

温度計測に基づく感潮河道の底泥浸食過程に関する研究

EROSION PROCESS OF COHESIVE SEDIMENT IN AN ESTUARINE CHANNEL

横山勝英¹・金子祐²・高島創太郎³

Katsuhide YOKOYAMA, Yu KANEKO and So-tarou TAKASHIMA

¹正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²学生会員 東京都立大学 土木工学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³非会員 いであ株式会社九州支店 (〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜1-5-12)

The erosion process of cohesive sediment in an estuarine channel was studied using thermometers. Sixteen self-logging thermometers were attached to a fishing rod at intervals of 0.1m; 15 of them were sunk in a muddy bed and one was placed in river water. The progress of bed erosion was estimated from the difference in the water and mud temperatures. This is because the water temperature, which is essentially higher than the ground temperature, drops rapidly when flood discharge occurs. The bottom shear stress was calculated by ADCP's velocity profile; bed erosion occurs when the shear stress exceeds 1.8 N/m². The heat diffusion coefficients of the bed sediment were estimated using an equation of heat conduction. Their values suggest that the moisture content in the upper layer was greater than 200% and the lower layer comprised compacted silt.

Key Words: Erosion process, cohesive sediment, mud temperature, shear stress, heat conduction

1. はじめに

沖積河川の河口域では汽水域の生態系に配慮した管理が求められており、基盤となる地形・底質の変動特性を解明することが必要である。河川感潮域では高濁度水塊の運動によって微細土砂が逆流輸送されて河道内に堆積することが分かっているが¹⁾、河道が安定形状を維持している場合には堆積過程だけではなく浸食過程が存在しなければならない。横山ら²⁾は筑後川感潮河道において洪水後に泥質河床が低下している様子を測量データから示したが、浸食のメカニズムは不明である。

洪水時の河床変動は音響測深器、砂面計、鉄リング、着色煉瓦などを用いて計測されるが、前者2つの方法は設置場所や計測上の制約が多く、後者2つの方法は最大洗掘深しか分からないという欠点がある。そのため、感潮河道の底質浸食過程を洪水時に調査した事例はほとんど見あたらない。

底泥の巻き上げという視点からは、例えば霞ヶ浦における梅田ら³⁾の現地観測や、大型円形回転水路による渡

辺ら⁴⁾の実験などが行われており、研究成果が蓄積されているが、洪水時の大規模な浸食現象を巻き上げて説明できるかどうかについての検討が必要である。また、関根ら⁵⁾は粘着性地盤の浸食過程を詳細に観察し、浸食速度に関する実験式を提案しているが、現地での適応性については検討していない。

そこで本研究では、感潮河道の底質浸食過程を詳細に解明するために、水温計を用いた浸食計測装置を考案して筑後川感潮域に設置し、得られた温度分布から底泥の浸食特性と物性の鉛直構造について考察した。

2. 研究方法

(1) 底泥浸食過程の計測方法

洪水時の底泥浸食過程を計測するにあたり、音響測深器を水面に浸す方法はセンサーが流木で破壊される危険性があり、別の問題として橋梁から計測するために橋梁周りの洗掘の影響を受ける。砂面計を用いる方法は、測器を支持するための構造物(H鋼など)を設置すること

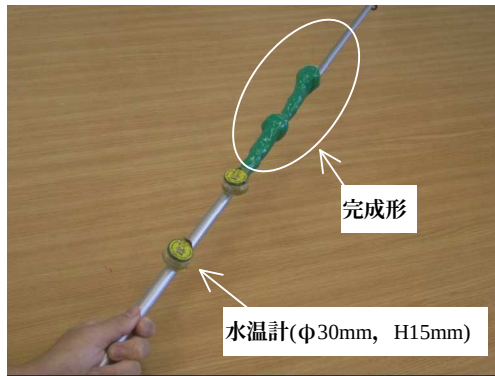


図-1 浸食計測装置

に多大な労力を要し、しかも構造物周りの洗掘が問題になる。そのため、何らかの小型センサーを強靱な構造物に頼らずに設置することが必要である。

本研究では安価な小型メモリー水温計により浸食過程を計測することを試みた。一般に、河川水温は気温・日射の影響を受けて日周変動しているが、洪水時には雨水の直接流出の影響で日常の温度変化とは別の温度傾向を示すと考えられる。また、地中は温度変化が気温や水温変化よりも緩やかである。

そこで図-1に示す接続水温計を底泥に埋設することで河川水温と泥温の違いから河床面の変動を把握することにした。直径30mm、高さ15mmのボタン型メモリー水温計(HOBO社Tidbit, 精度0.2度)を釣り竿に縛り付けた。釣り竿を利用したのは、洪水時の流体力に抵抗させずに屈倒させた方が構造物を小さくできるため、自身による洗掘を最小限に抑えられるからである。釣り竿はグラスファイバー製であるため熱伝導が悪く、地盤の温度環境を乱さない利点もある。

観測場所は筑後川感潮河道の14km地点とした。横山⁶⁾は、筑後川では河口から10～16kmの範囲にシルト・粘土が堆積しており、14km地点では砂質基盤層の上に最大で1.7mのシルト・粘土の堆積層が形成されていることを示している。さらに、このシルト・粘土堆積層は洪水時にフラッシュされることが明らかにされている²⁾。

これらの情報に基づき、図-2に示すように測定機を設置した。水温計を釣り竿に0.1m間隔で1.5mにわたって16個取り付け、さらに釣り竿を直径48mm、長さ1.3mの鋼管に接続した。鋼管が砂質基盤層に、釣り竿がシルト・粘土層に配置されるように、潜水士がハンマーを用いて河床に打設した。最上部の水温計は底泥表面から0.05m程度露出させ、河床水温を計測するようにした。設置の2週間後に埋没状況を目視点検して、釣り竿の周囲が洗掘されていないことを確認した。計測間隔は10分であり、データは装置撤去時に回収した。

河床浸食量の真値を得るために、洪水前後にデジタル魚群探知機(Eagle社Fish Strike 2000C)を用いて測深を行った。

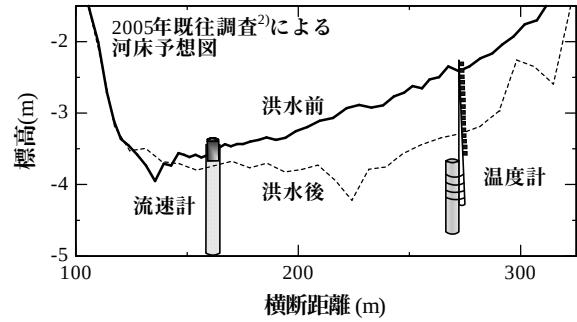


図-2 14km断面における測定機の配置図

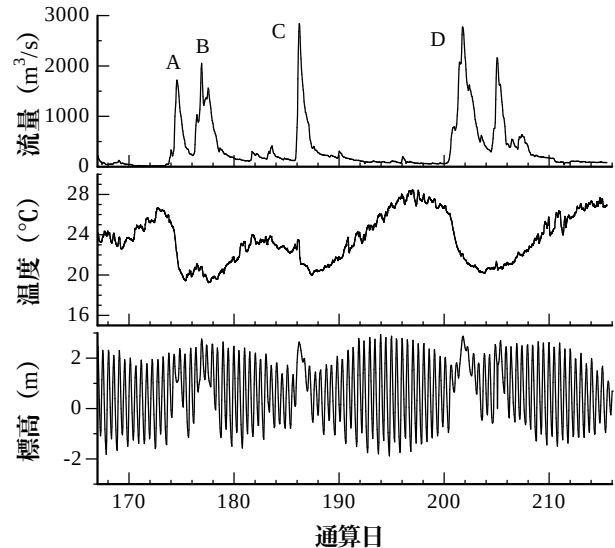


図-3 河川流量と水温、感潮域水位

(2) 流速・濁度の計測

流れと浸食の物理的な検討を行うために、超音波流速計(Nortek AS社, Aquadopp, 1MHz)を埋設した。設置場所は河床変動が少ない左岸最深部であり、全長4mの鋼管を河床に打設して、センサー部だけが水中に露出するように鋼管内に本体を納めた。計測設定は時間間隔が10分、底面ブランクが0.4m、計測セルが0.5mである。

このほかに洪水の発生状況を把握するために、水温・濁度計(アレック電子, COMPACT-CLW)を感潮域上流端(24km)に設置し、10分間隔で計測した。河川流量は国土交通省により河口から37km地点で計測されている。

3. 計測結果

(1) 河川流況

図-3に河川流量と水温、感潮域の水位を示す。6月23日(通算日174日)にピーク流量が1715m³/sの洪水Aが発生し、続いて6月25日(176日)に2051m³/sの洪水B、7月5日(186日)に2838m³/sの洪水C、7月20日(201日)に2773m³/sの洪水Dが発生した。50年間の平均年最大流量は3,000m³/sであるから、平均程度の洪水が発生したことになる。以後、日付は通算日で、洪水イベントは

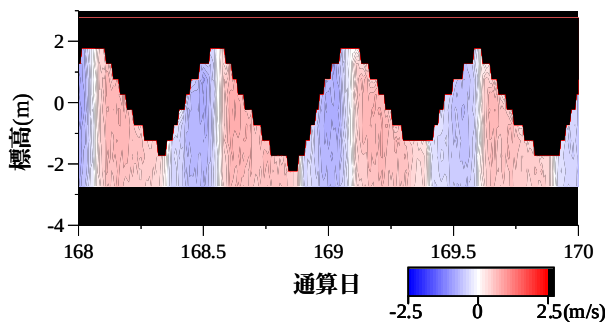


図-4 小潮時の鉛直流速分布

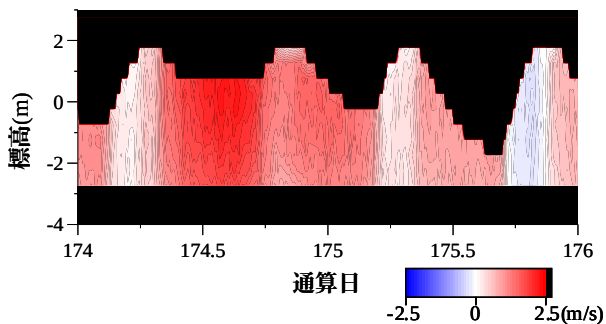


図-5 洪水時の鉛直流速分布

記号 [A] ～ [D] で呼称する。

A は中規模洪水であって大潮で発生しているので洪水水位が潮汐の中に吸収されたような形となっており、干潮時にのみ水位が上昇している。C は今期最大洪水であるが、小潮で発生しているため潮汐の影響が小さいような波形となっている。

河川水温を見ると、6 月は受熱期であるため平常時は温度が上昇傾向にあるが、洪水時には 3 ～ 7 度急低下している。本研究のアイディアは洪水時に河川水温が急変することを前提にしており、実際のデータは予想通りの変動を示した。

(2) 流速分布

超音波流速計で得られた流速鉛直分布を図-4、図-5に示す。図-4は小潮の例、図-5は中規模洪水Aである。河道の横断方向には流速がほとんど見られなかったため、主流方向のみを図示している。上流から河口に向かう流れを順流として赤色で、逆流を青色で表示している。筑後川感潮河道では小潮時にも全層一様の流向を示しており、水が強混合状態で往復運動していることが分かる。流速の最大値は約 0.7m/s であり、平常時にも比較的強い流れが発生している。

また、洪水時には上げ潮で流れが静止し、溜まった水が下げ潮で流れ出ている。洪水Aの最大鉛直平均流速は約 2.1m/s であった。また、洪水Cの最大鉛直平均流速は約 2.0m/s であった。つまり、流量は洪水Cの方が 1.65 倍大きいにもかかわらず、流速は変わらない。

この理由として、断面積の変化や潮汐との関係が挙げ

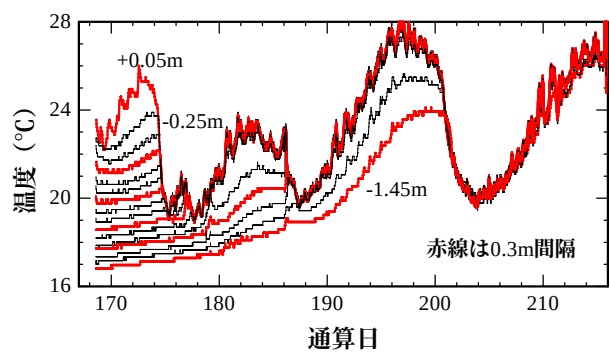


図-6 温度時系列図

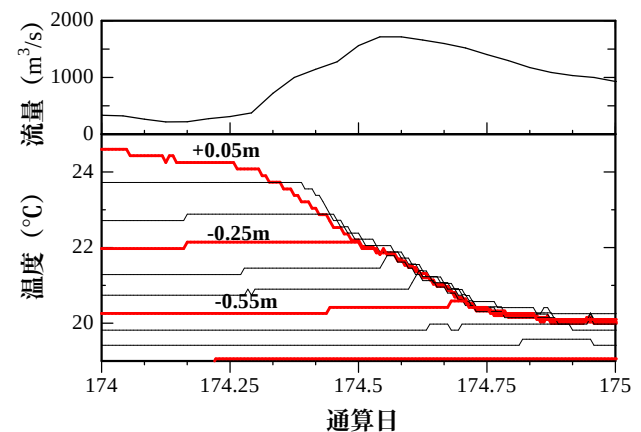


図-7 洪水Aでの温度変化

られる。前者については、洪水により河床の浸食が進行し、断面積が増大して流速が遅くなった可能性が考えられる。後者については、感潮河道では河口潮位が低いほど水面勾配が急になる。流速は水面勾配と水深、粗度の関数で表されるが、洪水Aでは大潮の干潮と洪水が重なって水面勾配が大きくなり、洪水Cにおける水深増大の効果よりも流速に効いたと考えられる。

(3) 温度分布

図-6に河床浸食計で計測された温度時系列を示す。図-3と比較すると、最上部の温度計が水温を計測しており、地中 0.05m の温度は水温変動に比べて緩慢な動きを示している。地中の深度が深くなるにつれて温度は低下し、最深部の 1.45m では表層と 8 度の温度差があった。

洪水Aが発生した 174 日には最上部の温度が急激に低下し、地中の温度が順次水温に追随している。このことは地中の温度計が上部から順に水中に露出したことを示している。この状況を拡大したものが図-7である。最上部の水温は洪水の流下にとまって 24.5 度から徐々に低下してゆき 18 時頃には 20.5 度になった。この間、地中 0.05m の温度が 9 時頃に泥温から水温に切り替わり、2 時間後には次の 0.15m の温度が水温を捉えている。17 時には 0.55m の温度計が水中に露出しており、およそ 8 時間で 0.5m が浸食されたと推測される。

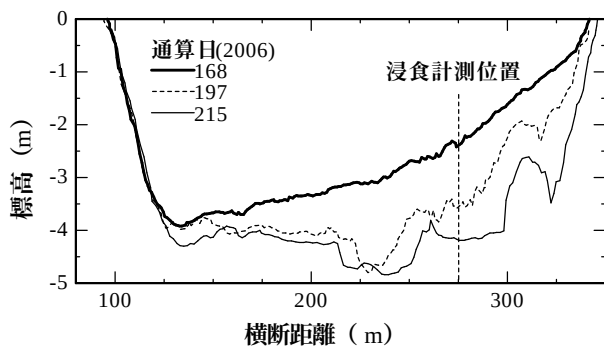


図-8 測量結果

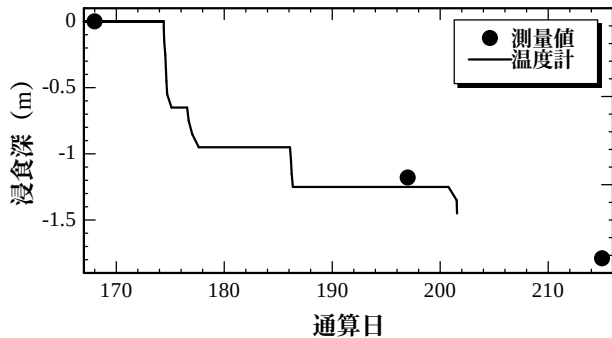


図-9 浸食計測装置による観測結果と測量値の比較

同様にして、176日の洪水Bでは温度計が0.95mまで、186日の洪水Cでは1.25mまで、201日の洪水Dでは最下部の1.45mまで露出したと考えられる。

4. 考察

(1) 浸食計測の精度

図-8に測量の結果を示す。音響測深は洪水Aの前の168日、洪水Dの前の197日と後の215日に実施した。197日までに温度計設置位置では1.18mの浸食が発生し、215日にはさらに0.61m河床が深くなった。また、超音波流速計の設置位置では河床が0.3m削れたにとどまり、測定機の配置は適切であった。温度計により推定された河床変動と測量で得られた河床高の変化を図-9に示す。197日時点の浸食位置はほぼ同じであり、水温および泥温の計測により底泥の浸食過程を精度良く把握できることが示された。しかも温度計測では浸食のタイミングを正確に把握できるので、価格の面も含めて従来の方法に比べて優れていると言える。

(2) 浸食速度と底面剪断応力

次に、河床浸食と底面剪断応力の関係を調べる。底面剪断応力は超音波流速計によって得られた流速鉛直分布から計算する。ここで、流速の計測位置と浸食計測地点は約100m離れており初期の河床状態では底面標高が1m異なるので、得られた底面剪断応力をそのまま浸食計測地点に適用することは厳密性に欠けるが、流速の横断分

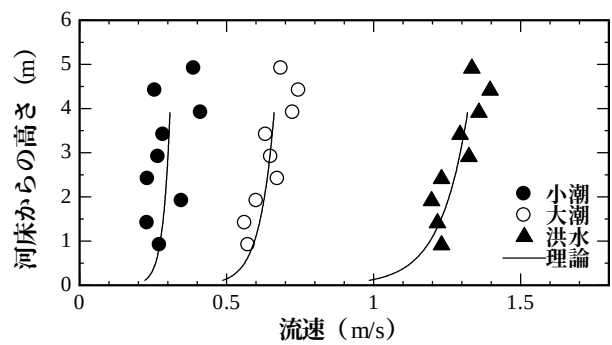


図-10 鉛直流速分布の実測値と推定値

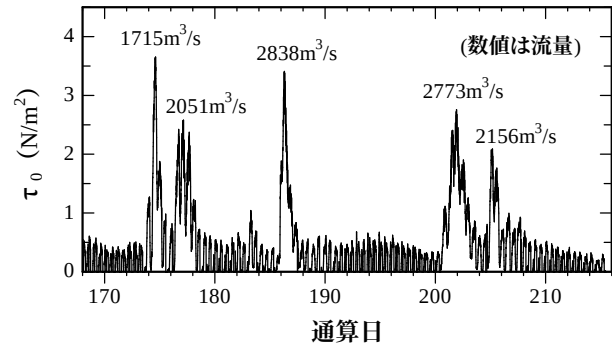


図-11 底面剪断応力の時系列

布が不明であるためそのまま適用させた。

河床底質はシルト・粘土であるため、滑面の対数流速分布式を用いて、計測された流速分布を表現する最適な摩擦速度を最小二乗法により求めた。なお、塩水楔と淡水流の相互作用で表面付近の流速は中下層と傾向が異なる場合があるため、水面下1.0m(2セル分)のデータは計算に使用しなかった。流速分布の再現結果を図-10に示す。これより小潮、大潮および洪水時の流速分布が適切に表されていることが分かる。

得られた摩擦速度を底面剪断応力に変換し、時系列表示すると図-11となった。観測地点では潮汐流によって日常的に高い底面剪断応力が発生しており、小潮では0.5N/m²程度、大潮では0.9N/m²に達している。既往の研究によれば、巻き上げ限界剪断応力は0.2N/m²程度との報告が多い。筑後川ではそれを上回る底面剪断応力が常に生じているため、高濁度水塊の発生要因の一つが河道内の底泥の巻き上げであると考えられる。

洪水時には底面剪断応力が潮汐流の数倍に上昇し、174日(洪水A)には3.7N/m²に達し、186日(洪水C)には3.5N/m²であった。洪水Aは中規模であるが、前述で述べた理由により流速が大きくなり、今期最大洪水Cよりも高い底面剪断応力が作用していたことが分かった。

図-12に底泥浸食状況と底面剪断応力の比較を示す。これより、底面剪断応力が上昇すると浸食が進行し、低下すると浸食が中断し、その閾値は概ね1.8N/m²であることが分かる。洪水Dでは201.5日付近で最下層の温度計が露出したため、その先の変動が見えない。

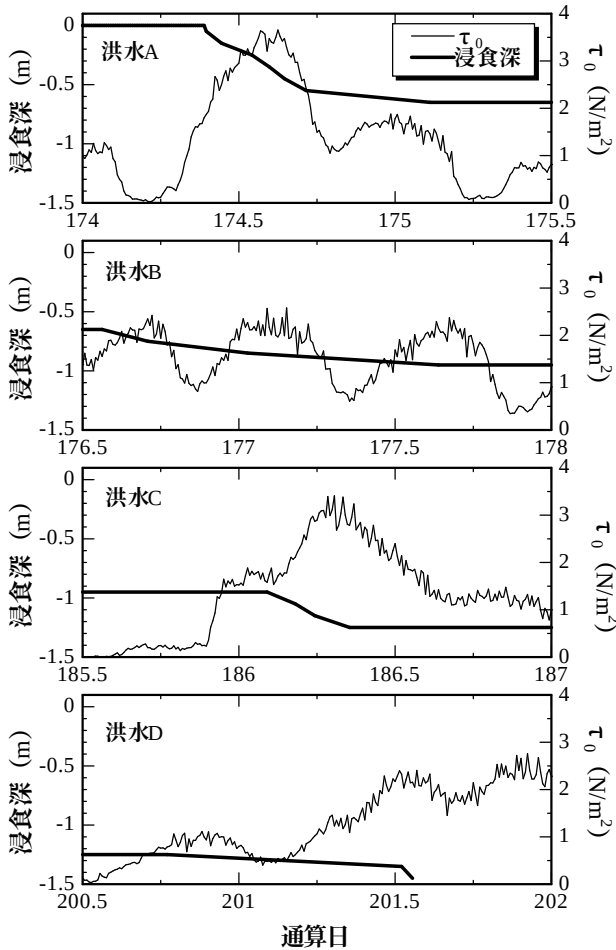


図-12 浸食の経過と底面剪断応力の変化状況

図-13 に浸食速度と底面剪断応力の相関を示す。浸食速度は次式で定義される。

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{T_{n+1} - T_n} \quad (1)$$

ここで、 ΔL は温度計の設置間隔 (0.1m)、 T_n は n 番目の温度計が水中に露出した時刻である。温度計センサー部は大きさが約 10mm であり、 ΔL が 0.1m であるため、浸食速度は 10% 程度の誤差を持つ可能性がある。

全体に右肩上がりの傾向が見られ、最下層の 16 番を除けば分散は小さい。洪水 D では最下層の水温計が露出する時間が他に比べて短い、この理由として一番下の水温度計は砂質基盤層に到達していた可能性が考えられる。砂層と粘土層の境界では粘着性が低いので、粘土層の浸食が進んで残り 0.1m を切ったところで、粘土層が砂層から剥離して、突発的なブロック破壊が発生したと推察される。

関根ら⁵⁾は S.A クレー ($D_{60}=0.016\text{mm}$) と T.A カオリン ($D_{60}=0.005\text{mm}$) を用いた水路実験から粘着性土の浸食速度 E_s (cm/s) を次のように提案している。

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} u_*^3 \quad (2)$$

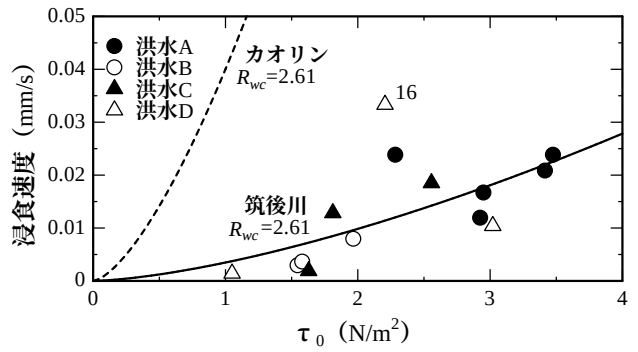


図-13 底面剪断応力と浸食速度の相関

ここで、 α (cm/s)⁻² は粘土の種類や水温に依存する係数であり、 $0.778 \times 10^{-5} \sim 3.89 \times 10^{-5}$ が示されている。 R_{wc} は水含有率 (粘土含有率 100% のとき含水比と等しい) である。横山ら²⁾は洪水前の表層底泥の性状として、平均含水比が 261%、 D_{50} が 0.011mm であることを示している。そこで水含有率を 2.61 として最適な α を算出したところ、 $\alpha = 0.10 \times 10^{-5}$ となり図中の実線が得られた。筑後川の底泥は関根らが用いた粘土と粒径が同程度であるが、 α は 1 オーダー小さく、浸食されにくいことが分かった。この差は粘土鉱物、有機物含有量、圧密期間、塩分などの違いによって生じたと考えられる。

(3) 底泥の鉛直構造

底泥の物性を熱伝導特性から検討する。媒質中の温度伝搬は熱伝導方程式で表され、定数として密度 (ρ)、比熱 (c) および熱伝導率 (λ) が用いられる。土壌は混相物であるため、係数は鉱物組成、粒径、含水比などの状態によって変化する。そのため、熱拡散方程式を解いて最適な係数を求め、既往の研究で得られた土壌係数と比較することで底質の性状を推測できる。

河床底泥は水平方向に均質であると仮定し、泥温が河川水温と地盤温度からの熱の鉛直伝達により決まるとすると、鉛直 1 次元の熱伝導方程式は次のように表せる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (4)$$

ここで T : 温度であり、 κ は温度拡散係数と言われる。

初期条件を $t=0$ における泥温の鉛直分布とし、境界条件を計算領域の上端と下端の泥温時系列として、計算値と観測値の差の 2 乗誤差が最小となる κ を求める。

洪水発生前の 169.5 日から 174.25 日までを対象として (図-6 参照)、 κ が全層一様と仮定した計算を行ったところ、表-1 の値が得られた。既往の文献値⁷⁾と比較すると、含水比 400% の湿潤泥炭地に近い値であった。ただし、数

表-1 温度拡散係数の文献値⁷⁾と解析値

		含水比(%)	温度拡散係数 κ ($\times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
文 献 値	泥炭地	400	0.12
	粘土	25	0.51
	砂	25	0.74
		計算領域(m)	
解 析 値	全層	+0.05~-1.45	0.16
	表層	+0.05~-0.65	0.12
	底層	-0.75~-1.45	0.45

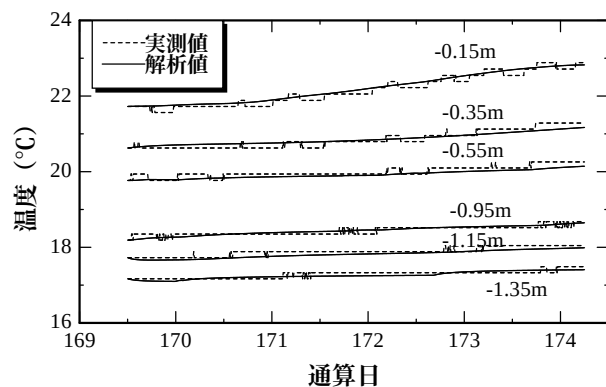


図-14 底泥の温度分布と熱伝導方程式の解析解

値解析解は中心温度計から上下に離れるにつれて誤差が拡大する傾向にあったため、上層と下層を分けてそれぞれ κ を一定として再計算した。その結果を表-1と図-14に示す。温度の計算値は実測値を良好に再現できており、温度拡散係数が底泥堆積層の上下で異なることが確認された。得られた係数と文献値を比較すると、上層は含水比が400%程度の泥炭状であり、下層は含水比が25%を上回る粘土状であると推測される。

既往の観測²⁾によれば表層の含水比は200%~300%であるため、熱拡散方程式から推測された表層媒質の性状は観測値に近い。したがって下層に関しても温度拡散係数と媒質の性状に関する対応が同様であると考えられ、下層底泥は上層よりも含水比が低く、締め固まっていると予想される。感潮河道では高濁度水塊がシルト・粘土を絶えず内陸側に輸送しているため、堆積作用が卓越する領域ではシルト粘土が降り積もって下層ほど締め固まった状態になる。したがって、今回は二層に分けて計算したが、実際には含水比が下層に向かって連続的に減少してゆくものと考えられる。

以上より、温度変化特性の分析からは底泥の浸食速度が一価の相関関係にあることが示され、熱伝導解析により底泥の含水比が上下で異なることが示された。しかし、2つの底泥状態は矛盾しており、含水比が低くなれば浸食速度は遅くなると考えられる。結果の整合性が悪い原因として、下層ほど洪水の経験回数が多いため変形や歪みが蓄積しており、含水比が低いためにひび割れが生じやすい状態にあった可能性が考えられる。そのため、水中に露出した際にブロック破壊が発生して、結果的に表層と同程度の浸食速度になったと推察される。

5. まとめ

本研究では感潮河道の底質浸食特性を明らかにするために、温度計を用いた浸食計測方法を考案し、筑後川において洪水期の観測を実施した。得られた浸食量は測量結果と良い一致を示し、さらに底面剪断応力の増大に伴って浸食現象が推移する様子が詳細に捉えられた。

底面剪断応力と浸食速度の関係を調べたところ両者には良い相関が認められたが、S.A クレーやT.A カオリンを用いた既往の実験よりも底質の粘着性が高い状態であると推測された。また、熱伝導方程式を解いて最適な温度拡散係数を求めたところ、上層と下層の含水比の違いが係数に現れた。下層は上層よりも締め固まっていると推測されたが、この違いは浸食速度に反映されていなかった。観測期間内に洪水が連続的に発生したため、下層ほど繰り返し応力の影響を受けて破壊浸食が生じやすい状況になっていたと推察された。

謝辞：本研究の実施にあたり、筑後川河川事務所ならびに筑後大堰管理所からは水位・流量のデータを提供して頂いた。また平成18年度科学研究費補助金（若手B、横山勝英）、及び河川環境管理財団河川整備基金の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)宇野誠高, 横山勝英, 森下和志, 高島創太郎, 大角武志: 熊本県白川河口域における土砂動態, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.561-565, 2002.
- 2)横山勝英, 山本浩一, 一寸木朋也: 筑後川感潮河道における地形・底質の季節変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, 2006. (印刷中)
- 3)梅田信, 長峯知徳, 長広遙, 石川忠晴, 宇田高明: 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.1171-1176, 2001.
- 4)渡辺亮一, 山崎雅義, 棚田哲也: 回転円形水路における底泥の巻き上げに及ぼす生物膜の影響に関する実験的検討, 水工学論文集, 第50巻, CD-ROM, 2006.
- 5)関根正人, 西森研一郎, 藤尾健太, 片桐康博: 粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察, 水工学論文集, 第47巻, pp.541-546, 2003.
- 6)横山勝英: 筑後川感潮河道における1950年代以降の底質変化と河床変動の関係, 海岸工学論文集, 第53巻, 2006. (印刷中)
- 7)竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座1, 東京大学出版, 1981.

(2006.9.30受付)