積雪寒冷地におけるガラスカーテンウォールの断熱・防露性能の事前及び実測検証に関する研究報告

STUDY ABOUT PRIOR AND MEASUREMENT VERIFICATION OF THE PERFORMANCE OF INSULATION AND DEW CONDENSATION PREVENTION OF GLASS CURTAIN WALLS IN SNOW COLD DISTRICTS

大山政彦 — * 1 永島健児 — * 1

Masahiko OHYAMA — * 1 Kenji NAGASHIMA — * 1

キーワード：

積雪寒冷地, ガラスカーテンウォール, 断熱性能, 防露性能, 事前検証, 実測検証

Keywords:

Snow cold districts, Glass curtain wall, Insulation performance, Dew condensation prevention performance, Prior verification, Measurement verification

Recently, a lot of buildings in snow cold districts are adopting as a their own façade. When adopting GCW where an external condition (snow, cold, strong wind) is significant, it is important to reduce heat loss and to get dew condensation prevention performance. This study is performed on desk examination and actual survey inspection first about insulation and dew condensation prevention performance of one building that have adopted the actual GCW in Sapporo city. Finally, we will confirm the possibility of the aim performance afterwards by comparing them.

1. 背景・目的

近年、積雪寒冷地においても、外装にガラスカーテンウォール^{注1)} (以下、GCW) の採用が多くなっている。降雪、冷温、寒風など外的条件が厳しい積雪寒冷地において GCW を採用する場合、断熱性能、結露防止 (以下、防露性能) といった諸性能の確保が特に重要である。一方、現実の建物においては、取付け方位の違いや施工精度により、GCW 単体の性能値と実際の納まりに基づく性能値は相違している可能性があるが、想定された性能値の実証は殆ど行われていない。GCW の断熱や防露の性能に関する既往研究は、GCW の熱性能を求める簡易的な計算方法を整理した田代ら¹⁾の研究や GCW スパンドレル部の結露について実験に基づき対策を示した権藤ら^{2), 3), 4)}の設計用シミュレーションプログラムに関する研究があるが、施工後の GCW を実測し検証を行う研究は見受けられない。

本報では札幌市内の建物に採用された GCW を対象に、実際の仕様にに基づく断熱性能・防露性能の机上計算を行う。更に建物に施工後の GCW を対象に実測検証を行い、目標性能の実現性を確認する。

また、GCW の断熱性能はメーカーの製品開発に依存する傾向が強く、現場段階での大幅な性能向上は容易ではない。積雪寒冷地では外装開口部の断熱性能向上のためにサッシを二重化してきた経緯がある。本報ではこれらの実情を踏まえ、GCW 内側に内障子を設置した場合の性能を検証し、未設置時の性能と比較することで、外装開口部における内窓を採用する際の一助となる知見の提示を試みたい。

2. 検証概要

2.1 検証項目・方法

検証は札幌市東区に建つ地上8階建てオフィスビルに2019年1月に装着されたGCWとし、以下の方法で断熱性能と防露性能を求める。
①設計仕様に基づき計算により算定する方法 (事前検証)

断熱性能は採用した GCW の仕様に基づき、日本工業規格で規定された JIS A 2102-1 窓及びドアの熱貫流率の計算方法にて算出する。

ビジョン部の防露性能は GCW 表面温度と露点温度を比較し判断する。表面温度は冬季の外気温と室内温湿度から条件設定し、解析ソフト^{注2)}により算出する。各部表面温度が露点温度を上回る場合に結露発生なしとする。スパンドレル部の防露性能は GCW 中空層内の結露を対象とし、解析ソフトにより冬季の中空層内表面温度を算出する。中空層内空気は施工時の周辺空気を密封したものとし^{注3)}、中空層内表面温度と密封空気の温湿度による露点温度を比較し判断する。

②実際の建物で測定した値により算定する方法 (実測検証)

断熱性能は測定した表面温度、外気温、室内温度に基づき、計算により熱貫流率を求める。

ビジョン部の防露性能は測定した GCW 表面温度と露点温度との比較により結露発生の有無を判断する。スパンドレル部の防露性能は目視により結露の有無を確認し判断する。

2.2 GCW の寸法ならびに設計仕様

ビジョン部、スパンドレル部とも寸法は W1, 600、H1, 050、フレームは断熱型材、ガラスは Low-E 複層ガラスを使用する。スパンドレル部の構成は外部側から Low-E 複層ガラス、中空層、アルミ樹脂複合板、耐火ボード、発泡ウレタンとする。

3. 事前検証による性能

3.1 断熱性能

3.1.1 熱貫流率の計算方法

JIS A 2102-1 に準拠し、式 (1)、(2) により窓の熱貫流率 (U_w 、 $U_{各部分}$) を算出する。ガラスの熱貫流率 (U_g) は JIS A 2102-1 に規定される表面熱伝達抵抗を用い JIS R 3107 に基づいた算出値を、フレームの熱貫流率は JIS A 2102-2 に準拠して算出値を用いる。(表 1)。

*1 (株)日本設計建築設計群 工修
(〒163-1329 東京都新宿区西新宿 6-5-1 新宿アイランドタワー 29 階)

*1 Architectural Design Div., NIHON SEKKEI INC., M. Eng.

表 1 各部熱貫流率など

部位		構成		熱貫流率 [W/(㎡・K)]	熱貫流抵抗 [(㎡・K)/W]
ビジョン部	ガラス	Low-E5+A16+FL5		1.35	0.74
	フレーム	方立見付幅[mm]	90	8.22	0.12
		無目見付幅[mm]	90	5.63	0.18
スパンドレル部	ガラス +B P	Low-E5+A16+FL6 + アルミ複合板 t3 + 耐火ボード t20 + 断熱材(ウレタン t37)		0.44	2.28
	フレーム	方立見付幅[mm]	90	0.52	1.92
		無目見付幅[mm]	90	0.48	2.08
		■各部材の熱伝導率 ^{注4)} [W/(m・K)]			
アルミ:160 耐火ボード:0.17 発泡ウレタン:0.026 アルミ複合板:0.8					

表 2 各部面積およびガラス見付周囲長

部位	計算式など	寸法・面積
伝熱開口 (サッシ)	W[mm]	1,600
	H[mm]	1,050
窓面積	A _w =W×H	1.68
ガラス面積	A _g =(W-b _f)×(H-b _f)	1.45
フレーム面積	A _f =A _w -A _g	0.23
ガラス見付周囲長	l _g =2(W+H)-4b _f b _f : フレーム投影幅 (フレーム見付幅)	4.94

表 3 ビジョン部シミュレーションの設定条件

条件	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
室外温度 T _o [℃]	-2.93	-2.63	-4.10	-5.42	-5.10	-5.20	-5.60	-5.30
室内温度 T _i [℃]	24.0			22.0		20.0		
室内相对湿度 φ [%]	40.0			45.0		50.0		
露点温度 T _e [℃]	9.6			9.5		9.3		
外部表面熱伝達率 α _o [W/㎡ K]	23.0 注4)							
内部表面熱伝達率 α _i [W/㎡ K]	9.0 注4)							
条件[1]～[8]は下記に示す時間における平均外気温を示す								
条件[1]	08:00～11:00		条件[4]	17:00～20:00		条件[7]	02:00～05:00	
条件[2]	11:00～14:00		条件[5]	20:00～23:00		条件[8]	05:00～08:00	
条件[3]	14:00～17:00		条件[6]	23:00～02:00

図 1 ビジョン部表面温度算定点

表 4 シミュレーションによる表面温度[°C]

条件	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
①	16.8	16.9	16.5	14.8	13.5	13.4	13.3	13.4
②	20.1	20.1	19.9	18.0	16.3	16.3	16.2	16.3
③	16.6	16.7	16.3	14.7	13.3	13.3	13.2	13.3
④	17.3	17.4	17.0	15.5	14.1	14.1	14.0	14.1
⑤	17.1	17.1	16.8	15.3	13.9	13.9	13.8	13.9
⑥	19.0	19.1	18.8	17.5	15.9	15.9	15.8	15.9
⑦	19.0	19.1	18.8	17.5	15.9	15.9	15.8	15.9
⑧	15.8	16.1	15.6	13.9	12.5	12.5	12.4	12.5
⑨	15.8	16.1	15.6	13.9	12.5	12.5	12.4	12.5
⑩	15.6	15.7	15.2	13.4	12.2	12.1	12.0	12.1
⑪	15.6	15.7	15.2	13.4	12.2	12.1	12.0	12.1
⑫	16.7	16.8	16.4	14.6	13.2	13.2	13.1	13.1
⑬	16.7	16.8	16.4	14.6	13.2	13.2	13.1	13.1

各部面積及びガラス見付周囲長は表 2 による。また、ガラス周囲部の線熱貫流率(Ψ_g)は、JIS A 2102-1 に規定された金属スペーサの値より 0.05[W/(m・K)]を、表面熱伝達抵抗は JIS A 2102 から室外側 (R_o) 0.04[(m²・K)/W]、室内側 (R_i) 0.13[(m²・K)/W]を用いる。

$$U_w = (\Sigma A_g \cdot U_g + \Sigma A_f \cdot U_f + \Sigma l_g \cdot \Psi_g) / (\Sigma A_g + \Sigma A_f) \cdots (1)$$

$$U_{\text{各部位}} = 1 / (R_o + \Sigma R_{\text{各部位}} + R_i) \cdots (2)$$

A_g , A_f : ガラス、フレーム面積 [m²]

U_g , U_f : ガラス、フレーム熱貫流率 [W/(m²・K)]

l_g : ガラス見付周囲長 [m]

Ψ_g : ガラス周囲部線熱貫流率 [W/(m・K)]

R_o , R_i : 表面熱伝達抵抗 (室外側、室内側) [(m²・K)/W]

3.1.2 検証結果

前項よりビジョン部、スパンドレル部の断熱性能を算出する。

(1) ビジョン部

$$U_w = (1.45 \times 1.35 + (90 \times 1050 / 10^6) \times 8.22$$

$$+ ((1600 - 90) \times 90 / 10^6) \times 5.63 + 4.94 \times 0.05) / 1.68 = 2.23$$

熱貫流率: 2.23W/(m²・K)、熱貫流抵抗: 0.45(m²・K)/W

(2) スパンドレル部

$$U_w = (1.45 \times 0.44 + (90 \times 1050 / 10^6) \times 0.52$$

$$+ ((1600 - 90) \times 90 / 10^6) \times 0.48 + 0.1) / 1.68 = 0.51$$

熱貫流率: 0.51W/(m²・K)、熱貫流抵抗: 1.97(m²・K)/W

3.2 防露性能

3.2.1 ビジョン部の検証

(1) 設定条件 (表 3)

外気温は札幌の 2016 年 1 月 25 日から 26 日^{注5)}までのうち、25 日 8:00 から 3 時間毎の平均外気温を用いる。室内環境は空調衛生工学会の冬季設計用湿度条件 (22°C40%) を参考に①24°C40%、②22°C45%、③20°C50%の 3 通りとして設定する。

(2) 検証結果

シミュレーションにおける算定点を図 1 に、結果を表 4 に示す。表面温度^{注6)}が露点温度を下回る算定点は無いため、設定条件下において結露は発生しない可能性が高いことが分かった。

3.2.2 スパンドレル部の検証

(1) 設定条件 (表 5)

外気温は空調設備協会による札幌の冬季設計用温度-8.4°Cを、室内温度はビジョン部の検証で設定した温度のうち 24°Cを採用する。

中空層内は施工時の空気が封入される前提とし、施工時期を 1 月、4 月、7 月、10 月と設定する。施工時の平均外気温、平均相対湿度は過去 5 年間 (2012～2016 年) 1 カ月平均値を用い、平均外気温と平均相対湿度から算出した露点温度を中空層内露点温度として用いる。

表 5 スパンドレル部シミュレーションの設定条件

条件	[1]	[2]	[3]	[4]
室外温度 T _o [°C]	-8.4			
室内温度 T _i [°C]	24.0			
ガラス施工想定時期平均外気温 ^{注7)} T [°C]	-3.7	7.4	21.8	11.7
スパンドレル内平均相対湿度 ^{注7)} φ [%]	67.6	60.0	73.4	64.6
スパンドレル内飽和水蒸気量 G [g/m ³]	2.5	4.8	14.1	6.8
露点温度 T _e [°C]	-8.8	0.0	16.8	5.3
外部表面熱伝達率 α _o [W/m ² K]	23.0			
内部表面熱伝達率 α _i [W/m ² K]	9.0			
条件[1]～[4]は下記に示す月の過去 5 年間の 1 カ月平均値を示す。				
条件[1] 1 月 条件[2] 4 月 条件[3] 7 月 条件[4] 10 月				

(2) 検証結果

シミュレーションにおける算定点を図2に、結果を表6に示す。条件1では全ての算定点で露点温度以上となるため、結露発生の可能性は低いと考えられる。条件2では算定点③以外で、条件3及び4では全ての算定点で露点温度を下回るため、条件1(1月施工)を除き結露発生可能性があることが分かった。

表6 シミュレーションによる表面温度[℃]

条件	[1]~[4]
①	-2.7
②	-1.8
③	0.9
④	-0.8
⑤	-4.2
⑥	-4.2

図2 スパンドレル部表面温度算定点

4. 実測検証による性能

4.1 断熱性能

4.1.1 検証方法

実装されたGCW周辺の温度を実測し、断熱・防露性能を検証する。温湿度計により気温や湿度を、サーモカメラによりGCWの各部表面温度を測定し^{注8)}、式(3)より熱貫流率を算出する。

$$U = 1/R$$
$$= 1 / (1/\alpha_i + \sum (t_i/\lambda_i) + 1/\alpha_o)$$
$$= (T_i - T_{si}) / (T_i - T_o) * \alpha_i \dots (3)$$

U: 熱貫流率 [W/(㎡・K)], α_i : 室内側熱伝達率=9 [W/(㎡・K)]

図3 ビジョン部測定点

R: 熱抵抗値 [㎡・K/W], α_o : 室外側熱伝達率=23 [W/(㎡・K)]
 T_i : 室内温度 [℃], t_i : 層の厚さ[m] (表1参照)
 T_o : 室外温度 [℃], λ_i : 層の熱伝導率[W/(m・K)] (表1参照)
 T_{si} : 室内部材表面温度 [℃]

4.1.2 ビジョン部の検証

(1) 検証条件

各測定日 1.5 時間の測定時間帯を設定し、同時間帯に 2 回の測定を行う。室内温度 (T_i) は、暖房器具を用いて 21~25℃の範囲を保持した。測定点は図3の通りとする^{注9)}。

(2) 検証結果

前項により3日間で計6回(A~Fとする)の測定を実施した。測定温度と熱貫流率の計算結果を表7に示す。測定点ごとの熱貫流率の平均をGCW全体の熱貫流率(U)とした^{注10)}。6回の測定の平均値は、熱貫流率(U)が2.34W/(㎡・K)、熱貫流抵抗(R)は0.43(㎡・K)/Wであった。

4.1.3 スパンドレル部の検証

(1) 検証条件

温湿度計とサーモカメラを使用し、測定日に1回の測定を実施する。測定点は図4の通りとする。熱貫流率は室内気温に依存しない

表7 ビジョン部及びスパンドレル部の測定結果

記号		A		B		C		D		E		F		G	
部位		ビジョン部												スペンドレル部	
測定日時		2019/2/1 15:00~16:30		2019/2/1 15:00~16:30		2019/2/2 19:00~20:30		2019/2/2 19:00~20:30		2019/2/3 09:00~10:30		2019/2/3 09:00~10:30		2019/3/13 08:00~09:00	
項目		温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率
外気温 To		-7.4		-7.4		-5.0		-5.0		-1.7		-1.7		1.5	
表面温度測定点	①	13.3	2.49	16.9	1.95	11.7	3.43	16.9	2.23	14.4	3.01	16.0	2.90	5.7	0.78
	②	18.7	0.79	20.4	0.93	19.5	0.83	22.4	0.53	20.5	0.74	21.3	1.07	5.7	0.78
	③	13.2	2.52	12.3	3.28	10.9	3.70	16.9	2.23	14.2	3.09	16.0	2.90	5.7	0.78
	④	12.7	2.67	12.3	3.28	11.4	3.53	12.3	3.65	13.1	3.50	15.0	3.24	5.9	0.39
	⑤	12.6	2.71	11.7	3.45	11.1	3.63	12.0	3.74	13.1	3.50	15.0	3.24	6.0	0.20
	⑥	13.3	2.49	16.6	2.03	16.6	1.80	16.6	2.32	15.9	2.45	18.0	2.21	5.9	0.39
	⑦	13.6	2.39	16.3	2.12	16.2	1.93	16.3	2.41	15.8	2.49	18.0	2.21	5.8	0.59
	⑧	13.5	2.42	16.7	2.00	16.8	1.73	16.7	2.29	16.8	2.12	17.6	2.34	5.7	0.78
	⑨	13.3	2.49	16.7	2.00	16.6	1.80	16.7	2.29	16.8	2.12	18.1	2.17	5.6	0.98
	⑩	13.7	2.36	17.5	1.77	17.4	1.53	17.5	2.04	17.9	1.71	19.0	1.86	5.9	0.38
	⑪	13.4	2.45	17.0	1.92	17.3	1.57	17.1	2.16	17.7	1.79	19.1	1.83	6.0	0.20
室温 Ti		21.2		23.6		22.0		24.1		22.5		24.4		6.1	
①~⑩平均U			2.34		2.25		2.32		2.35		2.41		2.36		0.57
①~⑩平均R			0.43		0.44		0.43		0.43		0.42		0.42		1.75

図4 スパンドレル部測定点

うえ、実際のスパンドレル部は無暖房となることが多いため、空調は行わないものとする。

(2) 検証結果 (表7)

測定点毎の熱貫流率の平均を GCW の熱貫流率とすると^{注10)}、熱貫流率 (U) は $0.57\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、熱貫流抵抗 (R) は $1.75(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ となる。

4.2 防露性能

4.2.1 ビジョン部の検証

(1) 検証条件

前節においてサーモカメラを使って測定した GCW 各部の表面温度 (表7) と、室内の露点温度 (温湿度計にて測定した温度と湿度による) を A~F の測定ごとに比較し、結露発生の有無を判断する。

(2) 検証結果 (表8)

温湿度計による露点温度とサーモカメラによる GCW 表面温度を表8にまとめる。全てで表面温度が露点温度を上回っており、今回の条件下ではどの測定点においても結露が発生しないといえる。

4.2.2 スパンドレル部の検証

防露性能は目視確認により行った。室内側ウレタン表面及び外部ガラス越しに確認した中空層内において結露を確認できなかった。施工時期が1月であり中空層内の露点温度が低いためと考えられる。

表8 ビジョン部の結露判定

記号	A	B	C	D	E	F
温湿度計	温度	21.2	23.6	22.0	24.1	22.5
	湿度	40%	41%	31%	32%	32%
	露点温度	7.1	9.6	4.1	6.4	5.0
サーモカメラ	測定点	⑩	⑩	⑪	⑩	③⑩
	表面温度	12.6	11.7	10.9	12.0	13.1
結露判定	結露なし	結露なし	結露なし	結露なし	結露なし	結露なし

表9 参考：湿度を仮定した場合の結露判定

測定日時	2019/3/13 8:00~9:00
温湿度計	室温
	湿度 (仮定)
	露点温度
サーモカメラ	測定点
	表面温度
結露判定	結露なし

表10 内窓の各部面積及び熱貫流率

構成	熱貫流率	熱貫流抵抗
面材：樹脂シート (㎡)	1.368	5.84
フレーム：アルミ (㎡)	0.312	0.17
縦材見付幅 [mm]	120.6	15.4
横材見付幅 [mm]	125	11.9

図5 内障子設置時表面温度算定点

参考として、前節の測定における室内側ウレタン表面の結露判定を表9に示す。ただし室内湿度は40%、50%と仮定する。いずれも表面温度が露点温度を上回り、結露発生なしといえる。

5. 内障子を含めた性能

GCW ビジョン部の断熱性能を向上させる手段として、内障子を設置した場合の性能を検証し、未設置の場合と比較する。内障子は枠・格子はアルミ製とし、面材は樹脂シート1枚貼りとする。

5.1 事前検証

5.1.1 断熱性能

(1) 熱貫流率の計算方法

JIS A 2102-1 に準拠し、式 (1)、(2) および、二重窓の熱貫流率 (Uw) を求める式 (4) を用いて算出する。内障子 (内窓) の各部面積及び熱貫流率は表10による。

$$U_w = 1 / \{ 1/U_{w1} - R_{si} + R_s - R_{se} + A_{w1} / (A_{w2} \cdot U_{w2}) \} \cdots (4)$$

U_{w1} : 外窓熱貫流率 = $2.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (3.1.2 (1) による)

U_{w2} : 内窓熱貫流率 = $7.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (式 (1) より算出)

R_{si} : 室内側熱伝達抵抗 = $0.13 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$

R_{se} : 室外側熱伝達抵抗 = $0.04 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$

R_s : 中間空気層の熱抵抗 = $0.173 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$

A_{w1}, A_{w2} : 外窓、内窓伝熱開口面積 = $1.68 \text{ [m}^2]$

(2) 検証結果

前項よりビジョン部に内障子を設置した際の断熱性能を算出する。

$$U_w = 1 / (1/2.23 - 0.13 + 0.173 - 0.04 + 1/7.23) = 1.70$$

熱貫流率 : $1.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、熱貫流抵抗 : $0.59(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$

5.1.2 防露性能

(1) 設定条件

設定条件は、内障子未設置の場合の検証に倣う。(表3)

(2) 検証結果

シミュレーションにおける算定点を図5に、結果を表11に示す。表面温度が露点温度 (表3参照) を下回る算定点はないため、設定条件下において結露は発生しない可能性が高いことが分かった。

5.2 実測検証

5.2.1 断熱性能

表 11 シミュレーションによる表面温度[°C]

条件	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
①	14.8	14.7	14.1	12.4	11.2	11.2	11.0	11.1
②	16.8	16.9	16.9	16.9	13.3	13.3	13.3	13.3
③	14.6	14.7	14.2	12.4	11.3	11.2	11.1	11.2
④	15.1	15.2	14.7	12.9	11.7	11.7	11.6	11.7
⑤	15.2	15.3	14.8	13.0	11.8	11.8	11.6	11.7
⑥	17.3	17.4	17.0	15.2	13.8	13.7	13.6	13.7
⑦	17.6	17.7	17.3	15.5	14.1	14.0	13.9	14.0
⑧	14.6	14.7	14.3	12.2	11.2	11.1	10.9	11.0
⑨	14.6	14.7	14.3	12.2	11.2	11.1	10.9	11.0
⑩	15.2	15.2	14.7	12.9	11.7	11.7	11.5	11.6
⑪	15.2	15.2	14.7	12.9	11.7	11.7	11.5	11.6
⑫	16.7	16.8	16.5	14.7	13.2	13.2	13.1	13.1
⑬	16.7	16.8	16.5	14.7	13.2	13.2	13.1	13.1
⑭	19.9	19.9	19.7	17.8	16.2	16.1	16.1	16.1
⑮	19.4	19.5	19.2	17.3	15.8	15.7	15.7	15.7
⑯	19.9	19.9	19.7	17.8	16.2	16.2	16.1	16.2
⑰	19.4	19.5	19.4	17.5	15.9	15.9	15.8	15.8
⑱	19.6	19.6	19.7	17.8	16.2	16.1	16.1	16.1
⑲	19.0	19.1	19.0	17.2	15.6	15.6	15.5	15.5
⑳	19.0	19.1	19.0	17.2	15.6	15.6	15.5	15.5

(1) 検証方法

温湿度計により気温や湿度を、内障子を含む GCW の各部表面温度をサーモカメラによって測定する。測定した数値に基づき、式(2)より熱貫流率を算出する。

(2) 検証条件

各測定日に測定時間帯を設定し、時間帯毎 2 回の測定を行う。室内温度 (T_i) は暖房器具を用いて 21~25°C の範囲を保持した。測定点は図 6 に示す^{注9)}。そのうち内障子表面の測定点は⑬、⑭、⑮とする。

(3) 検証結果

3 日間で計 6 回の測定を実施した。測定温度と熱貫流率の計算結果を表 12 に示す。内障子の測定点の熱貫流率の平均を内障子設置時の熱貫流率 (U) とした^{注10)}。6 回の測定の平均値は、熱貫流率 (U) が 1.65W/(m²・K)、熱貫流抵抗 (R) は 0.61(m²・K)/W であった。

5.2.2 防露性能

(1) 検証条件

前項においてサーモカメラで測定した各部の表面温度(表 12)と

図 6 内障子設置時測定点

室内の露点温度を、H~M の測定毎に比較し結露発生の有無を判断する。比較する表面温度は測定点のうち、最も低温の値とする。

(2) 検証結果(表 13)

各部表面温度を確認すると H の測定点③(ガラス端部)及び⑤(縦枠)で露点温度以下となり、それらを除くと H~M の全てで露点温度を上回っていることが分かる。よって H の条件下ではガラス端部や縦枠に結露が発生し、そのほかでは結露が発生しない可能性が高い。

表 13 内障子設置時の結露判定

記号	H	I	J	K	L	M
温湿度計	温度	21.2	23.6	22.0	24.1	22.5
	湿度	40%	41%	31%	32%	32%
	露点温度	7.1	9.6	4.1	6.4	5.0
サーモカメラ	測定点	③	①③	①	①③	③
	表面温度	5.5	9.7	7.0	9.0	11.2
結露判定	結露あり	結露なし	結露なし	結露なし	結露なし	結露なし

5.3 内障子設置の効果

5.3.1 内障子による断熱性能の向上効果

ビジョン部の断熱性能について検証結果を表 14 にまとめる。

事前検証と実測検証による断熱性能は、ほぼ同じ値となった。

表 12 内障子設置時の測定結果

		H		I		J		K		L		M	
測定日時		2019/2/1 15:00~16:30		2019/2/1 15:00~16:30		2019/2/2 19:00~20:30		2019/2/2 19:00~20:30		2019/2/3 9:00~10:30		2019/2/3 9:00~10:30	
項目		温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率	温度	熱貫流率
外気温 T_o		-7.4		-7.4		-5.0		-5.0		-1.7		-1.7	
表面温度測定点	①	8.9	3.87	9.7	4.04	7.0	5.00	9.0	4.67	11.9	3.94	12.3	4.17
	②	12.0	2.90	12.9	3.11	12.9	3.03	12.9	3.46	16.5	2.23	16.9	2.59
	③	5.5	4.94	9.7	4.04	7.1	4.97	9.0	4.67	11.2	4.20	12.4	4.14
	④	12.2	2.83	13.4	2.96	8.4	4.53	10.5	4.21	12.3	3.79	12.4	4.14
	⑤	5.6	4.91	13.4	2.96	9.0	4.33	10.4	4.24	11.4	4.13	12.4	4.14
	⑥	12.3	2.80	13.5	2.93	13.4	2.87	15.4	2.69	15.4	2.64	17.4	2.41
	⑦	10.6	3.34	12.9	3.11	14.1	2.63	16.1	2.47	15.5	2.60	17.1	2.52
	⑧	12.4	2.77	13.8	2.85	13.9	2.70	15.9	2.54	15.9	2.45	17.9	2.24
	⑨	10.0	3.52	12.4	3.25	13.6	2.80	15.6	2.63	16.7	2.16	17.6	2.34
	⑩	15.5	1.79	18.6	1.45	16.8	1.73	18.8	1.64	17.5	1.86	18.6	2.00
	⑪	15.6	1.76	18.6	1.45	16.8	1.73	18.8	1.64	17.5	1.86	18.4	2.07
	⑫	15.6	1.76	18.6	1.45	16.8	1.73	18.8	1.64	17.5	1.86	18.4	2.07
	⑬	14.0	2.27	18.7	1.42	16.9	1.70	18.9	1.61	17.6	1.82	19.8	1.59
	⑭	15.6	1.76	18.8	1.39	17.0	1.67	19.1	1.55	18.1	1.64	19.9	1.55
	⑮	16.6	1.45	18.5	1.48	16.9	1.70	18.9	1.61	17.8	1.75	19.7	1.62
室温 T_i		21.2		23.6		22.0		24.1		22.5		24.4	
⑬⑭⑮平均 U			1.83		1.43		1.69		1.59		1.74		1.59
⑬⑭⑮平均 R			0.55		0.70		0.59		0.63		0.58		0.63

事前検証による熱貫流抵抗は内障子設置時で $0.59(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 、内障子なしで $0.45(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ である。内障子設置により断熱性能が約 1.3 倍となった。実測検証による平均の熱貫流抵抗は、内障子設置時で $0.61(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 、内障子なしで $0.43(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ である。内障子を設置することで、4 割程度の断熱性能向上が確認でき、アルミ障子の両面に樹脂シートを貼るなどにより、更に大きな効果が期待できる。

表 14 ビジョン部の断熱性能一覧

		事前検証による性能	実測検証による性能
内障子なし	熱貫流率 $W/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	2.23	2.34
	熱貫流抵抗 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$	0.45	0.43
内障子あり	熱貫流率 $W/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	1.70	1.65
	熱貫流抵抗 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$	0.59	0.61
内障子設置効果	内障子あり / 内障子なし	131%	143%

5.3.2 内障子による防露性能の変化

ビジョン部の防露性能について、検証結果を表 15 にまとめる。内障子なしの場合は事前検証と実測検証に相違がなく、結露なしの結果となった。内障子設置時は事前検証では結露なし、実測検証では一部結露が発生する結果となった。実測検証で結露ありだった測定 H の外気温は -7.4°C (表 12) だが、事前検証の設定外気温は最も低温の条件で -5.6°C (表 3) のため、外気温の差が影響したと考えられる。

表 15 ビジョン部の防露性能一覧

		事前検証による性能	実測検証による性能
内障子あり	内障子なし	結露なし	結露なし
	建具間	結露なし	一部結露あり
	内障子室内側表面	結露なし	結露なし

6. 結論

(1) ビジョン部の熱貫流抵抗値は、事前検証で $0.45(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 、実測検証で 0.43 となり、ほぼ同じであった。省エネ基準の等級 4 における札幌の基準値^{注 11)}は 0.429 であり、当該 GCW は相応の性能を有しており、JIS における H-5 等級 ($0.429(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 以上) に相当する。

(2) スパンドレル部の熱貫流抵抗値は、事前検証で $1.97(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 、実測検証で 1.75 となり、実測検証の断熱性能が事前検証の値を下回った。また、省エネ基準の壁の基準値^{注 11)}は、札幌 (I 地域) の等級 4 で 2.564 、等級 3 で 2.222 となっている。

(3) ビジョン部の防露性能は、事前検証の設定条件下においても、実測検証においても結露は発生せず、同様の結果を示した。

(4) スパンドレル部の防露性能は、事前検証により冬季施工以外では中空層部に結露発生可能性があることが分かった。冬季施工である当該 GCW の実測検証では結露は確認されず、事前検証と整合する結果となった。冬季以外の施工では、中空層内を乾燥空気に置換する、外気導入し換気により湿度を逃がす等の対策を検討したい^{5), 6)}。

(5) 今回の条件において、設計仕様に基づく計算上の性能と、現地の実測に基づく性能の間に、大きな違いは無かった。本検証を行うことで、当該 GCW は概ね性能の実現性を担保できていることが分かった。

(6) また、GCW の断熱性能を向上させる目的で内窓を設置した結果、約 1.3~1.4 倍の断熱性能となった。更に内窓の仕様を変え同様の実証を行えば、各種内窓仕様と断熱効果の関係がより明確になり、採用判断に役立てることができると考えられる。一方、内窓設置時の防露性能は、建具間の温度が低下し GCW 面はより結露しやすくなることがあるため、建具間の温湿度を調整する等の対策が必要であろう。

7. あとがき

積雪寒冷地の GCW において、断熱性能と防露性能が重要な機能であることは論を俟たない。設計段階で計算上の性能を定めるだけでなく、現実に発揮させるために、施工精度を確保する方法についても検証すべきである。今後は、GCW を他用途の建築に用いる場合や設置する方位や高さなど、様々な条件で検証を重ねていきたい。完成後に実際の測定を行い、計算上の性能の実現性を検証することで、より正確で実践的な性能の確保につながっていくものと思われる。

謝辞

本報の執筆にあたり、五十嵐 基明氏に多大な協力を仰ぎました。記して感謝いたします。

注釈

- 注 1) 本報では外装面材にガラスを用い、ガラスをアルミなどのメタルフレームで支持するものを GCW とする。
- 注 2) アメリカ LBNL の窓解析ソフトウェア (THERM (Ver. 6.3)) を使用する。
- 注 3) 密封状態を確保するため、施工時に、スパンドレル室内側のパネルは透湿抵抗の大きな AL 材+シールにて周囲を塞ぎ、空気流入を防ぐ処置を行う。
- 注 4) 各部材の熱伝導率 (λ) については、アルミ: JIS A 2102-2 付属書 A、アルミ樹脂複合板: メーカーホームページ、耐火ボード: メーカーカタログ、発泡ウレタン: JIS A 9526 「建築物断熱用吹付け硬質ウレタンフォーム」 A 種 1H の規格値による。表面の熱伝達率 (α) は「平成 25 年 省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説」による。
- 注 5) 本事前検証は 2017 年に行ったため、外気温は前年 2016 年において厳しい冷え込みとなった同日の気温を用いることとした。
- 注 6) 室内側に近い⑩⑪ (フレーム部) が外部に近い⑧⑨ (ガラス端部) より表面温度が低い。⑧⑨はガラスの断熱性能が良い一方、⑩⑪はアルミ型材の裏面が外部側の冷えた型材の影響を受けるといった原因が考えられる。
- 注 7) 気温と湿度は気象庁 Web サイトの札幌のデータに基づく。
- 注 8) 引渡し後の建物において実測検証を行う際、入居者の負担軽減のため短時間で測定することを要求される場合がある。それらを踏まえ今回は簡便な測定が可能なサーモカメラを採用した。
- 注 9) 事前検証では高さ方向に複数の算定点を設けたが、実測検証では計測値に上下による差がなかったため、高さ方向の中央部のみを測定点とした。
- 注 10) JIS A 4710 断熱性試験方法における熱貫流率算出方法を参考にした。
- 注 11) H11 年省エネ基準 (「省エネ法 住宅事業建築主の判断基準 断熱性能等判断資料 (2009 年 4 月版) 2 (4) 鉄筋コンクリート造 (内断熱)」) の基準値。

参考文献

- 田代達一郎, 二宮秀典, 齋藤孝一郎: フレームを考慮したカーテンウォールの熱性能計算, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 670 号, pp. 1033-1042, 2011. 12
- 榎藤尚, 三原邦彰, 樋口豊, 鉾井修一: ガラス面結露の原因と対策に関する検討 ガラスカーテンウォールスパンドレル部の結露防止に関する研究 その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 665 号, pp. 601-607, 2011. 7
- 榎藤尚, 三原邦彰, 鉾井修一: ガラス面結露対策のシミュレーション検討 ガラスカーテンウォールスパンドレル部の結露防止に関する研究 その 2, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 726 号, pp. 697-706, 2016. 8
- 榎藤尚, 三原邦彰, 大山政彦, 鉾井修一: ガラスカーテンウォールスパンドレル部の設計用結露シミュレーションプログラムとその精度検証, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 726 号, pp. 687-696, 2016. 8
- 大山政彦: 積雪寒冷地の超高層建築物におけるガラスカーテンウォール仕様に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 83 巻, 754 号, pp. 2031-2311, 2018. 12
- 大山政彦: 積雪・寒風地の建築マニュアル, 鹿島出版会, 2015. 12

[2019 年 10 月 1 日原稿受理 2020 年 1 月 6 日採用決定]