

■ クラウス・フィツナー教授国際名誉員推挙記念講演会要旨

田中辰明 訳 お茶の水女子大学教授

キーワード：わき出し換気(Quelluftung, Displacement Ventilation), 床吹出し空調(Under Floor Air Conditioning), ヘルマン・リーチェル(Hermann Rietschel), 室内空気質(Indoor Air Quality), ドイツ(Germanty)

1. ヘルマン・リーチェルとヘルマン・リーチェル研究所

私が歴史ある(社)空気調和・衛生工学会の国際名誉員に推挙されましたのは身に余る光栄であります。この報を受けましたときには一瞬“本当の話か?”と疑ったのですが、躊躇することなくお受けすることと致しました。お受けすることがこの分野での日独の技術交流の促進にお役に立つと考えたからです。ありがとうございました。私は2002年8月までベルリン工科大学ヘルマン・リーチェル研究所の所長でありましたので、ヘルマン・リーチェルとヘルマン・リーチェル研究所について最初にお話したいと存じます。リーチェルは1847年4月19日にドレスデン(Dresden)で生まれました。父親は有名な彫刻家でエルンスト・リーチェル(Ernst Rietschel)といました。ワイマール(Weimar)のゲーテ・シラー記念碑(Goethe-Schiller Denkmal)やヴォルムス(Worms)のルッター記念碑(Luther Denkmal)は氏の代表作品として知られています。ヘルマン・リーチェルは1867年にベルリンに移り王立工芸アカデミー(Kgl. Gewerbeakademie)で機械工学を専攻しました。ここを卒業後1871年に暖房・換気・衛生設備の工事会社を設立し、1年後には氏の友人ヘンネベルク(Henneberg)の協力を得、会社を急成長させました。リーチェルは実務家としても大成功を取めたのですが、これだけでは満足せず、1880年に実務の傍ら著作活動に入っています。まず、ドイツの“建築ハンドブック”で暖房と換気の章を執筆いたしました。この時期に後にベルリン工科大学となった当時のシャロットテンブルク工科大学(TH Charlottenburg)に暖房と換気の講座をつくるために招へい(聘)を受けています。そこで、リーチェルは隆盛を誇った実業から引退し、大学教授などの公職についています。同時に、ベルリンに新しく建設される国会議事堂の建築設備審査委員などになり、ベルリン工科大学の学長にもなっています。多くの業績を残しましたが、名著“換気と暖房装置

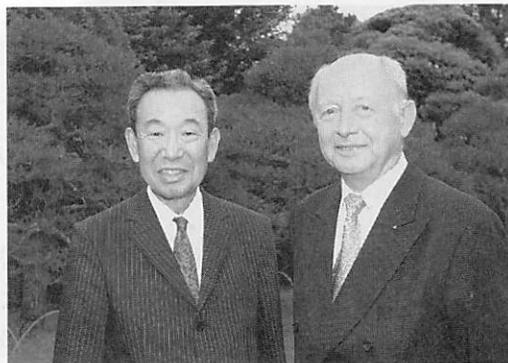


写真-1 クラウス・フィツナー教授(Professor Dr.-Ing. Klaus Fittzner)と抄訳者(総会会場にて)

の計算と設計のための教本(Leitfaden zum Berechnung und Entwerfen von Lüftungs- und Heizungsanlagen)を著わした業績は大きいと考えます。この初版は、1893年に出版されました。これまで技術者の経験で行われてきた暖房や換気の技術に学問の裏づけが行われたのであります。この著作は2巻からなり、1巻は負荷計算や配管の設計法など理論を扱い、2巻では放熱器、換気扇、ボイラなどの図面を紹介しています。そのため、単に設備技術者だけでなく、一般建築家にも愛読されたたちまちにして売り切れております。第2版は、翌年少し手を加えては発刊され、その後も研究成果を盛り込んで改定が行われました。リーチェルは1914年2月に亡くなっていますが、1913年に出版された教本は第5巻になるのですが、当時の教授のBrabbeéと共著になっています。その後もそのときの教授との共著の形をとり、現在では1994年に第16版が出版されています。リーチェルは1910年に退官していますが、その後は1911~1924年はK. Brabbeé博士が、1926~1949年はH. Grober博士が、1950~1968年はW. Rais博士が1968~1991年はH. Esdorn博士が、それ以降2002年までは私が後任を勤めました。1950年からベルリン工科大学の暖房と空調の研究所は、ヘルマン・リーチェルを記念してヘルマン・リーチェル研究所と呼ばれるようになりました。研究所は第二次世界大戦で被害を受けたものですから、建て替えられ、現在のものは1960年に計画が始まり建設されたものです。この研究所では、熱負荷計算のドイツ工業規格DIN 4701をつくってきたものですからこ

*1 平成16年5月17日工学院大学11階第5会議室にて開催。

*2 フィツナー教授の略歴などは、空気調和・衛生工学 Vol. 78, No. 6(平成16年6月発行)の巻頭“国際名誉員”欄をご覧ください。



写真-3 ヘルマン・リーチェルの胸像(ヘルマン・リーチェル研究所)

れに関連し、放熱器の能力試験を公にできる装置、空調の実験装置、恒温恒湿室、多目的実験室などを持っています。また、学生の講義用には120名を収容できる教室を持っています。建築設備に関する図書を集めた図書室もあります。

2. 室内における空気汚染物質と温度の分布

私自体は24年間にわたりドイツの空調会社¹⁾に勤務し、技術開発の責任者をしておりました。そこで多くの研究開発をいたしました。私は研究開発を世間に公開することを希望し、学会発表を行ってきました。開発技術を公開すると企業秘密が漏えいするとして嫌う会社も多いのですが社長はそれを許可してくれました。同業他社に真似されたら、さらにそれを上回る技術開発をすればよい、発表することでさらに他人から有益な意見がいただけるといった考えです。こういう理解を示していただけたことで会社に私は大変感謝いたしております。特に夢にも思わなかったベルリン工科大学から招へいを受けた際にも、会社は嫌がらずに私を送り出してくださいました。そして、顧問として会社に助言するように申し出られました。有難いことです。この間に行いました研究開発の一つがわき出し換気であり、床吹出し空調です。空気調和は天井や壁から吹き出すのが常識でしたから、当初は理解されずに苦労しました。さんざんの非難も受けました。でも私は多くの実験や理論計算から、わき出し換気、床吹出し空調は多くの長所を持っていると考え、実際の現場で少しずつ実施いたしました。ケルンのソニービル、エッセン市のFolkwang博物館、マインツのカジノで実施し、徐々に世間の理解を得、ついにはボンの国会議事堂でもこれを使用してくださいました。本日はその理論となるところをお話いたします。

2.1 はじめに

空気調和の目的は、ご承知のとおり部屋から熱負荷やじ

んあいなど汚染負荷を取り除くことです。あるときは最初の課題が重要で、あるときは2番めが重視されます。また、両方が同じくらい重要視される場合も多いのです。汚染物質の濃度分布と室内空気温度分布、汚染物質の種類、存在場所を正しく知るために室内空気の流れ、換気システムが重要になります。空気汚染と温度の分布、風速などを知る知識が必要で、これに役立つ判断の基準も必要になります。

2.2 空気汚染種類

通常の空気の成分はご承知のとおり酸素、窒素、希ガスそれに少しの水蒸気です。これらが空気の99.9%を構成しています。

残りの0.1%は非常にわずかな量ですが、非常に多岐にわたる物質からなっています。分析機器の向上は日進月歩であります。空気の汚染物質としては、8000種類以上のものが知られています。流体、固体、気体のエアロゾル、そして揮発性有機化合物(VOC)があります。さらに幾つかの無機質の物質があります。これらが最も少ない濃度でもよくない存在でして、また有害でもあります。これらの幾つかの物質に対する人間の臭覚の限界はppbの範囲です。これは実に 10^{-9} ということになります。

エアロゾルには最も微細な水滴、直径が $10\mu\text{m}$ 以下の粒子、有機物質ではウイルス、真菌、バクテリア、孢子そして花粉があります。空気の質量は小さいのですが、この空気と比べてもエアロゾルの質量は小さいのです。でもエアロゾルの数量は非常に大きいのです。直径が $1\mu\text{m}$ 以下のエアロゾルは肺にまで到達いたします。そして、 $0.01\mu\text{m}$ までのものは人体に大きな作用をいたします。この分野における広範囲な研究は、やっとなりに就いたばかりです。通常室内では1000の菌の濃度が普通です。衛生分野の専門用語では、コロニー形成単位KBE²⁾という単位を使用しています。これは、通常室内空気 1m^3 にどれだけ存在するかをいい、クリーンルームや手術室でも使用されます。比較のために、手術室では患者の近くでは200KBE/ m^3 以下にするように努力が払われています。さらに、多くのクリーンルームはその名前が表しますように、特に清浄でじんあいのない空気を維持しなければなりません。通常 1m^3 あたりの空気に 3×10^6 以下のじんあいの存在しか許容されません。同様に気体の場合、多くの粒子が存在しても粒子が小さいので、質量濃度は非常に小さくなります。 1mm^3 の空気におよそ 1mg の物質が存在したとしますと、直径 $0.5\mu\text{m}$ の粒子が 10^9 存在することになります。大都会では 1kg の空気に $100\mu\text{g}$ の粒子が含まれています。質量濃度では 10^{-7} に相当いたします。これは 1m^3 の空気に 10^9 の粒子が含まれているのです。ガス状の含有物もしくは汚染物濃度は 100ppm から 10ppb 、すな

わち 10^{-4} から 10^{-8} ということになります。

ここでまずそれが有害物質なのか、そうでないのか、また知覚しうるものか、そうでないかを区別しなければいけません。多くの場合、有害物質はある濃度以上で有害ということになります。しかし、この閾値の決定は全く簡単なものではありません。この許容地は、文献により求めることができます。例えば MAK 値³⁾、WHO⁴⁾、UBA⁵⁾ などで

室内空気の最初の条件は、有害物質が有害となる濃度に達しないことで、これは臭覚が知覚できるか否かということとは関係がないことなのです。その他の物質についても、室内における濃度とその分布ができるだけわかっていることが望ましいのです。

2.3 汚染と熱流の広がり

熱流と汚染はさまざまな方法で広がってまいります。部屋の中で最もよく生じる広がり機構は、熱流の場合でも汚染の場合でも対流によるものです。拡散によるものはほぼ無視できます。これはいつも壁の近くでは適用できません。対流による動きは空気の吹き出し、もしくは密度の相違により生じるもので、壁へ向けての熱の移動により空気の流れと汚染が生じるのです。しばしば壁付近では、熱移動と物質移動が同時に行われます。特に、これは人間の体表面で生じますが、熱源が室内にある限り、室内のすべての面でこういうことが生じます。

ガス状の汚染物質で非常に微細なエアロゾルは対流の動きにより移動し時間遅れがなく、直ちに空気に混ざります。大きな粒子の場合にはそれは当てはまりません。沈降速度が対流速度と同じになった場合、すなわち粒子の直径が $10\ \mu\text{m}$ またはそれ以上になった場合です。壁の近傍では粒子はさまざまな力が粒子に働くものですから、また違った動きをいたします。重力による粒子の沈降速度は表-1 のようになります。

ある壁から室内の周辺に向けての熱移動は、周囲へ向けての物質移動により根本的に異なります。ここでは、空気へ向けての対流と他の壁へ向けての放射とが同時に起こります。放射の吸収による空気の温度上昇は無視できます。

対流の重要性から、室内気流を理解することは特に重要です。まず、室内における主要な気流が大きな影響力を持ちますが、その他の小さな気流の領域、空気の吹き出し場所の周囲あるいは障害物における後流あるいはまた、壁における浮力による上昇気流なども影響します。

物質分布は、次のような影響により異なってまいります。

- 1) 等温流か非等温流か
- 2) 供給空気量、もしくは排気量が等しいか否か
- 3) 汚染物質源の分布が等しいか等しくないか

表-1

粒子の直径 [μm]	0.01	0.1	1	10
沈降速度 [mm/s]	0.013	0.004	0.07	5

- 4) 汚染物質の密度が等しいか否か
- 5) 汚染源と熱源に結び付きがあるか否か
- 6) 室内の空気流が混合気流か押し出し流れかそれとも引き出し換気か
- 7) 気流また物質の流入は定常的かそれとも非定常か
- 8) 層流の流れかそれとも乱流か

これらの組合せは無限に大きくなります。技術者はそういう場合最も重要な要素に目を向けます。空気調和を行っている建物では、等温の流れは大した役割を果たしません。非等温の場合、冷房ではより重要な役割を果たします。室内に人間もしくは機械があった場合、いつもそれらは同時に汚染物質を排出し、熱を発散しています。このような場合、次のような結果について調査が必要になります。

混合換気の場合は吹き出し口、吸込み口の位置は大して重要ではありません。これは経験から求めることができます。部屋の空間へアネモ型の引出し口で吹く場合や線状の吹き出し口で吹く場合があります。

多くの場合、汚染は特に物質と熱の移動が一緒になっている場合、同じ密度を想定して行っております。その場合、人間から放出される CO_2 の流れは上方へ向かい、部屋の上方に集められます。これは、人間が吐き出す暖かい空気に混合するからです。これは車庫における自動車についても同様のことが申せます。特別な例として、生産工場や手術室が知られており、密度の相違に着目しなければいけません。多くの実験研究は、重要な3種類の気流について行われ、定常状態において熱と物質の放出が同時に行われることを前提にしています。それでも広い場所などではすべてが実験されたわけでもありませんし、まだ不明な点が多いのです。層流の流れについてはあまり実験研究が行われていません。しかし、押し出し流れの場合に必要なことまいります。

2.4 濃度分布の判定尺度

ドイツではいわゆる汚染度 μ の測定はよく行われ、この使用は普及しています。これはある場所で測定したガスの濃度 C_p もしくはじんあい濃度と排気におけるそれぞれの濃度の比を取ったものです。ただし、これは給気には汚染ガスが含まれていないという条件が付きます。定常条件で行う実験の場合、トレーサガスとして笑気、 N_2O 、もしくは SF_6 が使用されます。

$$\mu = C_p / C_e \quad \dots\dots(1)$$

排気の濃度 C_r は汚染源の強度 S 、部屋に導かれる風量 V により決まります。供給空気の濃度 C_s は試験をしようとしている物質が可能な限り含まれていないのが理想ですが、そうでなければ一緒に測定し式(2)により補正する必要があります。

$$C_r = S/V + C_s \quad \dots\dots(2)$$

汚染度 μ の垂直もしくは水平の分布について関心が持たれます。または部屋容積もしくは床面積に対する μ の平均値などが重要です。ガスの源は一定でまたは源が1箇所であるのがよいのですが、試験を行った例では多数の源が部屋に分散しているものでした。典型的な実験例は、手術室の天井での空気質実験に用いられたものでした。これを基にドイツ工業規格 DIN 4799 が生まれました。人間の模型を手術台の周りに立たせ、トレーサガスで汚染源を再現し、手術台の上の患者の体表面にセンサを多数配置し、記録から推定をいたしました。

文献によりますと、特に外国の場合、汚染度の代わりにしばしばこの逆数で表す場所の空気質指数 ε が使用されています。

汚染源もしくはある場所の濃度を知らうとする場合に定常状態のトレーサガスを導入する代わりに、非定常で導入し評価を行うこともあります。濃度を知るのに減衰法、上昇法もしくはパルス法などさまざまな評価法をもって実験が行われます。このことについてあまり詳細にお話ししません。この詳細は、文献で紹介されています。例えば、Mundt 文史⁹⁾らにより出版されます“REHVA Guide Book に Ventilaton Effectiveness(換気の効率)”で紹介されていますのでご参照ください。

これにより、さまざまな形態での“空気の年齢”が算定できるようになります。トレーサガスはここで給気に用いられます。そして、部屋のある場所または排気の濃度変化を知ることによって空気の年齢を知り、ある場所での換気の効率を知ることができるのです。ある場所での換気の効率とは、一般に汚染度の逆数であります。

2.5 温度分布における特別例

すでに申し上げましたように、室内の汚染はもっぱら対流により広まってまいります。しかし、熱流は対流と放射により移動して参ります。それぞれの割合は、風速、周壁の熱吸収特性により異なってまいります。しかし、一般に室内での現象では両者はほぼ同じ割合になります。ですから、室内での温度分布と濃度分布は異なってくるわけです。

2.6 室内気流の種類

(1) 混合気流

図-3 は、混合気流の原理を示すものであります。天井もしくは他の場所から空気の吹出しが行われ、相当の速度

で室内に入っていきます。そして、全風量が室内で動き混合いたします。風速は 1 m/s もしくはそれ以上に達します。室内の温度ならびに風速分布はほぼ等しくなります。この場合の風速は、比較的速いものであります。室内の熱負荷が大きければ大きいほど風速も速くなります。熱に対して動的な力のほうが大きくなってはならないのです。図-1(a)~(c)は他の空気の移動場所で混合気流が生じている様子を示しています。空気の吹出しにより空気が供給されうる部屋の奥行きは、部屋の天井高さの 0.5 から 2 倍の範囲であります。排気口の位置は、たいして重要な意味を持ちません。

ここでは、混合気流の理想的な場合を図で示しましたが、実際の混合気流は図-6 に示すように多少ずれるものであります。

(2) 押し出し流れ

別の流れの形態である押し出し流れの原理を図-2 に示します。空気は流入側の面から均等に入ってまいります。そして、部屋の中に速い速度で、部屋の中を均等に流れ他の側から出て行くように流れます。熱の力または他の流れは流入空気の動的な力に比べて、小さくなければいけません。流出側の面の流出口は、ときに全面にわたる場合もあります。空気の動きは、押し出し流れの場合すべて同じ方向であります。押し出し流れの混合流れとの相違は室内の流れの方向にあります。

図-2(a)~(d)が示しますように、その他の流れの方向も考えられます。上から下へ、水平にある面から他の面へなどです。熱的な力がしばしば流れを妨げますので、押し出し流れの場合、風速は下から上への流れのときに、他の方向の流れの場合よりも小さくいたします。

(3) わき出し流れ

人間のような熱源が存在した場合、下から上への流れの押し出し流れは流れの図が異なり、図-3 に示すように“わき出し流れ”を形成し、風速を小さくできます。室内の流れは単に空気の導入の種類によるものでなく、熱源によっても決定されます。

熱源における浮揚する風量は、下から上へ向けて増大いたします。ある高さでは熱源は流入する場所の空気よりも、より多くの空気を流します ($V_0 > V_m$)。そして、押し出し流れを形成するのです。床の近くではある層に到達するまでは、ほぼ押し出し流れの状態であります。ほぼ押し出し流れと申しましたのは、熱源に向けまことに垂直に流れるからであります。床層の上部は浮揚する流れが、その定義のように流入空気よりも多くの空気を上方に促し、混合流れの形態を示します。

そこで連続の関係から、一般には壁の近くで下方へ流れが生じ、上方から下方へ減少していくのですが、これは

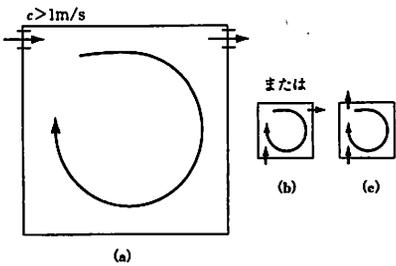


図-1 混合流れ

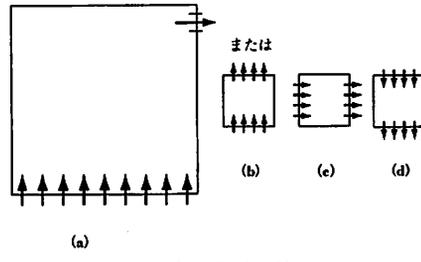


図-2 押し出し流れ

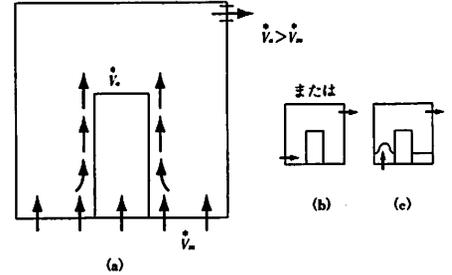


図-3 わき出し流れ

下方から上方へ増大していく流れに相当します。大きな部屋では、下方への流れは部屋の中でも生じます。図-3に他の考える空気の入込みを示しました。空気の流出口はここに示した室内気流を生じさせるために、常に熱源より上方に設けなければなりません。

2.7 混合換気とわき出し換気の分布に関する経験値

多くの実験がわき出し換気を行う部屋についての垂直温度と濃度分布を知ることを目的に行われております。これにより、わき出し換気の混合換気に対する優位性が最もよく証拠として示されます。典型的な温度分布は、Skistad氏により示されました。同氏は多くの実測から垂直分布を簡易化し、図-4のように線形にして示しました。部屋の中での線形の上昇とともに、床に沿って吹出しからの空気の温度上昇を知ることができます。この温度上昇は、多くの場合、床から天井へ向けての温度上昇になります。この温度上昇は、床面積に対する送風量にかかわってきます (Mundt 女史, 1990)。天井はその下の空気よりも冷たいものです。

しばしば生じる、汚染源と熱源が一緒になった場合の垂直の汚染分布は、全く別なものになり、すなわちS字型になります。

このことは、次のように説明できます。熱源は、対流と放射が作用します。熱エネルギーの半分とすべての汚染は対流によって空気に移動いたします。暖かい空気は上方に流れ、対流により壁の上部と天井を暖めます。冷却された空気は壁に沿い、空気温度と壁表面温度が等しくなる場所まで下方に流れます。最も強く冷却された空気は、さらに下方に流れます。天井と室内上部の壁は、エネルギーを下方の部屋の冷たい表面に放射します。それにより、部屋の上部では混合流れの原理が生じます。そこで汚染が生じます。部屋の下側では、空気はほんの少ししか汚染しません。そして、図-5に示すようなS字型の濃度分布が生じるのです。

温度分布は別のようにになります。熱源や天井からの放射は床を暖めます。これは、対流により空気流入口近くの空気に熱を与えます。それにより、図-4にみられますよう

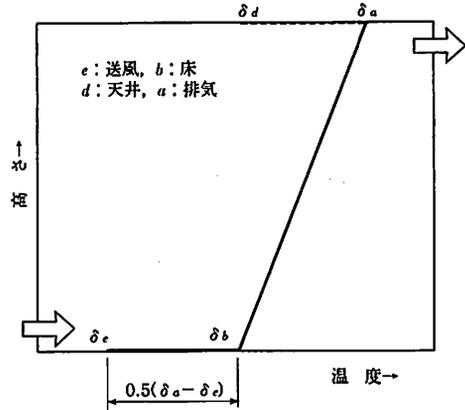


図-4 Skistad 氏による線形の温度分布

に、床近くの空気は比較的強力に加熱されます。部屋の下側の壁は空気よりも温度が高いため、上昇気流が生じ、上昇していく空気の温度が周囲温度に等しくなるまで垂直に流れます。ここで高めの温度の流れはさらに上方に流れます。これにより、線形の温度上昇が生じ壁の上方の下方へ向かう流れと同じようになります。実験では、一つ熱源がある場合に熱源はいつも同時に対流と放射が生じているものですから、S字型のプロフィールはなかなか得られません。

この証明は間接的ながらも Krühne 氏によって導かれました。ここで、同氏は汚染源を床に均等に分配しました。この場合、床の所で温度の場合と同じように線形の上昇していく濃度分布が生じました。図-5に、その分布を示しました。この問題に関するさらなる開示は、Skistad 氏 (2002 年) と私 Fitzner (2003 年) によって行われています。この分布図は、汚染源が熱源と必ずしも合体しないような場合に、何が生じるかといった問いに重要な回答をもたらせています。最初の推定は、混合流れの場合のように部屋全体に汚染度 1 が生じているということでしょう。これは、濃度の下方から上方への線形の上昇とは異なります。床に均等に汚染源があり、床での熱移動と一緒にしているということで説明がつかます。等温の流れでは、この関係はもちろん成立しません。

垂直の分布と同時に、水平の分布も汚染源がどれほどの

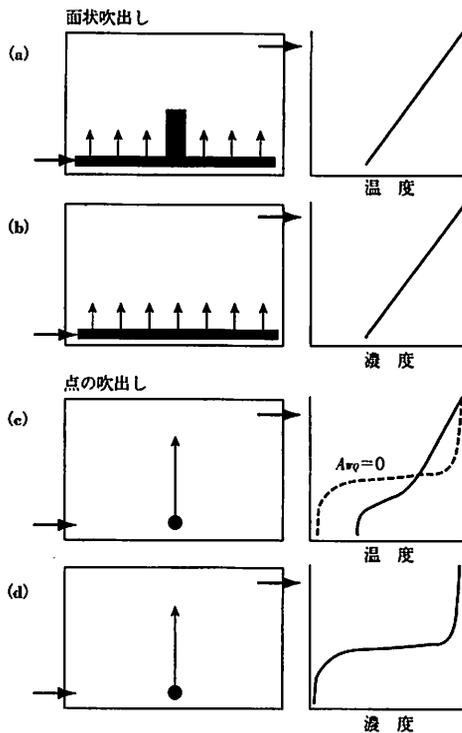


図5 物質と熱の放出のモード—温度と汚染濃度の分布 (Krühne氏とFitzner 1995年)

強度であるか、例えば1人の喫煙者によりある離れた場所に空気が到達するかといった予測できる重要な意義を持ちます。

ここで、押し出し流れは混合流れよりもよい結果を生じます。図-6は、ある部屋でわき出し換気を行い、部屋に2人滞在している場合と8人滞在している場合の物質汚染濃度 μ の水平分布を示しています。汚染物質の濃度は、部屋に2人滞在している場合のほうが8人滞在している場合よりも汚染源からの離隔に従い非常に早く減少するのがわかります。

濃度減衰の指数は8人滞在の場合は -0.4 、2人滞在の場合は -1.2 となっています。汚染源から 0.7m 離れた場合では、平均の汚染度は 0.33 となっています。

比較のため、私が1981年に行いました混合換気の実測例を図-6に示しましたが、混合流れの濃度減衰はおおよそわき出し換気で部屋に8人滞在する場合と同じ指数である -0.4 となっています。絶対値では、放射状吹き出し口を持つ換気のほうがわき出し換気より5倍大きくなっています。特に混合換気の場合、部屋のどの場所でも均等に混合されるのではなく、上記の近似値が取られたということがわかります。源からおおよそ 3m 離れた場所で、汚染度はおおよそ 1.0 になります。比較のため、床吹き出しの場合の値も示さなければなりません。濃度減衰の指数は -0.7 となっています。源から 1m 離れ、測定位置が床上 1.2m の場所で汚染度は 1.0 となっています。表-2に源から6

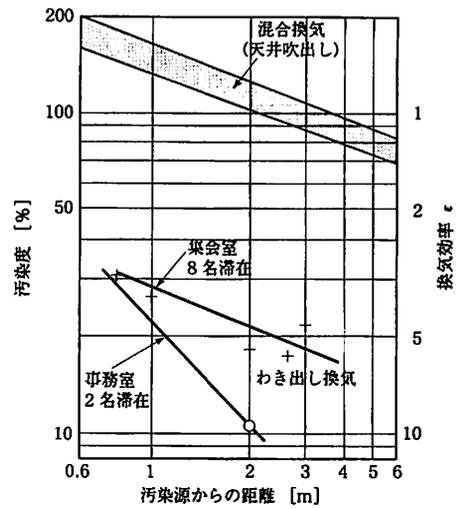


図-6 汚染源からの離隔による汚染度の垂直分布

m 離れ、汚染度が 1 となった場合の指数と汚染度をまとめて示しました。

$$\mu = \left(\frac{x}{x_1}\right)^c \quad \dots\dots (3)$$

わき出し換気の汚染度は、単に空気だけでなく壁が冷やされると変化をいたします。

図-7は、ある部屋でわき出し換気と天井冷房を行う場合の天井冷房の全冷房負荷に対する割合 ω_D を示すものであります。もしこの割合が 0.5 より大きければ、物質汚染度 μ_D は混合換気の場合に近づきます。もし、可能であれば冷房負荷の 50% は空気によって補われるべきです。しかし、これは冷房負荷が大きい場合に汚染度も大きくなる空気によるべきでなく、天井冷房によって行われるべきです。天井冷房を行うと、壁表面温度が空気温度より低い部分が広がり、床まで到達します。そして、壁部分で空気は下方に流れます。もう一つの問題は、高さ y_e において人間が吸入する空気の汚染濃度 C_e が周囲の同じ高さ y_e の濃度 C_p と同じかどうかということです。部屋の中で動かない限り、人が吸い込む空気の質 C_p は人間にとってよりよいものになります。同じ高さ C_p における周囲の濃度に対する吸気濃度の改善は新鮮空気層の高さ y_n と吸気の高さ y_e の比によります。体の所での上昇気流により、下からより良質な空気が得られます(図-8)。

2.8 成層と乱流の押し出し流れ

押し出し流れは、運転費が嵩むのでクリーンルームと手術室で使用されるだけです。クリーンルームでの気流は、源からの粒子の動きが有害な粒子を生産物や人間にできるだけ近づかないようにすることが重要です。粒子の源から人間、生産物を隔離することです。有害な生産物の場合は、生産物から出るエアロゾルから人間を、手術室の場合は手術を行う人間から放出される菌から患者を守らなければな

表-2

	指数 C	物質汚染度 μ	
		$\mu=1.0$ となる 場合の距離 x_1 [m]	距離 6 m の 場合の μ
わき出し換気	-0.4	0.06	0.15
床吹出し	-0.7	1.0	0.28
混合換気	放射状吹出し口	-0.25	3.0
	線状吹出し口	-0.1	3.0

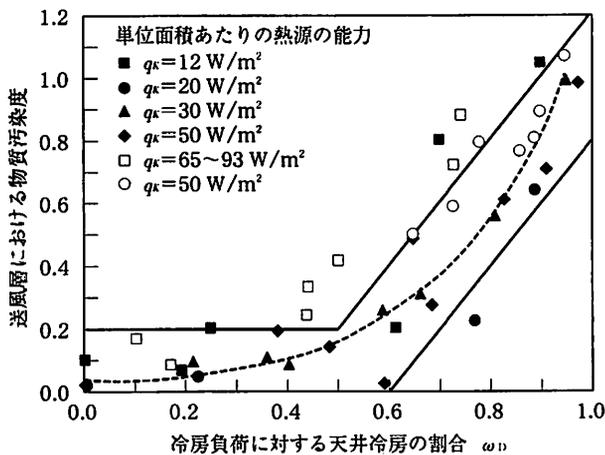


図-7 わき出し換気と天井冷房を行う場合の天井冷房の全冷房負荷に対する割合 ω_D に対する物質汚染度 μ_D (Krühne (1995年))

りません。これは、押し出し流れを実施することで、長い間成果を挙げて参りました。濃度の低減は、この流れで数十倍もよくなりました。最もよい状態は秩序だった押し出し流れで得られます。これは、層流の押し出し流れです。最初のクリーンルームの発明者は、この層流の押し出し流れを念頭においていました、と申しますのは、最初のクリーンルームはよく層流の押し出し流れについて語られていたからです。後になって“同じ方向の流れ”すなわち“一定方向の流れ”私どもの理解では押し出し流れなのですが、何も層流である必要はないのです。この場合よくあたかも層流と混同して語られていました。

レイノルズ氏が100年も昔に行った実験で層流といわれる流れは、一筋の煙の流れが長く目視されるものです。乱流ではこれはできません。流れが安定した範囲で安定しているか、そうでないかにかかわらず層流であることを前提にしています。この層流であることを証明するのは並大抵ではありません。と申しますのは、煙の出る細い管で煙を流れに持ち込む場合、細い管の周囲のレイノルズ数は40以下でなければなりません。そうでなければ、細い管による障害で乱流が生じるからです。この煙が出る細い管の直

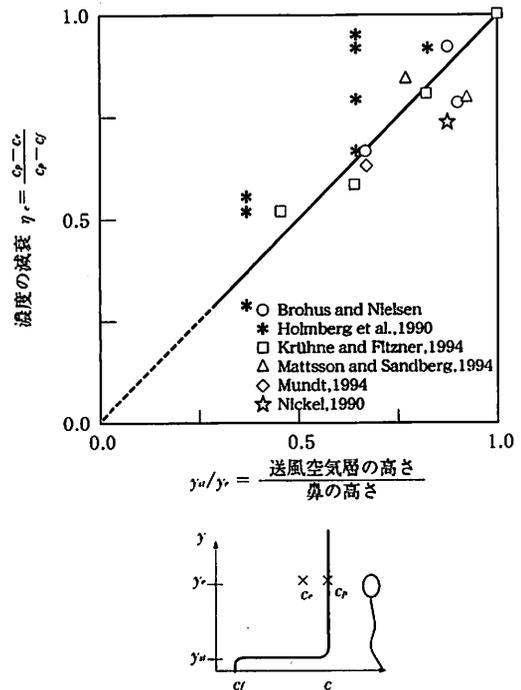


図-8 新鮮空気層高さ y_u と鼻の高さ y_r を関数とした吸気空気 の改善 (Brohus と Nielsen による (1996年))

径は1 mmより小さくなければなりません。

Leder氏が1992年に開発した方法を応用することもできます。氏はワックスまたその他の物質を加熱した非常に細い針金を用いて蒸発させました。物質は、流れの中で再び凝縮し流れの一筋の煙を可視化しました。ここに撮影した写真-4を示しますが、レイノルズ数が天井高を長さとし、およそ 10^6 となるにもかかわらず、高さ3mの部屋で天井から床への流れが層流になっているのがわかります。これはダクトの流れでレイノルズ数が2300で乱流になるのに反するわけではないのです。この場合、ダクトの流れに必要な助走長さがありません。

クリーンルームをダクトとみると、部屋は層流-乱流の変化が得られるには十分な高さがありません。部屋の入口の流れに層流発生装置があり、それが目の詰まった織物でできている場合で、層流発生装置から下流に向かい何の妨害物もないと想定いたします。層流発生装置の枠は妨害をしないといたします。ここで、非常に細い出口の径が使用されます。層流発生装置の織物の網の目の幅は、レイノルズ数が1以下になるようにしてあり、明白に流れは層流になります。

次のものは、乱流と層流の押し出し流れの幾つかの特性を詳細に示すものです(1988年フィツナー)。乱流と層流の差を明確にするために写真-5に二つの隣接した吹出し口による流れの写真を示しました。これも加熱した針金で可視化したものです。左は層流発生装置からの流れ右は断面積の40%に直径4mmの穴があり、よく押し出し流れの吹



写真-4 天井高3mのクリーンルームで上方から下方への層流押し流れを行い煙の可視化を実施(図の右に弱い乱流が認められる)

出しの覆いに使用されるものを使用しました。ブリキ製の有孔板の個々の開口での流れは、層流から対流への遷移域にあります。流れの乱れ度は右はおおよそ5%、左は1%以下です。乱流がいかにかんあいを本流に持ち込むかがわかります。

この流れの評価をするために計測はトレーサガスでなく、じんあいで行われました。じんあい計で多くの解決策が得られ、クリーンルームが必要であることが判明しました。

例外は手術室の天井に関する判断基準(DIN 4799, 1990年)で、本来汚染度を0.1以下にすることを目標にしていたもので、層流天井で可能になるような 10^{-3} 以下ではありません(Seipp氏 1998年)。

押し出し流れの場合、汚染領域における部分的な濃度を必ずしも排気の濃度に関連づけて換気効率や汚染度を算定するのではなく、吹き出し空気の流れの速度を計算する場合と同じように、部分的な数値を基本の流れの中央の濃度、あるいは汚染源から下方の流れの数値に関連づけたほうがよい場合もあります。全体の気流の中央値と比較すると、汚染源後方の汚染は非常に高くなります。これは気流が層流であればあるほど高い数値になります。

汚染源下方の流れの濃度の最大値に関連づけた、さまざまな乱れの強さに応じた汚染分布について、経験的な記述が幾つかあります(Sheer氏, 1998)。押し出し流れの中央もしくは断面全体に及ぶ一定速度の流れの中央に層流装置のすぐ上から、汚染粒子により可視化した細い流れを入れ、下方の異なる間隔における濃度分布をさまざまな乱れの度合いにおいて計測しました。層流装置の後方180mmの位置に取り付けた格子状の乱流装置によって、さまざまな度合いの乱流がつけられました。

気流のない空気の中に噴出された空気の流れの速度を計

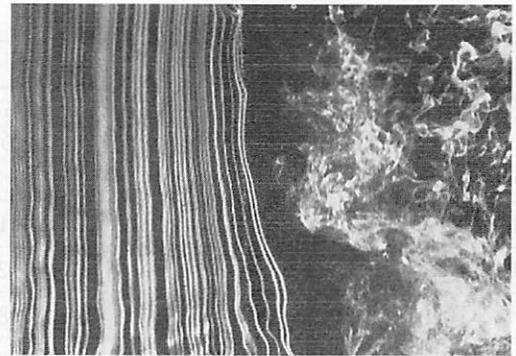


写真-5 層流発生装置の下(左)と有孔板の下における上方から下方への流れ

測した場合と同様に、普通に分布された粒子濃度 $c(y)$ が得られました。図-9に、層流装置から380mm離れた場所で得られた曲線が示されています。

乱れの強さの増加に伴い、粒子による流れ中央の汚染度 C_m は減少し、分布幅、もしくは分布特性の標準偏差が増大します。汚染粒子濃度 $c(y)$ は以下の式によって表されます。

$$c(y) = \frac{2P}{\mu\pi S^2} e^{-\frac{y^2}{s^2}} \quad \dots\dots (4)$$

ここで、

- x : 流れ方向の座標 [mm]
- y : 流れを横切る方向の座標 [mm]
- $c(y)$: 粒子濃度 [P/mm]
- P : 粒子源のわき出し強さ [P/s]
- μ : 基本の流れの速度 [m/s]
- $s = 2\sigma$: 分布プロファイルの標準偏差 [mm]

流れ中央の汚染度 $C(m)$ とわき出し強さ P ならびに基本の流れの速度との関係は、以下の式で表されます。

$$C(m) = \frac{2P}{\mu\pi S^2} \quad \dots\dots (5)$$

分布プロファイルの標準偏差は、汚染源からの距離 x と乱れの度合いの増加に伴い増加します。結果が図-10に示されています。この関係は、以下の式で示すことができます。

$$s = k_1 + xT_u/k_2 \quad \dots\dots (6)$$

標準偏差の増加は、横方向への広がりとして理解することができます。横方向への広がりも乱れの強さと源からの距離に伴って増大します。これらの結果は、例えば蒸気発生式加湿器後方の蒸気の拡散など、他のケースを考察する際に適用することができるでしょう。

k_1 と k_2 は実験の規模に応じた定数です。Scheer氏は $k_1 = 23$, $k_2 = 175$ mmであると算定しました。写真-6が示すように、乱流は壁付近の粒子の輸送に大きく影響します。どちらの場合にも、煙は壁から同じ距離で写真の上部から

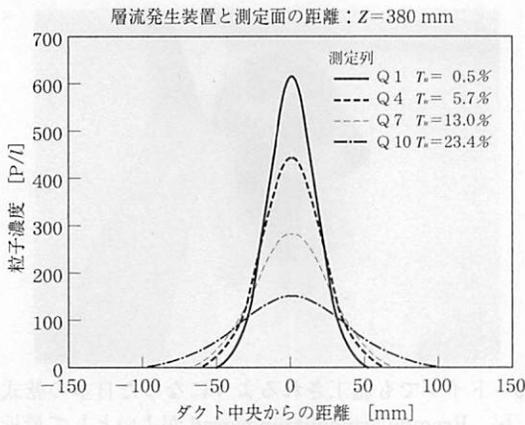


図-9 異なる乱れの強さを伴う押し出し流れにおける粒子の分布

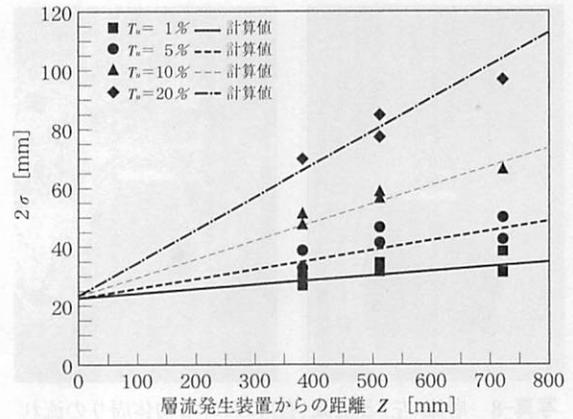


図-10 粒子濃度の分布の標準偏差

取り込まれています。

空気は上から下に向かって、壁と平行に流れています。層流がみられる右側の写真では、煙が壁に触れることなく、壁と平行に動いていることがわかります。乱流の左側の写真では、煙は何度も壁に触れています(Fitzner 1981)。

壁が敏感な製品であったなら、乱流の中で著しく汚染されます。通常の部屋の壁に取り付けられた放熱器あるいは他の熱源の枠の上部に生じる汚れのすじも同じ作用によって付着します。

しかし、逆に壁が汚染源の場合、乱流は、より多くの汚染物質の粒子を巻き上げ、空気の流れを横切って拡散させます。これはとりわけ、クリーンルームにいる人の周囲の空気の流れにおいて重要です。写真-7に、天井からの風速0.40 m/sの層流における人の周囲の気流が示されています。この人の前方で、手術台高さで層流と乱流における粒子の分布を計測しました。

乱流の場合、同一濃度の層の厚さが層流の10倍です。あるいは同じ距離では濃度は10倍高いことになります。人の近くに敏感な製品があったとしたら、その汚染の強さは10倍になるといえます(Fitzner 1988)。

押し出し流れの障害

多くの場合、物体によって気流に障害がもたらされます。フィルタの枠、照明あるいはまた有害物質フィルタにカバーが使われていなければ、フィルタの折り目そのものが障害物となり得ます。これらの物体後流域に同時に熱も発生する汚染物質が入り込みます。浮力によって物質粒子は後流領域の中で上方向に動き、室内の流れを横切って非常に離れた場所にまで到達します。水平の物体の後流域にある汚染源を使った計測から、汚染源から物体幅のおよそ5倍の距離までは、汚染物質濃度が汚染源からの距離に比例して減少することが明らかになりました。粒子濃度はさらに汚染源から離れるとより減少します。物体幅の10倍

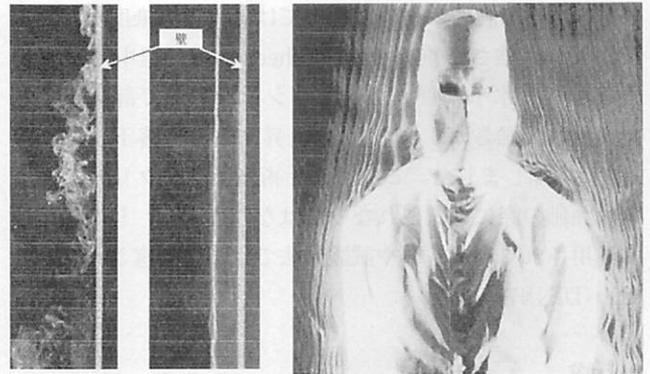


写真-6 壁の近くを流れる煙の筋(左は乱流, 右は層流)

写真-7 人の周りの層流の押し出し気流

の距離では初期値の10分の1に、100倍離れると1000分の1にまで減少します。しかし、汚染源から発生される粒子の数が大きいため、汚染濃度が著しく減少してもまだ非常に多くの粒子が部屋を横切って広がっていきます。

写真-8は、上方向からの同じ速度の層流と乱流の中に物体がある場合を示しています。この比較から二つの作用がわかります。層流では、すじ状の煙の流れは物体からかなり離れた位置ですでに方向が変化し、物体表面に到達しません。後流域はより大きいですが、粒子を含みません。乱流の場合、後流域はより小さいが、汚染されています。写真から、層流の明らかなメリットがみて取れます。乱流の場合、停滞領域はより狭くなります。気流に汚染粒子が含まれている場合、乱流により多くの粒子が壁のすぐ近くに到達し、表面を著しく汚します。これは、流れの停滞地点と壁に平行した流れにおける粉じん粒子の落下速度の計測から証明されています。

気流はく(剥)離領域と後流域が形成される可能性がある場合、汚染源がく離領域の中あるいは外にあるかを区別しなくてはなりません。層流におけるより大きな後流域は、後流域に汚染源がない場合は有利ですが、汚染源が後

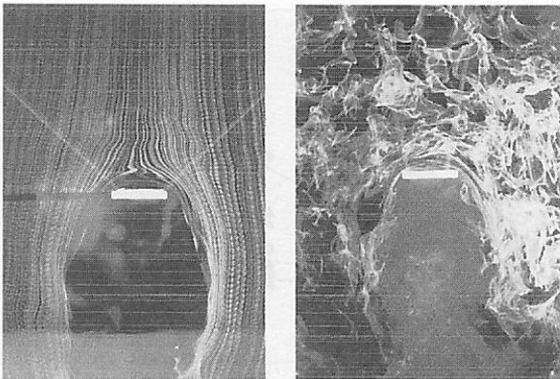


写真-8 層流(左)と乱流(右)における物体周りの流れ

流域にある場合は不利です。

壁表面への粒子の付着に関しては気流の汚染度だけでなく、乱れの強さが重要です。Scheer氏は、空中浮遊菌の落下速度を水平に置いたペトリシャーレ上で計測しました。乱れの強さが1から20%上昇すると、落下はおよそ2倍に増加しました。これは、手術室天井やクリーンルームの評価の際に考慮されなくてはなりません。しかし、通常適用されている基準や試験方法ではまだ考慮されていません(DIN 4799など)。

3. 総括

室内における気体や浮遊物質による汚染と温度の分布は、室内の気流と汚染源の場所によって異なります。その組合せは無数です。しかし、空調工学において最も重要な組合せを考えた場合、幾つかの一般的に有効な記述を行うことができます。最も重要な例は冷房、すなわち非等温流です。相対的な汚染は、汚染度あるいは換気係数によって表すことができます。

混合気流では、非等温流において室内の温度と汚染濃度の分布はほぼ均等で、このためあまり研究が行われていません。

わき出し換気の場合、分布図は汚染源の位置によって異なります。温度と物質濃度の分布図は大きく異なり、特徴的です。汚染物質は対流によって、熱は対流と放射の両方によって広がるためです。他方で放射により、暖房されていない面からも熱が放射されます。これにより、暖められていない面からも汚染物質と熱が組み合わせられた状態で放出されます。したがって、ほとんどの場合には汚染物質の密度の差は無視することができます。

押し出し流れでは、非等温の影響はあまり関係ありません。気流が熱の影響を押さえ込むようにつくられるからです。ここでは、室内の幾何学的特性と気流の種類が重要に



写真-9 ドイツでも施工されるようになった日本の乾式床暖房, Fremdwärmenutzungsgradがよいとして最近注目を浴びている。

なります。層流は乱流よりも有益です。流れの中に妨げとなる物体がある状態はできる限り避けるようにします。

本日、わき出し換気と天井放射冷房の組合せについてもお話いたしました。ドイツでは、コンクリート床板や天井板に配管を埋設する放射冷暖房が一般で、熱容量の大きいものでした。最近日本で開発されてきている乾式の床暖房は熱容量が小さいのが特徴です。ドイツで暖房時に日射が入る、人体や機械の発熱があるといった熱を“よその熱”すなわち“Fremdwärme”と呼んでいます。省エネルギーの観点から、この熱の利用率“Fremdwärmenutzungsgrad”を上げることがよいとされています。このことから、私は日本式の乾式の床暖房に興味を持ちました。写真-9に、ドイツでも施工が始まりました日本の乾式床暖房の施工写真を示します。

以上にて、私の講演を終了させていただきます。ご清聴有り難うございました。本日通訳を務めてくださいました吉岡恵利加さんには、前回来日し講演を行いました際にも通訳をしていただきました。大変の確な通訳をしていただき、この分野では最も優れた通訳であると認識しております。ありがとうございました。

訳註

- 1) Heinrich Nickel社, 本社 Betzdorf
- 2) Koloniebildenden Einheitenの略, 日本では英語の Colony forming unitの訳, CFUが使用されることが多い。
- 3) Maxmale Arbeitsplatzkonzentration(労働環境における最大許容濃度)
- 4) World Health Organization(世界保健機構)
- 5) Umweltbundesamt(ドイツ環境庁)
- 6) 現在ベルリン工科大学ヘルマンリーチェル研究所客員教授

(2004/5/31 原稿受理)