

X線解析写真測量の文化財への応用について

—地獄門への応用—

呉屋 充庸*・三浦 定俊・金子 忠夫*・石川 陸郎

1. ま え が き

昭和57年6月、東京国立文化財研究所が国立西洋美術館から地獄門（ロダン作、1920年頃、ブロンズ製）の修理に対する事前調査としてX線による調査を依頼された。X線撮影調査の段階において、いくつかの亀裂像が発見され、また多数のピンやボルト・ナット像とおぼしきものが撮影された。亀裂像の大きさ、遠近、あるいはピン、ボルト・ナットの位置関係を知るとは、簡単に解体ができないブロンズ製の地獄門では修理に先立って大切なことである。殊に立体的に重なりあっているレリーフのどちらに亀裂が生じているのかを知るためには、三次元的な観察と測定が必要である。他方、文部省科学研究費(特定研究「古文化財」昭和55～57年)の交付を受けて研究を継続してきた「古文化財に対するX線解析写真測量法」が古彫刻の内部構造調査に有効であったので、本法を地獄門に応用することが考えられ、試験的に行ってみたところ、その有効性が確認された。詳細は通常のX線透視撮影の結果も含めて修理報告書に掲載の予定であるが、今回はとりあえず、X線解析写真測量法の成果について簡単に報告する。

2. X線解析写真測量法について

構造物の形状調査に関する写真測量は、測定用カメラ（ステレオカメラ：固定焦点、無歪レンズ使用）で行われている。いわゆる、対象物体の等高線をアナログ的に図化したり、形状寸法を測定するための非接触三次元計測はこの実体写真測量法によるのが主流である。しかし、対象物体上の有限個の点の位置測定は必ずしもステレオ・カメラによる必要はなく、手持カメラによって撮影される一对の写真からも可能である。この非測定用カメラによる写真測量の研究は1970年代後半から殊に盛んになってきた。国内でも1979年から日本写真測量学会において報告¹⁾がなされている。X線による写真測量の場合も、被写体内部に存在する亀裂の大きさであるとか、その位置、あるいは仏像の体内に使用されている釘とか鏝の寸法、位置の測定というような目的に対しては、非測定用カメラによる写真測量と類似な理論を展開することができる。しかし、これら二つの方法の間には全く異なる点もある。本法は、非測定用カメラによる写真測量に類似した理論と、従来の測定用カメラによる実体写真測量と同じ観測方法から成り立っている。

本法と非測定用カメラによる写真測量との相違点

- (1) X線源であるターゲットはある大きさを持ち、したがってその実効焦点は理想的な点線源となっていない。
- (2) レンズが使用されないので、レンズによる収差は存在しない。
- (3) 投影中心に対するフィルムの位置が反対である。
- (4) データ収集法が異なる。非測定用カメラによる解析写真測量の場合は、一对の写真のそ

* 群馬工業高等専門学校（呉屋は昭和57年度招へい研究員）

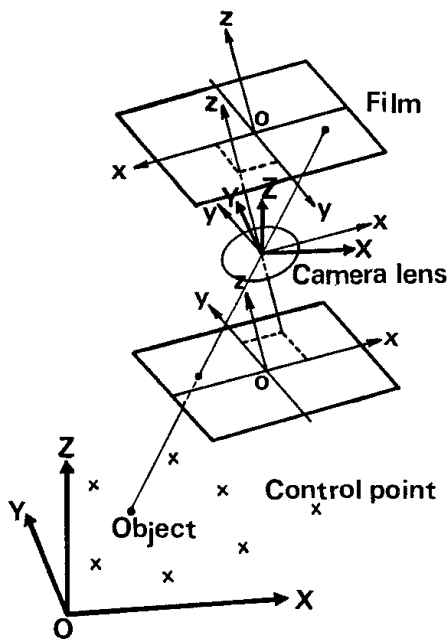


Fig. 1-1 Relationship between the external-coordinates system and the film-coordinates system of a camera.

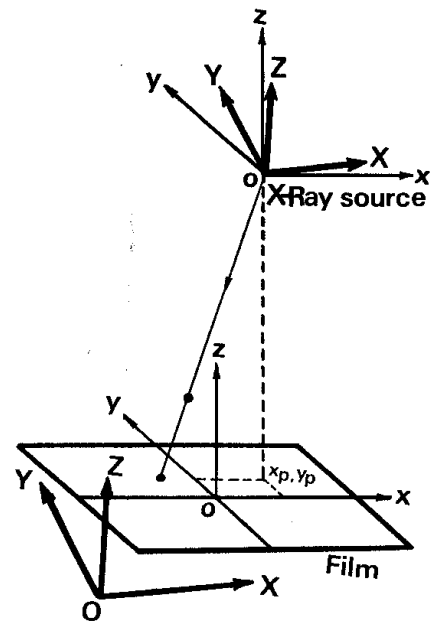


Fig. 1-2 Relationship between the external-coordinates system and the film-coordinates system in a X-ray photogrammetry

れぞれが個別的に単眼座標測定機にセットされ、両写真に撮影されている対応点の座標が収集される（このことは特長とも言える）。しかしX線写真の場合、被写体内部に存在する対象点が非常に単純な空間配置になっている場合を除いては、両写真に撮影されている対応点の確認が一般的にむづかしい。したがって測定対象点の座標データは実体視の下で収集される。すなわち一対の実体視用X線写真が撮影され、実体座標測定機によって目的とする点の位置は求められる。

3. 撮影に際しての事前調査

本法を文化財の調査に応用する場合、撮影装置一式、組立式簡易暗室、経緯儀等を現地へ運ぶ場合が多い。したがって撮影計画をたてる前の事前調査が大切である。

撮影現場に関する調査事項

- (1) 障害防止の立場にたつての環境調査
- (2) 電気、水道設備

撮影方法立案のための調査事項

- (1) 対象の大きさ、厚さの概略および材質
- (2) 撮影場の広さ、対象の周囲に置かれているものの材質、あるいは周囲を囲っているものの材質並に床の状況

4. 撮影計画

(1) 撮影の距離関係について

本法は、被写体の内部構造が写真によって判読的に調査されるだけでなく、定量的に計測されることを目的としているので特に影像の鮮鋭度が高められなければならない。X線写真の影像のボケを発生させる要因としては、増感紙によるものと散乱線の発生によるものがある。

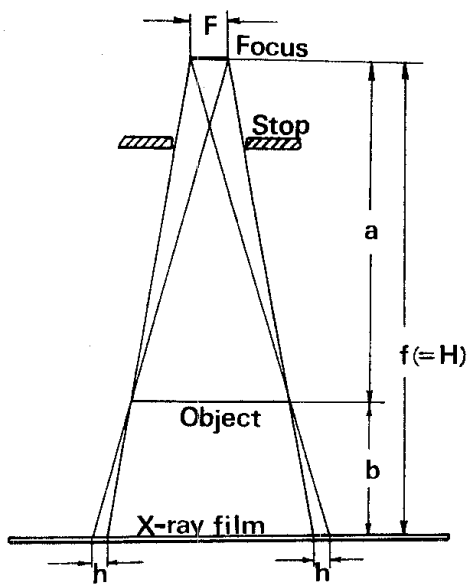


Fig. 2 Schematic diagram for the relationship between an effective focus F and halfshadow bands h .

その他撮影距離に関するものとしては、焦点の大きさがある。医療関係では、半陰影帯の大きさを0.2 mm以内としている²⁾。本法の場合も、筆者の計算によれば約0.2 mm以内が適当であると算出される。

いま半陰影帯を h 、焦点—フィルム間距離を H 、焦点被写体間距離 a 、被写体—フィルム間距離を b (被写体の厚さに相当する) とすれば

$$\frac{h}{F} = \frac{b}{a} = \frac{b}{H - b}$$

(Fig. 2 参照) なる関係があるので、 b をパラメータとした h/F と H の関係をグラフとして求めておく (Fig. 3-1, Fig. 3-2 参照)。

例えば、事前調査で被写体の厚さ約30 cm を知り、実効焦点が 2 mm \times 2 mm とすれば、Fig. 3-2 の $b = 30$ cm の曲線と $F = 2$ mm の交点に対する H を読みとると $H \approx 330$ cm を得る。すなわち撮影距離を330 cm 以上にとれば、ボケ (半陰影帯 h) を 0.100×2 mm 以下におさえ

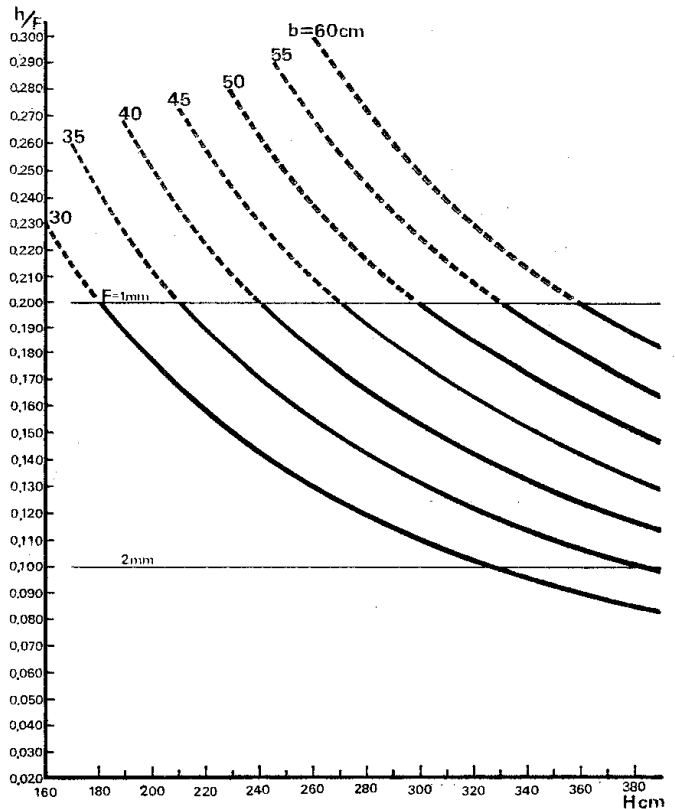
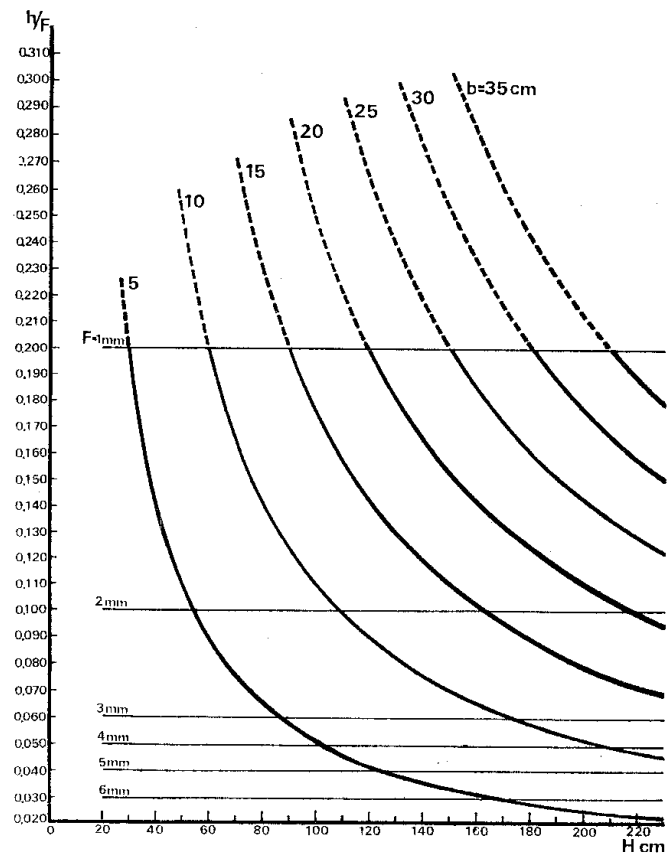


Fig. 3-1, 3-2 Relationship between H/F and the distance from a focus to a film, where H : the size of halshadow bands, F : the size of an effective focus.

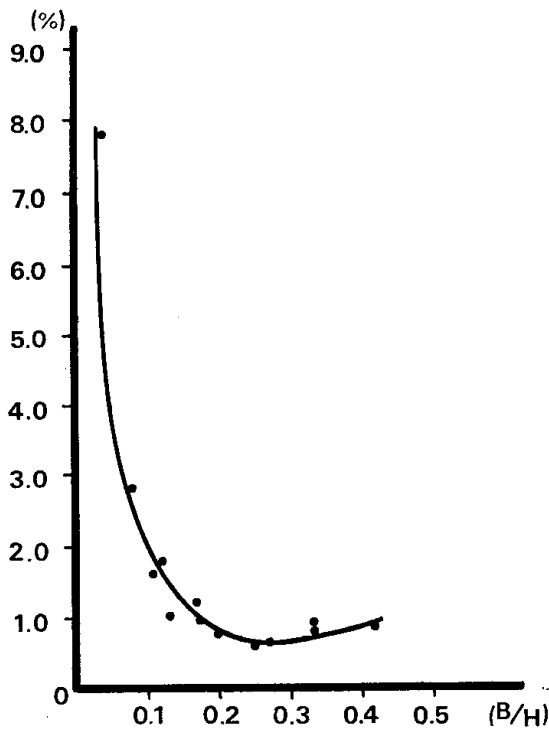


Fig. 4 Relationship between the relative precision and B/H, where B: a base length, H: the distance between a focus and a film

mm~65 mm と言われている。視明の距離は 25 cm, この場合の B/H は 0.24~0.26 となっている)。

(3) 増感紙の使用や、散乱線によるカプリの防禦について

増感紙を用いることによって、フィルムの黒化度やコントラストは増すが、影像の鮮鋭度は落ちることも知られている。したがって、本撮影にはいる前に予備テストとして (i)増感紙を使用しない場合と (ii)増感紙の使いわけについてのテストをして比較しておく必要がある。増感紙使用の場合大切なことは、増感紙とフィルムを密着させることである。

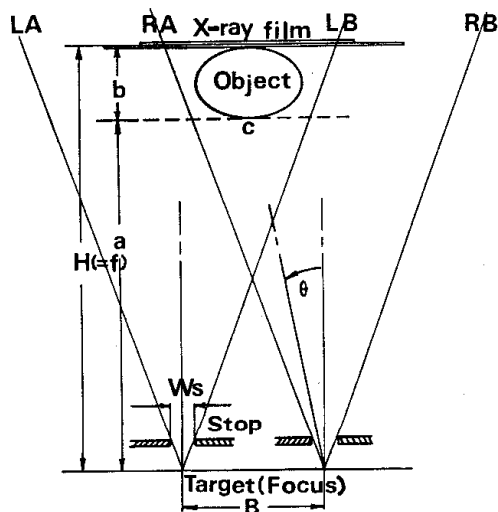


Fig. 5 Schematic diagram of a horizontal photograph

ることができる。しかしX線の強さは距離逆二乗の法則にしたがって減弱するので、そのことも考慮して撮影距離を 330 cm とする。

(2) 基線長Bについて

一対の実体視用X線写真を撮影するのであるから、撮影距離Hに対する基線長Bの割合を検討しておかなければならない。呉屋・金子の行った基礎実験では、測定精度を縦軸にとり、横軸に B/H をとると Fig. 4に示されるような結果³⁾が得られている。ここで測定精度とは

$$\frac{(\text{本法による計算値}) - (\text{実測値})}{(\text{実測値})} \times 100\%$$

である。これによれば、B/H を 0.2~0.3 の範囲にとる場合が一番精度が高い。すなわち相対誤差を 1% 以下にすることができる。このことからして、基線長 B は B = 0.25 H として定められる。上記の例で言うならば、B = 0.25 × 330 cm = 82 cm あるいは 83 cm とする(人間の両眼の眼基線は 60

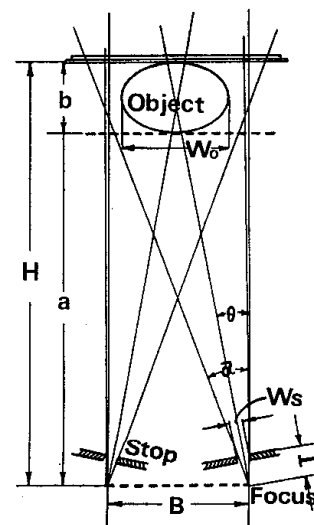


Fig. 6 Schematic diagram of a convergent photograph

被写体自体、あるいは被写体の周囲に存在する物質からの散乱線を防ぐには、遮光筒の使用、古文化財用のブッキーの開発とかの問題があるが、ここではX線放射をなるべく必要最小範囲にとどめるための放射口径（しぼり巾）のきめ方について述べる。

本法の場合、計測対象範囲内の影像是両写真に重複して撮影されなければならないので、Fig. 5に示されるように水平写真として撮影されるのが一般的であるが、そのためには放射口径 W_s をある程度大きくしなければならない。その結果、被写体の影像是 $RA \sim LB$ の範囲にわたって、一對の写真のそれぞれに撮影されるが、 $LA \sim RA$, $LB \sim RB$ の範囲にまでX線が放射され、被写体周囲の物質からの散乱線誘発の原因となる。これを防ぐため単に W_s を小さくしただけでは、両写真の重複部分が減少し、三次元計測の行なえる範囲が限定される。したがって、なるべく絞りの大きさ（放射口径） W_s を小さくし、被写体全体および被写体の周囲に配置される標定基準点全部の影像是一對の写真それぞれに撮影されるようにするには、放射中心軸をある角度 θ だけ被写体の中心方向に向かって回転させる（実際には被写体表面の中央部を狙う）。

Fig. 6の θ や α は、焦点からフィルムまでの距離 H や、被写体幅の概略値 W_0 、被写体の厚さ概略値 b 、基準点影像是撮影するために必要なフィルム幅の増分すなわち調整値 C などによって計算される。先ず θ については、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H}{8(H-b)}$$

$$\left(\frac{B}{H} = 0.25 \text{ として} \right)$$

ここで、 F, H, b の間には、前に述べた

$$\frac{h}{F} = \frac{b}{H-b}$$

という関係があるので $F=1.8 \text{ mm}$, $h=0.2 \text{ mm}$ を代入すれば、 $b=H/10$ となり

$$\theta = \tan^{-1} 0.1389 \approx 7^\circ 54'$$

約 8° だけ回転させる。同様に $F=2.3 \text{ mm}$ のときは $\theta=7^\circ 43'$ で同じく約 8° だけ回転させる。厳密には実効焦点の大きさによって θ は異なる

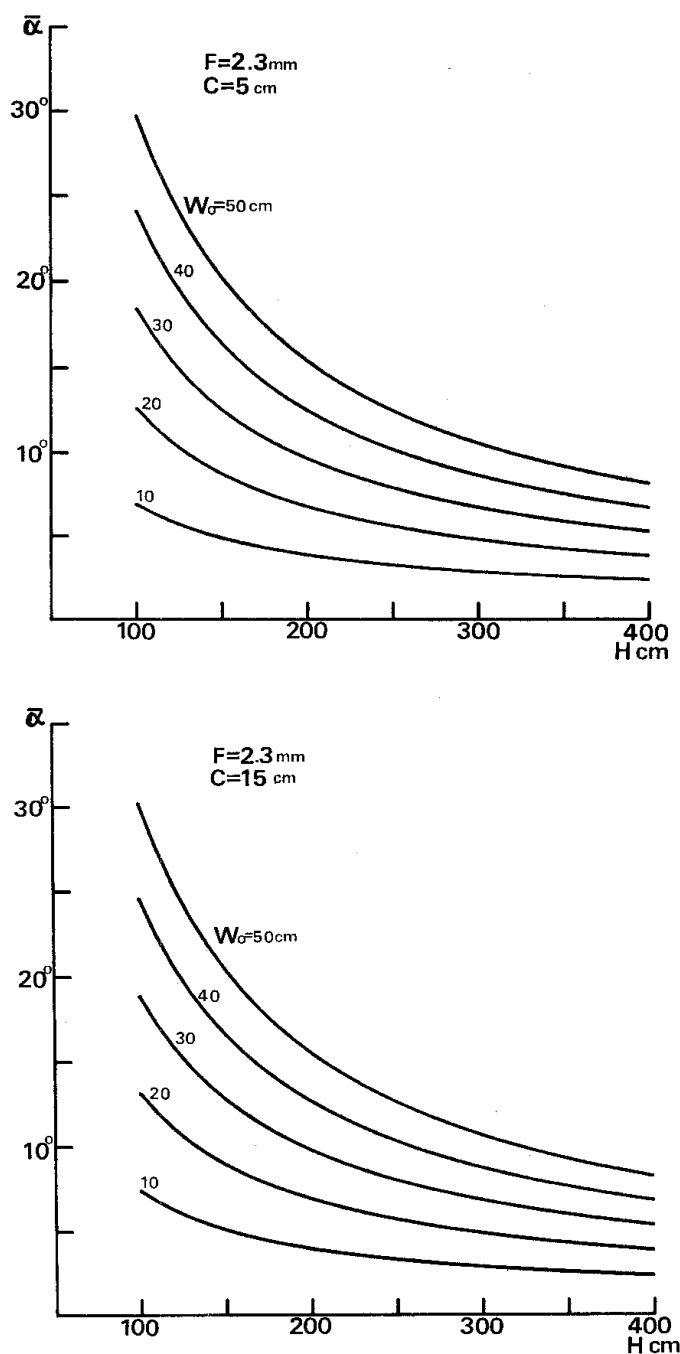


Fig. 7-1, 7-2 Relationship between the radiation-angle of X-ray and the distance from a focus to a film

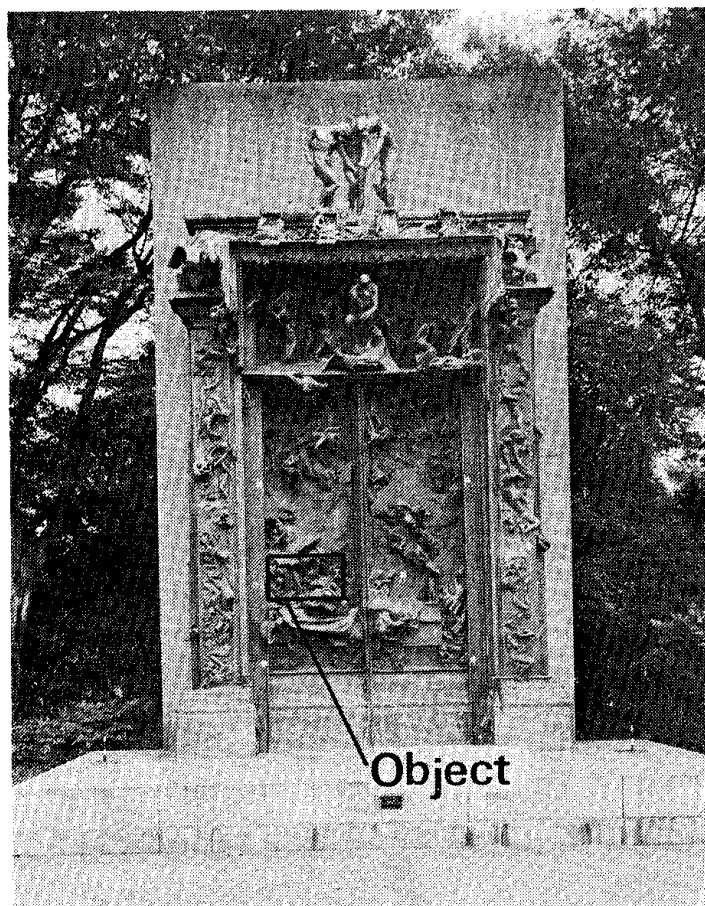


Fig. 8 The Gate of Hell (by RODIN, Bronze)

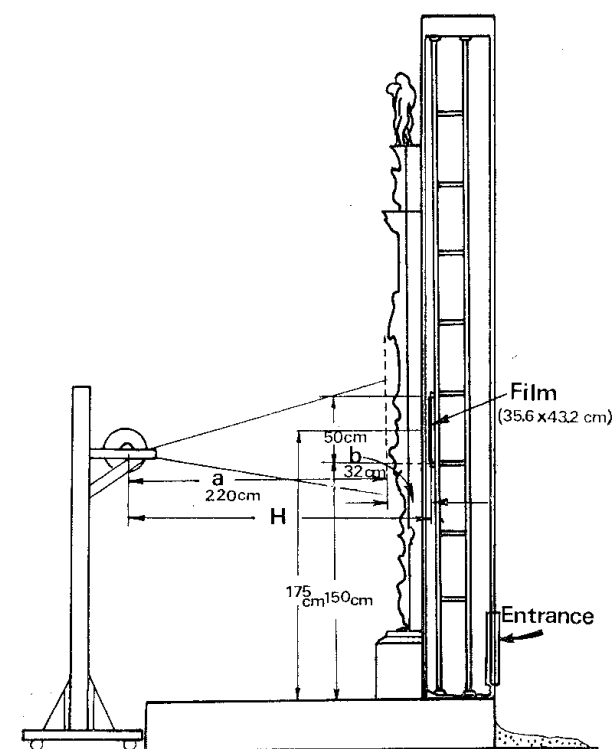


Fig. 9-1 Arrangement of X-ray apparatus and an object

が、現在われわれの使用しているX線発生装置では凡そ 8° 程度回転すればよいことがわかる。

つぎに、 α (実効放射角と名づける) に関する計算は、その計算過程が複雑であるからここでは省略し、その関係をグラフ (Fig. 7-1, 7-2) で示す。放射口径 W_s は、 T を焦点と窓の間隔の概略値とすると

$$W_s \approx 2T \tan \frac{\alpha}{2}$$

によって決定される。

5. 調査の実際

今回の調査は、はじめに触れたように当初、透視写真による亀裂の有無等の調査にあった。その調査過程において、亀裂の大きさ、それらの位置関係を知ることが必要になり、一つの試みとしてX線解析写真測量法を適用してみることとなったため、その撮影範囲は対象の一部に限

られた (Fig. 8 参照)。

(1) 撮影装置の配置関係

撮影対象が大きいため、今回は水平写真法によって撮影した。

距離関係

H : 約 252 cm, B : 約 63 cm, b : 約 32 cm したがって $B/H \approx 0.25$ となる (Fig. 9-1 参照)。

フィルムの固定

被写体の背後に組立てられたアルミ製の骨組みの梁の部分に、厚さ 2 mm, 80×50 cm のアルミ板がとりつけられ、そのアルミ板にフィルムを装填したフレキシブルカセット (ビニール製) がとりつけられている (Fig. 9-2)。

標定基準点と写真指標

基準点としては、幅 1 mm の十字の刻み

こまれた直径 3 cm, 厚さ 1.5 mm の鉛板が使用されている。この十字マーク 8 個が被写体の前面で空間的なバラツキをもたされて配置され, そのうちの 2 個が写真指標としても使用できるように配置されている注)。

注) これら標定基準点の位置は, すべてセオドライトによって, 被写体前方に設定された 2 個所の位置から測定されている。今回のそれら 2 点間の水平距離は 150 cm である。この 2 点を含む鉛直面内で, それら 2 点を結ぶ水平直線を外部座標系の X 軸, 被写体に向けて左側の 1 点を座標原点としている。また, 被写体上で特徴のある 2 点の位置がセオドライトによって測定されていれば, この 2 点を含む鉛直面内で, それらを通る直線を X 軸とする被写体座標系をつくることができ, 被写体の測定対象点の位置は, 外部座標系からすべて被写体座標系に変換できる。また被写体上に決定できる平面を基準面としてその基準面内に設定される座標系によって測定対象点の位置を示したいときは, 基準面内の X 軸を与える 2 点の他にもう 1 点だけ特徴のある点を選んで, 計 3 点の位置を外部座標系から求めておく。

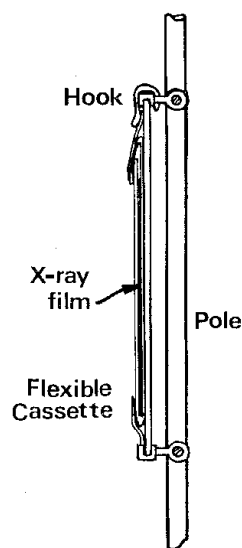


Fig. 9-2 Schematic diagram of a cassette holder

(2) X線発生装置

フィリップス社製, ポータブル X 線発生器, G 301, $V_P: 50 \sim 300 \text{ kV}$, $I_{\max}: 5 \text{ mA}$, 200 V 単相自己整流方式, 水冷, 実効焦点 $2.3 \times 2.3 \text{ mm}$, 窓の大きさ: $26 \times 110 \text{ mm}$ (今回使用) および $70 \times 92 \text{ mm}$, 放射角: 50° , 外径: $358 \text{ mm } \phi$, 長さ 1071 mm。

(3) フィルムと増感紙についての予備テスト (管電圧 295 kV, 5 mA, 10分)

No.	フィルム	カセ ッ テ	増 感 紙	適 否
1	医療用 RX	フレキシブル・カセッテ (ビニール製)	鉛箔 0.01	不 良
2	RX	黒 紙 袋	な し	や や 良
3	RX	黒 紙 袋	鉛箔 0.01	不 良
4	工業用 IX #100	フレキシブル・カセッテ	鉛箔 0.01	や や 良 コントラスト良
5	IX #100	黒 紙 袋	な し	不 良
6	IX #100	フレキシブル・カセッテ	な し	良

(4) 測定結果

写真 (Fig. 10-1) の部分に対する X 線写真 (Fig. 10-2) を実体視用的一对撮影し, これらをステレオコンパレータ (ツアイス社製) にセットして測定した結果を図 (Fig. 11) と表 (Table. 1) に示す。Fig. 10-2 から理解されるように, 単写真ではボルト・ナット像 B, C, D や, ピンの A~D 等の実体をつかみにくい。しかし 2 枚の実体視用 X 線写真を使って実体視すると非常にはっきりとそれらを観察することができ, 正確な判断ができる。また亀裂 Cr. 1, Cr. 2, Cr. 3 等はもとのフィルム上では亀裂像であることがわかるが, Fig. 10-2 のような焼付けたポジでは極めてわかりにくい。しかし実体視すると明確にそれらをつかむ



Fig. 10-1 Scope of the object

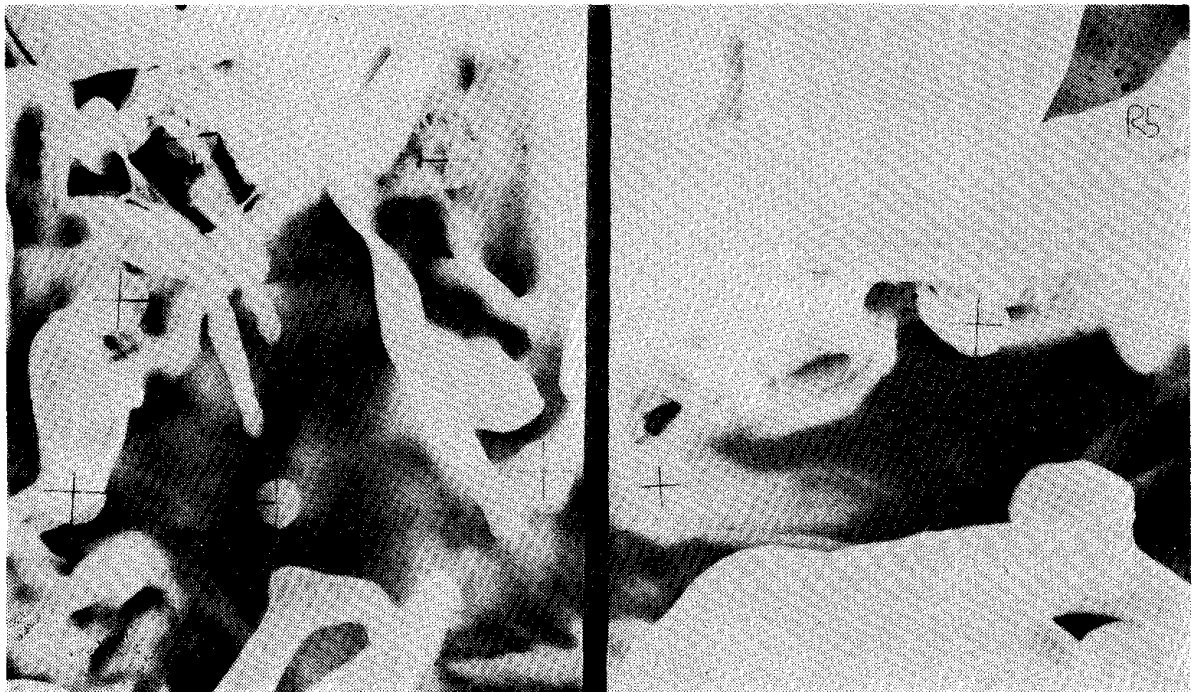


Fig. 10-2 X-ray photograph of the object

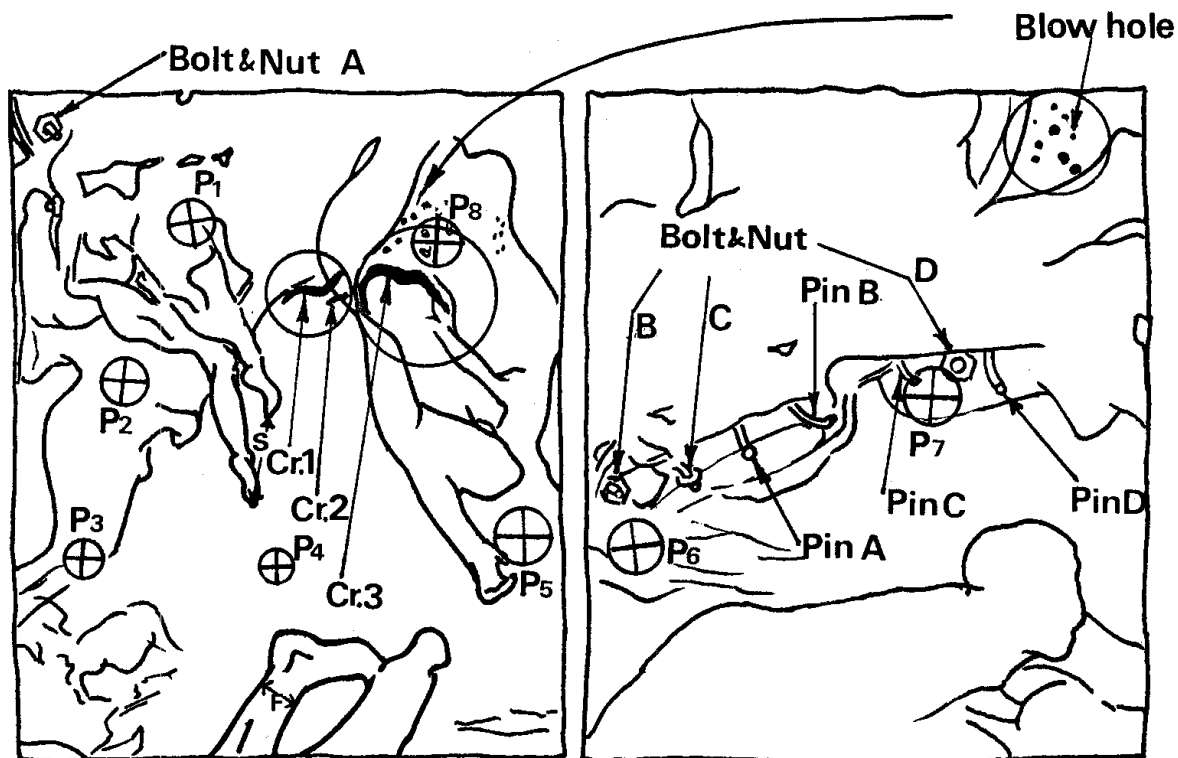


Fig. 11 Explanatory diagram of the observations, where P₁~P₈ are the control points and three cracks are shown by Cr. 1, Cr. 2, Cr. 3.

ことができ、その遠近もよく観察される。これらを実体観測して、三次元計測した値を Table 1 にまとめた。本法による測定値の信頼度を確かめるために、外部から直接測定できる足の爪先間の間隔Sと足首の径Fを巻尺で測ったところ満足できる値を得ていることが確認された (Table. 1 参照)。

6. あとがき

今回の試みを通して、X線解析写真測量は、地獄門のように簡単に解体できないような作品の内部構造調査に役立つことが確認された。この度の経験を生かして、さらに本格的な適用例をつみ重ねたいと考えている。終りに望み、本調査に全面的に御協力いただいた国立西洋美術館学芸課長谷川三郎主任研究官、並に撮影装置の面で御協力いただいた東京芸術大学杉下龍一郎助教授に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 村井俊治, 鈴木芳朗, 中村秀至: 非測定用カメラを用いた写真測量の基礎実験, 日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, 65/68 (1979)
- 2) 操 坦道, 柳瀬敏行, 木村幾生: レントゲンの取扱い方, p. 319, 東京堂華房 (1963)

Bolt&Nut A		119 mm
Pin A		5.8 mm
Distance between cracks in Z-direction		10.7mm, 11.7mm, 10mm
Length of each crack: Cr.1=3cm Cr.2=0.5cm Cr.3=4cm		
	Calculated value	Measurement value with tape measure
S	51.7 mm	52~54 mm
F	24.3 mm	23~24 mm

Table 1 List of the calculated results and the real values measured by a tape

- 3) 呉屋充庸, 金子忠夫, 大崎展靖, 石川陸郎: X線解析写真測量の古彫刻への応用, 日本写真測量学会年次学術講演会論文集, 11/16 (1982)

The Application of Analytical X-ray Photogrammetry in the
Study of 3-Dimensional Objects

—A Case Study of “Gate of Hell”, a Bronze Relief by RODIN—

Mitsuyoshi KUREYA, Sadatoshi MIURA,
Tadao KANEKO and Rikuo ISHIKAWA

This report describes the application of analytical X-ray photogrammetry as an aid in the study of “Gate of Hell” (by RODIN, 1920(?), bronze).

The practical procedures used to investigate the inside structure of “Gate of Hell” and to measure the size and the relative positions of cracks in the relief are described.

In this report, the most appropriate techniques for obtaining sharp images are outlined.