シミュレーション評価技術の開発

Development of Evaluation Techniques Using Computer Simulation

浜田健史* Hamada, Takeshi 坂 梨 眞 也* Sakanashi, Shinya

要旨

MFP(Multi-FunctionalPeripherals)/LBP(Laser Beam Printer)の信頼性と画質に対する要求にこたえるため製品 開発の上流段階から数値シミュレーションを駆使して設 計品質の向上に取り組んでいる。本稿では電子写真固有 技術分野へのシミュレーション評価技術開発の実用例と して、感光体のクリーニングと露光ユニットの熱変形に 関するシミュレーション技術の開発について紹介する。 これらの開発技術により、製品開発の早い段階からユー ザの様々な使用環境を想定した評価を行い、高画質で信 頼性の高い製品の実現に努めている。

Abstract

In order to meet the request for the reliability and picture quality of the MFP (Multi-Functional Peripherals)/ the LBP (Laser Beam Printer), using numerical simulation from an upstream stage of product development, we have accepted the challenge of improvement in design quality.

This paper introduces development of simulation technology for thermal deformation of an exposure unit and the cleaning of the photo-conductor, as a practical example of simulation appraisal of technical development, specifically in the electro-photographic technical field.

Via these development technologies, we evaluated machines, which respond to various environments at an early stage of development, and achieve products, which exhibit high reliability and high picture quality.

*コニカミノルタビジネステクノロジーズ㈱ 機器開発本部 プロセス改革推進部

1 はじめに

オフィスのみならず家庭においてもMFP/LBPの普及が 進み、より魅力ある製品を他社に先んじて顧客に届ける ために新製品開発期間の短縮に加え, 信頼性向上と画質 向上に対する要求が高まっている。弊社では、試作機の 評価結果をもって機能設計の変更を繰り返すのではな く,設計の基本構成検討段階から,品質との関わりの深 い機能に対して目標を設定し、評価することが最終的な 製品の品質を高めるために有効であると考えている。そ の方策として機能目標の達成に向けた設計課題をシミュ レーションによって評価する方法があり、その位置付け が年々高まっている。その理由はシミュレーション評価 により, 試作の方向性を事前に検証して試作回数や試作 費用の削減が可能となることや,実機評価でも求めるこ とが困難な品質を直接左右する特性値を求めることが可 能になったことにより設計課題の解決が効率的に行える ようになってきたからである。

本稿では画像品質に関する設計課題の解決に向け,開 発したシミュレーション評価の技術内容を紹介する。

2 シミュレーション評価技術の紹介

シミュレーション評価技術は,画像品質や信頼性に関 する設計課題を製品開発の上流段階から予測し,解決す るツールとして,今日までに様々な技術分野で開発,実 用化されている。本稿ではその中から電子写真固有の技 術分野において,我々が独自に開発したシミュレーショ ン評価技術のうち,以下の2件を紹介する。

- □クリーニングのシミュレーション評価技術の開発
 - 概要:クリーニング機能を代用する設計値(以下, 代用特性値)の変化を予測し,クリーニング
 - 機能を評価するシミュレーション技術の開発
 - 設計課題:クリーニング不良による縦筋などの画像 ノイズ
- □ 露光ユニットのシミュレーション評価技術の開発
- 概要:露光ユニットの材料の異方性・温度分布によ る熱変形形状を予測するシミュレーション技 術の開発

設計課題:露光ユニットの熱変形による色ずれ

3 クリーニングのシミュレーション評価技術 の開発

3.1 クリーニング機能

クリーニングとは、ウレタン製のブレードの先端を感 光体や中間転写ベルトに接触させてトナーを拭き取る機 能である。Fig.1に主な設計パラメータを示す。クリーニ ング機能の主な設計課題として、以下の2つがある。

- 当接力や当接角が小さいと画像上に縦筋状のク リーニング不良が発生する。
- 2) 当接力や当接角が大きい場合は先端めくれ,ある いは先端の振動による騒音が発生する。

クリーニング機能の代用特性値として感光体停止状態 で当接力や実効当接角(当接状態でのブレード先端とド ラム接線のなす角)を測り,クリーニング機能を満足す る範囲つまり機能窓を求めることによりFig.1の①~③の 設計値を決定している。



Fig.1 Design parameters of a cleaning blade

3.2 設計課題

2.1 ブレード圧接時のクリープによる代用特性 値の変化

ブレードは圧接されると、クリープ現象により代用特 性値の当接力・実効当接角が経時変化する。この影響を 設計上で考慮するためには、実際にクリープさせたブ レードを用いてクリーニング機能を満足する範囲を求め るか、またはクリープによる代用特性値の変化量を測定 しなければならず、いずれの方法とも検討に時間を要す る。

3. 2. 2 感光体摺動による代用特性値の変化

クリーニング機能の代用特性値は感光体停止時に測定 しており,摺動により変化する。また,摺動特性の異な る感光体,現像材への変更は,機能窓に影響を及ぼす。 新規な感光体,現像材を採用する場合,クリーニング性 能を維持するには,摺動特性の違いによる影響を予測し て機能窓を求めるか,または機能窓を取り直さなければ ならず,いずれの方法とも多くの時間を要する。

3.3 「ブレードクリープ」のシミュレーション評価 技術

クリープ現象について,ブレードの特性に適した材料 物性値を求めて,精度良く予測することができるシミュ レーション評価技術を開発した。

クリープのシミュレーションを行うためのクリープ歪 みの構成式は,線形粘弾性モデル,時間硬化則によるク リープモデル・歪み硬化則によるクリープモデルなど数 種類ある。また,ブレードに使用する材料の時間-クリー プ歪み波形を測定したところ,応力に対して非線形的な 特性を持つことがわかった。そのためクリープ歪みの非 線形的な現象のシミュレーションが行える下記の式(1)を 採用した。ここで, ε_{cr}はクリープ歪み,σは応力,t 時間,Tは絶対温度である。

但し、 $C_1 \sim C_7$: クリープ定数

次に、シミュレーション評価の実施手順を説明する。

- ①クリープ歪みが応力に対して非線形的な特性をもつ ため、応力を数種類変えて時間-クリープ歪み波形を 測定する。
- ②ブレードのクリープ歪みに式(1)の構成式を使い、① で測定した複数本の波形を使い、C₁~C₇のクリープ 定数を調整してカーブフィットする。
- ③得られたクリープ歪みの構成式を使って、時間の初期に発生するブレード内部に分布した応力や温度から歪み・応力の経時的な変化量をシミュレーションにより求める。

手順①~③のシミュレーション評価技術の検証のた め、食い込み量の設定変更ができる当接力評価用の実験 機を設計した。実験は、食い込み量を1.4mm、2.1mmの2 水準で、常温で16時間の放置試験をした後、当接力を測 定した。同じ条件で当接力を手順①~③のシミュレーショ ンにより求めた。測定とシミュレーション結果をFig.2に 示す。Fig.2はシミュレーションで求めた当接力のクリー プ緩和量が測定値と一致していることを示す。更に本稿 以外に、ブレードの材料を変えて行った検証を含め、ク リープ後の当接力が±5%以内の精度となり、実機に適 用可能な範囲であることを確認した。

以上から, ブレードのクリープ歪みを構成式(1)により カーブフィットしてシミュレーションを行う評価の信頼 性が高いことを確認できた。本評価技術により, 3. 2.1項で挙げた代用特性値のクリープによる変化量を シミュレーションで予測して機能窓による設計検討に反 映させることが可能になった。



Fig.2 Comparison of the contact force relaxation between an experiment and a simulation

- 3.4 「感光体摺動時」のシミュレーション評価技術 感光体,現像材の摺動特性として摩擦係数を考慮し, 代用特性値の感光体摺動時の変化を精度良く予測できる
- シミュレーション評価技術を開発した。
 - 本シミュレーション評価の実施手順を説明する。
 - ブレード材の応力 歪み線図を引張り試験機と圧縮 試験機を使って測定する。
- ②次に、減衰係数をリュプケ式の反発弾性試験をシ ミュレーション上で再現することによって求める。 ブレードに使用する材料の反発弾性係数は、JIS規格 のリュプケ式反発弾性試験に従って100mmの高さか ら鉄棒をブレード材料に衝突させ、跳ね返り高さか ら求められる。シミュレーションを使って、反発弾 性試験と同じ内容で跳ね返り高さを求め、材料物性 値の減衰係数を調整して反発弾性係数から求めた値 と一致させる。調整後の値をブレード材の減衰係数 とする。Fig. 3 (a)に鉄棒がブレード材料に衝突して、 歪みが最大になる瞬間の分布を、Fig. 3 (b)に時間に 対する鉄棒の反発高さの軌跡を示す。



(a) Strain distribution at an impact



Fig.3 Simulation of the impact of an iron bar

- ③専用の実験機を用いて感光体摺動時のトルクと当接 力を実測し,両者の比から摩擦係数を求める。
- ④得られた3つの材料物性値(応力-歪み線図,減衰 係数,摩擦係数)を使ってブレードをモデル化して 感光体に圧接,摺動させた状態でのブレードの歪 み,応力分布などをシミュレーションで求める。

この手順でシミュレーションした例をFig.4に示す。 Fig.4(a)は感光体が停止時,Fig.4(b)は摺動時のそれぞ れ感光体とブレード接触部の歪み分布を拡大したもので ある。この結果は,感光体が摺動するとブレード先端が 巻き込まれて接触幅が狭くなり,歪みの値が大きくなっ ていることを示している。



(a) Static state



(b) Dynamic state Fig.4 Strain distribution (dynamic/static)

次に, 3.3に記述した実験機を使って食い込み量を 変更して,感光体停止時・摺動時の当接力を測定する。 測定と同じ条件でシミュレーションを行い,求めた値と 測定結果を合わせてFig.5に示す。Fig.5は感光体摺動に より当接力が数10%増加する現象をシミュレーションが 再現していることを示している。更に,本稿以外にブ レードの材料を変更した検証を含めて,±20%以内の精 度で一致し,製品開発に適用可能な範囲であることを確 認した。



Fig.5 Comparison of the contact force between the experiment and the simulation

今回の取り組みを通じて、摩擦係数の影響を含めて、 感光体摺動による代用特性値の変化を精度良く求めるシ ミュレーション評価技術を開発することができた。本評 価技術により、3.2.2項で挙げた課題を解決し、ク リーニング機能の信頼性をより高める検討が行えるよう になった。

4 露光ユニットのシミュレーション評価技術 の開発

4.1 露光ユニットの機能

露光ユニットの機能は、原稿の画像情報をポリゴンミ ラーと光学素子を使ってレーザーを走査し、感光体上に 書き込むことである。ここでの機能問題は、熱・振動の ノイズにより露光ハウジングが変形し、レーザー走査位 置ずれを発生することである。特にカラー機の場合、熱 による変形はプリント画像の色ずれの原因になる。

4.2 設計課題

4. 2. 1 FRP露光ハウジングにおける設計課題

コスト・強度に優れるガラス繊維で強化した樹脂(以 下,FRP)は、ヤング率・線膨張係数が異方性をもつ。 FRP露光ハウジングは、温度が一様に上昇しても相似変 形にはならない。実機評価を行う場合、変形形状の予測 がつかないと効果的な設計改善を行うことが困難とな り、試行錯誤を繰り返すことになる。また温度を与えた まま、変形形状を実測するためには多くの時間を要す る。

4. 2. 2 温度分布による設計課題

露光ユニットは,温度分布の差が大きいと複雑に変形 し,変形形状の予測がつかない。温度分布は,露光ユ ニット内部の熱の流れと露光ユニット周囲の機内から受 ける空気流れに影響される。両方とも評価に時間はかか るが,特に機内の空気流れの評価は試作機を使う場合, 機械全ての部品を必要とし,多くの時間を要する。 3 FRP材料による露光ユニットのシミュレーション 評価技術

樹脂流動と熱変形のシミュレーションソフト間のデー タ転送プログラムを独自に開発した。このプログラムに より,露光ハウジングにFRP材料を使う場合の熱変形形 状を精度良く求める評価技術を開発した。データ転送プ ログラムの開発は次の2つをテーマに掲げて行った。

- (1)露光ユニットの樹脂成形・温度分布・変形を含む トータルなシミュレーションにより評価することを 可能にする。
- ②樹脂繊維配向の板厚方向の分布と局所的な分布の材料物性値への影響を熱変形シミュレーションで扱えるようにする。特に、板厚方向の分布を扱うために六層以上の要素で分割し、要素毎にヤング率・線膨張係数を求める。

本シミュレーション評価の露光ハウジングへの適用例 を説明する。まず、樹脂流動シミュレーションにより樹 脂成形の繊維配向を求めた結果をFig.6(a)に示す。繊維 配向の結果からヤング率と線膨張係数が要素毎に求まる。 次に、これらの値を熱変形シミュレーションの材料物性 値で定義し、一様に50℃の温度を与えた時の変形形状を Fig.6(b)に示す。



(a) Polymer textile flow



(b) Thermal deformation

Fig.6 Simulation results of an exposure housing

次に検証のため, Fig.7(a)の露光ハウジングに一様に 50℃の温度を与えて変形させ、A~Cの3点の変位量を レーザー変位計で測定する。またFig.6のシミュレーショ ン結果を使って測定箇所と同じA~Cの変位量を読み 取った。この読み取り値と測定結果をFig.7(b)のグラフ で比較する。Fig.7からシミュレーションで求めた変位量 が方向だけでなく、絶対値が一致していることがわかる。

今回の取り組みから, FRP材料による露光ユニットの シミュレーション評価技術を使って熱変形形状を予測 し、樹脂成形時のゲート位置や露光ユニットのリブ配置 の提案などを効果的に行えるようになった。



(a) An examined model and measured points



(b) Thermal deformation of a simulation model and an experimental model

Fig.7 Thermal deformation of the exposure housing at 3 random points

4. 4 温度分布のシミュレーション評価技術

露光ユニットの温度分布は、内部の熱の流れと周囲の 空気の流れによる冷却効果の影響を受ける。この内部と 周囲の両方の影響が同時に考慮できるように従来のシ ミュレーション方法をそれぞれ効率化し、温度分布のシ ミュレーション評価技術を開発した。

4.4.1 内部の熱流れのシミュレーション効率化

露光ユニット内部の熱流れのシミュレーションを効率 化するため, 要素数を減らして概略値が求まる伝熱シ ミュレーションによる方法を開発した。

最初に,熱流れの現象から説明する。熱流れはポリゴ ンモータが発熱源となり, 高速で回転するポリゴンミ ラーの影響で発生する。熱流れの現象をそのまま流体と してシミュレーションを行う場合は、発熱量及びポリゴ ンミラー回転による気流速度を定義する。この場合、シ ミュレーション精度は、熱源周りの要素数に依存し、精 度を確保するには計算時間を要する。

熱流れを伝熱としてシミュレーションを行う本手法 は、熱源からの熱流れを一つの空気の固まりとし、空気 の熱伝導率で表現した。この場合、シミュレーション精 度は熱伝導率に大きく依存し,要素数にはあまり影響さ れず、要素数を減らして計算時間の短縮が可能になる。 熱伝導率を別途設計した露光ユニット実験機による温度 分布をシミュレーション上で再現することによって求め た。

4.4.2 周囲の流量のシミュレーション効率化

機内を複数の流路に分割し,各流路の通風抵抗をシ ミュレーションで求め、その値により露光ユニット周囲 の流量を求める手法を開発した。本手法により機内の一 部を形状変更する場合は,影響を受ける流路の通風抵抗 をシミュレーションで求めて,露光ユニット周囲の流量 評価が可能となった。通風抵抗 R は, 流路の圧力損失 P, 流量Qによって次式で表される。

 $P = R \cdot Q^2$

 $\dots (2)$

本手法により機内の一部を形状変更する場合について Fiq.8を使って説明する。まず、変更する流路の通風抵抗 $(R_2$ 改)をシミュレーションで求め、既知の他の流路の 通風抵抗とFig.8の式から機内全体通風抵抗Rallを求め る。このRallを式(2)に代入し、得られたPQの二次曲線と、 Fig.9の製品で使用するファンのPQ特性との交点が機内 流量となる。この機内流量と各流路の通風抵抗により露 光ユニット周囲の流路を含めて各流路の流量が求まる。



60 圧力損失P 50 =機内通風抵抗 Rall × 流量Q² (Pa) 40 王力損失P 30 ファンのPQ特性 20 機内流量 10 0

Fig.8 Effective simulation method of flow path in the machine

0.8 流量Q(mm³/min)

1.2

14

Fig.9 Calculation of flow in the machine

次に製品を使って検証した内容を説明する。本手法 は、シミュレーションで各流路の通風抵抗を求め、上述 した手順で各流路の流量を計算した。また製品の各流路 の流速値を流速計で測り、断面積をかけて流量とした。

0

0.2

04 0.6 2つの方法による各流路の流量をFig.10のグラフに示す。 Fig.10は、本手法が測定結果と±10%以内の精度良い一致 であることを示しており、製品開発に適用可能な範囲で あることが確認できた。



Fig.10 Comparison of flow via measurement and via the methods based on simulation and mathematical equation

4. 4. 3 温度分布のシミュレーション評価技術検証

4. 4. 1, 4. 4. 2の効率化手法を含めた温度分 布のシミュレーション評価技術について,実験機を使っ た検証内容を説明する。検証に使った実験機(ポリゴン は図示していない)をFig.11に示す。露光ユニットは露光 ハウジングと板金の蓋,ポリゴンミラー,基板,放熱板 及びその間の伝熱シートで構成した。ポリゴンミラーの 回転速度,機内からの流量を変更し,温度分布を熱電対 で測定できるように設計した。



Fig.11 A test machine for verification of temperature distribution simulation

検証の条件を、ポリゴンミラーの回転数540rps、機内からの流量0.6m³/minに設定した。Fig.12はシミュレーションにより求めた露光ハウジングの温度分布であり、露光ユニットの内部を4.4.1、周囲を4.4.2の方法で効率化した。Fig.12は、ポリゴンモータの熱とポリゴンミラーの回転による空気流れの影響により温度が分布している様子を示している。

次に同じ条件で露光ユニット数箇所の温度を測定した。測定値とシミュレーション結果をFig.13で比較する。 Fig.13はシミュレーションで求めた露光ユニットの温度が



Fig.12 Temperature distribution of an exposure unit

各箇所で一致していることを示している。更に,ポリゴ ンミラーの回転数・機内流量を変更した検証の結果も含 めて,±15%以内の範囲に収まり,製品開発に適用可能 な精度であることを確認した。



Fig.13 Comparison of simulation and measurement of temperature distribution.

本手法により,露光ユニット全体の温度分布を効率良 く評価することが可能になった。この評価をもとに,露 光ユニットの変形量を小さくし,レーザー走査位置ずれ を小さくする設計提案を行うことを可能とした。

5 まとめ

「クリーニングのシミュレーション評価技術」,「露 光ユニットのシミュレーション評価技術」について製品 開発に適用可能な精度の高い技術を開発した。2つの開 発技術は製品開発の上流段階から適用可能で,環境の影 響を受けない高画質の設計が行える。

今後は、「クリーニングのシミュレーション評価技 術」により、クリープ及び感光体摺動による代用特性値 の変化を予測し、クリーニング機構の更に高いレベルに 向けた設計提案を行っていく。また、先端部の摩耗や先 端欠けによる代用特性値の変化を予測するためのシミュ レーション評価技術を開発する。露光ユニットに対して は、「FRP材料」と「温度分布」による熱変形評価技術 を駆使し、ハウジングのリブ配置や成形条件の最適化、 機内流路の改善など開発の上流段階から取り組んでいく。