

波浪作用下の海底砂層内に発生する間隙水圧の伝播特性

前 野 賀 彦*・長 谷 川 高 士**

1. ま え が き

波浪により海底地盤内に引き起こされる間隙圧に関する知識を得ることは、海底地盤の安定性を有効応力理論に基づいて検討する上から重要である。そこで、従来より多くの予測理論が提案されており¹⁾、一方では、原位において海底地盤内の間隙圧を測定することにより、その知識を得る試みも盛んに行われている²⁾。しかし、それらは大規模なもので大きなプロジェクトとなされているものである。一方、著者ら³⁾は、造波水槽を用いた室内模型実験に基づいて、沖浜問題としてだけでなく、near-shore を問題とする目的から、従来とは異なり、波形勾配を用いた実験式を提案している。そこで、実験式の検証の上からも、比較的安価に near-shore において、海底砂層中の間隙圧変動を観測できないものかと考えた。そのため、予備的実験結果に基づいて長期的な観測地点を設置する目的をもって、福井県大飯郡高浜町難波江浜に測定地点を設け、海底砂層表面と砂層中二点の三箇所の変動圧力を測定した。ここでは、まず、この予備的観測結果についての周波数分析結果を報告し、更に、海底砂層の土質力学的特性についての知識を得るために、Mavko et al.⁴⁾による地震時に測定された地盤内の間隙水圧と地盤表面の水平および鉛直加速度とのスペクトル比についての理論的考察を踏まえ、観測した砂層表面の変動圧力と砂層内の間隙圧変動とのスペクトル比についての理論的考察を試みた。

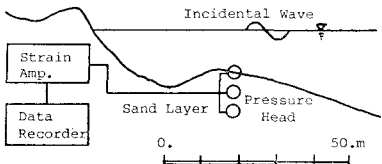
2. 難波江浜での実験について

原位における測定は、福井県大飯郡高浜町難波江浜において行った。著者らは、以前より海岸断面の季節的变化、底質の物理的特性などの検討を行ってきたことから、観測地としてこの地点を選んだ。この難波江浜の砂の特性は表一に示した。相当均等な砂であるといえる。また、採取位置の相違による砂の粒径分布等の変化は認められなかった。

測定は、図一に示すように圧力変換器を設置し、砂

表一 難波江浜の砂の特性

Coefficient of uniformity	1.53
Specific gravity	2.70
Permeability	0.023 cm/s
Effective grain size	0.114 mm
Average grain size	0.160 mm

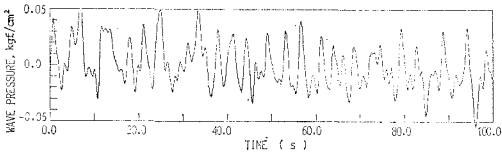


図一 実験概要

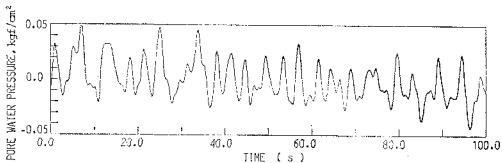
層表面および砂層中の圧力変動を測定した。海中での作業の困難から、最も深い所で、砂層中 30 cm のところであった。また、それらの圧力変換器は、防水ゴム被覆を施した延長ケーブルによって陸地に設置したプリアンプおよびデータレコーダに接続した。

3. 観測結果の周波数分析結果と考察

図二(a)、(b)に、1981年8月10日に測定した砂層表面および砂層中 30 cm のところにおける圧力変動の振幅変化をそれぞれ示した。それによると、砂層表面および砂層中共に同様の変動を示しているが、砂層中で



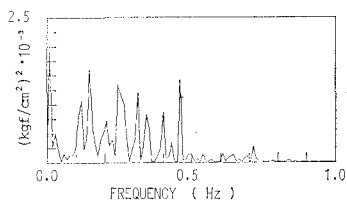
(a) 砂層表面の波圧変動



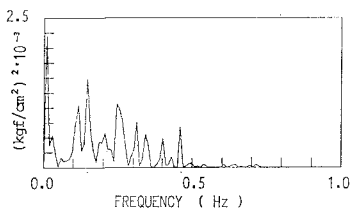
(b) 砂層中 30 cm における間隙圧変動

図二 砂層表面および砂層中の圧力変動

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校助手 土木工学科
** 正会員 農博 京都大学教授 農学部農業工学科



(a) 砂層表面



(b) 砂層中 30 cm

図-3 パワースペクトル図

比較的高い周波数成分が減衰しているのが認められる。このことは、図-3 (a), (b) に示す FFT によるスペクトル変化においても確認される。FFT を行うにあたっては、サンプリング間隔を、0.1 秒とすると、サンプリング点数は、1024 点となり、ナイキスト周波数は、5 Hz となる。海の波は、低周波であり、今回 1 Hz 以下の周波数成分について検討を行おうとすることから、問題はないものと考えられる。

図-3 によれば、砂層上の圧力変動のパワースペクトルにおける 0.5 Hz から 1.0 Hz の周波数成分は、砂層中の間隙水圧変動のパワースペクトルにおいて、ほとんど認められず、砂層中で減衰してしまったものと思われる。このことは、砂層表面での圧力変動の内、比較的高い周波数成分の減衰が大きいという造波水槽を用いた実験結果と同様の傾向を示している。(図-4)

砂層中 30 cm と砂層表面における二つの圧力変動の間のコヒーレンスおよびフェイズを、それぞれ図-5, 6 に示した。それによると、コヒーレンスは、0.5 Hz 付近までは、1.0 の値を示しているが、それ以上の周波数域では変動している。このことは、0.5 Hz 付近を境に

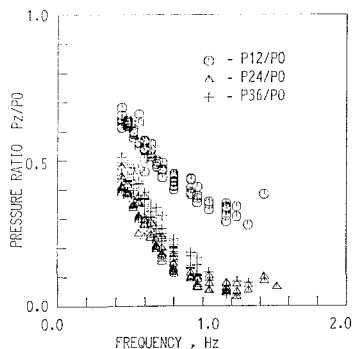


図-4 減衰比と周波数との関係

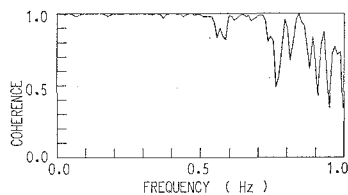


図-5 コヒーレンス

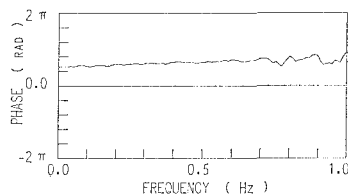


図-6 フェイズ

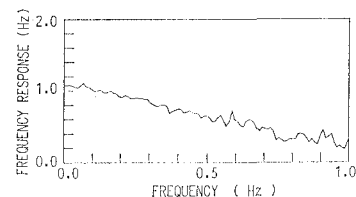
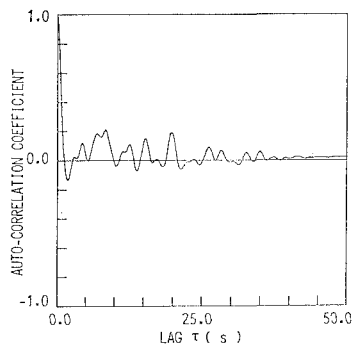
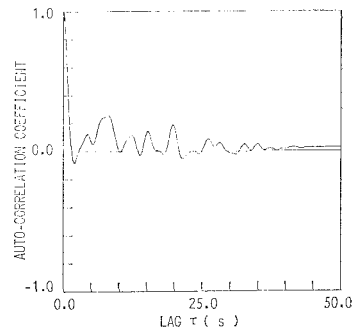


図-7 周波数応答関数

して、圧力の伝播特性が異なることを示唆しているものと思われる。また、フェイズについては、0.5 Hz 以上で変動が見受けられるものの、1.0 Hz 以下の範囲では、



(a) 砂層表面



(b) 砂層中 30 cm

図-8 自己相関関数

ほぼ一定値 ($\pi/2$) をとっており、フェイズが二つの圧力変動の間の時間遅れと角振動数とを掛け合わせたものであることから、周波数が小さくなれば、二つの変動の間の時間遅れが大きくなる。このことは、従来言われているように、長周期波が、波浪による砂層の安定性に影響を及ぼすとされていることを裏付けるものである。

また、周波数応答関数について、図-7 に示した。それによると、0.5 Hz 以上では変動が大きくなっているが、1.0 Hz 以下では全体として直線的な減少傾向にある。このことは、低い周波数成分の砂層中への伝播性が優れていることを示している。また、砂層表面の圧力変動と砂層中 30 cm における間隙水圧変動の自己相関関数を、図-8 (a), (b) にそれぞれ示した。それによると、とりわけて周期性は認められない。更に、砂層表面の波圧変動と砂層中 30 cm における間隙水圧変動との間の相互相関関数について、図-9 に示した。それによると、砂層中の圧力変動は、砂層表面の圧力変動からの遅れ時間がほとんどない状態で生じていることを示している。

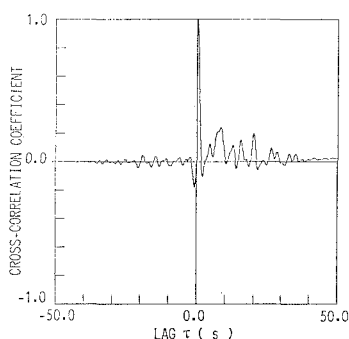


図-9 相互相関関数

4. 地震と波浪での地盤内間隙圧変動の特性の比較

地盤内の間隙圧と地盤運動との関係における一次特性の多くは、弾性波の伝播理論を用いて理解される。すなわち、固相と液相からなる飽和多孔質媒体において、それが、1) 線形弾性固体として挙動し、2) 作用する変動の周波数が、粘性流体の効果が無視できる程度に低いものであるなどの条件を満たすものとすれば、弾性波により引き起こされる間隙圧は、Jaeger & Cook⁹⁾ によれば、飽和多孔質媒体に関する相反作用理論により、次式のようになり固体の体積ひずみに比例することが推論される。

$$P = \{K_f(K_s - K_0)/[n(K_s - K_f)]\} \varepsilon \dots\dots\dots (1)$$

K_f : 流体の体積弾性係数, K_s : 固体の体積弾性係数,
 K_0 : 飽和混合体の体積弾性係数, n : 間隙率

Biot⁶⁾ は、多孔質媒体中の流体運動について検討を行い、流体の運動のメカニズムとして、次に示す二つのものを考えた。それらは、1) 固相と液相の相対的加速度

から得られるもの、2) 不均等な圧縮により生ずる圧力勾配によって、多孔質媒体中を、ダルシー則に従って拡散するものである。これらの両者共、個々に特徴を持っている。例えば、1) の流体運動は、速い圧縮波およびせん断波の両者により生じ、固体骨格に加速度を生じさせ、その慣性力により流体の流れにラグが生じる。また、2) の流体運動は、弾性波が多孔質媒体中を通過する時に間隙断面との間に摩擦力を生じさせ、その時、間隙形状と間隙の sinuosity の影響を受け、大きな圧力勾配が生ずることにより、局所的な squirt flow を生じさせる。Biot⁶⁾ は、摩擦力に依存する周波数への間隙形状の効果について検討しており、間隙断面として、スリット形状のものと円形状のものを考えた。これらは、間隙形状として両極端なものであるが、実際の間隙形状がその中間的なものであると考えられることから、理論は適用可能とした。その結果、間隙の sinuosity をも併せて、structure factor を用いて、弾性波の伝播特性に間隙形状を考慮している。しかし、この取り扱い、係数の値を変えることにより間隙形状の効果を考慮したもので、本質的に局所的な流体の運動を考慮したものではない。更に、Biot⁷⁾ は、2) の流体運動について検討を行い、間隙圧と全体積膨張とのスペクトル比の特性への間隙形状と sinuosity の効果について検討を行った。それによれば、速い圧縮波の作用下では、スリット状断面の間隙は、円形状断面の間隙よりも高い圧力が引き起こされ、1) のモデルについては、間隙圧と全体積膨張とのスペクトル比の正の傾斜を予測する。また、2) の局所的噴出モデルにおいては、円形断面の間隙中では負の傾斜を、また、スリット状断面の間隙中では正の傾斜を予測するというものである。

Mavko et al.⁴⁾ は、地盤表面の水平加速度と鉛直加速度を、それぞれ S 波、 P 波についての体積ひずみと関連付けることにより、間隙水圧と加速度を直接結び付けて理論的考察を行っている。例えば、 P 波列の到達時についての地盤内間隙圧と地盤表面の鉛直加速度とのスペクトル比を次式で定義している。

$$P = \{2K_f(K_s - K_0)/[nV_p^2(K_s - K_f)]\} A_p \dots\dots (2)$$

V_p : 速い圧縮波の速度

A_p : 地盤表面の鉛直加速度成分

彼らは、1980 年に起きたカリフォルニアのマンモス湖での地震時に計測された飽和砂中の弾性波により引き起こされた間隙圧の記録を解析している。その中で、彼らは、 P 波と S 波について、それぞれ間隙圧と表面の鉛直および水平加速度とのスペクトル比を示している。それによると、 P 波については、スペクトル比が、周波数に対して負の線形関係を示しているのが認められる。 S 波については、線形関係は認められず、周波数の増加に伴い指数関数的に減少し一定値に漸近している。

ここで、 P 波が主に速い圧縮波によりなるとすると、速い圧縮波についての間隙圧と鉛直加速度とのスペクトル比に見られる特性は、負の傾斜を示していることから、間隙断面が円形状であり、間隙中の流体の運動の効果として、2) の流体運動が卓越していることを示しているものと思われる。

一方、著者らは、砂層表面の変動圧力と海底砂層地盤の体積ひずみとを結び付けて検討を試みた。そこで、平面ひずみ状態下における地盤表面の圧力変動と地盤の体積ひずみとの関係を以下に求めた。

波浪作用下の海底地盤の変位は、本来 Biot^{9), 7)} の弾性波の伝播理論に基づく Yamamoto⁸⁾ の理論により求めるものであるが、今回砂層海底地盤を対象としており、海洋波浪の周期が、1 Hz 以下であることなどから、Zienkiewicz⁹⁾ によるところの Biot の多孔質体の動的および準静的挙動の定式化の分類に従えば、遅い現象であり、Biot¹⁰⁾ の圧密理論に基づく Yamamoto¹¹⁾ の理論による結果と同じ解を与えることになる。

そこで、海底地盤の変位は、 $T = P_0 \exp[i(Nx + \omega t)]$ の調和載荷を受ける時、次式で表わされる。

$$U = i \{ m [i(1-2\nu)\omega'' - 1 - 2(1-\nu)N''] \exp(-Nz) / [-N'' + i(1+m)\omega''] - [1 - mN'' / (-N'' + i(1+m)\omega'')] \times Nz \exp(-Nz) + m \exp(-N'z) / [-N'' + i(1+m)\omega''] \times (P_0/2NG) \exp[i(Nx + \omega t)] \} \quad (3)$$

$$W = \{ [1 + m[1 + (1-2\nu)(\omega'' - N'')]] / [-N'' + i(1+m)\omega''] \exp(-Nz) - [1 - mN'' / (-N'' + i(1+m)\omega'')] \times Nz \exp(-Nz) - m(1 + N'') \exp(-N'z) / [-N'' + i(1+m)\omega''] \times (P_0/2NG) \exp[i(Nx + \omega t)] \} \quad (4)$$

ここで、

$$N' = N + i\omega' \quad (5)$$

$$\beta = (1-\nu)/(1-2\nu) \quad (6)$$

$$\omega' = \omega/c \quad (7)$$

$$\omega'' = \beta(\omega'/N) \quad (8)$$

$$c = (k/\gamma) / \{ n/K_f + (1-2\nu)/[2G(1-\nu)] \} \quad (9)$$

$$m = nG/[K_f(1-2\nu)] \quad (10)$$

$$N'' = (N' - N)/N \quad (11)$$

$$1/K_f = 1/K_f + (1-S_r)/P_0 \quad (12)$$

K_f : 間隙流体の見掛けの体積弾性係数

G : 砂のせん断弾性係数

ν : ポアソン比

ω : 角振動数

k : 透水係数

S_r : 飽和度

U, W : x および z 方向変位

したがって、体積ひずみは、次式のように表わされる。

$$\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = \{ -[(1-Nz)(1+m) + m(1-2\nu)] \times (-N'' + i\omega'') \exp(-Nz) + mN'' \exp(-N'z) \} P_0 \exp[i(Nx + \omega t)] / G[-N'' + i(1+m)\omega''] \quad (13)$$

上式において、 $P_0 \exp[i(Nx + \omega t)]$ は、地盤表面での調和変動圧力であることから、上式は、体積ひずみと地盤表面の調和変動圧力との関係を求めたことになる。したがって、式(1)との関係から、間隙水圧と地盤表面の調和変動との関係を次式のように求めることができる。

$$P = K_f(K_s - K_0) \{ -(1-Nz)(1+m) + m(1-2\nu) \} \times (-N'' + i\omega'') \exp(-Nz) + mN'' \exp(-N'z) T / \{ nG(K_s - K_f)[-N'' + i(1+m)\omega''] \} \quad (14)$$

著者らが、福井県大飯郡高浜町難波江浜で観測を行ったところの 図-2 (a), (b) に示す砂層表面の変動圧力と砂層中での間隙水圧変動についてのスペクトル比を 図-10 に示す。それによれば、スペクトル比は、周波数の増加に伴い直線的に減少しているようにも認められるが、難波江浜での観測結果によれば、砂層表面の圧力変動と砂層中 30 cm の深さでの圧力変動との周波数応答関数が、周波数に対して、負の線形関係を示していることから、砂層表面の圧力変動と砂層中 30 cm の圧力変動のスペクトル比は、周波数の増加に伴い二次関数的に減少していることになる。

また、式(14)で提案した海底地盤内の間隙水圧変動と海底地盤表面での波圧変動との関係式について、表-2 に示す値を用いて計算を行った。それによると、0.5 Hz 以下の長周期波においては、式(14)による理論予測値と実測値によるスペクトル比とは良い一致を示している。なお、理論計算に用いた表-2 の諸数値の内、ポアソン比は、Hamilton¹²⁾ によるところの海底地盤で実測された速い圧縮波とせん断波の速度により、次式により

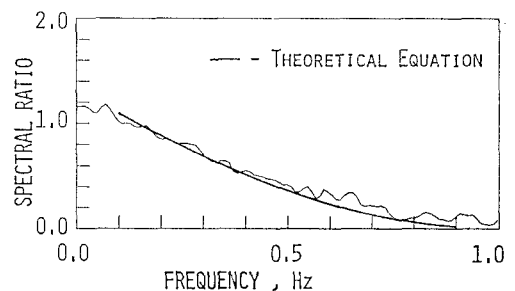


図-10 観測値のスペクトル比と理論値

表—2 理論計算に用いた諸数値

Bulk modulus of fluid, K_f	$2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Bulk modulus of mineral grains, K_s	$3.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Bulk modulus of composite, K_c	$4.9\text{--}5.4 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Poisson's ratio, ν	0.495
Shear modulus, G (dense sand)	$4.8\text{--}10^8 \text{ N/s}^2$
Porosity, n	0.35–0.45
Coefficient of permeability, k	$0.022 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

推定されたものである。

$$\nu = \{(V_p/V_s)^2 - 2\} / 2 \{(V_p/V_s)^2 - 1\} \dots\dots\dots (15)$$

また、流体や固体の体積弾性係数は、典型的な値が与えられていることから、実測した海底地盤表面の波圧変動と海底地盤中の間隙圧変動とのスペクトル比の値に基づいて、式 (14) 中の液相と固相からなる混合体の体積弾性係数を求めることが可能と考えられる。

また、難波江砂は、表—1 から解るように相当均等な海砂であることから、間隙断面が円形状と考えられ、また、透水係数の大きい砂であることから、間隙流体の局所的流れの効果も含まれているものと思われ、先に示した測定値についてのスペクトル比が理論予測値と良い一致を示すことから、速い圧縮波とせん断波の両者の効果を含むものと思われる。したがって、波浪による効果には、速い圧縮波だけでなく、せん断波についても考慮する必要があるのではないだろうか。

従来、海底地盤の土質に関する力学的および物理的特性についての知識を得るために、多くの研究がなされていることは先にも述べたが、海底地盤の試料採取に際し、試料の乱れや膨潤が生じ、その特性を知ることには多くの困難が伴っている。著者らの試みは、原位置において著者らがやっている海底地盤内の間隙圧変動の測定結果を用いて、海底地盤土質に関する知識を得ることであった。この点については、まだ多くの問題が残されているが、ここで述べたスペクトル比に関する考察から、著者らがまとめた⁷⁾ 波浪を受ける多孔質媒体中の間隙水圧についての理論に基づいて海底地盤の安定性の検討を行うことが可能と考えられる。

更に、Mavko et al.⁴⁾ に示されている地震についてのスペクトル比と波浪についてのスペクトル比の関係が類似しており相互に関連付けられることから、常時受けている波浪作用によるスペクトル比を用いて地震時の地盤内の間隙圧発達特性を推定することができれば都合が良いと考えられる。もちろん、波浪と地震動とでは、周波数特性などが異っており、土質の種類によっては、その伝播特性が周波数の影響を受けられることから、早計には言えないことではあるが、一つの方法として検討する意義はあると考える。

5. ま と め

以上のことから、長周期波の方が砂層中への圧力伝播

に際し、位相遅れ時間が大きく、また、砂層中への伝播特性が優れていることが認められる。コヒーレンス、フェイズ等から、0.5 Hz 付近を境にして圧力伝播特性が異なることについては、砂層の密度、砂層を構成する砂の粒径等の特性、砂層の透水性との関連も考えられ、今後詳しく検討していく必要があると思われる。

また、Biot^{6),7),10)} の多孔質体理論に基づいて、波浪作用下の海底地盤の特性を検討する上で、先に示した砂層中の間隙水圧変動と砂層表面の変動圧力との関係を用いることは有用と思われる。今後、観測データによるスペクトル比と理論値との比較から、海底地盤の特性についての知識を得ようと考えている。

更に、地震による地盤内の間隙圧の特性と波浪による地盤内の間隙圧の特性についての比較は、試料も少なく十分とは言えないが、それぞれのスペクトル比に関する考察から相互に関連付けられるとすれば、常時観測される波浪作用により求められた海底地盤に関する知識に基づき、地震時の海底地盤の挙動が推定できるのではないだろうか。

参 考 文 献

- 1) 前野賀彦・長谷川高士：波浪作用下の海底地盤内の間隙水圧の特性，第 10 回海洋開発シンポジウム論文集，pp. 151～156, 1985.
- 2) 前野賀彦・長谷川高士：波浪による砂層内の間隙水圧の伝播特性，第 20 回土質工学研究会講演集，pp. 1493～1496, 1985.
- 3) 前野賀彦・長谷川高士：波浪による砂層内の間隙水圧の特性，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 596～600, 1984.
- 4) Mavko et al.: Analysis of wave-induced pore pressure change recorded during the 1980 Mammoth Lakes, Calif. earthquake sequence, Bull. of the Seismological Soc. of Am., Vol. 74, No. 4, pp. 1395～1407, 1984.
- 5) Jaeger, J. C. et al.: Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen, London, England, 1969.
- 6) Biot, M. A.: Theory of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I—low frequency range, II—higher frequency range, J. of the Acoust. Soc. of Am., Vol. 28, pp. 168～191, 1956.
- 7) Biot, M. A.: Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media, J. of Acoust. Soc. of Am., Vol. 34, pp. 1254～1264, 1962.
- 8) Yamamoto, T.: Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations, Ocean Engng., Vol. 8, pp. 1～16, 1981.
- 9) Zienkiewicz, O. C. et al.: Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils, Geotechnique, Vol. 30, No. 4, pp. 385～395, 1980.
- 10) Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. of Applied Physics, Vol. 26, pp. 182～185, 1941.
- 11) Yamamoto, T.: Wave induced instability in seabeds, Proc. of ASCE Special Conf. Coastal Sediments '77, pp. 898～913, 1977.
- 12) Hamilton, E. L.: V_p/V_s and Poisson's ratio in marine sediments and rock, J. of Acoust. Soc. of Am., Vol. 66, pp. 1093～1101, 1979.