

(技術資料)

熱間鍛造品の形状計測技術による作業安全性・効率の改善

岡本 陽*¹・滝下峰史*¹・佐藤明宏*²・池上智紀*²・緒方啓丞*³

Improvement of Work Safety and Efficiency through Shape Measuring Technology for Hot-forged Products

Akira OKAMOTO・Takashi TAKISHITA・Akihiro SATO・Tomonori IKEGAMI・Keisuke OGATA

要旨

当社鍛圧工場で生産される大型鍛造品（船舶用クランク軸や推進軸などの丸棒素材，プラスチック射出成型用金型などの矩形（くけい）品など）は，自由鍛造プレスにより所定の形状に鍛造される。鍛造工程における熱間鍛造品の寸法確認は，作業者が熱間物に近づきパス測定により行われるが，酷暑作業であることに加え重篤な火傷のリスクがあり，また，立入許容限界内で行う『特別管理作業』の一つである。そこで，パス測定頻度の高い丸棒の直径，矩形品の高さ，段付き丸棒の軸長さについて，画像処理により非接触で高精度に測定できる計測装置を開発し，実用化した。これにより熱間物に近づく作業が大幅に低減し，作業者の安全確保につながり，業務プロセス改善（測定作業の技能レス化）にも役立った。

Abstract

The large, forged products produced at Kobe Steel's forging foundry, such as round bar materials for marine crankshafts and propulsion shafts, as well as rectangular products for dies for plastic injection molding, are forged into their predetermined shapes using a free forging press. In the forging process, the dimensions of hot-forged products are checked by workers using calipers. This task is performed close to the hot products, in an extremely hot environment and with the additional risk of severe burns. It is considered one of the "special management operations" conducted within permissible entry limits, hence the development and putting into practical use of a measuring device that utilizes image processing for non-contact and accurate measurement of the diameters of round bars, the heights of rectangular products, and the axial lengths of stepped round bars, which require frequent caliper measurements. As a result, the need for workers to approach hot products has been significantly reduced, leading to enhanced safety for the workers and contributing to the improvement of business processes by eliminating dependence on the worker's skills in measurement tasks.

検索用キーワード

熱間鍛造品，形状計測，画像処理

まえがき = 当社鍛圧工場では，船舶あるいは陸上発電用エンジンクランク軸用の丸棒素材，そのクランク軸と連動する連接棒，船舶動力用の推進軸や中間軸，プラスチック射出成型用金型（矩形品）などの大型鍛造品を2,000～13,000トンプレスにより，所定の形状に鍛造している。鍛造作業は，加熱炉により高温（約1,200℃）に加熱された鋼塊をマニプレータで把持し回転させながら，自由鍛造プレスにて所定の寸法や形状に造り込んでいくものである。鍛造作業における寸法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品（500～900℃程度）に近づき，パスや寸法棒を熱間鍛造品に直接接触させて行ってきた。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い
- ・ 火傷のリスクがある
- ・ 一時停止中のプレスに近づき立入許容限界内で行う『特別管理作業』の一つであり，重篤な災害を引き起こすリスクをはらんでいる
- ・ 技能や感覚に頼る部分があり，作業や使用するパスの状態による計測ばらつきが大きい

などの問題がある。そこで，これら課題を克服するため，鍛造中の熱間鍛造品の寸法を非接触で迅速かつ高精度に測定する計測装置を開発し，実用化することで，熱間鍛造中の寸法測定作業の作業安全性向上・効率化に貢献したのでその概要を紹介する。

1. 丸棒形状計測

従来，クランク軸や推進軸などの丸棒素材は，プレス作業途中もしくは作業終了時に，所定の寸法に成形されているかを確認するために，作業者が熱間鍛造中の丸棒に近づき，丸棒直径のパス測定や金尺による直径の測定を行っていた（図1）。とくに丸棒のパス測定は頻度の高い作業であるため，過去にも参考文献1）に示す計測手法で丸棒直径を計測する装置を開発したが，カメラを移動させるため計測に時間がかかることが課題であり，より早く，安定して直径を計測できる別の手法が求められていた。

1.1 丸棒直径計測装置の概要

開発した計測装置仕様を表1に示す。本計測装置の計測ヘッドは，近赤外波長領域に感度が高い高解像度モ

*¹ 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター *² 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット鋳鍛鋼工場製造部 *³ 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット鋳鍛鋼工場技術部

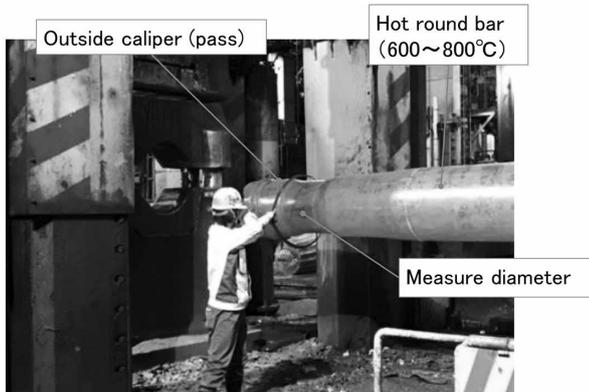


図1 丸棒のパス測定

Fig.1 Round bar diameter measurement by using outside caliper (pass)

ノクロカメラと、丸棒までの距離を測定するレーザ距離計と、カメラとレーザ距離計を搭載している台を上下に傾けて熱間丸棒を測定視野内に移動させる自動ゴニオステージで構成される (図2 (a))。計測ヘッドの設置場所は、プレスから5~10 m程度離れているが、高温、粉じん環境であるため、計測ヘッドをケーシング内に格納し、さらにケーシング内をエアージシ正圧にすることで計測ヘッドを輻射 (ふくしゃ) 熱および粉じんから保護している。計測ヘッドの外観の2例を図2 (b) に示す。

次に直径計測原理について説明する。まず、撮影した画像例を図3に示す。図3に示す直径測定ラインの輝度プロファイルにおいて、明るさが急変する箇所を画像処理で、丸棒の上下端点位置として検出する。

丸棒の上下端点位置は図4に示すように撮像面上の aa, bbとして検出される。丸棒が真円であると仮定すれば、レーザ距離計からの距離値dを使うと幾何学的な関係から、丸棒直径 (=半径r × 2) が計算できる。

また、操作インターフェースを図5に示す。画面右上に常にリアルタイムで直径の概略値が表示されている。そして本測定するときには作業者が左上ボタンを押すと、本装置は、

ステップ1: 測定誤差の少ない画像中央付近に丸棒が映るように、自動ゴニオステージが自動で動く。

ステップ2: 丸棒を画像撮像して、画像解析する。

の2ステップで直径が計算され、画面右下に直径の詳細値が表示される。本画面はタッチパネル操作であるため操作性も良い。

1.2 丸棒直径計測装置の現場適用

丸棒直径のパス測定の実施頻度が最も高い4,000トンプレスにてバララン (作業によるパス測定と直径計測装置の併用) を実施した。パス測定と計測装置の計測値の比較結果を図6に示す。Φ275~750 mmの丸棒直径を40回測定し、パス測定と直径計測装置での計測値の差のばらつきは±2.3 mmであった。鍛造品に求められる寸法精度やパス測定自体の測定者によるばらつきを考慮したうえで問題なしと判断し、パス測定を廃止し、計測装置の値を正として実運用を開始した。現在は、他の3プレスにも横展開し、鍛圧工場の主要4プレスで常時

表1 熱間丸棒直径計測装置の仕様

Table 1 Specifications of hot round bar diameter measuring device

Item	Specification
Measurement time	1 second or less
Difference with pass measurement	±3mm or less at temperature 600~800°C
Dustproof/Heat resistant	Air purge flows through the measurement head to achieve dustproof and heat resistant.
Operability	User-friendly interface
Saving measurement results	A function that automatically saves measurement results for confirmation in the event of quality abnormality/equipment abnormality.

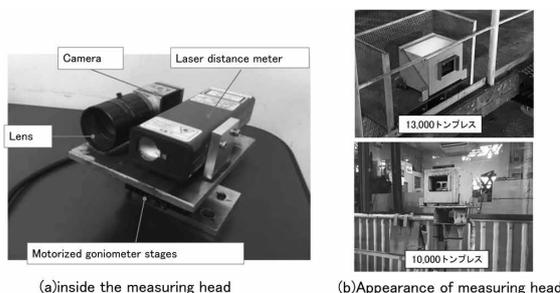


図2 計測ヘッドの外観

Fig.2 Appearance of measuring head

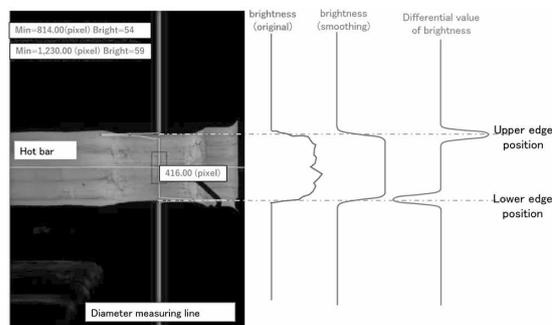


図3 平滑化した輝度プロファイルの微分値からのエッジ検出

Fig.3 Edge detection from the differential value of brightness profile after smoothing processing

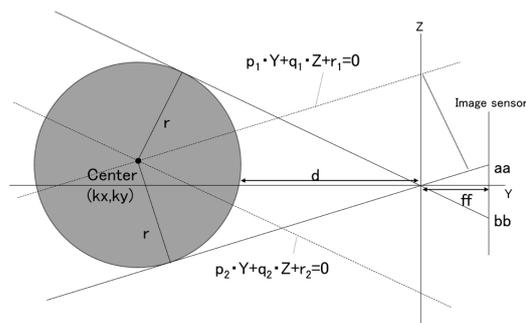


図4 丸棒直径の計測原理

Fig.4 Measuring principle of round bar diameter

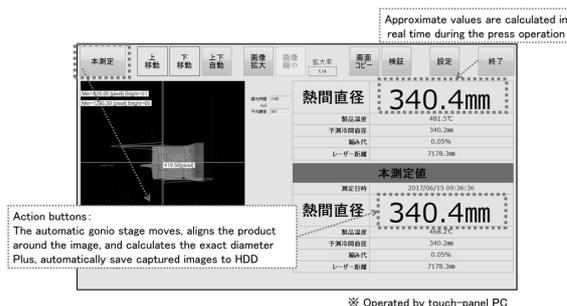


図5 丸棒直径計測の操作インターフェース

Fig.5 Operation interface for round bar diameter measurement

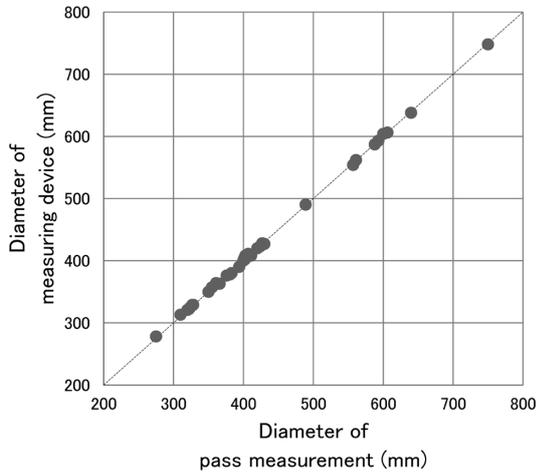


図6 パス測定と計測装置の直径値の比較

Fig.6 Comparison of diameter values between "outside caliper (pass) measurement" and "measuring device"

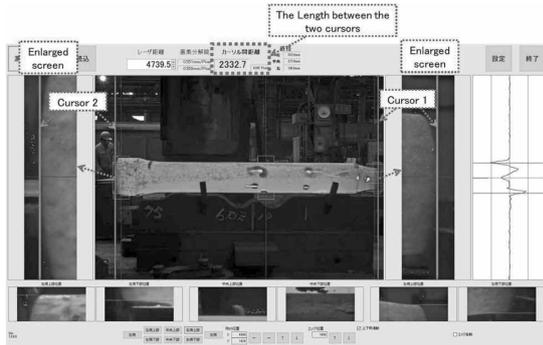


図7 段付き丸棒長さ計測の操作インターフェース

Fig.7 Operation interface for stepped round bar length measurement

活用している。丸棒の直径計測は、4プレス合計で1日あたり10回以上は行われる作業だったが、これをなくすことができている。

1.3 段付き丸棒の長さ計測装置の概要

次に、1.1節の丸棒直径計測装置を応用し、段付き丸棒の長さ計測装置を開発した²⁾。装置構成は、図2の丸棒直径計測装置と基本的には同様であるが、カメラのみRGBカメラに変更した。図7に段付き丸棒長さ計測の操作インターフェースを示す。計測画面上にて、2本のカーソル位置を指定することで、指定したカーソル間の丸棒長さを計測することが出来る。図8を用いて計測原理を説明すると、カーソル指定部の丸棒長さW (mm)は以下の計算式(1)で算出される。

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\Delta W_1 = \frac{L_1 \cdot k \cdot \Delta x_1}{f}, \quad \Delta W_2 = \frac{L_2 \cdot k \cdot \Delta x_2}{f},$$

$$L_1 = L_0 + R_0 - R_1, \quad L_2 = L_0 + R_0 - R_2$$

L_0 (mm) : レーザ変位計を用いて計測したレンズ主点から丸棒までの距離, $\Delta x_1, \Delta x_2$ (pixel) : 画像上のセンターラインからのカーソル指定位置, f (mm) : レンズの焦点距離, k (mm/pixel) : 受光素子のサイズである。また, R_0, R_1, R_2 (mm) は丸棒の半径であるが、1.1節で説明した直径計測と同様の計測原理を用いることで、画像上のサイズ $\Delta y_0, \Delta y_1, \Delta y_2$ (pixel) から幾何学計算により算出

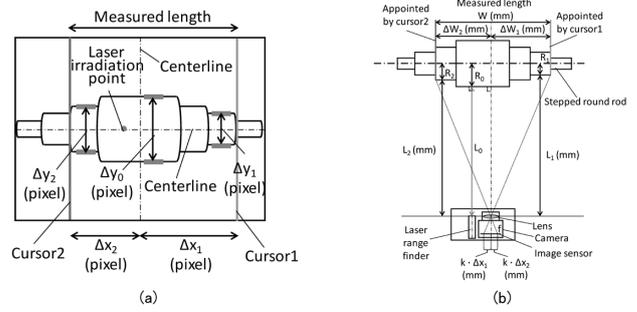


図8 段付き丸棒の長さ計測原理

(a) インターフェースおよび (b) 装置構成の模式図

Fig.8 Principle of measuring the length of stepped round bar. Schematic diagrams of (a) the operation interface and (b) the equipment configuration

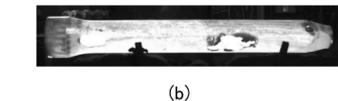
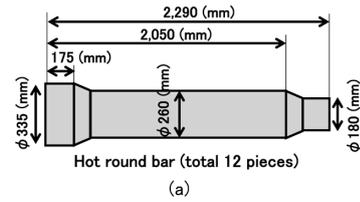


図9 (a) 測定した段付き丸棒の概寸および (b) 写真
Fig.9 (a) Approximate dimensions and (b) photograph of the measured stepped round bar

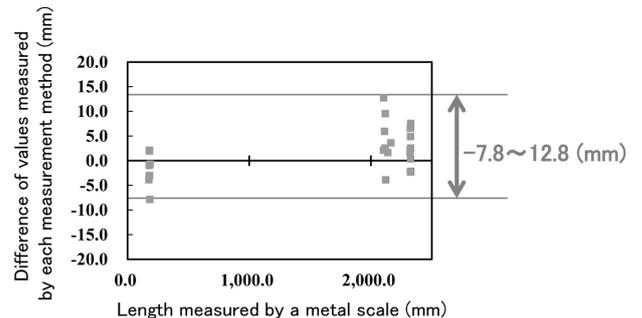


図10 金尺による長さ計測値と計測装置による長さ計測値の差異
Fig.10 Difference of values measured by a metal scale and the developed equipment

できる。

実機検証として、図9に示す段付き丸棒12本に対して、金尺での計測と本計測装置の比較を行った。結果として、図10に示すように計測値との差異は-7.8~12.8 mmとなった。中間工程の鍛造品(荒地)に求められる長さ寸法精度、手計測自体の誤差を考慮したうえで問題無いと判断し、2,000トンプレスにて実運用を開始した。

2. 矩形品の寸法計測

プラスチック射出成型用金型のような矩形品においても、鍛造途中あるいは鍛造終了時に、図11に示すように熱間矩形品の幅や厚みが所定の寸法に成形されているかを現場作業員が熱間物に近づいてパス測定している。高さが1 mを超える大きな矩形品になると輻射熱が非常に大きく、丸棒よりもパス測定の作業負荷が高い。パス測定頻度は丸棒と比べ低いものの、数回/週程度発生

している。そこで、作業の本質安全化をさらに進めるべく、矩形品の寸法測定装置も開発した。

2.1 矩形品の寸法（幅、厚み）計測

計測ヘッド設置場所のスペース制約や保守メンテナンスの簡易化のため、1章で紹介した丸棒直径計測装置のハードウェアを共用し、鍛造品種別に応じて丸棒直径計測用と矩形品寸法計測用ソフトウェアを切り換えるコンセプトとした。

矩形品のプレス作業は、マニプレータで矩形品の端部を把持して、矩形品を回転させながら、矩形品の幅と厚みを所定の寸法に鍛造していく。矩形品の高さを計測する原理を図12に示す。画像計測の観点から見ると、矩形品の幅も厚みも同じように観測されるので、計測対象である「幅」あるいは「厚み」を図12では「高さH」として記述している。

ここで、レーザー距離計出力値L (mm)、下エッジの撮

像上の位置a (mm)、上エッジの撮像上の位置b (mm)、カメラ光軸の仰角 θ (rad)、レンズ焦点距離f (mm)としたとき、

- 1) 矩形品のカメラ側の面は、地面から垂直であること。
- 2) レーザ距離計出力値の0点がレンズ中心であること。
- 3) レーザ距離計の測定方向とカメラ光軸が一致していること。

以上の仮定を置けば、矩形品の高さHは、幾何学的な関係から計算できる。

また、矩形品高さ計測の操作インターフェース画面を図13に示す。図5と同様、タッチパネル仕様となっている。

2.2 矩形品寸法計測装置の現場適用

矩形品についても、13,000トンプレスで、パス測定と計測装置の比較を行った。厚みの測定結果を図14 (a)に示し、幅の測定結果を図14 (b)に示す。図14 (b)に



図11 矩形品のパス測定
Fig.11 Outside caliper (pass) measurement of rectangular product

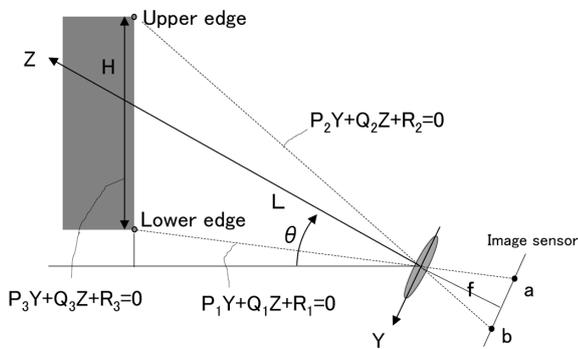


図12 矩形品高さの計測原理
Fig.12 Principle of measuring the height of rectangular products

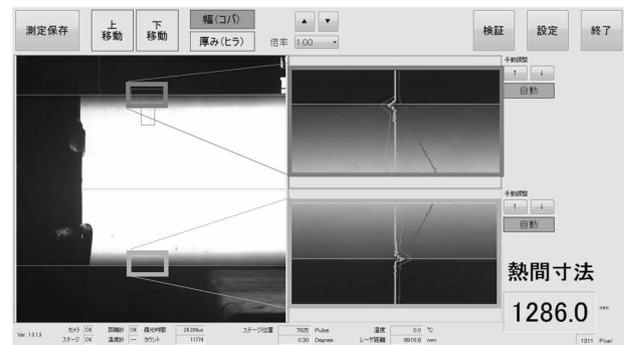


図13 矩形品高さ計測の操作インターフェース
Fig.13 Operation interface for rectangular product height measurement

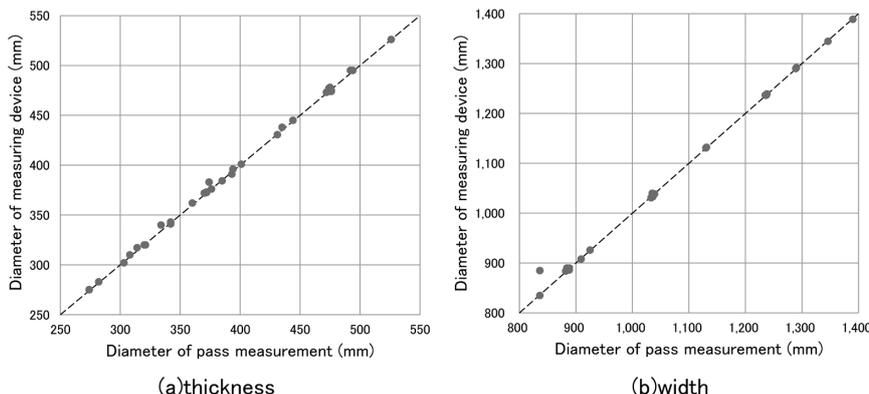


図14 パス測定と計測装置の比較
Fig.14 Comparison of diameter values between “outside caliper (pass) measurement” and “measuring device”

において、エッジ検出がずれて、大きめに計測されているケースがあったが、製品が地面に対して傾いていたことに起因する測定誤差であった。これを除けばパス測定との差異は±3mm以内であり、丸棒と同程度の精度を有することが確認できた。上記の測定誤差を防止するため、製品が傾いている場合は操作画面上にアラートを表示する機能を追加した上で13,000トンプレスでの実機適用を開始しており、約3回/週のパス測定作業を削減できている。今後、他プレスへ水平展開していく。

むすび = 熱間鍛造工程における丸棒の直径、段付き丸棒の長さ、矩形品の厚みと幅を測定する計測装置を開発し、本技術適用により、特別管理作業の頻度が低減でき、遠隔で安全かつ技能レスの寸法測定が可能となった。本作業以外にも、段付き丸棒の偏心ずれ量や丸棒曲がり量など熱間鍛造品の形状を、作業者が目視判断している作業も残っている。引き続き、自動計測の適用範囲を広げる開発を行い、実適用するなど鍛造作業の業務改善に努めていく。

参 考 文 献

- 1) 岡本 陽ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.3, p.29-33.
- 2) 滝下峰史ほか. 段付き丸棒の長さ計測装置の開発. 材料とプロセス. 第181回春季講演大会. 日本鉄鋼協会. 2021, Vol.34, No.1, p.137.