

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1148

December 2006

サンゴ礁－海草藻場間でのリン・窒素輸送に関する現地観測

井 上 徹 教
細 川 真 也
内 村 真 之
神 尾 光 一 郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
1.1 背景	4
1.2 目的	5
2. 観測内容	5
2.1 観測水域	5
2.2 観測及び分析項目	7
3. 観測結果	9
3.1 天候	9
3.2 潮汐	9
3.3 流量	9
3.4 リン・窒素	10
4. 考察	9
4.1 流動及び水質	10
4.2 流入量と流出量との比較	11
5. 結論	13
6. あとがき	14
謝辞	14
参考文献	14
付録 A 観測結果	16
付録 B 流量及びリン・窒素の輸送量	18

Field Observation of Phosphorus and Nitrogen Transport between Coral Reef and Seagrass Bed

Tetsunori INOUE*
Shinya HOSOKAWA**
Masayuki UCHIMURA***
Koichiro KAMIO****

Synopsis

The purpose of this study is to investigate the phosphorus and nitrogen balance between coral reef and seagrass bed through their transport due to current motion (advection) in a subtropical coastal region. Field observation of phosphorus and nitrogen transport between coral reef and seagrass bed within one tidal cycle was done on a measurement line settled beside seagrass bed in a coastal area in Ishigaki island, Okinawa, Japan. Results from flow measurements showed that the southwest-ward drift current constantly existed and there was an inflow from the northeast part and an outflow to the southwest part. Moreover, oscillatory current was observed in deep narrow channel.

Phosphorus and nitrogen concentrations were high in the northeast part and low in the southwest part on average. As a result, it was found that there was a net transport of phosphorus and nitrogen from offshore to the seagrass bed (or to the mangrove forest). In addition, a sudden inflow of phosphorus and nitrogen in middle layer of deep narrow channel was also observed.

Key Words: coral reef, seagrass bed, phosphorus, nitrogen

* Research Director of Coastal and Estuarine Environment Research Group
** Project Researcher of Coastal and Estuarine Environment Research Group
*** Postdoctoral Fellow of Coastal and Estuarine Environment Research Group
**** Former trainee of Coastal Ecosystems Division, Tokyo Kyuei Co.,Ltd
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5046 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:inoue-t@pari.go.jp

サンゴ礁 - 海草藻場間でのリン・窒素輸送に関する現地観測

井上 徹教*
細川 真也**
内村 真之***
神尾光一郎****

要 旨

亜熱帯沿岸域におけるサンゴ礁 - 海草藻場間におけるリン・窒素の輸送量の収支を定量化する目的で、沖縄県石垣市吹通川河口前面海域における海草藻場の周囲に測線を設定し、1 潮汐間のリン・窒素のフラックスに関する観測を行った。観測期間中は北東風が連吹し、海草藻場が存在する岸から 200～300m 以内の浅海部分では吹送流とみられる北東から南西に向かう沿岸流が卓越しており、恒常的に北東方面から流入、南西方面から流出していることがわかった。また、水深が 7m 程度の狭窄部付近においては潮汐による流入出も観測された。

水質分析の結果、測線の北東部におけるリン・窒素濃度は、南西部における濃度よりも概ね高い傾向がみられた。これにより、総和としては測線外から測線内へのリン・窒素の輸送が存在することが示された。また、狭窄部においては中層で特異的な流入が見られる場合があり、これにより比較的大きく突発的な流入が存在し、これが測線を横断するリン・窒素の収支に影響を及ぼすことが示された。

キーワード：サンゴ礁，海草藻場，リン，窒素

* 海洋・水工部沿岸環境領域主席研究官
** 海洋・水工部沿岸環境領域特任研究官
*** 海洋・水工部沿岸環境領域特別研究員
**** 前海洋・水工部沿岸生態研究室受託研修生（現（株）東京久栄）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5046 Fax：046-844-1274 e-mail:inoue-t@pari.go.jp

1. まえがき

1.1 背景

熱帯・亜熱帯沿岸域では非常に豊かな生態系が形成されている水域が多く見受けられるが、そこでの水域生態系を支える重要な要素として、マングローブ林、藻場、サンゴ礁などが挙げられる(Ogden, 1997; 仲岡, 2002)。これらの各水域はそれぞれが独立した生態系であるとの観点から、既に多くの個別の調査が行われてきた。中でも特に成果が上がっているのは、それぞれの水域における一次生産速度及び呼吸速度の推定である。Gattuso et al. (1998)はエスチュアリー、海草が優占するサンゴ礁、塩性湿地、マングローブ林等の水域別にグロスの一次生産速度、ネットの一次生産速度、呼吸速度の比較を行っており、それぞれの炭素循環への寄与について言及している。また、Ziegler and Benner (1998)は独立する3つの手法(open-water measurements, discrete measurements, annual estimates)により海草藻場の月別の一次生産速度及び呼吸速度を測定し、水柱系では従属栄養、底生系は独立栄養であるとしている。さらに、Watanabe (2004)はTA(アルカリ度) - DIC(溶解無機態炭素)ダイアグラムを用いて冬季におけるグロスの生産速度を $230 \text{ mmolC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、呼吸速度を $181 \text{ mmolC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、夏季におけるグロスの生産速度を $331 \sim 570 \text{ mmolC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、呼吸速度を $570 \sim 454 \text{ mmolC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と見積もっている。これらの値は全球的な炭素循環を検討する上で無視し得ない値であり、温暖化問題に関連する地球規模の炭素循環という観点から熱帯・亜熱帯沿岸域における個々の生態系の重要性が指摘されている。

しかし近年、これらは個別の生態系として成立するのみならず、それぞれに相互作用を持つ複合生態系を構成しているとの考えがなされるようになってきた(Hemminga et al., 1995)。

各系が複合的に影響を与えるという点を検討したものとして先行しているのは、魚類の生活史に伴う各系間の移動に関する研究である。一般にマングローブ林には構造的に複雑な部分や影になる部分が多く、捕食者からの避難場所として適している(Morinière et al., 2004)ため、特にcoral reef fishの幼魚が利用することが知られている。近接するマングローブ林 - 藻場 - サンゴ礁間での関連を示した例としては、以下の成果が挙げられる。Nagelkerken et al. (2000a)はカリブ諸島の内湾において、マングローブ、海草場、海藻場、サンゴ礁、サンゴ礁における魚類の群集構造に関する統一的な調査を行い、魚類群集と各種環境条件との関係やそれぞれの生活史における生育場の変化について明らかにしている。また、Nagelkerken, et al.

(2000b)はオランダ、アンティル諸島、ボネール島において、coral reef fishに対する6つのピオトープ(マングローブ、海草場、サンゴ礁の4水深)の役割をクラスター解析により定量的に考察している。さらに、Mumby et al. (2004)はANOVA(Clarke 1993)を用いて、coral reef fishのバイオマスにマングローブの有無が与える影響について、魚種別に定量的に評価している。これに対して、近接するマングローブ林 - 藻場 - サンゴ礁間の関係だけではなく、島全体という空間スケールでの関連に言及した例としては、Halpern (2004)の研究が挙げられる。この他にもDorenbosch et al. (2005)、Sheaves (2005)等の成果がある。また、Alfaro (2006)は底生生物に着目し、マングローブ - 海草間の底生生物相についてmultidimensional scaling plotを用いてハビタットや場所間での個体群の構造や構成の違いを特定している。

一方、これらの系内における栄養塩の動態についても、詳細な検討が行われてきている。造礁性のサンゴは褐虫藻を相利共生生物として骨格内に共生させ、それらの一次生産により生成されるエネルギーを得て成長する。これにより、造礁性のサンゴはサンゴ礁内における有機物生産と炭酸構造へ重要な影響を与えている(Muller-Parker and D'Elia, 1997)。初期の研究ではサンゴ礁への栄養塩の供給はサンゴ礁の生育及び維持に対して好ましいことと考えられてきたが、最近では栄養塩負荷の増加がサンゴの減少を引き起していることがわかってきた(Kinsey and Davies, 1979)。例えば、HawaiiのKaneohe Bayでは下水道からの流入負荷によりサンゴ礁が深刻な被害を受け(Johannes, 1975)、負荷の廃止によりサンゴ礁が回復する傾向が見られた(Steneck, 1988)との報告がある(Hubbard, 1997)。Ward-Paige et al. (2005)もサンゴ(ホソヤギ科, *Plexaura* spp.)の窒素及び炭素の安定同位体を継続して測定することで約30年間にわたる栄養塩負荷の変遷を考察し、下水道負荷によるサンゴ礁への影響について言及している。特に、高濃度のリン酸は石灰化を阻害するとの報告があり(Simkiss, 1964)、その濃度レベルには注意が必要である。

一方、海草藻場は栄養物質や懸濁物質をトラップすることにより水圏環境を良好に維持しているの見解がある(山室ら, 2002)。Evrard et al. (2005)は5種の海草(*Thalassia hemprichii*, *Halodule uninervis*, *Halodule pinifolia*, *Halophila ovalis*, *Halophila ovata*, *Syringodium isoetifolium*)により構成される海草藻場の栄養塩循環に関する検討を行っている。彼らは海草藻場は水中の懸濁物を補足し、堆積物中に輸送されたPOM由来の栄養塩を根から吸収することで他の一次生産者よりも有利であることを示し、前述の意

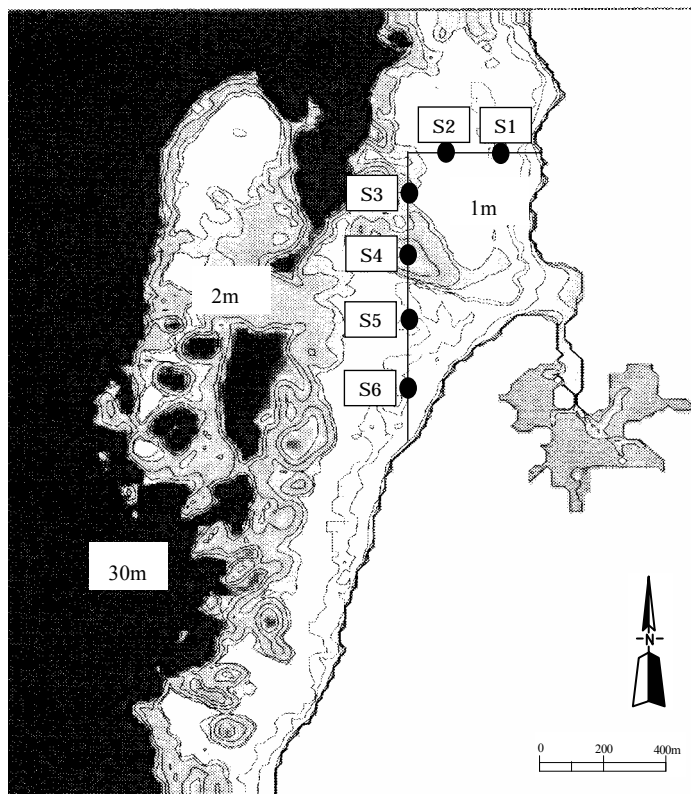


図-1 観測水域の水深分布及び観測点
(田村・灘岡(2005)より一部改変)

見を支持している。これらの考察は、海草藻場が粒子態を中心とした物質をトラップすることで自身の一次生産量を保持したり、周辺海域の浄化に役立っているとの見解を示したものである。さらに、Kitheka(1997)によると、マングローブクリーク内の懸濁物は海草藻場やマングローブスポンジで補足され、サンゴ礁には届かないとしている。この結果として、Hyndes and Lavery(2005)が海草デトリタスが近隣の動物生産に対する寄与について炭素及び窒素の安定同位体を用いて示したように、懸濁物や海草等を起源とするデトリタスがデトリタス食者を介して食物連鎖へ取り込まれることによりそこに生息する生物への炭素ソースとなるという海草藻場の水域生態系への寄与が期待される。

さらに、海草は根茎部からの栄養塩吸収のみならず葉状部からの栄養塩吸収も無視し得ないことが指摘されている。井上ら(2002)は葉状部と根茎部それぞれのアンモニア態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リンの吸収速度を室内実験から求めており、葉状部と根茎部は同オーダーの栄養塩吸収速度を持つことを示している。

1.2 目的

上述のような既存の成果を概観すると、(1)亜熱帯沿岸域における個々の生態系が相互に影響を与える場が存在すること、(2)サンゴ礁は過度の栄養塩負荷に対して脆弱であること、(3)海草藻場は負荷を補足する機能を持つこと、が理解される。さらに考察を拡張しこれら3点を組み合わせると、「海草藻場が負荷をトラップすることにより、サンゴが育成する前面海域の水質を良好に維持しているという関係性が存在する」、という仮説が生まれる。

サンゴ礁・海草藻場の境界は生物群集の構造や物理条件が急激に変化する場所であり、食物獲得や産卵場所に必要な場を提供するため亜熱帯沿岸域において非常に重要な箇所であると言える(Ogden, 1997)。しかし、これまでの海草藻場と前面海域間での物質循環に関する研究は、Mazda et al. (1990)やWatanabe (2004)に見られるような水質濃度分布から循環過程を推定する方法や、Sakata and Yamamuro (2005)のようにバイオマーカーから推定する方法、Yamamuro et al. (2003), Ward-Paige et al. (2005)のように生体または堆積物中の安定同位体から物質循環過程を間接的に推定する方法などが主であった。これに対して、直接的な観測としては流動と水質を同時に測定することにより物質輸送を測定する手法が挙げられる。亜熱帯沿岸域におけるこのような直接的な観測例としてはBoto and Bunt (1981)や赤松ら(2002)が挙げられるが、これらはマングローブクリークや前面の河川内を対象としておりサンゴ礁・海草藻場間における物質輸送過程の把握には至っていない。Kitheka (1997)は海草藻場及びサンゴ礁内で流動と水質の同時測定から物質輸送量の算定を行っているが、それぞれにおいて1箇所だけの観測で沿岸方向の分布を考慮しておらず、定量性に疑問が残る。そこで本研究では、亜熱帯の海草藻場とサンゴ礁が卓越する前面海域との間のリン・窒素の収支を定量化することを目的とし、現場観測を行ったので、その結果について報告する。本稿においては1潮汐間という短い時間スケールの中で、物質輸送が短期的にどのように変動するかに着目して検討を行う。この検討においては季節変動のような中期的変動を捉えることはできないが、潮汐やそれ以下の時間スケールで起こる現象を把握することができる。

2. 観測内容

2.1 観測水域

観測は沖縄県石垣市伊土名地先の吹通川河口域において行った。ここでは河口に比較的規模の大きいマングローブ林が存在し、その前面には砂浜を介して水深が1.0 ~ 2.5 m程度の浅海域が広がり、そこでは海草藻場が岸に沿

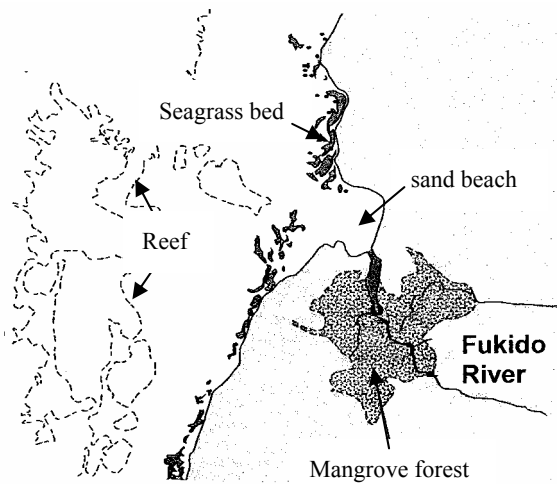


図-2 観測水域のマングローブ、海草藻場、サンゴ礁の分布 (Watanabe (2004) より一部改変)。図中の破線はサンゴ礁の縁辺部を示す。

うように帯状に存在する。さらに前面にはサンゴ礁があり、サンゴ礁より外海側では急深になっており、30 m以深の外海に面している (図-1)。風向きによっては外海において強い波浪がみられるが、サンゴ礁によってある程度減衰し礁内は概して静穏である。以下では、当該水域での生態系を構成する各要素について概観する。

(1) マングローブ

吹通川河口域には比較的広範囲にわたり、*Rhizophora stylosa* (ヤエヤマヒルギ)、*Kandelia candel* (メヒルギ)、*Bruguiera gymnorrhiza* (オヒルギ)、*Lumnitzera racemosa* (ヒルギモドキ) の4種が優占するマングローブ林が発達している (Watanabe, 2004)。このマングローブ林は、石垣島では最大の面積をもつヒルギ群落となる。マングローブ林は、川幅が満潮時で最大35m程度となる水路状に狭まった部分を介して前面海域と接続しており、外海との海水交換は専らこの水路上の部分を介して行われる (図-2参照)。

(2) 海草藻場

上述の水路状の部分より前面には約2 haの砂干潟が広がり、さらにその前面には水深が最大2.5m程度の浅海域が広がっている (図-1参照)。そこでは岸に沿うように帯状に *Enhalus acoroides* (ウミショウブ)、*Halophila ovalis* (ウミヒルモ) を中心とした海草藻場が約38 haにわたり成立している (田村・灘岡, 2005, 図-2参照)。他には、*Thalassia hemprichii* (リュウキュウスガモ)、*Cymodocea rotundata* (ベニアマモ)、*Cymodocea serrulata* (リュウキュウアマモ)、*Syringodium isoetifolium* (ポウバアマモ)、

表-1 観測点一覧

測点	北緯	東経
S1	24度29分36.0秒	124度13分41.6秒
S2	24度29分36.0秒	124度13分34.9秒
S3	24度29分31.5秒	124度13分31.5秒
S4	24度29分22.5秒	124度13分31.5秒
S5	24度29分13.5秒	124度13分31.5秒
S6	24度29分 4.5秒	124度13分31.5秒

表-2 観測時刻

	測点	開始時刻	終了時刻
RUN1	S1	10:18	~ 10:28
	S2	10:35	~ 10:43
	S3	10:51	~ 10:55
	S4	11:06	~ 11:24
	S5	11:44	~ 11:49
	S6	11:59	~ 12:05
RUN2	S1	12:41	~ 12:45
	S2	13:03	~ 13:05
	S3	13:13	~ 13:16
	S4	13:32	~ 13:36
	S5	13:46	~ 13:49
	S6	13:59	~ 14:01
RUN3	S1	15:07	~ 15:08
	S2	15:14	~ 15:17
	S3	15:23	~ 15:26
	S4	15:33	~ 15:41
	S5	15:48	~ 15:52
	S6	15:57	~ 16:00
RUN4	S1	17:14	~ 17:16
	S2	17:19	~ 17:22
	S3	17:25	~ 17:30
	S4	17:36	~ 17:41
	S5	17:45	~ 17:49
	S6	17:54	~ 17:57
RUN5	S1	18:25	~ 18:31
	S2	18:36	~ 18:40
	S3	18:48	~ 18:51
	S4	19:02	~ 19:06
	S5	19:13	~ 19:20
	S6	19:26	~ 19:29
RUN6	S1	19:38	~ 19:41
	S2	19:45	~ 19:48
	S3	19:55	~ 19:59
	S4	20:06	~ 20:12
	S5	20:18	~ 20:21
	S6	20:27	~ 20:30

Halodule uninervis (ウミジグサ)、*Halodule pinifolia* (マツバウミジグサ) などみられ、これら8種が優占種と考えられる (Watanabe, 2004)。

(3) サンゴ礁

吹通川河口沖には海岸線から約400 ~ 800 m程度沖合にサンゴ礁が形成されており、サンゴ礁内での波浪条

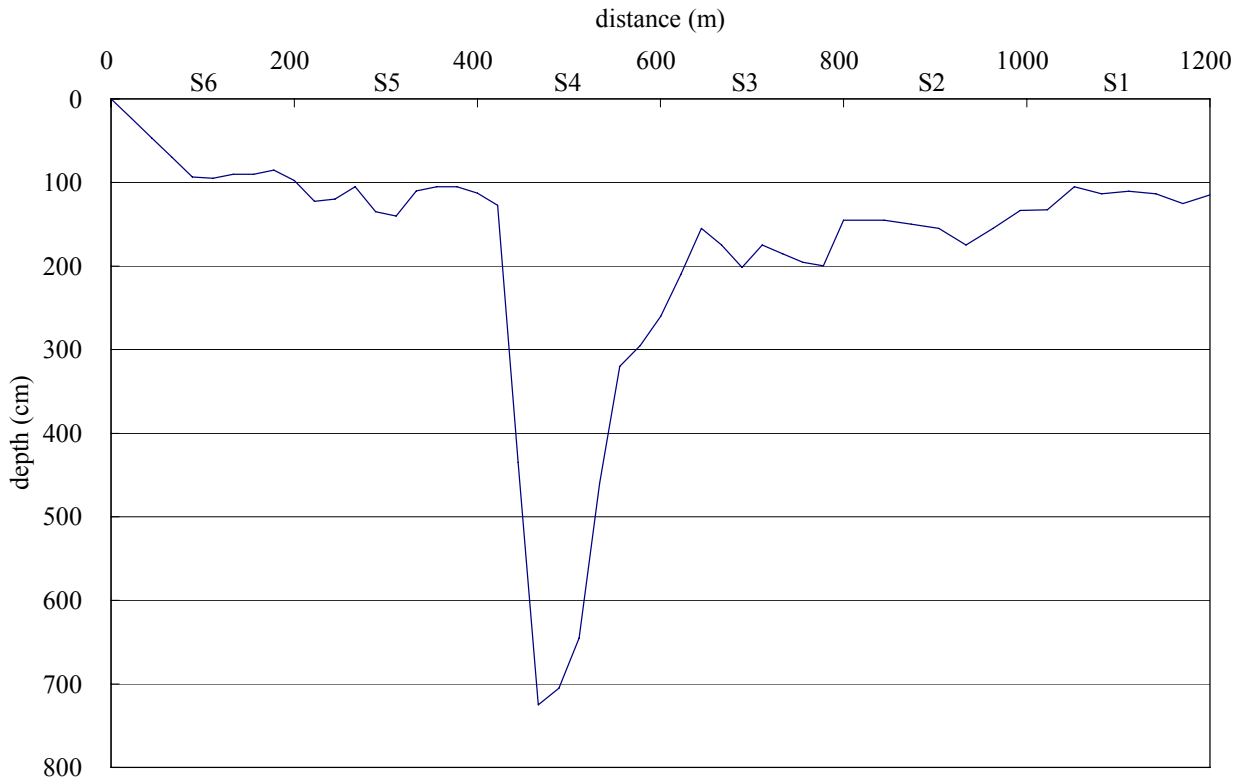


図-3 測線断面（測線の南端を基点として、0-800mまでは南北方向の測線（S3-S6を含む測線）上、800-1200mは東西方向の測線（S1-S2を含む測線）上の水深分布を表している。）

件は比較的穏やかである．そこでは卓状ミドリイシや散房花状ミドリイシが優占し，ハナヤサイサンゴ類やキクメイシ類が混生している（沖縄県企画開発部，2004）．また，リーフ内の浅海域においてもサンゴが点在している（図-2参照）．

2.2 観測及び分析項目

観測は2004年11月25日10時から同21時の間に連続的に行った．これは大潮時の下げ潮から次の下げ潮にかけての時間帯となる．北緯24度29分36.0秒，東経124度13分31.5秒を基点として河口域の海草藻場を囲うように東向きに400m，南向きに600mの調査測線を設定し，それらを200m間隔で等分した6断面（S1からS6）のそれぞれの中心を観測点とした（図-1及び表-1参照）．S4のみ7m程度の深掘部が存在するが，他は水深1.0-2.5m程度の浅海域である（図-3参照）．各観測点を測点番号の昇順に船で移動し，後述する項目について測定を行った．各測点での作業時間は5～15分程度，6点では約1時間を要したため，各測点での測定頻度は約1時間に1度程度での観測となった．各観測点における作業時刻を表-2に示す．

観測項目は水温，塩分，流速，水深，リン酸態リン，溶

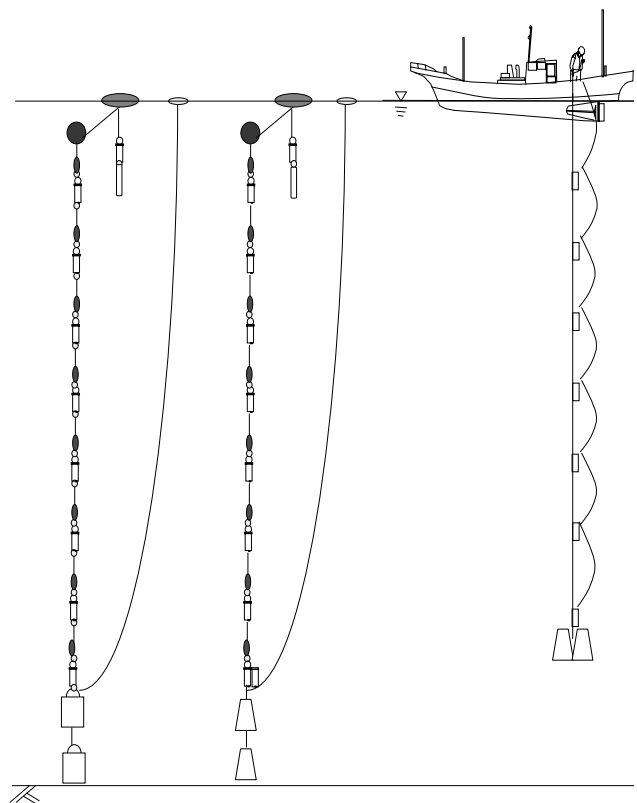


図-4 観測方法の概略図

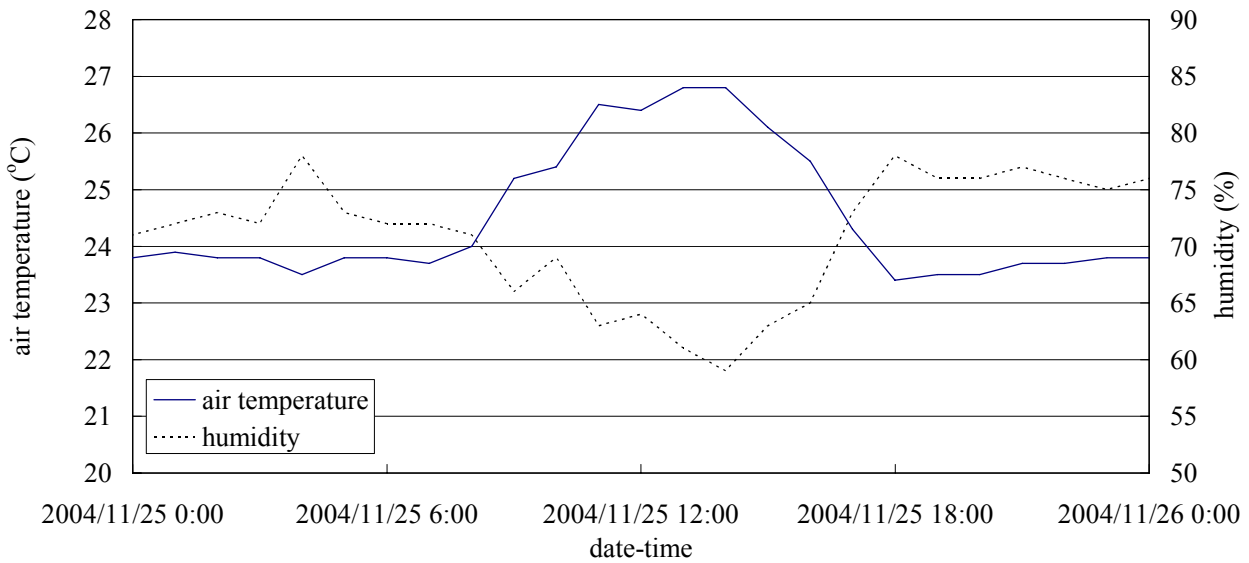


図-5 観測期間中の気温及び湿度の様子（石垣島地方気象台における観測データより作成）

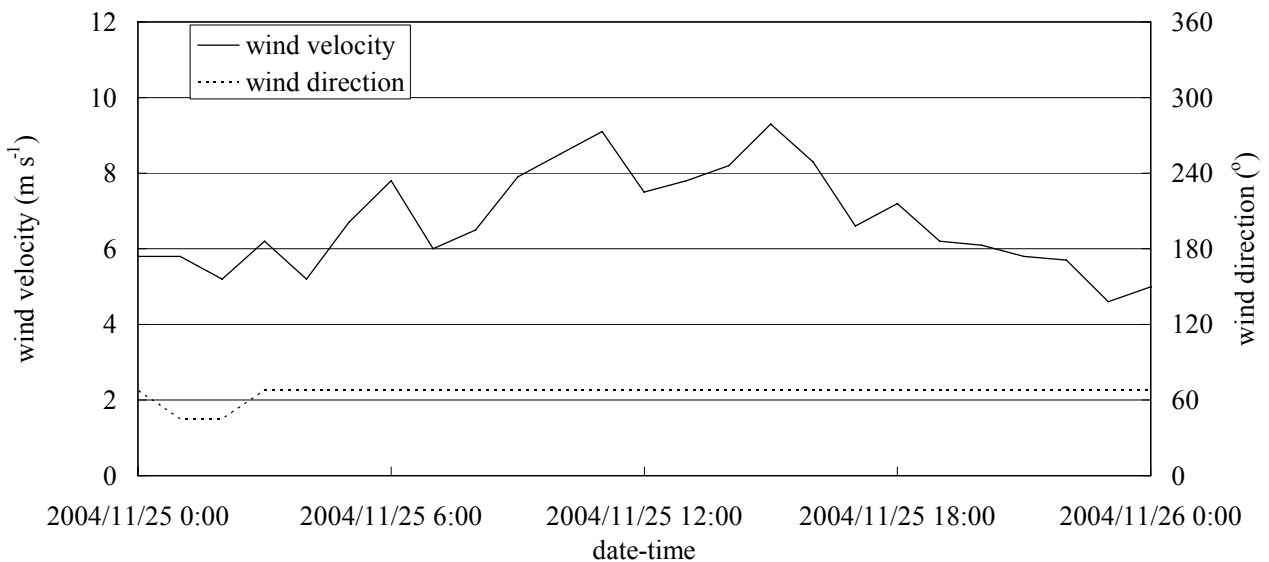


図-6 観測期間中の風速及び風向の様子（石垣島地方気象台における観測データより作成）

存有機態リン，懸濁態リン，全リン，アンモニア態窒素，
 亜硝酸態窒素，硝酸態窒素，溶存有機態窒素，懸濁態窒
 素，全窒素とした．水温，塩分についてはメモリー式小
 型水温塩分計（アレック電子，COMPACT-CT），流速につ
 いてはメモリー式小型流速計（アレック電子，
 COMPACT-EM）を0.5mから2.0mの間隔で配置したローブ
 を中間パイを用いて直立させることでそれぞれの鉛直分
 布の測定を行った（図-3参照）．得られた流速測定値から
 以下の式を用いて偏角（真北と磁北との差）を補正した
 データを採用した．

$$D = 7^{\circ}37.142' + 21.622' \Delta\phi - 7.672' \Delta\lambda$$

$$+ 0.442' \Delta\phi^2 - 0.320' \Delta\phi\Delta\lambda - 0.675' \Delta\lambda^2 \quad (1)$$

但し，

$$\Delta\phi = \phi - 37^{\circ} \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \lambda - 138^{\circ} \quad (3)$$

ここで，Dは偏角， ϕ は緯度， λ は経度で度単位で表す．計
 算の結果，今回の観測対象となった水域における偏角は
 $2^{\circ}58'$ （西偏）であった．また，測定中は超音波式測深機
 （本多電子，PS-7FL）を用いて水深測定を行った．

これらの観測と並行して加工したシリンジを用いて採
 水を行い（図-4参照），一部は採水後直ちに孔径 $0.45\mu\text{m}$ の

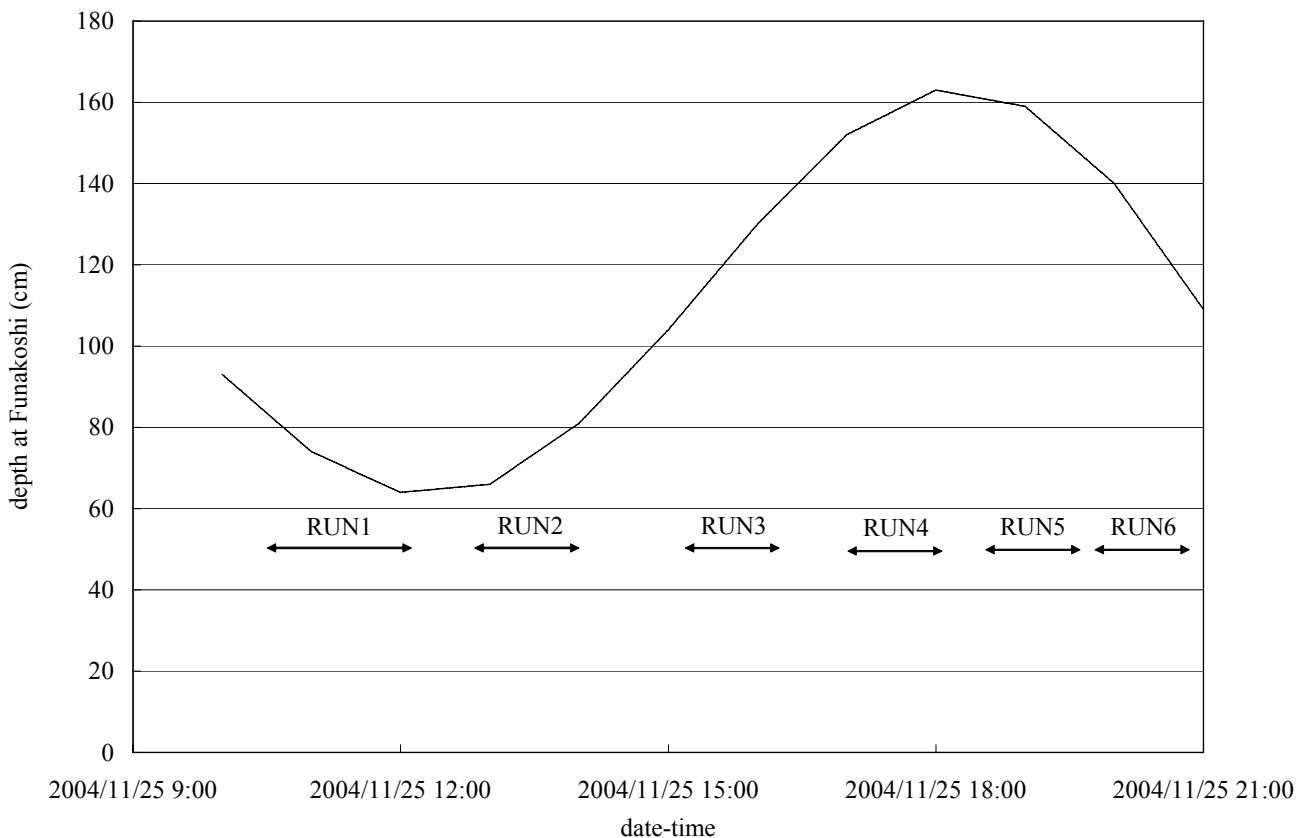


図-7 観測期間中の潮汐の様子（海上保安庁海洋情報部による船越港での推算値より図化）

ディスポーザルフィルター（ザルトリウス，ミニザルト SM16555K）によりろ過し，残りは原水のまま冷凍保管した．サンプルは実験室に持ち帰り，アンモニア態窒素，亜硝酸態窒素，硝酸態窒素，リン酸態リンについてはオートアナライザー（ブランルーベ，TRAACS800）を用いて常法により測定した．全リン，溶存態全リンについてはペルオキソ二硫酸カリウムを混合後加熱分解（120℃，30分間）したものをオートアナライザー（ブランルーベ，TRAACS800）を用いてリン酸態リン分析の常法により分析を行った．全窒素，溶存態全窒素についてはアルカリ性ペルオキソ二硫酸カリウムを混合後加熱分解（120℃，30分間）したものをオートアナライザー（ブランルーベ，TRAACS800）を用いて硝酸態窒素分析の常法により分析を行った．全窒素（又は全リン）と溶存態全窒素（又は溶存態全リン）との差を懸濁態窒素，溶存態全窒素（又は溶存態全リン）とアンモニア態窒素，亜硝酸態窒素，硝酸態窒素の和（又はリン酸態リン）との差を溶存有機態窒素（又は溶存有機態リン）とした．

3. 観測結果

3.1 天候

観測期間中の天候は晴れ，気温は日中では25.4～26.8℃，日没後は23.4～23.7℃の範囲で変動していた（図-5）．風速は5.8～9.3 m s⁻¹の範囲で変動し，風向は東北東よりの風で安定していた（図-6）．

3.2 潮汐

海上保安庁海洋情報部が潮汐推算値を提供している調査海域に最寄の港は船越である．海上保安庁海洋情報部による船越での調査時刻における潮汐の推算値を図-7に図示する．調査は大潮時の下げ潮時から次の下げ潮時まで行われた．

3.3 流量

流速の時間変化を見ると，観測期間中を通じてS1及びS2では外海から海草藻場内への流入，S5及びS6では逆の流出傾向であった．S1，S2，S5，S6においては比較的流速の変動幅が小さく，流量の絶対値自体は水深に大きく依存している．S3及びS4では潮汐に依存した流入出の傾

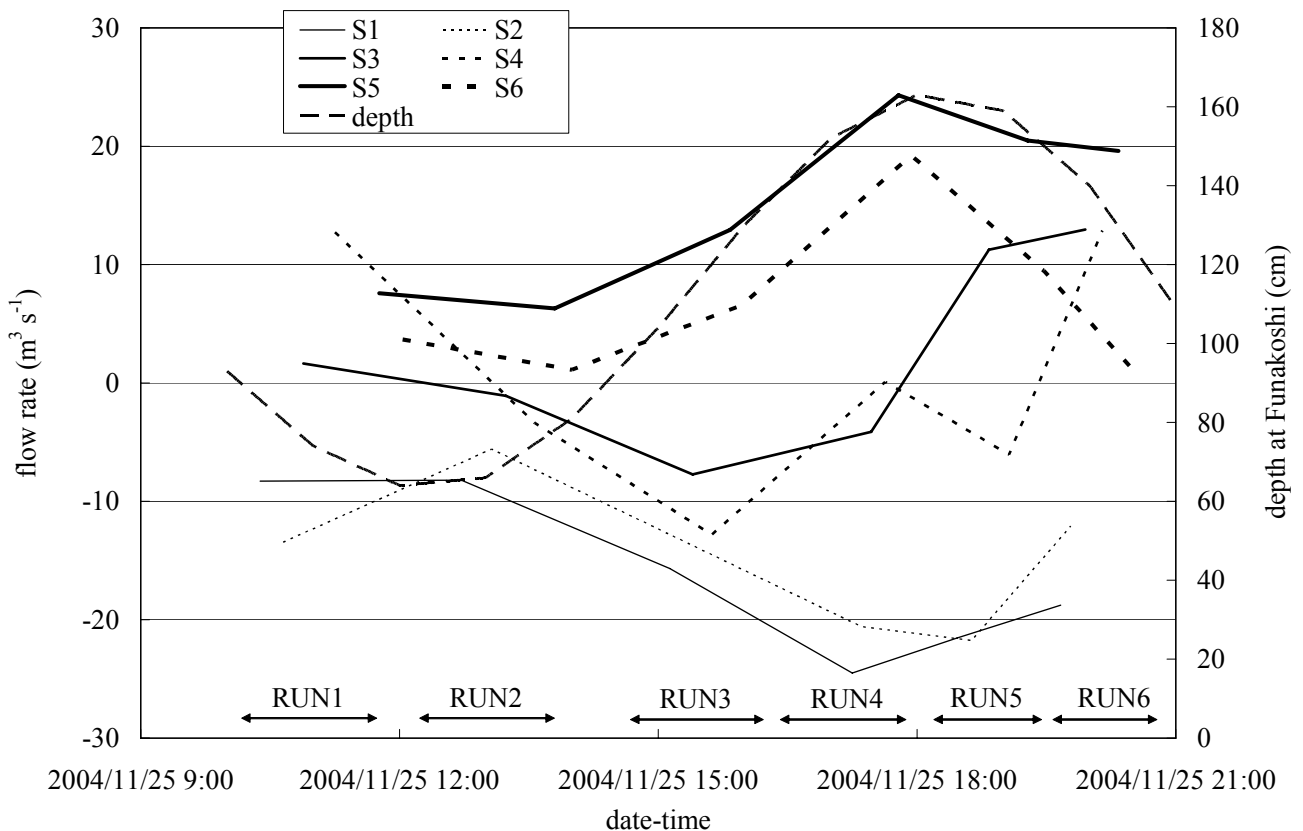


図-8 各観測点における流量の変化

向が見られる (図-8)。

3.4 リン・窒素

リン・窒素の分析結果をみると、概ねS1, S2において比較的高濃度であり、S5, S6において比較的低濃度である傾向がみられた。分析結果の詳細については、付録Aを参照されたい。

4. 考察

4.1 流動及び水質

各測点における平均流速をみると、観測期間中の最大値は約 15 cm s^{-1} であった。Kitheka et al. (1996)はマングローブ林、海草藻場、サンゴ礁が発達しているケニアのGazi Bayにおいて、海草藻場及びサンゴ礁内のそれぞれ1点で流速観測を行っており、そこでの流速のピーク値は小潮時で 25 cm s^{-1} 、大潮時で 30 cm s^{-1} としている。本稿における観測は大潮時に行われたものであるが、平均流速の最大値はKitheka et al. (1996)で得られた値の約1/2であった。

S1, S2, S5, S6においては常時北東から南西に向かう

沿岸流が観測されており、これらの測点においては流速そのものの値は潮汐の影響をほとんど受けていないことがわかる。この北東から南西に向かう沿岸流は、東北東よりの風の影響を受けた吹送流であると考えられる。これに対して、S3及びS4では潮汐の影響を受けた流れ場が観測された。しかしこれらの点においても上記の吹送流の影響は見られ、特に表層(水表面下0.5m)においては中層(水深3m付近)に比べて西へ向かう傾向が見られる。またS4では、RUN5において下げ潮時にも拘らず中層付近において流入が見られる。この中層における外海側から海草藻場側に向かう流れの駆動力については、現段階では不明である(図-9)。

水質分析の結果をみると、リン酸は $0.01 \sim 0.15 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、アンモニアは $0.01 \sim 6.73 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、亜硝酸は $0.02 \sim 0.67 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、硝酸は $1.06 \sim 8.04 \mu\text{mol L}^{-1}$ の値が得られた。Watanabe (2004)は同海域において水質分析を行っており、吹通川においてはリン酸は $1.3 \sim 4.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、アンモニアは $3.5 \sim 24 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、亜硝酸は $1.2 \sim 3.6 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、硝酸は $18 \sim 42 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、サンゴ礁ではリン酸は $0.01 \sim 0.03 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、アンモニアは $0.3 \sim 1.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、亜硝酸は

表-3 リン・窒素の収支 (mol h⁻¹)
(流出を正, 流入を負の値で示している)

	DIP	DOP	PTP	TP	DIN	DON	PTN	TN
10:00-14:22	-1.9	0.3	-3.7	-4.5	-49	-69	-288	-306
16:29-20:30	-2.0	-4.2	-13.4	-20.2	34	-592	-441	-998

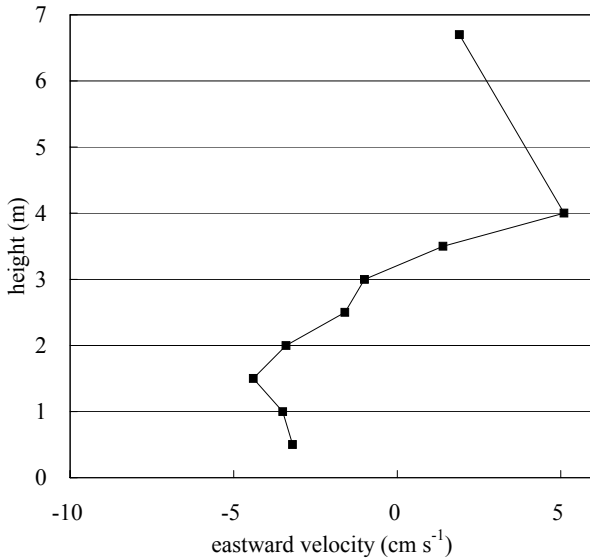


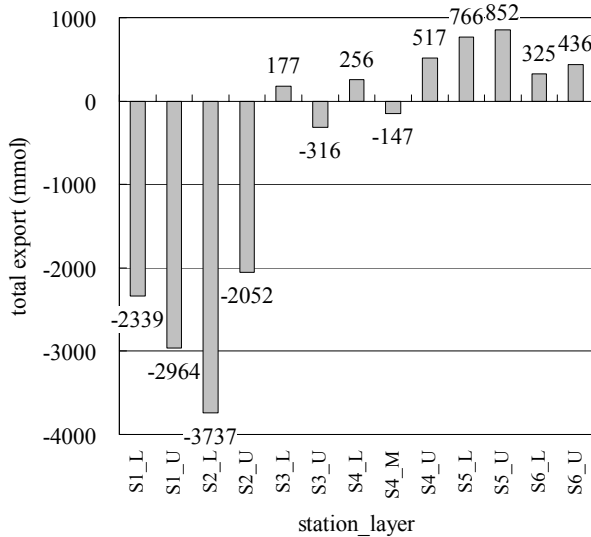
図-9 RUN5におけるS4での流速分布

0.04 ~ 0.05 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 硝酸は0.20 ~ 0.27 $\mu\text{mol L}^{-1}$ と報告している. 本稿における水質測定結果は吹通川とサンゴ礁の間に位置する地点で行われた観測結果であり, その値はWatanabe (2004)に記載されている吹通川とサンゴ礁での測定結果の中間に位置する値となり, 既存の調査結果と矛盾を生じない結果となった.

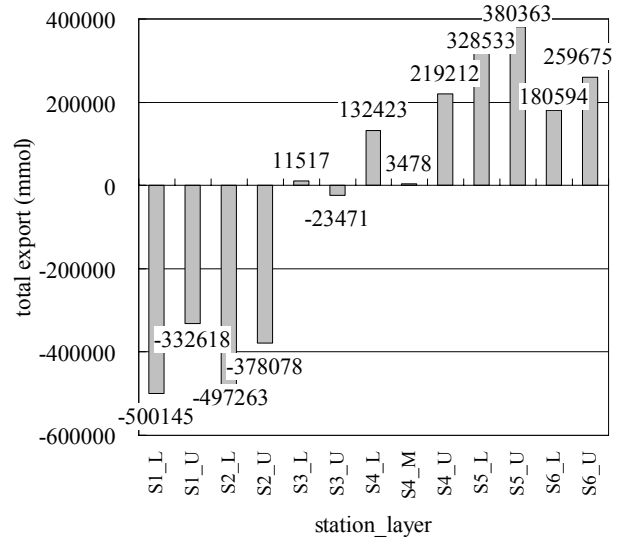
また, 溶存無機態窒素と溶存無機態リンの比 (DIN/DIP比) はほとんどのサンプルで100以上の値を示しており, 海草に対してはリン制限環境 (相対的にリン濃度が低い) であるといえる. しかし, 海草藻場へのリン及び窒素は外海からの供給のみならず, マングローブ林及び上流河川からの供給も含めても検討が必要であるため, 今後は上流域からの負荷量算定を含めたより詳細な検討が必要である.

4.2 流入量と流出量との比較

ここでは, 調査測線を横断するリン及び窒素の輸送量から計算されるそれぞれの収支について考察する. 収



(a) 溶存無機態リン



(b) 溶存無機態窒素

図-10 10:00 ~ 14:22 における各測線・各層での総流入出量
(横軸のLは底層, Mは中層, Uは表層を表す)

支を計算する際の潮位による影響を排除するため、ある時刻を基点とし、その時点での水深から潮汐変動により次に元の水深に戻るまでの期間を抽出し、その間の輸送量の積分値から収支を計算した。本観測期間中では、10:00から14:22まで、及び16:29から20:30までを該当する時間帯と見積もった。

まず、上記の時間帯における流量を時間的に積分することにより水塊の収支を計算すると、10:00から14:22にかけては約1214 m³の流出、16:29から20:30にかけては約1395 m³の流出となった。これらの値から各時間帯における平均的な単位時間当たりの流量を計算すると、10:00から14:22にかけては約4.62 m³ min、16:29から20:30にかけては約5.77 m³ minとなった。本観測の翌日にマングローブ林と海草藻場間の水路状になった箇所で行った流量観測の結果、上流からの基底流量（干潮時におけるマングローブ林からの流出量）は約7.56 m³ minであった。これらのことから、本観測においては測線上での流入出の観測は精度良く行うことができ、且つ地下水の流入等の今回観測対象となっていない流入出は無視できるものと考え、以下の考察を行うこととした。

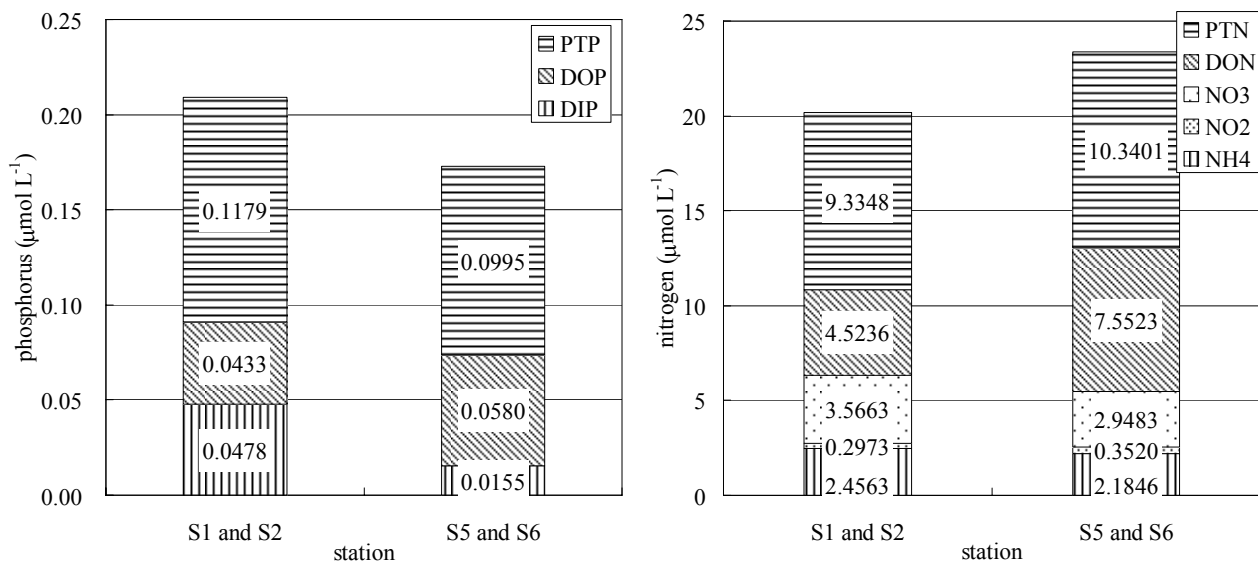
計算された1時間当たりの形態別のリン及び窒素の収支を表-3に示す。ここで陸側から外海側への流出を正、外海側から陸側への流入を負の値で示している。10:00から14:22までの溶存有機態リン（DOP）と、16:29から20:30までの溶存無機態窒素（DIN）以外は、全て流入する方向となっている。この結果は、外海からの負荷を海草藻場

またはマングローブ林が吸収していることを示唆している。

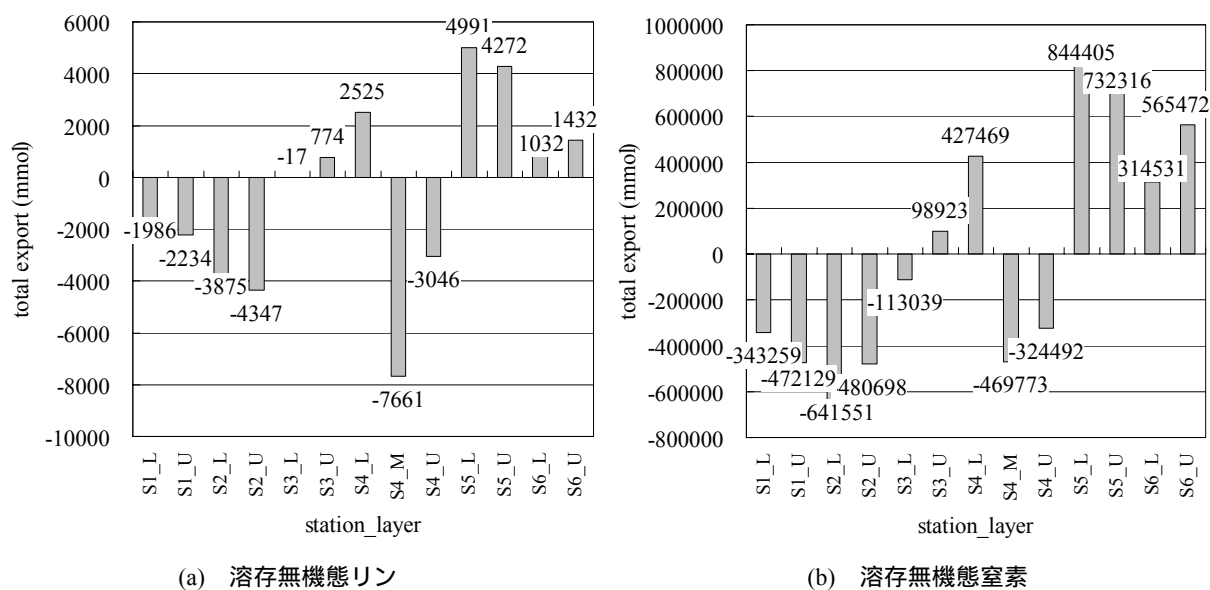
次に、溶存無機態窒素（DIN）と溶存無機態リン（DIP）の両方がネットで流入傾向である結果が得られた10:00～14:22の間での、DINとDIPについて考察する。10:00～14:22における各測線・各層での流入出の総量を図-10に示す。これを見ると、10:00～14:22においてはS1及びS2からの流入、S5及びS6からの流出が卓越していることがわかる。ここで、S1とS2及びS5とS6における平均的なリン・窒素の組成を図-11に示す。これを見ると溶存無機態についてはS1とS2に比べてS5とS6の方が小さな値となっている。

10:00～14:22の間での、DINの流出量と流入量との差及びDIPの流出量と流入量との差のモル比は約26となった。Yamamuro et al. (2004)は海草*Enhalus acoroides*のN/P比を14.0～28.9の範囲としている。また、Kaldy (2006)によると海草*Zostera marina*のN/P比は季節により変動し、12～32の範囲の値をとっている。上記の流出量と流入量との差のN/P比＝約26はこれらの範囲に入っており、沿岸流（吹送流）により北東方面から南西方面へと水塊が輸送される間に、海草の葉状部から栄養塩が吸収された可能性が示唆される。相対的にリンでその差異が明確であるのは、5.1節で示したように観測対象海域がリン制限であるためであると考えられる。

次に、16:29から20:30の間でのDINとDIPについて考察する。この間は、DIPについては10:00～14:22と同様にネットの流入がみられるのに対し、DINについてはネットの



(a) リン (b) 窒素
図-11 S1とS2, S5とS6におけるリン及び窒素の組成



(a) 溶存無機態リン

(b) 溶存無機態窒素

図-12 16:29 ~ 20:30 における各測線・各層での総流入出量

(横軸のLは底層、Mは中層、Uは表層を表す)

流出がみられる時間帯である。この時間帯においては、S4の特に中層における寄与が大きいことがわかる(図-12参照)。流入がみられるS4の中層及び表層における溶存無機態のN/P比はそれぞれ約61及び約107であり、これは他の測定箇所よりも低い値であった。このことから、16:29 ~ 20:30においては相対的にN/P比の小さい水塊(DINをあまり含まない水塊)がS4の中層及び表層から流入したことにより、DINの流入量の総和が小さくなったものと考えられる。この結果、DIPはネットの流入がみられるにも拘らずDINではネットの流出がみられる結果となったと考えられる。

10:00 ~ 14:22の溶存有機態リン(DOP)の収支をみるとネットの流出傾向がみられる。この流出は下げ潮時にみられ、マングローブからの流出の可能性が有る。別途2005年3月に行ったマングローブ河口域でのリン及び窒素の輸送量調査では、下げ潮時にはマングローブ林から前面海域への0.24 ~ 0.77 (mol h⁻¹)のDOP流出が観測された(未発表)。10:00 ~ 14:22におけるDOPの流出は0.3 (mol h⁻¹)となっており(表-3)、上記のマングローブ林から前面海域への流出の影響を受けた可能性がある。

懸濁態全リン(PTP)と懸濁態全窒素(PTN)は、共にいずれの時間帯においても流入する値となっている。海草藻場には懸濁物質をトラップすることで周辺の水環境を良好に保つ機能が期待されているが(山室ら, 2002)、本観測の結果はマングローブから流出してくる懸濁物質をトラップするだけでなく、外海から流入する懸濁粒

子もトラップすることを示している。

全リン(TP)及び全窒素(TN)についても、共にいずれの時間帯においても流入する値となっている。これは、少なくとも短期的には外海からの流入負荷を海草藻場、または隣接するマングローブ林が取り込む可能性を示唆している。ここで、観測測線で囲まれた水域の面積を160,000m²と仮定する。また、Enricoら(2003)の解析結果より吹通川河口域における海草藻場の被覆率を0.6、Kaldy(2006)から海草組織内のC:N:P比を400:20:1と仮定する。Moore(2004)は海草藻場の窒素除去速度を10mmol m⁻² d⁻¹と見積もっており、この値を用いると観測測線内での海草藻場による窒素除去速度は40mol h⁻¹、リン除去速度は2.0mol h⁻¹と計算される。また、Ziegler and Benner(1998)から海草藻場の一次生産速度を211 mmolC m⁻² d⁻¹と仮定すると、窒素除去速度は42mol h⁻¹、リン除去速度は2.1mol h⁻¹と計算される。これらは10:00 ~ 14:30におけるDINの収支、及び両時間帯におけるDIPの収支に近い値である。前述のDINの流出量と流入量との差及びDIPの流出量と流入量との差のモル比が海草組織内の構成に近いことも考えると、リン・窒素の流入の少なくとも一部は海草藻場によるトラップの可能性があると指摘できる。

5. 結論

亜熱帯沿岸域におけるサンゴ礁 - 海草藻場間の短い時間スケールでのリン・窒素の輸送過程を把握する目的で、

海草藻場の側面及び前面を囲う測線上において1潮汐間の窒素・リンの収支に関する観測を行った。観測結果から、対象水域の岸よりの浅海部分では風による吹送流と考えられる北東から南西に向かう沿岸流が卓越しており、恒常的にS1, S2から流入, S5, S6から流出していることがわかった。また、水深が7m程度の狭窄部付近においては潮汐と吹送流の両方に影響を受けた流れも観測された。

水質分析の結果, S1, S2におけるリン・窒素濃度は, S5, S6における濃度よりも概ね高い値が観測された。これにより, 総和としては外海から海草藻場内(またはマングローブ林内)へのリン・窒素の輸送が存在するという結果となった。また, S4においては中層で特異的な流入が見られる場合があり, これにより比較的大きな流入フラックスが存在することが示された。

6. あとがき

今回の観測は, 1潮汐間という非常に限られた時間内での短期的な観測である。本観測では短い時間スケールでの流量(輸送量)の変動が観測できるという長所がある反面, 長期間にわたる変動を追跡することができないという欠点がある。また, 荒天時など突発的なフラックスの急増が予想される期間のデータの重要性も認識されているが, そのようなデータが欠如していることにも注意する必要がある。

水質分析の結果から河川内, 海草藻場外縁部, サング礁内の順にリン及び窒素濃度は低下していくことがわかっており(5.1参照), これはリン及び窒素の負荷源が陸域にあることを示唆するものである。そのため外海から流入するリンや窒素は, 下げ潮時における溶存有機態の流出や荒天時における流出に由来するものである可能性があり, より長期間にわたる物質収支の理解に対しては別途検討が必要である。

今後は, 異なる季節において同様の観測を行い, 季節の違いによるリン・窒素の輸送量の変化について検討する予定である。

(2006年8月14日受付)

謝辞

本研究は, 科学研究費補助金(代表者: 山室真澄, 課題番号: 16201006, サング礁 - 海草藻場 - マングローブ林から構成される複合生態系における環境動態の解析)により行われた。

参考文献

- 赤松良久・池田駿介・中嶋洋平・戸田祐嗣(2002): 現地観測に基づくマングローブ水域における有機物・栄養塩輸送に関する研究 - 大潮期に着目して -, 土木学会論文集, 第698号, pp. 69-80.
- 井上公人・西村修・須藤隆一・田中仁(2002): 海草アマモの葉状部及び根茎部の栄養塩吸収・溶出機能, 日本沿岸域学会論文集, 第14巻, pp. 115-123.
- Enrico, C. P.・灘岡和夫・Miguel, D. F.・波利井佐紀・Jacqueline, J. S.・田村仁・三井順・中山哲蔵(2003): 藻場キャノピー光学モデルと高解像度衛星画像による海草藻場のマッピングと現地検証, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1386-1390.
- 沖縄県企画開発部(2004): 沿岸海域実態調査(宮古島・石垣島及び西表島並びに周辺離島).
- 田村仁・灘岡和夫(2005): 石垣島吹通川河口域のサング礁 - 藻場 - 干潟 - マングローブ連成系における水理及び温熱環境特性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1016-1020.
- 仲岡雅裕(2002): 陸からの物質流入が熱帯海草場に与える影響 - 河川の影響が異なる藻場の比較 -, 月刊海洋, 34, pp. 424-428.
- 山室真澄・西村清和・岸本清行・野崎健・加藤健・根岸明・大谷謙仁・林原毅・清水弘文・佐野元彦・玉城泉也・福岡弘紀・皆川恵(2002): 日本の亜熱帯海域における海藻藻場の評価手法に関する研究, 平成14年度環境省地球環境保全等試験研究費報告書, pp. 74-1-32.
- Alfaro, A. C. (2006): Benthic macro-invertebrate community composition within a mangrove / seagrass estuary in northern New Zealand, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 66, pp. 97-110.
- Boto, K. G. and Bunt, J. S. (1981): Tidal export of particulate organic matter from a northern Australian mangrove system, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 13, pp. 247-255.
- Clarke, K. R. (1993): Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure, *Australian Journal of Ecology*, Vol. 18, pp. 117-143.
- Dorenbosch, M., Grol, M. G. G., Christianen, M. J. A., Nagelkerken, I. and Velde, G. v. d. (2005): Indo-Pacific seagrass beds and mangroves contribute to fish density and diversity on adjacent coral reefs, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 302, pp. 63-76.
- Evrard, V., Kiswara, W., Bouma, T. J., and Middelburg, J. J. (2005): Nutrient dynamics of seagrass ecosystems: 15N

- evidence for the importance of particulate organic matter and root systems, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 295, pp. 49-55.
- Gattuso, J. P., Frankignoulle, M. and Wollast, R. (1998) : Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 29, pp. 405-434.
- Halpern, B. S. (2004) : Are mangroves a limiting resource for two coral reef fishes?, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 272, pp. 93-98.
- Hemminga, M. A., Gwada, P., Slim, F. J., d. Koeyer, P. and Kazungu, J. (1995) : Leaf production and nutrient contents of the seagrass *Thalassodendron ciliatum* in the proximity of a mangrove forest (Gazi Bay, Kenya), *Aquatic Botany*, Vol. 50, pp. 159-170.
- Hubbard, D. K. (1997) : Reefs as dynamic systems. *in* Life and Death of Coral Reefs (ed. Birkeland, C.), Chapman & Hall, pp. 43-67.
- Johannes, R. E. (1975) : Pollution and degradation of coral reef communities, *in* Tropical Marine Pollution (ed. Ferguson-Wood, E. and Johannes, R. E.), Elsevier.
- Kaldy, J. E. (2006) : Carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metal budgets : How large is the eelgrass (*Zostera marina* L.) sink in a temperate estuary?, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 52, pp. 342-353.
- Kitheka, J. U., Ohowa, B. O., Mwashote, B. M., Shimbara, W. S., Mwaluma, J. M. and Kazungu, J. M. (1996) : Water circulation dynamics, water column nutrients and plankton productivity in a well-flushed tropical bay in Kenya, *Journal of Sea Research*, Vol. 35, pp. 257-268.
- Kitheka, J. U. (1997) : Coastal tidally-driven circulation and the role of water exchange in the linkage between tropical coastal ecosystems, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 45, pp. 177-187.
- Kinsey, D. W. and Davies, P. J. (1979) : Effects of elevated nitrogen and phosphorus on coral reef growth, *Limnology and Oceanography*, Vol. 24, pp. 935-940.
- Mazda, Y., Sato, Y., Sawamoto, S., Yokochi, H. and Wolanski, E. (1990) : Links between physical, chemical and biological processes in Bashita-minato, a mangrove swamp in Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 31, pp. 817-833.
- Morinière, E. C. d. I., Nagelkerken, I., Meij, H., and Velde, G. (2004) : What attracts juvenile coral reef fish to mangroves : habitat complexity or shade?, *Marine Biology*, Vol. 144, pp. 139-145.
- Moore, K. A., 2004: Influence of seagrass on water quality in shallow regions of the lower Chesapeake Bay. *Journal of Coastal Research*, SI, 162-178.
- Muller-Parker, G. and D'Elia, C. F., (1997) : Interactions between corals and their symbiotic algae, *in* Life and Death of Coral Reefs (ed. Birkeland, C.), Chapman & Hall, pp. 96-113.
- Mumby, P. J., Edwards, A. J., Arias-Gonzalez, J. E., Lindeman, K. C., Blackwell, P. G., Gall, A., Gorczynska, M. I., Harborne, A. R., Pescod, C. L., Renken, H., Wabonitz, C. C. C., and Llewellyn, G. (2004) : Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean, *Nature*, Vol. 427, pp. 533-536.
- Nagelkerken, I., Dorenbosch, M., Verberk, W. C. E. P., Morinière, E. C. d. I., and Velde, G. v. d. (2000a) : Importance of shallow-water biotopes of a Caribbean bay for juvenile coral reef fishes : patterns in biotope association, community structure and spatial distribution, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 202, pp. 175-192.
- Nagelkerken, I., Velde, G. v. d., Gorissen, M. W., Meijer, G. J., Hof, T. V. t., and Hartog, C. d. (2000b) : Importance of mangroves, seagrass beds and the shallow coral reef as a nursery for important coral reef fishes, using a visual census technique, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 51, pp. 31-44.
- Ogden, J. C. (1997) : Ecosystem interactions in the tropical coastal seascape, *in* Life and Death of Coral Reefs (ed. Birkeland, C.), Chapman & Hall, pp. 288-297.
- Sakata, S., and Yamamuro, M. (2005) : Lipid biomarkers of chief primary producers and sediments in coral reef, seagrass bed, and mangrove forest ecosystems, 22nd International Meeting on Organic Geochemistry.
- Sheaves, M. (2005) : Nature and consequences of biological connectivity in mangrove systems, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 302, pp. 293-305.
- Simkiss, K. (1964) : Phosphates as crystal poisons of calcification, *Biological Reviews*, Vol. 39, pp. 487-505.
- Steneck, R. S. (1988) : Herbivory on coral reefs : a synthesis, *Proceedings of 6th International Coral Reef Symposium*, Townsville, pp. 37-49.
- Ward-Paige, C. A., Risk, M. J., and Sherwood, O. A. (2005) : Reconstruction of nitrogen sources on coral reefs : $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in gorgonians from Florida Reef Tract, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 296, pp. 155-163.

- Watanabe, A. (2004) : Process of seawater CO₂ system formation and biological community metabolism in coral reefs and brackish estuaries, Ph.D thesis, University of Tokyo, 210 pp.
- Yamamuro, M., Kayanne, H. and Yamano, H. (2003) : $\delta^{15}\text{N}$ of seagrass leaves for monitoring anthropogenic nutrient increases in coral reef ecosystems, Marine Pollution Bulletin, Vol. 46, pp. 452-458.
- Yamamuro, M., Umezawa, Y. and Koike, I. (2004) : Internal variations in nutrient concentrations and the C and N stable isotope ratios in leaves of the seagrass *Enhalus acoroides*, Aquatic Botany, Vol. 79, pp. 95-102.
- Ziegler, S. and Benner, R. (1998) : Ecosystem metabolism in a subtropical, seagrass-dominated lagoon, Marine Ecology Progress Series, Vol. 173, pp. 1-12.
- Zieman, J. C. (1982) : The ecology of the seagrass meadows of south florida : A community profile, U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report 82 (25), 158p.

付録A 観測結果

付録 A.1 流速

RUN1においては、S2を中心に流入、S5を中心に流出傾向が見られる。またRUN2においては、S1及びS4の中層を中心に流入、S5を中心に流出傾向が見られる。RUN3及びRUN4においては、S1及びS2で強い流入、S4の中層で弱い流入が、S5及びS6で流出が見られる。RUN5においても同様であるが、RUN4と比べると若干流れが弱まっている。RUN6においては、S1及びS2で流入、S3及びS5で流出が見られる(図-A.1)。

付録 A.2 リン酸態リン

RUN1においてはS1で、RUN2においてはS3の表層で相対的に高濃度である。S1では、RUN1、RUN3の表層で比較的高濃度である。RUN1からRUN2にかけては濃度の低下が見られる。RUN3では表層が高濃度となるが、RUN4、RUN5では再度濃度が低下する。RUN6では若干濃度の増加が見られる。S2では、RUN1、RUN2で下層が比較的高濃度である。RUN1からRUN2にかけては濃度の低下が見られ、RUN3からRUN4にかけては濃度の増加が見られる。RUN5、RUN6では再度濃度が低下している。S3では、RUN2の表層で比較的高濃度である。RUN1からRUN2にかけて表層で濃度の増加が見られるが、その後は下降していく。S4では、RUN1からRUN2まで単調に濃度は下降し、その後RUN5まで増加に転ずる。RUN6では再び下降する。S5

では、RUN1からRUN4まで単調に濃度が増加し、RUN5以降は単調に下降している。変化量は小さい。S6では、RUN1からRUN3までは特徴的な傾向は見られないが、RUN4以降は単調に下降している(図-A.2)。

付録 A.3 溶存有機態リン

S1では、RUN4、RUN5にかけて比較的高濃度になるが、RUN6では濃度の再度低下が見られる。S2では、RUN1からRUN4にかけて濃度の上昇が見られる。RUN5では一旦濃度の低下が見られ、RUN6では再度濃度が上昇している。S3では、RUN1からRUN2にかけて底層で濃度の低下が見られる。RUN3以降は濃度の上昇が見られる。S4では、RUN1からRUN2にかけて濃度は低下する。その後RUN4まで上昇するが、RUN5で一旦低下する。RUN6では再び上昇する。S5では、表層と底層で変動の様子が異なるが、全体的にはRUN1からRUN6まで単調に濃度が上昇している。S6では、RUN2からRUN3にかけて一旦濃度が低下するが、RUN4以降は上昇している(図-A.3)。

付録 A.4 溶存態全リン

RUN2においてはS3の表層において高濃度、S4において低濃度である。また、RUN5においてはS3の表層で高濃度、S1で比較的低濃度である。S1では、RUN1からRUN2にかけて濃度の低下が見られるが、RUN3では濃度が上昇している。RUN5までは再度低下するが、RUN6では再度上昇している。S2では、RUN1からRUN2にかけて濃度の低下が見られるが、RUN3、4では濃度が上昇している。RUN5までは再度低下するが、RUN6では再度上昇している。S3では、明瞭な変化は見られない。S4では、RUN1からRUN2にかけて濃度は低下する。その後RUN4まで上昇するが、RUN5で一旦低下する。RUN6では再び上昇する。S5では、RUN1からRUN3まで単調に濃度が上昇し、その後ほぼ安定するが、S6の表層では濃度の上昇が見られる。S6では、RUN3で濃度の低下が見られる(図-A.4)。

付録 A.5 懸濁態全リン

S1では、RUN4からRUN6にかけて特に底層において濃度の上昇が見られる。S2では、RUN2の表層、RUN5の表層、RUN6の表層において高濃度が観測されている。S3では、RUN1からRUN3にかけて濃度の上昇が見られ、RUN4、5で一旦低下し、再度RUN6で濃度の回復が見られる。S4では、RUN3の底層、RUN5の中層において高濃度が見られる。S5では、RUN5の底層では濃度の上昇が見られる。S6では、顕著な傾向は見られない(図-A.5)。

付録 A.6 全リン

S1では、RUN1からRUN2にかけて濃度の低下が見られるが、RUN3では濃度が上昇している。RUN5までは再度低下するが、RUN6では再度上昇している。S2では、RUN5の表層、RUN6の底層で比較的高濃度である。S3では、RUN1からRUN2にかけて濃度の上昇が見られるが、RUN4、5では低下する。RUN6では底層のみ上昇している。S4では、RUN2からRUN3にかけて底層の濃度が上昇する。RUN4では底層の濃度が低下し、中層で上昇する。S5では、RUN5の底層で濃度の上昇が見られる。S6では、RUN6で比較的高濃度が見られる(図-A.6)。

付録 A.7 アンモニア態窒素

S1では、RUN1、2で相対的に高濃度である。S2では、RUN1の底層、RUN2の表層、RUN6の底層で比較的高濃度である。S3では、RUN1の中層、RUN2の表層、RUN4の底層で比較的高濃度である。S4では、明瞭な傾向は見られない。S5では、RUN5の底層、RUN6の表層で比較的高濃度である。S6では、RUN5の底層で比較的高濃度である(図-A.7)。

付録 A.8 亜硝酸態窒素

S1では、RUN1、2で相対的に高濃度である。S2では、RUN1の底層、RUN2の表層、RUN6の底層で比較的高濃度である。S3では、RUN1の中層、RUN2の表層、RUN4の底層で比較的高濃度である。S4では、明瞭な傾向は見られない。S5では、RUN5の底層、RUN6の表層で比較的高濃度である。S6では、RUN5の底層で比較的高濃度である(図-A.8)。

付録 A.9 硝酸態窒素

S1では、RUN1、3で相対的に高濃度である。S2では、RUN1、6の底層で相対的に高濃度である。S3では、RUN1の中層、RUN2の表層、RUN4の底層で相対的に高濃度である。S6では、RUN5の底層で相対的に高濃度である(図-A.9)。

付録 A.10 溶存無機態窒素

S1では、RUN1、3で相対的に高濃度である。S2では、RUN1、6の底層で相対的に高濃度である。S3では、RUN1の中層、RUN2の表層、RUN4の底層で相対的に高濃度である。S4では、表層または底層において比較的高濃度になる場合が多い。S6では、RUN5の底層で相対的に高濃度である。概して硝酸態窒素と同様の傾向を示している(図-A.10)。

付録 A.11 溶存有機態窒素

S1では、RUN1の全層及びRUN2の底層で低濃度であるのに対し、RUN2、3の底層及びRUN4で相対的に高濃度である。S2では、RUN1の表層及び中層とRUN6の底層で低濃度であるのに対し、RUN2の表層及びRUN5の全層で相対的に高濃度である。S3では、RUN1からRUN3にかけて濃度が上昇しているが、その後は低下し、再度RUN6で上昇する。S4では、RUN1で低濃度、RUN6の表層において高濃度となり、調査期間を通じて概ね上昇傾向である。S5ではRUN3の底層及びRUN4の表層で比較的低濃度であるのに対し、RUN5及びRUN6の底層で比較的高濃度である。S6では、RUN1及びRUN6の底層で相対的に低濃度である。(図-A.11)。

付録 A.12 溶存態全窒素

S1ではRUN1の底層、RUN2の底層、RUN3、5の全層で高濃度である。S2では、RUN1の表層及び中層とRUN2の底層で低濃度であるのに対し、RUN2の表層及びRUN5の全層で相対的に高濃度である。S3では、RUN1の表層及び底層で低濃度であるが、RUN3の全層及びRUN6の底層で高濃度である。S4では、RUN1及びRUN2の底層で低濃度、RUN6の表層において高濃度である。S5ではRUN5の底層で比較的高濃度である。S6でも、RUN5の底層で相対的に高濃度である。(図-A.12)。

付録 A.13 懸濁態全窒素

S1ではRUN2、3、6の表層で相対的に高濃度である。S2では、RUN1の低層とRUN4の全層で低濃度であるのに対し、RUN1、3の表層で相対的に高濃度である。S3ではRUN1の中層、RUN3の全層、RUN6の底層で低濃度であるが、RUN1の底層で高濃度である。S4では、RUN3の中層及び底層、RUN5の底層において高濃度である。S5ではRUN1で比較的高濃度である。S6でも、RUN1で相対的に高濃度である(図-A.13)。

付録 A.14 全窒素

S1及びS2ではRUN1からRUN3にかけて濃度の上昇が見られる。RUN4で一旦濃度の低下が見られ、RUN5で再び上昇、RUN6で再度低下となる。S3ではRUN1の表層及び中層で低濃度である。RUN1からRUN4にかけて濃度の上昇が見られ、その後低下する。S4では、RUN1からRUN3にかけて特に底層において濃度の上昇が見られる。RUN4で一旦低下するが、その後特に表層において濃度の上昇が見られる。S5ではRUN1及びRUN5の底層で高濃度であ

る。S6ではRUN5の底層で高濃度である。表層の値はほとんど変化しない(図-A.14)。

付録B 流量及びリン・窒素の輸送量

付録 B.1 流量

観測期間中を通じて北東から南西に向かう沿岸流が卓越しており、S1及びS2で流入、S5及びS6で流出するという傾向が常時見られた。S3及びS4においては潮汐の影響を受けた流れ、即ち下げ潮時に流出し上げ潮時に流入するという傾向が見られた。しかし、RUN5におけるS4では下げ潮時にも拘らず中層付近において流入が見られる。これは基準面から4m付近の位置において貫入してくる流れが存在するためである(図-B.1)。

付録 B.2 リン酸態リン輸送量

RUN5以外では、S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。RUN5ではS4の中層における貫入流れのに伴う輸送が卓越している(図-B.2)。

付録 B.3 溶存有機態リン輸送量

リン酸態リンの場合と同様に、RUN5以外では、S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。しかし、リン酸態リンの場合と比較すると、S3及びS4における輸送量が多い(図-B.3)。

付録 B.4 溶存態全リン輸送量

RUN5以外では、S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。RUN1、RUN2、RUN5でS4における輸送量が多い(図-B.4)。

付録 B.5 懸濁態全リン輸送量

S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。RUN1、RUN2、RUN5でS4における輸送量が多い(図-B.5)。

付録 B.6 全リン輸送量

S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも常に上回っている。RUN1、RUN2、RUN5でS4における輸送量が多い(図-B.6)。

付録 B.7 アンモニア態窒素輸送量

S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っているケースが多いが、RUN4、RUN5ではS5及びS6からの流出量の方が大きい。総じてS4における

輸送量は大きくはない(図-B.7)。

付録 B.8 亜硝酸態窒素輸送量

RUN3、RUN5以外ではS1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。亜硝酸態での輸送量の絶対値は他の形態の窒素よりも小さく、この寄与は小さいと考えられる(図-B.8)。

付録 B.9 硝酸態窒素輸送量

RUN1、RUN2、RUN6では、S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。しかし、それら以外のRUNではS5及びS6からの流出量の方が上回っている。特にRUN3のS5において大きな流出が見られる(図-B.9)。

付録 B.10 溶存無機態窒素輸送量

RUN1、RUN2、RUN3、RUN6では、S1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。しかし、それら以外のRUNではS5及びS6からの流出量の方が上回っている(図-B.10)。

付録 B.11 溶存有機態窒素輸送量

RUN1、RUN6では、S5及びS6からの流出量の方が上回っている。それら以外のRUNではS1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている(図-B.11)。

付録 B.12 溶存態全窒素輸送量

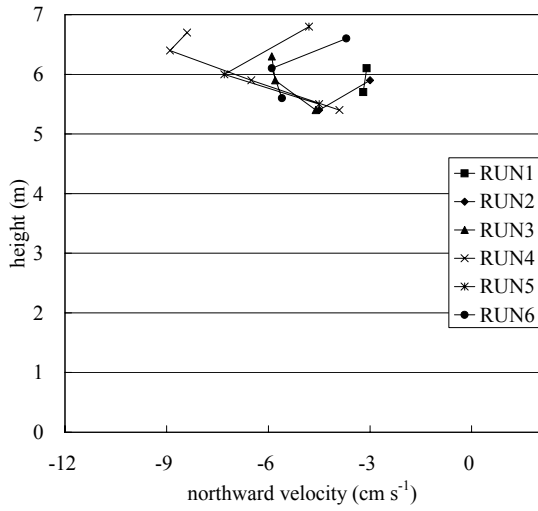
RUN4では、S5及びS6からの流出量の方が上回っている。それら以外のRUNではS1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。輸送量の絶対値はRUN5(満潮近傍)で最大となっている(図-B.12)。

付録 B.13 懸濁態全窒素輸送量

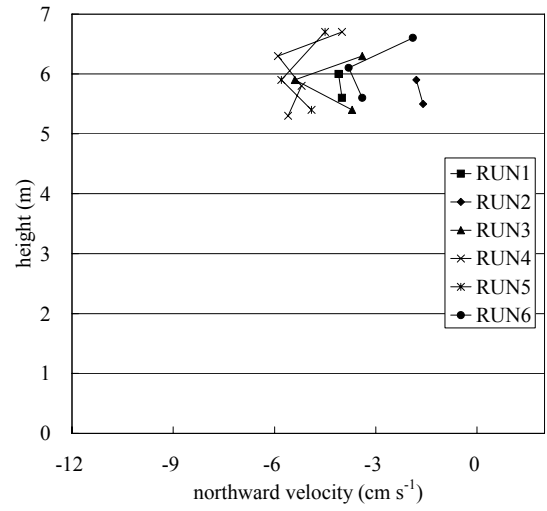
RUN4では、S5及びS6からの流出量の方が上回っている。それら以外のRUNではS1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている。総じてS2からの流入量が多いことが多い(図-B.13)。

付録 B.14 全窒素輸送量

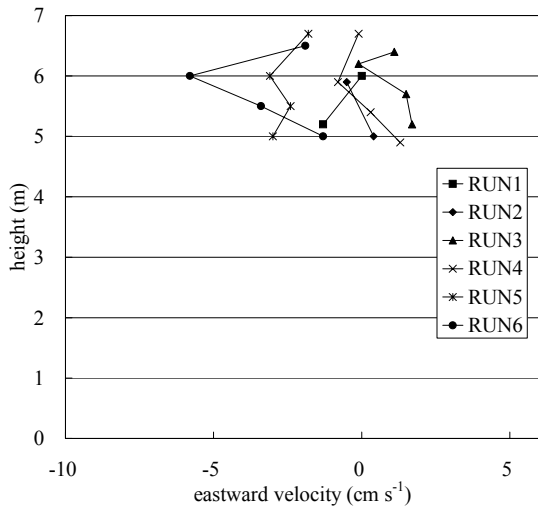
RUN4では、S5及びS6からの流出量の方が上回っているが、S3及びS4での輸送量を含めると総和は流入である。それら以外のRUNではS1及びS2からの流入量のほうがS5及びS6からの流出量よりも上回っている(図-B.14)。



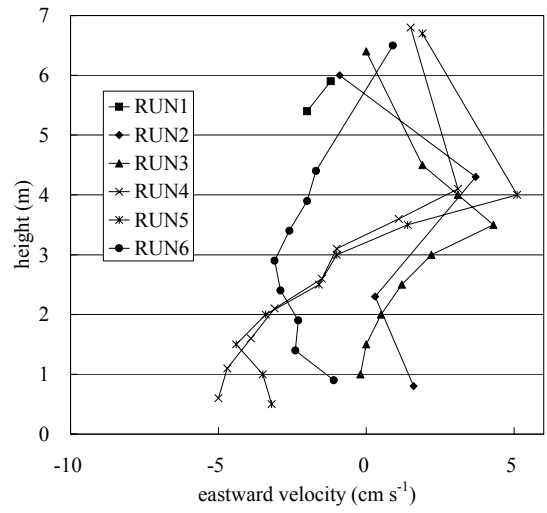
(a) S1



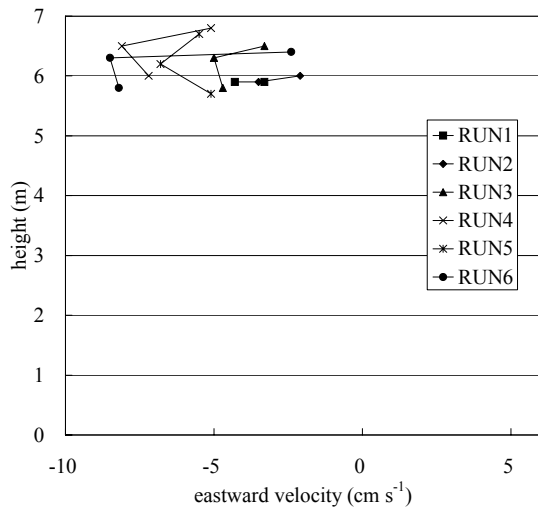
(b) S2



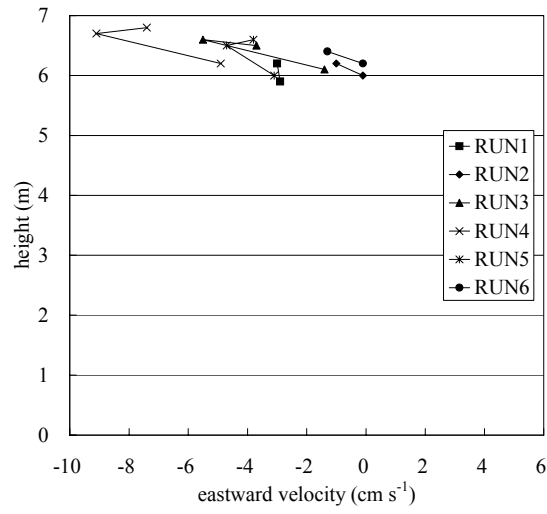
(c) S3



(d) S4



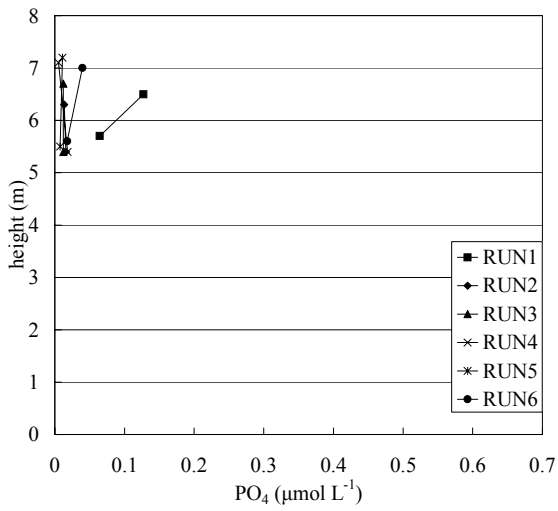
(e) S5



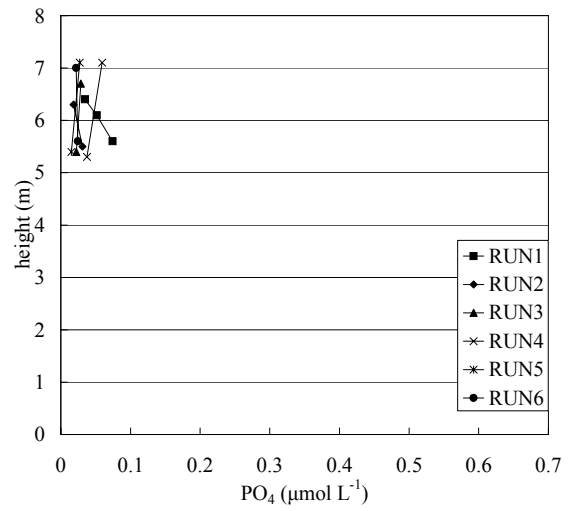
(f) S6

図-A.1 流速測定結果

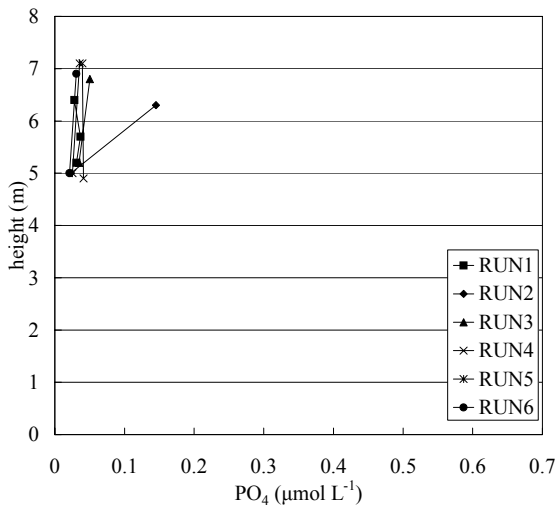
(縦軸は最深部からの高さを表す．観測船を横切る流れ，即ち S1, S2 については南北方向の流速成分（北向きを正），S3, S4, S5, S6 については東西方向の流速成分（東向きを正）を記載．)



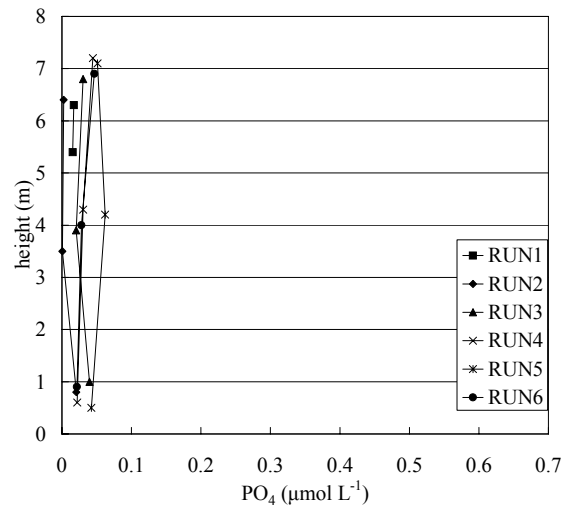
(a) S1



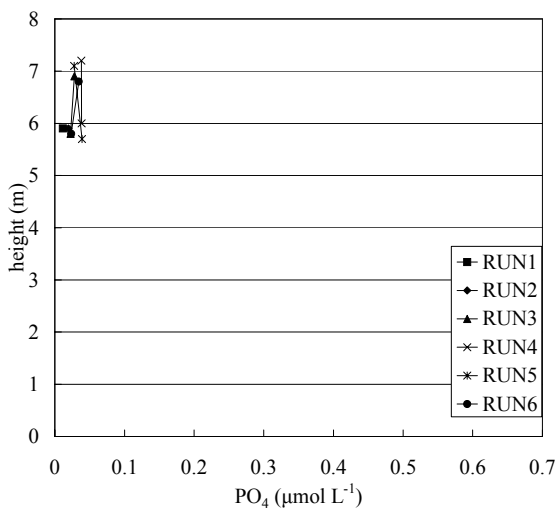
(b) S2



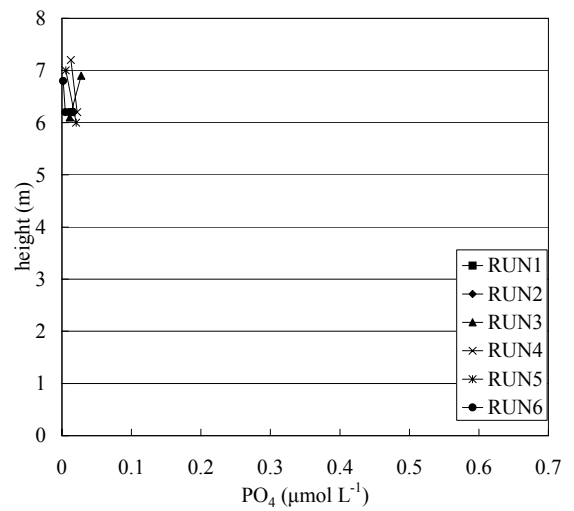
(c) S3



(d) S4

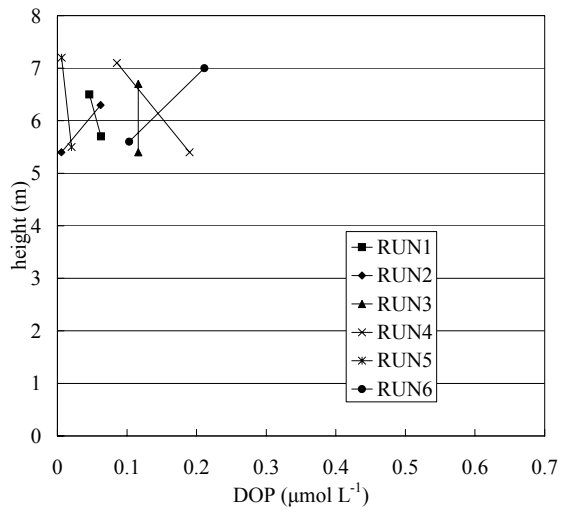


(e) S5

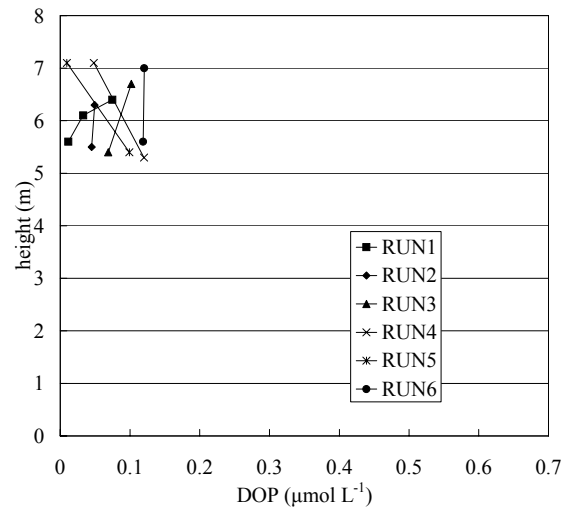


(f) S6

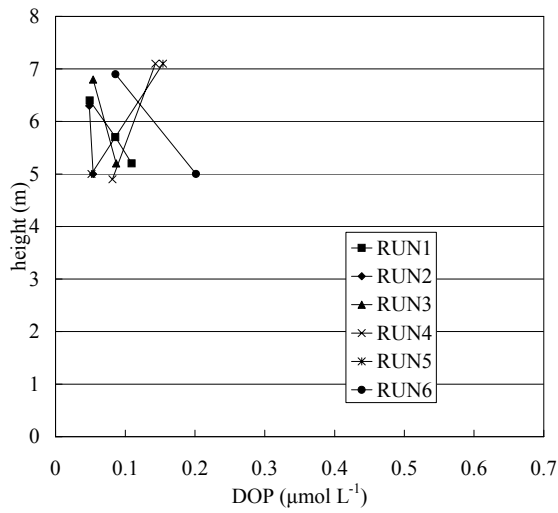
図-A.2 リン酸態リン測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



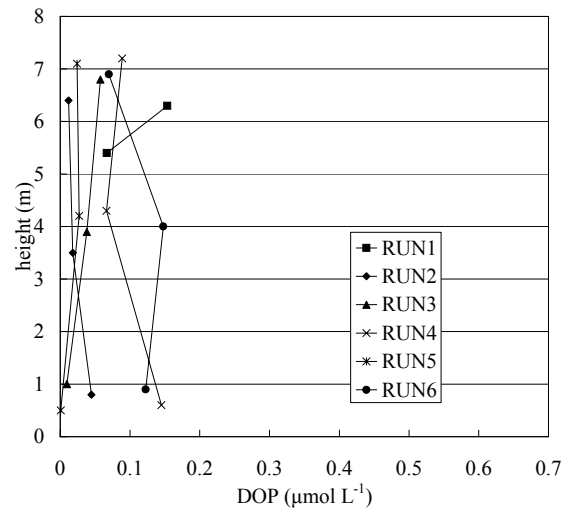
(a) S1



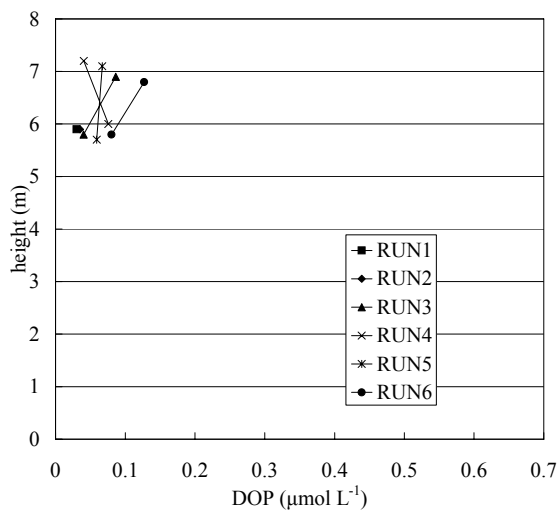
(b) S2



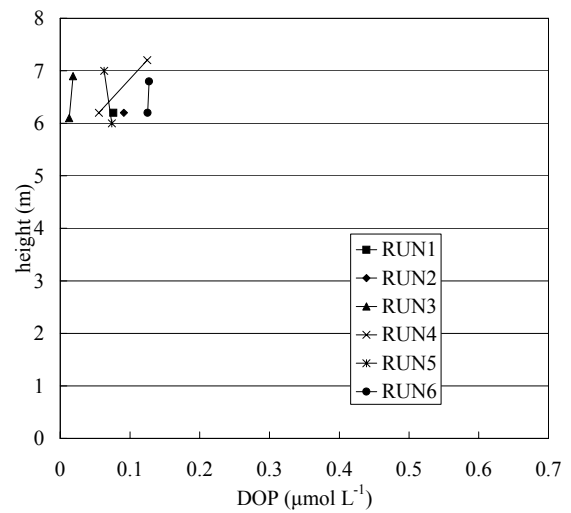
(c) S3



(d) S4

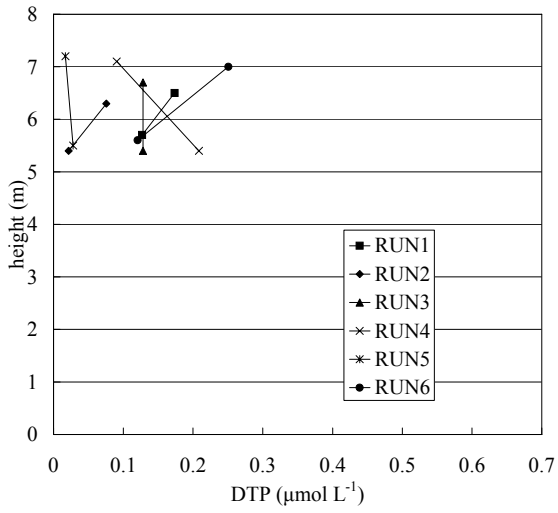


(e) S5

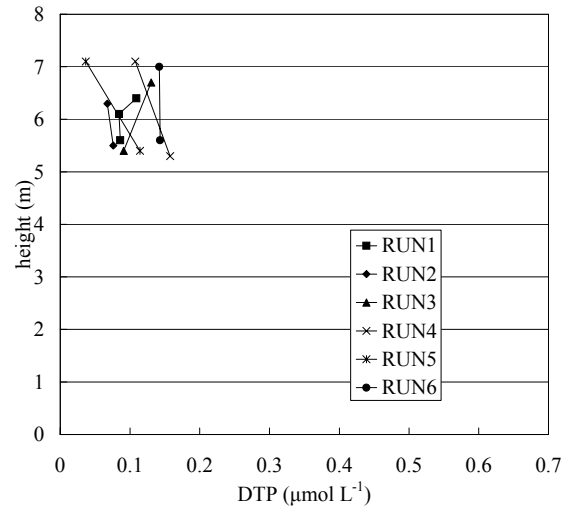


(f) S6

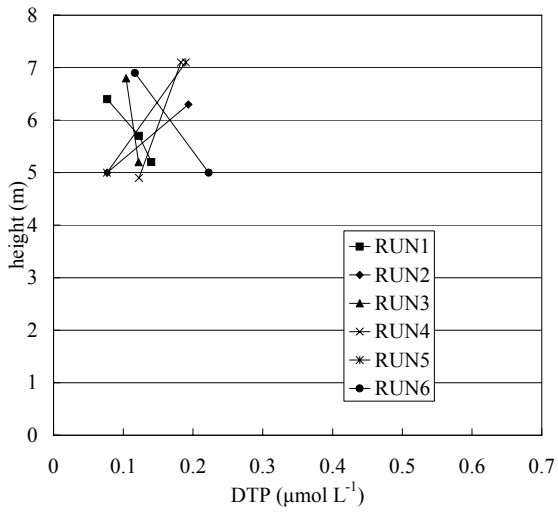
図-A.3 溶解有機態リン測定結果 (縦軸は基準点からの高さを表す)



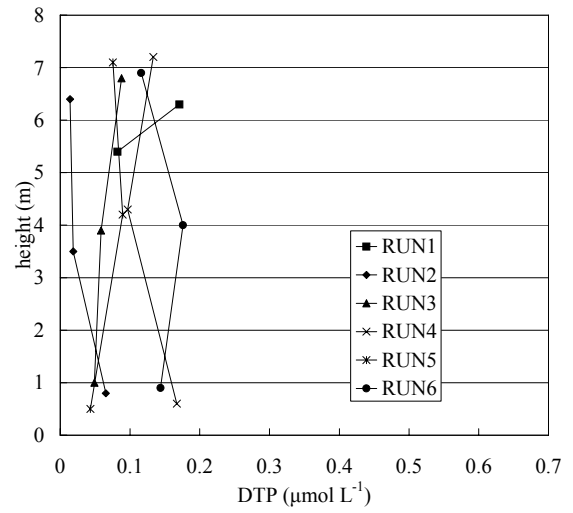
(a) S1



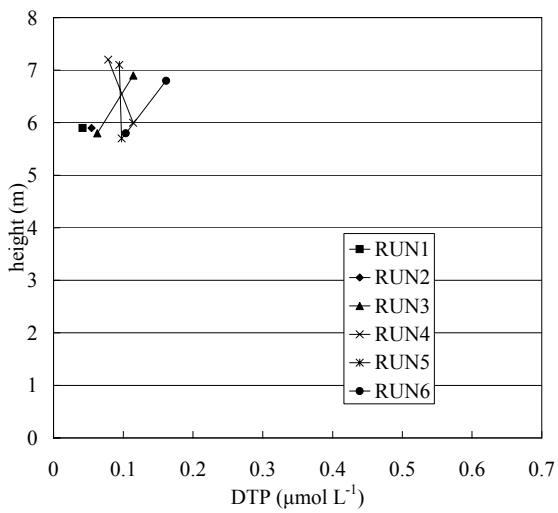
(b) S2



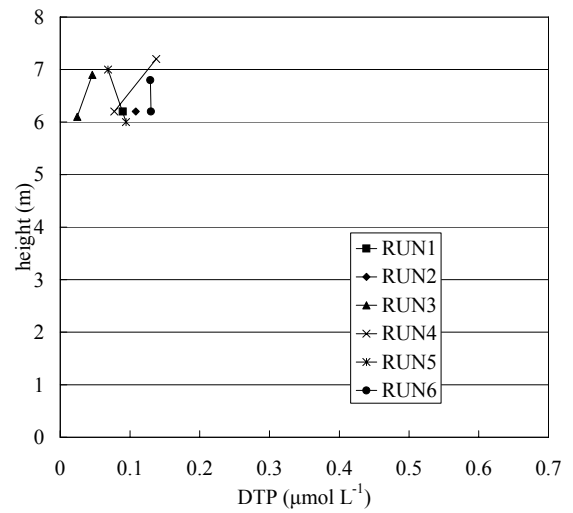
(c) S3



(d) S4

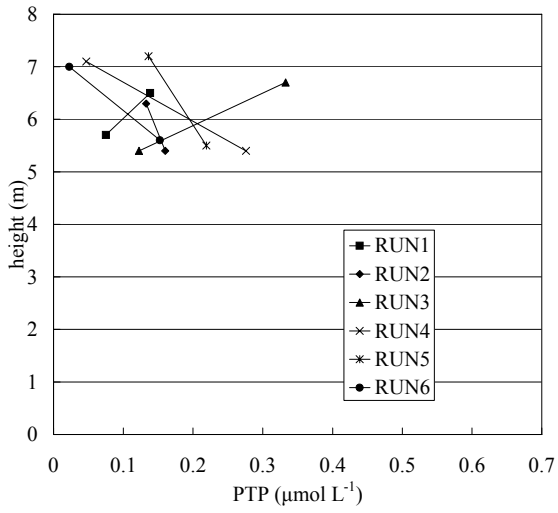


(e) S5

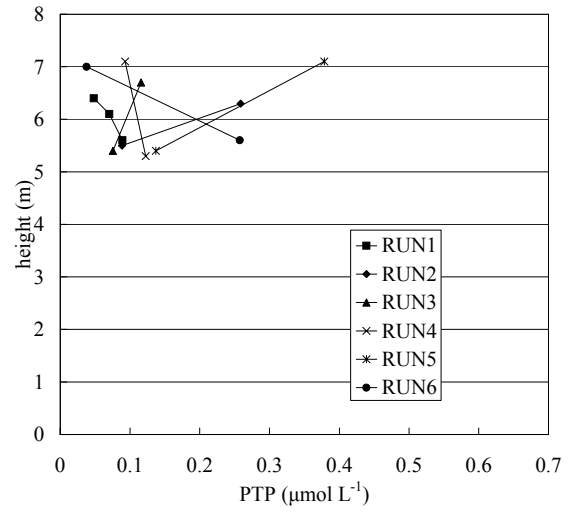


(f) S6

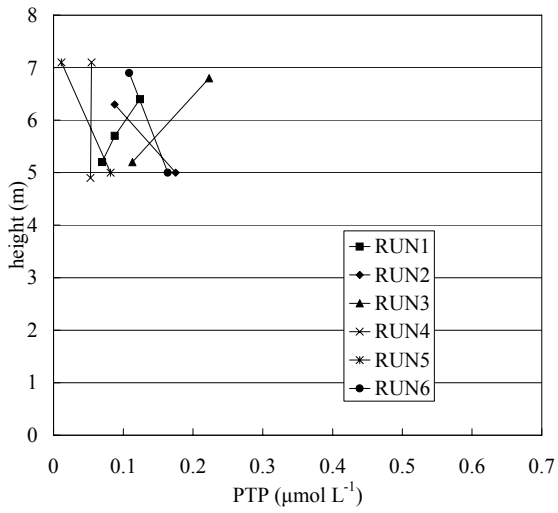
図-A.4 溶存態全リン測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



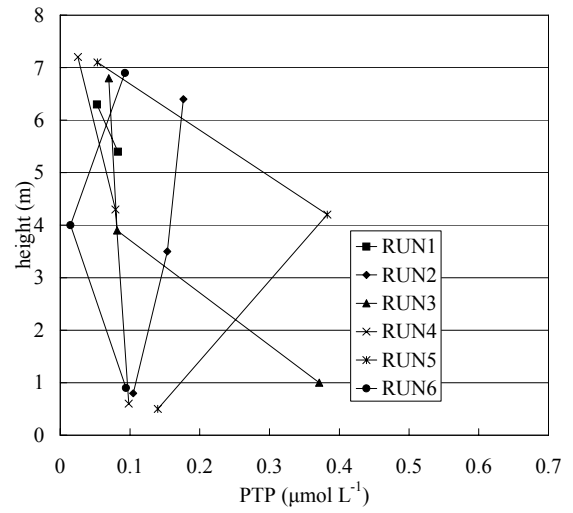
(a) S1



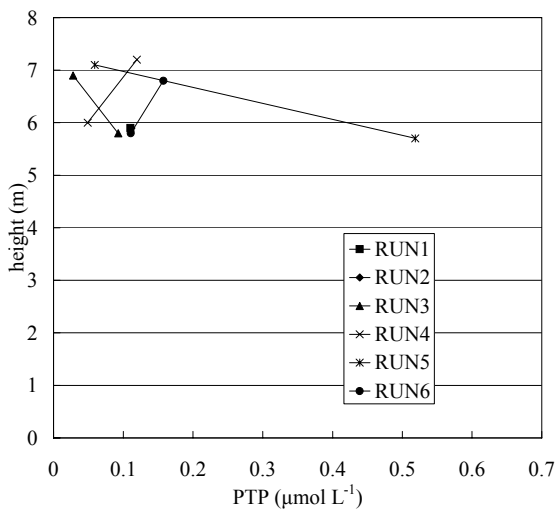
(b) S2



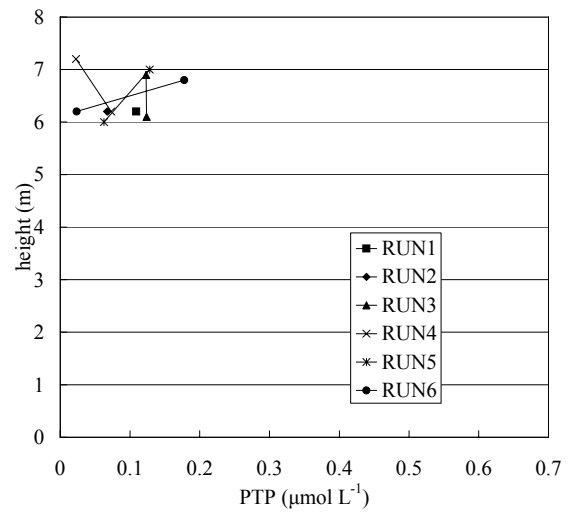
(c) S3



(d) S4

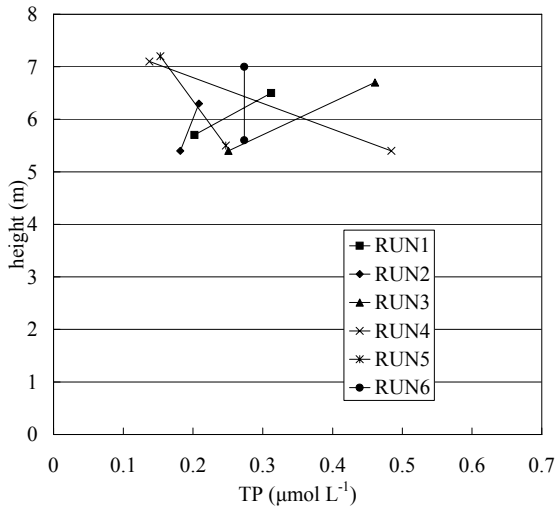


(e) S5

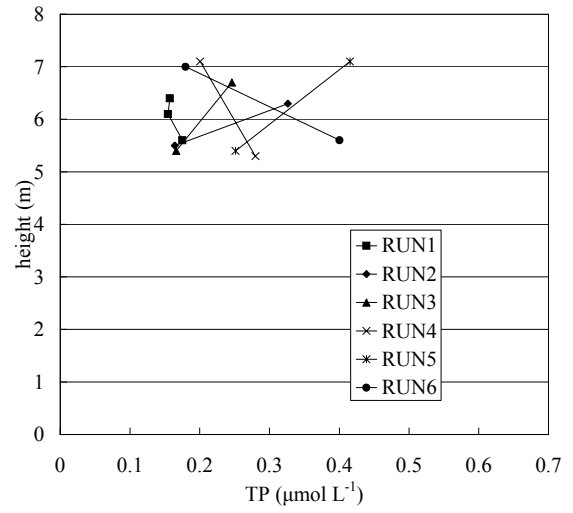


(f) S6

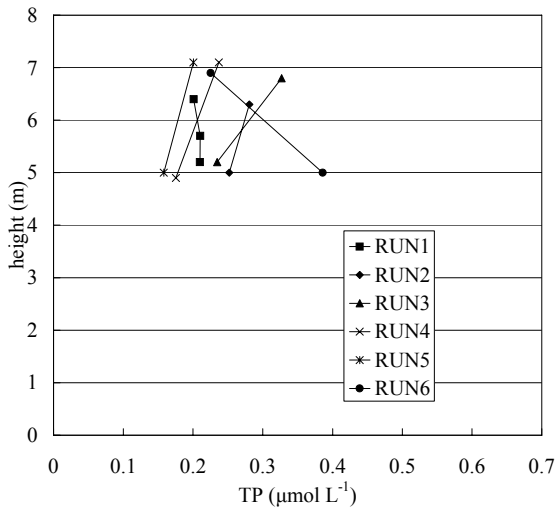
図-A.5 懸濁態全リン測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



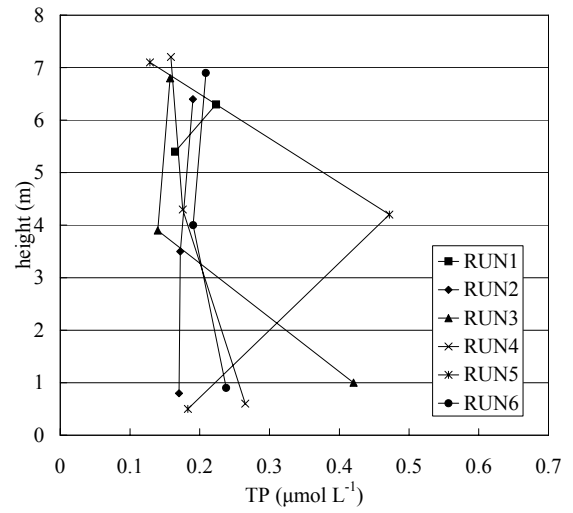
(a) S1



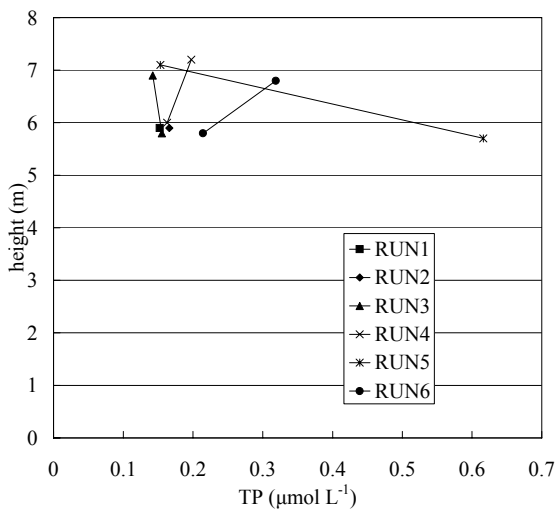
(b) S2



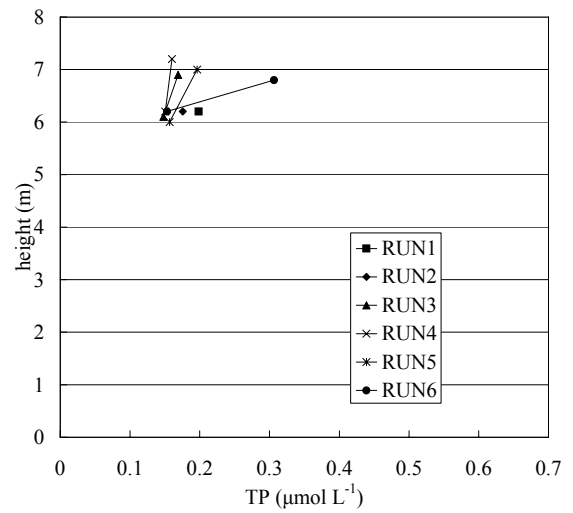
(c) S3



(d) S4

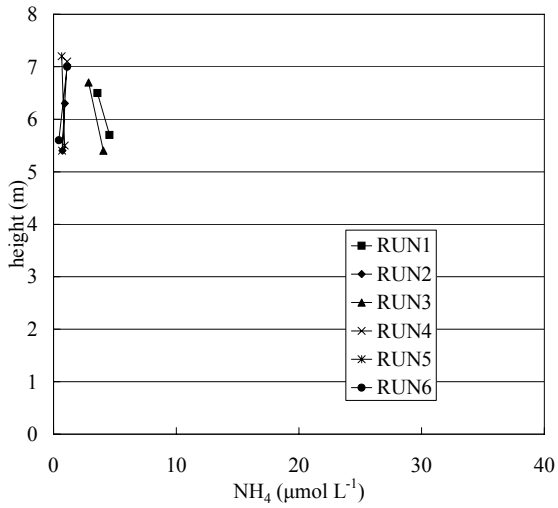


(e) S5

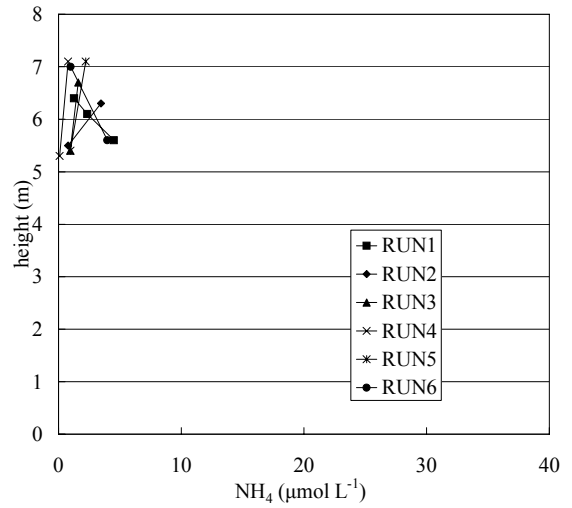


(f) S6

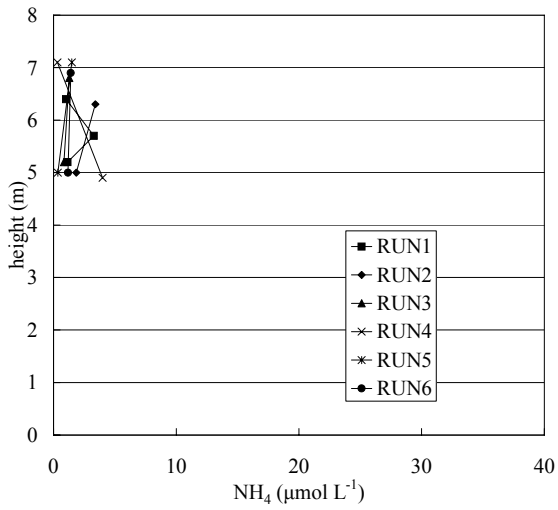
図-A.6 全リン測定結果 (縦軸は基準点からの高さを表す)



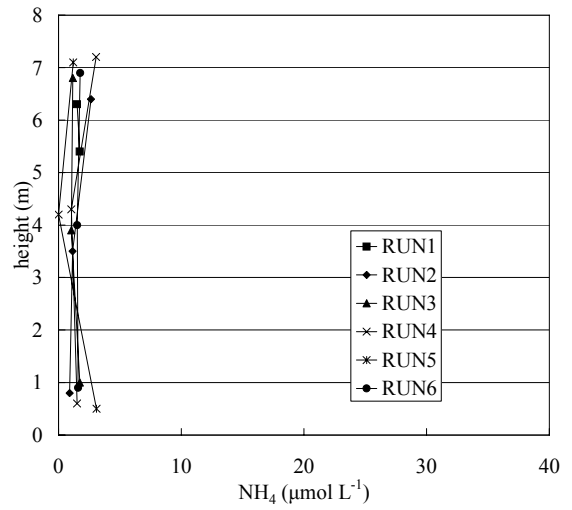
(a) S1



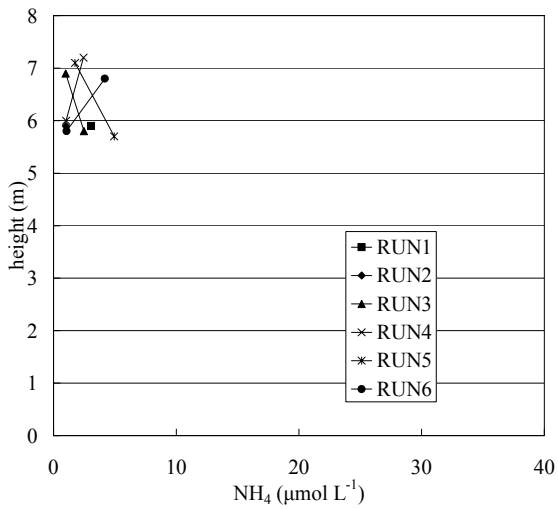
(b) S2



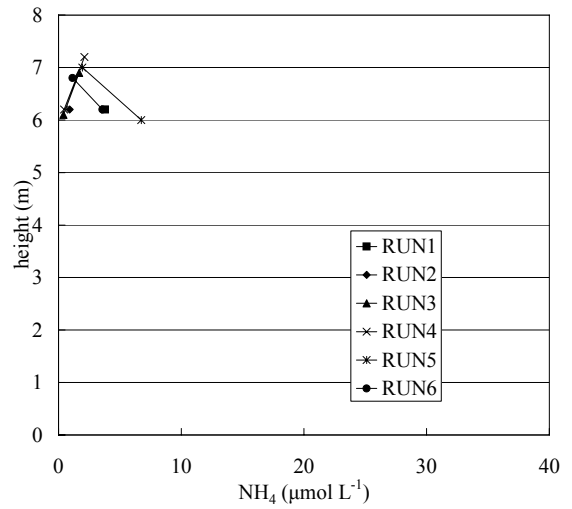
(c) S3



(d) S4

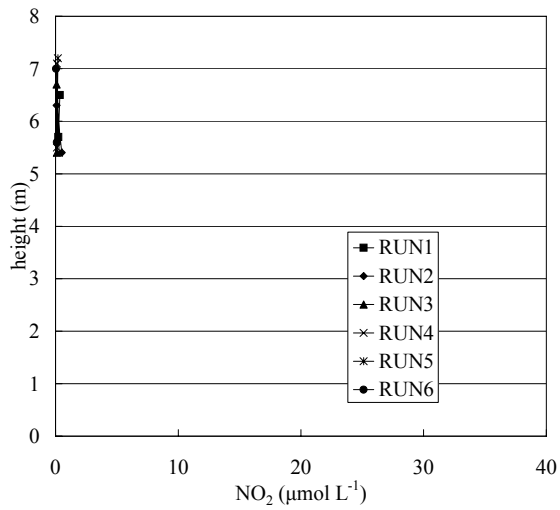


(e) S5

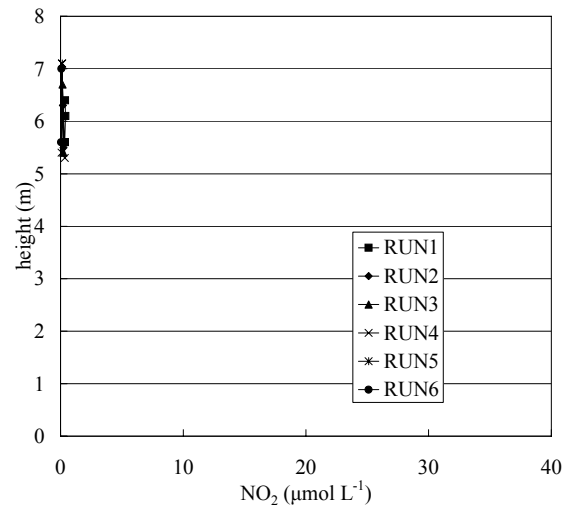


(f) S6

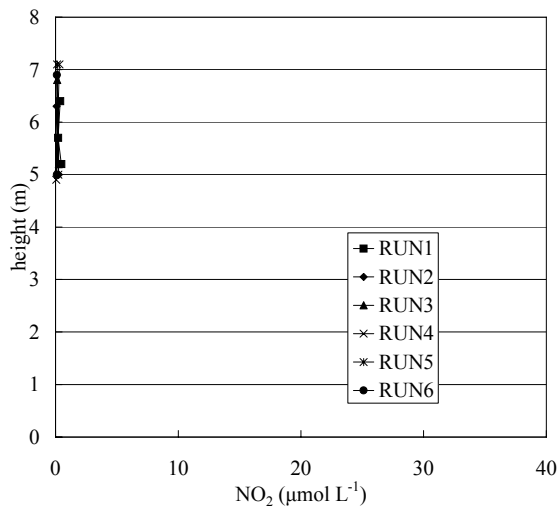
図-A.7 アンモニア態窒素測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



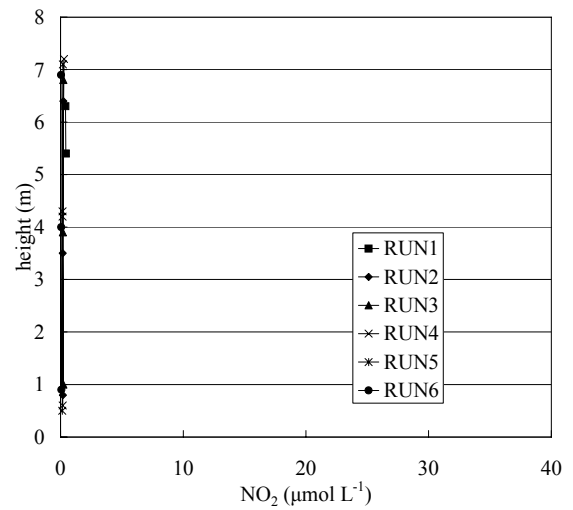
(a) S1



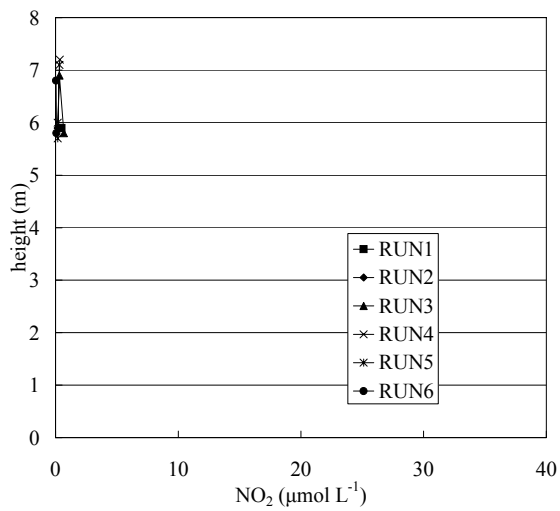
(b) S2



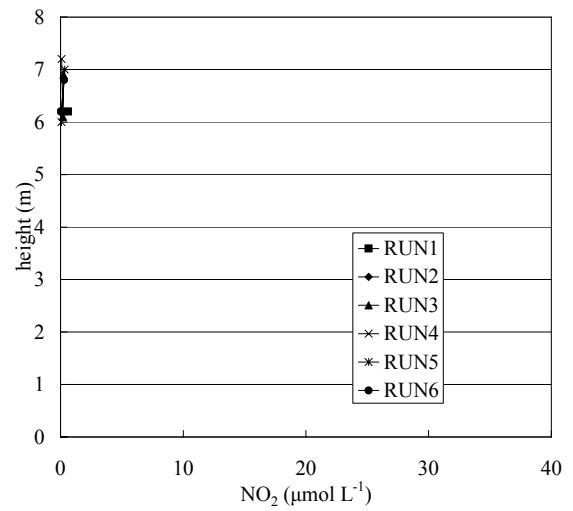
(c) S3



(d) S4

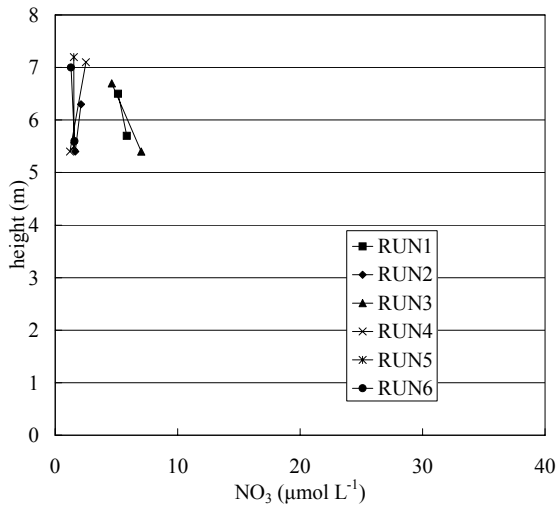


(e) S5

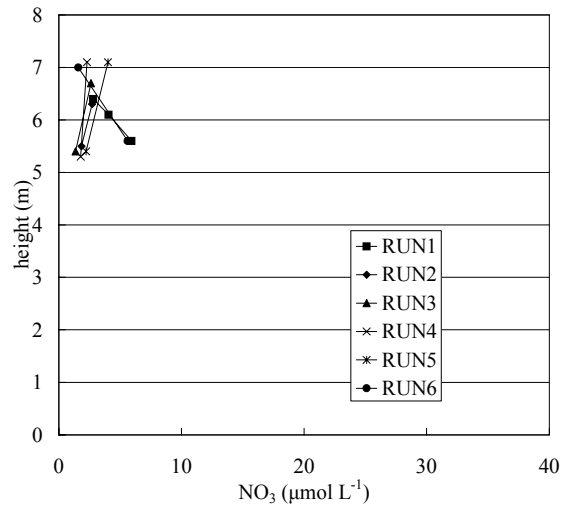


(f) S6

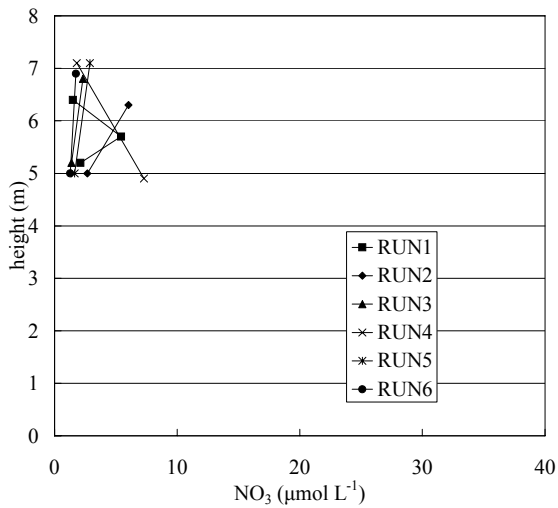
図-A.8 亜硝酸態窒素測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



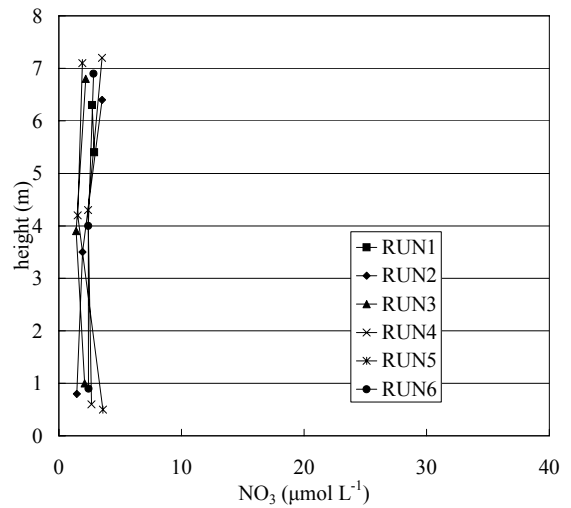
(a) S1



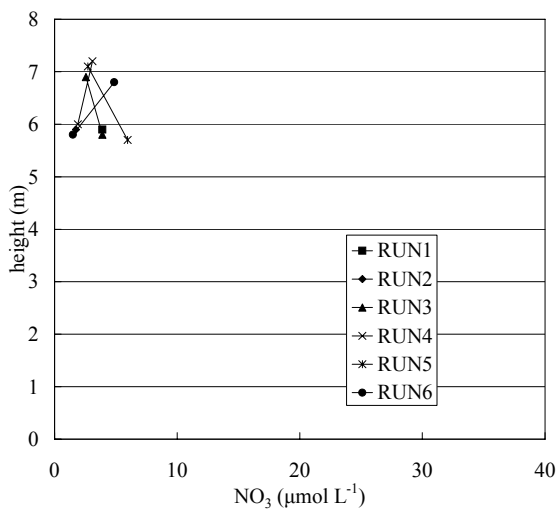
(b) S2



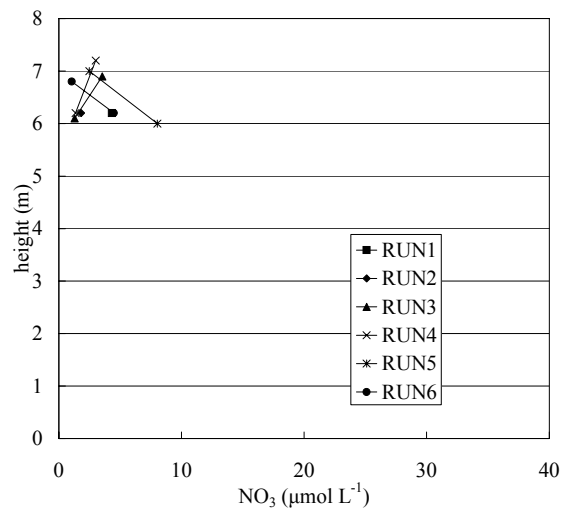
(c) S3



(d) S4

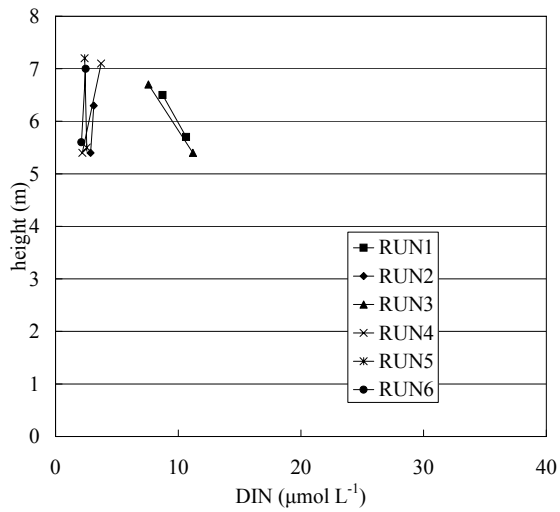


(e) S5

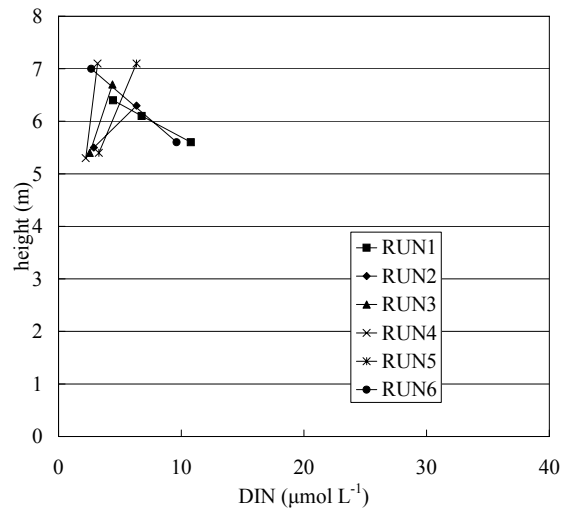


(f) S6

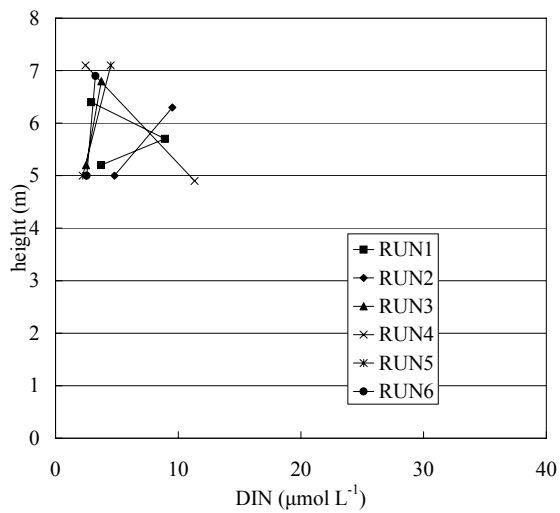
図-A.9 硝酸態窒素測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



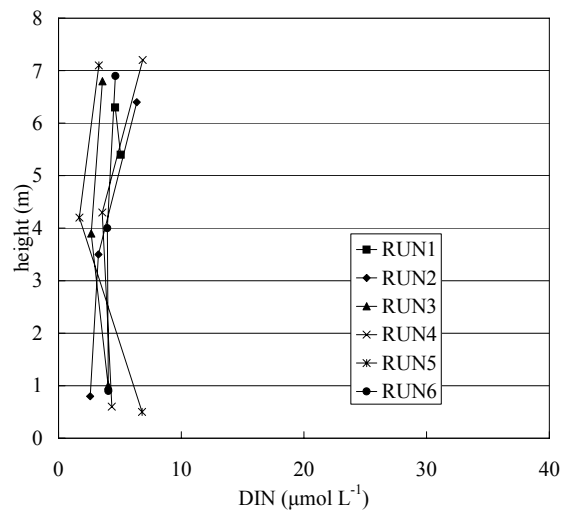
(a) S1



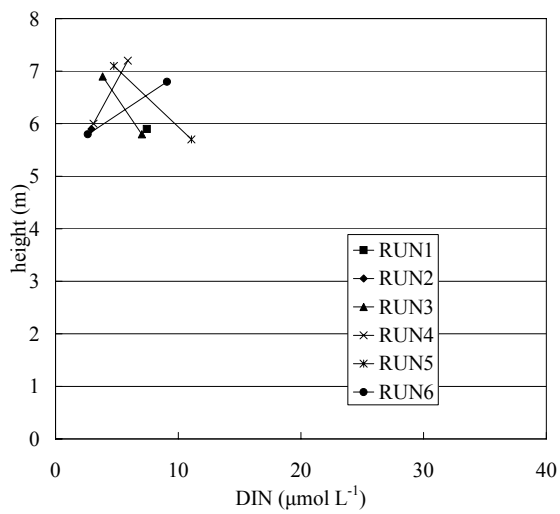
(b) S2



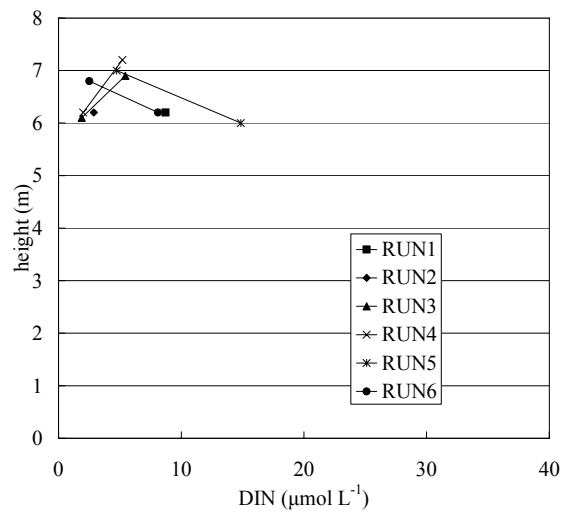
(c) S3



(d) S4

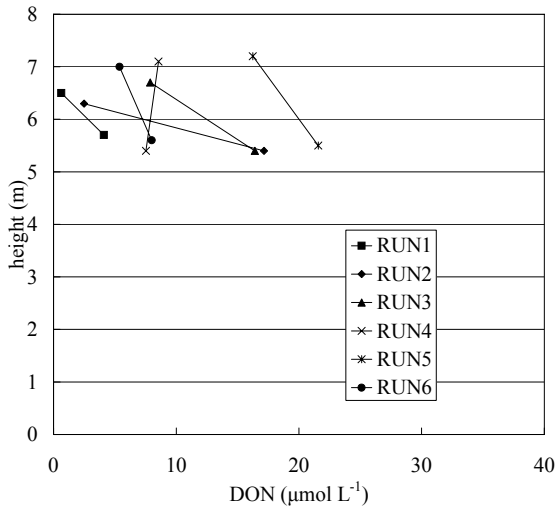


(e) S5

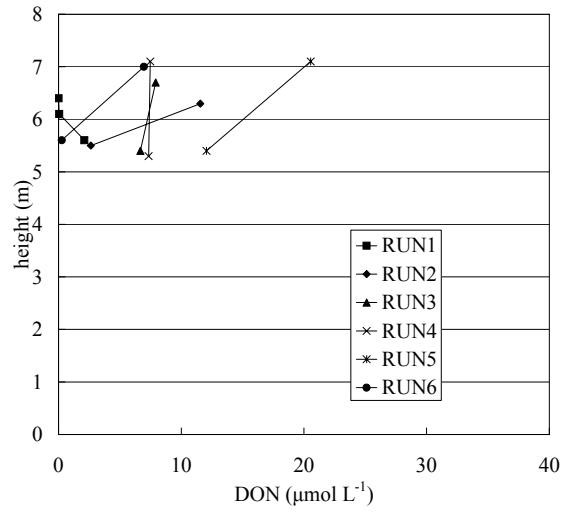


(f) S6

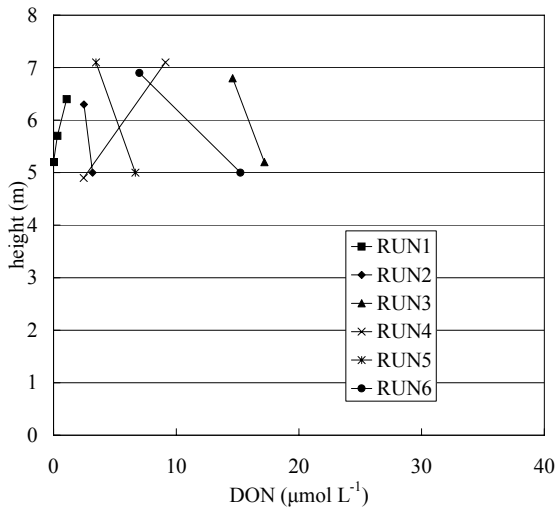
図-A.10 溶存無機態窒素測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



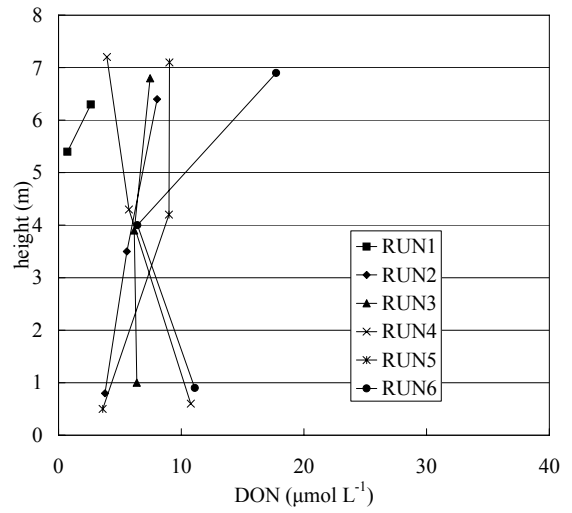
(a) S1



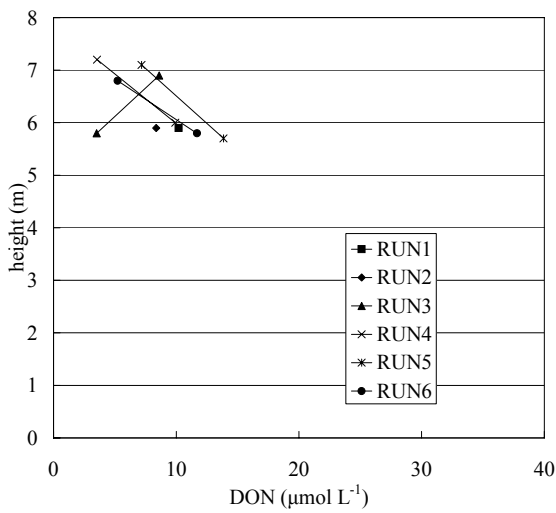
(b) S2



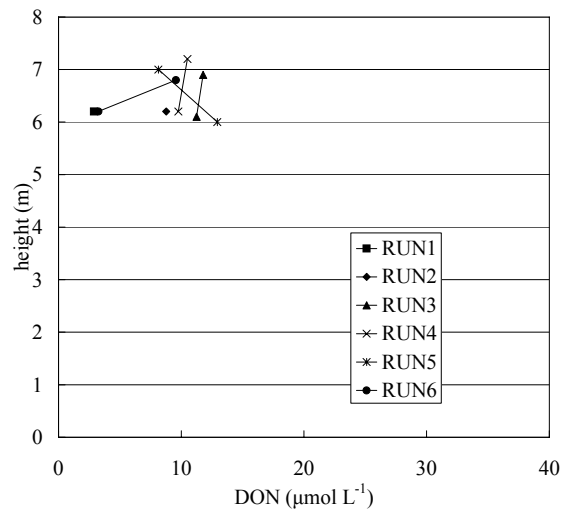
(c) S3



(d) S4

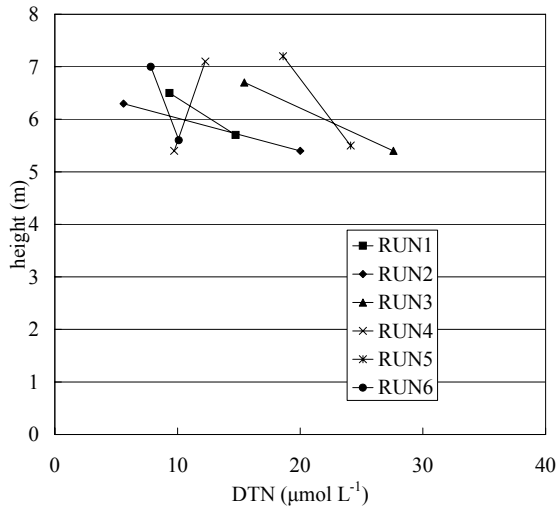


(e) S5

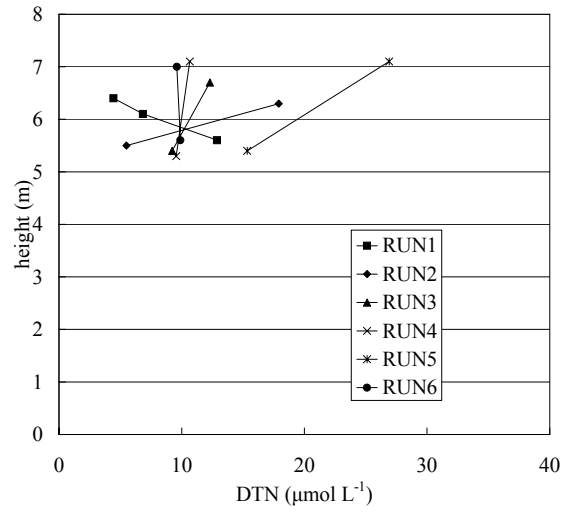


(f) S6

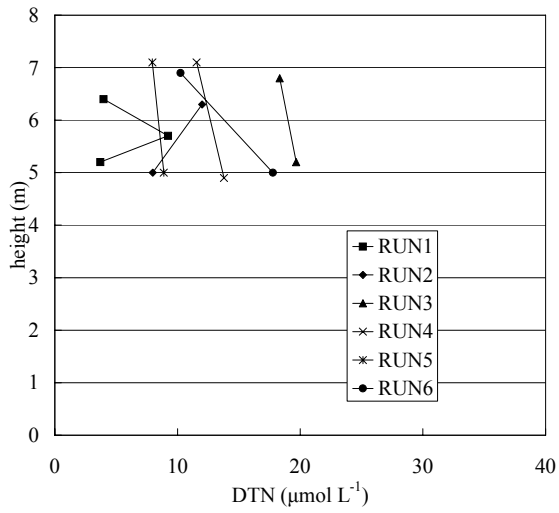
図-A.11 溶存有機態窒素測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



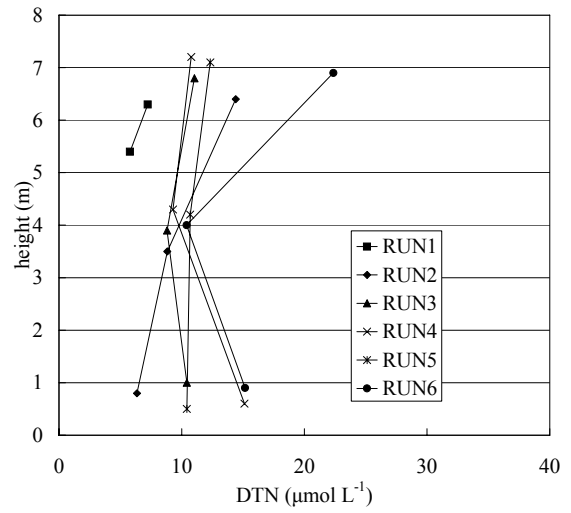
(a) S1



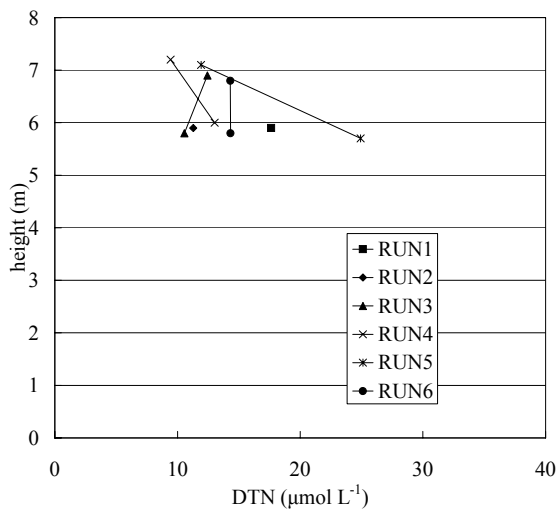
(b) S2



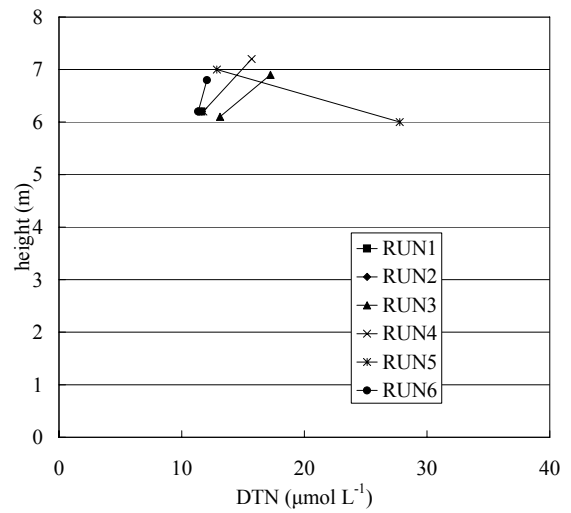
(c) S3



(d) S4

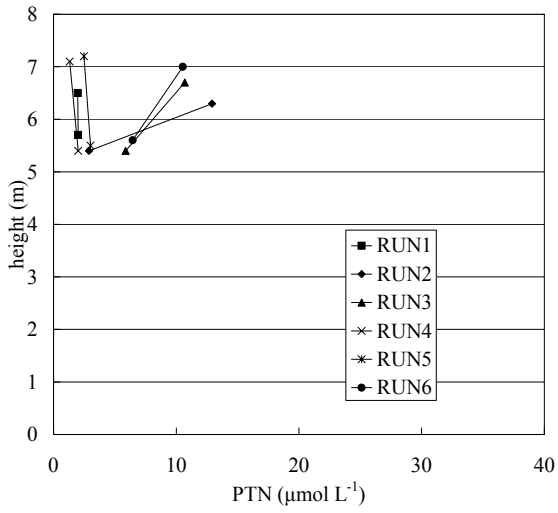


(e) S5

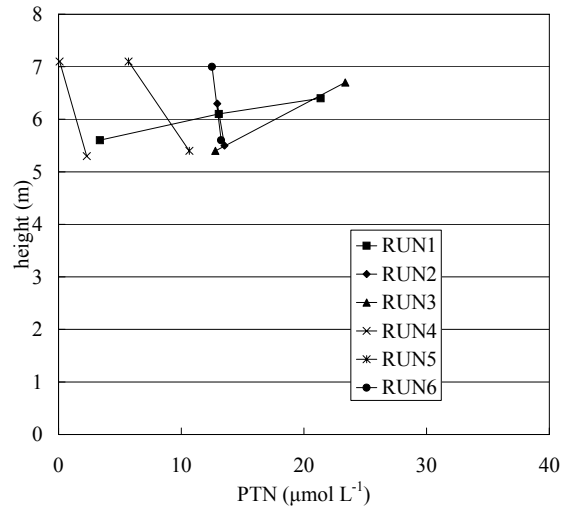


(f) S6

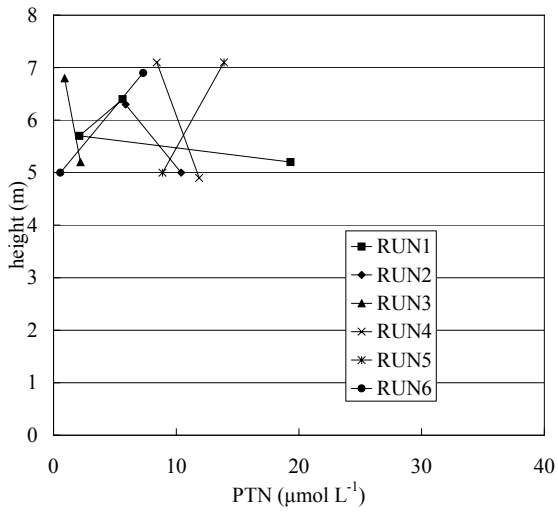
図-A.12 溶存態全窒素測定結果 (縦軸は基準点からの高さを表す)



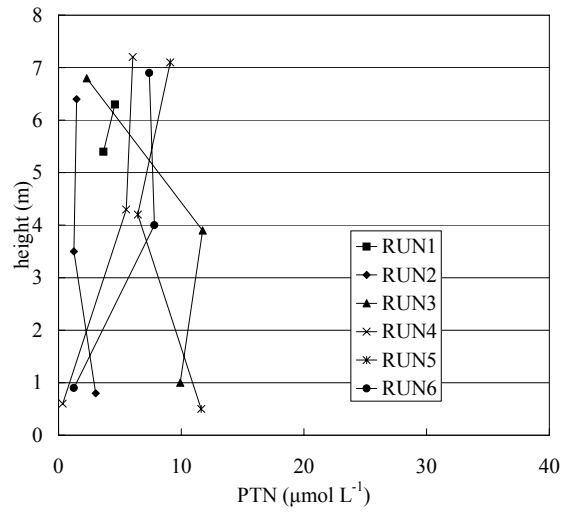
(a) S1



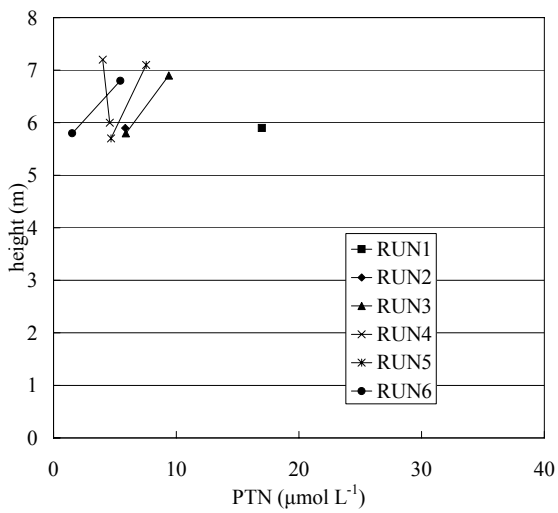
(b) S2



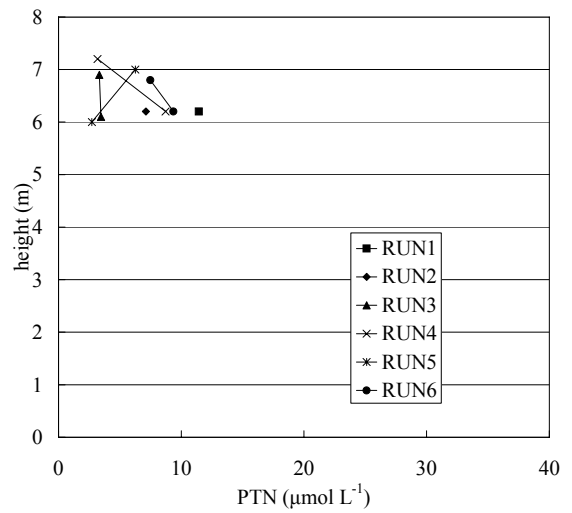
(c) S3



(d) S4

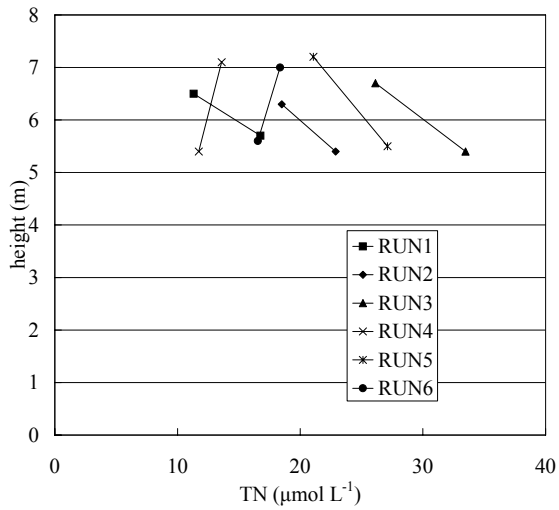


(e) S5

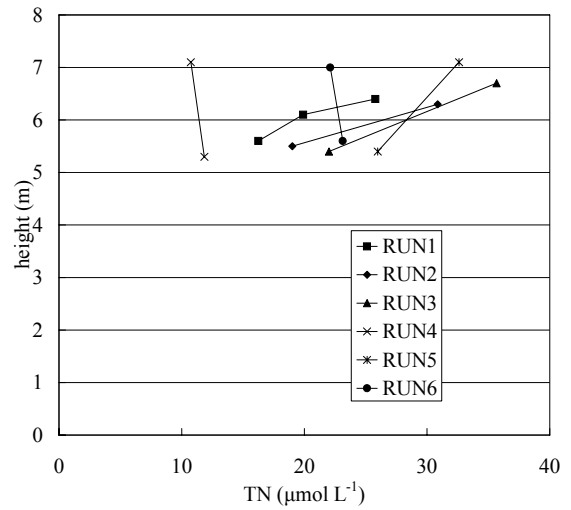


(f) S6

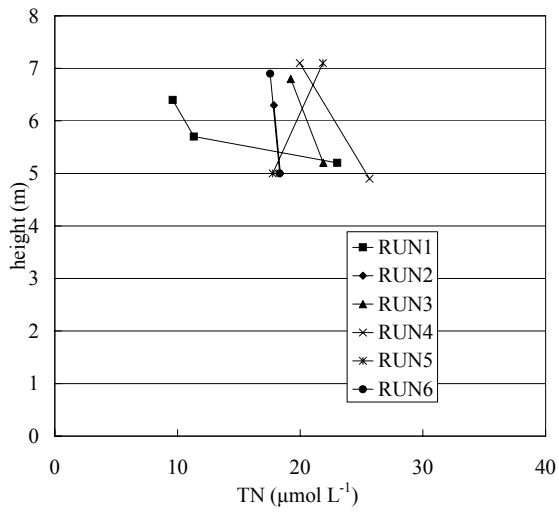
図-A.13 懸濁態全室素測定結果（縦軸は基準点からの高さを表す）



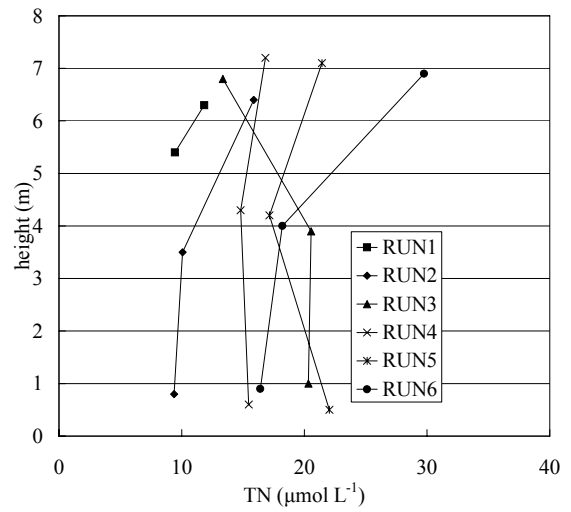
(a) S1



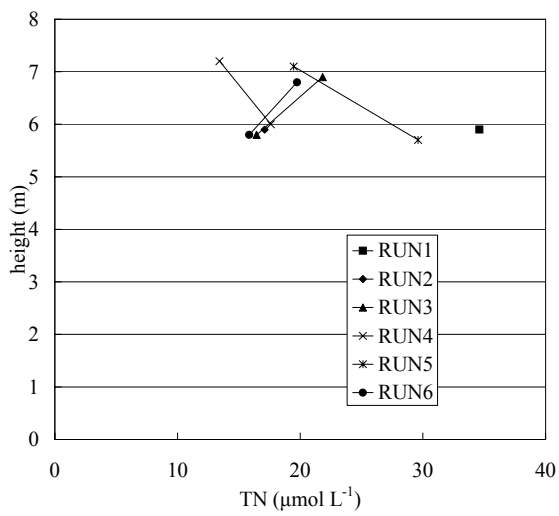
(b) S2



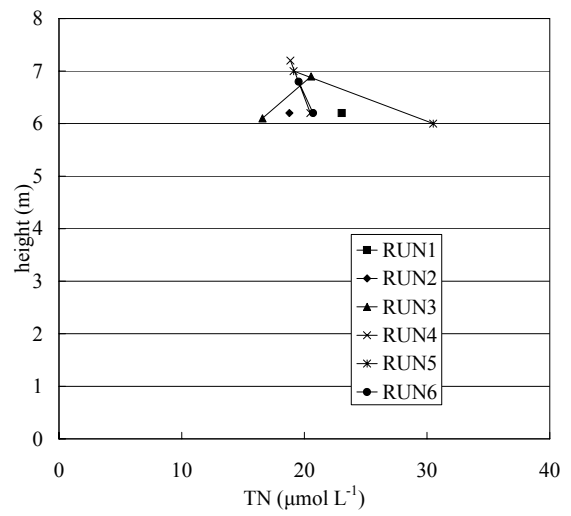
(c) S3



(d) S4

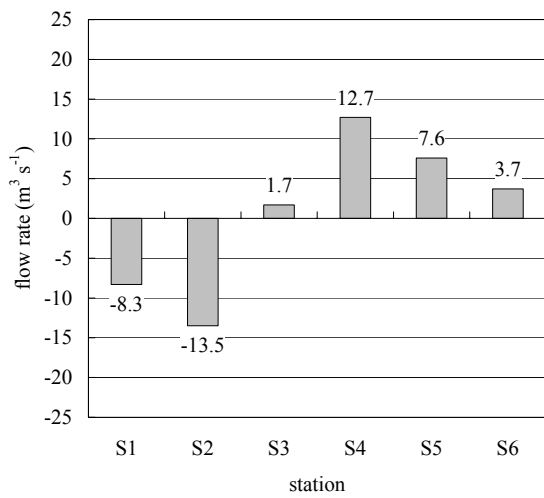


(e) S5

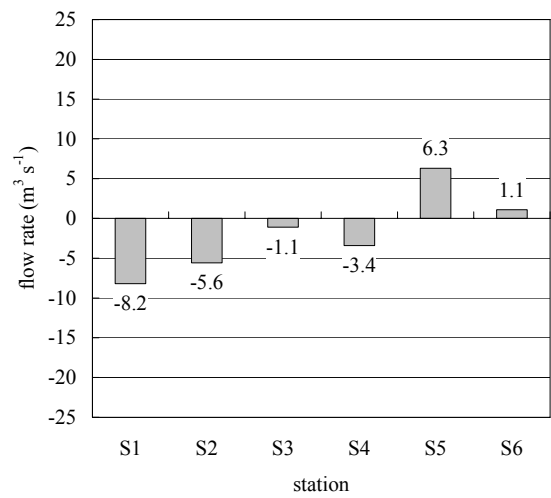


(f) S6

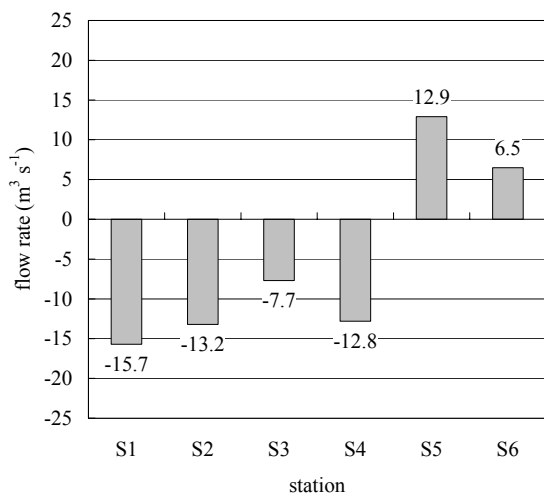
図-A.14 全窒素測定結果 (縦軸は基準点からの高さを表す)



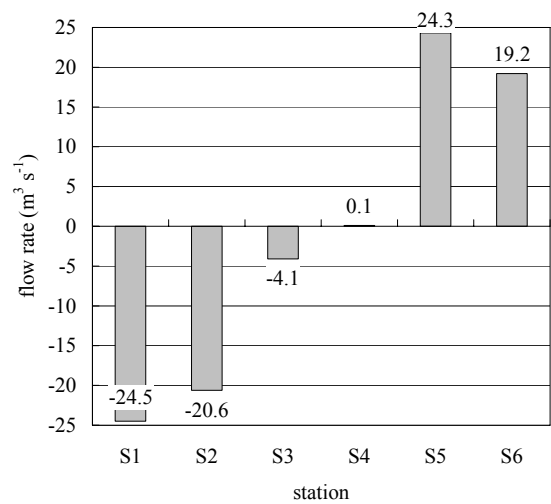
(a) RUN1



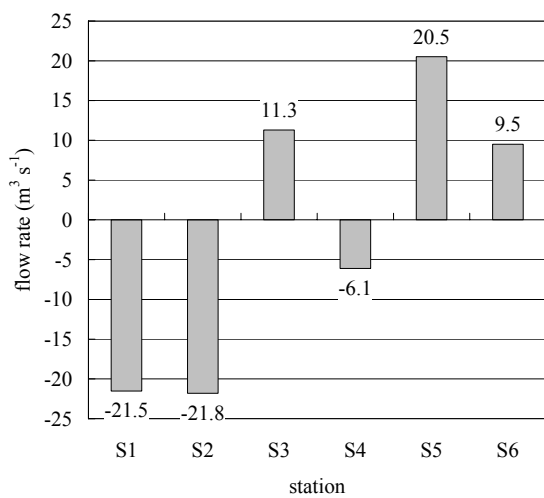
(b) RUN2



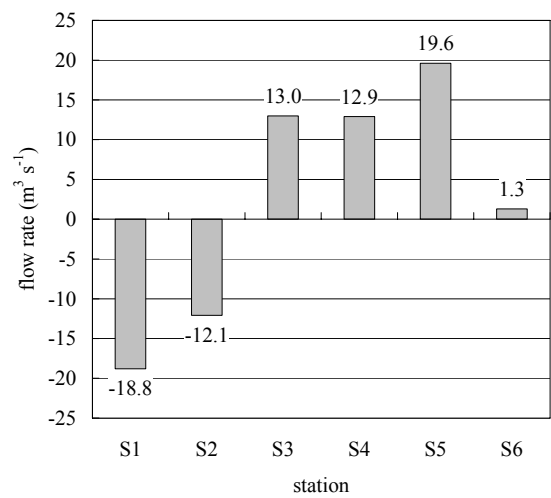
(c) RUN3



(d) RUN4

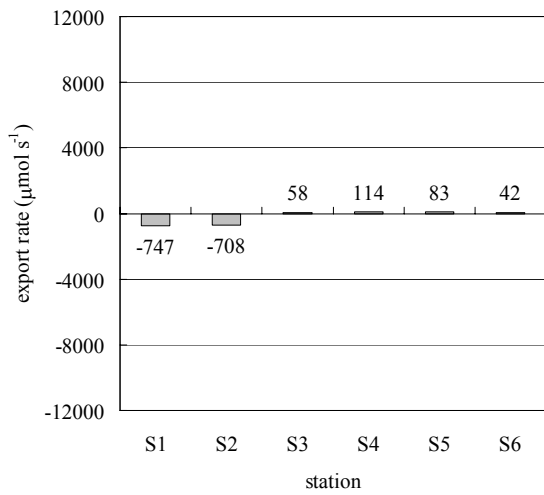


(e) RUN5

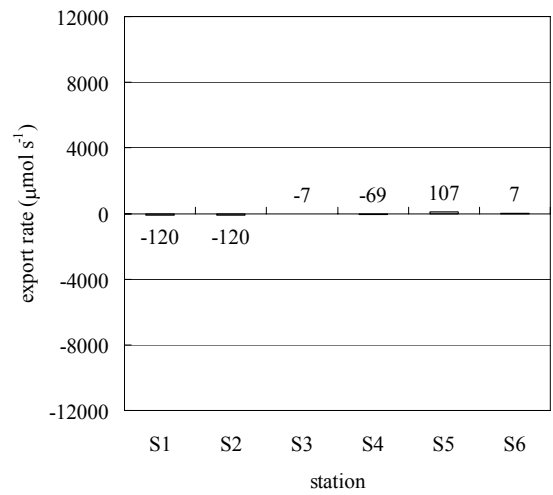


(f) RUN6

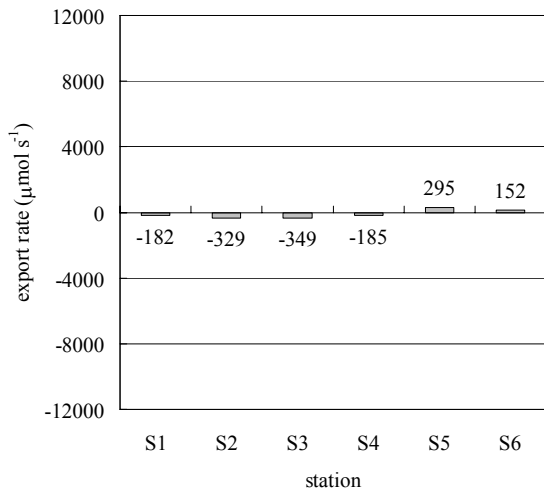
図-B.1 流量（陸側から外海への流出を正としている）



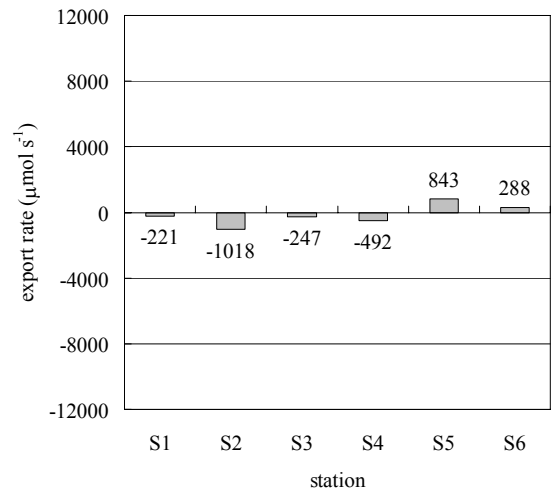
(a) RUN1



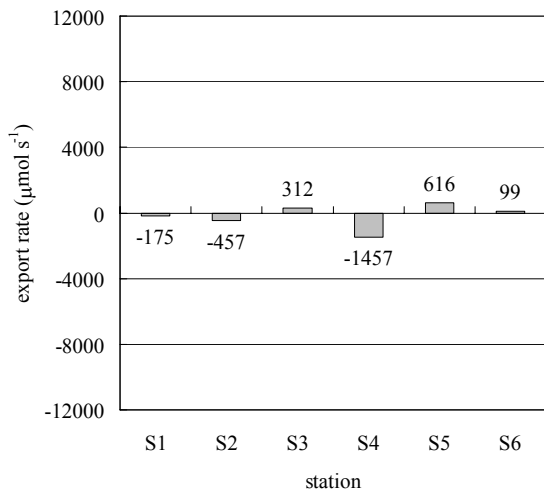
(b) RUN2



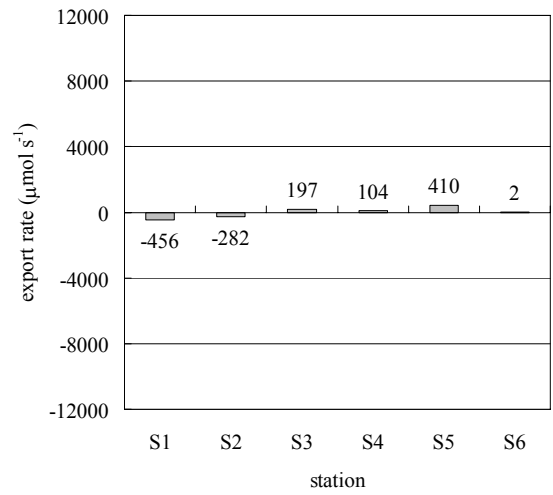
(c) RUN3



(d) RUN4

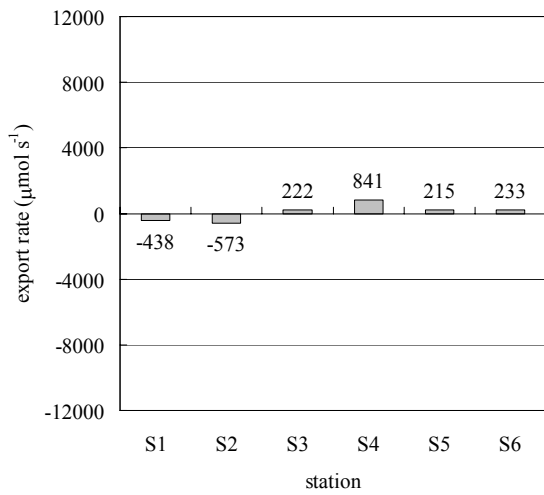


(e) RUN5

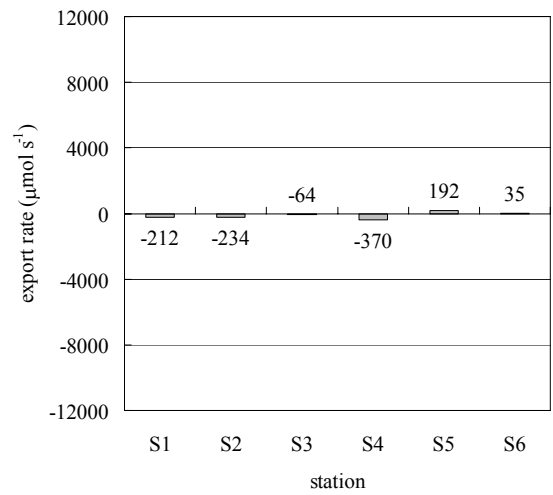


(f) RUN6

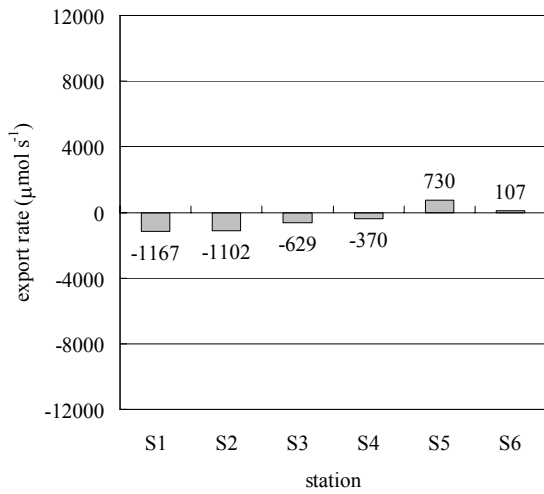
図-B.2 リン酸態リン輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



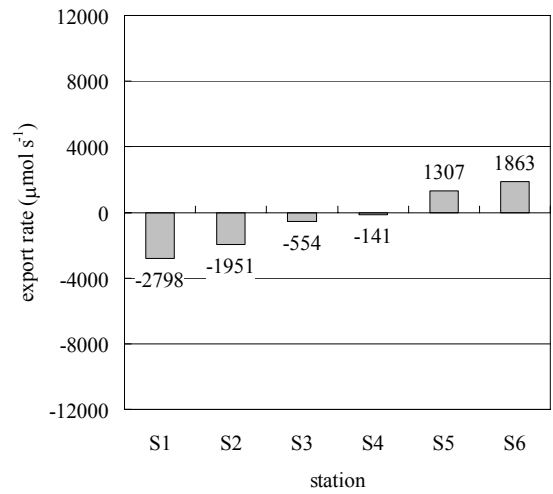
(a) RUN1



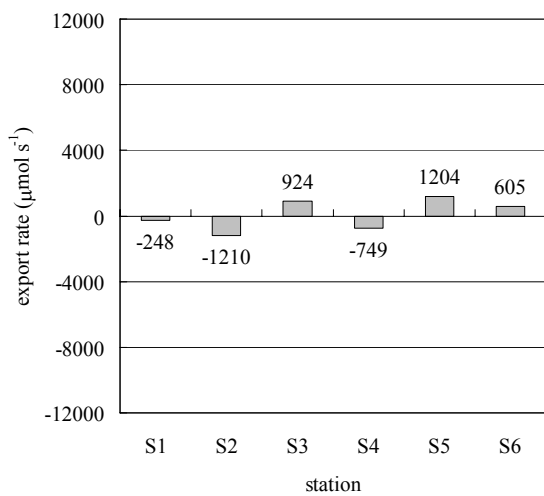
(b) RUN2



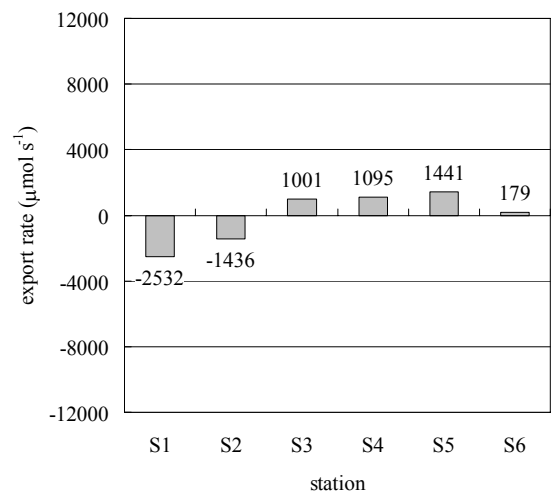
(c) RUN3



(d) RUN4

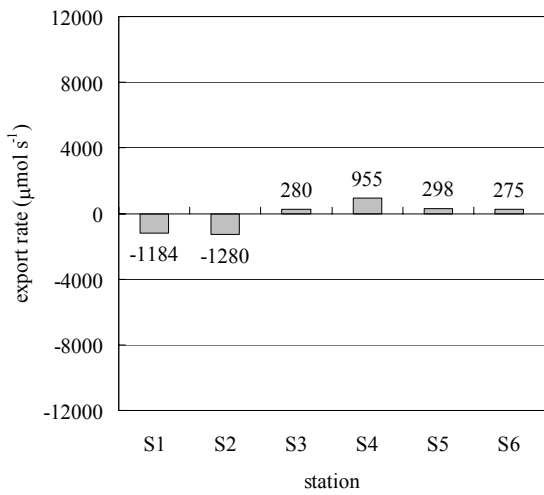


(e) RUN5

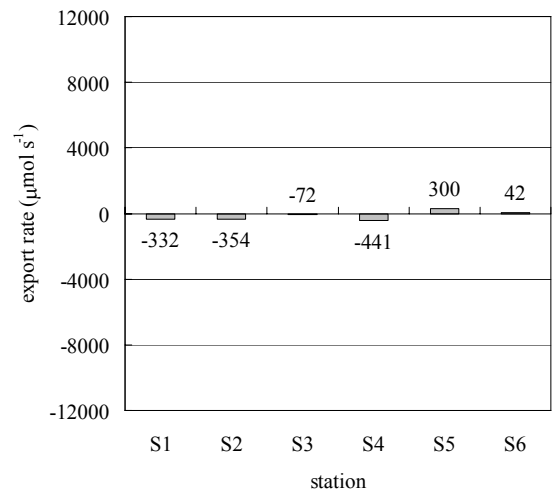


(f) RUN6

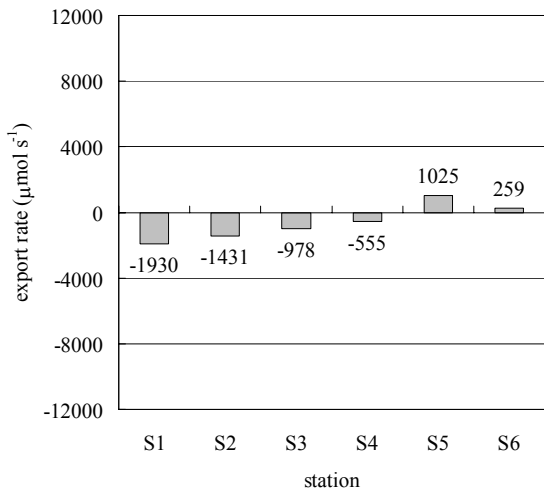
図-B.3 溶存有機態リン輸送量 (陸側から外海への流出を正としている)



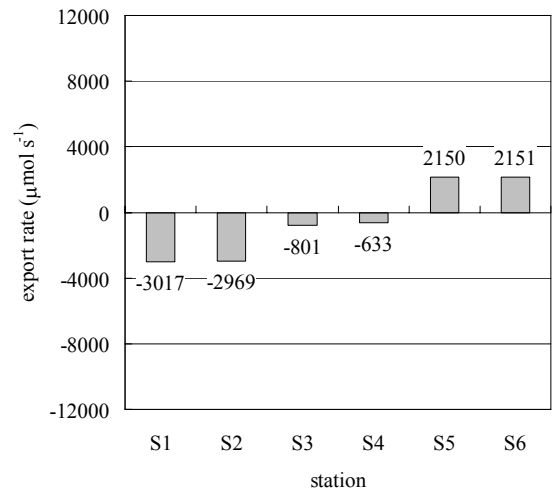
(a) RUN1



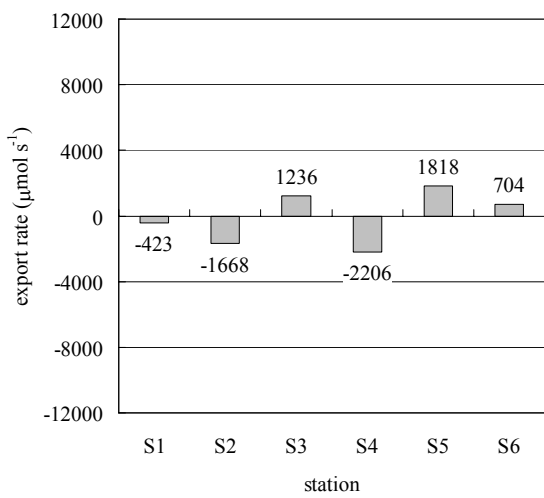
(b) RUN2



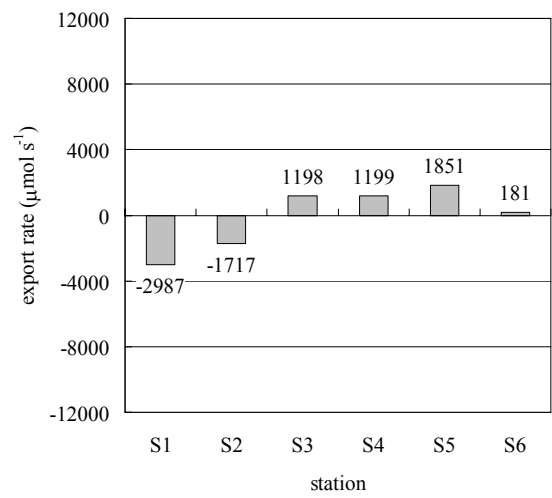
(c) RUN3



(d) RUN4

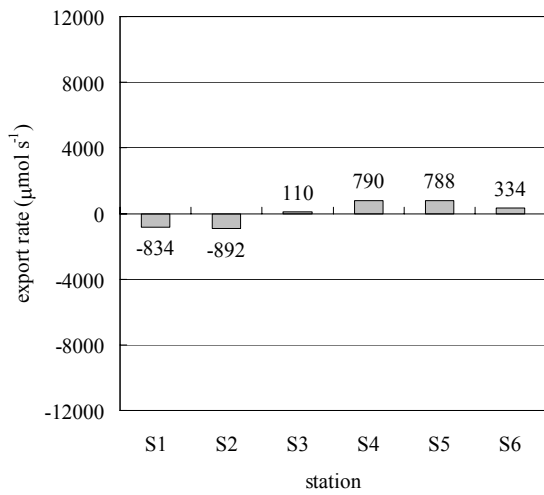


(e) RUN5

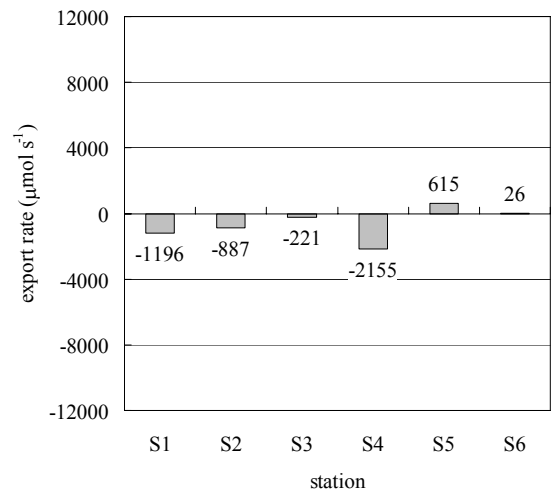


(f) RUN6

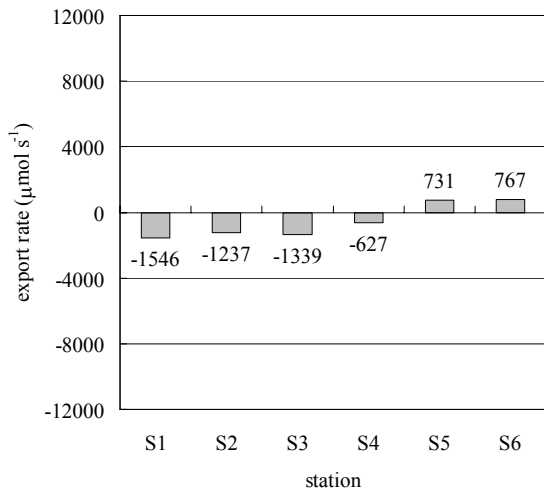
図-B.4 溶存態全リン輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



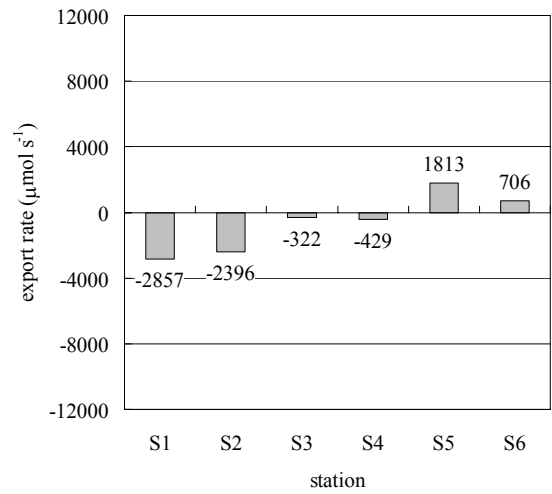
(a) RUN1



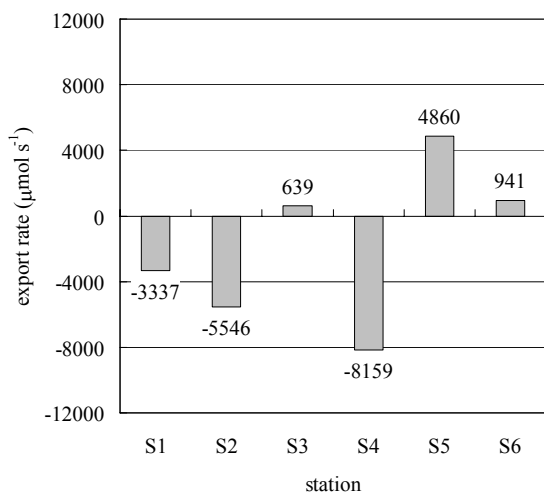
(b) RUN2



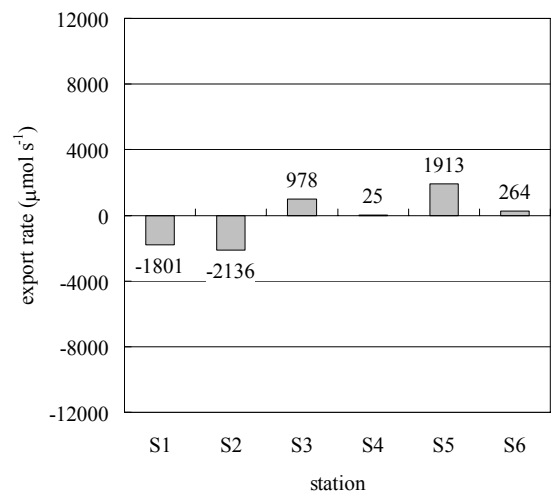
(c) RUN3



(d) RUN4

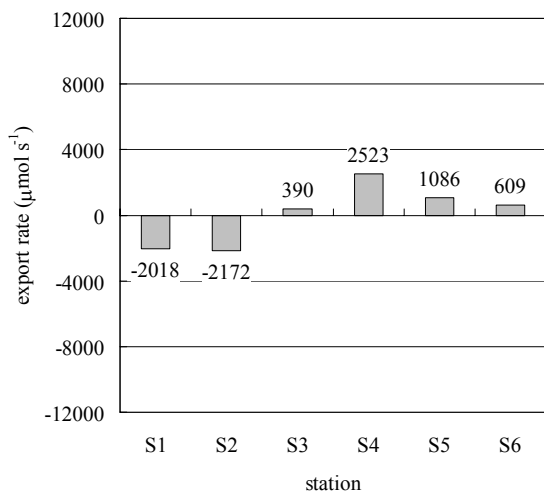


(e) RUN5

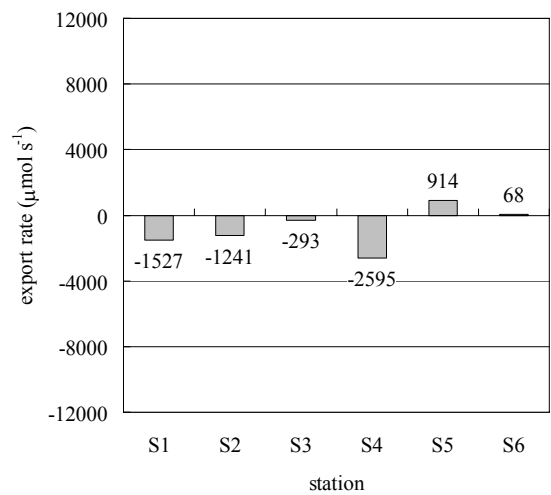


(f) RUN6

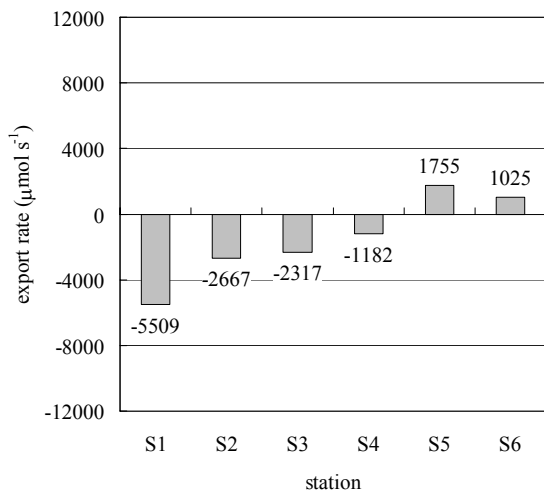
図-B.5 懸濁態全リン輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



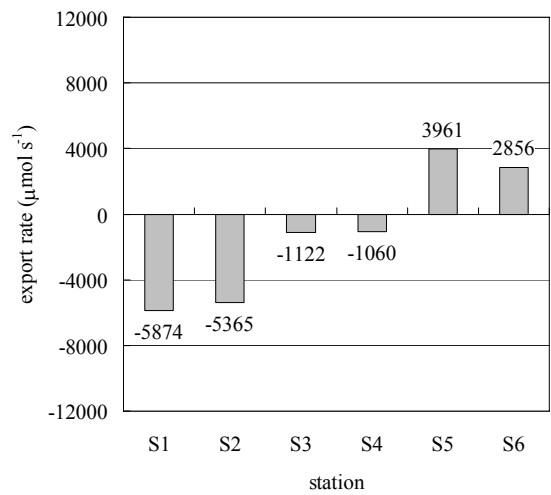
(a) RUN1



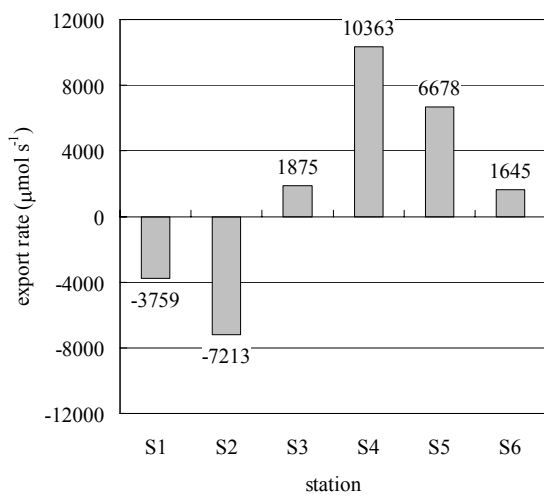
(b) RUN2



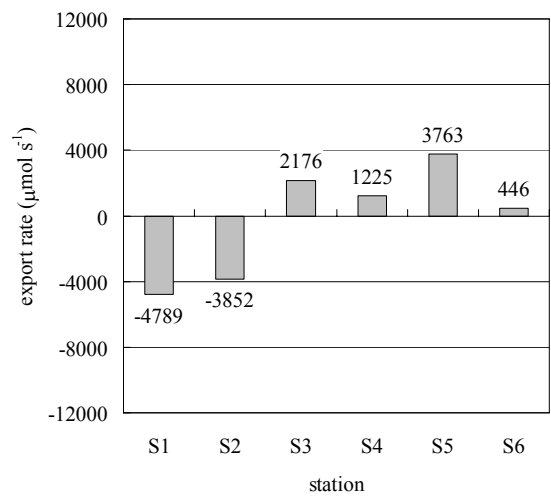
(c) RUN3



(d) RUN4

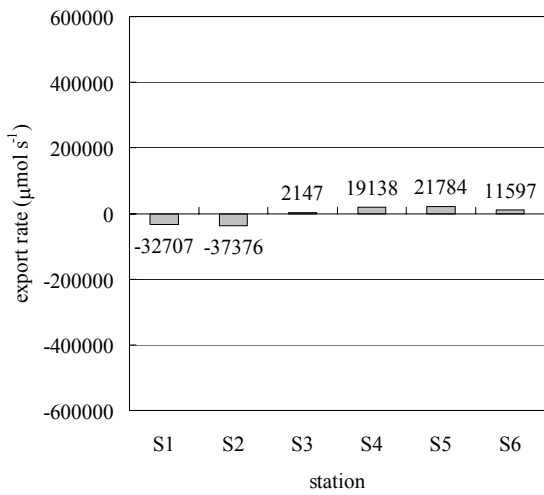


(e) RUN5

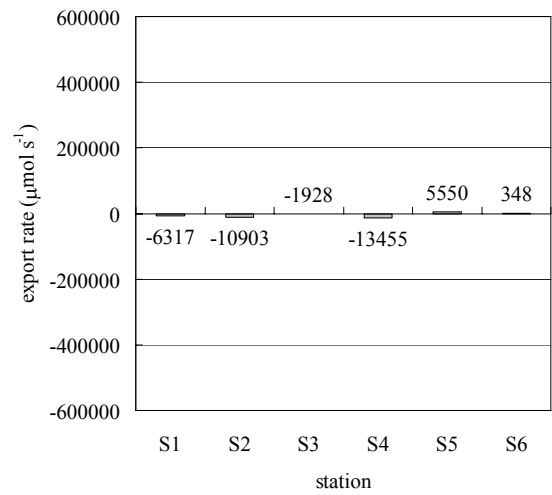


(f) RUN6

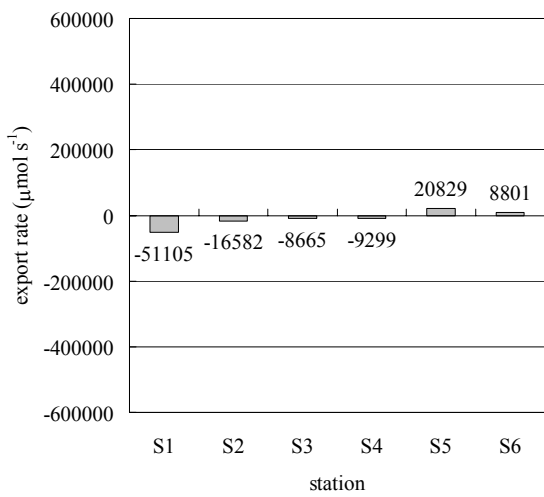
図-B.6 全リン輸送量 (陸側から外海への流出を正としている)



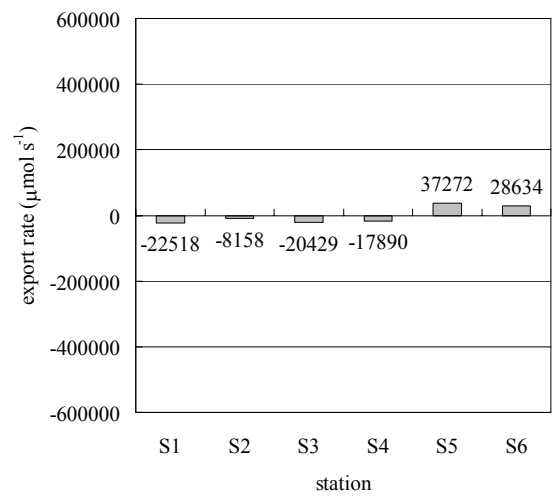
(a) RUN1



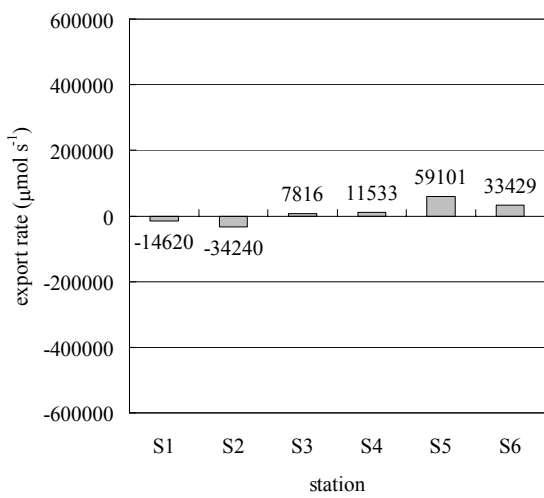
(b) RUN2



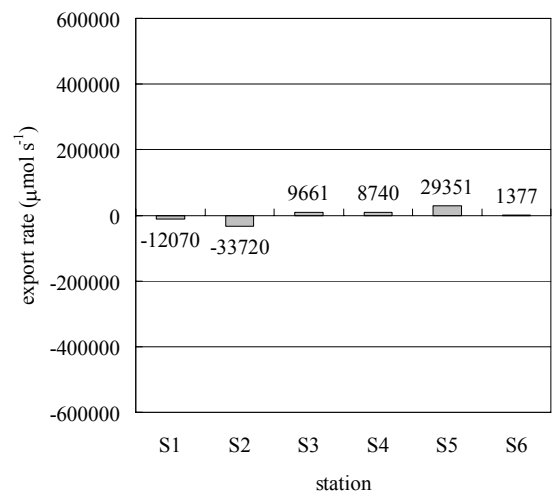
(c) RUN3



(d) RUN4

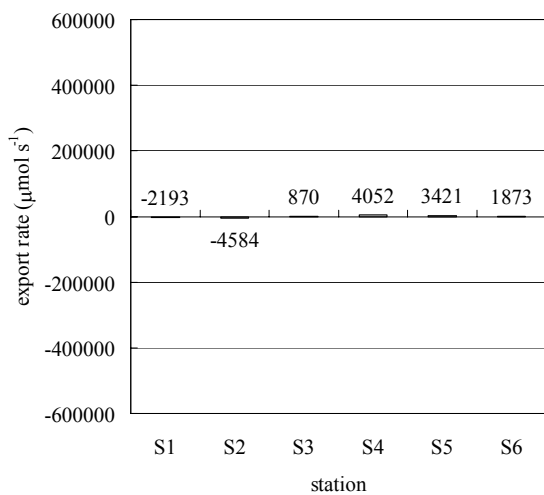


(e) RUN5

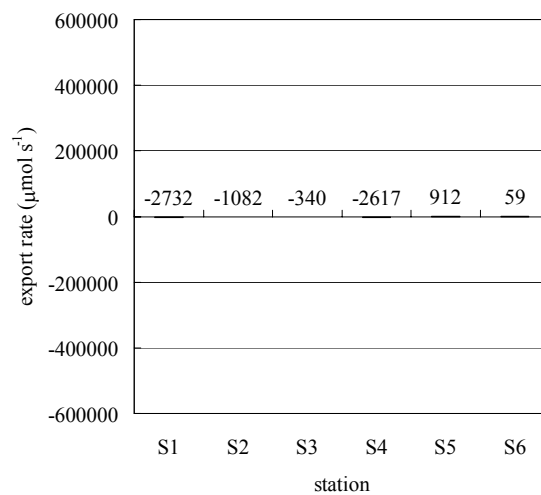


(f) RUN6

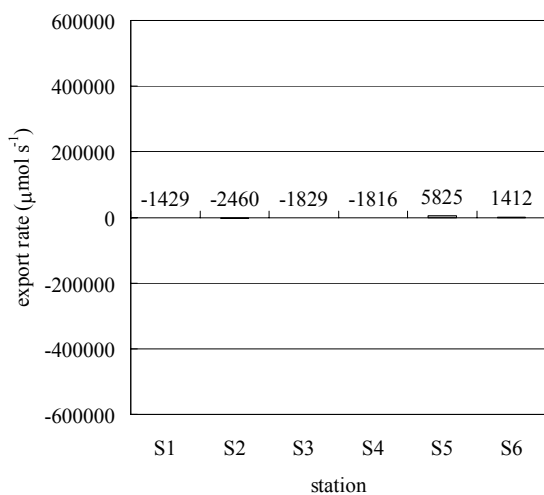
図-B.7 アンモニア態窒素輸送量 (陸側から外海への流出を正としている)



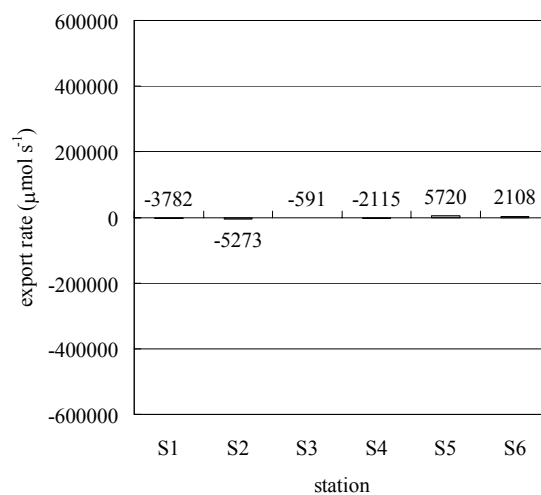
(a) RUN1



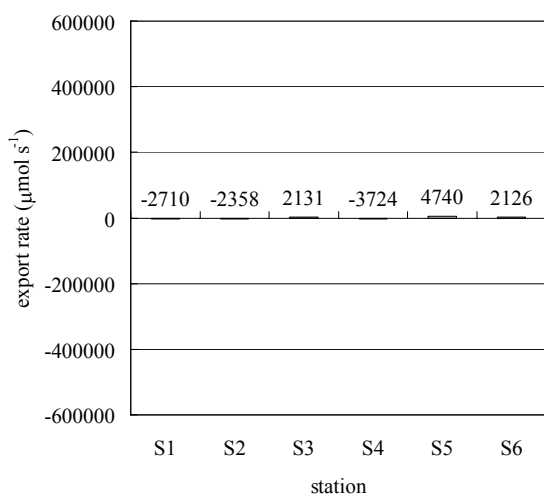
(b) RUN2



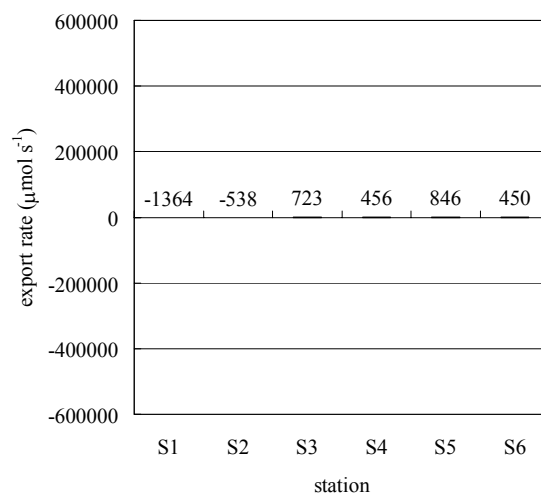
(c) RUN3



(d) RUN4

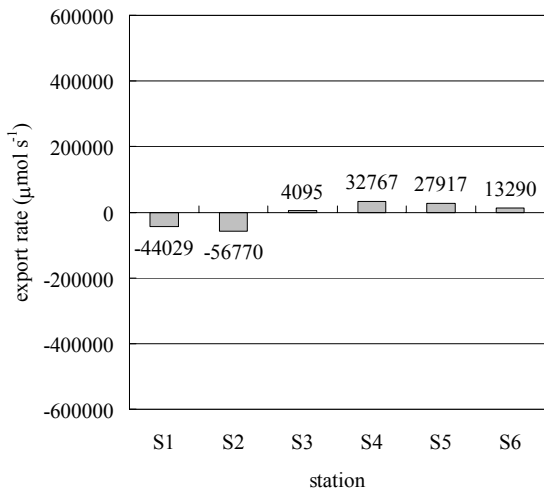


(e) RUN5

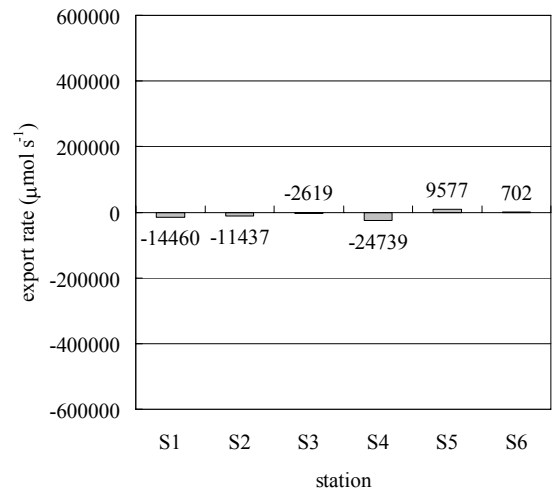


(f) RUN6

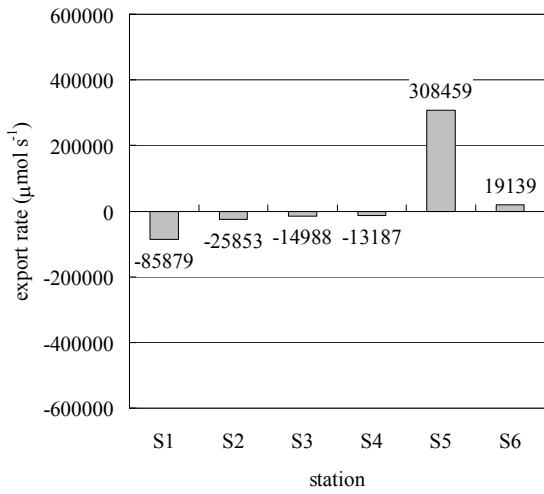
図-B.8 亜硝酸態窒素輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



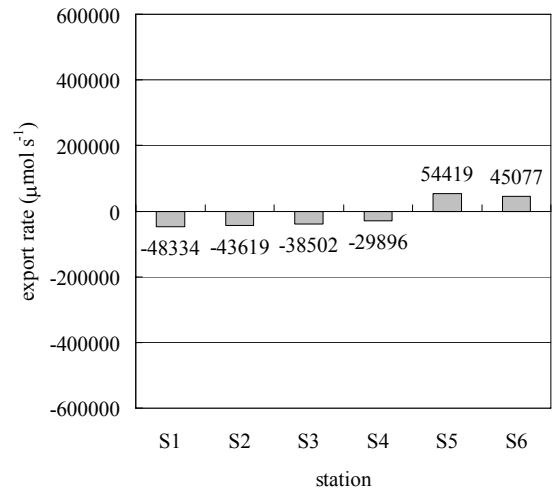
(a) RUN1



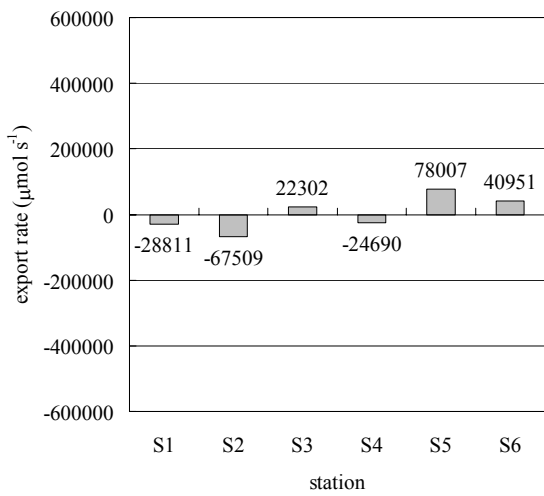
(b) RUN2



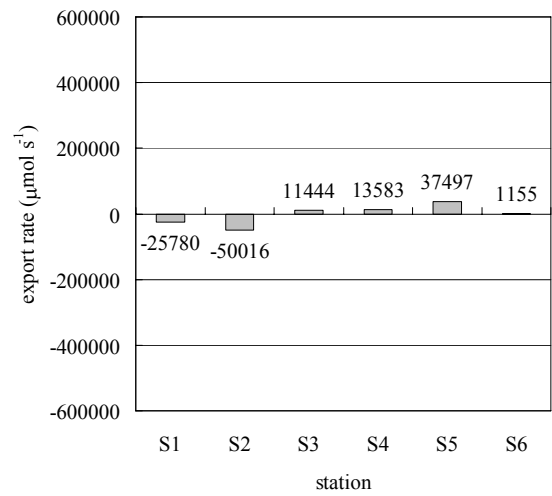
(c) RUN3



(d) RUN4

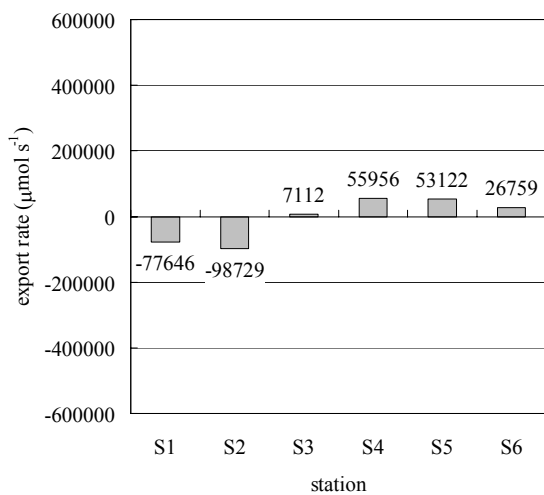


(e) RUN5

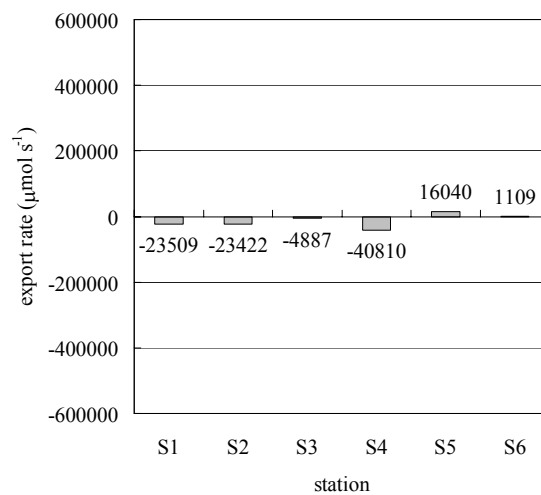


(f) RUN6

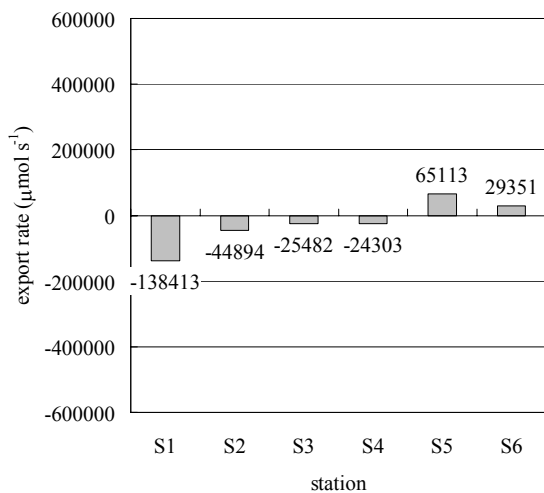
図-B.9 硝酸態窒素輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



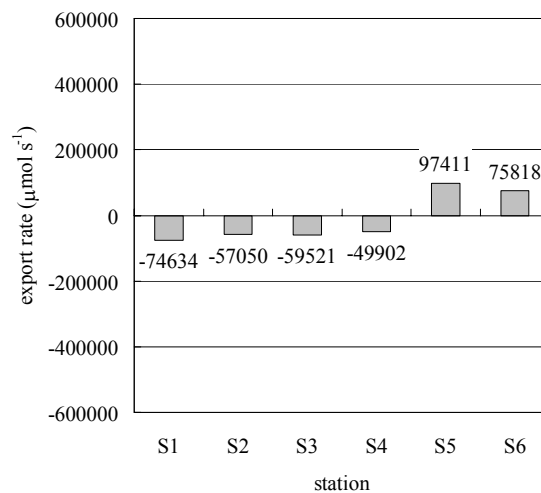
(a) RUN1



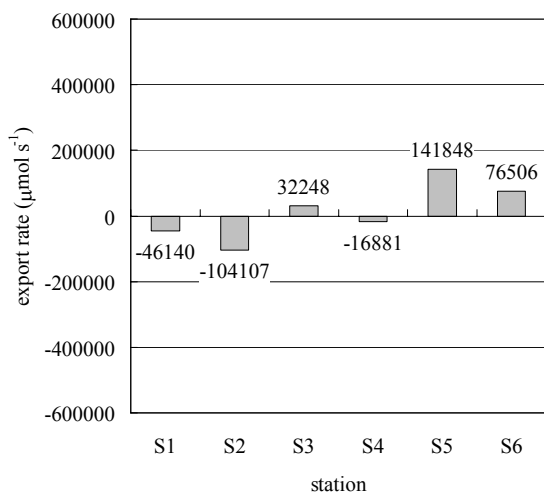
(b) RUN2



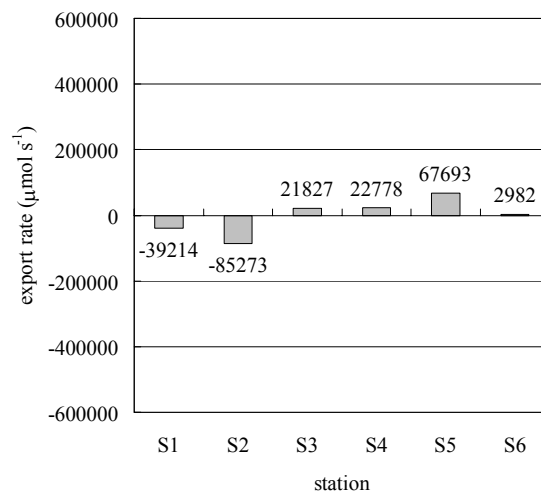
(c) RUN3



(d) RUN4

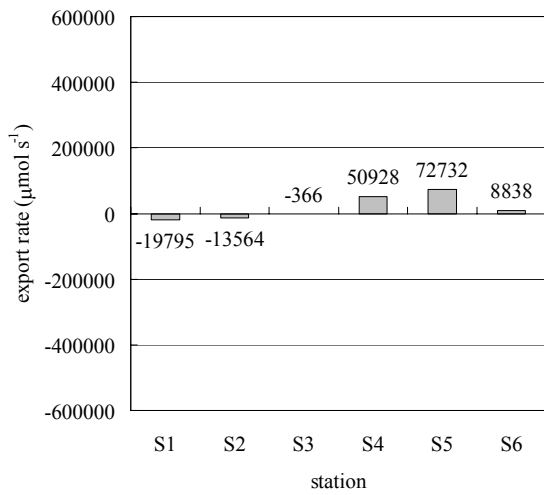


(e) RUN5

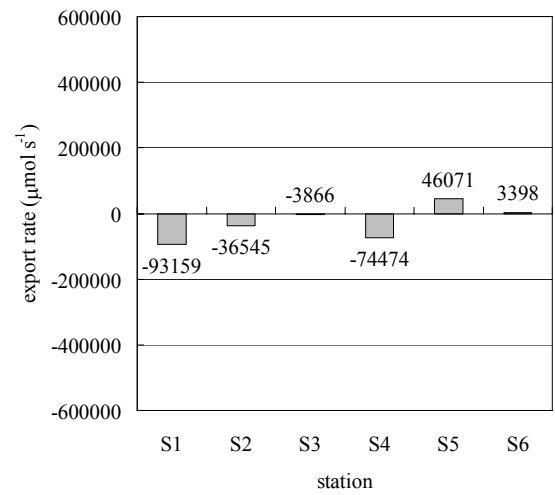


(f) RUN6

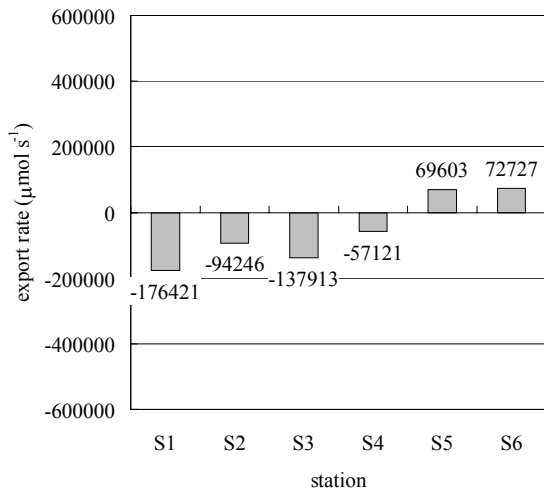
図-B.10 溶存無機態窒素輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



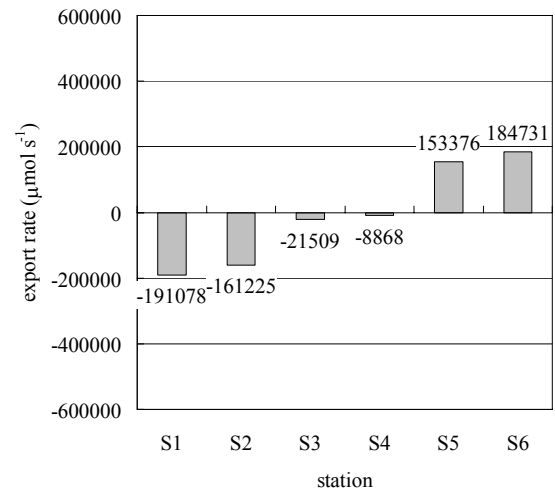
(a) RUN1



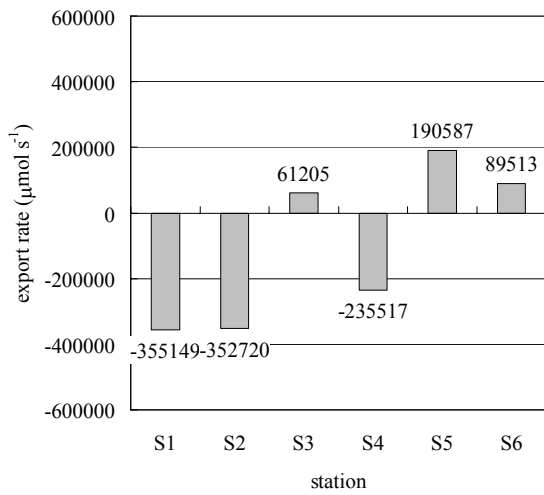
(b) RUN2



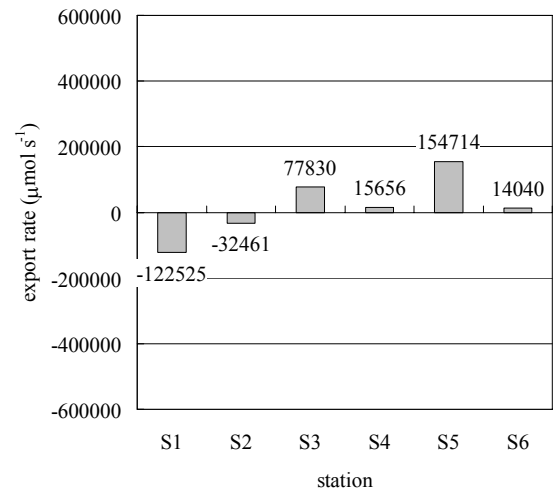
(c) RUN3



(d) RUN4

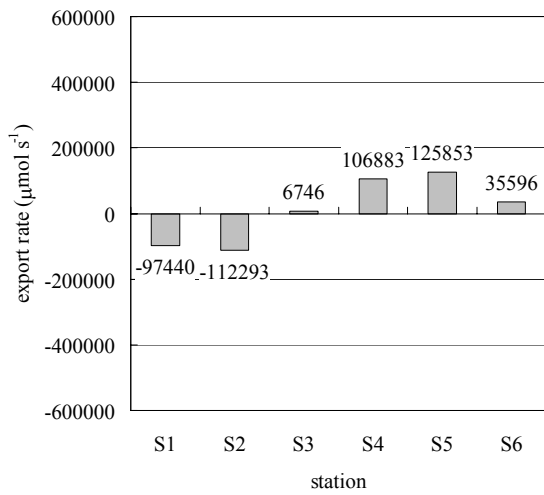


(e) RUN5

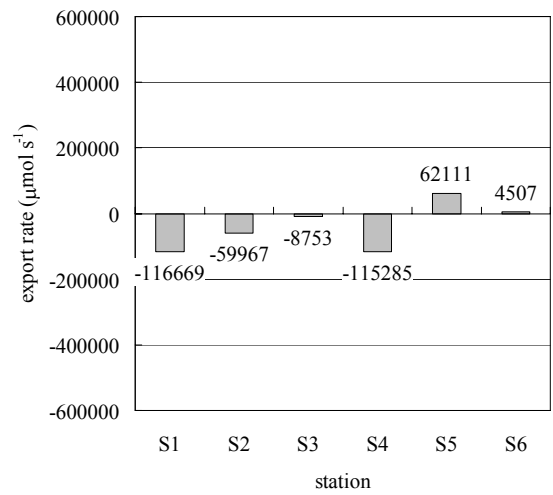


(f) RUN6

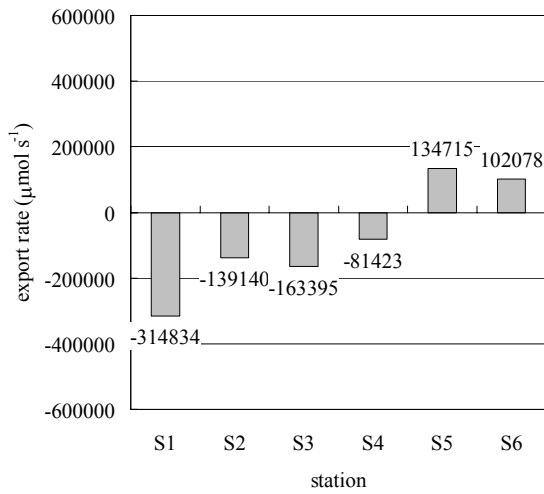
図-B.11 溶存有機態窒素輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



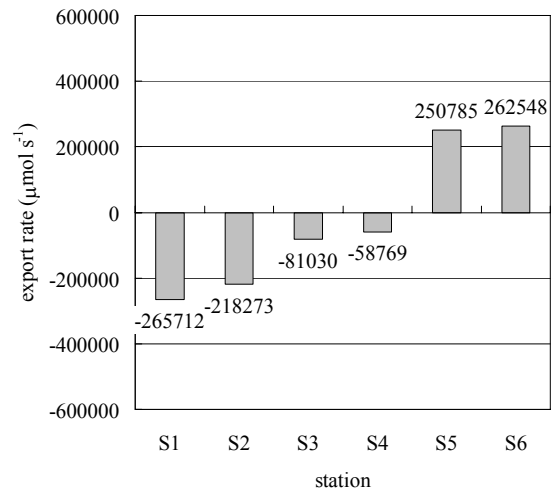
(a) RUN1



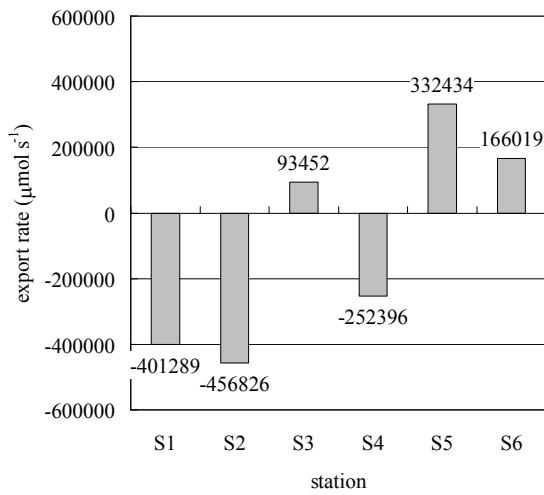
(b) RUN2



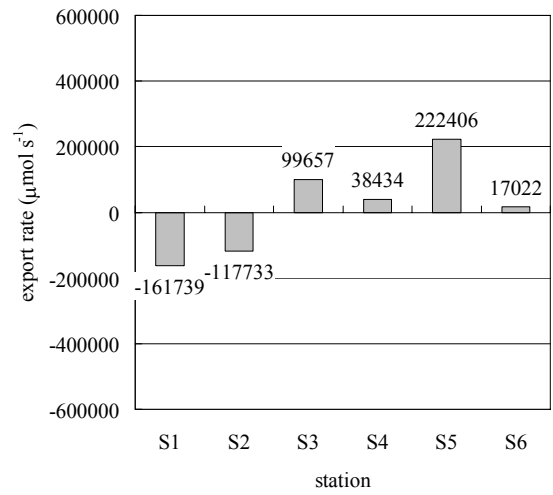
(c) RUN3



(d) RUN4

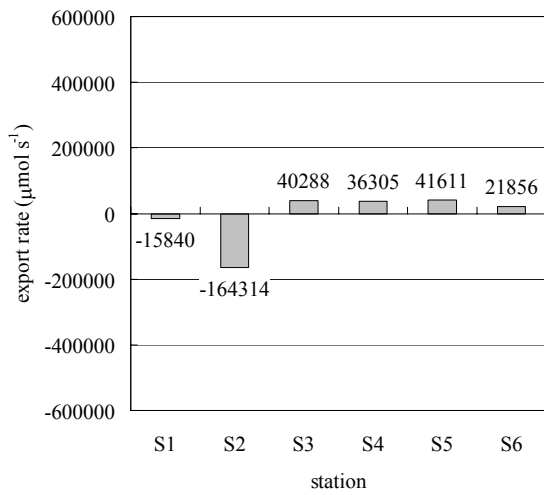


(e) RUN5

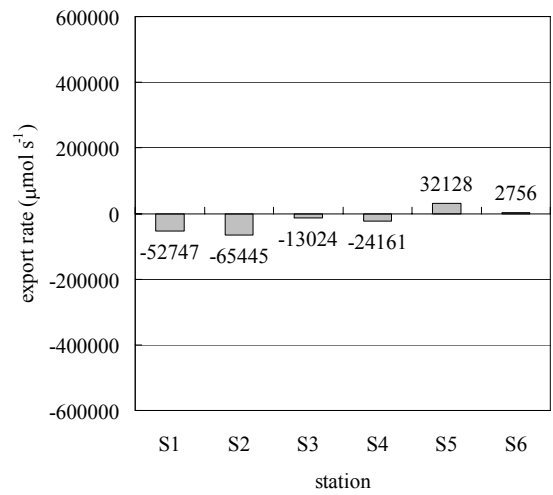


(f) RUN6

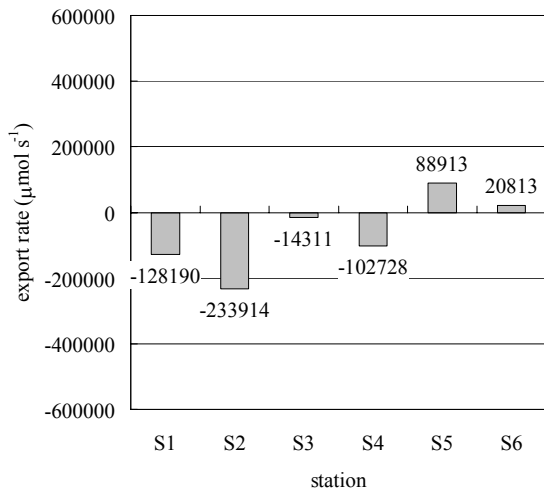
図-B.12 溶存態全窒素輸送量（陸側から外海への流出を正としている）



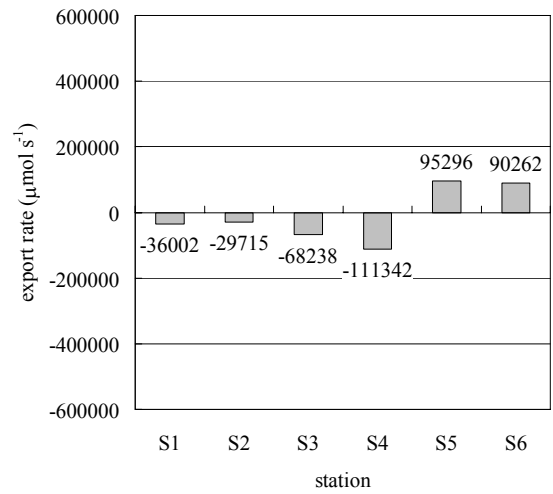
(a) RUN1



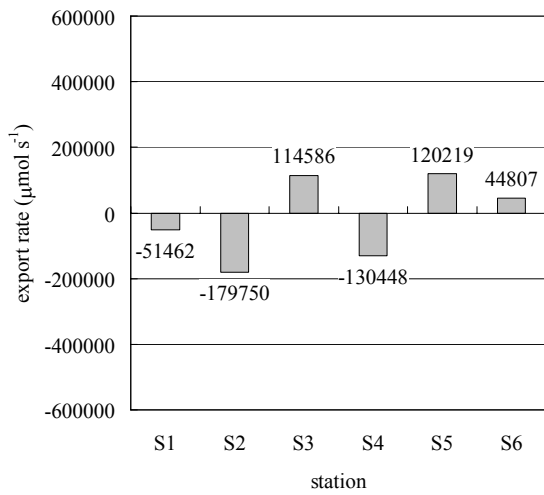
(b) RUN2



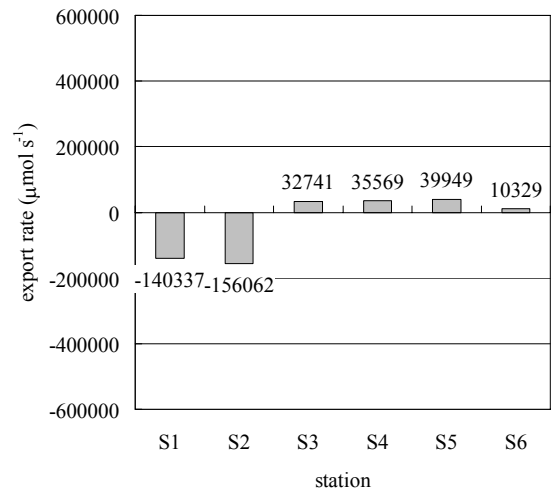
(c) RUN3



(d) RUN4

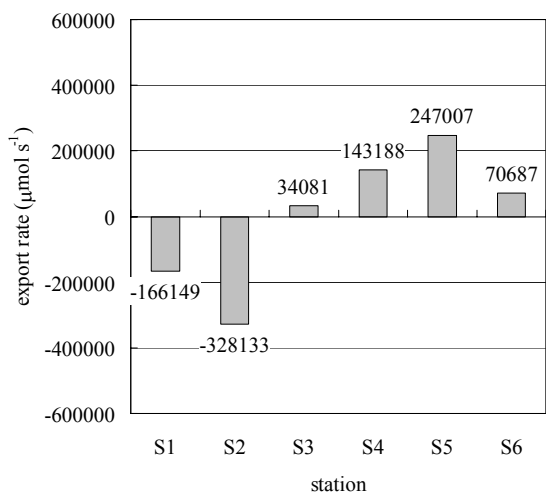


(e) RUN5

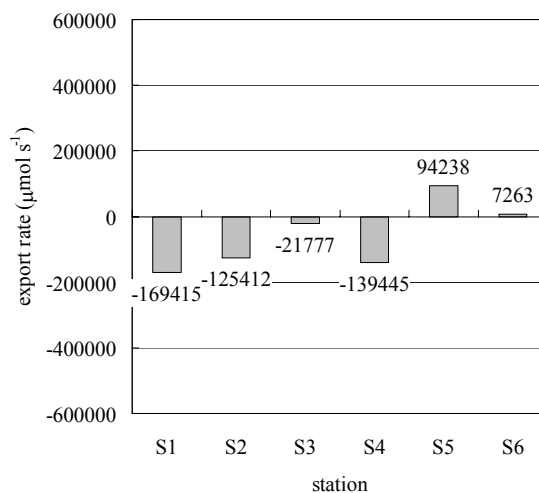


(f) RUN6

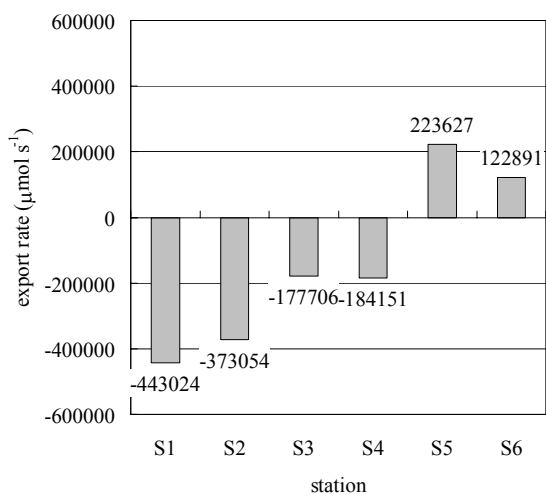
図-B.13 懸濁態全窒素輸送量 (陸側から外海への流出を正としている)



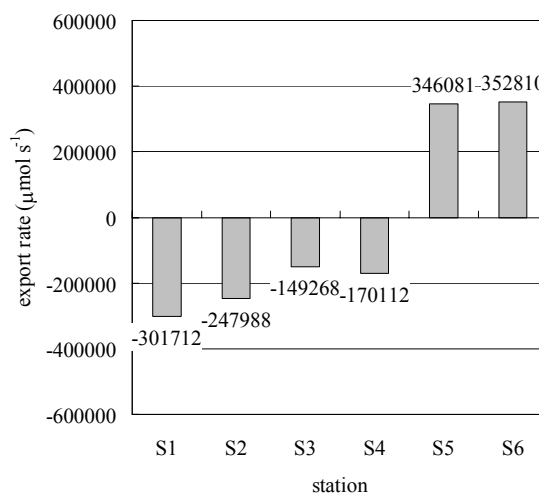
(a) RUN1



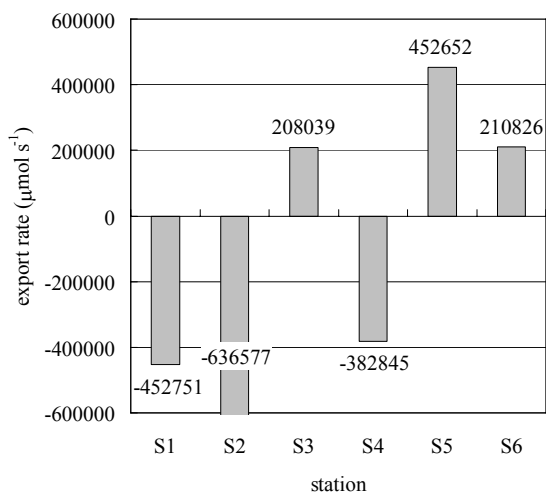
(b) RUN2



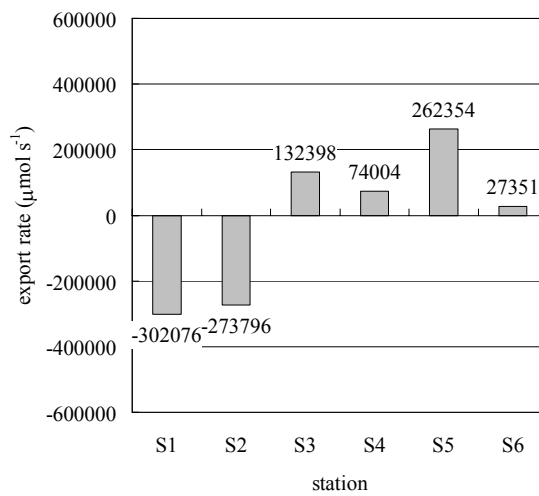
(c) RUN3



(d) RUN4



(e) RUN5



(f) RUN6

図-B.14 全窒素輸送量（陸側から外海への流出を正としている）