

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25881005

研究課題名(和文)異なる河川流出強度下での栄養塩輸送経路およびそのインパクトゾーンの解明

研究課題名(英文) Examination of transport paths of freshwater-derived nutrients and its impact zone in the coastal area

研究代表者

齋藤 光代 (Saito, Mitsuyo)

岡山大学・その他の研究科・助教

研究者番号：20512718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、異なる淡水流出強度下での淡水-海水混合域における栄養塩輸送過程について、瀬戸内海の中でも特に閉鎖性の高い海域の沿岸部を対象に水温、塩分、酸素・水素安定同位体比( $^{18}O$ ・ $D$ )およびラドン( $^{222}Rn$ )等をマルチトレーサーとした解析を行い、淡水由来栄養塩のインパクトゾーンおよび輸送経路(河川水および地下水経由)の季節変化を確認し、それにとまなう植物プランクトンの分布や現存量の変化を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We examined seasonal variations of the impact zone of freshwater-derived nutrients and its effects on phytoplankton in the coastal area of the Seto Inland Sea in western Japan using the spatial distributions of water temperature, salinity, oxygen and hydrogen stable isotope ratios ( $^{18}O$ ,  $D$ ) and radon ( $^{222}Rn$ ) concentrations as multi-tracers.

研究分野：水文化学

キーワード：海洋物理・陸水学 河川 地下水 栄養塩

### 1. 研究開始当初の背景

沿岸域は淡水(河川水および地下水)と海水とが混合する場であり、そこでの基礎生産は淡水由来の栄養塩供給に大きく依存し、栄養塩自体の供給量もさることながらその供給形態や輸送範囲によっても大きく変化すると考えられる。例えば河口域では、通常平水時には河川水と海水との密度差によるエスチュアリー循環が形成されており、河川から供給された栄養塩の一部は淡水の流動に沿って海面表層を通過し沖側へ輸送され、一部は植物プランクトン等に取り込まれて沈降し粒子態栄養塩となる。また、この粒子態栄養塩が一定期間をかけて溶出し再び基礎生産に寄与するいわゆるリサイクル(再生産)が生じる。一方で、増水時には河川流量の増加にともない溶存態および懸濁態栄養塩の供給量が増大し、より広範囲かつ沖側まで輸送されると考えられる。したがって、沿岸域への栄養塩供給に関しては従来から洪水流出の影響が特に大きいとされてきた。しかしながら、以上のような異なる流出強度下での栄養塩輸送の影響範囲は、実証データに基づき厳密に評価されてきたとはいえない。

また、一方で河川流出の影響が小さい渇水期には、再生産過程による栄養塩供給や、一般に河川水よりも高濃度の栄養塩を含む地下水による栄養塩供給がより重要度を増すと考えられる。しかしながら、以上のような河川流出強度の違いに応じた栄養塩輸送過程およびその生態系への影響について定量的に評価した例はこれまでほとんどない。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本研究では、異なる河川流出強度下での淡水-海水混合域における栄養塩輸送過程を定量的に評価することを目的とした。具体的には、(1) 瀬戸内海の中でも特に閉鎖性の高い海域の沿岸部を対象に、マルチトレーサー法に基づく淡水由来栄養塩のインパクトゾーンおよび輸送経路(河川水および地下水経由)の推定を行うとともに、その季節変化を明らかにし、さらに(2) 淡水成分インパクトゾーンの変化にともなう沿岸低次生態系(主に植物プランクトン)の応答について検討を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1)異なる河川流出強度下での淡水成分のインパクトゾーンおよび輸送経路の推定

対象地域の一つである大阪湾沿岸の河口域において、洪水流出時を含む河川流出強度の異なる時期に数回にわたり集中観測を実施した。現地では、河口部から約4km上流側から約10km沖合までの約14kmの区間(非感潮域~感潮域~沿岸域)を観測の対象とした。特に、河口から沖合に向かっては観測ラインを設定し、満潮時から干潮時にかけて約300m間隔で水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、クロロフィル a

(Chl.-a)およびラドン( $^{222}\text{Rn}$ )濃度の空間分布を確認するとともに、約100m間隔で水試料の採取を行い、栄養塩(窒素、リン、珪素)濃度および酸素・水素安定同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ )の分析を実施した。また、河口から約2km上流側の地点においては、洪水流出時を含めた時系列での水位観測および採水を行い、栄養塩濃度および懸濁態有機物(POM)の炭素・窒素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )の分析を行った。

で得られた結果に基づき、マルチトレーサー法による解析を行い、異なる河川流出強度下における淡水由来栄養塩のインパクトゾーンおよび輸送経路(河川水および地下水経由)の推定を行った。

#### (2) 淡水インパクトゾーンの変化にともなう沿岸低次生態系の応答の解明

河川流出強度の異なる時期におけるクロロフィル a (Chl.-a) および懸濁態有機物(POM)の炭素・窒素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )の変化から、淡水流出量の変化にともなう植物プランクトンの応答について検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1)異なる河川流出強度下での淡水成分のインパクトゾーンおよび輸送経路の推定

河川水位、塩分およびラドン( $^{222}\text{Rn}$ )濃度の空間分布等から、河口から約3~4km上流側は非感潮域であり、地下水がほぼ定常的に河川に向かって流出している傾向が確認された。一方で、それより下流側の感潮域では潮位変化に対応して河川水-地下水間の交流が生じており、満潮時には河川水が地下水へ侵入している傾向が確認された。また、河川水中の栄養塩濃度は非感潮域から感潮域に向かって上昇し、特に溶存無機態リン(DIP)の濃度は淡水と塩水との境界部で最も高くなる傾向を示した。以上の結果から、河口より上流側では河川-地下水交流にともなう栄養塩供給が生じていることが示唆された。

また、洪水流出時においては平水時と比較して河川水中の溶存態栄養塩の濃度が低下し懸濁態栄養塩の濃度が上昇する傾向を示し、さらに炭素・窒素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )の変化から、陸上植物由来(地表に堆積していたリター等)の有機物の流入量が増加したことが確認された。

河口より沖側においては全体的にラドン( $^{222}\text{Rn}$ )濃度のレベルが低く、明瞭な地下水流出傾向は確認できなかった。一方で、河川水および下水処理場からの放流水由来の淡水のインパクトゾーンが季節によって変化する傾向が確認された。特に、晩夏は河口のごく近傍に比較的明瞭な淡水-塩水境界が存在し、栄養塩濃度は河口近傍の表層において最も高く、その後沖合に向かって低下する傾向を示した。一方で、冬季は鉛直混合の卓越にともない表層から底層にかけて塩分が

比較的均一となり、より沖合まで塩分が低下する傾向がみられたことから、淡水のインパクトゾーンが全体的に拡大していると考えられた。

## (2) 淡水インパクトゾーンの変化にともなう沿岸低次生態系の応答の解明

河川水中の栄養塩濃度は非感潮域から感潮域に向かって上昇し、特に溶存無機態リン (DIP) の濃度は淡水と塩水との境界部で最も高くなる傾向を示した。また、同じエリアでクロロフィル a も上昇していたことから、河口より上流側では地下水経由の栄養塩供給が生じており、植物プランクトンの生産に影響していることが示唆された。

一方で、感潮域より沖合側では明瞭な地下水流出は確認できなかったが、地表水 (河川水および処理場由来排水) のインパクトゾーンが季節によって変化しており、特に冬季においてより沖合まで拡大する傾向がみられた。また、同時期においてクロロフィル a および溶存酸素濃度 (DO) も比較的高くなる傾向を示し、植物プランクトンの生産が活発になっている可能性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### [雑誌論文](計 11 件)

1. 齋藤光代・小野寺真一“沿岸地下水流出域におけるリン動態。”地球環境, 査読有 (印刷中)。
2. Saito, M., Onodera, S., Hidaka, G. and Tokumasu, M. “Evaluation for the effect of non-stationary nutrient transport on the coastal seaweed cultivation in western Japan.” Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (PIAHS), 査読有 (印刷中)。
3. Jin, G., Shimizu, Y., Onodera S., Saito, M. and Matsumori K. “Evaluation of drought impact on groundwater recharge rate by SWAT and Hydrus Model in an agricultural island, western Japan.” Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (PIAHS), 査読有 (印刷中)。
4. Maruyama, Y., Onodera, S., Kitaoka, K., Saito, M. and Shimizu, Y. “Estimation of the climate change effect on the long-term variation in river water temperature in a temporal snow-covered watershed.” Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (PIAHS), 査読有 (印刷中)。
5. Shimizu, Y., Onodera, S., Jin, G. and Saito, M. “Estimation of long term nutrient loadings into a hypereutrophic artificial lake in lowland catchment, western Japan.” Proceedings of the International Association

of Hydrological Sciences (PIAHS), 査読有, 368, 337-342, doi: 10.5194/piahs-368-337-2015, 2015.

6. 大西晃輝・小野寺真一・齋藤光代・清水裕太・金 広哲“大量施肥農業流域における不圧地下水での溶存  $N_2O$  の空間分布特性。”陸水学雑誌, 査読有, 75, 1-11, 2014.
7. Saito, M., Okubo, K., Onodera, S., Takagi, S., Maruyama, Y., Shimizu, Y., Jin, G. and Aritomi, D. “Effect of physical and morphometric factors on nutrient removal in agricultural ponds.” Proceedings of 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries (AGRO2014), 査読無, 1, 616-621, 2014.
8. Onodera, S., Onishi, K., Saito, M., Aritomi, D., Onodera, K., Maruyama, Y., Jin, G. and Shimizu, Y. “Nitrous oxide emission with submarine groundwater discharge in an agricultural watershed affected by significant fertilizer application.” Proceedings of 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries (AGRO2014), 査読無, 2, 196-203, 2014.
9. Jin, G., Onodera, S., Saito, M., Maruyama, Y., Hayakawa, A., Sato, T., Ota, Y. and Aritomi, D. “Vertical distribution of sediment phosphorus from Lake Hachirogata; considering land reclamation effects on phosphorus accumulation.” Proceedings of 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries (AGRO2014), 査読無, 2, 620-627, 2014.
10. Onodera, S., Tase, N., Terada, R., Saraiva, F., Hirata, R., Saito, M. and Maruyama, Y. “Nutrient component of groundwater in agricultural land.” Proceedings of Workshop on Water, Nitrogen and agriculture in the State of São Paulo, Brazil, 査読無, 41-44, 2014.
11. Jin, G., Onodera, S., Amano, A., Saito, M., Shimizu, Y. and Satou, T. “Effects of dam construction on sediment phosphorus variation in a semi-enclosed bay of the Seto Inland Sea, Japan.” Estuarine, Coastal and Shelf Science, 査読有, 135, 191-200, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.10.009>, 2013.

### [学会発表](計 39 件)

1. Saito, M., Onodera, S., Hidaka, G. and Tokumasu, M. “Evaluation for the effect of non-stationary nutrient transport on the coastal seaweed cultivation in western Japan.” 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), 2015年6月22日~7月2日, Prague, Czech

- Republic.
2. Jin, G., Shimizu, Y., Onodera S., Saito, M. and Matsumori K. "Evaluation of drought impact on groundwater recharge rate by SWAT and Hydrus Model in an agricultural island, western Japan." 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), 2015年6月22日~7月2日, Prague, Czech Republic.
  3. Maruyama, Y., Onodera, S., Kitaoka, K., Saito, M. and Shimizu, Y. "Estimation of the climate change effect on the long-term variation in river water temperature in a temporal snow-covered watershed." 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), 2015年6月22日~7月2日, Prague, Czech Republic.
  4. 齋藤光代・小野寺真一・古森 旭・大久保賢治・有富大樹・金 広哲・丸山 豊 "沿岸藻場分布域における地下水流出の評価." 日本地球惑星科学連合大会, 2015年5月24日, 幕張.
  5. 大久保賢治・齋藤光代・舩岡亮平・小野寺真一・金 広哲・丸山 豊 "農業用貯水池における成層構造の季節変化とその栄養塩循環への影響." 日本地球惑星科学連合大会, 2015年5月24日, 幕張.
  6. Saito, M., Onodera, S., Shimizu, Y., Maruyama, Y., Jin, G. and Aritomi, D. "Nitrogen dynamics in a tidal river zone influenced by highly urbanization, western Japan." American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, 2014年12月15日~19日, San Francisco, U.S.A.
  7. Onodera, S., Saito, M., Jin, G., Hayakawa, A. and Maruyama, Y. "Effect of subsurface flow on nutrient transport between a eutrophic coastal lake and agricultural reclamation land." American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, 2014年12月15日~19日, San Francisco, U.S.A.
  8. Saito, M., Okubo, K., Onodera, S., Takagi, S., Maruyama, Y., Jin, G., Aritomi, D., Le, H. T., Funaoka, R. and Shimizu, Y. "Effect of physical and morphometric factors on nutrient removal in agricultural ponds." 2014 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 2014年11月24日~26日, Kochi, Japan.
  9. Onodera, S., Onishi, K., Saito, M., Aritomi, D., Onodera, K., Maruyama, Y., Jin, G. and Shimizu, Y. "Nitrous oxide emission with submarine groundwater discharge in an agricultural watershed affected by significant fertilizer application." 2014 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 2014年11月24日~26日, Kochi, Japan.
  10. Jin, G., Onodera, S., Saito, M., Maruyama, Y., Hayakawa, A., Sato, T., Ota, Y. and Aritomi, D. "Vertical distribution of sediment phosphorus from Lake Hachirogata; considering land reclamation effects on phosphorus accumulation." 2014 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 2014年11月24日~26日, Kochi, Japan.
  11. Shimizu, Y., Onodera, S., Jin, G. and Saito, M. "Estimation of long term nutrient loadings into a hyper eutrophic artificial lake in lowland catchment, Japan." RSHS14 and ICGHWE14, 2014年8月24日~27日, Sun Yat-Sen University, China.
  12. Onodera, S., Saito, M., Shimizu, Y., Maruyama, Y., Jin, G., Miyaoka, K. and Aritomi, D. "Nutrient Dynamics in the Tidal Zone of Polluted River in Osaka Metropolitan City of Japan, Considering Seasonal Variations and Groundwater Exchange." Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014年8月1日, Sapporo, Japan.
  13. Onodera, S., Saito, M., Hayakawa, A., Jin, G., Maruyama, Y., Aritomi, D. and Sato, T. "Effect of Surface Water - Groundwater Interaction on Nutrient Enrichment in Hachiro-gata Area." Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014年8月1日, Sapporo, Japan.
  14. Jin, G., Onodera, S., Saito, M., Maruyama, Y., Hayakawa, A., Sato, T., Ota, Y. and Aritomi, D. "Comparison of Sediment Phosphorus Profiles from Lake Hachirogata, in Consideration of Groundwater Flow Effect." Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014年8月1日, Sapporo, Japan.
  15. Jin, G., Onodera, S., Li, G., Saito, M. and Shimizu, Y. "Comparative Research of the Recovery from Eutrophic Condition in Japanese Tidal Lakes." Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014年8月1日, Sapporo, Japan.
  16. Maruyama, Y., Onodera, S., Saito, M. and Kitaoka, K. "Estimation of Groundwater Flow with Bypass Flow in River-groundwater Interaction Zone of the Costal Alluvial Fan, Using Seasonal Variations of Temperature,  $\delta^{18}\text{O}$ , and Nutrient Concentration." Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014年7月31日, Sapporo, Japan.
  17. 齋藤光代・小野寺真一・金 広哲・丸山 豊・有富大樹・大久保賢治 "瀬戸内海沿岸域における藻場の空間分布に及ぼす地下水流出の影響の検討." 生物地球化学研究会, 2014年10月25日~26日, 京都.
  18. Jin, G., Onodera, S., Saito, M., Hayakawa,

- A., Sato, T. and Ota, Y. "Phosphorus distribution in sediment profile from Lake Hachirogata; considering land reclamation effects on phosphorus accumulation. , 2014年10月25日~26日, 京都 .
19. 齋藤光代・小野寺真一・金 広哲・丸山豊・有富大樹“潮間帯における藻場の空間分布とそれに及ぼす地下水流出の影響の検討.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  20. 大久保賢治・齋藤光代・柴田健志“湖底湧水の推算法に関する考察.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  21. Le, T. H., Okubo, K. and Saito, M. “Variation of nutrients and chlorophyll-a in North Basin of Lake Biwa for the last few decades.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  22. Jin, G., Shimizu, Y., Onodera S., Saito, M. and Matsumori K. “The estimation of water balance in Ikuchi Island by SWAT and Hydrus Model.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  23. 福岡正人・小野寺真一・齋藤光代・清水裕太・金 広哲・佐藤高晴・山本民次・北岡豪一・大久保賢治・早川 敦・宮岡邦任“沿岸地下水におけるリンのホットスポットに関する研究.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  24. 丸山 豊・齋藤光代・小野寺真一・北岡豪一“河川近傍の天然池が有する水質浄化作用.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  25. 有富大樹・小野寺真一・齋藤光代・大西晃輝・丸山 豊“花崗岩不圧帯水層中の溶存亜酸化窒素の鉛直分布とその時系列変化.” 日本水文科学会学術大会, 2014年10月4日, 広島大学 .
  26. 齋藤光代・小野寺真一・太田朋子・郭 新宇・武岡英隆・大西秀次郎・窪田卓見“瀬戸内沿岸海中でのラドン・ラジウム核種の空間分布およびその影響要因.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  27. 齋藤光代・小野寺真一“沿岸地下水流出域におけるリン動態に関する近年の研究動向” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  28. 小野寺真一・齋藤光代・清水裕太・丸山豊・宮岡邦任・金 広哲・有富大樹“大和川感 潮域における栄養塩動態の季節変化.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  29. 小野寺真一・齋藤光代・早川 敦・金 広哲・丸山 豊“地表水-地下水交流とその栄養塩輸送に及ぼす影響 - 八郎潟の例.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  30. Jin, G., Onodera, S., Ota, Y., Sato, T., Saito, M., Hayakawa, A. and Aritomi, D. “Contrasting vertical phosphorus profiles in sediment of Hachirogata ; considering water flow effect.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  31. 大久保賢治・齋藤光代・高木真也・小野寺真一・丸山豊・金広哲・有富大樹・清水裕太“成層安定度に基づくため池の類型化及び生態系指標に関する検討.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  32. 谷口智雅・小野寺真一・高橋英博・齋藤光代・清水裕太“瀬戸内海島嶼部における地下水利用 - 尾道市瀬戸田町生口島の事例 - .” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  33. 有富大樹・小野寺真一・齋藤光代・丸山豊・金広哲・大西晃輝“山地農業流域における地下水中の酸素安定同位体比および硝酸態窒素濃度の季節変化.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  34. 丸山豊・小野寺真一・齋藤光代・北岡豪一“扇状地河川近傍の河川-地下水交流特性 - 酸素安定同位体比と栄養塩濃度分布による評価 - .” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  35. 清水裕太・小野寺真一・齋藤光代“水文流出モデルによる河川からのリン輸送量推定の現状と課題.” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  36. 太田雄貴・佐藤高晴・小野寺真一・金広哲・齋藤光代・早川 敦“八郎潟調整池の堆積物柱状試料における岩石磁気測定の前分布特性 - 干拓地建設の影響 - .” 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, 横浜 .
  37. Onodera, S., Saito, M., Maruyama, Y., Miyaoka, K., Jin, G. and Shimizu, Y. “Nutrient dynamics and budget with the surface water-groundwater interaction in the tidal river in Japan.” AGU Fall Meeting 2013, 2013年12月9日~13日, Moscone Center, San Francisco.
  38. 齋藤光代・小野寺真一・金 広哲・太田雄貴・早川 敦・有富大樹・佐藤高晴“八郎湖における湖水および湖底間隙水中の栄養塩空間分布.” 生物地球化学研究会, 2013年11月2日~3日, 東広島市市民文化センター .
  39. 齋藤光代・小野寺真一“淡水 - 塩水境界域における窒素循環研究の現状と今後の課題 - 水文 生物地球化学相互作用の観点から - .” 日本水文科学会学術大会, 2013年10月19~20日, 千葉商科大学 .
6. 研究組織  
 (1)研究代表者  
 齋藤 光代 (SAITO MITSUYO)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・特  
任助教  
研究者番号：20512718