

振動シミュレーションモデルによる業務用洗濯機制振機構開発

三洋電機株式会社 メカトロニクス研究所 紀之内隆生

1. はじめに

業務用ドラム式洗濯機の洗濯槽及び外槽は床面に対して水平に設置されているため、洗濯物の偏りが原因となって脱水時に激しい振動が発生する場合がある^[1]。これにより床面に振動が伝わり設置場所集込に悪影響を及ぼすと共に、場合によっては特殊なアンカー工事が必要となる。この振動を軽減させるため、防振バネやダンパが外槽下部に、制振用の錘が外槽左右に取り付けられている。よって、バネ・マス・ダンパ系の最適化による振動対策は極めて重要であり、使用するバネやダンパの定数、取付位置、角度、制振用錘の重さや取付位置等の設計パラメータを効果的に最適化する必要がある。従来の振動対策では、試作機を用いた実験による試行錯誤で検討していたが、バネ・マス・ダンパ系の多くの設計パラメータを効果的に最適化するのは非常に困難であった。

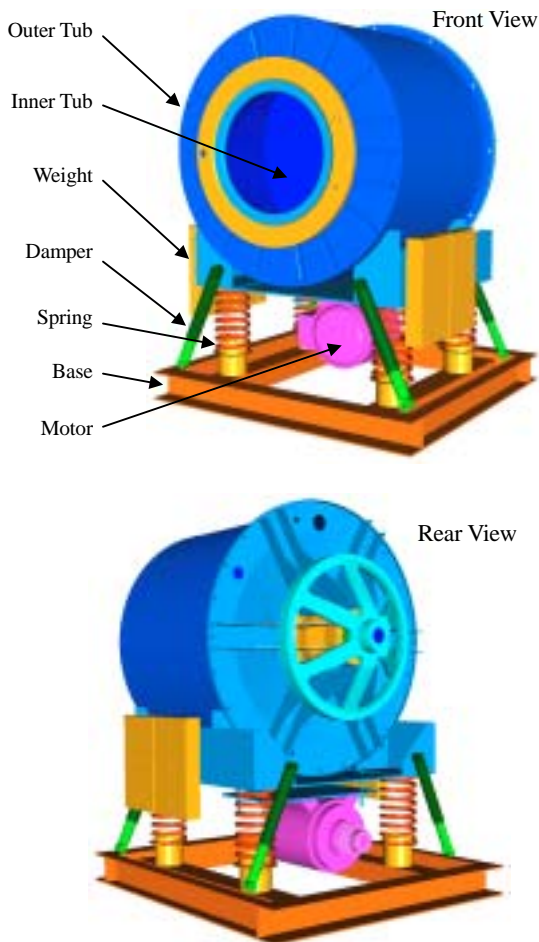


Fig.1 Commercial laundry

そこで、この振動対策を試作前の設計段階で検討するために振動シミュレーションモデルを開発すると同時に、制振のための最適構造を効率的に評価するために品質工学を応用する手法を開発して業務用ドラム式洗濯機の低振動化、軽量化を実現した。

2. 振動シミュレーションの適用

2.1 振動シミュレーションモデル

業務用ドラム式洗濯機の標準的な部品構成を図1に示す。洗濯槽が収められた外槽は、下方からバネとダンパで支持されており、外槽左右には制振用錘が取り付けられている。モータは外槽下部に取り付けられ、駆動ベルト、プーリを介して洗濯槽を回転させる。

洗濯槽、外槽、制振用錘、モータ等の各主要部品の重量、重心位置、慣性モーメントが解析精度に大きく影響を及ぼすため、できる限り製品形状に近い3次元モデルを作成した。振動シミュレーションのソルバとしては、機構解析汎用ソフト(ADAMS)を使用した。ADAMSでは、作成された3次元モデルの各部品を並進自由度や回転自由度を持った結合要素にて結合してシミュレーションモデルを作成した。

振動シミュレーションにおいては、図2に示すように、下から支えるバネとダンパの諸特性の設定が非常に重要となる。バネは軸方向の剛性だけではなく、横方向の剛性も実験によって計測して入力した。ダンパは、動作速度によって発生する反力が異なること、及び伸びる時と縮む時にも反力が異なることを考慮に入れた。さらに重要な点は、ダンパの外槽及びベースとの結合部である。この結合部にはゴムによるクッションが取り付けられている。よって、取付軸に対する回転自由度だけではなく、ゴムの弾性による並進自由度も考慮に入れた。

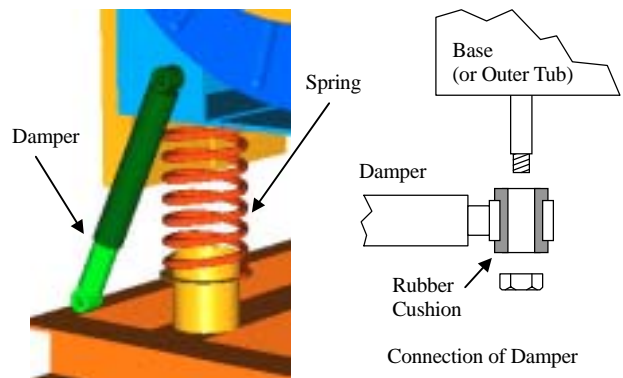


Fig.2 Details of spring and damper

2.2 シミュレーション結果の検証

試作機による振幅測定結果とシミュレーション結果の相関を 図 3 に示す．図 3 は 12 通りの設計パラメータの組合せにおいて 3 種類の回転数で測定箇所 4 箇所につき 3 方向の変位データを求め、1 つにプロットしたものである．横軸が実験結果、縦軸がシミュレーション結果を示し、左下から右上に向かう斜線が双方の結果の一致を示す理想的な直線である．理想直線上にポイントがほぼ集中しており良好な一致が見られた．これにより、実設計に適用できるレベルの振動シミュレーションモデルが作成されていることが確認できた．

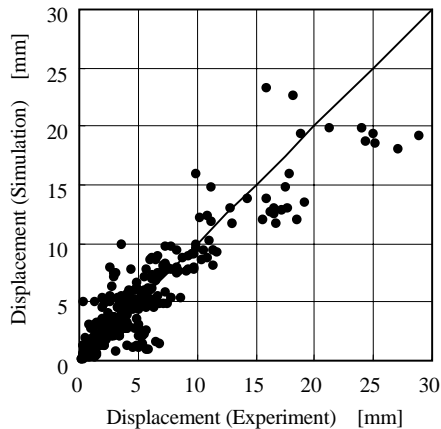


Fig.3 Comparison of experimental data with simulation results (Experiment No.1-12 Total)

2.3 シミュレーション結果に基づく設計変更の効果

前節のように作成された振動シミュレーションモデルを使用して、バネ・マス（制振用錘）・ダンパの諸特性、角度、位置等 60 通りの設計パラメータの組合せを検討した結果、次の 2 点の変更が最も有効であった．

- (1) 制振用錘の配置を外槽左右から外槽上部へ移動
 - (2) ダンパ角度を初期設計の 72.5° から 65° に変更
- これらの改良により、次のような効果が得られた．

(a) 外槽振幅低減による品質向上

図 4 に示すように外槽振幅を約 35% 低減することが可能となった．

(b) 製品重量軽減

150kg 超の制振用錘が必要な振幅値に 100kg の錘で達成できた（製品重量 10% 減）．

以上のように、従来のような試作機による試行錯誤では実験計測に多大な時間を要するため設計パラメータの組合せは数通りしか検討できなかったが、振動シミュレーションを用いることにより 60 通りの検討が可能となった．しかしながら、設計パラメータの組合せはこれら以外にも無数に考えられるため、今回の結果が最適な洗濯機構造とは限らない．そこで、効率的に最適構造を得るために振動シミュレーションに品質工学を応用し、少ないシミュレーション回数で設計パラメータの有効な組合せを数多く評価する手法を検討した．

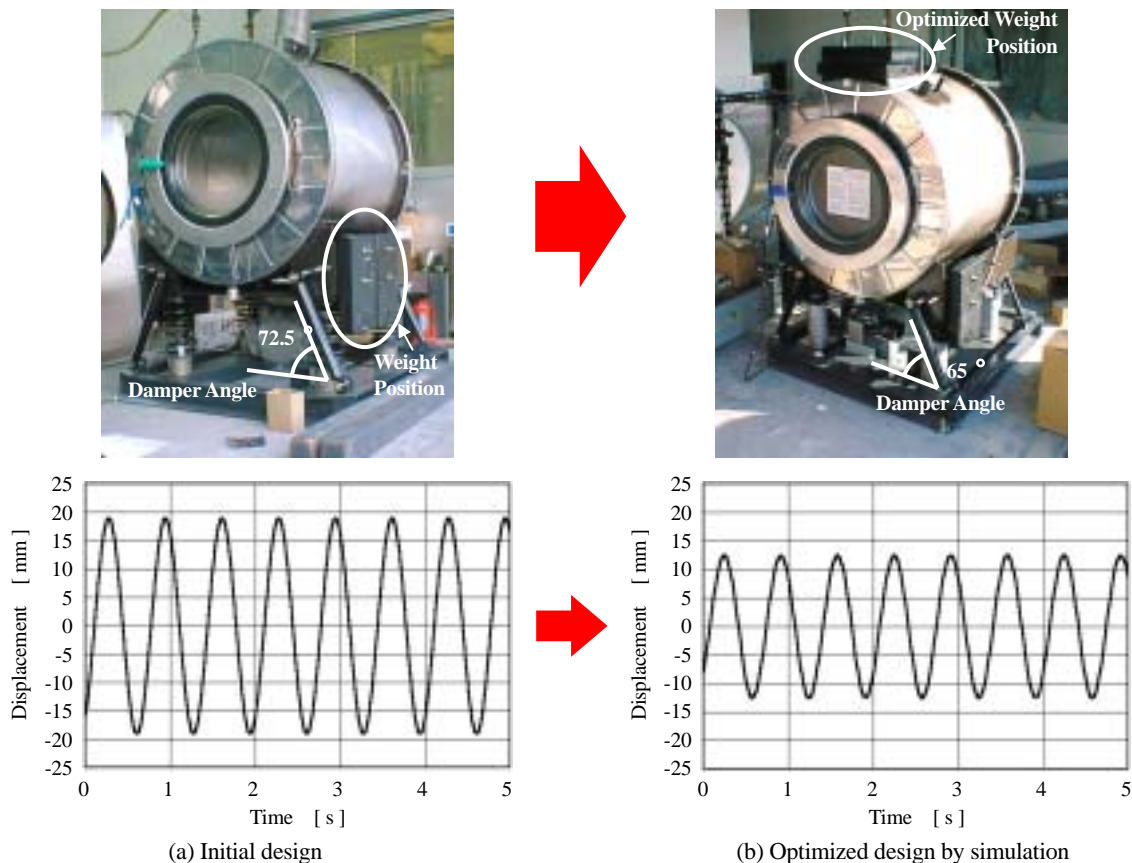


Fig.4 Effect of structural optimization by vibration simulation

3. 品質工学の適用

品質工学は設計工程下流における品質上のトラブルを上流段階で予測し改善することを目指した設計手法で、欧米ではタグチメソッドとも呼ばれている^[2]。品質工学は研究・開発段階におけるオフライン品質工学と製造工程におけるオンライン品質工学の2種類に大別されるが、本研究ではオフライン品質工学の中のパラメータ設計と呼ばれる手法を用いた。

パラメータ設計では、様々な使用条件でも出力（特性値）のばらつきが小さくなるようなロバスト性の改善と、出力を目標値：m に合わせるチューニング作業との2段階に分けてシステム（図5）の設計を行う（図6）。よってロバスト設計または2段階設計などとも呼ばれる。

出力のばらつきの程度はSN比[db]という尺度で表現される。SN比は通信工学の分野で信号対雑音比（Signal-to-Noise Ratio）として用いられてきた。

品質工学ではシステムに影響する要因のことを「因子」と呼び、それらを「技術者が設計段階で調整する設計パラメータ（制御因子：Control Factors）」と「特性値をばらつかせる原因（誤差因子：Noise Factors）」とに分類する。誤差因子には主にユーザの使用条件などが選ばれる。品質工学では出力をばらつかせる原因となる誤差因子を上流段階で積極的に取り入れて設計することにより、システム全体のロバスト性の向上を図る。

品質工学におけるSN比は、特性値の出力結果から計算されるが、特性値をどうしたいかという最適化の目的に応じて計算式が異なる。それは、入力と特性値の間に比例関係があることが望ましい場合の動特性のSN比と、特性値をある目標値に近づけたい場合の静特性のSN比に大別される。

本研究では振動や荷重をゼロとしたいので、静特性の中でも目標値がゼロの望小特性のSN比を用いた。

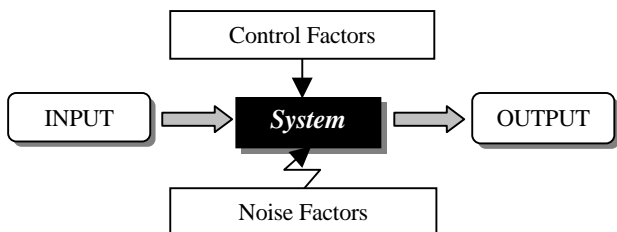


Fig.5 Parameter Design (Robust Design)

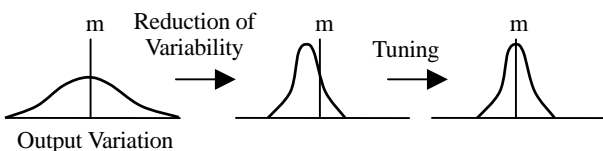


Fig.6 Robust Design (Two-Step Optimization)

3.1 問題の構造化

本研究において制振構造開発に品質工学を適用した際の要点は次の2点である。

(1) 実際に洗濯機を使用する場合を考慮し、洗濯機の制振構造最適化の目的を、外槽変位の低減と床荷重の低減としたことである。そして本研究のように複数の評価項目にトレードオフの関係がある場合の静特性のSN比による評価手法を構築した。

(2) 変位のばらつきをセンサの取り付け位置や変位の方向とし、床荷重のばらつきをバネとダンパの取り付け位置とした。さらに変位および床荷重のばらつきに対してシミュレーションの時間軸を取り入れ、過渡的な変化を考慮することとした。これにより、ドラムの回転数を増加させる際の不安定な応答も評価した。

3.1.1 制御因子

業務用ドラム式洗濯機に既存のバネ・マス・ダンパという振動系の値や取付位置等を調整して最適化を行うための設計パラメータとして、表1の因子とその値（水準）を取り上げて制御因子とした。制御因子は変位と床荷重の両方の最適化において同じ因子を用いた。

表1で網掛けになっている水準の組合せが試作機の現状条件（Current Condition）である。

Table 1 Control Factors and Levels

Control Factors		Level		
		1	2	3
A	Spring Angle	Current	Low	-
B	Spring Constant	Current	Middle	Hard
C	Spring Position 1	Down	Current	Up
D	Spring Position 2	In	Current	Out
E	Damper Angle	Low	Current	High
F	Damping Stiffness	Current	Hard	Soft
G	Weight	Light	Current	Heavy
H	Weight Position	Current	Middle	Up

3.1.2 L₁₈ 直交表

表1の制御因子の組合せをすべてシミュレーションすると $2 \times 3^7 = 4,374$ もの膨大な回数が必要となるが、品質工学ではL₁₈直交表（表2）にある18通りの組合せを行うだけで4,374通りのシミュレーションを行って最適条件を検討した場合と同等の結果を得ることができる。

そして、L₁₈直交表の太枠の右側に誤差因子を割り付け、各条件で計測される特性値から実験No.ごとのSN比（記号）の値を計算する。L₁₈直交表では一因子実験とは異なり、すべての水準が直交し、交互作用が均等に分布しているため、ある因子が単独で特性値に与える効果（主効果）を求めることができる。

3.1.3 SN比の計算

静特性の場合は特に入力（信号因子）は必要としないのでSN比は、式(1)~(3)を用いて計算される。ここで、S_Tは特性値の2乗和、σは標準偏差である。

$$S_{T1} = y_{1P1}^2 + y_{1P2}^2 + y_{1P3}^2 + \Lambda + y_{1Pn}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{S_{T1}}{n} = \frac{1}{n}(y_{1P1}^2 + y_{1P2}^2 + y_{1P3}^2 + \Lambda + y_{1Pn}^2) \quad (2)$$

$$\eta_1 = 10 \log \frac{1}{\sigma_1^2} = -10 \log \sigma_1^2 \quad [\text{db}] \quad (3)$$

Table 2 L₁₈ Orthogonal Array

No.	Control Factors								Noise P ₁ , P ₂ , ...	SN Ratio
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	y _{1P1} , y _{1P2} , ...	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	y _{2P1} , y _{2P2} , ...	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	...	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3	...	4
5	1	2	2	2	3	3	1	1	...	5
6	1	2	3	3	1	1	2	2	...	6
7	1	3	1	2	1	3	2	3	...	7
8	1	3	2	3	2	1	3	1	...	8
9	1	3	3	1	3	2	1	2	...	9
10	2	1	1	3	3	2	2	1	...	10
11	2	1	2	1	1	3	3	2	...	11
12	2	1	3	2	2	1	1	3	...	12
13	2	2	1	2	3	1	3	2	...	13
14	2	2	2	3	1	2	1	3	...	14
15	2	2	3	1	2	3	2	1	...	15
16	2	3	1	3	2	3	1	2	...	16
17	2	3	2	1	3	1	2	3	...	17
18	2	3	3	2	1	2	3	1	y _{18P1} , y _{18P2} , ...	18

3.2 最適条件の抽出

3.2.1 要因効果図

図 7 に要因効果図の一例を示す。要因効果図とは SN 比から各制御因子の水準の効果を求めてグラフ化したものである。要因効果図により制御因子の効果を視覚的に確認することができる。A ~ H の各制御因子において最も SN 比の高い水準が振幅や床荷重の低減に有効であることを示している。

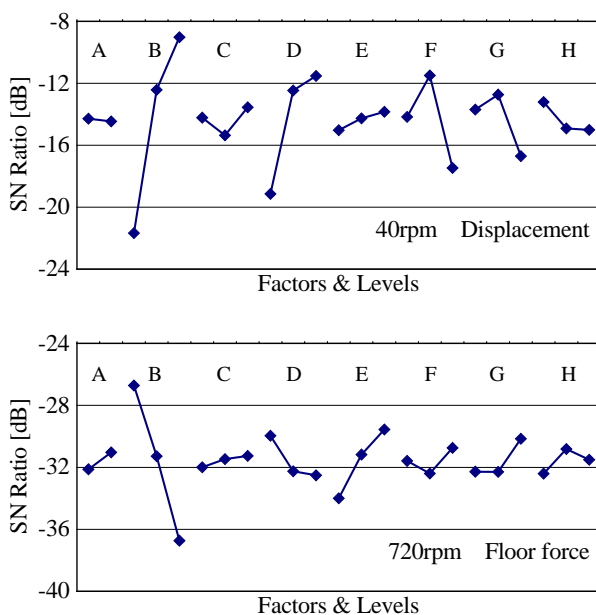


Fig.7 Factor Effect Graph (example)

3.2.2 最適条件の選定と確認実験

今回の検討では、低速回転(40rpm)時の変位の低減と定常回転(720rpm)時の床荷重の低減がトレードオフの関係にあるため、1つの要因効果図のみで最適条件を決定することができない。よって図7のように評価項目別の要因効果図を用いて比較検討することで設計パラメータの最適条件を求める。項目別の最適条件は、要因効果図のSN比の最も大きな水準を採用した組み合わせを選べば良い。しかし、ここでは互いにトレードオフの関係にある項目に対して改善できる条件を決定する必要がある。そこで、最適条件となる設計パラメータの組合せの候補をいくつか選出し、これらのシミュレーション結果から最終的な最適条件を決定した。最適条件のシミュレーション結果を図8に示す。

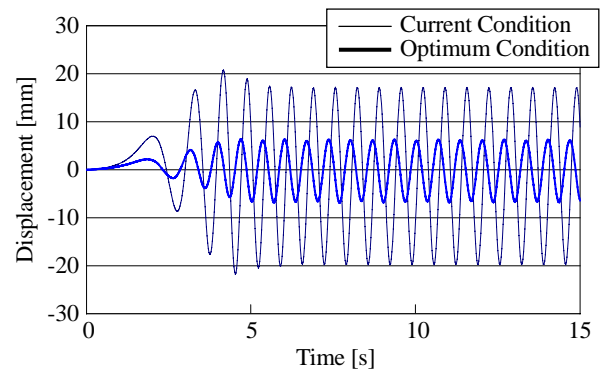


Fig.8 Result of Optimization (Displacement, example)

4. おわりに

本研究では、業務用ドラム式洗濯機の低振動設計に対する振動シミュレーション及び品質工学の適用に関して次の結果を得た。

- (1) 3次元モデルの活用やダンパ結合部を工夫することで実設計に活用できるレベルの振動シミュレーションモデルを開発した。これを用いて制振用錘の位置やダンパ角度を改良することで、外槽振幅を約35%低減できた。
- (2) 振動シミュレーションに品質工学を応用することで、18回のシミュレーションを行うだけで4,374通りのシミュレーションを行った場合と同等の最適結果を得ることが可能となった。
- (3) 低速回転(40rpm)時の変位低減と定常回転(720rpm)時の床荷重低減というお互いにトレードオフの関係にある最適化目的に対して、評価項目別の要因効果図を用いて比較検討することで設計パラメータの最適条件を容易に求めることが可能となった。

参考文献

- [1] 三輪修三：回転体の力学，森北出版，(1990)。
- [2] Genicni Taguchi, Subir Chowdhury, Shin Taguchi：ROBUST ENGINEERING, McGraw-Hill,(1999)。