有明海におけるノリ養殖場海域の窒素収支の定量評価

横山佳裕*

1　はじめに

全国一のノリ生産量を誇る有明海において，2000年度のノリ不作問題は社会問題となっており，その要因の一つに冬季の窒素不足が挙げられている[1)]。このノリの色落ちを引き起こした窒素不足は，ボックスモデルを用いた長期的なシミュレーション結果によると，ノリと植物プランクトンの窒素吸収競合関係において，植物プランクトンが近年優位な状況に推移していることが要因の一つと推察されている[2)]。一方，陸域からの窒素供給量は降雨の変動に伴い，経年的に変動しており，この流入負荷の不安定性も窒素不足の要因として指摘されている[3)]。現に2000年度に次ぐ低いノリ生産状況であった2002年度は，少雨に伴い陸域からの窒素供給が少なかったことが低生産の原因と考えられている[1)]が，2002年度よりも降雨が少ない1994年度にはノリ不作はみられておらず，単純に陸域からの流入負荷の多寡によるものとは結論づけられない。

本研究では，既存のボックスモデル[2)]を用いて，陸域からの窒素供給量が少ない少雨年を対象に，ノリ養殖場海域の窒素収支を求め，窒素不足の発生メカニズムを考察した。さらに，ノリ養殖場海域の窒素収支の構造特性について，定量的に評価した。

2　ボックスモデルについて

2．1　モデルの概要

図1にボックスモデルの概念図を，図2にボックス分割および主要流入河川の位置を示す。

ボックスモデルは，植物プランクトンが光合成により，無機態栄養塩（IN, IP）を取り込み，枯死によって有機態栄養塩（ON，OP）に変換し，さらに，有機態栄養塩が分解・無機化によって無機態栄養塩へと変換する物質循環を考えた。その他，ボックス間の移流や拡散，陸域からの流入負荷，沈降，溶出といった物質の移動も加味した。また，植物プランクトンは，赤潮の発生を表現するために，平均水面下1mでのプランクトン生成層のみ存在するものとした。ノリは，移流，拡散による移動は加味せず，成長による栄養塩の吸収，水揚げによるノリの取り上げのみを考慮した。

計算対象期間は1979年1月～2003年3月までの約24年間とし，計算間隔は30分とした。

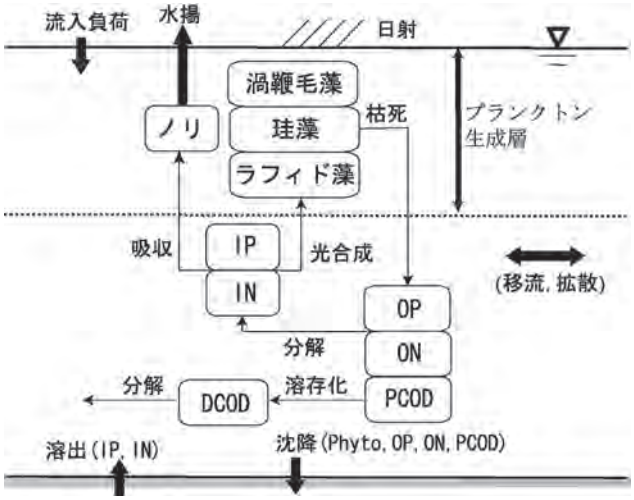
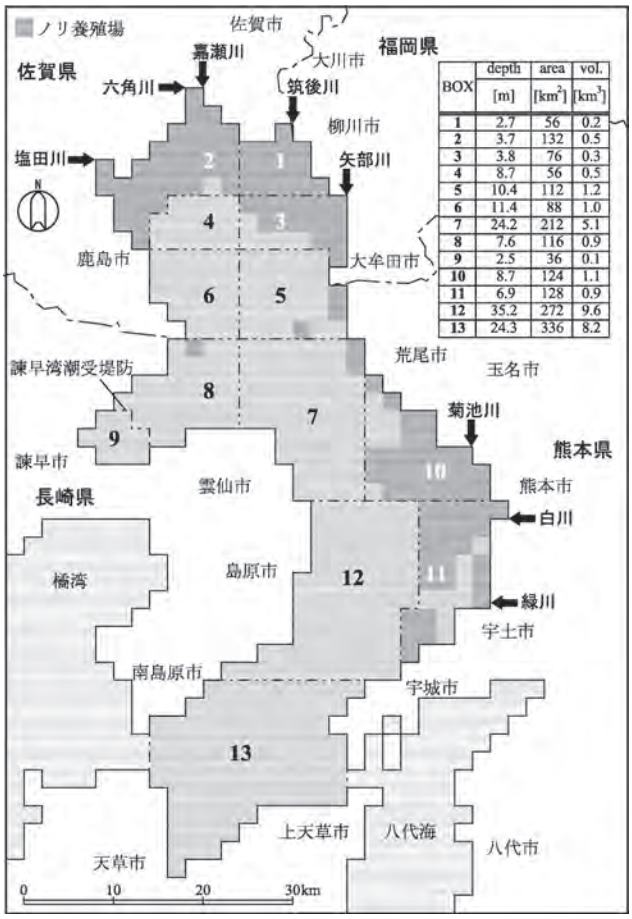


図1　ボックスモデルの概念図

2．2　流入負荷量

本研究で用いた経年的な流入負荷量は，2000年・2001年を対象に詳細に求められた国土総合開発事業調整調査[4)]（以下，「国調費モデル」とする。）をもとに，簡易的な手法により算出したものである[5)]。TN負荷

*（財）九州環境管理協会　環境部



BOX	depth [m]	area [km²]	vol. [km³]
1	2.7	56	0.2
2	3.7	132	0.5
3	3.8	76	0.3
4	8.7	56	0.5
5	10.4	112	1.2
6	11.4	88	1.0
7	24.2	212	5.1
8	7.6	116	0.9
9	2.5	36	0.1
10	8.7	124	1.1
11	6.9	128	0.9
12	35.2	272	9.6
13	24.3	336	8.2

図２　ボックス分割図

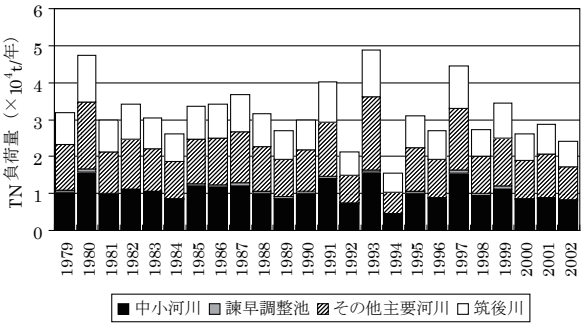


図３　TN 流入負荷量の経年変化

量の算定結果を図 3 に示す。

3　少雨年における窒素不足の発生メカニズム

3．1　ノリ生産量の経年変化と降水量

図 4 に有明海のノリ生産量[6] と佐賀地方気象台の降水量の経年変化[7] を示す。福岡（BOX1，BOX3），佐賀（BOX2），熊本（BOX10，BOX11）ではノリ生産量は経年的に増加し，1990 年代初めからはほぼ横ばいで推移している。ノリの大不作が問題となった 2000 年度は，それまでの最大生産量の 4 ～ 6 割の作況である。大不作翌年の 2001 年度では各県とも生産量の回復がみられるが，2002 年度の福岡，佐賀では再び大きく減少している。特に福岡県の大牟田地区では，図 5 に示すように，1979 ～ 2002 年度の平均生産量の 7 割以下と減少の程度が大きい。2002 年度の降水量は平成の大渇水と呼ばれた 1994 年度以降で 4 番目に少なく，1979 ～ 2002 年度の平均降水量（1,992mm/ 年）の 84% に相当する少雨年であった。このため，河川流量低下に伴う海域への窒素供給量の減少が，ノリ養殖場の窒素不足を引き起こした可能性がある。さらに，大牟田地区が位置する BOX3 は，矢部川といった河川からの窒素流入量が少ないため[8]，潜在的に窒素不足を引き起こしやすいと考えられる。そこで，BOX3 を対象に，少雨・不作年（2002 年度）と渇水・平作年（1994 年度）との窒素収支を比較し，窒素不足の発生メカニズムについて考察した。

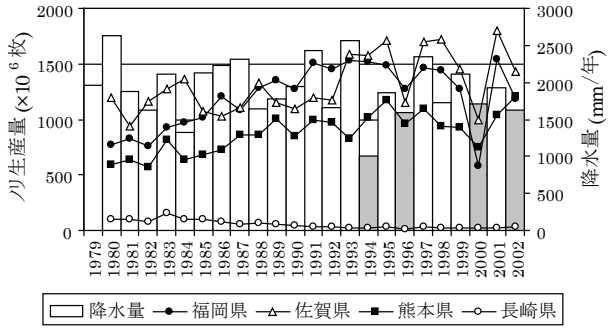


図４　有明海のノリ生産量と降水量の経年変化

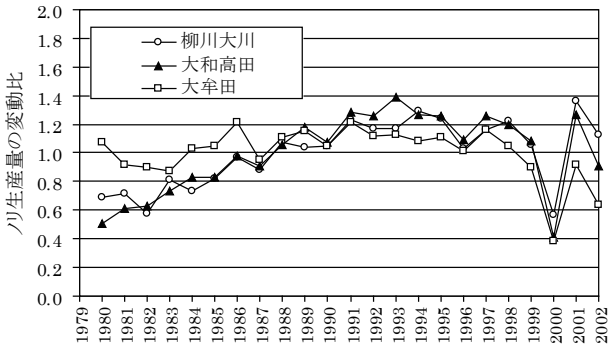


図５　福岡県の地区別ノリ生産量の経年変化

3．2　少雨・不作年（2002 年度）と渇水・平作年（1994 年）の窒素収支の比較

(1)IN 負荷の流入パターンの比較

図 6 に BOX3 における 1994 年度と 2002 年度の IN 流入負荷量の経月変化を示す。IN 負荷の流入パターンを比較すると，両年とも 2 つのピークがみられ，2002 年度のピーク（5 月，7 月）は 1994 年度よりも 1 ヶ月遅い。また，ピーク値は 2002 年度の方が 1994 年度よりも大きく，他の時期の差は小さい。

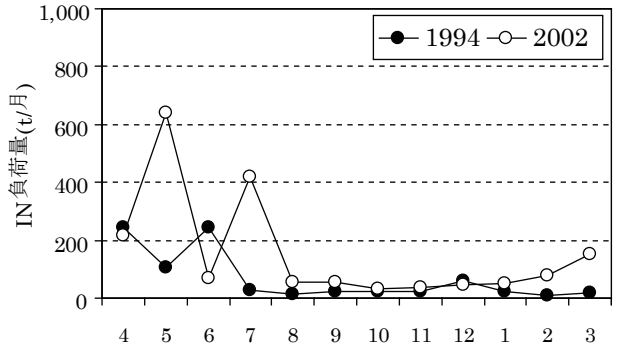


図 6　BOX3 における IN 流入負荷量の経月変化

(2) 利用可能窒素量（IN）の変動パターンの比較

図 7 に BOX3 の利用可能窒素量の経月変化を示す。利用可能窒素量は，当月初めの IN 現存量に，当月の移流・拡散量，底泥からの溶出量，ON 分解量，流入負荷量それぞれの月合計値を加えたものである。

利用可能窒素量は，両年ともに 2 つのピークを示した後，減少する変動パターンを示し、ピーク出現月は，図 6 の IN 流入負荷のパターンと概ね連動している。両年を比較すると，6 月を除き 4 ～ 9 月の利用可能窒素量は，2002 年度が 1994 年度を上回り，

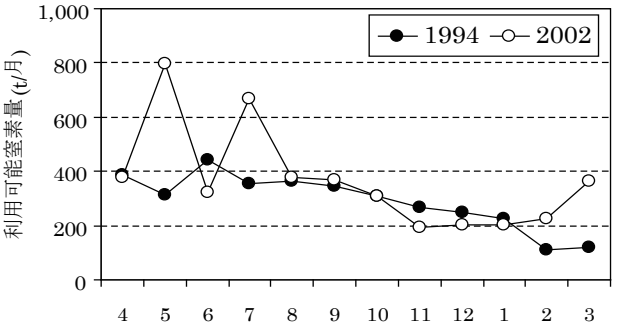


図 7　利用可能窒素量の経月変化

11 ～ 1 月のノリ養殖期にはこの関係が逆転している。

(3) 窒素取込量の変動パターンの比較

図 8 に BOX3 の 2002 年度と 1994 年度のノリと植物プランクトンによる窒素取込量の経月変化を示す。2002 年度の植物プランクトンによる取込量は 10 月にピークを示し，11 月以降減少している。このことから，10 月の植物プランクトンによる大量消費に伴い IN 現存量が減少したため，11 月の利用可能窒素量は少なくなり，前月までの利用可能窒素量の関係（1994 年度＜ 2002 年度）が逆転したものと考えられる。一方，1994 年度はピークが 11 月にみられ，その値は 2002 年度のピーク値の約 30% である。

図 9 に植物プランクトンの存在量を，図 10 に水温・日射量を，図 11 にノリおよび植物プランクトンの増殖速度の経月変化を示す。図 9 によると，窒素取込量のピーク前月における植物プランクトン存在量の関係は 1994 年度（10 月）＜ 2002 年度（9 月）である。しかし，水温・日射量の気象条件（図 10）は 2002 年度の方がやや不利な条件であるため，増殖速度（図 11）は 1994 年度（10 月の珪藻）＞ 2002 年度（9 月の珪藻）の関係である。

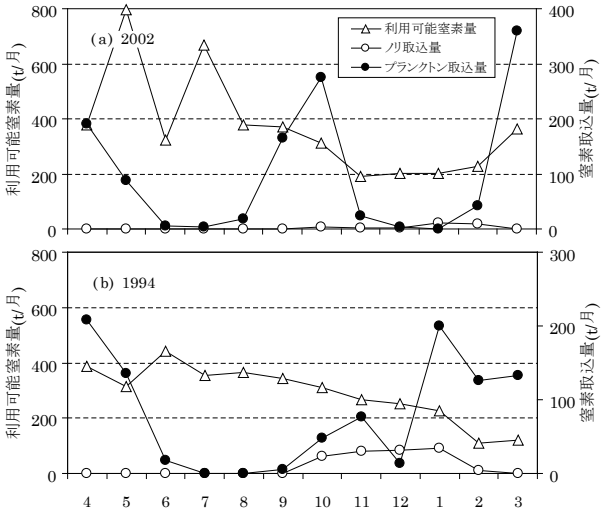


図 8　ノリと植物プランクトンによる窒素取込量の経月変化

3．3　2002 年度の BOX3 における窒素不足の要因

3．2 より，2002 年度ノリ養殖期における BOX3

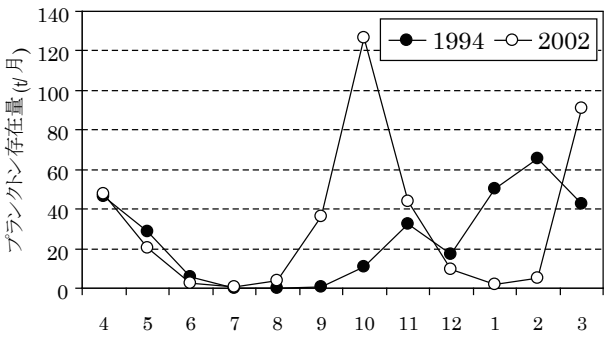


図9　プランクトン存在量の経月変化

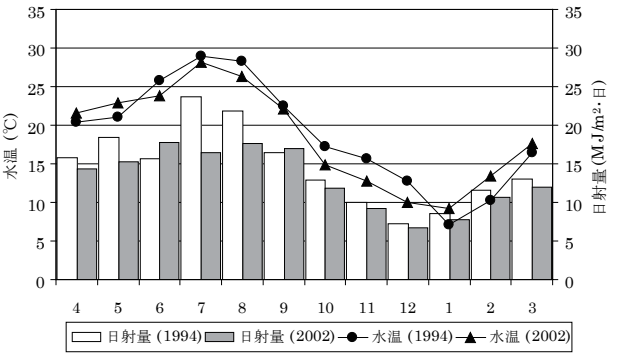


図 10　水温・日射量の経月変化

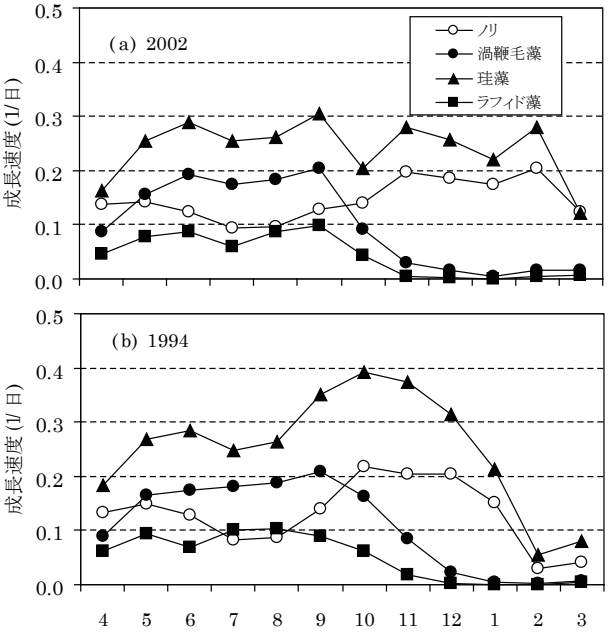


図 11　ノリとプランクトンの増殖速度の経月変化

の窒素不足のメカニズムは，以下のように推察される。

2002 年度のノリ養殖期当初（10 月）は，植物プランクトンの増殖速度は 1994 年度と比較して小さかったが，8 ～ 9 月に増殖した植物プランクトンの存在量が比較的大きかったため，IN が大量に消費された。この IN の大量消費が，10 ～ 11 月の IN 現存量を枯渇させ，11 月以降のノリの成長に必要な窒素が不足したと考えられる。これは，養殖期以前において，利用可能窒素量あるいは流入負荷量の 2 番目のピーク（7 月）の直後に，8 月の高温・高日射により植物プランクトンが活性化したことで，IN が一気に消費され，さらに 8 ～ 10 月に大きな流入負荷もなかったため，養殖期当初の窒素が十分に準備されなかったと考えられる。

これに対して，渇水年である 1994 年度の年間流入負荷量は 2002 年度と比較して低かったが，月変動におけるピーク時期が 2002 年度よりも 1 ヶ月早く，その後の植物プランクトンの増殖に好適な夏季に，植物プランクトン存在量が少なかったため，植物プランクトンによる IN 消費が抑制され，2002 年度と比較して高い利用可能窒素量がノリ養殖期当初まで維持されたと考えられる。このため，渇水に伴う低窒素の条件下であったにも関わらず，ノリ不作には至らなかったと考えられる。

このように，ノリ養殖期における窒素不足は，養殖期における IN 消費だけでなく，養殖期以前の利用可能窒素量や流入負荷量，植物プランクトンの変動パターンとも深く関係すると考えられる。

4　有明海の窒素収支の構造特性

4. 1　少雨年におけるノリ養殖場の窒素収支と利用可能窒素量の空間分布特性

図 12 に，有明海のノリ養殖場が位置するボックスでの少雨年の利用可能窒素量の経月変化を示す。5 つのノリ養殖場のボックスのうち，最湾奥の BOX1 は他のボックスと比較して，筑後川をはじめとする陸域からの供給量が多い反面，沖側への移流・拡散による流出量も多いことが特徴的である。この BOX1 の下流側にある BOX3 では，ノリ不作がみられた 2002 年度において利用可能窒素量は降水量の多かった春および梅雨時期を除いて，当月初めの IN 現存量（前月から繰り越された残存量）の占める割

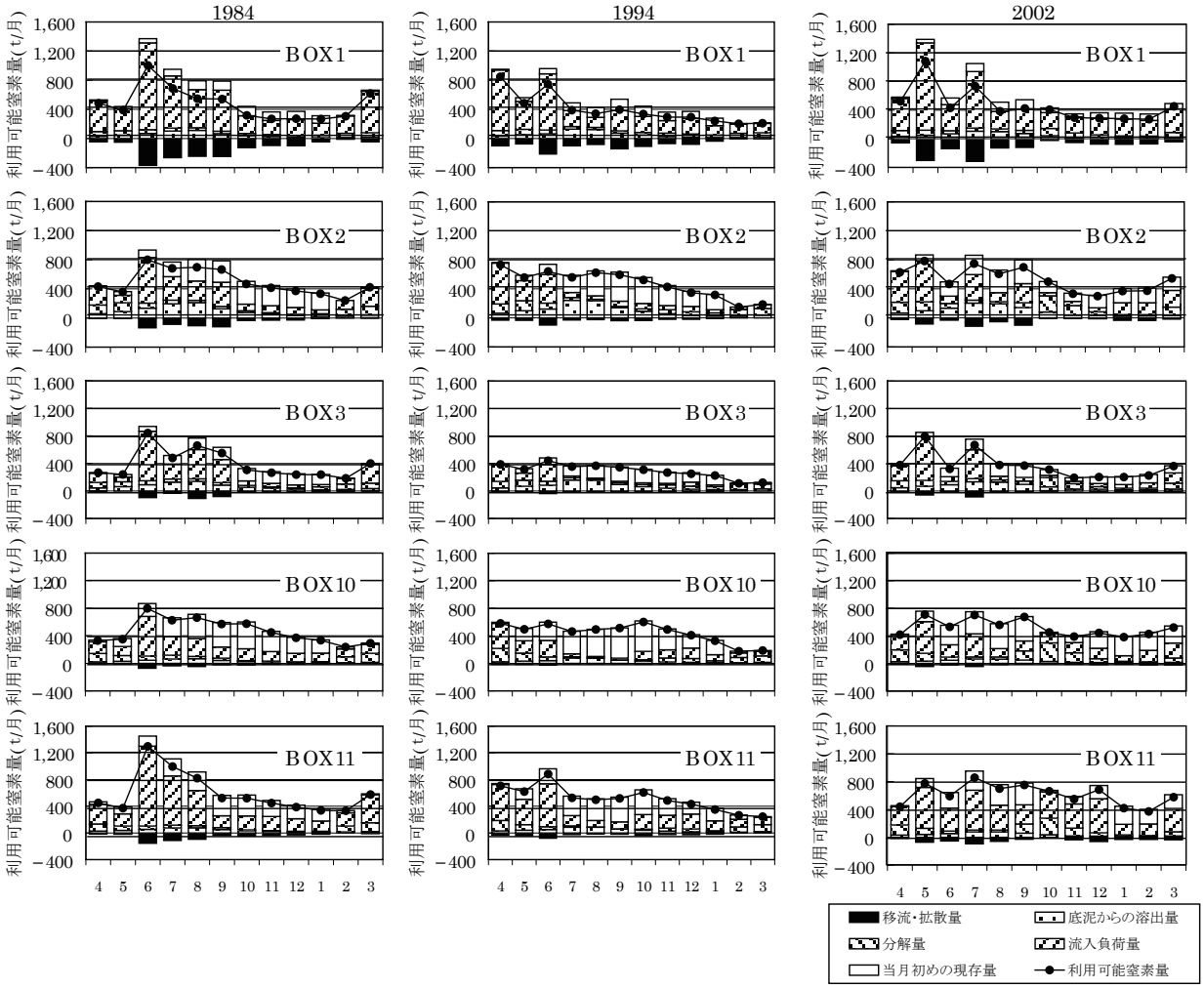


図 12　小雨年（1984，1994，2002 年度）における利用可能窒素量の経月変化

合が高い。ここで，上流の BOX1 をみると，利用可能窒素量に対して当月における陸域からの流入負荷量の寄与が大きく，この傾向は，他の少雨年（1984 年度と 1994 年度）でも同様である。このことは，IN が植物プランクトンの増殖により消費されても，BOX1 では陸域からの IN 供給により十分な利用可能窒素量を維持しやすいが，BOX3 では前から繰り越された IN 現存量に依存する割合が高いため，植物プランクトンが急増した場合，梅雨期のような高負荷がない限り，ノリ養殖期に向けて利用可能窒素量は回復しにくいことを示唆している。このように，BOX3 は，BOX1 に比べて，陸域からの安定的な窒素供給を受けにくく，植物プランクトンによる IN 消費の影響を受けやすいという特性を有した海域といえる。最湾奥西側に位置する BOX2 も，BOX3 と同様に筑後川ほどの窒素供給源はなく，利用可能窒素量が不安定な傾向を示す，いわゆる現存量に依存した海域であるが，ノリ養殖期には施肥によって窒素不足を補う特徴的な海域である。また，熊本沖北側の BOX10 は，陸域からの窒素の供給は小さく，利用可能窒素量は現存量に依存する傾向がみられる。南側の BOX11 は，ノリ養殖場海域のボックスの中では陸域からの窒素供給量はやや多い海域であるが，BOX10 と同様に，利用可能窒素量は現存量に依存する傾向がみられる。このように，有明海のノリ養殖場の分布位置と陸域からの窒素供給特性の違いによるノリ生産状況特性の存在がうかがえる。

4．2　ノリ養殖場海域の窒素収支の類型化

図 4 に示したノリ生産量の推移より，各県の生産状況をみると，福岡県は高生産であるが，変動が大きく不安定である。佐賀県は施肥により高生産性を維持している。熊本県は，湾奥部よりも生産量は少

なく，変動も小さいことから，適正生産といえる。そこで，ノリ養殖場海域の窒素収支の分布特性とノリの生産状況との関係をまとめると，表１のように類型化できる。

表１　ノリ養殖場海域の窒素収支の類型区分

BOX No.	窒素収支の類型化	ノリ生産量
BOX1	高負荷・流入依存型	高生産（不安定）
BOX2	低負荷・現存量依存－外部補給型	高生産（安定）
BOX3	低負荷・現存量依存型	高生産（不安定）
BOX10	低負荷・現存量依存型	適正生産（安定）
BOX11	高負荷・現存量依存型	適正生産（安定）

5　まとめ

ボックスモデルを用いて，少雨年を対象に，有明海のノリ養殖場海域の窒素収支について検討した。その結果，以下のことがわかった。

(1)IN 負荷の流入パターンと植物プランクトン発生適期のタイミング

梅雨に伴う流入負荷の時期が遅く，その後の高水温，高日射により植物プランクトンが窒素を大量に消費した場合，秋霖に伴う負荷の補給がなければノリ養殖期当初に十分な窒素を準備できず，ノリ養殖期間中の窒素不足を引き起こす可能性がある。

(2) 利用可能窒素量に対する流入負荷の寄与

利用可能窒素量に対する流入負荷の寄与が大きければ，植物プランクトンの増殖に伴う窒素の消費が大きい場合でも，その後の陸域からの供給により，次のステージの十分な利用可能窒素量の確保が期待できる。一方，流入負荷の寄与が小さければ，植物プランクトンによる消費が大きい場合，その後の陸域からの窒素補給を期待できない。つまり，利用可能窒素量に対する流入負荷の寄与が大きいほど，安定的な窒素供給が期待できる。

(3) ノリ養殖期以前の植物プランクトンの発生状況

ノリ養殖期当初は，比較的水温も高く，植物プランクトンの成長にも十分適した時期といえる。植物プランクトンの窒素消費量は，そのときの存在量にも依存するため，８～９月の植物プランクトンの発生如何によっては，プランクトンの窒素取込に伴い，ノリ養殖開始時期に窒素不足が起こる可能性がある。

(4) 窒素収支の空間分布特性

有明海のノリ養殖場海域は，植物プランクトンやノリによる窒素消費に伴う変動が大きくても，筑後川や緑川の河口海域のように陸域からの窒素が安定供給される流入負荷依存型海域と，その他の海域のように窒素流入負荷が少ない現存量依存型に類別される。さらに，ノリの生産量の違いから安定生産海域と不安定生産海域に分けられる。これらの海域特性により，ノリ養殖期の窒素不足の応答性は異なる。

参考文献

１）農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会（2003）：最終報告書－有明海の漁業と環境の再生を願って

２）中嶋雅孝，横山佳裕，内田唯史，中野拓治，中西弘（2005）：有明海における冬季のノリ及び赤潮プランクトンの増殖特性，水環境学会誌，28（5），339 － 345

３）中西弘，内田唯史，中嶋雅孝，横山佳裕，中野裕香子（2005）：有明海のノリ養殖環境と栄養塩管理，海苔と海藻，69，1 － 18

４）農林水産省，経済産業省，国土交通省，環境省（2003）：有明海海域環境調査報告書（国土総合開発事業調整費調査），3-2 － 3-34

５）中野裕香子，中嶋雅孝，横山佳裕，内田唯史，中野拓治，中西弘（2006）：簡易手法による有明海に流入する COD，窒素，リンの経年負荷量の推定，水環境学会誌，29（6），349 － 354

６）九州農政局（1979 － 2003）：東シナ海及び九州における漁業動向

７）気象庁：気象観測（電子閲覧室）http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html

８）中野裕香子，中嶋雅孝，横山佳裕，内田唯史，中野拓治，中西弘（2005）：有明海への無機態窒素（IN）負荷量とノリ養殖に関する一考察，（社）日本水環境学会九州支部研究発表会講演要旨集，21 － 22