

〈特集：受動喫煙〉

受動喫煙の物理的保護対策

池 田 耕 一（国立公衆衛生院建築衛生学部）

1. はじめに

1970年代後半に起こったエネルギー危機は、社会に様々な波紋を投げかけたが、建築物も例外ではなかった。すなわち、室内における省エネルギー対策の影響は、換気量の減少、外気の侵入を極めて小さくした気密ビルの建設となって現れ、それまでは表だっていなかったエネルギーの経済性と空気の質に関する矛盾が、顕在化してきた。このことを端的に表しているのが、いわゆるビル病、シックビル症候群或は、シックビルシンドローム（sick buildings syndrome, 略してSBS）等と呼ばれる問題である。これは、1980年代にはいる頃から、欧米各地のいわゆる省エネビルにおいて、居住者から目まい、吐き気、頭痛、平衡感覚の失調、眼、鼻、喉の痛み、粘膜や皮膚の乾燥感、ゼイゼイする、喉が枯れるなどの呼吸器系の諸症状等の体の不調を訴える苦情が多数ビルの所有者、国、州などの公共団体に出されるようになってきたことを言う。このような問題は、もっとも古くは、1960年代以前にもあったと言われているが¹⁾、本格的に問題とされ始めたのは、やはり、1980年代になってからのことである。SBSに関しては、すでにテレビ、新聞、週刊誌等で報じられている通り、欧米ではかなり大きな社会問題となっており、重症例では、そのビルにいる間じゅう防毒マスクを、つけていた人もいたほどである。このような状況を受けていくつかの調査がなされており、例えば、デンマークの1500人の市民（15～67才）を対象とした調査では、15%以上の人に上記の症状のうちのいずれかがみられ、北米の200近いビルについて行われた調査では、いずれの建物においても何等かの苦情の訴えがあったとされている²⁾。

以上のようにビル病とは、エネルギー危機に端を発した建物における省エネ対策としての導入換気量の削減を行った、オフィスビルで生じた様々な空気汚染による新しいタイプの室内環境問題と言うことができ

る。但し、省エネのための換気量削減による空気汚染問題は、オフィスビルだけで起こっている問題ではなく、住宅においても同様の原因で似たような問題が起こっており、著者としては、それらも、広義のビル病と言えるのではないかと考えている。そのような住宅、オフィスビルなどの一般環境における新しい室内空気汚染問題として、タバコ煙による空気汚染問題は、ラドン娘核種、微生物粒子、アレルゲン、ホルムアルデヒドなどによる汚染と勝るとも劣らない極めて深刻な問題となっている^{3),3),4)}。

タバコは、その燃焼により、2,000とも4,000とも言われる種類の汚染質を発生させる一般室内環境における最悪の汚染源と言える。それにもかかわらずアメリカでは、成人の35%、カナダでは、37%が、喫煙習慣を持つといわれている。しかし、アメリカの禁煙の必要性の認識は高く、わが国にも有名なタバコの箱へのタバコの有害性の警告の印刷の義務づけや、タバコの宣伝の大幅規制などに加え、15%のアメリカ企業が、従業員の禁煙を奨励したり、手助けするためのプログラムをもっており、例えば、ロサンジェルスのあるコンピューターソフト会社では、禁煙した従業員に対し、500ドルの「健康ボーナス」を出すなどの援助を行った⁵⁾。各地に禁煙学校があり、高い授業料にも拘らず、参加者が後を断たないなどと言うことはよく知られた事実である。

しかしながら、北米において最も問題となっているのは、他人の喫煙によって、タバコ煙に曝される受動喫煙（passive または involuntary smoking）問題である。この点を示す事例としては、1976年、ニュージャージーでは、一人のOLが、職場での喫煙禁止を求める処分を訴え、勝訴し、この種の訴訟の判例となったほか、1983年には、サンフランシスコ市がタバコ煙のない職場の確保を求める条例を可決した等を挙げることができる。この様に禁煙運動が盛んなのは、経営者が企業

が被る被害の大きさを認識したためであり、1年間に互る喫煙者がある職場における調査によれば、喫煙者が一人いる毎に本人にとっては、5,600ドル、同じ部屋で働く非喫煙者にとっても一人当り560ドルの損失になるとの試算もあるほどである。この数字の信憑性を直ちに評価することは出来ないが、受動喫煙により受ける影響が、自主的な喫煙のそれに比べ、少なくない

事を示すデータが多数だされており大きな社会問題となっている²⁾。

本報においては、この受動喫煙を防止するための物理的手段について既存の主要な研究例をレビューすることによって実用性、有効性などの検討を行う。但し、主要文献とは言ってもここで紹介するのは数多くある研究の内の一部の研究例と言うことであり、研究報告

表1 主流煙および副流煙の排出係数⁵⁾

	主流煙	副流煙	副流煙/ 主流煙の比
粒子状物質	<u>μg/cigarette</u>	<u>μg/cigarette</u>	
総浮遊粒子状物質	36,200	25,800	0.7
タール (クロロホルム排出物)	<500~29,000	44,100	2.1
ニコチン	100~2,500	2,700~6,750	2.7
総フェノール	228	603	2.6
ピレン	50~200	180~420	3.6
ベンゾ(a)ピレン	20~40	68~136	3.4
ナフタリン	2.8	40	16
メチルナフタリン	2.2	60	28
アニリン	0.36	10.8	30
ニトロソノルニコチン	0.1~0.55	0.5~2.5	5
NNK*	0.08~0.22	0.8~2.2	10
カドミウム	0.13	0.45	3.6
ニッケル	0.08	—	—
ヒ素	0.012	—	—
2-ナフチルアミン	0.002~0.028	0.08	39
シアン化水素	74	—	—
ポロニウム-210			
ガスおよび蒸気	0.029~0.044	—	—
	pCi/cigarette		
一酸化炭素	1,000~20,000	25,000~50,000	2.5
二酸化炭素	20,000~60,000	160,000~480,000	8.1
アセトアルデヒド	18~1,400	40~3,100	2.2
シアン化水素	430	110	0.25
塩化メチル	650	1,300	2.1
アセトン	100~600	250~1,500	2.5
アンモニア	10~150	980~150,000	98
ピリジン	9~93	90~930	10
アクロレイン	25~140	55~300	2.2
一酸化窒素	10~570	2,300	4
二酸化窒素	0.5~30	625	20
ホルムアルデヒド	20~90	1,300	15
ジメチルニトロアミン	10~65	520~3,380	52
ニトロソピロリジン	10~35	270~945	27

* : 4-(N-methyl-N-nitrosamino)-1-(3-pyridyl)-1-butanone

を網羅的に調べてその中から選定したものではない。

2. 受動喫煙による室内空気汚染

2-1 汚染発生源としてのタバコ煙

①発生量

上述した通り、タバコ煙は、多くの有害な化学物質を排出するが、表1に示したのは、松木⁵⁾によりまとめられたタバコの主流煙と副流煙からの主要な汚染物質の排出係数である。同様のデータは、浅野⁶⁾によっても表2の(a)および(b)に示す通りにまとめられている。既述の通り、この種のデータは、数多くみられるものである。これからタバコ煙の中に含まれる汚染物質としては、浮遊粒子状物質や一酸化炭素、二酸化炭素をはじめ放射性物質のポロニウム210までであることや、それらのタバコ1本当りの発生量などが分かる。

②発生状況

1本当りの発生量が分かってもタバコの喫煙状況が分からなければ室全体としての発生量を把握すること

ができないため、次の段階としては発生状況に関する情報が必要となってくる。しかしながら、この点に関してのある程度定量化、一般化のなされた情報は、それほど多いとは言えないようである。それは、喫煙状況を調査は、室内空気環境実測に際しての関連条件の把握として行われることはあっても、それ自体を主目的として行われることはほとんど考えられないためと思われる。多くの研究者にとって、ましてや環境の英性的な監視を目的として室内空気環境測定を行う環境衛生監視員などにとっては、各々が目的とする汚染物質の濃度が最も重要な関心事であり、たとえ実測に際し調査されたとしてもその結果の意図化まで考えた公表があまりなされなかったとしてもある程度やむをえないと言えよう。

そのような中で、喫煙状況、喫煙率のデータとして公表されたものの例としては、檜崎⁷⁾による調査結果を挙げることができる。彼は、表3に示すような各種

表2(a) シガレット煙気相成分に含まれる主要有害物質^{①)} (新鮮たばこ煙) ^{*1}

物 質 名	生物活性 ^{*2}	シガレット1本 当たり収量	
		範囲：報告例	米国シガレット ^{*3}
ジメチルニトロサミン	C	1~200ng	13ng
エチルメチルニトロサミン	C	0.1~ 10ng	1.8ng
ジエチルニトロサミン	C	0~ 10ng	1.5ng
ニトロピロジリン	C	2~ 42ng	11ng
その他のニトロサミン(4種)	C	0~ 20ng	?
ヒドラジン	C	24~ 43ng	32ng
ビニールクロライド	C	1~ 16ng	12ng
ウレタン	TI	10~ 35ng	30ng
ホルムアルデヒド	CT,CoC	20~ 90μg	30μg
シアン化水素	CT,T	30~200μg	110μg
アクロレイン	CT	25~140μg	70μg
アセトアルデヒド	CT	18~1,400μg	800μg
窒素酸化物(NO _x) ^{**}	T	10~600μg	350μg
アンモニア	T ^{*5}	10~150μg	60μg
ビリジン	T ^{*5}	9~ 93μg	10μg
一酸化炭素	T	2~ 20mg	17mg

* 1 他に未確定物質あり、* 2 Cは発癌物質、BCは膀胱発癌物質、TIは腫瘍創始物質、CoCは発癌促進物質、CTは纖毛細胞障害物質、Tは有害物質、* 3は1973~1976年に市販された85mmサイズの画切シガレット、* 4は95%以上がNOで残りはNO₂、* 5は米国シガレットではpH<6.5なので無害、アンモニアおよびビリジンはプロトン化した形でしか存在していない

表2(b) シガレット煙粒子相成分に含まれる主要有害物質⁶⁾ (新鮮たばこ煙) *1

物質名	生物活性 ²⁾	シガレット1本 当たり収量		物質名	生物活性 ²⁾	シガレット1本 当たり収量	
		範囲：報告例	米 国 ³⁾ シガレット			範囲：報告例	米 国 ³⁾ シガレット
ベンゾ(a)ピレン	TI	8~50 ng	20ng	3および4-メチル カテコール類	CoC	30~40μg	32μg
5-メチルクリゼン	TI	0.5~2ng	0.6ng	その他のカテコール類 (4種以上)	CoC	?	?
ベンゾ(j)フッ化アンセン	TI	5~40ng	10ng	未知のフェノール類 および酸類	CoC	?	?
ベンツ(a)	TI	5~80ng	40ng	N'-ニトロソノルニコチン	C	100~250ng	250ng
アントラセン	TI	?	?	その他の非揮発性 ニトロサミン類	C	?	?
その他の多環式芳香族 炭化水素(20種以上)	TI	3~10ng	8ng	β-ナフチルアミン	BC	0~25 ng	20ng
ジベンツ(a,j)アクリジン	TI	?	?	その他の芳香族アミン	BC	?	?
ジベンツ(a,h)アクリジン	TI	0.7 ng	0.7ng	未知のニトロ化合物	BC	?	?
ジベンツ(c,g)	TI	50~200ng	150ng	ボロニウム210	C	0.03~1.3 pCi	?
カルバゾール	CoC	50~250ng	170ng	ニッケル化合物	C	10~600ng	?
ピレン	CoC	10~60ng	30ng	カドミウム化合物	C	9~70ng	?
フッ化アンセン	CoC	?	?	ヒ素	C	1~25μg	?
ベンゾ(g,h,i)ペリレン	CoC	1~10μg	6μg	ニコチン	T	0.1~2.0mg	1.5mg
その他の多環式芳香族 炭化水素(10種以上)	CoC	0.3~0.9μg	0.8μg	その他のタバコ・ アルカロイド類	T	0.01~0.2mg	0.1mg
ナフタレン類	CoC	0.05~0.2μg	0.1μg	フェノール	CT	10~200μg	85μg
1-メチルインドール	CoC	?	?	クレゾール類(3種)	CT	10~150μg	70μg
9-メチルカルバゾール類	CoC	40~460μg	270μg				
その他の中性化合物	CoC						
カテコール	CoC						

*1 は他に未確定物質あり、2)、3) については表3 参照

表3 各種の室における喫煙率⁷⁾

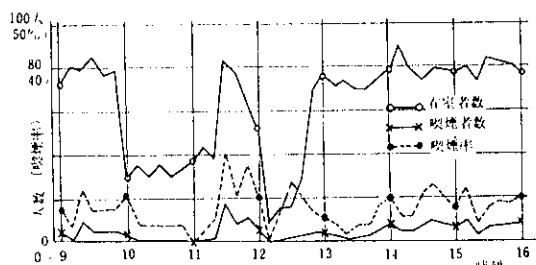
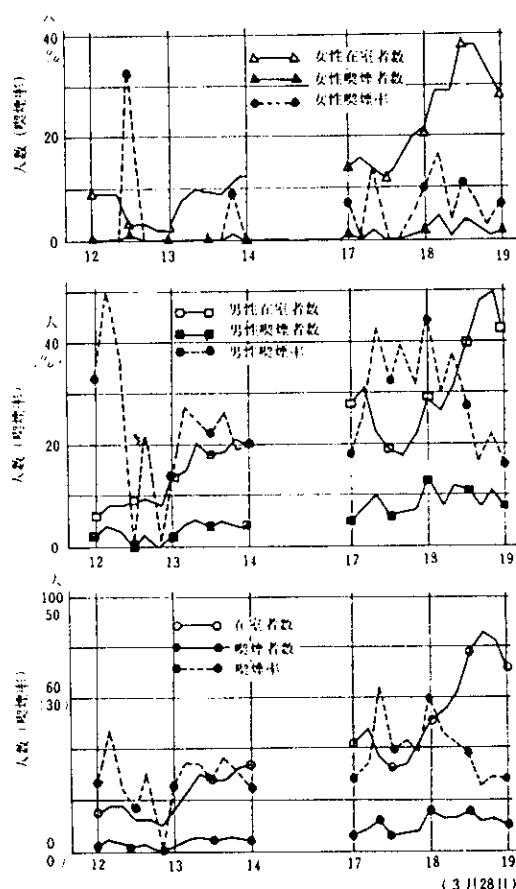
室用途	在室者 男女比率 (%)	喫煙率 (%)	男子 喫煙率 (%)	女子 喫煙率 (%)
会議室	95:5	11.4	12.0	0
事務室	72:28	7.3	10.1	0
銀行	53:47	5.5	9.7	0.8
喫茶店	55:45	16.5	25.4	4.9
研究室	—	21.0	—	—
列車	75:25	7.0	—	—

表4 各室における喫煙状況⁷⁾

場所	平均喫煙時間 (min/本)	平均喫煙長さ (mm/本)	平均燃焼速度 (mm/min)
事務室	4.2	36.0	9.0
銀行	4.3	38.5	9.1
喫茶店	5.5	37.0	6.8
研究室	6.5	44.1	6.7
会議室	5.2	36.2	7.0

表5 会議室における喫煙状況⁷⁾

喫 煙 者	喫 煙 量 (本/day)	喫 煙 時 間 (min)	非 喫 煙 時 間 (min)	喫 煙 時 間 間 隔 (min)	喫 煙 時 間 間 隔 (min)
A	15	5.0	13.8	18.8	64
B	12	5.4	22.4	27.8	80
C	25	8.0	9.7	17.7	38.4
D	50~60	4.6	4.3	8.9	19.2 ~16.0
E	20	6.1	20.5	26.6	48
F	50~60	3.7	7.4	11.1	19.2 ~16.0
G	30	5.1	12.2	17.3	32
H	25	5.5	16.3	21.8	38.4
I	25	7.3	28.0	35.3	38.4
平均	29.1	5.6	15.0	20.6	33.0

図1 事務室における喫煙率の時刻変化⁷⁾図2 喫茶店における喫煙率の時刻変化⁷⁾

室内について喫煙状況調査をし、喫煙率の経時変動(図1, 2)として表しただけでなく、室毎の喫煙時間、喫煙長さなどの平気値(表4)を求めたり、会議室については、被調査者別の詳細な喫煙状況に関するデータ(表5)として表している。

2-2 環境中での汚染レベル

室内の空気汚染を考える場合、室内にはタバコ以外にも様々な汚染質を出す数多くの汚染源があり、しかも既に述べた通り、タバコ煙だけでも、数千にものぼる汚染質を出すため純粋にタバコ煙による汚染だけを測定し評価することは事実上不可能である。そこで、実際には、タバコ煙中に比較的多く含まれ、計測が容易で、健康影響などの特性がよく知られている粉塵、一酸化炭素、二酸化炭素等についての測定をし、それらに関するタバコ煙以外の有力な汚染源の影響を推定できる場合はその分を排除し、できない場合は含めたままで評価することになる。タバコ煙の室内における挙動を研究すると言った観点に立つ場合には他の汚染源からの排出が見積れない実測は価値の低いものと見なされがちとなるが、実際に居住者が、測定した汚染質のどの程度のレベルに曝されているかを調べる研究であれば、必ずしも問題とする汚染質のオリジンが明確である必要はないわけであり、一概にこの種の実測結果の価値を低くみるべきではない。

そのような観点からタバコ煙に注目したデータを検索すると、数量的にはかなりの件数となる。それらを網羅、統計的な検討を行うことは、単に数が多いと言うだけでなく、おのおのの研究の対象や条件が多様であるため、かなり困難な作業となる。その上、条件のごとなるものを比較検討することの妥協性まで考える必要が生じ、きわめて手間のかかる作業となるが、表6に示したのは、様々な場所における数多くの研究者⁸⁾⁻²⁹⁾により報告されたタバコ煙成分ごとの汚染の実測例である。これは、Wadden³⁾により編集された表であり、データが少し古い点、北米と北欧のみの資料である点等、問題点もあるものの、上述のような困難を克服して行われたなかなかの労作であり、1つの参考資料として活用できるものと思われる。

3. 室内空気汚染防止対策

タバコ煙に限らず、室内空気汚染質の除去手段としては、汚染質の室内侵入を許さない手段と汚染質の侵入は許したのち除去する手段の2つに大別される。前者は、さらに汚染発生源を除去、隔離する方法と、発生源の性質を変え無害化する方法の2つに分けられ、後者も、空気清浄機によって汚染質を除去する方法と、換気により室外へ排出する方法の2つに分けられる。

表6 環境中でのタバコ煙の成分ごとの濃度測定

成 分	測定場所	換気回数 (回/h)	燃焼タバコ量	濃 度	出典 ²⁾
CO	80~170m ³ の室内 容積25m ³ の車内	6.4~2.3 なし	46~101本(紙巻タバコ) 4~9本(紙巻タバコ)	4.5~75ppm 12~110ppm	1, 2 3, 4
ニコチン	57~80m ³ の室内 38~170m ³ の室内	6.8~8.2 なし	42本(紙巻) 9本(葉巻) 10本(紙巻) 9本(葉巻)	0.1mg/m ³ 以下~0.42 mg/m ³ 0.13~1.04mg/m ³	2, 1, 5 2, 5
総浮遊微粒子	15~425m ³ の住宅の 室内 25m ³ の室内	1~3 なし	7~35本(紙巻) 4~24本(紙巻)	1.1~3.0mg/m ³ 2.28~16.65mg/m ³	6, 7 3
ジメチルニトロ アミン	4 m ³ の箱, 20m ³ の 室内	なし	10~100本(紙巻)	0.23~2.9μg/m ³	8
アクロレイン	30~170m ³ の室内	0~2.4	5~150本(紙巻)	0.02~0.2ppm	5, 9
アセトアルデヒド	38~170m ³ の室内	0~2.4	5~150本(紙巻)	0.06~0.56ppm	5
ホルムアルデヒド	30m ³ の箱	なし	5~10本(紙巻)	0.23~0.46	9
NO	30m ³ の箱	なし	5~10本(紙巻)	0.19~0.36	9
NO ₂	30m ³ の箱	なし	5~10本(紙巻)	0.02~0.04	9
CO	事務所, レストラン, 食堂, 体育館, 潜水 艦, 自動車, バス, 飛行機	--- 0~20	4~150本(紙巻)	2.5~28ppm 3~33ppm	10, 11, 12 13, 14, 15 16, 17, 18
ニコチン	潜水艦, 駅ターミナ ル	---	4~150本(紙巻)	1~35μg/m ³	15, 19
総浮遊微粒子	食堂, 体育館	0~6	---	0.15~0.98mg/m ³	11, 12
微粒子	住宅	---	1本(葉巻)	48×106個/ft ³	20
ベンツピレン	体育館	---	---	0.0071~0.021μg/m ³	12, 21
ジメチルニトロ アミン	バー	---	---	0.11~0.24μg/m ³	8
肺胞沈着性粒子 (RP)	レストラン, 体育館, ボーリング場	--	--	100~700μg/m ³	22

注1) From Chapter 11, Smorking and Health-A Report of the Surgeon Genemal, HEW (1979).

2) 出典: (1) Anderson and Dalhamn (1973), (2) Harke (1970), (3) Hoegg (1970), (4) Harke et al., (1974), (5) Harke et al., (1972), (6) Lawther and Commins (1970), (7) McNail (1975), (8) Brunnemann and Hoffman (1978), (9) Weber et al., (1976), (10) Chapell and Parker (1977), (11) Cuddeback et al., (1976), (12) Elirott and Rowe (1975), (13) Harke (1974), (14) Sebben et al., (1977), (15) Cano et al., (1970), (16) Godin et al., (1972), (17) Harke and Peters (1974), (18) Sciff (1973), (19) Hinds and First (1975), (20) Lefene and Inculet (1975), (21) Galuskinova (1964), (22) Repace and Lowrey (1980)

これら4つの方法は、汚染質に対する働きかけが、列挙した順に積極性が少なくなっていく特徴をもっている。

3-1 室内からの発生源の排除

第1番目の方法は、その意味で最も積極的であるが、

対象とする汚染質がタバコ煙の場合、室内からの除去、隔離がある程度の可能な場合もあるとも言えるが、具体的には、室内での禁煙あるいは、喫煙者の隔離を行うことであるため、事実上それらの措置を採ることが困難な場合も少なくないと思われ、この方法は、不可

能あるいは困難な場合も多い対策であると言えよう。

3-2 室内にある発生源の無害化

2番目の、発生源の性質を変え無害なものとする方法は、汚染質一般についていえば、ある意味で最初の方法より実現性が高いとも言えるが、対象がタバコ煙の場合には余り実用的とは言いがたいようである。また、何か発生源としてのタバコ煙を無害化する方法があったとしても、そのための手段として、加熱、圧縮などの物理的手段であれば、それほど問題がないが、実際問題として物理的手段だけでタバコ煙が無害化したり消失することは少ないようである。したがって多くの場合、汚染源の無害化のために化学的手段に頼らざるを得ない場合が多く、この場合には、当初目的としたタバコ煙の室内での発生を阻止することができても化学反応により別の形の汚染を生じ、その対策によるリスクと、その対策以前のタバコ煙によるリスクのどちらが大であるかと言ったきわめて微妙な判断を要求されるリスク評価を行わなければならない。そして、対策前のタバコ煙のリスクが大きい場合、対策により新たに生じるリスクが見落とされがちになったり、あるいは意図的に過小評価されることさえ懸念され、この方法にも余り多くを期待できないと言える。

3-3 空気清浄機による除去

3番目の空気清浄機を用いて室内に発生したタバコ煙を除去する方法は、前の2つに比べればかなり実用性の高い方法であると言える。但し、除去の対象となる汚染質が特定されており、さらにその物理化学的挙動特性が十分に知られていなければならない。よって対象とする汚染質がタバコ煙中の浮遊粉塵1種類のみとする場合のような単純なケースの場合は実用的であると言えるが、タバコ煙のように様々な化学物質からなる場合には、必ずしも全ての汚染物質を除去できないと言う問題点を抱えている。また、空気清浄装置の維持管理が不十分だと、浄化装置の汚染保持容量を越える汚染質を処理する結果となり、浄化装置からの汚染の再発生と言う事態も考えられる。

よって、この方法は、補助的手段くらいに捉え、余り多くを期待しない方が無難であると考えられる。

3-4 換気による除去

最後に、換気による室内空気中の汚染除去は、最も消極的な方法ではあるが、室内空気中の汚染質がガス

状物質であろうとエアロゾルであろうと、また、それらの汚染質の挙動等がよく分かっていなくとも、さらには除去しなければならない汚染質が何種類であろうとも確実に全ての汚染質を室外へ排除できるというメリットを持っている。本稿で対象とする臭気のような複雑な特性を持った汚染質の除去法としては、最も実用性の高い方法と言える（但し、換気される外気の汚染質の濃度は、室内空気中にある汚染質の濃度より低いことが前提となっている）。

本稿の以下の部分においては、上述の4つの中では受動喫煙によるタバコ煙汚染の除去策として実用性が最も高いこの換気による汚染質の除去について検討を行う。

①換気の換気の室内汚染防止効果

換気の効果を検討する前に、換気それ自信及びその表し方などの基本的な事項の定義を行う。

a. 換気の定義

日本語で言う「換気」は、英語の ventilation と air exchange の2つの語の訳として用いられている。この2つの英語の言葉は、意味が異なっており、それにもかかわらず、日本語では同じ言葉を使うため、1部で混乱を生じている面もあるので、ここではその定義を行う。なお、ventilation と air exchange (換気) の他にも infiltration, wxfiltration, cross ventilation など似たようで意味の異なる言葉がいくつかあるのでそれらについても定義を行う。但し、ここで言う定義は、あくまで本稿のみに適用されるべきものであり、一般的なコンセンサスの得られたものではないことを承知おきされたい。

イ) Air change (換気)

Air change は、単に「室内外の空気が入れ替わること」と言う現象を既述する言葉であり、きわめて広い意味領域を持っている。他の用語は全てこの中に含まれると言える。

ロ) Ventilation (換気)

Ventilation は、これに対し、「室内の空気浄化あるいは、温熱環境条件の改善などの明確な環境改善を目的として、居住者が意図的に行う室内外の空気の入替えのこと」であり、行為を表す言葉である。その行為を行うためには、室内外を結ぶ開口を設けると同時に、2つの空間の間の気圧差を高める必要があるが、

それを機械力によって行う場合を mechanical ventilation (機械換気)あるいは, forced ventilation (強制換気)と呼ぶ。特に, 空気調和設備を持った建物の場合に, 室内空気質改善を目的として行う air exchange (即ち ventilation) のことを「外気導入」と言い, そのために取り入れられる外気を「導入外気」と言う。一般に, 空調設備で室内の空気調和を行っている場合には, 省エネルギーのため, 空調対象の室へは, 100%導入外気とせず, 室からの排気を導入空気に一定割合混ぜて, 給気するが, この導入外気と室からの排気(recirculation air, 再循環空気と言う)を混ぜたものを「換気」と称し, その量を「換気量」という場合があるが, これは, 誤解を招き易い表現であるので, このような意味において「換気量」という言葉を使うべきではないと考える。このような場合は単に室への「給気量」と言うべきであって, 「換気量」と呼ぶにふさわしいのは, 給気量から再循環空気量を引いた純粹の「外気導入量」あるいは「導入外気量」のことである。この意味において, 本稿では, 空調設備を有した建物において換気量と言えば, 「外気導入量」あるいは「導入外気量」のことを意味するものとする。

一方, 風, 室内外の温度差など機械力によらない自然の力を利用する場合を natural ventilation (自然換気)と呼ぶ。後者の場合は, 後述する infiltration と exfiltration と混同し易いので注意を要する。

ハ) Cross ventilation (通風)

Cross ventilation は, natural ventilation の一種とも考えられるが, 部屋の窓を大きく開けるなどして, natural ventilation の場合より開口の面積を大きくし, 室内をかなりの高い速度の気流が通り抜けるようにすることを言う。この場合は, 室内の空気質の改善と言うより, 気流によって体感温度を下げると言った温熱環境改善が主目的である。もちろん, 空気質は, ほとんどの場合外気と同じまで高まると考えられる。

ニ) Infiltration (漏入) 及び exfiltration (漏出)

Infiltration, exfiltration は, ventilation とは異なり, 居住者の意図とは無関係に, 単に空気が室内に侵入したり, 室内から漏れ出したりする現象を記述する言葉である。但し, air exchange との違いは, 空気を通る経路が, 目に見えない建物の構造体の割れ目, 窓の隙間, 締め忘れた換気口, 通気口など居住者が意図

しない開口となっている点である。Infiltration と exfiltration 2つをまとめて air leakage (漏気)とも言うが, 漏気は, 居住者の意図しない air exchange と言うこともできる。結果として室内の空気質が改善されたり, 涼感が高まったりすることがあっても, その換気 (air exchange) が, 意図を持ってなされたものでない限り ventilation ではない。漏気は, 時として結果的に室内の環境改善に役立つことはあっても, その量自体及びそれによって生じる副作用を見積ることはおろか制御することは不可能な種類の air exchange であるので, これに室の環境改善を期待するとは好ましいこととは言えない。

b. 換気量の定義

すでに一部のべたように, 上で定義した諸事項のような室内を出入りする空気の量をそれぞれの言葉の後に「量」と言う言葉をつけて「〇〇量」と表すのが通常であるが, この「量」は, 英語の rate の訳語である。この rate は, 厳密には単位時間当りの「amount」のことであり, 日本語にすると amount も rate もいずれも「量」となってしまうため混乱を起しかねない状況にあると言える。本来なら, amount は「量」と訳され, rate は, 「量率」と訳されるべきであるが, 日本語として一般的ではない上, amount という言葉は, あまり使われることがないので, 本稿では, rate を「量」とし, amount に相当する概念の表現が必要になった場合にも, やはり「量」という言葉を用いるか, それでは非常に紛らわしい場合には, 「総量」と言う言葉を用いることとする。

c. 換気量の表し方

室内の汚染室の濃度の高さによって, 室の換気 (ventilation) の良し悪しを判断する場合, 同じ換気量 (air exchange rate) でも, 室の容積の大小によって室内の濃度の時間変動の様子が大きく変わる。そこで, 古来建築学の分野では, 換気量を室の容積で除したものを, 換気回数と称し, その単位としては回/h を用いてきた。この「換気回数」に当たる言葉として, 他の理工学の分野では, 「換気率」と言う言葉が使われている。論理的には, この言葉の方が分かりやすく内容を表していると考えられるが, 理学の分野では, 「換気回数」で表される概念が, 登場する機会が, 建築の分野に比べると極端に少ないため, 「換気率」という言葉は, あ

まり使われることがないので、本稿では、建築学の習慣に倣い「換気量を容積で除したものを「換気回数」と言う言葉を用いる。

なお、英語には、「換気回数」に当たる言葉はなく、air exchange rateを室の容積で除した量の単位として air change per hour という言葉を用いている。これは、記号で「ACH」とか、「1/h」とか「h⁻¹」などと表される。

d. 室内における汚染濃度構成機構と汚染防止効果

室内には、タバコ煙を始め、調理用のコンロやオーブン、暖房機、加湿機、事務機械、ある種のパーティクルボード、セメントボード、その他の建材からの汚染ガス等、室内空気の状態を決定する重要な発生源が数多く存在する。

これらの発生による室内濃度Kは、以下の微分方程式で表される。

$$V \cdot dK = W \cdot dt - Q \cdot (K - K_0) dt$$

ここで V : 質の容積 (m³)

W : 汚染質の発生強度 (m³/h)

t : 時間 (h)

K₀ : 屋外濃度

Q : 換気量 (m³/h)

これを t=0 のとき K=K₁ の初期条件の基にとくと $K = K_0 + (K_1 - K_0)e^{-Nt} + (W/NW) \cdot (1 - e^{-Nt})$

ここで N : 換気回数 (Q/V, 回/h)

この式において t=∞ においては

$$K = K_0 + W/NV$$

となる。濃度 K と時刻 t の関係を図 3 に示した。

上式は、汚染物質に付いて不変的に成り立つ式では

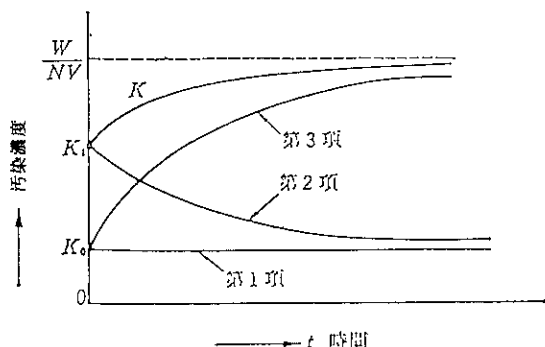


図3 汚染濃度の経時変動

あるが、厳密に言えば、上の微分方程式の右辺にタバコ煙の壁等への吸着、化学変化による変質などによる消失項が加わるべきであるが、その大きさに関する十分な知見が得られていないため、また、それは、存在したとしても安全側に動く要因であると考えられるためここではそれらに基づくタバコ煙の消失はないものと考えた。さらにタバコ煙が持つ臭気の場合には、居住者の臭いに対する慣れも考慮されるべき項目と考えられるが、これは化学変化や吸着よりさらに定量化の困難な項目である上、安全側に働く要因であることも事実であるので、ここではやはり考慮にいられていない。

以上のことから分かるように、室内の汚染濃度は、汚染発生量と換気量により決まり、最も近似的には、汚染発生量を換気量で除したものが室内濃度とも考えられることを示している。

③住居等一般建築物室内の換気の実態

上述したように、タバコ煙を始めとする室内空気汚染問題を考える上で、室の換気量は欠くことのできない重要な汚染防止対策の1つである。このため、ビル等事務の比較的規模が大きく中央式の空調がなされるような建物の設計に際しては、室毎(表7⁽¹¹⁾)はおろか、小さなダクトの末端に至るまでの換気量が精密に計算されるのは今や常識となっている。しかしながら、その建物が実際に竣工し使用されるようになった状態における換気率の実態は以外と把握されておらず、表7に示されるような設計値では十分な換気量があるはずの室でも実際の居住状態においては住み手の住まい方によっては換気量がほとんど0と言う状態すら頻繁に起こっている恐れがあることは想像に難くない。設計段階での換気量が精密に計算されているオフィスビルなどでこの状態であるので、換気量の設計時の検討などがほとんど行われることのないセントラルの空調機を備えていない一般の住宅などの換気率の実態に至っては、皆目検討がつかない状況であると言っても過言でなく、室内空気汚染問題等の検討に際しての障害となることも少なくない。よって、ここでは、ほとんど全ての人がその生活時間の大半以上を過ごすにもかかわらず、換気量に関しては、設計段階での検討すらほとんど行われることのない住宅における換気率の実態把握に焦点を合わせ、今までに実施された換気率に関する主要な実測結果を、実測された換気率の値の

表7 ASHRAE 必要外気量基準 (抄) ¹¹⁾ ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$)

施設名	1973		1981		1989
	最少値	推奨値	禁煙室	喫煙室	
食堂	18	27~36	12.6	63	36
バー&カクテルラウンジ	54	63~72	18	90	54
ホテル会議室	36	45~54	12.6	63	36
事務室	27	27~45	9	36	36
事務所会議室	45	54~72	12.6	63	36
小売商	12.6	18~27	9	45	0.036~0.54 ⁹⁾
美容院	45	54~63	36	63	45
ダンスホール&ディスコ	27	36~45	12.6	63	45
劇場, オーディトリウム	9	9~18	12.6	63	27
駅待合室	27	36~45	12.6	63	27
教室	18	18~27	9	45	27
病院	18	27~36	12.6	63	45
住宅	9	12.6~18	18	18	0.35 ⁹⁾
喫煙ラウンジ	—	—	—	—	144

範囲に着目した検討を行った。

表8 (A) ~ (D) に各研究者^{30~110)}によって報告された値をまとめて示した。各データは、測定方法、条件、目的などが異なっており、全てを同レベルで比較するのはかなりの無理があると思われる。しかし、表よりも第一に言えることは、わが国の住宅の場合は、窓などを開けて意図的に換気をしている場合も含むデータでは上限値が極端に高くなっているのはある程度当然の事としても、欧米に比べ換気率の下限値が高いと言うことであろう。この傾向は、新しいデータの場合は必ずしも明確ではなくなりつつあるが、それでもなお欧米の換気率は低いと言える。表8でみる限り、わが国の換気率は、最近ヨーロッパを中心に基準化されつつある基準値0.5回/h より少ないケースは稀であると言える。但し、既述のとおり、わが国の建物も気密性が高まりつつあり、カナダで開発され、北海道などを中心に建設され始めた R2000仕様住宅の様な高气密住宅の場合には、換気率が常時0.1回/h 以下となることも十分考えられ、このような場合には、住宅と言っても機械換気による常時換気が必要となるものと思われる。

また、わが国の場合には、Grot⁴⁴⁾、Warren⁵¹⁾、Persily⁷¹⁾、Ruotsalainen⁹⁰⁾、Johanson⁹¹⁾、Lyberg⁹⁵⁾らに見られるような度数分布を求めた報告がないので、

わが国の換気量の現状の度数分布を知ることができないが、これら外国の報告の場合を参考にすると、ある程度の予測はつくものと思われる。例えば、わが国の住宅の水準が北米の低所得者向けの住宅と同程度と考えれば、Grot⁴⁴⁾のケースなどは、参考になるのではないと思われる。

しかしながら、よりよい換気の実態の把握のためには、少なくとも欧米で行われているような統計的データが得られるような実測がわが国でも実施される必要があると思われる。そのためには、比較的簡便で、精度の良い換気量の測定法の開発が必要である。

また、実測によらずに住宅の構造や周辺市街地の建てこみぐあい、外界の気象条件などと気密の程度 (図4) を指標としてチャート図 (図5) から換気率を推定する方法も吉野³⁰⁾らによって提案されており、このようなアプローチもさらに検討されるべきである。

④換気の効率について

表8および図4、5などを用いれば、住居等一般居住環境における換気量の概要を知ることができるが、ここで求められている換気量はすべて、瞬時一様拡散に仮定に基づくものであり、室内を詳しくみれば局所的には予想される換気率よりかなり低い換気しか得られない場合が実際には起こることも十分考えられる。室内濃度に分布があると言うことは、それだけ換気の

表 8 (A) 住宅等室内の換気量の実測結果 (室内での測定例, 1987年以前)

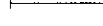
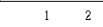
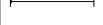
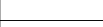
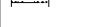
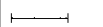
国	研究者	対 象	測 定 法	換気率の範囲 (度数分布)						備 考	
				1	2	3	4	5	回/h		
日 本	高津寿 ³⁰⁾ (1921)	自身の住宅 (1軒)	CO ₂ 濃度減衰法						1.5~2.7回/h	戦前の日本の住宅の代表例	
	野村 ³¹⁾ (1924)	代表的日本家屋 (1軒)	同上						1.5~6.5		
	大谷 ³²⁾ (1929)	立方体の住宅模型 (7個)	同上						0.3~2.63		
	勝田 ³³⁾ (1953)	RC 造集合住宅 (1戸)	CO ₂ 濃度減衰法と開口風量測定法						0.8~50	戦後の我国 (北海道を除く) の住宅の代表例	
	池田, 他 ³⁴⁾ (1985)	代表的日本家屋 (7軒)	CO ₂ 濃度減衰法						0.5~3.6		
	山本, 他 ³⁵⁾	RC 造集合住宅 (1戸)	同上						0.2~1.7		
	池田, 他 ³⁶⁾ (1987)	プレハブ実験住宅 (3軒)	同上						0.07~8.0	我国の高気密住宅の代表例	
北 米	Bahnfleth et al ³⁷⁾ (1953)	実験住宅 (2軒)	He 濃度減衰法						0.16~0.43	カナダの代表的な新築住宅	
	Tamura et al ³⁸⁾ (1964)	居住状態のカナダの住宅 (2軒)	同上						0.06~0.63		
	Tamura et al ³⁹⁾ (1979)	居住状態のカナダの住宅 (2軒, 上記と同じ住宅)	同上						0.05~0.43		
	Goldschmidt et al ⁴⁰⁾ (1979)	モービルホーム (2軒)	CO 濃度減衰法						0.1~2.0		
	Grot et al ⁴¹⁾ (1979)	低所得者向け住宅 (256軒)	CO ₂ 濃度減衰法と減圧法 2840 3030 2020 1010						0.25以下~4.25		
北 米	Hollouell et al ⁴²⁾ (1980)	省エネルギー住宅 (数軒)	同上						0.04~1.0		カナダの代表的な新築住宅
	Janssen et al ⁴³⁾ (1980)	実験住宅 (数軒)	トレーサーガス法						0.13~0.75		
	Cole et al ⁴⁴⁾ (1980)	カナダの実験住宅とプリンストンのタウンハウス	同上						0.06~0.68		
	Shau et al ⁴⁵⁾ (1981)	実験住宅 (2軒)	トレーサーガス法						0.15~0.4		
	Basset et al ⁴⁶⁾ (1981)	同上, 但し上記とは異なる2軒の住宅。	CO ₂ 及びSF ₆ 濃度減衰法						0.2~1.1		
	Moschandreas et al ⁴⁷⁾ (1981)	米国内各地の各種の住宅 (50軒程度)	同上						0.06~1.57		
	Shau et al ⁴⁸⁾ (1982)	実験住宅 (1軒)	SF ₆ 濃度減衰法						0.17~0.4		
	MacLaren Inc. ⁴⁹⁾	居住状態の家 (12軒)	同上						0.13~0.78		
	Persily ⁵⁰⁾ (1983)	パッシブソーラーハウス (56軒)	濃度減衰法 2840 3030 2020 1010						0.1以下~3.2		
	Doyle ⁵¹⁾ (1984)	住宅 (58軒)	減圧法						0.3~2.3		
	Nazaroff ⁵²⁾ (1985)	床下空間を持つ住宅 (2軒)	同上						0.3~0.65		
北 米	Varren et al ⁵³⁾ (1980)	住宅 (25軒)	NO _x 濃度減衰法 2840 3030 2020 1010						0.2以下~2.2	カナダの代表的な新築住宅	
	Hildingson et al ⁵⁴⁾ (1981)	スウェーデンの住宅 (5,600軒)	濃度減衰法						0.17~1.2		
	Liddament ⁵⁵⁾ (1982)	スウェーデンの住宅 (2軒)	同上						0.05~1.15		
	同上	イギリスの住宅 (3軒)	同上						0.1~1.7		
	同上	スイスの住宅 (1軒)	同上						0.2~0.4		

表 8 (B) 住宅等室内の換気量の実測結果 (床下空間での測定例, 1987年以前)

国	研究者	対 象	測 定 法	換気率の範囲 (度数分布)						備 考
				1	2	3	4	5	回/h	
日 本	池田, 他 ³⁴⁾ (1987)	プレハブ実験住宅 (1軒)	SF ₆ ガスによる定常濃度測定法	1.43回/h						
北 米	Nazaroff ⁵²⁾ (1985)	床下空間を持つ住宅 (2軒)	同上	0.2~3.9						

表 8 (C) 住宅等室内の換気量の実測結果 (室内での測定例, 1988年以降)

国	研究者	対象	測定法	換気率の範囲/頻度分布	
				換気率 (回/h)	
日	和吉ら ⁶⁶⁾ (1988)	住宅の模型 (1軒)	CO ₂ 濃度減衰法		0.94~5.0回/h
	山本ら ⁶⁷⁾ (1988)	開けた所に建つ住宅 (1軒)	同上		0.15~0.9
	池田ら ⁶⁸⁾ (1988)	首都圏に建つ住宅 (2軒)	PFT法		(室内) 0.41~0.46 (床下) 1.47~3.57
	堤ら ⁶⁹⁾ (1989)	4階建て校舎 (1軒)	プロパンガス定常法		0.2
	石岡ら ⁷⁰⁾ (1989)	学校 (3軒)	CO ₂ 及びSF ₆ 濃度減衰法		窓(開) 1.0~2.8 窓(閉) 0.41~0.94
	下田ら ⁷¹⁾ (1989)	プレハブ実験住宅 (1軒)	プロパンガス・SF ₆ 定常法		0.4~2.5
	下田ら ⁷²⁾ (1989)	プレハブ実験住宅 (1軒)	上		0.2~2.6
	小原ら ⁷³⁾ (1989)	強制排気装置の付いた住宅の小屋裏 (1例)	CO ₂ 濃度減衰法		0.73~4.20
	田中ら ⁷⁴⁾ (1989)	事務室 (2例)	SF ₆ 濃度減衰法		0.84~1.45
	石田ら ⁷⁵⁾ (1990)	プレハブ実験住宅 (1軒)	CO ₂ 定常法		換気率(ON) 1.3~2.0 (OFF) 0.1~0.6
欧	池田ら ⁷⁶⁾ (1990)	実験住宅 (1軒)	SF ₆ 濃度減衰法		0.066~0.126
	藤山ら ⁷⁷⁾ (1990)	住宅、事務室、地下街	不明		(住宅) 0.13~0.5 (事務室) 0.25~2.38 (地下街) 0.12~1.4
	Bohac et al ⁷⁸⁾ (1987)	居住状態の住宅 (1軒)	在来法(SF ₆ 定常法)PFT法		(在来法) 0.12~0.5 (PFT法) 0.06~0.25
	Harrie et al ⁷⁹⁾ (1987)	2軒並んで建つ実験住宅	SF ₆ 定常法		(冬~春) 0.05~0.85 (夏~秋) 0.05~1.00
	Nielsen ⁸⁰⁾ (1987)	ノルウェー10都市に建つ実験住宅	不明		0.18~0.26
	Basset et al ⁸¹⁾ (1988)	構造の異なる実験住宅5軒	SF ₆ 定常法		0.17~1.0
	Wouters et al ⁸²⁾ (1988)	ベルギー各地の住宅 (数10軒程度)	不明		0.1~2.0
	Edwards et al ⁸³⁾ (1988)	在米型実験住宅 (1軒) 及び省エネ型実験住宅 (1軒)	多種トレーサーガス法 (詳細不明)		(在米型) 0.94~5.1 (省エネ型) 0.23~3.7
	Lily et al ⁸⁴⁾ (1988)	実験住宅 (1軒)	SF ₆ 及びN ₂ O定常法		0.15~3.8
	Grot et al ⁸⁵⁾ (1988)	事務室 (1軒)	SF ₆ 濃度減衰法		0.1~2.8
米	Black et al ⁸⁶⁾ (1988)	事務室 (3軒)	SF ₆ 濃度減衰法		0.11~0.59
	Cramer et al ⁸⁷⁾ (1988)	建て住宅 (1軒)	同上		0.11~0.32
	Yull et al ⁸⁸⁾ (1988)	代表的なカナダの住宅 (78軒)	同上		0.02~1.0
	Persily ⁸⁹⁾ (1989)	アメリカ国内の事務室 (14軒)	同上	40~ 20~	0.1~3.0
	Proskiw et al ⁹⁰⁾ (1989)	カナダのウィニペックに建つR2000住宅 (20軒)	PFT法		0.03~0.16

効率が悪いことを意味しており、この効率を高めるためには、室内に攪拌ファンをおくなどして濃度分布を一樣にすれば良いことは明白であるが、問題は、その効率の良し悪しをどの様にして評価するかであり、北米においてはこの換気効率を如何にし評価するかと言う研究がASHRAE(米国空気調和冷凍工学会)を中心に盛んに行われるようになってきた。そのような状況を受け、わが国でも東京大学生産技術研究所が、空気

調和衛生工学会とASHRAEの協賛を得て換気効率に関する国際シンポジウムを1992年7月に東京で行ったが、まだ研究者の層も薄く、換気効率は重要な問題ではあるが、この問題に関するわが国の研究は、その緒に着いた段階であると言える。

4. まとめ

タバコ煙のような複雑な成分から成り立っている空気汚染物質による室内空気汚染に対する物理的対策と

表 8(D) 住宅等室内の換気量の実測結果 (室内での測定例, 1988年以降続き)

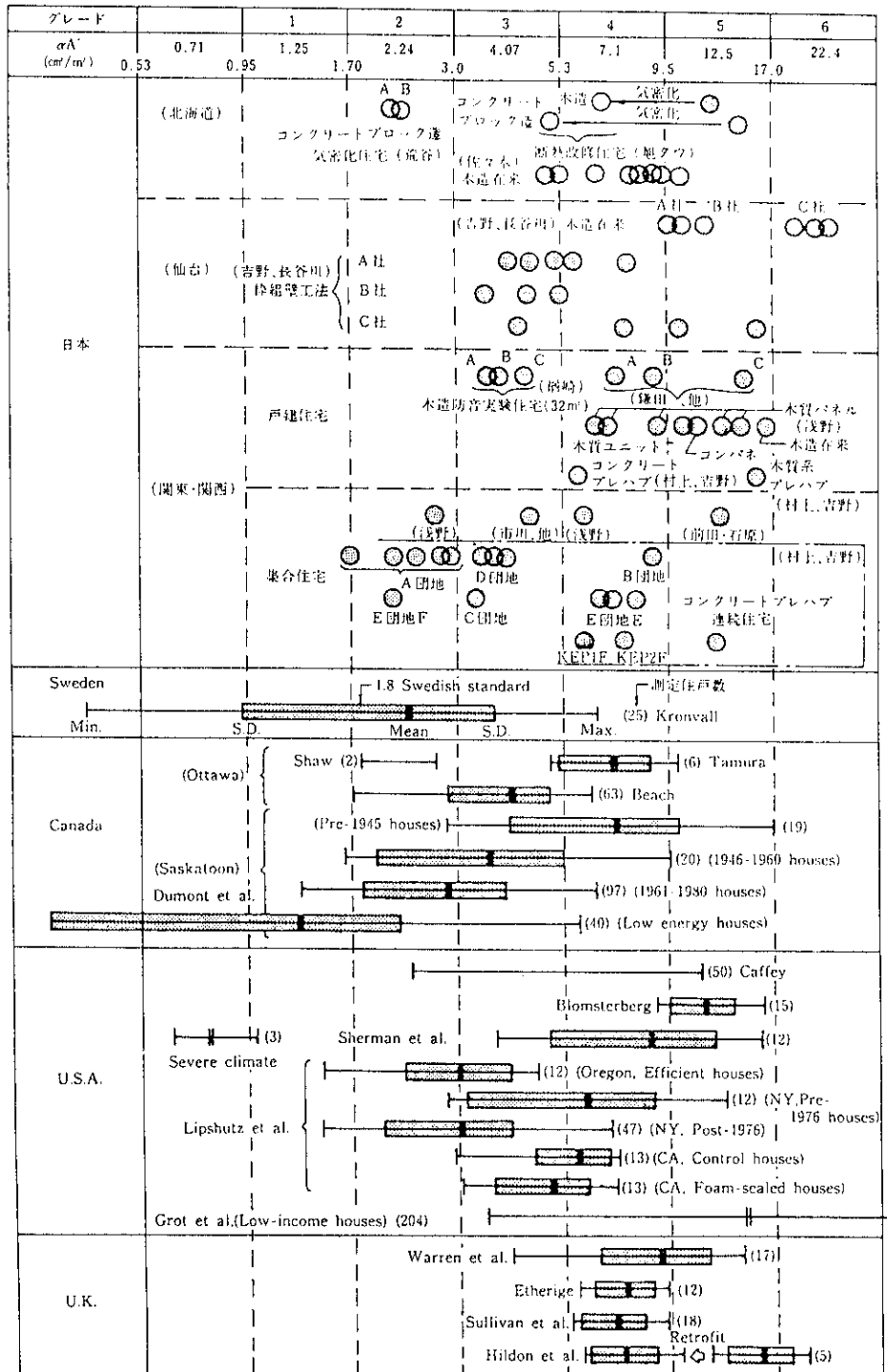
国	研究者	対象	測定法	換気率の範囲/頻度分布		
				換気率 (回/h)	1	2
欧	Alevantis et al ⁽⁸⁸⁾ (1989)	住宅 (2軒)	SF ₆ 濃度減衰法			
	Harrie et al ⁽⁸⁸⁾ (1989)	実験住宅の地下室	PFT法			
	Ruotsalainen et al ⁽⁸⁹⁾ (1989)	ヘルシンキに建つ住宅 (50軒)	CO ₂ 濃度減衰法			
	Johansson ⁽⁸⁹⁾ (1989)	スウェーデンに建つ住宅 (29軒) 同上 (19軒)	N ₂ O濃度減衰法 測定の詳細不明			
	Jones et al ⁽⁸⁹⁾ (1989)	工場 (1軒)	SF ₆ 及びN ₂ Oによる定常法と濃度減衰法			
	Basset et al ⁽⁸⁹⁾ (1989)	ニュージーランドに建つ住宅 (9軒)	SF ₆ による定常法と濃度減衰法			
	Brunsel et al ⁽⁸⁹⁾ (1989)	ノルウェーの事務室 (1例)	SF ₆ による定常法			
	Lyberg et al ⁽⁸⁹⁾ (1989)	スウェーデンの住宅 (1000軒)	詳細不明			
	Fehlmann et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	スイスの住宅 (5軒)	N ₂ Oによる定常法			
	Riveron et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	実験住宅 (1軒)	CO ₂ 濃度減衰法			
米	Werner et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	同上	同上			
	Mochandreas et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	4500m ² の事務室 (1例)	SF ₆ 法 (定常か非定常かは不明)			
	Hunter ⁽⁸⁹⁾ (1990)	窓のない学校 (1例)	ガス濃度減衰法 (ガスの種類は不明)			
	Grot et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	居住者のいる事務室 (1例)	SF ₆ 濃度減衰法			
	Jones ⁽⁸⁹⁾ (1990)	同上	CO ₂ 濃度から推定			
	Bonnberg et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	フィンランド国内の住宅 (251軒)	SF ₆ による定常法			
	Alevantis et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	事務室 (5例)	SF ₆ 濃度減衰法			
	Lebre et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	オランダの居住状態の住宅 (10軒)	SF ₆ による定常法			
	Wilson et al ⁽⁸⁹⁾ (1990)	実験住宅 (1軒)	同上			
	柳沢ら ⁽⁸⁹⁾ (1990)	ボストンの住宅 (501軒)	PFT法			

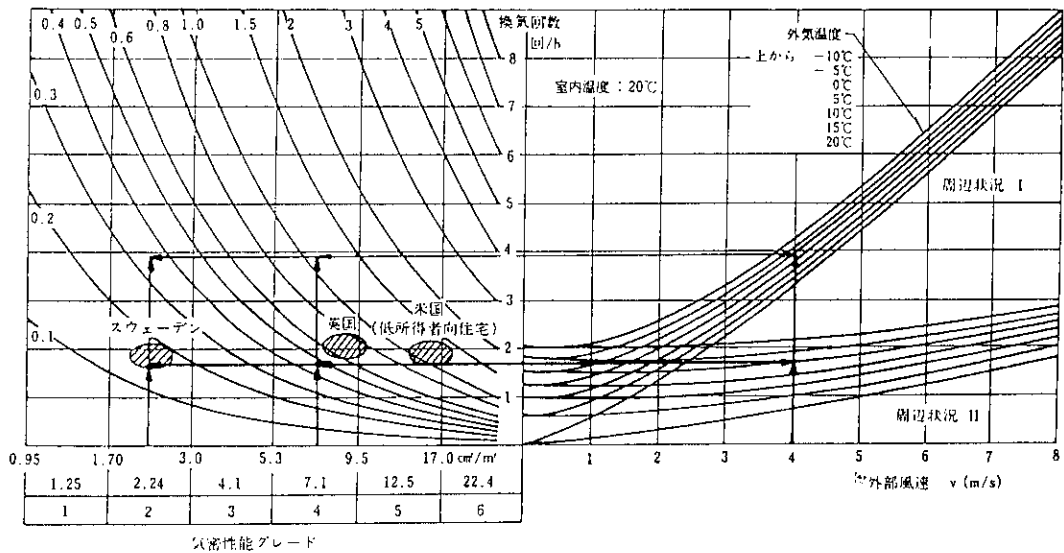
して最も実用的かつ確実な方法は、新鮮な外気を室内に導入する形で行われる換気である。

但し、わが国の住居、オフィスビル等の一般居住環境室内の換気量の実態についてはまだ十分研究が進んでいないため、少なくとも欧米で行われているような、統計的データが得られるような実測がわが国でも実施される必要があると思われる。そのためには、比較的

簡便で、精度の良い換気量の測定法の開発が必要である。

また、たとえ、量としては十分な換気があったとしても、室内の気流分布などが悪くなるため、濃度分布の大きくならないようにする換気法の開発などの研究のなされるべきである。この換気の効率に関しては、いままでわが国ではほとんど研究がなされていなかった。

図4 住宅全体についての気密性能のグレード表⁹⁶⁾

図5 気密性能と漏気量(換気率)の関係³⁶⁾

たが、今後はこの点も考えていかなければならないと思われる。

5. 終わりに

本研究のタバコ煙に関する文献を検索するに当たって多大なるご支援をくださった国立公衆衛生院生理衛生学部部長、大久保千代次先生及び東海大学医学部公衆衛生学教室助教授松本秀明先生のご支援を頂きました。また、換気量の実態に関する文献検索に当たっては、東北大学工学部建築学科助教授吉野博先生のご支援を頂きました。お世話になった方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Sterling, E., Sterling T. and McIntyer, D.: New Health Hazards in Sealed Buildings, *AIA Journal*, 1983.
- 2) Turiel, I.: Indoor Air Quality and Human Health, Stanford University Press, 1985.
- 3) Wadden, R. A. and Scheff, P. A.: Indoor Air Pollution, John Wiley and Sons, pp. 13-45, 1982.
- 4) WHO Regional Office for Europe: Indoor Air Pollutants: Exposure and Health Effects, "Report on a WHO Meeting, 1982.
- 5) 松本秀明(1992)「室内空気汚染の人体影響」第7回環境問題シンポジウム「室内空気汚染とその対策」講演要旨集, pp. 1-15.
- 6) 浅野牧茂: 環境情報科学, 第10巻, 第3号, pp. 30-39, 1981.
- 7) 猶崎正也: 喫煙と室内空気汚染, 空気清浄, 第14巻, 第4号, pp. 12-22, 1976.
- 8) Anderson, H. A. and Dalhman, T.: The Risk to Health of Passive Smoking, *Lakartidningen* 70, pp. 2833-2836, 1973.
- 9) Hark, H. P.: Problem of "Passive Smoking", *Munchener Med. Wochenscher*, Vol. 112, No. 5, pp. 2328-2334, 1970.
- 10) Hoegg, U. R.: Cigarette Smoke in Closed Space, *Environmental Health Paper*, Vol. 2, pp. 117-128, 1972.
- 11) Harke, H. P., Liedel, W. and Denker, D.: Zum Problem des Passivrauchens, II, Untersuchungen über den Kohlenmonoxidehalt der Luft im Kraftfahrzeug durch das Rauchen von Zigaretten, *Int. Arch. Arbeitsmed.*, Vol. 33, No. 3, pp. 207-220, 1974.
- 12) Harke, H. P., Baars, A., Prahm, B., Peters, H. and Schultz, C.: The Problem of Passive Smoking. The Concentration of Smoke Constituents in the Air of Large and Small Rooms as a Function of Cigarette Smaoked and of Time, *Int. Arch. Arbeitsmed.*, Vol. 29, No. 3, pp. 323-329, 1972.
- 13) Lawther, P. J. and Commis, B. T.: Cigarette Smoke and Exposure to Carbonmonoxide, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* Vol. 174, pp. 135-147, 1970.

- 14) McNail, P. E.: Practical Method of Reducing Airborne Contaminants in Interior Space. *Arch. Environ.* Vol. 30, No. 11, pp. 552-556, 1975.
- 15) Burunnenman, K. D. and Hoffmann, D.: Chemical Studies on Tobacco Smoke, LXI Analysis of Volatile Nitrosamines in Tobacco Smoke Polluted Indoor Environments, In: Environmental Aspects of N-Nitroso Compounds, IRAC Scientific Publication No. 19, pp. 343-356, 1978.
- 16) Weber, A., Fisher, T., Sancin, E. and Gamdfean, E.: La pollution de l'air par la Fumee de Cigarettes, *Sozial-und Preventiv-medizin*, Vol. 21, 4, pp. 130-132, 1976.
- 17) Chapell, S. B. and Perker R. J.: Smoking and Carbon Monoxide Levels in Enclosed Public Space in New Brunswick, *Can. J. Public Health*, Vol. 68, pp. 159-161, 1977.
- 18) Cuddeback, J. E., Donovan, J. R. and Burg W. R.: Occupational Aspect of Passive Smoking, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 37, No. 5, pp. 263-265, 1976.
- 19) Elliott, L. P. and Rowe, D. R.: Air Quality during Public Gatherings, *J. Air Pollut. Control Assoc.* Vol. 25, pp. 635-636, 1975.
- 20) Hark. H. P.: Zum Problem des Passivrauchens, I. Über den Einfluss des Rauchens auf die CO-Konzentration in Bueroraumen, *Int. Arch. Arbeitsmed.*, Vol. 33, No. 3, 1974.
- 21) Sebben, J., Pimm, P. and Shephard, R. J.: Cigarette Smoke in Enclosed Public Facilities, *Arch. Environ. Health*, Vol. 32, No. 2, pp. 52-58, 1977.
- 22) Cano, J. P., Catalin, J., Dumas, C., Viala, A. and Guillerme, R.: Determination de la Nicotine par Chromatographic en Phase Gazuse, II Appligation, *Ann. Pharmaceut. Fran.* Vol. 28, No. 11, pp. 633-640, 1970.
- 23) Godin, G., Wright, G. and Shephard, R. J.: Urban Exposure to Carbon Monoxide, *Arch. Environ. Health*, Vol. 25, No. 5, pp. 305-313, 1972.
- 24) Harke, H. P. and Peters, H.: Zum Problem des Passivrauchens, III, Über den Einfluss des Rauchens auf die CO-Konzentration Kraftfahrzeug bei Fahrten im Stadtgebiet, *Int. Arch. Arbeitsmed.*, Vol. 33, No. 3, pp. 221-229, 1974.
- 25) Seiff, H. E.: Carbon Monoxide as an Indicator of Cigarette-Caused Pollution Levels in Intercity Buses, US Dept. Transportation, Federal Highway Admin., Bureau of Motor Carrier Safety, 1973.
- 26) Hinds, W. C. and First, M. W.: Concentrations of Nicotine and Tobacco Smoke in Public Spaces, *N. Eng. J. Med.*, Vol. 292 No. 16, pp. 844-845, 1975.
- 27) Lefcoe, N. M. and Incelet, I. I. Particulates in Domestic Premises, II, Ambient Levels and Indoor Outdoor Relationship, *Arch. Environ. Health*, Vol. 30, No. 12, pp. 565-570, 1975.
- 28) Galuskinova, V.: 3, 4-Benzpyrene Determination in Smoky Atmosphere of Social Meeting Rooms and Restaurants, A Contribution to the Problem of Noxiousness of so-called Passive Smoking, *Neoplasma*, Vol. 11, No. 5, pp. 465-468, 1964.
- 29) Repace J. A. and Lowrey A. H.: Indoor Air Pollution, Tobacco Smoke and Public Health, *Science*, Vol. 208, pp. 464-472, 1980.
- 30) 高津奇章: 日本家屋の研究, 換気之部, 京都醫學雑誌, 第拾八卷, 第三號, pp. 286-305, 1921.
- 31) 野村仁: 家屋ノ自然換気ニ及ボス氣流ノ影響ニ就イテ, 國民衛生, 第一卷, 第十一號, pp. 1-32, 1924.
- 32) 大谷佐重郎: 日本家屋ノ自然換気ニ關スル總合的研究, 第三篇, 本邦各種家屋ノ自然換気ノ比較研究, 國民衛生, 第六卷, 第六號, pp. 1-66, 1929.
- 33) 渡辺要: 建築計画原論, III, 丸善, 1965.
- 34) 勝田高司, 藤井正一, 今野啓一: コンクリート造アパートに於ける換気に関する研究, 日本建築学会論文集, 第22号, pp. 235-236, 1953.
- 35) 日本建築学会: 設計計画パンフレット18, 換気設計, 1964.
- 36) 吉野博: 住宅の気密性能と漏気量の現状, 空気清浄, 第23巻, 第2号, pp. 29-40, 1985.
- 37) 池田耕一, 吉沢晋, 小峯裕巳, 阿部史朗: 居住状態の住宅室内に於けるラドンとその娘核種及び換気率の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 383-384, 1986.
- 38) 山本頼房, 長友宗重, 吉野博, 松本博, 内海康雄: 戸建て住宅を対象とした気密性能と換気量の関係についての実測, その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1099-1100, 1987.
- 39) 池田耕一, 吉沢晋, 小峯裕巳, 紙中修二: 住居におけるラドン濃度構成機構に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1227-1228, 1987.
- 40) Bahnfleth, D. R., Moseley, T. D. and Harris, W. S.: Measurement of Infiltration in Two Residences *ASHRAE Transactions*, No. 1614, pp. 439-452, 1957.
- 41) Tamura, G. T. and Wilson, A. G.: Air Leakage and Pressure Measurements on Two Occupied Houses *ASHRAE Transactions*, No. 1869, pp. 110-119, 1964.

- 42) Tamura, G. T. : The Calculation of House Infiltration Rates, *ASHRAE Transactions*, No. 2513, pp. 58-71, 1979.
- 43) Goldschmit, V. W. and Wilhelm, D. R. : Summer-time Infiltration Rates in Mobil Homes, *ASHRAE Transactions*, PH-79-10, No. 4, pp. 840-850, 1979.
- 44) Grot, R. A. and Clerk, R. E. : Air Leakage Characteristics and Weatherization Techniques for Low-Income Housing, Proceedings of DOE/ASHRAE Conference on Exterior Envelops of Buildings, pp. 178-194, 1979.
- 45) Hollowell, C. D., Berk, J. V., Boegel, M. L., Miksch, R. R., Nazaroff, W. W. and Traynor, G. W. : Building Ventilation and Indoor Air Quality, LBL-Report LBL-10391, EEB-Vent 80-3, 1980.
- 46) Janssen, J. E., Pealman, A. N. and Hill, T. J. : Calculating an Examination of Handbook Models, *ASHRAE Transactions*, DV-80-9, No. 1, pp. 751-764, 1980.
- 47) Cole, J. T., Zawacki, T. S., Elkins, R. H., Zimmer, J. W. and Macriss, R. A. : Application of a Generalized Model of Air Infiltration to Existing Homes, *ASHRAE Transactions*, DV-80-9, No. 2, pp. 765-777, 1980.
- 48) Shaw, C. Y. : A Correlation between Air Infiltration and Air Tightness for Houses in a Developed Residential Area, *ASHRAE Transactions*, No. 2655, pp. 333-341, 1981.
- 49) Basset, M. R., Shaw, C. Y. and Evans, R. G. : An Appraisal of the Sulfer Hexafluoride Decay Technique for Measuring Airinfiltration Rates in Buildings, *ASHRAE Transactions*, No. 2657, 1981.
- 50) Moscardreas, D. J. and Rector, H. E. : Indoor Radon Concentrations, Proceedings for International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, 1981.
- 51) haw, C. Y. and Brown, W. C. : Effect of a Gas Furnace Chimney on the Air Leakage Characteristic of a Two-Storey Detached House, *Building Research Note, National Research Council Canada*, No. 192, 1982.
- 52) MacLaren Engineers : A Study to Determine Contaminat Build-up in Houses, Report to National Research Council, Contract OSR81-00023, 1982.
- 53) Persily, A. K. and Grot, R. A. : Air Infiltration and Building Tightness Measurements in Passive Solar Residences, *Solar Energy*, pp. 118-121, 1983.
- 54) Doyle, S. M., Nazaroff, W. W. and Nero, A. V. : Time-Averaged Indoor Rn Concentration and Infiltration Rates Sampled in Four US Cities, *Health Physics*, Vol. 47, No. 4, pp. 579-586, 1984.
- 55) Nazaroff, W. W. and Doyle, S. M. : Radon Entry into Houses Having a Crawl Space, *Health Physics*, Vol. 48, No. 3, pp. 265-281, 1985.
- 56) Warren, P. R. and Webb, B. C. : The Relation between Tracer Gas and Pressurization Techniques in Dwelling, 1st AIC Conference, 1980.
- 57) Hildingson, O. : Measurements of Radon Daughters in 5,600 Swedish Homes, Proceedings of International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, 1981.
- 58) Liddament, C. A. : The Validation and Comparison of Mathematical Models of Air Infiltration, Report to AIC (Air Infiltration Center), 1982.
- 59) Dietz, R. N. and Cote, E. A. : Air Infiltration Measurements in a Home Using a Convenient Perfluorocarbon Technique, *Environmental International*, Vol. 8, pp. 419-433, 1982.
- 60) Yanagisawa, Y., Spengler, J. D. and Ryan, P. B. : Manual for Infiltration Measurement Using Perfluorocarbon Tracer Gas and Passive Collectors Harbord School of Public Health, 1984.
- 61) Grimsrud D. T., Sherman, M. H., Janssen, J. E., Pearman, A. N. and Harrie, D. T. : An Inter-comparison of Tracer Gases Used for Air Infiltration Measurements, Proceedings for ASHRAE Annual Meeting, No. 2572, pp. 258-267, 1980.
- 62) 国民線量推定のための基礎調査委員会 : 国民線量推定のための基礎調査 (XI), 1988.
- 63) 恒吉主格, 出口清孝, 井上一二三, 橋口智志 : 降圧時の自然換気システムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 835-836, 1988.
- 64) 山本頼房, 長友宗重, 吉野博, 松本博, 内海康雄 : 木造戸建て住宅を対象とした気密性能と、換気量の関係についての実測, その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 855-856, 1988.
- 65) 池田耕一, 吉沢晋, 小峯裕巳 : パッシブモニター法による一戸建て住宅室内外のラドンガス濃度の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 867-868, 1988.
- 66) 堤知子, 佐々木隆, 荒谷登 : 学校の換気経路と換気量の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 599-600, 1989.
- 67) 石川善美, 長友宗重, 伊藤直明, 吉野博, 山本頼房 : 小・中学校における教室の気密性能と換気量に関する

- 実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 601-602, 1989.
- 68) 千田善孝, 鎌田元康, 石田建一, 星川邦彦: 居住状態に転ける住宅の漏気・換気量に関する研究, (その1) 測定法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 615-616, 1989.
 - 69) 石田建一, 鎌田元康, 千田善孝, 星川邦彦: 居住状態に転ける住宅の漏気・換気量に関する研究, (その2) モデル住宅における長期測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 617-618, 1989.
 - 70) 小原総司, 赤坂裕, 須貝嵩, 出口清孝, 黒木莊一郎, 二宮秀典: 小屋裏強制排気による, 排気効果に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 621-622, 1989.
 - 71) 田中隆, 川島美勝, 枋原裕, 堀雅宏, 神村幸幸, 増田順子: オフィス環境総合調査研究(1), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 349-352, 1989.
 - 72) 石田建一, 鎌田元康, 千田善孝, 星川邦彦: 居住状態に転ける住宅の漏気・換気量に関する研究, (その3) モデル住宅における年間測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 559-560, 1990.
 - 73) 池田耕一, 伊藤和男, 浅野賢二: 室内気流のラドン娘核種の挙動に与える影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 661-662, 1990.
 - 74) 横山真太郎, 落藤澄, 近藤肇, 坂井俊和, 佐藤正章: 北海道における居住環境のラドン・ラドン娘核種の放射能レベル, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 309-312, 1990.
 - 75) Bohac, D. L., Harrie, D. T. and Horner, G. S.: Field Study Comparisons of Constant Concentration and PFT Infiltration Measurements, Proceedings for 8th AIVC Conference, pp. 47-51, 1987.
 - 76) Harrie, D. T., Bohac, D. L. and Fortmann, R. C.: Measurement of Seasonal Air Flow Rates in an Unoccupied Single Family House, Proceedings for 8th AIVC Conference, pp. 15.1-15.15, 1987.
 - 77) Nielsen, A. F.: Use of Statistics for Predicting Distribution of Air Infiltration, Proceedings for 8th AIVC Conference, pp. 9.1-9.13, 1987.
 - 78) Bassett, M. R.: Natural Air Flows between Roof, Subfloor, and Living Spaces, Proceedings for 9th AIVC Conference, pp. 5-26, 1988.
 - 79) Wouters, P., L'Heurex, D., Voordecker, P. and Bossicard, R.: Ventilation and Air Quality in Bergian Buildings; A State of the Art, Proceedings for 9th AIVC Conference, pp. 421-439, 1988.
 - 80) Edwards, P. E. and Irwin, C.: Further Studies of Passive Ventilation system—Assessment of Design and Performance Criteria, Proceedings for 9th AIVC Conference, pp. 61-84, 1988.
 - 81) Liliy, J. P., Piggins, J. M. and Stanway, R. J.: A Study of the ventilation Characteristics of a Suspended Floor, Proceedings for 9th AIVC Conference, pp. 123-140, 1988.
 - 82) Grot, R. A., Persily, A., Hodgson, A. T. and Dasey, J. M.: Ventilation and Indoor Air Quality in Modern Office Buildings, Proceedings for 9th AIVC Conference, pp. 303-326, 1988.
 - 83) Black, M. S. and Bayer, C. W.: Pollutant Measurement Methods Used in IAQ Evaluations of Three Office Buildings, Proceedings of the ASHRAE Conference, IAQ 88, pp. 317-353, 1988.
 - 84) Cramer, R., Schuler, Furrer, C., D. Burkart, and W.: The Influence of a Controlled Natural Ventilation on the Indoor Radon Decay Products Concentration; Case Study, Proceedings for 9th AIVC Conference, pp. 303-326, 1988.
 - 85) Yulli, G. K., and Comeau, G. M.: Investigations of the Indoor Air Quality, Airtightness, and Air Infiltration Rates of a Random Sample of 78 in Winnipeg, Proceedings of the ASHRAE Conference, IAQ 89, pp. 122-127, 1989.
 - 86) Persily, A.: Ventilation Rates in Office Buildings, Proceedings of the ASHRAE Conference, IAQ 89, pp. 128-136, 1989.
 - 87) Proski, G., Poersol, P. and Riley, M.: Observed Formaldehyde Levels in 20 New Houses with Mechanical Ventilation Systems, Proceedings of the ASHRAE Conference, IAQ 89, pp. 164-169, 1989.
 - 88) Alvantis, L. E. Girman, and J. R.: Occupant Controlled Residential Ventilation, Proceedings of the ASHRAE Conference, IAQ 89, pp. 184-191, 1989.
 - 89) Harrie, D. T., and Gasby, K. J.: Air Flow Measurement Techniques Applied to Radon Mitigation Problems, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 265-281, 1989.
 - 90) Ruotsalainen, R., Ronnberg, R., Majanen, A. and Seppanen, O.: The Performance of Residential Ventilation Systems, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 325-339, 1989.
 - 91) Jonsson, A. O.: Air Change in Flats with Natural Ventilation; Measurements and Calculation, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 85-100,

- 1989.
- 92) Jones, P. J. and Powell, G.: Comparison of Air Infiltration Rate and Air Leakage Test under Reductive Sealing for an Industrial Building, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 131-152, 1989.
 - 93) Basset, M. R. and Beckert, H. M.: Automated Tracer Equipment for Air Flow Studies in Buildings, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 293-310, 1989.
 - 94) Brunzell, J. T. and Skaret, E.: Infiltration and Ventilation Developments in Norway, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 293-310, 1989.
 - 95) Lyberg, M. D. and Boman, C. A.: Air Change and Scatter in Mechanical Ventilation Rates in Swedish residences, Proceedings for 10th AIVC Conference, pp. 413-418, 1989.
 - 96) Fehlmann, J., Wanner, H. U. and Gay, J. B.: Air Change Rates and Indoor Air Quality in Bedrooms of Well Tightened Residential Buildings, Preprints for 11th AIVC Conference, Vol. 2, pp. 42.1-42.11, 1990.
 - 97) Riberon, J., Bienfait, D., Barnaud, G. and Villain, J.: Effect of Wind Pressure Fluctuations on Air Movement inside Buildings, Preprints for 11th AIVC Conference, Vol. 1, pp. 15.1-15.12, 1990.
 - 98) Werner, H.: Demand Controlled Ventilation System, —Practical Test— Preprints for 11th AIVC Conference, Vol. 2, pp. 39.1-15.21, 1990.
 - 99) Mochandreas, D. J. and Relwani, S. M.: Characterization of a Healthy Building, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1, pp. 555-560, 1990.
 - 100) Hunter, I.: Addressing Discomfort and Dissatisfaction in a Windowless School, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1, pp. 745-749, 1990.
 - 101) Grot, R. A., Hodgson, A. T. and Persily, A.: Indoor Air Quality Evaluation of a New Office Building, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 3, pp. 401-406, 1990.
 - 102) Jones, P. J.: Room Air Distribution and Ventilation Effectiveness in Air Conditioned Offices, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 133-138, 1990.
 - 103) Ronnberg, R. and Ruotsalainen, R.: Indoor Climate and the Performance of Ventilation in 251 Residences, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 269-274, 1990.
 - 104) Alevant, L. E. and Hayward, S. B.: The Feasibility Study of Achieving Necessary Initial Mixing when Tracer Gas Decays for Ventilation Measurements, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 349-354, 1990.
 - 105) Lebre, E., Boleij, J. and Brunekreef, B.: Home Ventilation Normal Living Conditions, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 413-418, 1990.
 - 106) Wilson, D. J. and Walker, I. S.: Combining Air Infiltration and Exhaust Ventilation, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 467-472, 1990.
 - 107) Yanagisawa, Y., Spengler, J. D., Ryan, P. B. and Billick, I. H.: Relationships along Indoor NO₂, Air Exchange Rate and House Characteristics of Residential Houses in Boston, Proceedings for the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 485-490, 1990.
 - 108) 国民線量推定のための基礎調査委員会：国民線量推定のための基礎調査 (IV), 1981.
 - 109) Dietz, R. N. and Cote, E. A.: Air Infiltration Measurements in a Home Using a Convenient Perfluorocarbon Tracer Technique, *Environmental International*, Vol. 8, pp. 419-433, 1982.
 - 110) Yanagisawa, Y., Spengler, J. D. and Ryan, P. B.: Manual for Infiltration Measurement Using Perfluorocarbon Tracer Gas and Passive Collectors, Harbord School of Public Health, 1984.
 - 111) Janssen, J. E.: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, *ASHRAE Journal*, Oct. 1989, pp. 40-48, 1989.