

加速を伴う泥水サーマルの流動解析

FLOW ANALYSIS OF ACCELERATING TURBIDITY THERMALS

衛藤俊彦¹・福嶋祐介²

Toshihiko ETO and Yusuke FUKUSHIMA

¹ 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 工学研究科後期博士課程 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

² 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

The turbidity thermals are numerically analyzed using the $k-\varepsilon$ turbulence model. The basic equations are discretized by the SIMPLE method. The constants in the $k-\varepsilon$ turbulence model are set to be the standard values. The turbidity thermals are generated as the saline thermals initially. There are five conditions for calculation, i.e. the cases of the four grain size and a case of no sediment. One of these cases shows that turbidity thermal can erode sediments and accelerate in the flow direction. The variations of the travel speed, the maximum height, the maximum concentration and the contours of concentration and velocity vectors of turbidity thermals are obtained and compared with the results of the saline thermal. The characteristics of accelerating turbidity thermals are remarkably different from the other cases.

Key Words : turbidity thermal, accelerating flow, numerical analysis, $k-\varepsilon$ turbulence model, density front, concentration contours, velocity vectors

1. はじめに

泥水流は水中での乱れの作用により巻き上げられた土砂粒子が、周囲流体との密度差のために斜面方向へ流下する現象である。泥水流は海底溪谷や大きな湖底で発生し、沿岸域の砂や濁り物質を深部に運搬する機構の一部を担っていると考えられる (Inman ら¹⁾; Parker^{2),3)})。発生直後の泥水流は全体として非保存性傾斜サーマルの流動形態をとると考えられる。一定な傾斜角 θ をもつ斜面上における非定常な泥水サーマルを模式的に図-1に示す。河床から巻き上げられた土砂粒子がサーマル内で混合し、全体として非定常なフロント部を形成しながら流下する。

非定常な泥水流は、塩水や温度差などに起因する密度差を伴う保存性傾斜サーマルと類似の流れである。しかし泥水流では土砂粒子の底面からの巻き上げや、底面への沈降・堆積を伴うため、負の浮力の総量、すなわち、泥水流内の土砂の総量が流下方向に増減する。粒子の沈降フラックスが巻き上げフラックスより大きい場合、負の浮力の総量は流下に伴い減少する。一方、粒子の巻き上げフラックスが沈降フラックスより大きい場合には負の浮力の総量は流下方向に増加し、泥水サーマルは自ら加速することになる。

Parker²⁾ は定常な泥水流で層厚が流下方向には変化しない条件の下で、泥水流が加速に至る過程を解析的に検討した。その中で、ある水理条件を満たしたとき初め

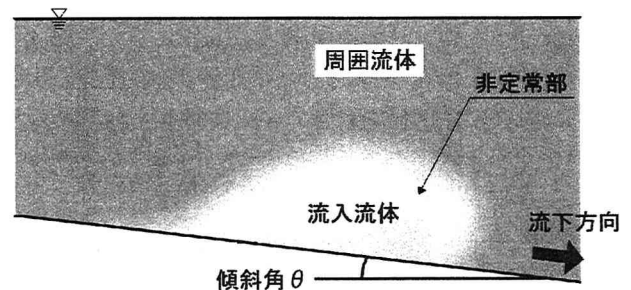


図-1 泥水サーマルの模式図

て泥水流が加速することを見出し、その条件を“ignition condition”と呼んだ。福嶋・Parker⁴⁾ はスクリップス海底溪谷での泥水流 (Inman ら¹⁾) を対象として、層積分法を用いた数値解析により加速あるいは減速する泥水流の流動特性を検討した。以上の結果を実験的に検討するため、Parker ら³⁾, Garcia⁵⁾ は定常なブルーム型の泥水流の室内実験を行った。衛藤・福嶋⁶⁾ は $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて、定常な泥水流の流速分布と濃度分布を数値的に求めた。衛藤・福嶋⁷⁾ は保存性の傾斜サーマルを対象として $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる数値解析を行い、傾斜角 30° での流動場の特徴を調べた。また、衛藤・福嶋⁸⁾ は硫酸バリウムを用いた非保存性の傾斜サーマルを対象として $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる数値解析を行い、傾斜角 10° , 30° について同様に流動場の特徴を調べた。

表 1: 計算条件

塩水濃度 c_0 (%)	塩水密度 ρ_s (g/cm ³)	淡水密度 ρ_w (g/cm ³)	相対密度差 $\Delta\rho/\rho_w$	土砂粒子密度 ρ_p (g/cm ³)	土砂粒子の粒径 D_s (mm)
5.00	1.04311	0.99922	0.04389	2.65	0.028 ~ 0.031

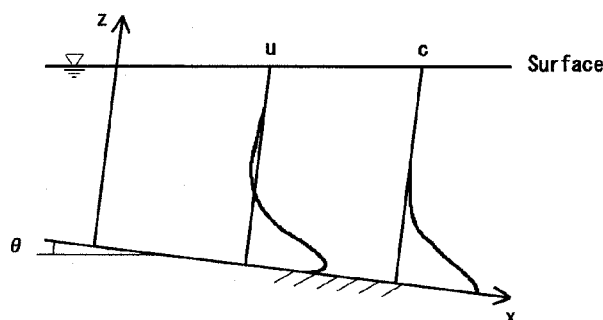


図-2 数値計算に用いた座標系

非定常な泥水流の発生は沿岸域の風波の碎波などによる流れや乱れが微細粒子を浮遊することが原因として考えられる。ここでは微細粒子によるサーマルの発生を塩水サーマルの発生で模擬し、以降の流れが加速するか減速するかを数値解析によって明らかにし、さらに、加速する泥水サーマルに着目してその流動機構を詳細に明らかにすることを目的とする。このため、底面からの巻き上げ、底面への沈降を伴うサーマル型の泥水流について、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行う。水路の底面には一様な粒径の砂が敷き詰められていると想定する。粒子の粒径が小さいとサーマルの流動に伴い、砂粒子が巻き上げられ、加速する。粒径が大きい場合には一旦砂粒子が巻き上げられても最終的には沈降が卓越し減速して静止に至る。数値解析結果よりサーマルの流下速度、最大厚さ、浮遊粒子総量などの流下方向の変化を求める。また、加速を示した条件に着目して流速ベクトル場、濃度コンター、濃度分布を求めて、泥水流内部と周囲の流動機構を調べる。

2. 傾斜サーマルの解析モデル

泥水サーマルの流動を解析するため、図-2に示すような座標系における流れを考える。一定の傾斜角 θ をもつ二次元の斜面上に、一様な密度 ρ_w をもつ淡水を満たす。水路の上流に平均濃度 c_s 、密度 ρ_s の塩水を満たし、その塩水が流動を始める。斜面上には密度 ρ_p をもつ一様な粒径の土砂粒子が敷き詰められており、この粒子が塩水の傾斜サーマルの流下とともに底面から巻き上げられる。今回の解析では巻き上げられる土砂の量が少ないと見なし、土砂粒子の巻き上げによる底面の地形変化は考慮していない。数値解析手法は基本的に衛藤・福嶋⁷⁾と同様である。すなわち、基礎方程式として連続式、 x, z 方向のレイノルズ方程式、乱流運動エネルギー k の方程式、分子粘性逸散率 ε の方程式を用いた。変更点としては、本研究では塩分の輸送と土

砂粒子の輸送の両者を扱う必要があるため、それぞれについての乱流拡散方程式を用いることである。塩分の拡散方程式は衛藤・福嶋⁷⁾と同様であり、土砂粒子の輸送は粒子の沈降性を考慮した乱流拡散方程式で表現する。以下にそれぞれの拡散方程式を示す。

(1) 塩分の拡散方程式

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + u \frac{\partial c_s}{\partial x} + w \frac{\partial c_s}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_s}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c_s}{\partial z} \right) \quad (1)$$

(2) 土砂粒子の拡散方程式

$$\frac{\partial c_p}{\partial t} + (u + w_s \sin \theta) \frac{\partial c_p}{\partial x} + (w - w_s \cos \theta) \frac{\partial c_p}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_p}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c_p}{\partial z} \right) \quad (2)$$

ここで c_p は土砂粒子の体積濃度、 u, w は x および z 方向の流速成分、 w_s は土砂粒子の沈降速度、 D は分子拡散係数である。また、 ν_t は渦動粘性係数であり、 k と ε を用いて $\nu_t = c_\mu k^2 / \varepsilon$ となる。 σ_t, c_μ は $k-\varepsilon$ 乱流モデルのモデル定数である。また塩分と土砂粒子の混合水の密度 ρ は次の式で表す。

$$\rho = \rho_0 (1 + R_g c_p) \quad (3)$$

$$\rho_0 = \rho_w (1 + R_s c_s) \quad (4)$$

ここで、 ρ_0 は塩水の密度、 $R_s c_s$ は淡水中での流入塩水の相対密度差、 $R_g c_p = (\rho_p - \rho_0) / \rho_0$ は塩水も含めた周囲流体中での土砂粒子の相対密度差である。

土砂粒子については底面からの巻き上げ、底面への沈降・堆積を考慮する必要がある。このことを表現するため、底面での土砂粒子の境界条件として以下の式を用いた。

$$\text{底面 } z = z_0 \text{ で } -\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c_p}{\partial z} = v_s E_s \quad (5)$$

ここで、 E_s は砂の連行係数であり、Akiyama and Fukushima⁹⁾の式を修正した Garcia⁵⁾の提案式を用いた。

$$E_s = A Z_u^5 / \left(1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5 \right) \quad (6)$$

ここで、 $A = 1.3 \times 10^{-7}$ 、 $Z_u = R_p^{0.6} u_* / v_s$ 、 $R_p = \sqrt{g R_g D_s D_s} / \nu$ 、 D_s は砂の粒径、 u_* は底面での摩擦速度である。この式は Z_u の値に敏感に変化し、例えば

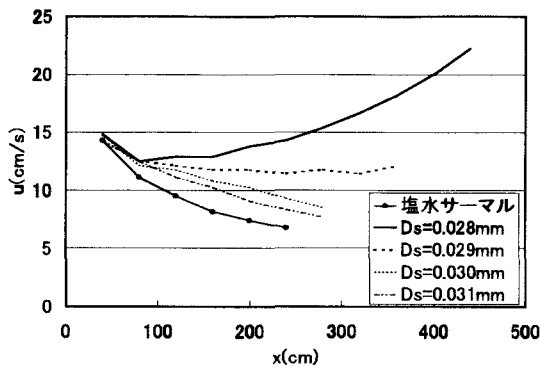


図-3 サーマルの流下速度の流下方向変化

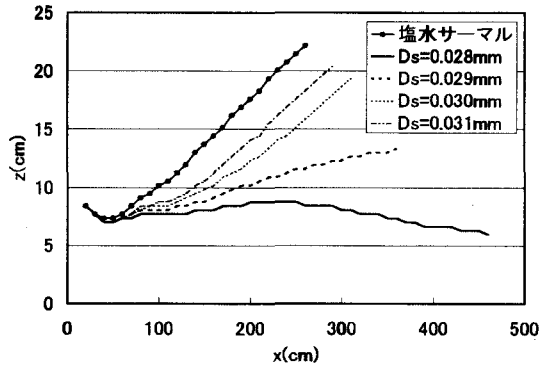


図-4 サーマルの最大厚さの流下方向変化

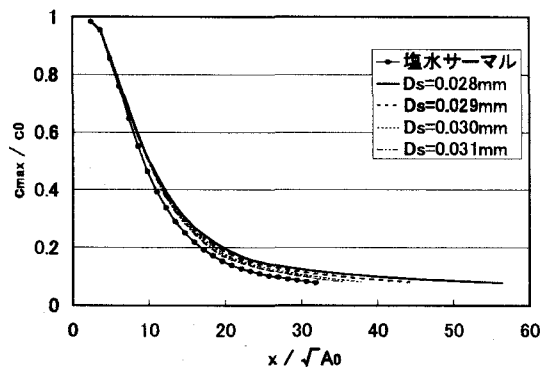


図-5 サーマルの最大塩分濃度の流下方向変化

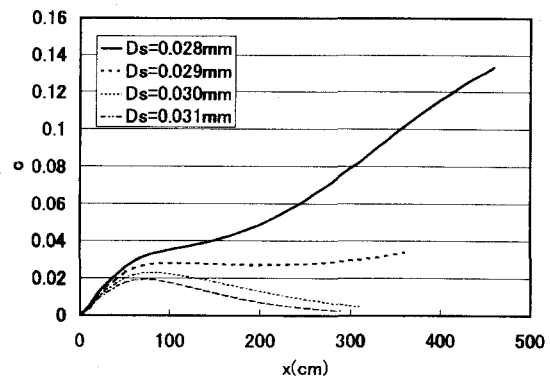


図-6 サーマル内土砂粒子の最大濃度の流下方向変化

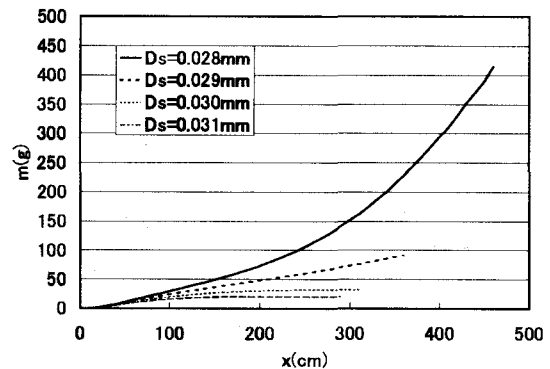


図-7 サーマル内浮遊粒子総量の流下方向変化

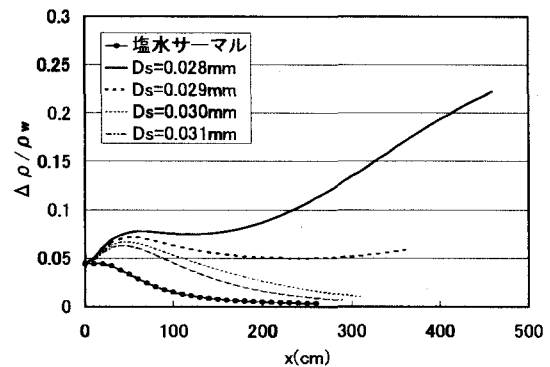


図-8 サーマルの最大相対密度差の流下方向変化

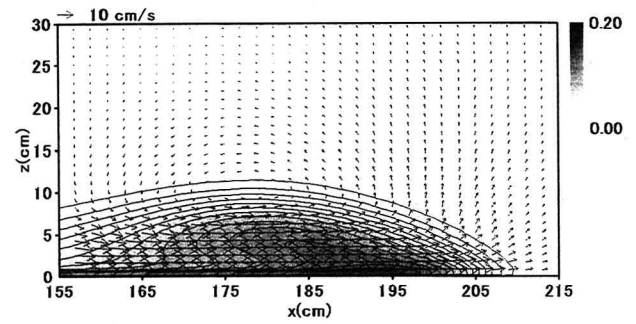
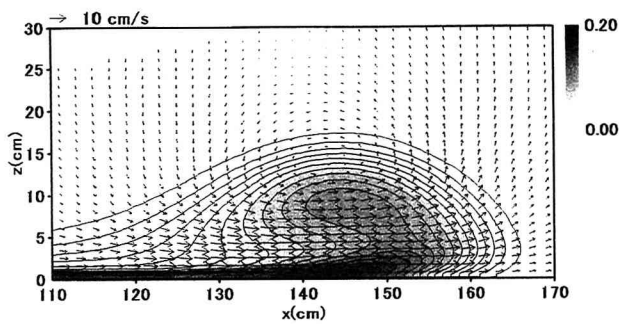
$Z_u = 1$ のとき $E_s = 1.3 \times 10^{-7}$ になり、現実的にはほぼ零になり、粒径が定まったときのしきい値があることになる。

以上の基礎方程式をバタンカー¹⁰⁾の SIMPLE 法を用いて離散化を行い、数値解析を行った。

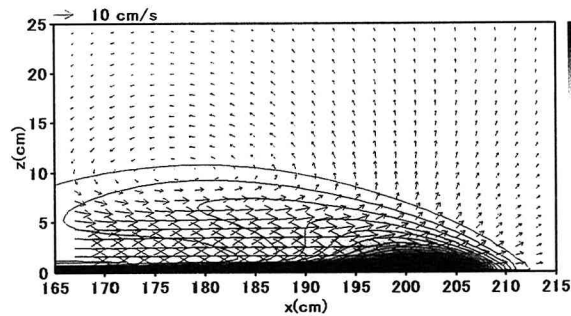
3. 傾斜サーマルの数値解析

数値計算の計算条件を表-1に示す。計算領域は x 軸方向に 500cm、 z 軸方向に 94.2cm であり、傾斜角 θ は 10° である。計算開始時には、上流端の $x = 0 \sim 10$ cm が初期塩水濃度 5% の塩水が満たされ、静止しているものとした。これより下流は、静止した淡水が満たされていると考えた。底面には密度 $\rho_p = 2.65(\text{g/cm}^3)$ の一様粒径の土砂粒子が敷き詰められていると考えた。数値計算は、時間刻みを $\Delta t = 0.1\text{s}$ として、30s が経過す

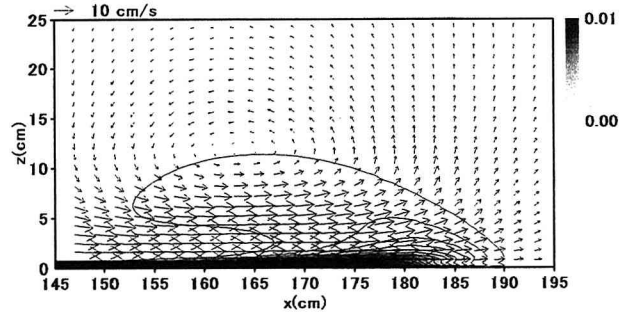
るまで行った。計算を開始すると塩水と淡水との密度差により塩水が流動を開始し、サーマルを形成しフロント状の流体塊となって流下する。塩水サーマルは底面に敷き詰められた土砂粒子を巻き上げながら流下する。数値計算の計算条件は、土砂粒子の粒径がそれぞれ $D_s = 0.028, 0.029, 0.030, 0.031\text{mm}$ のものと、土砂粒子の巻き上げがない塩水サーマルの 5 ケースとした。なお、この粒径はあらかじめ行った予備計算で、傾斜サーマルが加速状態になるものと、減速状態になるものの両方を再現する範囲として定めたものである。これらのサーマルの塩分濃度の等濃度線を基準として移動速度と厚さを求め、傾斜サーマルの流下速度、最大厚さと定義した。流体中に浮遊している土砂粒子の総量を、浮遊粒子総量として図化した。粒径の違いによる内部特性の変化を調べるため、サーマルの塩分と粒子の濃度コンターと流速ベクトルを描き、さらに土砂粒



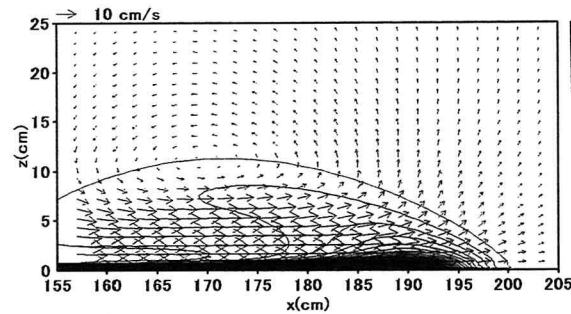
図－9 塩分濃度コンター・流速ベクトル (左：塩水, 右： $D_s=0.028\text{mm}$)



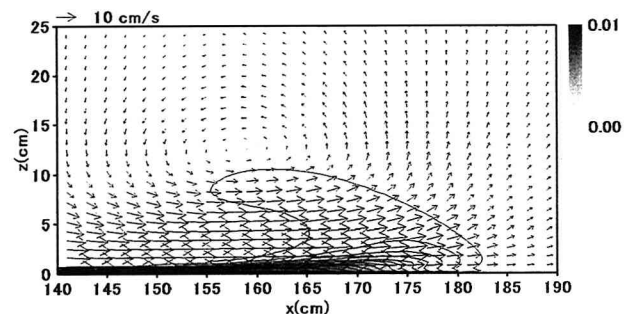
図－10 土砂粒子濃度コンター・流速ベクトル ($D_s=0.028\text{mm}$) $t=15\text{s}$



図－12 土砂粒子濃度コンター・流速ベクトル ($D_s=0.030\text{mm}$) $t=15\text{s}$



図－11 土砂粒子濃度コンター・流速ベクトル ($D_s=0.029\text{mm}$) $t=15\text{s}$



図－13 土砂粒子濃度コンター・流速ベクトル ($D_s=0.031\text{mm}$) $t=15\text{s}$

子の濃度分布を求めそれぞれ比較を行った。塩水サーマルの結果はこれまでに著者らが発表したもの^{7),8)}や他の研究者の結果¹³⁾とほぼ同じである。

図－3は、サーマルの流下速度の流下方向変化を示したものである。流下後 $x = 100\text{cm}$ の位置まではいずれの条件でもサーマルの流下速度は減少している。それ以降では $D_s = 0.029\text{mm}$ ではほぼ一定の流下速度を保っており、 $D_s = 0.028\text{mm}$ では加速している。サーマルの流下速度の増加は、底面からの土砂粒子の巻き上げが沈降・堆積を上回りサーマルの機動力であるサーマル内の粒子総量が増大したためであると考えられる。図－4は、サーマルの最大厚さの流下方向変化のグラフである。粒径が大きいものほど最大厚さの値も大きくなっている。また $D_s = 0.028\text{mm}$ 以外の条件では、最大厚さは流下方向に対し線形的な増加を示しており、 $D_s = 0.028\text{mm}$ では $x = 200\text{cm}$ 以降において厚さは減少を示している。図－5は、サーマルの最大塩分濃度

の流下方向変化を表したものである。 x 軸は流下距離を初期塩水部面積の平方根で、 z 軸は塩分濃度を初期塩分濃度でそれぞれ無次元化している。このように両軸に変数をとると計算条件の違いによる最大塩分濃度の違いは小さい。この図から、いずれも流下直後には最初に濃度が大きく減少したのち次第に緩やかに減少していく。このことから、無次元化した最大塩分濃度は粒径あるいは底面からの巻き上げ量にはよらないことが推察される。図－6は、サーマル内土砂粒子の最大濃度の流下方向変化を図示したものである。土砂粒子の粒径が $D_s = 0.030, 0.031\text{mm}$ では土砂粒子の沈降速度が大きいため、最大濃度は減少している。 $D_s = 0.029\text{mm}$ では最大濃度はほぼ一定の値を保っており、 $D_s = 0.028\text{mm}$ では $x = 100\text{cm}$ 以降で最大濃度は大幅に増加している。図－7は、サーマル内浮遊粒子総量の流下方向変化を示したものである。いずれの図も流下距離に対して浮

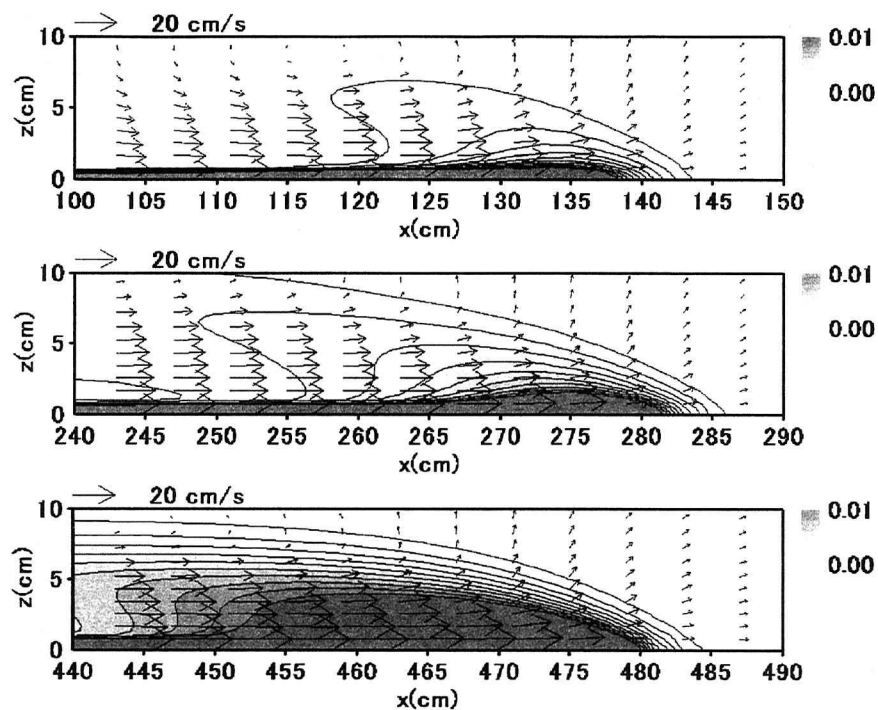


図-14 土砂粒子濃度コンター・流速ベクトル ($D_s=0.028\text{mm}$) $t=10\text{s}$, 20s , 30s

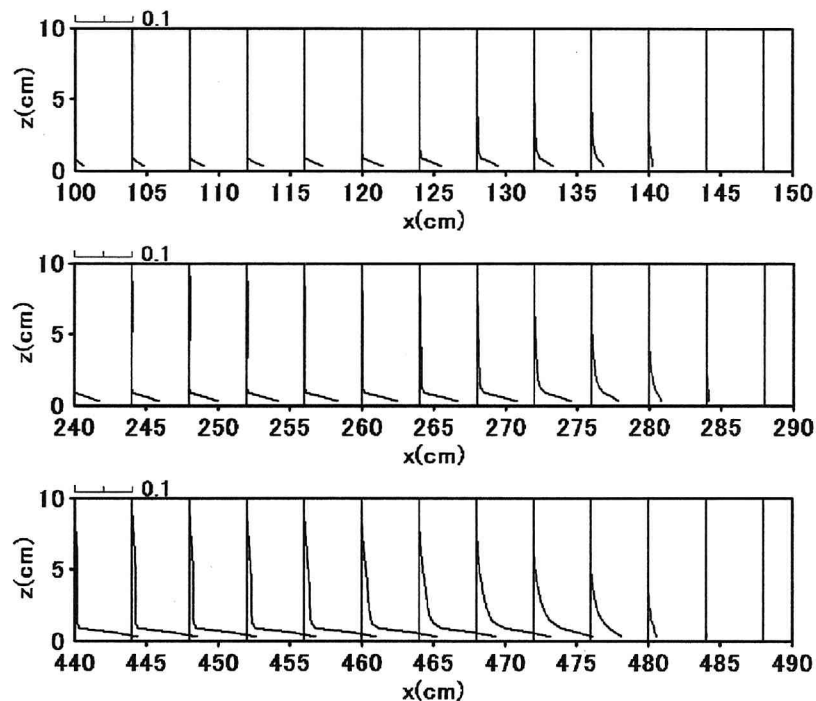


図-15 土砂粒子の濃度分布図 ($D_s=0.028\text{mm}$) $t=10\text{s}$, 20s , 30s

遊粒子総量は増加している。粒径が小さいものほど、この浮遊粒子総量の増加割合が大きいことが理解される。図-8は、サーマルの淡水に対する相対密度差の最大値の流下方向変化を図示したものである。塩水サーマル、 $D_s = 0.030, 0.031\text{mm}$ の条件では相対密度差は減少傾向にある。 $D_s = 0.029\text{mm}$ では相対密度差はほぼ一定であり $D_s = 0.028\text{mm}$ では大きく増加している。

サーマルの内部特性を調べるため、塩分濃度、土砂粒子の濃度をコンター図で図化し流速ベクトルをその上に重ねたものを、図-9~13に示す。図-9はそれぞれ、塩水サーマルと $D_s = 0.028\text{mm}$ の条件での15s後における塩分濃度の濃度コンター・流速ベクトル図である。塩水サーマルの条件ではサーマル形状は半楕円形の形状をしている。またサーマルの周囲では循環

流が形成されている。 $D_s = 0.028\text{mm}$ の条件ではサーマル形状は塩水サーマルのものと比べて、最大厚さが小さく全体として平らな形状をしている。この理由として考えられるのは、 $D_s = 0.028\text{mm}$ では底面からの土砂粒子の巻き上げにより、底面付近で流速ベクトルが増大し、上方への濃度の広がりが増えられたためと考えられる。

図-10~13 はそれぞれ、 $D_s=0.028\text{mm}$, 0.029mm , 0.030mm , 0.031mm の条件での 15s 後における土砂粒子の濃度コンター・流速ベクトルを描いたものである。 $D_s=0.030\text{mm}$, 0.031mm では、土砂粒子の濃度コンターはほとんど塩分濃度のコンターとかなり異なり、塩水サーマルの形状との違いが顕著である。 $D_s=0.028\text{mm}$, 0.029mm では、比較的塩水サーマルに近い形状を成しており、 $D_s=0.030\text{mm}$, 0.031mm と比べて全体的に土砂濃度が大きくなっている。また流速ベクトルを見ると、循環流の中心は粒径が小さいものほどその位置が低くなっている。

図-14 は、極めて強い加速傾向を示した $D_s = 0.028\text{mm}$ の土砂粒子の濃度コンター・流速ベクトル図であり、上から 10s, 20s, 30s 後のものである(図-3 参照)。この図より時間の経過とともに土砂粒子の濃度が増加し、サーマルが発達してゆく傾向が理解できる。時間の経過とともに高濃度の部分が広範囲になり、底面での流速ベクトルは増大している。

図-15 は、図-14 と同じ $D_s = 0.028\text{mm}$ に対して土砂粒子の濃度コンターと濃度分布図を描いたものであり、上から経過時間が 10s, 20s, 30s 後のものである。土砂粒子の濃度は時間の経過とともに底面付近で濃度が増加し、また上方への濃度の広がりも確認できる。この濃度分布形は塩分によるブルームの濃度分布(福嶋¹¹⁾)とはかなり異なり、むしろ開水路流れの浮遊土砂分布、あるいは地吹雪の雪粒子濃度分布に近い(福嶋ら¹²⁾)。

以上のように塩水サーマルが流下する間に底面での土砂を浮遊し、泥水サーマルに移行する現象を解析した。この論文ではさまざまな新しい知見を述べた。一方、本解析は完成されたものではなく、今後検討してゆくべき課題は多い。まず、土粒子の巻き上げ量として Garcia の式を用いた。この式は、開水路流れで生ずる浮遊土砂の濃度分布から求めたもので、泥水流に流用することの問題点がある。また、以上で示したように粒径のわずかの違いによって、計算結果が大きく異なることから、混合粒径の場合にどのような特性を示すかにも大いに関心がある。また、今回の解析では浮遊土砂量があり多くない場合を考えて、斜面の変形は無視されている。土砂の巻き上げ量が大きくなればそれに伴う地形変化を考慮した解析も必要となる。

このようなモデル化の問題はあるとしても、ここで得られた知見は重要なものが多い。Begin et al.¹³⁾ は、傾斜角を大きく変えて塩水サーマルの実験した。その結果、同じ傾斜角ではサーマル形状はほぼ相似形を保ち、半楕円形であると報告している。著者らの計算でも、保存性の塩水サーマルや粒子の巻き上げ、沈降が小さい粒子サーマルではサーマルの形状はほぼ相似形を

保つことを確認した(衛藤・福嶋^{7),8)}。一方今回のような加速する粒子サーマル(泥水サーマル)では、サーマル形状は流下方向にかなり変化し、相似形では表されない。この観点からは少なくとも巻き上げ、沈降をともなう粒子サーマルのモデルではこのことを反映させる必要があるかもしれない。

4. 結論

流下方向に加速する泥水流の流動特性を調べることを目的として、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて数値計算を行った。微分方程式の離散化には Patankar の提唱する SIMPLE 法¹⁰⁾を用いた。モデル定数には $k-\epsilon$ 乱流モデルの標準値を用いた。上流で発生した塩水サーマルが、その乱れによって底面から土砂粒子が巻き上げる条件のもとで計算を行った。土砂粒子の粒径の違いによる泥水サーマルの流動特性の変化を調べるため、粒子を浮遊しない場合と 4 種類の粒径で数値計算を行った。数値計算結果を用いて、塩水サーマルの流下速度、最大厚さなどの諸量を求め、粒径が異なることで塩水サーマルの流下方向の特性がかなり異なることが示された。数値計算を基に塩分濃度の濃度コンターと流速ベクトルを求め、土砂粒子の巻き上げのあるものとなしいものでは塩水サーマルの形状が異なることがわかった。特に急激な加速を伴うような条件では保存性の傾斜サーマルの流動特性とはかなり異なる特性を示す。土砂粒子について濃度コンターと流速ベクトル、さらに土砂粒子の濃度分布を求めた。この結果、土砂等濃度線と塩分の等濃度線とはまったく異なる形状を示すことが分かった。土砂の濃度分布形は開水路の浮遊砂流や地吹雪の分布に類似していることが分かった。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号 13650565, 研究代表者 福嶋祐介) の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Inman, D. L., C. E. Nordstrom and R. E. Flick., Annual Rev. of Fluid Mech., **8**, 275-310, 1976.
- 2) Parker, G., Marine Geology, **46**, 306-327, 1982.
- 3) Parker, G., M. Garcia, Y. Fukushima and W. Yu, J. of Hydraulic Research, **25**, 1, 123-147, 1987.
- 4) 福嶋祐介・Gary Parker, 海岸工学講演会論文集, **32**, 253-257, 1985.
- 5) Garcia, M., SAFHL, University of Minnesota, Project Report, **306**, 179, 1990.
- 6) 衛藤俊彦・福嶋祐介, 海岸工学論文集, **48**, 461-465, 2001.
- 7) 衛藤俊彦・福嶋祐介, 水工学論文集, **46**, 1043-1048, 2002.
- 8) 衛藤俊彦・福嶋祐介, 海岸工学論文集, **49**, 446-450, 2002.
- 9) Akiyama, J. and Y. Fukushima, SAFHL, Univ. of Minnesota, Ext. Memo. **195**, 1985.
- 10) パタンカー, S.V. 水谷幸夫・香月正司訳, 1985, コンピュータによる熱と流れの数値解析, 森北出版.
- 11) 福嶋祐介, 土木学会論文集, **399/II-10**, 65-74, 1988.
- 12) 福嶋祐介・衛藤俊彦・石黒慎太郎・小杉健二・佐藤威, 雪氷, **63-4**, 373-383, 2001.
- 13) Beghin, P., Hopfinger, E.J. and Britter, R.H., Jour. Fluid Mech., **107**, 407-422, 1981.

(2002. 9. 30 受付)