

山崎川における塩分遡上及び河床形状が水質に与える影響

指導教員 富永晃宏 教授

室屋 京介

1. はじめに：山崎川は図 - 1 に示すように猫ヶ洞池を水源とし、名古屋市を南西に流れる延長 13.6km の感潮河川である。近年、本河川感潮域（河口から 0k～5k600 区間）に対して白濁や悪臭などの問題点が指摘されている。当該区間において下層は高塩分、低 DO の貧酸素水塊が停滞していることにより、水質悪化が進行していると考えられる。また、東海道本線が横断する箇所河床が高くなっている部分（以下、マウンドとする。）が見受けられることから、マウンドが水交換を抑制することで水質環境に悪影響を与えていると推察される。そこで本研究では、潮汐流動特性と河床形状が水質に及ぼす影響を明らかにするため、山崎川の感潮域に注目して現地観測及び数値計算を行い、数値シミュレーションを用いて山崎川の水質改善策を立案することを目的とする。

2. 現地観測の概要：これまでの観測から底層には貧酸素水塊の存在が確認され、マウンド周辺及びその上流 1km 区間では表層においても貧酸素であることから、さらなる水質データの収集を目的としてマウンドの上流において流速及び水質観測を行った。一連の観測日時、内容、場所を表 - 1 にまとめる。

2016 年 9 月 15 日に山崎川感潮域（河口から 0k～4k800 区間）にて、ADCP（超音波多層式流速計、TELEDYNE RD INSTRUMENTS 製）を用いた河床形状観測を行った。ADCP を船体の横に設置し曳航して 0k 地点から 4k800 地点を川幅の中央と左右端を通るように 2 往復して計測を行った。

2017 年 7 月 10 日（大潮）は図 - 1 に示す裕竹橋（河口から 3k 850 地点）にて同じく ADCP を用いて流速観測を実施した。流速の断面鉛直分布を計測するために 6：30 から 18：30 まで 30 分毎に河川の右岸と左岸の間で ADCP を往復して計測を行った。

2017 年 10 月 2 日（中潮）、13 日（小潮）、19 日（大潮）には、河口から 3k700 地点において、2 日は 8：00～18：00、13 日及び 19 日は 6：00～18：00 の間で 30 分毎に RiverCAT（超音波ドップラー流向流速計システム、YSI/Nanotech Inc. 製）を用いて、7 月と同様の方法を用いて流速観測を行った。

定点観測は、2017 年 10 月 2 日、13 日、19 日に 8:00～18:00 まで月日塩水遡上と流速の影響を考察するために水面と川底からそれぞれ 0.5m の位置に多項目水質計（東亜 DKK 製 WQC-24）を 2 つ設置して、10 分間隔で pH、溶存酸素濃度（以下、DO とする）、濁度、塩分、水温を計測した。



図 - 1 山崎川感潮域

表 - 1 観測日時

観測日	観測内容	観測場所	時間帯	天候
2016.9.15 (大潮)	河床計測	山崎川感潮域	13:00～17:00	晴天
2017.7.10 (大潮)	流速観測	裕竹橋 (3k850)	6:30～18:30	晴天
2017.10.2 (中潮)	流速観測	3k700	8:00～18:00	雨
	水質観測		8:00～18:00	
2017.10.13 (小潮)	流速観測	3k700	6:00～18:00	小雨
	水質観測		8:00～18:00	
2017.10.19 (大潮)	流速観測	3k700	6:00～18:00	雨
	水質観測		8:00～18:00	

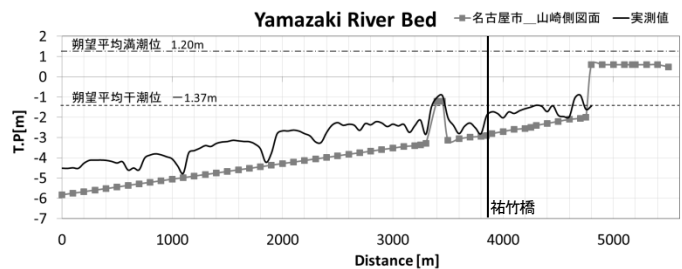


図 - 2 山崎川河床縦断面図

3. 観測結果と考察

3-1. 河床形状観測の結果と考察：図 - 2 に河床形状の観測結果及び山崎川の計画河床を示す。ただし、計測結果は河川中央で計測した 2 つを平均したものである。全体的に計画河床よりも実測値の方が高いことが見て取れることから下流においてはかなりの堆積物が存在すると考えられる。JR 東海道本線（河口から 3k450 地点）が横断する部分で河床が高くなっているのがわかる。この箇所においては朔望平均干潮位よりも高いことから干潮時には河床の一部が露出する。

3-2. 2017 年 7 月 10 日における観測の結果と考察：7 月 10 日の裕竹橋の流速観測時の名古屋港潮位と観測時間を図 - 3 (a) に示す。ただし、グレーの範囲で示した部分及び点線は観測を行った時間及び図 - 4 の時刻を示す。裕竹橋で 7 月 10 日に行った ADCP を用いた流速観測時の流速の観測結果を時間ごとに図 - 4 (a)～(d) に示す。ただし、流下方向を正として描画する。(a) 8 時半の下げ潮時は上層 1.5m 以浅で 20cm/sec 程度の顕著な流速が確認できる。一方、1.5m 以深で流速

は小さくなり流れが停滞している。

(b) 13 時の干潮時は、下げ潮時に顕著だった上層の流下方向正の流れも見られなくなった。全層において $\pm 5\text{cm/sec}$ 以下の流速となり、流れが停滞している。

(c) 16 時の上げ潮時は、下げ潮時と同様に上層 1.0m で流速が顕著であり、20cm/sec 程度の逆流が発生している。下層の流れは微小なままであり、停滞している。

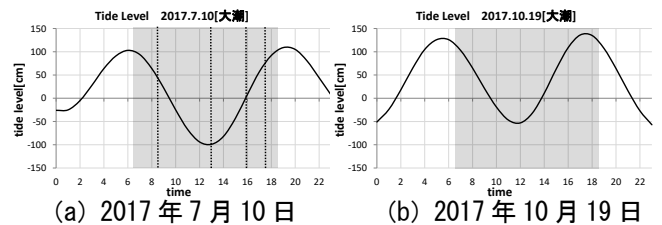
(d) 17 時半の上げ潮時は (c) より流速が小さくなり、逆流している層が水深 2m 近くまで拡大している。

以上より、ほとんどすべての時間帯で水深 1.5m 以深では $\pm 5\text{cm/sec}$ 以下と流速は小さく、流れが停滞しているといえる。上げ潮時に関しては、水深が増えるとともに上層で顕著な流れが中層まで拡大していき、より大きな断面で逆流が発生するために流速が小さくなるという流れ構造であると考えられる。本来は塩水楔を形成して塩分が遡上することで下層の流速が速くなると考えられるが、観測地点の下流にマウンドが存在するため、それを乗り越えて遡上したものが、そのまま上層を流れていくと推察される。

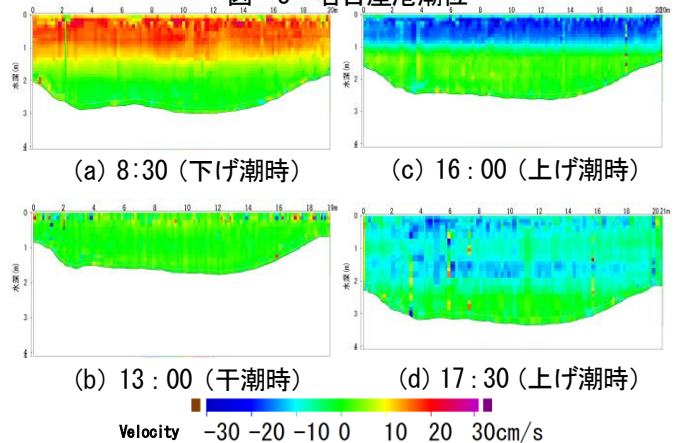
3-3. 2017 年 10 月の流速観測・定点観測の結果と考察

図 - 5 (a) (b), 図 - 6 (a) (b) にそれぞれ 10 月 13 日 (小潮), 19 日 (大潮) の河口から 3k700 地点における流速の時間鉛直分布と塩分の定点観測の結果を示す。大潮時の流速分布に注目すると下げ潮時は上層での流れが卓越しており中層以深では流れが停滞しているという 7 月 10 日と同様な結果が得られた。しかし、上げ潮時は上層において、7 月 10 日と比べると、それほど顕著な流れが確認できない。これは、10 月 19 日が降雨により河川水が増加し、大きくなった順流と上げ潮による逆流とが相殺されたため小さくなったと推察される。下げ潮時は上層のみが動くのに対し、上げ潮時には上層、下層ともに動くため塩水が排水されにくいことで滞留しやすく、同様の理由で堆積物のフラッシュ効果が低減することで溜まりやすいと推察される。小潮時はいずれの潮汐流動状況においても流速が小さく全層にわたり、流れが停滞している。

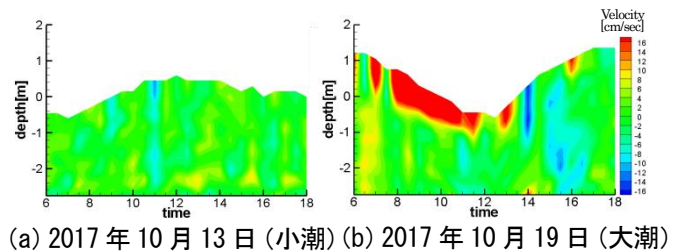
定点観測での塩分の結果に注目すると、小潮時は表層・底層ともにそれほど変化は見受けられないが、大潮時の表層に限っては、下げ潮とともに塩分が減少傾向にあり、上げ潮とともに上昇する傾向が見て取れる。ただし、底層においてはどちらも高い塩分濃度を示しており、濃度の変化が小さいことから長期にわたり同一水塊が停滞もしくは、往来していると考えられ、河川内における水交換が行われにくい状況の要因であり、水質悪化の原因であると考えられる。流速と水質を交えて考察すると、潮汐流動の大きい大潮時は流速も大きく、塩分も低下していることより水交換に寄与している可能性があり、対して小潮は流動が小さく貧酸素



(a) 2017 年 7 月 10 日 (b) 2017 年 10 月 19 日
図 - 3 名古屋港潮位

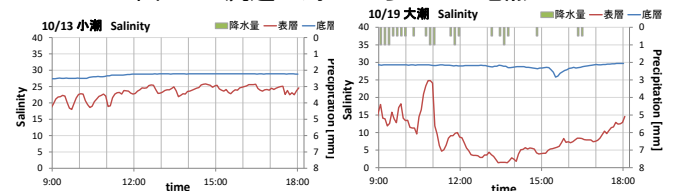


(a) 8:30 (下げ潮時) (b) 13:00 (干潮時) (c) 16:00 (上げ潮時) (d) 17:30 (上げ潮時)
Velocity -30 -20 -10 0 10 20 30cm/s
図 - 4 流速分布 裕竹橋 2017 年 7 月 10 日



(a) 2017 年 10 月 13 日 (小潮) (b) 2017 年 10 月 19 日 (大潮)

図 - 5 流速 河口から 3k700 地点



(a) 2017 年 10 月 13 日 (小潮) (b) 2017 年 10 月 19 日 (大潮)

図 - 6 塩分 河口から 3k700 地点

高塩分の水塊、汚濁を停滞させていると推察される。

4. 鉛直二次元数値シミュレーションによる検討

4-1. 数値計算の概要 : 本研究では、武田ら (2006) で提案した連続式、運動方程式、水温・塩分・DO・濁度の式を用いる。数値解析には有限体積法を用い、時間項は前進差分、移流項には Quick スキーム、その他の項には中央差分を用いた。水温は、日射や大気との熱輸送等の熱収支を考慮する。DO は水面における再爆気、水中における酸素消費、底層における酸素消費の生成と消費を考慮した。

4-2. 計算領域と境界条件 : 今回の計算は 2015 年 12 月 5 日から 12 月 15 日までを計算対象とし、z 方向格子幅を 0.25m, x 方向格子幅を 50m とし山崎川の河口 0k から 5k600 の感潮域の区間を計算領域とした。河床データは 2016 年 9 月 15 日に行った ADCP による河床計測結果を用いて設定した。

計算時間間隔 Δt は、安定条件 (C.F.L 条件) より 0.5 秒と定め、Leap-Frog 法を用いて計算を行った。各水質の初期条件は、2015 年 10 月 28 日に行った連続観測の実測値を用いる。初期水位は、名古屋港の潮位を与えて、満潮から計算を始めて、流速は 0.0 (cm/sec) とした。各境界条件は以下に示す。

(a) 上流端 (河口から 5k600 地点) : 上流端は全層から河川水が流入されるとして、総流量を $0.185\text{m}^3/\text{sec}$ となるように与えた。また、塩分を 0.0, 水温を 14°C , DO を 8.0mg/L として与えた。降雨の有無による流量変化を表現するために、上流の雨水吐から流入してくる流量を考慮した。

(b) 山崎水処理センターからの排水 : 水処理センターの排水は、表層の 1 層分から処理水が横流入するように設定し、流量を $0.86\text{m}^3/\text{sec}$, 塩分を 0.0, 水温を 25°C , DO は 3.0mg/L を常時与えた。

(c) 下流端 : 下流端水位は、名古屋港での 1 時間潮位を直線近似により計算時間における水位を与えるものとした。塩分、水温、DO は 2017 年 11 月 24 日に山崎川の河口部で計測した鉛直分布の観測結果を常時与えて計算を行った。

4-3. 再現性の検討 : 再現性の検討を 2015 年 12 月 14 日に裕竹橋で行った時間鉛直分布の現地観測の結果と同時刻に数値計算した日変化を比較して行う。図 - 7 ~ 図 - 10 に DO, 塩分、流速の現地観測と数値計算の結果を示す。

図 - 7 より、数値計算では貧酸素であることが再現できている。現地観測では表層に 3.0mg/L が見て取れるものの計算では一部下げ潮時のみでしか表現できず、表層の DO の再現は十分でなく、上げ潮時は実際よりも DO がやや高めに計算されているが、全体の特徴は捉えられているといえる。

図 - 8 の塩分に注目すると下げ潮時は良好に成層が表現され、濃度も妥当であるが、底層の塩分が過小となり、上げ潮に伴い塩分が低下している。

これは祐竹橋がマウンド上流に位置しており、マウンドを乗り越えた流れの計算がうまく行われず、河川水を攪拌する方向に計算されたために現地観測の結果と異なり、成層が破壊されたような結果になったと考えられる。実河川よりも塩水と淡水が混合しやすくなっているため、塩分の再現性には課題が残る。

図 - 9 の数値計算では現地観測と同様に下げ潮時における順流は表層でのみで発生しており再現できている。さらに、干潮から満潮にかけてはほぼ全層で微小ながらも逆流が再現されていることから数値計算は現地観測の流速の特徴を概ね捉えているといえる。

図 - 10 は DO の縦断分布である。観測日と計算時間は異なるが、共に大潮付近の下げ潮時であるので比較

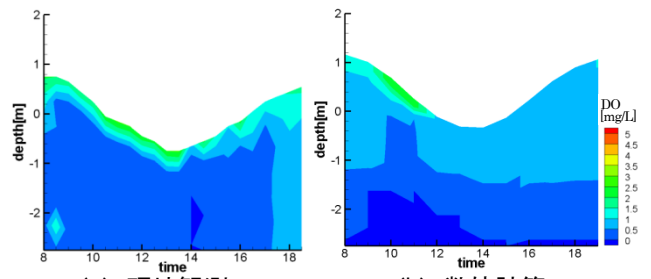


図-7 裕竹橋 DO[mg/L] 2015年12月14日

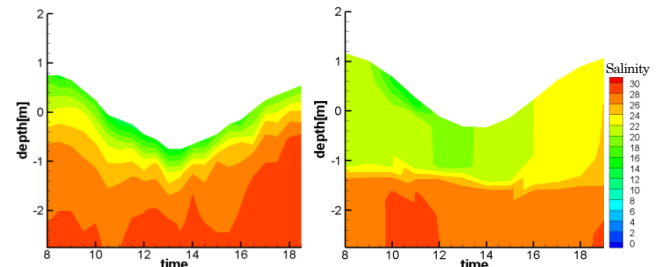


図-8 裕竹橋 塩分 2015年12月14日

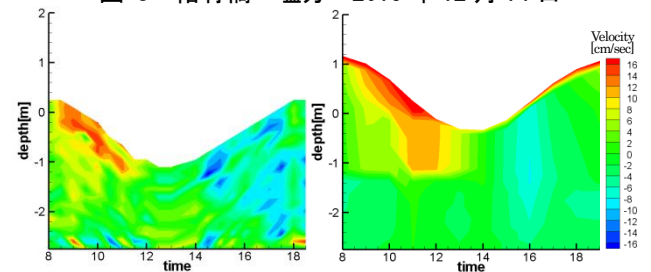


図-9 裕竹橋 流速[cm/sec] 2015年12月14日

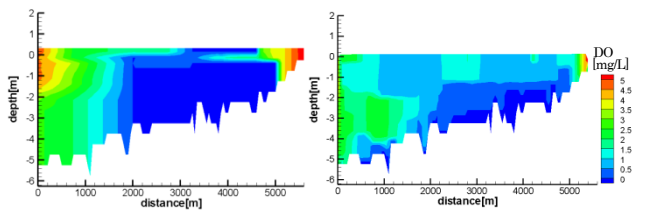


図-10 裕竹橋 DO[mg/L] 2015年

対象として妥当であるとし、比較を行う。数値計算の DO が現地観測のよりもやや過小であるものの、3k から 5k 区間で表層まで貧酸素であるという特徴を表している。11 月 11 日 8 時~12 時の現地観測によると 3 ~ 4.5k 区間で表層の DO が欠乏しているのが見て取れるが、これは潮汐流動によりマウンドに遡上する流れが衝突することで底層に滞留していた硫化物が湧昇したため酸素を消費し、表層においても DO が減少したと推察される。この特徴は数値計算でも再現されており、同区間において表層においても DO が 1.0mg/L 未満の状態である。

以上より、本山崎川数値計算の塩分の結果にはやや課題が残るものの、DO 及び流速の変化はある程度再現できたものとみなす。

4-4. 数値シミュレーションの結果及び考察 : 本研究では、上述した水質悪化原因であるマウンドの影響につ

いて着目する。また、加えて下流の堆積による河床の上昇や流量の増加を狙った導水の影響を検討する。表-2にシミュレーションケースを示す。再現計算時における計算結果を case0 としシミュレーションの初期ケースとした。今回は case1, case3 の河床形状と導水の影響に着目して検討を行う。導水は上流からの流入を増やすことで再現した。図-11, 図12に case0, case1-BM, case1-N の DO 及び塩分の縦断分布を示す。図-11(a1), (a2), 図-12(a1), (a2) の case0 では、満潮時、干潮時共に、下層において低 DO であり、高濃度の塩水が流入してきている。つまり、現状高塩分貧酸素水塊が滞留しているといえる。また、表層においても DO が低くなっている。図-11(b1), (b2) 図-11(b1), (b2) の case1-BM では、マウンドの除去のみを行った。シミュレーションにおいてはマウンドの影響は大きいとはいえず、case0 と DO, 塩分共に大きな改善は見られない。ただし、河床を計画河床とした図-11(c1), (c2), 図-12(c1), (c2) の case1-N においては高塩分の水塊が入ってくるものの DO は増加しており、特に、干潮時の上流、上層にて 2.0mg/L まで改善している。図-13 には case0 と case1-N の上げ潮時における流速の縦断分布を示している。図-13 (a) のマウンド周辺の流速に注目すると底層において流れが停滞しているのが確認できる。一方の case1-N では、底層において流速が発生しており、滞留を解消できたといえる。

今回はマウンドの除去及び浚渫等、河床形状に着目したが、導水によっても水質改善が認められ、組み合わせることで、より効果を得られると考えられる。今回のシミュレーションではマウンド及び河道の整備によりマウンドのあった箇所での貧酸素水塊は下層ではほとんど変化はなかったものの、表層においては DO の改善が見られ、貧酸素水塊が空气中に暴露しなくなったために悪臭や白濁が緩和されると推察される。

5. まとめ：本研究では山崎川の河床形状及びマウンド周辺の水質・流速特性を明らかにした。潮汐流動等で顕著な流れがあるのは主に表層で、底層にはほとんど流速が無く、高塩分の貧酸素水塊が滞留することで山崎川の水質に悪影響を及ぼしていると推察された。数値シミュレーションにより、現状マウンドの下流に著しい堆積があることからマウンドを除去するためのみでは大きな改善効果は得られなかった。表層の DO が低かった河口から 3k~5k の区間においては、計画河床とした場合に底層の硫化物が湧昇することなく、この区間において表層の DO が改善されたと推察される。なお、この硫化物が白濁、悪臭の原因だと考えられることから、河道を整備することにより、硫化物の空气中への暴露を抑制するという意味ではこれらが多少なりとも改善される可能性が示された。

表-2 シミュレーションケース

case名	河床形状	断面形状	導水	備考
case0	-	-	-	初期ケース
case1-BD	下流部浚渫	-	-	マウンドより下流を計画河床まで浚渫
case1-BM	マウンド除去	-	-	-
case1-N	名古屋市計画河床	長方形断面	-	計算範囲全てを計画河床まで浚渫
case1-NWD	名古屋市計画河床	長方形断面	-	-
case2-C1	-	-	0.2m ³ /sec	上流から流入させる
case2-C2	-	-	0.5m ³ /sec	上流から流入させる
case2-C3	-	-	1.0m ³ /sec	上流から流入させる
caseBD-C1	下流部浚渫	-	0.2m ³ /sec	上流から流入させる
case3BM-C1	マウンド除去	-	0.2m ³ /sec	上流から流入させる
case3N-C1	名古屋市計画河床	-	0.2m ³ /sec	上流から流入させる
case3NWD-C1	名古屋市計画河床	長方形断面	0.2m ³ /sec	上流から流入させる

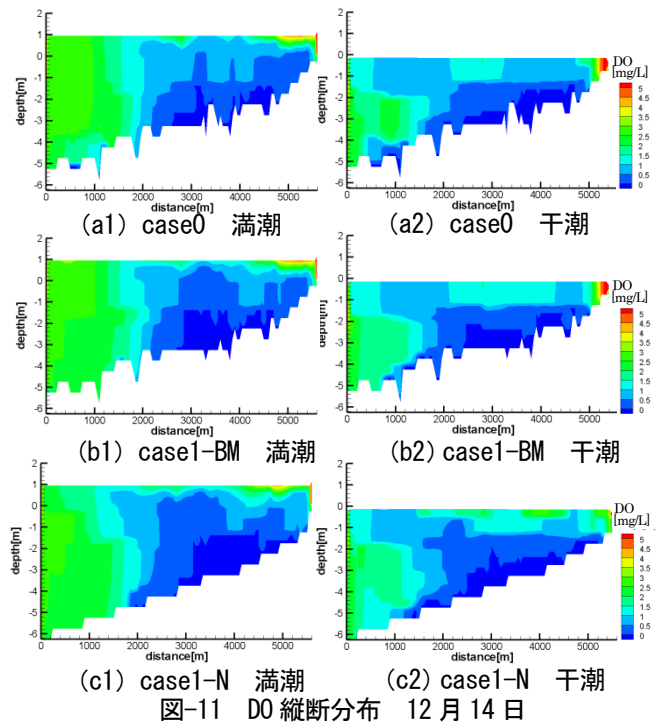


図-11 DO 縦断分布 12月14日

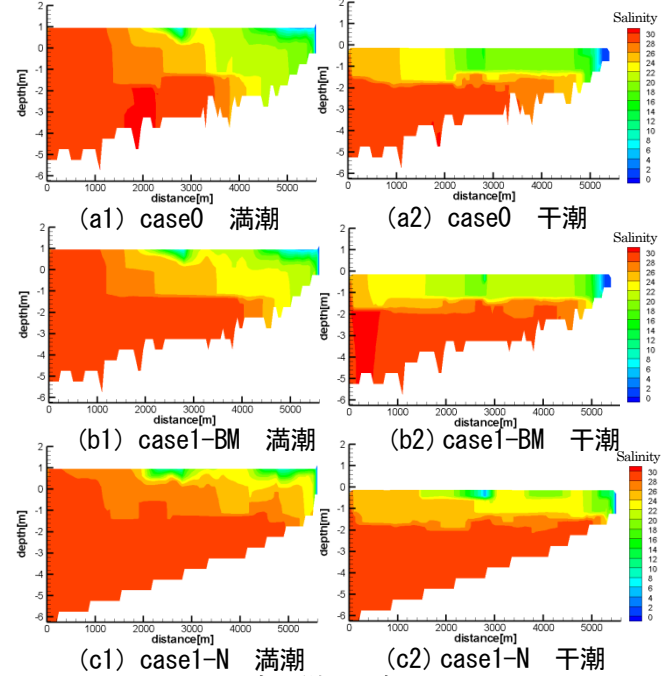


図-12 塩分縦断分布 12月14日

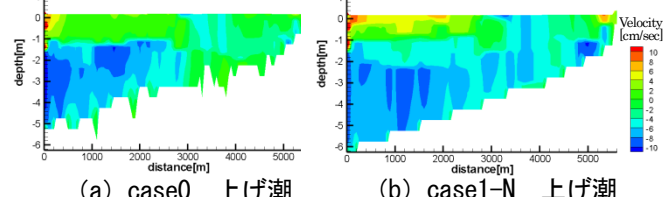


図-13 流速縦断分布 12月14日