

宇宙線透視像

名古屋工業技術試験所 湊 進

Cosmic-Ray Transmitted Images

Susumu Minato

Government Industrial Research Institute of Nagoya

Hirate-machi, Kita-ku, Nagoya, 462 Japan

Empirical formulas for transmission of cosmic-rays are presented to estimate the size of detectors and counting time required in obtaining optimum images of the materials to be tested.

Some examples of three-dimensional representation are demonstrated to show how powerful the cosmic-rays are for inspecting huge structural materials and to illustrate difference between transmitted images and actual structures.

1. はじめに

筆者は以前より「放射線で見る環境像」という観点から自然放射線の研究を進めている。放射線は他をもって替え難い性質ゆえに種々の探査を可能にしてくれる。非破壊でできる。また、天然の放射線は一般の人工放射線源と違って法律の規制から自由である。測定器は比較的安価に入手でき測定も簡単である。携帯型にして現場測定もできるし固定式の連続測定にも向いている。どこにでも存在している。このような理由で自然放射線（能）は環境の研究にうってつけの手段なのである。例えば、降雨降雪時の増加 γ 線で雲を視る、地表 γ 線で地中水分の流れを可視化する、乗り物を利用して γ 線で地殻中の特定の元素の分布を透視する、ラドンで気塊の動きを概観する、等々、教えてあげるときりがない。

宇宙線もまた自然放射線である。その透過力たるやX線やラジオアイソトープからの中性子、 γ 線あるいは加速器からの放射線と比較するのは意味がないほど強力である。これを大型構造物の非破壊検査に利用しようというアイデアが浮かんでくるのは当然だろう。洞穴探査、巨木内部の腐食状況検査、古代遺跡調査、など枚挙にいとまがない。見えないものが視えるということは実用的に重要である。同じ物でも目（可視光）で見た像と宇宙線で視た像は大いに異なる。実際に応用する前に、既知の構造物が3次元表示の宇宙線透過像では如何に見えるのかという比較をおくことが大切である。また、今のところ宇宙線の透視像の例は極めて少ないのでデザイン・ソースとしても活用できるだろう。

宇宙線による非破壊計測技術に関してはすでに報告した¹⁾。しかし、前回の報告では紙面の都合上、理論的側面を詳述する余裕がなかった。そこで今回はまず宇宙線の透過距離と角度に関する試験式を提示する。これで実験計画をたてる際に必要な被検体の大きさや密度、検出器の種類と寸法および測

定時間と計数誤差の関係を計算する。次に地下鉄鋼，研究棟，寺院山門，ピラミッドなどの2次元濃淡分布をとる。そして，濃度を高さにとって3次元表示し平面図や実体写真と比較することにする。

2. 透過宇宙線強度の近似式

これまでに幾つかの透過強度に関する実験式が提案されている²⁾。その殆どが深い地下で有効な式(硬成分のみ)なので宇宙線非破壊検査に適した式を新たに求める必要があった。ここでは軟成分にも適用できるものを導き，検出効率にも言及する。

1981年5月，米国エネルギー省環境測定研究所のK. O'Brienに依頼して名古屋の海面高度での宇宙線場を計算してもらった。その結果はエネルギーと天頂角に関する二重微分スペクトルとして発表してある³⁾。これを線源スペクトルとして連続減則近似を仮定して標準岩石⁴⁾に対する3 MeV以上の透過線束(Flux)と電離(Ionization)に関する次式を得た。

硬成分

$$\text{ミュー中間子} \quad I(h, \theta) = I_{00} \cos^n \theta e^{-h/\Lambda(h)} \quad (1)$$

$$\text{ここで} \Lambda(h) = A + Bh + Ch^2,$$

$$n = \alpha + \beta h,$$

であり，定数はTable 1に与えてある。また，ノックオン粒子束(電離ではない)に対しては，

$$\text{ノックオン電子} \quad 0.1033 I(h, \theta). \quad (1-1)$$

$$\text{ノックオン光子} \quad 0.1894 I(h, \theta). \quad (1-2)$$

軟成分

$$I(h, \theta) = \frac{1 + Dh \sec \theta}{1 + Eh \sec \theta} I_{00} \cos^3 \theta e^{-h \sec \theta / L}. \quad (2)$$

定数はTable 2に示してある。Iは強度で線束の場合は($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$)電離の場合は(ion pairs $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$)単位である。hは面密度(距離×密度)で表わした鉛直距離で単位は(hg cm^{-2})， θ は天頂角である。他の経験式や筆者等の実験と比較した結果この式は300 (hg cm^{-2})程度まで有効であることが分っている。

Table. 1 Constants used in equation (1) for calculating the transport of hard components.

	I_{00}	A	B	C	α	β
Flux	0.00723	17.61	0.1404	-7.069×10^{-5}	1.495	0.002018
Ionization	0.594	20.56	0.1386	-6.365×10^{-5}	1.427	0.001963

検出器に対する効率はミュー中間子と電子については1，光子については次式で計算する。

$$\text{NaI (TI) Scintillator} \quad \varepsilon = a + bX + cX^2 + dX^3 \quad (3)$$

$$\text{Plastic Scintillator} \quad \varepsilon = e + fX + gX^2 \quad (4)$$

Table. 2 Constants used in equation (2) for calculating the transport of soft components.

	I ₀₀	D	E	L
Flux				
electron	0.00224	13	7	0.6495
photon	0.0118	11	7	0.6530
Ionization	0.224	11	7	0.7186

ここでXは円柱型 (Cylindrical) ならば長さ, 球形 (Spherical) ならば直径で (cm) 単位である。Table 3, 4 に定数を与える。面密度単位で表わしてあるので低原子番号のものならば標準岩石以外の物質に対しても透過厚さ又は密度の推定に利用できる。調査対象が決まったらその大きさや密度の見当をつけて, 許容計数誤差を設定し(1)-(4)式により現地で要する測定時間を計算しておく。あるいは, 厳密に外形寸法が分かっているものについては測定値と計算値とを比較することにより内部に異物があるかどうかの判定に使う。

Table. 3 Constants used in equation (3) for calculating the photon counting efficiency of NaI (TI) scintillators.

	a	b	c	d
Cylindrical	0.0128	0.129	-0.00624	0.000106
Spherical	0.00669	0.0908	-0.00361	0.0000546

Table. 4 Constants used in equation (4) for calculating the photon counting efficiency of Plastic scintillators.

	e	f	g
Cylindrical	0.00119	0.0229	-0.000219
Spherical	0.000616	0.0155	-0.000118

3. 宇宙線透視像

3.1 名古屋市営地下鉄網

昭和32年11月15日, 名古屋-栄町間2.4kmに開通して以来営業している地下鉄は現在ほぼ20km四方の面をカバーし66駅を数えている。プラットフォームも地上にあるものから地下20mにあるものまでバラエティーに富んでいる。相互乗換駅6駅を含む72ホームで宇宙線量率を測定して3次元表示したものがFig. 1である。このように宇宙線は地下を這っている異様な空洞群を容易に眼下に晒してくれる。3"φ球形NaI (TI) シンチレータで一点につき10分間測定した。図には路

線平面図も書込んである。平均の空気吸収線量率は10.7 (nGy/h) 標準偏差4.9, 最小値5.6, 最大値は31.5である。名古屋の地下鉄駅は殆どが広い道路の真下にあるので宇宙線量率と深さの関係を研究するのに都合がよい。その詳細は文献5)に譲ってここではFig. 1のみを基にして両者の対応を見てみよう。

まず目につくのは東山線の終点である。上社, 本郷, そして終点の藤ヶ丘各駅間は名古屋市営地下鉄唯一の高架線である。したがってこの三駅では最大値が観測される(但し, 図では硬成分の値である23.6nGy/hで表示してある)。次に目立つのは東山線を三等分して中央にあたる部分である。これらは地下鉄開業当時から間もない頃にオープンカット(開削)工法で浅く掘られた部分に相当する。それ以外のトンネルはシールド工法で施行された。名城線, 鶴舞線と後で掘られたものほど深くなる。特に最近開通した桜通線は約20mの地下を工事したもので図でも最深部である。上述の測定条件でも各路線が十分識別できることが分かる。ここでは六つの相互乗換駅, 即ちトンネルが交差する所がある。Table 5 にこれらの駅のホームでの値と下のホームでの値を比較する。各路線がはっきり分離されている。前節の(1)-(4)式で解析すれば分解能を推定することもできる。

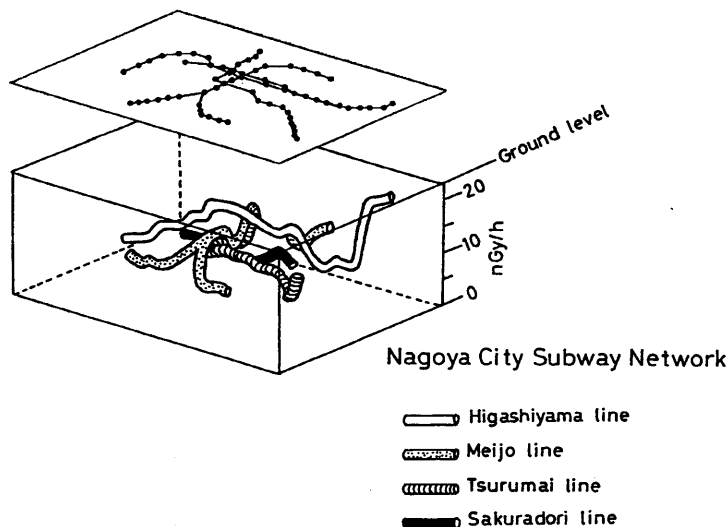


Fig. 1 3-D representation of cosmic-ray dose rate levels measured at platforms in subway lines along with the plan of the network.

Table. 5 Comparison of the cosmic-ray intensity measured at an upper platform (PF) to that at a lower PF in mutual transfer stations.

Station	Lines	Upper PF (nGy/h)	Lower PF (nGy/h)
Imaike	Higashiyama-Sakuradori	15.9	8.2
Sakae	Higashiyama-Meijo	15.6	10.7
Fushimi	Higashiyama-Tsurumai	15.3	8.4
Nagoya	Higashiyama-Sakuradori	14.7	7.2
Kamimaezu	Meijo-Tsurumai	13.4	9.0
Marunouchi	Tsurumai-Sakuradori	8.5	5.6

3.2 名古屋工業技術試験所研究棟

地表面レベルに碁盤目状に測定点を設定して計数すれば建築物の透視画像が得られる。Fig. 2がその例である。(1)式を積分すると透過距離が比較的小さいとき透過強度は指数関数で近似できる⁵⁾。それ故ここでは強度の代わりに、

$$h = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{J_0}{J} \quad , \quad (5)$$

を高さにとって3次元表示してある。 κ は質量減弱係数で約 $0.045 \text{ m}^2/\text{Mg}$ 、 J_0 は建物の影響が無い所での値、 J は測定点での値である。宇宙線透視像はカメラの視点とだいたい同じ視点で描いてある。画像のエッジをぼけさせずに雑音を除去するために 5×5 のメディアン・フィルターを通した。測定の詳細は文献6, 7)で述べてある。この棟は第四研究本館と呼ばれるL字型の鉄筋コンクリート製のビルである。直方体の6階建($33.4 \times 15.7 \times 24.1 \text{ m}$)に直方体の2階建($11.0 \times 11.8 \times 9.6 \text{ m}$)が付いている。これから2.6m離れてスレート葺きの鋳物工場(高さ7.8m)が接している。格子点は1.5m間隔で屋内、屋外あわせて 39×39 である。 $3'' \phi$ 球型NaI(Tl)シンチレータを用い、一点当たり10分測定した。

宇宙線がかなり広い角度分布を持ってくると(前節(1)-(2)式参照)と内部に受水槽や鉄製のエレベータ室などの異物が含まれていることのために透視像は直方体にならない。像の右裾が少し捲れ上がっているがこれは隣接する3階建の事務庁舎の影である。もう一つ気がつくのは2階建屋と6階建屋の高さの比が2対6になっていない事である。これは次のように解釈したい。前節(1)-(2)式で計算すると宇宙線束はその9割が鉛直方向に対して $\pm 60^\circ$ の線で切られるコーンのなかに入る。したがって背が高い割には巾が狭い建屋には鈍感である。即ち立体角の関係から

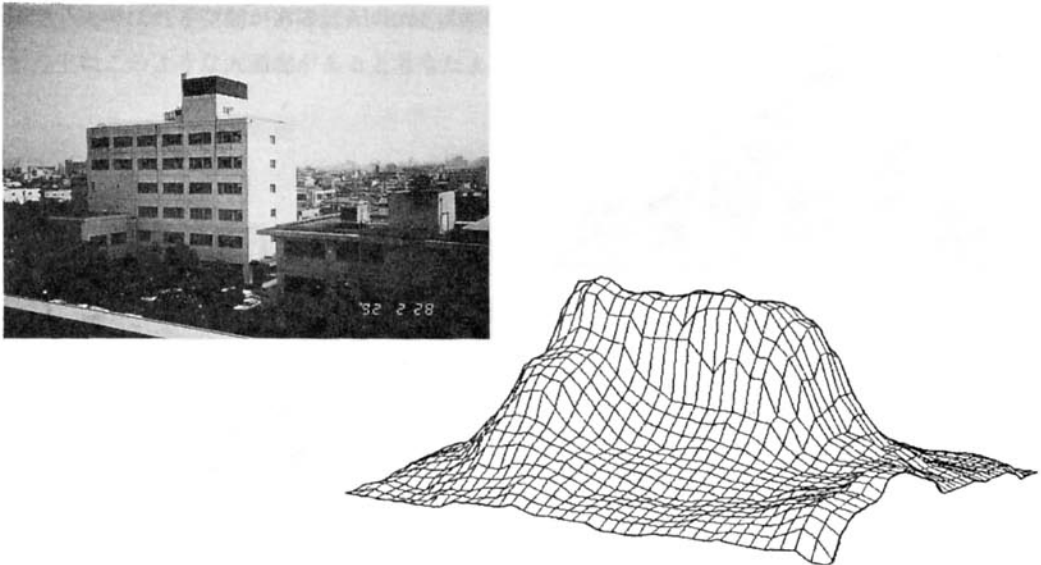


Fig. 2 3-D representation of a cosmic-ray transmitted image of a research building of our institute along with the photograph.

「検出器に近接する物体ほど、より鋭敏に反応する」と言いかえてもよい。

Fig. 2 で見られるように宇宙線で透視した3次元像は実際の建物の上から土砂を被せたような姿をしている。その主たる原因は宇宙線の角度分布にある。この土砂を画像処理技術で取除くのが次の課題である。濃度の微分とればエッジを検出することもできるし分解能も評価できることを付言しておく。

3.3 名古屋東別院大門

真宗大谷派名古屋別院で「お東さん」というニックネームがある。元禄4年(1691)から6年がかりで本堂が完成した。130余年経た文政5年(1822)までに御殿, 大門, 経蔵, 鐘楼などがそろった。昭和20年3月の空襲でほとんどを焼失, 同43年に鉄筋コンクリートで再建され, 昔の面影を取り戻した, という経歴のお寺である。Fig. 3 に大門の宇宙線透視像を示す。ここでも(5)式の関係を利用している。カメラとほぼ同じ視点で描いてあり, 5×5 のメディアン・フィルターを通したものである。さらにコンクリート製平屋のトイレが向かって左側の納戸に隣接している。格子点は 1.275m 間隔で $30 \times 39 = 1,170$ 点 (580坪相当) である。 $1.5'' \phi \times 4''$ NaI (Tl) シンチレータで一点当たり10分間観測した。この寺院を選んだ理由や解析については文献8, 9) を読まれたい。

これも宇宙線の角度分布が原因であったかも建物が土砂に埋まっているかのごとき印象を与える。まず目に付くのが頂上部分の二こぶラクダの如き突起である。これは二階に実際に高密度の異物が詰まっているという訳ではない。名工試研究棟での解釈にあったように検出器近傍の物体(この場合, 二組の支持柱)が影響している。同様の理由で納戸の高さと門の屋根の高さの比が実体と異なる。特にこの場合, 門の下の空隙が効いている。未知の物体にこの手法を応用する時にはこのような差異を十分念頭においてから取組む必要があるだろう。

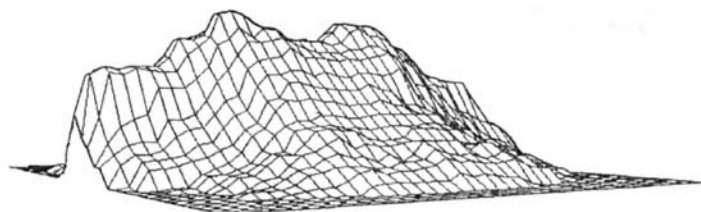


Fig. 3 3-D representation of a cosmic-ray transmitted image of a mountain gate of the Higashi-Honganji temple of Nagoya along with the photograph.

3.4 カフラー王のピラミッド

次にカイロの南約10kmのギザの大地にそびえ立つ三大ピラミッドのうちの一つを紹介しよう。これはL. Alvarezの仕事である。ピラミッドの隠し部屋捜しのいきさつや顛末は文献10)に、また測定解析法に関しては文献11)に生き生きと描写されている。重複を避けるためここでは3次元透視像の説明に必要な最小限の記述にとどめる。

このピラミッドは高さ145m、基底の一辺が215.5mという、規模ではクフ王のものに次ぐ第二のピラミッドである。その基底部のちょうど中央にある(と当初信じられていた)Belzoniの部屋に二つの放電箱から成る計数装置を設置した。1968年のことであった。放電箱は一辺が1.8mの大きさでお互いが0.3m垂直に離れていて、放電箱の上下と床にトリガーをかけるためのシンチレーション・カウンターがあり、散乱ミュー中間子を防ぐために下二つのシンチレータの間には1.2mの鉄板が挟んである、という大仕掛けなものである。要するにこの点に入射してくるミュー中間子一個ずつの角度情報を蓄積して理論計算と比較することにより隠し部屋の有無を調査しようとした訳である。数ヶ月間測定された。結果は文献11)に $3^\circ \times 3^\circ$ の単位でビン分けされた仰角(θ)と方位角(ϕ)の行列形式で表にまとめてある。筆者はそれを可視化してみた。Fig. 4である。視点は東南東のかなり上空に置いてある。前述の研究棟や寺院山門の例では位置(x, y)表示の像であったので写真との対応がつけられたが、この例は角度(θ , ϕ)表示なのでそういう訳にはいかない。以下、文献11)に従ってこの像の解説をしていこう。まず気がつくのは、この像はいわゆるピラミッド型をしていないことである。かなり偏心している。東北東方向にカウント数が多い。これにはAlvarezも驚いたらしい。後に、測定器に置いた地点が厳密に基底の中心ではなく、そこから東に15m北に4mずれていることが分った。次は中央部で南北方向に走るカウント数の少ない一帯である。クフ王のピラミッドには王妃の間の北側の少し上の方向に「大通廊」と呼ばれる空間がある。Alvarezは始めのうちカフラー王のピラミッドにもBelzoniの部屋の上にこのような大通廊があると考えたようだ。しかし後にこれは使用している放電箱の構造

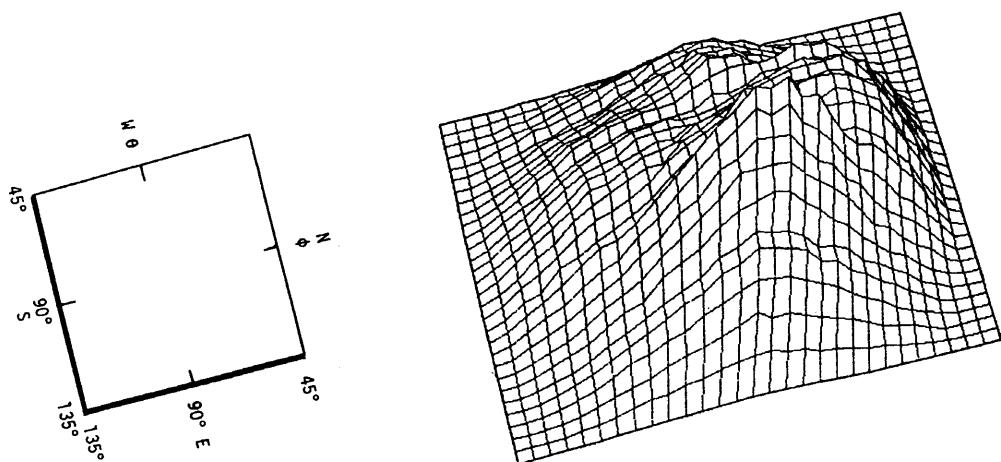


Fig. 4 3-D representation of a cosmic-ray transmitted image of the Pyramid of Chephren deduced from the data taken by Alvarez et al.¹¹⁾

に起因するものと判明した。

4. おわりに

本稿では4例の3次元宇宙線透視像を紹介した。もちろん通常のラジオグラフィーのように2次元濃淡分布で提示することもできた。さらに、いわゆる画像処理技術をその画像に適用した例を示すべきであったかもしれない。工学的な観点からは3次元像表示は不適切な誇りを免れなからう。今回このような表現をとったのは、普段見慣れた物でも宇宙線で視ると随分と想像力を刺激するような形に変貌するものだということを伝えたかったからである。筆者の知る範囲では宇宙線透視画像はこの4例しか無い。更に多くの例を増やしてから有用性を論ずるべきだし、工学的応用以外の発展も図るべきだとも思う。研究棟と寺院山門の像から判断するに、この程度の大きさでは宇宙線にとっては未だ小さ過ぎるのかもしれない。宇宙線強度の2次元スキャンはとにかく時間がかかる。実用的な見地からは短時間省力化を目指すべきだし、宇宙線デザイン派はより面白そうな対象を捜すことが課題である。

謝 辞

Alvarezのピラミッド探査に関する文献は日本原子力研究所技術情報部の海老沼幸夫氏に御紹介いただきました。篤く御礼申し上げます。

北アリゾナ大学物理天文学科のKeran O'Brien教授とは手紙を通じて宇宙線の輸送計算、実験との比較、Alvarezの方法などについて何回も討論しました。御厚情を感謝します。

引用文献

- 1) 湊 進：放射線，17-2，60-71 (1991).
- 2) 例えば西村 純：「宇宙放射線」，pp.396-397，共立出版 (1986).
- 3) S. Minato：Appl. Radiat. Isot., Intern. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A, 37, 941-946 (1986).
- 4) K. O'Brien：Phys. Rev. D, 5, 597-605 (1972).
- 5) S. Minato：NDT International, 20, 231-234 (1987).
- 6) 深谷光春，湊 進：名工試報告，37，147-156 (1988).
- 7) 深谷光春，松田秀春，湊 進：ESI-NEWS, 6, 191-195 (1988).
- 8) 湊 進：工業技術，pp.44-45 (1988年11月).
- 9) S. Minato：Materials Evaluation, 46, 1468-1470 (1988).
- 10) W. P. Trower：“Discovering Alvarez” pp.181-193, The Univ. of Chocago Press (1987).
- 11) L. W. Alvarez et al.：Science, 167, 832-839 (1970).