

◆ 報 文 ◆

下水処理水に含まれる栄養塩がノリに与える効果

阿部千雅* 鈴木 稔**

1. はじめに

都市化の進展や森林荒廃など流域の変化、また水利用の高度化等に伴い、流域から河川を經由し海域へ供給される栄養塩の物質収支が変化し、沿岸海域生物に影響を与えているとの指摘がある。下水道処理人口普及率は全国平均で69.3% (平成17年度末) ¹⁾ まで向上しており、下水道も陸域から海への栄養塩類の供給過程に大きく関わっていると言える。

下水道と海域の水質という観点で見れば、下水道の整備による閉鎖性水域の水質改善といった従来からの取り組みに加え、放流先の地先海域に生息する水生生物への配慮も求められるようになってきている。しかし、下水道を經由する栄養塩類が地先水生生物に与える影響や効果という視点からの調査検討は、ほとんどなされてこなかった。

ノリは日本の北から南まで広い範囲の沿岸海域で養殖されており、日本における海面養殖の中では最大の生産量とトップレベルの生産額²⁾を誇る。そこで、本研究では、養殖ノリを対象として、室内培養試験により、都市域から海域に供給される下水処理水中に含まれる栄養塩がノリに対してどのような影響や効果を持つかを把握することとした。

ノリは、沿岸域で同様に養殖されるカキ等の貝類と異なり、海水中に溶解している栄養塩を直接利用するという点で、陸域からの栄養塩供給の影響を直接的に受ける生物である。

なお、本研究においては下水処理の消毒過程としては、ノリ等への負の影響が認められていない手法を想定している。

2. 室内培養試験方法

実際にノリ養殖の行われている海域に放流している下水処理場の下水二次処理水と、ノリ養殖が

実際に行われている時期の現地海水と河川水とを用いて室内培養試験を行い、下水処理水中の栄養塩類がノリの生長量及び品質(色、味等)に与える効果について調査を行った。

2.1 実験材料

2.1.1 対象下水処理場と下水処理水

ノリ養殖の行われている海域の沿岸部に位置する標準活性汚泥法の下水処理場において、最終沈殿池越流水(消毒前)を平成18年2月の晴天時の一日間、1時間間隔で24回採水し、等量比により混合して下水処理水試料とした。

2.1.2 現地海水

現地海水は、下水処理水やノリ養殖の影響が直接ないと考えられる近傍の海岸(対象処理場から約20km南)の海水を用いた。採水は平成18年2月の晴天時に行った。

2.1.3 河川水

下水処理水の河川水による希釈の影響を検討するため、近傍海域に最も大きな影響を与えている直近一級河川の順流域最下端で採水し、河川水試料とした。採水は平成18年2月の晴天時に行った。

2.1.4 供試ノリ

ノリは一般に養殖に用いられるスサビノリ品種を用い、冷凍網に着生している葉体を用いた。

2.2 実験方法

2.2.1 試験区設定と培養液の作成

表-1に実験条件の設定を示す。ノリ養殖が行われている海域の塩分濃度観測結果から、海水と淡水(河川水及び下水処理水の混合液)の混合割合は4.4%とし、淡水中の河川水と下水処理水の割合は河川流量の季節変動等を考慮して60%から0%まで変化させた実験区を設定した。また、淡水中の下水処理水割合については、河川水に窒素(NaNO_3)及びリン(K_2HPO_4)を添加した対照区も設定した。培養液の水質を表-2に示す。

2.2.2 培養方法

各条件とも培養液100Lを水槽に満たし、培養

表-1 試験区の設定 (単位: %)

	淡水		自然海水	栄養塩 添加
	下水処理水	河川水		
実験区①	2.6	1.8	95.6	-
実験区②	1.8	2.6	95.6	-
実験区③	0.9	3.5	95.6	-
対照区①	0	4.4	95.6	-
対照区②	0	4.4	95.6	○

表-2 培養液の水質 (単位: mg/L)

	D-TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	D-TP	PO ₄ -P
実験区①	1.00	0.36	0.13	0.06	0.038
実験区②	0.77	0.27	0.14	0.06	0.035
実験区③	0.57	0.16	0.16	0.06	0.036
対照区①	0.41	0.04	0.17	0.04	0.023
対照区②	0.91	0.04	0.73	0.06	0.039

液攪拌のためにエアレーションを施して、これに全長5cm程度以下のノリ葉体が付着しているノリ網を目合いの3辺ずつに切り取って入れ、8日間培養した。ノリ網は各試験区3本垂下した。培養条件として、水温15~18℃、照度5,000~7,000 lx (3波長型昼白昼蛍光灯による人工照明)、光周期11時間明期13時間暗期に設定した。また、水槽内の栄養塩濃度が下がりすぎないように、培養液

は4日間毎に水質測定と培養液の交換を行った。

2.2.3 分析

水質分析として、実験開始時、培養液交換時及び実験終了時に各態窒素及びリンを表-3に示す方法により分析した。

ノリ葉体の分析としては、湿重量、葉体の吸光度、葉体の成分分析(窒素、炭素、リン、アミノ酸含有量)を行った。湿重量は、ノリ葉体を保護する細かなメッシュで包んだ上で簡易な手動の卓上遠心機(食品用)を用いて30秒間に60回転(120rpm)させて水分を除去して測定した。葉体の成分(窒素、炭素、リン、アミノ酸(18種))及び吸光度の分析方法を表-4に示す。ノリ葉体は部位により色彩が異なり、特に縁辺部は生殖器官が形成されると他の未成熟部位とは色彩を異にする³⁾ことから、本実験での吸光度の測定にはノリ葉体根元付近の中央下部を用いた。

全ての測定は3回実施し、結果は平均値とした。なおアミノ酸測定のみ、分析の制約上12日間の培養後の葉体を用いている。

2.3 比較試験の実施

室内培養試験で得られたケース間の結果を実際の養殖ノリと比較するため、複数のノリ生産現場から入手したノリ葉体について、室内培養試験と

表-3 水質分析項目及び方法

分類	分析項目	分析方法
窒素	T-N	JIS K 0102 45.4による銅・カドミウムカラム還元法
	D-TN	0.45μmフィルターを用いた濾液のT-Nを分析
	NO ₂ -N	JIS K 0102 43.1.1によるナフチルエチレンジアミン吸光度法
	NO ₃ -N	JIS K 0102 43.2.3による銅・カドミウムカラム還元・ナフチルエチレンジアミン吸光度法
	NH ₄ -N	海洋観測指針(1990年)によるインドフェノール青吸光度法
リン	T-P	JIS K 0102 46.3.1によるベルオキソ二硫酸カリウム分解法
	D-TP	0.45μmフィルターを用いた濾液のT-Pを分析
	PO ₄ -P	0.45μmフィルターを用いた濾液をJIS K 0102 46.1.1によるモリブデン青アスコルビン酸還元吸光度法

表-4 成分等分析項目及び分析方法

分析項目	方法等
吸光度	自記分光光度計(日立製作所製U-2000)を用いオパールガラス法 ⁴⁾ により測定
窒素含有量及び炭素含有量	CHNコーダー(Elementar社製)を用いる元素分析
リン含有量	底質調査方法H4.6硝酸・過塩素酸分解-モリブデン青吸光度法
アミノ酸含有量(18種)	アミノ酸自動分析計(L-8800型、日立製作所製)により、アルギニン、リジン、ヒスチジン、フェニルアラニン、チロシン、ロイシン、イソロイシン、メチオニン、バリン、アラニン、グリシン、プロリン、グルタミン酸、セリン、スレオニン、アスパラギン酸、トリプトファン、システンの含有量を測定

同様の成分分析を行った。

2.3.1 試供ノリ

有明海、瀬戸内海、三河湾の3海域内で、地元の評判として標準的な質のノリが取れる漁場（以下-Aとする）と良質のノリが取れる漁場（以下-B）で養殖され採取されたノリ（すべてスサビノリ）の葉体を、採取直後に速やかに-25℃で冷凍保存し、分析直前に自然解凍して分析に供した。ノリの採取は平成19年1月に行った。三河湾では赤潮発生時期を選んで採取した。

2.3.2 分析項目及び分析方法

分析項目はアミノ酸含有量とし、分析方法は2.2.3と同様とした。

3. 結果

3.1 室内培養試験

3.1.1 ノリの生長比

培養開始時の葉体湿重量に対する測定時湿重量の比を生長比として算出した。ケース毎の生長比経時変化を図-1に示す。

生長については、実験区②と実験区③では処理水濃度の高い実験区①より生長比が大きく、概ね下水処理水添加率の低い実験区において生長比が大きくなる傾向がみられた。この結果は既存の知見⁵⁾と一致している。すなわち、ノリがある程度の量の色素を持っている場合は、海水中に無機態窒素として0.2mg/L程度の含有窒素量があれば充分成長するというを示していると考えられる。

また実験区①と対照区②の比較では、実験期間を通して大きな違いが見られない。ノリの生長に対する下水処理水の悪影響はなく、下水処理水の栄養塩は人為的に試薬として添加された栄養塩と同様に吸収され、順調な生長につながったと考えられる。

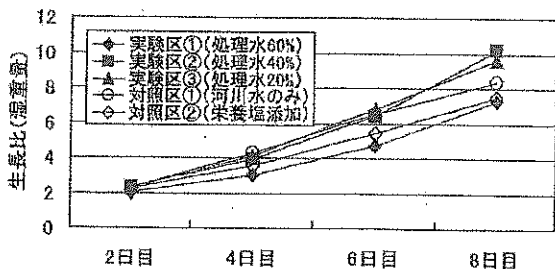


図-1 ケース毎ノリの生長比の経時変化

3.1.2 葉体色調

培養後の葉体の色調を、特定の波長の光における物質の吸収強度を示す尺度である吸光度により比較した。ノリの属する紅藻類に含まれる主な4種の光合成色素の吸収波長を選び出し、その波長における吸光度の変化を実験開始時の吸光度に対する比として算出し、比較した。吸光度の測定においては葉体をそのまま試料としており、色素による吸収以外に細胞膜や細胞内成分による吸収も考えられるため、得られた吸光度は相対的な色素量となる。

培養後の各試験区のノリ葉体の特定波長における吸光度を図-2に示す。ノリの色調はノリの持つそれぞれの色素の割合と量で決まるとされ⁶⁾、色素の生成にはアミノ酸が不可欠であるが、栄養塩が不足すると葉体の生長にアミノ酸が優先的に使われる結果、色素が十分に生成されず⁷⁾、ノリの色調が低下すると言われている。

実験区①~③と対照区①の4試験区の比較では培養液中の下水処理水濃度が高いほど吸光度の比が高いことから、下水処理水中の栄養塩が色素の生成に利用されたものと考えられる。また、実験区①の吸光度の比は対照区②の吸光度の比と概ね同等であったことから、下水処理水に含まれる栄養塩（主にアンモニア態窒素）が、人為的に添加した栄養塩と同程度に色素合成に使われたと考えられる。

3.1.3 葉体のアミノ酸含有量

各試験区の培養後葉体の遊離アミノ酸量を比較した結果を図-3に示す。実験区①~③と対照区①の4試験区の比較では、培養液中の下水処理水濃度が高いほどアミノ酸量が多い結果となった。アミノ酸生成には窒素などの栄養塩が不可欠であり、今回の実験においては下水処理水中の栄養塩

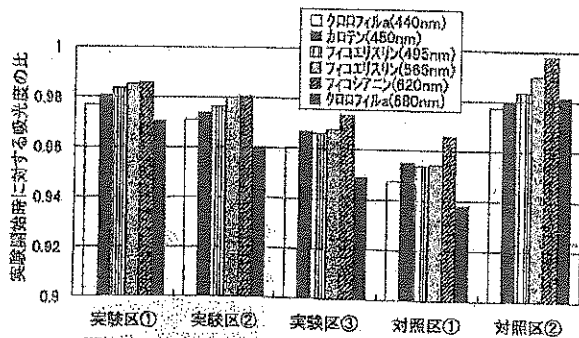


図-2 特定波長におけるノリ葉体の吸光度

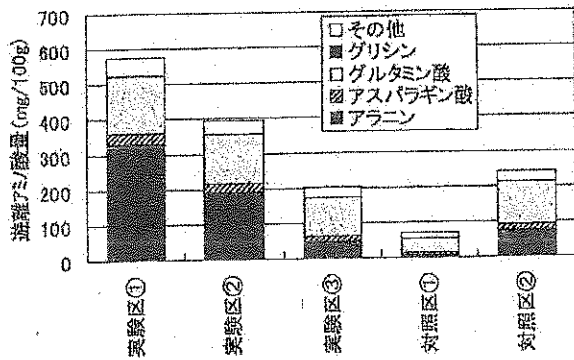


図-3 ノリ葉体の遊離アミノ酸量

がアミノ酸生成に利用されたと推測される。

また遊離アミノ酸の中でもアラニン（甘味）、グルタミン酸（旨み）、アスパラギン酸（酸味）、グリシン（甘味）の4つのアミノ酸量が多いほどノリはおいしくなるとされる⁸⁾。4種のアミノ酸組成を比較すると特にアラニンの含有量の変動が大きいことが示された。ノリは窒素源としてアンモニア態窒素を用いる場合にはその吸収は速やかで、吸収された窒素の相当量がアラニンの合成に用いられるといわれている⁹⁾。下水処理水の比率が高い実験区でアミノ酸が多く作られたのは、アンモニア態窒素濃度が高かったことが理由であると考えられる。

下水処理水を添加せず栄養塩のみ人工的に添加した対照区②において、栄養塩濃度が同程度である実験区①よりアラニンがかなり低い値となっていたが、これは、添加した窒素が硝酸態窒素であり、アンモニア態窒素の濃度は低かったことが大きく影響していると考えられる。

3.1.4 葉体の炭素、窒素、リン含有量

実験開始時及び各ケース実験終了時の炭素、窒素、リン含有量分析結果を表-5に示す。

窒素とリンで培養液の濃度と葉体含有量とに異

表-5 ノリ葉体炭素、窒素、リン含有量 (単位: mg/g)

ケース/項目	炭素 POC	窒素 PON	リン POP	
実験開始時	327	51.1	5.07	
実験終了時 (8日目)	実験区①	335	48.6	5.11
	実験区②	338	52.2	4.86
	実験区③	317	48.3	4.69
	対照区①	321	45.3	4.32
	対照区②	345	47.6	4.59

なる傾向が見られる。リンについては処理水の添加率が高いほど葉体中の含有量は高くなっている。藻類は一般的にリン酸態のリンを吸収した後に無機態のまま細胞内に存在し過剰に貯蔵するため、ある程度までは培養液の濃度に比例して本来必要とする以上のリンを吸収することがその原因と考えられる。一方、窒素については実験区②で葉体中の含有量が最も高くなり、処理水の添加率と葉体中の含有量との間には関連は見られなかった。

3.1.5 培養液の水質変化

表-6に実験期間中の培養液水質変化を示す。4日目試料の分析後に培養液の換水を行い、再び実験開始時と同じ水質の培養液での培養を開始している。各ケースとも培養液中の栄養塩が減少しており、ノリに吸収されたと考えられる。

各ケースの培養液中の窒素の実験期間中の累積減少量を図-4に、また初期培養液と累積窒素減少量中NH₄-Nの割合の関係を図-5に示す。これ

表-6 実験期間中の培養液水質変化 (単位: mg/L)

		実験区		対照区		
		①	②	③	①	②
T-N	実験開始前	1.04	0.80	0.62	0.44	0.93
	4日目	0.60	0.43	0.21	0.15	0.48
	8日目	0.40	0.18	0.21	0.14	0.39
D-TN	実験開始前	1.00	0.77	0.57	0.41	0.91
	4日目	0.59	0.42	0.18	0.14	0.42
	8日目	0.38	0.16	0.16	0.13	0.37
NH ₄ -N	実験開始前	0.36	0.27	0.16	0.04	0.04
	4日目	0.14	0.05	0.04	0.01	0.02
	8日目	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
NO ₂ -N	実験開始前	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	4日目	0.007	0.008	0.005	<0.001	0.011
	8日目	0.007	0.001	<0.001	<0.001	0.009
NO ₃ -N	実験開始前	0.13	0.14	0.16	0.17	0.73
	4日目	0.12	0.13	0.04	<0.01	0.37
	8日目	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	0.15
T-P	実験開始前	0.079	0.077	0.077	0.057	0.080
	4日目	0.051	0.054	0.051	0.039	0.054
	8日目	0.038	0.038	0.036	0.032	0.035
D-TP	実験開始前	0.062	0.060	0.063	0.039	0.061
	4日目	0.034	0.036	0.033	0.020	0.038
	8日目	0.019	0.019	0.015	0.013	0.017
PO ₄ -P	実験開始前	0.038	0.035	0.036	0.023	0.039
	4日目	0.009	0.013	0.009	0.004	0.011
	8日目	0.003	0.003	<0.003	<0.003	<0.003

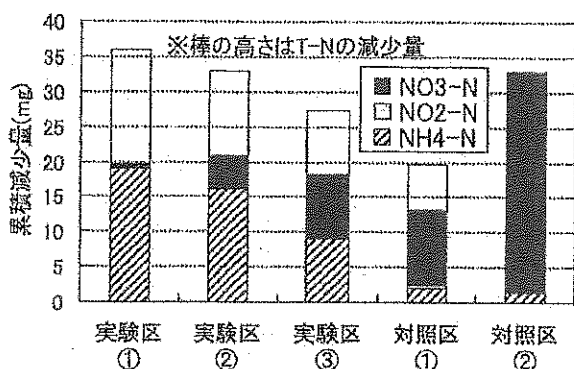


図-4 各ケース培養液中の累積窒素減少量

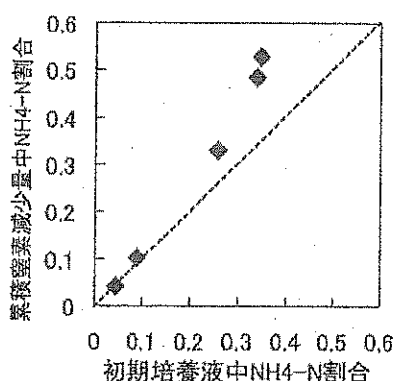


図-5 初期培養液と累積窒素減少量中NH₄-Nの割合

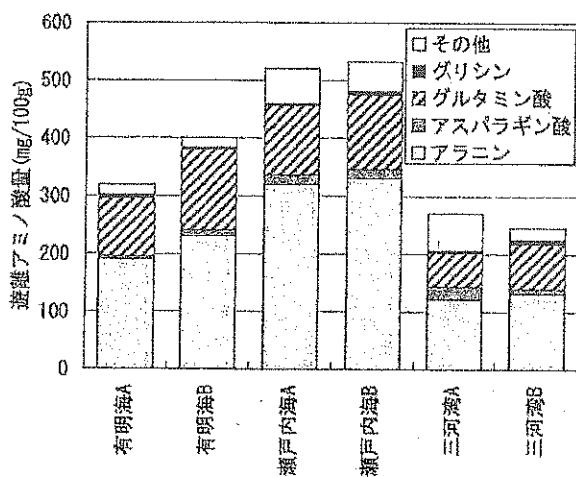


図-6 各海域試料のアミノ酸含有量

らの図から、窒素についてはアンモニア態窒素が優先的に吸収されていることが分かる。なお、リンについては培養液の水質とノリによる吸収量との間に特に関連は見られなかった。

3.2 比較試験 (アミノ酸量)

有明海A、有明海B、瀬戸内海A、瀬戸内海B、三河湾A、三河湾Bの6地点で採取されたノリ葉

体のアミノ酸量分析結果を図-6に示す。アミノ酸の含有量は、250～520mg/100gの範囲にわたり、実験区①の含有量は、その最大値に該当するものであった。このことから、下水処理水の添加された海水で培養されたノリは、実際の海域における養殖ノリと比較して、味に関連する質の面で遜色ないものと考えられる。

なお、赤潮発生中に採取した三河湾試料では特にアラニンの含有量が低かった。

4. 考察

4.1 ノリの色調と下水処理水中の栄養塩の関係

ノリは色調が濃いほど品質が良い⁸⁾と評価される。3.1.2に示したように下水処理水に含まれる栄養塩が色素合成に使われたと考えられることから、下水処理水による栄養塩の供給はノリの品質を色調の面で高める可能性があると考えられる。

4.2 ノリの味と下水処理水中の栄養塩の関係について

室内培養試験で下水処理水添加量が最も高かった実験区①のアミノ酸量は、比較試験で最もアミノ酸量の高かった瀬戸内海試料と同程度であり、一方、海水と河川水のみで調整されている対照区①のアミノ酸量は、赤潮発生中の三河湾試料の4分の1程度であった。これらの結果から、ノリの味に影響のあるアミノ酸の合成には、下水処理水中の栄養塩が寄与しているものと考えられる。

4.3 生長量と栄養塩量

室内培養試験では、3.1.1で示したように、概ね下水処理水添加率の低い実験区の方が下水処理水添加率の高い実験区よりも生長比が高い結果となった。これは、下水処理水添加率が低いと、葉体の存続のために最低限必要な栄養塩を確保するために葉体の表面積を拡大させる、つまり量的な生長が優先させるためであると考えられる。

一方、下水処理水添加率の高い実験区①、及び栄養塩を人為的に添加した対照区②については、葉体表面積を拡大することなく栄養塩を十分に吸収できる環境にあったと考えられ、このような状況では葉体の生長よりも光合成色素の合成のためにより多くの栄養塩が使われるために、生長比で見ると下水処理水添加率の低い実験区を下回る結果となったものと考えられる。

5. 結論と今後の方向性

本研究では、下水処理水中に含まれる栄養塩がノリに対してどのような効果を持つか、室内培養試験及び確認試験により検討した。その結果、次の結論を得た。

- ・本研究で設定した条件（培養液に占める下水処理水の割合（下水処理水添加率）で0.9～2.6%）では、下水処理水添加量が高いケースほど培養後葉体の吸光度は高く、ノリの色調が濃くなる傾向が見られた。
- ・下水処理水添加率が高いケースほど、培養後葉体中にはノリのうまみ成分であるアミノ酸含有量が高くなった。最も下水処理水添加率が高いケースでは、国内でも有数のノリ産地で実際に養殖されたノリと同程度の含有量となった。
- ・窒素の総量が同じであれば、アンモニア態窒素の割合が高い培養液のほうが、硝酸態窒素の割合が高い培養液よりもノリによる窒素の吸収とアミノ酸合成が速やかであった。
- ・以上のことから、下水処理水中の栄養塩は、味や色調といったノリの品質を高めることに寄与する可能性が高い。

しかし一方で、下水処理水が淡水であることや水温が高めであることなど、成分以外の要素の中にはノリの生長に悪影響を与える可能性のあるものもあり、今後はこれらの要素のノリへの影響等について検討する必要がある。さらに、ノリの養殖が行われる海域が閉鎖性水域である場合には、下水処理水による栄養塩の海域への供給が富栄養化を助長しかねないという指摘もあり、ノリへの栄養塩の供給という目的での下水処理水の活用といったミクロの視点と、海域全体の水質改善というマクロの視点との調和について、今後充分検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 下水道行政研究会編集：平成18年日本の下水道、(社)日本下水道協会、2006
- 2) 平成17年度水産白書
- 3) 能登谷正浩著、日本水産学会監修：ベルソープックス 012(社)海苔という生き物、成山堂書店、2002
- 4) 有賀祐勝、井上 勲、田中次郎、横濱泰繼、吉田忠生編：藻類学 実験・実習、講談社、2000
- 5) 松本文夫：ノリ生育に対する環境、特に水流の影響に関する研究、広大水産産紀要2 (2)、1959

- 6) 大石圭一：海藻の科学、朝倉書店、1993
- 7) 熊本県水産研究センター：ニュース「ゆうすい」第13号「ノリの色落ちはなぜ起こる?」、2005、<http://www.suiken.pref.kumamoto.jp/nyusu/13/13.htm>
- 8) 岩田静昌、JF全漁連 海苔海藻部編集：JF全漁連のりごよみ、全国漁業共同組合連合会、2005
- 9) 佐藤孜郎、佐藤美和、伊藤啓二、松本文夫：アサキサノリの生化学的研究-I、窒素添加培養による窒素成分の変化、Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, Vol.25 Nos.10-12, 1959

このほか、以下の文献を参考にした：

- ・山本民次、高尾允英：スサビノリ *Porphyra yezoensis* 葉体のアンモニア態及び硝酸態窒素の取り込みに及ぼす温度の影響、藻類、36号 p.37, 1988
- ・徳田 廣、大野正夫、小河久朗：海藻資源養殖学、(株)緑書房、1987
- ・能登谷正浩編著：海苔の生物学、成山堂書店、2000
- ・西澤一俊、千原光雄：藻類研究法、共立出版、1979

阿部千雅*



国土交通省国土計画局大
都市圏計画課 (前 独立
行政法人土木研究所つく
ば中央研究所水環境研究
グループ水質チーム主任研
究員)
Chika ABE

鈴木 稔**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水環境
研究グループ水質チーム
上席研究員
Yutaka SUZUKI