

東北地方太平洋沖地震に伴う河床地形変化が 北上川塩水挙動に及ぼす影響の 数値流動解析による検討

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE IMPACT OF RIVERBED SUBSICENDE
DUE TO THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE
ON ESTURAY CIRCULATION IN THE KITAKAMI RIVER

中村恭志¹・菊池喬²・石川忠晴³

Takashi NAKAMURA, Takashi KIKUCHI and Tadaharu ISHIKAWA

¹正会員 理博 東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

²工学 東京工業大学大学院修士課程 総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

³フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

The 2011 off the pacific coast of Tohoku Earthquake caused the subsidence of the riverbed in the Kitakami River estuary and it was observed the subsidence reached up to several tens cm. In this paper, by conducting three-dimensional simulations of estuary flow in the Kitakami River estuary, the impact of the riverbed subsidence on the estuary circulation is investigated. After the validation of the numerical model using the field measurement data observed before the earthquake, the numerical simulation of the flow with the subsiding riverbed was conducted. As a result of comparison, it is found that the estuary circulation tends to be enhanced due to the subsidence, and the residence time of the saline water tends to be shorter.

Key Words : Kitakami River Estuary, Estuary Circulation, the Tohoku Earthquake, subsidence of riverbed, three-dimensional numerical flow simulation

1. はじめに

2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）では、東北地方の諸河川の感潮域では大きな地形変化が生じた。津波による河口堤防など河口部付近地物の直接破壊に加え、東北地方の海岸平野では広範囲にわたる地盤沈下が生じ、河川の河床高も大きく沈下した。図-1には国土交通省東北地方整備局北上川下流事務所（以下、河川事務所）による宮城県北上川下流域の河床高横断測量結果の一例を示す。低水路と高水敷ともに数十cm～数m程度の地盤沈下を生じており、北上川汽水域の全域で地盤沈下が生じている。このことは、現地形

に対して海水面が相対的に1mのオーダーで上昇したことを意味している。現在、地球温暖化による海面上昇が汽水域環境に及ぼす影響が取りざたされているが、上記の地盤沈下により汽水域環境への影響はそれ以上となる恐れがある。

河川感潮域では塩水と淡水の密度差により塩水成層が形成される。海の潮位に応じて底層付近の塩水層は河川上流への侵入と後退を繰り返すが、日潮汐より長い時間で平均すれば比重が重い下層の塩水層は上流側に輸送され、上層の淡水層は下流側に輸送されるエスチュアリー循環が生じる¹⁾。明瞭な塩水層が形成される成層型汽水域では、水面から底層塩水層への溶存酸素(DO)の鉛直輸送が減少するため、エスチュアリー循環による海からの

高DO濃度の塩水塊輸送が底層塩水層への主要なDO供給源となる²⁾。エスチュアリー循環の過程では、バクテリア等によるDO消費のため、上流の塩水層先端付近に到達するまでにDO濃度はしだいに減少する。そのため、塩水塊が上流域に達するのに要する期間の長短、つまりエスチュアリー循環の強度が、上流底層塩水層での貧酸素化現象をコントロールする重要な要素となることが過去の研究から明確にされている³⁾⁴⁾。しかし、それら研究によるエスチュアリー循環の強度についての知見は地震以前の地形に対してであり、地震による地盤変化により強度がどの程度変化したのかを取り上げた研究は無い。そこで本研究では、地盤変化が汽水域水環境へ与える影響の把握の端緒として、貧酸素化を規定する要因であるエスチュアリー循環に着目し、地盤変化による強度の変化と、それにより塩水塊が上流域に達するのに要する時間がどの程度変化しているのかを、三次元数値流動解析を用いて明らかにすることを目的とした。

第二章では、北上川汽水域におけるエスチュアリー循環の特徴を、地震前に行われた現地観測に基づき纏める。続く第三章では、使用した数値モデルについて紹介し、地震前後の河床地形についての計算結果を比較し、地盤沈下に対するエスチュアリー循環強度の応答特性を考察する。

2. 北上川汽水域について

(1) 北上川汽水域の概要

北上川は幹川流路延長249km、流域面積10,150km²の東北地方最大の河川である。石巻市を貫流して仙台湾に注ぐ旧北上川と登米市付近で分流し、東の追波湾を通じて太平洋に注いでいる。分流後の北上川下流域は、洪水を追波湾に導く放水路として旧追波川の開鑿工事により造られた人造河川であり、河口から17.2KP(以下KPは河口からのkm数)地点に北上大堰が設置され流量が調整されている(図-2)。都市部である石巻市に流下する旧北上川の流量を確保するため、出水時を除いて北上大堰のメインゲートは閉じられ、北上川へ放流される流量は3m³/s程度と非常に少なくなっている。図-3には地震前の河床地形(2009年測量)について平均及び最深縦断形状を示す。14KP～16KP付近の上流域では河床標高がT.P. -8mにまで深掘れしている箇所が滞筋に存在しているが、河床勾配は1万分の1程度でほぼ平坦であり、北上大堰から河口までの区間が汽水域となっている。

(2) エスチュアリー循環の観測例

対象水域では2006年に河川事務所によりエスチュアリー循環に関わる集中観測が実施されている⁵⁾。8月～9月の渇水期に10～16KP区間で1km毎に船上から水質計を沈め、塩分・水温など水質の鉛直分布が毎日計測されて

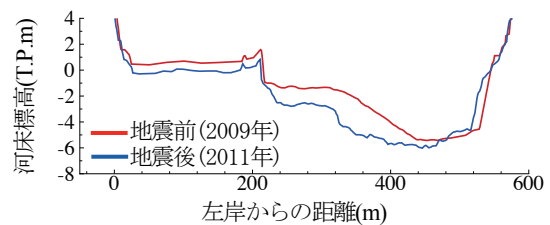


図-1 北上川8KPにおける横断河床標高。

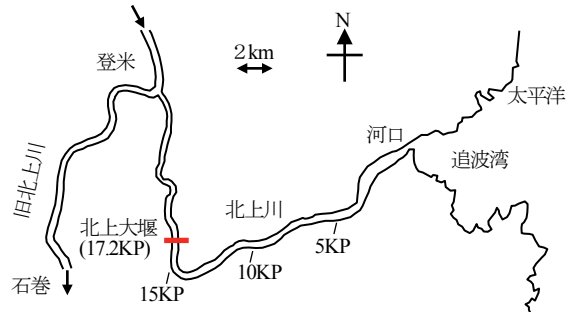


図-2 北上川の概況図。

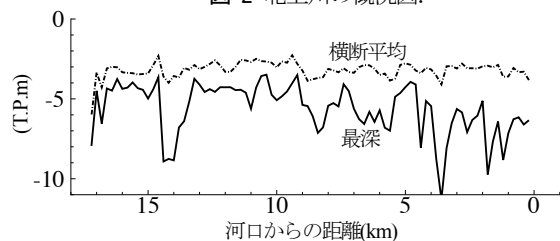


図-3 縦断河床形状(2009年測量)。

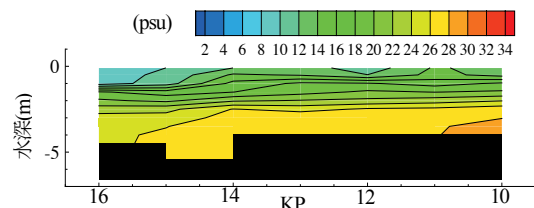


図-4 観測塩分縦断分布(2006年8月17日)。

いる。同時に2006年6月～2007年3月には15KPの最深部河床上にAcoustic Doppler Current Profiler (ADCP)が設置され、流速の鉛直分布が5分毎に底面から25cm刻みでモニタリング観測されている。観測結果の一例として、図-4に観測結果から作成した塩分縦断分布図を示す。エスチュアリー循環により30psuに近い高塩分水層が侵入し、明瞭な塩分成層が形成されていることが分かる。また、第3章で述べる数値計算の対象期間である2006年8月8日～31日について、宮城県鮎川港における実測海水位と北上大堰からの放流量を図-5(a)に、ADCP観測の一例として河床から2.66mでの滞筋方向の主流速時系列データを図-5(b)に示す。流速は日潮汐の影響を受けて順流($u>0$)と逆流($u<0$)が周期的に繰り返しているが、日潮汐周期よりも長い期間について流速の時間平均をとることでエスチュアリー循環の強度を評価することが出来る³⁾⁴⁾。

$$u_r(z) = \frac{1}{T} \int u(t, z) dt \quad (1)$$

T は平均を取る期間であり、 u_r は残差流速と呼ばれるエスチュアリー循環による各水深での輸送速度である。各

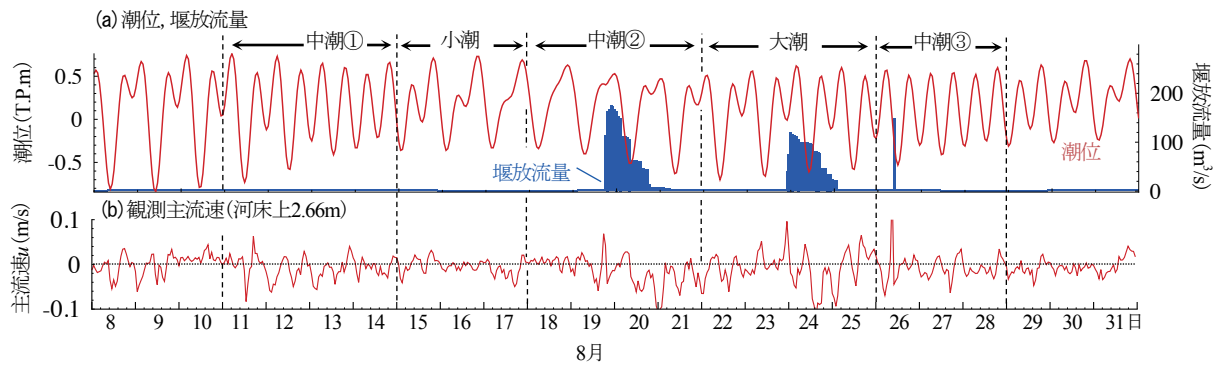


図-5 2006年8月の(a) 鮎川港潮位と北上大堰放流量，及び(b) 15KP地点でのADCPによる流速時系列データ。

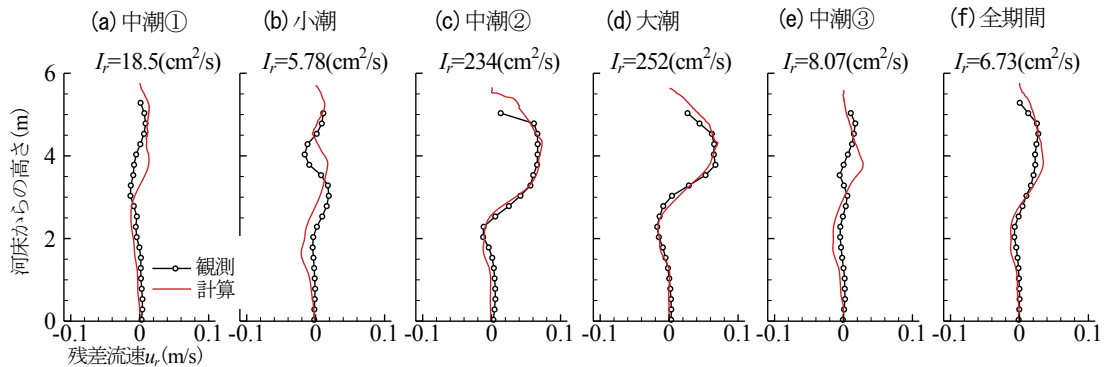


図-6 15KPにおける残差流速鉛直分布。白丸実線が観測結果，赤線は地震前の地形を用いた再現計算の結果を表す。

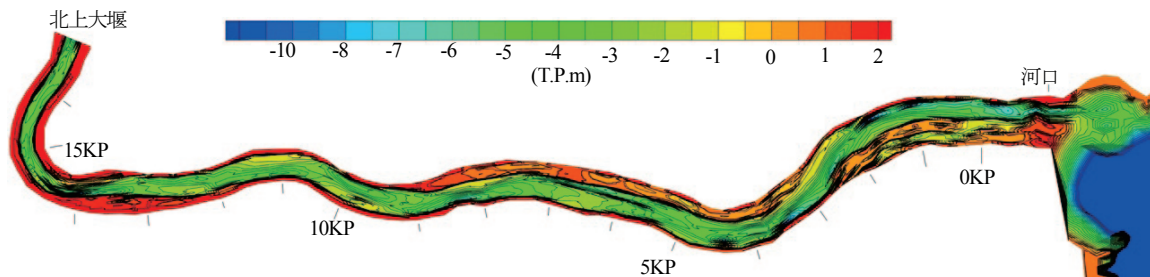


図-7 北上川汽水域河床標高分布(2009年測量)。

水深における流速時系列データに式(1)を適用し， u_r の鉛直分布を算出した．2006年8月8日～31日の期間には図-5(a)に示すように小潮，大潮及び中潮の期間が含まれている．それぞれの潮について図-6(a)～(e)に示すとともに，全期間についての結果を図-6(f)に示す．また，上流域への輸送強度を比較するため，塩水層について次式により逆流成分を鉛直積分して，エスチュアリー循環による上流への輸送フラックス(線流量) I_r を算出した結果も図-6に示す．

$$I_r = \int_{u_r < 0} |u_r| dz \quad (2)$$

図-6に示すように，何れの期間でも上層で順流，塩水層の存在する下層では逆流方向となる流れとなっており，エスチュアリー循環の特徴が認められる．中潮②と大潮の期間である図-6(c)と(d)ではエスチュアリー循環の強度が増加している．これらの期間には図-5(a)に示すように台風出水を受けて100m³/s程度の放流が行われてい

る．同じ中潮でも，図-6(a)と(e)に示す出水の無い期間ではエスチュアリー循環の明確な増加は見られないことから，図-6(c)と(d)の期間には出水により上層淡水層への塩水連行量が増加し，それを補うため下層塩水層の上流への輸送が増加して，エスチュアリー循環の強度が増加したと推察される．

3. 数値流動解析

(1) 数値解析の概要

河床地形変化がエスチュアリー循環に及ぼす影響について三次元数値流動解析から検討する．まず，前章で述べた2006年の集中観測期間について再現計算を行い，観測結果を用いて数値モデルのエスチュアリー循環の再現性を検証する．その後，同期間について河床地形のみを東北地震後の状況に変更して再度計算を行い，地震前後

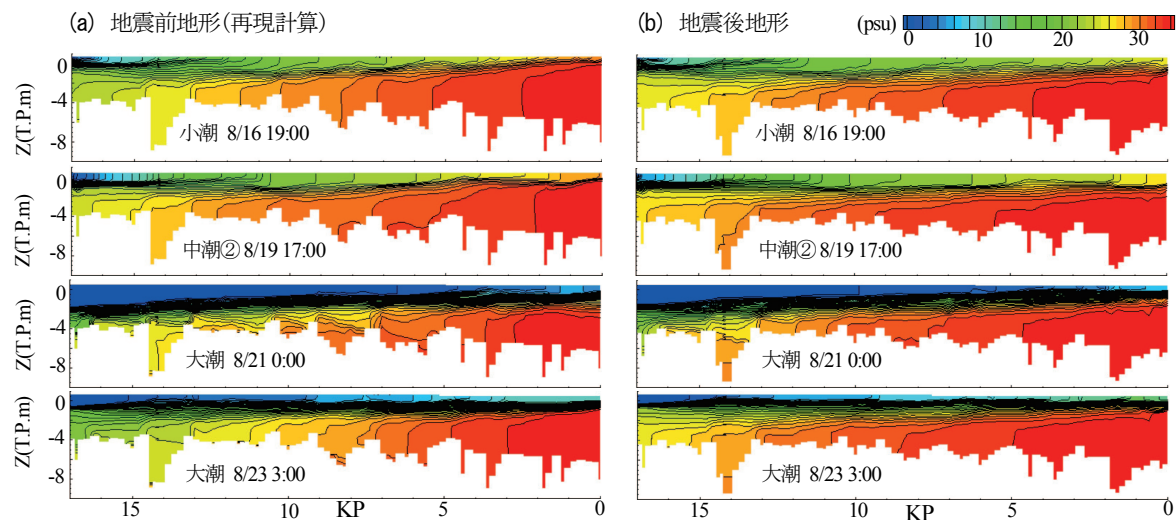


図-8 滞筋断面での塩分分布(満潮時)。(a)地震前の地形を用いた2006年8月の再現計算、(b)地震後の地形を用いた計算結果。

でのエスチュアリー循環強度の変化について検討を行う。数値モデルには三次元CIP-Soroban塩水流動モデルを使用した^{6),7)}。このモデルは非静水圧・非圧縮 $k-\epsilon$ 乱流方程式を基に、流速、塩分、乱流諸量、水位の時間発展を計算するもので、利根川汽水域におけるエスチュアリー循環を精度良く再現した実績がある⁸⁾。

(2) 地震前の河床地形を用いた再現計算

地震前の河床地形を用いた再現計算を行い、エスチュアリー循環の再現性について確認する。計算期間は集中観測の行われた2006年8月8日0:00～31日24:00とし、計算条件は以下の様に設定した。

a) 河床地形

河川事務所により河口から北上大堰の区間で河床標高の横断測量が200m毎で行われている。計算対象期間付近では2009年に実施されており、これを空間補間することで河床地形データとした。図-7に河床標高分布を示す。なお、河床標高の代表的横断形状と縦断形状は図-1と図-3に既に示している。計算領域は上流端を北上大堰とし、下流端は追波湾沖合7kmに設定した。格子間隔は主流x方向に200m間隔、横断y方向は北上川河道部で25m、追波湾で200m間隔とした。使用したモデルでは鉛直方向の格子間隔は密度界面付近で密となるよう各計算ステップで調整されるが^{7,8)}、鉛直方向の間隔が平均して20cm程度となるよう格子点数を設定した。

b) 計算条件

追波湾沖側の下流端では図-5(a)に示す鮎川港での毎時観測水位を境界条件として課し、流速は自由境界、塩分は海水の代表塩分34psuで一定とした。上流端の北上大堰では図-5(a)に示す毎時観測放流量を境界条件として課した。堰での操作記録を基にゲートが解放されている断面位置を決定し、観測放流量を断面積で割って求めた流速を放流断面に一樣に与えた。上流からの流入塩分については0psuで一定とした。計算期間中には台風接近

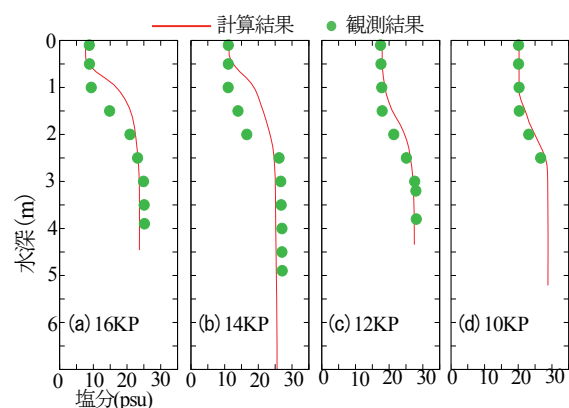


図-9 塩分鉛直分布(2006年8月1日)。

時などの $100\text{m}^3/\text{sec}$ 程度の放流が三回含まれているが、それ以外の平時時には概ね $3\text{m}^3/\text{sec}$ 程度の放流量であった。塩分の初期条件は計算開始日に10KP～16KPで行われた塩分鉛直分布の観測結果を基に与え、海洋部は34psuで一樣に与えた。流速は全領域で 0m/s とした。

c) 計算結果

滞筋断面での計算塩分分布を図-8(a)に示す。何れの期間でも塩分楔の形成が明瞭に見られたが、出水が無かった期間では塩水楔の遡上は穏やかに進行していた。一方、図-5(a)に示す様に8月20日には $150\text{m}^3/\text{s}$ 程度の出水が生じている。そのため、8月21日には塩水楔の後退が見られるが、その後の塩水楔の遡上は比較的速く進行しており、出水の時期にはエスチュアリー循環による輸送が強くなる傾向にあった。図-9に観測塩分鉛直分布との比較を地点ごとに示す。14KPより上流域では塩分躍層の位置に数十cm程度の差異が見られたが、計算期間を通じて計算結果は観測結果と総じて一致していた。計算結果から算出した15KPにおける残差流速鉛直分布を図-6に赤線で示す。出水の無い小潮や中潮①、③の期間では小さく、出水時の中潮②と大潮期に大きくなるなどの傾向が黒破線で示した観測と一致しており、使用した数値モデルでエスチュアリー循環の強度を精度良く評価

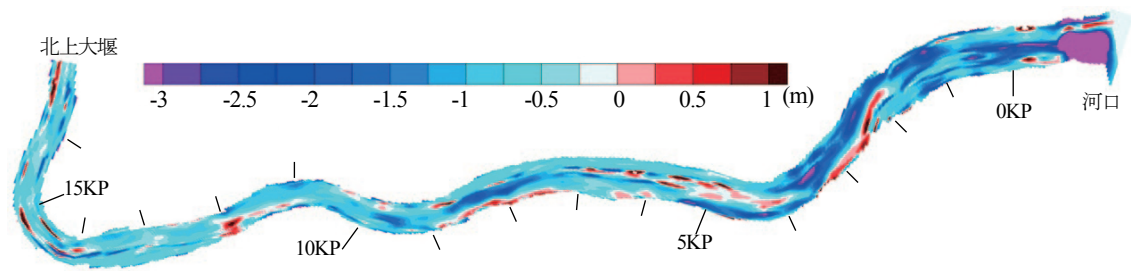


図-10 地震前後での河床標高の変位量(2009年の測量結果からの変化量).

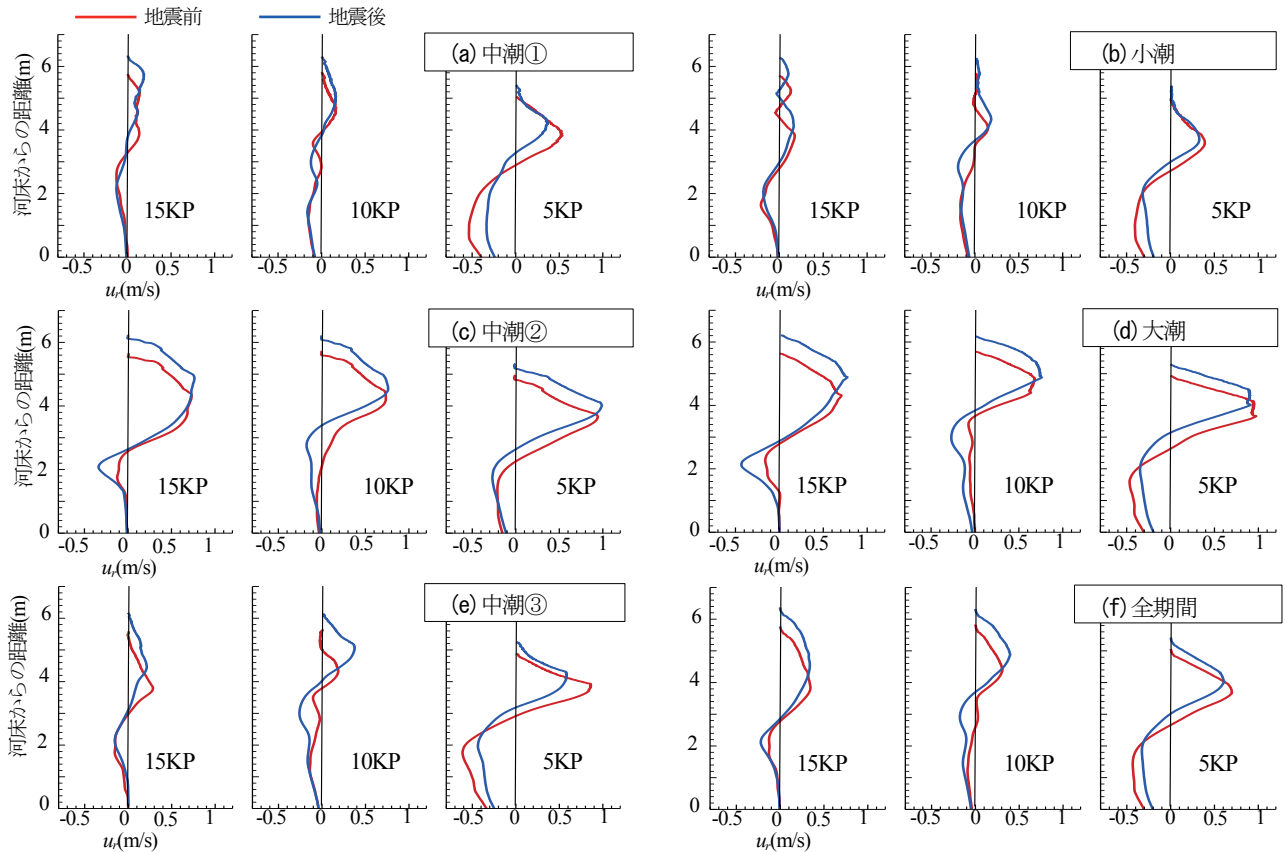


図-11 下流(5KP), 中流(10KP)及び上流(15KP)最深部での残差流速鉛直分布. 赤線が地震前, 青線が地震後の河床地形の計算結果.

可能であることが確認できる。

(3) 地震による河床地形変動の影響

河川事務所による河床標高横断測量が地震後の2011年中に河口から北上大堰の区間について200m毎で行われている。図-10に地震前後での河床高の変化量を示す。下流域の滞筋では2mを超える地盤沈下が見られ、高水敷を含め河川全域にわたり1m弱の地盤沈下が生じていることが確認できる。地形変動への応答を評価するため、計算期間及び条件は前節で述べた再現計算と同様とし、河床地形データのみ2011年の地震後のものに変更をして計算を行った。図-8(b)に滞筋断面での計算塩分分布を示す。図-8(a)で示す地震前の結果と比較すると、総じて塩分濃度は全域で上昇している。特に堰付近の上流域では最大で約5psu程度も増加し、塩分層の層厚も増加傾向にあることから、地盤沈下により塩水層が侵入し易くなっていることが伺える。地震前後での残差流分布を下

流(5KP), 中流(10KP)及び上流(15KP)について求めたものを図-11(a)～(f)に示す。何れの地点と期間についても、残差流の分布特性は大きく変化していない。しかし中流と上流では出水の生じた中潮②と大潮の期間に逆流が強くなる傾向が見られ、図-11(c)と(d)の15KPと10KPに示すように、逆流の残差流速の最大値は約2倍程度に増加している。表-1に式(2)を用いて求めたエスチュアリー循環による上流への輸送フラックス I_r を纏める。下流では I_r の明確な増加が見られない一方、中・上流域では、出水の生じた中潮②と大潮時に約2～3.5倍程度に大きく増加しており、全期間についても中流と上流域それぞれで約2.7倍及び約1.4倍への増加が確認された。つまり、地盤沈下により、エスチュアリー循環の強度が中・上流域で震災前に比べ増加していることが示唆される。エスチュアリー循環が強くなったことで、海洋から侵入した塩水の河道水域に留まる時間(滞留日数)が短くなる可能性がある。そこで計算された流速場を用いて、河

表-1 エスチュアリー循環による上流への輸送フラックス I_r の地震前後での比較.

	15KP(上流)			10KP(中流)			5KP(下流)		
	地震前 I_r (cm^2/s)	地震後 I_r (cm^2/s)	地震後 ÷地震前	地震前 I_r (cm^2/s)	地震後 I_r (cm^2/s)	地震後 ÷地震前	地震前 I_r (cm^2/s)	地震後 I_r (cm^2/s)	地震後 ÷地震前
中潮①	200	219	1.10	351	396	1.13	1,196	849	0.71
小潮	294	279	0.95	370	477	1.29	882	728	0.83
中潮②	136	300	2.21	94	335	3.56	405	512	1.26
大潮	165	432	2.62	149	540	3.62	957	848	0.89
中潮③	230	182	0.79	330	605	1.83	1,314	1,054	0.80
全期間	179	249	1.39	159	425	2.67	930	781	0.84

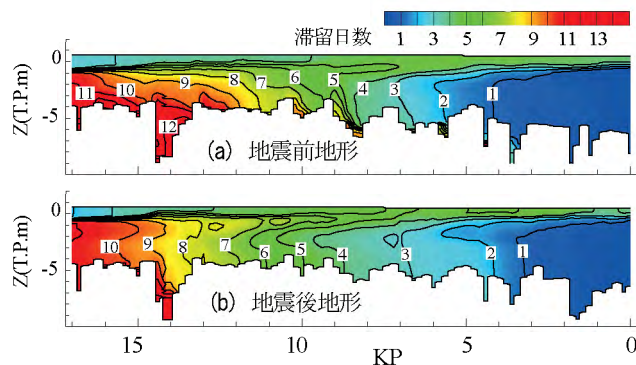


図-12 大潮(8/23 3:00)時の滞留日数滞筋断面分布.

口から侵入した水塊を追跡する計算を行い、震災前後での滞留日数分布を求めた。図-12に大潮での滞留日数の滞筋断面での分布を示す。また、図-13に5KP、10KP及び15KPにおける滞筋河床上1mでの滞留日数の時系列について、地震前後での比較を示す。エスチュアリー循環強度の増加が見られなかった5KP付近の下流域では明確な差異が見られない一方、循環強度の増加が見られた中流(10KP付近)と上流(15KP付近)では、地震前後で大潮期を中心に約1日程度の滞留日数の短縮が確認される。

4. まとめ

2006年8月について東北地震前後での河床地形を用いた数値解析を実行し、エスチュアリー循環に関わる比較を行った。結果、1)エスチュアリー循環の強度は地盤沈下により増加し、2)その増加は中流域と上流域で大きく、出水時期に顕著であること、3)遡上塩水層の塩分濃度と層厚が増加し、塩水層の滞留日数は上流・中流域で1日程度短縮されることなどが確認された。以上を総括すれば、地盤沈下により北上川汽水域ではエスチュアリー循環が強くなっている可能性が高く、滞留日数の短縮が見られたことから、地震前に比べ若干貧酸素化が抑制される傾向にあることが示唆された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、河床標高横断測量結果と各種観測結果など貴重なデータを国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所からご提供いただいた。

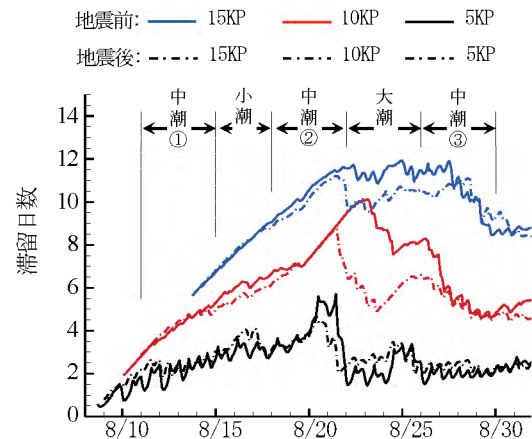


図-13 滞筋河床上1mの滞留日数の時系列。実線が地震前、一点鎖線が地震後の地形の結果を表す。

ここに記して深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) Prichard, D. W.: The dynamic structure of a coastal plain estuary, *J. Mar. Res.*, Vol.15, pp.33-42, 1956.
- 2) 西條八束, 奥田節夫編: 河川観潮域, 名古屋大学出版会, pp.173-194, 1996.
- 3) 鈴木伴征, 若岡圭子, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について, 水工学論文集, 第42巻, pp.769-774, 1998.
- 4) 鈴木伴征, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値計算, 水工学論文集, 第43巻, pp.881-886, 1999.
- 5) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: 平成18年度北上川下流域流況検討業務報告書, 2007.
- 6) Yabe, T., Mizoe, H., Takizawa, H., Moriki, H., Im, H. N., Ogata Y.: Higher-order schemes with CIP method and adaptive Soroban grid towards mesh-free scheme, *J. Comput. Phys.*, Vol.194, pp.57-77, 2004.
- 7) 中村恭志, 石川忠晴: CIP-Soroban法に基づく汽水域3次元数値流動モデルの開発, 水工学論文集, 第54巻, pp.1441-1446, 2010.
- 8) 許曉飛, 中村恭志, 小林有, 小島崇, 石川忠晴: CIP-Soroban 三次元流動モデルによる利根川感潮域塩水流動解析, 水工学論文集, 第56巻, pp.1555-1560, 2012.

(2013. 4. 4受付)