

静止水面上に瞬間流出した油の拡がりについて

羽田野袈裟義¹・田村宜史²・杉岡伸一³・朝位孝二⁴

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2丁目16-1)

²学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (現日本舗道(株))

³正会員 工修 芙蓉海洋開発(株) (〒111-0051 東京都台東区蔵前3-15-7)

⁴正会員 博士(工学) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2丁目16-1)

静止水面上に流出した油の放射状の拡がりを2層流モデルにより取扱っている。解析では2層流モデルと特性曲線法により初期値境界値問題として取り扱い、計算は先端条件を満たす位置より後方部について行なっている。先端条件については淡塩水を用いた水路実験により再検討し、密度界面が局部的に持ち上がった点のうち先端に最寄りのものを先端条件の位置とし、この位置の上層厚さを先端厚さと定義した。また、油層厚が極めて薄くなつた時の油層先端の計算上の処理を再考している。本計算法により計算が改良され、計算結果が既往の実験結果をよく再現することを確認した。

Key Words: oil spread, radial spread, two layer model, front condition

1. 序論

水面上に流出した油が拡がる現象は表面密度噴流の一種であり、その挙動を精度よく予測することは有効な回収措置を講ずる上で不可欠である。油層の拡がりを解析する方法として、2層流として取り扱い、油の連続条件と次元解析を用いて油層先端位置を時間のベキ関数として求める方法^{1,2}、相似解の存在を仮定する方法^{3,4,5,6}、特性曲線法を用いる方法^{7,8,9,10,11}、平面2次元の方程式を差分法で解く方法¹²、そして2層流の取扱いをせず鉛直速度成分まで解く方法¹³が挙げられる。第1のベキ関数による方法と第2の相似解の方法は、静止水域に一定体積の油が流出する場合や油が一定の流量で継続して流出する場合に適用可能である。また、第1の方法では流れの支配的な作用力が時間的に変化することを考慮して支配的な力に応じて領域区分を行っている。第3の特性曲線法を用いる方法は、原理的には流出流量が時間的に変化したり流れのある水域に油が流出した場合にも適用可能であるが現時点ではそのようなケースまでは取扱っておらず、静止水域に比較的単純な条件で油が流出する場合を取り扱うことにとどまっている。そのような複雑な場合には第4の平面2次元方程式を差分法で解く方法が有利である。第5の方法は、流れの鉛直構造まで計算する

ため、たとえばオイルフェンスからのくぐり抜けなど局所的な現象を検討するには有効であるが、平面的な拡がりまで含めて取扱う場合には膨大な計算が必要である。いずれにしてもオイルフェンスをどの辺まで展張すべきかなどを見積もる場合に必要不可欠というものではない。

以上を総合すると、油の拡がりを予測し、その結果を回収作業に反映する方法としては第3と第4の方法に代表されるように鉛直方向に積分された支配方程式を特性曲線法または差分法で解く方法が適しているといえる。その場合、内部境界面での抵抗、境界条件、あるいは初期条件についての入念なチェックが必要と考える。このような観点に立ち、羽田野ら¹⁴は一定幅の水面上を幅方向に一様に拡がる、いわゆる1次元的な拡がりを特性曲線法により解析し、内部境界面での抵抗、境界条件、そして初期条件を検討した。その結果は、先端油層厚と先端速度が極端に小さい範囲を除けば割合よい適合性を示した。しかしながら、いわゆる油層先端条件から求まる先端厚さがある一定値以下となつた時には計算上の油層先端厚をこの一定値に固定するという便法を用いらざるをえなかった。その一定値には水理学的な根拠がなく、現実への適用を考えればさらに入念な検討が必要と思われる。なお、油層先端の条件は、大野の実験結果を用いて定めたが、油層先端部の形状はその進行とともに変化

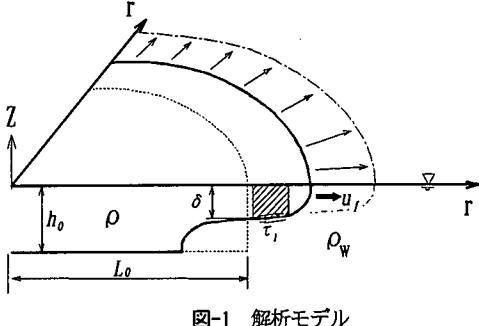


図-1 解析モデル

する事情にあり、大野の先端厚さの定義はこれを反映しているものの先端部のパターンの判定が困難な場合もあり測定者の主觀が入りやすいように思われる。また、油層の拡がりの基本的な問題としてこれまで1次元的拡がりと放射状拡がりが銳意研究されてきたが、放射状拡がりを初期値・境界値問題として完結する形で取扱った研究は著者らが知る限りないようである。放射状の拡がりは基本的本題として重要であるだけでなく、漸拡部を流れる油層の運動にそのまま適用できることにも注目すべきであろう。さらに、実験室の1次元水路で得られた先端条件がそれ以外の状況にも適用可能か否かも現実への適用との関連で重要な問題である。

本研究では、既報¹¹⁾で不十分であった先端条件と先端厚さが極端に小さくなった場合の取扱いに改良を加え、静止水域に油が放射状に拡がる場合を2層流モデルと特性曲線法により初期値境界値問題として取扱う。解析方法の妥当性を検討するため、まず1次元的な拡がりについて既報と同じケースを計算し、比較を行う。ついで放射状拡がりのケースを調べる。

2. 解析モデル

(1) 基礎方程式と計算式の導出

序論で述べたように、油層の運動を2層流モデルにより取扱う。図-1に示すように、密度 ρ_w の静止水面上に密度 ρ ($= \rho_w - \Delta \rho$) の油が流出するものとする。基礎方程式は、油の層平均の連続式と運動方程式であり、水・油界面での連続ではないから、これらは次のように与えられる⁹⁾。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + u \frac{\partial \delta}{\partial r} + \delta \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{u \delta}{r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{\partial \delta}{\partial r} - \frac{\tau_i}{\rho \delta} \quad (2)$$

ここで、 δ は油層厚さ、 u は油層の層平均流速、 τ_i は水・

油界面の単位面積のせん断抵抗である。

既報と同様に式(1)と(2)をMassauの方法¹⁰⁾により取扱う。 $C = (\Delta \rho g \delta / \rho)^{1/2}$ を導入して式(1)と(2)を変形し、得られた結果の和と差をとると次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} (u + 2C) + (u + C) \frac{\partial}{\partial r} (u + 2C) = - \frac{\tau_i}{\rho \delta} - \frac{Cu}{r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (u - 2C) + (u - C) \frac{\partial}{\partial r} (u - 2C) = - \frac{\tau_i}{\rho \delta} + \frac{Cu}{r} \quad (4)$$

これらの結果と1次元の場合の結果の差異は右辺第2項にある。

これらの式は、特性曲線 ω_+ : $d r / d t = u + C$, ω_- : $d r / d t = u - C$ を用いて次のように書かれる。

$$\frac{d}{dt} (u + 2C) = - \frac{\tau_i}{\rho \delta} - \frac{Cu}{r} \quad \text{on } \omega_+ \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (u - 2C) = - \frac{\tau_i}{\rho \delta} + \frac{Cu}{r} \quad \text{on } \omega_- \quad (6)$$

1次元の場合と同様これらをしかるべき初期条件と境界条件のもとに解く。以下に先端条件、界面抵抗、初期条件、境界条件を示す。

(2) 先端条件の再検討

本論文の解析では、油層先端条件を設定し、これを満足する位置より後方部分を前出の計算式により計算する。従来この目的のため先端条件が検討されている。首藤・大野⁹⁾や大野¹¹⁾は水深が油層厚に比べて大きい場合には、実験的に決定した油層先端厚さ、先端移動速度、水・油の密度差そして油の動粘性係数に基づく密度フルード数とレイノルズ数が一義的な関係にあることを示し、その関係式を与えた。この関係は、レイノルズ数が小さい領域ではレイノルズ数の増加とともに密度フルード数が増加し、レイノルズ数がある程度大きくなると密度フルード数はほぼ一定となる。羽田野ら¹²⁾は、油層先端部が水面上を進行する現象では油層が水の抵抗を受けて進行すると言えれば先端条件の検討には水の粘性が重要であるとして、水の動粘性係数を用いて大野のデータを再整理した。その結果、プロットされたデータの分布はより系統的なものとなった。さらに、簡単な力学的考察により油層先端部の密度フルード数とレイノルズ数との関係を定性的に説明した。

前章で述べたように、大野の油層先端厚さの定義は、油層の進行にともなう先端部の形状の変化を反映しているが、測定者の主觀が入りやすいように思われる。そこ

で一定幅の水路で淡水・塩水の表面密度噴流をつくり、先端速度と先端厚さの測定を行なって先端条件を再検討した^{16), 17)}。実験は、長さ4m、高さ0.4m、幅0.15mの総アクリル製開水路で行なった。水路の上流端0.2m区間は軽い流体(淡水)の貯留部となっており、それより下流部とはスリットにより仕切られている。実験は、塩水濃度3%、貯留部における上層流体の厚さ0.03~0.09mの条件で行なった。実験では淡水を着色し、スリット開放後の表面密度噴流の先端部をビデオで撮影した。そしてビデオを再生して先端厚さと先端移動速度を測定した。図-2は初期貯留厚さ0.09mの場合について先端を追尾し、先端付近の界面形状の時間変化を示したものである。図の矢印は、界面が局部的に持ち上がりがあった箇所のうち先端に最寄りのものを示す。以下これを“界面の持ち上がり”と呼ぶことにする。図において、界面の持ち上がりは $t=12.06$ 秒の直前に矢印の位置に発生している(最上段図)。フロントがさらに進行して $t=12.59$ 秒の直前に新たな界面の持ち上がりが発生(上2段目の図の矢印)し、上の図で発生した界面の持ち上がりは左の方に示されている。以下の図でも同様で、図に示した時刻の直前に図の矢印の位置に界面の持ち上がりが生じている。なお、この点は図-2では単に界面の持上がりとして示されるだけであるが、ビデオ画像によると界面の持ち上がりが発生して渦が界面のこの位置で剥離して、上層流体の中に埋没するように見える。この機構として、密度界面に沿って渦度が集積し、ある限界まで達して渦として放出されると考えられよう。このような界面の持ち上がりは先端の進行にともなって先端近くに多少不規則な時間間隔で次々に発生するが、先端に最寄りの界面の持ち上がりは最後に発生したものである。いずれにしても、界面の持ち上がりは先端近くの流れのある種の安定が崩れる現象を反映しており、この点は流体力学的に意味のある密度流先端部の界面現象を表現するものと期待される。したがって、先端に最寄りの界面持上がりが発生したときのその部分の層厚を先端厚さとして測定し、先端速度 u_f は最先端の位置 x_f の時間変化率として求めた。図-3はこのようにして求めた先端厚さ δ_f と移動速度 u_f により定義した先端部の密度フルード数とレイノルズ数の関係を示したものである。図よりこの整理法で得られたデータは大野のデータに比べて散乱が抑えられていることがわかる。図中から表面密度噴流の先端条件式として次式が与えられる。

$$\begin{aligned} Fr &= 0.156 Re^{0.29} & Re < 1000 \\ Fr &= 1.16 & Re \geq 1000 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $Fr = u_f / (\Delta \rho g \delta_f / \rho)^{1/2}$ 、 $Re = u_f \delta_f / \nu_w$ で、 ν_w は水の動粘性係数である。以上のように図-3の

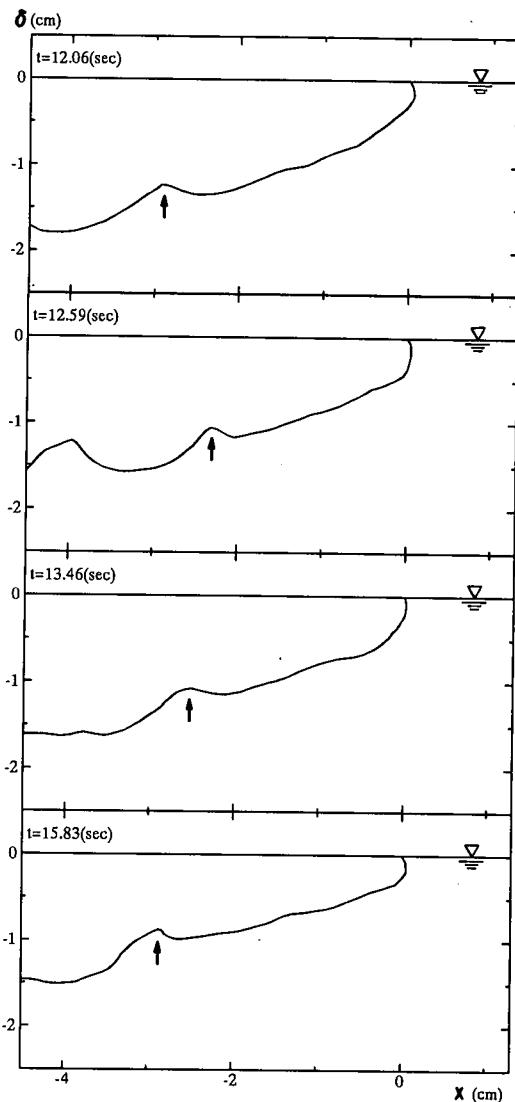


図-2 先端形状の時間変化

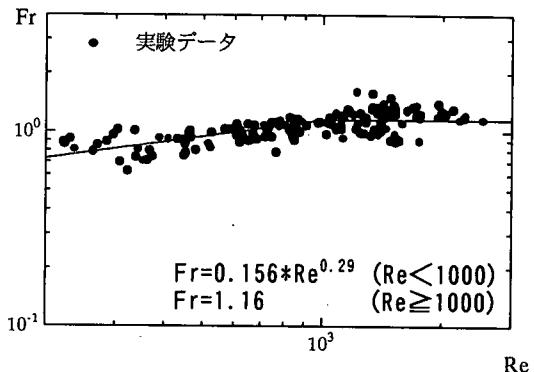


図-3 フルード数とレイノルズ数の関係

データは力学的に有意なものと考えられること、データの散乱が小さいこと、そして先端に近い位置の量であることから、本研究では上式を先端条件として採用する。

(3) 油・水境界面での抵抗

既報¹⁰⁾を踏襲し、油・水境界面が傾斜した状態で油層先端が進行して周囲水を押しのけて加速する際の慣性抵抗として油層先端部の付加的な界面抵抗を次式(8)で評価する。

$$\tau_F = \rho_w \frac{\partial \delta}{\partial t} \left[1 - \left\{ 1 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial x} \right)^2 \right\}^{-1/2} \right] u \quad (8)$$

そして、トータルの界面抵抗を次式(9)で与える。

$$\tau_i = \tau_F + f_i \rho_w u^2 \quad (9)$$

ここで、 f_i は後続部の界面抵抗係数で、油・水境界面の場合には0.003程度の値とみなされる¹⁸⁾。

(4) 初期条件

塙口¹⁰⁾は、初期に一定半径の円筒状に水面上に貯められた油が仕切りを取り除くことにより放射状に拡がる、いわゆる放射状瞬間流出の場合を実験している。その結果は、図-4に示すように、1次元の場合とほぼ同様で、半径 L_0 の貯油槽に貯められた層厚 h_0 の油層の仕切りをはずすと、仕切り位置での油層厚は $h_0/2$ となり、油層はこれより前に伸び、水の層は補償流として下半分に侵入する。塙口はこの状態について、仕切り開放直後の t_0 時間のうちに油層が l_0 だけ進行するものとして、次元的考察を行ない式(10)を得た。さらに、初期の油層進行の密度フルード数がほぼ1であることを確認し、 $l_0/L_0 \ll 1$ に対して式(11)を与えた。

$$t_0 = \{ l_0 / (\Delta \rho g \delta_0 / \rho) \}^{1/2} \quad (10)$$

$$l_0 = h_0 / 2 = \delta_0 \quad (11)$$

初期条件は、1次元の場合と同様に、以上を考慮してかつ単純な形として図-5のように与える。これを式で表現すると、式(12)のようである。

$$\delta = h_0 : u = 0 \quad \text{for } 0 \leq r \leq L_0 - \frac{h_0}{2}$$

$$\delta = \frac{L_0 + h_0 - r}{2} : u = \left(\frac{1}{2} + \frac{r - L_0}{h_0} \right) u_{f0}$$

$$\text{for } L_0 - \frac{h_0}{2} \leq r \leq L_0 + \frac{h_0}{2} \quad (12)$$

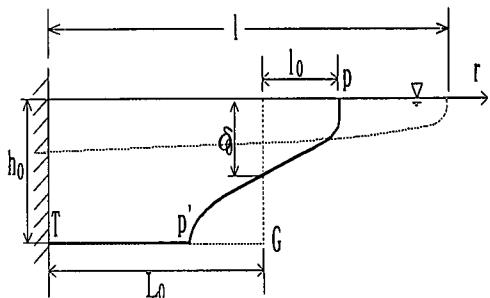


図-4 流出開始直後の油・水境界の状況

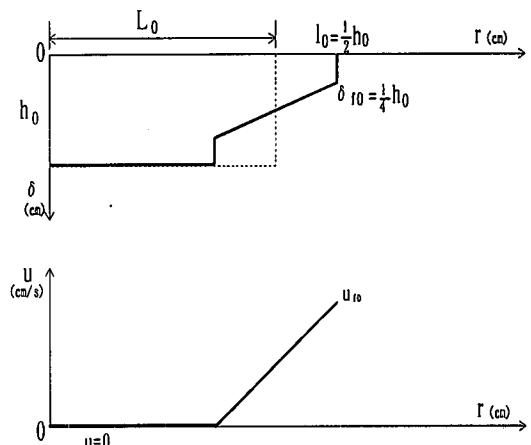


図-5 初期条件の与え方

ここで、 $u_{f0} = (\Delta \rho g \delta_0 / \rho)^{1/2}$ である。

(5) 境界条件

ここで検討する流れはほぼ全域で常流と考えられるから、境界条件は上流端と下流端の双方で u または δ を与える。下流端の境界条件は式(7)である。具体的には、式(7)より δ_i の表現式を求め、1ステップ前の時刻の u_i を用いて δ_i を与える。また、静止水域に瞬間流出する場合、上流側の境界条件は中心 $r=0$ で $u=0$ である。しかしながらこの条件をそのまま課すと式(5)と(6)右辺第2項の計算に支障をきたす。このため、適当な R ($R \ll L_0$)をとり、次の条件を与える。

$$u = 0 \quad \text{at} \quad r = R \quad (13)$$

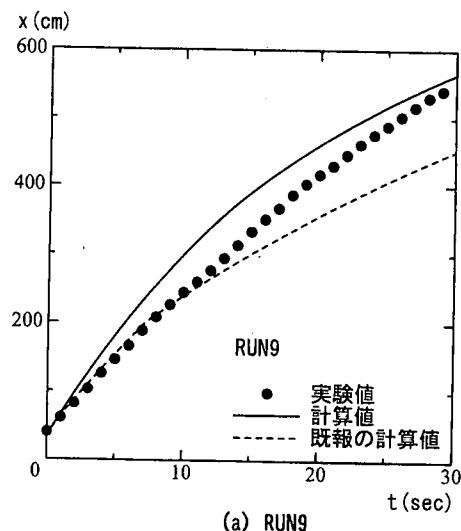
上式を用いるとき、油の体積の誤差は最大で $(R/L_0)^2$ 程度であるので、 R/L_0 として0.05程度の値を設定すれば問題はないと思われる。

表-1 1次元的拡がりの実験条件

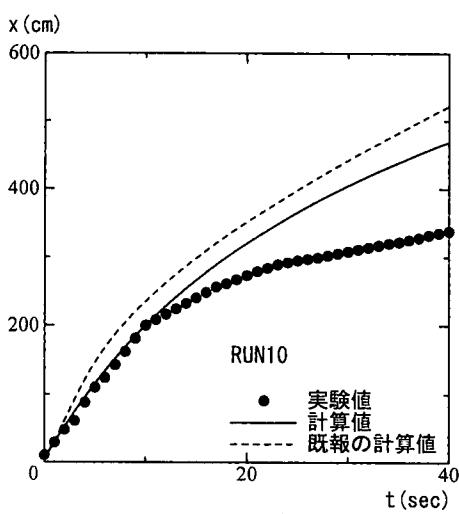
Run	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$\Delta \rho / \rho$	T(°C)
9	10.0	40.0	0.09	28.1
10	10.0	10.0	0.09	28.2
11	5.00	10.0	0.09	28.2

表-2 放射状拡がりの実験条件

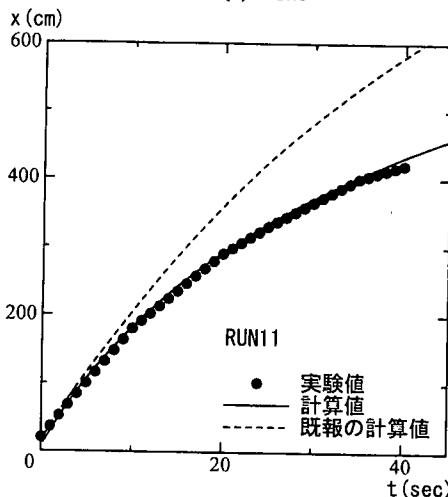
Run	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$\Delta \rho / \rho$	T(°C)
2-1	4.54	14.5	0.09	20.5
2-2	4.54	14.5	0.09	25.6
2-3	1.51	14.5	0.09	24.2
2-4	1.30	7.0	0.09	24.5



(a) RUN9



(b) RUN10



(c) RUN11

図-6 先端厚さの与え方の効果

3. 計算結果

前章で求めた解析法の検証のため、瞬間流出に関する塙口の実験結果との比較を行なった。まず、1次元の実験については既報¹¹⁾で検討しているので、先端条件式の変更の効果を調べた。その結果、先端条件式の変更自体の影響は小さいことがわかった。既報での課題として、先端条件の式により与えられる δ_f が 0.3cm 以下になると計算不能になるケースが出たため、 δ_f が 0.3cm 以下となつた以後は 0.3cm に固定した。この 0.3cm という値に何の根拠もないのにこれに代わるものとして、上層流体の平均層厚より小さ目の値を与えるのが合理的である。現実には δ_f を平均層厚さの何倍程度とするかが問題である。ここでは、大野のパターン分類 C と D の先端条件^{15), 19)}との

整合性、図-5に示す計算の初期時刻の先端との対応、および図-2の形象を考慮し、油層平均厚さの 1/4 とした。すなわち δ_f には式(7)が与える値と平均層厚の 1/4 の値のうち大きい方を与えた。図-6は、既報で適合性が思ひにくくなかった表-1に示す実験に適用した結果を示す。なお、既報の計算値は先端部のレイノルズ数が 300 以下となつたら式(9)の τ_f をゼロとおいて計算した結果である。本研究の処理法により適合性がかなり改善されていることがわかる。また、上記のように既報では先端厚さが小さくなり先端部のレイノルズ数が小さくなると慣性抵抗を無視することにより適合性を向上させたが、今回の計算ではそのような操作は不要であった。この事情は以下のように考えられる。

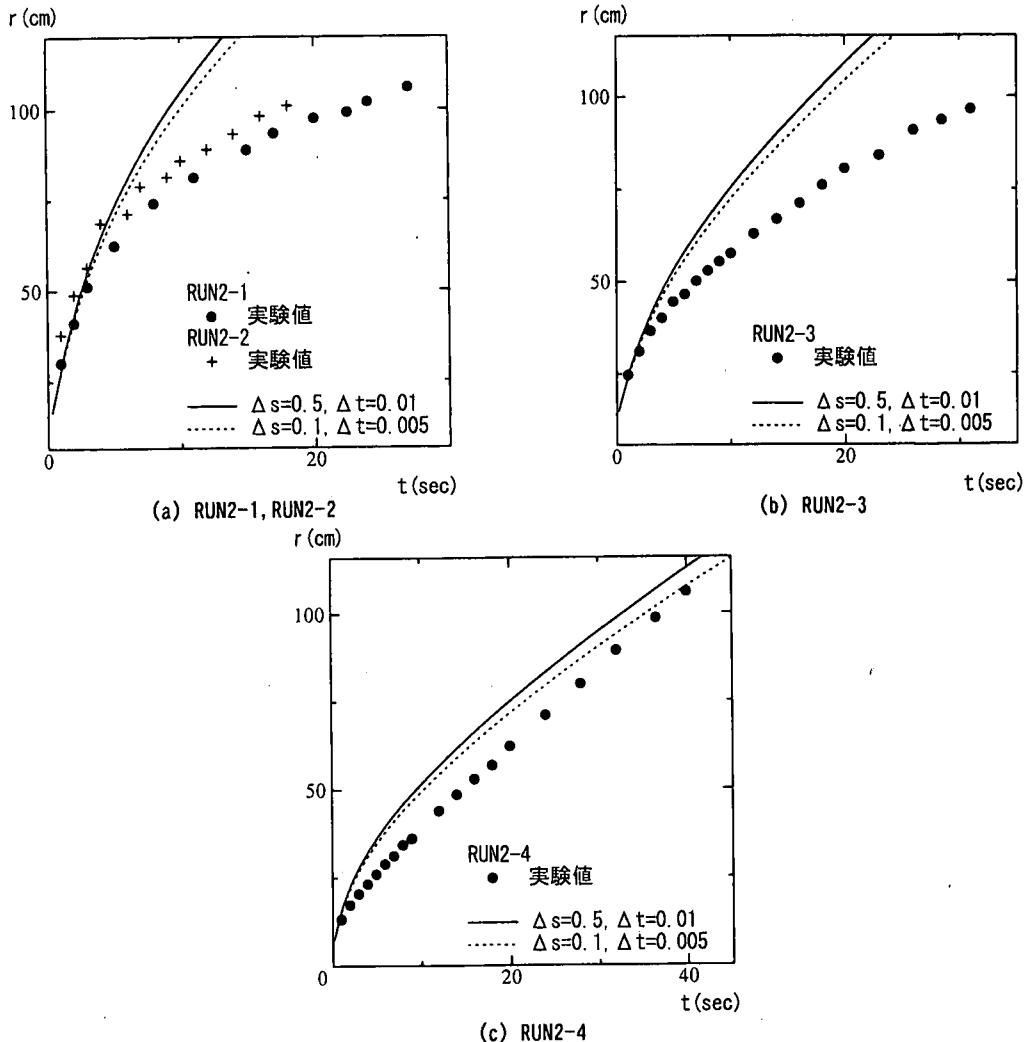


図-7 放射状拡がりへの適用結果

既報の層厚の下限値の設定法では実際の先端厚さ δ_f が0.3cmになった以降では δ_f を0.3cmに固定したため慣性抵抗を過大評価していたのに対し、本研究で提案した層厚の下限値の設定法では層厚の小さい領域まで慣性抵抗をより正当に評価していると考えられる。したがって、 δ_f が小さくなったときの処理法を改善されたものとみられる。このことは、 δ_f が小さくなったときの本研究の処理法の妥当性を示唆しているように思われる。

次に表-2に示す条件で行われた放射状流出の実験に適用した結果を図-7に示す。計算の刻みは $\Delta s = 0.5\text{cm}$, $\Delta t = 0.01\text{秒}$ と $\Delta s = 0.1\text{cm}$, $\Delta t = 0.005\text{秒}$ の2ケースとした。図より、共通して計算の刻みの小さい方が実験値に近い値を示す。RUN2-1, 2-2で6秒程度、RUN2-3で2.5秒程度、RUN2-4で1秒程度、 δ_f の値にして共通

して0.05cm程度までは実験値と計算値は近い値を示すが、それ以降では計算値が過大となっている。これは再設定後の値として採用すべき δ_f が過小なため、慣性抵抗が過小評価された状態が継続した結果と考えられる。以上より、放射状拡がりに対して先端条件に式(7)を用いて解析することは基本的に問題ないであろう。ただし、油層先端厚さが極端に小さくなったときの処理は、1次元のケースのようにはいかず、今後ほかの計算法と合わせてさらに検討することが必要である。

4. 結論

以上、本研究では静止水面上に瞬間流出した油の放射状拡がりを2層流モデルで取扱うことを試みた。まず、

淡・塩水を用いた水理実験により先端条件を検討した。また、先端厚さが極めて薄くなった場合の計算上の処置を検討した。本研究で得られた主要な結果は以下のようである。

(1) 放射状の拡がりは1次元の場合と全く同様にMassauの方法により初期値境界値問題として取扱うことができる。

(2) 先端条件は、先端厚さとして先端に最寄りの界面持上がりが形成したときこの位置での上層厚さを採用して、先端条件として式(7)を得た。

(3) 既往の実験に適用した結果、本解析モデルは程よい適合性を示した。ただし、放射状拡がりの場合、先端厚さが極端に小さくなつた時の処理に課題を残している。

本研究により、油の拡がりを2層流モデルで取扱う際の先端条件の取扱い方の細部についてある程度の情報が得られたと思われる。今後は、上記(3)の課題を解決し、より複雑な流れのある場に流出した場合の拡がりや水面波のある場合を検討することが必要である。また、油層を水表面に浮遊したバーセルとして取り扱うラグランジュ的な方法²⁰⁾との対応も興味深い。これについても鋭意研究していきたい。

謝辞：本研究にあたり、通産省中国工業技術研究所埜口英昭氏より貴重な資料をご提供頂いた。また、実験やデータ整理において、山口大学卒研生の天野卓三（現中電技術コンサルタント）、矢野晶人（現建設技術研究所）、坂本淳一（現中央開発）の諸氏の熱心な協力を頂いた。また、実験装置の製作で山口大学工学部河元信幸技官のご支援を頂いた。記して深甚の謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Fay, J.A. : The spread of oil slicks on a calm sea, *Oil on the Sea*, ed. by Hoult. D.P., pp.53-63, Plenum Press, New York, 1969.
- 2) Didden, N. and Maxworthy, T. : The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity currents, *J. Fluid Mech.*, Vol.121, pp.27-42, 1982.
- 3) Fannelop, T.K. and Waldman, G.D. : The dynamics of oil slicks, *AIAA J.*, Vol.10, No.4, pp.506-510, 1971.
- 4) Hoult, D.P. : Oil spreading on the sea, *Annual Review of Fluid Mech.*, Vol.4, pp.341-368, 1972.
- 5) Buckmaster, J. : Viscous-gravity spreading of an oil slick, *J. Fluid Mech.*, Vol.59, pp.481-491, 1973.
- 6) Huppert, H. E. : The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface, *J. Fluid Mech.*, Vol.121, pp.43-58, 1982.
- 7) Abbott, M. B. : On the spreading of one fluid over another, *La Houille Blanche*, Nos. 6, pp.827-846, 1961.
- 8) 首藤伸夫, 大野操: 石油の拡がりの実験, 第24回海岸工学講演会論文集, pp.509-513, 1977.
- 9) 埼口英昭, 平野宗夫: 静水面上に連続流出する油層の拡がりに関する研究, 土木学会論文集, No.393/II-9, pp.113-120, 1998.
- 10) 埼口英昭: 水面上に流出した油の拡がりに関する研究, 中國工業技術試験所報告, 第9号, 1991.
- 11) 羽田野袈裟義, 平野卓三, 松本治彦, 埼口英昭, 平野宗夫: 水面上の油層の1次元的な拡がりについて, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.117-124, 1998.
- 12) 後藤智明: 津波による油の拡がりに関する数値計算, 土木学会論文集, No.357/II-3, pp.217-223, 1985.
- 13) Goodman, R.H., Brown, H.M., An, C.F. and Rowe, R.D. : Dynamic modeling of oil boom failure using computation fluid dynamics, *Proc. of 20th Arctic and Marine Oil Spill Program Tech. Seminar*, Vol.1, pp.437-455, 1997.
- 14) 樋東一郎: 水理学II, p.30, 森北出版, 1973.
- 15) 大野操: 海面上における石油の拡がりに関する実験的研究, 中央大学修士論文, 1978.
- 16) 天野卓三: 油層の拡がりと表面密度噴流の流出直後の流動に関する研究, 山口大学修士論文, 1998.
- 17) 田村宜史, 羽田野袈裟義, 平野卓三, 河元信幸: 表面密度噴流の初期流動について, 土木学会第53回年次講演会概要集, II, pp.822-823, 1998.
- 18) Lau, Y.L. and Moi, J. : Booms used for oil slick control, *J. of the Environment Eng.*, Asce, Vol.105, No.EE2, pp.369-382, 1979.
- 19) 羽田野袈裟義, 平野卓三, 埼口英昭, 式正治, 平野宗夫: 油層の先端条件とその1次元解析への適用, 水工学論文集, 第41卷, pp.509-513, 1997.
- 20) Sugioka, S., Kojima, T., Nakata, K. and Horiguchi, F. : A numerical simulation of an oil spill in Tokyo Bay, *Spill & Technology Bulletin*, Vol.5, No.1, pp.51-61, 1999.

(1999.6.2 受付)

ON THE SPREAD OF OIL OF CONSTANT VOLUME SPILLED ON THE CALM WATER

Kesayoshi HADANO, Yoshifumi TAMURA, Shinichi SUGIOKA and Koji ASAI

Radial spread of oil spilled on the calm water is treated using the two layer model. Governing equations of oil layer are treated as the initial and boundary value problem employing the method of characteristics. Calculation is done for region behind a position where so called the front condition is satisfied. The front condition has been proposed through laboratory experiments using saline and fresh water. The front condition is given at the nearest one to the front of all the positions where the interface lifts up, since the first instability seems to occur there. Calculation showed good agreement with the previous laboratory experiments