

特集 ● 換気

大阪大学工学部建築工学教室 正会員 榎崎正也

建物の開口部と換気

まず、定常状態における開口部前後の圧力差と通気量の基本的な関係を述べている。しかし、現実の建物の換気系を考慮すると、建物外周の圧力差分布と外壁、内部間仕切り、種々のサービス用立て管などの通気特性を十分に把握することが大切である。しかし現在、実在建物におけるこれらの資料はあまりない。

本稿では、防音住宅の調査結果を中心に建物の通気特性と自然換気量を考察している。また、建物の気密化に伴う室内空気汚染、煙突作用による漏気の増大、外部風の乱れによる換気変動など、解決されるべき問題を指摘している。

はじめに

室空気、または外気の漏気も含めた室内外空気の入換え、すなわち換気は、冷暖房負荷を左右する重大な要素であり、建物の省エネルギー化を進めるうえで、なおざりにできない。通常、熱経済上換気を小さくすれば有効であるため、取入れ外気を減らしたり、外気の漏入を防ぐべく、建物の気密化を図っている。しかし、換気を減らせば減らすほどよいというものではなく、室空気汚染の点から、そこにはおのずと限界がある。それではどの程度換気をすればよいのか、また、そのためにどの程度気密にすればよいのか、現在納得のいく解答はない。

また、空調されないで侵入する外気は、ある場合には空気汚染の原因ともなるし、ドラフトとなって不快を増大することもある。逆に、室空気の隣室や天井裏への漏気が結露の原因ともなる。

このように換気は種々の事項と関連するため、慎重に計画されなければならない。機械換気では、換気はファンの能力とダクトなどの通気特性によってほぼ定まるはずであるが、現実には一定せず、外部風による外周壁面の圧力分布変動、室内外温度差による煙突効果、さらに給気と排気による圧力の不均衡、エレベータ・出入口扉の開閉による通気抵抗の変化などによって変動する。したがって、実際の建物において、その換気経路や通気量

を十分にわかっている場合は少ない。これは、室内外に生じる圧力差分布や建物全体としての通気特性に関する資料が不足しているためである。

本稿では、建物の開口部と通気の基本関係を解説するとともに、今までに得た建物の通気特性や換気に関する知見と、それに関連する問題点を述べる。

1. 開口部と通気量の関係

今、外壁の開口部やすきまの両側に圧力差 ΔP [mmAq] が生じると、空気流動を起して換気する。この圧力差は室内外空気の温度差、風圧力、ファンによるものの組み合わせの結果として生じる。両側の圧力差は結局、開口部を流れる際に生じる圧力損失 P_r と考えると、式 (1) となる。

$$\Delta P = P_r = \left(\xi_1 + \xi_2 + \lambda \frac{l}{D} \right) \frac{\gamma}{2g} v^2 = \xi \frac{\gamma}{2g} v^2 \quad \dots (1)$$

ここで、

ξ_1, ξ_2 : 流入口と流出口の形状抵抗による圧力損失係数

λ : 摩擦抵抗係数

l : 開口部長さ [m]

D : 開口部直径(円形でない場合、等価直径) [m]

v : 開口部の平均風速 [m/s]

- g : 重力の加速度 [m/s²]
- γ : 空気の比重 [kg/m³]
- ξ : 圧力損失係数 (=1/ α^2)
- α : 流量係数または流速係数

したがって、このときの通風量 Q [m³/s] は、式(1)から式(2)となる。

$$Q = vA = \alpha A \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、

A : 開口部面積 [m²]

筒のような開口の場合、式(2)のように流量は圧力差の平方根に比例する。

しかし、毛細管のように小さなすきまや多孔質材の通気は、管径が非常に小さいため Re 数が小さく、一般に層流となる。このとき、 λ は v に逆比例する。また、形状抵抗は λ に比べて小さく無視できるため、流速または流量は圧力差に比例する。

建物の場合、窓を開放していると圧力差と流量の関係は、式(2)の場合で、普通の窓なら $\alpha = 0.65 \sim 0.7$ である。

窓を閉じた場合、圧力差と流量の関係はすきまの状態によって異なる。普通は式(3)で表される。

$$Q = Q_0 (\Delta P)^{1/m} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 m は開口部・すきまの状態と Re 数によって変化し、筒の場合は $m=2$ 、毛細管の場合は $m=1$ で、すきまの場合は $m=1 \sim 2$ の間にある。また Q_0 は、 $\Delta P = 1 \text{ mmAq}$ のときの通気量である。圧力差と流量の関係は m と Q_0 とで決まる。

窓サッシでは、そのすきま長さ L [m] で割ったすきま 1m あたりの通気量 $q = Q/L$ [m³/m²・h] と ΔP の関係を実験によって求め、 q_0 [m³/m²・h・mmAq] や m の値を定めている¹⁾。

実際の室では、換気口などの開口部と窓・周壁のすきまなどが混在している。これらの換気系はすべて閉回路で構成される回路網をなし、温度差・風力・ファンなどによって生じる圧力と、開口部・すきまを空気が流れるときに消費する圧力が平衡を保つようにして定まる。ある開口部で風圧が変わると、室全体の換気系に影響を及ぼし、各開口部を流れる通気量に変化するため、時々刻々の換気量を推定することは難しい。

2. 建物の気密性

建物の気密性とは、室内外にある圧力差が生じたときに、その通気量の程度、あるいは周壁に存在する開口部・すきまを通じて室内外の空気が換気するのに有効な開口面積の総計と考えられる。この場合、室内外の圧力

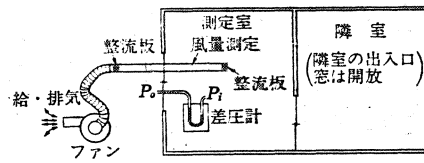


図-1 室の気密度テスト法

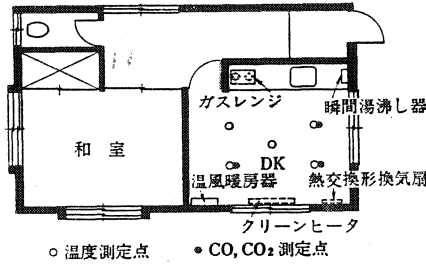


図-2 防音実験住宅平面図

差分布によって通気量が変わるため、どのような方法で圧力差をつくるのか、また気密性を代表する指標をどうするかなどの問題が生じる。

一般に、建物の気密性は図-1のようにファンで外気を押込み加圧するか、または室空気を排出し減圧することによって、室内外圧力差 ΔP とそのときの給気量または排気量 Q を測定する。そして窓サッシと同様に、換気口やすきまなどの組合せによって定まる室の通気特性を総括して式(3)のように与えられると考え、 Q_0 と m の値を求める。

または式(3)から $m=2$ と仮定し、式(4)を導く。

$$Q = \sum_{i=1}^N (\alpha_i A_i) \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma}} \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 $\sum \alpha_i A_i$ は室全体の総合した有効または相当開口面積といい、これが室の気密性を代表する指数と考える。

さらに窓サッシのように、室の場合には施工性と関連付けて、周壁の単位面積あたりとか換気量と関連付けて、単位体積または単位床面積あたりの通気特性で表示し、気密性を評価する。

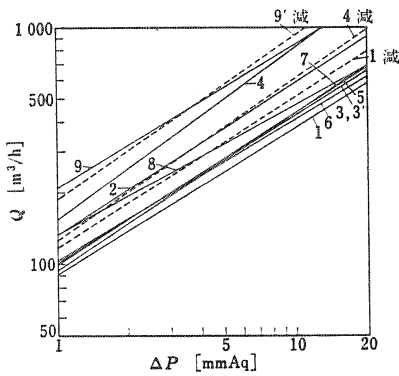
上記の方法で室の気密性を測った実例²⁾を、下記に示す。

実測建物は図-2に示すDKである。この建物は、空港周辺の民防対策の一貫として建てられた実験家屋である。C、C'棟は普通の構造で、窓は気密サッシにした2級防音構造である。C棟は隣室との間仕切りを普通壁、C'棟はふすまである。D棟は従来の外壁にボードと鉛シートを積層補強、天井も鉛シートに岩綿を積層補強し、窓は二重構造にした特級防音構造である。付帯設備としてガスレンジ・瞬間湯沸し器、それに排ガス用フー

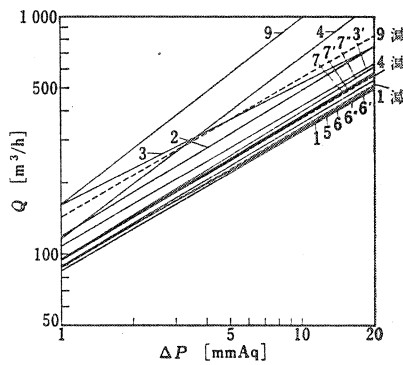
表-1 実験住宅の気密度調査結果

記号	開口条件	C棟				C'棟				D棟			
		Q_0	m	$\sum \alpha_i A_i$	αA	Q_0	m	$\sum \alpha_i A_i$	αA	Q_0	m	$\sum \alpha_i A_i$	αA
1	密閉状態	91.2 (117.5)	1.6 (1.6)	63.3 (81.6)	—	115.9	1.7	80.5	—	92.7 (91.6)	1.7 (1.7)	64.4 (63.6)	—
2	ロスナイ	132.4	1.6	91.9	28.6	146.2	1.6	101.6	21.1	131.5	1.7	91.3	27.0
3	給気ファン(ダンパ開)	103.2	1.7	70.2	6.9	133.1	1.8	92.4	11.9	134.9	1.8	110.4	46.1
3'	給気ファン(ダンパ閉)	101.1	1.6	71.7	8.4	116.1	1.7	80.6	0.1	130.8	1.8	74.1	9.6
4	排気ファン	154.6 (152.8)	1.4 (1.8)	107.4 (106.1)	44.1 (24.5)	154.1	1.3	107.0	26.5	121.3 (101.7)	1.3 (1.8)	84.3 (70.6)	19.9 (7.0)
5	入口戸	98.5	1.6	68.4	5.1	115.3	1.6	80.1	-0.4	97.8	1.8	67.9	3.6
6	窓(内・外閉)	104.1	1.7	72.3	9.0	126.5	1.7	87.8	7.3	95.1	1.7	66.1	1.8
6'	窓(内閉, 外開)	—	—	—	—	—	—	—	—	99.7	1.7	69.3	4.9
6''	窓(内開, 外閉)	—	—	—	—	—	—	—	—	99.7	1.8	69.3	4.9
7	ガラス戸(内・外閉)	93.7	1.5	65.1	1.8	123.7	1.7	85.9	5.4	100.0	1.7	69.5	5.2
7'	ガラス戸(内閉, 外開)	—	—	—	—	—	—	—	—	103.8	1.7	72.4	8.1
7''	ガラス戸(内開, 外閉)	—	—	—	—	—	—	—	—	105.0	1.7	72.7	8.3
8	ふすま	135.0	1.8	93.8	30.5	—	—	—	—	—	—	—	—
9	全開口部	210.3 (188.1)	1.7 (1.5)	146.1 (130.7)	82.8 (49.1)	217.1	1.2	129.0	48.5	169.0 (148.4)	1.3 (1.8)	117.4 (103.0)	53.0 (39.4)

注 ()内の値は減圧法による。



注 減は減圧法によるもの
図-3 C棟の圧力差と通気量の関係



注 減は減圧法によるもの
図-4 D棟の圧力差と通気量の関係

排気ファンと、燃焼空気供給用給気ファンが設けられている。また室換気用に熱交換形換気扇、冷暖房用にヒートポンプ式ルームエアコンディショナが備えられている。

今回の気密テストは、換気口や出入口・窓などの開口部をビニル布で覆って周囲を目張りし、すべての開口部を密閉した場合、それに各開口部の目張りを順次外したとき、そして、通常の開口部を閉じた場合について行った。これらの結果を図-3と図-4に示す。また、開口条件にそれぞれ対応して式(3)から求めた Q_0 [m³/h]と m 値を、また式(4)から $\sum \alpha_i A_i$ と各開口部の αA [cm²]を表-1に示す。

防音住宅では m は1.7程度である。ただし、加圧によってダンパの開閉状況が変わる機構をもつ排気ダクト

を含めると、 m は1.3程度となる。またDKの $\sum \alpha_i A_i$ のうち換気装置の αA が約半分、周壁のすきまの αA が約半分を占め、窓サッシなどのすきまの αA は極めて小さい。また遮音性を重視した特級構造でも、周壁に存在するすきまの αA はC棟に比べてあまり小さくならないし、二重窓にしても気密度の劣るサッシを加えているため、気密度はそれほど向上していない。

全体として、 $\sum \alpha_i A_i$ を周壁表面積 S [m²]で除した $\sum \alpha_i A_i / S$ について実験家屋と他の建物を比較し、これを表-2に示す。防音住宅の気密性はかなりよいと判断される。

しかし、スウェーデンでは1977年に省エネルギー化を推進する目的で建築基準を改正し³⁾、外壁の気密性を表-3のように規定している。寒い土地のためか、防音住宅よりもずっと高い気密度を要求している。

表-2 各種住戸の有効開口面積

測定住戸	$\Sigma\alpha_i A_i$	$\Sigma\alpha_i A_i/S$	測定住戸	$\Sigma\alpha_i A_i$	$\Sigma\alpha_i A_i/S$
防音住宅 C C D	146	3	ブ レ ハ ブ 住 宅	木造 A-1 A-2	4
	129	2			4
	117	2		鉄骨造 B-1 B-2 B-3 B-4	13
集合住宅 2DK 中廊下式 アルミ引違い窓 中間階	279	2			4
			7		
住宅 2Kの6畳と4.5畳 木製引違い窓 1階	435~470	6	RC造 C-1 C-2	7	
				4	
				6	

表-3 空気漏れの最大許容値³⁾ [m³/m²・h]

建物の部位	圧力差 [mmAq]	階数		
		1~2	3~8	>8
外気に接する壁	1	0.14	0.068	0.068
外気に接する窓・扉	1	0.58	0.58	0.58
外気に接する床・屋根(最上階天井)および床下空間(クロールスペース)に接する床	1	0.068	0.034	0.034

表-4 高層建築(カナダ)外壁の気密特性

外壁の気密度	q_{0w} [m ³ /m ² ・h・mmAq]
NAAMM*	0.291
良好	0.491
普通	1.473
不良	2.902

注 1/ $m_w=0.65$

* NAAMM: カナダ建築金属工業会仕様のもの

また、Tamuraらはカナダの高層建物の気密調査を行っている⁴⁾。建物外周を外壁・最上階スラブ・2階床に囲まれていると考え、加圧法によって式(5)を用いて各部分の単位面積あたりの q_0 と m を求めた。この結果を表-4に示す。

$$Q = q_{0w} \sum_{i=1}^N (A_w \Delta P_i^{1/m_w}) + q_{0b} A_b \Delta P_b^{1/m_b} + q_{0t} A_t \Delta P_t^{1/m_t} \quad \dots (5)$$

ここで、

w, b, t : 外壁・2階床・最上階スラブ

日本の高層建物などの気密性に関する資料は少ない。漏気の問題などを検討するためにも、これら資料の蓄積が必要である。

3. 気密性と換気量

気密度が同じでも周壁に圧力差分布が生じるため、その開口部やすまの位置や流れ方向によって換気量は異なる。しかし、一般には気密度のよい室は換気量も小さい

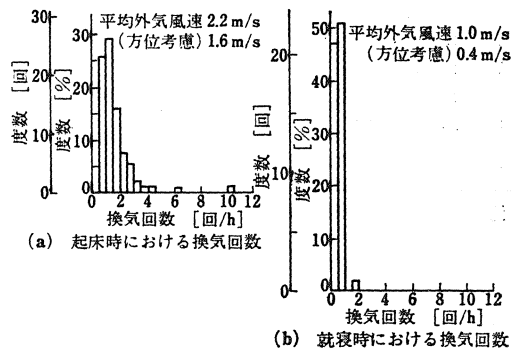


図-5 公営住宅の冬期実生活時の換気量

いと思われる。気密度のわかった室について、各開口を閉じた状態の自然換気量をCO₂ガスの濃度減衰から推定した。これを表-5に示す。換気量は風力と室内外温度差の影響を受けるため、各室を同じ条件で比較できないが、ほぼ $\Sigma\alpha_i A_i$ に比例すると言えよう。

一般の鉄筋コンクリート(RC)造集合住宅では $\Sigma\alpha_i A_i$ はほぼ300 cm²であり、換気量は窓・開口部閉鎖時はほぼ1.0回/hである。公営住宅で実生活時の冬期の換気量を、図-5に示す。外部風の影響もあるが、起床時には暖房したり、室への出入りもあり、換気は1.0回/h以上である。就寝時には間仕切りも閉鎖し、ほとんど1.0回/h以下である。最近建設されている民間マンションは間口も狭く、奥行き深い間取りが多いため、公営・公社のものより気密性もよく、換気量も小さいと想像される。

4. 気密性や換気に関連する問題点

4.1 室内空気汚染

集合住宅は外気に2面しか接してないため気密性もよく、独立家屋に比べて熱経済上有利であるが、換気不足によるマイナス面が生じる。東京都の都市ガスとLPGによる建物構造別ガス中毒発生状況⁵⁾をみると、耐火造と防火造とも全体の約40%の事故件数であり、実在建物数を考慮すると、これらは木造に比べて相当高い発生

表-5 各種住戸の有効開口面積と換気量

測定住戸	$\Sigma a_i A_i$	条件		換気回数 n [回/h]	換気量 Q [m ³ /h]	
		温度差 [°C]	風速 [m/s]			
防音住宅	C	146	0.5~4	4~5	0.6~0.7	14~17
	C'	129	17~26 0~12	1~5 0.5~9	0.68 0.3~0.4	15 7~9
	D	117	1~4 10~33	1~5 0.5~3	0.4 0.7~0.9	9 16~21
集合住宅	公団2DK アルミ引違い窓 中間階	279	間欠暖房時 非暖房時	平均4.1 平均3.3	0.95 0.92	88 85
	公団2K 木製引違い窓 1階	435~470	暖房時 非暖房時	平均1.1 平均1.1~1.7	2.1~2.6 0.7~1.2	85~106 28~49

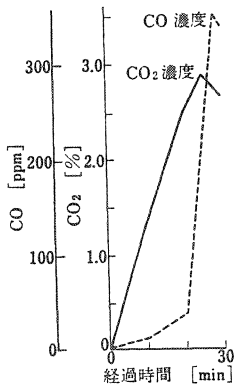


図-6 ガスレンジと瞬間湯沸し器を使用したときの室内空気汚染

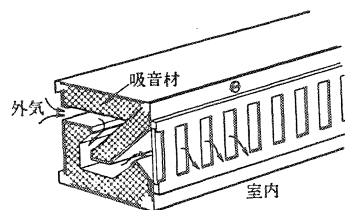


図-7 遮音形換気口

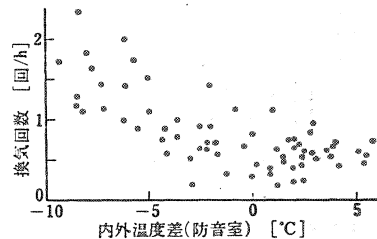


図-8 防音室(昭和48年度)の換気回数と室内外温度差の関係

空気汚染対策の配慮も十分になされるべきである。図-7のような遮音形換気口などの検討も必要である。また、このような換気口を設けても、ドラフトなどのためこれをふさぐ危険がある。密閉化の危険性を十分認識させる住民意識の向上も必要であろう。

4.2 煙突効果

ある事務室の換気・熱負荷調査[本学会誌 54-1(昭55-1)]によると、外気取入れ量以外にかなりの漏気があり、これが熱負荷を大きく左右することがわかった。

自然換気は外部風の影響も大きい、浮力の効果も無視できない。前記の防音室における室内外温度差と換気量の関係を、図-8に示す。換気量は $170 - 74^{1/3}$ にほぼ比例する。ここで、 γ_i, γ_o は室空気と外気の比重量 [kg/m³] である。

建物が高層化すると煙突作用も一層大きくなり、漏気の増大による熱負荷の増加、室内外圧力変化に伴う換気系の乱れ、扉開閉の困難さ、あるいは火災の煙伝ば(播)などの問題が生じる。Tamuraらは、十数年前からこの問題に注目し、種々研究している。彼らは表-4の建物に対し建物高さとも漏気量の関係を解析し、図-9のように示した⁴⁾。日本でも早川⁵⁾らが数年前から研究を進めている。建物全体としての通気特性、あるいは換気系に

率である。このような事故に至らなくとも、最近では集合住宅の住人から調理臭がこもるとか、排気ダクトからの排ガスの逆流があるなど排気能力の不足を訴える苦情をよく聞く。

前記の防音室において火気を使用した場合、排気ファン(カタログの排気量 720 m³/h)を稼働すると、室内CO₂は5000 ppm以下、COは10 ppm以下となって安全である。しかしこのとき室の換気回数は12回/h以上で、熱負荷の点で問題がある。また自然換気だけに依存すると、CO₂、COとも図-6のように短時間で高濃度になり、非常に危険である。CO₂が15000 ppm以上、COが150 ppm以上になると、O₂不足からガスが点火せず、生ガスが放散される。したがって、気密度の高い室では密閉形燃焼器具の使用が原則であり、少なくとも排気ファンとガス点火栓とを連動する処置が絶対に必要である。

近年、空港周辺に限らず自動車道路沿いの建物では、二重窓にするなどの防音化が進められているが、一方、

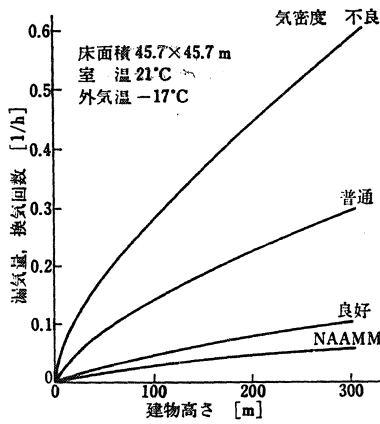


図-9 建物高さと同突作用による漏気量

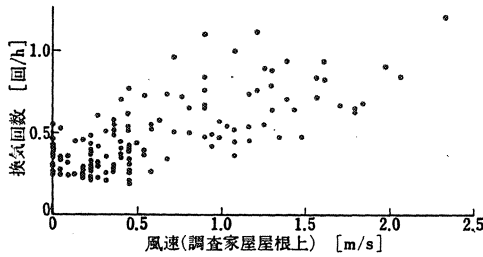


図-10 防音住宅(昭和48年度)の換気回数と風速の関係

に対する配慮を今後もっとする必要がある。

4.3 風の乱れ

防音住宅において、外部の平均風速と換気との関係を求めた(図-10)。換気量はほぼ風速に比例するようだが、そのばらつきは大きい。外部風の換気効果は複雑であり、ある集合住宅の場合、ある風向では風速と換気量は比較的直線関係を示したが、他の風向ではほとんどその傾向を見いだすことができなかつた。これは、建物およびその周辺によって作り出される風圧分布と、その変動のためである。ゆえに、従来の定常風圧分布とそれに基づく換気の問題から、近年は風害問題と関連して自然風の変動状況や乱流場における外壁面の風圧分布、さらにその換気効果などに関する研究^{7),8)}がなされている。

おわりに

二、三の建物の気密特性と自然換気とを示した。近年、騒音防止・省エネルギー化のため建物の気密化が進められている。しかし、それに派生する室内空気汚染は重大な問題である。特に、DKなど火気使用の場合には非常に危険な状況になるため、これらの換気方式を早急に確立することが望まれる。また浮力による換気効果も顕著であり、高層建物では漏気も大きくなる傾向にあるため、気密性や建物の換気システムに対する配慮が必要

である。

さらに、風力による換気は複雑であり、今後、乱流場における風圧分布や換気状況を解明すべきであろう。

参考文献

- 1) 勝田・寺沢：金属製サッシすきまよりの通気量，空気調和・衛生工学，37-3(昭38-3)
- 2) 榎崎・石堂・中根：住宅の気密性と換気について，日本建築学会建築環境工学論文集，No.1(昭54)，p.13
- 3) 中原信生訳：省エネルギーのためのスウェーデン新建築基準，空気調和・衛生工学，52-4(昭53-4)，p.421
- 4) G. T. Tamura, C. Y. Shaw: Studies on Exterior Wall Air Tightness and Air Infiltration of Tall Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 82, Part 1(1976), p.122
- 5) 村上：酸欠防止対策と問題点，日本建築学会換気分科会シンポジウム資料，(昭51)
- 6) 早川・戸河里：高層建物の煙突効果(I~IV)，日本建築学会大会梗概集，(昭53,54)
- 7) 片山・徳永：市街地風の変動と換気に関する確率モデル，日本建築学会建築環境工学論文集，No.1(昭54)，p.19
- 8) 関根・清田：市街地風の乱流構造と換気(2)，日本建築学会大会梗概集，(昭54)，p.281

(昭和54.11.6 原稿受理)

Openings and Ventilation for Buildings

Masaya Narasaki*

Synopsis This paper first describes the basic relation between pressure difference and air flow rate across an opening under steady-state conditions.

Taking the ventilation system of actual buildings into account, the pressure difference pattern across building enclosures and the air leakage characteristics of exterior walls, interior separations and various service shafts must be understood. But presently little of this information has been available for actual buildings.

This paper mainly presents new data on the air leakage characteristics and natural ventilation rates for sound insulating houses.

This paper also points out such unsolved problems as the indoor air pollution caused by the air-tightness of buildings, the increase in air leakage caused by stack action and the changes in the ventilation rates caused by fluctuations in the wind.

(Received November 6, 1979)

* Department of Architectural Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, Member