

海岸波浪の時系列特性とソリトンモード

篠田成郎*・安田孝志**・川口智也***・土屋義人****

1. 緒 言

海岸波浪の非線形性と波群性との関係が最近問題になってきており、特に非線形波動の変調不安定理論の進展と相まって、非線形 Schrödinger 方程式あるいは Zakharov 方程式に基づいた波群の力学的解析に対する関心が高まってきている。その結果、狭帯域スペクトルを持つ弱非線形な不規則波の力学的挙動を説明することには成功したものの、深海波が主要な研究対象となっている。また一方では、波群に関する統計的特性の解明にも力が注がれつつあり、Longuet-Higgins¹⁾に代表される線形理論を基礎とした波群の統計理論はほぼ完成したといえるが、非線形性の影響およびスペクトル幅の仮定に問題が残されている。構造物の外力の算定などの工学的問題においても、非線形性の卓越する極浅海における不規則波浪に存在する波群は、rocking 現象などの波の時系列に依存する問題を考えるときたいへん重要となる。

既に著者らは、このような浅海における非線形不規則波浪を不規則なソリトンの連なりとして扱う方法を提案し、その適用性を明らかにしてきた^{2),3)}。これによれば、波浪がソリトンを基準モードとしたコヒーレントな力学的構造を形成している場合には、その振幅は伝播過程において保存され、各ソリトンはその振幅に比例した速度で伝播する。このため、長い伝播過程を経ることにより波群は完全に崩壊し、浅海域において不規則波浪の力学的な意味での波群性は存在しないことになる。ところが、現実の極浅海域において波群は明らかに存在しており、海岸波浪の不規則ソリトン列としての描像と ensemble として一定の秩序を持つという波群性とは相入れないものとなっている。

そこで本研究では、浅海における非線形不規則波浪を不規則な振幅を有するソリトンの連なりとし、このとき生ずる上述の矛盾の実態を解明するために、時系列としての波群性とソリトンモードとの関係をうねり性の現地観測記録を用いて明らかにすると同時に、海岸波浪の波

群性に対して統計的観点より一つの説明を与える。また、ソリトンモードに基づく方法により、波群の崩壊過程を巨視的に論じ、その特性の空間的变化を明らかにする。

2. 観測波浪の特性

本研究において解析の対象とした観測記録は、1978年11月にアメリカ合衆国西海岸の California 州 Torrey Pines Beach において得られたものの一部であり、既に Guza および Thornton⁴⁾によりその詳細な解析結果が報告されている。

図-1 は、データの取得された海岸の海底地形およびほぼ波方向に並ぶ測点の位置を示し、図中の計測器番号先頭の 'P', 'W' および 'C' はそれぞれ波圧計、容量式波高計および2成分流速計を表わす。ここでは、波群特性を含めた波浪特性の空間的变化を議論するため、岸沖方向に計測器の揃った波圧計による11月20日の記録に対して解析を行った。また、このときのデータのサンプリング間隔は0.5 secであり、データ長は4096 secであった。なお、図中の海底地形は、1978年11月9日に測深されたデータを Spline 補間することにより求めたものであり、解析対象とした20日においては約1/30 から1/90の勾配を有する比較的緩斜面の海浜であった。

図-2 は、水位変動の周波数スペクトルの空間的变化の一例を示したものである。波浪の伝播に伴いピーク周波数の倍モードの周波数成分が励起されており、このと

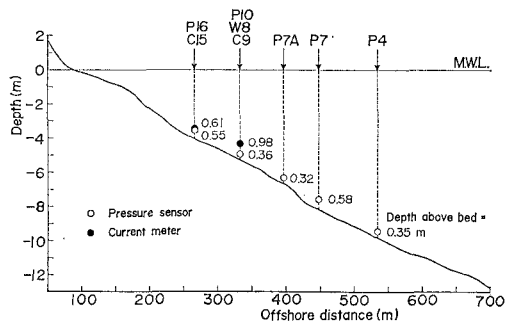


図-1 海底地形と測点番号

* 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

*** 学生員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

きの波浪は非線形性の卓越したうねり性の波浪であったと考えられる。また、0.04 Hz 以下の低周波数成分のエネルギー密度が、水深の減少に伴い増大する傾向が見られる。これは、Guza および Thornton⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾ も報告しているように、Torrey Pines Beach

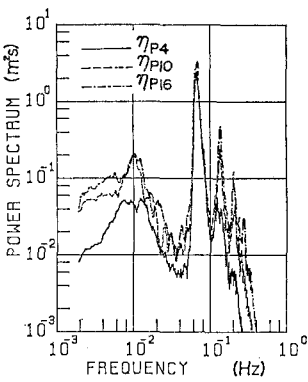


図-2 波の伝播に伴う周波数スペクトルの変化

付近の沿岸海域には surf zone 付近において顕著な surf beat が存在することから、surf zone に近くなる程低周

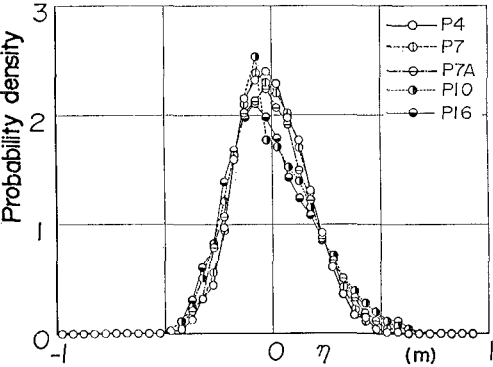


図-3 水位変動の分布の空間的变化

波の変動が強く現れていると考えられる。さらに、これらの結果からは明らかではないが、このとき使用された計測器には 0.3 Hz 以上の電氣的ノイズが含まれていたことも報告されている⁽⁴⁾。これらのことより、低周波および高周波側には、波動成分以外の変動成分が混在している可能性が高いと判断されるため、以下の解析においては、0.04 Hz 以下の低周波成分および 0.8 Hz 以上の高周波成分を FFT 法により除去して得られるフィルタ処理波形を用いることにする。

波浪の統計的解析を行うにあたり重要となるのは、確率変数としての水位変動の定常性である。そこで、波形の定常性の検定としてノンパラメトリック手法による連検定を行った。ここでは、波形の標本記録を各区間のデータが独立であると考えてさしつかえのないような時間区間 (1, 2, 3, 4 および 5 分間) に分け、各区間に対する標本標準偏差値の列をそれらの中央値に関する連の大きさによって検定を行った。その結果、標本値列の変動が不規則でトレンドを示しておらず、有意水準 5% で定常性の仮説が許容されることが確認された。

図-3 は、水位変動の分布の空間的变化を表したものである。これより、分布形は左右非対称であり、波浪の伝播に伴いピーク位置が負側へ移動している様子が見られ、水深の減少に伴い波浪の非線形性が次第に増加することが確認できる。また、表-1 は各測点における観測波浪の特性を表す様々なパラメータを示したものである。表中に示した skewness および Ursell 数の値は、波浪の伝播に伴い増加しており、このことから、非線形性の影響により波形が上下非対称になっていく様子がわ

かる。なお、表中の ν , Q_p および GF の計算の際には、周波数帯を 0.04~0.8 Hz に設定した。

3. 波浪の時系列特性

ここでは、波浪がソリトン構造を有すると考えた場合に生ずる波群性と前述の相反性を、上述の観測記録を用いて統計的に検討するとともに、波高の時系列特性としての波群性と不規則ソリトン列の振幅に関する時系列特性との関係を明らかにする。

(1) 波形のソリトンモード表示

不規則ソリトン列に関する統計的解析を行うに当

表-1 観測波浪の特性

Date	November, 20				
Location	P4	P7	P7A	P10	P16
Water depth (m)	10.226	7.523	6.853	5.721	3.973
Skewness	0.218	0.257	0.342	0.557	0.729
Kurtosis	2.953	3.000	3.063	3.363	3.864
$f_p \times 10^2$	6.750	6.750	6.750	6.750	6.750
$S(2f_p)/S(f_p) \times 10^2$	1.589	2.308	3.390	7.099	13.652
Spectral width parameter, ν	0.382	0.429	0.378	0.500	0.548
Spectral peakedness parameter, Q_p	6.820	6.640	6.386	5.339	4.324
kph	0.447	0.381	0.363	0.330	0.273
Groupiness factor	0.830	0.813	0.800	0.770	0.699
$H_{1/3}$ (m)	0.636	0.650	0.715	0.802	0.885
$T_{1/3}$ (sec)	13.973	14.027	13.285	12.392	12.060
$\bar{H}$ (m)	0.414	0.416	0.463	0.499	0.534
$\bar{T}$ (sec)	13.806	13.217	13.057	12.096	11.383
H_{rms} (m)	0.458	0.464	0.514	0.566	0.615
μ_A (m)	0.525	0.401	0.407	0.407	0.419
σ_A (m)	0.221	0.220	0.222	0.245	0.260
μ_T (sec)	11.785	10.531	9.607	8.148	7.328
σ_T (sec)	3.724	4.100	3.980	4.197	3.459
$\rho(A\&T)$	0.567	0.581	0.599	0.481	0.475
$\gamma_A(A_j\&A_{j+1})$	0.545	0.525	0.367	0.145	0.113
$\gamma_T(T_j\&T_{j+1})$	0.284	0.261	0.275	0.043	0.140
Mean of run length, $\bar{\ell}_1$	4.159	3.255	2.699	1.736	1.674
Mean of total runs, $\bar{\ell}_2$	7.591	6.800	5.562	3.893	3.867
Ursell number, Ur	8.145	14.449	18.947	26.999	56.102

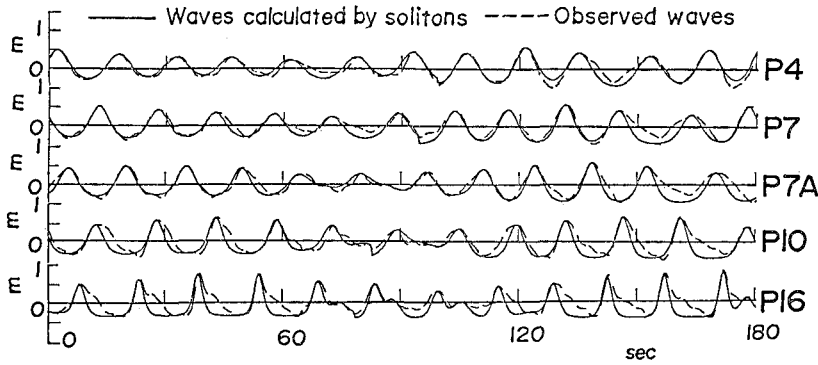


図-4 各測点における観測波形とソリトン合成波形との比較

り、確率変数の標本値としてのソリトンの振幅および位相が正確に得られていることが必須となる。図-4 は、この点を検討するために、前述のようにフィルター処理された観測波形とこれを不規則ソリトン列として表示して得られるソリトン合成波形との比較の一例を示したものである。これより、波浪の伝播に伴い、shelf の生成や波峯自体の前傾に伴うと考えられる波形の前後非対称が見られるようになり、これらの影響を無視したソリ

とすれば、この時系列特性に波群性が反映されるため、不規則ソリトン列の時系列に関する統計量によって波群性の評価が可能となる。

(2) 観測波浪の波群性

図-5 は、各測点における観測波形の一例を示したものであり、単に波形を見る限りにおいてはこのときの波浪には顕著な波群が存在していたと判断できる。また、波浪が沖側測点 P4 から岸側測点 P16 までの約 300 m

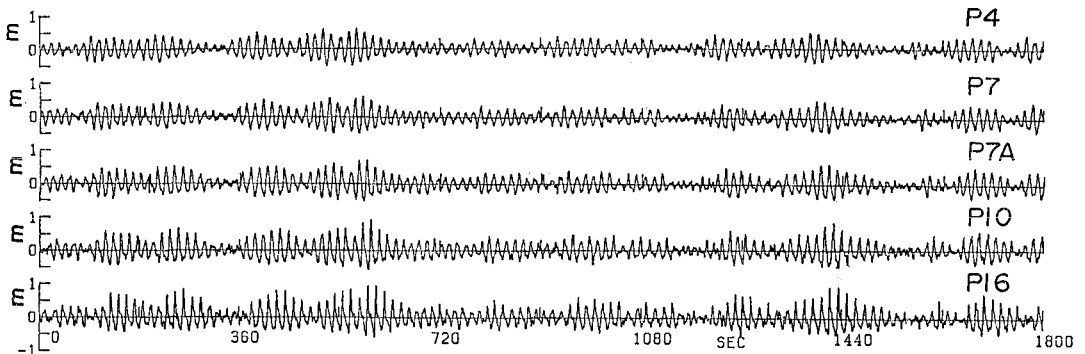


図-5 各測点における観測波形と波群

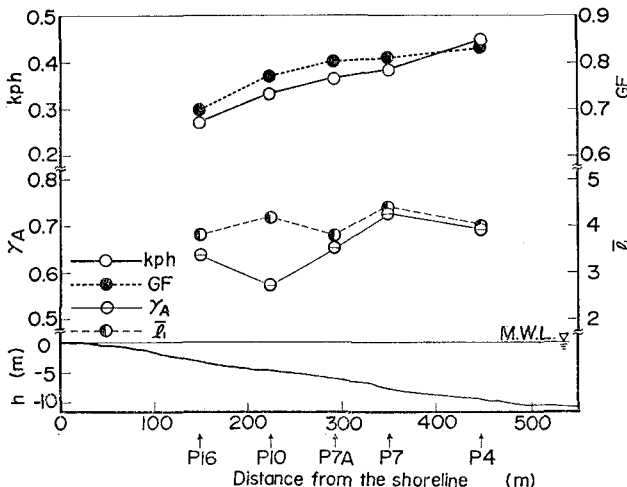


図-6 波群性に関する各種パラメータの空間的变化

を伝播する過程において、このときの波群が非線形 Schrödinger 方程式に従うとしたときに予測される浅水化に伴う包絡波形の平坦化は見られず、波浪が安定な波群形状を保持しつつ伝播していることがわかる。ただしここでは、波浪の統計的特性を波群と不規則ソリトン列との対応より検討するのが目的であるため、波浪の力学的構造までは言及しないものとする。

海岸波浪を不規則ソリトン列の集合として捉える場合には、その波群性はソリトンの振幅に関する時系列特性として表わすことができる。そこでここでは、この時系列特性に対応した波群性に関する統計量として隣り合うソリトンの振幅相互の相関係数を定義する。

図-6 は、波群性に関する各種パラメータの

空間的变化の一例を表しており、海底地形も併せて示してある。図中、 $k_p h$ はピーク周波数に対応した波数 k_p により求められた相対水深、 GF は Groupiness factor、 $\bar{l}_1$ はゼロアップクロス波の平均連長、 γ_A は隣り合うソリトンの振幅相互の相関係数を表している。これより、 $k_p h$ は一般に包絡ソリトンが形成される限界値と考えられる $kh=1.36$ よりもかなり小さいものの、 GF 、 $\bar{l}_1$ および γ_A ともにたいへん大きな値を示しており、波群の存在は無視できないことが確認できる。しかしながら、このときの波群が非線形 Schrödinger 方程式に支配されているとするなら、平均連長 $\bar{l}_1$ は伝播に伴って増大していくものと考えられるが、そうした傾向は見られない。

(3) ソリトン列の伝播と波群の崩壊

前述のように、一様水深場におけるソリトンの伝播速

度はその振幅によって一義的に決定されるため、各ソリトンは空間的に互いに独立に伝播する。すなわち、不規則ソリトン列における j 番目のソリトンの無次元伝播速度 c_j^* は次式で表される²⁾。

$$c_j^* = 1 + A_j^*/2 - \gamma_0/2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A_j^* ソリトンの無次元振幅および γ_0 波谷面と平均水面との水面差である。また、無次元化された時間軸上における j 番目のソリトンの位相を δ_j とすれば、隣り合うソリトンの無次元間隔 T_j^* は

$$T_j^* = \delta_{j+1} - \delta_j \quad \dots\dots\dots (2)$$

として定義できる。今、不規則ソリトン列が無次元距離 X だけ伝播し、その過程において各ソリトンが互いに追いつきしを起こさない場合には、伝播後の無次元ソリトン間隔 $T_j^{*'}$ は次式で求められる。

$$T_j^{*'} = T_j^* + \bar{e}_j X \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{e}_j = (c_j^* - c_{j+1}^*) / c_j^* c_{j+1}^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\bar{e}$ はソリトン間の相対速度に関連した確率変数であり、ソリトンの振幅の関数として表わされるため、一様水深場においては、空間的に保存される。

図-7 は、沖側測点 P4 における不規則ソリトン列に関する T^* と $\bar{e}$ の結合分布およびそれらの周辺分布を示したものである。式(3)において $T_j^{*'} \leq 0$ となる場合、すなわち

$$\bar{e}_j \leq -T_j^*/X \quad \dots\dots\dots (5)$$

を満たす T_j^* と $\bar{e}_j$ を持つソリトンの組は、無次元伝播距離 X を伝播する過程でそれらの配列を入れ替える。図-7 の結合分布図には、沖側測点 P4 から岸側の各測点までの距離をそれらの間の平均水深で無次元化して得られる無次元伝播距離を X として式(5)に代入し、この不等式の等号が成立するときの T^* と $\bar{e}$ の関係を実線で示してある。図中の実線より下側にプロットされる T^* と $\bar{e}$ の組は存在せず、これより、沖側測点 P4 から岸側測点 P16 の間においてソリトンの配列は全く変化しないと判断できる。さらに、この図において $X = -T_j^*/\bar{e}_j$ を最小にするのは $(T^*, \bar{e}) = (3.8, -0.030)$ の点であり、このとき $X=127$ となる。すなわち、平均水深 h を 5 m とすれば、このときの不規則ソリトン列の配列が最初に変化するのは $Xh=635$ m の地点であり、岸側測点 P4 から汀線までの距離が 448 m であったことを考慮すると、測点 P4 より岸側においてソリトン列の配列は全く変化していないと考えられる。前述の図-6 においても、個々波としての波群性に関するパラメータである $\bar{l}_1$ および γ_A は伝播に伴って若干減少している程度であり、ここで対

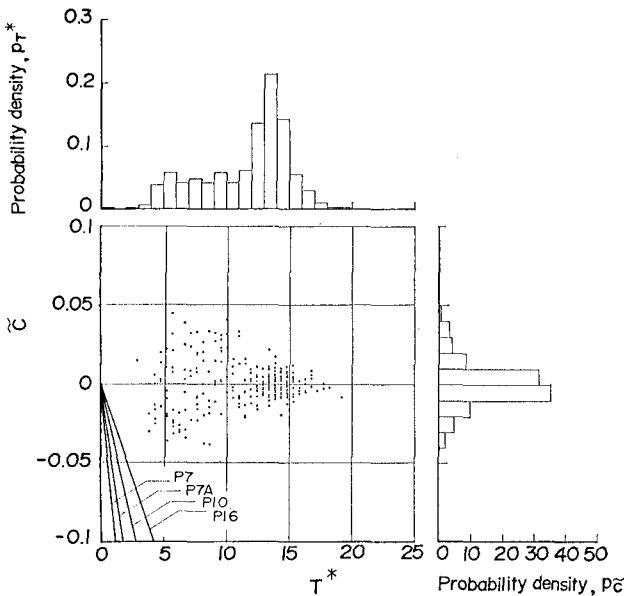


図-7 確率変数 T^* と $\bar{e}$ の結合分布およびそれらの周辺分布

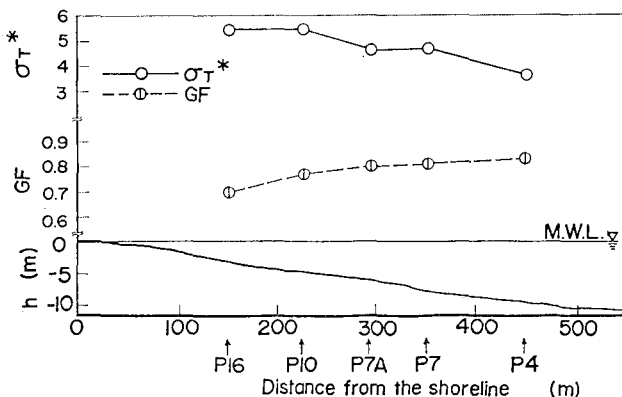


図-8 Groupiness factor および無次元ソリトン間隔の標準偏差の空間的变化

象とした 300 m 程度の伝播距離ではこれらを変化させるソリトンの配列の変化はほとんど生じないと思われる。また、式 (1), (3) および (4) から判るように、ソリトン列がその伝播過程において頻繁に配列を変化させるためには、ソリトンの振幅のばらつきが大きいたが必要であり、その分散が小さい場合には、不規則ソリトン列に関する時系列特性は空間的にほとんど変化しないと思われる。

図-8 は、無次元ソリトン間隔の標準偏差 σ_T^* および Groupiness factor GF の空間的变化を示したものであり、波浪の伝播に伴い σ_T^* が増加していることがわかる。これは、式 (3) および (4) から明らかなように、伝播距離 X の増加に伴い、 $\bar{\epsilon} > 0$ の場合には $T_j^* > T_j^{*'}> T_j^*$ となり、また $\bar{\epsilon} < 0$ の場合には $T_j^* < T_j^{*'}< T_j^*$ となるため、図-7 の結合分布が次第に左右に広がり、その結果として T^* の分散が増加するためと考えられる。また、これとは逆に GF は伝播に伴い低下する傾向がある。 GF が SIWEH の変動係数として定義されるのは周知のところであるが、SIWEH は搬送波の個々波としての振幅および波峰間隔に大きく依存しており、搬送波がソリトン化している場合には、その振幅は空間的に変化しないため、SIWEH の空間的变化はソリトン間隔に支配されることになる。このため、ソリトン間隔のばらつきが大きくなるに従い GF が低下しているものと思われる。これより、搬送波の統計的特性は包絡波としての波群による力学的な束縛を受けておらず、極浅海における波群はあくまで見かけ上のものであり、単に不規則ソリトン列の時系列特性として評価されるべき性質のものであると考えることができる。

4. 結 語

以上、極浅海における海岸波浪のソリトン構造と波群性との関係を統計的に検討し、その空間的变化特性を明らかにした。本研究によって得られた成果を要約すると次のようになる。

1) 極浅海における波群性は、不規則ソリトン列の振幅に関する時系列特性として評価される。

2) 線形理論に基づいて定義される波群パラメーターである Groupiness factor の空間的变化は、ソリトン間隔の分散の空間的变化に対応する。

3) 波群の崩壊過程は、ソリトン間の相対的な伝播速度とソリトン間隔との結合分布の空間的变化として捉えることができ、ソリトンの振幅の分散が小さい場合には、見かけ上の波群は極めて安定となる。

本研究において導入された確率変数 $\bar{\epsilon}$ は、波浪がソリトン構造を有しているとの仮定の下で、波群の崩壊過程を確率的に捉えることのできるパラメータであり、今後はこの $\bar{\epsilon}$ と無次元ソリトン間隔 T^* との結合確率密度の空間発展を記述する方程式を導き、これを基に波群の崩壊を確率的に論じるつもりである。

なお、本研究で用いたデータは Univ. of Delaware の Robert A. Dalrymple 教授に提供して頂いたものであり、ここに記して謝意を表す。また、本研究は文部省科学研究費（総合研究 (A)：代表者 土屋義人）による成果であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Longuet-Higgins, M. S.: Statistical properties of wave groups in a random sea state, Phil. Tran. Roy. Soc. Lond., Vol. A312, pp. 219~250, 1984.
- 2) 土屋義人・安田孝志・武山保徳：相互干渉を無視した場合のソリトンスベクトルの理論，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 89~93, 1981.
- 3) 土屋義人・安田孝志・篠田成郎：波浪ソリトン群とその統計理論，京都大学防災研究所年報，第 29 号 B-2, pp. 691~716, 1986.
- 4) Guza, R. T. and E. B. Thornton: Local and shoaled comparisons of sea surface elevations, pressures, and velocities, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, pp. 1524~1530, 1980.
- 5) Guza, R. T. and E. B. Thornton: Velocity moments in nearshore, Jour. Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng., A.S.C.E., Vol. 111, No. 2, pp. 235~265, 1985.
- 6) Guza, R. T. and E. B. Thornton: Observations of surf beat, Jour. Geophys. Res., Vol. 90, pp. 3161~3172, 1985.