

(論文)

# 熱間大型鍛鋼品の形状計測装置の開発

## Development of Shape Measurement System for Hot Large Forgings



岡本 陽\*  
Akira OKAMOTO



和佐泰宏\*  
Yasuhiro WASA



香川恭徳\*\*  
Yasunori KAGAWA

In conventional forging processes, workers used to approach hot forgings to measure the shape of the works. In order to reduce the hard labor in severe heat and improve the stability of the measurement, a shape measurement system for hot large forgings, such as a shell ring or rudder stock, has been developed. A highly stable measurement was achieved by applying image measurement technology such as binocular stereo methods.

まえがき = 石油精製用圧力容器(リアクタ)に用いられるシェルリング, 船舶の舵を回転させるラダーストック, 船舶用ディーゼルエンジン用組立型クランク軸のクランクスローやジャーナル軸などの大型鍛鋼品は, 当社鍛冶工場の8,000tや4,000tプレスにより所定の形状に鍛造され, その後, 製品形状とすべく切削加工が施される。鍛造加工は, 加熱炉により高温(約1,200)に加熱されたインゴット(鍛造ワーク)をプレス機の下に設置し, この鍛造ワークが所定の寸法や形状になるようにプレス作業を行う。プレス作業における形状確認方法として従来は, プレス作業を一時停止した後, 作業者がプレス直下の熱間鍛造ワーク(500~900)に近づいて, パスを用いた寸法測定や実物大の鋼板製テンプレート「ガバリ」を熱間ワークに直接接触させて寸法確認することが行われてきた(図1)。しかし, この作業は酷暑環境で行われるため, 作業負荷が非常に高く, また, 人による計測ばらつきが多かった。

そこで,

- ・作業者の負荷低減(酷暑作業や, プレスコラム内の特別管理作業の低減)
- ・寸法不良による廃却損失防止, 手直し費用削減
- ・計測時間短縮(鍛造時間の短縮)

を狙いとして, 鍛造中の熱間大型鍛鋼品の寸法を高速・高精度に測定する計測装置を開発し, 実用化した。

### 1. 操業現場や対象物の特徴に適した画像計測技術

測定対象である大型鍛鋼品は, 測定結果に応じて再度鍛造されることがあるため, 測定可能な広い場所まで移動させることができない。このため, 鍛造作業中もしくは鍛造作業を一時中断している間に, その場(プレス直下)で迅速に測定する必要がある。また, 操業現場では設備の制約から, 計測ヘッドにおいても設置可能な場所



Rudder stock : checking alignment by using steel board



Throw : checking alignment by using steel board



図1 鍛造中の形状確認作業

Fig. 1 Shape confirmation work under forging

\*技術開発本部 生産システム研究所 \*\* 鍛鋼事業部 鍛鋼工場 製造部

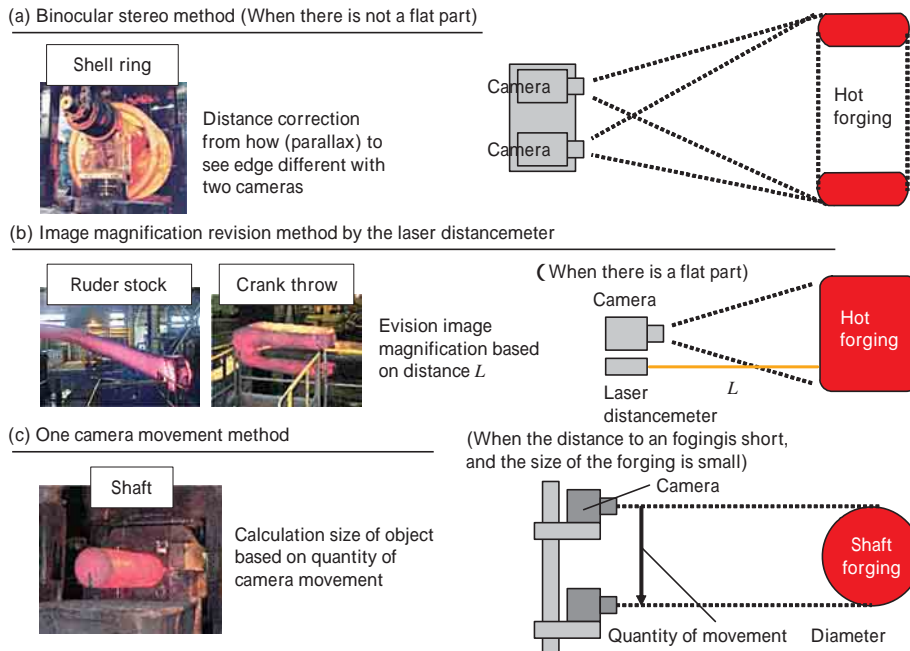


図2 測定対象に応じた形状計測技術の選定  
Fig. 2 Selection of shape measurement technology according to measuring object

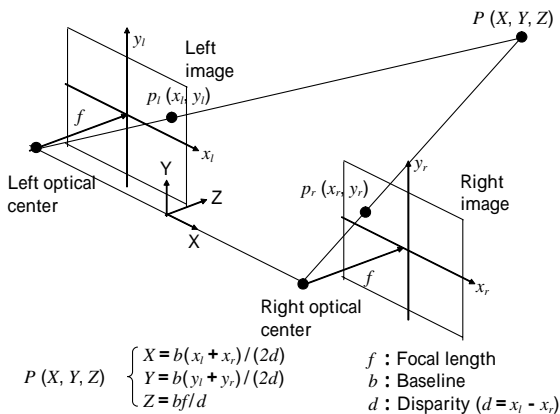


図3 両眼ステレオ法の原理  
Fig. 3 Measurement principle of binocular stereo method

も限られ、計測ヘッドを自由に配置できない。

そこで、熱間鍛鋼品形状や鍛造状況、あるいは操業現場の設備に応じて、適切な画像計測技術を選定する必要があることから以下の3方式を開発し、安価でコンパクトな設備として実用化させることができた(図2)。

- (a)「両眼ステレオ法」...対象に平坦部がない場合(シェルリング)において、端部エッジが明確であることに着目し、カメラを2台使用して2箇所から撮像し、異なるエッジの見え方から3次元計測する手法である<sup>1)</sup>。具体的には、図3に示すように $f, b$ が既知のもとで、左右の画像上の投影座標から、3次元位置 $P(X, Y, Z)$ が計算できる。
- (b)「レーザ距離補正法」...対象に平坦部が存在する場合(ラダーストック、クランクスローなど)には、レーザによる距離測定を行い、あらかじめ校正しているレンズパラメータを用いて距離倍率補正する手法が利用できる。高精度測定はできないものの、計測ヘッドをぶつけても容易に修復可能で、現場でのメンテナンス性に優れている。

(c)「単眼カメラ移動法」...対象物までの距離が比較的短く、対象物のサイズが比較的小さい場合、カメラ1台を移動させることで対象物の大きさ(直径)を測定する手法である。計測ヘッドの設置場所の制約のため、丸棒の軸方向から測定できない場合に、横から丸棒直径を計測することができる。

## 2. シェルリング形状計測

シェルリングの形状計測には「両眼ステレオ法」を適用した。熱間シェルリング(外径4~6m)から約20m離れた場所に両眼ステレオ用センサヘッドを常設している。センサヘッド外観および、計測画面例を図4に示す。本装置はシェルリングの外径/内径/厚さ/軸方向長さなど、形状確認に必要な寸法を同時にリアルタイム測定することができる<sup>2)</sup>。

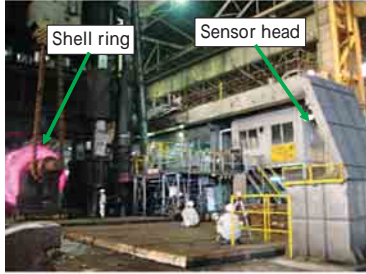
### 2.1 熱間物体形状を高精度に測定する光学キャリブレーション

#### 2.1.1 外部照明不要な自発光撮像方式

熱間鍛鋼品の自発光(赤外光)を利用することで、レーザ光などの能動的な照射光は必要とせず、光学フィルタ(赤外透過フィルタ)装着やレンズ絞り、カメラゲインの最適化により、シェルリング外形特徴量である外径や内径のエッジコントラストを向上させた。図5にカメラで撮像したシェルリング画像例を示す。背景(図5の )は暗く、シェルリングは明るく写る。さらに、シェルリングの軸方向の遠くない位置(無限遠方でない位置)にカメラを設置しているので、通常はシェルリング内面も観測される。シェルリング内面は、内面反対側からの輻射熱により、温度が下がりにくい。その結果、シェルリングの端面(図5の )より、内面部(図5の )は温度が高くなり、画像内の明るさレベルはシェルリングの端面より内面部が高くなる。すなわち、画像の明るさは、 の順で暗くなるため、これを利用するこ



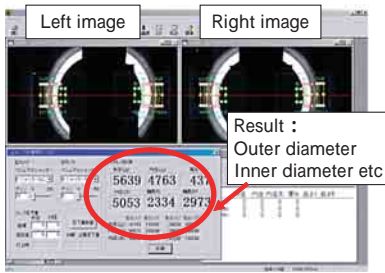
(1) Shell ring forging



(2) Palce of sensor head



(3) Sensor head



(4) PC monitor

図4 シェルリング形状計測装置の外観

Fig. 4 Appearance of shell ring shape measurement equipment

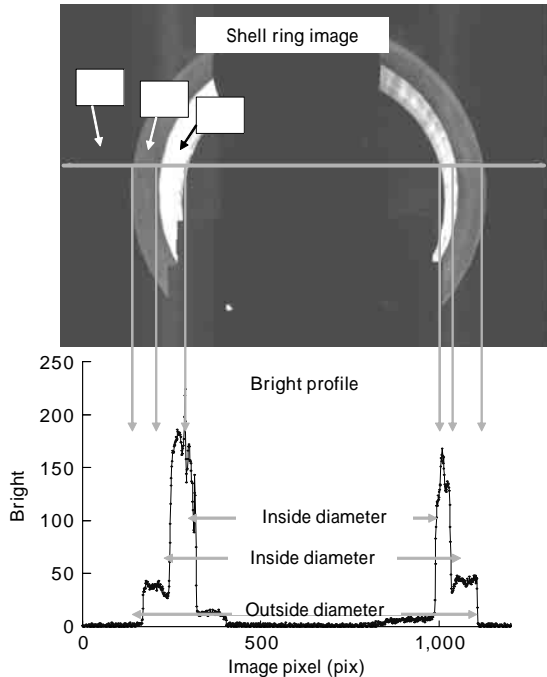


図5 熱間シェルリング画像

Fig. 5 Hot shell ring image

とによってエッジ抽出が比較的容易になる。

### 2.1.2 赤外波長に対応した光学キャリブレーション

約20m離れた場所から10mm精度で計測するには、サブピクセル精度の画像計測が必要であり、そのため、光学パラメータを精度良く算出することが必要である。

赤外光は、可視光とレンズ屈折率が異なるため、見え方が異なる。こうした特性をもつ赤外光を使って光学キャリブレーションを行い、焦点距離などの光学パラメータを導出した。また、最大直径6mのシェルを測定するには、画像端すなわちレンズ周辺部まで使用する必要があるが、赤外光の場合、レンズ周辺部付近では図6右グラフに示すように3画素程度のレンズわい曲収差が存在する。このひずみ量を5次式で近似することで1画素以下(サブピクセル精度)で補正でき、熱間物体(500以上)の高精度計測(0.2%オーダー)を可能にした。

### 2.2 ラボ実験および現場実験結果

本システムの有効性を確認するためラボ実験を実施した。2個の小さな熱間物体を長さ既知の間隔(D=4, 4.5, 6m)で設置し、約15m離れた場所からこれら2物体の外側エッジを画像計測することでその距離(間隔)を算出した。その結果を図7に示す。計測精度±5mm以下で測定できることを確認した。

次に、実ワークである鍛造時の熱間シェルリングの外

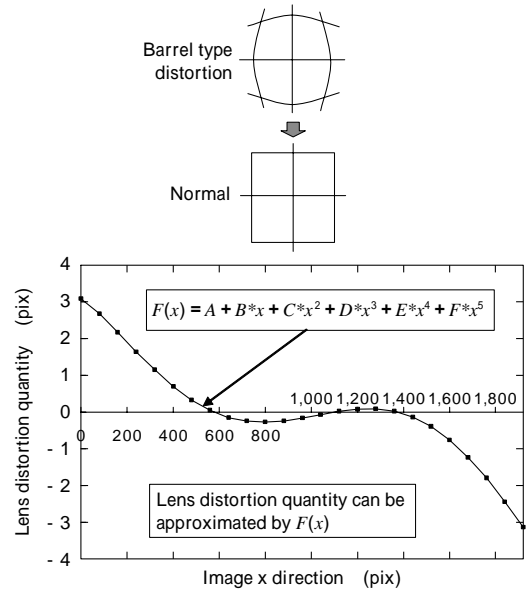


図6 レンズ歪曲収差の補正

Fig. 6 Calibration of lens distortion

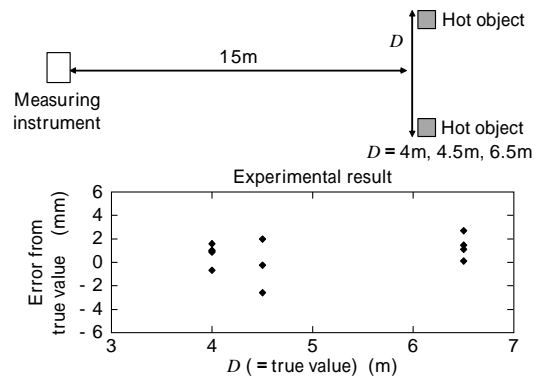


図7 直径計測のラボ実験結果

Fig. 7 Laboratory experimental results of diameter measurement



径計測結果を本手法と従来法とで比較した。ここでいう従来法とは、下記(1)~(4)の手順で実作業において従来から直径計測している手法である。

- (1) 作業者がシェルの右端に「的」を設置する。
- (2) レーザ距離計を用いて、的までの距離  $L_1$  を測定する。
- (3) レーザ距離計を用いて、シェルの左端までの距離  $L_2$  を測定する
- (4)  $L_1-L_2$  を直径とする。

本手法および従来法による測定結果を図8に示す。従来法との差異が約  $\pm 10\text{mm}$  で良好な結果となった。

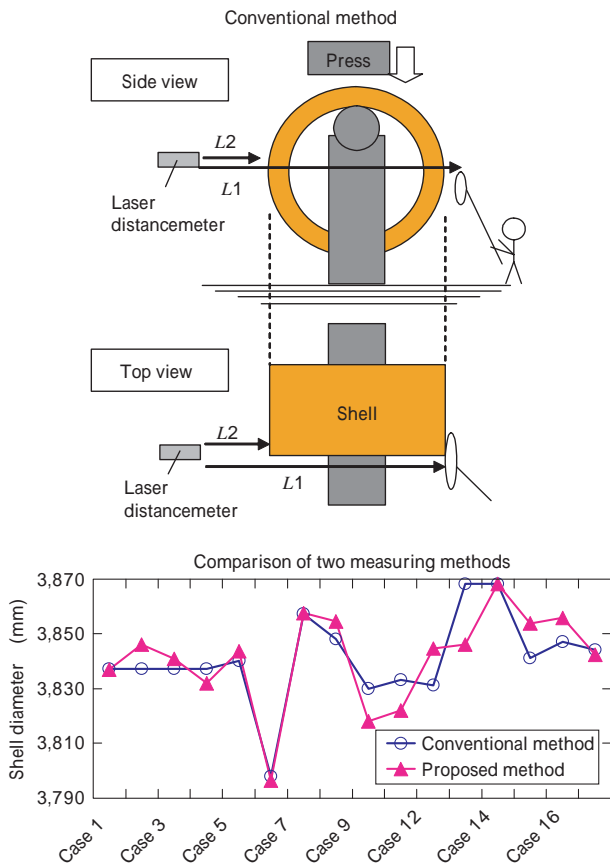


図8 本手法と従来法との比較実験

Fig. 8 Comparison of two methods (proposed method and conventional method)

### 3. ラダーストック/クランクスロー形状計測

ラダーストック(全長5~10m)やクランクスローなどの鍛造作業では、従来は実物大の鋼板製の型(ガバリ)を複数人で熱間ワークに押当てる方法で外形形状(取りしろ量、折曲げ位置など)を確認しており、酷暑作業となっていた。そこで、こうした作業者の負荷低減や計測の迅速化を図るため、「レーザ距離補正法」を適用した形状計測システムを開発した。

#### 3.1 システムの構成

本システムは、鍛造ワークを撮像する撮像手段(カメラとレーザ距離計から構成される)、撮像した鍛造ワーク画像と設計データに基づく形状モデルとの形状差異を明確にする目的で、これら2つの形状の重合画像を作成する信号処理部、およびその重合画像を表示し作業員に対して作業指針を与える表示部とを有する(図9)。ここで、撮像手段では、レーザ距離計を使用して対象物までの距離を測定することにより、距離に応じて形状モデルを倍率変換して重ね合わせることができる。また表示部においては、プレス作業者は、操作室内のPC画面に所要部位を拡大表示できるほか、寸法も容易に測定できるなど、鍛造作業における有用な指針を得ることができる。

#### 3.2 測定精度および結果

実物大の鋼板の型(ガバリ)を鍛造ワークに押当てた映像に、本システムの形状モデルを倍率変換して重ね合わせた映像例を図10に示す。カメラ光軸に対しワークが

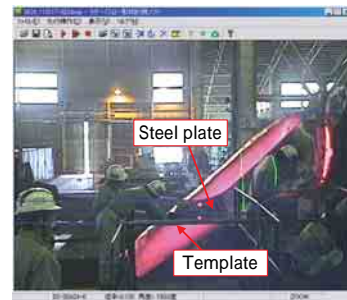


図10 形状モデルと 実物大のガバリを映像上で重ね合わせた映像例  
Fig.10 Example of overlapping image template with steel plate on image

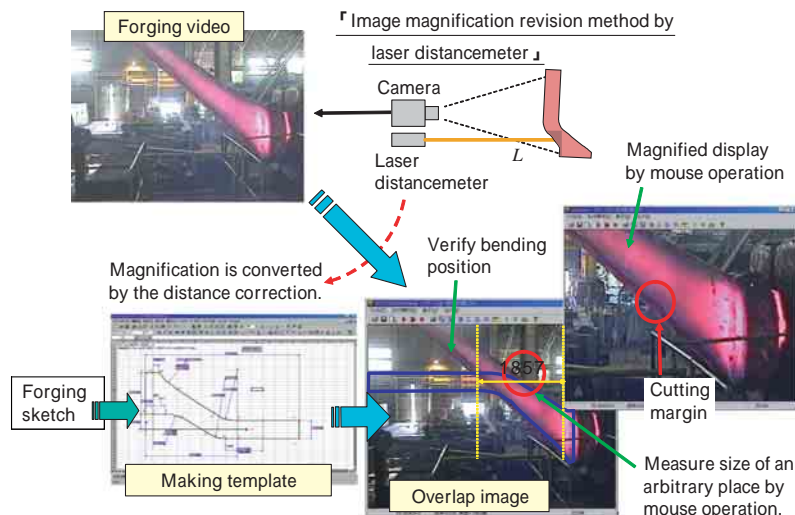
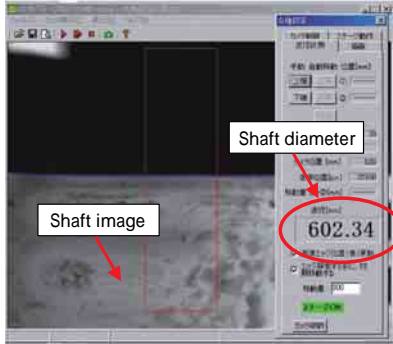


図9 「レーザ距離補正法」によるラダーストック形状計測装置

Fig. 9 Shape measurement system for rudder stock based on laser distance correction method



(1) Appearance of sensor head



(2) PC monitor

図11 熱間丸棒直径計測装置

Fig.11 Diameter measurement equipment for hot shaft

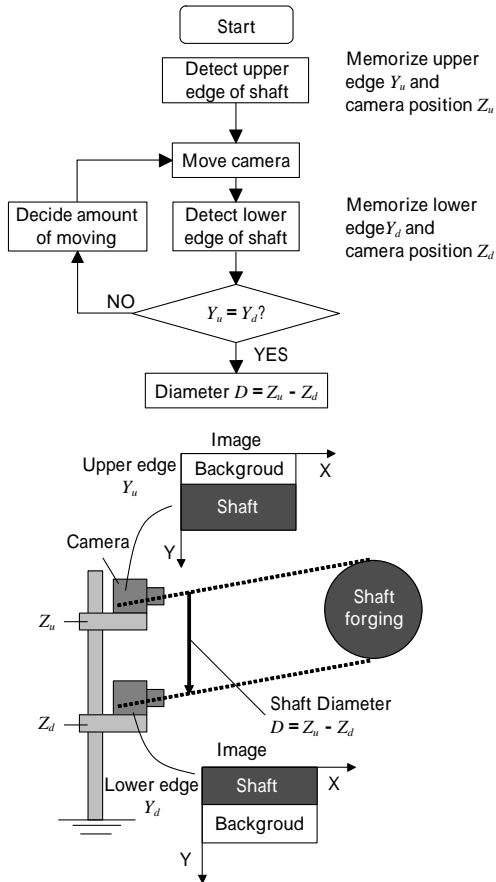


図12 丸棒直径計測の処理フロー

Fig.12 Algorithm of diameter measurement equipment

直角に配置されていれば 10mm 程度の誤差で合致し、十分に実用的であると判断できる。

#### 4. 丸棒直径計測

船舶部品の軸製品（推進軸や中間軸，ジャーナル軸など）や各種丸棒についても，鍛造仕上り直径を確認するため，プレス作業を一時停止させ，作業者が熱間丸棒に近づいて計測していた。そこで，酷暑作業低減，および計測の迅速化を狙いとして「単眼カメラ移動法」を適用した自動直径計測システムを開発した。

##### 4.1 システム構成

センサヘッド部外観を図11(1)に示す。プレスから約 7m 離れた場所に，カメラを上下移動できる移動ステージを常設している。直径計測処理フローを図12 に示す。

(1) カメラで丸棒の上端を含む画像を取得し，丸棒の上エッジを計測する。このときの画像内の上エッジ位置を  $Y_u$  とし，カメラ位置を  $Z_u$  とする。

(2) カメラを下方向に移動制御しながら，丸棒の下エッジ  $Y_d$  を探索し，下エッジ位置  $Y_d$  が画像内の上エッジ位置  $Y_u$  と同じ位置になるまで，カメラがガイドレールに沿って移動 ( $Z_d$ ) する。

(3) 丸棒の直径  $D = Z_u - Z_d$  を計算する。直径計測結果はプレス操作室に設置してある計測画面（図11(2)）で確認できる。本システムでは，丸棒（400 ~ 800mm）の直径を 3 秒程度で測定できる。

##### 4.2 ラボ実験および現場実験結果

本システムの計測精度を検証するため，直径が既知の冷間物体（402mm，502mm，602mm）の直径計測を行った。その結果，精度  $\pm 1\text{mm}$  以下の良好な結果となった。熱間の実ワークを対象に，本システムで計測した結果と作業者による直径計測結果を比較した結果，両者の差異は  $\pm 4\text{mm}$  以下となった。作業者による直径計測結果は，作業者によるばらつきも存在しており，この結果は実使用に耐えうるレベルと判断できる。

むすび = 熱間大型鍛造品の形状を高速・高精度に測定する装置を開発した。これにより作業者の酷暑作業を低減することが期待でき，計測時間の短縮（鍛造時間の短縮）にもつながる。また，本手法は鍛鋼品だけでなく，他の熱間対象物の形状計測に横展開できる。今後も鑄鍛鋼分野や，その他分野での形状計測自動化を推し進めていく予定である。

##### 参考文献

- 1) 松山隆司ほか：コンピュータビジョン，株式会社新技術コミュニケーションズ（1998）p.123.
- 2) A. Okamoto et al. : CAMP-ISIJ, 17 (2004) p.970.