

# マルチスペクトル画像解析を用いた大型高温鍛造物の形状計測

長 元 気<sup>†</sup> 盧 存 偉<sup>†</sup>  
 押 川 巧<sup>††</sup> 桑 木 透<sup>††</sup>

本研究ではマルチスペクトル画像解析を用いた大型高温鍛造物の形状計測手法を提案する。長さ数メートル以上、温度 600 ~ 1,200°C の鍛造物を誤差 5 mm 程度で計測することができれば、代表的な鍛造放重量で約 2% の歩留まり改善が可能となり、多大な省資源・省エネ効果が期待できるが、現状では誤差数 mm 程度、計測時間数分程度の性能を有した計測方法および計測システムは存在せず、鍛鋼業界における大きな解決課題となっている。上記問題を解決するために、提案手法では近赤外情報と可視光情報を同時に画像解析することで高速かつロバストに鍛造物の輪郭を検出する。さらに近赤外情報を用いて鍛造物の温度分布を推定し、計測結果に含まれる熱膨張の影響を補正することで高精度な形状計測を実現する。計測精度評価実験および実計測例の結果は提案手法の有効性を実証した。

## A Shape Measurement Technique for High-temperature and Large-size Forging Using the Multi-spectrum Image Analysis

GENKI CHO,<sup>†</sup> CUNWEI LU,<sup>†</sup> TAKUMI OSHIKAWA<sup>††</sup>  
 and TORU KUWAKI<sup>††</sup>

A new shape measurement technique using the multi-spectrum image analysis is presented for high-temperature and large-size forging. If the shape of a forging with the high temperature from 600 degrees to 1,200 degrees can be measurable with the high precision which suppresses a measuring error within 5 mm, about 2% of yield improvement will come out. However, such measurement apparatus does not exist now. In our proposed technique, by the comprehensive analysis of the infrared image and the RGB color image, the outline of the forging thing is extracted with a sufficient precision, and the shape is measured. Furthermore in order to improve the measurement accuracy, the measuring error produced by temperature expansion of the high temperature forging is corrected by use of the temperature presumption technology using an infrared image. Finally, some experimental results are shown for proving the effectiveness of the proposed technique.

### 1. はじめに

鍛造とは、金属の塑性加工法の一つであり、可鍛性のある金属材料をハンマーやプレスで工具を介し圧力を加えることで金属内部の空隙をつぶし、金属の組織や性質を改良するとともに、様々な形に成形する加工法である。このうち、熱間自由鍛造は金属材料の変形抵抗を減少させるために再結晶温度以上の高温に加熱し、自由鍛造プレスを用いて素材を成形する方法であり、鍛造と比較して内部欠陥が生じにくいいため、発電プラントや船舶など、負荷の激しい設備の心臓部に使

用される部材の製造によく用いられる<sup>1)~5)</sup>。図 1 に一般的な熱間自由鍛造品の製造工程を示す。製鋼は金属材料を溶解し、所定の製品成分を生成する工程である。造塊は材料を鋳造し、鋼塊を製造する工程である。鍛造は鋼塊を鍛錬し、自由鍛造プレスを用いて鍛造品の素材を成形する作業である。熱処理は素材への加熱や冷却処理であり、素材に所定の性質を与える工程である。機械加工処理は素材を最終製品寸法に成形する作業であり、品質検査は寸法や機械的性質などの検査である。

現在、このような熱間自由鍛造品の製造コストで問題視されているのが、高温素材のボリューム計算が困難であるために発生する余剰材料のコストと、素材の余肉を所定の製品寸法に切削するための機械加工コストである。これらの問題はいずれも高温状態における素材の実用的な形状計測方法が確立されていない

<sup>†</sup> 福岡工業大学工学部  
 Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technologies

<sup>††</sup> 日本鑄鍛鋼株式会社  
 Japan Casting and Forging Corporation



図 1 熱間自由鍛造品の製造工程

Fig.1 The process of hot open-die forging.

ことが原因である。要求される形状計測内容は径寸法や偏芯量、曲がりの有無、長さなどがあり、材料コストや機械加工コストの面からいえば径寸法の計測が最も重要である。現在用いられている高温状態での鋼塊や素材の径寸法の主な計測方法はプレスデジタルやパスである。プレスデジタルとは鋼塊から素材を成形する際に用いる大型自由鍛造プレスを接触式センサとして使用する方法である。プレスデジタルはプレス幅の範囲内に対してはプレスの跳ね返りなどを考慮しても $\pm 10$  mm程度で径寸法を計測できるが、長さ数メートルから十数メートルの大型鍛造品を成形する場合、計測時間が長いという問題や、素材全体での軸心に対する信頼性が乏しく、偏芯や曲がりを検出することが困難であるという問題があり、場合によっては製品の確保が不可能となる。パスとは寸法を計測したり写したりする器具であり、その足先で計測対象物をはさみ、その開きを直尺で読み取り、外径や内径などを計測する方法である。パスは人の介在が必要なため、大型高温の鋼塊や素材の測定作業には危険をとまうという問題や、プレスデジタルと同様に計測時間が長いという問題、偏芯や曲がりを検出することが困難であるという問題がある。そのため、鍛造物の温度状態に悪影響を与えないように短時間で精度良い形状計測を行う方法は現在存在せず、実際の鍛造では目的寸法に数十 mm以上の余肉の付加を行い、製品確保に必要な素材寸法形状としているのが現状であり、大型自由鍛造品の製造効率向上を妨げる要因となっている<sup>6)~9)</sup>。たとえば、高温状態にある鋼塊や素材などの鍛造物の径寸法を $\pm 5$  mm程度の精度で計測することができれば、鍛造成形放重量で約2%の歩留まり改善が可能となり、年間鍛造品生産量が4万t規模の鍛鋼会社では表1のような年間数千万円相当の省資源・省エネ効果が期待できる。

一方、近年の代表的な非接触式の形状計測方法としてレーザー計測方法<sup>10),11)</sup>や3次元画像計測方法<sup>12)~14)</sup>がある。レーザー計測方法は非接触で鍛造物の形状を精度良く計測することができるが、1回のレーザー照射で1点もしくは1ラインしか計測できず、計測に時間がか

表 1 材料配分や素材余肉量改善によるコスト削減効果概算  
Table 1 The cost-reduction effect by improvement of material distribution and yield.

内容	省資源・省エネ効果
鋼塊削減重量	1,000 (t)
製鋼電力削減量	500,000 (kwh)
加熱燃料節約量	150 (kl)
機械加工短縮時間	7,200 (h)

注：年間鍛造品生産量が4万t規模での計算例

かるという問題や、鍛造物の形状によってはレーザーの反射を上手くとらえることができないという問題がある。また、大型高温鍛造物にレーザーを照射する際には人体への影響を考慮する必要がある。3次元画像計測方法は非接触で物体の空間位置や形状を計測ことができ、近年のデジタルカメラの高精細化により様々なシーンにおいて実用化研究が行われている。3次元画像計測方法はステレオ視計測法に代表される受動型計測方法と、パターン光投影法に代表される能動型計測方法とに大別することができる。ステレオ視計測法は局所的な模様や輪郭などの特徴を手がかりに形状計測を行う方法が一般的であるが、高温状態の鍛造物は温度分布の不均一や無作為の酸化膜などが存在し、可視光波長領域において安定した特徴情報を得ることは困難である。パターン光投影法は既知のエネルギーや形状を持つパターン光を計測対象に投影するので特徴情報を能動的に与えることができるが、大型高温鍛造物を短時間で形状計測するためには多数かつ広範囲出力可能なパターン光投影設備が必要となる。また、上記の計測方法は鍛造物の温度分布を推定することができず、形状計測結果に含まれる熱膨張の影響を補正することが困難である。

上記問題を解決するために、本研究では近赤外波長領域と可視光波長領域とを同時に撮影可能なマルチスペクトルカメラを用い、マルチスペクトル画像解析に基づいた大型高温鍛造物の形状計測方法を提案する。近赤外情報と可視光情報を同時に解析することで高温鍛造物の特徴を安定して検出し、計測のロバスト性と高速性を確保する。また、近赤外情報を解析することで鍛造物の温度分布を推定し、計測結果に含まれる熱膨張の影響を補正することで高精度計測を実現する。本論文は5章より構成され、2章ではシステム構成および計測アルゴリズムについて説明する。3章ではマルチスペクトル画像解析による鍛造物の輪郭検出方法と、近赤外画像情報より鍛造物の温度を推定し、計測結果に含まれる熱膨張影響の補正方法について述べる。4章では計測精度評価結果および実計測例を示す。5章では本研究のまとめと今後の課題について言及し、

最後に産学連携の経験による著者らの所見を述べる。

## 2. システム構成および計測アルゴリズム

大型自由鍛造工場は大規模な機械設備が多く、大掛かりな計測システムの導入は困難である場合が多い。そのため、計測システムは既存の鍛造設備を利用して計測を行えるように構成する。図2は計測システムの構成例であり、計測システムはカメラ1台とコンピュータおよび鍛造工場既存のマニピュレータとライトマーカより構成される。マニピュレータとは造塊や素材成形に用いられるハンドリング器具であり、ライトマーカとは鍛造物の長さ方向に対し、既知の間隔で平行にレーザスリット光を照射する設備である。カメラは鍛造プレスの斜め上に固定し、マニピュレータにより鍛造物をカメラ視野内の適当な場所に移動させ、鍛造物の画像を取得する。また、マニピュレータにより鍛造物を回転させ、異なる視点の画像を取得する。鍛造物の異なる視点から取得した画像複数枚をコンピュータに入力し、図3のアルゴリズムにより鍛造物の断面形状や偏芯などを計算する。形状計算に必要な画像枚数は鍛造物の形状や要求された計測精度により変わり、通常3~8枚とする。カメラの選定は画像計測の実用化プロセスにおいて重要なことであり、本研究では1章にあげた諸問題の解決のために、近赤外画像とRGBカラー画像を同時に撮影できるマルチスペクトルカメラを選んだ。複数台のカメラの使用により、計測速度と計測精度を向上させることができるが、マルチスペクトルカメラは高価であり、コストの面から考え、本研究では1台カメラ方式を選んだ。

計測アルゴリズムを図3に示し、各ステップの説明を下記に述べる。

Step 1: マニピュレータを用いて鍛造物を回転させ、鍛造物の各方向の写真をカメラより撮影し、マルチスペクトル画像をコンピュータに入力する。

Step 2: 鍛造物のカメラに対する姿勢は鍛造物とマーカとする工場に既存の参照物との画像上の位置関係により、三角測量の原理を用いて推定する。推定された姿勢より、投影変換方法を用いて画像をカメラの視線と垂直な方向に変換する。変換後の正規化画像にあるライトマーカのレーザ線の間隔により、鍛造物とカメラ間の距離を推定する。具体的な方法は本論文では省略する。

Step 3: マルチスペクトル画像解析を行い、鍛造物の輪郭を検出する。具体的な方法は3.1節で述べる。

Step 4: 近赤外画像情報を用いて鍛造物の温度を推定し、検出された輪郭形状に含まれる熱膨張の影響を

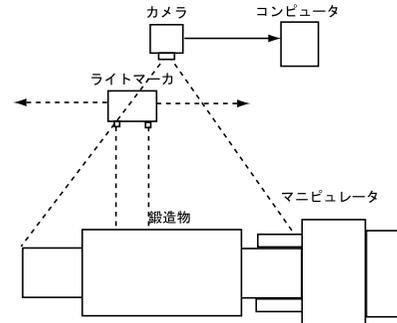


図2 計測システムの構成  
Fig. 2 Measurement system setup.

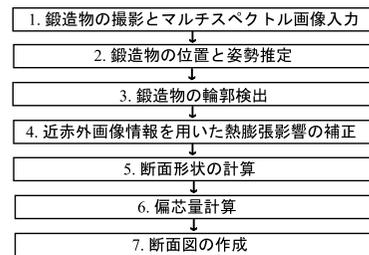


図3 鍛造物形状計測の流れ  
Fig. 3 Flow of shape measurement of forging.

補正する。具体的な方法は3.2節で述べる。

Step 5: 姿勢や熱膨張影響が補正された鍛造物の輪郭情報を用い、必要な計測断面の各方向の径寸法を計算する。

Step 6: 鍛造物の中心軸を計算し、中心軸と各径の中心点とのずれ量を計測断面の各方向の偏芯量として検出する。材料コストや機械加工コストに最も大きい影響を与える胴部分の上下輪郭座標の中心線を最小自乗法より近似し、中心軸とする。

Step 7: 計測断面の各方向の中心軸を一致させ、各方向の径および各方向の偏芯量を合成して断面図を作成する。

## 3. マルチスペクトル画像解析による鍛造物の輪郭検出および熱膨張影響の補正

### 3.1 鍛造物の輪郭検出

画像より目的の物体および形状を抽出するためには、抽出すべき物体の構造や特徴情報をあらかじめモデルとして記述し、画像から抽出された同様の記述との間で対応付けを行う方法があるが、このような方法は環境変化に対するロバスト性に欠ける点が問題とされている<sup>15)~17)</sup>。本研究では物体抽出自体は主目的ではなく、物体の輪郭特徴を精度良く検出することが重要であるが、鍛造工場においては環境光の変化や、

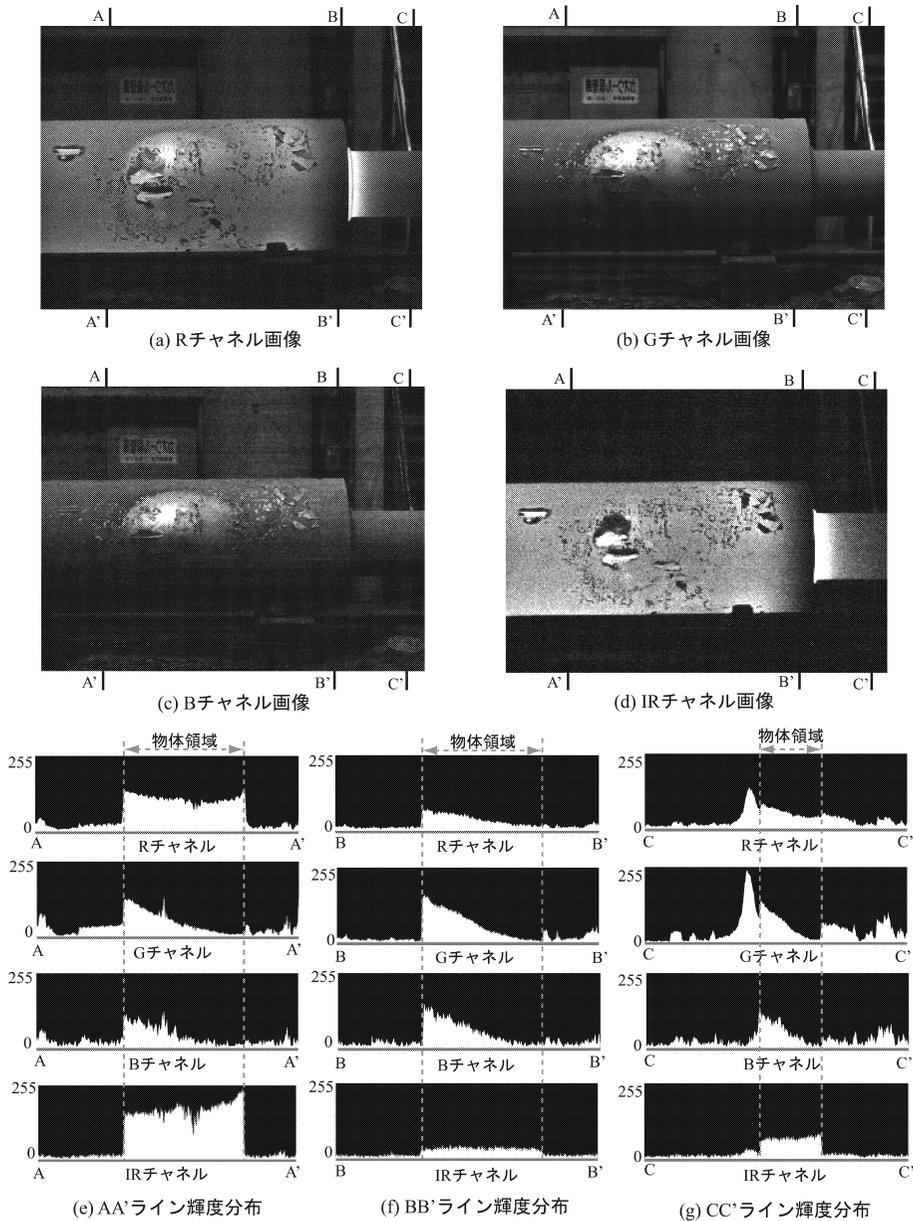


図 4 高温大型鍛造物の撮影画像および強度分布

Fig. 4 Images and its intensity distributions of a high-temperature forging.

鍛造機器の移動にともなう背景変化などがあり、可視光波長領域を撮影した RGB カラー画像だけを用いての精度良い輪郭特徴検出は困難な場合が多い。本研究ではマルチスペクトル画像を利用し、カラーチャンネルと近赤外チャンネル画像の総合解析により、鍛造物の輪郭検出を行う。提案手法ではマルチスペクトル画像を取得するために、Duncan Tech 社製のマルチスペクトルカメラを使用する。マルチスペクトルカメラは 3CCD デジタルカメラで 400 ~ 850 nm の波長領域

を青 (B : 400 ~ 500 nm), 緑 (G : 500 ~ 600 nm), 赤 (R : 600 ~ 700 nm), 近赤外 (IR : 700 ~ 850 nm) に分けて、その中の 3 つの波長領域画像を同時に取得できる。空間解像度は  $1,392 \times 1,040$ , 強度解像度は 8 bit である。

図 4 の画像を例とし、輪郭検出方法を述べる。図 4 は可視光の青領域から近赤外領域において撮影された鍛造物のマルチスペクトル画像とその強度分布である。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ R, G, B および

IR チャンネル画像である．撮影時の鍛造物の平均温度は約 700°C である．高温物体の抽出は近赤外画像を用いる方法が有効であるが，鍛造物の温度分布が不均一な場合には，温度分布が低い部分や酸化膜が生じた部分では精度良い輪郭の検出が困難になる場合があるので，鍛造物の輪郭を検出する際には近赤外画像とカラー画像とを併用する方法が有効である．図 4 (e), (f), (g) はそれぞれ (a) ~ (d) の AA' ライン, BB' ラインおよび CC' ライン上における画像の強度分布である．縦軸は画素強度値，横軸は評価ラインを表している．AA' ライン上では R, G, IR のチャンネルで物体成分と背景成分の強度差が大きいので，R, G, IR のいずれのチャンネルを用いても精度良く鍛造物の輪郭形状を検出することができる．BB' ライン上のような鍛造物の温度低下が激しい部分では，R チャンネルや IR チャンネル画像では物体成分と背景成分との強度差が小さくなっており，G チャンネルや B チャンネル画像を用いる方法が有効である．また，CC' ライン上では背景成分の影響が強く，G チャンネルや IR チャンネル画像を用いる方法が有効である．画像の同時撮影チャンネルを IR, R, G としたときの具体的な輪郭検出方法を下記に述べる．

まず IR チャンネルにおいて閾値処理を用い，物体の概形形状を抽出する．次に，抽出された概形の周囲において IR, R, G チャンネルを領域的に参照・評価し，鍛造物の輪郭検出を行う．最後に，抽出された各チャンネルの輪郭を 1 画素ずつ評価し，正しい輪郭である確信度が最も高いチャンネルの輪郭情報を，該当領域の輪郭情報とする．輪郭の確信度を評価するために，抽出された概形の輪郭を中心とする周辺小領域に，評価フィルタをかけ，式 (1) ~ (4) により確信度を計算する．今回は鍛造物の形状変化や姿勢などによる輪郭検出結果への影響を考慮し，図 5 のような高さ  $F$ ，底辺  $(2F - 1)$  から定義される二等辺三角形形状のフィルタ形状を用いる．抽出された鍛造物概形の輪郭の周辺領域にある注目点の画像座標を  $(x, y)$  とし，式 (1) の評価値  $E$  を最大とする座標  $(x, y')$  をこの領域内の輪郭座標として検出する．

$$E(y') = \max\{E_{IR}(y'), E_R(y'), E_G(y')\}, \quad (1)$$

$$y' = y, y \pm 1, \dots, y \pm M$$

このとき， $M$  は検索範囲であり，本論文では  $M = 30$  とした． $E_{IR}, E_R, E_G$  はそれぞれ注目点  $(x, y')$  の IR, R, G 各チャンネルにおける輪郭の確信度であり，下記のように定義する．

$$E_k(y') = \frac{|U_k(y') - D_k(y')|}{S_k} \quad (2)$$

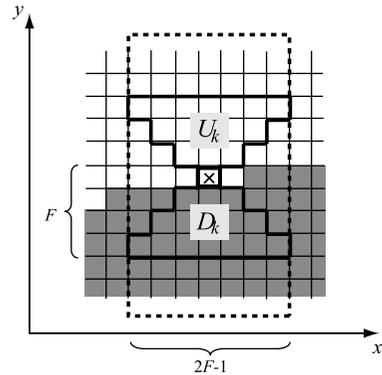


図 5 輪郭確信度評価に使用するフィルタ形状  
Fig. 5 Form of filter for edge reliability evaluation.

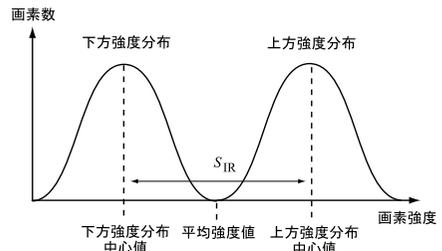


図 6 輪郭評価範囲内において規格化されたヒストグラム  
Fig. 6 Standardized histogram of edge evaluation area.

$$U_k(y') = \frac{2}{A} \sum_{a=0}^{F-1} \sum_{b=-a}^a I_k(x+b, y'+a) \quad (3)$$

$$D_k(y') = \frac{2}{A} \sum_{a=1-F}^0 \sum_{b=-a}^a I_k(x+b, y'+a) \quad (4)$$

このとき， $k \in \{IR, R, G\}$ ， $I_k(x+b, y'+a)$  は  $k$  チャンネルにおける座標  $(x+b, y'+a)$  である画素の画像強度， $A = F(2F - 1)$  であり，本論文では  $F = 5$  とする． $S_k$  は  $k$  チャンネルの確信度評価領域内において画素数と画素強度で規格化されたヒストグラムの物体領域における強度分布中心値と背景領域における強度分布中心値の差である．たとえば鍛造物と背景の温度差が原因で，IR チャンネルにおいて鍛造物領域と背景領域の画像強度差が十分得られた場合，鍛造物の輪郭座標を中心とする周辺領域のヒストグラムは，図 6 のように鍛造物と背景を示す山状の強度分布がそれぞれ生成され，その強度分布中心値の差  $S_{IR}$  が確信度の計算に用いられる．

このように，最初に鍛造物の概形を抽出しておき，その周囲において局所的に領域の画素強度分布やその

強度差を参照・評価することで、ノイズの影響を軽減した口バスト性の良い輪郭検出を高速に行うことができる。

### 3.2 熱膨張影響の補正

鍛造物は造塊や素材成形時において約 600~1,200°C もの高温状態であり、鍛造物の温度分布に応じて長さや体積が熱膨張するので、精度良い形状計測を行うためには鍛造物の温度分布を推定し、検出された輪郭形状に含まれる熱膨張の影響を補正する必要がある。一般的な鍛造物の温度を測定する方法として、接触式の測温方法や非接触式の放射測温方法がある<sup>18)</sup>。しかし、鍛造物はプレスや形状などの様々な要因で放熱と均熱化を繰り返すため、温度分布や熱膨張影響は不均一であり、測温に時間がかかるという問題や形状計測精度が低下するという問題がある。

上記問題を解決するために、本研究では IR チャネル画像の強度情報を利用して計測位置における局所的な温度分布を推定し、小領域ごとに熱膨張影響の補正を行い、1枚の画像より形状計測と温度推定および熱膨張影響の補正を行うことで、鍛造物の形状計測の精度および速度の向上を図る。具体的には材質既知の鍛造物の IR チャネルの画像強度より、画像強度と鍛造物温度との関係テーブルに基づき、注目領域の温度を推定し、熱膨張量を推定する。まず径寸法計測位置(ライン上)の平均画像強度  $I'_{IR}$  を計算する。このとき、酸化膜の影響を考慮し、ライン上で強度が局所的に低下している部分は平均化対象から除外する。次に、ライン上の平均画像強度  $I'_{IR}$  より、式(5)を用いて計測位置の鍛造物温度  $t$  を推定する。

$$t = a_0 I'_{IR} + a_1 \quad (5)$$

このとき、 $a_0$ 、 $a_1$  は定数である。その後、推定された計測位置の鍛造物温度  $t$  を用いて膨張率を計算することで、計測結果に含まれる熱膨張量を補正する。

図7は予備実験により得られた IR チャネル画像強度と鍛造物(ニッケルクロムバナジウム系の低合金鋼)平均温度の関係を線形近似した結果( $a_0 = 0.725$  [K],  $a_1 = 599.6$  [K])を示したグラフである。得られたデータと線形近似式の誤差は平均で 2.1°C、最大で 5.0°C である。低合金鋼の線膨張率は約  $15.0 \times 10^{-6}$  [1/K] であり、5°C の温度計測誤差による長さ推定誤差は 0.0075% 以内なので、上記線形近似結果を IR チャネル画像強度と鍛造物温度との関係テーブルとして使用する。このとき、鍛造物の温度以外に IR チャネル画像

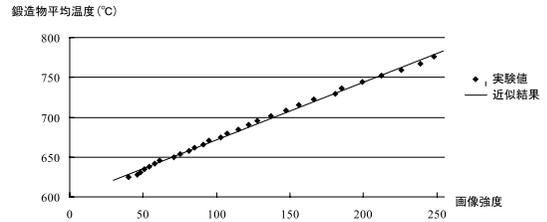


図7 IR チャネル画像強度と鍛造物温度の関係

Fig. 7 Relation between IR channel image intensity and temperature of the forging.

強度に影響する要因として、カメラのシャッタースピードやレンズの絞りなどがあるが、これらのパラメータは鍛造物の形状計測時における予想温度範囲よりあらかじめ調節し、実際の形状計測を行う際には予備実験と同一のパラメータを用いることを前提とする。

通常、非接触式の測温方法を用いる場合、温度の計測精度は測定対象の放射率に大きく影響される<sup>19)</sup>。放射率は鍛造物の材料や表面の無作為な酸化膜などにより変化するので、厳密な推定や計測を行うことは困難である。本研究では少ない温度変化範囲で、IR チャネルの画像強度と物体の温度の対応関係を線形関係で近似し、材料既知の鍛造物に対して予備実験により酸化膜が除去された画像強度と鍛造物の温度との対応関係、すなわち式(5)の  $a_0$  と  $a_1$  を推定する。

このように、画像強度より鍛造物の温度分布を局所的に推定し、輪郭形状に含まれる熱膨張影響を計測ラインごとに補正することで、1枚の撮影画像から形状計測と局所温度推定および熱膨張影響補正を同時に行うことができ、鍛造成形中に外部から温度情報などを入力することなく精度良い形状計測を実現することができる。

## 4. 実験結果

### 4.1 計測精度および口バスト性評価実験

図4の形状既知の軸状鍛造物を用い、提案手法の計測精度を評価する。鍛造物は機械加工品(ニッケルクロムバナジウム系の低合金鋼)であり、長さは画像中において約 2.8メートル、径寸法は大きい胴部分(区間A)で 883mm、小さい胴部分(区間B)で 444mm である。鍛造物からカメラまでの距離は約 11メートルである。計測結果は熱膨張影響の補正を行わない方法と、IR チャネルにおける鍛造物の平均強度をもちいて平均温度を推定し、均一的に熱膨張影響を補正する方法および提案手法で比較を行う。温度推定のためのテーブルは図7を用る。真値は機械加工寸法とし、計測精度評価のため、区間Aと区間Bでそれぞれ 930

熱膨張量は長さ方向の線膨張と、体積変化の体積膨張がある。本論文で対象とする鍛造物の計測内容は主に径寸法であるので、線膨張モデルを用いて形状計測結果を補正する。

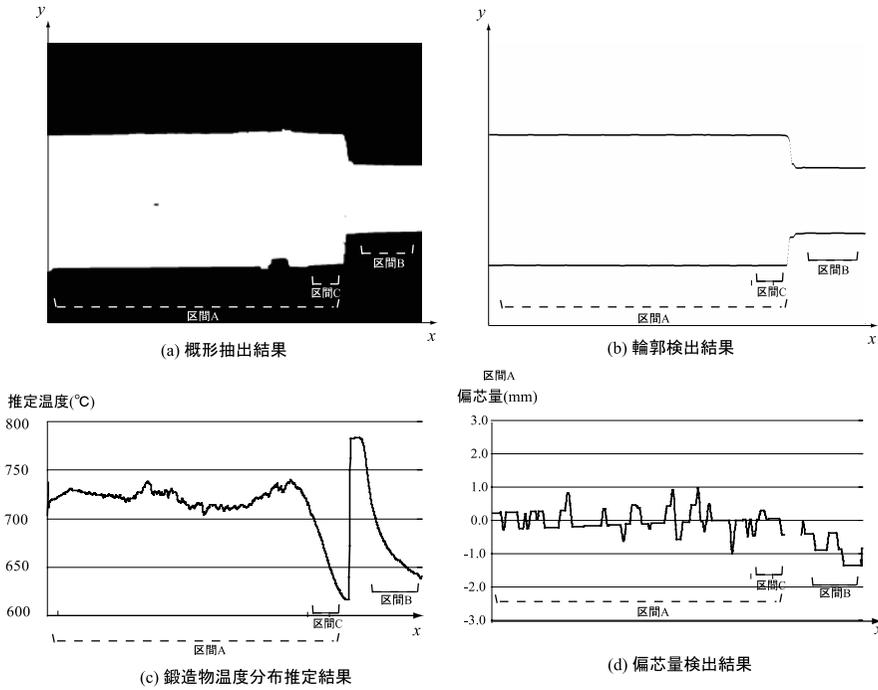


図 8 鍛造物の輪郭検出および温度推定結果

Fig. 8 The experimental result of edge detection and temperature presumption of a forging.

ライン, 140 ラインずつ径寸法を計測する. また, 局所的な熱膨張影響補正方法の評価のために, 温度低下の激しいと思われる区間 (区間 C) においても区間 A より 70 ライン抜粋して計測精度を評価する.

図 8 は計測結果であり, (a) は鍛造物の概形抽出結果, (b) はマルチスペクトル画像解析による輪郭検出結果, (c) は IR チャンネルの強度情報を用い, 計測ラインごとの鍛造物温度分布を推定した結果である. このとき同時に計算された鍛造物全体の平均温度は  $710^{\circ}\text{C}$  であった. (d) は鍛造物の偏芯量検出結果であり, 数値の正負が偏芯方向を表している. このとき, 偏芯量の標準偏差は  $0.45\text{ mm}$ , 最大偏芯量は  $1.36\text{ mm}$  であり, 小さい胴の先端部分で検出された. これは機械加工品を長時間加熱したために鍛造物に曲がりが発生したものと予想される. また, 計算時間は鍛造物の抽出と輪郭検出から径寸法計算 (1,070 ライン), 温度推定および熱膨張影響の補正を含み 1.5 秒以内であった.

表 2 に 1,070 ラインにおける径の計測精度評価結果を示す. 熱膨張影響の補正を行った場合と行わない場合とでは, いずれの計測区間においても平均誤差で 4 倍程度計測精度が向上している. また, 最も温度低

表 2 鍛造品形状計測精度評価

Table 2 Evaluation results of shape measurement accuracy.

計測位置	計測数	熱膨張補正方法	平均誤差	最大誤差
区間 A	930	なし	8.86	12.62
		平均温度補正法	1.80	4.30
		提案手法	1.16	3.41
区間 B	140	なし	4.77	6.49
		平均温度補正法	1.21	3.10
		提案手法	0.97	2.17
区間 C	70	なし	8.51	9.48
		平均温度補正法	2.06	4.30
		提案手法	0.33	2.00

単位: mm

下の激しい区間 C においては, 鍛造物全体を平均温度で均一的に補正した場合と比較し, 局所的に計測ラインずつ補正した場合のほうが平均誤差で 6 倍, 最大誤差で 2 倍以上向上している.

上記に述べた誤差は, 物体抽出, 輪郭検出, 温度推定, 計算誤差, カメラやレンズの非線形誤差などを含むシステム計測誤差である. 表 2 に示した誤差比較データは熱膨張補正方法以外のシステム変化がないので, 熱膨張補正方法の結果を示したと考えることができる. このことより, 提案手法を用いれば鍛造物の輪郭形状を高速に精度良く検出することができ, さらに近赤外情報を用いて鍛造物の温度を推定し, 局所的に

使用コンピュータ: CPU: Intel<sup>(R)</sup> Xeon<sup>(TM)</sup> 3.06 GHz, OS: Microsoft Windows XP Professional SP2.

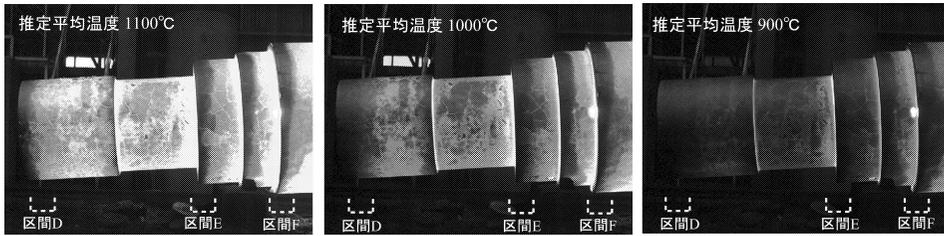


図 9 形状変化の大きい鍛造品  
Fig. 9 Forging with large shape change.

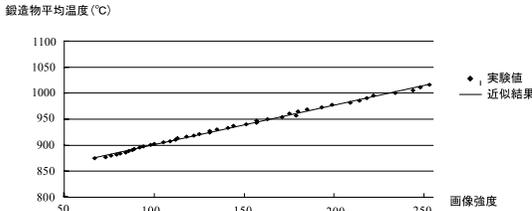


図 10 IR チャネル画像強度と鍛造物温度の関係

Fig. 10 Relation between IR channel image intensity and temperature of the forging.

熱膨張影響を補正するので、局所温度変化の大きい鍛造物に対しても高精度な形状計測が可能となる。

また、鍛造物のサイズや形状、材料成分および温度変化などに対する提案手法のロバスト性を検証するために、図 9 のような径寸法 798 ~ 1,336 mm の段階的に断面径が変化する機械加工品（クロムモリブデン系の低合金鋼）に対し、平均温度 1,100°C より 900°C まで自然放熱しながら計測実験を行った。図 10 は予備実験により得られた温度推定テーブルであり、 $a_0 = 0.735 [K]$ 、 $a_1 = 829.7 [K]$  である。表 3 は平均温度別の精度評価結果であり、計測ラインは温度低下が著しく、輪郭検出が困難と思われる区間 D、E、F における合計 130 ラインである。結果より、鍛造物がいずれの温度状態にある場合においても、提案手法の平均計測誤差は 2 mm 程度、最大計測誤差は 5 mm 程度であり、輪郭検出および温度推定が安定して行われていることが分かる。

上記の実験結果より、提案手法は短時間でロバストに鍛造物形状計測が実現でき、実用性があると考えられる。

4.2 実計測例

図 11 に成形中の鍛造物の実計測例を示す。鍛造物の長さは画像中において約 4 メートル、最大径は約 1 メートル、平均温度は約 800°C である。(a) は軸状鍛造物の実成形シーン、(b) は輪郭検出結果の一例であり、図中の #1 ~ #4 ラインは断面形状の復元位置を示している。(c) は (b) に示された #1 ~ #4 各断面の断

表 3 鍛造品の温度別形状計測精度

Table 3 Evaluation results of shape measurement accuracy of each forging temperature.

推定平均温度	熱膨張補正方法	平均誤差	最大誤差
1,100°C	なし	16.16	21.11
	平均温度補正法	2.06	5.47
	提案手法	2.01	5.28
1,000°C	なし	14.20	22.51
	平均温度補正法	2.27	6.15
	提案手法	1.87	4.44
900°C	なし	15.61	23.54
	平均温度補正法	2.80	5.43
	提案手法	2.46	5.29

単位：mm

面形状であり、オペレータなどに視覚的に径寸法や偏心量および偏心方向などが理解しやすいように表現されている。計測用画像は鍛造物を 45° 間隔で回転させ撮影した 4 枚であり、計測されていない点の情報はスプライン法を用いて補間した。計測所要時間は鍛造物の回転を含めても 2 分程度であり、鍛造成形終了温度などに悪影響を与えることなく計測が行えた。

5. おわりに

大型熱間自由鍛造品は、世界中で数百家の鍛造工場が製造しているが、高温状態の大型鍛造物の形状計測を行う有効な手段は見出されておらず、大幅な製造余肉の付加を余儀なくされており、稼働率の高い鍛造工場では年間数千万円相当のロスが発生している。本研究では上記問題を解決するために、マルチスペクトル画像解析を用いた大型高温鍛造物の形状計測方法を提案した。また、近赤外情報を用いて鍛造物の温度を推定し、計測結果に含まれる熱膨張影響を補正した。計測精度評価実験例において平均誤差 2 mm 程度、最大計測誤差 5 mm 程度の計測精度を確認した。さらに、実成形シーンにおいて鍛造物をマンピュレータで回転させ、回転角度ごとの径寸法形状計測結果を合成し、任意の断面形状や偏心などの計測を短時間で実現した。提案システムはデジタルカメラ、コンピュータおよび標準的な鍛造設備のみで構成が可能であり実用性が高

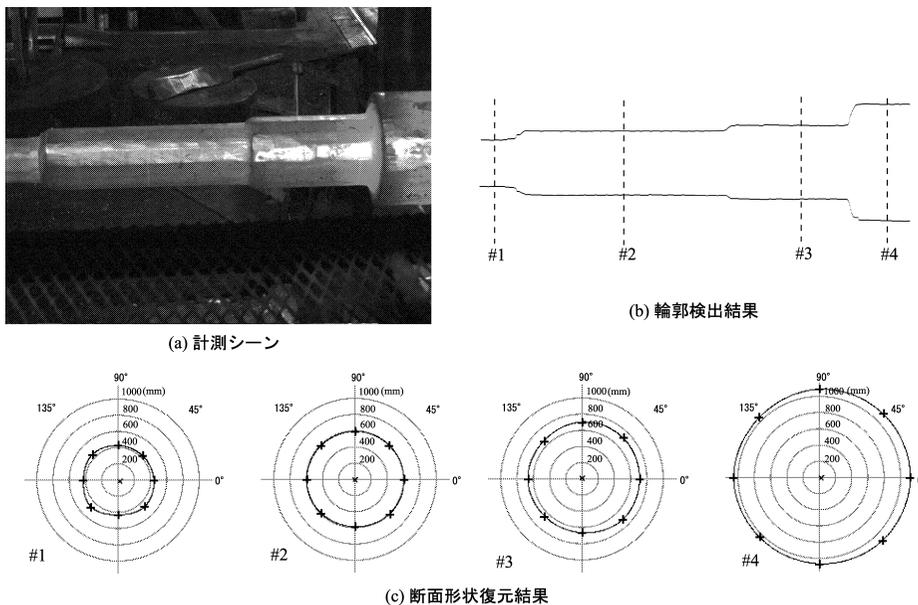


図 11 成形中鍛造物の実計測結果例  
Fig. 11 The measurement result of a processed forging.

い。今後の課題としては鍛造物の表面模様などによる特徴情報を利用した計測感度の向上などがあげられる。

最後に特集号の場を借りて、産学連携に関する経験をふまえ、著者らの所見を述べる。産学連携を通じて、著者らは産学連携の意味とその困難さを痛感し、その中で一番重要なのは期待感や認識の差の問題であると考え、企業側は大学との産学連携事業に高い期待を持ち、大学の研究成果を短時間で実用・製品化することを望んでいる。しかし大学の研究成果のほとんどは原理的な面における成果であり、実用・製品化するためには、さらに様々な工夫や中間実験などが必要である。また、大学側の研究成果は実験室という理想環境や様々な仮説の前提の下で得られた成果もあり、実用化研究を遂行しない限り実用・製品化できない場合がある。

一方、大学側は企業からの資金と人員の投入や実験場所の提供などを期待し、大学が提供した技術を消化したうえで企業独自に製品化することを望んでいる。しかし企業には固有の運営方針や資金計画があり、技術力や公開における制限もあるので、大学の期待に応えられない場合もある。相手への高い期待感は産学連携の原動力であるが、期待に応えられない場合や認識がずれた場合には、逆に産学連携の障害の原因にもなりうる。

本研究は平成 15 年度より福岡工業大学と日本鑄鍛鋼株式会社の産学連携推進事業として行われ、今年で

4 年目の継続研究課題である。本共同研究では、大学側は企業に技術や研究成果を提供するだけでなく、実用できるシステム案や計測アプリケーションなどを提供する一方、企業側は共同研究チームに人員、資金、大学側に不足する技術および現場の豊富な経験を提供するとともに、実験の場を保証しており、幸いにも相互の理解が順調に育まれながら産学連携を推進できていることをこの場を借りて報告させていただく。

謝辞 本研究を進めるにあたりご協力いただいた日本鑄鍛鋼株式会社鍛錬工場および福岡工業大学学術支援機構のスタッフの皆様に深く感謝いたします。なお、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金の援助を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) 葉山益次郎：塑性学と塑性加工（第 2 版），オーム社（1982）.
- 2) 稲盛宏夫：特殊鋼の条鋼圧延および自由鍛造における技術進歩，電気製鋼，Vol.70, No.1, pp.27-34（1999）.
- 3) 鈴木義人：INCOL Alloy 601 大型自由鍛造品の製造技術，電気製鋼，Vol.70, No.4, pp.283-288（1999）.
- 4) 小野信市：エネルギー産業を支える超大型鍛鋼品，日本機会学会誌，Vol.107, No.1024, pp.152-153（2004）.
- 5) 清水 透：鍛造，塑性と加工，Vol.46, No.535, pp.39-45（2005）.

- 6) 岩波義幸, 岩崎泰三, 村井悦夫, 岩本隆志, 田中光之, 小野信市: 大型鍛鋼品の熱間加工による品質保証技術, 塑性と加工, Vol.28, No.320, pp.920-925 (1987).
- 7) 山本俊行, 石原道章, 田村栄二: 最近の鉄鋼業におけるオンライン寸法計測技術, 電気製鋼, Vol.68, No.3, pp.181-188 (1997).
- 8) 遠藤敏夫: 鉄鋼業における計測制御技術の動向, 電気製鋼, Vol.70, No.1, pp.97-105 (1999).
- 9) 西 雄二, 中原雅輝: 熱間成形オンラインにおける欠肉自動選別技術の開発, 鍛造技報, Vol.24, No.78, pp.8-15 (1989).
- 10) Finali, A., Gualeni, O., Dionigi, F., Callegari, L., Casagrande, E., Melandri, A. and Zanatta, L.: LASER TECHNOLOGY APPLIED TO DIMENSIONAL CHECK OF FORGINGS AT SdF, *Proc. 13th International Forgemasters Meeting (IFM1997)*, Pusan, Korea, Vol.1, pp.287-296 (1997).
- 11) Kirchhoff, S., Lamm, R., Muller, N. and Rech, R.: LASER MEASUREMENT ON LARGE OPEN DIE FORGING (LACAM-FORGE), *Proc. 15th International Forgemasters Meeting (IFM2003)*, Kobe, Japan, Vol.1, pp.137-140 (2003).
- 12) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).
- 13) 吉澤 徹: 光三次元計測, 新技術コミュニケーションズ (1998).
- 14) Batlle, J., Mouaddib, E. and Salvi, J.: Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey, *Pattern Recognit.*, Vol.31, No.7, pp.963-982 (1998).
- 15) 前田英作, 高橋裕子, 石井健一郎: 環境変動にロバストな物体有無判定法, 信学論, Vol.J74-D2, No.12, pp.1731-1740 (1991).
- 16) 松山隆司, 和田俊和, 波部 斉, 棚橋和也: 照明変化に頑健な背景差分, 信学論, Vol.J84-D2, No.10, pp.2201-2211 (2001).
- 17) 関真規人, 和田俊和, 藤原秀人, 鷲見和彦: 背景変化の共起性に基づく背景差分, 情報処理, Vol.44, No.SIG05, pp.54-63 (2003).
- 18) 久野治義: 赤外線工学, コロナ社 (1994).
- 19) 宮尾 亘, 中川靖夫, 白水俊次: 光センシング

工学, 日本理工出版 (1995).

(平成 18 年 5 月 16 日受付)

(平成 18 年 11 月 2 日採録)



長 元気

2001 年福岡工業大学工学部電子工学科卒業。2003 年同大学大学院修士課程修了。2006 年同大学院博士課程修了, 博士 (工学)。2006 年 4 月同大学ポストドクター。画像計測の研究に従事。電子情報通信学会, システム制御情報学会, 電気学会各会員。



盧 存偉 (正会員)

1983 年中国山東科学技術大学電気情報学科卒業。1988 年同大学大学院修士課程修了。1990 年同大学講師, 1994 年助教授。同年大阪大学客員研究員として来日, 1999 年同大学大学院博士後期課程修了, 工学博士。1999 年 4 月福岡工業大学工学部助教授, 2005 年教授, 現在に至る。3 次元画像計測, 計測制御システム等の研究に従事。電子情報通信学会, 計測制御学会, システム制御情報学会等各会員。



押川 巧

2002 年九州工業大学工学部物質工学科卒業。同年日本鑄鍛鋼株式会社入社。現在, 同社製造部鍛錬工場勤務。



桑木 透

1990 年都城工業高等専門学校機械学科卒業。同年日本鑄鍛鋼株式会社入社。現在, 同社製造部鍛錬工場勤務。