

越波造流型海水交換防波堤の開発とその水理特性

下迫健一郎* ・近藤充隆**・藤堂ひろみ***
福井正幸****・高橋重雄*****

1. まえがき

閉鎖性の湾内で、特に湾口に防波堤がある場合、防波堤によって港外側と港内側の海水交換が阻害されるため、水質低下が問題となることがある。こうした港内の水質低下への対策として、これまでにいくつかの海水交換防波堤が開発されてきた(岡本ら, 1985; 道下ら, 1988; 柳瀬ら, 1991; 猿川ら, 1993; 塩崎ら, 1996; 高橋, 1997; 川嶋ら, 1999)。従来の海水交換防波堤の多くは、堤体の一部に開口部を設けて通水性を確保するタイプ(通水型)であり、開口部に生じる海水の動きは港外側と港内側との往復流となる。したがって、波による海水交換の効果は堤体付近のみに限定され、港内全体の水質低下を防ぐのには不十分であった。

一方、通常の防波堤でも、高波浪時には越波によってかなりの流量が港内側へ送り込まれており、港内の水質維持に貢献している場合も少なくない。ただし、越波が多くなると波高伝達率も大きくなり、防波堤本来の目的である港内静穏度の確保が困難になる。そこで、本研究では、港内静穏度を確保しつつ、越波を利用して港内側への一方向流をつくり海水交換を行う新しい海水交換防波堤を開発し、その基本特性について検討した。

2. 越波造流型海水交換防波堤の構造

2.1 基本型

図-1 は、越波造流型海水交換防波堤の概念図である。堤体上部に貯水部を有し、送水管を通じて港内側へ越波水を送り込む構造となっている。堤体の港外側は、越波を促進するため斜面壁となっている。斜面壁の天端を低くすることにより、比較的波高の小さいときでも港内側へ新鮮な海水を送り込むことができる。また、港内側の

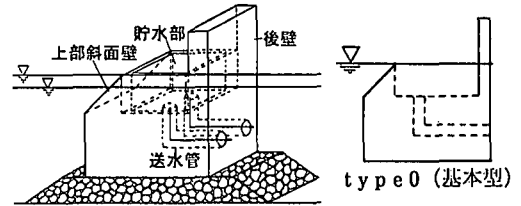


図-1 越波造流型海水交換防波堤の概念図

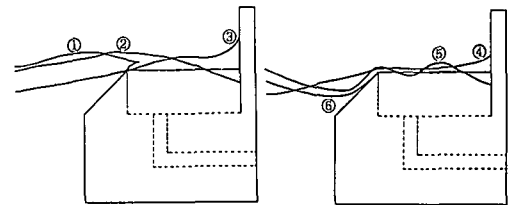


図-2 波作用時の海水交換のメカニズム

堤体後壁は、越波水が港内側へ直接落下するのを防いでおり、後壁を高くすることによって、後壁からの越波による港内側への波高伝達率を小さくすることが可能である。また、送水管から放出される水が港内静穏度に与える影響を少なくするため、排出口は港内側の堤体下部に設けている。本報告では、図-1 に示した形状を基本型(type 0)と呼ぶことにする。

図-2 は、波作用時の海水交換のメカニズムを模式的に示したものである。港外側の斜面壁を越波した波によって貯水部上の水位が上昇し、港内側との水位差が生じる。この水頭差によって、越波水が送水管を通じて港内側へ放出される。引き波時に港外側の水位が低下しても、斜面部の天端が港内側水位より低くない限り、海水が港外側へ逆流することはなく、港外側から港内側への一方向流を作り出すことができる。

従来の海水交換防波堤では、潮位によって海水交換量が大きく変化したり、波高の大きいときにしか海水交換されないものも多く、川嶋ら(1999)は浮体構造を利用して潮位変動への対策を講じている。これに対して本防波堤では、基本的に斜面天端を平均海面 MSL 程度とすることにより、後述するように、LWL から HWL まで潮

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
 ** 運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室
 *** 運輸省第三港湾建設局 大阪港湾空港工事事務所 (前 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室)
 **** (株)沿岸環境開発資源利用センター (前 運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室長)
 ***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長

位に関係なく、しかも波高が小さいときでも十分な海水交換を行えることが特長である。

2.2 断面形状改良型

基本型の場合、斜面壁天端を低くして後壁天端を高くすると、後壁に比較的大きな波力が作用することになる。そこで、後壁への波の作用を弱めることや反射波の低減などを目的として、断面形状を改良し、斜面部や貯水部にスリットを設けた構造などについても検討を行った。これらを断面形状改良型と呼ぶことにする。

図-3は、今回検討した種々の断面形状を示したものである。type 1は斜面壁前面にスリット壁を設けたもので、主に反射波の低減を目的としている。type 2は斜面壁後側にスリット壁を設けたもので、後壁へ作用する波力を低減させることが主な目的である。type 3は斜面壁から16cm離れたところにスリット壁を設けたもので、貯水部に入った水が再び港外側へ流出するのを抑制して効率よく送水させること、および後壁への波力の低減を目的としている。type 4は後壁を前に出すことで貯水部の奥行きを基本型のほぼ半分にしたもので、貯水部の大きさによる送水量の変化を調べることを目的としている。

2.3 平面配置改良型

現地において海水交換防波堤を設置する場合、必要とされる海水交換量によっては、必ずしもすべての防波堤を海水交換防波堤とする必要はなく、数箇所おきに設置すればよいケースも考えられる。著者の一人らは、直立消波ケーソンを防波堤の法線方向に部分的に、しかも前面から後退させて配置することにより、消波性能を向上させる方法について研究を行っている(高橋ら1989)。これは、平面的な凹部での波浪の共振現象によって、波のエネルギーが平面的に集まる性質(共振集波効果)を利用

したものである。今回の研究では、海水交換防波堤における共振集波効果についても検討している。すなわち、共振集波効果によって生じる海水交換防波堤前面での波高増大による海水交換効率の変化を調べた。

図-4は、共振集波効果を利用するために平面配置を改良したtype 5の形状を示したものである。通常の直立堤の間に海水交換防波堤を配置し、前面を直立堤の前面から波長の約10%(周期1.0sで14.4cm, 1.4sで23.4cm)港内側へ後退させている。また、水路幅全体に対して海水交換防波堤部分の占める割合は約46%である。さらに、直立堤の天端は斜面壁の天端よりも5cm高くなっている。

3. 実験方法

3.1 水路と模型

実験は、港湾技術研究所の小型造波水路(長さ36m, 幅48cm)で行った。図-5は、実験における堤体の断面を示したものである。通常の防波堤では捨石マウンドの上にケーソンを設置するが、今回の実験ではマウンド透過波の影響を避けるため、水路上の砂地盤の上に直接ケーソン模型を設置した。ケーソンはアクリル製で、内部および前後に重錘を設置して、動かないよう固定した。ケーソンの形状は幅50cm(模型縮尺を1/40とした場合、現地量で20m)、高さ37.5cm(15m)、貯水部の奥行き32.5cm(13m)、送水管の内径φ4cm(1.6m)で

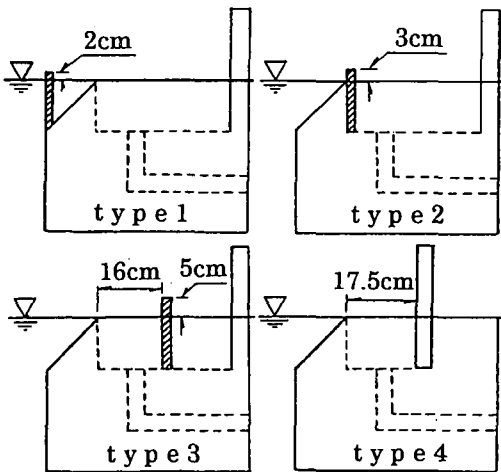


図-3 断面形状改良型

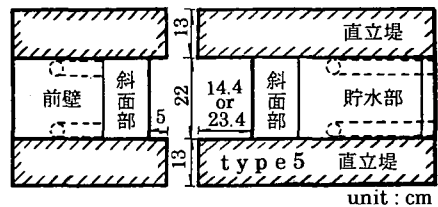


図-4 平面配置改良型

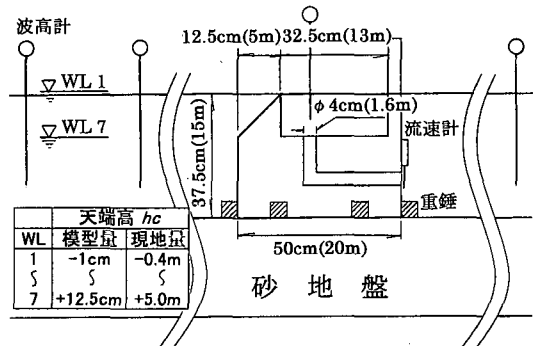


図-5 実験断面図

表一 実験波と実験ケース

波の種類	周期	波高	天端高さ	実験ケース
規則波	$T=6.3, 8.9, 12.6$ s	$H=0.4\sim 3.6$ m ($H=1.0\sim 9.0$ cm)	$h_c=-0.4\sim 5.0$ m ($h_c=-1.0\sim 12.0$ cm)	type 0 type 2
	$T_{1/3}=6.3, 8.9$ s ($T_{1/3}=1.0, 1.4$ s)	$H_{1/3}=0.6\sim 3.6$ m ($H_{1/3}=1.5\sim 9.0$ cm)	$h_c=0\sim 1.4$ m ($h_c=0\sim 3.5$ cm)	type 0~5

(): 模型値

ある。本論文においてはこれ以降、実験結果等はすべて現地量で表すものとする。なお、今回の実験では後壁からの越波を完全に防ぐために後壁の天端を極端に高くしているが、現地に適用する場合には、波浪条件や許容される波高伝達率によって適当な高さに設定すればよい。

3.2 実験波と実験ケース

実験波については、表一に示すように規則波と不規則波の両方を用いた。周期 T (不規則波では有義波周期 $T_{1/3}$)は6.3s, 8.9s, 12.6sの3種類とし、それぞれについて、波高 H (不規則波では有義波高 $H_{1/3}$)を0.4~3.6m程度まで変化させた。また、斜面壁の天端高 h_c と送水量 Q の関係を調べるため、 h_c が+5.0mから-0.4mとなる範囲で、水深(潮位)を最大で7段階に変化させている。ただし、できるだけ送水量を多くすることが目的であるので、実験は天端高の低いケース ($h_c=+1.4$ m~0m)を中心に行った。また、周期についても、12.6sの実験波は規則波の一部のケースでのみ用いた。

3.3 実験方法

実験では、図一五に示すように、ケーソン前面および貯水部内に波高計を設置し、水位の変化を測定した。また、送水管排出口の近くに電磁流速計を設置し、放出される水の流速を測定した。さらに、不規則波実験では、港外側と港内側にもそれぞれ波高計を設置し、反射率および波高伝達率を測定した。

送水量は、送水管排出口における流速を用いて計算した。ただし、単に流速に送水管の断面積を乗じただけでは正確な流量は求められない。そこで、ポンプを用いて一定の流量を貯水部に送り込み、排出口における流速と流量の関係をあらかじめ求めておき、この結果を用いて波作用時の送水量を計算した。なお、規則波の実験において越波量が非常に少ない場合については、貯水部底面にある送水管の穴をふさぎ、貯水部に貯まった水の体積を直接計測して送水量を求めている。

4. 越波量の実験結果

4.1 基本型

図一六は、基本型に関して、規則波で $T=8.9$ sの場合について、斜面壁天端高の違いによる送水量の変化を示したもので、縦軸には単位時間単位幅当たりの送水量 Q 、横軸には波高 H をとっている。一般に天端が低いときほど越波量は多く、 $h_c=0.4$ mおよび-0.4mのケースで

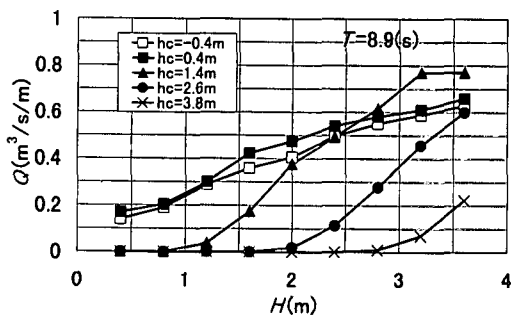
は、波高が小さい場合でも多くの送水量が期待できることがわかる。このときの送水量は、静水面上の波の体積 $Q_0 (=HL/2\pi)$ に対して、ほぼ10~25%に相当し、波高が小さいときほどこの割合は高い。なお、波高が大きい場合には、 $h_c=0.4$ mおよび-0.4mのケースよりも、むしろ $h_c=1.4$ mのケースのほうが送水量は多くなっている。これは、天端が極端に低いと、斜面壁を越波した水の一部が再び港外側へ流出してしまうためである。ここには示していないが、 $T=6.3$ sおよび12.7sの場合についても、ほぼ同じような結果であり、周期の違いによる送水量の差はほとんどなかった。

図一七は、不規則波による送水量について、図一六と同様に示したもので、横軸には有義波高 $H_{1/3}$ をとっている。図一六と比較すると、全体的な傾向は規則波の場合とほぼ同じであることがわかる。なお、周期の違いによる送水量の差については、全体的に $T_{1/3}=6.3$ sのほうが $T_{1/3}=8.9$ sに比べてわずかに大きいものの、天端高の影響に比べると周期の影響は小さいことがわかる。

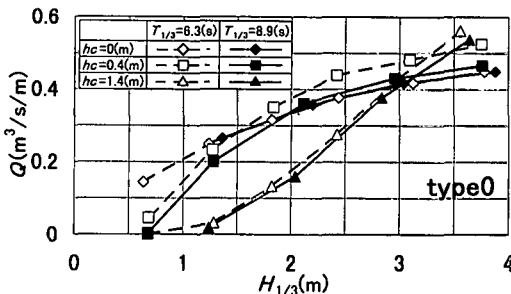
4.2 断面形状改良型

図一八は、不規則波 $T_{1/3}=6.3$ sにおけるtype 1~4の送水量 Q を、 $h_c=1.4$ m, 0.4mおよび0mの各天端高ごとに示したものである。

type 1については、どの潮位の場合にも、他の断面に較べて送水量が少なくなっている。これは、スリット壁



図一六 基本型における天端高と送水量 (規則波)



図一七 基本型における天端高と送水量 (不規則波)

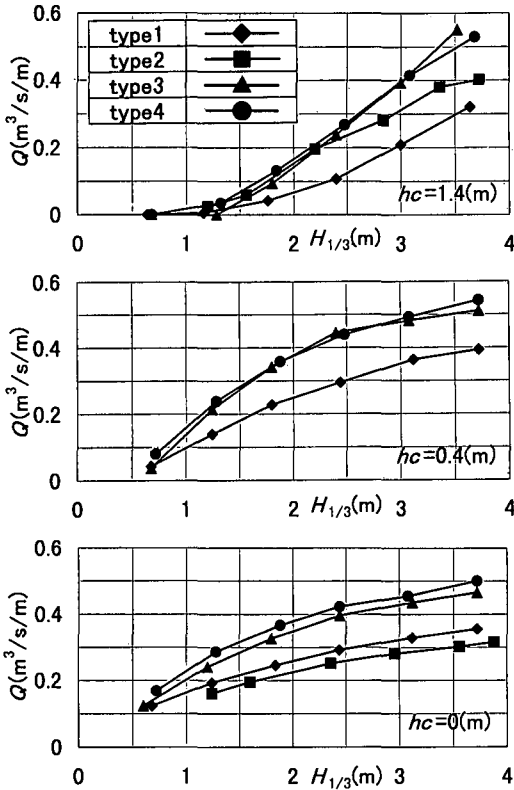


図-8 断面形状改良型における送水量 (不規則波)

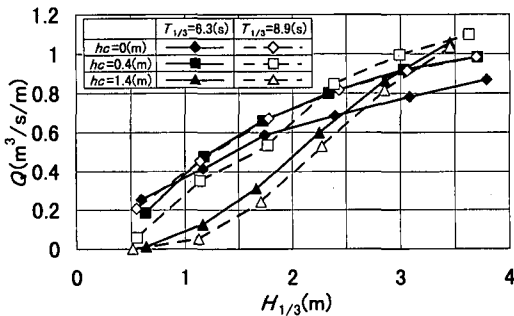


図-9 平面配置改良型における送水量 (不規則波)

を斜面部前面に取り付けたことによって、貯水部への波の進入が遮られたためと考えられる。

type 2 については、潮位の高い $h_c=0$ m のときには送水量はもっとも少ないが、潮位の低い $h_c=1.4$ m で波高が小さいときには、他の type とほぼ同じ送水量となっている。これは潮位の高いときには波の大部分が斜面の上を越えて直接越波するため、波の一部がスリットに当たって跳ね返され、貯水部への流入量が減少するのに対して、潮位が低いときには斜面を遡上するような形で越波してくるので、スリットによる流入量の減少が比較的

小さいためと考えられる。

type 3 では、どの潮位でも送水量が多くなっている。これはスリット壁によって貯水部内の水面の振動が少なくなり、港外側への流出が減少したためと考えられる。また、スリット壁の後ろに一時的に貯まった水が、引き波時に水位の低くなったスリット壁前側へ流れ込むため、送水管付近の水位が常に高い状態が保たれたことも、送水量が多い理由の一つと考えられる。

type 4 については、貯水部が小さいにもかかわらず、type 3 と同じ程度の送水量であり、特に $h_c=0$ m のときには type 3 よりも送水量が多くなっている。これは、今回の構造では送水管の径が十分大きく、貯水部に入った水は直ちに送水管から排出されるため、貯水部の小さいほうが水位の高い状態を保持しやすくなり、効率的な送水ができたものと考えられる。

4.3 平面配置改良型

図-9 は共振集波効果を利用した type 5 の送水量を示したもので、 $T_{1/3}=6.3$ s、 $H_{1/3}=0.6\sim 3.6$ m のときの結果である。なお、送水量 Q については、水路幅全体ではなく海水交換防波堤部分のみの単位幅当たりの量で表している。共振集波効果によって前面水位が上昇するため送水量はかなり多く、平均的には基本型の2倍近くになっている。海水交換防波堤部分の水路幅全体に占める割合は約46%であるから、水路幅全体で考えた単位幅当たりの送水量でも、基本型の8~9割程度になる。すなわち、通常の混成堤と1箇おきに配置しても、共振集波効果のために全体の送水量はあまり低下せず、極めて効率的な海水交換が可能であることがわかる。

5. 反射率の実験結果

図-10 は、 $T_{1/3}=6.3$ s における反射率について、type 0 と type 1 を比較したものである。type 1 のほうが全体的に反射率がかなり低くなっており、波高が小さいときには基本型の約半分になっている。ただし、潮位が高く波高の大きいときには基本型とほぼ同じか、逆に基本型

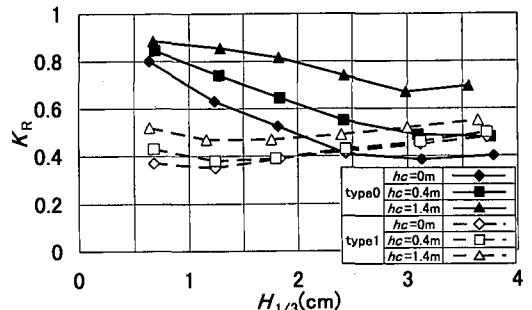


図-10 反射率の比較

表—2 現地における海水交換量の検討

模型実験の想定縮尺	1/40			1/25	
水深 h (m)	15.0			9.4	
防波堤の構造	海水交換防波堤 (基本型)		混成堤	海水交換防波堤 (基本型)	
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	1.0	3.8	3.8	0.63	1.0
平均送水量 Q ($m^3/s/m$)	0.21	0.45	0.10	0.10	0.14
湾内の水をすべて交換するに要する時間(時間)	19.8	9.3	41.7	26.1	18.7

※湾の奥行きは1000mと仮定する。また、混成堤では送水量は越波量を意味する。

よりも反射率が高くなっている。これは潮位の低いときや、潮位が高くて波高が小さいときには、入射してきた波がスリット壁を通過するため、その消波効果によって反射率は落ちるのに対して、潮位が高く波高も大きいときには、波がスリット壁の上を越波していくのでスリットによる効果がほとんどなくなるためと考えられる。なお、ここには示していないが、type 1以外の断面形状改良型については、あまり反射率は低下せず、基本型と同じ程度であった。また、共振集波効果を利用したtype 5については、かなり消波効果があり、特に $T_{1/3}=8.9$ s についてはtype 1よりも反射率が小さくなった。

6. 現地への適応性

これまで述べたように、本防波堤の特長は、潮位に関係なく、比較的波高の小さいときでも海水交換を行えることである。たとえば、図—2より、斜面壁天端高が±0.4mの範囲では、送水量は天端高による違いは少なく、また、波高が小さい場合でもかなりの海水交換が可能であることがわかる。すなわち、斜面天端高をMSL程度とすることによって、LWLからHWLまでどのような潮位でも、コンスタントに海水交換を行うことができ、トータルの海水交換量も極めて多くなると考えられる。

ここで、湾内の水をすべて交換するのにどのくらいの波高とその継続時間が必要かについて検討を行った。表—2はその結果をまとめたものである。たとえば湾内の平均水深を15m、奥行きを1000mと仮定して断面的に考える。このとき、図—7より、基本型における有義波高1mのときの平均送水量を $0.21 m^3/s/m$ とすると、1mの波が約1日続けば、湾内の水がすべて交換されることになる。参考のため、同じ条件で設計有義波高を3.8mと仮定し、天端高を有義波高の0.6倍とした通常の直立堤(混成堤)における越波流量を、合田ら(1975)の算定図を用いて計算すると、設計波相当の3.8mの波でも

平均越波流量は $0.1 m^3/s/m$ に過ぎない。このことから、本防波堤の海水交換能力が極めて高いことがわかる。

一方、水深の浅い場所への適用を考える場合、今回の実験の想定縮尺を変えることで検討できる。たとえば、縮尺を1/25と考えると水深は約9.4mとなる。この場合の送水量は、水深15mの場合に比べて $(25/40)^{1.5}=0.494$ 倍、すなわちほぼ半分となる。ただし、波高も縮尺に応じて小さくなるため、有義波高は0.63mでこれだけの送水量が得られることになる。ちなみに、水深15mの場合と同様に有義波高1mで考えると、平均送水量は $0.14 m^3/s/m$ 程度となり、やはり1日以内で湾内の水がすべて交換されることになる。

このように、本防波堤は基本型でも極めて高い海水交換能力を有しており、さらに、既に述べたように、貯水部や斜面部前面にスリット壁を設けたり、共振集波効果を利用することによって、海水交換効率を一層高めたり、反射率を低下させることができる。また、共振集波効果を利用して本防波堤を部分的に配置することにより、建設コストの縮減を図ることも可能である。

参考文献

- 岡本 博・森下敏夫 (1985): 海水交換機能を持つ弁式有孔堤について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 540-544.
- 川嶋直人・中村昭男・早瀬松一 (1999): 潮位変動を考慮した海水交換型防波堤の開発, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 427-432.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1990): 不規則波による防波堤岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告, 14巻4号, pp. 3-44.
- 猿川 弦・水野雄三・笹島隆彦・木村克俊・高橋哲実 (1993): 消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 971-975.
- 塩崎禎郎・磯崎総一郎・中村 滋・堀内 博 (1996): 海水交換機能を有する透過型スリットケーソンの水理特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1226-1230.
- 高橋重雄・木村克俊・田中 智 (1989): 共振集波効果を応用した直立消波ケーソンの原理と水理特性, 港研報告, 28巻3号, pp. 3-28.
- 高橋重雄 (1997): 新構造防波堤とその設計, 水工学に関する夏期研修会講義集Bコース, 土木学会海岸工学委員会, pp. 1-20 (97-B-5).
- 道下 照・国栖広志・葛原 徹 (1988): 鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換防波堤の水理特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 577-581.
- 柳瀬知之・谷野賢二・水野雄三・梅沢信敏・桑原伸司 (1991): 有孔堤の海水交換機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 856-860.