

2026年度 JPECフォーラム

ファウリング解析モデル開発

2026年5月12日

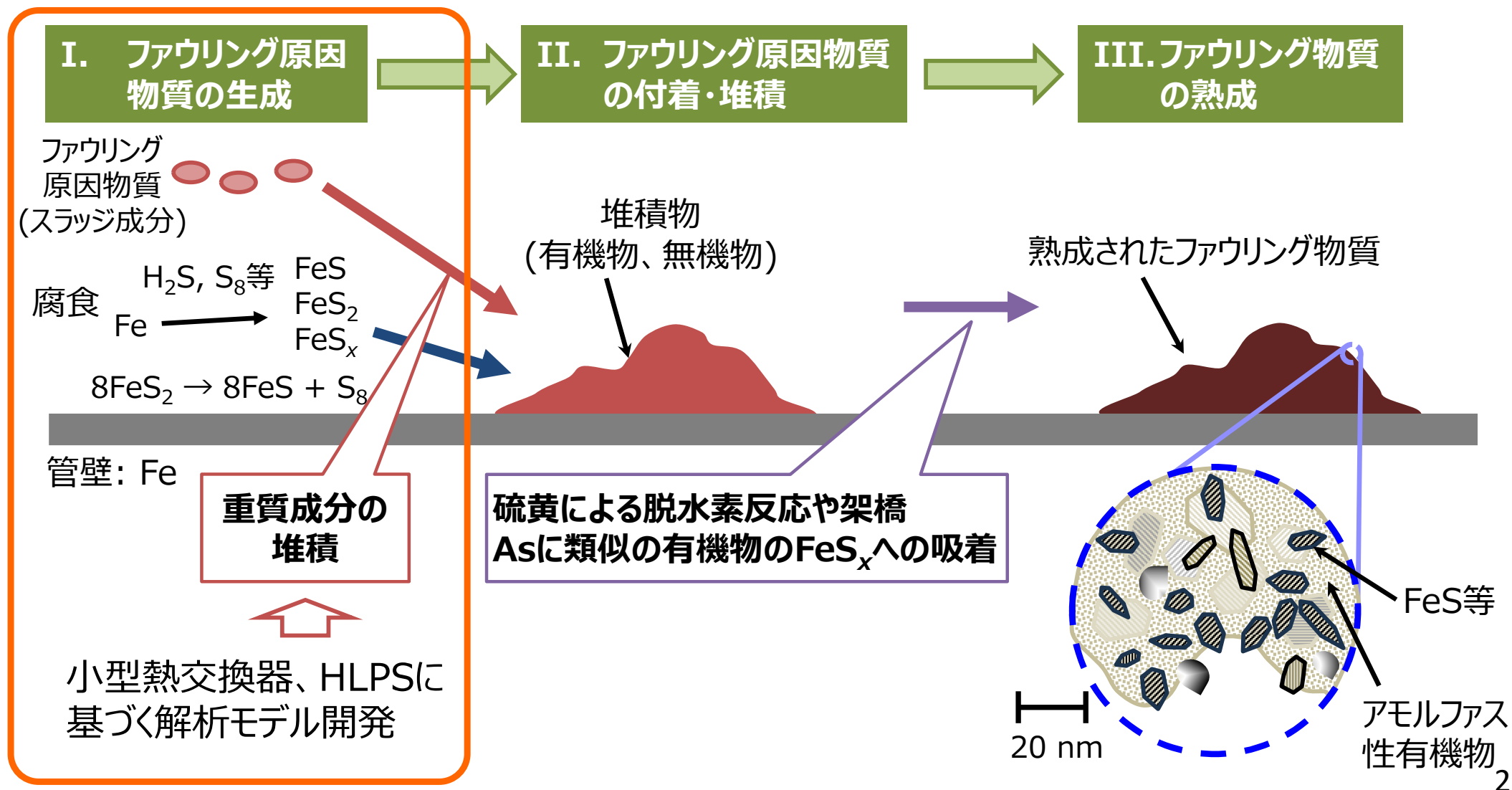
JPEC ペトロリオミクス技術研究室

1. ファウリング生成機構の体系的整理
2. ファウリング解析モデル開発の目標
3. 試験機によるファウリングデータの採取
4. ファウリング解析モデルの構築
5. まとめ

1. ファウリング物質生成機構の体系的整理

➤ これまでの検討よりファウリング物質生成機構を体系的に整理し、ファウリング形成には初期段階の解析が重要であると考察した。

⇒熱交換器試験(卓上型評価装置・1Lスケール、試験用の小型熱交換器・40Lスケール)を行い、MCAM(Multi Components Aggregation Model)を用いたファウリング解析モデルの開発を行った。



2. ファウリング解析モデル開発の目標

- 分子レベルでのファウリング物質生成機構に基づき、原油や重質油の熱交換器におけるファウリング状態をシミュレーションする技術(ファウリング解析モデル)の開発を目指す。

熱交換器内でのファウリング物質生成過程のイメージ

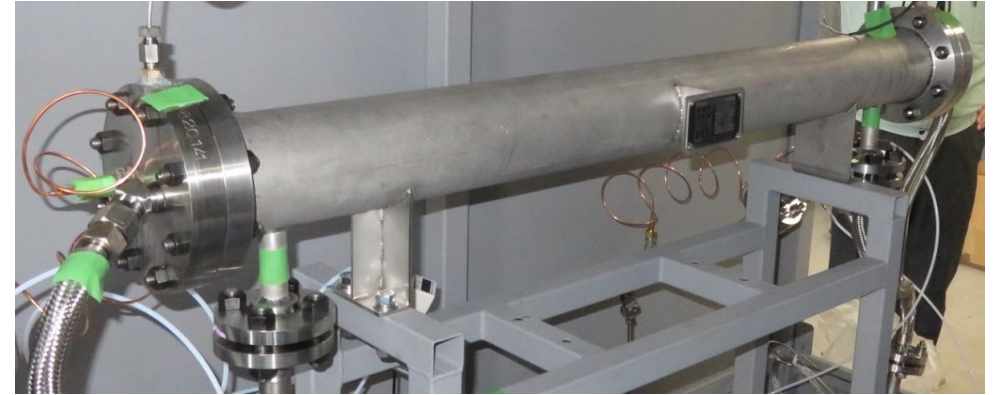


- 製油所熱交換器では年単位で運転を継続し、原油種やその構成が日々変化するため、上記生成過程を運転データよりシミュレーションすることは困難

試験用の小型熱交換器、卓上型評価装置の試験データより、伝熱係数低下を評価するファウリング解析モデルを構築した。

3. 試験機によるファウリングデータの採取

①各ファウリング試験機の特徴



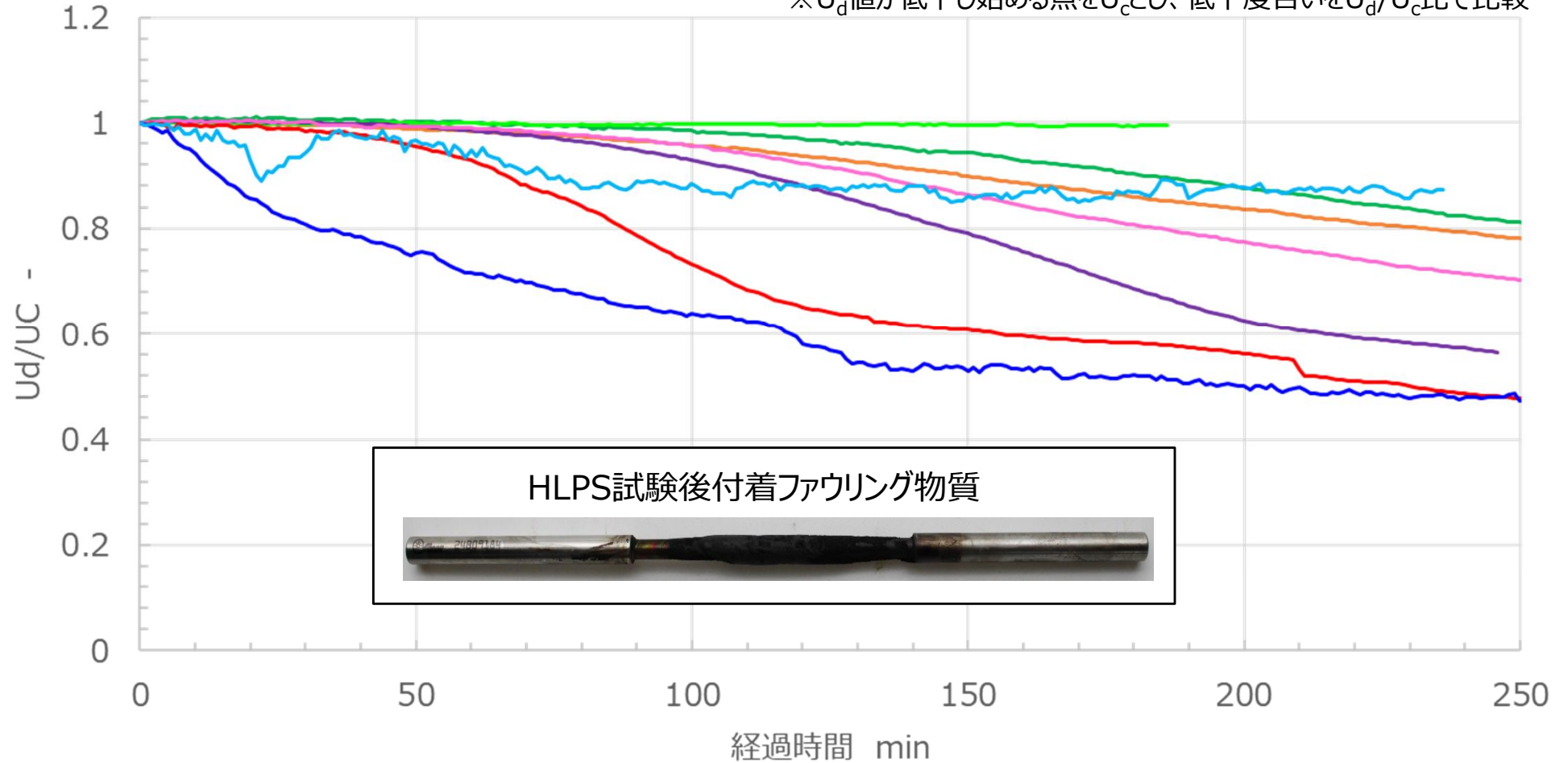
卓上型ファウリングテスター(HLPS装置)	小型熱交換器
<ul style="list-style-type: none">•実機と形状の乖離大(内径数mmの二重管型)•流速が遅い(層流状態)•試験油の供給はワンパス方式	<ul style="list-style-type: none">•形状が実機に類似(多管型)•実運転に近い条件での試験が可能•流速が調整可能(層流～乱流状態)•試験油の供給はマルチパス方式

- HLPS(Hot Liquid Process Simulator)装置によりファウリング影響因子を評価し、小型熱交換器の試験条件を決定した。
- 小型熱交換器結果とHLPS装置結果を比較し、類似性について確認した。

3. 試験機によるファウリングデータの採取

②HLPS装置によるファウリング評価結果（例）

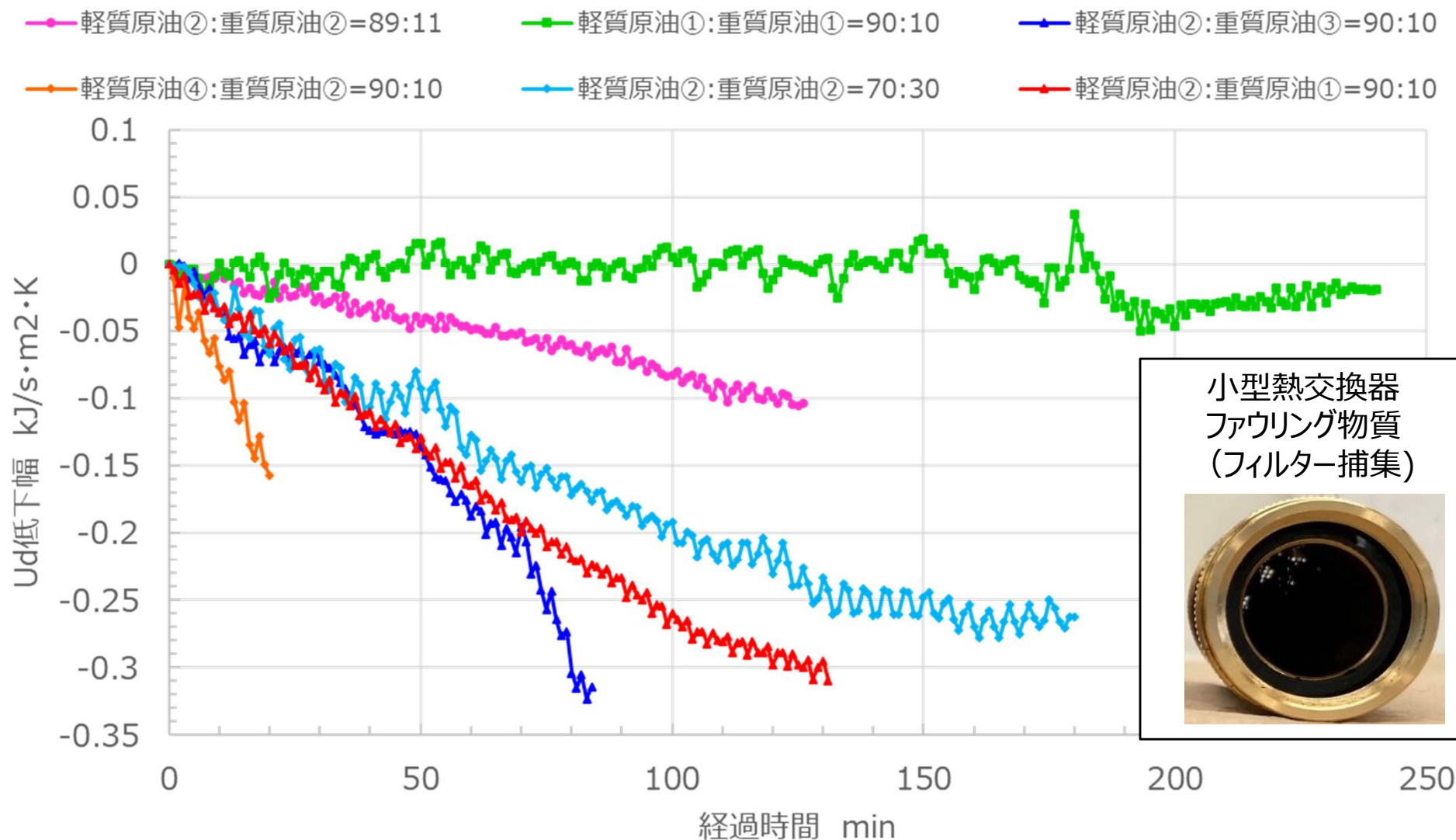
— 軽質原油①:重質原油①=90:10 — 軽質原油②:重質原油②=89:11 — 軽質原油②:重質原油②=70:30 — 軽質原油②:重質原油①=90:10
— 軽質原油②:重質原油③=90:10 — 軽質原油④:重質原油②=90:10 — 軽質原油⑤:重質原油②=90:10 — 中質原油④:重質原油②=90:10
※ U_d 値が低下し始める点を U_c とし、低下度合いを U_d/U_c 比で比較



- HLPS装置を用い、単品原油・混合原油について総括伝熱係数(U_d)を求め、小型熱交換器で試験可能な油種・条件を選定した。

3. 試験機によるファウリングデータの採取

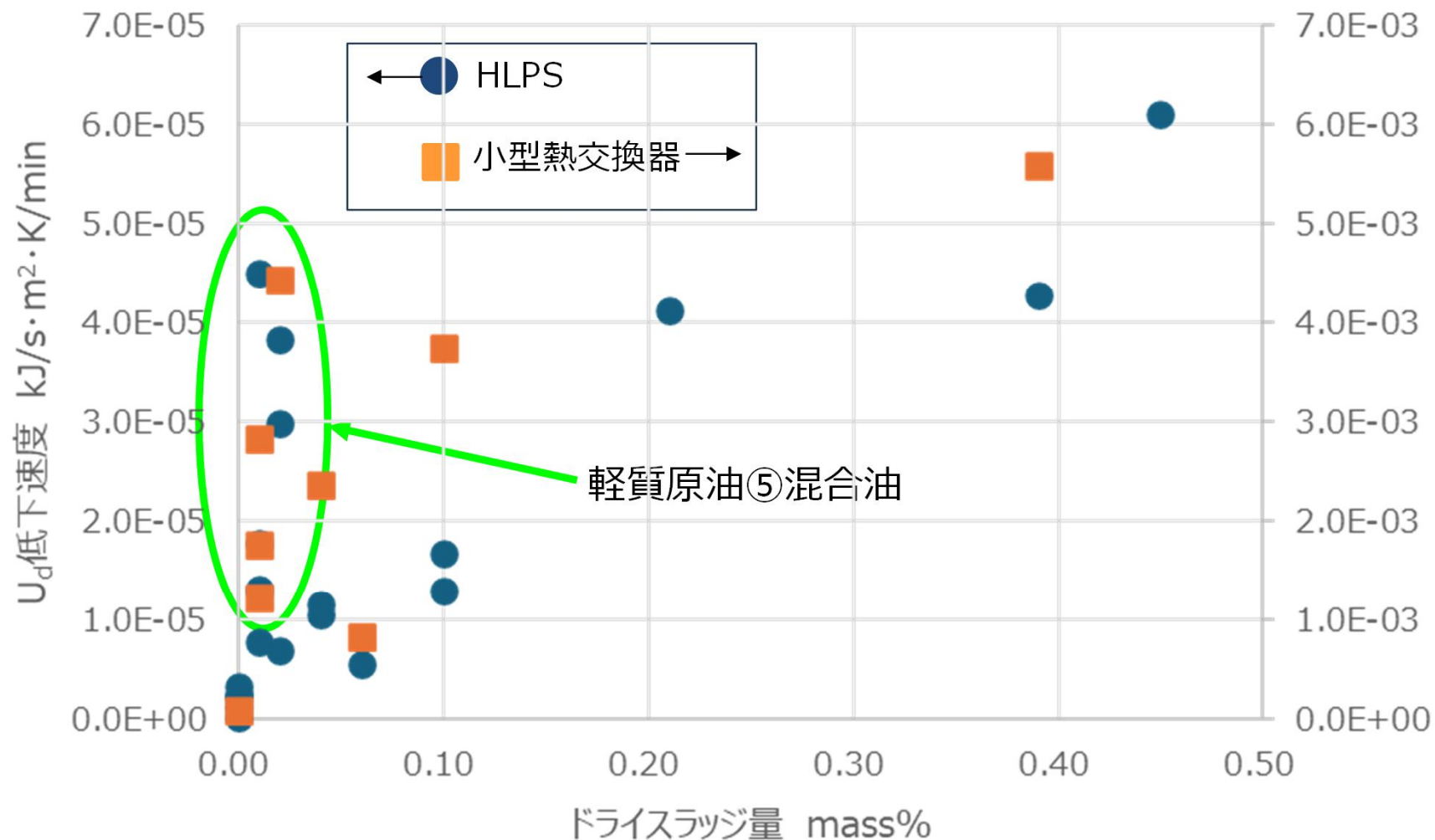
③小型熱交換器によるファウリング評価結果（例）



- U_d が最大になった点を初期値 (U_c) とし、 U_c からの経時変化より U_d 低下速度を求め、各油種を比較した。

3. 試験機によるファウリングデータの採取

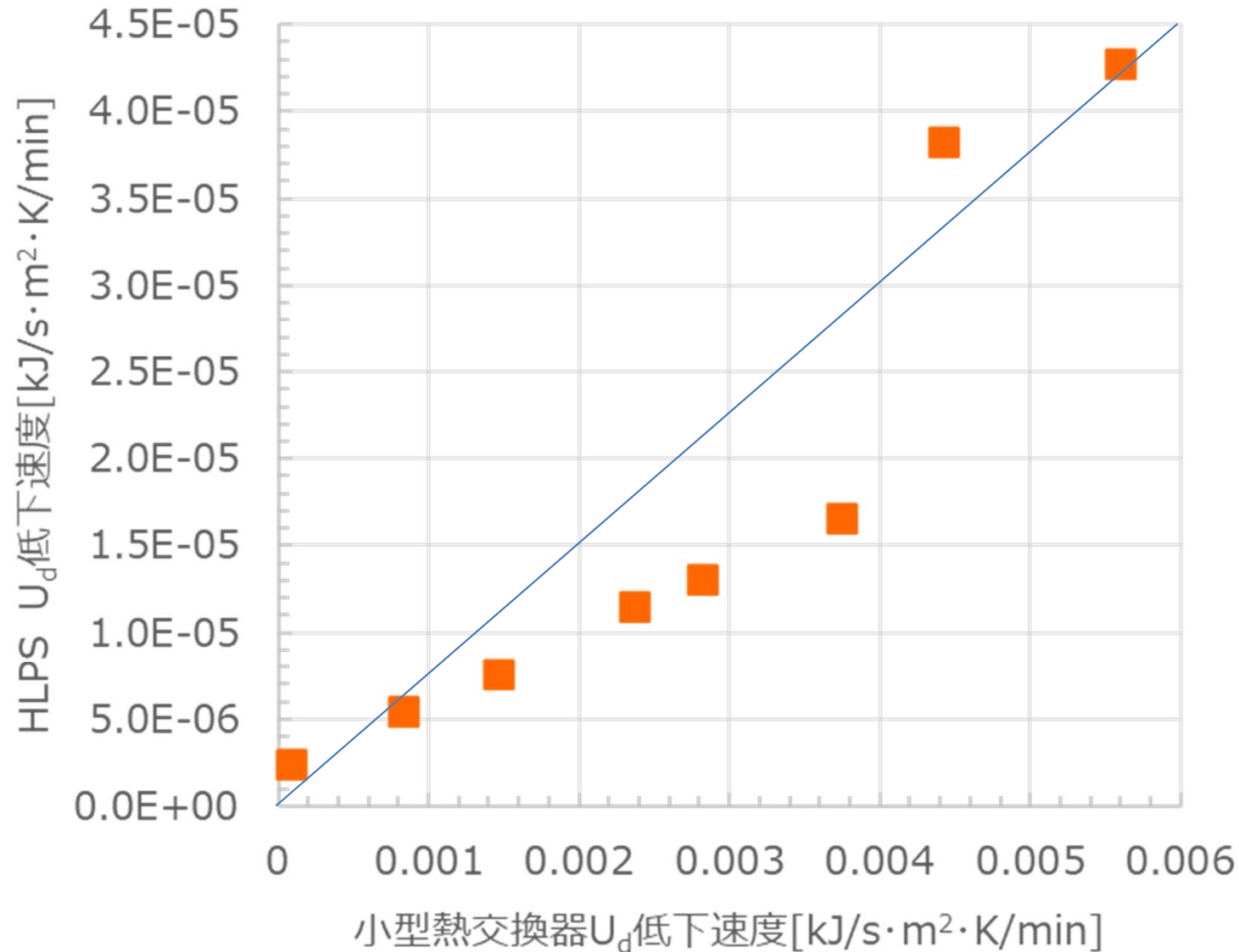
④ ドライスラッジ量と U_d 低下速度の関係



- U_d が最大になった点を初期値 (U_c) とし、 U_c からの経時変化より U_d 低下速度を求め、ファウリングと相関の高いドライスラッジ量と比較した。
- 絶対値は異なるが、小型熱交換器・HLPSとも、ドライスラッジ量と U_d 低下速度が概ね比例関係にある一方、軽質原油⑤を含む混合油は比例関係から外れていた。

3. 試験機によるファウリングデータの採取

⑤ HLPSと小型熱交換器の相関



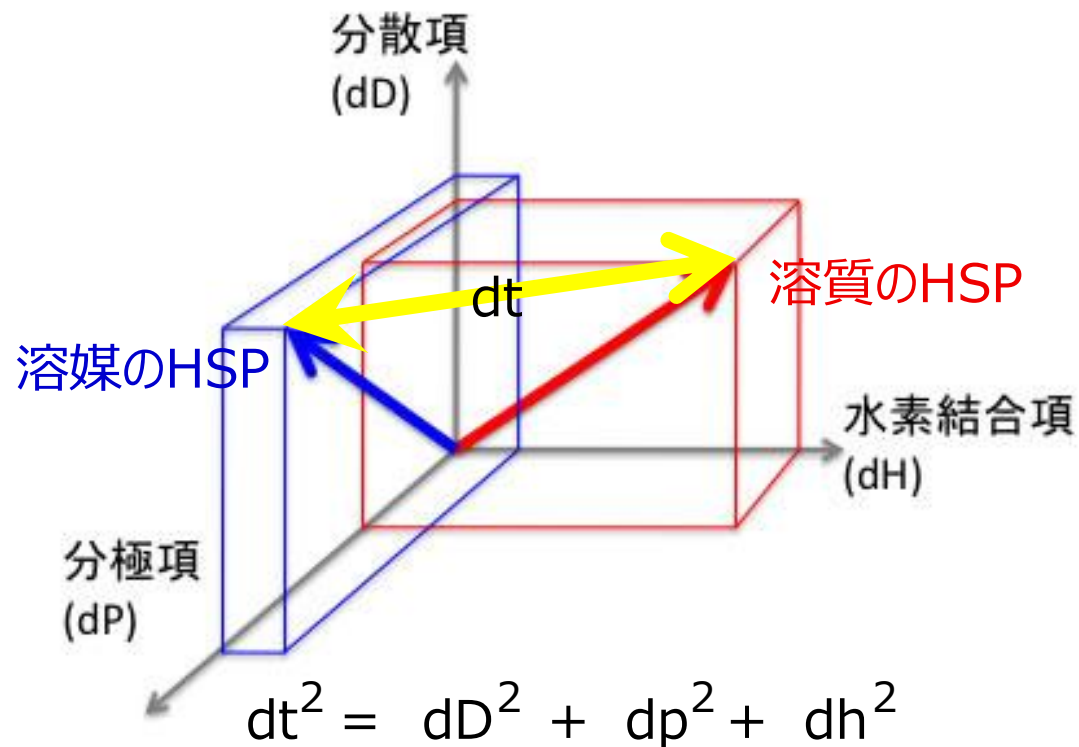
- HLPSと小型熱交換器の U_d 低下速度はほぼ比例関係があり、HLPSの結果から多管型熱交換器の傾向予測が可能と推察された。

4. ファウリング解析モデルの構築

①基本コンセプト

➤MCAM(系内の分子を液相/凝集相/固相に分類するモデル)より推算した積算固相量を用いることで、組成情報からファウリング挙動を評価できるモデルを構築する。

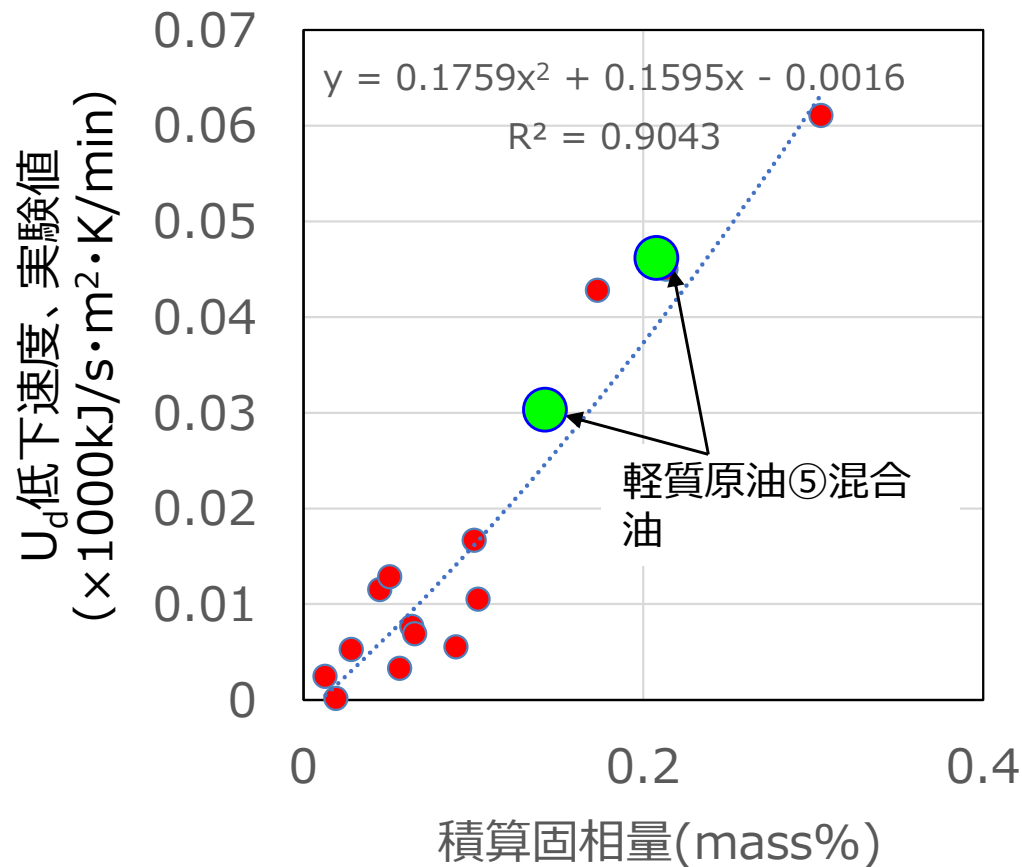
- 詳細組成構造解析により得られた全組成・構造から、融点とHSP値を推算して計算に使用
- 各成分の溶解/凝集/析出の判定は、凝集度 (DAgg) に従い決定
DAgg = f (液相のHSP値と対象分子のHSP値の差、濃度、温度)
- ハンセン溶解度パラメータ (HSP) :
 - ・溶解度パラメータを3次元ベクトルで表現
 - ・ハンセン溶解度パラメータの差が小さいと溶解、大きいと凝集/析出



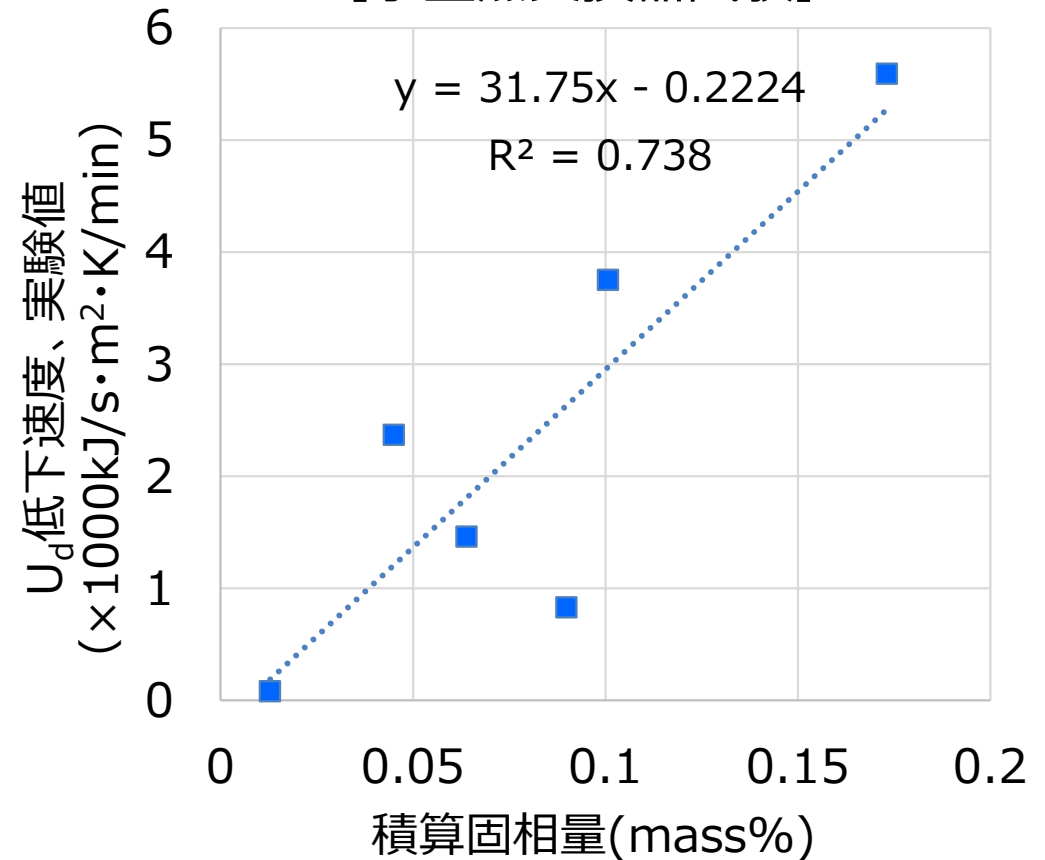
4. ファウリング解析モデルの構築

②積算固相量と U_d 低下速度の関係

【HLPS試験】



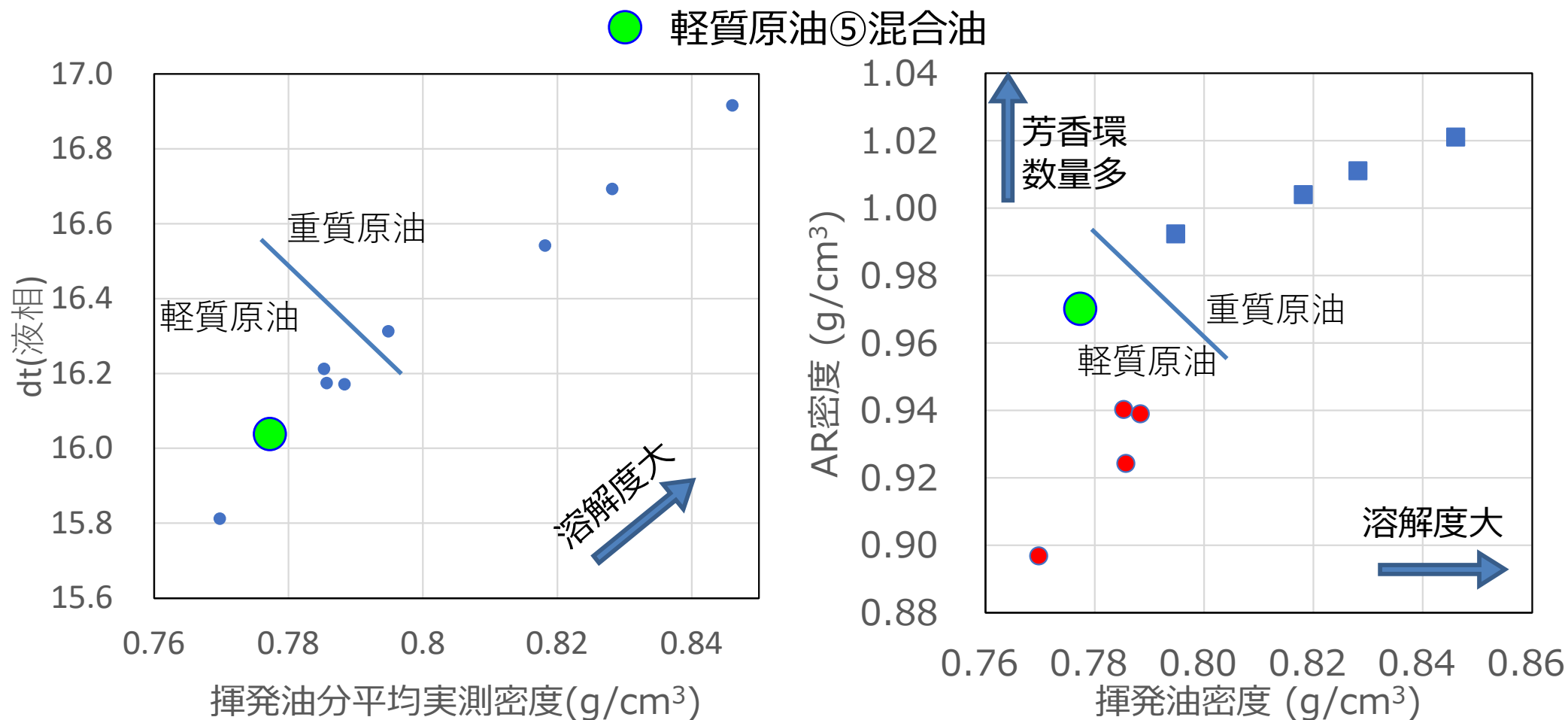
【小型熱交換器試験】



- 積算固相量値と U_d 低下速度の間に比例関係が見られた。
- ドライスラッジ試験において比例関係から外れていた軽質原油⑤混合油にも相関性が見られた。
- 小型熱交換器試験は点数が少ないため、試験結果を積み上げた上での精度確認が必要と考える。

4. ファウリング解析モデルの構築

③物性比較



- 軽質原油⑤は、溶媒としての溶解機能が低く、他の軽質原油に比べて芳香環数の多い成分(低溶解性成分)を多く含んでいた。
- 固形成分の析出が速く、微細な析出が起こりやすいと推察されるが、析出性との関係説明が必要。

4. ファウリング解析モデルの構築

- MCAMより求めた固相析出量より、 U_d 低下速度の推算式を得た。

$$U_d \text{低下速度} = f(X) \quad X: \text{ファウリング原因物質の生成量}[\text{mass}\%]$$

⇒MCAM計算より固相量を算出

- 小型熱交換器の場合：

$$f(X) = 31.75X - 0.2224$$

- HLPS試験機の場合：

$$f(X) = 0.1759X^2 + 0.1595X - 0.0016$$

- ✓ 原油DBシステム提供先である石油会社においても、MCAMを活用して本モデルを使用することが可能。
- ✓ JPECは、小型熱交換器・HLPS試験のファウリング評価に関するノウハウ、知見やファウリング物質の分析結果やファウリング理論などの基礎的知見を活かしサポートしていく。

5. まとめ

- 小型熱交換器・HLPS装置を用いたファウリング試験を行い、ドライスラッジ量と U_d 低下速度が概ね比例関係にあることを見出した。
- MCAMを活用することで、原油の組成情報から U_d 低下速度を評価するファウリング解析モデルを開発した。
- 解析モデルにおいては、ドライスラッジ量測定値と U_d 低下速度が比例しない原油においても相関が見られたが、今後更に試験結果を積み上げた上での精度確認が必要。

謝辞

本研究は経済産業省・資源エネルギー庁の
補助事業として実施されました。
ここに記して、謝意を表します。