弱混合型, microtidalである都川河口域における粒子状物質の集積

成 田 高 秀* 町 田 基**
 相 川 正 美*** 立 本 英 機**

Accumulation of Suspended Particulate Matter in Weakly Mixed, Microtidal Miyako River Estuary

Takahide NARITA*, Motoi MACHIDA**
 Masami AIKAWA*** and Hideki TATSUMOTO**

* Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi 263-8522, Japan

** Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi 263-8522, Japan

*** Faculty of Science, Kisarazu National College of Technology, 11-1 Kiyomidai-Higashi 2-Chome, Kisarazu-shi 292-0041, Japan

Abstract

The turbidity maximum (TM) is a special region where the maximum concentrations of suspended particulate material (SPM) occur relative to SPM concentrations both upstream and downstream of an estuary. Therefore, SPM concentrations show a specific distribution in an estuary. Published observations of SPM concentrations within a short, weakly tidal, and microtidal estuary are not sufficient. We investigated longitudinal and vertical distributions of SPM and salinity at spring and neap tides in the weakly mixed, microtidal MIYAKO river estuary. The maximum concentration of SPM in the water column of the tidal area occurred at a constant distance from the mouth of the MIYAKO river estuary at ebb tide. The phenomena of the maximum concentration of SPM in the water column of a tidal area do not correspond to the definition of TM. The distance of the maximum concentration of SPM from the river mouth is not affected by tidal range. The maximum concentration of SPM in the water column of a tidal area increases with tidal range. The order of the maximum concentration of SPM in the MIYAKO river estuary is comparable to that in other microtidal estuaries. We presumed the export of SPM in the MIYAKO river from our own investigated data.

Key words : macrotidal, weakly mixed estuary, SPM, salinity, tidal range

1. はじめに

緩混合および強混合型の河口域では、淡水および海水中の粒子状物質 (SPM) 濃度に比べて高い値の最大値が現れる流域が発生し、これをTurbidity Maximum (TM) と定義している¹⁾。また、SPMは温度躍層および密度躍層に集積する傾向があり^{2)~3)}、それら二つの要因によってSPMは河口域内において特異な分布を示す。SPM濃度を追跡し、その輸送を調査することは、SPMに結合している栄養塩、重金属、および合成有機化合物のfateを知る上で重要である。またTM形成に関して、microtidal, 弱混合型河口域の調査報告が少ない⁴⁾。そこで本研究では、microtidalで弱混合型に属する都川河口域の大潮満潮および干潮、小潮干潮時の塩分、SPMの流下方向および深さ方向の濃度分布を調べ、TM形成の有無を確認し、さらに塩分躍層の発達がSPMの濃度分布に与える影響および河口域内のSPM濃度が潮位差にどう影響されるかを検討した。

2. 調 査

2.1 調査地点

今回調査地点に選んだ千葉市内を流れる都川 (Fig. 1) およびその河口域の特徴について述べる。都川河口域に近い千葉灯標において、大潮における年平均潮位差は1.8mである⁵⁾。潮位差が2m未満なので、Davies⁶⁾とHayes⁷⁾の分類から、都川河口域はmicrotidalである。2003年の都川の淡水流量は、千葉市の降水量⁸⁾のデータを下に推定した。塩水が遡上する距離は、河口から3km未満であり、他国の河口域と比べて極端に短い⁴⁾。

2.2 サンプルング地点

水試料のサンプルング地点をFig. 1に示す。2003年4月10日の小潮干潮時、4月17日大潮干潮時、6月21日小潮干潮時、7月1日の大潮満潮時および干潮時の前後1時間以内に一定区間で流下方向および深さ方向でサンプルングを行った。流下方向の調査地点は、4月10日および4月17日は河口、河口から約500m, 710mおよび900m上流の地点、6月21日および7月1日は河口から約700m, 900m, 1300m, 1800m上流の地点であった。また、干潮時には深さ10cmごとに、満潮時は20cmごとに、ロープに自主制作した採水瓶を取り付け、採水を行った。各サンプルング地点において採水と同時に鍾をつけたロープで水深を測定し、bottom lineを決定した。

* 千葉大学大学院自然科学研究科物質化学工学専攻 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

** 千葉大学工学部 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

*** 木更津工業高等専門学校 〒292-0041 木更津市清見台東211-1

Fig.1 Sampling locations in the MIYAKO River.

その結果、常に河口から約900m上流の地点にSPMが高濃度で集積している層が見られたので、その地点で大潮および小潮の干潮時を挟んで1時間以内に、深さ方向のサンプリングを7月16日、10月23日の大潮および7月23日、10月5日の小潮の干潮時に行った。

2.3 分析方法

2.3.1 塩分濃度

塩分 (psu) はHORIBA U-2001とATAGO HAND REFRACTOMETERで測定した。

2.3.2 SPM濃度

焼き入れ済み (550℃で1時間) Whattman GF/Fを使用し、試料水をろ過後、110℃で2時間乾燥して重量を測定した⁹⁾。

3. 結果

4月10日、17日、6月21日および7月1日の流下方向および深さ方向の塩分およびSPM濃度の分布を調査したもののうち、4月10日の小潮干潮時と、7月1日の大潮満潮および干潮時の結果を示す。

3.1 大潮および小潮における塩分およびSPM濃度分布の結果—断面図

調査結果により、都川河口域は満潮時および干潮時に成層化していることがわかった。深さ方向で塩分勾配がほとんどの地点でみられ、塩分躍層の水深を定量的に指摘することが困難であった。そこで本研究では同一地点の深さ方向での採水ポイント2点間の水深変化10cmあたり、塩分が4psu以上変化する層を塩分躍層と定義した。

3.1.1 4月10日小潮干潮時

4月10日小潮干潮時の河口から約900m上流の地点までの塩分分布をFig. 2(a)に示す。調査した干潮時と、満潮時の潮位差は、0.8mであった。Fig. 2(a)にみられるように、各調査地点において塩分躍層が確認され、地点4 (河口から約900m上流) において深さ40–70cm、地点3 (河口から700m上流) では40–60cm、地点2 (河口から約500m上流) で40–60cm、地点1 (河口) で30–50cmにみられた。

各地点の塩分躍層の深さからみると、河口から約900m上流の地点にかけて、深さ70cm以上は27–28psuの塩水で満たされており、上層との混合は弱かった。

4月10日小潮干潮時の河口から約900m上流の地点までのSPM濃度の分布をFig. 2(b)に示す。Fig. 2(b)にみられるように、SPM濃度は地点2以外では、深さ方向においてピーク

を示した。SPM濃度は、地点4において深さ60cm ($31.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、また地点3において60cm ($22.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) でピークを示した。地点2において深さ100cmで最大値 ($22 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) を示したが、採水ポイントが100cmで途切れていたためピークかどうか定かではなかった。さらに、SPM濃度は地点1において80cmでピークを示した ($12.7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)。SPM濃度のピークは、地点4で最大 ($31.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) であった。

SPM濃度のピークは、河口から約900m上流地点の深さ60cmで調査した感潮域内の最大値を示した。各地点におけるSPM濃度のピークは、河口に近づくに従い小さくなった。SPM濃度のピークと塩分躍層の位置は、一致するとは限らなかった。

3.1.2 7月1日大潮

調査は、はじめに満潮時、引き続いて干潮時の調査を行った。干潮時と満潮時の潮位差は、1.8mであった。

(1) 7月1日大潮満潮時

7月1日大潮満潮時の河口から約700m上流から約1800m地点までの塩分分布をFig. 3(a)に示す。Fig. 3(a)にみられるように、各調査地点において塩分躍層が確認され、地点6 (河口から約1800m上流) において深さ40–60cm、地点5 (河口から約1300m上流) では20–40cm、地点4 (河口から約900m上流) では20–40cm、地点3 (河口から約700m上流) では20–40cmにみられた。

各地点の塩分躍層の深さからみると、河口から約700m上流から約1800m地点にかけて、深さ60cm以上は24–26psuの塩水で満たされており、上層との混合は弱かった。

7月1日大潮満潮時の河口から約700m上流から約1800m地点までのSPM濃度分布をFig. 3(b)に示す。Fig. 3(b)にみられるように、すべての地点でSPM濃度の鉛直分布はピークを示し、地点6において深さ80cm ($9.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、地点5では60cm ($7.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、地点4では80cm ($8.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、地点3では100cm ($10.4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) でピークを示した。

SPM濃度のピークおよびSPM濃度は後に示す干潮時よりも全体的に濃度が低かった (満潮時に調査したSPM濃度の総平均: $6.1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$; 干潮時に調査したSPM濃度の総平均 $19.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)。またSPM濃度のピークは、地点3 (河口から約700m) の深さ100cmで最大 ($10.4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) であった。

(2) 7月1日大潮干潮時

7月1日大潮干潮時の河口から約700m上流から約1800m地点までの塩分の分布をFig. 4(a)に示す。Fig. 4(a)にみられるように、塩分躍層が地点3のみで確認された。地点6の採水した水は、淡水であった。地点5で採水した水は、表層と深さ10cmでそれぞれ3および4psuであった。地点4では、今回定義した塩分躍層はみられなかった。地点3では、塩分躍層が深さ20–60cmにみられた。

各地点の塩分躍層の深さから、地点3の深さ60cm以上では23psuの塩水が満たされ、上層との混合が弱い、そのほかの地点では淡水と海水が上下層で混合されていた。

7月1日大潮干潮時の河口から約700m上流から約1800m地点にみられるように、地点3、4の深さ方向において、SPM濃度はピークを示した。SPM濃度は、地点6において、調査区間中最大値 ($37.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) を示し、地点5では深さ10cmで最大値 ($22.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) を示した。SPM濃度は、地点4において50cm ($31.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、地点3において20cm ($22.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) でピークを示した。調査区間中のSPM濃度の最大値は、淡水域の地点6においてみられ、一方で感潮域では、地点4

Fig.2(a) Distribution of salinity at ebb tide of neap tide in MIYAKO River on 10 April 2003.

Fig.2(b) Distribution of concentration of SPM at ebb tide of neap tide in MIYAKO River on 10 April 2003.

Fig.3(a) Distribution of salinity at flood tide of spring tide in MIYAKO River on 1 July 2003.

Fig.3(b) Distribution of concentration of SPM at flood tide of spring tide in MIYAKO River on 1 July 2003.

Fig.4(a) Distribution of salinity at ebb tide of spring tide in MIYAKO River on 1 July 2003.

Fig.4(b) Distribution of concentration of SPM at ebb tide of spring tide in MIYAKO River on 1 July 2003.

の深さ50cmで最大 ($31.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) であった。

SPM濃度のピークは、大潮干潮時に、河口から約900m上流地点の深さ50cmで感潮域内の最大値を示した。満潮時では、SPM濃度の最大ピークは河口から約700m上流の地点にみられるが、干潮時の約3分の1であった。干潮時では、地点3, 4にかけてSPM濃度のピークが、流下方向で小さくなった。また干潮時にみられたSPM濃度のピークと塩分躍層の位置は、地点3のみ一致した。調査区間内のSPM濃度は干潮時のほうが満潮時よりも高かった。

4月10日および7月1日以外にも、4月17日大潮干潮時、5月2日大潮干潮時および6月21日小潮干潮時の流下方向および深さ方向の調査においても、河口から約900m上流の地点に感潮域内最大SPM濃度を確認できた (Fig. 5)。よって、

感潮域内の最大SPM濃度が、大潮および小潮の干潮時に河口から900m上流の地点の水中に現れるといえる。また、SPM濃度は感潮域の各地点において深さ方向でピークを示すが、干潮時のほうが満潮時よりも高い。さらに、塩分分布から、都川は弱混合で成層化しており、また今回定義した塩分躍層とSPM濃度のピークは一致するとは限らないといえる。

3.2 感潮域内最大SPM濃度と潮位差の関係

4回の流下方向および深さ方向の調査 (4月17日および6月21日は示していない) で確認された感潮域内最大SPM濃度は、4回の定点調査 (Fig. 6) でも確認できた。7月16日は深さ50cm ($31 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、7月23日は深さ110cm ($16.4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、10月5日は深さ40cm ($10.4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、10月26日は

Fig. 5 Each peak concentration of SPM at ebb tide on 16 April, 17 April, 21 June, and 1 July.

Fig. 7 The relationship between SPM concentrations and tidal range.

Fig. 6 Distributions of salinity and concentration of SPM at ebb tide of spring tide on 16 July(a), neap tide on 23 July(b), neap tide on 5 October(c), and spring tide on 26 October(d).

深さ100cm (15.8mg · l⁻¹) にみられた。

これら計8回の調査でみられた干潮時の感潮域内最大SPM濃度と潮位差は、4月10日を除けば比例関係にあった ($R^2=0.8156$; Fig. 7)。潮位差が大きい干潮時ほど、感潮域内最大SPM濃度が大きくなるといえる。

4. 考察

4.1 Microtidal, 弱混合型都川河口域における感潮域内最大SPM濃度の形成

都川河口域においてSPM濃度は、大潮および小潮の干潮時に河口から約900m上流の地点において、深さ方向で調査区間中最大のピークを示す。満潮時にはみられない。ゆえにSPMは大潮および小潮の干潮時に、河口から約900m上流の地点の水中に、調査した感潮区間中、最も多く集積している。また7月1日の調査では、淡水中のSPM濃度のほうが、感潮域内での最大濃度よりも高かったために、今回示した感潮域内最大SPM濃度の出現は、他の河口域で報告されたTMの定義とは合致しない現象である。

大潮および小潮の干潮時に共通してみられたことから、感潮域内最大SPM濃度の発生する河口からの距離は、潮位差 (0.8–1.8m) に影響を受けていない。約900m上流付近より下流は水深が大きく、支流 (よし川: Fig. 1) と合流していることから、流速が抑えられて滞留時間が長くなっ

ていることが原因と考えられる。

感潮域内最大SPM濃度および各地点のSPM濃度のピークの深さと塩分躍層の深さは、一致するとは限らない。ゆえに、SPMは今回定義した4psu/10cmの塩分躍層よりも塩分の勾配が小さい層や、塩分一定の層にも集積する場合があると考えられる。感潮域内最大SPM濃度が発生する深さ、および各地点においてSPMが集積する深さは、塩分勾配以外の影響を受けていると考えられ、SPM粒子の密度が、影響していると考えられる。

Microtidal, 弱混合型河口域である都川において、SPMが大潮および小潮干潮時に河口から一定距離の上流の水中に集積して、感潮域内最大SPM濃度を示す。

今回の調査では、川底付近を調査できていない。今後、川底付近の調査およびデータも含めて感潮域内最大SPM濃度を議論すべきだろう。またほかの河口域では、淡水流量に応じてTM位置が移動することが報告されている¹⁾が、今回は感潮域内最大SPM濃度の河口からの距離に変化はなかった (4月10日、17日、6月21日および7月1日)。ただし季節的な淡水流量の変動を考慮した調査をしていなかったため、今後は淡水流量変動に対する感潮域内最大SPM濃度の発生位置の変動を検討する必要がある。

4.2 潮位差が感潮域内最大SPM濃度に与える影響

4回の流下方向、深さ方向の調査および4回の定点調査の結果から、4月10日の結果を除けば潮位差が大きいほど、感潮域内最大SPM濃度が高いといえ、本調査の結果は、他のmicrotidal, mesotidal, macrotidal, hypertidalなどの様々な潮位差および混合形式を有する河口域のTM内SPM濃度と潮位差の関係に類似している^{4), 10)}。

潮位差が大きいほど、引き潮速度が速くなり、上流の底泥が多く再懸濁され、輸送されるからではないかと考えられる。潮位差が大きいほどSPM濃度が高いのは、潮汐流の速い大潮ほど底泥再懸濁、侵食の強度が大きくなるからとされている⁴⁾。一方、感潮域内最大SPM濃度と潮位差の関係からずれた4月10日は、前前日と前日を合わせて33.5mmの降雨量があったため⁸⁾、淡水流量が増し、土壌や底泥の侵食および輸送量が増え、約900m上流地点での集積量が増加したから、潮位差と比例関係になかったと考えられる。

河口域内最大濃度SPMの桁数は、ほかのmicrotidal河口域で観測されたTM内のSPM濃度に匹敵している (Patos Lagoon: 30 mg · l⁻¹; Delaware: 100 mg · l⁻¹; Hawkesbury: 86 mg · l⁻¹)⁴⁾。都川河口域は、他のmicrotidal河口域と、

淡水流量（今回未測定）、塩水侵入距離、深さおよび滞留時間（今回未測定）などの条件が違うが、SPM濃度の桁数が一致していることから、河口域内のSPM濃度は主に潮位差によって決まるといえる。

4.3 都川河口域におけるSPM輸送

今回の調査結果から次のようなことが明らかとなった。大潮、小潮の干潮時に、感潮域では河口から約900m上流の地点にSPMが最も多く集積する。SPMが集積する量は、潮位差が大きいほど多い。感潮域におけるSPM濃度のピークは河口に向かって小さくなる。

以上のことから、都川河口域においてSPMは、次のような輸送経路を経ると考えられる。感潮域上部の河床に沈降集積した底泥が潮位差に応じて再懸濁され下流へ流される。それらが河口から約900m上流地点のある深さに集積する。その後希釈されながら海域へ輸送される。

SPMは溶存物質をpH、塩分およびDOなどの変化に応じて吸脱着をするため、SPMが高濃度に集積すると、吸脱着する量が大きいと予測される。そのためSPM集積が周辺の水質と溶存物質輸送に与える影響は大きいと考えられる。今後はSPMの輸送過程が溶存物質に与える影響を調査する必要がある。

5. まとめ

1) 干潮時に、都川河口域の河口から約900m上流地点の水中に感潮域内最大SPM濃度が形成される。そのことから干潮時に、SPMは、河口から約900m上流の地点のある深さに、調査した感潮区間中、最も多く集積している。

2) 感潮域内最大SPM濃度の発生する河口からの距離は一定で、潮位差に影響を受けていない。約900m上流地点の下流で水深が大きいことや、支流と合流していることから、流速が抑えられて滞留時間が長くなっていることが、原因と考えられる。

3) 感潮域内最大SPM濃度は、潮位差が大きいほど高い。

ほかの潮位差、および混合形式を有する河口域と同じ傾向である。潮位差が大きいほど、引き潮速度が速くなり、上流の底泥やSPMが多く再懸濁され、輸送されるからではないかと考えられる。

4) 感潮域内最大SPM濃度の桁数は、ほかのmicrotidal河口域のTM内SPM濃度の結果に匹敵しており、河口域内のSPM濃度は潮位差によって決まると考えられる。

5) 調査結果から都川水中のSPMの輸送経路を推定した。
謝 辞

本研究の調査企画の段階から産業技術総合研究所鷺見栄一氏には貴重な意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

（原稿受付2004年11月15日）

（原稿受理2005年 3月14日）

参 考 文 献

- 1) Wai, O.W.H., Wang, C.H., Li, Y.S. and Li, X.D. (2004) formation mechanisms of turbidity maximum in the Pearl River estuary, China, *Marine Pollution Bulletin*, **48**, 441.
- 2) 鷺見栄一, 鋤崎俊二 (2001) 沿岸海域の懸濁態粒子の粒径分布の現地測定とデトリタス分布, 海岸工学論文集, 第48巻, 1101-1105.
- 3) Rosa, Fernando (1985) Sedimentation and sediment resuspension in lake ONTARIO, *Great Lakes Research*, **11**, 13.
- 4) Uncles, R.J. (2002) The dependence of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time, *Continental Shelf Research*, **22**, 1835.
- 5) 財団法人 日本水路協会 (2003) 電子潮見表 2003年版.
- 6) Davies, J.L. (1964) A morphogenic approach to world shorelines, *Zeitschrift für Geomorphologie*, **8**, 127-142.
- 7) Hayes, M.O. (1975) Morphology of sand accumulations in estuaries, In: Cronin, L.E. (Ed.), *Estuarine Research. Geology and Engineering*, Vol.2. Academic Press, New York, PP. 3-22.
- 8) 気象庁 <http://www.data.kishou.go.jp/>
- 9) JIS K0102.
- 10) Geyer, W.R., Hill, P.S. and Kineke, G.C. (2004) The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows, *Continental Shelf Research*, **24**, 927.