

# 日本海における表層水と深層水の交換過程に関する検討

高橋 義也\*・和田 明\*\*

## 1. 研究目的

図-1 に示すように、日本海は大陸と日本列島に囲まれており、他の海洋とは浅く狭い間宮・宗谷・津軽・対馬の 4 海峡で接続し閉鎖的な海洋である。日本海の表層は対馬海峡から流入する対馬暖流と大陸沿岸を南下するリマン海流により極前線が形成され、それら海流の下層は年間を通じて一様な水温と塩分を持つ日本海固有水で占められている。

森安(1972)によれば、日本海の組織的な観測は、1928 年から 1931 年に現在の神戸海洋気象台によって行われたのが最初である。第二次世界大戦後、観測範囲は狭くなり、主に日本海南部(福岡, 1962; 森安, 1972; 長沼, 1977; 周東, 1982) や対馬海峡における海流 (Kawabe,

1982; Katoh, 1994a, 1994b; Isobe, 1994a, 1994b) および海洋構造の観測 (Tawara・Fujiwara, 1985) が盛んに行われている。その後、観測範囲の拡大と観測技術の進歩により、日本海固有水の研究 (Senju・Sudo, 1994) も行われ、現在も気象庁・水産庁・海上保安庁により日本海の計画的観測が行われている。

また、日本海の循環に関する数値実験は Yoon (1982a, 1982b, 1982c) によって最初に行われ、対馬暖流の East Korean Warm Current や沿岸分枝の特徴を示した。また、多くの海洋学者は海洋大循環モデル (OGCM) を用いて流動解析を行っているが、西側境界で過大評価する欠点を指摘している。そこで、Seung・Yoon (1995) は OGCM に水温と塩分の同化項を考慮したモデルを用いて解析を行い、East Korean Warm Current の北への張り出しを抑え、大陸沿岸を南下する North Korean Cold Current の流動の再現に成功している。また、Kim・Yoon (1996) は Reduced Gravity Model を用いて解析を行い、日本海北部の渦の形成と East Korean Warm Current の朝鮮半島からの離岸に風応力が重要な役割を果たしていることを見出した。

このように日本海に関し観測および数値計算は数多く行われ、日本海の海洋構造や流動は解明されてきているが、日本海の深層に存在する日本海固有水の起源や挙動については、冬季の北部日本海から下降し形成されると推測されているものの、決定的な結論に至っていないのが現状である。

OGCM は格子幅を、微細に設定でき風応力を考慮しているという利点を有しているが、海面における降水量や蒸発量を考慮していないこと、時間積分した後求められる定常流は必ずしも質量保存が成立していないという欠点がある。そこで、本研究は格子幅が大きいのが、降水量と蒸発量を考慮しても質量保存をほぼ満足し、観測水温と観測塩分の分布を保持する交換流量を求めるボックスモデルを用いて日本海における流動解析を季節毎に行い、その流動の再現性およびモデルの有用性を検討し、更に粒子追跡計算により、日本海の表層水と深層水の交換の過程を解明することを目的とする。

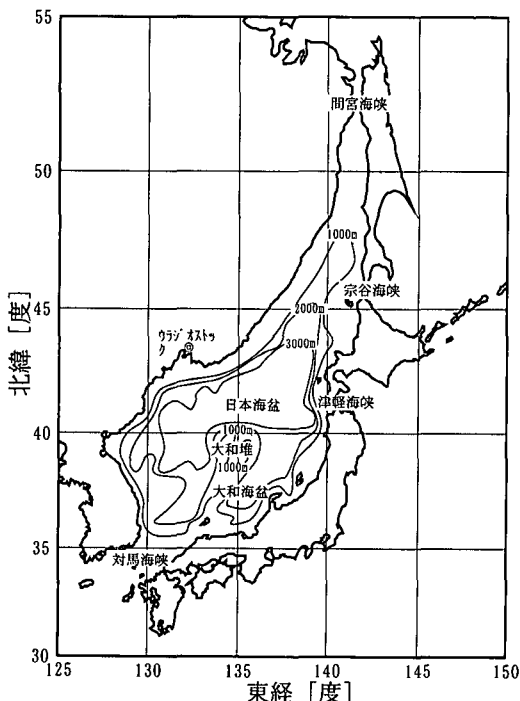


図-1 日本海の概要

\* 正会員 工博 (株)日本科学技術研修所  
\*\* 正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科

## 2. ボックスモデルによる解法

### 2.1 基礎式

ボックスモデルは計算対象領域をボックスに分割し、そのボックス内部は一樣な性質を持つ海水と仮定して水温および塩分データを入力し、海面の気象条件および河川流量を加え、ボックス間の交換流量を求める。基礎式は、(1)式から(3)式に示す海水の質量、塩分量、および熱量の3つの保存方程式である。

$$\sum_{j=1} W_{ji}\rho_j - \sum_{j=1} W_{ij}\rho_i + \sum_r R_r \rho_r' + P_i - E_i = 0 \dots (1)$$

$$\sum_{j=1} W_{ji}\rho_j - S_j - \sum_{j=1} W_{ij}\rho_i S_i + \sum_r R_r \rho_r' (S_r - S_i) = 0 \dots (2)$$

$$\sum_{j=1} W_{ji}\rho_j T_j C - \sum_{j=1} W_{ij}\rho_i T_i C + H_i = 0 \dots (3)$$

ここで、 $W_{ij}$  (m<sup>3</sup>/s) は求めるべき未知数の交換流量である。添え字  $i, j$  はボックス番号を表し、 $W_{ij}$  はボックス  $i$  からボックス  $j$  への交換流量を表し、 $W_{ji}$  はボックス  $j$  からボックス  $i$  への交換流量を表している。添え字  $r$  は河川の属性を示し、 $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) は海水の密度を表している。 $R$  (m<sup>3</sup>/s) は河川水の流入量、 $\rho_r'$  (kg/m<sup>3</sup>) は河川水の密度、 $P$  (kg/s) は降水量、 $E$  (kg/s) は蒸発量である。 $S$  は海水の塩分、 $S_r$  は河川水の塩分である。 $T$  (°C) は海水の温度、 $C$  (J/kg·°C) は海水の比熱、 $H$  (J/s) は大気と海洋の熱収支の総和である。

これら保存方程式を各ボックスでたてるが、未知数と方程式の数が一致せず、また、未知数である交換流量は正であるため、(4)式に示すような非負条件付誤差最小化問題に変換して交換流量を求める。

$$\epsilon = \sum_i \{ \alpha_i [(1)の左辺]^2 + \beta_i [(2)の左辺]^2 + \gamma_i [(3)の左辺]^2 \} \dots (4)$$

ここで、 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  はそれぞれの保存方程式が交換流量に与える影響力が異なるために用いる係数である。

### 2.2 計算領域

計算対象領域は、図-2に示す対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡、日本列島、大陸、および北緯48度に囲まれた日本海海域である。水平方向は海峡を含む領域を30分メッシュ、他の領域を1度メッシュに分割し、鉛直方向は水深0mから3500mを最大11層に分割し、全ボックス数は1163個となる。季節は水温が最低になる2月を冬季の中心とし、3ヶ月毎に冬季、春季、夏季、秋季とした。また、縦縞のボックスは河川水の流入ボックスであり、横縞のボックスは海峡における流入出ボックスである。ボックス内の数字は層数を表す。

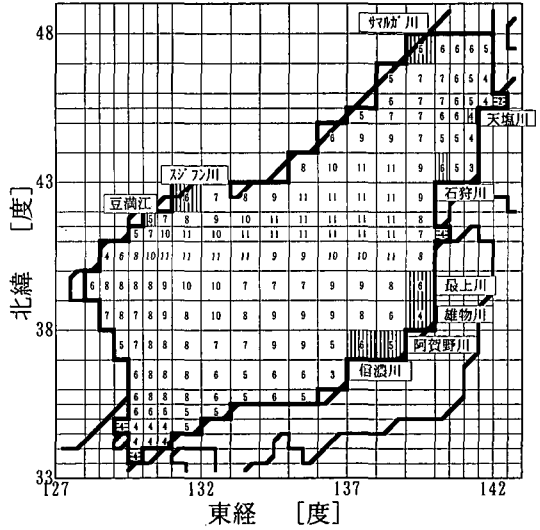


図-2 計算対象領域

### 2.3 データ整理

水温・塩分データは、日本海洋データセンター(JODC)の海洋データオンライン提供サービス(J-DOSS)を利用した。収集範囲は、東経125度から東経150度、北緯30度から北緯55度であり、観測期間は、1906年から1993年の88年間である。日本海における観測点は155,189点であり、水温データ数は1,888,094個、塩分データ数は289,492個である。

このデータは、観測時の野帳への記入ミスやデータの入力ミス等、人為的なミスが存在している可能性があり、そのまま流動解析の入力データとして使用することはできないので、統計処理を行い、計算対象領域の季節毎の水温、塩分、気象および河川データを作成する。

統計処理の手順は、観測水温をポテンシャル水温に変換し、しきい値、静力学的安定度、標準偏差によるデータチェック、補間およびスムージングである。標準偏差によるデータチェック終了時のデータ数、水温データが1,069,585個、塩分データが260,032個となる。

気象データ(気温、雲量、相対湿度、降水量、全天日射量、風速)は、1906年から1993年の88年間の気象条件より求める。

また、河川データは、河川便覧および外国気候表より求める。

## 3. 解析結果

### 3.1 流動解析結果

表層・中層・深層の代表深度としての水深75m層、350m層、1750m層における特徴的な冬季と夏季の流動解析結果を示す。

図-3に示す水深75m層の解析結果は、朝鮮半島沿岸で北向きの流れ、日本列島沿岸で東向きの流れが存在し、これらの流れは冬季に弱く夏季に強くなり、それぞれ East Korean Warm Current, 沿岸分枝に対応する。しかし、夏季における朝鮮半島沿岸の流れは既存の知見(長沼, 1977; Seung・Yoon, 1995)による流れよりも若干北に張り出している。大陸沿岸の南西向きの流れは、冬季に存在を確認できるが、夏季に非常に弱くなり、大陸沿岸を南下するリマン海流の知見と一致する。また、ここでは示していないが夏季の日本海南部、北海道西岸は地衡流的な流れを示している。

水深350m層の解析結果(図-4)は、大和堆西側で反

時計回りの流れ、大和海盆付近で時計回りの流れを示し、中層における既存の知見(Seung・Yoon, 1995)と良く一致する。また、冬季の大陸沿岸における南西向きの流れは、水深75m層よりも明瞭に現れ、Seung・Yoon(1995)の解析結果と一致している。

大和田・谷岡(1971)によると、深層の流動は日本海盆で反時計回りの流れ、大和海盆で時計回りの流れ、ウラジオストック沖で南下流が存在しているといわれている。水深1750m層の解析結果(図-5)は、冬季、夏季ともに、日本海盆で反時計回りの流れを示す。また、冬季は大和海盆で時計回りの流れを示している。夏季はウラジオストック沖で南下する流れを示し、地衡流計算と

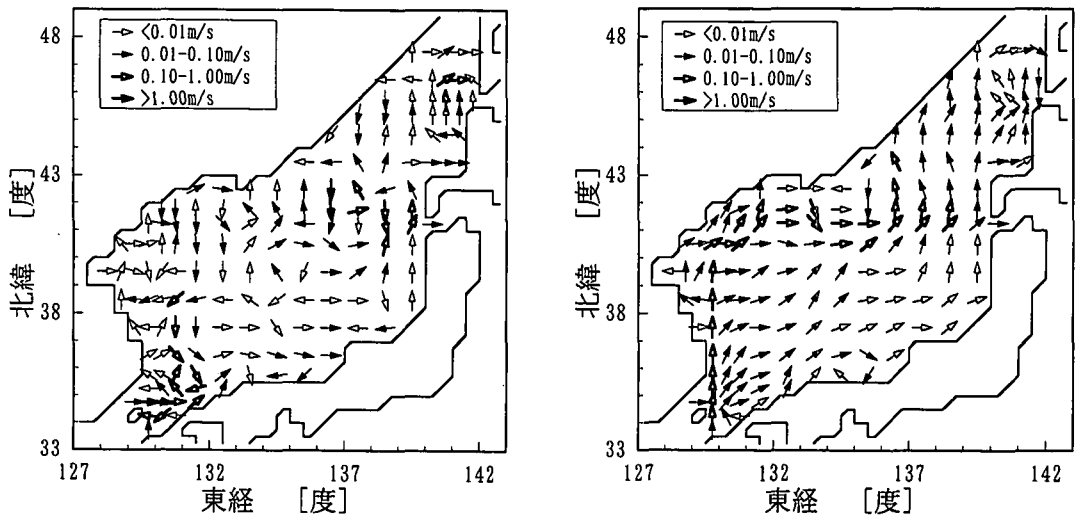


図-3 水深75m層における冬季(左図)と夏季(右図)の水平流速分布

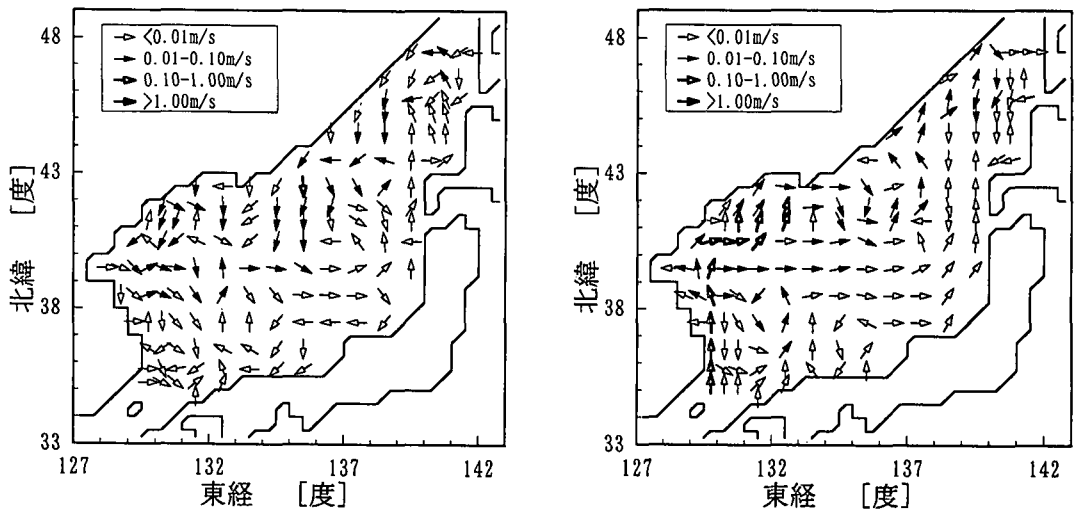
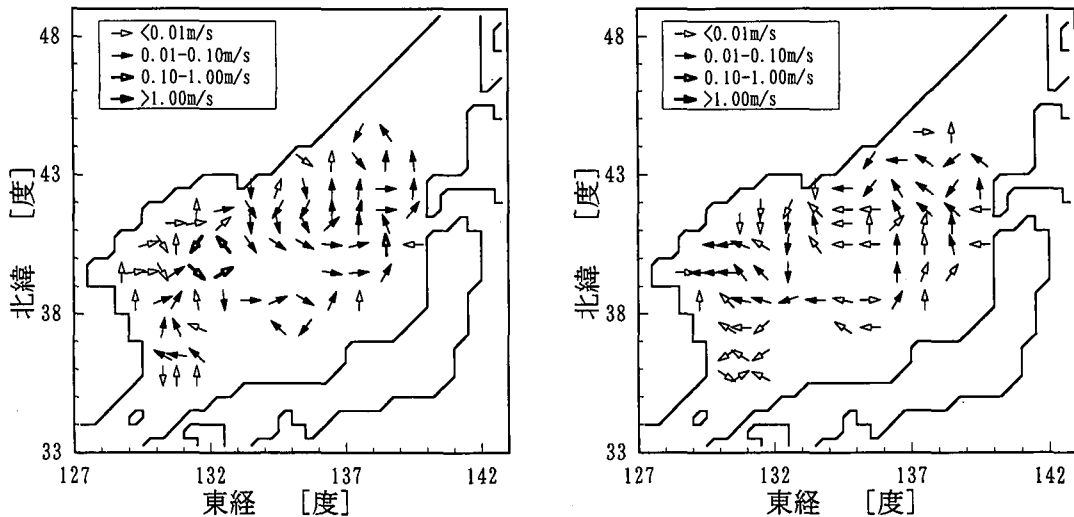


図-4 水深350mにおける冬季(左図)と夏季(右図)の水平流速分布



図一五 水深1750 m層における冬季(左図)と夏季(右図)の水平流速分布

一致している。

流動解析結果において、表層における夏季の朝鮮半島沿岸の流れがやや北に張り出しているものの、既往の知見と同様な結果を得ることができた。また、ボックスモデルは水温および塩分分布に依存する交換流量を示すが、地衡流的な流動も示すことが確認でき、また、高い質量保存性を持つため、物質循環や物質拡散を検討する

のに有効な手法であると考えられる。

### 3.2 粒子追跡結果

粒子追跡計算に用いる粒子は質点であり海水に完全に溶解しているものと仮定している。つまり、周囲の海水と全く同様の挙動を示す。また、流速は流動解析から得られた流量より水平・鉛直方向の線形補間により算定する。

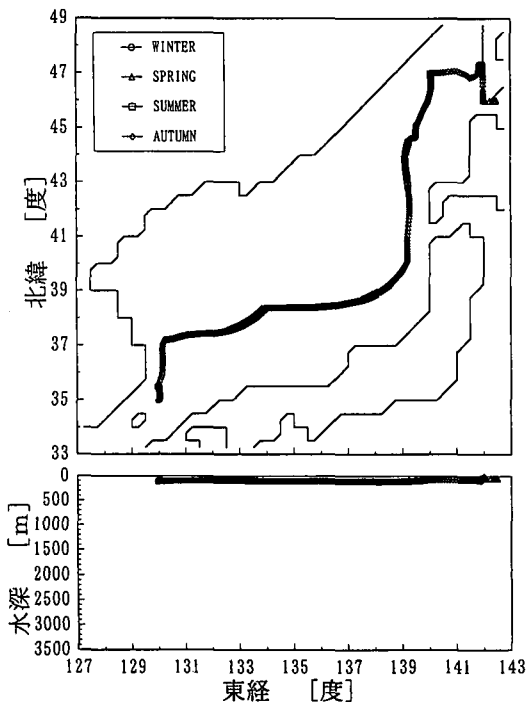
粒子投入点として、日本海に海水を供給している日本海南部の対馬海峡付近と日本海深層への下降流が予測される日本海北部に投入した粒子追跡結果を図一六および図一七に示す。

日本海南部に投入した粒子(図一六)は朝鮮半島沿岸を北上し、北緯37度付近で朝鮮半島から離岸し北緯40度付近を東に向かって流れ、日本列島沿岸を北上し宗谷海峡から流出している。これは East Korean Warm Current と良く一致している。

日本海北部に投入した粒子(図一七)は日本海北部のシベリア沿岸で水深2000 m以深に急激に下降している。その後、水深1000 m以深の日本海を水平的・鉛直的に活発に移動している。この活発な運動により深層に一樣な水塊である日本海固有水が形成されていると考えられる。

また、ここでは示していないが、深層の海水は朝鮮半島沿岸で表層に上昇し、再び日本海北部に向かって移動し、下降する海水の存在を確認することができた。

つまり、日本海深層水の交換の過程は、冬季に日本海北部の大陸沿岸から日本海盆北部深層に沈降を開始し、深層で水平・鉛直の移動を繰り返し日本海深層に一樣な水塊を形成し、その一部は朝鮮半島沿岸で表層に上昇すると推測される。



図一六 日本海南部における粒子追跡結果

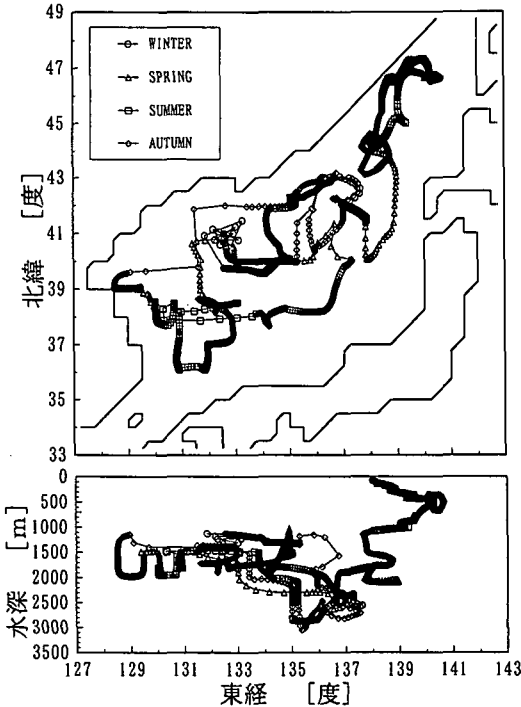


図-7 日本海北部における粒子追跡結果

4. 結 論

ボックスモデルによる流動解析結果から、夏季における朝鮮半島沿岸の流れは既存の知見よりも若干北に張り出しているが日本海の流動をほぼ再現していることが確認できた。この結果は水温と塩分分布による交換流量を示すが夏季において地衡流的な流れも示し、また高い質量保存性から物質循環や物質拡散を検討するのに有効な手法であると考えられる。

粒子追跡計算より、日本海深層水の交換の過程は冬季に日本海北部の大陸沿岸から日本海深層に下降を開始し、深層で水平・鉛直の移動を繰り返しながら日本海固有水と呼ばれる一様な水塊を形成し、その一部は朝鮮半島沿岸で表層に上昇すると推測される。

参 考 文 献

大和田守・谷岡克己 (1971): 日本海の海水の流動および水平、

鉛直構造に関する研究, 日本海に関する総合研究報告書, pp. 51-72.  
 川辺正樹 (1994): 海洋大事典 (和達清夫監修), 東京堂出版, pp. 359-361.  
 周東健三 (1982): 日本海の家況 (II), 海と空, Vol. 57, pp. 1-15.  
 長沼光亮 (1977): 日本海の家況変動, 海洋科学, Vol. 2, pp. 183-187.  
 福岡二郎 (1962): 日本海の家況の特性—太平洋と比較して—, J. Oceanogr. Soc. Japan, pp. 180-188.  
 森安茂雄 (1972): 日本海の家海洋物理, 海洋科学, Vol. 3, pp. 28-34.  
 Isobe, A. (1994a): Seasonal variability of the barotropic and baroclinic motion in the Tsushima-Korea Strait, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 223-238.  
 Isobe, A. (1994b): Seasonal variation of the vertically averaged flow caused by the Jebar effect in the Tsushima Strait, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 617-633.  
 Katoh, O. (1994a): Short-term fluctuations of the Tsushima Current in warm northwest of Yamaguchi Prefecture, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 51-64.  
 Katoh, O. (1994b): Structure of the Tsushima Current in the southwestern Japan Sea, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 223-258.  
 Kawabe, M. (1982): Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea. Part I. data analysis, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp. 95-107.  
 Kim, C. H. and J. H. Yoon (1996): Modeling of the wind-driven circulation in the Japan Sea using a reduced gravity model, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 359-373.  
 Senjyu, T. and H. Sudo (1994): The upper portion of the Japan Sea Proper Water, its source and circulation as deduced from isopycnal analysis, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 663-690.  
 Seung, Y. H. and J. H. Yoon (1995): Robust diagnostic modeling of the Japan Sea circulation, J. Oceanogr., Vol. 51, pp. 421-440.  
 Tawara, S. and T. Fujiwara (1985): Sea surface temperature distribution and its variability across the Tsushima Strait, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 41, pp. 49-55.  
 Yoon, J. H. (1982a): Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea: Part I. formation of the East Korean Warm Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp. 43-51.  
 Yoon, J. H. (1982b): Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea: Part II. influence of seasonal variations in atmospheric conditions on the Tsushima Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp. 81-91.  
 Yoon, J. H. (1982c): Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea: Part III. mechanism of the Nearshore Branch of the Tsushima Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp. 125-130.