

## (解説 1 : hiTRAN の汚れ防止効果)

(まえがき)

熱交換器の汚れ(fouling)を「化学工学における最大の未解決問題」として捉えた、意欲的なマンチェスター大学の博士論文(2005年4月、クレメンテ.A.ロドリゲス氏)をロビン・スミス(同論文の指導教官)のご厚意で入手した。原報は8章296ページにおよぶ論文で、原油精製プロセスに起こる汚れ軽減の戦略テーマに取り組んだものである。主体は熱交換器ネットワーク全体の汚れ軽減による最適化シミュレーションに関する論文であるが、前段で汚れに関して過去の研究も含めて論じられており、非常に参考になった。興味のある方には原報とその日本語訳を差し上げられることが出来るので、連絡いただきたい。

(はじめに)

熱交換器の表面に沈着する”汚れ”は、熱効率を低下させるのみではなく、その回復のためなどのために、大きな社会的損失を引き起こしているにもかかわらず、熱交換器の設計ソフト内でも、**fouling factor**として理論的根拠のない経験的係数を設計値に加えているのみである。筆者は「交換器群のための汚れ軽減戦略」と題して、過去の研究の整理(ピンチテクノロジーに基づく手法、数学的プログラミング技術、ハイブリッド到達手法、統計的到達手法)の上に、熱交換器のネットワークのためのモデルを構築し、シミュレーション研究した論文である。シミュレーションのフレームワークは **Simulated Annealing** 呼ばれるものらしいが、その部分の解説は荷が勝ちすぎるので、前段部分の汚れの考え方とその生成機構の部分を要約し、同時に hiTRAN 伝熱促進体の効果についても考察を加えた。

(熱交換器の汚れに伴うコスト)

熱交換器表面の望ましくない堆積物“汚れ”は、もともとプロセス流体に含まれる場合と化学反応によって生じる場合の2つに分類される。汚れ発生による運転上の問題は、1) 圧力損失が増加し、遂には所要流量が確保できなくなること、2) 総括熱伝達係数が低下し、目標とする熱交換が達成出来ず、遂には洗浄のためのプラント停止を必要とすることである。したがってそのコスト(損失)は次のように多岐にわたっている。ちなみに工業化された国々における汚れに関する費用は、国民総生産の0.25%となることを見出し、1992年では450億ドル/年に達するとしている報告もある。

コストの種類	内容
資本コスト	設計段階で汚れのために低下する伝熱係数を補償する伝熱面積の増加に伴う費用。交換器だけでなく輸送、設置、基礎の費用も。(平均コストアップは35% : 25%~50%) 2重化による対応は連続運転継続を保証するが、相当のコスト増を伴う。
エネルギーコスト	熱回収の低下のための燃料の損失の他にポンプの要求する余分のエネルギーは見過ごされやすい。ほとんどの設計ではポンプシステムは大きすぎ、バルブで制御されているが、その場合原単位への影響は少ない。総エネルギーの1~5%が汚れに起因すると言われている。
メンテナンスコスト	熱交換器の洗浄のコスト(労務費、薬品代、特殊な機器)の他に、圧力上昇に伴うポンプや配管などのメンテナンスコストも含めるべき。静機器である交換器は汚れが発生すると動機器以上のコストとなることもある。
生産損失	汚れた装置を洗浄するために、処理量の低下あるいはプラントの停止による生産量の減少は、大きな金額の損失となる。2重化による生産量の確保は資本コストの増大となり、既存設備ではスペースが無く、設備出来ないことが多い。
環境コスト	回収熱量の低下は追加のエネルギー(通常は石化燃料の燃焼)の供給となるが、この炭酸ガスの放出のコストも考慮しなければならない。

汚れ改善のためには、設備改造の投資が必要となるが、その投資効率を確実なものとするためにも、もれなく汚れに起因するコストを把握することが重要である。

(汚れの分類)

一般的に汚れは；粒子、結晶化、化学反応、腐蝕、生物、凍結と 6 つの範疇に分類することが一般的に受け入れられている。

汚れの種類	生成物の内容
1) 粒子状汚れ	プロセス流体に浮遊している固形粒子が重力などで交換器表面に沈着する。
2) 結晶化汚れ	溶解塩の沈殿と沈着である。水系ではスケーリング、炭化水素ではワックス結晶の沈着、溶液の冷却、蒸発、pH の変化などによる析出など。
3) 化学反応汚れ	流体に含まれる成分の化学反応による生成物の沈着。温度により指数関数的に増加する。
4) 腐食汚れ	腐蝕汚れは交換器表面との反応汚れの 1 種であるとも定義される。熱交換器表面の何処かで形成され、堆積する場合には、粒子状流れとして捉えられる。
5) 生物汚れ	バクテリアや藻などの成長と堆積によって起こり。冷却水システムに起こる。
6) 凍結汚れ	プロセス流体がその凍結温度以下に冷却されて発生し、ワックス沈着は凍結汚れと間違われる。水冷却器での氷の生成。フェノールの結晶生成などがある。

ここでの流体は液体であること主として論じられているが、気体（ガス）であってもほぼ同様に考えられる。空気中の水分が露点以下に冷やされて、熱交換器表面に沈着する場合、定性的には結晶化汚れと同じような機構であろう。

(汚れ堆積に影響する因子)

汚れのプロセスには温度や流速、流体組成、熱貫流、表面状態など多くの因子が影響するが、これらの影響の大きさは汚れ機構に依存する。化学反応汚れの場合、アレニユースの式に示されるように温度によって指数的に増大する。結晶汚れでは臨界条件を超えた時に堆積が発生する。この時全体の平均飲んで無く、交換器の表面温度に着目すべきである。

流速は熱伝達係数に大きな影響を与えるだけでなく、汚れの堆積とその堆積物の除去にも影響し、その挙動は複雑である。大きな流速下での乱流渦は、壁面での強いせん断力で汚れを剥がす効果がある。炭化水素の化学反応汚れに対し多くの研究がなされており、過酷な汚れの起こり始める壁面温度である、“汚れ閾（しきい）値温度 (*fouling threshold temperature*)” が存在するとしている。汚れの種類ごとにモデル化し、その堆積プロセスを明確にすることが重要であり、その過程から hiTRAN のような管内挿入体の効果の期待が予想出来るであろう。

(汚れの発生パターン)

汚れは堆積物の生成と流体によるはく離の同時進行プロセスとして考えられる。正味の汚れ速度は次式のように表現される。

$$RF' = \Phi_D - \Phi_R$$

図 1 は汚れ抵抗の時間経過の幾つかのパターンである。新しいあるいは洗浄された熱交換器が運転状態に置かれた場合、その熱伝達係数は一定値を示す。この誘導期間は汚れの機構によって大きく変化し、曲線のパターンは汚れの堆積のメカニズムによって類型化出来る。直線性の汚れは堆積が変化せずに残って行く場合で、はく離する機構が無い場合である。この挙動はシリカや炭酸カルシウムのような固く固着性の堆積物であり、流体のせん断力によってはく離することはない。

最も一般的には、汚れの堆積がある程度以上になると、せん断力によるはく離とが起こり、漸近曲線となる。間欠的なはく離が起こる場合には、鋸歯状の傾向曲線が得られる。

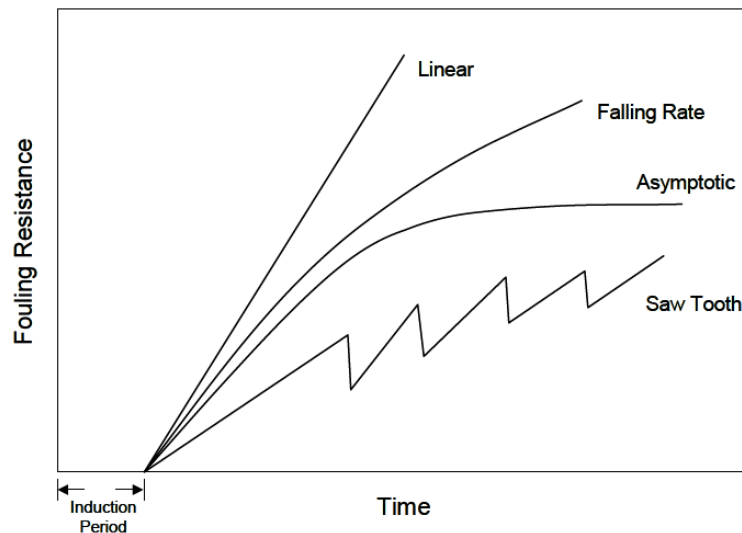


図1 汚れ抵抗の特性曲線

### (hiTRAN の機能)

それぞれの汚れのモデルに対して、hiTRAN がどのような影響を与えるかについて考える前に、この伝熱促進体が管内流体に与える効果を確認しておこう。hiTRAN とはワイヤーを特別な立体形状に編んだ素子であって、熱交換器管内に挿入することによって伝熱促進を達成する。その原理は、この管内挿入体に流体が衝突することで、層流から疑似乱流に変換されて、境膜伝熱係数を向上させるものである。この挿入体は流体移動に必要なエネルギー（圧力損失）を増加させるが、平滑管内の流速増加によって起こる乱流よりも少ないエネルギーで、境膜を消失出来る（管内壁面と中心部の攪拌効果が得られる）構造となっている。実際に壁面と中心部に注入したインキが、hiTRAN によって効果的に混合される様子の動画が、[http://calgavin.jp/about\\_hiTRAN.htm](http://calgavin.jp/about_hiTRAN.htm) に掲載されているので、ぜひ参照願いたい。そこには比重の大きな粒子を含んだスラリーの hiTRAN が沈降させること無く運んで行く動画も掲載されている。この混合効果、その結果としての伝熱係数の向上が、汚れの各モデルにどのような効果をもたらすかを、考えて行きたい。

### (汚れモデルと hiTRAN の役割)

#### 1) 粒子状汚れ

粒子汚れは、堆積とはく離の同時進行プロセスの結果とされるが、はく離は壁面での流体せん断力に依存するとされている。

hiTRAN の役割はまさにこの壁面のせん断力を大きくすることに他ならず、流体中にもともと存在する粒子のみならず、生成した汚れ成分あるいは汚れ前駆体の堆積を防ぐ意味では、以下の全ての汚れモデルに対して一定の効果を有するものである。この定性的な表現では、“邪魔ものの存在は堆積場所、詰まりの原因になる” という感覚的なイメージを払拭するのは難しいかもしれないが、先に示した動画の実験結果を見れば、壁面でのせん断力（進行方向とは直角な混合流れ）が大きく堆積を防止していることは明らかである。

#### 2) 結晶化汚れ

結晶化は、溶液の過飽和、核の生成、壁面への核粒子の成長と移動、吸着堆積、はく離、熟成の行程で進行するとされている。結晶化によって例えばワックスや塩が生成した後の hiTRAN の効果は、せん断力そのものであるが、その汚れの生成過程にも hiTRAN は抑制に寄与出来る。

過飽和状態は温度低下によって起こるのが一般的である。熱伝達係数の小さい場合には、熱貫流を保つために冷却側の温度を下げなければならないが、hiTRAN 挿入によって熱伝達係数が改善されている場合には、冷却側温度をより高くすることにより、壁面での局部的過飽和状態を避けられることが期待できる。

### 3) 化学反応汚れ

化学反応汚れは、流体中のある成分が化学反応によって可溶性前駆体を形成し、さらに不溶性汚れ物質を形成するモデルが提案されている。

化学反応速度はアレニウスの式に従って加速されたため、高い壁面温度が汚れ生成の場となる。したがって hiTRAN によって熱伝達係数が向上すると加熱側の温度を下げる事が出来るため、壁面温度を低下出来るので指数的に汚れの低下が可能となる。石油精製のプラントの予熱工程における汚れ低減の数多くの研究はなされており、化学反応汚れが無視出来るような原油の加熱条件の存在が報告されている。境膜温度と流速の間に閾値が存在するとの考え方で、化学反応で出来た汚れ物質は、堆積の前に移送流体の乱流渦によって取り除かれるとするものである。

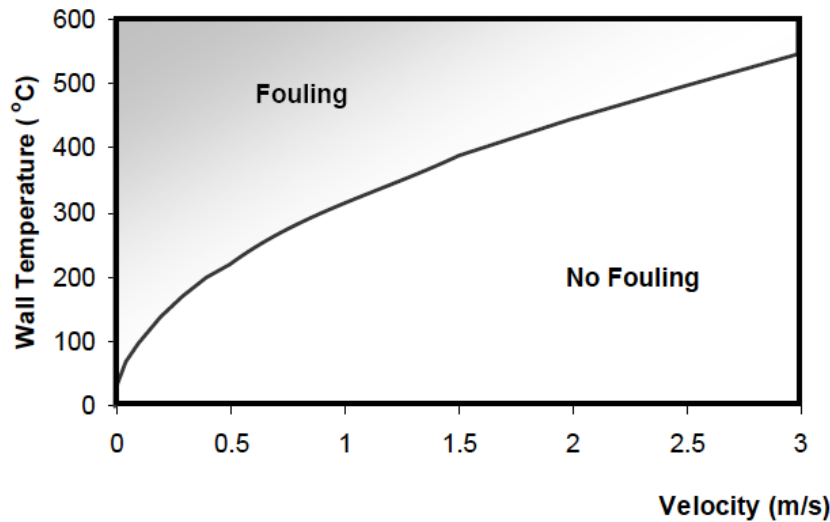


図2 閾値境膜温度と流速の関係

この考えあるいは実験結果からすれば、hiTRAN を管内挿入することで低流速での壁面の乱流渦を大きく出来るため、閾値を大きくすることが可能で、事実汚れ低減が出来た数多くの実施例が存在する。

### 4) 腐食汚れ、5) 生物汚れ、6) 凍結汚れ

これら 3 つの汚れ分類についての、その生成工程における hiTRAN の直接的効果は希薄と言わざるを得ないが、先に述べたように管側流体のせん断力を上げる効果は存在する。

個別の問題の解決には、汚れの原因となっている現象を観察し、解析することによって、最適な解決方法を探索するしかないと言えよう。

(あしがき)

熱交換器の汚れ付着の問題は、ほとんどの石油精製、化学プラントの中で起こっており、生産コストを圧迫しているが、いまだに解決されていない場合が多い。hiTRAN の技術は万能薬ではないが、汚れの付着のメカニズムを解析し、hiTRAN の機能を正しく理解、利用することで、有効な施策を提案できる可能性を持っていることを強調しておきたい。