

海岸地下浸透流およびそれに伴う沿岸域への 栄養塩供給過程の解析

内山雄介* · Peter Rölke** · 瀧岡和夫***
足立久美子**** · 仲宗根琢磨***** · 八木宏*****

1. 緒 論

水産資源等に多大な影響を及ぼす沿岸域の水質は、沖合水の影響に加えて、河川水や地下水といった陸水の影響を強く受けて形成されているため、これらの寄与を定量的に明らかにすることが必要となる。このうち、農地からの化学肥料を中心とした窒素、リンの供給、および家庭下水や畜産排水の浸透等によって増加しつつある地下水中の栄養塩は、沿岸海域、河川、湖沼等に直接流入し、水域の富栄養化現象の一因となり得る。しかしながら、他の影響因子と比較して、地下水を通じて前浜に至る後背地起源の栄養塩の海域向き輸送量、特にその供給過程に関する知見は欠如しているのが現状である。

沿岸生態系に対する地下水を通じた栄養塩供給過程の重要性は Johannes (1980) により指摘され、その後、McLachlan and Illenberger (1986), Simmons (1992), 鶴見・上田 (1997) などによって現地海岸における栄養塩フラックスが算出されている。また、本研究で対象とした鹿島灘波崎海岸では、汀線近傍の帶水層における潮汐に伴う海水交換と有機物好気分解プロセスに関する検討例 (仲宗根ら, 1997) や、透水層による海浜安定化工法に関連した栄養塩測定例 (柳嶋ら, 1997) がある。汀線近傍の帶水層では、塩水楔の形成に伴って流速分布が変形され、同時に複雑な生化学反応によって栄養塩濃度が時空間的に変動することが知られている (運輸省第五港湾建設局, 1981)。そのため、栄養塩フラックスの算出に Darcy 則あるいはトレーサー試験に基づく単純な断面平均流速を用いた既存の手法には疑問が残る。

そこで本論文では、鹿島灘波崎海岸の自然砂浜域において、汀線から海岸林背後に至る広範囲の現地観測によって海岸空間における地下水経由の栄養塩輸送プロセスを詳細に調査し、さらに海岸帶水層中の浸透流速分布の時空間変動を考慮し得る数値計算手法を用いて栄養塩フラックスを試算した結果などについて報告する。

2. 現地観測の概要

2.1 調査海域

現地観測は、広く外洋に面した典型的な自然砂浜海岸である、鹿島灘波崎海岸において実施した (図-1)。鹿島灘は茨城県の波崎町から大洗町を結ぶ延長約 70 km の砂浜域で、途中鹿島港により分断されている。鹿島港より南側の海岸は、鹿島港と波崎漁港に挟まれた延長約 16 km の砂浜であり、鹿島港南岸壁から南方約 5 km 離れた波崎海岸を観測サイトに選んだ。この位置には運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設 (HORS) があり、HORS 周辺の砂浜において採水用の井戸を掘削して地下水観測を行った。観測海域の南側約 12 km に、国内最大の流域面積を有する利根川の河口が位置している。

2.2 調査方法

観測期間は 1997 年 8/7~12/12 までであり、HORS から銚子方向に約 100 m 離れた地点において岸沖方向に測線を設けた。図-2 に示すように、測線上の HORS 基点である 0 m 地点 (D. L. = 2.2 m) に Sta. 1 を、そこから内陸方向に Sta. 2~Sta. 6 を設定し、それぞれの位置で採水用井戸を掘削した。井戸の深度は 2 m~30 m であり、図-2 中のハッチの箇所に採水口 (ストレーナー) を設けて採水を行った。採水には直径 40 mm, 長さ 50 cm の地下水採水器 (太陽計器製) を用いて 8/7~8/8, 8/22, 9/5, 9/25, 10/9, 10/31, 12/12 に実施し、NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, SiO₂, 塩分等を測定した。また、10/31, 12/

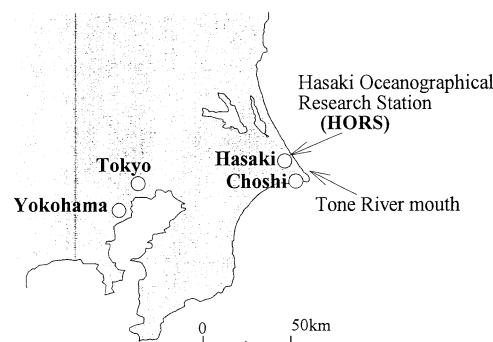


図-1 現地観測地点 (茨城県鹿島郡波崎町, HORS 周辺)

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室
** Ph.D. 東京工業大学 大学院情報理工学研究科
*** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科
**** 水修 水産庁水産工学研究所 環境改変研究室
***** 修(工) 水産庁水産工学研究所 環境改変研究室
***** 正会員 博(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

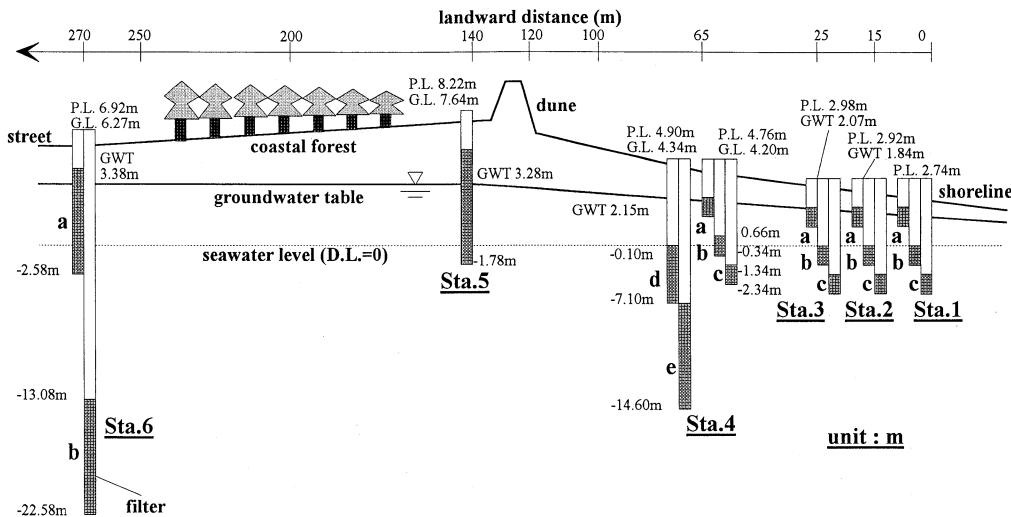
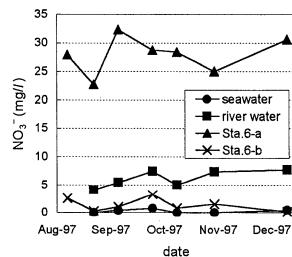
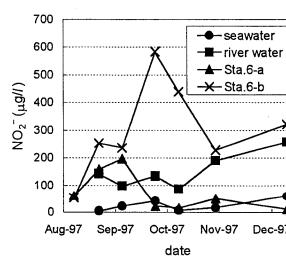
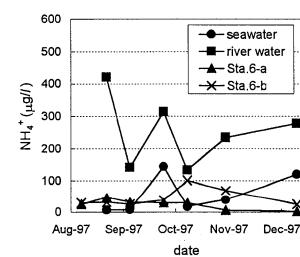
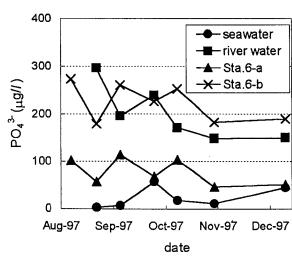
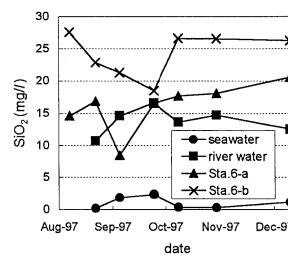
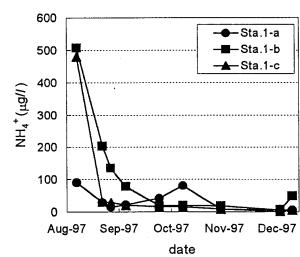


図-2 観測井戸の設置概況

図-3 NO₃⁻濃度の時系列図-4 NO₂濃度の時系列図-5 NH₄⁺濃度の時系列図-6 PO₄³⁻濃度の時系列図-7 SiO₂濃度の時系列図-8 汀線近傍での NH₄⁺濃度の時系列

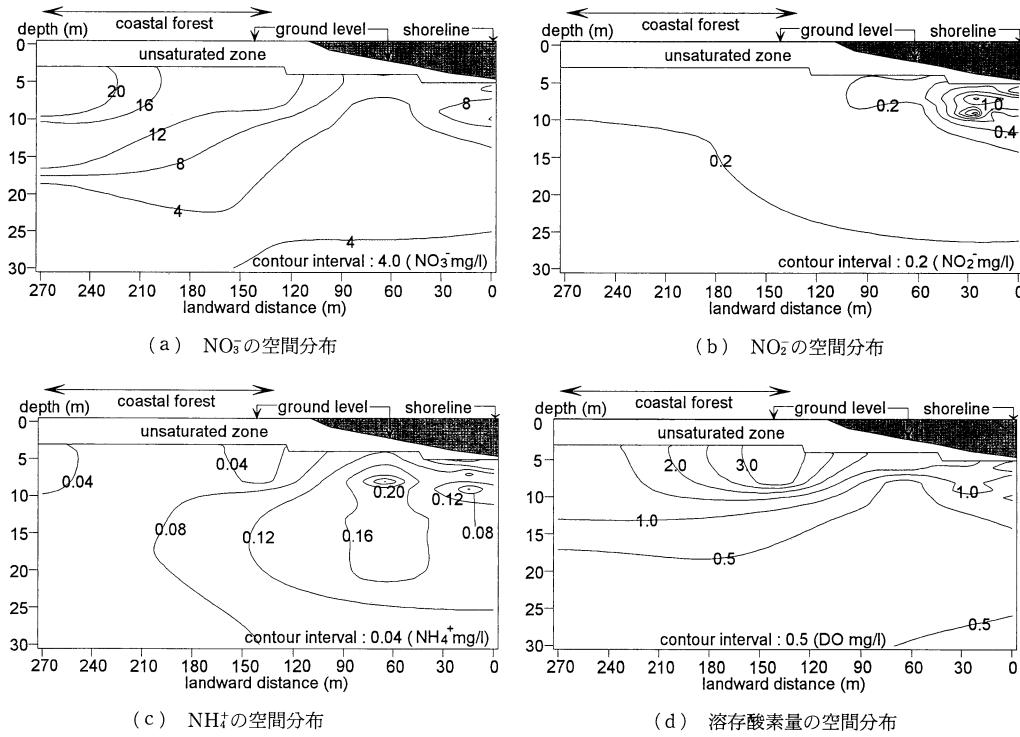
12には溶存酸素量(以下、DO)を併せて計測した。同時に、参照海水として汀線付近の海水を、利根川水との比較を行なうために河口から4km地点における河岸付近の表層河川水を採水した。さらに、Sta.4~6では水圧式地下水位計(Diver, Eijkelkamp社製)を設置し、10分間隔で地下水位を連続自動測定した。

3. 沿岸域への栄養塩輸送過程

3.1 地下水、海水、河川水中栄養塩濃度の比較

図-3~7は、海水の影響をほとんど受けないものと考

えられるSta.6-aおよびbでの地下水、利根川水、参照海水における、NO₃⁻(図-3)、NO₂(図-4)、NH₄⁺(図-5)、PO₄³⁻(図-6)およびSiO₂(図-7)の各濃度の時系列を示したものである。栄養塩5項目の全ての値は海水中で極めて低く、地下水中の栄養塩濃度は、NH₄⁺を除いて河川水中のそれと概ね同程度以上であり、かなり高濃度である。当海域では、SiO₂を摂取して細胞を形成する珪藻植物プランクトンが圧倒的な優占種であり、また、PO₄³⁻が生物生産に対する制限因子となっている(足立ら、1994)。さらに、高濃度のNH₄⁺は魚類の生息環境に対

図-9 溶存態無機窒素 (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+) および溶存酸素量の空間分布

して好ましくない（柳嶋ら, 1997）ことから、地下水中の高濃度の PO_4^{3-} , SiO_2 , NO_3^- 供給および低濃度の NH_4^+ 供給によって、海域の生態系に対して好適な栄養塩環境が創出されているものと考察される。

3.2 海岸帶水層における栄養塩濃度の季節変化

図-8に汀線近傍の Sta. 1 各深度における NH_4^+ 濃度の時系列を示す。帶水層内陸側 Sta. 6 (図-5) と比較して、Sta. 1 における NH_4^+ 濃度には明確な季節変化が存在し、8月から9月にかけて著しく高濃度であるものの、11月に向かって急激に減少していることが分かる。ここでは示さないが、このような傾向は NO_2^- , PO_4^{3-} にも同様に見られ、前浜周辺におけるバクテリア活性が低下したことが原因であるものと考えられる。次節では、前浜周辺の濃度が高い夏期 (8/7~10/9) の平均的な地下水中小栄養濃度の空間分布特性について論じることとする。

3.3 溶存態無機窒素の空間分布特性

図-9(a)～(d) はそれぞれ NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ および DO の実測値について空間補完を行い、夏期の平均的な濃度分布を表したものである。

a) 内陸部における溶存態無機窒素の空間分布特性

内陸部の 270 m 地点 (Sta. 6) 近傍では、帶水層表層の NO_3^- 濃度が全領域を通じて最大値をとっており、表層 DO は 1.0~1.5 mg/l 程度である。好気的な環境であるため硝化活性が高まると同時に、 NO_3^- から NO_2^- , NH_4^+ へ

の還元が抑制されることにより、 NO_3^- 濃度は高く、反対に NO_2^- , NH_4^+ 濃度が著しく低くなっている。下層へいくに従って DO が低減して還元的な環境となり、その結果、 NO_3^- は低減している。また、地上部にクロマツを中心とした海岸林が繁茂している Sta. 6～砂丘直背後 140 m 地点 (Sta. 5) の区間において、Sta. 5に向かって表層 DO は 3.5 mg/l まで増加するとともに、 NO_3^- は 22 mg/l から 13 mg/l にまで減少している。これは、不飽和帯から帶水層上層にかけて存在する根の周辺において、バクテリアの生化学過程によって NO_3^- の消費 (Freeze and Cherry, 1979) が顕著に生じていることを示すものと考察される。

b) 汀線近傍における溶存態無機窒素の空間分布特性

NO_3^- と DO は砂浜上の 65 m 地点 (Sta. 4) で一旦減少した後、汀線近傍 (Sta. 1) に向かって再び増加しており、好気性環境下での硝化が生じていることが分かる。しかしながら、汀線近傍では NO_2^- と NH_4^+ もまた増加しており、複雑な生化学反応が生じていることが予見される。

坂本 (1988) によれば、潮汐に伴う汀線部の底質間隙への浸透水の流出入によって、海水中の溶存態有機窒素 (DON) 等は帶水層中で NH_4^+ にまで分解無機化され、その後、硝化細菌によって NO_2^- , NO_3^- へと酸化される。通常、砂浜や礫浜のように好気的な場では脱窒細菌による N_2 への還元は起こらないとされるので、溶存態無機窒素

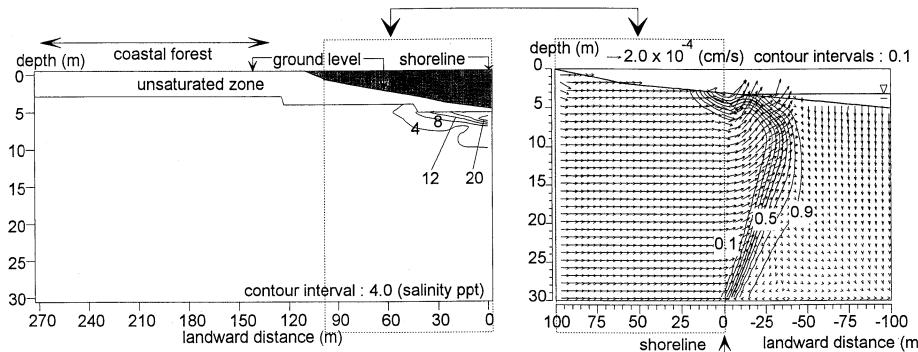


図-10 8/22における、(左)実測塩分分布と(右)計算による無次元塩分および流速分布(点線内領域どうしが対応している)。

(DIN) の総量変化は DON の無機化と生物による DIN 摂取によって決定されるものと考えられている。これに対して Lowrance and Pionke (1989) は、潮汐による地下水位の変動などに伴って、異なる化学的環境、例えば好気的あるいは嫌気的環境を交互に経験するような場合、帶水層は脱窒細菌の活動に対して好条件となると論じている。さらに最近の観測(鷺見・上田, 1997)によつて、汀線近傍では有意な数の脱窒細菌が存在することが確認されており、化学的な条件が揃えば砂浜においても脱窒が起こる可能性が指摘されている。以上のことから本観測では、汀線近傍で NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ 濃度が同時に増加していることから、陸域起源の DIN の硝化、海域起源の DON の無機化とその後の硝化、脱窒細菌による還元が同時に生じているものと考察される。

しかしながら全体的に見れば、汀線近傍における DIN に占める NO_3^- の割合は他の無機窒素と比較して極めて大きく、酸素が十分に供給されれば、DIN は容易に NO_3^- にまで酸化される傾向にあると言える。結局、浸透流による後背地起源の DIN の海域向き供給と、汀線部における海水起源の DON の無機化、およびそれらの酸化還元反応とが合わさって、帶水層中の栄養塩分布が決定されているものと結論付けられる。

4. 沿岸域への栄養塩供給量

4.1 数値計算の概要

一般に、地下水流速を多面的、連続的に測定することが困難であるのに対して、地下水位の計測は極めて容易であり、良質なデータの蓄積が可能である。そこで本研究では、実測した地下水位と潮位データを、地下浸透流に関する数値モデルの境界条件として逐次用いることにより、地下浸透流速分布の時空間データを得ることを試みた。以下に数値モデルや計算条件等の概要を簡単に述べるが、その詳細については内山(1998)を参照されたい。

基礎方程式は、溶質(塩分)による浸透ポテンシャル

の変化を考慮した Richards 方程式と、地下水中の溶質に関する移流分散方程式である。なお、不飽和透水係数と体積含水率との関係には Brooks-Corey 式を、体積含水率と圧力ポテンシャルとの関係には谷(1982)の式を、分散係数テンソルには Scheidegger(1961)による流速依存型の表現式をそれぞれ採用した。また、飽和透水係数 K_s 、飽和含水率 θ_s には、現地砂から求めた値 ($K_s = 1.331 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ および $\theta_s = 0.3531$) をそれぞれ用いた。

境界条件は、水平方向には水面上で開放条件、水面下では既知の無次元塩分(淡水側で 0、海水側で 1.0)と静水圧分布を仮定した既知の圧力ポテンシャルを与え、鉛直方向には通過する塩分フラックスおよび流量がゼロとした。初期条件は、全ポテンシャルと塩分を全領域でゼロ(静止平衡状態、淡水)とした。

図-10 に計算結果の一例として、実測塩分と計算による無次元塩分の 8/22 における一日平均の空間分布を比較する形で示す。但し、計算結果には日平均流速分布を併せて表示している。水位変動を考慮することにより、汀線近傍の屈曲した塩分分布を得られることが定性的に示されている。

4.2 地下浸透流による海域への栄養塩供給量

本研究では、圧力ポテンシャルと塩分のみを未知量として計算を行い、算出された流速場に各栄養塩濃度の実測値を乗じることによって栄養塩フラックスを求めた。

表-1 は、Sta. 1 断面における地下浸透流による海域への栄養塩フラックスと、利根川下流部の流量データおよび実測した栄養塩濃度を用いて求めた利根川からの平均栄養塩フラックスを示している。ただし、浸透流によるフラックスは、波崎漁港～鹿島港間の砂浜距離(16 km)を乗じて、砂浜全体からの供給量として算出している。これによると、海域全体へ供給される栄養塩フラックスは全項目ともに利根川からの方が圧倒的に多いことが分かる。しかしながら、河口から放出された栄養塩フラックスが全て砂浜に到達するわけではないので、両者を単純に比較することはできない。

表一 地下水および利根川からの栄養塩フラックス

	Groundwater (ton/day)	Tone River (ton/day)
NO ₃ ⁻ -N	0.0548	22.8673
NO ₂ ⁻ -N	0.0045	0.6485
NH ₄ ⁺ -N	0.0047	3.6012
PO ₄ ³⁻ -P	0.0078	1.3496
SiO ₂ -Si	0.4351	11.9039

表二 栄養塩濃度の海水中平均値と地下水による変化速度

	Seawater (mg/l)	Groundwater (mg/l/day)
NO ₃ ⁻ -N	0.0653	0.1522
NO ₂ ⁻ -N	0.0089	0.0125
NH ₄ ⁺ -N	0.0458	0.0131
PO ₄ ³⁻ -P	0.0083	0.0217
SiO ₂ -Si	0.4867	1.2086

そこでここでは、単位体積あたりの栄養塩濃度変化速度を求め、地下水による栄養塩フラックスが前浜周辺水塊に与える影響を簡単に見積もった結果を表一2に示す。ここでいう変化速度とは、表一1中の栄養塩フラックスを静穏時の碎波帯内程度の水塊体積(碎波帯幅150m、前浜勾配1/50と仮定)で除した値である。表中には海水中栄養塩濃度の観測期間全体を通じた平均値を、比較のために併記している。表二を見ると、地下水による栄養塩濃度変化速度は海水中の栄養塩濃度と同程度のオーダーであることが分かる。このことから、地下水経由の栄養塩フラックスは前浜周辺海域における静穏時の栄養塩濃度変化を引き起し、そのため、前浜周辺の生態系に對して少なからず影響を与えているものと考察される。加えて、利根川河川水が南側に偏流する場合などのようにイベント的に接岸したときには、前浜周辺の水環境に對して河川の影響が強く現れるものと推察される。また、利根川は我が国最大級の河川であるため、その栄養塩フラックスは極めて大きい値となっているが、このような大河川を周辺に有さない自然海浜周辺における生物生産に對しては、地下水からの栄養塩供給がさらに重要な意味を持つことになることは言うまでもない。

5. 結 論

帶水層中における後背地起源の栄養塩濃度は高く、河川水中濃度と同程度である。内陸側の帶水層表層では好気性環境下での硝化活性が高いため硝酸態窒素が極めて多く、反対に亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素は著しく少ない。汀線近傍では脱窒と硝化が同時に生じる複雑な化学環境が形成され、後背地からの栄養塩と、海域より

供給される有機物から生じる無機態窒素とが混合して海域へと湧出している。

地下水位、潮位変動を考慮した数値計算手法を用いて帶水層から湧出する栄養塩フラックスを求めたところ、その値は海域全体として見れば極めて小さく、鹿島灘では利根川の影響が大きいことが分かった。しかしながら、前浜部の碎波帯周辺海水中の栄養塩濃度を変え得る程度の変化速度を有していることから、極浅海域の生態系に對して少なからず影響を与えていると考察された。

最後に、海岸林は後背地起源の帶水層中栄養塩濃度を減少させていることが観測データから示されたが、海岸林を構成する植生の種類によっては、落葉等に伴って栄養塩が帶水層中に供給される可能性もあり、今後さらなる調査が必要であるものと考えられる。

参考文献

- 内山雄介 (1998): 海一陸境界領域としての海岸空間の環境特性に関する研究、第8章、東京工業大学学位論文。
- 足立久美子・日向野純也・木元克則 (1994): 鹿島灘砂浜海岸における一次生産(1992年)、水産工学研究所技報(水産土木), Vol. 16, pp. 13-24.
- 運輸省第五港湾建設局 (1981): 砂浜の海水浄化作用(養浜工計画基礎調査報告書総集編)。
- 坂本市太郎 (1988): 生態系の構造と機能—1. 砂浜・河口、沿岸域の生態学とエコテクノロジー(栗原 康編)、東海大学出版会, pp. 119-125。
- 鷺見栄一・上田真吾 (1997): 地下水中栄養塩の砂浜から沿岸域への流入過程、地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会第5回講演集, pp. 85-90。
- 谷 試 (1982): 一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性、日本林学会誌, Vol. 64, pp. 409-418。
- 仲宗根琢磨・足立久美子・竹内智行・日向野純也・八木 宏 (1997): 砂浜地下水中の栄養塩濃度について、海洋学会秋季講演会梗概集, p. 128。
- 柳嶋慎一・加藤一正・中官利之・金澤 寛・原田久志 (1997): 現地海岸に埋設した透水層の海水浄化効果、海岸工学論文集、第44巻, pp. 1171-1175。
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979): Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., pp. 384-457.
- Johannes, R. E. (1980): The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 3, pp. 365-373.
- Lowrance, R. R. and Pionke, H. B. (1989): Transformation and movement of nitrate in an aquifer systems, Nitrogen management and groundwater protection (edited by Follett, R. F.), Elsevier, pp. 373-392.
- McLachlan, A. and Illenberger, W. (1986): Significance of groundwater nitrogen input to a beach/surf zone ecosystem, *Stygologia*, Vol. 2, No. 4, pp. 291-296.
- Scheidegger, A. E. (1961): General theory of dispersion in porous media, *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, pp. 3273-3278.
- Simmons, Jr G. M. (1992): Importance of submarine groundwater discharge (SGWD) and seawater cycling to material flux across sediment/water interfaces in marine environments, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 84, pp. 173-184.