学会提言

必要換気量算定のための
室内二酸化炭素設計基準濃度の考え方

令和 3 年 5 月 31 日

公益社団法人空気調和・衛生工学会

必要換気量検討特別委員会

① 本書の内容は，必要換気量検討特別委員会の活動成果をまとめたものであり，当学会の統一した見解を示すものですが、当学会の定める免責規定（平成 25 年 7 月制定）に従うものであり、その責任範囲（第 3 条）については、以下の通りです。

（ア）当法人が公開する情報発信類の記載事項は、作成時点で可能な限り精査し提供するが、技術的・法的に不完全な記述や誤植が含まれる場合があり、記載事項に起因して障害が生じないことおよび利用結果が記載通りであることを保証するものではなく、当法人では責任を負わないものとする。

（イ）当法人は、法律上の瑕疵責任を含めて特定目的への適合性の保証、権利の不侵害への保証を含む、いかなる明示もしくは黙示の保証責任も負わないものとする。

当法人は、内容もしくは使用にかかわる損害の責任(直接的損害、間接的損害、派生的損害、逸失利益、情報システム上のプログラムおよびデータの損失などの無体物の損害などを含むいかなる損害に対する責任)を負わないものとする。

② 方法のいかんを問わず，無断複製・転載を禁じます。

目　　次

提言 …1

はじめに …4

1.　必要換気量の歴史と現状 …5

1.1　我が国の換気研究黎明期における二酸化炭素濃度と必要換気量に関する認識 …5
1.2　必要換気量の歴史的背景 …12
1.3　二酸化炭素濃度と知覚空気質 …17
1.4　海外換気基準の現状 …20

2.　建築物における二酸化炭素濃度基準と現状 …24

2.1　建築物衛生法における二酸化炭素濃度基準の制定根拠 …24
2.2　特定建築物における二酸化炭素濃度不適率の現状 …28

3.　二酸化炭素濃度と健康影響 …32

3.1　二酸化炭素の濃度基準と疫学調査結果の見方 …32
3.2　二酸化炭素濃度は換気量の指標になり得るか …36
3.3　まとめ …37

提言

必要換気量算定のための室内二酸化炭素設計基準濃度

これまで, 換気設計における必要換気量の算定において, 総合的指標としての二酸化炭素濃度は 1 000 ppm が用いられてきたが，外気の二酸化炭素濃度の上昇により，世界平均の二酸化炭素濃度は現状で約 410 ppm（2019 年）となっており，都市部ではさらに高い値を示している。この現状が今後も続けば，換気設計で算定される必要換気量は増加の一途をたどることが予想される。必要換気量の増加は建物の消費エネルギーの増加をもたらすものであり，脱炭素社会の実現にとってはマイナス要因と言えることから，その合理性と必要性については，十分な検討が必要と考えられる。

ここで，二酸化炭素が室内空気質の総合的指標とされていることを考えると，本来は外気濃度に依存するべきではないことから，外気濃度の上昇に伴う必要換気量の増大は不合理であり，室内の二酸化炭素濃度基準を固定的に規定する現行の室内二酸化炭素濃度基準は再検討の必要があるとの声も聞かれるようになった。このような背景から，平成 25 年 12 月 6 日には国土交通省大臣官房官庁営繕部から本学会加藤信介会長（当時）宛てに“外気導入量について（お願い）”が出され，外気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴う必要換気量の在り方についての検討に関する要望が寄せられた。これを受けて, 本学会では，平成 26 年 4 月 1 日に「室内空気質小委員会」が設置され，二酸化炭素濃度と必要換気量についての国内・海外関連文献の調査の結果より，①室内二酸化炭素濃度の実態，②二酸化炭素による健康影響，③二酸化炭素濃度の基準値，④必要換気量設計のための二酸化炭素濃度などについて議論を重ねてきた。また，平成 28 年 7 月 11 日には，シンポジウム「必要換気量について考える（室内空気質小委員会主催)」を開催した。本シンポジウムにおいては，講演者と参加者間で議論が行われ，“室内空気質のための設計換気量は室内と屋外の二酸化炭素濃度差 700 ppm の条件で行う”との共通認識に至った。またさらに，令和 2 年 9 月には本学会ワークショップ「室内空気質のための必要換気量設計 第 2 部 室内空気質維持のための必要換気量（換気設備委員会主催)」が開催され，より新しい研究成果や社会の動向に関する調査結果が紹介され，換気規格 SHASE-S 102-2011 の改訂案の内容についても協議された。

本委員会では，上記の平成 28 年度の換気設備委員会・室内空気質小委員会報告書「室内空気質のための必要換気量」と同年開催のシンポジウムの結果について再検討するとともに，令和 2 年空気調和・衛生工学会ワークショップ「室内空気質のための必要換気量設計 第 2 部 室内空気質維持のための必要換気量」での議論を整理し，これまでの二酸化炭素濃度基準値の歴史的経緯を踏まえた上で，最新の研究動向の調査結果に基づいて検討を行った結果，換気設計のための二酸化炭素設計基準濃度の改訂を提案するものである。

提言：必要換気量算定のための二酸化炭素の設計基準濃度（総合的指標）は外気濃度＋700 ppm とすることが望ましい。

本提言に至った主な根拠は以下の通りであり，詳細については，報告書の内容を参照されたい。

① 明治以来の我が国における換気に関する二酸化炭素と必要換気量に関する認識に関する調査の結果，当時 Pettenkofer の提唱した二酸化炭素濃度 1 000 ppm が早くから認識され，人から発生する体臭や生体発散物質の除去を目的とするものであった。

② 空気汚染源に対する考え方は，SBS（Sick Building Syndrome，シックビルディング症候群）や BRI（Building-Related Illness，ビル関連病）が社会問題となった 1980 年代を境として，「人間」から，「人間+建物」に変化し，それとともに，本来二酸化炭素は換気の指標としての役割を終えているはずであるが，本学会換気規格 SHASE-S 102-2011 では，総合的指標として位置づけられている。

③ 空気汚染源が「人間＋建物」とシフトした後，知覚空気質という考え方が提唱され，Fanger らにより多くの研究が行われたが，発生する知覚空気汚染がすべて人体発生によるものと仮定した場合の二酸化炭素濃度がおよそ 1 000 ppm に相当することが示された。ただしこの値は，当時の外気濃度の場合に限定され，二酸化炭素の発生量は年齢や代謝量の影響を受けることから，限定された条件での結果であると言える。

④ ASHRAE，EN などの海外の換気規準では，空気汚染源として「人間」と「建物」を明確に分け，それぞれに対する必要換気量を計算し，その合計により必要換気量を算定している。また，在室者や室用途によるカテゴリーが設定され，より細かい設計が可能となっており，先進的な規準と言えるが，一般的な事務室を対象としてカテゴリーを選択する場合，ASHARE，EN いずれも 1 人当たりの換気量が 30 m^3/h 程度となり，二酸化炭素の外気濃度と室内濃度の差異を 700 ppm と想定する場合の換気量とほぼ等価なものとなる。

⑤ 1970 年に制定された建築物衛生法では，倦怠感，頭痛，耳鳴りや息苦しさ，フリッカー値の増加を防ぐ観点から，二酸化炭素濃度 1 000 ppm が決められたとの記述があり，当時，同程度の濃度における様々な生理的人体影響も確認されている。この点においては，Pettenkofer 以来の 1 000 ppm を採用しているものの，基準値の考え方には差異があるものと言える。

⑥ 建築物衛生法における特定建築物の二酸化炭素濃度不適合率は平成 11 年度から年々上昇し続けており，特に学校と事務所の上昇が著しく，2019 年現在で 30%に近くなっている。この原因は，必ずしも外気濃度の上昇とは言えず，省エネ法の改正，建築物衛生法の改正，震災などに影響された省エネ行動などが考えられる。

⑦ 海外の二酸化炭素濃度のガイドラインでは，国により様々な値が決められているが，その多くが指標としての二酸化炭素濃度として規定されており，外気濃度基準で示されるもの，室内濃度そのもので示されるものの両者が存在している。本学会換気規格と同様に総合的指標として規定されているものについては，外気濃度基準で示されることが望ましいと言える。

⑧ 二酸化炭素によるビル関連病（BRI）などヒトの健康影響に関する疫学調査では，二酸化炭素単体の影響かどうかが判断できないものが多く，二酸化炭素単体の毒性を評価することはできない。様々な汚染質発生源が存在する室内において，二酸化炭素はあらゆる汚染質を代表する指標ではなく，経験的に換気の指標としての意味を持つに過ぎない。

以上より，換気設計における二酸化炭素濃度は，総合的指標として位置づけることが望ましく，外気濃度に依存する室内濃度で表現するのではなく，外気濃度を基準とした値で表記することが望ましい。外気基準の濃度値としては，ASHRAE などの基準値や，この 50 年間における二酸化炭素濃度の上昇を考慮した上で，外気濃度＋700 ppm を採用し提言するものである。

なお，本提言での設計基準濃度により算出される必要換気量は，通常の事務室での在室者に対しては約 30 m^3/h 人 であり，現行の換気設計における必要換気量と整合するものではあるが，本提言は現行法規との整合性において課題を有することには留意する必要がある。建築物衛生法（一定床面積以上の特定建築物）や建築基準法（中央式空調設備）の二酸化炭素濃度の管理値・基準値は 1 000 ppm であるが，外気＋700 ppm で設計された機械換気設備を運転する場合には，運用上において管理値を守れない状況も生じる。室内二酸化炭素濃度基準を 1 000 ppm と考える場合，例えば在室者 1 人当たりの二酸化炭素発生量を 20 L/h と仮定すると，1 人当たりの必要換気量は外気濃度によって変化し，外気濃度 300 ppm では 29 m^3/h 人であるが，400 ppm で 33 m^3/h 人，500 ppm で 40 m^3/h 人，600 ppm では 50 m^3/h 人となる。現行法規を遵守することを必須とする場合，このような必要換気量の増大は避けられない。本提言はこの様な必要換気量の増大を必要とはしない考え方を提案するものであるが，外気濃度の上昇による室内濃度の上昇は無制限に許容されるべきものではなく，二酸化炭素単体の人体影響の観点から上限値は設定されるものであり，今後継続的に検討が必要であると言える。

必要換気量検討特別委員会

委員会構成

委員長	山中　俊夫	大阪大学	〔1.2〕
幹事	柳　宇	工学院大学	〔3.1, 3.2〕
幹事	鍵　直樹	東京工業大学	〔2.2〕
幹事	小林　知広	大阪大学	〔1.1〕
委員	東　賢一	近畿大学	〔2.1〕
委員	岩下　剛	東京都市大学	〔1.3〕
委員	遠藤　智行	関東学院大学	〔1.4〕
委員	小笠原　岳	明星大学	
委員	倉渕　隆	東京理科大学	
委員	近藤　靖史	東京都市大学	
委員	竹内　仁哉	秋田県立大学	
委員	竹村　明久	摂南大学	
委員	田島　昌樹	高知工科大学	
委員	鳥海　吉弘	東京電機大学	
委員	中村　和人	元清水建設（株）	
委員	林　基哉	北海道大学	
委員	三橋　太	高砂熱学工業（株）	
委員	桃井　良尚	福井大学	
委員	吉野　一	日本工業大学	

は　じ　め　に

現状，建物の換気設計における必要換気量は，室内で発生する汚染質の発生量とそれぞれの汚染質の設計基準濃度，及び当該汚染質の外気濃度から定常状態を仮定して算出される。空気調和・衛生工学会の換気規格 SHASE-S 102-2011（以下本学会換気規格）では，複数の汚染質を対象としている場合は，それぞれの汚染質に対して求められる必要換気量の最大値を採用することとしている。そのなかで，唯一二酸化炭素については，総合的指標としての 1 000 ppm と健康影響の観点から決められた単独指標としての 3 500 ppm の二種類の基準値を有している。しかし単独指標の適用には，他の汚染質のすべての発生量が明確になっている必要があり，多くの場合は，総合的指標の 1 000 ppm が適用され，燃焼器具などの使用がない一般室においては，二酸化炭素濃度 1 000 ppm となる換気量が最終的に室の必要換気量となる場合が多い。一方で，建築物衛生法や建築基準法でも二酸化炭素濃度基準値は 1 000 ppm であり，結果的に法にも適合することになる。

ところで，二酸化炭素濃度 1 000 ppm を基準として必要換気量を算定する場合，外気中の二酸化炭素濃度と在室者からの二酸化炭素発生量を仮定して行っている。ところが，近年の地球温暖化に伴い，外気中の二酸化炭素濃度が上昇傾向にあることから，算定される必要換気量もそれに伴って増大しつづけている。しかし，現行の本学会換気規格における二酸化炭素の設計基準濃度 1 000 ppm は，人体由来の空気汚染物をはじめとする様々な汚染質の総合的指標として位置づけられており，二酸化炭素自体の毒性によって決められたものではない。その意味では，外気濃度の上昇による必要換気量の増加は総合的指標としては不合理なことと言うことができ，外気濃度変動に影響されない算定手法として，換気量を直接規定する方法や，外気濃度と室内濃度の差によって必要換気量の算定を行う方法などに変更するべきではないかという意見も聞こえるに至った。

一方で，本換気規格において健康影響から決められる単独指標は 3 500 ppm と比較的高濃度ではあるものの，1 000 ppm 程度の二酸化炭素濃度が，人体に有害な生理的影響を及ぼしたり，知的生産性の低下を招くとする研究結果もあり，二酸化炭素濃度の設計基準濃度の変更は慎重に行うことが必要と考えられた。

故に，外気の二酸化炭素濃度の上昇に伴う必要換気量の増加の是非について科学的知見から検討し，必要換気量として望ましい二酸化炭素の設計基準濃度のあり方について協議した上で，学会としての本学会換気規格案の改訂を目的とした提言案の作成を行うことを必要換気量検討特別委員会の目的とする。

活動の内容としては，平成 28 年度の換気設備委員会・室内空気質小委員会報告書「室内空気質のための必要換気量」について検討するとともに，平成 28 年 7 月に開催されたシンポジウム「必要換気量について考える」での議論，及び令和 2 年空気調和・衛生工学会ワークショップ「室内空気質のための必要換気量設計 第 2 部 室内空気質維持のための必要換気量」での議論を整理し，これまでの二酸化炭素濃度基準値の歴史的経緯を踏まえた上で，最新の研究動向の調査結果に基づいて，換気設計のための二酸化炭素設計基準濃度の改訂提案を行うものである。

必要換気量検討特別委員会
委員長　山中　俊夫

1. 必要換気量の歴史と現状

1.1 我が国の換気研究黎明期における二酸化炭素濃度と必要換気量に関する認識

1.1.1 はじめに

建築物衛生法における室内環境の管理基準として，二酸化炭素濃度 1 000 ppm が用いられ始めて 50 年が経過し，本学会規格 SHASE-S 102 においても同様の値が用いられている。現状の換気システムもこれに基づいて設計されることが多いが，近年外気中の二酸化炭素濃度が上昇する中で同基準の使用を継続することは実質的に一人当たりの必要換気量を引き上げる。当該濃度付近での二酸化炭素単体の毒性がないと仮定した場合，同基準値を継続することはこれまで以上の過剰な換気設計を強要することを意味し，動力エネルギーを浪費して低炭素社会の実現に逆行する。そのため，外気二酸化炭素濃度上昇が顕著であるこの時代にいま一度あらためて必要換気量のあり方を学術的に検討することは当学会ならびに我が国全体において必要かつ意義深いものと言える。

本特別委員会における活動として必要換気量のあり方をあらためて考えるにあたり，まず本節では日本において学術的根拠をもって換気の重要性が説かれ始めた時期の必要換気量及び室内二酸化炭素濃度に関する認識を，当時の文献を調査することにより確認することとする。

1.1.2 明治期における換気に関する学術的知見：薬学者 田原良純

日本で最も早期に換気を題材に取り扱った学術研究が見られるものの一つに「大日本私立衛生会雑誌」が挙げられる。当該雑誌は 1883 年に設立された大日本私立衛生会（現日本公衆衛生協会の前身）の機関紙である。ここでは衛生学全般に関する学術論文や報告が多数掲載されており，換気に関する論文数は少ないものの，衛生学の分野において当時換気を取り扱った論文が残されている。例えば薬学者の田原良純は当該雑誌において最初の換気研究論文を発表している。我が国で最も古い換気に関する学術論文の一つとして当時の認識を示すことの意義は大きいとの考えから，ここではその内容を概説する。田原は明治 17 年（西暦 1884 年）に刊行された同雑誌の第 12, 14, 16 號において「東京府下小學校空氣試験説」[1-3] を発表しており，以下は導入部となる第 12 號掲載論文 [1] からの引用である。ここではまず室内の空気を汚染する要因に焦点が当てている。

「凡ソ人ノ衛生ニ闕ク可ラザル事物ハ其數極メテ多ク指僂ニ暇アラスト雖モ蓋シ空氣ヨリモ要且急ナル者ハアラザルナリ」「今世人ニ向ヒ人生ニ必需ノ物ヲ問ハバ必ス衣食住ヲ推シテ第一トシ至要ノ空氣ヲ以テ答フルナキハ何ソヤ」「此レ所謂天與ノ無盡藏ナルヲ以テ人其ノ貴重ナルヲ覺ラサルナリ 況ンヤ空氣ノ潔汚ヲ論シ室内換氣通風ノ方法ヲ講スル者ノ如キハ世ノ甚タ稀レニ見ル所ナリ」

これらの文言から，明治 17 年当時には建物における適切な換気法や必要な換気量については，少なくとも一般的な知識としては定着しておらず，当時の日本において先端的な知見を示す換気研究論文であったと思われる。また，当該論文では上記の後に，

「學校工場劇場囚獄等ノ稠人廣座ノ處ニ於イテハ室内ノ空氣ヲ汚穢スルノ因由極メテ多ク尋常家屋ノ比ニアラサルヲ以テ換氣通風ノ方法ヲ設クル一層ノ親切ヲ要スト雖モ人多クハ之ヲ忽諸ニ付シ去リ其戸扇ヲ推シテ室内ニ入ルニ當リ忽チ一種不快ノ臭氣ヲ認メ嫌厭鬱惱ニ堪ヘサルヲ多トス 是汚穢ノ空氣室内ニ充滿スルニ由ルナリ」

と記されており，在室人数の多い居室においては不快な臭気が充満しやすく，人体由来の汚染物質が問題となることを記した上で，一連の研究で小学校を対象に換気実験を実施している。田原はこの目的を，室内空気の汚染状況を明らかにすることで，衛生家が世の人を誘掖して換気・通風に勉めさせ，純良な空気を呼吸させることと述べている。さらに，上記に続く以下の一節では人体から放出される汚染物を「悪氣」と表現し，室内空気汚染において人体由来の汚染物質がその最大の要因であるとの認識を示している。

「夫レ室内ノ空氣ヲ不潔ニスルノ原因ハ一ニシテ足ラズト雖モ第一人ノ呼吸作用ト皮表ノ蒸發氣トニ

因テ絶ヘス室内ニ悪氣ヲ放散スルモノナリ」

ここで田原は人体の呼吸を暖炉に例え，呼気に含まれる二酸化炭素にも言及しているが，「獨リ炭酸ノタメニ汚穢セラル，ノミナラス他ニ尚ホ多量ノ水蒸氣ト有機性ノ氣類トヲ混有スルモノニシテ」と，二酸化炭素が単独で空気汚染の要因なのでなく人体からの生体発散物質（bioeffluents）の存在も指摘している。

田原は前述の報告で汚染源を明示した上で，第 14 號掲載の続報[2)]では主に海外の知見を紹介し，換気により室内に新鮮空気を導入することの重要性を説いている。ここでは動物実験の例を挙げ，容器内で動物の呼気と皮膚からの蒸発気により汚染空気を作り，二酸化炭素のみを取り除いて酸素濃度は外気程度以上に保ったとしても空気は汚濁して病苦の證（しる）しが示された例を紹介し，有機性汚染物質の有害性が明らかだと指摘している。続いてダブリンの孤児院での癆瘵の流行を取り上げ，狭い部屋で 100 名以上を生活させていたことによる空気汚染の問題が指摘されて換気を改善したところ，一掃された例も紹介している。また，欧州の兵営での兵士の肺病の例にも触れ，換気を善くして空気を清潔に保つことで病勢が衰退して死者数が減少した事例も紹介し，さらには欧州各国の囚獄においても，換気が十分で空気が清潔な囚獄では死亡者数が明らかに異なる例や，懲役場で屋外就業者に比べて屋内就業者の疾病の比率が 10 倍程度である例を紹介している。田原はこれらの事例に基づき，「人々宜シク換氣通風ニ注意シテ常ニ室内ノ空氣ヲ清潔ニセサル可カラス」と改めて換気の必要性を述べている。主として生体発散物質による不快感や臭気の問題，結核や癆瘵の問題と捉えると換気量の増加がその改善に直結したことは現在では容易に理解されるが，上記に続けてその「換気の程度」を考えるにあたって記された文章は当時の認識を知る上で重要と思われたため，以下に原文のまま引用する。

「然ラバ則チ如何ナル空氣ヲ不潔ニシテ健康ヲ害シ之ヲ呼吸シテ久シキヲ歴レハ病患ヲ釀スモノトスル歟 其純駁汚潔ノ分カル，所ノ限界ヲ設ケテ以テ其傷害ノ有無ヲ判決スルノ標準トスルハ實ニ缺クヘカラサルノ要件トス 而シテ其標準ヲ定ムルニハ蓋シ先ツ吾人ノ經驗ト其官能ノ感覺トニ問フニ若クハナシ」

「然レトモ人ノ官能ニ遲鈍鋭敏ノ差アリテ其識別シ得ル所固ヨリ同一ナル能ハサルモノナレハ唯官能ノ感覺ニ問フノミニテハ未タ十分ニ信憑ヲ措クニ足ラサルナリ 故ニ歐洲ノ衛生試驗家ハ更ニ化學ノ幇助ヲ藉リテ室内空氣ノ科學試驗ヲ施行セシニ其ノ未タ人ニ汚穢セラレス臭氣ヲ放タサル空氣ハ其一千容中炭酸ノ○，七容ニ超過セサレトモ其既ニ人ニ汚穢セラレ居住スルニ堪ヘサル不潔空氣ハ其一千容中一容以上ノ炭酸ヲ含有スルヲ發見シタリ 」

上記では，空気の清浄度の目安としての室内二酸化炭素濃度について言及し，臭気や不快感を伴う人体由来の汚染物が問題であるが故に，判定方法として官能試験に及ぶものはないが個人差によるばらつきが大きいため，化学的な方法として二酸化炭素濃度の 1 000 ppm を標準とする欧州の知見を紹介している。ここでは，あくまで「人に汚穢されて居住に耐えざる空気」と記載していることから，あくまで対象は人体由来の汚染物であるとの認識で記されている。このことは，上記に続く以下の文言からも明らかと言える。

「然レトモ炭酸ノ量此標準ヲ超過シタレハトテ中毒ノ如ク人身ニ的面ノ危害アリト言フニ非ラス 又其一千分中一分以上ノ炭酸ヲ含ムノ空気ハ其發生ノ狀況如何ニ關セスシテ直チニ之ニ有害ノ名ヲ命スルニ非ス 是ヲ要スルニ其標準ヲ設クル所以ハ學校，工場，劇場，寄席，囚獄等ノ室内ノ炭酸ハ主トシテ源ヲ人体ニ發シ獨リ炭酸ノミナラス 既ニ上文ニ述フル如ク他ニ尚ホ空氣ヲ汚染シテ遂ニ人ヲシテ煩惱ニ耐ヘサラシムル諸般ノ悪氣ヲ傍生スル本源タルコトヲ推度シ唯汚穢ノ徴候トシテ觀察ヲ下タスニ過キサルノミ」

このことから田原は二酸化炭素濃度 1 000 ppm はあくまで人体から発せられる諸般の「悪気」による室

内の空気汚染の徴候を示すものであり，人体由来ではなく二酸化炭素単独で 1 000 ppm を超過した場合に危害があることを意味しないと明記している。田原はこの点について説明を行った上で，続報となる 16 號掲載論文[3]で 3 箇所の東京府下の小学校を対象に二酸化炭素濃度のみを測定してその空気質環境を評価している。具体的には，多数の生徒を収容する教室で 4 000 ppm を超過する例も含む実態と，休憩時間に窓を開け間欠的に換気を行うことによる濃度低減効果を示し，さらには生徒が退室した直後とその 1 時間後でそれぞれ濃度を測定し，非定常の濃度予測式から換気量を推定している。まさにトレーサガスを用いた濃度測定二時点法[4]による換気量測定が，今より 140 年近く前に行われている。その上で，室内空気汚染の原因を「一人当たりの気積の不足」と「自然換気が励行されていないこと」の 2 点に絞っており，併せて Pettenkofer を引用して 1 000 ppm 以下とするための必要換気量の算定式を示し，実測結果の換気量が圧倒的に不足していることも論理的に示している。なお，ここでは小学校生徒一人当たりの必要換気量を 20 m^3/h としてその一人分の不足分が 17〜18 m^3/h 程度，すなわち実際の換気量は必要換気量の 1 割程度しかないことを示しており，二酸化炭素濃度は人体由来の汚染物の指標として，最終的に教室の「換気量と許容人数」の目安を示していることも当時の認識を理解する上では重要と思われる。また，在室人数を制限して授業中の窓開けを励行するなどして在室人数に対する自然換気量を増加すれば室内空気汚染は防ぐことはできるものの，冬季に自然換気により換気量を増加させることは温熱環境の点から難しいことも指摘されている。これに対して田原は教室の火鉢を廃して暖炉を導入する提案もしている。これは火鉢の暖房能力の低さと室内への人体以外の汚染物排出も指摘するとともに，暖炉は「満室平等」に温め，燃焼に伴う汚染物は排気経路から排出され，内外温度差により排出した分の新鮮外気が導入可能との建築物理的な観点からの根拠も併せて示されている。こお，この提案による収容人数制限による教室の新設及び暖炉の設置による費用の問題にも言及が見られるが，小学生徒の健康は国家元気の衰盛に関わる重要な事項であることに鑑みれば小費に過ぎず，衛生に着目して健康を保全することで当時の富国強兵策実現という題目も掲げた提案として当該論文が締め括られている。

1.1.3　明治期における換気に関する学術的知見：衛生学者 坪井次郎・森林太郎

前節に紹介した田原の論文以降，他にも複数の換気に関する知見が学術雑誌に見られるようになった。このことは明治新政府の国策によりドイツ医学が本格的に導入された時期[5]でもあったことが大きく影響していると言え，1883 年の大日本私立衛生会の設立，1885 年の東京大学における日本で最初の衛生学講座開設（緒方正規教授）なども発展の経緯になったと言える。緒方正規は 1880 年春に東京帝国大学を卒業した後にドイツ留学の内命を受けて同年 11 月より洋行の途につき，ライプツィヒでの 2 年半の研究生活の後にミュンヘンに転学して Pettenkofer に師事し，半年間での業績が認められてミュンヘンで助手となり 1884 年 12 月に帰国，翌 1885 年 1 月より東京帝国大学で衛生学教室を開設して同年 2 月に教授となった[6, 7]。この緒方正規の衛生学教室に入り，1885 年 10 月の卒業前となる 5 月より大学御用係，その後助手を経て 1887 年より助教授を務めた衛生学者が坪井次郎[7]である。

1886 年，坪井による「日本家屋換氣論[8]」が大日本私立衛生会雑誌に掲載されている。当該論文では初めに人体からの二酸化炭素発生量について述べられており，次いで室内空気の二酸化炭素濃度 1 000 ppm 以上で健康上有害のものとみなす Pettenkofer の知見が紹介されている。ここでは二酸化炭素単体の影響と生体発散物質との区別については詳しく述べられておらず二酸化炭素濃度の意味合いが明記されていないが，一室内に衆人群居しても毎時毎頭 60 m^3 の空気を供給すれば室内空気の二酸化炭素濃度が 1 000 ppm を超過しないことが述べられている。また，この一人あたりの必要換気量については通常病室，瘡傷者・妊婦病室，獄者，職工場，兵営，集会場（短時間/長時間）と室ごとに示されている。このことから，1 000 ppm は重要な線引きととらえながらも一人当たりの換気量が重要との認識が当該論文でも見られる。さらには内外温度差と窓戸閉鎖時の自然換気量との関係に関する Pettenkofer の実験を紹介しており，同氏のトレーサガス法による換気量測定の方法と理論が比較的詳しく説明されている。本論文では日本の建築においてトレーサガス減衰法を実施して 15 回にわたり換気量測定を行っている。論文としては，日本家屋はその構造から内外の空気流通が生じやすく，換気の点においては適している

と予想したが想像以上に換気量は小さく，日本家屋であっても自然換気量は不十分であると指摘している。

上記の論文を発表後，坪井自身も 1890 年からミュンヘン衛生学教室への留学を開始して Pettenkofer に師事しているが，換気実験に関する Pettenkofer の実験手法は東京帝国大学衛生学教室において緒方から学んだ点もあったと思われる。この 1890 年の留学前に，建築雑誌には坪井の換気実験の報告として「換氣実験[9]」，「日本作リ病室換氣量[10]」が掲載されている。このうち前者では新築の大学寄宿舎での換気量測定，後者では和風建築の病室における換気量測定を報告しており，どちらの報告においても必要とされる外気量に着目した実験と考察が見られている。

坪井と同時期の著名な衛生学者としては，軍医としての森林太郎が挙げられる。森は緒方が卒業した翌年となる 1881 年に東京帝国大学を卒業し，陸軍に出仕している。その 3 年後となる 1884 年 10 月から 1888 月 7 月までドイツに留学を命じられ，ライプツィヒ（Hofmann），ドレスデン（Roth），ミュンヘン（Pettenkofer），ベルリン（Koch）で学び，1888 年 9 月に帰朝した後は陸軍軍医学舎（学校）の教官となった[11]。翌 1889 年 3 月には「陸軍衛生教程[12]」をまとめている。全 26 編にわたるこの教程は非常に幅広く網羅的に記された衛生学の教科書と言える。森はこの中の第二編「空氣」の章で，人の皮肺からは放臭物として「腐氣」が放出されるが，その量が微かなので測ることはできず，その汚染の指南車（インデックス）とすると記している。空気の善悪を判断するための恕限度として 0.6～0.7‰（600～700 ppm）と記しており，基準値としては 1 000 ppm より厳しい値を示しているが，対象とすべき汚染物質が人体由来の「腐氣」であることを上記の通り明記しており，この点前節の田原と同様の認識を持っている。また，併せて一人当たりの必要換気量が 67～100 m^3/h となることも記されている。なお，この時期衛生家の中で家屋衛生が注目されており，森は 1893 年に造家学会（現日本建築学会の前身）で行った講演[13]でも採光と換気の重要性を述べている。

1896 年 12 月，森はさらに小池正直とともに実に 493 頁に及ぶ「衛生新篇[14]」を著しており，これも明治における衛生学の教科書と言える。そのうちの「家屋」の章中「室内空気」の節において，「氣中ノ炭酸ハ数十‰ノ多キニ至ルモ大害アルモノニ非ズ 唯之ト與ニ増加スル所ノ一種ノ有機質アルヲ以テ害アリト爲スノミ」と記し，二酸化炭素単体では数万 ppm でも大きな害はなく，ともに発生する有機物の問題であると述べている。さらにはこれに続けて，二酸化炭素の増加のみを問題視してその発生源について考えないがために判断を誤る者があるが，人畜意外の発生源により二酸化炭素濃度が増加した場合には（CO の発生がなければ）問題がない旨も記している。

1.1.4　以降の時代の換気に関する文献中の記載

これまで示した通り，明治期に見られ始めた換気に関する文献においては Pettenkofer の提唱した 1 000 ppm は在室者による室内空気汚染の指標としての記載が多く見られ，二酸化炭素単体の影響とは切り離して考えるべきとの認識とともに，在室者一人当たりの必要換気量が記されている。その後の換気に関する学術誌では，例えば 1902 年に医学得業士の北と駿河による学校校舎・寄宿舎における二酸化炭素濃度と換気量の測定報告[15]が見られる。ここでは導入部で多数の人員を収容する教室において人体から発せられる有機物等が問題となることに触れた上で，まずは多数の室を対象に使用時の二酸化炭素濃度を測定して恕限度としての 1 000 ppm を満たしているかどうかの確認が行われている。それに加えて二酸化炭素濃度が高い部屋においてはトレーサガスでの換気量測定を行い換気量の不足を問題視した上で収容人数の低減か換気の改善の必要性を指摘しており，田原[3]の示した方針と一致している。大正期になると，前述の坪井次郎が初代医科大学長を務めた京都帝国大学において，戸田正三を中心に雑誌「国民衛生」が創刊され，この時期からは流体力学的な知見に基づく換気量計算の分野に関する論文発表も見られ始めた[16-17]。また，同雑誌では京都大学の藤井厚二[18]が日本の住宅改善に関する論文を発表している。このことは，衛生学の中でも家屋衛生・造家衛生として換気が取り扱われたために建築を設計するための実学的な研究が行われるようになったことを示すとも思われるが，これらの論文の内容は報告書

の本題とは異なるためにここでは詳しい言及を避ける。

前述の通り大正期・昭和初期からは建築工学分野でも換気研究が見られ，空気に限らず建築計画原論全般として知見を取りまとめた書籍も見られる。早いものでは大阪市の技師であった伊藤正文が 1938 年に「建築保健工学[19]」を著しており，換気学説の変遷を詳しく述べた上で Pettenkofer の 1 000 ppm にも言及して汚染の指示標準であることも述べている。この点は大正期の建築設備分野の書籍である柳町政之助の「煖房と換氣[20]」も同様の傾向であり，当時の書籍では換気学説の詳しい解説が見られた。同じく大正期に大澤一郎と櫻井省吾が著した設備分野の書籍である「煖房換氣工学[21]」では，二酸化炭素は直接的な問題ではなく間接的な効果として空氣汚染のインディケーションに過ぎないと簡潔に述べており，その詳しい説明までには踏み込んでいない書籍もある。

1934 年の渡邊要と長倉謙介による「計畫原論[22]」では，換気学説として炭酸瓦斯説を紹介する中で「CO_2 が怨限量を遥かに超過する場合があっても不快，頭痛其他の障碍は他の原因によって既にそれ迄に現れて來るので CO_2 のためで無いことは實驗上及生理學上明らかであると云ふ」と紹介し，二酸化炭素そのものは室内空氣の良否には第 1 次的には関係がないというのが当時の定説と記すとともに，Pettenkofer の説として，人体からの有害物質の量を定める指標として二酸化炭素を選んだと記している。一方で，Hermans とその他の実験による「現在では未だ毒物らしい物質を確認する事ができない」との説も紹介した上で，人間臭が鬱積しそのために不快になることは事実だとしている。また，戦後 1948 に刊行された当時公衆衛生院建築衛生学部長の佐藤鑑による「建築環境學[23]」では，二酸化炭素濃度 1 000 ppm について以下のように述べ，二酸化炭素単体としては 1 000 ppm は非常に安全側に入ると記すとともに，換気設計では常に考慮すべきと提言している。

「汚染の綜合的判斷の指標であって，眞の意味の生理的怨限度ではあり得ない。實際の有害怨限度としては，CO_2 は 3～5%，O_2 は 17～19%と考へられる。従つて他の汚染狀態が問題とならぬ様な場合は，上記の CO_2 の怨限度 0.1%を以て換氣計算等の標準とする時は，非常に安全側に入ることが想像される。これは換氣計畫では常に念頭におくべきであろう。」

また，その翌年となる 1949 年の木村幸一郎と三木韶による「建築計畫原論[24]」では，室内二酸化炭素濃度について「極めて換氣不良な部屋での實測結果でも 0.5～1.0%を越えることは稀である。この程度では直接健康には障害がない。」と記している。なお，これと同様の記述は前述の計畫原論[22]でも見られる。その上で，木村幸一郎らの建築計畫原論[24]では以下のようにも述べている。

「今日に於いては，CO_2 の増加，O_2 の減少による有害説は一應棄てられた感がある。しかし乍ら汚染空氣中に長く滞在すると，多くの人が氣分が悪くなり，甚しい者は頭痛吐気をもよおすこと等の事實からして，何等かの有害物質の存在も想像され，結局今日においては CO_2 量は空氣の汚染度の指標として用いられることになった。これは他に適當な空気の新鮮度を標示するものがないので，今日もなお CO_2 の測定が行われるのである。そして怨限度を 0.07～0.1%とし，これ以上の空氣を不潔とする。」

この 1949 年の文章では，明治期から変わらず対象とすべき汚染物は生体発散物質であるが，その測定が叶わないために当時でもなお二酸化炭素濃度を示度に用いていると書かれている。

なお，必要換気量の歴史的背景と変遷は次節で言及するが，1939 年に当学会前身の衛生工業協会が示した換気規格[25]においては以下のように記されている。

第十七條　「第一種及第二種換氣法ニ依ル外氣量ハ収容人員一人ニ對シ毎時 35 立方米以上トス　但シ室内の溫濕度ヲ適當ニ調節シ得ルモノハ之ヲ半減スルコトヲ得」

冷暖房を伴わない機械換気量は一人当たり 35 m^3/h との規定であり，二酸化炭素濃度への言及はない。この規格制定にあたっての委員会の見解を当時委員であった柳町政之助は講演で解説しており[25]，この

十七條について以下のように述べ，二酸化炭素濃度には意図的に触れずにあえて換気量のみを記載することを決定した経緯が窺い知れる。

「外氣量の決定に就きましては以前は主に炭酸ガス含有量の許容範圍から算出されたものでありましたが，今では此點は餘り重要視されないで，最近では寧ろ臭氣の方から部屋に適當に外氣を入れて換氣をしないと體臭とか，着物や呼吸から出たりする色々な臭氣の爲に部屋の空氣が汚れて不快を來すものであると云ふ點が問題となつて來まして，アメリカあたりの研究でも大體上述のやうな數字の外氣をいれなければいかぬと云ふことがいはれて居ります。」

上記の 1939 年の換気規格の改定案として，1972 年に当学会の空調設備基準委員会第一小委員会における換気規格分科会（主査:中村平，委員:小林陽太郎，専門委員 9 名）が提示した HASS 102（案）では「居室の必要換気量は，居住者 1 人あたり 30 m^3/h 以上とすること」とあり，その解説において換気量の決め方として二酸化炭素許容値による基準が記載され，外気濃度の想定値 0.03%と基準値として建築物衛生法の 0.1%にも言及している。同解説では「CO_2 そのものは有毒ガスでないことは周知の事実であり，これを基準としてよいものかとの疑問があった」とも記載されている。しかしながら，この HASS 102（案）の 2 年前にあたる 1970 年の建築物衛生法で決められている 1 000 ppm によって換気量を決めたと記されている。この改訂については，シンポジウムにおける質疑応答の記録が残されており，木内俊明（国士館大学）からは推奨値を 2 本立てまたは 20 m^3/h にするような意見が出ており，中村は「0.1%の妥当生については疑問があることは認めるが，現行法規を守る意図である」と回答した上で，その妥当生は別途検討する必要があるとの認識を示している。後藤滋（横浜国立大）からも「CO_2 0.1 %を基準に考える意味はあまりないように思うが，その根拠は何か」と規格改訂の根拠についての質疑があり，「炭酸ガスそのものが人体に有害であることは認め難いが，空氣汚染の指針として炭酸ガスを採用したに過ぎない。」と回答されている。このように，HASS 102（案）で二酸化炭素濃度が記載された当時の議論としては，単体指標として当該濃度で有害ではないが建築物衛生法のために 1 000 ppm 記載したことと，当学会においてはこの値の学術的な妥当性について議論の余地があるとの認識が示されている。このため，この建築物衛生法の制定根拠についても確認が必要と言え，この点については 2.1 節に後述する。

1.1.5 まとめ

本節では我が国における換気に関する学術研究が見られ始めた明治期及び以降の認識を確認することを目的に当時の文献調査を行った。明治政府の国策として当時最先端の衛生学をドイツに学んだことから，Pettenkofer の提唱した室内二酸化炭素濃度 1 000 ppm の基準値も早期から認識されているが，少なくともこの当時は，あくまで臭気や不快感をともなう生体発散物質こそが対象とすべき汚染物質であり二酸化炭素濃度はその示度に過ぎないこと，そして二酸化炭素単体の毒性は当該濃度程度では問題にならないとの認識も持たれ，紹介されていた。この点は大正・昭和初期・戦後の文献でも同様の認識が引き継がれ，この区別は換気設計において常に留意すべきとの認識も記されていた。また，昭和 1939 年の衛生工業協会の換気規格では当時換気量のみを規定して二酸化炭素濃度については意図的に規定しなかった点も確認された。加えて，1972 年の改定案提示のタイミングで，必要換気量算定の根拠として 1970 年の建築物衛生法における基準値との整合のために 1 000 ppm との記載が解説に加えられたが，当時の規格委員会としても二酸化炭素単体の有害性は当該濃度付近では問題にならないことと，1 000 ppm の妥当性は当学会においても別途学術的に検討が必要との認識を示している点が確認された。

【参考文献】

1) 田原良純：東京府下小學校空氣試驗説，大日本私立衛生会雑誌，第 12 號, pp.8-14, 1984.5
2) 田原良純:東京府下小學校空氣試驗説（前號ノ續キ），大日本私立衛生会雑誌，第 14 號, pp.8-14, 1984.7

3) 田原良純：東京府下小學校空氣試驗説（第十四號ノ續キ），大日本私立衛生会雑誌, 第 16 號, pp.8-14, 1984.7
4) 空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S 116 – 2011 トレーサガスを用いた単室の換気量測定法, 空気調和・衛生工学会, 2012
5) 實成文彦：わが国の公衆衛生学教育の歴史的概観と課題, 医学教育, 第 43 巻, 第 3 号, 2012.6
6) 緒方正規：緒方正規略歷, 衞生學傳染病學雜誌, 第 15 巻, 第 2 號（故緒方會頭記念號）, pp.123-137, 1919.11
7) 泉彪之助：衛生学者坪井次郎の経歴と業績, 日本医史学雑誌, 第 38 巻, 第 3 号, pp.401-431, 1992.9
8) 坪井次郎:「日本家屋換氣論」，大日本私立衛生會雜誌, 第 41 號, pp.61-75, 1886
9) 坪井次郎:「換氣實驗」，建築雜誌, 第 4 輯, 第 39 號, pp.41-42, 1890
10) 坪井次郎:「日本作リ病室換氣量」建築雜誌,第 4 輯,第 45 號, pp.146-147, 1890
11) 丸山博：森鴎外と衛生学, 勁草書房, 1984.7
12) 森林太郎：陸軍衞生教程, 陸軍々醫學校, 1889.3（第二編 空気 : pp.13-19）
13) 森林太郎:「造家衛生の要旨」建築雜誌 , 第 7 輯 76 號, pp.115-122, 1893
14) 森林太郎, 小池正直：衛生新篇, 南江堂, 1896.12 (家屋, 室内空氣 : pp.425-429)
15) 北豐吉, 駿河尚庸：校舍及寄宿舍空気中炭酸含量幷換気量試驗報告, 金澤醫學專門學校十全會雜誌, 第 24 號, pp.9-29, 1902.7
16) 野村仁: 家屋ノ自然換氣ニ及ボス氣流ノ影響ニ就テ 第一篇, 國民衛生, 第 1 巻, 第 5 號, pp.1-13, 1924.1
17) 大谷佐重郎: 日本家屋ノ自然換氣ニ關スル總合的研究, 國民衛生, 第 5 巻, 第 11 號, pp.1-13, 1928.11
18) 藤井厚二: 我國住宅建築ノ改善ニ關スル研究（承前）,國民衛生, 第 4 巻, 第 4 號, pp.137-148, 1926.12
19) 伊藤正文: 建築保健工學 第一部, 工業圖書株式會社, 1938
20) 柳町政之助：煖房と換氣-後編（温濕度調整法），大日本工業學會, 1922.5
21) 大澤一郎, 櫻井省吾：煖房換氣工學, 丸善, 1926.10
22) 渡邊要, 長倉謙介：計畫原論, 常磐書房, 1934.11
23) 佐藤鑑: 建築環境學, 紀元社, 1948
24) 木村幸一郎, 三木韶: 建築計畫原論, 共立出版, 1949
25) 加茂正雄, 柳町政之助:換氣規格制定委員會報告, 衞生工業協會誌, 第 14 巻, 第 2 號, pp.61-76, 1940.2
26) 換気規格分科会（主査 中村平, 委員 小林陽太郎, その他専門委員ら）: 室内環境基準作成のための研究および基準 – 規格試案の提案 HASS 102 換気（案）, 空気調和・衛生工学, 第 46 巻, 第 12 号, 1972.12

1.2　必要換気量の歴史的背景

1.2.1　CO_2 1 000 ppm 問題とは

現在，建築基準法，建築物衛生法（建築物における衛生的環境の確保に関する法律）いずれにおいても，室内空気質の基準の一つとして，二酸化炭素濃度は 1 000 ppm 以下と定められている。教科書やテキストなどでは，二酸化炭素濃度 1 000 ppm は二酸化炭素の毒性によって決められたものではなく，室内空気質の総合的指標であると書かれているが，それも厳密にいえば正しくはない。総合的指標というと，さまざまな汚染物質が人体に与える影響を総合した指標を意味するが，実は二酸化炭素濃度 1 000 ppm は人間の呼気由来の二酸化炭素だけを対象としており，体臭強度を代表することができる指標であり，「二酸化炭素濃度は体臭強度の代表的指標」というのが正しい。さらにいえば，嗅覚は順応することから，在室者は体臭に順応し，数分でにおいを感じなくなってしまうため，外来者評価による体臭強度の指標であるといえる。

しかしいま，多くの建物において，室内の二酸化炭素濃度が 1 000 ppm を超える場合が多くなってきている。図 1.2.1[1]は，東京都での立ち入り検査で建築物衛生法に定められる換気基準値を満たさなかった建物の割合（不適率）の経年変化を示したものであるが，室内の二酸化炭素についての不適率は，昭和 46 年当時でも 20%前後であり，ここ十数年は徐々に増加し，約 30%でピークとなり，その後やや減少するものの，現在でも約 20%と高い値で推移していることがわかる。しかし，この不適率の増加の原因は一体何であろうか。一つには，いわゆる地球温暖化に伴う大気中の二酸化炭素濃度の増加が原因として挙げられる。図 1.2.2 は，世界平均の外気の二酸化炭素濃度の経年変化を表した図である。二酸化炭素濃度の不適率が上昇する平成 9 年（1997 年）あたりからでも，外気の二酸化炭素濃度はおよそ 45ppm 上昇しており，人間一人あたりの二酸化炭素発生量を 20 L/h とすると，一人あたりの換気量が 31.5 m^3/h から 33.9 m^3/h に増加させなければならないことになる。現在のところ，建物の換気設備は外気の二酸化炭素濃度に応じて増減させる装置は付けられていないため，自然と不適率が増えるというわけであろう。もちろん，外気の二酸化炭素濃度上昇だけが不適率増加の原因とは言えないが，一つの大きな要因であることは確かである。不適率を下げるためには，空調設備の外気導入量，即ち換気量を増大させればよいわけであるが，現在の省エネルギーや脱炭素への取り組みのなかで，換気量の増加は空調機の消費エネルギーの増大を招くことから，その必要性は慎重に議論されなければならない。

室内の二酸化炭素濃度が 1 000 ppm を超えるとき，室内の空気環境は在室者の健康と快適性を保てないほどに悪化するか。1 000 ppm は是が非でも守らなければならない室内環境基準なのか。我々は，この問いを「CO_2 1 000 ppm 問題」と呼ぶこととし，本稿では 1 000 ppm が決められるに至った過程での，換気に関する考え方と必要換気量の変遷，最新の研究動向などを紹介し，今後の二酸化炭素濃度基準がどうあるべきかについて，議論するための資料としたい。

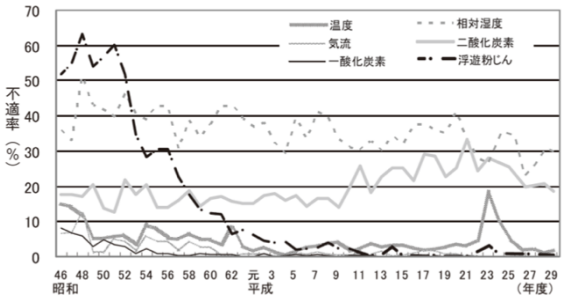


図 1.2.1　空気環境管理項目の不適率経年変化（東京都）[1]

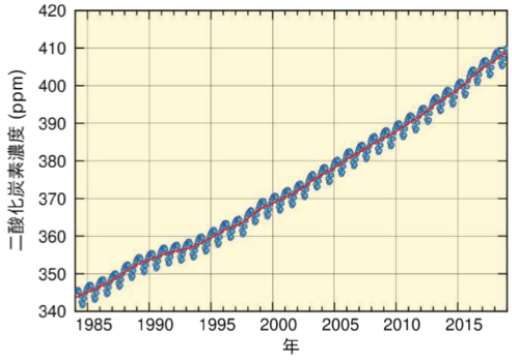


図 1.2.2　外気の二酸化炭素濃度の経年変化（世界平均）[2]

1.2.2　換気哲学の変遷

図 1.2.3[3), 8)]は換気哲学の変遷と，アメリカにおける必要換気量の変遷が対比させて描かれた図であり，以後，この図の様な変遷の経緯をたどっていくことにする。

古く 18 世紀に，ラボアジェは多数の人間がいる室で人々が不快になったり病気にかかるのは，人体から発生する二酸化炭素が原因であるとする考えを発表した[4)]。それまでは，空気のよどみや人間の汗が原因と考えられたこともあったが，確固たる科学的根拠に立脚した考え方はなかったといえる[5)]。

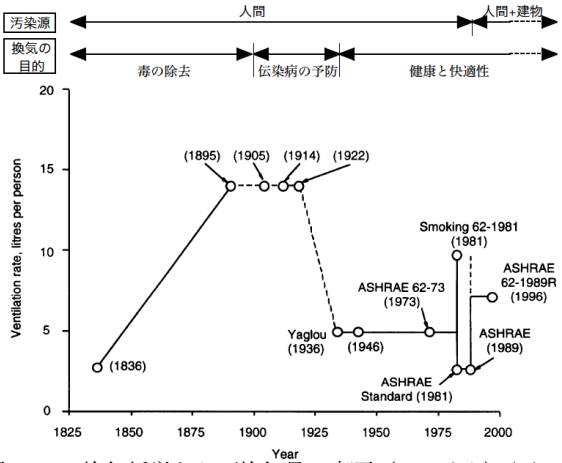


図 1.2.3　換気哲学と必要換気量の変遷（アメリカ）[3), 8)]

ラボアジェ以後，二酸化炭素が有害物質であると信じられたが，19 世紀中頃に，森鷗外が師事したペッテンコッフェル[6)]が通常の室内で出現する濃度の二酸化炭素や酸素濃度の減少は決して有害なものではないことを証明するとともに，有害な空気汚染の主原因は人体から発生する有機物であると主張した。それからしばらくの間は，人間は有害な有機物の発生源であると信じられ続けることになる。

1900 年頃には，その有害物質が伝染病の感染を引き起こすと信じられるようになる[3)]が，1930 年代の半ばには新しいパラダイムシフトが起こる。1936 年にヤグロー[7)]らが，重要な汚染物は人体から発生する体臭であるとし，体臭濃度を許容できるレベルに保つために必要な換気量を提案したことにより，換気にとって体臭が重要な汚染物であると考えられるようになるのである。その考え方はその後の様々な国の換気基準の基礎となった。しかし，1980 年代の欧米において，石油価格の高騰に由来する省エネルギー対策の一環として建物の換気量が削減化されると，吐き気やめまい，頭痛などの症状を訴える在室者が急増し，シックビルディング症候群（Sick Building Syndrome）と呼ばれて問題となる。この原因は，換気量削減によって濃度が上昇した室内の建材などから発生する様々な化学物質であると考えられ，このことが体臭以外の汚染源も重要であるという考え方を生んだ。その考え方はファンガーの知覚空気汚染量という新しい概念の提案につながり，現在では，室内空気汚染の原因は人間だけではなく，建物も重要な汚染物発生源であると広く認識されるに至っている。

表 1.2.1 には，これまで述べた 17 世紀以降の空気汚染のメカニズムに関する考え方の変遷を年代順に示すとともに，必要換気量の例を示している。また，表 1.2.1 より，換気の目的の考え方に応じて必要換気量も変化している様子がわかる。ファンガーは，「室内の空気はただ許容されることだけを目標として設計されるのではなく，最上なる

表 1.2.1　空気汚染の考え方年表[9)]

時代	空気汚染の考え方	必要換気量
17～18 世紀	空気のよどみ，人混みによる汗が伝染病や発熱の原因と考えられる	
1777	ラボアジェ(Lavoisier)が不健康な環境の原因は二酸化炭素であると主張	
1836	Tredgold が人間の息から吐き出された有害な汚染物質が空気中に存在していると主張	
1845	Meikleham がラボアジェの二酸化炭素有毒説を支持	
1857		Roscoe により，兵舎の臭気除去のための換気量：12 $m^3/h\cdot$人
1862	ペッテンコッフェル（Max von Pettenkofer)が室内で出現する程度の低濃度では二酸化炭素は無害であること，また酸素濃度の低下による影響も問題ないことを証明。また，二酸化炭素が身体や肺から排出された有機物の指標となると主張	長期在室の室：50 $m^3/h\cdot$人(CO_2 濃度 700 ppm) 通常の室：30 $m^3/h\cdot$人(CO_2 濃度 1 000 ppm)
1872	Sealtzer が人間から排出される有機物が有害であることを主張	
1880		健康のための会議にて必要換気量：51 $m^3/h\cdot$人
1887	Brown-Se'quard が，人間が吐き出した息には“anthropotoxin”と呼ばれる有害物質が含まれているという理論を発表	
1893	J.Billings が人間の呼気有機物汚染理論に基づき，不適当な換気と肺結核との相関を指摘	必要換気量：51 $m^3/h\cdot$人
1920～30	伝染病の感染には換気以外の要因がより重要であることが明らかになる	
1931		ニューヨーク換気委員会：17～25 $m^3/h\cdot$人(教室)
1936	ヤグロー(Yaglou)らは人体から発生する臭気が重要な汚染物であることを示す	25～30 $m^3/h\cdot$人 ＊1 人当たりの気積に応じて必要換気量を変えた
1973		ASHRAE 換気規格：25.5 $m^3/h\cdot$人(一般事務室)
1981		ASHRAE 換気規格：8.5 $m^3/h\cdot$人
1988	Fanger は，体臭ばかりでなく，建材や空調換気装置，煙草が重要な空気汚染源であることを示す。新しい空気質の単位である olf と decipol を提唱	
1989		ASHRAE 換気規格：27 $m^3/h\cdot$人

外気と同じくらい快適で,新鮮で,刺激を受けるものとして知覚されるように設計されることであろう。」[3]と，近い将来，換気哲学における新たなパラダイムシフトを予見している。

1.2.3　人間の体臭と二酸化炭素

ここでは，1936 年のヤグローの研究以来換気哲学の主流となった人体から発生する体臭と換気に関する内外の研究成果について紹介する。

前項で述べたように，はじめて体臭を主要な空気汚染源と位置づけたのはヤグローら[7]であり，様々な階級（平均的階級，労働者，貧困，上流など）の在室者を対象に換気量と臭気強度の関係や二酸化炭素濃度と臭気強度との関係などを実験によって明らかにした。彼らの研究で特徴的なことは，同じ在室者数，同じ換気量であっても，在室者１人あたりの気積が大きくなると臭気強度が低下する傾向が示されたことである。定常状態が達成されれば体臭濃度は気積にかかわらず換気量のみに依存する筈であるので，この気積への依存性は理解しがたいものであり，その後の研究においても確認されていない。一方で，ヤグローらは二酸化炭素濃度は信頼性の高い指標ではないと結論づけている。

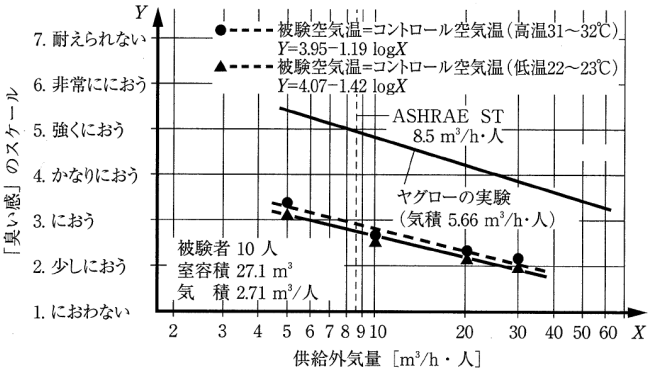


図 1.2.4　換気量と体臭強度との関係[10]

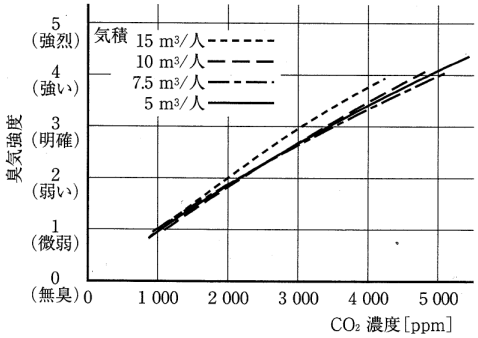


図 1.2.5　二酸化炭素濃度と体臭の臭気強度との関係[11]

ヤグロー以後しばらくは目立った研究はなかったが,省エネルギーが重要視されるようになった1980年代に入り，日本でも体臭と必要換気量に関する研究が多く始められた。1982 年に南野ら[10]は２種類の温湿度条件下において換気量と体臭強度との関係について検討を行った。図 1.2.4 は換気量と臭気強度との関係を示したものであるが，ヤグローの実験に比べると同じ換気量でも臭気強度が低くなっていることがわかる。この原因は，生活習慣・居住環境・実験方法の差異によるものだと説明されている。南野らはヤグローらと違い，呼気由来の二酸化炭素が体臭強度の信頼できる指標であることを示し，室内の臭気濃度を「少しにおう」に保つためには，二酸化炭素濃度を約 1 000 ppm にすれば十分良いことを示した。これは図 1.2.4 の供給外気量 30 m³/h 人とも対応するものである。

その後楢崎ら[11)-13)]は様々な気積において換気量と体臭の臭気強度との関係について検討し，ヤグローらが示した気積による影響はないことを実証した。図 1.2.5 は，二酸化炭素濃度と体臭の臭気強度との関係を示したものであるが，両者の関係に在室者１人あたりの気積が殆ど影響を及ぼさないことがわかる。同時に臭気強度の指標として二酸化炭素濃度を位置づけると，臭気強度を「微弱」とするためには，二酸化炭素濃度を 1 000 ppm にしなければならないことがわかる。また楢崎らは，在室者に運動を負荷した場合や温湿度が高い場合には同じ二酸化炭素濃度でも臭気強度・不快度ともに高いことを明らかにしている。

一方，ヤグローが示した体臭強度の在室者１人当たりの気積への依存性を説明するための試みとして，クラウゼンら[14]によって，体臭の室内空間での安定性について研究が行われた。空気中での酸化作用や壁面などへの吸着によって空気中の体臭濃度は減衰する。クラウゼンらはその減衰の特性を安定係数（Stability ratio ：理論濃度に対する実際の濃度の比）として定量化した。実験の結果，体臭濃度の安定係数は，時間とともに安定係数が明らかに減少したことが，ヤグローの実験結果を説明できるほどの

減衰は得られず，その後も，気積によって体臭強度が異なる合理的理由は見つかっていない。

1.2.4　二酸化炭素濃度が 1 000 ppm と決められた経緯

ところで，アメリカ（ASHRAE：米国暖房冷凍空調学会）はじめ各国の換気基準の源流になったのは，ペッテンコッフェル[6]の論文（1858 年）と考えられ，表 1.2.1 にも示す通り，ペッテンコッフェルは人による空気汚染は二酸化炭素濃度の増加に伴うため，長時間在室する室での二酸化炭素濃度は 700 ppm，通常の室では 1 000 ppm を提唱した。その後，ビリングス[15]（1893 年）が健康の観点から一人当たりの最低換気量として 51 m^3/（h・人）を提唱したことなどもあったが，最終的には体臭制御という目的からヤグロー[7]（1936 年）らの研究成果を基礎として，ASHARE 基準 62-73（1973 年）が策定された。この基準では，例えば事務所の換気量は 25～42m^3/（h・人）とされ，外気の二酸化炭素濃度が例えば 330 ppm とすると，806～1 130 ppm 程度となる換気量であった。この基準から 2 年後，日本では，建築物衛生法が制定され，現在に至るまで二酸化炭素濃度 1 000 ppm の値は変更されていない。アメリカではその後換気量基準が削減されたが，シックシンドロームビルが社会問題となり，再度換気量の見直しが図られ，ASHRAE Standard 62.1-2013 としてさまざまな空気汚染物質に対応した詳細な基準となっている。なお，この基準では，二酸化炭素濃度に基づいて換気量を決める場合には，外気濃度＋700 ppm とするべきであるが，二酸化炭素は信頼できる確実な空気質指標ではないと付記されている。ただし，その後，二酸化炭素濃度に関する基準値は掲載されなくなっている。ASHRAE の換気規準は，二酸化炭素だけでは室内の良好な空気質は保てないと判断しているものと考えられる。

1.2.5　おわりに

本項では，現在の建物の室内環境基準値のなかで，建築物衛生法での不適率（1 000 ppm より高）が高い汚染質の一つである二酸化炭素が室内環境において持つ意味について考えるために，換気哲学の変遷，体臭と二酸化炭素濃度との関係，二酸化炭素濃度基準 1 000 ppm が決められた背景など，二酸化炭素の濃度基準を考える上で最低限必要と考えられる知見を紹介した。

なお，本稿は，参考文献 9)及び平成 28 年度の換気設備委員会・室内空気質小委員会報告書「室内空気質のための必要換気量」「2.2.1　体臭と CO_2 濃度・必要換気量について」の一部を基に最新資料を加えて再構成したものである。

【引用・参考文献】

1) 公益社団法人日本建築衛生管理教育センター：「新　建築物の環境衛生管理（中巻）」，2020年
2) 気象庁「気候変動監視レポート」，2020年7月，https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html
3) P. O. Fanger: "THE PHILOSOPHY BEHIND VENTILATION: PAST, PRESENT AND FUTURE", Proceedings of INDOOR AIR '96, Vol.4, pp.3-12, 1996
4) K. Klauss, R.H.Tull, L. M. Roots and J. R. Pfafflin: "Histry of the Changing Concepts in Ventilation Requirements", ASHRAE Journal, June, 1970
5) 渡辺英行抄訳：「換気の必要性についての概念の変遷」，空気調和・衛生工学，第51 巻，第10 号，1977 年，pp.110-114
6) M. V. Pettenkofer: "Über den Luftwechsel in Wohngebäuden", München, 1858
7) C. P. Yaglou, E. C. Riley and D. I. Coggins: "Ventilation Requirements", ASHVE Transactions, Vol. 42, 1936, pp.133-162
8) Hazim B. Awbi: "Chapter 7 -- Ventilation ", ARCHITECTURE：COMFORT AND ENERGY, 1998, pp.157-188

9) 山中俊夫：「3.1 建物における必要換気量」，都市・建築空間の科学 ―環境心理生理からのアプローチ，2002年，pp.91-101，技報堂出版
10) 南野 脩ら：「建築物における必要換気量に関する研究 （第１報）」，建築環境工学論文集，第４号，1982 年，p.53
11) 楢崎正也，佐藤隆二：「体臭に基づく必要換気量算定のための基礎的研究 （その４）実験室調査における臭気強度と臭気不快度」，日本建築学会大会学術講演梗概集，1983 年，pp.361-362
12) 楢崎正也，板田昌彦：「体臭に基づく必要換気量算定ための基礎的研究 （その５）運動負荷時の臭気強度と臭気不快度」，日本建築学会近畿支部研究報告集，1984 年，pp.9-12
13) 楢崎正也，板田昌彦：「体臭に基づく必要換気量算定のための基礎的研究 （その７）高温状態における臭気強度と臭気不快度」，日本建築学会大会学術講演梗概集，1985 年，pp.315-316
14) G. H. Clausen, P. O. Fanger, W. S. Cain and B. P. Leaderer: "Stability of Body Odor in Enclosed Spaces", Environmental International, Vol.12, 1986, pp.201-205
15) J. S. Billings: “Ventilation and health”, The Engineering Record”, New York, New York, 1893
16) T. Tredgold: "The Principles of Warmimg and Ventilation, Public Buildings, M. Taylor, 1836
17) A. Saeltzer Acoustics and Ventilation, D. Van Nostrand, New York, 1872
18) C. E. Brown-Sequard, A. D'Arsonval: "Demonstration de la puissance toxique des exhalaisons pulmonaires provenant de l'homme et du chien", Compt. Rend. Soc. de Biol. Vol. 39, p. 814, 1887
19) 吉沢 晋：「室内環境基準と必要換気量」，空気調和・衛生工学，第54 巻，第4 号，1980 年4 月，pp.3-9
20) W. S. Cain, B. P. Leaderer, R. Isseroff, L. G. Berglund, R. J. Huey, E. D. Lipsitt and D. Perlman: "Ventilation Requirements in Buildings ---I. Control of Occupancy Odor and Tobacco Smoke Odor", Atmospheric Environment, Vol.17, No.6, 1983, pp.1183-1197
21) 楢崎正也：「必要換気量について（学会換気規格案に関連して）」，環境工学研究会資料，第110号，1985 年，pp.13-26
22) 楢崎正也：「室空気質と必要換気量」，GBRC，Vol.38，1985年4月，pp.21-30
23) 楢崎正也：「室空気清浄設計の原理」，GBRC，Vol.64，1991 年10月，pp.8-15
24) John E. Janssen: "The V in ASHRAE: An Historical Perspective", ASHRAE Journal, Vol.36, No.8, 1994, pp.126-132

1.3　二酸化炭素濃度と知覚空気質

1.3.1　はじめに

二酸化炭素濃度と知覚空気質，空気質の快適性との関係を調査した研究は[1)~4),9)~12)]，室内二酸化炭素濃度の約 1 000 ppm が許容レベルに相当するとの報告が少なくない。これらの研究は二酸化炭素濃度を在室者から発生される生体発散物質(bioeffluents，体臭)の指標として捉えており，想定されている空気汚染源は二酸化炭素ではなく，体臭である。二酸化炭素濃度は人体から呼出される二酸化炭素量と換気量とのバランスに依存するため，二酸化炭素濃度が生体発散物質濃度の指標として考えるのは合理的である。しかし，二酸化炭素濃度を総合的な空気の汚れの指標とするのは限定的に考えるのが妥当であろう。室内空気汚染源には人体（在室者）以外にも，建材，空調システム等，さまざまなものがあるからである。そこで本節では，在室者，建材，空調システムの発生する知覚空気汚染物質を同一の単位で評価する手法を紹介し，二酸化炭素濃度と知覚空気質との関係について述べることとする。二酸化炭素濃度を空気汚染指標とする場合，汚染源が在室者なのか，建材なのか，空調システムなのか，もしくは二酸化炭素自体なのかを区別することが必要であると思われる。

1.3.2　知覚空気質を評価する単位

1980 年前後にオフィス，学校教室，会議室などにおいて在室者がむかつき，吐き気，めまい，頭痛などを訴える，いわゆるシックビルディングシンドロームが欧米を中心に話題になり，WHO（世界保健機構）でも正式に取り上げられた。デンマーク工科大学教授の P.O.Fanger を中心とした研究グループはデンマークの建物で多くの空気環境調査を行い，温湿度，二酸化炭素濃度，TVOC 濃度等の物理・化学因子と在室者の申告する空気不快感との相関が低いことを報告した[5)]。そこで彼らは，通常のウイークデイの実測結果から執務者が在室勤務している環境での知覚空気汚染強度を，空調システムが稼働しているウイークエンドの実測結果から空調稼働時の知覚空気汚染強度を，空調システムが稼働していないウイークエンドの実測結果から建材の知覚空気汚染強度を算定する手法を提案した。知覚空気汚染強度は，Fanger らの提案した，人間の知覚に基づく単位である olf（オルフ）を用いて算定した。知覚空気汚染強度の単位 olf は，知覚空気質を判定する人々が申告する不快者率を基にした，知覚空気汚染度の単位 decipol（デシポル）と，現場の換気量の２つの要素を，Fanger らが数多くの被験者実験から求めた「不快者率―換気量関係式」に代入することによって求められる。

表 1.3.1　建材，空調システム，在室者からの知覚空気汚染強度

対象空間	単位床面積あたりの知覚空気汚染強度　(olf/m²)		
	建材から	空調システムから	在室者から
幼稚園[6)]	0.07	0.31	0.31
小学校教室[7)]	0.11	0.20	0.20
オフィス[5)]	0.12	0.25	0.07
会議場[5)]	0.32	0.28	0.11

上記のような知覚空気汚染強度を用いた算定法により，表 1.3.1 に示すように建材や空調システムからの知覚空気汚染物質が発生していることが把握できた。このように建材や空調システムからの知覚空気汚染は，在室者からの空気汚染とは異なり，二酸化炭素濃度を指標として用いることはできない。また，知覚空気汚染強度 olf の加法性についても，在室者，建材，タバコについては合理的な結果が得られていることが報告されている[8)]。

1.3.3　二酸化炭素濃度と知覚空気質

Fanger らは，上記の「不快者率―換気量関係式」を導くにあたり，多くのデンマーク人男性の在室者

から発生される体臭のレベルをパネルが評価する実験を行っており[9]，室内二酸化炭素濃度 1 000 ppm が不快者率の 20%に相当するとしている。その際，外気濃度は 350 ppm であったので，外気濃度がこれより高い場合は，その分，対応する室内二酸化炭素濃度は高くなる，としている。これは在室者がデンマーク人女性の場合[10]でも，アメリカ人[11]，日本人[12]であっても，ほぼ同様の結果となっている（図 1.3.1）。日本人被験者を用いて調査した岩下[12]らの研究では二酸化炭素濃度 995 ppm が不快者率 20%に相当し，その際，外気濃度は 370 ppm であった。上記の研究においては不快者率 20%に相当する二酸化炭素濃度に人種間の差は無く，ほぼ外気濃度+650 ppm に相当している。また，不快者率 20%を得るために必要な換気量を定常状態を仮定して算定すると，在室者一人当たり約 7.5 L/s (27 m³/h)となる（図 1.3.2）。

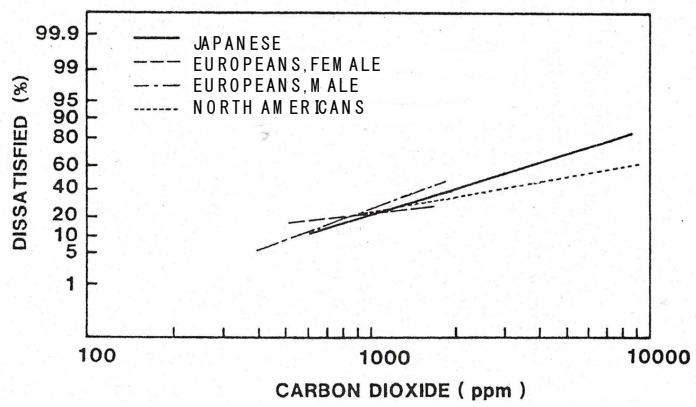


図 1.3. 1　不快者率と二酸化炭素濃度との関係

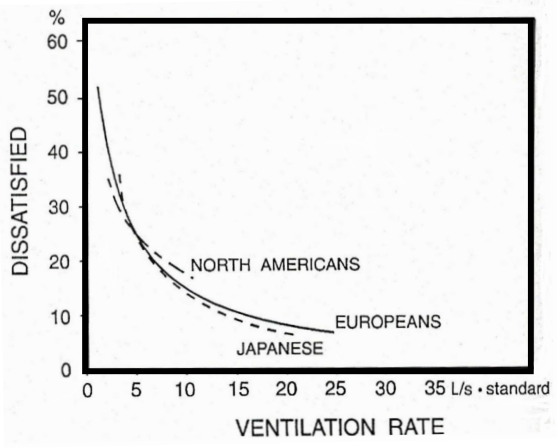


図 1.3.2　不快者率と在室者一人当たりの換気量との関係

上記の「不快者率―換気量関係式」に係る一連の研究は，人体からの空気汚染が顕著な空間，そして在室者としては大学生年齢の成人被験者を想定している。在室者からの空気汚染のみが有意な対象汚染物質であれば，二酸化炭素濃度が合理的な指標となるが，前述したように，建材や空調システムからの空気汚染が顕著な場合は，二酸化炭素濃度を空気環境の指標に用いるのは避けるべきである。「二酸化炭素濃度は総合的な空気汚染の指標」という考えは，条件付きと思われる。

また，在室者からの知覚空気汚染強度は，成人よりも児童の方が多くなることが Yaglou ら[13]によって報告され，Wargocki も Fanger らの研究成果から，幼稚園児，小学生の olf 値の増加について述べている[8]。成人の方が児童よりも二酸化炭素呼出量が多いのに対し，知覚空気汚染物質発生強度は児童の

方が多いことには注目に値する。また，Wargocki は在室者の活動レベルの上昇による olf 値の増加についても言及している [8]。在室者の年齢や活動レベル等の変化によっても，二酸化炭素濃度と知覚空気汚染との関係は異なってくるため，注意が必要である。

【参考文献】

1) 南野脩ほか2名，建築物における必要換気量に関する研究（第二報）　体臭を対象とした実験的研究（その２）実験結果，日本建築学会大会梗概集，1981 年 9 月，pp.347-348
2) 南野脩ほか2名，建築物における必要換気量に関する研究　ー体臭を対象とした実験的研究―，建築環境工学論文集第四号学術論文講演発表会資料，1982 年 6 月，pp.61-66
3) 楢崎正也，佐藤隆二，体臭に基づく必要換気量算定のための基礎的研究　その 4.実験室調査における臭気強度と臭気不快感，日本建築学会大会梗概集，1983 年 9 月，pp.361-362
4) 浅野賢二，人体による空気汚染と感覚等の関係，日本建築学会大会梗概集，1981 年 9 月，pp.349-350
5) Fanger, P.O., Lauridsen, J., Bluyssen, P., and Clausen G., Air Pollution Sources in Offices and Assembly Halls Quantified by the Olf Unit, Energy and Buildings, Vol.12, pp.7-19, 1988
6) Pejtersen, J., Srensen, J., Quistgaard, D., Clausen, G., Iwashita, G., Zhang, Y., Onishi, T., and Fanger, P.O., Air Pollution Sources in Kindergartens, Proc. of Healthy Building, Washington, D.C., 1991
7) Pejtersen, J., Oie, L., Skar, S., Clausen, G., and Fanger, P.O., A Simple Method to Determine the Olf Load in a Building, Proc. of INDOOR AIR '90, Toronto, Vol.1, pp.537-542, 1990
8) Wargocki, P., Sensory pollution sources in buildings, Indoor Air 2004; 14 (Suppl 7), pp.82–91
9) Fanger, P.O., and Berg-Munch, B., Ventilation and Body Odor, Proc. of An Engineering Foundation Conference on Management of Atmospheres in Tightly Enclosed Spaces, Atlanta, ASHRAE, pp.45-50, 1983
10) Berg-Munch, B., Clausen G., and Fanger, P.O., Ventilation Requirements for the Control of Body Odor in Spaces Occupied by Women,　Environment International, Vol.12, pp.195-199, 1986
11) Cain, W.S., Leaderer, B.P., Isseroff, R., Bergland, L.G., Ventilation Requirements in Buildings-I：Control of Occupancy Odor and Tobacco Smoke Odor, Atmospheric Environment, Vol.17(6), pp.1183-1197, 1983
12) 岩下剛，木村建一，田辺新一，吉沢晋，池田耕一: 人間の嗅覚に基づく室内空気質の評価に関する基礎的研究，日本建築学会計画系論文報告集，第 410 号，pp.9-19，1990 年
13) Yaglou, C.P., Riley, E.C., and Coggins, D.I., Ventilation Requirements, H.P. & A.C., Jan., pp.65-76, 1936

1.4　海外換気基準の現状

本節では海外（アメリカ，欧州）における外気取り入れ量の考え方について紹介する。

1.4.1　ASHRAE，EN について

ASHRAE（American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers：米国暖房冷凍空調学会）は空調・冷凍・換気などに関する国際的な学会であり，ASHRAE で定められている多くの Standard が世界各国の基準に影響を与えている。EN は European Norm（European Standards：欧州統一規格）の略称であり，EN 規格は CEN(欧州標準化委員会)や CENELEC(欧州電気標準化委員会)，ETSI(欧州通信規格協会)が発行する欧州の統一規格である。加盟各国は EN 規格を自国の国家規格として採用することが義務付けられている。

1.4.2　ASHRAE 及び EN における外気取り入れ量の基本的な考え方

本項では，ASHRAE 及び EN における外気取り入れ量の基本的な考え方について紹介する。オフィスビル等の建物の換気量について，ASHRAE では Standard 62.1 2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality[1)]に記されており，EN では EN 16798-1:2019 Energy Performance of buildings – Ventilation for buildings Part1[2)]に記されている。どちらにおいても，人体由来の汚染物質に対する外気取り入れ量と建物由来の汚染物質に対する外気取り入れ量をそれぞれ算出し，合計値を室の外気取り入れ量としている。

1.4.2.1　ASHRAE Standard（アメリカ）

Standard 62 1989 までは，室内の外気取り入れ量（27 m^3/h）を二酸化炭素・におい・室に通常存在する汚染物質の濃度を許容値以下にできるものとし，二酸化炭素の許容濃度として 1 000 ppm を用いている。なお，Appendix において，二酸化炭素発生量を 0.30 L/min（1.2 met），外気濃度 300 ppm，許容濃度 1 000 ppm として換気量を計算し，約 25.7 m^3/h となることを理論的根拠としている。

その後は EN の基準等を参考に，現行の人体由来と建物由来の双方の汚染物質に対する外気取り入れ量の考え方となっている。Standard 62 1999 から 2016 までは，Appendix において，室内空気に馴染んでいない人々（外来者）の 80%が満足する臭気レベルになるものとして，外気取り入れ量 7.5L/s を示しており，これと，活動量 1.2met 時の二酸化炭素発生量 0.31 L/min から，外気と室内空気の二酸化炭素濃度差 700 ppm を導き出している[3)]。

現行の Standard 62 2019 では，外気取り入れ量の考え方は変わっていないが，Appendix における外気取り入れ量と二酸化炭素濃度差の記述は削除されている。

外気取り入れ量は人体由来と建物由来の双方の汚染物質を考慮し，以下の式（1.4.1）で求める。

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_a \times A_z \tag{1.4.1}$$

ここで，

V_{bz}：居住域（呼吸域）における外気取り入れ量 [L/s]

R_p：一人あたりの外気取り入れ量 [L/(s・人)]

P_z：人数 [人]

R_a：単位床面積あたりの外気取り入れ量 [L/(s・m^2)]

A_z：床面積 [m^2]

R_p及び R_aは基準の中で建物用途別に規定されている。代表的な例として，オフィスの一部を表 1.4.1 に示す。在室人数は，一般使用時の最大使用人数を想定する（例外として，変動がある場合の時間平均値の算出方法が別に記載されている）。最大使用人数を推定出来ない場合のために，表 1.4.1 には在室人

員密度の既定値も記されている。

表 1.4.1　居住域における外気取入れ量 [1)]

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate R_p		Area Outdoor Air Rate R_a		Default Values Occupant Density	Air Class	OS (6.2.6.1.4)
	cfm/ person	L/s·person	cfm/ft^2	L/s·m^2	#/1000 ft^2 or #/100 m^2		
Office Buildings							
Breakrooms	5	2.5	0.12	0.6	50	1	
Main entry lobbies	5	2.5	0.06	0.3	10	1	✓
Occupiable storage rooms for dry materials	5	2.5	0.06	0.3	2	1	
Office space	5	2.5	0.06	0.3	5	1	✓
Reception areas	5	2.5	0.06	0.3	30	1	✓
Telephone/data entry	5	2.5	0.06	0.3	60	1	✓

表 1.4.1 から，オフィスにおける一人あたりの外気取り入れ量を計算すると，以下のようになる。

- 一人あたりの外気取入れ量（R_p）は表より，2.5 L/s （=9 m^3/h）である。なお，この数値は外来者ではなく，室内空気に馴染んだ在室者を想定した外気取り入れ量となっている [4)]。
- 単位床面積あたりの外気取り入れ量（R_a）は表より 0.3 L/(s・m^2)（=1.08 m^3/(h・m^2)）である。表中の在室人員密度（5 人/100 m^2）より，一人あたりの床面積は 20 m^2 となるため，床面積から算出される外気取入れ量は 0.3×20=6 L/s（21.6 m^3/h）となる。

これらより，オフィスにおける一人あたりの外気取り入れ量は 2.5＋6＝8.5 L/s（30.6 m^3/h）となり，我が国で用いられている 30 m^3/h と概ね同様の数値となる。

1.4.2.2　EN 規格（欧州）

現行の EN 16798-1 において，外気取り入れ量は人体由来と建物由来の双方の汚染物質を考慮し，以下の式（1.4.2）で求める。

$$q_{tot} = n \times q_p + A \times q_b \qquad (1.4.2)$$

ここで,

q_{tot}：室の外気取り入れ量 [L/s]

n：室の設計利用人数 [人]

q_p：一人あたりの外気取り入れ量 [L/(s・人)]

A：床面積 [m^2]

q_b：単位床面積あたりの外気取り入れ量 [L/(s・m^2)]

EN 規格では室内環境を表 1.4.2 のように 4 つのカテゴリーに区分しており，標準レベルはカテゴリーII とされている。q_p及び q_bはカテゴリー毎に表 1.4.3 に定められており，q_bはさらに室内空気汚染の状況に応じて，3 つに分類されている。

表 1.4.3 において，カテゴリーII は室内空気に馴染んでいない外来者の不満足率が 20%となる環境に

相当することがわかる。この時の一人あたりの外気取り入れ量は7 L/s であり，想定する対象はASHRAE とは異なり，外来者となる。カテゴリーIII は外来者の不満足率が 30%となる環境であり，一人あたりの外気取り入れ量は 4 L/s となるが，この数値でも ASHRAE よりも高いものとなる。

表 1.4.2　カテゴリーの分類 [2)]

Category	**Level of expectation**
IEQ_I	High
IEQ_{II}	Medium
IEQ_{III}	Moderate
IEQ_{IV}	Low
NOTE In the tables only the category numbers are used without the IEQx symbol.	

表 1.4.3　一人あたりの外気取り入れ量及び単位床面積あたりの外気取り入れ量 [2)]

Category	**Expected % Dissatisfied**	**q_p (l/s/person)**	**q_b (l/s/m²)**		
			Very low polluting building	Low polluting building	Non low-polluting building
I	15	10	0.5	1.0	2.0
II	20	7	0.35	0.7	1.4
III	30	4	0.2	0.4	0.8

表 1.4.3 から，室内空気汚染が低いオフィスにおける一人あたりの外気取り入れ量を計算すると，以下のようになる。

【カテゴリーII】

- 一人あたりの外気取り入れ量（q_p）は表より，7 L/s （=25.2 m³/h）である。
- 単位床面積あたりの外気取り入れ量（q_a）は表より 0.7 L/(s・m²)（=2.52 m³/(h・m²)）である。EN におけるオフィスの在室人員密度は 0.1 人/m² であることより，一人あたりの床面積は 10 m² となるため，床面積から算出される外気取り入れ量は 7 L/s（25.2m³/h）となる。

これらより，一人あたりの外気取り入れ量は 7 + 7 = 14 L/s（50.4 m³/h）となる。

【カテゴリーIII】

- 一人あたりの外気取り入れ量（q_p）は表より，4 L/s （=14.4 m³/h）である。
- 単位床面積あたりの外気取り入れ量（q_a）は表より 0.4 L/(s・m²)（=1.44 m³/(h・m²)）である。EN におけるオフィスの在室人員密度は 0.1 人/m² であることより，一人あたりの床面積は 10 m² となるため，床面積から算出される外気取り入れ量は 4 L/s（14.4 m³/h）となる。

これらより，一人あたりの外気取り入れ量は 4 + 4 = 8 L/s（28.8 m³/h）となり，この条件での外気取り入れ量が ASHRAE 同様，我が国で用いられている 30 m³/h に近い数値となる。

1.4.3 まとめ

本節では，オフィス等の非居住空間における外気取り入れ量について，ASHRAE と EN で定められている算出方法を紹介した。双方において，人体由来の室内空気汚染のみでなく，建物由来の室内空気汚染を考慮に入れた外気取り入れ量の算出方法を採用しており，外気二酸化炭素濃度の上昇に伴う換気量の増大を防止できる点では，室内二酸化炭素濃度（1 000 ppm）を基準とするものよりも先進的な考え方であるといえる。

オフィスにおける一人あたりの外気取り入れ量を求めた結果，ASHRAE では 30.6 m³/h，EN ではカテゴリーII で 50.4 m³/h，カテゴリーIII で 28.8 m³/h となった。室内の定常状態を想定した場合，在室者はある程度，室内空気に馴染んだ状態になっていると考えられることから，EN のカテゴリーIII を適用してみると，どちらも外気取り入れ量は我が国の 30 m³/h と近いものとなる。

現行の ASHRAE，EN ではともに外気取り入れ量と二酸化炭素濃度との関係についての記載はないが，一人あたりの外気取り入れ量は約 30 m³/h となり，これは外気と室内空気の二酸化炭素濃度差が 700 ppm の定常状態を想定した場合の外気取り入れ量と概ね等価なものであると考えられる。

【参考・引用文献】

1) ASHARE: ASHRAE Standard 62.1 2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2019
2) BSi: BS EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2019
3) Andrew K. Persily: Don't Blame Standard 62.1 for 1,000 ppm CO_2, ASHRAE JOURNAL, pp.74-75, 2021.2
4) Bjarne W. Olesen: Revision of EN 15251: Indoor Environmental Criteria, REHVA Journal, pp.6-12, 2012.8

2. 建築物における二酸化炭素濃度基準と現状

2.1 建築物衛生法における二酸化炭素濃度基準の制定根拠

2.1.1 はじめに

日本では1970年（昭和45年）に制定された「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」（昭和45年4月14日法律第二十号）において，「建築物環境衛生管理基準」が規定され，二酸化炭素濃度の環境衛生管理基準が定められている。本基準は，1970年の制定以降，現在でも建築物の維持管理関係者に広く浸透し，衛生規制として重要な役割を担っている。本報では，二酸化炭素について，本基準が設定された経緯や根拠を概説する。なお，本報の内容の一部は，解説記事[1),2)]で詳説しているので参照されたい。

2.1.2 建築物衛生法の環境衛生管理基準[1),2)]

日本では，第二次世界大戦後の高度経済成長期において，人口の都市への集中や建築技術の高度な進歩等に伴って，都市部を中心に大規模な建築物が多数建設され，ビル等の建築物の室内で1日の大半を過ごす人々が飛躍的に増大した。建築物は，日常における生活や活動の場であり，そこに滞在する人々の健康を維持する上で，衛生的な環境が保持されていなければならない。

1965年（昭和40年）6月30日，厚生大臣の諮問に応じて，(1)環境衛生に係る公害に関する重要事項，(2)水道・清掃施設・下水道の終末処理場その他環境衛生に係る生活環境に関する重要事項，これら2項目を調査審議するために「公害審議会」（1967年11月25日に生活環境審議会に改名）が発足した。この審議会の中に生活環境部会が設置され，「健康的な居住水準の設定について」が1965年9月27日に諮問された（厚生省環第６５９号）。その後，公害審議会の審議過程において，「多人数利用建築物の衛生水準の設定について」があわせて審議され，生活環境部会は，1966年8月13日に上記2項目に関する中間答申を公害審議会に提出した。

「多人数利用建築物の衛生水準の設定について」の中間答申では，ビルなどの建築物に対する衛生上の設備およびその維持管理についての十分な規制や指導が行われていないことから，多くの問題が生じているので，国民の健康を保持，増進するためには，厚生行政の立場から建築物の環境衛生基準の設定，建築物の維持管理に関する専門技術者制度の創設等について早急に措置する必要があるというものであった。昭和30年代頃において，夏期の冷房により消化器系疾患の罹患率が上昇する例がみられること，旧式ビルで冬期暖房中に二酸化炭素濃度が 0.3～0.4%まで上昇する例がみられること，空気調和設備が適切に使用されると粉じん濃度が外気濃度より下回ることが多いことなど，不適切な建築物の維持管理に起因する健康への影響事例がいくつも報告されていた。従って，このような背景をもとに，厚生省は，この問題についての技術的な基礎固めを行うため，昭和40年度厚生科学研究補助金により，社団法人空気調和・衛生工学会に研究を委託した。同学会は，医学，衛生工学，建築学などの学者で組織する委員会（委員長：小林陽太郎 氏）を立ち上げ，欧米先進諸国の制度等も参考にして研究を進め，1966年3月に「ビルディングの環境衛生基準に関する研究」を報告した。これらの準備を経て，建築物の維持管理に関して環境衛生上必要な事項を定めることにより，建築物における衛生的な環境の確保をはかり，もって公衆衛生の向上及び増進に資することを目的として，1970年4月14日に「建築物衛生法」が公布された。

建築物衛生法「第四条第一項」では，「建築物環境衛生管理基準」を規定している。ここでは，特定建築物の所有者，占有者その他の者で当該特定建築物の維持管理について権原を有するものは，政令で定める基準に従って当該特定建築物の維持管理をしなければならないと規定されている。建築物衛生法施行令は，1970年10月12日に公布された。その後，幾多の改正を経て，2004年3月19日に改正された施行令（政令第四六号）が現在施行されているものである。建築物衛生法施行令に規定されている建築物環境衛生管理基準において，空気調和設備を設けている場合の空気環境の調整に関する基準は表2.1.1の通りであり，二酸化炭素濃度は，1 000 ppm以下と規定されている。

表 2.1.1　建築物衛生法施行令における空気環境の建築物環境衛生管理基準

項目	基準
浮遊粉じんの量	0.15 mg/m^3 以下
一酸化炭素の含有率	10 ppm（厚生労働省令で定める特別の事情がある建築物にあつては，厚生労働省令で定める数値）以下
二酸化炭素の含有率	1 000 ppm 以下
温度	一　17℃以上 28℃以下 二　居室における温度を外気の温度より低くする場合は，その差を著しくしないこと。
相対湿度	40%以上 70%以下
気流	0.5 m/秒以下
ホルムアルデヒドの量	0.1 mg/m^3 (0.08 ppm)以下

建築物環境衛生管理基準は，空気環境の調整，給水および排水の管理，清掃，ねずみ・昆虫等の防除に関し，環境衛生上良好な状態を維持するために必要な措置について定めている。本基準は建築物内部の人工的な総合環境を網羅した管理基準であり，この管理基準を遵守するため，建築物の所有者は権原者として，管理技術者を選任し，管理項目に沿った維持管理を実施する義務が課せられている。本基準は制定後これまでにおいて，維持管理関係者に広く浸透し，衛生規制として重要な役割を担っている。また，対象外施設の維持管理基準やガイドラインとしても広く参考とされ，活用されている。

基準値の概念としては，理想値，目標値，推奨値，許容最低限度といった各段階がある。この管理基準は，基準違反に対して直ちに法的措置がとられるものではなく，実現可能な望ましい基準というべきものを示し，特定建築物の所有者，占有者，その他の者で当該特定建築物の維持管理について権原を有する者に，遵守するよう要求しているものであって，推奨値的性格の強いものとされている。

2.1.3　二酸化炭素濃度の建築物環境衛生管理基準の設定根拠

建築物衛生法施行令で定められた二酸化炭素濃度の建築物環境衛生管理基準については，1971 年に作成された厚生大臣指定建築物環境衛生管理技術者講習会テキストに以下の記述がある [3]。「二酸化炭素濃度は，空気清浄度の 1 つの指標として，従来より測定されており，また居室では，人の呼気，喫煙，炊事，また調理等により，影響を受けやすい。二酸化炭素自体は，少量であれば人体に有害ではないが，1 000 ppm を超えると倦怠感，頭痛，耳鳴り，息苦しさ等の症状を訴えるものが多くなり，フリッカー値の低下も著しいこと等により定められたものである。」

二酸化炭素の基準については，1968 年に世界保健機関（WHO）が公表した「The physiological basis of health standards for dwellings; 住居の衛生基準に対する生理学的基礎」[4]にも次のような記載がある。「最近まで地上の炭酸ガス（二酸化炭素）の作用の研究に 2 つの判定が用いられていた。その第 1 は，生理学的研究によると，0.5%以上の濃度になると，炭酸ガスは呼吸数をガス交換に必要なレベル以上に増加させ，呼吸系統に付加的な重荷を負わせる。第 2 は 1881 年に Pettenkofer と Flügge は 0.07~0.1%を炭酸ガスの許容濃度とみなすと提言した。この後の数字は生理的な基礎を持っていないが，これは家庭内の空気の汚染の間接的な指標としてかなり実際的な数値であると認められた。はなはだ最近まで，この値は部屋の必要換気量を計算するために用いられたし，また，室内の空気の質を評価して，換気系統の効率を判定するのに用いられてきた。」。また，WHO の報告書では，1964 年に Eliseeva が発表した研究 [5]を引用し，0.1%（1 000 ppm）の炭酸ガスの吸入実験によって，呼吸，循環器系，大脳の電気活動に変化がみられたと報告している。

なお，建築物設計における環境に関して 1978 年に初めて出版された日本建築学会編集「建築設計資料集成 1，環境」において，二酸化炭素濃度の人体への影響については，0.1%（1 000 ppm）で呼吸器・循環器・大脳などの機能に影響が見られると記載されており，上述の Eliseeva の知見が用いられている [6]。

Eliseeva の研究結果は，建築物衛生法の検討に携わっていた国立公衆衛生院の委員から代々，同院建築衛生学部内で受け継がれており，1978 年の建築設計資料集成 1 でも記載がみられている。

従って，二酸化炭素濃度の建築物環境衛生管理基準の設定にあたっては，WHO の報告書で指摘された二酸化炭素の判定基準を踏まえ，さらに 1 000 ppm を超過した際の二酸化炭素による健康影響を考慮し，環境衛生管理基準を 1 000 ppm に設定したと考えられる。

なお，2001 年 10 月に立ち上げられた厚生労働省の建築物衛生管理検討会（座長 : 吉澤 晋 氏）では，建築物衛生上の新たな課題に対応した建築物環境衛生管理基準の在り方等について検討を重ねており，当時の建築物環境衛生管理基準の見直しに関する見解が以下のように示されている [7]。

二酸化炭素については,「二酸化炭素は, 少量であれば人体に影響は見られないが, 濃度が高くなると，倦怠感，頭痛，耳鳴り等の症状を訴える者が多くなることから，また，室内の二酸化炭素濃度は全般的な室内空気汚染を評価する 1 つの指標としても用いられていることから，二酸化炭素の含有率は「百万分の千以下」と定められている。良好な室内空気環境を維持するためには，1 人当たり概ね 30 m^3/h 以上の換気量を確保することが必要であるが，室内の二酸化炭素濃度が 1 000 ppm 以下であれば，この必要換気量を確保できていると見なすことが可能である。エネルギー消費を節約する観点から，過度に換気する必要はないものの，衛生的な空気環境を維持するためには，二酸化炭素濃度が現行の基準値以下になるよう，今後とも適正に管理することが必要である。」と報告している [7]。このことからも，二酸化炭素濃度の建築物環境衛生管理基準の設定にあたっては，1 000 ppm を超過した際の二酸化炭素による健康影響を考慮し，環境衛生管理基準を 1 000 ppm に設定したことが裏付けられる。

2.1.4　諸外国における二酸化炭素濃度の空気質指針値

諸外国における二酸化炭素濃度の空気質指針値に関しては，ほとんどの諸外国で室内空気汚染や換気の指標として 1 000 ppm が採用されている（表 2.1.2）[1),2),8)]。特に，シンガポール，中国香港特別行政区，韓国環境部などのアジア諸国では，日本の建築物衛生法が参照されている。

表 2.1.2　諸外国における二酸化炭素濃度の空気質指針値

諸外国（公表年）	室内濃度の指針値	対象
ノルウェー厚生省（1999）	1 000 ppm（最大値）※室内空気汚染の指標	居住空間
カナダ保健省（1995）	1 000 ppm　※換気の指標	オフィス環境
カナダ保健省（1987）	3 500 ppm 以下（許容可能な長期曝露範囲）	居住空間
シンガポール環境省（1996）	1 000 ppm（8 時間平均値） ※換気の指標	空調設備を有するオフィスビル
中国香港特別行政区（2003）	最良質 : 800 ppm （8 時間平均値） 良　質 : 1 000 ppm（8 時間平均値）	機械換気や空調設備を有する建物や閉鎖空間
中国環境保護総局（2002）	1 000 ppm（24 時間平均値）	住宅とオフィス
韓国環境部（2003）	1 000 ppm	大規模店舗，医療機関，室内駐車場
台湾環境庁（2012）[8)]	1 000 ppm（8 時間値）	行政機関，公共施設，店舗，医療施設，福祉施設，興行場，金融機関等

ドイツでは，2008 年に連邦環境庁の室内空気衛生委員会（IRK）が二酸化炭素の室内空気質指針値を公表している（表 2.1.3）[9)]。ドイツのガイドラインでは，健康と衛生上の問題を考慮したうえで，1 000 ppm 以下を無害（harmless），1 000～2 000 ppm では健康と衛生上の問題が上昇（elevated），2 000 ppm 以

上を許容不可能（unacceptable）としている。特に，小学生の学習能力への空調設備の影響に関する研究によると，二酸化炭素濃度を 1 300 ppm から 900 ppm，または 1 700 ppm から 1 100 ppm に低下させると，小学生の学習能力が有意に増加することが示されており [10]，この研究結果などが二酸化炭素濃度の空気質指針値を勧告する際の基盤となっている。

表 2.1.3　二酸化炭素濃度に関するドイツの室内空気質ガイドライン

二酸化炭素濃度	健康と衛生上の評価	留意点
1 000 ppm 以下	無害（harmless）とみなされる	処置の必要なし
1 000～2 000 ppm	有害性が上昇する（elevated）	換気状況の確認と改善（外気導入量や換気効率の増加等）
2 000 ppm 以上	許容できない（unacceptable）	必要に応じて追加措置を試みる

2.1.5　まとめ

建築物衛生法における二酸化炭素濃度の環境衛生管理基準は，1 000 ppm を超えると倦怠感，頭痛，耳鳴り，息苦しさ等の症状を訴えるものが多くなり，疲労度が著しく上昇すること等の知見に基づき定められたものである。制定当時の科学的知見として，低濃度二酸化炭素の生理学的影響に関する実験報告等が参考にされたと考えられる。

【参考文献】

1) 東 賢一, 内山巖雄. 建築物環境衛生管理基準の解説と近年の知見. ビルと環境, No. 134, pp. 4−17, 2011.
2) 東 賢一, 内山巖雄: 建築物環境衛生管理基準の設定根拠の検証について. 建築物環境衛生管理に関する調査研究平成 22 年度研究報告書, 財団法人ビル管理教育センター, 2011.
3) ビル管理教育センター. ビルの環境衛生管理. 厚生大臣指定建築物環境衛生管理技術者講習会・テキスト, 1971.
4) Goromosov MS (1968) The physiological basis of health standards for dwellings. Public Health Papers No. 33, World Health Organization, Geneva.
5) Eliseeva OV. On the determination of maximum permissible carbon dioxide concentrations in the air of apartment buildings and public buildings. Gig Sanit 29:10−15, 1964. (in Russian)
6) 池田耕一. 空気環境と人体. 日本建築学会編「建築設計資料集成 1，環境」，丸善，1978. 275 pp.
7) 建築物衛生検討会: 建築物衛生管理検討会報告書. 厚生労働省健康局生活衛生課, 平成 14 年 7 月, 2002.
8) Chen YY, Sung FC, Chen ML, Mao IF, Lu CY. Indoor air quality in the metro system in North Taiwan. Int. J. Environ. Res. Public Health 13;pii: E1200, 2016.
9) IRK (Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitsschutz 51 (11): 1358–1369, 2008.
10) Wargocki P, Wyon DP. Research report on effects of HVAC on student performance. ASHRAE Journal 48: 23–28, 2006.

2.2　特定建築物における二酸化炭素濃度不適率の現状

2.2.1　全国特定建築物における環境衛生管理基準の不適率

建築物において室内環境が居住者へ与える影響について，多くの知見が得られている[1)]。我が国では，「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」において，特定建築物の維持管理として，環境衛生管理基準値が表 2.2.1 のように定められている。この管理基準値の設定根拠については，既往の報告書[2)]において詳細に述べられている。そして実際の建築物においては，温度，相対湿度，二酸化炭素濃度，一酸化炭素，気流，浮遊粉じんの 6 項目について 2 カ月以内ごとに 1 回測定し，基準値との比較を行うことで，適切な維持管理を行うことになっている。ホルムアルデヒドについては，新築または大規模模様替えを行った後，最初に来る 6 月から 9 月の間に 1 回測定する。更には保健所による立入り検査により指導を行うことで，建物の衛生環境を良好に保つこととしている。この法律の仕組みにより，衛生的に良好な環境に維持され，欧米諸国に比べればわが国では，シックビル症候群が抑えられているとも言われている。

表 2.2.1　空気環境に関する建築物環境衛生管理基準

浮遊粉じんの量	0.15 mg/m^{3}以下
一酸化炭素の含有率	10 ppm以下
二酸化炭素の含有率	1 000 ppm以下
温度	17℃以上28℃以下
相対湿度	40％以上70％以下
気流	0.5 m/秒以下
ホルムアルデヒドの量	0.1 mg/m^{3}以下（＝0.08 ppm以下）

建築物衛生法により，特定建築物においては保健所による立入検査が行われているが，この調査結果については，厚生労働省が建築物衛生法に関する各都道府県，保健所設置市，特別区における建築物衛生の実態を把握することを目的とし，厚生労働省が毎年集計を行っているもので，独立行政法人統計情報センターで公表されている。そこで，公表されている全国の建築物の維持管理に関するデータを用いて，基準値に適合しなかった建物の割合，不適率の動向の整理を行うことにより，建築物における環境衛生の実態，特に二酸化炭素濃度の不適率の状況について把握することとする[3)]。また，上述の不適率の情報では，室内環境の物理的な測定値はないため，その原因について不明な点がある。そこで，東京都における立ち入り測定によって得られた環境計測データを用いた検討も行った。

本報告で使用した建物維持管理のデータは，建築物の維持管理項目ごとの調査件数及び不適件数が集計されている。また，対象期間は平成 8 年度から令和元年度（1996-2019 年度）までで，不適率の推移を見ることができる。建築物の維持管理項目は，帳簿（1 項目），空気環境の調整（16 項目），給水の管理（10 項目），雑用水の管理（9 項目），排水設備（1 項目），清掃（1 項目），防除（1 項目）に分けられている。用途は興行場，百貨店，店舗，事務所，学校，旅館，その他と分かれており，それぞれの用途別ごとの不適率の比較をすることができる。これらのデータに基づき，用途別不適率及び不適率の経年変化を集計し，建物維持管理の問題点の抽出を行った。

図 2.2.1 に空気環境 7 項目（浮遊粉じん，二酸化炭素，一酸化炭素，温度，相対湿度，気流，ホルムアルデヒド）の不適率の経年変化を示す。浮遊粉じん，一酸化炭素，気流，ホルムアルデヒドについては，低い不適率で推移している。一方，二酸化炭素濃度，温度，相対湿度の不適率においては，いずれも値が高く，3 回の顕著な上昇が見られた。1 回目は平成 11 年度（1996 年度）（相対湿度），2 回目は平成 15 年度（2003 年度）（温度，相対湿度，二酸化炭素濃度），3 回目は平成 23 年度（2011 年度）（温度，相対湿度，二酸化炭素濃度）であった。それぞれは省エネ法の改定と建築物衛生法改定の翌年，東日本大震災の年と重なる。省エネのために，設定温度・相対湿度の設定・制御の問題，換気量を削減することな

どにより，基準値を逸脱する事例が増加したものと考えられる。また，平成 15 年度（2003 年度）における建築物衛生法の改定により，個別空調建物が特定建築物の適用範囲となったため，基準値の不適合の件数が増加したことが考えられる。なお，平成 25 年（2013 年度）に相対湿度の不適率が一旦減少に転じているが，その原因として加湿器を設置してない建築物において，相対湿度との比較を行わなくなったことも関係すると考えられる。二酸化炭素については，平成 29 年度（2017 年度）までは上昇傾向であったが，その後若干の減少に転じている。

図 2.2.2 に二酸化炭素の用途別不適率の経年変化を示す。旅館を除けば，全ての用途で軒並みに上昇し続けている。特に学校と事務所の上昇が著しく，平成 8 年度（1996 年度）の 10%程度に比べ，令和元年度（2019 年度）は 4 倍超となった。学校については，学校保健安全法の学校環境衛生基準において，換気の基準として 1 500 ppm 以下であることが望ましいとしており，特定建築物となっている学校建築においては，同じ二酸化炭素濃度であっても，基準値が異なっていることも要因として考えられる。旅館において不適率が低い要因としては，計測場所・時間など測定条件に起因することも考えられる。例えば，宴会場において，宴会の最中に計測がされているかといえば，困難であることが想像される。

その他の項目として，温度，相対湿度は何の用途においても上昇傾向，気流，浮遊粉じん，一酸化炭素，ホルムアルデヒドについては，用途によらず何も低い傾向であった。

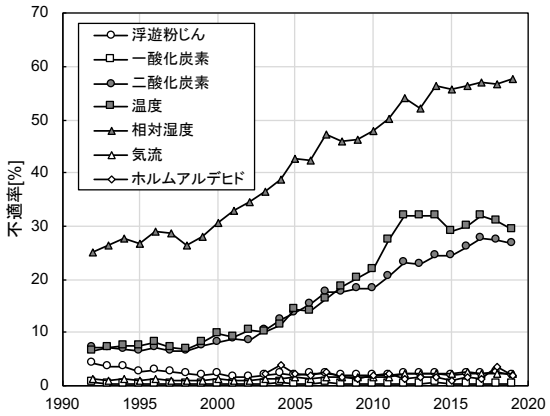


図 2.2.1　空気環境 7 項目の不適率の経年変化

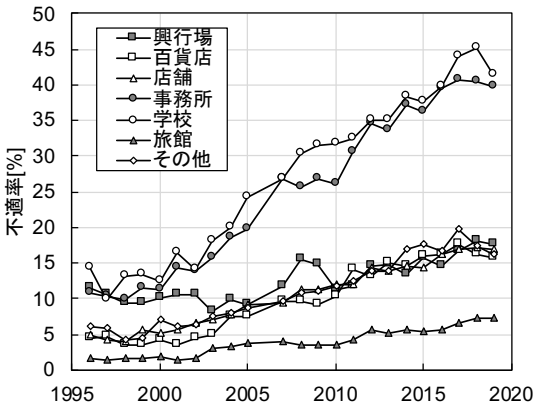


図 2.2.2　用途別の二酸化炭素濃度不適率の経時変化

2.2.2　東京都における特定建築物の空気環境調査

東京都では建築物衛生法第 11 条第 1 項及び第 13 条第 2 項に基づき，特定区内の延床面積 10 000m^2 を超える特定建築物に対してはビル衛生検査班が，多摩地区内の特定建築物については各保健所環境衛生係が立ち入り検査を実施している。そこで，この東京都の平成 25 年度及び 26 年度において立ち入り測定により得られた実測値を用いて，二酸化炭素の不適率の原因について検討を行った。

平成 25 年度及び 26 年度に実施された東京都による立ち入り測定の対象建築物については，共に 300 件超で，延床面積については，85%の対象ビルが 10 000m^2 以上，累積分布の中央値は約 17 000m^2 であり，比較的大規模なビルが対象となっている。図 2.2.3 に対象とした用途別の建築物の種類を示しているが，用途別では学校が 49 件，興行場が 7 件，事務所が 224 件，集会場が 3 件，図書館が 0 件，店舗 15 件，美術館が 1 件，百貨店が 6 件，遊技場が 4 件，旅館が 7 件であった。平成 26 年度における測定対象は 338 件あり，用途別では学校が 52 件，興行場が 5 件，事務所が 216 件，集会場が 3 件，図書館が 0 件，店舗 45 件，博物館が 1 件，美術館が 1 件，百貨店が 1 件，遊技場が 7 件，旅館が 7 件であった。平成 25 年度と平成 26 年度を比較すると，全国特定建築物立ち入り調査の結果で不適率が高い傾向にあった事務所の割合が減り，不適率の低い店舗の割合が増加しているのが特徴となる。

図 2.2.4 に今回対象とした建築物の空調制御方式について示すが，制御方式別では平成 25 年度と平成 26 年度ともに 55%程度がゾーン別制御方式であり，測定対象ビルの半数以上はゾーン別制御方式を用い

ており，また比較的大規模の建築物が対象建物としては多くなっているが，個別制御方式も 3 割程度採用している。

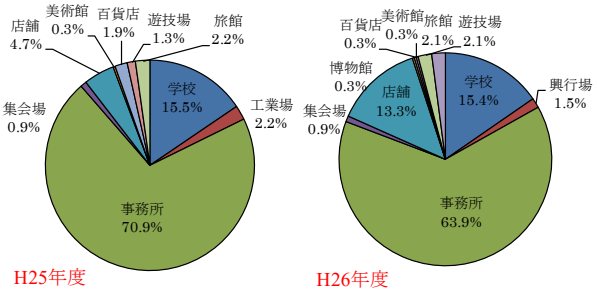


図 2.2.3　用途別の割合 [4)]

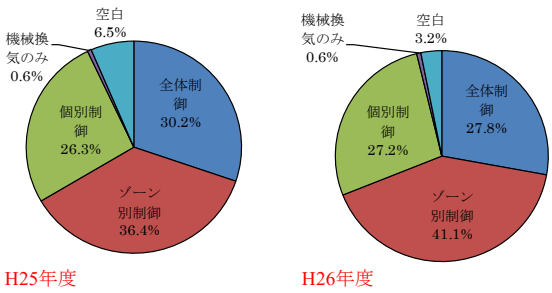


図 2.2.4　対象建築物の空調方式の特徴 [4)]

図 2.2.5 に二酸化炭素濃度の累積頻度分布を示す。平成 25 年度の 1071 件，平成 26 年度の 957 件の測定のうち管理基準を満たさなかったのは 104 件及び 94 件であり，不適率が 10%程度であった。図 2.2.6 に二酸化炭素の月別データを示す。二酸化炭素濃度は管理基準値の 1 000 ppm を超過することに関しては，季節とは関係しないこと分かった。建築物における機械換気においては，夏期の冷房運転，冬期の暖房運転，中間期など空調機の運転とは異なり，季節に影響されていないこととなる。よって，二酸化炭素不適の原因としては，室内における設定換気量の少なさ，居住者の多さが原因となっているものと考えられる。

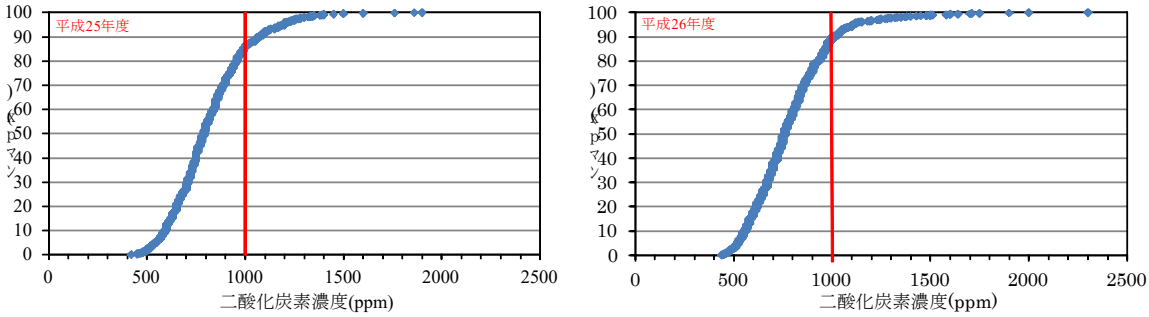
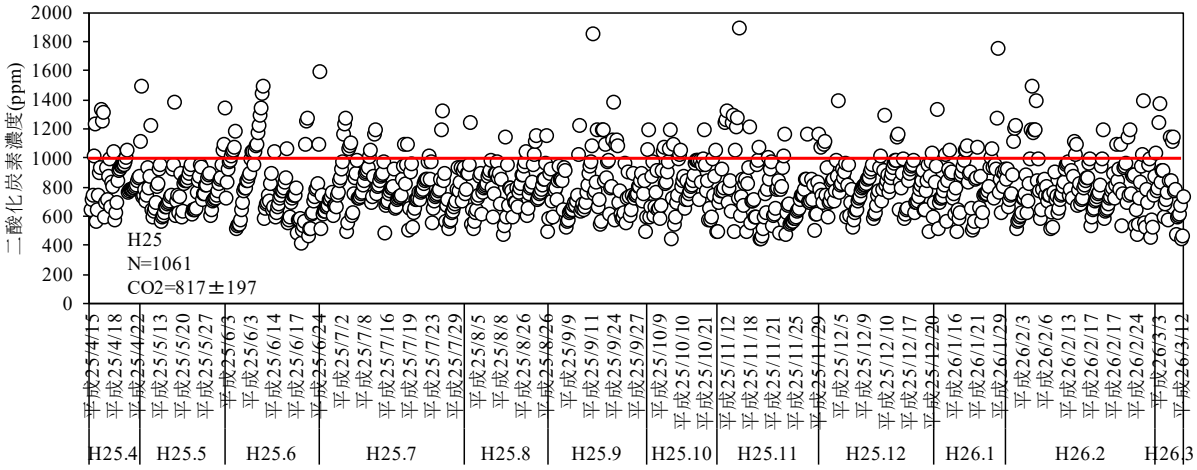


図 2.2.5　二酸化炭素濃度の累積頻度分布 [4)]



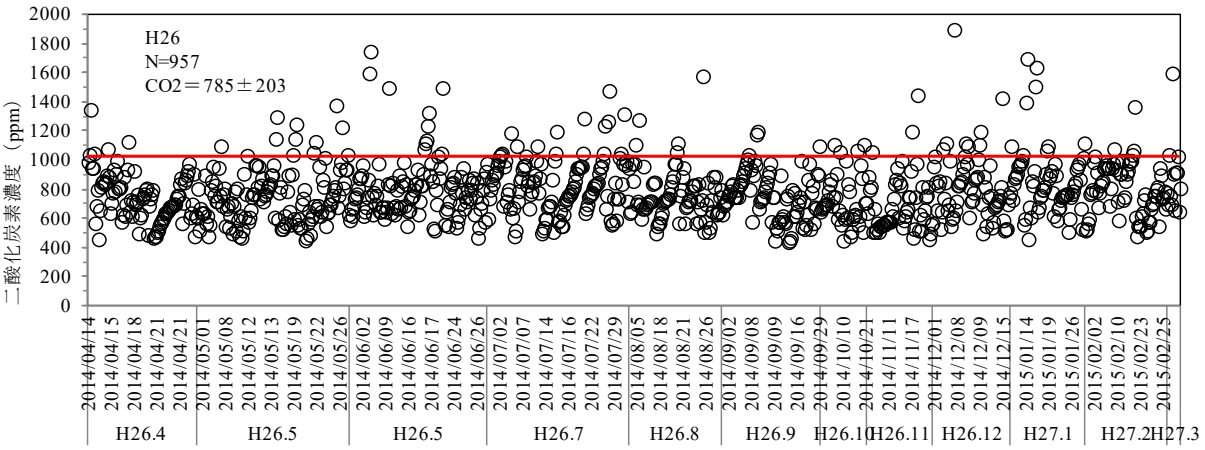


図 2.2.6　二酸化炭素濃度の測定値の変化 [4)]

2.2.3　まとめ

本研究では，全国の立ち入り調査のデータを用いた全国都道府県の不適率の最新動向の解析及び東京都の立ち入り測定のデータを用いた室内空気環境の詳細な検討により，下記の事柄が明らかになった。

・全国の不適率については，温度，湿度，二酸化炭素濃度が平成 11 年度から上昇し続けている。二酸化炭素に関しては，特に学校と事務所の上昇が著しく，平成 8 年度の 10%程度に比べ，令和元年は 4 倍超となった。その間に顕著な上昇が見られたのは，大規模な省エネ法の改正，建築物衛生法の改正，そして東日本大震災に関連し，その法改正や震災直後の節電などによる省エネ行動が深く関わっていることが示唆された。

・平成 25 年度の東京都の事務所建築物における立ち入り測定データを用いた解析の結果，前述した全国の不適率より低く，二酸化炭素濃度の不適率は 10%程度であった。季節ごとには不適率に変化がないことから，冷房，暖房などの空調設備の運転状況によるものではなく，室内における設定換気量の少なさ，居住者の多さが原因となっているものと考えられる。

【参考文献】

1)　髙野大地，池田耕一，東賢一，鍵直樹，柳宇，大澤元毅，中川優馬：建築物利用者の職場環境と健康に関するアンケート調査，平成 25 年度空気調和・衛生工学会大会，pp. 333-336，2013

2)　東賢一：建築物環境衛生管理基準の設定根拠の検証について，財団法人ビル管理教育センター　建築物環境衛生管理に関する調査研究　平成 22 年度報告書，2011

3)　東賢一，池田耕一，大澤元毅，鍵直樹，柳宇，斎藤秀樹，鎌倉良太：建築物における衛生環境とその維持管理に関する調査解析，空気調和・衛生工学会論文集，No.179，pp.19-26，2012

4)　大澤元毅他：建築物環境衛生管理に係る行政監視等に関する研究，厚生労働研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）　平成 27 年度　総括・分担研究報告書，2016.3

3. 二酸化炭素濃度と健康影響

3.1 二酸化炭素の濃度基準と疫学調査結果の見方

3.1.1 二酸化炭素と人体

ヒトは食物を代謝してエネルギーを取り出し，生命を維持している。食物からエネルギーを取り出すには発酵のように酸素を必要としない作用もあるが，効率が悪いため，進化した動物では主に酸化反応が利用される[1]。酸化反応によって二酸化炭素と水が生成される。ヒトの呼吸は必要な酸素を取り入れ，代謝において生成される不必要になった二酸化炭素を体外へ排出する。

ヒトの静脈血中の二酸化炭素分圧は細胞からもらった二酸化炭素で 45 mmHg（6.75%）となっている。一方，吸気によって膨らんだ肺胞内の二酸化炭素分圧は 40 mmHg（6%）である。静脈血中の二酸化炭素はこの分圧の差によって肺胞に排出し，それが呼気とともに体外へ排出する。従って，室内環境中の二酸化炭素濃度は一般的に数百～数千 ppm（吸気濃度）であるが，呼気中二酸化炭素濃度は約 40 000 ppm と高い[2]。このガス交換は血液の pH の調整に重要な役割を果たす。室内環境中，とりわけ吸気中の二酸化炭素濃度が高すぎると，肺胞内の二酸化炭素分圧が上昇し，静脈血中の二酸化炭素分圧との差が小さくなるため，二酸化炭素が体外へ正常に排出できず，その結果静脈血中に二酸化炭素が残り，血液は酸性に傾く。この高濃度二酸化炭素濃度による生体への影響として，呼吸器系障害，腎臓障害，骨障害が挙げられる。

3.1.2 二酸化炭素濃度の基準

(1) 毒性指標

労働衛生環境分野では，毒性指標として二酸化炭酸の濃度基準を定めている。アメリカの NIOSH（National Institute of Occupational Safety and Health, 国立労働安全衛生研究所）は STEL（Short-Term Exposure Limit，短期暴露限界値）を 30 000 ppm，TWA（Time-Weighted Average，時間加重平均）値を 5 000 ppm と定めている[3]。また，OSHA（Occupational Safety and Health Administration，労働安全衛生庁）の TWA 値も 5 000 ppm である[4]。日本の労働安全衛生法「事務所衛生基準規則」第三条では，二酸化炭素濃度の基準を 5 000 ppm と定めている。

上記のように毒性指標と見た場合の二酸化炭素濃度の基準は一般的に 5 000 ppm であることが分かる。

(2) 環境基準

カナダ保健省はまとめた諸国・地域の二酸化炭素濃度基準値の一覧を 2021 年 3 月 19 日に公開された。表 3.1.1 にその一部を示す[5]。室内二酸化炭素濃度の基準値を 1 000 ppm～1 500 ppm として定められている国は少なくないが，EU，フィンランド，ドイツは二酸化炭素濃度別に室内空気質のグレードを付けている。さらに，フィンランドは空気質のみならず温熱快適性においても二酸化炭素濃度を指標としている。それは二酸化炭素そのものというよりも，換気量の指標としていることが推察される。

多くの二酸化濃度の基準は居住者の Bioeffluents（におい）を対象にした換気量の確保のために制定されており，直接に健康影響に係るものではない[5]。オフィスビルなどの室内の二酸化炭素濃度の主な発生源が居住者であるため[6]，二酸化炭素濃度はヒトから発生する汚染物質のための換気量の指標となる（定常状態：式 3-1，式 3-2）。式 3-2 に示されている通り，室内二酸化炭素の発生量が分かれば，室内と屋外の二酸化炭素濃度差（$C_i - C_o$）から換気量 Q が求められる。例えば，ヒトの二酸化炭素ガスの発生量を 20ℓ/h，室内と屋外の濃度差は 700 ppm とすると，換気量は 28.6 m^3/h（約 30 m^3/h）になる。この換気量は厚生労働省[7]が COVID-19 対策としての“換気の悪い空間に当たらない”換気量に等しい。しかし，実際の場合，室内に諸汚染物質の発生源があり，後述するように二酸化炭素濃度はほかの汚染物質の換気量の指標にはならない。

$$C_i = C_o + \frac{M}{Q} \qquad (3\text{-}1)$$

$$Q = \frac{M}{C_i - C_o} \qquad (3\text{-}2)$$

C_i：室内二酸化炭素濃度 [ppm]
C_o：屋外二酸化炭素濃度 [ppm]
M：二酸化炭素濃度発生量 [mℓ/h]
Q：換気量 [m^3/h]

表 3.1.1 諸外国・地域の二酸化炭素濃度の基準/ガイドライン

国	基準値	組織/基準/規制	出典	備考
アメリカ	外気濃度＋700 ppm	ASHRAE	ASHRAE (2016)*	外気濃度：空気質（におい）の同時の濃度
EU	外気濃度＋400 ppm 外気濃度＋400-600 ppm 外気濃度＋600ー1000 ppm 外気濃度＋1000 ppm	NF EN 13799 standard	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	最良質な室内空気質 平均的な室内空気質 中程度的な室内空気質 低程度的な室内空気質
フィンランド	S1 700 ppm S2 900 ppm S3 1200 ppm	FiSIAQ	FiSIAQ 2002	S1：最良質。夏期と冬期における室内空気質が非常に良く、温熱環境も快適である。 S2：良質。室内空気質は良好でドラフトを感じない。夏期温度が最も高い日に室内温度は快適レベルを超える可能性がある。 S3：室内空気質と温熱環境はビルの基準を満足する。新鮮な空気の欠乏とドラフトを感じる可能性がある。夏期の暑い日に温度は通常快適レベルを超える。
	1200 ppm	D2 National Building Code	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	住宅・学校・オフィスの基準/ガイドライン
ドイツ	1000 ppm 1000ー2000 ppm 2000 ppm	German Committee on Indoor Guide Values	Fromme et al. (2019)	室内二酸化炭素濃度は、1000ppm以下であれば、無害、1000ー2000ppmであれば有害性上昇、2000ppmを超えれば許容できないと考えられる。
	1500 ppm	DIN 1946 Standard	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	学校の基準/ガイドライン
カナダ	1000 ppm （24時間平均値）	Health Canada	Cat:H144-81/2021E-PDF	住宅の基準
フランス	1000 ppm	Memorandum dated August 9, 1978	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	学校とオフィスビルの基準/ガイドライン
イギリス	1500 ppm （授業日日平均） 5000 ppm （最大値）	Building Bulletin 101	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	学校の基準/ガイドライン
オランダ	1000ー1500 ppm	Standard NEN 1087	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	住宅の基準/ガイドライン
	1200 ppm	Standard NEN 1089		学校の基準/ガイドライン
デンマーク	1000 ppm かつ上限値 2000ppm	AIVC 2000	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	学校の基準/ガイドライン
ノルウェー	1000ppm	Regulations for environmental health protection in schools	CSTB (2011) (cited in ANSES 2013)	学校の基準/ガイドライン

＊筆者注：ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019には、二酸化炭素濃度基準に関する記述が削除された。

3.1.3 二酸化炭素濃度とヒトへの健康影響

(1) 実験の結果

これまで，二酸化炭素濃度と意思決定パフォーマンスの関係について多くの研究成果が発表されている。Allen ら[8]は，1 000 ppm 濃度の環境で意思決定パフォーマンスの顕著な低下がみられたと報告している。Satish らは，ピュアな二酸化炭素ガスを用いたチャンバ試験では，600 ppm に比べると 1 000 ppm と 2 500 ppm での意思決定パフォーマンスが顕著に低下すると報告している[9]。一方, Zhang ら[10,11,12]は,

ピュアな二酸化炭素濃度 1 000 ppm，3 000 ppm，5 000p pm における大学生を対象とした実験の結果では，統計的に明確な差がみられなかった。しかし，ヒトの代謝で生成される二酸化炭素の濃度が 3 000 ppm と 5 000 ppm では意思決定パフォーマンスの低下がみられた。

Rodeheffer ら[13]は，二酸化炭素濃度 600 ppm, 2 500 ppm, 15 000 ppm への急性曝露では，潜水艦乗務員が操縦している間に意思決定パフォーマンスに影響がみられないと報告している。Robert ら[14]は，600 ppm，1 200 ppm，2 500 ppm，5 000 ppm の環境における 22 名の宇宙飛行士を対象とした実験の結果では，明確な量ー反応関係が認められなかった。また，集計速度，正確さ，スコアの何れにおいても，ベースラインの 600 ppm より 1 200 ppm の方が低い値を示すものの，高濃度の二酸化炭素濃度は 600 ppm と同程度かむしろ高い値を示した。Yang ら[15]と Sayers ら[16]は，いくつかの研究は二酸化炭素に対するネガティブな影響は濃度 12 000 ppm ではじめて見られ，60 000-70 000 ppm まで上昇につれその影響が大きくなると報告している。

以上のように，二酸化炭素濃度による意思決定パフォーマンスへの影響について共通したコンセンサスが得られていない。

(2) 疫学調査の結果

疫学研究方法は，観察研究と介入研究に分類される。前者には記述的研究，生態学研究，横断的研究，症例対照研究，コホート研究，後者には臨床試験，野外試験，地域介入研究の手法がある。アンケート調査による疫学研究は主として記述研究手法を用いている。記述研究とは，集団における疾患異常の頻度と分布を観察的に記述して，①人の属性，②時間，③場所の面から見た特徴を明らかにすることである，疫学研究の第 1 番目のステップとして位置づけられる[17]。

これまで，室内二酸化炭素濃度と居住者の症状に関して多くの疫学調査の結果が発表されている。Tsai ら[18]は，室内 二酸化炭素濃度が 800 ppm 以上になると，在室者の SBS （シックビルシンドローム）症状（特に，目のと上部呼吸器系の刺激）がみられると報告している。Tsai ら[18]，Norbärk[19]ら，Erdmann ら[20]，Gladyszewskafiedoruk ら[21]，Simoni ら[22]は， 二酸化炭素濃度が 1 000 ppm を超えると，在室者から頭痛，目と上部呼吸器系などの症状が申告されると報告している。

以上のように，二酸化炭素濃度は 1 000 ppm 前後であっても，SBS 症状が申告されている。それは，後述するように，二酸化炭素そのものによる影響ではなく，その環境条件でのほかの汚染物質による影響であると考えられる。東ら[23]は，500 ppm 以上，1 000 ppm 以上，10 000 ppm 以上，30 000 ppm 以上，50 000 ppm 以上，80 000~100 000 ppm，100 000 ppm 以上における生理変化，精神運動パフォーマンス，健康徴候についてシートレビュを行い，諸徴候は室内汚染物質併存に起因するようであると指摘している。

3.1.4 疫学調査の結果をどう見るか

記述研究（アンケート調査）は実施しやすい研究方法であるといわれている。同時に多数のヒト（対象となる集団）に対して情報を収取でき，また，その結果を数字で表され，統計処理によって結果を導くメリットがある。一方，アンケートのデザインによって，結果に与える重要な因子（例えば，環境要因）が抜け落ちることがある。この場合では，いくら統計的に有意な差が得られたとしてもその結果の信頼性に問題が生じる。

室内環境とビル関連病（BRI，Building-related illness または Building-related Symptoms）の関連について多くの調査結果が報告されている。二酸化炭素濃度一つの指標，あるいはそれと一部の環境要因でそれが BRI 症状と結びつく論文がしばしばみられる。しかし，BRI は医学的に確立した単一の疾患ではなく，環境要素に関わる，居住者由来するさまざまな健康障害の総称であり[24]，どれか一つの環境要素（例えば二酸化炭素濃度）に由来するものではない[25]。二酸化炭素濃度は，ヒト由来の Bioeffluents（におい）の換気量の指標に過ぎず，ほかの環境要素の指標にはならない。

突然変異の発がん性物質を除けば，汚染物質によるある集団の健康影響は量−反応関係によって決まる。その量は二酸化炭素だけではなく，室内に存在するあらゆる汚染物質に関係する。即ち，式 3-3 に

示す室内での暴露量は様々な汚染物質の発生量 M に関係する。言い換えれば，BRI 症状に与えうる汚染物質がアンケート調査や環境調査の項目に含まれていなければ，統計的に有意な差があったとしても，真実と異なる結果になる恐れがある。たとえば，Lu ら [26]は，自らが行った調査の結果について，“SBS の徴候が様々な病因的要素に関係していることを示し，一部の症状は室内と屋外二酸化炭素濃度の差に関係し，眼や乾燥感などのリスクは若干 TVOC に関係する。”と報告している。Norbäck ら [27]は，コンピューター教室において，温度と二酸化炭素濃度の上昇は粘膜の徴候，頭痛および疲労に影響するが，室内の温度は最も重要で, 二酸化炭素濃度は温度による影響に一部関係しているかもしれないとしている。

$$M = \sum_{k=1}^{n} M_k \qquad (3\text{-}3)$$

3.2　二酸化炭素濃度は換気量の指標になり得るか

前述した通り，ヒト由来の Bioeffluents（におい）の換気量の指標であり，室内あらゆる汚染物質のための換気量の指標にはならない。ASHRAE の 2019 年の室内許容できる空気質のための換気量の基準では，二酸化炭素濃度の基準値を削除され，換気量をヒトから発生する汚染物質のための換気量と，室内から発生するほかの汚染物質のための換気量の合計値としている[28]。

図 3.2.1 にあるオフィスビルの室内二酸化炭素濃度と TVOC 濃度の経時変化を示す[29]。二酸化炭素濃度と TVOC 濃度は異なるトレンドを示すことが分かる。これは発生源とその発生特性が異なるためである。

以上の通り，ヒト由来の Bioeffluents（におい）の換気量の指標であり，それが低いことは一人当たりの換気量が多く導入されていることを意味している。しかし，建材などほかの汚染源からの発生は居住者の多少にかかわらないため，二酸化炭素濃度が高くても（一人当たりの換気量が少なくても），ほかの汚染物質の発生量が少なければその濃度が低い。逆に，二酸化炭素濃度が低くても（一人当たりの換気量が多くても），ほかの汚染物質の発生量が多ければその濃度が高い。即ち，二酸化炭素濃度はあらゆる汚染物質の換気量の指標になりえない。

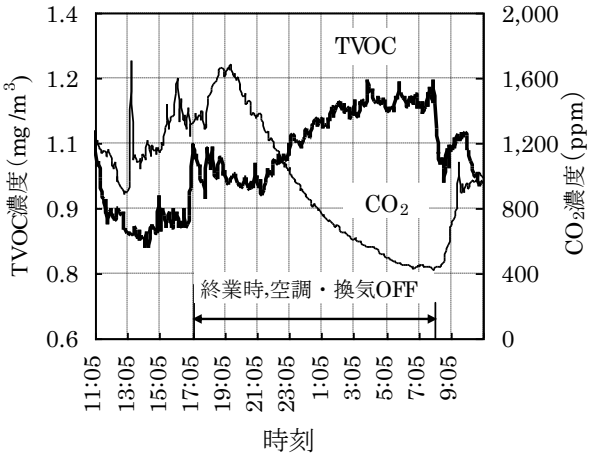


図 3.2.1 二酸化炭素濃度と TVOC 濃度の経時変化の測定例

3.3　まとめ

① 毒性指標と見た場合の二酸化炭素濃度の基準は一般的に 5 000 ppm である。

② 室内二酸化炭素濃度の基準値を 1 000 ppm～1 500 ppm として定められている国は少なくないが，EU，フィンランド，ドイツは二酸化炭素濃度別に室内空気質のグレードを付けている。さらに，フィンランドは空気質のみならず温熱快適性においても二酸化炭素濃度を指標としている。

③ 二酸化炭素濃度による意思決定パフォーマンスへの影響について共通したコンセンサスが得られていない。

④ BRI は医学的に確立した単一の疾患ではなく，環境要素に関わる，居住者由来するさまざまな健康障害の総称であり，どれか一つの環境要素（例えば二酸化炭素濃度）に由来するものではない。

⑤ アンケート調査はそのデザインによって，結果に与える重要な因子が抜け落ちた場合，いくら統計的に有意な差が得られたとしてもその結果の信頼性に問題が生じる。

⑥ 二酸化炭素濃度は，ヒト由来の Bioeffluents（におい）の換気量の指標である。

⑦ 二酸化炭素濃度はあらゆる汚染物質の換気量の指標になりえない。

【参考文献】

1） 吉良枝郎・太田保世編：呼吸，pp. 77，医学書院，1986

2） 呼吸の事典，p.20，成美堂出版，2020

3） https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0103.html（閲覧日：2021 年 4 月 8 日）

4） https://www.cdc.gov/niosh/idlh/124389.html（閲覧日：2021 年 4 月 8 日）

5） Health Canada, Residential Indoor Air Quality Guidelines, CARBON DIOXIDE. ISBN: 978-0-660-37419-2. 2021-03-19

6） Kiray, M., et al. Effects of carbon dioxide exposure on early brain development in rats. *Biotechnic and Histochemistry*, 89(5): 371-383. 2014

7） 厚生労働省. 商業施設等における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について, 2020 年 3 月 30 日, https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf

8） Allen, J.G., et al. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exosure study of green and conventional office environments. *Environ. Health Perspect*, 124, 805–812. 2016

9） Satish, U, et al. Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to moderate CO2 concentrations on human decision-making performance, *Environ. Health Persp*, 2012;120:1671-1705. 2012

10） Zhang, X, et al. Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor Air.* 27, 65–77. 2017

11） Zhang, X, et al. Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms and cognitive performance. *Indoor Air.* 27, 47–64. 2017

12） Zhang, X, et al. Human responses to carbon dioxide, a follow-up study at recommended exposure limits in non-industrial environments. *Building and Environment*, 100, 162–171. 2016

13） Rodeheffer, C.D., et al. Acute exposure to lowto-moderate carbon dioxide levels and submariner decision making. *Aerosp Med Hum Perform*, 89(6),520–525. 2018

14） Robert R, et al. Effects of acute exposures to carbon dioxide on decision making and cognition in astronaut-like subjects. *npj Microgravity* (2019) 17. 2019

15） Yang, Y., et al. The effect of moderately increased CO2 concentration on perception of coherent motion. *Aviat. Space Envir. Md*, 68(3), 187-191. 1997

16） Sayers, J. A., et al. Effects of carbon dioxide on mental performance. *Journal of Applied Physiology*, 63 (1), 25-30. 1987

17） 柳川洋ら：公衆衛生マニュアル 2016，南山堂，2016

18） Tsai DH, et al. Office Workers' Sick Building Syndrome and Indoor Carbon Dioxide Concentrations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 9: 345–351. 2012

19） Norbäck, D., et al. Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study. *Indoor Air*, 21: 427-437. 2011

20） Erdmann, C.A., et al. Indoor Carbon Dioxide Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in the Base Study Revisited: Analyses of the 100 Building Dataset, Berkeley, CA, Lawrence Berkeley National Laboratory. 2002

21） Gladyszewskafiedoruk, K., et al. The possibilities of energy consumption reduction and a maintenance of indoor air quality in doctor's offices located in north-eastern Poland. *Energy and Buildings*, 85, 235–245. 2014

22） Simoni, M., et al. School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *European Respiratory Journal*, 35: 742-749. 2010

23） Azuma K, et al. Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor. *Environment International* 121, 51–56. 2018

24） Menzies D, Bourbeau J. Building related illnesses, New England Journal of Medicine, Nov 20, 1997

25） Mendell, M.J. Non-specific symptoms in office workers: a review and summary of the epidemiologic literature. Indoor Air 3:227-236.1993

26） Lu et al. Building-Related Symptoms among Office Employees Associated with Indoor Carbon Dioxide and Total Volatile Organic Compounds. *Environmental Research and Public Health*. 2015, 12, 5833-5845; doi:10.3390/ijerph120605833.

27） Norbäck D, et al. Sick building syndrome in relation to air exchange rate, CO_2, room temperature and relative air humidity in university computer classrooms: an experimental study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, volume 82, 21–30. 2008; doi:10.1007/s00420-008-0301-9

28） ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.

29） 柳　宇:最近の建築物衛生法における空気調和設備の扱い。建築設備と配管工事, Vol.43, No4, pp.61-64，2005

必要換気量算定のための室内二酸化炭素設計基準濃度の考え方
Principle of concentration limit of indoor carbon dioxide for ventilation requirement

---

令和 3 年 5 月 31 日　発行
編集・著作権者　　公益社団法人 空気調和・衛生工学会
発　　行　　所　　公益社団法人 空気調和・衛生工学会
〒162-0825　東京都新宿区神楽坂 4-8
電話（03）5206-3600　　FAX（03）5206-3603

理由もしくは方法のいかんを問わず，無断複製・転載を禁じます。