

遠州灘に面した浜松五島～湖西海岸での汀線変化と沿岸漂砂量の推定

一般財団法人土木研究センターなぎさ総合研究所長 宇多高明

1. はじめに

遠州灘海岸の天竜川河口以西は天竜川の河口デルタの一部をなしており、天竜川からの流出土砂量の減少などとともに侵食が進んできた。当初は天竜川河口右岸の浜松五島海岸で侵食が著しかったために、浜松五島海岸では 1970～1990 年に全体で 23 基の離岸堤および消波堤が造られて汀線固定が図られた。その後、2003 年 9 月には中田島砂丘の外縁部に埋められていたゴミが侵食により露出するなど、馬込川河口右岸の浜松篠原海岸で汀線が著しく後退したため、2004 年からは天竜川下流部の河床掘削土砂を用いた粗粒材養浜が開始され、2015 年までに総量 94.3 万 m³ の土砂が投入された（うち沖出し量 27.7 万 m³）。一方、浜名湖と太平洋を結ぶ今切口では、1964～1974 年には導流堤兼用の防波堤が延ばされた結果、退潮流による ebb tidal delta が著しく発達したが、その後デルタの発達に伴い西向きの沿岸漂砂が再び流れるようになった。当沿岸では、これらの人工改変による地形変化が起きているが、今後の地形変化について検討するには、まず現在までに起きてきた地形変化の特徴を十分理解することが必要である。そこで既往空中写真を収集し、汀線の場所的变化を詳しく調べた。その際、空中写真が時間的に密に測定された 1972 年を基準として汀線変化を調べた。また、沿岸漂砂量の推定も行った。

2. 汀線の空間的变化と代表測点の海浜状況

図-1 には 2016 年 1 月の遠州灘海岸全域の空中写真とともに、1972 年基準での 2005、2011、2016 年までの汀線変化、および浜幅の沿岸分布と防護上必要な浜幅（基本は 30 m）を示す。図には、東端の浜松五島海岸から静岡・愛知県境の湖西海岸に至る 5 地先の海岸名と、天竜川、馬込川および浜名湖今切口の位置を示す。また、特徴的な汀線変化が観察される地点として St. 1～St. 12 を選び、それらの位置を示した。さらにこれらの地点の海岸状況を 2015 年 12 月撮影の斜め写真上に示した（図-2～図-5）。

まず図-2 によれば、浜松五島海岸の離岸堤群東側においてフック状に後退した汀線の付け根付近にあって、現在建設中の突堤の東 80 m に位置するのが St. 1 である。St. 1 は東向きに発達したフック状の汀線に位置していることから、汀線に沿う西向きの沿岸漂砂は起こり得ない条件を有している。St. 2 は、浜松五島海岸の 6 基の離岸堤の中央部汀線に位置し、両側を離岸堤に囲まれているため汀線はほぼ固定されている。St. 3 は浜松五島海岸の離岸堤群西端近傍の、馬込川河口導流堤の東側直近に位置する。ここも離岸堤と導流堤に

挟まれているため汀線変化はほとんど起こり得ない条件を有する。次に、図-3 に示す St. 4 は、馬込川河口導流堤の西側直近で粗粒材養浜が行われてきた場所の前面に位置する。また、図-1 にも示したように、St. 4 付近での粗粒材養浜区間の西側には3基の離岸堤が設置されている。離岸堤は西向きの沿岸漂砂を阻止しうることから、3号離岸堤西端に St. 5 ($x = 8.35 \text{ km}$) を設けた。図-3 によれば、この地点は3号離岸堤の西側直近のため汀線がやや凹状となった場所のほぼ中央を通る。さらに図-1 によれば、浜松篠原海岸の $x = 10.3 \text{ km}$ には汀線変化の起こらない不動点がある。この不動点では、西向き沿岸漂砂が通過しつつ汀線が動的平衡状態を保っていると考えられるので、この地点を St. 6 とした。また浜幅は St. 6 の西 6.5 km の St. 7 から急激に増大していることから、 $x = 16.8 \text{ km}$ に St. 7 を設けた。さらに浜名湖今切口の東側の浜幅が広い地点に St. 8 を配置した。図-4 によれば、St. 7, 8 はいずれも広い海浜がある場所にある。

今切口では浜名湖の入退潮流が作用し、そこで著しい地形変化が起きている。また、導流堤の西側直近には海岸保全のために3基の離岸堤が設置されていることから、離岸堤の西端部汀線に St. 9 を、その西側の新居海岸で最も顕著な汀線変化が起きた場所に St. 10 を、またその下手側の汀線の不動点に St. 11 を、さらに湖西海岸の西端に St. 12 を配置した (図-5)。

以上の特徴を理解した上で、図-1 より天竜川河口から西向きに汀線変化の特徴を調べると、まず天竜川河口に隣接する浜松五島海岸の St. 1 では、2005年までに河口近傍で汀線が後退したが、2005年以降の変化は小さい。また浜松五島海岸では1970-1990年に離岸堤群が造られて汀線固定が図られた結果、1972年当時と比較して突出した汀線が取り残されており、最近では離岸堤群により囲まれているために汀線変化はほとんど生じていない。同様な特徴は馬込川河口左岸の St. 3 でも見られる。これらと比較し、St. 4~St. 5 では2005年まで著しく汀線が後退した後、2005年以降粗粒材養浜が行われるとともに、離岸堤が造られたため一時は後退した汀線が再び大きく前進している。また、St. 5~St. 6 では汀線後退量が西向きに減少し、St. 6 の汀線の不動点に至る。

St. 6 から今切口の東側直近の St. 8 では、汀線が1972年以降前進してきたが、近年はやや後退も示す。総じてこの区間では150 m以上の浜幅があるのが特徴である。今切口の西側区域については、その西側隣接部で St. 9 のように離岸堤が造られたため汀線は固定されているが、その西側では距離とともに汀線後退量が増大し、今切口の西 1.7 km に位置する St. 10 では1972年から2005年までに最大で約114 mの汀線後退が生じた。浜松篠原海岸の馬込川河口の西側隣接部と同様なパターンで汀線が後退しているが、汀線後退は現在のところ St. 11 で収束している。

3. 汀線の時系列変化

図-1 に示した St. 1~St. 12 での1972~2016年における汀線の時系列変化を詳しく調べた。

以下、図-6～図-12には各2地点での汀線変化をまとめて示す。図-1に示す天竜川河口右岸のSt.1と浜松五島海岸中央のSt.2の汀線変化のうち、St.1では1972年から1995年までの期間一時的な変動はあったものの、1995～2005年に汀線の急速な後退が起きた。その後2013年まではほぼ一定値を保ったが、2014年からは再び急減傾向を示す。1995～2016年の汀線後退量は206 m（平均後退速度9.9 m/yr）であった。一方、St.2では1972～1995年に115 m前進した後、近年を除けばほぼ一定値（140 m）を保っている。図-1, 2よりSt.1, 2の関係を調べると、St.2は突出した離岸堤群の中央に位置するのに対し、St.1はSt.2より大きく汀線が後退した位置にあって、しかもその汀線が東向きにフック状となっている。このことを考慮すると、図-6においてSt.2での汀線がほとんど無変化なのは離岸堤に挟まれているためであり、これに対してSt.1では離岸堤により西側が塞がれた条件で天竜川河口方面へと東向きに漂砂が流出したため汀線が後退したと考えられる。

次に、馬込川河口を挟むSt.3, 4では、図-7に示すように両地点とも汀線は後退傾向を示すものの、St.3では1995年以降ほぼ平衡状態に達したのに対し、St.4では1987年以降2005年まで汀線が170 mも後退した（後退速度9.5 m/yr）。しかし2005年以降は粗粒材養浜の効果が現れて汀線は前進傾向に変わり、2013年までに最大141 mの汀線前進が起きた。

図-8に示すSt.5では、1995年まではわずかな汀線後退を示した後、1995～2016年には変動を示しつつも徐々に後退し、2016年までの後退量は81 m（平均後退速度3.9 m/yr）であった。これに対して汀線の不動点であるSt.6では、汀線は一定値を保っており、この地点では一定量の沿岸漂砂が通過する条件を有することが確認できる。

今切口導流堤の東側2.7 kmのSt.7と導流堤脇のSt.8の汀線変化（図-9）では、両地点の汀線は互いほぼ相似形を保ちつつ緩やかに前進してきたが、1995年以降は前進傾向が停止し、ほぼ一定値を保っている。このことから1995年以降、St.6を通過して流入するのと同量の西向きの沿岸漂砂が今切口を通過していると考えられる。1972年から1995年まで汀線前進量はともに90 m（前進速度4.0 m/yr）であり、その後は変動はあるものの一定値を示す。

今切口の西側区域の測点のうちSt.9とSt.10の汀線変化では（図-10）、今切口の西側に隣接するSt.9の汀線はほぼ一定値を保っているが、St.10では1972年から1995年に汀線が最大76 m後退した後、1995年以降はほぼ平衡状態を保っており、ここでも1995年以降は一定量の沿岸漂砂が流れる状態に変わったことが分かる。最後に、図-11に示すSt.11, 12では大きな汀線変化は見られず、汀線はほぼ一定位置を保っており、動的平衡状態にあると推定される。

4. 汀線の方向角の変化

1972年と2016年の空中写真より、沿岸方向に10 m間隔で汀線位置を読み取り、各点において汀線への法線を引き、この法線と図-1に示すy軸とのなす角を読みとった。読み取り値はばらつきが大きいことから、読み取り地点を挟む両側0.25 km内の方向角の平均値を

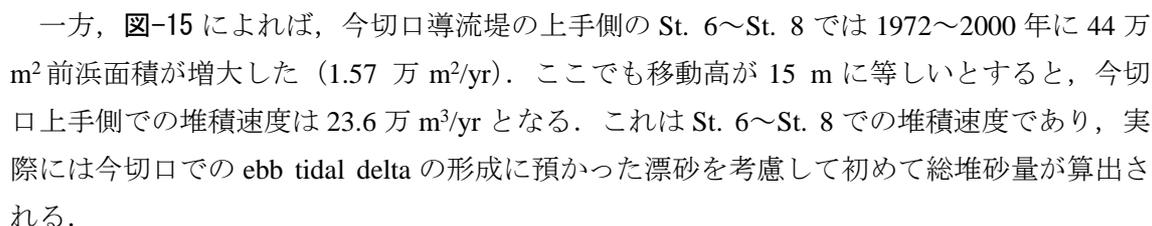
算出し、その上で St. 6 での法線角との差 θ を求めてその沿岸分布を図-12 に示した。 θ の図示に際しては、 St. 6 での汀線への法線角度と比較して左回りの角を正とした。 図-12 によれば 1972 年当時、 θ はほぼ 1.5 km 間隔での変動を伴いながらも浜松五島海岸から西向きに増加し、今切口の西側隣接部で局所的に減少する分布であった。 図-1 に示したように、 St. 6 は St. 4 から始まる侵食域の西端に位置しているので、 St. 6 では左回りの方向からの波の入射が卓越している。 一方で図-12 によれば St. 6 より西側では汀線への法線の方向角が左回りの方向に傾くので、 St. 6 と同じ方向からの入射波に対しては碎波角が西側ほど減少し、結果的に西向きの沿岸漂砂量が低減する結果をもたらす。 また、 1.5 km 間隔での角度の変動は、当海岸でしばしば形成されるラージカスプに対応した汀線変動によると推定される。 2016 年になると、 St. 4~St. 6 では汀線の後退とともにその方向角が汀線の不動点である St. 6 での値とほぼ等しくなるような変化が起きた。 同様な特徴が今切口の西側の侵食域でも見られる。 このように、沿岸漂砂の場所的の不均衡により汀線が後退した区域では、いずれも汀線が左回りに回転する変化が生じている。

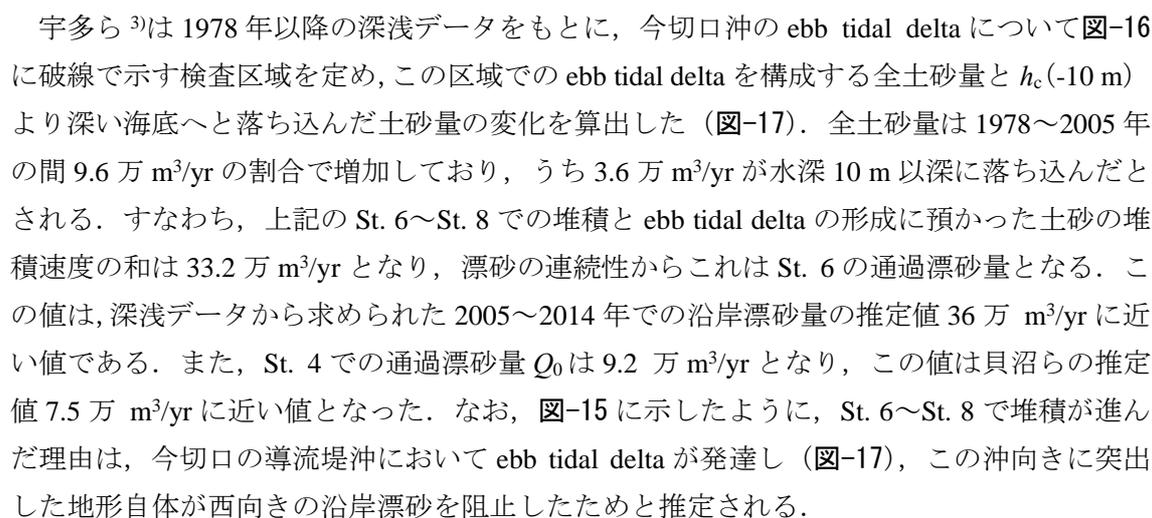
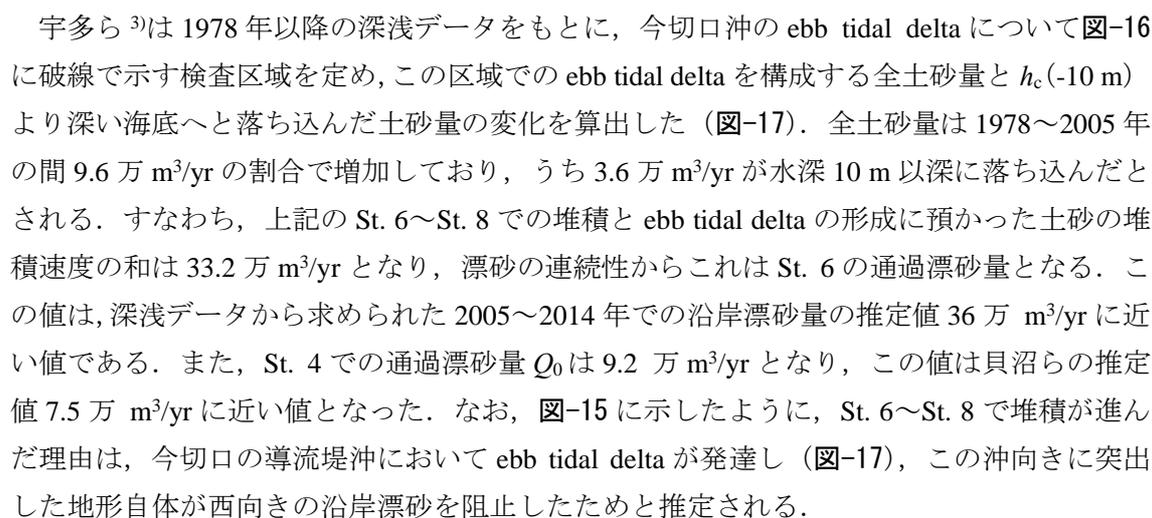
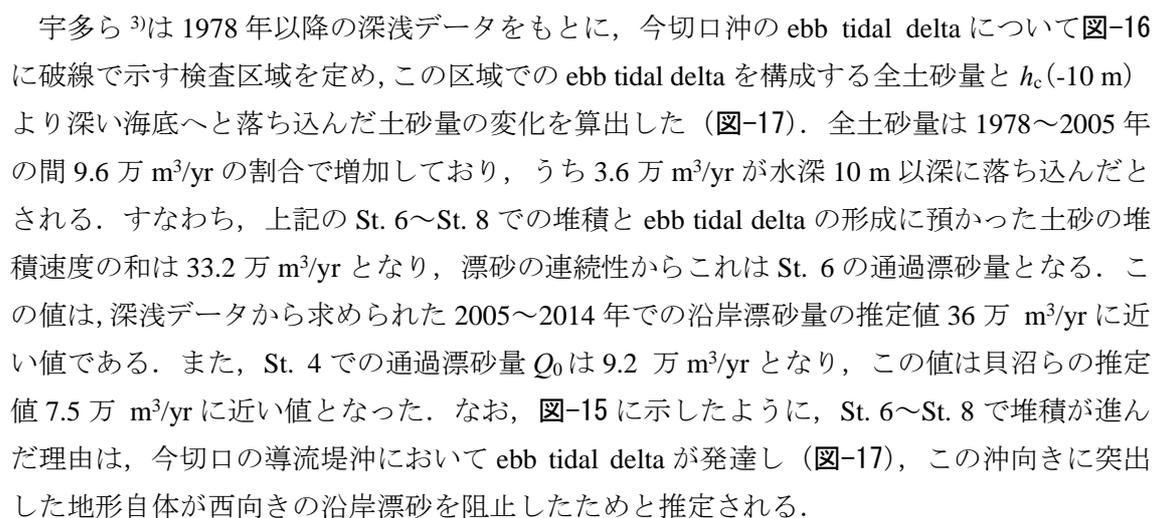
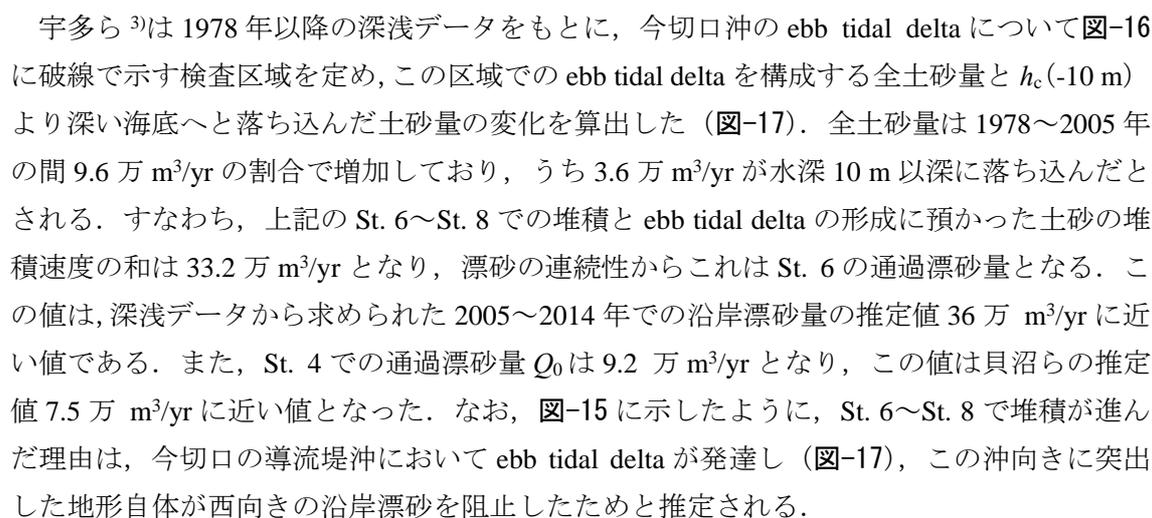
5. 代表地点における沿岸漂砂量の推定

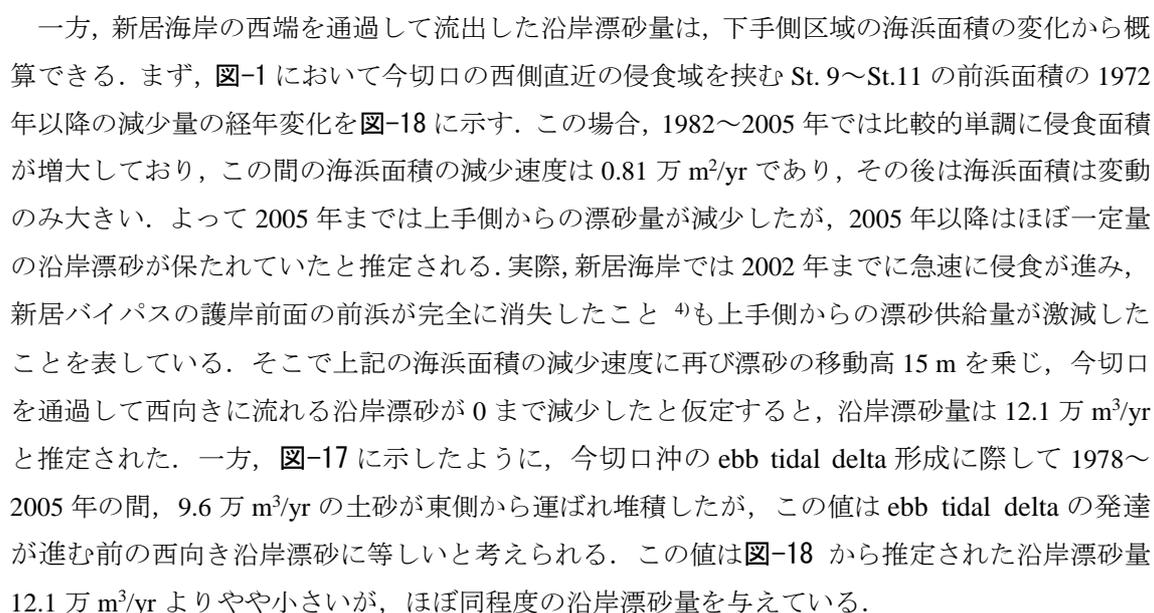
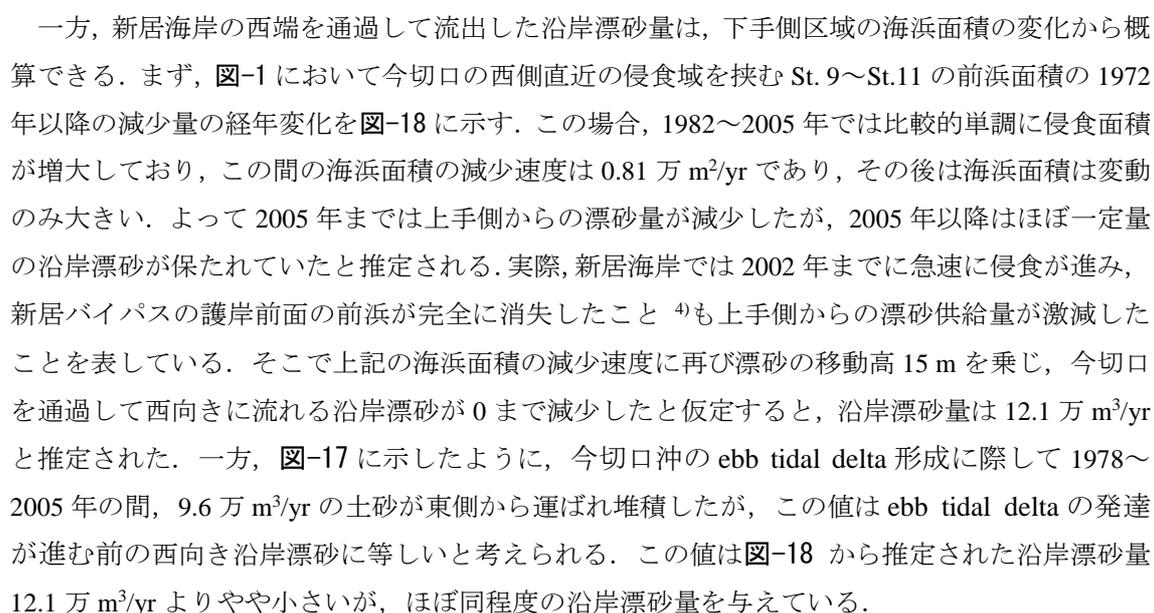
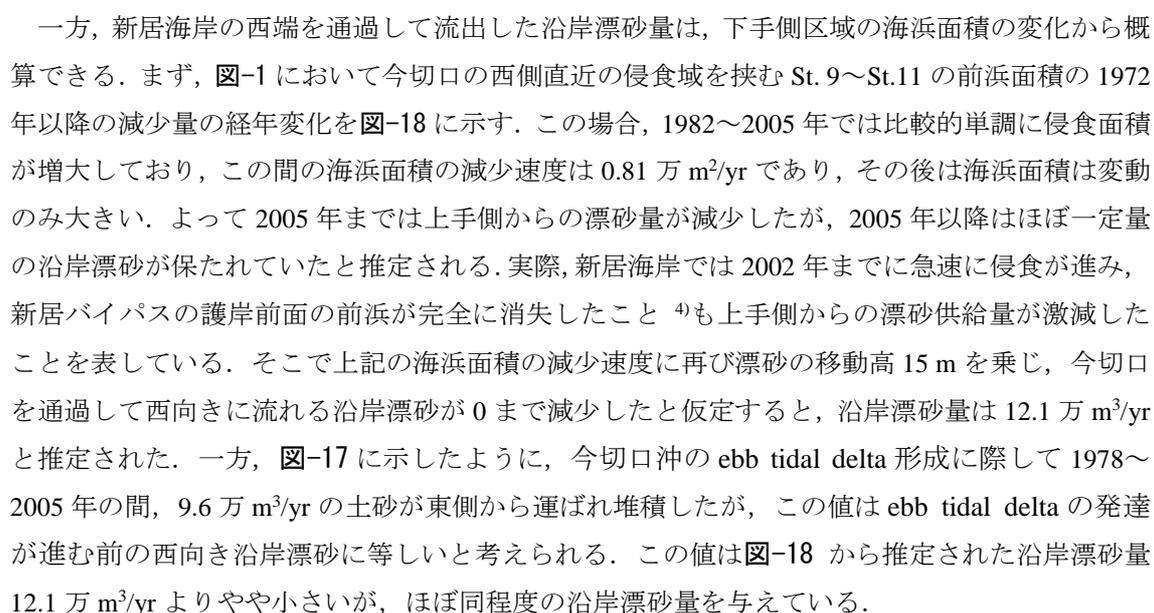
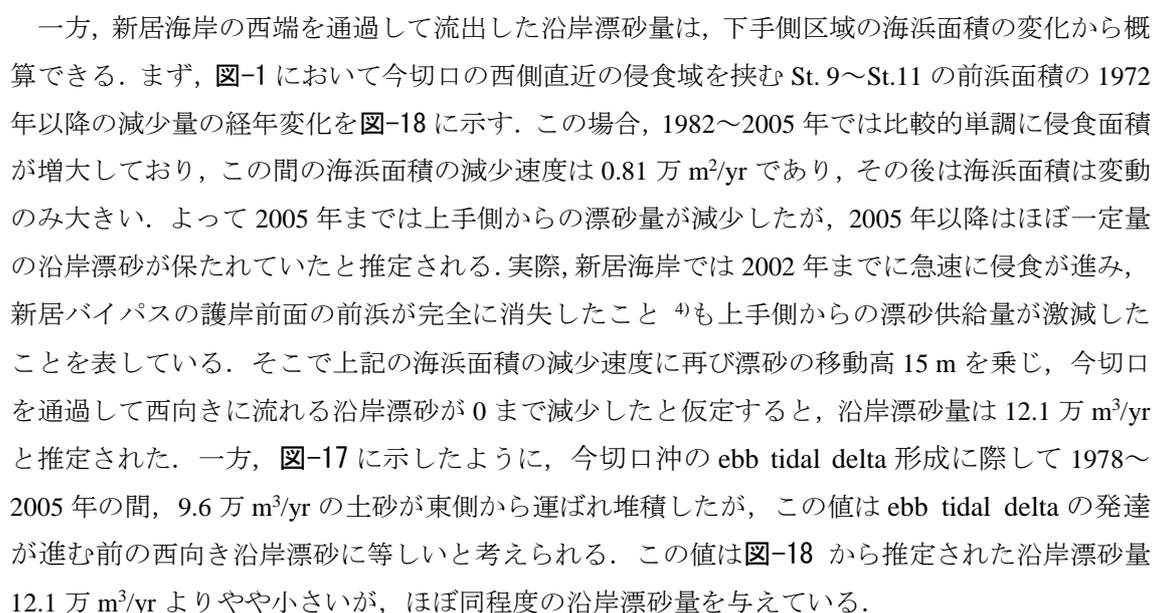
貝沼ら¹⁾は、 図-13 に示すように、 浜松五島・浜松篠原海岸に区間 A, B, C を定めた上で、海浜地盤高が 3~4 m と 4~-12 m の区域に二分し、深浅測量データを基にそれぞれの水深帯の土砂量と、 3~-12 m の全水深帯の土砂量の変化を算出した。 なお、この算定では天竜川河口からの流出土砂は近年主に河口東側の竜洋海岸方面へと流れていると見られることから、河口部から区域 A への供給土砂量は 0 と仮定している。 また、土砂収支解析自体は 1974 年以降の地形変化を対象に行われたが、 1974~2005 年では解析に使用可能なデータが少なかったことから、浜松篠原海岸での粗粒材養浜開始直後の 2005 年から 2014 年まで 9 年間での土砂収支が求められた (図-14)。 この期間では、 図-14 の上段に示すように、区域 A から馬込川を横切って 7.5 万 m^3/yr の沿岸漂砂が流入し、区域 C の西端 (St. 6 の東側 0.7 km 地点) からは 36 万 m^3/yr の漂砂が流出しているとした。

一方、浜松篠原海岸では、 図-1 に示したように汀線変化が求められているので、推定精度をやや犠牲にすれば、前浜面積の減少速度からの沿岸漂砂量の推定も可能である。 まず、馬込川河口の西側隣接部で汀線後退が顕著に見られる St. 4~St. 6 区間での前浜面積の減少量を正としてその変化を図-15 に示す。 ほぼ 2005 年までは直線的に前浜面積が減少したが、その後は養浜により前浜面積が増加に転じた。 1980~2005 年 (25 年間) での前浜面積の減少量は 40 万 m^2 と算定される (前浜面積の減少速度 1.6 万 m^2/yr)。 この海岸では漂砂の移動高は算定されていないが、遠藤ら²⁾は実測の縦断形変化を参考に h_c を 12 m、 h_R を 3 m としている。 そこで漂砂の移動高を h_c と h_R の和で近似すると、移動高は 15 m となるので、これを前浜面積の減少速度に乗じることにより侵食速度は 24 万 m^3/yr と推定された。 いま、馬込川河口を横切って上手側から流れ込む沿岸漂砂量を Q_0 とおくと、 St. 6 の通過漂砂量は

24 万 $\text{m}^3/\text{yr} + Q_0$ となる。

一方、-15 によれば、今切口導流堤の上手側の St. 6~St. 8 では 1972~2000 年に 44 万 m^2 前浜面積が増大した (1.57 万 m^2/yr)。ここでも移動高が 15 m に等しいとすると、今切口上手側での堆積速度は 23.6 万 m^3/yr となる。これは St. 6~St. 8 での堆積速度であり、実際には今切口での ebb tidal delta の形成に預かった漂砂を考慮して初めて総堆砂量が算出される。

宇多ら³⁾は 1978 年以降の深浅データをもとに、今切口沖の ebb tidal delta について-16 に破線で示す検査区域を定め、この区域での ebb tidal delta を構成する全土砂量と $h_c(-10 \text{ m})$ より深い海底へと落ち込んだ土砂量の変化を算出した (-17)。全土砂量は 1978~2005 年の間 9.6 万 m^3/yr の割合で増加しており、うち 3.6 万 m^3/yr が水深 10 m 以深に落ち込んだとされる。すなわち、上記の St. 6~St. 8 での堆積と ebb tidal delta の形成に預かった土砂の堆積速度の和は 33.2 万 m^3/yr となり、漂砂の連続性からこれは St. 6 の通過漂砂量となる。この値は、深浅データから求められた 2005~2014 年での沿岸漂砂量の推定値 36 万 m^3/yr に近い値である。また、St. 4 での通過漂砂量 Q_0 は 9.2 万 m^3/yr となり、この値は貝沼らの推定値 7.5 万 m^3/yr に近い値となった。なお、-15 に示したように、St. 6~St. 8 で堆積が進んだ理由は、今切口の導流堤沖において ebb tidal delta が発達し (-17)、この沖向きに突出した地形自体が西向きの沿岸漂砂を阻止したためと推定される。

一方、新居海岸の西端を通過して流出した沿岸漂砂量は、下手側区域の海浜面積の変化から概算できる。まず、-1 において今切口の西側直近の侵食域を挟む St. 9~St.11 の前浜面積の 1972 年以降の減少量の経年変化を-18 に示す。この場合、1982~2005 年では比較的単調に侵食面積が増大しており、この間の海浜面積の減少速度は 0.81 万 m^2/yr であり、その後は海浜面積は変動のみ大きい。よって 2005 年までは上手側からの漂砂量が減少したが、2005 年以降はほぼ一定量の沿岸漂砂が保たれていたと推定される。実際、新居海岸では 2002 年までに急速に侵食が進み、新居バイパスの護岸前面の前浜が完全に消失したこと⁴⁾も上手側からの漂砂供給量が激減したことを表している。そこで上記の海浜面積の減少速度に再び漂砂の移動高 15 m を乗じ、今切口を通過して西向きに流れる沿岸漂砂が 0 まで減少したと仮定すると、沿岸漂砂量は 12.1 万 m^3/yr と推定された。一方、-17 に示したように、今切口沖の ebb tidal delta 形成に際して 1978~2005 年の間、9.6 万 m^3/yr の土砂が東側から運ばれ堆積したが、この値は ebb tidal delta の発達が進む前の西向き沿岸漂砂に等しいと考えられる。この値は-18 から推定された沿岸漂砂量 12.1 万 m^3/yr よりやや小さいが、ほぼ同程度の沿岸漂砂量を与えている。

6. まとめ

St. 6 を通過して西向きに流れた沿岸漂砂量は 33.2 万 m^3/yr と推定され、この漂砂が下手側へと運ばれ、今切口沖では ebb tidal delta が形成され、これが沿岸漂砂を阻止したため今切口を含んで上手側の St. 6~St. 8 で堆積が進んだと考えられる。ebb tidal delta の発達が続

いた間、今切口を通過して西向きに流れる沿岸漂砂は激減し、新居海岸では汀線が後退してきたが、ebb tidal delta が十分発達するとその外縁を漂砂が通過することが可能となり、新居海岸の St. 11 の通過漂砂量は現在では 12.1 万 m³/yr となつてほぼ動的平衡状態に至つたと推定される。沿岸漂砂の絶対値が St. 6 と比べて小さい点は、図-12 に示した汀線への法線角度が St. 6 から西向きに減少することから説明可能である。

参考文献

- 1) 貝沼征嗣, 遠藤和正, 榊原秀作, 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎浜: 浜松篠原海岸の粗粒材養浜区域の沖合で進む大規模侵食, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, 2016. (印刷中)
- 2) 遠藤和正, 榊原秀作, 宇多高明, 石川仁憲, 古池 鋼: 浜松篠原海岸の養浜後の汀線前進と沖合侵食の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_781-I_786, 2015.
- 3) 宇多高明, 芹沢真澄, 三波俊郎, 古池 鋼, 石川仁憲: ebb tidal delta の地形変化予測と沖への土砂損失防止策の検討, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.626-630, 2008.
- 4) 貝沼征嗣, 遠藤和正, 榊原秀作, 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎: Tidal Inlet の発達に伴う沿岸漂砂の不連続性に起因する下手海岸での急激な侵食, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, 2016. (印刷中)

図表一覧

- 図-1 遠州灘に面した浜松五島海岸から湖西海岸に至る区間の汀線変化と浜幅の分布
- 図-2 St. 1, 2, 3 付近の海岸状況を示す斜め空中写真 (2015 年 12 月 28 日撮影)
- 図-3 St. 4, 5, 6 付近の海岸状況を示す斜め空中写真 (2015 年 12 月 28 日撮影)
- 図-4 St. 7, 8, 9 付近の海岸状況を示す斜め空中写真 (2015 年 12 月 28 日撮影)
- 図-5 St. 10, 11, 12 付近の海岸状況を示す斜め空中写真 (2015 年 12 月 28 日撮影)
- 図-6 St. 1, 2 における汀線の経年変化
- 図-7 St. 3, 4 における汀線の経年変化
- 図-8 St. 5, 6 における汀線の経年変化
- 図-9 St. 7, 8 における汀線の経年変化
- 図-10 St. 9, 10 における汀線の経年変化
- 図-11 St. 11, 12 における汀線の経年変化
- 図-12 各地点と St. 6 の汀線への法線の方向角のなす角の沿岸分布
- 図-13 浜松五島海岸と浜松篠原海岸での土砂収支計算のための区域分割
- 図-14 浜松五島海岸と浜松篠原海岸での 2005 年以降での土砂収支と沿岸漂砂量
- 図-15 浜松篠原海岸の St. 4~St. 6 とその下手側の St. 6~St. 8 での砂浜面積の変化
- 図-16 1978 年から 2005 年までの地形変化量の平面分布

図-17 検査区域内の土砂量変化

図-18 今切口西側の St. 9～St. 11 区間での砂浜面積の変化

2016年1月撮影

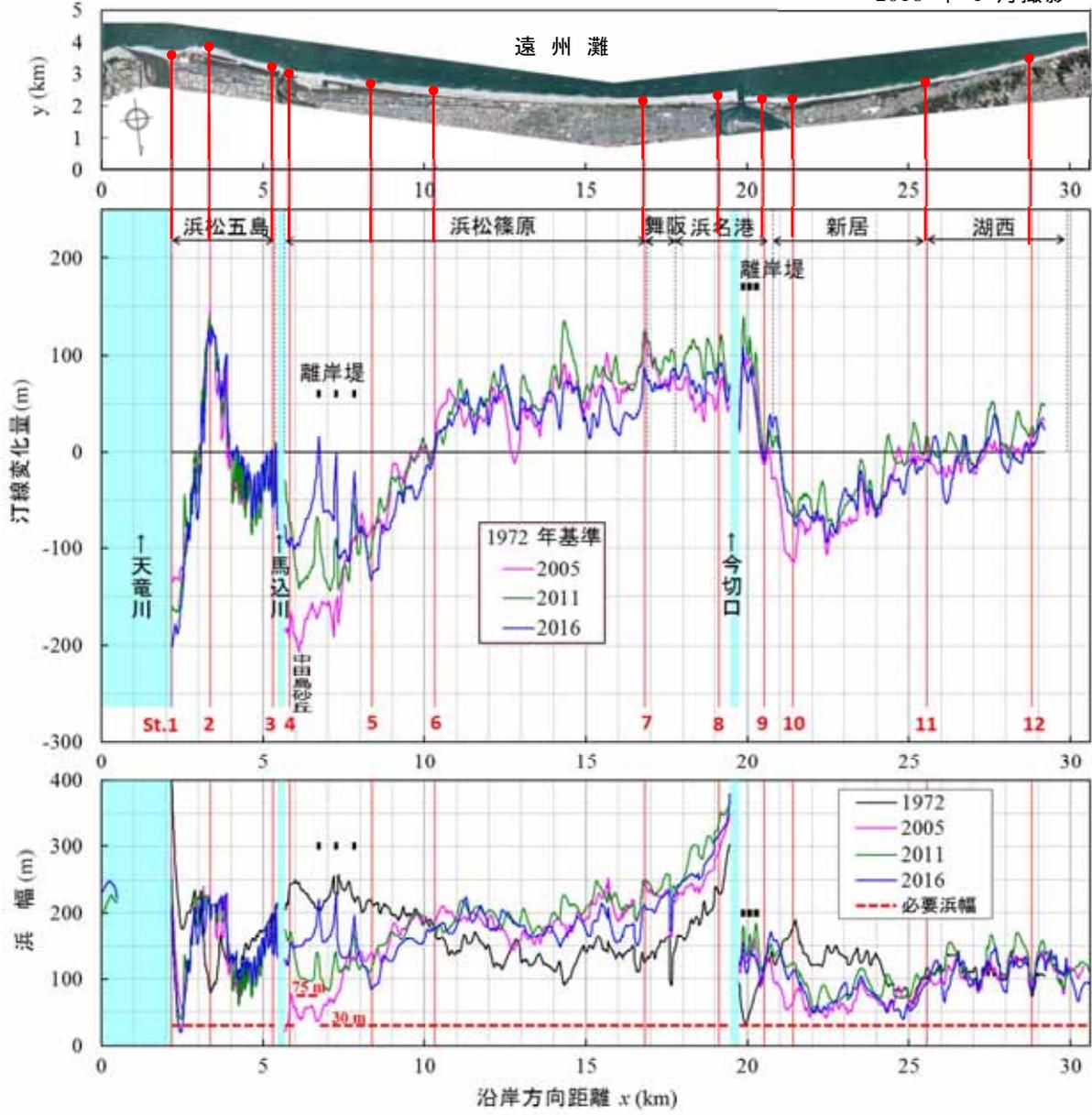


図-1



図-2



図-3



图-4



図-5

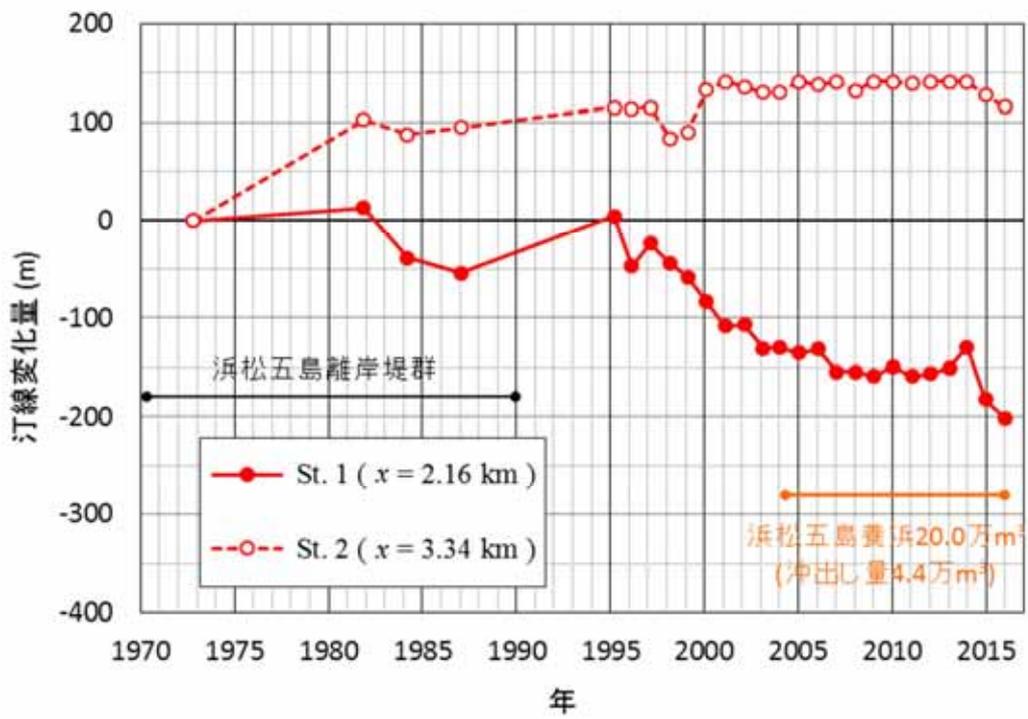


図-6

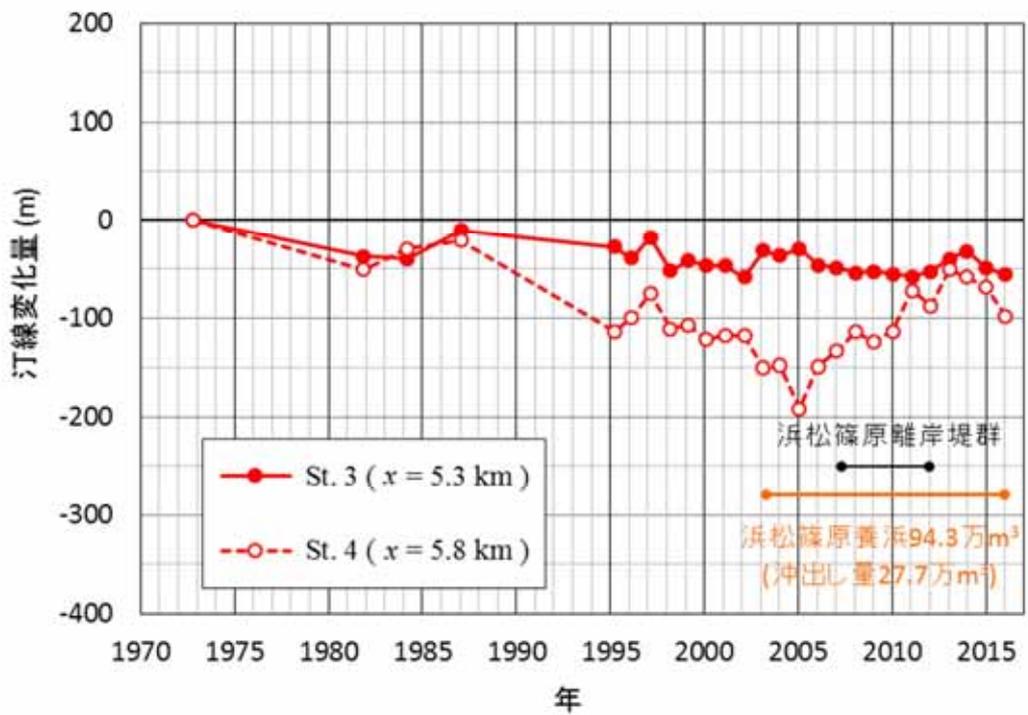


図-7

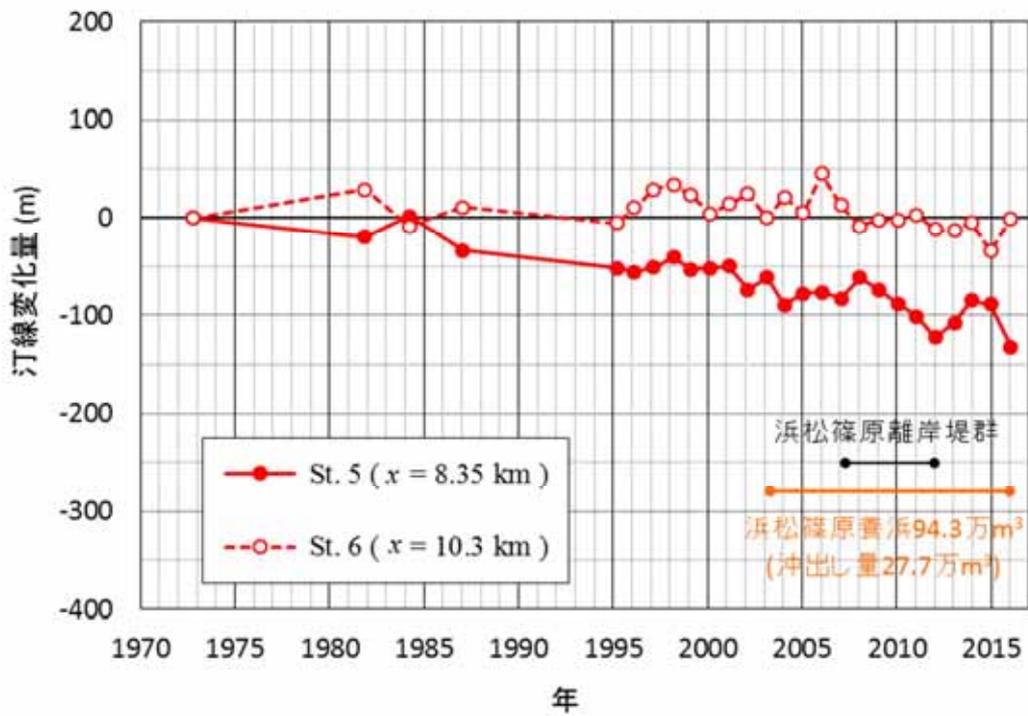


図-8

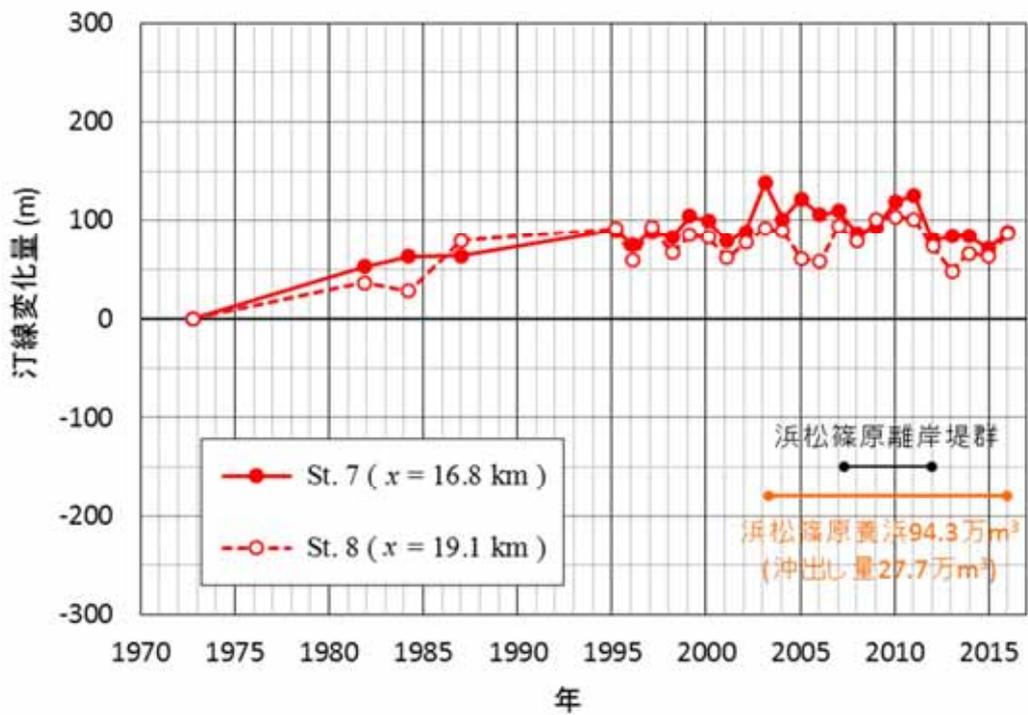


図-9

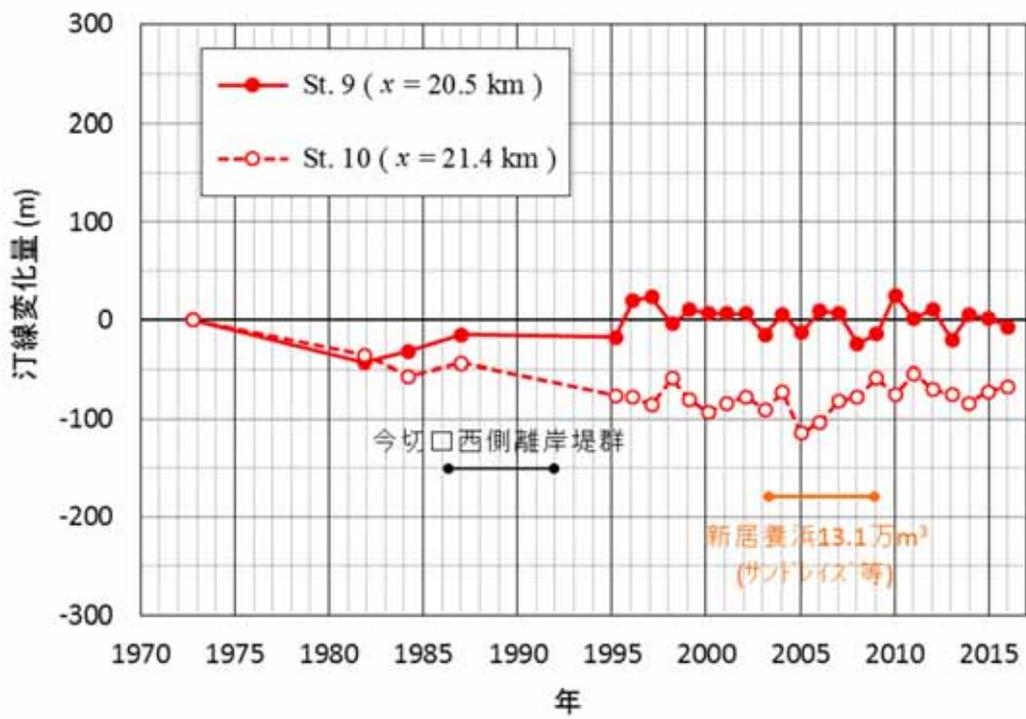


図-10

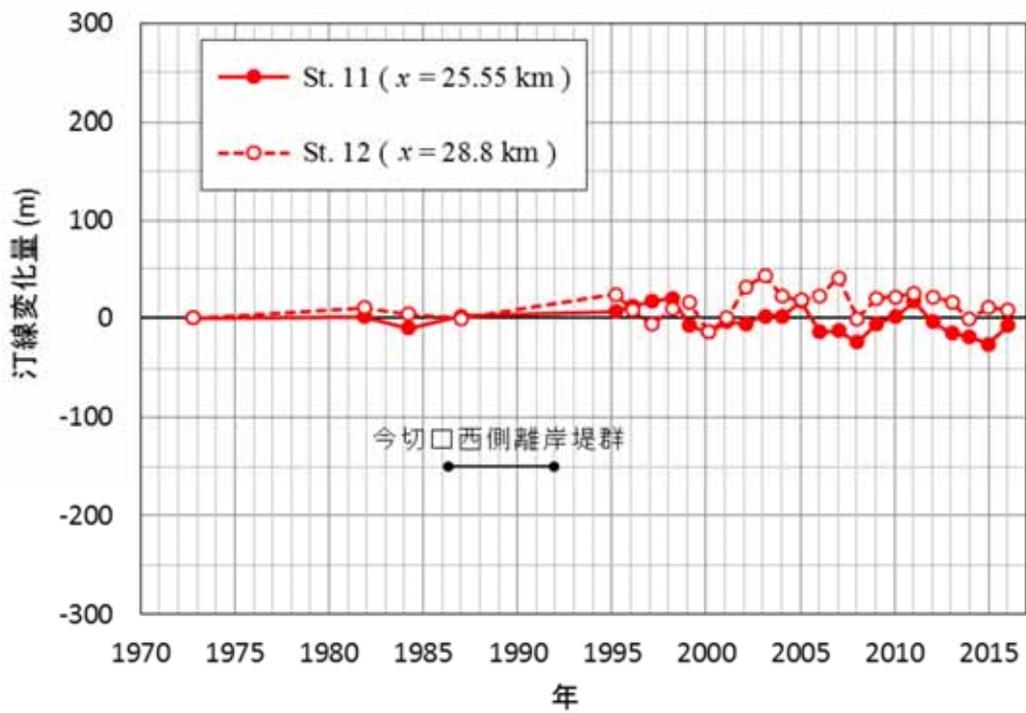


図-11

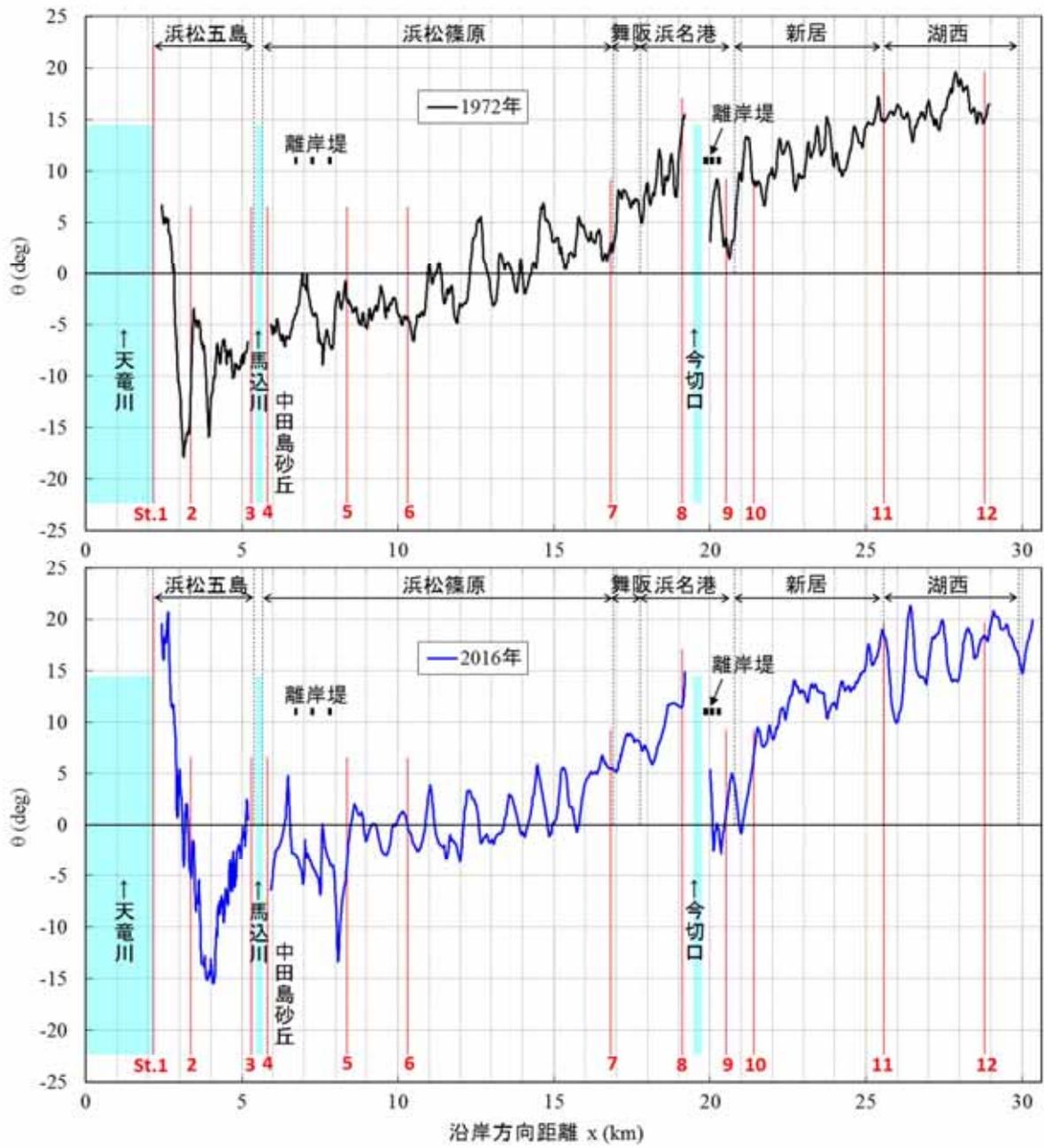


图-12

2014年2月

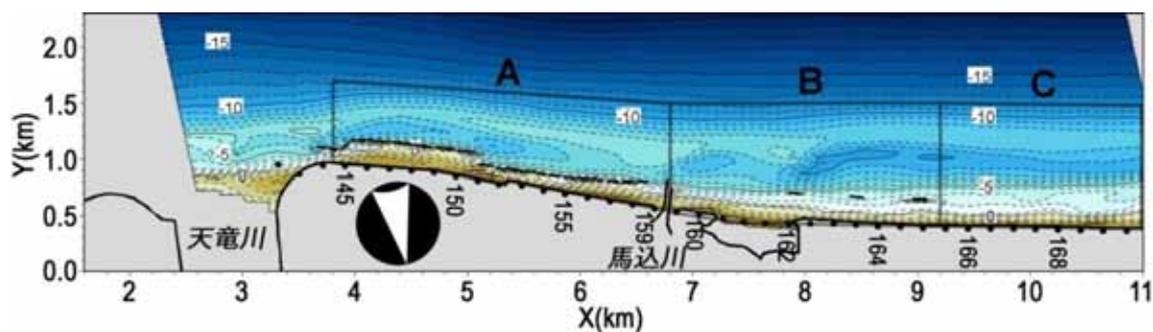


図-13

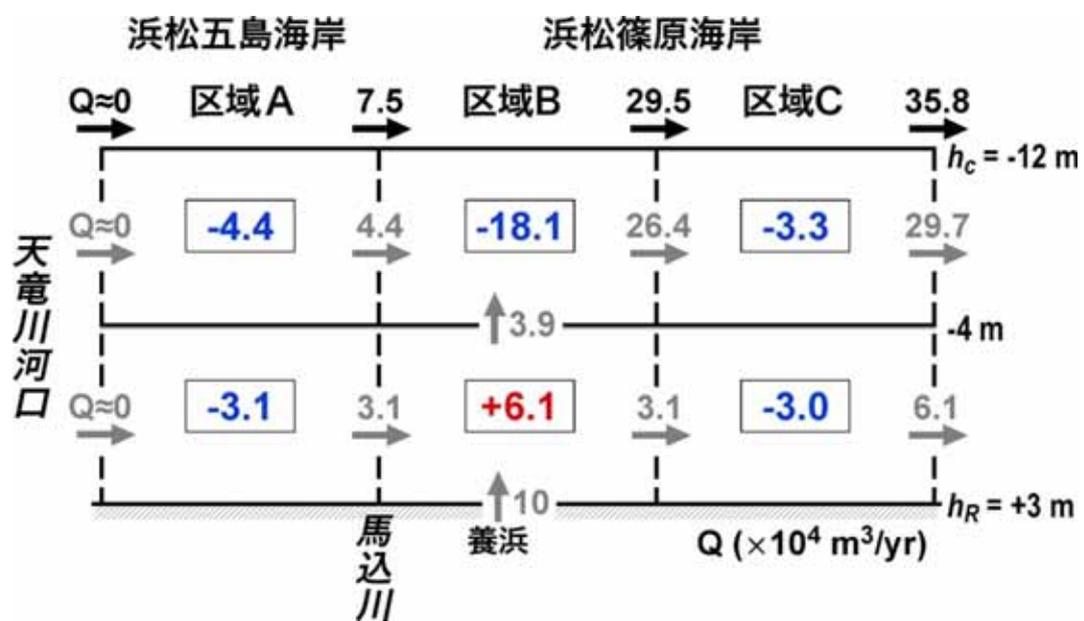


図-14

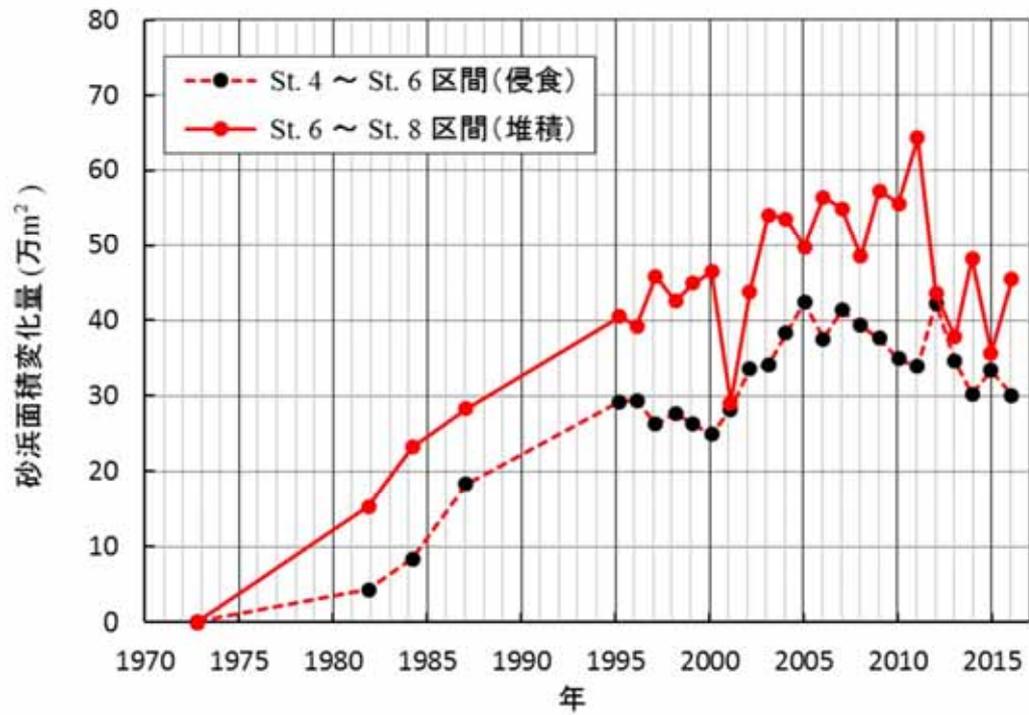


図-15

水深変化量 (実測)

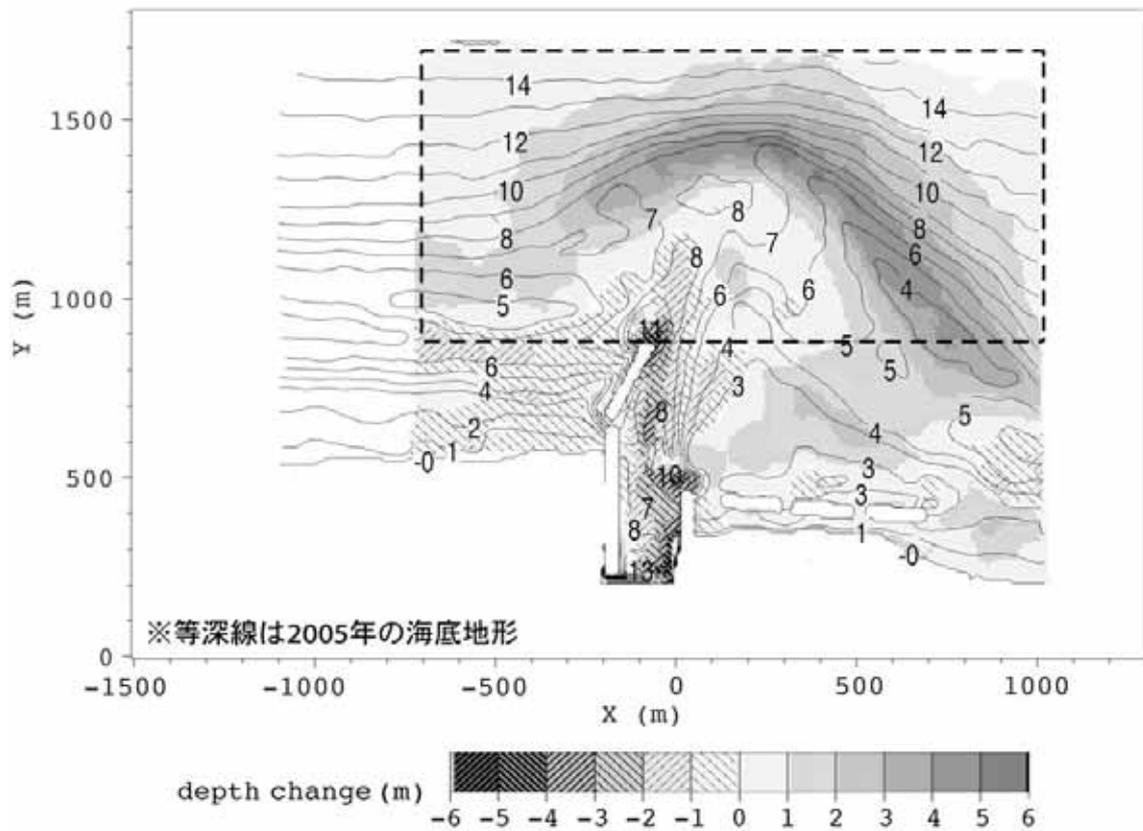


図-16

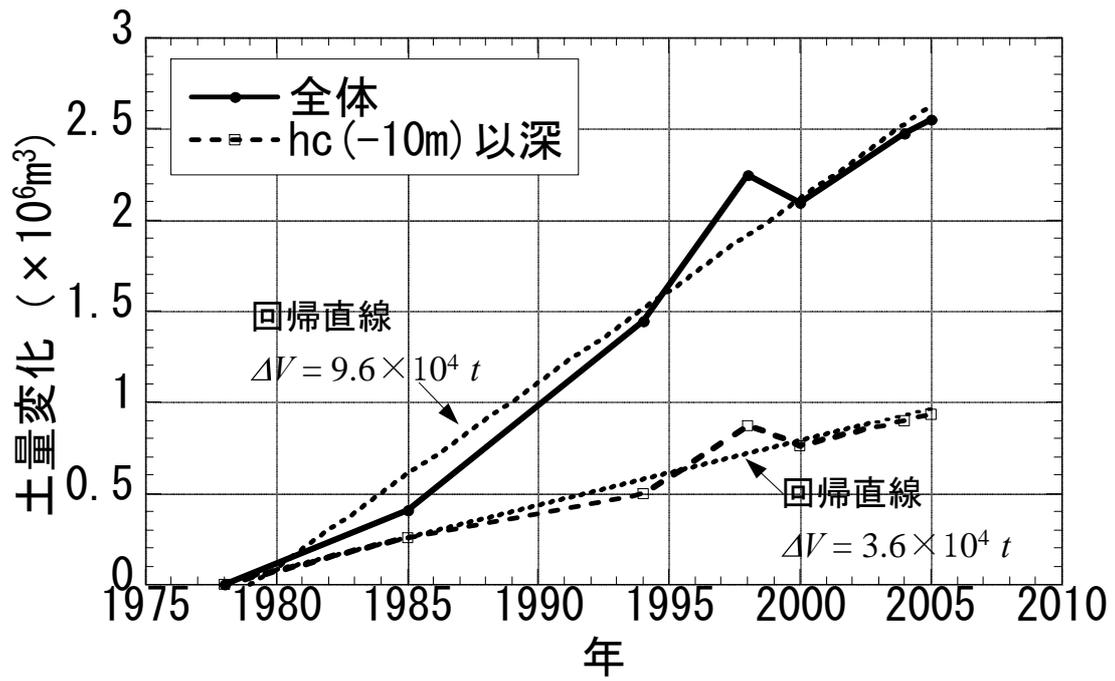


図-17

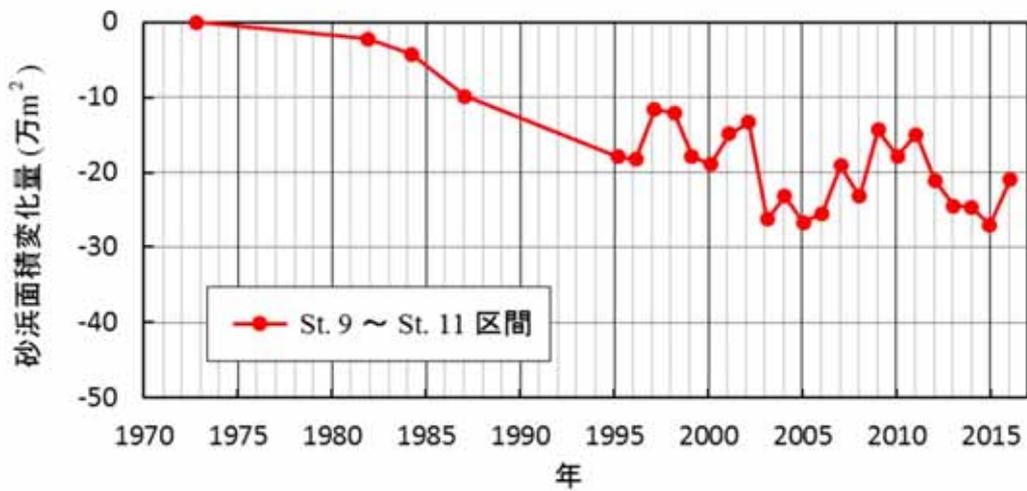


図-18