

## 異なる立地環境における森林土壌中の水と溶存物質の動態 Water and solute dynamics in soils under different environments

小林 政広<sup>1\*</sup>, 吉永秀一郎<sup>2</sup>, 伊藤優子<sup>1</sup>  
KOBAYASHI, Masahiro<sup>1\*</sup>, S. Yoshinaga<sup>2</sup>, Y. Itoh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 森林総合研究所, <sup>2</sup> 森林総合研究所九州支所

<sup>1</sup>Forestry and Forest Products Research Institute, <sup>2</sup>Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

### 1. はじめに

流域の最上部に位置する森林には、下流に清浄な水を安定して供給する機能が求められている。森林から流出する渓流水の水質は、雨水が地中を移動する間に様々な化学的・生物学的プロセスの影響を受けて形成される。特に、立地環境の影響を受ける土壌中のプロセスは水質形成において重要であり、これを理解するためには土壌中を移動する水と物質の量を測定することが必要である。本研究では、異なる立地環境下の森林を対象にライシメータを用いた土壌水の採取を行い、土壌中の水と溶存物質の移動量を明らかにした。

### 2. 研究方法

観測は茨城県城里町に位置する桂試験地および茨城県石岡市に位置する筑波共同試験地で行った。両試験地とも、土壌は火山灰を母材とする褐色森林土である。林内雨による窒素流入量は、桂試験地で  $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  以下、筑波共同試験地では  $10 \sim 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  であり、後者で多い。桂試験地の斜面下部のスギ林および斜面上部の落葉広葉樹林、筑波共同試験地の斜面下部のスギ林および斜面上部のヒノキ林に観測プロットを設置し、林内雨、 $A_0$  層通過水、土壌水を採取した。林内雨はポリエチレン製のロートとタンクよりなる採取装置で採取した。 $A_0$  層通過水は、堆積有機物直下に挿入したテンションフリーライシメータで採取した。土壌水は、深度 30cm および深度 100cm 付近に埋設した直径 27cm のセラミックプレートと自動制御の吸引・貯留部から構成されるテンションライシメータを用いて採取した。水試料は、メンブレンフィルター（孔径  $0.45 \mu\text{m}$ ）でろ過し、イオンクロマトグラフ法および ICP 発光分光法により主要溶存成分濃度を測定した。また、全有機体炭素計により溶存有機炭素（DOC）濃度を測定した。

### 3. 結果と考察

年間の土壌水の移動量は、斜面上部では桂試験地、筑波共同試験地とも林内雨量より 300mm 前後少なく、斜面下部では両試験地とも林内雨量と同等かそれを上回る値となった。斜面上部では樹木根による吸水の影響がそのまま現れたものと考えられる。これに対して斜面下部では、樹木根による吸水があるものの、斜面上部からの水移動がこれを打ち消す程度に生じていることが推察された。なお、桂試験地の落葉広葉樹林では、冬の落葉期には林内雨量と水移動量がほぼ同じ値であった。 $A_0$  層通過水の年間の窒素移動量に占める硝酸態窒素の割合は、斜面上部では桂試験地、筑波共同試験地とも 7 割程度であったが、斜面下部では両試験地とも 9 割を超えた。斜面下部の湿潤な環境下では硝化が生じやすいことの反映と考えられる。深度 100cm 付近の硝酸態窒素移動量は、桂試験地では斜面上部、下部ともゼロに近い値であったが、筑波共同試験地では斜面上部、下部とも  $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  を上回った。筑波共同試験地では、大気からの窒素流入量が多く、生態系が必要な窒素の量を上回り「窒素飽和」の状態にあるためと考えられる。多量の硝酸の存在により、筑波共同試験地の斜面下部では、桂試験地の斜面下部の約 2 倍の Ca イオンが溶脱し、桂試験地ではほとんど検出されない Al の移動も生じていた。

キーワード: 森林土壌, 水, 溶存物質, 立地環境

Keywords: Forest soil, water, solute, site environment

## 西南日本の複雑地形地人工林小流域を対象とした森林蒸発散量の評価手法について Comparison of evapotranspiration obtained through multiple observation methods from a planted forest on complex terrain

清水 貴範<sup>1\*</sup>, 熊谷朝臣<sup>2</sup>, 小林政広<sup>1</sup>, 飯田真一<sup>1</sup>, 井川怜欧<sup>4</sup>, 玉井幸治<sup>1</sup>, 清水晃<sup>3</sup>

SHIMIZU, Takanori<sup>1\*</sup>, Tomo'omi Kumagai<sup>2</sup>, Masahiro Komayashi<sup>1</sup>, Shin'ichi Iida<sup>1</sup>, Reo Ikawa<sup>4</sup>, Koji Tamai<sup>1</sup>, Akira Shimizu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 森林総合研究所, <sup>2</sup> 名古屋大学地球水循環研究センター, <sup>3</sup> 森林総合研究所, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Forestry and Forest Products Research Institute, <sup>2</sup>Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, <sup>3</sup>Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, <sup>4</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

我が国の国土の18%はスギ・ヒノキ植栽木を主体とした人工林が占有している。その多くは複雑地形上に生育しており、さらにパッチ状に植栽されているため、こうした森林からの蒸発散量を単一の手法で精度良く定量化することは困難であると考えられる。そこで、九州北部に位置する人工林小流域を対象に、水文・微気象および樹木蒸散量などの観測を行い、複雑地形地森林において蒸発散量を定量化する際の手法の比較検討を試みることにした。

観測地は熊本県山鹿市に設定した鹿北流域試験地 (KHEW) である。観測地周辺は谷筋から斜面中腹にスギ、斜面上部から尾根にはヒノキが植栽されている人工林である。面積 2.63ha および 3.69ha の2つの流域の末端に設置した流量堰から水流出量を測定し、流域近辺の林道沿いで降雨量観測を行った。より面積の小さい方の流域の中央部には高さ 50m の観測タワーを設置し、クロードパス分析計による水蒸気フラックスの測定を行った。さらに、流域内で斜面位置が異なる複数のスギ林分プロットを設け、グラニエ法に樹液流速測定を行った。また、大径スギ・中径スギ・ヒノキ林分の3地点で樹冠遮断雨量の観測を行った。2007年 - 2008年に取得したこれらのデータを解析の対象とした。

2007年の降雨量は1956.5mmであり、中径スギ林分プロットでの樹冠遮断量は435.3mmであった。また、2流域の年流出量は10%程度異なったが、これは基岩層の傾斜方向が表面地形に一致しないために、より小さい方の流域で漏水が生じている可能性が高いためであると考えられた。また、上層木の単位地表面積当たりの蒸散量は斜面位置で異なるが、上部斜面で繁茂している下層植生の蒸散がこの差を補償する可能性があると考えられた。一方水蒸気フラックスの純放射量に対する比率は、観測タワーに対して南風になる場合と北風になる場合で著しい差があり、これは南風側の斜面が急傾斜で、且つスギ林分に比較して生育状況の良くないヒノキ林分の影響を受けやすいことが原因となっている可能性が高いと考えられた。発表ではこれらの事象を比較検討し、年間の蒸発散量や流域水収支について考察を行う予定である。

キーワード: 人工林小流域, 複雑地形地, 蒸発散量, 降雨-流出, 水蒸気フラックス, 樹液流速測定

Keywords: Planted Coniferous forest, Complex terrain, Evapotranspiration, Rainfall-runoff, Latent heat flux, Sap flux measurement

## 森林土壌における脱窒に関わる微生物群集構成：脱窒機能遺伝子による把握 Community structures and activity of denitrifying microbes in forested catchment: survey using nitrite reductase genes

青木麻耶<sup>1</sup>, 大手 信人<sup>1\*</sup>, 勝山千恵<sup>2</sup>, 諏訪裕一<sup>2</sup>, 丹下健<sup>1</sup>

Maya Aoki<sup>1</sup>, OHTE, Nobuhito<sup>1\*</sup>, Chie Katsuyama<sup>2</sup>, Yuichi Suwa<sup>2</sup>, Takeshi Tange<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院農学生命科学研究科, <sup>2</sup> 中央大学理工学部

<sup>1</sup>Graduate School of Agr. and Life Sci. University of Tokyo, <sup>2</sup>Faculty of Science and Engineering

To elucidate the mechanisms of denitrification processes in the forested catchment, microbial ecological approaches have been applied in an experimental watershed that has previously investigated its hydrological processes. The study catchment is located in the Chiba prefecture in central Japan under the temperate Asian monsoon climate. Potential activities of denitrification of soil samples were measured by incubation experiments under anoxic condition associated with  $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$  addition. Existence and variety of microbes having nitrite reductase genes were investigated by PCR amplification, cloning and sequencings of nirK and nirS fragments after DNA extraction. Contrary to our early expectation that the potential denitrification activity was higher at deeper soil horizon with consistent groundwater residence than that in the surface soil, denitrification potential was higher in shallower soil horizons than deeper soils. This suggested that the deficiency of  $\text{NO}_3^-$  as a respiratory substrate for denitrifier occurred in deeper soils especially in the summer. However, high denitrification activity and presence of microbes having nirK and nirS in surface soils usually under aerobic condition was explainable by the fact that the majority of denitrifying bacteria have been recognized as a facultative anaerobic bacterium. This also suggests the possibility of that denitrification occurs even in the surface soils if the wet condition is provided by rainwater during and after a storm event. Community structures of microbes having nirK were different between near surface and deeper soil horizons, and ones having nirS was different between saturated zone (under groundwater table) and unsaturated soil horizons. These imply that microbial communities with nirK are sensitive to the concentration of soil organic matters and ones with nirS is sensitive to soil moisture contents.

キーワード: 森林土壌, 脱窒, 微生物群集, 機能遺伝子

Keywords: forest soil, denitrification, microbial community, functional gene

## 異なる浅層地下水中の脱窒速度 Denitrification rates in different shallow aquifers

江口 定夫<sup>1\*</sup>

EGUCHI, Sadao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 農業環境技術研究所

<sup>1</sup>National institute for Agro-Environmental Sciences

浅層地下水中の脱窒速度は、帯水層の水文地質環境と土地利用条件に強く依存する。本発表では、異なる水文地質環境と土地利用条件下における浅層地下水中の脱窒速度を整理すると共に、その簡易モデル化を検討する。

キーワード: 脱窒, 浅層地下水帯

Keywords: denitrification, shallow aquifer



## 鳥取砂丘における地下水の湧出メカニズムと水文地質構造

### Groundwater discharge mechanism and hydro- geological structure in Tottori sand dune

河合 隆行<sup>1\*</sup>, 齊藤忠臣<sup>2</sup>, 金久研也<sup>2</sup>, 糟谷哲史<sup>2</sup>, 塩崎一郎<sup>3</sup>, 多田泰之<sup>4</sup>

KAWAI, Takayuki<sup>1\*</sup>, SAITO Tadaomi<sup>2</sup>, KANEHISA Kenya<sup>2</sup>, KASUYA Satoshi<sup>2</sup>, SHIOZAKI Ichiro<sup>3</sup>, TADA Yasuyuki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 鳥取大学 産学・地域連携推進機構, <sup>2</sup> 鳥取大学 農学部, <sup>3</sup> 鳥取大学大学院 工学研究科, <sup>4</sup> 森林総合研究所

<sup>1</sup>Regional Industrial Academic Cooperation, Tottori University, <sup>2</sup>Faculty of Agriculture, Tottori University, <sup>3</sup>Graduate School of Engineering, Tottori University, <sup>4</sup>Forestry and Forest Products Research Institute

#### 1. はじめに

山陰海岸国立公園に位置する鳥取砂丘は、世界的にも貴重な自然景観として2010年に世界ジオパークに登録された。一方で、国立公園特別保護区および天然記念物として厳重に管理されてきたため、地質等を含む砂丘内の自然現象については科学的解明が進んでいない。その砂丘内にはオアシスと呼ばれる非恒常性の小水域が存在しており、発生・消滅を繰り返している。オアシスは砂丘の自然景観を形成する因子として重要な役割を担っており、如何なるメカニズムで発生・消滅しているのかは古くからの学術的関心である。このオアシスの近くには、常に地下水が湧出している地点がある。この湧水はオアシス方面へと流下しているため、オアシスの形成に大きく影響を与えられていると考えられている。しかし、砂丘内にはこの湧水以外にも様々な規模の湧水点を確認されており、これらの湧水もオアシス形成に影響を与えている可能性は否定できない。そこで本研究では、砂丘の地下水・湧水の面的な水質特性と、深度10m付近までの浅層の水文地質構造探査を用いてオアシス形成のメカニズムを解明する。なお、国立公園特別保護区および天然記念物である鳥取砂丘内での地質調査は、環境省からの許可を得ている。

#### 2. 研究方法

地下水位分布について、2011年9月にオアシス周辺100m×300mの範囲で測定を行った。約20m間隔で水位観測用の縦孔を76本掘削し、孔内発生水位を測定した。

湧水の水質として、酸素安定同位体比、水温、電気伝導度、pHを測定した。測定地点は、2ヶ月以上連続して湧水が確認できた3地点(A-1,2,3と呼称)、大きな降水後に湧出し2ヶ月未満で消滅する6地点(B-1~6と呼称)の計9地点である。なお、この中で最大の湧水点がおアシスに向かって河川形状を作っているA-1地点である。

同位体比測定のためのサンプリングは降水量に応じて毎日から隔日で行い、同位体比質量分析計を用いて分析した。水温は月に1回、EC、pHは水の同位体比測定後のサンプルを使用し測定した。降水量測定および降水サンプルの採取は、湧水を採取した地点から約1km離れた鳥取大学乾燥地研究センターにて実施し、全ての日降水量の同位体比および電気伝導度、pH測定を行った。水質の測定期間は2010年12月から2011年11月である。

地質構造探査には二次元比抵抗映像法を用いた。電極に銀-塩化銀の非分極電極を用い、電極間隔を1mに設定して深度約10mまでの探査を実施した。測定期間は2010年12月である。

#### 3. 結果と考察

地下水位分布調査の結果、地下水面は地表面下0.2-2.8mという浅層部に存在していることが明らかになった。また、測定域内の地下水面形状には分水界が形成されており、東部と西部で流向方向が異なっていた。なお、地形面には分水界は存在せず、西から東へなだらかに下方傾斜している。この東部の地下水流域にはオアシスが形成され、流域内には湧水A-1、湧水B-1,2の計3地点の湧水地点が含まれる。残りの6地点の湧水は西部の地下水流域内に存在し、オアシス形成にはほとんど寄与していないと考えられる。水温、電気伝導度、pHの結果から、2ヶ月以上連続して湧水が確認できるA-1,2地点は毎回の降水イベントの影響をあまり受けておらず、地下水の滞留時間が相対的に長いことが示された。その他の地点は、各測定値が直前の降水イベントの値に左右されているため、相対的に滞留時間は短いと考えられる。酸素安定同位体比の結果から、オアシス水の増減と近似した値を示したのはB-1地点の湧水であることが明らかになった。B-1は湧水の中では一番東部に位置し、降水量が減ると消滅する湧水点であるが、この地点を通過する地下水がオアシス形成に大きく寄与していると考えられる。なお、通年かつ最大の湧出量であるA-1地点は、オアシスの発生については強い関連性が見られなかった。比抵抗モデルの結果から水文地質境界を推定した結果、地表面から1-3mの深度に、比抵抗が200以下の低比抵抗の物質が堆積していることが明らかになった。今回検出された低比抵抗物質は大山倉吉層に代表される火山灰層と考えられる。また、この火山灰層は測定地点東部ほど深くに位置し、西部ほど浅くほぼ地表面付近に堆積していた。このことは、東部域において砂帯水層が相対的に厚く存在することが可能であることを意味している。これは、安定同位体比の結果から明らかになった東部の地下水ほどオアシス発生へ寄与をする、という現象を裏付けている。

キーワード: 地下水湧出, 鳥取砂丘, 酸素安定同位体比, 比抵抗映像法探査

Keywords: Groundwater discharge, Tottori sand dune, Oxygen Isotope Ratio, Resistivity tomography

## ユーカリ林周辺の水と栄養塩の動態

### Water and Nutrients Dynamics in and around Eucalyptus Forests

田瀬 則雄<sup>1\*</sup>, 小野寺 真一<sup>2</sup>, 山中 勤<sup>1</sup>, 田村 憲司<sup>1</sup>, 瀧澤 紗史<sup>1</sup>, 仁平 尊明<sup>3</sup>, 林 久喜<sup>1</sup>, ヒラタ ヒカルド<sup>4</sup>, サライバ フェルナンド<sup>4</sup>, テラダ ハファエル<sup>4</sup>, シロタ ヒカルド<sup>4</sup>  
TASE, Norio<sup>1\*</sup>, ONODERA, Shin-ichi<sup>2</sup>, YAMANAKA, Tsutomu<sup>1</sup>, TAMURA, Kenji<sup>1</sup>, TAKIZAWA, Sachika<sup>1</sup>, NIHEI, Takaaki<sup>3</sup>, HAYASHI, Hisayoshi<sup>1</sup>, HIRATA, Richardo<sup>4</sup>, SARAIBA, Fernando<sup>4</sup>, TERADA, Rafaeru<sup>4</sup>, SHIROTA, Ricardo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学, <sup>2</sup> 広島大学, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> サンパウロ大学

<sup>1</sup>University of Tsukuba, <sup>2</sup>Hiroshima University, <sup>3</sup>Hokkaido University, <sup>4</sup>University of Sao Paulo

成長速度が著しく速いユーカリの植林が世界の多くの地域で行われ、ブラジルでは、南東部を中心に 350 万 ha、国土の 0.6 % がすでにユーカリ林となっており、世界最大のユーカリ植林国となっている。ユーカリの木材資源としての有用性は高いが、環境への悪影響 - 水・栄養塩消費、多様性破壊、発生有害物質などが懸念され、オーストラリアなどの半乾燥地では弊害が出ているところもあるが、ブラジルではこれらの問題がほとんど顕在化していない(桜井、1996)。一方、ブラジル南東部はトウモロコシやサトウキビの主要産地で、農地での施肥による地下水の硝酸性窒素汚染が顕在化しつつあるとともに、近年強度の激しい降雨頻度が増加する傾向にともない畑地からの土壌侵食・流亡も深刻である。本研究は、ユーカリ林の環境・生態学的悪影響などが顕在化していない科学的根拠と影響発現の閾値(条件)を現地調査と文献で行いながら、ユーカリの特性を利用し、農地からの栄養塩溶脱による地下水汚染とサトウキビやトウモロコシの大規模耕作による土壌侵食の防止などを、ユーカリ林の植林地の配置 - 土地利用連鎖系 -、営農方法の最適化により構築することを目的としている。今回は予備調査の結果について報告する。

研究対象地域として、サトウキビ畑とユーカリ林が隣接し、地下水面が浅いサンパウロ州の Rio Claro 市郊外と Anhembi 近郊の Mandacaru の 2ヶ所を選定した。調査地一帯は風成のシルト質砂層からなる標高 500 ~ 600 m の波状の準平原で、Piracicaba での年平均気温は 21.4 °C、年降水量は 1279mm である。2011 年については、気温は平年並みであったが、降水量は平年より 300mm も多かった。両サイトとも上流側にサトウキビ畑が存在し、下流側にユーカリが植林され、その樹齢はおよそ 4 年(通常 7 年で伐採)、樹高は 15m 程度である。両地点に 100m x 200m の範囲で、3 ~ 8m ほどの地下水観測井網を掘削し、地下水位、水質を分析し、表層土壌の理化学特性を分析した。また、周辺地域で、湧水、井戸水、河川水なども採水・分析した。サトウキビ畑では施肥による地下水中の硝酸性窒素濃度の上昇、耕作による表土の流亡などが認められたが、ユーカリ林では硝酸性窒素濃度は低く、土壌は保全されていた。ユーカリ林による吸収の効果については今後評価する予定である。また、農耕地が広がる周辺地域の湧水や井戸水の水質は概して良好であった。

今後、より詳細な調査解析や聞き取りを行い、実態の解明と共に、持続可能な営農方法を検討したい。なお、本調査は科研費基盤研究 B (海外調査)により実施している。

キーワード: ユーカリ, 土地利用連鎖系, 環境保全, 地下水汚染, サンパウロ, ブラジル

Keywords: eucalyptus, land-use sequences, environmental conservation, groundwater contamination, Sao Paulo, Brazil

## 地下水中の地質由来の溶存成分と滞留時間の関係

### Relationship between Geogenic Solute Concentration and Residence Time in Groundwaters

中屋 眞司<sup>1\*</sup>, 青木秀斗<sup>1</sup>, ファン・ホアン・ミン・ハ<sup>1</sup>, 岩井慶貴<sup>1</sup>, 伊東章裕<sup>1</sup>, 中野 孝教<sup>2</sup>, 益田 晴恵<sup>3</sup>, 前田 俊介<sup>3</sup>, 岡林 克樹<sup>3</sup>, アシュラフ・セディーク<sup>4</sup>, 森川 徳敏<sup>5</sup>, 安元 純<sup>6</sup>, 中野拓治<sup>6</sup>

NAKAYA, Shinji<sup>1\*</sup>, Hideto Aoki<sup>1</sup>, Phan Hoang Minh Ha<sup>1</sup>, Akihiro Itoh<sup>1</sup>, NAKANO, Takanori<sup>2</sup>, MASUDA, Harue<sup>3</sup>, MAEDA, Shunsuke<sup>3</sup>, OKABAYASHI, Katsuki<sup>3</sup>, Ashraf A. Seddique<sup>4</sup>, MORIKAWA, Noritoshi<sup>5</sup>, YASUMOTO, Jun<sup>6</sup>, Takuji Nakano<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 信州大学, <sup>2</sup> 総合地球環境学研究所, <sup>3</sup> 大阪市立大学, <sup>4</sup> ジェソール科学技術大学, <sup>5</sup> 産業技術総合研究所, <sup>6</sup> 琉球大学  
<sup>1</sup>Shinshu University, <sup>2</sup>Research Institute for Humanity and Nature, <sup>3</sup>Osaka City University, <sup>4</sup>Jessore Science & Technology University, <sup>5</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>6</sup>University of the Ryukyus

循環する地下水中の鉱物の溶解スピードを見積もることは、岩石の風化や、地質由来の汚染物質の生成と蓄積を評価するのに重要かもしれない。本研究では、飲料水として利用されている八ヶ岳第四紀火山岩分布地域の湧水と井戸水の滞留時間と SiO<sub>2</sub> 濃度の関係、農業用水や生活用水として利用されている沖縄南端の琉球石灰岩分布地域の湧水と井戸水の滞留時間と Ca 濃度の関係、飲料水として使われているバングラデッシュの沖積層の井戸水の滞留時間と As 濃度の関係について調べた。

八ヶ岳の火山岩分布地域では、地下水の滞留時間は 15 年～50 年にある。実流速の分布は概ね 100～500m/y の範囲と見積もられる。SiO<sub>2</sub> の濃度と滞留時間は直線関係にあり、その傾きは流域によってバラツキを持ち、0.45-2.8mg/L/y の範囲にあった。このことは、最近の 50 年間も各流域毎に、一定の速度で風化が進行していることを示唆している。沖縄石灰岩分布地域では、地下水の滞留時間は 15 年～30 年にある。石灰岩の分解によって生成された Ca と滞留時間も直線関係にあるが、4.3-8.0mg/L/y とバラツキを持って見積もられる。このことは、石灰岩の溶解が最近の 30 年間にバラツキを持った速度で続いていることを示唆している。このバラツキは石灰岩の水理地質構造の不均質性により生じる流速のばらつきの影響を反映したものかもしれない。さらに、バングラデッシュの地下水 As ホットスポット(ハリハルディ村)では、1970-1980 年間に涵養した地下水にリリースした As 濃度と滞留時間は直線関係にあり、26-37 μg/L/y と見積もられる。これは、場所は異なるが、バングラデッシュの沖積層の地下水中の As について Stute et al.(2007) が報告した 19-23 μg/L/y より大きい。このことは、As ホットスポットでは As のリリース速度が大きいことを示しているかもしれない。最近の 1980 年以降に涵養した地下水は、滞留時間が短いほど As 濃度が高くなっている。1990 年以降に涵養した 3 地点の地下水について、単純に As を滞留時間で除して見積もると、56, 91, 120 μg/L/y となる。1990 年以降、見かけ上、As のリリース速度が大きくなっていることを示唆している。このことは、30 年程度以前とされる灌漑用の揚水の開始による地下水流速の加速と関係しているかもしれない。

キーワード: 地下水, 滞留時間, 八ヶ岳, 琉球石灰岩, バングラデッシュ, ヒ素

Keywords: groundwater, residence time, Mt. Yatsugatake, Ryukyu limestone, Bangladesh, Arsenic

## 沖縄本島南部地域の琉球石灰岩帯水層における地下水水質の変動特性とその要因 Characteristics and fluctuation factors of groundwater quality on Ryukyu limestone region in southern part of Okinawa

安元 純<sup>1\*</sup>, 中野 拓治<sup>1</sup>, 中屋 眞司<sup>2</sup>

YASUMOTO, Jun<sup>1\*</sup>, NAKANO, Takuji<sup>1</sup>, NAKAYA, Shinji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学 農学部 地域農業工学科, <sup>2</sup> 信州大学 工学部

<sup>1</sup>University of the Ryukyus, Faculty of Agriculture, <sup>2</sup>Shinshu University, Department of civil engineering

Characteristics and fluctuation factors of groundwater quality(the four major cations (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) and four major anions (Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) is investigated using observed data on groundwater at springs and observation wells in the southern part of Okinawa Main Island, Japan, where Ryukyu limestone is extensively distributed. In this study, FS6 survey was conducted to examine the residence time of groundwater in limestone aquifer. The distribution of Ca<sup>2+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> were similar trend because the CO<sub>2</sub> charged water first encounters a calcite layer below the groundwater table. It was found that the residence time obtained from FS6 were related with the concentrations of Ca<sup>2+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. The composition of groundwater was dominated by Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> reflecting salt water in coastal area. It was considered that NO<sub>3</sub>-N and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations were influenced by the rainfall, geological structure and agricultural land use.

キーワード: 地下水, 水質, 琉球石灰岩, 変動特性

Keywords: Groundwater, Water quality, Ryukyu limestone, Characteristics and fluctuation



## バングラデシュ・シヨナルガオのヒ素汚染地下水形成に関わる帯水層構造と地下水流動

### Aquifer structure and groundwater flow related to arsenic contaminated groundwater in Sonargaon, Bangladesh

益田 晴恵<sup>1\*</sup>, 前田俊介<sup>1</sup>, 岡林克樹<sup>1</sup>, 三田村宗樹<sup>1</sup>, セディキ・アシュラフ・アリ<sup>2</sup>, 中屋真司<sup>3</sup>, 森川徳敏<sup>4</sup>  
MASUDA, Harue<sup>1\*</sup>, Shunsuke Maeda<sup>1</sup>, Katsuki Okabayashi<sup>1</sup>, Muneki Mitamura<sup>1</sup>, Ashraf Ali Seddique<sup>2</sup>, Shinji Nakaya<sup>3</sup>, Noritoshi Morikawa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 益田晴恵, <sup>2</sup> ジェソール科学技術大学, <sup>3</sup> 信州大学工学部, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Harue Masuda, <sup>2</sup>Jessore Science and Technology University, <sup>3</sup>Faculty of Engineering, Shinshu University, <sup>4</sup>AIST

ガンジスデルタは世界最大のヒ素汚染地下水が出現する地域として知られている。この地域でのヒ素汚染地下水は、生物化学的作用により地下水が還元され、それに伴ってヒ素を吸着している酸水酸化鉄が分解することによって生じると説明されてきた。しかし、私たちは、バングラデシュ・シヨナルガオで行ってきた一連の研究を通して、ヒ素を不純物として含む碎屑性の黒雲母ないしは緑泥石が化学的風化作用により分解することによって、ヒ素汚染地下水が形成すると考えてきた。また、ヒ素汚染地下水形成には、地下水利用の増加による影響があると考えられてきたが、どのような関連があるかは不明であった。本研究では、バングラデシュ・シヨナルガオの調査地域でもっとも地下水涵養が活発な集落で、掘削により帯水層構造を明らかにすること、コア掘削により帯水層堆積物中のヒ素を固定する物質を特定すること、深度の異なった地下水でのヒ素と関連元素の濃度変化を追跡すること、地下水の年代測定により涵養年代とヒ素汚染の関係を明らかにすることによって、ヒ素汚染地下水形成最初期に帯水層で起こっている化学反応と人為による影響について検討した。

コア掘削と深度の異なる井戸掘削は、もっともヒ素濃度の高い地下水が出現する井戸 (1.2 mg/L) の近傍で行った。この地域のヒ素汚染地下水は、-30~40m に位置する不透水層である更新世の粘土層の上位にある完新世の砂層を帯水層としている。また、粘土層の下位にある更新世の被圧地下水は汚染されていない。ところが、コア掘削地点においては、粘土層が欠如しており、二つの帯水層は直接接触していた。今回の掘削地点の南方にも粘土層の欠如している地点があるが、この周辺の地下水中のヒ素濃度も高い。すなわち、本調査地域では、粘土層が欠如しているところに高濃度のヒ素汚染地下水が分布している。また、地下水の年齢は、800mg/L を超すヒ素を含む地下水では 1990 年以降に涵養されたものが多い。これらのことから、更新世の被圧地下水が過剰揚水により水圧低下し、鉛直方向の地下水浸透が盛んになったことに伴って、ヒ素汚染地下水が形成されたと考えられる。

ヒ素の原因物質は緑泥石である。逐次段階抽出法による帯水層堆積物中のヒ素は、大部分が難溶態 (ケイ酸塩 + 硫化物) として存在するが、地下水位面付近 (-7 m 付近) で、酸水酸化鉄に伴うヒ素の割合が増加する。また、-5, -10, -15m の深度での地下水中のヒ素の濃度とイオン価を分析した結果では、-5m の試料で濃度は 0.3mg/L 程度あり、As(III):As(V)=0.4:0.6 で、緑泥石のイオン価の比にほぼ等しかった。一方、-10m では、濃度は 800mg/L を超し、As(III):As(V)=0.95:0.05 となり、-15m でもあまり変化しない。これらのことは、緑泥石が調和溶解することでヒ素が溶出し、この反応は-5?-10m でもっとも盛んであることを示している。この深度では、酸素が失われていないため、緑泥石の分解に伴って溶出した鉄は酸水酸化鉄として沈殿している。

以上の結果から、本地域では、地下水涵養が活発化し、鉛直方向への好氣的地下水の流入が増加することによって、還元的な地下水環境が酸化的に変化したために、Fe(II) に富む緑泥石の分解が促進されることによって、ヒ素が地下水中に溶出したと結論づけられる。還元的な地下水環境は、ヒ素をより溶解度の高い亜ヒ酸に変化させているが、ヒ素溶出の本質的なきっかけではない。緑泥石は、他の地域でも帯水層中に広く出現することが知られていることから、このヒ素汚染地下水形成メカニズムは、ガンジスデルタの広い地域で、最初期のヒ素溶出を説明している可能性がある。

キーワード: ガンジスデルタ, ヒ素汚染地下水, 緑泥石, 化学的風化作用, 形態別化学分析

Keywords: Ganges delta, arsenic contaminated groundwater, chlorite, chemical weathering, sequentially extracted chemical analysis

## 小規模貯水池における栄養塩貯留・放出を制御する臨界水深と滞留時間の関係 Relationship between critical depth and residence time as controlling factors to retention and release of nutrient

清水 裕太<sup>1\*</sup>, 小野寺 真一<sup>1</sup>

SHIMIZU, Yuta<sup>1\*</sup>, ONODERA, Shin-ichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院総合科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

流域内に存在する貯水池は、上流から運ばれてくる栄養塩を滞留させ、栄養塩循環を複雑化させる。一般に水深が深く、水の滞留時間が長いものほど流入した栄養塩の滞留量が多くなり、それと共に内部での再循環量が増加する。そして、栄養塩や土砂の蓄積が進行するにつれて貯水容量は減少するため、栄養塩貯留可能量も低下し、ある時点から栄養塩の貯留作用から放出作用へと転換する。本研究では、この転換点を臨界水深と定義し、栄養塩の貯留・放出に及ぼす臨界水深と、滞留時間の関係を数値モデルを用いて明らかにすることを目的とする。対象地域は、広島県東部を流れる一級河川芦田川の支流である高屋川流域の中流に位置する早田堰である。早田堰は平均水深が1.5m、貯水容量が $2.1 \times 10^4 \text{m}^3$ であり一年を通じて貯水され、平均滞留時間は約2日である。本研究では、堰の水深を、0.5m, 1m, 2m, 3mの4つのケースを仮定し、実測モニタリングデータおよび西オーストラリア大が開発した鉛直次元貯水池水理生態系モデル(DYRESM-CAEDYM)を使用し解析を行った。この結果、窒素に関して、水深1, 2, 3mのケースでは、上流からの流入量に対して41%~48%が堰内でトラップされている結果を示したが、水深0.5mでは3%のみがトラップされる結果を示した。また、リンに関しては、水深1, 2, 3mのケースでは、流入量の23%~31%がトラップされたのに対し、0.5mのケースでは、流入量の113%が流出する結果となり、以上の流出率と水深の関係から臨界水深は窒素の場合0.33m、リンの場合0.59mが導き出された。そして、導き出された臨界水深と滞留時間の間には一定の関係があることが明らかとなった。

キーワード: 栄養塩, 貯水池, 臨界水深, 貯留, 放出

Keywords: Nutrient, Reservoir, Critical water depth, Retention, Release

## 沖縄島羽地内海の内湾性礁原被覆薄層の粒度分布と窒素・酸素安定同位体比から得られた赤土成分の拡散パターン Diffusion pattern of red soil runoff on a bay reef flat, Okinawa-jima Island, using delta13C and delta15N.

木庭 元晴<sup>1\*</sup>, 北窪友美子<sup>1</sup>, 中辻真央<sup>1</sup>  
 Koba, Motoharu<sup>1\*</sup>, Kitakubo, Yumiko<sup>1</sup>, Nakatsuji, Mao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関西大学  
<sup>1</sup> Kansai University

沖縄では、1972年の沖縄本土復帰前後からサトウキビやパイナップルの急激な農地開発が進み、環境問題を批判的に受け入れる時代となって、赤土等流出問題は沖縄県の自然に係わる環境問題の中心となった。1994(平成6)年に沖縄県赤土等流出防止条例が制定されたが、いまだ豪雨時には河川や海岸では赤土流出が観測されている。ボーリングコアや海底に見られる堆積物について、陸起源の炭素を評価する手法が必要と考え、この研究を実施した。

沖縄島羽地内海は沖縄県では稀少な内湾的環境にある。羽地内海に面する屋我地島南岸地先に展開する潮間低地で2011年夏、二本の350m長ほどの垂直縦断面上で数十センチ厚の表層堆積物を採取した。測定にはGPSとトータルステーションを使用した。この海域に展開する陸源堆積物の多くはサトウキビ畑が広がる屋我地島から供給されたものである。現在、この潮間低地域およびその沖合に続く浅海域には造礁サンゴは生息していないが、この基盤は内湾性の原と考えられる。

この潮間低地では表層に20cmほどの砂質堆積物が分布し、この下位にはマトリックスを持たない軟体動物貝殻片層が分布している。この報告では表層の砂質堆積物の粒度分析結果とこの層準にわずかに含まれる泥質堆積物の安定炭素・窒素同位体比について述べる。採取した堆積物の粒度分析は、砂質部分については金篩による乾式篩別、泥質部分はレーザー回折法による。表層砂質堆積物の粒度分析の結果ではそのほとんどがシャープなモードを3(細粒砂)にもち、次により粗粒部にはブロードなモードを-1?3(中礫)に持っている。泥質の画分は限られる。この潮間低地には砂漣がよく発達しており、堆積物の陶太度がよく平板状で一部トラフ状葉理を示している。泥質部は一部マッドドレープの形で観察された。

採取した表層砂質堆積物の63μmより細粒の画分を同位体比測定試料とした。窒素および炭素の安定同位体比計測のために、泥質試料10mgを燃焼によってガス化し計測した(使用ガスの検量線は作成していない)。次にこの安定炭素同位体比の研究成果を示す(参照添付図)。

添付図上下の横軸は海岸線からの距離を示す。まず下図を参照して欲しい。最も海岸線よりの試料採取点は海岸線から21mの距離に位置し、10cm余りの表層砂質堆積物に覆われた赤土層でその<sup>13</sup>Cの測定結果は-19.6‰であった。海岸線から離れるにつれて表層砂質堆積物の同位体比は増加してゆく。これを飽和曲線の一つであるロジスティック曲線に回帰した(決定係数0.9652)。この曲線で距離を増やしてゆくとほぼ500mで収束し-9.8‰になる。

次に上図を参照して欲しい。堆積物の安定同位体比計測値が陸源水塊(の同位体比L)と海水塊(の同位体比S)の混合比を反映するという前提で、堆積物の安定同位体比 = L + (1 - )S を想定すると、堆積物の安定同位体比 = (-19.6) + (-9.8)(1 - ) が成り立つので、縦軸を つまり陸源水塊の混合率とする上図が得られた。この図には対数回帰曲線を示している。当然ながらほぼ500mで陸源堆積物は消失している。なお、この図にプロットされた点は混合率の式に海岸線からの距離を50m間隔で入力した結果得られたものである。

陸上の赤土そのものの<sup>13</sup>C値は未だ測定していないが、-25‰ほどであろう。海水塊の<sup>13</sup>C値とした-9.8‰は沿岸域の付着藻類のものと同じである。屋我地島の河川という水路は、幅1間ほどのもので大雨時にはフラッシュ的に流出する。その際には海水域に流出して急激に沈殿・拡散しているだろう。これまで述べた表層砂質堆積物の出現形態からわかるように、ここで得られた安定炭素同位体比の分布傾向は、赤土が海域に供給された後の、希釈・拡散結果を示している。言い換えれば、陸域から赤土がいわば継続的に供給される環境がこの分析結果を生み出していると言えるのではないかと。なお、この層準にはサンゴ礁起源のものは極めて限られている。測定対象とした粒径63μm以下の画分には石灰質のものはほとんど含まれないと考えているが、酸と熱の処理によって早急に炭素の起源を確認する必要がある。

窒素同位体比<sup>15</sup>Nについては、試料重が多くてスペクトルがスケールアウトしたこともあり、この7点のうち、陸端一点と海方端二点の計3点であるが、すべて値は5.7‰を示した。このことは、赤土流出の起源流域の特定の可能性を示唆しており、湾内コアの個々の層準についてエプロンまたは舌状堆積物の区分に使えるかも知れない。

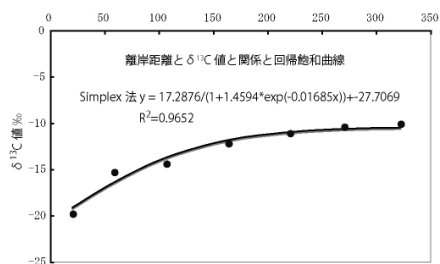
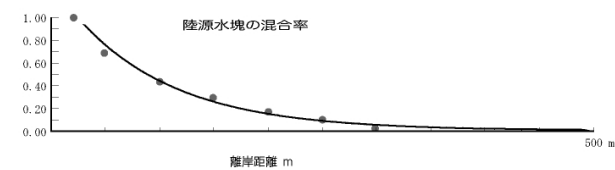
キーワード: 赤土流出, 内湾性礁原, 粒度分布, 窒素・酸素安定同位体比, 沖縄島羽地内海

Keywords: red soil runoff, bay reef flat, particle size distribution, stable isotope ratios of C and N, Okinawa's Haneji inland sea

AHW30-11

会場:101A

時間:5月22日 14:00-14:15





## 大型干潟における地下水流出に伴う栄養塩の変化特性

### Characteristics of nutrient change via submarine groundwater discharge at large tidal flat.

小野寺 真一<sup>1\*</sup>, 齋藤 光代<sup>2</sup>, 大西 晃輝<sup>1</sup>, 清水 裕太<sup>3</sup>, 金 広哲<sup>1</sup>, 徳増実<sup>3</sup>, 谷口 真人<sup>4</sup>

ONODERA, Shin-ichi<sup>1\*</sup>, SAITO, Mitsuyo<sup>2</sup>, ONISHI, Koki<sup>1</sup>, SHIMIZU, Yuta<sup>3</sup>, JIN, Guangzhe<sup>1</sup>, Minoru Tokumasu<sup>3</sup>, TANIGUCHI, Makoto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院総合科学研究科, <sup>2</sup> 愛媛大学沿岸環境科学センター, <sup>3</sup> 西条市, <sup>4</sup> 総合地球環境科学研究所

<sup>1</sup> Graduate school of Integrated Arts and Sciences, University of Hiroshima, <sup>2</sup> Center for marine environmental studies, University of Ehime, <sup>3</sup> Saijo City Office, <sup>4</sup> Research Institute for Humanity and Nature

瀬戸内海では、1980年代をピークとした富栄養化対策として、陸域からの栄養塩類の流出規制が施行され効果がみられたが、近年では沿岸域のノリの色落ちに代表されるように貧栄養化傾向が指摘されている。しかし、陸域の栄養塩類(リン:P、シリコン:Si、窒素:N)流出と海域環境との関係は十分明らかになっているとはいえない。例えば、河川や地下水の影響に関しても、その変動性や不均一性の点で、さらなる解明が必要である。

本発表では、瀬戸内海流域で最高峰の石鎚山の分布する愛媛県西条市加茂川流域に着目し、その沿岸域における地下水流出及び栄養塩流出について評価を行うことを目的とする。なお、本研究は科研A(09年~11年、代表:福岡正人)、西条市受託研究費、ニッセイ財団(代表:齋藤光代)の一部である。

調査地域は、瀬戸内海の燧灘(ひうちなだ)に面する愛媛県東部の西条市である。西条市は、背後に中四国最高峰の石鎚山を抱え、平野部には「うちぬき」と呼ばれる自噴井が多数分布し、名水100選にも指定されている。対象とした干潟は、石鎚山を水源とし北流する加茂川河口域に形成された大型河口干潟である。干潮時には埋立ての進んだ現海岸線から、おおそ1kmも干上がる。

干潟では、おおそ100mで深度1mの間隙水を2010年7月24日に採水しその水試料の分析を行った。分析は、<sup>222</sup>Rnについてはバッチ法によりRAD7で分析し、栄養塩類は分光法であるオートアナライザーで、塩分についてはイオンクロマトグラフィで分析を行った。また、干潮時の海岸線付近(堤防から1km沖)と満潮時の海岸線(堤防付近)には2010年7月、8月、9月、11月にピエゾメータ内に間隙水圧計を設置し1週間程度水圧を計測し、8月、11月に数日間採水器及びRAD7を設置し<sup>222</sup>Rn及び栄養塩濃度の時間変化をとらえた。また、護岸堤防付近と干潟中央部の二地点で深度10cm、30cm、50cm、75cm、100cm、150cm、200cm、250cmの間隙水を2013年1月24日から25日にかけて採水しその水試料についても上記分析を行った。

沿岸の栄養塩濃度分布(2010年11月)は、スポット的に栄養塩濃度が上昇していることを示す。本試験地とした干潟付近で濃度が高い傾向を示した。本干潟付近で地下水湧出量が多い傾向がみられること<sup>2)3)</sup>から、地下水湧出の影響が示唆される。おおそそのN:Pは20:1で、植物プランクトンの比(レッドフィールド比16:1)とほぼ同等であった。

沿岸干潟の間隙水中の<sup>222</sup>Rn濃度及び塩分との関係から推定した淡水の起源として、河川水、浅層地下水、深層地下水を考慮した。沿岸域は主に浅層地下水が、沖合は主に深層地下水が起源となっていることが特徴的であり、河川起源の水の分布は少なかった。なお、間隙水中の淡水寄与率は堤防付近で60%、沖合1km付近でも10%程度と高い地点がみられた。

干潟での栄養塩の寄与は、地下水由来すると推定される。干潟の間隙水中における溶存アンモニア性窒素濃度(溶存窒素の9割を占める)の分布と溶存リン濃度の分布では、高濃度域が不均一に分布していた。沖合500m及び800mで深層地下水の寄与する地点と沿岸の東側で浅層地下水の寄与する地点である。ただし、N:Pは40:1と窒素が過剰となっていた。これらは単純な地下水と海水の混合では説明できない濃度になっているため、堆積物中からの分解・溶出した成分であることが示唆される。

キーワード: 大型干潟, 鉛直解析, 栄養塩, 海底地下水流出

Keywords: large tidal flat, vertical distribution, nutrient, submarine groundwater discharge

## 瀬戸内海沿岸域の低次生態系に及ぼす地下水流出の影響評価

### Evaluation of the effect of submarine groundwater discharge on the coastal lower tropic ecosystem in the Seto Inland Sea

齋藤 光代<sup>1\*</sup>, 小野寺 真一<sup>2</sup>, 徳増 実<sup>3</sup>, 大西 晃輝<sup>2</sup>, 吉川 昌志<sup>2</sup>, 金 広哲<sup>2</sup>, 清水 裕太<sup>2</sup>

SAITO, Mitsuyo<sup>1\*</sup>, ONODERA, Shin-ichi<sup>2</sup>, Minoru Tokumasu<sup>3</sup>, ONISHI, Koki<sup>2</sup>, YOSHIKAWA, Masashi<sup>2</sup>, Guangzhe Jin<sup>2</sup>, SHIMIZU, Yuta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 日本学術振興会特別研究員 PD, 愛媛大・CMES, <sup>2</sup> 広島大・院・総合, <sup>3</sup> 西条市

<sup>1</sup>JSPS PD, CMES, Ehime Univ., <sup>2</sup>Grad. School of Hiroshima Univ., <sup>3</sup>Saijo City

近年, 国内外において地下水流出が沿岸生態系へ及ぼす影響の重要性が指摘されてきている。しかしながら, 瀬戸内海に対する地下水流出の影響は, これまで幾つかの観測事例はあるものの定量的な評価はまだまだ不十分である。そこで本研究では, 日本有数の地下水量を誇る愛媛県西条市が面する瀬戸内海の海域の一つである燧灘を対象とし, 地下水流出が沿岸低次生態系に及ぼす影響を評価することを目的とした。

ラドン濃度や栄養塩濃度の空間分布から, 対象地域においては干潟域や海岸線近傍への地下水流出が存在しており, 栄養塩供給にも寄与している可能性が高いことが明らかになった。また, 沿岸域に生息する青海苔の窒素安定同位体比 ( $d_{15}N$ ) から, 海水だけでなく河川水や地下水由来の窒素を利用していることが確認され, 特に海底湧水付近に生息する海苔については, 他の場所で採取された海苔と比較して低い  $d_{15}N$  を示し,  $d_{15}N$  の低い地下水由来の窒素に影響を受けていることが示唆された。以上を踏まえると, 研究地域では, 地下水が沿岸低次生態系への重要な窒素供給源の一つとなっている可能性が考えられる。

\* 本研究は, H22 年度ニッセイ財団若手研究助成 (代表: 齋藤光代) の支援により行われた。

キーワード: 地下水流出, 沿岸低次生態系, ノリ養殖, 瀬戸内海

Keywords: submarine groundwater discharge, coastal lower tropic ecosys, seaweed harvesting, Seto Inland Sea

## 淀川河口の植物プランクトン種の短時間変化 Short time variation of phytoplankton species in the Yodo River

林 美鶴<sup>1\*</sup>, 木村桃子<sup>1</sup>, 樽谷賢治<sup>2</sup>  
 HAYASHI, Mitsuru<sup>1\*</sup>, Momoko Kimura<sup>1</sup>, Kenji Tarutani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学, <sup>2</sup> 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所  
<sup>1</sup>Kobe Univ., <sup>2</sup>FEIS

淀川河口では、初春から晩秋にかけて赤潮が発生する。16日間にわたって河口の表層に係留系を設置し、クロロフィルa濃度、水温、水中光量などを10分間に測定した。また表層、水深7m、海底上で2ないし3日毎に採水を行い、植物プランクトン種別の細胞密度、栄養塩濃度を測定した。この期間中に、珪藻類の割合が若干減少し、渦鞭毛藻類の割合が若干上奏する変化が見られた。この時に、窒素(N),リン(P),珪素(Si)濃度と、N/P、N/Si、Si/Pを解析すると、制限栄養塩の変化と種の割合が関係していることが明らかとなった。

キーワード: 淀川, 植物プランクトン  
 Keywords: Yodo River, Phytoplankton

