

有明海における平均海面および 満干潮位の長期変動について

LONG TERM VARIATION OF MEAN SEA LEVEL, HIGH WATER LEVEL AND LOW WATER LEVEL IN ARIAKE BAY

田井明¹・齋田倫範²・矢野真一郎³・小松利光⁴

Akira TAI, Tomonori SAITA, Shinichiro YANO and Toshimitsu KOMATSU

¹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
(〒819-0395福岡市西区元岡744)

²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)

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(〒819-0395福岡市西区元岡744)

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(〒819-0395福岡市西区元岡744)

Recently, there are many researches on sea level rise due to global warming. It is considered that problems on aquatic environment and disaster prevention will be caused by the sea level rise. Variations of high water level (H.W.L.) and low water level (L.W.L.) rather than that of mean sea level (M.S.L.) are important to discuss counter-measures against these problems. However, few researches on the long term variations of H.W.L. and L.W.L. have been carried out, and the characteristics of them are not made clear. In this study, in order to evaluate the variations of H.W.L., L.W.L. and M.S.L. the tide in Ariake Bay is discussed by analyzing tide data, numerical test and theoretical analysis. As a result, it is clarified that H.W.L., L.W.L. and M.S.L. have risen after 1960's, and the rate of rise increased in order of L.W.L., M.S.L., and H.W.L.. In addition, it is implied that M.S.L. rose corresponding to the decrease of tidal current due to the reclamation in Isahaya Bay.

Key Words : Mean sea level, tide level, Ariake Bay, Isahaya reclamation project

1. はじめに

近年, 地球温暖化に起因する海面の上昇について多くの研究が行なわれている. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による報告書¹⁾に引用されている研究結果では, 20 世紀中に平均海面は 1.7 ~ 1.8mm/year で上昇したと報告されている²⁾. 同じく IPCC の報告書の中で引用されている TOPEX/Poseidon による観測結果では 1993 ~ 2003 年の間に平均海面の上昇は 3.1mm/year となっており, 近年になって海面上昇が加速していることが示唆されている³⁾. しかし, 平均海面の変化は全球的に一樣に生じるのではなく, TOPEX/Poseidon による観測結果では地域によっては海面が下降していることや, 日本近海を含む西太平洋やインド洋では全球平均より高い上昇率となっていることが示されている. また, 我が国沿岸での平均海面の変動は, 1960 年代以降に西日本 (東経 137 度線以西) で 2.4mm/year で上昇, 東日本 (同以東) で 3.1mm/year で下降しており, 国内でも海面変動に地域差があることが示され

ている⁴⁾. さらに, 将来予測も行なわれており 21 世紀末には 20 世紀末に比べて平均海面が 28 ~ 43cm 程度上昇するとされているが⁵⁾, この値も地域により大きく異なることが予想される. このように, 近年の平均海面の変動や将来予測に関しては全球的な知見は得られているものの, 特定の地域に関する知見を得るためには個別に解析を行なう必要があると考えられる. また, 沿岸海洋では潮汐による半日~一日周期の変動が支配的である場合が多い. したがって, 長期的な海面変動によって生じる様々な問題に対しては, 平均海面の高さではなく現実に生じる最高水位や最低水位, すなわち満干潮位の変動を考慮するほうがより直接的な議論が可能になる. しかし, 満干潮位の変動に関する研究は行なわれておらず, その変動特性はよく分かっていない. 特に, 本研究で対象とする有明海は潮位差が我が国で最も大きいので, 平均海面と満干潮位の変動特性が大きく異なる可能性がある.

近年の有明海の水環境悪化に関する漁業者を対象としたアンケート調査では, 多くの漁業者によって

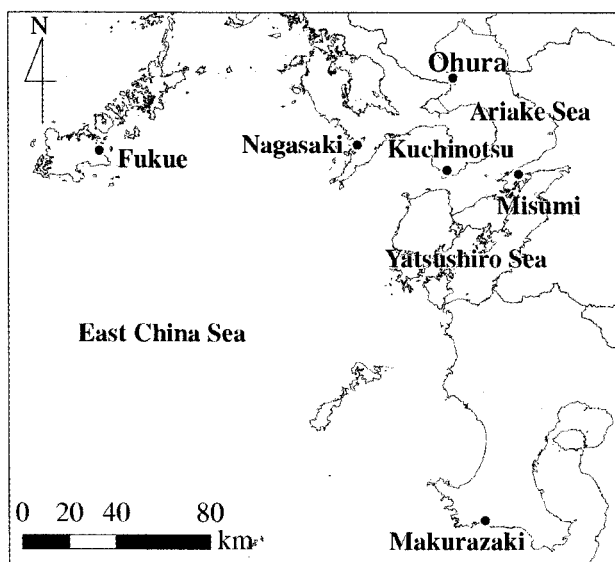


図-1 有明海周辺の地理と検潮所の位置

近年の海面上昇が指摘され、諫早湾干拓事業との関連も疑われている⁶⁾⁷⁾。また、平均海面の上昇にともなう高潮災害に対する危険度の増加が予想され、山城らは有明海を対象として海面上昇による将来の高潮に対する危険性の予測を行なっている⁸⁾。前者はノリ養殖等の観点から主に干潮位の変動に、後者は最大潮位が生じる満潮位の変動に深く関わっていると考えられる。よって、有明海の近年の水環境の悪化の原因究明や適切な高潮災害対策のためにも、満干潮位の長期的な変動特性に対する知見が必要になると考えられる。加えて、諫早湾潮受け堤防建設に起因する平均海面の変動に関しても詳細な検討が必要であると考えられる。

そこで、本論文では実測潮位データの解析によって有明海の平均海面および満干潮位に関する詳細な検討を行ない、その変動特性についていくつかの知見を得たので報告する。

2. 実測潮位データの解析

(1) 満干潮位の算出について

解析は、日本海洋データセンター(JODC)⁹⁾により公開されている有明海内の大浦、口之津、および外海に位置する枕崎の毎時潮位データを用いて行なった。各検潮所の位置を図-1に示す。三角と長崎は後に述べる観測基準面の変動が大きいため、今回の解析には用いなかった。また、離島に位置する福江についても観測基準面と東京湾平均海面の正確な位置関係が不明なため解析の対象外とした。入手した毎時潮高データから満干潮位を求めるために以下の作業を行なった。

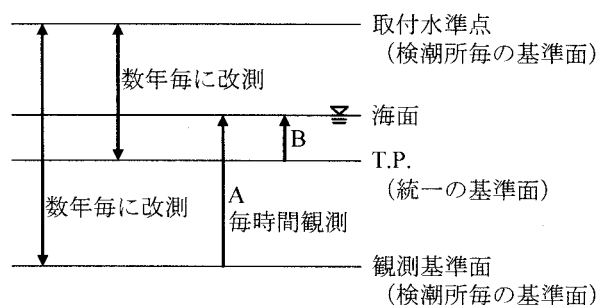


図-2 各基準面の位置関係

検潮記録は観測基準面との高低差であり、基準面の地殻変動を含んだ相対的な海水位の変動を示している。岩崎ら⁴⁾は日本がテクトニ的に地殻変動の活発な地域に位置するため、観測された相対的な海水位変動には地殻変動成分が大きいと考え、検潮所の取付水準測量の結果を利用して地殻変動の影響を除去して解析を行なっている。村上・山田¹⁰⁾も海面水位の絶対的な高さを解析するために、観測基準面と東京湾平均海面（以下、T.P.）との相対的な位置関係を求めて検潮データの補正を行なっている。本研究でも絶対的な海水位の変動を解析するために、次の手順で観測基準面の変動の除去を行なった。

図-2に示す取付水準点と観測基準面、および取付水準点とT.P.の高低差は数年毎に測量が行なわれており、その結果は海岸昇降検知センターにより公開されている¹¹⁾。このデータとJODCの潮位データ（図-2中のA）を用いて、潮位データを海面とT.P.の差（図-2中のB）に変換した。このように算出されたT.P.基準の潮位データは、観測基準面の変動の影響のみならず、異なる検潮所間の観測基準面の差も補正されている。そのため、この潮位データを用いれば各検潮所間の海面の高低差についても考察が可能である。ここで、2002年以前の取付水準点の標高は「昭和44年度平均成果」が基になっているが、それ以降は「2000年度平均成果」に切り替わっている。「2000年度平均成果」を用いると観測基準面が不連続に数cm～数十cm変動してしまい経年的な変動を解析するには不都合である。そこで、本研究では切り替え以降は「昭和44年度平均成果」を基にした測量データのうち最も新しいものを用いて変換を行なった。また、気圧変動の影響に関しては、その影響は温暖化に起因する海面変動に比べて小さいという柳・赤木の研究結果¹²⁾から本研究では考慮しないこととした。

以上のように算出されたT.P.基準の潮位データを用いて、各年の1月1日0時から369日分データで調和分解を行ない38分潮に対する調和定数を求めた。この調和定数より10分間隔の潮位データを再合成し、そのデータから満干潮位を算出した。こ

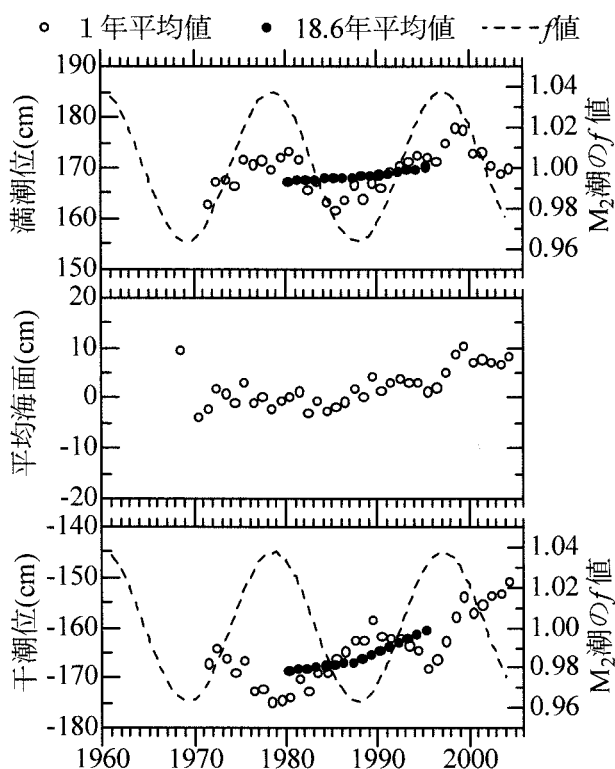


図-3 大浦の平均海面および満干潮位の変動

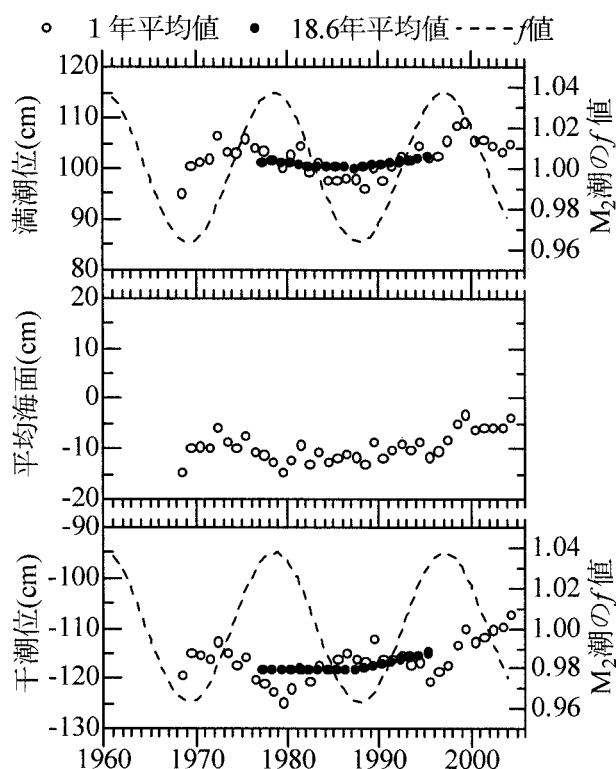


図-4 口之津の平均海面および満干潮位の変動

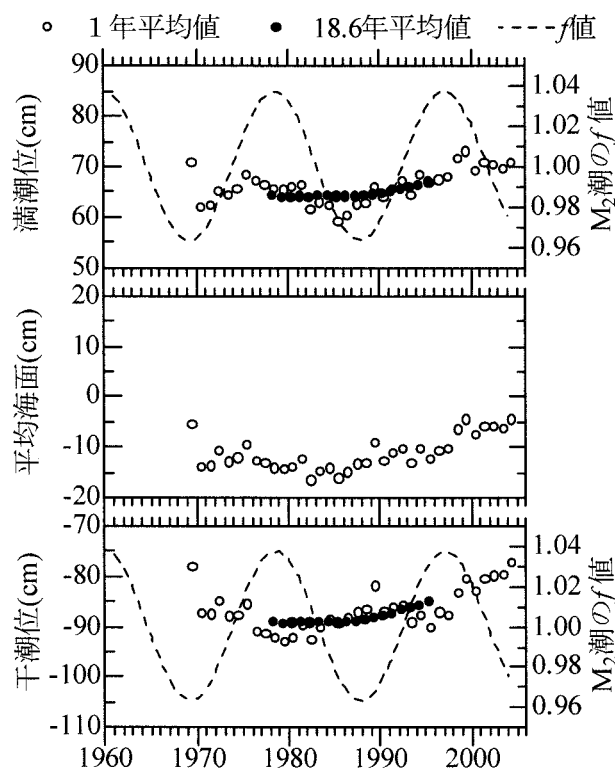


図-5 枕崎の平均海面および満干潮位の変動

こで、欠測データが全データ数の1割以上ある年は解析から除外している。

(2) 解析結果と考察

算出した満干潮位データ、および調和分解で得ら

表-1 平均海面および満干潮位の上昇率(mm/year)

検潮所	平均海面	満潮位	干潮位
大浦	3.1	1.8	5.5
口之津	1.4	0.3 ^a	1.8
枕崎	1.8	1.4	2.3

P-value : ^aP=0.205, その他 P<0.0001

れた平均海面データを用いて短周期の潮汐や季節変動を除去することを目的として1年平均値を求めた。さらに、月の昇交点運動の影響を除去することを目的として18.6年平均値を求めた。図-3、図-4、図-5に結果を示す。

満干潮位の1年平均値は月の昇交点運動によるM₂潮振幅の変化を示すf値と対応しており、満潮位は同位相、干潮位は逆位相となった。大浦の満干潮位はfの最大時と最小時とで10cm以上の差が生じている。また、全地点で1990年代後半から現在までに干潮位が急激に上昇しており、大浦では20cm以上の上昇がみられる。これは、1997年の諫早湾潮受け堤防締め切り後に潮位が数10cm上昇したという漁業者の証言⁷⁾に対応していると考えられる。湾奥の大浦における平均海面は湾口の口之津に比べて10～15cm高いことが分かる。外海に位置する枕崎は口之津と同程度であった。

次に、長期的な海面の変動について考察するために平均海面については1年平均値、満干潮位については18.6年平均値に対する回帰直線の勾配から上

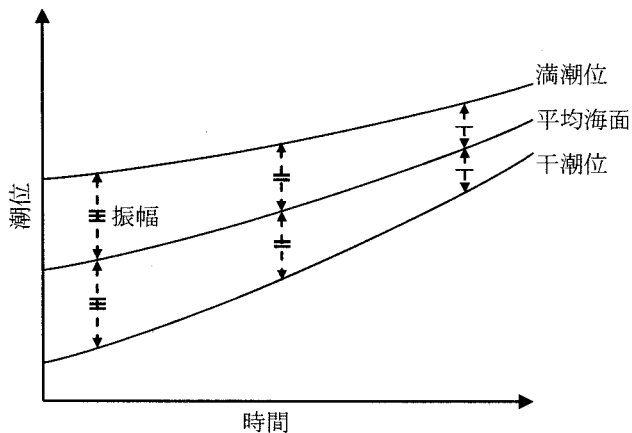


図-6 平均海面と満干潮位の変動の模式図

昇率を求めた。結果を表-1に示す。まず、平均海面は3地点ともに有意に上昇しており、大浦の上昇率が3.1mm/yearと一番大きくなっていた。18.6年平均値の変動は統計的に有意でなかった口之津の満潮位を除き、満潮位も干潮位も増加していた。上昇率は干潮位が最も大きく、次に平均海面、最も小さいのが満潮位であった。特に、大浦の干潮位の上昇率は5.5mm/yearであり前述した全球的な平均値を大きく上回っていた。それに対し、満潮位の上昇率は1.8mm/yearと干潮位の上昇率の約3分の1であった。これは有明海の潮汐振幅が干拓や水位上昇の影響により減少したためである。図-6に示すように、平均海面の上昇と潮位振幅の減少が同時に生じた場合には干潮位、平均海面、満潮位の順に上昇率が大きくなる。このことから3地点の中で大浦の変動が一番大きいのは平均海面の上昇率自体が大きいことに加え、潮汐振幅の減少が大きいためと考えられる。また、外海に位置する枕崎でも同様の傾向が得られており、外洋でも平均海面の上昇と同時に潮汐振幅の減少が生じていると考えられる。

以上より、有明海のように潮汐の影響の強い内湾における満干潮位の変動は平均海面の変動と傾向は一致するものの、その変化率は異なっており、干潮位、平均海面、満潮位の順に大きくなることが示された。

3. 諫早湾干拓事業の影響

(1) 数値シミュレーションについて

諫早湾干拓事業による平均海面への影響を調べるために、平面2次元数値シミュレーションを行なった。本研究では、千葉・武本¹³⁾により開発され、田井ら¹⁴⁾により改良された干潟モデルを有する平面2次元モデルを用いた。支配方程式は平面2次元の浅

水方程式であり、これを一般曲線座標系を用いた有限差分法により離散化した。移流項の差分には河村桑原スキームを用いている。計算領域は、有明海と八代海の全域、および東シナ海の一部（湾口から約100km遠方まで）である。計算対象期間は2003年7月とし、福江検潮所での実測値を開境界に与えて解析を行なった。この数値モデルを用いて行なった諫早湾干拓事業が潮汐・潮流に与えた影響の検討は既に報告されているので¹⁴⁾、モデルの詳細については省略する。

(2) 解析結果と考察

図-7に諫早湾潮受け堤防締め切り後の平均海面の空間分布を示す。ここで、高さの基準は数値シミュレーションにおいて潮汐を与えない場合の静止した水面を0cmとしている。平均海面は湾口の口之津付近で低くなり、湾奥に向かうにつれて高くなっている。大浦と口之津の差は15cm程度であり、実測潮位データで示された平均海面の差をほぼ再現できている。宇野木によれば¹⁵⁾、湾内の平均海面の分布は、海水密度、風、潮流の非線形効果の影響により生じるとされている。さらに、共振潮汐が生じる湾では湾奥の潮流の弱いところで平均海面が高く、湾口の潮流の強いところで平均海面が低くなる。本研究で用いた2次元モデルでは海水密度と風の影響は考慮されていないため、シミュレーション結果および実測潮位データで得られた有明海の湾口と湾奥の平均海面の差は潮流の非線形性により生じていると考えられる。

図-8に潮受け堤防締め切りによる平均海面の変化量分布を示す。これより、締め切り後に有明海全体で平均海面が上昇していることが分かる。これは、図-9に示す田井ら¹⁴⁾により示された流速振幅の減少範囲とよく対応している。また、潮流の減少量の大きい湾口の口之津付近で上昇量も大きいことが分かる。これは前述したように、有明海の平均海面の高さは潮流の非線形性に支配されているためであり、以下のように解析的に説明できる。

潮流として正弦的な振動流を考え、周期的な水面変動のほかに平均海面の勾配があるとすると、1次元水路における潮流の非線形効果による平均海面の分布は次式で記述できる¹⁵⁾。

$$\bar{\eta} = \eta_0 - \bar{u^2} / 2g \quad (1)$$

ここで、バーは一周期平均を示し、 η は平均海面、 η_0 は湾奥の平均海面、 u は流速、 g は重力加速度である。この式を用いて流速の変化 Δu による平均海面の変化 $\Delta \eta$ を求めると、

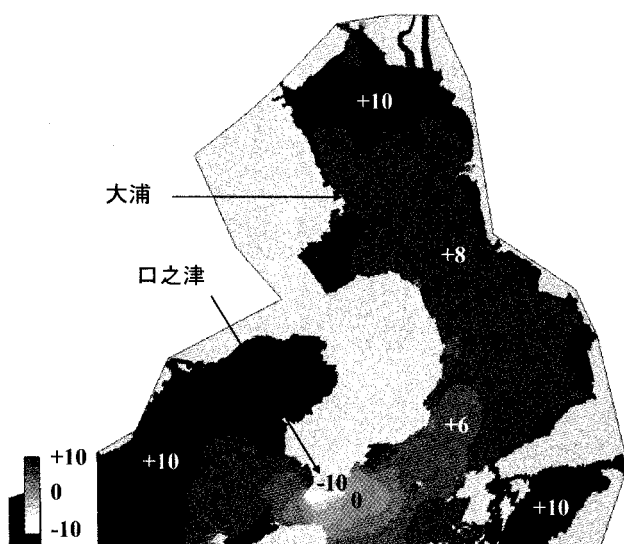


図-7 数値シミュレーションにより求められた平均海面の分布(締め切り後の結果, 単位: cm)

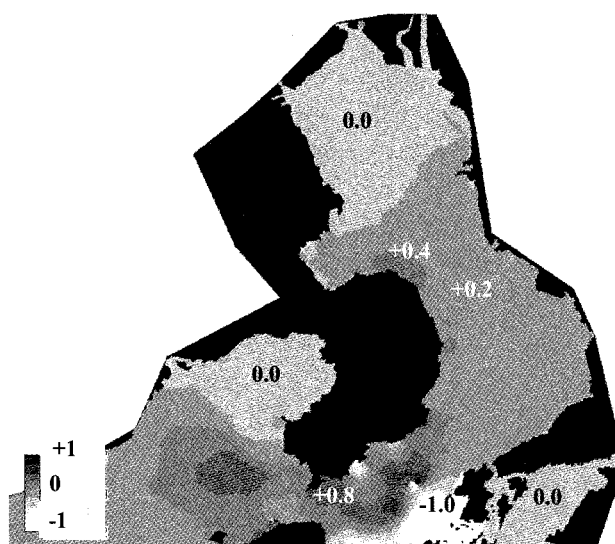


図-8 数値シミュレーションにより求められた潮受け堤防締め切り前後の平均海面の差(プラスが締め切り後の上昇, マイナスが低下, 単位: cm)

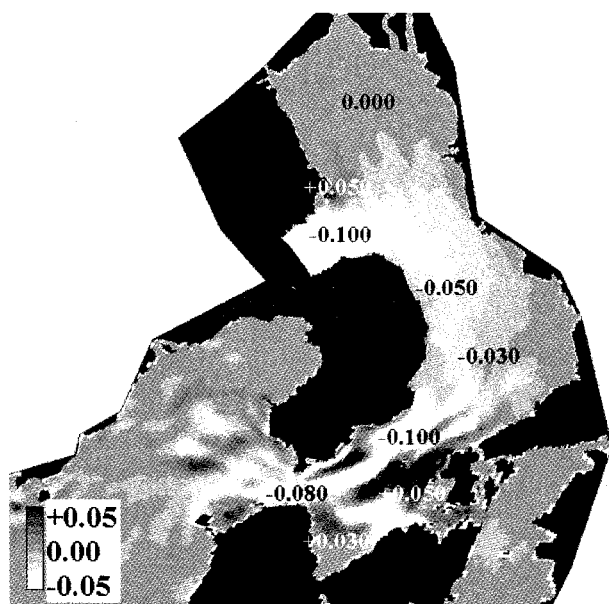


図-9 田井ら¹⁴⁾による潮受け堤防締め切り前後の M_2 潮流振幅の差(プラスが締め切り後の増加, マイナスが減少, 単位: m/s)

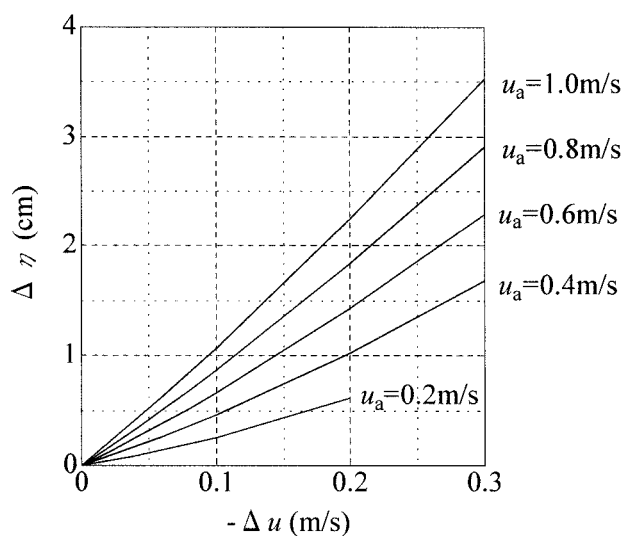


図-10 式(2)より求められた流速のRMSの変化 Δu と平均海面の変化 $\Delta \eta$ の関係。

$$\Delta \eta = \frac{-\Delta u}{2g} (2u_a - \Delta u) \quad (2)$$

となる。ここで、 u_b および u_a はそれぞれ締め切り前後の流速の一周期2乗平均値の平方根(RMS)であり、 Δu はその締め切り前後の差($\Delta u = u_a - u_b$)である。この式により求められる流速のRMSの変化量と平均海面の変化量の関係を図-10に示す。流速のRMSと振幅は同程度になると考えて、数値シミュレーションの結果と比較すると、数値シミュレーションで生じる流速変化 $-\Delta u$ が0.0～0.1m/sの範囲で、 $\Delta \eta$ が0～1cmの範囲となっており、よく一致していた。

以上から、諫早湾干拓事業による平均海面の変化は、流速の減少に対応して有明海全体で上昇しており、その値は0～1cm程度であることが分かった。

4. まとめ

1960年代以降の有明海の平均海面および満干潮位の変動に関していくつかの検討を行なった結果、以下のような知見を得た。

(1) 実測潮位データの調和解析より求めた平均海面および満干潮位は有明海湾奥の大浦、湾口の口之津、外海に位置する枕崎のいずれの地点でも上昇傾

向を示した。

(2) 平均海面, および満干潮位の上昇率は, 干潮位, 平均海面, 満潮位の順で大きくなることが確認された。特に大浦の干潮位上昇率は5.5mm/year, 満潮位上昇率は1.8mm/yearであり, 他の地点と比較して満潮位と干潮位でその差が大きかった。

(3) 有明海では潮流の非線形効果により湾口から湾奥にむけて平均海面が10～15cm高くなることが確認された。

(4) 諫早湾干拓事業により, 有明海全体で平均海面が0～1cm程度上昇していた。これは, 流速の減少量とよく対応していることが理論解析と数値シミュレーションにより示された。

謝辞: 本研究で用いた潮位データは, 日本海洋データセンターより公開されているものである。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) IPCC WG I: *Climate Change 2007 "The Physical Science Basis"*, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>, 2007.
- 2) Church, J.A. and White, N.J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826, 2006.
- 3) Cazenave, A. and Nerem, R.S.: Present-day sea level change: Observations and causes, *Reviews of Geophysics*, vol. 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139, 2004.
- 4) 岩崎伸一, 松浦和徳, 渡部勲: 地殻変動を除去した長期海水位変動と海面水温の関係, 海の研究, 第11巻, pp. 529-542, 2002.
- 5) IPCC WG II: *Climate Change 2007 "Impacts, Adaptation and Vulnerability"*, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg2.htm>, 2007.
- 6) 有明海漁民・市民ネットワーク: 諫早湾干拓が海を変えた - 有明海漁民アンケート調査結果報告書, p. 65, 2003.
- 7) 有明海再生機構: 平成18年度漁業者ヒアリング調査結果報告書, p. 84, 2007.
- 8) 山城賢・橋本典明・河合弘泰・麻生紀子・荒木健人: 有明海における温暖化した将来の高潮の出現特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 141-146, 2007.
- 9) 日本海洋データセンター: 毎時潮高データ, http://www.jodc.go.jp/index_j.html.
- 10) 村上和男・山田邦明: 我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1026-1030, 1992.
- 11) 海岸昇降検知センター: 験潮場取付水準測量成果集, p. 131, 2004.
- 12) 柳哲雄・赤木竜也: 日本周辺の平均海面水位変動, 海の研究, 第2巻, pp. 423-430, 1993.
- 13) 千葉賢, 武本行正: 諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流況変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 376-380, 2003.
- 14) 田井明, Hatta, M. P., 矢野真一郎, 齋田倫範, 小松利光: 諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 331-335, 2006.
- 15) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, p. 672, 東海大学出版会, 1993.