特定非営利活動法人有明海再生機構

有明海環境Q&A

Q6. 潮位潮流(成層化)の変化

Q6-1.潮汐、潮位、潮流、小潮、大潮などの潮に関する用語の意味を教えてください 。

Q6-2.潮位・潮流の議論でよく使用されるM_2分潮、S_2分潮、K_1分潮、O_1分潮とは何ですか？

Q6-3.潮位・潮流の議論でよく聞く18.6年周期とは何ですか？　また、ｆ値という言葉をよく聞きますが、その意味は何ですか？

Q6-4.18.6年周期はなぜ起こるのですか？

Q6-5.有明海の潮位は長期的にどのように変化してきましたか？

Q6-6.有明海の潮位潮流の変化の要因は何ですか？

Q6-7.有明海の潮位は諫早湾潮受堤防の締め切りでどのような変化がありましたか？

Q6-8.1980年代から最近までの期間で有明海の潮位振幅に与えた要因の寄与度は，それぞれどの程度でしょうか？

Q6-9.潮流の減少に伴う成層度の増加は有明海にどのような影響を与えているのですか？

Q6：潮位潮流の変化

Q6-1：　潮汐、潮位、潮流、小潮、大潮などの潮に関する用語の意味を教えてください。

A6-1：

Q6-2：潮位・潮流の議論でよく使用されるM$_2$分潮、S$_2$分潮、K$_1$分潮、O$_1$分潮とは何ですか？

A6-2：複雑な形をした潮位振幅を正弦波 (余弦波) の和の形で表したそれぞれの波のことです。

下の波形は、有明海の入り口、口の津における潮位を示したものです。大潮の時は振幅が大きく、小潮の時は振幅が小さくなるのは理解できますが、大潮の時でも干満の差が大きい潮と、干潮がそれほど下がらない潮とが交互に現れている複雑な波形をしています。

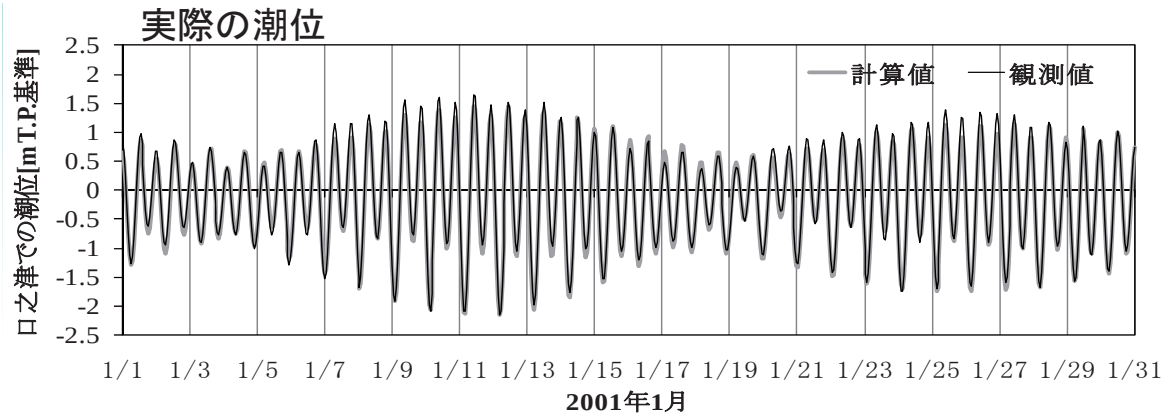


図 6-1.1　口之津における潮位

上のようなある程度規則的な波形は、次式に示すいくつか (有限個) の正弦波 (または余弦波) の和で正確に表すことができます。

$$\eta = \sum_{i=1}^{38} a_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} t + b_i\right)$$

上式において は潮位振幅を、a_i は i 番目の波の振幅を、T_i は i 番目の波の周期を、b_i は i 番目の波の位相角を示しています (このような式で表すと思ってください)。

例を挙げてみます。実際の潮位振幅を示すには 40 個から 50 個の和を求める必要がありますが、簡単のために下に示す 4 個だけの係数 (基本 4 分潮) を用いて上の式で示す潮位振幅 を、主要 4 分潮だけの和で求めると次のような図が求まります。口之津の潮位振幅をそれらしく表現しています。

主要4分潮

	分潮周期(h)	角速度(rad/h)	相対的な振幅(M2=100)	名前
M2	12.4206012	0.505868	100.0	主太陰半日周潮
S2	12.0000000	0.523599	46.7	主太陽半日周潮
K1	23.9344697	0.262516	58.4	日月合成日周潮
O1	25.8193417	0.243352	41.5	主太陰日周期

表 6-1.1　主要 4 分潮の周期、角速度、振幅

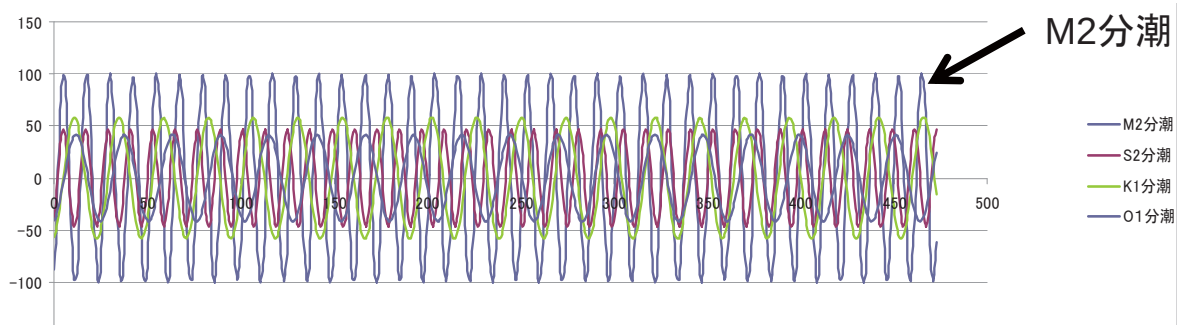


図 6-1.2　主要 4 分潮の潮位振幅 (表 6-1.1 の値からの計算値)

主要 4 分潮の潮位の和を求めると次のような図が求まります。口之津の潮位振幅をそれらしく表現しています

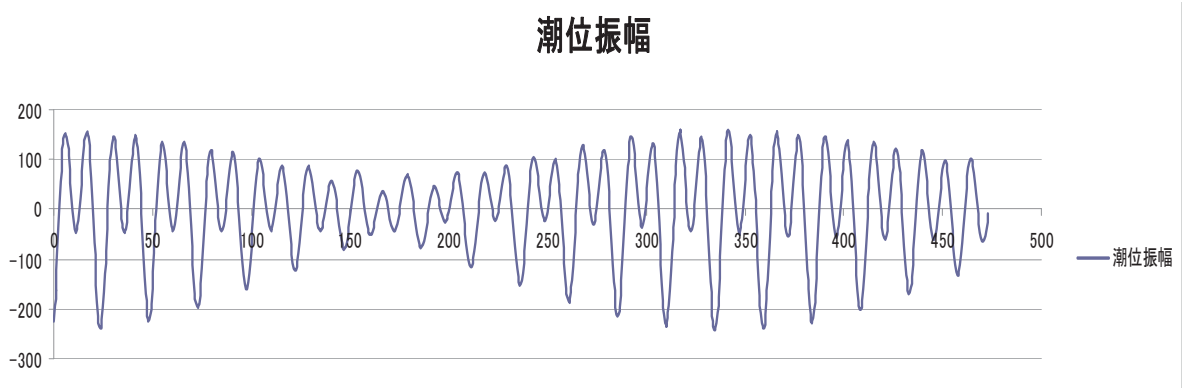


図 6-1.3　主要 4 分潮の潮位振幅の和 (計算値)

M_2分潮は、月の引力によって起こる分潮で、12.42 時間の周期で干満を起こし、振幅が最も大きい基本的な分潮です。調子振幅の長期的な変動を議論するときにこの分潮がどのように変化したかを示すことが多いので記憶しておいてください。

S_2分潮は、周期 12 時間ちょうどで太陽の動きに起因する分潮で、O_1分潮は、周期が 25.82 時間で月に起因する分潮で、K_1分潮は、周期 23.93 時間で月と太陽が合成して引き起こす分潮です。

出典：有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム第 5 回 (2010)

Q6-3：潮位・潮流の議論でよく聞く 18.6 年周期とは何ですか？　また、f 値という言葉をよく聞きますが、その意味は何ですか？

A6-3：M_2 分潮、S_2 分潮などの分潮は、潮位振幅を 18.6 年周期で変化させています。18.6 年周期で変化する振幅の係数を f 値と呼びます。

下の図は、昭和 45 年 (1970 年) ～平成 19 年 (2007 年) 間の佐賀県大浦、熊本県三角、長崎県口之津、長崎市、長崎県福江、鹿児島県枕崎における M_2 分潮の潮位振幅の変化を示したものです。どの場所も昭和 53 年 (1978 年) と平成 9 年 (1997 年) に最大となり、昭和 63 年 (1988 年) と平成 18 年 (2006 年) に最小となる非常に規則的な動きをしています。世界中の潮位差は 18.6 年周期で変動しており、次の Q6-4 で示すように、地球の公転面と月の公転面が約 5°傾いているのが原因であり、有明海あるいはその近隣だけで起こる現象ではありません。
下図には、破線で M_2 分潮に対する f 値が示されています。M_2 分潮の振幅は次の式で表されます。

$$M_2\text{分潮の振幅} = f_{M2} \cdot a_{M2}$$

f_{M2} 分潮の振幅 の値が約 0.96 ～ 1.04 の範囲で変動して、周期性を表すのです。下の図の濃い実線は、f_{M2} を含む含む M_2 分潮の振幅そのものを表しています。

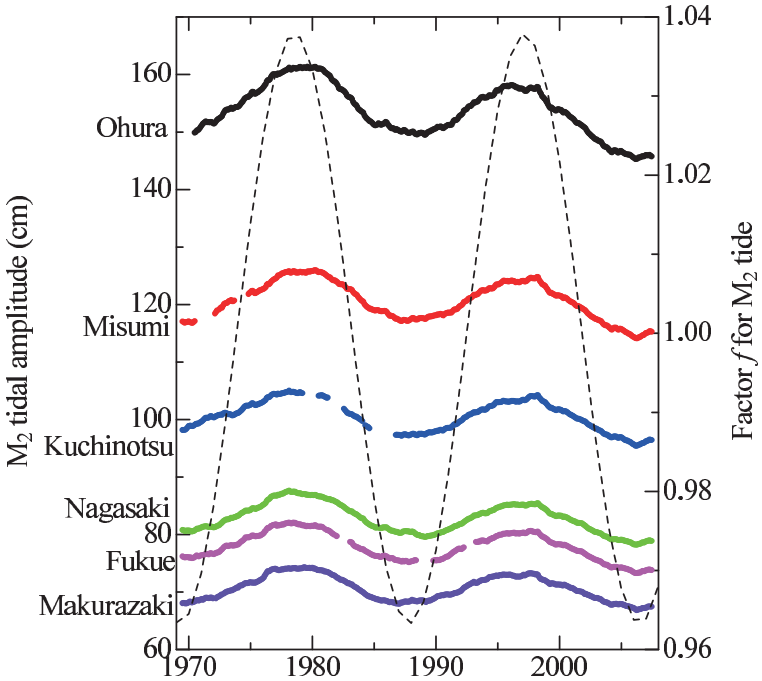


図 6-3.1　M_2 潮振幅の経時変化

出典：有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究　(田井　2010)

下図 6-3.2 は、大浦、三角、口之津における S_2 分潮の経時変化を示したものです。M_2 分潮ほど明確ではありませんが、同様に 18.6 年周期で変化していますが、M_2 分潮とは逆位相で変化しているので、M_2 分潮が大きいときには、S_2 分潮は振幅を小さくします。下、右図 6-3.3 と下段の図 6-3.4 は、K_1 分潮と O_1 分潮の経時変化を示しています。S_2 分潮と同様に、M_2 分潮が最大となる昭和 53 年 (1978 年) と平成 9 年 (1997 年) に最小値をもつ強い周期関数であることが分かります。

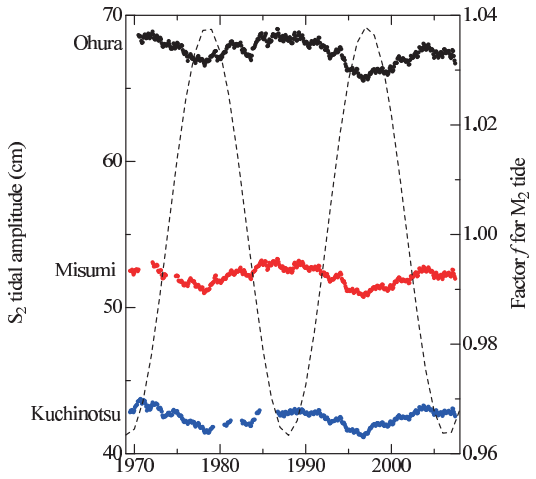


図 6-3.2　S_2 潮振幅の経時変化

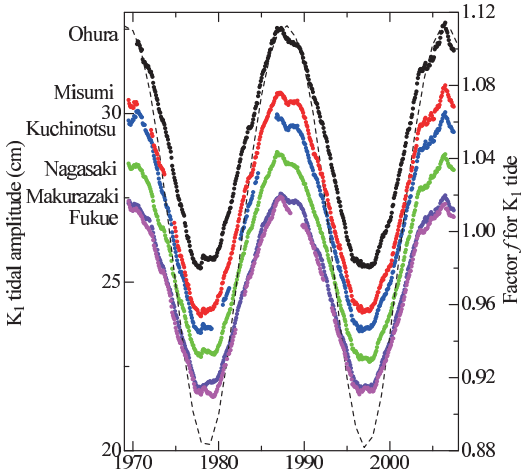


図 6-3.3　K_2 潮振幅の経時変化

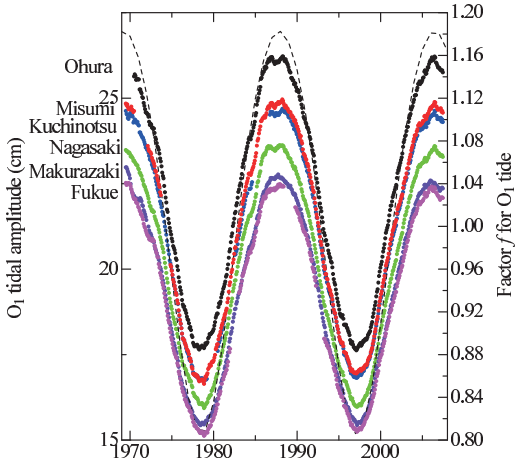


図 6-3.4　O_2 潮振幅の経時変化

出典：有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究　(田井　2010)

Q6-4：18.6 年周期はなぜ起こるのですか？

A6-4：地球の公転面と月の公転面が約 5°傾いており、月の公転面が一定の周期で歳差運動 (コマが頭を振る運動) をするために、引力の向きが変化し、潮位差が 18.6 年周期で変化します。

地球は太陽の周りを回っていますが、その軌道が作る平面を地球の公転面と呼びます。また、月は地球の周りを回っていますが、その軌道が作る平面を月の公転面と呼びます。月の公転面は、地球の公転面と約 5°傾いています。2 つの平面が交わる線上で月の軌道と地球の軌道が交わる点が 2 つあります。それを交点と呼び、月が地球の公転面を下から上に横切る点を昇交点呼びます。

下の図 6-4.1 は、交点が地球の公転軌道上にある場合です。月が太陽と同じ方向にあるとき (新月) を示しています。月は地球の公転面より 5°ずれた位置にあるので、並んでいるときに比べて引力が小さくなり潮位差が小さくなるのです。

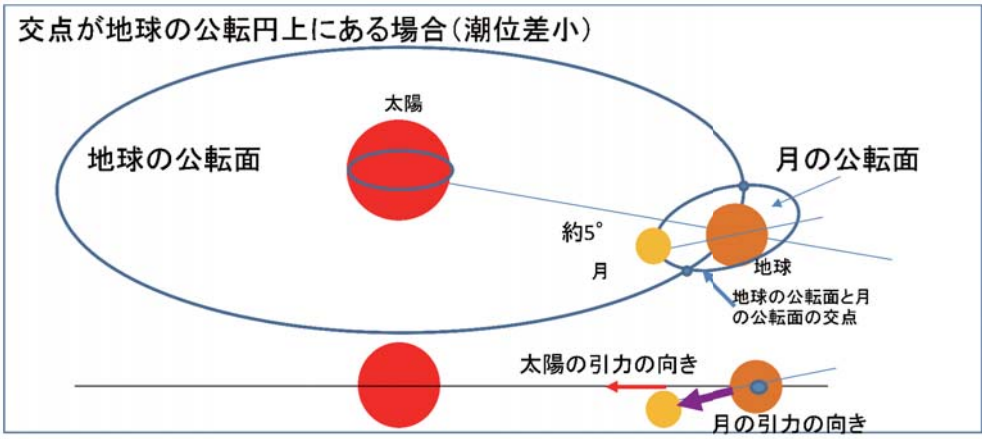


図 6-4.1　地球の公転軌道上に交点がある場合 (潮位差小)

ところが、月の公転面は歳差運動 (コマが頭を振る運動) をするため、交点が地球の公転面上を移動します。次の図 6-4.2 は、交点が地球と太陽を結ぶ線上に来た時を示しています。月の公転面は、地球と太陽を結ぶ線に直角な方向に 5°下を向きます。月が太陽と同じ線上に来たとき (新月)、太陽と月の引力の向きが合致するので、上の場合に比べて引力が大きくなり、潮位差が大きくなるのです。

月の公転面が頭を振る歳差運動が 37.2 年周期で起こるので、潮位差は 18.6 年周期で振幅を大きくしたり小さくしたりしているのです。

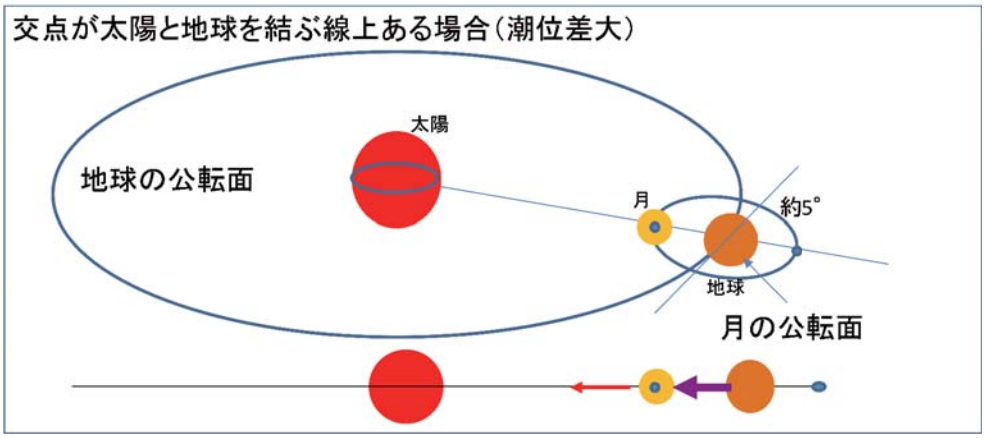


図 6-4.1　太陽と地球を結ぶ直線上に交点がある場合 (潮位差大)

Q6-5：有明海の潮位は長期的にどのように変化してきましたか？

A6-5：潮位差は 18.6 年周期で変化しながら、次第に小さくなっています。f 値が最も小さくなった平成 18 年 (2006 年) 頃は、最近 80 年間で最も小さな潮位振幅でした。

昭和 6 年 (1931 年) からの観測結果がある三角験潮所、昭和 16 年 (1941 年) からの観測結果のある厳原験潮所における長期的な潮位変化を解析した結果を田井氏が示しています。下図 6-5.1 は三角における M_2 分潮の経時変化を示したもので、波線は f 値を含む実際の潮位振幅を、実線は f 値の影響を除去した長期的変化を表しています。約 80 年間で 5cm 以上潮位振幅が減少しているのが分かります。 f 値の影響で一番振幅が小さくなった平成 18 年 (2006 年)(破線) は、80 年前に比べると 10cm 以上、M_2 振幅が小さくなっています。

下図 6-5.2 は S_2 分潮の長期変化を示したものです。M_2 分潮ほど明確ではありませんが、わずかながら減少しています。このような長期的な M_2 分潮の減少は、有明海内の三角験潮所だけでなく、他の験潮所でも観測されています。次ページの図 6-5.3 及び 6-5.4 の 2 枚の図は、厳原 (対馬) とハリファックス (北大西洋、カナダ、ノバスコシア州都) における M_2 分潮の経時変化を示したものです。両験潮所とも、長期的に M_2 分潮が減少していることが分かります。なぜ世界的な規模で潮位差の現象が起こっているのかについてはまだはっきりとは分かっていません。

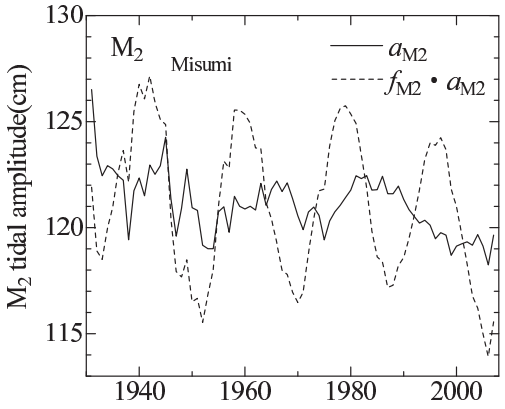


図 6-5.1　三角における M_2 分潮の経時変化

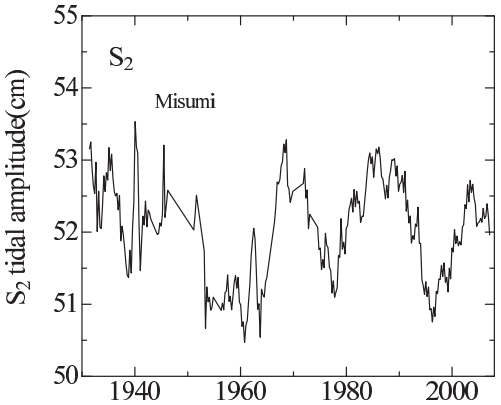


図 6-5.2　三角における S_2 分潮の経時変化

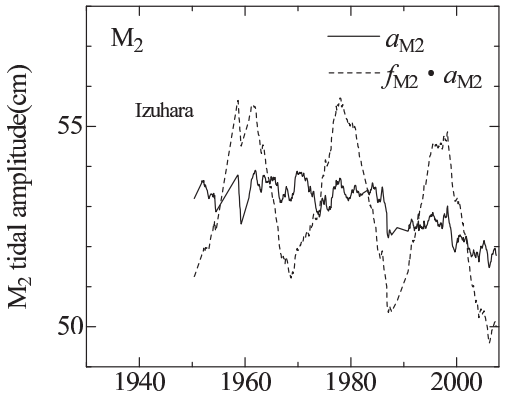


図 6-5.3　厳原における M_2 分潮の経時変化

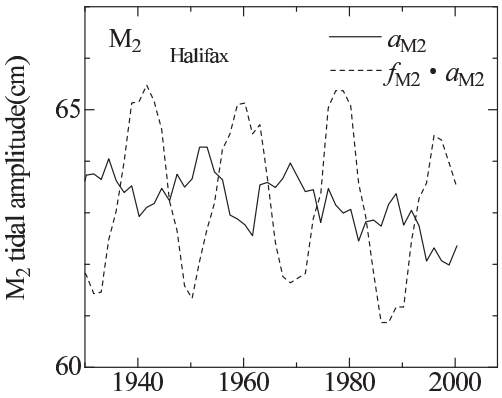


図 6-5.4　ハリファックスにおける S_2 分潮の経時変化

出典：「有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究」(田井、2010)

Q6-6：有明海の潮位潮流の変化の要因は何ですか？

A6-6：海水面積の減少、平均水位の上昇、潮汐振幅の減少です。

潮位潮流の変化の要因として、地形の変化 (干拓・埋立等) による有明海内の海水面積の減少や、外海の平均水位に伴う有明湾内の平均潮位 (水位) の上昇、および、外海の潮汐振幅の減少などがあげられます。

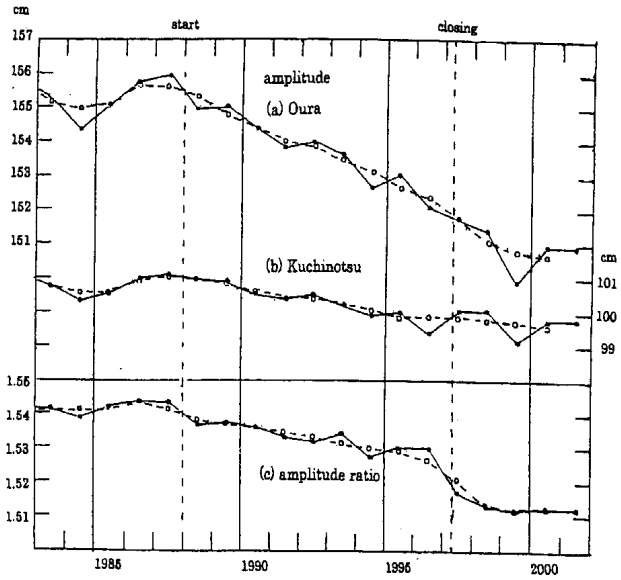
主な見解として、有明海湾奥部では 1980 年代までに行われた干拓による海岸線の変化、諫早湾内では、諫早湾の潮受堤防締め切りの影響による流速の減少があげられています。また、有明海湾奥の流速の減少に関して諫早湾潮受堤防締め切りによる地形変化の影響も指摘されていますが、それよりも、湾内の干拓や 18.6 年値周期 (f 値) による潮汐振幅の影響が大きいといわれています。しかし、Q6-7 にあるように、諫早湾潮受堤防締め切りによる有明海全体への影響に関しては、まだ、完全に一致した見解には達していないようです。

参考：「有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究」(田井、2010)
環境省有明海八代海総合調査評価委員会報告書
諫早湾潮受堤防締め切り　Q9-1　参照

Q6-7：有明海の潮位は諫早湾潮受堤防の締め切りでどのような変化がありましたか？

A6-7：環境省有明海八代海総合調査評価委員会報告書では、口之津を基準としたときの大浦のM_2分潮増幅が諫早湾潮受堤防締め切りで低下したので、影響を受けたとする説と、低下は長期変動の一部であり影響はないとする説が併記されていて、結論が出ていませんでした。田井氏は、口之津の潮位振幅は諫早湾の締め切りに影響を受けるので、増幅率を議論するときは外海に基準点を取るべきで、長崎を基準にした場合、諫早湾の締め切りの影響より外海変動の影響の方が大きいとしています。

環境省有明海・八代海総合調査評価委員会は、異なる２つの説を併記しています。図 6-7.1 は大浦と口之津のM_2分潮の潮位振幅と、口之津を基準とした大浦の増幅率を示したものです。増幅率が、諫早湾潮受堤防の締め切り(諫早湾締め切り)が行われた平成９年(1997 年)を境に急激に減少していることから、諫早湾締め切りが潮位振幅を大きく減少させたとする論拠となりました。図 6-7.2 は、同じ変化を左図より長期間示したもので、昭和 45 年(1970 年)頃も増幅率が低い時期があり、長期的変化の一部であるとする説の論拠となりました。



注)
１．(a) は大浦、(b) は口之津のM_2分潮振幅を示し、(c) は振幅比、すなわち増幅率を示す。
２．実線は観測値・破線は３年間の移動平均値(短周期ノイズを消すために実施)である。
３．縦の破線は、諫早湾干拓事業の開始と潮受け堤防による締切。

図 6-7.1　M_2分潮の経時変化
(上：大浦　中：口之津　下：増幅率(大浦 / 口之津))

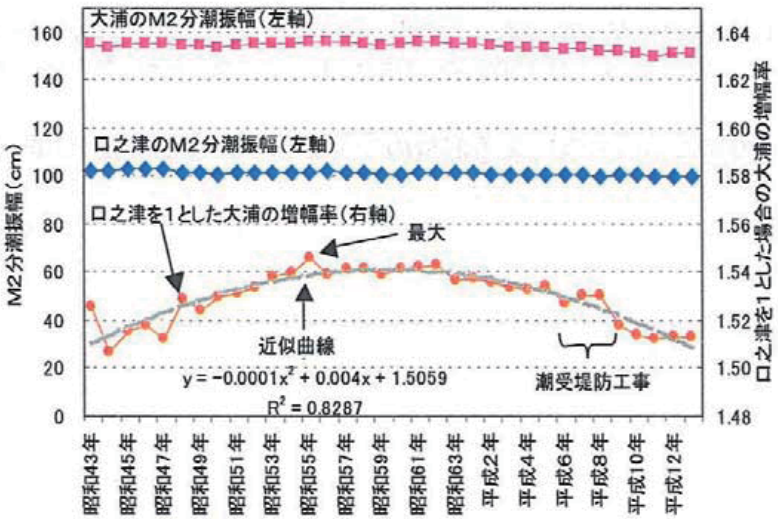


図 6-7.2　M_2分潮の経時変化　　(上：大浦　中：口之津　下：増幅率(大浦 / 口之津))

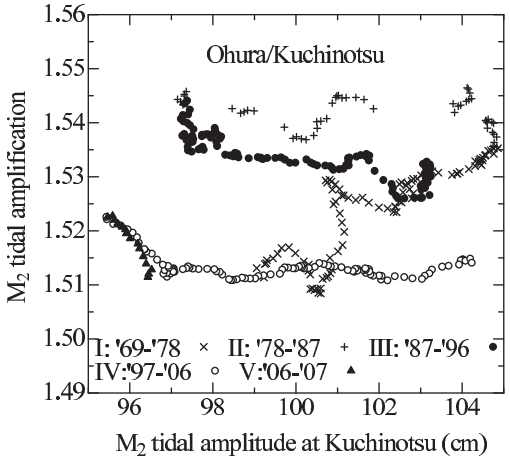


図 6-7.3　M $_2$ 分潮の増幅率（大浦／口之津）
（横軸：口之津のM $_2$ 分潮振幅）

田井氏も同様に、口之津を基準点として大浦のM $_2$ 分潮の増幅率を求めて、左図 6-7.3 のような結果を得ています。横軸は口之津のM $_2$ 分潮の振幅で、縦軸は口之津に対する大浦の増幅率を示しています。諫早湾締め切り前の昭和 62 年 (1987 年) から平成 8 年 (1996 年) における増幅率が 1.53 程度で一定なのに対し、締め切り後の平成 9 年 (1997 年) から平成 18 年 (2006 年) ではほぼ 1.51 となり、諫早湾締め切りで増幅率が低下する減少が捉えられています。しかも、口之津のM $_2$ 分潮の振幅に依らずほぼ一定の値を示しています。

田井氏はまた、増幅率を計算する時に基準点として用いた口之津の潮位振幅そのものが陸域における改変 (諫早湾締め切り) の影響を受けていることから、湾外に基準点を設けるべきであるとの考え方に立ち、長崎を基準点とする大浦、三角、口之津の増幅率を求めました。下図左は長崎を基準点としたときの大浦のM $_2$ 分潮の増幅率を示す図で、横軸は長崎のM $_2$ 分潮振幅を取ってあります。諫早湾締め切り前 (×、＋、●) は振幅が大きくなると増幅率が小さくなる、すなわち増幅率が振幅に依存する強い非線形性を示しているのに、締め切り後 (○) は振幅に依存する非線形性が緩和されていることが分かります。

諫早湾締め切り前には、 f 値の変化により振幅が減少するのに伴って増幅率が増大するため、振幅はそれほど減少しなかったと思われますが、締め切り後は、振幅の減少があっても増幅率が増加しない (非線形性の緩和) ため、締め切り前より潮位振幅が減少したと考えられます。下右図は、長崎を基準点にした時の口之津のM $_2$ 分潮の増幅率を示したものです。同様に非線形性は緩和していますが、大浦と異なり振幅の大きい方で締め切り後の変化が大きくなっています。

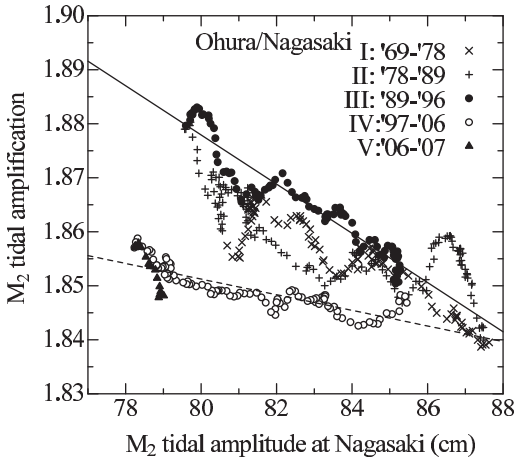


図 6-7.4　M $_2$ 分潮の増幅率 (大浦 / 長崎)
(横軸：長崎のM $_2$ 分潮振幅)

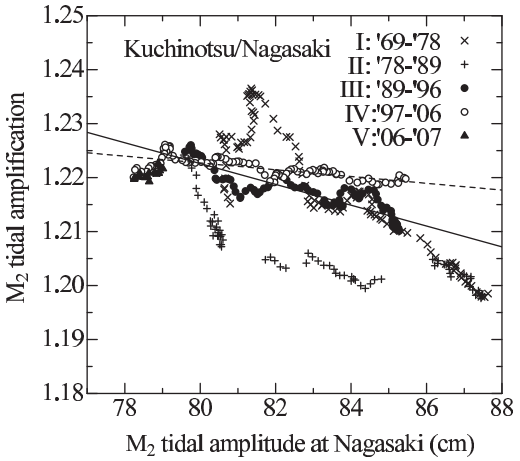


図 6-7.5　M $_2$ 分潮の増幅率 (口之津 / 長崎)
(横軸：長崎のM $_2$ 分潮振幅)

出典：「有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究」(田井、2010)

Q6-8：1980 年代から最近までの期間で有明海の潮位振幅に与えた要因の寄与度は、それぞれどの程度でしょうか？

A6-8：大浦験潮所の潮位に対する影響の度合いは、18.6 年周期による潮位変化が最も大きく (58%)、次いで外海の潮位振幅の長期的減少で (29%)、諫早干拓の影響度合いは最も小さい (13%) と計算されています

シミュレーションによる解析

田井氏は、有明海の流動シミュレーションモデルを用いて、諫早湾潮受堤防締め切りが潮位振幅に与えた影響を考察しています。計算に使用した領域を下図 6-8.1 に示しています。潮位境界を図下端とし、0.75m のM_2分潮振幅を与えています。図左端、図上端は放射境界とし、長い波の反射の影響を除去しています。

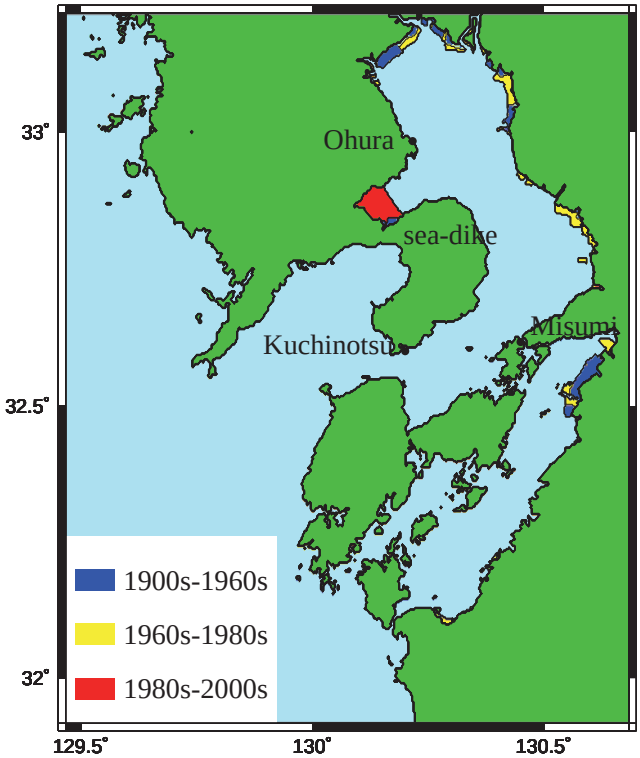


図 6-8.1　シミュレーションの計算領域
（下端：潮位境界　左上端：放射境界）

シミュレーションモデルを用いた解析結果が実測値データとよく合っていることを確認した上で、各年代にどのようなM_2分潮振幅になるかを示したのが表 6-8.1 です。境界条件を同じにしていますので、振幅の変化は有明海で行われた干拓などの陸域における改変が原因です。有明海で干拓などの改変を行うと口之津では潮位振幅が増大するのに、三角、大浦では減少しており、観測結果と一致します。1980 年代から 2000 年代の陸域における変化は諫早湾締め切りしかありませんので、大浦におけるM_2分潮振幅の減少量 1.5cm は締め切りの影響を示しています。

一方、1900 年から 1980 年代にかけての陸域の改変の大部分は有明海湾奥部のおける干拓ですから、M_2分潮振幅の減少量 1.3cm は湾奥における干拓が原因と言うことができます。シミュレーションモデルを用いた解析結果からは、大浦のM_2分潮振幅の減少への寄与率は、湾奥部での締め切りが 46％で、諫早湾締め切りの影響が 54％ということになります。

年代	口之津	三角	大浦
1900 s	98.6	119.1（1.208）	154.9（1.572）
1960 s	99.6	119.1（1.196）	154.9（1.555）
1980 s	100.1	118.7（1.186）	153.6（1.534）
2000 s	100.5	118.4（1.178）	152.1（1.513）

表 6-8.1　各年代のM_2分潮振幅 (境界での振幅同じ)

大浦におけるM_2分潮から f 値の変化による影響を除去した潮位振幅は、1980 年代から 2000 年にかけて約 5cm 減少したことが図 6-7.1 から得られているので、1980 年代から 2000 年にかけての大浦における潮位振幅の減少は、外海における長期的振幅減少の影響が 70%、諫早湾閉め切りの影響が 30% ということになります。

18.6 年周期で変動するM_2分潮の f 値は、昭和 53 年 (1978 年) が最大で 1.04、平成 18 年 (2006 年) が最小 0.96 です。1980 年代の最大の潮位差は、153.6 × 1.04=159.7cm で、2006 年の最小潮位差は 152.1cm × 0.96=145.9cm でその差は 7cm です。それに長期的低下分 5cm を加えると、昭和 53 年 (1978 年) のM_2分潮の潮位差と平成 18 年 (2006 年) のM_2分潮の潮位差は 12cm となります。

昭和 53 年 (1978 年) と平成 18 年 (2006 年) の潮位差の差への寄与度 (どの程度影響を与えたか) を考えてみると、18．6 年周期の最大と最小の影響が 58.3％ (7/12 × 100) で、長期的低下の影響が 29.2%(3.5/12 × 100)、諫早干拓の影響が 12.5% となります。

田井氏の研究成果から、大浦験潮所におけるM_2分潮振幅に諫早湾締め切りの影響をまとめると表 6-8.3 のようになります。

有明海が最も豊かだったと思われている昭和 53 年 (1978 年) と最もM_2分潮潮位差が小さかった平成 18 年 (2006 年) の潮位差の違いに大きな影響を与えたのは、18.6 年周期で起こる潮位変動と外海の長期的な潮位減少の自然変化であり、諫早湾締め切りの影響度合いは 13% 程度です。

有明海の潮流が遅くなっていると感じている漁師さんは多くおられますが、その原因の大部分は自然変化の影響であることが明らかになりました。

	18.6 年周期	外海における長期的減少	諫早湾締切	有明海湾奥部の干拓
1978 年 (18.6 年周期の最大) と 2006 年 (18.6 年周期の最小) の潮位差に与えた影響	58%	29%	13%	0%
1900 年代から 2000 年代までの有明海奥部の干拓と諫早湾干拓の影響	-	-	54%	46%
1980 年代から 2000 年代にかけての長期的減少の影響	-	70%	30%	-

表 6-8.2　大浦験潮所における M_2 分潮の潮位振幅に与えた諫早湾潮受堤防締め切りの影響

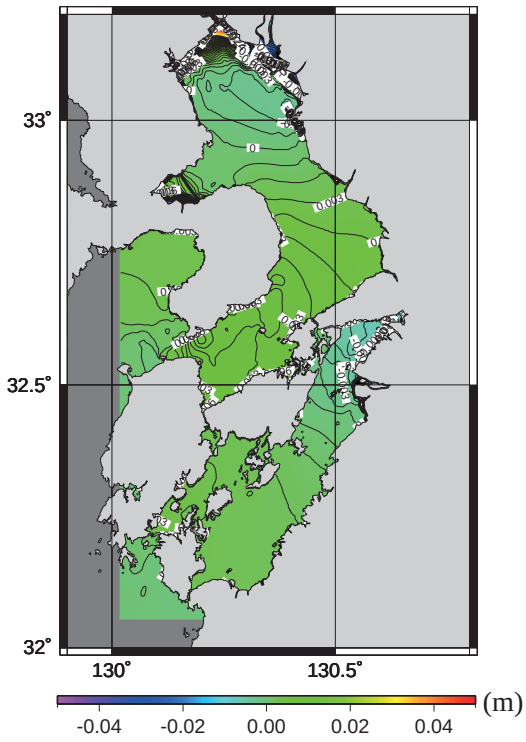


図 6-8.2　1900 年代から 1960 年代の
M_2 潮潮汐振幅の変化量 (m)

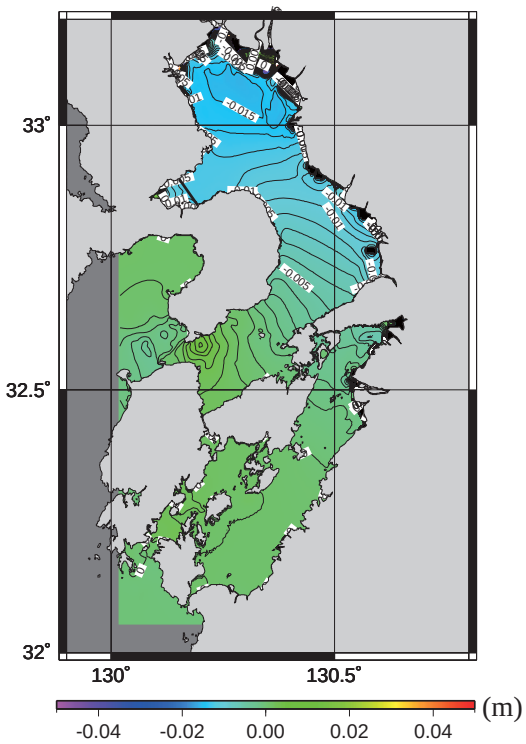


図 6-8.3　1960 年代から 1980 年代の
M_2 潮潮汐振幅の変化量 (m)

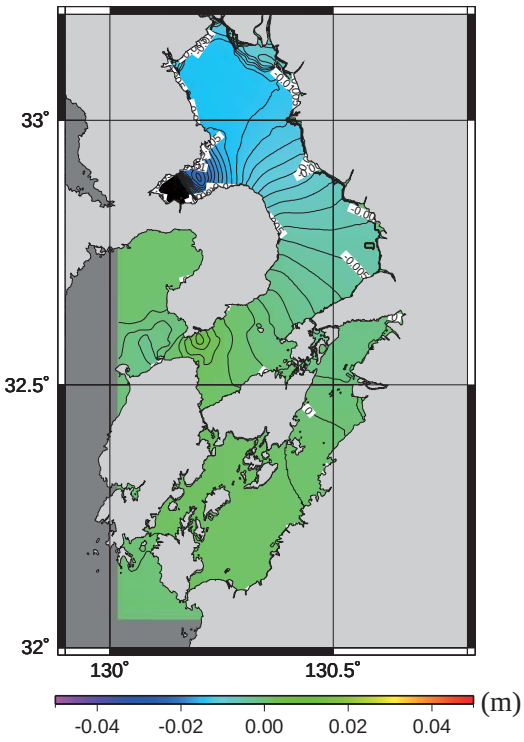


図 6-8.4　1980 年代から 2000 年代の
M_2 潮潮汐振幅の変化量 (m)

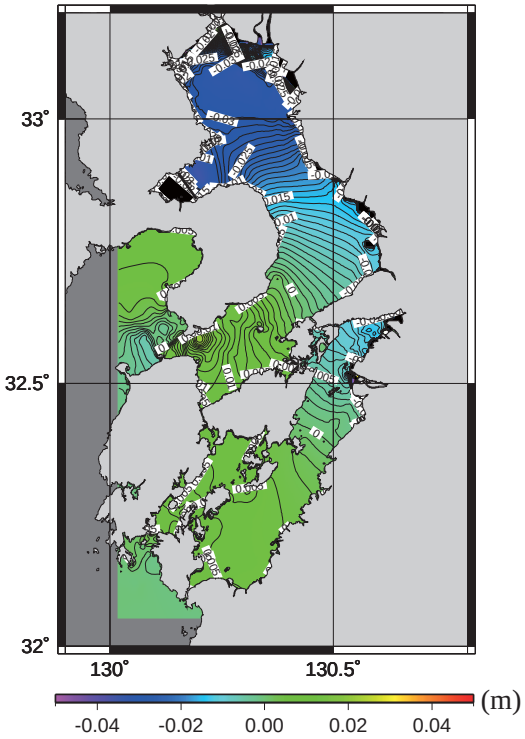


図 6-8.5　1900 年代から 2000 年代の
M_2 潮潮汐振幅の変化量 (m)

Q6-9：潮流の減少に伴う成層度の増加は有明海にどのような影響を与えているのですか？

A6-9：貧酸素水塊および赤潮の発生を引き起こしやすくなります。

近年の有明海が貧酸素化の進行に関するシナリオの一つとして、潮流の低下→成層度の強化→貧酸素化があげられています。貧酸素水塊が発達することで、赤潮の増加、ベントスの減少、二枚貝の減少、ひいては、漁獲量の減少やノリの不作に繋がります。

参考：佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 (2010)
恒星社厚生閣「有明海の生態系再生をめざして」(2007)
環境省有明海八代海総合調査評価委員会報告書 (2006)