

# 減圧浸炭シミュレーション技術

Simulation Technology for Low Pressure Carburizing

武藤 康政\*

MUTO Yasumasa

## 1. はじめに

地球温暖化への対応としてカーボンニュートラルを目指す動きが世界的に加速しており、自動車部品、産業機械部品等の製造工程においても、よりCO<sub>2</sub>排出量の少ない熱処理プロセスの選択が進められている。ギヤ・シャフトなどの駆動系部品の製造では、高い疲労強度や耐摩耗性を部品に付与するために、表面硬化処理として浸炭焼入れが施されている。浸炭処理方法としては、CO/CO<sub>2</sub>雰囲気を緻密に制御して浸炭するガス浸炭が主流であるが、近年では、CO<sub>2</sub>排出量削減や処理時間短縮の観点から、メリットのある減圧（真空）浸炭（LPC: Low Pressure Carburizing）が注目されている。

図1に、ガス浸炭と減圧浸炭の特徴<sup>1, 2)</sup>を示す。ガス浸炭は、プロパン（C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>）、ブタン（C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>）などの炭化水素系ガスと大気中の酸素を高温で反応させて生成したキャリアガス中のCOから、次に示す平衡反応によって炭素（C）が鋼材中に侵入する浸炭機構となっている。



そのためガス浸炭では、炉内のCO/CO<sub>2</sub>ガス組成を均一にして安定した浸炭品質（表面C濃度など）を得るために、多量のキャリアガスをオーバーフローさせた状態で炉を稼働させている<sup>3)</sup>。通常、浸炭反応に作用しなかった

COを含む余剰ガスは、安全面から燃焼処理されるため、多量のCO<sub>2</sub>が発生する<sup>3)</sup>。

一方で減圧浸炭は、減圧環境下にてアセチレン（C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>）・プロパンといった炭化水素系の浸炭ガスを直接導入し、鋼材表面からCを侵入させる「浸炭期」と、浸炭ガスを導入せずに鋼材表面から内部へCを拡散させ、表面C濃度を低下させる「拡散期」から構成される浸炭処理である。この浸炭期における反応機構は、浸炭ガスの分解により生成した黒鉛（グラファイト）と鋼材表面の平衡反応によると考えられている<sup>2)</sup>。この機構から、浸炭反応の過程でCO<sub>2</sub>は基本的に発生しない。また、減圧浸炭における浸炭ガスは、反応効率（供給量に対して実際に浸炭に寄与するCの割合）が高く、適時適量導入すればよいため、余剰ガスは殆ど発生せず、燃焼排気によるCO<sub>2</sub>発生は殆どない<sup>1, 3-5)</sup>。このように、減圧浸炭は、ガス浸炭とは異なる浸炭機構を有しており、ガス浸炭よりもCO<sub>2</sub>排出量を削減できる方法となっている。

しかしながら、減圧浸炭は、浸炭品質（C濃度分布と炭化物析出状態）の制御が難しく、ガス浸炭から切替えをする上での課題となっている。ガス浸炭では、炉内CO/CO<sub>2</sub>濃度と鋼材表面の平衡反応に基づき、炉内の浸炭能力を示すカーボンポテンシャルを制御することで、最表面のC濃度が調整されている。また、表面C濃度を固溶限以下とす

	ガス浸炭	減圧浸炭
圧力	大気圧	10kPa 以下
浸炭機構	$2\text{CO} \rightleftharpoons [\text{C}] + \text{CO}_2$	$\text{C}_2\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{C}_{\text{Graphite}} + \text{H}_2$ $\text{C}_{\text{Graphite}} \rightleftharpoons [\text{C}]$
反応図		

図1 ガス浸炭と減圧浸炭の特徴<sup>1,2)</sup>

\* 研究・開発センター 基盤研究室 予測研究グループ

ることで、炭化物（セメンタイト、 $\theta$ ）の形成を回避した処理が可能である。対して、減圧浸炭では、反応機構<sup>2)</sup>上、浸炭期の表面は高C濃度となるため、鋼種・処理温度によっては、C濃度が固溶限を超えることで図2のようなネット状粗大 $\theta$ を形成する。特にギヤ歯先などの部品エッジ部においては、図3に示す減圧浸炭におけるエッジ部のC拡散挙動の概略図<sup>6)</sup>の通り、拡散場の重なりが存在することでC濃度が高くなり、粗大 $\theta$ の形成が促進される<sup>6)</sup>。このような粗大 $\theta$ は、部品の疲労強度を低下させる懸念がある<sup>6)</sup>ため、形成抑制が必要となっている。加えて、減圧浸炭では、ガス浸炭で行われるようなカーボンポテンシャルを指標とした表面C濃度の制御は困難であることから、トライ&エラーを繰り返して浸炭条件を決定する必要があり、実用化の際の課題となっていた<sup>7)</sup>。

減圧浸炭における浸炭品質（C濃度分布・ $\theta$ 状態）制御の課題に対して、近年では適切な浸炭条件の導出を容易にするため、浸炭状態を予測する減圧浸炭シミュレーションの実用化も進められており、解析モデルも報告されている<sup>2, 8)</sup>。代表的な解析モデルとしては、減圧浸炭の浸炭期において表面はグラフアイトと平衡、拡散期において雰囲気とのCのやり取りはないとし、 $\theta$ の存在を熱力学的平衡計算により考慮した拡散解析モデル（局所平衡モデル）が挙げられる<sup>2, 8)</sup>。

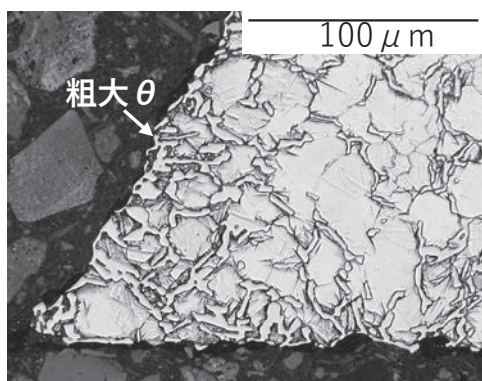


図2 減圧浸炭で形成したエッジ部粗大 $\theta$ の例

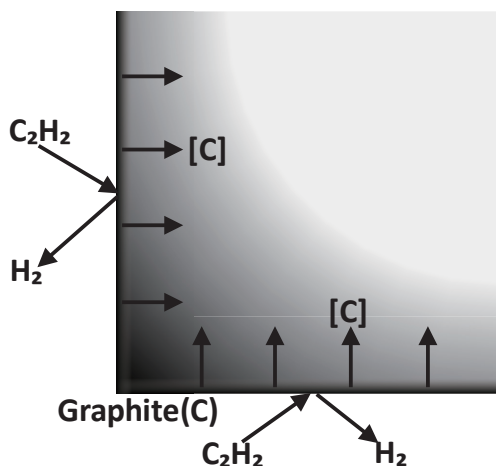


図3 減圧浸炭でのエッジ部C拡散挙動の概略図<sup>6)</sup>

当社でも、カーボンニュートラルを背景にした減圧浸炭の活用ニーズに応えるべく、C濃度分布や $\theta$ 状態を予測可能な減圧浸炭シミュレーションモデルを開発した。本報では、当社の減圧浸炭シミュレーションモデルの概略を示すとともに、実際の解析を通して、その有効性を確認した結果も紹介する。

## 2. シミュレーションソフトウェアの選択

シミュレーションモデルを構築する上で当社は、扱い易さを考慮し、市販のシミュレーションソフトウェアを活用した。減圧浸炭下の代表的なC拡散挙動の解析モデルである局所平衡モデル（ $\theta$ 形成・固溶の挙動を熱力学計算により考慮した拡散解析モデル）により、多成分系での解析が可能なソフトウェアとして、DICTRA (Diffusion Control TRAnsformations)<sup>9)</sup>が市販されている。当社ではまず、DICTRAを用いて、部品平坦部などを対象とした一次元解析が可能なシミュレーションモデルの構築に取り組んだ。

一方で、DICTRAは機能上、角材の平坦部、円筒・球体の平滑部で起きるような、表面から法線方向の一次元のC拡散挙動の解析は可能<sup>9)</sup>であるが、減圧浸炭で粗大 $\theta$ が特に問題となるエッジ部断面で起きる二次元のC拡散挙動の解析はできない。加えて、減圧浸炭を実際の部品に施す場合、同一浸炭条件であっても、部品内の歯先、歯底など形状により浸炭後のC濃度分布は異なるため、精度の良い解析を行うには、部品形状をモデルに反映する必要がある。また、部品の形状は、昨今の小型・軽量化や一体化ニーズへの対応から、今後さらに複雑化していくと考えられ、解析においても、より複雑な形状のモデリングが必要となる可能性がある。これら課題に対応するため、当社では、前述のDICTRAを用いたモデル構築の後に、その知見を活かして、二次元は勿論、三次元の解析も可能であり、加えて、CADデータの活用や、自動メッシュ作成機能・ツールの普及により、解析対象の形状複雑化ニーズにも対応<sup>10)</sup>している汎用の有限要素法（FEM: Finite Element Method）ソフトウェアを用いて、シミュレーションモデルの構築を行った。

## 3. 平坦部を対象にした一次元解析

DICTRAを用いて構築した解析モデルによる平坦部を対象にしたシミュレーションの実施例を紹介する。同一の浸炭条件で減圧浸炭後の $\theta$ 残存程度が異なる2鋼種（ $\theta$ 残存の程度：Steel A > Steel B）を対象にし、C濃度分布のEPMA (Electron Probe Micro Analyzer) による実測とシミュレーションによる解析を行った。図4は対象2鋼種の減圧浸炭後の平坦部マイクロ組織であり、Steel Bでは粗大 $\theta$ は存在せず、Steel Aでは表面から100 $\mu$ m程度の範

図に粗大 $\theta$ が存在していることが確認できる。

図5に、平坦部断面のC濃度分布（解析値及び実測値）を示す。実測値（図5中の□プロット）に関して、Steel Aでは表面から100 $\mu\text{m}$ 程度まで、C濃度が著しく高くなっている範囲が確認された。一方でSteel Bには同様の高C範囲は確認されなかった。Steel A 表面近傍の高C範囲は、図4で示した粗大 $\theta$ の存在する範囲と対応している。C濃度の実測値に対して、DICTRAでモデル構築・計算実行した局所平衡モデルによる解析値（図5中の灰色実線）は、粗大 $\theta$ がない範囲においてはよく一致しており、解析精度は良好である。しかしながら、粗大 $\theta$ が存在する範囲のC濃度は、解析値と実測値で乖離しており、局所平衡モデルでは、 $\theta$ 析出部の再現や予測は難しいことが分かる。

上記の局所平衡モデルで生じた乖離は、同モデルの $\theta$ 析出・固溶など組織変化に必要な時間を無視するという仮定に起因していると推察した。そこで当社は、局所平衡モデルに対して、組織変化に必要な時間の影響を考慮させる改良を加え、独自の解析モデルを開発した。この開発モデルに基づいたシミュレーションは、DICTRAを用いて実施可能である。図5の黒破線で示す通り、開発モデルによるシ

ミュレーション結果は、 $\theta$ 析出部を含めて実測値と良く一致しており、精度良くC濃度分布の解析ができています。

DICTRAを用いたシミュレーションでは、材料組織・元素拡散の連成解析がソフトウェアのプログラム内で自動に実施されているため、解析に他のソフトウェアを必要としない。そのため、後述するFEMソフトウェアを用いて構築したシミュレーションに比べて、モデル作成（計算条件の設定）の手間が少なく、迅速・簡便にシミュレーションを実施できるというメリットがある。

#### 4. エッジ部を対象にした二次元解析

$\theta$ の形成・固溶を伴った減圧浸炭下の二次元C拡散挙動のシミュレーションを実施可能とすべく、FEMソフトウェアを用いてモデル構築を行った。前述した局所平衡モデルに基づき、他の熱力学計算ソフトウェアによる組織状態の計算結果を活用して $\theta$ と母相の複合組織を含んだ鋼材中の拡散係数を計算するユーザーサブルーチンを独自に開発し、解析モデルに組込んだ。

FEMソフトウェアを用いた解析モデルによる、エッジ

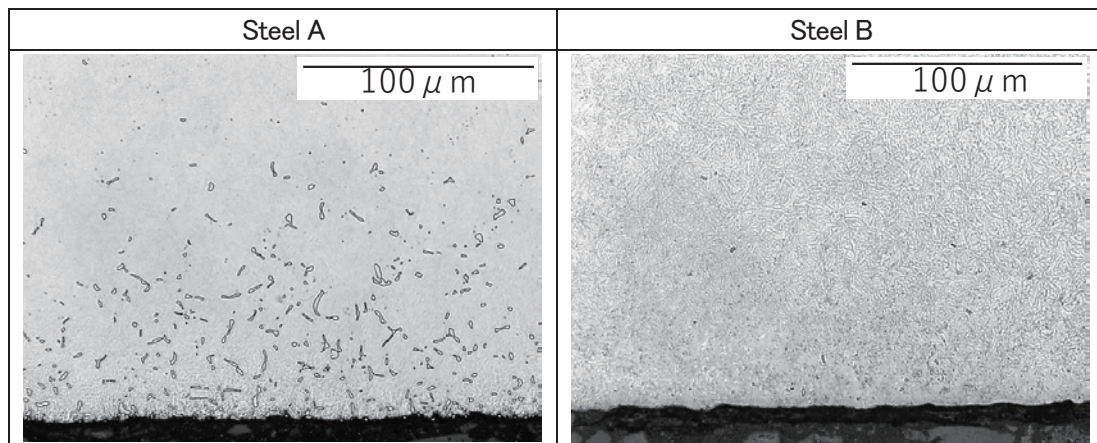


図4 減圧浸炭後の平坦部マイクロ組織

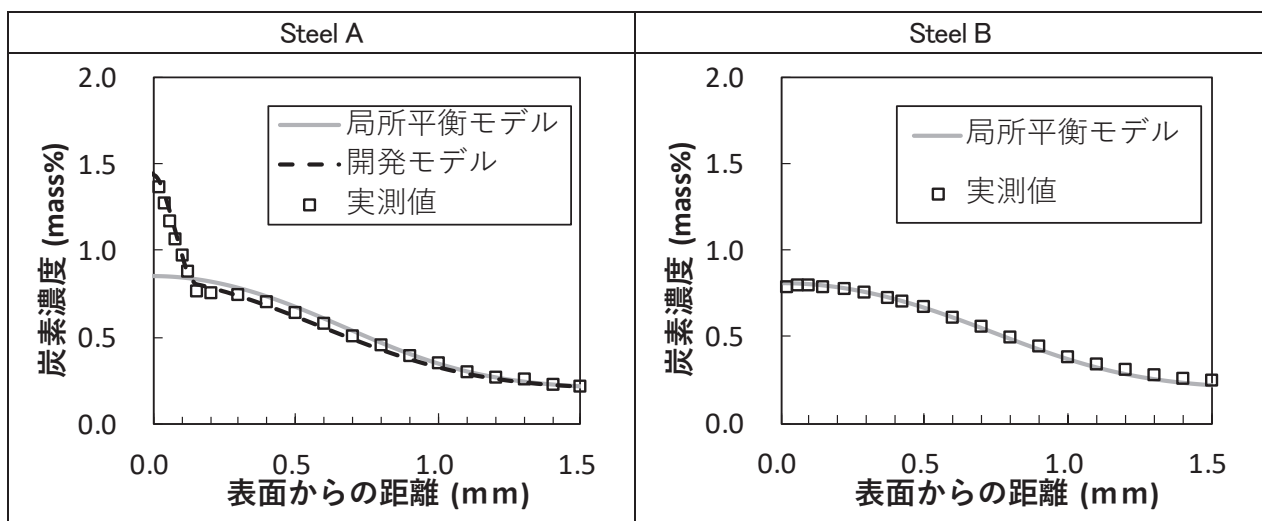


図5 減圧浸炭後の平坦部C濃度分布

部を対象にしたシミュレーションの実施例を紹介する。前章（平坦部の解析）と同じ2鋼種を対象にし、二次元断面において、C濃度分布のシミュレーションによる解析とEPMAによる実測を行った。図6は対象材の減圧浸炭後の60° エッジ部マイクロ組織であり、Steel Bでは粗大θが殆ど存在せず、Steel Aでは頂点近傍に粗大θが多量に存在していることが確認できる。

図7に、エッジ部断面のC濃度分布（解析値及び実測値）を示す。C濃度分布は、60° エッジ部断面において、角の二等分線上に沿って、解析値・実測値を得たもの

である。実測値（図7中の□プロット）に関して、Steel Aでは頂点から350μm程度まで、C濃度が著しく高くなっている範囲が確認され、一方でSteel Bには同様の高C範囲は確認されない。図6との比較にて、Steel A頂点近傍の高C範囲は、C濃度分布を得た角の二等分線上にて粗大θが多く存在する範囲と対応している。C濃度の実測値に対して、FEMソフトウェアでモデル構築・計算実行した局所平衡モデルによる解析値（図7中の灰色実線）は、前章の一次元解析と同様に、多量の粗大θが存在する高C範囲を除いて良く一致するが、高C範囲に関しては乖離が生じ

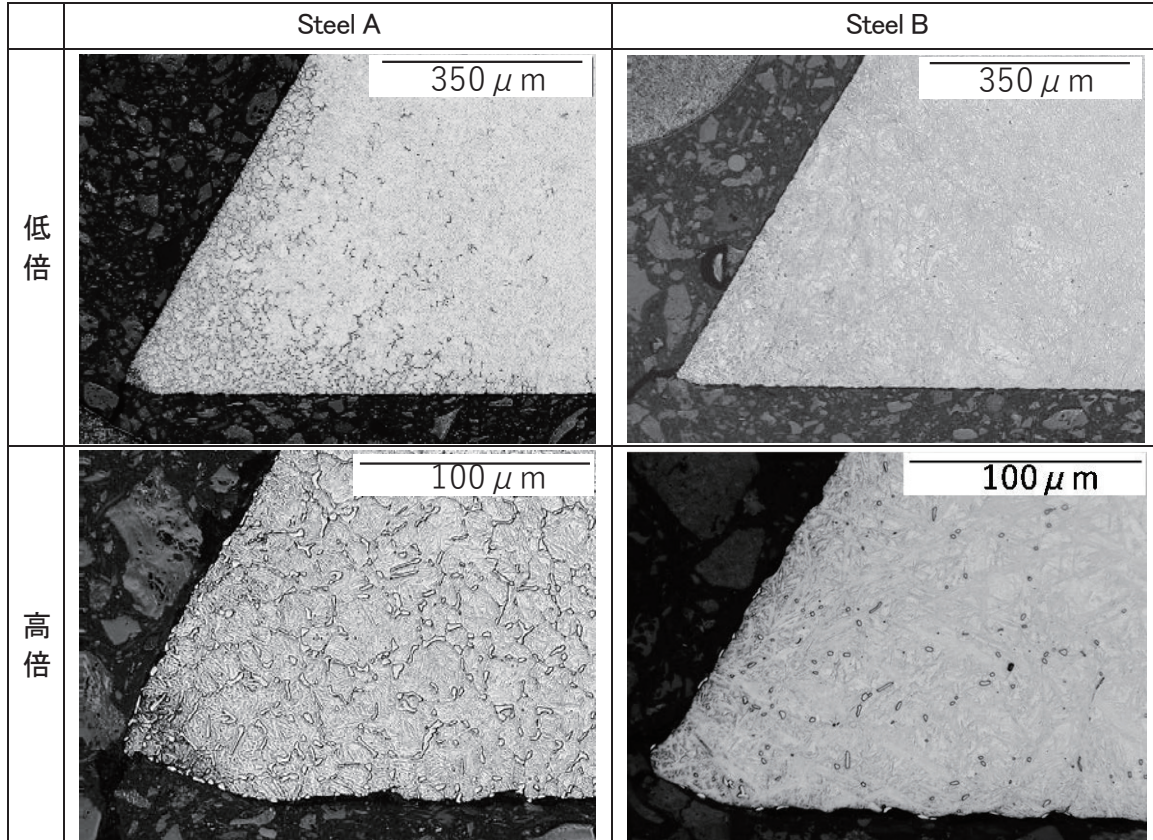


図6 減圧浸炭後の60° エッジ部マイクロ組織

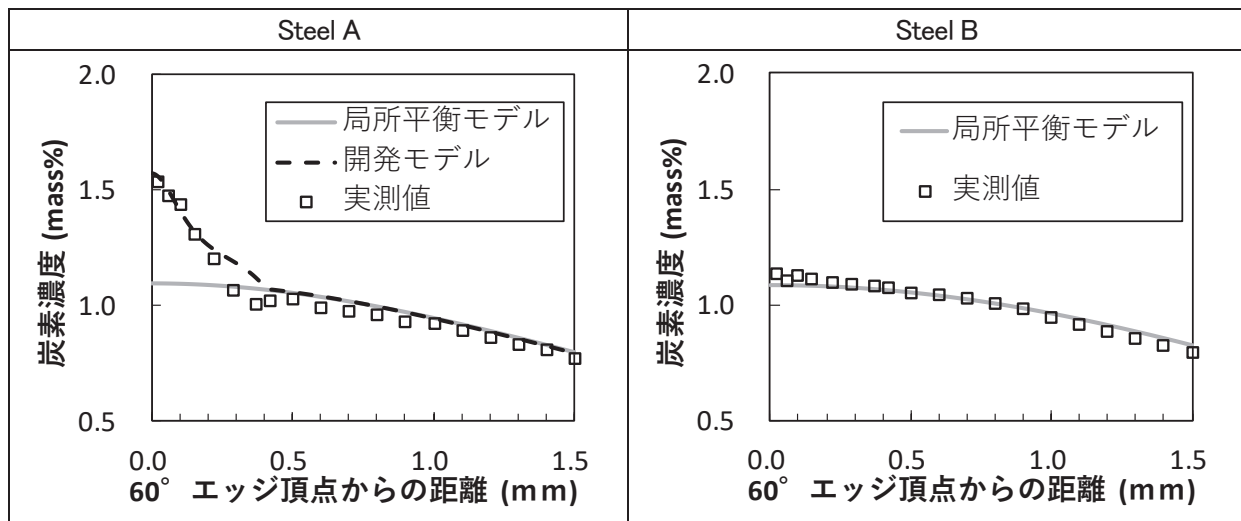


図7 減圧浸炭後の60° エッジ部C濃度分布

た。このように、局所平衡モデルでは、エッジ部断面を対象とした二次元解析でも、 $\theta$ 析出部の解析精度は低いことが分かる。

この解析精度の課題に対して、前章の平坦部を対象とした研究で得た知見を踏まえ、鋼材中の拡散係数を計算するユーザーサブルーチンに改良を加え、独自の開発モデルに基づくシミュレーションをFEMソフトウェアにて実施可能にした。図7の黒破線で示す通り、開発モデルによるシミュレーション結果は、 $\theta$ 析出部を含めて実測値と良く一致しており、精度良くC濃度分布の解析ができています。

開発したFEMソフトウェアを用いたシミュレーションは、今後、その汎用性、形状モデル化の容易さから、他の二次元断面形状や、より複雑な実部品形状を反映させた三次元形状など、解析対象の拡大が可能であり、あらゆる部品形状に対して、適切な浸炭条件を導出するためのツールとして活用できると考える。

## 5. おわりに

カーボンニュートラル実現に向けた、自動車・産業機械の部品製造における熱処理プロセスの変革の一つとして、CO<sub>2</sub>排出量削減の観点で優れた方法である減圧（真空）浸炭の活用が進められている。本稿では、当社で開発した減圧浸炭シミュレーション技術について報告した。本シミュレーションは、減圧浸炭における浸炭品質（表面C濃度・粗大 $\theta$ ）制御に活用できる。今後も、本技術の更なる活用、発展を進め、当社顧客のカーボンニュートラル実現に向けた取組みに貢献していく。

### 参考文献

- 1) 堀哲：特殊鋼, 61 (2012) 3, 14-16.
- 2) 森田敏之, 羽生田智紀：鉄と鋼, 92 (2006) 4, 268-273.
- 3) 水越朋之, 横山雄二郎, 星野英光, 石神逸男：日本マリンエンジニアリング学会誌, 46 (2011)5, 11-15.
- 4) 大下修：工業加熱, 57 (2006) 5, 1-7.
- 5) 河田一喜：特殊鋼, 70 (2021) 3, 40-43.
- 6) 森田敏之, 梅本実：鉄と鋼, 96 (2010)6, 400-405.
- 7) 鮎谷清司：電気製鋼, 77 (2006) 1, 53-66.
- 8) 藤堂尚二, 末野秀和, 今高秀樹：新日鉄住金技報, 406(2016), 13-18.
- 9) H. Larsson and L. Höglund：Calphad, 33 (2009) 3, 495-501.
- 10) 山田知典, 河合浩志：精密工学会誌, 76 (2010) 11, 1244-1247.