風力による 2 重窓の換気性状と結露防止

建物の風力換気に関する研究 第 2 報

正 会 員 佐 々 木 隆*
正 会 員 林 基 哉**
正 会 員 荒 谷 登***

1. はじめに

冬季におけるこれまでの多層窓中空層の結露防止対策は、完全密封型の複層ガラスを用いるか、あるいは室内側をできる限り気密化した上で、中空層を外気側に開放するという経験的な方法によっていた。室内の湿った空気の流入を少くし外気との換気を増すことにより、中空層の湿度上昇を抑えるのが結露防止の原則であるが、室内側が正圧になるような状況での換気動力は、中空層における煙突効果のみとなり、それを考慮した従来の定常的な換気計算結果では結露防止が著しく困難になったり実状とそぐわない結果しか得られなかった。

この原因の一つには、換気への影響がかなり大きいと思われる風力変動の考慮の欠如が挙げられると考えられる。

本研究の目的は、変動する風圧による建物の自然換気機構を明らかにすることであり、前報¹⁾で中空層の換気性状に関する基礎的検討を行った。本報では通気特性が既知の隙間を設定した 2 重窓中空層における結露防止対策について壁面風圧の実測データ、および正弦波による通気的基本的性質の検討を行い、外気側隙間の開放条件を明らかにした。

2. 壁面風圧変動時の 2 重窓中空層換気性状

前報¹⁾で、板のたわみを考慮した 2 重窓中空層の風圧変動時の換気的基本的性質を把握した。本報では前報で中空層の例として示した 2 重窓中空層の計算モデルと、実際の建物の窓位置で測定した壁面風圧の実データを用いて多層窓中空層の換気性状の検討を行った。

2-1 壁面風圧変動の測定

壁面風圧変動の測定は、図-1(a) に示す建物の 3 階窓部分で図-1(b) に示す方法により行い、1/100 秒ごとに約 3 分間にわたって測定したものを 1 つの収録データとし、全体で 33 例を分析に用いた。

それぞれの壁面風圧変動の収録データの変動の性質を

知るために、風圧の平均値と標準偏差の計算を行った。図-2(a)~(c) は変動波形の例で、表-1 に各収録データの内容を示した。なお、壁面風圧の測定と同時に、建物屋上で、風速、風向も測定した。この点に関しては本報では参考だけにとどめ、詳細な分析は次報以降に譲るが、風向と壁面風圧の平均値の関係が必ずしも一定でなく、例えば同一風向でも平均風圧が正負の値をとっているデータがあるように風速、風向と壁面風圧測定位置の差がそのまま結果に現われており、周辺建物の影響を明らかに受けている様子が分る。

2-2 壁面風圧変動実データによる分析

換気計算は厚さ 3 mm, 1^m×1^m のガラス板を有する中空層の外気側の隙間 (長さ 30 mm, 内径 2 mm の銅パイプ (通気率 $a = 0.05 \text{ [m}^3/\text{hmmAq}^{1/2}]$), 通気特性値 $n =$

図-1(a) 壁面風圧測定位置

図-1(b) 壁面風圧測定方法

* 北海道大学 助手・工博
** 北海道大学 大学院生
*** 北海道大学 教授・工博
(昭和 62 年 1 月 10 日原稿受理)

1.23)) を基準とし、室内側の隙間との通気抵抗比をパラメータとして図-3 に示すモデルを用い (1) 式により隙間内空气の移動距離を求めた後、隙間経路長さの影響を補正し換気量として求めた。すなわち、実データを

図-2 壁面周圧変動測定例

用いた計算では中空層に対する隙間空气の移動距離が隙間経路長さを上回ったとき、その差の積算値を中空層内への有効換気量とした。

$$[M] \left\{ \frac{d^2 x}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dx}{dt} \right\} + [K] \{x\} = \{f\} \dots \dots (1)$$

但し、

表-1 壁面風圧実測データの内容

データ名	壁面風圧変動 の平均値 [N/m ²]	壁面風圧変動 の標準偏差	風速の平均値 [m/s]	風向の 平均
D-1	9.3	15.9	5.0	S
D-2	-0.5	4.3	5.0	S
D-3	-7.2	7.3	5.0	S
D-4	-6.6	4.4	3.0	SSW
D-5	-7.5	6.3	3.0	SSW
D-6	-3.9	5.8	3.0	SSW
D-7	-7.5	6.6	3.0	SSW
D-8	-16.9	7.7	7.0	S
D-9	-15.2	10.1	7.0	S
D-10	1.1	5.5	5.0	S
D-11	13.7	9.4	2.5	E
D-12	-0.1	13.8	5.0	S
D-13	2.7	13.4	5.0	S
D-14	-8.1	5.3	5.0	S
D-15	15.3	9.2	2.5	E
D-16	15.6	14.7	2.5	E
D-17	6.8	9.6	2.5	E
D-18	-2.7	12.7	5.0	S
D-19	-16.3	9.0	5.0	S
D-20	-13.0	6.1	5.0	S
D-21	17.2	6.8	4.0	ESE
D-22	1.1	4.0	4.0	ESE
D-23	0.5	4.1	4.0	ESE
D-24	0.8	4.4	4.0	ESE
D-25	6.6	5.2	4.0	ESE
D-26	-9.0	7.4	4.0	ESE
D-27	-18.4	8.7	4.0	ESE
D-28	-24.9	9.4	5.0	S
D-29	-19.3	10.2	5.0	S
D-30	-11.4	8.7	5.0	S
D-31	-7.8	8.7	5.0	S
D-32	-2.9	8.1	5.0	S
D-33	8.5	6.5	4.0	ESE

図-3 2重窓の概念図とその機械系モデル化

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ & m_2 \\ & & m_3 \\ 0 & & & m_4 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ & c_2 \\ & & c_3 \\ 0 & & & c_4 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \frac{\gamma P_0}{V} \begin{bmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 \delta & -S_1 S_3 & -S_1 S_4 \delta \\ S_1 S_2 & S_2^2 \delta & -S_2 S_3 & -S_2 S_4 \delta \\ -S_1 S_3 & -S_2 S_3 \delta & S_3^2 & S_3 S_4 \delta \\ -S_1 S_4 & -S_2 S_4 \delta & S_3 S_4 & S_4^2 \delta \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 \end{bmatrix}, \{f\} = \begin{bmatrix} S_1(P_i - P_g) \\ S_2(P_i - P_g) \\ -S_3(P_0 - P_g) \\ -S_4(P_0 - P_g) \end{bmatrix}$$

ここに,

m_1, m_3 : 隙間内空気の質量 [kg]

m_2, m_4 : ガラス板一次振動モードの有効質量 [kg]

c_1, c_3 : 隙間通気抵抗 [kg/s]

c_2, c_4 : ガラス板一次振動モードの減衰定数 [kg/s]

δ : ガラス板一次振動モードの最大変位に対する平均変位の割合

γ : 空気の定積比熱と定圧比熱の比

S_1, S_3 : 隙間断面積 [m²]

S_2, S_4 : ガラス板面積 [m²]

P_0, P_i : 外気および室内圧 [N/m²]

x : ガラス板および隙間内空気の変位 [m]

P_g : 中空層内圧 [N/m²]

K_2, K_4 : ガラス板一次振動モードバネ定数 [kg/s²]

圧力変動の入力は、外気側に壁面風圧変動の実測値を用い、室内側に内外温度差により生ずる一定差圧（内部結露に不利な条件として中性帯より上にある窓を想定し、5.0 N/m²の正圧）を与えた。計算に用いた2重窓の諸特性は表-2に示すとおりである。なお、建物において窓以外の部分の気密性が高ければ、室空間容積の方が中空層容積よりもはるかに大きいので、外風圧変動が室内圧に及ぼす影響はきわめて少ないと考え、ここでは室内圧一定とした。

表-2 ガラス板の諸特性

	3mm厚1.0X1.0
弾性定数	41498.9
有効質量	2.80
減衰係数	6.87

収録した33例の壁面風圧変動データを用いて計算した中空層内への外気と室内空気の侵入量の合計値に占める外気侵入量の百分率を中空層内外気成分比と定義し、それぞれのデータ平均値との関係を示したものが図-4である。中空層内の外気成分比は風圧の平均値が増すに従い多くなり、また外気側に対し室内側を気密化（△は●に対し室内側の通気抵抗を12倍にした）することでも増大することが分る。さらに、風圧の平均値による従来の定常計算結果（図中の鎖線）と比較すると、明らかに風圧変動が中空層の換気に影響を与え、変動の平均値が負圧の場合でも中空層内には外気が導入されていることが分る。風圧変動の指標として各収録データ名を同図中に示したが、標準偏差つまり乱れの大きさが大なるデータほど定常計算結果とはかけ離れており、乱れを伴った換気計算には風圧の平均値に加え、風圧変動の大きさの考慮も不可欠であると考えられる。

2-3 風圧変動の標準偏差の中空層換気への影響

風圧変動の大きさが中空層換気に影響を与えていることは、上の風圧変動の測定データを用いた計算でも確認されたが、基本的な性質をより明らかにするためにここでは、0.1 Hzの正弦波を用い振幅と平均値を変化させて、変動の大きさ（標準偏差）と換気関係を同一モデル、同一条件でさらに検討した。

図-5は、その結果を中空層内の外気成分比と標準偏差の関係として示したものである。従来の定常計算（図中鎖線）では温度差圧と変動圧の平均値が等しい点を境にして、中空層内の外気成分は0から100%に急変する

図-4 風圧変動単位データの平均値と窓中空層内外気成分

図-5 中空層内の外気成分割合と標準偏差の関係

図-6 圧力変動周波数と中空層内外気成分の関係

ことになるが、変動を考慮した場合には圧力変動の平均値が増大するにつれ外気成分も除々に増加している。また、乱れの大きさつまり標準偏差が大きいほど外気成分も増加する。この傾向は変動圧の平均が負圧になるとさらに顕著になる。したがって、この結果と先の実測データによる検討結果から壁面の風圧変動が激しいほど中空層内への外気導入量は増加し、建物の風背側に相当する負圧部分に位置する中空層であっても外気の導入は有効に行われることが分る。

図-6は、さらに標準偏差を一定($\sqrt{20}$)とし変動周波数の差による中空層内外気成分の割合の変化を示したものであるが、周波数が低くなるに従い、外気成分は少くなっている。

また、それは変動の平均値が負の方向で増大するにつれても同様な傾向を示している。

したがって、中空層内への外気導入量の割合は、風圧変動の平均値が負の場合で減少する傾向にあるが、変動周波数が高くなると増加し、また変動が大きくなっても増えるという傾向にあることが明らかになった。

3. 風圧変動による中空層の結露防止

ここで検討の対象とする窓は、最も結露の危険性の高い建物の中性帯以上に位置するものとし、中空層には自然風圧変動と煙突効果による差圧 5N/m^2 が加っている

場合を想定している。計算は2の検討と同様に、中空層隙間の外気側および室内側の通気抵抗比をパラメータとして壁面風圧変動の実測データを用いて行い、中空層内の結露防止対策について検討した。

3-1 中空層の室内側および外気側隙間の通気抵抗比と換気

図-7は中空層内外の通気抵抗比と中空層内の外気成分の関係を各データについて示したものである。2でも示したように、中空層の換気性状は風圧の平均値と乱れの大きさにより異なっているが、いずれにしても室内側の隙間量を減らせば、中空層内の外気成分が増大し、結露防止への寄与も大きくなることは明らかである。

3-2 中空層内結露防止のために必要な換気と隙間の関係

中空層の空気状態は、室内と外気の空気状態とそれぞれの換気量によって決まる。本検討では冬季を想定し、室内を 20°C DB , $50\% \text{ RH}$, 外気を -5°C DB , $80\% \text{ RH}$ としたうえで中空層内空気状態を壁面風圧実測データによる換気量計算結果を用いた定常温度、湿度計算により求めた。なお、ガラス板面の室内側および中空層内の熱伝達率は $8\text{kcal/hm}^2\text{C}$, 外気側を $20\text{kcal/hm}^2\text{C}$ とした。

計算の結果、中空層内の空気温度は換気の影響をほと

んど受けず約 5°C 一定となったが、相対湿度は図-8に示すように、外気成分の増加とともに直線的に減少しており、熱的には影響を無視し得る換気量でありながら、結露の危険性は明らかに変化することが分る。この計算

条件のもとで、中空層内外気側ガラス面に結露を引き起す空氣の限界相対湿度は、約 59.7% となる。

したがって、本計算で用いた壁面風圧変動の実測データと温度差に基づく一定差圧の範囲内では、中空層に流

図-7 中空層の通気率比と外気成分割合の関係

図-8 中空層内外気成分と相対湿度の関係

図-9 壁面風圧実データによる中空層内結露の限界点 (数値はデータ番号を表す)

入する空気のうちの外気成分が約 72.5 % 以上あれば結露現象を防止できることになる。

図—9 は、計算に用いた壁面風圧変動の実測データの変動の平均値とそれぞれの条件下で結露防止のために最低限必要な中空層内外の通気率比の関係を示したものである。図中の破線は、壁面風圧変動の平均値と温度差に基づく差圧が等しい部分を表しており、風圧の平均値がこの値以下になると、データによっては室内側の隙間量を小さくする必要のあることを示している。ちなみに、ここで用いた実測データのうち変動風圧の平均値が最低のものは -24.9 N/m^2 であるから、そのときの結露防止に必要な中空層の室内側隙間は、外気側に対して有効開口面積で 1/50 以上の気密性を有していなければならないことになる。

しかしながら、実際にはこの範囲を超える場合（例えば、平均値が小さく乱れも小さな D—4 など）もあるので、結露を完全に防ぐための中空層の適正な隙間量を具体的に明示することはできないが、本来自然風は風速風向ともに時々刻々と変化しているものであり、たとえ一時的に平均値の大きな負圧のために中空層内が結露しても、室内側の隙間を外気側に対して 50 分の 1 程度に気密化しておけば、いずれは結露は解消されるということがいえる。

したがって、今回示した条件内で今後結露防止を考慮した多層窓の設計を行うには、逆に外気側の隙間を室内側の 50 倍程度にして外気へ開放すればよく、また中空層内の空気が温度差による対流現象¹³⁾により十分に拡散されていることを考えると、開口部分は従来のように上下 2 箇所は必要なく 1 箇所のみでも効果があると考えられる。

4. 結 論

本報では、風圧変動による 2 重窓中空層の換気性状の解析および結露防止対策について検討を行い、次の結果を得た。

1) 壁面風圧の実測データを用いた 2 重窓中空層のモデル計算の結果、建物の風背側においても中空層内に外気が導入されることが分った。

2) 中空層内へ外気が導入される原因として、実測データの風圧の平均値および変動の大きさ（標準偏差）が考えられる。

3) 変動に正弦波を用いた検討では、変動の振幅が大きいほど、また変動周波数の高いほど、外気が中空層に導入される割合は大きくなることが分った。

4) 室内を 20°C DB 、60 % RH、外気を -5°C DB 、80 % RH とした場合の中空層内結露防止のための室内

側の隙間は外気側（長さ 30 mm、内径 2 mm の銅パイプ）に対し約 1/50 以下の通気率にするのが望ましい。

5) 中空層内の換気を風力で行うかぎり、外気側の開口は 1 箇所のみでも十分効果的である。

【本研究の関連論文】

- 1) 佐々木隆：多層窓中空層の風の乱れによる換気性状，日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 55，pp. 41～44，昭和 57 年 3 月
- 2) 佐々木隆：多層窓中空層の換気性状について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 363～364，昭和 57 年 10 月
- 3) 佐々木隆，林 基哉，荒谷 登：窓の風圧変動時の隙間通気抵抗と通気量の関係（風力による建物の自然換気に関する研究・その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 451～452，昭和 58 年 9 月
- 4) 林 基哉，佐々木隆，荒谷 登：圧力変動時における隙間通気抵抗の性質（風力による建物の自然換気に関する研究・その 2），日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 57，pp. 97～100，昭和 59 年 3 月
- 5) 佐々木隆，林 基哉，荒谷 登：風圧変動による窓ガラスの撓みの中空層換気への影響（風力による建物の自然換気に関する研究・その 3），日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 57，pp. 101～104，昭和 59 年 3 月
- 6) 林 基哉，佐々木隆，荒谷 登：壁面風圧変動時の窓中空層換気（風力による建物の自然換気に関する研究・その 4），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 307～308，昭和 59 年 10 月
- 7) 佐々木隆，林 基哉，荒谷 登：風圧変動による窓中空層の結露防止（風力による建物の自然換気に関する研究・その 5），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 309～310，昭和 59 年 10 月
- 8) 佐々木隆，林 基哉，荒谷 登：風力による中空層の換気性状（建物の風力換気に関する研究 第 1 報），日本建築学会論文報告集，372 号，昭和 62 年 2 月
- 9) 鈴木尚毅，佐々木隆，林 基哉，荒谷 登：ガラス板の振動を考慮した窓中空層の換気基本特性（風力による建物の自然換気に関する研究・その 6），日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 58，pp. 69～72，昭和 60 年 3 月
- 10) 鈴木尚毅，佐々木隆，林 基哉，荒谷 登：ガラス板の振動を考慮した風力による窓中空層の結露防止（風力による建物の自然換気に関する研究・その 7），日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 58，pp. 73～76，昭和 60 年 3 月

【参考文献】

- 11) Newmark, N. M. "A Method of Computation for Structural Dynamics" Proc. ASCE Vol. 85, 1959
- 12) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，昭和 56 年 6 月
- 13) 羽山広文，荒谷 登，絵内正道，佐々木隆：窓断熱戸の性能測定結果，日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 50，pp. 255～258，昭和 54 年 3 月

SYNOPSIS

UDC : 697.9 : 551.571

DIE BESCHLAGDICHT DER LUFTSCHICHT ZWISCHEN DEN ZWEI SCHEIBENFENSTER DURCH DIE WIND-UNRUHE

von Dr. TAKASHI SASAKI, MOTOYA HAYASHI and Dr.
NOBORU ARATANI, Mitglieder von A. I. J.

Diese Abhandlung wird über die Beschlagdicht der Luftschicht zwischen den zwei Scheibenfenster beschrieben. Der Schlüsse sind wie das Folgende ;

- 1) Die Außenluft fließt in die Luftschicht gegen der Windrichtung des Gebäudes ein.
- 2) Das Verhältnis des Einflusses von Außenluft in die Luftschicht nimmt zu, wenn der Schwingungsweite groß ist und die Frequenz hoch ist.
- 3) Für die Beschlagdicht der Luftschicht soll die äußeren Lücke etwa 1/50 gegen der inneren Lücke als die Durchlässigkeit brauchen.