

原油タンカー出荷時のベーパー回収技術 — スプレー吸収

Vapor Recovery Technique for Crude Oil Ship Loading — Spray Absorption

渋谷 佳樹 SHIBUYA Yoshiki JFE エンジニアリング エネルギープラント事業部 技術部 化学プロセス主幹

要旨

産油国において、洋上の出荷基地で原油タンカーに出荷する際に排出されるガスが大気汚染源となっている。この排出ガスから炭化水素成分を回収するプラントを浮体上に設置する場合、浮体の揺れによる影響を受けないスプレー式の吸収器が必要となる。原油のベーパーを原油のスプレーで吸収した事例はなく、実証試験を実施した。原油と原油のベーパーは多成分のため性能の検証が難しいが、回収量が最も多いブタンに着目することで吸収性能が詳細に確認でき、実用の可能性が高まった。また、モデルを作って解析したところ、実証試験結果と計算結果がよく一致したことで、大型の装置を設計するための基準が得られた。

Abstract:

In petroleum exporting countries, exhaust gas from crude oil tanker through loading operation at offshore terminals is the serious pollutant. A spray absorber, which is not affected by pitching and rolling motions in a floating plant, will be key equipment for the vapor recovery from crude oil ship loading. Because there was no case to apply crude oil sprays for vapor recovery, a series of pilot tests had been conducted to confirm the performance of spray absorber. Crude oil vapor is very complex in nature and it makes the analysis of the pilot test result quite difficult. By focusing on butane, the performance evaluation was easily performed and the possibility to apply the spray absorber was suggested. A simplified model was proposed to trace the phenomena in the absorber, and it was proved that the performance could be simulated by the calculations based on the model.

1. はじめに

タンカーによる原油の大量輸送では、原油の積込み時に発生するベーパーが大きな問題になっている。すなわち、VOC（揮発性有機化合物）の大量排出源の一つとして環境汚染の原因になっており、米国環境保護局（EPA）では VOC 汚染に由来するグラウンドレベルオゾンを警戒している¹⁾。また、特に硫黄分の多い原油では、ベーパーによる悪臭が出荷基地の従業員などに悪影響を与えている。さらに、排出している VOC が LPG（液化石油ガス）やガソリンに相当する成分を含み、エネルギーが無駄に放散されている。JFE エンジニアリングは 2007 年に JX 日鉱日石油基地（株）の喜入基地に世界最大級のタンカー排出ガス処理設備（Tanker vapor recover, 以下 TVR）を竣工した。この技術を産油国向けに展開する際に必要なスプレー吸収について実証試験を行なった。

2. タンカー排ガス処理設備

2.1 喜入基地の処理設備

喜入基地の TVR 設備のプロセスフロー図を図 1 に示す。タンカーから排出されるベーパーはベーパー回収ラインで TVR 設備に送られる。TVR 設備内では、まずベーパーはスクリーンプレッサーで昇圧され、その後冷却されて不

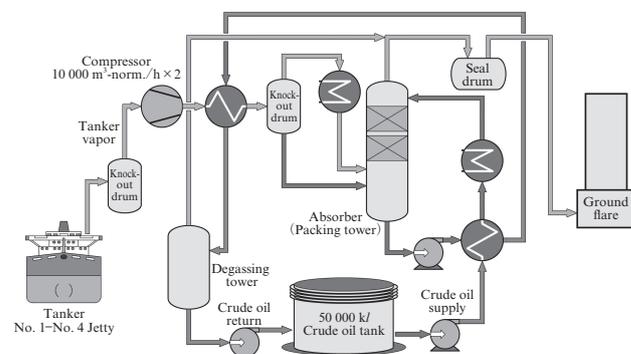


図 1 JX 日鉱日石油基地（株）タンカー排出ガス処理設備

Fig. 1 Process flow of tanker vapor recovery (TVR) at Kiire Terminal, JX Nippon Oil & Energy Staging Terminal Corp.

規則充填物が充填された吸収塔に導入される。吸収塔では吸収用の原油が同じく冷却されて流通しており、吸収塔内で原油とベーパーが向流接触してベーパー中の炭化水素成分が回収される。

近年、喜入基地の原油中継備蓄基地としての役割はわが国にとってますます重要となってきた。年間に TVR 設備が処理するベーパーは 10 万トンタンカーを中心に約 300 隻であり、ここで回収される原油は年間 1 万キロリットルにもなっている。

2.2 産油国への適用

このように、TVR 設備は環境対策設備でありながら、VOC を回収することで大きな利益を生み出す設備である。この優れた環境対策技術を原油出荷の多い産油国へ適用することで、産油国への技術貢献をするとともに将来にわたって原油の供給元を確保するための一助になると期待できる。しかしながら、実際には産油国に適用するにあたって、多くの技術的なハードルを越えなくてはならない。たとえば、産油国におけるタンカー出荷の多くが、陸上から遠く離れた洋上にある設備で出荷されていることである。このため、排出ガス処理プラントを設置する場所が確保できない。そこで、当社ではユニバーサル造船（株）（現ジャパンマリンユナイテッド（株））とタイアップし、バージ上にプラントを建設してタンカーに係留する方式を考案し、比較的少ない設備費で洋上プラントを建設する提案を行なった。提案したプラント搭載のバージを **図 2** に示す。

ここで問題となるのが吸収塔である。この浮体式プラントではバージの上にプラントを設置するため、波浪による揺動が避けられない。吸収塔は直径 3 m、高さが 20 m を超える巨大なものであり、デッキ上ではわずかな揺れでも塔頂では大きな振幅の揺れとなる。塔頂から供給される吸収用原油は、傾いていることにより不均一な流下になるだけでなく、



図 2 洋上出荷基地向けタンカー排出ガス回収設備

Fig. 2 Custom build vessel for offshore tanker vapor recovery (TVR)

往復動の慣性で側面にたたきつけられることが推測される。この結果、吸収用原油は不規則充填物の表面積をうまく生かせず、吸収に必要な液面の面積を吸収塔内に確保することができなくなる。長引く原油高により、近年になって大深海の油田開発が積極的に行なわれ、FPSO と呼ばれる浮体式の原油洋上生産貯蔵設備が多く稼働するようになったが、この中でも大きな充填塔は使用されていない²⁾。

揺動に強い吸収装置としてはスプレー吸収器やサイクロン吸収器が考えられるが、原油が産地により性状が大きく異なることや、ベーパーにも未知な部分が多いことから、一番シンプルなスプレー形式の吸収器を想定した。充填物を利用する吸収塔では、メーカーから得られるデータおよび喜入基地での実績値から最適な設計が可能だが、原油を噴霧するスプレー吸収器でベーパー回収を行なった事例はなく、設計に必要なデータが不足している。そこで、2012 年度に JX 日鉱日石エネルギー（株）、および JX 日鉱日石石油基地（株）の協力も得てスプレー吸収器の実証試験を行なうこととなった。

3. 試験装置

3.1 スプレー吸収試験設備の概要

スプレー塔実証試験は喜入基地内にて実際の吸収用原油と実際のタンカー排出ガス（ベーパー）を使用して行なった。スプレー吸収器実証試験設備の概要を **図 3** に示す。

スプレー吸収器は内径 500 mm の横置き円筒型圧力容器である。タンカーガスを水平方向に流し、原油を上から下向きにスプレー噴霧する。スプレーノズルは、ガスの流れに沿って多数配置される十字流方式の吸収器とした。図中で、タンカーガスは吸収器の左側から流入して、低い流速で右へ向かって流れる。原油は上部から多数のノズルで噴霧し直接接触させる。スプレーノズルは 4 つのブロックに分け、それぞれのブロックごとに流量の調節ができるようにした。

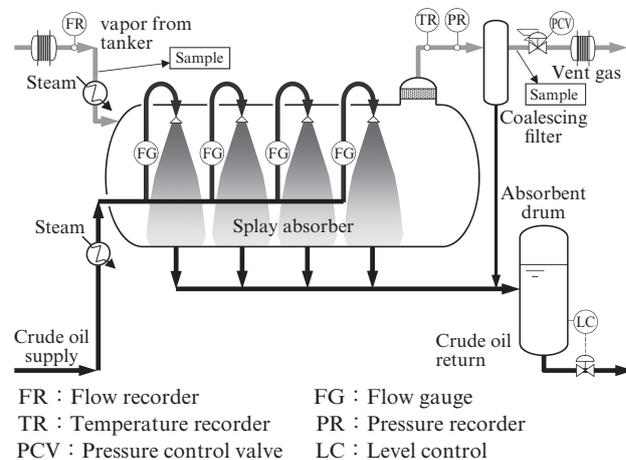


図 3 スプレー吸収器実証試験設備の概要

Fig. 3 Field test apparatus for spray absorption

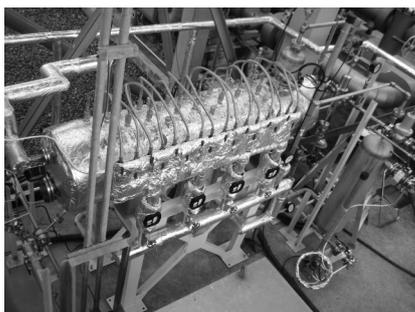


写真1 スプレー吸収器の写真

Photo 1 Overview Photo of the Test Spray Absorber

広範囲の噴霧液滴径でテストをするために、スプレーノズルを簡単に交換できるノズル取り付け座を配置した。吸収した原油は下部から排出される。通過したガスは、出口側の上部にあるデミスターを通して随伴する原油のミストを除去して排出される。

さらに、下流には念のためコアレッサーを設置して、原油のミストが下流へ飛散するのを防ぐこととした。試験条件として気温よりも若干高めで運転できるように、原油とタンカーガスのいずれも、吸収器に導入される前にスチームで加熱する熱交換器を設置した。試験スプレー吸収器を写真1に示す。また、噴霧の状況を直接監視できるように、吸収器にはのぞき窓および明かり取り窓を設けた。

3.2 スプレーノズル

使用したスプレーノズルの仕様を表1に示す。スプレーノズルは、標準的な充円錐（フルコーン）ノズルを選定した。充円錐ノズルをはじめとして一般的な一流体ノズルでは、小さいノズルを使用すると噴霧流量が少ないだけでなく、噴霧の平均液滴径が小さくなる。逆に、大きめのノズルでは同じ圧力で噴霧した場合には流量が増加するとともに噴霧液滴径が大きくなる。また、同じノズルでは圧力を高くすると流量が増えるとともに液滴径が小さくなる。

3.3 分析、記録

図1のフロー図に記載のあるガス入口および出口において分析用のガスをサンプリングし、ガスクロマトグラフィーで炭化水素（HC）成分の定量を、オルザット分析器でCO₂の

定量を実施した。その他、流量および温度・圧力などのデータはセンサーの信号をデータロガーで記録した。

4. 試験結果

4.1 結果の概観

スプレー吸収器では通常は理論段一段相当の吸収がターゲットとして設計されるが、噴霧の状態などにより一段の平衡にも達しないことが懸念された。多くの試験条件による分析結果から、タンカーガスからのHC回収の効率などの程度かを確認した結果を図4に示す。横軸を入口ガスのHC濃度、縦軸を出口ガスのHC濃度としている。

一段相当の吸収では、出口濃度は入口濃度および吸収液流量とガス流量の比率L/Gで決まる。そこで、プロット点の試験条件でL/Gを色の濃淡で表現した。また、プロセスシミュレーターで温度20℃の条件で平衡計算した結果を同じグラフに示す。L/Gが小さい結果の多くは計算値より出口濃度が高く、一段相当の吸収ができていない。一方、L/Gが大きいものは計算値よりも出口濃度が低い結果もあり、L/G以外の要素が影響していると考えられる。

4.2 結果の詳細確認

原油と原油ベーパーの系は多成分の混合物であり、また液側の蒸気圧が高いため、場合によっては吸収の逆で液からの蒸発が発生するなど、吸収性能の解析が非常に難しい。

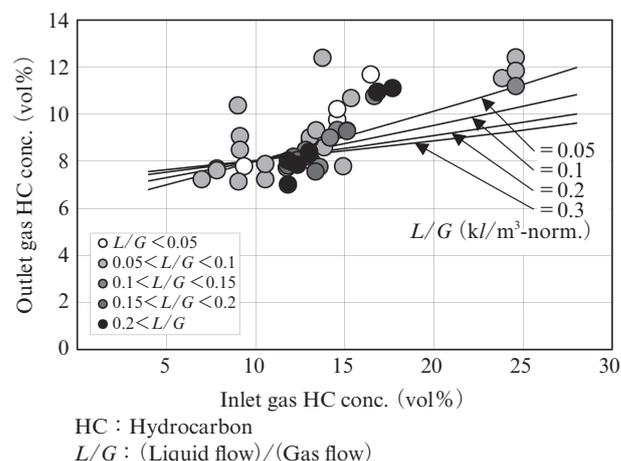


図4 試験結果の概要

Fig. 4 Overview of the test result

表1 使用したスプレーノズルの仕様

Table 1 Spraying data of the employed spray nozzles

Model number	Spray angle			0.05 MPa		0.1 MPa		0.2 MPa (Standard)		0.5 MPa	
	0.05 MPa	0.2 MPa	0.5 MPa	Flow (l/min)	d32 (μm)	Flow (l/min)	d32 (μm)	Flow (l/min)	d32 (μm)	Flow (l/min)	d32 (μm)
020	60°	65°	55°	1.06	483	1.46	411	2.00	350	2.91	290
040	60°	65°	55°	2.12	579	2.91	493	4.00	420	5.81	348
060	70°	75°	65°	3.18	655	4.37	558	6.00	475	8.72	393

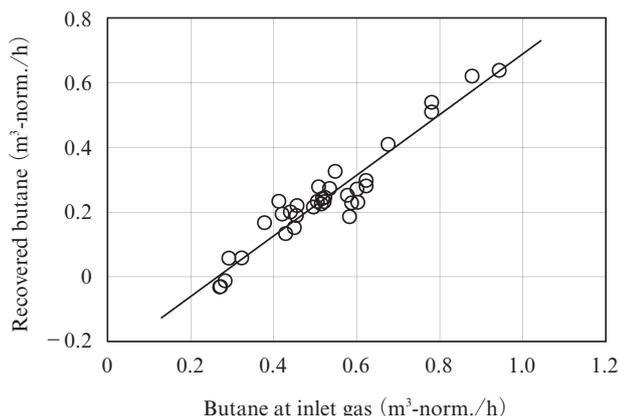


図5 ブタン成分の吸収

Fig. 5 Absorbed butane flow depends on feed butane flow

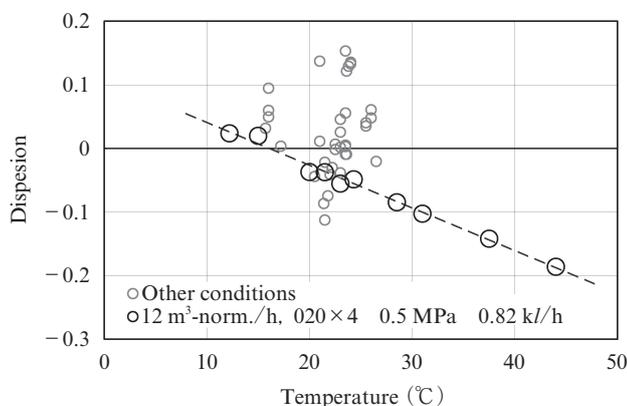


図6 温度の影響

Fig. 6 Temperature effects on the performance

今回の一連の試験では、吸収器の入口と出口の組成値があるため、ひとつの成分に絞って解析を行なうこととした。吸収量が最も多い成分であるブタン（i-ブタンと n-ブタンの和）を利用する。図5は横軸に入口ガス中のブタンの流量を、縦軸に回収されたブタンの流量をプロットしたものである。

HC 全体で捉えたグラフと比べて、非常に高い相関が見られる。最小二乗法による一次回帰直線も示した。ここに示す入口のブタン量と回収ブタン量の関係が、回帰直線を平均として上下に分散しており、これは試験条件の違いによる吸収量の大小が表現されていると考える。

この回帰直線からの偏差に着目し、影響の大きい要素を探した。気液平衡は温度の影響を大きく受けるので、その確認を行なった。横軸に温度をとった偏差のグラフを図6に示す。

温度を変えた試験では条件を統一したため、非常に強い相関が見られ、温度の影響が大きいことがわかる。常温で行なった試験も、実際は12℃から26℃の範囲で温度が異なることから、これが分散の要因になっていると考えられる。

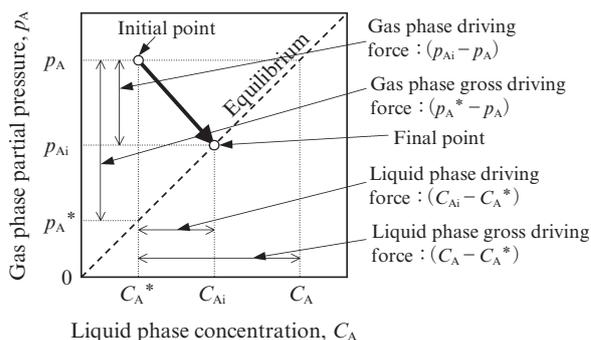


図7 一段吸収の溶解平衡線

Fig. 7 Equilibrium solubility curve

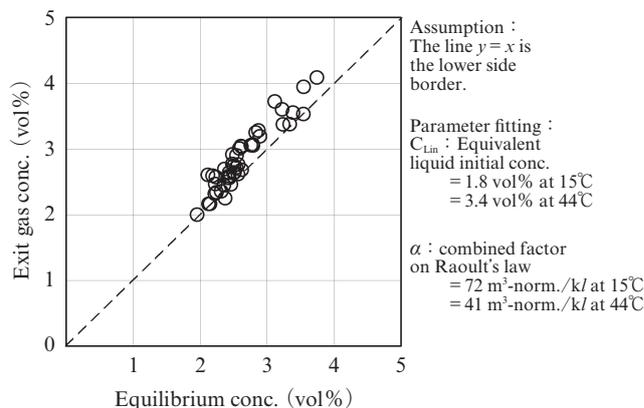


図8 計算による平衡濃度と出口ガス濃度

Fig. 8 Calculated equilibrium conc. vs. Analyzed exit conc.

4.3 バランス計算との照合

前述のシミュレーションでは、原油の物性はシミュレーターの持っているデータベースに修正を加えたものを使用したが、ブタンに限定した一段吸収の平衡値であればラウールの法則またはヘンリーの法則に従うとして簡単な計算ができる³⁾。

図7はヘンリーの法則に従う場合の一段吸収溶解平衡線図である。横軸に液側の濃度、縦軸にガス側の分圧をとっている。今回の試験では温度と圧力はほぼ一定なので、簡略化しガスの分析値にすべて換算した。すなわち、ガス側は分圧を濃度に換算し、液側でも濃度に対応するガス側の平衡濃度に換算した。その係数として α (m³-norm./kl) を定義し、平衡値 C_{Geq} について以下の式をたてた。

$$C_{Geq} = \frac{C_{Gin} + C_{Lin} \times L/G \times \alpha}{L/G \times \alpha + 1} \dots\dots\dots (1)$$

この式で C_{Lin} と α をパラメータフィッティングで求める。

条件の良い試験結果では計算された平衡値付近まで吸収が進んでいると考え、実測値のプロット群が $y=x$ の線に接するように求めた。また、4.2節で述べたとおり、気液平衡

であるから温度によって大きな影響を受けるため、 C_{Lin} と α はともに温度の一次関数とした。この結果を図8に示す。スプレーの条件と吸収量について5章で考察する。

5. 考察

5.1 スプレー吸収の理論

気液直接接触による物質移動では、ミクロにはガス側拡散速度、気液界面の面積、液滴内拡散速度が支配し、マクロにはガス滞留時間、液ホールドアップが重要な要素である。充填塔の場合には非平衡ながら定常状態の連続を考えればよく、計算手法が確立している。一方、スプレーによる気液直接接触は設備としてはシンプルだが、検討を行なうには非定常の解析が避けられず、難解なシステムである。

液滴が飛行する運動と、これに伴う周囲のガスの流動を把握した上で、界面とその近傍の物質移動を検討するべきだが⁴⁾、原油を噴霧した場合の微小液滴の状態は、計測も推算も困難である。このように実測データを得られない未知の数値が多数必要になる。さらに、原油のベーパーと原油という多成分系のため、厳密なモデルで説明することは不可能に近い。ここではスプレー吸収の能力検討に不可欠な、液滴の滞留時間と液滴表面でのブタンに限った物質移動速度の二つに絞り、簡略化したモデルを構築して計算と実績値を照合する。

5.2 液滴の滞留時間

ノズルから放出された液体は分裂して液滴となり、その後は減速を続ける。この減速を表現する式としてよく使われるのは、球体が空気抵抗で減速する運動方程式である⁵⁾。しかし、これはガスが静止した空間で他の運動する物体の影響を受けない前提であり、連続的なスプレー噴霧でこの式を適用するのは合理的でない。減速により失われる運動エネルギーはガスに受け渡されるが、無数の液滴が連続して通過すれば周囲のガスは加速され、すぐに液滴の速度とガス流速が等しくなる。このようにスプレー全体を捉えて運動エネルギーのバランスする速度を求める手法が、ミクロに液滴の運動を考えるよりも簡単で、しかも実際の動きをうまく説明できる。

系内のガス流れを噴霧されている領域とそれ以外の領域に分けて図9に示すようにモデル化する。噴霧の領域ではガスが液滴に加速されて運動エネルギーを得、それが壁に衝突して失われる。ガスはノズル近傍で液柱が液滴に分裂するときに加速されるが、その後も噴霧の拡がりに合わせて連続的にガスが引き込まれて加速する。最終的に壁に衝突する直前の断面積分が液滴と同じ速度になり、かつここまでのエネルギーバランスが取れていると考える。衝突した液滴は流下排出されるが、ガスは外の領域を通過してスプレーノズル近傍へ戻る。

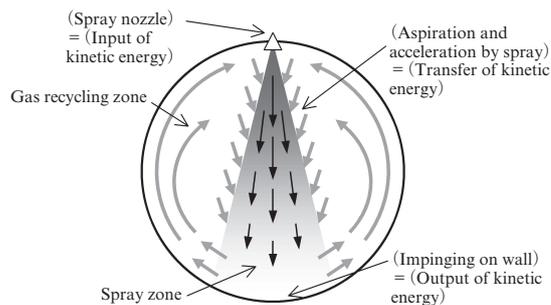


図9 ガス流れと運動エネルギーのバランス

Fig. 9 Model based on the balance of kinetic energy

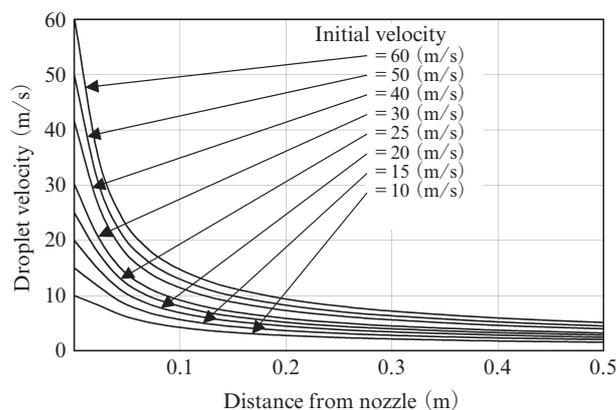


図10 スプレー液滴の速度変化の例

Fig. 10 Calculated droplet velocity distribution

噴霧の外側でのガスの運動エネルギーを無視し、さらに壁に衝突する瞬間にはガスが液滴の速度になっていると仮定すれば、噴霧領域内での運動エネルギーの移動量とそのときの速度が簡単に算出できる。噴霧流量によって異なるが、実際に使用したノズルと吸収器で計算した例を図10に示す。

このグラフを積分すると、実際に行なった試験条件の大半は滞留時間が0.1秒前後であったと推定され、のぞき窓からのビデオ撮影の解析とも一致する結果である。

5.3 スプレー吸収の簡易モデル

5.2節で述べたとおりスプレーからエネルギーを得たガスは噴霧によって激しく攪拌されていることが目視でも確認された。今回の系では前述の通り液側の滞留時間が0.1秒以下と短いのに対してガスは数分の滞留時間があり、完全混合に近い状況であることが推察される。このためガス側の拡散速度は無限大で濃度分布がないという仮定をする。さらに、今回のように発生源である液体を吸収液として使用する共洗いのガス吸収では、一般的にL/Gが極端に大きい操業条件になり液側の濃度変化は非常に小さい。液滴が小さく拡散距離が短いことも考え、液滴内拡散速度も無限大で液滴内に濃度勾配がないという仮定をする。これらの仮定によ

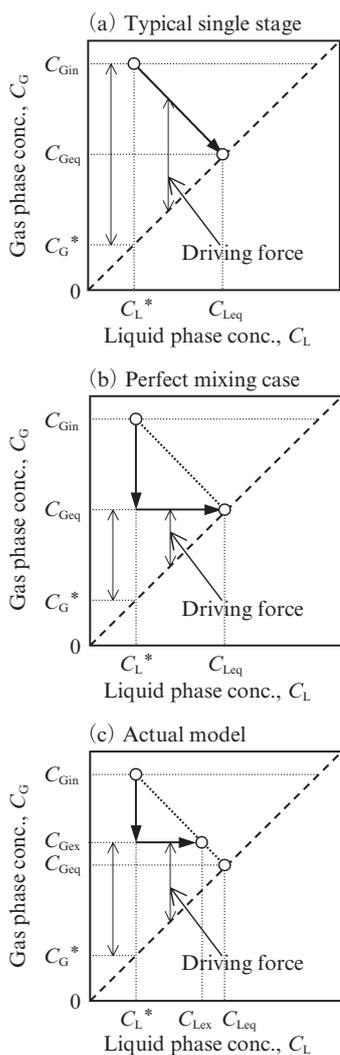


図 11 物質移動モデル

Fig. 11 Model of mass transfer

りガス側はある容積全体で、液側は噴霧されてからある時間経過した微小時間において、それぞれの代表濃度だけを考慮して物質移動を考えることができる。このように簡素化したモデルについて以下に述べる。

図 11 (a)~(c) は縦軸にガス側の濃度 C_G 、横軸に液側に換算した相当ガス濃度 C_L をとった溶解平衡線図で物質移動のモデルを考えたものである。まず、(a) 図は前述した一般的な吸収の操作線を今回のガス相当濃度書き直したものである。液とガスが並流で流れ平衡に到達する十分な時間がある前提の理想的な操作線である。ガス側、液側ともに初期のドライビングフォースが大きく効率が良い。これに対して、スプレー吸収器ではガス側が完全混合と仮定すると、(b) 図のようにガス側の濃度は系内に入った瞬間にほぼ平衡濃度になってしまい、物質移動のドライビングフォースは小さくなる。しかし、現実には平衡まで到達することはなく、ガス側の濃度は (c) 図のように平衡よりも高い出口濃度で一定になっているために、ドライビングフォースが若干大き

くなっている。いずれにせよ、この操作で変化があるのは液滴内のブタン濃度だけと考える。液がスプレーノズルから噴出し、壁に衝突するまでの短い時間にこの操作が行なわれることになる。この液滴のブタン濃度変化をトレースする式を導く。ある時間の C_{Gi} と C_{Li} の関係は (c) 図での比例関係から (2) 式で表せる。

$$\frac{C_{Gi} - C_{Geq}}{C_{Gin} - C_{Geq}} = \frac{C_{Leq} - C_{Li}}{C_{Leq} - C_L^*} \dots\dots\dots (2)$$

このモデルを適用するに当たって、ヘンリーの法則が成り立つとすれば、前章で述べた通り原油側の濃度は平衡にあるガス濃度と一次の関係にあり、置き換えて扱うことができる。すなわち添え字の G と L を同等に扱えるとする、(2) 式は (3) 式のように展開できる。

$$C_{Li} = C_{Geq} - \frac{(C_{Gin} - C_{Geq}) \times (C_{Geq} - C_G^*)}{C_{Gin} - C_{Geq}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、図 11 (c) に示すようにドライビングフォースにはガス側の平衡濃度と終点濃度の差がプラスに作用する。

$$\begin{aligned} DF &= C_{Gex} - C_{Li} \\ &= C_{Gex} - C_{Geq} + \frac{(C_{Gin} - C_{Geq}) \times (C_{Geq} - C_G^*)}{C_{Gin} - C_{Geq}} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、DF：ドライビングフォース (vol%)

すなわちモデルとしてはガス側が完全混合で均一な濃度として液側濃度を計算するが、(4) 式の上ではガス側濃度が初期濃度から終点濃度へと変化する単純なものとなる。

5.4 物質移動係数

5.3 節に記したモデルを適用して試験結果の解析を行なうにあたり、 C_{Gin} にはガス入口の分析結果を、また C_{Gex} は出口の分析結果を使用した。 C_G^* には 4 章でフィッティングにより求めた原油の入り口濃度に対する平衡ガス濃度 C_{Lin} を使用した。これに加えて試験条件の L/G と 4 章でフィッティングにより求めた α を使用して平衡濃度 C_{Geq} を算出し、操作線の具体的な数値とした。これらの値により求めるドライビングフォースから、(5) 式により微小時間内の物質移動を求め、次の濃度を算出する逐次計算を行なうことができる。

$$N = K \times S \times DF \times \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 N ：微小時間の物質移動量 ($m^3\text{-norm.}$)
 S ：気液界面面積 (m^2) (水噴霧相当)
 K ：物質移動係数 ($m^3\text{-norm.}/(m^2 \cdot \text{vol}\% \cdot s)$)
 Δt ：計算の微小時間 (s)

表2 典型的なスプレー条件の例

Table 2 Spraying data of the employed spray nozzles

Run number	1207B	1118I	1207A	1116E	1116L	1116M
Gas flow rate (m ³ -norm./h)	12.46	5.25	11.99	11.08	11.02	5.72
Spray rate (kg/h)	0.35	1.64	0.9	1.66	1.24	1.24
Temperature (°C)	17.2	24	16.2	23.5	23.6	23.6
Inlet C ₄ H ₁₀ (vol%)	2.593	4.694	2.438	4.723	4.67	4.619
Outlet C ₄ H ₁₀ vol%	2.163	2.563	1.999	2.631	2.761	2.64
L/G (kg/m ³ -norm.)	0.028	0.312	0.075	0.15	0.113	0.217
Equilibrium conc. (vol%)	2.149	2.414	1.957	2.504	2.571	2.285
Nozzle	0.20	060	020	040	060	060
Spray pressure (MPa)	0.1	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5
Initial velocity (m/s)	30.2	41.6	60.4	60.4	60.4	60.4
Droplet diameter (mm)	0.41	0.455	0.28	0.325	0.37	0.37
Sprary angle (°)	62	75	55	60	65	65

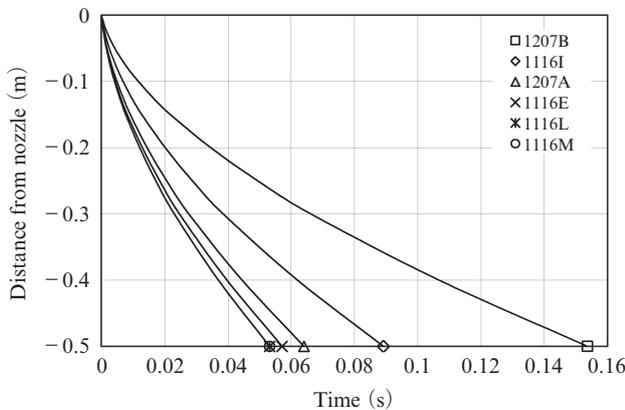


図12 各スプレー条件の液滴滞留時間

Fig. 12 Retention time calculation for each test

スプレー噴霧での平均液滴径については、公表されている水噴霧の液滴径を利用し、系内で微小時間に流れる気液界面面積（水噴霧相当）を計算して使用した。計算には物質移動係数の仮定値と微小時間の設定値が必要になるが、計算式では互いに反比例の関係であり、微小時間と物質移動係数の積 $K \cdot \Delta t$ を設定した。 $C_{Gi} = C_{Gin}$ となる初期濃度から始めて、逐次計算を $C_{Gi} = C_{Gex}$ となる出口濃度に到達するまで繰り返した。

5.5 モデルの検証

スプレー条件などを変化させた試験の典型的な例6点について計算した結果を表2に示す。

まず、それぞれのスプレー条件で前述のエネルギーバランスにより逐次速度を算出し、500 mm進むまでの滞留時間を求めた経過を図12に示す。

これとは別にガス側濃度一定でドライビングフォースを算出する物質移動の逐次計算を、 $K \cdot \Delta t$ を0.01と設定して行なった。こちらもガス側平衡濃度が入口濃度から出口濃度まで吸収が進む様子を図13にプロットした。

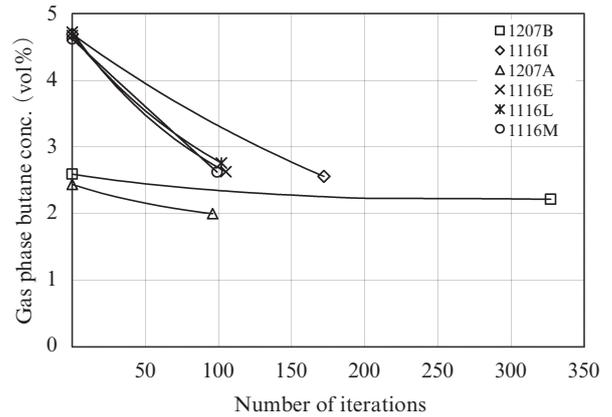


図13 物質移動逐次計算結果

Fig. 13 Iterating calculation of mass transfer for each test

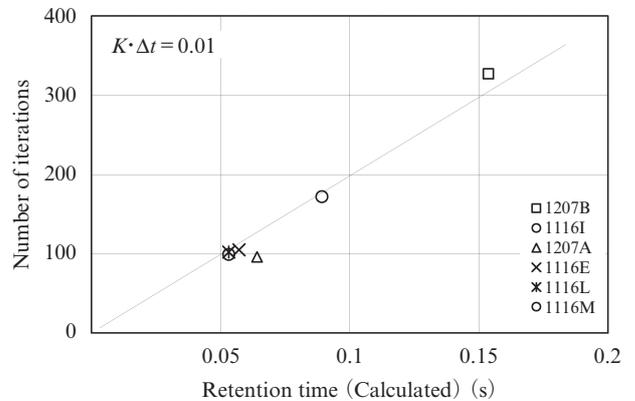


図14 滞留時間と繰返し計算回数

Fig. 14 Correlation between the number of iterations and retention time

物質移動の逐次計算では、ガス濃度や試験条件としてのガスと原油の流量、および噴霧の平均液滴径など多数のデータをもとに計算される。さまざまな条件のデータだが、終点に至るまでの時間は前の液滴滞留時間と似た関係になっている。そこで、この滞留時間に対して出口濃度に到達するまでの繰返し計算回数をプロットしたものを図14に示す。

表2に示した6点での計算結果が原点を通る直線状に並んでおり、エネルギーバランスのモデルで計算した滞留時間と完全混合モデルによる物質移動の逐次計算回数が比例していることが分かる。この結果、いずれも十分な精度があると判定でき、グラフから物質移動係数を算出できる。物質移動の繰返し回数300回が滞留時間0.15秒に相当するので、繰返し計算の微小時間 Δt は 0.0005 秒であり、物質移動係数 K は $0.01 \div 0.0005 = 20 \text{ m}^3\text{-norm.}/(\text{m}^2 \cdot \text{vol} \% \cdot \text{s})$ と推定される。

噴霧液滴径に関してはメーカーの公表する水噴霧の場合の値を使用しており、物質移動係数も水噴霧相当の界面表面積基準となっている。今回はこの前提でうまくまとまったが、ノズルのメーカーやノズルの内部構造が異なる場合に

も同じ評価ができるかについては、今後の調査が必要である。

6. おわりに

原油のベーパー中に含まれる炭化水素を原油によるスプレー吸収で回収するプロセスにおいて、(1) 成分としてブタンのみを対象にして解析する、(2) 液滴の速度は運動エネルギーのバランスから解いて求める、(3) 物質移動については原油側の濃度をガス側の平衡濃度に換算し、ガス側完全混合として簡単なモデルで逐次計算するという手法を用いることで簡単かつ精度よく物質移動係数が求められた。これにより、大型の設備でも対応可能な設計基準を構築することができる。

今回の実証試験は一般財団法人国際石油交流センターによる平成 24 年度産油国石油精製技術等対策事業費補助金の交付を受けて実施した産油国等石油関連産業基盤整備事業のうち事業化推進協力事業である「中東地域における原油出荷基地の環境対策検討（サウジアラビア）」の一環である。

参考文献

- 1) EPA Proposed stronger ground-level ozone standards, Professional Safety 2007, vol.52, no. 8, p. 14.
- 2) Lapidaire, P.; Leeuw, P. The effect of ship motions on FPSO topsides design. Offshore Technology Conference 8079. Houston, USA, 1996.
- 3) Reid, R. C.; Prausnitz, J. M.; Poling, B.E. The properties of gases and liquids. 4th ed., McGraw-Hill, 1986.
- 4) 釘島正弘, 中島 晋, 国武幹生, 永岡義久. 液滴吸収モデルによるコークス炉ガス精製プロセスの操業ガイドの開発. 川崎製鉄技報. 1987, vol. 19, no. 2, p. 15.
- 5) 梶島賀敬, 三輪靖雄, 阪田祐作. スプレー液滴シミュレーションモデルによる排煙脱硫装置の開発. 化学工学論文集. 2006, vol. 32, p. 59.



渋谷 佳樹