

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 496 Sept. 1984

海 上 風 の 実 測 記 録

清	宮	理
西	澤	英 雄
上	田	茂

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 風の基本的な性質	3
2.1 風の概要	3
2.2 強風をもたらす気象現象	4
3. 風の観測	7
3.1 観測場所	7
3.2 観測計器	8
3.3 取得された記録と整理の項目	9
4. 風速の時間的な変動	10
4.1 概 要	10
4.2 平均風速とガストファクター	10
4.3 風速の乱れの強さ	12
4.4 風速のパワースペクトル	13
5. 風速の空間的な性質	14
5.1 概 要	14
5.2 風速の乱れの大きさ	14
5.3 風速の方向分散	19
5.4 風速の鉛直分布	20
6. ま と め	24
7. あ と が き	24
参考文献	24
付録A 気 象 図	26
付録B 観測された風速記録	35
付録C パワースペクトルと自己相関係数	44
付録D 方 向 分 散	65

Records of Strong Winds Above Sea

Osamu KIYOMIYA*
Hideo NISHIZAWA**
Shigeru UEDA***

Synopsis

Field observation of wind velocity at an observation station in Ohsaka Bay about 450km west from Tokyo has been carried out since 1978. Seven aerovane type anemometers and two three-dimensional sonic anemometers are installed to the observation towers constructed on the shore in order to know properties of strong wind of above sea.

23 records of wind velocity are analyzed. The mean wind velocities of them are in the range of 13 to 21m/s. The summary of the results from the field observation is shown below:

- 1) Gust factors for 10 minutes at 15m height in the sea are in the range between 1.2 and 1.4.
- 2) Dominant frequencies of logarithmic spectrum in horizontal wind component are about 0.03Hz. The properties of the spectrum of the observation records coincide with the properties of spectrums proposed by Davenport and by Hino in the range of 0.02 to 5Hz.
- 3) Coefficients of power index presenting the wind profile of the perpendicular direction at the observation tower with 100m height are in the range of 5 to 6 for winds from sea.
- 4) The vortices of turbulence in wind are oval-shaped. The alongwind scales of the vortices are in the range of 50 to 250m. The lateral scales are smaller than the alongwind scales.
- 5) The angular distribution of 10 minutes in wind velocity is very small.

* Chief of the Subaqueous Tunnels and Pipelines Laboratory, Structures Division
** Member of the Subaqueous Tunnels and Pipelines Laboratory, Structures Division
*** Chief of the Offshore Structures Laboratory, Structures Division

海上風の実測記録

清 宮 理*
西 澤 英 雄**
上 田 茂***

要 旨

大阪湾海上及び沿岸の2地点で1978年より超音波風速計等の観測計器を用いた風の現地観測が行われている。取得された記録の中から取得状況の良好な23個の記録について整理・解析を行い、海上での風の基本的な性質を調べた。23個の記録の平均風速は、13 m/s～21 m/sの範囲である。これらの記録の整理・解析から次の主要な結果を得た。

- ① 海面上15 mの高さでの風速のガストファクターは1.2から1.4の範囲内であった。
- ② 風速の時系列データから得られたパワースペクトルの卓越振動数は約0.03 Hzであった。0.02 Hzから5 Hzの範囲内でDavenportや日野の提案しているパワースペクトルと値及び形状が似ていた。
- ③ 風速の鉛直分布を示すべき法測でのべき指数の定数値は、5から6の範囲であった。

1. まえがき

太平洋の北西部に位置し、四方を海に囲まれている日本は、台風、温帯低気圧等の通過により相当の頻度で強い風がもたらされる。この強い風は、地震、波浪等とともに構造物にとって厳しい自然現象の一つである。従来の着底式、重力式、杭式等の構造様式の港湾構造物では、地表面（あるいは海面）上に露出する面積が小さく、かつ構造物自体も剛である。したがってこれらに作用する風力は、波力や地震力と比較して小さい。また橋梁、高層ビル、煙突等の比較的柔な構造物のように風を直接受けかつ風による振動が設計上重要な現象となることは、従来の港湾構造物にはほとんど無かった。

これらの理由により従来港湾技術者は風外力を、波浪外力、地震外力等に比較して、さほど重要視してこなかった。

近年大水深域における海洋開発において、大型浮体式海洋構造物の建設が計画されている。その具体例として、洋上石油備蓄基地計画、浮防波提計画、浮遊式プラント計画等がある。浮体式海洋構造物は、浮力で構造物の自重を支え、チェーンやドルフィン等によって係留される。したがって地震力や海底地盤の沈下等の影響を直接受けないという利点がある反面、波浪、風及び流れの作用によって動揺する。その場合、係留系の変位復元力特性が

柔らかいので、風や流れなどの周期の長い変動成分に対する応答が問題になることがある。同じことは、船舶の係留問題についても言える。すなわち係留ブイに係留された大型タンカーの動揺問題、港内外の避泊船舶の動揺問題においても風が重要となる。

このようなことから浮体式海洋構造物や船舶の係留問題において、風に対する安全性の確認や評価を適切に行う必要がある。

そこで風に対する安全性の確認や評価を行う際の基礎資料として海上での強風の記録を図り、その性質を明らかにする必要がある。本資料では、大阪湾上の風の観測記録を整理し、風速の時間変動特性、空間変動特性を中心に解析を行った結果について述べる。

2. 風の基本的な性質

本章では、風の生じる要因及び現象について概説する。

2.1 風の概要^{1),2)}

風は空気の運動である。この運動の基本となる力の種類は、気圧差に基づく気圧傾度力、地球の自転による偏向力（コリオリの力）、海面の摩擦力、曲線的な運動に伴う遠心力などである。図-1に風を支配する力の種類と方向を示す。等圧線が曲線の場合には、気圧傾度力、遠心力及びコリオリの力が作用して平衡状態が保たれる。風向は、ほぼ等圧線と平行となる。この状態で吹く風は、

* 構造部 沈埋構造研究室長

** 構造部 沈埋構造研究室研究員

*** 構造部 海洋構造研究室長

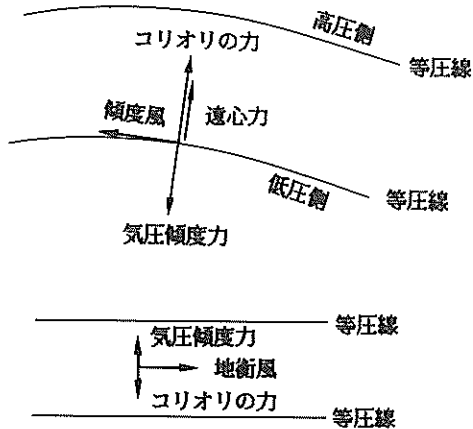


図-1 風を支配する力の状態

傾度風と呼ばれている。台風（中心付近）や竜巻の場合には、コリオリの力は遠心力と比較して無視できる。この状態で吹く風は、施衡風と呼ばれている。また等圧線が平行な場合には、気圧傾度力とコリオリの力で平衡が保たれる。この状態で吹く風は地衡風と呼ばれている。以上述べたことは、地表面や海面での摩擦力の影響が及ばない高層での風の状態を説明している。通常我々が体験する風や構造物に作用する風は、地表面や海面での摩擦力等の影響を受け複雑な性質を持つ。図-2に鉛直方向の気層の推定される状況を示す。海面上から500~1,000m以上の大気層では、海面の摩擦力はほとんど影響を及ぼさない。この大気層の空気の運動は、ほぼ理想流体として取扱える。海面からこの大気層までは、大気境界層（あるいは摩擦層）と呼ばれている。特に海面からおおよそ50~100mまでは底部摩擦域と呼ばれている。本資料で言及する風は、この底部摩擦域

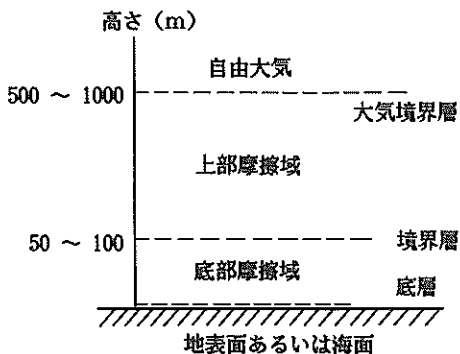


図-2 鉛直方向の気層の推定される状況

での風を対象としている。

前述したとおり、気圧傾度力、コリオリの力、遠心力等の力が釣合っている風が、海面上を吹き渡る時表面摩擦力等によって乱される。ここでは、コリオリの力の影響は小さくなる。底部摩擦域の風は、上層の風よりも風速が小さく、風向が等圧線と必ずしも平行とならない。また気流に乱れが生じる原因から、風速と風向が時間的にも空間的にも変動する。これらの性質は、海面の性状にかなり支配される。

海面上の気温の分布状況によっては、大気中对流現象が発生する。しかし構造物や船舶の動揺に大きな影響を及ぼす強い風が吹いているときには、対流現象の発生は少く、大気は中立安定の状態にある。すなわち、構造物や船舶の動揺にとっては、対流現象よりも機械的な攪乱による風の性質を把握することが重要となる。

陸上の風に関しては、観測記録の集積も多くその性質も次第に解明されつつある。しかし海上の風に関しては、情報量は乏しい。海面上のように、開けた場所での風は、陸上の風と比較して一般的に風速が速く乱れも少いとされているが、その程度については詳細に調べられていない。

ところで、“理科年表”によると日本での最大平均風速の記録は、1965年9月10日に室戸岬で観測された69.8 m/sである。強大な台風通過時等には、日本各地で強い風が観測されている。

2.2 強風をもたらす気象現象³⁾

浮体式構造物や船舶等の動揺に影響を与える強い風をもたらす気象現象として、台風、冬季の季節風、春の低気圧等がある。次にこれらの概要について述べる。

(1) 台風

毎年、夏から秋にかけて我が国には、幾個かの台風が接近・上陸し、ときにはじんな被害を与える。台風は、世界的にみても最も強い風を与える風因である。太平洋南西部や南シナ海に発生し発達した熱帯性低気圧で、最大風速が17 m/s以上の低気圧を気象庁では台風と呼んでいる。表-1に台風の発生数を示す。台風は、一年間に平均約30個ほど発生する。月別では、7月から10月の間に全体の約70%以上の台風が発生する。発生した台風は、太平洋上を進行中に勢力を発達させながら、西または北西に進み、その後北上にともない進路を曲げ日本に接近する。日本に上陸する台風は、全台風の約14%である。台風は、渦巻きの性質を示し、等圧線は、ほぼ円形に近い。表-2に台風の規模を示す。台風の大きさ（直径）は、1,000 mbの等圧線の範囲で示される。通常の台風の大きさは、直径が600 km位である。大

大きい台風では2,000 km位、小さい台風では100 km位の大きさも存在する。北半球では、台風の渦は左巻きである。台風の進路の右側の各地点では、台風の進行に伴い風向が時計回りに変化し、左側の各地点では反時計回りに変化する。

台風を中心の半径10 km程度の範囲内は、台風の日と呼ばれほとんど無風の状態である。台風を中心から40～50 kmの範囲では、風速は中心からの半径にほぼ比例する。中心から40～50 kmの地点に最大風速が生じ、その外側の風速は、半径の平方根にほぼ反比例する。

台風の進行方向の右側は、台風の進行速度の影響が加わり風速が増加する。台風域内の風速の分布モデルは、高橋・光田^{4), 5)}らが提案しており、各種の検討に用いられている。

(2) 低気圧

低気圧は、寒気団と暖気団との境である前線帯上に発生することが多い。日本付近では、大半の低気圧が、上層の偏西風に流され西から東へ向かう。低気圧の中心気圧が990 mb程度になると風雨が強まり、時には台風並の強さに発達する場合もある。温帯低気圧は、真夏以外の時期に日本へ到来する。冬季には、日本近海で発生した低気圧が東方洋上に出て発達し、アリューシャン列島付近の洋上で数日間停滞することがある。この際、いわゆる西高東低の気圧配置となる。この気圧配置が継続する限り、北西あるいは西からの強い風が日本列島に吹く。この風は、冬季の季節風と呼ばれ、陸上での風速が時には15～20 m/sに達する。この季節風は、吹いている区域が広いこと、継続時間の長いこと等の特徴がある。また2月頃、太平洋沿岸に強い風をもたらす「台湾坊主」と呼ばれている低気圧がある。この低気圧は、台湾近海に発生し、本州南方洋上を北東の進路で進む。この低気圧が通過する際には、太平洋沿岸にときには雪をもたらす場合がある。また低気圧が日本海を北東または東に進む場合があり、この際強い南風を日本列島に与える。

(3) 前線の通過

異なる気団が接触している境界面を前線面と言う。前線の種類には温暖前線、寒冷前線等がある。前線の通過の数分～数時間の間に、風速が増加する。一般的には、前線通過時の平均風速は、10 m/s前後である。

(4) 竜巻

強い渦巻状の気流を竜巻と言い、その旋回風は最も猛烈な風速を持つ風である。時には最大風速が100 m/sを越し周囲から竜巻に吹き込む風のため家屋等の重量物が巻き上げられる場合もある。アメリカ大陸でのトルネードは、竜巻として著名である。日本では、トルネードは

どの規模の竜巻が頻発することはない。日本全国での発生頻度は、年3～17回である。竜巻が通過する区域は、激しい被害を受ける場合もあるが、被害の範囲は通過経路付近に限定され、局地的な現象と言える。

以上述べた要因によって生じる風速の大よその大きさを示す指標として表-3に示す気象庁風力階級(ビューフォート風力階級)がある。ここでは、風力を17階級に分類して地表や海面の状況を示している。表-3では17階級のうち12階級までを示している。海上での風は、陸上での風と比較して、風速が速いとされている。

表-1 台風の発生回数および日本への上陸回数 (1941～1970)

月別発生および上陸回数

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
発生回数	14	12	11	22	28	55	127	188	147	117	74	38	833
上陸回数	0	0	0	1	1	6	18	47	32	8	1	0	114

表-2 台風の大きさと強さの分類

1. 大きさの分類

程 度	1,000 mb 等 圧 線 の 半 径	風速 25 m/s 以上の半径 (参 考)	最大円形の 等 圧 線 半 径 (参 考)
ごく小さい	100 km以下		100 km以下
小型(小さい)	100～200	100 km前後	200～300
中型(なみ)	200～300	200 #	300～400
大型(大きい)	300～600	300 #	400～800
超大型(非常に 大きい)	600以上	400または それ以上	800以上

2. 強さの分類

階 級	中心気圧	最大風速 (参 考)
弱 い	990 mb 以上	25 m/s 未満
な み	960～989	25～34
強 い	930～959	35～44
非常に強い	900～929	45～54
猛 烈 な	900以下	55以上

表-3 気象庁風力階級表（ビューフォート風力階級表）

風力階級	開けた平らな地面から10mの高さにおける相当風速	海上での状況	おおよその波高（最大波高）
0	0.3 未満 m/s	鏡のような海面。	—
1	0.3 ~ 1.6	うろこのようなさざなみができるが、波がしらにあわはない。	0.1 (0.1)
2	1.6 ~ 3.4	小波の小さいもので、まだ短いはっきりしてくる。波がしらはなめらかに見え、砕けていない。	0.2 (0.3)
3	3.4 ~ 5.5	小波の大きいもの、波がしらが砕けはじめる。あわはガラスのように見える。ところどころに白波が現われることがある。	0.6 (1)
4	5.5 ~ 8.0	波の小さいもので、長くなる。白波がかなり多くなる。	1 (1.5)
5	8.0 ~ 10.8	波の中ぐらいのもので、いっそうはっきりして長くなる。白波がたくさん現われる。（しぶきを生ずることもある）	2 (2.5)
6	10.8 ~ 13.9	波の大きいものができはじめる。いたるところで白くあわだった波がしらの範囲がいっそう広がる。（しぶきを生ずることが多い）	3 (4)
7	13.9 ~ 17.2	波はますます大きくなり、波がしらが砕けてできた白いあわは、すじをひいて風下に吹き流されはじめる。	4 (5.5)
8	17.2 ~ 20.8	大波のやや小さいもので、長さが長くなる。波がしらの端は砕けて水けむりとなりはじめる。あわは明りょうなすじをひいて風下に吹き流される。	5.5 (7.5)
9	20.8 ~ 24.5	大波、あわは濃いすじをひいて風下に吹き流される。波がしらはのめり、くずれ落ち、逆巻きはじめる。しぶきのため視程がそこなわれることもある。	7 (10)
10	24.5 ~ 28.5	波がしらが長くのしかかるように非常に高い大波、大きなかたまりとなったあわは濃い白色のすじをひいて風下に吹き流される。海面は全体として白く見える。波のくずれかたは、はげしく衝撃的になる。視程はそこなわれる。	9 (12.5)
11	28.5 ~ 32.7	山のように高い大波（中小船舶は、一時波の陰にみえなくなることがある）海面は、風下に吹き流された長い白色のあわのかたまりで完全におおわれる。いたるところで波がしらの端が吹きとばされて水けむりとなる。視程はそこなわれる。	11.5 (16)
12	32.7 以上	大気はあわとしぶきが充満する。海面は吹きとぶしぶきのために完全に白くなる。視程は、著しくそこなわれる。	14 (-)

（備考：波高は、陸岸から遠く離れた外洋において生ずる波の高さのおおよその目安を与えるだけのものである。内海あるいは陸岸近くで、沖に向う風の場合にはこの表に示された数値より小さくなり、波はとがってくる。）

3. 風の観測

3.1 観測場所

大阪湾での風の観測は^{6), 7)}、図-3に示す大阪府泉南市に設置された気象海象観測施設で、昭和53年1月より行われている。風速を計測する機器は、4地点に設置されている。4地点の名称を、MT局、C局、L1局及びL2局とする。図-4に示す海上での観測施設(MT局)は、ジャケット式の観測塔で、泉州海岸より約6km沖に位置している。観測塔の海面上15mの箇所に超音波風速計と風車型風向風速計とが取付けられている。また海底地盤面に設置された超音波波高計及び塔体に取り付け

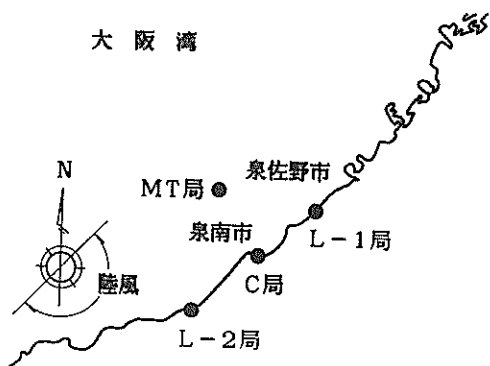


図-3 観測位置

MT局(樫井川河口より北西6km)

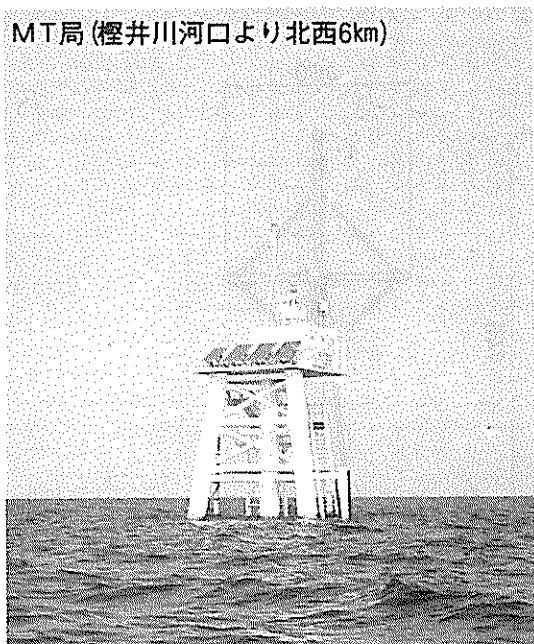


図-4 MT局での観測塔

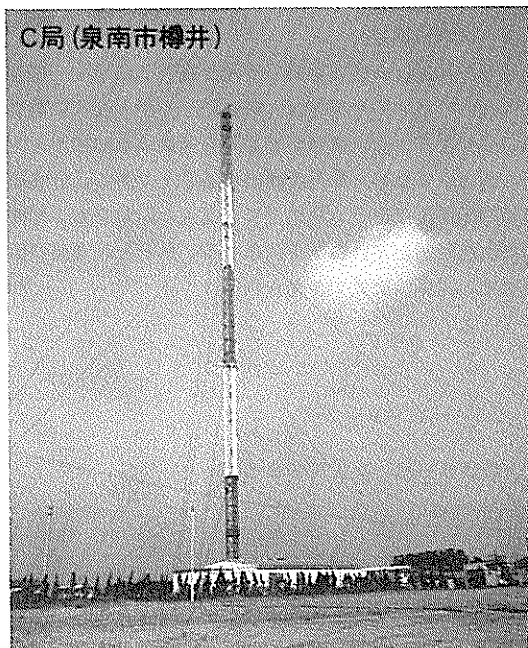


図-5 C局での観測塔

られたステップ式波高計により、風速の観測中に生じている波浪の波高、周期及び波向に関する情報が得られる。

陸上での観測施設(C局)は、泉南市の海岸に位置し、図-5に示すように高さ100mの観測鉄塔が設けられている。この観測鉄塔の地上100mの箇所に超音波風速計と風車型風向風速計とが取付けられている。また地上10m、20m及び40mの3箇所に風車型風向風速計が取付けられており、風速の鉛直方向の分布等の情報を得ることができる。海岸の別の2地点に設置されているL1局及びL2局では地上20mの箇所に風車型風向風速計が設置されている。海岸では、西南から時計回りに北東にかけて海に面している。この方向から吹く風は、海風とみなせる。山側より吹く風は、したがって陸風となる。C局の周辺は、住宅、松林、農地などが混在しているが、付近に特に高い建物や山等は存在していない。

表-4に観測地点を取巻く各気象台での既往の最大風速を示す。観測地点付近は、台風通過時などに、いままでもかなりの頻度で強い風がもたらされている。

表-4 周辺での最大風速の記録

地点	最大風速 (m/s)	風向	記録日 (年, 月, 日)	統計開始年	風速計地上高さ (m)
神戸	33.4	NE	1950. 9. 3	1897	26.8
大阪	42.0	S	1934. 9. 21	1910	18.6
和歌山	36.5	SSW	1950. 9. 3	1879	11.6
徳島	37.8	SE	1941. 8. 15	1929	16.9

3.2 観測計器

(1) 超音波風速計

超音波風速計の概要を図-6及び図-7に示す。超音波風速計の基本的な原理は、離れた2点から交互に超音波の信号を発信し、信号が2点間を通過する時間から空気の動き、すなわち風速を検出することである。いま超音波の伝播速度を C 、風速を V 、2点の距離を L 、伝播に要した時間を T_1 及び T_2 とする。風速と超音波の伝播速度の関係は次式で与えられる。

$$\frac{L}{T_1} = C + V$$

$$\frac{L}{T_2} = C - V$$

(1)

上式より V は、次式で求まる。

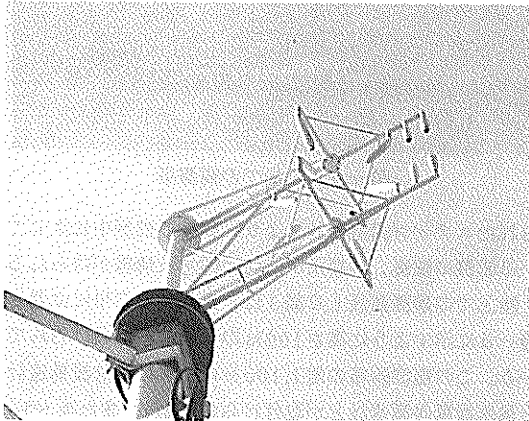


図-6 超音波風速計

$$V = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right) \quad (2)$$

超音波風速計による測定方法によれば、空気の流れを直接乱すことなく風速を測定できる。風向は、検出器を直交方向に組み合わせ、各方向の速度成分を検出することによって求められる。今回の観測に用いた超音波風速計の主要な仕様を表-5に示す。計測する成分は、東西、南北及び鉛直成分である。0.1秒ごとの風速が、連続的に計測される。

表-5 超音波風速計の仕様

形 式	プローブ TR-31B ジャンクションボックス OA-33H 本 体 PA-314
方 式	パルス伝播時間差方式
測定範囲	X成分 0～±60 m/s Y成分 0～±60 m/s W成分 0～±10 m/s
測定精度	±3%以内
測定周波数	0～10 Hz 以内
出 力	DC 0～±1 V 出力インピーダンス 150 Ω以下
電 源	DC (各種電圧)

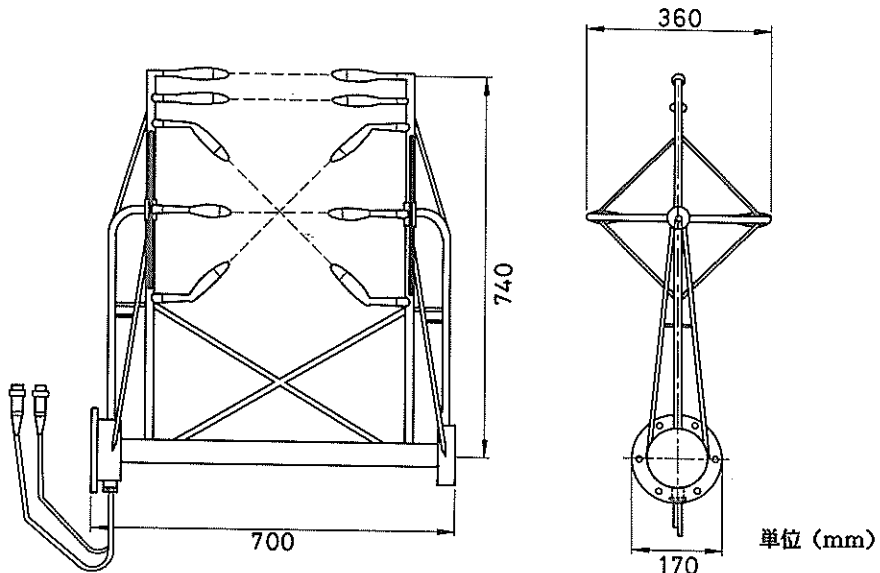


図-7 超音波風速計の寸法

(2) 風車型風向風速計

風車型風向風速計は、図-8に示すように流線型の胴体、尾翼及びプロペラより構成されている。胴体は、風が吹いている間風向に対して頭を向ける。胴体の水平方向の回転量をモーターにより検出し、風向が得られる。風速は、プロペラに直結した発電機の電圧より得られる。今回用いた風車型風向風速計では風速に対するプロペラの回転数は、直線的で補正の必要性がなく、また低風速でもプロペラは起動する。

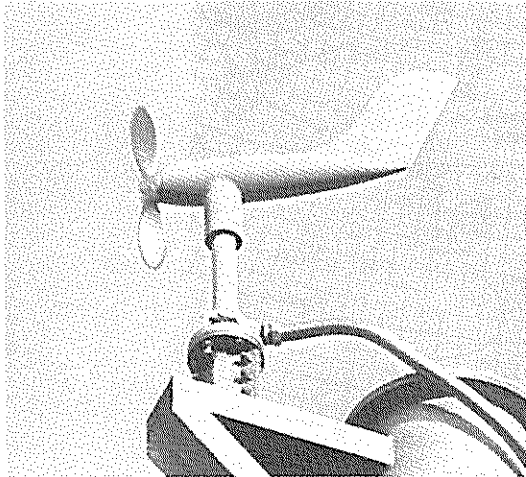


図-8 風車型風向風速計

3.3 取得された記録と整理の項目

(1) 取得された記録

本資料では、1978年より1982年までの4年間に取得された風の記録のうち、風速が大きくかつ記録の取得状況の良好な23個の記録を選んで解析を行った。ただし、記録の一部にはノイズ(雑音)が混入しているものがあつたが解析の際に極力取り除いた。

表-6に各記録の風向、平均風速、強風の原因を示す。23個の記録で、18個はおもに西から吹いてきた海風で、残りの5個がおもに南から吹いてきた陸風である。MT局での風車型風速風向計で得られた平均風速を表中に示す。取得された記録の平均風速は、12m/sから22m/sの範囲であるが、これらの値は、超音波風速計で得られた平均風速の値と若干異なっている。強風の原因は、低気圧、台風及び季節風によるもので、竜巻、前線の通過による強風は観測されていない。

表-7に各地点で得られた平均風速とその時の海面での波の状況(有義波高、有義周期及び波向)を示す。

いずれの記録でも、C局(10m)、L1局、L2局の陸上局での平均風速は、海上のMT局での平均風速よりも小さい。同一の風に対して、海上風の方が陸上風より

も平均風速は小さい。また観測中の海面(MT局)では、有義周期が5秒前後で、有義波高が1.2mから2.7mの範囲の波が発生した。ただしMT局での波向と風向とは必ずしも一致していない。

表-6 取得された風の諸元

記録番号	取得年月日	風向	種類	平均風速*	風の原因
1	1978.02.28.20	西	海風	21.7 ^{m/s}	春一番
2	1979.01.18.14	#	#	17.7	季節風
3	1979.03.30.15	南南西	陸風	17.8	日本海低気圧通過
4	1979.10.19.11	北西	海風	17.6	7920台風
5	1979.11.06.03	西	#	22.3	季節風
6	1980.01.07.09	西北西	#	18.7	#
7	1980.04.06.13	南南西	陸風	16.9	日本海低気圧通過
8	1980.05.15.08	#	#	15.1	#
9	1980.10.25.22	西	海風	20.6	低気圧通過
10	1980.10.25.23	#	#	21.1	#
11	1980.10.25.24	#	#	21.2	#
12	1980.10.26.02	#	#	20.6	#
13	1980.10.26.03	#	#	19.2	#
14	1980.12.04.04	#	#	19.9	日本海低気圧通過
15	1980.12.04.06	#	#	20.3	#
16	1980.12.24.16	#	#	16.5	#
17	1981.01.02.09	#	#	20.4	#
18	1981.03.15.06	#	#	12.2	#
19	1981.11.02.15	南南西	陸風	20.7	低気圧通過
20	1981.11.02.16	南	#	21.1	#
21	1981.12.01.12	西北西	海風	20.0	8010台風
22	1981.12.01.22	#	#	22.5	#
23	1982.08.01.23	#	#	20.1	低気圧通過

* MT局での風車型風速風向計

表-7 各観測点での平均風速と波の状況

記録番号	MT局	C局(10m)	C局(100m)	L1局	L2局	有義波高	有義周期	波向
1	21.7 ^{m/s}	12.0 ^{m/s}	22.8 ^{m/s}	11.9 ^{m/s}	19.2 ^{m/s}	1.38	4.0 ^s	西南西
2	17.7	8.1	15.5	9.0	13.6	1.55	4.4	西南西
3	17.8	11.5	21.3	11.5	11.6	1.28	4.7	南南西
4	17.6	9.4	22.1	11.3	15.1	1.50	4.1	西南西
5	22.3	12.7	23.5	13.7	18.6	2.69	6.1	東北東
6	18.7	12.9	20.5	13.6	17.3	1.82	4.9	西北西
7	16.9	11.4	20.7	11.4	12.6	1.59	4.5	西北西
8	15.1	10.9	20.7	10.7	13.9	1.15	3.9	南西
9	20.6	10.6	19.6	10.5	15.2	1.67	4.5	北西
10	21.1	11.5	20.5	11.3	16.4	2.11	5.4	北北西
11	21.2	12.5	23.4	12.3	17.7	2.22	5.7	北北東
12	20.6	11.2	20.6	13.4	14.6	1.87	5.1	北西
13	19.2	13.4	23.5	12.9	15.7	1.88	5.3	北西
14	19.9	11.2	20.6	12.3	16.9	1.97	4.9	北北西
15	20.3	10.6	18.6	13.8	15.0	2.31	5.2	東北東
16	16.5	9.2	15.5	9.7	14.1	1.58	4.7	西北西
17	20.4	10.9	19.8	10.0	16.3	1.80	5.4	北北西
18	12.2	7.0	13.3	8.8	11.6	1.32	4.2	南南西
19	20.7	13.0	22.6	11.5	14.3	1.21	3.9	南南西
20	21.1	10.6	18.8	12.0	11.1	1.72	4.8	西北西
21	20.0	10.1	17.3	12.1	15.5	2.34	5.5	北北西
22	22.5	10.3	18.7	11.5	17.6	2.24	5.3	北北東
23	20.1	12.3	20.8	11.4	16.7	1.62	4.8	西南西

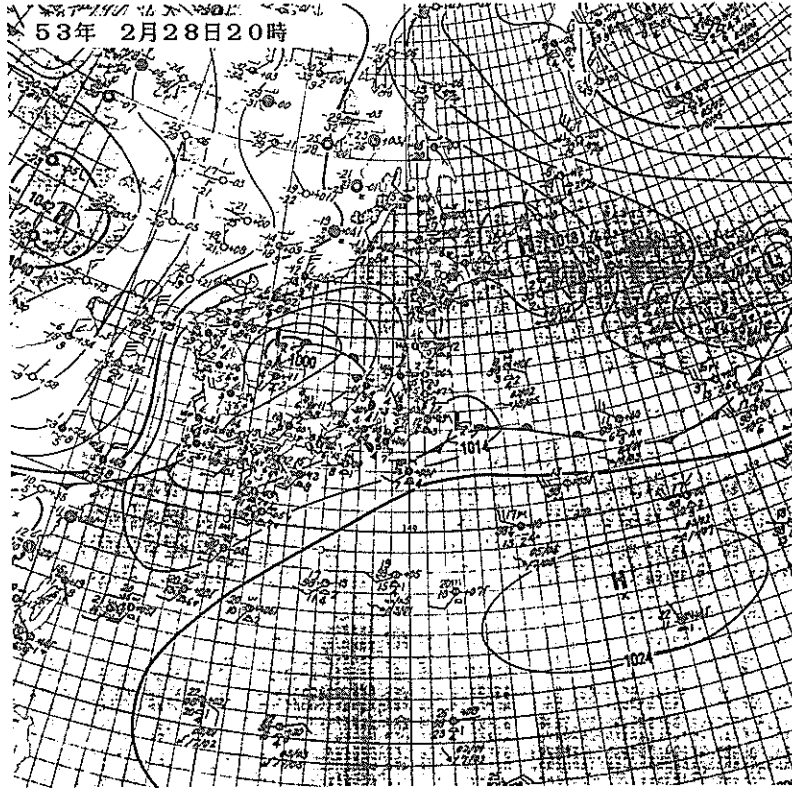


図-9 No. 1 の記録取得日の気象図

図-9に記録番号No. 1の風を取得した当日の気象図を示す。他の記録での気象図は、付録Aに示す。

また図-10に記録番号No. 1の風でMT局の超音波風速計で得られた3方向の風速データを示す。他の記録での主要な風速データを、付録Bに示す。

(2) 解析の項目

海上での風の性質を把握するため、以下に示す項目について解析を行う。

- ① 最大風速 (U_{max})、平均風速 (\bar{U})、ガストファクター (G)
- ② 自己相関関数 ($C(\tau)$)、乱れの強さ (σ)
- ③ パワースペクトル ($F_u(n)$)
- ④ 渦の平均的な大きさ (L)
- ⑤ 風向の分散性
- ⑥ 平均風速と高度との関係

①から⑤までの項目は、主にMT局に取付けられている超音波風速計で取得された風速データを中心に解析を行う。⑥の項目は、C局の観測塔に取付けられた4台の風車型風速風向計で取得された風速データを基に解析を行う。

4. 風速の時間的な変動

4.1 概要

風は、一定の風速で吹いておらず、その値は時々刻々と変化している。このように風の強さが変化する状態を「風が息をしている」と呼んでいる。この理由は、風が一樣に流れ乱れない層流状態ではなく、種々の大きさの渦から構成されている乱流状態であることを示している。海面付近の風が乱流状態である主原因は、おもに海面の摩擦による。風が乱流の性質を持つことから、風の性質を把握するため風速の時間的な変動性状を調べる必要がある。

4.2 平均風速とガストファクター^{8), 9)}

時間ごとに変動する風速に関して、ある時刻(t)での瞬間風速を $U_i(t)$ とする。平均風速 (\bar{U}) は、次式で得られる。

$$\bar{U} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} U_i(t) dt \quad (3)$$

風速の平均化時間 (T) は、有限の値で普通10分間を

78. 2. 28. 20. 00 MT局

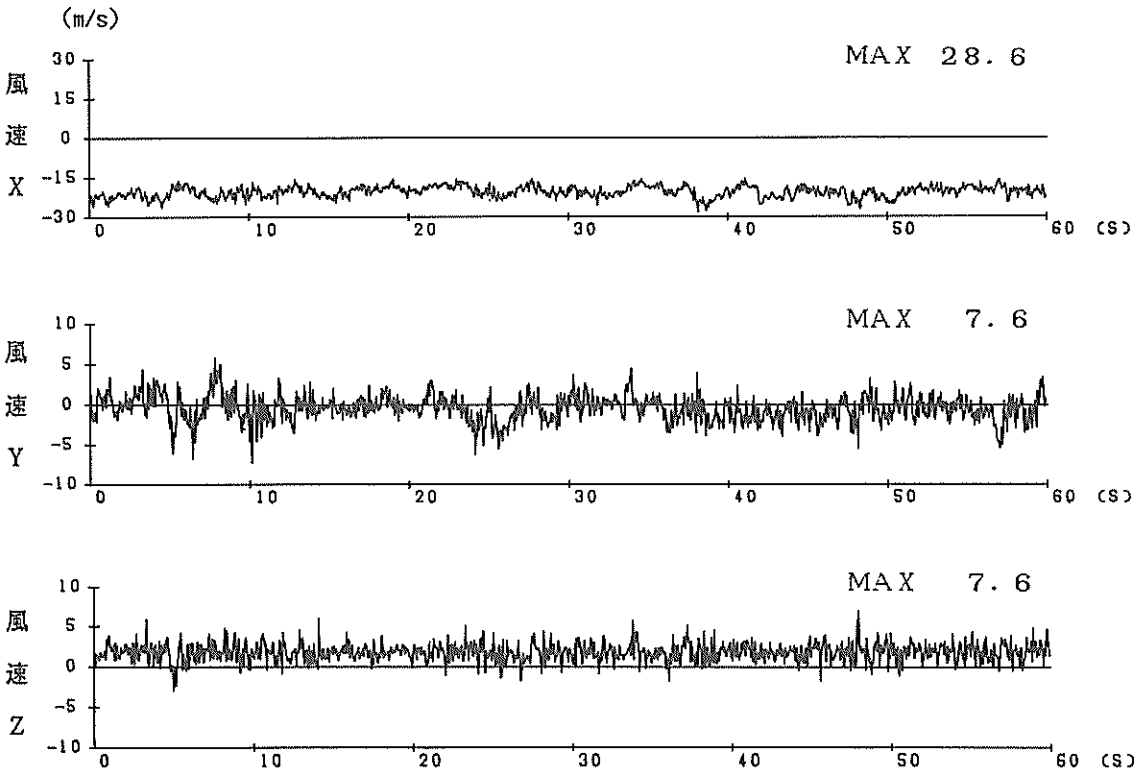


図-10 No.1の風の風速記録

設定する。この10分間で $U_i(t)$ の最大値を瞬間最大風速と定義する。ただし風速の記録の取得間隔は、0.1秒である。風速を示す標準高度は、地上10mである。海上のMT局の超音波風速計は、海面上15mの箇所に取付けられているが、本資料では、高さ10mの風速に修正していない。

ところで、10分間の評価時間での瞬間最大風速と平均風速との比は、ガストファクター（突風率）であり次式で与えられる。

$$\text{ガストファクター}(G) = [U_i(t)]_{\max} / \bar{U} \quad (4)$$

ガストファクターは、構造物に作用する風荷重の推定の際用いる。設計¹⁰⁾に際しては、風荷重を静的荷重と第一義的に考えている。すなわち、風荷重(F)を次式で求める。

$$F = \frac{1}{2} C \rho U^2 S \quad (5)$$

ここで、 ρ ：空気密度、 C ：抗力係数、 U ：風速、

S ：構造物の風を受ける投影面積である。

風速(U)は、対象とする構造物の設置位置での瞬間最

大風速である。ガストファクターは、平均風速、高度、風速の評価時間及び海面（あるいは地表面）の粗度等の影響を受ける。一般的には、平均風速が小さいほど、高度が低いほど、粗度が大きいほど、ガストファクターの値は大きくなるとされている。

図-11及び図-12に今回の観測で得られたガストファ

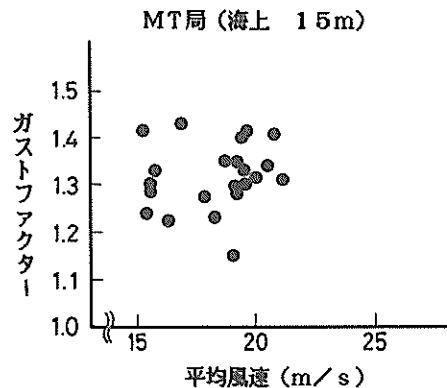


図-11 ガストファクターと平均風速との関係 (MT局)

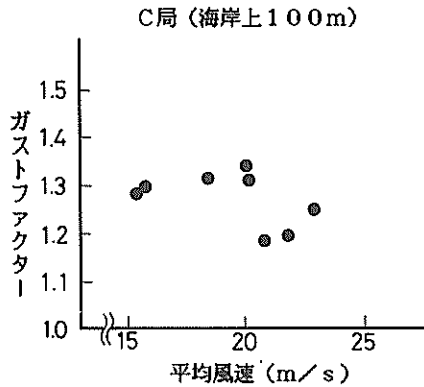


図-12 ガストファクターと平均風速との関係(C局)

クターと平均風速との関係を示す。図-11は、MT局での、図-12はC局での超音波風速計でのおの得られた風速の記録より作成したガストファクターである。平均風速が、13~21 m/sの範囲で、MT局でのガストファクターは1.2~1.4であった。またC局でのガストファクターは、MT局よりも若干値が小さく、かつ風速に対するばらつきも小さいと言える。

4.3 風速の乱れの強さ

風速の変動成分 (u, v, w) は、ある指定した時刻での風速 (U_x, U_y, U_w) から平均風速 ($\bar{U}_x, \bar{U}_y, \bar{U}_w$) をひいた値である。

$$(u, v, w) = (U_x, U_y, U_w) - (\bar{U}_x, \bar{U}_y, \bar{U}_w) \quad (6)$$

変動成分の自乗和の平均は、標準偏差(分散 σ)であり、次式で与えられる。

$$\sigma = \sqrt{\bar{u}_i^2 / N} \quad (7)$$

ここで u_i は変動成分 (u, v, w)、 N はデータ数である。標準偏差は、風速の乱れの強さを示す一指標である。本資料では、標準偏差と平均風速との比を乱れの強さと定める。図-13にMT局での乱れの強さと平均風速との関係を示す。主流方向の乱れの強さは、0.08から0.14の範囲であり平均的には、0.10程度である。

また、同図に上下方向の乱れの強さ (σ_w) も合わせて示してある。上下方向の乱れの強さは、水平方向の乱れの強さの約半分である。強い風の際の乱れが、等方性乱流 ($\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w$) でないことを示している。乱れの強さは、海面(あるいは地表面)の状況と密接な関係がある。

Chounihan¹⁾ は、地表面の状況と乱れの強さとのおよその関係を表-8に示すように設定した。今回の観測結果での乱れの強さは、Chounihanの示す分類の滑面及びやや粗面に相当している。また乱れの強さは、海面での摩擦速度 (U_*) との間に次に示す関係が成立するとされている。

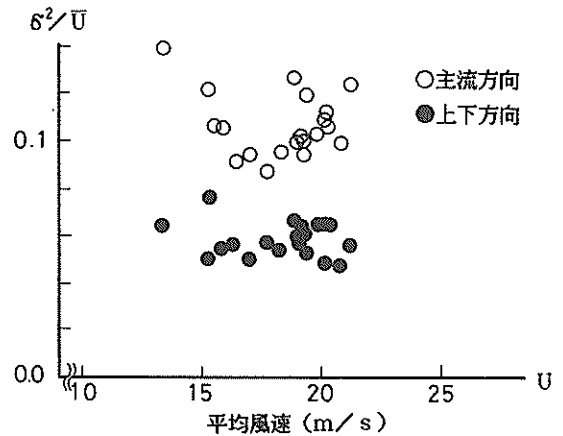


図-13 乱れの強さと平均風速との関係

表-8 Chounihan の分類

表面の状況	滑面	やや粗面	粗面	非常に粗面
σ / U	0.10~ 0.12	0.13~ 0.20	約0.2程度	0.30~ 0.48

$$\sigma = A U_* \quad (8)$$

ここで A は係数である。一方大気と海面との境界面での摩擦力 (τ) は、次式で得られる。

$$\tau = \rho U_*^2 = \rho K \bar{U}^2 \quad (9)$$

ここで K は表面摩擦係数、 ρ は空気の密度である。式(8)及び式(9)より次式が得られる。

$$\sigma = A \sqrt{K} \bar{U} \quad (10)$$

Davenport¹¹⁾ は、 A の値を $\sqrt{6}$ と設定した。すなわち

$$\sigma^2 = 6 K \bar{U}^2 \quad (11)$$

である。乱れの強さが、0.08から0.14の範囲での表面摩擦係数 (K) は、式(11)を用いると、0.001から0.003の範囲となる。また、この平均値は、0.002である。ただし陸風の方が海風より若干表面摩擦係数の値が大きい。表-9にDavenportによって得られた海面(地表面)の状況と表面摩擦係数との関係を示す。今回の観測結果から得られた表面摩擦係数は、波面の立つ開けた水上に相当している。兵庫県垂水の海岸での小野田らによる風速の観測結果¹²⁾によると、海風に対して表面摩擦係数は、

表-9 Davenport による表面摩擦係数

表面の状況	表面摩擦係数
波面の立つ開けた水上	0.001 ~ 0.002
開けた草原	0.003 ~ 0.005
樹林, 森林, かん木地帯	0.015 ~ 0.03
都市の市街化地区	0.03 ~ 0.05

0.002 から 0.003 の範囲であった。また徳島県那賀川での塩谷ら^{13),14)}によると、同じく海風に対して 0.002 弱という観測結果が得られている。今回の観測結果から得られた表面摩擦係数の値は、垂水及び那賀川で得られた値とほぼ同程度と言える。

4.4 風速のパワースペクトル

(1) パワースペクトルの概要^{15),16)}

風速の変動成分は、種々の大きさを持つ乱流渦の集合として捕えることができる。風の場合は、直径が数 mm の渦から大気大循環のじょう乱に含まれる数千 km の渦まで存在する。乱流においては、一般的に大きな渦は、平均流からエネルギーを吸収し、自らこのエネルギーを消費することなく小さな渦へエネルギーを伝播する。小さな渦では、空気の粘性によりエネルギーを熱に変換する。大気中では大規模な運動は長続きせず、小さな渦でエネルギーを吸収することになる。乱流中の風速の変動成分の自乗和の平均 (σ) は、前述した通り風速の持つ強さ (パワー) を表す。変動成分は、種々の周波数 (n) と振幅 (a) とを持つ多数の正弦波形の合成したものと仮定できる。個々の正弦波のパワーに寄与する割合を示す指標にパワースペクトル ($F_u(n)$) がある。パワースペクトルを計算することにより、どの周波数の成分を持つ正弦波が大きなパワーを持つか知ることができる。風の変動成分には、数 Hz から 10^{-6} Hz 程度までの振動数の存在が各研究者によって確認されている。ただし構造物の動揺に工学的に影響を及ぼす振動数は、数 Hz から 10^{-2} Hz 程度までと考えて良い。図-14 にパワースペクトルと乱流の状態の大よその状況を示す。レイノルズ数が大きく慣性項の支配的な慣性領域 (レイノルズ数 $> 10^5$) では、パワースペクトルは周波数の $^{-5/3}$ 乗に比例することが Kolmogorov によって理論的に求められている。また粘性項が支配的で、粘性によって乱れのエネルギーが熱に逸散する高振動数領域 (エネルギー逸散部) では、Heisenberg が、パワースペクトルは振動数の -7 乗に

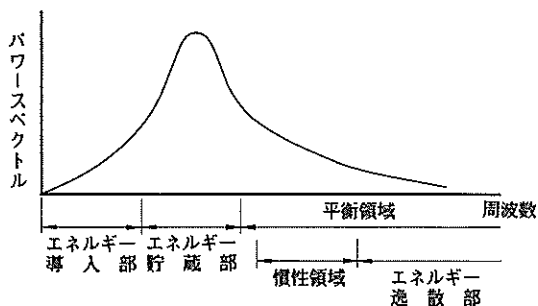


図-14 パワースペクトルの状態

比例することを導いた。一方低い振動数の領域である、エネルギー導入部やエネルギー貯蔵部でのパワースペクトルの理論的な誘導は困難である。これらの振動数の領域では、多数の研究者の実験や観測によって得られた結果をもとに何種類かの経験式が提案されている。風の代表的なパワースペクトルとして、Davenport¹¹⁾と日野¹⁷⁾の提案式がある。これらのパワースペクトルは、橋梁、給水塔等の構造物の耐風性の検討に広く用いられている。ところで、風のパワースペクトルは、対数パワースペクトルとして表示されるのが一般的である。

$$\sigma = \int_{n_1}^{n_2} F_u(n) dn = \int_{l_{n_1}}^{l_{n_2}} \frac{1}{l_n} F_u(n) d(l_n) \quad (2)$$

対数パワースペクトルにより広範囲の振動数でのパワーの分配の割合が理解できる。

(2) 提案されているパワースペクトルの式

① Davenport のパワースペクトル

$$\frac{n F_u(n)}{U_{10}^2} = 4 K \frac{X^2}{(1+X^2)^{4/3}} \quad (3)$$

ここで $X = 1,200 n/U_{10}$

U_{10} : 基準高度 (10 m) における平均風速 (m/s)

K : U_{10} を用いて定義した表面摩擦係数

Davenport は、米国、英国、豪州で測定した風速の観測記録を整理して、上式を提案した。このパワースペクトルの値は、振動数が高い領域で $n^{-5/3}$ 、低い領域で n に比例する。Davenport の提案式は、対象としている地点で、平均風速と表面摩擦係数を与えれば、所定のパワースペクトルを得られる。Davenport の提案式は、高度の影響が入らないという問題点がある。また振動数が低い領域ではパワースペクトルの値が、 n に比例するよりも一定値と設定した方が実測結果をうまく説明できることが指摘されている。

② 日野のパワースペクトル

$$F_u(n) = 0.476 \frac{\sigma^2}{\beta} \left\{ 1 + \left(\frac{n}{\beta} \right)^2 \right\}^{-5/6} \quad (4)$$

ここに $\beta = 1.169 \times 10^{-3} \times \frac{U_{10}^\alpha}{\sqrt{K_\tau}} \left(\frac{z}{10} \right)^{2m\alpha-1}$

z : 高度 (m)

α : 平均風速の鉛直分布のべき指数

m : 気層の安定度を示す修正係数

日野のパワースペクトルは、Davenport の提案式での問題点を改良している。すなわち、低い振動数領域でのパワースペクトルの値を一定値と設定し、かつ高度が高くなるにつれパワースペクトルの値が減少する現象を加味している。この観点からは日野の提案式は、Davenport の提案式より合理的である。しかし強風時の実測データ

の集積が乏しいこと、風速の測定精度の問題があること等により、いずれの提案式を用いるのが妥当であるかは現在明確にされていない。

(3) 実測データでのパワースペクトル^{18), 19)}

風速の変動成分の時系列データからパワースペクトルを求める方法として、Blackman Tukey 法、高速フーリエ交換法 (FFT)、MEM 法等がある。本資料では、Blackman Tukey 法²⁰⁾を用いて風速のパワースペクトルを得る。

パワースペクトル ($F_x(n)$) と自己相関関数 ($C(\tau)$) とは、Wiener-Khinchine の公式で結びついている。すなわち両者が、互いにフーリエ変換の関係があり、一方を求めれば他方も次式により求めることができる。

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(n) e^{i 2\pi n \tau} dn \quad (15)$$

$$F_x(n) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-i 2\pi n \tau} d\tau$$

ただし $\sigma = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(n) dn$ である。

自己相関関数は、次式で求まる。

$$C(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} U_i(t) \cdot U_{i+\tau}(t+\tau) \quad (16)$$

ここで N : 時系列データの個数

τ : 時間遅れ

τ : τ 時間内での時系列データの個数

超音波風速計で取得された一回の観測での風速の時系列データの時間間隔は、0.1 秒、サンプリング個数は、6,000 個である。この時系データから自己相関関数 ($C(\tau)$) を求め COSINE 変換で所定のパワースペクトルを得る。

最大の時間遅れは、60 秒と設定する。したがって振動数 0 Hz から 5 Hz までの範囲で 0.0083 Hz の間隔のパワースペクトルを得ることができる。

表-10 に各記録番号での風速の解析結果の一覧を示す。

図-15 に記録番号 No.1 でのパワースペクトル (対数表示) と自己相関関数とを示す。同じく図-16 に記録番号 No.2 での場合を示す。両図でのパワースペクトルは、MT 局で取得された風速データより求めた。記録番号 No.1 と No.2 はともに西風であるので、E-W 成分が主流方向、N-S 成分が主流直交方向となる。パワースペクトルの最大値は、E-W 成分の方が N-S 成分よりも大きい。また卓越している振動数は、0.03 Hz と低い。また主流方向に対して Davenport と日野のパワースペクトルを図-15 及び図-16 に併せて示す。観

測された風速から得られたパワースペクトルの値及び形状は、両提案式と大きく異なっていない。同図に示す日野のパワースペクトルでは、0.025 Hz 付近に最大値がある。一方 Davenport のスペクトルでは、0.06 Hz 付近に最大値があり、日野のパワースペクトルより最大値を与える振動数が高い。観測された風速記録でのパワースペクトルでの最大値を与える振動数は、日野のパワースペクトルでの振動数とほぼ一致している。低い振動数領域では、日野のパワースペクトルの方が観測された風速記録でのパワースペクトルと対応が良いと言える。

上下方向のパワースペクトルは、主流方向のパワースペクトルと比較して、0.3 Hz から 0.8 Hz 位の高い振動数領域に最大値がある。またパワースペクトルの最大値は、主流方向よりもかなり小さい。

また各成分での自己相関係数を図-15 及び図-16 に併せて示す。風速の変動は、時間差 (τ) が大きくなると相関性が低くなる。自己相関係数の形状は、自己回帰過程 (あるいは一次のマルコフ過程) の場合での自己相関係数の形状と類似している。すなわち風速の変動成分では、微小な時間差のとき前の性質をある程度保有し、かつ白色雑音的な性質があると言える。上下方向の自己相関係数は、時間差が 2 秒を超えるとほとんど 0 となる。上下方向は主流方向と比較してより白色雑音的な性質が強い。また自己相関係数の分布形から乱流の渦の平均的な大きさを推定できる。詳細は次章に示す。

5. 風速の空間的な性質^{21~23)}

5.1 概要

風速は、時間ごとに変動するとともに場所ごとにも異なっている。立体的に考えれば、風速は一般的に高度とともに大きくなり、かつ平面的にも異なった風速となる。大規模な橋梁や浮遊式石油備蓄施設等のように、鉛直方向あるいは水平方向 (両方向の場合も存在する) に広がりを持つ構造物では、一点よりも多点での風速をもとに風に対する応答を検討する方が合理的である。本資料では、風速の空間的な基本的な性質を把握する目的で、風速の乱れの大きさ、風速の方向分散及び風速の鉛直方向の分布について整理を行った。

5.2 風速の乱れの大きさ

前述したように風は、多数の渦から構成されている乱流として捕えることができる。乱流の性質を表示するのに乱流の大きさ、すなわち乱れの大きさがある。渦の中の二点間の相関が大きいほど渦の平均的な大きさは、大きいと言える。

また乱流の場においては、渦が自分で形を変えること

表-10 超音波風速計での風速の解析

記録 番号	成分	最大瞬間 風速	平均風速	σ	σ / \bar{U}	パワースペクトル の最大値	最大値を与 える振動数	乱れの 大きさ①	乱れの 大きさ②
		m/s	m/s				Hz	m	m
1	EW	27.6	20.5	2.05	0.100	38.3	0.0333	57	89
	NS	6.2	0.5	1.60	0.078	11.2	0.1	25	25
	UD	5.2	1.7	1.03	0.050	1.1	0.683	8	8
2	EW	20.2	16.4	1.50	0.091	28.1	0.0333	56	71
	NS	10.2	6.2	1.24	0.076	13.6	0.0333	26	52
	UD	5.0	1.3	0.95	0.058	1.2	0.6330	10	3
3	EW	9.4	4.6	1.61	0.095	17.9	0.0333	17	54
	NS	24.1	16.9	1.70	0.101	31.5	0.0333	57	73
	UD	4.4	0.9	0.86	0.051	0.8	0.8670	9	2
4	EW	15.0	10.6	1.58	0.120	26.3	0.0333	11	42
	NS	21.0	13.2	1.90	0.144	42.7	0.0333	5	57
	UD	6.0	1.0	0.87	0.066	1.0	0.6670	8	2
5	EW	26.8	20.8	2.28	0.110	61.6	0.0333	75	90
	NS	8.4	2.3	1.56	0.075	15.2	0.0333	21	66
	UD	6.5	1.1	1.20	0.058	2.7	0.6667	10	3
6	EW	22.4	18.2	1.74	0.096	40.7	0.0333	102	78
	NS	9.4	4.2	1.85	0.102	61.7	0.0333	237	58
	UD	4.8	0.9	1.02	0.056	1.6	0.1960	15	10
7	EW	7.2	2.9	1.55	0.098	17.1	0.0333	9	50
	NS	21.0	15.8	1.67	0.106	30.6	0.0333	38	68
	UD	4.5	0.4	0.90	0.057	0.8	0.8333	8	2
8	EW	26.7	6.7	1.03	0.067	6.3	0.3000	6	5
	NS	19.0	15.3	1.26	0.082	19.6	0.0333	37	67
	UD	4.2	0.5	0.78	0.051	0.4	0.8330	8	2
9	EW	24.8	19.1	1.83	0.096	35.2	0.0333	69	84
	NS	6.8	1.4	1.50	0.079	21.9	0.0333	27	61
	UD	6.4	1.4	1.12	0.059	1.2	0.2833	11	7
10	EW	27.4	19.4	2.34	0.121	84.7	0.0333	182	85
	NS	7.9	0.1	1.58	0.081	23.2	0.0333	35	62
	UD	5.2	1.4	1.07	0.055	1.3	0.4500	14	5
11	EW	27.7	19.6	2.02	0.103	48.6	0.0333	71	86
	NS	7.0	0.1	1.77	0.090	22.4	0.0333	27	62
	UD	6.1	1.5	1.31	0.067	2.5	0.5667	12	4
12	EW	25.0	19.4	1.97	0.102	47.2	0.0333	81	85
	NS	8.3	0.4	1.91	0.098	43.3	0.0333	93	61
	UD	7.4	1.5	1.19	0.061	1.7	0.3167	12	6

記号 番号	成分	最大瞬間 風速 m/s	平均風速 m/s	σ	σ/\bar{U}	パワースペクトル の最大値	最大値を与 える振動数 Hz	乱れの 大きさ① m	乱れの 大きさ② m
13	EW	22.6	17.8	1.56	0.088	21.7	0.0333	53	77
	NS	11.2	5.3	1.96	0.110	62.1	0.0333	263	57
	UD	5.8	1.3	1.05	0.059	1.5	0.3500	11	5
14	EW	24.5	19.1	1.92	0.101	47.2	0.0333	107	83
	NS	7.7	0.4	1.92	0.101	64.0	0.0333	175	61
	UD	6.5	1.5	1.13	0.059	1.5	0.3530	11	6
15	EW	26.0	19.4	1.98	0.102	42.8	0.0333	74	85
	NS	10.8	4.0	2.13	0.110	60.9	0.0333	147	62
	UD	6.9	1.4	1.23	0.063	2.7	0.5833	12	4
16	EW	20.1	15.6	1.68	0.108	43.3	0.0333	137	69
	NS	7.2	1.5	1.75	0.112	59.8	0.0333	—	—
	UD	5.2	1.3	0.95	0.061	2.5	0.5330	11	3
17	EW	26.6	20.1	2.13	0.106	43.3	0.0333	76	88
	NS	9.9	3.3	1.89	0.094	33.0	0.0333	44	64
	UD	6.4	1.5	1.32	0.066	2.2	0.7373	14	3
18	EW	29.3	20.8	2.24	0.108	33.3	0.0500	62	91
	NS	10.1	3.2	1.67	0.080	6.2	0.3667	17	66
	UD	7.2	1.7	1.34	0.064	1.5	0.2667	12	3
19	EW	13.3	6.5	2.36	0.122	47.3	0.0333	58	61
	NS	29.5	19.4	2.70	0.139	114.6	0.0333	147	85
	UD	6.0	1.0	1.11	0.057	1.5	0.8660	10	2
20	EW	11.5	5.9	1.87	0.097	21.4	0.0333	19	61
	NS	25.8	19.2	2.35	0.122	71.6	0.0333	115	84
	UD	5.2	1.1	1.06	0.055	1.2	0.7500	10	3
21	EW	25.4	18.8	2.40	0.128	40.6	0.0333	113	82
	NS	12.2	6.3	1.99	0.106	32.2	0.0333	56	60
	UD	7.2	1.8	1.27	0.068	3.2	0.3667	11	5
22	EW	27.8	21.2	2.68	0.126	130.0	0.0333	23.7	93
	NS	16.3	7.3	2.72	0.128	81.3	0.0333	—	67
	UD	7.7	2.0	1.23	0.058	3.9	0.6333	13	4
23	EW	21.4	15.2	1.89	0.124	33.9	0.0333	40	67
	NS	15.9	10.9	1.46	0.096	14.3	0.0333	27	48
	UD	—	2.0	5.00	0.078	1.9	0.2167	9	7

78/ 2/28 20.00-4

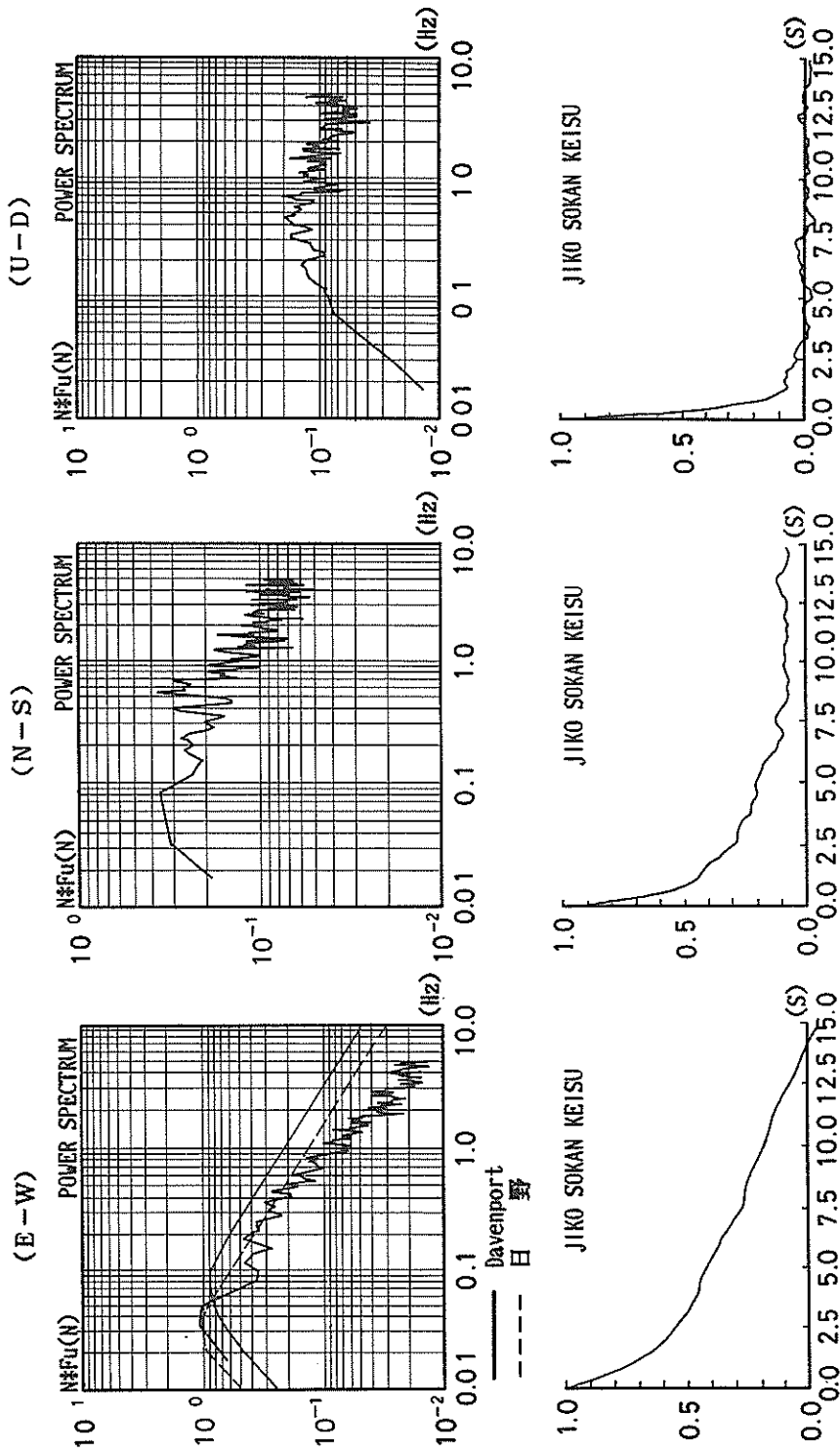


図-15 No.1の風でのパワースペクトルと自己相関係数

79/ 1/18 14.00-4

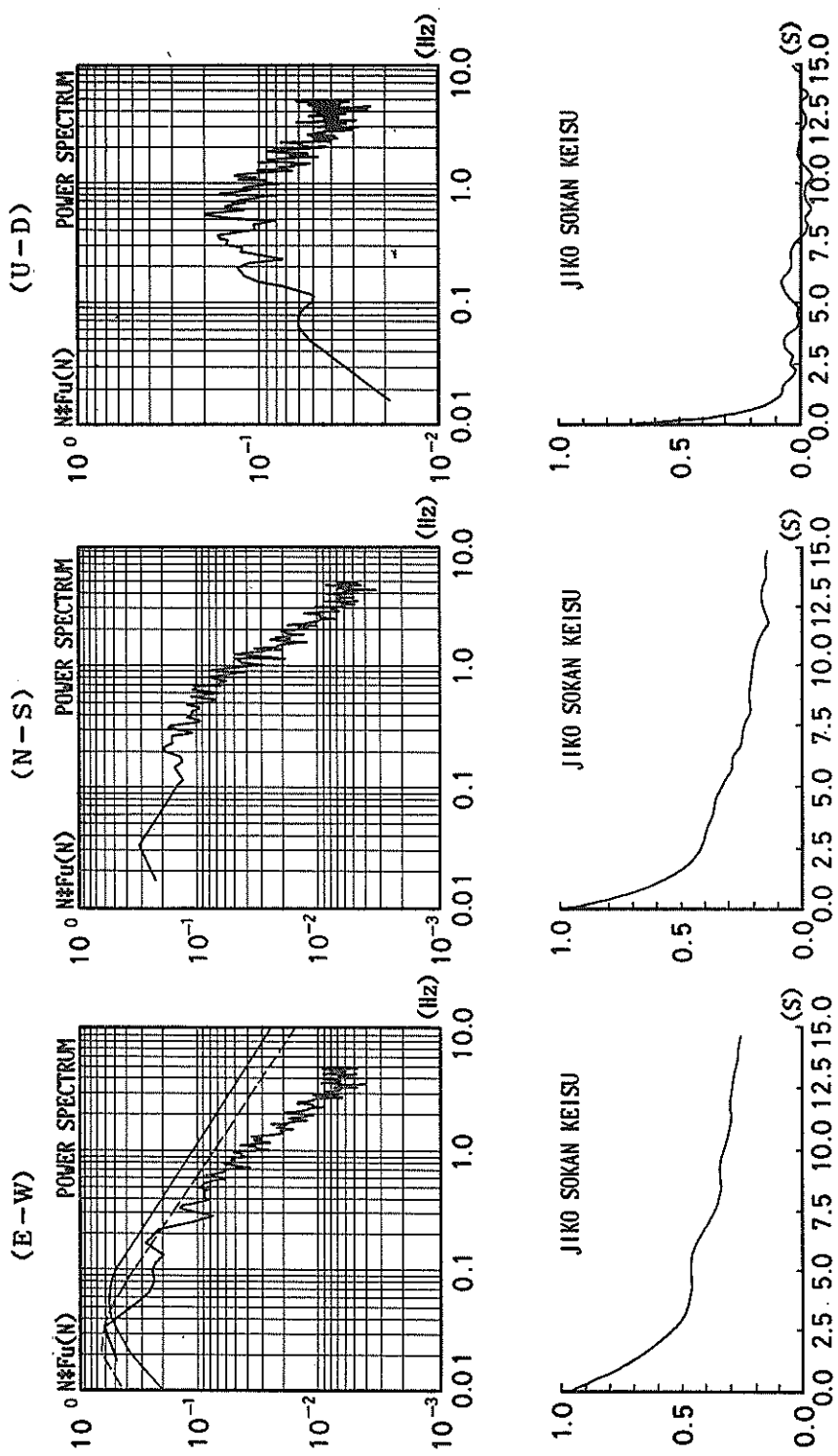


図-16 No. 2 の風でのパワースペクトルと自己相関係数

なく運搬されるとみなせる時間及び空間の範囲内では、 $\partial/\partial t = -\bar{U}(\partial/\partial x)$ の変換が許される。これを Taylor の乱れの凍結に関する仮説と呼ばれている。この仮説は、平均流の速度 (\bar{U}) と比較して変動成分が小さい場合に成立する。渦の平均的な大きさ (L) 及び時間スケール (T) は、自己相関係数 (R) を用いて次式で得られる。

$$L = \int_0^{\infty} R(r) dr \quad (17)$$

$$T = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau \quad (18)$$

平均流方向の空間スケール (渦の平均的な大きさ) と時間スケールとは $r = \bar{U}\tau$ で示される Taylor の仮説より次式で関係づけられる。

$$L = \int_0^{\infty} R(r) dr = \int_0^{\infty} R(\tau) d(U\tau) = \bar{U}T \quad (19)$$

すなわち、風の渦の平均的な大きさが、平均風速と変動成分の自己相関係数とから計算できる。ただし、自己相関係数では、 τ の大きい所で $C(\tau)$ が必ずしも 0 に収束しない場合があり、積分に正確さが欠ける。そこで、Panofsky¹⁾ は、自己相関係数が 0.6 となる時間差 (τ_c) を用いて、 $L = 2\tau_c\bar{U}$ より渦の平均的な大きさを求めている。本資料でも Panofsky の示す方法によって求める。

また主流直交方向及び鉛直方向の渦の平均的な大きさを式 (19) を用いて同様に得ることができる。

渦の平均的な大きさは、自己相関係数による方法の他に、風のパワースペクトルからも求めることができる。

式 (14) で示した日野のパワースペクトルと同型である次式のパワースペクトル²⁴⁾ から渦の平均的な大きさを本資料では用いる。

$$F(x) = \frac{NF_u(n)}{\sigma^2} = 0.476 \frac{X}{(1+X^2)^{3/2}} \quad (20)$$

ここで $X = L_e n / \bar{U}$ で L_e はスケール長さを示す。式 (20) の最大値は、 $F'(x) = 0$ すなわち $X = 1.224$ のとき 0.272 である。パワースペクトルと自己相関関数の関係は、式 (19) で示した Wiener Khintchine 公式で結びついている。

そこで $F_u(0)$ を自己相関係数より求めると次式を得る。

$$F_u(0) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) dt = 2\sigma^2 \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau \quad (21)$$

また式 (20) で $F_u(0)$ を求めると次式を得る。

$$F_u(0) = \frac{2\sigma^2 L_e}{\bar{U}} \quad (22)$$

式 (20)、式 (21) 及び $L = \bar{U} \int_0^{\infty} R(\tau) dt$ の関係より、渦の平均的な大きさは次式で求まる。

$$L = 0.118 L_e \quad (23)$$

対数パワースペクトルの最大値を与える $X = L_e n_{\max} / \bar{U}$

の値より L は最終的に次式で求まる。

$$L = 0.144 \frac{\bar{U}}{n_{\max}} \quad (24)$$

すなわち、平均風速と対数パワースペクトルの最大値を与える振動数 (n_{\max}) を知れば、渦の平均的な大きさが得られる。同様に主流直交方向及び鉛直方向の渦の平均的な大きさが得られる。

すなわち

$$\text{主流直交方向} \quad L = 0.106 \frac{\bar{U}}{n_{\max}} \quad (25)$$

$$\text{鉛直方向} \quad L = 0.106 \frac{\bar{U}}{n_{\max}} \quad (26)$$

上式の n_{\max} は、おのおのの方向の対数パワースペクトルの最大値を与える振動数である。このような手順で、パワースペクトルより風の渦の平均的な大きさが得られる。しかし、 n_{\max} を求める際の誤差を考えると、自己相関係数による場合と同様に風の渦の平均的な大きさの算定にも正確さが欠けている。

いずれの方法によっても渦の平均的な大きさは正確に求まらないので、現状では風の乱れの大きさのおおよその目安と考えておくのが、良いであろう。本資料では、上記の二方法を用いて風の渦の平均的な大きさ 10 分間での風速の変動成分を基に計算する。

前述した表-10 に各記録の成分ごとの渦の平均的な大きさを示す。自己相関係数の方法とパワースペクトルの方法とでは、渦の平均的な大きさの値は、必ずしも良い一致を示してはいない。しかし、全般的に主流方向の渦の平均的な大きさは、数十 m から二百数十 m の範囲であり、主流直交方向の大きさは、おおよそ主流方向の大きさの半分程度である。また鉛直方向の渦の平均的な大きさは、ほぼ 10 m 以下と言える。この計算結果から、本資料に示す風の渦のおおよその形状は、水平面内では主流方向に細長いだ円形をしていると推定できる。またこのだ円形の鉛直方向の厚さは、ほぼ 10 m 以下である。

5.3 風速の方向分散

風の吹いてくる方向が、10 分間にどの程度変化するかを調べる。吹いてくる方向の範囲を示す指標に方向分散がある。風のパワースペクトル (F_u) は、振動数 (n) と方向 (θ) との関数とで表示さる。いま F_u を振動数と方向との項に次式に示すように分離できると仮定する。

$$\left. \begin{aligned} F_u(n, \theta) &= F_u(n) \cdot h(\theta) \\ \int_{-\pi}^{\pi} h(\theta) d\theta &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここで $h(\theta)$ は方向分散を示す。方向分散は、評価時間、風の種類、高度、周辺の状況等の影響を受ける。例

えば、台風の場合には、台風の移動に従い、ある一地点の風向は、時々刻々に変化する。一方冬季の季節風の場合には、ほぼ一定の方向から風が吹いてくる。本資料では、長期間での方向分散は考えず、10分間の評価時間内での方向分散を調べることにする。風速の実測記録は、三成分の超音波風速計を用いて取得されている。三成分のうち東西成分と南北成分とで得られる風速の時系列データでベクトル合成を行い、風向の広がりや強さを求める。すなわち東西方向の風速の成分を U_{EW} 、南方方向の風速の成分を U_{NS} とすると、その強さは $\sqrt{U_{EW}^2 + U_{NS}^2}$ で、方向は $\theta = \tan^{-1}(U_{NS}/U_{EW})$ で求まる。0.1秒ごとに強さと方向とを計算し、1度きざみの各方向ごとに強さを累積して方向分散とする。この手順で得られた方向分散を図-17に示す。図に示すとおり、10分間の評価時間内での方向の分散性は少く、主流方向の軸に関して、±5度以内に大半の風が入ってくる。開けた海面での方向分散性は小さいと言える。

5.4 風速の鉛直分布^{25~27)}

(1) 概要

海面付近の風は、海面の摩擦の影響により高さに応じて風の性質が異なる。一般的には、海面付近の風速よりも、高い地点での風速の方が大きい。風速の高度による変化の状況を風速の鉛直分布と言う。この風速の鉛直分布を示す関係法則として、対数法則とべき法則とがある。

対数法則

$$U = \frac{U_*}{k} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (25)$$

ここで k : Karman 定数 (= 0.4)

Z_0 : 粗度長 (滑らかな海面で $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ m 程度)

Z : 高度

U_* : 海面における摩擦速度

べき法則

$$\frac{U}{U_{10}} = \left(\frac{Z}{Z_{10}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (26)$$

U_{10} : 基準高度 ($Z_{10} = 10$ m) における風速

n : 定数

境界層の下部では、風速の鉛直分布は理論的に対数法則で表示できる。べき法則は対数法則より理論的な背景に乏しい。しかしながら、構造物の耐風設計では、我が国を含め世界各国で、べき法則の方が良く利用されている。この背景としては、べき法則の式が簡明であるとともに、実測された風速の鉛直分布が、べき法則と対数法則の鉛直分布とで有意な差がないことを挙げることができる。本資料でも、べき法則を用いて風速の鉛直分布を

調べる。

べき法則での定数 (n) は、海面 (あるいは地表面) の粗度に支配されるが、一般的に海面の粗度が小さいほど n の値は大きくなる。周辺の状況と n の値とのおおよその関係を表-11に示す。

表-11 表面の状況と n とのおおよその関係

表面の状況	n
非常に滑らかな面 静かな海面	10 程度
平野、草原	7 程度
森林、高い建物のない市街地	4
大都市の郊外周辺	3
大都市の中心付近	2

(2) 観測結果

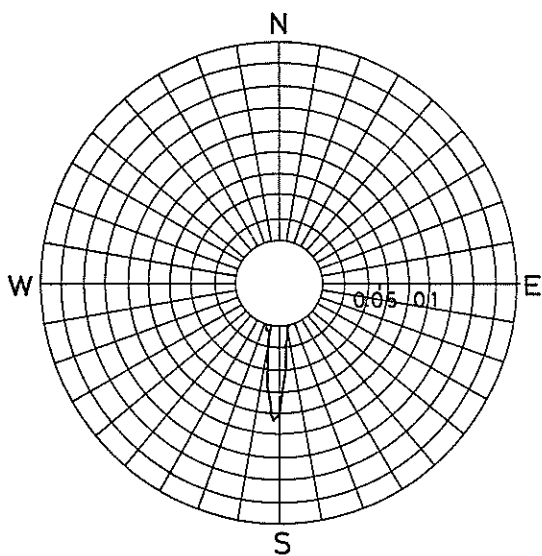
風速の鉛直分布は、前述したO局での100mの高さを持つ観測塔に設置された風車型風速風向計によって得られた平均風速を基に作成する。風車型風速風向計は、地上より10m、20m、40m及び100mの高さに設置されている。したがって100mまでの高さでの平均風速の鉛直分布が得られる。この風速の鉛直分布から、べき法則での定数 (n) を求めることになる。

図-18に今回観測された風速の鉛直分布を示す。べき法則での定数 (n) の値は、5から6の範囲であった。また定数の値は、海風と陸風とで大きな差はなく、ほぼ同一であった。表-11に示す表面の状況では、ほぼ広げた平野、草原とに対応している。これは、海面での波の影響 (有義波高で1.2mから2.7mの範囲) によると考えられる。強い風が吹けば、海面の波の波高も高くなり、表面の粗度も波高の増大に伴って大きくなると言える。

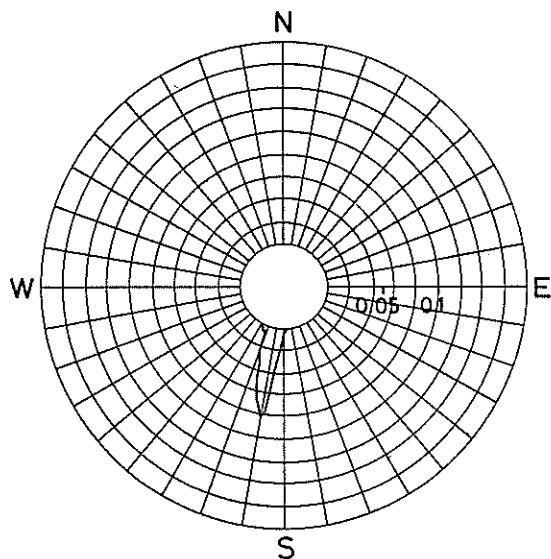
また前述した兵庫県垂水及び徳島県那賀川の両岸での風の観測でも風速の鉛直分布が得られている。

垂水では、地上より80mまでのべき指数の定数として海風で5.7 (20個の記録の平均)、陸風で5.4 (2個の記録の平均) であった。また那賀川では、地上より150mまでで、海風で6.1 (12個の記録の平均)、陸風で6.1 (12個の記録の平均) であった。

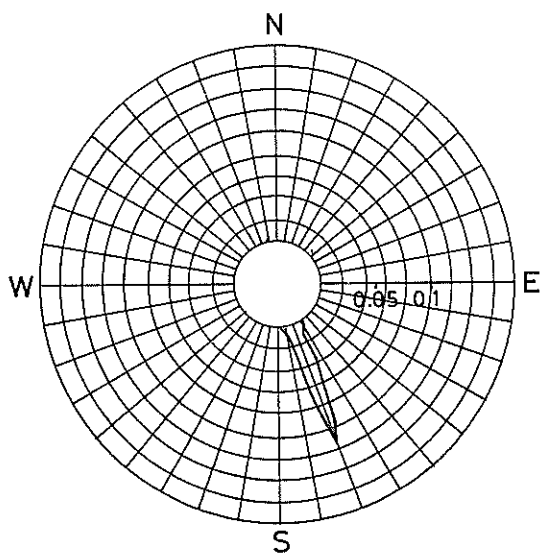
O局でのべき指数の定数は、垂水と那賀川での定数とほぼ同一の値であったと言える。



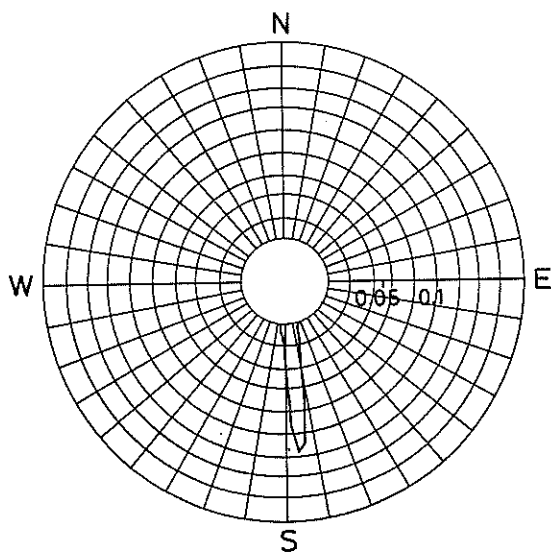
78/ 2/28 20.00-4



78/ 2/28 20.00-3



79/ 1/18 14.00-4



79/ 1/18 14.00-3

圖-17 方向分散

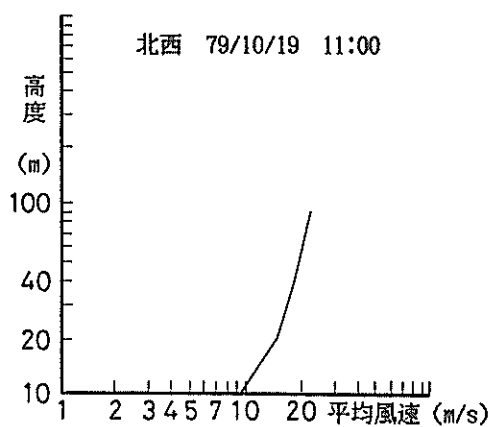
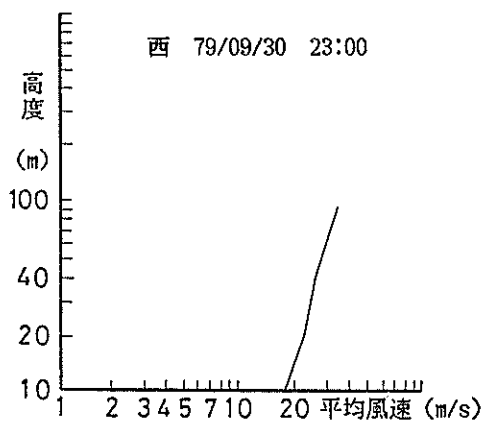
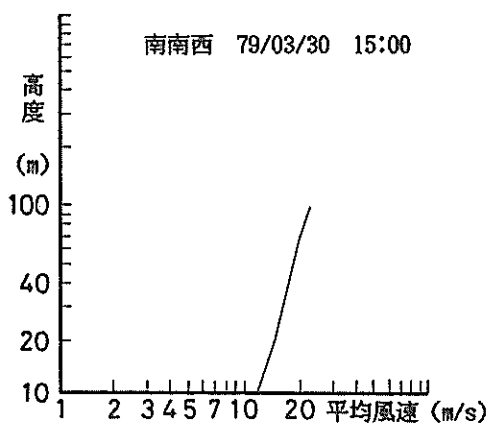
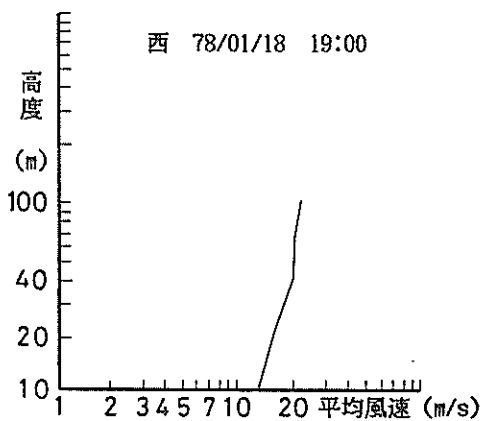
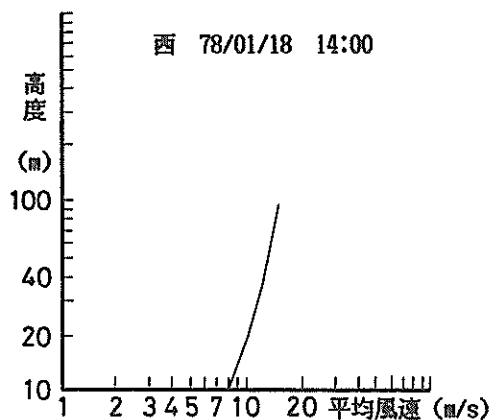
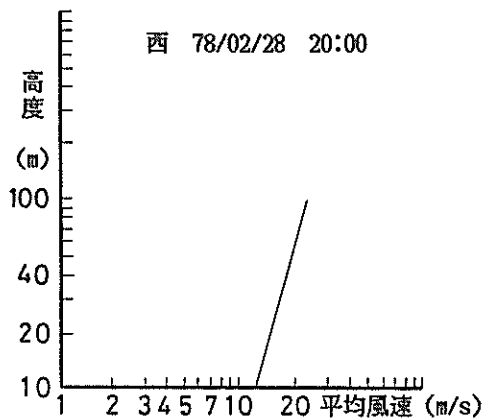


図-18 風速の鉛直分布 (その1)

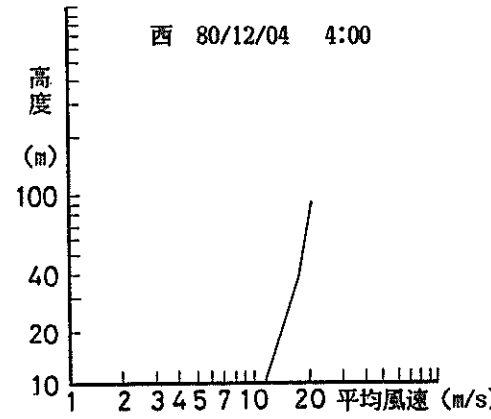
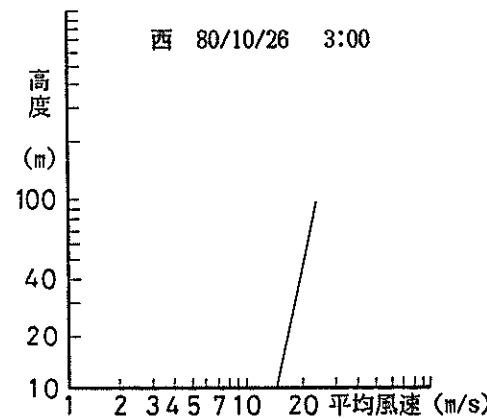
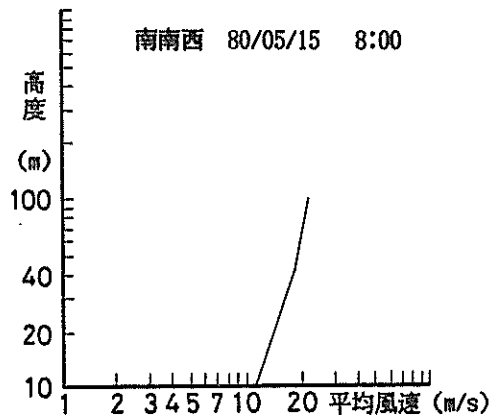
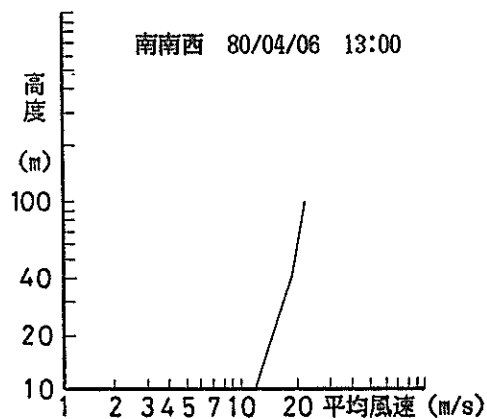
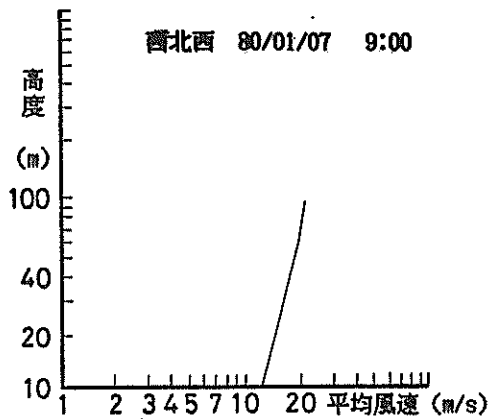
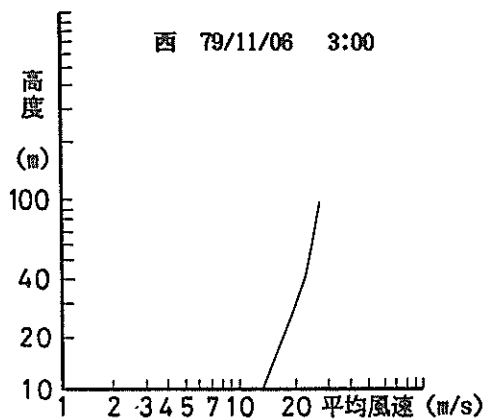
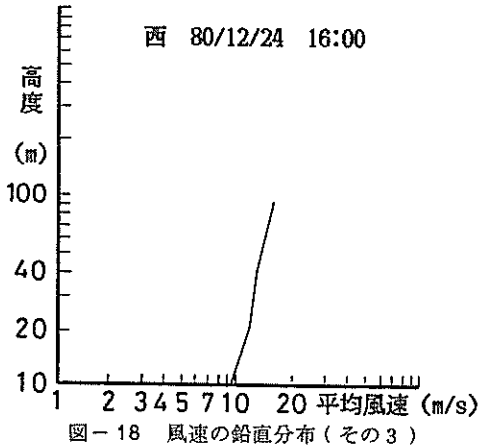


図-18 風速の鉛直分布(その2)



6. まとめ

本資料は、1978年から1982年までの期間中に大阪湾で行われた、海上風の観測で得られた風速データを整理・解析した結果を取りまとめたものである。整理・解析の対象とした記録の個数は、23個である。各記録での平均風速は、13 m/s から 21 m/s の範囲である。本資料で得られた主要な解析結果は、以下のとおりである。

(1) 海面上 15 m の高さでのガストファクター (= 最大瞬間風速 (U_{max}) / 平均風速 (\bar{U})) は、10 分の評価時間で 1.2 から 1.4 の範囲であった。また海岸に設置された観測塔の 100 m の高さでのガストファクターは、1.2 から 1.3 の範囲であり、海上 15 m の高さでのガストファクターよりも若干小さい値であった。

(2) 観測された風速データの水平方向のパワースペクトルでは、約 0.033 Hz と低い振動数が卓越していた。Davenport 及び日野がおのおの提案しているパワースペクトルと観測された風速データのパワースペクトルとを比較すると 0.02 Hz から 5 Hz の振動数の範囲で、形状と値とが三者でほぼ同一であった。ただし低い振動数の領域では、日野のパワースペクトルが、Davenport のパワースペクトルよりも観測された風速のパワースペクトルに良く合う。

(3) 風速の乱れの強さ ($\sigma^2 = 6 K \bar{U}^2$) から海面での表面摩擦係数 (K) が求まる。海面の状況が有義波高 1.2 m から 2.7 m のとき表面摩擦係数は 0.001 から 0.003 の範囲であった。

(4) 風速データの自己相関あるいはパワースペクトルから、風の渦の大よその形状と大きさを検討したところ、海上での風の渦は、主流方向に細長い扁平形をしているものと考えられる。

(5) 10 分間の評価時間での風向の変動は小さい。す

なわち、主流方向に対して土 5 度の範囲内で風が吹いている。

(6) 風速の鉛直方向の分布は、べき法則で示すことができる。周囲の開けた海岸に設置された風車型風向計で得られた平均風速から求めたべき法則での定数 (n) は、5 から 6 の範囲であった。また海風と陸風では定数 (n) はほぼ同一であった。

7. あとがき

大阪湾海上での風の記録の整理・解析については、2、3 の記録を対象に既に港湾技術研究所報告第 19 巻 2 号に発表済である。本資料では、その後集積された風の記録を同報告とほぼ同様の手法で解析し、とりまとめた。海上での風の記録に関しては、取得記録数が多くないが、本資料が、浮遊式海岸構造物の風に対する安全性の評価および、係留船舶の動揺解析の一助になれば幸いである。

また本資料は、運輸省港湾局「港内避泊対策技術調査」の一環として行われた調査結果を取りまとめたものである。

(1984年6月25日受付)

謝 辞

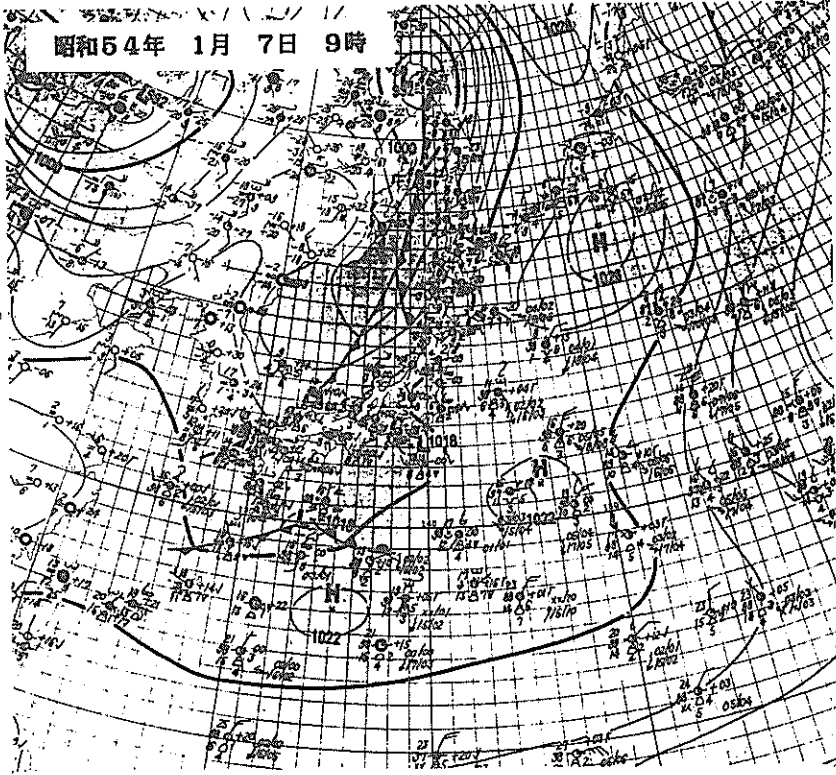
本資料で用いた風の記録は、運輸省大阪航空局及び第三港湾建設局より提供を受けました。ここに関係各位に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

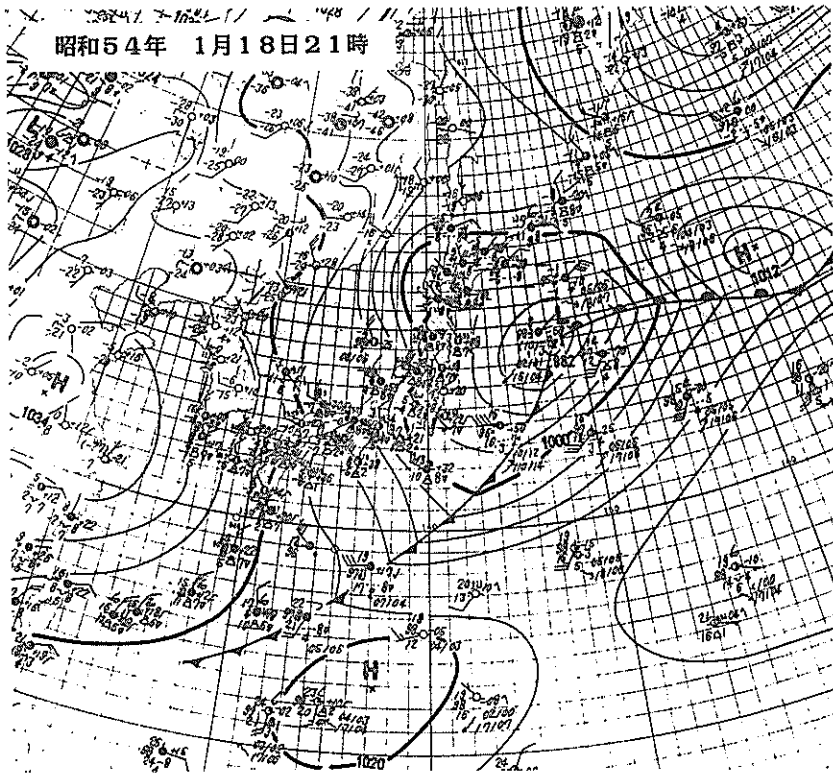
- 1) 岡内 功・伊藤 學・宮田利雄：耐風構造，丸善，昭和52年，pp. 21～248.
- 2) 石崎潑雄：耐風工学，朝倉書店，昭和52年，pp. 49～89.
- 3) 理科年表（昭和56年），東京天文台編纂，丸善株式会社
- 4) 光田 寧：標準計画台風について(1)，京都防災研究所年報，第8号，昭和40年3月，pp. 605～612.
- 5) 光田 寧：標準計画台風について(2)，京都防災研究所年報，第9号，昭和41年3月，pp. 267～272.
- 6) 清宮 理：海上風の性質とそれによる矩形浮体の動揺解析，港湾技術研究所報告，第19巻第2号，1980年6月，pp. 124～142.
- 7) 上田 茂・清宮 理・白石 悟・土田 肇：海上風の性質と大型浮遊式海洋構造物の動揺解析，第13回日米天然会議，耐風耐震構造専門部会，1981年5月，pp. 731～761（英文）
- 8) K. Takeuchi：Present Status of the Study on

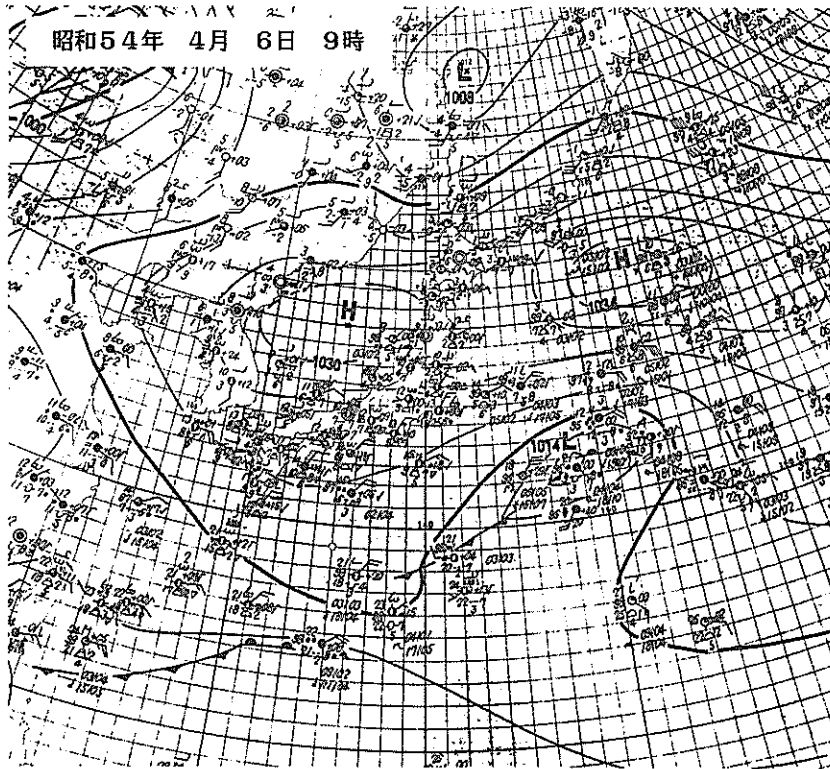
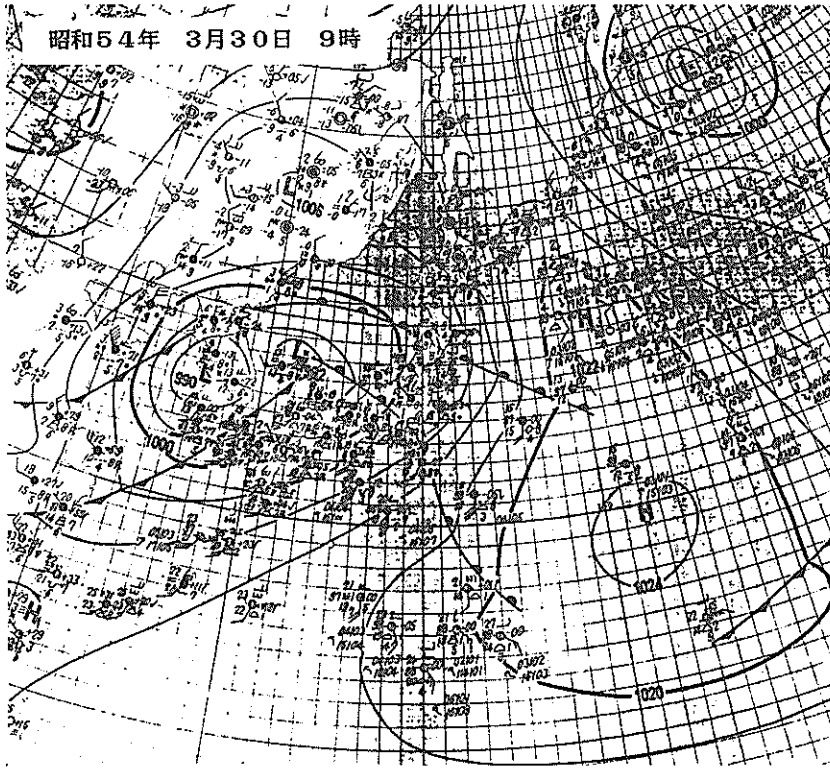
- the Wind Structure in Japan, Seventh Joint Meeting US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR Tokyo, May 20-23, 1975.
- 9) 石崎潑雄・光田 寧：強風時における突風の拡がり
と突風率について，京都防災研究所年報第5号A，
昭和37年3月，pp.135~138.
 - 10) 土木学会編，海洋鋼構造物設計指針(案)解説，昭和
48年，pp.9~15.
 - 11) Alan G. Davenport : Gust Loading Factor, ST,
ASCE, 1967年6月，pp.11~34.
 - 12) 土木学会，本州四国連絡橋耐風研究小委員会：本州
四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書，昭和50
年3月，pp.9~56.
 - 13) 塩谷正雄・新井秀雄・林田千秋：暴風時の風速の鉛
直分布と突風の鉛直構造，鉄道技術研究所資料研究
概要，昭和41年5月，Vol. 23. No. 5, pp.6~11.
 - 14) 塩谷正雄・黒羽罔夫：強風時における変動風速の鉛
直成分，日本大学生産工学部報告，1970年2月，第
3巻第1号，pp.131~146.
 - 15) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，昭和53年，
pp.25~75.
 - 16) 17th ITTC REPORT OF THE OCEAN
ENGINEERING COMMITTEE, Sept 1984. 54 p.
 - 17) 日野幹雄：瞬間最大値と評価時間の関係 — とくに
突風率について，土木学会論文集，第117号，昭和
40年5月，pp.23~33.
 - 18) J. C. Kaimal, J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O.
R. Cote : Spectral characteristics of surface-
layer turbulence : Quart, J. R. Met. Soc. 1972.
98, pp.563~589.
 - 19) 花房龍男：スペクトル解析の方法と気象要素のスペ
クトル，気象研究ノート第131号，1977年，60 p.
 - 20) 大地羊三：電子計算機の手法とその応用，森北出版，
1970年，pp.232~239.
 - 21) 塩谷正雄・岩谷祥美：強風時における変動風速の水
平方向の相関，日本大学生産工学部報告，第3巻第
1号，1970年2月，pp.117~129.
 - 22) 塚本 修・光田 寧：強風時における風速変動の空
間相関について，京都防災研究所年報，第21号B-
1，昭和53年4月，pp.427~436.
 - 23) Y. Iwatani : Some Features of the Spatial
Structures of the Surface Layer Turbulence
in the High Wind Condition, Journal of the
Meteorological Society of Japan, Vol. 55, No.
1, Feb.1977, pp.130~137.
 - 24) 宮田利雄・中島威夫：格子乱流による風洞実験につ
いて，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集第
1部，昭和50年10月，pp.463~464.
 - 25) 加藤 始・武村莞爾：水面上の風速分布，港湾技術
研究所報告，第5巻1号，1966年1月，26 p.
 - 26) 川鍋安次：下層大気中の風の鉛直プロフィールにつ
いて，海と空，第42巻，3,4合併号，1967年，pp.
142~179.
 - 27) 花房龍男他3名：筑波研究学園都市に新設された気
象観測用鉄塔施設，気象研究所技術報告，第3号，
1979年12月，50 p.

昭和54年 1月 7日 9時

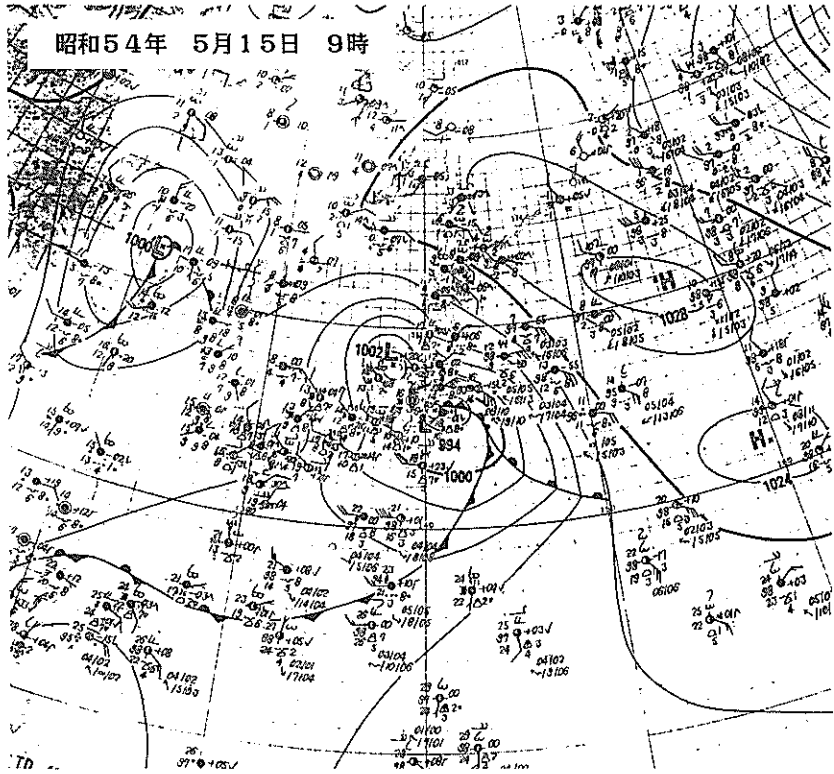


昭和54年 1月18日 21時

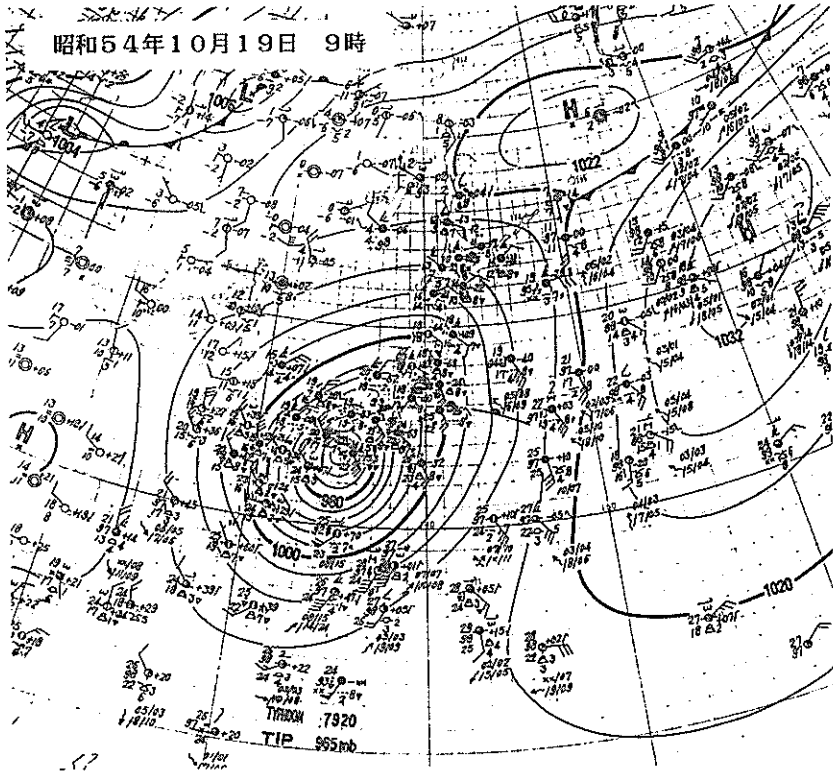


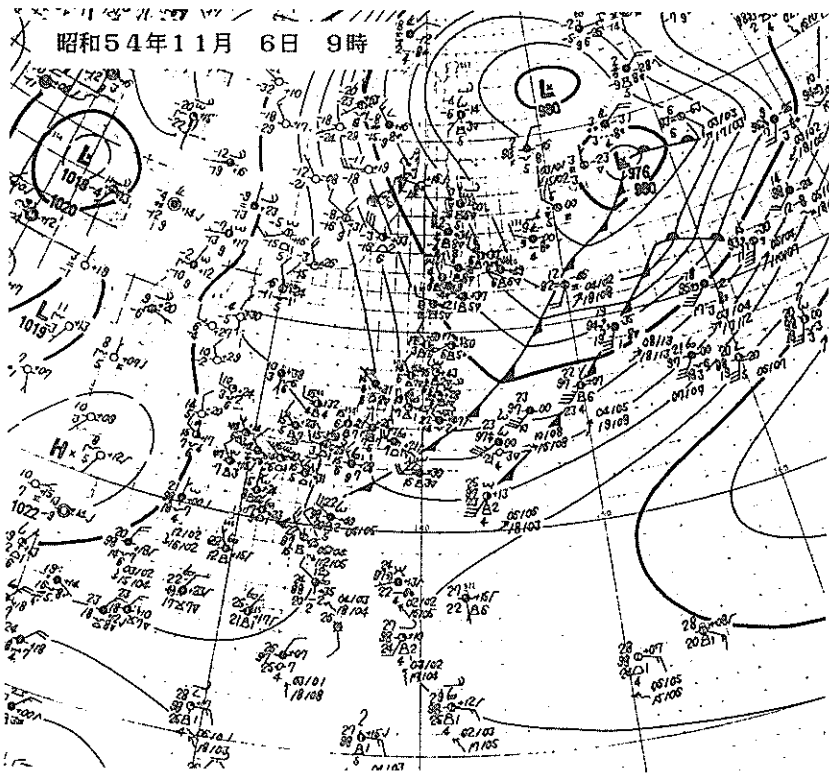
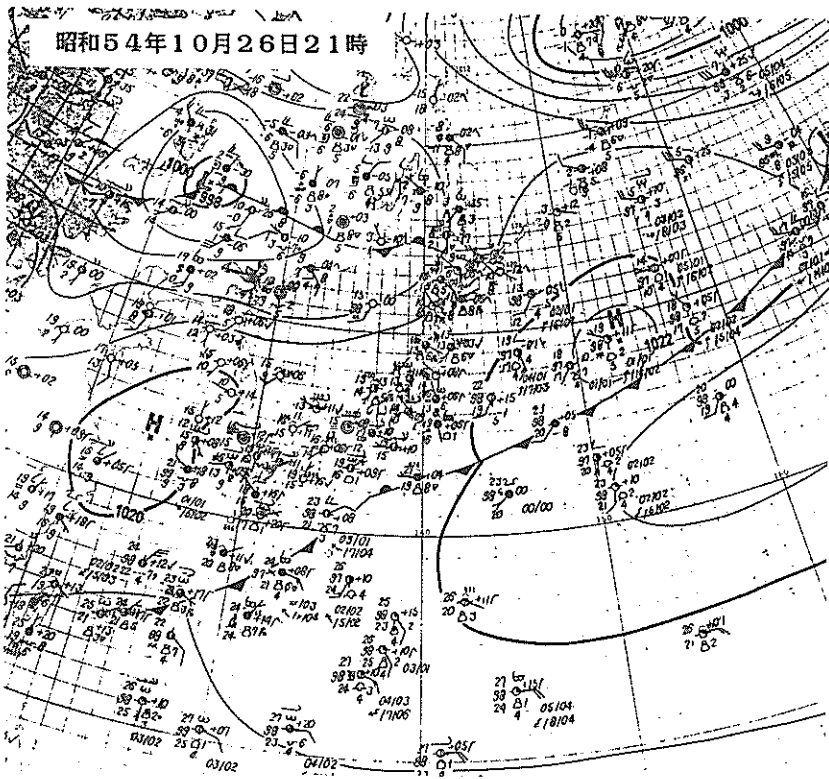


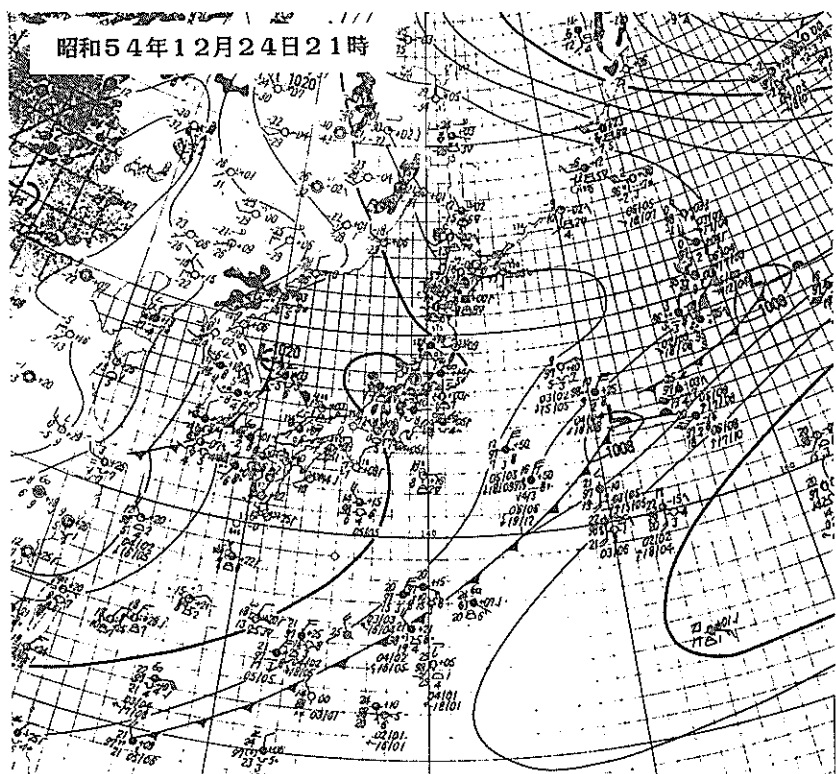
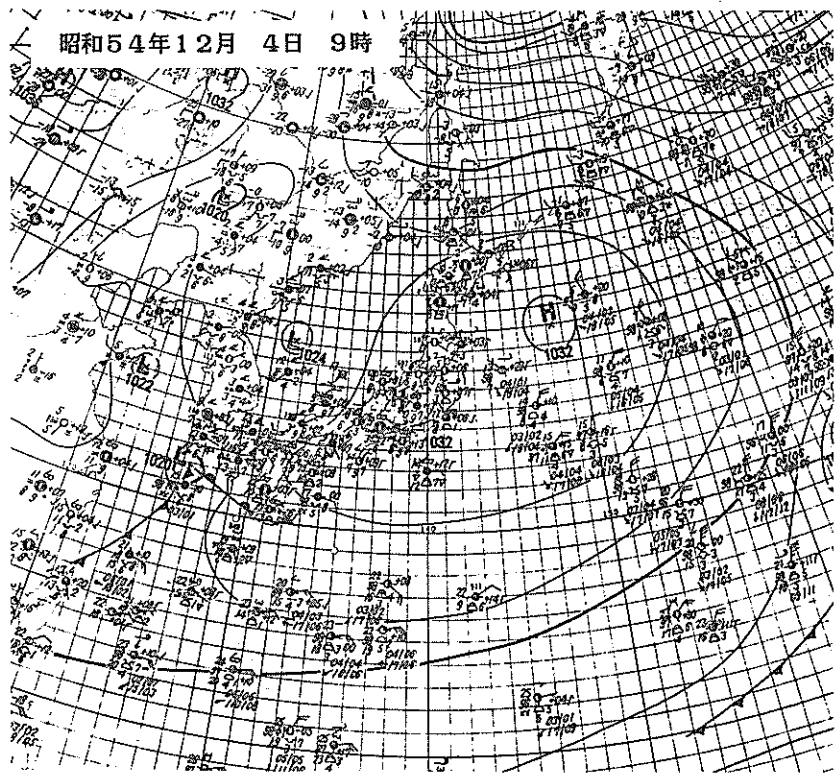
昭和54年 5月15日 9時

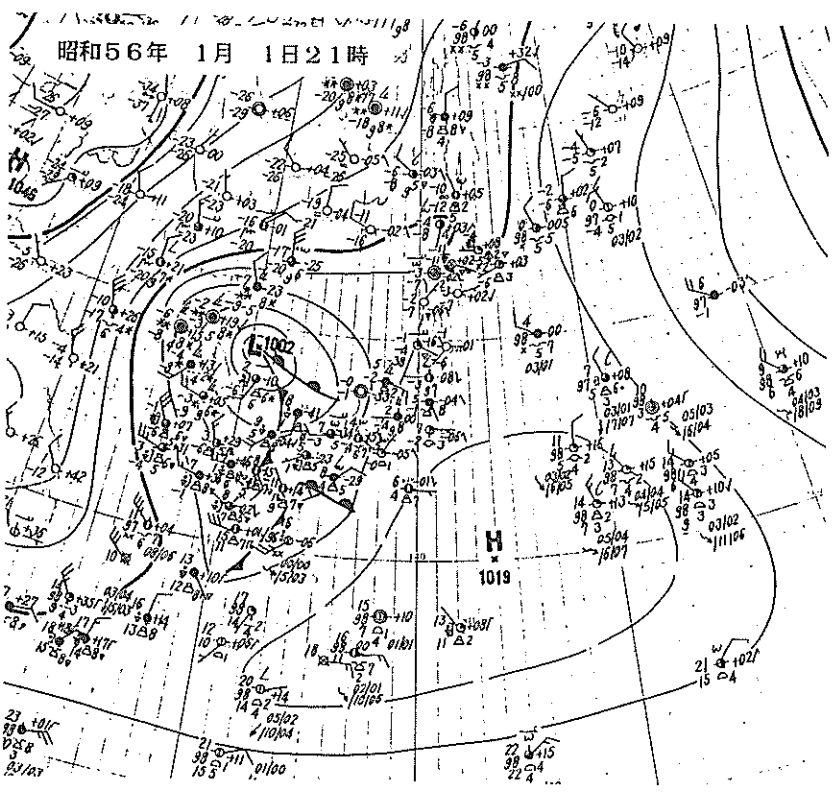
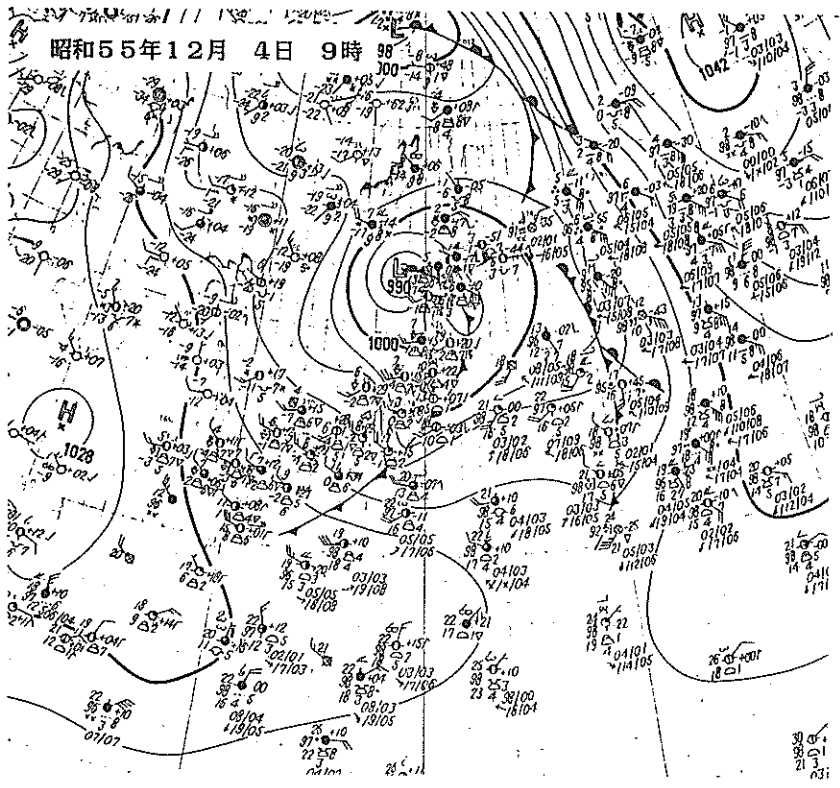


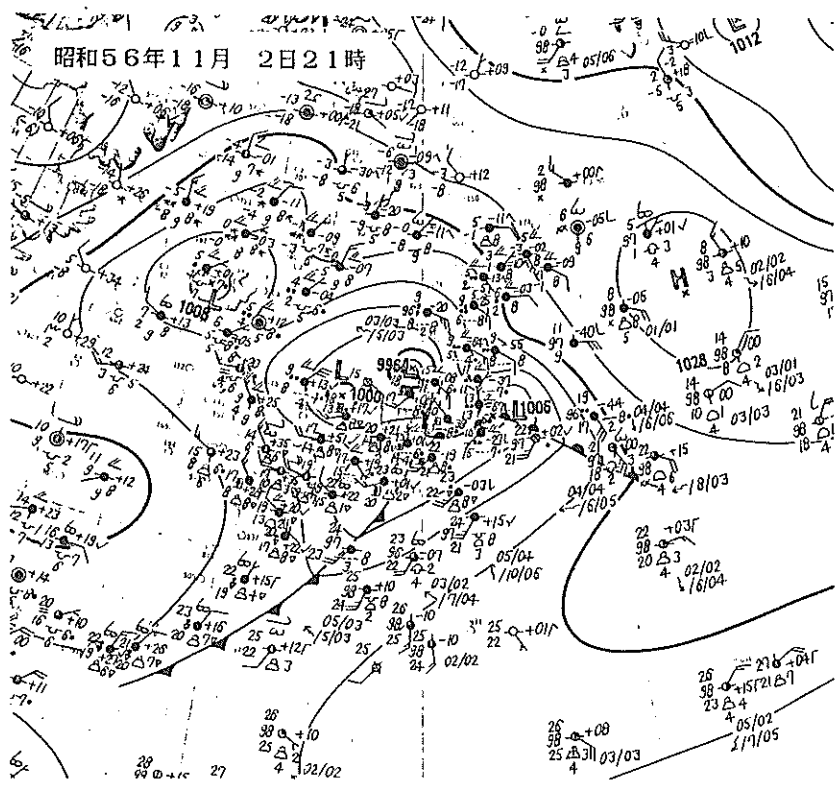
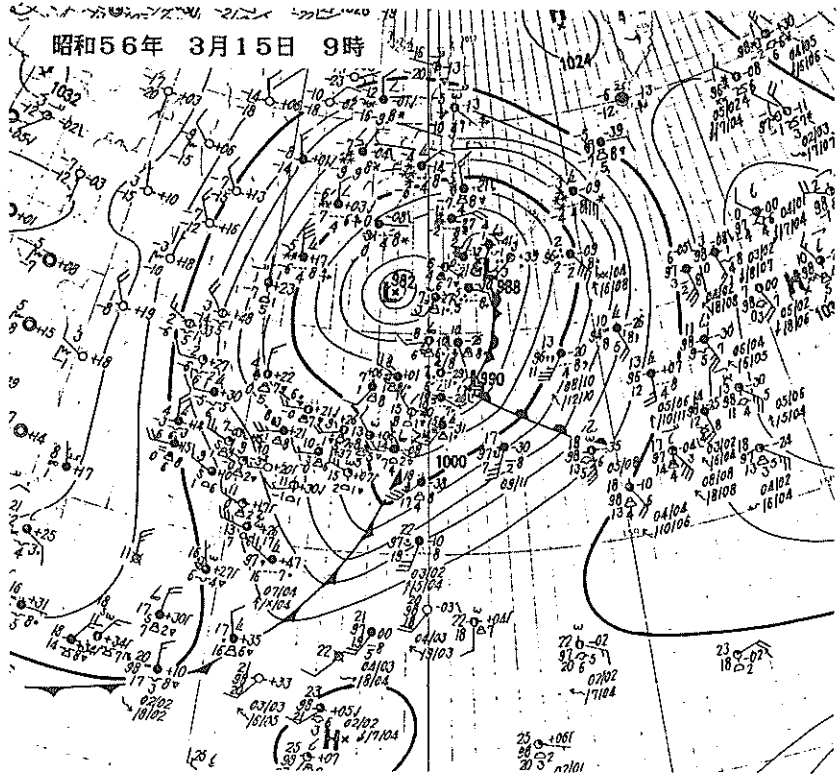
昭和54年 10月19日 9時

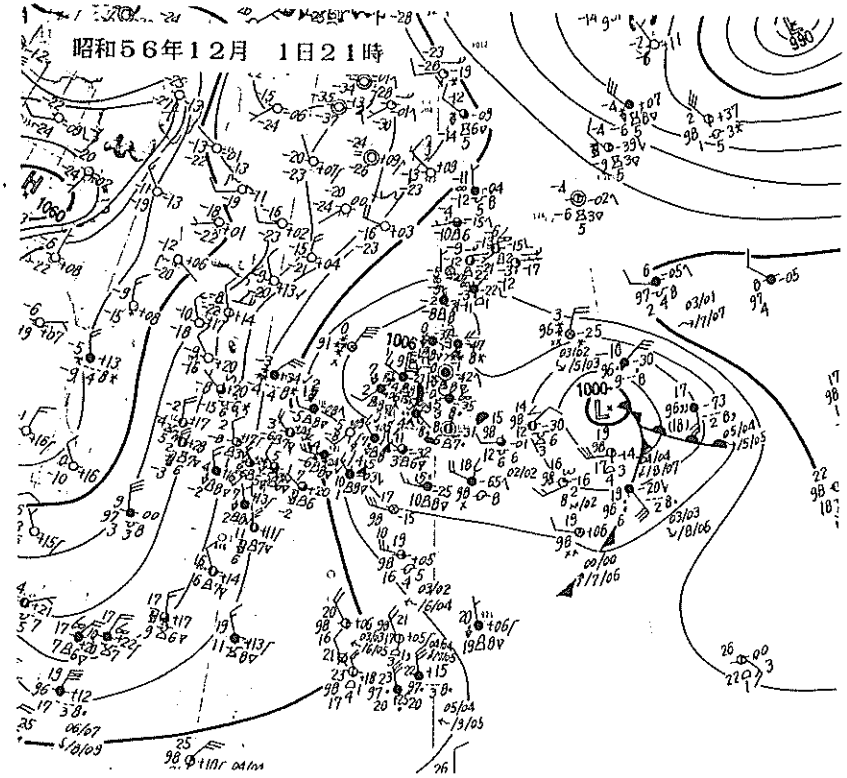
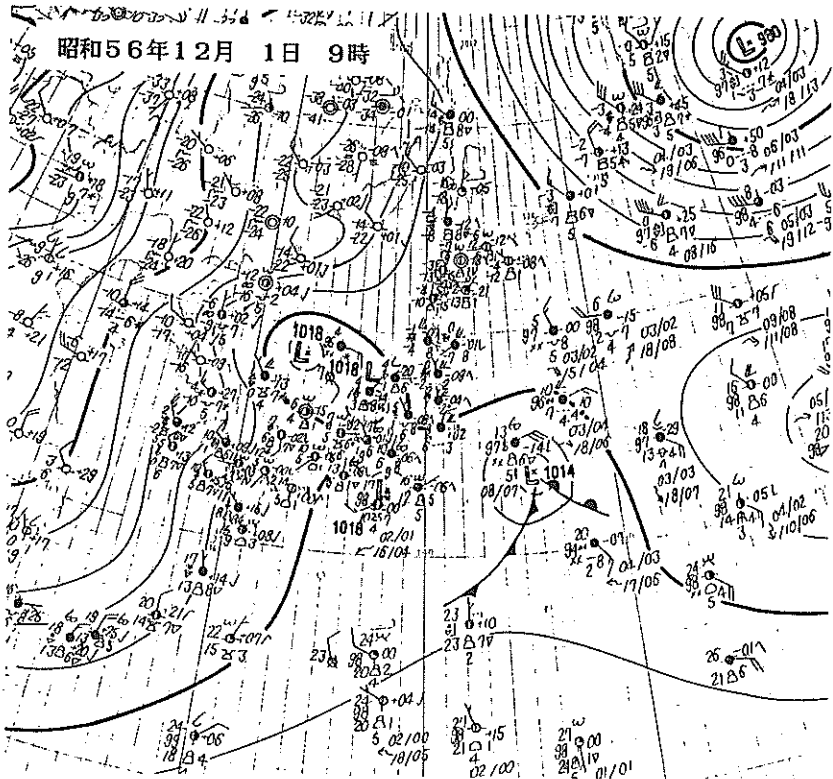


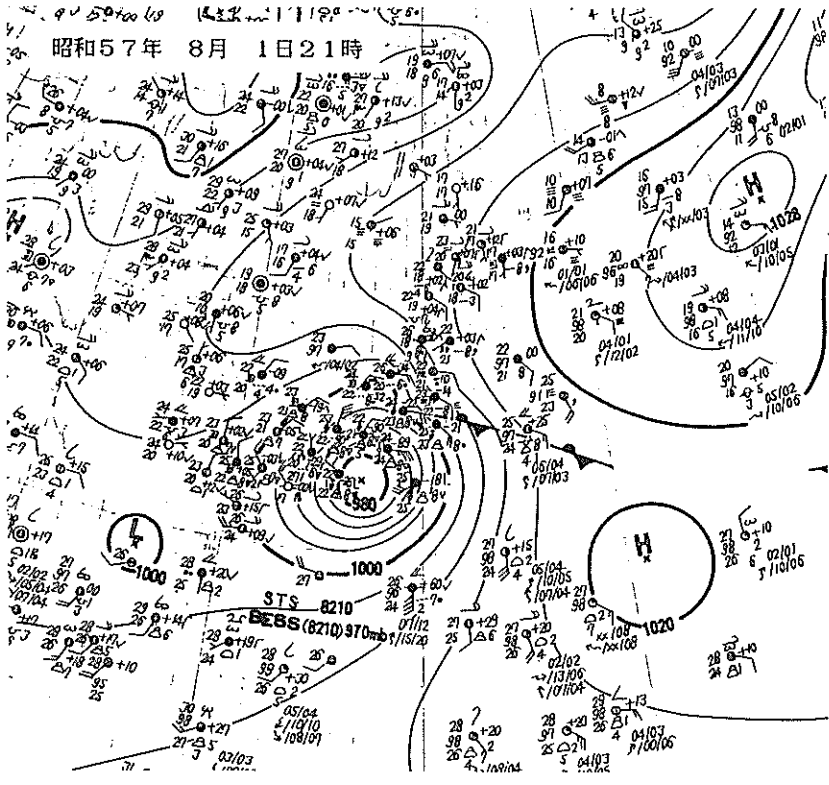




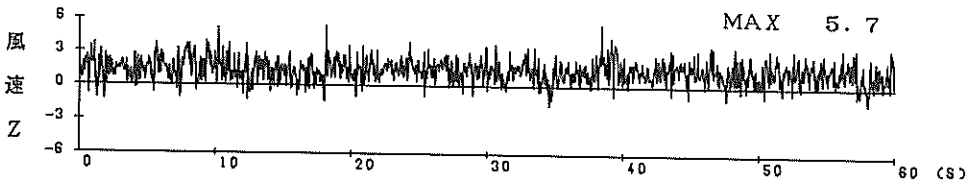
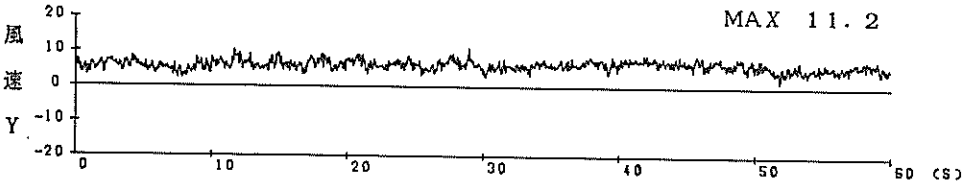
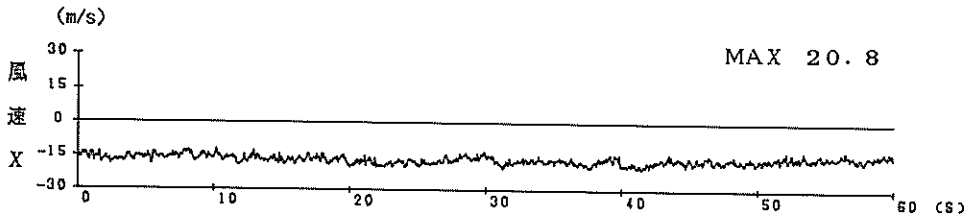




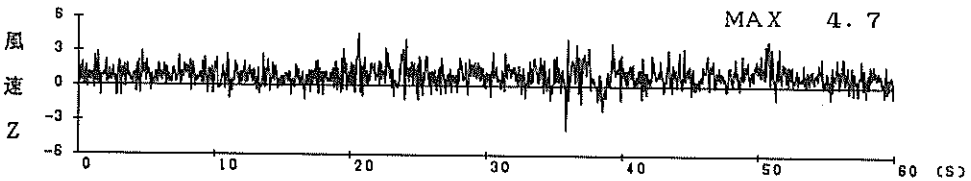
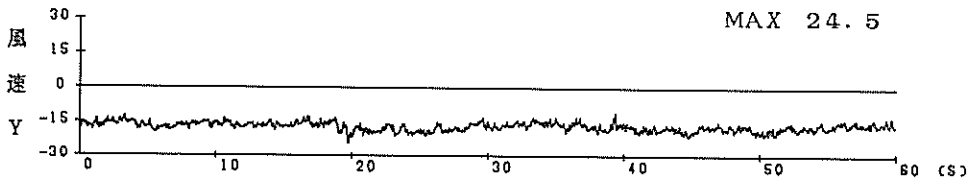
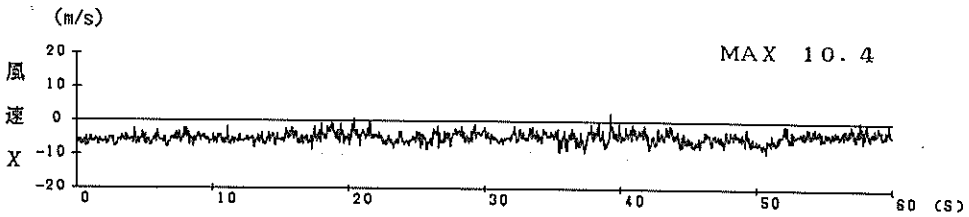




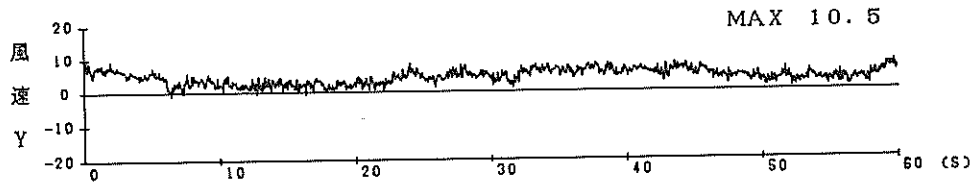
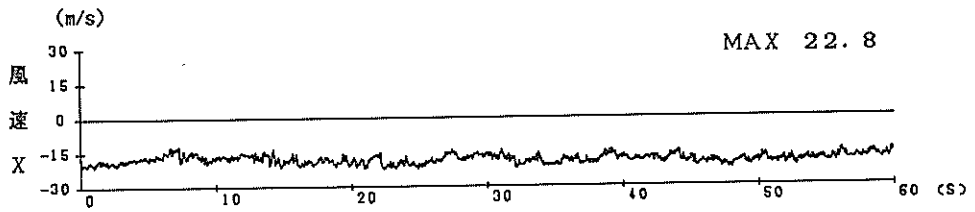
79. 1. 18. 14. 00 MT局



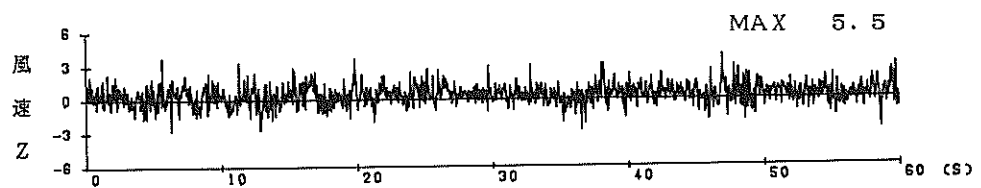
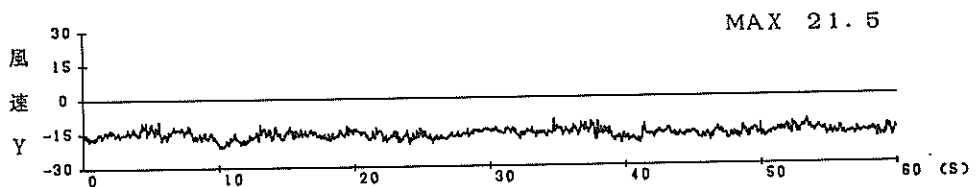
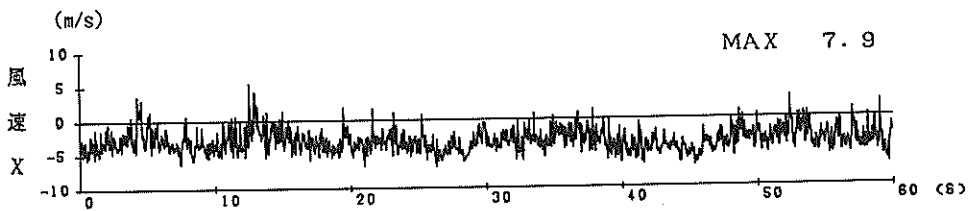
79. 3. 30. 15. 00 MT局



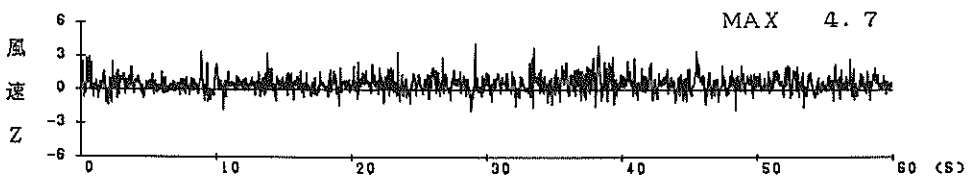
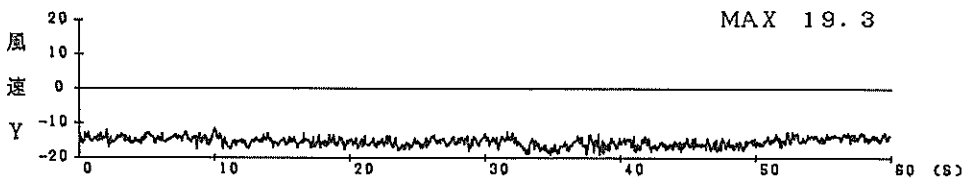
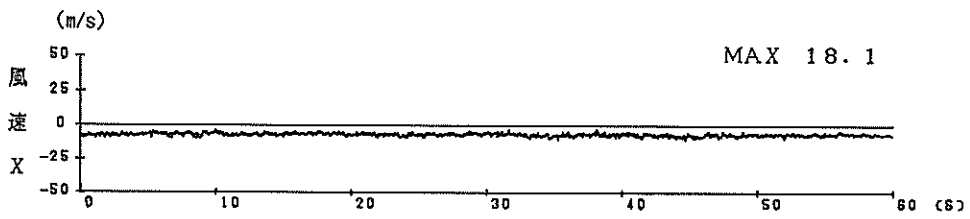
80. 1. 7. 9.00 MT局



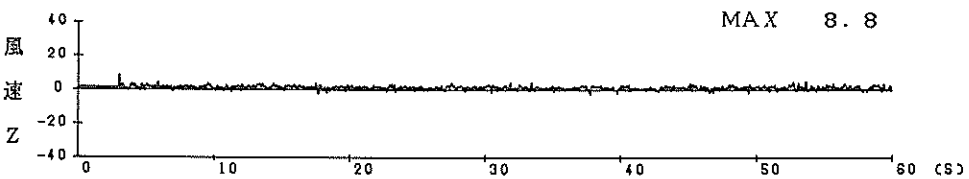
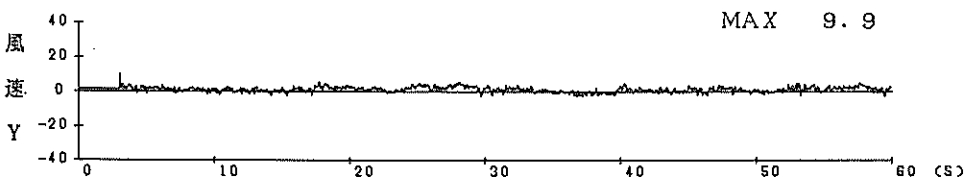
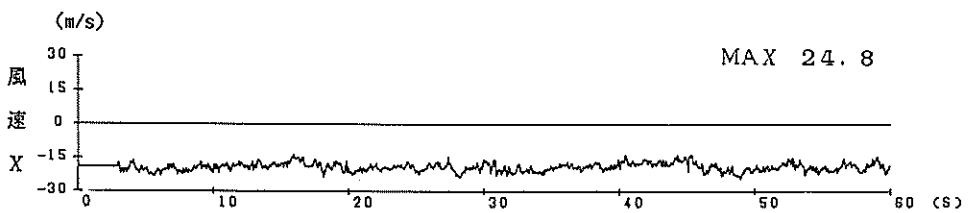
80. 4. 6. 13.00 MT局



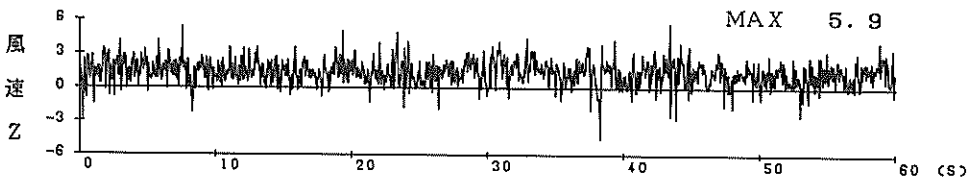
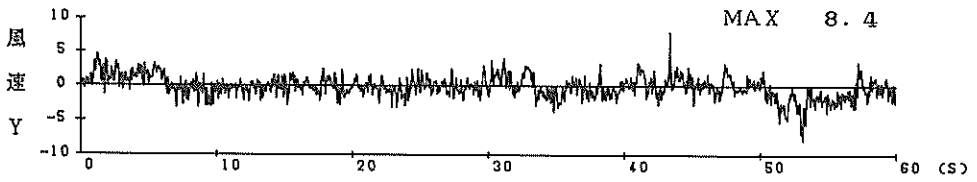
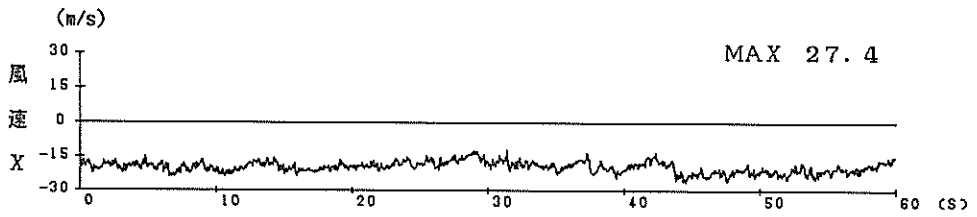
80. 5. 15. 8.00 MT局



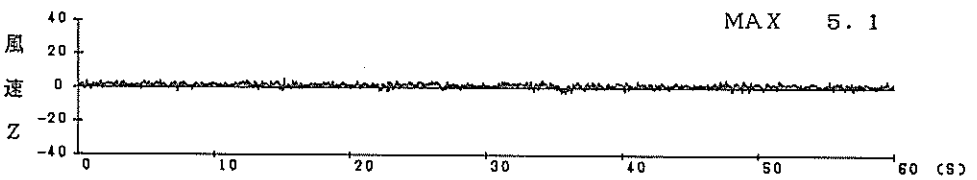
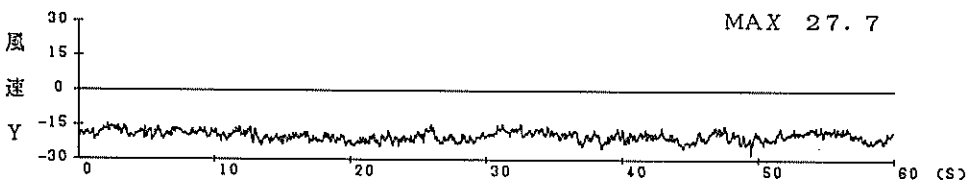
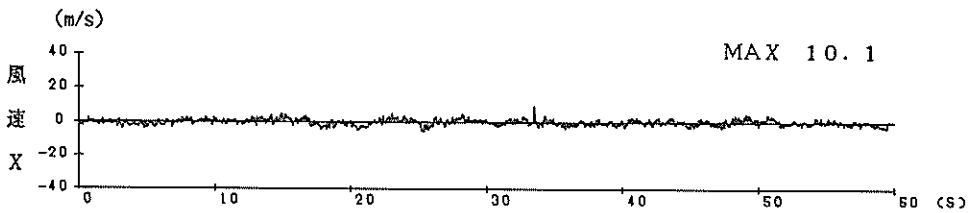
80. 10. 25. 22.00 MT局



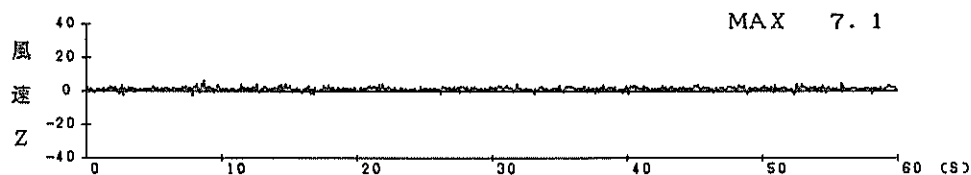
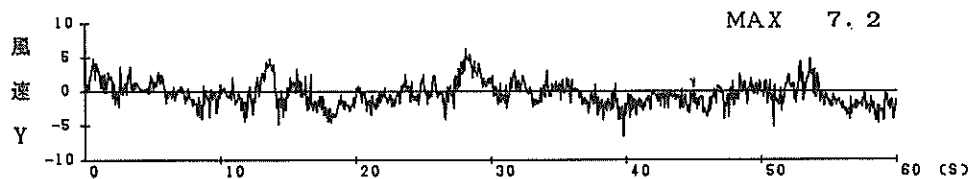
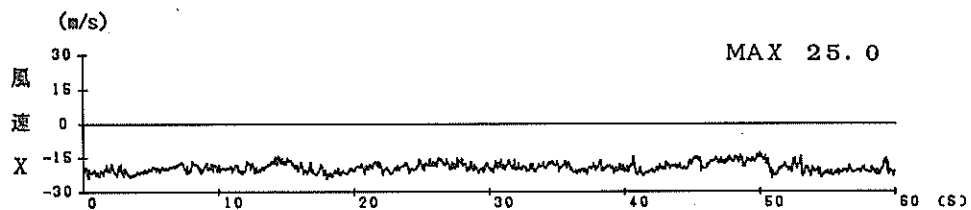
80. 10. 25. 23. 00 MT局



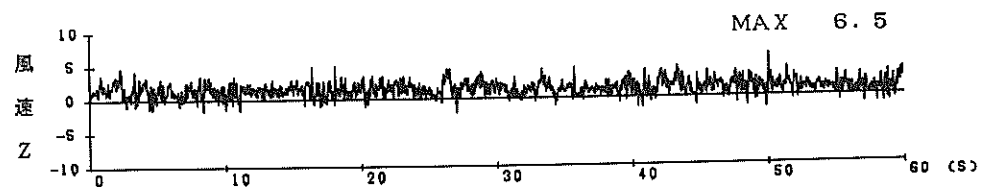
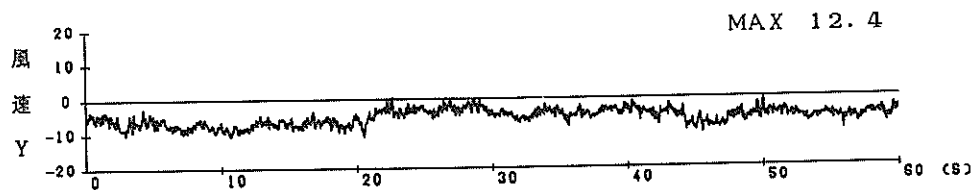
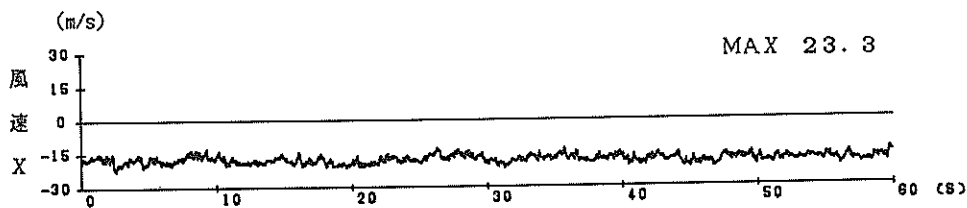
80. 10. 25. 24. 00 MT局



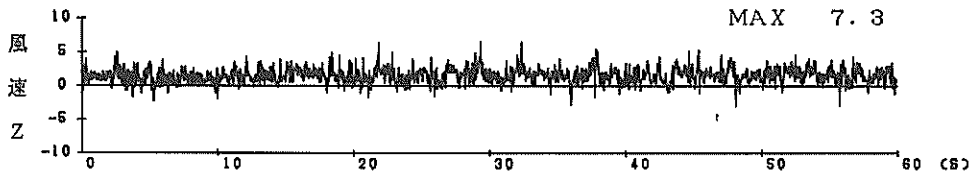
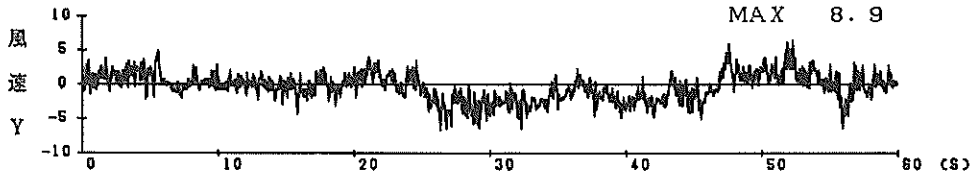
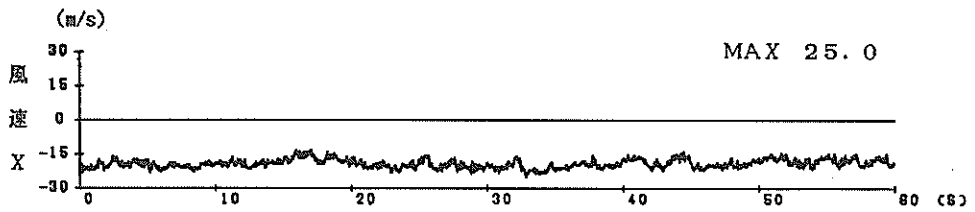
80.10.26. 2.00 MT局



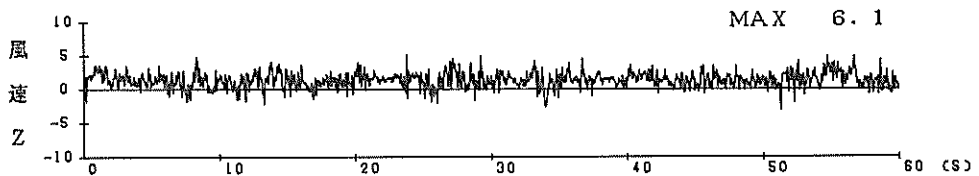
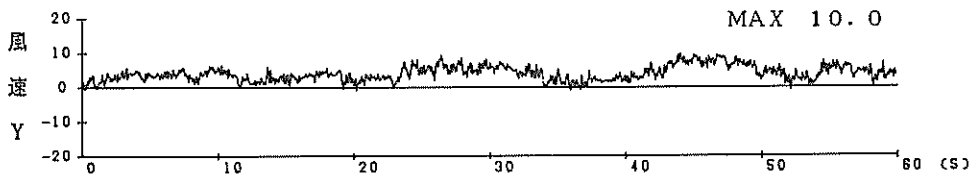
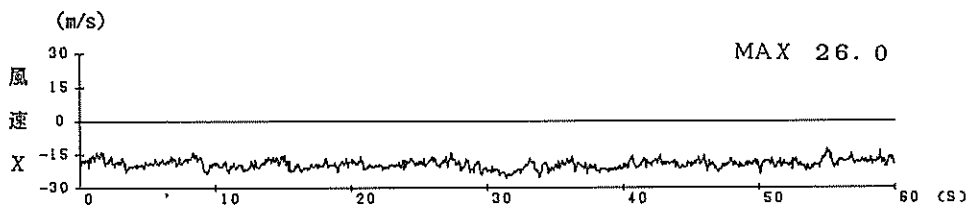
80.10.26. 3.00 MT局



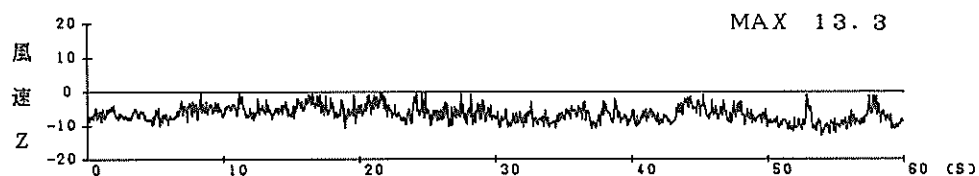
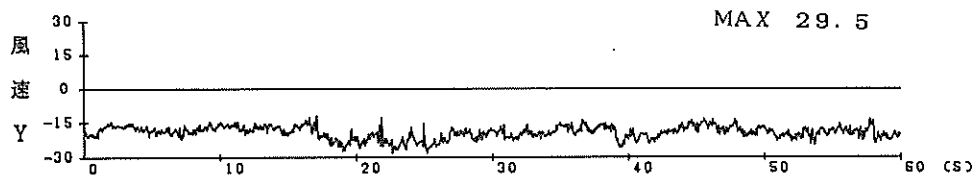
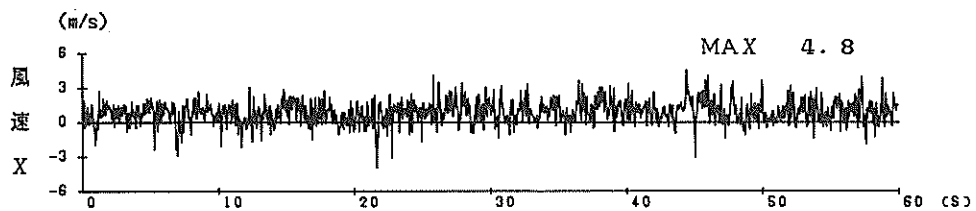
80.12. 4. 4.00 MT局



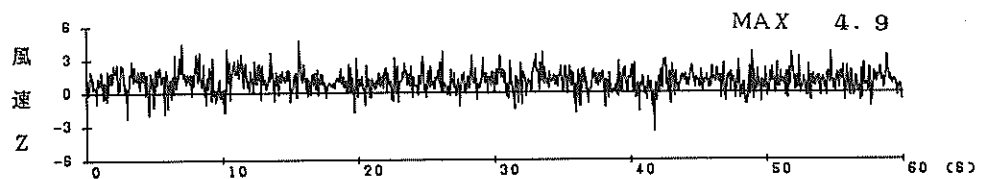
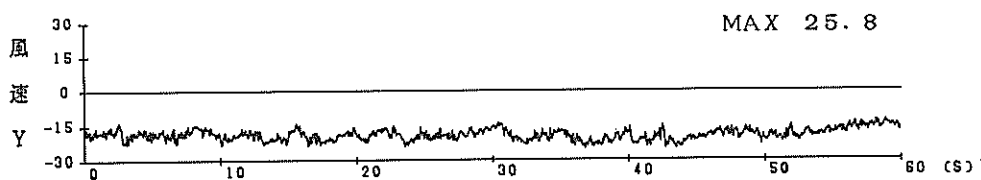
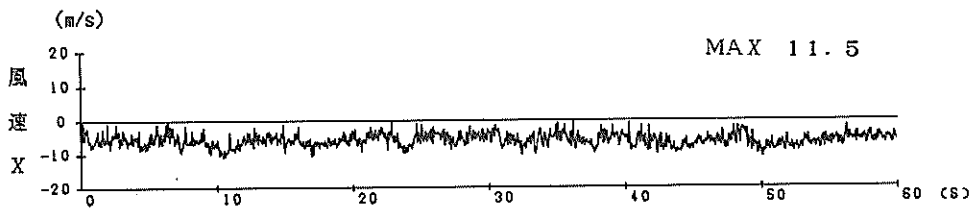
80.12. 4. 6.00 MT局



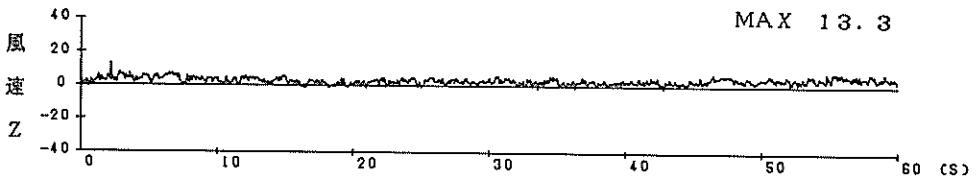
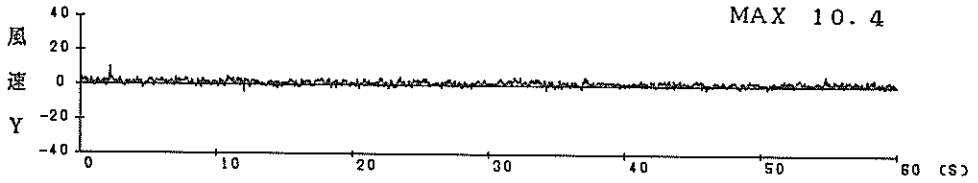
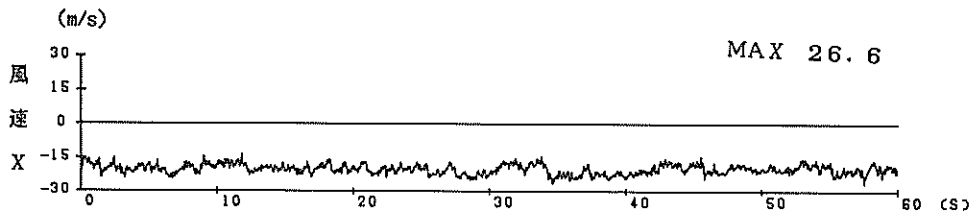
81.11. 2.15.00 MT局



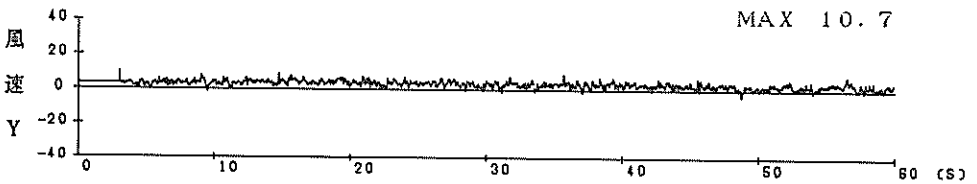
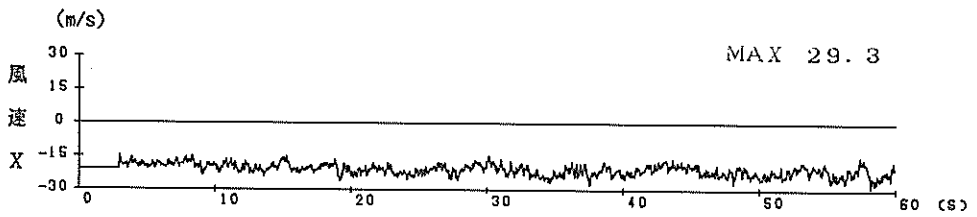
81.11. 2.16.00 MT局



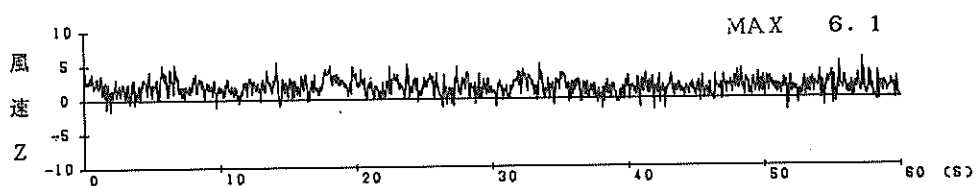
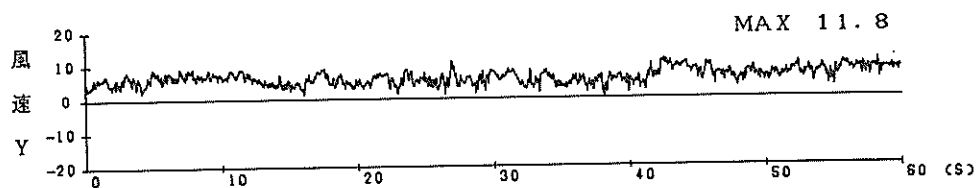
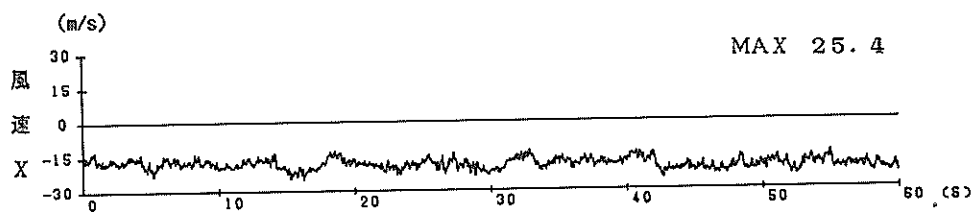
81. 1. 2. 9.00 MT局



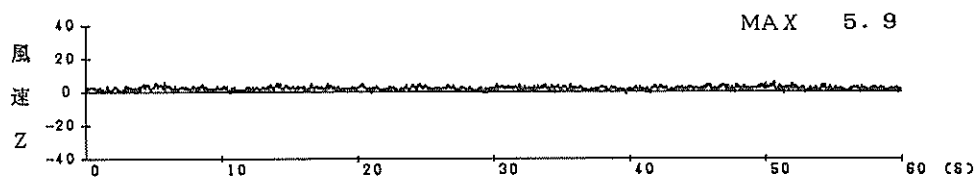
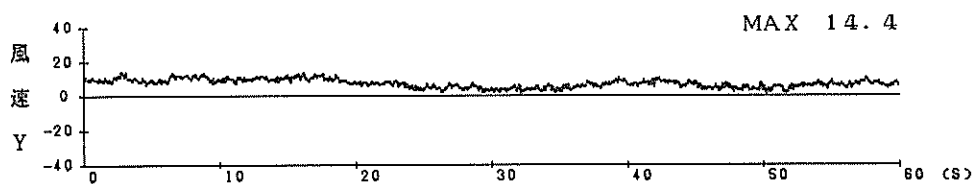
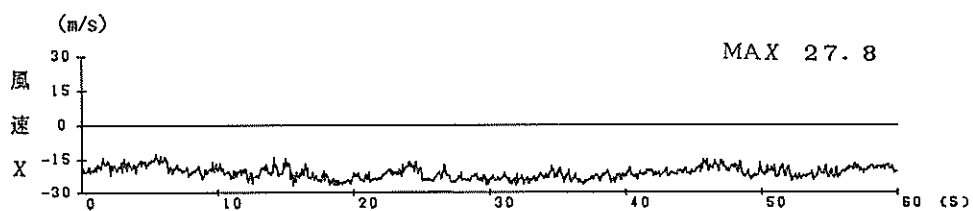
81. 3. 15. 6.00 MT局



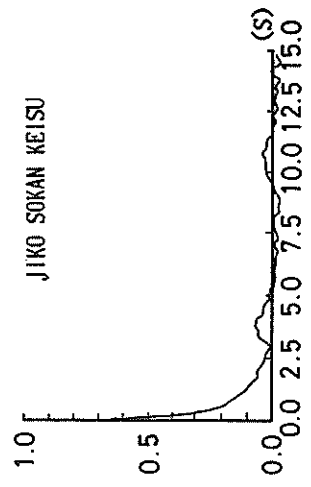
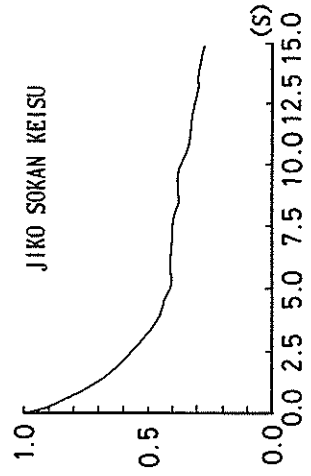
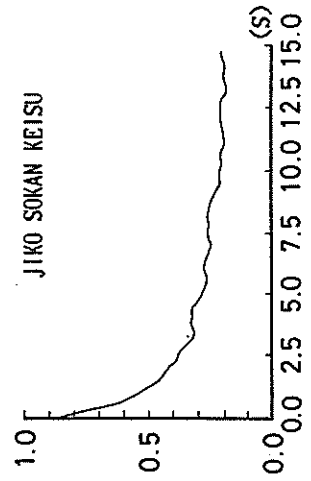
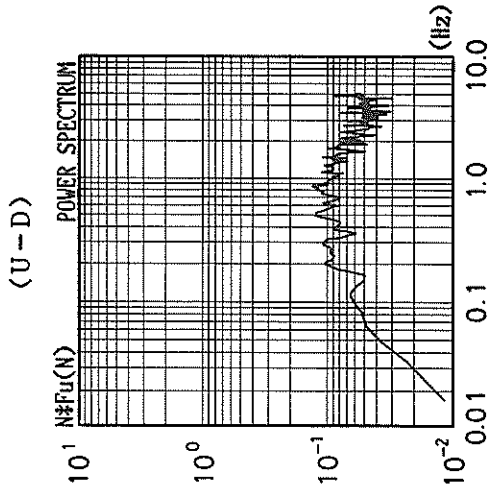
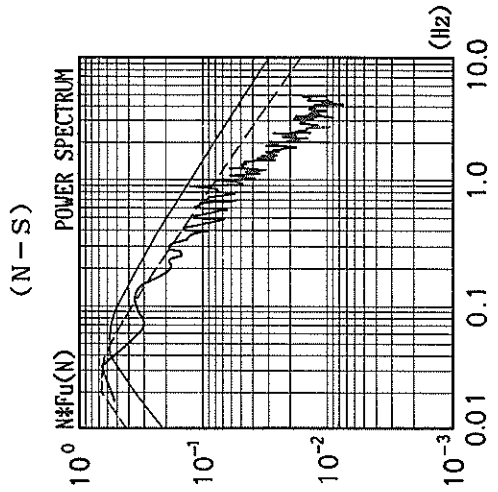
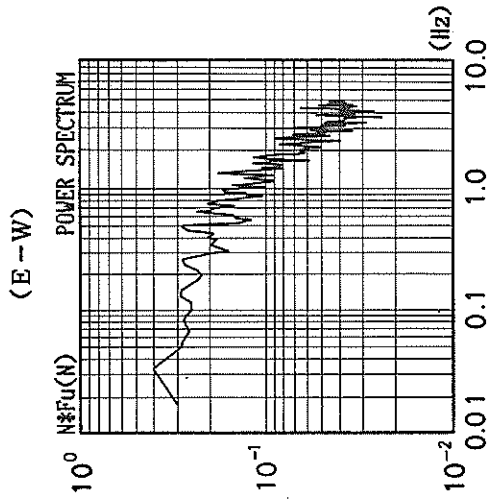
81.12. 1.12.00 MT局



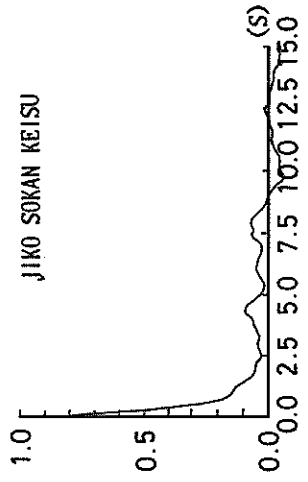
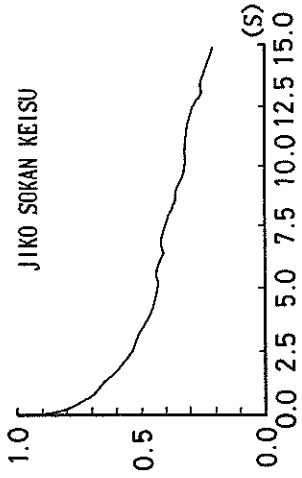
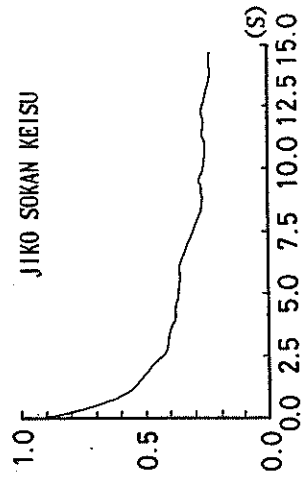
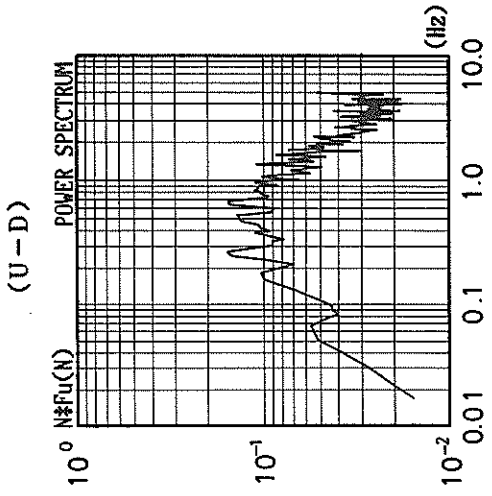
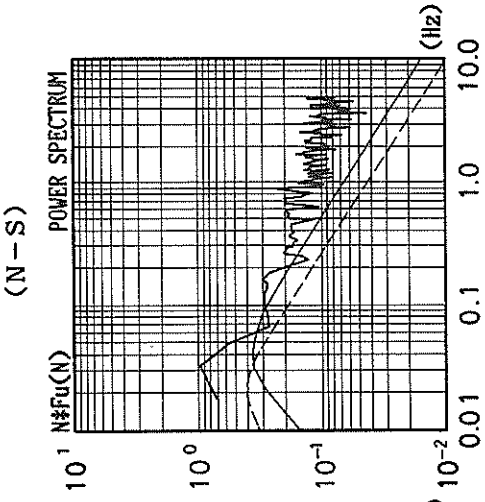
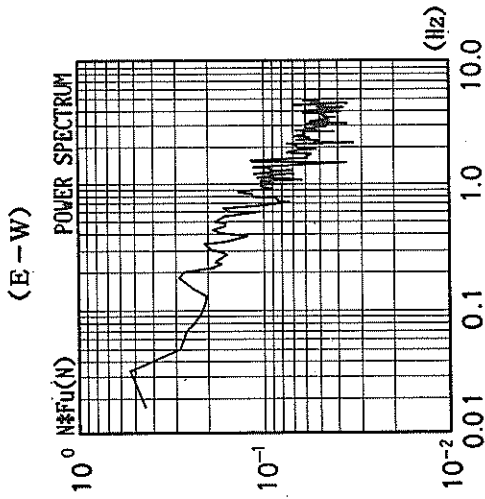
81.12. 1.22.00 MT局



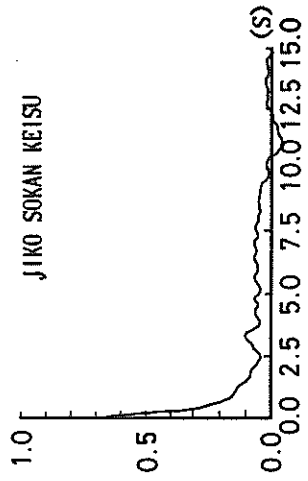
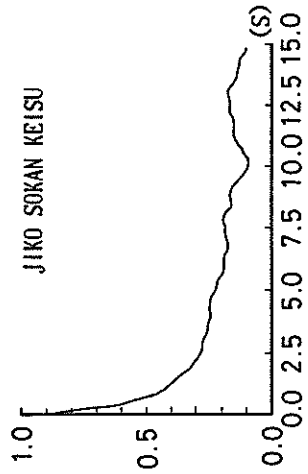
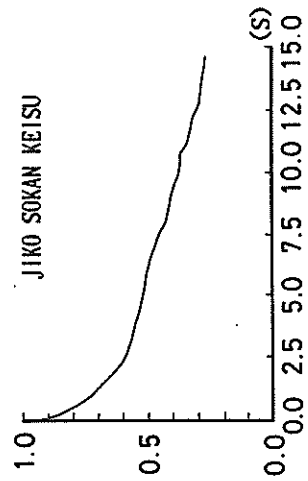
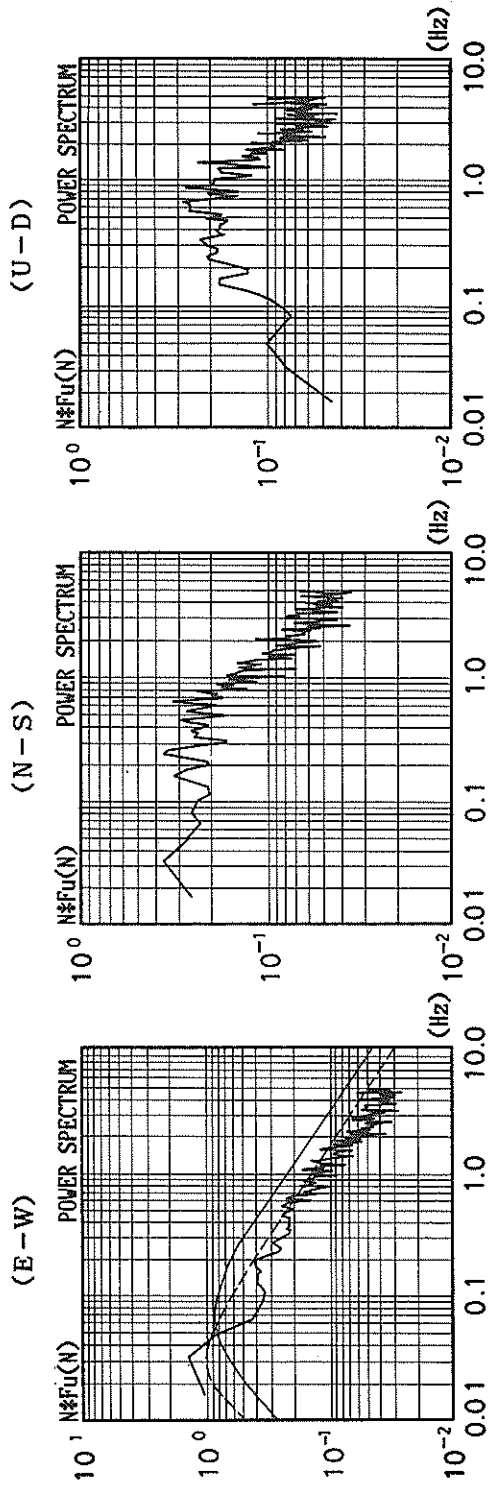
79/ 3/30 15.00-4



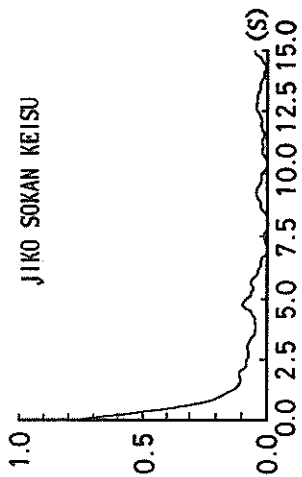
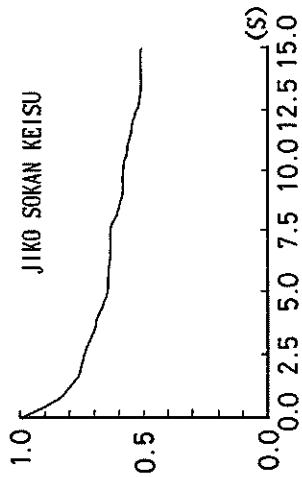
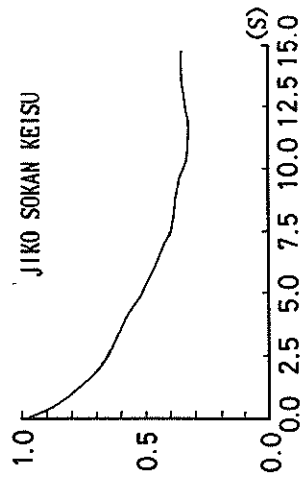
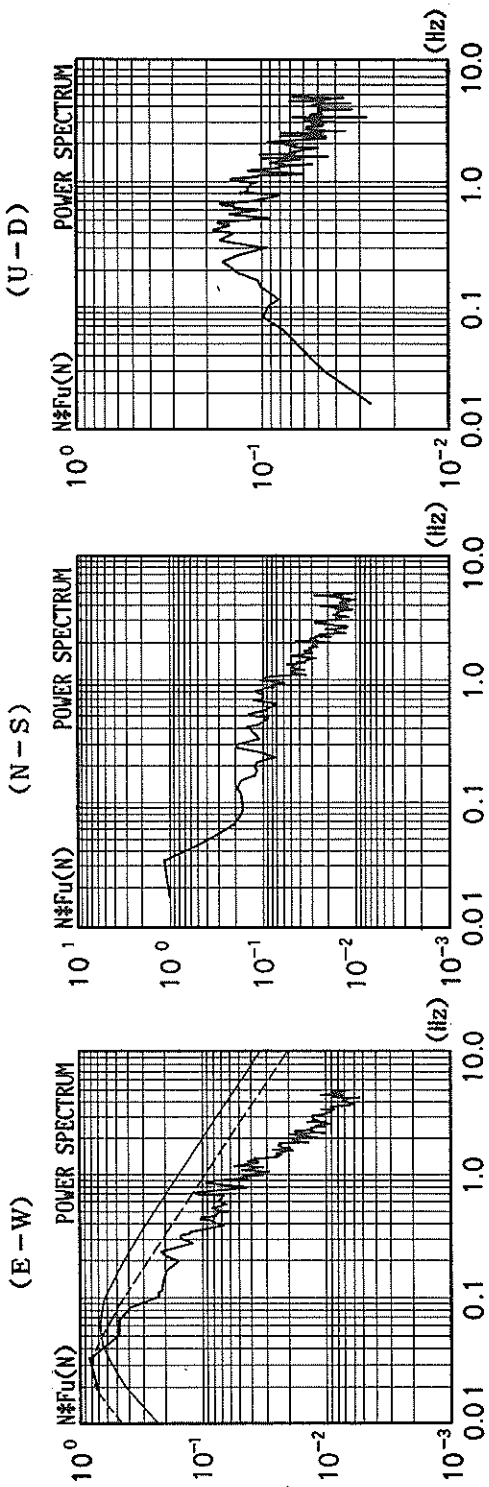
79/10/19 11.00-4



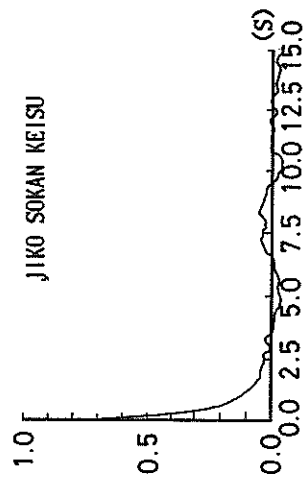
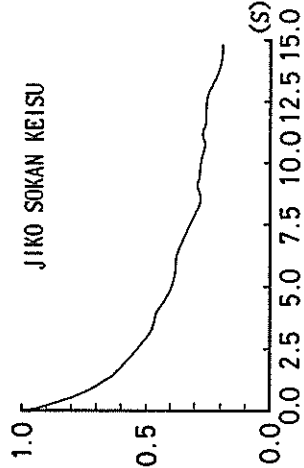
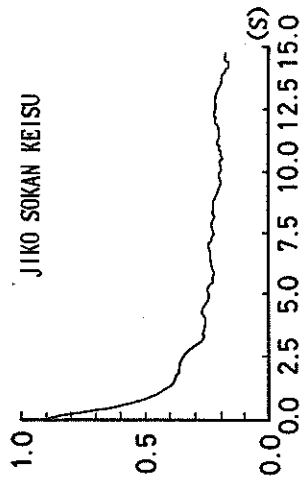
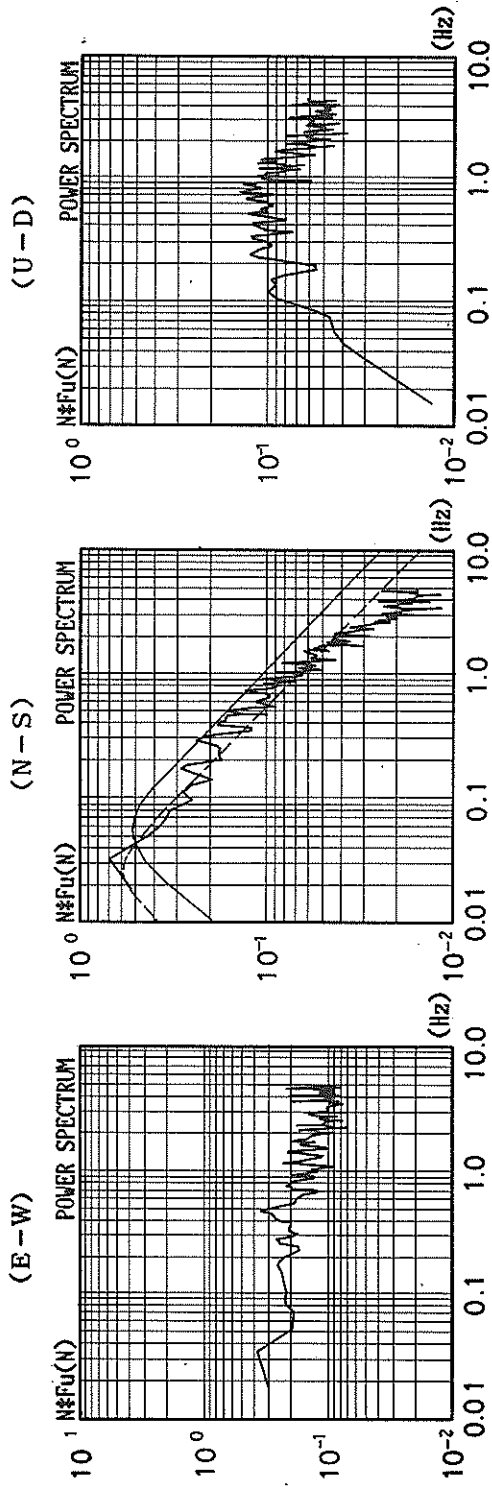
79/11/ 6 3.00-4



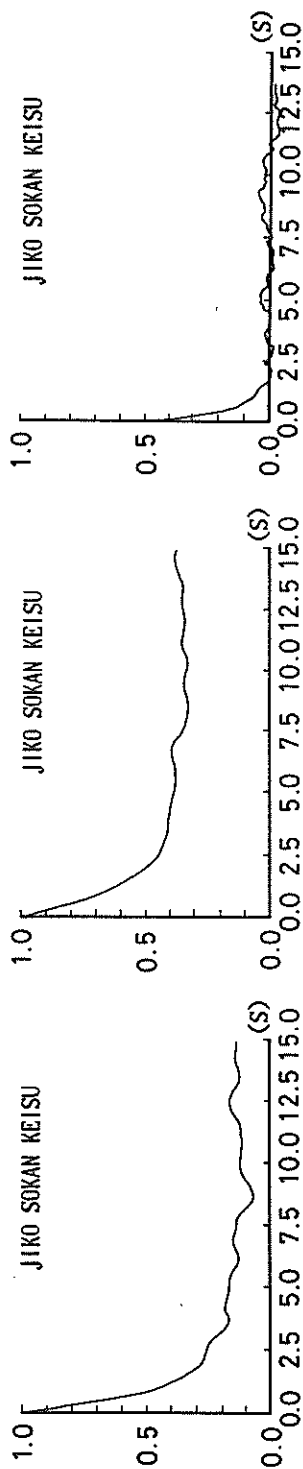
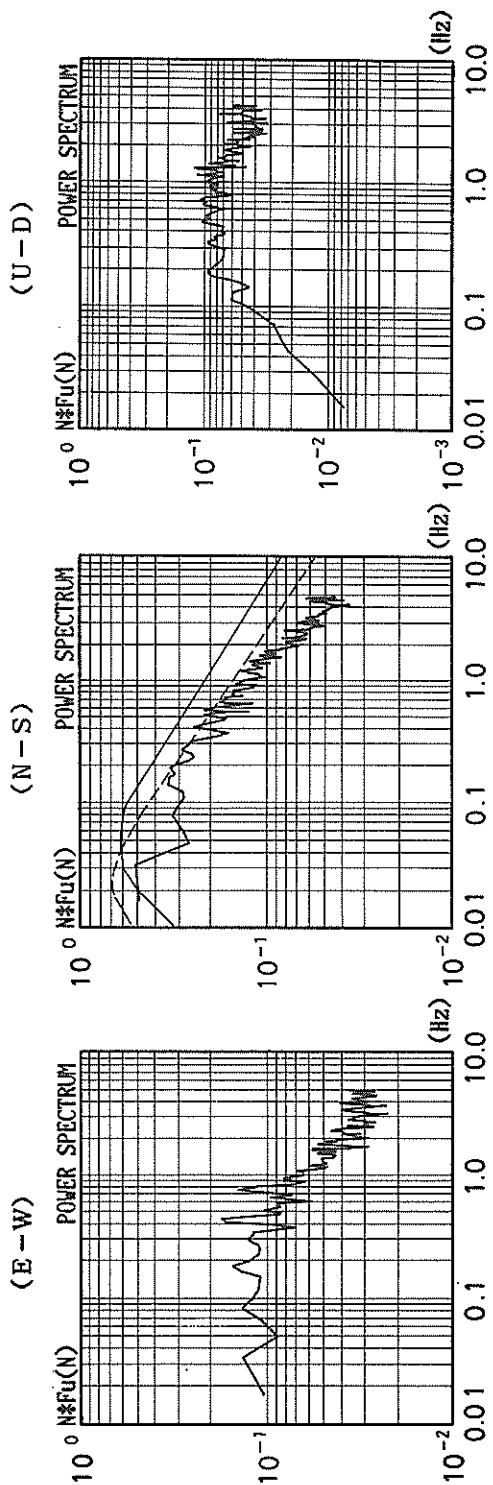
80/ 1/ 7 9. 00-4



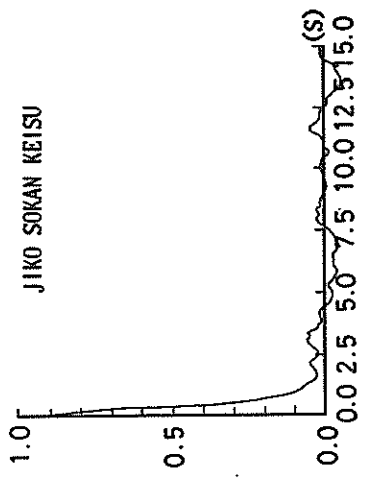
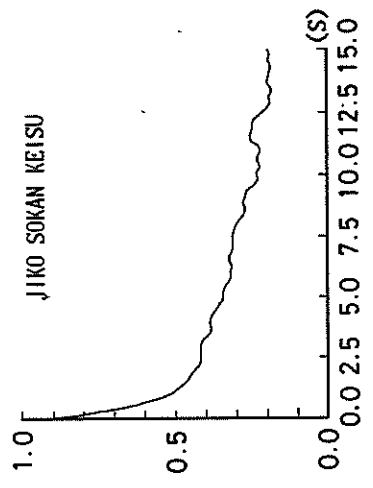
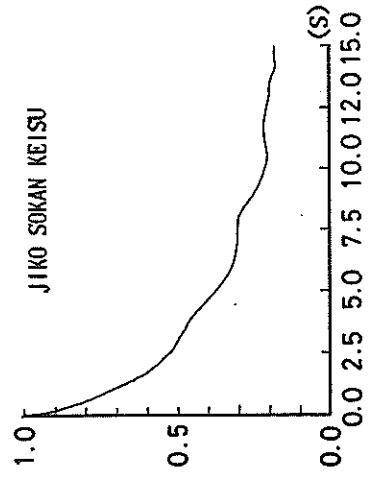
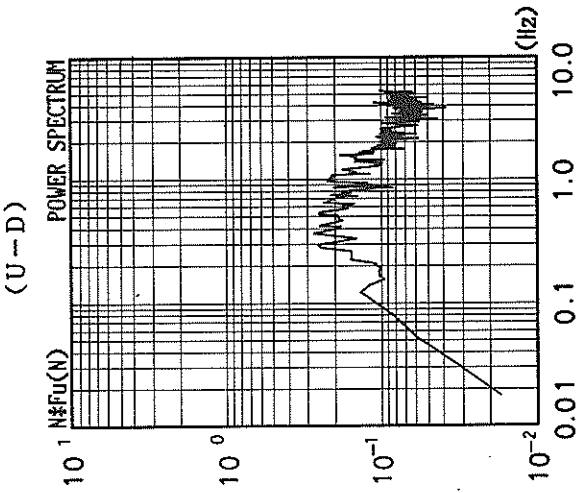
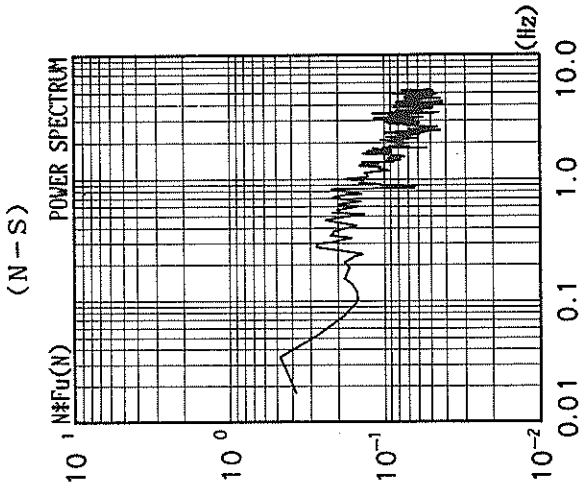
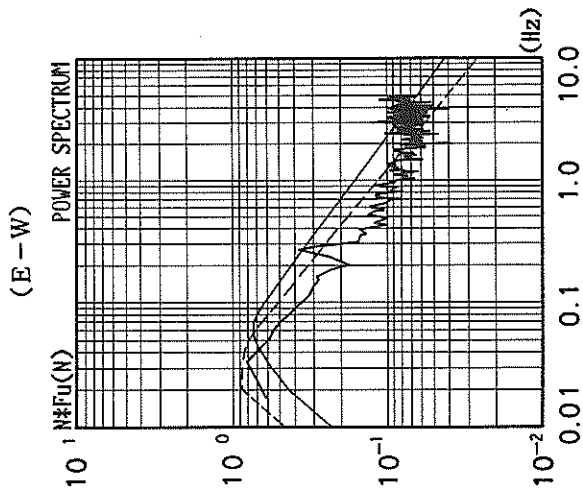
80 / 4 / 6 13. 00-4



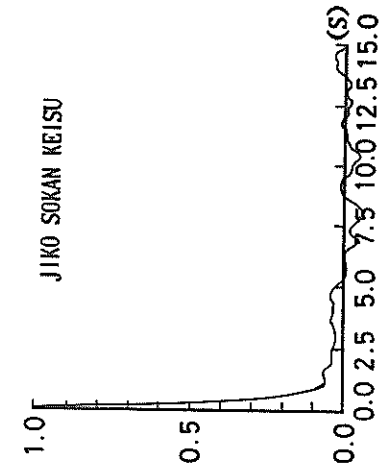
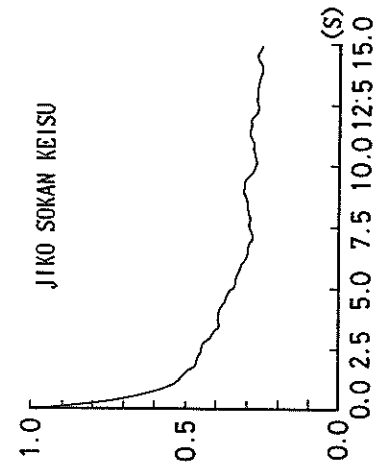
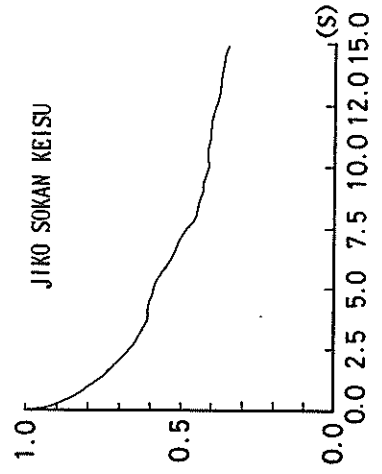
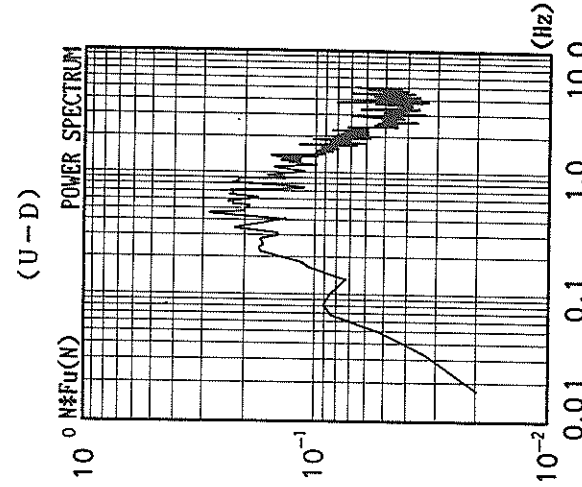
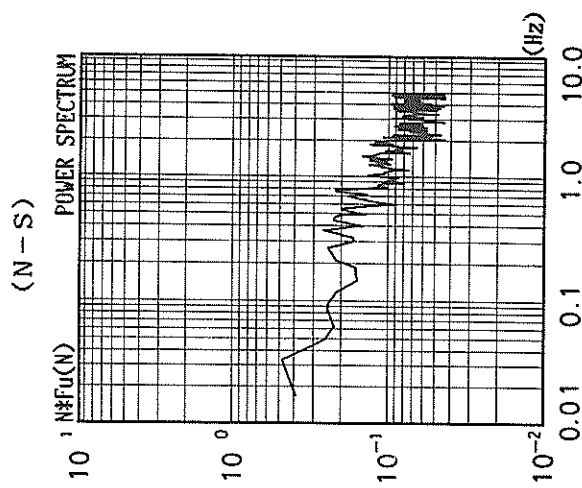
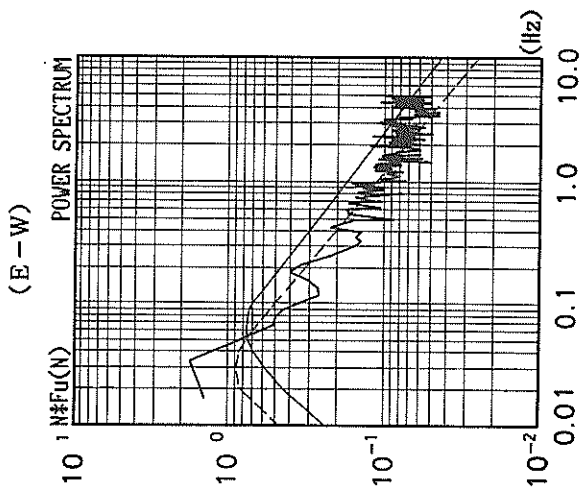
80/ 5/15 8.00-4

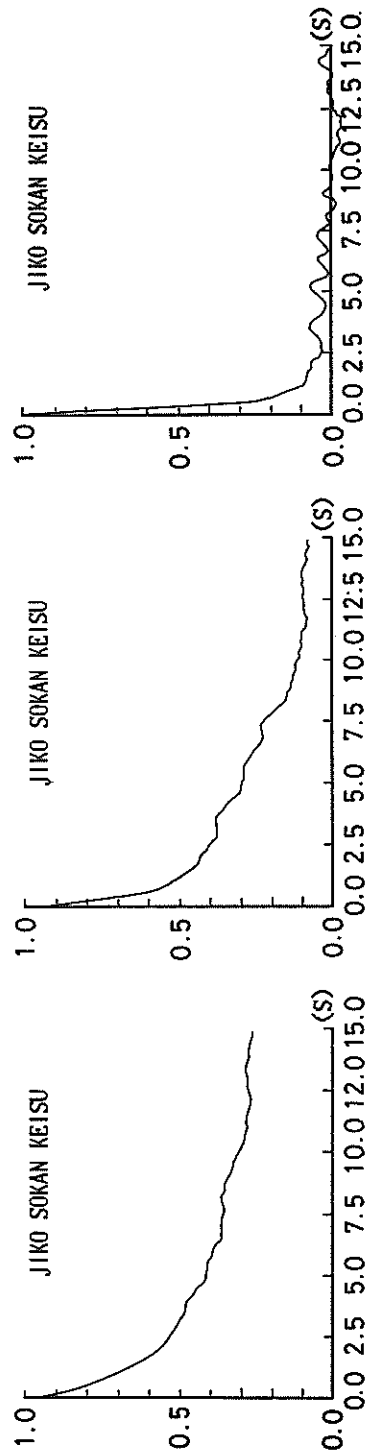
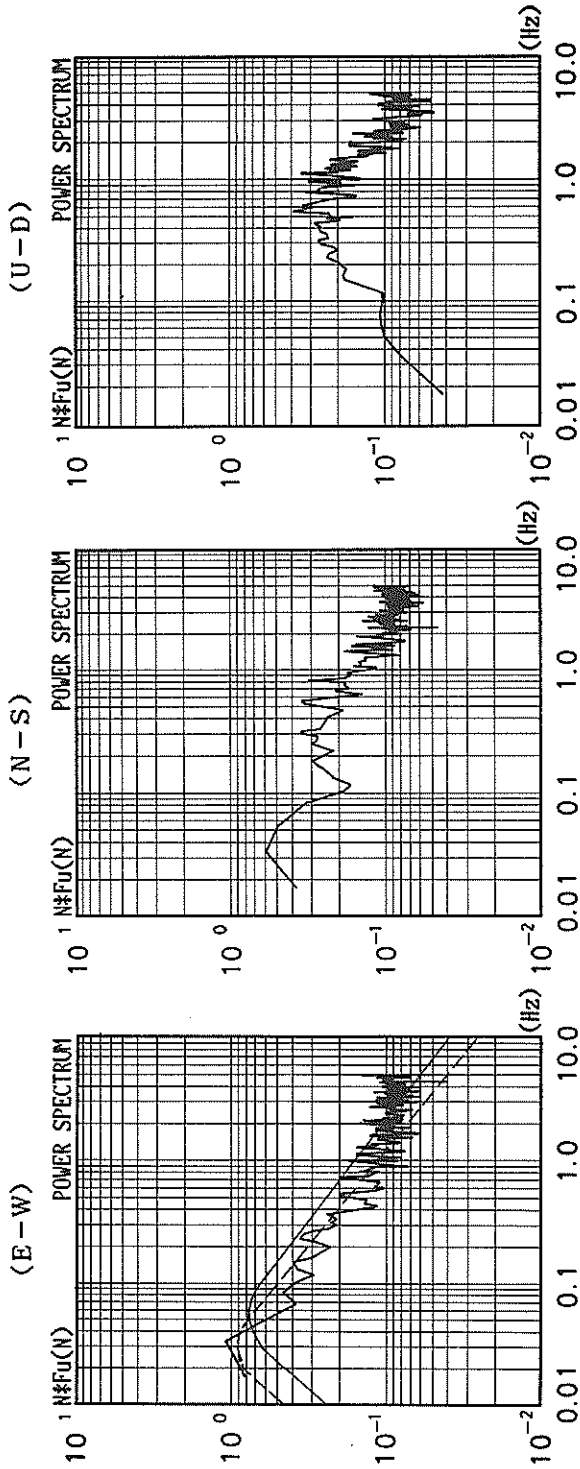


80/10/25 22.00-4

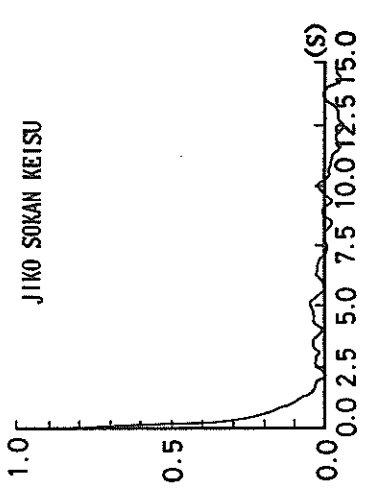
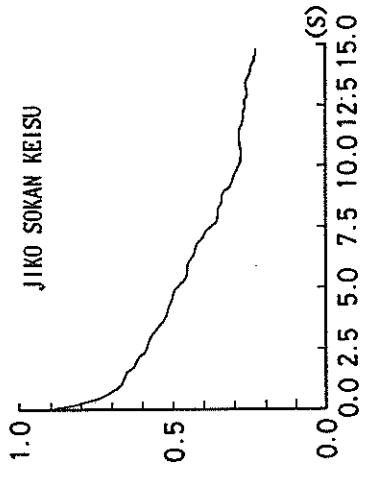
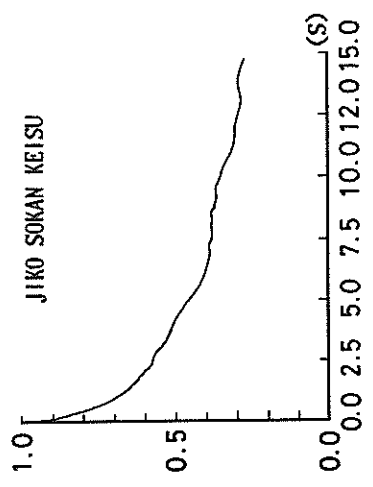
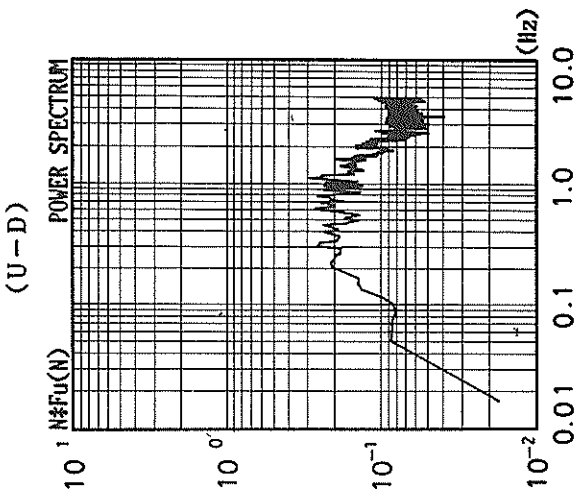
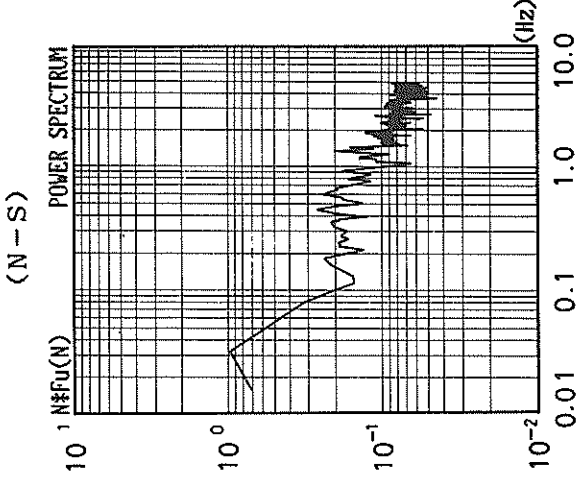
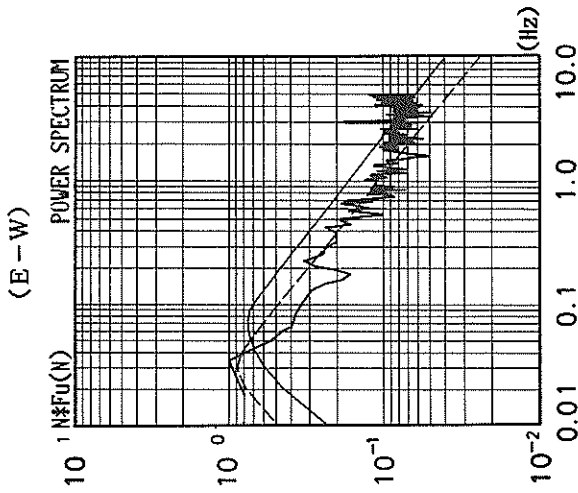


80/10/25 23.00-4

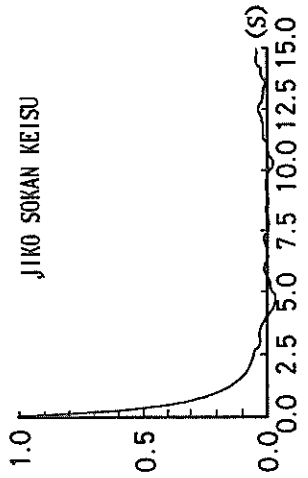
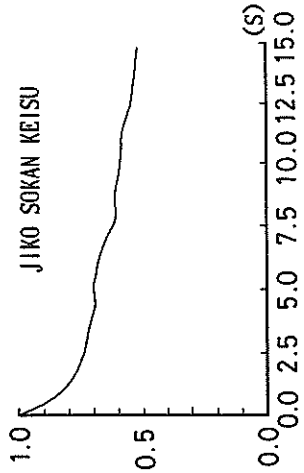
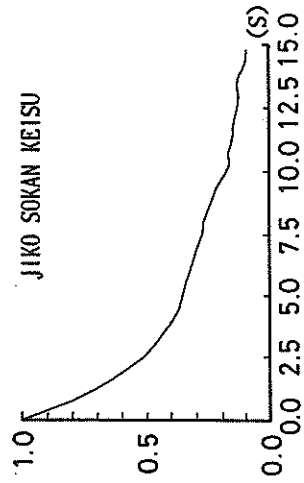
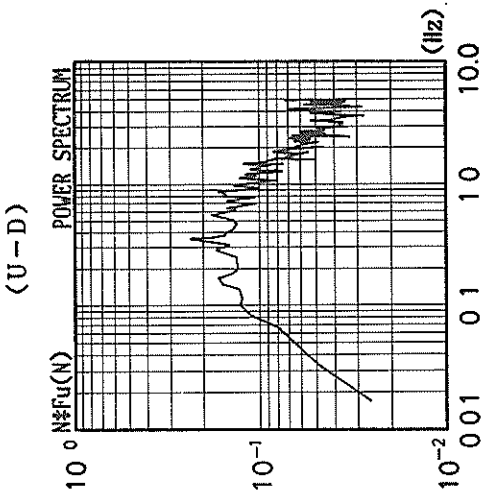
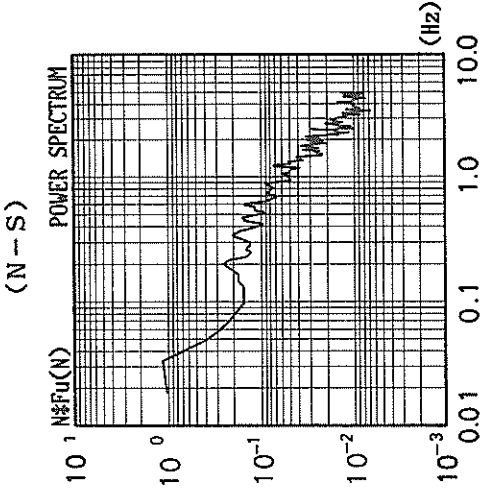
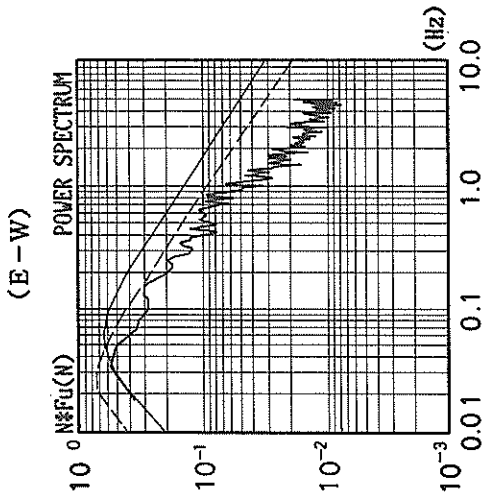




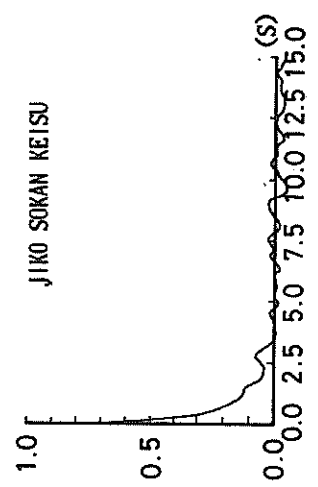
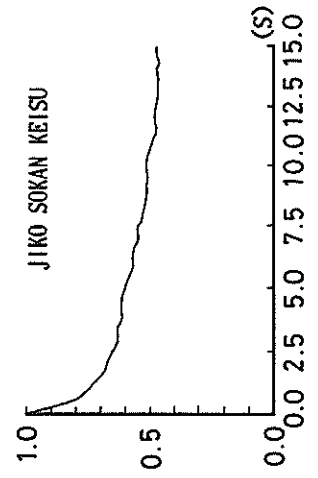
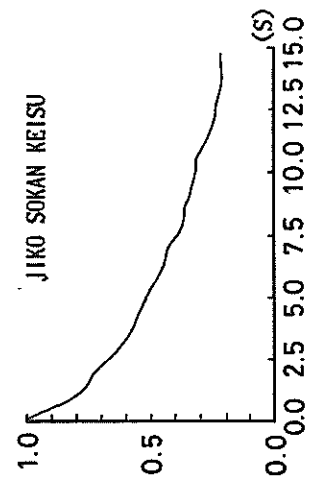
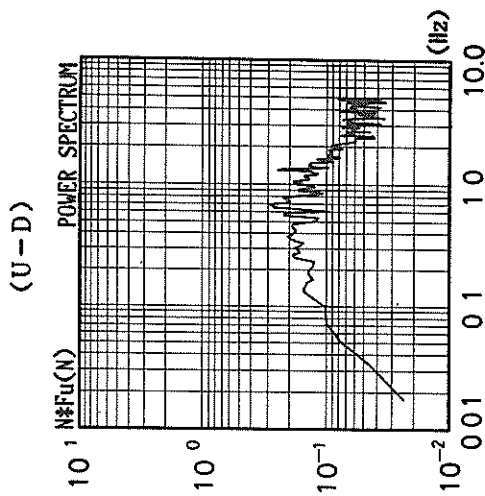
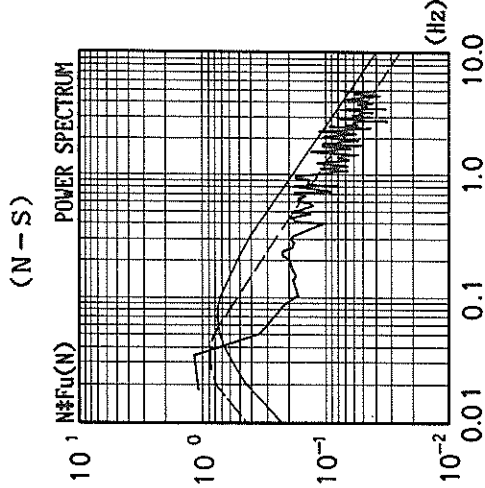
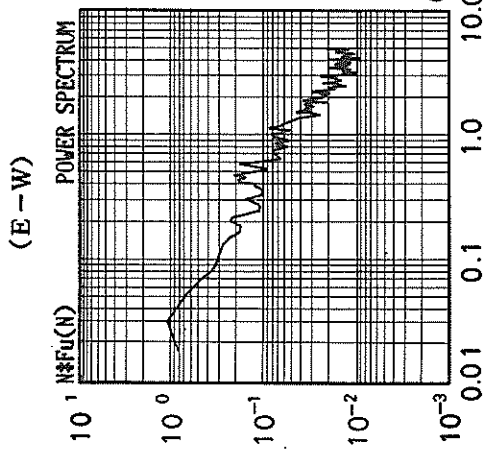
80/10/26 2.00-4



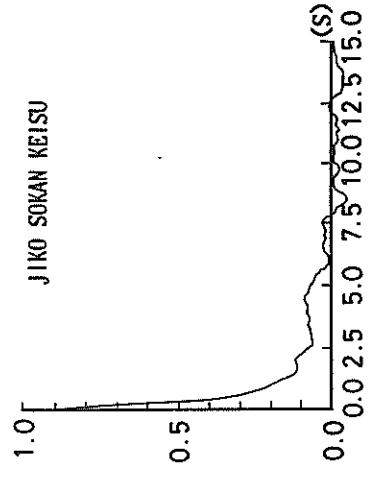
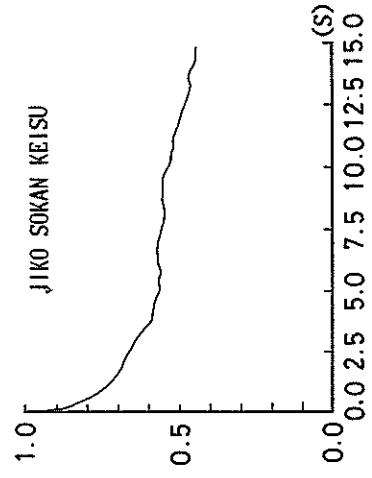
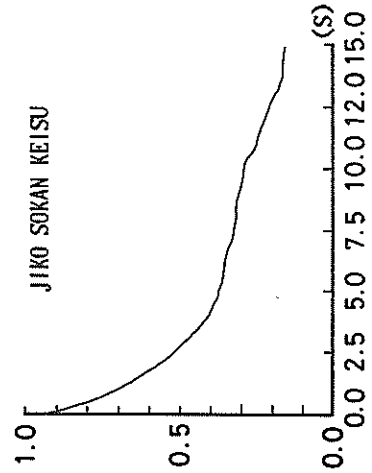
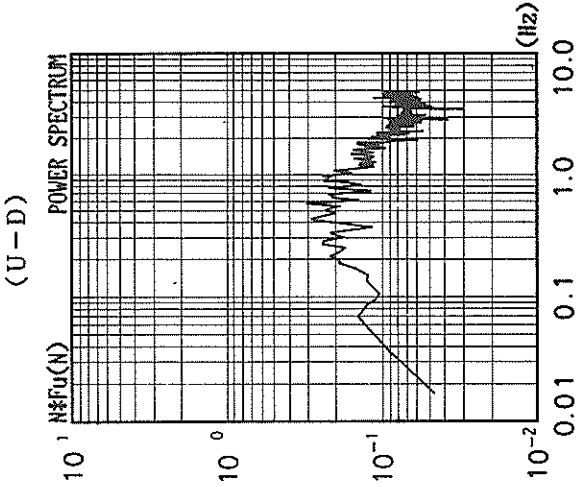
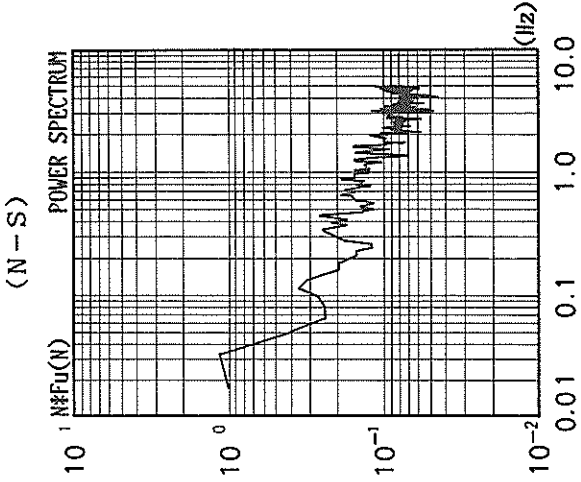
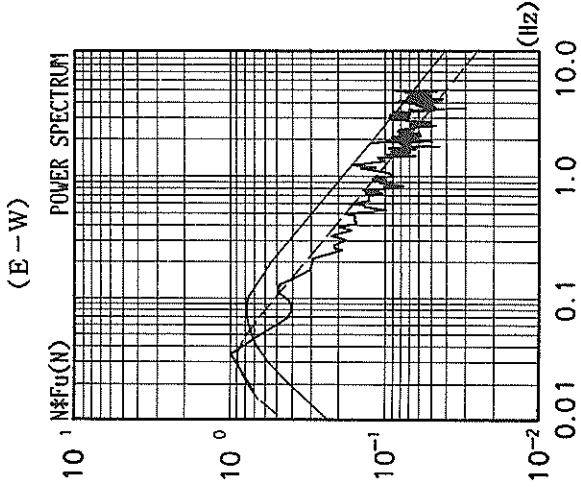
80/10/26 3.00-4



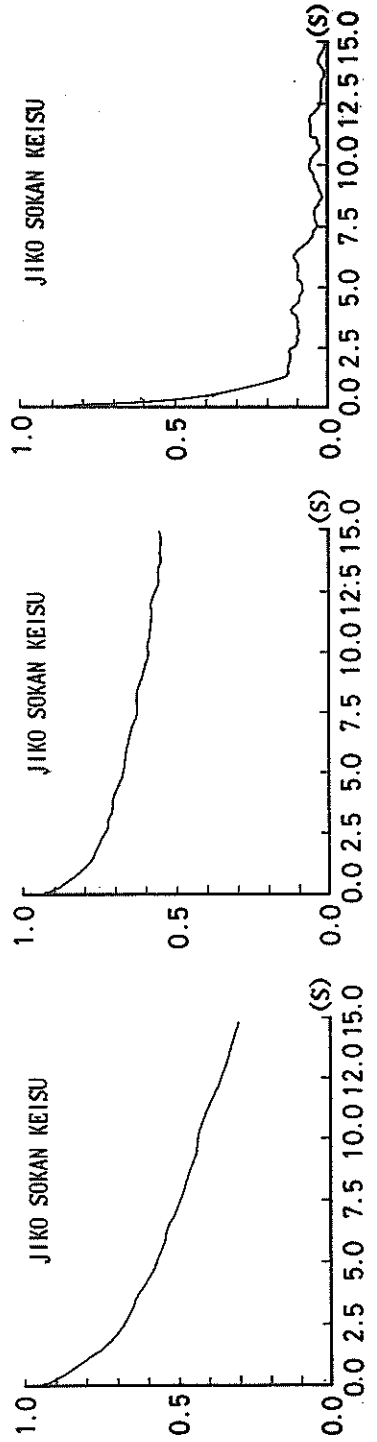
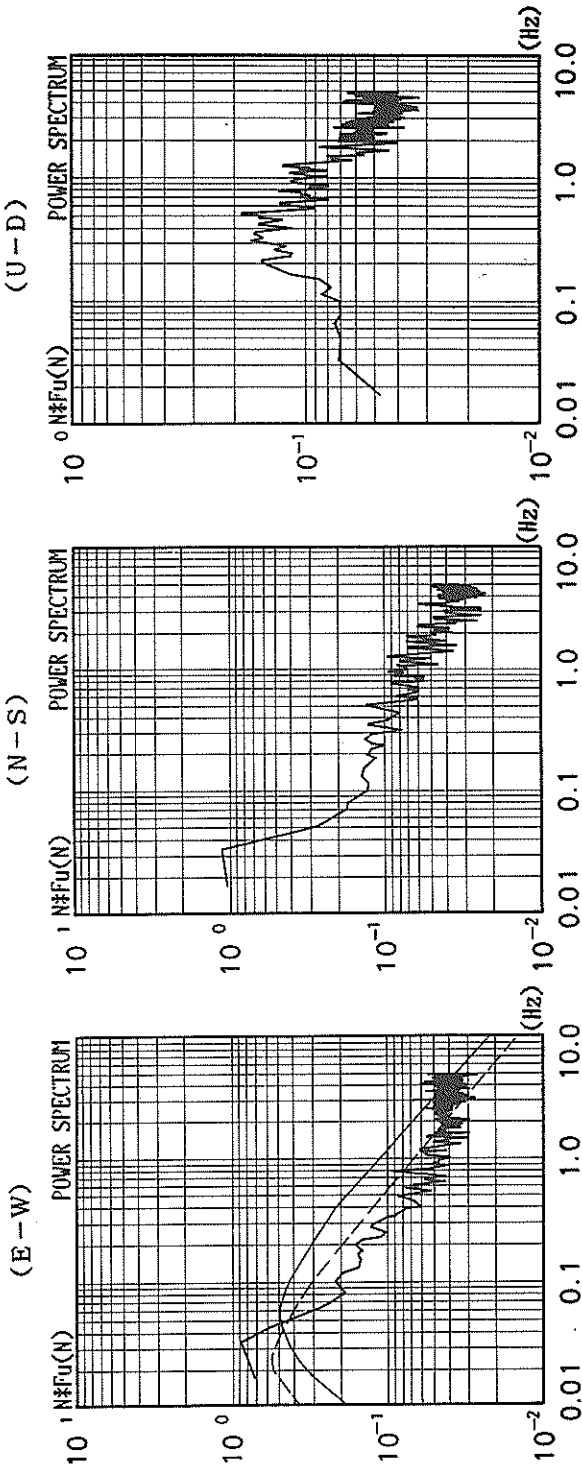
80/12/ 4 4.00-4



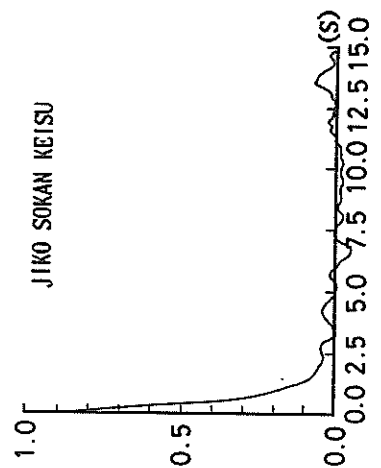
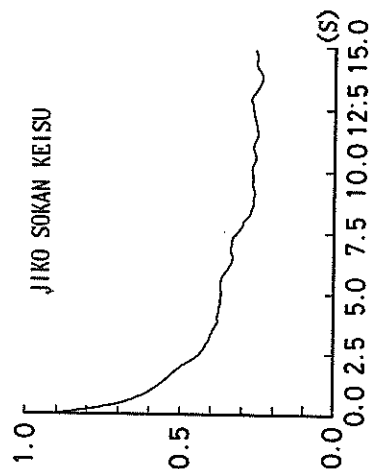
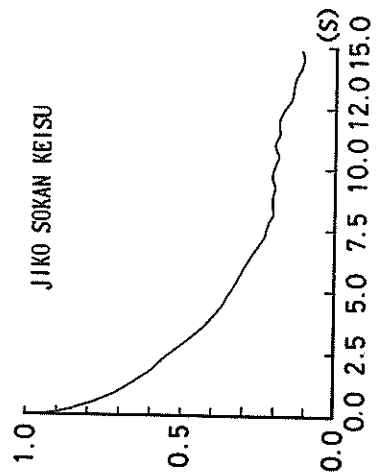
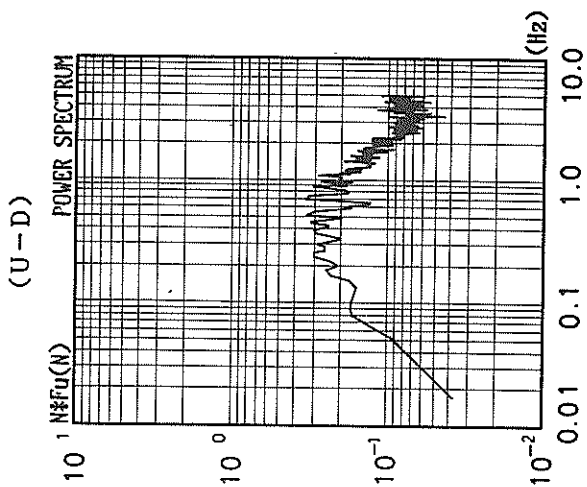
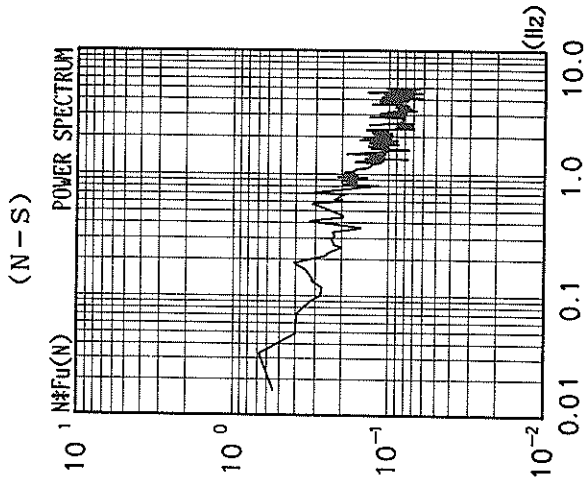
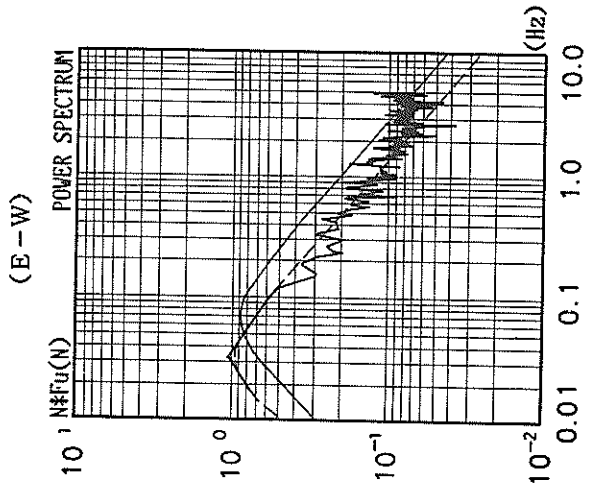
80/12/ 4 6.00-4



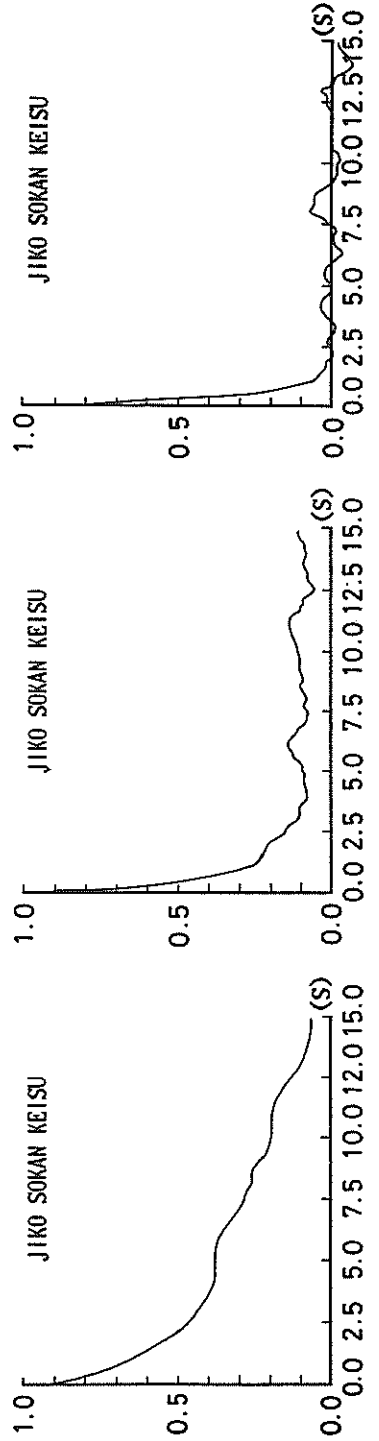
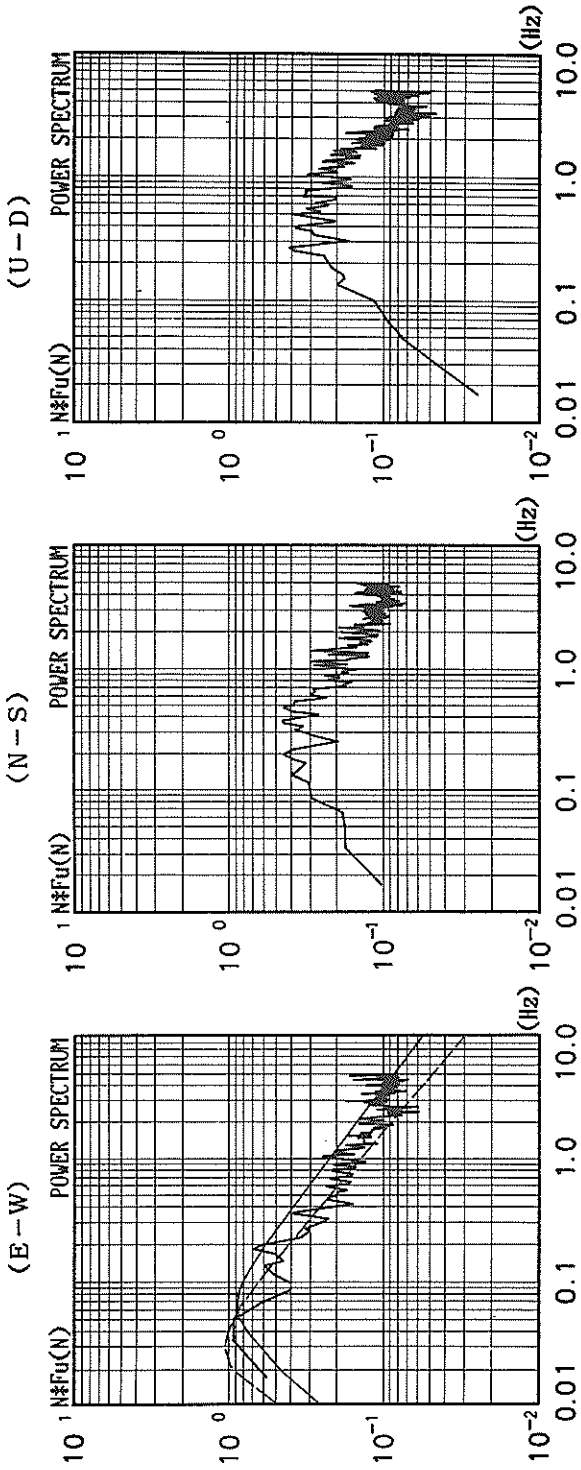
80/12/24 16.00-4



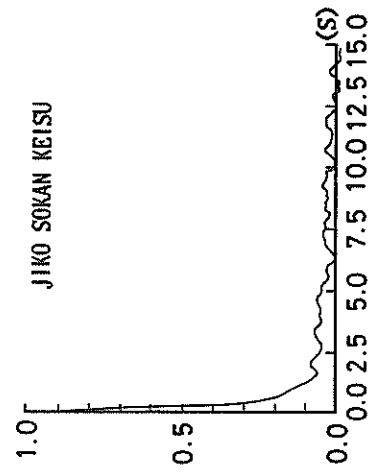
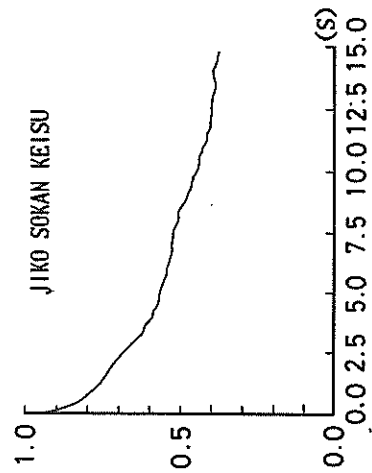
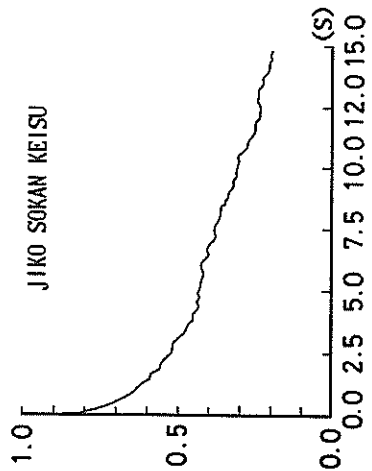
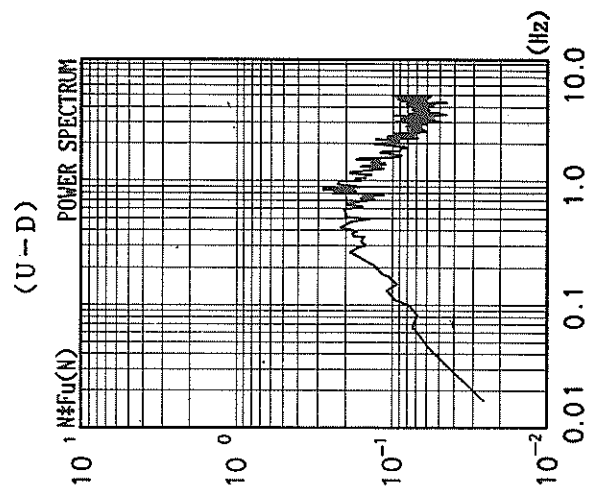
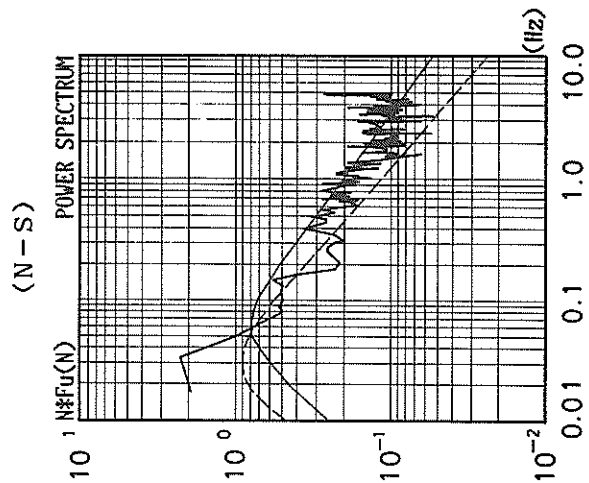
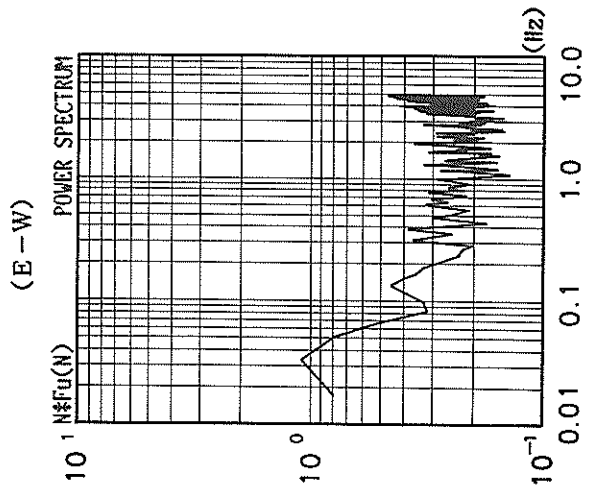
81/ 1/ 2 9.00-4



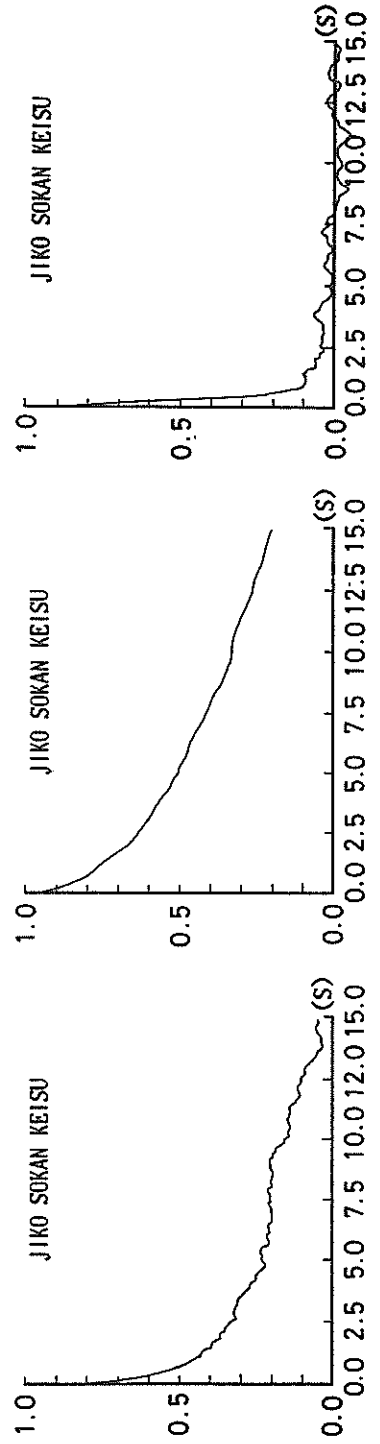
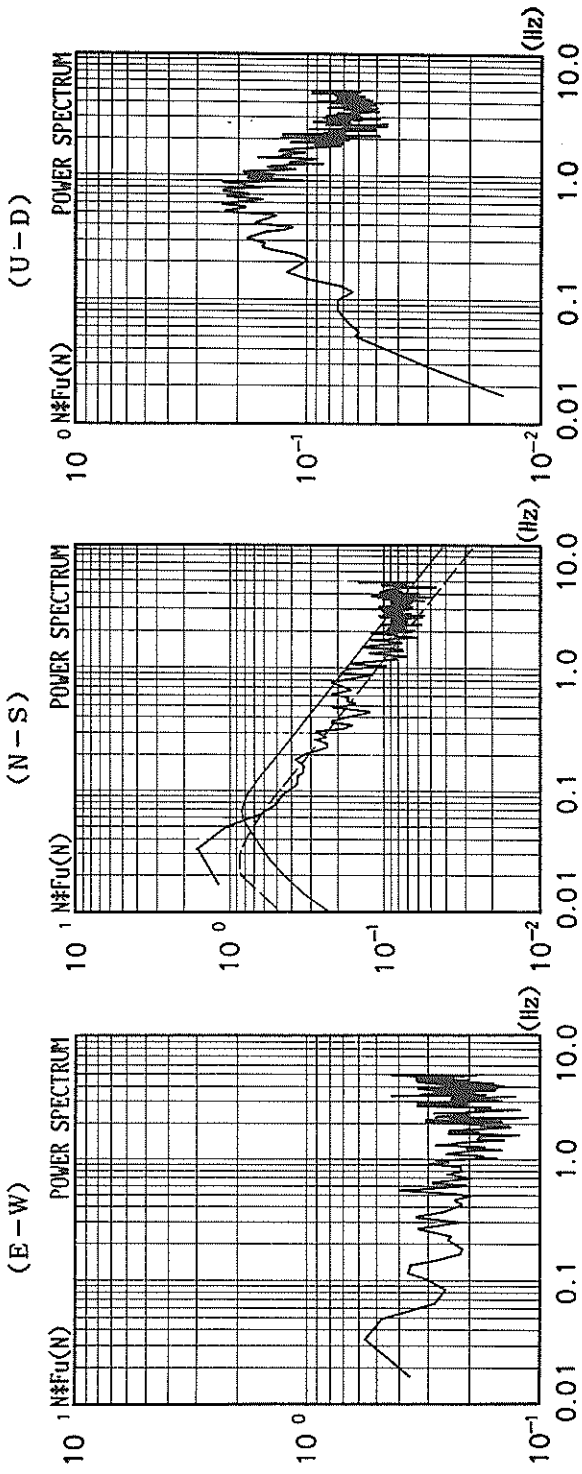
81/ 3/15 6.00-4



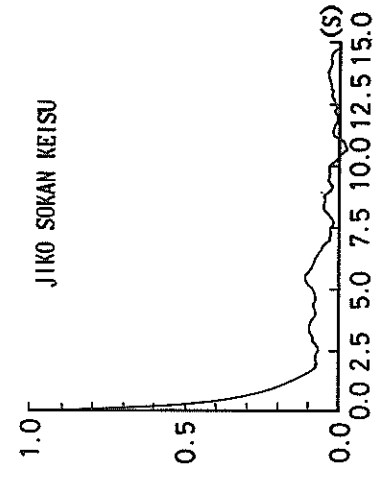
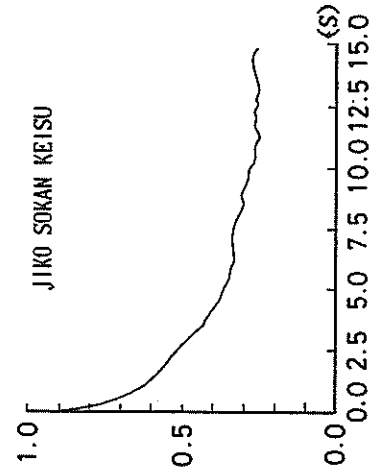
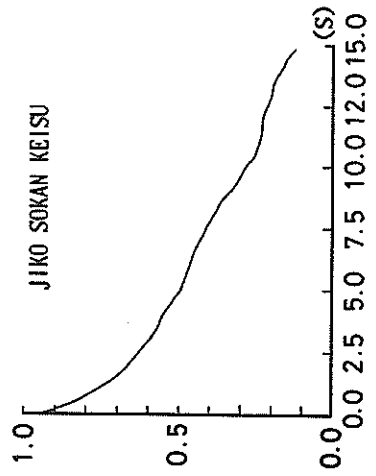
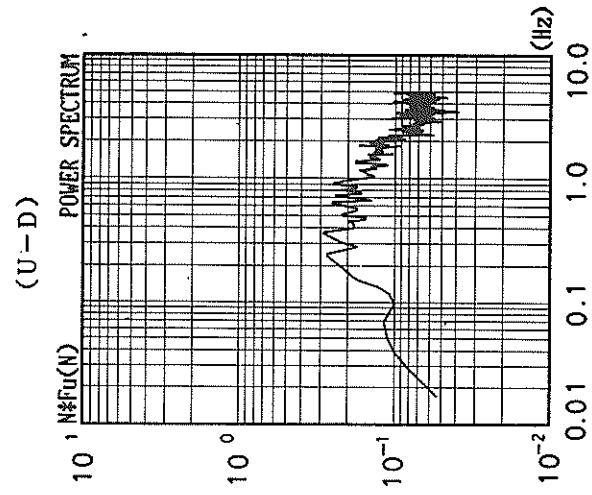
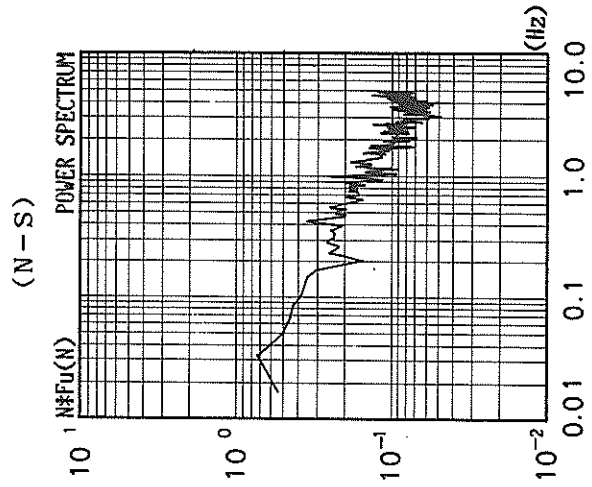
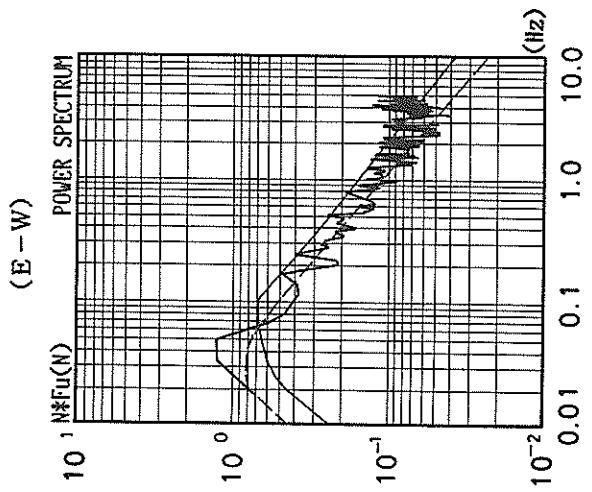
81/11/ 2 15.00-4



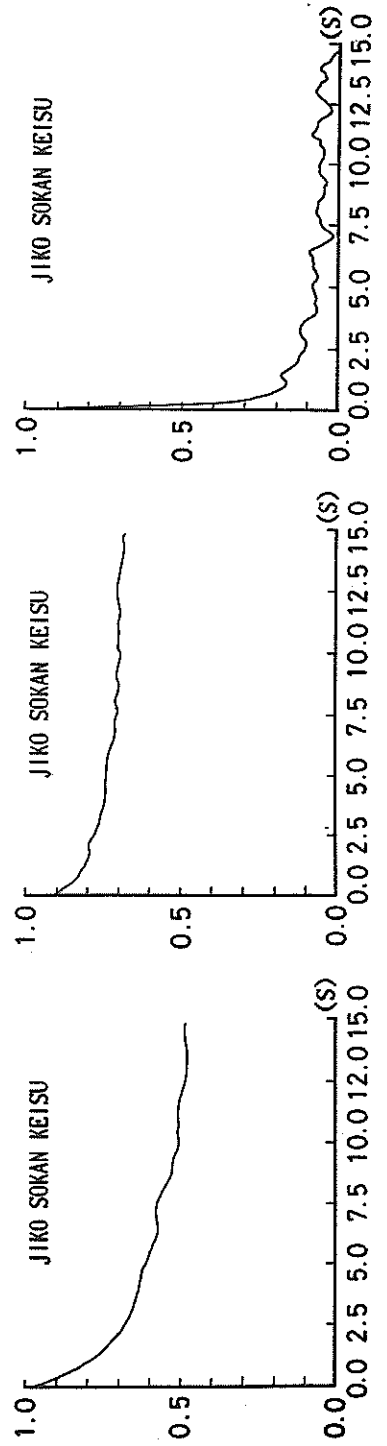
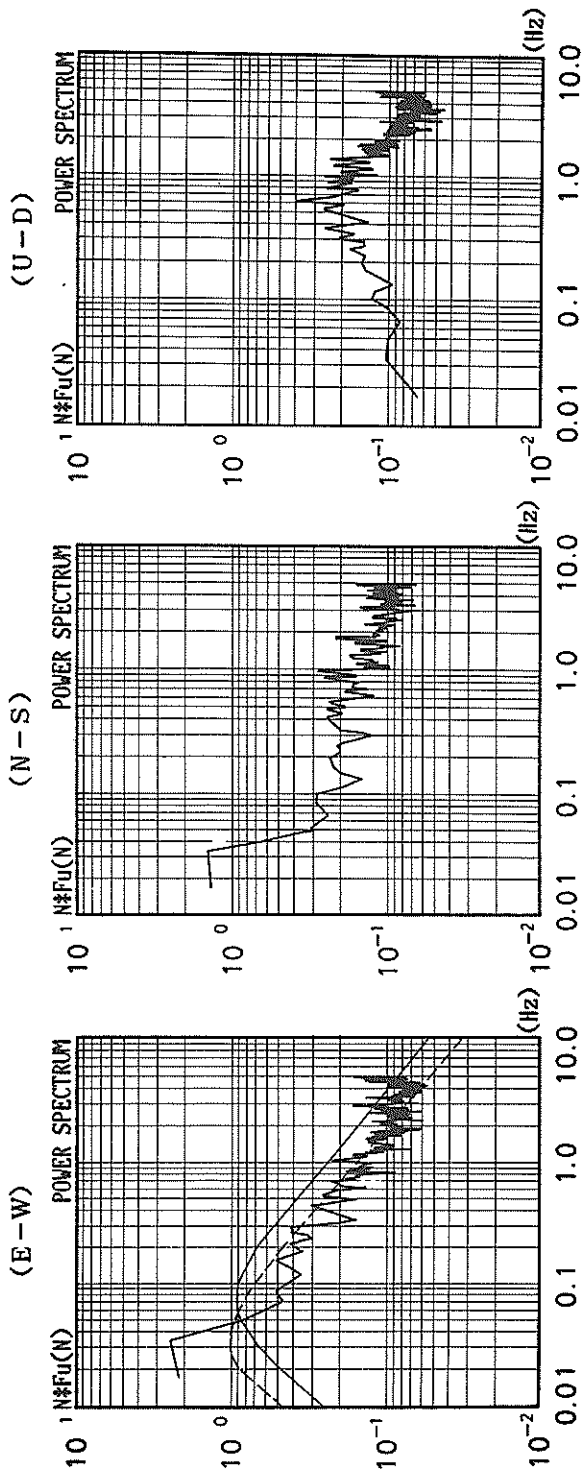
81/11/ 2 16.00-4



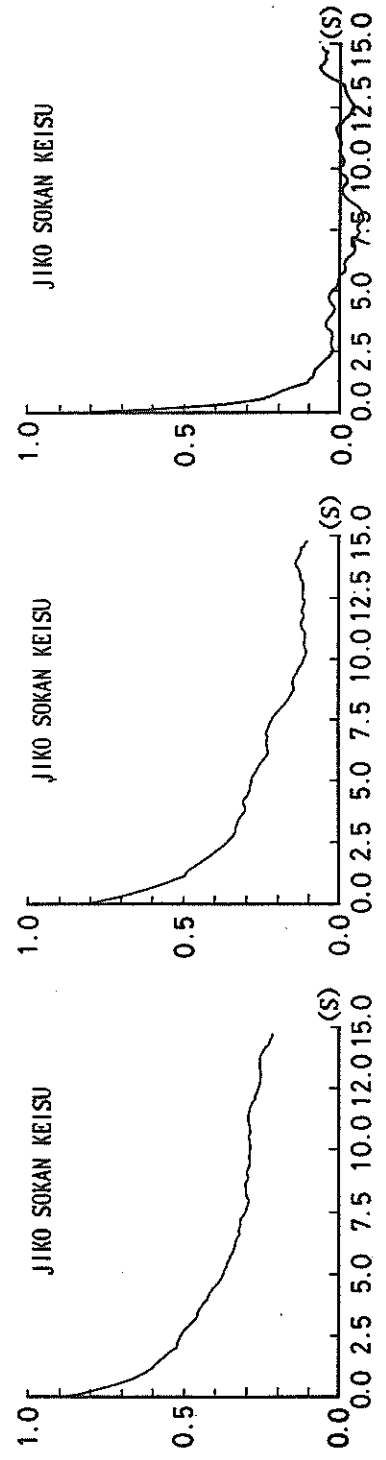
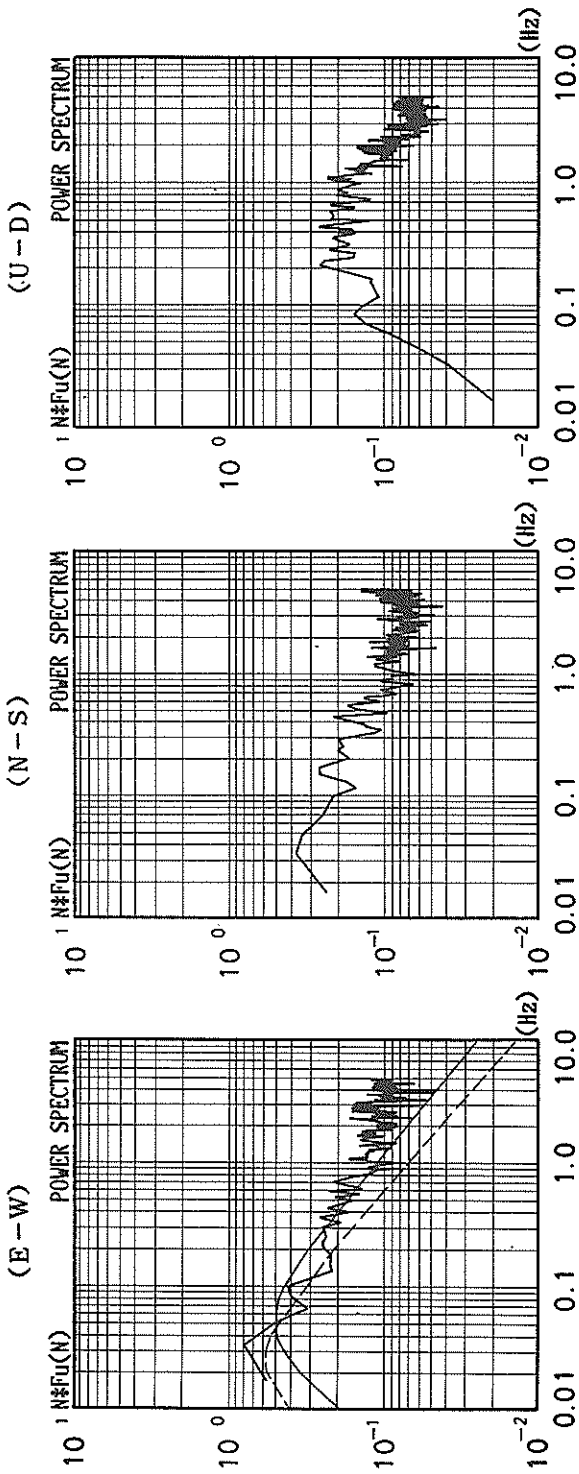
81/12/ 1 21.00-4

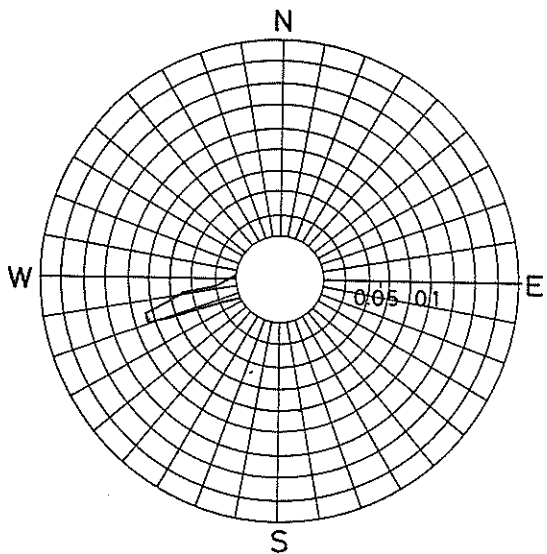


81/12/ 1 22.00-4

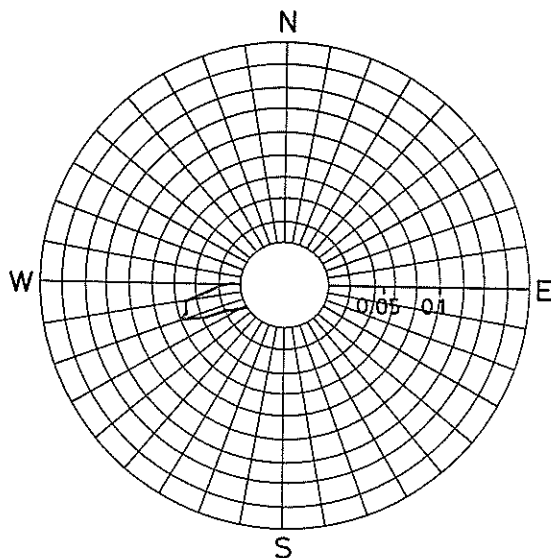


82/ 8/ 1 23.00-4

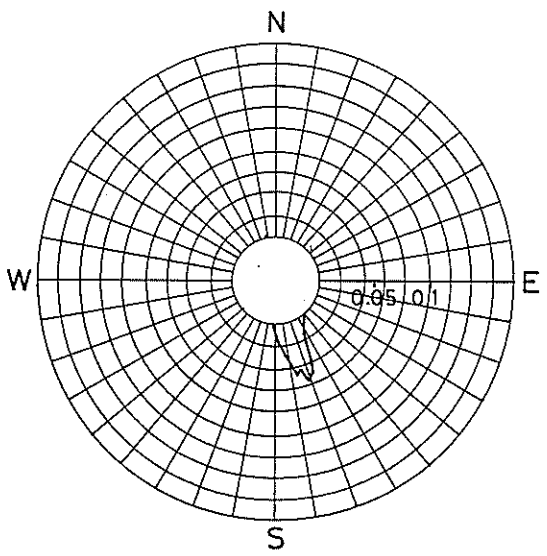




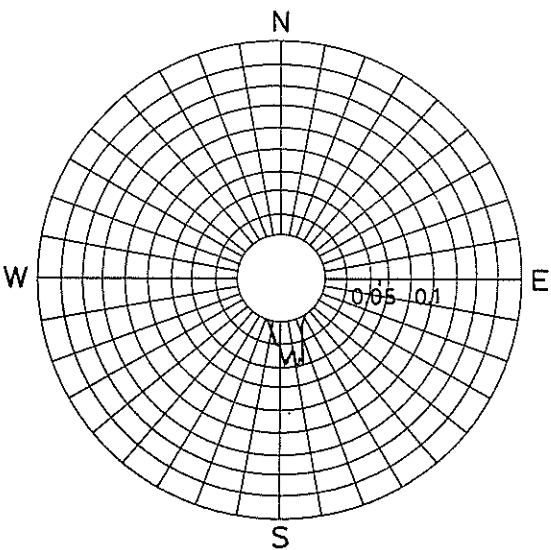
79/ 3/30 15.00-4



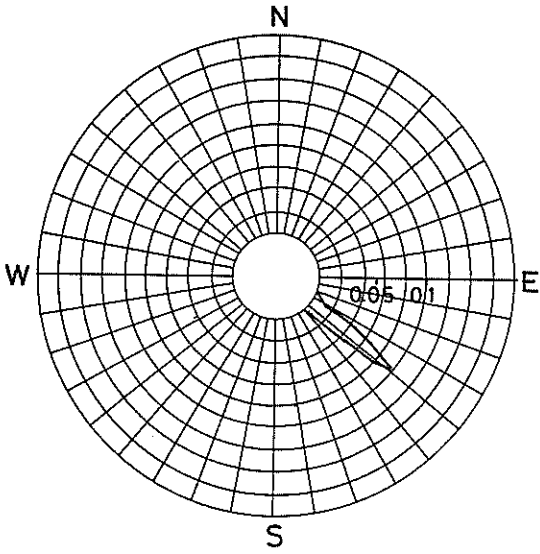
79/ 3/30 15.00-3



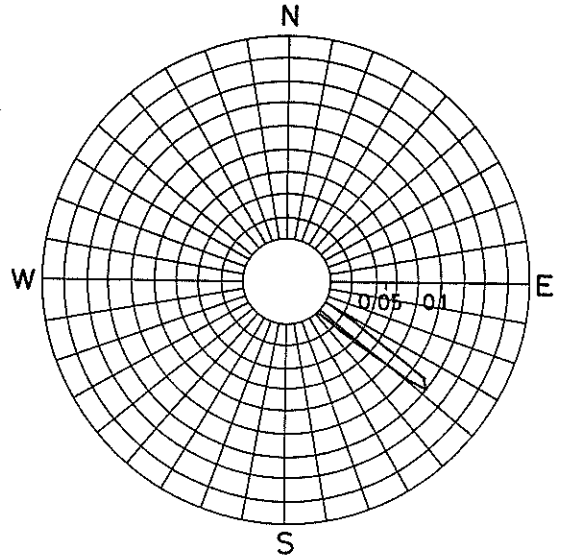
79/ 9/30 23.00-4



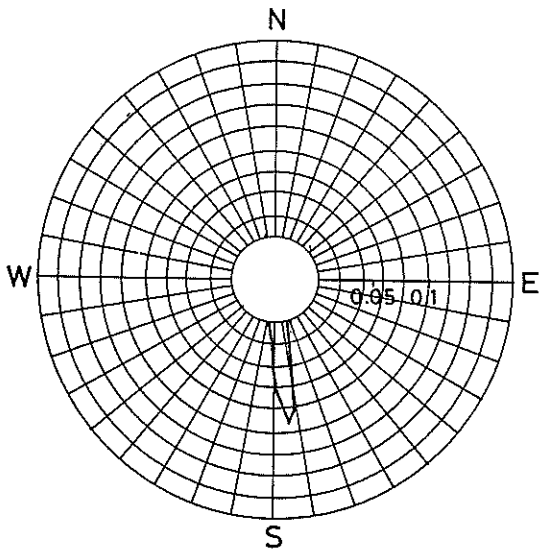
79/ 9/30 23.00-3



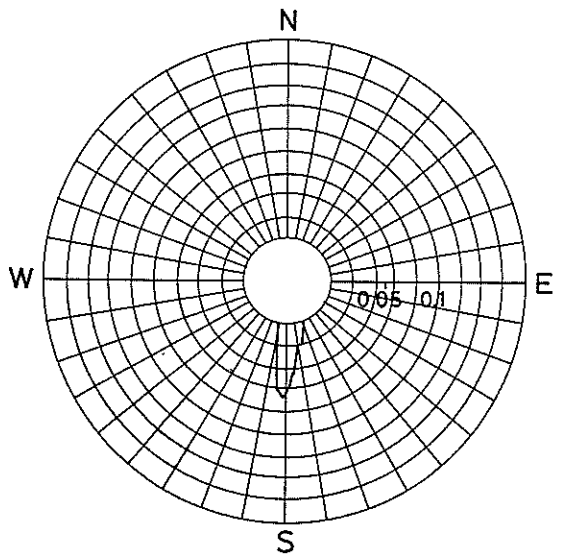
79/10/19 11.00-4



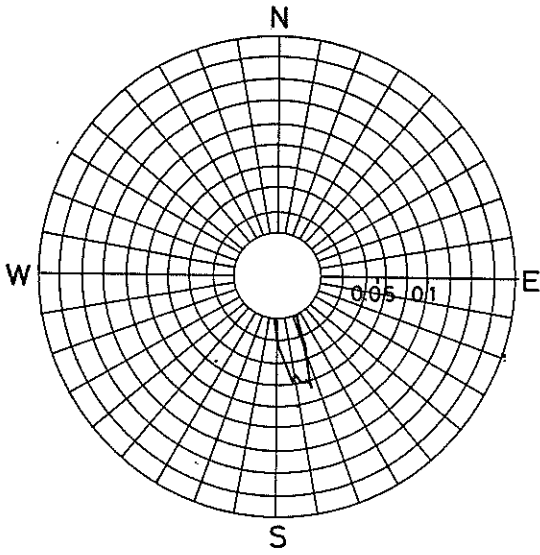
79/10/19 11.00-3



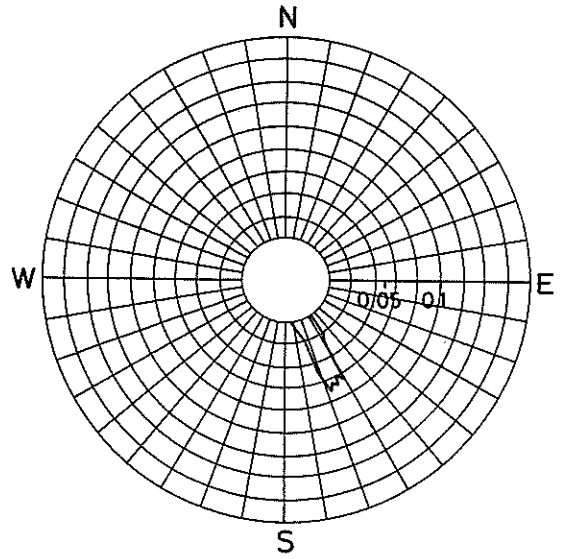
79/11/6 3.00-4



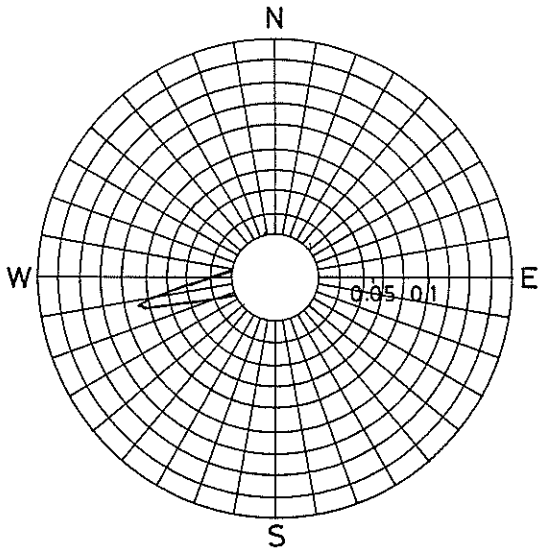
79/11/6 3.00-3



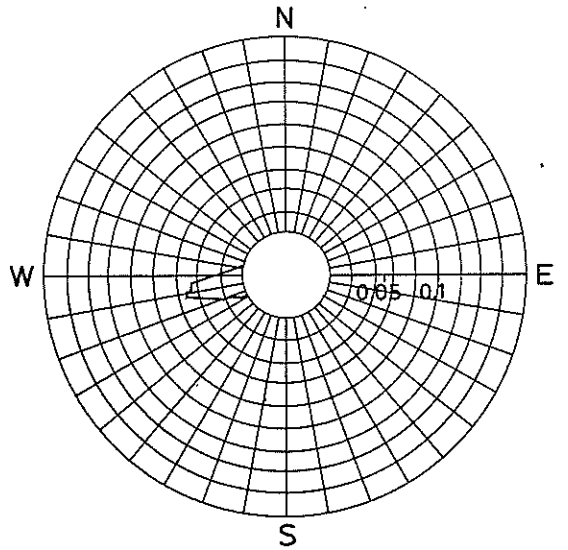
80/ 1/ 7 9.00-4



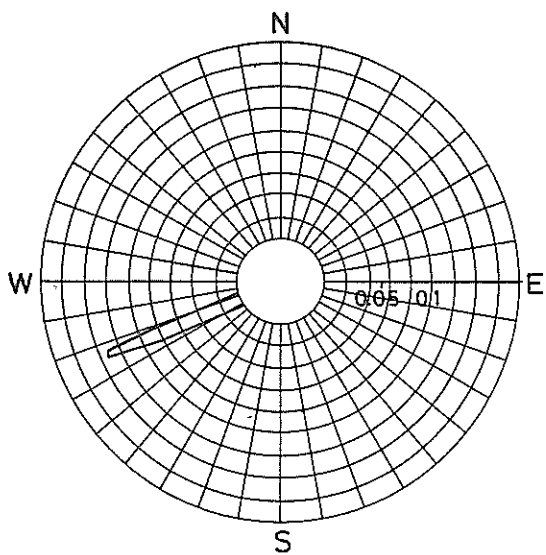
80/ 1/ 7 9.00-3



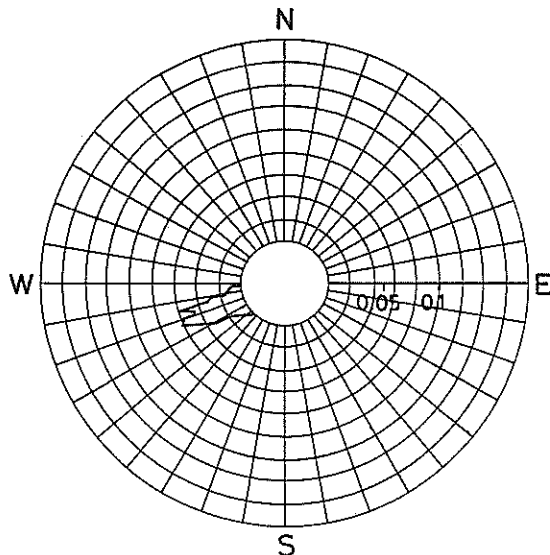
80/ 4/ 6 13.00-4



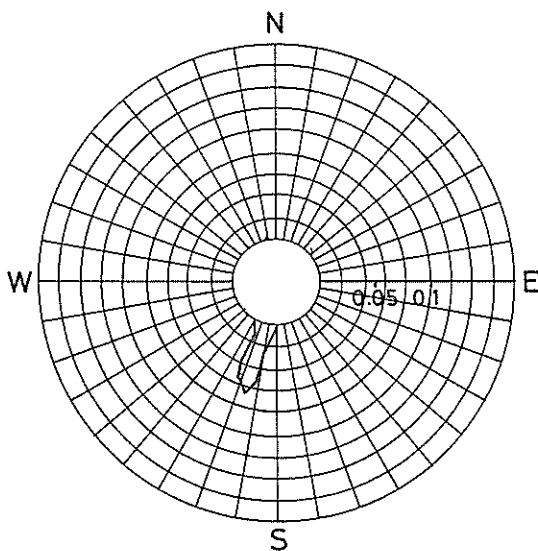
80/ 4/ 6 13.00-3



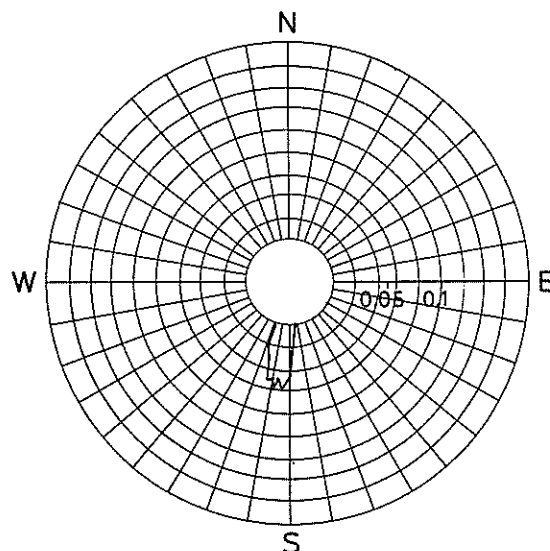
80/ 5/15 8.00-4



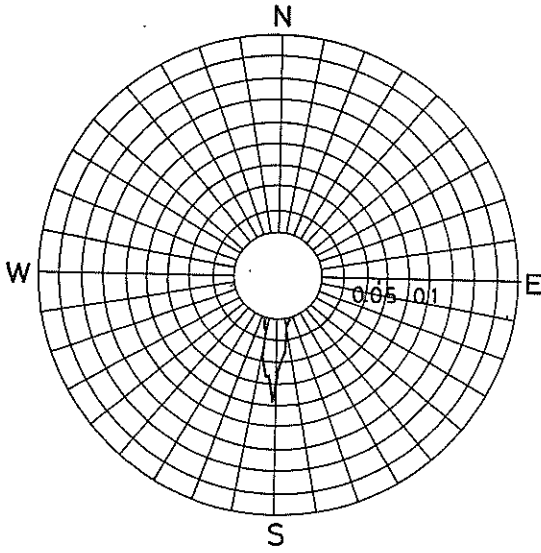
80/ 5/15 8.00-3



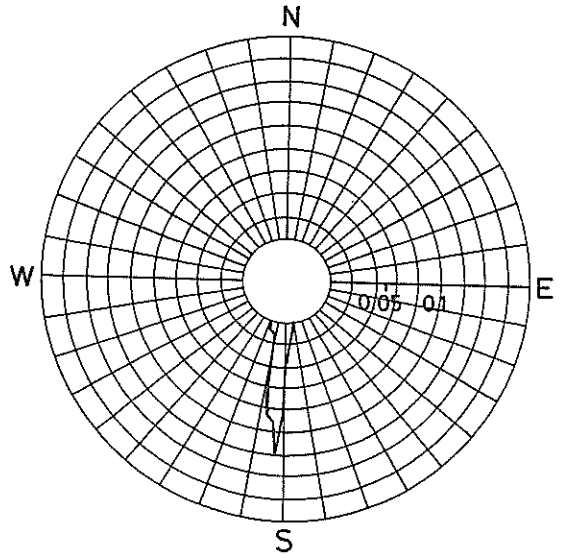
80/10/26 3.00-4



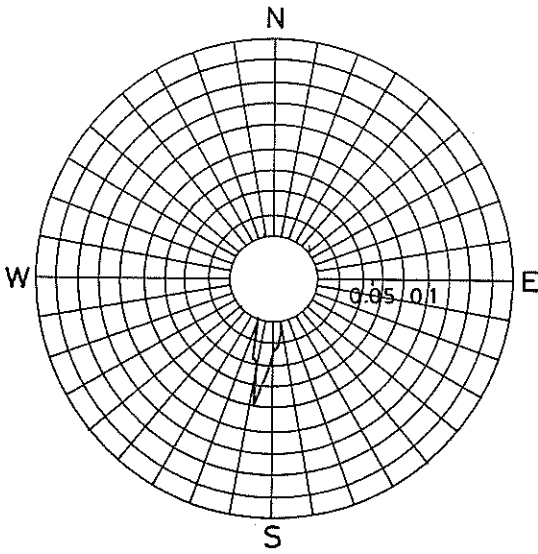
80/10/26 3.00-3



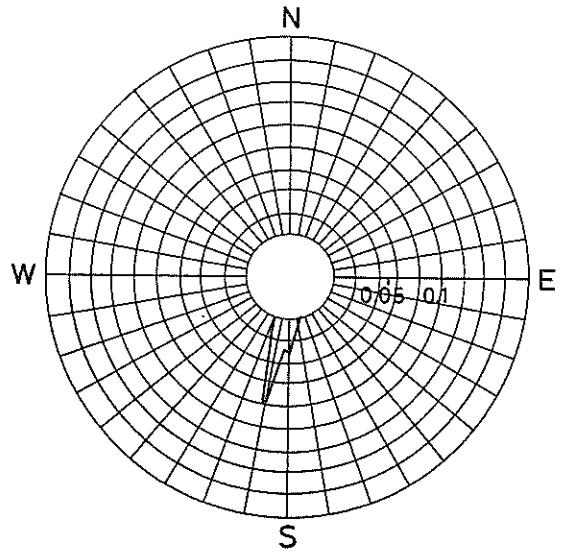
80/12/ 4 4.00-4



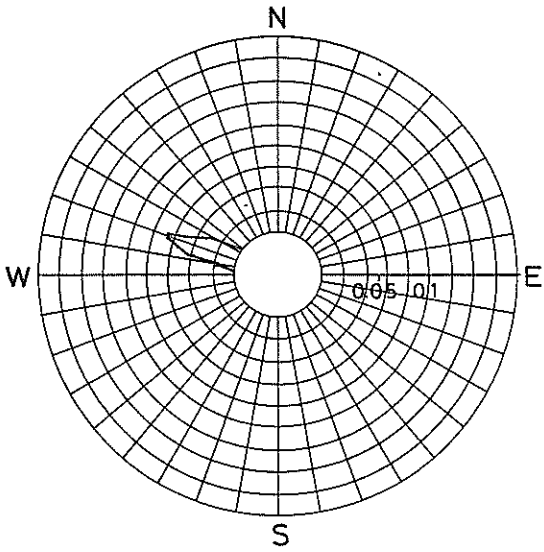
80/12/ 4 4.00-4



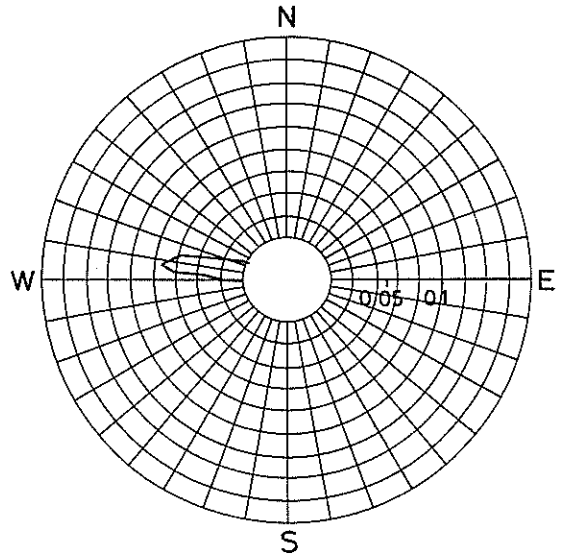
80/12/24 16.00-4



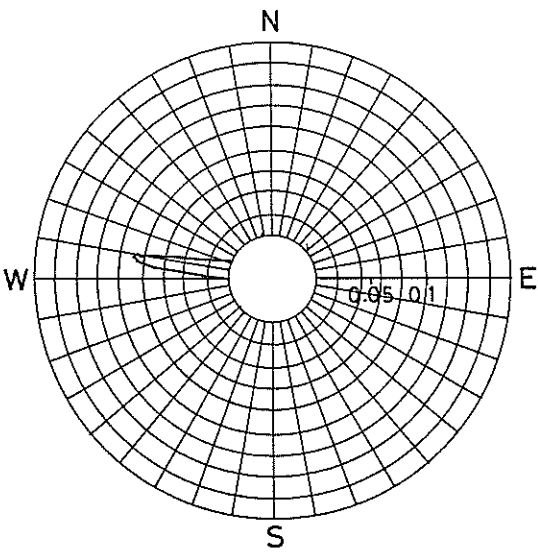
80/12/24 16.00-3



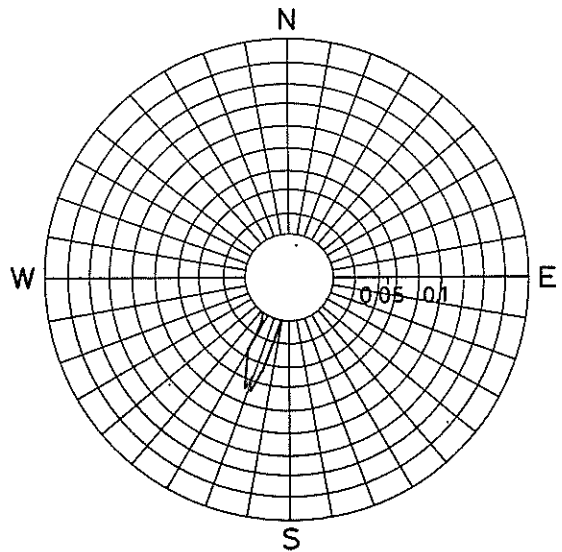
80/12/ 4 6.00-4



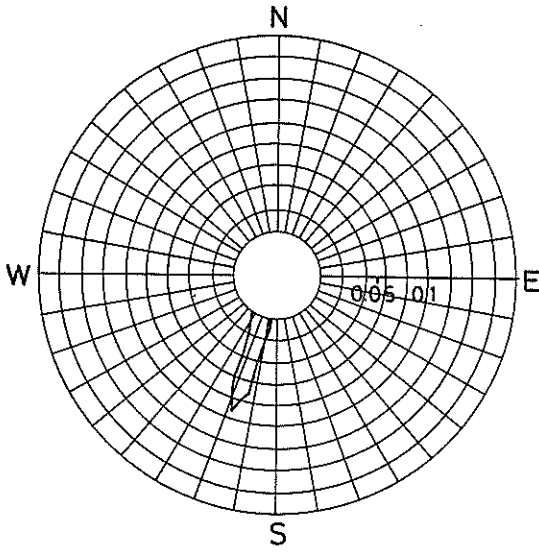
81/ 1/ 2 9.00-4



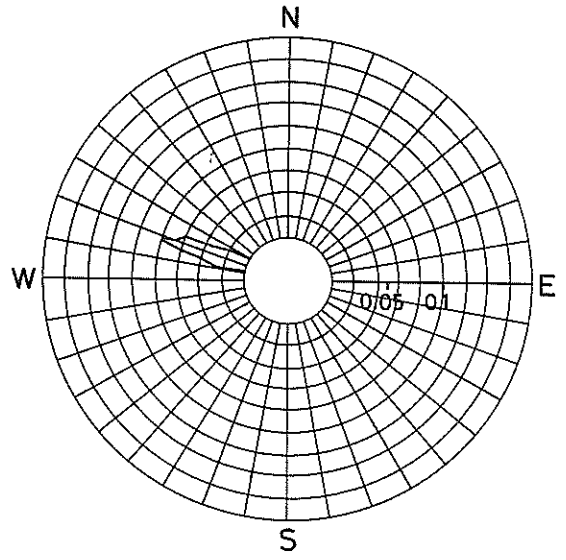
81/ 3/15 6.00-4



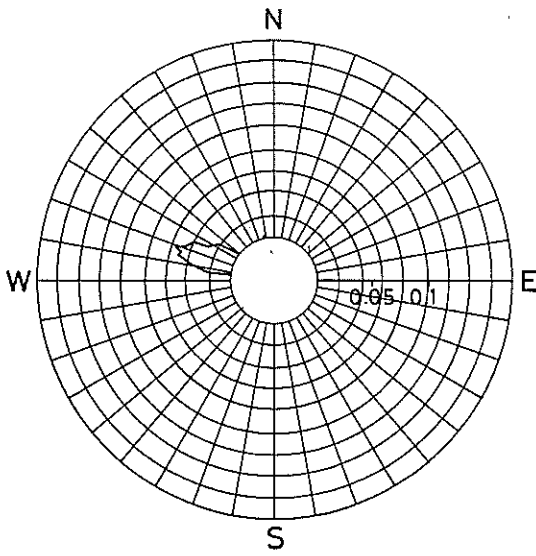
81/11/ 2 15.00-4



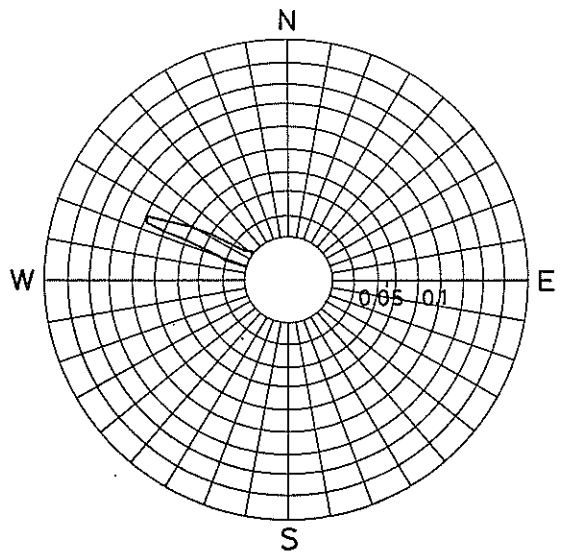
81/11/ 2 16.00-4



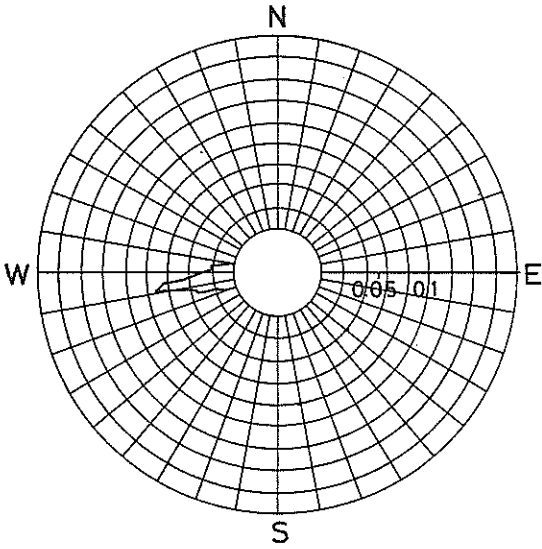
81/12/ 1 21.00-4



81/12/ 1 22.00-4



82/ 8/ 1 23.00-4



80/12/24 16.00-4

港湾技研資料 No. 496

1984・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.