

技術解説

 Technical Review

鍛造品の熱間形状計測技術

森 大輔*¹, 新美清明*¹, 高橋信幸*¹, 濱井拓也*²

Shape Measurement Technology of Hot Steel Forgings

Daisuke MORI, Kiyooki NIIMI, Nobuyuki TAKAHASHI

and Takuya HAMAI

Synopsis

A piece of automatic shape measurement equipment for hot forging has been developed. For example, the material used in the ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) project is an important constituent part of a thermonuclear reactor for which high heat conductivity, mechanical strength, heat resistance and corrosion are required. Therefore, strict measurement precision is required because it is important for the ITER material. Up to now, workers measured using a scale gauge; however, the work took up time and was difficult. Thus, we developed the shape measurement equipment using a line laser and stereo camera system. Due to this, inspection of the high-speed, high-discrimination capabilities, and non-contact is enabled. This paper describes the development results of the line laser and stereo camera system for the ITER material of hot forging parts.

- (1) Reduction of measurement errors due to thermal expansion.
- (2) Development of the measurement algorithm
- (3) Measurement result of the standard plate
- (4) Measurement result of the ITER material just after hot forging.

From these results, this equipment achieved the following performance: "Non-contact measurement for hot forging parts", "Measurement accuracy less than $\pm 10\text{mm}$ at a distance of 6200 mm", and "Less than one minute in measuring time". In addition, it contributed to production cost and the hard labor reductions

1. 緒 言

国際熱核融合実験炉のITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) は、プラズマ同士を衝突して得られるエネルギーを発電に使用する次世代エネルギーの実現性を研究する実験施設である。ITER で用いられる構造部品の1つに、真空容器を取り囲み、プラズマを制御して閉じ込めるための大型重要部品がある^{1), 2)}。これは、大型でかつ、複雑形状であることに加え、高品質であることが求められている。そのため、高級素材として

位置付けられており、特に高品質を裏付ける製品寸法の公差は大型部材でありながら、厳密に管理されている。このITER 部材 (以下、ITER 材という) は、Fig. 1 に示す通り、大型で湾曲形状をしていることが特徴である。

このITER 材は、熱間自由鍛造により成形された後、切削加工工程を経て製造される。熱間自由鍛造時には、次工程での切削加工代を適量確保しつつニアネットシェイプ成形³⁾することが求められているため、寸法精度の厳格な管理が重要視される。そのため、鍛造中に寸法を繰り返し確認しながら、鍛造の打撃回数、圧力、位置

2017年5月12日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

を調整し、形状を寸法公差内へ収めている。

熱間状態で鍛造品が寸法公差内であるかどうかの確認には、作業者が Fig. 2 に示すガバリと呼ばれる所定の寸法に加工された金型を直接当てて判定を行ったり、スケールを当てて寸法を読み取るなどの手法が取られている。



Fig. 1. Bent ITER parts by forging.



Fig. 2. Example of the gabari (gauge template).

しかし、熱間鍛造中は、最大で 900 °C となり、直接寸法を計測することは危険かつ重労働である。さらに、全長に渡っての計測は、多大な時間を要することもあり、作業者の負荷が大きい。そこで、これらの理由から、今回、鍛造品熱間形状計測技術の開発を行った。

2. 開発目標

今回の開発目標を Table 1 に示す。

本報告では、計測対象物を湾曲形状の大型 ITER 材とし、非接触で熱間鍛造品の自動形状計測が可能な装置開発を行うこととし、計測機器と ITER 材までの距離については、現状の設備制約より、6200 mm 離れた距離から非接触で計測する設計とした。

Table 1. Development specifications.

Item	Specification
Target	Hot forging parts (ITER)
Imaging range	5000 mm × 2500 mm
Working distance	6200 mm
Material temp.	≤900 °C
Measurement time	1 min.
Tolerance judgment	≤ ±10 mm

そして、取得した形状データとガバリの CAD 図との形状差異を画像処理により演算し、鍛造機オペレータにガイダンスする。これにより、鍛造機のオペレータは、形状差異の結果をモニタリングしながら、再成形できる仕様とした。

さらに、目標とする計測時間や寸法計測精度については、ITER 材の全長 5000 mm の範囲において 1 分以内、寸法計測精度については、ガバリとの照合精度 ± 10 mm とした。これは、作業者がガバリを用いて計測する時間および照合精度を参考に決定した。

3. 計測方式の選定

非接触でかつ大型熱間鍛造品を精度良く計測する方法として、レーザとカメラを組み合わせた計測方法が報告されている^{4), 5)}。たとえば、レーザ光と三角測量法を組み合わせた光切断法が挙げられる^{6), 7)}。この光切断法は、ライン状のレーザ光とカメラを用いる手法で、計測対象物に照射したレーザ光をカメラで受光する。受光したカメラの素子座標から、距離データに変換し、2次元の形状データを取得することができる。しかしながら、この計測方法の適用には問題点がある。それは、計測対象物と計測機器との位置関係が精度に大きく影響することである。今回の形状計測を例として、Fig. 3 に図示する。

計測機器から ITER 材までの距離を 6200 mm とし、カメラの設置角度に、0.1° の変化が生じたと仮定する。この場合、三角関数で計算すると、10.8 mm の誤差となり、計測精度に大きく影響を与える。また、広範囲の計測データを得ようとした場合、計測機器が走査する必要があるが、同様に計測機器の位置制御精度により、計測精度が低下するおそれがある。

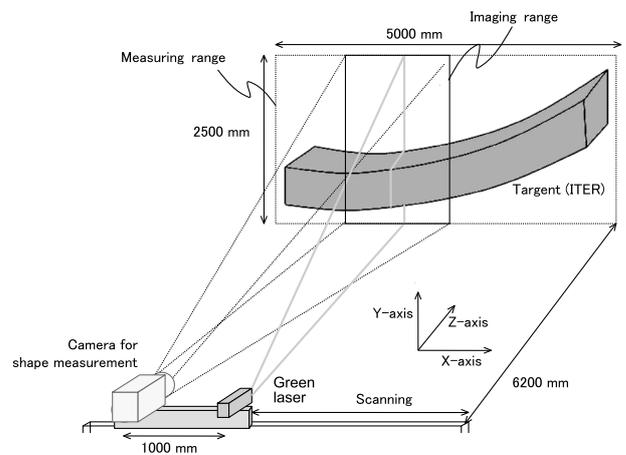


Fig. 3. Examination of the 3D-dimensional shape measurement using light section method.

そこで本報告では、ラインレーザを用いた、ステレオカメラ方式による3次元形状計測技術を開発することとした。Fig. 4に図示するように、このステレオカメラによる3次元形状計測方式は、人間の目の視差と同様の原理であり、近年、自動車の車間距離を計測する方法として取り入れられている⁸⁾。複数台のカメラにより、得られた対象物体の撮像画像を用い、その検出位置座標の差異から、3次元的な位置を認識することができる^{9)、10)}。

今回は、計測対象物にラインレーザ光を照射する手法を採用し¹¹⁾、レーザ光をガルバノミラー制御により首振り走査を行い、その都度、2台のカメラで撮像することとした。今回のITER材へ適用する場合の配置をFig. 5に示す。

この方式のメリットは、レーザの照射位置を2台のカメラで撮像し、視差により距離データとして算出するため、カメラとレーザの成す角度依存による計測精度低下の問題が、大きく改善される。

また、2台のカメラを固定位置のまま6200mm離れた5000mm×2500mmを撮像視野に入るように、光学系および、素子サイズを設計し、カメラ素子サイズあたり2.5mmの分解能で計測できる仕様とした。

以上の検討により、「熱間大型鍛造品を非接触で計測」「計測時間1分以内」「照合計測精度±10mm以内」の実現の目途を得て、鍛造品熱間形状計測装置の実機化を行うこととした。

4. 高精度化の検討

4. 1 熱影響に関する対策

次の課題として、熱間鍛造中のITER材から発せられる熱輻射の影響や気温の変化により、ITER材と計測機器の距離を6200mm離れたとしても、カメラを固定する架台が熱膨張を引き起こす可能性がある。そのため、架台に設置した2台のカメラ間距離が変化することで、計測精度に影響をおよぼすことが考えられる。熱膨張の小さい材料として、ニッケル合金などが挙げられるが、コストや加工性を考慮し、今回は炭素鋼でカメラの取付架台を製作することとした。

そこで、熱影響による計測精度を幾何学演算で検証した。今回は、カメラ1とカメラ2の間隔D=5000mm、温度変化 $\delta T=50^\circ\text{C}$ 、炭素鋼の線膨張率 $\alpha=11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の場合を想定し、カメラ架台が伸びたことによりカメラ2のみが動いたと仮定する。その時の計算をFig. 6および下記にて説明する。

上記の条件において、カメラ間の伸び量 δD は、温度上昇に比例した量で伸び、下記の式で与えられる。

$$\delta D = D \times \alpha \times \delta T \tag{1}$$

温度変化を 50°C として、式(1)に代入すると、

$$\delta D = 5000 \times 11 \times 10^{-6} \times 50 = 2.75 \text{ mm}$$

となる。 δD だけ位置が変化した時のZ方向、ここでは計測対象までの距離 $Z=6200 \text{ mm}$ の変化量を導出しY方向の変化量に換算する。まず、Fig. 6中のカメラに投影される点、 X_L 、 X_R 、 X'_R を計測対象のX座標値 $P(x)=1000 \text{ mm}$ 、焦点距離 $f=8 \text{ mm}$ を用いて、相似関係より求める。

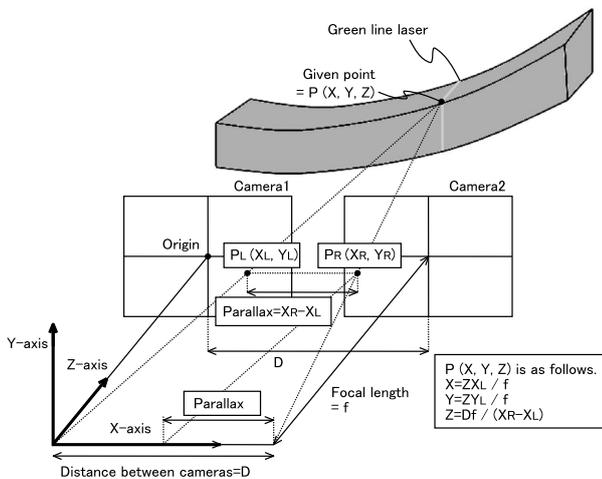


Fig. 4. Principle of the stereo camera method.

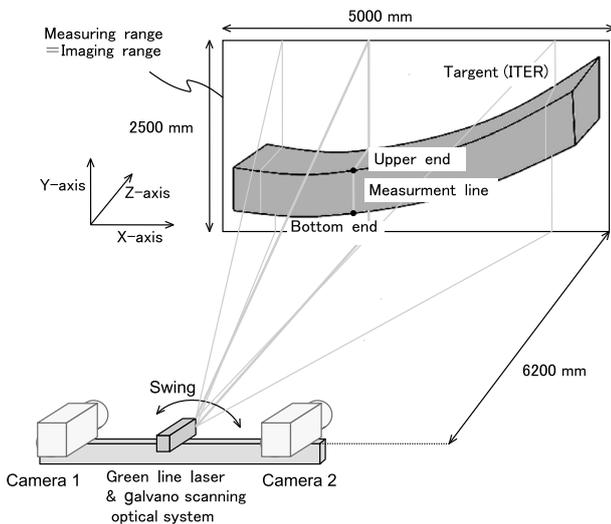


Fig. 5. Examination of the 3D-dimensional shape measurement using stereo camera method and galvano scanning line laser system.

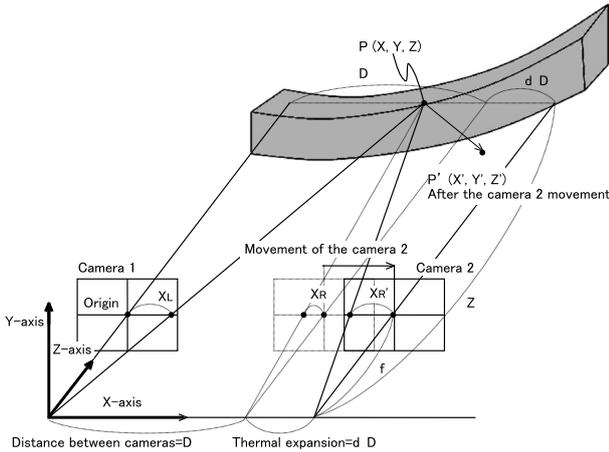


Fig. 6. About the distance measurement error following position deviation of stereo camera.

$$X_L = \frac{f \times P(x)}{Z} = 1.2903 \text{ mm} \quad (2)$$

$$X_R = \frac{f \times (D - P(x))}{Z} = 5.1613 \text{ mm} \quad (3)$$

$$X'_R = \frac{f \times (D + \delta D - P(x))}{Z} = 5.1648 \text{ mm} \quad (4)$$

最後に、カメラ1は固定のままカメラ2のみがX軸に平行移動した時に得られる計測対象までの距離Z'は、下記の(5)式に表される。

$$Z' = \frac{f \times D}{X_L + X'_R} = 6196.4 \text{ mm} \quad (5)$$

本来、計測される対象物の位置Zは6200mmで与えられているため、距離の誤差δZは、

$$\delta Z = Z - Z' = 6200 - 6196.4 = 3.6 \text{ mm}$$

となる。前述のFig. 4に示す通り、Y方向の値は、Z方向の値により決定され、Y方向の誤差δYは、δY=δZとなる。

よって、目標である計測精度±10mmに対して、計測誤差要因となることが想定される。

これらの計算結果を用いて、Fig. 7に温度変化に対する計測誤差の計算値を示す。今回は、温度変化を±2℃以内に抑制することで、熱膨張による計測誤差の低減を目指すこととした。

熱膨張の抑制方法は、カメラを設置する架台に水冷冷却装置を導入し、25℃の恒温状態を維持することとした。恒温の効果を確認するため、2台のカメラ、カメラ架台の計3箇所に温度センサーを設置し、レーザー出力ON時の温度計測を行った。温度計測結果をFig. 8に示す。

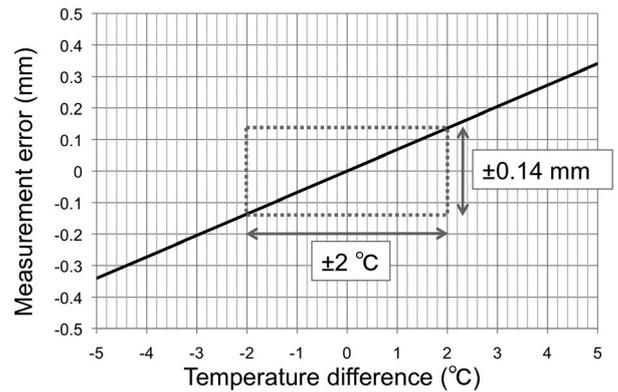


Fig. 7. Calculated results of temperature difference vs. measurement error.

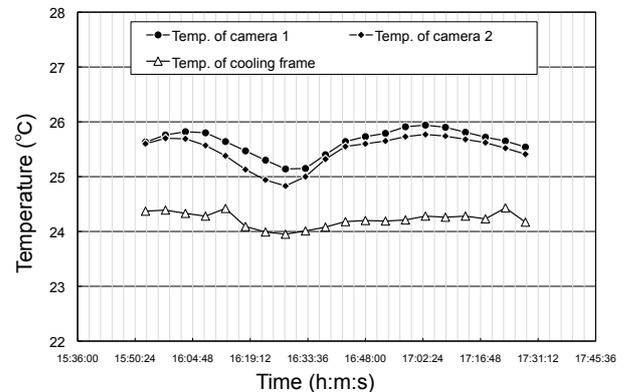


Fig. 8. Temperature measurement results of four thermometer points.

2台のカメラおよび、カメラ架台に設置した温度センサーは、23℃から27℃の±2℃以内に収まっており、恒温の効果が確認された。

ここで、熱間の鍛造品固有の問題点についても触れておく。本計測におけるレーザーの役割は、2台のカメラで、レーザーの照射位置を正確に撮像出来るようにすることである。つまり、今回使用する532nm緑色波長域のレーザー光と、熱間の鍛造品が放つ赤色から赤外線に渡る波長域を弁別することが重要である。Fig. 9に、CCDカメラの受光感度、材料の自発光域、緑色レーザーの波長の波長域を示す。

カメラレンズの直前に緑色レーザーの波長域532nmのみを通過するバンドパスフィルタを採用することで、ノイズ源となる熱間の鍛造品が放つ波長域をカットした。これにより、緑色レーザー光の指示位置のみをカメラで受光する光学設計とした。

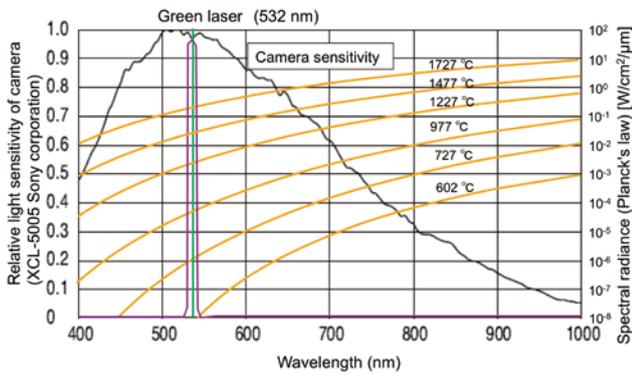


Fig. 9. Sensor sensitivity of the camera, spectral radiance, and laser wavelength properties.

4. 2 計測アルゴリズムの開発

これまで熱間鍛造品形状データの取得方法について述べてきた。本項では、ラインレーザとステレオカメラによって得られた ITER 材の 3 次元形状計測データとガバリ CAD データを照合し、所定の寸法公差内であるかどうかを判定するソフトウェアを開発したので、その内容を紹介する。

まず、(1) ITER 材の形状抽出と輪郭生成を行った。これは、計測箇所のエッジ部分に障害物や熱間鍛造品を保持するためのマニピュレータが、画像上で重なってしまう。

これらの障害物の除去プロセスの模式図と除去後の ITER 材形状計測データの例を Fig. 10 に示す。ITER 材の形状をスキャンした後に、障害物を除去し、エッジ部分のみを検出することで輪郭データを抽出した。

そして、(2) CAD データから照合用のデータを生成した。事前にメモリされている ITER 材の CAD データから、形状計測データの範囲を照合するため、公差範囲を示す輪郭描写の自動生成を行った。

最後に、(3) 形状計測データと CAD データとの照合と判定表示を行った。上述の (3) で生成した照合用の公差範囲と形状計測データを比較することで、照合をシミュレートすることとした。この時、オペレータの作業負担を軽減するために、これらのデータの大まかな位置あわせは自動で行うものとし、シンプルな操作性を実現した。

5. 計測精度の検証

5. 1 基準プレートによる計測精度の確認

ラインレーザとステレオカメラ方式による精度検証として、寸法があらかじめ分かっている基準プレートを用いて確認を行った。

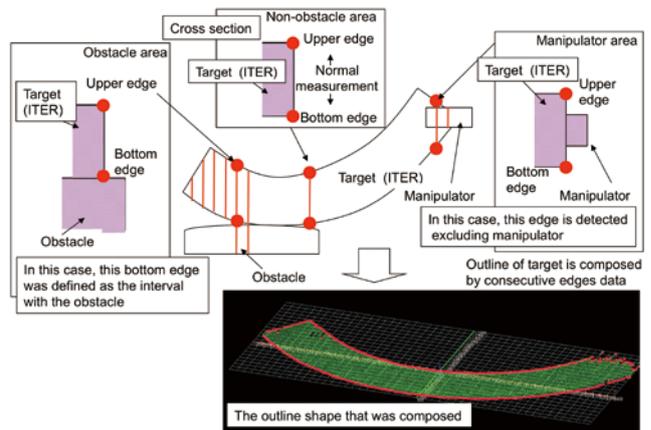


Fig. 10. Outline data extracting method of the ITER.

まず、ステレオカメラ方式の校正方法については、各種文献^{12)~15)}にて説明されているので、ここでは簡単に説明する。本装置の校正方法は、既知の間隔に配置した複数のドットマークが印字されたプレートを 2 台のカメラで撮像し、ドットマークの座標を照合することでカメラ間の位置情報を校正した。

そして、精度検証については、Fig. 11 中の A から F の計測ポイントにおいて、高さ 500 mm の基準プレートを計測した。その計測結果を Fig. 12 に示す。

各計測ポイントにおいて 500 mm の基準プレートを ± 10 mm 以内で計測できていることを確認した。さらに、標準偏差 σ については、 3σ の範囲で、1.5 mm 以下となり、目標とする計測精度内という結果が得られた。

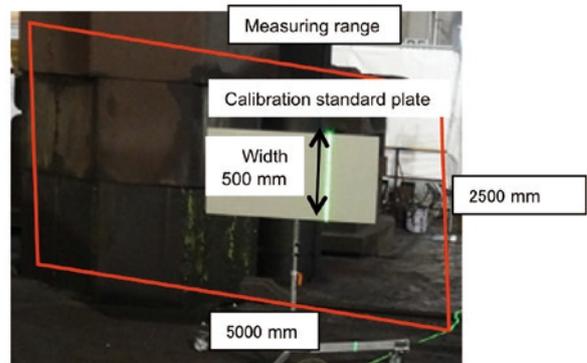
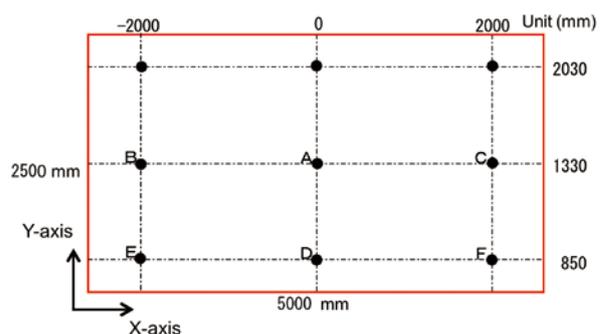


Fig. 11. Measurement position of the standard plate.

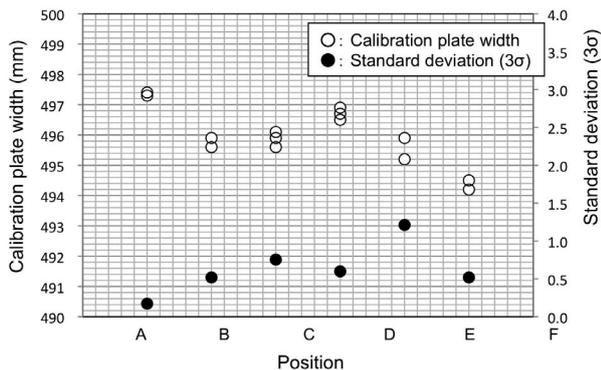


Fig.12. Measurement results of the standard plate.

5. 2 熱間鍛造品の計測結果

最後に、熱間 ITER 材の計測テストを実施した。計測時の写真を Fig. 13 に、ガバリの CAD 図との照合結果の例を Fig. 14 に示す。

Fig. 14 中の細いラインは、ガバリの寸法公差範囲を示しており、計測データは、太いラインで示している。黄色のラインは、公差範囲より大きく、緑色のラインは公差内、赤色のラインは公差範囲よりも小さいことを示しており、オペレータは視覚的に、形状を把握することが可能となった。さらに装置の精度維持評価として、約4ヶ月間の基準プレート計測精度をモニタリングした。その結果を Fig. 15 に示す。

500 mm の基準プレートに対し、± 10 mm 以内であり、熱間鍛造機近くの悪環境下においても計測精度が維持できていることを確認した。

最後に、全長 5000 mm の計測時間については、時間間隔 0.1 秒かつ、全長に対して 20 mm 間隔でデータ収録を行い、目標値である 1 分以内の計測時間を達成した。

6. 結 言

鍛造品である ITER 材向け、熱間形状計測装置を、緑色ラインレーザとステレオカメラ方式により、実機化した。

本装置は、大同特殊鋼(株)渋川工場にて適用され、「熱間大型鍛造品を非接触で計測」「計測時間 1 分以内」「照合計測精度 ± 10 mm 以内」を達成した。そして、本装置は作業者の負荷軽減や、加工プロセスの歩留まりとサイクルタイム低減に貢献している。今後は、他の形状への展開を目指す。

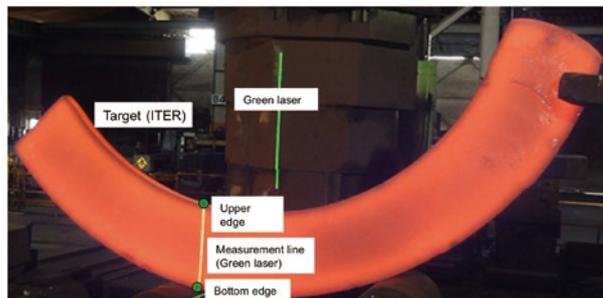


Fig. 13. The measurement state of ITER just after free hot forging.

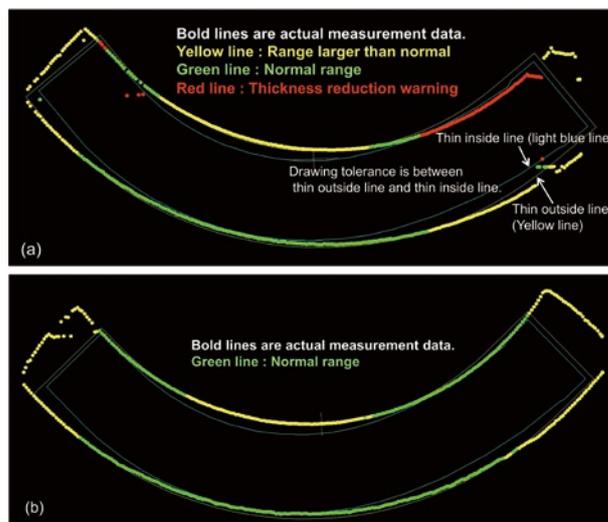


Fig. 14. Discrimination results; (a) Detecting abnormalities of dimension and size.

(b) Dimension and size are within the normal range.

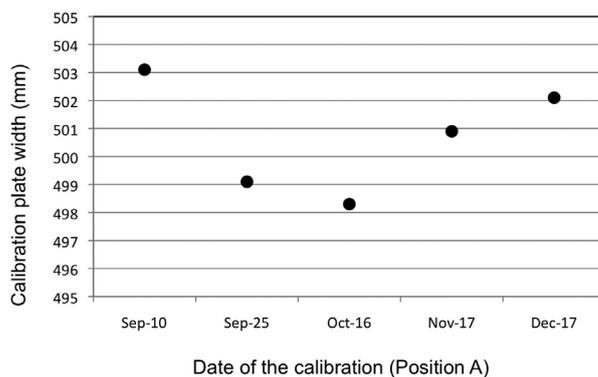


Fig. 15. Standard plate measurement results during approximately four months.

(文 献)

- 1) 国際熱核融合実験炉 ITER ウェブサイト：<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_1.html> 最終アクセス日 2017/4/11.
- 2) 日経ビジネス, 2013/10/21, 17.
- 3) 小坂田宏造: 精密工学会誌, 58(1992), 6, 943.
- 4) 片山二郎, 穴吹善範, 藤本洋二: 川崎製鉄技報, 30(1998), 4, 222.
- 5) 岡本陽, 和佐泰宏, 香川恭徳: R&D 神戸製鋼技報, 57(2007), 3, 29.
- 6) 高井利久: 電気製鋼, 79(2008), 4, 305.
- 7) 濟木弘行, 丸茂康男: 公益財団法人天田財団 助成研究成果報告書, 17(2004), 46.
- 8) 実吉敬二: 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), 2013-CVIM-185(2013), 19, 1.
- 9) 金田憲明, 成田十一, 大滝雄一郎, 本間智之, 渡邊健次郎, 伊関陽一郎, 大野 宏: 新潟県工業技術総合研究所工業技術研究報告書, 34(2005), 44.
- 10) 民谷真孝, 平井慎一: ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2012), 1A1-C09.
- 11) T. Ekkel, A. M. Meyer, T. Luhmann, H. Hastedt and F. Bethmann: Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, 2013, 79.
- 12) 蚊野浩, 金出武雄: 電子情報通信学会論文誌 D-II, J79-D-II(1996), 11, 1810.
- 13) Aaron Wetzler: Low cost 3D Laser Scanning Unit with application to Face Recognition, Faculty of Engineering Department of Electrical Engineering University of Cape Town, (2005).
- 14) João L. Vilaça, Jaime C. Fonseca and António M. Pinho: Optics & Laser Technology, 41(2009), 2, 112.
- 15) A. Prokos, G. Karras and E. Petsa: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII, Part 5(2010), 505.



森 大輔



新美 清明



高橋 信幸



濱井拓也