

---

# MFP機内全体の熱・気流シミュレーション

Application of Numerical Simulation of Air Flow and Heat Transfer to Whole MFPs

---

大杉 友哉\*  
Tomoya OHSUGI

首藤 美和\*  
Miwa SHUTOU

---

## 要 旨

---

MFPには多くの部品が搭載されており、その形状は微細形状を多く含み複雑である。したがって、従来は形状を大幅に簡易化しない限り、MFP機内全体の熱・気流シミュレーションを行うことができなかった。しかしながら近年のPCの性能向上により、このような大規模なモデルでも、詳細形状そのままシミュレーションを行うことが可能になってきており、筆者らは、メッシュ数1億以上のボクセルメッシュを用いてこれを実現した。加えて、発熱源の発熱条件を正しく見積もれるようにするとともに、紙やベルトが熱を輸送する現象まで考慮したシミュレーションを行えるようにして、試作せずに温度仕様値を満足するか否かを評価可能とする解析精度を達成した。

## ABSTRACT

---

MFPs consist of huge numbers of parts whose geometries are very complex. This conventionally caused it difficult to simulate the air and heat flow in a whole MFP, but nowadays such a simulation is getting easier by the progress in CPU technology. We adopted over 100 million voxel meshes with carefully and precisely evaluating the heat sources and considering the heat transport by paper and intermediate-transfer belts. As a result, the simulated temperature profile of the MFP showed an excellent agreement with the measured one, and turned out to be usable for the design of MFPs without actual prototyping.

---

\* プロセスイノベーション本部 デジタルエンジニアリングセンター  
Digital Engineering Center, Process Innovation Group

## 1. 背景と目的

MFP (Multi Function Printer) には数多くの発熱源が存在する。定着用のヒータ、駆動モータ、駆動部品の摺動部、各種PCB上の電子部品等である。

これに対し、積極的な冷却が必要な箇所も多くあり、中でもトナーが存在する箇所の冷却が重要である。トナーは、定着部以外ではある温度以上に達すると、トナー粒子が凝集して異常画像を生じたり、トナーが熔融後に再凝固して装置が動作不能になったりする。一方、定着部での消費電力を抑えるために熔融温度は低く設定したく、さらに、トナーの温度は40~55°C程度に抑えなければならない。MFPの動作環境温度は最大30°C程度なので、10~25K程度しか温度上昇が許容されないことになる。加えて、トナーは機内の最深部にも存在するため、冷却のための気流経路を形成するのは容易ではない。その他、モータ、PCB上の電子部品、トナー定着後の紙なども冷却の対象となる。

また、トナーを用いる電子写真方式では、異臭のあるオゾンや微粒子が微量ながら発生するため、これを確実にフィルターに通して吸着するための気流形成も必要である。

以上より、MFPにおいては、多くの発熱源と冷却が必要な箇所があり、臭気や微粒子の除去も必要で、機内の気流経路が大変複雑になる。これに対して従来は、試作機を作ってから温度等を実測して評価し、対策の試行錯誤を行っていたが、機内の空気や熱の流れを可視化することができないこともあって、有効な対策に行き着くまでの手戻りが大きく、慢性的な重要課題の1つとなっていた。

したがって、このMFP機内の熱と気流のシミュレーションができると、開発効率向上に大きな効果がある。ところが、このシミュレーションには下記の技術的課題があり、これまで実現できていなかった。

MFPには部品が数千~1万点ほど搭載されている。多くの部品の厚さは1~2mm程度で、気流の流路の幅も狭いところで数mm程度、1mm以下の形状やす

き間も無数にある。したがって、通常の熱流体解析でよく用いられるテトラメッシュを生成して解析しようとする、微細なメッシュを膨大に生成することとなり、メッシュモデル作成工数と計算時間が膨大となる。

また、微細な形状を省略した簡略化モデルをCAD上で作成してから解析を行うという手法もあるが、簡略化モデル作成にも一定の時間が掛かる上、事前に気流の流れ方と伝熱に影響の大きいところを把握できていないと、形状簡略化による流れの変化が大きくなり、シミュレーションによって設計をミスリードしてしまう可能性がある。MFP機内のような気流経路が複雑な解析対象では、この手法のリスクは大きい。また、簡略化モデルによる気流シミュレーションと熱回路網を併用する手法も提案されており<sup>1)</sup>、熱回路網法は計算時間が短く特に設計上流段階において大変有効な手法ではあるが、気流解析を簡略化モデルで行っている限りは、上記手法と同様のリスクがある。

さらに、上述のようにトナーの制約から、最重要である作像部の温度上昇が10~25K程度しか許容されないため、シミュレーション結果の実測との差異が2~3K程度に収まっていないと、試作評価に置き換えて本格的に活用することが難しい。したがって、シミュレーションには非常に高い精度が要求されることになり、これまで実用的な解析作業量で高精度なシミュレーション技術は報告されていなかった。

以上に対し筆者らは、①まず、近年の計算機の高性能化を受けて、大規模かつ詳細なCAD形状を簡略化せずにそのまま用いて、機内全体を現実的な時間内に解析可能な手法を確立し、実用化した。②次に解析精度を向上して、試作せずにシミュレーションだけで温度仕様値を満足するか否かを評価可能とした。具体的には、まずMFP内の発熱条件を正確に見積れるようにし、さらに紙やベルトなどの移動体が熱を輸送する影響まで考慮した解析を行えるようにして、相対比較ではなく絶対値での評価が可能なレベルまで精度を高めた。

本稿では、以上の内容について説明する。

## 2. 機内全体シミュレーションの実現

### 2-1 メッシュ生成手法の選定

前述のように、MFPは大規模なモデルとなるため、いかにしてメッシュモデルを短時間で作成できるようにするかが課題となる。

熱流体シミュレーションにおいて用いられるメッシュとして代表的なものには、テトラメッシュ（四面体要素）とヘキサメッシュ（六面体要素）がある。

テトラメッシュは、ほとんどの形状に対して全自動で生成が可能であるため、一般的に、複雑な形状を有する対象の熱流体シミュレーションではよく用いられる。

一方、ヘキサメッシュの一種として、ボクセルメッシュがある。ボクセルメッシュは、CAD形状に合わせてメッシュを切るというよりは、メッシュに部品形状を合わせてしまうという特徴があることから、形状が複雑で部品数の多い大規模モデルでも、全自動でメッシュ生成が行えるという大きなメリットがある。ただし、メッシュに合わせて形状が変更されてしまうため、解析精度が悪くなる懸念される。

そこで我々は、テトラメッシュを用いた手法と、ボクセルメッシュを用いた手法の2つを試行した。

### 2-2 ラッピング+テトラメッシュ

テトラメッシュは、ほとんどの形状に対して全自動で生成が可能である。ところが、MFPには膨大な数の部品が搭載されている上、設計者が設計するCADモデルには、ネジのような微小部品や、厚さ0.1mm程度の薄板部品なども含まれる。また、部品同士のすき間も0.1mm前後といった微小量となっている箇所が無数にある。したがって、MFP本体全体のメッシュモデルを作成するために、これらの形状を1つ1つ修正しては作業に膨大な時間が必要となり、かといって、これらの形状を修正せずにそのままメッシュを切ろうとすると、無理に大きなサ

イズのメッシュを適用して品質の悪いメッシュができて計算の安定性を確保できないか、または膨大な数の微小なメッシュが必要となり、計算時間が数ヶ月以上といったオーダーになってしまう。

そこで筆者らはまず、ANSYS社のメッシュ生成ツールTgridの持つラッピング機能を利用し、形状を自動的に簡略化するという手法を試行した。ラッピング機能を用いることで、モデルの大きな構造はそのまま保ちつつ、自動的に微小形状は鈍らされ、微小すき間は塞がれるため、微小なメッシュが不要となる（Fig.1）。この手法によって、主要な箇所のメッシュサイズを1~5mm程度にしつつ、16CPUでの並列計算で計算時間を2~3日程度に抑えることができた。この時の計算メッシュ数はおよそ3~5千万である。

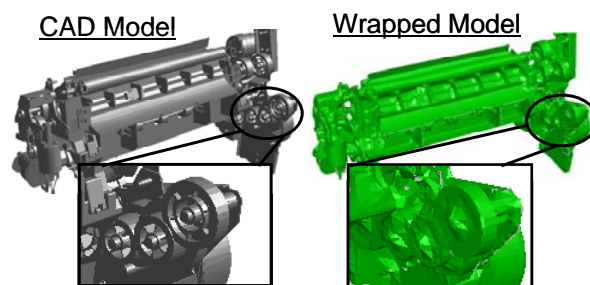


Fig.1 Wrapped model.

しかしながら、テトラメッシュは自動生成しただけではメッシュ品質が悪く、上記の3~5千万メッシュのモデルで数百~数千箇所のメッシュ形状修正を手動で行う必要が生じた。また、ラッピングにも弱点があり、気流だけを解析する場合には特に問題はないが、固体内熱伝導も合わせた解析において、異なる熱伝導率を持つ固体間の境界を正しく表現するためにはかなりの手間を要する。このため、計算実行前のプリ処理工程全体の工数が、機内の部品の材質を大雑把に分割した場合で2週間、より詳細に分割しようとするとなればそれ以上を要した。

## 2-3 ボクセルメッシュ

次に、上記とは異なるアプローチとして、ボクセルメッシュ (Fig.2) を適用した。

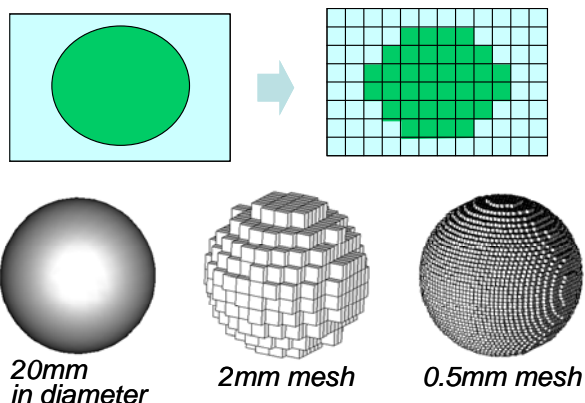


Fig.2 Voxel mesh.

ボクセルメッシュの手法は、特に熱流体解析では古くから用いられていたが、近年のコンピュータの性能向上とコスト低下を受けて改めて活用が進んでいる<sup>2)</sup>。前述のように、CAD形状に合わせてメッシュを切るというよりはメッシュに部品形状を合わせてしまうという特徴があることから、形状が複雑で部品数の多い大規模モデルでも、全自動でメッシュ生成が行えるという大きなメリットがある。メッシュの品質改善のために手間が掛かるようなこともほとんどない。

ボクセルメッシュを用いた熱流体解析ソフトとして、ソフトウェアクレイドル社のSTREAM (有限体積法を使用) を用いてMFP機内全体の熱・気流シミュレーションを行った。その結果の例をFig.3に示す。ボクセルメッシュの場合、テトラメッシュほど自由にメッシュの粗密をつけることができないため、メッシュ数は1億程度となった。ただし、計算の収束性が良く、繰り返し計算のイタレーションが少なく済んだため、計算時間は16CPUで1~2日程度に収まった (第3章にて述べる、紙による熱輸送の計算はここでは含めていない)。

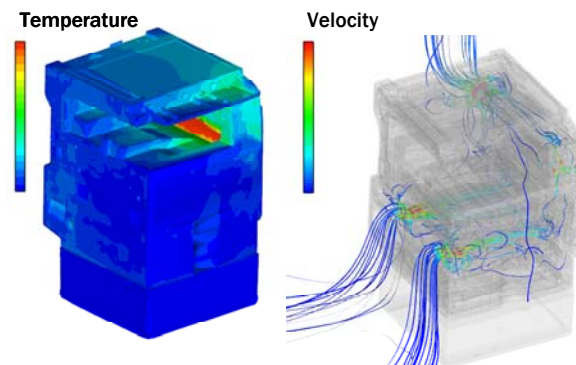


Fig.3 Example of analysis results using voxel mesh.

以上より、我々はMFP機内全体の熱・気流シミュレーションを、ボクセルメッシュで行うことにした。

ただし、ボクセルメッシュには、Fig.4に示すように座標系に平行でない斜面や曲面の形状が正確に再現されずに階段状になってしまうという問題や、Fig.4のconnected with edge部のように、座標系に平行でない向きで配置されている薄板部品が線で接続されたメッシュで表されてしまい、薄板部品内の熱伝導が正しく計算されないといった問題があり、薄板を多用するMFPにおいて必要な解析精度が確保できるのかどうか、疑問があった。そこで、MFP機内の主要な箇所温度について、解析結果と実測結果とを比較し、ボクセルメッシュを用いたシミュレーションの解析精度が設計プロセスにおいて活用可能なレベルかどうかを検証した。この結果は第4章で述べる。

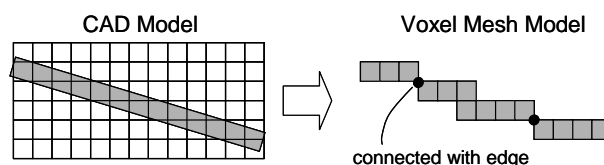


Fig.4 Problem of representation of tilted walls on voxel mesh system.

### 3. 解析精度の向上検討

#### 3-1 必要な解析精度

背景で述べたように、トナーの条件から、最重要である作像部の温度については、温度上昇が10～25K程度しか許容されず、シミュレーション結果の実測との差異が2～3K程度に収まっていないと、試作評価に置き換えて本格的に活用することが難しい。一方、例えばモータは30 K前後温度上昇するが、この場合のシミュレーション結果と実測との差異は、±5K程度あれば十分である。

以上より、筆者らはこのシミュレーションの目標精度を、以下の式で計算される実測との差異の度合いにて、±20%以内と設定した。

$$\begin{aligned} \text{解析精度} &= \frac{\text{実測温度と計算結果との差異}}{\text{実測の温度上昇}} \times 100(\%) \\ &= \frac{\text{実測温度} - \text{計算結果温度}}{\text{実測温度} - \text{雰囲気温度}} \times 100(\%) \quad (1) \end{aligned}$$

#### 3-2 発熱源の洗い出しによる精度向上

MFP本体には様々な発熱源がある。発熱体の温度上昇は発熱量と比例するため、主要な発熱源全てについて、発熱量が正しく入力されなければ、機内の温度分布を正確に再現することはできない。

そこで筆者らは、まず主要な発熱源を洗い出し、次にその発熱源各々について、発熱量の算出方法や同定方法を整理した。例えばDCモータであれば、モータメーカーより提示される出力トルクと電流値の関係を元に発熱量を算出した。これにより、モータ単体での温度上昇の実験とシミュレーションとの比較において、目標精度を達成できることが確認できた。

#### 3-3 紙やベルトによる熱輸送の考慮

MFPにおける主要な伝熱形態である固体内熱伝導や空気による熱伝達は、第2章で既に述べた市販の熱流体解析ソフトの機能で解析が可能である。しかしながらMFPにおいては、空気だけではなく紙

やベルトのような固体の移動体も熱を輸送し、この現象は市販ソフトの標準機能では解析ができない。特に両面印刷時には、一度おもて面にトナーを定着させるために定着ユニットを通して温まった紙が、裏面の印刷のために再度機内を通して転写部まで戻ってくるため、片面印刷の時よりも機内の温度が上昇する。したがって、MFPの機内温度が最も高くなるのは両面連続印刷時であることから、シミュレーションにおいても、この移動体が熱を輸送する現象の再現が必要となる。

そこで、第2章で示したボクセルメッシュタイプの市販熱流体解析ソフトに、この移動体による熱輸送部分を計算するためのサブルーチンを組み込むことで上記を実現した。計算方法として、移動体が移動しながら熱を輸送する現象を、メッシュ自体を移動して表現する方法を用いると必然的に非定常計算となり、定常状態に達する時の最大到達温度を求めらるまでに長い時間を要す。また、時間とともに変形するメッシュにも対応する必要がある。このため、メッシュを移動せず定常解析で移動体の熱輸送が考慮できるように工夫した。今回用いた具体的な手法について、以下で説明する。

紙が周囲に放熱しながら熱を輸送していく現象は、Fig.5のような考え方で表現した。上述したように、メッシュを移動させず定常での計算を行いたいため、紙が持つ熱量だけが紙の中を移動するものと考えた。この時、Fig.5のように紙を搬送方向に分割して考えると（分割した各要素をセクションと呼ぶこととする）、セクションnでは、熱が上流のセクションn-1から入ってきて（単位時間あたり $Q_{in(n)}$ の流入）、そのうちのいくらかがセクションnの表面から周囲に放熱され（単位時間あたり $Q_{out(n)}$ の流出）、残った熱量が次のセクションn+1に渡される熱量（ $Q_{in(n+1)}$ ）となる。したがって、これを式で表すと下記のようなになる。

$$Q_{in(n)} - Q_{out(n)} = Q_{in(n+1)} \quad (2)$$

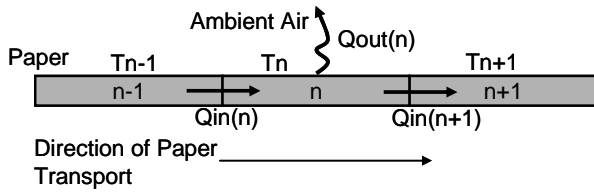


Fig.5 Numerical scheme for heat transfer and transport around paper.

ここで、 $Q_{in}$ は、紙の密度 $\rho$ 、紙の比熱 $C_p$ 、単位時間あたりの紙の体積の通過量 $V$ 、および紙の温度 $T_p$ より、以下のように表せる。

$$Q_{in(n)} = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot T_{p(n-1)} \quad (3)$$

また $Q_{out}$ は、紙の周囲の隣接計算点と紙との間の距離 $d$ 、熱伝導率 $\lambda$ （空気または接触固体）、各セクションの面積 $A$ 、周囲温度 $T_a$ より以下のように表せる。

$$Q_{out} = \lambda \cdot A \cdot \frac{(T_p - T_a)}{d} \quad (4)$$

$T_a$ 、 $d$ 、 $\lambda$ を後述の本体全体モデルより得ることによって、(2)~(4)式から紙の温度 $T_p$ を計算する。

次に、上記の紙による熱輸送を計算するサブルーチンとボクセル法によるMFP本体全体モデルとの連成について説明する。まず、Fig.6に示すように、両面印刷時の紙搬送パスに沿って、連続した紙のモデルを作成した。図示したように、紙はボクセルメッシュ（一辺およそ1~2mm）よりも粗い四角形メッシュ（5~20mm×60mm）で分割してあり、この紙モデルはサブルーチン内の計算に用いるだけでなく、MFP全体モデルの中にも温度条件設定用の固体壁面として用いている。

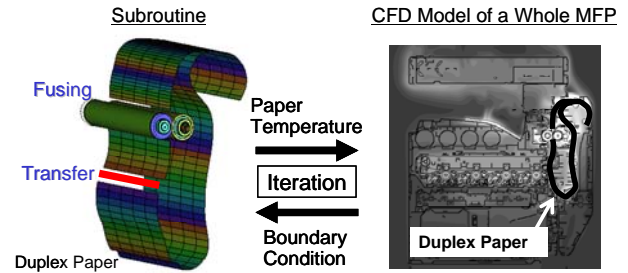


Fig.6 Computational method of heat transport in duplex printing in MFP.

紙モデルは、定着直後を出発点とし、両面搬送路を1周して定着の入り口まで戻ってくる。ここで、紙には、定着直後の出発点において、所定の温度を固定条件として付与し、その後周囲に放熱しながら下流に向かって熱を輸送していく過程を上記の式(2)~(4)に従って計算した。

手順としては、Fig.6の左側のサブルーチン内で、まず紙の温度を計算する。次に、ここで算出された紙の各部位の温度を、Fig.4右側のMFP本体全体モデル内の紙の同じ位置に固定条件として付与し、全体モデルでの計算を数サイクル行う。この結果、紙からの熱を受けて、紙の周囲の温度が変化する。こうして計算された紙の周囲の温度 $T_a$ 、紙~隣接セル間距離 $d$ を左側のサブルーチンに返す。これを受けてサブルーチンではこれらのパラメータを更新し、再度紙温度の計算を行う。これを繰り返すことで、紙の熱輸送まで考慮したMFP本体全体の温度分布が得られることになる。

なお、サブルーチン内で計算に用いる上述のセクションは、本体全体モデルにおけるメッシュとは異なるもので、サブルーチンの計算負荷を低減するために、メッシュに比べセクションの方を粗く設定している。

中間転写ベルトによる熱輸送も、以上の紙の場合と同様の考え方で計算することができる。



## 4. 精度検証

### 4-1 紙による熱輸送解析の精度検証

まず、紙による熱輸送の計算部分について、精度検証を行った。Fig.7に示すように、単体で動くようにした定着ユニットに対して紙を通し、温められて出てきた紙が、周囲に放熱して自身の温度を下げながら進んでいく様子をサーモビューワで撮影した (Fig.8)。定常状態での検証を行うため、温度が安定するまで通紙した後の温度を測定した。同様の条件でのシミュレーション結果と比較した結果を Fig.9に示す。実測とシミュレーションとの差異は最大4.1K、雰囲気温度からの温度上昇に対する割合としては13%以内に収まっており、前章の計算方法の妥当性が確認できた。

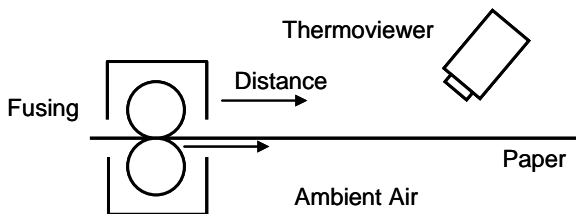


Fig.7 Validation model of heat transport simulation.

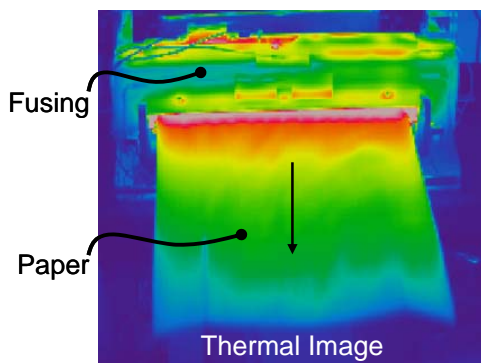


Fig.8 Paper temperature distribution after fusing in an experiment.

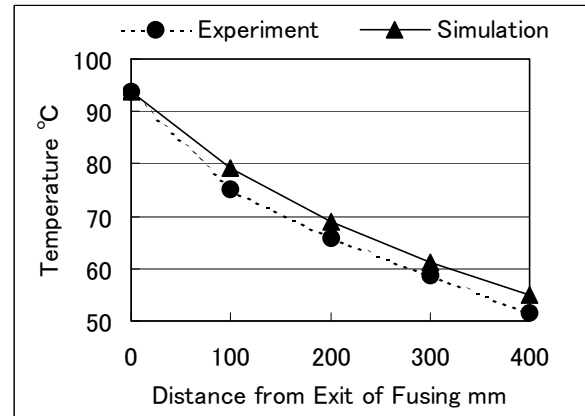


Fig.9 Paper temperature distribution after fusing in experiment and simulation.

### 4-2 MFP本体全体での精度検証

次に、実際のMFPに対して、以上を反映したシミュレーションを行い、温度の測定結果と比較して精度検証した。結果をFig.10～12に示す。Fig.10が片面印刷時、Fig.11が両面印刷時の機内全体の温度分布であり、Fig.12のグラフの縦軸は、雰囲気温度からの温度上昇の実測値に対する、シミュレーションと実測値の差異（絶対値）の割合を示している。Fig.12の①～⑥は、各々作像部の主要な箇所の温度を示している。Fig.10とFig.11を比較すると、全体としては、両面印刷時には、片面印刷時に対し両面紙搬送路の温度が高くなっている。また、これに伴って作像部（中央部）の温度が5～8K程度上昇している。Fig.12に示したように、実測との差異は平均して10%程度、最大でも20%以下に収まっており、良い精度が確保できていることが確認できた。したがって、ボクセルメッシュを用いても、主要な箇所の温度が精度良く再現できることが分かった。また、片面印刷時と両面印刷時の違いがシミュレーションで表現でき、それぞれの温度が実測と合っていることから、紙およびベルトによる熱輸送の影響についても、正しく計算できているものと判断できる。

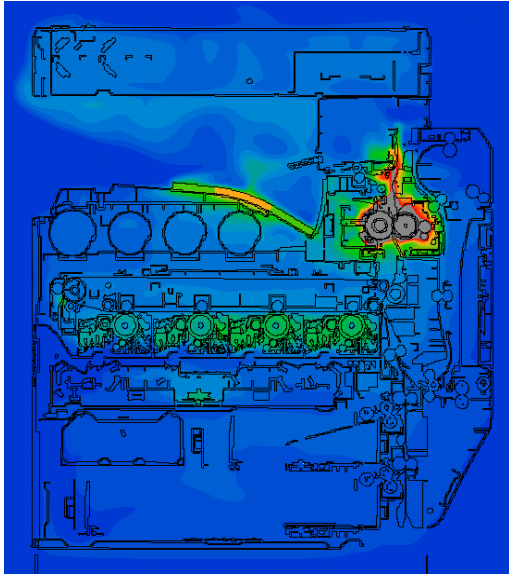


Fig.10 Temperature profile: simplex printing.

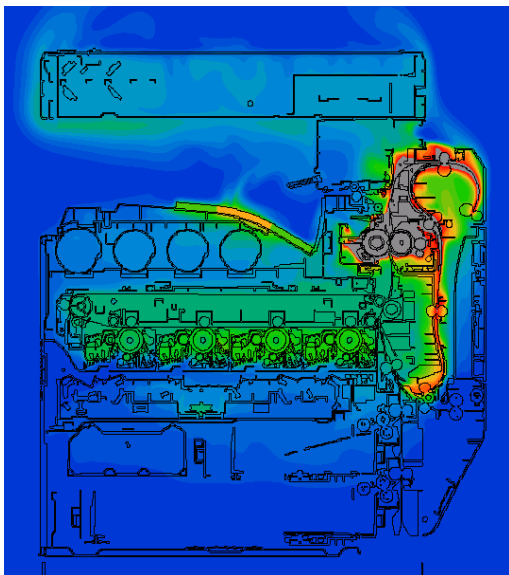


Fig.11 Temperature profile: duplex printing.

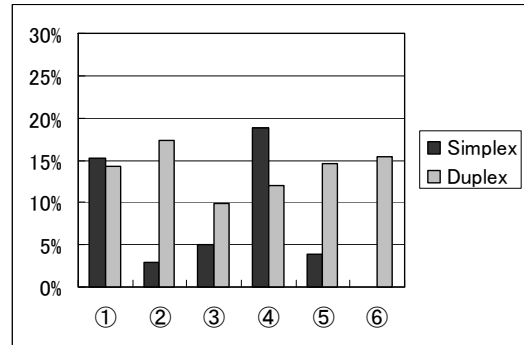
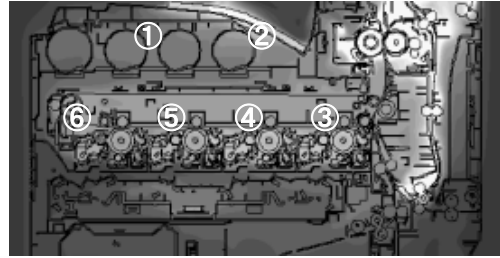


Fig.12 Temperature difference between experimental and simulation results.

最後に、2つの機種での精度検証結果をFig.13に示す。Model-AはFig.10～12で用いた既存機種、Model-Bは新規機種に対して開発の最中に適用した結果である。縦軸にシミュレーション結果、横軸に測定結果を取り、作像部やモータを含む駆動部等、主要な箇所の温度上昇をプロットして比較した。このように、主要な箇所全てにおいて解析精度が目標とした±20%以内に収まっていることが分かる。

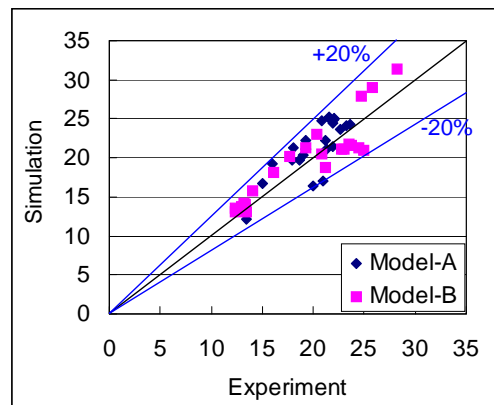


Fig.13 Temperature difference between experimental and simulation results.



以上より、第2章 (Fig.4等) にて述べたボクセルメッシュの解析精度面での懸念については、このように主要な箇所が実測とよく合っていることから、少なくともこの程度まで詳細なメッシュ (1mm~2mm程度) を用いると、MFPの解析において大きな誤差は生じないものと判断できる。Fig.4で示したような、傾斜しておりかつ固体内の熱伝導が大きい薄板がある箇所があまり多くなく、機内全体への影響が小さいことも一因であろうと推察する。

本章で示した解析に用いた要素数は約1億3千万、計算時間は、移動体による熱輸送を考慮しなければ、24CPUで半日~1日程度、考慮した場合は2~3日程度を要した。前処理の工数も含めて、概ね1~2週間程度で解析を行うことが可能である。また、いくつかの部品を形状変更したものと差し替えて再計算を行うといった場合は、前処理時間は数時間で済む。したがって、所要時間と精度の両面から、十分に設計プロセス内で活用できるものとなっている。

なお、このシミュレーションにおいて、実験結果を見てから解析条件を調整するような、いわゆる合わせ込みの類は行っておらず、試作前に得られる情報だけでこの精度の解析を行うことが可能である。

---

## 5. 結論

---

- (1) ボクセルメッシュを使用することにより、簡略化しない詳細モデルを用いたMFP本体全体の熱・気流シミュレーションを、設計プロセス内で活用可能な実用的な期間で行えるようにした。
- (2) さらに、発熱条件の正確な見積もりと、紙やベルトのような移動体による熱輸送の考慮により、実機内の温度分布を目標精度内で精度良く再現できることを確認できた。これにより、設計案の温度が仕様値を満足するか否かを、試作せずに評価可能となった。加えて、本体全体モデルでの詳細かつ高精度なシミュレーション技術を確立したことで、実験では捉え切れなかった様々な

部位の温度上昇メカニズムが把握できるようになり、より効果的な熱設計が可能となった。

なお、本稿は、Imaging Conference Japan 2012にて発表した内容を基に、説明を加えて再構成したものである<sup>3)</sup>。

### 参考文献

---

- 1) 百村裕智ほか: 熱回路網法とCFDの連携による複写機の熱流解析, Imaging Conference JAPAN 2010論文集, A-5, pp.23-26 (2010).
- 2) 鈴木克幸: ボクセル解析法とCAE, 理研シンポジウム ものづくり情報技術統合化研究プログラム第2回, pp.43-52 (2002).
- 3) 大杉友哉, 首藤美和: MFP機内全体の熱流体解析, Imaging Conference JAPAN 2012 論文集, pp.51-54 (2012).