

新潟沖で観測された方向スペクトルの出現特性

永井紀彦*・橋本典明**・浅井 正***
大野正人****・杉浦 淳*****

1. はじめに

沖合で観測される海洋波の方向スペクトル形状は多様である。著者ら(1992)は、この分布形状が要因となる気象擾乱により支配されていることを例示した。しかし、波浪は、沿岸域に到達するまでの間に、地形条件や構造物等の外的要因によってさらに変形を受ける。このため、沿岸域の方向スペクトルは、それぞれの海域に特有の性質を示す。たとえば、新潟近海では佐渡島の影響等により沿岸の波浪特性が特徴づけられ、これまでに興味深い研究課題として検討がなされている。ただし、これらの研究は有義波諸元や波浪推算結果を用いた検討にとどまっているので、方向スペクトルに与える影響の把握はいまだ不十分であり、詳細な知見を得るに至っていない。そこで、本論文では、新潟港沖合で観測された方向スペクトルの実測値を用いて、佐渡島等の地形条件が与える影響について気象要因等と比較しながら検討を行うこととした。

2. 新潟沖波浪観測地点

(1) 観測地点の概要

運輸省第一港湾建設局による新潟沖波浪観測の実施地点(以下、新潟沖と呼ぶ)は、図-1に示す新潟港阿賀野川河口から北4.7 km沖合の水深-35 m地点(北緯38°00'07", 東経139°07'46")にある。新潟東港は本観測地点からENE~E方向に約8.5 km離れたところに位置している。新潟沖からみて、佐渡島はNW~W方向に位置し、観測地点との距離は約50 kmである。観測地点の背後には、NE~SW方向にかけて海岸線がのびている。

観測機器は1辺が25.0 mの正三角形の各頂点に設置された3台の超音波式波高計とその重心位置に設置された超音波式水平2成分流速計および水圧計から構成されている。データの取得は毎偶数正時前後10分の20分間実施され、サンプリング間隔0.5秒でA/D変換を行っている。

(2) 観測データの解析方法

解析対象期間は1989年11月から1991年6月までの20ヶ月とし、2.(1)に示した最大6成分の観測データからベイズ型モデル(橋本:1987)を用いて方向スペクトルの推定を行っている。この方法は他の推定方法と比べて推定精度のみならず安定性にも優れた方向スペクトル推定法であり、見かけのピークの発生やピークの分裂といった現象が生じにくい。また、同時に対象期間内の有義波諸元や代表波向等の波浪統計諸元の整理も行っている。なお、本論文では代表波向として方向スペクトルの最大値が示す方向(以下、ピーク波向と呼ぶ)を用いている。これは、本論文で対象とする方向スペクトルは遮蔽等の影響により波エネルギーの分布が歪んだ形状を示す可能性が高いため、平均波向を代表波向とみなすのは妥当ではないと判断したからである。

3. 新潟沖の方向スペクトル特性

(1) 新潟沖周辺海域の気象特性

新潟沖周辺の日本海沿岸では、冬季に発達する高気圧によるNW方向からの季節風が特徴的な気象要因となっている。このため、代表的な高波浪は冬季に観測され

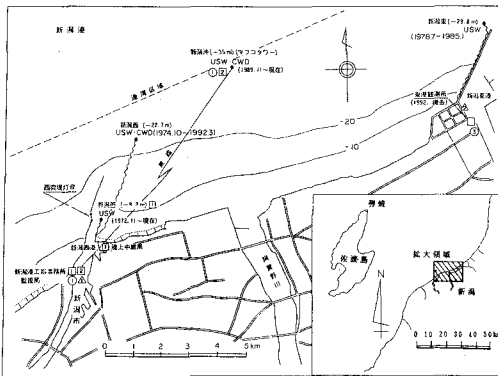


図-1 新潟沖波浪観測地点位置図

* 正会員	運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室長
** 正会員	工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 主任研究官
*** 正会員	工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室
**** 正会員	工修 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所次長
***** 正会員	(株)エコー第一事業部 解析調査課

ることが多く、ピーク波向もNW~NNW方向に分布する。これとは逆に、夏季にはS方向からの季節風が発達するので、新潟沖ではほぼ静穏とみなせる状態が続く。秋季や春季に高波浪が観測されるときは、台風や日本海を通過する移動性の低気圧が要因となることが多く、N寄りの波浪が発達する。また、ピーク波向として観測されることは少ないが、ENE方向から入射する微小な波エネルギーが、冬季を通して方向スペクトル上に認められる。

(2) 地形条件が方向スペクトル形状におよぼす影響

① 佐渡島の遮蔽効果のおよぼす影響

図-2(1)および(2)は、それぞれ1990年12月の1ヶ月の間に観測された有義波高および周期のピーク波向別の散布図を示したものである。両図より、高波浪時の波向はNW~NNW方向とWSW方向の2つの部分に主に分布していることがわかる。新潟沖周辺では冬季を通してNW方向を中心とした季節風が発達することを考えると、W~NW方向から到達する波浪は佐渡島による遮蔽を受けてNWあるいはWSW寄りになっているか、あるいは、波高・周期が減少しているものと考えられる。佐渡島から新潟沖までの吹送距離が十分にならないため、遮蔽の影響は有義波周期の分布にとくに顕著にあらわれる。

図-3は、1990年12月2日から12月3日の間に測得された方向スペクトルを周波数について積分した値を時系列に沿って並べ、等値線図を用いて表示したものである。図中の等値線はエネルギー密度を対数変換した値を等間隔で示したものであり、図上の棒グラフはスペクトルの積分値を示す。図より、2日2時頃よりW方向から入射する波浪が発達するが、16時頃に一度減衰する。全体的にエネルギーが小さい状態が数時間続いた後、再び波浪の発達がみられるが、このときの入射波の方向はNW方向に変化している。図-4に示す対象期間の代表天気図より、対象期間中は台風9028号崩れの日本海低気圧の通過とともに風波が一貫して発達していたと考えられる。また、他の要因による波浪の発達・減衰は考えにくい。したがって、図-3はW~N方向にピーク波向を変化しながら発達している波浪が、佐渡島にNW方向

の波エネルギーを一時的に遮蔽された結果とみなすことができる。台風のような移動性の低気圧が日本付近を通過する場合には、W~N方向にピーク波向が変化するため、遮蔽の効果が顕著に現れるようである。このほか、方向スペクトルの分布形状について種々整理した結果、日本海を通過する低気圧が速くに位置するか長い時間に渡り停滞する場合は方向スペクトルの分裂が明確である

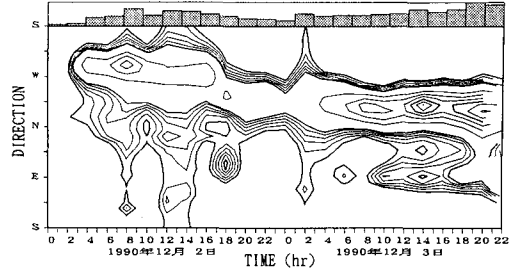


図-3 方向分布の経時変化図
(1990年12月2日~3日)

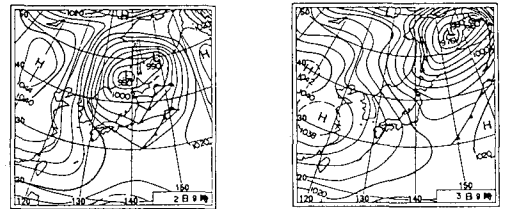


図-4 対象期間の代表天気図
(1990年12月2日~3日)

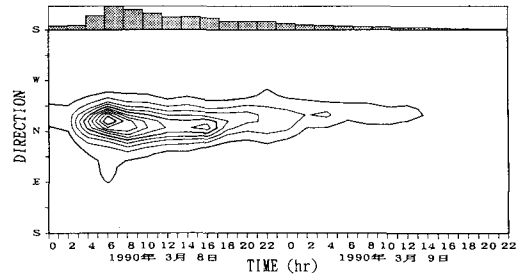


図-5 方向分布の経時変化図
(1990年3月8日~9日)

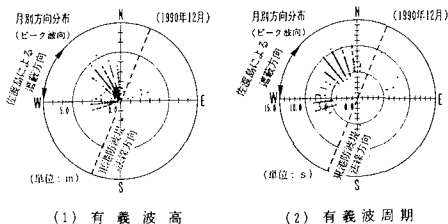


図-2 有義波諸元の方角別散布図 (1990年12月)

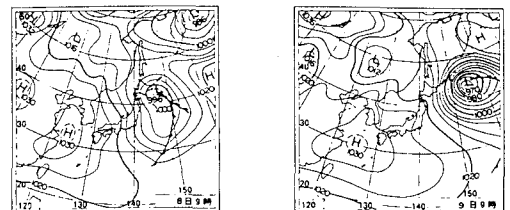


図-6 対象期間の代表天気図
(1990年3月8日~9日)

が、比較的新潟沖に近いところに位置する場合は単一のピークしか明瞭に判別できない傾向がみられた。

冬型の気圧配置の場合の方向スペクトルの経時変化を図-5に示す。対象期間内の代表天気図は図-6のとおりである。図のように冬型の気圧配置により発達した波浪が観測される場合には、遮蔽の効果が読み取りにくい。これは、方向分散および屈折・回折の影響により方向分布が平滑化され、遮蔽領域からの入射もかなりみられるようになるためであろう。しかしながら、風向はNWが中心と考えられるのに対し、ピーク波向はNNWでほぼ一定であることから、佐渡島の方からの入射波は図-3の場合と同様に遮蔽されていると考えられる。この点については、今後、佐渡島より沖合いの方向スペクトルを波浪推算から求め、検証していきたい。また、方向分布形状の歪み度についても、今後検討を加えていきたい。

② ENE 方向からの波エネルギーの入射について

図-7(1)～(3)は1990年11月10日から11月11日にかけて発達した高波浪時の方向スペクトルの経時変化である。このときの気圧配置は強い冬型を示していたので対象期間内ではNWを中心とした風が発達していると考えてよい。図-7(1)の方向スペクトルには2つのピークがNWとWSW方向に認められる。NW方向のピークに対するスペクトルの方向分布はE側とW側で非対称であり、W側の分布形状の方が方向集中度が大きい。また、WSW方向のピークについては比較的周波数が高く、あまり発達していない。これは佐渡島によりNW～WSW方向から来襲するエネルギーが遮蔽されるためピークが2つになっていると考えられる。図-7(2)では図-7(1)と比較して波向がややN寄りに変化し、ENE方向に小さな2つめのピークが現れている。2で述べたようにENE方向には新潟東港が位置している。防波堤から観測地点までの吹送距離では周期5秒以上の風波の発達は考えにくいので、この小さなピークは防波堤からの反射波によるものと考えられる。観測地点と東港防波堤(延長3 km, 法線方向SSW～NNE)との

地理的な関係からNW～NNW方向から波が入射するときに反射波が到達しやすく、これは観測結果と一致する。図-7(3)は、NNW方向に2つのピークがみられる場合であり、E方向の分布形状は両ピークと対応している。なお、ENE方向のピークに対する波エネルギーの大きさは最大値と比較して十分小さいので、図-2のようにピーク波向の散布図上にはENE方向の波はほとんど認められない。同様の理由から、これらのピークのエネルギーによる有義波高の増大も無視できる程度である。

なお、中田ら(1983)は観測結果の整理から新潟沖周辺では局地風により発達する風波を考慮する必要があることを指摘している。また、山口ら(1985)は波浪推算結果を用いて季節風の発達する場合に佐渡島と新潟の間の海峡に沿ったENE方向の局地風が発生することを示している。したがって、局地風の影響も無視できず、波浪計算を用いて検証しておく必要があるだろう。ただし、中田らの観測結果ではENE方向は海岸線により吹送距離が小さくなるため、局地風の影響は $f > 0.156$ Hz ($T < 6.4$ 秒)程度の高周波数側で顕著にあらわれている。これに対し、図-7(2)および(3)中のENE方向の波浪エネルギーのピーク周波数は0.1 Hz程度である。今回の観測は中田らの観測と近接した地点で行われており、図中のスペクトルも同様な傾向を示すと考えられるので、図-7の場合は局地風の影響による波浪とは異なる可能性が高い。

4. 歪んだ方向スペクトル形状が波向統計量に与える影響の数値的検討

(1) 数値シミュレーション

3より、新潟沖へW～NW方向から入射する波浪エネルギーは、佐渡島に遮蔽されていることが明らかになった。このため、方向スペクトルの分布形状も、遮蔽される部分のエネルギーが無視できるほど小さくなっている。そこで、新潟沖では、入射波から遮蔽される方向の

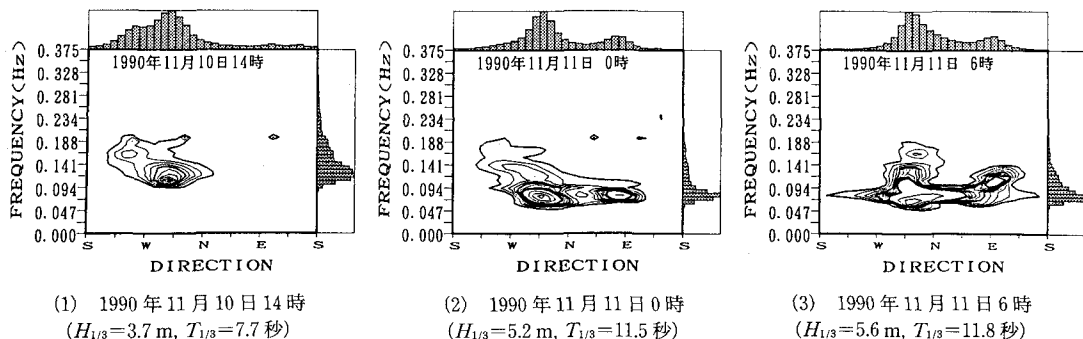


図-7 方向スペクトル分布図 (1990年11月10日～11日)

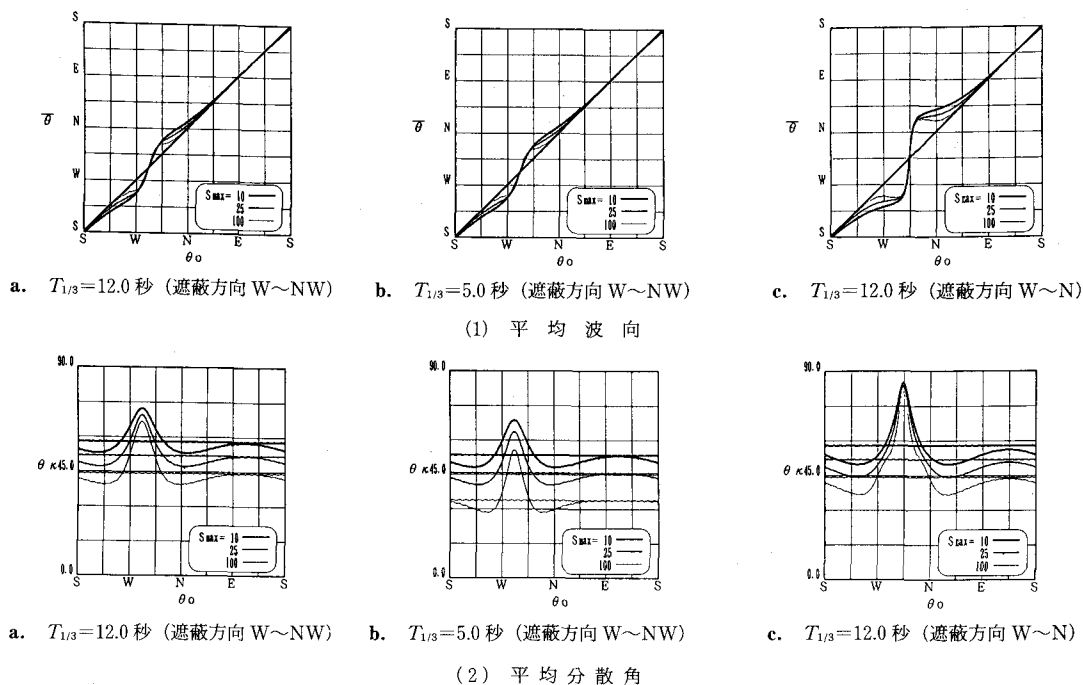


図-8 数値シミュレーション結果

エネルギーを消去し、不連続部分を平滑化した方向スペクトルが観測されるものと仮定して、数値シミュレーションを行った。そして、入射波の波向を変化させた場合に、平均波向 $\bar{\theta}$ および平均分散角 θ_k が示す特性を検討した。本論文では風波を対象としているので、入射波の周波数スペクトルとして JONSWAP 型スペクトルを採用し、光易型方向関数から特定方向の波エネルギーを消去することによって、スペクトルの方向分布形を与えることとした。ここで、方向は N を 0° として時計回りを正で示している。また、 θ_0 , S_{max} は、それぞれ光易型方向関数の主軸の方向と方向集中度の最大値とし、 θ_1 , θ_2 は、それぞれ遮蔽される方向の始点と終点とする。

なお、実際には、佐渡島の両端で発生する回折波、佐渡島から波浪観測地点までの間の吹送距離から発生する風波、および佐渡島と新潟海岸の地形形状から発生する局所風の効果等による波浪を考慮する必要があるが、ここでは、現象を単純化して遮蔽による効果のみを検討することとした。

(2) 代表波向に与える影響

図-8 (1) は、4. (1) で定義した方向スペクトルの θ_0 に対する $\bar{\theta}$ の変化をそれぞれ示している。ここで、 θ_0 は遮蔽を考慮しない場合の波向を表すので、沖合いでの波向とみなせる。図の a. は $T_{1/3}=12.0$ 秒および $\theta_1=270^\circ$, $\theta_2=315^\circ$ (遮蔽範囲: W~NW) とした場合を示している。これに対し、b. は、 $T_{1/3}$ を 5.0 秒と小さくした場合を

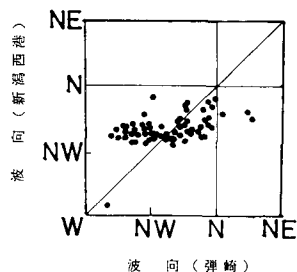


図-9 弾崎と新潟西港の波向の関係

示している。また、遮蔽される方向を $\theta_1=270^\circ$, $\theta_2=360^\circ$ (遮蔽範囲: W~N) として計算した場合についても、同様に c. に示し、波エネルギーの遮蔽領域の大小による相違を検討する。図の縦軸は、 $\bar{\theta}$ であり、横軸は θ_0 を示している。図中の太線は S_{max} の場合を示しており、以下、線が細くなるにつれて $S_{max}=25$ および 100 と方向集中度が大きくなる。どの図にも、波エネルギーの遮蔽がない場合のグラフを直線で示している。

どの図でも、 $\bar{\theta}$ は、遮蔽領域から波浪の入射がある場合 ($\theta_1 \leq \theta_0 \leq \theta_2$)、近い方の遮蔽領域端部寄りの方向を示す。そして、 θ_0 が遮蔽領域の中央付近となる場合 ($\theta_0 = (\theta_1 + \theta_2)/2$) に、 $\bar{\theta}$ は θ_0 と一致する。このため、この前後で平均波向の急激な変化が認められる。また、 $S_{max}=100$ と大きな場合には、 θ_0 が遮蔽領域から 20° 程度外れると、 $\bar{\theta}$ が θ_0 とほぼ一致するようになる。しかし、 S_{max} が

小さくなると、 θ_0 が遮蔽領域から $45^\circ \sim 90^\circ$ 外側にあるときでも、 $\bar{\theta}$ と θ_0 の間にずれがみられる。

数値シミュレーションに用いた方向スペクトルは、 θ_0 が遮蔽領域にあるとき、2つに分裂した方向分布形状を示す。両分布は、それぞれ遮蔽領域の端部から少し外側に離れたところで極大値をもつ。両分布のそれぞれの極大値の比を比較すると、 θ_0 が遮蔽領域の端部の方向と一致する ($\theta_0 = \theta_1$ または θ_2) 場合に、 θ_0 に対応する分布の側で極大値の比が最大となる。また、 θ_0 が遮蔽領域の中央となる場合には、両分布の極大値は等しくなる。異なる2つの波浪場が混在するとき、 $\bar{\theta}$ はエネルギーの大きい方の分布の影響をより強く受けるため、 θ_0 に近い方の遮蔽領域端部周辺の値を示す。エネルギーの大きい方の分布が $\bar{\theta}$ に与える影響は、2つの極大値の間の角度が大きいほど強くなる。このため、c. では、 θ_0 が遮蔽領域内にあるときに、ほぼ $\theta_0 = \theta_1$ または θ_2 とみなすことができる。 θ_0 が遮蔽領域の外側にある場合には、方向分布形状がすそ部で非対称となるが、もとのエネルギー自体が小さいので、もとの関数形と判別することは難しい。しかし、方向集中度が小さくなると、波エネルギーの方向分布形状がなだらかになり、すそ部のエネルギーが無視できなくなる。このため、 θ_0 が遮蔽領域の外側にあるときにも、方向スペクトルに遮蔽の影響がおよぼされるようになる。また、 θ_0 が遮蔽領域の内側にある場合、方向集中度が小さな方向スペクトルでは、遮蔽領域の両側に幅広く波エネルギーが分布する。このため、それぞれの分布の卓越波向は遮蔽領域両端より外側になるので、 $\bar{\theta}$ も遮蔽領域両端より外側の値を示している。

中田らは、弾崎 (佐渡島) と新潟西港の波向の関係について、図-9 を用いて検討している。図の横軸は弾崎の波向を示し、縦軸は新潟西港の波向である。したがって、図-8 (1) の $\bar{\theta}$ が縦軸に対応し、 θ_0 は横軸に対応する。弾崎で WNW~NNE 方向の波向が観測される場合、NNW 付近で両者の波向は一致すること、また、他の場合についても、新潟西港では全体的に波向が NNW 寄りに観測されることを示している。このことは、今回のシミュレーション結果において、遮蔽効果がみられる地点の代表波向が、沖側の波向に関係なくほぼ一定の方向を示すことと定性的に一致する。ただし、中田らの用いた波向は両地点ともレーダーを用いた観測結果であるため、高周波数側の影響を強く受ける。したがって、佐渡島端部からの回折波や佐渡島背後の海域で発達した風波

の影響が強くあらわれて、波向が NNW 寄りになっているものとも考えられる。

(3) 方向集中度パラメータに与える影響

図-8 (2) は、4. (1) で定義した方向スペクトルの θ_0 に対する θ_k の変化をそれぞれ示している。図の a.~c. の条件は、図-8 (1) の場合と同じである。図の縦軸は θ_k であり、横軸は θ_0 を示している。図に示されるように、 θ_k は、 θ_0 が遮蔽領域の両端付近となるときに極小値をとり、遮蔽領域の中央部とそれから 180° 離れた方向のとき極大値となる。 $\theta_k = \theta_1$ または θ_2 のとき、波エネルギーは θ_0 を軸として片側がすべて遮蔽される。このとき、分布形状が尖鋭となるので、方向集中度が増加する。これに対し、 θ_0 が遮蔽領域の中央付近になるときは、入射波の極大値付近のエネルギーがカットされ、同程度の大きさのピークを2つもった方向スペクトルがあらわれる。このため、方向集中度が減少するものと考えられる。

5. おわりに

海洋波の方向スペクトルの分布形状は気象条件により支配されるが、伝播の過程で地形条件等の影響による変形を受けて沿岸域に到達する。本論文では、佐渡島の遮蔽効果を例として、方向スペクトルに与える地形条件の効果を実測値を用いて検討し、波向統計量におよぼす効果について説明を試みた。今後は、日本海全域を対象とした波浪推算結果を用いて、外洋の入射波との関係をより具体的に検証するとともに、回折波や局所風による影響についても検討を加えていきたい。

謝辞：新潟沖における定常観測は、新潟港工事事務所をはじめとする第一港湾建設局の関係諸機関により実施されている。ここに改めて記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正・菅原邦彦・久高将信 (1992): いわき沖で観測された方向スペクトルの出現特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 166-170.
- 橋本典明 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 97-125.
- 中田邦夫・及川 研・中尾邦彦・高橋豊喜・榎原修治 (1983): 佐渡島の遮蔽効果に関する現地観測, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 179-183.
- 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄 (1985): 波浪推算法に基づく佐渡島のしゃへい効果の検討, 愛媛大学工学部紀要, 第10巻第4号, pp. 343-353.