

図-4.26: 現地観測における波高計の設置位置

4.2 現地観測データへの適用

本節では、§2.3で提案した方向スペクトルの推定法を現地観測で得られたデータに対して適用した結果について述べる。

4.2.1 現地観測の概要

現地観測では、1992年4月20日より約3週間に渡って、福島県小名浜港内にて波高計・流速計を用いた波浪の連続観測が行われた。本研究では、防波堤前面において、同期された3地点で観測された水面変動の時系列データを使用した。防波堤前面の波浪場に対して本研究で提案された方向スペクトルの推定法を適用し、その結果より現地観測データへの推定法の適用性を検討した。

防波堤前面での波高計の設置位置の模式図を図-4.26に示す。防波堤前面には消波構造物が設置されていた。なお波高計には水圧式波高計を用いている。

本研究で利用したデータは、表-4.2で示す4ケースである。表-4.2には、水面変動を測定した時刻、そのときの平均水深 h (m)、波高計Bで得られた水面変動データから求めた有義波高 $H_{1/3}$ (m)、有義波周期 $T_{1/3}$ (s)、波高計Cが設置されている地点に設置されている流速計によって求めた平均波向 θ_m ($^\circ$)、主波向 θ_p ($^\circ$) を示している。

Case 2とCase 3の間に低気圧が通過しており、その直前のCase 1, 2のデータは有義波周期が長くなっており風波が卓越していると考えられる。また、Case 3, 4は低気圧が通過

表-4.2: 現地観測データの波浪場諸元一覧

Case No.	月日	時	h (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	θ_m (°)	θ_p (°)
1	4/30	12:00	13.42	0.60	5.83	160	173
2	4/30	14:00	13.71	0.83	5.33	166	171
3	5/1	20:00	13.48	1.13	10.67	184	185
4	5/1	22:00	13.44	0.97	10.76	189	187

したあとのデータであり、有義波周期が長くなっておりうねり性の波であると考えられる。

水面変動の時系列データは、それぞれサンプリング周期 0.5s で 2046 個測定しており、測定時間は 17.5min である。これらの時系列データを FFT 法を用いてスペクトル解析を行い、さらに幅約 0.1Hz の放物線型のスペクトルウィンドーをかけて平滑して得られたクロスパワースペクトルに対して、方向スペクトルパラメターの推定を行った。

4.2.2 方向スペクトルパラメータの推定結果

図-4.27から図-4.34には、表-4.2のCase 1からCase 4の波浪場において、それぞれの波高計で観測されたパワースペクトル、コヒーレンス、フェイズと、その波浪場に対して方向スペクトルパラメータを推定した結果を示している。コヒーレンスがピーク周波数付近で有意な値を持っており、波高計アレイが設置されているあたりでは、波浪場は一樣となっていると考えられる。また、コヒーレンスが $f = 0.08\text{Hz}$ 付近で小さくなっているのは、その周波数成分波の波長が $L \approx 135\text{m}$ となり、波高計AとCの位置で重複波の節になっているからである。

フェイズの計算結果は、§3.2.1で得られた数値シミュレーションデータによる結果と比較することにより、反射面における反射率はそれほど大きくないことが予測できる。

方向スペクトルパラメータの推定結果については、反射面に垂直な直線アレイを用いて推定していることから、反射率の推定値は信頼できる値となっているはずである。4ケースの観測データから推定した結果、反射率の推定値はピーク周波数付近で $r=0.2\sim0.3$ 程度の値となっている。この値は、反射面の前面に消波構造物が設置されていることを考慮すれば、妥当な推定値であるといえる(表-4.3)。

また、ピーク波向の推定値はCase 1を除いてどのケースもほぼ 180° 付近となっている。§3.3の議論によれば、反射面に垂直な直線状の波高計アレイを用いて推定したピーク波向の推定値は、波浪場の主波向にかかわらず $\theta_0 = 180^\circ$ となり信頼できないが、各ケースで得られたピーク波向の推定値と表-4.2の平均波向、主波向の観測値と比較することにより、推定値は妥当であると考えることができる。

波浪場の方向集中度についても、ピーク波向と同様に、この結果だけから推定することはできないが、どのケースにおいてもピーク周波数付近で方向集中度係数の推定値はピークを示す推定結果となっており、§3.2で得られた結果と比較すると、どのケースにおいても方向集中度の大きい波浪場であったことが推測できる。

波高計の組み合わせ：A-B(実線), B-C(破線), C-A(点線)
 (パワースペクトルは、A(実線), B(破線), C(点線))

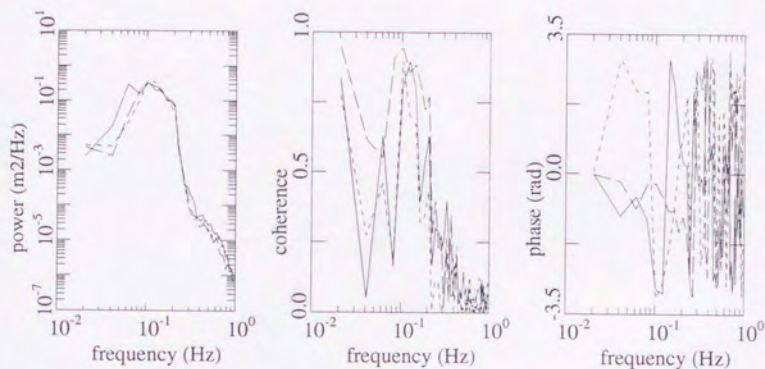


図-4.27: コヒーレンス, フェイズ (Case 1)

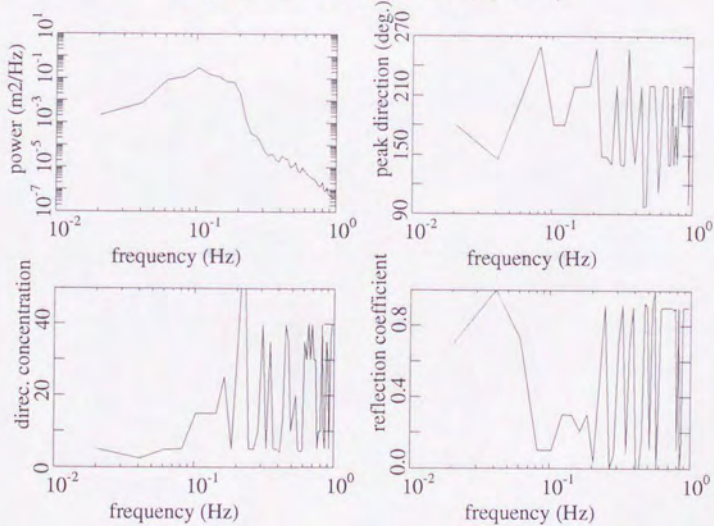


図-4.28: パラメターの推定結果 (Case 1)

波高計の組み合わせ：A-B(実線), B-C(破線), C-A(点線)
 (パワースペクトルは、A(実線), B(破線), C(点線))

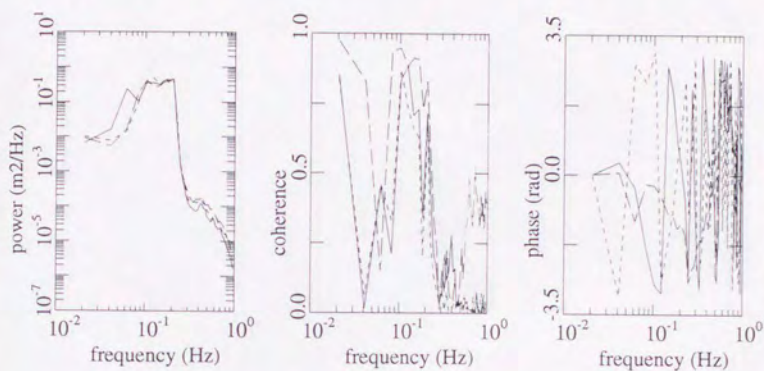


図-4.29: コヒーレンス, フェーズ (Case 2)

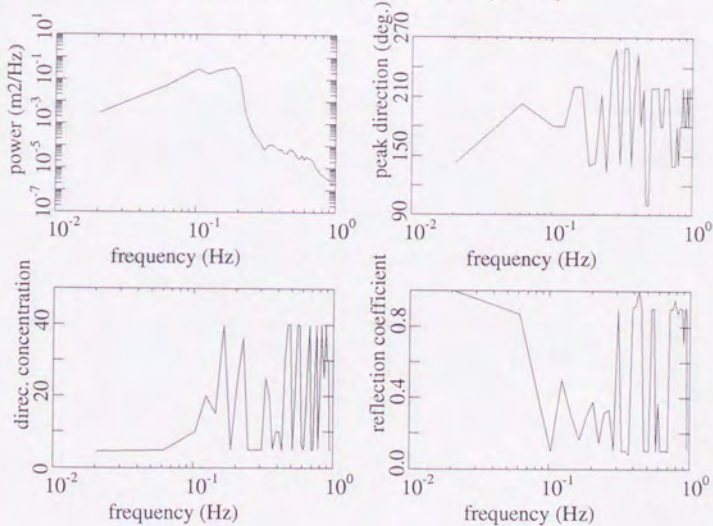


図-4.30: パラメターの推定結果 (Case 2)

波高計の組み合わせ：A-B(実線), B-C(破線), C-A(点線)
 (パワースペクトルは、A(実線), B(破線), C(点線))

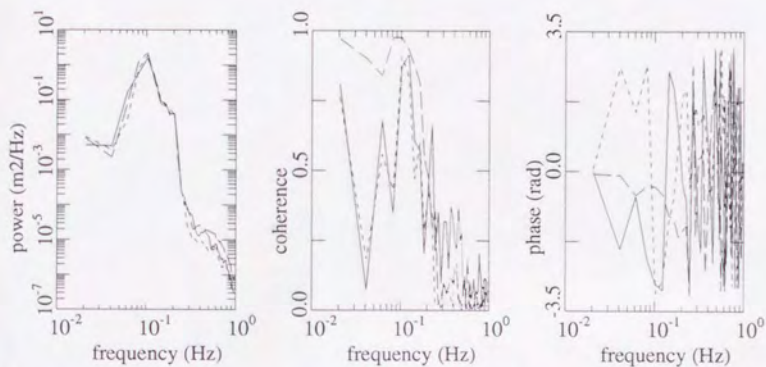


図-4.31: コヒーレンス、フェイズ (Case 3)

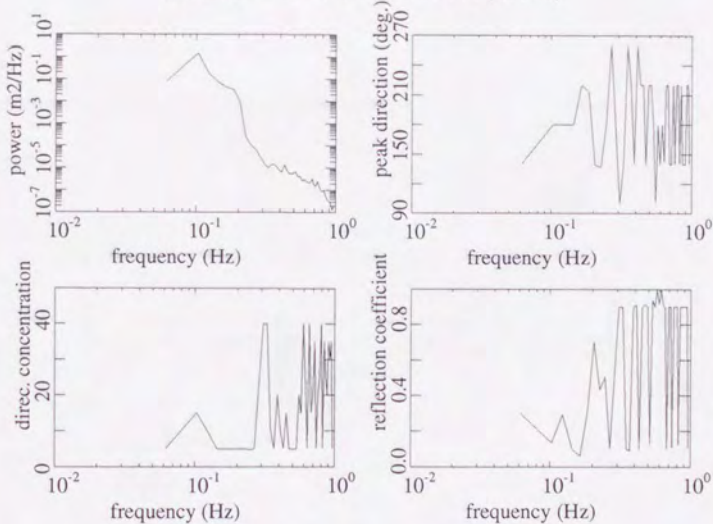


図-4.32: パラメータの推定結果 (Case 3)

波高計の組み合わせ：A-B(実線), B-C(破線), C-A(点線)
 (パワースペクトルは、A(実線), B(破線), C(点線))

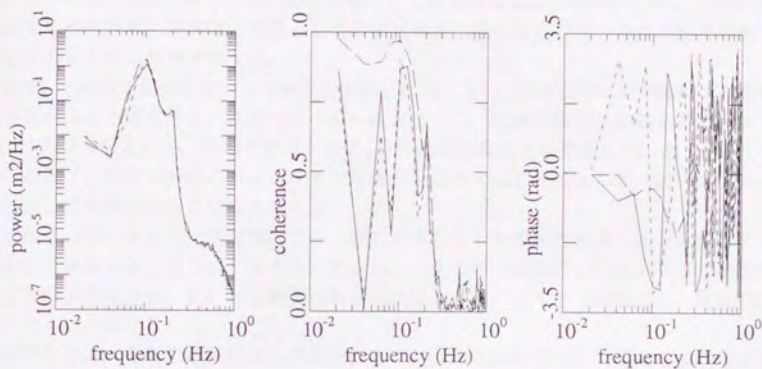


図-4.33: コヒーレンス, フェイズ (Case 4)

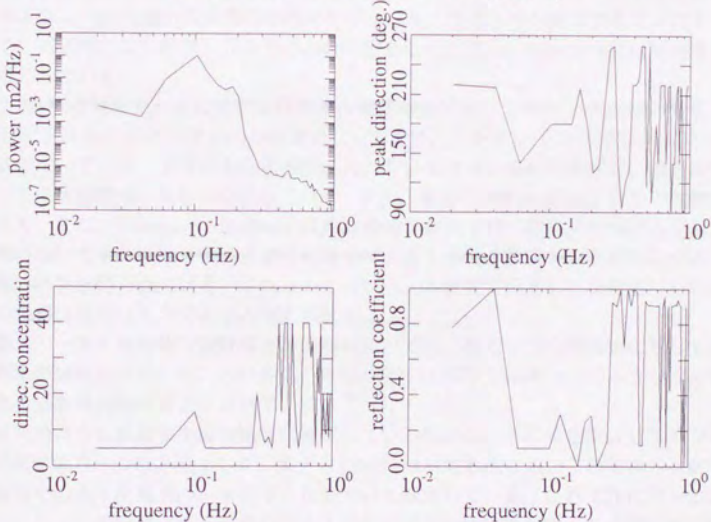


図-4.34: パラメターの推定結果 (Case 4)

4.3 反射率の決定法

本研究では、構造物前面における反射率を方向スペクトルパラメータの1つとして、周波数の関数として定義して推定している。しかし、海岸構造物の設計などの実務においては、反射率は周波数に関係のない固有の値として与えられることが多い。そこで本節では、本研究で推定された周波数の関数としての反射率と、設計などで用いられる固有の値としての反射率との関係を考察する。

まず、本研究で仮定している反射率の解釈を説明する。反射面前面に有限幅のエネルギー減衰帯があると仮定する。このエネルギー減衰帯とは、水槽実験では砕石あるいはサラシロックのようなものを、現地ではテトラポッド、捨石斜面などを想定している。そして、波が反射面で反射する際にこのエネルギー減衰帯を通過することによって、波のエネルギーが減衰し反射率が小さくなると考える。

また、このエネルギー減衰帯内では、波のエネルギーを減衰させる方法として水面変動に対して摩擦のようなものと考えられる。すると、エネルギー減衰帯の中でより多く水面変動をする周波数成分波、すなわち高周波数成分波ほどよりエネルギーが減衰し、反射率が小さくなることになる。

本研究では、各周波数成分波の構造物前面における反射について、以上で述べたような機構を仮定している。ただし、上の議論では、反射率は周波数のみならず波向や振幅の関数になるべきではあるが、その定義のためには膨大な情報が必要となり、また本研究の目的である少ない波動量から実用的な精度を持つ方向スペクトルを推定することにそぐわないので、本研究では反射率を周波数のみの関数として定義し、波向方向には平均された量であるとしている。

§4.2.2の現地観測データに対する反射率の推定結果では、どのケースにおいても、 f が 0.06Hz 以下においてはほぼ $r=0.9$ 程度になっており、 f が $0.1\sim 0.2\text{Hz}$ では $r=0.2\sim 0.3$ 程度の値になっている。すなわち低周波数成分においては高い反射率を示し、高周波数成分においては比較的低い反射率を示している。また、鹿島(1968)の断面2次元の水槽実験においても、また、Thornton・Calhoun(1972)の捨石斜面を持つ防波堤における反射率の現地観測においても、低周波数成分波の反射率は大きく高周波数成分の反射率は小さいという同様の結果が得られている。これらのことから、本研究で仮定した反射面における波の反射の機構は妥当なものであると考えられる。

しかし、一方で構造物の設計などの実務においては、ある1つの構造物に対しては1つの反射率の値を対応させることが多く、例えば合田(1990)では表-4.2のような構造物の種類による反射率の概略値が示されている。

本研究のように反射率を周波数毎に推定している場合は、それらを統合して1つの値にする必要がある。この方法として、大下ら(1987)は現地観測において防波堤の反射率を低周波数帯での入・反射波のエネルギー比を用いて推定している。これは先に行った数値シミュレーションの結果より反射率を求めるのに高精度の推定値が得られる周波数帯を選んでいるのである。また、合田(1990)は一方不規則波を対象として有意な周波数帯における、入射波のエネルギーと反射波のエネルギーの比の平方根として反射率を求めている。

反射面における反射率が周波数のみならず波向、波高によっても変化するものであるこ

表-4.3: 反射率の概略値 (合田 (1990))

構 造 様 式	反 射 率
直立壁 (天端は静水面上)	0.7~1.0
直立壁 (天端は静水面下)	0.5~0.7
捨石斜面 (2~3 割勾配)	0.3~0.6
異形消波ブロック斜面	0.3~0.5
直立消波構造物	0.3~0.8
天然海浜	0.05~0.2

とを考えると、工学的な意味で構造物の反射率とは、前面の波浪場における入射波のエネルギーと反射波のエネルギーの比のようなもので定義するのがよいと考えられる。したがって、入射波のエネルギーがピークとなる周波数付近での反射率の平均値をその反射面での反射率とする。§4.2.2の推定結果によると防波堤の反射率は $r=0.2\sim0.3$ であると推定される。

第 5 章

結 論

本研究では、円正規分布関数を用いた入・反射波共存場における方向スペクトルの推定法を提案し、それを数値的にシミュレートされた波浪場に対して適用し、その有効性を検討するとともに、波高計アレイの形状、波高計間隔によるパラメータの推定精度の変化について考察した。さらに水槽実験、現地観測で得られた実測データに対しても方向スペクトルの推定法を適用し、その推定結果を検討して推定法の有効性を検討した。

その結果得られたことを以下に簡単にまとめる。

第 2 章では、円正規分布関数を用いた方向スペクトルの推定法を提案した。

この推定法は、各波高計で得られた水面変動データのクロスパワースペクトルの組み合わせと、表-2.2に示される方向スペクトルパラメータを用いて式(2.89)のように定式化されたクロスパワースペクトルの組み合わせとが等しくなるような方向スペクトルパラメータを最尤推定法を用いて推定することによって、方向スペクトルを推定するものである。

式(2.89)のクロスパワースペクトルの定式化に用いる方向関数として、本研究では円正規分布関数を用いた(式(2.88)、式(2.90))。これは、円正規分布関数が方向関数として具備すべき条件を満たしているのに加えて、クロスパワースペクトルを計算する級数展開式(式(2.91))において、少ない項数で高精度の収束値が得られるためである。

また、方向スペクトルパラメータを求める方程式(式(2.99))を解くために、非線形の連立方程式を解くアルゴリズムである修正 Marquardt 法を採用した。この方法により、広い範囲のパラメータの初期値から繰り返し計算を始めても、安定的に解に収束することが確認された。

第 3 章では、数値シミュレーションによって作成した各波高計における時系列データに対して方向スペクトルの推定法を適用した。主波向が 180° 、 135° 、 95° の 3 種類、方向集中度が $s_{\max}=10$ 、 40 、 75 の 3 種類、反射率が 0.1 、 0.5 、 0.9 の 3 種類のいろいろな組み合わせのすべての波浪場において、本研究で提案した推定法を用いて十分な精度で方向スペクトルパラメータを推定することができた。

また、同じ条件の波浪場においても、異なる波高計アレイでの水面変動データを用いて方向スペクトルを推定することにより、波高計アレイの形状や波高計間の距離、波高計アレイの設置位置などが方向スペクトルパラメータの推定値におよぼす影響について議論した。その際、方向スペクトルパラメータの推定誤差として、ある周波数帯における推定誤

差の正規化された rms 値を用いた。

その結果、反射率を高精度で推定するためには反射面に垂直な直線状の波高計アレイを、ピーク波向、方向集中度係数を高精度で推定するためには反射面に平行な直線状の波高計アレイを用いるのがよいことがわかった。また、三角形状の波高計アレイを用いると、反射率、ピーク波向、方向集中度係数のすべてのパラメータを精度良く推定することができる。しかしその精度は直線状の波高計アレイほど高くはないことがわかった。

また、様々な三角形アレイによるパラメータの推定結果より、波高計間隔が拡大することによりパラメータの推定精度が低下することは確認されたが、波高計アレイが反射面から離れて設置されていることによるパラメータの推定精度の低下は確認されなかった。

第4章では、水槽実験と現地観測において得られた水面変動の時系列データに対して推定法を適用して、その有効性を検討した。

水槽実験データに対して適用すると、反射面に垂直な波高計アレイを用いると反射率が、反射面に平行な波高計アレイを用いるとピーク波向、方向集中度係数が正しく推定されるという結果が得られた。これは、数値シミュレーションデータに対する推定結果と一致するものである。また、現地観測データに対する適用では、どのケースにおいても入射波のパワースペクトルがピークとなる周波数帯で反射率が $r=0.2\sim0.3$ となる結果を得た。本研究で提案された方向スペクトルの推定法を実測データに適用した結果、本推定法が実測データに対しても有効に方向スペクトルパラメータを推定することが確認された。

最後に、現地観測データに対して推定された反射率の解釈について議論し、構造物前面における反射率の値を入射波のスペクトルの値がピークとなっている付近で得られた推定値の平均値とすることが妥当であることを示した。

参考文献

- [1] 磯部雅彦・近藤浩右 (1983) : 入・反射波の共存場における方向スペクトルの推定法, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 44-48.
- [2] 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司 (1984) : 方向スペクトルにおける MLM の拡張, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177.
- [3] 磯部雅彦 (1989) : 標準化された方向スペクトルの推定法, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 158-162.
- [4] 大下哲則・近藤浩右・関本恒浩・今井澄雄・中村光宏 (1987) : 港内における方向スペクトルの観測と反射率の推定, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 121-125.
- [5] 鹿島遼一 (1968) : 不規則な波の入射および反射エネルギー・スペクトルの推定法について, 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 91-96.
- [6] 川嶋弘尚・酒井英昭 (1989) : 現代スペクトル解析, 森北出版, 372p.
- [7] 合田良実 (1980) : 波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻, 第 3 号, pp. 37-70.
- [8] 合田良実 (1981) : 二方向波浪系における代表波向の算定について, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- [9] 合田良実 (1990) : [増補改訂] 港湾構造物の耐波設計 — 波浪工学への序説, 鹿島出版会, 333p.
- [10] 合田良実・鈴木康正 (1975) : 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45pp.
- [11] 中川 徹・小柳義夫 (1982) : 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 206p.
- [12] 橋本典明・小舟浩治 (1985) : 最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定法, 港湾技術研究所報告, 第 24 巻, 第 3 号, pp. 123-145.
- [13] 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.

- [14] 橋本典明・小舟浩治 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定 —入・反射波共存場を対象として—, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 3-33.
- [15] 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993a): 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 1 号, pp. 3-25.
- [16] 橋本典明・永井紀彦・浅井 正 (1993b): 海洋波の方向スペクトルの推定における拡張最大エントロピー原理法の修正 —入・反射波共存場を対象として—, 港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 4 号, pp. 25-47.
- [17] 日野幹雄 (1977): スペクトル解析, 朝倉書店, 300p.
- [18] 平口博丸・清水隆夫・池野正明・田中寛好 (1990): 多方向不規則波造波システムの効率化とその造波特性, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 140-144.
- [19] 平口博丸・鹿島遼一・田中寛好・石井敏雅 (1991): 多方向不規則波造波装置の反射吸収性能に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 121-125.
- [20] 藤原隆一・磯部雅彦・渡辺 晃 (1994): 双峰型の標準方向スペクトルの推定法, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 46-50.
- [21] 堀川清司 編/本間 仁 監修 (1985): 海岸環境工学 — 海岸過程の理論・観測・予測手法, 東京大学出版会, 582p.
- [22] 光易 恒・水野信二郎・本田忠夫・力石国男 (1973): 海洋波の方向スペクトルについて, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 435-439.
- [23] 光易 恒 (1995): 海洋波の物理, 岩波書店, 210p.
- [24] 山口正隆・土屋義人・小矢田宏 (1977): 一様風域場における波浪の方向スペクトルの特性について, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 97-101.
- [25] 山口正隆・土屋義人 (1980): 発達過程にある風波の方向スペクトル特性, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 99-103.
- [26] 横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1991): 多方向不規則波浪場における反射率の推定法, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 146-150.
- [27] 横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1994): 円正規分布関数を用いた入・反射波共存場における方向スペクトルの推定法, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 41-45.
- [28] 横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1995): 円正規分布関数を用いた方向スペクトルの推定法の実験・現地データへの適用, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 206-210.

- [29] Barber, N. F. (1963) : The directional resolving power of an array of wave detectors, *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall Inc., pp. 137-150.
- [30] Borgman, L. E. (1969) : Directional spectra models for design use for surface waves, HEL 1-12, Hydraulic Engineering Laboratory. University of California, 56p.
- [31] Capon, J. (1969) : High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418.
- [32] Davis, R. E. and L. A. Regier (1977) : Methods for estimating directional wave spectra from multi-element arrays, *Journal of Marine Research*, vol. 35, no. 3, pp. 453-477.
- [33] Donelan, M. A., J. Hamilton and W. H. Hui (1985) : Directional spectra of wind-generated waves, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, ser. A, vol. 315, pp. 509-562.
- [34] Hasselman, D. E., M. Dunkel and J. A. Ewing (1980) : Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 10, pp. 1264-1280.
- [35] Herbers, T. H. C. and R. T. Guza (1990) : Estimation of directional wave spectra from multicomponent observations, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 20, pp. 1703-1724.
- [36] Jenkins, G. M. and D. G. Watts (1968) : *Spectral Analysis and its Applications*, Holden-Day, Inc., 525p.
- [37] Koopmans, L. H. (1974) : *The Spectral Analysis of Time Series*, Academic Press, 366p.
- [38] Lawson, L. M. and R. B. Long (1983) : Multimodal properties of the surface-wave field observed with pitch-roll buoys during GATE, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 13, pp. 474-486.
- [39] Long, R. B. and K. Hasselmann (1979) : A variational technique for extracting directional spectra from multi-component wave data, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 9, pp. 373-381.
- [40] Longuet-Higgins, M. S. (1957) : The statistical analysis of a random, moving surface, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, ser. A, vol. 249, pp. 321-387.

- [41] Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith (1963) : Observations of directional spectrum of sea waves using the motions of floating buoy, *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall Inc., pp. 111-136.
- [42] Lygre, A. and H. E. Krogstad (1986) : Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 16, pp. 2052-2060.
- [43] Marsden, R. F. and B. -A. Juszko (1987) : An eigenvector method for the calculation of directional spectra from heave, pitch and roll buoy data, vol. 17, pp. 2157-2167.
- [44] Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi (1975) : Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 5, pp. 750-760.
- [45] Oakeley, O. H. and J. B. Lozow (1977) : Directional spectra measurement by small arrays, *Proceedings of 9th Offshore Technology Conference*, pp. 155-166.
- [46] Oltman-Shay, J. and R. T. Guza (1984) : A data-adaptive ocean wave directional-spectrum estimator for pitch and roll type measurements, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 14, pp. 1800-1810.
- [47] Panicker, N. N. and L. E. Borgman (1974) : Enhancement of directional wave spectra, *Proceedings of 14th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 258-279.
- [48] Pawka, S. S. (1983) : Island shadows in wave directional spectra, *Journal of Geographical Research*, vol. 88, pp. 2579-2591.
- [49] Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery (1992) : *Numerical Recipes in Fortran (Second edition)*, Cambridge University Press, 963p.
- [50] Rice, S. O. (1944) : Mathematical analysis of random noise, *The Bell System Technical Journal*, vol. 23, pp. 282-332.
- [51] Thornton, E. B. and R. J. Calhoun (1972) : Spectral resolution of breakwater reflected waves, *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, *Proceedings of the ASCE*, vol. WW4, pp. 443-460.

付 録 A

クロスパワースペクトルの表示式

A.1 式 (2.91) の導出

式 (2.90) から式 (2.91) に至る導出過程を説明する。まず、式 (2.90) を再掲する。

$$\varphi(a, \theta, R, \Theta | f) = \frac{1}{2\pi I_0(a)} \int_0^{2\pi} \exp \{-ikR \cos(\theta - \Theta)\} \exp \{a \cos(\theta - \Theta)\} d\theta \quad (\text{A.1})$$

右辺の分母を払って積分のみとする。

$$2\pi I_0(a) \cdot \varphi = \int_0^{2\pi} \exp \{-ikR \cos(\theta - \Theta)\} \exp \{a \cos(\theta - \Theta)\} d\theta \quad (\text{A.2})$$

さらに変数変換 $\theta' = \theta - \Theta$ を行うと式 (A.2) は式 (A.3) のように表される。

$$2\pi I_0(a) \cdot \varphi = \int_0^{2\pi} \exp \{-ikR \cos(\theta' + \Theta_0 - \Theta)\} \exp(a \cos \theta') d\theta \quad (\text{A.3})$$

ここで、 $\beta = \Theta_0 - \Theta + \pi$ とおくと、式 (A.3) 中の被積分関数の一部が式 (A.4) のように表される。

$$\begin{aligned} & \exp \{-ikR \cos(\theta' + \Theta_0 - \Theta)\} \\ &= \exp \{-ikR \cos(\theta' + \beta + \pi)\} \\ &= \exp \{ikR \cos(\theta' + \beta)\} \\ &= \cos \{kR \cos(\theta' + \beta)\} + i \sin \{kR \cos(\theta' + \beta)\} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

ここで Bessel 関数に関する公式を用いて式 (A.4) における $\cos \{kR \cos(\theta' + \beta)\}$ 、 $\sin \{kR \cos(\theta' + \beta)\}$ を展開すると、

$$\cos \{kR \cos(\theta' + \beta)\} = J_0(kR) + \sum_{n=1}^{\infty} \{2(-1)^n \cos 2n(\theta' + \beta) J_{2n}(kR)\} \quad (\text{A.5})$$

$$\sin \{kR \cos(\theta' + \beta)\} = \sum_{n=0}^{\infty} [2(-1)^n \sin \{(2n+1)(\theta' + \beta)\} J_{2n+1}(kR)] \quad (\text{A.6})$$

が得られる。ここで、 $J_n(x)$ は n 次の第 1 種 Bessel 関数である。また、三角関数の加法定理より、

$$\cos 2n(\theta' + \beta) = \cos 2n\theta' \cos 2n\beta - \sin 2n\theta' \sin 2n\beta \quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned} \sin \{(2n+1)(\theta' + \beta)\} &= \sin(2n+1)\theta' \cos(2n+1)\beta \\ &\quad + \cos(2n+1)\theta' \sin(2n+1)\beta \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

が得られる。ここで、 $\exp(a \cos \theta')$ 、 $\cos 2n\theta'$ は θ' について偶関数、 $\sin 2n\theta'$ は奇関数であることを考慮すれば、式 (A.3) の積分において $\sin 2n\theta' \exp(a \cos \theta')$ は積分に寄与しないことがわかる。このことを考慮して式 (A.4) から式 (A.8) までを式 (A.3) に代入すると、式 (A.9) が得られる。

$$\begin{aligned} 2\pi I_0(a) \cdot \varphi &= \int_0^{2\pi} \left[J_0(kR) + \sum_{n=1}^{\infty} \{ 2(-1)^n \cos 2n\theta' \cos 2n\beta J_{2n}(kR) \} \exp(a \cos \theta') \right] d\theta' \\ &\quad - i \int_0^{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \{ 2(-1)^n \cos(2n+1)\theta' \sin(2n+1)\beta J_{2n+1}(kR) \} \exp(a \cos \theta') d\theta' \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

式 (A.9) を整理して式 (A.10) のように表し、

$$\begin{aligned} 2\pi I_0(a) \cdot \varphi &= J_0(kR) \int_0^{2\pi} \exp(a \cos \theta') d\theta' \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ 2(-1)^n \cos 2n\beta J_n(kR) \int_0^{2\pi} \cos 2n\theta' \exp(a \cos \theta') d\theta' \right\} \\ &\quad - i \sum_{n=0}^{\infty} \left[2(-1)^n \sin(2n+1)\beta J_{2n+1}(kR) \right. \\ &\quad \left. \times \int_0^{2\pi} \cos(2n+1)\theta' \exp(a \cos \theta') d\theta' \right] \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

変形された Bessel 関数の公式 (式 (A.11)) を用いると、

$$\begin{aligned} I_n(a) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(a \cos \theta) \cos n\theta d\theta \\ 2\pi I_0(a) &= \int_0^{2\pi} \exp(a \cos \theta) \cos n\theta d\theta \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

式 (A.10) は式 (A.12) のように表され、

$$\begin{aligned} 2\pi I_0(a) \cdot \varphi &= J_0(kR) 2\pi I_0(a) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} 2(-1)^n \cos 2n\beta J_n(kR) 2\pi I_{2n}(a) \\ &\quad + i \sum_{n=0}^{\infty} 2(-1)^n \sin(2n+1)\beta J_{2n+1}(kR) 2\pi I_{2n+1}(a) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

左辺の分母を払うことによって式 (2.91) が得られる。

$$\begin{aligned} \varphi(a, \theta_0, R, \Theta | f) &= J_0(kR) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos 2n\beta J_{2n}(kR) \frac{I_{2n}(a)}{I_0(a)} \\ &\quad + 2i \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cos(2n+1)\beta J_{2n+1}(kR) \frac{I_{2n+1}(a)}{I_0(a)} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

A.2 クロスパワースペクトルの微分係数

本節では、本研究の数値計算で用いたクロスパワースペクトルの方向スペクトルパラメータによる微分係数のうちその導出が複雑であると思われる、方向集中度係数 a による微分係数の表示式を示す。

まず、クロスパワースペクトルの表示式を再掲する。

$$\Phi_{pq}(f) = \left\{ \begin{array}{l} \varphi(a, \theta_0, R_{pq}, \Theta_{pq}|f) \\ + r^2 \varphi(a, \theta_0, R_{pq}, \pi - \Theta_{pq}|f) \\ + r \varphi(a, \theta_0, R_{pqr}, \Theta_{pqr}|f) \\ + r \varphi(a, \theta_0, R_{pqr}, \pi - \Theta_{pqr}|f) \end{array} \right\} (1 + \delta_{pq} \varepsilon_p) P(f) \quad (\text{A.14})$$

ここで、

$$\begin{aligned} \varphi(a, \theta_0, R, \Theta|f) = & J_0(kR) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos 2n\beta J_{2n}(kR) \frac{I_{2n}(a)}{I_0(a)} \\ & + 2i \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cos(2n+1)\beta J_{2n+1}(kR) \frac{I_{2n+1}(a)}{I_0(a)} \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

である。ここで、 $\beta = \theta_0 - \Theta + \pi$ である。

A.2.1 方向集中度係数 a による微分

まず、方向集中度係数 a の関数になっている部分のみを a で微分した式を求める。変形された Bessel 関数の微分に関する公式より、

$$I_{n-1}(a) + I_{n+1}(a) = 2 \frac{\partial I_n(a)}{\partial a} \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial I_0(a)}{\partial a} = I_1(a) \quad (\text{A.17})$$

であるから、これらの公式より、 $I_n(a)/I_0(a)$ を a で微分すると次式のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[\frac{I_n(a)}{I_0(a)} \right] = \begin{cases} \frac{I_{n+1}(a)}{2I_0(a)} + \frac{I_{n-1}(a)}{2I_0(a)} - \frac{I_n(a)I_1(a)}{\{I_0(a)\}^2} & \cdots \quad (n \geq 1) \\ 0 & \cdots \quad (n = 0) \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

式 (A.18) を用いることにより、 $I_n(a)/I_0(a)$ の a に関する 2 次微分式は次式のように表

される。

$$\frac{\partial^2}{\partial a^2} \left[\frac{I_n(a)}{I_0(a)} \right] = \begin{cases} \frac{I_{n+2}(a) + I_{n-2}(a)}{4I_0(a)} - \frac{2I_{n+1}(a)I_1(a) + I_n(a)I_2(a) + 2I_{n-1}(a)I_1(a)}{2\{I_0(a)\}^2} + \frac{2I_n(a)\{I_1(a)\}^2}{\{I_0(a)\}^3} & \dots \quad (n \geq 2) \\ \frac{I_3(a) - 3I_1(a)}{4I_0(a)} - \frac{3I_2(a)I_1(a)}{2\{I_0(a)\}^2} + \frac{2\{I_1(a)\}^3}{\{I_0(a)\}^3} & \dots \quad (n = 1) \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

したがって、クロスパワースペクトル Φ_{pq} の方向集中度係数 a に関する、1 次、2 次の微分式はそれぞれ、式 (A.18)、式 (A.19) を式 (A.15) の $I_{2n}(a)/I_0(a)$ および $I_{2n+1}(a)/I_0(a)$ の代わりに代入することによって求めることができる。

付 録 B

尤度の導出

本章では、式(2.92)で示した尤度の導出過程の説明を磯部(1989)に基づいておこなう。 M 種類の時系列データ $\xi^{(p)}(\mathbf{x}_p, t)$ ($p = 1 \sim M$) をフーリエ級数展開して、式(B.1)のように表すと、

$$\xi^{(p)}(\mathbf{x}_p, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n^{(p)} \cos 2\pi f_n t + b_n^{(p)} \sin 2\pi f_n t \right) \quad (\text{B.1})$$

フーリエ係数 $a_n^{(p)}$, $b_n^{(p)}$ は平均値が0となる正規分布となる。ここで、 M 種類の時系列データの周波数の第 n 成分のみに着目して、列ベクトル A_c , A_s を次式のように表し、

$$A_c = (a_n^{(1)}, \dots, a_n^{(M)})^t \quad (\text{B.2})$$

$$A_s = (b_n^{(1)}, \dots, b_n^{(M)})^t \quad (\text{B.3})$$

さらに、列ベクトル A を式(B.4)のように表す。ただし、添字の t は転置行列を表している。

$$A = (A_c, A_s)^t \quad (\text{B.4})$$

A の確率密度関数は、多次元の正規分布の確率密度関数となるので、次式のように表される(例えば、川嶋・酒井, 1989)。

$$p(A) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\Delta f)^{2M}\sqrt{\Xi}} \exp\left(-\frac{1}{2\Delta f} A^t \Xi^{-1} A\right) \quad (\text{B.5})$$

ここで Ξ は、 A の分散共分散マトリクスを表しており、

$$\Xi \Delta f = [AA^t] = \begin{bmatrix} C & Q \\ -Q & C \end{bmatrix} \Delta f \quad (\text{B.6})$$

と書ける(例えば、Rice, 1944)。また、 Δf は A が代表する周波数間隔であり、 C , Q はそれぞれコスペクトル、クオドラチャスペクトルを表しており、クロスパワースペクトル Φ と

$$\Phi = C - iQ \quad (\text{B.7})$$

の関係がある。ここで、 Ξ が式 (B.6) の後半のように書き表されることから、ベクトル ζ を

$$\zeta = A_c - iA_s \quad (\text{B.8})$$

のように定義すれば、式 (B.5) の確率密度関数の式は次式のように表される。

$$p(\mathbf{A}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\Delta f})^M |\Phi|} \exp \left(-\frac{1}{2\Delta f} \zeta^t \Phi^{-1} \zeta \right) \quad (\text{B.9})$$

ここで、 Φ はベクトル ζ の分散共分散マトリクス、すなわちクロスパワースペクトル (行列) を表しており、

$$\Phi \Delta f = \left[\frac{\langle \zeta^* \zeta^t \rangle}{2} \right] = (C - iQ) \Delta f \quad (\text{B.10})$$

である。

フーリエ級数の組み合わせ \mathbf{A} が同時に起こる起こり易さを表すものとして結合確率密度関数がある。本研究では、例えば J 個の組み合わせでの結合確率密度関数を式 (B.11) のように表しこれを尤度と定義している。

$$\begin{aligned} A(\mathbf{A}^{(j)}; \Phi) &= \left\{ \prod_{j=1}^J p(\mathbf{A}^{(j)}) \right\}^{1/J} \\ &= \frac{1}{(2\pi\Delta f)^M |\Phi|} \exp \left(-\sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M \phi_{pq}^{-1} \hat{\phi}_{qp} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

ここで $\hat{\phi}_{qp}$ は次式のように表され、

$$\hat{\phi}_{qp} = \frac{1}{2J\Delta f} \sum_{j=1}^J \zeta_q^{*(j)} \zeta_p^{(j)} \quad (\text{B.12})$$

ペリオドグラムに矩形フィルターをかけたものとなっており、本研究でいうところの実測されたクロスパワースペクトルの組み合わせを表している。

付 録 C

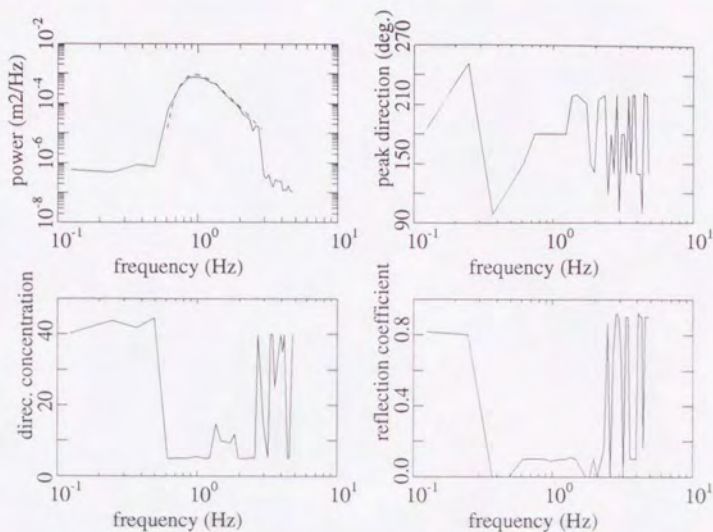
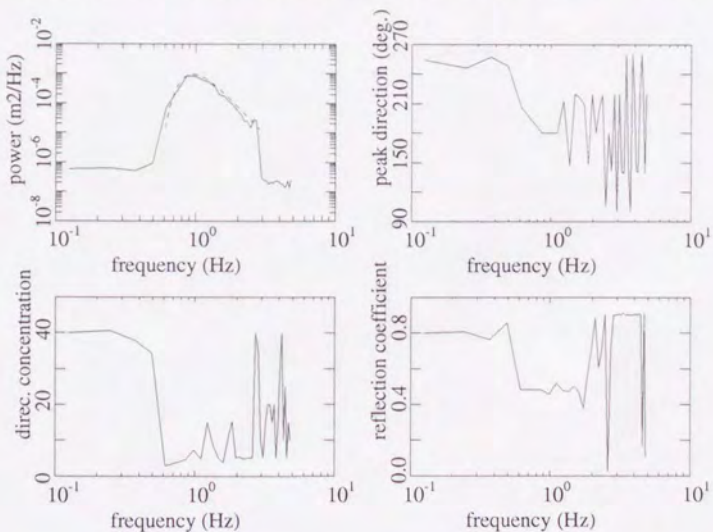
方向スペクトルパラメターの推定結果図

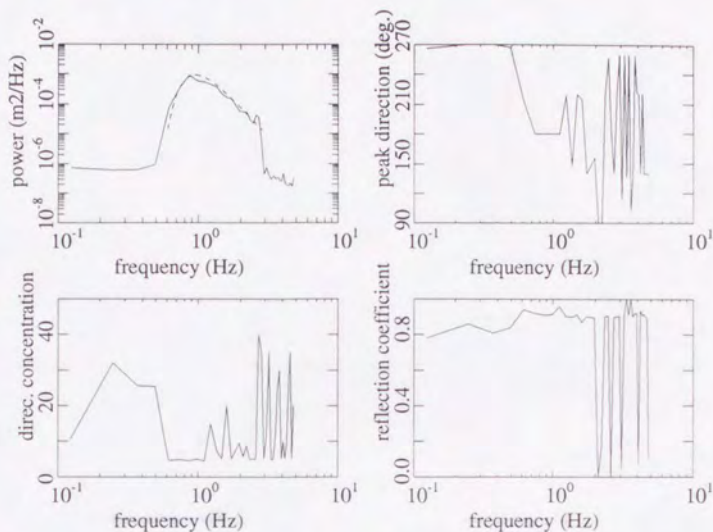
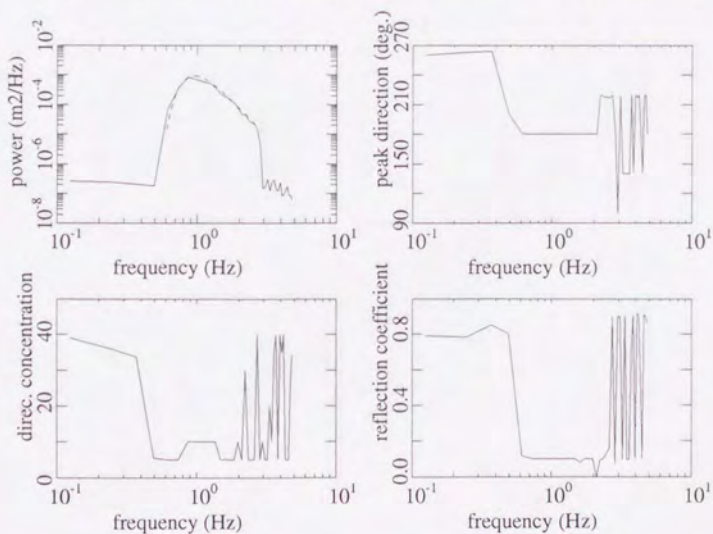
C.1 主波向が 180° の波浪場に対する推定結果

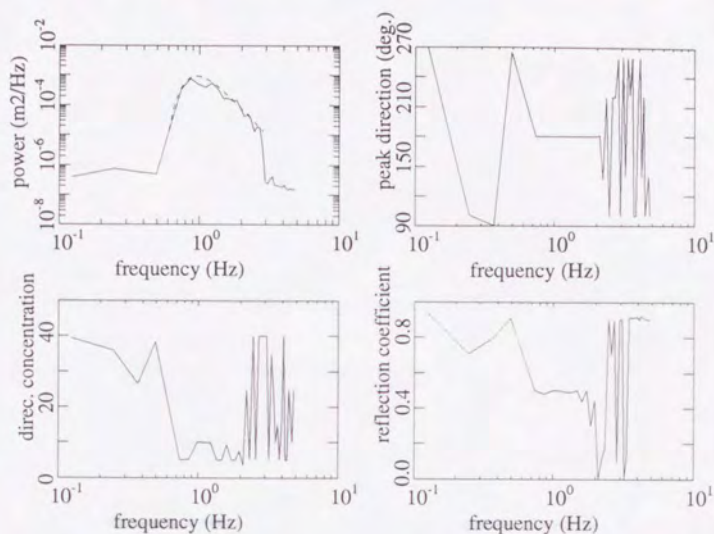
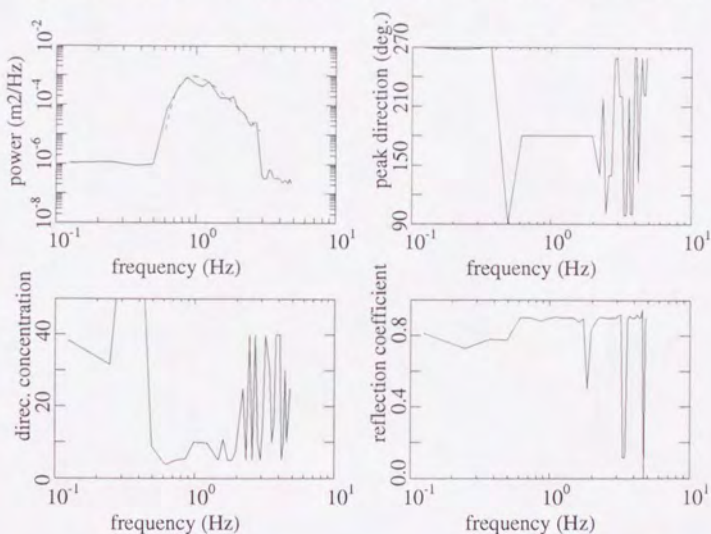
C.1.1 反射面に垂直な波高計アレイを用いた推定結果

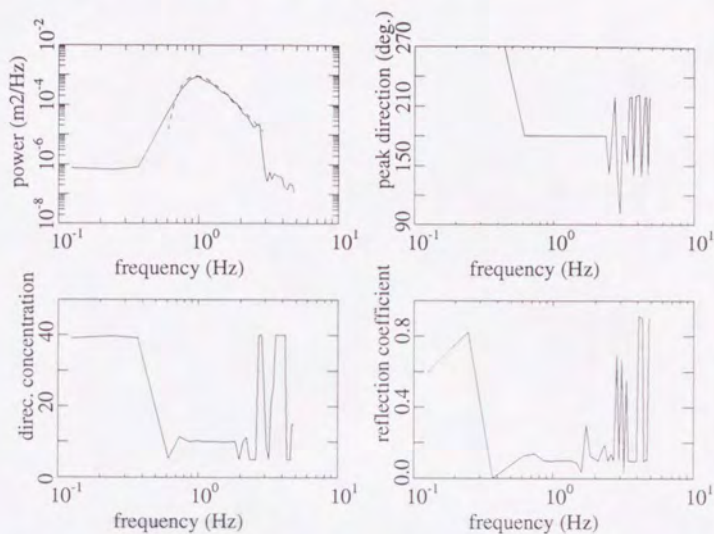
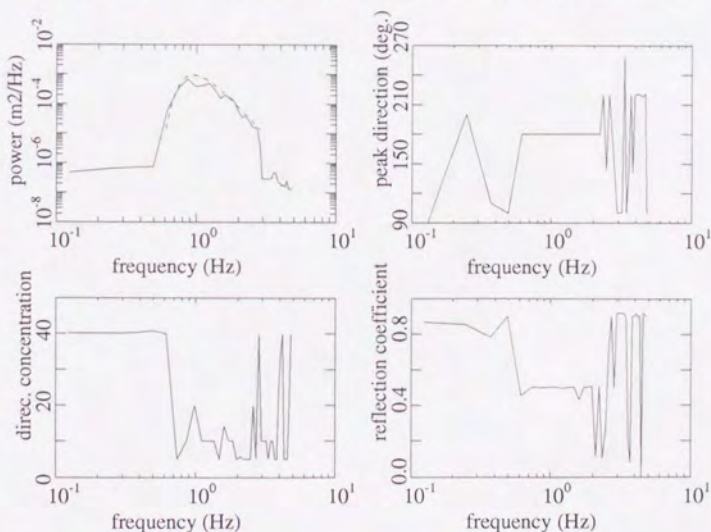
表-C.1: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=180^\circ$, 反射面に垂直)

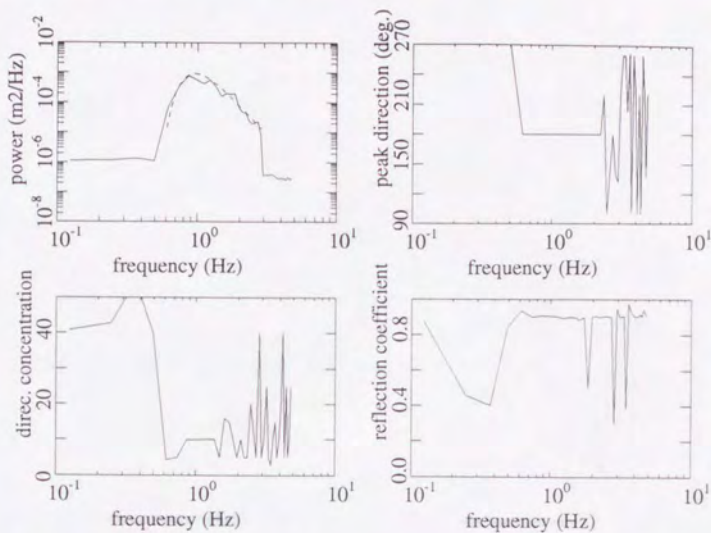
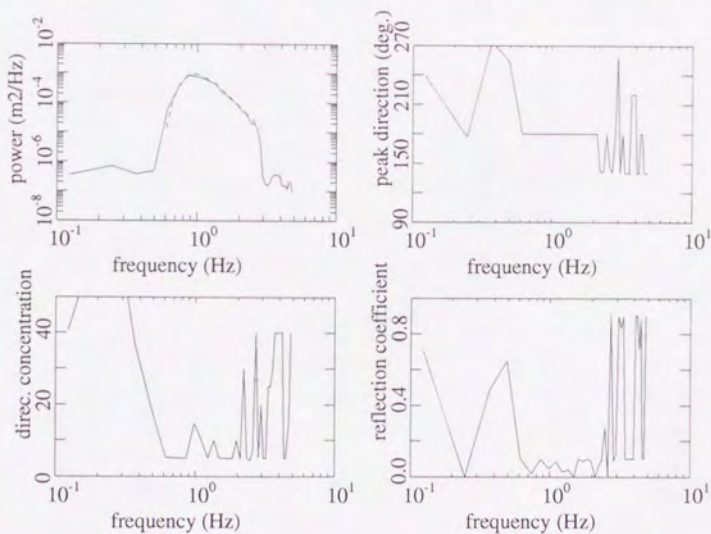
図の番号	$\theta_p (^\circ)$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.1	180	10	0.1	A-B-C
図-C.2	180	10	0.5	A-B-C
図-C.3	180	10	0.9	A-B-C
図-C.4	180	40	0.1	A-B-C
図-C.5	180	40	0.5	A-B-C
図-C.6	180	40	0.9	A-B-C
図-C.7	180	75	0.1	A-B-C
図-C.8	180	75	0.5	A-B-C
図-C.9	180	75	0.9	A-B-C
図-C.10	180	40	0.1	A-B-D
図-C.11	180	40	0.5	A-B-D
図-C.12	180	40	0.9	A-B-D
図-C.13	180	40	0.1	C-D-E
図-C.14	180	40	0.5	C-D-E
図-C.15	180	40	0.9	C-D-E

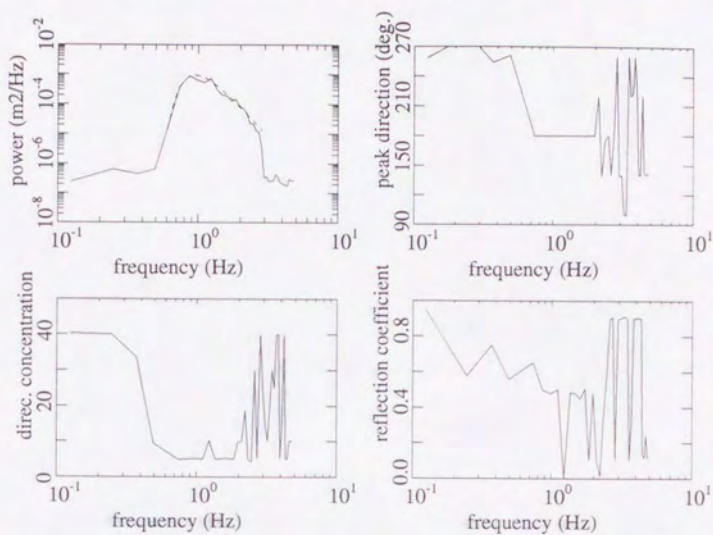
図-C.1: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.2: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)

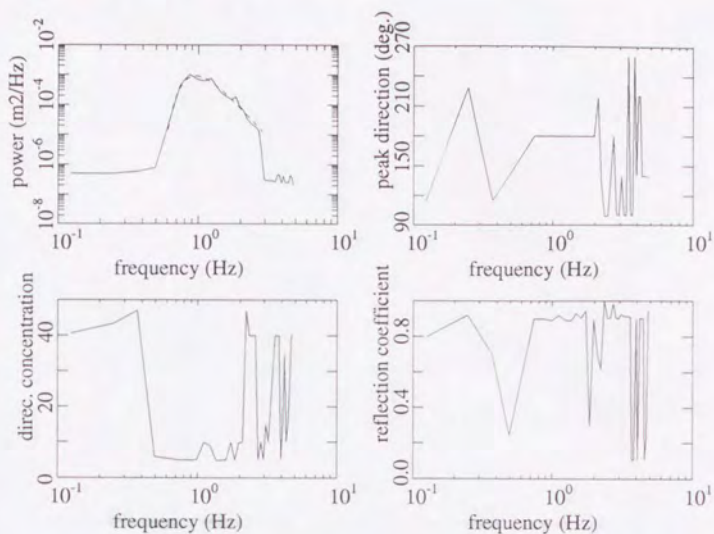
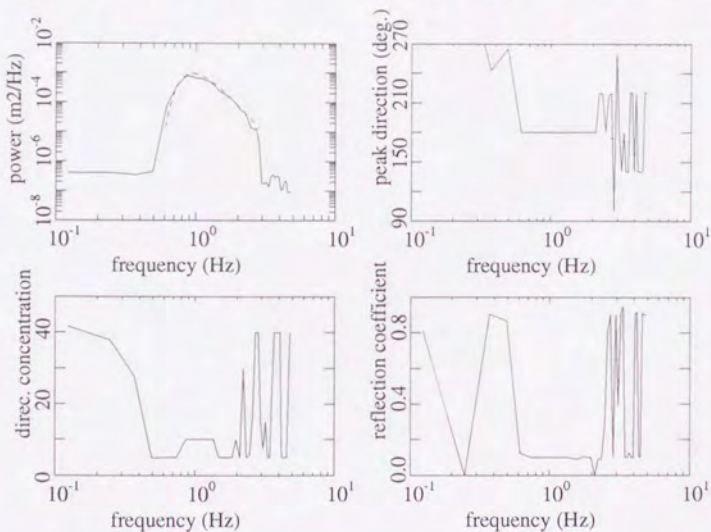
図-C.3: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.4: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-B-C)

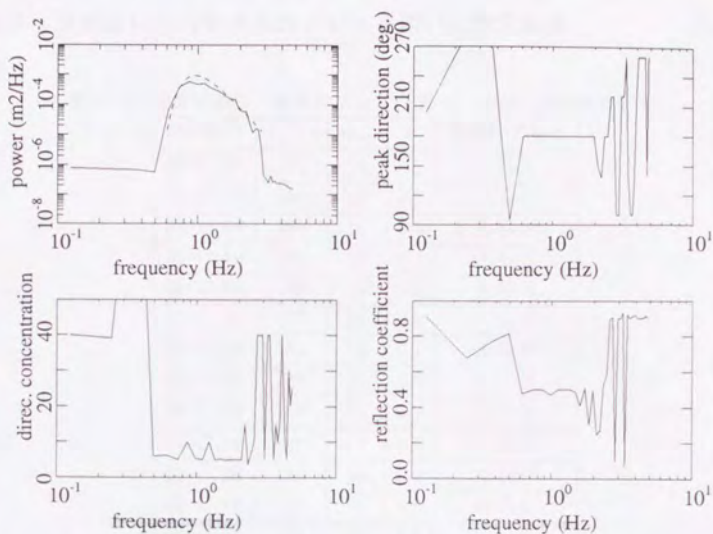
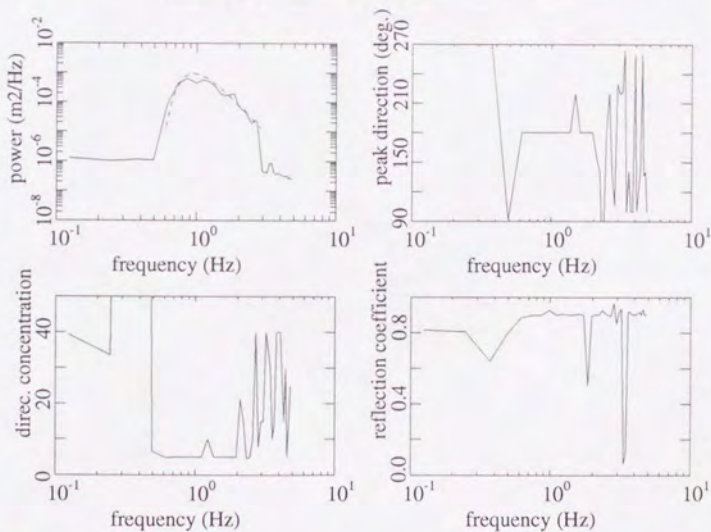
図-C.5: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.6: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-B-C)

図-C.7: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.8: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)

図-C.9: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.10: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-B-D)

図-C.11: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-D)

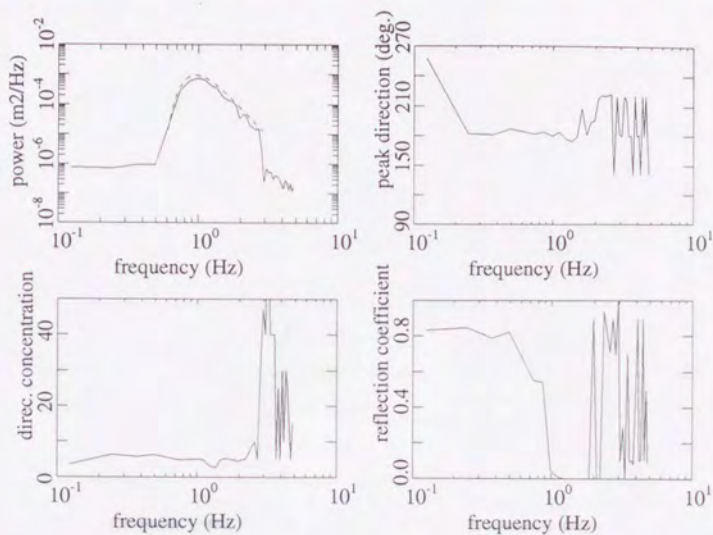
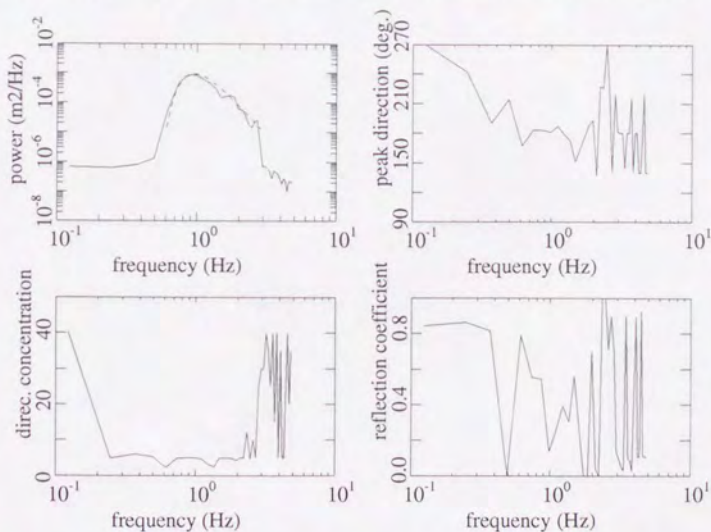
図-C.12: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-B-D)図-C.13: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: C-D-E)

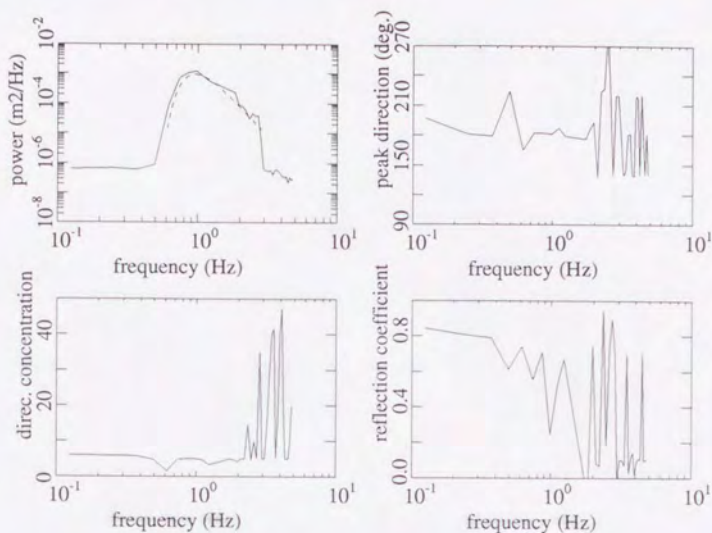
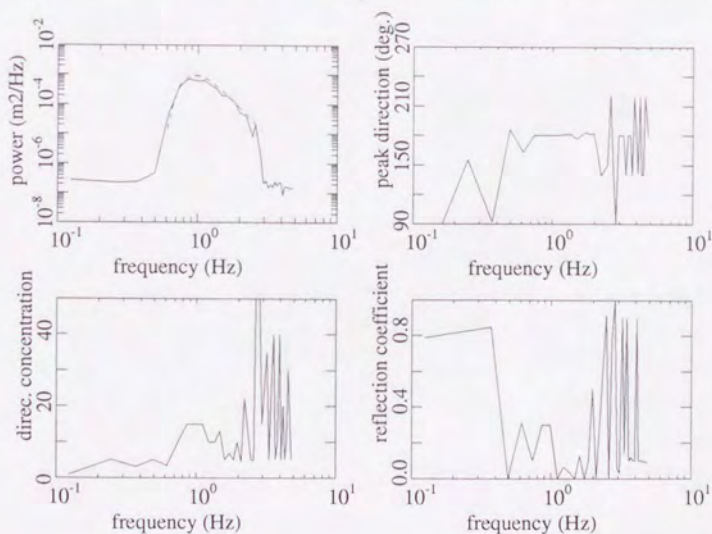
図-C.14: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : C-D-E)図-C.15: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ : C-D-E)

C.1.2 反射面に平行な波高計アレイを用いた推定結果

表-C.2: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=180^\circ$, 反射面に平行)

図の番号	$\theta_p (^{\circ})$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.16	180	10	0.1	A-G-N
図-C.17	180	10	0.5	A-G-N
図-C.18	180	10	0.9	A-G-N
図-C.19	180	40	0.1	A-G-N
図-C.20	180	40	0.5	A-G-N
図-C.21	180	40	0.9	A-G-N
図-C.22	180	75	0.1	A-G-N
図-C.23	180	75	0.5	A-G-N
図-C.24	180	75	0.9	A-G-N
図-C.25	180	10	0.5	A-G-U
図-C.26	180	40	0.5	A-G-U
図-C.27	180	75	0.5	A-G-U
図-C.28	180	10	0.5	C-I-Q
図-C.29	180	40	0.5	C-I-Q
図-C.30	180	75	0.5	C-I-Q

図-C.16: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-G-N)図-C.17: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

図-C.18: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-G-N)図-C.19: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-G-N)

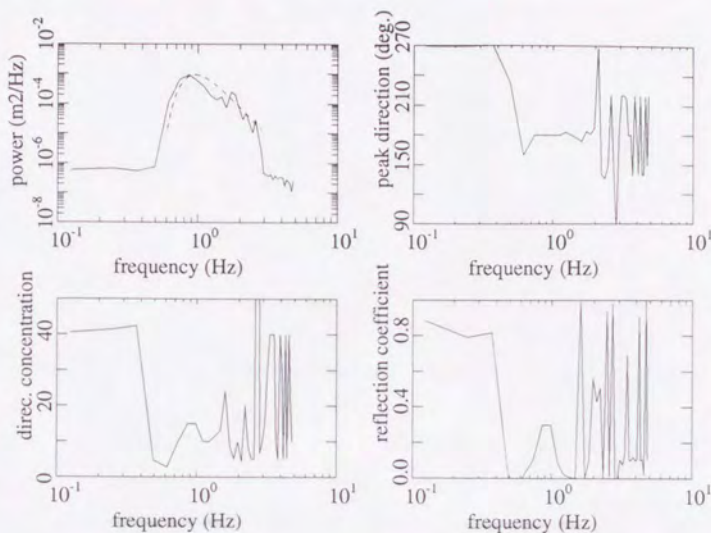


図-C.20: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

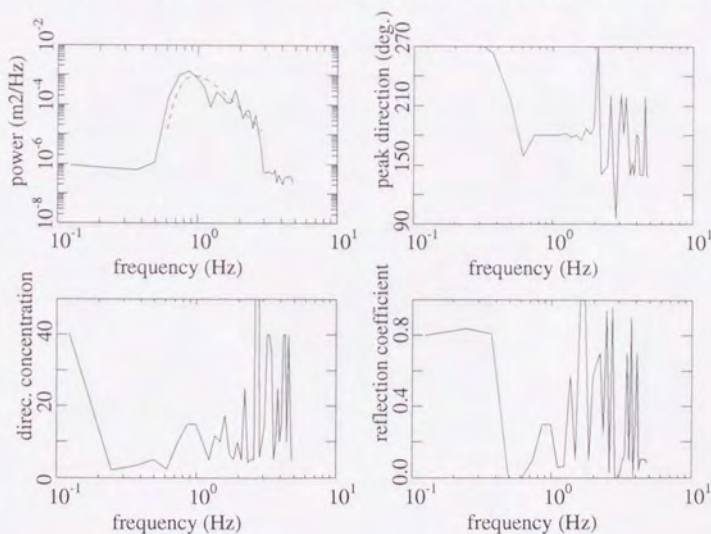
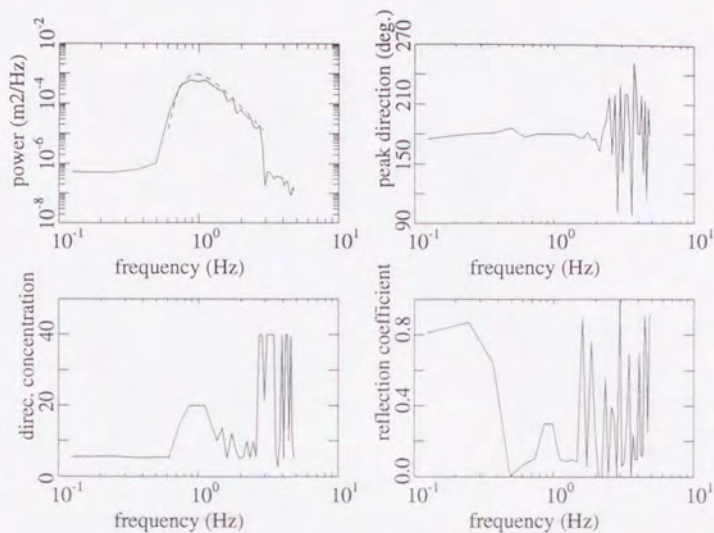
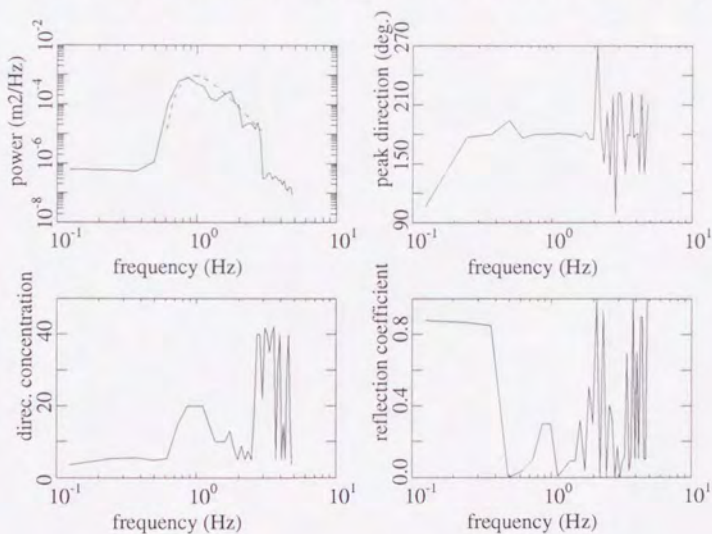
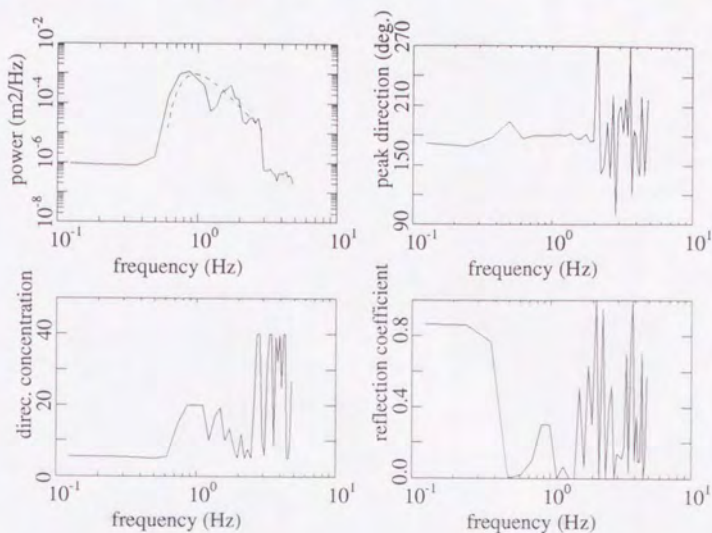
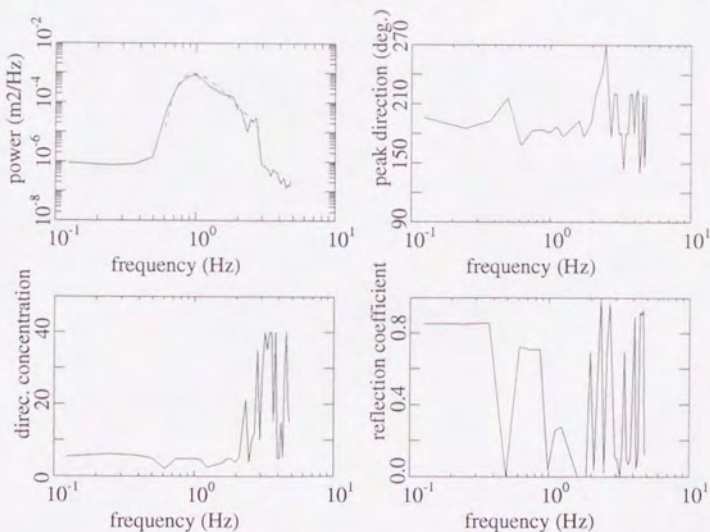
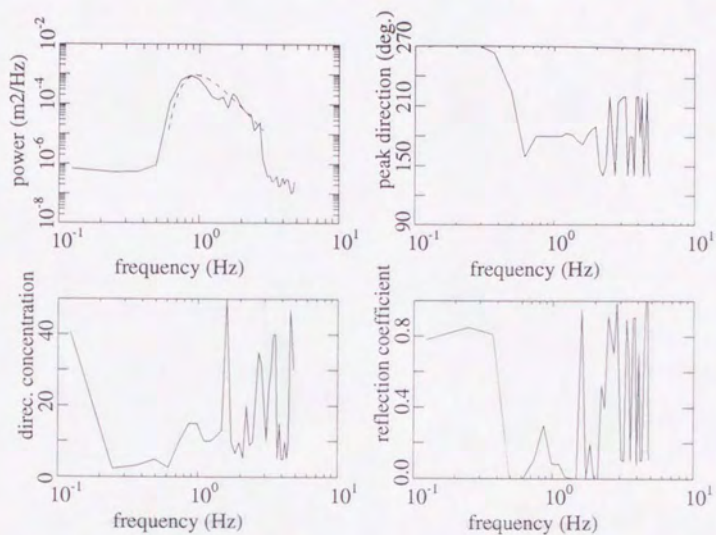


図-C.21: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-G-N)

図-C.22: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-G-N)図-C.23: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

図-C.24: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.9$, 波高計アレイ : A-G-N)図-C.25: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ : A-G-U)

図-C.26: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-U)

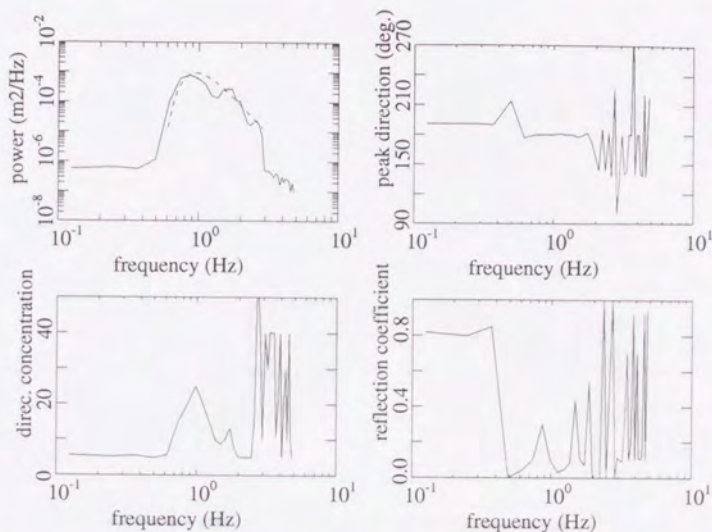


図-C.27: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-U)

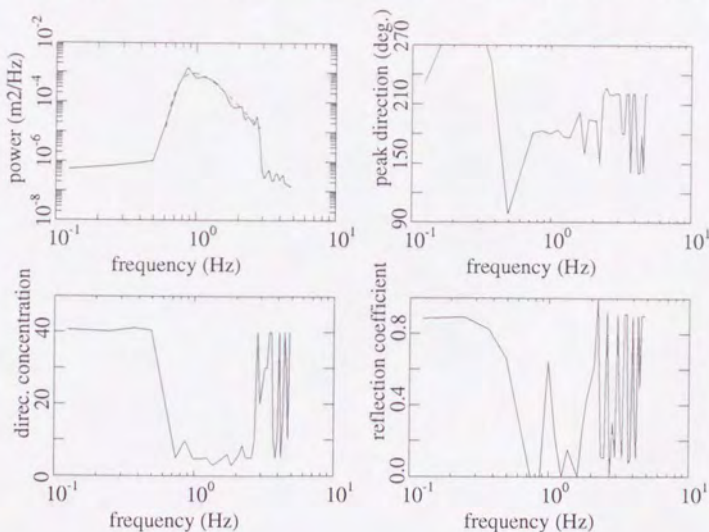
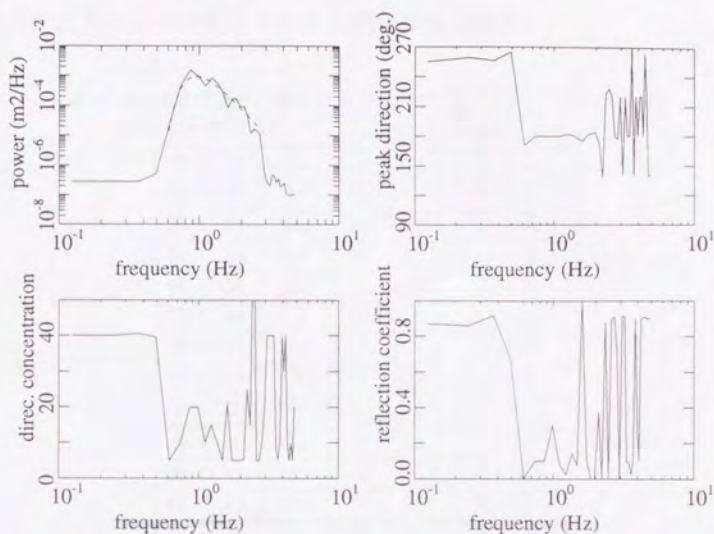
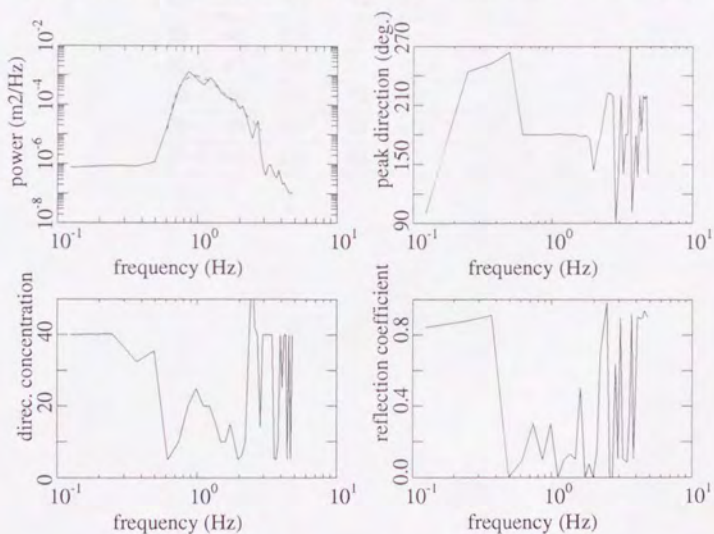


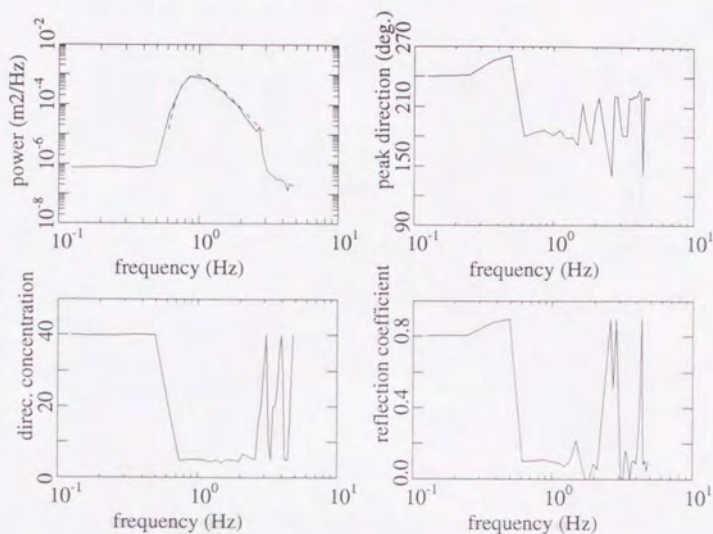
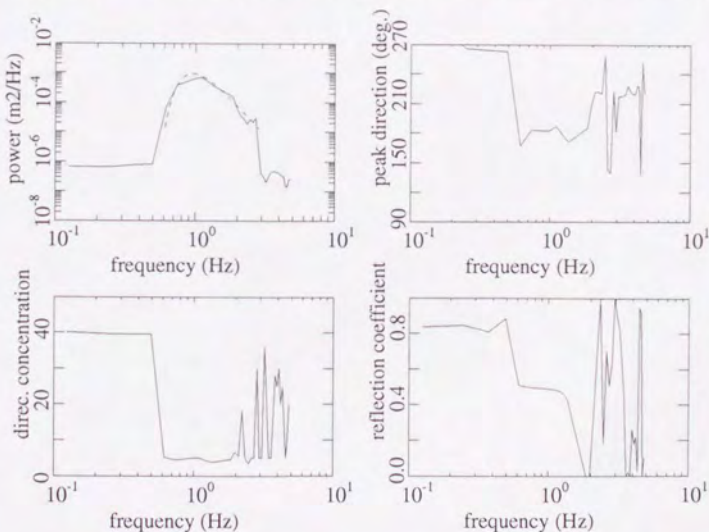
図-C.28: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: C-I-Q)

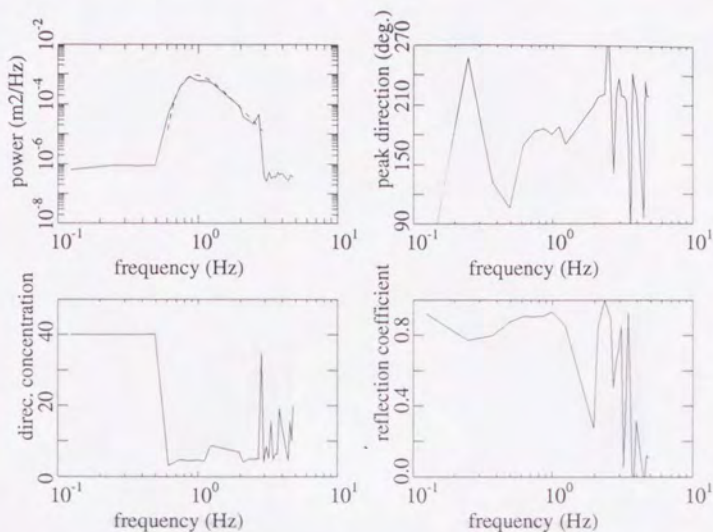
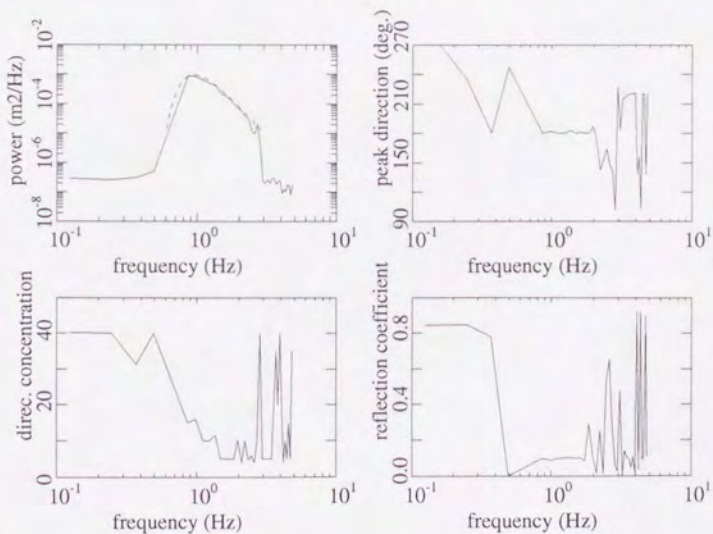
図-C.29: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : C-I-Q)図-C.30: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : C-I-Q)

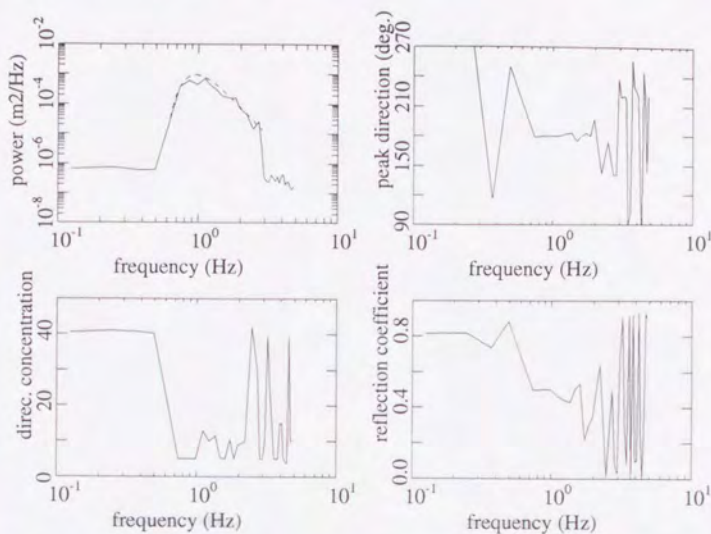
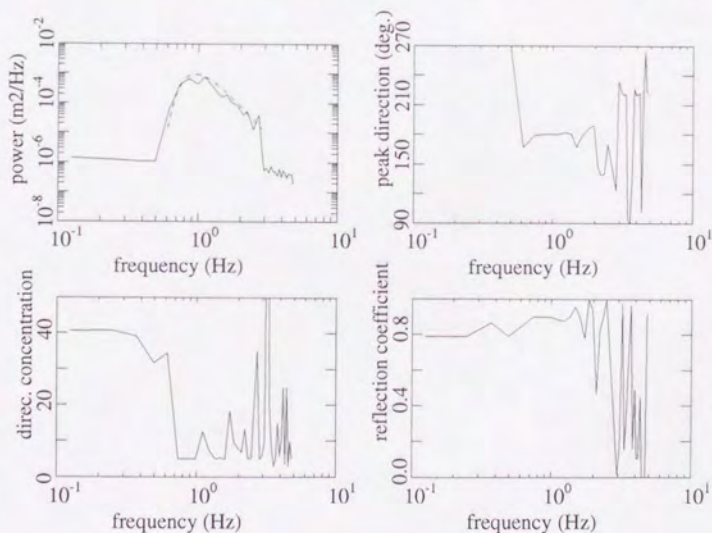
C.1.3 三角形の波高計アレイを用いた推定結果

表-C.3: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=180^\circ$, 三角形アレイ)

図の番号	$\theta_p (^\circ)$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.31	180	10	0.1	G-A-B
図-C.32	180	10	0.5	G-A-B
図-C.33	180	10	0.9	G-A-B
図-C.34	180	40	0.1	G-A-B
図-C.35	180	40	0.5	G-A-B
図-C.36	180	40	0.9	G-A-B
図-C.37	180	75	0.1	G-A-B
図-C.38	180	75	0.5	G-A-B
図-C.39	180	75	0.9	G-A-B
図-C.40	180	10	0.5	G-A-C
図-C.41	180	40	0.5	G-A-C
図-C.42	180	75	0.5	G-A-C
図-C.43	180	40	0.1	N-A-B
図-C.44	180	40	0.5	N-A-B
図-C.45	180	40	0.9	N-A-B
図-C.46	180	10	0.5	I-C-D
図-C.47	180	40	0.5	I-C-D
図-C.48	180	75	0.5	I-C-D
図-C.49	180	40	0.1	I-C-D
図-C.50	180	40	0.9	I-C-D

図-C.31: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.1$, 波高計アレイ: G-A-B)図-C.32: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-B)

図-C.33: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.9$, 波高計アレイ: G-A-B)図-C.34: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: G-A-B)

図-C.35: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : G-A-B)図-C.36: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ : G-A-B)

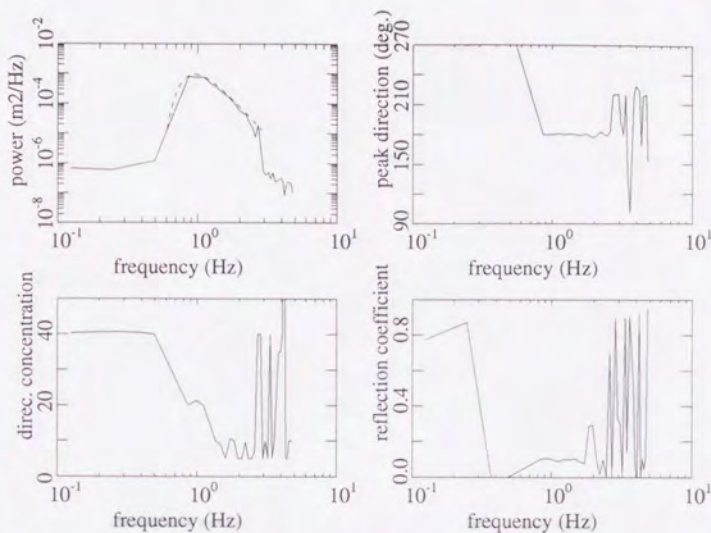


図-C.37: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.1$, 波高計アレイ: G-A-B)

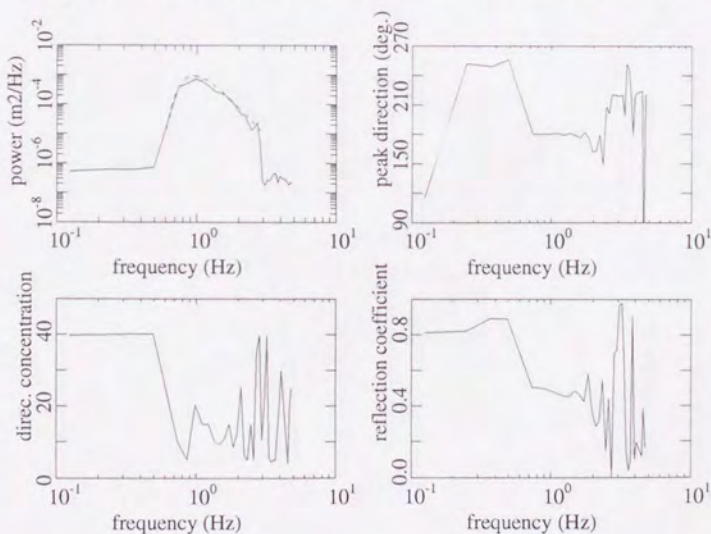
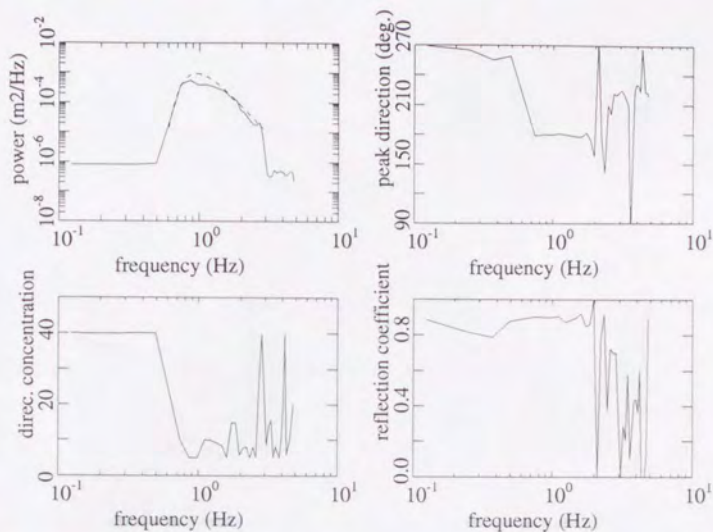
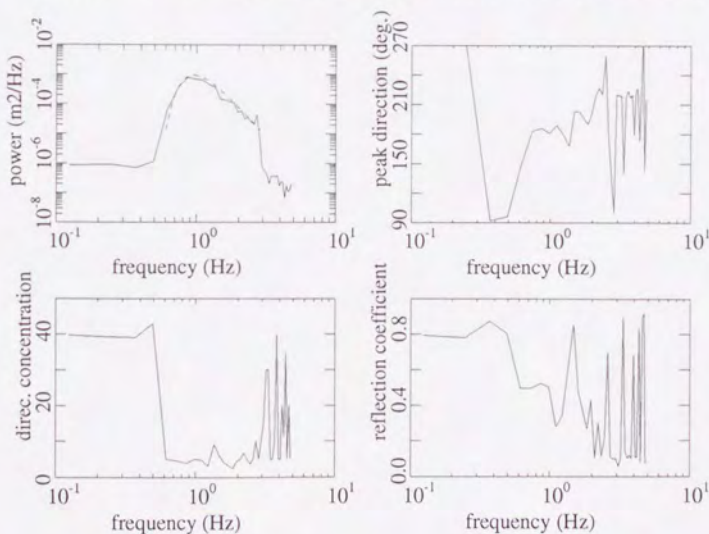
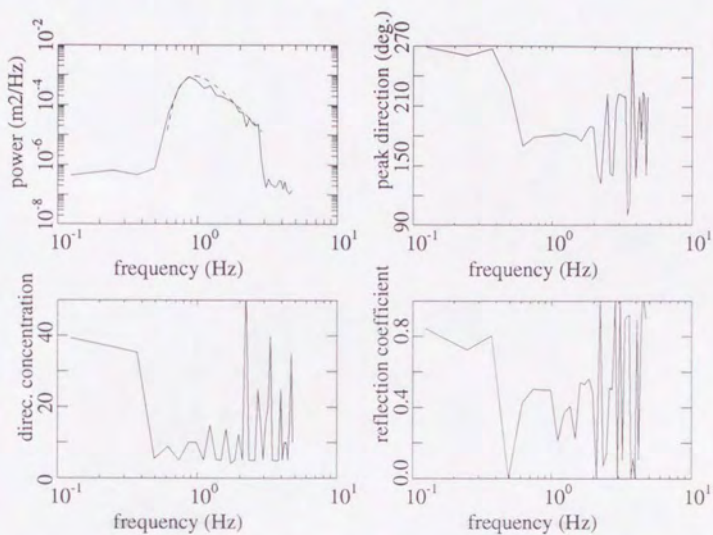


図-C.38: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-B)

図-C.39: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.9$, 波高計アレイ : G-A-B)図-C.40: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ : G-A-C)

図-C.41: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)

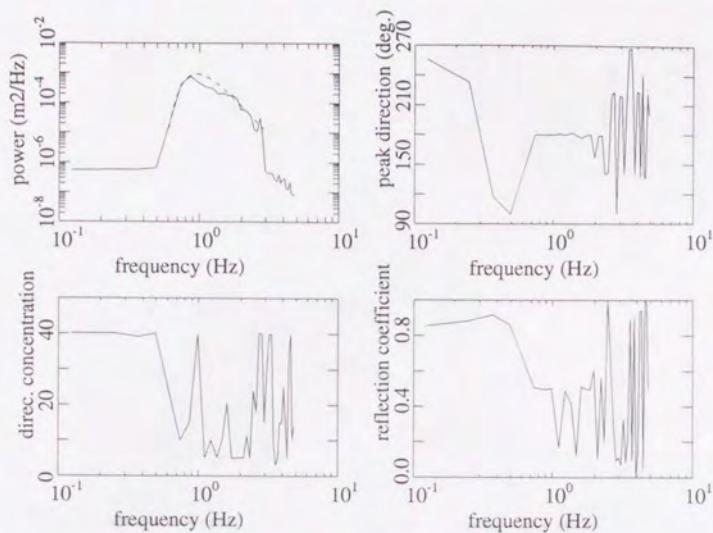


図-C.42: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)

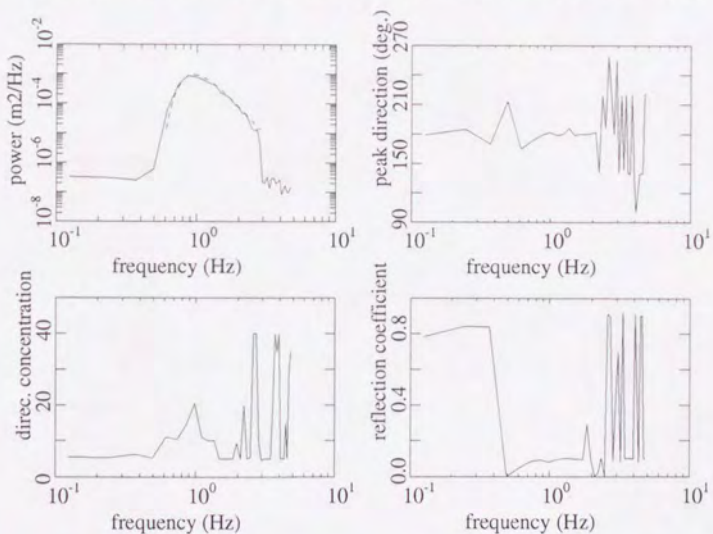
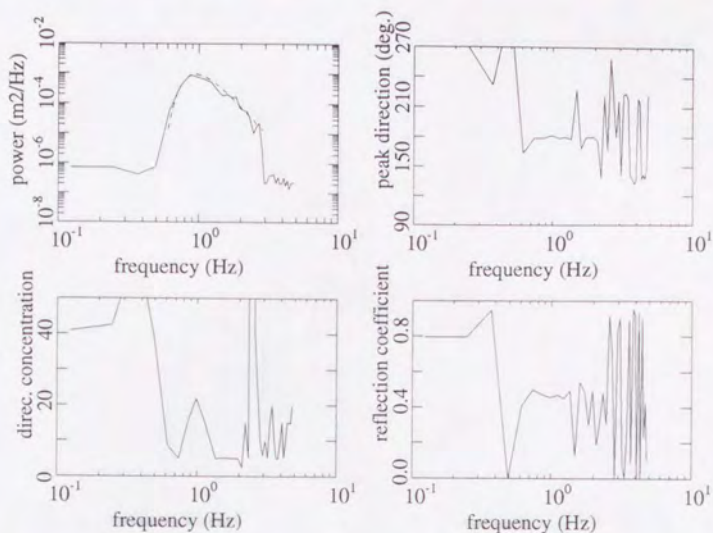
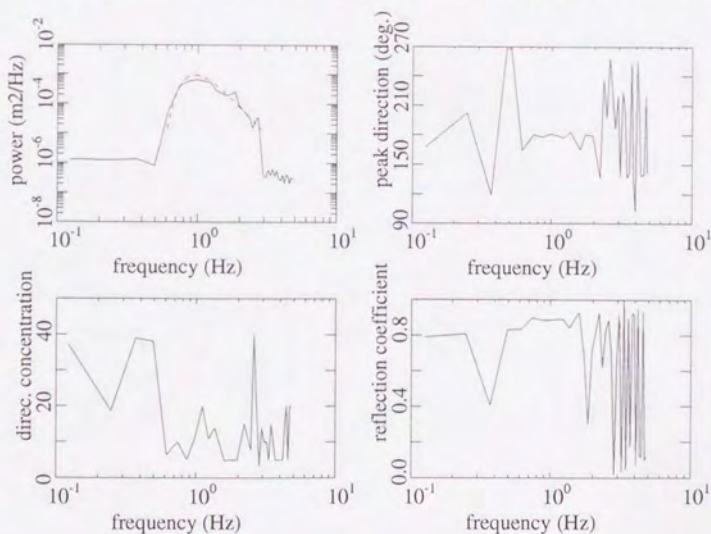
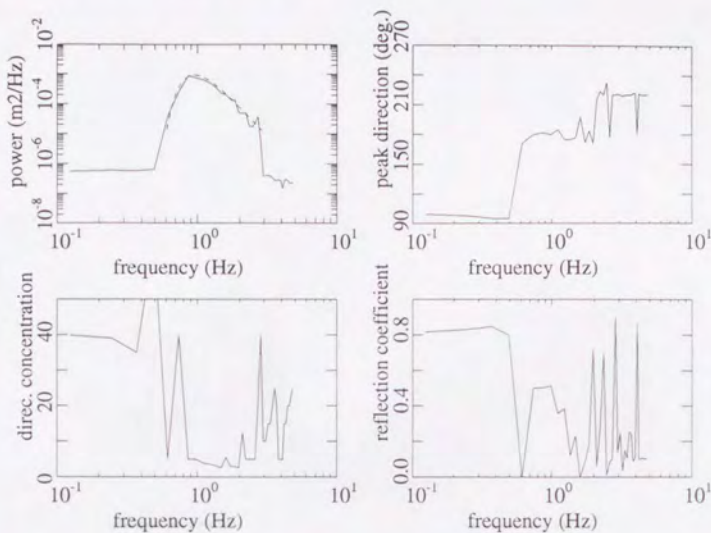
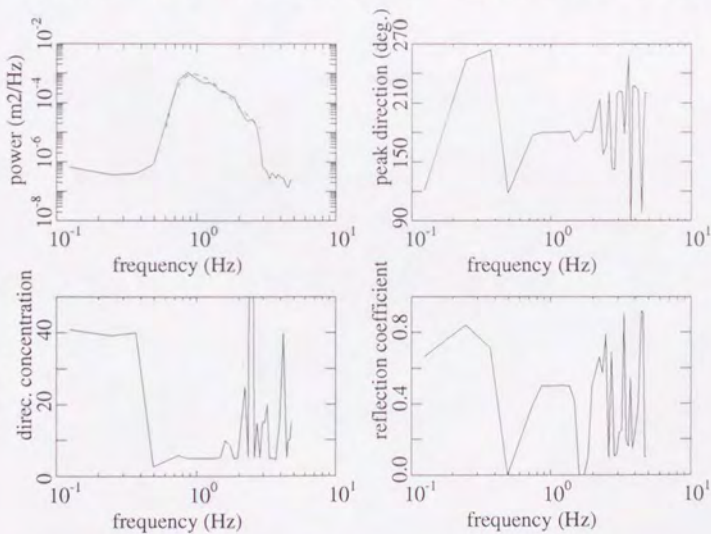
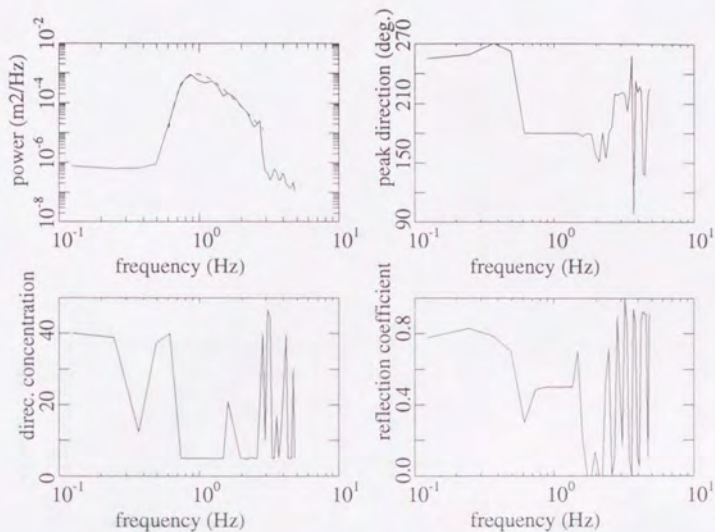
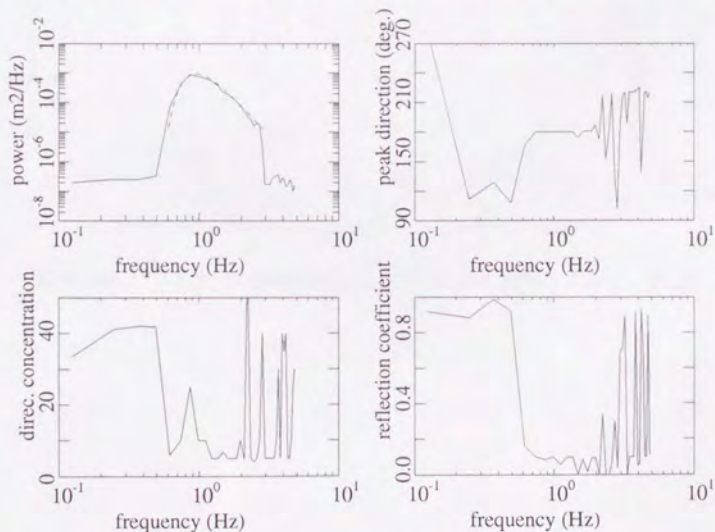
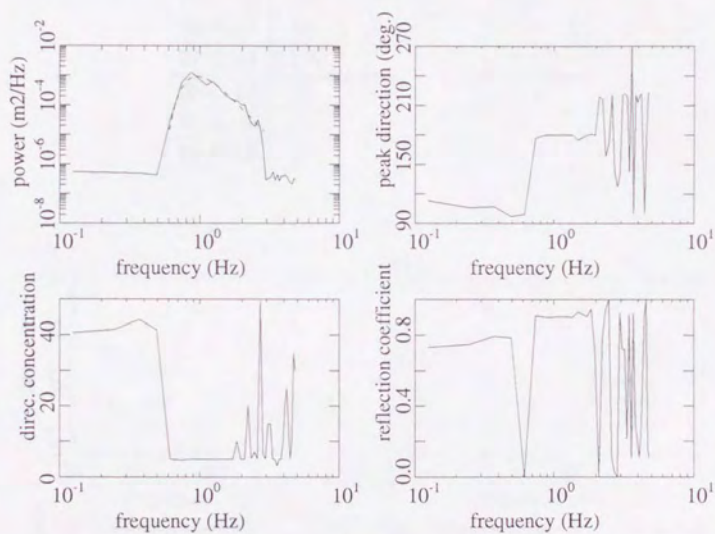


図-C.43: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: N-A-B)

図-C.44: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: N-A-B)図-C.45: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: N-A-B)

図-C.46: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)図-C.47: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)

図-C.48: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)図-C.49: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: I-C-D)

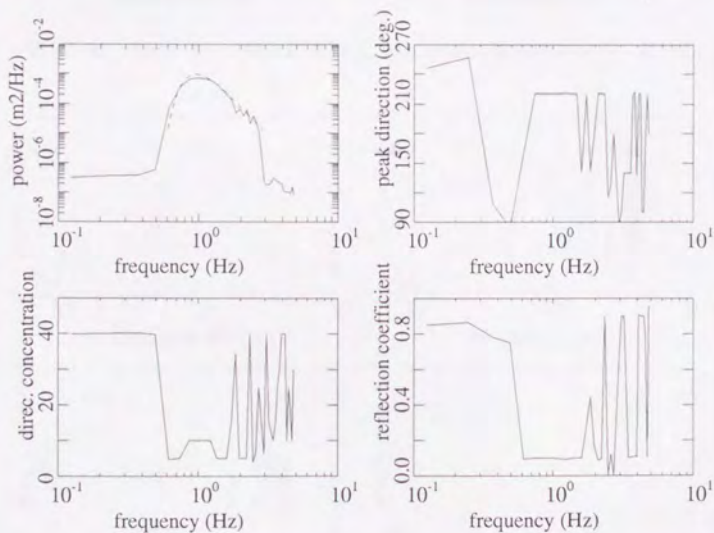
図-C.50: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: I-C-D)

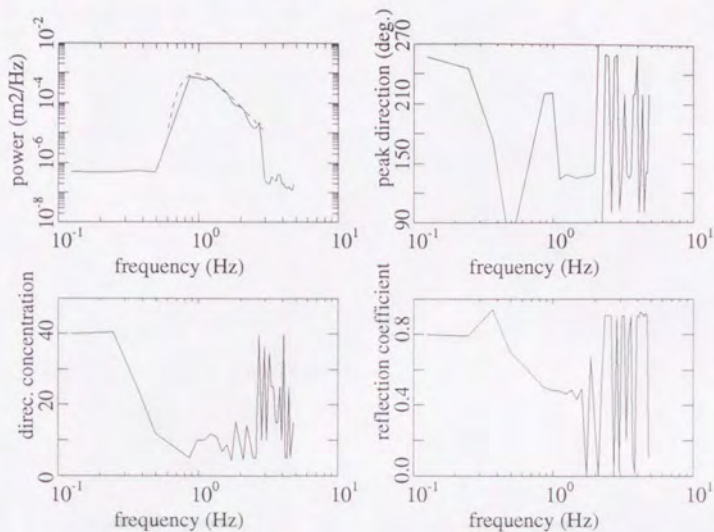
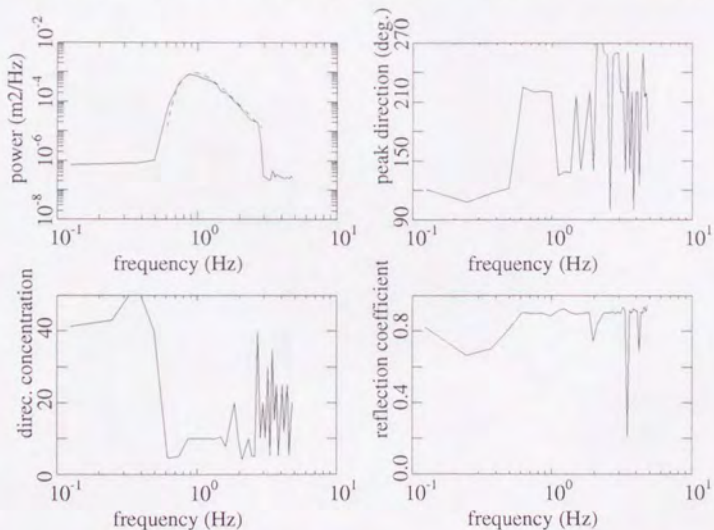
C.2 主波向が 135° の波浪場に対する推定結果

C.2.1 反射面に垂直な波高計アレイを用いた推定結果

表-C.4: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=135^\circ$, 反射面に垂直)

図の番号	$\theta_p (^\circ)$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.51	135	40	0.1	A-B-C
図-C.52	135	40	0.5	A-B-C
図-C.53	135	40	0.9	A-B-C
図-C.54	135	10	0.5	A-B-C
図-C.55	135	75	0.5	A-B-C
図-C.56	135	40	0.1	C-D-E
図-C.57	135	40	0.5	C-D-E
図-C.58	135	40	0.9	C-D-E

図-C.51: パラメータの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-B-C)

図-C.52: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.53: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-B-C)

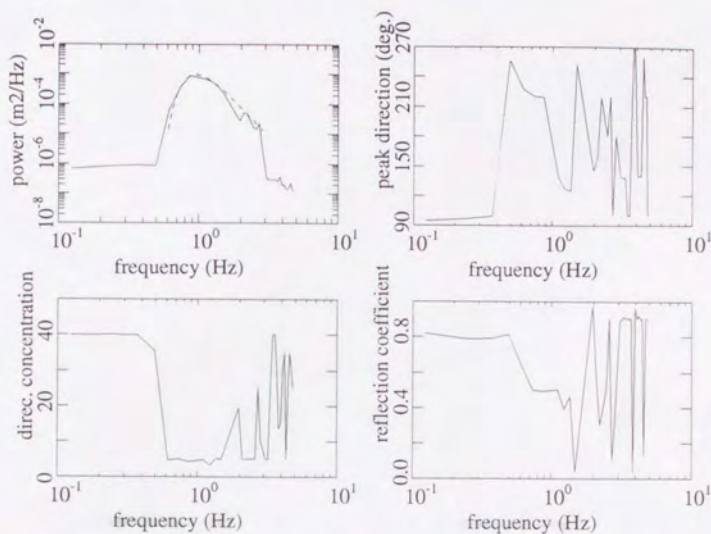


図-C.54: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)

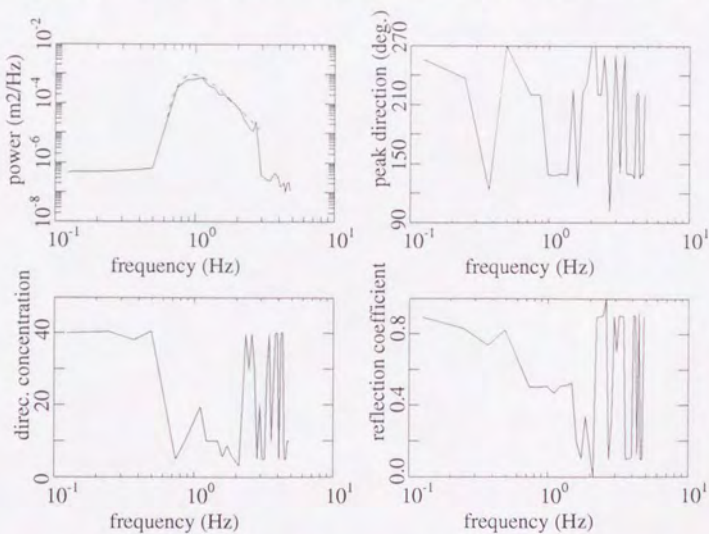
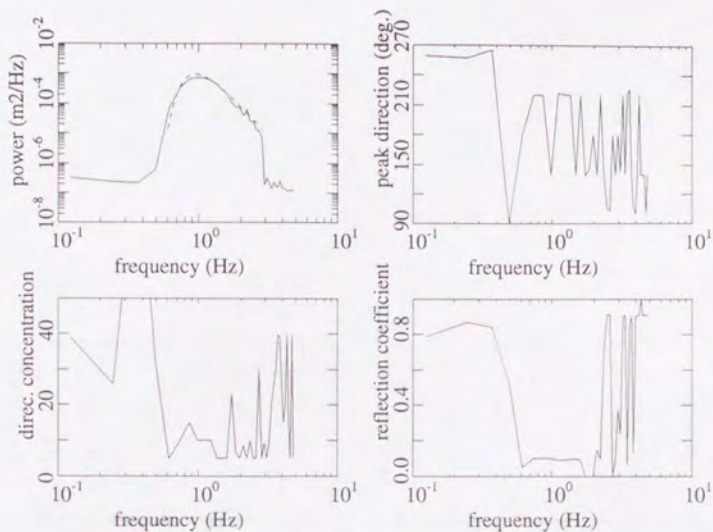
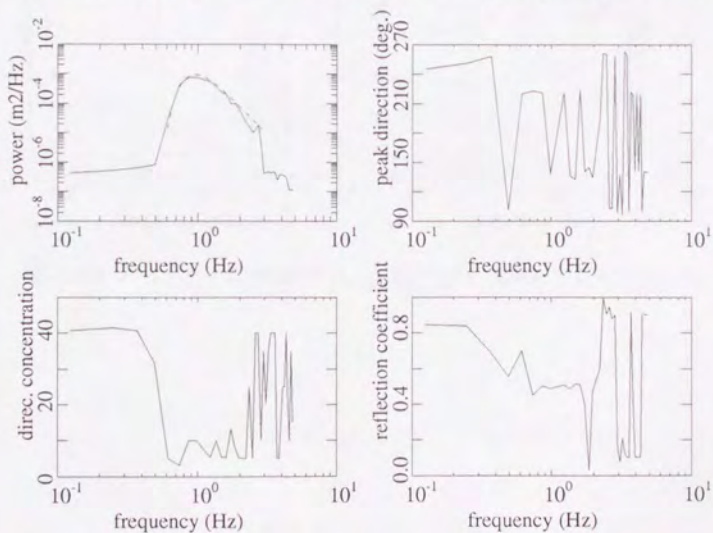


図-C.55: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)

図-C.56: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: C-D-E)図-C.57: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: C-D-E)

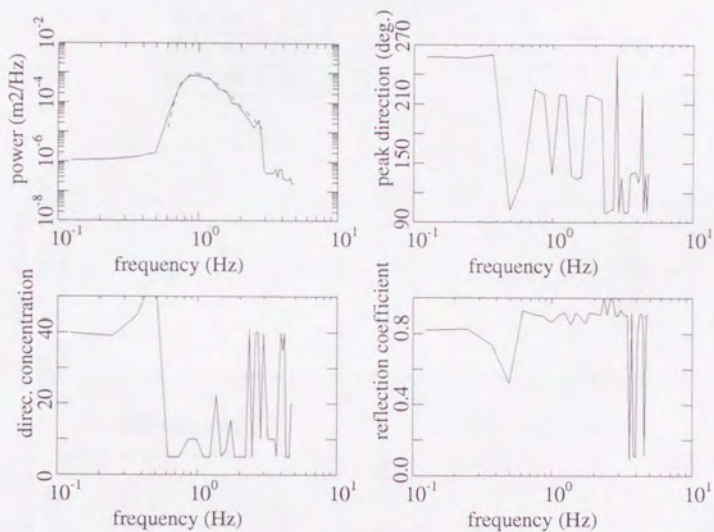
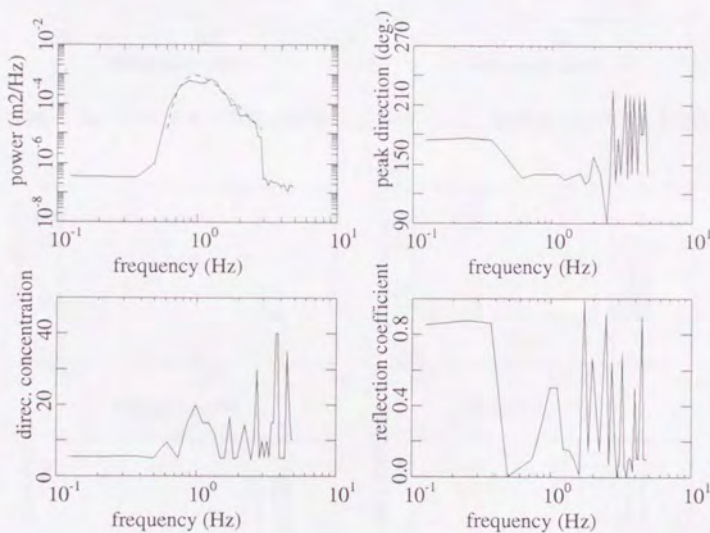


図-C.58: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: C-D-E)

C.2.2 反射面に平行な波高計アレイを用いた推定結果

表-C.5: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=135^\circ$, 反射面に平行)

図の番号	θ_p ($^\circ$)	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.59	135	40	0.1	A-G-N
図-C.60	135	40	0.5	A-G-N
図-C.61	135	40	0.9	A-G-N
図-C.62	135	10	0.5	A-G-N
図-C.63	135	75	0.5	A-G-N
図-C.64	135	10	0.5	C-I-Q
図-C.65	135	40	0.5	C-I-Q
図-C.66	135	75	0.5	C-I-Q

図-C.59: パラメータの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-G-N)

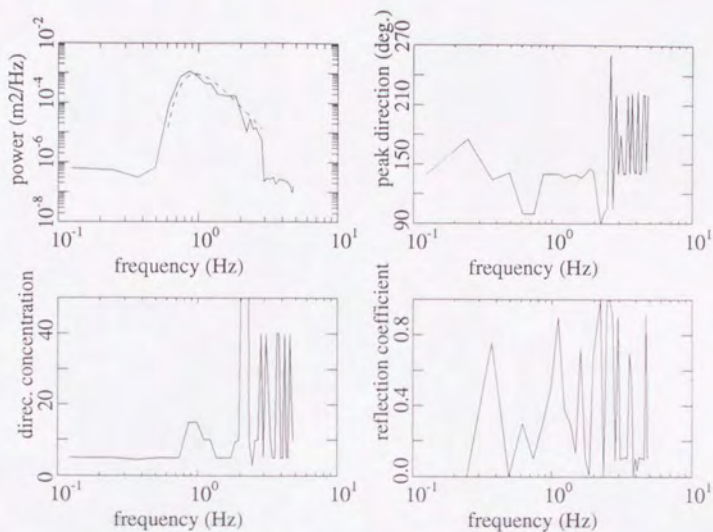


図-C.60: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

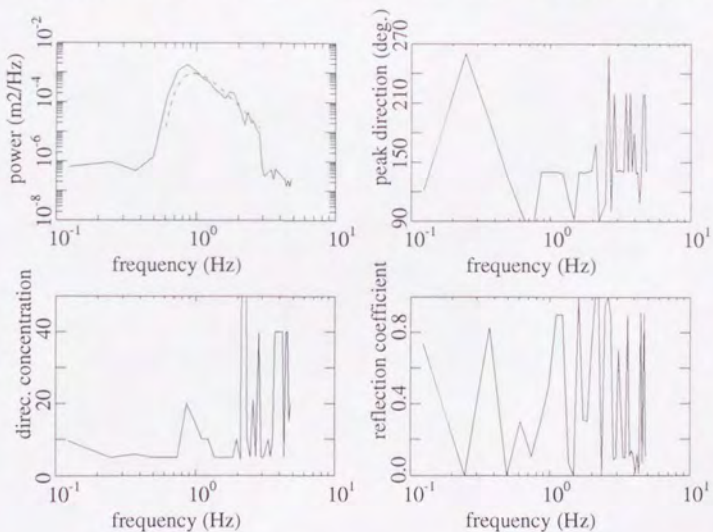


図-C.61: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-G-N)

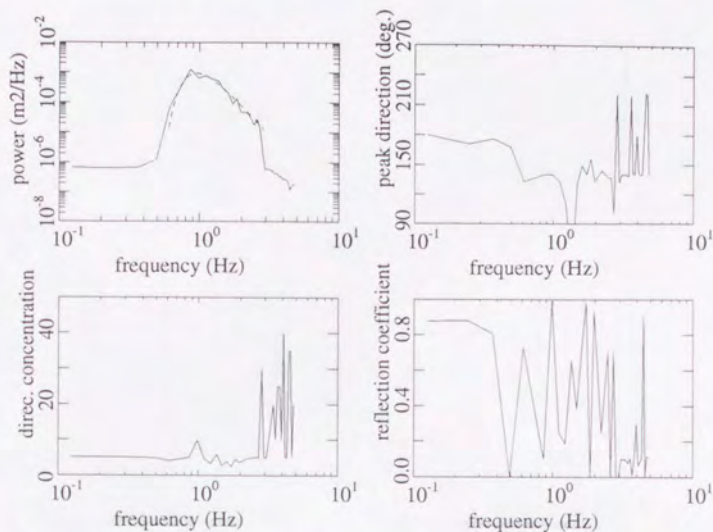


図-C.62: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

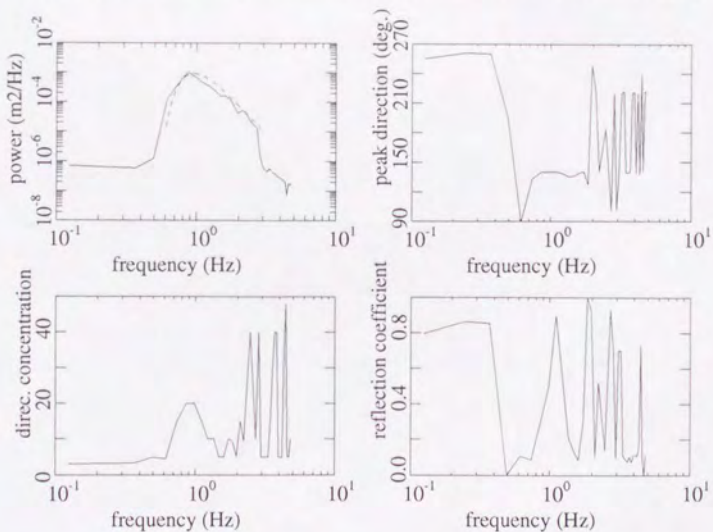
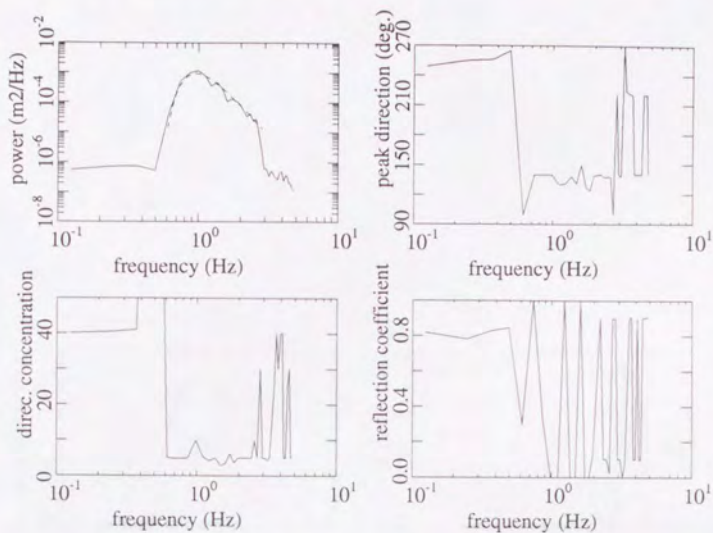
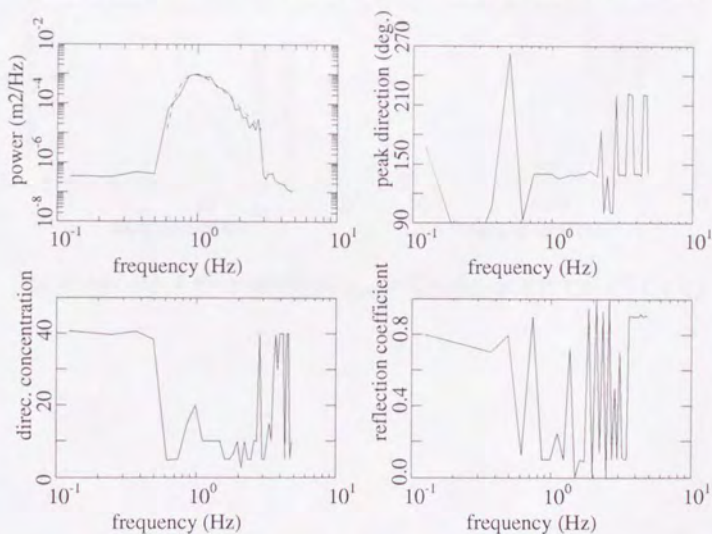
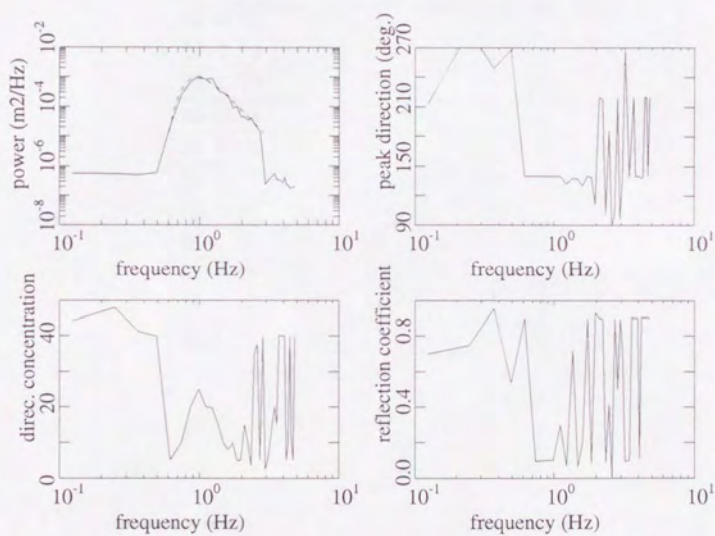


図-C.63: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

図-C.64: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: C-I-Q)図-C.65: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: C-I-Q)


図-C.66: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ : C-I-Q)

C.2.3 三角形の波高計アレイを用いた推定結果

表-C.6: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=135^\circ$, 三角形アレイ)

図の番号	θ_p ($^\circ$)	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.67	135	40	0.1	G-A-B
図-C.68	135	40	0.5	G-A-B
図-C.69	135	40	0.9	G-A-B
図-C.70	135	10	0.5	G-A-B
図-C.71	135	75	0.5	G-A-B
図-C.72	135	10	0.5	G-A-C
図-C.73	135	40	0.5	G-A-C
図-C.74	135	75	0.5	G-A-C
図-C.75	135	40	0.1	N-A-B
図-C.76	135	40	0.5	N-A-B
図-C.77	135	40	0.9	N-A-B
図-C.78	135	40	0.1	I-C-D
図-C.79	135	40	0.5	I-C-D
図-C.80	135	40	0.9	I-C-D
図-C.81	135	10	0.5	I-C-D
図-C.82	135	75	0.5	I-C-D

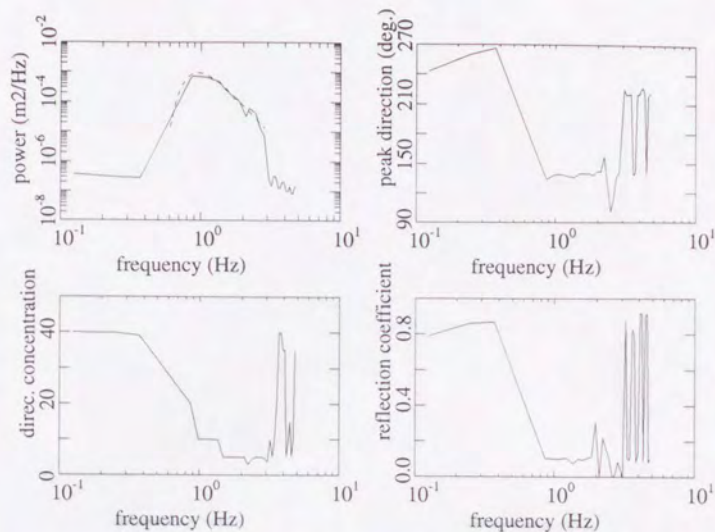


図-C.67: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ : G-A-B)

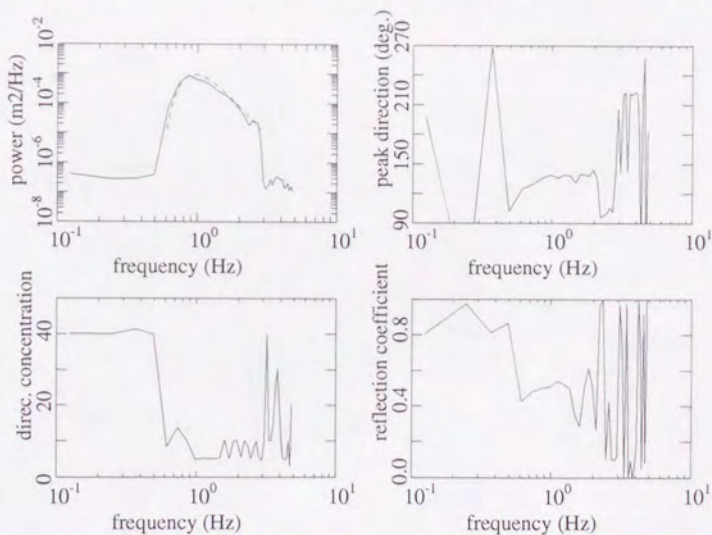
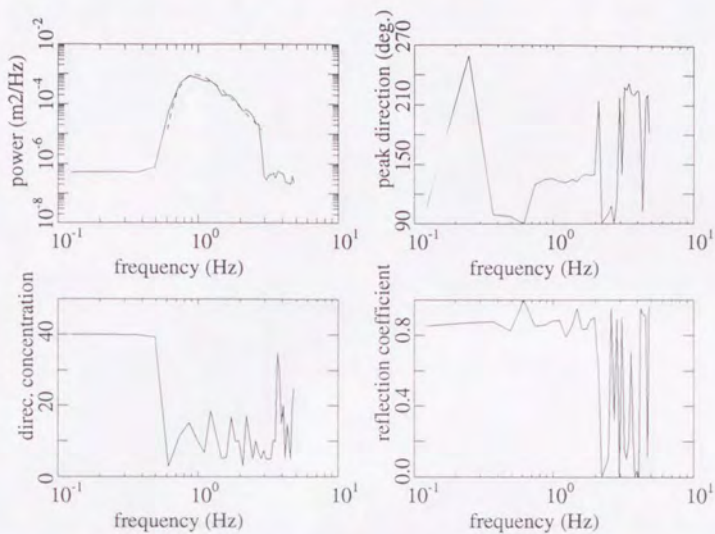
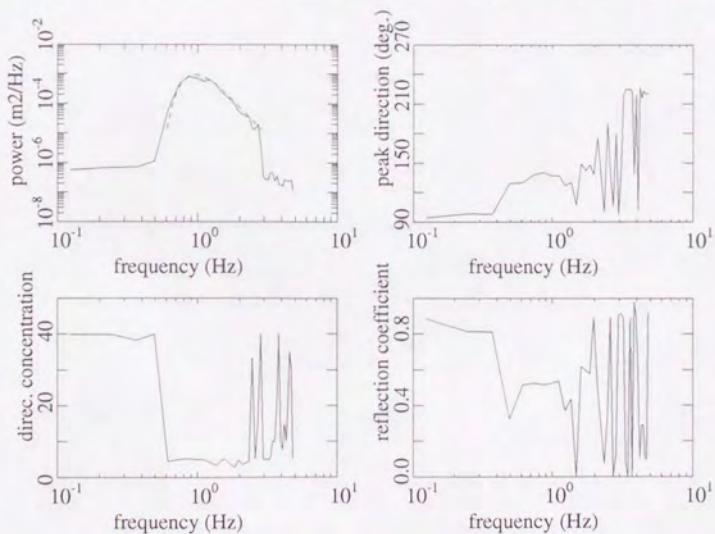
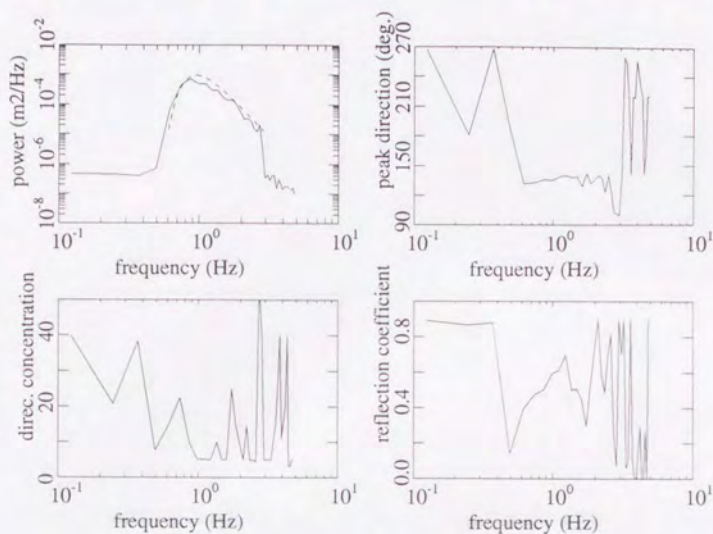
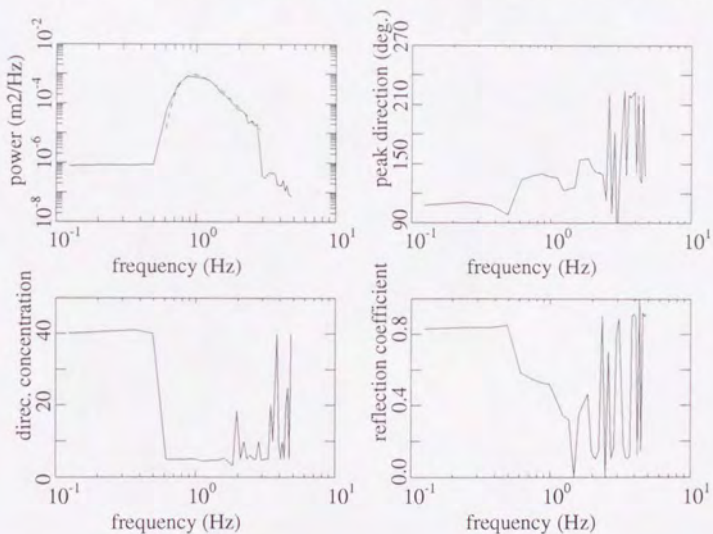


図-C.68: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : G-A-B)

図-C.69: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: G-A-B)図-C.70: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-B)

図-C.71: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-B)図-C.72: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)

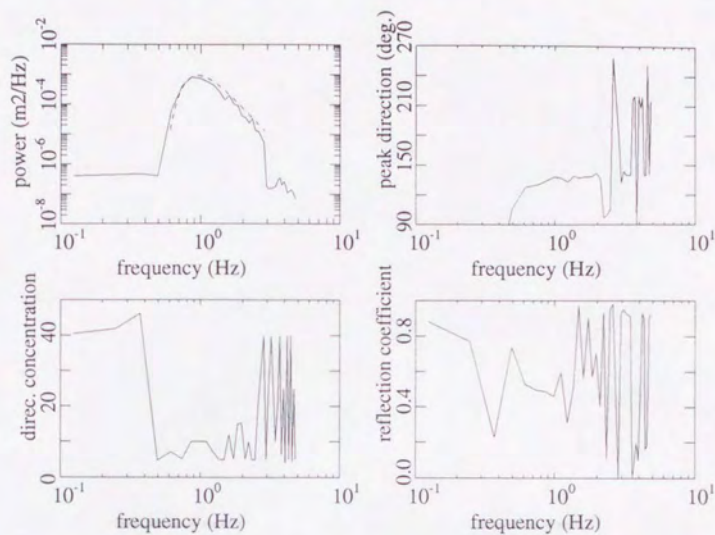
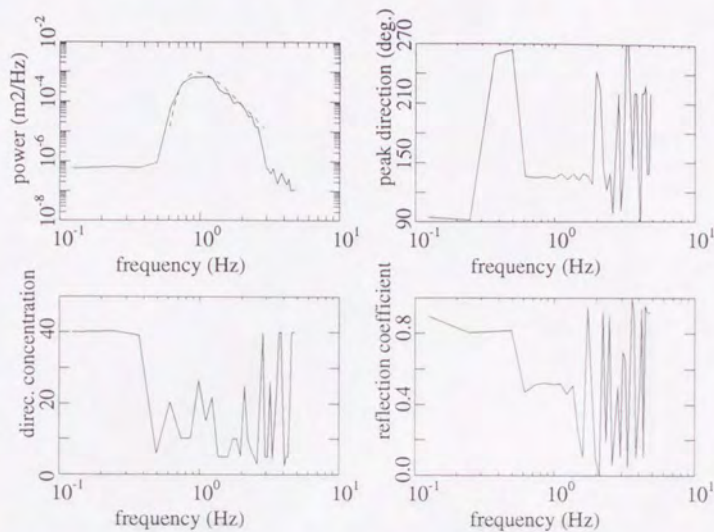
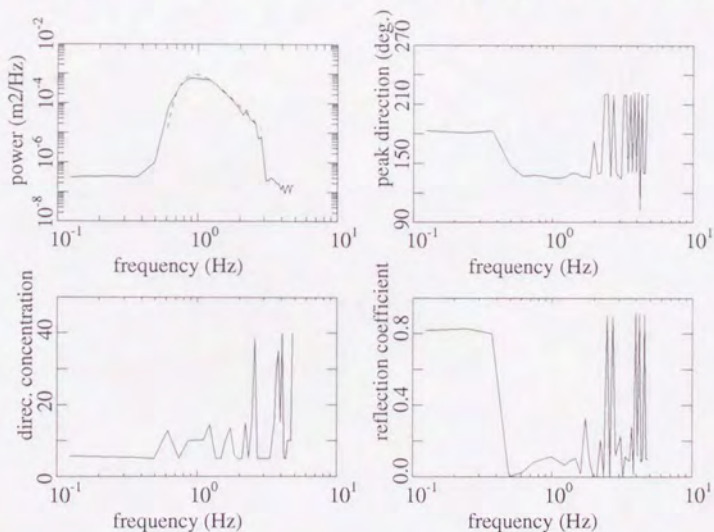


図-C.73: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)

図-C.74: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)図-C.75: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: N-A-B)

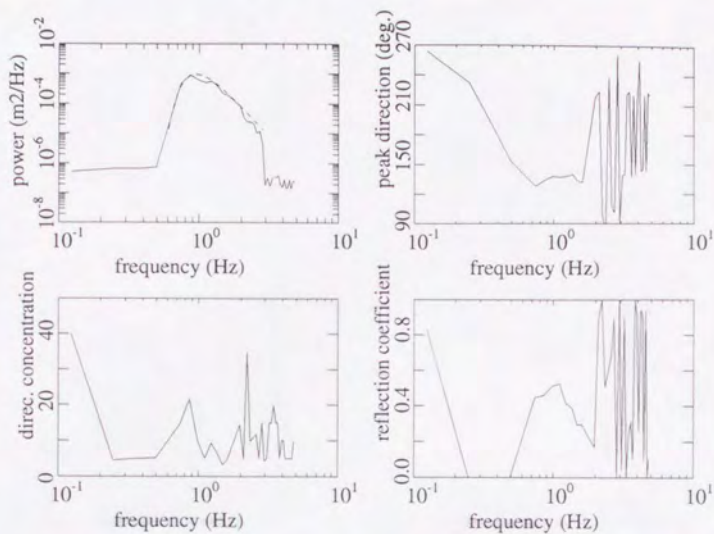


図-C.76: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : N-A-B)

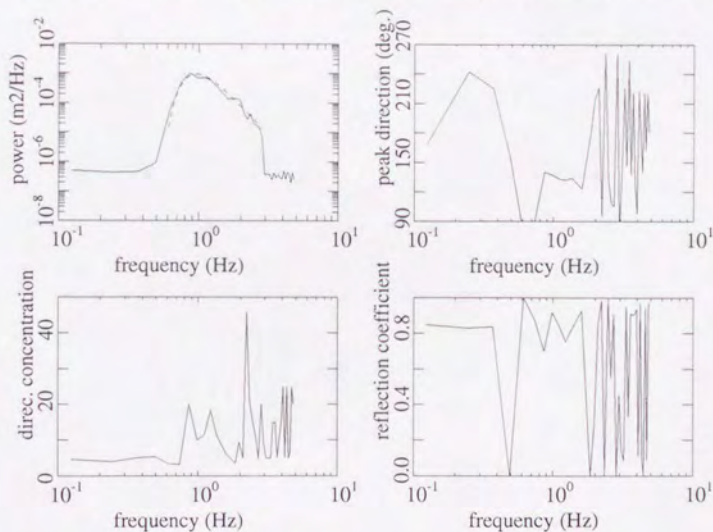


図-C.77: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ : N-A-B)

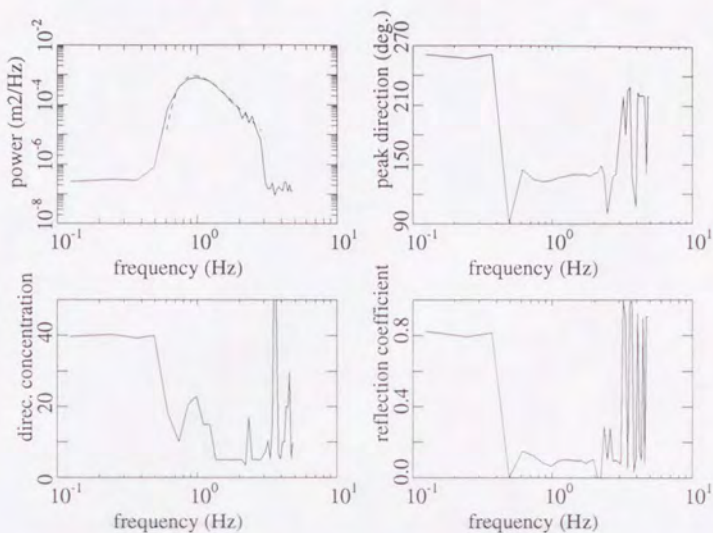


図-C.78: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: I-C-D)

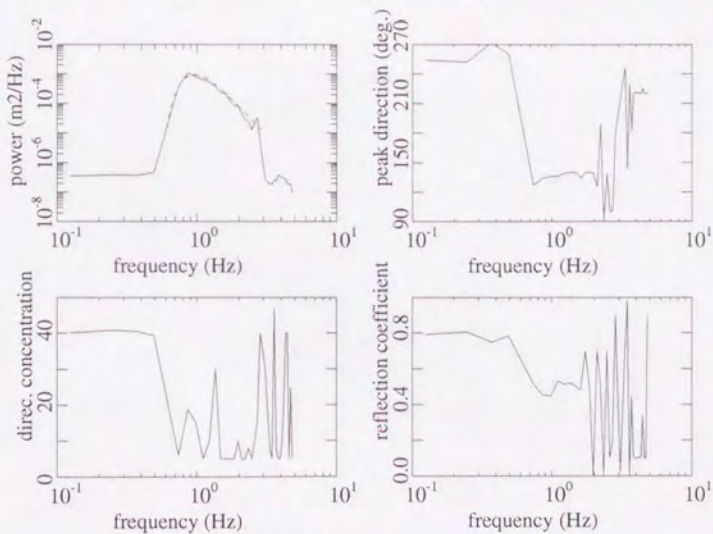


図-C.79: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)

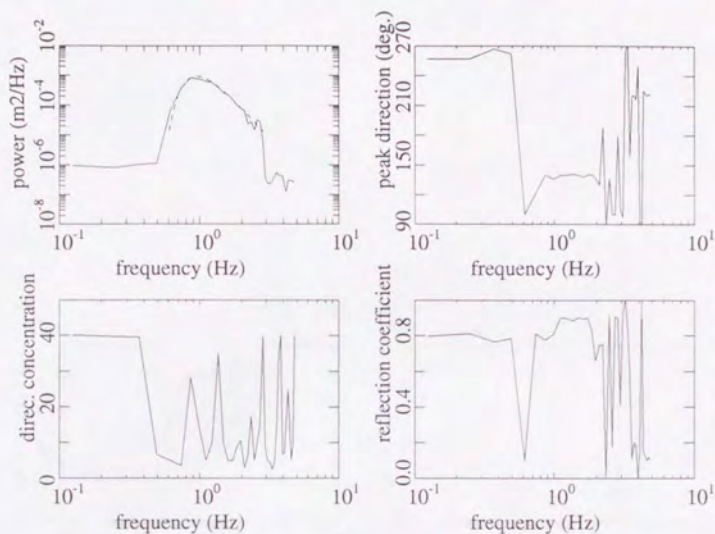


図-C.80: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: I-C-D)

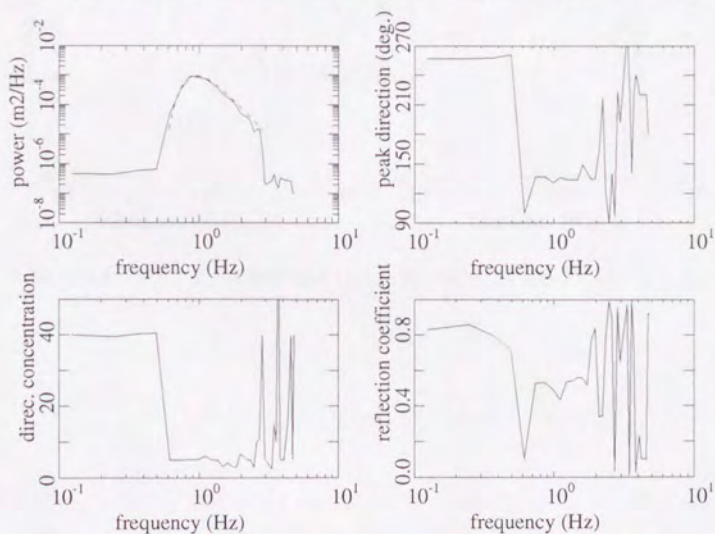
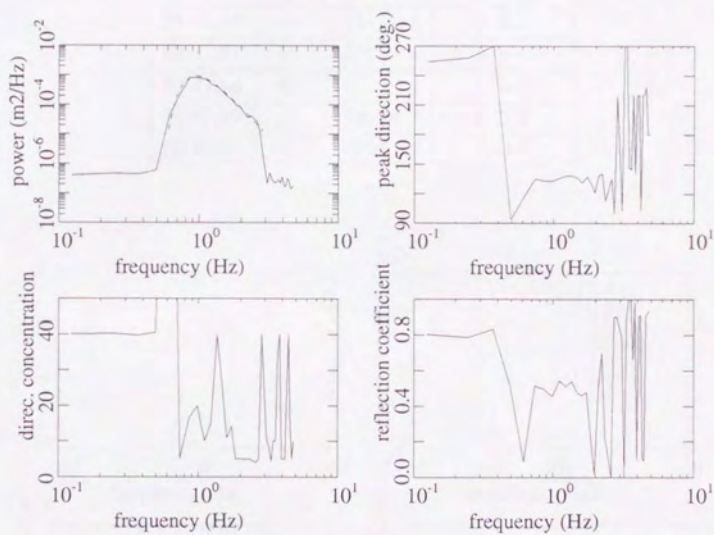


図-C.81: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)

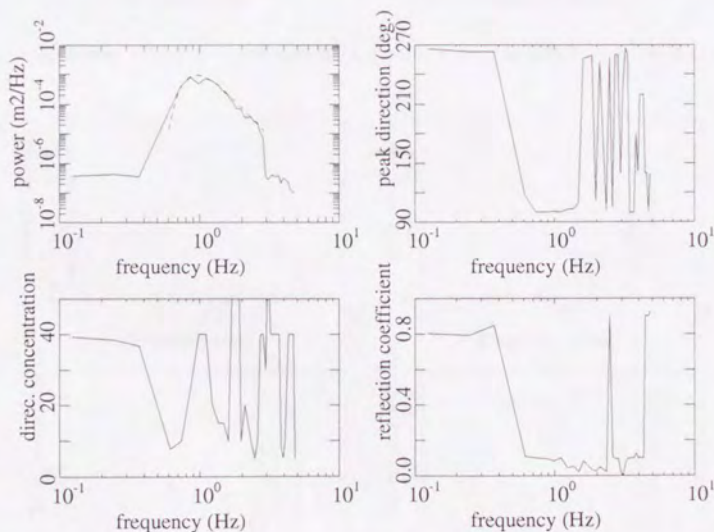
図-C.82: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)

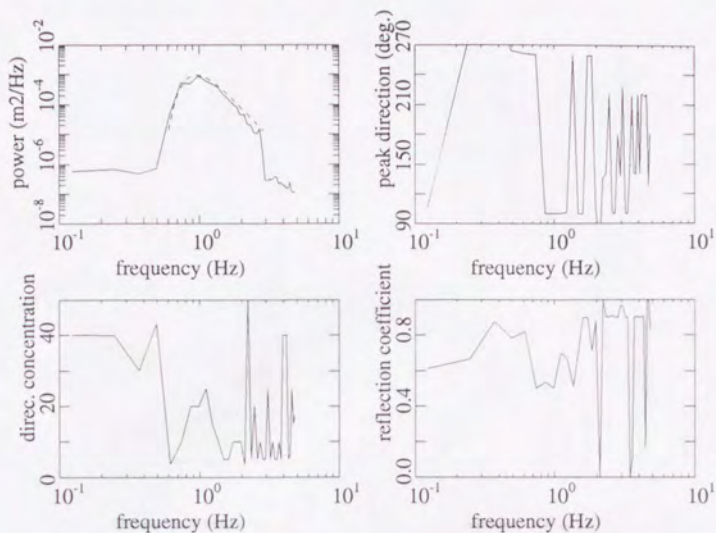
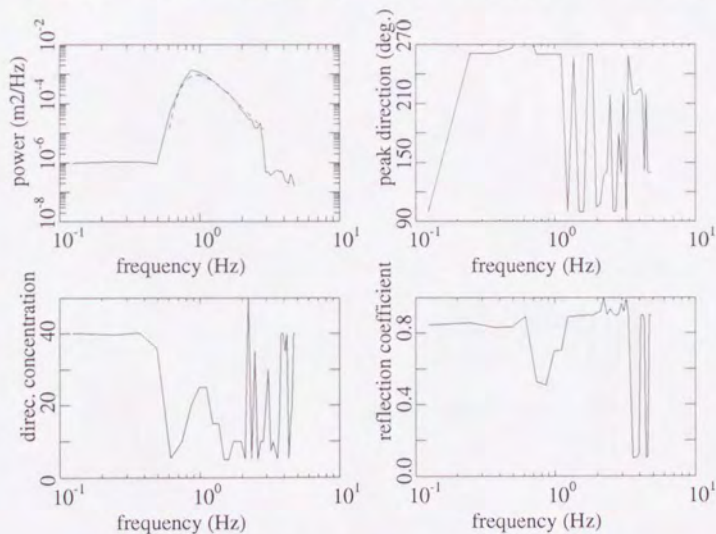
C.3 主波向が 95° の波浪場に対する推定結果

C.3.1 反射面に垂直な波高計アレイを用いた推定結果

表-C.7: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=95^\circ$, 反射面に垂直)

図の番号	$\theta_p (^\circ)$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.83	95	40	0.1	A-B-C
図-C.84	95	40	0.5	A-B-C
図-C.85	95	40	0.9	A-B-C
図-C.86	95	10	0.5	A-B-C
図-C.87	95	75	0.5	A-B-C
図-C.88	95	40	0.1	C-D-E
図-C.89	95	40	0.5	C-D-E
図-C.90	95	40	0.9	C-D-E

図-C.83: パラメータの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-B-C)

図-C.84: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)図-C.85: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-B-C)

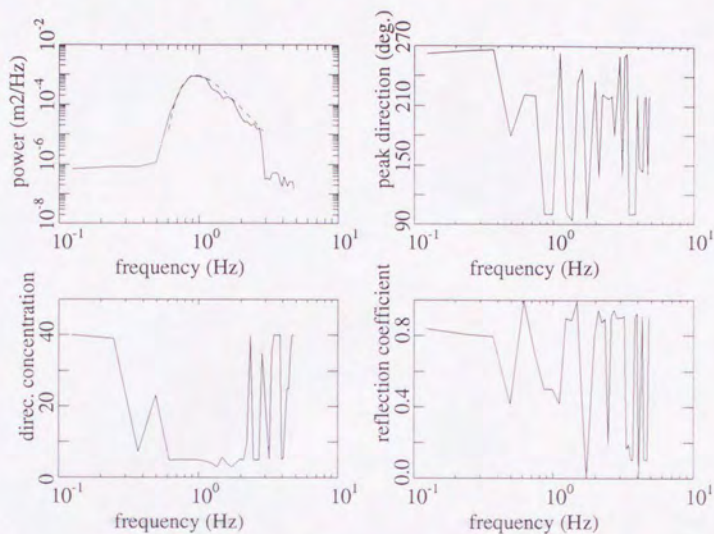


図-C.86: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)

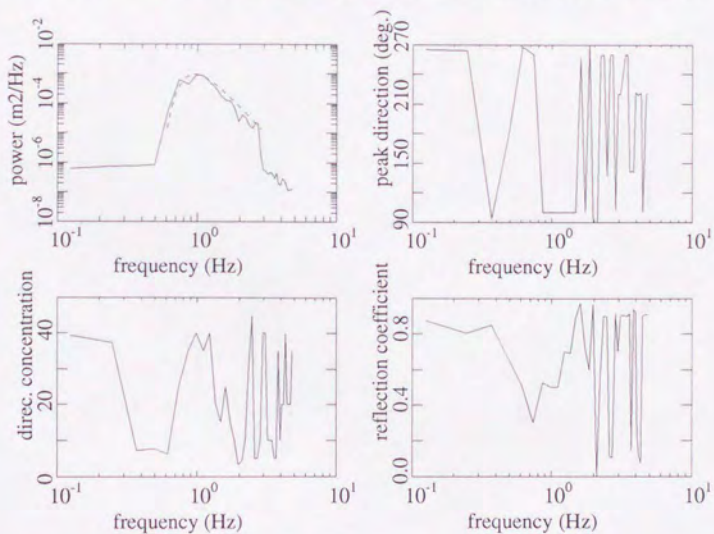
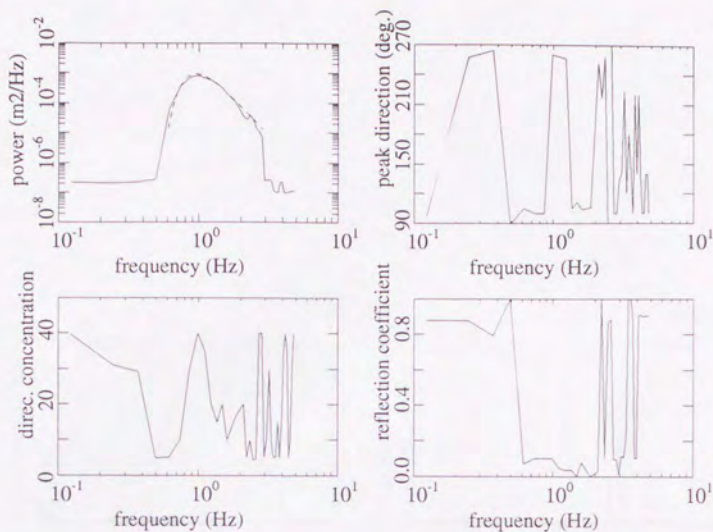
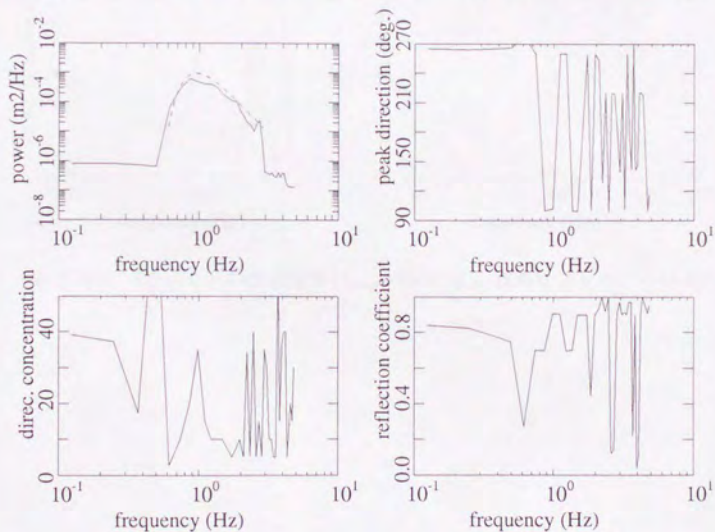
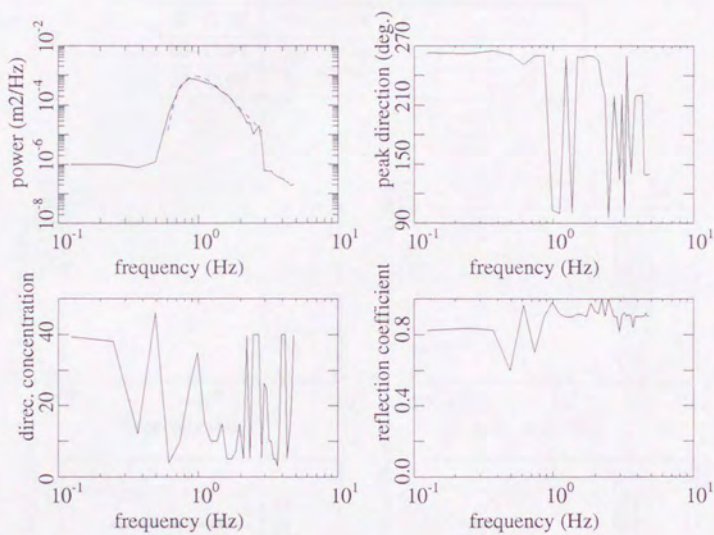


図-C.87: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-B-C)

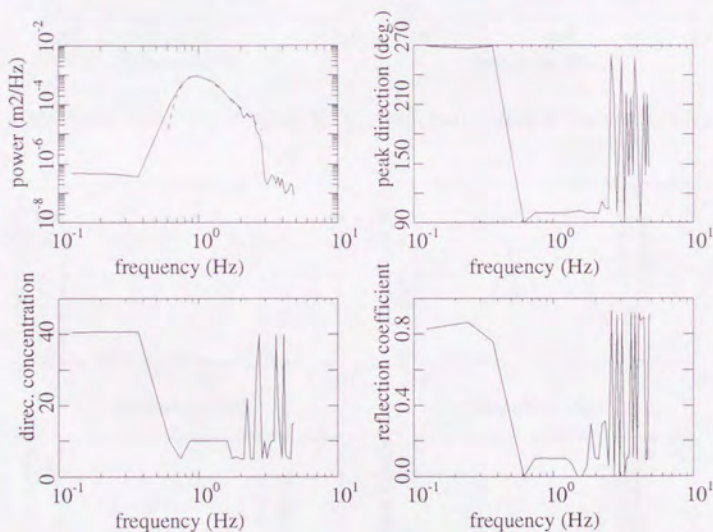
図-C.88: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: C-D-E)図-C.89: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: C-D-E)

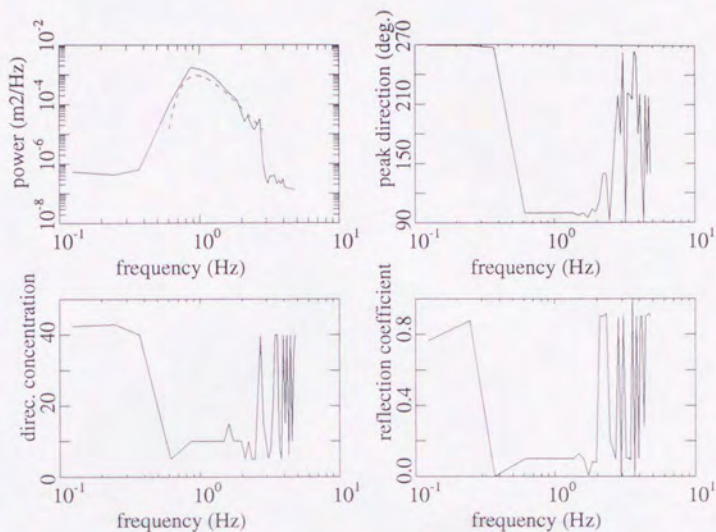
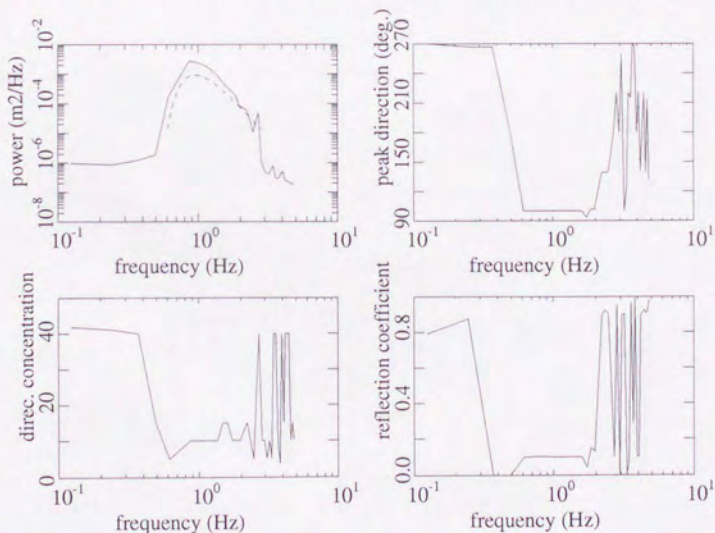
図-C.90: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: C-D-E)

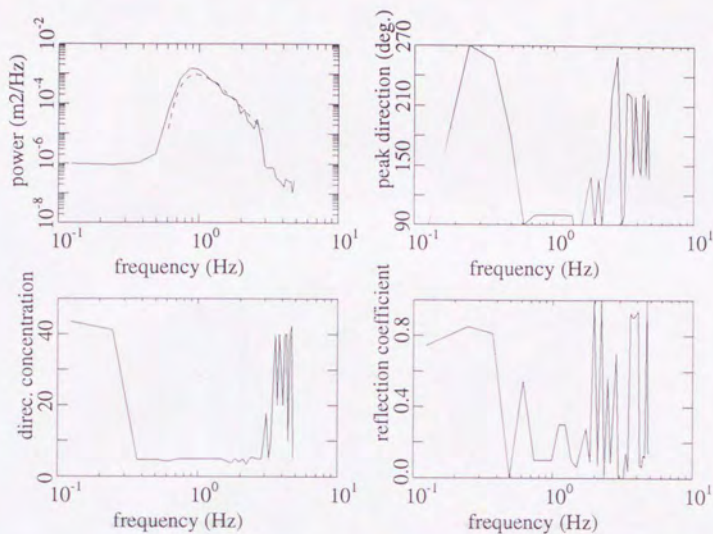
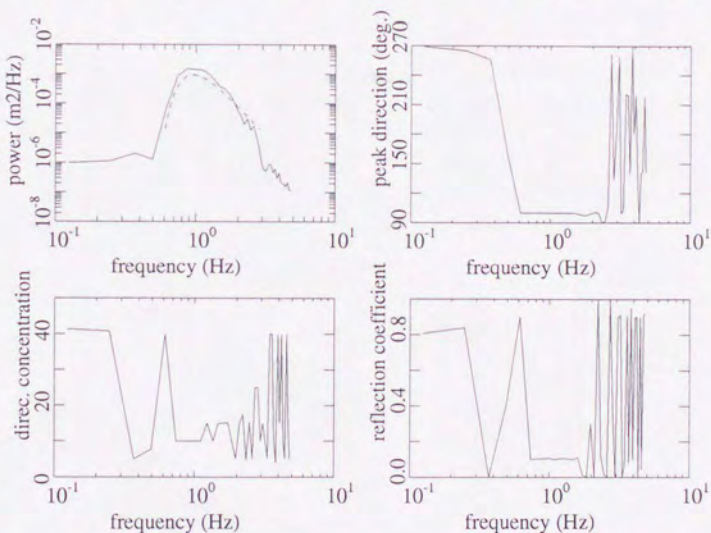
C.3.2 反射面に平行な波高計アレイを用いた推定結果

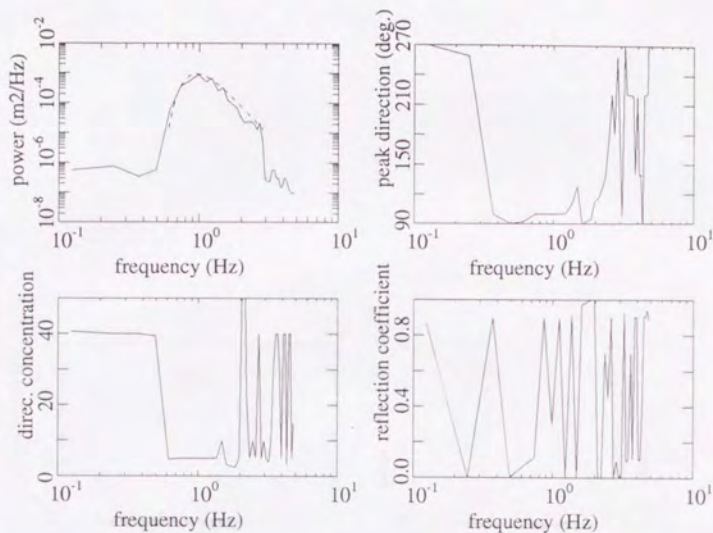
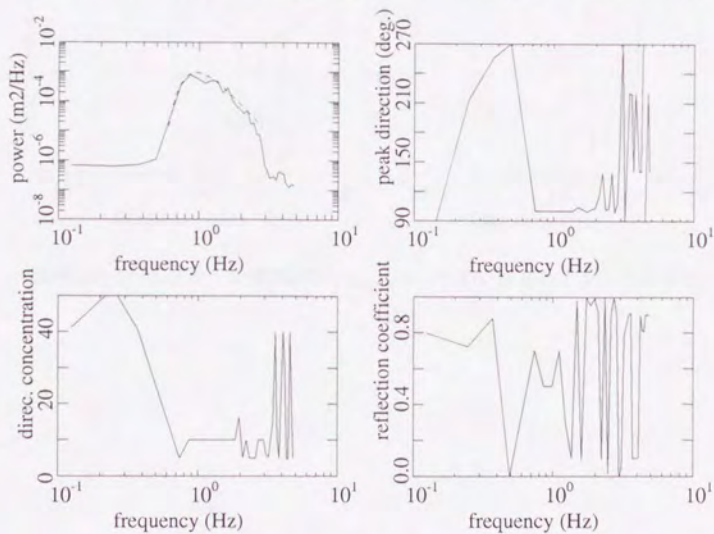
表-C.8: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=95^\circ$, 反射面に平行)

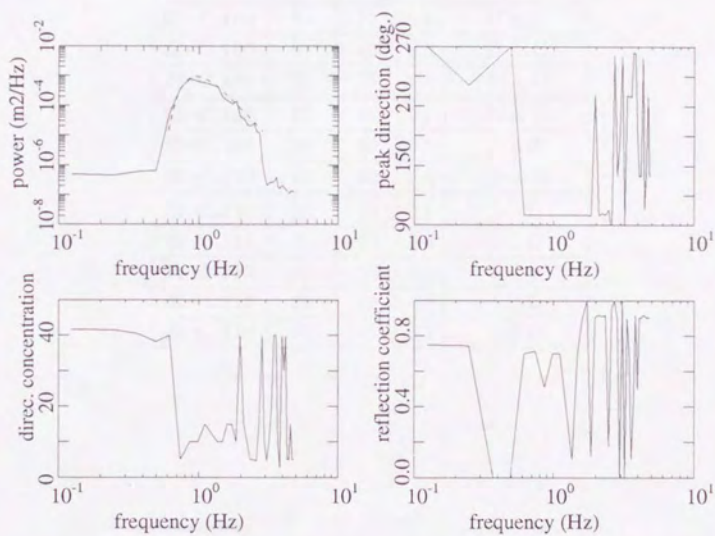
図の番号	$\theta_p (^\circ)$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.91	95	40	0.1	A-G-N
図-C.92	95	40	0.5	A-G-N
図-C.93	95	40	0.9	A-G-N
図-C.94	95	10	0.5	A-G-N
図-C.95	95	75	0.5	A-G-N
図-C.96	95	10	0.5	C-I-Q
図-C.97	95	40	0.5	C-I-Q
図-C.98	95	75	0.5	C-I-Q

図-C.91: パラメータの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: A-G-N)

図-C.92: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)図-C.93: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: A-G-N)

図-C.94: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)図-C.95: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: A-G-N)

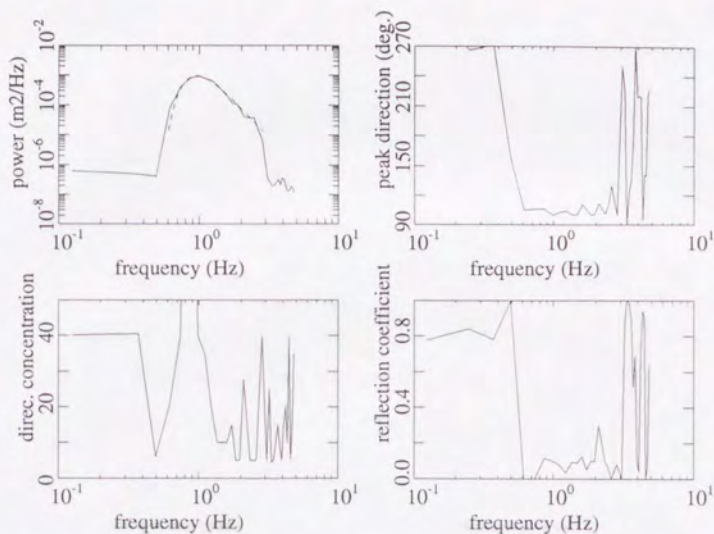
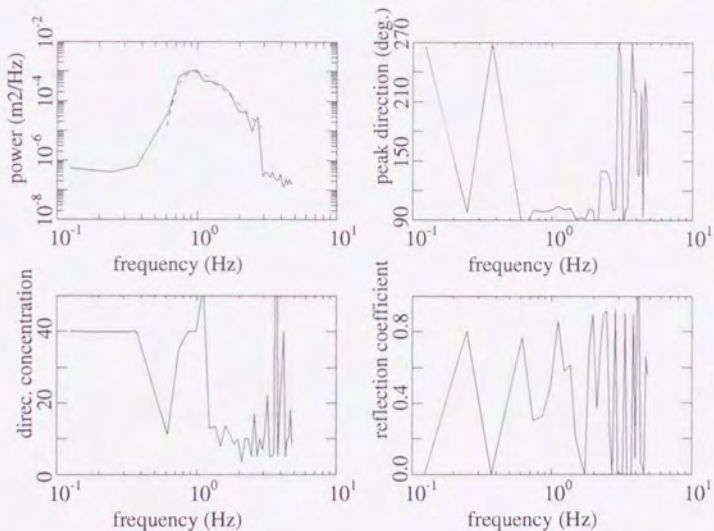
図-C.96: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ : C-I-Q)図-C.97: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : C-I-Q)

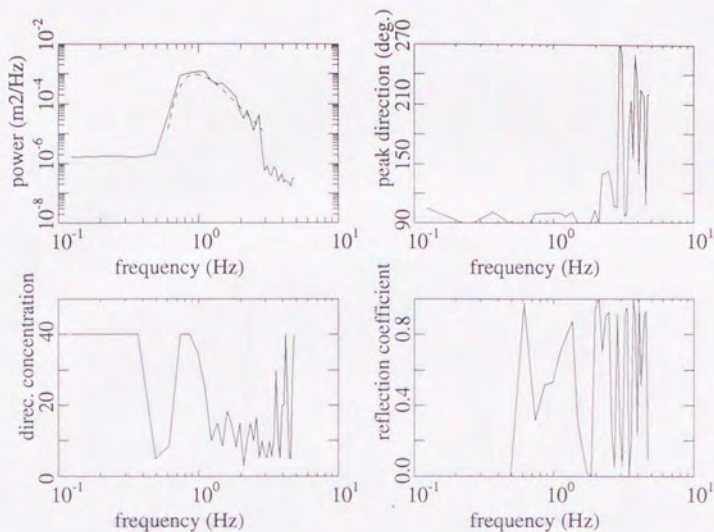
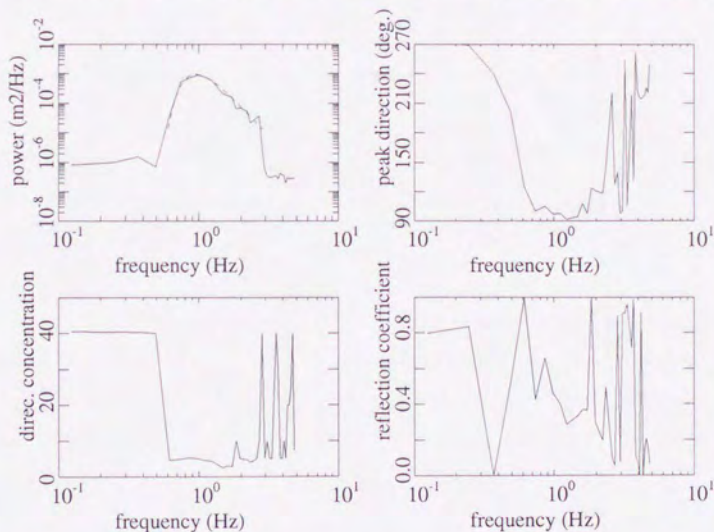
図-C.98: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: C-I-Q)

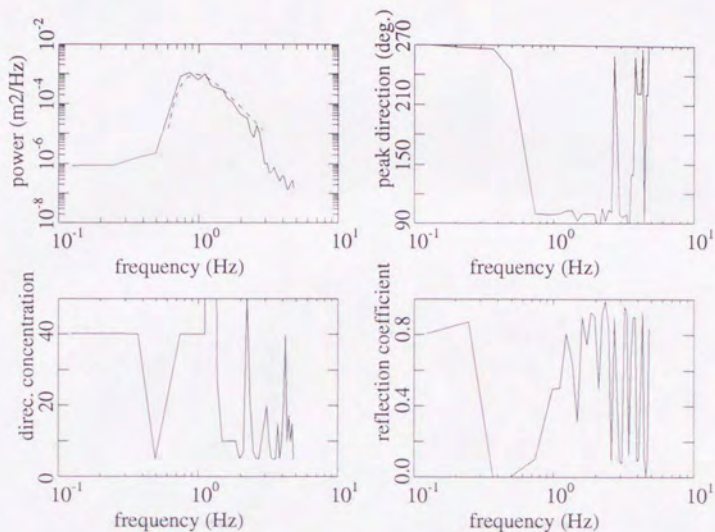
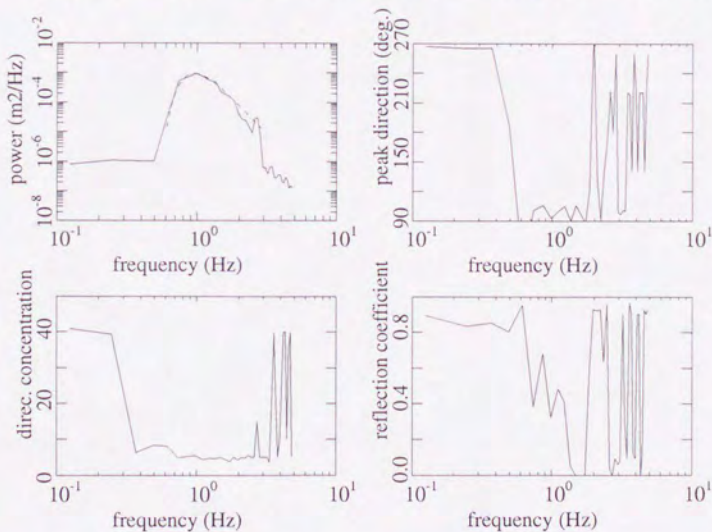
C.3.3 三角形状の波高計アレイを用いた推定結果

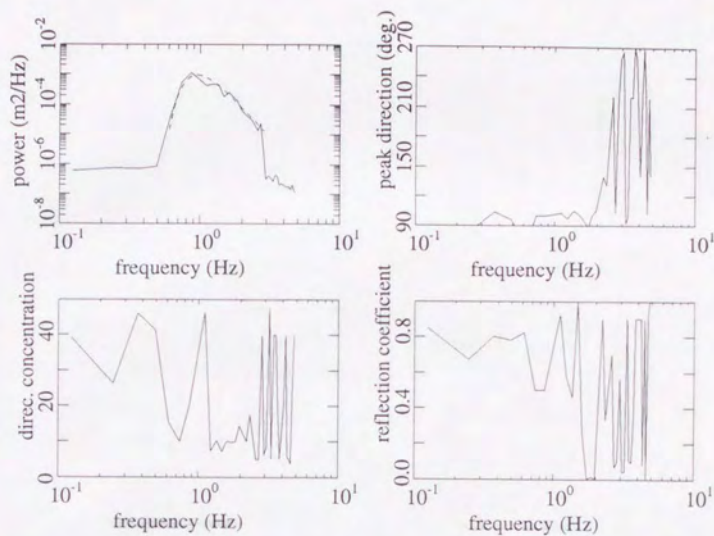
表-C.9: 波浪場条件, 波高計アレイ一覧 ($\theta_p=95^\circ$, 三角形アレイ)

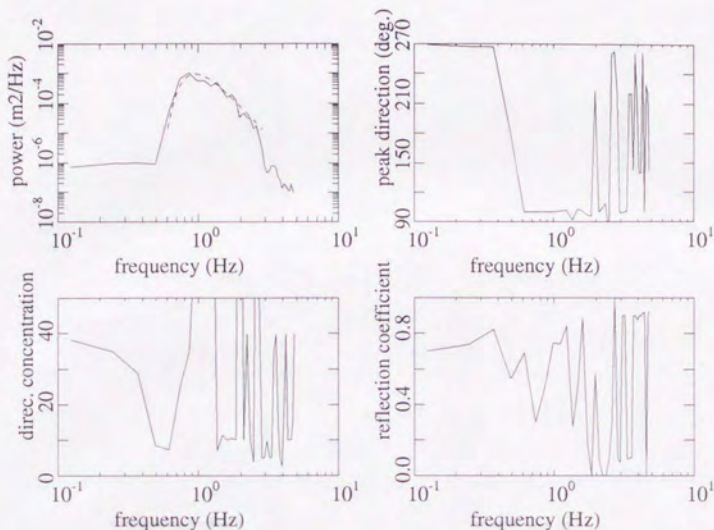
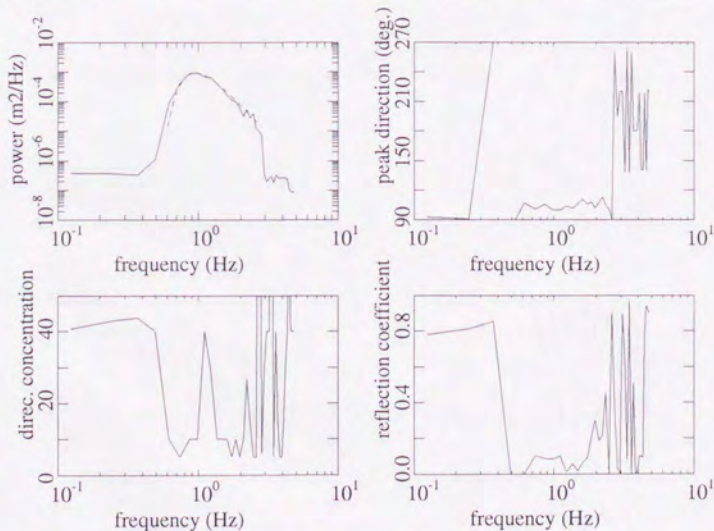
図の番号	$\theta_p (^\circ)$	s_{\max}	r	波高計アレイ
図-C.99	95	40	0.1	G-A-B
図-C.100	95	40	0.5	G-A-B
図-C.101	95	40	0.9	G-A-B
図-C.102	95	10	0.5	G-A-B
図-C.103	95	75	0.5	G-A-B
図-C.104	95	10	0.5	G-A-C
図-C.105	95	40	0.5	G-A-C
図-C.106	95	75	0.5	G-A-C
図-C.107	95	40	0.1	N-A-B
図-C.108	95	40	0.5	N-A-B
図-C.109	95	40	0.9	N-A-B
図-C.110	95	40	0.1	I-C-D
図-C.111	95	40	0.5	I-C-D
図-C.112	95	40	0.9	I-C-D
図-C.113	95	10	0.5	I-C-D
図-C.114	95	75	0.5	I-C-D

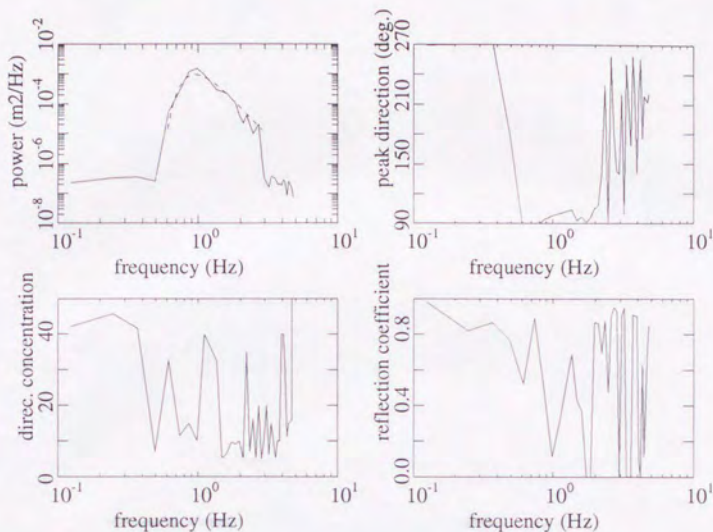
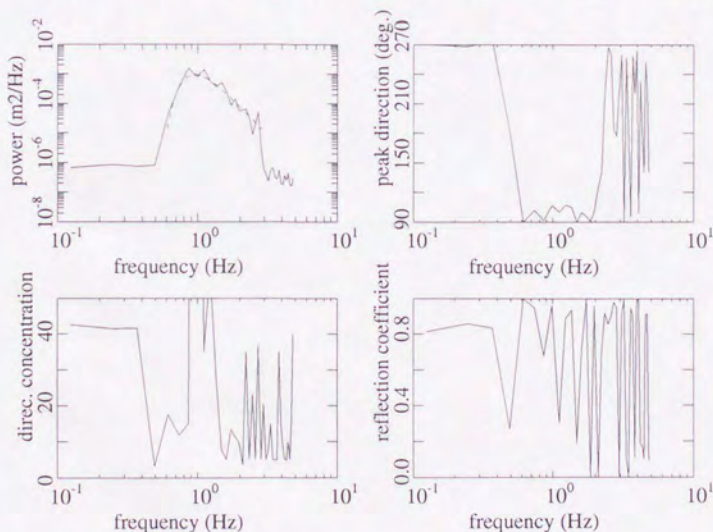
図-C.99: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ : G-A-B)図-C.100: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ : G-A-B)

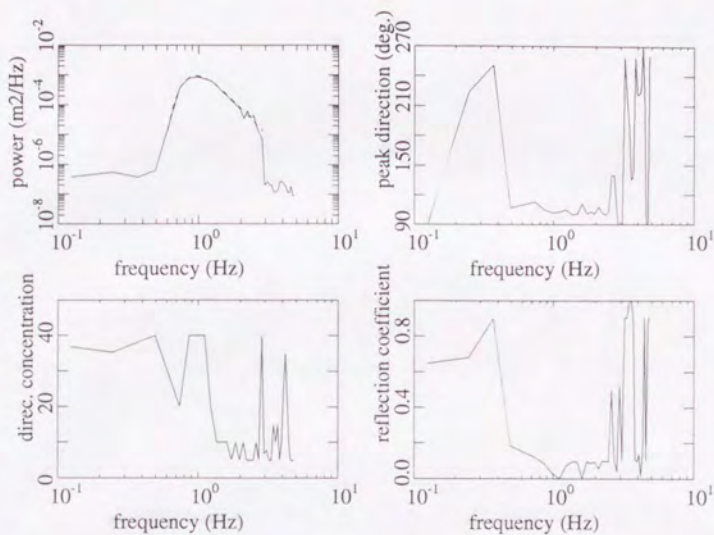
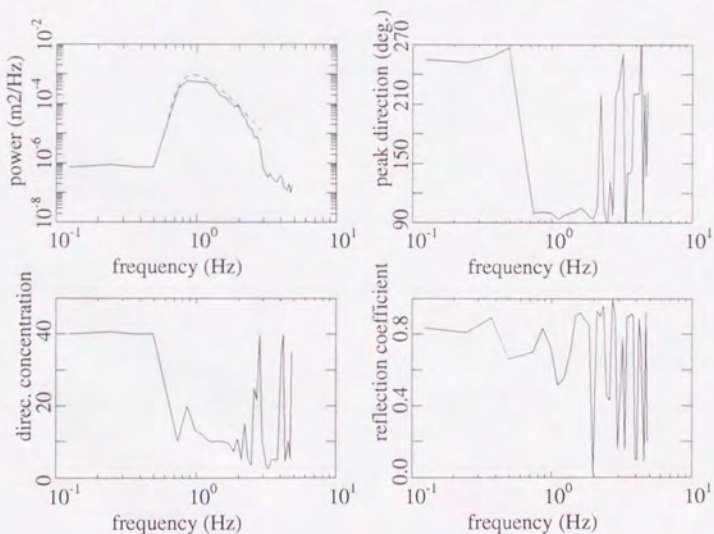
図-C.101: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ : G-A-B)図-C.102: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ : G-A-B)

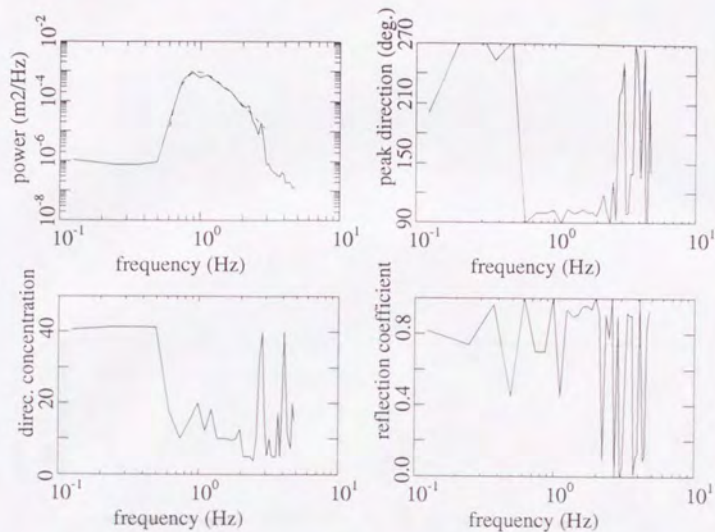
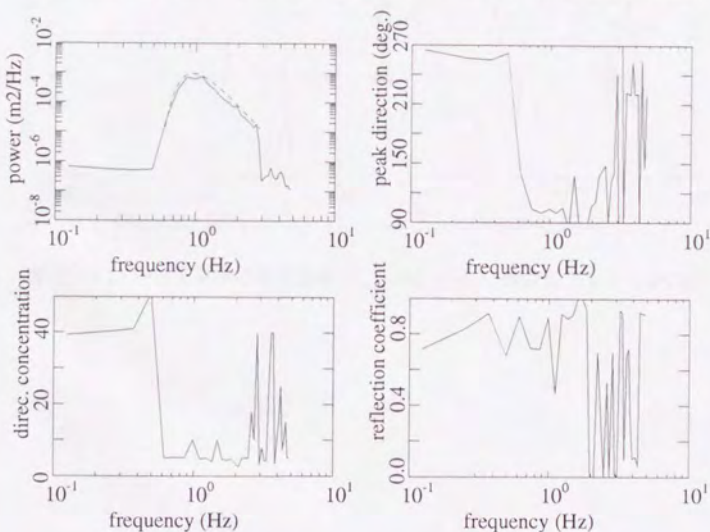
図-C.103: パラメータの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-B)図-C.104: パラメータの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)

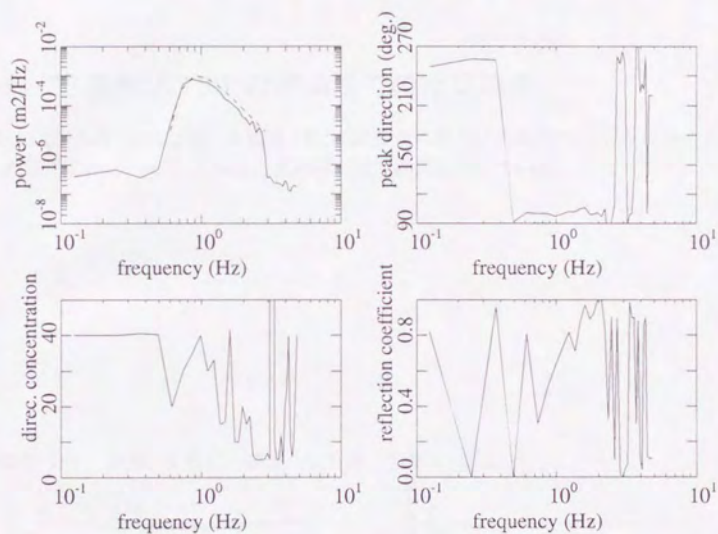
図-C.105: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: G-A-C)

図-C.106: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ : G-A-C)図-C.107: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ : N-A-B)

図-C.108: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: N-A-B)図-C.109: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: N-A-B)

図-C.110: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.1$, 波高計アレイ: I-C-D)図-C.111: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)


図-C.112: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=40$, $r=0.9$, 波高計アレイ: I-C-D)

図-C.113: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=10$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)

図-C.114: パラメターの推定結果 ($s_{\max}=75$, $r=0.5$, 波高計アレイ: I-C-D)

付 録 D

パラメーターの推定誤差の評価

D.1 主波向が 180° の波浪場での推定誤差

図-D.1から図-D.6には、主波向 180° の波浪場に対して方向スペクトルパラメーターを推定した結果の内の、ピーク波向と反射率の推定誤差を示している。

波高計アレイ：実線：A-B-C，破線：A-B-D，点線：C-D-E

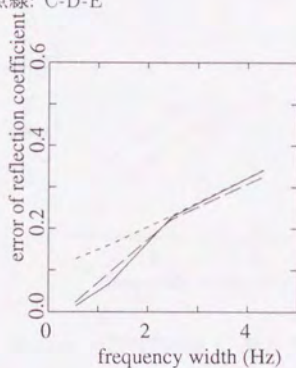
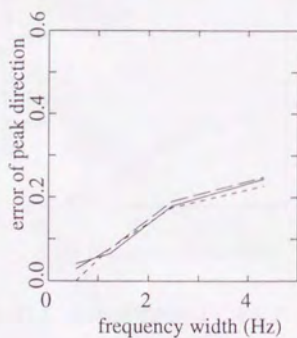


図-D.1: θ_0 の推定誤差 (垂直アレイ)

図-D.2: r の推定誤差 (垂直アレイ)

波高計アレイ：実線：A-G-N，破線：A-G-U，点線：C-I-Q

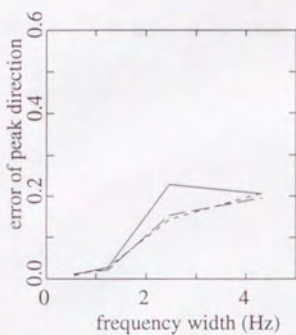


図-D.3: θ_0 の推定誤差 (平行アレイ)

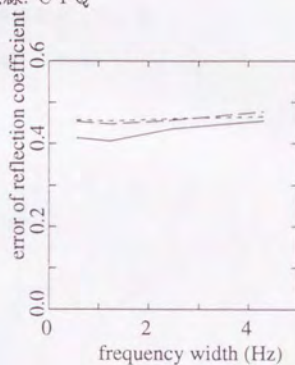


図-D.4: r の推定誤差 (平行アレイ)

波高計アレイ：実線：G-A-B，破線：G-A-C，点線：N-A-B，一点鎖線：I-C-D

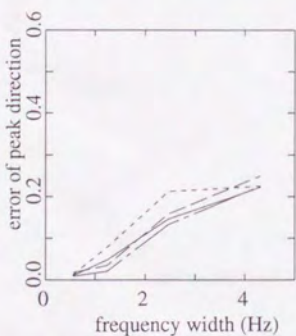


図-D.5: θ_0 の推定誤差 (三角形アレイ)

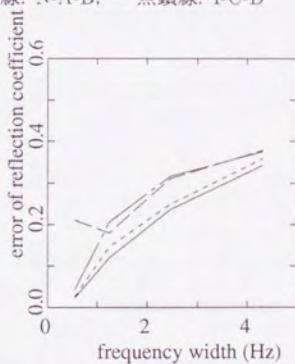


図-D.6: r の推定誤差 (三角形アレイ)

D.2 主波向が 135° の波浪場での推定誤差

図-D.7から図-D.12には、主波向 135° の波浪場に対して方向スペクトルパラメターを推定した結果の内の、ピーク波向と反射率の推定誤差を示している。

波高計アレイ：実線：A-B-C，破線：A-B-D，点線：C-D-E

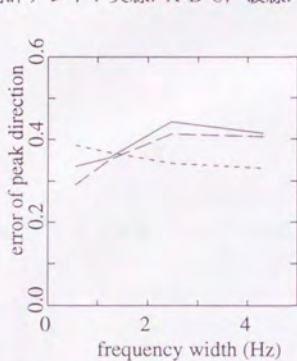


図-D.7: θ_0 の推定誤差 (垂直アレイ)

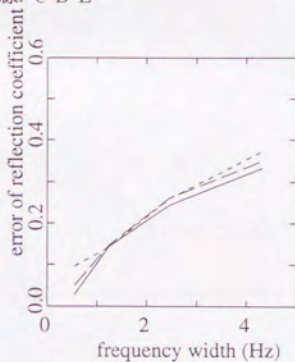


図-D.8: r の推定誤差 (垂直アレイ)

波高計アレイ：実線：A-G-N，破線：A-G-U，点線：C-I-Q

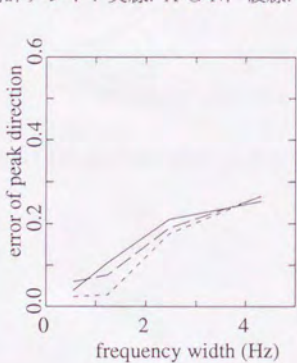


図-D.9: θ_0 の推定誤差 (平行アレイ)

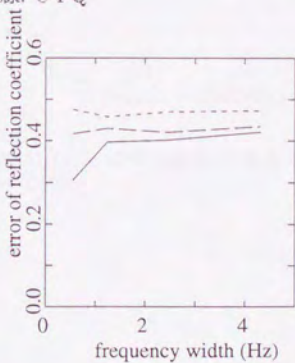


図-D.10: r の推定誤差 (平行アレイ)

波高計アレイ：実線：G-A-B，破線：G-A-C，点線：N-A-B，一点鎖線：I-C-D

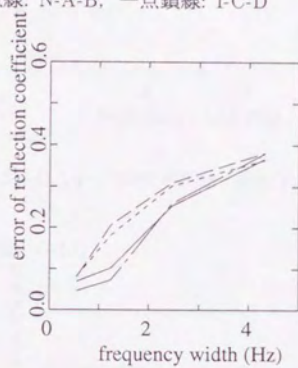
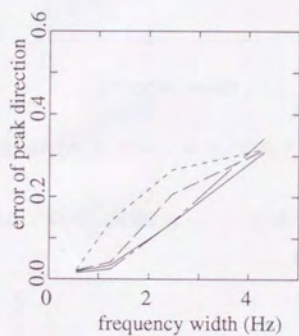


図-D.11: θ_0 の推定誤差 (三角形アレイ)

図-D.12: r の推定誤差 (三角形アレイ)

D.3 主波向が 95° の波浪場での推定誤差

図-D.13から図-D.18には、主波向 95° の波浪場に対して方向スペクトルパラメターを推定した結果の内の、ピーク波向と反射率の推定誤差を示している。

波高計アレイ：実線：A-B-C，破線：A-B-D，点線：C-D-E

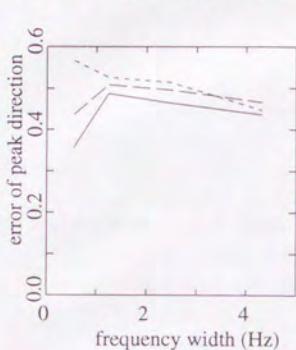


図-D.13: θ_0 の推定誤差 (垂直アレイ)

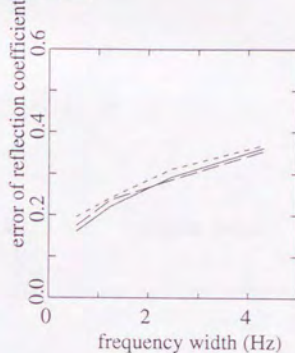


図-D.14: r の推定誤差 (垂直アレイ)

波高計アレイ：実線：A-G-N，破線：A-G-U，点線：C-I-Q

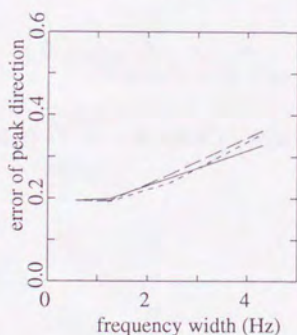


図-D.15: θ_0 の推定誤差 (平行アレイ)

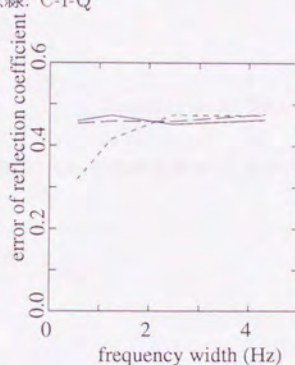


図-D.16: r の推定誤差 (平行アレイ)

波高計アレイ：実線: G-A-B, 破線: G-A-C, 点線: N-A-B, 一点鎖線: I-C-D

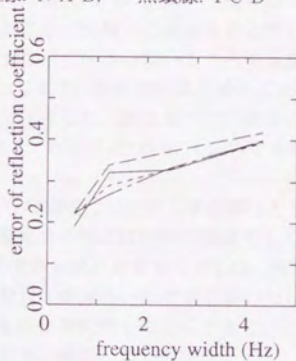
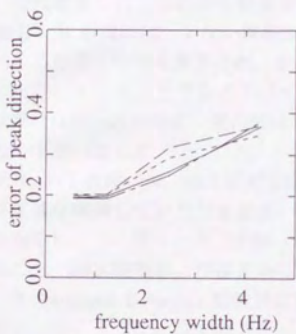


図-D.17: θ_0 の推定誤差 (三角形アレイ) 図-D.18: r の推定誤差 (三角形アレイ)

あとがき

本研究を遂行するにあたっては様々な人にお世話になりました。簡単ではありますが以下にお礼を述べさせていただきたいと思います。

筆者の修士論文の主査であり、その後現在に至るまで私の研究内容から研究態度に至るまで常に暖かく見守って下さり、また厳しく指導して下さいた磯部 雅彦 教授には、ただひたすら感謝の気持ちでいっぱいです。磯部先生には研究だけに限らず、様々なことを教えていただきました。これから研究をやっていく上で必ずや助けになるものと思います。

渡辺 晃 教授には、少ない情報から筆者の研究の弱点、足らないところを見抜かれ指摘されることで、いつも驚かされ、かつ感謝しております。本研究をまとめるにあたって、その指針ともいえるものをアドバイスしていただきました。渡辺先生には直接研究のご指導は受けなかったものの、常に気にかけていただき、昨年にはついに「いつできるのか」と尋ねて下さいました。

玉井 信行 教授には、論文説明の際の筆者の下手な説明に辛抱強く耳を傾けて下さり、かつ有意義な議論していただき感謝いたします。審査会の時には明快な発表をして少しは名誉挽回をしようと思ったのですが、やっぱり下手で申し訳ありませんでした。河原 能久 助教授にも、論文説明および審査会において大変貴重な議論をいただき感謝いたします。また、Mohammad Dibajnia 助教授には、論文の査読を大変熱心にして下さり、この論文がよりよくなるようにと多くのアドバイスをいただき、感謝いたします。

本論文の第4章で説明した水槽実験は、(財)電力中央研究所で行われたものです。実験データを快く提供していただいた、池野 正明 氏に感謝いたします。また、本論文で用いた現地観測データは、(株)五洋建設のご好意で使用させていただきました。現地観測やデータの作成でお世話になりました。清水 琢三 氏、鶴飼 亮行 氏に感謝いたします。

さて、筆者が学部から大学院修士課程へ進学しさらに助手となり、研究・教育者としての道をまがりなりにも歩み始めることができたのは、ひとえに渡辺・磯部両先生のご指導のおかげであります。ここでもう一人、小林 智尚 氏(現・東京理科大学 理工学部 助手、元・東京大学 工学部 助手)を忘れることはできません。小林さんは筆者が学生だった3年間、研究室の助手をされておられ、筆者に研究者となるよう強く薦めて下さいました。大変感謝しております。

また、研究室の皆さんにもいろいろお世話になりました。論文執筆の際には、あまり卒業生・修論生の面倒を見てあげられなかったと思いますが、誰も文句を言うこともなく、さらには筆者の進捗状況の心配までしていただき感謝しております。特に、朝比奈 良幸 さん・岡野 千恵子 さんには、面倒な雑用をこなしていただき、時には論文作成のお手伝い

でしていただき感謝しております。

最後に、電話する度に「論文まだか」と催促してくれた両親と、文字どおり陰に陽に応援してくれた妻 雅子に深く感謝する。

1996 年 4 月

横木 裕宗

