

ベイズ推定を活用した圧縮機油劣化予測モデルの開発

Development of a Model for Predicting Compressor Oil Degradation Using Bayesian Estimation

日立・(正) *吉富 翔太郎 日立・(正) 斎藤 颯 日立・(正) 太田 亮 日立・(非) 寺田 尚平

Shotaro Yoshitomi*, Hayate Saito*, Ryo Ohta*, Shohei Terada*

*Hitachi Ltd.

1. はじめに

脱炭素社会に向け、産業機械の省エネルギー化が求められている。一般製造業に占める空気圧縮機使用時の消費電力割合は 10~20%である。そのため、各空気圧縮機メーカーで効率向上に向けた開発競争が加速しており、空気圧縮機の圧縮機油を対象とした高効率化の研究が進められている。この高効率化より圧縮機油はより高温、高压等の過酷環境に曝され空気圧縮機の信頼性が低下する課題が生じるため、様々な顧客使用環境下でも安全な使用状況を担保する高精度劣化予測技術が必要となる。よって圧縮機油の劣化指標である圧縮機油の物性（全酸価）の変化を詳細に把握する必要がある。本発表では少ないデータ数で実機再現性の高い予測モデルを得るため、複数の劣化予測モデルを確率分布で推定可能な特徴を有するベイズ推定を活用した劣化予測モデルの構築手法について紹介する。

2. 実験方法

本研究では圧縮機油の物性の一つである全酸価（TAN）の高精度な劣化予測モデルの構築に向け、Fig. 1 に示す 3 ステップで研究を推進した。はじめに STEP 1 にて、内燃機関潤滑酸化安定度試験（ISOT 試験¹⁾）より、温度を環境変数とした 0 次反応に基づく反応速度論で整理し、最小二乗法に基づき温度を変数とした全酸価の劣化予測モデルを構築した。次に STEP 2 で回転ボンベ式酸化安定度試験（RBOT 試験²⁾）より、圧力と水分を環境変数とした劣化による全酸価の推移を STEP 1 で構築したモデルに追加した。最後に STEP 3 で実機運転後の空気圧縮機から取得した温度・圧力の時間変化等より劣化後の全酸価を予測した。そして劣化後の全酸価の測定データ 11 件と比較する事で劣化予測モデルの予測精度を検証した。

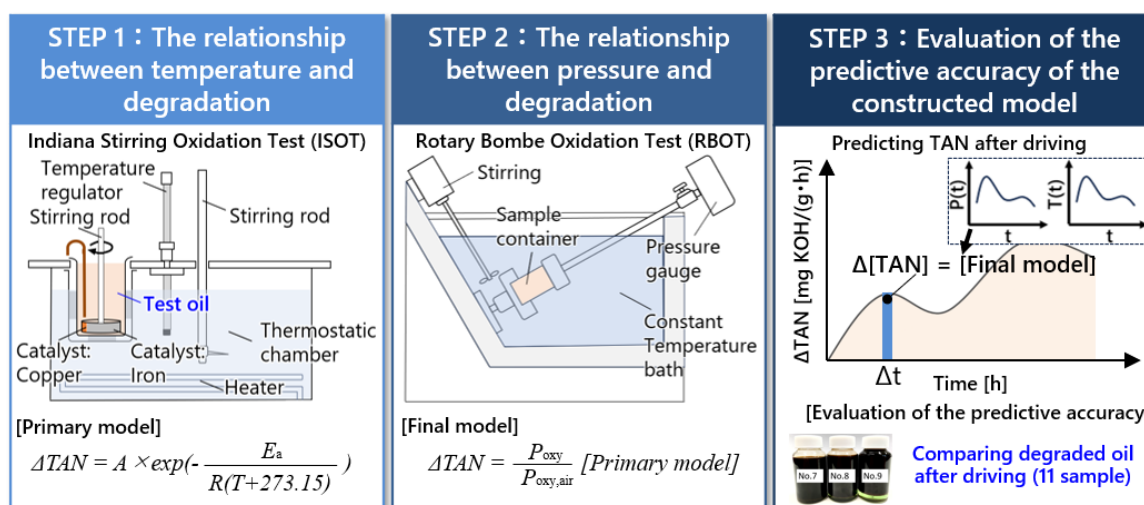


Fig. 1 Flow of construction of Air compressor oil degradation prediction model.

3. 試験結果

STEP 1 および 2 にて構築した式は式 (1) の通りである。なお水分が劣化による全酸価の推移に影響を与えなかったため、水分を劣化の環境因子より除外した。

$$TAN(t) = TAN(0) + \int_0^t \frac{P_{oxy}(t)}{P_{oxy,air}} A \exp\left(-\frac{E_a}{RT(t)}\right) dt \quad (1)$$

$TAN(0)$: 初期全酸価 [mgKOH/g], A : 頻度因子 [mgKOH/(g·h)], E_a : 活性化エネルギー [J/mol], R : 気体定数 [J/(K·mol)], T : 温度 [K]

実機運転後の空気圧縮機から取得した温度・圧力の時間変化を基に全酸価を予測し、劣化した圧縮機油 11 件の全酸価と比較する事で劣化予測モデルの予測精度を検証した。11 件の予測精度を平均した結果 58.1%となった。この時、加速劣化試験結果で最適化した、頻度因子と活性化エネルギーの値は、 $(A, E_a) = (7.22 \times 10^9 \text{ [mg KOH/(g·h)]}, 102.4 \times 10^3 \text{ [J/mol]})$ であった。

4. ベイズ推定による可能性検証

STEP 1 と STEP 2 で構築した劣化予測モデルは、加速劣化試験より未知の定数の頻度因子 (A) と活性化エネルギー (E_a) を最適化する。実機特有の油への負荷によりこれらの定数が変化すると推定した。実機特有の負荷の一例として、ロータの回転による油の分子鎖のせん断が考えられる (Fig. 2)。このような加速劣化試験にない実機特有の負荷が影響したと推定した。先述した 3 ステップでの構築は、加速劣化試験結果に対して反応速度論と最小二乗法を活用し未知の定数を最適化するため、実機の負荷を再現する事は不可能である。以上の精度低下の考察に基づき、数理モデル構築時の未知の定数の頻度因子 (A) と活性化エネルギー (E_a) の最適化手法を改良した。本研究では、データ数の少なさと実機再現性の高い解を得るためにベイズ推定を活用する事とした。手法としては、Fig. 3 に示すように加速劣化試験結果より、反応速度論とベイズ推定を活用し、11 件の実機運転後の劣化油を学習データとして活用し、最適化対象となる未知の定数の頻度因子 (A) と活性化エネルギー (E_a) の解の確率分布を導出した。そして 95%信頼区間に存在する複数の劣化予測モデルを導出し、それらの中で実機環境の圧縮機油の劣化状態の再現性が高いモデルを選定した。

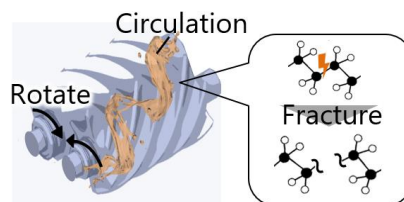


Fig. 2 Degradation factor of Compressor oil.

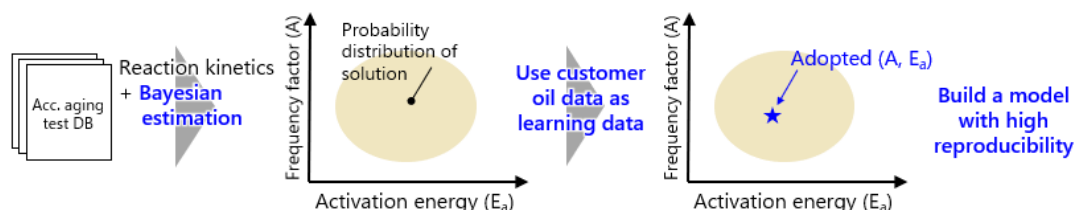


Fig. 3 Flow of constructing a mathematical model using Bayesian inference.

学習データとして使用した劣化油 11 件の予測精度を平均した結果 86.8% となり、予測精度の向上を確認した。この時の頻度因子と活性化エネルギーの最適値は、 $(A, E_a) = (2.30 \times 10^7 [\text{mg KOH}/(\text{g} \cdot \text{t})], 83.7 \times 10^3 [\text{J/mol}])$ であった。劣化油 11 件の最小二乗法による初期モデル (Initial model) とベイズ推定による改良モデル (Improved model) の比較を Fig. 4 に示す。さらに汎化性能を検証するために、学習に使用した実機使用後のデータ 11 件以外にテストデータとして実機運転後の劣化油 3 件を用意し、予測精度を比較した。その結果を Table 1 に示す。初期モデルで導出された平均予測精度は 61.2% に対し、改良モデルでは 88.8% と高い予測精度が得られ、ベイズ推定より汎化性能の高いモデルが得られた事が示唆された。

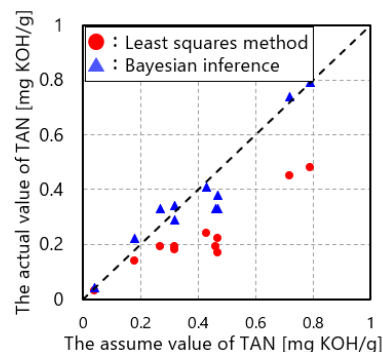


Fig. 4 Actual machine verification result.

Table 1 Prediction accuracy for 3 test data using least squares (initial model) and bayesian inference (Improved model).

Sample	Actual value (mg KOH/g)	Initial model		Improved model	
		Assume value [mg KOH/g]	Prediction accuracy [%]	Assume value [mg KOH/g]	Prediction accuracy [%]
A	0.3	0.19	63.3	0.35	83.3
B	0.47	0.45	62.5	0.39	83.0
C	0.26	0.15	57.7	0.26	100
Average	-	-	61.2	-	88.8

5. まとめ

加速劣化試験結果より最小二乗法で最適化した時の初期モデルと比較して、実機データを活用しベイズ推定で最適化した時の改良モデルで算出された活性化エネルギーは 102.4×10^3 から $83.7 \times 10^3 [\text{J/mol}]$ と減少した。この事より、加速劣化試験よりも実機環境の方が反応が進行しやすい事が示唆された。反応が進行しやすくなった原因として Fig. 2 で示したような加速劣化試験では取り込めない劣化加速因子が空気圧縮機の実機で作用したと推定される。今後さらなる高精度な圧縮機油の全酸価の劣化予測モデル構築に向け、ロータの回転による油の分子鎖のせん断等の環境因子も取り込み検討を継続する。

6. 文献

- 1) JIS K 2514-1 : 2013 潤滑油-酸化安定度の求め方- 第 1 部 : 内燃機関用潤滑油酸化安定度
- 2) JIS K 2514-3 : 2013 潤滑油-酸化安定度の求め方- 第 3 部 : 回転圧力容器式酸化安定度
- 3) WOLFRAM SCHNABEL 著, 相馬 純吉訳, 高分子の劣化 -原理とその応用-