

透過性浮消波堤の構造と消波効果

服部 昌太郎*・波木 守**・高橋 孝雄**

1. ま え が き

浮遊式消波構造物は、マリーナや人工漁場などの外郭施設として、また港湾・海岸での海上工事用の消波施設として、近年数多く使用される傾向がみられる。このため、これまで種々の形式の浮遊式消波構造物の開発がなされ、それらの消波効果に対する理論的考察や実験結果が発表されている。

従来の浮遊式消波堤または防波堤の研究で、実験の対象となった構造形式は、堤体が(1)剛構造のもの¹⁾と、(2)可撓性スラブのものに大別することができる²⁾。

(1)の形式に属するものとしては、筏型やポンツーン型²⁾のように堤体が比較的単純な形状と構造であるものや、あるいは Brebner ら³⁾、Chen ら⁴⁾が考案したような、複雑な形状と構造および消波機構を備えた剛構造の浮体によって、波による水面運動をおさえるものがある。また、消波機構として、水面および水中での流体運動と浮体運動との間の位相差や、多孔板、スリット、パイプなどによってエネルギーの消散をはかる形式の浮防波堤もある^{5),6)}。

(2)の形式の浮防波堤としては、水面上に浮遊する可撓性スラブ状の袋の中に、水または空気を入れて堤体としたものが提案されている^{7),8),9),10)}。わが国では、高分子系のシートや網を利用した浮消波工が、人工漁場の造成に際して使用され、また実物実験が行なわれている¹¹⁾。

浮遊式消波構造物の固定方法として、従来は各種のアンカーと係留索とによる係留固定とピアによる固定とが考えられていた。しかし、アンカーによる堤体の係留固定方式では、アンカーの引抜き抵抗力、係留索の力学的挙動などについて、まだ十分な解明がなされていず、若干の基礎的研究が見られるに過ぎない^{12),13),14)}。したがって、浮遊式消波構造物の研究では、消波効果に比べて堤体の係留固定に関する検討が、非常に立遅れているといえる。

以上の理由より、これまで提案された浮遊式防波堤の多くのものは、いずれもその係留固定機構に問題があるため、実用化が困難なように思われる。

そこで、本報では、水深が8~15 m までの比較的浅く、しかも外海よりの襲来波の影響をある程度受けるような水域に設置することを前提とした、浮消波堤の一形式を提案し、その構造と材料およびその消波効果について報告する。

2. 浮消波堤の構造

上記のような理由から、浮遊式構造物、特に浮防波堤では、アンカーと係留索による係留固定方式は、十分な信頼度をもって使用することができない。

そこで、本報では、浮遊堤体をケーブルワイヤと海底に固定した中空三角ピアとによって固定する方式の浮消波堤を提案する。提案する浮消波堤の概略は図-1に示

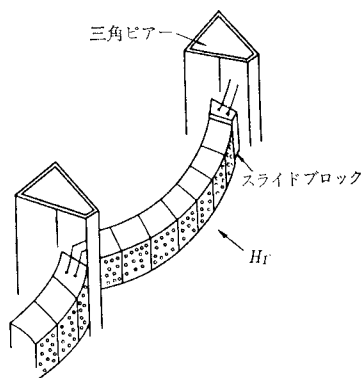


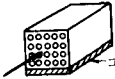
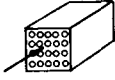
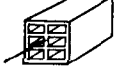
図-1 ピア・スライド固定方式浮消波堤の構造

すように、消波堤体は上下自在のスライドブロックをかいいて、テンションローブによって、アーチ状に中空三角ピアに定着される。このような構造では、堤体自体が浮力によって浮き、堤体比重を適当に調節することによって、所用の吃水深を保持しうのような材料が必要となる。図-1では、浮消波堤の堤体としては、堤体に働く波力を減少させるため、多孔ブロックを考えているが、いろいろな形式の堤体形状および構造のものを使用することができる。そして、この堤体構造では、波力は主としてアーチ状に連絡される多孔ブロックの圧縮力で分担し、波による海面の上下運動に起因する堤体の変動浮力は、テンションローブによって分担させるように考案してある。

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 株式会社開発機構

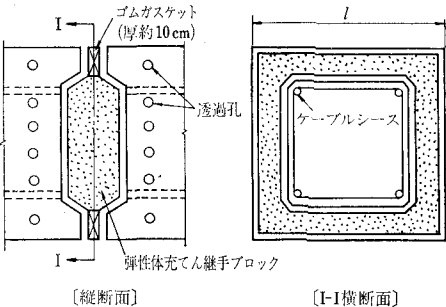
表—1 浮消波堤の部材構成

部 材 構 成	材 料	特 長		
		間 げ き 率	浮 遊 安 定 性	耐 久 性
A 	スチロフォーム (比重 0.02) セメントコンクリート (比重 2.30)	25%以下が有利	重力不足で重揺し易い	表面コート必要
B 	スチロフォーム混入・モルタル (比重 0.4~1.0)	同 上	適 当	同 上
C 	軽量パネル・接着合成 (比重 1.0 以下)	75%以上が有利	別にフロート必要	同 上

表—2 スチロフォーム混入モルタルの物性

物 性	
比 重 (ρ)	0.4~1.0
吸 水 率 *	10% Vol.
圧 縮 強 度 σ _c	15~60 kg/cm ²
曲 げ 強 度 σ _b	4~15 kg/cm ²
せん断強度 τ	4~15 kg/cm ²
ヤング率	10 ⁴ ~10 ⁵ kg/cm ²
耐 久 性	セメントペーストの劣化による強度低下があるが配合の改善で防止する。

* 吸水率は比重に関係しない



図—2 堤体ブロック連結構造の一例

このような構造の浮消波堤では、堤体ブロックは海中にはば固定されると考えられることから、カーテン防波堤¹⁵⁾の一形式ともいえる。図—2 は、堤体となる多孔ブロック間の連結機構の一例を示したものであるが、堤体の連結機構はこの他にも種々考えられる。

3. 浮消波堤の堤体材料

浮消波堤の堤体材料としては、堤体が自力で浮遊する条件より、表—1 のような各種のものが考えられる。一般に堤体の間げき率が大きくなるほど、同程度の消波効果をうるに必要とする堤体幅は大きくなり、したがって、消波堤延長当りの所要材料は必ずしも節減できない。

浮消波堤の材料としては、軽量体(スチロフォーム)と重量体(セメントコンクリート)とを分離構成する方法(表—1 A)が、両者を均一分散混合したブロック(表—1 B)に比べて、コスト的にはかなり有利である。しかし、波浪による繰返し荷重、衝撃特性、浮遊時の安定性、耐久性などの点を総合的に評価すると、スチロフォーム混入モルタル製ブロックが、最も有利となる。

表—2 は、この材料の代表的物性の一例を示したもので、この材料はスチロフォームの混入率によって、その比重を広い範囲に選択できる。しかも、この材料の今一

つの特徴は、現場成形が可能であり、また類似の軽量体材料に比べて、吸水率は小さく、耐久性も大きい。このスチロフォーム混入モルタルによる堤体を、レジンモルタルまたは FRP など で表層被覆すれば、かなり高強度のブロックあるいはパネルを作製することができ、また摩耗に対する抵抗力も増大しうる。

4. 消波効果の実験に対する予備的検討

服部¹⁶⁾は、多孔壁式防波堤の透過率に関する理論計算を行ない、多孔壁の透過率は、入射波波形勾配、相対水深、多孔壁の間げき率、孔の直径と流量係数とに関係することを示した。また、従来の潜堤やカーテン防波堤の実験結果を考慮すると、浮消波堤の透過率 K_T は、式(1)のように表わされる。

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} = f_1 \left(\frac{H_I}{L_I}, \frac{h}{L_I}, \frac{d}{h}, \frac{l}{L_I}, \frac{D}{l}, C_\epsilon \right) \cdots (1)$$

ここに、 H : 波高、 L : 波長、 h : 水深、 d : 吃水深、 l : 堤体幅、 D と C : 堤体にあけられた孔の直径と流量係数、 ϵ : 堤体の間げき率である。添字 I, T は、それぞれ入射波と透過波に関する量であることを示す添字である。

堤体にあけられた孔の流量係数は、孔の直径に関する Reynolds 数 ($Re = \bar{U}D/\nu$, ここに $\bar{U}$: 波運動による水粒子の平均速度の水平方向成分、 ν : 水の動粘性係数)

と D/l , および孔の相対粗度 k/D (ここに, k : 絶対粗度), 孔の形状の関数であると考えられる。以上のことを考慮すると式(1)は次のように書き直せる。

$$K_T = f_2\left(\frac{H_I}{L_I}, \frac{h}{L_I}, \frac{d}{h}, \frac{l}{L_I}, \frac{D}{l}, \frac{k}{D}, Re, \varepsilon, \text{shape}\right) \dots\dots\dots (2)$$

本研究では, 実験条件を単純化することと実用上の理由より, 次のような事項を考慮して模型実験を行なう。すなわち, (1) 堤体にあける孔は円断面とし, その内面は水理的に滑面となるよう, ガラス管または塩化ビニル管を利用する。(2) 実験での Reynolds 数の範囲は, $10^4 < Re$ となる実験条件とする。

上記のことから, 本実験では, 式(3)中に含まれる6個の要素と堤体の透過率との関係を検討することとする。

$$K_T = f_3\left(\frac{H_I}{L_I}, \frac{h}{L_I}, \frac{d}{h}, \frac{l}{L_I}, \frac{D}{l}, \varepsilon\right) \dots\dots\dots (3)$$

5. 実験装置と実験方法

実験は, 長さ 50 m, 幅 1.0 m, 高さ 1.0 m の片面ガラス張りの 2 次元波動水槽を使用して行なった。実験設備の一般的な配置は, 図-3 に示される。図-3 に示すように実験水槽の一端にはフラップ式造波装置 (12 HP), また他端には消波堤が置かれている。

すでに述べたように, 消波堤体は海中にほぼ固定に近

表-3 模型堤体形状

Exp. No.	l (cm)	D (cm)	D/l
1	44.5	2.0	0.0450
2	47.5	4.0	0.0842
3	87.2	4.0	0.0459

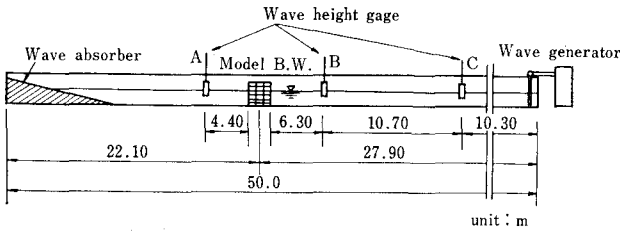


図-3 実験装置の一般的配置

い状態に設置されると考えられるので, 実験では 図-3 に示す位置に模型堤体となる多孔ブロック堤体を, 所定の吃水深となるように固定設置した。実験に使用した多孔ブロックの間げき率は $\varepsilon=0.25$ とし, ブロック幅と孔の直径は 表-3 に示す 3 種類とする。また, 実験を行なった水深は 40 cm, 使用した実験波の周期は 1.55 sec と 2.07 sec の 2 種類である。

入射波および透過波の波高は, 図-3 中の A, C 2 個の電気抵抗式波高計で検出し, ペン書きレクタグラフに記録した。また, 堤体の反射率は波高計 B によって, 堤体前面での水位変動を検出し, Healy の方法によって算出した。

図-4 および 5 は, 堤体への入射波と透過波の波形記録の例を示したものである。この波形記録にも見られるように, 堤体背後の水域に伝達する透過波の波形は, (1) 平均水面上の孔より落下する水流によるじょう乱と, (2) 水中部の孔にとじこめられた空気塊が周期的に放出されることによるじょう乱とによって, 非常に乱れたものとなっている。

一方, 堤体を通過する透過波の周期は, 図-4 と 5 に見られるように, 入射波周期とほとんど同じである。本研究においては, 式(1)にみられるように, 堤体の透過率を透過波高と入射波高との比として定義している。そこで, 実験よりえられる堤体の透過率は, じょう乱を受けた透過波の最大波高を使用して算定することとする。

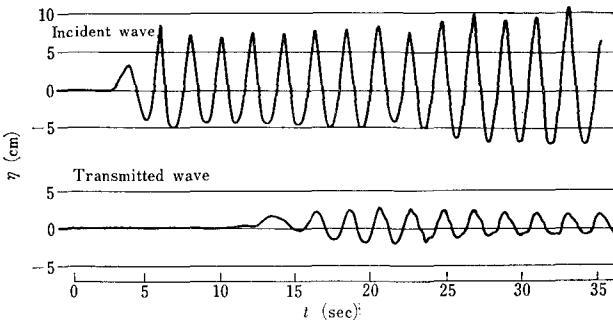


図-4 入射波と透過波の波形記録例 (実験-1, $d/h=0.667$ の場合)

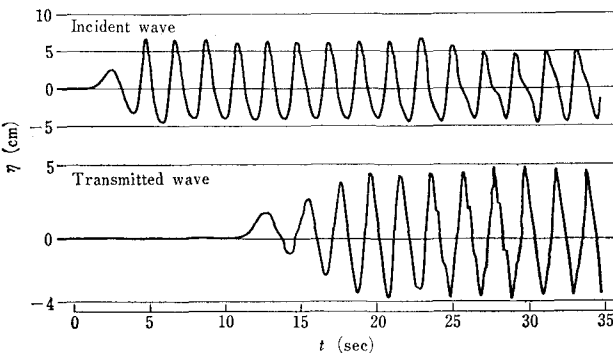


図-5 入射波と透過波の波形記録例 (実験-2, $d/h=0.667$ の場合)

6. 実験結果とその考察

浮消波堤の透過率と入射波の波形勾配との関係を示す実験結果が、図-6～8に示される。これらの実験結果は、堤体の相対吃水深と相対水深とをパラメーターとして示してある。実験結果に見られるように、堤体の透過率は、波形勾配が増大するにつれて減少するという、透過性消波構造物の一般的特性と同一の特性を有することを示している。

堤体にあけられる孔の直径の透過率におよぼす直接的

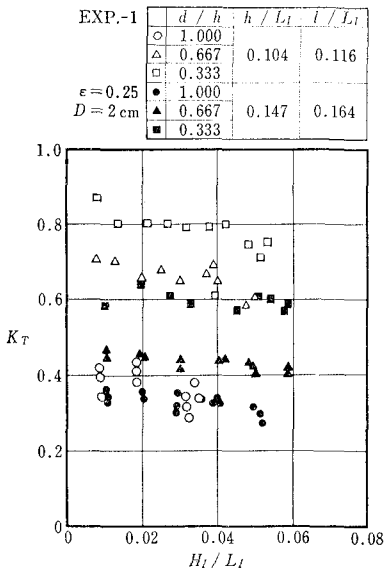


図-6 入射波波形勾配と透過率(実験-1の場合)

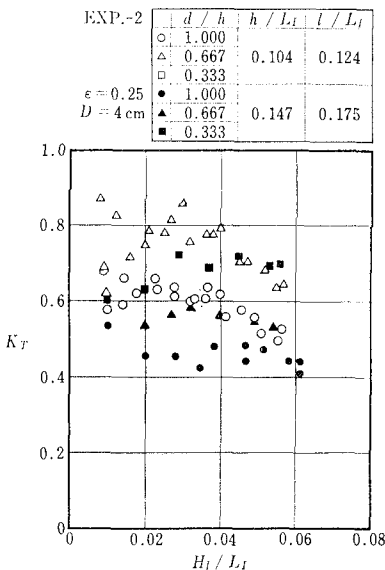


図-7 入射波波形勾配と透過率(実験-2の場合)

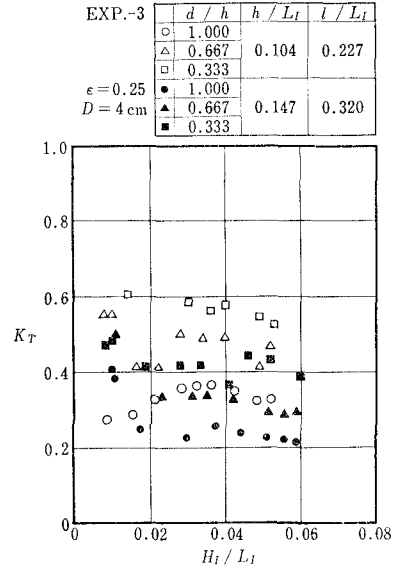


図-8 入射波波形勾配と透過率(実験-3の場合)

な影響は、図-6と7の比較より見ることができる。本実験の結果によると、堤体間げき率が同一であっても、孔の口径が小さくなると透過率が減少することが認められる。多孔堤体の間げき率を一定とする場合には、小口径の孔ほど堤体にあけられる孔の数が多くなり、孔の摩擦や孔よりの流出水流によるエネルギー損失が増大することが、この結果よりわかる。

孔の直径と堤体幅との比 D/l と透過率との関係を検討するため、図-6～8の実験結果中より $d/h=1$ の場合の透過率を取り出し、各実験条件について比較表示したものが、表-4である。堤体の透過率は、入射波の波形

表-4 D/l と K_T との関係
($d/h=1.0$ の場合)

Exp. No.	D/l	$K_T(\epsilon=0.250)$		$K_T(\epsilon=0.186)$ (樫木らの実験)
		$(h/L_I=0.104)$	$(h/L_I=0.147)$	
1	0.0450	0.30~0.42	0.27~0.36	0.10~0.2
2	0.0842	0.49~0.53	0.41~0.53	
3	0.0459	0.26~0.37	0.21~0.40	

勾配によって変化するので、表-4には、波形勾配が $0.01 \sim 0.06$ の範囲に対応する透過率の変化範囲を示してある。樫木らは、本実験と同様な多孔壁体の透過率に関する実験を行なっている¹⁷⁾。樫木らは、多孔壁体の間げき率が $\epsilon=0.186$ 、沖波波形勾配が $0.01 \sim 0.03$ である場合の、透過率と D/l との関係を示している。表-4中には、樫木らの実験結果より、本実験での D/l の値に対する透過率を、参考のため示してある。そして、本実験ならびに樫木らの実験より、多孔堤内でのエネルギー損失は、相当程度 D/l の値に関係することが認められる。

堤体幅の透過率におよぼす効果は図-7と8の実験結果を比較することによって検討しうる。本実験の範囲内では、堤体幅が1.8倍となると透過率は40%程度減少することが認められた。これは浮消波堤の場合も他の浮防波堤と同様に、消波効果を高めるには、堤体幅を広げることが有力な手段の一つであることを示している。

すでに指摘したように、本報で提案した浮消波堤は、カーテン防波堤の一形式ともいえることから、森平らの行なったカーテン防波堤の実験結果¹⁸⁾との比較を行なう。図-9

は、カーテン防波堤の透過率に関する実験結果より、本実験とほぼ同一の相対水深の場合のものを選び、本実験の結果(図-6~8)と比較したものである。図-9は、相対水深をパラメータとして、相対吃水深と透過率との関係を示したものである。カーテン防波堤は、 $l/L_I \approx 0$ 、 $\epsilon = 0$ の場合の浮消波堤と考えることができるので、図-9より透過率におよぼす堤体幅と堤体の間げき率の効果を、相対的に検討することができる。まず、相対水深が $h/L_I \approx 0.15$ の場合には、堤体の吃水深が $d/h < 0.8$ となると、カーテン防波堤より浮防波堤の透過率は小さくなる。このことは、図-9中のすべての実験条件の場合に対していえるので、短周期の入射波の減勢には、堤体幅による消波効果が大きいものと考えられる。一方、 $h/L_I \approx 0.10$ の場合には、堤体にあけられる孔を透過する入射波エネルギーによって、カーテン防波堤と同程度もしくはそれ以上の透過率となる場合がある。ことに、堤体にあけられる孔の口径が大きい場合(当然 D/l が大きい場合)には、

多孔堤体としたために消波効果が相当減少する。

7. あとがき

本報では、浮防波堤の実用化上で最大の難点といわれている、アンカーと係留索による堤体係留方式の不確定さをさせて、海底に固定した中空三角ピアにスライドブロックをかいしてアーチ状に定着される多孔堤体をもつ、透過性浮消波堤の一形式を提案した。そして、この浮消波堤の堤体材料として、比重調節可能、耐久性、強度の点から、軽量体のスチロフォーム混入モルタルブロックが、最適であることを示した。

浮消波堤の消波効果を示す指標として、本研究では堤体の透過率を取りあげ、多孔堤体の間げき率が25%の場合について実験を行なった。その結果、堤体の透過率は堤体の吃水深、入射波の波形勾配に関係する以外に、相対水深、堤体幅に関する孔の相対口径 D/l にも関係することが認められた。そして、本実験の範囲では $D/l = 0.045$ 、 $l/L_I = 0.32$ となる堤体規模が、消波効果の点から考えて堤体の最小規模であると考えられる。

本研究では、堤体間げき率を25%とした場合について、その消波効果を検討したが、透過性岸壁の場合¹⁹⁾と同様に、堤体の最適間げき率について今後検討を行なう必要がある。また、堤体着定構造の適性を検討するため、堤体に作用する波力についても検討する必要がある。

なお、この形式の浮消波堤に対しては、堤長が30~60m程度の実物試験を行なう予定である。

参考文献

- 1) Ippen, A. T. ed.: Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, 1966, pp. 379~397.
- 2) 本間仁・堀川清司・望月博正: 浮防波堤に関する一研究, 第10回海岸工学講演会講演集, 1963, pp. 144~149.
- 3) Brebner, R. J. and A. O. Ofuya: Floating breakwaters, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engineering, 1968.
- 4) Chen, K. and R. L. Wiegel: Floating breakwater for reservoir Mirinas, Proc. of 12th Conf. on Coastal Engineering, 1970.
- 5) Marks, W.: A perforated portable breakwater for fixed and floating application, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engineering, 1966.
- 6) Bourdinos, E. L. and A. T. Ippen: Characteristics of an open tube wave attenuation system, Proc. of ASCE, Vol. 94, No. WW 4, 1968.
- 7) Ripken, J. F.: An experimental study of flexible floating breakwater, Univ. of Minnesota, St. Anthony Falls Lab., T. P. No. 31, 1960.
- 8) Wiegel, R. L., H. W. Shen, and J. D. Cumming

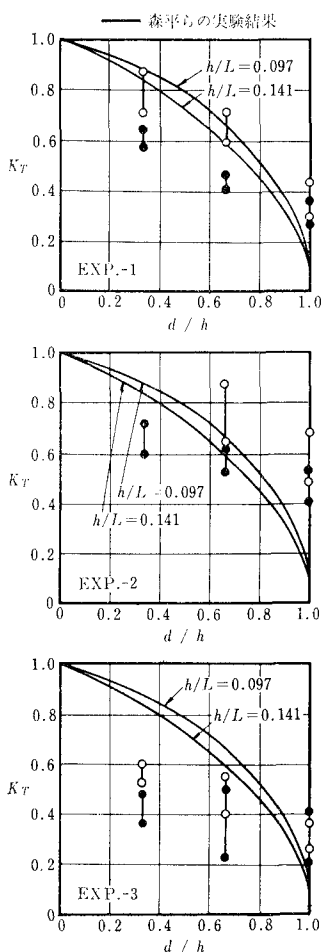


図-9 カーテン防波堤の透過率との比較

- : Hovering breakwater, Proc. of ASCE, Vol. 88, No. WW 2, 1962.
- 9) Noble, H. M. : Wave-maze floating breakwater, Proc. of Civil Engineering in the Oceans II, ASCE, 1969.
 - 10) 加藤重一他: シート型浮防波堤の消波効果, 第16回海岸工学講演会講演集, 1969, pp. 297~300.
 - 11) 中原裕幸: 浮消波施設の開発動向, 海洋産業研究会資料, 1972.
 - 12) ASCE: Proc. of Conf. on Civil Engineering in the Oceans, 1967.
 - 13) 服部昌太郎: 浮遊式海洋構造物の投設アンカーの引抜き抵抗, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要, 第IV部, 昭和48年10月.
 - 14) Wilson, B. W.: Elastic characteristics of mooring, Proc. of ASCE. No. WW 4, 1967.
 - 15) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実: カーテン防波堤とその特性について, 港湾技術研究所報告, Vol. 3, No. 1, 1964.
 - 16) 服部昌太郎: 多孔壁式防波堤の水理, 第18回海岸工学講演会論文集, 昭和46年, pp. 115~120.
 - 17) 榎木 亨・岩田好一朝: 多孔壁式鉛直消波岸壁の水理特性に関する二, 三の考察, 土木学会論文報告集, 第220号, 昭和48年12月.
 - 18) 文献 15) と同じ.
 - 19) 文献 17) と同じ.
-