC造の高断熱型H校では朝方も含めて室温が10℃を下回ることがなく、旧標準型I校とA校よりも最低室温、室温変動率の温度特性に優れ、現標準仕様の2倍以上の断熱性能を有していることを確認した。
- 4) H校の日射熱ベースの室内外温度差が平均11.4℃に対し、避難者からの発熱量34.56kWによって確保できる人体発熱ベースの室内外温度差は19.1℃で概ね設計目標を達成していたと判断できる。
- 5) 大規模空間における気密測定により通気率、隙間特性値、総相当隙間面積の性能値を検証し、気密性能の違いとして、主に構造の種類や窓サッシの種類の違いが大きく影響していたと考えられる。
- 6) H校の信頼区間も含めた総相当隙間面積は692～937cm²、漏気回数は0.41回/h（外表面積当たり1.68m³/h・m²）になり、室内外温度差20℃、外部風速0～10m/sにおける隙間風損失は5.5～22.1kWであることを確認した。

謝辞

札幌市内小学校、札幌市都市局建築部、札幌市教育委員会、(株)北海道日建設計、大泉翔平氏（当時学生、現在東日本旅客鉄道(株)）には多大なご協力を頂きました。記して謝意を表します。なお、平成26年度札幌市受託研究「収容避難施設の高断熱化に関する研究」、平成24～26年度科学研究費補助金（基盤研究（C））「日常及び緊急時双方に適用可能な無暖房化に向けた住環境整備手法の構築」（研究代表者：菊田弘輝）を受けて本研究を実施しました。

注

- 注1) 冬休み期間は2010年12月25日～翌年1月18日の25日間である。
注2) 利用時間は平日18:15～21:45、土日祝日9:00～17:00を基本とする。
注3) 温風が床下コンクリートの隙間を通過して床上吹出し口から室内に供給されるため、コンクリートの蓄熱により暖まりにくく冷めにくい特徴がある。暖房機の仕様は加熱能力116kW、送風量140m³/分、吹出し温度

60℃（加熱防止装置100℃設定、比例制御による外気ダンパー開閉）である。また、上下温度差3℃で暖気溜り利用のための風循環運転、相対湿度70%で除湿のための湿度感知運動運転が行われる。

- 注4) S校とI校はCW下吹出し+床下吸込み式である。
注5) 発熱量は灯油消費量に低位発熱量8,243kcal/Lを乗じたものである。その際灯油消費量はCO₂発生量をCO₂排出係数1.28m³/Lで除して推定しているため、消費量自体に多少の誤差が生じている。
注6) 温熱快適性に関して「どちらでもない」の選択肢は意図的に設けておらず、児童が回答しやすいように快適か不快かの度合いを尋ねている。
注7) 既往研究¹⁹⁾では測定の信頼性を評価する指標として、不適合率が定義されている。回帰式残差から伝播した不確かさ標準偏差の、測定誤差から伝播した不確かさ標準偏差に対する比で表され、その比率が1よりもかなり大きければ、前提の不適合ということになる。参考までに通気率、隙間特性値のそれぞれの不適合率を試算した結果、概ね1前後であった。
注8) SRC造のH校の場合、開口部の隙間が大きく、S造のA校の場合、開口部及び外壁の隙間が大きいために予想される。しかし、部位別の性能値までは不明瞭であるため、いずれも長辺方向（高さ10m）において、隙間が均等分布であると仮定している。

参考文献

- 1) 国立教育政策研究所文教施設研究センター：学校施設の防災機能に関する実態調査結果について、報道発表，pp.1-5，2011.8.5
- 2) 国立教育政策研究所文教施設研究センター：学校施設の防災機能に関する実態調査結果について、報道発表，pp.1-11，2015.11.13
- 3) 梶井浩史，前田英彦，絵内正道，大林勇，湯浅岳雄，荒谷登：積雪寒冷地の災害時避難施設(小学校及び仮設カプセル)の熱環境調査，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.70，pp.313-316，1997.3
- 4) 久保田克己，絵内正道，荒谷登：体育館の熱環境とその改善に関する研究 その1 研究の目的と実測調査結果，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.60，pp.21-24，1987.3
- 5) http://www.mext.go.jp/a_menu/shisetu/ecoschool/detail/1289509.htm，2016.4.8参照
- 6) 池澤知子，須永修通：アンケート調査によるエコスクール認定校の実態把握－環境調整手法とエネルギー消費量－，日本建築学会環境系論文集，No.641，pp.783-788，2009.7
- 7) 田中稲子，村上美奈子，谷口新，望月悦子，古賀誉章，高口洋人：杉並区エコスクールにおける住環境学習プログラムの開発－荻窪小学校における萌芽段階の事例評価－，日本建築学会技術報告集，No.36，pp.755-758，2011.6
- 8) 菊田弘輝，今井綾子，羽山広文，丹保洋人：北方型エコスクールを対象とした暖房エネルギー消費量の実態と暖房負荷低減に関する研究，日本建築学会環境系論文集，No.657，pp.1001-1008，2010.11
- 9) 菊田弘輝，羽山広文：各種統計的手法による国内のエコスクールのカテゴリー化及び地域性との関係，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.545-548，2011.9
- 10) 大泉翔平，菊田弘輝，羽山広文，森太郎：積雪寒冷地における体育館内包型小学校の環境性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学Ⅱ，pp.185-186，2014.9
- 11) http://www.city.sapporo.jp/toshi/kenchiku/ibento/kenchikubu_koudannetsuka.html，2016.4.8参照
- 12) 久保田克己，絵内正道，荒谷登：体育館の熱環境とその改善に関する研究 その2 アンケート調査結果と改善の方向，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.60，pp.25-28，1987.3
- 13) 木村建一：建築設備基礎理論演習，学献社，1970
- 14) 学校環境衛生推進委員会編集：〔改訂版〕学校環境衛生管理マニュアル「学校環境衛生基準」の理論と実践，文部科学省，2010.3
- 15) JIS A 2201：送風機による住宅等の気密性能試験方法，財団法人日本規格協会，2003.4
- 16) 気密測定技術普及委員会編集：住宅の気密性能試験方法，建築環境・省エネルギー機構，2004.5
- 17) 石原正雄：建築換気設計，朝倉書店，1969
- 18) 趙雲，佐原幸久，吉野博：住宅における換気量の簡易予測法，日本建築学会計画系論文集，No.512，pp.39-44，1998.10
- 19) 奥山博康，大西由哲：送風機による建物気密性測定のパラメータ推定法と不確かさ評価方法の再考，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.177-180，2011.9

BUILDING ENVELOPE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF GYMNASIUM AT ECO-SCHOOLS IN COLD REGIONS

Thermal insulation and airtightness performance verification of gymnasium designed by high thermal insulation

Koki KIKUTA *, *Hiroshi KIKUCHI* **, *Shiho AOYAGI* ***
and Hirofumi HAYAMA ****

* Assist. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

** Kona Sapporo Co., Ltd.

*** Grad. Stud., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.

**** Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr.Eng.

Immediately after the Great East Japan Earthquake, 622 school facilities were performing the function as evacuation shelters. However, the problems such as ensuring of power and water, shortage of heating equipment, and so on occurred. On the other hand, as an important measure against cold for disaster prevention in Sapporo, it has been stockpiling a lot of sleeping bag, blanket, portable kerosene stove. Moreover, an approach to high thermal insulation for gymnasiums was shown in June 2011, and it has actually been attempted from FY2014. The aim of this study is to quantitatively clarify the effects of building envelope performance improvement of gymnasium at Eco-Schools in cold regions designed by high thermal insulation that will contribute to improvement of thermal comfort, reduction of heating energy consumption and strengthening of disaster prevention. The results are as follows:

1) Because eating and sleeping will be main actions at the time of emergency evacuation, there were the most 20 °C or more at the minimum room temperature that should be secured. In addition, the occurrence frequency of icicles was particularly high due to warm air retained near a ceiling and insufficient thermal insulation of a roof.

2) Annual heating energy consumption per floor area in a gymnasium building was 344 MJ/m²/year that was equivalent to 2 times of that in a school building. About 80 % gymnasiums were widely distributed over 20-40 % regarding the heating consumption rate of gymnasium among entire school.

3) There was no case that room temperature fell below 10 °C in gym H for high thermal insulation type designed by external insulation and SRC structure. Gym H had the superior temperature characteristics of minimum room temperature and room temperature fluctuation rate compared to gym I and A for old standard type. It was confirmed that gym H had the thermal insulation performance of more than twice of present standard specification.

4) Inside-outside temperature difference based on solar heat in gym H was 11.4 °C on average. On the other hand, because it based on human body heat ensured by calorific value 34.56 kW from evacuees was 19.1 °C, it can be determined that the design target was almost achieved.

5) The performance values of air leakage coefficient, air leakage exponent and effective leakage area were verified by airtightness measurement. It was considered that the difference of airtight performance was greatly influenced by the differences such as mainly structure type or window sash type.

6) Equivalent leakage area including a confidence interval in gym H was 692-937 cm², and also ACH50 was 0.41 h⁻¹ (per envelope area 1.68 m³/h/m²). It was confirmed that infiltration heat loss was 5.5-22.1 kW under inside-outside temperature difference 20 °C and wind velocity 0-10 m/s.

(2016年4月8日原稿受理, 2016年6月14日採用決定)