

INCREASED SHEAR, REDUCED WALL TEMPERATURES, USE OF hiTRAN WIRE MATRIX INSERTS IN SYSTEMS SUBJECT TO FOULING

汚れ問題のあるシステムにhiTRAN立体ワイヤーを挿入した場合の壁面ずり応力と壁面温度

p. Droegemuller¹ W. Osley¹ and D. PhiUpp²

¹ Cal Gavin LTD, Minerva Mill Technology Centre, Station Road, Alcester, B980PW, UK

Peter.Droegemueller@calgavin.com, William.Osley@calgavin.com

² Technische Universität Braunschweig, Institut efor Chemical and Thermal Process Engineering (ICTV)

要約

汚れの特徴は熱と流体力学境界層の特性に大きく影響される。本報は hiTRAN のような管側伝熱促進素子が、壁面温度と壁面ずり速度の両方に影響する道具として使えることを述べる。レーザー・ドップラー速度計実験装置と hiTRAN ワイヤ素子の壁面ずり速度の直接測定が提示された。これらの測定結果は CFD シミュレーションで、検証された。これらの結果良い一致を示し、この種の挿入体の適用は壁面せん断応力の増加を示している。hiTRAN 素子を熱交換器設計で使用する主たる動機は、管側伝熱の大幅な増加である。熱伝達の上を上げる直接的な結果として、管壁面温度が変化し、さらに汚れ挙動を変える。実際に原油の汚れのシナリオに使用された hiTRAN は、壁面せん断応力を低下し、壁面温度を低下させることで、この工程の全体的な負荷を改善する。

緒言

研究の中心は、汚れ挙動を決定する因子を確認するために実施されてきた。その結果準経験的な汚れのモデルが開発された。経時的な原油の汚れ挙動を記述するために、Ebert&Pannchal モデル

(1997) とその変化系が成功裏に適用された。これらのモデルは管側流体の化学反応汚れとみなして開発された (Wilson et al., 2012)。閾値条件に達するための管挿入体を使用した幾つかの研究も提案されて

いる (Mengyan et al., 2012)。この種のモデルの共通項は、堆積と抑制の折り合いである。脱塩装置下流の原油の汚れは、より高い温度で増加する汚れ成分の化学反応による化学反応汚れであると特定されている。この堆積条件は流体の境膜温度に大きく影響される。この抑制の条件は、汚れの堆積と既に形成された堆積物の除去に、壁面応力がどのように影響するかで決まる。

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (1)$$

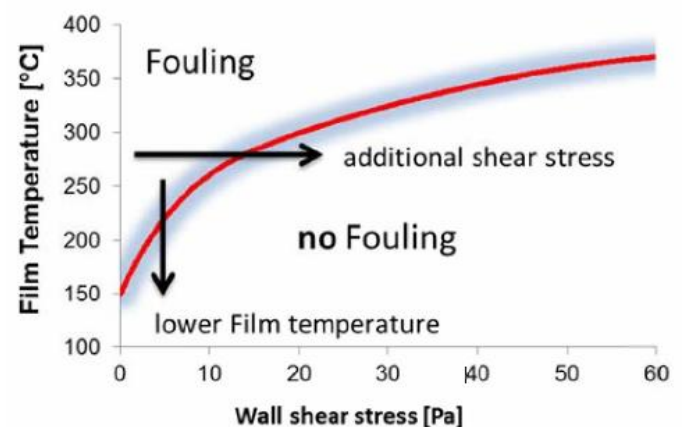


図 1. 閾値モデル：ずり応力の増加と境膜温度の低下

図 1 に示したように、何もしなくてもこの種のモデルは、技術プロセスの中での境膜温度と壁面ずり応力のみで、完全な汚れの抑制の出来ることを示している。汚れの因子、 α 、 β 、 γ および活性化エ

エネルギーEaは、実験またはプロセスデータから決定されるものである。

空洞管の熱交換器委設計では、プロセスと形状と物性条件によって、壁面温度と壁面温度の変数が決定される。hiTRAN 管挿入体は、これら2つの変数に対し、有益に影響するために用いることが出来る。

hiTRAN ワイヤー立体素子

hiTRAN 技術（図2）は、効果的に管側流の乱流増加をするため用いられる。主たる適用範囲は層流と遷移領域であるが、システムが追加の圧力損失を許容する場合、乱流領域でも用いられる。挿入体の充填密度を変化することで、圧力損失と伝熱性能は、プロセス条件に合わせる事が可能である。既にこの種の挿入体は、汚れ対応に適用され成功している。（Gough et al., 1995, Ritchie et al., 2007）



図2. 典型的な hiTRAN ワイヤー立体素子.

伝熱における壁面温度の影響

単相流試験装置による管側伝熱測定が、広い範囲の充填密度をもつ hiTRAN の管側性能を測定するために実施された。

図3は高・低2つの充填密度の hiTRAN 挿入体の伝熱性能をレイノルズ数の関数として示している。全範囲の hiTRAN 形状の伝熱と圧力損失のための、熱的と流体性能データは、CalGavin 社からソフトウェア hiTRAN.SP として提供されている。層流領域では1.6倍、乱流領域でも2から4倍の伝熱性

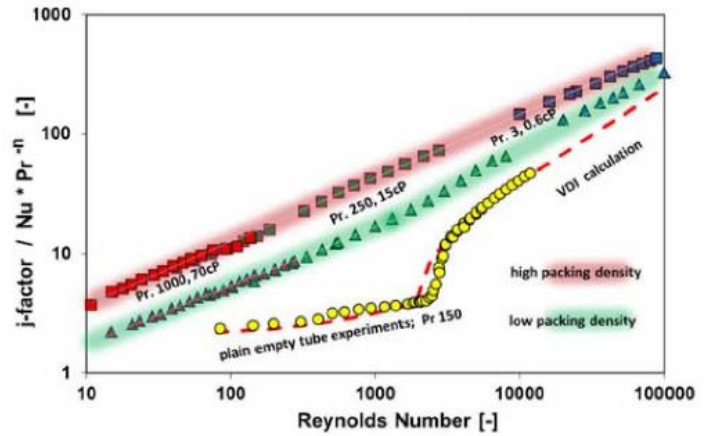


図3. 典型的な2つの密度の hiTRAN の伝熱性能

能の増加が観察できる。壁面抵抗と汚れ層（抵抗）を無視すれば、壁面温度は次のように表せる。

$$T_w = T_o - \left(\frac{h_i}{h_i + h_o} \right) \cdot (T_o - T_i) \quad (2)$$

管側の伝熱係数が増加すると、壁面温度は管側の平均温度に近づく。管側熱せられる場合、より低い壁面温度が達成できる。管側熱伝達の増加は、図1における汚れ無しの領域に移動するのに役立つ。

hiTRAN の壁面せん断応力

空洞管の場合、壁面せん断応力 τ_w は、圧力低下 Δp に直接関係する。

$$\tau_w = \frac{4 \Delta p D}{L} \quad (3)$$

管挿入体を採用した場合、挿入体の形状による抗力とせん断応力によって、相当量の圧力低下が誘発される。これら力は、圧力低下の測定に基づく、壁面せん断応力を決定するものであることが知られている。本報では、3つの独立した測定方法と、hiTRAN 挿入体の存在する場合の管壁面せん断応力の計算方法を記述する。

流速場の測定による壁面せん断応力の計算

壁面剪断応力は、管壁の近くの流速場と直接関係している。:

$$\tau_w = \eta \frac{du}{dy} \quad (4)$$

レイノルズ数の異なる空洞管と中間の密度を持つ挿入体の壁の近傍の詳細な測定が実施された。この結果は図5に示されている。

層流状態の標準化された空洞管の速度勾配 du/dy は、 $\sim 0.2 : 1/s$ 程度と測定され計算されている。レイノルズ数3000の繊維状態流れでは、この値は約 $0.275 : 1/s$ である。hiTRANのある場合はより急勾配で、表1のように、空洞管に比べて、2.9倍も高い壁面せん断応力を生成する。

表1. ある挿入体形状を持つ場合のせん断応力の倍率

Reynolds	$du / dy [1/s]$	Multiplier [-]
100	0.4	2
500	0.55	2.75
3000	0.8	2.9

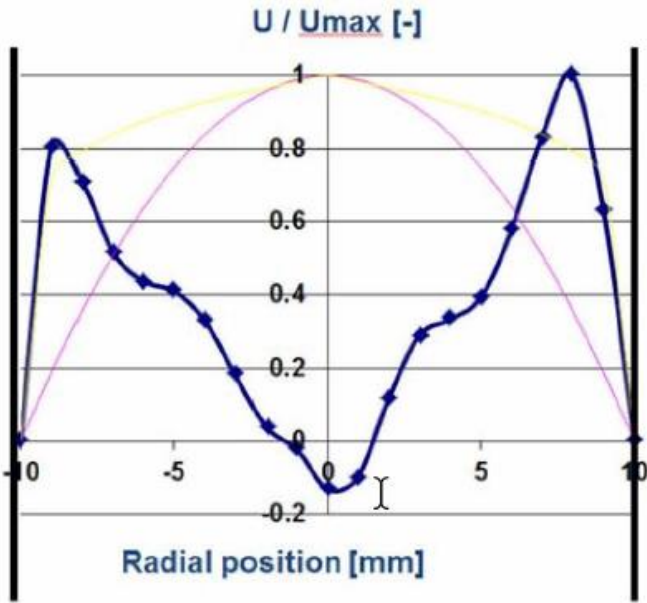


図4. レイノルズ数500で、hiTRANを挿入した標準速度のプロフィール 空洞管：黄色線—乱流、ピンク線—層流のプロフィール

Smeethe等の(2004)のレーザー・ドップラー速度法(LDV)データが、再評価された。彼らはhiTRAN挿入体のすぐ下流の速度プロフィールを測定した。トレーサー用のアルミニウム粒子がスリップ無しに流体に加えられ、2重交戦レーザーが当てられた。この技法で、トレーサー粒子の速度が測られ、流速のプロフィールが測定された。流速のプロフィールは、測定されたレイノルズ数条件下でも層流に比べて、その管壁面で、より急な速度勾配 du/dy を示している。(図4)実際に、レイノルズ数500における壁面近くのhiTRANの速度勾配は、ほぼ乱流状態と同じであった。

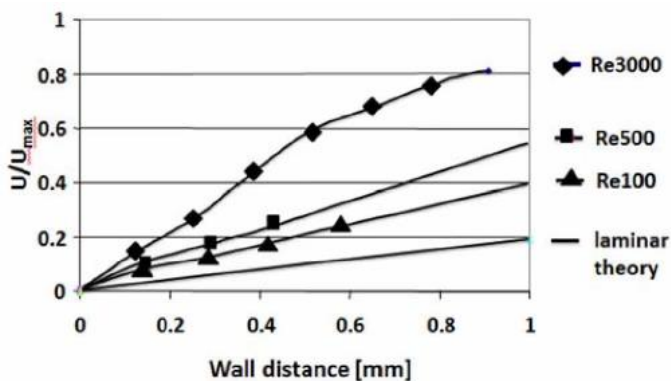


図5. レイノルズ数の異なる一定密度の挿入体と空洞管理論値の数近傍の速度プロフィール

挿入体に掛かる力の測定による壁面せん断応力計算

別々に組み立てられた実験装置で、挿入体全長に及ぼるせん断応力が測定された。

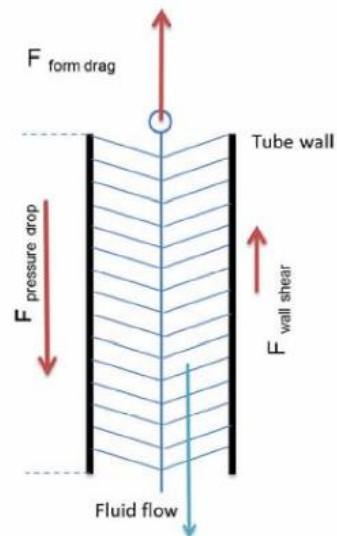


図6. hiTRAN挿入体を加えた場合の壁面せん断応力の増加を決定するための測定原理

この組み立てにおいて、挿入体は、いかなる突き出しの圧力無しで、そのループが管壁に丁度触れているような方法で、設置される。大きな流量範囲を測定するために、水と水—グリセリンの混合物が使用された。ロードセルは挿入体に流体の流れによって加わる引っ張り力を測定する。(図6)加えて、挿入体長さ全体への圧力損失も測定される。全体の壁面せん断応力は、式5によって計算できる。

$$F_{\text{wall shear}} = \Delta p \cdot A_{\text{cross section}} - F_{\text{form drag}} \quad (5)$$

壁面せん断応力 (τ_{wal}) は、測定されたせん断力 ($F_{\text{wall shear}}$) を、挿入体の占める管表面積で割り算することで、計算される。個々の形状をもつ挿入体の無次元数壁摩擦係数は、次式によって計算することが出来る。

$$f_W = \frac{2 \tau_W}{\rho u^2} \quad (6)$$

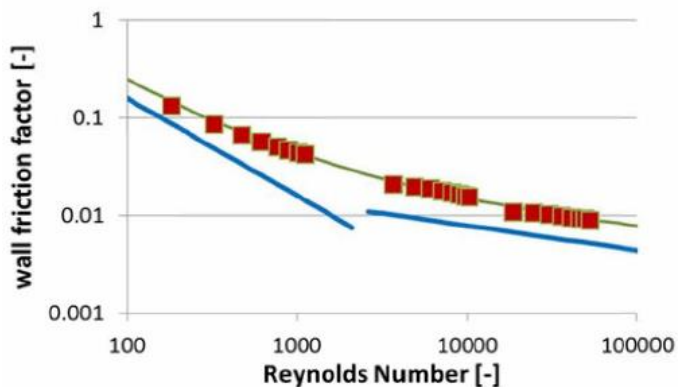


図7. あるhiTRAN形状の測定された扇形 (Fanning) 壁面摩擦係数と空洞管のデータのレイノルズ数との関係

この手法を使うことにより、hiTRAN挿入体の無次元壁面摩擦係数は、測定が可能で、図7に示した空洞管の摩擦係数と比較される。

このデータポイントをつなぐことで、各挿入体形状の摩擦係数の相関性を見つけることが出来る。図8. には空洞管と比較して、壁面せん断力が倍率として表されている。青色と赤色の間の面積は、低密度から高密度のhiTRANが作用する範囲である。

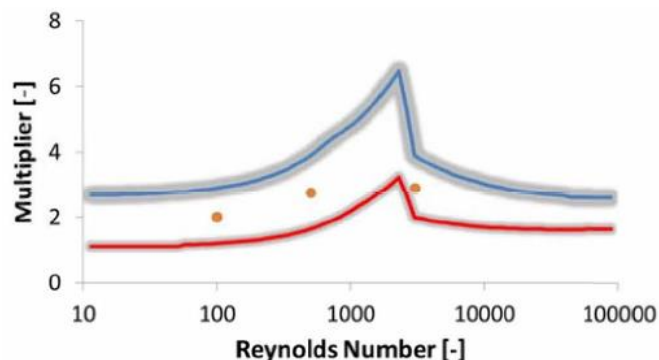


図8. hiTRAN挿入体を使った場合のせん断力倍率 赤色低位線は低密度、青色の上位線は高密度hiTRAN使用、黄色の点はLDV実験値

図8. に見られるように、最高の増加は層流と乱流の遷移状態の直前に認められる。ここでは空洞管と比較して、7倍のせん断力が測定されている。表1のレーザー実験による中密度の測定データも、この結果とよく一致している。

CFDによる壁面ずり応力

2つの実験方法とは別に、CFDがこの挿入体の流動挙動を計算するために採用された。本報で用いたCFDソフトウェアには、ANSYS CFXが使用された。挿入体の形状は、ANSYS設計モデラーで描画された。メッシュを容易に切るための幾らかの単純化が実施された。その形状はそしてANSYSメッシュソフトウェアを使ってメッシュ化された。メッシュの独立性の検証は、個々の形状に適用され、十分に精度の高いモデルであることが確認された。せん断応力移送 (SST : Shear Stress Transport) 乱流モデルが、その値がk- ϵ 乱流モデルに比べて壁面近くでより正確な値となるまで、乱流領域で用いられた。

計算は等温条件下で実行され、物性、形状、プロセス条件は、せん断力実験とほぼ同じであった。図9は典型的な層流の計算値を示したもので、壁面近傍で急激な速度勾配を持つところが、LDV測定プロフィール (図4) と非常に良く似ている。

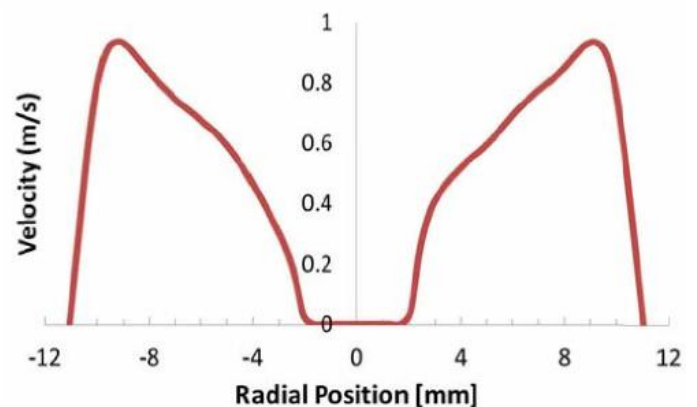


図9. CFDシミュレーションによる速度プロフィール レイノルズ数 1000

この局所的な壁せん断応力の計算結果と測定データは、全体の管表面積に対して積算される。この結果はCFD計算による平均せん断応力である。図10には、補

正壁面せん断応力が、CFD計算の別個のデータポイントと比較して、レイノルズ数の関数として比較されている。

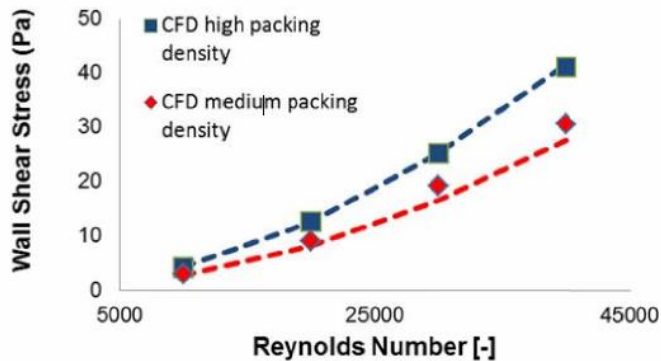


図 10. 測定データの補正壁面せん断応力と CFD シミュレーション：中密度（赤点線）と高密度（青点線）
hiTRAN

高密度挿入体の CFD 計算値は、補正測定値と非常に良く一致している。中密度の挿入体の場合、CFD 計算値は極わずかであるが測定データを上回っている。測定データに対する CFD シミュレーションの確認により、次の段階では各部位におけるせん断応力を研究することが出来る。空洞管の壁面応力に比べて、hiTRAN 促進管は管壁面に沿って変化する。図 1 1 には中密度の挿入体の 2 つの隣接したループの間のせん断応力を示している。

せん断応力は直接ループワイヤーの上部でピークとなり、ワイヤーの後は最低値となる、このことは水粒子分散液の実験によって確認することが出来る。図 1 2 には、幾らかの粒子が、ループの後ろの低いせん断部分に堆積しているが、原理的に空洞管部分の堆積が大きいことは明らかである。

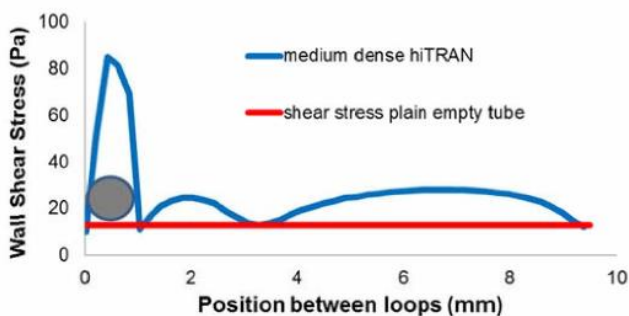


図 1 1. 隣接した hiTRAN ループ間のせん断力分布
水、流速 2.06m/sec レイノルズ数 30000



図 1 2. 水分散流。平均粒径：50 μ 比重：2420kg/m³

またループワイヤーの直後の最も低いせん断応力をシミュレーション結果、空洞管と同じレベルである。（図 1 1 の赤線）

事例：VDU（真空蒸留残渣）供給熱交換器

壁面温度と壁面せん断応力に影響し、汚れ挙動を変えるために、hiTRAN 挿入体が用いられている例が発見される。

2 系列の AES 型 Feed/Effluent 熱交換器の改造適用で、hiTRAN 立体ワイヤー素子を取り付けられた。これらの熱交換器では、管側流体（VDU 供給）は、加熱炉に入る前に約 300°C にまで加熱される。設計条件の下で、この熱交換器はレイノルズ (Re) 数 ~6000 の遷移状態領域で運転される。この熱交換器の総括伝熱係数は管側流速である。胴側の真空残渣は、予熱 VDU 供給によって、350°C から冷却される。

この熱交換器は 0.4m/s 程度の低い設計速度で、その結果、低い管側境膜係数と高い壁面温度、長い流体滞留時間と低い壁面せん断応力に晒される。低い管側の摩擦による圧力降下も、バンドル内の流体分布の不良のリスクを大きくしている。



図 1 3. 汚れた AES 型 VDU/供給熱交換器の調査

図 1 3 は 1130 日運転後の汚れた空洞管熱交換器を示している。管側の汚れと胴側の汚れが観察された。hiTRAN 伝熱システムを挿入する前に、この熱交換器は洗浄された。hiTRAN 挿入後の管側許容圧力損失は、70mbar と計算された。誘発されたせん断応力は 0.43Pa から 0.75Pa に増加した。さらに重要なことは、管側熱伝達速度は約 4 倍になり、312W/m²K から 1132 W/m²K に増加した。結果として、主たる熱伝達抵抗は胴側に移行した。hiTRAN 挿入後のプロセス情報は、10 カ月にわたって測定された。両方を比較するために、最初の 300 日間のみが評価のために用いられた。最初の構成では管側律速であり、hiTRAN システムが著しく伝熱に効果的である範囲にある。この熱交換器の測定された総括伝熱係数は、約 40% も増加した。(図 1 4)

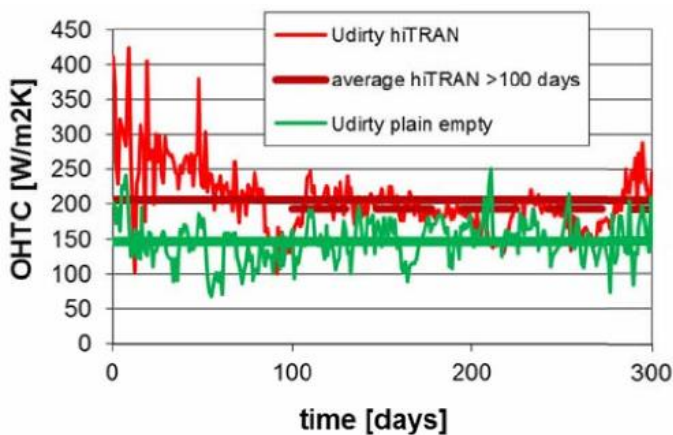


図 1 4. 空洞管と hiTRAN システムの総括伝熱係数の推移

管側伝熱係数が増加すると、管側の壁面温度の低下が期待される。

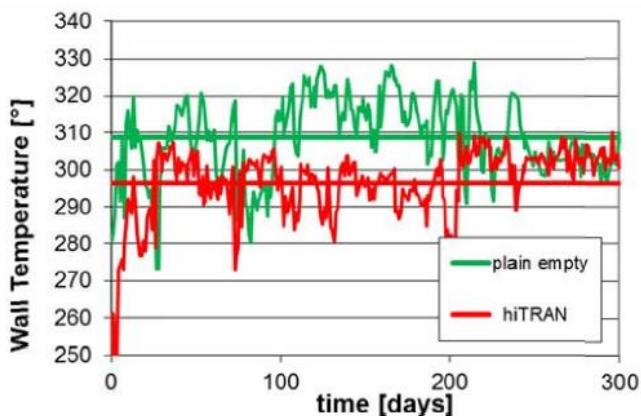


図 1 5. hiTRAN 挿入前後の管壁面温度

平均の壁面温度は空洞管の管温度に比べて、13°C 低くなっていた。より大きいのはピーク時の値が 330°C から 310°C になっていることである。(図 1 5)

表 2. hiTRAN 挿入前後の諸条件

Geometry	Plain empty	hiTRAN
TEMA Type	AES	
Shells in Series	2	
Tube geometry	1416 x 19.05mm OD x 6096mm	
No of tube passes	2	
Process		
Averages over time [days]	1130	300
Shell side flow [kg/s]	28.6	25.6
Tube side flow [kg/s]	33.4	30
Shell side in/out Temp [°C]	347 / 293	343 / 286
Tube side in/out Temp [°C]	256 / 294	268 / 309
Duty [MW]	3.79	3.54
EMTD [°C]	41.2	18.3
Average tube wall temp. [°C]	309	296
Tube side HTC [W/m ² K]	312	1132
Shell side HTC [W/m ² K]	647	602
Tube side velocity [m/s]	0.34	0.31
Overall coefficient [W/m ² K]	147	206
Tube side Reynolds [-]	4842	5018
dp calculated [bar]	0.09	0.7
Wall shear [Pa]	0.43	0.75

300 日間の汚れ係数が計算され、hiTRAN 挿入と以前より長い期間とが比較された。図 1 6 では初期の汚れは空洞管に比べて同じような挙動に見える。今後 2 年間で汚れのジャンプを経験するか、hiTRAN 素子の挿入で避けることが出来るかが興味あるところである。この期間の運転で、熱交換器の伝熱量増加による加熱炉の負荷減少による便益は既に得られている。

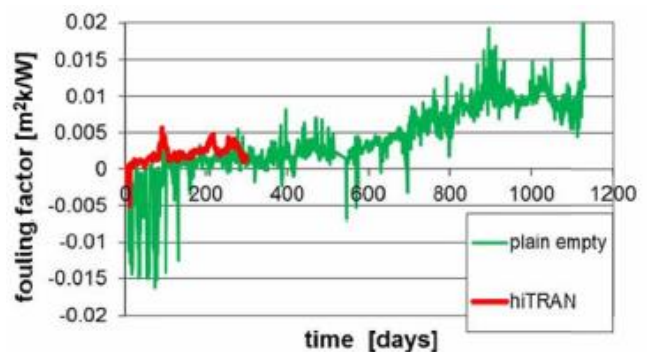


図 1 6. 空洞管と hiTRAN 運転の汚れ係数の推移

まとめ

本報では、空洞管に置き換えて hiTRAN 管挿入体の使用によって壁面温度と壁面ずり応力の状況の変化の可能性について議論した。汚れ閾値モデルのためには、この2つの変数の情報は、期待される汚れ速度の決定するために必要である。

壁面ずり応力はこの流動状態で、7倍に増加できることが示された。壁面ずり応力を測定するための、異なった実験装置が提案され、非常に良い一致を示した。測定の結果は、CFD シミュレーションの結果とほぼ一致した。これらのシミュレーションは、挿入体ループ間の部分のずり応力を研究するのに理想的であり；微粒子状汚れの実験結果と定性的な一致を再び示した。

熱交換器性能に対する強い影響は、熱交換器の改造シナリオで説明された。hiTRAN の評価のための全体運転期間は、促進材の挿入による汚れの挙動の効果を明確に結論付けるには短すぎた。それでも総括伝熱係数の増加から得られるプロセスへの便益は明らかとなった。

熱交換器が低流速で動いており、全ての入手できる圧力損失を利用できない場合、たとえば、小さな推進温度差のために1パス構成採用している熱交換器には、その乱流形成のために、hiTRAN システムは現実的な選択肢である。多くの汚れの負荷に対する、hiTRAN の適用効果の信頼性を提供するため、十分な研究は完了しました。管挿入体の存在がある場合、汚れの速度挙動に追加の影響があるかを明確にするためには、更なる研究が必要です。

NOMENCLATURE (命名)

A	Area, m ²
D	diameter, m
E _a	fouling model activation energy, J/mol
F _{drag}	drag force, N
F _{shear}	shear force, N
h	heat transfer coefficient, W/m ² K
L	length, m
Nu	Nusselt, dimensionless number
n	Prandtl exponent
Δp	pressure drop, N/m ²
Pr	Prandtl, dimensionless number

R	gas constant, J/mol K
R _f	fouling resistance, m ² KAV
t	time, s
T _f	film temperature, K
T	temperature, K
u	velocity, m/s
y	coordinate, m

Greek letters

α	fouling model parameter, m ² K/J
β	fouling model parameter, dimensionless
γ	fouling model parameter, m ² K/J Pa
φ	fanning friction factor, dimensionless
τ	shear stress, Pa
η	dynamic viscosity, Pa s
ρ	density, kg/m ³

Subscript (添字)

i	inner
o	outer
w	wall

REFERENCES (文献)

- Ebert, W., and Panchal, C.B., 1997, Analysis of Exxon crude oil slip stream coking data. Proc. Mitigation of Fouling in Industrial Heat Exchanger Equipment, San Luis Obispo, USA Begell house pp.451 — 460
- Gough, M.J., I.J. Gibbard, G.T. Polley and A.S. McMullan, 1995, Case studies of refinery fouling reduction. Proc. Engineering Foundation Conference on Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchangers. California.
- Meneyan, Y., Crittenden, B. 2012, Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts, Applied Energy, Volume 89(1), pp. 67 — 73

Ritchie, J.M. , Droegemueller, P., Simmons M.J.H.,
 2007, hiTRAN Wire Matrix Inserts in Fouling Applications
 in Heat Exchanger Fouling and Cleaning VII, Eds, ECI
 Symposium Series, Volume RP5.

Smeethe, A., P. Droegemueller, J. Wood, W. Bujalski,
 2004, Fluid dynamics in a tube equipped with wire matrix
 inserts. Proc. 4th European Thermal Sciences Conference.
 Birmingham

Wilson, D.I., PoUey, G.T., Pugh, S.J.,
 2005, Proceedings of the 6* International Conference on
 Heat Exchanger Fouling and Cleaning- ECI Symposium
 Series, Kolster Irsee, Germany, June 5 — 10, Volume RP2

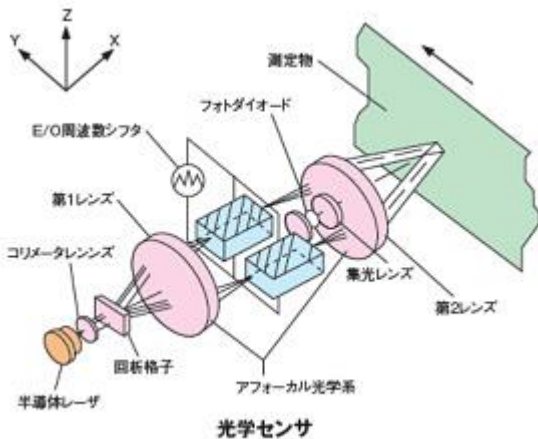
2017年12月7日 aPEC株域会社
 業務部長 酒井昭二 訳

=====

CANON レーザードップラー速度計 技術資料 <http://cweb.canon.jp/indtech/es/lineup/ldvm/technology.html>

測定原理

キヤノンLDVは、電気光学結晶を使用したE/O周波数シフタを内蔵しており、それぞれの周波数差がfRになるように周波数変調された2光束のレーザ光を入射角θで測定物に照射しています。
 測定物からの散乱光は測定物の移動により発生するドップラー効果により周波数シフトをした光となり、フォトダイオード上に生じるスペックルの干渉光は $F=2Vd+fR$ のドップラー周波数成分を持ったビート信号となり、静止状態からの測定が可能になっています。(dは対象物上で2光束が構成する干渉縞ピッチ) このドップラー周波数を信号処理することにより測定物の速度を算出しています。



この商品に関するお問い合わせ

キヤノンマーケティングジャパン株式会社 生産革新機器営業部 CB販売課

電話番号 03-3740-3336 ファクス 03-3740-3356

住所

〒108-8011 東京都港区港南2-16-6 CANON S TOWER