

インペラ摩耗模擬試験による多点分析手法の検討

Investigation of multivariate analysis for detection of wear in pump impellers

株式会社 IIU	角皆 学	Manabu Tsunokai	Member
株式会社 IIU	萱田 良	Ryo Kayata	Member
株式会社 IIU	高瀬 健太郎	Kentaro Takase	Member

The experiments that imitate wear in pump impellers were performed, in which various physical values such as outlet pressure, suction pressure, flow rate and motor current were acquired simultaneously. Three impellers with various wear amount and a normal one were tested. Similarity Based Modeling (SBM) was applied to the data for detection of the abnormality. SBM is a non-parametric modeling method that makes a model of a certain state by sampling vectors that consists of various physical values at the same point in time. By this analysis the abnormality was detected clearly and the degree of that corresponded to the wear amount. Moreover sensitivity of this method was clearly high comparing to the normal method which monitors the level of each values.

Keywords: condition monitoring, pump impellers, multivariate analysis, Similarity Based Modeling,

1. 背景

日本保全学会では平成 18 年度以降「状態監視技術の高度化に関する調査検討分科会 (CMT 分科会)」を設置し、海外調査、文献調査、検証・確認試験等を通じて状態監視技術及び状態基準保全に対する様々な調査、検討を行ってきた。平成 22~23 年度 CMT 分科会 (第 3 フェーズ) までは主に回転機器の異常検出技術として振動診断、電磁診断、潤滑油分析等の高度化に関する検討が行われてきたが、平成 24~25 年度 (第 4 フェーズ) では監視対象を回転機器を含むサブシステムに拡張し、圧力や流量といった各種プロセス量を用いた状態監視技術を検討することがテーマとなっている。本研究は保全学会 CMT 分科会第 4 フェーズ 2 年目における技術ワーキンググループの活動として行われたものであり、ポンプインペラの摩耗の検出を対象に、圧力・流量・モーター電流等のデータを複合的に分析する手法の適用性を検証したものである。

2. インペラ摩耗模擬試験

2.1 試験条件

Fig.1 に試験ループの概要と取得物理量、Fig.2 に試験に使用されたポンプの外観を示す。

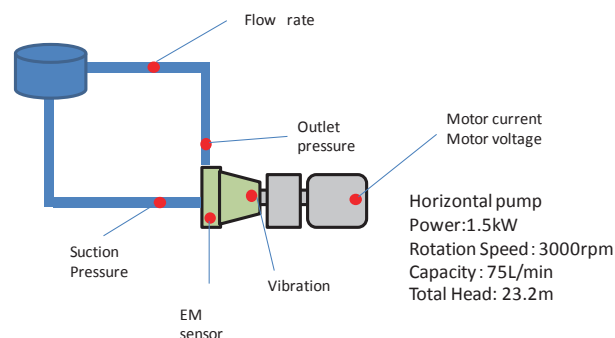


Fig.1 Schematic of the test loop and sensors

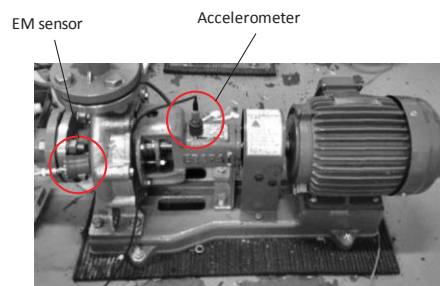


Fig.2 Horizontal pump

連絡先: 角皆学、〒110-0008 東京都台東区池之端
2-7-17 井門池之端ビル 7F、電話 03-5814-5350
E-mail:tsunokai@iiu.co.jp

本試験では摩耗を模擬したインペラを装着したポンプを運転し、各種センサにより物理量を測定する。

インペラの摩耗については、実機において摩耗が発生するライナリングとの接触部について旋盤加工により均一に切削加工を施した。摩耗模擬インペラは摩耗量の違う3体を用意し、加えて正常なインペラについても試験を行った。

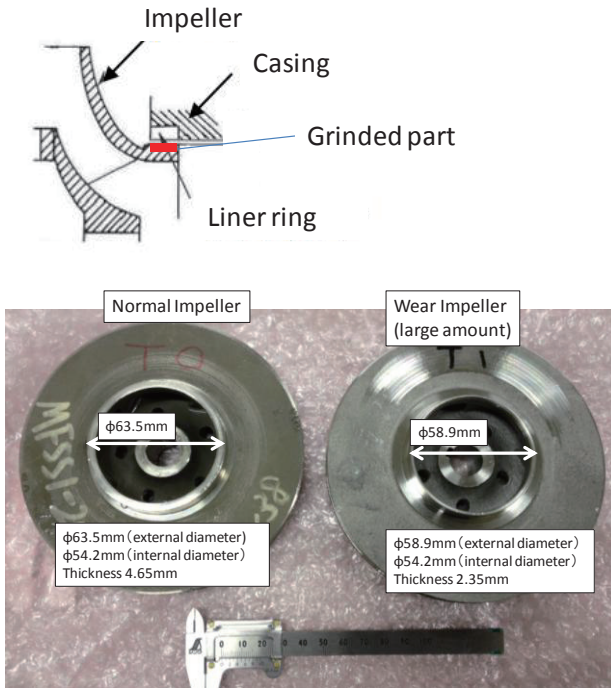


Fig.3 Test Impellers

運転状態のばらつきを模擬的に導入するため、各インペラにつき6通りの圧力で運転を行った。圧力は出口側に設置された圧力計表示を目視で確認しながら圧力調整弁により調整した。Table 1に各インペラの加工部の厚さ及び運転時の圧力条件を示す。試験条件はインペラ4通り×圧力6通りの計24条件である。

Table 1 Experimental Conditions

Impeller	Thickness	Outlet Pressure (Mpa)
Normal	4.65mm	0.190
Wear Small	3.95mm	0.192
Wear Middle	3.25mm	0.194
Wear Large	2.35mm	0.196
		0.198
		0.200

各条件につき5回のデータ収録を行った。1回のデータ収録はTable 2に示す7種の物理量を20kHz・10秒間の同時サンプリングで行った。

Table 2 Measurement Conditions

Sampling conditions		Measured data
Sampling Rate	20kHz	Suction Pressure
Sampling Time	10sec	Outlet Pressure
		Flow Rate
		Electromagnetic Field
		Vibration Acceleration
		Motor Current
		Motor Voltage

2.2 試験結果

各インペラごとのそれぞれの物理量の信号レベルの平均値を以下に示す。(圧力6条件は運転条件のばらつきとして1つのインペラデータに含まれている) エラーバーはそれぞれの条件における標準偏差を示している。

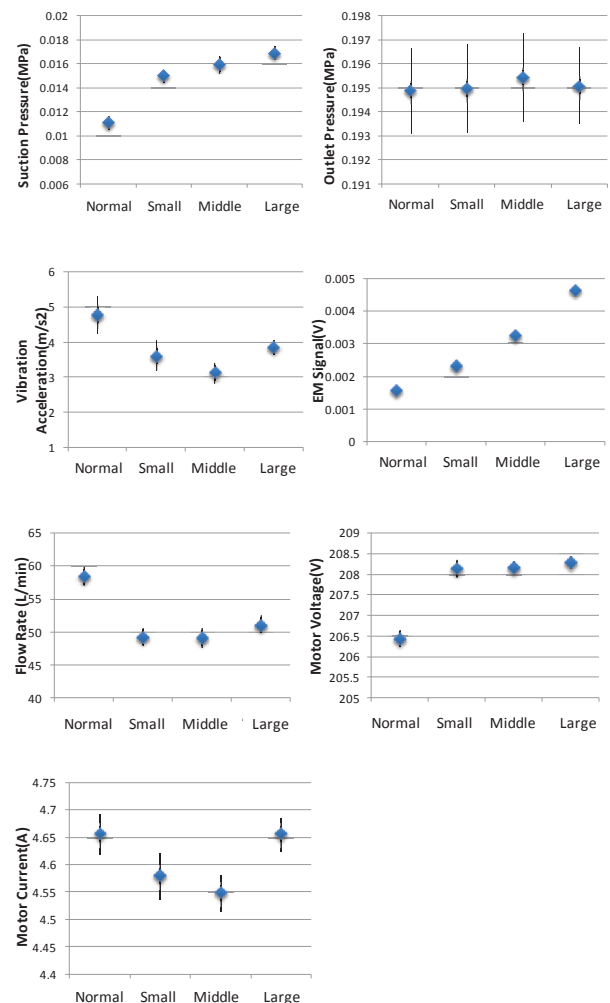


Fig.4 Signal Levels

Fig 4 から明らかなように、圧力による値の変化（エラーバー）が小さく、インペラの摩耗量による変化が大きいのはインペラ付近のケーシング部に設置された EM センサの値であり、単点で見た場合最も良い指標となっている。

EM センサは磁石とコイルで構成され、センサ設置部付近の磁場変化を電圧として検出するセンサであるが、今回の試験では切削加工によりインペラごとに磁化の状態が大きく変化したと考えられ、これが結果に反映している可能性があるため摩耗検出の指標とすることは適切でない。ただし実際のインペラ摩耗においても摩耗量に応じて一定の磁化変化が発生するとすれば、EM センサによる測定は有効な手段となり得る。

以上の考察から、以降の多点分析を行う上では EM センサ以外の 6 物理量を用いることとした。

2.3 Similarity Based Modeling の適用

ここで複数のセンサのデータを 1 つのセットとして扱う Similarity Based Modeling を適用し、インペラの摩耗を検出する手法を検討する。本手法は過去の CMT 分科会の調査で取り上げた手法を参考にしている^[14]。

まず正常時のある時刻 t_i における m 個の物理量のセットを 1 つのベクトル $\mathbf{x}(t_i)$ とし、正常時のばらつきをカバーできるだけの複数時刻のベクトルからなる行列を正常時のモデル \mathbf{M} とする。

$$\mathbf{M} = [\mathbf{x}(t_1), \mathbf{x}(t_2), \mathbf{x}(t_3), \dots] \quad (1)$$

ここである時刻の物理量のセット（実測値） \mathbf{y} を正常時のモデル $\mathbf{x}(t_1) \sim \mathbf{x}(t_n)$ の一次結合で予測することを考える。つまり $\mathbf{x}(t_i)$ に係る重みを w_i とするベクトル \mathbf{w} を用いて式(2)のよう \mathbf{y} を推定する。

$$\mathbf{y}_{est} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{w} \quad (2)$$

この \mathbf{w} を以下の式から求める。

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{v}}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = (\mathbf{M}, \mathbf{M})^{-1} \cdot (\mathbf{M}^t, \mathbf{y}) \quad (4)$$

なお、ここで (\mathbf{A}, \mathbf{B}) は

$$(\mathbf{A}, \mathbf{B})_{ij} \equiv (\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_j) \quad (5)$$

で定義される演算とする。また $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$ は 2 つのベクトルの相関を評価する演算とし、ここでは(6)式を用いた。

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle = \frac{1}{1 + |\mathbf{a} - \mathbf{b}|} \quad (6)$$

(6)式で相関を 0 から 1 の正の値として表現していること及び(3)式でサンプルベクトルの係数の合計を 1 とする規格化を行っていることから、正常時のモデル $\mathbf{x}(t_1) \sim \mathbf{x}(t_n)$ 間の内挿の範囲内のみ推定可能となり、逆にその範囲から逸脱した場合は異常として評価することが可能となる。

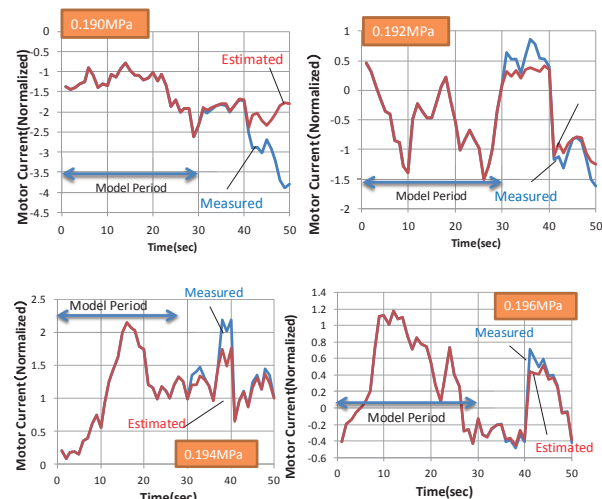
ここでは正常インペラの取得データの一部を使用して正常時のモデルを作成した。モデルには全ての圧力条件のデータを含めており、このモデルを使用してインペラ摩耗の検出性を評価する。

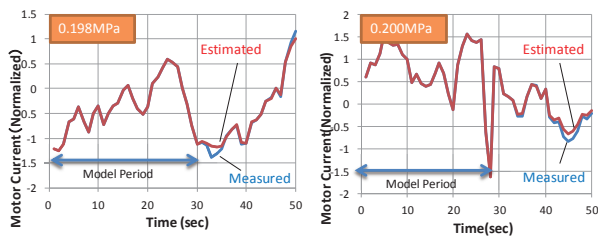
Normal						Small Wear						Middle Wear						Large Wear											
P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P						
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6						
NORMAL MODEL																													

Each cell represents 1 acquisition

Fig.5 Used data for model making

Fig 6 に本手法による実測値と推定値の比較例として、正常時インペラ、モーター電流の例を示す。グラフにはモデル作成期間も含まれており、モデル作成期間内では推定値と実測値は完全に一致する。モデル作成期間外では、モデル作成期間内での変動範囲から逸脱する場合に特に正しく推定できていない傾向があることが分かる。





**Fig.6 Comparison of measured and estimated value
(motor current at normal impeller)**

Fig 6 はモーター電流のみを図示したが、推定は6物理量を組み合わせたベクトルとして得られる。モデルからの逸脱の度合いを評価するため、実測ベクトルと推定ベクトルの差 residual r を(7)として定義する。

$$r = |y - y_{est}| \quad (7)$$

それぞれのインペラについて r を評価した結果を Fig7 に示す。なお Normal の値はモデル作成期間以外の正常時のデータに対して評価を行ったものである。

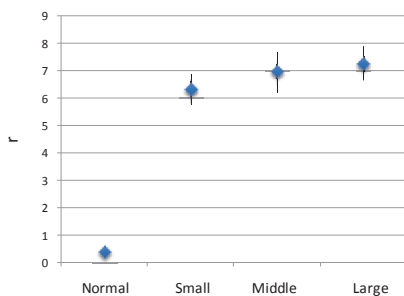


Fig.7 Comparison of Residual Values

正常時データとの差異が明確に現れており、さらに摩耗量が大きいほど差が大きくなる傾向が見られる。

次に正常時との差が正常時の標準偏差の何倍であるかをそれぞれの物理量と、SBM による residual を比較した結果を Fig.8 に示す。

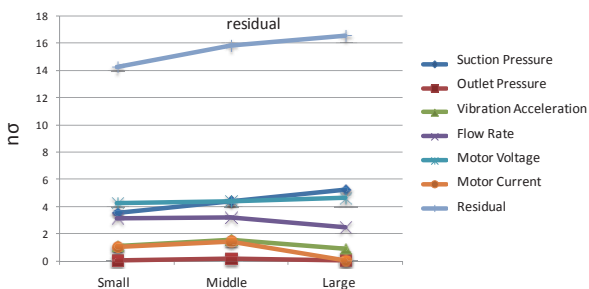


Fig.8 Comparison of Sensitivity

単点の正常時の標準偏差からの逸脱度を評価する通常のしきい値監視に対し、正常時に複数物理量を使用してモデル化を行い、推定値と実測値との差を評価することで検出性が高くなっており、本手法の有効性が示されたと云える。

3 まとめ

本手法では、正常時の複数物理量をベクトルとしてモデル化することで、任意の実測値に対しモデルベクトル間の内挿の範囲内での推定が可能となる。

これにより正常時と同様の変動は推定の範囲内に収まり、そこからの逸脱を感度高く捉えられることが示された。

本インペラ摩耗模擬異常では、入口圧力の増加として現れることを予め把握しておけば通常の単点のしきい値監視でも検出可能であるが、様々な異常に対するベクトルの状態を記録することで、異常種類の特定までを含めた高度化が可能になり、データを蓄積するほどに複数物理量を用いる手法の利点が大きくなると考えられる。

参考文献

- [1] Stephan W. Wegerich, Robert M. Pipke, "Nonparametric Modeling of Vibration Signal Features for Equipment Health Monitoring" Aerospace Conference, 2003. Proceedings. 2003 IEEE (Volume:7)
- [2] Stephan W. Wegerich, " Similarity Based Modeling of Time Synchronous Averaged Vibration Signals for Machinery Health Monitoring" Aerospace Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE (Volume:6)
- [3] Stephan Wegerich " Similarity Based Modeling of Vibration Features for Fault Detection and Identification" Sensor Review, Vol. 25, No. 2. (February 2005), pp. 114-122