
感光体ドラム駆動に対応した高精度遊星歯車機構における品質工学を用いた寿命予測手法

High Precision Planetary Gear for Photo-Conductor Drum and Life Estimation Method with Quality Engineering

松田 裕道* 宮脇 勝明* 庄司 尚史** 細川 哲夫*** 伊東 良平****
Hiromichi MATSUDA Katsuaki MIYAWAKI Hisashi SHOJI Tetsuo HOSOKAWA Ryohei ITOH

要 旨

新開発した樹脂歯車の遊星歯車機構の感光体ドラム駆動ユニットを対象に、品質工学の機能性評価を用いた寿命予測手法を開発した。従来、市場実績がない新規駆動ユニットの耐久性評価は長期間を要し、開発期間短縮の大きな課題となっていた。本手法は、あらかじめ寿命が既知の駆動ユニットをベンチマークとして、市場を想定した温湿度環境、動作モードで劣化テストを行い、立ち上がり時のモータ消費電流波形から、駆動ユニットの機能ばらつきを示すSN比を求め、ベンチマークと遊星歯車機構のSN比の差から寿命を予測する。本手法により、半年以上掛かった従来のユニット耐久評価を約2週間に短縮することができた。

ABSTRACT

This article proposes a life prediction method using the functional evaluation of the quality engineering for a new photo-conductor drive unit of plastic planetary gear. A conventional durability evaluation needs a long term and it causes development period longer. In this method, a field-proven drive unit is adopted as a benchmark. A degradation test is conducted in market environmental and operating conditions and SN ratio that indicates functional variation of the drive units are calculated by characteristic of startup motor current. A life is predicted from the difference of the SN ratio between the benchmark and the planetary gear. This method shortens the evaluation period from a half year to two weeks.

* 画像エンジン開発本部 ICT開発センター
Imaging Core Technology Center, Imaging Engine Development Division
** 画像エンジン開発本部 技術企画室
Technology Planning Department, Imaging Engine Development Division
*** 品質本部 QAセンター
Quality Assurance Center, Quality Management Division
**** 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

高い定速性能と耐久性が求められるプロダクションプリンティング（以後、「PP」とする）分野の電子写真感光体ドラム駆動では、近年コストダウンの要望が高まり、採用されている遊星ローラトラクション駆動機構は、切削加工を要する金属部品が多く、低コスト化が大きな課題であった。そこで、業界初となる樹脂歯車を用いた高精度遊星歯車機構 Precision Planetary Gear（以後、「Precision PG」とする）を開発した¹⁾。

Precision PGは、機構解析シミュレーションと品質工学を用いた設計パラメータの最適化、および、フィードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせた制御技術により、金属歯車に比べ成形誤差が大きい樹脂歯車を用いながらも、高い定速性能を実現している。Precision PGは、樹脂歯車を始めとし、多くの樹脂部品を採用しており、その耐久性が懸念されるため、PP分野製品の本体駆動システムの要求寿命を満足するか評価する必要がある。

従来から、樹脂歯車の耐久性評価では、樹脂歯車の強度計算式²⁾に基づいて歯車を設計し、標準使用条件における連続運転試験で磨耗状態を評価してきたが、試験期間に半年以上を要するため、技術開発の大きな障害となっていた。このような問題から、樹脂歯車の噛合い歯面温度と寿命に相関があることに着目した寿命推定手法³⁾が提案されている。この手法は、提案された寿命曲線と運転中の歯面温度上昇特性の計測値から寿命推定するものであるが、Precision PGは内歯車を有し、歯面温度計測が困難なため適用できない。また、運転中の歯面温度をシミュレーションする手法^{4,5)}も提案されているが、同材質の平歯車対で無潤滑条件に限定する熱解析モデルのため、Precision PGへの適用は困難である。

一方、品質工学の機能性評価は、開発評価プロセスの効率化だけでなく、その結果は、寿命と高い相関があることが知られており、例えば、機能性評価

によりコイルバネ加工条件を最適化した事例では、寿命性能が向上したことが報告されている⁶⁾。

以上の背景のもと、本開発では、機能性評価結果と寿命との高い相関に着目し、寿命の明確な駆動ユニットと新開発された駆動ユニットの機能性評価結果の相对比较から、新開発の駆動ユニットの寿命を短時間で、正確に予測する手法を開発し実践する。また、新開発のPrecision PGがPP分野製品の要求寿命を満足するかを予測判断することを目的とする。

2. Precision PG の構成と課題

2-1 感光体ドラム駆動システムの比較

感光体ドラムの速度変動は、バンディングと呼ばれる周期的な濃度むらや色ずれなどの画像劣化要因であるため、PP分野では、非常に高い定速性能が必要とされる。当社では製品仕様を考慮し、様々な方式を採用している。Precision PGを含めた方式一覧をTable 1に示す。

感光体ドラムを直接駆動するダイレクトドライブモータは、回転精度は非常に高いが、モータが大型で高コストである。歯車減速とフライホイールは、慣性力で回転精度は高いが、装置全体の大型化、重量増となる。遊星ローラトラクション駆動は、圧接した金属ローラで伝達する方式で、回転精度は高いが、高精度な金属ローラ部品にコストが掛かる。一方、Precision PGは、低コスト、省スペース、軽量の点で他方式に対し優位な特徴を持つ。

Table 1 Comparison of photo-conductor drive systems.

Drive System	Direct Drive Motor	Gear & Flywheel	Traction Drive	Precision PG
Accuracy	◎	◎	◎	◎
Durability	◎	△	◎	?
Efficiency	△	◎	◎	◎
Cost	×	◎	×	◎
Compact	△	×	◎	◎
Weight	×	×	△	◎

2-2 Precision PG の構成

Precision PGの構成をFig.1に示す。2段減速機構を採用しており、各段は、中心に太陽歯車、その周りを回る3つの遊星歯車と、これら遊星歯車を支えるキャリア、最外周に固定された内歯車で構成される。入力太陽歯車の回転により、遊星歯車は自転および公転運動する。この公転運動がキャリアの回転となり出力される。遊星歯車機構は複数の歯車で荷重分担されるため、小型で高トルク伝達が可能である。

同構成の高精度減速機は数多く市販されているが、いずれも切削加工の金属歯車やハウジング、ボールベアリングを多用しており高コストである。一方、Precision PGは、樹脂歯車、樹脂製すべり軸受、その他、キャリアなどの構成各部品を樹脂製とすることで、大幅な低コスト化と軽量化を実現している。

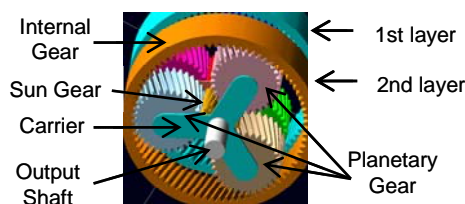


Fig.1 Constitution of the Precision PG.

2-3 耐久性評価の課題

Precision PGは、PP分野製品の駆動ユニットとして4,000 [h]の耐久性が求められている。従来の連続運転試験による耐久性評価では以下の問題がある。

- ・ 半年以上の試験期間を要し、不具合対策の再評価工程が発生すると開発期間が長期化する。
- ・ Precision PGは新規構成で、破壊モードが不明のため、極端に厳しい水準設定での加速試験は、市場での劣化現象と関連しない可能性がある。
- ・ 試験台数で評価条件（環境、負荷トルク、動作モード）は制限され、市場での多様な運転条件すべてを評価しきれない可能性がある。

また、従来の歯車部の寿命推定だけでは、駆動システムの総合的な耐久性評価としても不十分である。

そこで、試験期間の大幅な短縮化と、駆動ユニットの総合的な耐久性評価を実現するため、品質工学の機能性評価による寿命予測に着目し、具体的な手法を開発し、Precision PGのPP分野製品における耐久性を判断する。

3. 方法

3-1 機能性評価による寿命予測手法

3-1-1 機能性評価と寿命の関係

品質工学では、システムの基本機能（入出力特性）がノイズによって、あるべき理想特性からどれだけ離れるか、機能の安定性をSN比で評価する。この評価方法を機能性評価と呼び、SN比は10log（特性の平均/特性のばらつき）[db]で定義される。システムの寿命が、市場における劣化ノイズ（使用環境、使用動作）により、入出力特性が時間とともに変化して許容範囲を超えることだとすれば、その入出力特性を評価したSN比と寿命は高い線形相関を持つと考えられる。機能性評価と寿命の相関をFig.2に示す。Fig.2 (a)に示すように、基本機能の初期特性が黒い直線で、仕様が異なるSpec.1とSpec.2があったとする。これらに劣化ノイズを与え、それぞれ赤斜線および青斜線の範囲に入出力特性のばらつきが生じ、Spec.2のばらつきがSpec.1に対し1/2（SN比が+3 [db]）である場合、Fig.2 (b)に示すように、寿命は2倍であることが期待できる。

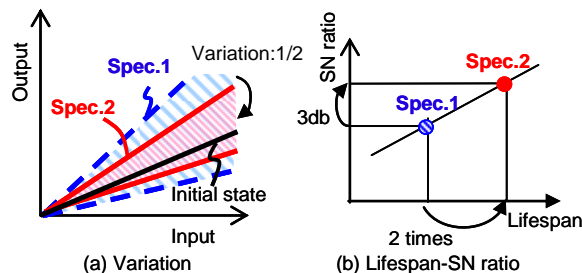


Fig.2 Lifespan-SN ratio characteristics of quality engineering.

3-1-2 ベンチマークを用いた寿命予測

本寿命予測手法は、市場実績から寿命時間が既知の駆動ユニットをベンチマークとし、Precision PGの寿命を予測する。機能性評価結果の例をFig.3に示す。機能性評価の結果、ベンチマークとPrecision PGのSN比は、Fig.3 (a)の $\eta_B=16$ [db]と、Fig.3 (b)の $\eta_P=13$ [db]であったとする。ベンチマークの寿命が10,000 [h]の場合、Precision PGの寿命は、利得16-13=3 [db]より、ベンチマークの1/2となる5,000 [h]と予測できる。

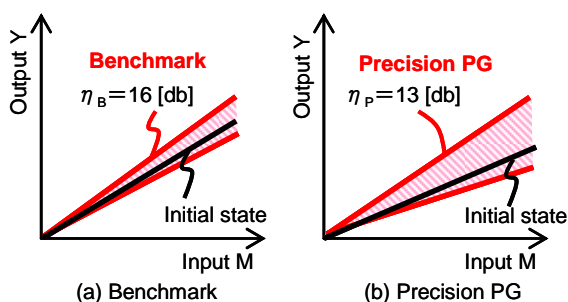


Fig.3 Schematic diagram of a life prediction approach.

3-2 寿命予測手法の検証方法

駆動ユニットの寿命予測と、予測結果の妥当性を検証するために、ベンチマークを2種類用意する。ベンチマーク1は、当社PP分野製品に搭載実績があり、稼働時間10,000 [h]において規定の市場故障率が保証された高耐久駆動ユニットとした（以後、「Benchmark 1」とする）。Precision PGと機能性評価結果を比較し寿命予測する。ベンチマーク2は、当社ローエンド分野の低耐久駆動ユニットを無潤滑で使用する事とした（以後、「Benchmark 2」とする）。Fig.4に、想定される寿命予測結果を示す。実際のBenchmark 2の寿命時間は、劣化テスト後に稼働時間と部品磨耗量を計測し、推定判断することとした。その推定寿命時間と本寿命予測手法によるBenchmark 2の寿命予測時間を比較し、予測手法の妥当性を検証する。

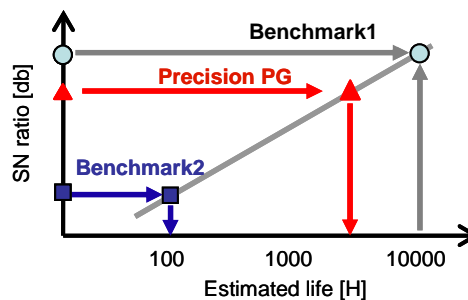


Fig.4 Schematic diagram of a life prediction method.

3-3 評価装置

各駆動ユニットに対し、恒温槽内で複数の条件の劣化テストを実施し、機能性評価するための駆動評価装置を製作した。評価装置の模式図を、Fig.5に示す。評価装置には感光体ドラム駆動を模擬するフライホイールと定常回転負荷のブレーキが設けられており、駆動ユニットの出力軸に設置されたエンコーダ（HEIDENHAIN製ERN480）で回転速度を、電流計でDCモータの消費電流を計測し、データロガーで取得する。モータ消費電流計測には、瞬時電力計測が可能なクランプセンサ（Tektronix製TCPA300）を用いた⁷⁾。

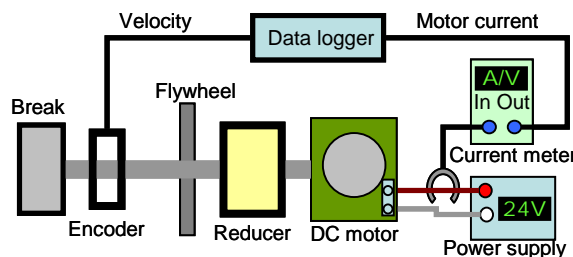


Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus.

3-4 評価項目と劣化テスト条件

駆動ユニットの基本機能を定義する評価項目の候補を、Fig.6に示す。計測対象2種（消費電流、回転速度）と駆動状態2種（立ち上がり時、定常時）の

組合せの4種類である。これら評価項目のうち、エネルギーの入出力特性を用いた機能性評価が寿命と相関が高く、また、過渡特性を評価することで高感度に機能ばらつきを評価できると考え、立ち上がり時の消費電流を評価項目の第一候補として採用した。その他の3つ評価項目については機能定義の妥当性を判断するために、同様に計測を実施した。

計測条件は、線速2水準（定格速度の100%、50%）、負荷2水準（定格負荷トルクの100%、120%）の組合せの4条件とした。

本評価では、まず、初期評価として、3環境の温湿度評価を実施する。3環境とは、市場想定の上下限条件に従って設定した、低温低湿（LL）、常温常湿（MM）、高温高湿（HH）の環境である。次に、環境、動作モードが異なる6種類の劣化テストを順番に実施する。劣化テストの条件をTable 2に示す。それぞれの劣化テスト期間は1~2日間で、全体は約2週間で終了する。各動作モードについては、連続（定格速度で継続運転）、間欠（10sec駆動、1sec停止の繰り返し）、正逆（間欠運転+1sec逆転駆動）、放置（停止状態）とした。6番目の劣化テスト環境HCはヒートサイクルで、高温高湿と低温低湿を短時間で繰り返す条件とした。各劣化テスト後にMM環境のみの中間評価を実施する。また、全条件の劣化テストを実施した後に終了評価として3環境の評価を再度実施する。

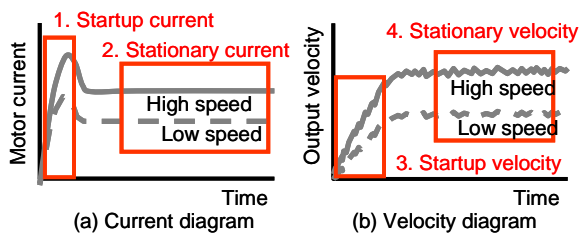


Fig.6 Schematic diagram of quality evaluations.

Table 2 List of degradation tests.

	Temperature	Humidity	Operating conditions
N1	High	Low	Intermittent
N2	Low	Low	Stop
N3	High	High	Continuous
N4	High	High	CW and CCW
N5	High	Low	Continuous
N6	HC	HC	Intermittent

3-5 SN比解析方法

立ち上がり時のモータ消費電流を評価項目とした動特性SN比の計算式について説明する。評価装置の減速機出力軸はブレーキで定負荷トルクが設定されているため、モータ消費電流を評価することで入出力特性が評価できる。Table 3に、初期MM環境と劣化テストN1、N2後の機能性評価で得られる計測データ y_{ijkl} を示す。各添字について、 i は環境条件（1: MM環境、2: HH環境、3: LL環境）、 j は劣化テスト条件（0: 初期、1-6: 劣化テスト条件、7: 終了）、 k は計測条件（Table 3の4条件）、 l は時系列番号である。本計測では、DCモータ消費電流を1msec周期でデータサンプリングしており、計測時間100msecとした場合、各計測条件で各100個、合計400個の時系列データが得られる。この400個のデータからSN比を算出する。

Table 3 List form of sample data of the motor current during startup.

Speed	Load torque 100%		Load torque 120%	
	100%	50%	100%	50%
Initial MM	$y_{1011}, y_{1012}, \dots$	$y_{1021}, y_{1022}, \dots$	$y_{1031}, y_{1032}, \dots$	$y_{1041}, y_{1042}, \dots$
N1	$y_{1111}, y_{1112}, \dots$	$y_{1121}, y_{1122}, \dots$	$y_{1131}, y_{1132}, \dots$	$y_{1141}, y_{1142}, \dots$
N2	$y_{1211}, y_{1212}, \dots$	$y_{1221}, y_{1222}, \dots$	$y_{1231}, y_{1232}, \dots$	$y_{1241}, y_{1242}, \dots$

ところが、実際には、定格速度までの立ち上がり区間を評価範囲に設定すると、各駆動ユニットで立ち上がり時間が異なり、合計の計測データ数が異なる。従来の標準SN比の計算式では、データ数の影響を受けてSN比が変化するため、データ数の異なる駆動ユニットのSN比の比較（寿命予測）ができない。そこで、データ数の影響を受けにくいエネルギー比型SN比の計算式を採用する⁸⁾。

初期、終了評価（3環境SN比: η_p ）では、MM環境時の特性に対するLLとHH環境の機能ばらつきを解析する。各劣化テスト後の評価（劣化テストSN比: η_N ）では、劣化テスト前の特性に対するテスト後でのMM環境の機能ばらつきを解析する。さらに、総合評価（総合SN比: η ）として、初期のMM環境時の特性に対して、全計測結果の機能ばらつきを解析する。各SN比は駆動ユニット毎に算出され、寿命予測には各駆動ユニットの総合SN比を用いる。

以下に、SN比算出式を示す。

m : 環境テスト水準数

n : 劣化テスト水準数

o : 運転条件水準数

p : 各環境劣化テストでの計測データ数

全変動（全2乗和） S_T は、式(1)より求める。

$$S_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p y_{ijkl}^2 \quad (1)$$

計算上の信号因子となる標準出力の有効除数 r は式(2)より求める。

$$r = \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p y_{1jkl}^2 \quad (2)$$

計測データの線形式 L_j は、式(3)より、初期MM環境のデータと各劣化テスト後データの積から求める。

$$L_j = \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p y_{10kl} y_{ijkl} \quad (3)$$

比例項の変動 S_β は、式(4)となる。

$$S_\beta = \frac{\left(\sum_{j=1}^n L_j \right)^2}{nr} \quad (4)$$

比例項の差の変動 $S_{N \times \beta}$ は、式(5)となる。

$$S_{N \times \beta} = \frac{\sum_{j=1}^n L_j^2}{r} - S_\beta \quad (5)$$

誤差変動 S_e は、式(6)より求める。

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} \quad (6)$$

SN比（エネルギー比型） η_E は、式(4)~(6)の変動成分を用いて、式(7)より算出される。

$$\eta_E = 10 \log \frac{S_\beta}{S_{N \times \beta} + S_e} \quad (7)$$

4. 結果

4-1 SN比解析結果

初期、各劣化テスト、終了において、立ち上がり時のDCモータ消費電流から機能性評価で算出したSN比一覧をTable 4に示す。

総合SN比 η の関係は、Benchmark 1 > Precision PG >> Benchmark 2となった。Precision PGとBenchmark 1の利得 $\Delta \eta = -4.2$ [dB]より、Precision PGの寿命は、Benchmark 1の1/2.6と予測された。

4-2 寿命予測結果

総合SN比の相対比較から、Benchmark 1の寿命を10,000 [h]としたPrecision PGとBenchmark 2の寿命予測結果をFig.7に示す。

劣化テスト終了後のBenchmark 2の軸受部磨耗状態をFig.8に示す。樹脂製スベリ軸受部に大量の磨耗粉と歯車回転軸の欠損が確認された。この劣化状

態は、感光体ドラム駆動システムとしては寿命と判定される程度であり、Benchmark 2の軸受部の磨耗量と本劣化テスト稼働時間から、Benchmark 2の寿命は200 [h]と判定できた。Table 4に示したBenchmark 2のSN比の推移より、劣化テストN4の高温環境下の正逆転動作で磨耗が促進したことが推測される。

Table 4 SN ratio [db] of the startup motor current in the each tests.

	Precision PG	Benchmark 1	Benchmark 2
Initial η_p	25.6	29.8	14.4
η_{N1}	26.4	32.6	12.0
η_{N2}	27.2	31.3	12.4
η_{N3}	26.9	31.0	11.1
η_{N4}	27.3	31.3	7.6
η_{N5}	26.7	30.1	5.6
η_{N6}	26.4	29.6	8.9
Late η_p	25.1	28.2	18.3
Total η	23.7	27.9	10.2



Fig.8 Photographs of worn-out gear bearings of the benchmark 2.

Benchmark 2の軸受部磨耗の影響がSN比に反映され、かつ、Benchmark 2の寿命を200 [h]程度に予測できたことから、駆動ユニットの寿命予測手法として十分な予測精度であるといえる。

樹脂製のPrecision PGの寿命予測結果は3,800 [h]であった。金属製の高耐久駆動ユニットのBenchmark 1に対して、寿命は短いと予想されていたが、その通りの結果であった。劣化テスト終了後にPrecision PGを観察したところ、歯車の支持機能が不十分であることが分かった。この支持機能を改善し、製品仕様とすることで、目標耐久時間4,000 [H]の達成が可能であると判断した。

4-3 考察

立ち上がり時の消費電流評価の妥当性について、Fig.6に示した他の評価項目の寿命予測結果をFig.9からFig.11に示し考察する。まず、Fig.9の定常時の消費電流評価では、Benchmark 2の予測結果が4,100 [h]であり、実際の200 [h]と比べ、予測精度が著しく低い。この理由は、定常速度を保持するモータ制御システム側の補正強度の影響により、消費電流波形が過剰にばらついたためである。

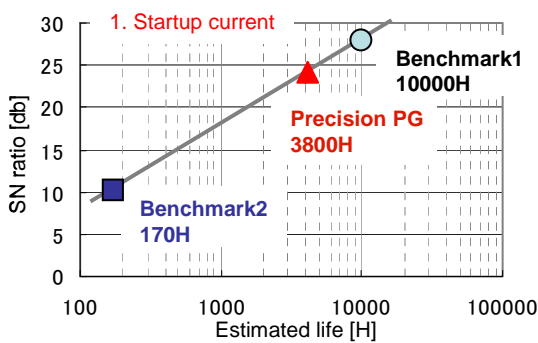


Fig.7 Predicted values of the startup current evaluation.

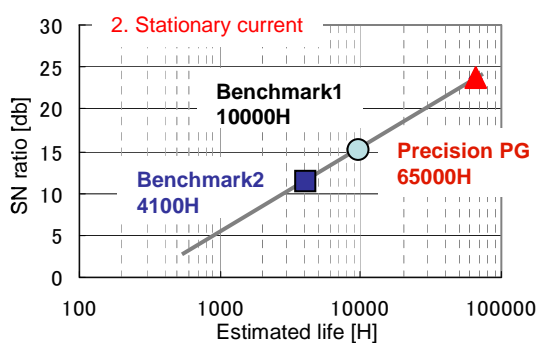


Fig.9 Predicted values of the stationary current evaluation.

Fig.10, Fig.11の速度変動評価では、各駆動ユニットのSN比の差が少なく、駆動ユニットの劣化状態が検出し難い結果であった。これは、エネルギー伝達の機能ではなく回転品質評価となっており、寿命予測には不適切であるといえる。

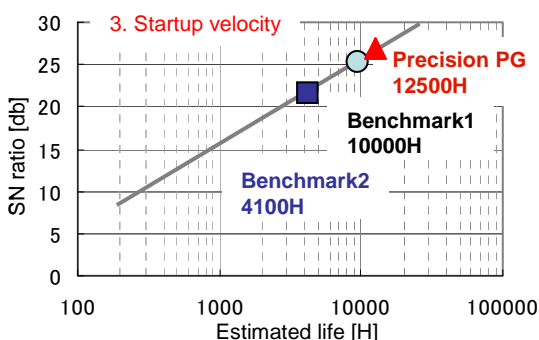


Fig.10 Predicted values of the startup velocity evaluation.

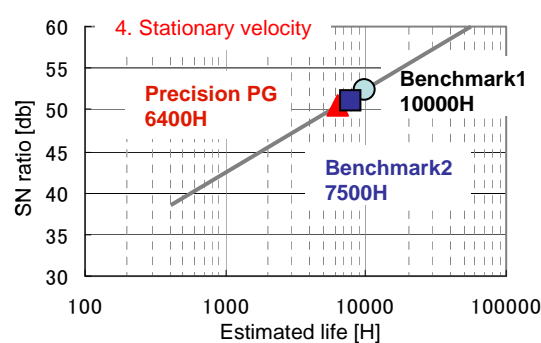


Fig.11 Predicted values of the stationary velocity evaluation.

一方で、立ち上がり消費電流評価は、立ち上がり時のDCモータと減速機で生じるエネルギー伝達ロスをもータ消費電流波形で評価できる。また、立ち上がり時はDCモータがフル加速の状態、幅広い速度領域を評価するため、わずかな変化を高感度に検出できると考えられる。したがって、駆動ユニットの機能評価であり、寿命予測手法として最適と考えられる。

また、Table 4に示した立ち上がり消費電流評価のSN比の推移より、Benchmark 1の初期と終了の3環境評価やN6（ヒートサイクル）評価のSN比が他のSN比よりも低い傾向があり、Benchmark 1は温度変化に弱いことが推定される。この傾向はBenchmark 1の市場実績と相関があり、他の評価項目ではこの傾向は確認されなかった。この点でも本寿命予測手法としての妥当性を示している。

本検討結果を基にPrecision PGを採用したPP分野製品は、社内の厳しい信頼性評価において問題を出すことはなく、短期間に商品化することができた。今後、本寿命予測手法の信頼性を更に高めるために、Precision PGの市場実績情報を収集し、予測結果を検証したい。

5. 結論

感光体ドラム駆動ユニットの耐久性評価において、機能性評価を用いた寿命予測手法を開発した。従来の寿命予測手法では歯車形状や運転条件が限定された予測であったが、本手法は、駆動ユニット全体の様々な運転条件における総合的な寿命予測となる。本寿命予測手法は、駆動ユニットに対し、市場を想定した劣化テストを行い、立ち上がり時のモータ消費電流波形のばらつきを評価する機能性評価から寿命を予測する。検証用駆動ユニットの寿命予測結果は、磨耗量から判定した寿命値に近く、寿命予測手法として十分な精度であると考えられる。本手法により、従来の連続運転試験では半年以上掛かる評価期間を約2週間に短縮した。さらに、業界初となる樹脂歯車を用いた低コスト高精度遊星歯車機構である Precision PGの予測寿命は、PP分野製品の要求レベルに近く、適用可能であることが判断できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた有限会社アイテックインターナショナルの中野恵司氏に深く感謝を致します。

参考文献

- 1) 松田裕道ほか: 感光体ドラム駆動に対応した高精度遊星歯車と駆動制御技術, *Imaging Conference JAPAN 2013 論文集*, pp.225-228, 日本画像学会 (2013).
- 2) 精密工学会成形プラスチック歯車研究専門委員会編: 成形プラスチック歯車ハンドブック, p.379, シグマ出版 (1995).
- 3) 高橋美喜男ほか: プラスチックはすば歯車および平歯車対の寿命推定方法に関する一考察, *日本機学会論文集(C編)*, Vol.75, No.755, pp.172-178 (2009).
- 4) 上田昭夫ほか: プラスチック歯車のかみ合い発熱のコンピュータシミュレーション (歯の温度上昇に及ぼす歯幅の影響), *日本機学会論文集(C編)*, Vol.74, No.748, pp.224-229 (2008).
- 5) 上田昭夫ほか: プラスチック歯車のかみ合い発熱のコンピュータシミュレーション (歯の温度上昇に及ぼすモジュールと回転速度の影響), *日本機学会論文集(C編)*, Vol.75, No.752, pp.308-316 (2009).
- 6) 今井力也, 小澤仁: 品質工学を用いた加工工程の最適化, *Ricoh Technical Report*, No.38, pp.131-137 (2012).
- 7) 桑原修ほか: 瞬時電力の測定および評価に関する一考察, *品質工学会誌*, Vol.16, No.2, pp.72-79 (2008).
- 8) 鐵見太郎ほか: 品質工学で用いるSN比の再検討, *品質工学会誌*, Vol.18, No.4, pp.80-88 (2010).