試料内部 3 次元情報取得システムによる アルミニウム合金ダイカスト内部の鑄巣観察*

古城直道**† 横田秀夫†† 藤崎和弘††† 山形 豊††
小久保光典‡ 姫野龍太郎‡‡ 牧野内昭武†† 樋口俊郎***,††

Observation of Porosities inside Aluminum Diecasts using Three-dimensional Internal Information Acquisition System

Naomichi FURUSHIRO, Hideo YOKOTA, Kazuhiro FUJISAKI, Yutaka YAMAGATA,

Mitsunori KOKUBO, Ryutaro HIMENO, Akitake MAKINOCHI and Toshiro HIGUCHI

Casting defects in die casting materials are known as starting points of fatigue fractures. Therefore investigating their presence, sizes, and distributions are important for lifetime predictions of casting materials. In this paper, the size and the shape of casting defects inside aluminum die casting alloy were investigated by an automated three-dimensional information acquisition system based on consecutive precision milling and cross-sectional image recording. The main results obtained are as follows: (1) Two-dimensional color cross-sectional images were consecutively recorded in $4 \times 4 \times 5 \mu\text{m}$ resolution for $20 \times 14 \times 20 \text{ mm}$ aluminum die casting specimen. (2) Casting defects were distinguishable in those images, and the regions of casting defects were extracted, and over 5000 individual regions were three-dimensionally reconstructed. (3) 90% of those regions were near sphere and relatively small in diameter ($< 100 \mu\text{m}$).

Key words: high precision machining, three-dimensional internal structure, casting defect, shrinkage cavity, micro porosity, void, aluminum casting alloy, ADC12

1. 結 言

鑄造製品の品質管理, 寿命予測などには内部に存在する巣など鑄造欠陥の有無, 形状, 分布を知ることが重要である。一般に巣の 3 次元形状や分布の調査には X 線 CT が用いられている。しかし, 通常の X 線撮影は組織内部での X 線吸収量の差のみに注目しているため, 結晶粒の形態や結晶欠陥など密度差のない領域の区別は不可能である。また, 現状の CT 装置は空間分解能が 0.1 mm 程度と高くない¹⁾。一方, 対象物を切断して断面組織を観察する断面観察法がある。断面観察法では多様な観察方法と高分解能観察が可能である。しかしながら, このような断面観察を元に巣の 3 次元形状を構築するためには, 多くの場合断面画像間の位置合わせが必要であり, 時間と労力を要する²⁾。

筆者らは, これまで生体組織を対象とし, 試料の切断と切断面を観察する工程を繰り返し, 自動的に試料の内部情報を取得する 3 次元内部構造顕微鏡システムを開発してきた³⁻⁶⁾。本システムを用いれば, 高速かつ高分解能に試料の内部情報を得ることができる。また, 観察した断面画像間に位置ずれがないため, 得られた画像をコンピュータ内で容易に再構築することができる。撮影した画像をコンピュータに取り込みソフトウェア上で処理することで高精度な立体像の構築も容易である。この手法を用いて, 生物の内部構造の解析⁷⁾やシミュレーションモデル

の構築⁸⁾を行ってきた。しかし, この手法では, カミソリ状の平刃を用いて試料を切断するため, 硬度が高い試料の観察は困難であった。そこで筆者らは, 金属の鏡面切削加工技術⁹⁾に基づき, 正面フライス切削を利用した試料内部 3 次元情報取得システムを構築した¹⁰⁾。構築したシステムは, 精密切削と断面観察を繰り返すことで, 金属材料内部の 3 次元情報を自動的に取得する。

本研究では, 構築したシステムを用いてアルミニウム合金ダイカスト試験片内部の鑄巣を観察した。取得した連続断面画像から鑄巣領域を抽出し, 鑄巣の 3 次元再構築を行った。この結果を X 線 CT にて撮影した結果と比較し, 本システムの有効性を検証したので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図 1 にシステム概要を示す。試料内部 3 次元情報取得システムは, 単結晶ダイヤモンド工具を用いた正面フライカット法による精密切削と逐次断面観察を繰り返すことで, 試料内部の 3 次元情報を μm 以下のオーダで自動的に取得する専用の観察・記録システムである¹⁰⁾。

2.2 試験片

試験片には, 鑄巣を含有する ADC12 材を用いた。図 2 に試験片の外観および試験片の X 線透過像を示す。試験片寸法は $20 \times 14 \times 37 \text{ mm}$ である。ADC12 材 (Al-11%Si-2.5%Cu) は鑄造性がよく, 強度が優れているため, アルミニウム合金ダイカストの中でシェアが高い。現在日本で生産されているダイカスト製品の約 90% を占めている。用途は広く, 特に自動車部品 (エンジン部品を含む), 電気機器部品によく使用されている。

2.3 切削条件選定

表 1 に切削条件を示す。切削には, ノーズ半径 0.5 mm , すく

* 原稿受付 平成 19 年 12 月 3 日

** 正 会 員 東京大学大学院 (現, 関西大学; 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

*** 正 会 員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

† 正 会 員 理化学研究所 (現, 関西大学)

†† 正 会 員 理化学研究所 (埼玉県和光市広沢 2-1)

††† 正 会 員 理化学研究所 (現, 北海道大学; 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

‡ 正 会 員 東芝機械株式会社 (静岡県沼津市大岡 2068-3)

‡‡ 理化学研究所

い角 0° , 逃げ角 7° の単結晶ダイヤモンド工具を使用した。

加工面の理論粗さは、工具ノーズ半径 R mm, 送り量 f $\mu\text{m}/\text{rev}$ を用いて、(1)式で表される。

$$Rz = f^2 / 8R \mu\text{m} \quad (1)$$

式(1)から、送り量を小さくすることで面粗さは向上する。ノーズ半径 0.5mm の工具では、送り量 $20\mu\text{m}/\text{rev}$ 以下で理論粗さが 100nm Rz 以下の鏡面加工となる。しかし、送り量が小さすぎるとパニッシングによって断面形状が保持されず、観察に適さない。一方、送り量が大きすぎても構成刃先が生じやすく、擦過痕によって観察に適した鏡面が得られない¹⁰⁾。

そこで、後述する実験に合わせて切り込みを $5\mu\text{m}$ とし、送り量 $2\sim 20\mu\text{m}/\text{rev}$ の条件で観察に適した切削条件を選定した。切削条件の選定は、断面観察によって行った。断面観察には光学顕微鏡を使用し、長作動距離対物レンズ ($\times 5$) , リングライト照明、顕微鏡 C マウントに取り付けた CCD カメラによって画像を記録した。リングライト照明では、表面の乱反射光を観察するため、観察対象が鏡面に近いほど画像は暗くなる。一方、観察対象の表面が粗いほど画像は明るくなる。

図 3 に各送り量で切削した断面観察画像を示す。送り量 $10\sim 20\mu\text{m}/\text{rev}$ (図 3(e)～(h)) では、表面に擦過痕と見られるムシレが生じた。一方、送り量 $5\mu\text{m}/\text{rev}$ 以下 (図 3(a)～(d)) では、鏡面加工が可能であった。しかし、送り量 $2\mu\text{m}/\text{rev}$ (図 3(a)) ではパニッシングによって工具形状の転写が良好に行われていなかった。従って、観察に適した良好な鏡面加工を実現する加工条件は、 $3 \leq f < 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ である。ここで、最大切りくず厚さ $t_{\max}$ μm は式(2)で表される。

$$t_{\max} = \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2Rd - d^2}} \mu\text{m} \quad (2)$$

(2)式から、観察に適した良好な鏡面加工を実現する加工条件は、 $0.41 \leq t_{\max} < 1.31 \mu\text{m}$ である。

3. 実験結果

3.1 連続断面画像の取得

連続断面画像の取得には、前項と同じくノーズ半径 0.5mm , すくい角 0° , 逃げ角 7° の単結晶ダイヤモンド工具を使用し、選定した切り込み $5\mu\text{m}$, 送り量 $5\mu\text{m}/\text{rev}$ の条件で加工した。断面観察には、光学顕微鏡を使用し、長作動距離対物レンズ ($\times 1$) , 落射照明、顕微鏡の C マウントに取り付けた CCD カメラ (KEYENCE 製 VHX-200) によって画像を記録した。表 2 に断面観察および画像記録条件を示す。画像は 4800×3600 画素、24bit カラー画像である。1 画素あたりの分解能は約 $4 \times 4 \mu\text{m}$ で、1 画像あたり約 $20 \times 15\text{mm}$ の範囲を記録した。照明には、落射照明を用いた。落射照明では、表面からの直接反射光を観察するため、観察対象が鏡面に近いほど画像は明るくなる。一方、微細な穴部では画像は暗くなり、切削断面の画像処理による鑄巣の領域の決定が容易であった。

前記条件で連続する約 3900 断面を切削し、表 2 に示す条件で切削面を逐次観察・記録した。図 4(a) に切削中の様子、図 4(b) に切削面の様子を示す。選定した切削条件により、良好な鏡面加工が可能であった。1 断面あたりの切削・観察・記録の所要時間は約 1min であり、試験片全体の総所要時間は約 65h であった。

図 5 に断面画像が連続的に変化する様子を示す。図 5 から、試験片内部の鑄造欠陥が形状・分布とともに複雑に変化する様子がわかる。図 6 に、図 5(b) 口枠部に注目し、深さ方向 $250\mu\text{m}$ 毎に表示した画像を示す。本システムによって、直径 $100\mu\text{m}$ 以下

Fig. 1 Structural chart of the system

(a) ADC12 specimen (b) X-ray transfer image of the specimen

Fig. 2 Appearance of test specimen

Table 1 Cutting conditions

Work Material	Aluminum die casting material ADC12: $20 \times 14 \times 37$ mm
Tool Material	Single crystal diamond
Tool geometry	Rake angle: 0° Clearance angle: 7° Nose Radius: 0.5 mm
Cutting speed	942 m/min ($=15.7$ m/s) (Cutting diameter: 50 mm, Revolution speed 6000 min $^{-1}$)
Feed rate f	$2, 3, 3.5, 5, 10, 12, 15, 20$ $\mu\text{m}/\text{rev}$
Cutting depth d	5 μm
Cutting fluid	Air

Fig. 3 Cut surface images

Table 2 Observation and recording conditions

Object lens	M Plan Apo $1 \times$ (MITUTOYO)
Illumination	Incident light
Light source	Mercury-arc lamp
Imaging device	VHX-200 (KEYENCE) Effective pixels: 4800×3600 Image format: 24 bit color TIFF
Field of view	20.0×15.0 mm
Image resolution	4.14×4.14 μm
Recording media	Hard disk drive
Recording time	2 s per 1 recording

Fig. 4 Cross section of the specimen

Fig. 5 Recorded 2-D images of the specimen

Fig. 6 3-Dimensional change of porosities (area: Fig. 5 (b) □)

Fig. 7 3-D reconstructed image of porosities

の鑄巣から、長径数 mm の鑄造欠陥まで、その輪郭形状の形態変化を詳細にとらえられたことがわかる。

3.2 鑄巣の 3 次元再構築

連続断面画像からの鑄巣の 3 次元再構築には、VGStudio MAX 1.2.1 Build 330 (Volume Graphics GmbH) および V-Cat 1.4.1 (RIKEN) を用いた。鑄巣の 3 次元再構築手順を以下に示す。

- ① 連続断面画像の取り込み
- ② 画像の輝度値の二値化による鑄巣領域の抽出

Fig. 8 3-D reconstructed image of porosities

- ③ 鑄巣領域へのラベル付け
- ④ ラベル付き領域のボリュームレンダリング、表示
- ⑤ ボリュームデータの保存

図 7(a) に図 6 内で最も大きい鑄巣の 3 次元再構築像を示す。上部は比較的球状で、下部は二方向に分かれる形状であることがわかる。また、図 7(b) に図 5(d) □ 枠部に示す $5 \times 4 \times 1 \text{ mm}$ 領域に存在する鑄巣の 3 次元再構築像を示す。本システムによって、直径 $100 \mu\text{m}$ 以下の鑄巣から、長径数 mm に至る様々な形状の鑄巣がこの領域内に存在する様子がわかる。

図 8 に全断面画像から作成した鑄巣領域の 3 次元再構築像を示す。鑄巣は試験片内部に様には分布しておらず、形状、寸法ともに多岐にわたることが確認できた。また、図 2(b) に現れない無数の鑄巣が内在していたことも確認できた。その中でも最も大きな巣を図 8 中に薄灰色で示した。その形状から、多数の鑄巣が連結して生じたと推定される。

3.3 鑄巣の体積分布および形状分布

前項で再構築した全鑄巣の体積および球形度について調査した。体積はラベル付けされたボクセル数から求め、球形度は(3)式に示す体積と表面積の関係から求めた。表面積は、鑄巣領域のうち外部と接する面の数から求めた。

$$\text{Sphericity} = \sqrt[3]{36\pi(\text{Volume})^2 / (\text{Surface_Area})} \quad (3)$$

全鑄巣のうち、直径 $30 \mu\text{m}$ 以上の鑄巣の体積から算出した鑄巣半径と球形度のヒストグラムをそれぞれ図 9(a), 図 9(b) に示す。図 9(a) から全体の約 90% が半径 $100 \mu\text{m}$ 以下で、寸法が大きくなるに従い、鑄巣の数は対数的に減少することがわかる。一方、図 9(b) から、体積の増加に伴い、球形度が低くなる傾向がわかる。この関係を詳しく調査するため、鑄巣を大 ($1.0 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ 以上)、中 ($2.0 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ 以上, $1.0 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ 未満)、小 ($2.0 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ 未満) の 3 グループに分け、作成したヒストグラムを図 9(c) に示す。体積が大きくなるに従い、球形度は低くなり、ばらつきも大きくなる傾向にあることが確かめられた。

4. 考 察

4.1 レプリカによる断面形状観察

(a) Porosity radius

(b) Porosity volume and sphericity

(c) Sphericity of porosities

Fig. 9 Feature characteristics of porosities

記録した画像の陰影部が鑄巣（凹部）に対応していることを確認するため、レプリカによる断面形状の観察を行った。レプリカとして、固定樹脂（Technovit 3040 : Kulzer）を使用した。図 10(a)に記録した画像の鏡像の一部、図 10(b)に作製したレプリカにおいて図 10(a)に対応する箇所を示す。図 10(b)に示した形状の三次元測定を行った。測定結果を図 11 に示す。測定には、非接触レーザプローブ三次元測定器（三鷹光器製 NH-3）を

(a) Image of cross-section (mirror image)

(b) Image of replica

Fig. 10 Image of the replica

Fig. 11 3-D shape of the replica

Fig. 12 X-ray image of specimen

Fig. 13 Averaged image of optical microscope images

用い、 $640 \times 480 \mu\text{m}$ の範囲に対し $10 \times 10 \mu\text{m}$ 毎に 64×48 点の測定を行った。図 11 から、記録した画像の陰影部は、断面上に存在する約 $0.45 \times 0.3 \times 0.05 \text{ mm}$ の凹部（鑄巣）に対応していることが確認できた。また、陰影部の輪郭形状についても形状測定結果の凸部分とほぼ等しいことが確認できた。なお、他の陰影部についてもレプリカを実体顕微鏡で観察することで、元の形状が凹部であったことを確認した。

4.2 X 線 CT との比較

図 12 に X 線 CT による取得画像、図 13 に本手法による取得画像の平均化画像を示す。比較のため、空間分解能を X 線 CT 画像の $400 \times 400 \times 500 \mu\text{m}$ に合わせ、本手法の取得画像を $414 \times 414 \times 500 \mu\text{m}$ に平均化した。図 12、図 13 から、本手法では平均化画像であっても輪郭形状が明瞭である。また、内部の鑄巣については、X 線 CT 画像では繋がって見える部分が、本手法の平均化画像では分離していることが分かる。また、X 線 CT に比べ微細な鑄巣が観察できている。このように、平均化画像におい

でも本手法は X 線 CT 画像に比べ、鑄巣の観察に適している。

4.3 SEM 画像との比較

図 14(a) に本手法による取得画像、図 14(b) に図 14(a) に対応する箇所の SEM 画像を示す。図 14 から SEM は焦点深度が深いために、比較的深い凹部のみ観察可能で、凹凸が小さい凹部の観察には適さない。したがって、SEM は本手法のように各断面における凹部の輪郭形状の取得が求められる場合には適していない。

4.4 工具摩耗の観察画像への影響

実験に用いたアルミニウム合金ダイカスト試験片は、Si を多く含むため、工具が摩耗しやすい。摩耗が進んだ際の観察画像を図 15(a) に示す。図 15(b) に示す工具交換直後の観察画像と比較し、パニッシングによって良好な鏡面加工とならず、微細な鑄巣の観察も困難であることがわかる。今回の実験では、工具交換までの切削距離は約 200mm であった。図 16 に摩耗した刃先の SEM 観察像を示す。刃先には幅 50 μ m、長さ 200 μ m 程度の摩耗が生じていた。

4.5 切削バリの観察への影響

工具摩耗とともに、切削時に生じるバリが観察に影響を及ぼすと考えられる。断面に凹部があるとき、その輪郭部では出口バリが生じる¹¹⁾。バリの大きさは一般的にパイロ切削方向と加工物エッジ角によって決まることが知られている¹²⁾。

そこで、巣の非常に少ない ADC12 試験片に直径 40 μ m の微小径穴をあけ、単結晶ダイヤモンド R 刃工具で切削し、生成されるバリの大きさを観察した。このとき、エッジ角は 90° で、バリは比較的生じやすいと予想される。

切削には実験と同じくノーズ半径 0.5mm、すくい角 0°、逃げ角 ϕ の単結晶ダイヤモンド工具を用い、(a) 切り込み 5 μ m、送り量 5 μ m/rev と、(b) 切り込み 20 μ m、送り量 50 μ m/rev の切削後の穴輪郭部の様子を観察した。図 17 に SEM 観察画像を示す。(a) の輪郭は、複数回にわたる切削のため、切削方向に出口バリが生じていた。全体的に複数回の切削によって輪郭形状が乱れている。ただし、生じたバリは穴内部に落ち込む形で伸びており、画像ではほとんど観察されず、輪郭形状は真円に対し数 μ m 程度であった。一方、(b) では、1 回のみの切削であるため、輪郭部は、元の形状をほぼ保っており、バリはほとんど生じていなかった。従って、刃先が摩耗しておらず、穴径が送り量よりも小さければ、輪郭形状が保たれ、刃先が摩耗している場合や、穴径に対し送り量が小さい場合に、バリが生じやすいと思われる。

なお、図 18 に示すように、送り量が小さくても、切り込みを大きくすることで切りくずが流出しやすくなり、出口バリ、輪郭形状の乱れともに生じにくいことを確認した。切りくず流出角は、Colwell ら¹³⁾によれば(4)式で表される。

$$\lambda = \arctan \frac{1}{\sqrt{2R/d} - 1} \quad (4)$$

ここで、 λ : 切りくず流出角、 R : 工具ノーズ半径、 d : 切り込みである。(4)式に、 $R = 0.5$ mm、 $d = 5$ μ m、を代入すると、 $\lambda = 4.05^\circ$ となる。一方、 $R = 0.5$ mm、 $d = 20$ μ m を代入すると、 $\lambda = 8.13^\circ$ となる。これは、切りくず流出角が大きくなることで、側面バリの生成が主となり、出口バリが小さくなるという橋村ら¹¹⁾の実験結果とも一致する。

5. 結 言

本研究では、正面フライス切削を利用した試料内部 3 次元情

(a) Image of microscope

(b) Image of SEM

Fig. 14 Microscope image and SEM image of machined surface

(a) Worn tool

(b) New tool

Fig. 15 Cut surface with worn tool and new tool

Fig. 16 Tool nose wear after cutting

(a) $d = 5$ μ m, $f = 5$ μ m/rev

(b) $d = 20$ μ m, $f = 50$ μ m/rev

Fig. 17 Burr formation and cutting conditions

$d = 20$ μ m, $f = 5$ μ m/rev

Fig. 18 Clear shape of circle after cutting

報取得システムを用いて、アルミニウム合金ダイカスト試験片に対し、精密切削および断面画像記録を繰り返し、鑄巣領域の観察を行った。

本論文で得られた結論は以下のとおりである。

参 考 文 献

- (1) アルミニウム合金ダイカスト試験片に対し、ノーズ半径 0.5mm の単結晶ダイヤモンド R 刃工具を使用し、切り込み 5 μ m、送り量 3~10 μ m の条件で観察に適した鏡面加工を実現した。
 - (2) 20×14×20mm のアルミニウム合金ダイカスト試験片切削面を逐次観察・記録することで、3 次元内部情報を 4×4×5 μ m 分解能で取得した。
 - (3) 連続断面画像から鑄巣領域を抽出し、3 次元再構築することで、試験片内部の鑄巣の詳細な 3 次元分布を明らかにした。
 - (4) 20×14×20mm のアルミニウム合金ダイカスト試験片内部に含まれる、直径 90 μ m 以上の鑄巣の体積と球形度の関係を明らかにした。
 - (5) 切削面のレプリカを作製し、形状を測定することで、記録した断面画像の陰影が鑄巣に相当することを確認し、画像から鑄巣領域の抽出が可能であることを示した。
 - (6) X 線 CT 画像および SEM 画像と本手法を比較し、微細な鑄巣観察における優位性を示した。
 - (7) 微小径穴の輪郭形状に切削が及ぼす影響は、工具送り量と穴径に関係があり、工具ノーズ半径及び切り込みから算出される切りくず流出角にも関係があることを確かめた。
- 1) 石井博行, 岡田貴弘, 三和田靖彦: X 線 CT を活用した 3 次元形状計測, 精密工学会誌, **69**, 4 (2003) 473.
 - 2) M.V. Kral and G. Spanos: Three-dimensional Analysis of Proeutectoid Cementite Precipitates, *Acta Materialia*, **47**, 2, (1999) 711.
 - 3) 小林賢知, 樋口俊郎, 青木勇, 工藤謙一: 三次元内部構造顕微鏡の開発, 精密工学会誌, **61**, 1 (1995) 100.
 - 4) 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎, 佐藤嘉平: 発現遺伝子観察用 3 次元内部構造顕微鏡の開発, 医用電子と生体工学, **36**, 3 (1998) 244.
 - 5) S. Ueno, G. S. Do, Y. Sagara, K. Kudoh, and T. Higuchi: Three-dimensional Measurement of Ice crystals in Frozen Dilute Solution, *International Journal of Refrigeration*, **27**, 3, (2004) 302.
 - 6) 工藤謙一, 木下泰希, 都甲洙, 内ヶ崎万蔵, 佐藤嘉兵, 樋口俊郎: リニアマイクロスライサを用いた生体内部観察システムの開発, 生体医学, **43**, 1 (2005) 103.
 - 7) J. Kimura, Y. Hirano, S. Takemoto, Y. Nambo, T. Ishinazaka, R. Himeno, T. Mishima, S. Tsumagari and H. Yokota: Three-Dimensional Reconstruction of the Equine Ovary, *Anatomia Histologia Embryologia: Journal of Veterinary Medicine Series C*, **34**, 1, (2005) 48.
 - 8) 横田秀夫, 平田忍, 川口龍平, 中村佐紀子, 牧野内昭武, 姫野龍太郎, 矢部比呂夫, 樋口俊郎: 3 次元内部構造顕微鏡を用いた生体軟組織の半自動 FEM 解析メッシュ生成, 日本機械学会論文集 A 編, **71**, 702 (2005) 219.
 - 9) 浅井昭一: 超精密ダイヤモンド切削における切りくず観察と鏡面生成機構に関する考察, 精密工学会誌, **55**, 10 (1989) 1851.
 - 10) 古城直道, 横田秀夫, 藤崎和弘, 山形豊, 小久保光典, 姫野龍太郎, 牧野内昭武, 樋口俊郎: 逐次精密切削加工による試料内部 3 次元情報取得システムの開発, 精密工学会誌, **74**, 6 (2008) 587.
 - 11) 橋村雅之, D.A. Domfeld: フライス切削のばり生成に及ぼす縦すくい角の影響, 精密工学会誌, **64**, 1 (1998) 1658.
 - 12) 西嶋祐: 現場で役立つ切削加工の勘どころ—西嶋祐切削塾からの提言—, 日刊工業新聞社 (2004) 156.
 - 13) L.V. Colwell and A. Arbor: Predicting the Angle of Chip Flow for Single-Point Cutting Tools, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, **76**, 2, (1954) 199.

謝 辞

本研究は、(独) 理化学研究所「生体力学シミュレーション研究プロジェクト」の一環として進められた。関係者の研究支援に謝意を表する。