

油層の先端条件とその1次元解析への適用

Front-end Condition of Oil Slick Propagation and Its Application to One Dimensional Analysis

羽田野袈裟義*・天野卓三**・埜口英昭***・式 正治****・平野宗夫*****

Kesayoshi HADANO, Takuzo AMANO, Hideaki NOGUCHI, Masaharu SHIKI and Muneo HIRANO

Front-end condition of oil slick propagating on the surface of calm water is studied by examining the existing experimental data on the front speed and carefully determined front depth. As a result, plots of the front Froude number and front Reynolds number showed almost straight line on the log-log paper. The result is applied to the two-layer model to predict the spread of oil slick propagation. Also the initial and boundary conditions of the computation for the case of instantaneous spill are inspected by referring to the shape of interface observed immediately after release in the experiments. Computed result of the front propagation is compared with the experiments of instantaneous spill.

Keywords: propagation, oil spread, front condition

1. まえがき

海面上に流出した油が拡がる現象は表面密度流の一種であるが、その挙動を精度よく予測することは海域環境上きわめて重要である。この問題をたとえば2層流モデルにより解析する場合、先端部では流動厚さが有限値からゼロに変化するため、先端部の取扱には工夫が必要である。同様の問題は、陸地に達した津波の解析や氾濫解析でもおこり、ふつうは先端条件としてフルード数が1程度、または適当に小さな一定の流動厚さが採用されている¹⁾。しかしながら、表面密度流の場合にこのような条件を先端部に課すことには注意が必要である。まず、フルード数についていえば、表面噴流は津波や氾濫流にくらべて運動が緩慢であるため、粘性の影響が出やすいことが考えられる。また、油の拡がりを観察すれば明白であるが、先端部は最初のうち膨らんだ形状をもっているが、進行とともにその形状が少しずつ変化し、くさび形へと移行する。このような油層先端の条件として適当に小さな一定の流動厚さを設定するのも不自然な感がある。

本研究では、既往の油層先端の実験データを用いて先端条件を検討し、その結果を非定常2層流モデルによる解析に適用することを試みる。油層先端部における水・油境界面の抵抗の評価は難しいが、ここでは、Fannelopら²⁾が先端部での境界層の発達を考慮して与えた評価式を適用した。

-
- * 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)
** 学生員 山口大学大学院 工学研究科 (同上)
*** 正会員 工博 通産省工業技術院中国工業技術試験所 (〒737-01 呉市広末広2-2-2)
**** 正会員 工修 アイ・エヌ・エー九州支店 (〒816 大野城市南ヶ丘1-1-15)
***** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

2. 油層の先端条件

油層の拡がりに関する研究は数多く行われ、先端の進行速度について種々の検討が加えられている^{3), 4)}。しかしながらそれらは流量一定あるいは一定体積の瞬間流出という単純な場合について先端位置を流出後の経過時間の関数として表現するのがほとんどで、流出条件が時間的に変化する場合には対応できない。また、先端部の局所的な物理量の間の関係を与えるものではないため、2層流モデルの先端条件としては適当でない。そんな中で、首籙ら⁵⁾は先端から数10cm後方の平均的な油層厚さと先端速度をもちいて定義した密度フルード数とレイノルズ数の関係を与えている、がデータの散乱が大ききようである。ここでは、先端速度と先端部の流動厚さを詳細に調べた大野⁶⁾の実験データを再整理して先端条件を検討する。

2.1 大野の実験データ

大野は、軽油(動粘性係数 $\nu = 0.043 \sim 0.067 \text{ cm}^2/\text{s}$)、モーター油20W40($\nu = 0.864 \sim 3.81 \text{ cm}^2/\text{s}$)、およびモーター油($\nu = 0.043 \sim 0.067 \text{ cm}^2/\text{s}$)を用いて一定幅水路の静水面上に油を連続放出する実験を行い、先端の形状に注意しながら先端速度と流動厚さの詳細な測定を行っている。その結果、油層先端の形状は大雑把には次のようなタイプがあることを示し、タイプに応じて図-1のように先端厚さを読みとっている。

- (A) head shaped front が生じ、油・水界面に内部波がみられる。
- (B) head shaped front が生じるが、内部波は殆ど見られない。
- (C) head shaped front は発生せず、油層は先端から後方へとその厚さを増していく。内部波は殆ど見られない。
- (D) 先端部が突出している。そのほかの点はC型と同様。

なお、流出直後にAのパターンであったものが時間の経過とともにC、Dのパターンへと移行すること、およびパターン分類が困難をともなうものがあることを述べている。CとDについては最先端近くの界面形状が比較的平らな部分をとっているとみられるが、Cでは判定が難しいように思われる。

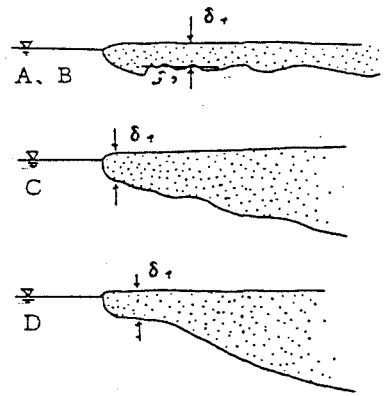


図-1 油層先端形状と先端厚さ

2.2 二次的考察

首籙ら⁵⁾は先端部の密度フルード数が先端部のレイノルズ数と油層厚さ/水深により変化すること、そして水深に比べて油層厚さが小さく水深の影響が無視できる場合に対して先端条件を密度フルード数とレイノルズ数との関係として与えている。このことは、水深の影響が無視できる場合、油層先端部では、慣性力、重力、粘性力が適当にバランスした状態にあると考えれば納得できる。しかしながら、前述のようにデータの散乱がかなり大きい。この原因として、図-1に示した先端部の形状のパターンに応じた整理をしていないことが考えられる。図-2は、フロント進行速度を u_f 、水・油の密度差を $\Delta\rho$ 、油の密度を ρ 、水の動粘性係数を ν_w とし、 $F_F = u_f / (\Delta\rho g \delta_f / \rho)^{1/2}$ で定義されるフロントフルード数(以下では単にフルード数と記す)と $R_F = u_f \delta_f / \nu_w$ で定義されるフロントレイノルズ数(以下では単にレイノルズ数と記す)の関係を示したものである。図中の線は両対数紙上で最小自乗により直線近似した結果である。図-2(a)は図-1のA~Dのすべてのパターンの結果を示しているが、パターンによりデータの散乱の度合いに差異

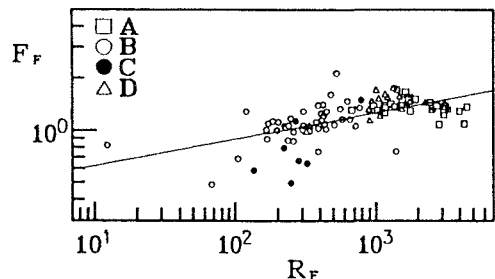


図-2 F_F と R_F の関係 (a) 全部

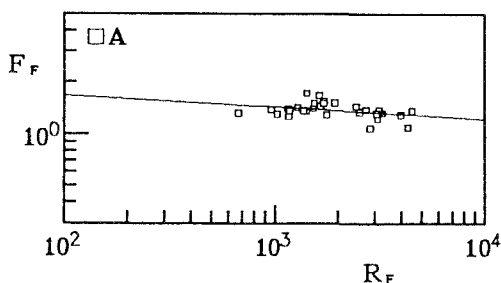


図-2 (b) パターンA

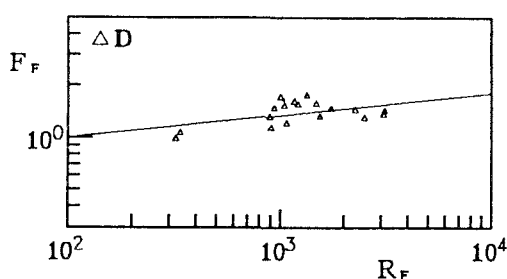


図-2 (c) パターンD

がある。BとCのパターンでデータの散乱が著しいが、この原因としてこれらのパターンでの現象が不安定であったこと、およびこれにともない流動厚さの判読が難しかったことが考えられる。図-2 (b) と (c) はデータのまとまりが比較的よかったAとDのパターンの結果を示す。図中の線は最小自乗近似した直線である。これらの式形を示すと、

$$u_f / (\Delta \rho g \delta_f / \rho)^{1/2} = 2.29 (u_f \delta_f / \nu_w)^{-0.067} \quad \text{for A} \quad (1a)$$

$$u_f / (\Delta \rho g \delta_f / \rho)^{1/2} = 0.556 (u_f \delta_f / \nu_w)^{0.128} \quad \text{for D} \quad (1b)$$

パターンAではレイノルズ数が増大するほどフルード数が減少するのに対し、パターンDではレイノルズ数が増加するほどフルード数も増加する。パターンAの結果は先端部すぐ後方のくびれた部分の流動厚さを採用しており、この部分で後流域形成していることなど複雑な現象を反映していると思われる。なお、後述の2層流モデルでは流出直後からの挙動を表現させるため、油層の先端条件としてパターンAの結果(式(1a))を採用する。なお、式(1a)の指数は小さくパターンAのフルード数をを定数とみなせばほぼ1.38である。以上は混合の生じない水・油の場合の先端条件であるが、温排水のように周囲流体と混合がおこる場合でも、フロント部では慣性力、重力、そして粘性力がバランスした状態にあるとする上記の考えはそのまま適用されることが考えられ、したがって上で求めた先端条件は混合が生じる場合に対しても近似的に成立することが期待される。

3. 2層流モデルへの適用

3.1 理論の概要

図-3に示すように、密度 ρ_w の静止水域にこれより軽い密度 ρ の油が流出する場合を考える。このとき流出した油は表面密度噴流として流動する。連行はないから、基礎方程式である連続式と運動方程式で次のように与えられる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial (u \delta)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = - \frac{\partial}{\partial x} (\Delta \rho g \delta^2 / 2) - \tau_i \quad (3)$$

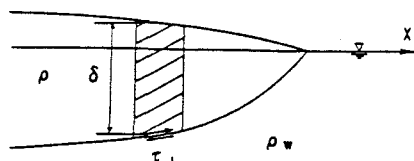


図-3 解析モデル

ここで、 u は断面平均流速、 τ_i は内部境界面におけるせん断応力である。せん断応力の詳細は後に示す。これらの式による計算は、放出口(上流端)から先端条件を満たす位置の間について行われる。

式(2)と(3)は開水路非定常流の基礎式と同型であるため、首篠らと同様、Massauの方法により取り扱う。 $C = (\Delta \rho g \delta / \rho)^{1/2}$ を導入して δ を C に変換し、得られた結果の和と差をとると、

$$\partial(u+2C)/\partial t + (u+C) \partial(u+2C)/\partial x = -\tau_1/(\rho\delta) \quad (4)$$

$$\partial(u-2C)/\partial t + (u-C) \partial(u-2C)/\partial x = -\tau_1/(\rho\delta) \quad (5)$$

をえる。これらの式は特性曲線上で次のように書かれる。

$$d(u+2C)/dt = -\tau_1/(\rho\delta) \quad \text{on } \omega_+ : dx/dt = u+C \quad (6)$$

$$d(u-2C)/dt = -\tau_1/(\rho\delta) \quad \text{on } \omega_- : dx/dt = u-C \quad (7)$$

これらの式を適切な初期条件と境界条件のもとに解けばよい。前述のように、下流側の境界条件として式(1)が用いられる。

3.2 内部境界面の抵抗

密度流先端部付近は複雑な流れを示すため、界面抵抗 τ_1 の見積もりは難しくこれを取り扱った研究はあまり見られない。Fannelopら²⁾は油層の拡がりの問題で、水・油境界面では油層先端から境界層が発達すると考え、平板に沿う境界層についてのブラジウスの研究結果を参照して境界面での抵抗を次式で与えた。

$$\tau_w = (\rho_w \mu_w / \pi)^{1/2} u u_{LE}^{1/3} (x_{LE} - x)^{-1/2} \quad (8)$$

ここで、 x_{LE} は油層最先端(leading edge)の位置、 u_{LE} はその断面での油層の流速、 ρ_w と μ_w はそれぞれ水の密度と粘性係数である。式(8)からわかるように、 $x = x_{LE}$ では界面抵抗が無限大となりこのままでは計算不能な事態が生じる。このため、式(1)の先端条件を満足する位置を x_+ 、この周辺の δ_+ 程度の区間での平均的な界面勾配を $grad$ とし、 x_{LE} を次式で与えることにする。

$$x_{LE} = x_+ + K \delta_+ / grad \quad (9)$$

ここで、 K は無次元の係数である。

3.2 初期条件および境界条件

(a) 初期条件

計算の初期条件は埴口³⁾の結果を用いる。埴口は一定幅の水槽で一定体積の油を仕切を外して流出させる、いわゆる瞬間流出の実験を行い、流出直後の油層界面の形状を調べた。その状況が図-4に模式的に示されている。水平長さ L_0 の貯油槽にたまった厚さ h_0 の油層が仕切をはずすと、仕切位置の油層厚さが $h_0/2$ ($=\delta_0$)となり、油層はこれより前方に延び、水の層が逆に下半分に侵入するようになる。これは lock exchange flow と同様である。埴口はこの状態について、流出直後の t_0 時間のうちに油層が l_0 だけ進行

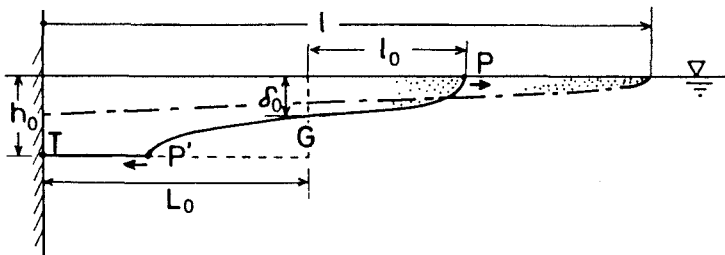


図-4 流出直後の水・油境界面の状況 (瞬間流出)

するものとして、次元的考察をおこなった。さらに、初期の油層進行のフルード数がほぼ1であることを確かめ、次の関係式を与えた。

$$t_0 = [l_0 / (\Delta \rho g / \rho)]^{1/2} \quad (10); \quad l_0 = \delta_0 \quad (11)$$

従来の研究により、油の流出直後には慣性力と重力の項がバランスすることが明らかにされている。このバランスはフルード数の条件であり、式(10)はそのことを表現している。以上より、瞬間放出の場合の初

期条件は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \delta &= h_0 & ; u &= 0 & \text{for } 0 \leq x \leq L_0 - \delta_0 \\ \delta &= \delta_0 = h_0 / 2 & ; u &= [1 + (x - L_0) / \delta_0] \cdot u_{+0} & \text{for } L_0 - \delta_0 \leq x \leq L_0 + \delta_0 \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $u_{+0} = (\Delta \rho g \delta_0 / \rho)^{1/2}$ である。上の式は $0 \leq x \leq L_0 - \delta_0$ の区間では流出前の状態であることを示している。

一方、油が連続的に放出される場合にも式(10)と(11)の関係は成立すると考えてよい。また、連続流出の場合には流量がコントロールされ、このことは流出初期でもいえる。したがって、これらの条件を同時に満足するものとして次式が得られる。

$$\delta = (q_0^2 / (\Delta \rho g / \rho))^{1/3} ; u = (q_0 \Delta \rho g / \rho)^{1/3} \quad (0 \leq x \leq \delta) \quad (13)$$

ここで、 q_0 は出口での単位幅流量の初期値である。式(13)が連続流出の場合の初期条件で、計算の初期時刻における油層厚さと流速の分布を与える。

(b)境界条件

すでに述べたように、下流側の境界条件は式(1)に示す先端条件であり、これは瞬間放出の場合にも連続流出の場合にも共通である。上流側の境界条件は2つのケースで異なり、瞬間流出の場合には上流端で流速がゼロである。一方、連続流出では出口の流量が制御される。以上をまとめると次のようである。

$$u = 0 \text{ at } x = 0 \text{ (瞬間流出)} ; q(t) = u \delta \text{ at } x = 0 \text{ (連続流出)} \quad (14)$$

連続流出の場合、上式と特性曲線 ω - 上で成立する関係式(7)とを組み合わせることで解くことになる。

4. 計算結果

以上の解析法の検証のため、瞬間流出についての埜口⁴⁾の実験結果について計算を行い、先端位置の結果の比較を行った。その結果が図-5に示されている。図では式(1a)による先端条件の結果を示しているが、フルード数1.38の条件でもほぼ同様の結果を得た。図中の黒い丸は実験値で、曲線は式(9)の係数Kを種々変化させた場合の計算結果である。実験は初期貯油槽厚さ、1cm、3cm、5cm、および10cmについて行われているが、図では初期貯油厚さ3cmと5cmの実験について示した。計算では先端条件で与えられる先端油層厚さが3mmを下ると、以後計算ができなくなった。このため、それ以降は先端条件として油層厚さ3mmで固定した。図中の曲線の折れ線はこの先端条件のシフトを示している。図によれば、初期貯油厚

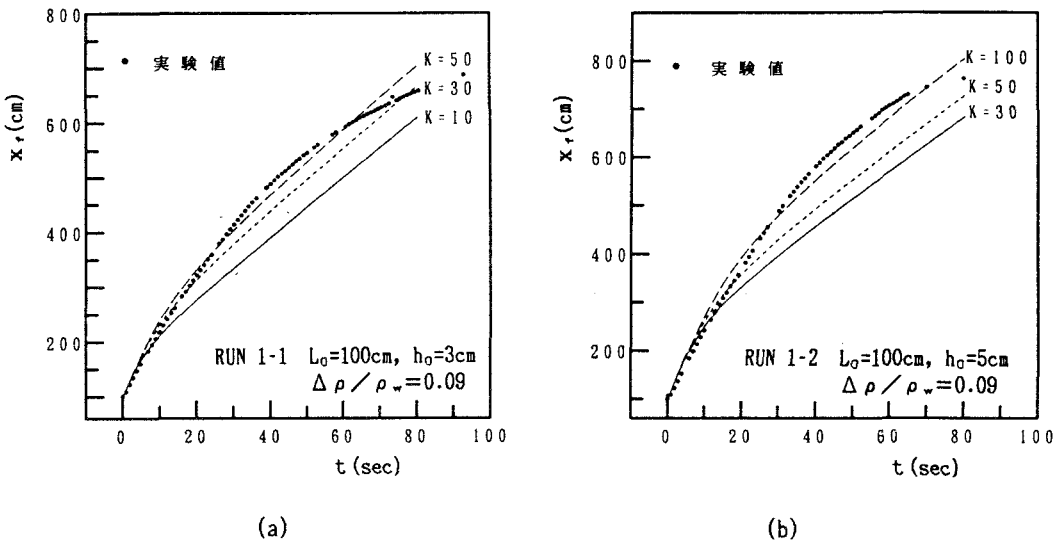


図-5 先端位置と流出開始後経過時間の関係

さ5cmの実験では流出初期に先端位置の計算値が実験値より前方に進んでいるが、この状況は初期油厚さ10cmのケースではもっと顕著である。これは、界面抵抗を、迎え角ゼロの場合の平板に沿う境界沿う理論により与えられる壁面抵抗で評価したため、流出直後の油層厚さの大きい部分で界面抵抗が過小評価されたことによると思われる。流出初期の油層厚が大きい部分に境界層理論の結果を使うとすれば圧力勾配の考慮が必要となる。いずれにしても界面勾配の大きい先端部が進行する場合の抵抗の評価は見直しは必要であろう。また、先端部は図-1に示すようにパターンが変化するが計算では先端条件としてパターンAだけの条件を用いている。今後、これらを併せて計算法を改良する予定である。

謝辞：本研究にあたり東北大学工学部首藤伸夫教授より貴重な文献をご提供頂いた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 後藤・首藤：各種津波遡上計算法と波先端条件の比較、第27回海岸工学講演会論文集、pp.80-84、1980.
- 2) Fannelop, T.K. & Waldman, G.D.: The dynamics of oil slicks, AIAA J. Vpl. 10, No. 4, pp. 506-510, 1971.
- 3) 首藤：海での石油の拡がり、第3回環境問題シンポジウム講演集、pp.82-86、1975.
- 4) 埜口：水面上に流出した油の拡がりに関する研究、中国工業技術試験所報告、第9号、1991.
- 5) 首藤・大野：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.
- 6) 大野：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.