

百間川河口水門を含む児島湾の流動解析

前 野 詩 朗*・辻 風 馬**

本研究は、百間川河口水門増築後の水門周辺の流況を精度良く再現するための数値モデルの構築するための基礎として、現況の水門を想定した3次元数値シミュレーションを行った。計算領域は児島湾全域とし、非洪水時および洪水時の2つのケースについて解析を実施した。その結果、児島湾の流況は、非洪水時には潮汐の影響が卓越すること、また、洪水時には河川流の影響が支配的であることが示された。百間川河口水門周辺では、非洪水時には水門からの流れの湾内流に対する影響は少ないが、洪水時には大規模な放流が行われるため、水門周辺における局所洗掘の発生が予測される。

1. はじめに

旭川河口から約12(km)の地点で分派している百間川は岡山城下の洪水被害軽減を目的に、津田永忠が設計・施工し、貞享3年(1686年)に完成させた人工放水路である。平成4年の計画で旭川の計画高水量は3800(m^3/s)から6000(m^3/s)に、百間川への分流量は1200(m^3/s)から2000(m^3/s)に変更され、それに対応した築堤が砂川を残し既に完了している。また、百間川河口部では支川合流を加えて2450(m^3/s)となるが、現在の百間川河口水門の流下能力は昭和41年計画の1200(m^3/s)であり、計画高水量に満たないため、水門の増築が急がれている(図-1)。現在、水門は内水位(百間川)が外水位(児島湾)より高い時は内水排除のためゲートを全開し、その他の条件では、河川内への塩害防止としてゲートは全閉するという操作を行っている。しかし、旭川から百間川への維持流量が1(m^3/s)と非常に少なく、内水位が外水位を上回することはほとんどない。このため、水門は全閉であることが多く、滞留時間が長くなり、百間川河口域の水質悪化が危惧されている。このように、百間川河口域の水質を良好に保つことは重要な課題となっており、そのための水門操作も今後は必要となる。また、水門の増築に伴い、洪水時には新たに設置する水門周辺河床に堆積している底質の浮遊、水門周辺の局所洗掘、更には水門から流出した土砂の児島湾内での流動・拡散などに対する予測とその対策が急務とされている(図-2)。したがって、水門増築後の流況を再現出来る精度良い数値解析モデルを構築することは水門を実際に運用する上で大いに貢献するものであり、工学上意義がある。これらのことを考慮して、本研究は、水門増築後の百間川水門周辺の流況を精度良くシミュレーションするための数値モデルを構築することを目的として行うものであり、そのための基礎段階として、百間川水門は現況の水門を想定して解析する。なお、今回は非洪水時および洪水時の2ケースについて解析している。

2. モデルの概要

一般公開されている MEC モデル(濱田, 2001)をもとに、若干のバグの修正および河川流入部や湾口の取り扱い、百間川河口水門の操作などを表現するためのコードを新たに加えたプログラムを作成して、非洪水時および洪水時の水位、流速、温度、塩分について、鉛直方向の圧力を静水圧のみ考慮した静水圧近似モデルを用いて3

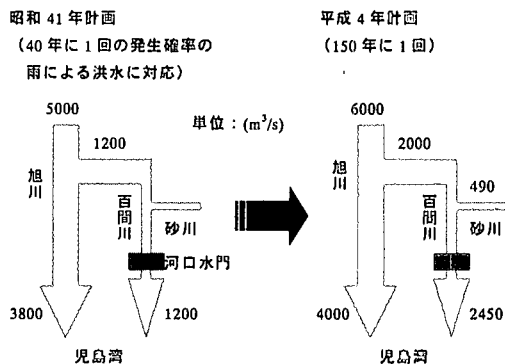
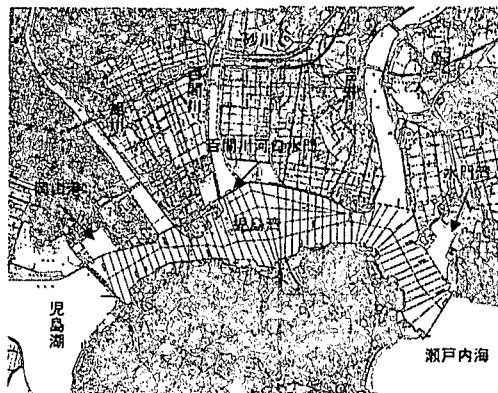


図-1 百間川計画高水量の推移



児島湾内の線は音響測深を行った航跡である。各河川および児島湾を取り囲む破線は音響測深等の観測を行った範囲を示している。

図-2 児島湾の地図

* 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科
** 学生会員 岡山大学大学院自然科学研究科

次元的に求めた。解析の概要を以下に示す。

(1) 支配方程式および離散化

T.P. 0(m) を $x-y$ 平面とし、鉛直上向きを正とするデカルト座標系を考え、対象海域はコリオリ力が緯度に依存しないとする。また、児島湾のような湾内域では鉛直方向の運動が十分小さいとして静水圧近似を適用し、更に、浮力項でのみ密度変化を考えるブジネスク近似を適用すると海水の運動は以下の支配方程式で記述することができる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f u - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad \cdots \cdots (3)$$

連続の式は次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \cdots \cdots (4)$$

u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 p は圧力である。 ρ, ρ_0 は海水密度、 f はコリオリパラメータ、 A_M, K_M は水平および鉛直渦動粘性係数である。

水温 T 、塩分 S の支配方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad \cdots \cdots (6)$$

A_c, K_c は水平および鉛直渦動拡散係数である。なお、水平渦動粘性係数・渦動拡散係数は、リチャードソンの $4/3$ 乗則にしたがうものとし、格子幅の関数とする。また、鉛直渦動粘性係数・渦動拡散係数は、成層化関数による表現を用いる。

以上の式を、直交格子によって離散化する。 u, v, w を格子面で、 T, S, ρ, ρ_0 を格子中央で評価するスタガードメッシュを使用する。それぞれの式の移流項には 1 次上流差分、粘性・拡散項には中央差分を適用する。時間方向の積分は、 u, v, ζ に関しては forward-backward scheme を適用する。すなわち、まず、Euler 前進差分によって u, v を求め、次にその最新の u, v を適用し、 ζ を求める。水温、塩分の式には FTCS (Forward-Time,

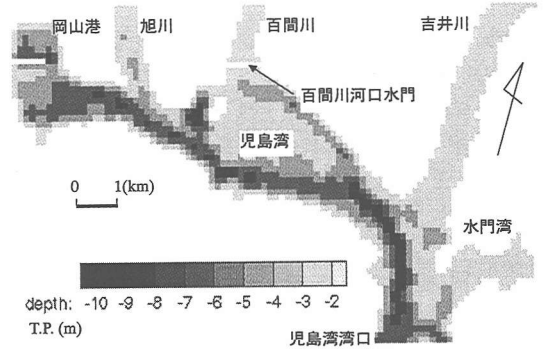


図-3 計算領域

表-1 解析条件

計算時間(時間)	48		
時間刻み(s)	1		
河川と湾口の境界条件	1層目	2層目	3層目
河川境界の塩分濃度(psu)	0.09		
河川境界の温度(°C)	31.5		
湾口境界の塩分濃度(psu)	30	33	35
湾口境界の温度(°C)	34	33	32

Centered-Space) scheme を適用する。

(2) 解析条件

計算領域は図-3 に示すように、旭川河口、百間川河口、吉井川河口、水門湾を含む児島湾全域である。児島湾の滞筋は湾南岸沿いにあり、岡山港への航路として利用されている。本研究では、等間隔格子メッシュを適用し、計算領域をメッシュ幅 89.8(m) で、 x, y 方向にそれぞれ 99×60 分割し、鉛直方向にはメッシュ幅は 2(m) で分割し、湾内の最深部では 5 層となる。初期条件として、水位は T.P. 0(m)、流速は 0(m/s) を計算領域全体に与えた。温度に関しては、1 層目(表層)から 5 層目(最深層)にそれぞれ 32, 31, 30, 29, 28(°C)を与え、塩分濃度に関してはそれぞれ 25, 27, 30, 33, 35(psu)となる鉛直分布を与えた。

境界条件は旭川、百間川、吉井川の上流端および児島湾湾口において図-4 に示すような方法で与えた。すなわち、非洪水時における各河川流量 Q_0 は、旭川 20(m³/s)、百間川 1(m³/s)、吉井川 25(m³/s)を与えた。湾口における潮汐の振幅は名合ら(1981)の研究を参考にして 0.75(m)とした。ただし、旭川、吉井川では児島湾からの海水の流入が予想されるので、単純に河川境界部のメッシュに河川流量を与えるのではなく、そのメッシュにある一定の面積 A_{river} を持つため池のようなものを想定し、河川流量 Q_0 による水位変化(= $Q_0/A_{river} \times dt$)および計算領域内部からの流入 Q_{in} による水位変化(=

$Q_n/A_{river} \times dt$ の和を河川境界メッシュに与えた。 dt は時刻刻みである。この手法を用いることにより、河川境界メッシュ内側のメッシュの水位が河川境界メッシュのそれより高くなれば、河川上流側にも流入する（洪水時には各河川の上流端において計算領域内部からの影響は少ないと考え、この手法は用いなかった）。次に、洪水時には各河川流量 Q_p はピーク時で旭川 $4000 \text{ (m}^3/\text{s)}$ 、百間川 $1200 \text{ (m}^3/\text{s)}$ 、吉井川 $5000 \text{ (m}^3/\text{s)}$ とし、湾口では平均水位 2.0 (m) を基準に振幅 0.75 (m) の潮汐を与えた。ピーク時に至るまで平均水位、潮汐の振幅ともに 12 時間の助走時間を与えた。百間川の水門操作は内水位が外水位より 5 (cm) 高くなれば全開、それ以外の条件であれば全閉とした。その他の解析条件は表-1 に示すとおりである。

3. 解析結果

(1) 非洪水時

図-5 は表層における非洪水時の流速分布を示している。図中の t_1, t_2, t_3, t_4 は図-4 のそれと対応している。上げ潮最強時には湾口からの流れにより旭川、吉井川では逆流が生じている。満潮時には児島湾全体で 1.0 (m/s) を超えるような大きな流速は見られないが、水門周辺や水門湾では渦が発生する。下げ潮最強時には旭川、吉井川から湾口に向かうような流速が見られ、湾口部中央では 1.0 (m/s) 程度の比較的大きな流速が見られる。この時、百間川水門から放流が行われているが、百間川流量が $1 \text{ (m}^3/\text{s)}$ と極めて小さいため、水門からの流れも微小で、児島湾全体に影響を及ぼすものではない。干潮時を見ると、渦の回転が満潮時と反対になる以外は、ほぼ満潮時と同様な流況を示す。

児島湾における流れの大半が児島湾南部の溺筋を通過しており、百間川河口水門周辺では大きな流速は見受けられない。また、水門湾の奥や旭川以西の岡山港付近では滞留する時間が長く、海水交換がほとんどなされていない。表層以外の流速は河床せん断力などの影響で底部に近づくほど小さくなるが、変化傾向は表層のそれと同様であった。

図-6 は表層における非洪水時の塩分濃度分布を示している。上げ潮最強時、湾口からの強い流れにより高濃度の海水が児島湾南東部や吉井川河口に流れ込んでいるのがわかる。その影響は旭川河口までには至っていないが、百間川河口水門周辺では若干の濃度上昇が見られる。湾口境界付近の底部では境界条件の影響で表層より高濃度の海水が確認できる。満潮時には、吉井川の流入境界付近まで 30 (psu) 前後の高濃度の海水が浸入しており、また、旭川河口部でも 10 (psu) 程度まで濃度が上昇している。児島湾における水質変化特性に関する河原ら (1979) の観測結果においても、湾口の潮汐作用による旭

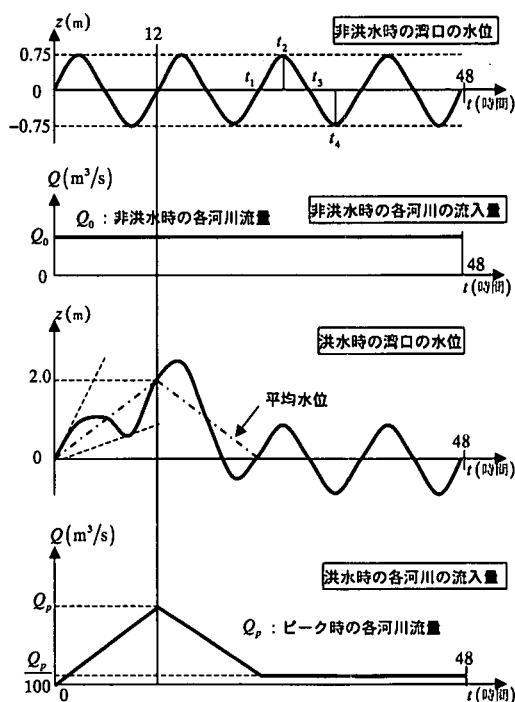


図-4 境界条件の設定方法

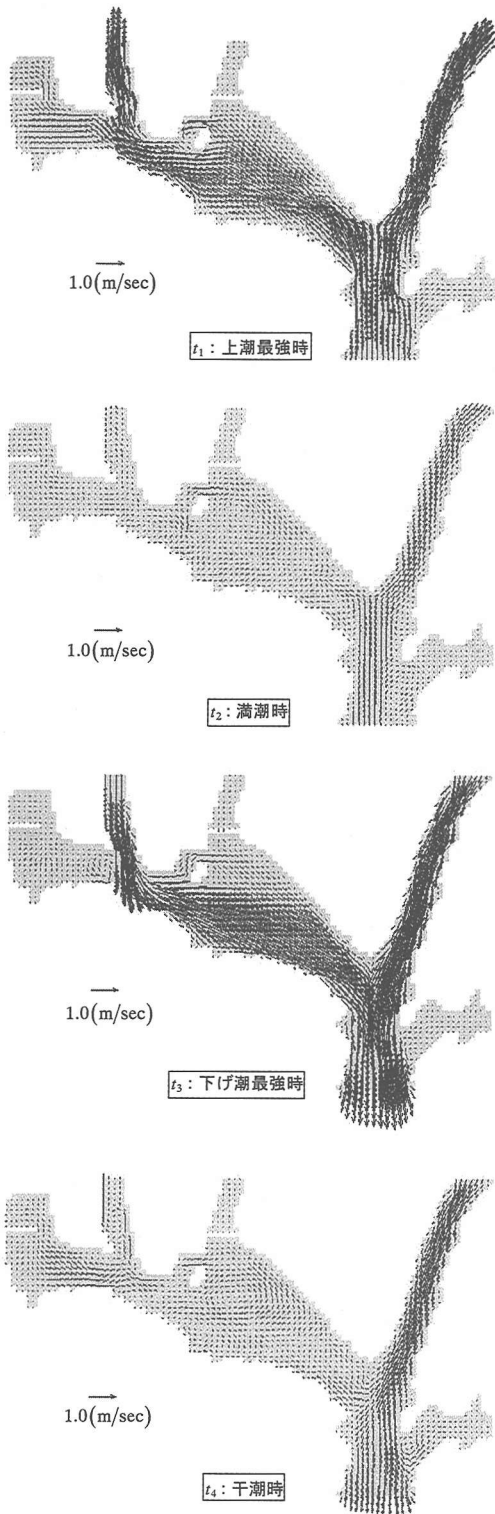
川、吉井川における濃度の上昇が確認されている。下げ潮最強時には、旭川からの流れが強くなるため、その流れにより児島湾中央部まで淡水が流入する。加えて、吉井川でも下げ潮による速い流れが湾口からの海水の浸入を遮り、河口付近まで淡水化する。干潮時、旭川および吉井川からの淡水流入による濃度の低下は湾口近くまで伝播する。しかし、河川からの淡水は表層付近を流れるため、表層以外ではあまり濃度の低下は見られない。図-5 を見てもわかるように、百間川河口水門周辺では終始大きな流速が見られないため、濃度変化は少ない。

また、温度分布については紙面の都合上省略するが、その変化傾向は塩分濃度分布とほぼ同様であった。

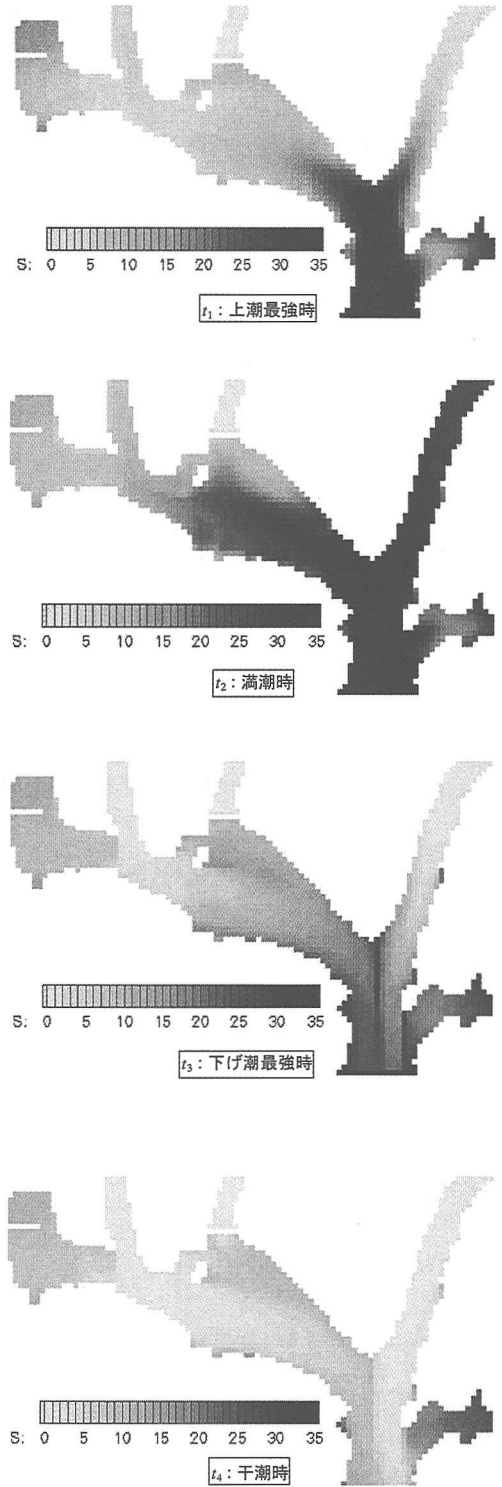
以上の結果より、児島湾の流速、塩分濃度および温度は潮位変動によって大きく変化しており、児島湾の流況は非洪水時には潮汐の影響が卓越していると言える。

(2) 洪水時

ピーク流量までの流速の時間変化を見てみると、旭川、吉井川の流速が徐々に大きくなり、やがて、百間川の水位が児島湾の水位を超えると、百間川水門から激しく流出し始める。図-7 は洪水のピーク時における表層の流速分布を示している。非洪水時に比べて、激しい流れになっているのがわかる。第2層より深い層では非洪水時同様、表層に比べ小さな流速になる。旭川と百間川からの激しい流れが児島湾中央部で合流し、さらに、湾口近くで吉井川からの流れも巻き込み、湾口に向けて一気



図—5 非洪水時における表層の流速分布



図—6 非洪水時における表層の塩分濃度分布 (psu)

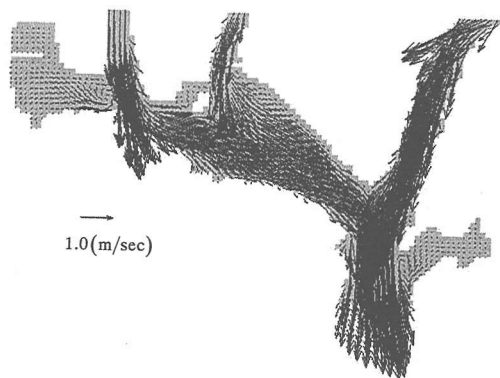


図-7 洪水ピーク時における表層の流速分布

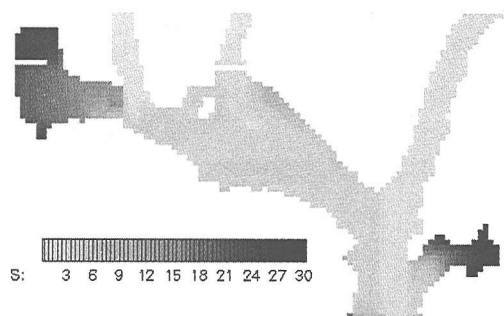


図-8 洪水ピーク時における表層の塩分濃度分布 (psu)

に流れ出している。湾口では2.0(m/s)～3.0(m/s)の流速になる。また、百間川水門周辺では流速が2.0(m/s)程度になるところも見られる。児島湾の湾内環境についての宮野・柴木(1998)の研究によれば、水門周辺ではシルト・粘土が底質組成のほぼ100%を占め、中央粒径 d_{50} は0.01(mm)以下であり、粒径が非常に小さいことから、水門付近の局所洗掘の発生が予測される。

図-8は洪水のピーク時における表層の塩分濃度分布を示している。表層では各河川からの淡水の流入により児島湾全域で0(psu)近い値を示している。ただし、河川からの激しい流れは主に表層付近を通過するため、底部では濃度の高い部分が残留している。水門湾奥・岡山港付近では洪水の影響は少ない。

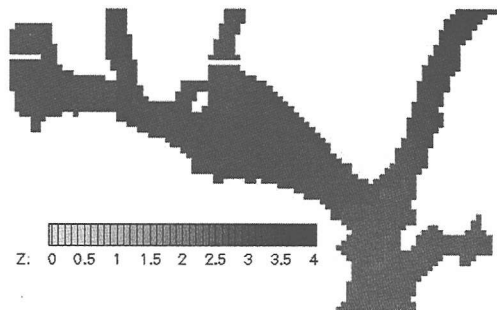


図-9 洪水ピーク時の水位 T.P. (m)

図-9は洪水のピーク時における水位分布である。湾口付近を除いた計算領域のほぼ全域で2.0(m)以上の高い値を示している。旭川、百間川河口では約2.5(m)、吉井川河口では、約3.0(m)の水位になる。洪水時の流況の時間変化を見ると、洪水の発生時には潮汐の影響はほとんど受けないが、洪水後には潮汐に依存する流況へと変化する。

4. 結 論

本研究は、水門増築後の百間川水門周辺の流況を精度良く再現できる数値モデル構築の基礎段階として、現況の水門を想定した児島湾の数値シミュレーションを実施した。非洪水時には、児島湾では潮汐の影響が支配的であること、また、洪水時には、非洪水時のように潮汐の影響はあまり見られず、河川流量が卓越することが示された。さらに、百間川河口水門周辺では洪水時において大規模な洗掘の発生が予測される。

参 考 文 献

- 河原長美・岡本晴利・金山秀樹・金 広 (1979): 児島湾と旭川、吉井川の感潮部における水質変化特性, 第31回中国四国支部年次学術講演会, pp. 150-151.
- 名合宏之・河原長美・前野詩朗 (1981): 児島湾の流動特性と水質, 第25回水理講演会論文集, pp. 585-590.
- 濱田孝治 (2001): 静水圧モデル, MECモデルワークショップ(第1回), pp. 37-50.
- 宮野 仁・柴木秀之 (1998): 湾奥の締切りが湾内の海底地形に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 466-470.