

沖縄県石垣島における 1771 年明和大津波と津波石移動の数値解析

今村文彦*・吉田 功**・アンドリュー・ムーア***

1. はじめに

沖縄県における津波の発生頻度は比較的低いと言われるが、過去の資料を見ると、大きな災害をもたらした事例が残されている。明和 8 年 3 月 10 日 (1771 年 4 月 24 日) に発生した八重山地震津波である。この津波により、八重山列島・宮古島列島を中心とした地域で多大な被害を受けている。当時の記録によると、全琉球で地震を感じたが、震害はなかったようである (渡邊, 1998; 牧野, 1968)。つまり、小さな揺れ (地震マグニチュード) で、大きな津波が来襲したことになり、広義の意味での「津波地震」にも分類される特異な事例である。

津波は八重山・宮古両列島を襲い、引きから始まった津波の高さは最大 30 m 以上となり、石垣島で最も多くの被害を受けたと報告されている (渡邊, 1998)。特に、石垣島では東方沖から津波の直撃を受け、死者 8,335 名、海水に洗われた総面積は約 8,000 町歩、石垣島総面積のおよそ 40% に達したと言われる。ただし、島の反対側は海岸地帯の低地に浸水した程度で、被害は軽微であった。また、宮古島の東海岸および池間・伊良部・下地・多良間・水納の各島を襲い、死者 2,548 人の被害を出している。合計で 1 万 2 千名もの犠牲者を出した。沖縄だけでなく我が国の災害歴史上最大規模の災害をもたらしたことになる。

本研究では、明和津波の波源モデルの再検討及び石垣島などの津波石の数値解析の検討を行い、歴史津波の解明に貢献することを目的とする。

2. 対象とする津波痕跡高さ

まず、数値解析にあたり、参考または比較対象とする推定遡上高や津波石の情報を正確にしなければならぬ。ここでは、過去の研究 (中田・河名, 1986; Ota et al., 1995; 河名, 2000; 加藤, 1986; 河名・中田, 1987) を参考に整理を行った。

津波が来襲した島々には、津波石が海岸から内陸深くまで多数分布している。当時の被害状況を詳しく記載した古文書「大波時各村乃形行書」では、28 丈 2 尺 (85.4 m) の石垣島での最高遡上高さを記載している。この遡上高について今村 (1938) は、単位が一桁間違っで記録されたと否定的見解を示したが、牧野 (1968) は、「大波時各村乃形行書」と津波石の分布から肯定的見解を示し、この津波の大きさを強調した。一方、加藤・木村 (1983) は、石垣島の津波石のうち、宮良湾内に点在する岩塊を

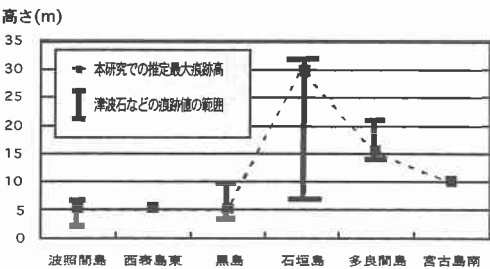


図-1 八重山・宮古列島での推定される津波の痕跡高さ

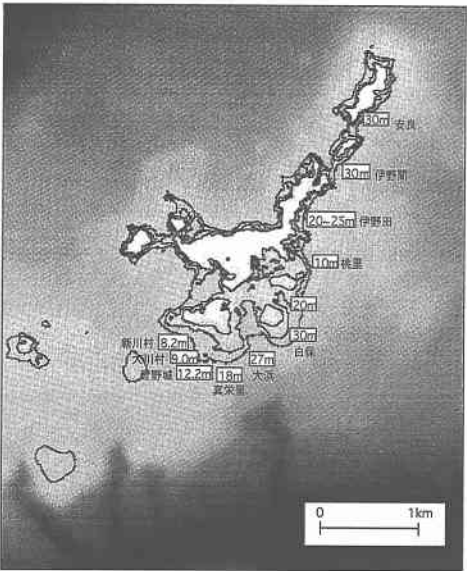


図-2 石垣島における各地点での推定される津波の痕跡高さ

* 正会員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科 附属災害制御研究センター
** 正会員 修(工) 東亜建設(株)
*** Ph.D. 東北大学講師 大学院工学研究科 附属災害制御研究センター

除いて、多くは明和津波以前から分布していた更新世隆起石灰岩からの転石であること、などを指摘している。このように明和大津波の痕跡についてはいくつかの論争があり、その実体については十分に解明されたとはいえない。そこで、現在までの津波石や被害状況の記述を整理し、その信頼性について確認を行った。

痕跡データの整理結果の詳細は今村ら（2001）を参照されたい。ここでは、図-1 には、八重山・宮古列島での分布図、図-2 には、石垣島での痕跡高さの分布図を示す。津波エネルギー（津波高さに関連）は石垣島を中心に分布していること、さらに、石垣島では、東部海岸で 30 m を越える値が出ていることが分かる。

さらに、津波石移動の数値解析の対象は注意をして選定した。数値解析においては、津波来襲前の津波石の位置を知る必要があり、この情報を持ち当時の津波によって移動したと確証の高いものが対象となる。河名(2000)により、詳細な調査が実施させ、その中から 6 例が本研究の対象となると考えられた。ただし、大浜での津波石は、移動については非常に詳細で正確であるが、津波来襲時に 2 つに分かれてたとの記述があり、本数値解析ではその再現は難しい。また、石垣島南方の「ふこりおり石」は、移動距離が大変長いこと、来襲前の位置が不正確であるため、適用が難しい。従って、特に伊野田の「あまたりや湖荒（おうあり）」を中心に数値解析を行う。

3. 津波波源の推定

明和津波の波源位置及び規模に関する検討は、中田・河名(1986)により初めて行われた。位置に関しては、津波被害の規模から、琉球海溝の内陸斜面にある最も陸側に近い小舟状海盆の北縁にあると推定している。また一方、吉田ら（2000）は、海溝近傍および小舟状海盆付近に断層を仮定し津波伝播計算を実施し、八重山・宮古諸島の痕跡高さとの比較により、小舟状海盆付近での断層位置の妥当性を示した。ここでは、小舟状海盆の北縁の付近に位置するというを前提とし、さらに詳しい位置や波源の規模の検討を行う。

3.1 八重山・宮古諸島での波源の検討

a) 計算方法

図-3 は本数値解析の対象領域を示し、西は波照間島、東は宮古島を含み、南は水深 2500 m 付近まで領域をカバーしている。津波伝播シミュレーションの支配方程式は線形長波理論とし、海岸では完全反射の条件とし遡上計算までは行わない。また、外側境界条件は自由透過条件とし、日野・仲座(1988)により提案された境界に仮想的な完全壁面を設定しそこで発生する重複波の半分が透過波成分と等しいという原理を利用して与えた。ここでは仮定壁面の位置を工夫して、1 時間ステップあたり

表-1 計算領域と条件

対象領域	空間格子間隔	支配方程式	沿岸境界条件
八重山・宮古諸島	150 m	線形長波理論	遡上なし
石垣島	50 m	浅水理論	遡上あり
伊野田	17.6 m	浅水理論	遡上あり

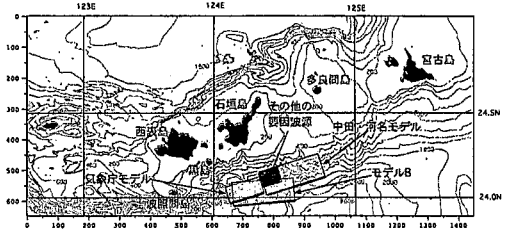


図-3 対象計算領域と各モデルの位置

表-2 検討した断層モデル

モデル名	マグニチュード	断層長さ (km)	断層幅 (km)	走向	傾斜角	すべり角	すべり量 (m)
気象庁モデル	7.4	33	15	255	70	90	8.3
中田・河名モデル	7.8	66	33	255	70	90	8
モデル B2	7.8	40	20	270	70	90	30
モデル C	地震	7.6	40	20	270	70	10
	その他原因		15	10	260	70	50
モデル C+	地震	7.7	40	20	270	70	20
	その他原因		15	10	260	70	90

離れた伝播距離とすることにより、反射条件をより正確にした。

b) 波源の推定と計算結果

まず、気象庁による $M=7.4$ を元にした波源（以下、気象庁モデル）と、中田・河名(1986)による痕跡高から推定された波源モデル（以下、中田・河名モデル）を比較検討した。なお、中田・河名モデルでは波源サイズが推定しており、これに基づいて $M=7.8$ 程度のマグニチュードが算出されている。両モデルの位置を図-3 に示し、断層パラメータを表-2 に示す。なお、すべり量は地震マグニチュードと断層パラメータの標準的な関係より若干大きい値としている。

この二つのモデルに対し数値計算を実施し、その計算結果と痕跡値との比較を図-4a に示す。計算値は痕跡の周辺の数点での最大値を選んでいる。この結果より、数値計算結果と痕跡値との間に約 3 倍以上の値の違いがあることがわかる。また、空間分布を見ると、石垣島に対して津波の主要エネルギーの分布が、気象庁モデルでは

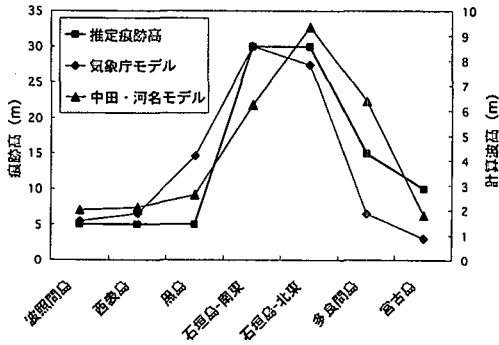


図-4a 各島々の最高水位の比較

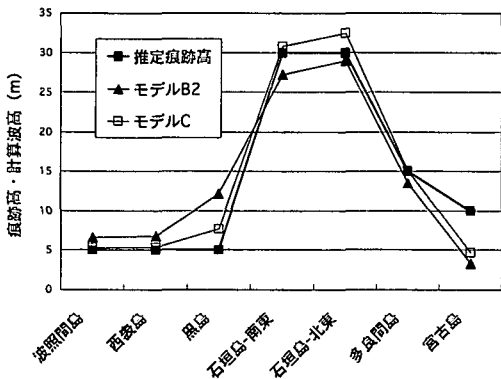


図-4b 各島々の最高水位 (モデル B2, モデル C との比較)

若干西側に、中田・河名モデルでは東側にずれていることがわかる。ただし、気象庁モデルは、石垣島より東では過小評価しているが、全体的な空間分布を見てみると、痕跡値と比較的良好に対応していることがわかる。従って、波源の位置は、気象庁モデル付近であることが推定できるが、定量的な不一致を修正しなければならない。

c) 本研究で提案する波源モデル

津波高さの違いはすべり量に関係し、エネルギー分布は断層の走向に大きく関連する。ここでは、図-4aの比較結果を基に、気象庁モデルの位置を基準として、走行やすべり量を変えたパラメータスタディを行った。その結果、走向は270度、すべり量30m、断層長さが40km(ここでは、モデルB2と呼ぶ)が最も妥当な値であることが分かった。痕跡値との比較を図-4bに示す。痕跡値の再現性は高くなったと思われるが、黒島、石垣島南東部での不一致が見られる。

このモデルB2のすべり量30mは、地震の相似則から考えてもとても非現実的なものであり、他の要因による津波発生を考える必要があると判断する。松本・木村(1993)は八重山沖黒島付近での海底調査を実施し、明和地震の際に大規模な海底の斜面崩壊を確認しており、大規模津波の発生原因の一つである可能性を指摘してい

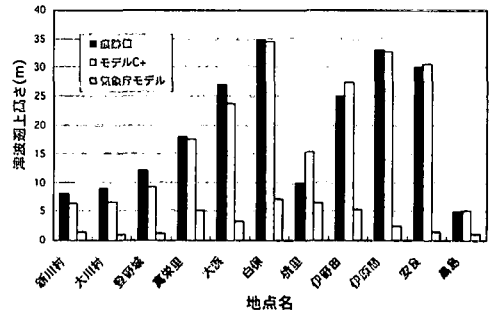


図-5 石垣島各地点の遡上高の比較 (モデル C+)

る。そこで、断層位置はこのままで、その他の要因(地滑りなど)があったとし、さらに別の波源を仮定する。つまり、モデルB2のすべり量を10m($M=7.8$ 相当)にした断層モデルに、その他の波源を組み合わせたものとした。その他の波源の規模、動的な挙動が不明であるために、ここでは断層モデルを仮定して鉛直変位量のみを与えることとした。本研究で試行錯誤の結果、このすべり量は50mとなったが、海面の鉛直変位量としては最大25m程度である。このモデルの断層パラメータ(モデルC)及び断層位置を表-2及び図-3に示す。なお、断層面自体はモデルBと同じである。宮古島での痕跡値を除いて、最も再現性の高い結果となった。

3.2 石垣島での詳細検討—遡上効果を考慮—

a) 計算方法

石垣島に着目して、詳細地形(空間格子間隔50m)を用いた遡上計算を行い、波源の再検討を行う。細かい格子間隔を採用することにより珊瑚礁・リーフ地形を再現することが出来き、さらに遡上計算を実施することにより島陸上部での痕跡値と直接比較することが可能である。比較対象の痕跡値は、図-2に示された11カ所で得られている結果である。波源モデルは、前節で得られたモデルCである。

b) 計算結果

モデルCの計算遡上高と推定浪跡高との比較した、石垣島において両者の空間分布はおおむね一致しているものの、数値結果が過小評価になっていることが分かった(詳細は今村ら(2001)を参照)。これは、3.1での検討が線形長波理論であり陸側境界で完全反射を仮定したために、遡上させた場合よりも津波の高さが過大になっていたと判断できる。特に、石垣島などは沿岸に珊瑚礁が発達しており、この浅瀬が特に差を生じさせたと考える。

そこで、断層の位置及び長さ、幅は変えずにすべり量のみ大きくして、数値計算を実施することとする。今回最も妥当であったモデルが表-2に示されたモデルC+である。比較結果を図-5に示す。非常に良い一致を示している。ただし、石垣島の南西部(新川村、大川村、登

野城) 周辺で計算値が若干過小, 桃里で過大評価となっている。以上の結果から, このモデル C+ が最も妥当であると考えられる。

4. 津波石移動の数値解析

4.1 数値モデルと支配方程式

数値モデルは, 通常の津波成分に対するモデルと津波の流れによる津波石の移動モデルとで構成される。津波石は流れにより移動するが, 同時に流れに抵抗として作用するので, 相互に働く力のモデル化が重要である。まず, 流れの計算には浅水理論を適用する。この運動の式は, 津波石が流れに与える影響を考慮している。相互作用力は抗力と質量力とし, f_{Dx} , f_{Ix} は, それぞれ津波石が流れに作用する抗力(相対流速の 2 乗に関係する), 質量力(相対加速度に関係する)を単位面積当たりに換算したもので, 次式のモデル化を行った (x 方向のみ示す)。

$$f_{Dx} = \frac{1}{2} C_D (U - \dot{X}) \cdot \sqrt{(U - \dot{X})^2 + (V - \dot{Y})^2} HW / \Delta x \Delta y \quad \cdots (1)$$

$$f_{Ix} = \{ C_M \dot{U} LHW - (C_M - 1) \ddot{X} LHW \} / \Delta x \Delta y \quad \cdots (2)$$

上 2 式中の Δx , Δy は, 空間格子間隔を示す。

一方, 岩塊の移動は次式により支配されると考えられる (x 方向のみ示す)。

$$\begin{aligned} \rho_s LHW \ddot{X} &= \frac{1}{2} \rho_f C_D (U - \dot{X}) \sqrt{(U - \dot{X})^2 + (V - \dot{Y})^2} HW \\ &+ \rho_f C_M \dot{U} LHW - \rho_f (C_M - 1) \ddot{X} LHW \\ &- F_{bx} - F_{gx} \quad \cdots (3) \end{aligned}$$

ここで U , V はそれぞれ x , y 方向の流速であり, X , Y はそれぞれ岩塊の x , y 方向の移動距離を表す。 H , L , W は岩塊の高さ, 長さ, 及び幅であり, F_b は底面摩擦, F_g は重力の斜面方向成分を示す。添え字の f , s はそれぞれ流体と岩塊とに関する量であることを示す。同様にして y 方向の式も求めることができる。また C_D , C_M は野路ら (1993) が定式化したモデルを用いる。図-6 には,

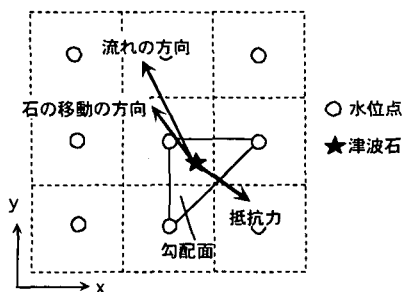


図-6 石移動数値モデルでの流れ・力の方向

2 次元伝播問題での作用力成分のベクトルとしてのバランスを示す。流れ方向と津波石の抵抗力方向は異なり, その差が津波石の移動方向成分を表すことに注意されたい。

4.2 津波石移動の計算条件

以上のモデルを石垣島伊野田での津波石に適応する。この地域の地形 (50 m 空間格子間隔), 及び津波石の想定初期位置を図-7 に示す。初期位置は, 河名 (2000) によると岸からおよそ 3 町 (327 m) 沖にあったとされ, 現在では汀線から 2 町 (218 m) 陸側の場所にある。ただし, 具体的にどこにあったのかは不明であるので, 5 つの初期位置 (図中の P1, P2, P3, P4, P5) を想定して計算することとした。また, 津波石の寸法は, 現在確認されている津波石のサイズとし, 高さ 4.5 m, 長さ 6 m, 幅 6 m, 岩の密度は 1.5 t/m^3 とする。静止摩擦係数, 動摩擦係数はそれぞれ, 現地で実測して得た 0.75, 0.71 とする (吉田, 2001)。また, 津波石は流れに対して, 常に直行しているとして, 投影面積を一定とする。

4.3 計算結果及び考察

図-7 に岩塊の移動結果を示す。この地域では, 津波の入射状況はほぼ同じであるが, 岩の場所が異なると戻り流れの違いにより, 各岩塊の移動の差が見られる。特に P5 は, 戻り流れによって, 300 m 近く海域方向へ移動している。河名 (2000) が報告している津波石に最も近い移動を示した位置は, P3 である。従って, 津波来襲前の津波石の位置は P3 付近であると推定できる。ただし, P3 での初期位置が最も現在の津波石の位置を説明できるが, 海岸線からの位置が若干異なっている。この原因の一つは, 流れ・岩の移動数値モデルの空間格子間隔やが関係すると思われる。

図-8 に, x , y 方向の岩塊の速度と岩塊に作用する流

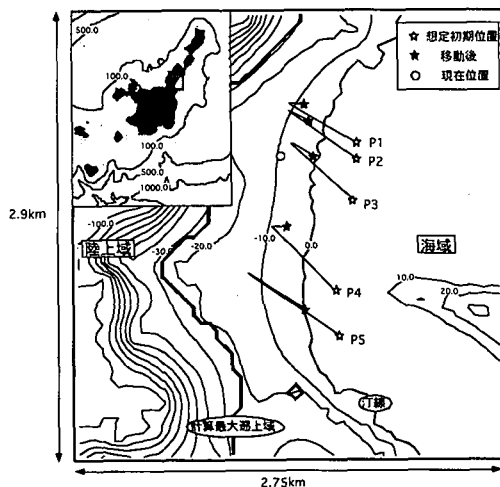


図-7 伊野田での津波石の移動地点と地形

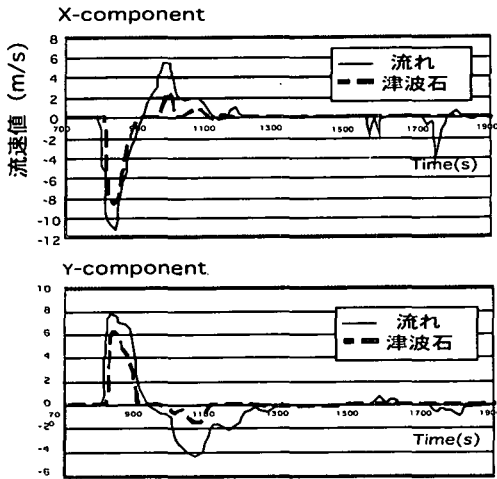


図-8 津波石に作用する流速と移動速度 (x, y 方向)

体の流速を示す。これらを参照すると、石の移動はほとんど第一波の押し引きによる結果であるといえる。また、押し波では x, y 方向とも同じ時間帯で速度が増加し、岩を移動させているが、引き波では、 x, y 方向とも異なる時間で岩を再移動させていることがわかる。この違いが岩が戻る時の軌跡を左右させている。第一波の流速は 10 m/s を超える値であり、2 m/s 程度を下回ると津波石は停止するようである。ただし、これは、津波石のサイズや摩擦係数だけでなく、その位置の斜面勾配などにも関係する。

5. 終わりに

以上の検討により、以下のような結果を得た。

津波波源に関しては、気象庁モデル ($M=7.4$) による断層モデルでは、津波の痕跡値を説明することはできない (図-5)。断層サイズはほぼ同じであるが、すべり量を大きくしたモデルに加えて面積の小さい変位量のかかなり大きい波源モデルが必要である。その場所は、松本・木村 (1993) が海底地滑り痕跡を指摘している黒島海丘の付近になる。

野路ら (1993) の津波石移動 1 次元モデルを改良し、現地に適用できる方法にした。特に、津波石に作用する力の各方向成分のバランスをとり、移動させた。本モデルを伊野田での津波石に適用させ、安定した結果を得ることができ、適正な空間格子間隔 (ここでは 17.6 m ほど) を選定すれば、現在の津波石の位置を説明することができる。

最後に、図-8 の位置 P3 のケースが示唆しているが、地形によっては戻り流れの大きい場所があり、そこでは津波石が大幅に元の位置に戻される。従って、現在ある津波石の標高は、実際の津波遡上高さよりかなり低い位置となる。津波石の周辺での津波数値計算を実施し、このような効果を算定し、津波高さの再評価を行う必要があると思われる。

謝辞：本研究の一部は、科研費基盤 (B) (2) (12574016) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 今村明恒 (1938): 琉球地震帯及びに明和大津波に就て, 地質, 10, pp. 431-450.
- 今村文彦・吉田 功・Andrew Moore (2001): 石垣島における 1771 年明和大津波と津波石移動の数値解析, 東北大学工学研究報告, 第 18 号, 印刷中.
- 加藤祐三 (1986): 八重山地震津波 (1771) の津波の遡上高, 歴史地震, 第 2 号, pp. 133-139.
- 加藤祐三 (1988): 沖縄県宮古群島における八重山地震津波 (1771) の挙動—新発見史料「思明氏家譜」付属文書「御問合書」による検討—, 歴史地震, 第 4 号, pp. 47-56.
- 加藤祐三・木村政昭 (1983): 沖縄県石垣島のいわゆる「津波石」の年代と期限, 地質学雑誌, 89, pp. 485-488.
- 河名俊男 (2000): 琉球列島南部の宮古諸島と八重山諸島における 1771 年明和津波の遡上高と岩塊の移動, 及び沖縄県南部における大型台風の高潮と古津波による岩塊の移動, 東海・東南海・南海地震津波研究会津波防災対策現地調査ガイドブック, 25 p.
- 中田 高・河名俊男 (1986): 明和 8 年 (1771) の地震津波について, 歴史地震, 第 2 号, pp. 141-147.
- 野路正浩・今村文彦・首藤伸夫 (1993): 津波石移動計算法の開発, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 176-180.
- 河名俊男・中田 高 (1987): 明和津波と海底地震変動, 歴史地震, 第 3 号, pp. 181-194.
- 牧野 清 (1968): 八重山の明和大津波, 著者出版, 462 p.
- 松本 剛・木村政昭 (1993): 1771 年八重山地震津波発生域における精密地形調査と津波発生メカニズムに関する一考察, 地震 II, 第 45 巻, pp. 417-426.
- 日野幹雄・仲座栄三 (1983): 数値はどう解析における新しい無反射境界スキームの平面二次元問題への適用, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 262-266.
- 吉田 功・今村文彦・Andrew Moore (2000): 石垣島における 1771 年明和大津波の数値解析, 土木学会東北支部技術発表会講演集, pp. 122-123.
- 吉田 功 (2001): 石垣島における 1771 年明和大津波の数値解析, 東北大学大学院工学研究科修士論文, 84 p.
- 渡辺偉夫 (1998): 日本被害津波総覧, 東大出版会, 238 p.
- Ota et al. (1995): Late Holocene coastal morphology and sea-level records on small islands, the south Ryukyus, Japan, Geographical Review of Japan, 58B, pp. 185-194.