

地表面におけるラドン濃度の日周変動データから
鉛直分布を推定するための簡単なモデル

湊 進

放射線地学研究所



1. はじめに

地表面近傍でラドン濃度を測定すると24時間周期の変動が見られる。晴天日は特に変動巾が大きい。日の出のころに極大値を、日没あたりで極小値を示す。

本研究では非降水時の大気境界層内における日周変動を説明する比較的簡単なモデルを提案する。公刊されているいくつかの実験結果と比較して、このモデルの利用可能性を検討する。

2. 着想

図1の上段は大気境界層内の温位鉛直分布の時間変化の例である¹⁾。6時の分布では、高度500m付近より下層に逆転層が見られる。日の出により地面が加熱されると、大気は

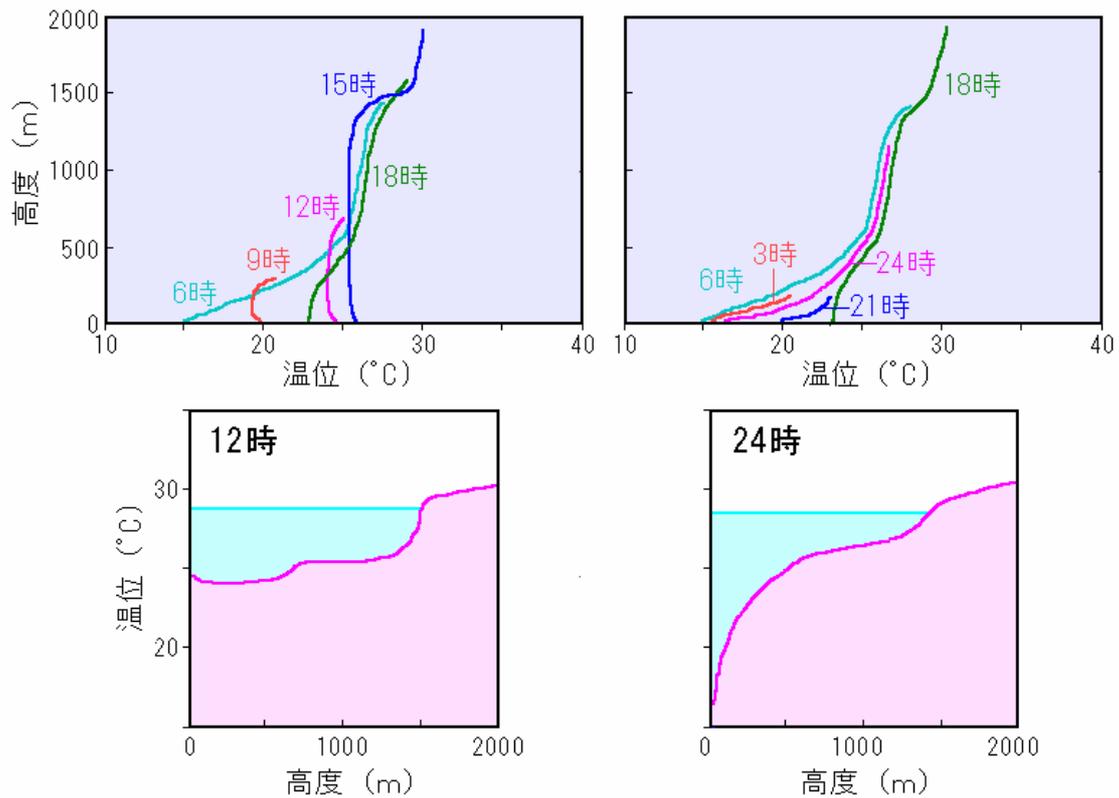


図1 春分秋分のころの大気境界層内の温位

下層から温度が上昇しはじめる。その結果、鉛直方向によく混合され、ほぼ等温位の大気混合層が形成される。時がたつにつれ混合層が発達していく。日没になると温位は下層で下がりはじめ、徐々に逆転層の厚みが増す。

図 1 の上段の図を回転させたのが下段の図である。温位曲線を器に見立てて、そこに水が満たされているとしよう。各時刻における水量は同じとする。つまり水の湧出率と器からの漏洩率+蒸発率は平衡していると仮定する。この場合の各高度での水深（水面の高さと器の高さの差）がラドン濃度に対応すると考えるのである。高度が低いほど水深が深く、高いほど浅い。これはラドンの鉛直分布の傾向を表している。

図 2 は地表面近傍での模式図である。各時刻について図 1 下段の操作を行うと水深が図 2 のそれぞれのラドン濃度に対応していることが分かる。

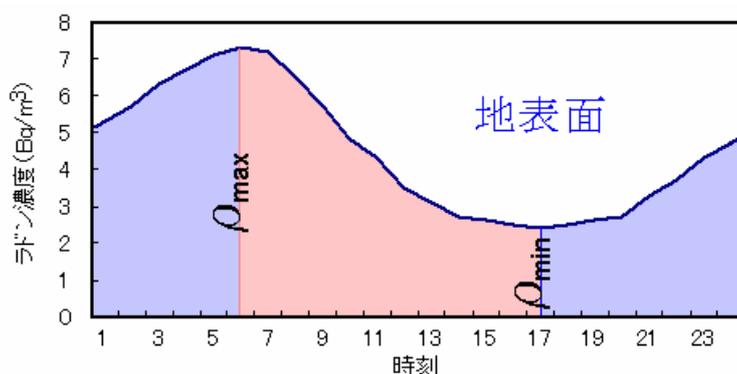


図2 地表面におけるラドン濃度の日周変動

定式化しやすいように図 1 上段を更に単純化した形にしておく。図 3 がそれである（以後の説明のため回転してある）。18時から6時までの温位勾配は同じであるとしている。

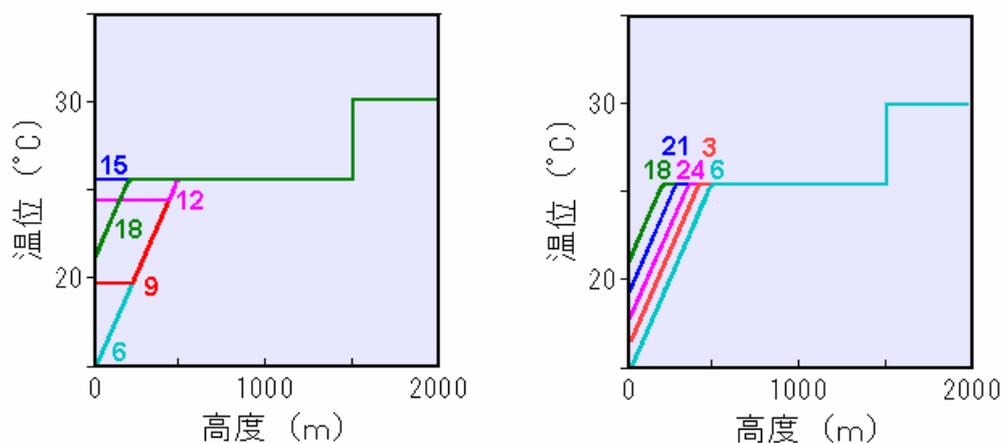


図3 更なるモデル化

図 3 は春分秋分のころの分布であった。しかし、以下のモデルではどの季節にも適用できるように接地逆転層厚最大時に現れる地表面近傍でのラドン濃度の最大値 (ρ_{max}) を図 3 の 6 時に、混合層厚最大時に出現する地表面での最小値 (ρ_{min}) を 15 時の分布に対応させる。

3. 定式化

図1と図3でラドン濃度を水深に例えることにより温位分布との対応が理解できた。ラドン濃度を定量的に表現するには温位の替わりになる概念を導入して目盛りを付けねばならない。ここではこれを温位相当ラドン濃度（PTERC）と名付けておく。水深の例えで言えば、RTERCの器にラドンを満たした時、表面の濃度レベルからPTERCを差し引いた値がラドン濃度である。

図4は図3の6時の温位分布である。 H_i は接地逆転層厚最大時の高さ、 H_m は混合層厚最大時の高さである。地表面近傍でのラドン濃度最大時の地表面でのPTERCを0とする。 L_m は混合層のみが存在する時（図3の15時相当）のPTERCである。このときの混合層内のラドンの総量は

$$A_{BL} = \rho_{\min} H_m \quad (1)$$

である。

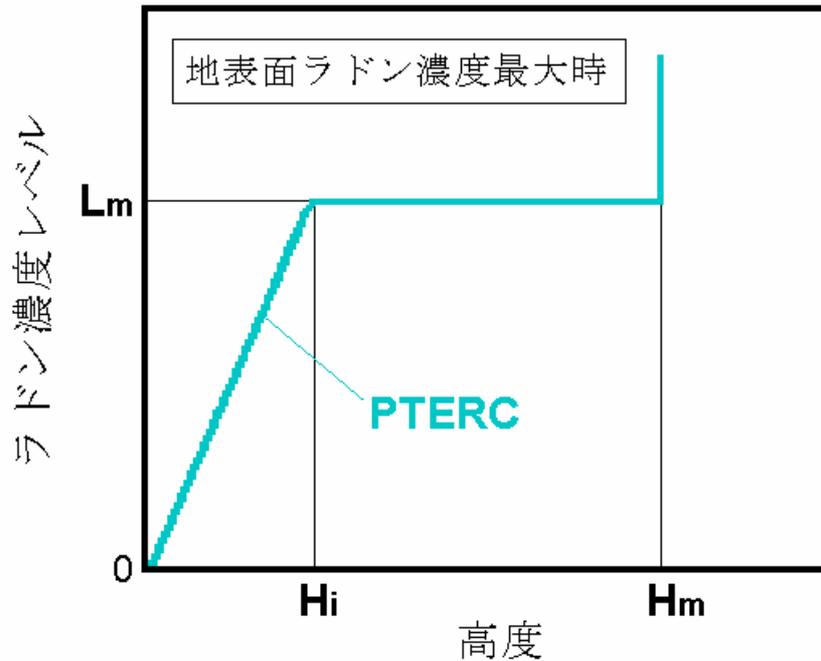


図4 温位相当ラドン濃度（PTERC）

3.1 混合層のみが存在するときの温位相当ラドン濃度（PTERC） - L_m

ラドン濃度最大時もラドンの総量は同じなので

$$\frac{L_m H_i}{2} + (\rho_{\max} - L_m) H_m = A_{BL} = \rho_{\min} H_m$$

$$\therefore L_m = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{H_m - \frac{H_i}{2}} \quad (2)$$

3.2 最大混合層厚 - H_m

混合層の高さは次式により日射量 (i) と関係づけることができる²⁾。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{a}{H} i \quad (3)$$

ここで a は定数である。

I を日の出から日没までの積分日射量とすると (3) 式より次を得る。

$$H_m = 373\sqrt{I} \quad (4)$$

ただし H_m の単位は m 、 I は MJ/m^2 である。名古屋における 1989 年 4 月～1990 年 3 月までの非降水時の日射量の月間平均値で計算した H_m と同時期の R_{min} の相関から次式を得た (図 5 参照)。ただし 5～9 月の海方向から風が吹く時刻のデータは除いてある。

$$H_m = -226\rho_{min} + 2000 \quad (5)$$

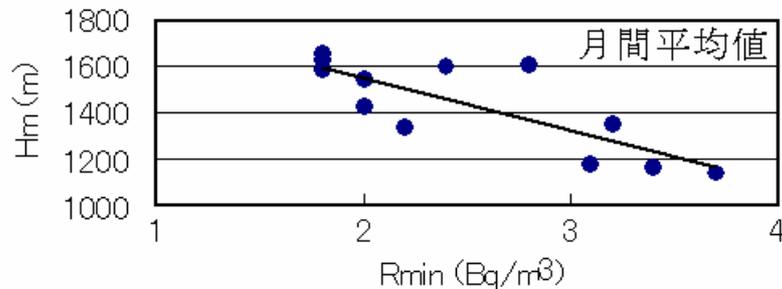


図5. ラドン濃度最小値と混合層高度

本来ならば (1) 式より $H_m \propto 1/\rho_{min}$ なる形を採るべきであるが、(5) 式の形のほうが相関が良いのでこちらを選んだ。

3.3 最大接地逆転層厚 - H_i

図 4 においてラドン濃度位の勾配を ϵ とすると

$$H_i = \epsilon L_m \quad (5)$$

(2) (5) 式より

$$H_i^2 - 2H_m H_i + 2\epsilon(\rho_{max} - \rho_{min})H_m = 0$$

$$\therefore H_i = H_m \left(1 \pm \sqrt{1 - 2\epsilon \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{H_m}} \right) \quad (6)$$

物理的要請に基づいて (6) 式における \pm は負号を採る。

さて問題は ϵ の値であるが、ここではワンガラ実験データに基づくシミュレーション結果の当てはめにより決める。Vinuesa, Basu and Galmarini³⁾はオーストラリアの乾燥地帯の平坦地ワンガラで行われた気象因子の観測実験に乱流輸送計算用のコード、Large-Eddy Simulation (LES)を適用してラドンの鉛直分布を計算した。結果を図 6 に示す。

この図から

$$=75 \text{ (m per Bq/m}^3\text{)} \quad (7)$$

を得る。

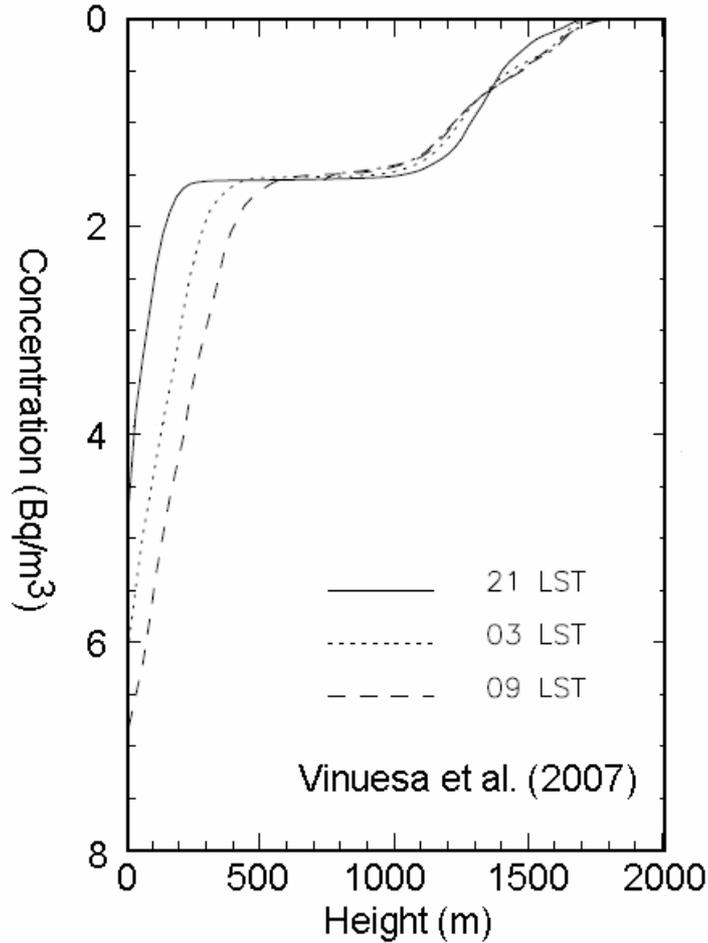


図6. ワンガラ実験データに基づくシミュレーション

3.4 ラドン濃度

温位相当ラドン濃度 (PTERC) の模式図を図7に示す。1日を2つの時間帯に別けて方程式を導出する(図2および図3も参照)。

PTERCの器にラドンを満たした時の表面の濃度レベルを L_s で、PTERCのレベルを $L(h)$ で表すと時刻 t でのラドン濃度の鉛直分布は

$$R(t, h) = L_s(t) - L(t, h) \quad (8)$$

ただし上式にはすべての項に t が入っているので、以後 t を省いて記述する。

PTERCの最小値を L_B で表記する(地表面近傍でのラドン濃度最大値出現時は $L_B=0$)。また、地表面でのラドン濃度は

$$R(0) = L_s - L_B \quad (9)$$

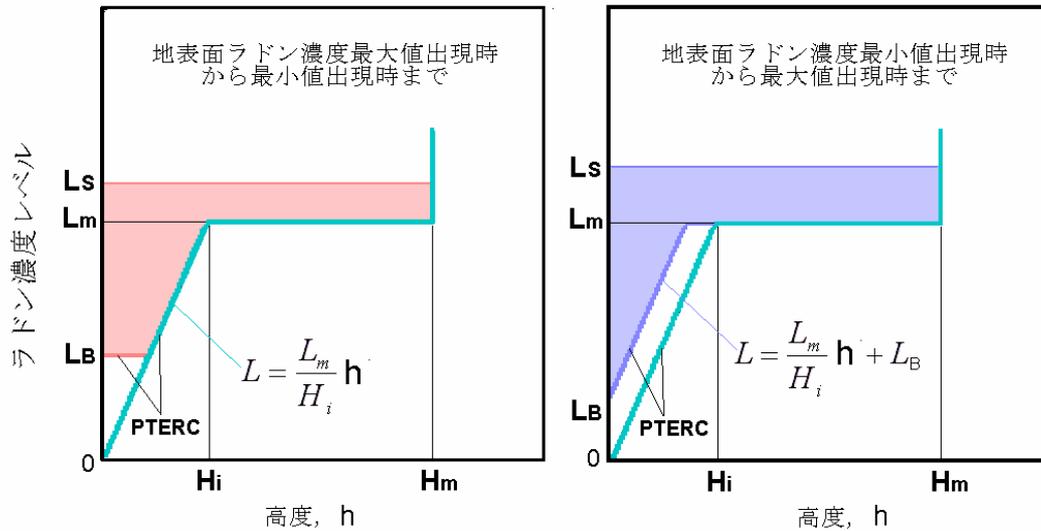


図7 温位相当ラドン濃度 (PTERC) の鉛直分布

(A) 地表面ラドン濃度最大値出現時から最小値出現時まで

大気境界層内のラドンの総量を A_{BL} とすると (1) (9) 式より

$$\rho_{\min} H_m = (L_s - L_m) H_m + \frac{1}{2} \left(H_i + \frac{L_B}{L_m} H_i \right) (L_m - L_B)$$

$$aL_B^2 + bL_B + c = 0$$

$$\therefore L_B = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (9)$$

ただし

$$a = \frac{H_i}{L_m}, \quad b = -2H_m, \quad c = -2\{R(0) - \rho_{\min} - L_m\}H_m - L_m H_i \quad (10)$$

(9) 式における \pm は物理的要請により負号を採る。

以上まとめると

$$L(h) = \begin{cases} L_B & (0 \leq h < \frac{L_B}{L_m} H_i) \\ \frac{L_m}{H_i} h & (\frac{L_B}{L_m} H_i \leq h < L_m) \\ L_m & (H_i \leq h) \end{cases} \quad (11)$$

(B) 地表面ラドン濃度最小値出現時から最大値出現時まで

大気境界層内のラドンの総量を A_{BL} とすると (1) (9) 式より

$$\rho_{\min} H_m = (L_S - L_m) H_m + \frac{1}{2} \left(H_i - \frac{L_B}{L_m} H_i \right) (L_m - L_B)$$

$$aL_B^2 + bL_B + c = 0$$

$$\therefore L_B = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (12)$$

ただし

$$a = \frac{H_i}{L_m}, \quad b = 2(H_m - H_i), \quad c = -2\{R(0) - \rho_{\min} - L_m\}H_m + L_m H_i \quad (13)$$

(12) 式における \pm は物理的要請により正号を採る。

以上まとめると

$$L(h) = \begin{cases} \frac{L_m}{H_i} h + L_B & (0 \leq h < (\frac{L_m - L_B}{L_m}) H_i) \\ L_m & ((\frac{L_m - L_B}{L_m}) H_i \leq h) \end{cases} \quad (14)$$

3.5 散逸率

地表面におけるラドンの散逸率は大気境界層内のラドンの総量と自由大気への漏洩率の和である。前者は(1)式により計算できる。後者は以下の手順で近似的に評価する。図8は大気安定度が中立のときの鉛直分布である。

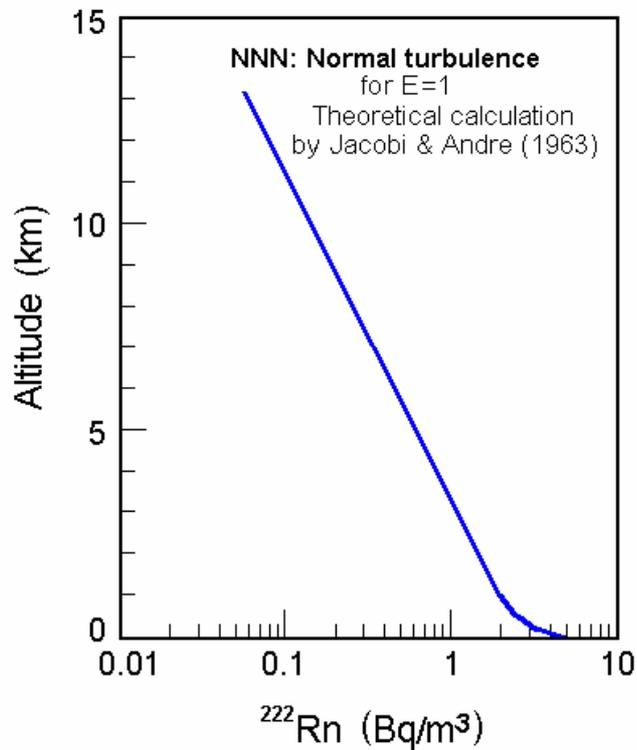


図8 ラドン高度分布の計算値

この図の上空部分の濃度 (C) は次の近似式で表現できる。

$$C = 2.6e^{-0.00029h} \quad (h > 1000m) \quad (15)$$

これを積分すると、

$$F = \int_h^{\infty} 2.6e^{-0.00029h'} dh' = 9000e^{-0.00029h} \quad (16)$$

ここで h には最大混合層厚さを代入する。

4. 計算例

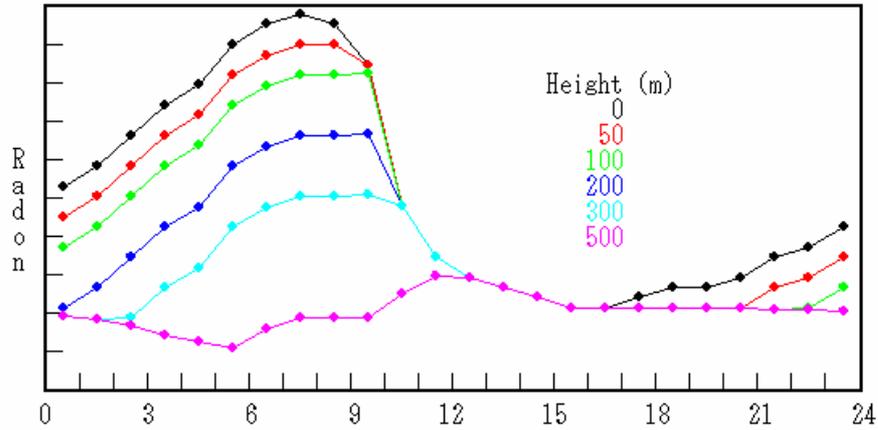
地表面でのラドン濃度の日周データを入力してモデルで計算した例を図 9 に示す。なお PTERC 曲線が市女笠をひっくり返したような形に似ているので、以下これを「市女笠モデル」と呼び、LES 等の他のモデルと区別することにする。

*** ITIME (Calculation of Radon Profiles) ***

Data File Name : EXAMPLE.CSV
 Ground Level Data : Nagoya: Spring 1989

Maximum at surface= 8.2(Bq/m³)
 Minimum at surface= 1.8(Bq/m³)

Exhalation rate= 0.85(atom/cm².s)
 Flux to Free Air= 0.57(atom/cm².s)



Mixed layer depth= 1598(m)
 Inversion layer depth= 592(m)

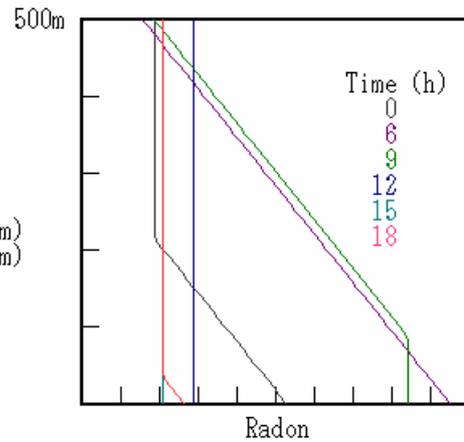


図9. 計算例

5. 他のデータとの比較

5.1 鉄塔観測

平坦地において鉄塔などにより高高度までのラドンの鉛直分布を長期間測定した例は極めて少ない。オランダの Cabauw における 213m 鉄塔での観測はその意味で貴重なデータである⁵⁾。図 10 に比較を示す。両者の一致は満足すべきものである。

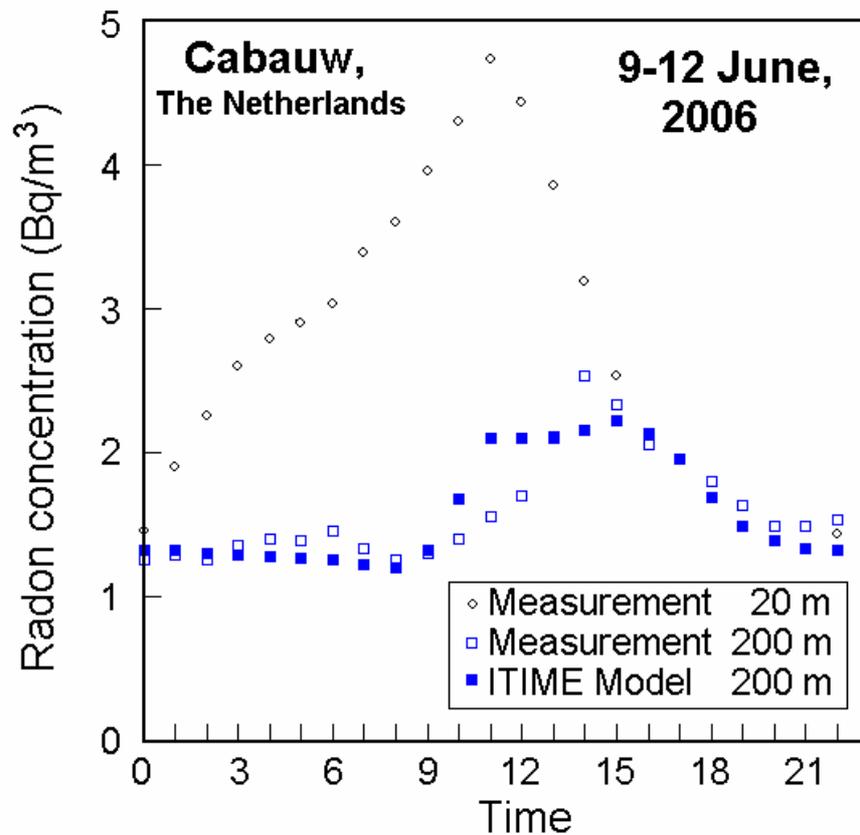


図10. 鉄塔実験と市女笠モデルの比較

5.2 環境線との同時観測

地表面近傍でラドン濃度とラドンから放出される線を同時測定しても同じパターンにはならない。空気中におけるラドンからの線が100m程度の平均自由行程を有するため、上空のラドン分布が影響してくるからである。図11はその例である⁶⁾。

図12にはラドンの鉛直分布が地表面で観測される気中ラドン起因の線量率にどの程度寄与しているか計算したものである。

市女笠モデルでラドンの鉛直分布を推定し、図12の重みを掛けて線測定と比較すれば、間接的にモデルの妥当性を検討していることになる。

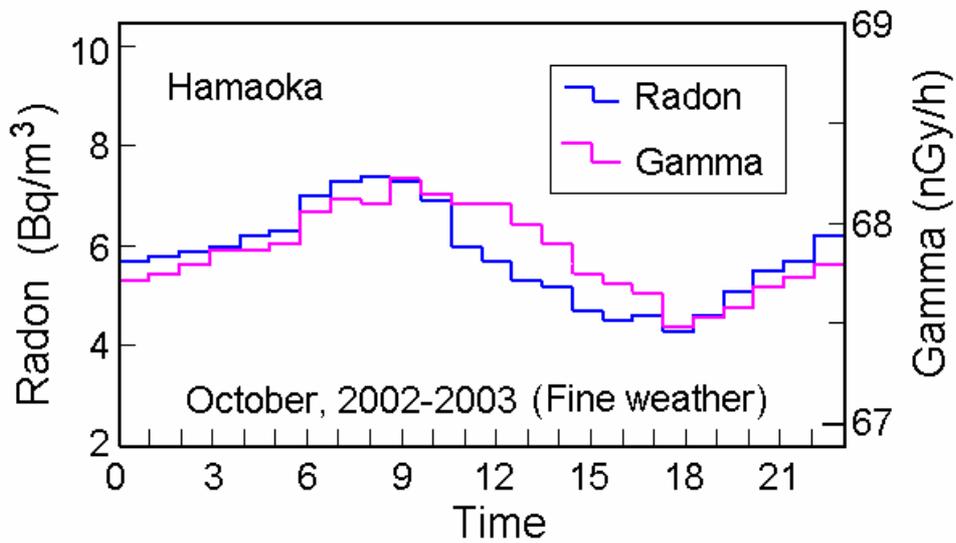


図11 浜岡（静岡）における地表面近傍のラドン濃度と自然環境γ線の日周変動

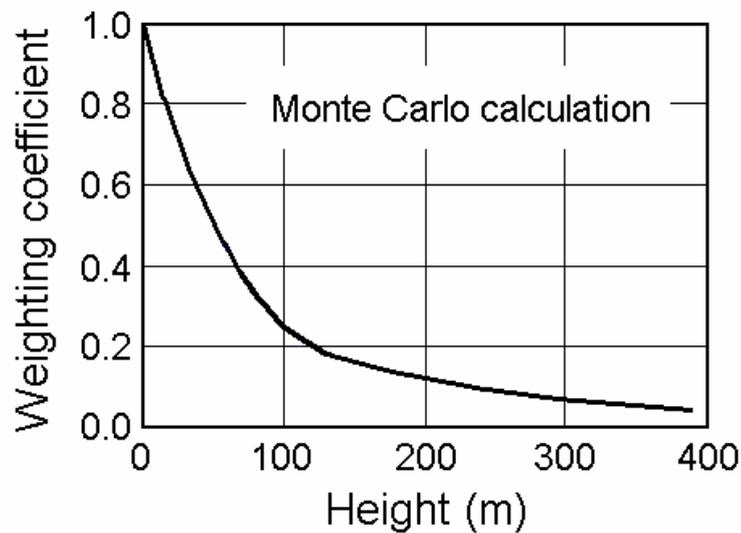


図12 地表面でのラドンγ線量率に対する上空ラドンの寄与率（規格化してある）

Fujinami, Watanabe and Tsutsui⁷⁾の表示法に従って図 11 をヒステリシス・ループで表現したものが図 13 の左側である。時刻も記入してある。また、変数はそれぞれの標準偏差 () で規格化してある。市女笠モデルでラドンの鉛直分布を計算し、図 12 の荷重係数を掛けたものとの相関が図 13 の右側である。

図 14 は舞鶴の例である⁷⁾。浜岡、舞鶴とも荷重係数の効果により相関が向上しているのが認められる。

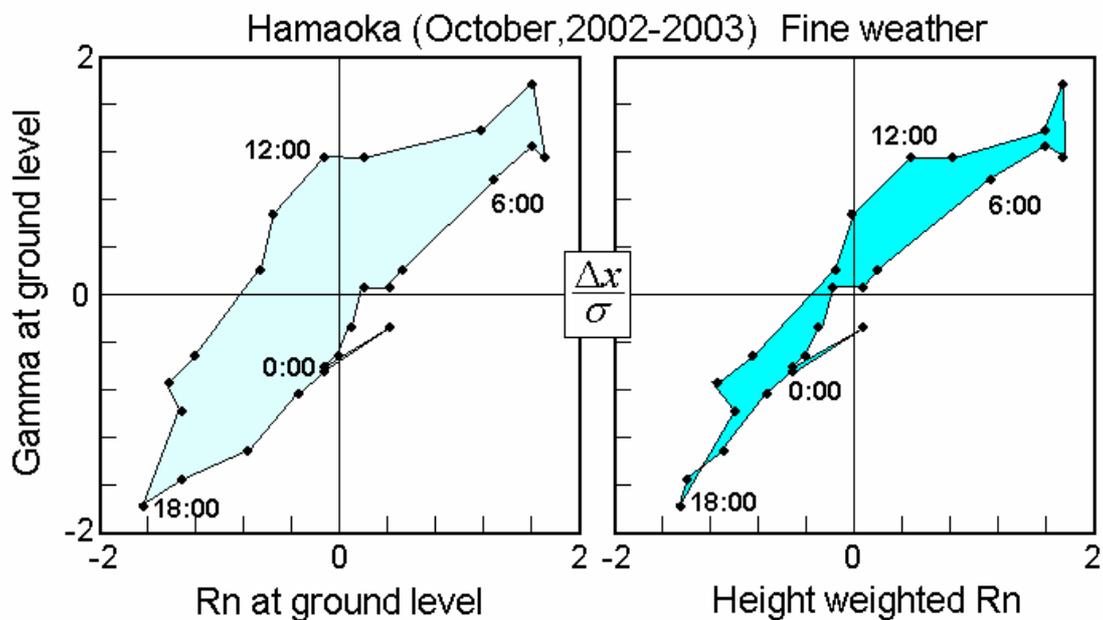


図13 ラドン-γ相関（浜岡）

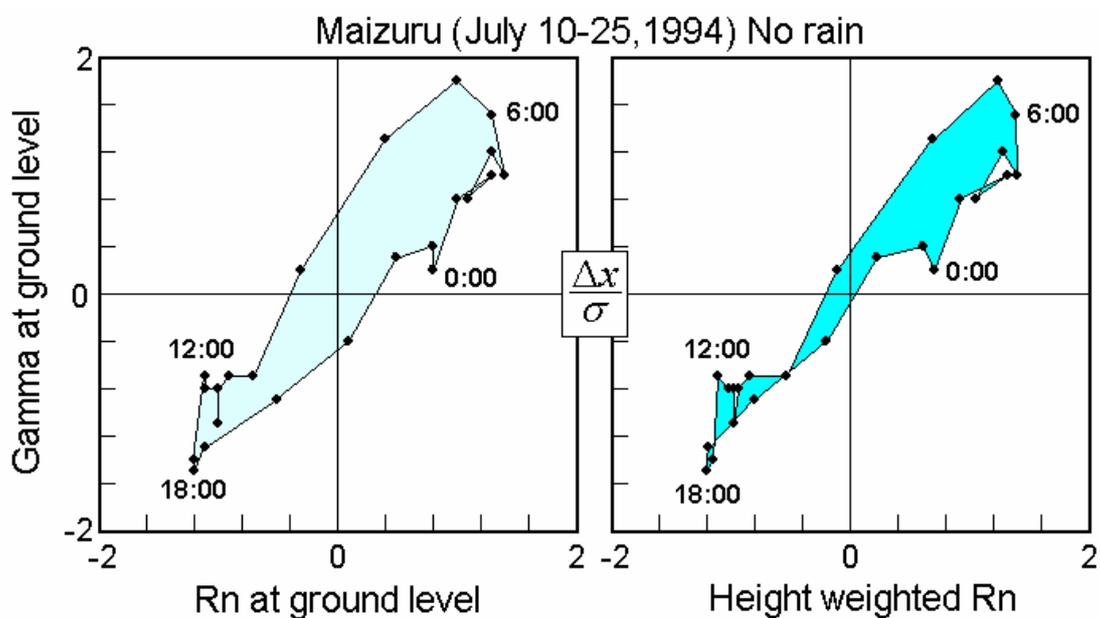


図14 ラドン-γ相関（舞鶴）

以上 3 例の比較からは市女笠モデルは妥当なものであると判断できる。しかしこのモデ

ルの汎用性を謳うには、より多くの観測事例と比較する必要がある。今後の鉄塔観測のデータの蓄積を待ちたい。

補遺

最後に比較データの少なさを補う意味でCO₂のデータを示す。CO₂の鉄塔観測データはラドンに比べて多い。ここでは Wang et al.⁸⁾の論文を紹介する。ウィスコンシン州のテレビ塔での測定である。

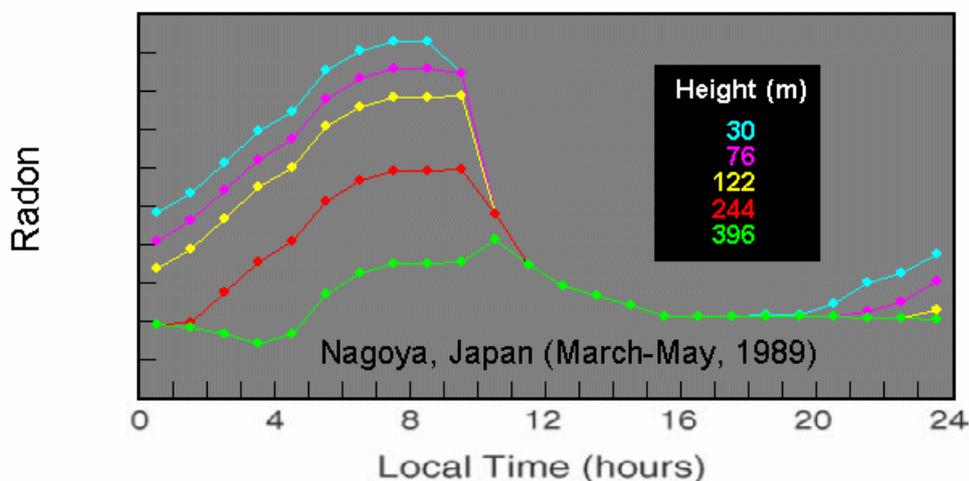
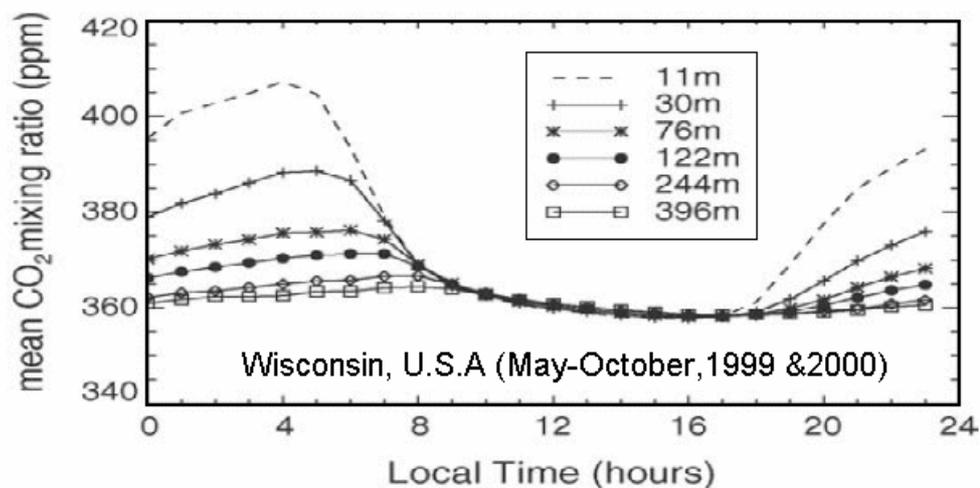


図15. CO₂とラドンの比較

比較のために図 9 の計算で高度をウィスコンシン・データに入れかえて計算してみた。両者の日周変化のパターンは酷似している。これは、ラドンの定式化において決定した幾つかのパラメータをCO₂用に変更すれば、市女笠モデルがCO₂にも応用可能であることを示唆している。CO₂以外にも大気境界層で関心の持たれている気体類は多い。モデルの改良作

業とともに応用分野を広げていくことが望まれる。

文 献

- 1) 近藤純正 (2000) 「地表面に近い大気の科学」、東京大学出版会。
- 2) 湊 進 (1984) 自然環境ガンマ線変動シミュレーション用のモデル、*名古屋工業技術試験所報告*, **33**: 246-258.
- 3) Vinuesa, J.-F., Basu, S., Galmarini, S. (2007) The diurnal evolution of ^{222}Rn and its progeny in the atmospheric boundary layer during the Wangara experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 5003-5019.
- 4) Jacobi, W., Andre, K. (1963) The vertical distribution of radon 222, radon 220 and their decay products in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **58**, 3799-3314.
- 5) Vermeulen, A.T. (2006) Continuous high-precision tall tower observations of greenhouse gases, Final Report, ECN-E 07-052 (<http://www.chiotto.org>).
- 6) 吉田秀行、息 明雄、伊吹裕子、五島廉輔 (2005) 静岡県浜岡地域の空間線量率の季節変動とその要因、*RADIOISOTOPES*, **54**, 123-137.
- 7) Fujinami, N., Watanabe, T., Tsutsui, T. (2005) Looping variation of correlation between radon progeny concentration and dose rate in outdoor air, *RADIOACTIVITY IN THE ENVIRONMENT*, **7**, 284-289.
- 8) Wang, W., Davis, K., Cook, B., et al. (2005) Surface layer CO_2 budget and advective contributions to measurements of net ecosystem-atmosphere exchange of CO_2 , *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**, 202-214.