熱交換換気システムを用いた集合住宅の結露防止方法に
関する研究CONDENSATION FREE MULTIPLE DWELLING USING
VENTILATION SYSTEM WITH HEAT EXCHANGER

福島 明*, 入江雄司**

Akira FUKUSHIMA and Yuji IRIE

Concrete multiple dwelling seldom have serious condensation problem, because of lack of ventilation, partial heating system and inside thermal insulation. Condensation free method by using ventilation system with heat exchanger is presented in this paper. Experimental study on this system installed in the house suffered by serious condensation problem, shows that the system is successful and possible to avoid extreme dryness in heating area simultaneously. Minimum ventilation demand to avoid condensation problem and comparison with exhaust only system are discussed through calculation.

Keywords: condensation, multiple dwelling, ventilation system, heat exchanger

結露、集合住宅、換気システム、熱交換

1. はじめに

R.C.造集合住宅は、構造躯体の気密性が高く窓や玄関扉など開口部の気密性の向上によって、高い気密性を実現している¹⁾。しかし、気密性の向上に伴うべき断熱や換気、暖房の対応が不十分で、結露被害が後を絶たない²⁾。北海道では、戸建て住宅には及ばないものの、外壁や窓の断熱性の向上によって、暖房室内での結露は減少し、外付け押入や暖房のない北側の室などで生じる非暖房室型結露が、主な結露障害となっている。寒冷地では、冬期間外気の絶対湿度が低下するため、外断熱化など断熱性を高め、全室暖房と適切な換気システムを取ることで、結露障害を完全に防止することはそう困難なことではない。しかし、こうした対応を一般的な集合住宅に適用することは経済的に負担が大きく、内断熱で暖房や換気の対応は、従来の部分間欠暖房と壁の換気レジスター等による自然換気によっているのが現状である。また、こうした集合住宅では、結露防止を居住者の住まい方に負う部分が大きく、すでに建設された集合住宅で結露被害を生じた場合、戸建て住宅とは異なり、断熱改修や全室暖房の装備など、建築的な対応は容易でない。断熱や空調設備の急速な普及を期待できない現状では、既存住宅における結露防止対応を含めて、部分暖房を許

容しながら、既存の仕様のままで結露被害を防止する手法が求められている。

集合住宅の結露被害とその対策については、多くの報告がなされており、例えば池田らは、隅角部の結露のメカニズムと吸放湿材の利用による結露障害の防止方法を提案している³⁾。また、土屋は、集合住宅の温湿度の非定常計算から、吸放湿や換気など総合的な結露防止対応について検討している⁴⁾。しかし、いずれも結露を許容しながら障害を回避する手法であり、寒冷な地域では生活状態や温度の管理など僅かな対応の不備により、結露障害を生じるリスクが高い。一方換気は、一般的な結露防止対策の一つであり、寒冷地では壁掛型の熱交換換気扇などが利用されている。しかし、熱交換によっても給気温度の上昇は不十分で快適性を損なうことや、装置騒音が直接室内に発生することなどから、部分的、一時的な対策に限定されているのが実状である。

本研究では、熱交換型換気システムを用いて住宅内の空気の流れを制御することにより、部分暖房の住宅でも完全に結露を防止する手法を提案し、当該システムを設置した既存住宅における実測により、その効果を明らかにした。また、住宅内の換気のシミュレーションにより、空気の流れの制御に必要な換気量の検討、および集中排

* 北海道立寒地住宅都市研究所 工修

** 北海道立寒地住宅都市研究所

Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban Research Institute, M. Eng.

Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban Research Institute

気方式との性状比較を行った。

2. 測定住宅と測定の概要

2.1 測定住宅の詳細

測定した住宅の平面図を図1に示す。札幌市内に建つR.C.造2階建て6戸入り集合住宅の1階西側端部住戸である。1983年建設で、築後2年間に南側居室の西向きの押入内部を始め、北側洋室の壁面全面などに著しい結露とカビ被害が発生した。床面積約84 m²で、居住者は幼児一人を含む3人家族である。断熱は、38 mmの発泡ポリスチレンをコンクリート同時打ち込みで施工しており、隅角部は10 mmの現場発泡ウレタンで断熱補強している。開口部は窓が、外側がペアガラス入りの防音型気密アルミサッシ、内側が単板ガラス入り木建具で、ガラス3層構造である。玄関にも断熱気密玄関ドアを採用しており、換気口、換気設備を塞いで測定した相当隙間面積は、床面積当たりで1.8 cm²/m²であった。暖房は居間のFF式石油ストーブ1台による間欠暖房で、強制換気装置は台所と浴室、便所に設けられている。写真1は収納空間内部のカビ被害状況である。

2.2 換気システム

換気システムの空気の流れの概念を図2に示す。結露被害の顕著な押入内部や非暖房室に給気し、廊下や居室を経由して、水蒸気の発生は最も多いが、暖房されていて結露の恐れが少ない台所・居間空間から排気する。低温空間から暖房空間への空気の流れを作ることによって、

温度の低い空間への水蒸気の移動を妨げ、湿度の上昇を抑えるシステムである。

換気システムを図1中に示す。熱交換換気装置の本体はユーティリティー天井面に吊り、各室への給排気には100 mmφの塩化ビニール管を使用し、室内に露出配管している。水蒸気の排出が目的なので、熱交換換気装置にはM社製のクロスフロー型で顕熱回収タイプの装置を使用しており、装置内部の結露水を排出するためドレーンを設けているほか、ウレタンシートにより本体の防露対策もされている。給気口は南側および西側の和室押入内部と北側洋室に設け、排気は居間の収納空間から行った。

押入内への給気は、熱回収によっても加温の不十分な取り入れ外気を更に室温に近づける効果が期待され、押入内の乾燥化と同時に、外気の導入による居住空間の環境悪化を防ぐ上で大きな効果が期待できる。

2.3 測定の概要

換気装置は、1987年の暖房開始前に設置し、換気装置の運転状況は、実験期間中を除いて弱ノッチで連続運転である。水蒸気発生に関わる居住者の生活に関して、特別な制約は全く行っていない。給気口に約30 cmの円筒を取り付け、中心風速を熱線式微風速計で計測することにより各給気口の給気風量を推定した結果、弱ノッチで南側和室押入、西側和室押入、北側洋室それぞれ約50、25、15 m³/hであった。室内への給気口は風量調節のできないガラリタイプが設置されており、給気量に差を生じているが、実測はこの風量のまま実施した。

図1 測定住宅の平面図(西側端部1F)

写真1 カビ被害状況

図2 熱交換換気システムの概念図

図3 換気装置運転時と停止時の各部温湿度変動

外気温度の最も低下する1月下旬に、換気装置の連続運転を継続しながら1週間測定し、その後換気装置を停止して1週間の測定を実施した。温湿度の測定箇所は図1中に示すとおりである。測定機器には、S社製の電気抵抗式温湿度センサーを使用した。押入内部の隅の測定は、衣類の入った段ボール箱と外壁側壁面の僅かな隙間を利用し、センサーを奥の隅角部床面に置いた。その他の空間の温湿度は全て、床上1.8 mで測定している。

3. 測定結果と考察

3.1 温湿度の日変動

図3は、測定期間中の住宅内各部の温湿度変動を示したものである。換気装置運転時には、外窓のアルミサッシ面に僅かな水滴が見られる他は全く結露は発生していない。換気装置停止後、居間の相対湿度が僅かの時間で上昇し、続いて押入内部の隅をはじめ北側洋室など、非暖房空間の湿度が徐々に上昇する。換気装置停止後3日目にはある程度安定し、相対湿度が90%に達する部分も出現する。結露現象としては、換気装置を停止した翌日には暖房空間の外側アルミサッシの面に、2日後には、北側洋室の3重ガラスの室内側表面に流れ落ちるほどの結露を観測している。また、3日目には、北側洋室の床プラスチック幅木面にも水滴が確認された。前年まで結露被害の大きかった押入内隅角部については、測定完了後に目視で調査したが、結露の被害が発生した様子は見られなかった。ガラス面やプラスチック面など吸湿性のない素材面では湿度の上昇に伴ってすぐに現象となって現れるが、押入内部など吸湿性のある部分では、結露被害の発生までには時間を要することがわかる。

図4 換気装置の運転・停止時の温湿度

3.2 換気装置運転時と停止時の温湿度比較

換気装置の運転期間中と、停止後ある程度湿度が安定した期間それぞれ2日間の温湿度を湿り空気線図上にプロットし、換気装置の運転による影響を検討した。図4は、居間及び北側洋室の温湿度を比較したものである。換気装置の運転時には、居間の絶対湿度は5g/kg前後で一定しており、室温が25℃に達する暖房時間帯には相対

図5 南側和室の温湿度

湿度が25%程度まで低下している。外気の給気側になる北側洋室では、それより1.5g/kg程度低く保たれ、相対湿度も約45%で安定している。これに対して、換気装置停止時（停止4日後）には、絶対湿度が暖房時間帯に高く、暖房停止

時には低い傾向が見られ、むしろ相対湿度が50%前後で安定している。これは、暖房停止時には、窓面での結露などで絶対湿度が低下するためと考えられる。北側洋室は、換気装置運転時に比べて僅かに相対湿度が上昇するが、暖房空間ほど大きな変化ではない。温度については、換気装置の運転による影響はほとんど見られない。

図5は、南側居室と付属する押入内部隅角部の温湿度を、換気装置の運転時と停止時について示したものである。換気装置の停止によって押入内隅角部の相対湿度は、平均66%から87%に上昇し、換気装置運転時には70%を越えないのに対して、換気装置停止後は長時間90%を越える。換気量の増大によって室内の絶対湿度自体が低くなっていることを考慮しても、換気装置の運転による低温部分の結露防止効果は顕著である。温度は、給気量が50 m³/hと多いこともあり、換気装置の運転時の方が2℃程度低く推移する。熱交換により温度が上昇しているとはいえ、室内への直接給気は温度環境に影響するものと考えられる。当該システムは、風量調節によって空間に絶対湿度の差を作りながら、非暖房室の結露と暖房室の過度の乾燥を同時に防ぐことが可能で、こうした特性を生かす上でも非暖房空間の結露防止に必要な給気量を把握し、適切に調整することが必要と考えられる。

4. 換気と湿度性状の定常計算による検討

本研究で提案する結露防止法は、非暖房室から暖房空間への空気の流れを作り、非暖房室への湿気の流れを減少させる手法である。これによって、暖房室の湿度を過度に低下させることなく、非暖房空間の結露を防ぐことができる。換気装置の運転が住宅内の空気の流れと各室の絶対湿度に及ぼす影響を明らかにする事を目的に定常計算を行った。吸放湿を考慮した防露設計には非定常計

表1 各部の通気特性

部位	通気率 m ³ /h・mmAq ^{1/n}	n 値
ふすま（押入、和室）*	52 (㎡当たり)	1.5
ドア（北側室、居間）*	14 (㎡当たり)	1.5
換気口（丸形自然給気口）**	20 (1ヶ所当たり)	1.5
換気口以外の隙間***	216 (全体)	1.5

*土屋⁷⁾、**石原⁸⁾による、***実測値

表2 水蒸気発生量^{9)・10)}

種類	発生量	備考
人体	夫 800 g/day	在宅時間 12 時間 睡眠時間 8 時間
一般時 100g/h	専業主婦 1500	在宅時間 19 時間 睡眠時間 8 時間
就寝時 50	幼児 750	同上×0.5
洗濯 毎日	800	
炊事 朝食	467.8×0.4= 187.1	換気装置の使用により 60%は直接排出
昼食	159.3×0.4= 63.7	
夕食	946.0×0.4= 378.4	
入浴 毎日	1000×0.4= 400	同上
計	4879.2	

算が必要であるが、換気経路の設計によって結露を完全に防止することを目的とする本研究では、定常計算による検討で特性を検討することが可能と考えた。

4.1 計算方法と条件

換気の計算は、各室の風量収支式を圧力仮定の Newton-Raphson 法による近似計算で解くことにより行った。収束計算の補正值に対する緩和係数として 0.6 を用いた⁹⁾。風量収支は物質収支なので重量風量で計算した。計算に用いた通気各部の特性を表1に示す。主要な室内建具および換気口の通気特性は、土屋⁷⁾、石原⁸⁾の値を用い、建物の換気口以外の隙間の通気特性は、減圧法によって求めた実測値である。各通気部位の隙間は、その上下端高さの位置に集中しているものとし、部位全体の通気率を2等分して配置した。換気口以外の隙間は、各室の窓の上下端高さの位置に集中しているものとし、全体の通気率から各室の床面積で按分して求めた各室の通気率を、2等分してそれぞれの高さの位置に配置した。換気装置運転時の排気量は給気量と同一とした。

絶対湿度は、各室で水分収支により計算した。ふすま部位のみ透湿を考慮した。¹¹⁾水蒸気発生量は表2に示すように設定し、1日の発生量 4.8λ を時間平均し、200g/hとした。水蒸気発生モードとして、次の2種類を設定した。

モード1：寝室に使われている南和室および西和室でそれぞれ20g/h、北側洋室とユーティリティーでそれぞれ15g/h、130g/hが居間で発生する。
モード2：就寝時を想定して、主寝室の南側和室で75g/h、西側和室で50g/h、75g/hが居間で発生する。

温度条件は比較的外気条件が安定した1月19、20日の48時間平均値を使用し、外気の相対湿度は90%とした。風量収支式及び水分収支式を注2に示す。

表3 各室の絶対湿度計算結果 (g/kg)

	水蒸気発生 モード	換気装置	
		停止時	運転時
北側洋室 (7.31)	モード1	9.29	2.73
	モード2	6.56	1.83
押入内隅 (6.69)	モード1	11.32	3.01
	モード2	13.52	4.45
南側和室 (12.91)	モード1	11.32	3.71
	モード2	13.52	6.00

(): 各空間の空気温度による飽和絶対湿度(g/kg)

4.2 計算結果と考察

(1)住宅内の空気の流れと絶対湿度

図6は、換気装置運転時と停止時の各部の空気の流れである。換気装置停止時には換気量は全体で約22kg/h、換気回数約0.1回/hである。外部風を考慮に入れていない計算であるが、衛生上の必要換気量を満たしているとはいえない状況である。また、表3は各室内の絶対湿度の計算結果であるが、換気装置停止時には、北側洋室や押入内隅など温度の低い空間ばかりでなく暖房空間でも飽和絶対湿度を上回り、住宅全体が結露条件となる。室

間の空気の流れを見ると交換換気による暖房空間から非暖房空間への空気の流れが見られ、北側洋室で室内の水蒸気発生のないモード2の条件でも絶対湿度が上昇し結露条件に至っている。

換気装置運転時の計算結果は、各給気口から15kg/h供給され、その合計量を居間から排気するとして計算した結果である。この結果、全体換気量は67kg/h、0.3回/hに増大し、3人家族で、平均在宅人数を1.5人とする、ほぼ必要換気量を満たしているといえる。1室当たりの給気量としてはごく僅かであるが、いずれの条件でも低温部分の温度から計算した飽和絶対湿度を下回り、結露の可能性は全くない。寝室の発生量を増加した設定では、寝室内の絶対湿度が上昇し、相対湿度で約45%となっているが、結露の発生には至らない。空気の流れを見ると、非暖房室から暖房室への明確な流れが生じ、暖房室から非暖房室への流れが極端に低下し、意図した空気の流れが生じている。

(2)非暖房室における就寝時の必要給気量

図7は給気量の変化と各空間の絶対湿度である。日中を想定したモード1では、各給気口の給気量を10kg/h、水蒸気の発生を寝室中心にしたモード2でも15kg/hの給気量を確保すると、いずれの空間でも飽和に達することはない。換気装置の換気能力は、弱運転時定格出力41W、88m³/hであるが、ダクト系の抵抗により実質約60m³/h(76kg/h)程度期待できる。このことから、こうした小型の熱交換換気装置により、住宅内に空気の流れを作り、結露をほぼ完全に防止することが可能で、その必要な給気量は、全体で45kg/h程度である。

(3)ユーティリティにおける強制排気方式の比較

住宅内に空気の流れを作る簡便な手法として、ユーティリティの既存排気ファンを利用する方法がある。そこで、本研究で提案する熱交換換気システムによる方法との比較を試みた。全体換気量をパラメータとし、水蒸気発生量をモード2として各室の絶対湿度および相対湿度を計算した結果を図8、9に示す。熱交換換気システムの場合は各給気口に均等に給気するものとした。

図7 給気量の変化による絶対湿度

図8 換気方式による絶対湿度の比較

図9 換気方式による相対湿度の比較

押入隅の絶対湿度が、飽和絶対湿度を下回る時の全体換気量は、熱交換換気システムの約45kg/hに対して、強制排気方式では、80kg/hと大きな差を生じる。また、熱交換換気システムでは、給気量45kg/h、総換気量67kg/h程度の換気量で、押入隅の相対湿度は60%以下に低下する。これに対して、強制排気方式では、室内と同じ絶対湿度になるため、総換気量を120kg/hにしても、押入隅の相対湿度は80%程度にしかならない。熱交換換気方式では、押入内給気によって、押入内部が居室より絶対湿度が低く保たれ、押入内隅の相対湿度が60%でも、居室の相対湿度は40%を維持できる。強制排気方式で押入内隅の相対湿度を同様に低湿に維持するには、さらに多くの換気が必要とし、室内の低湿化が避けられない。いくら換気量を増しても、乾燥感から加湿を行えば、結露の危険性は容易に高まることになる。こうした各空間の湿度管理の点からも、本研究で提案した方式の利点は少なくない。

5. まとめ

気密性に優れた部分暖房の集合住宅を対象に、熱交換換気システムによる結露防止方法を提案し、実測とシミュレーションにより、その効果と特性を明らかにした。

(1)既存住宅の実測から

結露とカビの被害を発生した既存の集合住宅で、当該システムを設置したことにより結露障害は完全に解消し、結露防止に大きな効果を得た。換気装置の運転時と停止時の、室内各部の温湿度環境を測定した結果、換気装置の停止によって、短時間に相対湿度が上昇し、2、3日で各部に結露を生じた。また、結露被害の著しかった押入の隅では表面結露は確認できなかったが、相対湿度が70%から90%に上昇し、著しい高湿化が観測された。

(2)換気と湿度のシミュレーションから

換気経路と結露の防止に必要な給気量の検討を目的に換気と湿度に関する定常計算を行った結果、45kg/h程度の給気量で、住宅内に有効な空気の流れを生じさせ、結露を完全に防ぐことが可能なことが明らかとなった。また、ユーティリティのファンを利用した強制排気システムとの比較した結果、強制排気システムでは、同じ効果を得るために2倍程度の換気量が必要なこと、このことによって、居室の相対湿度が低下することが明らかになった。

寒冷地では、換気自体が寒さの原因となり、積極的な換気がおろそかになりがちである。気密化の普及と共に被害の様相が変化し、カビやダニによる健康被害が心配される中で、室内の温度環境を損なうことなく、基本的な換気量を確保できることから、熱交換換気システムによる換気は、集合住宅の環境改善に大きな効果が期待できると考えられる。

謝辞：熱交換換気方式の利用に関して、北海道大学荒谷教授から、貴重な助言を頂きました。記して感謝します。

参考文献

- 1) 村上周三, 矢作和久, 長谷川攻, 大山信一: 集合住宅の気密性能と換気設備の実測調査(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984. 10.
- 2) 澤田紘次: 積雪寒冷地における住宅の結露被害の実態—集合住宅における実態調査の結果から—, 日本建築学会熱環境委員会, 第21回熱シンポジウム, pp169~177, 1991. 8.
- 3) 池田哲郎: 結露のある場合の室内温湿度変動(一戸建て住宅における結露性状と吸放湿材貼付効果), 日本建築学会熱環境委員会, 第21回熱シンポジウム, pp85~94, 1991. 8.
- 4) 土屋喬雄: 住宅の結露防止性能評価法(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp743~744, 1981. 10.
- 5) 土屋喬雄: 住宅の結露防止性能評価法(その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp791~792, 1982. 10.
- 6) 石田建一, 宇田川光弘: 換気及び室相互のふく射を考慮した多数室室温・熱負荷計算法, 日本建築学会論文報告集第381号, pp46~55, 1987. 11.
- 7) 土屋喬雄: 住宅の結露防止性能評価法(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp615~616, 1980. 10.
- 8) 建築換気設計, 石原正雄著, 朝倉書店
- 9) 建築設計資料集成1環境, 日本建築学会編, 丸善株式会社
- 10) 最新建築環境工学, 土屋喬雄他著, 井上書院

関連論文

- I) 福島明, 入江雄司, 川治正則: R.C. 集合住宅の換気対策による環境改善効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987. 10.
- II) 福島明, 入江雄司: R.C. 集合住宅における室内の部分環境の実体, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988. 10.

注1

ふすまの湿気貫流率[0.61(g/m²・h・(g/kg))]は、温度20℃、断面構造を2.7mmベニヤ+20mm空気層+2.7mmベニヤとして、参考文献9より算出した。

注2

換気計算に用いた収支式は以下のとおりである。

換気収支式

$$\sum_{j=1}^{N_j} Q_{ij} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{ij} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} (A_{ijk} \times \gamma_j \times \Delta P_{ij}^{1/n}) \dots\dots\dots (2)$$

水分収支式

$$\sum_{j=1}^{N_j} (Q_{ij} + K_{ij}) \times (X_j - X_i) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

記号

- N_j : i室と通気する室数
- M_{ij} : i室とj室の通気部位数
- Q_{ij} : i室からj室への通気量(kg/h)
- A_{ijk} : k番目の部位の通気率(m³/h・mm Aq^{1/n})
- γ_j : j室の空気密度(kg/m³)
- ΔP_{ijk} : k番目の通気部位の両側の圧力差(mm Aq)
- n : 通気特性値(1~2)
- K_{ij} : i室とj室の間の湿気貫流率(g/h・(g/kg))
- X_i, X_j : i室、j室の絶対湿度(g/kg)

(1995年7月6日原稿受理, 1995年11月9日採用決定)