

資 料



宇宙線測定データを解析して推定した コンクリート製天守閣の重量

湊 進[†]

放射線地学研究所

461-0024 愛知県名古屋市東区山口町9-6

[†]willow@sf.starcat.ne.jp

2019年1月31日 受付

2019年4月11日 受理

鉄筋コンクリート製の25の天守閣内でNaI(Tl)シンチレーション・スペクトロメータにより宇宙線の線量率を測定した。天守閣の形を多重円柱で近似し、天守閣内線量率と屋外線量率の比から天守閣の高密度を算出した。これに体積を掛けて重量を求めた。天守閣ごとの解析に必要な標高、延床面積、体積、屋外線量率、天守閣内線量率及び対応する高密度と重量を示して一覧表とした。他のモデル計算と比較して本報告の計算結果の妥当性を示した。

Key Words: cosmic ray, dose rate, NaI(Tl) scintillation detector, concrete, castle tower, bulk density, weight

1. はじめに

全国のコンクリート製天守閣（以下「天守」と略記）における各階の床面積や高さなどの寸法データは多くの場合、城郭の管理担当部署に問い合わせることにより入手可能である¹⁾。しかし重量に関しては把握している当該部署がほとんどなく、関連文献も極めて少ない。ただし、本論文中の重量とは質量のことを指す。

建造物の重量は耐震診断や解体時の廃材量の推定に必須のデータである。また、歴史的建造物の移動（曳家）にはその重量を知ることが最も重要である。

本報告では天守における宇宙線線量率の測定値と外形から高密度を算出して重量を推定する。NaI(Tl)シンチレーション・スペクトロメータによる宇宙線測定では、通常寸法の検出器を用いる場合30分から1時間程度の測定時間で十分な計数の精度を確保できる。本研究で示す方法が確立されれば一般のコンクリート製建築物にも簡便推定法として応用ができる。また、

設計図の残っていない古代のコンクリートや石造りの建造物に対する重量推定も可能となる。

2. 解析法

本研究では図1に示す多重円柱モデルを用いる。各階の床の面積と等しい円とその階の高さで各円柱を表現する。

屋外の宇宙線による空気吸収線量率（以下「線量率」と略記） D_0 (nGy/h) は次式で表される。

$$D_0 = C_\mu \mu_0 + C_E E_0 \quad (1)$$

添字 μ 及び E はそれぞれ μ 粒子（硬成分）及び電子（軟成分）を表す。 μ_0 及び E_0 は基準値であり、この研究では名古屋の海面レベルの値を使う²⁾。それぞれ24.0、及び5.2(nGy/h)である。 C_μ 及び C_E は地磁気緯度と標高及び太陽活動度により異なる定数である。EXPACSプログラム³⁾に測定地の緯度、経度、標高及び測定年月日を入力して μ 粒子と電子による屋外線量率を求める。そして μ_0 及び E_0 と比較して C_μ 及び C_E を得る。

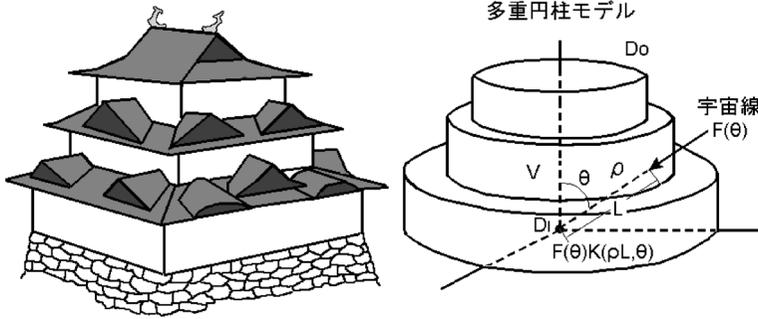


図1 天守閣に対する多重円柱モデル

解析モデルに従って(1)式第1項及び第2項をより詳しく表現すると、

$$D_0 = 2\pi \int_0^{\pi/2} \{C_{\mu}F_{\mu}(\theta) + C_E F_E(\theta)\} \sin \theta d\theta \quad (2)$$

ここで θ は入射宇宙線の天頂角であり、 $F_{\mu}(\theta)$ 及び $F_E(\theta)$ は単位立体角当たりの線量率である。これらは $\mu_0 (=24.0\text{nGy/h})$ 及び $E_0 (=5.2\text{nGy/h})$ で規格化されており、その式の形は文献^{4,5)}に記載されている。

宇宙線測定を実施する階(測定階)の中央における天守内線量率 $D_I(\text{nGy/h})$ を次式で表す。

$$D_I = C_{\mu}\mu_I + C_E E_I \quad (3)$$

その詳細表現は

$$D_I = 2\pi \int_0^{\pi/2} \{C_{\mu}F_{\mu}(\theta)K_{\mu}(\rho L, \theta) + C_E F_E(\theta)K_E(\rho L, \theta)\} \sin \theta d\theta \quad (4)$$

ここで $\rho(\text{ton/m}^3)$ は天守の高密度、 $L(\text{m})$ は通過距離である(図1参照)。 $K(\rho L, \theta)$ の式も文献^{4,5)}に記載されている。

天守の重量は高密度 ρ に体積 $V(\text{m}^3)$ を乗ずることによって得られる。 ρ の求め方は以下の通りである。測定により得られる値は D_I なので、 ρ をパラメータとして式(4)で多重円柱モデルを用いて数値計算を繰り返し、実測値 D_I と一致するときの値を測定対象天守の ρ と定める。また、そのときの重量を $W_{MC}(\text{ton})$ と表記する。

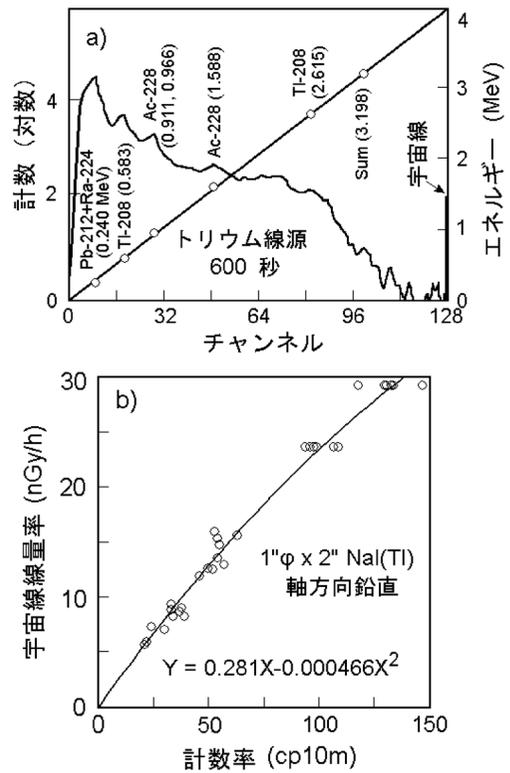


図2 a) トリウム線源によるエネルギー校正と b) 計数率-線量率曲線

3. 測定結果と検討

屋内における宇宙線線量率測定法についてはこれまで幾つか報告がある^{2,6-9)}。本報告では1"φ×2" NaI (TI) シンチレーション・スペクトロメータ(浜松ホトニクス社製 C3475)を用いて4MeV以上の計数率を測定する。図2a)に示すようにトリウム線源を用いてゲイン調整

表1 計算条件と結果

城名	記号	計算条件				計算結果			
		標高 h (km)	延床面積 A (m ²)	体積 V (m ³)	屋外線量率 D ₀ (nGy/h)	天守内線量率 D _I (nGy/h)	嵩密度 ρ (ton/m ³)	重量 W _{MC} (ton)	
吉田城	Yd	0.010	223	817	28.8	21.3	0.421	344	
岩崎城	Is	0.056	257	725	29.0	19.3	0.825	598	
浜松城	Hm	0.011	276	908	28.8	22.7	0.264	240	
墨俣城	Sm	0.007	304	966	28.9	19.3	0.739	716	
高島城	Ts	0.763	354	1640	35.3	21.4	0.711	1166	
大垣城	Og	0.009	369	1279	28.7	20.8	0.423	541	
旭城	Ah	0.065	461	1565	28.1	20.8	0.428	670	
岐阜城	Gf	0.319	462	1626	31.2	18.5	0.861	1400	
清州城	Ks	0.008	537	1865	28.9	21.5	0.354	660	
小牧城	Km	0.086	630	2693	29.3	21.8	0.302	814	
岸和田城	Kw	0.011	758	3942	28.7	21.3	0.261	1029	
岡崎城	Ok	0.024	807	3201	28.9	19.7	0.453	1450	
和歌山城	Wy	0.009	814	4620	28.7	19.9	0.386	1783	
長浜城	Nh	0.091	1078	4913	29.3	20.0	0.388	1906	
若松城	Wm	0.232	1230	5493	31.0	21.3	0.318	1747	
広島城	Hs	0.007	1317	5564	28.7	20.1	0.339	1886	
岡山城	Oy	0.011	1370	3984	28.7	19.4	0.493	1964	
福山城	Fy	0.023	1390	6749	28.8	17.3	0.595	4016	
島原城	Sb	0.025	1416	6152	28.5	18.6	0.466	2867	
小田原城	Ow	0.012	1452	6049	28.7	19.3	0.391	2468	
小倉城	Kk	0.009	1844	8678	28.6	18.6	0.426	3697	
伊勢安土城	IA	0.019	2350	11303	28.7	17.7	0.463	5233	
勝山城	Ky	0.178	3021	22725	30.3	17.0	0.434	9863	
大阪城	Os	0.035	5071	24336	28.8	15.0	0.541	13166	
名古屋城	Ny	0.017	5356	24788	28.8	18.2	0.330	8180	

をし、最大エネルギーを4 (MeV) に設定する。本器は最大エネルギーを越える放射線はすべて最終チャンネルにまとめて計数される設計になっている。計数率から線量率への換算は次のようにした。以前、名古屋市営地下鉄の多くのホーム及び屋外で線量率を測定したことがある¹⁰⁾。今回、同じ地下鉄ホームで円柱型検出器の軸方向を鉛直にして測定した計数率と比較して線量率への換算係数を求めた。図2b) に校正曲線を示す。

本研究では測定階の中央部で測定を6回行い、その平均を採った。ここでは石垣天端がその階の床と窓の間に位置している階を測定階としている。

天守の規模は各階の床面積の総和である延床

面積で表現される¹⁾。表1は天守閣ごとの解析に必要なデータ及び計算結果を延床面積の順に示したものである。測定誤差を全計数に対する標準偏差の比、すなわち変動係数で表現すると、最少が浜松城の4.16(%)、最大が大坂城の5.30(%)と評価された。

図3は延床面積、A、に対する宇宙線線量率の天守内/屋外比、 D_I/D_0 、の関係である。延床面積が大きいほど天守内/屋外比は低い傾向が見て取れる。同じ延床面積であってもバラツキが大きいのは天守の嵩密度の違いによると考えられる。図には特徴的な天守の記号も付す。天守内/屋外比の高い浜松城(Hm)や岸和田城(K_w)は嵩密度が小さいことが表1よりわかる。同じ延床面積でも天守内/屋外比の低い岩崎城

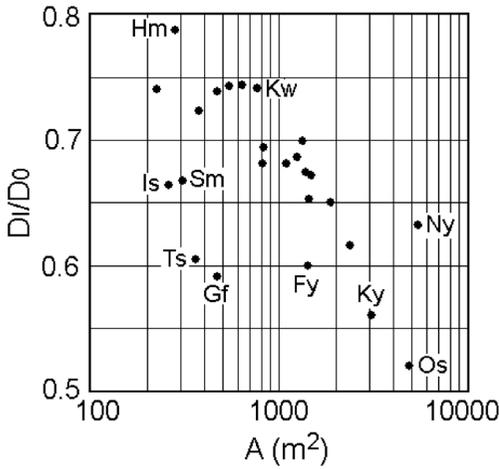


図3 延床面, A, と天守内/屋外線量率比, D_I/D_0 , の関係

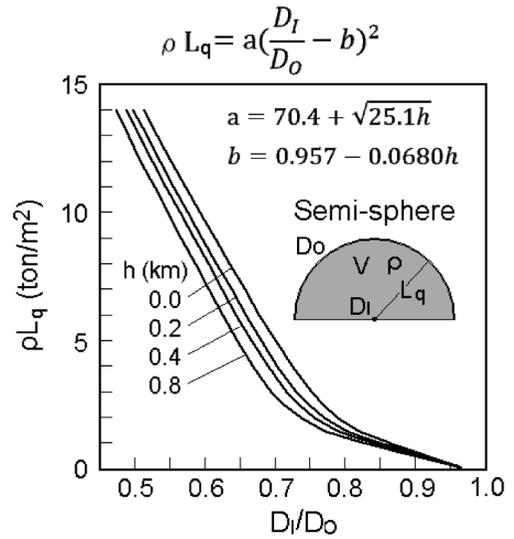


図5 天守閣に対する半球モデル

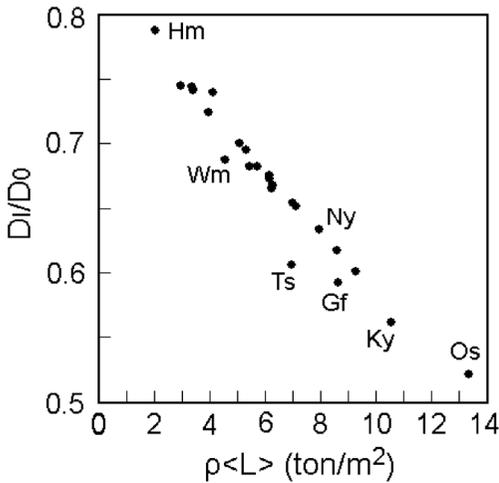


図4 高密度×宇宙線通過距離の平均値, $\rho \langle L \rangle$, と天守内/屋外線量率比, D_I/D_0 , の関係

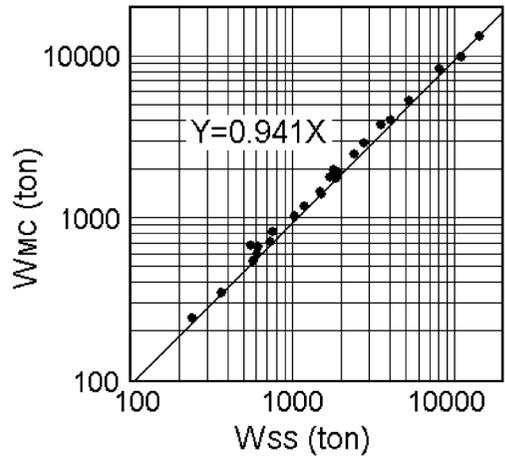


図6 半球モデルより推定した重量, W_{SS} , と多重円柱モデルより推定した重量, W_{MC} , の比較

(Is), 墨俣城 (Sm), 高島城 (Ts), 岐阜城 (Gf) 及び福山城 (Fy) は高密度が大き。式(4)に示されているように天守内/屋外比は ρL の関数である。式(2)を用いて平均の L を次式で計算することにより

$$\langle L \rangle D_0 = 2\pi \int_0^{\pi/2} L \cdot \{C_\mu F_\mu(\theta) + C_E F_E(\theta)\} \sin \theta d\theta \quad (5)$$

天守内/屋外比との関係を見たものが図4である。両者のバラツキは小さい。この中で若松城 (Wm), 高島城 (Ts), 岐阜城 (Gf) 及び勝山城

(Ky) は全体の傾向から外れる。その理由は天守内/屋外比が地磁気緯度よりも標高(表1参照)に大きく依存することによる。これについては次節で詳しく述べる。

ここまで宇宙線線量率の測定値から多重円柱モデルに対する数値計算で天守の重量を求めた。この方法の妥当性を確かめるためには、式(4)の精度とモデルの適切さが問題となる。前者については文献^{5, 11-13)}において確認されているので、ここでは後者について検討する。

3.1 半球モデルによる理論値との比較

多重円柱モデルによる数値計算のプログラミングに瑕疵がないかを調べるために、ここではより簡単なモデルで理論的に重量を求めて両者を比較してみる。嵩密度 ρ 、半径 L_q の半球において式(2)及び式(4)により名古屋の地磁気緯度に対して計算すると、 ρL_q (ton/m²)は

$$\rho L_q = a \left(\frac{D_I}{D_0} - b \right)^2 \quad (6)$$

という経験式で表現できる(図5参照)。ここで a 及び b は標高 h (km)の関数であり

$$\begin{aligned} a &= 70.4 + \sqrt{25.1h} \\ b &= 0.957 - 0.0680h \end{aligned}$$

である。 $h=0$ の場合、 $D_I/D_0 > 0.8$ では主に軟成分が吸収される範囲であり、0.8以下は硬成分のみの範囲である。

ρL_q が h により異なるのは、式(2)及び式(4)の軟成分と硬性分の係数の比、 C_E/C_μ が標高により変化するからである。たとえば名古屋の地磁気緯度の場合、 $h=0, 0.2, 0.4$ 、及び 0.8 (km)に対して C_E/C_μ は0.204, 0.240, 0.265、及び0.303と算出される。図4において若松城(Wm)、高島城(Ts)、岐阜城(Gf)及び勝山城(Ky)が全体の傾向から若干外れたのは標高差によるということが理解できる。

半球の体積を多重円柱モデルの体積 V (m³)に等しいと置くと

$$V = \frac{2\pi}{3} L_q^3 \quad (7)$$

なので、半径 L_q は

$$L_q = \left(\frac{3}{2\pi} V \right)^{1/3} \quad (8)$$

である。よって半球の重量の理論値 W_{SS} (ton)は式(6)、(7)、(8)より

$$W_{SS} = \rho V = \rho L_q \frac{V}{L_q} = \left(\frac{2\pi}{3} \right)^{1/3} V^{2/3} \rho L_q \quad (9)$$

となる。図6が両者の相関である。勾配は0.94であり1に近い。従って実測値と多重円柱モデルから導出する重量の推定法は半球モデル理論により支持されていると言ってよい。また、半球モデルによる計算(図5参照)は名古屋の地磁気緯度に対して行われたが、図6は全国の結果と比較しても良い相関になることを示している。

半球モデルを用いる利点は次の通りである。屋外線量率 D_0 に対してはEXPACS値が必要なく、屋外で測定した値を利用すればよい。また、この方法では D_I/D_0 と天守の体積及び標高データのみで重量を概算することができ、前節で述べたような ρ をパラメータとして数値計算を繰り返す必要がない。

3.2 天守重量の文献値との比較

天守の重量に関する文献値と比較してみる。文献¹⁴⁾によれば、大阪城の鉄筋コンクリートの重量は11000(ton)である。本研究で得た重量は13000(ton)である。また、文献¹⁵⁾によれば、名古屋城の鉄筋コンクリート重量は8300(ton)である。本研究の結果は8200(ton)である。さらに、文献¹⁶⁾によれば高島城の鉄筋コンクリート重量は1200(ton)であり、本研究では1166(ton)である。文献値は石垣中にある基礎部分も含めた鉄筋コンクリートの総重量であり、それ以外の瓦などの構造物や天守内の積載物は含まれていない。一方、本研究における測定には石垣天端の階とその上のすべての構造物・積載物が含まれている。そのため両者の直接の比較は意味をなさないが、少なくとも両者がほぼ比例関係にあることは確認できる。

3.3 鉄筋コンクリート製研究棟での比較

ここまでは屋外、天守内それぞれの線量率と天守の形状から嵩密度を求めて重量を算出した。その方法の妥当性を確かめるために、ここでは長谷川ら¹⁷⁾により提案されている重量評価方式と比べてみる。

長谷川らは鉄筋コンクリート製の一般的な建

物について床面積当たりの地上分の重量を推計している。これによると延床面積 $A(\text{m}^2)$ の建物の重量 $W(\text{ton})$ は次式で表現できる。

$$W = cA \quad (10)$$

ここで c は延床面積から重量への換算係数である。長谷川らによれば c の値は一般住宅に対して 1.20, ビル 1.79, 学校 5.45 (ton/m^2) である。種別により係数が大きく異なるのは, 床面積当たりの平均の体積と嵩密度が異なるためと考えられる。

6階建ての直方体研究棟 ($15 \times 33 \times 24\text{m}$) の1階中央で線量率を測定してその嵩密度を推定した例がある¹¹⁾。線量率は $16.4(\text{nGy}/\text{h})$ であった。この値に対して直方体均質モデル¹⁸⁾で嵩密度を計算すると $0.50\text{ton}/\text{m}^3$ となった。これに体積を掛けると $5900(\text{ton})$ となる。上述の長谷川らのビルに対する換算係数を用いると $1.79 \times 15 \times 33 \times 6 = 5320(\text{ton})$ が得られる。

ここで本報告において使用している円柱モデルではどのような結果になるかを調べておく。研究棟の上面及び下面の面積と等しい円柱で計算すると上述の線量率に対して $5600(\text{ton})$ を得る。これは直方体モデル計算結果と長谷川らの換算係数計算の間の値になる。

さらに3階建ての直方体研究棟 ($17 \times 94 \times 11\text{m}$) に対しても線量率を測定して嵩密度を推定した¹¹⁾。線量率は $18.2(\text{nGy}/\text{h})$ であった。この値に対して直方体均質モデルで嵩密度を計算するとやはり $0.50(\text{ton}/\text{m}^3)$ となった。これに体積を掛けると $8800(\text{ton})$ となる。上述の長谷川らのビルに対する換算係数を用いると $1.79 \times 17 \times 94 \times 3 = 8600(\text{ton})$ が得られる。円柱モデルで計算すると $8000(\text{ton})$ となり, 両者を下回る。今後, 直方体ビルでの測定例を増やして三者を比較する必要がある。

宇宙線線量率からモデル計算した重量の値は長谷川らの推計値と比較的よく一致する。すなわち宇宙線測定による重量推定法の妥当性を立証するものである。次節で天守に対する換算係数の評価を試みる。

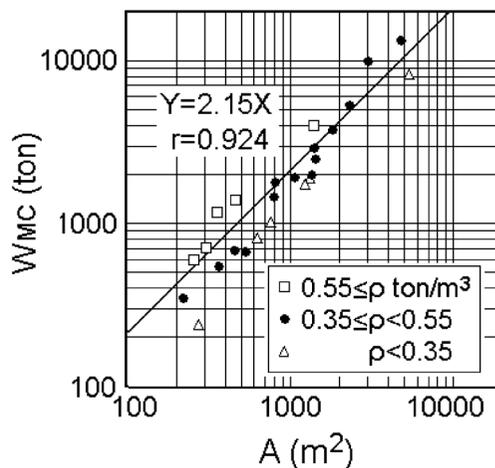


図7 天守の延床面積, A , と多重円柱モデルより推定した重量, W_{MC} , の関係。図中の r は相関係数

3.4 天守の延床面積-重量換算係数

ここで長谷川ら¹⁷⁾の手法にならって天守の延床面積から重量への換算係数を求めてみる。図7は多重円柱モデル計算による重量, W_{MC} , と延床面積, A , との関係である(表1参照)。データは多少ばらついているが天守に対する換算係数 c は $2.15(\text{ton}/\text{m}^2)$ と評価される。これは3.3節の種別において, ビルよりは幾分大きく, 学校よりはかなり小さな値である。データがばらつく理由は, 図7からわかるように嵩密度 ρ が天守ごとに大きく異なるためである。しかし全体としての相関は比較的よい。

4. おわりに

本報告では $1''\phi \times 2''$ の NaI (Tl) シンチレーション・スペクトロメータで1地点あたり1時間の測定を実施した。より大きな検出器を用いればより短時間で測定できる。測定時間が短縮できれば多数点を測定できるため, さらに詳細な情報が得られるであろう。

本報告における検討内容から多重円柱モデルによる推定方法は概ね正しいものと考えられる。今後は推定方法のさらなる高精度化に向け, 測定対象天守の瓦, 鉄骨, コンクリート, セメント, モルタル, 天守内の積載物などの全資材量

を算定し、本方法と比較することが望ましい。

謝 辞

宇陀ジオサークルの池田正氏には岸和田城、和歌山城、岡山城、及び勝山城において、 $3^\circ\phi\times 3^\circ$ NaI (TI) シンチレーション・スペクトロメータで宇宙線線量率の同時測定をしていた。また、核融合科学研究所准教授の赤田尚史氏にも勝山城において同様の測定をしていただいた。それらのデータと比較することにより、本研究での測定精度を確認することができた。記して深く感謝いたします。

文 献

- 1) 湊 進, お城で宇宙線を測る, *Isotope News*, **757**, 66–68 (2018)
- 2) 湊 進, 高森和英, 池辺幸正, $3^\circ\phi$ 球型シンチレーション・カウンターによる屋内宇宙線線量測定法, 名古屋工業技術試験所報告, **32**, 14–25 (1983)
- 3) EXPACS Homepage, “Excel-based program for calculating atmospheric cosmic-ray spectrum”, <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>
- 4) 湊 進, 宇宙線透視像, 放射線, **19**, 49–56 (1992)
- 5) 湊 進, 地下宇宙線強度の経験式について, 放地研特別寄稿シリーズ, SCS-0121, 放射線地学研究所 (2017), <http://www1.s3.starcat.ne.jp/reslnote/>
- 6) Miller, K. M. and Beck, H. L., Indoor gamma and cosmic ray exposure rate measurements using a Ge spectrometer and pressurized ionization chamber, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **7**, 185–189 (1984)
- 7) Lin, P. H., Chen, C. J., Huang, C. C. and Lin, Y. M., Study of the indoor cosmic radiation ionization intensity, *Radiat. Prot. Dos.*, **16**, 329–332 (1986)
- 8) 松田秀晴, 湊 進, 種々の生活環境における自然空間放射線線量率の測定 (第3報) ポータブル型スペクトロメータの諸特性, 名古屋工業技術試験所報告, **40**, 407–416 (1991)
- 9) 長岡 鋭, 森内 茂, 坂本隆一, 斎藤公明, 他, $3^\circ\phi$ 球形 NaI (TI) シンチレーション検出器を用いた屋内宇宙線線量率の簡便測定法, 保健物理, **30**, 9–14 (1995)
- 10) Minato, S., Feasibility study on cosmic-ray nondestructive testing through structural analysis of subway stations, *NDT Int.*, **20**, 231–234 (1987)
- 11) Minato, S., Bulk density estimates of buildings using cosmic rays, *Appl. Radiat. Isot.*, **37**, 941–946 (1986)
- 12) 湊 進, 宇宙線を利用する非破壊計測技術, 放射線, **17**, 60–71 (1991)
- 13) Matsuda, H., Fukaya, M. and Minato, S., Feasibility study on a cosmic-ray level gauge, *Nuclear Geophysics*, **3**, 403–406 (1989)
- 14) 天野光三, 佐崎俊治, 渡辺 武, 北川 央, 他, 昭和の大坂城天守閣の基礎構造について, 土木史研究, **17**, 405–411 (1997)
- 15) 日本共産党名古屋市委員団, 名古屋城天守閣の調査結果, 名古屋市政資料, **187**, p. 39 (2015)
- 16) 今井広亀, 「諏訪高島城」, 諏訪市教育委員会 (1970)
- 17) 長谷川耕平, 谷川寛樹, 橋本征二, 全国の都道府県における地下と地上のマテリアルストックに関する研究, 第36回環境システム研究論文発表会講演集, 303–308 (2008)
- 18) 深谷光春, 湊 進, 各種環境における宇宙線線量率の測定と解析, 名古屋工業技術試験所報告, **37**, 147–156 (1988)

Abstract

Weights of Concrete Castle Towers Estimated from Analyses of Cosmic Ray Measurement Data
Susumu MINATO[†]: Radiation Earth Science Laboratory, 9–6 Yamaguchi-cho, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461–0024, Japan, [†]willow@sf.starcat.ne.jp

Cosmic ray dose rate measurements were performed inside 25 reinforced concrete castle towers using a NaI(Tl) scintillation spectrometer. Approximating the shape of each tower with a multi-cylinder, a bulk density was calculated using inside/outside ratio of dose rate. The evaluated bulk density was multiplied by the volume of the tower to obtain its weight. The data of each tower necessary for analyses were elevation, total floor space, volume, outside and inside dose rates. Those data were listed along with the corresponding calculated bulk density and weight.

(Received January 31, 2019)

(Accepted April 11, 2019)