

外断熱工法における二重窓の結露防止性能に関する検討

A Study on Condensation Formation in Double Window Systems in Externally Insulated Buildings

紺野 康彦 YASUHIKO KONNO

酒井 英二 EIZI SAKAI

島田 潔 KIYOSHI SHIMADA

この研究は普及の兆しを見せている外断熱工法の建物に対して、どのような窓を取り付けたらよいかを実験的に検討したものである。寒冷地でこれまで広く用いられてきた二重窓が、外断熱と組み合わせることで窓面の結露防止に対して有効であることを確かめた。また、窓の壁への取り付け位置や断熱補強などについて適した手法を比較検討し、実際の病院の施工に反映した。

キーワード：外断熱，窓，結露

This report shows experimental results following the installation of windows in externally insulated buildings. Through the study, it was confirmed that the double window system that is popular in cold regions is also effective in preventing condensation when used as part of an externally insulated wall system. In addition, better window positioning and insulation reinforcement were obtained as comparative experiments. These results were reflected in the construction of a hospital.

Key Words: External insulation system, Window, Condensation

1. はじめに

建物の高断熱・高气密化の流れは次世代省エネルギー基準などの制定により、確実に浸透してきている。壁や屋根などの部位は厚い断熱材を使用することで比較的容易に熱損失を低減できるのに対して、ガラスや金属で構成される窓などの開口部は壁などの部位に比べれば遥かに熱抵抗が小さくなっている。したがって、この開口部の熱損失を小さくすることが、建物全体の暖冷房消費エネルギー量を減らすための重要な鍵となっている。

さらに、窓は断熱された外皮に比べて冬期間の表面温度が大きく低下するために「結露・結霜」が生じる可能性が極めて高く、窓面への結露（霜）は当然の現象として認識されている場合が多い。しかしながら、外が見えなくなるといった初期的な機能障害を始めとして、窓周辺の建築部材やカーテンなどが結露水により汚損され、カビが発生する被害も起こっている。さらには結露水の凍結により窓が開放できない危険状態に至ることも考えられ、対策が求められている。



写真-1 外断熱工法を採用した病院
(北海道千歳市)

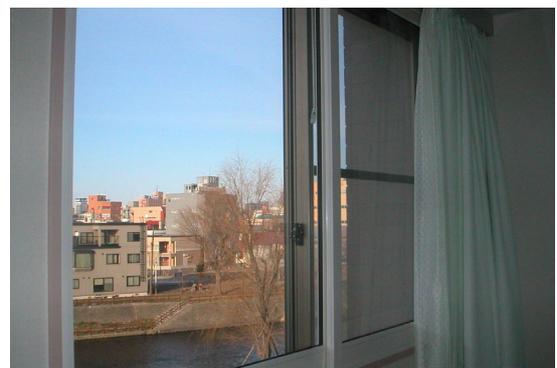


写真-2 採用された二重窓

2. 外断熱と窓

外断熱は開発から 20 年以上が経過した現在、北海道などの寒冷地を中心に本格的に普及しつつある。これらの建物では外断熱された外皮が高い断熱性能や防露性能を持つだけに、これにバランスのとれた窓の性能が要求される。

近年の戸建住宅などの低層建物では樹脂製の窓枠に低放射 (Low-e) ペアガラスなどを用いた高断熱仕様の窓が普及してきており、窓に対する熱損失や結露の問題には一定の方向性が示されてきている。一方、中高層の建物では防火性能やコストなどの関係から、断熱性能の高いサッシ枠が採用されにくい状態で、依然として断熱・防露性能に問題が残っていると考えている。また、木造にサッシを取り付けるのと異なり、RC 造や S 造などでは窓を取り付ける際に熱橋が生じやすいことも防露性能に大きな影響を与えている。

そこで窓の性能を簡単に向上させる手法が伝統的に用いられている二重窓である。これは外窓と内窓の間でできる空間 (空気層) で断熱性能を引き出すもので、外窓にアルミサッシを用いて防火・防水性能を持つ窓枠を採用し、内側に樹脂や木などの断熱性能に優れた窓を使用することで窓の熱性能を向上させている。使い勝手や意匠的には問題もあるが、寒冷地の住宅で多用されてきており、RC 造の壁にも設置が可能である。

寒冷地で外断熱工法の外壁に二重窓を採用することは、工法の進歩からみても自然な展開であるが、具体的な施工実績が乏しく、二重窓の適否や施工方法についての確信が得られていない状態であった。

3. 検討の方法

北海道千歳市に建つ病院 (写真-1) では外断熱工法が採用され、窓には二重窓 (写真-2) が設置されることになった。この病院の断熱構造と窓、および環境条件を例として、窓の取り付け方法と結露の関係を実験的に把握し、結露防止の解決策を検討することとした。その外壁と窓周りの代表的な仕様を図-1 に示す。厚さ 50mm の発泡ポリスチレンをコンクリート壁に密着させた外断熱で、レンガ積みの外装材と通気層を有している。外部に引き違いのアルミ枠のシングルガラス窓が躯体に金物で固定され、内側に PVC 枠のペアガラス窓が木枠に取り付けられている。外窓の取り付け位置はコンクリートの躯体上部になる。内窓の木枠とコンクリート躯体の間に施工上空隙が生じるが、ここにウレタンを充填し断熱補強とするべきか、モルタルを充填し躯体と温度を連続させるべきか、結露の危険性で迷うと

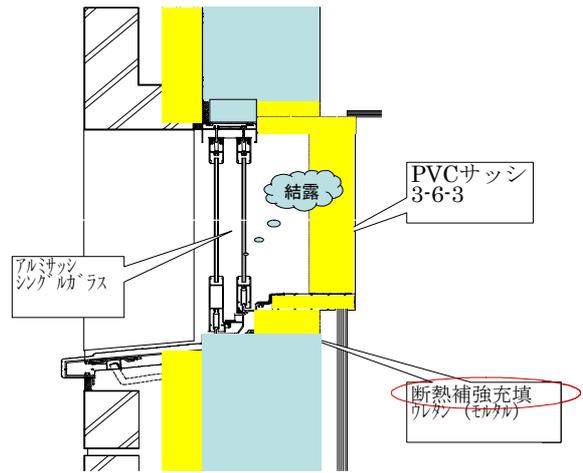


図-1 レンガ積み外断熱工法を採用した壁への二重窓の納まり状態 (実験壁の基準案)

表-1 実験の組み合わせ

南側窓	実験番号	1 2 3 4 5 6 7 8 9 13													
	断熱	内断熱						外断熱							
窓の種類	一重窓			二重窓						断熱PVC					
アルミサッシ設置位置	コンクリート躯体														
その他の条件	M	U	M	U	U	M	M	MB	MIB	U					
北側窓	実験番号											10	11	12	14
	断熱											外断熱			
	窓の種類											二重窓		断熱PVC	
	アルミサッシ設置位置											外装壁			
その他の条件											U	UB	UIB	U	

その他の条件
 M、U: 窓取り付け時の充填材 Mはモルタル Uはウレタン
 B: 二重窓の室内側に断熱ブラインドを設置
 IB: 二重窓の中間に断熱ブラインドを設置

ころである。一重の窓であれば、2次元などの伝熱解析で目処がつけられるとも考えられるが、二重窓では間の空気層の温度と湿度の状態の予測が難しく、また枠の取り付け部位における伝熱の適切な評価方法も見当たらない。そのため、実大の窓と壁体を用意し、想定される環境下に設置することで、より実際に近い状態でのデータを採取する実験を行い判断することとした。

4. 実験の概要

実験は任意の温度条件を保つことができる屋外環境シミュレータ室に 2.9m x 2.7m x 2.7m (H) の実験箱を設置し、そこに窓を有する実験壁を取り付け、外部と内部で温度差が生じるようにし、観察と記録を行った。

(1) 比較検討条件

比較検討するためのパラメーターは以下のとおりであり、これらを表-1 のように組み合わせて実験を行った。

- ①断熱方法: 外断熱・内断熱 (断熱厚さ 50mm)
- ②窓の種類: アルミー重窓・アルミ+内窓 PVCペアを使用した二重窓・断熱 PVC サッシ (Low-e ペア)

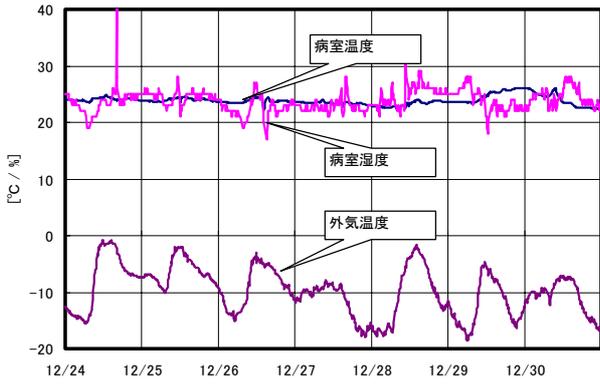


図-2 千歳市内某病院における病室の温湿度記録 (2002 年末)

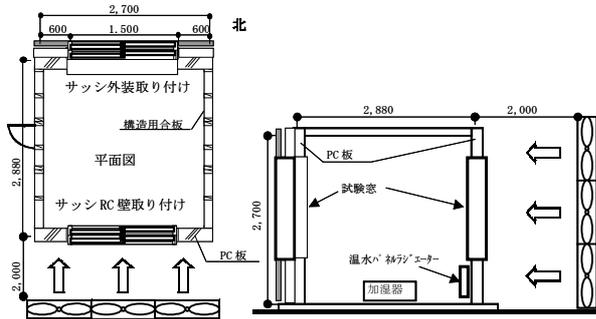


図-3 実験箱の概要

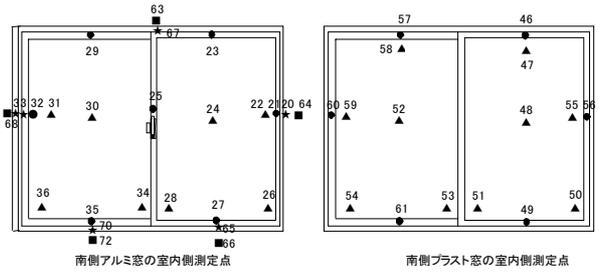
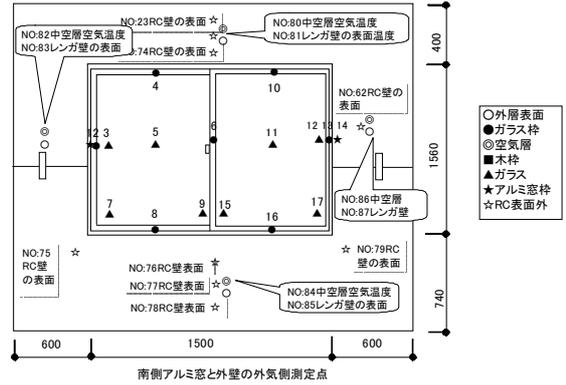


図-4 実験窓と外壁の温度測定位置

表-2 窓面への結露状況と基準

判定	表面	露点	Δt	アルミ窓ツ中空層側全面	状況写真	状況写真
×	右側縦中央	-5.4	8.7	-14.1		
	右側下横中央	-6.9	4.2	-11.1		
	左側縦中央	-3.7	8.7	-12.4		
	左側下横中央	-4.2	4.2	-8.4		
	右ガラス面中央	5.3	8.7	-3.4		
	右窓ガラス下右側	-2.1	4.2	-6.3		
	左ガラス面中央	4.7	8.7	-4		
	左窓ガラス下左側	-4.6	4.2	-8.8		
	サッシ面右下中央	-6.2	4.2	-10.4		
中央柱縦中央	10.4	8.7	1.7			
サッシ面左下中央	-7	4.2	-11.2			
右側縦中央	-5.6	-3.7	-1.9			
右側下横中央	-6.5	-6.6	0.1			
左側縦中央	-3.4	-3.7	0.3			
左側下横中央	-3	-6.6	3.6			
右ガラス面中央	-5.5	-3.7	-1.8			
右窓ガラス下右側	-6.9	-6.6	-0.3			
左ガラス面中央	-5.1	-3.7	-1.4			
左窓ガラス下左側	-7.4	-6.6	-0.8			
サッシ面右下中央	-8.2	-6.6	-1.6			
中央柱縦中央	-2.6	-3.7	1.1			
サッシ面左下中央	-8.6	-6.6	-2			
右側縦中央	3.1	-3.2	6.3			
右側下横中央	3.4	-5	8.4			
左側縦中央	6.1	-3.2	9.3			
左側下横中央	5.1	-5	10.1			
右ガラス面中央	-4.1	-3.2	-0.9			
右窓ガラス下右側	-4.2	-5	0.8			
左ガラス面中央	-4.1	-3.2	-0.9			
左窓ガラス下左側	-4.2	-5	0.8			
サッシ面右下中央	-3.4	-5	1.6			
中央柱縦中央	-0.8	-3.2	2.4			
サッシ面左下中央	-3.9	-5	1.1			

- ③サッシの取り付け位置：外断熱で外窓を躯体上部に取り付け・外装材部分に張り出して取り付け
- ④サッシ取り付けの周辺断熱補強：あり（ウレタン充填）・なし（モルタル充填）
- ⑤窓付加物：断熱ブラインドを室内側に設置・断熱ブラインドを二重窓の間に設置
- ⑥外部風速：風を当てた場合・当てない場合

(2) 環境条件

屋外、および室内の環境条件はより現実的な設定とするために既存の病院で実際のデータを採取し参考とするこ

とにした。図-2は千歳市に建っている病院（今回対象とした外断熱病院の関連病院）において代表的な病室の温度と湿度および外気温度を計測したものである。外気は-18℃程度まで下がり、最高気温も0℃を下回る真冬日が連続している。病室の温度は22℃から25℃で昼夜を問わず暖房されていることが分かる。湿度は20%から30%で推移しているが、時折上昇することもある。これらの測定から実験における室内側の環境条件を、温度25℃、湿度40%、外気側を-15℃、湿度は成り行きとすることにした。

表-3 測定結果（風のない場合）

実験No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
実験パターン風なし		内断熱				外断熱		アルミサッシ設置箇所						断熱PVCサッシ設置箇所	
		一重窓		二重窓		コンクリート壁			外層壁			コンクリート壁	外層壁		
		M	U	M	U	U	M	M	MB	MTB	U	UB	UIB		
実験日		3/5	3/19	3/7	3/18	3/24	3/28	5/7	5/11	5/13	5/7	5/11	5/13	5/28	5/28
時刻		19:00	9:00	4:00	5:00	13:00	11:00	10:00	14:00	7:00	10:00	14:00	7:00	16:00	16:00
外気	屋外空気温度	-14.4	-14.3	-14.8	-16	-15.6	-15.9	-15.8	-15.6	-15.3	-15.7	-15.4	-15.1	-15.6	-15.6
室内側温湿度	中央温度	24.7	24.4	25	25.1	25.3	24.8	25.1	25.2	25.2	25.1	25.2	25.2	24.9	24.9
	中央湿度	39.8	40	43.9	40.1	42.3	38	41.5	40.8	40.6	41.5	40.8	40.6	40.4	40.4
	露点温度	10.1	10.0	11.9	10.6	11.6	9.5	11.1	11.0	10.9	11.1	11.0	10.9	10.5	10.5
	窓側300mm温度	23.2	23.1	25.1	24.6	25.8	25.3	24.7	25.1	25	25.6	26.6	25.7	24.4	26.7
	窓側300mm湿度	41.4	39.2	40.3	38.1	37.4	33.7	39.7	38.2	38.2	36	36.3	38.7	39.5	35.4
中空層温湿度	露点温度	9.4	8.5	10.7	9.4	10.2	8.2	10.1	9.9	9.8	9.5	10.5	10.6	9.8	10.2
	窓の間上温度	—	15.9	—	2.4	4.2	5.1	4.4	3	5.2	0.9	1	1.3	23.3	24.6
	窓の間上湿度	—	60.6	—	65.1	67.9	68.8	55.9	59.3	64.5	62.3	61.2	63.2	41.1	38.1
	露点温度	—	8.3	—	-3.5	-1.2	-0.1	-3.6	-4.1	-0.9	-5.5	-5.6	-4.9	9.4	9.4
	窓の間中温度	—	13	-1.1	0.2	1.2	1.5	0.7	-1.3	-0.7	-1.6	-2.3	-2.3	23.3	24.9
	窓の間中湿度	—	74.9	75.4	74.9	75	75	74	73.8	88.6	67.3	68.6	74.9	44.7	36.7
	露点温度	—	8.7	-4.9	-3.7	-2.7	-2.4	-3.4	-5.3	-2.3	-6.8	-7.3	-6.1	10.6	9.1
	内と外窓の間下温度	—	8.2	—	-3.7	-1.8	-0.3	-1.7	-2.8	-3.4	-4.5	-5.5	-7.2	21.5	25.2
	内と外窓の間下湿度	—	75.8	—	80.2	79.2	75.9	72.3	65.6	79.8	78.3	81	92.8	45.5	35.3
	露点温度	—	4.2	—	-6.6	-4.9	-4.0	-6.0	-8.3	-6.4	-7.7	-8.2	-8.2	9.3	8.8
外窓枠	右側縦中央	-7.3	-5.4	-8.5	-5.6	2.5	3.3	3	3	2.6	-8.8	-8.7	-8.9	18.3	10.9
	右側下横中央	—	-6.9	—	-6.5	-0.4	3.5	1.3	1	0.6	-10.3	-10.3	-11.4	10.2	8.1
	左側縦中央	-4.7	-3.7	-6.5	-3.4	5.2	6.6	1.2	0.4	0.4	-6.4	-6.3	-6.3	14.5	13
	左側下横中央	—	-4.2	—	-3	2.2	5.4	3.3	3.4	2.3	-8.3	-8.5	-9.8		
窓ガラス表	右ガラス面中央	0.8	5.3	-5.4	-5.5	-4.1	-4.2	-3.9	-5.5	-5.2	-6.5	-6.9	-7.3	16.9	18.7
	右窓ガラス下右側	-5.6	-2.1	-8.4	-6.9	-4.7	-3.7	-5	-5.9	-6.6	-9.3	-9.7	-10.9	12.3	14.3
	左ガラス面中央	-0.1	4.7	-5.3	-5.1	-3.9	-3.6	-4	-5.5	-5	-6.1	-6.5	-6.9	17	19.1
	左窓ガラス下左側	-4.5	-4.6	-8.7	-7.4	-5	-3.9	-4	-5	-5.3	-8.4	-8.2	-10	13.9	14.5
外窓枠サッシ	サッシ面右下中央	-7.4	-6.2	-9.8	-8.2	-4.8	-1.3	-4.2	-2.3	-4.7	-10.1	-10.4	-11.5	10.2	10.8
	中央柱縦中央	7.3	10.4	-3.4	-2.6	-1.1	-0.8	-1.5	-3.2	-2.7	-3.8	-4.3	-4.5	18.6	20.6
	サッシ面左下中央	-6.6	-7	-9.9	-8.6	-5.4	-3.6	-4.5	-4.9	-4.7	-10	-10.2	-11.2	17.1	17.2
内窓	右ガラス面中央	—	—	17.6	20.4	21	19.4	17.1	12.1	20.4	18	16.5	20.1		
	左ガラス面中央	—	—	18.1	20.3	20.1	20.5	17.1	12.4	20.6	18.9	16.3	20.1		
	プラスチック面右下中央	—	—	15.1	22.7	19.5	21	15.2	8.7	18.8	15.8	9.2	18.5		
	プラスチック面左下中央	—	—	—	17.5	17.2	18.8	15.1	8.7	17.8	14.8	9.7	20.7		
外壁	RC壁の表面温度室内側	-10.4	-7.8	-7.1	-1.6	17	19	15.3	16.7	15.8	18.3	21	19.9	20.7	20.9
	窓下モルタル中温度	-7.8	-4.3	-9.1	-2.8	10.2	16.9	11.2	12.4	11	—	—	—		
	窓下アンカー表面温度	-6	-5.5	-8.2	-2.2	14.9	18	11.9	13.3	11.9	-13.1	-12.5	-12.7	9.3	-5.1
結露判定		×	×	△	△	○	○	○	○	○	△	△	△	○	○

注 - M, モルタル充填 U, ウレタン充填

(3) 実験箱

図-3 は実験箱を示している。木造で縦・横・高さとも 2.7 m の立方体で作られている。この両側面に所定の断熱仕様と窓を組み込んだ鉄筋コンクリート板 (厚さ 100mm) をプレキャストで製作しこれを接合し実験壁としている。箱内は、窓下に設置した温水パネルヒーターと補助電気ヒーター及び加湿装置により温度は 25℃±1℃、湿度は 40%±3% に制御している。

外部環境となるシミュレータ室は自動で -15℃±2℃ に制御されている。また造風機を設置し、壁面部分で平均風速

3m/s になるよう調節し、風の影響も見ることとした。実験開始からデータを取るまで時間は 8 時間程度としている。

表面温度は図-3 に示す位置で熱電対を用い計測し、空気温度湿度の計測はおんどとりで行った。

5. 結露状況の把握

表-2 はこの実験によって生じる結露あるいは結霜の程度の判断基準を示している。窓の各部に厚い氷が堆積する状況のものを×、窓とサッシ枠の全体に薄い氷が付くもの

表-4 測定結果 (風のある場合)

実験No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
実験パターン風あり		内断熱				外断熱		アルミサッシ設置箇所							
		一重窓		二重窓		コンクリート壁			外層壁			コンクリート壁	外層壁		
		M	U	M	U	U	M	M	MB	MIB	U	UB	UIB		
実験日		3/5	3/19	3/7	3/18	3/24	3/28	5/6	5/10	5/12	5/6	5/10	5/12	5/28	5/28
時刻		20:00	11:00	14:00	13:00	17:00	16:00	23:00	11:00	20:00	23:00	11:00	20:00	20:00	20:00
外気	屋外空気温度	-14.2	-15.5	-14.9	-14.1	-14.5	-14.4	-14.3	-14.5	-14.3	-14	-14.2	-14.2	-15.1	-15.1
	中央湿度	25.1	23.8	25	24.2	24.5	25.4	25	24.9	24.1	25	24.9	24.1	24.9	24.9
室内側温湿度	中央湿度	40.1	35	40.6	42.3	42.2	38.9	40.4	39.8	32.9	40.4	39.8	32.9	39.7	39.4
	露点温度	10.6	7.5	10.7	10.6	10.8	10.4	10.6	10.3	6.8	10.6	10.3	6.8	10.3	10.2
	窓側300mm温度	23.7	22.3	25.1	23.9	25.2	25.6	24.6	24.4	23.9	25.7	26	24.9	24.4	24.8
	窓側300mm湿度	41.5	35.8	36.0	41.6	36.9	35.4	38.3	39	31.2	30	36.5	30.3	37.8	38.6
	露点温度	9.9	6.5	9	10.1	9.5	9.2	9.5	9.6	5.9	6.9	10.0	6.3	9.1	9.8
	中空層温湿度	窓の間上温度	—	6.6	—	-5.4	-0.8	-2.5	3.9	2.3	3.3	-3.8	-3.7	-3.8	23
窓の間上湿度		—	63	—	48.5	46.9	49	65.3	69	62.8	34.2	36	41.2	40.4	40.1
露点温度		—	0.1	—	-14	-11	-12	-2.0	-2.8	-3.1	-17.2	-16.5	-15.0	8.9	9.1
窓の間中温度		—	12.5	-4.3	-6.6	-4.4	-4.5	-0.2	-2.4	-2.7	-5.6	-5.7	-6.3	23.1	22.7
窓の間中湿度		—	69.4	59.4	54.6	54.7	56.3	75.7	77.9	87.6	36.8	39.9	50.2	43.9	41.1
露点温度		—	7.1	-11	-14	-12	-12	-3.9	-5.7	-4.5	-18.0	-17.1	-14.9	10.2	8.8
内と外窓の間下温度		—	7.5	—	-9.9	-7.9	-7.1	-2.3	-3.6	-5.3	-8.1	-8.8	-10.1	21.5	22
内と外窓の間下湿度		—	70.2	—	58.6	59.4	55	73.4	68.8	77.9	41.1	48.3	84.9	44.5	42.1
露点温度	—	2.4	—	-16	-14	-15	-6.4	-8.5	-8.5	-18.9	-17.7	-12.1	8.9	8.6	
外窓枠	右側縦中央	-7.4	-5.4	-10.7	-11.5	-2.1	-2.7	2	1.9	1.4	-12.7	-12.6	-12.6	17.1	1.4
	右側下横中央	—	-6.4	—	-12.1	-5.7	-2.5	0.3	-0.1	-1.2	-13.2	-13.4	-13.6	10.1	0.4
	左側縦中央	-4.8	-4.3	-10.1	-10.5	0.7	0.6	4.6	4.5	3.9	-11.2	-11.3	-11.1	13.1	7.1
	左側下横中央	—	-4.1	—	-11.1	-2.2	1.4	3	3.5	1.4	-11.8	-12.3	-12.6		
窓ガラス表	右ガラス面中央	1.1	5.3	-9.6	-11.3	-9.9	-9.9	-5.4	-7.1	-7.4	-10.8	-10.9	-11.5	15.4	14.4
	右窓ガラス下右側	-5.7	-2.3	-11.6	-12.7	-10.6	-10.6	-4.9	-5.8	-7.2	-12.3	-12.5	-13.3	10.6	11
	左ガラス面中央	0.1	4.4	-9.8	-11.2	-9.4	-9.3	-4.3	-6.3	-6.7	-10.8	-10.8	-11.4	15.1	14.8
	左窓ガラス下左側	-4.6	-5.1	-12.6	-12.7	-9.9	-9.6	-4.9	-6	-6.8	-12.3	-11.6	-13	12.2	9.6
外窓サッシ	サッシ面右下中央	-7.5	-6.3	-12.7	-13.5	-10.8	-7.4	-5.9	-3.9	-7.3	-13.1	-13.3	-13.7	9	6.2
	中央柱縦中央	7.6	105	-6.9	-9.2	-7.2	-7.3	-2.6	-4.5	-4.8	-7.7	-7.9	-8.6	17.1	15.7
	サッシ面左下中央	-6.8	-6.3	-13.4	-13.3	-10	-9.2	-5	-5.5	-5.6	-11.8	-12.3	-12.6	15.7	12.1
内窓	右ガラス面中央	—	—	17.6	16.3	18.9	18.8	16.7	12.1	18.2	16.8	15.9	17.2		
	左ガラス面中央	—	—	17.2	15.5	18.2	19.4	16.9	12.4	18.4	16.4	15.2	17.1		
	ブラスト面右下中央	—	—	14.9	12.8	21.1	19.4	14.9	7.8	16.5	13.4	6.3	15.6		
	ブラスト面左下中央	—	—	—	11.2	15.1	16.9	15.1	8.2	15.8	12.2	4.4	17.7		
外壁	RC壁の表面温度室内側	-10.4	-5.2	-8.7	-7.4	17.3	19.8	16.4	19.3	16.7	16.8	19.8	18.1	20	19.8
	窓下モルタル中温度	-8.2	-8.2	-10.3	-8.7	9.2	15.6	11.3	13.5	10.2	—	—	—		
	窓下アンカー表面温度	-6.2	-9.1	-9.1	-8.4	14	16.5	11.9	14.3	11	-14.6	-14.6	-14.4	8.9	-11
結露判定		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注 - M, モルタル充填 U, ウレタン充填

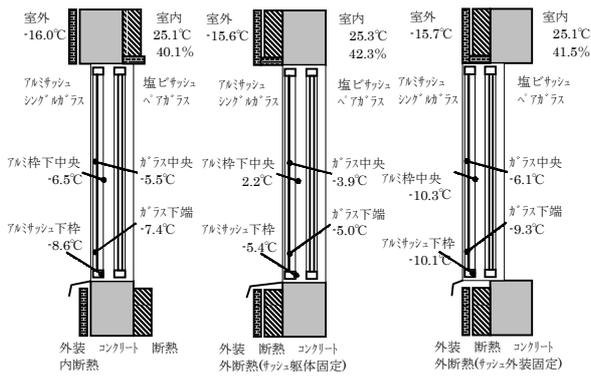


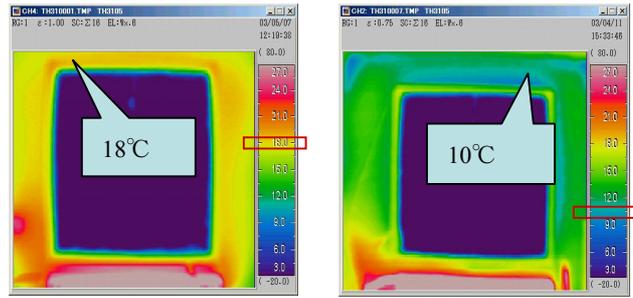
図-5 窓の取り付け位置による表面温度の違い (実験 No. 4, 5, 10)

を△、局所的に薄い氷が付くものを○と評価することとした。×の状態では測定点すべての表面温度が近傍空気の露点温度を下回り、氷により窓の開閉などにも支障をきたす状態となることが考えられる。○の状態では一部を除いて表面温度が露点温度を上回っており、実害は生じないと考えられる。

6. 測定結果と結露防止性能

(1) 窓の取り付け位置による違い

図-5 は内断熱に取り付けた二重窓と、外断熱で外窓のアルミサッシの取り付け位置が異なる二重窓の温度測定結果を比較したものである(実験 No.4,5,10)。表-3 の各実験(風のない場合)の主要な測定結果と合わせて比較してみる。それぞれのケースの室内と室外の条件はほぼ同一になっている。何れの窓の場合でも測定位置によってかなりの温度差が生じており、二重窓の中空層内においても、上部の温度が高く、下部が低くなっている。露点温度は上部が高く、下部が低くなり下部の空気が乾燥した状態であることが分かる。中空層の上部、中央部、下部の平均温度は外断熱でサッシをコンクリート躯体部分に取り付けた No.5 が一番高く 1.2°C、次に内断熱の No.4 が-0.4°C、外装材に外窓が取り付けいた No.10 が-1.7°Cと一番低くなっている。また、露点温度も上記の順序になっている。外窓のガラスおよびアルミサッシ枠の中空層側の表面温度は下部で中空層の露点温度を下回り、中央部ではほぼ露点温度程度あり、結露(霜)が下部を主体に発生していくことが温度測定からも分かる。一方、大きく異なるのが外窓の取り付け枠の温度で No.5 が 2.4°C、No.4 が-4.6°C、No.10 が-8°Cとなり、枠を取り付ける位置の影響がはっきりと現れた。外断熱のサッシをコンクリート躯体部分に取り付けた場合には、枠部分への結露が全く見られないが、内断熱や外装材取り付けの窓枠では結露が発生する。



窓周りをウレタン充填した場合

窓周りをモルタル充填した場合

図-6 外壁窓周りの充填方法の違いによる表面温度測定 (実験 No. 5, 6)

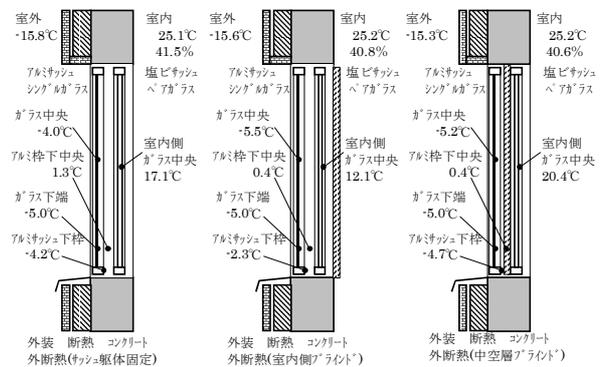


図-7 断熱ブラインドの取り付け位置による表面温度の違い (実験 No. 7, 8, 9)

表-5 風の有無による二重窓の中空層の換気量と温度・結露の違い

風 あり			風 なし		
外気側	中空層	室内側	外気側	中空層	室内側
3.500 m ³ /h		0.023 m ³ /h	-0.0 m ³ /h		1.484 m ³ /h
測定場所	温度/湿度/露点	測定場所	温度/湿度/露点		
屋外温度	-14.4	屋外温度	-15.9		
室内温度	25.4 / 38.9 / 10.4	室内温度	24.8 / 38 / 9.5		
中空層中部	-4.5 / 56.3 / -11.8	中空層中部	1.5 / 75.0 / 7.2		
ガラス表面	-9.9	ガラス表面	-4.2		
ガラスサッシ枠	-7.4	ガラスサッシ枠	-1.3		
窓アルミ枠	-2.5	窓アルミ枠	3.5		

また、内窓のペアガラス表面温度は上記の順序となるが、窓枠の温度は内断熱が若干高くなっている。No.10 ではNo.5 に比べてガラス中央面温度で3℃低くなり、開口部として大きな熱損失の差が生じている。

(2) 窓周りの断熱補強による違い

図-6 は外断熱において内窓枠周辺の断熱補強の違いを赤外線カメラで測定したものである(実験 No.5,6)。モルタル充填で断熱補強が行われない No.6 では窓周辺の壁の温度が10℃程度まで低下し、壁面に結露を発生させることがあり(室内露点温度10℃)、No.5のようにウレタンの断熱補強を行う必要がある。一方、この断熱補強によって二重窓の中空層温度や外窓枠の表面温度がさらに上昇するが、室内壁が結露する危険性の方が問題であると判断した。

(3) 断熱ブラインドの設置位置

図-7 は断熱ブラインドの取り付けによる影響を示している(実験 No.7,8,9)。このブラインドは普通のブラインドのスラット(板)の代わりに不織布が水平方向に二重の空気層を形成し断熱性能を高め、さらに左右にもガイドレールが設置され、ある程度の気密性能を発揮するようになっている製品である。

二重窓の室内側にブラインドを設置した No.8 は実験箱内部に面した内窓のガラス表面と樹脂製のサッシ枠の温度が5℃以上低下し、結露が発生することが確認された。

二重窓の中空層にブラインドを設置する No.9 は断熱ブラインドを設置しない No.7 に比べて室内側のガラス表面温度が3℃程上昇し断熱性能が向上したことが分かる。当然、内窓への結露は起こらない。外窓の温度は断熱ブラインドを設置した No.8 も No.9 も同程度で、No.7 に比べ1℃以上の差がある。二重窓の中空層の温度は断熱ブラインドの設置で下部および中間部で低くなるが、No.9 では上部の温度が高くなり、温度勾配が大きくなっていることが分かる。相対湿度は高くなり、上下の露点温度の勾配も大きくなっている。外窓への結露はNo.7 と No.8 では同程度であるが、No.9 では窓の中間部より上部で発生しやすくなっている。

(4) 風の影響

表-5 は造風機によって風を正面から当てた場合と当てない場合の二重窓中空層の換気性状をトレーサーガス(SF6)による一定発生法と濃度減衰法によって測定した結果を示している。風を当てた場合には3.5m³/hの外気が室内に侵入し、無風の場合には室内側から中空層に1.5m³/hの空気が流れ込むことが分かった。これは実験箱での窓の取り付け位置が中性帯より高い位置にある影響であると考えられる。外部から風が浸入する風の状態では、二重窓中空層の温度と湿度が下がり結露が発生しにくくなる、あるいは結露を解消させる状態となり、室内空気が流れ込む時には外窓へ結露しやすい状態となることが分かった。

表-6 窓の結露状態の観察結果

No	実験パターン		実験結果と考察	結露判定	
				風なし	風あり
1	内断熱	M	内断熱外壁の二重窓・窓周りはモルタル充填。室温の設定条件(25℃、湿度40%)になる前から、窓全体が数分で曇り始め、水滴が生じた。その水滴はガラス面を流れて、下のアルミ枠に溜まって凍り始めていった。約一時間後にはアルミ枠から水滴があふれて、外枠には氷柱が発生した。サッシまわりにも結露が生じた。	×	×
2		U	内断熱外壁の二重窓・窓周りはウレタン充填。1の場合とほとんど同様で、窓全体が数分で曇り始め、水滴が生じた。その水滴はガラス面を流れて、下のアルミ枠に溜まって凍り始めていった。約一時間後にはアルミ枠から水滴があふれて、外枠には氷柱が発生した。サッシまわりにも結露が生じた。	×	×
3	二重窓	M	内断熱外壁の二重窓・窓周りはモルタル充填。設定条件になる前から、窓ガラスは曇り始めて、一時間も経たないうちに、次第にガラス面に結露が生じていき、次第に厚みを増していった。また窓サッシまわりも、薄くところどころ結露が発生していた。	○	○
4		U	内断熱二重窓・窓周りはウレタン充填。3の場合とほとんど同様であった。	○	○
5	外断熱	U	外断熱二重窓・窓周りはウレタン充填。ガラス面は曇り、薄い結露が生じた。サッシまわりには、左窓の右窓との重ね合わせ窓枠以外に結露は見られなかった。また時間が長くなると、次第にガラス面の結露は厚くなっていった。	○	○
6		M	外断熱外壁の二重窓・窓周りはモルタル充填。測定開始から5時間、間欠的に風を窓に当てた。風が止まると窓ガラスは曇り始めるが、風を当てると、曇りは消失した。窓サッシにはまったく結露は見られなかった。風を当てない場合は、5と同様であったが、結露したあとに連続的に風を当てると、若干結露の減少が見られた。	○	○
7	コンクリート躯体取付け	M	南側外断熱外壁の向かい合わせの二重窓。北側の窓に風が当たった場合は南側の窓が結露し、風の当たった窓は結露はしていない。風を停止すると、両側とも窓は結露した。前窓のアルミサッシ周りは、結露はほとんど見られなかった。	○	○
8		MB	外断熱外壁の向かい合わせの二重窓、室内側にブラインドあり。ガラス面は7とほとんど同じであるが、室内側のプラスチック窓のガラス・ガラス枠に結露が発生していた。	○	○
9		MIB	南側外断熱外壁の向かい合わせの二重窓。中空層内にブラインドあり。7と同様の結果であった。	○	○
10	外装材取付け	U	北側外断熱外壁の向かい合わせの二重窓。風が当たったときは結露はしていなかったが、風が停止したときアルミサッシ・アルミ枠とも結露した。窓枠の上部から漏れた水蒸気が、外の通気層の部分で結露して結露し、外気温が高くなったときに再び解けて、水滴となって中空層に流れ落ちてきた。	△	○
11		UB	北側外断熱外壁の向かい合わせの二重窓。室内側にブラインドあり。ガラス面は10とほとんど同じであるが、室内側のプラスチック窓のガラス・ガラス枠・窓枠の下部に結露が発生していた。	△	○
12	UIB	北側外断熱外壁の向かい合わせの二重窓、中空層側にブラインドあり。10と同様の結果であった。	△	○	
13	断熱サッシ	南側	向かい合わせのLow-eペアガラス南側窓の下部2センチ程度の帯状に結露が見られた。	○	○
14		北側	向かい合わせのLow-eペアガラス北側窓の下部2センチ程度とそこに接触しているプラスチック部分、および接触している木枠にも結露が見られていた。	○	○

表-4には風を当てた場合の測定結果を示す。すべての場合において中空層や窓面の温度と露点温度が低下する。結露現象も解消するが、室内側の窓面温度も低下し、隙間からの換気に加えて貫流による熱損失も大きくなっていることが分かった。

(5) 断熱高性能窓

最後に表-3および表-4で防火と断熱性能を持ったPVCサッシに断熱性能の高いLow-eペアガラスを取り付けた窓(一重窓)の結果(実験No.13,14)に注目する。窓の室内側表面の温度は二重窓の内窓での測定温度を下回っており、ガラスやサッシ枠の下部で温度低下が大きい。また外装材上部に取り付けたNo.14の窓枠では風が当たった場合には0℃近くまで温度が低下する箇所がある。したがって結露も局所的に観測された。高性能断熱窓の性能は単体では優れているが、適切に設置された二重窓より劣る結果となった。

(6) 結露判定

表-6は各実験の結果を観察記録と結露判定の結果でまとめたものである。二重窓では外窓の結露判定はサッシが外装材に取り付けられた実験No.10,11,12で外部の風がない状態で△の判定をした以外は○の判定がされる結果となった。

7. 実験結果のまとめ

外断熱工法の開口部に、アルミサッシのシングルガラスの外窓、PVCサッシのペアガラスの内窓で構成される二重窓について、その結露状況を実大実験で検討した。窓の取り付け位置、枠周りの断熱補強、風の影響、断熱ブラインドの設置、高性能窓との比較が主な実験要素である。その結果、以下のことが判明した。

- ①外断熱工法のコンクリート上部の位置に外窓のアルミサッシを取り付けた場合、アルミ枠面の温度が上昇し、内断熱の場合に比べて、外窓の結露が大幅に改善する。
- ②外断熱工法において外窓のアルミサッシを外装面位置に張り出して取り付けられた場合には外窓の温度が低下し、結露は内断熱と同程度になる。
- ③外断熱工法において、室内側のサッシ枠周りの充填をモルタルで行うと、外窓サッシへの結露はさらに改善される。しかし、室内側の窓周りの外壁温度が大きく低下するためウレタン充填により断熱補強をすることが望ましい。
- ④風や温度差によって生じる圧力のため、窓の温度や漏

気は影響を受ける。二重窓中空層の結露も室内側から空気が浸入するときに促進され、外気が浸入すると解消される傾向がある。

- ⑤断熱ブラインドを二重窓の中空層に設置すると、外窓の結露は、ブラインドがない場合や室内側に設置した場合と大差なく、内窓での結露は全く発生せず断熱効果が得られる。
- ⑥低放射ペアガラス入りのPVCサッシを一重で使用した窓は、二重窓よりも熱損失で劣り室内側に局所的に結露も発生する。

以上の結果を参考にして図-1,2で示した外断熱の病院に二重窓が施工された。

8. おわりに

北海道などで伝統的に多用されてきた引き違い窓は、夏季の通風や故障時の保守の容易さ、開閉のし易さなどの利点がある。外断熱の場合には温まったコンクリート躯体に外窓を取り付けることで、アルミ部分の温度低下を緩和し結露防止に大きな効果があり二重窓と外断熱は相性が良いことが分かった。また二重窓では中空層に断熱ブラインドを挿入するなどの手法の可能性があることを示した。

将来は防火性能を備えた断熱サッシの性能も向上し、コストも低下して、従来型の二重窓は減っていくかもしれないが、最近の事務所建築で採用が増えてきているダブルスキャンウインドウのように、さらにその特性を生かした展開の可能性を考えたい。

謝辞：この研究に当たっては、北海道北方建築総合研究所の福島明氏(当時)と鈴木大隆氏に全面的なご指導と施設利用への多大なご配慮などをいただきました。また実験の準備を外断熱システム開発事業共同組合の花香氏に全面的にお願いし、断熱作業や窓資材や取り付けに関してはメーカーの方々にご協力をいただきました。最後にすべての実験・観察・記録・まとめを行って下さったサデギアンモハammadタギ氏には大変なご苦労をおかけいたしました。誌面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大島新人,鈴木憲三:窓ガラスの結露防止に関する研究,日本建築学会大会梗概集,環境工学D-2, pp287, 1998
- 2) 寺山哲夫,坂本雄三,永田明寛,嶋理恵子:事務所建築における開口部複層化の効用に関する研究 その1,窓ガラス面の結露防止効果について,環境工学 D-2, pp267, 1997
- 3) 山本正顕,秋津康孝,市毛圭二:集合住宅の開口部周りの結露性状確認試験,日本建築学会大会梗概集,環境工学D-2, pp477, 2004