

トナー開発への溶融シミュレーションの適用

Application of Numerical Simulation of the Toner Melt Behavior to Toner Development

藤崎 達矢*
Tatsuya FUJISAKI

万袋 麻希子**
Makiko MANDAI

加川 哲哉***
Tetsuya KAGAWA

伊藤 博人***
Hiroto ITOU

要旨

環境負荷低減への社会的な要望により、MFPのTEC (typical electricity consumption) 値を低下させる技術開発の必要性が増している。その中で、トナーにおいては更に低温で定着できることが求められている。今回、低温定着化の因子を明確化することを目的として、トナー構造および物性を考慮できる、粒子法を用いた溶融シミュレーションを構築しトナーの溶融挙動に加えてワックス染み出し性を予測することを可能にした。実験検証として、モデルトナーを作成し、定着性およびTOF-SIMSによるワックス染み出し量を測定した結果、計算結果と実験結果が整合することを確認した。さらに、本手法を用い小径化の効果を予め計算で予測し実際に実験を行ったところ、低温定着化の因子であることが確認できた。以上のように、シミュレーションで予測・設計し、実験で検証する開発プロセスを確立した。今後、実験での仮説検証に加え本手法を併用したトナー検討や、トナーと定着プロセスの最適化検討における更なる効率化が期待できる。

Abstract

Due to social demand for energy saving, it is required to develop new toner with low fixing temperature that meets the level of TEC (typical electricity consumption) in Energy Star. In order to understand and improve the fixing process, we have developed a new simulation model, called "Particle Method", that can include parameters of structure and physical properties of toner particle. The model also made it possible to estimate wax exudation behavior and toner melting temperature. In order to verify the model, we made some toners with variable physical parameters and observed melting behavior and wax exudation by using TOF-SIMS. Our simulation predicted smaller toner was more effective to lower the melting temperature and it was verified through the experiments. We now expect our model enhances the efficiency of toner development process and reduces the time for optimization.

* 情報機器開発本部 材料要素技術開発C 化製品開発部

** 開発統括本部 要素技術開発C システム技術開発室

*** 開発統括本部 要素技術開発C 価値創造室

1 はじめに

昨今、環境負荷低減、特に省エネルギーへの要望が高まっている。国内外で制定されるエネルギー効率に関する基準値の測定基準として「国際エネルギースタープログラム」(以下、エナジースターと表記)が2007年にTEC (typical electricity consumption) 値を導入した。MFP, プリンターの導入時にその製品のTEC値がエナジースターに適合していることが導入条件になっている場合が数多くある。上記動向の中で、MFPの消費電力のうち多くを占める定着システムの省エネ技術開発が欠かせない¹⁾。トナー開発においては、より低い温度で完結する低温定着化技術の向上が重要である。

また、製品のライフサイクルが短い今日では、短期間で効率のよい開発が求められ、シミュレーションを用いた試作レス開発が望まれている^{2), 3), 4)}。しかし、トナーのような複数の構成材料が複雑な内部構造を形成し、複合した機能発現を求められる有機系資材にシミュレーションを適用することは、困難である場合が多い。

2 低温定着化の方針

低温定着化の設計方針として、シャープメルト性の向上、熱伝導性の向上、メディアとの接着性の向上が挙げられる。特にシャープメルト性の定着性への影響が大きい。シャープメルト性とは、単位時間あたりの粘度変化のことであり、短時間で粘度低下することが好ましい。理想的なトナー粘弾性挙動は、トナーの保管温度以上で急激に粘度低下し、高温側では弾性を保つ挙動である。急激な粘度変化により定着ニップ内でトナーが素早く溶融変形することができる。

そのような粘弾性挙動を設計するにあたって、メインバインダの熱物性は当然のことながら定着助剤やワックスの物性や、ドメイン構造の制御も重要な設計因子の一つである。

3 トナー設計へのシミュレーションの適用

トナー設計では仮説検証サイクルを素早く回すことが肝要である。設計因子の効果把握のため、実際にトナーを作製し性能検証しようとするとうとトナー製造自体が困難であることが多く開発効率が悪い。そこで我々は、理想的なトナー構造と物性、それらの組み合わせの方向性を見出すための溶融シミュレーションと、その構造を実現するためのトナー作製の方向性を見出す内部構造シミュレーションの計算モデル検討を行っている。本稿では溶融シミュレーションに関して報告する。

一般的なトナー構成は、メインバインダ、色材、ワックス、定着助剤である。ワックスは定着工程の後半で定着ベルトから画像を離型させる役割があり、画像の最表層に存在する。そのため、ワックス染み出し性は、特に

多くの画像品質に関連する。溶融性を変化させるとワックス染み出し性が変化し品質の副作用が発生する場合がある。低温定着化検討の際にはワックス染み出し性について把握し、副作用を発生させない設計をすることが非常に重要である。しかし、これまで、溶融性とワックス染み出し性に関するシミュレーション手法の報告はなく、計算モデルの構築が必要であった。

4 基本計算モデルの構築

4.1 溶融シミュレーションの手法

SPH (smoothed particle hydrodynamics) 法は個々の粒子が計算点になっており、有限要素法のように格子の歪みを気にすることなくラグランジェ法の計算ができることから、大変形や破壊を容易に計算できるという特徴がある^{5), 6)}。その特徴を生かし、トナーが割れて内部のワックスが浸み出す挙動をシミュレーションすることが可能となる。

4.2 SPH法とは

SPH法は1970年代に圧縮性流れの計算手法として開発された。計算格子を使用せず、空間に配置された粒子を計算点として用いる。格子法では計算点が格子状に配置され、計算領域が極端に変形すると格子が大きくなりすぎ、計算が破綻してしまう。それに対して粒子法では格子を用いないため、変形が大きくても問題はない⁶⁾。破壊や分裂が生じるような変化であっても、特別な設定が不要で安定して解析を行うことができる。

SPH法は粒子を連続体としての挙動として扱うために、評価点を中心にカーネル関数を用いて物理量 $f(x)$ を平均化して式(1)のように表現する^{7), 8), 9)}。

$$f(x) = \int f(y) W(x-y, h) dy \quad (1)$$

ここで、 $W(x-y, h)$ はカーネル関数、 h は平滑長さ、 x, y はそれぞれ評価中心、任意粒子の座標値である。ここでカーネル関数は次に示す性質を満たす必要がある

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x-x', h) = \delta(x-x') \quad (2)$$

$$W(x, h) = 0 \text{ for } |x| \geq 2h \quad (3)$$

$$\int W(x, h) dx = 1 \quad (4)$$

カーネル関数 W は多くの候補があるが、3次B-spline関数がよく使われる⁸⁾。

$$W = \begin{cases} \frac{C}{h^D} [1 - \frac{3}{2}z^2 + \frac{3}{4}z^3] (z < 1) \\ \frac{C}{4h^D} [2 - z]^3 (1 \leq z < 2) \\ 0 (z \geq 2) \end{cases} \quad (5)$$

ここで

$$z = \frac{u}{h} \quad (6)$$

であり、 u は粒子間の距離 $u = |x - y|$ 、 D は空間次元数で、定数 C は次のように与えられる。

$$C = \begin{cases} \frac{2}{3} (D = 1) \\ \frac{10}{7\pi} (D = 2) \\ \frac{1}{\pi} (D = 3) \end{cases} \quad (7)$$

粒子毎の表現に書き直すと、各粒子点に分布を持たせたカーネル関数を定義し、座標 x_i の関数 $f(x_i)$ は h の範囲の中にある粒子のカーネル関数の足し合わせとなり、式(8)のように表現できる。

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h) \quad (8)$$

添え字 j は物理量の定義点(粒子 i)近傍の粒子 j を意味しており、 m 、 ρ はそれぞれ粒子の質量、密度を表している。

粒子法は大変形問題の解析に特に有効なため流体への適用が先行的に開発されてきたが、弾性解析にも同様の計算原理が適用できる。

4.3 前提と計算モデル

本研究ではSPH法のコードを含む汎用の非線形構造解析ソフトウェアLS-DYNAを利用してトナーの割れを考慮した計算を実施した。計算を簡単にするため、定着ベルトは剛体として扱い、温度は一定とし、トナー粒子は2粒子とした。紙については変形・温度変化ともに許容している。周辺空気はモデル化せず、周辺空気を介した対流熱伝達や、周辺への放熱は無視した (Fig. 1)。

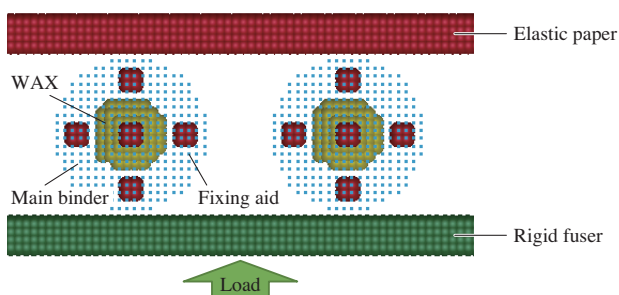


Fig. 1 The single-layer calculation model.

4.4 計算パラメータ

トナー構成はメインバインダ、ワックス、定着助剤とし、各因子の効果幅を把握すべく品質工学の手法に則りL18直交表に割り付けた (Table 1)。

Table 1 Table of the control factors and levels.

No.	Label	Level		
		1	2	3
A	Distributed state of fixing aid	Dispersion	Center	
B	Melting point of wax	Low	Middle	High
C	Melting point of fixing aid	Low	Middle	High
D	Elastic modulus decrease start temperature	High	Middle	Low
E	Distributed state of wax	Dispersion	Dispersion	Center
F	Shear force for toner	Weak	Middle	Strong
G	Addition amount of wax	Middle	Small	Large
H	Addition amount of fixing aid	Middle	Small	Large

各構成成分の粘弾性測定を行い弾性率の温度変化を入力パラメータとした (Table 1 B, C, D)。計算時間の都合上、数点のプロットのみを用いた。ワックスおよび定着助剤の分散状態は、中央配置と分散配置の2水準とした (Table 1 A, E)。中央配置では全てのワックスまたは定着助剤をトナー中心に配置する。この時、ワックスと定着助剤の両方が中央配置となる条件ではワックスの周囲を定着助剤で取り囲むように配置した。分散配置では、ワックスまたは定着助剤を分割して、トナー表面からトナー半径の概略1/2の深さに、お互い等距離になるように配置する。この時、ワックスと定着助剤の位置が重ならないように、ワックスは8等分、定着助剤は6等分 (Fig. 1) とした。また、ワックスと定着助剤それぞれの添加量も割り付けた (Table 1 G, H)。更に、実際の定着ニップで生じるずり力の効果を把握すべく割り付けた (Table 1 F)。その他、各構成成分の比熱、密度、熱伝導率はそれぞれ測定値を用いた。

4.5 溶融性の計算結果

ニップ時間に対するトナー高さ変化の計算結果の一部をグラフに示す (Fig. 2)。

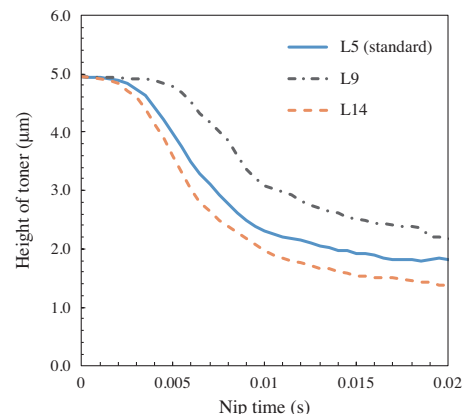


Fig. 2 Calculation result of toner height change during nip time.

基本条件のL5に対して、熱物性やトナー構造が反映された溶融性が異なる計算結果が種々得られており、L5よりもL14の方が良好な溶融性を示している。

溶融性の指標として、ニップ時間が21 msのトナー高さを特性値として要因効果図を作成した (Fig. 3)。

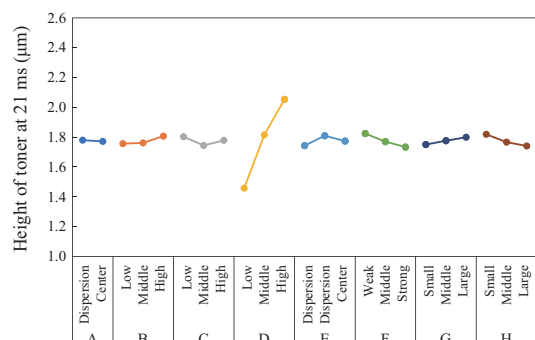


Fig. 3 Graph of factorial effects of toner height at 21ms.

メインバインダの弾性率低下開始温度が大きな効果があることが示されるとともに、温度が低いと溶融性が良く、低温定着性の評価指標であるアンダーオフセット性が良好するという従来の知見と符合している。

4.6 ワックス染み出し性の計算結果

ワックス染み出し性の指標は、ベルト側から0.5 μmの深さ方向に存在するワックスを構成するSPH粒子数とした。ニップ時間が21 ms時の要因効果図を Fig. 4 に示す。

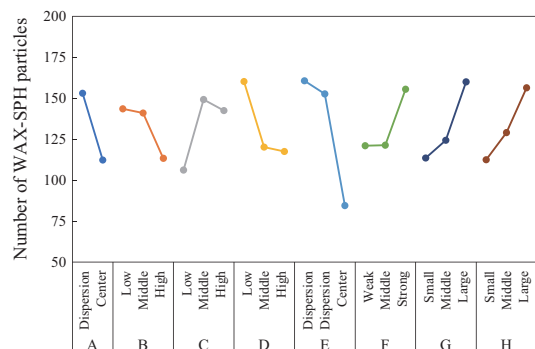


Fig. 4 Graph of factorial effects of the number of WAX-SPH particles on the surface of the toner layer.

ワックスの存在状態の効果が大きめであるとともに、ワックス添加量の増加に伴い、ワックスがベルト側に多く染み出すという結果が得られた。

これまでにTOF-SIMS (time of flight secondary ion mass spectrometry) による分析結果で得られた傾向と符合している。定着ニップ内ではトナー表面から伝熱し溶融開始するために、ワックスがトナー中で分散した状態であると画像表面に存在しやすくなるためであり、トナー中のワックス添加量を多くすれば画像表面への存在確率があがるためである。更に、メインバインダの弾性率低下開始温度が低いほどワックスが多く染み出す傾向が示された。

4.7 確認実験 (計算)

溶融性の要因効果図から得られる基本条件と最適条件の推定値の利得の再現性を確認すべく確認実験 (計算)を行った。結果を Table 2 に示す。

Table 2 Calculation result as the confirmation experiment.

		The height of toner (μm)	Gain (μm)	Number of WAX-SPH particles	Gain
Estimated value	Standard	1.72	-	128	-
	Optimal	1.41	-0.31	195	67
Confirmation value	Standard	1.76	-	121	-
	Optimal	1.29	-0.47	210	89

品質工学では、通例、利得の再現性が6割程度であると良好とみなされる場合が多い。利得の再現性が推定値通りに得られた場合を100%とした時、±40%の範囲を目安とした。確認実験で得られた溶融性とワックス染み出し性の利得の再現性は、それぞれ正側に52%、33%ずれた値となった。ワックス染み出し性については目安とする範囲内である一方、溶融性については目安とする範囲から更に12%大きめであった。しかし、いずれも正側にずれていることから特性としては好ましいと判断して実験検証を行った。

4.8 実験検証

4.8.1 アンダーオフセット性評価結果

計算結果の実験検証において、溶融性への寄与が大きかったメインバインダの弾性率低下開始温度を変えるべく重量平均分子量Mwが大きく異なるモデルトナーを作製した。その他の因子は固定した。実際のプリンターを用いて、アンダーオフセット発生温度を評価したところ、低分子量で構成されたトナーの方が3°C程度良好であり、計算結果と符合することが確認できた (Fig. 5)。

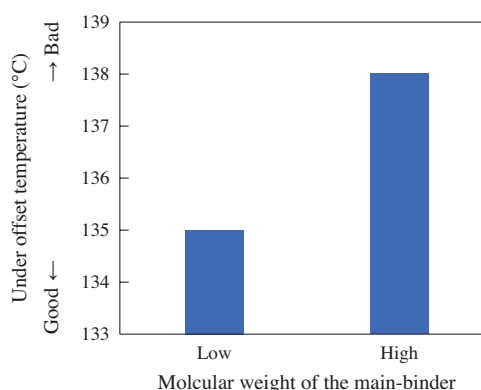


Fig. 5 Evaluation results of minimum fusing temperature with different molecular weight.

4.8.2 画像表面ワックス染み出し量の評価結果

同モデルトナーを用いて、定着温度の異なる画像表面のワックス量を比較すべくTOF-SIMSによる分析を行った。用いた装置はアルバック・ファイ社製 TRIFT-V nano-TOFである。一次イオンとしてBi³²⁺を用い、加速電圧は

30kVとした。ラスタサイズを100 μm 角、一次イオンの照射ドーズを 3×10^{12} 個/ cm^2 として、イオンの質量0.5uから2000uまでを取り込んだ (uは統一原子質量単位)。帯電防止のため、中和電子銃を作動させた。帯電等により測定毎に試料表面の状態が異なり、ピーク強度の絶対値が変動するが、それを補正するため、得られた質量スペクトルの中でワックスに特有のピークのピーク強度をマトリクス樹脂に特有のピークの強度で規格化し、試料表面に存在するワックス量の多寡を相対的に比較した。定着温度ごとのワックス由来のピークの相対強度を比較した結果をFig. 6に示す。

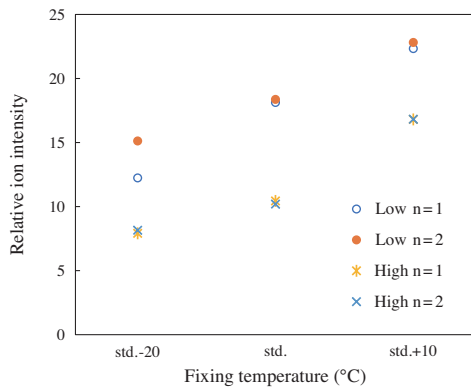


Fig. 6 Relative ion intensity of low or high molecular weight of main-binder by TOF-SIMS for each fixing temperature.

定着温度は、プリンターのデフォルト条件 (Fig. 6 std.と表記) から+10°C, -20°Cの3水準とした。いずれの定着温度においても低分子量で構成されたトナーにおいて画像表面に多くのワックスが存在していることがわかった。以上により、溶融性およびワックス染み出し性についての計算結果が実験結果と符合することが確認でき、基本計算モデルの妥当性が示された。

5 応用展開

上記の基本計算モデルを用いて、トナーの小径化による溶融性への効果確認を行った。

5.1 前提と計算モデル

同付着量でのトナー層の高さ変化を把握すべく、計算モデルを多粒子に拡張した。Fig. 7に粒子配置の様子を示した。

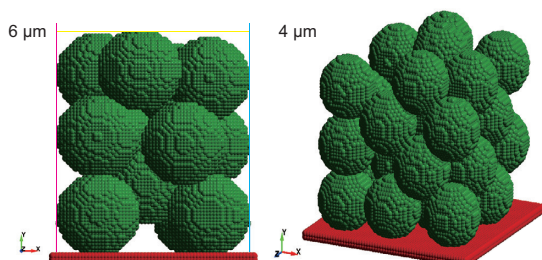


Fig. 7 The multi-layer calculation model with difference of the diameter of each toner.

使用したソフトの仕様上、周期境界条件が設定できないため、周辺部の崩れを制御するための壁を設け、疑似周期境界を設けた。また、計算負荷軽減のため、紙は剛体シェルに変更し、紙とトナーの間は断熱とした。トナーの初期配置は単位面積当たりのトナー付着量を一定、高さを自由として決定した。具体的には別途、DEM (discrete element method) を用いてトナーと同じ大きさの球を付着量が一定となる所定の空間内で攪拌した後、自由落下させる計算を行いその中心座標を配置に用いた。

5.2 溶融性の計算結果

計算モデルを構成するトナー粒径が6 μm および4 μm のトナー層の高さ変化の計算結果をFig. 8に示す。

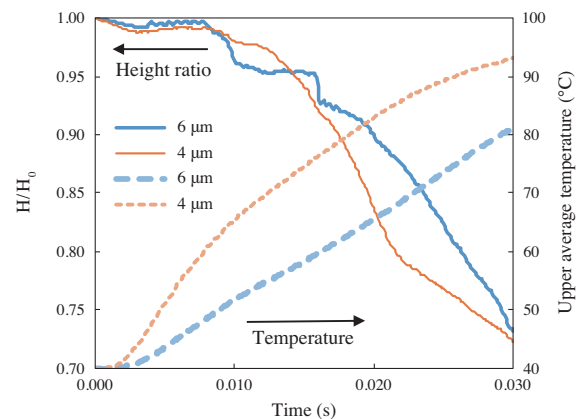


Fig. 8 Change in height and temperature of toner layer.

なお、グラフ上の縦軸は、トナー層高さ H を初期のトナー層高さ H_0 で規格化した値である。4 μm のトナー層は、単位容積あたりの隣接トナー同士の接触点が多いため熱伝達が速く、トナー層の高さ変化が素早く起こることがわかった。すなわち、トナー小径化は低温定着に有利であることが示唆された。

5.3 実験結果

得られた計算結果の効果を確認すべく、粒径違いのトナーを作製しアンダーオフセット性を評価した結果をFig. 9に示す。

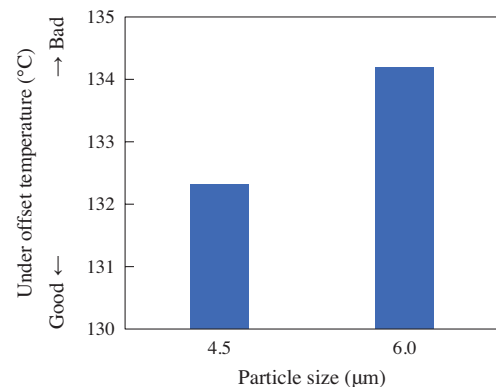


Fig. 9 Evaluation results of minimum fusing temperature with different diameter of toner.

小径側でおよそ2°C程度良好であることが確認できた。以上により、溶解性の向上が予測されたトナーの小径化は、低温定着化の因子の一つであることが実際に確認できた。

6 まとめと今後

トナー構造と物性を入力パラメータとした溶解性およびワックス染み出し性を予測できる計算モデルを構築し、実験検証によりその妥当性を示した。本手法により、小径化の効果をあらかじめ計算で予測し、実際に実験を行ったところ、低温定着化の因子であることを確認した。

今後、本手法によるトナーの低温定着化因子探索に加え、定着プロセスとの最適化検討を効率よく行うことを可能にした。このように、開発プロセスにおいて、実験での仮説検証に加え本手法を併用することで一層の開発効率向上が期待できる。一方で、計算モデルとしては大規模化の検討を行い、更に適用範囲を拡張していきたい。

●参考文献

- 1) M. Onodera, H. Kawakami, K. Takahashi, and A. Okamoto, “Energy-Saving fusing technology for next-generation B/W Light-Production printer”, KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, **13**, pp.8-11 (2016) [in Japanese].
- 2) T. Kagawa, J. Murauchi, K. Saito, H. Takada, and Y. Shibata, “Analysis of Developer Motion in Developing Unit by Visualization with X-ray and Numerical Simulation”, Proceedings of the 114th Annual Conference of the Imaging Society of Japan (Imaging Conference JAPAN 2010), pp.271-274 (2010) [in Japanese].
- 3) K. Saito, T. Ito, T. Kagawa, H. Takada, J. Murauchi, T. Kato, and I. Demizu, “Analysis of developer Motion in developing unit by visualization with X-ray and Numerical simulation”, KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, **9**, pp.67-70 (2012) [in Japanese].
- 4) S. Hasebe, “Simulation technology for toner melting process in fusing system”, Fuji Xerox Technical Report, **22**, pp.44-51 (2013) [in Japanese].
- 5) S. Koshiduka, “Particle method (second edition)”, Maruzen (2005), [in Japanese].
- 6) H. Goto, “Particle method”, Morikita (2018) [in Japanese].
- 7) M. Sakai and A. Yamashita, “Study on the Fundamental Characteristics of Structural Analysis by Particle Method based on SPH”, Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers, **67**, pp.1093-1102 (2001) [in Japanese].
- 8) J. W. Swegle, S. W. Attaway, M. W. Heinstein, F. J. Mello, and D. L. Hicks, “An analysis of smoothed particle hydrodynamics”, SANDIA REPORT, SND93 2513 (1994).
- 9) LS-DYNA Dev, “LS-DYNA Theoretical Manual”, Livermore Software Technology Corporation (2019).

●出典

本稿は日本画像学会誌 第60巻 第1号 (2021年2月10日発行) に掲載予定の論文を、日本画像学会 (著作権者) の許可を得て転載したものである。本稿の著作権は日本画像学会が有する。