

砕波に起因する大規模渦の発生条件

砂 村 継 夫*・張 達 平**

1. はじめに

砕波によって形成される渦に関する最初の研究は榎木ら(1973)によって行なわれ、砕波後の波高減衰機構との関連において horizontal roller と呼ばれる大規模な渦(水中で発生し、水平な回転軸とほぼ円形の断面をもつ)の挙動が実験室において調べられた。このような渦をここでは水平渦と呼ぶ。Miller (1976) も水平渦についての記載を行なっているが、砕波と関連する渦の研究が本格化したのは数年前からである。酒井・内田(1984)や三村ら(1984)は実験室において砕波帯内の流速測定を行ない、plunging 型砕波による水平渦の特性を調べている。前者の実験は 1/20 の一様勾配斜面上で、後者の実験は複合断面(1/10 斜面で立ち上り、それに接続する一様水深部をもつ断面)上で行なわれている。時を同じくして、日野ら(1984)は複合断面(1/20 斜面と一様水深部)上で実験を行ない、spilling 型砕波で作られた渦が傾斜した回転軸をもつことを見出し、灘岡ら(1985)はこの種の渦を斜降渦と名付けた。また日野ら(1984)は、砕波型式が plunging 型であっても斜降渦が bore の形成領域で発生すると述べている。Bore が進行するにつれて、その先端付近にはかなり不安定な二次元性の強い渦が生じる。この渦は時間の経過とともに三次元性を帯び、bore の進行方向に傾いた軸をもつ渦へと発達して斜降渦となる(灘岡ら, 1985)。さらに灘岡ら(1987)は、水平渦の発生が見られないような spilling 型砕波を 1/20 の一様勾配斜面に作用させ斜降渦の構造ならびに挙動について調べている。

一方、酒井・田中(1985)は、plunging 型砕波で形成された水平渦が斜降渦へと発達することを 1/20 の一様勾配斜面を用いた実験で見出している。最近、山下ら(1988)は、1/20 斜面上での spilling 型砕波で形成された水平渦が斜降渦へ移行する過程をハイスピードビデオシステムを用いて詳細に観察している。

最近の流速測定技術の進歩とあいまって、水平渦あるいは斜降渦に伴う流体の運動特性の解明を目的としたミ

クロなアプローチの研究が精力的に行なわれており(既に引用した文献以外に、例えば、青野・服部(1984, 1986, 1988); 水口・友金, 1985; 柴山ら, 1985), 新たな知見が得られつつある。しかし、これらの渦がどのような波浪・斜面勾配の条件で発生し、また、例えば、水平渦から斜降渦への移行現象はどのような条件が整えば生ずるのか、という点に関する研究は行なわれていないようである。そこで、これらの点を明らかにするために、3 種類の一様勾配斜面と種々の波浪特性とを組合せた条件を設定し二次元造波水路実験を行なった。

2. 実験装置・条件ならびに方法

実験は、長さ 12 m, 幅 0.2 m, 深さ 0.4 m の片面ガラス張りの二次元造波水路(プランジャー型造波装置付)の一端に一様勾配の斜面(ステンレススチール製)を設置して行なわれた。斜面勾配は 1/5, 1/10, 1/20 の 3 種類とした。一様水深部の水深は 25 cm で一定に保った。実験波の周期を 0.5~2.0 s, 砕波波高を 1.0~14 cm に変化させて、斜面勾配・周期・波高を適宜組合せて合計 120 ケースの実験を行なった。

砕波現象および砕波に起因する渦の構造や挙動を調べるために 2 台のビデオカメラを用いて同時撮影(シャッタースピード: 1/500 s)を行なった。1 台のカメラは水路側方から水路に向けて直角にセットされており、砕波点を含む岸側の領域を撮影するのに用いられた。他の 1 台は砕波点後方の水路側方に設置されており、波の進行方向に対し約 30° の角度から砕波帯内を撮影するのに使用された。渦の特性は、砕波に伴って混入した気泡そのものをトレーサとして用いビデオ画像上で調べられた。砕波波高もビデオ画像から求められた。

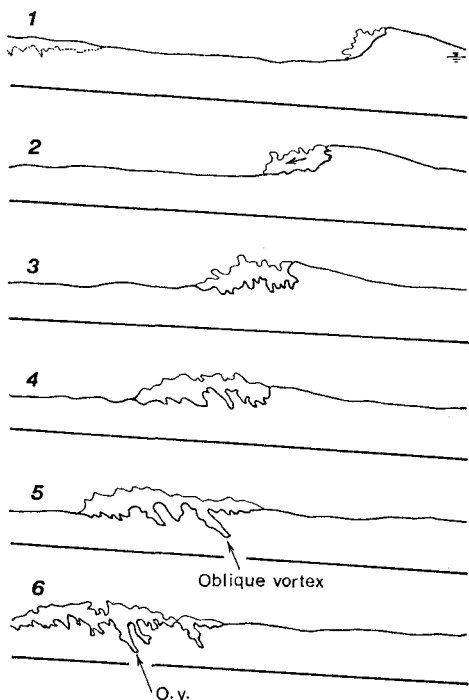
3. 大規模渦のタイプ

従来の知見の通り、大別すると斜降渦と水平渦の 2 種類の渦が存在することが確認できた。しかし水平渦の中にはその発達・変化の過程が異なる 4 つのタイプがあることが明らかとなった。そこで、以下に斜降渦から順に各タイプの渦の特徴を説明する。

斜降渦 (Oblique vortex)

* 正会員 工博 筑波大学教授 地球科学系
** 筑波大学大学院 地球科学研究科

Oblique vortex



図—1 斜降渦の発達 (模式図)

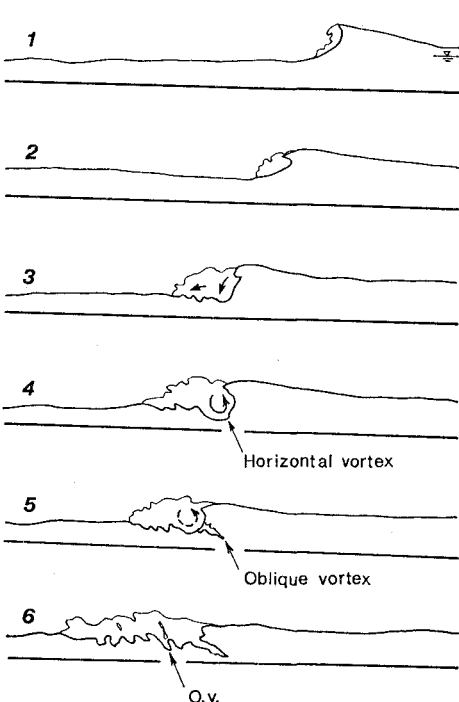
碎波時に波頂付近から気泡を含んだ水塊が波の岸側斜面を滑り降りるように波面前面に広がる (図—1, ステージ 2). 波形は大きく崩れ bore となって進行する. 気泡を含んだ水塊の下端の境界は凹凸のある多くの突起で特徴づけられる (ステージ 3, 4). 突起部は, 波が進行するにつれて, その回りに水粒子の回転を伴いながら斜め下方に発達し, 斜降渦となる (ステージ 5). このタイプには水平渦の形成は全く見られない. 灘岡ら (1987) が取扱った渦がこのタイプのものであり, 恐らく日野ら (1984) のケースもこれに該当すると思われる. このタイプの渦は本実験では $1/10$ と $1/20$ 斜面上での spilling 型碎波のケースに見られた.

水平渦 (Horizontal vortex)

a. 水平渦から斜降渦へ変化するタイプ (H-a)

碎波時に飛び出した水塊が波面前面に突入することによって水平渦がまず形成される (図—2, ステージ 3~4). この水平渦は, 時間の経過とともに斜降渦に変化する (ステージ 5). このタイプは, 酒井・田中 (1985) や山下ら (1988) が報告しているものと同じである. また, 柴山ら (1985) のケースもこれに該当すると推定される. 水平渦の発生開始と同時に低角度で前面に飛び出した水塊 (ステージ 3) は, bore をなして進行し, やがて弱い斜降渦を発達させる (ステージ 6). このタイプは $1/10$ と $1/20$ 斜面上での spilling もしくは plunging 型碎波に見

Horizontal vortex: H-a type



図—2 水平渦から斜降渦への変化 (H-a, 模式図)

られた.

b. 複数の水平渦が発達するタイプ (H-b)

上述のタイプ (H-a) に比べて碎波直後の水塊の突入が激しく高角度である (図—3, ステージ 2). これによって顕著な水平渦が形成される (ステージ 3). 水塊突入直後に斜め上方に水塊の飛び出し (例えば, Peregrine, 1983, Fig. 4) が起こり (ステージ 2), これが前面に突入してもう一つの水平渦を作る (ステージ 4 の破線) が, 最初の渦ほど明瞭ではない. 突入を繰返すことにより, 第 3, 第 4 の水平渦が形成されることがある. 酒井・内田 (1984) や三村ら (1984) が取扱った渦は, このタイプの水平渦であろう. このタイプは $1/5$ と $1/10$ 斜面上での典型的な plunging 型碎波において発生した.

c. 水平渦が短時間に消滅するタイプ (H-c)

碎波によって最初に水平渦が形成される (図—4, ステージ 4). この過程は上述の二つのタイプ (H-a, b) と基本的に同じで水塊の突入に起因するが, この水平渦は短時間のうちに消滅する (ステージ 5). 一方, 水平渦の形成開始と同時に飛び出した水塊は水面上を滑るように移動し (ステージ 2~5), その後, 小規模な斜降渦を発達させる (ステージ 6). このタイプは $1/20$ 斜面上での plunging 型碎波で観察された.

d. 水平渦から無組織渦への変化するタイプ (H-d)

上述の 3 つのタイプにおける水平渦の形成と同様に,

Horizontal vortex: H-b type

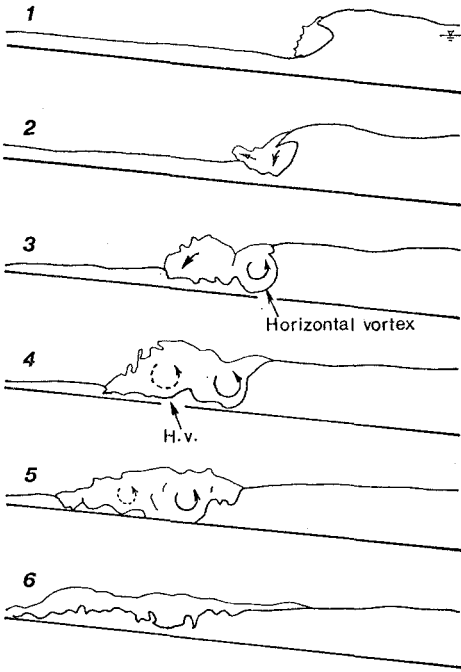


図-3 複数の水平渦の発達 (H-b, 模式図)

Horizontal vortex: H-d type

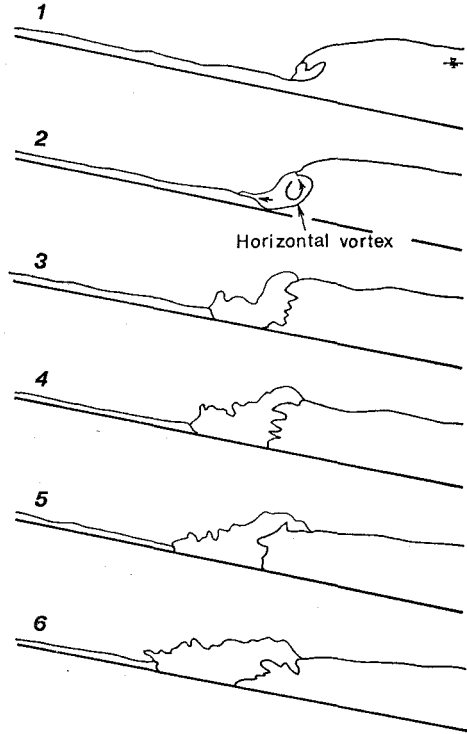


図-5 水平渦から無組織渦への変化 (H-d, 模式図)

Horizontal vortex: H-c type

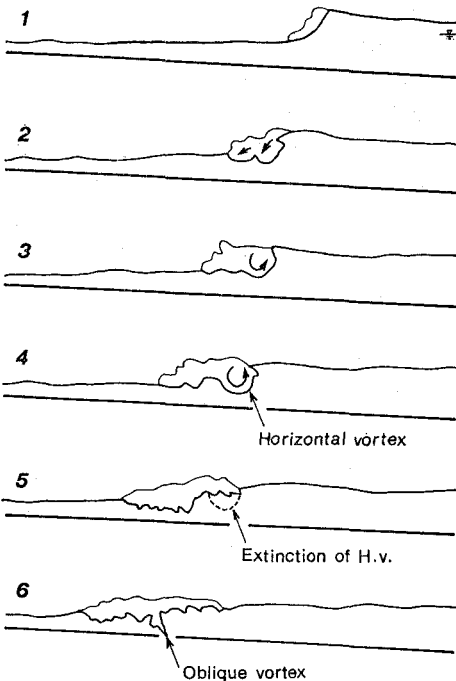


図-4 水平渦の消滅 (H-c, 模式図)

水塊の突入により水平渦が形成される (図-5, ステージ 2) が短時間で消滅する。渦の形成と同時に飛び出した水塊は、斜面に沿って大きな乱れを伴いながら前進する (ステージ 2~5) が、明瞭な組織渦は確認できなかった。このタイプは 1/5 と 1/10 斜面上での plunging 型砕波で見られた。

4. 渦の発生条件

一連の実験で観察された渦のタイプは、斜降渦と 4 つに細分された水平渦の 2 種に大別される。これらの特徴的な流体運動のほかに 2 種類の流れの場が出現した。一つは、組織渦が発生せず、砕波時に形成された大きな乱れが bore となって進行するタイプで、1/5 と 1/10 斜面上での collapsing 型砕波で見られた。他の一つは、気泡の混入がほとんどなく砕波自体が不明瞭となり顕著な乱れが発生しないタイプで、すべての斜面上で波高が極めて小さい時に出現した。

前述の 5 つの渦のタイプとこれら 2 つのタイプの流れの場の発生条件を系統的に整理するために 2 つのパラメータを用いた。1 つは、Galvin (1968) の Breaker-type index, B_t , である。

$$B_t = H_b / gT^2 \tan \beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_b は砕波波高、 T は波の周期、 $\tan \beta$ は斜面

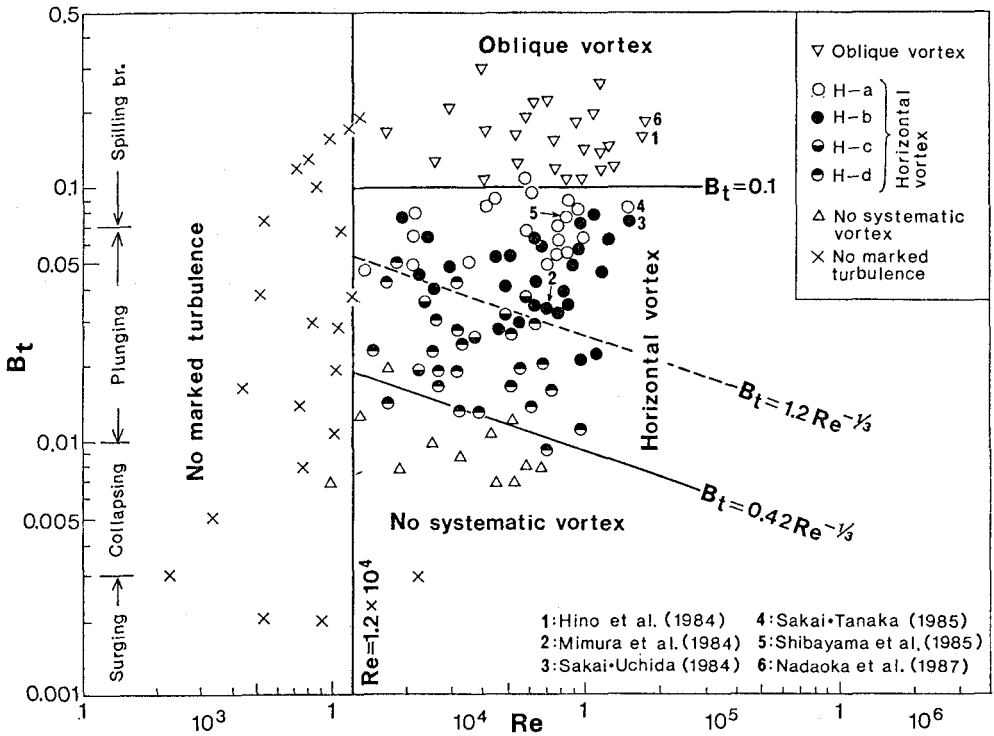


図-6 各種の渦の発生条件

勾配, g は重力加速度である。これは、渦のタイプの決定に碎波形式が重要な役割を果たすとの観点から採用したものである。第2のパラメータとしては、流体運動における粘性の効果を表わす指標、すなわちレイノルズ数を用いるのが妥当と考えられる。特性長さとして碎波波高、特性速度として碎波頂部における水粒子の水平速度 U_b をとることとする。この速度は碎波時点ではほぼ波の位相速度と同等とみなし得る ($U_b \sim L_b/T$, L_b : 碎波波長) ので、碎波に関するレイノルズ数, Re , を次のように定義する。

$$Re = H_b L_b / \nu T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ν は動粘性係数である。

上記の2つのパラメータを用いて、各種の渦の発生条件をプロットしたものが図-6である。また、この図には、既往の実験結果の中から渦のタイプが判定可能で、しかも碎波の諸元が与えられているケースを選んでプロットしてある (複合断面の場合には一様勾配斜面の値を $\tan \beta$ にとった)。なお、 Re の算定に必要な ν の値は $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ とし、 L_b の値は微小振幅波理論に基づき、実測された碎波水深から求めた。この図より、気泡を含むような碎波が発生するためには

$$Re \geq 1.2 \times 10^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

でなければならないことがわかる。この条件に加え、斜降渦の発生には

$$B_t \geq 0.1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

水平渦の発生には

$$0.42 Re^{-1/3} \leq B_t \leq 0.1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

の条件が必要となる。

水平渦の発生領域内では、H-a, bのタイプとH-c, dのタイプとが図-6の破線 ($B_t = 1.2 Re^{-1/3}$) によってかなり明瞭に区分できる。前者と後者のタイプの現象面上での差異は、前者の水平渦 (H-bでは最初に形成されたもの) の持続時間, t , が後者のものに比べて長いことである。この結果は図-7に示されている。 $B_t = 1.2 Re^{-1/3}$ を境にして H-a, bのタイプは $t/T > 0.1$ (特にH-bは

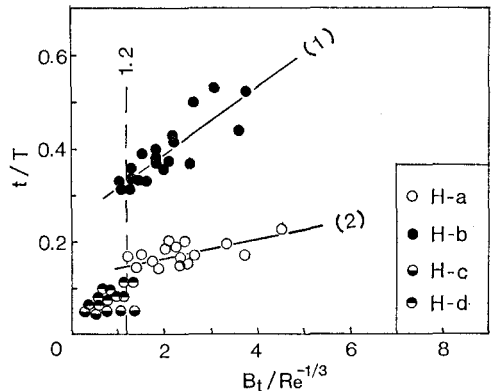


図-7 4種類の水平渦の継続時間

大きな値を示す), H-c, d タイプは $t/T \leq 0.1$ であることがわかる. また, H-a, b タイプでは, どちらも $B_t/Re^{1/3}$ の値が大きくなるにつれて t/T も大きくなる傾向が明らかに読みとれる. この傾向は, H-b タイプ (図中の直線 (1)) では

$$t/T = 0.07 B_t Re^{1/3} + 0.24 \quad \dots\dots\dots (6)$$

H-a タイプ (直線 (2)) は

$$t/T = 0.02 B_t Re^{1/3} + 0.12 \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表わすことができる.

H-a と H-b タイプの渦の発生領域を B_t-Re 平面 (図-6 の破線上方) 上で明確に区分することは困難であるが, H-a タイプは $B_t \geq 0.07$ の領域で卓越する傾向が認められる. 一方, H-c と H-d タイプの領域 (図-6 の破線下方) では, H-c タイプのデータ数が不足していることもあり, H-d との区分はここではできない.

砕波型式の区分はビデオ画像上で行なわれた. Spilling 型と plunging 型砕波との境界は, Galvin (1968) の結果とほぼ同じで $B_t = 0.07$ であった. Plunging 型と collapsing 型との境界は $B_t = 0.01$, collapsing 型と surging 型との境界は $B_t = 0.003$ (この値は, Galvin の plunging 型と surging/collapsing 型との境界を示す結果と一致) で与えられた. 本実験で得られた砕波型式区分を 図-6 に示す. 砕波型式と各種の渦とは必ずしも 1 対 1 に対応していないが, spilling 型砕波は斜降渦発生条件となることがわかる.

5. おわりに

Galvin の Breaker-type index B_t と砕波に関するレイノルズ数 Re とを用いることにより, 斜降渦と水平渦の発生条件を B_t-Re 平面上で明確にすることができた. しかし, 4 つに細分された水平渦に関しては, それぞれの発生条件を十分明らかにするまでには至らなかった. 渦のタイプと砕波型式とは必ずしも対応しないが, spilling 型砕波は斜降渦発生の必要条件であることがわかった.

謝辞: 本研究は文部省科学研究費 (一般研究 B, 研究代表者: 筑波大学構造工学系西村仁嗣教授) による研究

の一部である. 本研究を行うにあたり西村教授から有益な助言をいただいた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 青野利夫・服部昌太郎 (1984): 砕波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 6~10.
- 青野利夫・服部昌太郎 (1986): 回転スペクトルを用いた砕波下での大規模渦に関する実験的研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 6~10.
- 青野利夫・服部昌太郎 (1988): 砕波帯内のエネルギー逸散過程に関する実験的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 59~63.
- 酒井哲郎・内田雅博 (1984): 巻き波型砕波による乱れと底質浮遊機構, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 296~300.
- 酒井哲郎・田中秀明 (1985): 斜面上の砕波における水塊の突入と渦の挙動, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 70~74.
- 榎木 亨・岩田好一朗・松本 昇 (1973): 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について—砕波の内部機構に関する基礎的研究—, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 565~570.
- 柴山知也・樋口雄一・岡安章夫 (1985): バックウォッシュと巻き砕波による砕波帯内流速場の構造, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 65~69.
- 灘岡和夫・小谷野喜二・日野幹雄 (1985): 二成分光ファイバ流速計を用い砕波帯内流速場の特性の解明, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 50~54.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 砕波帯内における底面近傍の流体運動特性と浮遊砂について, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 256~260.
- 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤 (1984): 砕波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5.
- 水口 優・友金幸浩 (1985): 巻き波型砕波時の流れの場の実験的研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 60~64.
- 三村信男・岡安章夫・柴山知也・ブリーチャ・カムロンリントン (1984): Plunging 砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 11~14.
- 山下隆男・James R. Tailent・土屋義人 (1988): 砕波水平渦の生成機構と移動特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 54~58.
- Galvin, C. J. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 3651~3659.
- Miller, R. (1976): Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces, Soc. Economic Paleontology Mineralogy, Special Pub., No. 24, pp. 92~114.
- Peregrine, D. H. (1983): Breaking waves on beaches, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 15, pp. 149~179.