

有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響

滝 川 清*・田 淵 幹 修**

有明海では、ノリの色落ちや貝類の激減など環境の異変が現れているが、その詳細な原因については不明のままである。本研究では、新しく開発した浅水流動解析法(平面2次元)を用い、詳細な地形データに基づく数値シミュレーションを中心に、沿岸堤防や港湾、ノリ網設置などの潮汐変動・物質拡散におよぼす影響などの物理環境特性の変化を調べた。その結果、たとえば諫早干拓止め堤は、諫早湾口外の潮流や循環に影響を及ぼすなど、人為的な改変の影響をある程度明かにできた。

1. はじめに

かつて、ノリ養殖や豊かな魚介類の宝庫として、また、特有の貴重な生物種が生息するなど豊饒の海であった有明・八代海域の環境に異変が現れ、2000年夏には大量の赤潮が発生、2001年1月にはノリの色落ちにより莫大な被害が生じている。この急激な環境悪化の要因には、干潟域の減少、沿岸域の開発、流域の都市化や農薬使用に伴う汚水物質の流入、洪水に伴う土砂・汚濁物質の大量流入、高温海水の浸入や潮流の変化など様々な原因が考えられるが、詳細な因果関係は不明のままである。

本研究は、これまで観測データも乏しくその環境特性がよく分かっていない有明海について、詳細な地形データに基づく数値シミュレーションを中心に、沿岸堤防や港湾、また、ノリ網設置などによる潮汐変動・物質拡散への影響などの物理環境特性を調べ、環境変動の要因分析と改善方策の資料を提供しようとするものである。

2. 数値解析法の概要と計算条件

2.1 離散化方程式の概要

本研究で用いる解析法は、微分可能性を前提とした基礎方程式の差分化は行わず、流れ場に固定された格子網の各々のコントロールボリュームに対して、質量(または体積)と運動量保存則の概念を直接適用して離散化方程式を構成した、平面2次元解析である。これは、巨視的な物理法則が成立する積分形の基礎方程式に根拠を置くことになり、跳水などのようにエネルギーの激しい逸散を伴う場合、あるいは水面が不連続な場合なども計算でき、水底勾配も考慮される。

座標系は直交座標で、直交格子を採用する。離散化は、時間的にも空間的にも中央差分として、水理量の平均操作や風上差分は用いない。これにより、離散化方程式本来の物理的意味を確保するとともに、精度の向上を図ることができる。また、空間的な離散化では、コントロー

ルボリュームの中心値と境界上の8つの点、併せて9つの点の値を用いる。これは要素境界上の水理量の分布を考慮したことになり、計算の精度を上げ、計算の発散をおさえる効果があり、コントロールボリュームの一部分が干出している場合の取り扱いも容易である。

また、汎用性を考え、流体の密度(または単位質量)と大気圧を変量として扱っている。

尚、本解析法における差分スキームは空間的にも時間的にも中央差分となっているが、完全な陽形式である。初期条件は2ステップ分の値を与え、開境界条件も境界および境界から1要素中に入った格子の2重に与える。安定条件はC.F.L条件である。

水理量は水深方向の平均値を扱う。水平な基準面に x 軸および y 軸の直交座標系をとり、計算領域を、 x 軸および y 軸の格子間隔をそれぞれ Δx , Δy とする直交格子で分割する。この格子上の全ての点で、全ての水理量を Δt 時間毎に定義する。また、地盤高もすべての格子点で与える。これを h とし、基準面から下方にとる。なお、ここで取り扱う主な水理量としては、 η :水位(基準面から上方にとる)、 D :水深($=\eta+h$)、 U , V :それぞれ x 軸および y 軸方向の線流量、 u , v :それぞれ x 軸および y 軸方向の水深方向に平均した流速($u=U/D$, $v=V/D$)である。

2.2 質量(体積)保存則

直交格子で作られるコントロールボリュームに質量(体積)保存則を適用すると、 (x, y) 点の時刻 $t+\Delta t$ における水位 $\eta_{x,y}^{t+\Delta t}$ を求める次式が得られる。

$$(\rho\eta)_{x,y}^{t+\Delta t} = (\rho\eta)_{x,y}^{t-\Delta t} + \sum_{k=1}^3 \gamma_k F_{x,k}^t \frac{\Delta t}{\Delta x} + \sum_{k=1}^3 \gamma_k F_{y,k}^t \frac{\Delta t}{\Delta y} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{x,k}^t = \{(\rho U)_{x-\Delta x} - (\rho U)_{x+\Delta x}\}_{y+(k-2)\Delta y}^t$$

$$F_{y,k}^t = \{(\rho V)_{y-\Delta y} - (\rho V)_{y+\Delta y}\}_{x+(k-2)\Delta x}^t$$

$$\gamma_k = \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right)$$

ここに、 ρ :流体の密度である。

右辺{ }の最も外側(右側)の上下にある添え字は{ }

* 正会員 工博 熊本大学教授 沿岸環境科学教育研究センター
** 正会員 熊本大学講師 工学部環境システム工学科

内の水理量に適用されるものとし、この表記方法は以後も用いる。

2.3 運動量保存則

前項で述べたコントロールボリュームに運動量保存則を適用することによって、時刻 $t + \Delta t$ における線流量 U , V を求める式が得られる。平面二次元の場合の運動量保存則は、せん断力や波浪によるラディエーション応力、コリオリ力等を除いた基本的な部分を概念的に表現すると次のように表わされる。

コントロールボリューム内の運動量の時間変化
= 圧力による力積 + 流体の運動によって持ち込まれる運動量……………(2)

流体の単位重量を $\omega (= \rho g, g$: 重力の加速度) として静水圧分布を仮定すると右辺第1項の圧力による力積は次のようになる。

$$\text{圧力による力積の } x \text{ 軸方向成分} = \sum_{k=1}^3 \gamma_k G_{x,k}^i \Delta y \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} G_{x,k}^i = & \frac{1}{2} [D_x \{ (\omega D)_{x-dx} - (\omega D)_{x+dx} \\ & - 2(\Delta p_{x-dx} - \Delta p_{x+dx}) \} \\ & + (D_{x-dx} - D_x) \{ (\omega D)_{x-dx} - 2\Delta p_{x-dx} \} \\ & + (D_x - D_{x+dx}) \{ (\omega D)_{x+dx} - 2\Delta p_{x+dx} \} \\ & + (h_x - h_{x-dx}) \{ (\omega D)_x + (\omega D)_{x-dx} \\ & - (\Delta p_{x-dx} + \Delta p_x) \} \\ & + (h_{x+dx}) \{ (\omega D)_{x+dx} + (\omega D)_x \\ & - (\Delta p_{x+dx} + \Delta p_x) \}]_{y+(k-2)\Delta y}^t \end{aligned}$$

$$\text{圧力による力積の } y \text{ 軸方向成分} = \sum_{k=1}^3 \gamma_k G_{y,k}^i \Delta x \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $G_{y,k}^i$ の内容は上述の $G_{x,k}^i$ の記述式中、 x を y に書き換えたものである。

右辺第2項の流体の運動によって持ち込まれる運動量は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{持ち込まれる運動量の } x \text{ 軸方向成分} \\ & = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^3 \gamma_k (M_{x,k}^i + N_{y,k}^i) \Delta y \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{x,k}^i = & [\omega_{x-dx} (u_{x-dx} - u_{x+dx}) U_{x+dx} \\ & + \omega_{x-dx} u_{x-dx} (U_{x-dx} - U_{x+dx}) \\ & + (\omega_{x-dx} - \omega_{x+dx}) u_{x+dx} U_{x+dx}]_{y+(k-2)\Delta y}^t \\ N_{y,k}^i = & [\omega_{y-dy} (u_{y-dy} - u_{y+dy}) V_{y+dy} \\ & + \omega_{y-dy} u_{y-dy} (V_{y-dy} - V_{y+dy}) \\ & + (\omega_{y-dy} - \omega_{y+dy}) u_{y+dy} V_{y+dy}]_{x+(k-2)\Delta x}^t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{持ち込まれる運動量の } y \text{ 軸方向成分} \\ & = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^3 \gamma_k (M_{y,k}^i + N_{x,k}^i) \Delta x \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに、 $M_{y,k}^i$ は $M_{x,k}^i$ 式中の x を y に、 u と U をそれぞれ

v と V に書き換えたものである。また $N_{x,k}^i$ は $N_{y,k}^i$ 式中の y を x に、 u と V をそれぞれ v と U に書き換えたものである。

以上の式は桁落ちに配慮した表現となっている。これらを式(2)に代入してまとめると、 $U^{t+\Delta t}$, $V^{t+\Delta t}$ を求める次式が得られる。

$$\begin{aligned} (\omega U)_{x,y}^{t+\Delta t} = & (\omega U)_{x,y}^{t-\Delta t} \\ & + \sum_{k=1}^3 \gamma_k \{ g G_{x,k}^i + (M_{x,k}^i + N_{y,k}^i) \} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\omega V)_{x,y}^{t+\Delta t} = & (\omega V)_{x,y}^{t-\Delta t} \\ & + \sum_{k=1}^3 \gamma_k \{ g G_{y,k}^i + (M_{y,k}^i + N_{x,k}^i) \} \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

2.4 その他の外力項

運動量保存の概念式(2)では流れの基本的な部分のみを考慮したが、計算の対象とする現象によっては必要に応じて次のような項を追加する。

(a) 水底摩擦

水底摩擦の表現は乱流理論による方法もあるが、本計算では、マンニングの抵抗則を用いる。

(b) 水平方向の乱れエネルギーによるレイノルズ応力
浅海部では、SDS and 2 HD モデル(磯岡ら, 1993)を、深海部では拡散型モデルを用いる。

(c) 水面に働く風のせん断応力

水面に働く風の接線応力は、風速の2乗に比例するとし、水面の抵抗係数と風速の関係式は本多・光易(1980)を用いる。

(d) その他、波浪による運動量輸送、コリオリ力など。

2.5 解析法の信頼性

本解析法は、9918 台風による八代海(不知火海)の高潮に適用して、高潮偏差の実測値と計算値がよく一致することを確かめている(滝川・田淵, 2000)。また、本計算法は形状損失を自動的に計算するが、その計算の妥当性や、河岸の形状や河床勾配の複雑な実河川(白川: 熊本県)の出水に適用して実測水位をよく説明できることを確認している。本論文では、紙数の関係で検証については省略するが、次項以下の計算の一部で実測値との比較を行っている。

3. 有明海の湾振動と潮汐特性

有明海の湾振動特性を調べるために、外海から様々な周期の海面振動(長周期波浪)を入射して、各地点の水面振動の応答を計算した。非線形性を除くなど、現象を単純化するために、入射波の振幅は小さい値(0.1 m)としている。また、計算格子の間隔は600 m から200 m のメッシュとした。図-1は計算結果の出力点を示し、図-2は外海からの入射波の周期による各点での水面振動の応答関数で、諫早湾締め切りの有無による比較をし

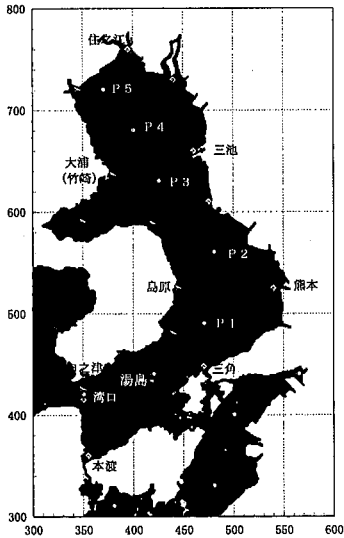


図-1 有明海の計算結果の出力点

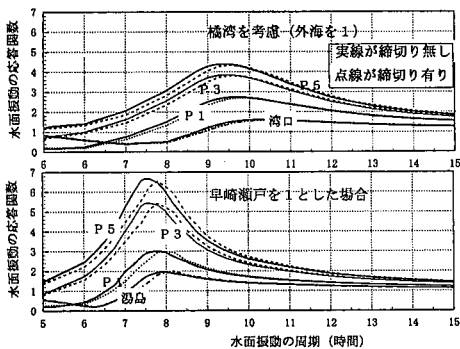


図-2 湾水振動への諫早湾締め切りの影響

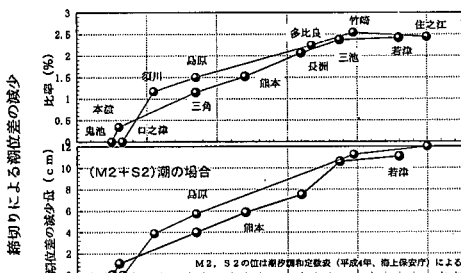


図-3 諫早湾締め切りの潮位差への影響

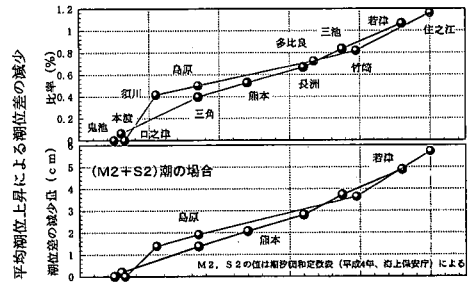


図-4 平均潮位上昇 (20 cm) の潮位差への影響

間に有る橘湾の湾振動特性の関係で、早崎瀬戸（有明海湾口）の振幅が変化するために生じる現象である。

諫早干拓の潮受け堤防を設置すると、この共振周期は約 20 分程度短くなることが計算される。

また、潮汐の周期を 12 時間とすると、諫早湾の堤防締切による潮位差の減少割合は、図-3 に示すように湾奥にゆくほど大きく、湾の最奥の住之江では約 2.5% (M_2 潮 + S_2 潮換算での潮位差は約 12 cm) の減少である。

図-4 に示すように、平均水位の上昇が 20 cm あるとして計算すると、潮位差の減少は、住之江で約 1.2% (同じく潮位差で約 6 cm) である。近年 20 年間の観測結果 (農林水産省, 2001) によると、湾奥に近い大浦では、潮位差の減少は大潮時の干満差で約 21 cm である。これは潮位差の約 3% にあたり、数値シミュレーションの結果ともほぼ一致する。

4. 潮流特性と諫早湾締め切りの影響

諫早干拓潮受け堤や熊本港など、最近の人為的改変の無い場合の有明海の潮流を計算した。図示するのは 1 級河川から豊水流量相当の流出を与えた大潮に相当する潮汐の計算例で、図-5、図-6 は、それぞれ、上げ潮最盛期、下げ潮最盛期の線流量である。図-7 は、物質輸送に大きく関係する 1 潮汐間での残差流量 (線流量で表した恒流) である。

有明海の恒流 (線流量)、すなわち、1 潮汐間の海水流動は湾口部から島原沿岸沿いで大きく、この海域では多くの渦 (循環) が現れている。熊本県沿岸沿いの有明海東岸から湾奥部および諫早湾にかけての流動は少ない。

図-8 は、諫早干拓潮受け堤があり、調整池の水位が -1.0 m (TP.) で管理されている場合である。上げ潮、下げ潮とも諫早湾内部への入り込みが少なくなつて、湾口付近での南北の流れが強まり、湾口南部・島原半島北部の沿岸域での循環流が弱まっている。

諫早湾内では、潮受け堤建設前はほぼ全域で上げ潮時に最大流速が生じていたのが、潮受け堤建設後は逆になっている。物質輸送・底質の巻き上げ沈降などの特

たものである。図より、有明海の海面振動応答のピークは早崎瀬戸 (有明海湾口) を基準にすると約 7.5 時間の周期で生じるが、外海からの波浪に対しては約 9.5 時間の周期で最も増幅される。これは、長崎半島 (野母半島) およびその延長上の海底山脈と、島原半島・天草下島の

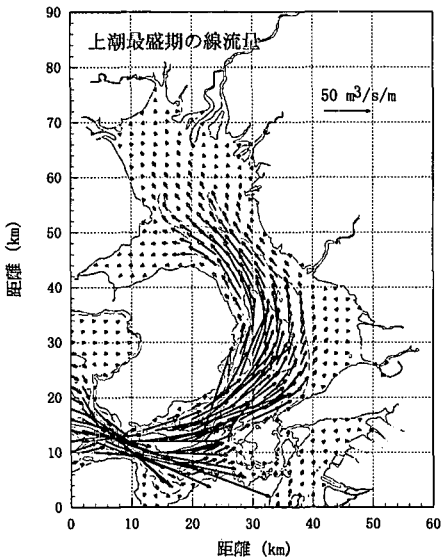


図-5 上潮最盛時の線流量

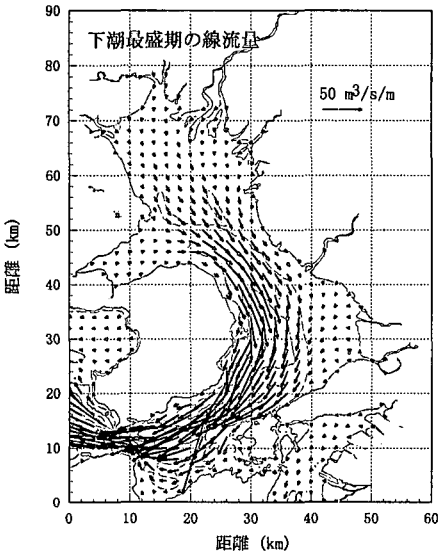


図-6 下潮最盛時の線流量

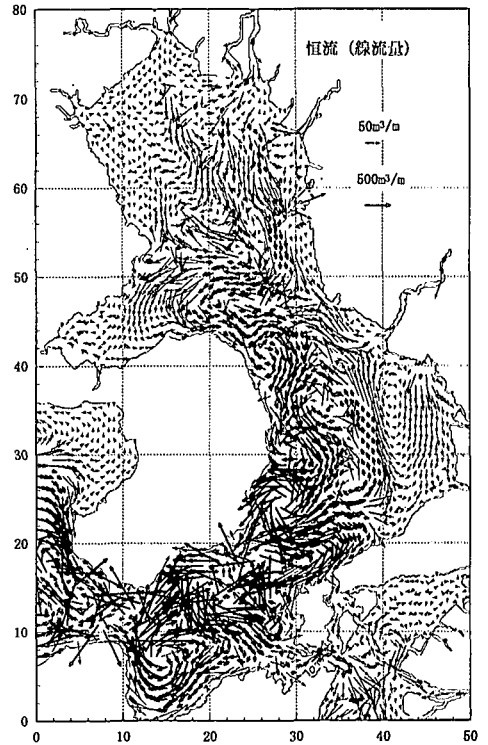


図-7 残差流量 (線流量の恒流)

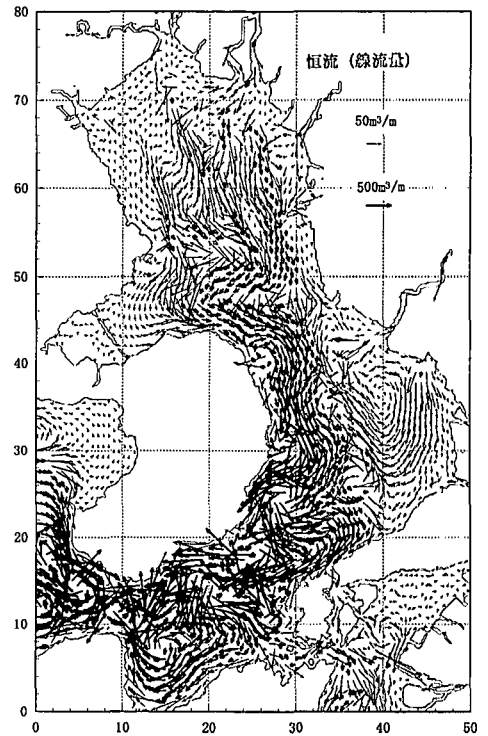


図-8 残差流量 (諫早湾締め切り後)

性が変化している可能性がある。

5. 熊本港建設の影響

熊本港建設による港近傍の流況変化を図-9に示す。計算のメッシュ間隔は、地形と防波堤等の再現のため熊本港周辺では20 mと細かくした。図は下げ潮最盛期、上げ潮最盛期における、熊本港建設前後での流速の変化量を示したもので、港の周辺では20~30 cmの流速変化がある。また、潮位差への影響は、港の周辺で±2 cm程度である。

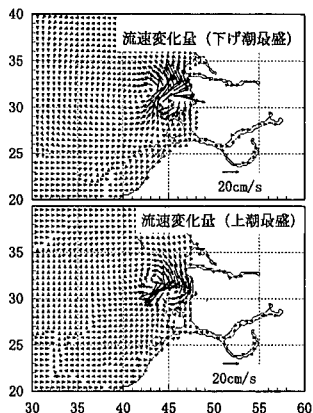


図-9 熊本新港設置前後の流速変化量

6. ノリ網の潮流におよぼす影響

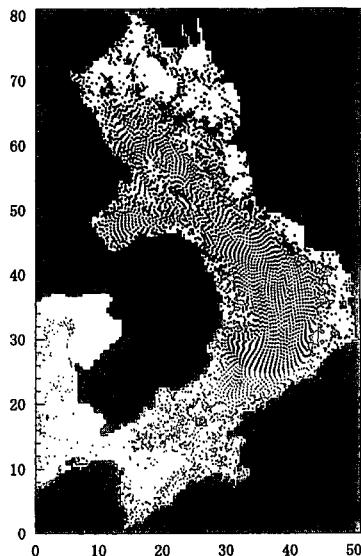
図-10 は、ノリ網の影響を透過性構造物の抵抗係数として評価し、ノリ網設置の有無による有明海流況の変化を粒子追跡により調べたもので、粒子追跡から3潮汐後の結果を図示したものである。ノリ網の影響も無視できず、特に湾中央から湾奥にかけての海水の流動が小さくなる傾向にある。

7. あとがき

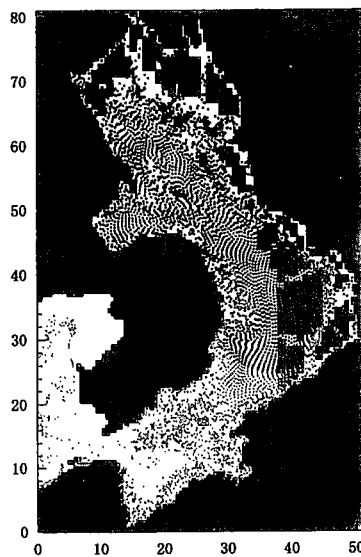
有明海域の大きな特徴として、広大な干潟と大潮位差で外海の影響も受けている潮汐がある。これは、潮流の数値解析を行う立場からは、干出・水没を繰り返す干潟を考慮しながら、また、滞筋などの微地形を取りこみながらも外海を含む広範囲の海域の計算を行わねばならないという困難がつきまとう。

また、有明海域は干潟のみならず複雑な地形の大水深域も存在するため、この海域の流況把握には3次元解析が望まれる。しかし、計算精度やコンピュータの能力を考えたとき、3次元計算はこれから開発すべき重要な課題の1つであるといえる。ここでは、平面2次元の非線形浅水流や長周期波動を対象にした解析法を新たに開発し、この計算手法を用いて、有明海の湾振動特性、諫早湾の潮受け堤の影響、熊本新港建設の影響、ノリ網設置の影響などを調べた。いずれもなんらかの影響が見とめられる。

今回は触れられなかったが、流入河川流量の影響や潮汐振幅の違いなどについても調べており、これらの結果とその複合過程の環境変動に及ぼす要因分析が課題である。また、これらの物理環境の変動が自然・生態環境にどのような影響を与えるかについては、先に述べた3次元解析や生態系モデルなどを通じさらに定量的な研究へと進展させる必要がある。



(a) ノリ網設置なし



(b) ノリ網設置あり

図-10 ノリ網設置の有無による流況変化(粒子追跡開始3潮汐後)

参考文献

- 滝川 清・田淵幹修 (2000): 台風9918号による不知火海の高潮と波浪特性, 海岸工学論文集, 47(1), pp. 291-295.
- 灘岡和夫・八木 宏 (1993): 浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No. 473, pp. 25-34.
- 農林水産省 (2001): 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 第6回会議資料, 資料5, 「有明海海域環境調査」関係資料一有明海の30年間の推移の概況一
- 本多忠夫・光易 恒 (1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93.