

ノリ養殖施設の流体抵抗と潮流・浮泥輸送への影響

八木 宏* ・石田大暁** ・高橋 亜依***
灘岡和夫**** ・田村 仁***** ・小谷正幸*****

本研究では、ノリ網の流体抵抗及びノリ養殖施設周辺の流動構造を現地計測により把握し、これに基づく数値実験によって有明海湾奥域におけるノリ養殖域周辺の流動構造や浮泥輸送特性の解明を試みた。その結果、ノリ網の流体抵抗係数は、0.01~0.021の値を示しノリ量によって変化すること、ノリ養殖域1区画あたりに作用するノリ網流体抵抗は支柱の流体力や底面摩擦力と同程度の大きさであることを示し、水面付近に発達するノリ網境界層の空間構造を現地計測と数値計算の両面からその特徴を明らかにした。さらに、有明海湾奥部を対象とした潮流及び浮泥輸送計算によって、ノリ養殖域やその沖側前面部分で流速や浮泥濃度が低減、抵抗が小さい船通し部で上昇するなどノリ養殖施設が潮流や浮泥輸送に与える影響を示した。

1. はじめに

日本最大の潮位差と広大な干潟を有する有明海は、二枚貝を始めとした水産資源が豊富であり、冬季には湾奥部干潟域を中心として広大な範囲でノリ養殖が行われるなど漁業活動が極めて活発で生産性が高い海域である。近年、埋立・干拓に伴う干潟域の減少や陸域からの負荷増大を背景として、有明海の水環境劣化が懸念されてきたが、2000年には大規模な赤潮によるノリの色落ち現象が発生し大きな被害となったことから有明海の水環境保全が社会問題に発展している。今後、有明海の水環境を保全し、漁業活動の中心であるノリ養殖を健全に進めていくためにも、干潟域に広大に広がるノリ養殖施設周辺の流動構造や有明海の基礎生産力に影響が大きい浮泥輸送特性を把握することが重要である。

ノリ養殖施設周辺の流動特性については、1980年代に収益性の高いノリ網配置法を確立するためにその検討が精力的に行われているが(馬場ら, 1987), 当時の計測方法が石膏ボールによる流速強度測定が中心であったために詳細な流動構造やノリ養殖施設の流体抵抗評価までには至っていない。また、滝川・田淵(2002)は有明海の流動計算結果に基づいてノリ養殖施設が潮流に与える影響を指摘しているがその詳細は明らかにされていない。

そこで本研究では、これまでに十分に明らかにされていないノリ養殖施設の流体抵抗及びノリ養殖施設周辺の詳細な流動構造を現地計測により把握し、これを反映させた干潟~内湾系の流動シミュレーションを行うことで、有明海湾奥部を中心とした流動構造・浮泥輸送にノリ養殖施設が与える影響を明らかにすることを試みた。

2. ノリ養殖施設の流体抵抗特性と流動構造に関する現地計測

(1) 現地計測概要

ノリ養殖施設の流体抵抗は、ノリ網とそれを支える支柱の抵抗から構成されている。このうち、ノリ網の流体抵抗についてはその定量的な評価がなされていないため、本研究では、ノリ網の流体抵抗とノリ養殖施設の流動構造を把握するための現地計測を、福岡県柳川市沖のノリ漁場内にある福岡県水産海洋技術センター有明海研究所の試験区域(図-1)において、2004年1月の大潮期に実施した。ノリ網流体抵抗計測については、図-2(a)に示すように、ノリ養殖施設1区画(1小間と呼ぶ)からノリ網1列(ノリ網2枚)を小間外に取り出し、その一端を支柱に固定した状態で流下方向に流して、ノリ網と支柱をつなぐロープに作用する張力を防水型ロードセルで計測した。張力はノリ網1列全体にかかる流体力に対応していることから、これと上流側に設置した電磁流速計(水面下50cm)及び超音波ドップラー流速計(ADCP)の流速値との関係からノリ網に作用する流体抵抗を評価した。計測は、満潮から干潮までの下げ潮時(半潮汐間)に行い、またノリ網に付着したノリ量の違いが流体抵抗に与える影響を把握するために、ノリ量が小さい時期(Case 1: 1/8)と大きい時期(Case 2: 1/26)の2回計測を実施した(表-1)。一方、ノリ養殖施設の流動構造計測については、ノリ網流体抵抗計測終了後に図-2(b)に示すようにノリ養殖区域(小間)の縁辺部にADCP(RD Instrument社)を一潮汐間設置し、下げ潮時にはノリ網の下流側、上げ潮時にはノリ網の上流側における流速鉛直構造の計測を実施した。

(2) ノリ網の流体抵抗特性

図-3に、Case 2(1/26)の計測時における水位、ADCPによって計測された水深平均流速、単位面積あたりのノリ網流体抵抗(τ_L)、底面せん断力(τ_b)の時間変化を示す(底面せん断力はADCPの底層流速値から対数分布則とマンニングの粗度係数0.03として推定)。これを見ると、

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学助教授 大学院情報理工学研究科

** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科

*** 修(工) (株)国際航業

**** フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科

***** 学生会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員

福岡県水産海洋技術センター有明海研究所

満潮から干潮に向かう下げ潮時の潮流速変化に対応してノリ網流体抵抗も増減を示していることがわかる。その大きさを底面せん断力と比較すると、ノリ網流体抵抗の方が全体的に大きく、最大時には底面せん断力の2倍以上となっている。

次に、以上の計測結果に基づいて、ノリ網の流体抵抗係数を算出することを試みた。一般に、流れに沿って置かれた平板系の物体に作用する単位面積あたりの流体抵抗 τ は次式で評価される。

$$\tau = D/A = \frac{1}{2} \rho \cdot C_f \cdot U^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D ：物体に作用する全流体力、 ρ ：流体の密度、 C_f ：抵抗係数、 A ：物体の表面積、 U ：流速である。ノリ網に対しても同様に流体抵抗が評価できると考えれば、単位面積あたりのノリ網流体抵抗 τ_L と $\rho U^2/2$ の関係から C_f が算出できる。図-4 に、Case 1 (1/8) 及び Case 2 (1/26) の流体抵抗計測結果に対する τ_L と $\rho U^2/2$ の関係を示す(流速 U は ADCP による水深平均流速値)。図中の直線の傾きが抵抗係数に相当するが、この結果からノリ網の流体抵抗係数 C_f は、ノリ量の小さい Case 1 で 0.01、ノリ量の大きい Case 2 では 0.021 となり、ノリ量によって抵抗係数が2倍程度変化することがわかる。

次に、ノリ網流体抵抗の相対的な大きさを示すために、ノリ養殖施設1区画(1小間、図-2参照)あたりに作用するノリ網流体抵抗、支柱の流体抵抗及び底面せん断力の大きさを比較した。なお、ノリ網流体抵抗試験時は、ノリ網をノリ養殖施設外に取り出しているなど通常の状態と異なることから、後述する1潮汐間流動計測時を対象として、そのときの水位、流速記録からそれぞれの流体抵抗を算出し比較した。具体的には、ノリ網流体抵抗は、前述の抵抗試験から求めた Case 2 の抵抗係数(0.021)と ADCP による水深平均流速から式(1)に基づいて、1小間(ノリ網6列、12枚)あたりの値を算出した(但し、水深がノリ網干出レベルよりも低下した場合にはノリ網流体抵抗を0としている)。ノリ支柱にかかる流体力 D_p は、支柱を円柱とみなすと次式で表され、これと1小間内の支柱本数(66本)の積から1小間あたりの支柱による抵抗を評価した

$$D_p = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot d \cdot \Delta z \cdot U_i^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_d ：円柱の抗力係数(1.1)、 d ：支柱の直径(5 cm)、 U_i ：ADCP の i 層の流速、 Δz ：層厚、 n ：層数)。さらに、底面摩擦力については、図-2と同様に ADCP 底層流速値から底面せん断力を推定し、これと小間の面積の積を1小間に作用する底面摩擦力とした。図-5にその結果を示すが、これを見ると、ノリ養殖施設1小間あたりで考えても、ノリ網流体抵抗は底面摩擦力や支柱

と同程度の大きさを示しておりその重要性がわかる。特徴的なことは、それぞれの流体抵抗の時間変動特性の相違であり、支柱の流体抵抗は比較的水深が大きい時間帯に最大になるのに対し(図中矢印 A)、底面摩擦、ノリ網流体抵抗は下げ潮期後半に最大値を示し(図中矢印 B)、このうちノリ網流体抵抗は下げ潮期後半にノリ網が干出するために途中で流体力が急激に低下すると考えられ

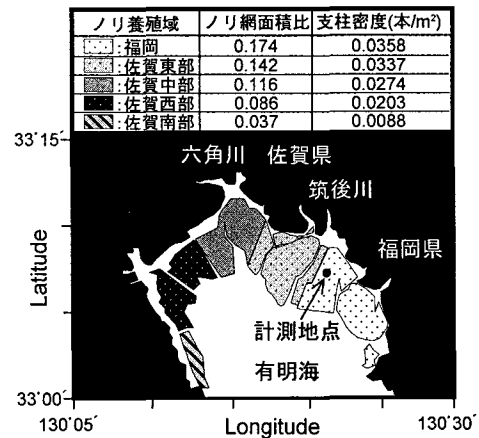


図-1 現地計測位置及びノリ養殖施設設置領域

表-1 現地計測時の潮時の潮位差とノリ量

	潮位差 (m)	ノリ葉長 (mm)	ノリ網1列のノリ 着生湿重量(kg)
Case 1 (2004.1.8)	3.16	85	22.84
Case 2 (2004.1.26)	3.59	280	186.32

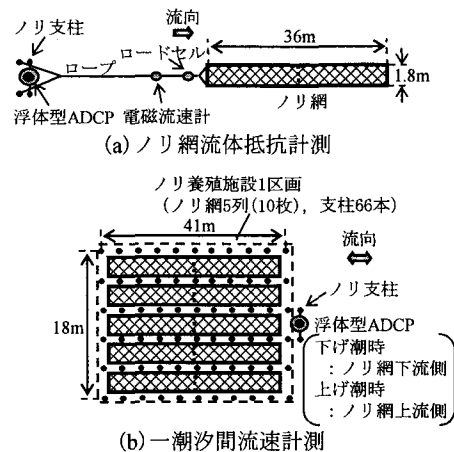


図-2 計測方法

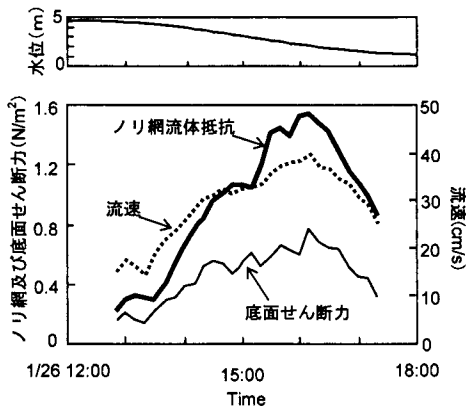


図-3 ノリ網流体抵抗計測時の水深平均流速・ノリ網流体抵抗・底面せん断力の時系列 (Case 2)

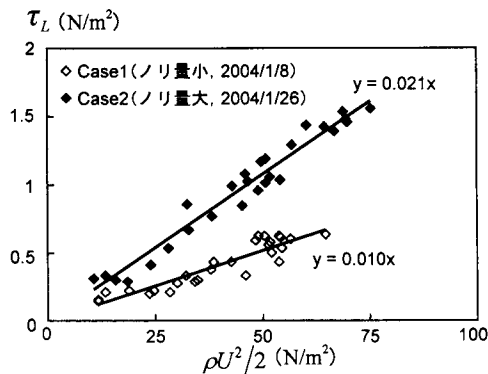


図-4 ノリ網の流体抵抗係数

る。

(3) ノリ養殖施設の流動構造

次に、ノリ養殖施設の流動構造を把握するために行った一潮汐間流動計測結果を示す。図-6 (a) は、Case 2 の計測で得られた一潮汐間の流速時空間分布、また (b) は下げ潮時の流速鉛直分布と底面流速から推定された対数分布則を併せて表示したものである。これを見ると流速分布構造の特徴として、①下げ潮時には水面から約 1~2 m の範囲で流速が低減する (1/27, 1:00~4:00)、②表層の流速低減は水深が浅くなり干潮に近づくにつれて (4:00 以降) 解消することがわかる。前述のように、下げ潮時には、流速計がノリ網下流端に位置することから、表面流速の低減はノリ網流体抵抗の影響と考えられ、さらに下げ潮末期にはノリ網の干出に伴い表層流速が回復することを計測結果は示している。さらに、底層付近の流速について、下げ潮期と上げ潮期 (上げ潮時には流速計はノリ網の上流端に位置する) とを比較すると、下げ潮期の方が相対的に底層流速が大きくなっており、こ

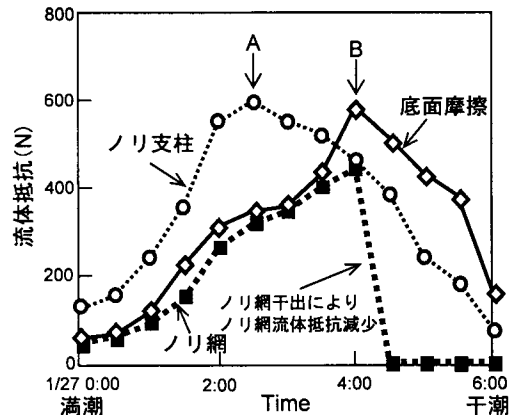


図-5 ノリ養殖施設 1 区画 (18×41 m) あたりのノリ網・支柱・底面摩擦の流体力の比較

れはノリ網の流体抵抗により流速が最大となる鉛直位置が下層にシフトし、底層流動構造、底面せん断力が変化する可能性を示唆している。

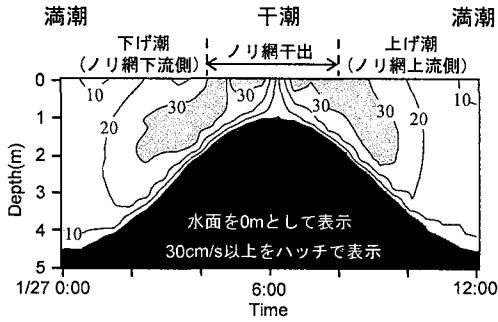
図-7 は、参考のために 3 次元流動モデル (二瓶ら, 2002) を用いて、ノリ網周辺の流速場を計算したもので、下げ潮最強時 (1/27, 3:00) に対応している。計算結果には、ノリ網先端から下流側に向けて水面付近に境界層が発達している様子がわかる。図-7 (b) には、現地計測結果と計算結果 (ノリ網下流端) の比較も示しているが、両者はノリ網流体抵抗による表面流速の欠損の大きさやその範囲など特徴が概ね一致しており、このことからノリ網周辺には潮流流速変動に対応した形で、ノリ網境界層が発達と減衰を繰り返し、表面流速が低減していることがわかる。

3. ノリ養殖施設が潮流・浮泥輸送に与える影響に関する数値実験

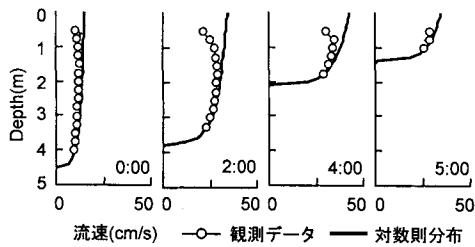
現地計測によってノリ網の流体抵抗特性及びノリ養殖施設の流動構造が把握できたので、次に、ノリ養殖施設が広域の潮流や浮泥輸送に及ぼす影響について数値実験による検討を行った。

(1) 数値実験概要

今回の数値実験においては、浅い水域の流れと底質輸送現象の表現に適した SDS&Q 3D モデル及び準三次元底質輸送モデル (田村・灘岡, 2001) をベースとして、これに干潟域の干出に対応するための移動境界条件を導入したものを数値モデルとして用いた (高橋, 2004)。計算領域は、有明海全体から干潟域の滞筋のスケールまで表現するために 2 段階ネスティング法を採用し、広領域 (有明海を中心に外海を含む, 90 km×90 km, 計算格子サイズ 1 km)、狭領域 (有明海湾奥部, 25 km×20 km, 計



(a) ノリ養殖施設周辺の流速の時空間分布



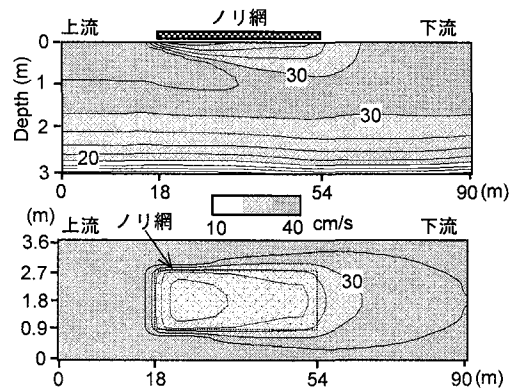
(b) 下げ潮時ノリ養殖施設下流端の流速鉛直分布

図-6 現地計測によるノリ養殖施設周辺の流動構造

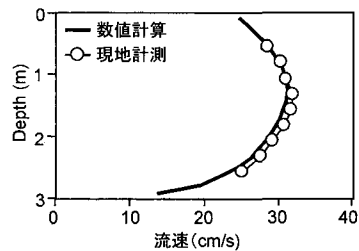
算格子サイズ 100 m)とした。潮流計算の境界条件は、広領域計算の外海境界において付近の検潮所の調和定数を参考に水位を 0.85 m の振幅の半日周潮 (M_2) として与えており、計算結果を調和解析した結果は湾内の検潮所の調和定数と概ね一致していることを確認している。なお、今回はノリ養殖施設が潮流やそれによる浮泥輸送に与える影響を検討することが目的であるために、河川流量や海域計算の成層状態などは考慮していない。また、底質輸送計算に必要な底質巻き上げ量 (E) については、有明海の底泥に対する次式 (中川, 2003) を採用し、沈降速度については 0.2 cm/s とした。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ec}} - 1 \right) \quad \tau_b > \tau_{ec} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 M : 浸食速度係数 ($10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{min}$)、 τ_b : 底面せん断力、 τ_{ec} : 限界せん断力 (0.1 N/m^2) である。数値モデルへのノリ養殖施設の流体抵抗の導入については、ノリ網抵抗は式 (1)、支柱は式 (2) と同様に評価し、ノリ網抵抗係数は現地計測結果に基づきノリ量が多い状態の 0.021 とした。なお、実海域においては、ノリ養殖施設の占有面積が漁場によって異なっている。そこで福岡県水産海洋技術センター有明海研究所、佐賀県有明水産振興センターの資料に基づいて、図-1 に示すように各漁場の単位面積あたりのノリ網面積比及び支柱本数を与え、それと式 (1)、(2) の積によって浅海域の流体抵抗を評価した。



(a) ノリ網周辺の流速鉛直分布及び水平分布



(b) ノリ網下流端における流速鉛直分布の計算結果と現地計測結果の比較

図-7 数値計算によるノリ養殖施設周辺の流速分布

(2) 数値計算結果

図-8 (c) (d) は、ノリ養殖施設の流体抵抗を考慮しない場合と考慮した場合の計算結果から、両者の流速差及び底面浮泥濃度差を算出し、上げ潮時 (満潮後 11.5 時間) 及び下げ潮時 (満潮後 2.1 時間) について表示したものである。図には、(a) 海底地形及びノリ養殖施設の設置領域図 (詳細は図-1 参照)、(b) ノリ養殖施設の流体抵抗を考慮した場合の流速ベクトルも併せて表示しており、(c) (d) 中のハッチ部は流速差、浮泥濃度差が負の領域 (ノリ養殖施設によって流速、浮泥濃度が減少した領域) を示している。これを見ると、上げ潮時、下げ潮時ともに、ノリ養殖域及びその沖側前面部分で流速が低減しており、それとは逆にノリ漁場間にある船通しとよばれられる部分で増加していることがわかる。これは、ノリ養殖施設による流体抵抗の空間分布がノリ養殖域やその沖側前面で流速を低減、また逆に流体抵抗が相対的に小さい船通しで流速を増加させたためと考えられ、流速差は水深平均流速で最大 5 cm/s 程度となっている。底面近傍の浮泥濃度も流速に対応して、ノリ養殖施設周辺及びその沖側前面部分で濃度低下、船通しで濃度上昇となっている。以上の結果は、ノリ養殖施設によって有明海湾奥部の流れや浮泥輸送の空間構造が変化している可能性を示している。

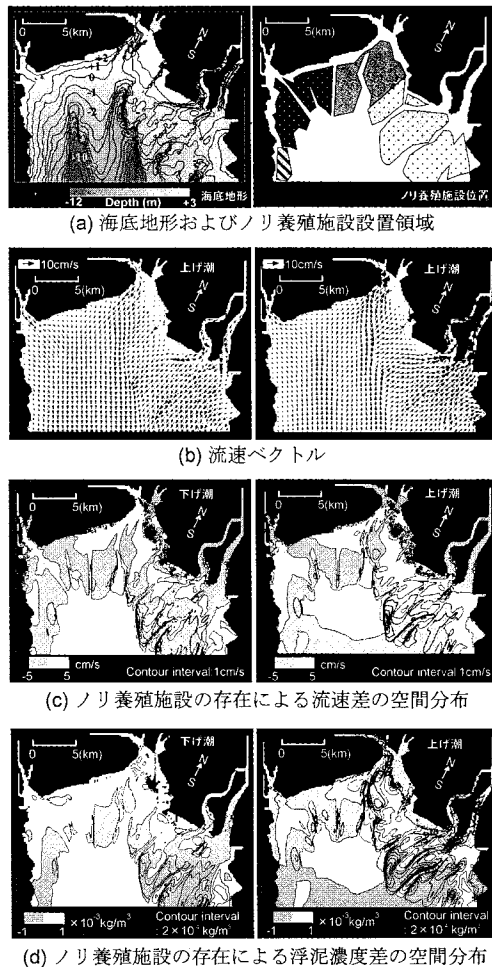


図-8 ノリ養殖施設の存在による流速差・浮泥濃度差の空間分布 (左図: 下げ潮時 (満潮後 2.1 時間), 右図: 上げ潮時 (満潮後 11.5 時間), 図中のハッチ部は流速・浮泥濃度が減少した領域)

4. おわりに

本研究によって得られた知見は以下の通りである。

- (1) ノリ網の流体抵抗を現地計測した結果, 流体抵抗係数は 0.01 (ノリ葉長: 8.5 cm) ~ 0.021 (28 cm) の値を示し, ノリ量によって 2 倍程度変化する。
- (2) ノリ養殖施設 1 区画 (1 小間) あたりに作用するノリ網流体抵抗は, 1 区画内に作用する支柱の流体力及び底面摩擦力と同程度の大きさであることを

示し, それぞれの時間変動パターンの特徴を明らかにした。

- (3) ノリ網の流体抵抗によって水面付近に発達する境界層の空間構造を現地計測と数値計算の両面からその特徴を示した。
- (4) 有明海湾奥部における潮流と浮泥輸送に関する数値実験結果から, ノリ養殖域やその沖側前面部分ではノリ養殖施設の流体抵抗によって, 潮流速や浮泥濃度が低減, 抵抗が小さい船通し部分で上昇し, ノリ養殖施設が潮流や浮泥輸送の空間構造に影響している可能性を示した。

謝辞: 現地調査を行う上でご協力頂いた福岡県水産海洋技センター有明海研究所ノリ養殖課長岩淵光伸氏をはじめとする研究所の方々, ノリ養殖施設設置領域の情報を提供頂いた佐賀県有明水産振興センターノリ研究室長川村嘉広氏にここに記して謝意を表します。また本研究は文部省科学研究費基盤研究 (c) 『ベントス系を中心とした沿岸生態系の劣化と保全・再生戦略に関する研究企画調査』 (代表者: 灘岡和夫), 萌芽研究『ベントス幼生広域供給経路同定に基づく沿岸生態系保全に関する研究』 (代表者: 灘岡和夫), 文部省科学研究費基盤研究 (c) 『相互作用系として捉えた河川—沿岸域間の動的水環境形成機構解明と河口機能の評価』 (代表者: 八木 宏), とうきゅう環境浄化財団の補助を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 高橋亜依 (2004): 有明海湾奥部における流動構造と浮泥輸送に関する研究, 平成 15 年度東京工業大学大学院修士論文, 100 p.
- 滝川 清・田淵幹修 (2002): 有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1061-1065.
- 田村 仁・灘岡和夫 (2001): 準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルの開発に基づく港口部での底質浮遊と輸送に関する解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 526-530.
- 中川康之 (2003): 有明海における底泥輸送現象のモデル化, 港湾空港技術研究所報告, 第 42 巻, 第 4 号, pp. 25-42.
- 二瓶泰雄・山崎雄介・西村 司・灘岡和夫 (2002): 浅水流動場を対象とした三次元数値モデルの近似手法に関する研究〜座標系と静水圧近似に着目して, 海岸工学論文集, 第 49 巻, No. 1, pp. 411-415.
- 馬場裕文・川村嘉広・山下康夫・中武敏一 (1987): ノリ品質向上のための漁場行使に関する研究, 昭和 61 年度地域重点新技術開発促進事業報告書, 57 p.