写真測量を利用した三次元の精密測定

——鎌倉大仏の測定を例にとって——

丸安隆和・大島太市・薦岡康子・津田昌明

1. まえがき

鎌倉の大仏は，芸術的にもまた技術的にも最も完成した作品であるといわれている．頭をわずか前に傾けて，手を前に組んで冥想にふけっている姿は何ともいえない奥床しさを感じさせるし，身体の各部の簡素なうちに調和した落付き，物静かな顔付きからは，何か深い魅力を感ぜずにはおられない．

造られた時代からいうと，奈良の大仏の方がだいぶ古いが，奈良の大仏は，何度か戦火の洗礼をうけて，部分的なつくり直しがなされているが，鎌倉の大仏は建立当時そのままの姿で残っているという点で，文化財的には非常に重要な意味を持っているということである．

しかし，大正 12 年の関東大震災のとき，台座がこわれ，大仏もあぶなく傾いたので，修理委員会ができて，現在のように，非常に丈夫な基礎につくり直された．ところが，その後いろいろ調べてみると，首のうしろの方に傷があって，もし関東地震のような大きい地震がもう一度起こると，今度は基礎が非常にがんじょうになっているから，首がこの傷がもとで，もげ落ちるようなことがあるかも知れないというようなことが問題になって，いまのうちに，しっかり調査して，完全な補修をしておこうという話がまとまった．そして再び大仏像の修理の委員会ができて，検査と修理のための仕事が始められた．

そこで，まず必要になったのが，大仏の各部分の寸法がどのようになっているか，重さはいくらか，などという資料である．これがわからないと，地震がきたとき首の根っこにどのくらいの力が働くかが計算できないし，どの程度の補強が必要であるかも正確に知ることができない．

従来，このような物体の寸法を知ろうとすると，まわりにやぐらを組んで，1点1点物差をあてて，やぐらからの距離を測って各点の位置を決めていったのである．しかし，鎌倉の大仏は，いま国際的な観光地であり，毎日万に近い観光客が訪れる．それなのに，大仏のまわりに，あまりにも不似合なやぐらを組んだのでは困るという意見が強く，これにかわって，地上写真測量を利用してみようという話が持ち上がった．

しかし，地上写真測量は，いままでダムの現場や砕石場など，危険で近よることのできない所の地図作成に，大いに活躍してきたのであるが，非常に近い距離にある物体で，しかも要求される測定精度が数 mm という精密測定に利用したことがない．それでまずいろいろ予備的な実験を繰り返して，大仏の精密測定にこれを応用し，予期の成果をおさめることができたのである．

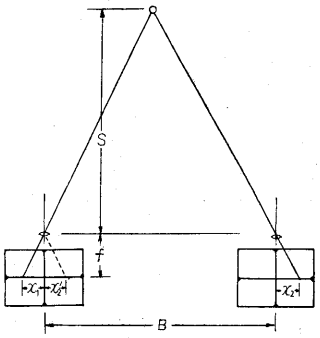
この仕事を行なうについては，修理委員会委員長関野克博士（本研究所教授）に多大の援助と指導をいただいたことを付記し，謝意を表する次第である．

2. 写真測量の原理と写真測量の作業

われわれが立体的な奥行を感じたり，遠近を知ることができるのは，両方の眼が約 65 mm へだたった位置から物を見ているからである．実体感覚は，直接に実物を見ている時ばかりでなく，双眼鏡のような光学器械を通して観察する場合にも起こる．これは，われわれの目が単に目に入ってくる光線の最後の径路だけを認識するという性質によるのである．したがって，もう一歩進めると，左右に適当な間隔だけへだてた2地点から撮影した2枚の写真を，右の眼で右の写真，左の眼で左の写真を眺めることができたら，ちょうどカメラの位置に目をおいて，ながめると同じ感覚が得られ，しかも，この場合カメラの間隔は，両眼の間隔よりも大きいから，実際に目でながめるよりも立体観が一層誇張されて見えることになる．

写真測量は，この原理を使って誇張された立体像について測定を行なうのである．

地上写真測量では，適当な間隔（撮影基線）離してカメラを水平に整置し，平行に2枚の写真をとる．地上の点を X, Y, Z（X は撮影基線，Y は奥行，Z は高さ）であらわすと，乾板面は X—Z 面になり，カメラ軸は Y 方向にむく．たとえば，第1図で，S だけ離れた点にある物体を焦点距離 f のカメラで，B だけ離れた位置で撮影したとすると，写真面にはそれぞれ画面の中心から x_1, x_2 の位置にうつる．これから距離 S を $S=B\cdot f/x_1+x_2$ で求めることができる．したがって，地上写真を使って位置を正確にきめようとすれば，撮影に当たって二つのカメラを水平にかつ平行に据えること



第 1 図

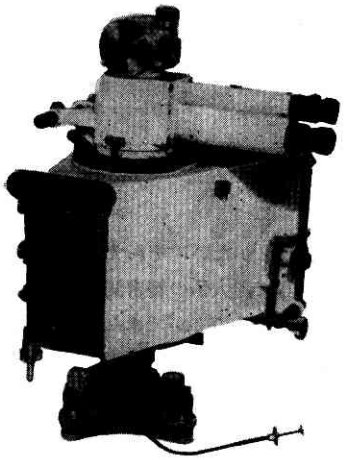


写真1　CⅢB地上写真経緯儀

のほかに，焦点距離（一般にはレンズの中心から画面までの垂直距離），撮影基線が正確にきめられなければならない．また小さい乾板に縮写された映像をもとにして測定するのであるから，レンズのわずかな収差も誤差の原因になるし，乾板面の凹凸や伸縮も，乾板面がレンズ軸に正確に垂直になっているかどうか，ということも，精度に大きい影響を与える．

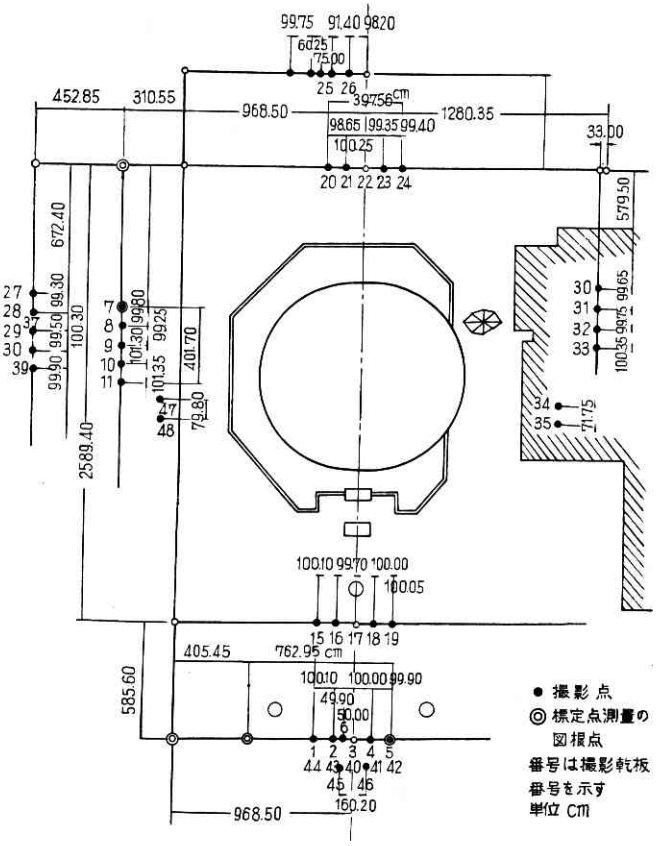
今度の作業には，これらのことを考えて，Zeiss 製の CⅢB 写真経緯儀（写真1）を用いることにした*．このカメラの焦点距離はすでに，正確に測定されているが，今度は近い距離で撮影するので，乾板面の位置をわずかに後に移動し，レンズ中心からの距離を 1/100 mm まで正確に測定した．

撮影した乾板を図化機にかけて測定するときには，およそ 10 倍に拡大して観測し，視野の中につくられている立体像の表面にそって測標という小さい黒点を丹念にたどらせる．正確な追跡ができるためには，できた立体像が鮮明であるとともにあまりコントラストが強くてはこまる．これらのために，乾板には特に調製した極微粒子でフラットに仕上がるような乳剤をぬって使用した．

3. 撮影作業

一般に撮影基線を長くするほど，立体感覚が誇張され測定精度を高めることができる．しかし対象物までの距離にくらべて，基線があまり長すぎると，左右の写真像が余りに違いすぎて，正確な立体像が得られなくなる．

大仏の場合には，割合近い距離で撮影するのと，着物のひだの凹凸がかげをつくるので，何カ所かで撮った写真を適当に組み合わせて，図化に用いることが望ましいと考え，一つの基線上 4〜5 点で撮影を行ない，最も都合のよい写真対を用いて図化するようにした．第2図は撮影基線および撮影点の配置図である．



第2図　撮影点の配置図

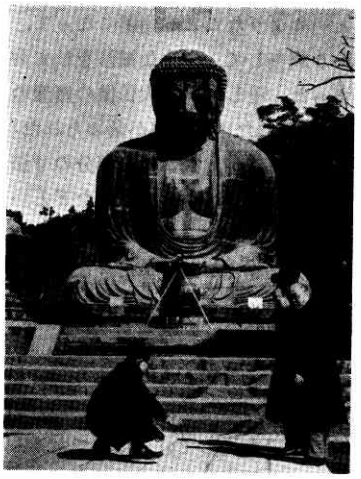


写真2　撮影点の測定

図化精度を高めるためには，撮影点間の距離や，各撮影基線の関係が非常に正確にきめられなければならない．このため距離測定には，検定の終えた鋼巻尺を，測角にはトランシットを用いて入念な測定を行なった（写真2）．

また大仏全体を1枚の写真にうつすことができなかったので，アルミ管で組み立てた脚立をつくり，カメラをこの上にのせて撮影した（写真3）．

用いた乾板は約 10 ダースであったが，このうち実際に図化に用いたのは約その 1/3 である．

* ある模型を 35 mm カメラで撮影し，この写真を測定機にかけて，テストしたが，レンズのひずみのため高い精度の測定はできなかった．

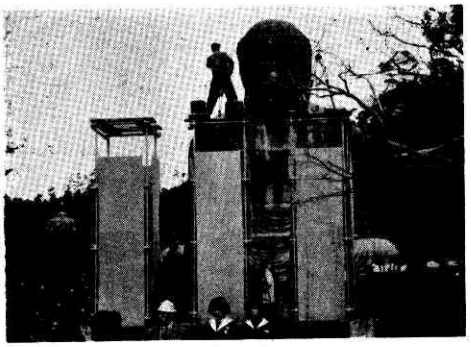


写真 3　撮影作業

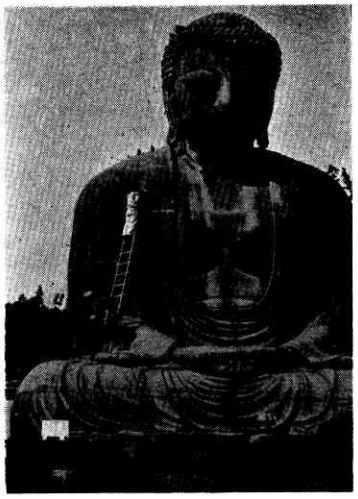


写真 4　標定点の設置

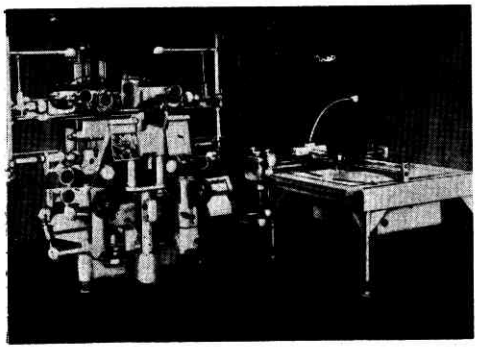
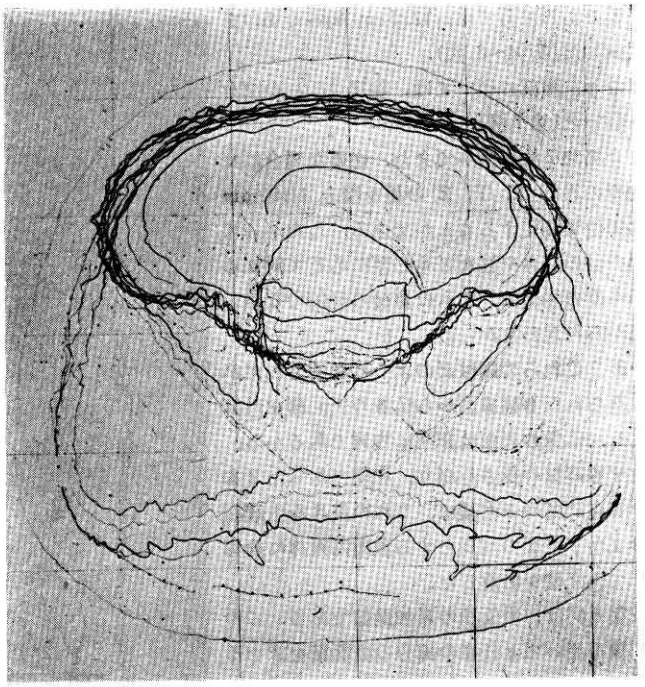


写真 5　ステレオプラニグラフ

図化するときには，あまりコントラストの強いものよりも，いくらかフラット過ぎるものの方が作業し易いので，乾板乳剤にもそのような考慮ははらわれているが，撮影も，太陽光線の直射をさけ，日のでる前か曇天の日を選んで行なうようにした．

実体視するとき，両方の写真がなるたけ同じ調子に仕上がっていることが望ましい．それで，露光に際してはもちろんであるが，現像処理を行なうときにも，特に留意して現像液の温度を一定に保ち，前夜のうちに調整したものを使用した．



第 3 図　平　面　図

4.　標定点について

図化測定はステレオプラニグラフを用いた．この図化機械の構造や原理はすでに多くの文献に示されているがその根本は投射器に乾板をのせ，その後方より光を送って，現地と同じような光模像をつくり，この光模像について測定を行なうのである．したがって，測定精度を高めようとすれば，ここにできる光模像は，実際の対象物の正確な縮図でなければならない．地上写真測量ではカメラの関係位置や撮影方向は十分正確にきめて撮影できるが，なお一層正確を期するため，また，正面，側面，裏面から行なう測定の関係をつけるため，正確な縮尺をきめるためなどの目的で，適当な位置に標定点を設け，(写真 4) この位置を別に精密に測定した．そして，その位置を図化に先立って図紙上に展開しておき，写真から測定して得られた点の位置がこの点とどの程度によく一致しているかによって図全体の正確さを知ることができるし，また所望の精度になるまで器械の規正および標定作業を行なうよりどころとなるのである．

5.　図　化　作　業

図化作業は前述のようにステレオプラニグラフ C5 によった．この器械は構造上 Y 軸と Z 軸の切換えができるので，地上写真を用いる場合，一定の高さの水平面で切った切口を描くこともできるし，撮影基線に平行な鉛直断面で切った切口（これは航空写真を用いたときの等高線と同じ）を描くこともできる(第 3 図)．

実際には，全体の縮尺 1/20 の図を正面，側面，裏面から描き，これに 25 cm 間隔の，また特に細部を示す

必要のある部分では，12.5 cm 間隔の切口を描画した(第 4〜6 図).

なお，頭部については，縮尺 1/10 の図をも描いた(第 7 図).

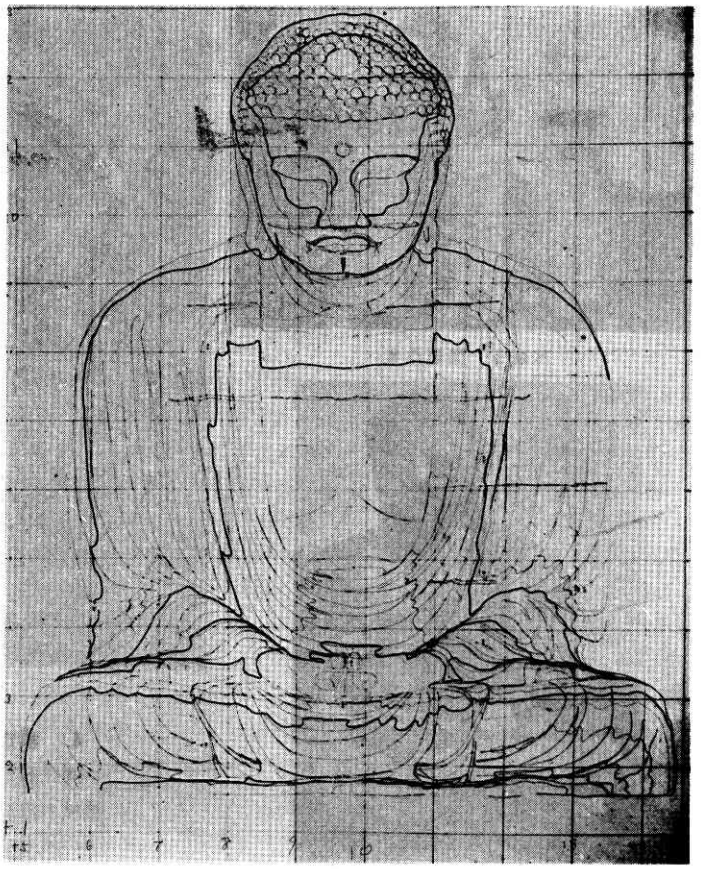
全部で 7 枚の図ができた．必要な場合には任意の点の X, Y, Z の値を図上 1/100mm の単位で測定することができる．したがって口や目の長さや幅なども必要に応じて測れるが今度の場合は，これは直接の目的でなかったから行なわなかった.

6. これらの図はどのように利用されたか

得られた等高線図から仏像の表面積を計算した．仏像の表面は非常に複雑であるから，まず等高線の長さを測り，相隣りあった 2 本の等高線間の表面積は，これの長さを上底面および下底面の周長とする截頭円錐体に換算して表面積を計算した.

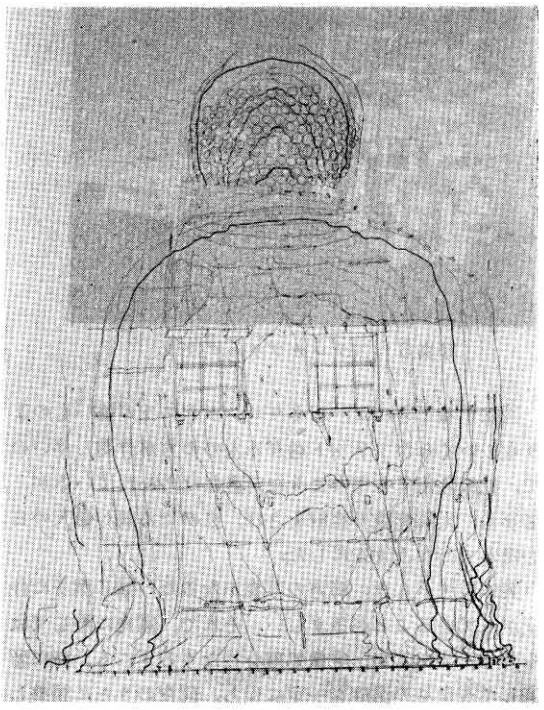
第 8 図は，表面積の累加曲線である．この曲線を用いると任意の部分の表面積を求めることができる.

まだ，厚さの精密な測定ができていないが概測した結果を総合して第 8 図中に示した頻度曲線が得られた．これから平均の厚さを 5.1 cm とし，青銅の比重を 9.0 とすると，仏像全体の重さは 128 ton となる．また，頭部だけの重さは約 20 ton である.



第 4 図　正　面　図

第 5 図　側　面　図



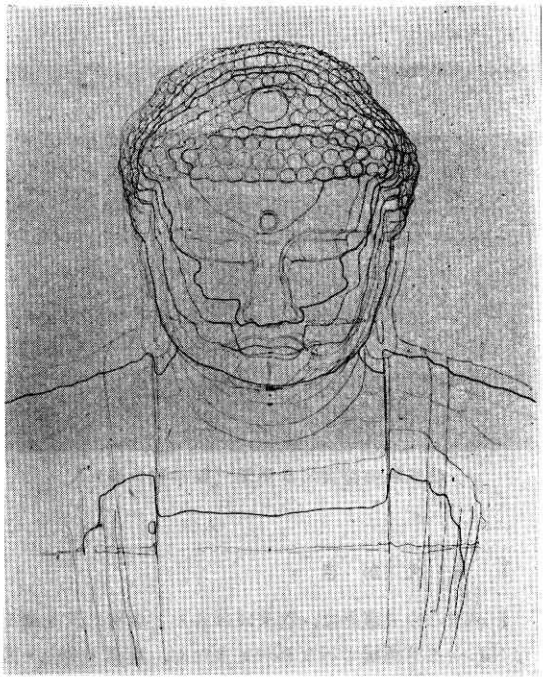
第 6 図　裏　面　図

これらの図からさらに各部分の重心位置を求めている．

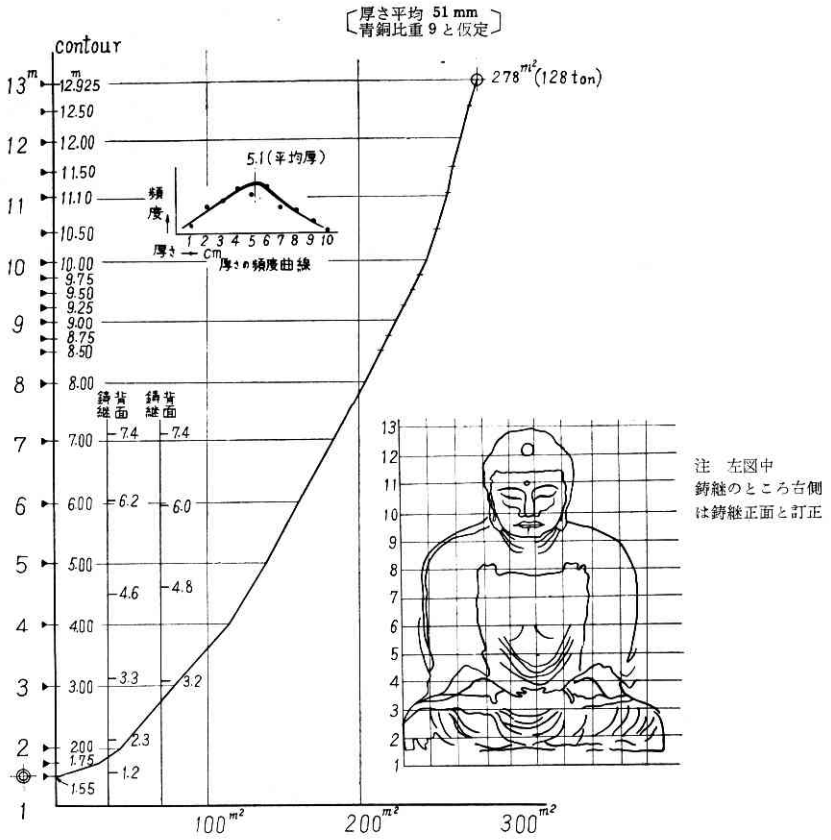
7. む す び

この大仏の実測は，割合近い距離にある物体を地上写真を用いて三次元的にどの程度に精密に測定できるか，また，どんな作業方法によればよいか，などの新しい問題を実際に解決するための貴重な実例であった．解決しなければならない問題はいくつか残ったとはいえ，この結果は複雑な形をした物体，または直接測定できない物体の測定に極めて有効に利用できることを示した．この結果をもとにして，昨年 11 月から行なわれているインド遺跡調査には，地上写真による測定が実際に応用された．海外における調査には，特に時間的な制限もあり，再測する必要がおこったときにも，それが不可能であるということもあるから，これに写真測量が利用できるということになると，経費や時間を節減できる上に正確な資料を得られるという点で，今後その利用価値がますます多くなることが想像できるわけである．

(1960. 4. 25)



第 7 図　頭部正面（縮尺 1/10 の図）



第 8 図