

(28) 干潟システムによる養魚場排水の浄化に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PURIFICATION OF
FISH-POND WASTEWATER BY TIDAL FLAT SYSTEMS

徐 開 欽*, 藤 沼 紀 敏*, 須 藤 隆 一*

Kai-Qin XU*, Noritoshi FUJINUMA* and Ryuichi SUDO*

ABSTRACT: Wetlands in estuary areas supply an important resting and feeding place for migratory birds. The preservation of these wetlands has been focused in recent years. A simulated tidal flat system was established to evaluate the treatment characteristics of fish-pond wastewater which was rich in Chl-a, SS, COD, nitrogen and phosphorus, and was directly discharged to the wetland. The results from both batch and continuous experiments indicated that the removal of suspended substances including SS, Chl-a was quite high, and the removal of organic matter, nitrogen and phosphorus was simultaneously recognized. The removal rates of COD, TN and TP were found to be 180, 120 and 18mg/m²/day, respectively. It indicated that sandy sediments of tidal flat played an important role in purification of fish-pond wastewater. However, if the tidal flat sediments are disturbed, the purification ability such as denitrification will be dropped significantly.

KEYWORDS : COD, fish-pond wastewater, nitrogen, phosphorus, removal rate, sediment, tidal flat

1. はじめに

干潟は、海域と陸地の接点に位置しており、それ故、特異な環境を形成している。潮汐による干満の繰り返し、波浪による砂泥の巻き上げ、陸地からの淡水の流入とそれに伴う栄養塩の供給、土砂類等の堆積など変化の著しい環境となっている。生息している生物にとっては厳しい環境であり、特に、干潮時には、夏場では高温と乾燥に、冬場では厳しい寒さと凍結に見舞われることになる。波浪の攪拌力による水中への酸素の供給、干出による砂泥中への酸素の供給、日光の透過による魚類や底生動物の餌となる藻類の繁殖、流入河川や波浪による栄養塩類や餌となる豊富な有機物、栄養塩類の供給などである。生物にとって、このような有利な条件は、上述したマイナス要因を補ってもあまりあるといえる¹⁾。また、干潟は古来より生産力および浄化力が高い場所として知られており、各種生物の重要な生息場所を与え、栄養塩の再生、水の浄化、沈澱物の捕捉、景観、高潮の防御、海岸の安定化等に重要な役割を果たしている。しかし、このような自然環境は1950年代の高度成長時から、多くの干潟が埋め立てられ、今日では戦前の干潟面積の約4割を失っている^{2,3)}。このため、干潟を生育場としているアサリ等の二枚貝やクルマエビなどの浅海性魚介類の生産が減少し、漁業関係者から干潟の重要性が指摘された。最近では渡鳥の保護のような漁業以外の分野からも干潟の重要性が指摘されてきた⁴⁾。

七北田川河口左岸に発達する蒲生干潟は日本における有数のシギ・チトリ類の飛来地として知られており、しかも仙台新港、臨海工業地帯と隣接していることから、いわゆる保護と開発の問題を抱えた場となっている。このように蒲生干潟は現代の社会的、学問的課題を抱えた生態系であるために、保護と開発が相克している場のモデルとして宮城県のみならず広く全国から注目されてきた。このような背景もあって栗原を中心とした研究グループは1970年代前半より現在に至るまで生態学、生物学、物理学、化学、水理学等の多方面にわたって研究・調査を進めてきた^{5,7)}。栗原は干

* 東北大学・工学部 Department of Civil Engineering, Tohoku University

潟および潟、ヨシ原、砂丘を含む蒲生生態系の維持・変化のメカニズムについて詳細な研究を行ない、シギ・チトリが干潟に飛来するための条件として、干潟のもつ立地条件や土壌特性のほかに、彼らの餌である底生動物の種類と量、採餌場所となる干潟の面積が重要出、蒲生干潟に供給される養魚場の排水中の有機物が、河口部および干潟内での水の流動によって、干潟を適度に富栄養化し、底生動物の生産量を高め、その底生動物がシギ・チトリの好適な餌になっていることを指摘した。

一方、現在の蒲生干潟の問題点としては、蒲生干潟の奥部の有機物汚染、軟体の堆積・浅化、ヨシ原の張り出し、水交換の悪化、底生動物相の劣化等が挙げられる。このように、渡鳥の餌条件を好適に維持するためには、水の流動特性を望ましい状態に制御して、満潮時と干潮時との水位差を大きくし、塩分濃度を適性条件に保つと同時に、浅化、ヨシ原の張り出し、軟体の堆積、水質汚濁特に有機物、栄養塩等の過度の汚染を抑制することが不可欠である。河口・沿岸域の自然生態系による水質浄化機能を維持、活用するための手法を確立するには、干潟の水質浄化特性の把握が重要と考えられる。筆者らは砂質干潟と泥質干潟を対象に室内実験を通じて、養魚場排水が干潟の酸素消費特性に与える影響が大きいこと、砂質干潟の栄養塩の変換特性の方が優れていることなどを報告した⁸⁾⁹⁾。そこで、本研究では蒲生干潟と実際のこの干潟に流入する養魚場排水を焦点を当て、現場砂質干潟底質を用いて、干潟モデルシステム（疑似現場実験）を構築し、養魚場排水の流入の有無による干潟の水質浄化機能について検討を行なうこととする。

2. 実験方法

2.1 対象現場の概要

疑似現場の対象は宮城県仙台湾に面する蒲生干潟である。Fig.1 にはその概要を示している。蒲生干潟は仙台市の北縁を流下する七北田川が仙台湾に注ぐ河口の左岸に発達した約30haの小さな汽水性の干潟で、日本における有数のシギ・チトリ類の飛来地として知られている。また蒲生干潟は養魚場から排水や汚濁度の進んだ七北田川の河川水を受け入れており、汚濁の進行しつつある干潟である。干潟の陸域部では20haの養魚場があり、平均7,000ton/dayの排水が干潟に放流されている。Fig.2 には蒲生干潟の底質の分布を示した。底質は大きく砂質、砂泥質、泥質、黒色軟泥質とに分けられ、砂質と砂泥質が大部分を示している。河口に近いところでは砂質と

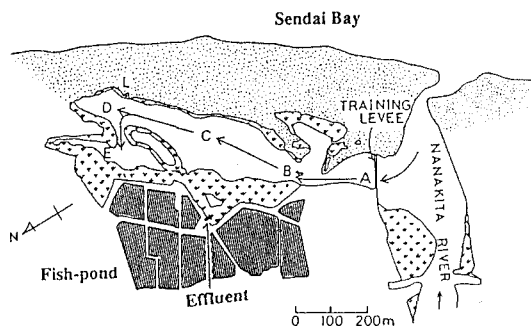


Fig.1 Study area of the Gamo tidal flat
A, B, C, D, and E show the sediment sampling Stations ;
Arrows show the direction of tidal current at flood tide.

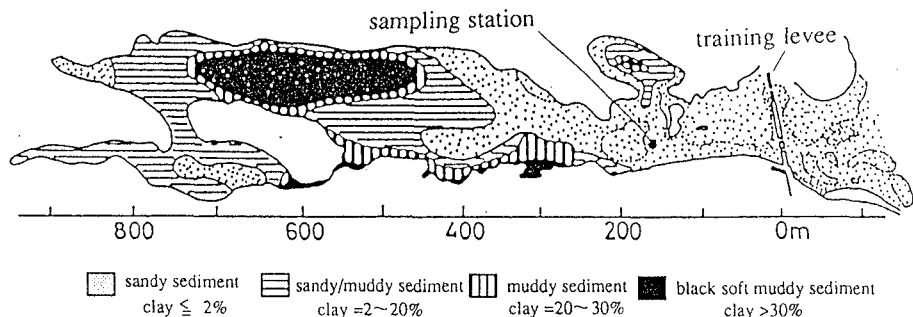


Fig.2 Distribution of composition of Gamo tidal flat sediment

っており、潟の奥部または養魚場排水の流入部付近では、泥質か黒色軟泥質になっている⁹⁾。

2.2 実験装置

干潟底泥における一潮干満の間の汚濁物質の挙動と環境条件の変化による汚濁物質の挙動を見るためにモデル実験装置を（疑似現場実験）を構築した。疑似現場実験装置はできるだけ干潟の潮位干満の特徴を表せるような実験装置を考案した。Fig.3には実験装置の概要を示した。実験水槽（30x40x30cmのアクリル製水槽）を蒲生干潟現場に運び、砂質底泥をスコップで順序に底から15cmまで敷き詰めた。水槽の一端は水が側面から行き来できるように透水板を設けた。潮汐の干満の調節はマイクロポンプとタイマーで交代で運転できるように調節した。干潟の表面は緩やかな勾配（1%）を持ち、表面積は約0.12m²とした。流量は水槽の容量と満潮時の水深（12cm）を考慮して50ml/minとし、一潮の間（6時間）水槽に流入する原水の量は18リットルになっている。光条件は1日12時間明暗交代をタイマーで制御した。実験は1日2回の潮汐の干満周期と12時間周期の明暗条件に伴って同現場原水の流入系と養魚場排水の流入系、またろ過した養魚場排水の添加系などを用いて、露出と水没のサイクルを繰り返し、定期的あるいは干満時の栄養塩の挙動を調べた。また干満時の水質を追跡、分析し、干潟の水質浄化機能を評価した。なお、供試した砂質底泥の粒度分布特性をFig.4に示した。

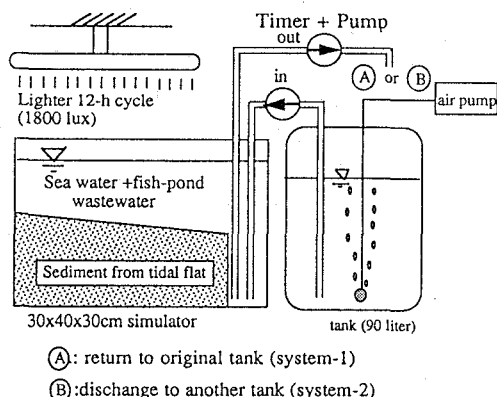


Fig.3 An outline of experimental systems

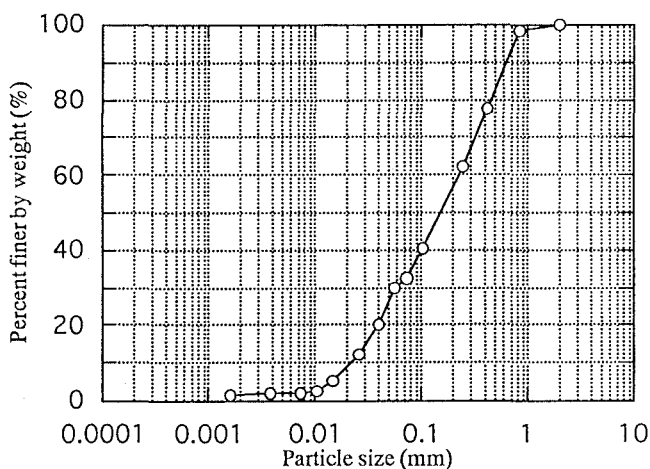


Fig.4 Particle size distribution curve of sediment used

2.3 実験系および実験条件

実験は疑似現場実験装置を用いて、回分実験と連続実験の2通り行った。

(1) 回分実験 (System-1)

回分実験はある一定期間における干潟の水質変化特性を見るために行った。干潮から満潮にかけては、（上げ潮時）供試原水タンクからポンプによって試水をモデル実験槽に供試し、満潮から干潮にかけては（下げ潮時）水槽の水が同じ供試原水タンクに戻るようにした。実験期間中は原水タンクの水質を均一に保つためにばっきを行った。また、採水方法と採水時間は常に一定間隔で原水タンクの水質を測定した。供試試水については、汽水のみの系（CASE-1）、養魚場排水の添加系（CASE-2）を用意した。また養魚場排水が干潟に流入した場合、多くの植物プランクトンが入っていることから、疑似現場の回分実験では、養魚場排水をろ過した実験系との比較も行なった。さらに、底泥が安定している系と底泥が一時的に攪乱した系の比較をするために、2系列の疑似現場装置の片方の底泥をかき混ぜて攪乱させ、同様の原水を用いて干潟の

浄化特性に与える影響についても回分実験で調べた。何れの実験系とも原水タンクの供試原水は54リットルに調整した。

(2) 連続実験 (System-2)

連続実験では、回分実験の結果をふまえて、干潟の一潮干満における水質の変化を見るために行った。従って、干潮から満潮にかけては（上げ潮時）供試原水タンクからポンプによってモデル実験水槽に供給し、満潮から干潮にかけては（下げ潮時）水槽の水が別のタンク（供試原水タンクと異なるタンク）に流れるようになっている。

採水方法は実験開始から12時間までの干満一サイクルの間に、0、3、6、9、12時間目の採水を行った。採水は連続的に追跡するため、原水タンクからモデル水槽へ、またモデル水槽から排出タンクへと場所を追って行った。実験開始時（0時間目）は原水タンク内の水質、上げ潮中点（3時間目）のモデル水槽内の水質、満潮時（6時間目）は水槽内の水質、下げ潮中点（9時間目）は水槽から排出タンクに蓄えた3時間分の水の水質および次の干潮になるまで（12時間目）の残り3時間分の下げ潮の水の水質を分析した。この行程を連続して72時間続けて行なった。供試試水は実験系によって、汽水のみの系（CASE-3）、養魚場排水を一定の割合を添加した系（CASE-4）に分けられている。

モデル実験に供試した干潟底泥の平均含水率（W.C.）と強熱減量（I.L.）はそれぞれ30%と2.5%となっている。実験は現場底泥をモデル実験装置に敷き詰めた後、安定まで約1ヵ月現場の原水で連続的に運転してから、開始した。実験期間は1994年7月より1994年12月までとした。実験系と実験条件はTable 1に示した。

2.4 測定項目および分析方法

注目する水質項目は水温、pH、SS、Chl-a、有機物（ COD_{Mn} 、TOC）、TN、TP、DTN、DTP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 等である。分析方法は下水試験法に準じて行なった。

3. 実験結果と考察

Table 1 Experimental systems and conditions

Run	Symbol	Water used	Experimental Conditions
System-1	Case-1	Lagoon water	Batch test
	Case-2	Lagoon water + Fish-pond wastewater	
System-2	Case-1	Lagoon water	Continuous flow
	Case-2	Lagoon water + Fish-pond wastewater	

Table 2 Characteristics of fish-pond wastewater used in experimental systems-1 and 2

Item	pH	SS	Chl-a	COD	TOC	DOC	TN	TP	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_x\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$
min	8.0	12	200	10	5.0	4.2	1.2	0.5	0.4	0.1	0.05
max	8.5	141	980	38	14.9	8.5	5.5	1.5	2.5	2.6	1.1
mean	8.3	52	540	20	11.0	7.0	2.5	1.1	1.0	1.2	0.6

Unit: mg/l except pH and Chl-a (ug/l)

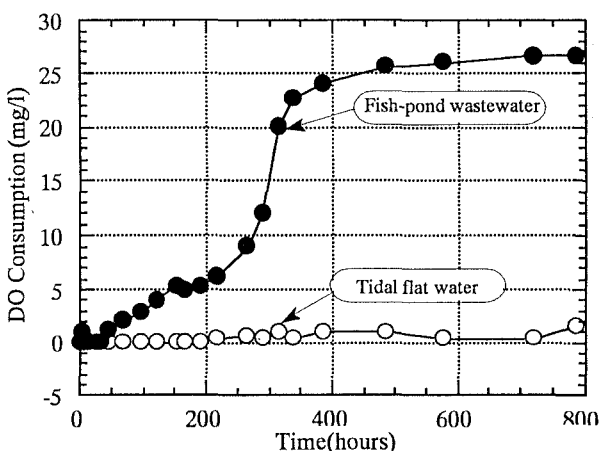


Fig.5 Variation of DO consumption of the fish-pond wastewater

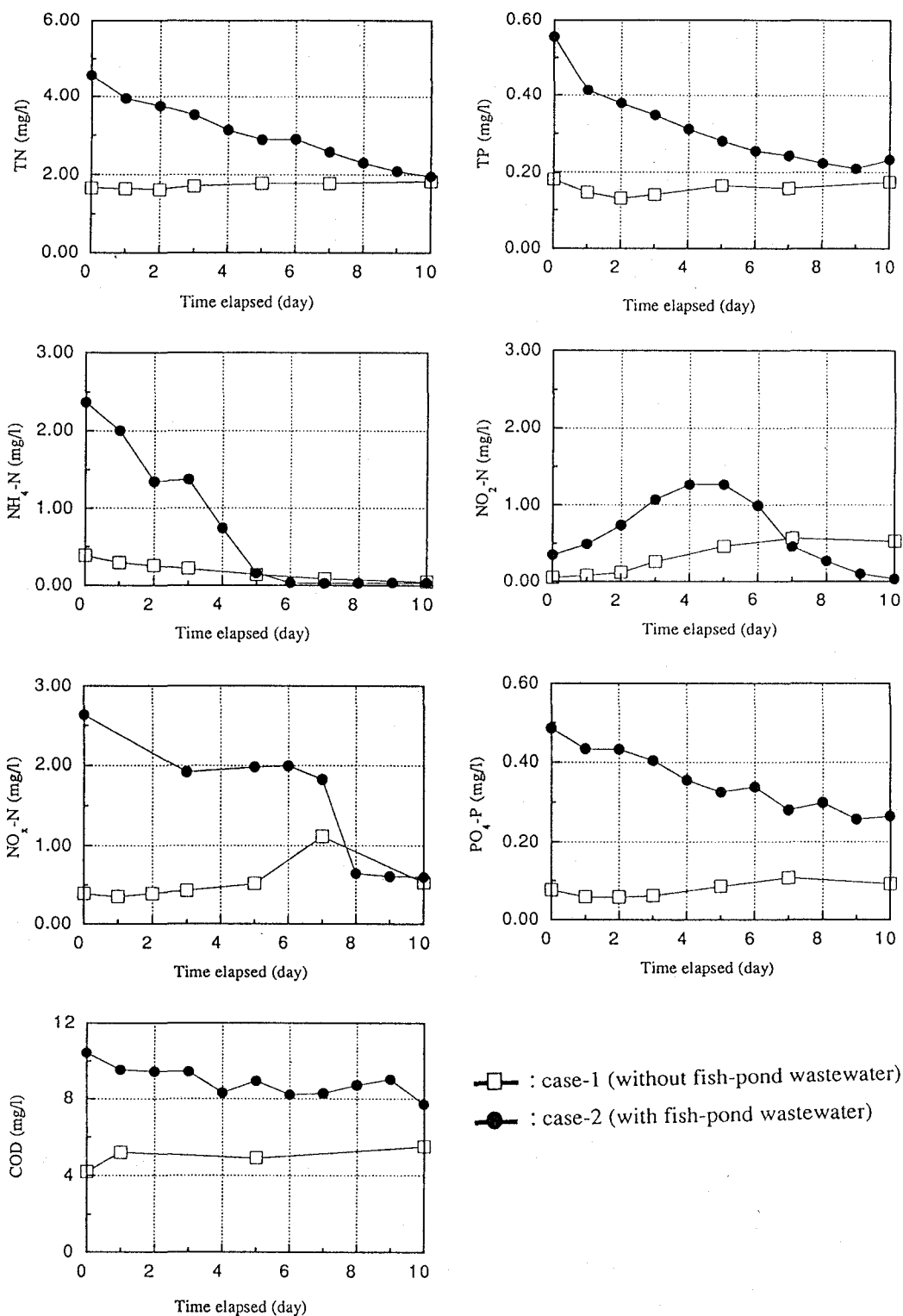


Fig.6 Concentrations of TN,TP,NH₄-N,NO₂-N,NO_x-N,PO₄-P,and COD during the experimental period in system-1

回分実験と連続実験とも、水温20℃の恒温室内で行い、実験期間中の水槽中のpHは7.8～8.2の間、DO濃度は5.0～8.0mg/lの間（好気条件）となっていた。供試養魚場排水の水質はTable 2に示している。この表から養魚場排水には多量の植物プランクトン、有機物、栄養塩が含まれていることが明かである。またFig.5には養魚場排水と干潟汽水の酸素消費特性を示した。BOD Testerによる養魚場排水の酸素消費は明らかに干潟汽水より大きいことがわかった。

3.1 疑似現場実験－回分実験の結果

Fig.6にはそれぞれ養魚場排水の入っていない系（CASE-1）と養魚場排水の入った系（CASE-2）における実験期間中のTP, TN, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, CODの経時変化を示している。養魚場排水の入っていない系においては、元々現場に馴致している汽水が濃度も低く、干潟システムとの間平衡状態に達しているため、無機態窒素を除いて、その他水質項目の大きな変動は殆ど見られなかった。一方、養魚場排水の入った系ではある期間の循環によって、すべての水質項目において、干潟システムによって除去されていることが認められた。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、実験開始から5日目までほぼ時間に比例して減少していた。除去速度は単位時間（日）単位干潟面積（ 0.12m^2 ）当りに減少した量（減少した濃度 × 供試原水（54リットル））に換算すると約 $230\text{mg/m}^2/\text{day}$ になる。5日目以降は 0.10mg/l に落ちついた。それに対して、 $\text{NO}_2\text{-N}$ は硝化によって増加したが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はむしろ減少傾向が認められた。これは干潟において硝化と脱窒が同時に起こっていることが考えられる。TNの結果から見ても、実験期間中 4.6mg/l から 2.0mg/l に減少し、56.2%の除去率を示した。除去速度は単位時間単位干潟面積当りに換算すると約 $120\text{mg/m}^2/\text{day}$ になる。TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、それぞれ経過日数とともに初日は 0.5mg/l 、 0.6mg/l 、10日目にはおよそ 0.28mg/l 、 0.2mg/l となり、除去率は44%、70%であった。その間の除去速度はそれぞれ約 $18\text{mg/m}^2/\text{day}$ 、 $11\text{mg/m}^2/\text{day}$ であった。CODの減少は比較的緩やかで、平均除去速度は $180\text{mg/m}^2/\text{day}$ となり、最初の4日間の除去速度は $240\text{mg/m}^2/\text{day}$ となった。

またここでは図示しないが、養魚場排水をろ過した系とそうでない系の結果より、ろ過の有無にかかわらず、各水質項目の濃度の差があったものの、除去速度が両者の間に差が見られなかったことから、硝化などは養魚場排水のSS等に付着している微生物によって行われているわけではなく、主として干潟底泥に生息している微生物によって行われることが分かった。

攪乱された干潟底泥が水質浄化にどのような影響を受けるかをするために、疑似現場実験に供した底泥を実験開始する前に、全体的に攪乱し、攪乱していない系との比較実験を行なった。その結果の一例(TIN, $\text{PO}_4\text{-P}$)をFig.7示した。攪乱した系とそうでない系を比べると、TINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の除去率はそれぞれ52%、82%と16%、44%となっている。底泥を攪乱すると窒素とリンの除去率が低下することが認められた。したがって、底泥が攪乱されることによって微生物に何らかの影響を与え、水

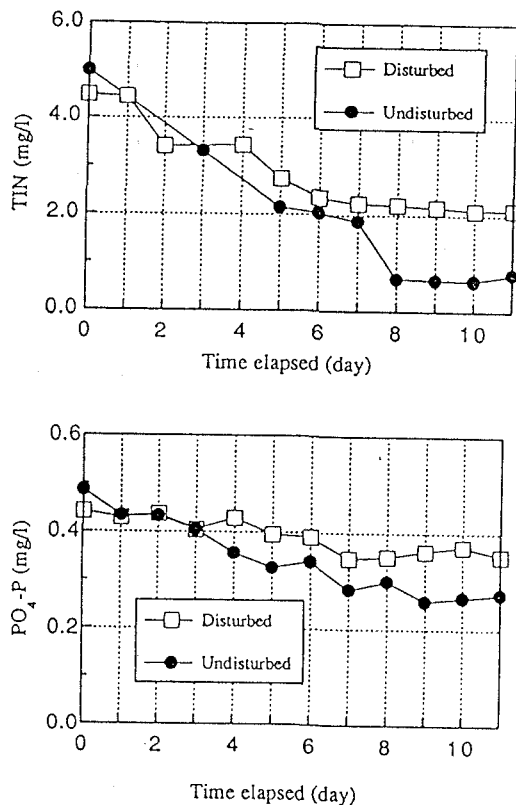


Fig.7 An example of variation of TIN and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration under the condition of tidal flat sediment disturbed

質浄化機能の低下を招いた可能性があるを示唆した。

このように、干潟に流入する有機物や栄養塩類のような汚濁物質は、主として潮汐作用によって表面水が底質内を通過する際の物質交換、ろ過により除去されることが判った。すなわち底質粒子間での吸着、ろ過などの物理化学的な浄化と、分解、捕食をはじめとした底生生物の活動エネルギー取り込まれる生物学的除去が、同時に行なわれてる為と考えられる。蒲生干潟による養魚場排水の除去速度は佐々木の報告⁴⁾やKnightら¹⁰⁾, Sikoraら¹¹⁾の報告とほぼ同じ範囲の値となった。干潟に生息する生物が植物連鎖過程や底質環境のなかで、流入した有機物の分解、除去する役割を担っていることが再確認できた。

3.2 疑似現場実験－連続実験の結果

連続実験は、回分実験の結果をふまえて、干潟の一潮干満における水質の変化過程を見るために行った。Fig.8にはそれぞれCASE-3とCASE-4における実験期間中のSS、Chl-a、TIN、PO₄-P、NH₄-N、NO_x-N、CODの経時変化を示している。干潮から満潮、また満潮から干潮に戻る（計12時間）間、供試タンクから定量ポンプによって実験水槽へ、また実験水槽より排出していく過程で、養魚場排水を入った系(CASE-4)ではSS、Chl-a、COD等の水質項目は大きく減少しており、TIN、PO₄-Pについても対照系（CASE-3）より減少したことが認められた。一方、対照系では流入濃度が低いためその減少が小さかった。このことから、砂質干潟では栄養塩成分を含んでいる養魚場排水が流入した場合、潮の干満の過程で栄養塩成分が干潟底泥によって除去されることがわかった。これらの減少は流入した懸濁態物質が砂層を通過した際に抑留されたためと考えられる。また溶存態成分であるTIN、PO₄-Pなども同様に養魚場排水の入った系では減少の傾向を示したが、対照系ではほとんど変化がなかった。一潮干満の間でも硝化や脱窒反応が起こっていることが認められた。

一潮干満（12時間サイクル）の間養魚場排水の項目別の平均除去率を見ると、Table 3に示しているとおりである。養魚場排水の流入する系CASE-4において、NH₄-Nが30%、NO₂-Nが19%、NO₃-Nが21.6%、PO₄-Pが40.5%、TOCが41%、CODが44.4%、SSが72.6%、Chl-aが84.6%となり、CASE-3より大きな除去率を示した。また本実験においては、NH₄-Nが0.436mg/l、PO₄-Pが0.089mg/lと干潟汽水に対しても除去率がそれぞれ22.4%、30.2%と現場干潟においても常日頃から浄化が行われていることがうかがえる。特に有機物COD、TOCの単位時間、単位面積当りの平均除去速度が大きく、2100、680mg/m²/dayとなった。またTIN(NO_x-N+NH₄-N)、PO₄-P、Chl-aの除去速度はそれぞれ75、48、120mg/m²/dayと高いことが認められた。これは蒲生干潟のもつ水質浄化能は高いことを意味し、現在でも干潟に放流し続けている養魚場排水に耐えている原因の一つと言える。

Table 3 Average removal of fish-pond wastewater during one cycle of current tide in System-2 (Case-4)

	Items (%)							
	COD	NH ₄ -N	NO _x -N	TIN	PO ₄ -P	SS	Chl-a	TOC
Removal	44.4	30.0	21.0	22.0	40.5	72.6	84.6	41.0

以上のように実際に養魚場排水の流入を受けている干潟砂質底泥を用いて、疑似現場実験を通じて、養魚場排水が干潟の水質の挙動について検討してきた。その結果、懸濁成分が多く含まれている養魚場排水が干潟システムに流入した場合、一潮干満サイクルを通じて干潟底泥によって除去されたことが明らかになった。また溶存態成分であるPO₄-Pなども同様に養魚場排水の入った系では減少の傾向を示したが、対照系ではほとんど変化がなかった。一潮干満の間でも硝化や脱窒反応が起こっている可能性が示された。干潟に流入する有機物や栄養塩類のような汚濁物質は、主として潮汐作用によって表面水が底質内を通過する際の物質交換、ろ過により除去されることが判った。

また砂質干潟においては流入水が底質内を移動しやすく、汚濁物質の吸着、分解等が起こる割合が大きいと予想される。今後、砂質干潟を中心に、干潟底質に付着する微生物の挙動、養魚場排水が干潟に与える影響等についてさらに検討する必要がある。また、攪乱した干潟生態系と安定した

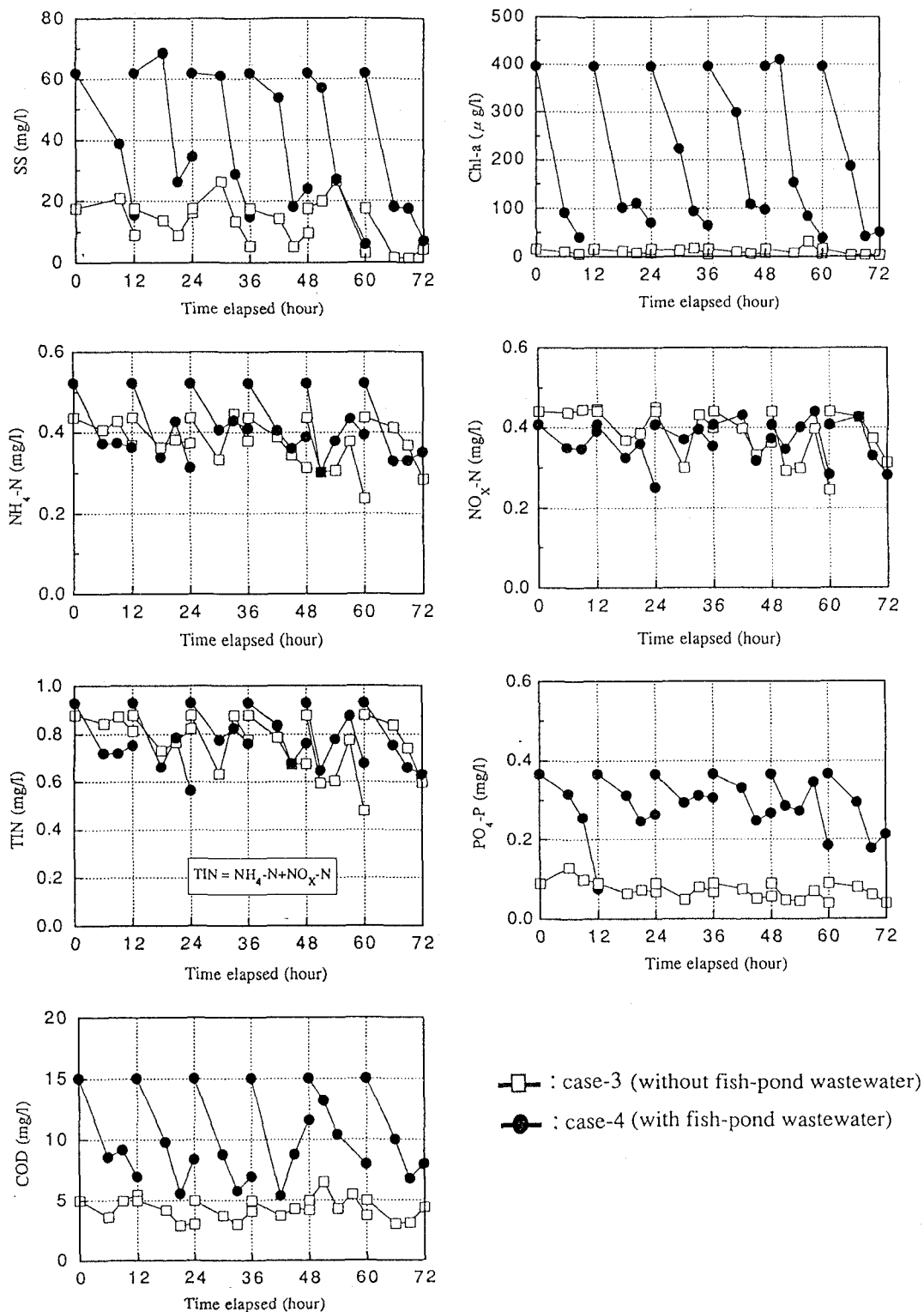


Fig.8 Concentrations of SS,Chl-a, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$,TIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, COD during the experimental period in system-2

系の実験結果より、干潟システムの底泥が攪乱されることによって窒素やリンの除去率が低下することから、干潟生態系に人為的な開発や埋立等の攪乱による水質浄化機能の低下を招く可能性があることを示唆した

4. まとめ

実際の養魚場排水を用いて、砂質干潟システムを構築し一連の疑似現場実験を行った結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 砂質干潟システムによる養魚場排水の浄化効果が確認された。COD, TN, TPの除去速度はそれぞれ180, 120, 18mg/m²/dayとなった。これは干潟に流入する有機物や栄養塩類のような汚濁物質は、潮汐作用によって底質内を通過する際のろ過作用などの物理化学的な浄化と分解、捕食をはじめとした底生生物の活動エネルギー取り込まれる生物学的除去が、同時に行なわれているためと考えられる。
- 2) 干潟システムの底泥が攪乱されることによって窒素やリンの除去率が低下することが認められた。これは干潟生態系に人為的な開発や埋立等の攪乱による水質浄化機能の低下を招く可能性があることを示唆した。
- 3) 一潮干満の短い間においても養魚場排水の流入する系において、NH₄-Nが30%, NO₂-Nが19%, NO₃-Nが21.6%, PO₄-Pが40.5%, TOCが41%, CODが44.4%, SSが72.6%, Chl-aが84.6%除去されていることが認められた。養魚場排水のような汚濁した水に対しても砂質干潟システムによる有機物の分解、硝化、脱窒やリンの吸着摂取等の浄化機能が発揮され、特にSS, Chl-a等の懸濁成分の除去には優れていることが判った。

今後、砂質干潟を中心に、浄化に寄与する干潟底質に付着する微生物の挙動、養魚場排水が干潟生態系に与える影響等についてさらに検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 木村賢史：人工干潟（海浜）の水質浄化能（1）、水、Vol.36, No.506, pp.23-36, 1994
- 2) 稲森悠平、木村真子、須藤隆一：干潟における底生生物の役割と保全のための対策のあり方、用水と廃水、Vol.36, pp.15-20, 1994
- 3) 環境庁自然保護局：沿岸域の自然環境について、第274回海洋産業定例会資料、1992
- 4) 佐々木克之：干潟の水質保全と物質循環、用水と廃水、Vol.36, pp.21-32, 1994
- 5) 栗原康：都市河口域生態系の劣化と修復・保全、平成4年度文部省科学研究費国際学術研究成果報告書、1993
- 6) 栗原康：河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー、東海大学出版社、1988
- 7) 栗原康：干潟は生きている、岩波書店、1980
- 8) 徐 開欽、藤沼紀敏、熊谷幸博、須藤隆一：干潟底泥の酸素消費特性に及ぼす養魚場排水の影響、第29回日本水環境学会年回講演集、pp.49、1995
- 9) Xu K.Q, M. Takasaki, O. Nishimura and R. Sudo: The effect of the tidal flat sediments on the behavior of nitrogen using fish-pond wastewater, *Proceedings of the 4th international conference on wetland systems for water pollution control*, pp.210-218, 1994
- 10) Knight R.L., R.W. Ruble, R.H. Kadlec, S.C. Reed : Wetlands for wastewater treatment: Performance database, *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, G.A. Moshiri edited, CRC Press U.S.A. pp.35-58, 1993
- 11) Sikora F.J., T. Zhu, L.L. Behrends, S.L. Steinberg, H.S. Coonrod and L.G. Softley : Ammonium and phosphorus removal in constructed wetlands with recirculating subsurface flow: Removal rates and mechanisms, *Proceedings of the 4th international conference on wetland systems for water pollution control*, pp.147-161, 1994