

流域の空間情報を考慮した栄養塩の長期流出変動機構の解明

清水 裕太

広島大学大学院総合科学研究科

Long term variation in nutrient discharge controlled by spatial heterogeneities in Seto Inland Sea watersheds

Yuta SHIMIZU

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

Abstract

The objective of this study is to clarify the mechanism of long-term variation for nutrient discharge in the Seto Inland Sea. Especially, we 1) evaluated the effect of Submarine Groundwater Discharge (SGD) on nutrient discharge from land to the sea using newly developed model, and 2) confirmed the effect of climate change and human activity on the long-term nutrient discharge in watershed, and 3) evaluated the nutrient retention efficiency by small weirs on the stream using hydrodynamic ecological model, and 4) discussed the mechanism of nutrient discharge from land to the sea and suggested the reuse of phosphorus. The results are summarized as follows:

- 1) The estimated SGD by the new model corresponded with the water balance method. Therefore, this method made possible to evaluate SGDs spatially and quantitatively. Amount of nutrient discharge via SGD based on the new method was equal to 10% of total amount of river discharge. On the other hands, phosphorus discharge of SGD was 3.6 times larger than that of river discharge. Therefore, it was confirmed that SGD was one of the important nutrient sources to the sea.
- 2) The decrease trend of precipitation and discharge were confirmed from long-term record of the Asahi River watershed. Result of analysis for nutrient discharge in long-term using a quasi-distributed hydrological model (Soil Water Assessment Tool; SWAT) indicates there is a relationship between precipitation and magnitude of phosphorus discharge. This result indicates that phosphorus could be delivered to the sea mainly in the wet year. Based on the long-term analysis, land use change from farmland to residence has confirmed due to increasing of human population in the Takaya River watershed. The variation of nutrient concentration indicated two significant trends. One is that nitrate has been increasing while particulate phosphorus has been decreasing. This result suggested that nitrate and particulate phosphorus were influenced by human population and total area of farmland in the watershed, respectively. Another is that phosphate and ammonium have decreased since

1998 by construction of large weirs on the stream.

- 3) A result of simulation for nutrient dynamics in a small reservoir using a hydrodynamic ecological model indicates that phosphorus overflows from water column to downstream in flood event, while it circulates with sedimentation - resuspension process inside the reservoir in ordinary condition. The net flux of phosphorus was estimated that 23% of total inflow is trapped in the reservoir and the residue is overflowed toward downstream. On the other hands, the net flux of nitrogen was estimated that 15% of total inflow is trapped as sedimentation, 26% is attenuated by denitrification and the residue is overflowed. These results suggest that the small reservoir has a capability of nutrient retention.
- 4) A result of trace for source of phosphorus in the Takaya River watershed indicates that the phosphorus discharge from middle stream was higher than that from upper stream because there were not anthropogenic sources in upper stream. In middle stream, soluble phosphorus discharged from domestic wastewater while particle phosphorus discharged from agricultural wastewater. Source of phosphorus in the Takaya watershed was consisted of domestic wastewater and agricultural wastewater with 1:1. The total sediment in the reservoir was estimated to be 62352 ton include 42.4 ton of phosphorus. This result was equal to an accumulation of 15 years of the estimated annual sediment load. It was confirmed that phosphorus in the pore water was actually higher concentration than that in the water column. And also, simulation result indicated phosphorus, which is equal to approximately 4.4 times of the river flux, circulates in a short time in the reservoir. Hence, abundant phosphorus in the sediment was confirmed by field survey and simulation. Consequently, these results suggest the small reservoir could be a sink of phosphorus and its possibility for reuse.

Keywords: Nutrient discharge, River, Submarine Groundwater Discharge, Irrigation Reservoir, Trapping effect

1 章 序 論

栄養塩とは植物の生長に必須の元素を指し、本研究では特に窒素、リンに注目する。栄養塩は食物連鎖の基底となる植物プランクトンの増殖に直接影響することから生態系にとって重要な役割を担っている。この窒素、リンは人間活動や農業活動の増大に伴って環境中に大量に放出されるようになり、特に、地球全体としてのリンの排出量は最近150年間で約4.7倍まで増加している。また、最近の世界的な穀物需要の増加に伴ってリン肥料の原料であるリン鉱石の枯渇も危惧されている。特に我が国は、使用量のほぼ全量を海外輸入に頼っていることから、農業分野においてリン成分の流出抑制や効率的利用とともに再利用について模

索段階にある。そのため、流域スケールでのリン循環、例えば農地からの流亡量や下流での沈殿・堆積などの評価は重要である。

一方、河川の流出先である沿岸域では、窒素・リンの過剰な流入による水質の悪化や赤潮による漁業被害等の問題が生じてきた。富栄養化問題が特に深刻であった瀬戸内海では、瀬戸内海環境保全特別措置法に代表される栄養塩の総量規制に関する法規制や行政指導によって、河川からの栄養塩流出量は近年減少傾向にある。しかしながら、最近では栄養塩不足による漁獲量低下やノリの色落ち問題といった以前とは異なる新たな問題も発生している。河川からの栄養塩流出は人間活動および気候変動の影響を強く受けるため、これらを考慮したうえで海洋生態系への影響を評価してい

くことが重要である。さらに、近年では河川だけでなく、海底地下水流出 (Submarine Groundwater Discharge) と呼ばれる陸域から海洋への地下水の直接流出が、栄養塩供給経路として非常に注目されている。このため、海域への栄養塩流出量を評価するにあたり SGD を考慮することは重要である。

以上に挙げたような資源的および環境科学的な陸—海域における種々の問題に対しては、流域での栄養塩循環速度を考慮した栄養塩流出量の評価を行うことが非常に重要である。その際、短期の解析では循環速度に及ぼす環境変化の影響（気候変動、人間活動）を考慮することが困難であるため、長期的な解析による評価が必要となる。そのため、本研究は瀬戸内海中央部流域を対象に栄養塩流出の空間分布及び長期変動機構を明らかにすることを目的とした。

I章では従来の SGD に関する研究、河川からの栄養塩流出に関する研究、そして貯水池内の栄養塩動態に関する研究についてレビューを行い、本研究の目的と位置づけを明確にする。II章では瀬戸内海の備讃瀬戸海域を対象として、新たに開発した地形モデルを用いた海底地下水流出の空間分布と量的評価を行う。III章では、まず瀬戸内海へ流入する一級河川の中で人間活動の影響が比較的小さいと考えられる岡山県旭川流域を対象に、気候変動が栄養塩流出の長期変動に及ぼす影響を確認する。次に、一級河川芦田川水系の中の高屋川流域を対象に、栄養塩流出に及ぼす人間活動の影響および河道内の栄養塩動態を明らかにする。IV章では、栄養塩流出に対して高さ 2 m 弱の農業用堰建設の影響が大きかったことから農業用堰停滞水域内の栄養塩動態を明らかにするとともに、農業用堰が流域からの栄養塩流出に与える影響について貯水池水理生態系モデルによる定量的な評価を行う。そして、最後にV章で以上の結果を基に総合考察を行う。

II章 瀬戸内海へ流入する一級河川流域からの栄養塩流出量の評価

100km程度の海岸線における SGD の空間分布

を推定するために、新たに地形—地下水流出モデルを構築し、既知の流域での校正と流域水収支法での検定に基づき、50mメッシュ単位で見積もった。この結果、本手法を適用することによって、岡山県沿岸では SGD が年間 $0.2 \times 10^5 \text{m}^3$ 以上に見積もられたグリッドが多くの海岸線に分布し、香川県の埋め立て地部分では、SGD が年間 0m^3 となるといった空間的な表現が可能となった。本手法によって算出された SGD は、岡山県沿岸では年間66.2mmで降水量の4.8%、香川県沿岸では年間48.1mmで降水量の3.8%に相当すると推定された。これを従来の手法である流域水収支法による算出値と比較した結果、オーダー的には十分精度良く評価できていることを確認できた。以上より、これまで評価ができなかった SGD の発生地点とその大小を、空間的かつ定量的に評価することが可能となった。SGD による栄養塩流出量の推定を試みた結果、淡水としての地下水流出量は河川流量と比較して10分の1程度であり、同様に窒素の流出量も10分の1程度であった。一方、リンの流出については河川からの流出量のおよそ3.6倍と見積もられ、海域に対する SGD の重要性が示された。

III章 一級河川流域からの栄養塩流出量変動特性の解明

河川からの栄養塩流出に及ぼす気候変動の影響評価では、従来報告されている降水量および河川流量の減少傾向が、対象流域とした岡山県旭川流域における既存の長期観測データより確認された。また、米国で開発された準分布型水文流出モデル Soil Water Assessment Tool (SWAT) を用いた河川栄養塩流出量の長期変動解析結果では、降水量とリン流出量に相関関係が認められ、年降水量が少ない年は河川からのリン流出量は少なく、降水量が多い年は多いといった気候変動の影響を確認できた。河川からの栄養塩流出に関しては、特に溶存態リンとアンモニア性窒素は1999年頃に境に明瞭な減少傾向が確認され、その原因として農業用堰の改築による停滞水域の大型化の影響が示唆された。特に SWAT による栄養塩濃度の再

現解析において停滞水域を通過することで過大評価を示したことや、現地調査においても負荷量の減少が明確に現れたことから、農業用堰による停滞水域が栄養塩流出に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

IV章 農業用堰の栄養塩貯留・流出機構の解明

農業用堰が下流域への栄養塩流出に及ぼす影響を定量的に評価するために、高屋川流域内の新早田堰において現地調査を行った結果、水柱内は一年を通じて良く混合され、栄養塩については明瞭な季節変化をしていることが確認された。水理生態系モデルによる解析の結果は、停滞水域内のリンの多くは一旦蓄積したものが堆積と再懸濁を繰り返し、洪水時にその一部が下流へ流されるといった動態をしていることを示した。窒素の正味の流出量としては、流入量の15%が停滞水域に堆積という形でトラップされ、26%が脱窒により大気中へ放出され、残りの59%が下流へと流出する結果を示し、正味のリン流出量としては、流入量の23%が停滞水域にトラップされ、残りの77%が下流へと流出する結果を示した。この結果、農業用堰による停滞水域が栄養塩の循環に対して大きな影響を及ぼしていることが、本研究により定量的に解明された。水理生態系モデルによって得られた出力結果を SWAT へ再入力することにより、流域からの栄養塩流出に及ぼす停滞水域の影響の検証を行った。その結果、SWAT 単独の解析の場合はモデルの再現性が非常に悪い傾向であったのに対し、水理生態系モデルの結果を考慮した SWAT の解析では再現性は向上した。停滞水域を考慮した流域からの窒素流出量は、停滞水域を考慮しなかった場合と比較して58%減少し、リン流出量についても44%減少した。以上の結果から、

農業用堰を考慮せずに推定した従来の評価は過大に見積もられている可能性が示唆された。

V章 総合考察

農業用堰内に蓄積したリンの供給源を追跡するため SWAT を用いて逆解析を行った結果、次のようなリン供給源の空間分布が推定された。上流の山林地帯ではリン流出量は少ないが、中流域の本流沿いでは生活排水に起因する溶存態リンの流出が多いのに対し、支流では農地からの流出に起因する懸濁態リンの流出が多いことが示された。最下流地点でのリン負荷量に占める発源起源の割合は、生活排水由来と農業排水由来によるものが、ほぼ1:1であった。また、前述した農業用堰停滞水域内には、62352tの土砂が堆積しており、その中には42.4tのリンが蓄積されていると推定された。この量は、流域内の農地への年間リン施肥量(2005年ベース)16.1tのおよそ2年半分に相当した。水理生態系モデルによる解析結果では、年間河川流入量の4.4倍もの量が、停滞水域内において短い時間で循環しており、堆積物コアの化学分析結果においても堆積物中に非常に高濃度のリンが表層付近に濃縮されていることを確認していることから、農業用堰はリン再利用に向けて非常に有用な存在であることが確認された。

以上、本論文では既存の陸域からの栄養塩流出量の評価において課題となっていた、SGD の評価手法の開発、気候変動と人間活動の影響を考慮した河川流出量の評価、そして小規模貯水池である農業用堰における栄養塩動態解析およびリンの資源的評価を行った。これらの研究成果は、将来予測を含めたより定量的な陸域からの栄養塩流出推定に関する重要な知見になるだけでなく、枯渇が危惧されるリン資源の再利用に寄与することが期待される。