

〈特別研究課題〉 室内環境中のラドンを含む汚染物質の挙動と
健康影響評価

助成研究者 名古屋大学 飯田 孝夫



室内環境中のラドンを含む汚染物質の挙動と健康影響評価

飯田 孝夫*¹、ノーリン ラフマン*¹、横山 真太郎*²、伊藤 智徳*²
(*1: 名古屋大学、*2: 北海道大学)

Evaluation of Behavior and Health Effects due to Air Pollution including Radon in Indoor Environment

Takao Iida*¹, Naureen M. Rahman*¹, Shintaro Yokoyama*², Tomonori Ito*²
(*1: Nagoya University, *2: Hokkaido University)

Abstract

In Nagoya and Sapporo, we have measured the concentrations of radon and its decay products, particle size distribution of natural radioactive aerosols, the concentrations of formaldehyde and volatile organic compounds, airborne microbe (fungus and bacteria), carbon dioxide, carbon monoxide, ozone and suspended particulate matter in indoor environment. High radon concentration and air pollution were observed in the rooms with no window. The work in the room of high concentration of radon and formaldehyde gives rise to potentially high risk of lung cancer.

キーワード：ラドン、放射性エアロゾル粒径分布、ホルムアルデヒド、健康影響

1. はじめに

人は生活時間の大半を室内環境で過ごしている。近年、日本では地球環境問題が要請する建物空間における省エネルギーを考慮した高断熱高気密化仕様の建物や地下空間などが増加している。この結果、近年の空調機の普及と相まって、室内空気の換気回数は減少傾向にある。室内汚染物質の主な発生源は壁面や床面である。このような状況下では、室内環境中の汚染物質の濃度が増加すると予想される。室内空気汚染物質の濃度の増加は、人への健康に重大な影響を与える可能性がある。さらに、産業の構造変化によって人々のライフサイクルは大きく変化し、人間の活動は室内中心になってきている。その結果、人は室内特有の空気汚染物質に暴露する機会を増大させている。

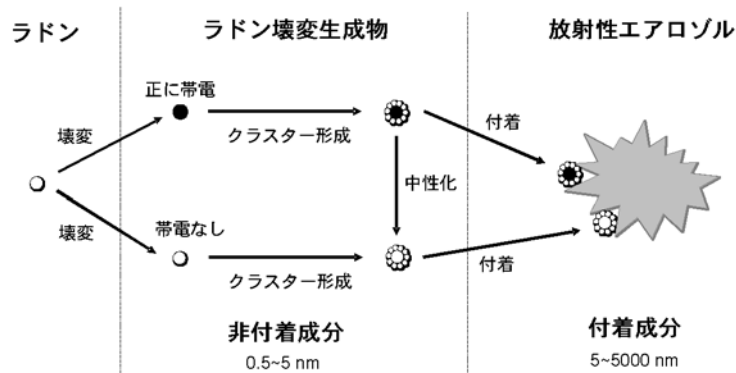


図1 放射性エアロゾルの生成過程

室内環境の悪化は、室内の自然放射性物質のラドン (^{222}Rn) 濃度の上昇をもたらす。ラドンは建物の床下土壤中や壁材で発生した後、室内へ進入してくる。ラドンの短寿命壊変生成物は空気中のエアロゾルに付着する。放射性エアロゾルの生成過程を図1に示す。これらの放射性エアロゾルが呼吸で吸入され、気管支や肺胞に沈着する。沈着した放射性エアロゾルは α 線を放出するため、肺がんのリスクを高める。肺がんの主要な原因となっている喫煙とラドン短寿命壊変生成物の影響が重なれば相乗作用があり、どちらか一方の汚染物質に被曝する場合の約10倍のリスクがあると推定されている⁹⁾。

本論文では、室内環境の空気質を総合的に調べるために、これまで行ってきた自然放射能濃度調査に加えて、室内空気中に浮遊する放射性エアロゾルの粒径分布や微生物の調査および化学物質のホルムアルデヒド等の調査結果とその健康影響評価について述べる。北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻人間環境計画学講座の協力⁹⁾を得て、名古屋地区と札幌地区で調査を実施した。

2. 室内汚染物質の測定法

2.1 はじめに

室内には自然放射性物質のラドン (^{222}Rn) に加えて、人間活動によるタバコの煙、調理用のコンロやオーブン、暖房機、加湿器、事務機器からの汚染物質の発生、室内の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、仕上げ材からの汚染物質の発生など、室内には汚染物質発生源が数多く存在している。この章では、調査に用いた室内汚染物質の測定法を簡単に述べる。

2.2 ラドンとその壊変生成物の濃度測定

室内ラドン濃度測定にはラドン濃度連続測定装置AlphaGUARD (PQ2000, Genitron Inc. Germany) を使用した。この装置は内部に600mLの電離箱が設置されている。ラドンからの α 粒子のパルスを計測してラドン濃度を求めている。測定方法は非常に簡易で、測定地点に装置を設置し、作動させれば、1時間毎に連続測定される。内蔵されている気圧・相対湿度・温度センサーによって、それぞれの要素についても連続的に記録される。ラドン壊変生成物の濃度測定には、WLxモニター (Pylon Electronics Inc. Canada) を使用した。この装置は1時間毎に自動的にフィルター上に空気中のラドン壊変生成物を捕集・計数し、各核種濃度と平衡等価ラドン濃度を出力する。

2.3 放射性エアロゾル粒径分布測定法

自然の放射性エアロゾルの粒径分布は以下の手順で測定した。低圧カスケードインパクター（LP-20RPS47, 東京ダイレック）を用いてエアロゾルを粒径別に分級捕集する。インパクターは12段のステージとバックアップフィルターで構成されている。最下段のバックアップフィルター上部では-73.3kPaに減圧されているので、～50nm, 50～110nm, 110～190nm, 190～280nm, 280～480nm, 480～730nm, 730～1000nm, 1000～1900nm, 1900～3500nm, 3500～5500nm, 5500～8100nm, 8100～12000nm, 12000nm～の13に分級できる。これらのフィルターをイメージングプレート（IP:Fuji film.Co.Ltd.）に露光し、IP読み取り装置BAS-5000（Fuji film.Co.Ltd.）を用いて2次元画像を取得する。作成した画像解析プログラムを用いてこの画像から α 線スポットを検出し、各フィルター上の α 線スポットの個数を計数する。この計数分布から粒径分布を求める³⁾。

2.4 ホルムアルデヒドの測定法⁴⁾

ホルムアルデヒドの測定方法としては、吸光光度法の一つであるAHTM法を用いた。今回の測定調査では、可搬性に優れているポータブルHCHO濃度検査キットSILSET（島津製作所）を用い、他の揮発性有機化合物とは別に測定分析を行った。この検査キットは一定量（3.2L）の空気をポンプで吸引し捕集液の中を通し、捕集されたホルムアルデヒドを捕集液に漬け込み、その後発色試薬を加えその色の濃さで濃度を測定した。

2.5 揮発性有機化合物の測定法⁴⁾

室内空気中には、少なくとも数十から数百の揮発性有機化合物（VOCs）が存在している。室内におけるVOCsの発生源は、建材、塗料、接着剤、脱臭剤、殺虫剤、ドライクリーニング剤、喫煙、燃焼機器など様々である。Tenax TAを100mg、Carboxen1000を70mg充填した内径4mm長さ90mmの捕集管を用いて空気中のVOCsを捕集する。捕集管は加熱脱着装置：TurboMatrix ATD（PerkinElmer）で300℃に加熱され、回収用キャリアーガス（高純度Heガス）を30ml min⁻¹で10分流してVOCsを脱着させる。その後4℃のコールドトラップに脱着試料を導入し、30分程度でVOCsを濃縮する。コールドトラップにキャリアーガスを接続し、一気に300℃に加熱し、GC/MS：TurboMassガスクロマトグラフ質量分析計（PerkinElmer）内のカラム〔DB-1MS（60m×0.25mm 内径0.25 μ m）〕に導入する。この結果、VOCsをその各構成物質に分離する。検出器としては、FID（水素炎イオン化検出器）ECD（電子捕獲型分析器）MS（質量分析計）を用いた。

2.6 浮遊微生物濃度測定⁵⁾

空中浮遊微生物である真菌と細菌（バクテリア）は一般環境の室内空気汚染物質と関係が深い。真菌は数万種類あり、植物のように菌糸を伸ばし、胞子を出して増殖する。細菌は真菌と異なり一定の時間が来ると分裂を起こし、増殖する。真菌と細菌の測定は、培地に捕集し、培養してコロニー数を計数するのが基本である。微生物の捕集法には衝突法を用いた。衝突法は、空気を噴流状態にして平板に吹き付けると粒子の一部が平板に衝突し捕集されることを利用した方法である。衝突法には様々な種類があるが、ここではRCSサンプラーを用いる遠心気流法を用いた。培地としては、真菌専用生培地TC（Biotest）と一般細菌専用生培地TC（Biotest）を用いた。

2.7 気体状物質等の測定法⁵⁾

室内環境の二酸化炭素（CO₂）を測定する計測方法としては検知管法と赤外線吸収法の2つが

最も普及している。赤外線吸収法とは、CO₂の吸収スペクトル（4.2～4.5 μm）付近での赤外線吸収量を測定することで濃度を定量する方法である。本研究では、非分散型赤外線方式のIAQモニター(KANOMAX)を用いた。一酸化炭素（CO）の測定方法には、CO₂の測定と同様に検知管法や赤外線吸収法が用いられる。本研究ではIAQモニター(KANOMAX)を用いた。このモニターは同時に室内環境中の気温と湿度も測定できる。

室内でのオゾンの主要発生源はコピー機と静電式空気清浄機である。オゾンの測定法としては、ヨウ化カリウム法、オゾンメーター法などがある。オゾンメーター法とはヨウ化カリウム法の一つで、オゾンによってヨウ化カリウムが酸化反応を起こす際に流れる電流を測定することによって、オゾン濃度を連続的に求める方法である。調査ではオゾンキャッチャー AET-030P（新コスモス電機）を用いた。

浮遊粒子状物質の測定法には散乱光式とろ紙式がある。光散乱式は粉塵に光を当てた際の反射光を測定する事によって、粉塵の個数、粒径等を測定するタイプである。当てる光の種類によって、レーザー式、ハロゲン式と呼ばれる。測定では光散乱式デジタル粉塵計（KANOMAX）を用いた。

2.8 まとめ

室内環境調査では、自然放射性物質、一般空気質5種類および微生物の測定を行った。表1に測定項目と測定機器を示す。今回の測定調査は測定項目が多岐にわたり、フィールドワークで移動が多いことなどから、測定機器は小型で可搬性が優れている機種を用いた。

測定項目	測定機器
ラドン濃度	AlphaGUARD（PQ2000, Genitron Inc. Germany）
ラドン壊変生成物濃度	α線用シンチレーションカウンタ TDC-103(ALOKA) WLx モニター（Pylon Electronics Inc. Canada）
放射性エアロゾル粒径分布	低圧カスケードインパクター（LP-20RPS47, 東京ダイレック） BAS-5000（Fuji film.Co.Ltd.）
ホルムアルデヒド	ポータブル HCHO 濃度検査キット SILSET（島津製作所）
揮発性有機化合物（VOCs）	加熱脱着装置:TurboMatrix ATD (PerkinElmer) TurboMassガスクロマトグラフ 質量分析計(PerkinElmer)
浮遊微生物（真菌、細菌）	エアーサンプラー RCS、真菌専用生培地TC（Biotest）、一般細菌専用生培地 TC（Biotest）
二酸化炭素、一酸化炭素 気温・湿度	IAQ モニター（KANOMAX）
オゾン	オゾンキャッチャー AET-030P（新コスモス 電機）
浮遊粒子状物質	光散乱式デジタル粉塵計（KANOMAX）

表1 測定項目と測定機器

3. 名古屋と札幌での室内汚染物質の調査

3.1 はじめに

本研究の課題である「室内環境中のラドンを含む汚染物質の挙動」の温暖地と寒冷地の違いを調べる目的で、名古屋と札幌の都市公共施設（大学内施設）において屋内汚染物質の調査を行った。ラドン(^{222}Rn)濃度、ラドン壊変生成物濃度、放射性エアロゾル粒径分布測定は名古屋大学が行った。室内環境の空気の質を総合的に調べるためには、室内空气中に浮遊する化学物質のホルムアルデヒド濃度、揮発性有機化合物（VOCs）、浮遊微生物および粒子状物質等の調査を行う必要があると考え、北海道大学の協力を得て調査を実施した。

3.2 調査の概要

3.2.1 名古屋地区における調査

名古屋地区における測定は2005年10月9日から10月14日の6日間行った。調査地点として、10月9日には名古屋大学工学部6号館213実験室、10日には名古屋大学工学部4号館大講義室と6号館玄関付近の外気、11日には名古屋大学附属図書館1階書庫、12日には名古屋大学博物館、13日には名古屋市営地下鉄名古屋大学駅プラットホーム、14日には名古屋大学工学部6号館中性子実験室の7地点を選んだ。ほとんどの測定項目は2時間程度で終了するが、ラドン濃度とラドン壊変生成物濃度の測定は測定機器の特徴から1回につき4時間、放射性エアロゾルの測定は一回の測定から結果を得るまで3時間を要し、それを2回行うこととしたため、1日1ヶ所で調査を行った。測定者は合計6人で2人ずつにわかれ、3グループで測定を行うこととした。なお、測定の際には、人による不確定要素をできる限り取り除くために、測定者以外の調査施設内の出入りを控えるように心がけた。VOCsの測定に関しては、測定機器の不具合があったため、12月2日と3日の2日間に追加の調査を行った。

3.2.2 札幌地区における測定

札幌地区における測定は、2005年10月31日～11月5日の6日間行った。調査地点として、10月31日には北海道大学工学部H207実験室、11月1日には北海道大学博物館、2日には北海道大学工学部図書館、3日には北海道大学工学部B31講義室、4日には札幌駅北口地下通路と北海道大学工学部H棟付近の外気、5日には北海道大学工学部地下通路の7地点を選んだ。名古屋での調査と同様に、ほとんどの測定項目は2時間程度で終了するが、ラドン濃度測定や放射性エアロゾルの測定には時間を要するので、1日1ヶ所で調査を行った。測定者は合計4人で2人ずつにわかれ、2グループで測定を行うこととした。なお、札幌地区の測定では、WLxモニターによるラドン壊変生成物濃度の測定は行わなかった。VOCsの測定に関しては、測定機器の不具合があったため、11月24日と25日の2日間に追加の調査を行った。

3.3 測定地点

温暖地と寒冷地での室内環境中汚染物質の挙動の違いを明らかにするために、名古屋と札幌の各7ヶ所の測定地点には、構造・用途の点で類似した場所を選んだ。測定地点は表2のように分類した。外気はバックグラウンド濃度と考えることができる。実験室は、我々が普段使用している最も身近な施設ということで対象とした。薬品などの発生源や換気など設備面での不安がある。博物館、図書館、講義室は不特定多数の人々が入り出す空間である。博物館や図書館は展示品、展示パネル、本棚など、揮発性物質の発生源が多くあると予想される。講義室は人が多くなると、

二酸化炭素や浮遊粒子状物質（粉塵）濃度、人の呼吸による細菌などの増加が予想される。地下空間や無窓空間は外気との換気があまり無く、他の地点に比べ空気環境が劣悪になる可能性がある。地下空間は、大学施設に比べさらに不特定な人数の利用者が居るために、実態を把握することは大変重要である。無窓空間は最も汚染物質濃度が高いと考えられる。

分類	測定地点(名古屋)	測定地点(札幌)
実験室	名古屋大学工学部6号館213実験室	北海道大学工学部H207実験室
博物館	名古屋大学博物館	北海道大学博物館
図書館	名古屋大学附属図書館1F書庫	北海道大学工学部図書館
講義室	名古屋大学工学部4号館大講義室	北海道大学工学部B31講義室
外気	名古屋大学工学部6号館玄関付近外気	北海道大学工学部H棟付近外気
地下空間	名古屋市営地下鉄プラットフォーム	札幌駅北口地下通路
無窓空間	名古屋大学工学部6号館中性子実験室	北海道大学工学部地下通路

表2 測定地点の分類

3.4 まとめ

名古屋地区と札幌地区の測定調査の概要について説明した。今回は自然放射性物質だけでなく、一般空気質、微生物も含め十数もの測定項目を札幌・名古屋合わせて14ヶ所で測定するという大きなプロジェクトである。そのために、可搬性が優れている機器で調査を行った。

4. 名古屋と札幌における室内汚染物質の調査結果

4.1 はじめに

2章で述べた測定法を用いて、ラドンとその壊変生成物、揮発性有機化合物（VOCs）、一般空気質の名古屋地区と札幌地区での調査結果についてについて述べる。対応測定地点ごとの調査結果をレーダーチャートにまとめ、建築物の用途・構造と室内空気汚染物質の濃度の関係を比較検討する。

4.2 名古屋地区における測定結果

4.2.1 ラドンとその壊変生成物濃度

名古屋地区での調査では、ラドン濃度はAlphaGUARDを用いて、ラドン壊変生成物濃度はWLx モニターを用いて測定を行った。2つの機器による測定結果から、ラドン濃度に対するラドン壊変生成物濃度の割合を示す平衡等価係数(equilibrium Equivalent Factor)も求めた。名古屋大学内の実験室、講義室、図書館、博物館、地下鉄駅ホーム、中性子実験室の計6ヶ所の測定結果の平均値を表3に示す。測定結果から、無窓空間の中性子実験室のラドン濃度はWHOの基準値100Bqm³を上回る高濃度となった。換気設備が整っていないことがラドンが高濃度となる原因と思われる。その他の実験室、講義室、博物館、図書室では25Bqm³以下で、比較的low濃度であった。平衡等価係数は部屋の空間が大きいほど高い値を示している。大きな部屋ではラドン壊変生成物の壁などへの沈着割合が小さく、小さな部屋では沈着割合が大きいことを反映している。大きな講義室では屋外の平均的な平衡係数0.6より高くなっている。ラドン濃度から被曝評価する場合に注意を要する。

日 時	測定場所	ラドン濃度	ラドン壊変生成物濃度	平衡等価係数
10月9日 8:00～16:00	工学部6号館213実験室	11±3	3.2±0.4	0.31
10月10日 9:00～14:00	工学部4号館大講義室	17	14.3	0.84
10月11日 10:00～14:00	附属図書館	23±4	12.8±1.3	0.57
10月12日 9:00～14:00	博物館	24±7	11.5±0.6	0.49
10月13日 10:00～14:00	地下鉄プラットフォーム	10±3	2.6±0.4	0.25
10月14日 10:00～14:00	工学部6号館中性子実験室	154±19	106.8±1.0	0.70

表3 名古屋地区におけるラドンとその壊変生成物濃度の測定結果

4.2.2 放射性エアロゾル粒径分布

測定場所で、低圧カスケードインパクターを用いてエアロゾルを粒径別に13に分級し、フィルター上に捕集した。これらのフィルターをイメージングプレートに露光した。イメージングプレートを実験室に持ち帰り、BAS-5000を用いて2次元画像を取得した。画像解析プログラムを用いてこの画像から α 線スポットを検出し、計数分布から粒径分布を求めた。粒径分布の例として、工学部6号館中性子実験室で得られた結果を図3に示す。ラドンの放射能レベルが高いために、統計的なばらつきが小さい。破線はこの分布を対数正規関数でフィティングした曲線である。ピーク位置が空気力学的放射能中央径 (AMAD) である。曲線の幅が標準偏差 (σ_g) である。この値が小さいほど分布の広がりが狭い。表4に計6ヶ所の測定結果を示す。粒径分布はほぼ同じであり、AMADは約0.2 μm であった。

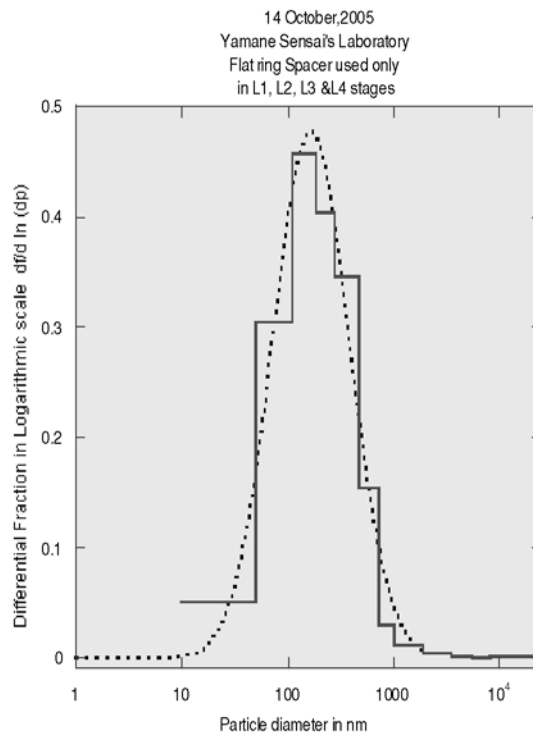


図2 中性子実験室内の放射性エアロゾルの粒径分布

日 時	測定場所	空気力学的放射能 中央径:AMAD (nm)	標準偏差 (σ_g)
10月9日 8:00~16:00	工学部6号館213実験室	186	3.3
10月10日 9:00~14:00	工学部4号館大講義室	178	2.6
		191	2.8
10月11日 10:00~14:00	付属図書館	172	2.8
		184	2.6
10月12日 9:00~14:00	博物館	205	2.5
		191	2.5
10月13日 10:00~14:00	地下鉄プラットフォーム	187	2.7
		184	2.7
10月14日 10:00~14:00	工学部6号館中性子実験室	166	2.3

表4 名古屋地区における放射性エアロゾル粒径分布の測定結果

4.2.3 ホルムアルデヒドとVOCsの測定結果

ホルムアルデヒド濃度の測定結果を図3に示す。博物館と講義室でWHOの基準値である80ppb ($100 \mu\text{g m}^{-3}$)と同じ値を示した。博物館はパネルや展示物といった発生源が多く存在するため高濃度になったと予想される。講義室で高濃度になったのは、机や椅子が比較的新しいため、これらが発生源になったと考えられる。中性子実験室でも基準値に迫る濃度が検出された。その他の測定場所では比較的低濃度であった。

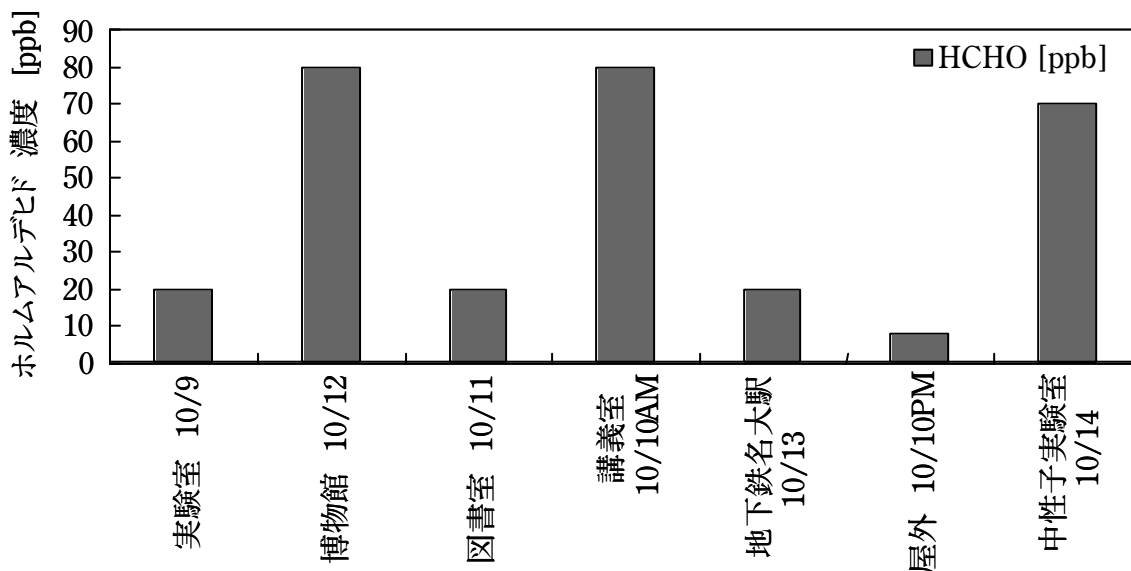


図3 名古屋地区におけるホルムアルデヒドの測定結果

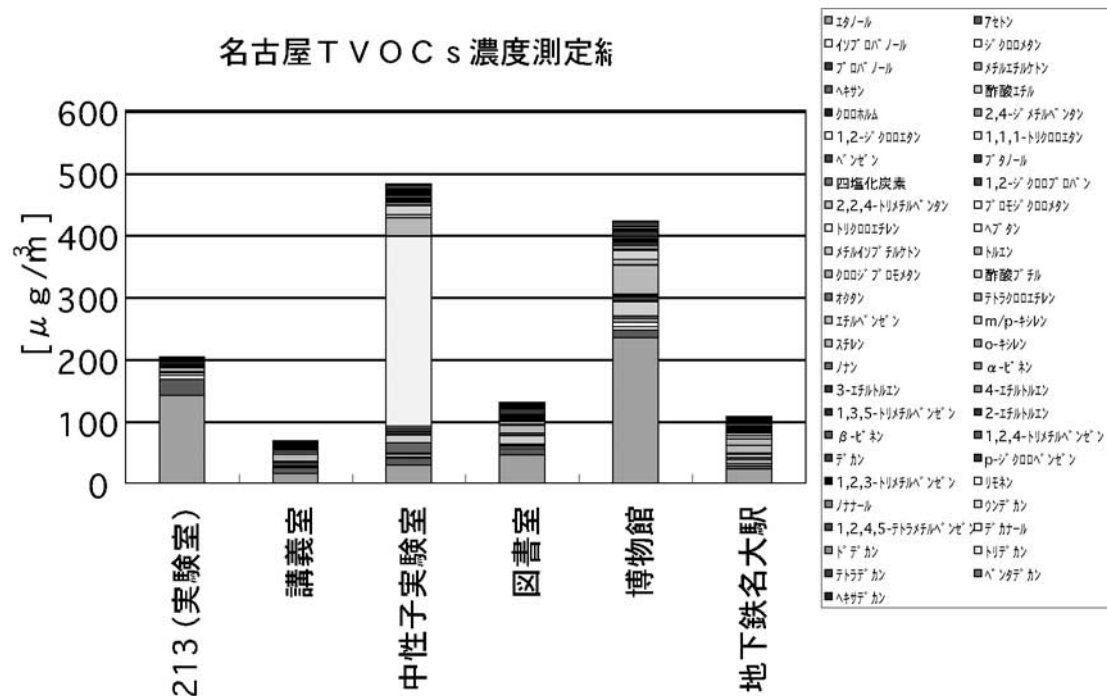


図4 名古屋地区におけるVOCs測定・分析結果

揮発性有機化合物（VOCs）の測定結果を図4に示す。ホルムアルデヒドと同様に、博物館のTVOCs濃度が高く、厚生労働省の指針値 $400 \mu\text{g m}^{-3}$ を超えている。個別に見ると、エタノールの濃度が非常に高い。トルエンの濃度も高いことから、展示品やパネルなどからの放散があったと思われる。中性子実験室でも、厚生労働省の指針値 $400 \mu\text{g m}^{-3}$ を超える濃度が検出された。特に、注目すべきはトリクロロエチレンの濃度が $300 \mu\text{g m}^{-3}$ を超えていることである。これは、室内に大きな発生源があることが予想され、早急に対処する必要がある。薬品が保管されている実験室では、エタノールが多く検出されている。

4.2.4 一般空気質の測定結果

名古屋地区で気温、湿度、一般空気質10種類の同時測定を行った結果を表5にまとめた。各地点とも、 NH_3 、 SO_2 は検出限界以下であった。期間中の天候は晴れまたは曇りの日が多かった。10月10日は雨模様であった。気温は建築物内では 25°C と前後のほぼ快適な温度で保たれている地点が多かった。実験室は空調設備を完全にとめたため、気温が 30°C を上回りやや不快であった。外気温は 21.4°C と平均気温並みであった。相対湿度はビル管理法に定められている40～70%の範囲またはその前後であった。一般細菌濃度は全体的に低レベルであり、各測定地点とも清浄レベル(2000cfu m^{-3})の範囲であった。講義室と実験室は他地点に比べ高めであった。浮遊真菌濃度も一般細菌と同様、全体的に低レベルであり、各測定地点とも清浄レベル(2000cfu m^{-3})の範囲であった。浮遊粉塵濃度は、どの地点においてもビル管理法の基準値 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ 以下であった。オゾンはほとんどの地点で検出限界以下であった。名古屋市営地下鉄の名古屋大学駅のプラットフォームで低濃度であるが検出された。一酸化炭素濃度は、各地点ともビル管理法の基準値である10ppm以下であった。名古屋市営地下鉄の名古屋大学駅のプラットフォームでやや高い濃度の4.5ppmが観測された。

	実験室 10/9	博物館 10/12	図書室 10/11	講義室 10/10 AM	地下鉄名大 駅 10/13	屋外 10/10 PM	中性子実 験室10/14	基準値	補足
天候	晴	晴	曇り	曇りのち雨	晴	曇りのち雨	晴		
気温 [°C]	30.9	25.45	25.8	25.2	25.5	21.4	25.2		
湿度 [%]	45	62	63.3	60	56	82	65.5		
浮遊細菌[個] [CFU/m ³]	34 850	14 350	17 425	24 600	5 125	9 225	17 425	2000	清浄レベル
浮遊真菌[個] [CFU/m ³]	20.5 512.5	6 150	1 25	10.5 262.5	4 100	54 1350	3 75	2000	清浄レベル
浮遊粉塵[mg/m ³]	0.012	0.018	0.022	0.016	0.026	0.035	0.010	0.150	ビル管理法
オゾン(O ₃) [ppm]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.008	n.d.	n.d.	0.076	WHO 1時間平均
CO ₂ ave [ppm]	850	456	517	463	431	413	902	1000	ビル管理法
max	880	470	530	490	477	435	958		
min	796	442	500	442	395	406	847		
CO ave [ppm]	0.4	0.8	0.8	0.3	4.5	0.8	2	10	ビル管理法
max	0.6	0.9	0.9	0.4	5.2	0.9	2.2		
min	0.1	0.6	0.8	0.2	3.9	0.7	1.9		
(マルチガスモニター)									
NH ₃ [ppm]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
SO ₂ [ppm]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
Water(vap)[kPa]	1.84	1.79	1.86	1.73	1.64	1.95	1.99		

n.d. … 検出限界以下

表5 名古屋地区における一般空気汚染物質の測定結果

二酸化炭素濃度は、ビル管理法の基準値である1000ppmを超える値が検出された地点は無かった。しかし、実験室や中性子実験室では、基準値に迫る濃度だった。両地点に共通していることは、空間が狭く、換気設備が整っていないことが挙げられる。

4.3 札幌地区における測定結果

4.3.1 ラドンとその壊変生成物濃度

札幌地区での調査では、ラドン濃度はAlphaGUARDを用いて、ラドン壊変生成物濃度はフィルター法を用いて測定を行った。ラドン濃度に対するラドン壊変生成物濃度割合を示す平衡等価係数(equilibrium Equivalent Factor)も求めた。実験室、博物館、図書室、講義室、札幌駅地下通路、北大地下通路の計6ヶ所の測定結果の平均値を表6に示す。ラドン壊変生成物濃度はフィルター法で求めた値からの推定値である。北海道大学工学部地下通路の濃度はWHOの基準値100Bqm³より高い濃度となった。地下空間であることから、取り囲む土壌から発生したラドンがポーラスなコンクリート内部やコンクリートの亀裂を通過して、侵入したことが原因と考えられる。換気設備が整っていないことも高濃度化する原因となったと思われる。実験室、博物館、図書室、講義室においても基準値には達していないが、室内空間としてはやや高い濃度であった。

日 時	測定場所	ラドン濃度	ラドン壊変生成物濃度	平衡等価係数
10月31日 8:00~16:00	工学部H207 実験室	29±5	10.1	0.35
11月1日 9:00~14:00	博物館	21±4	8.4	0.40
11月2日 10:00~14:00	工学部図書室	29±5	16.4	0.56
11月3日 9:00~14:00	工学部B31 講義室	21±6	13.8	0.66
11月4日 10:00~14:00	札幌駅北口地下通路	6±2	3.1	0.58
11月5日 10:00~14:00	工学部地下通路	141±18	87.6	0.62

表6 札幌地区におけるラドンとその壊変生成物濃度の測定結果

4.3.2 放射性エアロゾル粒径分布

測定場所で、低圧カスケードインパクターを用いて測定したエアロゾルの粒径分布の測定結果を表7に示す。空気力学的放射能中央径（AMAD）と標準偏差（ σ_g ）は分布を対数正規関数でフィティングして求めた。イメージングプレートの読み取り装置が不調のために、H207実験室の結果は11月5日に再度測定した結果である。博物館の結果は曝露から1日後に読み取ったため、データの信頼性は低い。名古屋地区のAMADは約 $0.2 \mu\text{m}$ であったのに対し、札幌地区では、札幌駅北口地下通路の粒径が約 $0.3 \mu\text{m}$ と大きかった。講義室の粒径分布も他の部屋に比べてAMADが少し大きかった。

日 時	測定場所	空気力学的放射能 中央径: AMAD(nm)	標準偏差 (σ_g)
10月31日 8:00~16:00	工学部 H207 実験室	187	2.2
11月1日 9:00~14:00	博物館	115	2.0
11月2日 10:00~14:00	工学部図書館	142	2.7
		186	2.2
11月3日 9:00~14:00	工学部B31講義室	226	2.2
		239	2.1
11月4日 10:00~14:00	札幌駅北口地下通路	284	3.0
		300	2.4
11月5日 10:00~14:00	工学部地下通路	187	2.2

表7 札幌地区における放射性エアロゾル粒径分布の測定結果

4.3.3 ホルムアルデヒドとVOCsの測定結果

ホルムアルデヒド濃度の測定結果を図5に示す。どの測定地点においてもWHOの基準値である80ppbを下回っている。建物のリフォームやパネルなどによるの展示といった発生源が多く存在すると思われる機械系図書室や博物館などでは、濃度が高かった。実際、以前、機械系図書室で働いていた職員がシックビル症候群のような症状を起こしたため、現在、換気設備に加えて空気清浄機が2台設置されている。

揮発性有機化合物（VOCs）の測定結果を図6に示す。ホルムアルデヒドと同様に、博物館のTVOCs濃度が他の測定地点に比べやや高い傾向がある。薬品が保管されている実験室では、エタノールが多く検出されている。工学部の地下室では、他の測定地点に比べるとイソプロパノールの割合が非常に高い。札幌駅の北口通路は、最も低濃度であった。

4.3.4 一般空気質の測定結果

札幌地区で気温、湿度、一般空気質10種類の同時測定を行った結果を表8にまとめた。各測定場所ともオゾン、 NH_3 、 SO_2 は検出限界以下であった。期間中の天候は晴れまたは曇りで、天気が大きく崩れる日は無かった。建築物内の気温は $20 \sim 28^\circ\text{C}$ とほぼ快適な温度で保たれていた。ほとんどの測定地点で、相対湿度はビル管理法に定められている $40 \sim 70\%$ の範囲であった。一般細菌濃度は全体的に低レベルであり、各測定場所とも清浄レベル(2000cfu m^{-3})の範囲

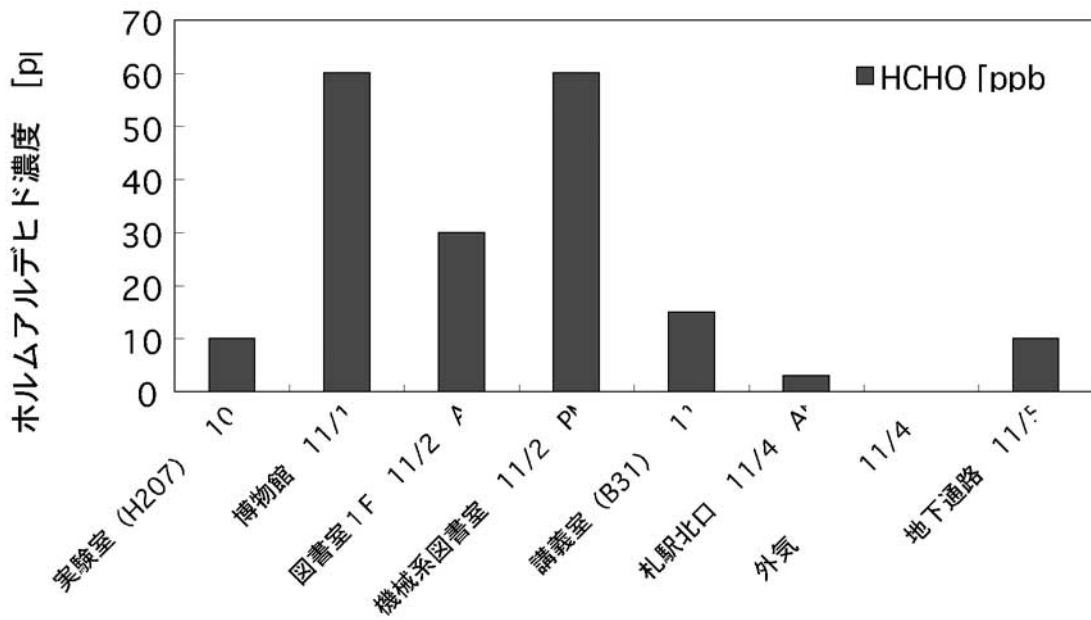


図5 札幌地区におけるホルムアルデヒドの測定結果

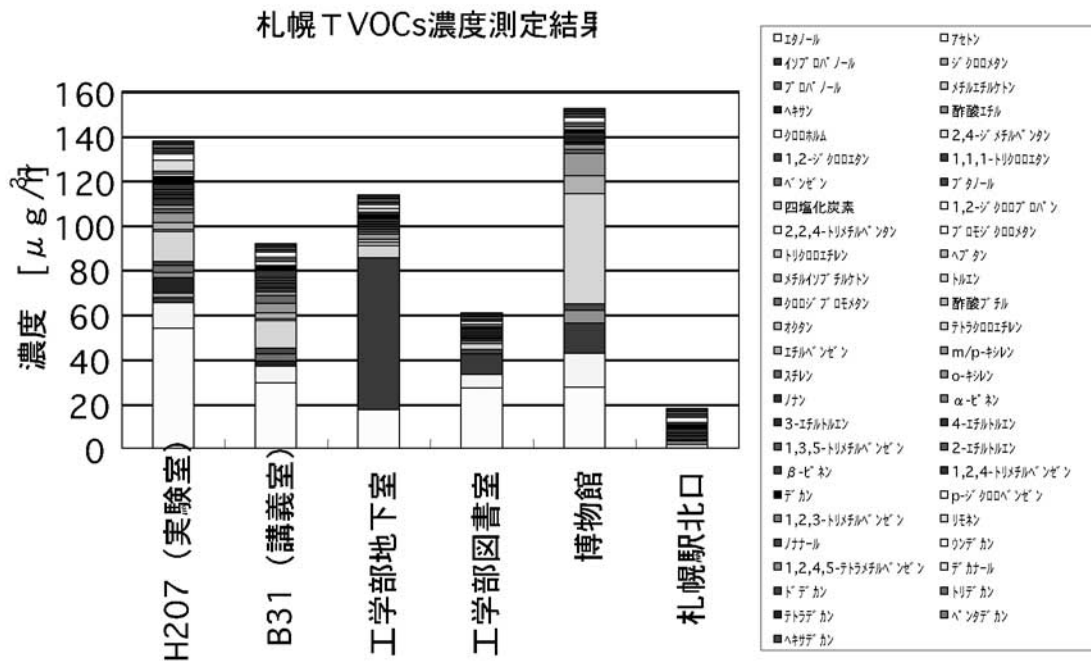


図6 札幌地区におけるVOCs測定・分析結果

であった。浮遊真菌濃度も一般細菌と同様、全体的に低レベルであり、各測定地点とも清浄レベル(2000cfu m³)の範囲であった。浮遊粉塵濃度は、どの地点においてもビル管理法の基準値150 μg m³以下であった。北海道大学工学部地下通路ではやや高い濃度となった。これは、換気設備が設置されていないために、粉塵が蓄積しやすい環境であったことが原因だと考えられ

	実験室 (H207) 10/31	博物館 11/1	図書室 1F 11/2 AM	図書室 4F 11/2 AM	機械系図書室 11/2 PM	講義室 (B31) 11/3	札幌北口 11/4 AM	外気 11/4 PM	地下通路 11/5	基準値	補足
天候	晴	晴	晴	晴	晴	曇り	曇り	曇り	晴		
気温 [°C]	25.4	21.5	28	26.1	26.4	22.5	18.9	15.7	21.4		
湿度 [%]	29.5	39	40	49.5	38.5	46.7	48	73	70.5		
浮遊細菌 [個] [CFU/m ³]	47 1175	28 700	57 1425	11.5 287.5	22 550	26.5 662.5	9 225	8 200	16.5 412.5	2000	清浄レベル
浮遊真菌 [個] [CFU/m ³]	2 50	0 0	6 150	0 0	1 25	1 25	1 25	27.5 687.5	10 250	2000	清浄レベル
浮遊粉塵 [mg/m ³]	20.0	19.0	11.0		6.0	22.3	28.0	44.0	67	150	ビル管理法
オゾン(O ₃) [ppm]	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.076	WHO 1時間平均
CO ₂ ave [ppm]	682	540	651	650	1091	568	427	406	634	1000	ビル管理法
max	730	566	702		1124	594	448	421	650		
min	657	519	595		1054	518	412	400	618		
CO ave [ppm]	0.6	1.1	0.8	0.4	0.8	0.7	1.2	1	1	10	ビル管理法
max	0.7	1.4	1		0.8	0.8	1.6	1.2	1.2		
min	0.4	0.9	0.5		0.5	0.6	1	0.8	0.8		
(マルチガスモニター)											
NH ₃ [ppm]	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
SO ₂ [ppm]	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
Water (vap) [kPa]	0.929	0.91	1.42		1.21	1.11	1	1.25	1.78		

n.d. … 検出限界以下

表8 札幌屋地区における一般空気汚染物質の測定結果

る。一酸化炭素濃度は、各地点ともビル管理法の基準値である10ppm以下であった。二酸化炭素濃度は、北大工学部機械系図書室でビル管理法の基準値である1000ppmを超える値が検出された。測定直前に室内で5名ほどが食事をしていたため、その影響を受けている可能性がある。

4.4 対象施設ごとの比較

表2で示した調査を行った名古屋と札幌の各6地点のデータを、定量下限値以下のオゾンを除く変動の大きな10成分に着目して、レーダーチャート方式で評価した。その結果を図7に示す。正10角形の形をした外枠は各物質の各法律等で定められている基準値及び指針値とした。実線は名古屋大学の、点線は北海道大学の測定結果を同一チャート上に示した。基準値を超えたところは外枠を外れる。左側に自然由来の汚染物質の、右側に人間活動による汚染物質の測定項目を配置し、汚染物質の分布特性を視覚的に把握できるようにした。

図7(a)の実験室のレーダーチャートを見ると、グラフは右側に伸びていることが分かる。これは、二酸化炭素やTVOCsの濃度がやや高いことが影響している。グラフの形式を見ると、名古屋大学と北海道大学で類似している。図7(b)の講義室の図を見ると、右側に大きなピークがある。これは、名古屋大学の講義室のホルムアルデヒドが非常に高かったことが影響している。この原因としては、名古屋大学の講義室の内装が比較的新しいことが考えられる。ホルムアルデヒド濃度以外は形状が類似していることから、用途の同じ建築空間において室内空気質濃度が類似する可能性がある。図7(c)の図書館の結果は右側に伸びている。特に、北海道大学では浮遊細菌濃度が高かった。二酸化炭素濃度がやや高いことから、測定地点で名古屋大学に比べ北海道大学の場合はやや人が多かったことが影響していると推定できる。ラドン濃度はどちらも少し高かった。図7(d)の博物館の図を見ると、名古屋大学、北海道大学ともに、ホルムアルデヒド濃度とTVOCs濃度が非常に高いことがわかる。名古屋大学では基準値を上回る濃度が検出された。これは、構造物や建材の影響というよりは、むしろ展示品や展示パネルに使われている接着剤や塗料などが原因だと考えられる。換気などの対策をする必要がある。ラドン濃度は少し高かった。屋外の測定結果についてはレーダーチャートを示さなかったが、人間活動による浮遊粉塵と生物起源の浮

遊真菌の濃度が少し高い。図7(e)の地下空間図を見ると、汚染物質が非常に少ないことが分かる。名古屋の地下空間での一酸化炭素濃度がやや高いのを除いては清浄な空間といえる。図7(f)の無窓空間のレーダーチャートを見ると、正10角形が大きく崩れていることが分かる。ラドン濃度が名古屋大学・北海道大学ともに基準値を大幅に超えている。名古屋大学の無窓空間は中性子実験室で、普段学生や教官が使用している。北海道大学の無窓空間は清掃員や事務職員の控え室が存在し、多くの学生や教職員が毎日のように利用する地下食堂とも繋がっている。無窓空間では換気がされにくいいため、汚染物質の濃度が高濃度化する可能性がある。全体を見ると、右上にグラ

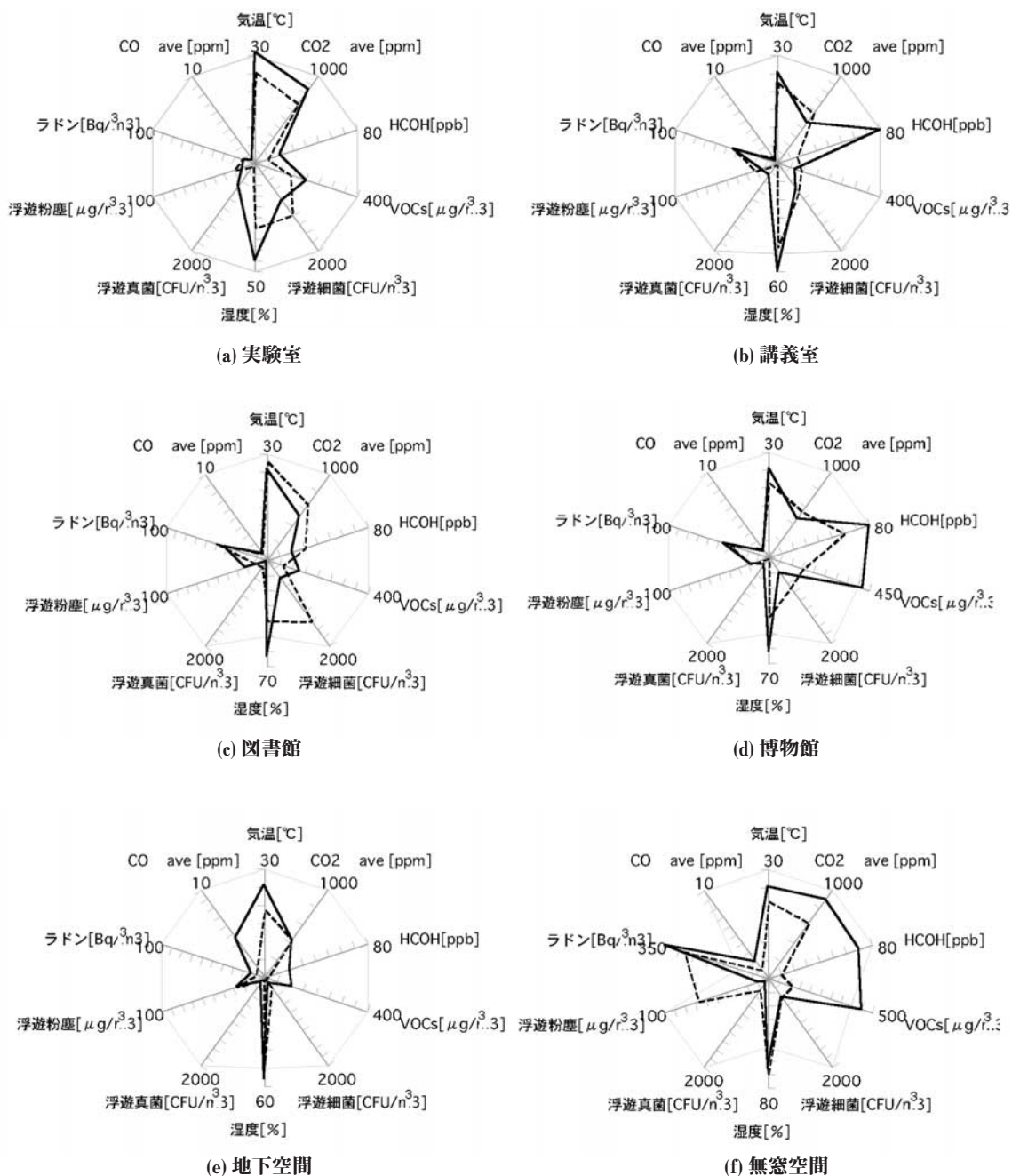


図7 レーダーチャート：実線；名古屋、点線；札幌

フが広がっている。換気不足による二酸化炭素濃度の増加があったことと、名古屋大学の測定地点では特定のVOCの発生源が存在したことによる濃度の増加があったことによる。これらの結果、無窓空間では室内空気汚染物質が高濃度に存在する可能性が高いため、室内空気質に対する適切な制御が必要である。

4.5 まとめ

名古屋と札幌の都市施設の総合的室内空気質測定調査結果をまとめた。全体的にみると、無窓空間を除く5地点では、基準値を大幅に超えるような空間は無かった。無窓空間では、適切な換気を行い、濃度減少に努める必要がある。特に、自然放射性物質のラドンが高濃度であった。6地点の建築空間での測定結果からそれぞれ類似している点もあり、用途・構造の点から室内空気質に対する制御を考えることが重要である。今回は大学内の施設での測定が中心であったが、今後、大学以外の測定地点を増やし、同地点での連続測定などでデータの蓄積をはかる必要がある。

5. 室内汚染物質の健康影響の評価

5.1 はじめに

4章で、名古屋地区と札幌地区での室内汚染物質の調査結果をのべた。この章では、これらの室内汚染物質濃度レベルでの人への健康影響について述べる。

5.2 ラドン壊変生成物

ラドン壊変生成物の多くは図1に示す放射性エアロゾルを形成し、呼吸器管内で沈着する。その呼吸器官区域ごとの沈着割合は粒子の沈着機構と粒子の放射性エアロゾル粒径分布の影響を大きく受ける⁶⁾。4章で述べたように、名古屋と札幌で測定された放射性エアロゾル粒径分布に、2カ所を除き大きな違いは見られなかった。放射性エアロゾルの粒径分布を考慮したラドン壊変生成物の被曝評価は将来の課題として、ここでは国連科学委員会の放射性エアロゾル粒径を0.2 μmとした被曝評価法を採用する⁷⁾。ラドン被曝による実効線量は

$$H = D \times F \times Q \times T \quad (1)$$

と表される。ここで、 H は平均年実効線量(mSv y^{-1})、 D は線量換算係数で $9 \times 10^{-6} \text{ m Sv}(\text{Bqhm}^{-3})^{-1}$ 、 F は平衡等価係数、 Q はラドン濃度(Bq m^{-3})、 T は居住係数である。労働環境での居住時間は年間の労働時間の2000時間とする。表9に計算結果を示す。名古屋地区も札幌地区も無窓空間では年約2mSvである。この環境で50年間働くとする、全被曝線量は100mSvとなる。この被曝によるがん死のリスクは 5×10^{-3} となる⁸⁾。

5.3 ホルムアルデヒドと揮発性有機化合物

室内空気汚染、いわゆるシックハウス問題に関する高まり⁹⁾を受け、厚生労働省は室内空気汚染に係るガイドライン¹⁰⁾を示し、現在までに11種類の物質と総揮発性有機化合物(TVOCs)の室内濃度指針値を設定している。動物実験では発がん性が認められるものの、ヒトでの発がん性に関しては十分な証拠がない¹¹⁻¹³⁾。信頼性のあるデータがない等の理由で、全ての化合物のヒトに対する発がん性の影響について評価されているわけではない。トルエンとキシレンについては発がん性の評価は必要ないとされている。パラジクロロベンゼンは発がん性の評価の要する室内汚染物質である。ホルムアルデヒドについては、米国環境保護局(EPA)は吸入暴露についてFischer 344ラットの実験結果から、吸入曝露量と鼻腔の扁平上皮がんの発生率との関係を用い、生涯の

測定場所 (名古屋)	ラドン壊変 生成物濃度	被曝線量 (mSv y ⁻¹)	測定場所 (札幌)	ラドン壊変 生成物濃度	被曝線量 (mSv y ⁻¹)
実験室	3.2±0.4	0.06	実験室	10.1	0.18
博物館	11.5±0.6	0.21	博物館	8.4	0.15
付属図書館	12.8±1.3	0.23	図書館	16.4	0.30
大講義室	14.3	0.25	講義室	13.8	0.25
地下鉄駅	2.6±0.4	0.05	札幌駅地下	3.1	0.06
中性子実験室	106.8±1.0	1.92	工学部地下	87.6	1.58

表9 名古屋と札幌での労働環境におけるラドンによる年平均実効線量

リスク評価に適用するリスクユニットを 1.3×10^5 ($\mu\text{g m}^{-3}$)⁻¹と算出している。

この値を用いて、ホルムアルデヒドの平均値が $100 \mu\text{g m}^{-3}$ (80ppb)の室内での生涯過剰発生率は 1.36×10^3 と算出さる。この値はラドンによるがんのリスクと同程度である。

5.4 まとめ

屋内ラドン濃度と肺がんの疫学調査から、 100Bq m^{-3} の家屋の生活者は16%の過剰肺がんが認められている。ラドンの健康影響については比較的よく調査されているが、ホルムアルデヒドや揮発性有機化合物による健康影響はよく調べられていない。しかし、WHOが規制している濃度レベルは同程度の健康影響が予想される。

6. まとめ

名古屋地区と札幌地区で、ラドン濃度、ラドン壊変生成物濃度、放射性エアロゾル粒径分布、ホルムアルデヒド、揮発性有機化合物 (VOCs)、浮遊微生物 (真菌、細菌)、二酸化炭素、一酸化炭素、気温・湿度、オゾン、浮遊粒子状物質の調査を行った。名古屋と札幌での調査結果を比較すると、6地点の建築空間での測定結果からそれぞれ類似している点もある。建物の用途・構造の点から室内空気質に対する制御を要する。窓のない空間を除く5地点では、WHOや厚生労働省の基準値を大幅に超えるような空間は無かった。窓のない空間では、名古屋・札幌ともにラドン濃度はWHOの 100Bq m^{-3} を超え、ホルムアルデヒドやVOCs濃度も基準を超えるか基準に近い値であった。これらの空間では適切な換気を行い、濃度減少に努める必要がある。今回は、大学内の施設での測定が中心であったが、今後、測定地点を増やし、同地点での連続測定などでデータの蓄積をはかる予定である。屋内ラドン濃度と肺がんの疫学調査から、 100Bq m^{-3} の家屋の生活者は16%の過剰肺がんが認められている。ラドンの影響は比較的よく調査されているが、ホルムアルデヒドや揮発性有機化合物による健康影響はよく調べられていない。しかし、WHOが規制している濃度レベルは同程度の健康影響が予想される。

謝辞

名古屋大学と北海道大学で室内空気質調査を行ったとき、調査に協力して頂いた北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻の増田弘樹君および名古屋大学大学院工学研究科エネルギー工学専攻の太田雅和君と松田基聖君と濃野友紀君そして日本原子力研究開発機構の西藤文博氏に感謝致します。

参考文献

- 1) BEIR VI Report: Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) VI Report: "The Health Effects of Exposure to Indoor Radon", National Academy Press, Washington, D.C. (1999).
- 2) 伊藤智徳：自然放射性物質を中心とする多元室内空気質の挙動の解析と健康影響評価に関する研究、北海道大学大学院工学研究科修士論文、2006年2月。
- 3) F. Saito, S. Furuichi, N. M. Rahman, T. Iida and J. Koarashi: A New Method for Measuring Particle Size Distribution of Radon Decay Products Using Imaging Plate, Jpn. J. Health Phys., 40(2), 177-182 (2005).
- 4) 有害大気汚染物質測定の実測委員会編：有害大気汚染物質 測定の実際。
- 5) 横山真太郎：室内空気質、現代の空気衛生調和工学、落藤澄編、朝倉書店。
- 6) ICRP Publ.65：放射線防護のための人体呼吸気道モデル(1994)。
- 7) UNSCEAR 1993 report: Sources and Effects of Ionizing Radiation(1993)。
- 8) ICRP Publ.65：家庭と職場におけるラドン²²²に対する防護(1993)。
- 9) 池田耕一：シックハウス問題について考える, 保健医療科学, 50, 3 (2001)。
- 10) 室内空気汚染に係るガイドラインについて-室内濃度に関する指針値：厚生労働省医薬局審査管理課 (2002)。
- 11) 化学物質の環境リスク評価； 第1巻, 環境省環境保健部環境リスク評価室 (2002)。
- 12) 化学物質の環境リスク評価； 第2巻, 環境省環境保健部環境リスク評価室 (2003)。
- 13) 化学物質の環境リスク評価； 第3巻, 環境省環境保健部環境リスク評価室 (2004)。