

現地海岸に埋設した透水層の海水浄化効果

柳嶋 慎一* ・加藤 一正**・中官 利之***
金 澤 寛****・原田 久志*****

1. はじめに

砂浜の中に埋設した透水層によって海浜を保全する工法に関する現地調査をおこない、地下水位の低下、前浜侵食の減少、三次元的な前浜堆積促進効果を確認した(柳嶋ら, 1995, 1996). 本工法は、このような前浜地形変化の制御ばかりでなく、砂層を通過する浸透海水流量を増大させるため、砂層中のバクテリアによって水質が改善されるという付加的な効果も期待される。

そこで、現地海岸に埋設した透水層周辺で水質調査を行い透水層内外の基本的な水質の変化を検討し、次に透水層の海水浄化効果を栄養塩類の変化に注目した分析によって検討した。

2. 調査方法

調査は、茨城県の鹿島灘に面する砂浜海岸にある波崎海洋研究施設(図-1、以後 HORS と呼ぶ)で行った。

透水層は、前浜から後浜にかけての 88 m、幅 7.6 m の範囲に、現地盤から 1~2 m の深さに設置してある(詳細は、柳嶋ら, 1995 参照)。

(1) 定常的な調査

以下の項目について連続測定を行った(図-2)。

a) 汀線付近(岸沖方向距離 22 m)での水面変動を観測機橋上に取り付けた超音波式波高計によって測定した。水位については、観測データを平均して求めた。また、毎正時をはさむ 20 分間のデータについてスペクトル解析を行い、その結果得られた周波数スペクトルを用いて、その 0 次モーメントから長周期波の波高を求めた(加藤ら, 1989)。

b) 排水パイプ外側に取り付けた超音波流量計によって排水パイプ内の流量を測定した。

c) 透水層背後に設置した採水用井戸内、透水層内(岸沖方向距離-22 m)、および汀線付近の海底面に設置した水温・塩分計によって、1996 年 6 月から水温・塩分濃

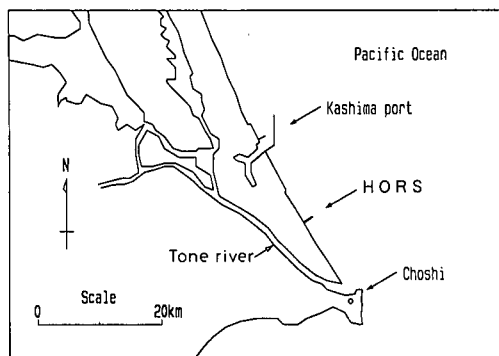


図-1 調査位置図

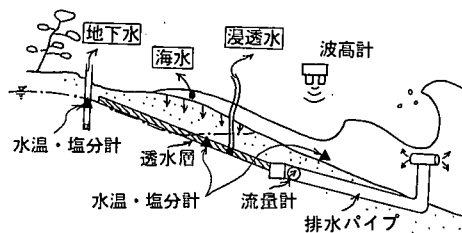


図-2 計測器の配置および採水位置

度を連続測定した。なお、汀線付近の水温・塩分計が設置されていない期間は、簡易水質計によって 1 日 1 回水温、塩分濃度の測定をおこなった。

d) 地下水位の平面分布と前浜地形は、1 日 1 回測定した(詳細は柳嶋ら, 1996 参照)。

e) 鹿島港湾工事事務所と銚子气象台で 1 時間ごとに観測された雨量を平均して解析に用いた。

(2) 採水調査

採水調査は、波が遡上する汀線付近(海水)、透水層背後の海水の影響の及ばないところ(地下水)および浸透した海水と地下水が混じり合う透水層内(浸透水)の 3 地点(図-2)について、満潮時に波が透水層内の採水地点(岸沖方向距離-12 m)を越えて遡上している条件のもとで、1995 年 11 月から 10 回行った。採水は、満潮時に重点をおき、3 地点ほぼ同時に 2 潮汐にわたり行った。採水後、塩分濃度は電気伝導率計により分析した。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋環境部主任研究官
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部漂砂研究室長
... 運輸省港湾技術研究所海洋環境部漂砂研究室
*** 正会員 工修 運輸省港湾局技術課長
**** 運輸省第二港湾建設局工務第一課防災施設係長

アンモニウム塩 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸塩 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸塩 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸塩 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 濃度は、オートアナライザー (II型, TRAACS 800) によって分析した。

3. 透水層内外の水温・塩分濃度の季節変化

透水層内の浸透水の水質は、海水の浜への遡上、浸透に大きく影響される。そこで、波の遡上について調べた。波の遡上高さは、汀線での水位と長周期波の波高を考慮した加藤ら (1989) の式で計算した。

図-3は1996年6月から1997年3月までの波の遡上高さ水温・塩分計設置地点地盤高の変化を示している。波の遡上高さが不連続なのは、地形データが測定できなかったためと、波高計設置地点が堆積し、波形の観測ができなかったためである。

水温・塩分計設置地点を越える波の遡上は9月以降多く発生している。しかし、2月末から前浜の堆積が進み波の遡上は少なくなっている。

図-4の上段は、同期間の正時の海水と地下水の、下段は地下水と浸透水の水温変化を示している。なお、図中に矢印で示す期間、透水層排水口のフィルターが目詰まりし、透水層内の浸透水は滞留した状態にあった。海水の水温は、 $6^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化し、数日周期の変化とともに、夜間に水温が低下する日周期の水温の変動が見られる。

地下水の水温は、 $15^{\circ}\text{C}\sim 22^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化している。7月上旬と9月下旬の一時的な水温の上昇は、低気圧通過および台風第9612号来襲の際の降雨(それぞれの合計雨量は、60時間に199.5 mm, 18時間に212.0 mm)と一致している。つまり、気温、地表面温度の高い時に雨がたくさん降り、地下水の水温に影響が及んだものと考えられる。ところが11月11日から12日に8時間の間に24.0 mmの降雨があったけれど、地下水の水温に変化は生じていない。これは、その時の気温と地下水の水温がともに 19°C で同一であったためである。

浸透水の水温は、排水口フィルターが目詰まりしていた期間を除くと、 $13^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化している。長期的な変化とともに6月から10月に短期的に僅かな水温の上昇が見られる。一方、12月から3月初旬にかけて数日間にわたり $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ の水温低下が数回生じている。このような浸透水の水温変化は、図-3に示した水温・塩分計設置地点を越えて波が遡上している時に一致している。つまり、浸透水の水温は、水温の異なる海水の浸透により短期的に変化している。

図-5は、塩分濃度の変化を示している。海水の塩分濃度は、10月始めと1月上旬に 25‰ に下がった場合を除き $30\sim 35\text{‰}$ の範囲にあり、季節的变化は見られない。

地下水の塩分濃度は、調査期間を通じて 0.5‰ でほと

んど変化しない。

浸透水の濃度は、 $0\sim 22\text{‰}$ の間で激しく変動している。浸透水の塩分濃度が高くなるのは、一部を除き図-3に示した水温・塩分計設置地点を越えて波が遡上している時に一致し、濃度は $13\sim 21\text{‰}$ になっている。

ただし、図中A、Bで示す時には測定地点を越える波の遡上は生じていない。このような塩分濃度の上昇の原因として逆流の可能性が指摘できる。つまり、透水層内の地下水位と排水口位置の水位との差(水位差)は負になる場合もあり、その時には排水口から透水層に向かう逆流が生じる(柳嶋ら, 1995)。そこで調査期間中の排水流量について正時から20分間のデータの平均を計算し、その結果を図-6に示す。期間中のほとんどは、沖に向かう(正)流れであるけれど、逆流(負)も生じている。特に図中にAで示す時は、数時間にわたり、 5 l/s を越える逆流が生じていた。この時の排水流量、パイプ径(0.4 m)、排水パイプ延長(144 m)を用いて排水口の海水が透水層に至るまでの所用時間を計算すると1時間になる。従って図-5にAで示した時に浸透水の塩分濃度が高いのは、逆流(図-6のA)によって海水が透水層内に到達したためと考えられる。逆流が生じる時の外力条件は、波浪が小さく、大潮の上げ潮時で、自然海浜の地下水位も低い時であった。

一方、図-5にBで示す10月中旬の塩分濃度上昇の時の排水流量は、負であるものの値は小さく、海水の逆流が原因とは考えにくい。そこで、前浜地形と波の遡上位置との関係を調べたところ、水温・塩分計設置地点の7 m沖側にバーム法肩がありそれよりも沖側の前浜勾配は急になっていた。さらにこの時は大潮であり、波の遡上高さが高くなっていた。従って、Bで示す時には、波が塩分計設置地点の水平方向近くまで遡上していたため、前浜から海水が透水層に浸透し、浸透水の塩分濃度が高くなったものと考えられる。

塩分計設置地点を越えて波が遡上する荒天時には、海水の浸透流量が増え、浸透水の濃度は高くなるはずである。しかし、このような時には降雨を伴うことが多く、浸透水の濃度は、砂浜背後からの降雨によって増量した地下水によって希釈されるため低くなっている。

4. 透水層内外の栄養塩濃度の季節変化

砂層中のバクテリアによる海水の浄化を検討する観点から、今回の採水は波の遡上が高いレベルまでおよぶ条件の時(図-5中の○印)に行った。分析した10回の結果を採水日、採水地点、各栄養塩毎に平均値を求め、栄養濃度の季節変化を調べた。

図-7は、アンモニウム塩濃度の変化を示している。海水の濃度は、1995年11月から3月、1997年1、2月に高

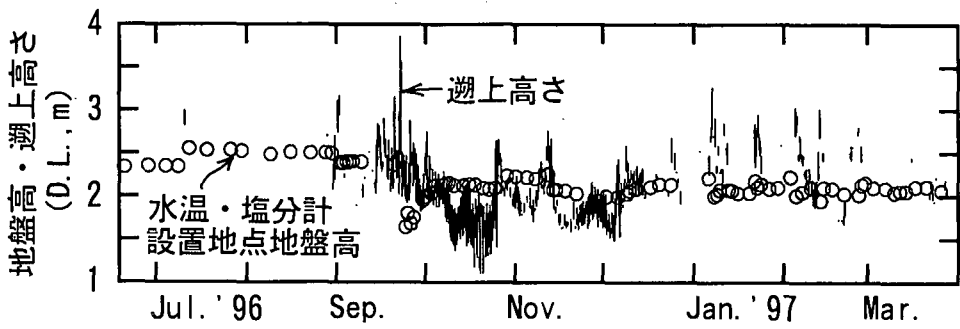


図-3 波の遡上高さ、水温・塩分計設置地点地盤高の変化

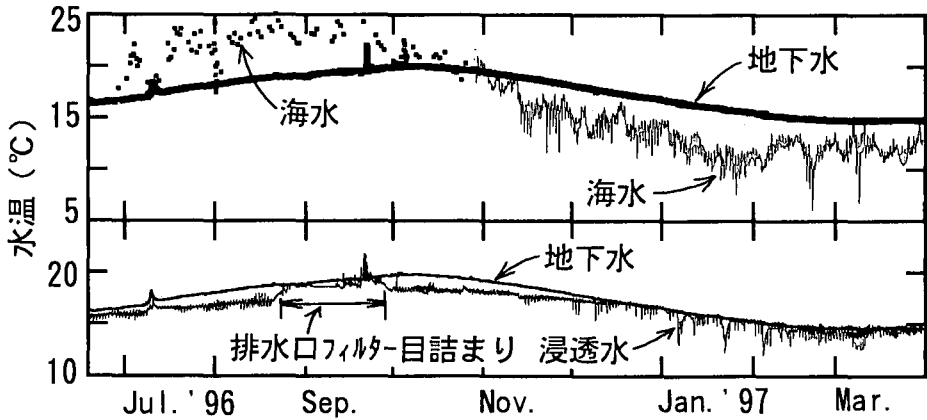


図-4 水温の変化

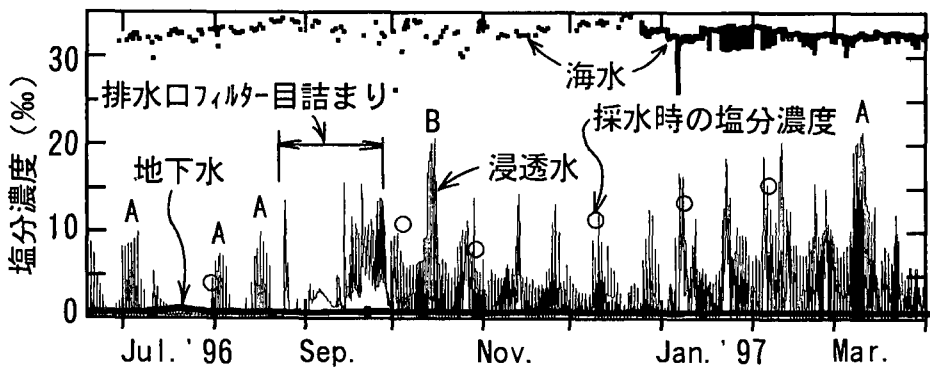


図-5 塩分濃度の変化

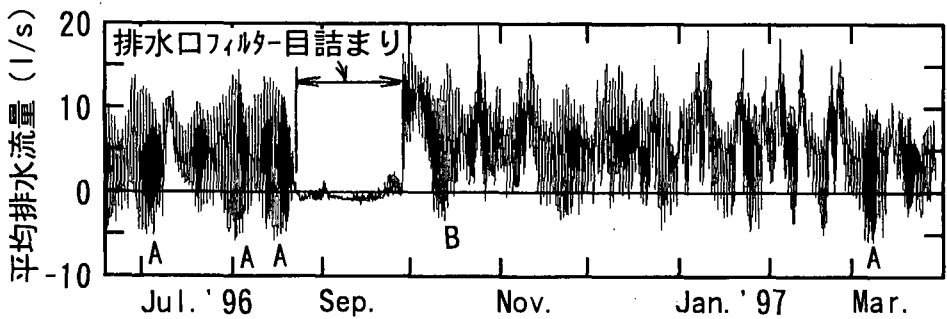


図-6 排水流量の変化

く1996年8月から12月は低くなっている。冬期にアンモニウム塩濃度が高いのは、汀線付近の海水の流動に関係しているものと考えられる。そこで、HORSで測定した沿岸流とアンモニウム塩濃度の関係について調べた。

図-8は、採水日から4～5日前までの沿岸流速ベクトルを示したものである。図-7と対比すると、沿岸の流れが銚子方向（南下流）に向かっている時に海水のアンモニウム塩濃度が高いことがわかる。

一般に親潮の栄養塩濃度は高いため、南下流によって調査海域まで運ばれた可能性がある。足立（1995）は、HORSの汀線付近他の調査によって、HORSの鹿島側300 mにある小水路から海域への栄養塩の供給が大きい時があることを指摘している。従って、このような小水路からの高濃度の排水と南下流が重なった場合にも海水の濃度は高くなると考えられる。一方、夏から秋に海水のアンモニウム塩濃度が低いのは、植物プランクトンの活性が高く、アンモニウム塩がプランクトンに吸収されたことも原因の一つと考えられる。

地下水および浸透水のアンモニウム塩濃度は、全て1 μM 以下であり、両地点とも季節変化は見られない。海水の濃度が高い時でも、浸透水の濃度は低く保たれていることが分かる。この海水と浸透水の濃度の違いが砂層中を海水が通過する際の水質浄化効果を示している。冬期に水質浄化効果が明確に現れているのは、図-4に示した浸透水の水温が冬期でも15°C前後であり、バクテリアの活性が保たれるためと考えられる。

図-9は、アンモニウム塩の酸化により生成された亜硝酸塩濃度を上段に、亜硝酸塩の酸化により生成された硝酸塩の濃度変化を下段に示している。

亜硝酸塩濃度は調査期間中、各採水地点とも他の栄養塩に比べ低い（縦軸の目盛りに注意）。

海水の硝酸塩濃度は、全て10 μM 以下である。地下水の濃度は、60～230 μM の範囲で変化している。浸透水の濃度は、30～75 μM の範囲にある。地下水、浸透水の硝酸塩濃度は、アンモニウム塩（1 μM ）、亜硝酸塩（1 μM ）にくらべ非常に高くなっている。これは、砂浜背後から酸化した硝酸塩が供給されていることを示している。

図-10は、リン酸塩濃度の変化を示している。海水と地下水のリン酸塩濃度は1 μM 以下である。しかし、浸透水の濃度は、常に海水、地下水よりも高く1～3.5 μM の範囲にある。浸透水のリン酸塩濃度が高いのは、砂層内で、海水に含まれる有機物がリン酸塩に変化したためと考えられる。

浸透水のリン酸塩が増える変化は当海域にとって望ましい変化と考えられる。というのは、当海域のリン酸塩濃度は年間を通じて低く、リン酸塩の濃度が低いことが植物プランクトン生産の制限因子となっている可能性を

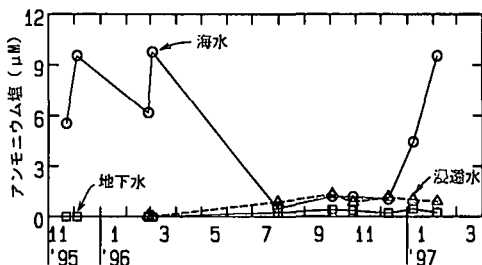


図-7 アンモニウム塩濃度の変化

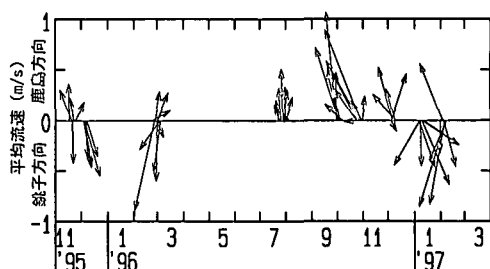


図-8 沿岸流速の変化

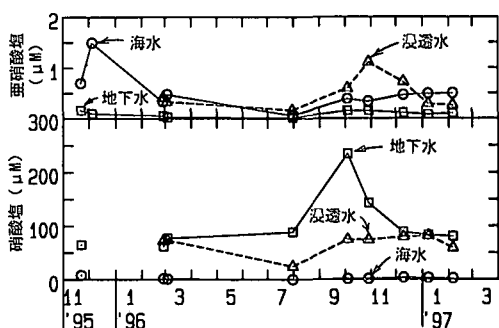


図-9 亜硝酸塩、硝酸塩濃度の変化

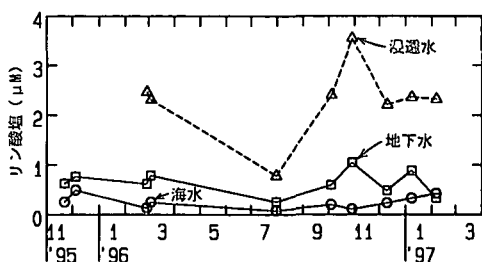


図-10 リン酸塩濃度の変化

足立（1995）が指摘しているからである。

5. 透水層による海水浄化効果の検討

図-11, 12は海水のアンモニウム塩濃度が高かった1997年2月6日～7日の分析結果のうちアンモニウム

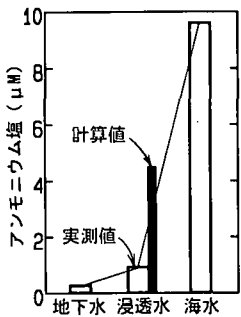


図-11 アンモニウム塩濃度の変化
(1997年2月6～7日)

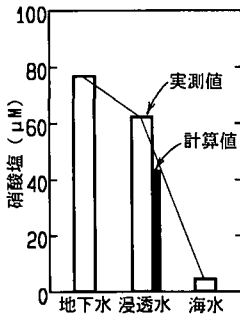


図-12 硝酸塩濃度の変化
(1997年2月6～7日)

塩と硝酸塩について採水地点毎に平均した値を示したものである(縦軸の目盛りの違いに注意)。図中の黒棒グラフは、海水と地下水が単純に混合した時の浸透水濃度の計算値を示している。この計算は次のように行った。まず、バクテリアによって砂層内で濃度が変化しない透水層内の塩分濃度から海水と地下水の混合割合を推定した。次に、得られた混合割合に基づいて海水と地下水が混合した場合の透水層内のアンモニウム塩と硝酸塩濃度を計算した。

地下水は硝酸塩濃度が高く、海水はアンモニウム塩濃度が高くなっている。

浸透水のアンモニウム塩濃度と硝酸塩濃度は、地下水と海水の濃度の間にあるものの、実測値は、計算値に比べ、アンモニウム塩が、 $1/4$ に減少($-3.5 \mu\text{M}$)し、硝酸塩が 1.5 倍に増加($+19.3 \mu\text{M}$)していて、海水と地下水が単純に混合した計算値とは異なっている。

アンモニウム塩が減少し、硝酸塩が増加する変化は、海水が砂層を通過する際に、砂層内のバクテリアによって海水中のアンモニウム塩が酸化され、亜硝酸をへて硝酸塩に変化したためと考えられる。高濃度のアンモニウム塩は、魚類にとって害となるのでアンモニウム塩が減少するのは望ましい変化である。

アンモニウム塩の除去量は、浸透水の計算濃度と実測濃度の差(つまり、海水の浄化割合)に浸透海水流量を掛け合わせることで求められる。この時の浄化割合($-3.5 \mu\text{M}$)、浸透流量($3.1 \text{ m}^3/\text{m/h}$)を用いて計算すると、アンモニウム塩の除去量は、沿岸方向単位幅(m)当たり、単位時間(h)当たり 0.2 g になった。

自然海浜における海水の浸透流量は、浸透流数値シミュレーションによって、 $0.2 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{m/h}$ と計算されている(柳嶋ら, 1990)。この値は透水層を埋設した時の

浸透流量の $1/10$ である。自然海浜における浄化割合を透水層を埋設した場合の値と同一と仮定すると、透水層は自然海浜の約 10 倍のアンモニウム塩除去能力を有していることになる。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

① 汀線付近の海水は、南下流の時にアンモニウム塩濃度が高くなるが、他の栄養塩は年間を通じ低い。

② 砂浜背後からの地下水は、年間を通じ硝酸塩濃度が高く、他の栄養塩濃度は低い。

③ 海水のアンモニウム塩濃度が高い時に透水層内の浸透水のアンモニウム塩は減少し、硝酸塩は増加する。これはバクテリアによる酸化作用、つまり海水の浄化を示し、アンモニウム塩の除去量は、 0.2 g/m/h である。この値は、自然海浜の場合の 10 倍に相当する。

④ 透水層の埋設は、硝酸塩、リン酸塩の海域への供給量を増加させる。

最後に、本調査は、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所、(株)テトラ、日鐵建材工業(株)および当所の共同研究で実施したものである。栄養塩の分析に際しては、水産庁水産工学研究所の足立久美子研究官に多大なる協力を得るとともに、とりまとめにあたり有益な助言をいただいた。当所での栄養塩の分析に当たっては、海水浄化研究室三好英一研究官および江口菜穂子研究員の協力を得た。鹿島港の波浪データの使用に当たっては、鹿島港湾工事事務所、当所海象調査研究室のご協力をいただいた。雨量データは、鹿島港湾工事事務所、銚子地方気象台から提供していただいた。ここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 足立久美子 (1995): 鹿島灘碎波帯における植物プランクトン量の分布・変動、シンポジウム—砂浜海岸の生態系と物理環境、水産工学研究所集録, No. 1, pp. 57-62.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食、長周期波に注目した現地観測、海岸工学論文集, 第42巻, pp. 354-358.
- 柳嶋慎一・加藤一正・天坂勇治・名城 整・望月徳雄 (1995): 現地海岸に埋設した透水層の排水流量と前浜地形変化、海岸工学論文集, 第42巻, pp. 726-730.
- 柳嶋慎一・加藤一正・村上裕幸 (1990): バーム形成に関する現地調査、海岸工学論文集, 第37巻, pp. 359-363.
- 柳嶋慎一・金澤 寛・平井宜典・加藤一正・望月徳雄 (1996): ストライプ状透水層の前浜地形変化に及ぼす三次元的効果、海岸工学論文集, 第43巻, pp. 661-665.