

資 料



宇宙線測定データを解析して推定した木造天守閣および櫓の重量

湊 進^{1,†}, 池田 正²¹放射線地学研究所, ²宇陀ジオサークル

†willow@sf.starcat.ne.jp

2019年9月21日 受付

2019年11月20日 受理

木造の天守閣13棟及び櫓5基でNaI(Tl)スペクトロメータにより宇宙線の線量率を測定した。天守閣と櫓を多重円筒殻で近似し、屋内線量率と屋外線量率の比から円筒殻の密度と厚さを算出した。この密度に円筒殻の体積を掛けて重量を求めた。解析に必要な標高、延床面積、表面積、屋外線量率、屋内線量率、そして対応する円筒殻の密度と厚さの積及び重量を一覧表にした。他のモデル計算及び重量実測例と比較して本方法の妥当性を示した。

Key Words: cosmic ray, dose rate, NaI(Tl) scintillation detector, wood, castle tower, turret, weight

1. はじめに

前報¹⁾では宇宙線を利用してコンクリート製の天守閣(以下「天守」と略記)の重量を推定する方法とその結果について述べた。今回は木造城の重量について報告する。ただし、本論文での重量とは質量のことを指す。

耐震診断などに必要な建築物の重量は、屋根、壁、床などの構成部材単位の個別重量を集計して評価するのが一般的である。しかしこの方法で城郭のような大型建築物を評価するには、煩瑣な手順とかなりの誤差を覚悟しなければならない。

本研究では城内においてNaI(Tl)シンチレーション・スペクトロメータにより宇宙線線量率を測定し、城の外形から重量を推定する方法を採る。通常寸法の検出器を用いる場合、数十分程度の測定時間で十分な計数を確保できる。そのため短時間で高精度の簡便推定法として利用できる。設計図が残っていない建築物にも適用できるため、国内外の多くの歴史的木造建築物への応用も可能である。

2. 解析法

木造天守及び櫓の場合、土壁と屋根瓦が全重量のかなりの部分を占めていると考えられる。そのため本研究では図1に示す多重円筒殻モデルを用いる。各階の床の面積と等しい内径を持つ円とその階の高さで各円筒を表現する。各階の床面積と高さは城郭を管理する市役所の担当部署から入手できる^{1,2)}。外径と内径の差が屋根瓦及び土壁の厚さに対応する殻の厚さである。また、天井も同じ厚さとする。このモデルの妥当性については次節で詳しく検討する。計算方法は前報¹⁾で詳しく述べたので、ここでは必要部分のみを要約する。

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_o (nGy/h)は次式で表される。

$$D_o = 2\pi \int_0^{\pi/2} \{C_\mu F_\mu(\theta) + C_E F_E(\theta)\} \sin \theta d\theta \quad (1)$$

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。 C_μ 及び C_E は地磁気緯度と標高及び測定日により異なる定数であ

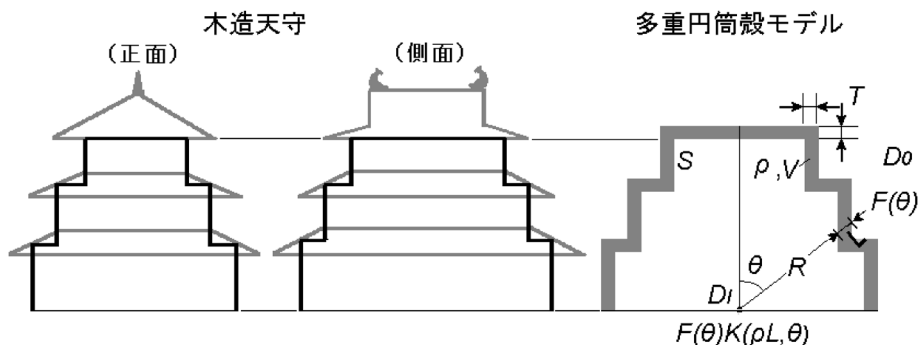


図1 天守および櫓に対する多重円筒殻モデル

る¹⁾。 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。

天守あるいは櫓各階の床中央における屋内線量率、 D_I (nGy/h)は次式で表される。

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

ここで ρ (ton/m³)は円筒殻の密度、 L (m)は円筒殻内の宇宙線通過距離(図1参照)である。

円筒殻の重量は殻の密度 ρ と殻の体積 V (m³)の積で表すことができる。その求め方は次の通りである。まず ρ の値を仮定する(本研究の場合は便宜的に $\rho=2.0$ ton/m³とする)。次に殻の厚さ T (m)をパラメータとして(2)式で多重円筒殻モデルにつ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あるいは櫓の T と定める。その時の殻の体積を V とする。

ここでは $\rho=2.0$ ton/m³として計算するが、 ρ 値が変化しても同じ D_I に対して ρT は一定となる。(2)式の K_{μ} 及び K_E が共に ρL の関数になっているからである。

3. 測定結果と検討

表1は天守及び櫓における測定階の延床面積(測定階以上の床面積の総和)の順に計算条件及び計算結果を示したものである。城名の記号

に大文字が付されているものは櫓を意味する。本研究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1階としている。

宇宙線線量率は1"φ×2" NaI (TI)¹⁾及び3"φ×3" NaI (TI)^{3,4)}シンチレーション・スペクトロメータによる測定法を利用して評価する。表1のうち、松本城1階(Mm1)のみは天守内線量率 D_I を床中央で測定できなかったため、壁際での値を用いている。

図2は延床面積に対する宇宙線線量率の天守あるいは櫓内/屋外比、 D_I/D_0 の関係である。図には特徴的な天守及び櫓の記号も付す。本モデルでは D_I/D_0 は延床面積に関係なく、(2)式に示されているように宇宙線が殻の密度と殻内を通過する距離の積 ρL のみの関数であるとしている。図2によれば延床面積が大きいほど D_I/D_0 が小さくなるが、その変化率はコンクリート造天守の場合¹⁾に比べて小さい。延床面積に応じて D_I/D_0 が小さくなる傾向は、規模の大きい天守ほど壁や屋根が厚いことによると考えられる。また、同じ天守でも上層階に比べて下層階の壁が厚い傾向があることも要因の一つであろう。

典型例を図3に示す。名古屋城(コンクリート造)⁵⁾と今回測定した松江城(木造)の各階における測定結果である。コンクリート造の名古屋城(図3黒丸)では壁や屋根の他に床も宇宙線を減衰させる効果があるため、延床面積が大きくなるほど D_I/D_0 は小さくなる。一方、木造

表1 計算条件と結果

城名	記号	計算条件		天守及び櫓内			計算結果	
		標高	延床面積	殻内面 表面積	屋外 線量率	櫓内 線量率	密度×殻厚	重量
		h (km)	A (m ²)	S (m ²)	D ₀ (nGy/h)	D _I	ρT (ton/m ²)	W _{MCS} (ton)
丸亀城 3 階	Mg3	0.059	25	108	28.9	27.2	0.392	40
大洲城 4 階	Oz4	0.023	39	118	28.6	26.0	0.586	64
宇和島城 3 階	Uj3	0.049	53	116	28.6	26.7	0.446	48
丸亀城 2 階	Mg2	0.059	82	207	28.9	25.9	0.500	114
松江城 5 階	Me5	0.028	86	238	29.0	26.2	0.600	134
伊賀上野城 3 階	Iu3	0.178	96	311	30.0	27.6	0.500	149
松山城 3 階	My3	0.132	104	160	29.4	25.9	0.702	103
大洲城 3 階	Oz3	0.023	106	325	28.6	24.9	0.708	165
明石城巽櫓 1 階	AsTM1	0.023	139	273	28.3	24.7	0.742	220
宇和島城 2 階	Uj2	0.049	143	241	28.6	26.2	0.516	131
西尾城 1 階	No1	0.015	149	233	28.8	27.4	0.304	79
丸亀城 1 階	Mg1	0.059	185	383	28.9	26.7	0.378	169
明石城坤櫓 1 階	AsHS1	0.023	203	353	28.3	24.3	0.858	320
大洲城 2 階	Oz2	0.023	216	390	28.6	25.7	0.508	219
伊賀上野城 2 階	Iu2	0.178	259	585	30.0	25.0	0.874	534
松山城 2 階	My2	0.132	276	486	29.4	25.3	0.798	382
宇和島城 1 階	Uj1	0.049	283	580	28.6	23.8	0.874	529
松江城 4 階	Me4	0.028	288	467	29.0	26.2	0.554	281
掛川城 1 階	Kg1	0.037	305	469	28.9	26.6	0.416	217
大洲城 1 階	Oz1	0.023	379	628	28.6	24.0	0.856	588
名古屋城東南隅櫓 1 階	NyTN1	0.017	395	482	28.9	24.9	0.774	409
名古屋城西南隅櫓 1 階	NySN1	0.017	400	490	28.9	24.6	0.844	459
白石城 1 階	Si1	0.073	413	662	29.6	24.5	0.928	697
名古屋城西北隅櫓 1 階	NySH1	0.017	487	711	28.9	24.6	0.850	633
松江城 3 階	Me3	0.028	490	580	29.0	25.6	0.632	426
伊賀上野城 1 階	Iu1	0.178	506	912	30.0	25.9	0.638	634
彦根城 1 階	Hn1	0.120	528	729	28.9	25.3	0.692	559
松山城 1 階	My1	0.132	535	744	29.4	25.1	0.782	621
犬山城 1 階	Iy1	0.055	736	677	28.7	24.4	0.708	589
松江城 2 階	Me2	0.028	992	1072	29.0	25.6	0.614	775
松本城 1 階	Mm1	0.591	1055	992	33.9	25.4	1.322	1452
松江城 1 階	Me1	0.028	1496	1259	29.0	25.6	0.582	906
姫路城 1 階	Hj1	0.038	2409	2224	28.7	22.8	1.340	3138

の松江城 (図3 白丸) では天守内は延床面積に対し D_I/D_0 はほぼ一定である。つまり1階から5階までの床の影響がきわめて小さく、壁や屋根の厚さが主な影響因子である。しかもこの天守の場合、各階の壁や屋根の厚さがあまり変わらないことを示している。これは木造天守には円筒殻モデルが適切であることの証左である。

(1), (2)式に示されているように線量率の屋内/屋外比は ρL の関数である。平均の L を次式で計算する。

$$\langle L \rangle D_0 = 2\pi \int_0^{\pi/2} L \cdot \{C_\mu F_\mu(\theta) + C_E F_E(\theta)\} \sin \theta d\theta \quad (3)$$

図4は ρL と D_I/D_0 との関係を見たものであ

る。この中で姫路城1階(Hj1)と松本城1階(Mm1)はほぼ同じ $\rho\langle L \rangle$ あるいは ρT (表1参照)であるにもかかわらず D_i/D_0 が幾分異なる。

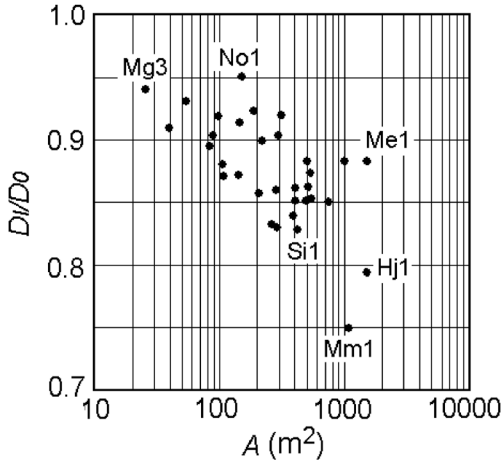


図2 延床面積, A, と天守あるいは櫓内/屋外線量率比, D_i/D_0 , の関係

これは前述のごとく D_i/D_0 は標高に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。松本城を除いて2次式で相関を調べると、相関係数が0.988と評価され、きわめて強い相関が認められる。

ρT は $\theta=0$ 及び 90° 以外では常に ρL より小さいが、 ρT と $\rho\langle L \rangle$ は比例関係にある。図5にその関係を示す。

ここまでに宇宙線線量率の測定値から多重円筒殻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、(2)式の精度とモデルの適切さが問題となる。前者については前報¹⁾で確認済みなので、ここでは後者について検討する。

3.1 半球殻モデルによる検討

多重円筒殻モデルによる数値計算のプログラムに瑕疵がないかを調べるために、ここではよ

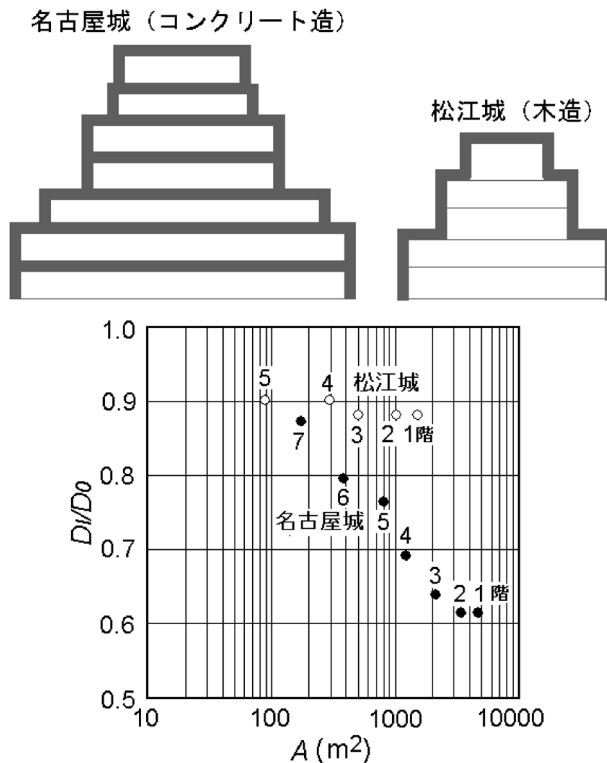


図3 松江城 (木造) と名古屋城 (コンクリート造) の比較

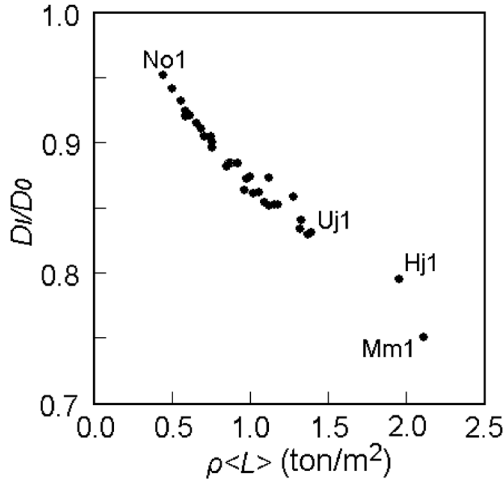


図4 殻密度×殻内宇宙線通過距離の平均値, $\rho \langle L \rangle$, と天守あるいは櫓内/屋外線量率比, D_I/D_O , の関係

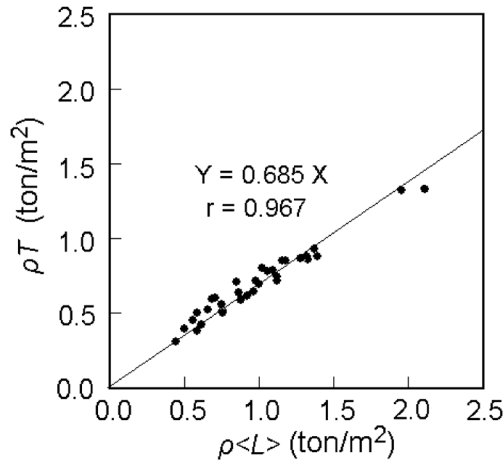


図5 殻内宇宙線通過距離の平均値, $\langle L \rangle$, と殻厚, T , の関係。 r は相関係数

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。密度 ρ , 厚さ L_k の半球殻に対して(1), (2)式で計算すると ρL_k (ton/m²) は

$$\rho L_k = a \cdot e^{-\frac{D_I}{D_O}} \quad (D_I < D_O) \quad (4)$$

という経験式で表現できる(図6参照)。ここで a 及び b は標高 h (km) の関数であり

$$a = 3690e^{-4.95h} + 600$$

$$b = 9.59 - 2.86h$$

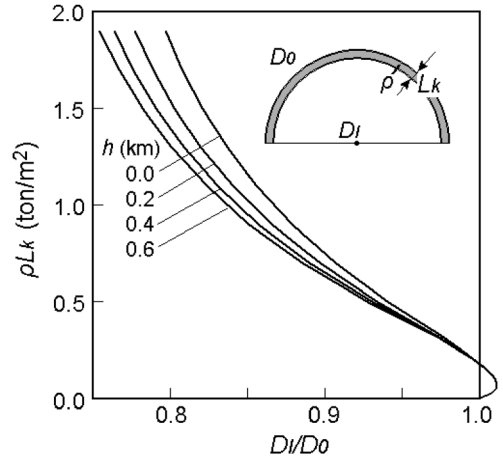


図6 天守および櫓に対する半球殻モデル計算

となる。ただし(1), (2)式の C_μ 及び C_E は名古屋の地磁気緯度に対する値を用いて評価してある。

図6の計算において, ρL_k が 0.2 ton/m² 以下の薄い壁で D_I/D_O が1よりわずかに大きくなるのは以下の理由による。宇宙線の電子及び光子成分が空気から媒質に入射する際, それぞれの臨界エネルギーの違いによりカスケードシャワーの発達の程度が異なる⁶⁾ ためにこのようなことが起きる。例として, 文献7)には空気-コンクリートの場合の計算が示されている。今回の測定では表1に見られる通り $D_I > D_O$ の例はなかった。

図6に示されているように ρL_k が h により異なるのは, (1), (2)式の軟成分と硬性分の比, C_E/C_μ , が標高により変化するからである¹⁾。図4において姫路城1階(Hj1)及び松本城1階(Mm1)が似たような $\rho \langle L \rangle$ であるにもかかわらず, D_I/D_O が幾分異なるのは標高差によることが理解できる。

次に半球殻モデルを利用する重量評価を試みる。半球殻の厚さ L_k を図1に示されている円筒殻内の宇宙線通過距離 L の平均値, すなわち(3)式の $\langle L \rangle$, に等しいと置く。そうすると図5より,

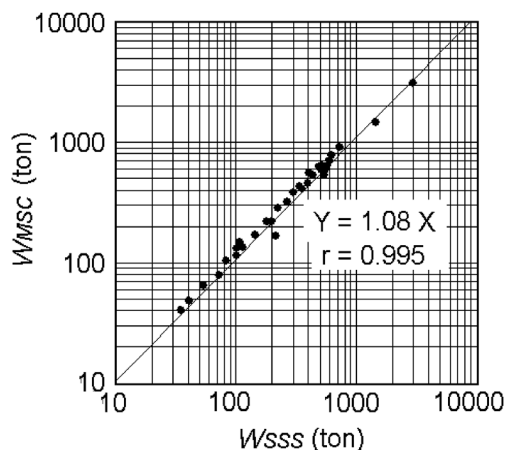


図7 半球殻モデルを利用して推定した重量, W_{SSS} , と多重円筒殻モデルより推定した重量, W_{MCS} , の関係。 r は相関係数

$$T = cL_k \quad (5)$$

ここで $c=0.685$ である。

図1において $T \ll R$ の場合, 多重円筒殻の重量は ρT と殻内面の表面積 $S(\text{m}^2)$ の積で近似できる。半球殻モデルを利用して表現した重量 $W_{SSS}(\text{ton})$ は(5)式より

$$W_{SSS} = \rho L_k \frac{T}{L_k} S = c \rho L_k \quad (6)$$

となる。

図7が両者の相関である。 W_{SSS} と W_{MCS} の関係を表す回帰直線の勾配は1.08であり1に近い。したがって線量率の実測値と多重円筒殻モデルから導出する重量推定法は, 半球殻モデル理論により支持されていると言ってよい。また, 半球殻モデルによる計算(図6参照)は名古屋の地磁気緯度に対して行われたが, 図7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。

半球殻モデルを用いる利点は次の通りである。屋外線量率 D_o には $C_\mu C_E$ 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_o と天守あるいは櫓の表面積及び標高データのみで重量を概算することができる。つまり, 前章で述べたような T 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 実測値との比較

明石城の坤櫓及び巽櫓を曳き家工法で移動させた際, それぞれの重量が実測されている⁸⁾。それによれば坤櫓は340ton, 巽櫓は240tonであった。本報告の方法では前者が320ton, 後者が220tonと推定されている(表1参照)。宇宙線測定による推定値と実測値とはかなりよく一致する。

ここでは比較的延床面積の小さい2例を挙げるにとどまったが, 大規模な天守ではどの程度的一致が見られるか知りたくなる。図4では低標高の天守において上記2櫓を含む延床面積の広い範囲において, 殻の密度×厚さと D_i/D_o の間にきわめて強い相関が認められた。この事実及び(5), (6)式から, 大規模な天守に対しても本推定法の有効性が期待できる。

4. おわりに

本研究では多重円筒殻モデルによる木造城の重量推定の方法を提案し, 簡易計算法や実測例との比較を行った。

殻モデルの妥当性をさらに深く追求するためには, 重量計算が容易なコンクリートや石造りの大型ドーム構造物などとの比較を重ねる努力が必要である。また, 推定方法のさらなる高精度化に向け, いくつかの大型木造城の屋根瓦や土壁, 木材, 城内の積載物などの全資材量を詳細に算定し, 本方法と比較検討するのが望ましい。

文 献

- 1) 湊 進, 宇宙線測定データから推定したコンクリート製天守閣の重量, *RADIOISOTOPES*, **68**, 613-619 (2019)
- 2) 湊 進, お城で宇宙線を測る, *Isotope News*, **757**, 66-68 (2018)
- 3) 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)

- 4) 湊 進, 3"φ×3" NaI(Tl) スペクトロメータによる屋内宇宙線線量率測定法の要約, 放地研データ集, <http://www1.s3.starcat.ne.jp/reslnote/fudou.html>
- 5) Minato, S., Bulk density estimates of buildings using cosmic rays, *Appl. Radiat. Isot.*, **37**, 941–946 (1986)
- 6) 小田 稔, 「宇宙線」, 豪華房 (1975)
- 7) 湊 進, 高森和英, 池辺幸正, 3"φ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)
- 8) 吾郷明人, 明石城の櫓を曳き家工法で移動, 鴻池組技術広報誌 *Engineering Topics*, **216**, 4–5 (1996)

Abstract

Weights of Wooden Castle Towers and Turrets Estimated from Analyses of Cosmic Ray Measurement Data

Susumu MINATO^{1,†} and Tadashi IKEDA²: ¹Radiation Earth Science Laboratory, ²Uda Geoscience Club, [†]willow@sf.starcat.ne.jp

Cosmic ray dose rate measurements were carried out inside 13 wooden castle towers and 5 turrets using a NaI(Tl) spectrometer. Approximating a shape of each tower or turret with a multi-cylindrical shell, a density and thickness of the shell were calculated using an inside/outside ratio of dose rate. The density was multiplied by a volume of the shell in order to obtain its weight. Input data required for the model analysis for each castle tower or turret, i.e., elevation, total floor space, surface area, outside and inside dose rates, were listed along with the corresponding density and thickness of the shell and its weight derived by the model calculation. Comparison with other model calculations and examples of actual weight measurements showed the validity of the calculated results described in this report.

(Received September 21, 2019)

(Accepted November 20, 2019)