

Ⅳ フィールドワーク研究報告②

高知県仁淀川における森林土壌からの栄養塩供給および微細藻類へのその影響

深見 公雄¹⁾ * · 玉置 寛²⁾ · 和 吾郎³⁾

要 旨

河川水への栄養塩供給源としての森林土壌の重要性を明らかにするため、山地への降水が森林土壌を通過することでどれくらい栄養塩が付加されるのか、また、供給された栄養塩が河川水中や河口域に生息する微細藻類の動態にどのような影響を及ぼしているのかを明らかにしようとした。高知県仁淀川において調査を実施した結果、降水が森林土壌を通過することで栄養塩濃度が激増すること、特にケイ素は数百倍にも増加したことから、森林土壌は河川水へのケイ素のきわめて重要な供給源であることが分かった。これらの栄養塩は河床岩石表面に生息する付着性微細藻類の一次生産をもたらし、さらに藻類はアユ等によって消費されることで、河川の物質循環と生物生産を支えていることが明らかとなった。さらに残存して河口域に達した栄養塩は、黒潮の影響を受け比較的貧栄養な高知県沿岸の基礎生産にも大きく寄与していることが示唆された。

キーワード：栄養塩供給, 生物生産, 河川水, 森林土壌, 付着性微細藻類

1. はじめに

高知県は、黒潮の影響を強く受けた豊かな自然環境を有しており、その温暖な気候は豊富な降水を山間部にもたらしている。このため、四万十川や仁淀川に代表される高知県下の河川は水量豊かで、森林から供給された豊かな栄養分が、山地から流域を通して貧栄養な黒潮と混じり合う河口汽水域に至るまで、多様な生物資源を育てていると考えられる(山本, 2007)。

近年、山・川・里・海はすべてつながっており、これらを個別にとらえるのではなく、一つのシステムとして総合的に研究することの必要性があちこちで指摘されている(京都大学フィールド科学教育研究センター, 2007)。しかしながらこれらは話題ばかりが先行し、科学的なデータを基にそれらが検証された事例はまだほとんどない。このため、森林生態系が河川や沿岸海洋生態系の成立・維持に果たす役割についてはほとんど知見が得られていない。河川の流域における生物資源の再生産機構や物質循環を明らかにするためには、森林から海洋まで河川流域全体を総合的かつ定

量的に評価する必要がある。高知大学では、大学院黒潮圏海洋科学研究科が中心となって、黒潮の影響を強く受けた高知県の山地から沿岸海域までを一つのシステムとしてとらえる学際的研究を「黒潮流域圏総合科学」と称し、平成18年度からプロジェクト研究が実施されている。

そこで本稿では、「黒潮流域圏総合科学」のなかでも特に、河川水中および沿岸河口域の生物生産を支える基礎となる無機栄養塩の動態に注目し、森林から河川水にどれくらいの栄養塩が供給されているのか、その栄養塩は河川水中でどのような生物に利用されているのかなどその役割について述べたあと、河川水中で消費されてもお残った栄養塩が沿岸生態系の生物生産にいかにか寄与しているかを、仁淀川での調査を中心に高知県下のいくつかの河川での結果を踏まえて述べたい。

2. 森林土壌から河川水への栄養塩の供給

無機栄養塩は、貧栄養な降水が山地に降り、森林土壌中に浸透したあと、森林土壌中の微生物等によって有機物が分解されて生成される。これらは、土壌中を通過し、湧水となって河川の本流に流れ込むことで、河川水へ豊富な栄養塩を供給していると考えられる。

そこで本章では、高知県仁淀川流域の降水および森林土壌を通過した直後の湧水ならびに河川本流の栄養

2007年12月25日受領; 2007年12月30日受理

1) 高知大学大学院黒潮圏海洋科学研究科
〒783-8502 高知県南国市物部乙200

* 連絡責任者 e-mail address: fukami@kochi-u.ac.jp

2) 高知大学農学部
〒783-8502 高知県南国市物部乙200

3) 西日本科学技術研究所
〒780-0812 高知県高知市若松町9-30

塩濃度を比較することで、森林土壌からの無機栄養塩の供給および河川水への寄与に対する役割を明らかにしようとした。

2-1. 材料・方法

仁淀川流域の高知県吾川郡いの町成山地区に設置した採雨装置により、降水試料を得た(田中, 2008)。また森林土壌に吸収された降水に、土壌を通過する過程でどれくらい栄養塩が付加・供給されるかを知るために、成山地区における森林直下の湧水を採取した。さらにこれらの湧水が仁淀川本流に流れ込む地点よりやや下流部の河川水を採取した。

これらの試料は研究室に持ち帰り、グラスファイ

バーフィルター (GF/C) でろ過後、栄養塩自動分析装置 (TRAACS-800) により 3 態窒素 (アンモニア・亜硝酸・硝酸)、リン酸 (DIP)、およびケイ酸 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) の各濃度を測定した。3 態窒素濃度の合計を溶存態無機窒素 (DIN) 濃度とした。

2-2. 結果と考察

2006年8月から12月にかけて採取された降水中には、10-20 μM の DIN, 0.1 μM 前後の DIP, そして 0.1-2 μM 程度のケイ酸が含まれていた (Fig. 1a, b, c)。雨水は海や陸地から蒸発した水蒸気が液体 (雨滴) になったものであり、本来ならば蒸留水であるためほとんど何も溶解していないと思われがちであるが、実際には大気

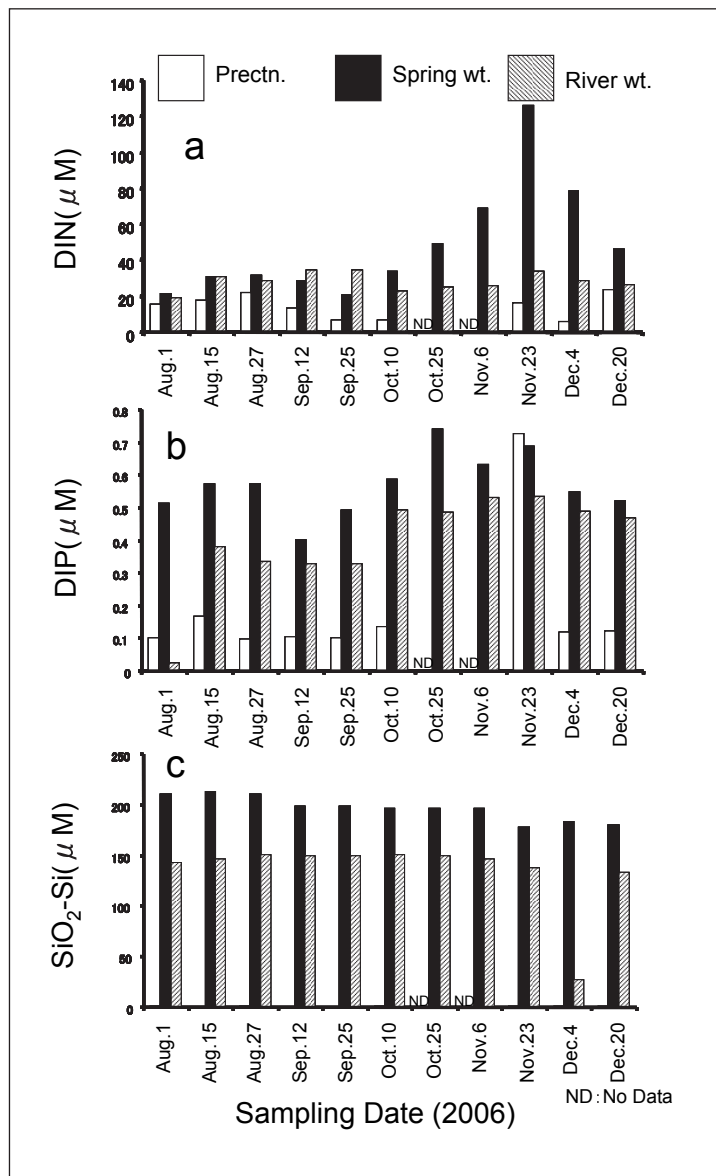


Fig. 1. Seasonal fluctuations of the concentrations of inorganic nutrients in precipitation (Prectn.), spring water (Spring wt.), and main stream (River wt.) of Niyodo River at the sampling station of Ino Town, Kochi Prefecture, from August to December in 2006. a: dissolved inorganic nitrogen (DIN), b: phosphate (DIP), c: silicate.

中の様々な物質を溶かし込んでいる。このため特に窒素成分が比較的高い値を示したのは、大気中のNO_x等の溶解によるものと考えられた。

これら降水中の栄養塩濃度は、森林土壌を通過することにより激増した。特にリン酸とケイ酸はそれぞれ0.5-2 μMおよび200-250 μMとなり (Fig. 1b, c), 森林土壌は河川水への栄養塩、特にケイ素の極めて重要な供給源であることが分かった。この高い湧水中の栄養塩は、河川本流に流入することで希釈され、約30 μMのDIN, 0.4-0.5 μMのDIP, 約150 μMのケイ酸濃度にそれぞれ安定し、大きな季節変動は観察されなかった (Fig. 1a, b, c)。

ケイ素は、後で述べるように河川水中の珪藻類の重要な栄養源である。そして珪藻類は河川における重要な一次生産者の一群である。このため、森林土壌から豊かなケイ酸塩が河川中に供給されていることは、河川の生物生産にとってきわめて大きな意味を持つものと考えられる。

3. 微細藻類による河川水中の栄養塩の消費

河川水中には珪藻類やラン藻類などの微細藻類が生息している。このうち浮遊性のものを植物プランクトンと呼び、岩の表面等に生息しているものを付着性藻類と呼ぶ。後者はアユの餌になるいわゆる“コケ”の正体である。河川ではこれらの浮遊性および付着性の微細藻類が、河川水中の栄養塩を利用して増殖し、一次生産者として重要な役割を果たしている (深見ら、

1994b)。

そこで本章では、森林や流域から供給された栄養塩が河川水中の微細藻類の増殖に対してどのような影響を及ぼしているかを明らかにするために、仁淀川において浮遊性および付着性の微細藻類の生物量を周年にわたって測定した。また特に付着性藻類は、前述のようにアユの餌料として重要な役割を果たしていることから、その生物量の季節変動や栄養塩濃度との関係についても調べた。

3-1. 材料・方法

仁淀川の上流から河口にかけて7つの観測点 (Stns. 1~7) を設け、ひと月に1ないし2回の頻度で試料の採取を行った (Fig. 2)。最も上流のStn. 1付近では、岩肌からの湧水も採取した (Stn. S)。採取された河川水試料は、研究室に持ち帰ったのち、前章と同様の方法で無機栄養塩の分析に用いた。ろ過に用いたグラスファイバーフィルター (GF/C) は、浮遊性微細藻類の現存量を知るためにクロロフィルaの測定に用いた。

同時に、測点現場の河床から直径約20cmの石を採取し、その表面に付着している微細藻類を脱脂綿で採取することで (Fig. 3)、その現存量をクロロフィル量として測定した (深見ら、1994a)。

また付着性藻類については、現存量だけでなくその増殖速度の測定も行った。塩酸によりきれいに洗浄した石を網カゴの内外にそれぞれ設置し、経時的にその表面のクロロフィルa量を測定した。カゴ内部の石

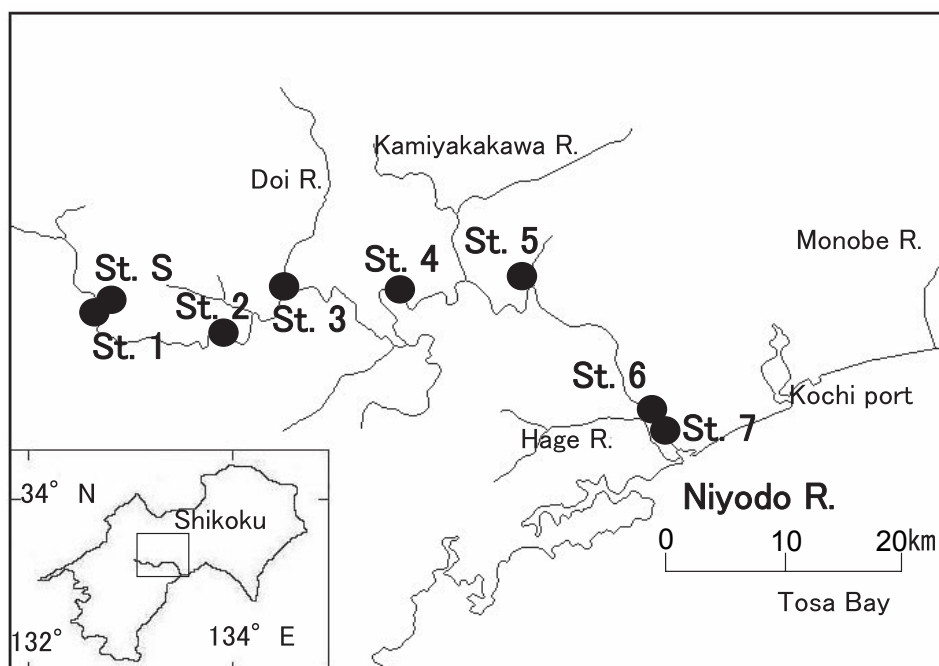


Fig. 2. Sampling stations at Niyodo River. Spring water was collected at Stn. S.



Fig. 3. Sampling of sessile microalgae attached to the surface of a rock in river floor.

表面での増加速度から付着藻類の増殖速度を、またカゴ内外の付着藻類増加速度の差からアユ等の藻類食者による消費速度を見積もった。詳細は深見ら（1994b）に記述されている。

3-2. 結果と考察

2006年から2007年にかけて測定された3つの栄養塩元素のうち、代表例として、各測点におけるDIN濃度の季節変動をFig. 4に示した。河川水中のDINの大部分は、これまでの報告（深見ら，1994a）と同様、硝酸態チッ素であった。湧水を採取したStn. Sおよび河口部のStn. 7で濃度の変動が比較的大きかったが、それ以外の測点では、DINで約 $30\mu\text{M}$ 、DIPで約 $0.405\mu\text{M}$ 、ケイ酸は約 $150\mu\text{M}$ と、一年を通してほぼ一定の濃度に保たれていることが明らかとなった。これらの値を基におおよその平均の栄養塩比（N:P:Si比）を算出してみたところ、 $67:1:333$ となった。この値から、いわゆるレッドフィールド比などから示されるN:P:Si = $16:1:15$ と比較してリンの濃度が相対的にかなり低いことが分かる。ちなみに和ら（2008, 投稿中）は、

四万十川下流部の河川水のN:P:Si比を $160:1:1820$ と報告している。これらのことを考慮すると、高知県の河川の水は相対的にリンが不足気味でケイ素が豊富に含まれていると考えられる。

同様に各測点における浮遊性微細藻類の生物量をFig. 5に示した。ほとんどの測点および観測時において、検出されたクロロフィル量は極めてわずかであり、河川水中には浮遊性微細藻類（植物プランクトン）はごくわずかしか現存していないことが分かった。その中で、大渡ダム湖内のStn. 2および河口部のStn. 7では、比較的高いクロロフィル量が観察された（Fig. 5）。これらはいずれも河川の流速がほとんどないか極めてゆるやかな測点である。このように、流速のある測点ではクロロフィル濃度が極めて低かったにもかかわらず、水の滞留している測点で植物プランクトンの現存量が高かったのは、流速が速いと藻類が次々と希釈され流されてしまうのに対し、流速の遅い測点では藻類が滞留することにより増殖速度が希釈速度を上回るためと考えられた。

一方、付着性藻類の現存量は逆に流速の大きい測点で高くなる傾向が見られた。このことは、岩石表面に

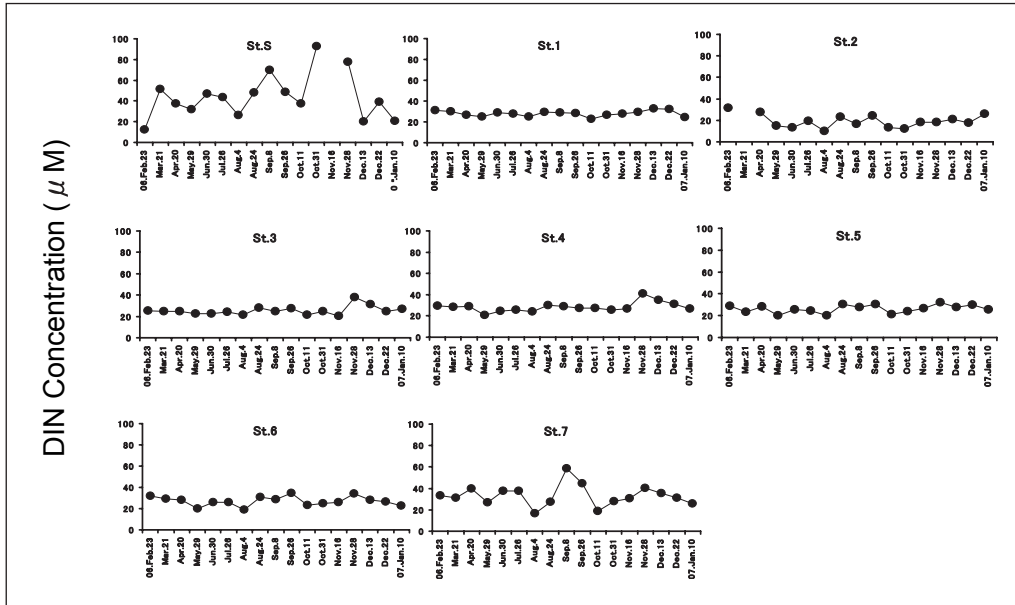


Fig. 4. Seasonal fluctuations of the concentration of dissolved inorganic nitrogen (DIN) at sampling stations from upper to lower stream courses of Niyodo River from February 2006 to January 2007.

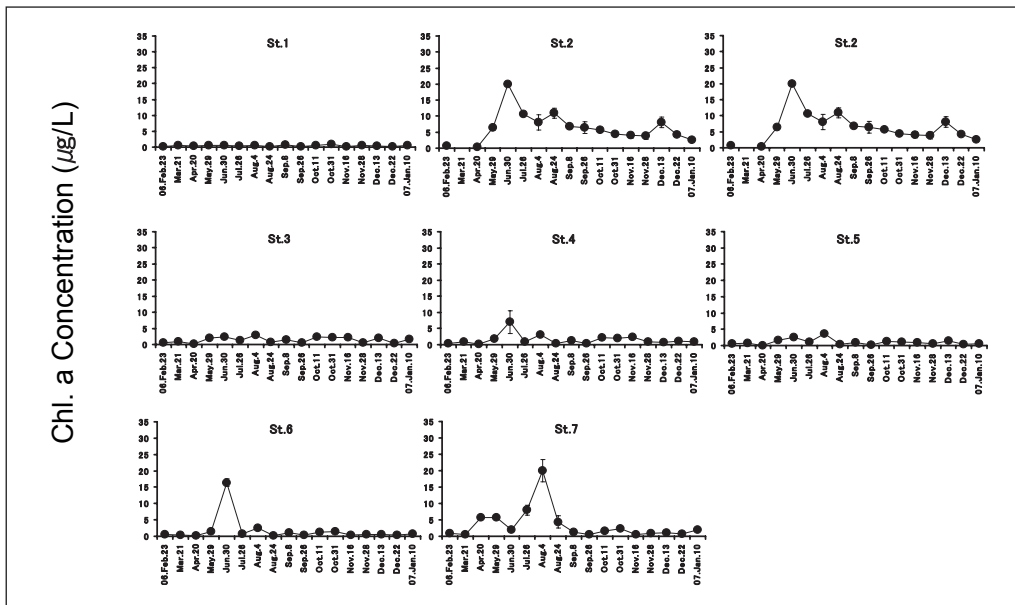


Fig. 5. Seasonal fluctuations of the concentration of chlorophyll a at sampling stations from upper to lower stream courses of Niyodo River from February 2006 to January 2007.

付着している藻類は浮遊性のものと異なり、水流に流されることがないため、次々と栄養塩が供給される流速の大きい測点で活発に増殖したことによると考えられた。しかも興味深いことに付着藻類の現存量は、水温が上昇して生物活動が活発になる夏季よりも冬季に増加する傾向が見られ (Fig. 6), しかも水中の栄養塩濃度とはむしろ逆相関を示し、栄養塩濃度の高い季節に現存量が減少し、低い季節に増加する傾向が見られた (図示せず)。さらに付着藻類の増殖速度と消費速度との間には正の相関が見られ、藻類が活発に増殖し

ている季節には消費速度も速い傾向にあること、しかもそれほど明瞭ではないものの、現存量と同様に増殖速度と栄養塩濃度との間には逆の相関関係を示すことが分かった (図示せず)。

深見ら (1994a) は、高知県物部川および伊尾木川での同様の観察結果から、付着藻類の現存量は河川水の濁度と明瞭な負の相関関係を示すこと、また河川水中の栄養塩濃度は藻類の現存量とはあまり相関がなく、むしろ増殖速度との間に逆相関があることを指摘している (深見ら, 1994b)。本研究によって得られた

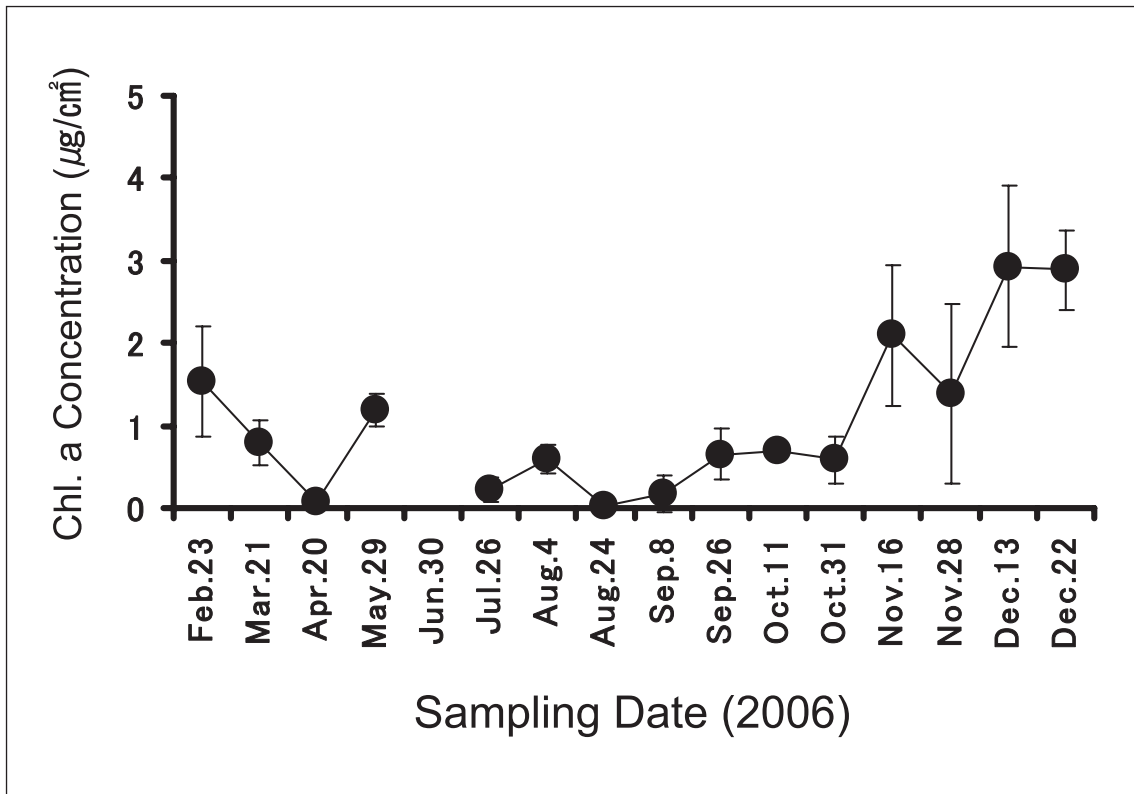


Fig. 6. Seasonal change in the amount of chlorophyll a on the surface of rocks at a sampling station of middle part (Stn. 4) of Niyodo River from February to December in 2006.

結果およびこれらの文献で報告されている事実を合わせて考察すると、付着藻類の現存量や増殖速度の大小は河川水中の栄養塩濃度に左右されるのではなく、むしろ濁度等の影響を強く受けた藻類の増殖や生物量の大小が水中の栄養塩濃度に影響を及ぼしていることを示唆するものである。つまり、付着藻類が活発に増殖して現存量が増加すると取り込まれる栄養塩の量が増えるということであり、河川水中の栄養塩濃度は藻類が消費したあとの“残量”であることを意味するものである。また水温の高い夏季よりも低くなる冬季に付着藻類の生物量が増加することから、アユなどによる藻類消費も現存量に大きく影響していることなどが分かった。

深見ら（1994a）によれば、高知県の河川の付着性微細藻類にはラン藻類の割合が多く、珪藻類は水温の低下する冬季には相対的に増加するものの総じてその割合が他地方の河川と比較して少ないことが分かっている。このことは付着藻類によるケイ素の消費が相対的に少ないことを意味している。前述のように、高知県下の河川水中にはリンが少なくケイ素が豊富であるという事実は、このような付着性微細藻類の群集組成に起因しているのかもしれない。

都市近郊の河川では、栄養塩は森林土壌のみならず

陸上からの排水によっても多量に負荷されている。このように付着藻類は栄養塩を利用して増殖し、アユによって消費され、そしてアユは人間によって釣り上げられる。このことはとりもなおさず森林土壌ならびに生活排水等によって河川環境に負荷された栄養塩が再び陸上へ回収・除去されることを意味しており、河川の生態系では、栄養塩—付着藻類—アユ—人間という物質循環が起こっていることを示している。つまりアユが河床の“コケ”を活発に摂食して育ち、それを人間が釣り上げることが、環境浄化に役立っているといえよう。

4. 河川の栄養塩が河口域の生物生産に果たす役割

以上述べてきたように、森林土壌からの供給や生活排水等によって負荷された河川水中の栄養塩は、途中で微細藻類や水生植物などの増殖・成長をもたらしながら消費されていく。そして消費されずになお残存した栄養塩がついには海に流れ込む。高知県のように栄養の極めて乏しい黒潮の影響を強く受けている地域では、河川水からの栄養塩の供給が沿岸域の生物生産に大きく寄与していると考えられる。

そこで本章では、日本本土で最初に黒潮が接岸する足摺岬周辺から四万十川河口域にかけての海域における栄養塩およびクロロフィルの分布を調べ、河川水の流入がいかに沿岸海域の基礎生産に重要な役割を果たしているかについて考察した。

4-1. 材料・方法

高知県土佐湾西部の四万十川河口域地先から足摺岬周辺海域にかけて合計8点の観測点を設け (Fig. 7), 表層水を月に1度の頻度で採取した。採取された海水試料中の栄養塩濃度 (硝酸+亜硝酸, リン酸, ケイ酸) およびクロロフィルa量を, 前述の方法で測定した。

4-2. 結果と考察

2005年10月から2006年9月にかけて, 各測点における表層水中の栄養塩濃度を測定したところ, 四万十川河口付近の測点 (Stn.P4) とそれ以外の測点 (Stns. A3・5・6・7・10, および P3・5) で大きな違いがあることが分かった。Stn.P4を除く7測点の硝酸+亜硝酸は0.06-7.6 (平均1.7) μM , リン酸は<0.03-0.57 (平均0.13) μM , ケイ酸は0.75-75 (平均9.1) μM であり, 足摺岬

周辺海域ではいずれの栄養塩濃度も常に低く, 極めて貧栄養であることが分かった。これはおそらく, 貧栄養な黒潮の影響によるものと考えられた。それに対し, 四万十川河口付近のStn.P4では硝酸+亜硝酸, リン酸, ケイ酸の濃度はそれぞれ8.7-18 (平均8.7) μM , 0.07-0.60 (平均0.20) μM , 22-190 (平均71) μM と, ほとんどの場合において栄養塩濃度が周辺海域に比較して高い傾向が見られた。特に降雨が多くなる6-8月では, その傾向が顕著であった。一例として2006年8月の観測結果をFig. 8に示した。その結果, 植物プランクトンの現存量を示すクロロフィルaの分布もそれに対応して, 四万十川河口付近で高い傾向が明瞭に観察された (Fig. 8)。

和ら (2008, 投稿中) は, 四万十川の河川水が沿岸海域に供給する栄養塩の総量を, 河川水の栄養塩濃度に流量を乗ずることで見積もっている。その結果, 同海域が成層状態にありかつ雨量が増加する夏季には, 四万十川の河川水の影響が大きく, 特にチッ素とケイ素の分布に対する河川水の寄与が顕著であることを報告した。一方, 足摺岬の西側では, 一年を通してクロロフィルaの濃度が低く, 彼らはその理由を, 四万十川のような相対的に規模の大きな河川が存在しないためとしている。

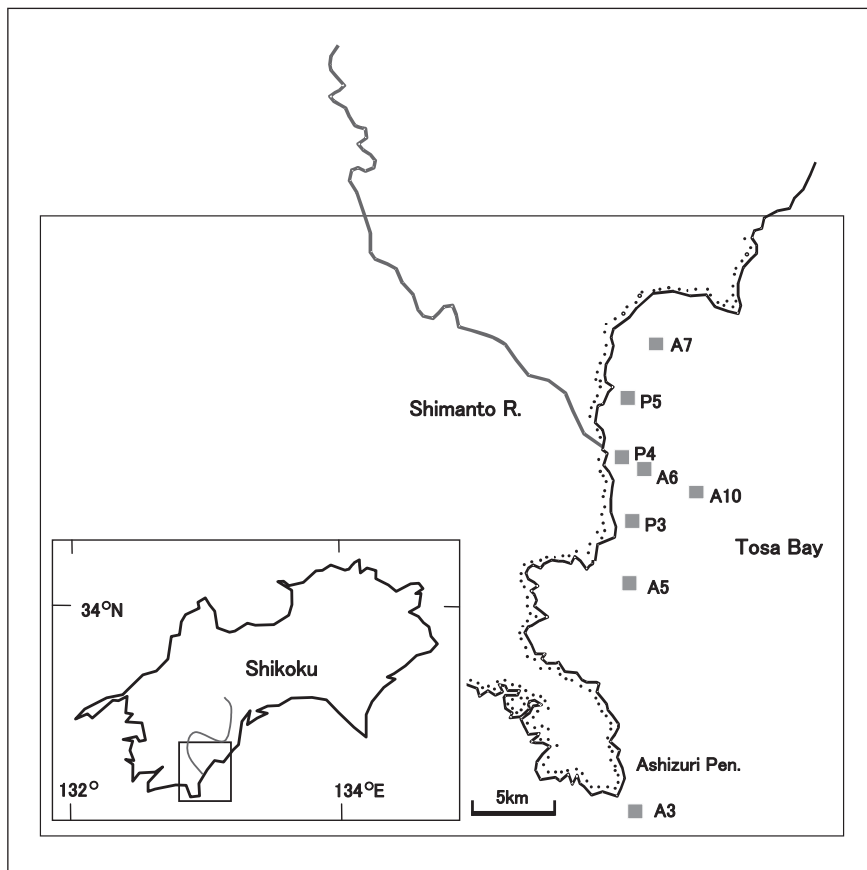


Fig. 7. Sampling points in the western part of Tosa Bay, in Kochi Prefecture.

これらの結果から、貧栄養な黒潮の影響により、高知県西部の沿岸部では植物プランクトンによる生物生産が非常に少ないこと、しかしながら、足摺岬の東側の海域、特に四万十川河口域では、河川水から供給される豊かな栄養塩のために、周辺海域と比べて植物プランクトンの生物量が多いこと、その傾向は四万十川の水量が増加する梅雨から夏季にかけての季節でその効果がより明瞭であることが明らかとなった。つまり高知県の沿岸部は、貧栄養な黒潮の海水とやや富栄養な河川水や沿岸の海水がほどよく絶妙のバランスで混ざり合うことで、豊かな生物の生産が行われ自然の恵みを十二分に受けているたぐいまれな地域であることが示唆された。

5. まとめ

以上述べてきたように、栄養塩の動態の面からも、河川は森林と沿岸海域を結ぶ重要な役割を果たしていることが明らかになった。森林土壌から供給された豊かな栄養塩は、途中の河川水中において多くの微細藻類の一次生産を育み、アユ等の藻類食者の生産を支えているであろうことが示された。また、特に高知県沿岸のように人為的な影響が比較的少なく貧栄養な沿岸海域では、河川水を通して河口域に運搬される栄養塩は極めて大きな役割を果たしていると考えられた。今後は、森林の植生による栄養塩の質的・量的な違い等についても明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 深見公雄,水成隆之,久保田 浩,西島敏隆. 1994a. 高知県下の二河川における水質および付着藻類の季節変動. 水産増殖, 42: 185-197.
- 深見公雄,水成隆之,久保田 浩,西島敏隆. 1994b. 高知県下の二河川における付着藻類の増殖速度およびアユによる藻類消費速度の見積り. 水産増殖, 42: 199-206.
- 京都大学フィールド科学教育研究センター. 2007. 「森里海連環学—森から海までの統合的管理を目指して」. 山下洋 (監修), 京都大学学術出版会, 京都. 364 p.
- 和 吾郎, 木下 泉, 深見公雄. 2008. 四万十川から供給される栄養塩が土佐湾西部沿岸海域の栄養塩分布と基礎生産の季節変化に及ぼす影響. 海の研究 (投稿中).
- 田中壮太. 2008. 高知県の町成山のヒノキ林と竹林における物質動態. 黒潮圏科学, 1 : 88-95.
- 山本民次. 2007. 環境再生に対する考え方と取り組み. 「閉鎖性海域の環境再生」, 山本民次・古谷 研 (編). 恒星社恒星閣, 東京. pp. 9-27.

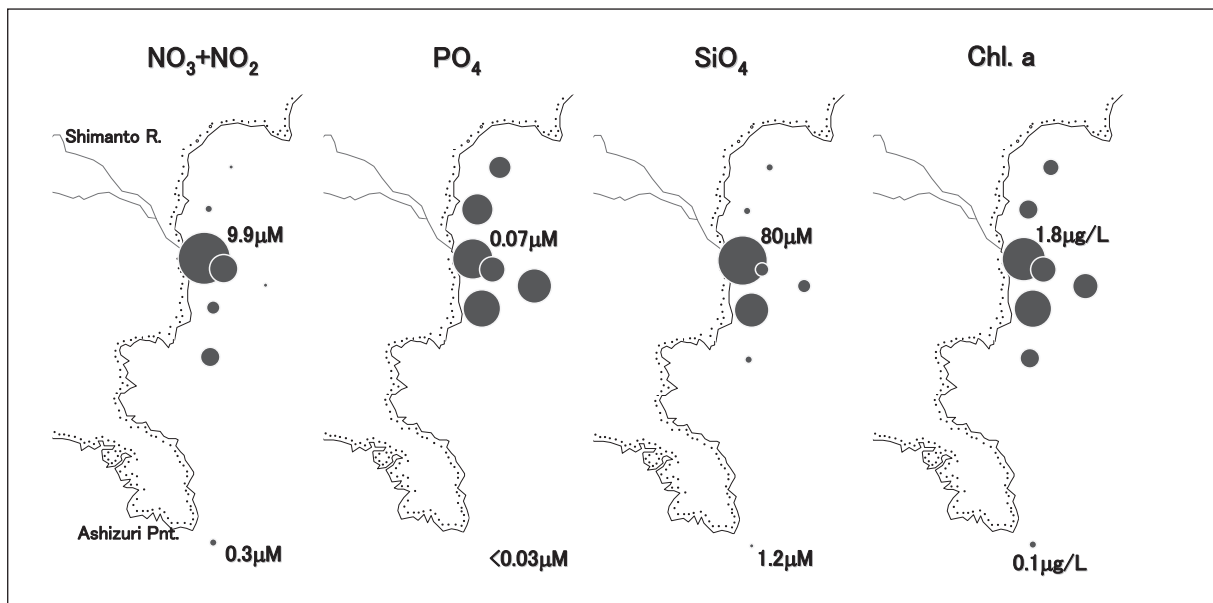


Fig. 8. Distributions of nitrate + nitrite, phosphate, silicate, and chlorophyll a at each sampling station in August, 2006.

Supply of Inorganic Nutrients to River Water from Forest Soil and its Effects on Microalgae in Niyodo River, Kochi Prefecture

FUKAMI, Kimio¹⁾ · TAMAKI, Hiroshi²⁾ · NIGI, Goro³⁾

1) Graduate School of Kuroshio Science (GRAKUS), Kochi University, Monobe, Nankoku, Kochi 783-8502, NIPPON (Japan)

2) Faculty of Agriculture, Kochi University, Monobe, Nankoku, Kochi 783-8502, NIPPON (Japan)

3) Nishinohon Institute of Technology, Wakamatsucho, Kochi, Kochi 780-0812, NIPPON (Japan)

Abstract : To elucidate the importance of forest soil as a source of inorganic nutrient supply to river water, increase in nutrient concentrations of precipitation by passing through soil, and its effects on the dynamics of microalgae in river and estuarine waters were investigated in Niyodo River, Kochi Prefecture. Results showed that concentrations of inorganic nutrients increased significantly. In particular, silicate was enriched as much as several hundred times greater than the concentrations in precipitations, indicating that forest soil is very important source of silicate supply to the river water. These nutrients support the primary production of sessile microalgae on river floor, and they were consequently consumed by Ayu, *Plecoglossus altivelis*. As a result, inorganic nutrients supplied from forest soil are the fundamental for the material cycling in river water. Some parts of nutrients, remaining without consumption and transported to estuarine, also support the primary production in relatively oligotrophic coastal areas in Kochi Prefecture.

Key word : Supply of inorganic nutrients, Primary production, River water, Forest soil, Attached microalgae