

護岸建設による干潟上の 流速減少に関する一考察

A STUDY ON DECREASE OF TIDAL CURRENT VELOCITY ON TIDAL FLAT BY SEAWALL CONSTRUCTION

齋田倫範¹・田井明²・矢野真一郎³・小松利光⁴

Tomonori SAITA, Akira TAI, Shinichiro YANO and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博（工）九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門（〒 819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）

²学生会員 修（工）九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻・日本学術振興会特別研究員（同上）

³正会員 博（工）九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門（同上）

⁴フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門（同上）

In Ariake Bay, a vanishment of tidal flat due to reclamations is pointed out as one of the reason for deterioration of aquatic environment, because a tidal flat has not only biological and chemical purifying effect but also strong vertical mixing by tidal current and wave. In this study, the influence of the seawall construction in tidal flat on tidal current and wave is estimated by a simple theoretical analysis and field survey. As a result, it is clarified that the construction of seawalls bring about considerable influence on the tidal current, and the influence depends on a positional relation between the mean tide level and ground heights at the seawall. In the case where the seawall is constructed farther offshore in tidal flat, tidal current decreases more drastically. In addition, the impact of seawalls on tidal current reaches farther area under the condition that a slope of tidal flat is gentler. The seawalls are located at from 0 m to 3 m high above mean water level in the northern part of Ariake Bay. It implies that the decrease of tidal current and vertical mixing due to constructed seawalls occurs mainly at around high tide in the northern part of Ariake Bay.

Key Words: Ariake Bay, tidal current, tidal flat, seawall, Isahaya Sea-Dike

1. はじめに

近年、有明海では赤潮や貧酸素水塊の頻発化・大規模化などの水環境問題が生じている^{1),2)}。潮流流速の減少に伴う成層の強化がこれらの環境変化の一因とされており³⁾、潮流の変化とそのメカニズムについて現地観測⁴⁾や数値シミュレーション^{5),6),7),8)}を用いた多くの研究が行われている。また、鉛直混合と潮流の関係についても研究が行われている⁹⁾。

一方、有明海の特徴の一つに広大な干潟の存在が挙げられる。干潟域は生物化学的な効果による水質浄化機能¹⁰⁾のみならず、流れや波により複雑な物理場が形成される。それらによる物理的攪乱効果は想像以上に大きく、したがって水環境に与える影響は非常に大きいと考えられる。

しかし、有明海湾奥部の干拓事業が干潟域の物理環境に与えた影響については、いまだ十分に評価されていない。本研究では、干拓事業による直立護岸の建設が有明海の水環境に与えた影響を評価することを目的として、有明海湾奥部における干潟上の流速と攪乱に関する簡単な理論的考察と護岸設置状況の現地調査から干拓事業がもたらした影響を検討した。

2. 干潟域の潮流流速

浅海域における水位変化は、沖合からの海水の流入によって生じる。したがって、図-1のように干潟を模式的に表示すると、潮流流速と水位変化との関係は連続条件から式(1)のように近似的に表現できる。

$$\frac{\partial G}{\partial t} + Hu = 0 \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 H は水深、 u は水深 H の断面における水深平均流速、 G は水深 H の断面よりも岸側の水中部分の縦断面（図-1中の網掛けの領域）の面積である。この基礎式を用いて、護岸が無い場合（Case0）、護岸が干潮時の汀線よりも沖側にある場合（Case1）、護岸が干潮時の汀線よりも岸側にある場合（Case2）の3ケースに

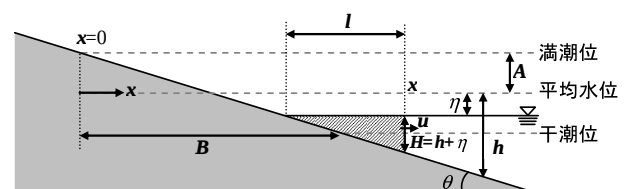


図-1 護岸が設置されていない干潟の模式図 (Case0)

ついて検討を行った。なお、図-1において、 $x < 0$ は潮上帯、 $0 < x < B$ が潮間帯で有明海においては多くの場合に干潟に該当し、 $x > B$ は潮下帯である。ここでは、簡単のためにこの潮上帯、潮間帯、潮下帯で勾配が一定であるような地形を想定している。また、以下、潮間帯のことを干潟と呼ぶことにする。

(1) 護岸がない場合 (Case0)

護岸がない場合 (Case0) には、図-1 より式 (1) を書き換えると式 (2) のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} H l \right) + H u = 0 \quad (2)$$

ここで、 H は水平位置 x における水深、 u は水平位置 x における水深平均流速で冲向き (x の正の向き) を正とする。 l は x から汀線までの距離である。なお、 x の原点は干潟の岸側の端にとる。ここで、地形の勾配を θ とすると幾何学的な関係より

$$l = \frac{H}{\tan \theta} \quad (3)$$

となるので、式 (2) に代入して整理すると、

$$\frac{1}{\tan \theta} \frac{\partial H}{\partial t} + u = 0 \quad (4)$$

となり、水平位置 x における平均水深を h 、水位変動を η とすると $H = h + \eta$ より、

$$\frac{1}{\tan \theta} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) + u = 0 \quad (5)$$

となる。ここで、 $h = h(x)$ なので、 $\partial h / \partial t = 0$ となり、

$$\frac{1}{\tan \theta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + u = 0 \quad (6)$$

であるから、 u について整理すると、

$$u = -\frac{1}{\tan \theta} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (7)$$

が得られる。水位変動を正弦波 $\eta = A \sin \sigma t$ で与えると流速 u_0 は、

$$u_0 = -\frac{A\sigma}{\tan \theta} \cos \sigma t \quad (8)$$

となる。 A は水位変動の振幅、 σ は角周波数である。したがって、護岸がない場合の潮下帯の流速振幅 $\hat{u}_0$ は式 (9) で表現され、潮差、水位変動の周期、地形の勾配のみで決定され、場所には依らず一定となる。

$$\hat{u}_0 = -\frac{A\sigma}{\tan \theta} \quad (9)$$

式 (9) から求めた、潮下帯における勾配 θ と流速振幅の関係を図-2 に示す。ところで、干潟上でも式 (8) が成立するが、干出時には流速は生じない。したがって、条件

$$H > 0 \quad (10)$$

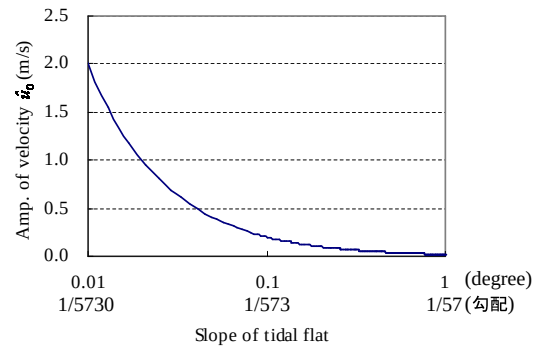


図-2 地形勾配と潮下帯の流速振幅の関係 ($A=2.5\text{m}$, $T=12.42\text{h}$ の場合)

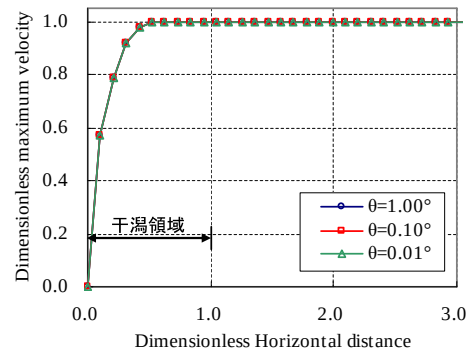


図-3 Case0 における最大流速の岸沖方向の変化 ($A=2.5\text{m}$, $T=12.42\text{h}$ の場合、横軸は x/B)

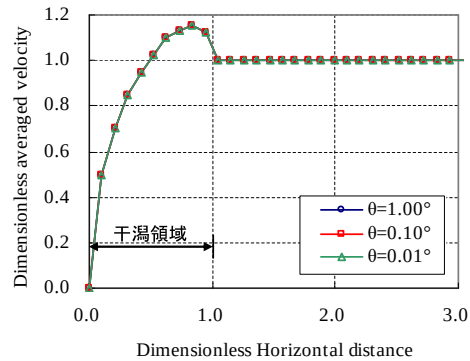


図-4 Case0 における平均流速の岸沖方向の変化 ($A=2.5\text{m}$, $T=12.42\text{h}$ の場合、横軸は x/B)

を満たす時間帯のみ流速が生じることになる。このことを考慮して岸沖方向の最大流速の分布を式 (8) から求めると図-3 のようになる。ただし、ここでは潮汐振幅 $A=2.5\text{m}$ 、周期 $T=12.42\text{h}$ とした。ここで、横軸は干潟の岸沖方向の幅 B で無次元化した x 、縦軸は潮下帯の最大流速 $\hat{u}_0$ で無次元化した各地点の最大流速である。この結果より、潮下帯ならびに平均水位以下の干潟部分においては最大流速は一定であるが、平均水位以上の干潟領域では岸に近づくに従って最大流速が減少していくことがわかる。次に、時間平均流速の岸沖方向分布を求めると図-4 のようになる。潮汐振幅 $A=2.5\text{m}$,

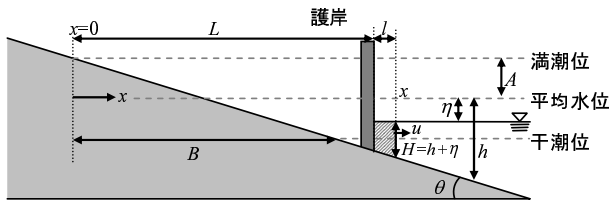


図-5 護岸が干潮時の汀線よりも沖側にある場合の模式図 (Case1)

周期 $T=12.42\text{h}$ とし、干潟における平均流速は湿潤状態で流速が生じる時間帯のみの平均値とした。ここで、横軸は干潟の岸沖方向の幅 B で無次元化した x 、縦軸は潮下帯の平均流速で無次元化した各地点の平均流速である。この結果より、潮下帯においては平均流速は一定であるが、干潟上では平均水位時の汀線より沖側で平均流速が大きくなるという興味深い結果が得られた。一方、平均水位時の汀線より岸側の干潟上では、岸に近づくに従って平均流速が減少していくことがわかる。

(2) 護岸が干潮時の汀線よりも沖側にある場合 (Case1)

図-5 に示すように護岸が干潮時の汀線よりも沖側にある場合については、護岸から水平位置 x の断面までの距離 l は時間に無関係であるので式 (11) の関係が成立する。

$$l \frac{\partial \eta}{\partial t} + (h + \eta)u = 0, \quad l = x - L = \text{const.} \quad (11)$$

ここで、 L は $x = 0$ の断面から護岸前面までの距離である。したがって、

$$u = -\frac{x - L}{h + \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (12)$$

の関係が得られる。ここで、Case0 と同様に水位変動が正弦波 $\eta = A \sin \sigma t$ であるなら、潮下帯に護岸がある場合の流速 u_1 は、

$$u_1 = -\frac{A\sigma(x - L)}{h + A \sin \sigma t} \cos \sigma t \quad (13)$$

となる。ここで、 $h = x \tan \theta - A$ と表現できるので、

$$u_1 = -\frac{A\sigma(x - L)}{x \tan \theta - A(1 - \sin \sigma t)} \cos \sigma t \quad (14)$$

となる。ただし、 $l < 0$ の場合には $u_1 = 0$ となる。

式 (14) を用いて岸沖方向の最大流速の分布を求めると図-6 のようになる。ただし、潮汐振幅 $A=2.5\text{m}$ 、周期 $T=12.42\text{h}$ とした。ここで、横軸は護岸からの距離 x 、縦軸は最大流速であるが、横軸は潮間帯の岸沖方向の幅 B 、縦軸は護岸を設置しない場合の潮下帯の最大流速 $\hat{u}_0$ で無次元化してある。この結果、Case0 と異なり、護岸の存在によって潮下帯において最大流速の大幅な減少が生じることが分かる。その減少量は護岸に近づ

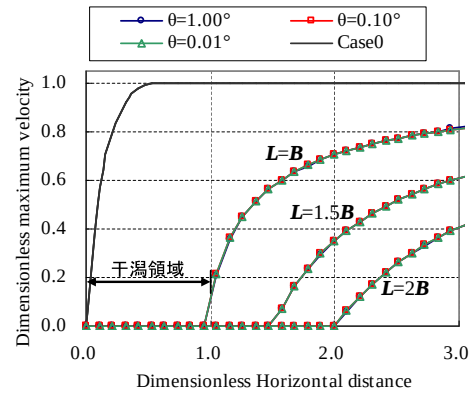


図-6 Case1 における最大流速の岸沖方向の変化 ($A=2.5\text{m}$, $T=12.42\text{h}$ の場合、横軸は x/B)

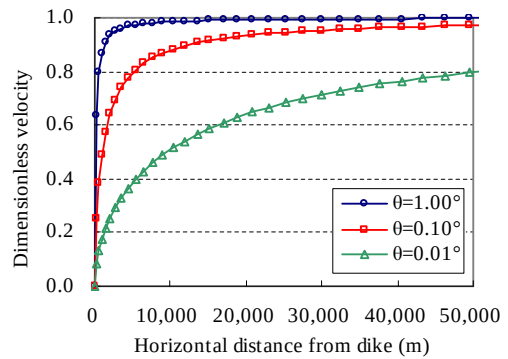


図-7 Case1 における最大流速の岸沖方向の変化 ($A=2.5\text{m}$, $T=12.42\text{h}$ の場合)

くに従って大きくなり、当然のことであるが護岸前面において最大流速は 0 となる。したがって、潮下帯に護岸が設置されると、図-6 に併記した Case0 の結果との差の分だけ最大流速が減少することになる。

次に、潮下帯の上端近くに護岸が設置された場合 ($L \approx B$) の護岸からの距離 l と岸沖方向の最大流速の分布の関係を図-7 に示す。ここでは、縦軸についてのみ最大流速を護岸を設置しない場合の潮下帯の最大流速 $\hat{u}_0$ で無次元化している。図-6 で示したように最大流速の減少量は護岸からの距離 l が大きくなるに従って小さくなるが、その減少量の変化は干潟の勾配によって異なり、干潟の勾配が緩やかであるほど護岸建設の影響が遠くまで及ぶことが確認できる。これは、勾配が緩やかである程干潟部分の面積が広がり、護岸建設により遮断される入退潮量の全体の入退潮量に対して占める割合が大きくなるためである。

(3) 護岸が干潮時の汀線よりも岸側の干潟上にある場合 (Case2)

図-8 に示すように護岸が干潮時の汀線よりも岸側にある場合についても、汀線が護岸設置位置より沖側にある時間帯には式 (6) の関係が成立する。一方、汀線が護岸に到達している時間帯には Case1 と同様に、式

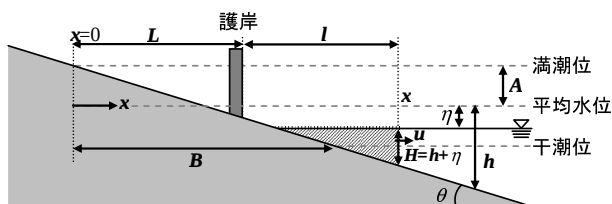


図-8 護岸が干潮時の汀線よりも岸側にある場合の模式図
(Case2)

(11) の関係が成立する．したがって，流速 u_2 は，汀線が護岸に到達していないとき，

$$u_2 = -\frac{A\sigma}{\tan \theta} \cos \sigma t \quad (15)$$

到達しているとき、

$$u_2 = -\frac{A\sigma(x-L)}{\chi \tan \theta - A(1 - \sin \sigma t)} \cos \sigma t \quad (16)$$

となる.

(4) 護岸設置による潮流振幅の減少率

各ケースの比較から護岸設置による潮流の変化を解析する．まず，護岸が無い場合（Case0）の流速 u_0 は式 (8)，護岸がある場合（Case2）の流速 u_2 は式 (15)，式 (16) より求めることが出来る．これらを用いて，減少率 R_d を

$$R_d = \frac{u_0 - u_2}{u_0} \times 100 \quad (17)$$

と定義すると、まず、汀線が護岸に到達していないとき、

$$R_d = \frac{\frac{A\sigma}{\tan \theta} - \frac{A\sigma}{\tan \theta}}{\frac{A\sigma}{\tan \theta}} \times 100 = 0 \quad (18)$$

となり、護岸の有無は流速に影響を与えない。一方、汀線が護岸に到達しているとき、

$$R_d = \left\{ \frac{(L \tan \theta - A) + A \sin \sigma t}{(x \tan \theta - A) + A \sin \sigma t} \right\} \times 100 \quad (19)$$

となる．ここで，護岸前面の平均水深 $h_D = L \tan \theta - A$ とし， $h = x \tan \theta - A$ を用いると，

$$R_d = \frac{h_D + A \sin \sigma t}{h + A \sin \sigma t} \times 100 \quad (20)$$

となる. 護岸前面の水深を $H_D = h_D + \eta$ とし, $H = h + \eta$ と併せて用いると,

$$R_d = \frac{H_D}{H} \times 100 \quad (21)$$

となる．ここで，前述のように汀線が護岸まで到達していないとき（すなわち $H_D < 0$ のとき）， $R_d = 0$ であることを考慮すると，

$$R_d = \frac{\max(H_D, 0)}{H} \times 100 \quad (22)$$

と表現できる.

R_d は時間 t と水平方向の位置 x の関数となることが

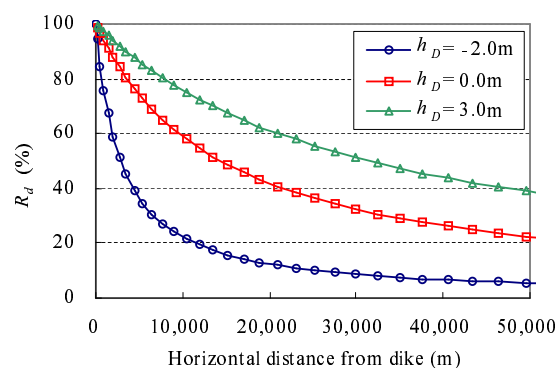


図-9 護岸前面の水深別の護岸設置後の流速減少率

わかる。護岸からの距離 l と一潮汐間に現れる最大の R_d との関係を図-9に示す。ただし、潮汐振幅 $A=2.5$ m, 周期 $T=12.42$ h, 干潟の勾配 $\theta=0.01^\circ$ とした。ここで、 h_D が負の場合は平均水位が護岸下端より低い位置に、正の場合は護岸下端より高い位置にあり、0の場合は両者が一致している。よって数値が大きいくほど海水と護岸が接する時間が長いことになる。

以下、算定された R_d より、護岸設置位置による流速への影響を評価する。まず、護岸から離れるに従って流速の減少率の最大値は小さくなり、平均水位が生じたときに護岸全面の水位が 0m になるような状況では $l=20\text{km}$ で約 40%、 $l=60\text{km}$ で約 20%の減少率となる。また、平均水位の汀線よりも岸側に護岸を設置した場合 ($h_D=-2.0\text{m}$) には、護岸近傍で急激に減少率が小さくなるような傾向が見られ、 $l=20\text{km}$ で約 10%まで減少率が小さくなる。

以上より、新たに護岸が設置された海域の干潟や沿岸域における護岸の法線方向の流速の減少率を考える上では、平均水位（あるいは、平均汀線）と護岸の設置位置の相対的な位置関係が最も重要となると考えられる。

3. 護岸調査

(1) 護岸調査の概要

2章より、護岸下端と平均水位の位置関係により、護岸が流速に与える影響は変化することが分かった。そこで、有明海北部沿岸で護岸の実態調査を行い、近年の浅海域での流速の変化を考察する上での資料とすることを試みた。

調査は2007年12月9日、10日に実施し、護岸設置状況の調査および護岸の下端と水面の高低差の測量を行った。調査地域は図-10に示されており、南（島原市有明町～諫早湾潮受け堤防南端）、西（鹿島市～諫早湾潮受け堤防北端）、北（鹿島市～筑後川河口）、東（筑後川河口～長洲町）の4班に分けて行った。調査地点は、踏査を行いながらその周辺の護岸・地形の状況を代

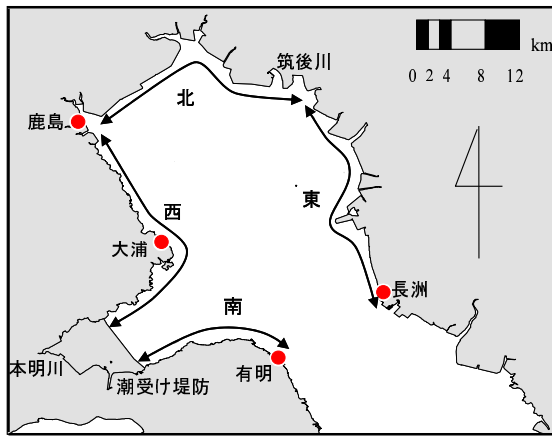


図-10 調査地域と地域分け

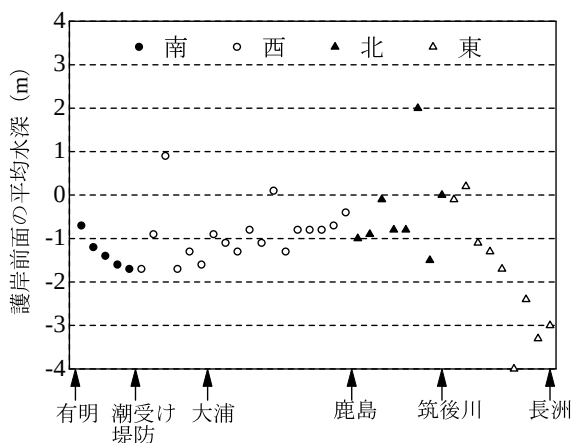


図-11 護岸前面の平均水深（南西北東の順に海岸線を時計回りに表示）

表していると考えられる場所を選定した結果、南 5 地点、西 18 地点、北 13 地点、東 11 地点の計 47 地点となった。

調査により得られた護岸下端と水面の高低差を鹿島、長洲、島原で実施した潮位観測データおよび大浦検潮所の潮位データ¹¹⁾を利用して護岸前面の平均水深（2章(3)の h_D に相当）に変換した。

(2) 護岸調査の結果

図-11に調査結果を示す。なお、護岸下端と水面の高低差の測量が困難であった地点（7地点）は除いてある。護岸前面の平均水深の平均値は、南側で-1.3m、西側で-1.1m、北側で-0.4m、東側で-1.9mで平均的にはおおそ-1m程度であった。このことから、多くの地点で、護岸下端が平均水位より高い位置にあることがわかる。一方、諫早湾潮受け堤防前面の状況を干潮時に目視で確認したところ、堤防前面の大部分で平均水深は正の値となると推察される状況であった。

(3) 考察

北部有明海においては大部分の海岸線が、2章(3)において護岸設置による潮流の減少率が最も小さい $h_D = -2.0\text{m}$ に相当している。しかし、有明海は潮汐振幅（大浦での M_2 潮振幅が約1.5m、 S_2 潮振幅が約0.6m）が大きいため、2章で得られたように護岸設置により水位の高いときには干潟域の流速は減少していると考えられる。一方で諫早湾潮受け堤防では、干潮時に堤防前面が大部分干出しないことから $h_D = \text{約 } 3.0\text{m}$ 程度と推定され、潮流に与える影響が大幅に湾奥部のその他の護岸より大きいと考えられる。

実海域、特に干潟の存在するような浅海域での海水の混合過程においては、潮流に加えて波の影響も重要である。諫早湾潮受け堤防により締め切られた調整池および干拓農地の大半が以前は干潟域であり、本明川やその他の中小河川からの河川水はそこで潮流や波の影響により攪乱されていたと考えられる。しかし、現在は潮受け堤防の南北の排水門から直接潮下帯に河川水が排出されており、以前より潮流および波による攪乱作用が著しく減少していると考えられる。

4. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる。まず、護岸建設と干潟上の流速に関する簡単な理論的考察から湾奥部の干拓事業が干潟の物理環境に及ぼす影響を評価した。その結果、

(1) 一様勾配の潮下帯における流速振幅は場所には依存せず、潮差、周期および干潟の勾配のみで決定され、一定の流速振幅となることが示された。また、干潟域のうち平均水位の低い範囲では、冠水して潮流が発生する時間帯の平均流速が潮下帯の平均流速より大きくなる。干潟の存在しない内湾などでは、湾奥に向かうに従って入退潮量が減少することから潮流振幅は減少していくが、このことと比較すると、干潟上の潮流は興味深い特徴を示している。

(2) 干潟に護岸を設置した場合には潮下帯において流速振幅の減少が生じるが、その減少量は護岸に近いほど大きくなり、護岸前面において流速が0となる。また、干潟上の沖側に護岸を設置するほど、潮流の減少率も大きくなる。このとき、干潟の勾配が緩やかであるほど護岸による流速減少の影響が遠くまで及ぶ。

(3) 潮流振幅の減少率に関する検討結果から、護岸から離れるに従って流速の減少率の一潮汐間の最大値は小さくなる。また、海岸の縦断勾配が同じであれば、護岸を沖側に設置するほど潮流の護岸建設の影響が遠くまで及ぶことが示された。

次に、有明海における平均水位と護岸前面の地盤高の相対的関係を明らかにすることを目的として、有明海湾奥部の護岸設置状況の調査を実施した。その結果、

(4) 有明海湾奥部では1m程度、北部有明海西岸では、

0.5～1.5m 程度，北部有明海東岸では，0～3m 程度，平均水位よりも高い位置に護岸が設置されていることが明らかとなった．これは，潮差が最大で 5m を超える有明海では満潮前後に限って護岸の影響による潮流流速や波による攪乱の減少が現れるような状況であることを意味している．

(5) 諫早湾潮受け堤防は，有明海湾奥部のその他の護岸に比べて浅海域の潮流への影響が非常に大きいことが分かった．

以上より，護岸が設置された海域における護岸の法線方向の潮流流速や波によって生じるオルビタルモーションによる攪乱の減少を考える上では，潮位と護岸の位置との関係が重要なファクターとなる．また，干潟域の鉛直混合能力の消失が，諫早湾内外の成層強化の主要因の一つとなっている可能性が示唆された．

謝辞：本研究を行うにあたり多大なるご協力をいただいた九州大学環境流体力学研究室の諸氏，ならびに水位計設置に際して便宜を図っていただいた鹿島漁協，有明町漁協，長洲漁協の関係者の方々に深甚なる謝意を表します．また，本研究に関して潮流解析勉強会（主催：NPO 法人有明海再生機構）の場で大変有意義な議論をさせていただきました．参加された皆様に感謝の意を表します．最後に，本研究は有明海再生機構からの受託研究「有明海湾奥の潮流解析」の一環として行われたことを付記します．

参考文献

- 1) 堤裕昭，木村千寿子，永田紗矢香，佃政則，山口一岩，高橋徹，木村成延，立花正生，小松利光，門谷茂：陸域からの栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大規模赤潮の発生メカニズム，海の研究，第 15 巻，pp.165-188，2006.
- 2) 濱田孝治，速水祐一，山本浩一，大串浩一郎，吉野健児，平川隆一，山田裕樹：2006 年夏季の有明海奥部における大貧酸素化，海の研究，第 17 巻，pp.371-376，2008.
- 3) 宇野木早苗，佐々木克：有明海異変の発生システムについて，海の研究，第 16 巻，pp.319-328，2007.
- 4) 西ノ首英之，小松利光，矢野真一郎，齋田倫範：諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.336-340，2004.
- 5) 灘岡和夫，花田岳：有明海の潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防締め切りの影響，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.401-405，2002.
- 6) 藤原考道，経塚雄策，濱田孝治：有明海における潮汐・潮流の原因について，海の研究，第 13 巻，pp.403-411，2004.
- 7) 塚本秀史，柳哲雄：有明海の潮汐・潮流，海と空，第 78 巻，pp.31-38，2002.
- 8) Manda, A. and K. Matsuoka : Changes in Tidal Currents in the Ariake Sound Due to Reclamation, *Estuaries and Coasts*, Vol.29, pp.645-652, 2006.
- 9) 齋田倫範，矢野真一郎，田井明，志岐慎介，重田真一，小松利光：冬期有明海における鉛直混合強度の現地観測，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.421-425，2008.
- 10) 佐々木克之，程木義邦，村上哲生：諫早湾調整池からの COD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定，海の研究，第 12 巻，pp.573- 591，2003.
- 11) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

(2008.9.30 受付)