

原著論文

屋内ラドンとラドン短寿命娘核種濃度の
シミュレーションプログラムの開発と応用横山真太郎¹, 吉岡誠記¹, 増田正夫², 角田直人³, 青木徹⁴, 内見裕聡⁵, 下道国⁶

[受付 2002.7.25] [受理 2002.11.12]

Development and Application of Computer Programs for Predicting
Concentrations of Indoor Radon and Its DaughtersShintaro YOKOYAMA¹, Masaki YOSHIOKA¹, Masao MASUDA², Naoto KAKUTA³,
Tohru AOKI⁴, Hiroaki UCHIMI⁵ and Michikuni SHIMO⁶

[Received Jul 25, 2002] [Accepted Nov 12, 2002]

要旨

北海道におけるわれわれの屋内現場測定値により、わが国の高気密化住宅では条件によってはラドンならびにラドン短寿命娘核種の放射能濃度が無視できないことがわかり、本報では、あらかじめ計画時にラドンとラドン娘核種濃度の予測や換気設備の最適運転管理に有用なコンピュータプログラムを開発し、地下室を対象とした実測値とシミュレーション値を比較検討しその有効性を確かめた。さらに、相互換気量が確認されている三室モデルでの濃度変化をシミュレーションした。

Abstract

In our measurement survey, we found that the concentrations of indoor radon and its daughters were higher in energy-efficient houses in Japan. Therefore, we have developed a computer program predicts, evaluates and controls concentrations of indoor radon and its daughters. A comparison of measured and simulated results in underground spaces shows the validity of the computer program. By using the computer program concentrations of indoor radon and its daughters in a three-zone model were simulated.

Key words: indoor radon, radon daughters, radioactive concentration, simulation

1. はじめに

近年、わが国特に北海道では地球環境問題が要請する省エネルギーを考慮した高気密建物が増えてきた。土壌やコンクリートから発生するラドンならびにラドン短寿命娘核種が高気密建物で蓄積することによって、その建物の居住者あるいは屋内活動者に肺ガンをもたらす危険性が懸念される。そこで、既報¹⁾にてラドンとラドン短寿命娘核種の屋内現場測定調査を行ったところ、北海道のブロック造個別住宅や地下室ではEPAの基準値148 Bq/m³やASHRAE, WHOの基準値

100 Bq/m³²⁾をはるかにこえる230~240 Bq/m³レベルに達していた。これまで、わが国ではラドン問題が無視されていたきらいがあるが、近年の高気密化住宅ではラドンならびに短寿命娘核種を室内空気質の測定項目に入れるべきことを示していると考えられた。

本報では、あらかじめ計画時にラドンとラドン娘核種濃度の予測や換気設備の最適運転管理に有用なコンピュータプログラムを開発し、地下室を対象とした実測値とシミュレーション値を比較検討しその有効性を確かめた。さらに、相互換気量が確認されている三室

- 1 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-13 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan
- 2 高砂熱学工業(株)総合研究所 〒243-0213 厚木市飯山3150
R&D Centre, Takasago Thermal Engineering Co., Ltd., 3150 Iiyama, Atsugi, Kanagawa 243-0213, Japan
- 3 電機通信大学 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
University of Electro-Communication, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan
- 4 北海道ガス(株) 〒060-8530 札幌市中央区大通り西7丁目3-1
Hokkaido Gas Co., Ltd., 3-1 Nishi-7, Odori, Chuo-ku, Sapporo 060-8530, Japan
- 5 (株)エヌ・ティ・ティファシリティーズ 〒108-0023 東京都港区芝浦3-4-1
NTT Facilities Inc., 3-4-1 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan
- 6 藤田保健衛生大学 〒470-1192 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪1-98
Fujita Health University, 1-98 Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake, Aichi 470-1192, Japan

モデルでの濃度変化をシミュレーションしたので、報告する。

2. ラドンとラドン娘核種濃度の予測シミュレーションプログラムの開発

ここでは、Rn と RaA (²¹⁸Po), RaB (²¹⁴Pb), RaC (²¹⁴Bi) の室内における濃度の予測シミュレーションの結果について述べる。

2.1 ラドンとラドン娘核種の屋内濃度に関する微分方程式

ラドンとラドン娘核種の原子数濃度の時間変化は次式のように表される³⁾。

$$\frac{dn_N}{dt} = M + \nu n_{N0} - (\lambda_N + \nu) n_N \quad \dots(1)$$

$$\frac{dn_A}{dt} = \xi \nu n_{A0} + \lambda_N n_N - (\lambda_A + \nu + \gamma) n_A \quad \dots(2)$$

$$\frac{dn_B}{dt} = \xi \nu n_{B0} + \lambda_A n_A - (\lambda_B + \nu + \gamma) n_B \quad \dots(3)$$

$$\frac{dn_C}{dt} = \xi \nu n_{C0} + \lambda_B n_B - (\lambda_C + \nu + \gamma) n_C \quad \dots(4)$$

ここで、M：屋内での Rn の発生率 (atom/m³h), n_N：屋内空気中の Rn 原子数濃度 (atom/m³), n_A：屋内空気中の RaA 原子数濃度 (atom/m³), n_B：屋内空気中の RaB 原子数濃度 (atom/m³), n_C：屋内空気中の RaC 原子数濃度 (atom/m³), n_{N0}：屋外空気中の Rn 原子数濃度 (atom/m³), n_{A0}：屋外空気中の RaA 原子数濃度 (atom/m³), n_{B0}：屋外空気中の RaB 原子数濃度 (atom/m³), n_{C0}：屋外空気中の RaC 原子数濃度 (atom/m³), λ_N：Rn の崩壊 (壊変) 定数 (=0.0075 (/h)), λ_A：RaA の崩壊定数 (=13.63 (/h)), λ_B：RaB の崩壊定数 (=1.551 (/h)), λ_C：RaC の崩壊定数 (=2.110 (/h)), ν：換気回数 (/h), ξ：給気設備

の漏洩率 (-)⁴⁾, γ：ラドン娘核種の壁や床への沈着率 (/h)。

ラドンは壁や床等への沈着率はないものとして γ=0としている。式(1)の右辺第2項および式(2)~式(4)の右辺第1項は単位時間当たりに室内に侵入する原子数を表している。また、式(2)~式(4)の右辺第2項は親核種が室内で崩壊することにより生成する原子数を表している。

本報では自然放射性物質の放射能濃度を Bq (ベックレル) を用いて表している。Bq (ベックレル) とは 1 秒間に 1 回の崩壊が生じる放射能濃度である。しかし上式では原子数濃度で表現している。そこで原子数濃度 n_i (atom/m³) から放射能濃度 Q_i (Bq/m³) (i = N, A, B, C) の変換を以下に示す。

$$\text{放射能濃度} = \frac{n_i \times \lambda_i}{3600} \text{ (Bq/m}^3\text{)} \quad \dots(5)$$

このようにして得られる連立の常微分方程式を、換気量や発生量などの情報を与え、濃度を予測するプログラムを作成した。連立常微分方程式の解法には Runge-Kutta 法を用いた。これまで、Fortran 版, Basic 版, Mathematica 版を開発した。

2.2 コンピュータプログラムの有効性

本節では、われわれが先に検討したフィルター法¹⁾を用いて行った実測結果とシミュレーション結果を比較検討し、その有効性を検討する。

室容積 102 m³, 表面積 17.3 m² をもち、有効開口面積がほとんどない北海道大学衛生工学実験棟地下室に機械換気装置を設置し、設定換気回数のもとで、ラドンとラドン娘核種の放射能濃度の変化を測定した。

一方、Jacobi⁵⁾に従ってラドン娘核種の壁や床への沈着率 γ (/h) を 0.5 と考え、開発したコンピュータ

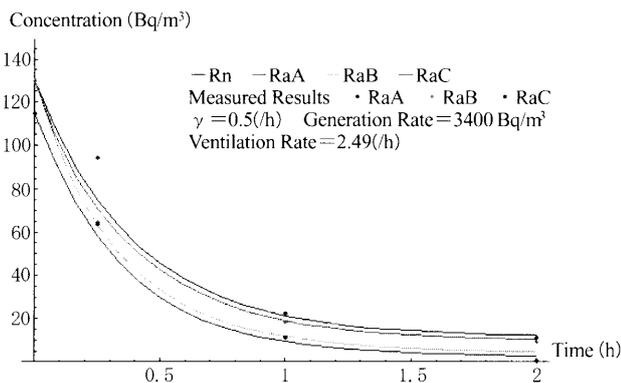


Fig. 1 A comparison of measured and simulated results in underground space (ν=2.49 (/h)).

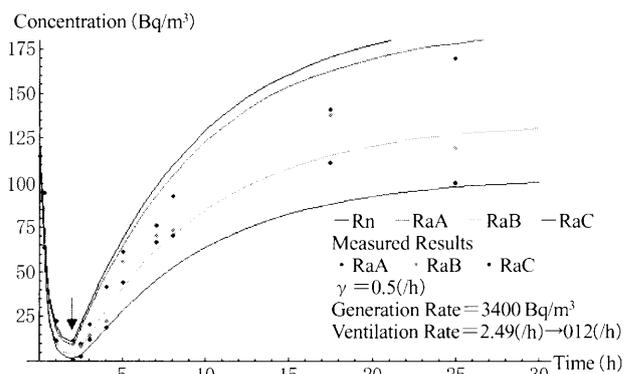


Fig. 2 Concentrations after mechanical ventilation system turned off. The downward arrow shows the time changing from ν=2.49 (/h) to ν=0.12 (/h).

プログラムを用いて放射能濃度の計算をした^{#2)}。

Fig.1は比較的高濃度レベルあった地下室に対して、機械換気装置により換気回数を増加させた場合の放射能濃度が減少する過程を示している。この時の換気回数は実測値に基づき2.49 (/h)と与えた。また、発生量を3400 Bq/m³と与えて計算した。図中の実線はこれらの値を用いた計算結果である。測定値と比較的一致しているといえる。

Fig.2は同じ条件のもとで、十分な換気による濃度の減少が見られた後に換気設備を停止し、その後の蓄積過程を示している。換気設備停止後の換気回数は実測により0.12 (/h)と与えた。10時間後にはWHO, ASHRAEの基準値²⁾の100 (Bq/m³)やEPAの基準値²⁾148 Bq/m³を越えており、換気の必要性がシミュレーション結果からも読みとれる。この場合も計算値は測定値と比較的一致している。

Fig.3はFig.1と類似したシミュレーションと実測値の比較である。ここで、測定による初期濃度はRn, RaA, RaB, RaCそれぞれ275, 260, 225, 130 Bq/m³と高濃度となっていることと機械換気装置による換気

回数の実測値が3.72 (/h)となっていることが異なっている。また、図中の測定値は平衡仮定ラドン娘核種(Rn-Dts)濃度であるが、その理由は濃度変化が急激で非定常性が強く、フィルター法の三回計測法^{#3)}の条件を満たさなかったことによる。平衡仮定ラドン娘核種(Rn-Dts)濃度はRaBの濃度と近似していることがわかっている⁴⁾ので、得られた平衡仮定ラドン娘核種(Rn-Dts)濃度とシミュレーションによるRaBの濃度を比較したところ、良く一致している。

Fig.4はその後換気装置を停止し、設定換気回数0.15 (/h)の条件下での蓄積過程を示している。これらの結果も、時刻3~6hの間で多少のずれはあるもののその後のRaBの蓄積過程を見ると比較的一致しているといえる。

Fig.5とFig.6は機械換気装置による設定換気回数を4.15 (/h)とさらに増加させたときの除去過程と、換気装置を停止したあとの設定換気回数0.15 (/h)での蓄積過程を示している。この場合も比較的良く一致しているといえる。

いずれの結果にも共通していることは、外気が極低

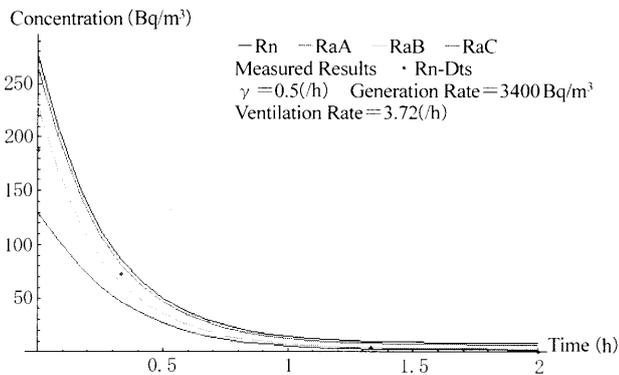


Fig. 3 Concentrations with mechanical ventilation system turned on ($\nu = 3.72$ (/h)).

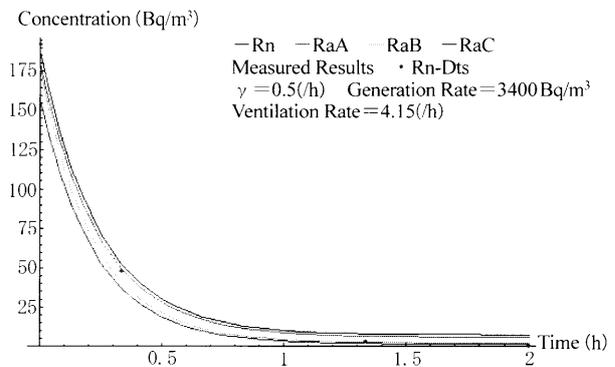


Fig. 5 Concentrations with mechanical ventilation system turned on ($\nu = 4.15$ (/h)).

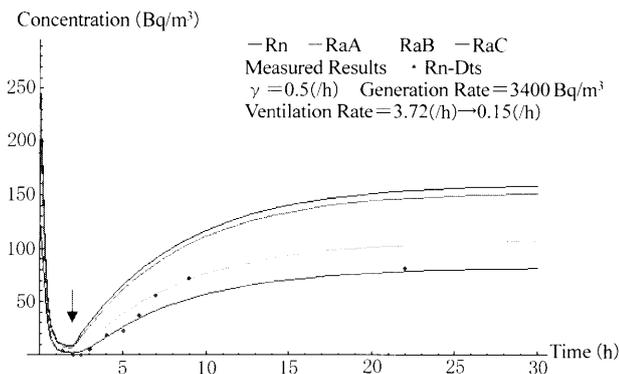


Fig. 4 Concentrations during mechanical ventilation system turned off. The downward arrow shows the time changing from $\nu = 3.72$ (/h) to $\nu = 0.15$ (/h).

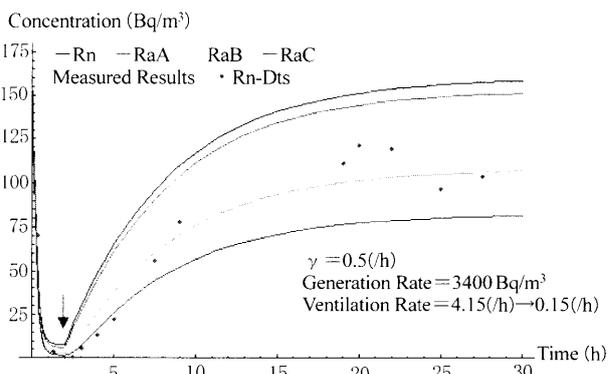


Fig. 6 Concentrations with mechanical ventilation system turned off. The downward arrow shows the time changing from $\nu = 4.15$ (/h) to $\nu = 0.15$ (/h).

濃度であることから屋内ラドンとラドン短寿命娘核種放射能濃度は換気に大きく依存していることである。他の汚染物質と異なることは、ラドン娘核種の場合、崩壊（壊変）現象とともに沈着率もある条件下では屋内濃度に影響することである。すなわち機械換気などにより換気回数があるレベル以上ならばその影響はほとんどないが、設定換気回数が低ければその影響は顕著であると考えられる^{註4)}。また、本測定値と比較して計算を繰り返すことにより沈着率等の汚染物質の濃度に影響するファクターのおおよその値を予測することも可能であると思われる。

以上の結果から今回開発したコンピュータプログラムは実用に供することを確認できた。これを使用して、室内における空気汚染物質の蓄積過程や換気による除去過程の予測が可能であると思われる。寒冷地における冬期には一般に換気回数は減少し、室内の空気環境の悪化を招く。そこで、室内における汚染物質の蓄積過程や濃度レベルを予測することにより適切な換気回数・換気時間を設定し、過剰な換気による室内気温の低下、ひいては消費エネルギーの増大を抑制することができると思われる。

3. 3室における放射能濃度シミュレーション

前節ではいわゆる単室モデルとして放射能濃度を予測した。実際の建物における濃度を予測する場合は多数室モデルにおいて室内における汚染物質濃度を予想することになる。以下には多数室モデルでの計算例を示す。

多数室の場合には、当該室の換気量が他室との相互換気量に影響を受け、場合によっては汚染物質の発生量が他の部屋における汚染物質の濃度に影響するなどといったことが予想される。ここでは、前節と同様にラドンおよびその娘核種を対象として同様の手法で計算を行っている。ラドンおよびその娘核種の放射能濃度を算出する場合に、前節では4式よりなる連立微分方程式を解いた。今回は3室を想定しており、計12式の連立微分方程式を解くことになる。

解析対象とした3室の室容積はそれぞれ24.4 m³(室1)、13.5 m³(室2)、12.1 m³(室3)であり、この3室はすべて隣接している(Fig.7参照)。トレーサーガス法による通常状態の各室の換気回数は、室1で1.70 (/h)、室2で1.87 (/h)、室3で1.09 (/h)である。その内訳ともいえる通常状態の相互換気量の測定結果をFig.8 (CASE0)に示す。図中の※は、換気量が1 m³/h

未満の値を表している(以下同様)。

そのような3室に対して、Fig.7に示すように室1と室2に送風機を設置した。以降、それぞれを送風機A、送風機Bとする。送風機Aは室1から外(廊下)へ排気し、また送風機Bにより室2の空気は室1へと運ばれる。これらの送風機の設定風量をCASE1~CASE3の3段階に分けて、室間相互換気量をSF₆によるトレーサーガス法により測定した。相互換気量の測定手順や対象室の測定結果の詳細は、Yokoyama et al. (1997)を参照されたい⁶⁾。送風機A、送風機B

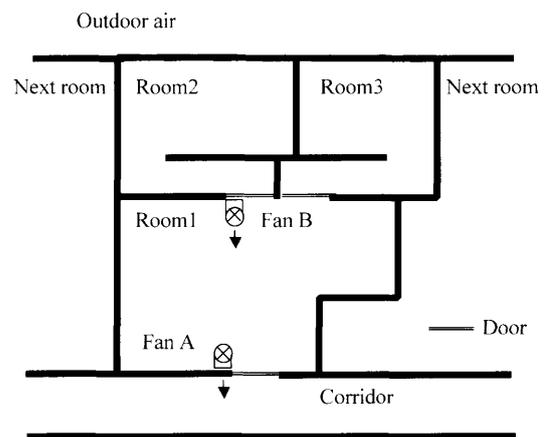


Fig. 7 Schematic diagram for the three zone-model.

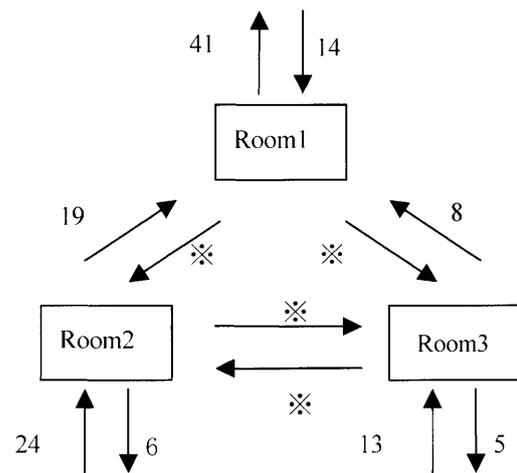


Fig. 8 Three-zone air flow rates (m³/h) (Case 0). Symbol (※) shows the values less than 1 m³/h.

Table 1 Air flow rates of Fan A and Fan B

	Fan A	Fan B
Case 1	—	30m ³ /h
Case 2	150m ³ /h	—
Case 3	150m ³ /h	31m ³ /h

の組み合わせによる3段階に設定値を Table 1 にまとめた。ここでは、Table 1 に掲げた設定換気量による換気効果をシミュレートした。

また、各室でのラドン発生率は室1では3400 Bq/m³、室2で3400 Bq/m³、室3で1500 Bq/m³とした。室1と室2における発生量は地下室レベル⁷⁾を想定した値であり高い値となっているが、これは汚染物質の移動量を明確に示すために意図的に大きな値を採用した。また、室3における発生量は気密化ブロック造住宅レベル⁷⁾を想定している。各室における初期濃度は、この発生率で両方の送風機が停止している換気状態のもとでの定常計算により得られた放射能濃度を初期濃度として与えた (Table 2 参照)。

Table 2 Initial concentrations (Bq/m³) of radon and radon daughters

	Rn	RaA	RaB	RaC
Room 1	125	115	57	34
Room 2	108	93	40	20
Room 3	100	95	47	27

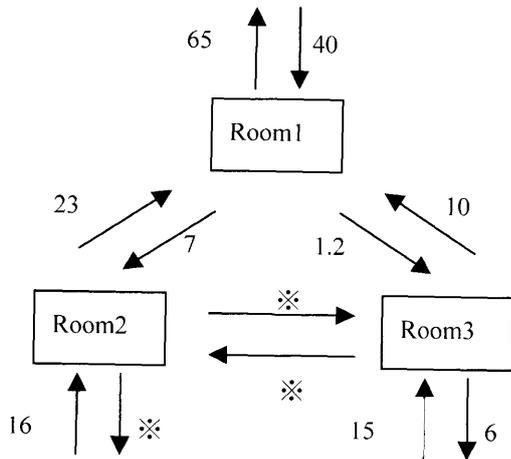


Fig. 9 Three-zone air flow rates (m³/h) (Case 1). Symbol (※) shows the values less than 1 m³/h.

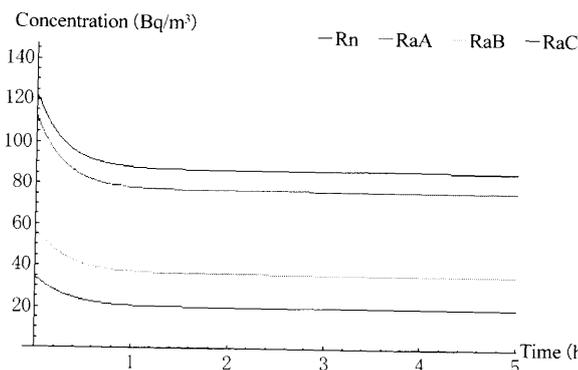


Fig. 10 Simulated results of concentrations for Room 1 (Case 1).

Fig.9は CASE 1 での相互換気量を表しており、この場合送風機 B のみの作動となっている。全てのケースについていえることだが、室2と室3の相互換気量は壁によって遮られているために相互換気量が極微小の1 m³/h 未満となっている。CASE 1 でのシミュレーション結果の中から Fig. 10 ~ Fig. 12 に室1から室3までの放射能濃度の変化を示した。30 m³/h

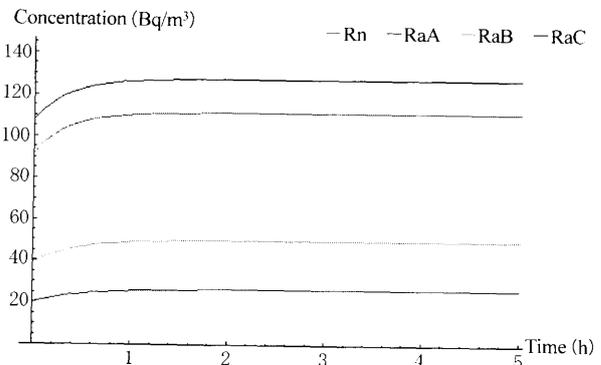


Fig. 11 Simulated results of concentrations for Room 2 (Case 1).

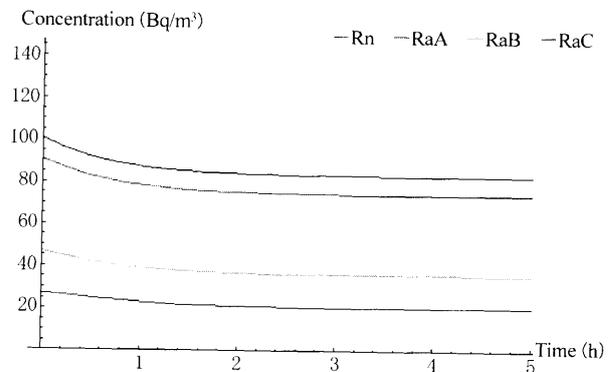


Fig. 12 Simulated results of concentrations for Room 3 (Case 1).

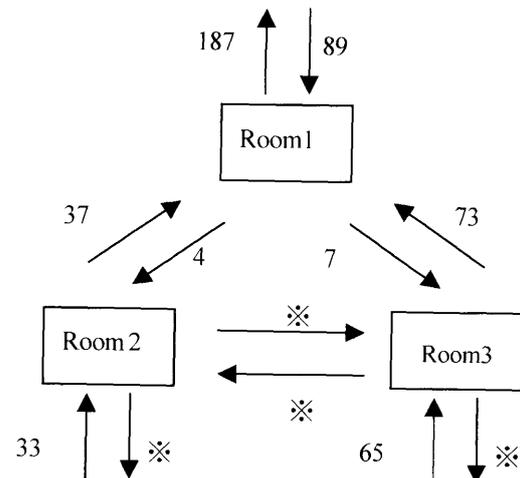


Fig. 13 Three-zone air flow rates (m³/h) (Case 2). Symbol (※) shows the values less than 1 m³/h.

程度の機械換気の吸引側の室2では換気量が減少^{註5)}しているため濃度が増加していることがわかる。それに対して室1と室3では換気の効果が見られる。

CASE 2はCASE1での30 m³/hレベルの5倍の送風量を送風機Aに設定した時のシミュレーションである。この時の相互換気回数をFig.13に示した。それに基づく各室の濃度変化の計算結果をFig.14～Fig.16に示した。このケースでは送風機Aを作動させることにより室1が負圧となり、特に室3から空気

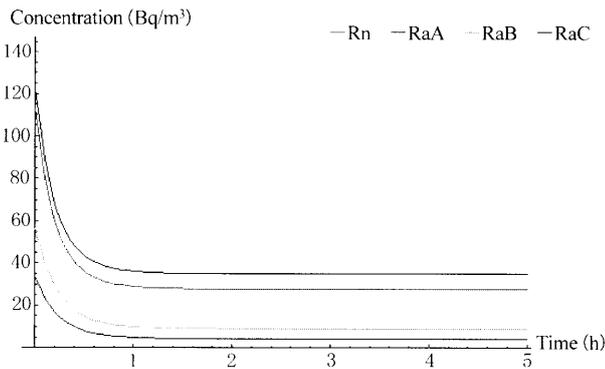


Fig. 14 Simulated results of concentrations for Room 1 (Case 2).

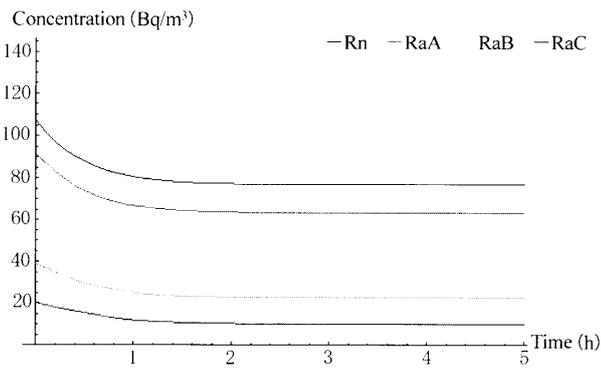


Fig. 15 Simulated results of concentrations for Room 2 (Case 2).

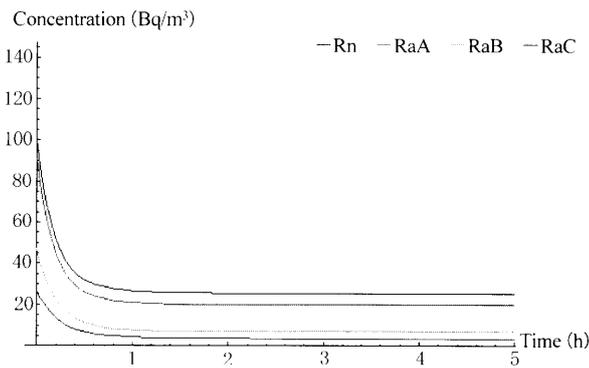


Fig. 16 Simulated results of concentrations for Room 3 (Case 2).

が誘引され直接外に放出されるために、室1に対してだけでなく他室にも効果を及ぼしていると考えられる。Fig.14～Fig.16のそれぞれは、Fig.10～Fig.12と比較し、濃度低減のレベルと低減時間が短縮している。また、送風機Aの風量をさらに増加させることにより、室1へと誘引される空気量が増加し、さらに大きな換気効果が得られると考えられる。

CASE 3では送風機AとBの双方を作動させてい

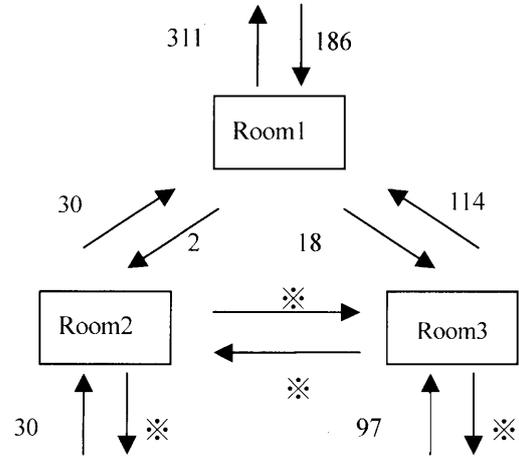


Fig. 17 Three-zone air flow rates (m³/h) (Case 3). Symbol (※) shows the values less than 1 m³/h.

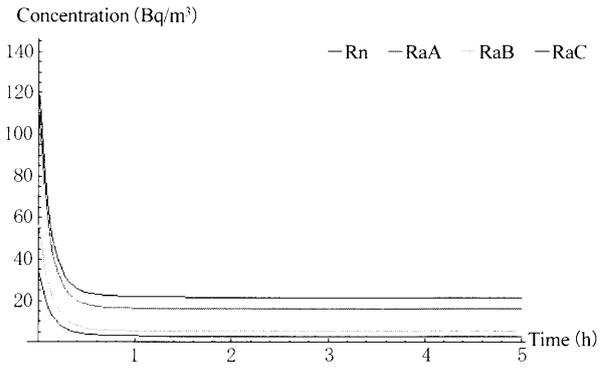


Fig. 18 Simulated results of concentrations for Room 1 (Case 3).

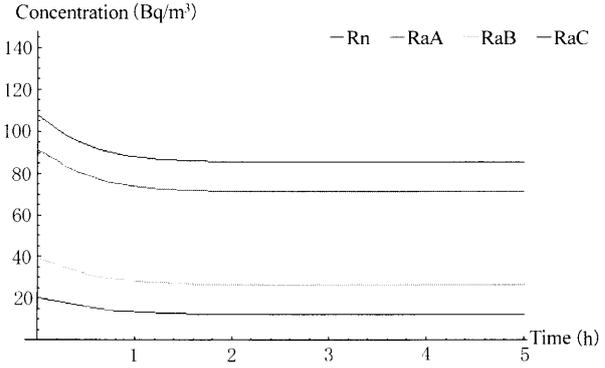


Fig. 19 Simulated results of concentrations for Room 2 (Case 3).

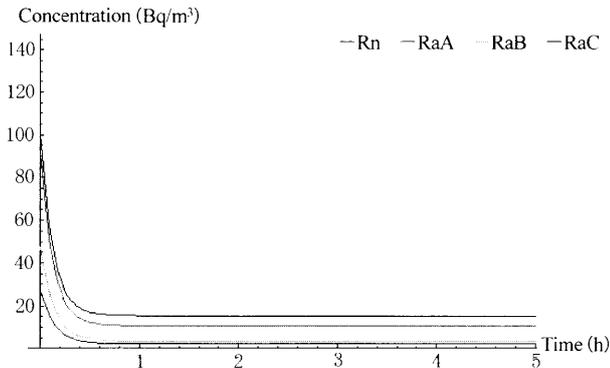


Fig. 20 Simulated results of concentrations for Room 3 (Case 3).

る。この場合の相互換気量は Fig. 17 のとおりである。Fig. 18～ Fig. 19 が各室の濃度変化を示している。このケースも風量の大きい送風機 A を作動させることにより室 1 が負圧となり、室 2 と室 3 から空気が誘引され直接外に放出されることと、送風機 B の寄与も加わり、CASE 2 と比較し、室 1 と室 3 で十分な換気効果が見られる。室 2 では、他の 2 室ほどではないが換気効果の向上が見られる。Fig. 18～ Fig. 19 の放射能濃度の計算結果もそれを反映した形となっている。また、送風機 A、B の送風量を増加させることによりさらに高い換気効果が期待され、より短時間で低減することが予想される。

4. おわりに

わが国の高気密化住宅では条件によってはラドンならびにラドン短寿命娘核種の放射能濃度が高濃度になることをうけて、本報では、1) あらかじめ計画時にラドンとラドン娘核種濃度の予測や換気設備の最適運転管理に有用なコンピュータプログラムを開発した。2) 地下室を対象とした実測値とシミュレーション値を比較検討し、プログラムの有効性を確かめた。3) 相互換気量が確認されている多数室を対象としたラドンとラドン娘核種の放射能濃度のシミュレーション結果を示した。

われわれは、このようなシミュレーションの援用による室内空気環境の予測、あるいは評価を可能とするシステムの構築を目標としている。今回対象として行ったラドンとラドン娘核種の放射能濃度のシミュレーション結果からも分かるように、屋内空気環境に大きく影響を与えるのは換気量と汚染物質の発生量である。

これに関連して二酸化炭素や一酸化炭素、浮遊粒子状物質などでは発生源や発生量の同定は比較的容易と考えられ、シミュレーションが比較的簡単に達成できると考えている。一方で、近年問題となっている化学物質過敏症やシックビル・シンドロームなどと関わりが深いと考えられている VOCs はその発生量の同定に若干の困難性を伴うことが考えられるが、室内において発生する物質やその発生量を多角的に予測することは空気環境を評価する上で重要な事柄と考えられ、今後更に努力したい。

謝 辞

北海道大学にて本研究を行うにあたりご指導いただきました落藤澄名誉教授に謝意を表します。また、測定法とラドン問題の多くの事柄を直接ご指導いただきました池辺幸正名古屋大学名誉教授にお礼申し上げます。また、北海道における一連の測定調査にご協力いただきました皆様と当時北海道大学工学部 4 年生ならびに工学研究科大学院生の諸君に謝意を表します。

註

註 1) ξ : 給気設備の漏洩率(-)は空気浄化装置が設置されている場合にも対応できるように導入した。そのような場合、空気浄化装置の捕集率 η (-) の導入の方が一般的である。 $\xi = 1 - \eta$ になることを付記する。

註 2) 計算に際しての与条件の中で、換気回数と外気濃度は実測値に基づき、発生量はパラメータ推定法を基盤にした推定値を与えたことを付記する。

註 3) 著者らは先にフィルター法による三回計測法の捕集時間の短縮化を検討した¹⁷⁾。その結果、従来の 30 分や 15 分と同程度の精度を保持しながら 5 分間まで短縮可能なことを示した。信頼性のある計測のためには、時間帯でのフィルターからの発現の安定性などの条件もあるが、ここで指している三回計測法の条件とは、捕集時間帯での濃度の定常性の条件を意味していることを付記する。

註 4) 式 (1)～(4) により、低換気条件での沈着や崩壊(壊変)現象の影響は、沈着率(Jacobi⁵⁾に従えば 0.5 (/h) とラドン娘核種の崩壊(壊変)定数(最大は RaA の 13.63 (/h) と)の相対的な関係で決まる。沈着率の影響が顕著になるのは、換気回数が 0.5 (/h) 以下のレベルと考えられる。

註 5) 初期値のもととなった換気状態は送風機設定前の値であり、送風機設定にあたり、ドアを交換し周囲を目張りしたことも換気量減少の要因と考えられる。

文 献

- 1) 横山真太郎, 月館司, 青木徹, 西願栄二, 内見裕聡, 池田耕一, 飯田孝夫: 北海道における屋内ラドンとラドン短寿命娘核種濃度の測定調査, 室内環境学会誌, 6, 9-17 (2003)
- 2) 横山真太郎: 室内空気質. 現代の空気調整工学 (落藤澄編著), 朝倉書店, 59-85 (1996).
- 3) 下道国, 加藤隆夫, 池辺幸正: 屋内空気中のラドンとその娘核種の濃度-換気装置給気側の除塵効率の影響-, 保健物理, 17, 119-126 (1982).
- 4) 横山真太郎, 青木徹, 吉岡誠記, 月館司, 増田正夫, 内見裕聡, 下道国: フィルター法による屋内ラドン娘核種の測定法とその除去指標およびラドン濃度の簡易同定法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, (投稿中).
- 5) W. Jacobi: Activity and potential α -energy of 222 radon- and 220 radon-daughters in different air atmospheres, *Health Physics*, 2, 441-450 (1972).
- 6) S. Yokoyama, N. Kakuta, K. Ochifuji, and D. T. Grimsrud: Developing a practical algorithm for multizone air flow rate measurement system and its applications to university facilities, *Proceedings of Health Building / Indoor Air Quality '97*, 2, 557-562 (1997).
- 7) S. Yokoyama and K. Ochifuji: A Study on indoor radon and radon daughter concentrations in Hokkaido of Japan. *Proceedings of Indoor Air '87*, 2, 430-436 (1987).