

5. 三河港周辺域における水質環境および波浪特性の現状評価

建築・都市システム工学系 教授 井上 隆信, 准教授 加藤 茂, 助教 岡辺 拓巳

5-1 研究の背景と目的

三河湾の湾奥に位置する三河港では港湾の全域において富栄養化状態にあり、夏季には慢性的な貧酸素水塊が形成されている。この水塊の湧昇によって発生する苦潮（青潮）により、湾内の干潟では貝類の大量斃死が頻繁に確認されている。愛知県産のアサリは国内シェアの6割を占めており、三河湾内の沿岸漁業に欠かせない。近年の全国的なアサリ漁獲量の急減の中で、比較的安定した供給が見込める重要な生産地であることから、三河湾の水質問題は全国的な漁業・食料問題に及ぶリスクとなっている。三河湾内の各漁場では港湾内の豊川河口に広がる干潟（六条潟）で採捕した稚貝を放流用種苗とすることでアサリを生産しており、稚貝の供給を六条潟のみに依存する高いリスクを抱えた構造である。このような大型港湾や内湾における環境問題は、生物相の多様性や水環境の保全が重要なキーポイントである。本研究テーマでは、貧酸素水塊の形成に密接に関わる港湾への栄養塩流入について、現地調査に基づいた降雨時の流出負荷を明らかにする。また、港湾内に広がる干潟域における波・流れの観測を行い、その特性を検討した。

湾内の水質汚濁の原因には流入する河川流域や沿岸域における産業活動や、生活の影響が大きいといわれているが、陸域からの発生負荷量は水質総量規制によって減少傾向にある。しかし、現状では三河湾の水質改善は見られない。この原因として考えられるのが非特定汚染源からの流入負荷量の推定方法である。現在の推定方法は平水時の調査結果を用いて算出しているが、降雨時に多くの栄養塩物質が流出するという報告があり、必ずしも正確な値が用いられていない可能性がある。そのため正確な発生負荷量を降雨時調査によって明らかにする必要がある。平成23年度はモデルによる推定手法について、平成24年度は詳細な調査に基づく正確な負荷量算定手法について報告した。本年度は、問題となる畑地群において降雨時の栄養塩流出負荷量について検討を行った。

港湾内の水質環境は波や流れといった水理特性と強く関連する。六条潟は河川出水や風、高波浪や高潮といった高いエネルギーの自然外力に曝されており、干潟域での土砂移動は活発である。特に底質輸送と、それに関わる波や流れといった輸送外力の短期（気象・潮汐）～中期（季節）特性や干潟域での空間的な特徴は、アサリ稚貝の発生サイクルと密接に関わると考えられており、内湾干潟海域の環境保全に不可欠な情報である。ここでは、愛知県水産試験場の協力のもと、2012年11月～2013年3月まで行われた六条潟での多点波浪・流況観測より、その特徴を把握する。



図 5-2-1 調査地点

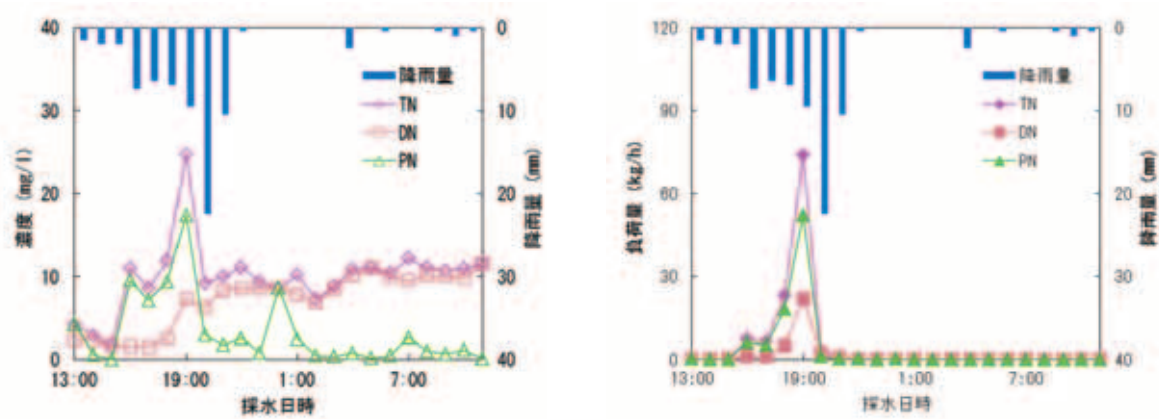


図 5-2-2 形態別窒素濃度及び負荷量経時変化 (2013 年 4 月 6-7 日降雨時調査)

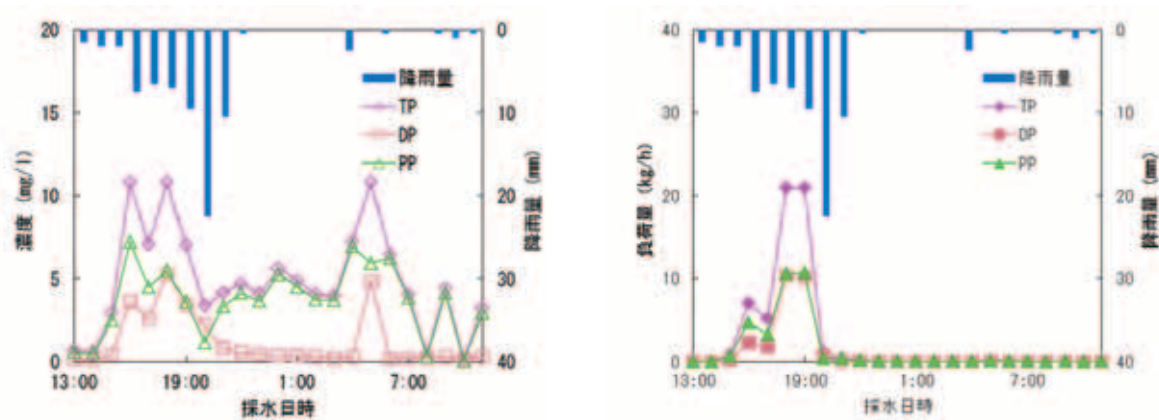


図 5-2-3 形態別リン濃度及び負荷量経時変化 (2013 年 4 月 6-7 日降雨時調査)

表 5-2-1 降雨時調査結果

	降水量	流量	TN	DN	PN	TP	DP	PP
	mm	m ³	kg	kg	kg	kg	kg	kg
4/1	6	51.84	0.19	0.13	0.05	0.04	0.03	0.02
4/6	74.5	7268.99	116.81	33.99	83.00	57.24	25.78	31.46
4/20	15	698.24	2.31	1.72	0.59	3.31	0.17	3.13
4/30	2	24.05	0.26	0.26	0.01	0.06	0.06	0.01
5/19	3.5	124.71	0.60	0.53	0.07	1.30	0.71	0.59
6/11	5.5	154.14	0.63	0.52	0.12	1.52	0.83	0.69
6/20	50	3382.60	19.57	17.91	2.01	31.41	12.23	19.17
6/26	16	789.15	2.83	1.37	1.46	5.78	4.31	1.47
7/4	2.5	29.30	0.36	0.35	0.01	0.22	0.22	0.01
10/15	90	16319.25	192.78	165.18	27.60	61.61	20.80	40.81
10/20	66.5	7674.00	66.02	49.59	16.43	25.14	8.80	16.35

5-2 降雨時の栄養塩流出負荷量の説明

(1) 調査概要

調査地点は、図 5-2-1 に示す豊橋市南部の台地の畑地群の中の農業排水路である。この用水路は晴天時には通常水は流れておらず、降雨に伴い流域の畑地等の表面流出水が流入する。そのため、畑地土壌等の濁水が流入するため、降雨に伴う畑地からの栄養塩流出調査には大変適した地点である。調査地点には、水位・流速計、自動採水器を設置し、降雨に伴い水位が観測されると、1 時間ごとに自動に採水するシステムを構築し 2011 年より連続観測を実施している。自動観測した水位と流速から流量を算出している。採水した試水は降雨後速やかに実験室に持ち帰り、懸濁態浮遊物質 (SS)、全窒素 (TN)、溶存態窒素 (DN)、全リン (TP)、溶存態リン (DP) を測定した。TN から DN を差し引いて懸濁態窒素 (PN)、TP から DP を差し引いて懸濁態リン (PP) を算出した。降水量は豊橋気象台の値を使用した。調査期間は 2013 年 1 月から 12 月の 1 年間である。

(2) 調査結果

2013 年 4 月 1-2 日、4 月 6-7 日、4 月 20-21 日、4 月 30 日、5 月 19 日、6 月 11 日、6 月 20-21 日、6 月 26 日、7 月 4 日、10 月 15-16 日、10 月 20 日の合計 11 回の降雨時調査を実施した。例として、4 月 6-7 日について、形態別窒素の濃度及び負荷量経時変化を図 5-2-2 に、形態別リンの濃度及び負荷量経時変化を図 5-2-3 に示し、降雨時調査結果の一覧を表 5-2-1 に示す。降雨に伴い流量が増加すると PN 濃度の上昇に伴い、TN 濃度も上昇し、流量が減少すると PN 及び TN 濃度は減少した。それに対して、DN は PN 上昇の約 4 時間遅れで濃度が上昇し、そのまま推移していた。このことは、PN と DN の流出挙動が異なることを示している。しかし、負荷量の変化は PN、DN 流量の増減と同じ挙動を示し、

流量に大きく依存していることが明らかとなった。

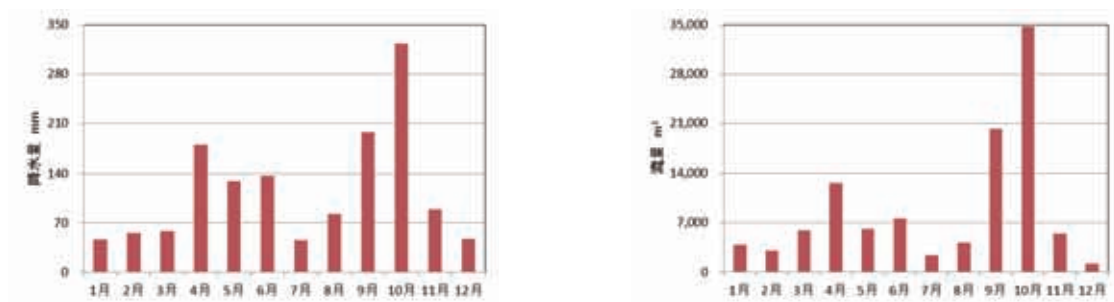


図 5-2-4 月別降水量及び流量（2013 年）

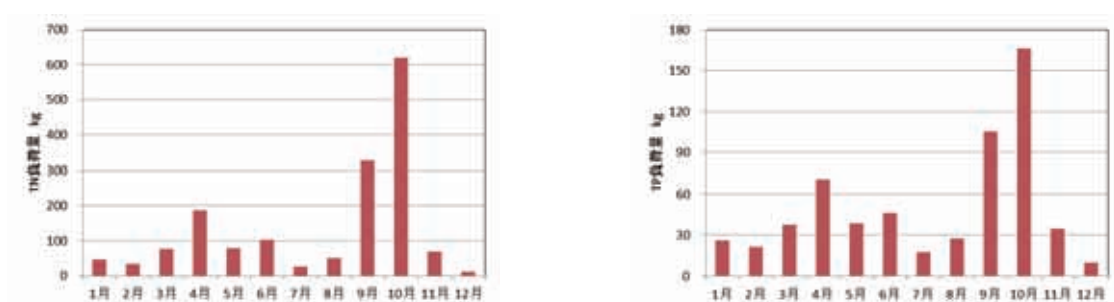


図 5-2-5 月別 TN 及び TP 負荷量（2013 年）

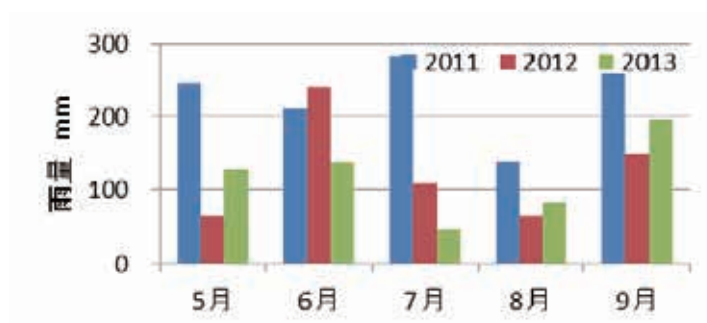


図 5-2-6 月別降水量

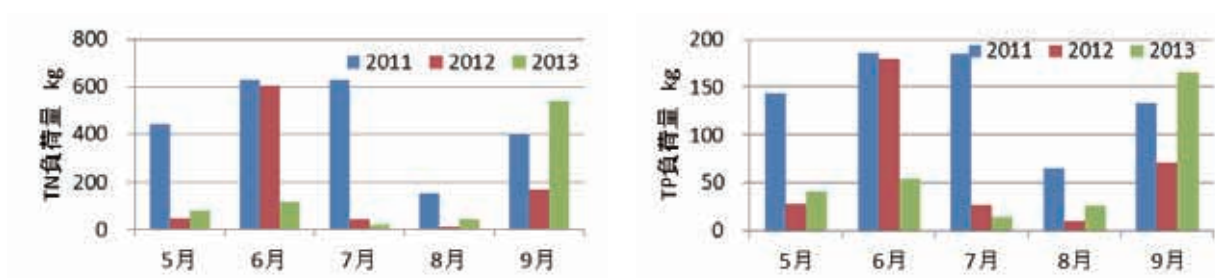


図 5-2-7 月別 TN 及び TP 負荷量

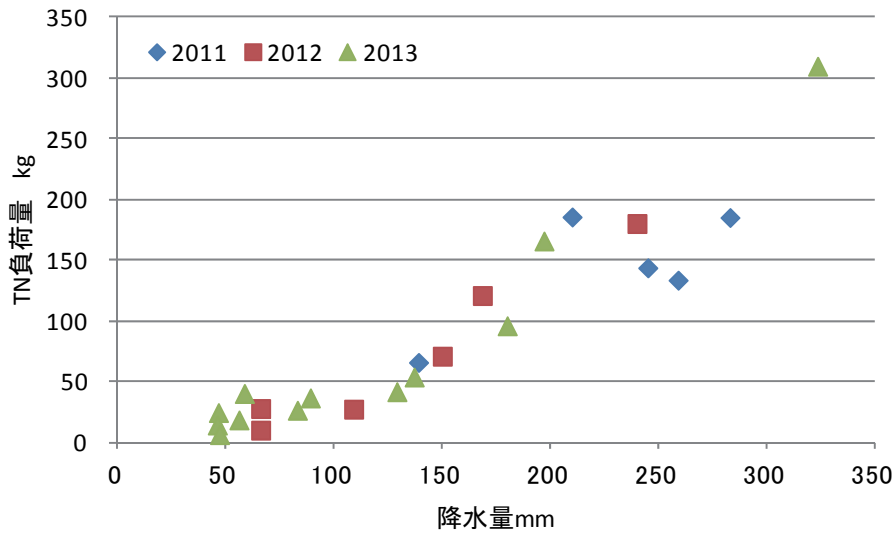


図 5-2-8 降水量と TN 負荷量

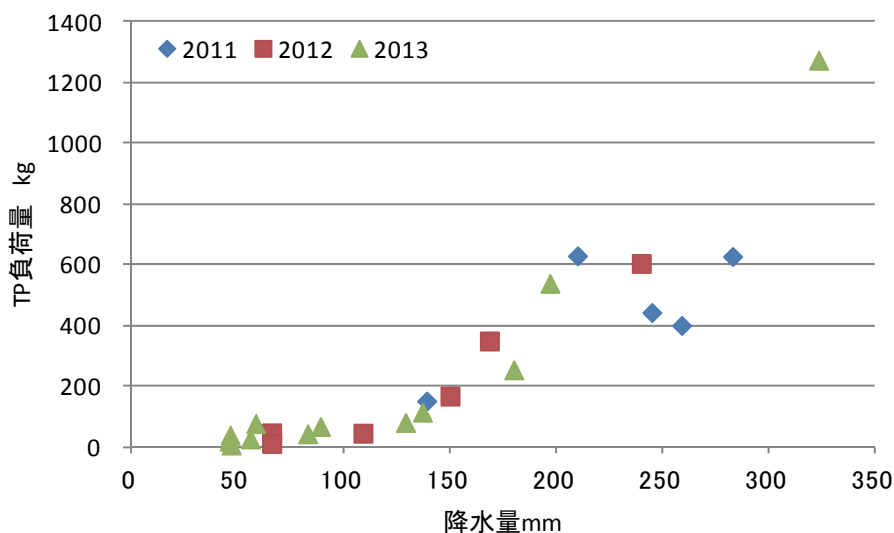


図 5-2-9 降水量と TP 負荷量

2013 年 1 月から 12 月までの各月の降水量，総流量及び負荷量を図 5-2-4，図 5-2-5 に示す。9 月と 10 月は台風接近に伴う大雨の影響で，降水量が年間の約 37%（9 月：197 mm，14%，10 月：324 mm，23%）を占めた。そのため，河川の流量が増加し，9 月の総流量は $2.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ ，10 月の総流量は $3.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ と年間の約 50%を占めた。TN 負荷量では 9 月は 327 kg，10 月は 620kg と年間の約 58%も占めており，大部分がこの 2 か月で流出していることが明らかとなった。TP 負荷量では，9 月は 105kg，10 月は 166kg と年間の約 45%を占め，TN と同様の結果が得られた。

三河湾の赤潮や青潮が発生する夏季の期間に着目するために図 5-2-6，図 5-2-7 に 2011 年，2012 年，2013 年の 5 月から 9 月までの各月の降水量，TN 負荷量，TP 負荷量を示す。2013 年は梅雨の時期に

は降水が少なく、2011 年と比較しても約 1/3 の降水量で、7 月に至っては 1/10 の降雨しかなく東三河地域は大渇水であった。そのため、各負荷量は小さくなっており、2011 年の各月の負荷量に対して、TN 負荷量は 5 月、6 月では約 1/5、7 月に至ってはわずか 3%と負荷量が非常に少なかった。TP 負荷量は 5 月、6 月では約 1/3、7 月では 8%と TN 負荷量と同様に小さくなった。

図 5-2-8、図 5-2-9 に降水量と TN 及び TP 負荷量の関係を示す。降水量が多くなるほど負荷量が大きくなっていることがわかる。このことは、近年問題となっているゲリラ豪雨や猛烈に発達した台風の影響等で短時間に大量の雨が降ると、畑地からの表面流出に伴う栄養塩流出負荷量は降雨に大きく依存し、TN 及び TP 負荷量が増加することを示唆している。

5-3 港湾内に広がる河口干潟域の波と流れ

(1) 現地観測の概要

2012～2013 年に行った観測地点を図 5-3-1 に示す。図中の丸点で示した干潟上 2 地点 (L1-2, L2-2) およびその沖側 2 地点 (L1-4, L2-3) の計 4 地点において、水位変動と底層流速 (水平 2 方向) を観測した。L1 および L3 の沿岸方向距離はおおよそ 1 km 離れている。また、L1 から L3 までの 5 本の岸沖測線において、夏場の大潮干潮時 (2013 年 8 月 21 日) に断面測量を行った。

(2) 六条潟の地形

図 5-3-1 に示した L1, L15, L2, L25, L3 の計 5 測線における六条潟の岸沖断面図を図 5-3-2 に示す。各側線間は沿岸方向 (おおよそ南北方向) に約 500 m 離れている。断面測量は 2013 年 8 月 21 日大潮干

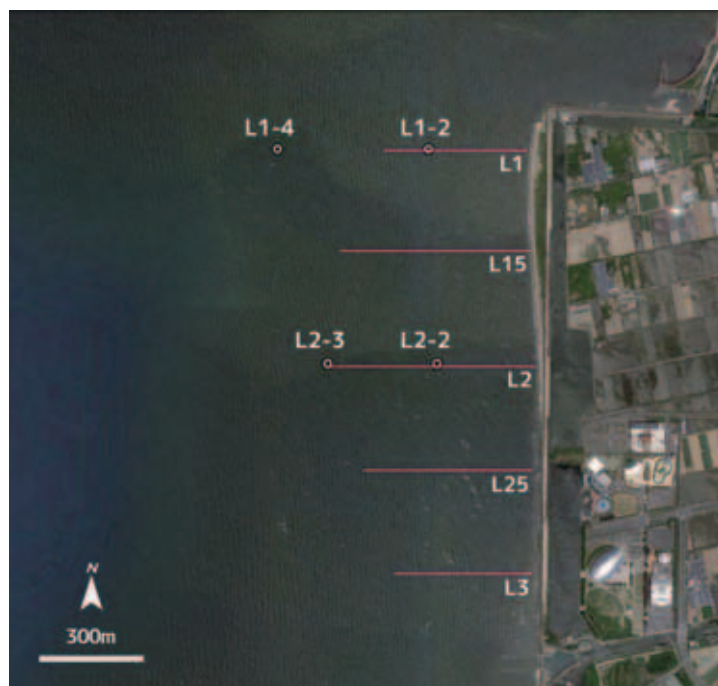


図 5-3-1 六条潟における計測地点

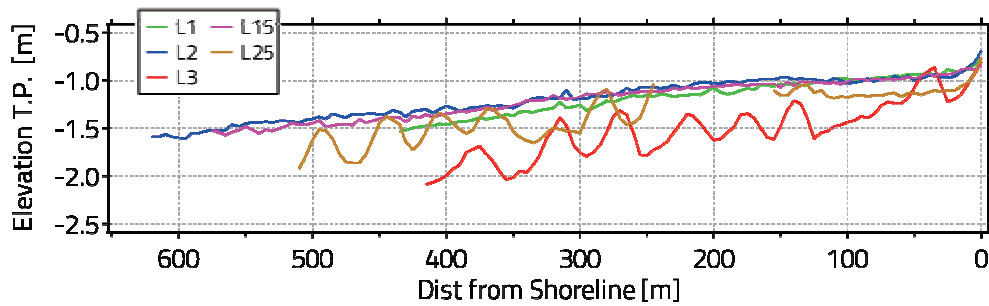


図 5-3-2 六条潟の岸沖断面地形図

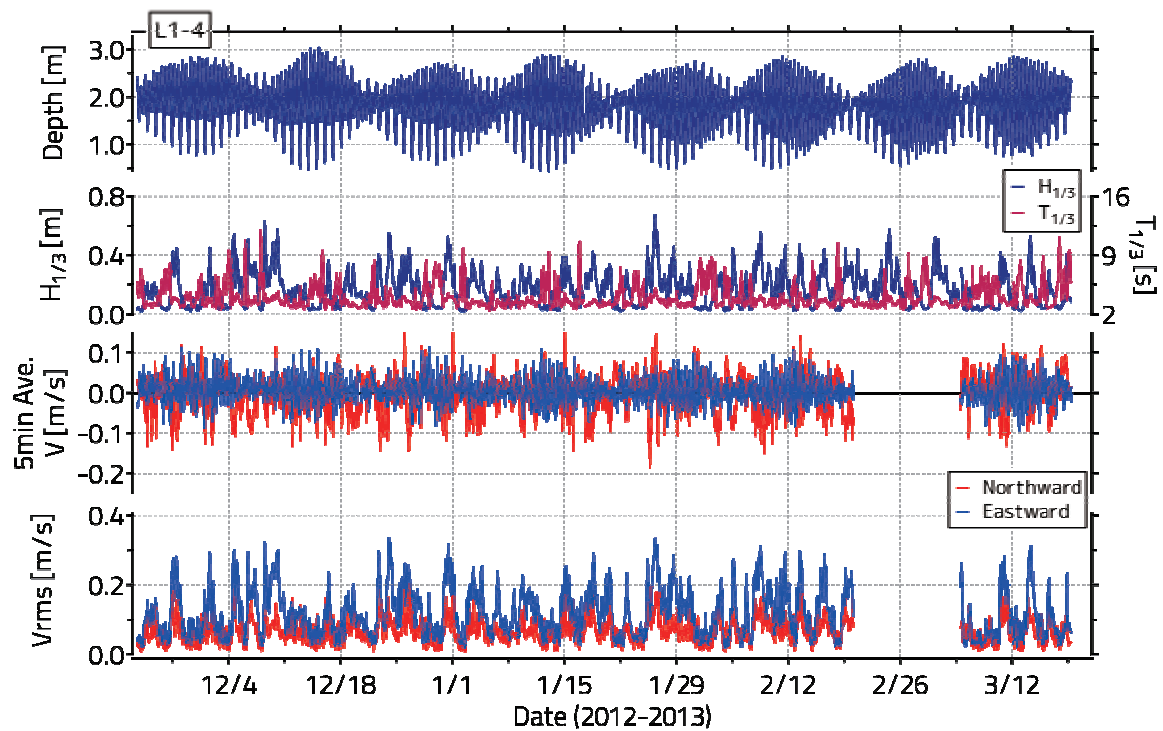
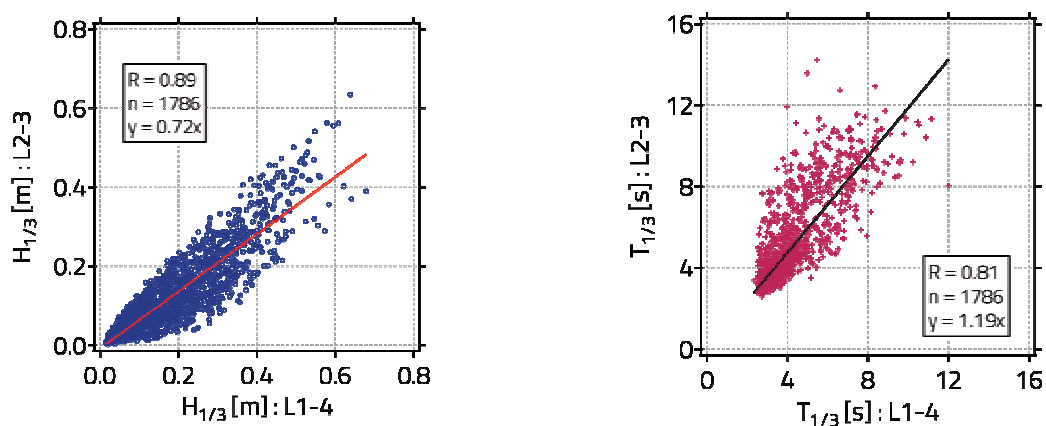


図 5-3-3 観測データ（水位・有義波高・有義波周期・流速）の経時変化（L1-4）



(a) 有義波高

(b) 有義波周期

図 5-3-4 L1-4 と L2-3 における有義波高と有義波周期の比較

潮時に行った。測量方法は、測量時の水深が 0.0 m の位置を汀線とし、測線に沿って沖向きに 5 m 毎の水深および計測時刻を記録しながら進む。後に観測潮位を用いて T.P.からの値に補正することで標高を得た。図は各側線の汀線を基準として北向きに見た断面として示している。なお、計 5 地点の汀線位置は最大で 20 m 東西方向に異なっている。図より、L2 より北側と南側で地形の特徴が異なることがわかる。L15 および L2 は汀線から 200 m 沖まではほぼ平坦であり、それより沖側で 1/700 程度の勾配で深くなっている。最も河口に近い L1 では、汀線から約 150 m 沖側より深くなっているものの、その勾配は L15 らとほぼ同等である。一方、干潟南側に位置する L25 および L3 は振幅約 0.5 m、波長およそ 50 m のサンドウェーブが見られる。地形勾配は南側へ向かうに従って急になり、L3 では平均勾配がおおよそ 1/400 である。この地形データはスナップショット的に取得したものであり、これ以上の考察には測量データの蓄積が必要である。しかしながら、六条潟での地形の特徴には空間的な違いがあり、標高の高低差も比較的大きいことが明らかとなった。このような特徴が現れる要因や地形変化の時空間スケールを明らかにすることは、干潟域の土砂動態を知る上では重要な情報であり、継続的な地形モニタリングが必要であることがわかった。

(3) 波と流れの観測結果

ここでは、L1-4 地点にて観測された水位変動および流速データを概観する。図 5-3-3 は L1-4 で観測された水位および流速より算出した毎正時からの 10 分間平均水位、有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ 、毎正時からの 5 分間平均流速、流速の変動成分の rms 値の経時変化を示している。これより、冬季の六条潟における有義波高 $H_{1/3}$ は 1 m に満たないものの、0.5 m 程度の波高はかなりの頻度で発生していることがわかる。有義波周期 $T_{1/3}$ は $H_{1/3}$ が小さい時に増大しているが、これは水位変動が小さい条件下での波別解析に起因するものであり、実際にはうねりのような波浪は来襲していない。平均流速については、南北成分が東西成分と比較して大きく、 $H_{1/3}$ に対応して増大している。また、南北成分の強い平均流速は南向きに多く発生している。東西成分については周期的な平均流速の増加が見られ、これは朔望の周期と一致する。流速変動の rms 値は $H_{1/3}$ に対応した増大と減少が見られ、その大きさは東西成分の方が大きい。また、rms 値で 0.3 m/s 程度の早い流速も頻繁に観測されている。

次に、干潟の北部 (L1-4) と中央部 (L2-3) で取得された波浪を比較する。図 5-3-4 は両地点での有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ をそれぞれ比較したものである。これより、L1-4 に比べて L2-3 で取得された波浪は、 $H_{1/3}$ が小さく $T_{1/3}$ が長い傾向にあることがわかる。L2-3 では計測機器の制約から L1-4 の 1/4 の頻度でしか計測されていないため、算出された波高は小さく、周期は長くなることから、これら両地点での観測値の違いは観測場所によるものよりも、波の周期に対する計測サンプリングの違いによる部分が大きいと考えられる。

(4) 潮汐に伴う流れと残差流

ここでは、干潟上の中でも干出することのない沖側 (L1-4 および L2-3) での冬季の流れについて、潮汐流とそれ以外の成分 (潮汐残差流) に着目した解析を行う。図 5-3-5 は L1-4 における潮汐流およ

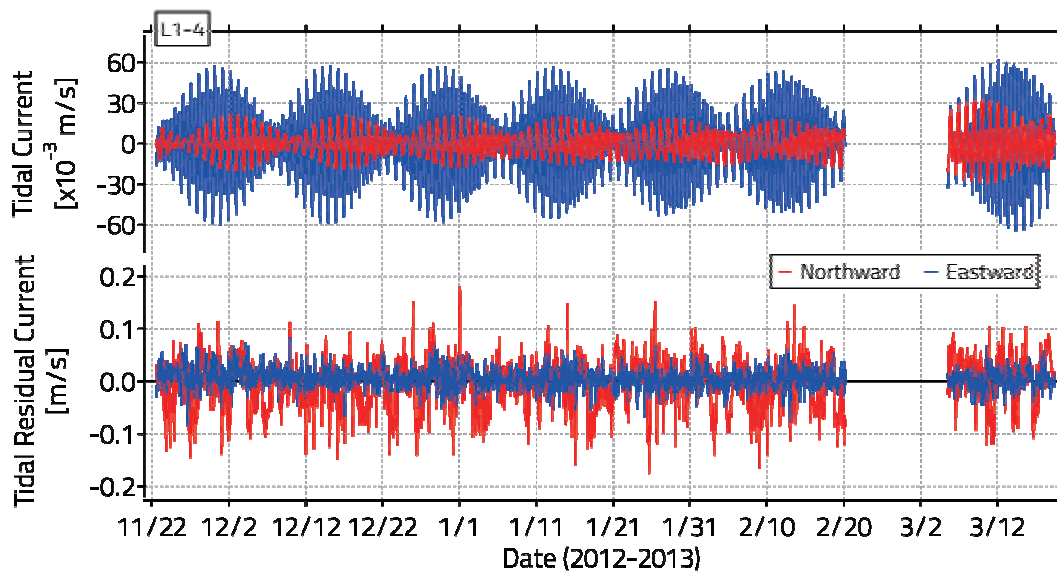


図 5-3-5 潮汐流および潮汐残差流の経時変化 (L1-4)

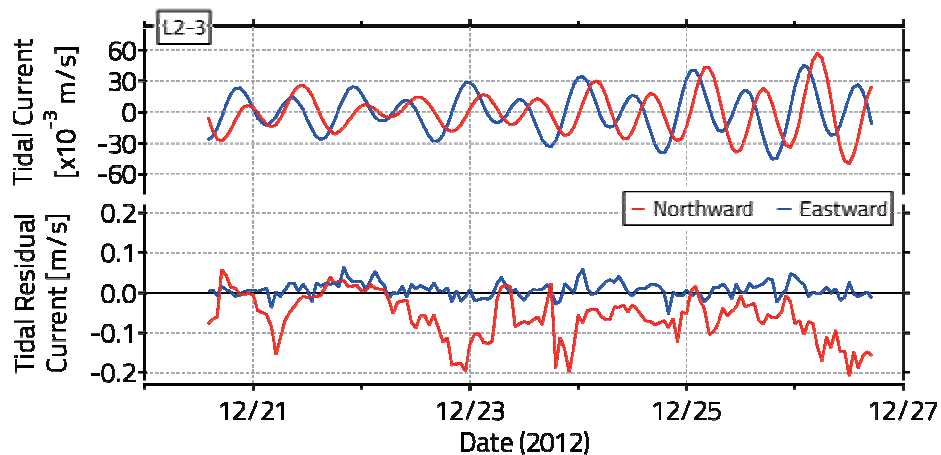


図 5-3-6 潮汐流および潮汐残差流の経時変化 (L2-3)

び潮汐残差流の経時変化を示したものである。潮汐流は観測流速（毎時の5分間平均値）の南北および東西成分毎に主要4分潮（ M_2 , S_2 , K_1 , O_1 ）で調和解析し、それら潮汐成分を再構成した時系列である。潮汐残差流は観測流速から潮汐流を差し引いたものであり解析期間中の平均流速は残差成分へ組み込んでいる。なお、2013年3月からの時系列については調和解析を行った期間が短い（3月5日～19日の約14日間）異なることに注意されたい。それ以前の流速データについては、2時間のメンテナンス時間（2回）を線形補間し、2012年11月22日～2013年2月20日までの時系列を構成して調和解析を行った。従って、この長期間の解析値がより正確な潮汐流を示していると言える。これより、潮汐流は東西方向成分が強く、その大きさ（振幅）は南北成分の2倍程度で大潮時において最大6 cm/sである。潮汐残差流は南北成分が卓越しており、南向きに0.1 m/s程度の残差流が生じている頻度が高いことがわかる。

図 5-3-6 は L2-3 における潮汐流および潮汐残差流の経時変化を示したものである。図 5-3-5 と同様

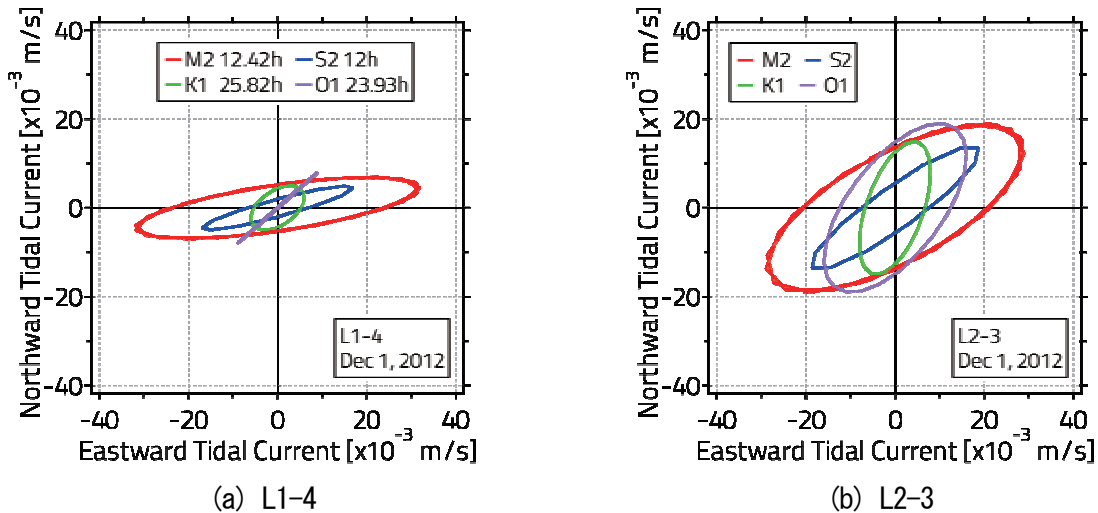


図 5-3-7 L1-4 と L2-3 における主要 4 分潮の潮流楕円

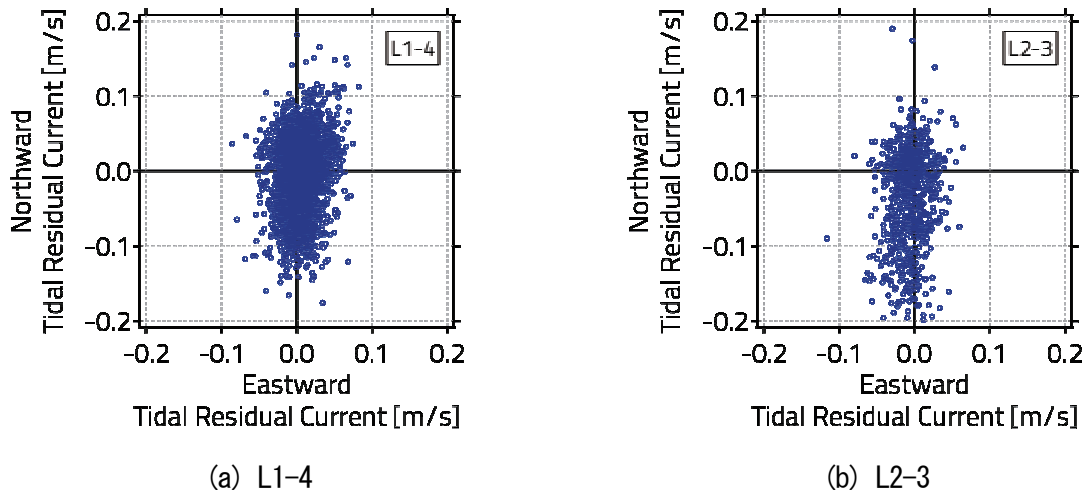


図 5-3-8 L1-4 と L2-3 における潮汐残差流の位相面プロット

の処理を行ったっているものの、各計測期間が 14 日に満たないため調和解析の結果については正確性に欠けると考えられる。特に 2012 年 12 月の計測期間は 6 日間しかない。これより、潮汐流の東西方向成分は L1-4 と同じく最大で 6 cm/s であり、東西（岸沖）の周期の長い流れは潮汐に起因する変動成分が卓越していることがわかる。一方、南北成分については東西成分を上回る流速があり、L1-4 の結果（図 5-3-5）と比較しても調和解析結果に疑問が残る。

図 5-3-7 は L1-4 および L2-3 における潮流楕円を、主要 4 分潮について示したものである。L1-4 における潮流楕円（図 5-3-7(a)）は、M2 および S2 の半日周期成分が主に東西方向に強く現れており、長軸方向がやや北に傾いているのは河川（豊川）への入退潮に関連していると考えられる。K₁ および O₁ の日周期成分については北東-南西方向が長軸となっており、南北成分の潮汐流も東西方向のそれと同等の大きさであることがわかる。L2-3 における潮流楕円（図 5-3-7(b)）は、それぞれの分潮の長軸が L1-4 と比較して北に傾いており、扁平率は小さい。L2-3 は干潟中央部に位置しており、河口方

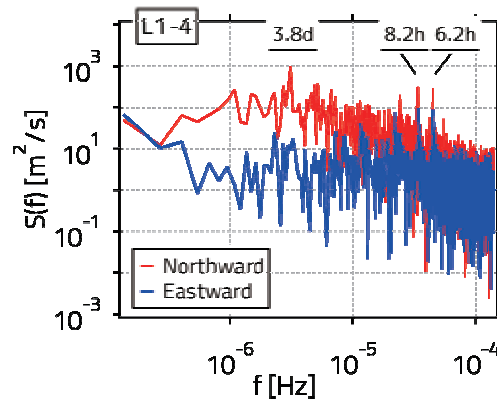


図 5-3-9 L1-4 における潮汐残差流のパワースペクトル

向への潮汐流は不自然ではない。日周期の潮汐流については L1-4 と比較して南北成分が大きいですが、これは解析期間が短いため北西からの冬季の季節風の日周期変動の影響が含まれている可能性もある。いずれにせよ、L2-3 の潮汐流について議論するためには長期の連続観測データが必要であろう。

図 5-3-8 は L1-4 および L2-3 における潮汐残差流を位相面プロットで示したものである。両地点とも南北方向に強く、おおよそ南向きへの残差成分が強い傾向がある。ただし、極短期的には北向きにも大きな残差流 (0.15~0.2 m/s) が見られる。東西成分は約 0.05 m/s の範囲に収まっており、潮流楕円の値 (図 5-3-7) からも潮汐流の占める割合が高いことがわかる。図 5-3-9 は L1-4 における潮汐残差流の東西および南北方向成分についてのパワースペクトルを示したものである。対象とした潮汐残差流は 2012 年 11 月 22 日からの 2048 時間分のデータである。これより、半日程度の変動エネルギーについては、両方向成分ともに同様のピークが現れており、エネルギーも比較的同等である。変動が長周期になるに従って南北方向成分のエネルギーが大きくなっており、約 3.8 日周期での変動にピークが見られる。これは、大陸からの移動性高気圧や低気圧が交互に日本付近を通るため変化する秋の天気周期 (3~4 日程度) とおおよそ一致する。これらより、潮汐残差流の南北成分は天候の変化に伴った流れが支配的であることが明らかになった。