

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE NO.15

AN INTERCOMPARISON STUDY BETWEEN

THE WAVE MODELS MRI AND MRI-II

—A COMPILATION OF RESULTS—

BY

OCEANOGRAPHICAL RESEARCH DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第15号

波浪推算モデル MRI と MRI-II の相互比較研究

—計算結果図集—

海洋気象研究部

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 1985

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. Kiyohide Takeuchi

Forecast Research Division	Head : Mr. Taiji Yoshida
Typhoon Research Division	Head : Dr. Masahiko Aihara
Physical Meteorology Research Division	Head : Dr. Toshihiko Okabayashi
Applied Meteorology Research Division	Head : Mr. Tsunehiro Majima
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. Keikichi Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. Masaharu Ichikawa
Oceanographical Research Division	Head : Dr. Hayato Iida
Upper Atmosphere Physical Research Division	Head : Dr. Muneyasu Kano
Geochemical Research Division	Head : Mr. Tsutomu Akiyama

1-1 Nagamine, Yatabe-Machi, Tsukuba-Gun, Ibaraki-Ken, 305 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Tsunehiro Majima

Editors : Koji Yamazaki Hiroki Kondoh Tomoyuki Ito
 Tomoaki Yoshikawa Jiro Aoyagi Masami Okada
 Masahiro Endoh Kunihiko Kodera Katsuhiko Fushimi

Managing Editors : Keikō Nishida, Yusai Yuhara

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the MRI.

序

さざ波の広がる海は詩や絵画の世界であります。一度時化ると海の波の恐ろしさは想像を絶するものがあります。とくに我国の周辺海域は、台風の襲来、冬の季節風、低気圧の発達等による高波の瀕発する難所となっており、今日でも船舶の遭難が続発し、また堅牢を誇る港湾海岸の構築物も一夜にして無に帰してしまうこともしばしばです。このため、従来の経験的方法による波の予報から定量的なより精密な予報への改善が要望されておりました。気象庁ではこれ等社会的ニーズに答えるため定量的な波浪予報の業務化を計画、これに基づき気象研究所海洋研究部は昭和46年から昭和50年までの5ヶ年の歳月を費やし、内外の諸研究の成果を踏まえ波浪推算モデル(MR I)を開発しました。このモデルは実用試験の後、昭和52年度波浪予報の業務化と同時に標準モデルとして使用され現在に至っております。

本報告は、その後の内外の諸研究(とくにSWAMP計画)の成果に加え、MR Iのすぐれた点を包含し、欠点を補正するべく開発された第2世代の波浪予報モデルMR I-IIの諸特性を明らかにするためのものです。同モデル利用のマニュアルとして、また、波浪予報モデルの次の段階への発展のための基礎資料として有効に活用されることを期待するものであります。

最後になりましたが、本研究を実施した海洋研究部、宇治豪主任研究官の功労を多とするとともに、惜しみなく各種協力をしていただいた所内、部内の関係官、研究者、気象庁海洋気象部関係官、適確かつ建設的な意見・批判および有用な情報を提供して下さった東北大学、九州大学の同学の志に深甚の感謝の意を表す次第であります。

昭和60年1月

気象研究所 海洋研究部長

飯田隼人

目 次

序

概 要 (和文)	1
1 序	1
2 モデルの概説	2
3 数値実験	4
4 計算と出力の推定	5

概 要 (英文)	17
1. Introduction	17
2. Outline of the Models	18
3. Test Case of the Intercomparison Study	20
4. Specifications for Calculation and Plots	25
5. List of Diagrams	30
6. References	36

DIAGRAMS

Case I	39
Case II	53
Case III	69
Case IV	88
Case VII	106
Case V	135
Case VI	151

波浪推算モデルMRIとMRI-Ⅱの相互比較研究*

1. 序

1981年に10の波浪推算モデル(波モデル)のグループが米国, ヨーロッパ, 日本から参加して波モデル相互比較研究が行なわれた。この研究はIUCRMの波浪の力学と海面の電波探査のシンポジウムの中の一つのテーマであって, その結果は同シンポジウムのプロシーディングとして出版された(The SWAMP Group (Part 2) 1982, (Part 1) 1984)。この研究の第一の目的は風で生じる水の表面波の物理についての理解が現時点でどのように波モデルに反映しているかをテストすることであった。この研究は, 実験や理論だけでなく波モデルの数値的取り扱いについての将来の指針を得ることに特に役立つと考えられる。この研究に我々が開発した第一世代に属する線形な波モデルMRI(Uji and Isozaki 1972, Isozaki and Uji 1973, Uji 1975)も参加した。その結果, このモデルは波高の推算の点では特に欠点はなく, しかも複雑な風系での性能は優れていることが確認された。しかし, このMRIは風波のパラメータ表現を利用した第二世代の波モデルに較べ, 発達初期の風波のスペクトルの形をうまく表せないことも明らかになった。この点を改良するため風波のパラメータ表現を利用した波モデルMRI-Ⅱを新たに作成した(Uji 1984)。

この新しい波モデルMRI-Ⅱの性質を明らかにしておくことは, 利用の便に供する意味から重要である。さらに, MRI-Ⅱは, 波浪の数値的表現および波浪エネルギーの伝播を計算する工夫が古いMRIと全く同じであるところから, 数値的取扱による結果の差異はこれらのモデル相互の間には生まれないので, 両者の結果を比較することはモデルの基礎となっている物理的仮定の違いを浮かびあがらせる意味で特に有効である, この意味で, この相互比較研究は波モデルの将来の発展に取っても, 重要な基礎データを提供し得ると考えられる。このような理由で, 新しいMRI-Ⅱを用いてSWAMPで行なわれた全ての数値実験を再現し, その結果をSWAMPの作図様式に則って描いた。ここにそれらの図をMRIの結果と合わせて全て収録する。The SWAMP Group 1982, 1984には上記の相互比較研究の過程で作図された全ての図は収録されていないので, ここにはそれらに含まれていない図もある。この図集は上記のThe SWAMP Groupの結果とあわせて利用すればより有効に活用できる。そこで, The SWAMP Groupによる結果と対比できるように, 図の番号は図15-7. 4-1. のように示されている。即ち, 最初の15は本誌全体の通し番号, 二番目の7. 4はThe SWAMP Group 1984 (Part 1)に示された番号, 三番目の1. はThe SWAMP Group 1982 (Part 2)の番号である。SWAMPの文献に対応する図がない場合

*宇治 豪 : 海洋気象研究部

はその番号を0にしてある。

2. モデルの概説

波浪の推算には、

$$\frac{\partial F}{\partial t} + Cg \cdot \nabla F = S_{net} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2.1)$$

で表されるエネルギーバランスの式を用いている。ここで $F = F(\sigma, \theta; x, t)$ は波浪の2次元スペクトル、 σ は角周波数、 θ は成分波の進行方向、 $Cg = Cg(\sigma, \theta)$ は成分波の群速度、 S_{net} は成分波が単位時間に得る全エネルギーを、 S_{in} は風から波へのエネルギーの流入を、 S_{nl} は非線形相互作用による成分波相互のエネルギー輸送を、 S_{ds} はエネルギーの散逸を表す。なお、 t は時間 x は場所である。式(2.1)の右辺にある S_{net} 、(S_{in} , S_{nl} , S_{ds}) については厳密な意味では未だ全てが明らかになってはいない。この S_{net} の表現の仕方と波浪の数値的表現方法によって色々な種類の波モデルが存在する。

2.1 波モデルMRI

このモデルでは S_{net} の内容として、順風による線形および指数関数的成長、波浪が成長すると共にピアソン-モスコビッツ (P-M) のスペクトルで表される平衡状態に近づくような形をした碎波の効果、成長しすぎた成分に対する摩擦によるエネルギーの散逸および逆風の効果が考慮されている。波と波の相互作用と、浅海効果は無視している。

数値的には波のエネルギーを352個(16方位×22周波数成分)のスペクトル成分で表現している。波のエネルギーの伝播の計算にはエネルギーの空間分布の歪みを防止する工夫がなされている(Uji and Isozaki 1972)。

MRIでは波浪のスペクトル成分と風との関係を次の三つの過程に分けて取り扱っている。各々の過程における S_{net} は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} S_{net} &= (A + B \cdot F) \{1 - (F/F_{\infty})^2\} \Gamma(\theta - \theta_w), & | \theta - \theta_w | \leq 90^\circ, F \leq 1.41 F_{\infty}, \\ S_{net} &= -D \cdot f^4 F, & | \theta - \theta_w | \leq 90^\circ, F > 1.41 F_{\infty}, \\ S_{net} &= -[B \cdot \Gamma(\theta - \theta_w) + D \cdot f^4] F, & | \theta - \theta_w | > 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

ここで、 A と B は風速と成分波の周波数で決まる定数で I_{noue} (1966) の値を用いている。 D は定数でその値は $1/3600 \text{ s}^3$ 、また十分発達したスペクトル F_{∞} は

$$F_{\infty} = \phi_{PM} \Gamma(\theta - \theta_w)$$

と表される。ここに ϕ_{PM} はP-Mのスペクトル、 $\Gamma(\theta)$ は方向分布関数で

$$\Gamma(\theta) = \begin{cases} (2/\pi) \cos^2 \theta, & |\theta| \leq 90^\circ \\ 0, & |\theta| > 90^\circ \end{cases}$$

と仮定されている。 θ_w は風向を表す。

2.2 波モデル MRI - II

このモデルは5個の過程を含んだエネルギーバランスの式を基礎としている。その過程とは、順風によるエネルギー入力、風波をなす成分波間での共鳴相互作用による非線形なエネルギー輸送、砕波、摩擦による散逸および逆風の効果である。このモデルでは風波の単一パラメータ表現によって風からの入力と共鳴相互作用による非線形エネルギー輸送を同時にかつ陰に表現している。この単一パラメータ表現の内容は、Tobaによる波高と周期間の2/3乗則、パラメータであるスペクトルピーク周波数 σ_p に対するTobaの予報式

$$(d\sigma_p^* / dt) = 1.783 \times 10^{-3} \{1 - \text{erf}(4.59 \times 10^{-2} \sigma_p^*)\} \quad (2.3)$$

およびP-Mのスペクトルに風波のスペクトルが相似であるという仮定である(変数の右肩の*は摩擦速度 u_* と重力の加速度 g によって無次元化した量であることを常に示す)。

以上から、パラメータ表現を用いた風波のスペクトル F_p は

$$F_p(\sigma; \sigma_p) = (\sigma_p / \sigma_{PM}) \phi_{PM}(\sigma; \sigma_p) \Gamma(\theta - \theta_w)$$

と表される。うねりとうねり、又はうねりと風波の共鳴相互作用は無視してある。

砕波の効果を表現するため仮説的な考え方を導入した。この仮説は、砕波とは波の峰の処にある波高の二乗に比例する大きさの水塊が波としてのエネルギーを失う過程だという考え方に立脚している。砕波によるエネルギーの散逸 S_{ds}' を

$$S_{ds}' = -C_b \cdot P_i \cdot \sigma_p \cdot E^2 \{1 + (\sigma / 2 \sigma_p)^4\} F / E_n$$

と仮定する。ここの C_b は長さの-2乗の次元を持つ定数で、台風8013号の波浪の追算によって $6/3600 \text{ m}^{-2}$ という値に決めた(Uji, 1984)。 P_i は砕波がおこる確率で、 E は波浪の全エネルギー、 E_n は規格化因子である。この P_i と E_n はそれぞれ

$$P_i = 0.27 \log(u_*^2 / \sigma_p \nu) - 0.78$$

$$E_n = \iint [1 + (\sigma / 2 \sigma_p)^4] F \, d\sigma \, d\theta$$

と表される。ここに ν は空気の力学的粘性係数である。さらに、スペクトル F が F_∞ に近い所では $S_{in} + S_{nl}$ が $-S_{ds}$ におおむね等しいので F が $1.414 F_\infty$ より小さいところでは

$$S_{in} + S_{nl} = \{ (F/F_\infty)^2 - 2 \} S_{ds}' \text{ と置いている。}$$

MRI-IIでは波浪のスペクトル成分の変化を次の四つの場合に分けて取り扱っている。各々の過程における S_{net} は次のように表される：

$$S_{net} = \left. \begin{aligned} & \{ F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p) - F_p(\sigma_p) \} / \Delta t, \\ & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ, F \leq F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 S_{\text{net}} &= 0, & |\theta - \theta_w| &\leq 90^\circ, & F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p) &< F < F_\infty \\
 S_{\text{net}} &= \begin{cases} \{ (F/F_\infty)^2 - 1 \} S_{\text{ds}}', & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ, \\ & F_\infty \leq F < 1.41 F_\infty, \\ S_{\text{ds}}', & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ, 1.41 F_\infty \leq F, \end{cases} \\
 S_{\text{net}} &= S_{\text{ds}}' - (B \cdot \Gamma + D \cdot f^4) F, & |\theta - \theta_w| &> 90^\circ
 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

但し $\Delta\sigma_p$ は Δt の間における σ_p の変化量であって式 (2.3) によって計算される。

ただしうねりのエネルギーが順風方向に存在するときはそのエネルギーを考慮して風波のピーク周波数の変化量 $\Delta\sigma_p$ を次の式を満足する $\Delta\sigma_p'$ に置換する。

$$\sum_{\sigma, \theta} [F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p') - F(\sigma)] = \sum_{\sigma, \theta} [F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p) - F_p(\sigma_p)]$$

ここで F は初期の波浪の2次元スペクトルである。また左辺の和は

$$F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p') > F(\sigma)$$

の関係を満たす成分についてのみ行なう。

2.3 MRIとMRI-IIの相違

MRI では波浪のスペクトル成分は風や砕破や粘性の影響を受けながら変化するが、これらは全て各成分について独立に働く。一方、MRI-II では風波のパラメータ表現と砕破によるエネルギーの散逸が全エネルギーと風波のピーク周波数と摩擦速度によって決定されるという仮定が導入されている。その結果、MRI-II では全局面で波浪のスペクトル成分がお互いに独立ではない。

3. 数値実験

3.1 序

MRI-II を用いて SWAMP の全事例について数値実験を行なった。事例についての解説は The SWAMP Group Part 1 1984, Part 2 1982 に記載されているが、参照を容易にするためにここに再録する。

現時点では、実際のデータに照らして波モデルを検討しても、モデルのどの部分（例えば発達過程の基本式、減衰過程の取り扱い、波浪の数値的表現方法）の影響でそのような結果がでてきたかを分離して判断することは困難であると考えられている。その代りに以下にあげる7つのテスト例は波モデルの各部分に別々に焦点をあててその部分の効果がうきあがってくるように設計されている。事例の順は後で追加された第7例を除けば事例の番号が増すほど複雑さが増すように並んでいる。波モデルMRIとMRI-IIは全て同じ格子点を用いて同じ条件下で計算されている。

3.2 計算事例

第1事例（移流テスト）は純粹なうねりの伝播の実験（うねりの減衰は考慮しない）で、波浪を有限個のスペクトル成分で表現している波モデルにおける移流項計算のスキームのテストである。

第2事例（吹送時間と吹送距離による成長）はまっすぐな海岸から直角に海に向かって吹き出ししている様でかつ一定な風による、波のない状態からの波の場の成長に関係したテストである。この場合、十分大きな吹送距離における時間的な波の成長は一つの理想的な吹送時間による波の成長曲線を与え、十分時間が経過して波の状態が定常状態に漸近的に近づいた時の岸から沖に向かっての波の変化は吹送距離による波の成長曲線を与える。

この事例は最も単純な条件下での波の成長であるので他の事例のより複雑な風系が波の場に及ぼす効果を議論する際の基礎となる。

第3事例（斜めの吹送距離）は第2事例の風向を風上の海岸線に対して 45° になるように一般化したものである。この実験は一樣一定の風の下で考えられる最も単純な方向の非対称性を風上の境界条件によって導入し、これに対する波モデルの応答を調べるものである。

第4事例（海の半分のみ風）は風が吹いている海域から無風域へのうねりの伝播のテストである。さらに風向に平行な風域の境界が風域内の波場にどのように作用するかも調べる。

第5事例（斜めに走るフロント）ではフロントを横切って伝播する風波に対し、その前後で順風から横風に 90° 風向が変化している。この実験では風向が突然変化した時の波の方向特性に対するモデルの応答を調べるのが目的である。しかしながら、波の場が場所によって異なるため、この実験には波の方向に対する応答と波の伝播の効果が複雑にかさなって現れる。そこで、この二つの効果を分離するために第7事例が追加された。

第6事例（止まっているハリケーンと動いているハリケーン）我々が取り扱わなければならない最も複雑な風系である。この事例では非常に極端な、しかし、現実的な風系に対するモデルの性能テストになっている。このような複雑な条件下でのモデル間の結果の重要な違いを明瞭に分類するには前もって行なった理想的な風の下でのテストの解析結果を参照する必要がある。

第7事例（風向の 90° 変化）は第5事例から移流の効果を取り除いて単純にしたものである。広い海において一樣な風がある時間吹き続いた後、急に風向が全ての場所で同じように 90° 変って今まで発達してきた風波に対し横風が吹きはじめる。波の場はどこも一樣なので波の状態は時間のみに依存する。

4. 計算と出力の指定

計算と出力の様式においてSWAMPの実験で提案されたものとMR I—IIを用いて行なった実験では多少違った点がある。そこで例えば、SWAMPの出力点は $X=30\text{km}$ で我々のは $X=40\text{km}$ の場合、今後、出力点は $X=40$ (S.30) kmのように記載することにする。

4.1 第1事例（移流テスト）

平面上に $x-y$ 座標を考えてその上に x 方向 y 方向に同じ大きさの格子間隔 Δx , Δy で格子を作る。波のエネルギーとしては単一のスペクトル成分（単一方向、単一周波数）を考える。伝播

方向としてはy軸に対して平行の例と30°の角度をなす例をテストする事にSWAMPではなっているが我々のモデルでは波浪の2次元スペクトルを16方向成分で表現しているのでy軸に対しては平行, 22.5° および45°の3例を計算した。周波数としては1/20, 1/10, 1/5 Hzの3例とする。各格子点上の初期のエネルギー量は下図のようにする:

.0	.0	.0	.0	.0
.0	.1/16	.1/8	.1/16	.0
.0	.1/8	.1/4	.1/8	.0
.0	.1/16	.1/8	.1/16	.0
.0	.0	.0	.0	.0

この分布の全エネルギー量は1である。波は3日間にわたり伝播させ、この間半日ごとのエネルギー場を出力する。理論的に予想されるエネルギーの中心も図中に示すことになっている。この数値実験の格子間隔 Δx , Δy は40km, 積分時間間隔 Δt は1時間である。

波モデルにおける伝播は、1つの格子点上にエネルギーが集中している初期条件の下での、分散 S^2 のクーラン数 C 又はモデルのタイムステップ数 n による振舞いによっても特徴づけられる。

目的:

本事例では波モデルがどのようにエネルギーを格子上で移流させるかをテストする。特に、エネルギーの空間分布が伝播に伴ってどのように変化するかに注意する。

作図:

SWAMPでは分散 S^2 をクーラン数 C 又は、タイムステップ数 n に対して描く事が提案されているだけである。ここでは以下の作図を行なった。

エネルギーの空間分布:

初期に上に示した9個の格子点に有った単一のスペクトル成分のエネルギーの空間分布の等値線を $X-Y$ 平面内に描く。

全エネルギー対タイムステップ数 n :

初期に上に示した9個の格子点に有った単一のスペクトル成分のエネルギーの計算海域内の総和をタイムステップ数 n に対して描く。周波数 f と波向 θ を曲線族のパラメータとする。

エネルギーの中心位置対タイムステップ数 n :

エネルギーの中心位置 $I(n)$ および $J(n)$ をタイムステップ数 n に対して描く。波向 θ を曲線族のパラメータとする。

分散 S^2 対タイムステップ数 n :

分散 S^2 をタイムステップ数 n に対して描く。曲線族のパラメータとしてはクーラン数 C を用いる。

第1事例においては作図形式は指定されていない。

4.2 第2事例（吹送距離と吹送時間による発達）

十分広い海の上を19.5 m (S.10 m) 高度での風速が20 m/s の一様で一定な西風が沖合に向かって西の海岸線に直角に吹いている。初期 ($t = 0$) には全海上で全く波のない状態であり、海岸線では $t > 0$ においても波はないようにする。数値実験は全海域において波が定常状態に達するまで続ける。ここでは風は西風で、海の辺がそれぞれ東西と南北に平行な1000 kmの正方形とし、その西岸のみを海岸線とした。格子間隔は40 km、積分時間間隔は1時間で、積分時間は72時間とした。これは波の状態が全海域で定常になるのに十分な時間である。格子は東西に26点南北に26点取り西端の点を全て陸とした。

目的：

どのモデルも一様で一定な風場での観測で得た吹送距離による成長曲線によって更正されている。このテストの結果は、他のより複雑な風場におけるテストの結果の議論のために重要である。また、吹送距離による発達と吹送時間による発達の関係が波モデルによってどう変化するかを調べるのに都合がよい。特に、風波のパラメータによる表現を用いていないMRIと用いているMRI-Ⅱのあいだの基本的な違いを明確にするのに有効である。

出力：

風と平行な海の中心線上での、風波の時間と空間による変化を見る。結果が出力されるべき点は次に示すとうりである：吹送距離 $X = 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000$ km, 吹送時間 $T = 1, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30, 36$ 時間と以後定常状態に達するまで6時間ごと。我々の実験では ΔX が40 kmであるので出力点は $X = 40, 80, 120$ kmと指定された点に最も近い格子点を用いた。

作図：

全エネルギー対吹送距離：

無次元全エネルギー E^* を無次元吹送距離 X^* に対して描く。曲線族のパラメータとしては無次元吹送時間 T^* を用いる（作図形式 # 1）（作図形式の説明はその項で行なう）；

ピーク周波数対吹送距離：

無次元ピーク周波数 f_p^* を無次元吹送距離 X^* に対して描く。曲線族のパラメータとしては無次元吹送時間 T^* を用いる（作図形式 # 3）；

全エネルギー対吹送時間：

E^* を T^* に対して描く。パラメータは X^* とする（作図形式 # 2）；

ピーク周波数対吹送時間：

f_p^* を T^* に対して描く。パラメータは X^* とする（作図形式 # 4）；

全エネルギー対吹送距離-吹送時間：

$X^* - T^*$ 平面に規格化された E^* の等値線を描く（作図形式 # 5）；

ピーク周波数対吹送距離-吹送時間：

$X^* - T^*$ 平面に規格化された f_p の等値線を描く (作図形式 # 6) ；

周波数スペクトル対吹送距離：

定常状態における規格化された周波数スペクトル $\phi(f)$ を無次元周波数 f^* に対して描く。スペクトル族のパラメータは X とする (作図形式 # 7) ；

周波数スペクトル対吹送時間：

吹送距離 1000 km における規格化された ϕ を f^* に対して描く。パラメータは T とする (作図形式 # 7) ；

2次元スペクトル：

規格化された2次元スペクトル $F(f, \theta)$ の等値線を $f^* - \theta$ 平面に描く。描く図は $T = 6, 36$ 時間, $X = 150, 1000$ km の4枚とする (作図形式 # 8)。

ここで示した第2事例での作図は全部で12枚である。

SWAMP Part 1 による追加：

定常状態での X^* に対する E^* の発達曲線が SWAMP の結果の平均値にできるだけ近づくように摩擦係数 $Cd = 1.83 \times 10^{-3}$ を Cd' に変更して無次元化した X^* に対する E^* ；

同様に処理した X^* に対する f_p^* ；

同様に処理した T^* に対する E^* ；

同様に処理した T^* に対する f_p^* 。

ただし, Cd' / Cd は MRI では 1.05, MRI-II では 0.87 である。

4.3 第3事例 (斜めの海岸線)

第2事例と同じ形だが全境界が陸の 1000×1000 km の大きさの静かな海に突然 19.5 (S.10) m 高度で 20 m/s の南西風が一様に吹きはじめる。 x 軸を東西に y 軸を南北にとり, 角度は北から時計回りに計るものとする。図31-8. 1-0 において点 A, B, C, D, E および F で示された場所での波の時間変化を記録しておく。また, 十分時間が経過して波が定常状態に達するまで計算を続け, その時の全点での波の状態を記録しておく。SWAMP の境界条件は西岸と南岸を陸とし, 全ての境界は完全にエネルギーを吸収し, かつ境界を通過して外部からのエネルギーの流入はないものとする。

目的：

このテストでは風上の海岸線が風向に対して 45° の角度をなしていることによって境界条件がもたらす風向に対する非対称性が波の場にどのように現れるかを見るのを目的とする。そこで, この非対称性が最も強く現れる F 点における2次元スペクトルの形に焦点をあてる。波の場の空間分布は全エネルギー, ピーク周波数と平均波向で論じる。

この事例の風の場合は単純なものであるが波の場は方向によって変化する風からの入力, 波のエネルギー伝播, 波と波の共鳴相互作用による成分波間の非線形エネルギー輸送およびエネルギー散逸

の各項の間のバランスによって制御されている。このように、この事例は多くの過程が単なる発達曲線では調整できない非対称の条件下でお互いにどのように作用し合うかをテストするものである。

作図：

定常状態の規格化された全エネルギー E の等値線を $X^* - Y^*$ 面に描く (作図形式 # 9)。

定常状態の規格化されたピーク周波数 f_p の等値線を $X^* - Y^*$ 面に描く (作図形式 # 10)。

定常状態のカスタダイアグラム (規格化された全エネルギーと平均波向を示す矢印) を描く (作図形式 # 11)。

ここでは簡単のため地点を表す場合 $(X, Y) = (1 \text{ km}, 2 \text{ km})$ のことを単に $(1, 2)$ とする。地点 $(75, 75)$ と $(300, 300)$ および $(750, 750)$ での規格化された周波数 スペクトルの族をパラメータに吹送時間 T を用いて描く (作図形式 # 7)。同じく周波数スペクトル族を原点からの距離 $(X^2 + Y^2)^{1/2}$ をパラメータとして描く。この際、結果の出力点はさきほどの3点で出力時間は第2事例で優先させた時間とする。

定常状態の6地点 $(75, 75)$, $(300, 75)$, $(750, 75)$, $(300, 300)$, $(750, 300)$, $(750, 750)$ の規格化された2次元スペクトルを周波数一波向 $(f^* - \theta)$ 面に描く (作図形式 # 8)。

上記の出力点は我々の場合それぞれ $(80, 80)$, $(320, 80)$, $(760, 80)$, $(320, 320)$, $(760, 320)$, $(760, 760)$ である。

第3事例において提案された作図は全部で17枚である。

SWAMP Part 1 による追加：

F 地点での E_{III} / E_{II} 対 $f_{p, III} / f_{p, II}$ のパラメータ平面内でのモデルの位置を作図する。添字の II と III は同じ吹送距離における第II事例と第III事例の結果であることをそれぞれ示す。

4.4 第4事例 (半面のみ有風)

1000 × 1000 km の海があり、その西側半面で 19.5 (S.10) m 高度で 20 m/s の南風が吹き、東側半面は無風である。つまり、海を東西に二等分する線が風域と無風域のフロントになっている。海の東半面は無風のままとする。風域と無風域の境は南北に走っていて、その位置は西側から $X = 500 \text{ km}$ になるべく近く設定する。全ての境界は完全にエネルギーを吸収し、かつ境界を通過しては外部から計算領域内へのエネルギー流入はないものとする。計算は初期に静穏な海から始め、波が定常状態に達するまで行なう。図50-9.1-0に風場と計算結果の特別な出力地点を示す。

目的：

風がある海域から無風の海域へのうねりの放出の様子を調べる事によってモデル内で風波からうねりへのエネルギーの転稼の操作をテストする。また、洋上での風のフロントが風域内の波におよぼす影響も調べる。

作図：

作図は全て定常状態の波について行なう。

規格化された全エネルギー E の分布図を描く (作図形式 # 9)。

規格化された平均周波数 \bar{f} の分布図を描く (作図形式 # 10)。

全エネルギー E と平均波向 $\bar{\theta}$ を示すカスターダイヤグラムを描く (作図形式 # 11)。

$Y = 80, 320, 760$ (S. 75, 300, 750) km, $X =$ フロントの位置 ± 20 (S. 40) km と $X = 760$ (S. 750) km の9点での定常状態における規格化された2次元スペクトルの等値線を描く (作図形式 # 8)。

規格化された1次元スペクトル族を前記の X の3個の出力点について Y をパラメータとして描く (作図形式 # 7)。

第4事例での全作図は15枚である。

SWAMP Part 1 による追加：

図50-9.1-0 に示したA地点における (E_{IV}/E_{II}) とB地点における同様な値をパラメータとした平面内におけるモデルの位置を作図する。

地点BとCにおけるエネルギー比 E_C/E_B と平均周波数比 \bar{f}_C/\bar{f}_B をパラメータとした平面内におけるモデルの位置を作図する。

4.5 第7事例 (風向の90°変化)

無限に広い海に19.5 (S. 10) m高度で20 m/s の一様な南風が十分に長い時間吹いて風波は半分発達 ($f_P = 2 f_{PM}$, MRI では $E = E_{PM}/8$ とする, 第7事例の1), か又は, 十分発達している ($f_P = f_{PM}$, 第7事例の2)。このとき ($T = 0$ で突然に) 風速は変わらないで風向のみが90°変り東風になる。 風場も波の場も共に一様であるのでモデルの演算としては移流項を無視して一つの格子点だけで波浪の時間による変化を追うことができる。

目的：

風向が変化した瞬間, 今までの風波のエネルギーの多くの部分はうねりになる。そして新たに新しい風の方向に風波が発達を始める。このうねりと風波からなる波浪は時間とともに新しい風による十分発達した風波に漸近的に近づく。この事例ではこの変化の過程を調べる。このテストは次の第5事例の風向が変るフロントが海上にある場合を単純化して時間的推移のみを追跡したものである。

作図：

初期 ($T = 0$), $T = 2, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30$ 時間における規格化した2次元スペクトルの等値線を描く (作図形式 # 8)。

平均波向が45°変化した時間 T_{45} を周波数に対して描く (作図形式 # 17)。

全エネルギー E を時間 T に対して描く (作図形式 # 2)。

$f^* - T$ 平面内に $F(f)$ と $\bar{\theta}$ を示すカスターダイヤグラムを描く (作図形式 #18)。

第7事例での作図は全部で26枚である。

SWAMP Part 1による追加：

$T = 0$ における風向変化後の風波 (新風向) の2次元スペクトルのピーク値の時間変化を実線で、うねり (旧風向) の2次元スペクトルのピーク値の時間変化を点線で描く。

4.6 第5事例 (斜めのフロント)

1000 km四方の海の南西から北東に向って走る対角線上にフロントが存在している。初期は静穏な海とし、全ての境界は陸とする (S.外部からのエネルギーの流入はなく、内部からのエネルギーは完全に吸収するものとする)。フロントの南東側の海では20 m/sの南風が北西側の海では20 m/sの東風が吹いている。ちょうど対角線上に並ぶ格子点上では南風とする。計算は波が定常状態に達するまで行ない、その時の波の場を調べる。この事例の風場と計算結果の特別出力地点を図97-11.1-0に示す。

目的：

前の節で示した第7事例では風向の変化に対するソースファンクション S_{net} のみ関与する場合のモデルの応答を調べた。この事例では第7事例の効果に南東半面での吹送距離による波の発達の性質と波がフロントを通過した後の北西半面での第3事例に似た斜の吹送距離の効果が加わる。

定性的にはフロントの南東半面では境界の影響を除けば風上岸からの距離によって大きさが決まり、平均波向が風向に平行な波の場ができる。風上岸である南岸からフロントまでの距離は西から東に行くにしたがって増加するのでフロント上での波のエネルギーはフロントの南西端から北東に進むにつれてだんだん増加する。この北進する波はフロント通過後うねりとなって伝播し、新に東風によってフロントの北西側で生じた風波と共存することになる。

フロントの北西側ではどこでも方向スペクトルは東風による風波と南から伝わってきたうねりによって決定される。ここでの波の状態は斜めの吹送距離における風波の発達、うねりのエネルギーの散逸とうねりと風波の相互作用による。波の場は非一様であり、さらに強い方向依存性がある。このように波の場は第3事例や第7事例に比較すると相当複雑であるけれども実際のフロント通過時の強い風場の不連続性をモデル化したもので、この結果は興味深い。

作図：

作図は全て定常状態の波の場について行なう。

規格化された全エネルギー E の等値線を $X^* - Y^*$ 平面に描く (作図形式 #9)。

規格化された平均周波数 \bar{f} の等値線を $X^* - Y^*$ 平面に描く (作図形式 #10)。

E と $\bar{\theta}$ を示すカスターダイヤグラムを $X^* - Y^*$ 平面に描く (作図形式 #11)。

格子点 (240, 360), (280, 320), (320, 280), (360, 240), (680, 800), (720, 760), (760, 720), と (800, 680) [S. (225, 350), (250, 325), (325, 275),

(350, 250), (675, 800), (700, 775), (775, 725) と (800, 700)〕における波の規格化された $F(f, \theta)$ の等値線を $f^* - \theta$ 平面に描く (作図形式 # 8)。ここで指定した出力格子点は南岸の境界から 300 と 750 km の所でフロントを直角に横切る線の近傍にあり、それらの点はフロントから約 53 km と 88 km それぞれ離れている (図 97-11.1-0 参照)。

南の境界から 300 km 地点の 4 点を曲線族のパラメータとして、規格化された $\phi(f)$ を描く (作図形式 # 7)。

南の境界から 750 km 地点の 4 点を曲線族のパラメータとして、規格化された $\phi(f)$ を描く (作図形式 # 7)。

ここで提案された全作図枚数は 13 枚である。

SWAMP Part 1 による追加 :

図 97-11.1-0 に示す S 線に沿った規格化された全エネルギー E と平均波向 $\bar{\theta}$ を X に対して描く。

4.7 第 6 事例 (ハリケーン)

モデル化されたハリケーンの風場を用いて次の 2 例を計算する。

第 6 事例の 1 (止っているハリケーン) : 東西 1280 (S. 1300) km, 南北 1720 (S. 1700) km の海で計算を行なう。ハリケーンの原因は (650, 1400) にあり、風場は Atlantic Oceanographic and Meteorological Labs. で用意されたのを用いる。初期条件と全時間を通じての境界条件は Ross のハリケーンモデルをエネルギーを 1/2 倍にして (S. そのまま) 用いる。計算は 24 時間続行し、その結果を調べる。

第 6 事例の 2 (北に 54 km/h で動いているハリケーン) : ハリケーンの風場は第 6 事例の 1 と全く同じものを用いる (移動に伴う風場の変形は無視する)。計算開始時のハリケーンの原因は (650, 104) で 24 時間後に (650, 1400) に至る。

その他の条件は第 6 事例の 1 と同様とする。

ハリケーンの風場と計算結果の特別出力地点を図 113-12.1-0 に示す。

目的 :

このテストは一つの極端に複雑で今まで各々独立に調べてきた多くの風波についての過程が同時に作用する風場で、かつ現実的な風場に対する波モデルの性能を調べるものである。

作図 :

有義波高の分布図を描く (作図形式 # 12)。

平均周期の分布図を描く (作図形式 # 13)。

有義波高と平均波向を示すカスターダイヤグラムを描く (作図形式 # 14)。

中心から北東, 北西, 南西と南東の各々の方向に沿った 4 地点の 1 次元スペクトルを中心からの距離をパラメータとして描く (作図形式 # 16)。

以下に示す格子点の規格化された $F(f, \theta)$ の等値線を描く (作図形式 #15)。

作図地点はハリケーンを中心から四方向 (北東, 北西, 南西, 南東) に向って距離がそれぞれ約 0, 70, 140 と 318 km の地点で, それらは各々 (640, 1400), (600, 1440), (600, 1360), (680, 1440), (680, 1360), (560, 1520), (560, 1280), (760, 1520), (760, 1280), (440, 1640), (440, 1160), (880, 1640), と (880, 1160) [S. (650, 1400), (700, 1450), (750, 1500), (825, 1625), (600, 1450), (550, 1500), (425, 1625), (600, 1350), (550, 1300), (425, 1175), (700, 1350), (750, 1300), (875, 1175)] である。

作図枚数は第6事例の1, 2の各々について20枚である。

SWAMP Part 1による追加:

ハリケーンによる波場に現れる最大の有義波高の大きさとその平均波向を示す矢印を最大波高が現われた位置に描く。

4.8 注意

以上述べてきた数値実験を行なうにあたって大事なことは可能な限り全実験を通じて同一の分解能や計算スキームで行なうことと, 海は線形直交座標で表現することである。

4.9 作図形式

SWAMP 指定の作図形式を以下に示す。ただしここに掲げる図は印刷の都合で縮尺してある。また, SWAMP では第1事例の図の作図形式は指定されていない。

1 T^* をパラメータとした E^* の X^* に対する図: 両軸は共に1桁5cmの対数目盛りとし, 原点を $(X^*, E^*) = (10^5, 10)$ とする。また,

$$E^* = E \cdot g^2 / u_*^4$$

$$X^* = X \cdot g / u_*^2$$

$$T^* = T \cdot g / u_* \text{ である, ただし}$$

$$g = 9.806 \text{ m/s}^2$$

$$u_* = 0.855 \text{ m/s} \text{ の値を用いる。}$$

2 X^* をパラメータとした E^* の T^* に対する図: 原点を $(T^*, E^*) = (10^4, 10)$ にする以外は #1 と同じ。

3 T^* をパラメータとした f_p^* の X^* に対する図: 目盛りは両対数で X^* 軸は #1 と同じ, 縦軸 f_p^* は1桁20cmの長さで $f_p^* = 0.01$ の位置を原点より7cm上にとる。

4 X^* をパラメータとした f_p^* の T^* に対する図: T^* 軸は #2 と f 軸は #3 と同様にする。

5 $X^* - T^*$ 平面の E/E_{PM} の等値線: 両軸線形目盛りとし, X^* 軸は $0 \sim 2 \times 10^7$ を20cmに T^* 軸は $0 \sim 1.5 \times 10^6$ を15cmにとる。 E は $E_{PM} = \alpha g^2 (2 \pi f_{PM})^{-4} / 5$ で規格化する, ただし $f_{PM} = 0.13 \text{ g} / U_{10} = 0.06374 \text{ Hz}$,

$\alpha = 0.0081$ である。

$U_{10} = 20 \text{ m/s}$, $u_* = 0.855 \text{ m/s}$ および $g = 9.806 \text{ m/s}^2$ とすると,

$$f_{PM}^* = 5.5575 \times 10^{-3}$$

$$E_{PM} = 0.60552 \text{ m}^2$$

$E_{PM}^* = 1.0896 \times 10^3$ である。

等値線は 0.1 間隔で描く。

- # 6 $X^* - T^*$ 平面の f_P / f_{PM} の等値線: $X^* - T^*$ 平面は # 5 と同じ。等値線間隔は 1 から 2 の間は 0.1, 2 以上では 0.5 とする。

- # 7 X^* , Y^* , T^* 又は格子点を曲線族のパラメータとした 1 次元スペクトル

$F(f) / F_{PM}(f_{PM})$: $F(f)$ の規格化は

$$F_{PM}(f_{PM}) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} (f_{PM})^{-5} e^{-5/4} = 136.1 \text{ m}^2/\text{Hz} \text{ で行なう。縦軸は } 0 \leq F/F_{PM} \leq 1.5 \text{ の範囲を } 15 \text{ cm に, 横軸は } 0 \leq f^* \leq 0.02 \text{ を } 20 \text{ cm にそれぞれ線形に目盛る。}$$

- # 8 $f^* - \theta$ 平面の 2 次元スペクトル $F(f, \theta) / F_{MAX}$ の等値線: F_{MAX} は $F(f, \theta)$ の最大値である。縦軸は $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ を 16 cm に横軸は $0 \leq f^* \leq 0.02$ を 20 cm にそれぞれ線形に目盛る。ここで, θ は波の進行方向で北から時計回りに計る。 F_{MAX} の値を図中に明示する。

- # 9 ある T^* における $X^* - Y^*$ 平面の E/E_{PM} の等値線: 両軸線形目盛の X^* , Y^* をいずれも $0 \leq X^* \text{ 又は } Y^* \leq 1.5 \times 10^7$ の範囲を 15 cm の長さにとる。縦軸 Y^* は北を横軸 X^* は東を正とする。等値線間隔は 0.1 とする。

- # 10 ある T^* における $X^* - Y^*$ 平面の f_P / f_{PM} 又は \bar{f} / f_{PM} の等値線: 両軸は # 9 と同じとする。等値線間隔は 1~2 では 0.1, 2 以上では 0.5 とする。

$$\bar{f} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty f \cdot F(f, \theta) df d\theta / E \text{ である。}$$

- # 11 $X^* - Y^*$ 平面内に E/E_{PM} と $\bar{\theta}$ を表す矢印を描く (カスターダイアグラム) : # 9 と同じ平面を用いる。矢じりの位置は, ΔX , $\Delta Y = 80 \text{ km}$ (S. 75 km) で定義される格子点とする。矢の向きは平均波向 $\bar{\theta}$ とする。 θ は北から時計回りに計り,

$$\bar{\theta} = \arg \left[\int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(f, \theta) e^{i\theta} df d\theta \right] \text{ とする。矢の長さは } E/E_{PM} \text{ に比例し, } E/E_{PM}$$

が 1 のとき 1.5 cm とする。

- # 12 $X - Y$ 平面内の H_s の等値線: $240 \text{ km} \leq x \leq 1080 \text{ km}$, $680 \text{ km} \leq Y \leq 1720 \text{ km}$ (S. 250 $\leq X \leq 1050 \text{ km}$, $700 \text{ km} \leq Y \leq 1700 \text{ km}$) を 100 km を 2 cm の長さにして両軸線形に目盛る。等値線は H_s が 2 m 以下では 0.5 m 間隔でそれ以上では 1 m 間隔で描く。

- # 13 $X - Y$ 平面内の \bar{f} の等値線: 両軸は # 12 と同じ。0.05 Hz 以上を 0.01 Hz 間隔で描く。

- # 14 $X-Y$ 平面内に H_s と $\bar{\theta}$ を表す矢印を描く (カスターダイヤグラム) : #12と同じ平面を用いる。矢じりの位置は, $\Delta X, \Delta Y = 40\text{km}$ (S. 50km) で定義される格子点とする。矢の向きは平均波向 $\bar{\theta}$ とし, $H_s = 10\text{m}$ を 1 cm の矢の長さで表す。
- # 15 $f-\theta$ 平面内の $F(f, \theta) / F_{\text{MAX}}$ の等値線 : 縦軸は $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ を 16cm に横軸は $0 \leq f \leq 0.2\text{Hz}$ を 20cm にそれぞれ線形に目盛る。 F_{MAX} の値を図中に明示する。等値線は 0.1 間隔で描く。
- # 16 ハリケーンの目からの距離をパラメータとした周波数 f に対する規格化された 1 次元スペクトル $F(f) / F_{\text{MAX}}$: 両軸線形目盛で $0 \leq f \leq 0.2\text{Hz}$ を 20cm の長さに横軸にとり, $0 \leq F / F_{\text{MAX}} \leq 1$ を 15cm の長さに縦軸にとる。 $F(f)$ の一族中における最大値 F_{MAX} の値を記入すると共に格子点とグラフの対応も明示する。
- # 17 f に対する T_{45° : 両軸線形目盛りで原点を (0 時間, 0.04 Hz) にとり, T_{45° は縦軸に 2 時間を 1 cm に, 横軸は 0.01 Hz を 1 cm に目盛る。
- # 18 両軸線形目盛の f^*-T^* 平面での $F(f)$ と $\bar{\theta}$ を示すカスターダイヤグラム : 矢の長さは最大で 1 cm になるように規格化する。 $\theta = 0$ を上向き, つまり, 周波数軸と平行にする。出力する周波数は 0.04, 0.05, 0.06 …… 0.21 Hz の 18 点 (S. 0.04, 0.045, … 0.080, 0.090, 0.100, 0.110, 0.120, 0.150, 0.175, 0.200 の 16 点) とし, f は f^* に変換して用いる。出力点は縦横共 1 cm 間隔に作図する。
- その他 : 全作図にはモデル名, 事例番号, 時間, 場所および規格化因子 (例えば #15 の F_{MAX}) を明示する。

AN INTERCOMPARISON STUDY BETWEEN THE WAVE MODELS MRI AND MRI-II *

— A COMPILATION OF RESULTS —

1. Introduction

In 1981, a wave model intercomparison study was carried out by the SEA WAVE MODELLING PROJECT (SWAMP) Group composed of ten groups from USA, Japan and Europe. The main purpose of the intercomparison study was to test our present understanding of the physics of wind generated surface waves from the view point of wave modelling. Fortunately, the author was able to participate in the intercomparison study with a linear wave model called MRI (Meteorological Research Institute) developed for the routine operation of wave prediction (Uji and Isozaki 1972, Isozaki and Uji 1973 and Uji 1975) and it is now in use for the operation at the Japan Meteorological Agency. The study made clear strong points as well as weakness of MRI relative to models based on the parametric representation of the growth of wind waves (The SWAMP Group 1984 (Part 1), 1982 (Part 2) ; MRI gives always reasonable wave height distribution for any complex wind fields but it is inferior in predicting the spectral form for early growth stages of windsea.

A new wave model MRI-II was developed to overcome the weaknesses of MRI (Uji, 1984). MRI-II inherits both the way of numerical representation of wind wave spectrum and the calculation scheme for wave propagation. The intercomparison between MRI and MRI-II, therefore, is effective to made clear how the difference in basic physical assumptions for wave models produces an effect on predicted wave fields and the results can be useful for further wave model development. Furthermore, it is of great importance to clarify the characteristics of MRI-II for the use of it in practical operation.

For above reasons, numerical experiments for all the SWAMP test cases are carried out using MRI-II and the results are plotted according to the SWAMP format. Here, all diagrams of MRI-II are collected together with those of MRI. For easy reference to the SWAMP reports, a diagram is numbered as Fig. 15-7. 4-1 i.e., the first numeral 15 shows the sequential number in this text, the second one 7.4 corresponds to the number in the SWAMP (Part 1) for the corresponding diagram and the third one 1 is in the SWAMP (Part 2). When there is no corresponding diagram in the SWAMP Part 1 or Part 2, the second or the third

* Takeshi Uji : Oceanographical Research Division

numeral is written zero. These diagrams will be more instructive if it will be used in conjunction with the SWAMP reports Part 1 and Part 2.

2. Outline of the models

The evolution of a surface wave fields in space x and time t is governed by the energy balance equation

$$\frac{\partial F}{\partial t} + Cg \cdot \nabla F = S_{net} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2.1)$$

where $F(\sigma, \theta; x, t)$ is the two-dimensional (2-D) wave spectrum, dependent on angular frequency σ and propagation direction θ , $Cg = Cg(\sigma, \theta)$ is the group velocity, ∇ is the gradient operator in the horizontal plane and the net source function S_{net} is represented as the sum of the input S_{in} from the wind, the non-linear transfer S_{nl} and the dissipation S_{ds} .

However we still do not have full understanding about the physics of energy transfer from wind to waves and the energy dissipation of wind waves and also do not have simple way of calculation for S_{nl} . A wave model, therefore, can have its own assumptions on the physics of wind waves, own parametrization of the source functions and own numerical style of representation of wind waves, so that several kinds of wave model were developed according to its usage.

2.1 MRI wave model

MRI contains four energy transfer processes, namely, linear and exponential wave growth, wave breaking leading to an equilibrium state of Pierson & Moskowitz (P-M) spectrum, frictional dissipation for over-saturated waves and decay of waves due to opposing winds. Neither wave-wave interactions nor shallow water effects are considered.

Wave energy is numerically represented by 352 (16 directions times 22 frequencies) spectral components. A special numerical scheme is used to prevent computational spatial deformation of each wave energy component (Uji and Isozaki, 1972). Equally spacing grids on local Cartesian co-ordinates are employed.

Three stages of the sea state are considered, and the source functions are assumed according to the each stage as follows :

$$\begin{aligned} S_{net} &= (A + BF)\Gamma(\theta - \theta_w) [1 - (F/F_\infty)^2], & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ, & \sqrt{2} F_\infty = F, \\ S_{net} &= -D \cdot f^4 F, & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ, & \sqrt{2} F_\infty < F, \\ S_{net} &= -(B\Gamma(\theta - \theta_w) + D \cdot f^4) F, & |\theta - \theta_w| > 90^\circ, & \end{aligned} \quad (2.2)$$

where θ_w is the wind direction, $F_\infty = \Gamma(\theta - \theta_w) \phi_{PM}$ the fully developed 2-D spectrum, ϕ_{PM} the P-M spectrum, $\Gamma(\theta)$ the angular distribution of 2-D spectrum and is assumed to be propor-

tional to $\cos^2 \theta$. The numerical values of A and B were given by Inoue (1967) and the constant D is $1/3600 \text{ sec}^3$.

2.2 MRI-II wave model

MRI-II contains five energy transfer processes, namely, the input by the wind, the non-linear transfer among the components of windsea by resonant wave-wave interactions, wave breaking, frictional dissipation and the effect of opposing winds. The non-linear energy transfer is expressed implicitly together with the wind effect by Toba's one-parameter representation of windsea, but neither swell-swell nor swell-windsea resonant interactions are considered.

The bases of the one-parameter representation are Toba's 2/3 power law between wave height and period, Toba's growth equation for the peak frequency of windsea,

$$d\sigma_p^{*-2}/dt^* = 1.783 \times 10^{-3} [1 - \text{erf} (4.59 \times 10^{-2} \sigma_p^{*-1})], \quad (2.3)$$

and the assumption that the form of the windsea spectrum is similar to that of P-M spectrum. These leads the parametric expression

$$F_p(\sigma; \sigma_p) = (\sigma_p / \sigma_{PM}) \phi_{PM}(\sigma; \sigma_p) \Gamma(\theta - \theta_w)$$

for the 2-D spectrum of windsea, where σ_{PM} is the peak frequency of P-M spectrum .

Hypothetical assumptions are introduced to describe wave breaking effects. The basic idea on the assumptions is that wave breaking is a process in which a water mass at a wave crest with a mass proportional to the square of the wave height loses its wave motion energy. The expression of S_{ds}' thus obtained is

$$S_{ds}' = -Br \cdot F = -\{C_b \cdot Pi \cdot \sigma_p E^2 [1 + (\sigma/2\sigma_p)^4] / E_n\} F,$$

where E is the total energy, Br is the damping ratio, Pi is the probability of breaking determined from data collected by Toba (1979) as

$$Pi = 0.27 \log \left(\frac{u^2}{\sigma_p \nu} \right) - 0.78,$$

$E_n = \iint [1 + (\sigma/2\sigma_p)^4] F d\sigma d\theta$, $C_b = 1/600 \text{m}^{-2}$ and ν is the kinematic viscosity of air.

After all the net source function S_{net} is expressed as

$$S_{net} = [F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p) - F_p(\sigma_p)] / \Delta t, \quad |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ \text{ and } F \leq F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p)$$

$$S_{net} = 0, \quad |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ \text{ and } F_p(\sigma_p + \Delta\sigma_p) < F \leq F_\infty$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{net}} &= (1 - (F/F_{\infty})^2) Br \cdot F, & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ \text{ and } F_{\infty} < F \leq 1.414 \cdot F_{\infty} \\
 &- Br \cdot F, & |\theta - \theta_w| \leq 90^\circ \text{ and } F > 1.414 F_{\infty} \\
 S_{\text{net}} &= - (B\Gamma(\theta - \theta_w) + Df^4 + Br)F, & |\theta - \theta_w| > 90^\circ
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

where Δt is the time interval of numerical integration, $\Delta\sigma_p$ is the amount of change σ_p given by Eq. (2.3) for Δt , B is the growth rate of waves by wind and D is the constant, whose numerical values are taken over from MRI. When the energy of swells is preexisting at $t=0$, the effect of it for the growth of windsea is incorporated by the replacement of $\Delta\sigma_p$ by $\Delta\sigma_p'$ which satisfies the relation

$$\begin{aligned}
 \Sigma(F_p(\sigma, \theta; \sigma_p + \Delta\sigma_p') - F(\sigma, \theta)) &= \Sigma(F_p(\sigma, \theta; \sigma_p + \Delta\sigma_p) - F_p(\sigma, \theta; \sigma_p)), \\
 ((\quad)) &\text{positive}
 \end{aligned}$$

where $((\quad))$ positive) means to summarize only for the positive bracketed values and $F(\sigma, \theta)$ is the 2-D spectrum at $t=0$ including the swell energy.

MRI-II has the same numerical representation of the wave spectrum and also the same scheme for wave energy propagation as MRI.

2.3 Fundamental differences between MRI and MRI-II

For MRI every spectral component is independently evolved with each other by the action of wind, the effect of wave breaking and the effect of the viscosity of water. On the other hand, for MRI-II a parametrical description of the windsea spectrum and the hypothetical assumptions of wave breaking on which the energy dissipation term is described by the total energy, the peak frequency of windsea and the friction velocity, are introduced. On the consequence of this introduction, spectral components are not independent with each other for MRI-II.

3. Test cases of the intercomparison study

3.1 Introduction

Seven test cases were proposed for the Wave Model Intercomparison Study by SWAMP Group in 1981. This set of seven test cases was so well designed to focus separately on various critical properties of the models that it is also useful to compare MRI-II to MRI and other wave models according to the same procedures as proposed in the Wave Model Intercomparison Study. Description of the test cases are printed in the SWAMP report Part 1 and Part 2. However, for easy reference a short description of notation and model tests is

included in this report.

3.2 Test Cases

Seven test cases presented by the SWAMP Group are as follows :

Case I (advection test) is a pure swell propagation experiment. The wave energy of only one component of 2-D spectrum is assumed to be initially, $t=0$, on grid points. The spatial distribution at $t>0$ is calculated by the numerical advection scheme of the wave models.

Case II (fetch and duration limited growth) concerns the growth of a wave field for a uniform, stationary wind blowing orthogonally off a straight shore. The sea state was initially zero. For large fetch the evolution of the wave field with time provides duration limited growth curves, while for large duration the evolution of the wave field with distance off shore yields fetch limited growth curves. The results from this case provides a reference base for discussing this effects of the more complicated wind field geometries considered the remaining case study.

Case III (slanting fetch) represents a generalization of Case II to an off-shore wind blowing at an angle 45° to the coast. The purpose of the experiment is to test the directional response of the models for the simplest case of a uniform wind field in which an asymmetry is introduced by the boundary condition.

Case IV (half-plane wind) is intended to test the propagation of swell away from the side of a laterally bounded wind field into a neighbouring calm region. The case also provides information on the effect of a lateral wind field boundary on the generation of waves within the wind field region.

Case V (diagonal front) concerns the propagation of wind waves across a diagonal front where the wind turned suddenly by 90° from a parallel to a cross-wave direction. The purpose of the experiment is to test the directional response of the models to sudden change in the wind direction. Because of the inhomogeneity of the wave field, however, the experiment actually represents a rather complex superposition of directional response and advection effects. To separate the two, Case VII is added to the set of experiments.

Case VI (stationary and moving hurricane) represents the most complex wind field considered. It is included to test the performance of the models under extreme but nevertheless realistic wind conditions. Most of the critical elements of the models which are investigated separately in the other case studies come into play simultaneously in the examples.

Case VII (90° change in wind direction) represents a simpler analogue to Case V in which the advection effects are removed by considering a non-stationary rather than inhomogeneous wind field. At a given stage in the development of a duration limited windsea, the direction of a uniform wind field is suddenly turned by 90° into the cross wave direction, remaining constant thereafter. Since the wave field remains homogeneous throughout, only one integration variable, the time, enters rather than the two spatial co-ordinates of Case V.

3.3 Symbols

The symbols used in the description and the plots are recapitulated below.

C	Courant number
Cg	group velocity
E	total energy (kinematic total wave energy per unit area divided by ρg , where ρ is the density of water)
E_{PM}	total energy of the P-M spectrum
f	frequency
\bar{f}	mean frequency
f_p	spectral peak frequency
f_{PM}	peak frequency of P-M spectrum
$F(f)$ or ϕ	one-dimensional (1-D) energy density spectrum
F_{MAX}	maximum value of the energy density spectrum
$F_{PM}(f)$ or ϕ_{PM}	1-D P-M spectrum
$F(f, \theta)$	2-D energy density spectrum
g	acceleration of gravity
H_s	significant wave height
n	number of time steps
S	energy dispersion factor
T (or t)	time variable
T_{45}°	time for which mean direction of a given frequency band has turned by 45° (case VII)

Δt	time step
u_*	friction velocity
U_{10}	wind speed at 10 m height
$U_{19.5}$	wind speed at 19.5 m height
X, Y (or x, y)	Cartesian space variables (X is in east-west direction and Y in north-south)
$\Delta X, \Delta Y$	grid spacings
α and α_{PM}	Phillips' "constant" and that for P-M spectrum
θ	wave direction
$\bar{\theta}$	mean wave direction
θ_w	local wind direction
σ	angular frequency

3.4 Definitions of quantities

The definitions of dimensional quantities are as follows :

α_{PM}	$= 0.0081,$
g	$= 9.806 \text{m/s}^2,$
u_*	$= 0.855 \text{m/s},$
U_{10}	$= 20 \text{m/s},$
f_{PM}	$= 0.13g/U_{10} = 0.06374 \text{Hz},$
E_{PM}	$= [\alpha_{PM}g^2(2\pi f_{PM})^{-4}]/5 = 6.0552 \text{m}^2,$
H_s	$= 4E^{1/2},$
$F_{PM}(f)$	$= \alpha_{PM}g^2(2\pi)^{-4}f^{-5}\exp(-5/4(f_{PM}/f)^4)$ or
ϕ_{PM}	$= \alpha_{PM}g^2\sigma^{-5}\exp(-5/4(\sigma_{PM}/\sigma)^4),$
	where $\sigma_{PM} = ((4/5)0.74)^{1/4}(g/U_{19.5}),$
$F_{PM}(f_{PM})$	$= \alpha_{PM}g^2(2\pi)^{-4}(f_{PM})^{-5}\exp(-5/4) = 136.1 \text{m}^2/\text{Hz},$
$F_{PM}(f, \theta)$	$= F_{PM}(f) \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \theta_w),$ for $ \theta - \theta_w \leq \frac{\pi}{2},$
	$0,$ for $ \theta - \theta_w > \frac{\pi}{2},$
$F_{PM}(f_{PM}, \theta_w)$	$= 86.64 \text{m}^2/\text{Hz rad},$
\bar{f}	$= \frac{1}{E} \iint f F(f, \theta) df d\theta,$
$\bar{\theta}$	$= \arg \iint e^{i\theta} F(f, \theta) df d\theta,$ with measured clock wise from North,
$E(n)$	$= \sum_{x,y} E(x, y, n),$

$$\begin{aligned}
 \bar{X}(n) &= \sum_{x,y} x E(x,y,n) / E(n), \\
 \text{or } I(n) &= \bar{X}(n) / \Delta X \\
 \bar{Y}(n) &= \sum_{x,y} y E(x,y,n) / E(n), \\
 \text{or } J(n) &= \bar{Y}(n) / \Delta Y \\
 S_x^2 &= \sum_{x,y} [x - \bar{X}(n)]^2 E(x,y,n) / E(n), \\
 S_y^2 &= \sum_{x,y} [y - \bar{Y}(n)]^2 E(x,y,n) / E(n), \\
 S^2 &= S_x^2 + S_y^2, \\
 C &= Cg \cdot \Delta t / \Delta x.
 \end{aligned}$$

In Case VI, the Ross hurricane model has been used with a multiplication factor 0.5 for our calculation. The model is defined as follows :

$$\begin{aligned}
 F_R(f, \theta) &= F_R(f) S_R(\theta), \\
 S_R(\theta) &= (2/\pi) \cos^2(\theta - \theta_w), \quad |\theta - \theta_w| \leq \frac{\pi}{2}, \\
 &0, \quad |\theta - \theta_w| > \frac{\pi}{2}, \\
 F_R(f) &= \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp \left\{ -1.25(f/f_P)^{-4} + (\ln \gamma) \exp\left[-\frac{1}{2\delta^2} \left(\frac{f}{f_P} - 1\right)^2\right] \right\},
 \end{aligned}$$

with parameters given by

$$\begin{aligned}
 \delta &= 0.1, \\
 f_P &= \frac{g}{U_{10}} \cdot 0.97 \xi^{-0.21}, \\
 \alpha &= 0.035 \left(\frac{U_{10}}{g} \cdot f_P \right)^{0.82}, \\
 \gamma &= 4.7 \xi^{-0.13}, \text{ for } \xi \leq 3 \times 10^4,
 \end{aligned}$$

and ξ is the dimensionless equivalent fetch

$$\xi = g \cdot r / U^2,$$

where r is the distance to the eye of the hurricane. For $\xi > 3 \times 10^4$,

$$\text{set } F_R = 0.$$

Non-dimensional variables are as follows :

$$\begin{aligned}
 E^* &= E g^2 / u_*^4, \\
 f_P^* &= f_P u_* / g, \\
 T^* &= T \cdot g / u_*, \\
 X^* &= X \cdot g / u_*^2,
 \end{aligned}$$

$$f_{PM}^* = 5.5575 \times 10^{-3} \text{ and}$$

$$E_{PM}^* = 1.0896 \times 10^3.$$

4. Specifications for calculation and plots

There are some differences in the conditions of calculation between SWAMP suggestions and ours. When the SWAMP out put is $X=30\text{km}$ and ours is $X=40\text{km}$, from now on, it will be described as "out put is 40 (S. 30) km".

4.1 Case I—Free Propagation

The purpose of this test is to see how well the models advect energy. We consider a flat earth with an X - Y co-ordinate system. The models have equal grid spacings Δx and Δy of 40km in the 1560km square sea. The wave energy is uni-directional. Two directions were considered in SWAMP. However, our model have three characteristic directions and three directions of propagation are considered : (a) parallel to the Y -axis, (b) a 22.5° angle relative to the Y -axis and (c) a 45° angle relative to the Y -axis. Three different values of the frequency 0.05, 0.1 and 0.2 Hz are considered.

The initial distribution of energy in grid models should be as follows :

$$\begin{array}{cccccc} .0 & .0 & .0 & .0 & .0 & \\ .0 & .1/16 & .1/8 & .1/16 & .0 & \\ .0 & .1/8 & .1/4 & .1/8 & .0 & \\ .0 & .1/16 & .1/8 & .1/16 & .0 & \\ .0 & .0 & .0 & .0 & .0 & \end{array}$$

The waves should propagate for 3 "simulated" days. The energy distributions every half day are plotted with theoretical location of the center of energy distribution.

S^2 for a wave packet initially at a single grid point is also plotted vs. C and n . For this case, no special plot formats required.

The time step of numerical integration Δt is 1 hour.

4.2 Case II—Fetch and Duration limited growth

With an initially calm sea, a wind of $U_{19.5}$ (S. U_{10}) = 20m/s is turned on at $T=0$. The wind direction is perpendicular to a boundary, form the west. The western boundary is land, the energy at this boundary remains zero for $T>0$. All other boundaries are perfectly absorbing. Since our model results seem to become stationary by about 36 hours, the test was

run for 72 hours to check the stationariness.

Output :

The evolution of the sea with time and fetch along the center of the grid from west to east will be displayed. Suggested output are $X=10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750$ and 1000 km at $T=1, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30$ and 36 hours, and additional output every 6 hours until stationary condition is attained. However our output are $X=40, 80, 120$ km and nearest grid points to the suggested ones, because our Δx and Δy are 40km. The time step is 1 hour.

Plots :

- E^* and f^* vs. X^* with T^* as the family parameter (plot description #1 and #3, from now on, it will be abbreviated “#1 and #3”)
- E^* and f^* vs. T^* with X^* as the family parameter (#2 and #4)
- Contours of E/E_{PM} vs. X^* and T^* (#5)
- Contours of f_p/f_{PM} vs. X^* and T^* (#6)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with X^* as family parameter, stationary state (#7)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with T^* as family parameter, at $X=1000$ km (#7)
- $F(f, \theta)/F_{MAX}$ vs. f^* and θ for $T=6$ and 36 hrs at $X=160$ (S. 150) km, and for $T=6$ and 36 hrs at $X=1000$ km(#8).

Total number of suggested plots=12.

4.3 Case III—Slanting fetch

This test starts with the same configuration as Case II, except that the wind now blows diagonally (45°) across the 1000km \times 1000km box ocean, and that both southern and western boundaries are land. The remaining boundaries are also land (S. subject to the same conditions as in Case II). The test run 72 hours(S. should be run until the model results are stationary) with Δx and Δy are 40km and Δt is 1 hour.

Output :

The test displays the evolution of the sea with time and asymmetric fetch. Suggested output points for the spectra are at $(X, Y) = (80, 80), (320, 80), (760, 80), (320, 320), (760, 320),$ and $(760, 760)$ [S. $(X, Y) = (75, 75), (300, 75), (300, 300), (750, 75), (750, 300),$ and $(750, 750)$] kilometers. Priority output times are $T=6, 12, 24, 36$ hours and stationary.

Plots :

- Contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^* , stationary state (#9)

- Contours of f_p/f_{PM} vs. X^* and Y^* , stationary state (#10)
- Custer diagram of E/\bar{E}_{PM} and $\bar{\theta}$, stationary state (#11)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with T^* as family parameter, at the co-ordinates $(X, Y) = (80, 80), (320, 320), (760, 760)$ km (#7)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with distance from the origin $\{(X^*)^2 + (Y^*)^2\}^{1/2}$ as the family parameter corresponding to the same three coordinates as above. Use priority times (#7).
- $F(f, \theta)/F_{max}$ vs. f^* and θ for the steady state, at the coordinates $(X, Y) = (80, 80), (320, 80), (760, 80), (320, 320), (760, 320),$ and $(760, 760)$ km (#8).

Total number of suggested plots=17.

4.4 Case IV—Half-plane wind field

A stationary wind of $U_{19.5}(S. U_{10}) = 20$ m/s is turned on at $T=0$ over the left half-plane. The right half-plane remains calm. The wind blows offshore to the north, parallel to a north-south front. This front lies grid points, to the left of and as near as possible to $X=500$ km in the 1000 km square sea. All boundaries are land (S. The southern boundary is land. All other boundary condition are as in Case II).

Output :

The test shows the radiation of swell from the windy half-plane into the calm half-plane and the influence of the front on the windsea development in the windy half-plane. Special output co-ordinates are $Y=80, 320$ and 760 (S.75,300,750) km and X equals front location ± 20 (S.40) km and 760 (S.750) km. Output only for the steady state.

Plots :

- Contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^* (#9)
- Contours of \bar{f}/f_{PM} vs. X^* and Y^* (#10)
- Custer diagram of E/E_{PM} and $\bar{\theta}$ (#11)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with Y^* as family parameter for each output X^* (#7)
- $F(f, \theta)/F_{max}$ vs. f^* and θ at grid points with the co-ordinates $Y=80, 320$ and 760 km and X equals front location ± 20 km and 760 km.

Total number of suggested plots=15.

4.5 Case VII—90° change in wind direction

A stationary wind of $U_{19.5}(S. U_{10}) = 20$ m/s is blowing to the north over an infinite ocean. At $T=0$ the wind turns instantaneously from north to west. Consider two cases : an initial

state (at $T=0$) equal to a fully developed wind sea as developed by the model for times $T < 0$, and an initial state equal to a half developed sea state, defined as the state for which the peak frequency of the wave spectrum f_P equals $2 f_{PM}$ for $U_{19.5} = 20\text{m/s}$ ($S, f = 0.26 g / U_{10} = 2f_{PM}$) and for MRI the state is defined by $E = E_{PM}/8$ for $U_{19.5} = 20\text{m/s}$. The ocean and wind field should be regarded as completely uniform spatially. This is achieved by bypassing the advection terms in the transport equation. The problem should be one-dimensional, dependent on time only.

Output :

The test displays the directional relaxation characteristics of the sea state under the influence of a turning wind. The problem is strictly one-dimensional, so the output is required at a single grid point only.

Plots :

- E^* vs. T^* for $T^* > 0$, both cases (#2)
- T_{45° vs. f , both cases (#17)
- Custer diagram of $F(f, T)/F_{MAX}(f)$ and $\bar{\theta}(f, T)$, both cases (#18)
- $F(f, \theta)/F_{MAX}$ vs. f^* and θ for $T = 0, 1, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24,$ and 30 hrs, both cases (#8).

Total number of suggested plots = 26.

4.6 Case V — Diagonal front

A front is running diagonally southwest to northeast across a 1000km square grid. All boundaries are land (S. The southern boundary is land and all other boundary conditions are as in Case II) An initial condition is as in Case II. At $T = 0$, a wind of $U_{19.5}$ (S. U_{10}) = 20m/s, to the north below the front, and to the west above the front, is turned on. For grid points on the diagonal, the wind is to the north, so the front lies between the main diagonal line of grid points and the next diagonal line of points above (to the north of) the main diagonal.

Output :

The test shows the influence of a steady but spatially inhomogeneous wind field on the development of the sea. Special output points are at $(X, Y) = (240, 360), (280, 320), (320, 280), (360, 240), (680, 800), (720, 760), (760, 720)$ and $(800, 680)$ (S. $(X, Y) = (225, 350), (250, 325), (325, 275), (350, 250), (675, 800), (700, 775), (775, 725),$ and $(800, 700)$) km. These points lie close to orthogonal lines crossing the front 300 and 750km from the southern boundary; the points are about 53 and 88km from the front. Choose your computing grid points to closest the these

co-ordinates. Output only for the steady state.

Plots :

- Contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^* (#9)
- Contours of \bar{f}/f_{PM} vs. X^* and Y^* (#10)
- Custer diagram of E/E_{PM} and $\bar{\theta}$ (#11)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with grid point as family parameter for the four points near 300km (#7)
- $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with grid point as family parameter for the four points near 750km (#7)
- $F(f,\theta)/F_{MAX}$ vs. f^* and θ at or closest to the above mentioned special output points (#8).

Total number of suggested plots=13.

4.7 Case VI—Stationary and moving hurricane

Using idealized hurricane wind fields prepared by Atlantic Oceanographic & Meteorological Labs., run two cases : a stationary storm and a storm translating to the north (Y-direction) at 15 m/s. Consider the storms to be defined on coordinate $0 \leq X \leq 1280$ (S. 1300) km, $0 \leq Y \leq 1720$ (S. 1700) km. The eye of the stationary storm is at co-ordinates (650, 1400); the eye of the moving storm is at the same co-ordinates after 24 hours. If the computing grid is smaller, its position relative to this co-ordinate system is fixed at the modeller's discretion. Use the hurricane model whose energy is as much as 1/2 of Ross hurricane model (defined before) (S. Use the Ross hurricane model) for initial conditions and for boundary conditions throughout the run. Start the moving storm's eye 1296km south of (650,1400), even if much of the storm is off the computing grid. Run both storms for 24 hours.

Output :

Special output points are at $(X, Y) = (640, 1400), (600, 1440), (600, 1360), (680, 1440), (680, 1360), (560, 1520), (560, 1280), (760, 1520), (760, 1280), (440, 1640), (440, 1160), (880, 1640)$ and $(880, 1160)$ [S. $(X, Y) = (650, 1400), (600, 1450), (600, 1350), (700, 1450), (700, 1350), (550, 1500), (550, 1300), (750, 1500), (750, 1300), (425, 1625), (425, 1175), (875, 1625)$ and $(875, 1175)$ km]. These points lie at distance 10 (S. 0), 70, 140, and 318km to the northwest, southwest, northeast, and southeast of the eye. Output is required only at $T = 24$ hours.

- Contours of H_s vs. X and Y for each storm (#12)
- Contours of \bar{f} vs. X and Y for each storm (#13)
- Custer diagram of H_s and $\bar{\theta}$ for each storm (#14)

— $F(f)/F_{MAX}$ vs. f with distance from eye as family parameter for each azimuth and for each storm (#15)

— $F(f,\theta)/F_{MAX}$ vs. f and θ for each storm and at or closest to the above mentioned spectral output points (#16).

Note that all hurricane variables are dimensional.

Total number of suggested plots=40.

4.8 Note

It is important that essentially the same resolution and numerical scheme of each individual model is maintained in all tests, wherever possible. Further, it has to be noted that all models are supposed to operate in Cartesian co-ordinates for all exercises of the inter-comparisson study.

5. List of Diagram

Case I

1-0-0 contours of $F(f,\theta)$ vs. X and Y for $f=0.05$ Hz and $\theta=\pi$, every 0.5 day. Numerals on the contours show the interval of them in the unit of 1/1000. The energy is initially at the grid points marked+. The mark \times shows the theoretically expected location of the center of the energy packet.

2-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $\theta=9\pi/8$

3-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $\theta=10\pi/8$

4-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.10$ Hz and $\theta=\pi$

5-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.10$ Hz and $\theta=9\pi/8$

6-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.10$ Hz and $\theta=10\pi/8$

7-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.20$ Hz and $\theta=\pi$

8-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.20$ Hz and $\theta=9\pi/8$

9-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.20$ Hz and $\theta=10\pi/8$

10-0-0 $E(n)$ vs. n with f and θ as parameters. The energy level falls to zero when the energy travels out of the calculation area.

11-0-0 $I(n)$ and $J(n)$ vs. n with θ as parameter. The end effect appears at around $n=50$, because the maximum grid number in I and J direction is 40.

12-0-0 S^2 vs. n with C as parameter for $\theta=\pi$. The larger the value of C of the wave component, the faster the wave travels out of the calculation area and S^2 is reduced in value.

13-0-0 The same as Fig. 12-0-0 except for $\theta=9\pi/8$

14-0-0 The same as Fig. 12-0-0 except for $\theta=10\pi/8$

Case II

15-7.4-1 E^* vs. X^* with T^* as parameter

16-7.5-3 f_p^* vs. X^* with T^* as parameter

17-7.6-2 E^* vs. T^* with X^* as parameter

18-7.7-4 f_p^* vs. T^* with X^* as parameter

19-7.8-0 rescaled E^* vs. X^* by redefining the drag coefficient to lie the curve E^* vs. X^* as close as possible to the mean curve of the SWAMP results. The ratios Cd'/Cd of modified drag coefficient Cd' to Cd of 1.83×10^{-3} are 1.05 and 0.87 for MRI and MRI-II respectively.

20-7.9-0 Same as Fig. 19-7.8-0 except rescaled f_p^* vs. X^*

21-7.10-0 Same as Fig. 19-7.8-0 except rescaled E^* vs. T^*

22-7.11-0 Same as Fig. 19-7.8-0 except rescaled f_p^* vs. T^*

23-0-5 contours of E/E_{PM} vs. X^* and T^*

24-0-6 contours of f_p/f_{PM} vs. X^* and T^*

25-7.3-7 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with X^* as parameter

26-0-8 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with T^* as parameter

27-0-9 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=6$ hrs, $X=160$ km

28-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=36$ hrs, $X=160$ km

29-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=6$ hrs, $X=1000$ km

30-0-10 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=36$ hrs, $X=1000$ km

Case III

31-8.1-0 wind field geometry for Case III and special output points

32-0-11 contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^*

33-8.2-12 contours of f_p/f_{PM} vs. X^* and Y^*

34-8.3-13 cluster diagram of E/E_{PM} and $\bar{\theta}$ vs. X^* and Y^*

35-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6, 12, 24, 72$ and point (80,80)

36-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6, 12, 24, 72$ and point (320,320)

37-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6, 12, 24, 72$ and point (760,760)

38-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6$ hours and points A, B, and D

39-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=12$ hours and points A, B, and D

- 40-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=24$ hours and points A, B, and D
- 41-0-14 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=36$ hours and points A, B, and D
- 42-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=72$ hours and points A, B, and D
- 43-0-15 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (80,80)
- 44-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (320,80)
- 45-8.4-16 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (760,80)
- 46-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (320,320)
- 47-0-17 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (760,320)
- 48-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (760,760)
- 49-8.5-0 location of models in the E_{III}/E_{II} vs. f_{PIII}/f_{PII} parameter plane at point F (MRI is not shown, as the peak wind sea frequency was not well defined for Case II for small fetch), where indices III and II refer to Case III and Case II for the same fetch.

Case IV

- 50-9.1-0 Wind field geometry for Case IV. A,B and C denote special output points.
- 51-0-18 countours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^*
- 52-0-19 countours of \bar{f}/f_{PM} vs. X^* and Y^*
- 53-9.2-20 custer diagram of E/E_{PM} and $\bar{\theta}$ vs. X^* and Y^*
- 54-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (480,80)
- 55-0-21 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (480,320)
- 56-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (480,760)
- 57-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (520,80)
- 58-0-22 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (520,320)
- 59-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (520,760)
- 60-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,80)
- 61-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,320)
- 62-9.4-23 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,760)
- 63-0-24 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ for $T= 72$ hrs and point (480,80), (480,320) and (480,760)
- 64-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ for $T= 72$ hrs and point (520,80), (520,320) and (520,760)
- 65-0-25 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ for $T= 72$ hrs and point (760,80), (760,320) and (760,760)

- 66-9.3-0 model locations in the partameter plane spanned by the values of (E_{IV}/E_{II}) at points A and B
- 67-9.5-0 model locations in the partameter plane of E_C/E_B vs \bar{f}_C/\bar{f}_B , where indices B and C refer to points B and C.

CaseVII-1 ($f_P = 2f_{PM}$)

- 68-0-55 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 0 hrs
- 69-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 1 hrs
- 70-10.1a-56 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 2 hrs
- 71-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 4 hrs
- 72-10.1b-57 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 6 hrs
- 73-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 9 hrs
- 74-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 12 hrs
- 75-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 15 hrs
- 76-0-58 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 18 hrs
- 77-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 24 hrs
- 78-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 30 hrs
- 79-0-0 T_{45° vs. f
- 80-0-0 E^* vs. T^*
- 81-0-0 custer diagram of $F(f)$ and $\bar{\theta}$ vs. T^* and f^*

CaseVII-2 ($f_P = f_{PM}$)

- 82-0-59 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 0 hrs
- 83-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 1 hrs
- 84-0-60 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 2 hrs
- 85-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 4 hrs
- 86-0-61 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 6 hrs
- 87-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 9 hrs
- 88-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 12 hrs
- 89-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 15 hrs
- 90-0-62 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 18 hrs
- 91-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 24 hrs
- 92-0-0 scaled 2-D specturm $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 30 hrs
- 93-0-0 T_{45° vs. f

94-0-0 E^* vs. T^*

95-0-0 cluster diagram of $F(f)$ and $\bar{\theta}$ vs. T^* and f^*

Case VII-1 and 2

96-10.11-0 peak spectral densities $F_{MAX}(f, \theta)/F_{PM}(f_{PM}, \theta_w)$ for windsea and swell vs. time

Case V

97-11.1-0 wind field geometry for the diagonal front Case V

98-0-26 contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^*

99-0-27 contours of \bar{f}/f_{PM} vs. X^* and Y^*

100-0-28 cluster diagram of E/E_{PM} and $\bar{\theta}$ vs. X^* and Y^*

101-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (360,240)

102-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (320,280)

103-0-30 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (280,320)

104-0-31 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (240,360)

105-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (800,680)

106-0-29 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,720)

107-0-33 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (720,760)

108-0-32 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (680,800)

109-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for points (360,240), (320,280), (280,320) and (240,360)

110-0-34 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for points (800,680), (760,720), (720,760) and (680,800)

111-11.5-0 E along the section S (cf. Fig.97-11.1-0). Note that fetch increase to the right (decreasing X^*)

112-11.6-0 Relaxation of mean wave direction along the section S

Case VI-1 (Stationary Hurricane)

113-12.1-0 Hurricane wind field and selected output points for spectra

114-0-35 contours of H_s vs. X and Y

115-0-36 contours of \bar{f} vs. X and Y

116-0-37 cluster diagram of H_s and $\bar{\theta}$ vs. X and Y

117-0-47 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400), (680,1440), (760,1520) and (880,1640) (eye and NE direction)

- 118-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(600,1440),(560,1520) and (440,1640) (eye and NW direction)
- 119-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(600,1360),(560,1280) and (440,1160) (eye and SW direction)
- 120-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(680,1360),(760,1280) and (880,1160) (eye and SE direction)
- 121-0-38 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (640,1400) (eye)
- 122-12.5-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (680,1440) (NE1)
- 123-0-39 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (760,1520) (NE2)
- 124-0-40 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (880,1640) (NE3)
- 125-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (600,1440) (NW1)
- 126-0-41 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (560,1520) (NW2)
- 127-0-42 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (440,1640) (NW3)
- 128-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (600,1360) (SW1)
- 129-0-43 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (560,1280) (SW2)
- 130-0-44 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (440,1160) (SW3)
- 131-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (680,1360) (SE1)
- 132-0-45 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (760,1280) (SE2)
- 133-0-46 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (880,1160) (SE3)

Case VI-2 (moving Hurricane)

- 134-0-48 contours of H_s vs. X and Y
- 135-0-49 contours of \bar{f} vs. X and Y
- 136-0-50 custer diagram of H_s and $\bar{\theta}$ vs. X and Y
- 137-0-54 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(680,1440),(760,1520) and (880,1640) (eye and NE direction)
- 138-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(600,1440),(560,1520) and (440,1640) (eye and NW direction)
- 139-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(600,1360),(560,1280) and (440,1160) (eye and SW direction)
- 140-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{\text{MAX}}$ for points (640,1400),(680,1360),(760,1280) and (880,1160) (eye and SE direction)
- 141-0-51 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (640,1400) (eye)
- 142-0-53 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (680,1440) (NE1)

- 143-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (760,1520) (NE2)
- 144-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (880,1640) (NE3)
- 145-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (600,1440) (NW1)
- 146-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (560,1520) (NW2)
- 147-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (440,1640) (NW3)
- 148-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (600,1360) (SW1)
- 149-0-52 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (560,1280) (SW2)
- 150-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (440,1160) (SW3)
- 151-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (680,1360) (SE1)
- 152-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (760,1280) (SE2)
- 153-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{\text{MAX}}$ for point (880,1160) (SE3)

Case VI-1 and 2

- 154-12.4-0 Positions of $(H_s)_{\text{MAX}}$ for different models. Arrows point in $\bar{\theta}$ and are proportional to $(H_s)_{\text{MAX}}$ in length

6. References

- Allender, J.H., T.P.Barnett and M.Lybanon(1984) : An improved spectral model for ocean wave prediction. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- Cavaleri, L., and C.Bertrotti(1984) : A wave model for wind wave prediction. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- De Voogt, W.J.P., G.J.Komen and J.Bruinsma(1984) : The KNMI operational wave prediction model GONO. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Prenum Press.
- Golding, B.(1984) : The UK Meteorological Office operational wave model. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- Greenwood, J.A., V.J.Cardone and L.M.Lawson (1984) : Intercomparison test version of the SAIL wave model. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- Günther, H. and W.Rosenthal(1984) : The hybrid parametrical(HYPA) wave model. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.

- Hasselmann, S., and K.Hasselmann(1984) : Integrations of the spectral transport equation with exact and parametrical computation of the nonlinear energy transfer. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- Haug, O.(1968) : A numerical model for prediction of sea and swell.The Norwegian Met. Inst., Meteor. Ann. 5, No.4.
- Inoue, T.(1967) : On the growth of the spectrum of wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to forecasting. Geophys. Sci. Lab. Tr-67-5, New York Univ.,74.
- Isozaki, I. and T.Uji(1973) : Numerical prediction of ocean waves. Papers in Met. and Geophys., 24(2), 207-232.
- The SWAMP Group : J.H.Allender, T.P.Barnett, L.Bertotti, J.Bruinsma, V.J.Cardone, L. Cavaleri, J.Ephraums, B.Golding, A.Greenwood, J.Guddal, H.Günther, K.Hasselmann, S. Hasselmann, P.Joseph, S.Kawai, G.J.Komen, L.Lawson, H.Linne, R.B.Long, M.Lybanon, E.Maeland, W.Rosenthal, Y.Toba, T.Uji, and W.J.P. de Voogt(1984) : The Sea Wave Modelling Project (SWAMP), An intercomparison study of wind wave prediction models,Part 1 : Principal results and conclusions. in Proc. IUCRM Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- The SWAMP Group : J.H.Allender, T.P.Barnett, L.Bertotti, J.Bruinsma, V.J.Cardone, L. Cavaleri, J.Ephraums, B.Golding, A.Greenwood, J.Guddal, H.Günther, K.Hasselmann, S. Hasselmann, P.Joseph, S.Kawai, G.J.Komen, L.Lawson, H.Linne, R.B.Long, M.Lybanon, E.Maeland, W.Rosenthal, Y.Toba, T.Uji, and W.J.P. de Voogt(1982) : The Sea Wave Modelling Project(SWAMP), An intercomparison study of wind wave prediction models, Part 2 : A compilation of results, KNMI Publication 161.
- Toba, Y.(1979) : Study on wind waves as a strong nonlinear phenomenon. 12th Symp. on Naval Hydrodynam., National Acad. of Sci., Washington, D.C., 521-540.
- Toba,Y., S.Kawai and P.S.Joseph(1984) : The Tohoku wave model. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.
- Uji,T. and I.Isozaki(1972) : The calculation of wave propagation in the numerical prediction of ocean waves. Papers in Met. and Geophys., 23(4), 347-359.
- Uji,T.(1975) : Numerical estimation of the sea waves in a typhoon area. Papers in Met. and Geophys., 26(4), 199-217.
- Uji,T.(1984) : The MRI wave model. Proc. Symp. on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981, Plenum Press.

Uji, T. (1984) : A coupled discrete wave model MRI-II. J. Oceanogr. Soc. Japan, 40(4), 303-313.

CASE 1
 NO.1

DX : 40 KM. DT : 1 HOUR

DIR. OF WAVE : S

PERIOD : 20 SEC

TIME (DAY)	TOTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999978
1.0	0.988420
1.5	0.000000
2.0	0.000000
2.5	0.000000
3.0	0.000000

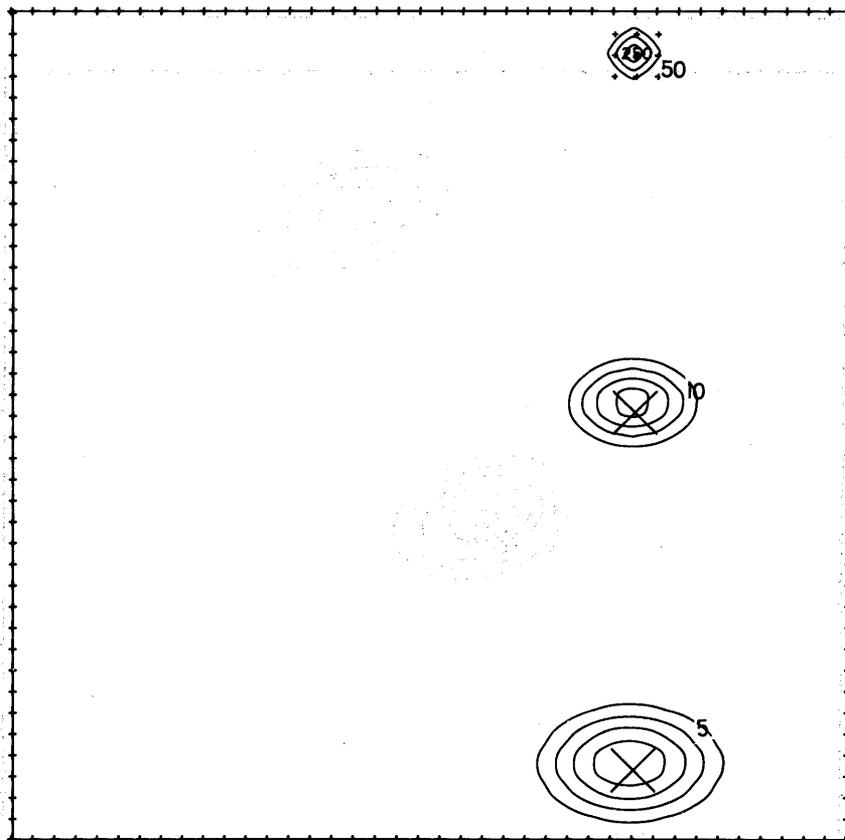


Fig. 1-0-0 contours of $F(f, \theta)$ vs. X and Y for $f=0.05$ Hz and $\theta=\pi$, every 0.5 day. Numerals on the contours show the interval of them in the unit of 1/1000. The energy is initially at the grid points marked +. The mark \times shows the theoretically expected location of the center of the energy packet.

CASE 1
NØ.2

DX : 40 KM, DT : 1 HOUR

DIR. ØF WAVE : SSW

PERIØD : 20 SEC

TIME (DAY)	TØTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999976
1.0	0.999597
1.5	0.000159
2.0	0.000000
2.5	0.000000
3.0	0.000000

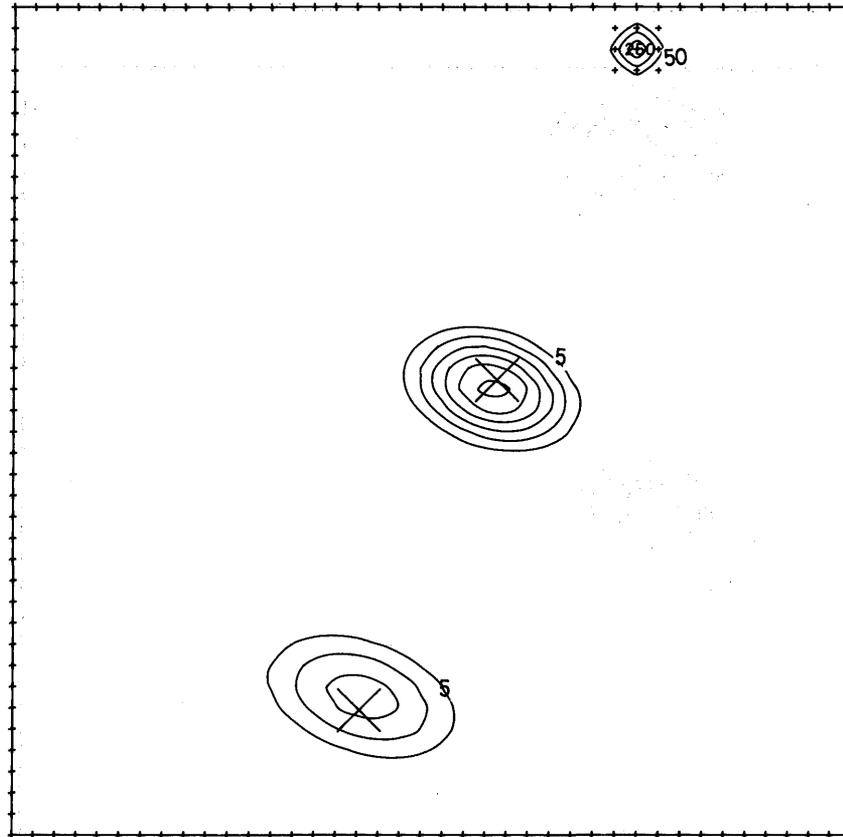


Fig. 2-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $\theta=9\pi/8$

CASE 1
NO. 3

DX : 40 KM. DT : 1 HOUR

DIR. OF WAVE : SW

PERIOD : 20 SEC

TIME (DAY)	TOTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999972
1.0	0.995960
1.5	0.007618
2.0	0.000000
2.5	0.000000
3.0	0.000000

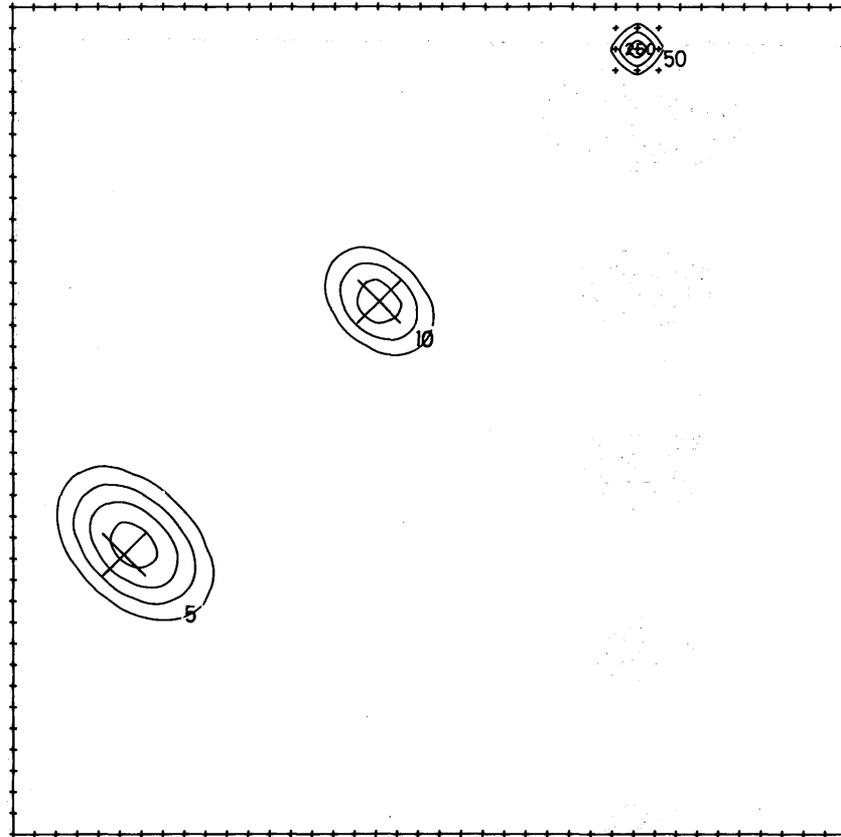


Fig. 3-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $\theta=10\pi/8$

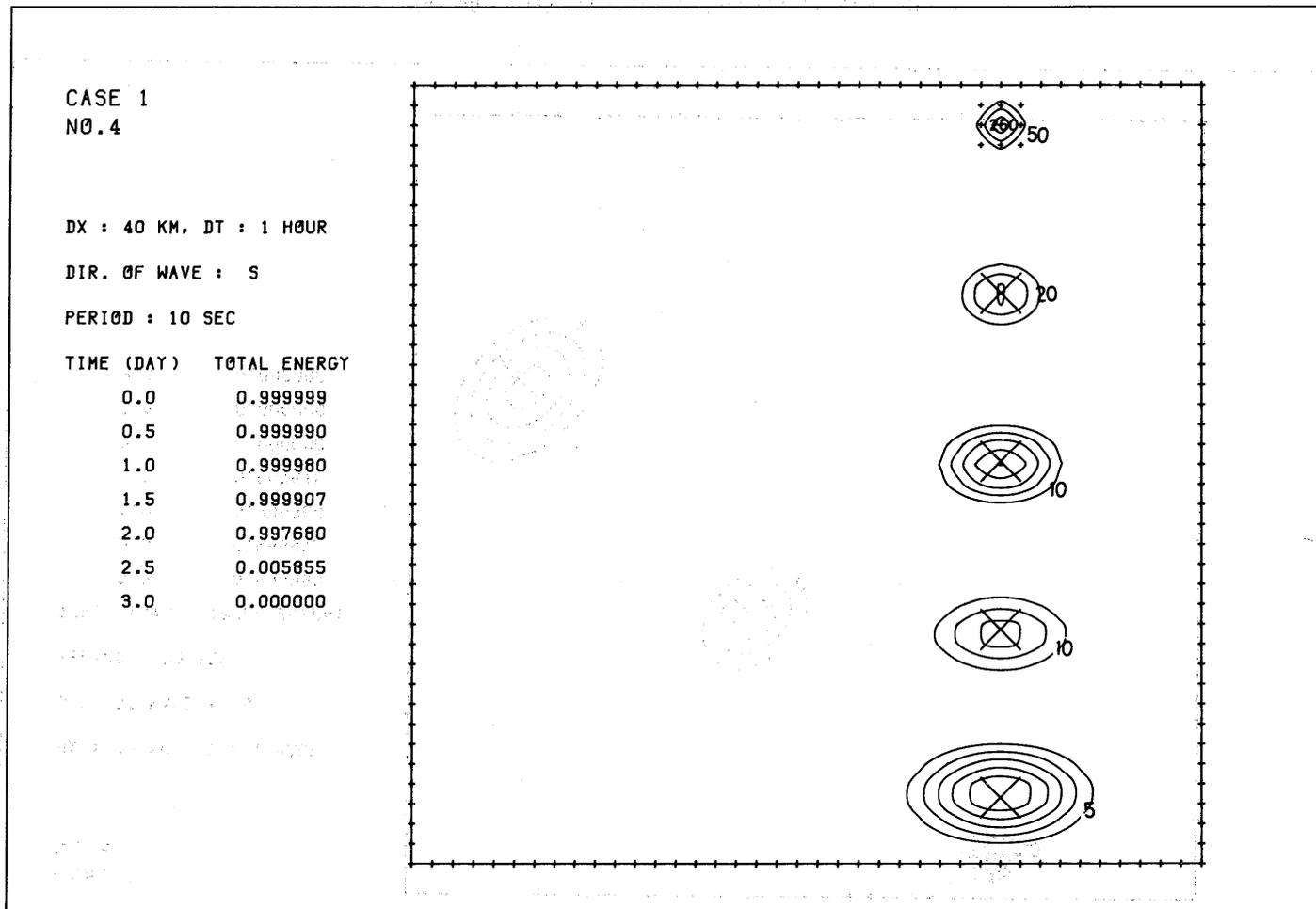


Fig. 4-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.10$ Hz and $\theta=\pi$

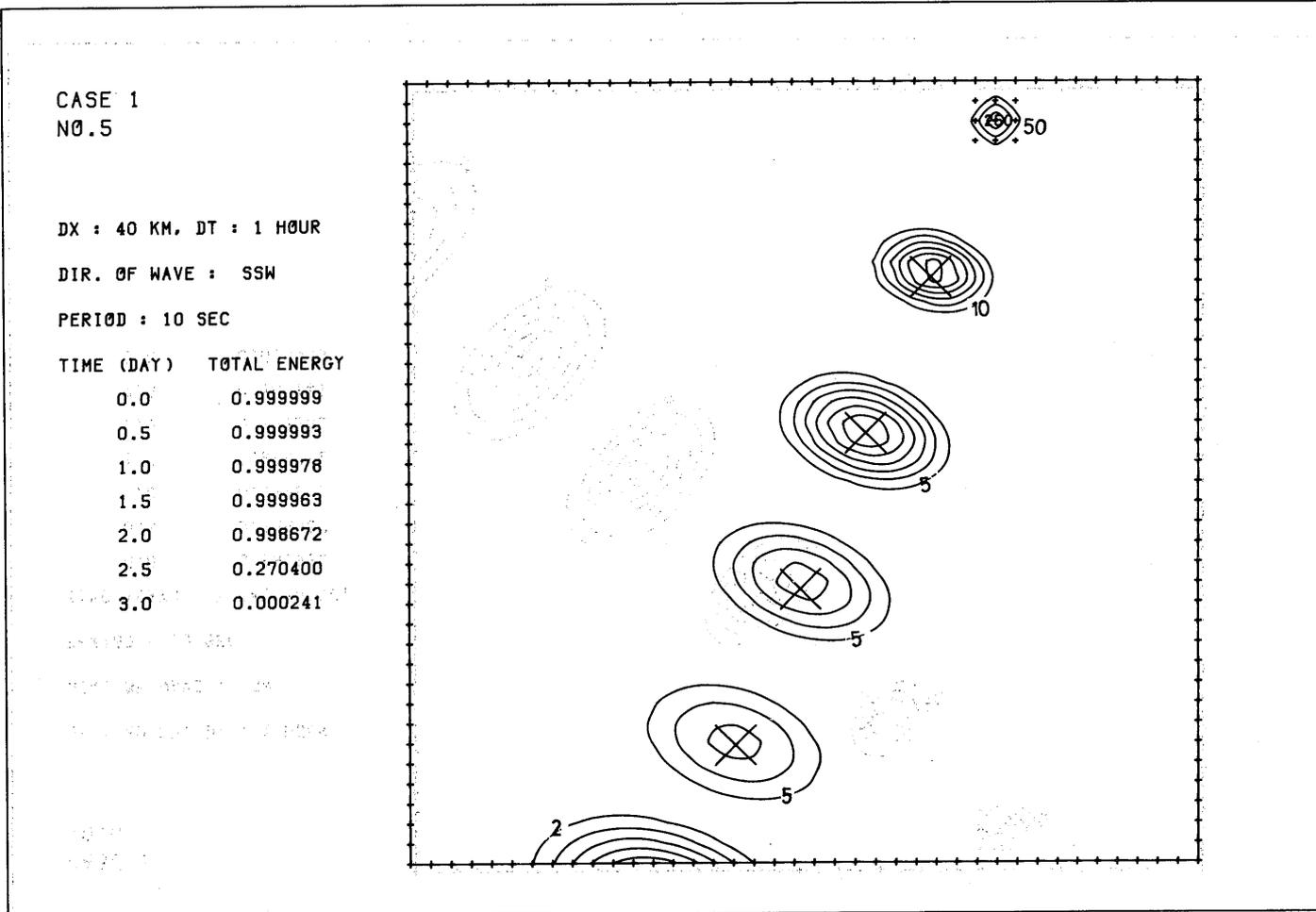


Fig. 5-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.10$ Hz and $\theta=9\pi/8$

CASE 1
NO. 6

DX : 40 KM, DT : 1 HOUR

DIR. OF WAVE : SW

PERIOD : 10 SEC

TIME (DAY)	TOTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999987
1.0	0.999976
1.5	0.999962
2.0	0.997295
2.5	0.469141
3.0	0.005435

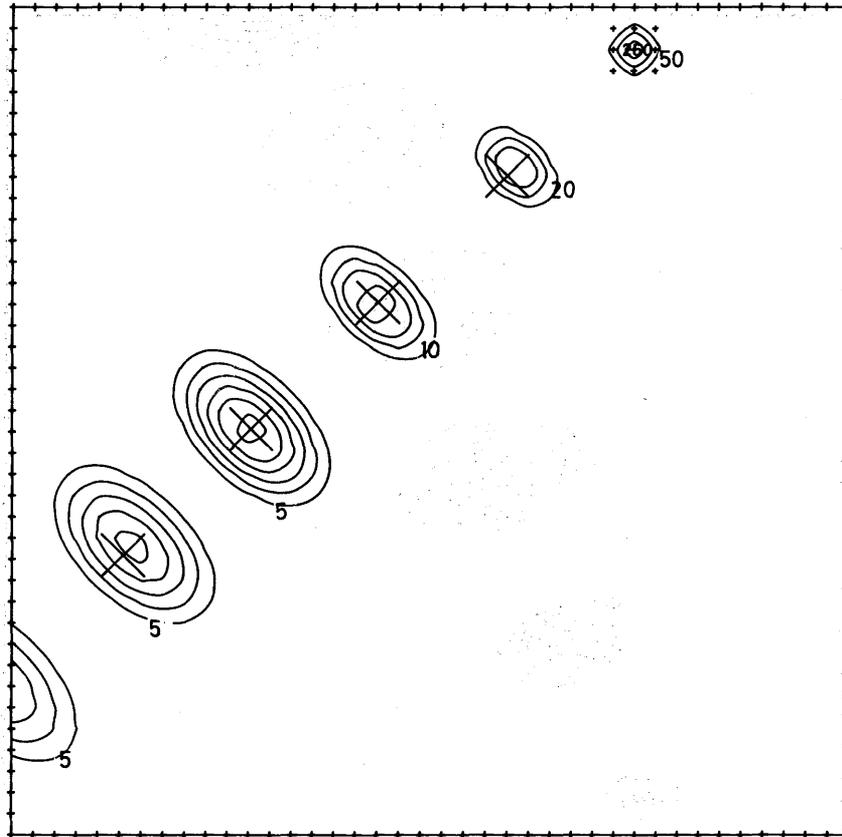


Fig. 6-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.10$ Hz and $\theta=10\pi/8$

CASE 1
NØ.7

DX : 40 KM, DT : 1 HOUR

DIR. OF WAVE : S

PERIOD : 5 SEC

TIME (DAY)	TOTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999995
1.0	0.999991
1.5	0.999988
2.0	0.999985
2.5	0.999977
3.0	0.999954

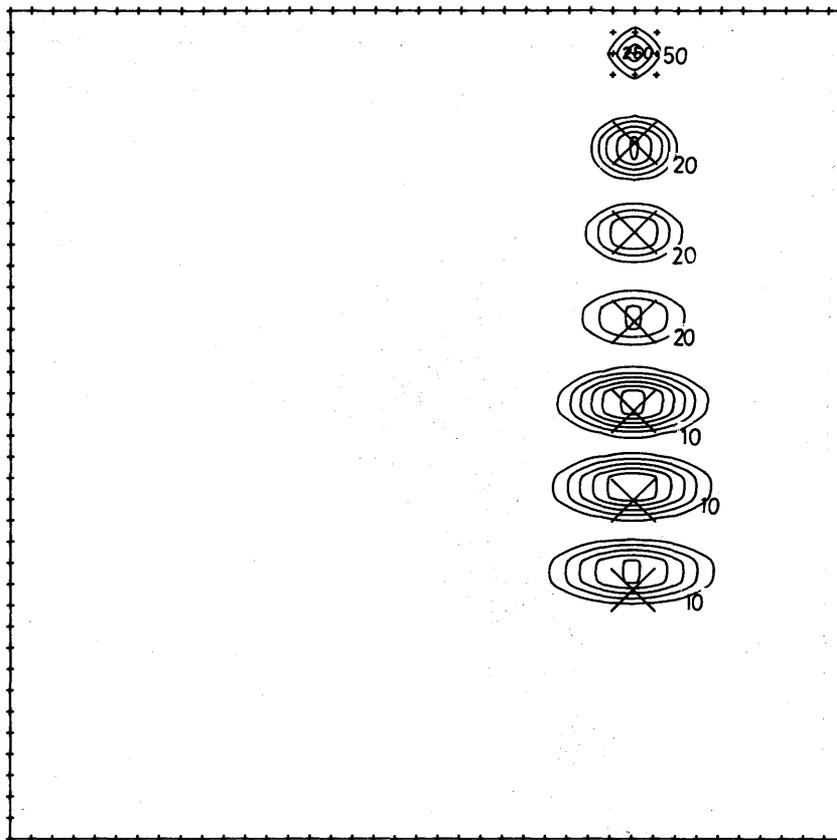


Fig. 7-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.20$ Hz and $\theta=\pi$

CASE 1
NO. 8

DX : 40 KM, DT : 1 HOUR

DIR. OF WAVE : SSW

PERIOD : 5 SEC

TIME (DAY)	TOTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999997
1.0	0.999994
1.5	0.999988
2.0	0.999981
2.5	0.999975
3.0	0.999971

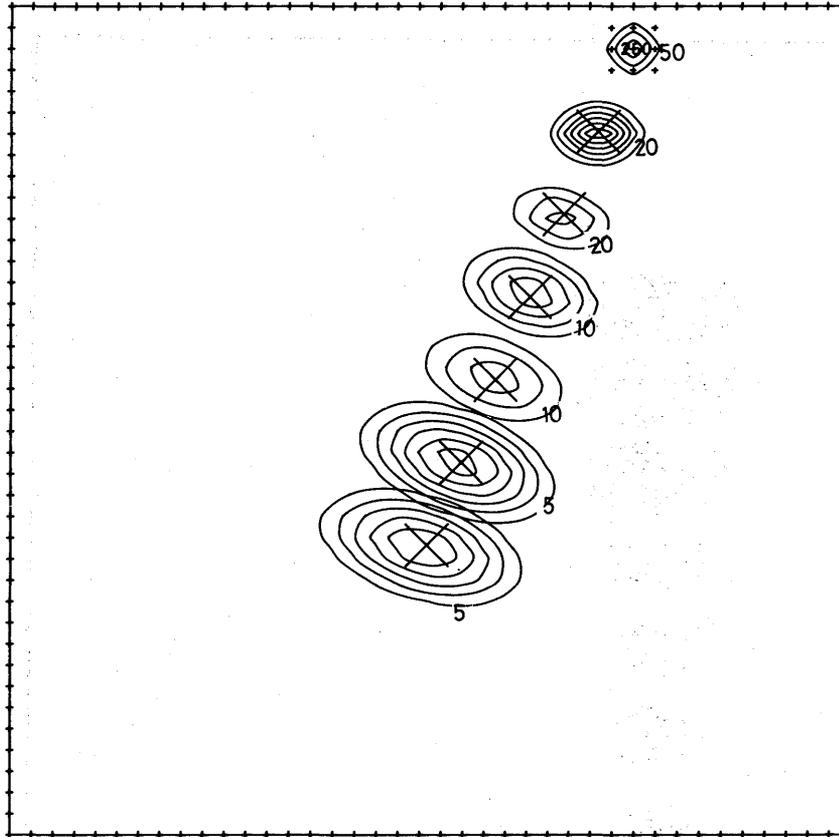


Fig. 8-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.20$ Hz and $\theta=9\pi/8$

CASE 1
NO. 9

DX : 40 KM, DT : 1 HOUR

DIR. OF WAVE : SW

PERIOD : 5 SEC

TIME (DAY)	TOTAL ENERGY
0.0	0.999999
0.5	0.999971
1.0	0.999967
1.5	0.999960
2.0	0.999954
2.5	0.999949
3.0	0.999941

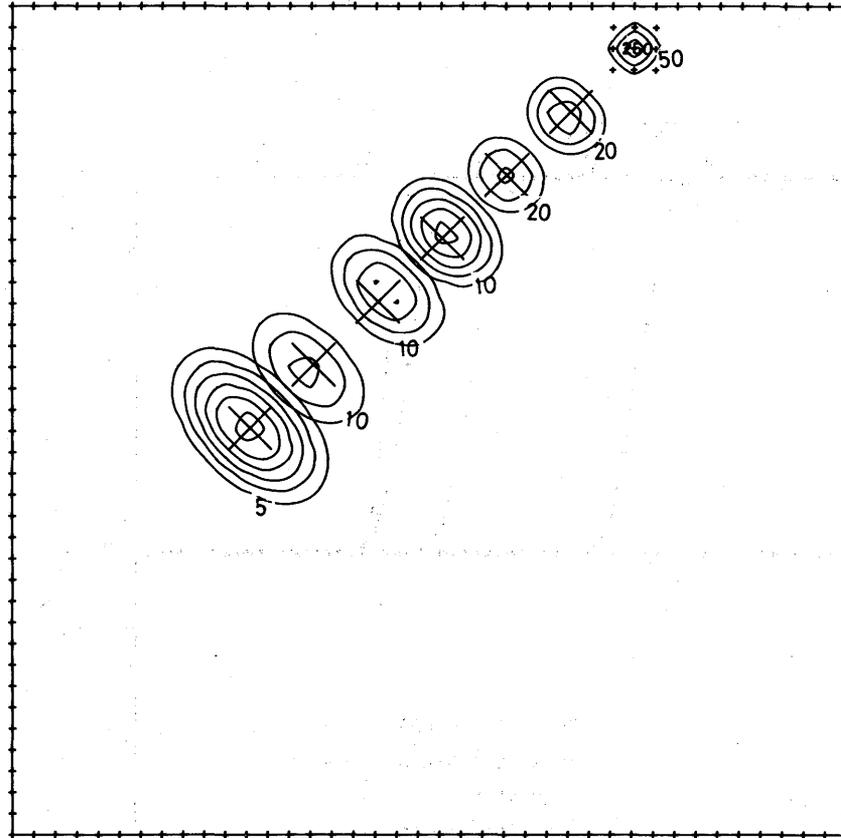


Fig. 9-0-0 The same as Fig. 1-0-0 except for $f=0.20$ Hz and $\theta=10\pi/8$

CASE 1

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR

IMAX=40 : JMAX=40

X EXTENT:0-1560 KM

Y EXTENT:0-1560 KM

E(N) VS. TIME

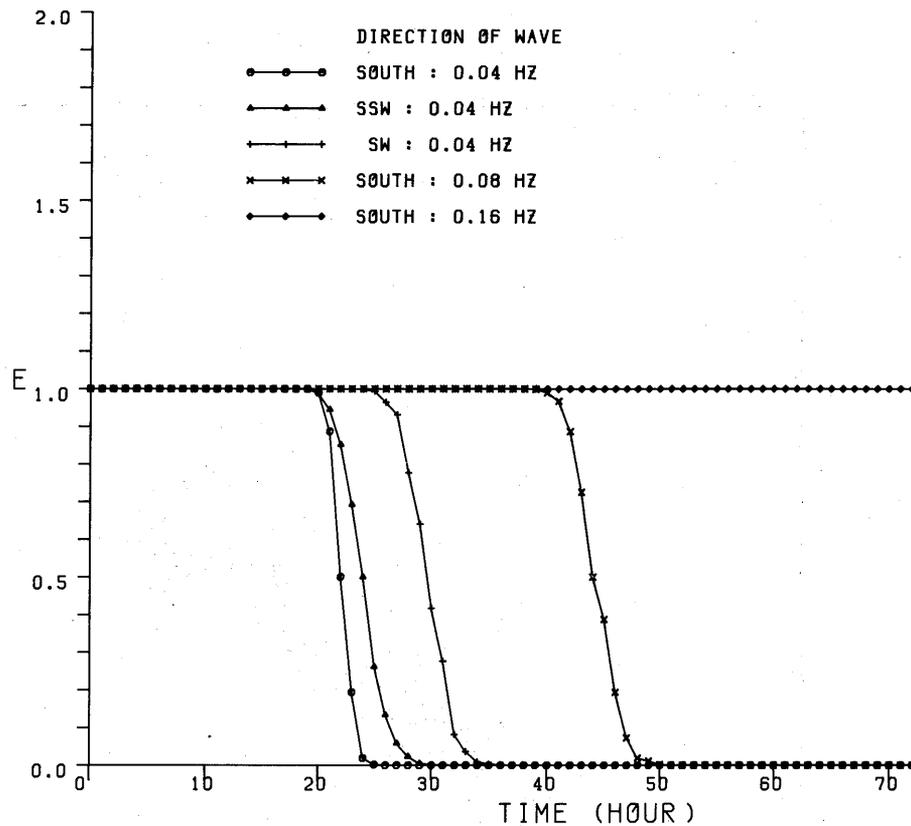
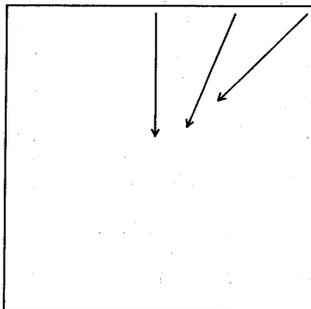


Fig. 10-0-0 E(n) vs. n with f and θ as parameters. The energy level falls to zero when the energy travels out of the calculation area.

CASE 1

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=40 : JMAX=40
 X EXTENT:0-1560 KM
 Y EXTENT:0-1560 KM

$\overline{I(N)}$ VS. TIME
 $\overline{J(N)}$ VS. TIME

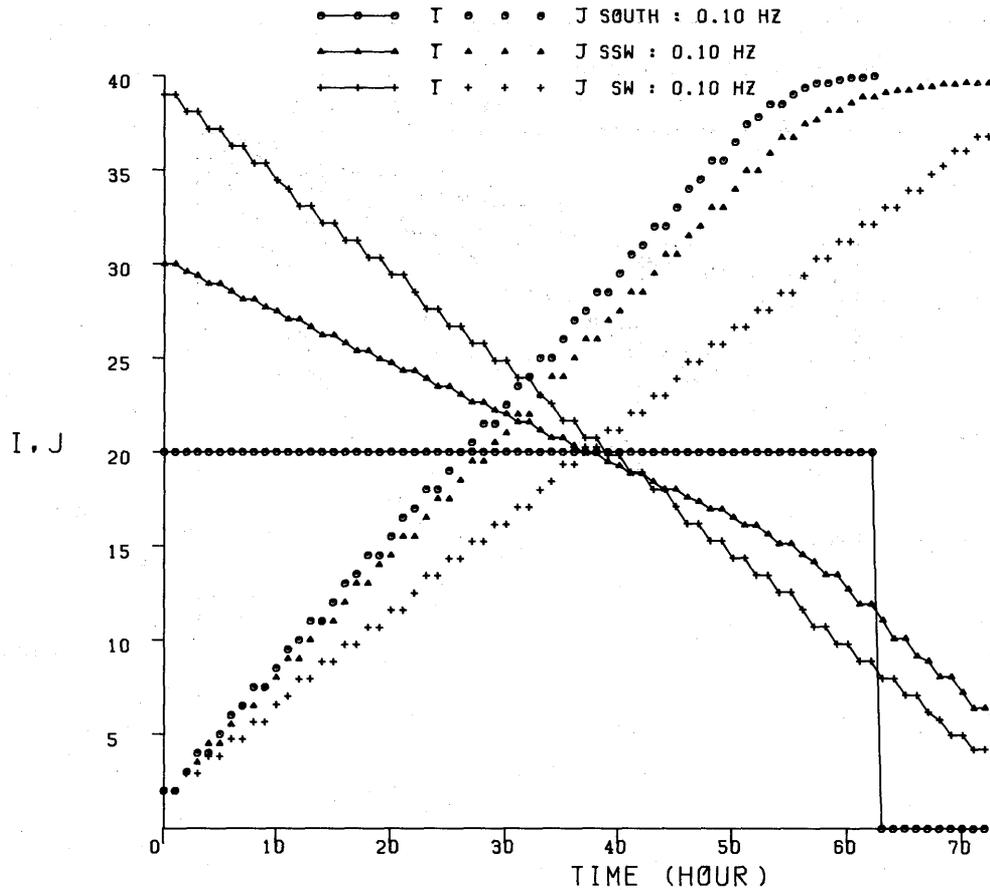
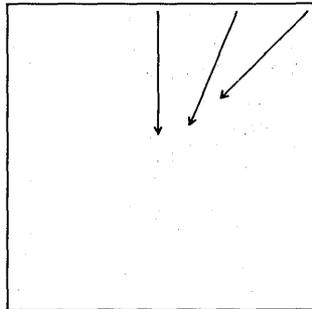


Fig. 11-0-0 $I(n)$ and $J(n)$ vs. n with θ as parameter. The end effect appears at around $n=50$, because the maximum grid number in I and J direction is 40.

#00

CASE 1

IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
IMAX=40 : JMAX=40
X EXTENT:0-1560 KM
Y EXTENT:0-1560 KM

S² VS. N

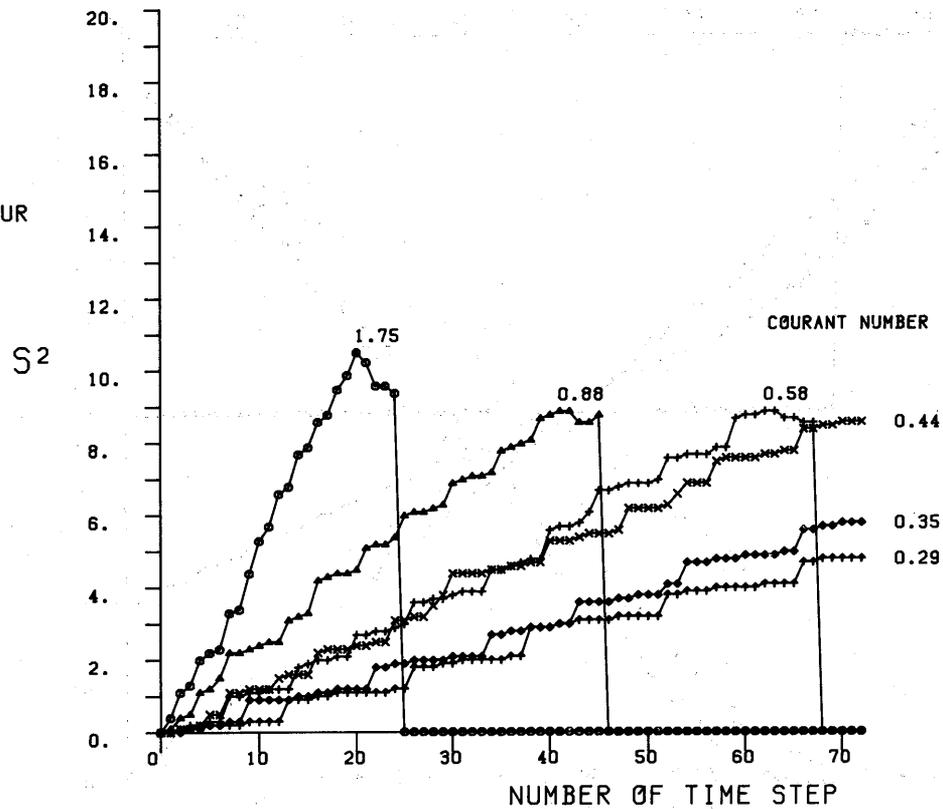
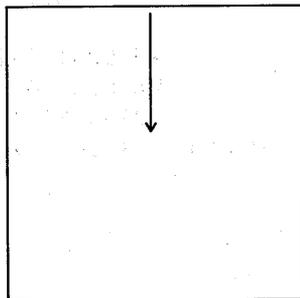


Fig. 12-0-0 S² vs. n with C as parameter for $\theta = \pi$. The larger the value of C of the wave component, the faster the wave travels out of the calculation area and S² is reduced in value.

#00

CASE 1

IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
IMAX=40 : JMAX=40
X EXTENT:0-1560 KM
Y EXTENT:0-1560 KM

S² VS. N

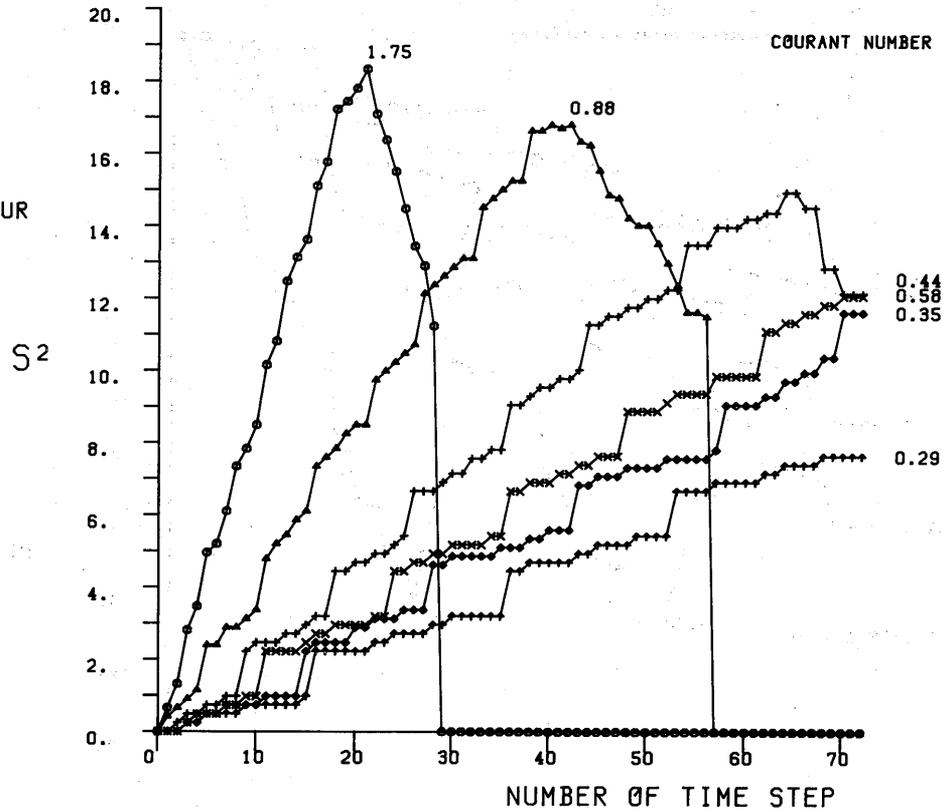
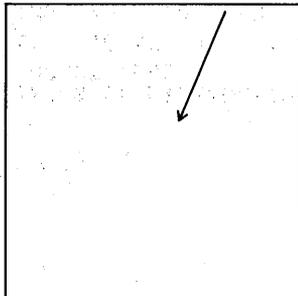


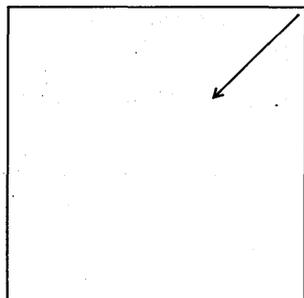
Fig. 13-0-0 The same as Fig. 12-0-0 except for $\theta=9\pi/8$

#00

CASE 1

IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
IMAX=40 : JMAX=40
X EXTENT:0-1560 KM
Y EXTENT:0-1560 KM

S² VS. N



S²

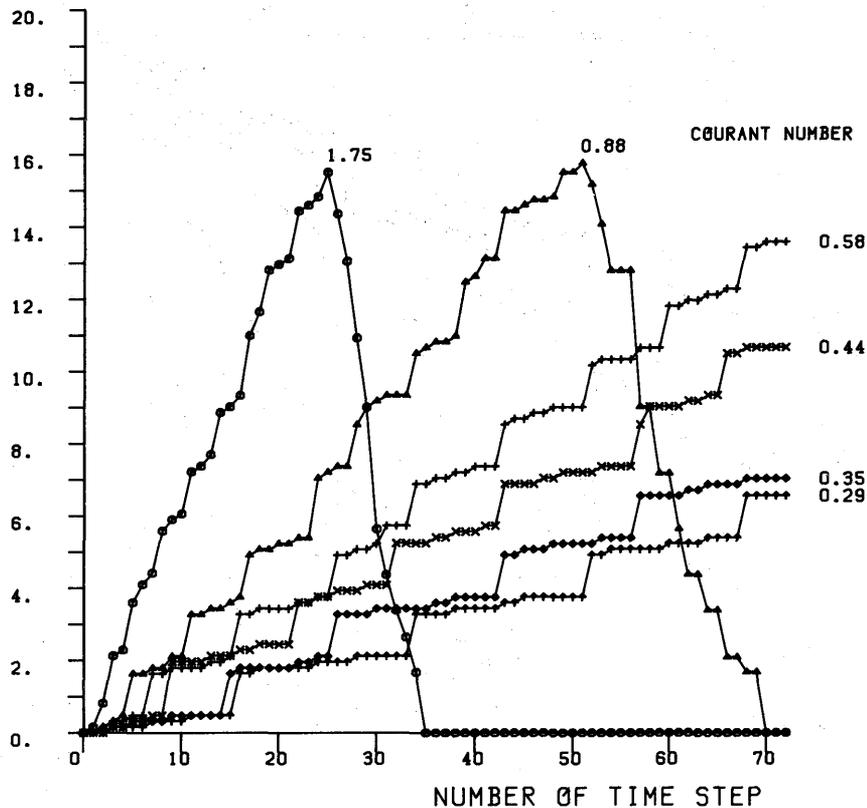


Fig. 14-0-0 The same as Fig. 12-0-0 except for $\theta=10\pi/8$

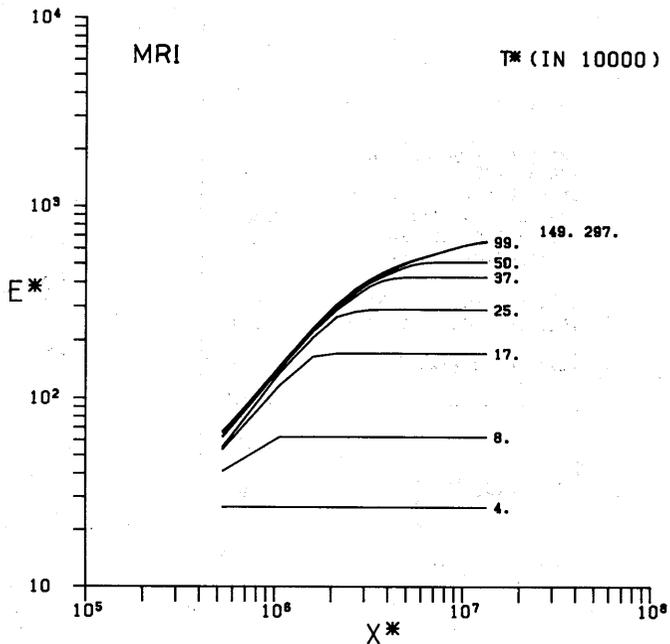
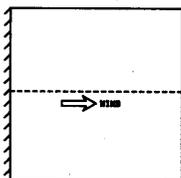
#1

CASE 2

IMPROVED PROPAGATION
 AUGUST 1981
 DX : 40 KM, DT : 1 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : WEST
 VEL. OF WIND : 20 M/S

E* VS FETCH AND TIME



CASE 2

E* VS FETCH AND TIME

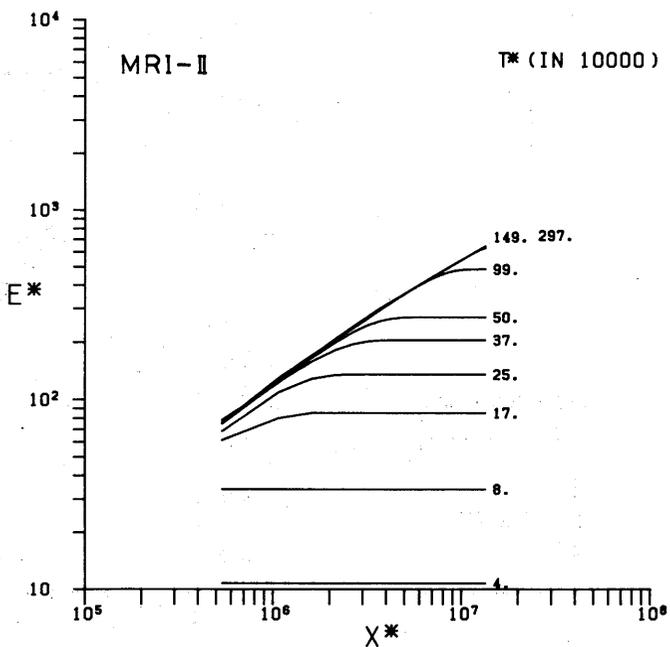
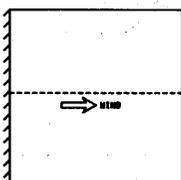


Fig. 15-7.4-1 E^* vs. X with T^* as parameter

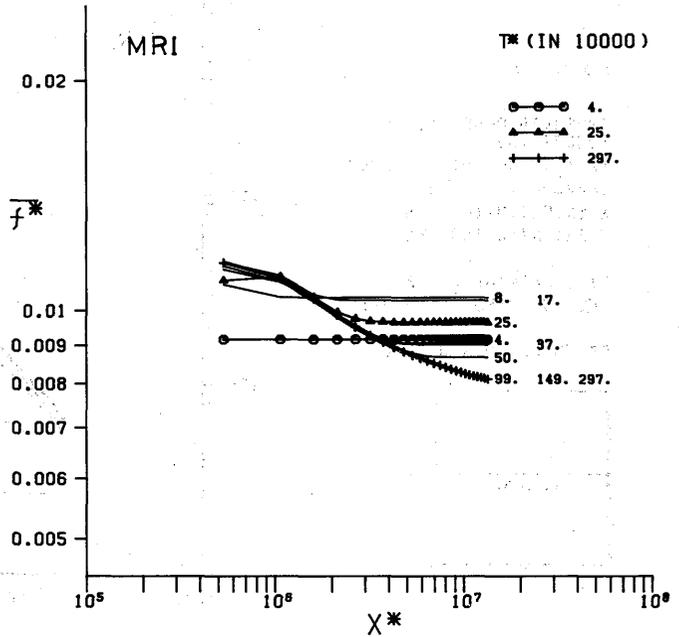
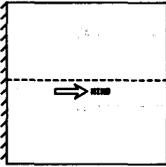
#3

CASE 2

IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM. DT : 1 HOUR
IMAX=26 : JMAX=26
X EXTENT:0-1000 KM
Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : WEST
VEL. OF WIND : 20 M/S

f^* VS FETCH (X^*)



#3

CASE 2

f_p^* VS FETCH (X^*)

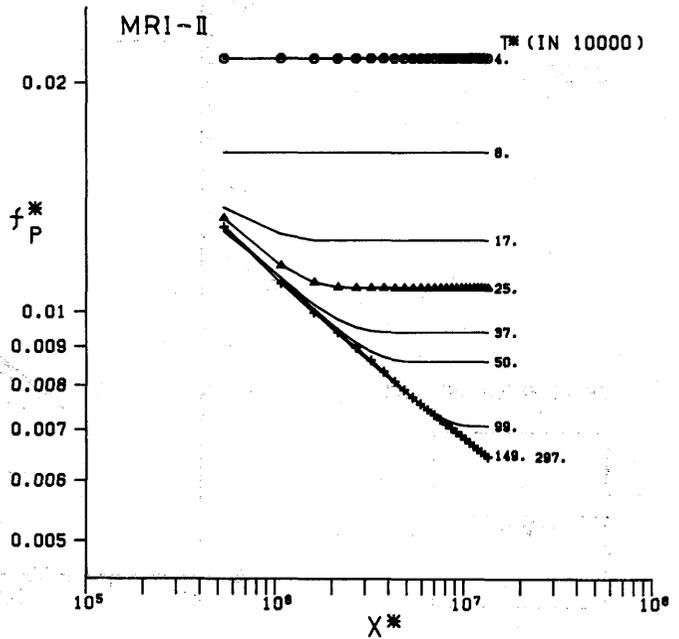
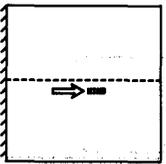


Fig.16-7.5-3 f_p^* vs. X^* with T^* as parameter

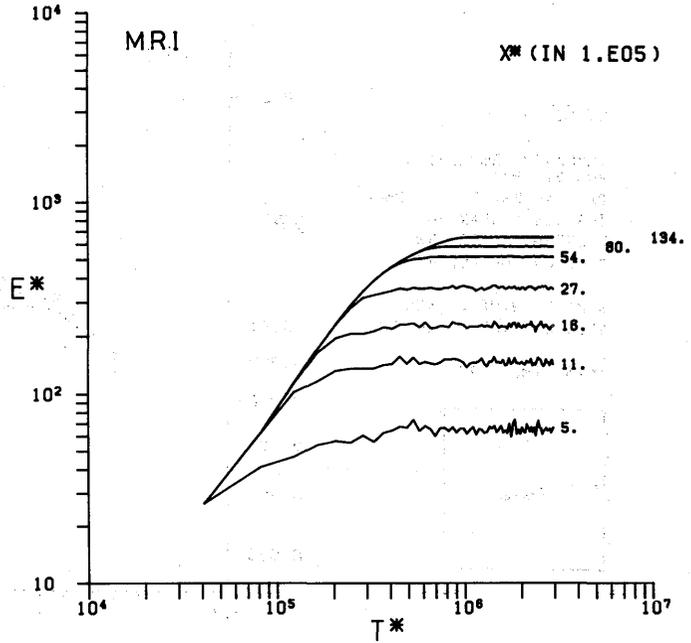
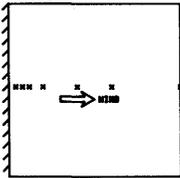
#2

CASE 2

IMPROVED PROPAGATION
 AUGUST 1981
 DX : 40 KM, DT : 1 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : WEST
 VEL. OF WIND : 20 M/S

E* VS FETCH AND TIME



CASE 2

E* VS FETCH AND TIME

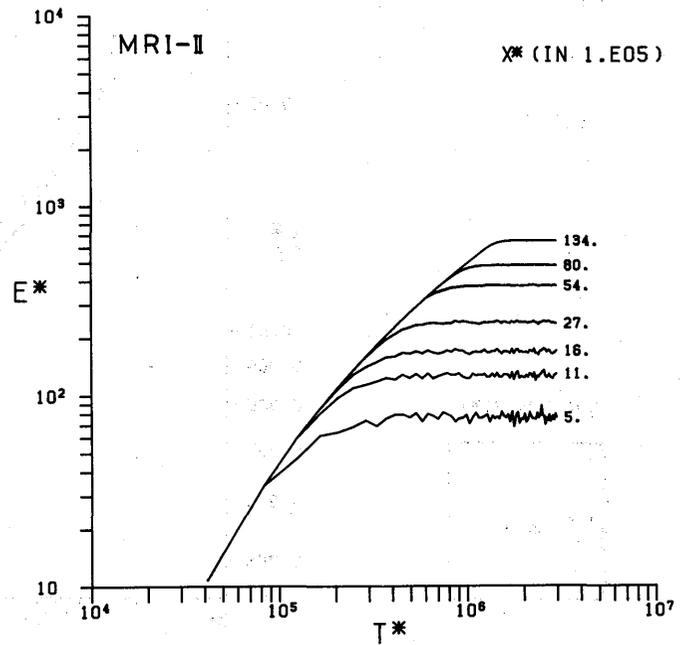
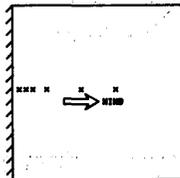


Fig. 17-7.6-2 E^* vs. T^* with X^* as parameter

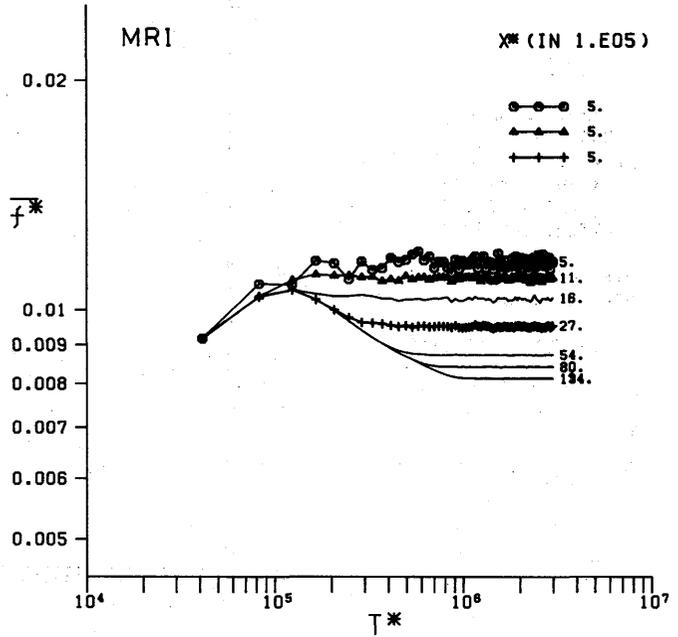
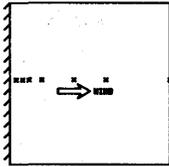
#4

CASE 2

IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM, DT : 1 HOUR
IMAX=26 : JMAX=26
X EXTENT:0-1000 KM
Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : WEST
VEL. OF WIND : 20 M/S

f^* VS TIME (T^*)



#4

CASE 2

f_p^* VS TIME (T^*)

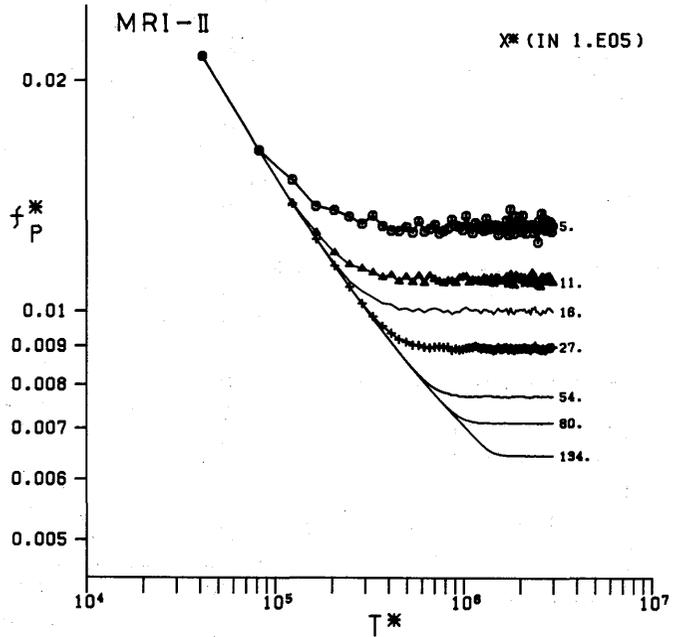
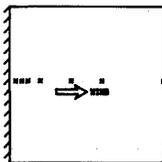


Fig. 18-7.7-4 f_p^* vs. T^* with X^* as parameter

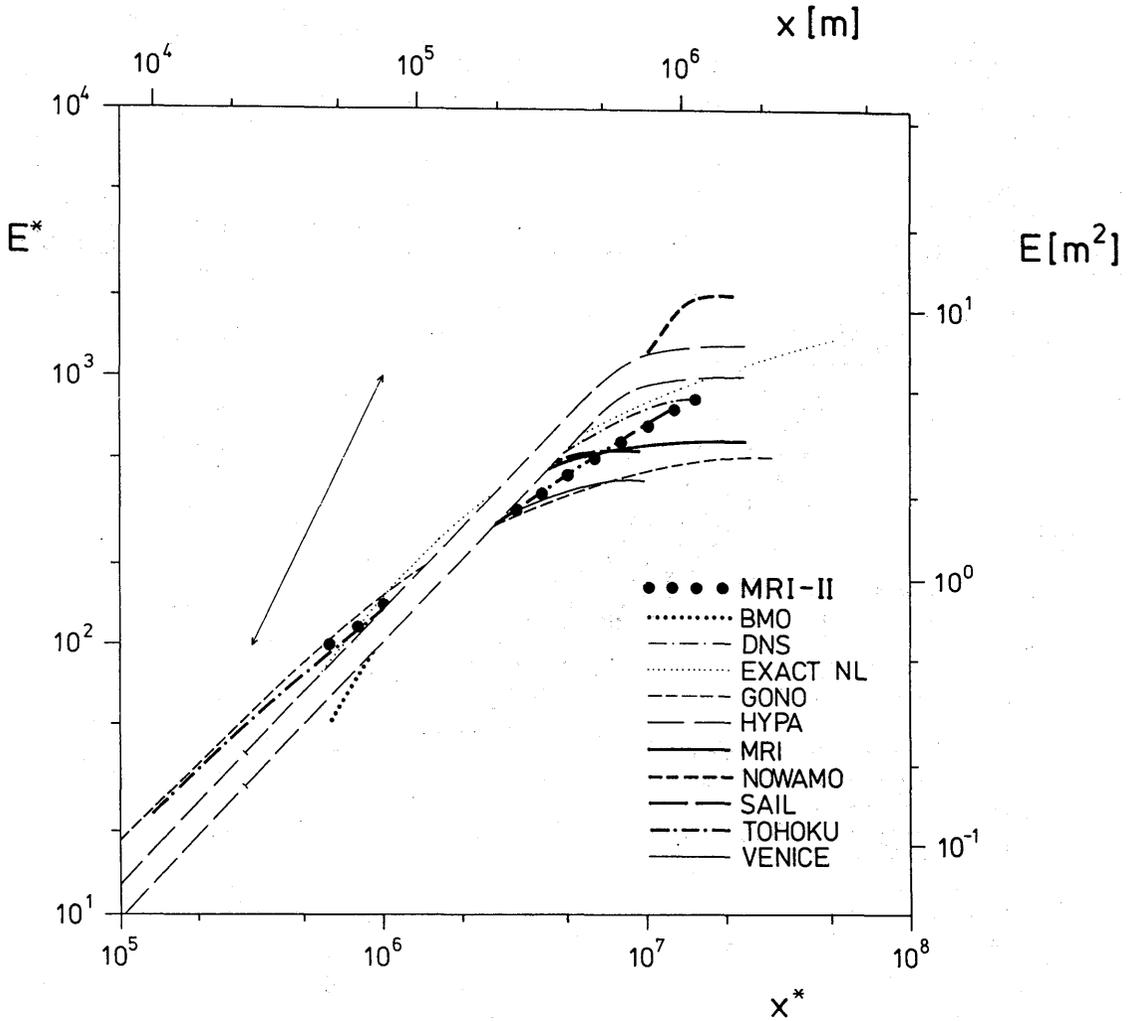


Fig. 19-7.8-0 rescaled E^* vs. X^* by redefining the drag coefficient to lie the curve E^* vs. X^* as close as possible to the mean curve of the SWAMP results. The ratios Cd' / Cd of modified drag coefficient Cd' to Cd of 1.83×10^{-3} are 1.05 and 0.87 for MRI and MRI-II respectively.

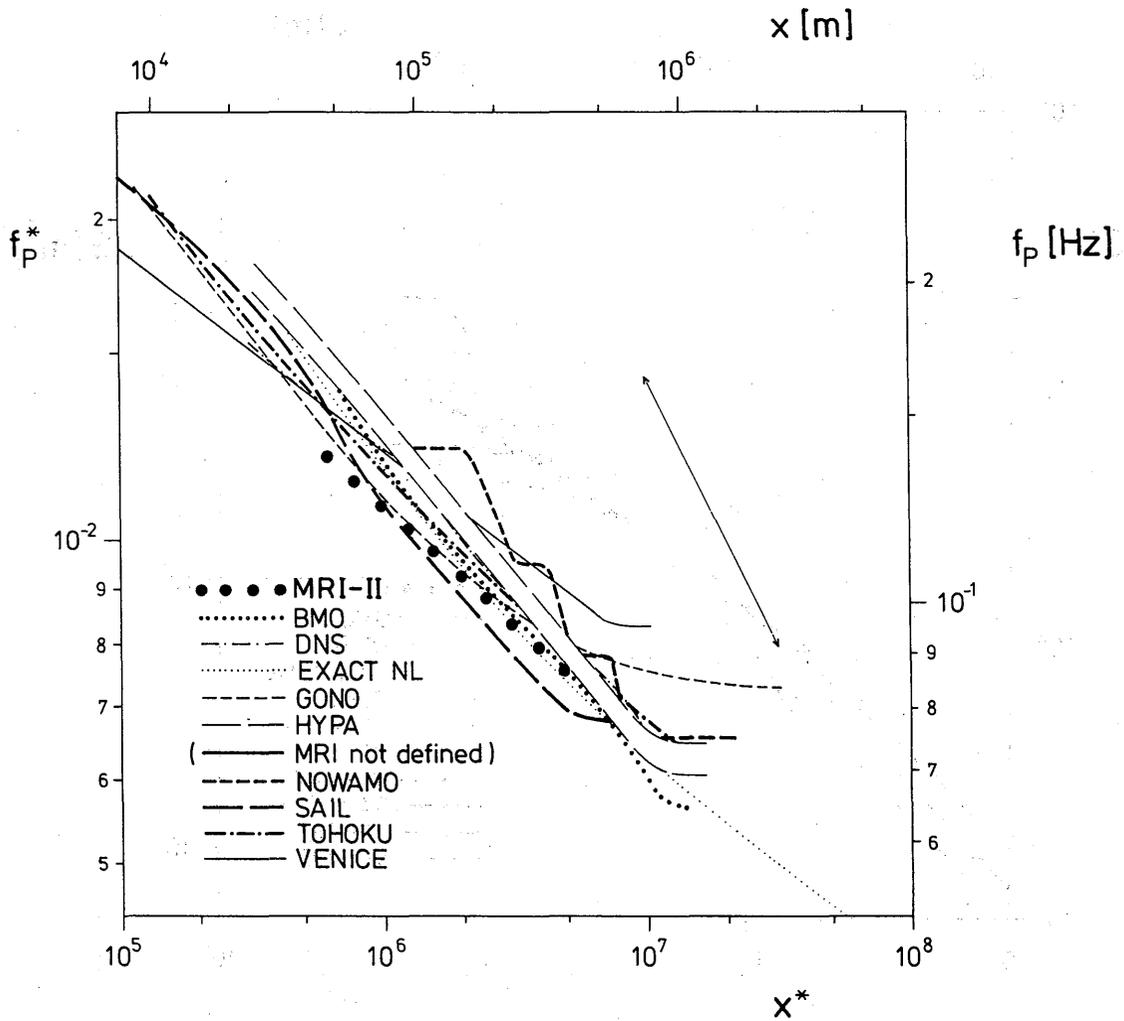


Fig. 20-7.9-0 Same as Fig. 19-7.8-0 except rescaled f_p^* vs. X^*

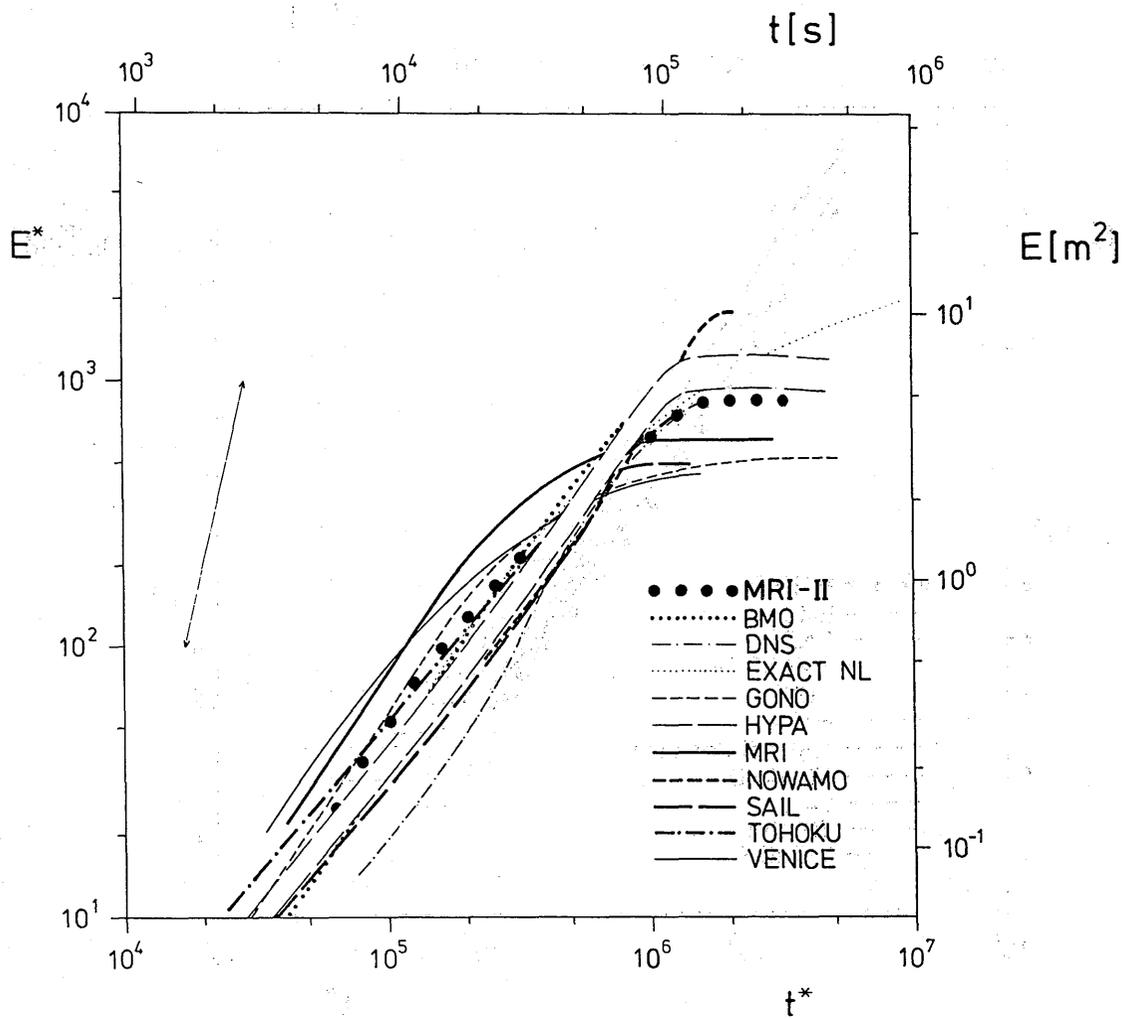


Fig. 21-7.10-0 Same as Fig. 19-7.8-0 except rescaled E^* vs. T^*

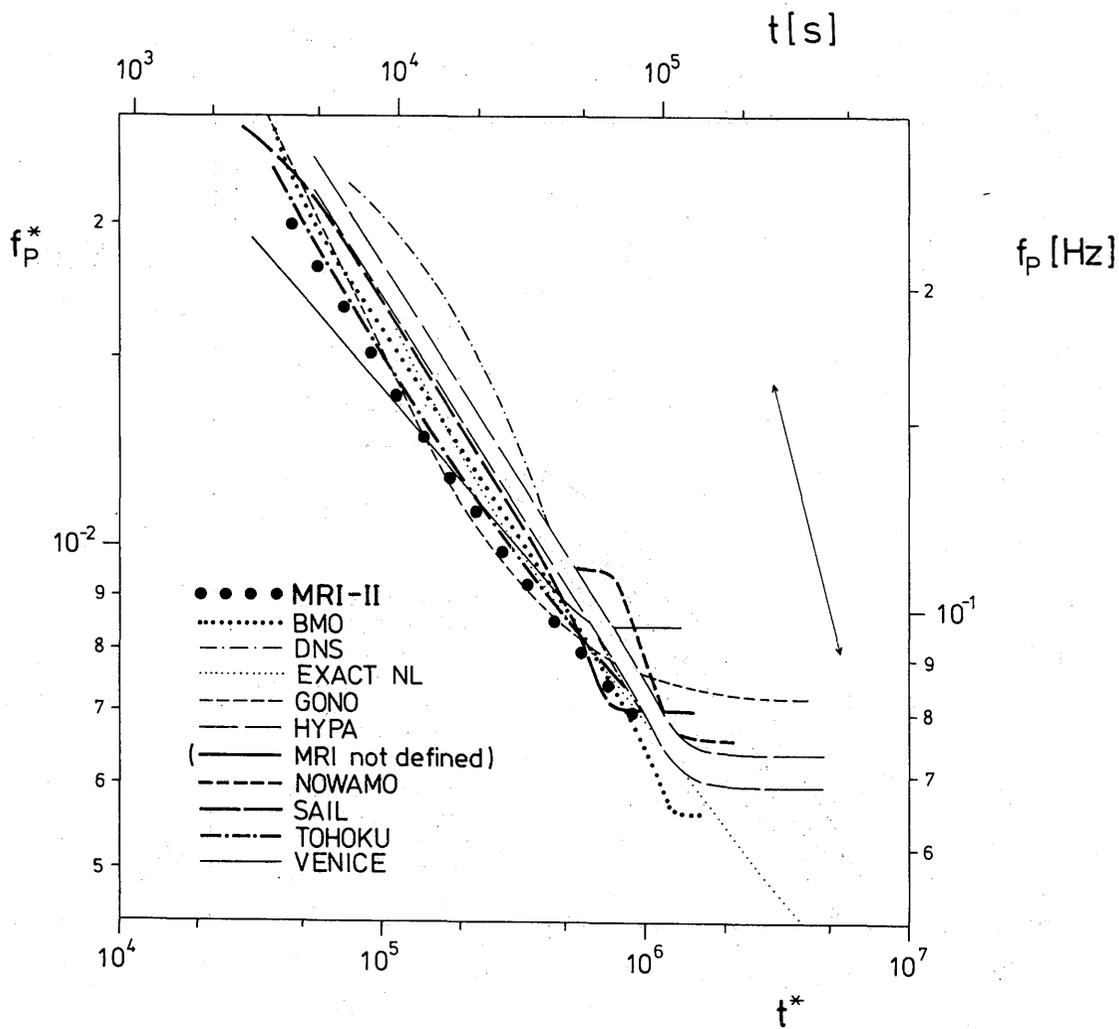


Fig. 22-7.11-0 Same as Fig. 19-7.8-0 except rescaled f_p^* vs. T^*

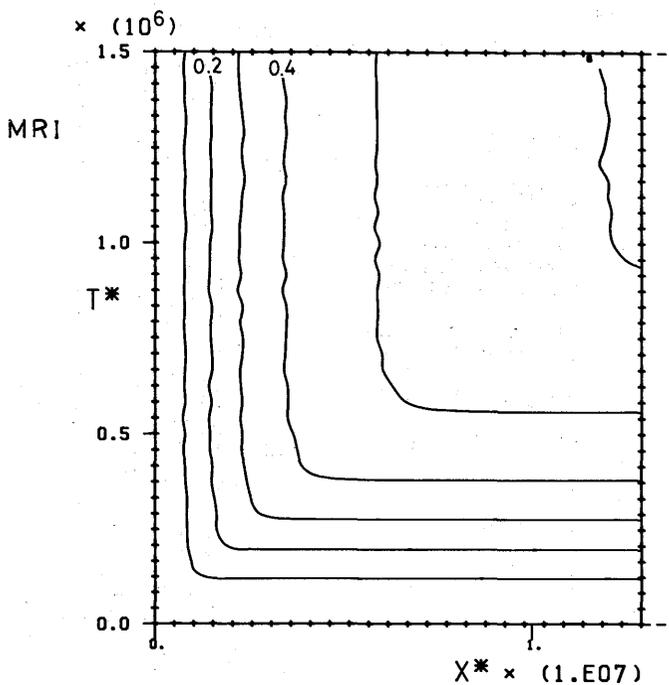
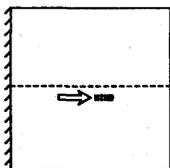
#5

CASE 2

IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM, DT : 1 HOUR
IMAX=26 : JMAX=26
X EXTENT:0-1000 KM
Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : WEST
VEL. OF WIND : 20 M/S

E/E_{PM} VS. X^* AND T^*



#5

BY T.UJI (M.R.I.)

CASE 2

E/E_{PM} VS. X^* AND T^*

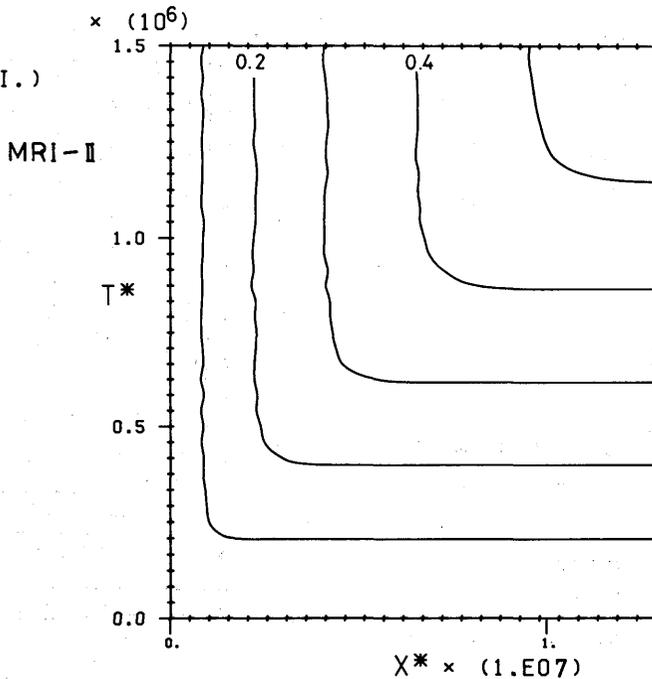
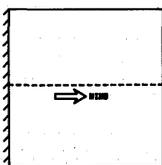


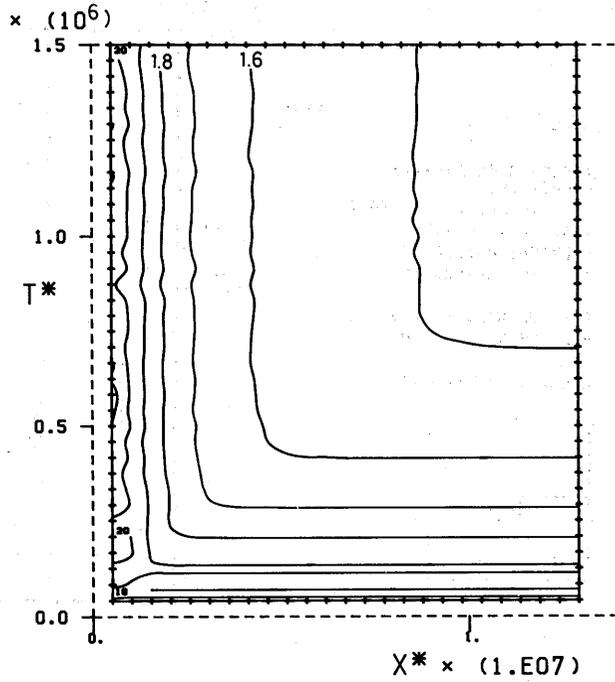
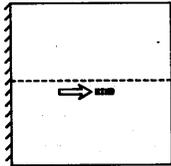
Fig. 23-0-5 contours of E/E_{PM} vs. X^* and T^*

#6

CASE 2
MRI
IMPROVED PROPAGATION
AUGUST 1981
DX : 40 KM, DT : 1 HOUR
IMAX=26 : JMAX=26
X EXTENT:0-1000 KM
Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : WEST
VEL. OF WIND : 20 M/S

 f_p/f_{PM} VS. X^* AND T^*



#6

BY T.UJI (M.R.I.)
CASE 2

MRI-II

f_p/f_{PM} VS. X^* AND T^*

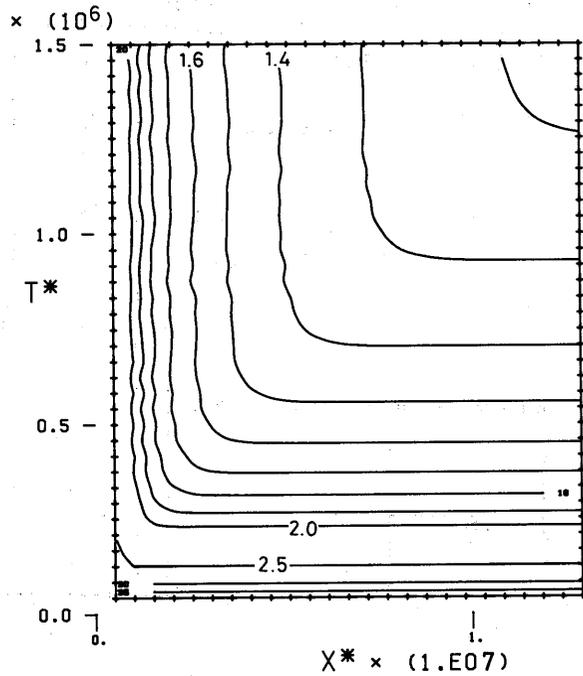
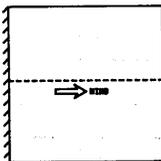


Fig. 24-0-6 contours of f_p/f_{PM} vs. X^* and T^*

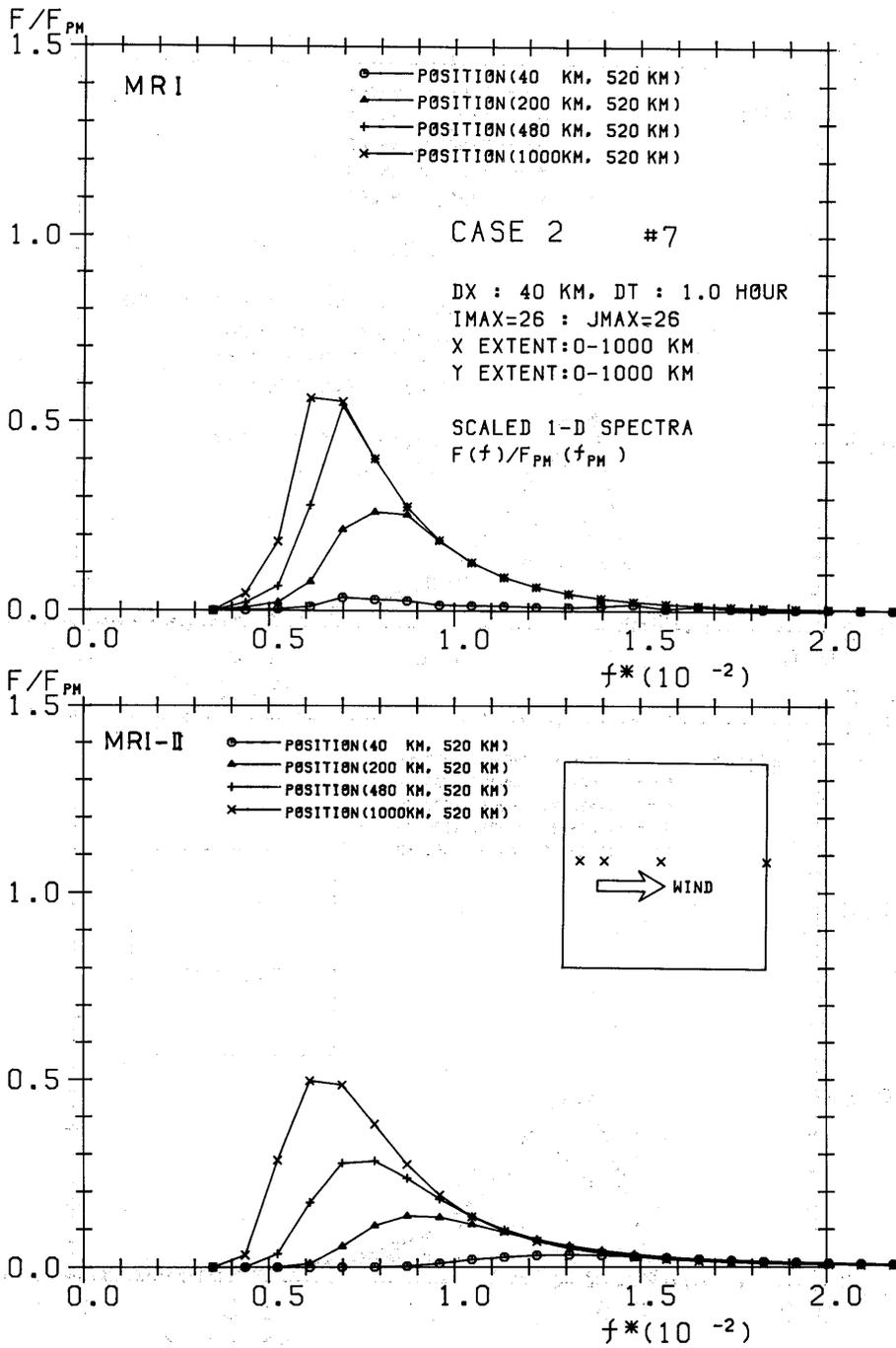


Fig. 25-7.3-7 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with X^* as parameter

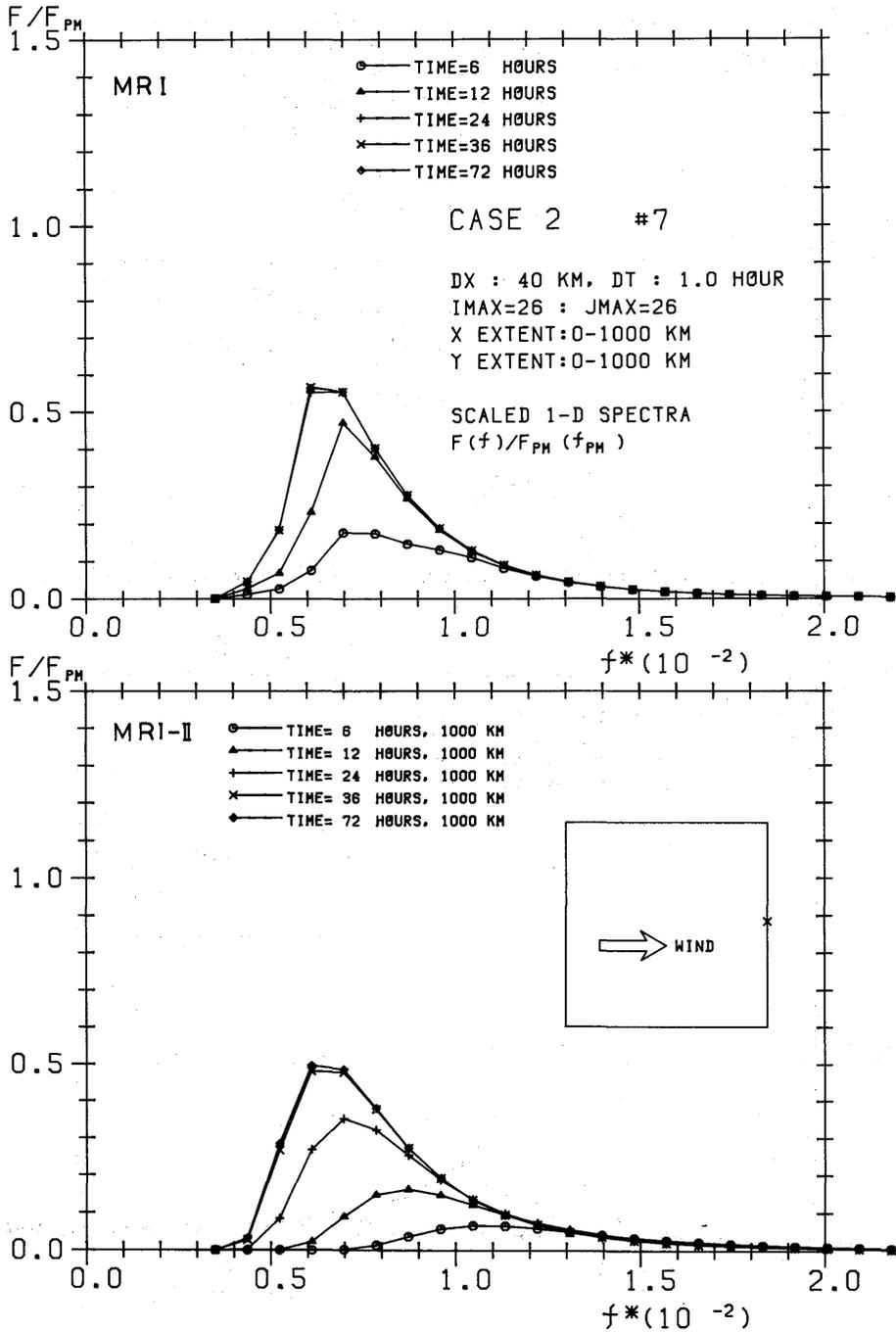


Fig. 26-0-8 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* with T^* as parameter

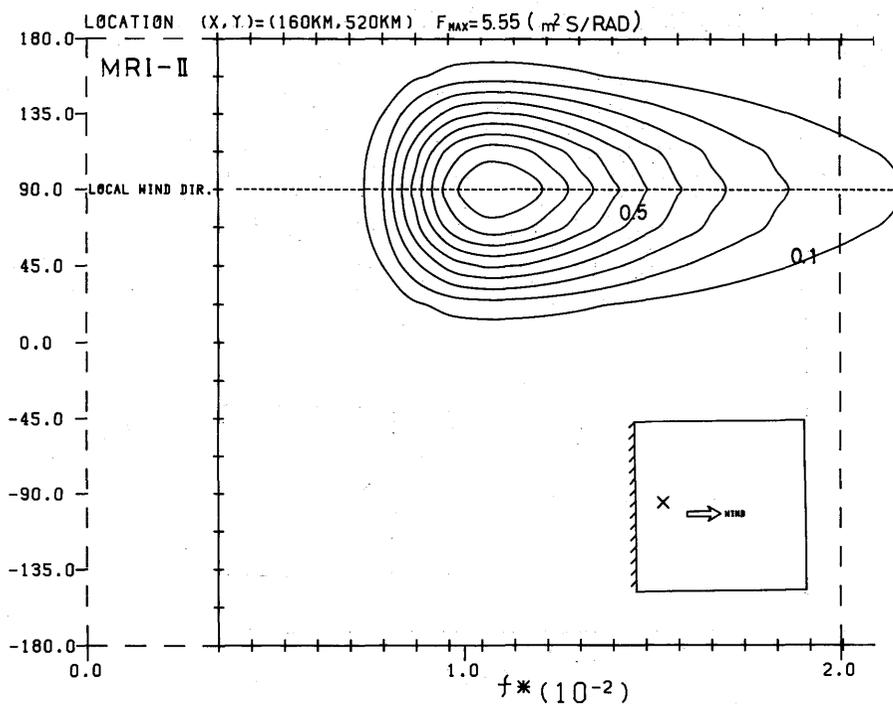
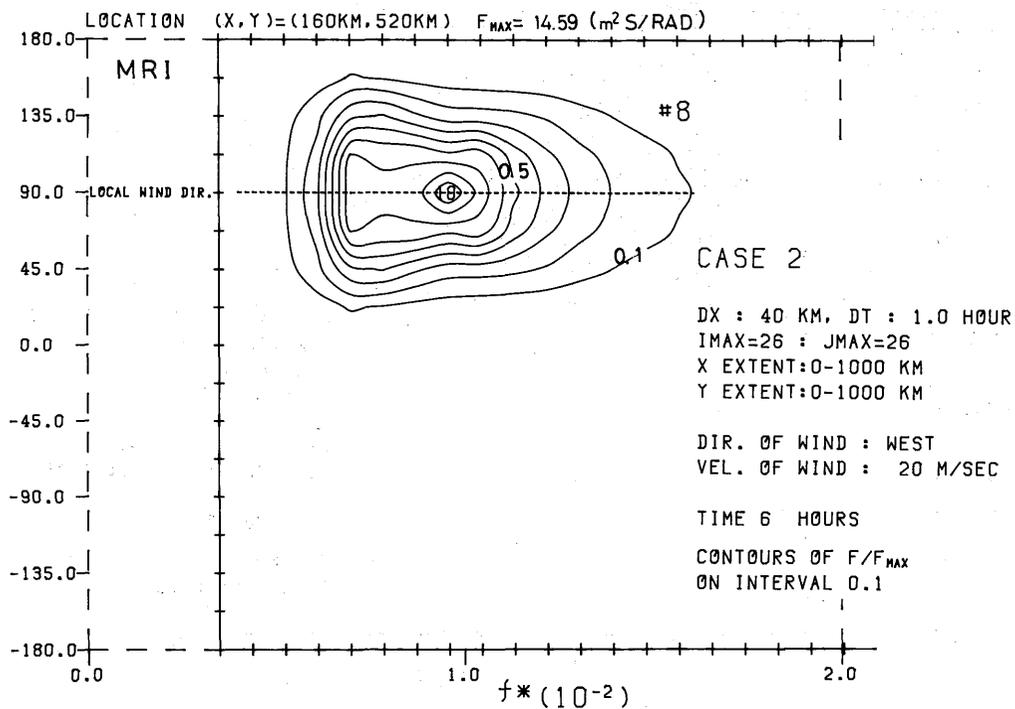


Fig. 27-0-9 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 6$ hrs, $X = 160$ km

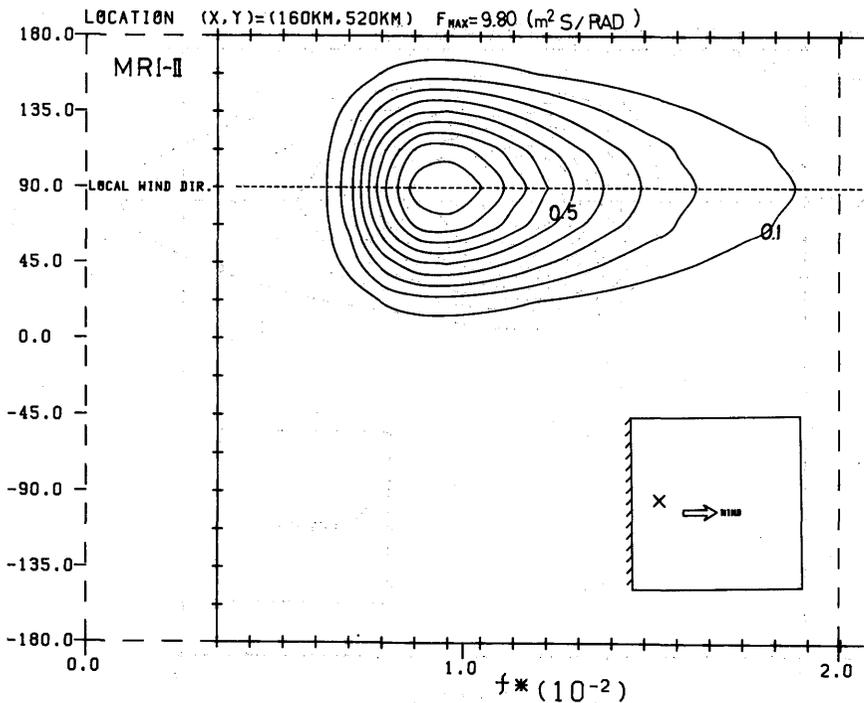
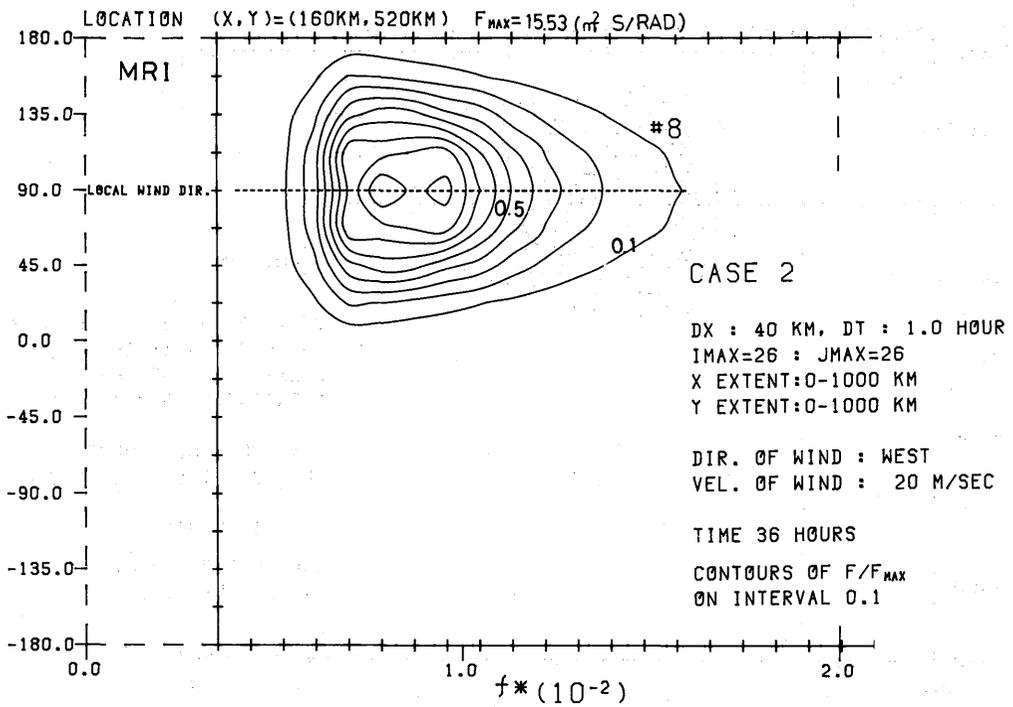


Fig. 28-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 36$ hrs, $X = 160$ km

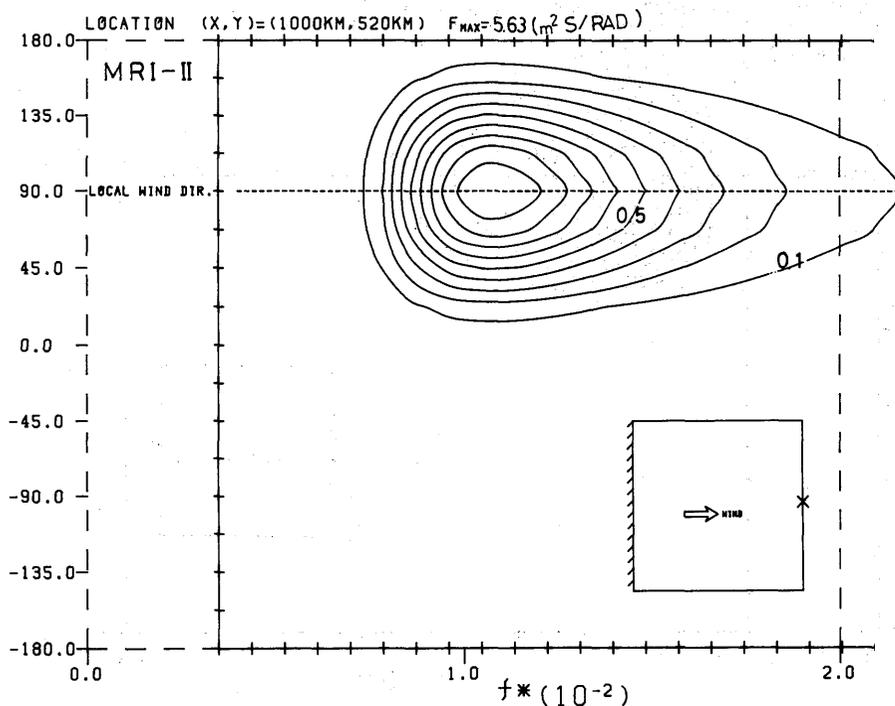
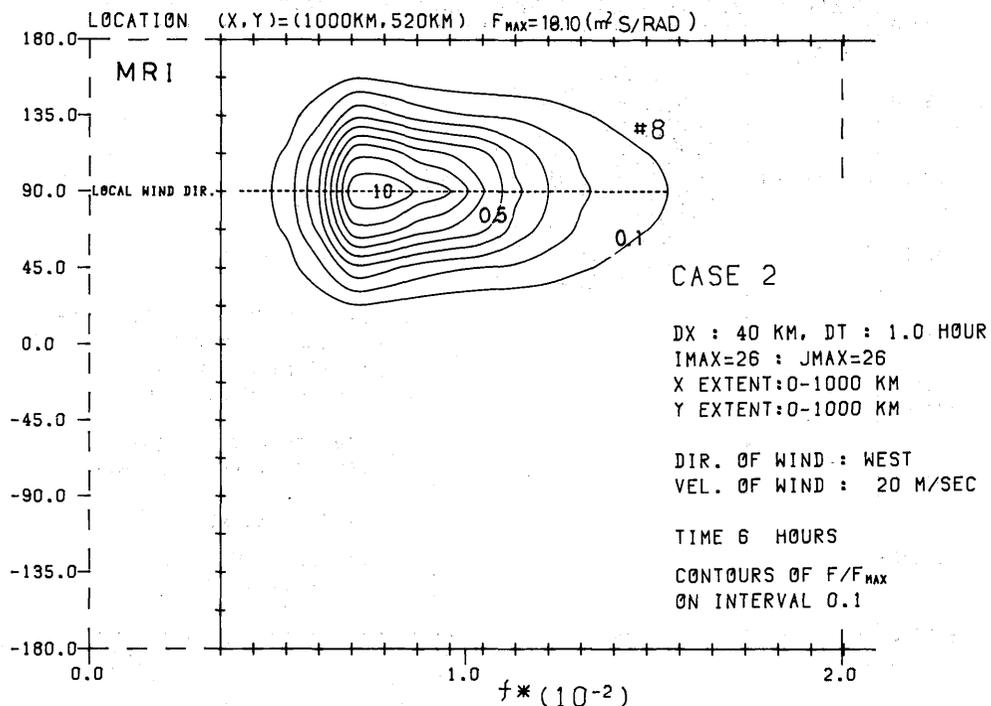


Fig. 29-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T=6$ hrs, $X=1000$ km

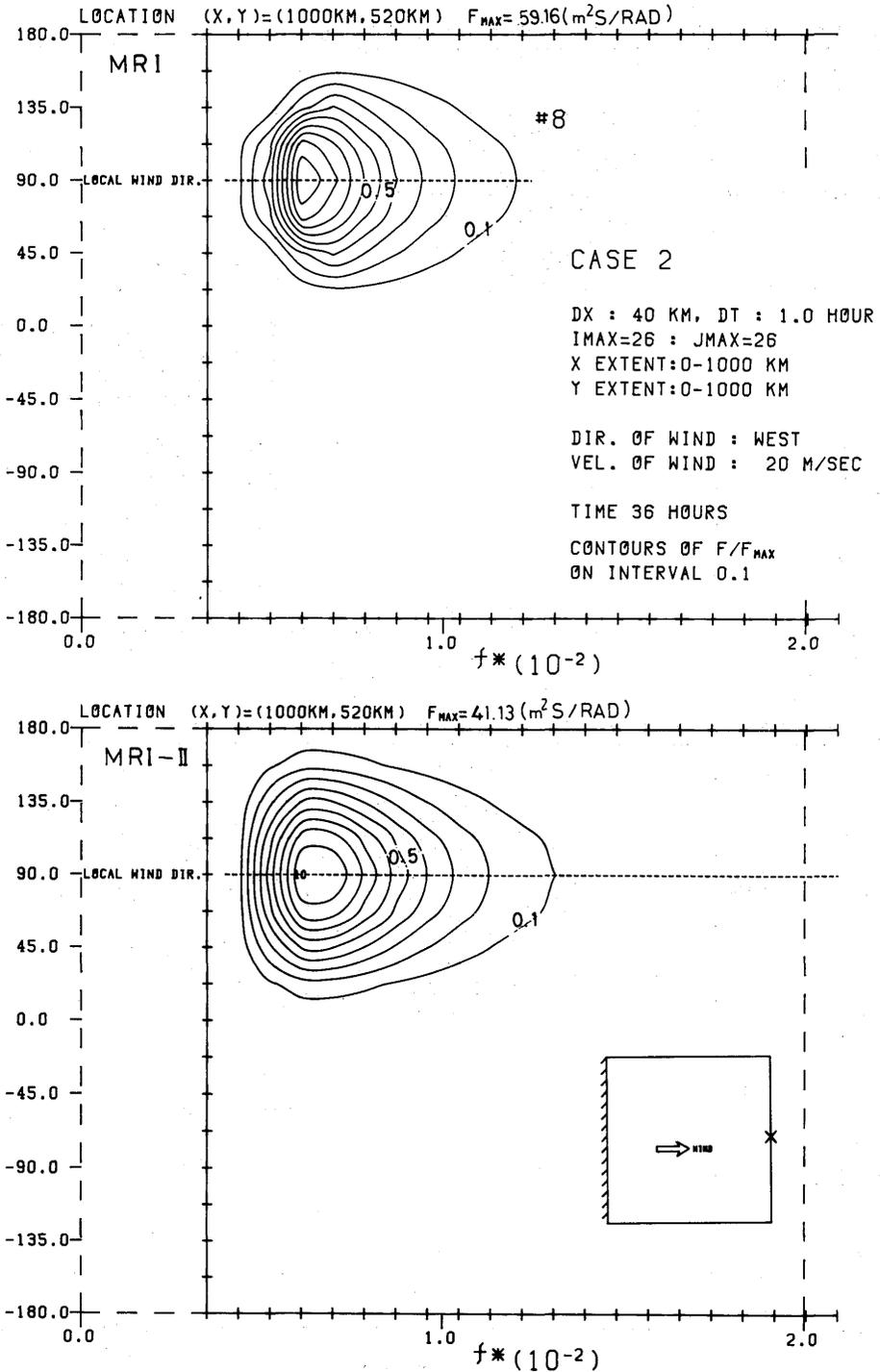


Fig. 30-0-10 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=36$ hrs, $X=1000$ km

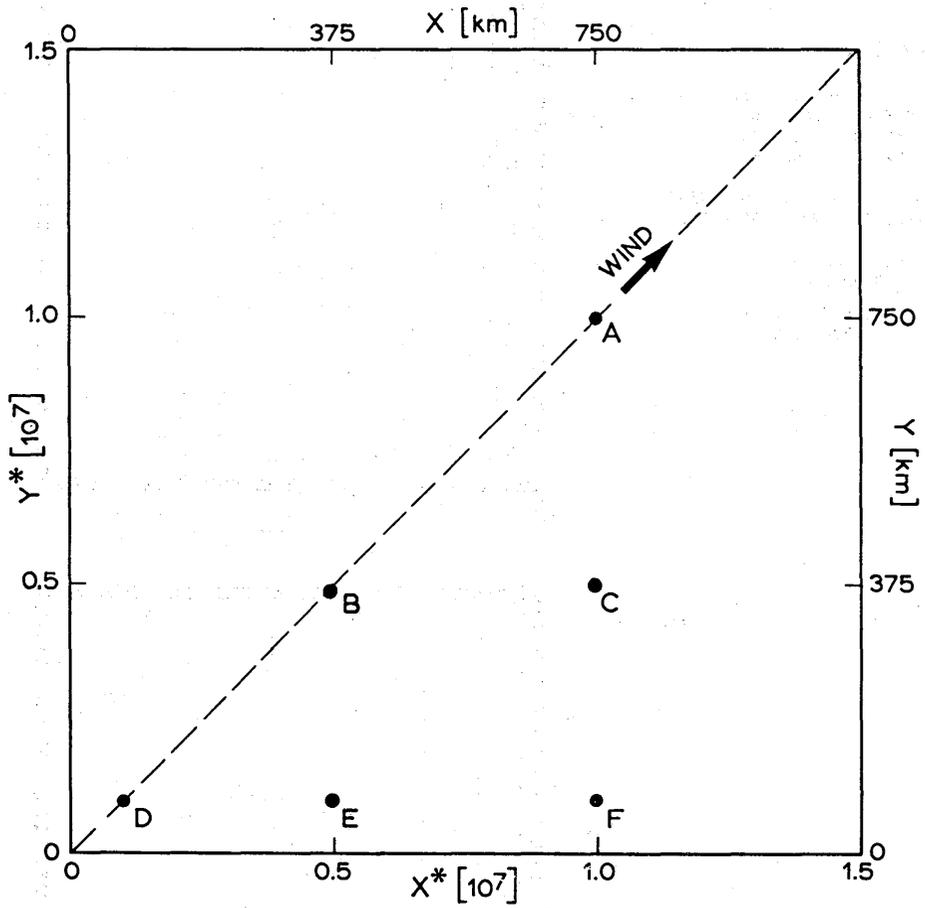


Fig. 31-8.1-0 wind field geometry for Case III and special output points

#9

1.5 -

CASE 3

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTHWEST
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

CONTOURS OF SCALED E
 ON INTERVAL 0.1

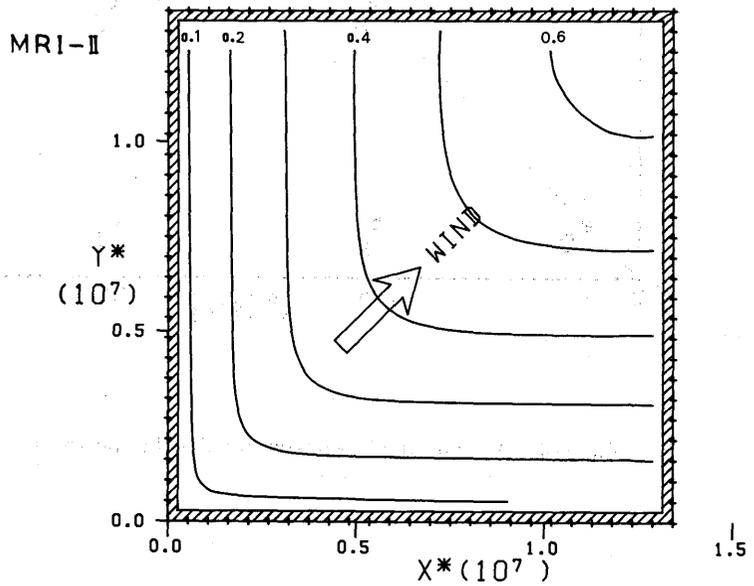
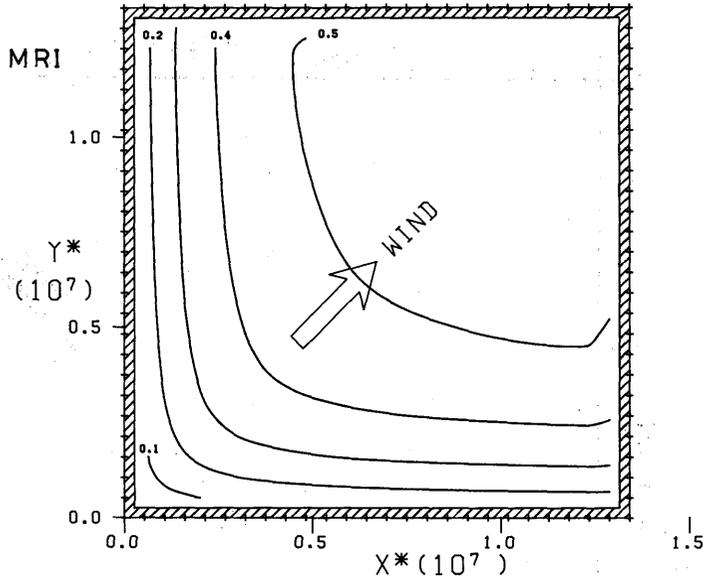


Fig. 32-0-11 contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^*

#10

1.5 -

CASE 3

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTHWEST
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

CONTOURS OF \bar{f}/f_{PM}
 ON INTERVAL 0.1 FOR
 RANGE 1 TO 2, 0.5 FOR >2

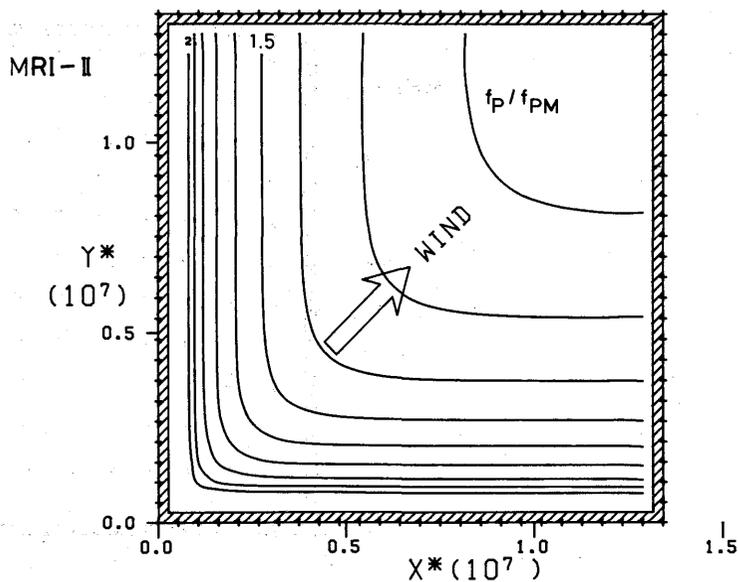
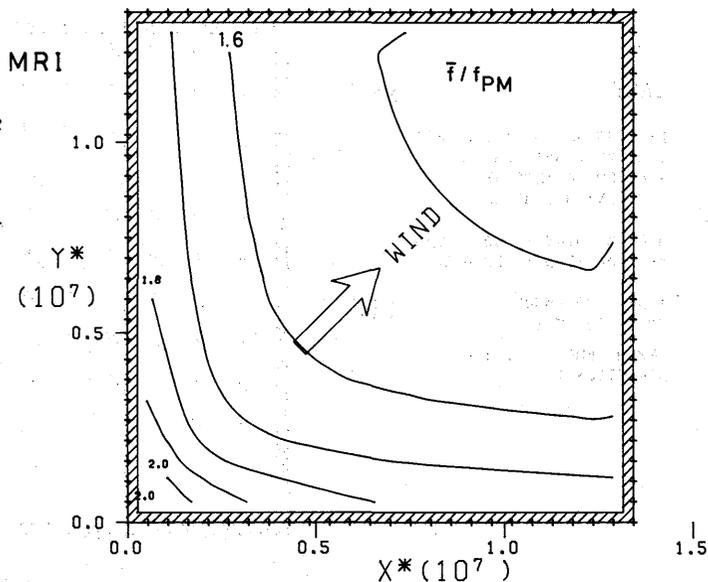


Fig. 33-8.2-12 contours of f_P/f_{PM} vs. X^* and Y^*

#11

CASE 3

DX : 40 KM. DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTHWEST
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME : 72 HOURS
 T* IS 2972764.

ARROW LENGTH : E/E_{PM}
 DIRECTION= θ

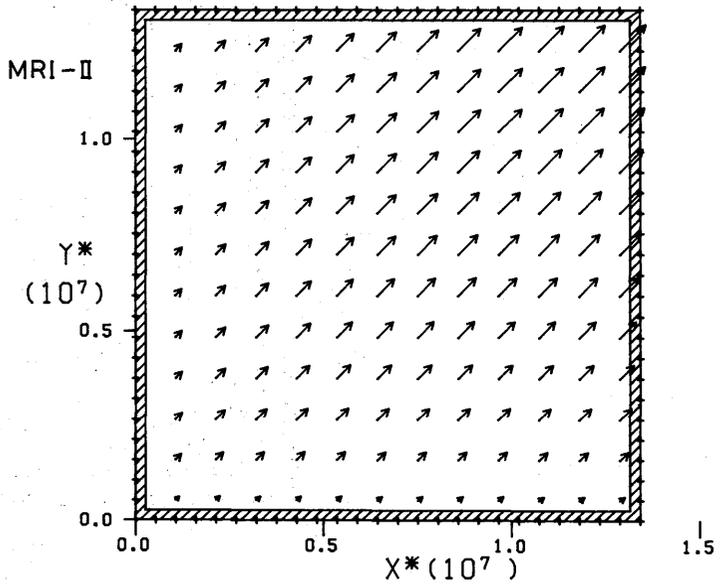
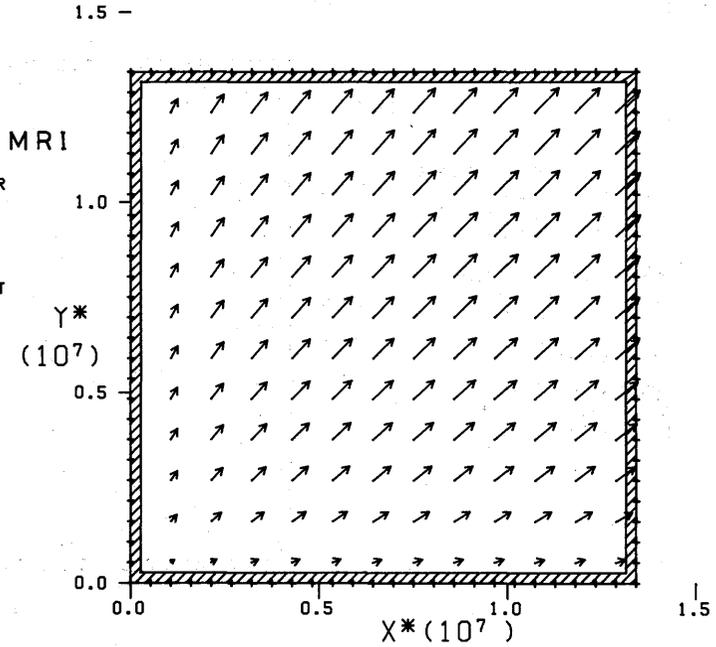


Fig. 34-8.3-13 cluster diagram of E/E_{PM} and θ vs. X^* and Y^*

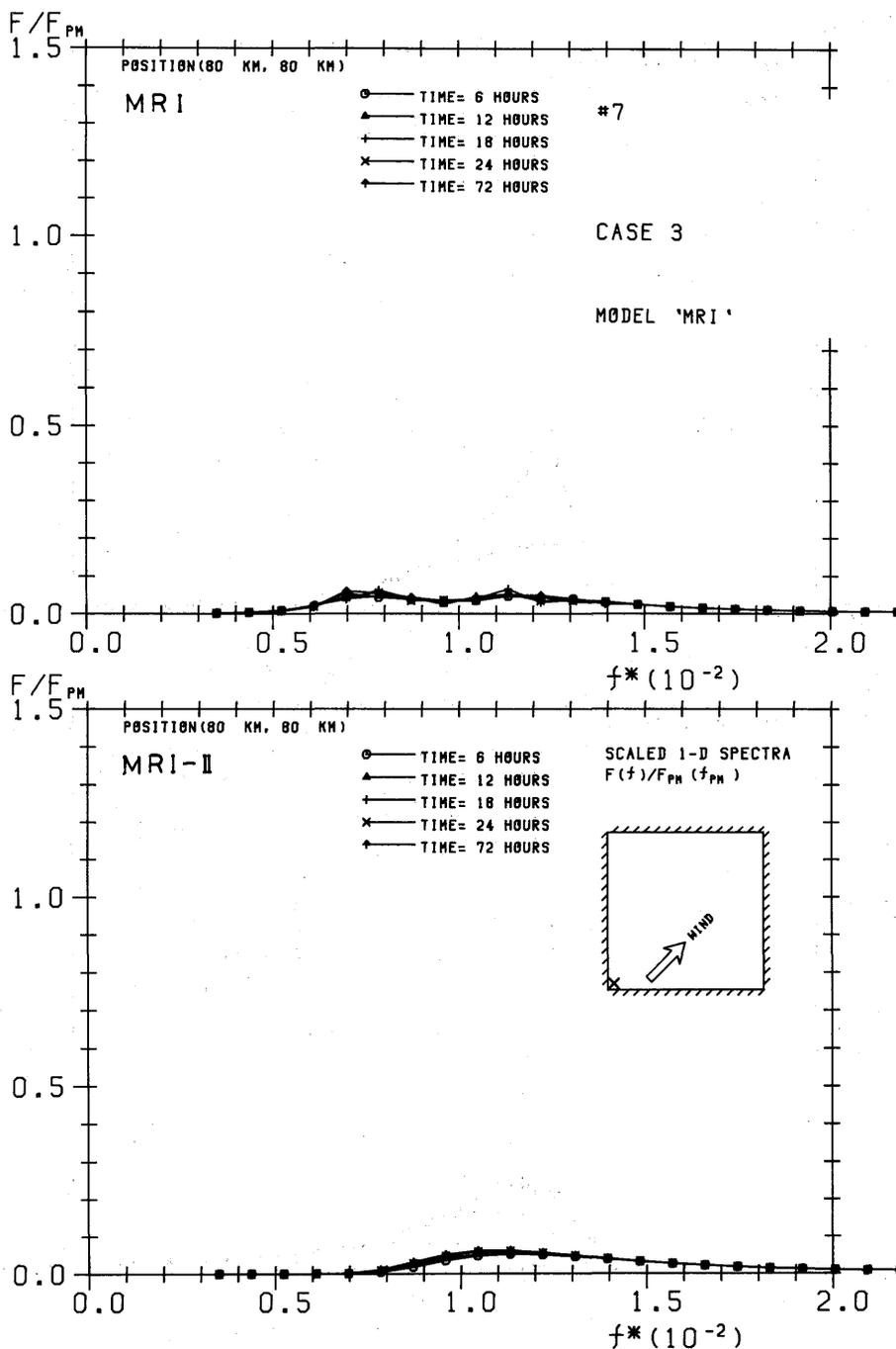


Fig. 35-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6, 12, 24, 72$ and point (80,80)

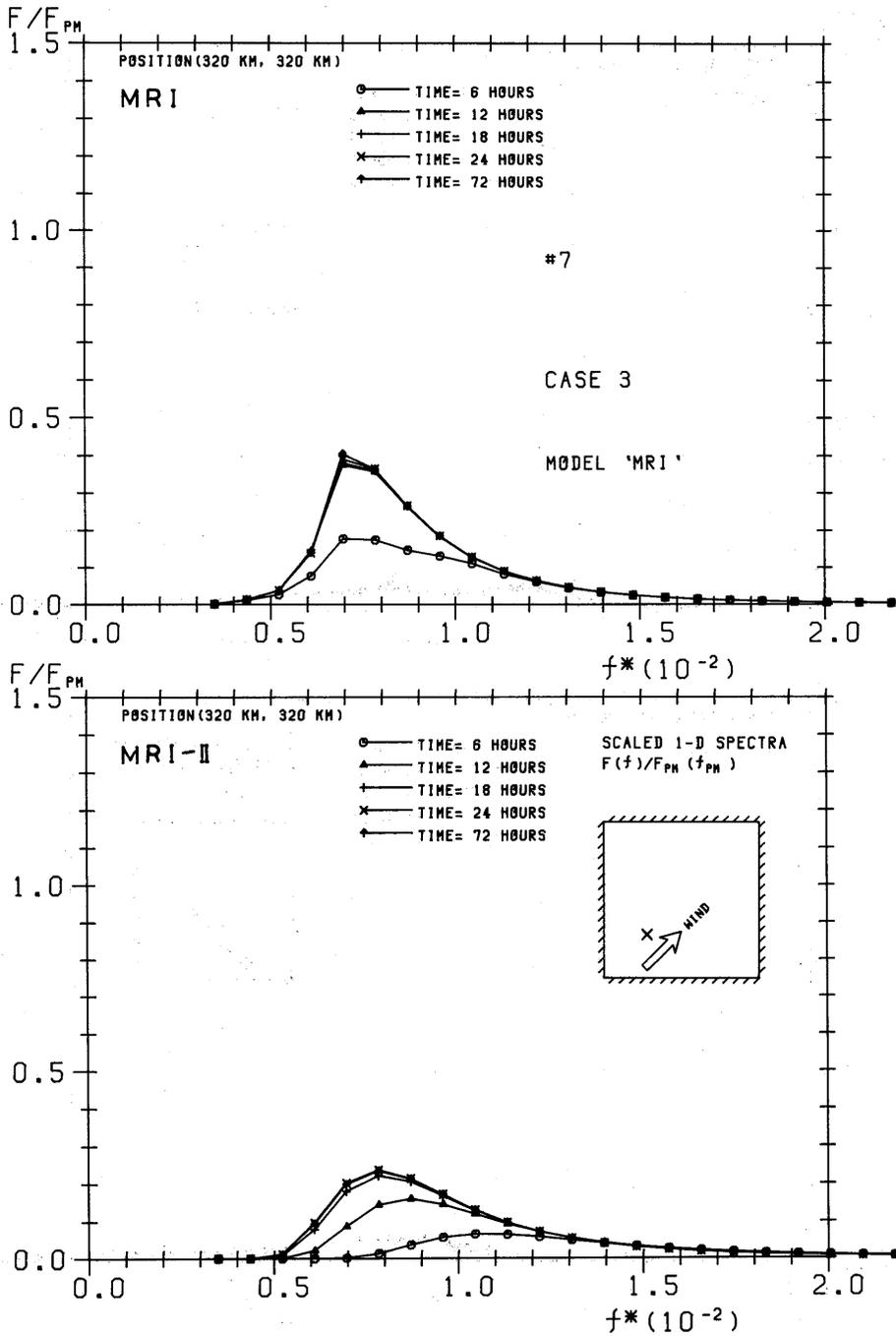


Fig. 36-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6, 12, 24, 72$ and point (320,320)

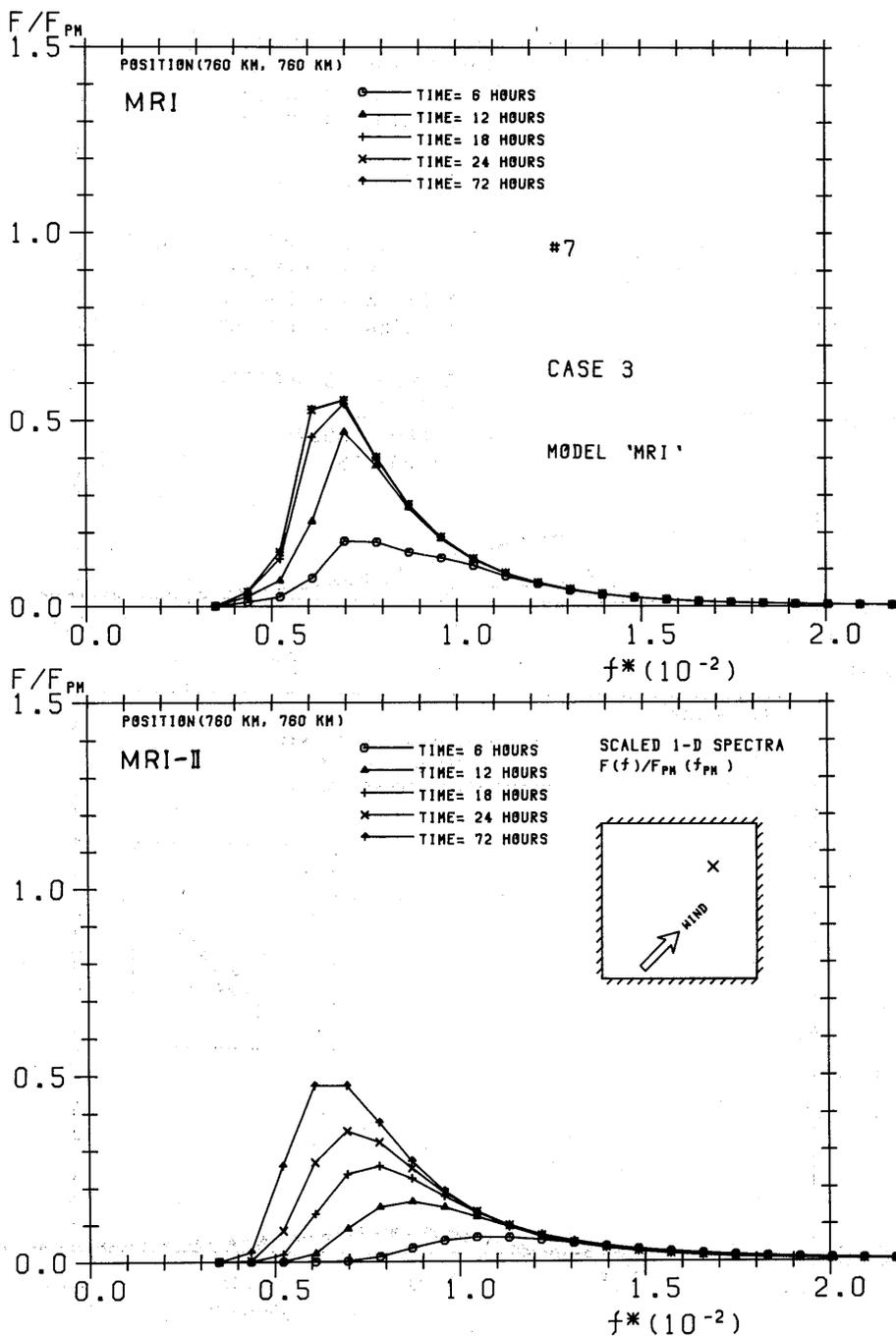


Fig. 37-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6, 12, 24, 72$ and point (760,760)

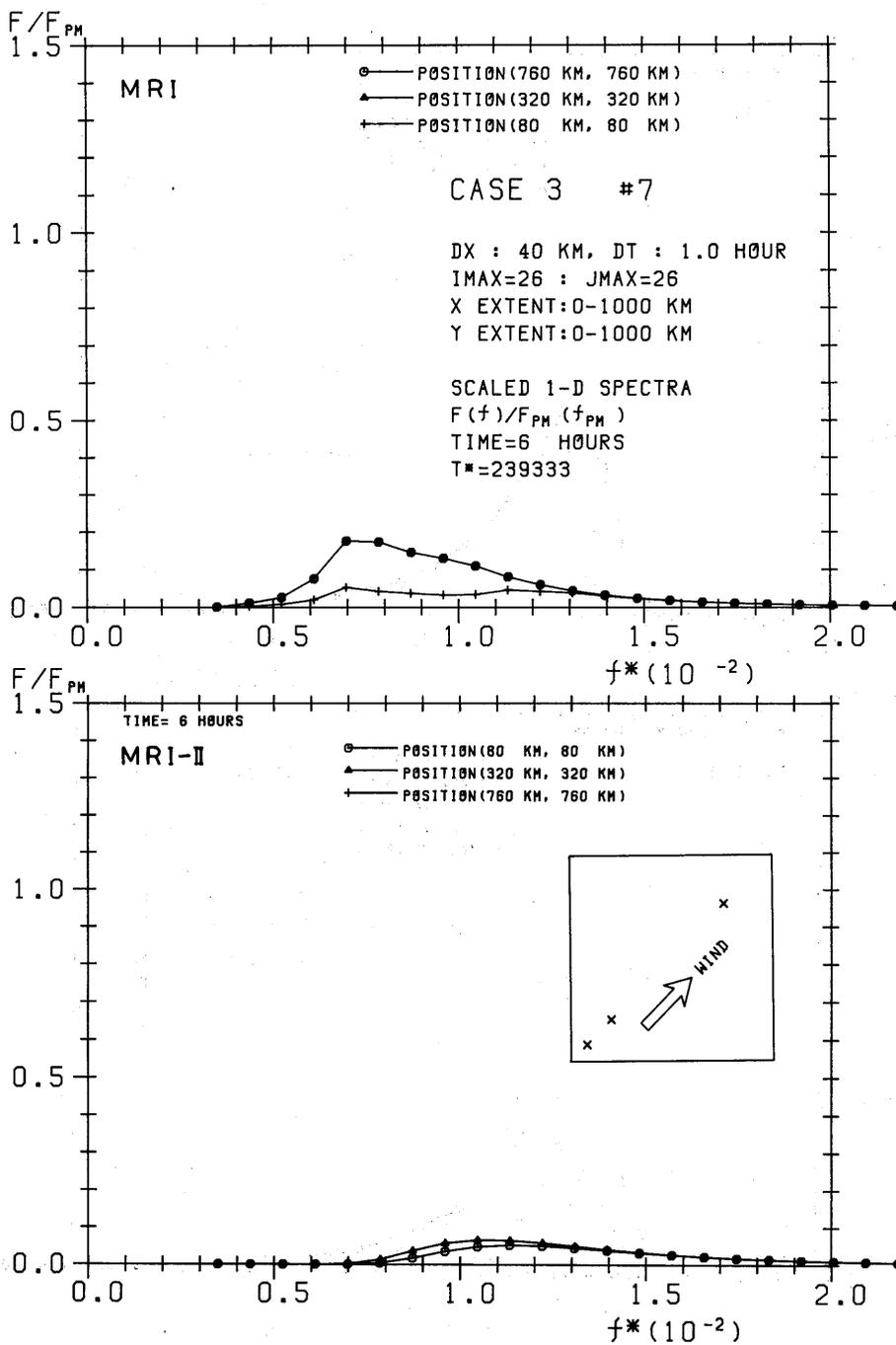


Fig. 38-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=6$ hours and points A, B, and D

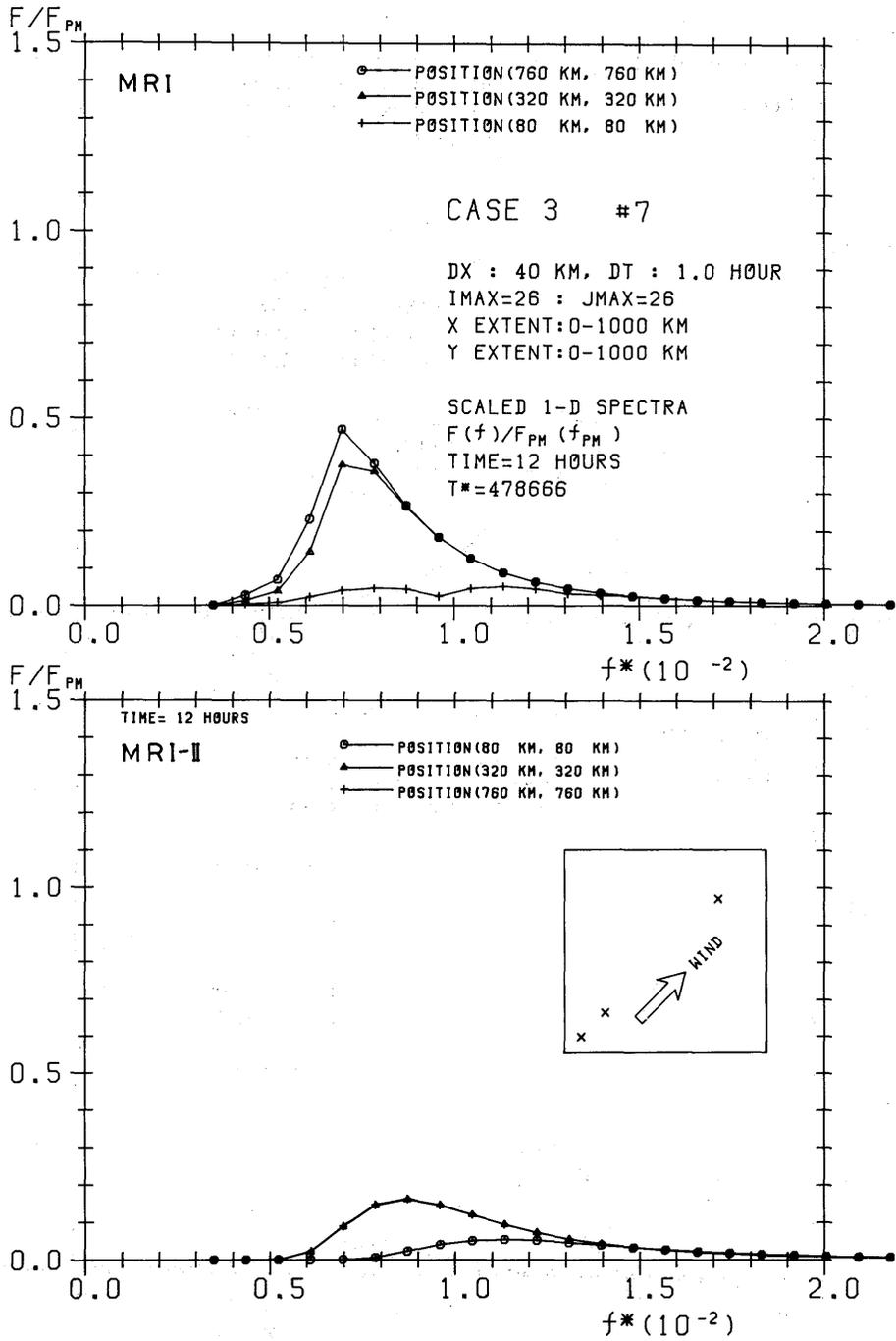


Fig. 39-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=12$ hours and points A, B, and D

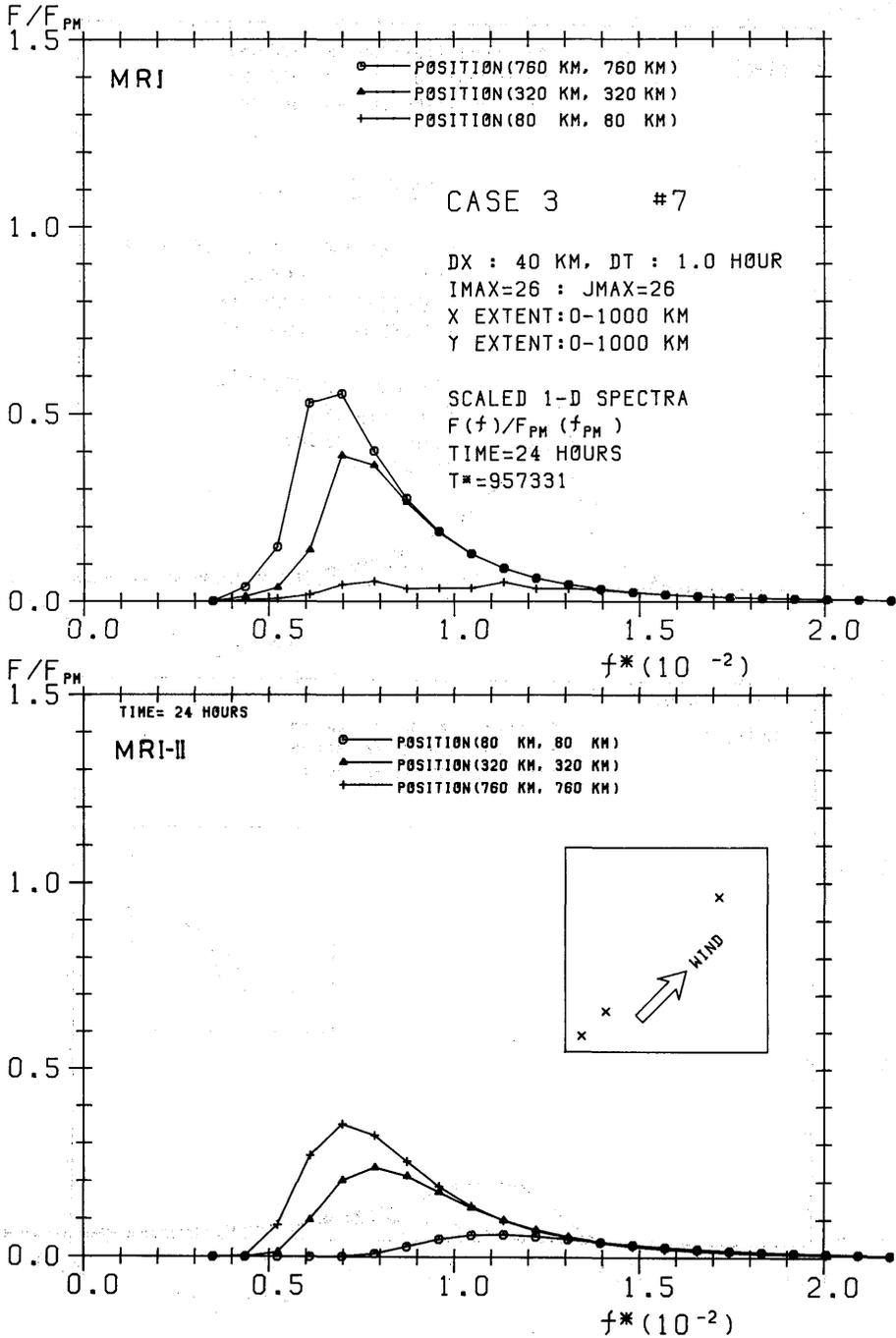


Fig. 40-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=24$ hours and points A, B, and D

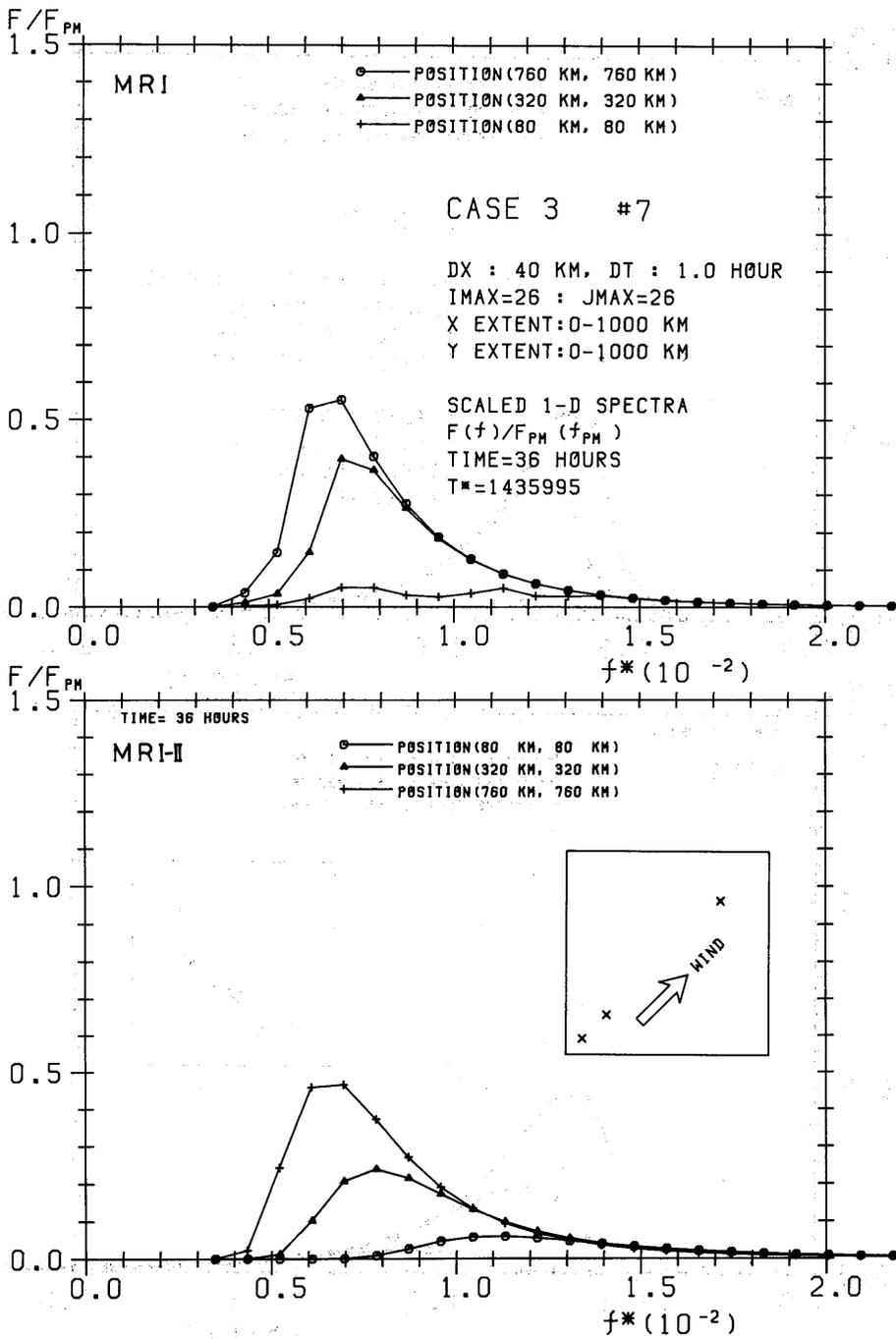


Fig. 41-0-14 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=36$ hours and points A, B, and D

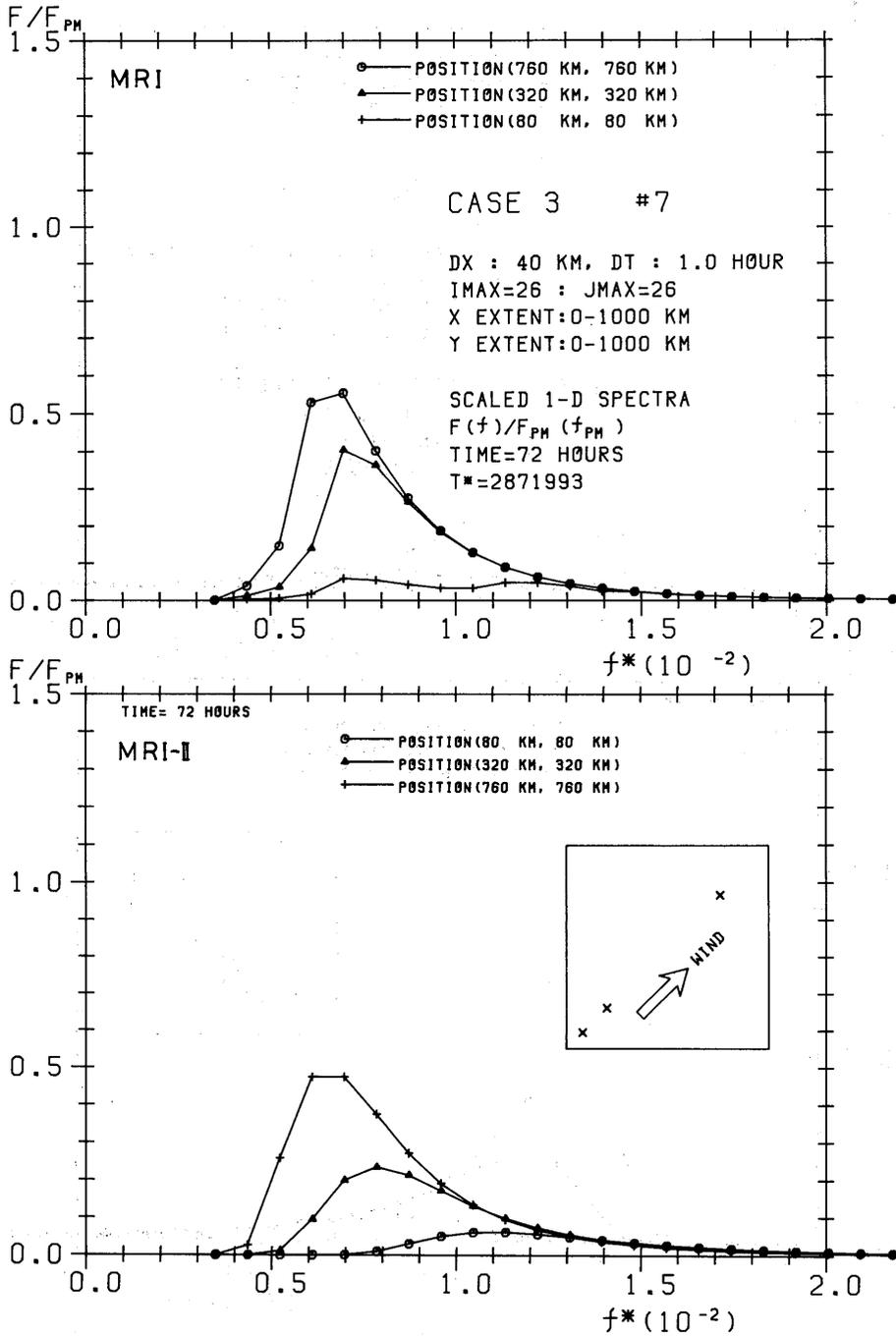


Fig. 42-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F_{PM}(f_{PM})$ vs. f^* for $T=72$ hours and points A, B, and D

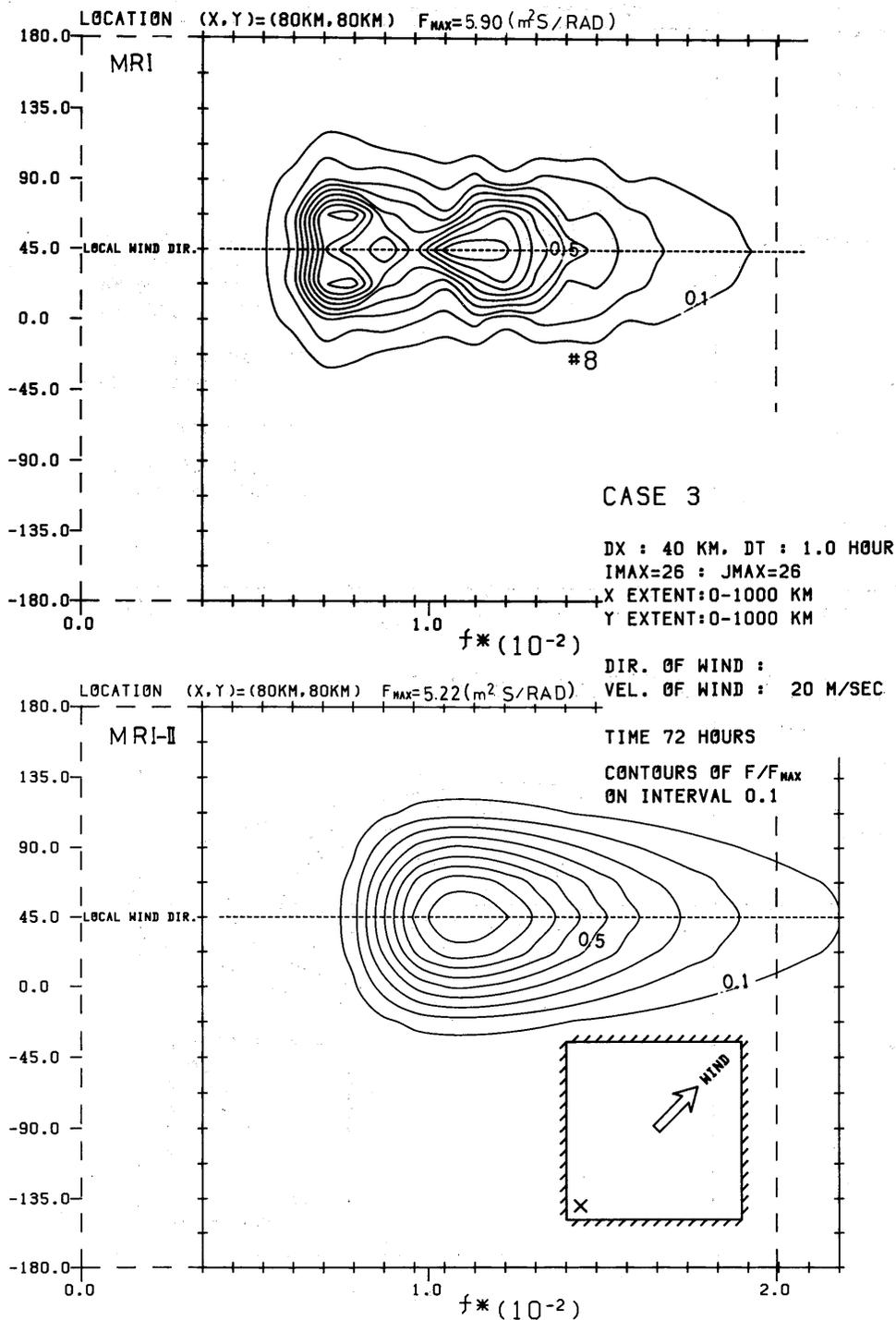


Fig. 43-0-15 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (80,80)

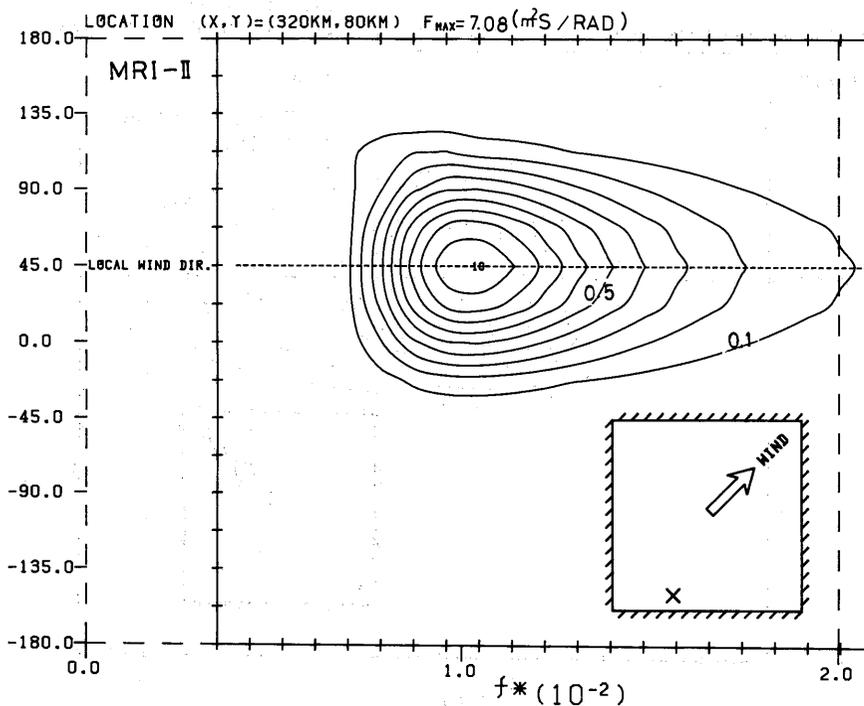
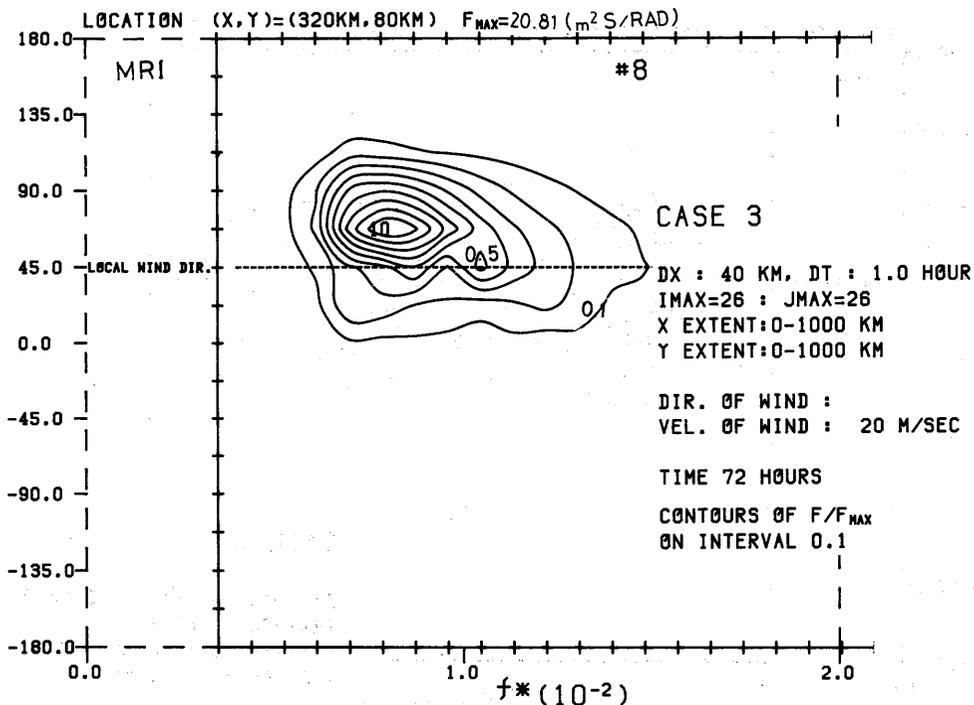


Fig. 44-0-0. scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (320,80)

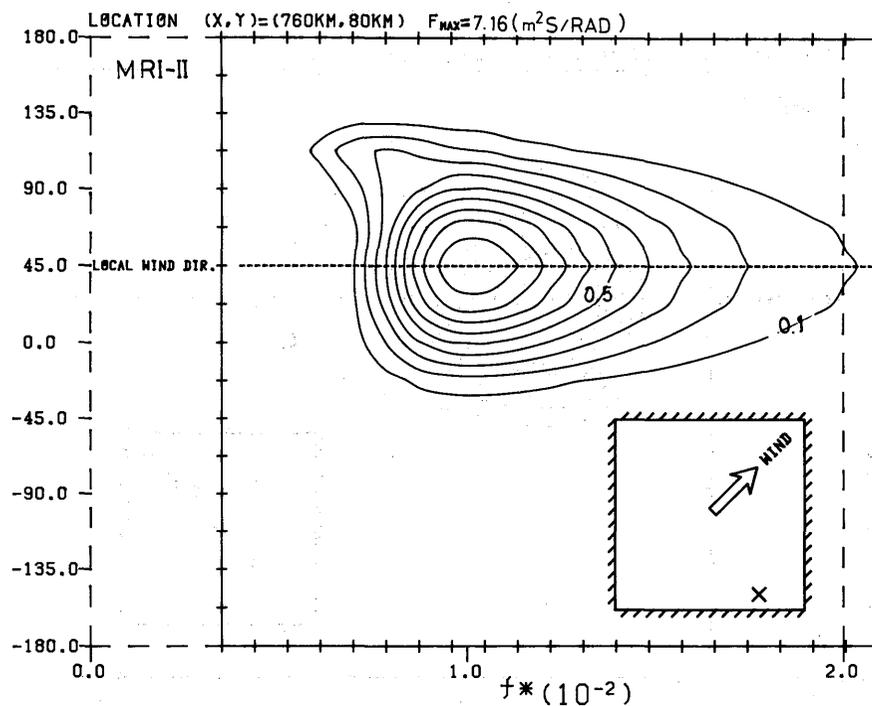
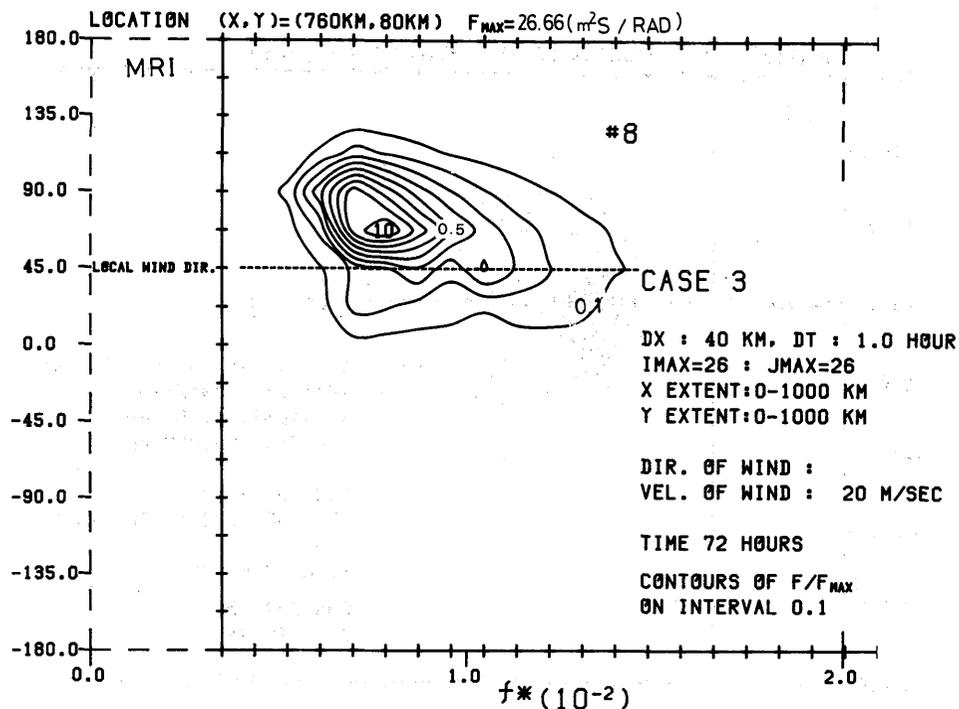


Fig. 45-8.4-16 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (760,80)

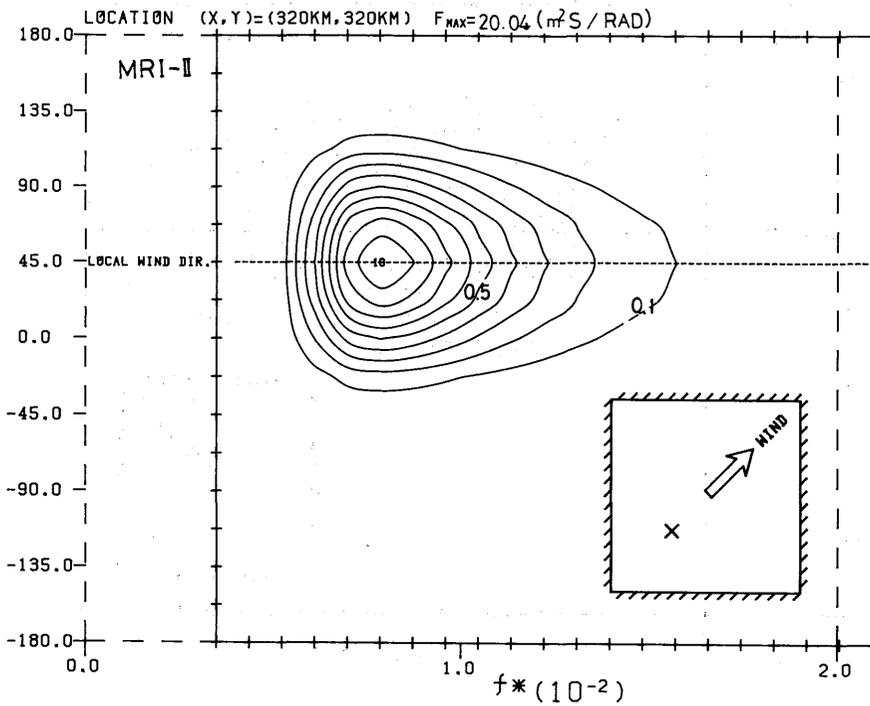
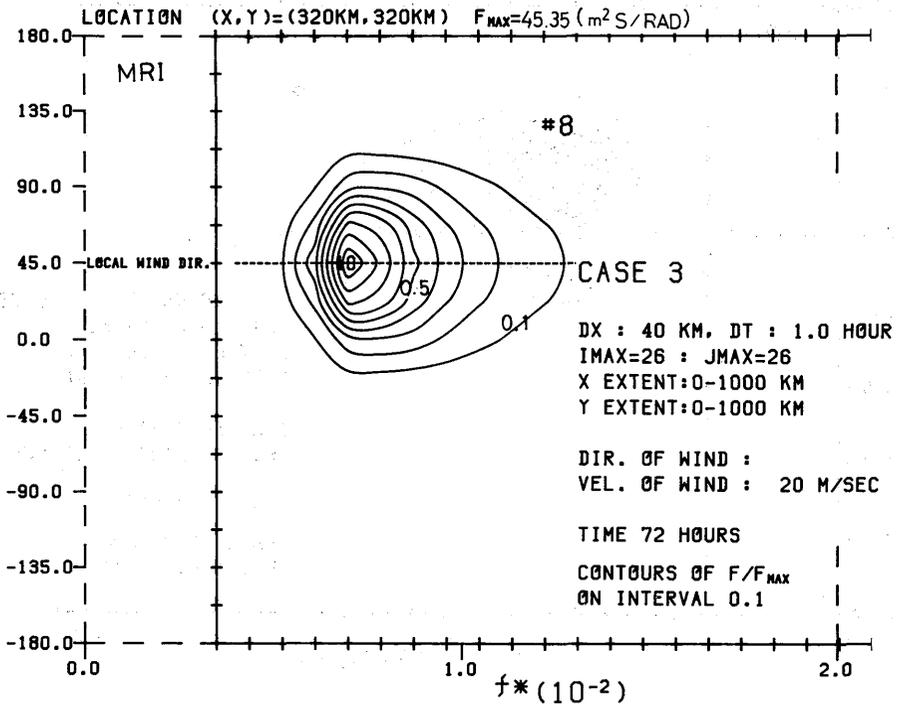


Fig. 46-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (320, 320)

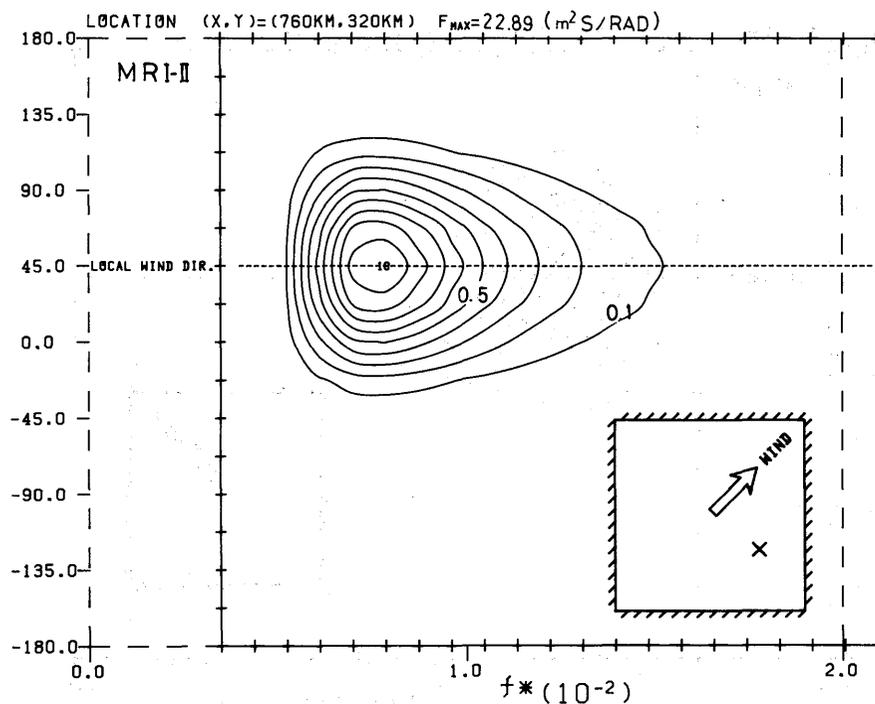
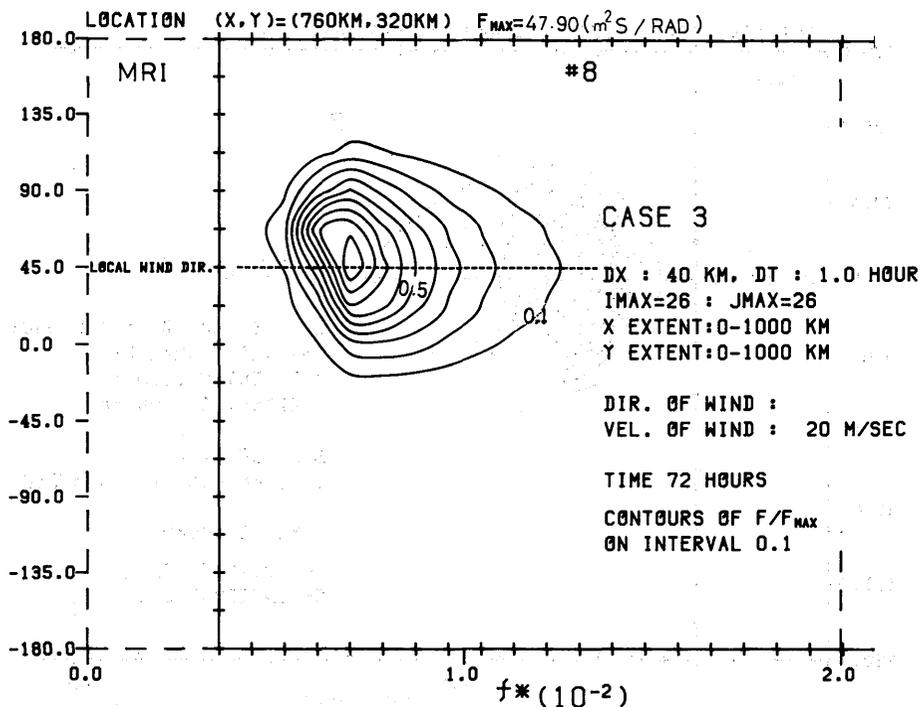


Fig. 47-0-17 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (760,320)

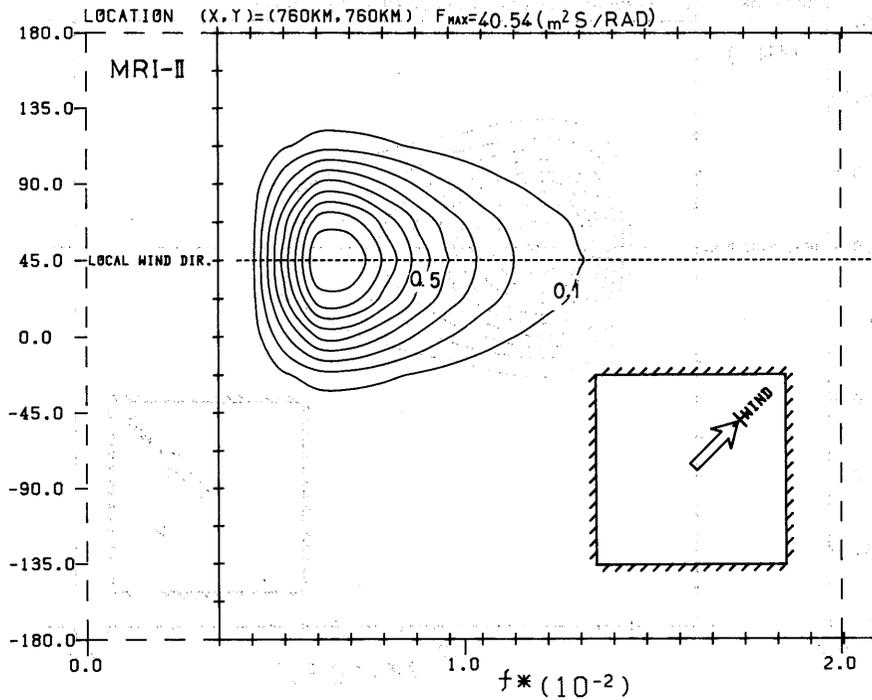
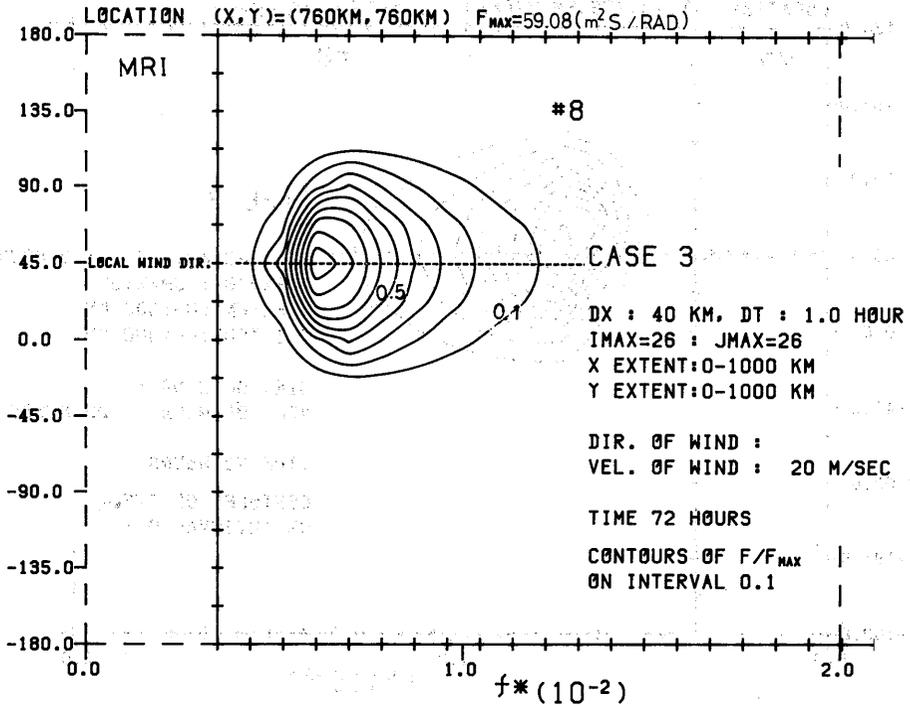


Fig. 48-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T=72$ hrs and point (760,760)

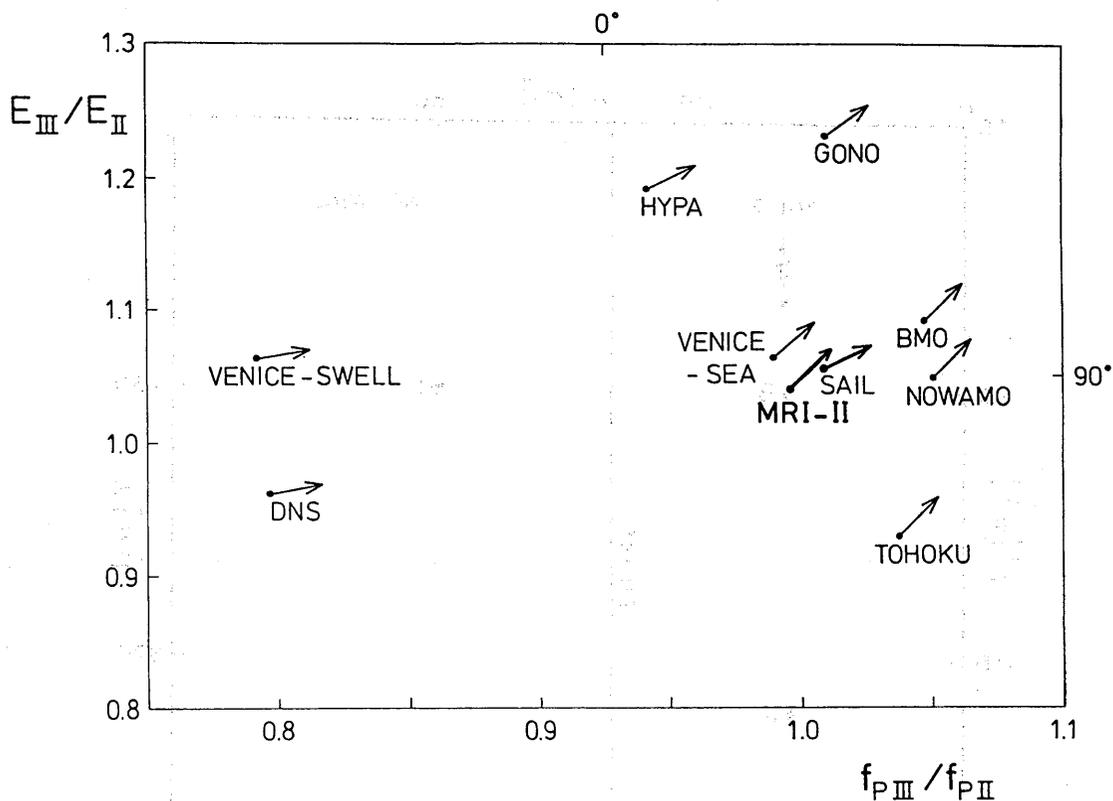


Fig. 49-8.5-0 location of models in the E_{III}/E_{II} vs. $f_{P_{III}}/f_{P_{II}}$ parameter plane at point F (MRI is not shown, as the peak windsea frequency was not well defined for Case II for the small fetch), where indices III and II refer to Case III and Case II for the same fetch.

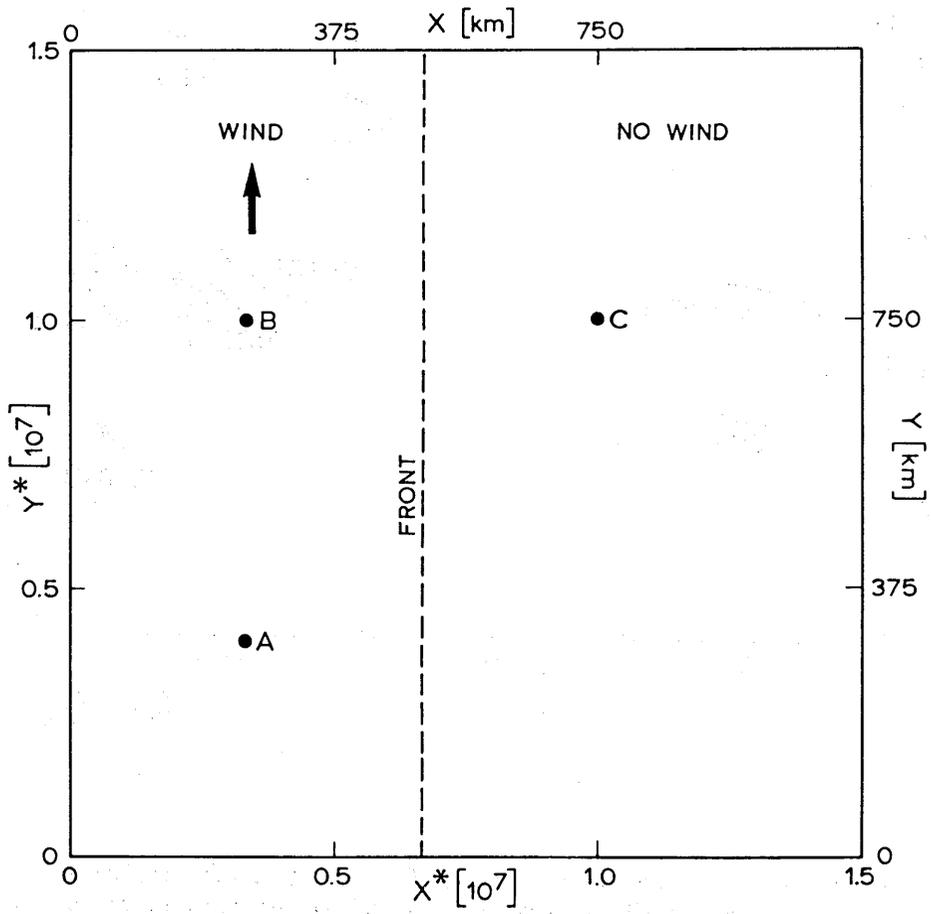


Fig. 50-9.1-0 Wind field geometry for Case IV. A,B and C denote special output points.

#9

1.5 -

CASE 4

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 ; JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

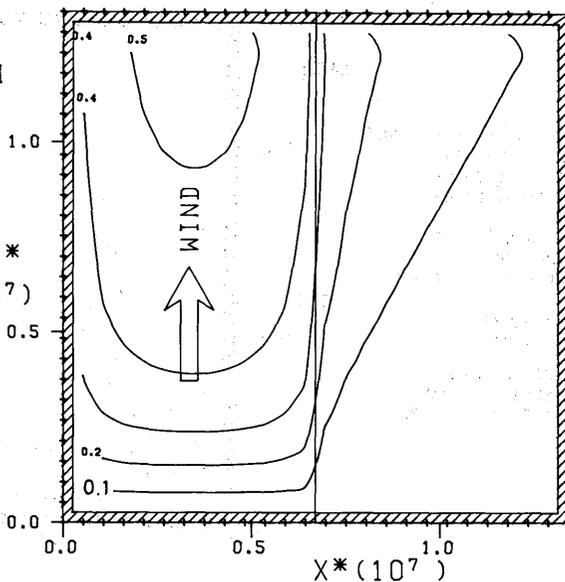
DIR. OF WIND : SOUTH
 LEFT THE FRONT
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

CONTOURS OF SCALED E
 ON INTERVAL 0.1

MRI

Y*
 (10⁷)



1.5

#9

1.5 -

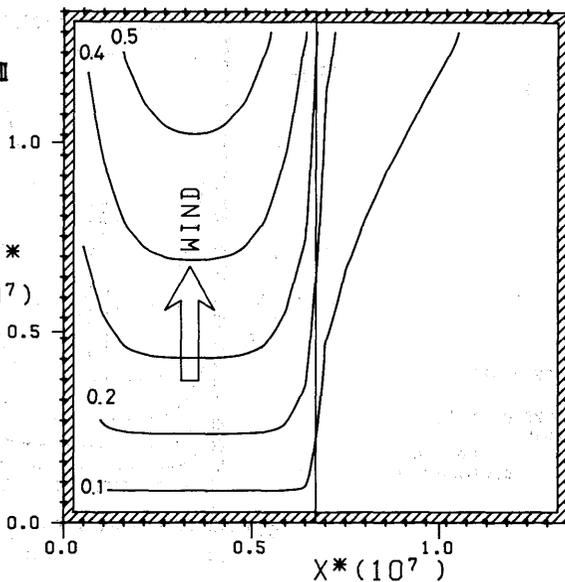
CASE 4

TIME=72 HOURS

CONTOURS OF SCALED E
 ON INTERVAL 0.1

MRI-II

Y*
 (10⁷)



1.5

Fig. 51-0-18 countours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^*

#10

1.5 -

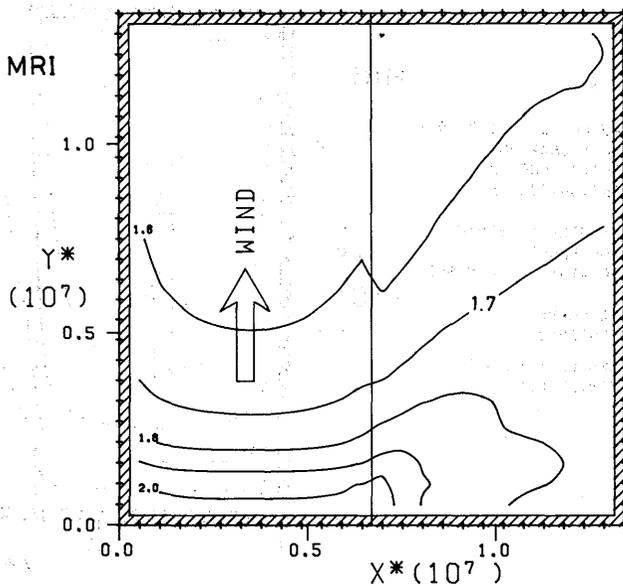
CASE 4

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTH
 LEFT THE FRONT
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

CONTOURS OF f/f_{PM}
 ON INTERVAL 0.1 FOR
 RANGE 1 TO 2, 0.5 FOR > 2



#10

1.5 -

CASE 4

TIME=72 HOURS

CONTOURS OF f_p/f_{PM}
 INTERVAL
 0.1 FOR 1 TO 2
 0.5 FOR G.T. 2

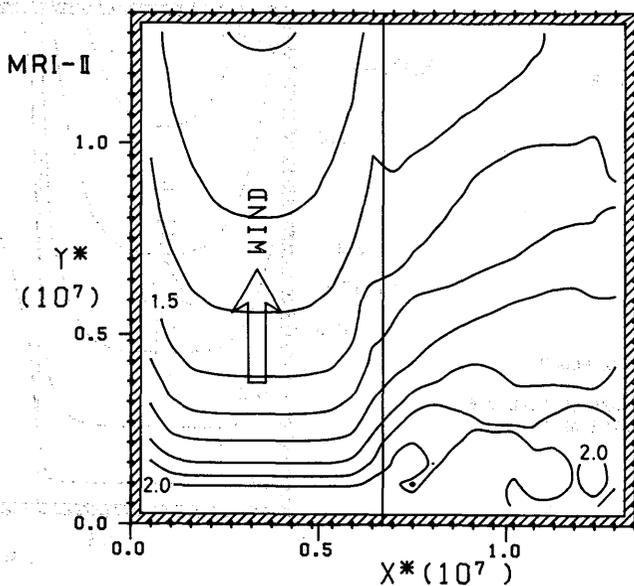


Fig. 52-0-19 contours of f/f_{PM} vs. X^* and Y^*

#11

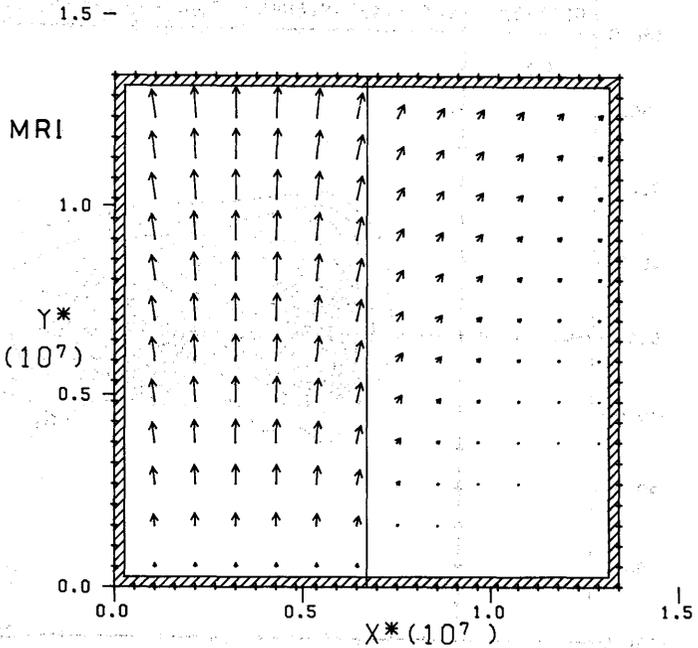
CASE 4

DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTH
 LEFT OF THE FRONT
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME : 72 HOURS
 T* IS 2972764.

ARROW LENGTH : E/E_{PM}
 DIRECTION=#



#11

CASE 4

TIME=72 HOURS

ARROW LENGTH : E/E_{PM}

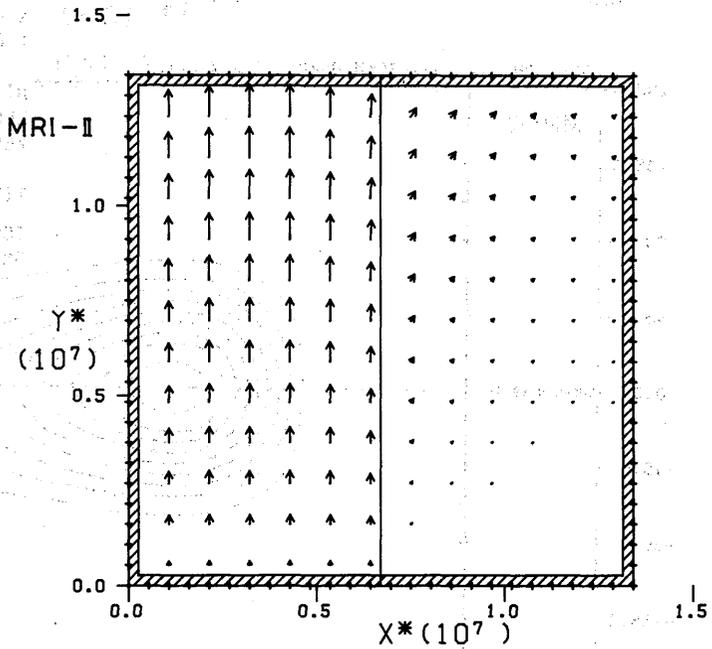


Fig. 53-9.2-20 cluster diagram of E/E_{PM} and θ vs. X^* and Y^*

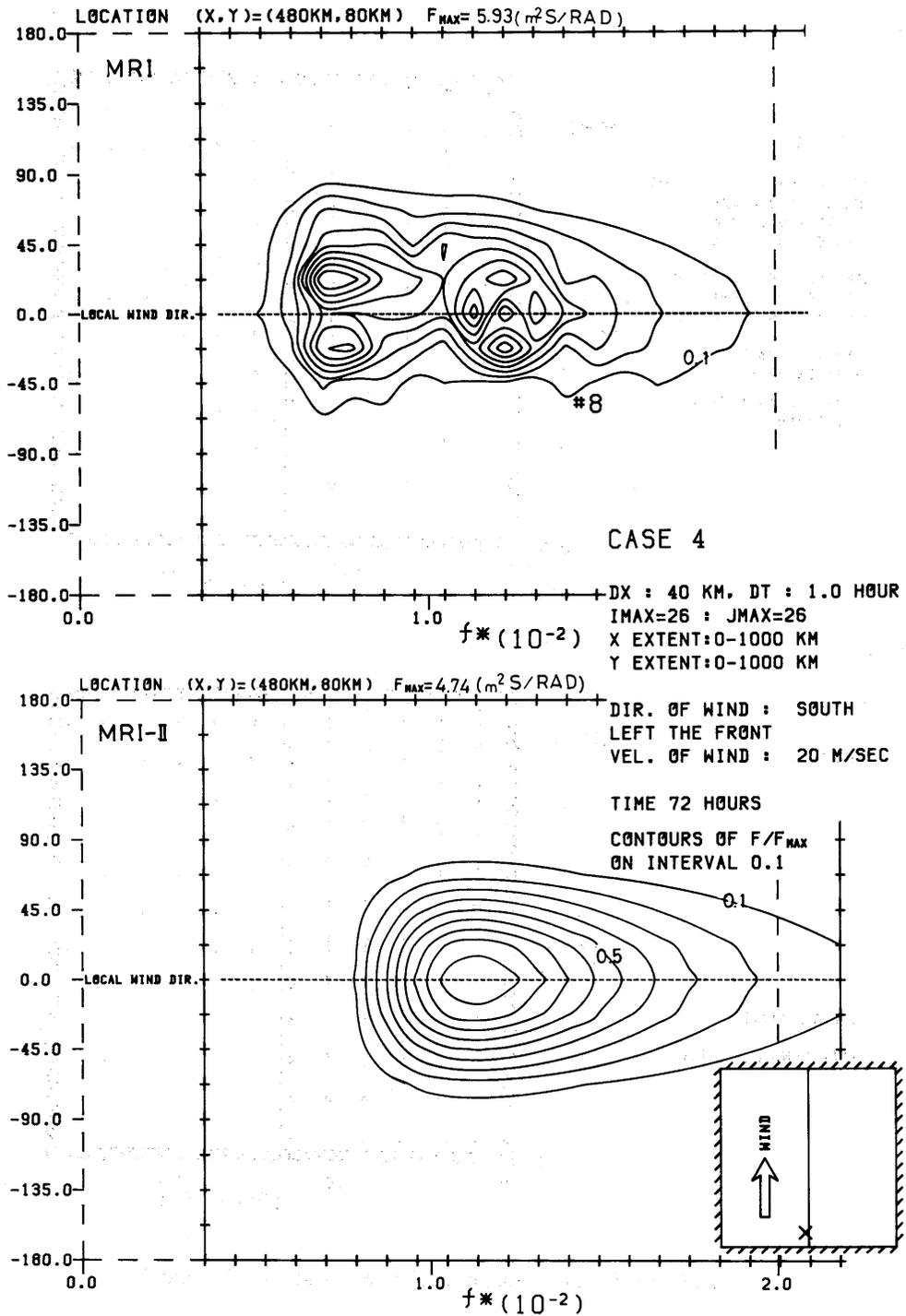


Fig. 54-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (480, 80)

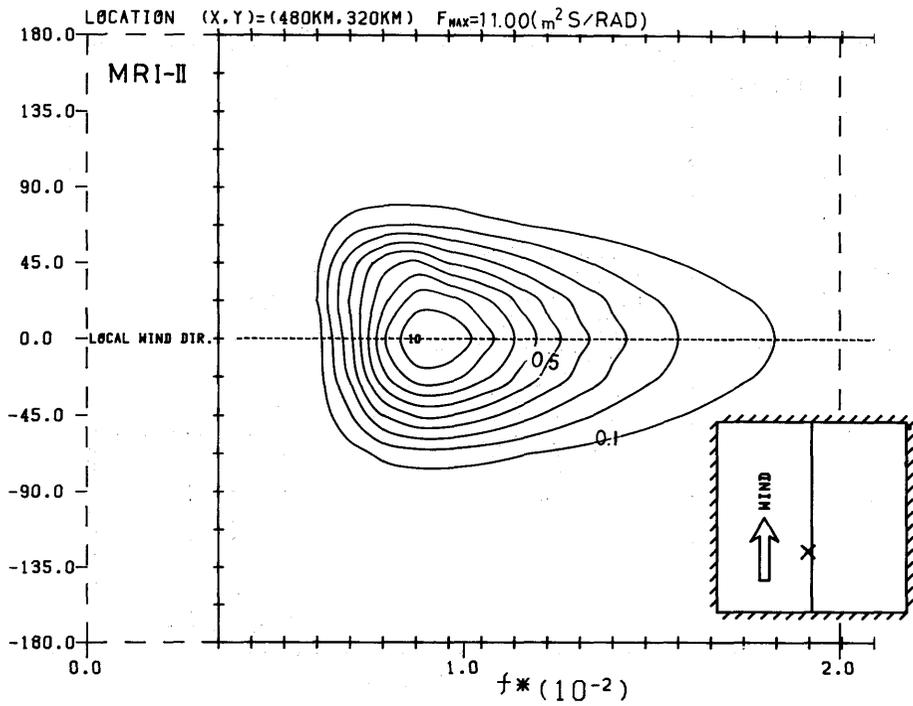
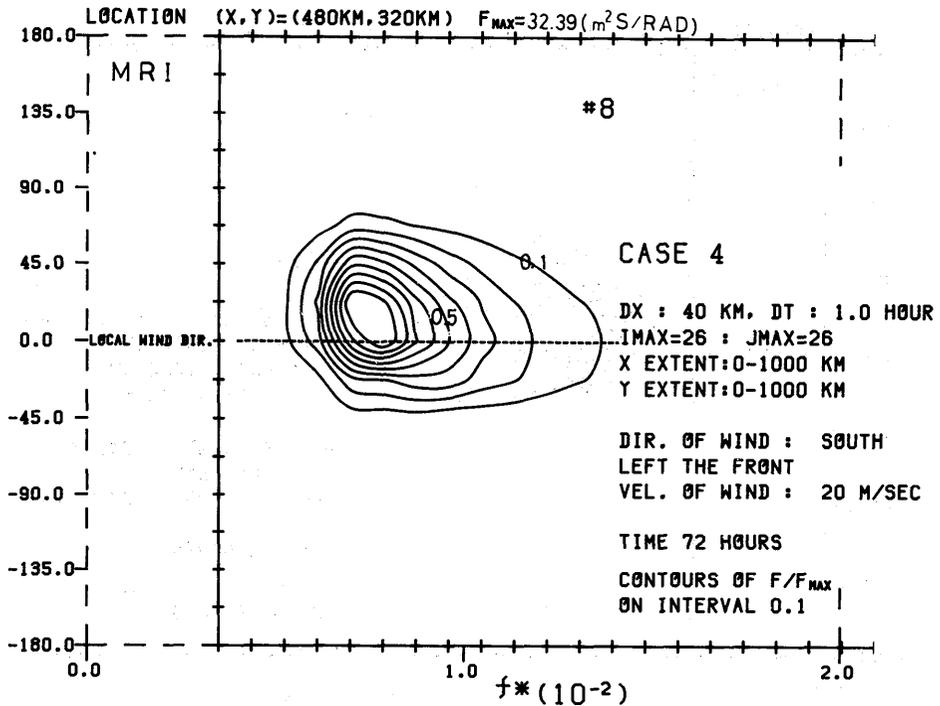


Fig. 55-0-21 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (480,320)

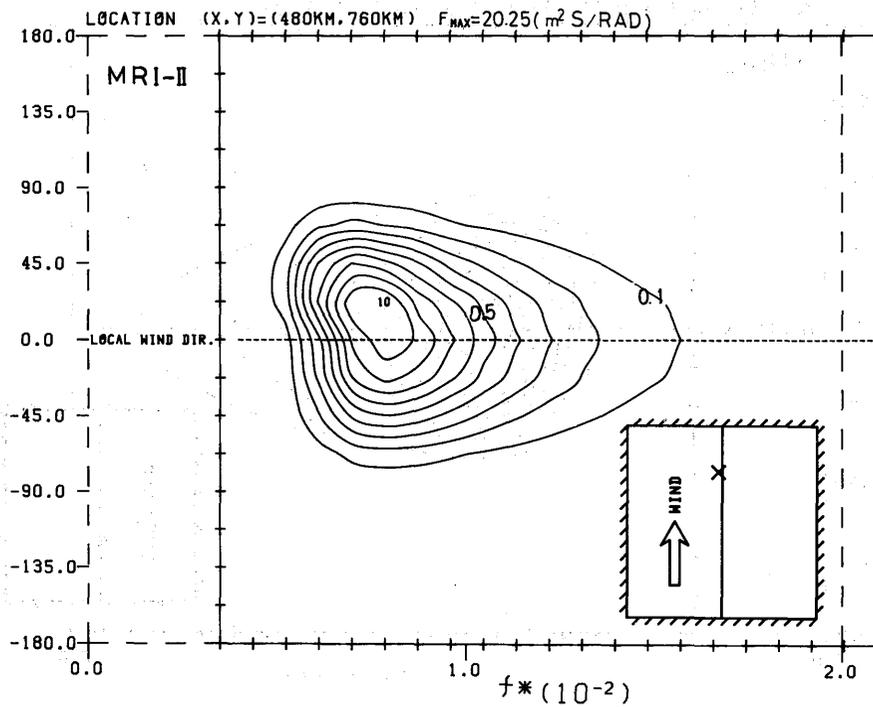
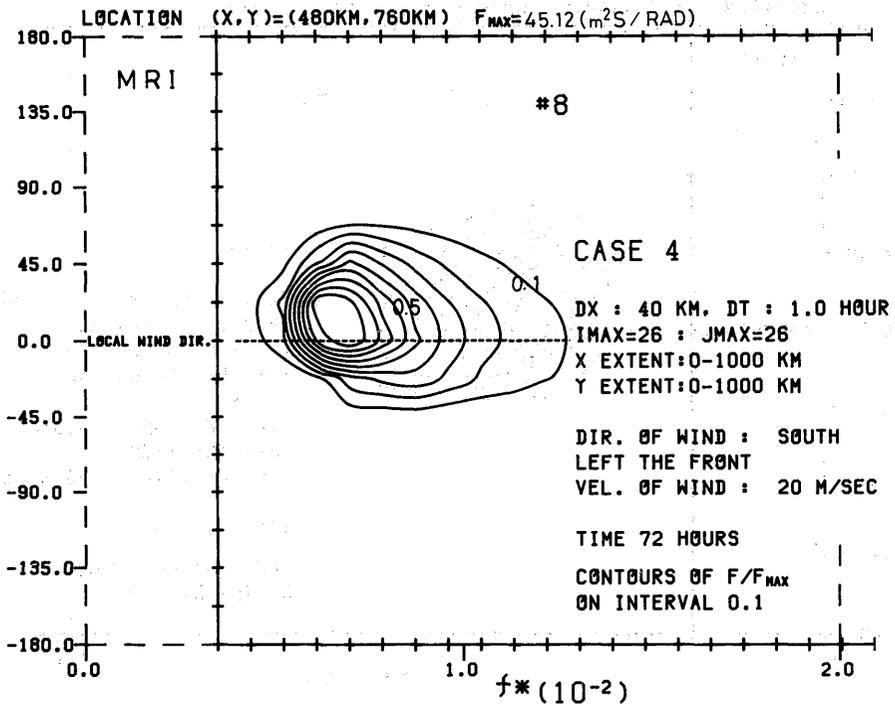


Fig. 56-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (480, 760)

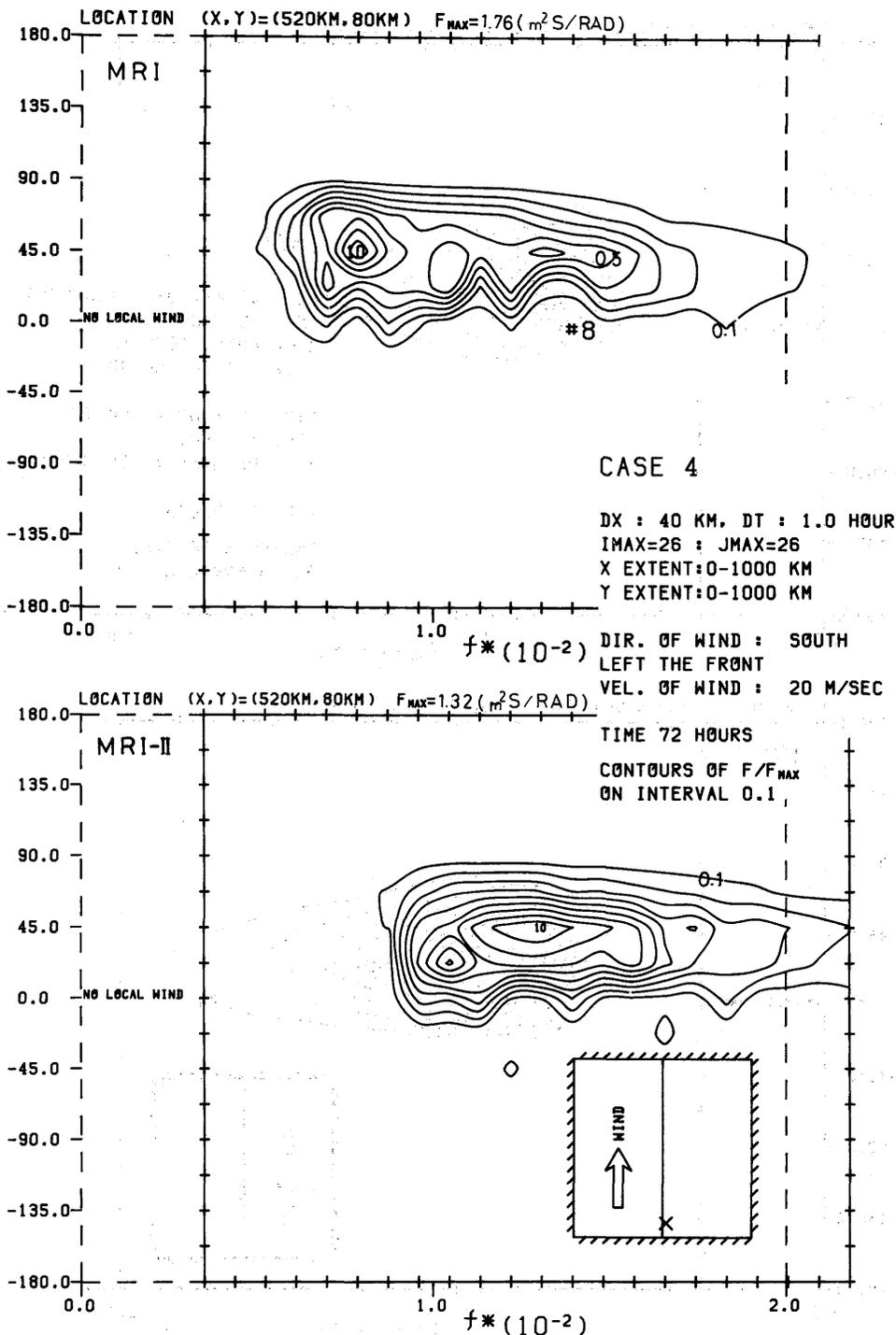


Fig. 57-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (520, 80)

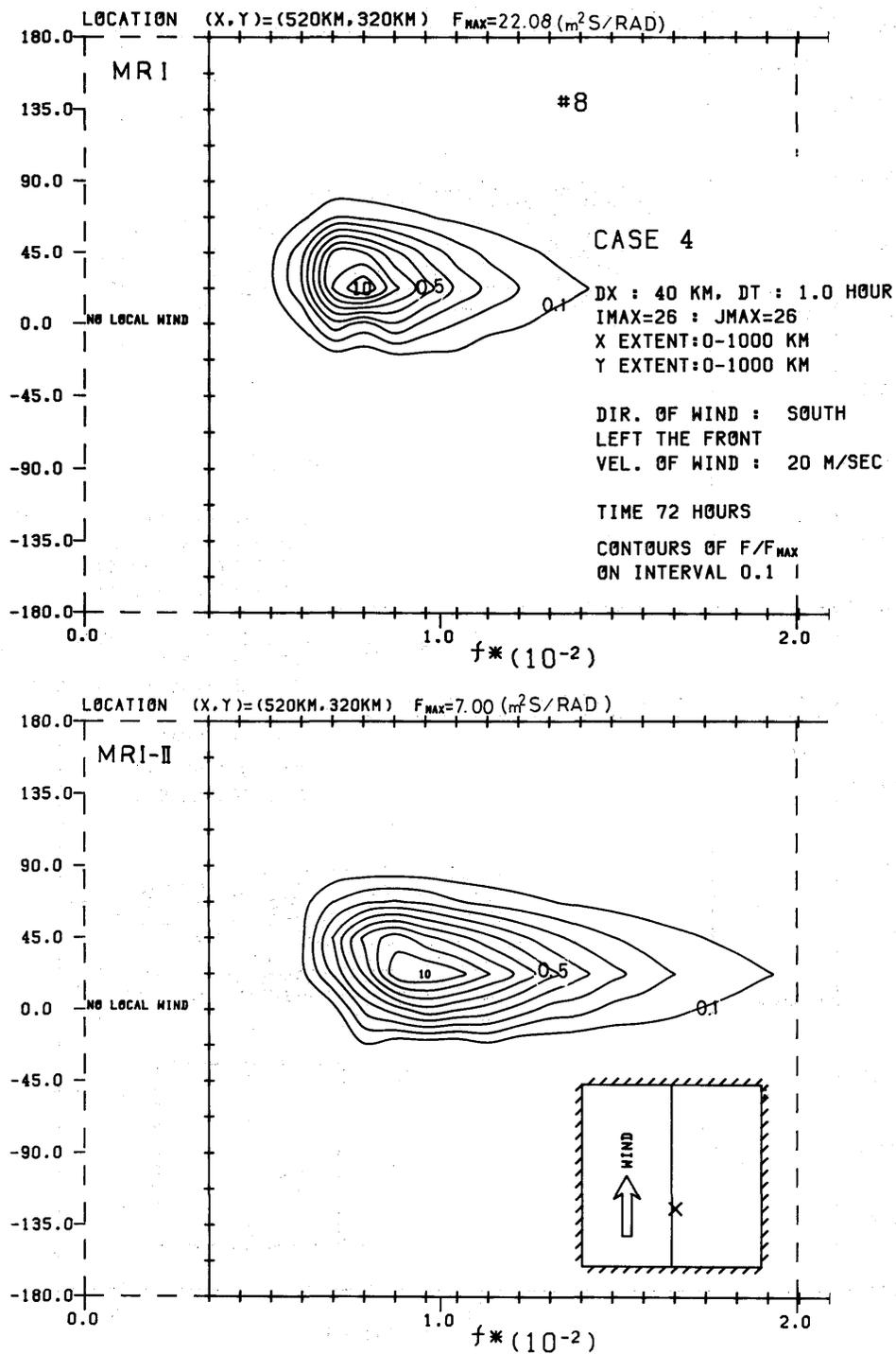


Fig. 58-0-22 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (520, 320)

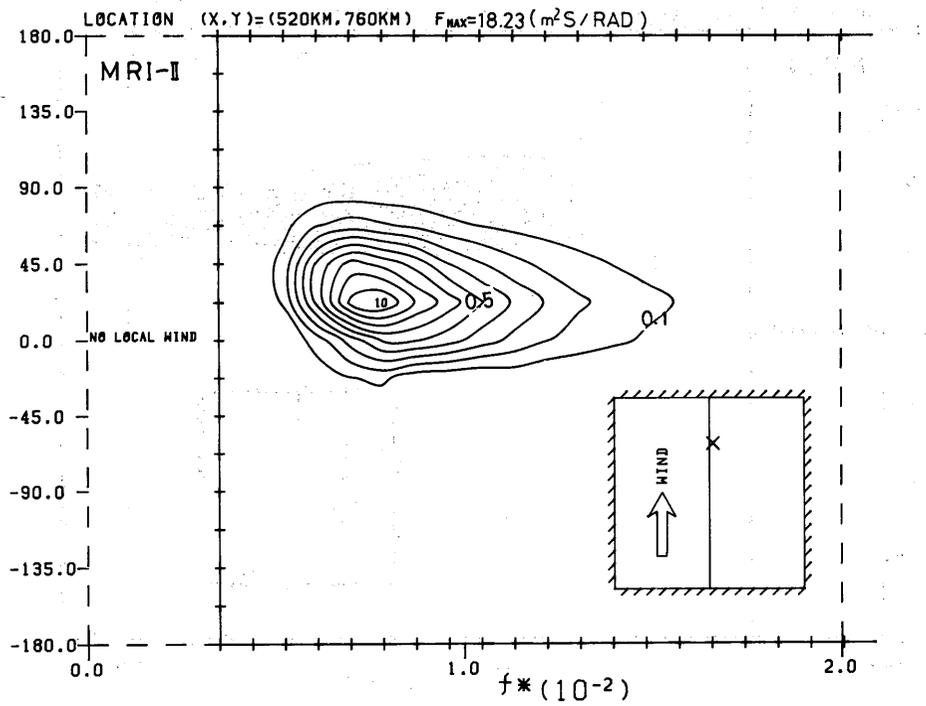
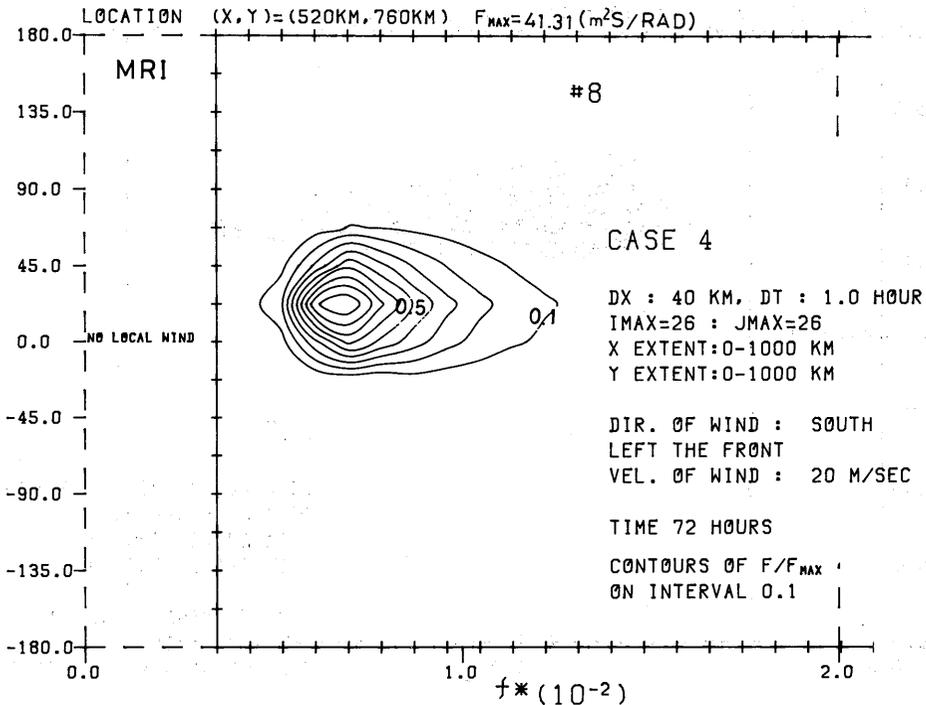


Fig. 59-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (520, 760)

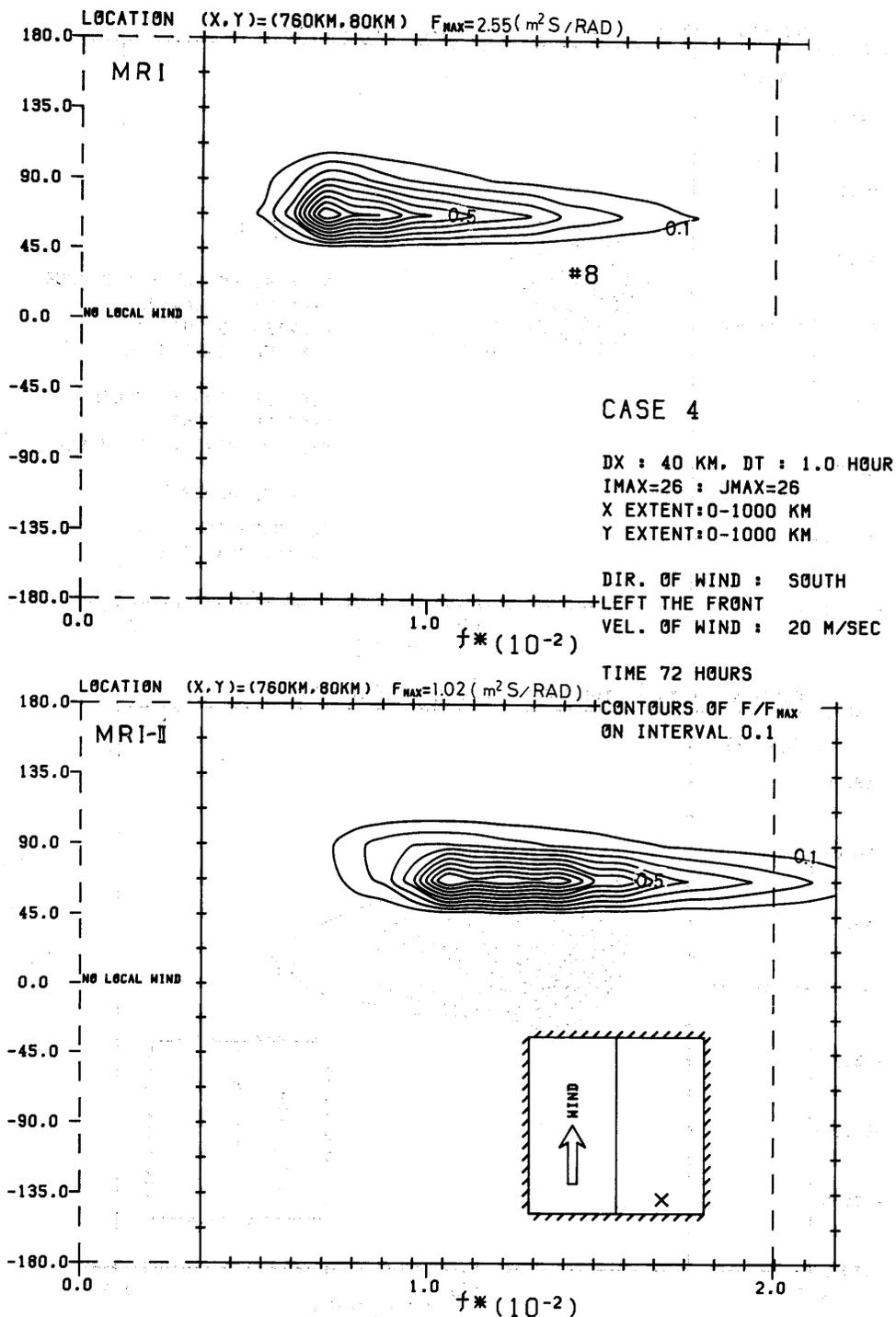


Fig. 60-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760, 80)

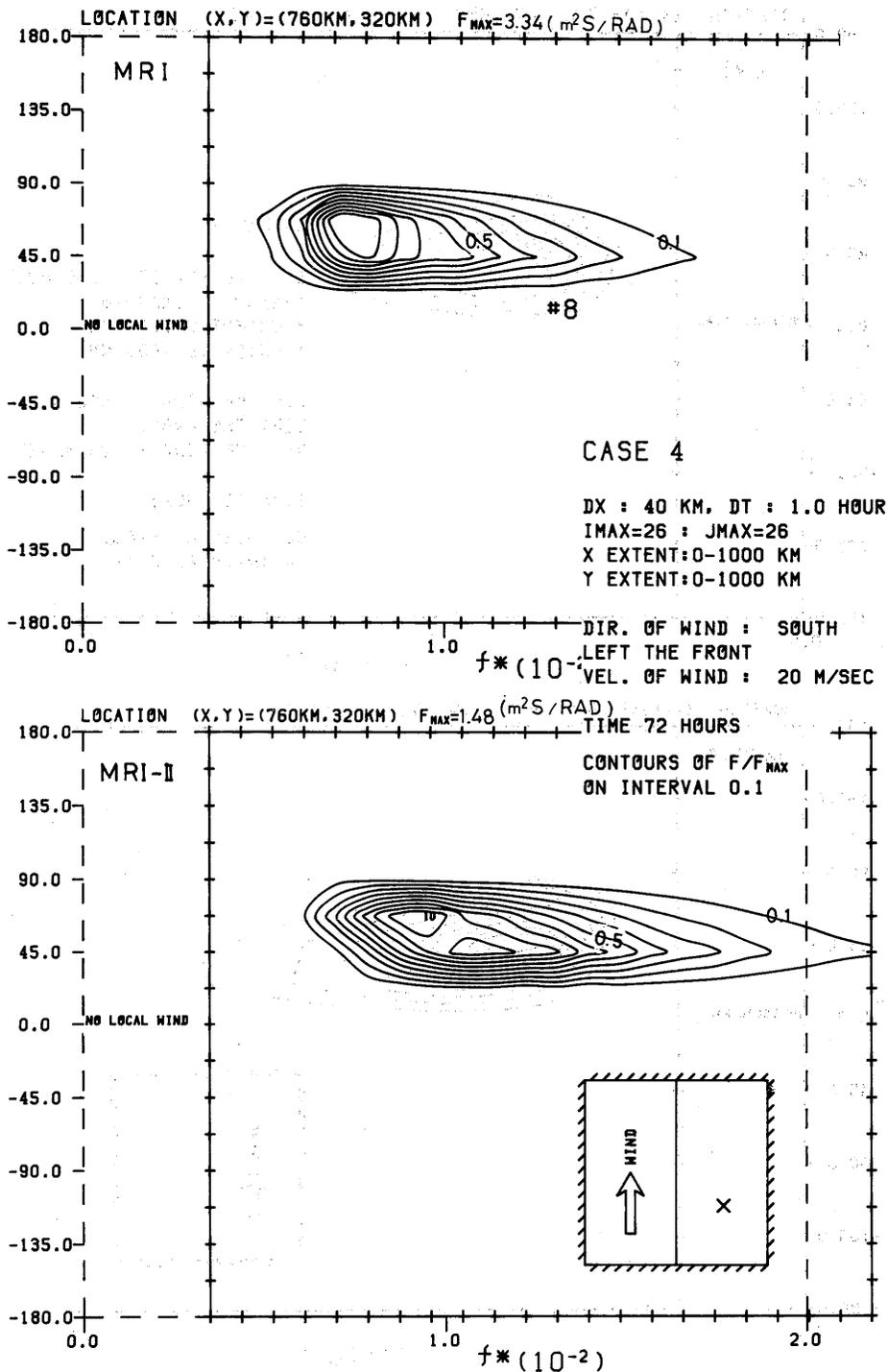


Fig. 61-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,320)

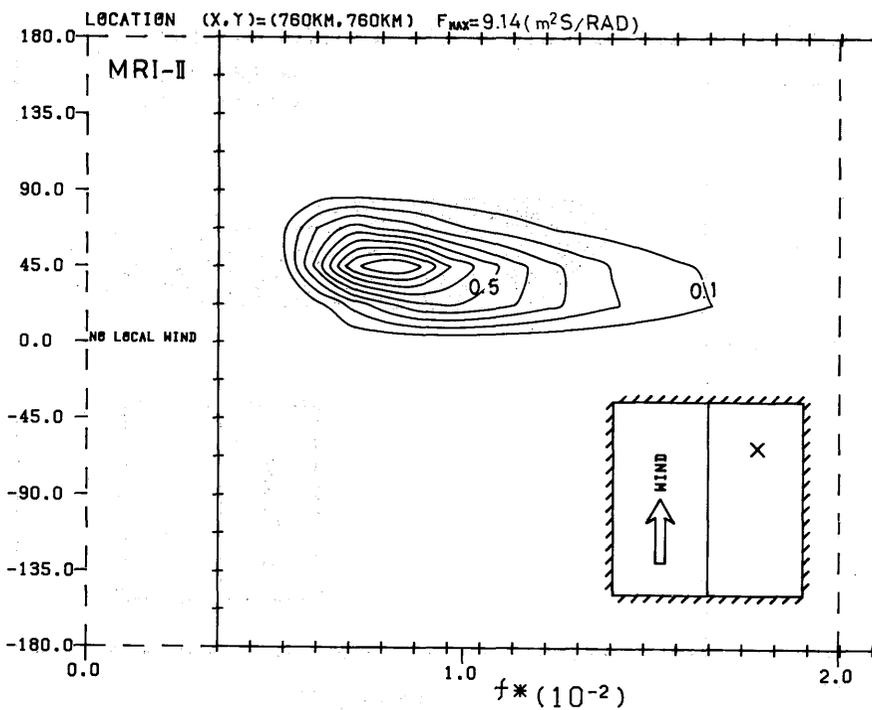
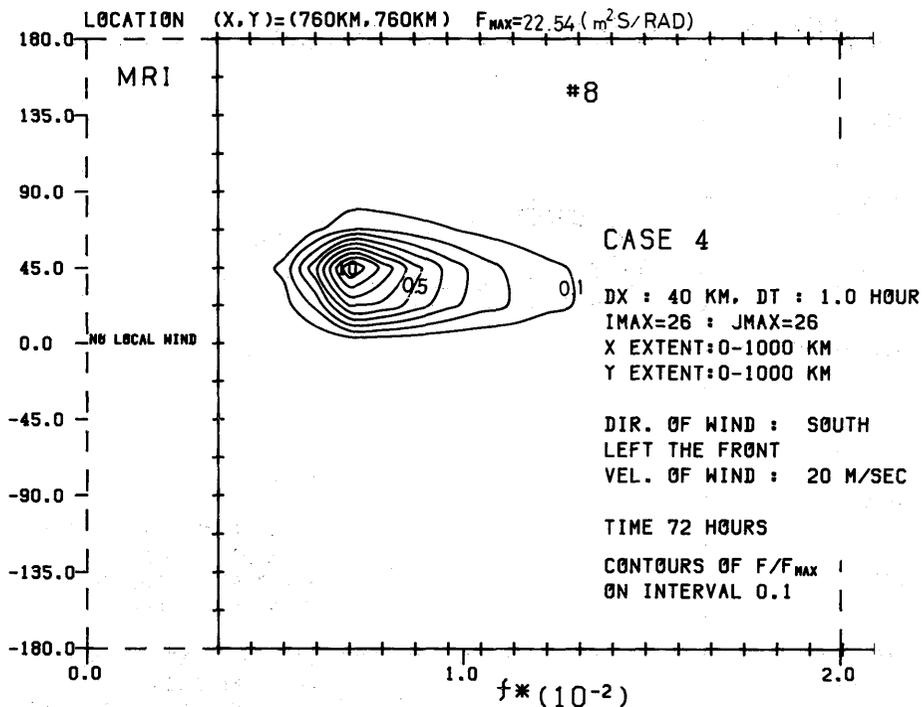


Fig. 62-9.4-23 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,760)

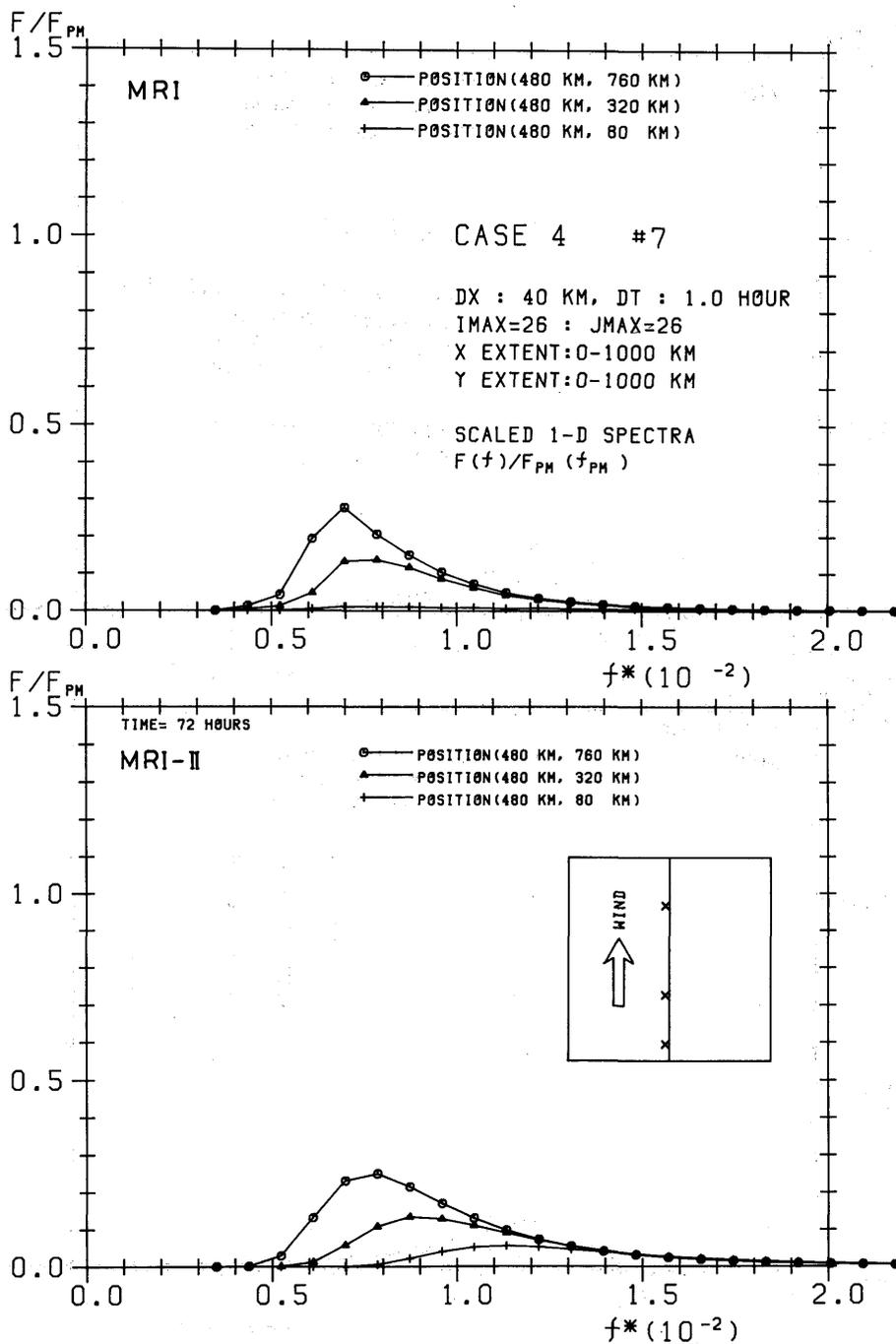


Fig. 63-0-24 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for $T = 72$ hrs and point (480, 80), (480,320) and (480,760)

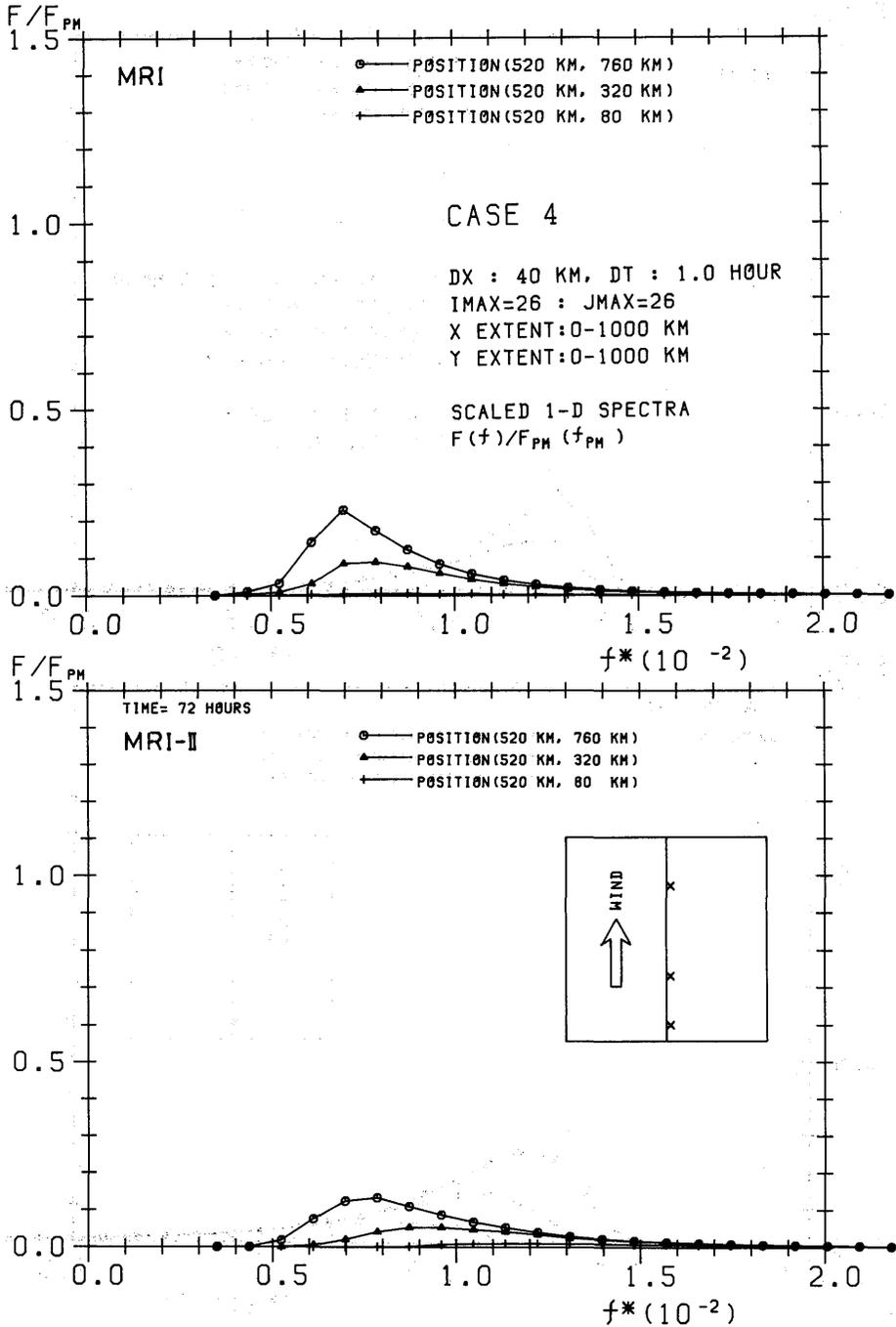


Fig. 64-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for $T = 72$ hrs and point (520, 80), (520,320) and (520,760)

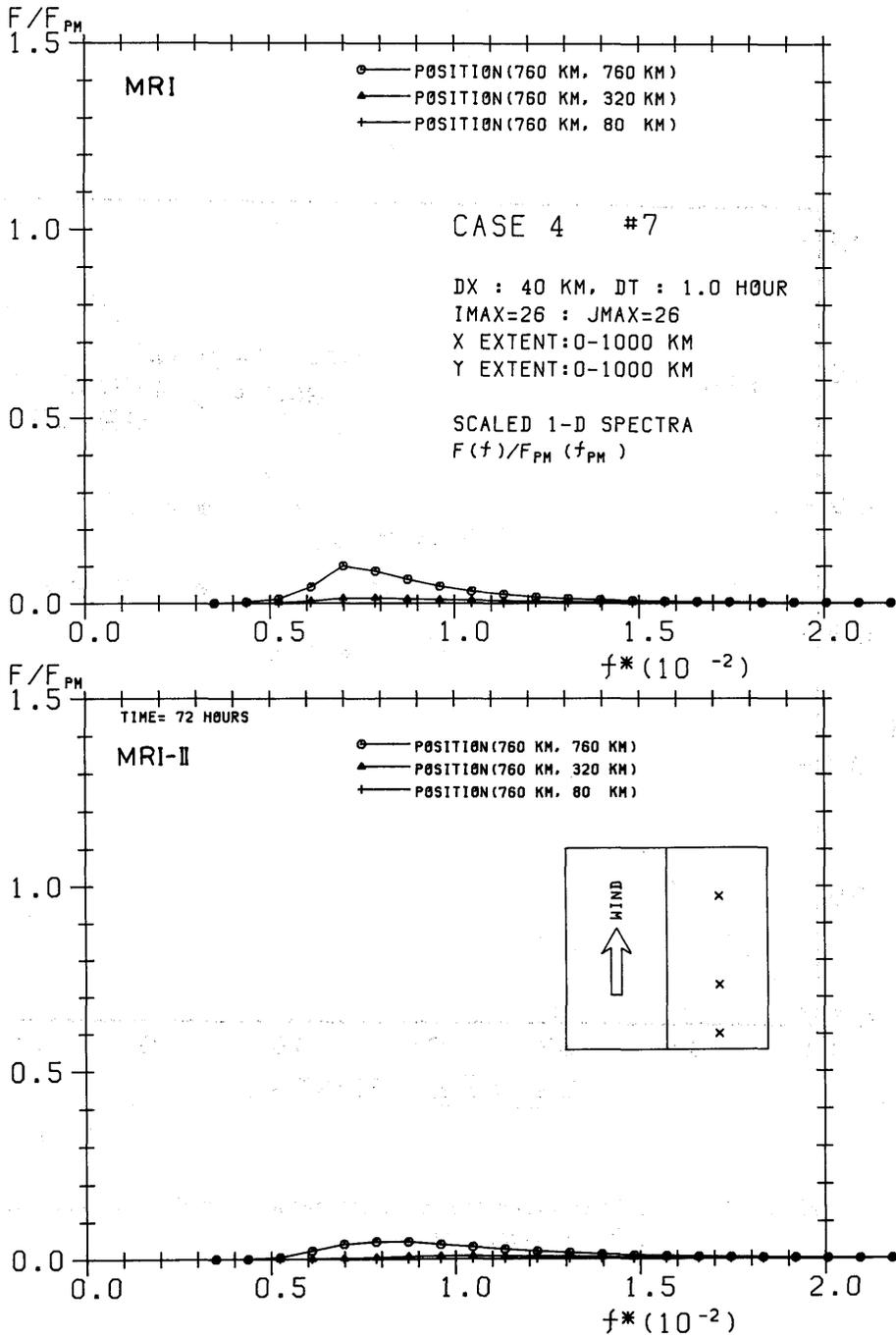


Fig. 65-0-25 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for $T = 72$ hrs and point (760, 80), (760,320) and (760,760)

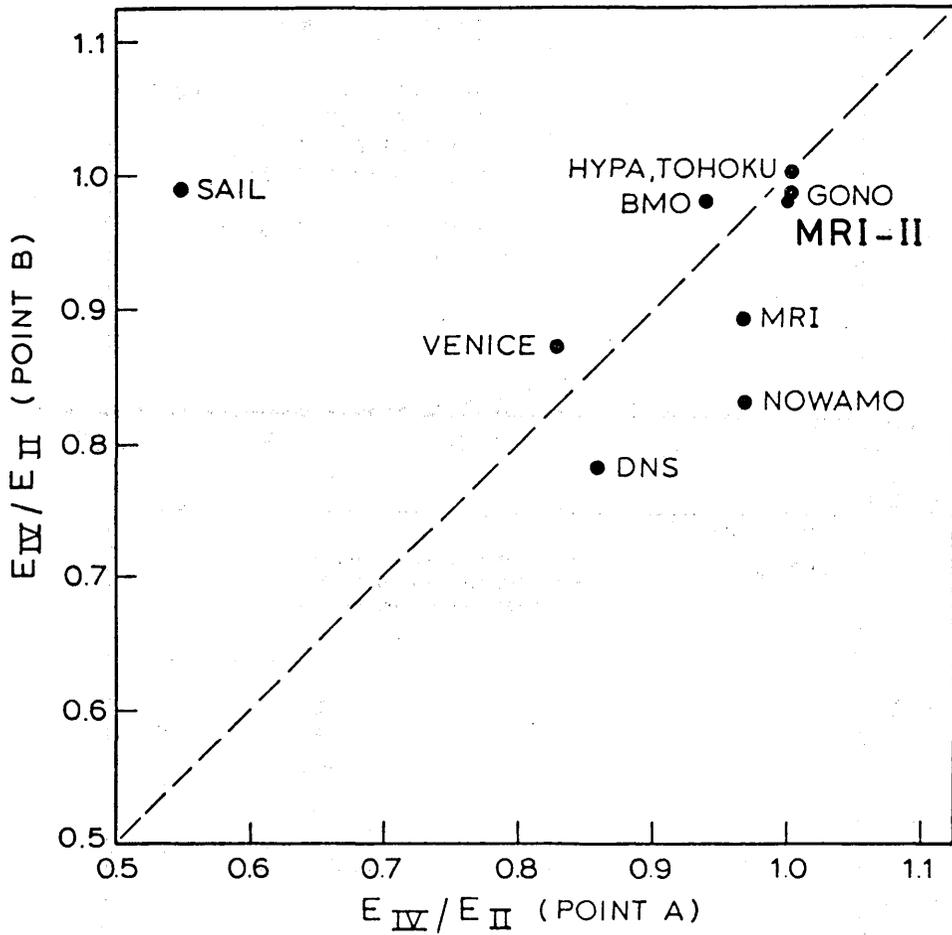


Fig. 66-9.3-0 model locations in the parameter plane spanned by the values of (E_V/E_{II}) at points A and B.

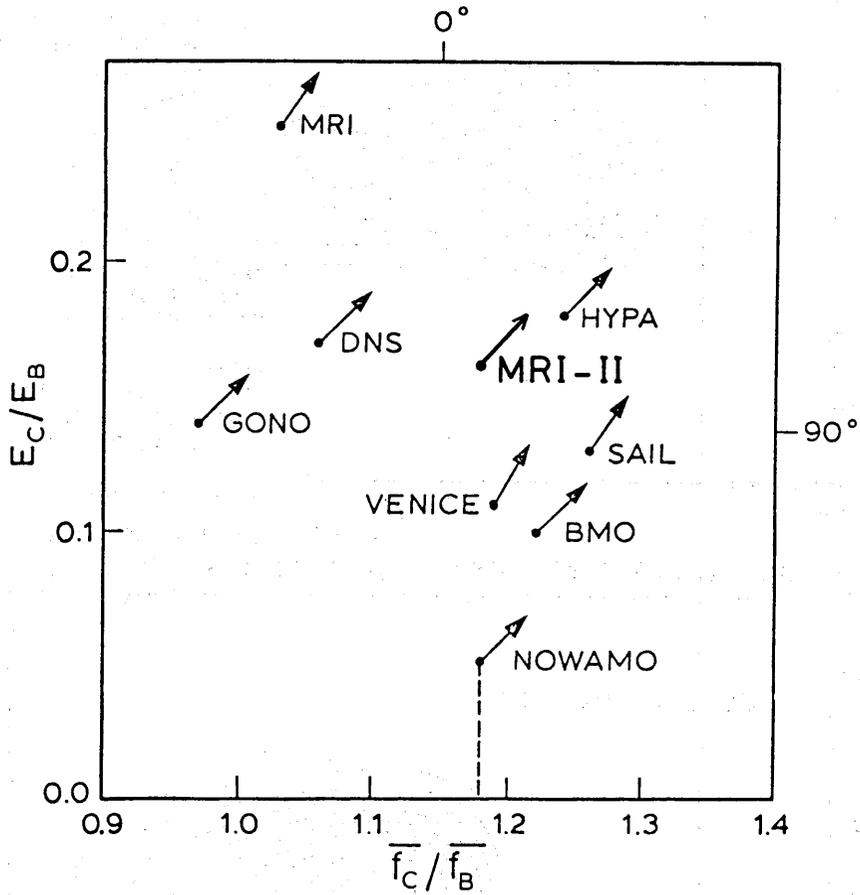


Fig. 67-9.5-0 model locations in the parameter plane of E_C/E_B vs $\overline{f_C/f_B}$, where indices B and C refer to points B and C.

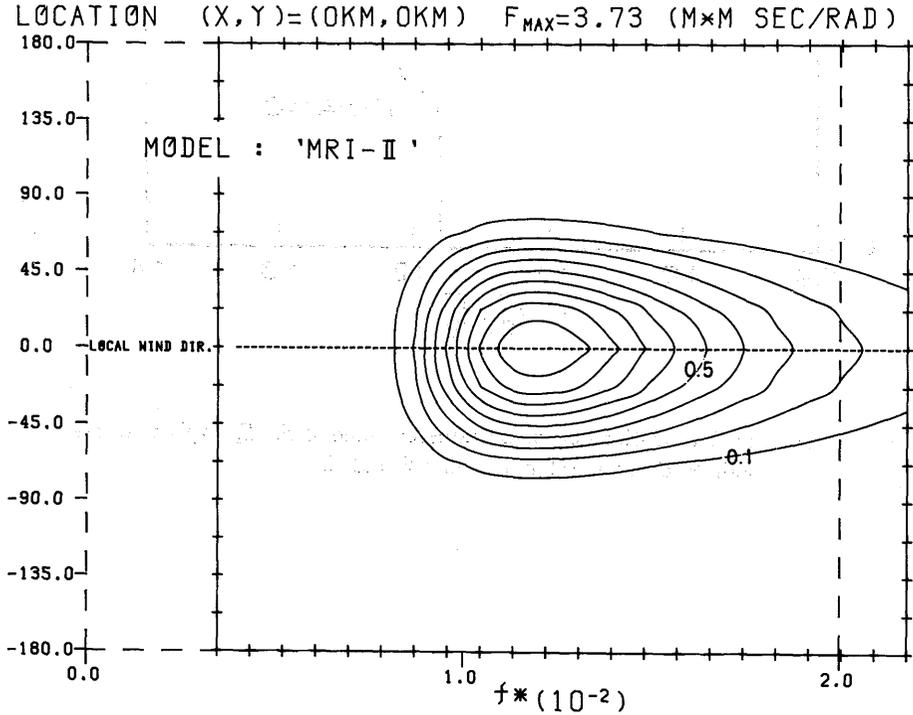
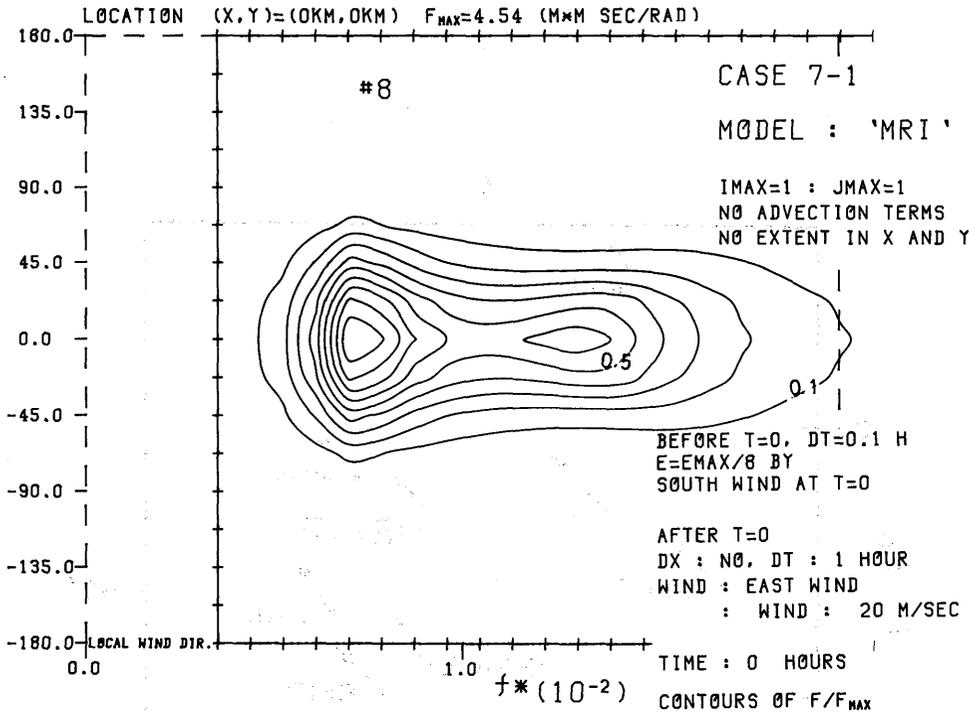


Fig. 68-0-55 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 0 hrs

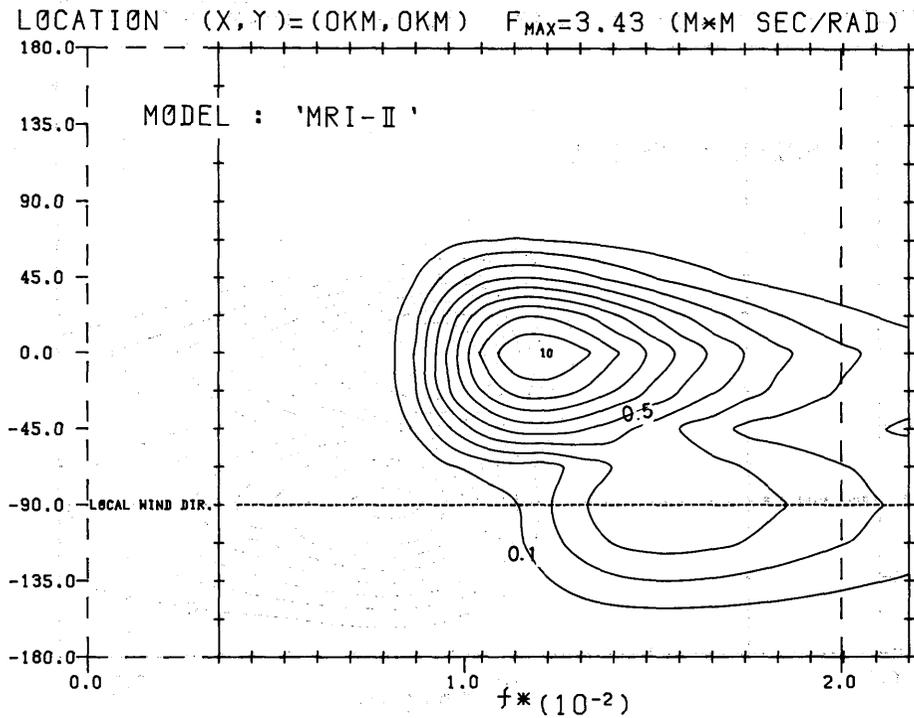
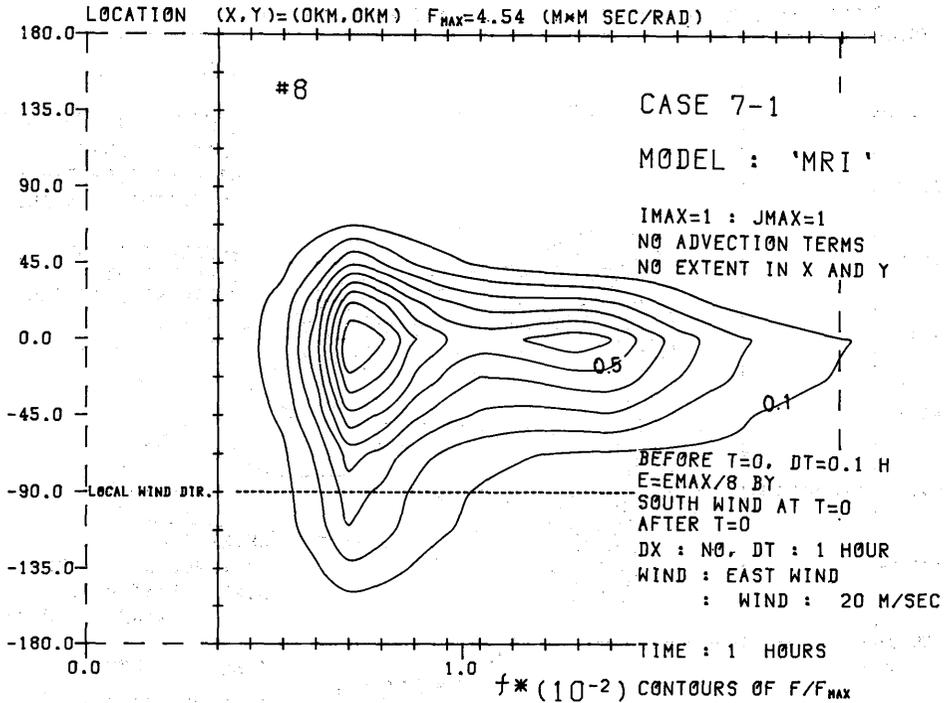


Fig. 69-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 1 hrs

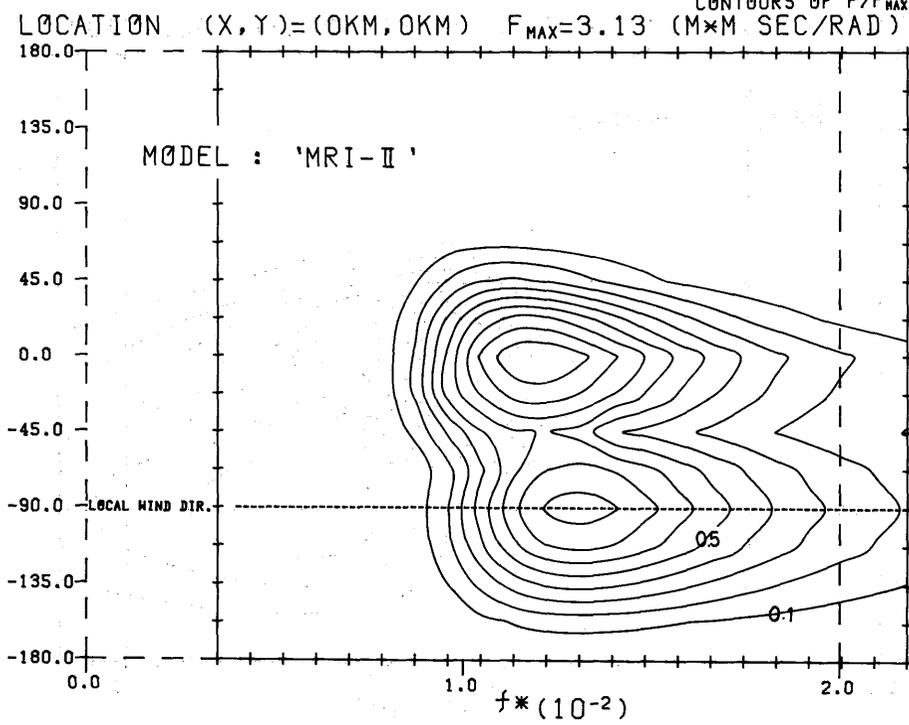
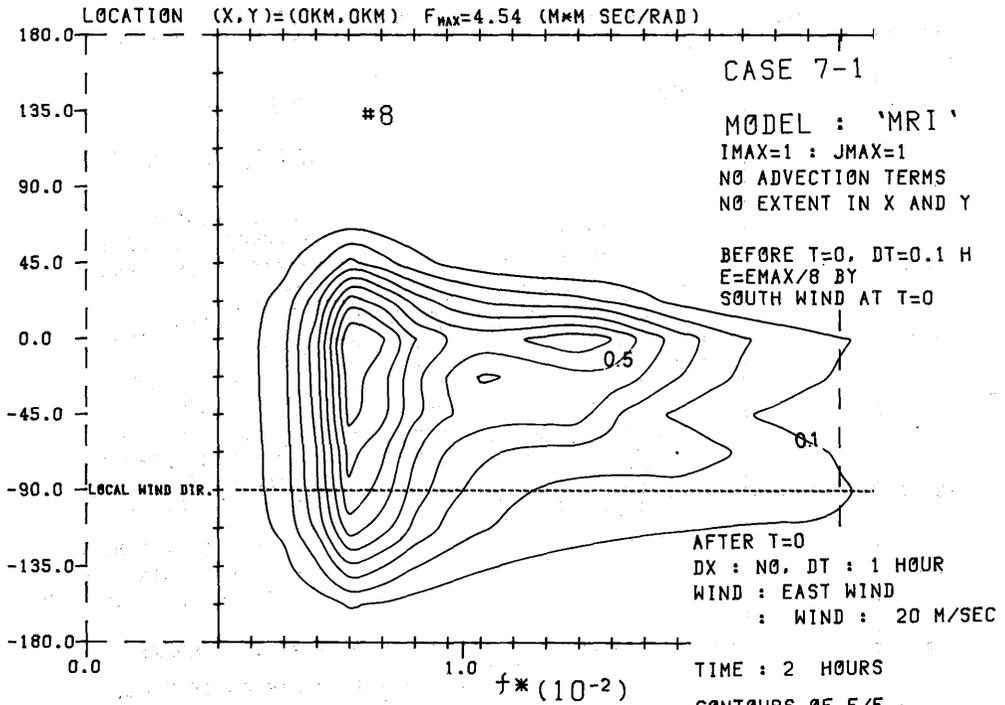


Fig. 70-10.1a-56 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 2 hrs

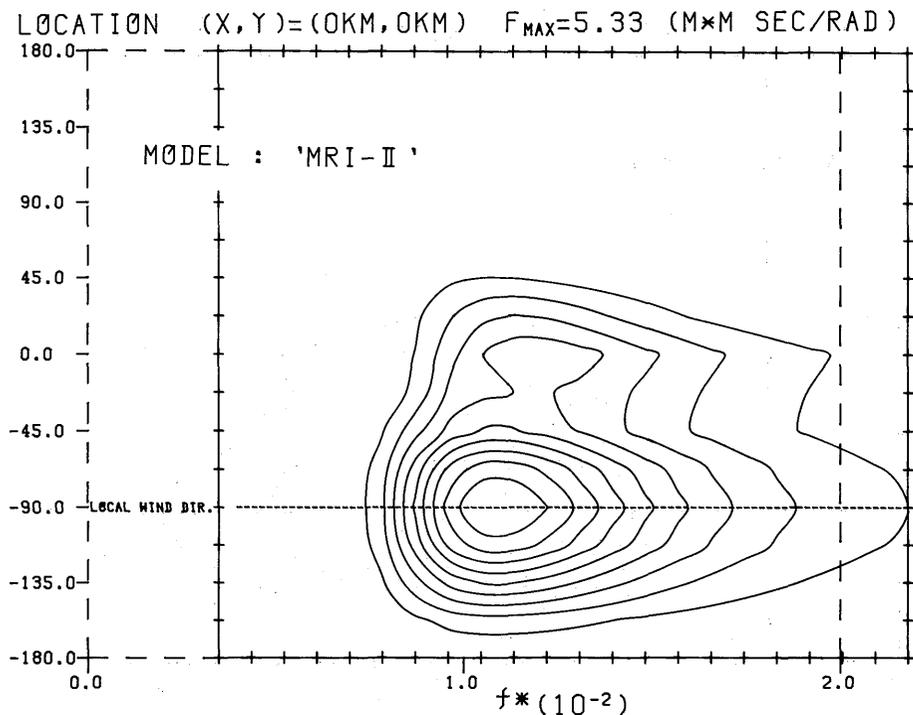
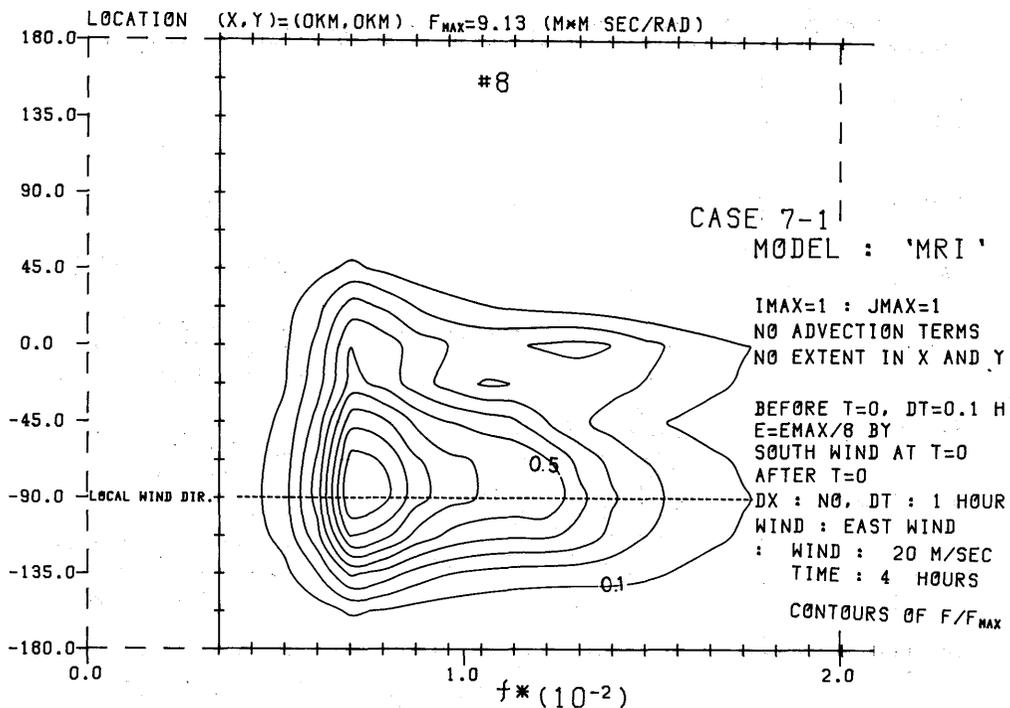


Fig. 71-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 4 hrs

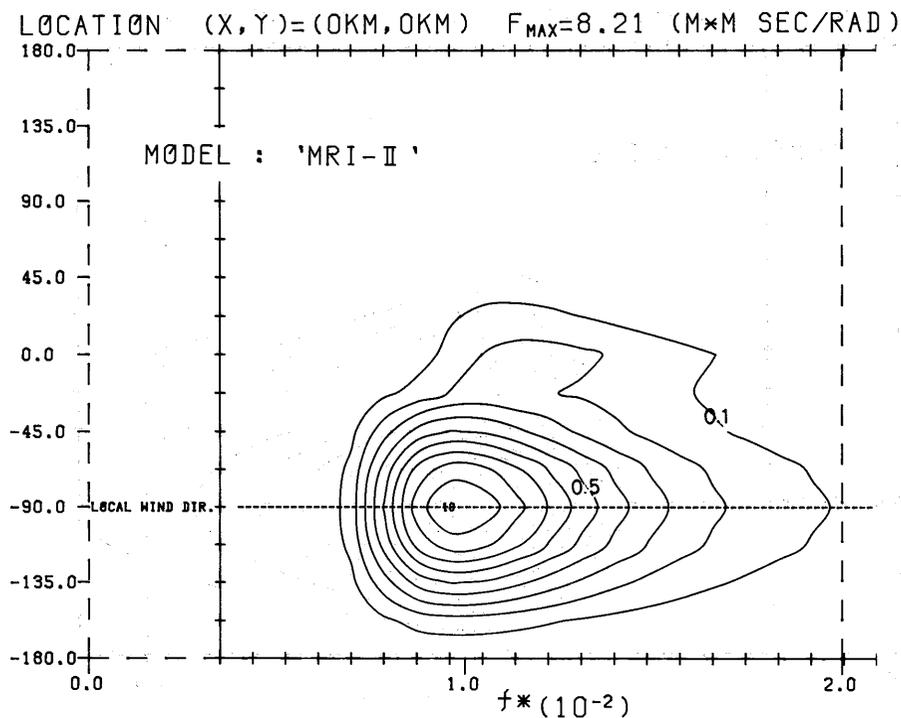
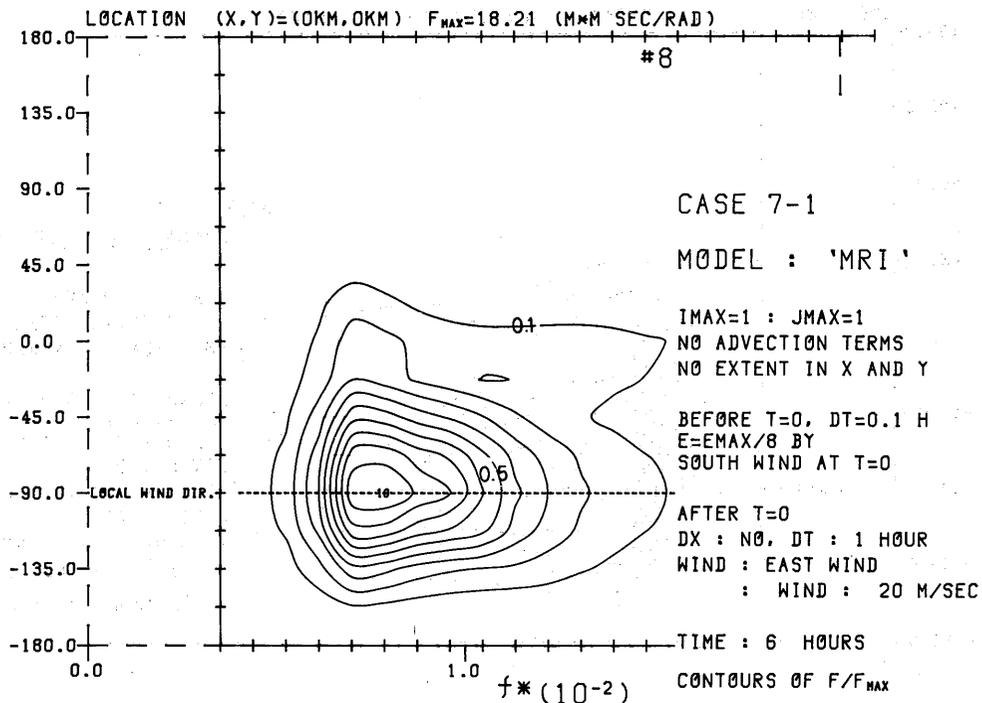


Fig. 72-10.1b-57 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 6 hrs

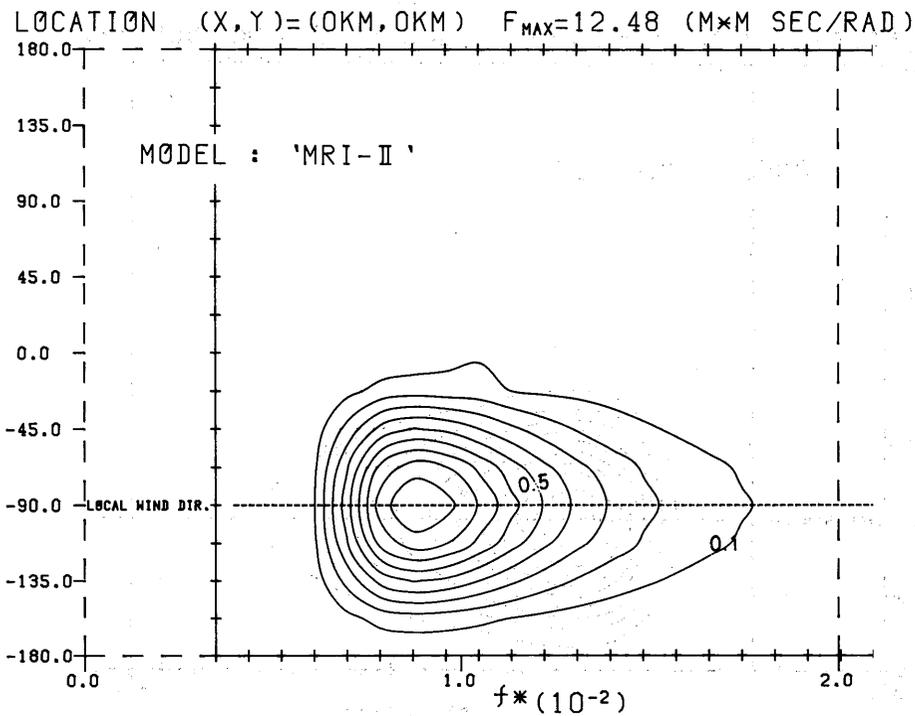
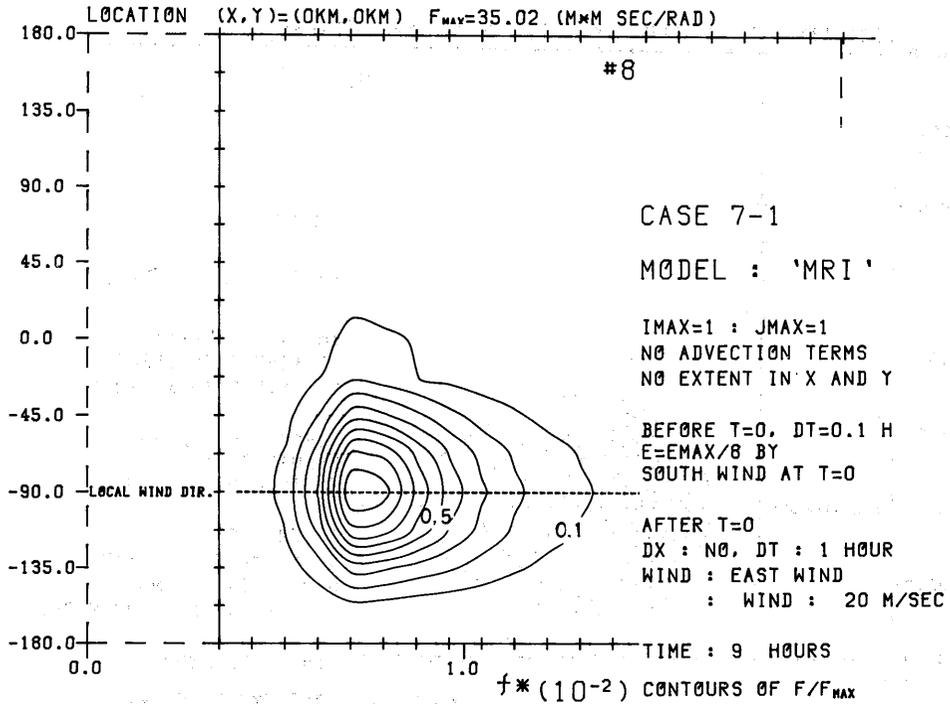


Fig. 73-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 9 hrs

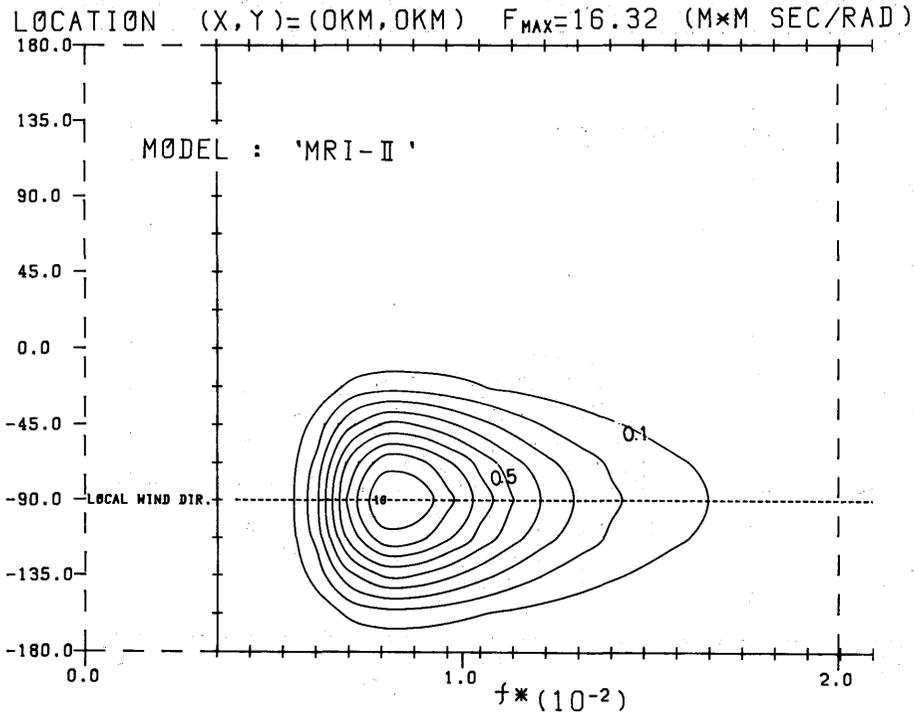
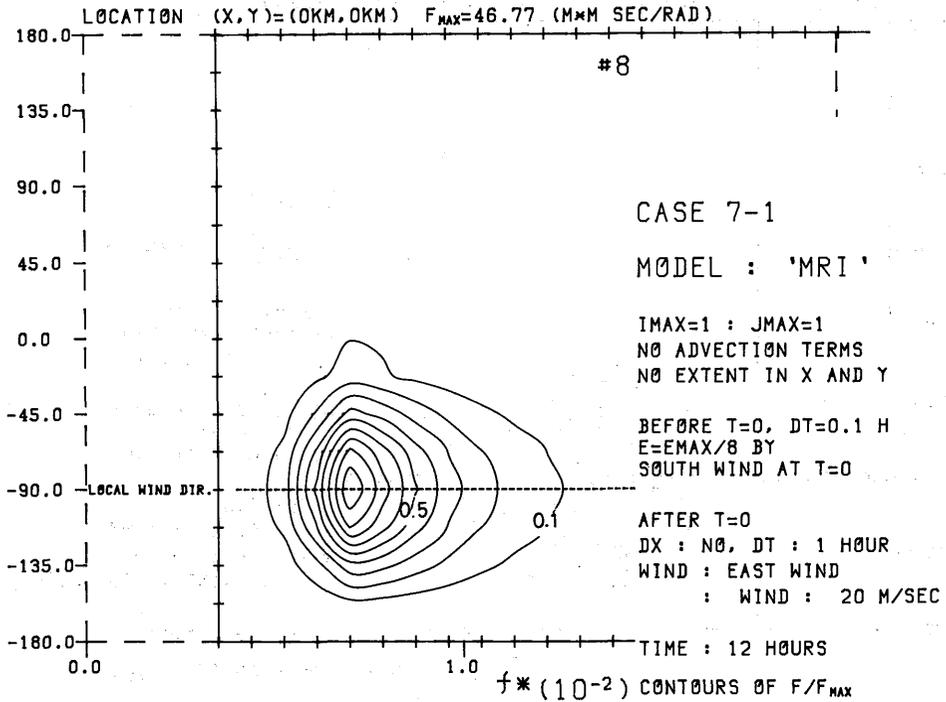


Fig. 74-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 12 hrs

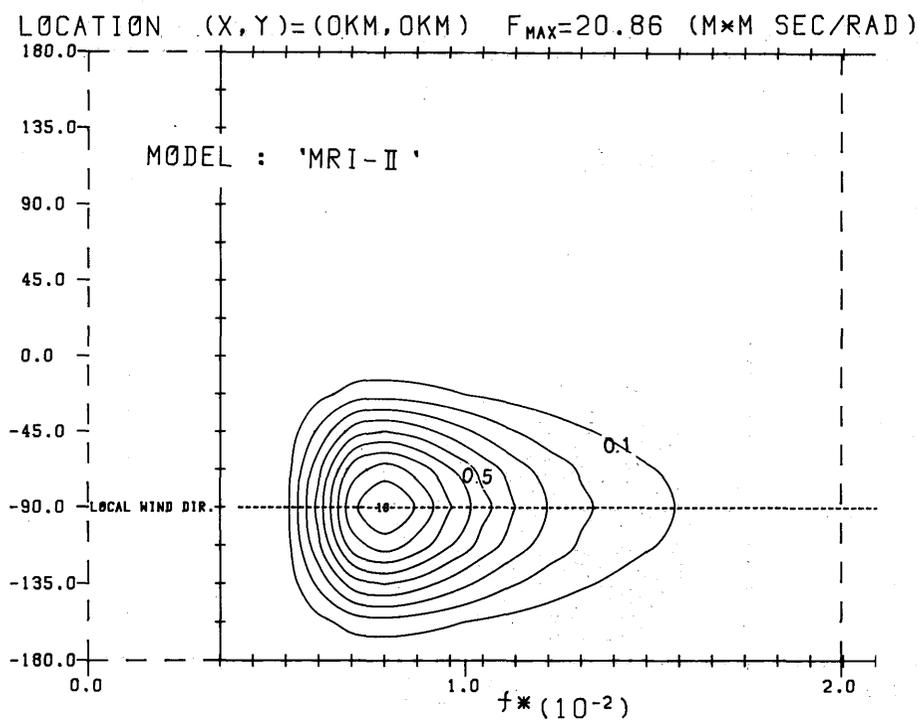
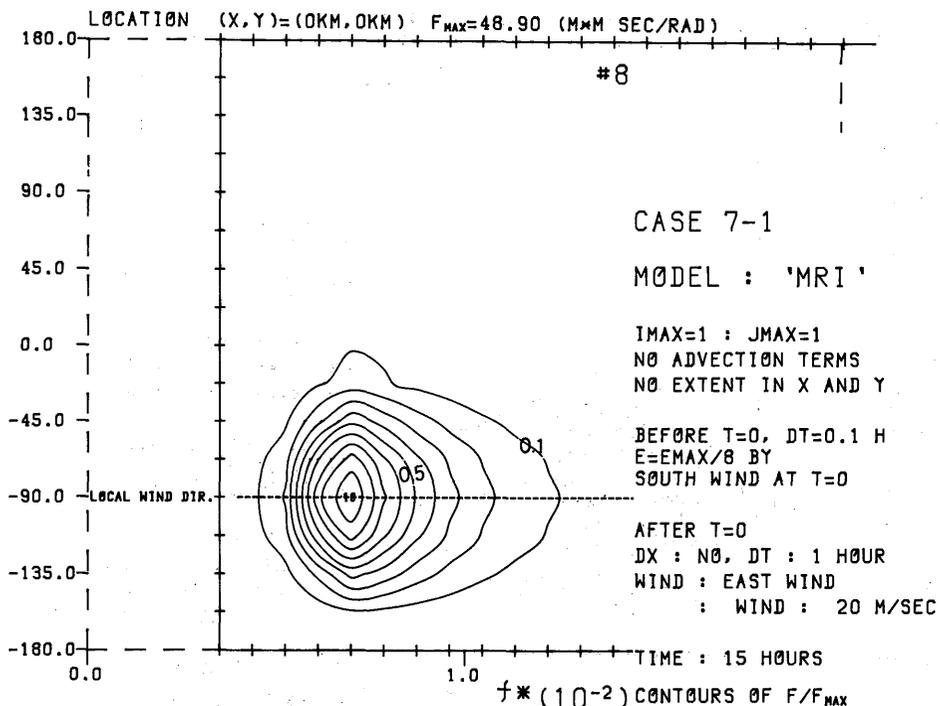


Fig. 75-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 15 hrs

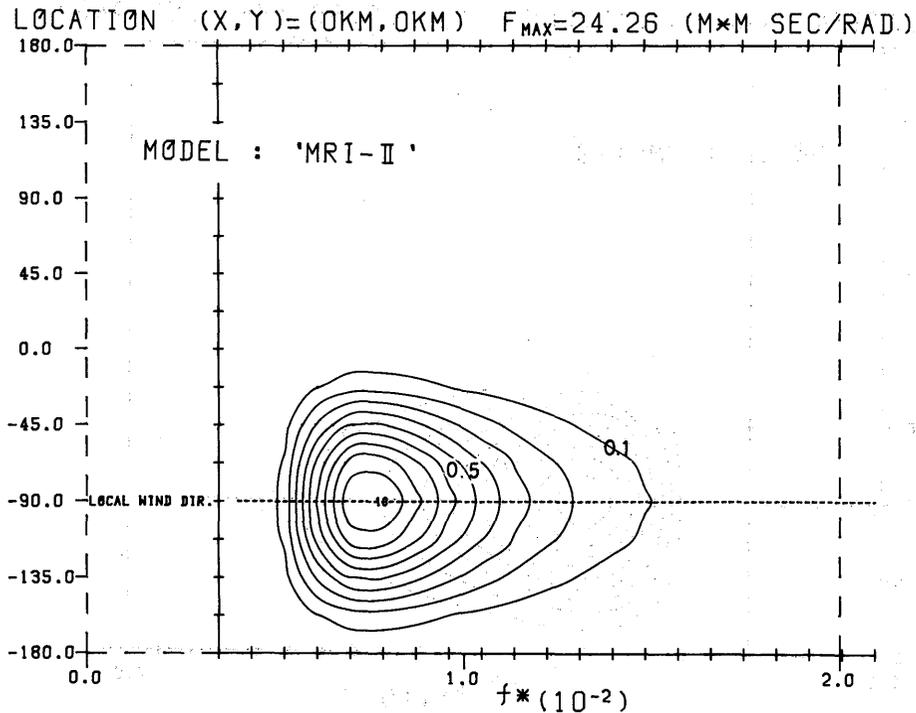
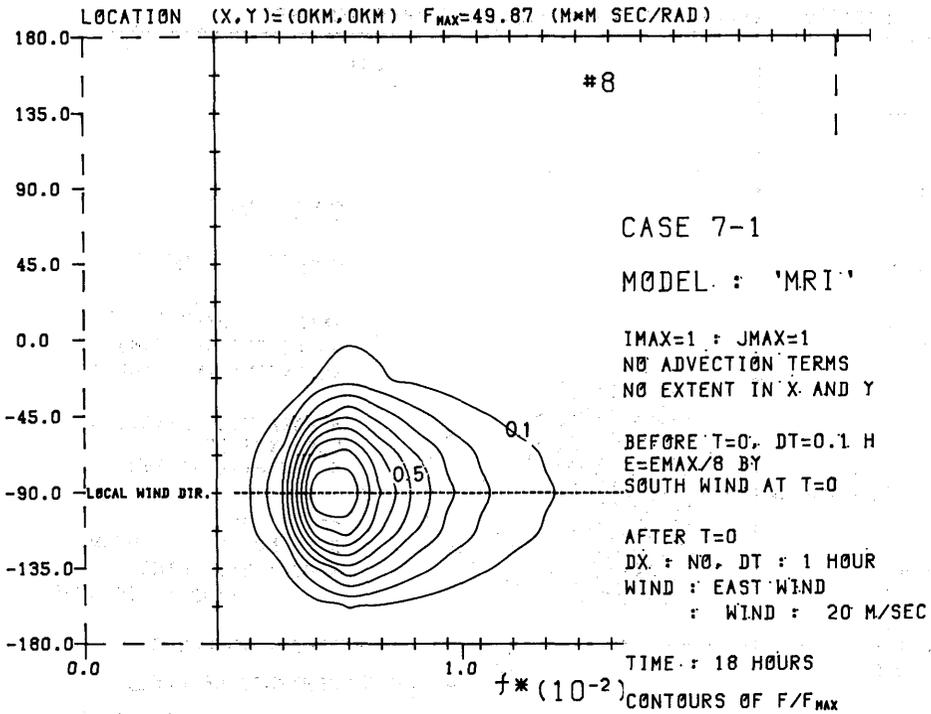


Fig. 76-0-58 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 18 hrs

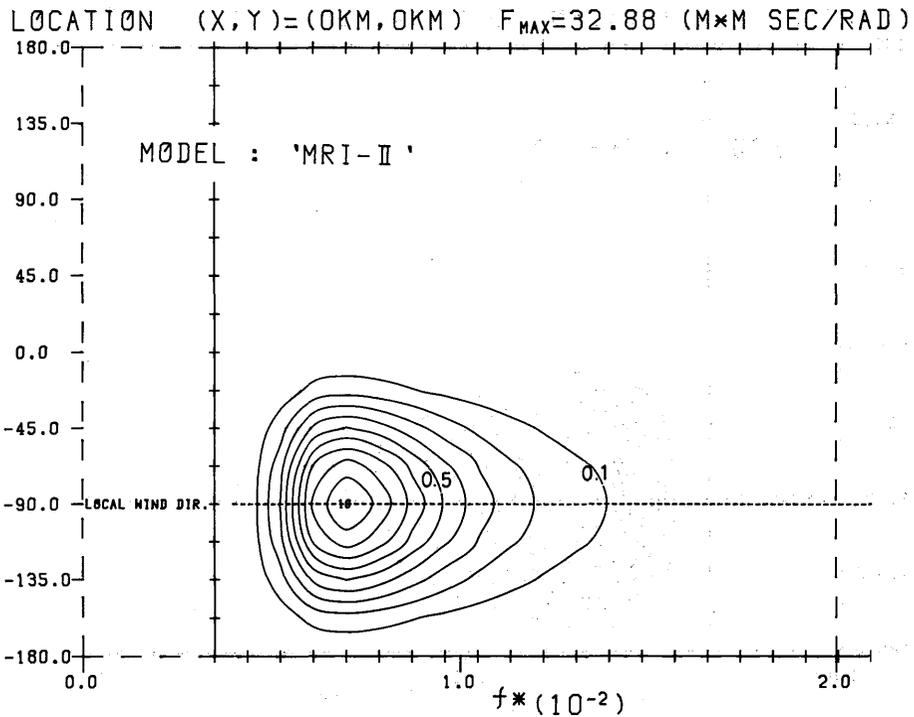
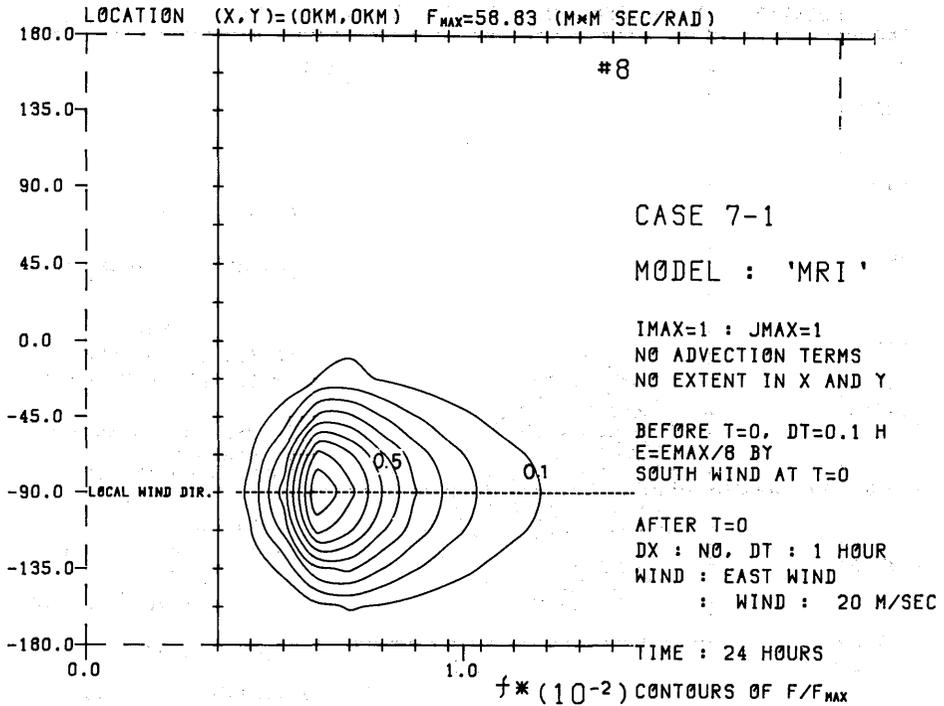


Fig. 77-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 24 hrs

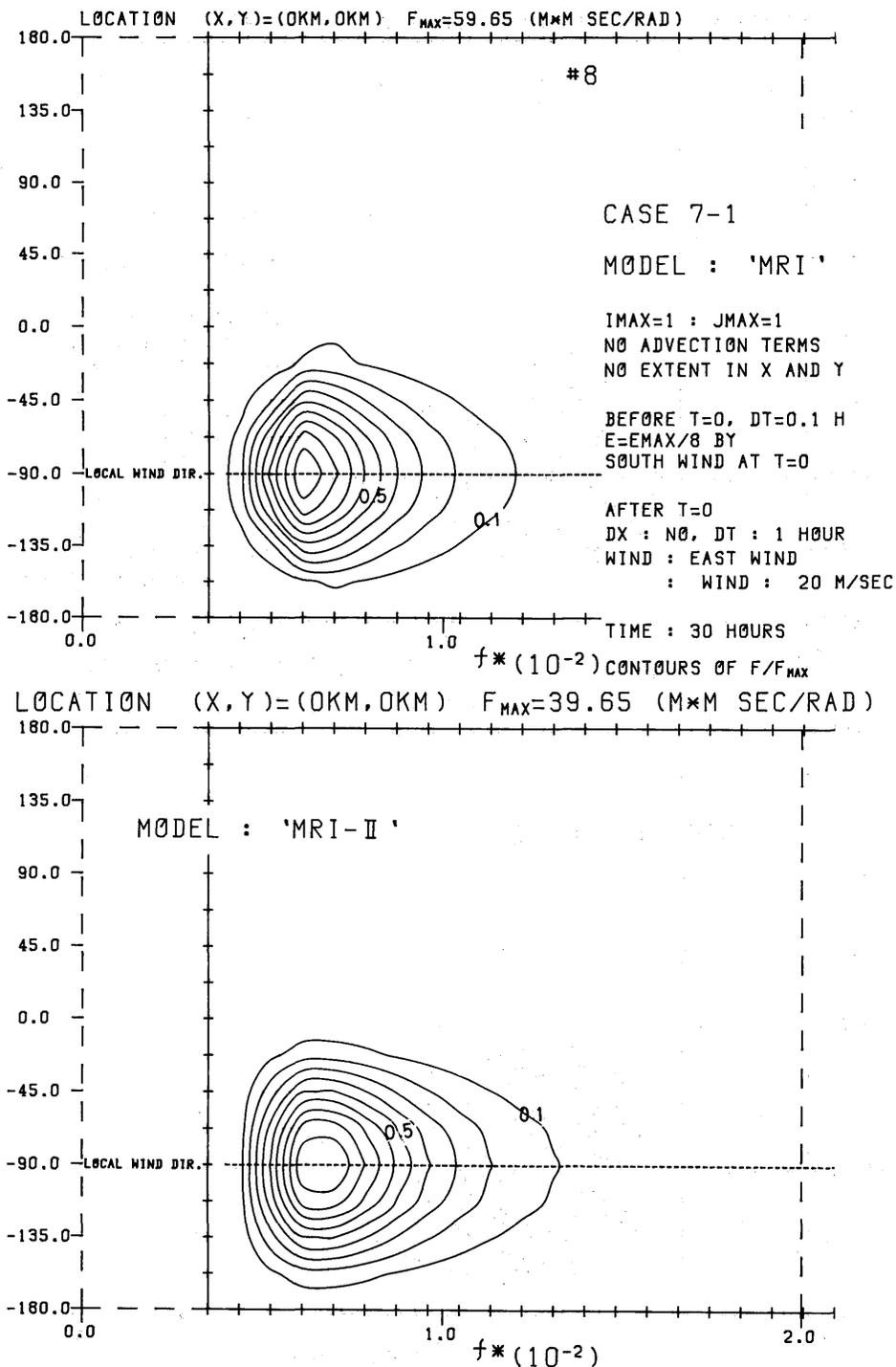


Fig. 78-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 30 hrs

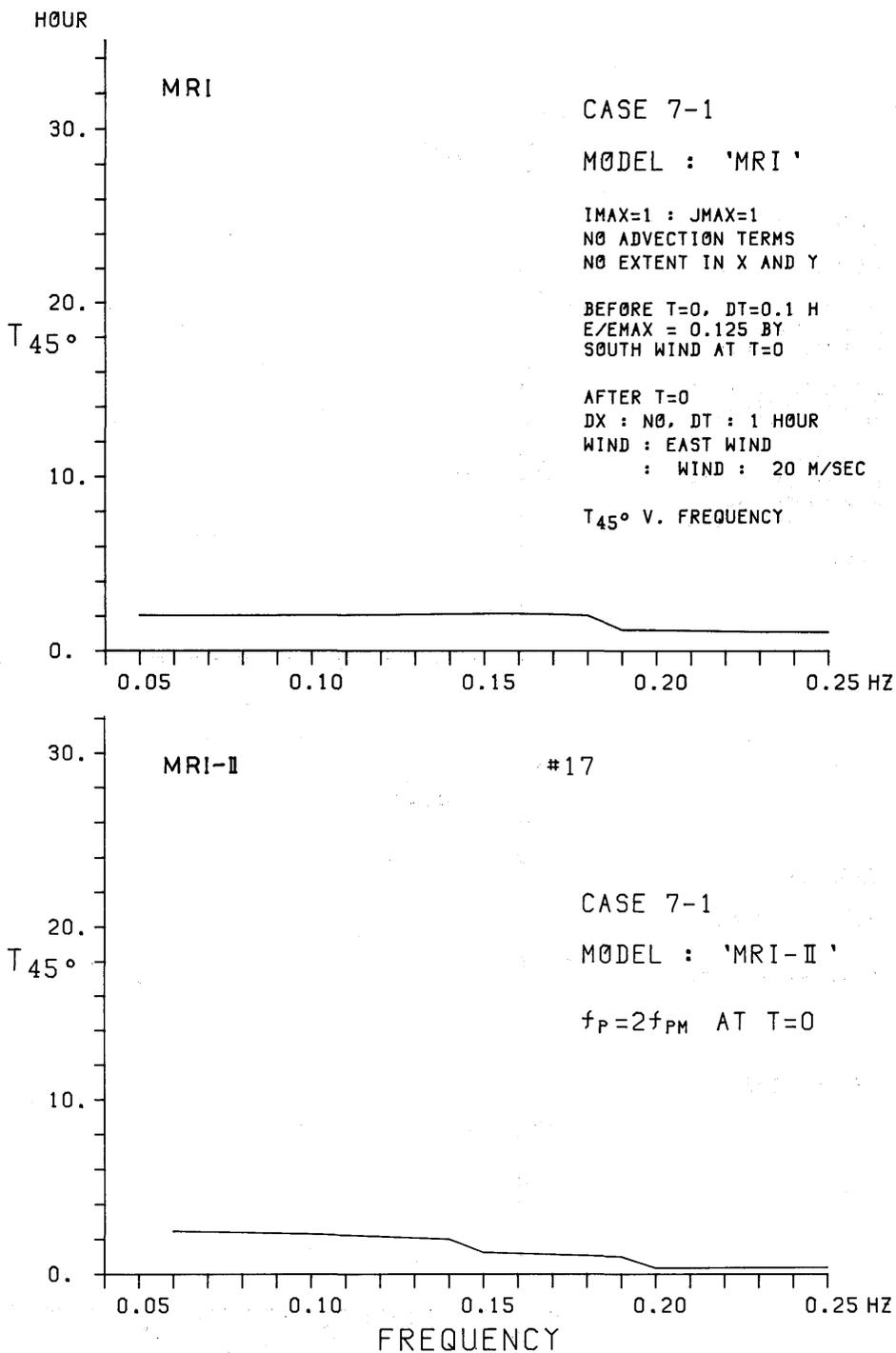


Fig. 79-0-0 T₄₅° vs. f

#2

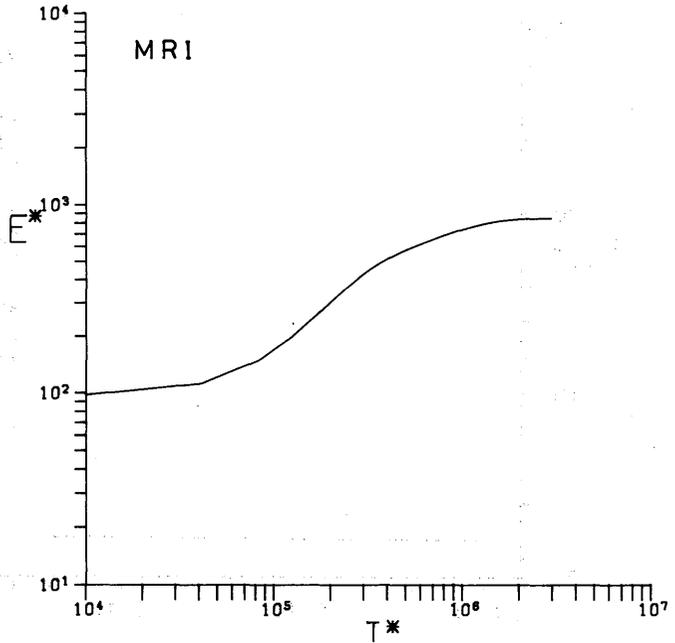
CASE 7-1
 MØDEL : 'MRI'

IMAX=1 : JMAX=1
 NO ADVECTION TERMS
 NO EXTENT IN X AND Y

BEFORE T=0, DT=0.1 H
 E/EMAX = 0.125 BY
 SOUTH WIND AT T=0

AFTER T=0
 DX : NO, DT : 1 HOUR
 WIND : EAST WIND
 : WIND : 20 M/SEC

E* VS TIME



#2

CASE 7-1
 MØDEL : 'MRI-II'

$f_P = 2f_{PM}$ AT T=0

E* VS TIME

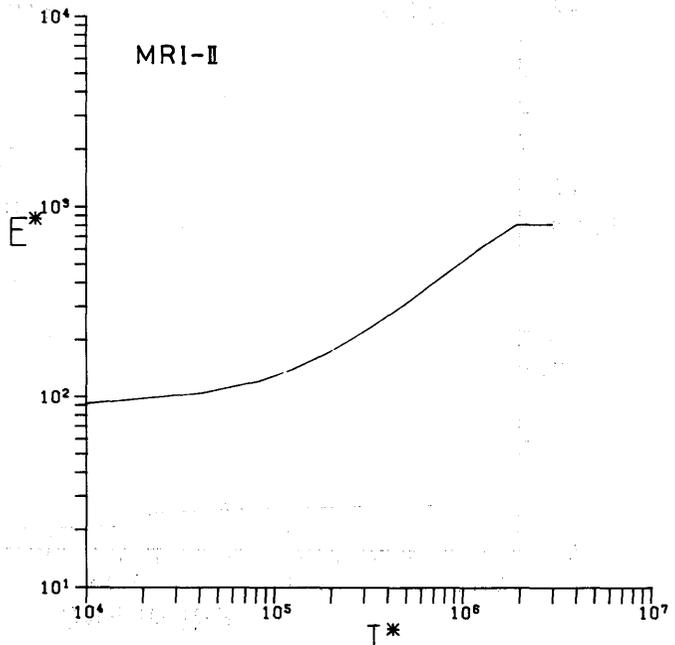


Fig. 80-0-0 E* vs. T*

#18

CASE 7-1

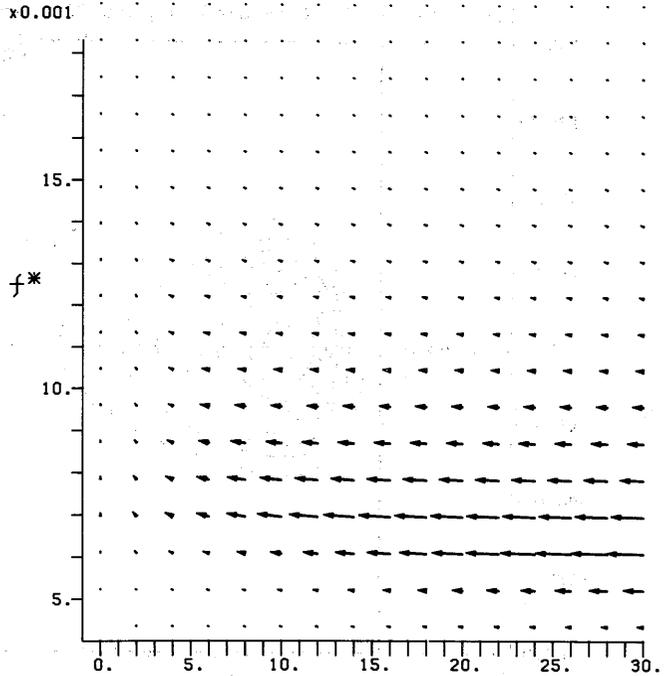
MODEL : 'MRI'

IMAX=1 : JMAX=1
 NO ADVECTION TERMS
 NO EXTENT IN X AND Y

BEFORE T=0, DT=0.1 H
 E/EMAX = 0.125 BY
 SOUTH WIND AT T=0

AFTER T=0
 DX : NO, DT : 1 HOUR
 WIND : EAST WIND
 : WIND : 20 M/SEC

CUSTER DIA. IN $f^* - T^*$



#18

CASE 7-1

MODEL : 'MRI-II'

$f_P = 2f_{PM}$ AT T=0

CUSTER DIA. IN $f^* - T^*$

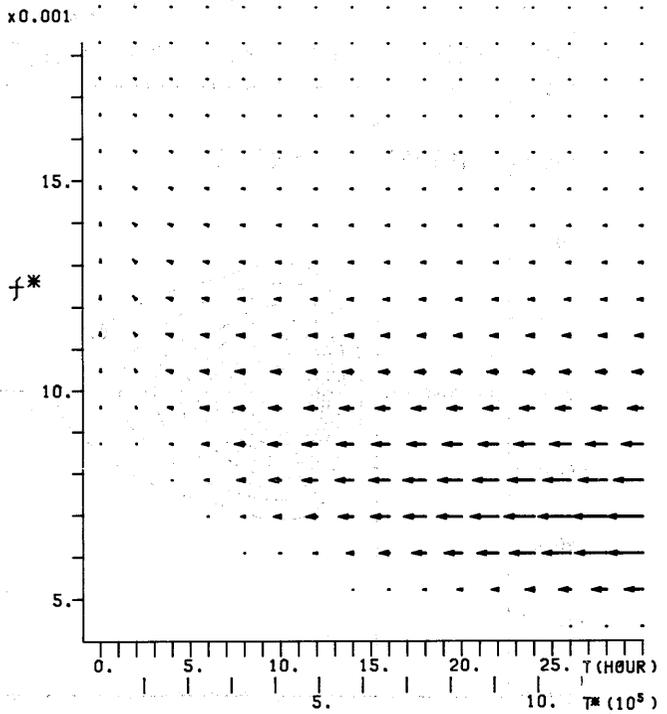


Fig. 81-0-0 custer diagram of $F(f)$ and $\bar{\theta}$ vs. T^* and f^*

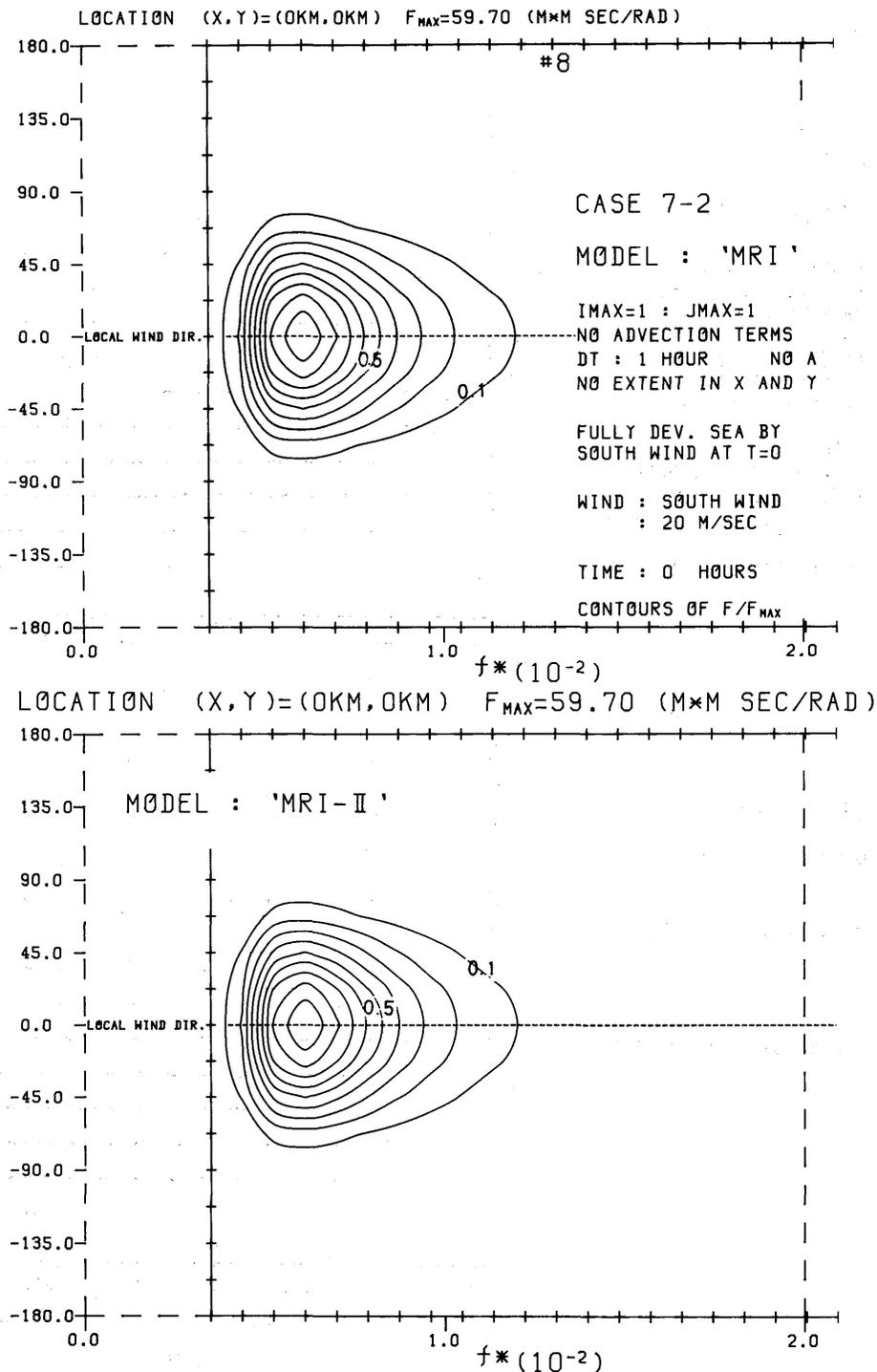


Fig. 82-0-59 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 0 hrs

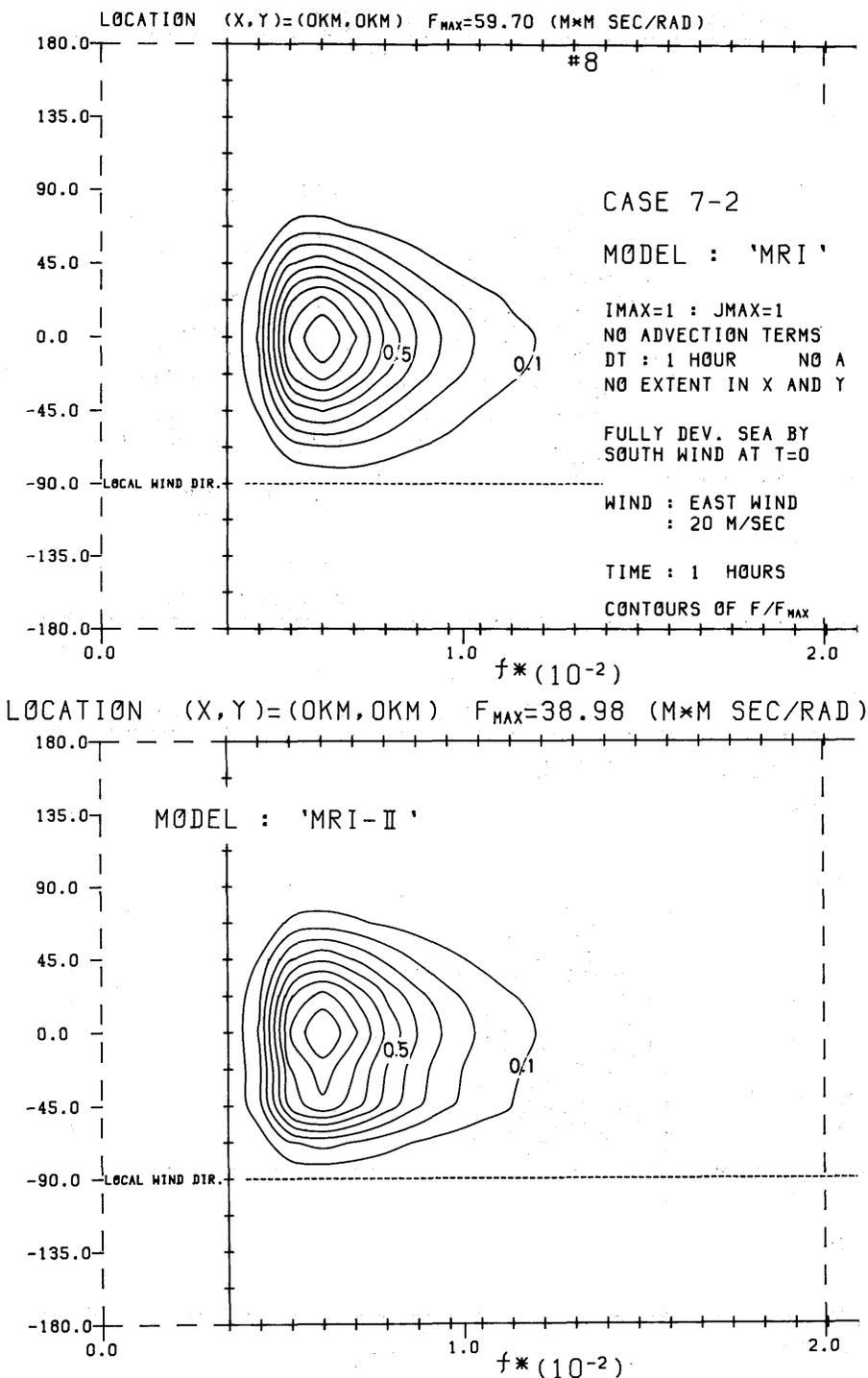


Fig. 83-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for 1 hrs

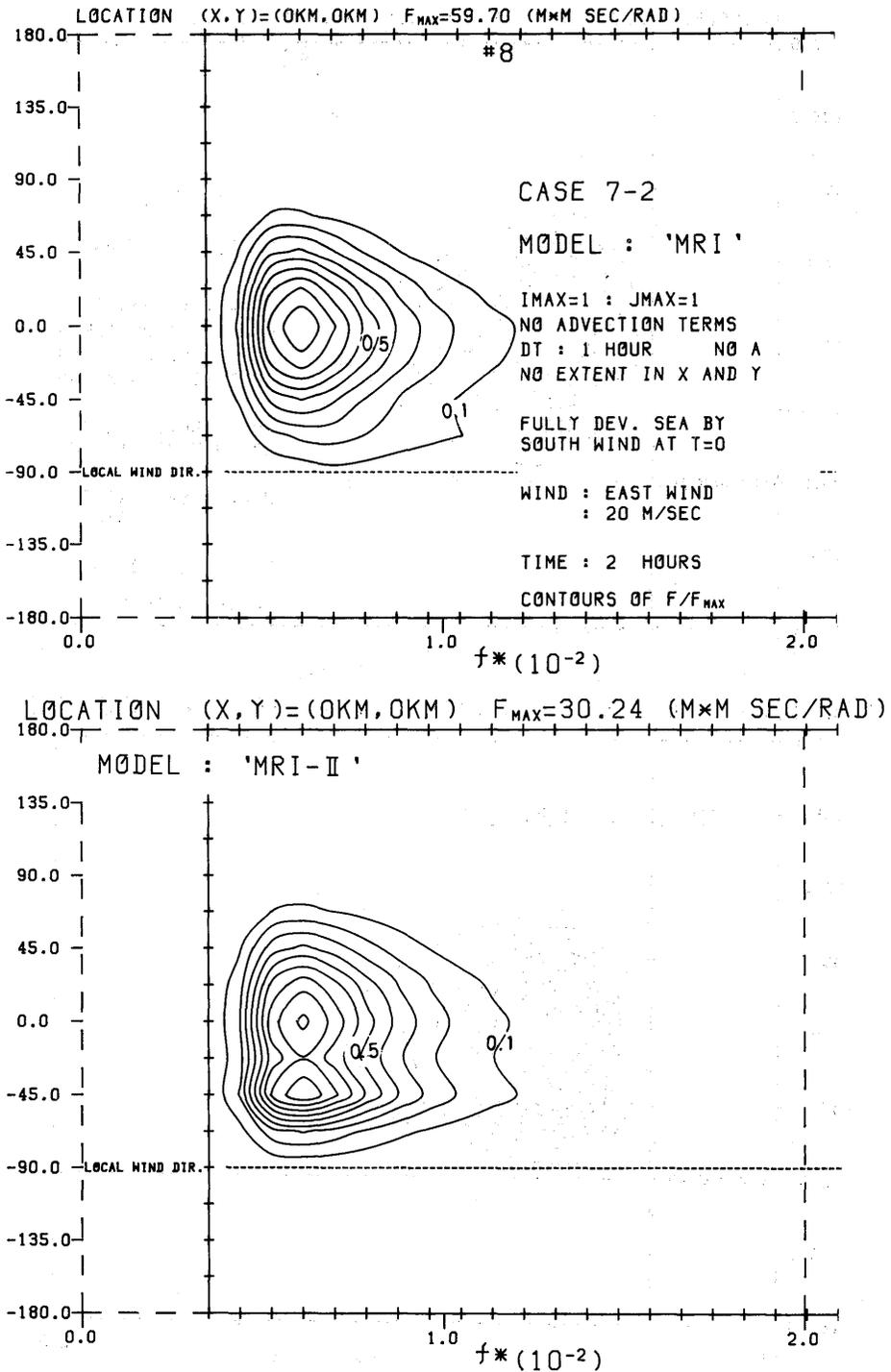


Fig. 84-0-60 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 2 hrs

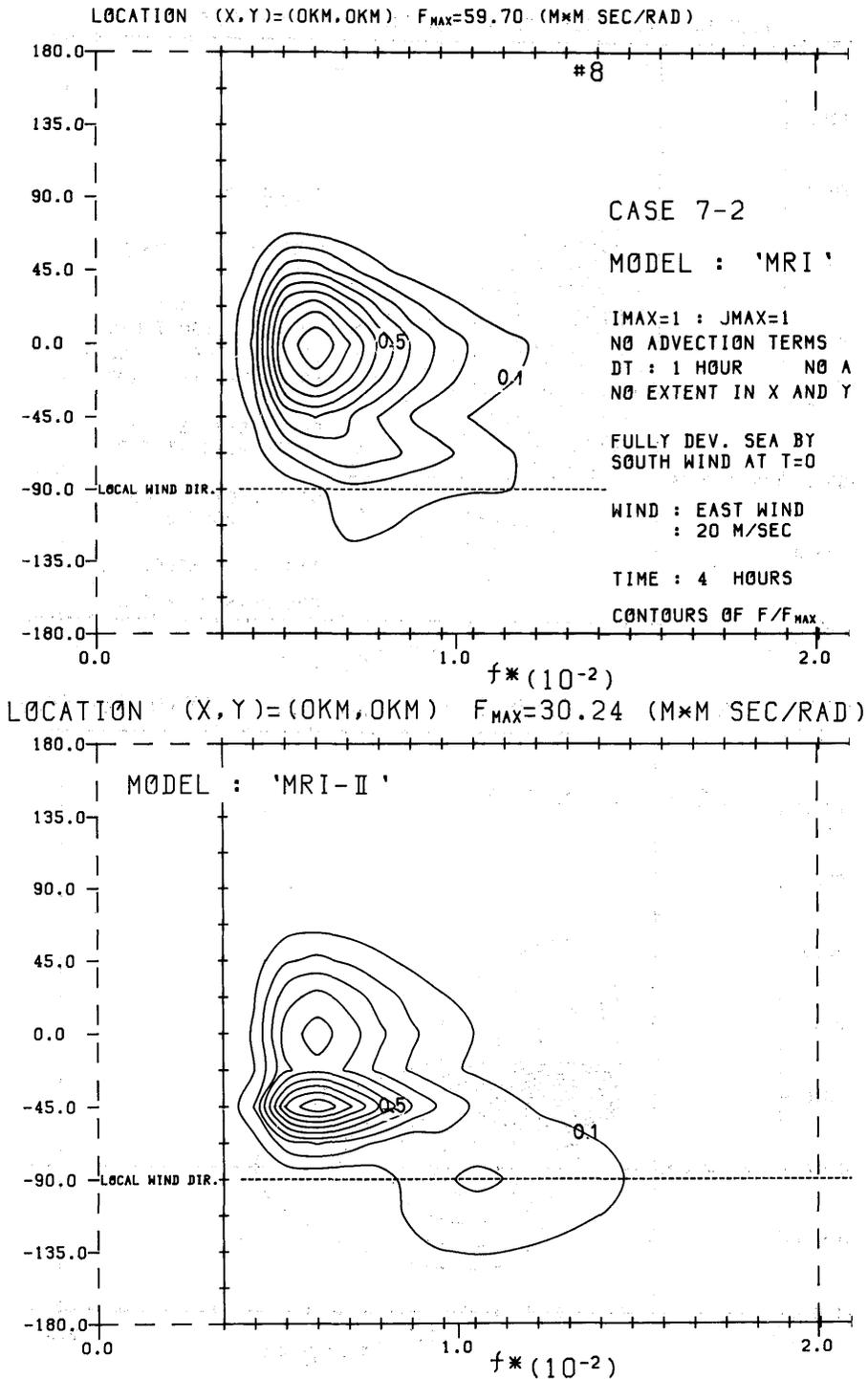


Fig. 85-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 4 hrs

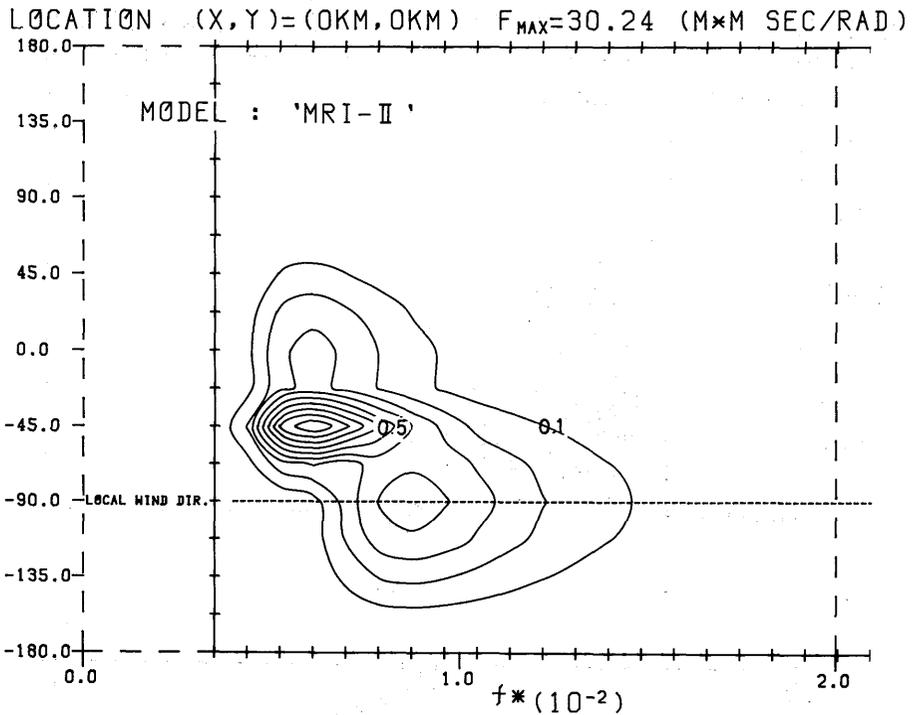
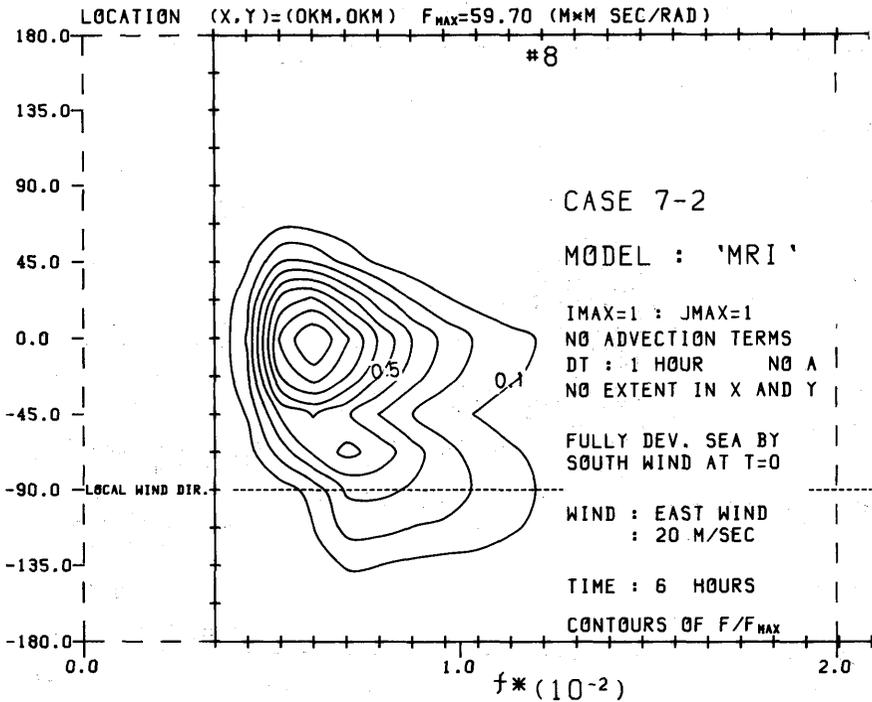


Fig. 86-0-61 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 6 hrs

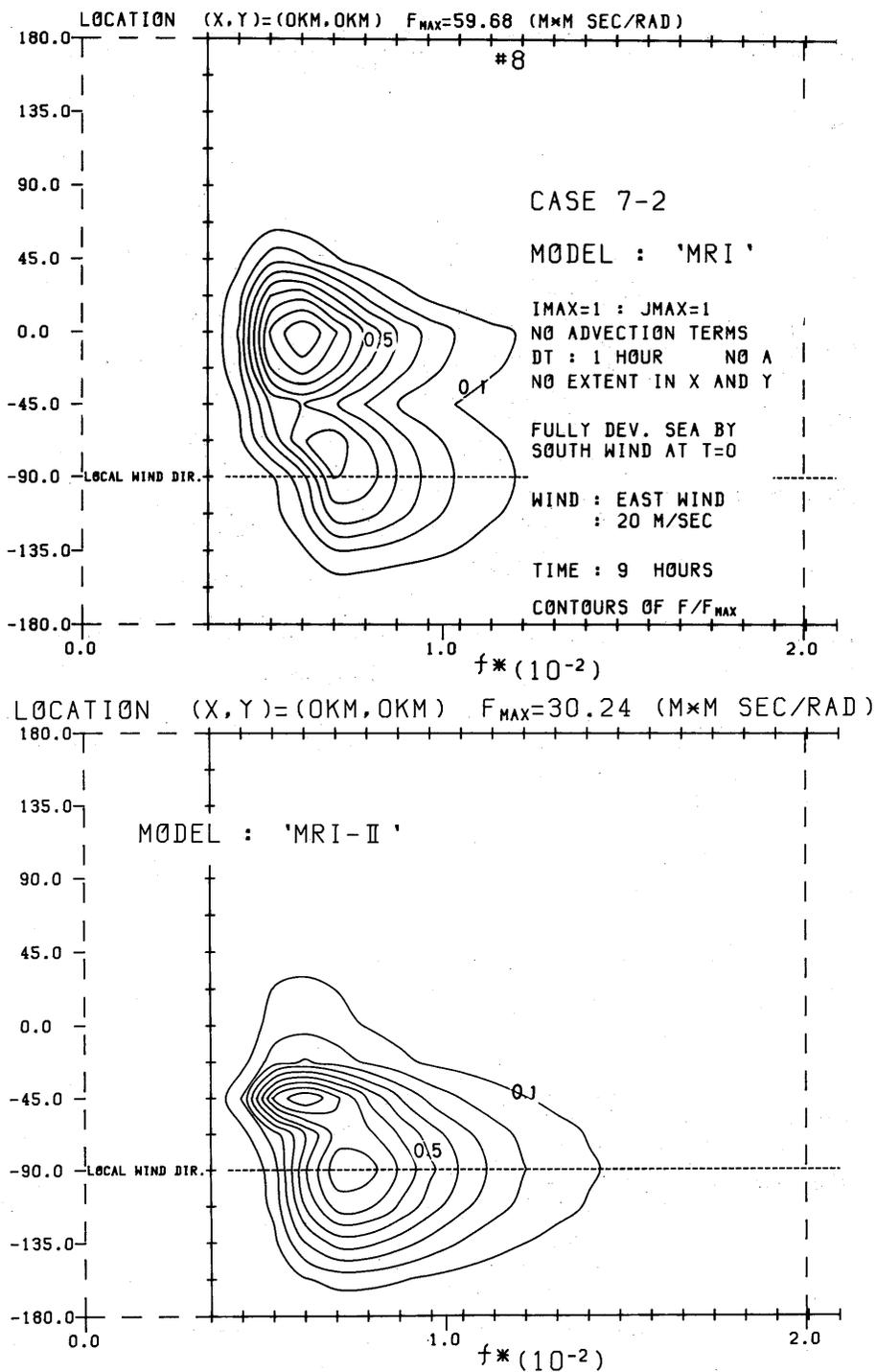


Fig. 87-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for 9 hrs

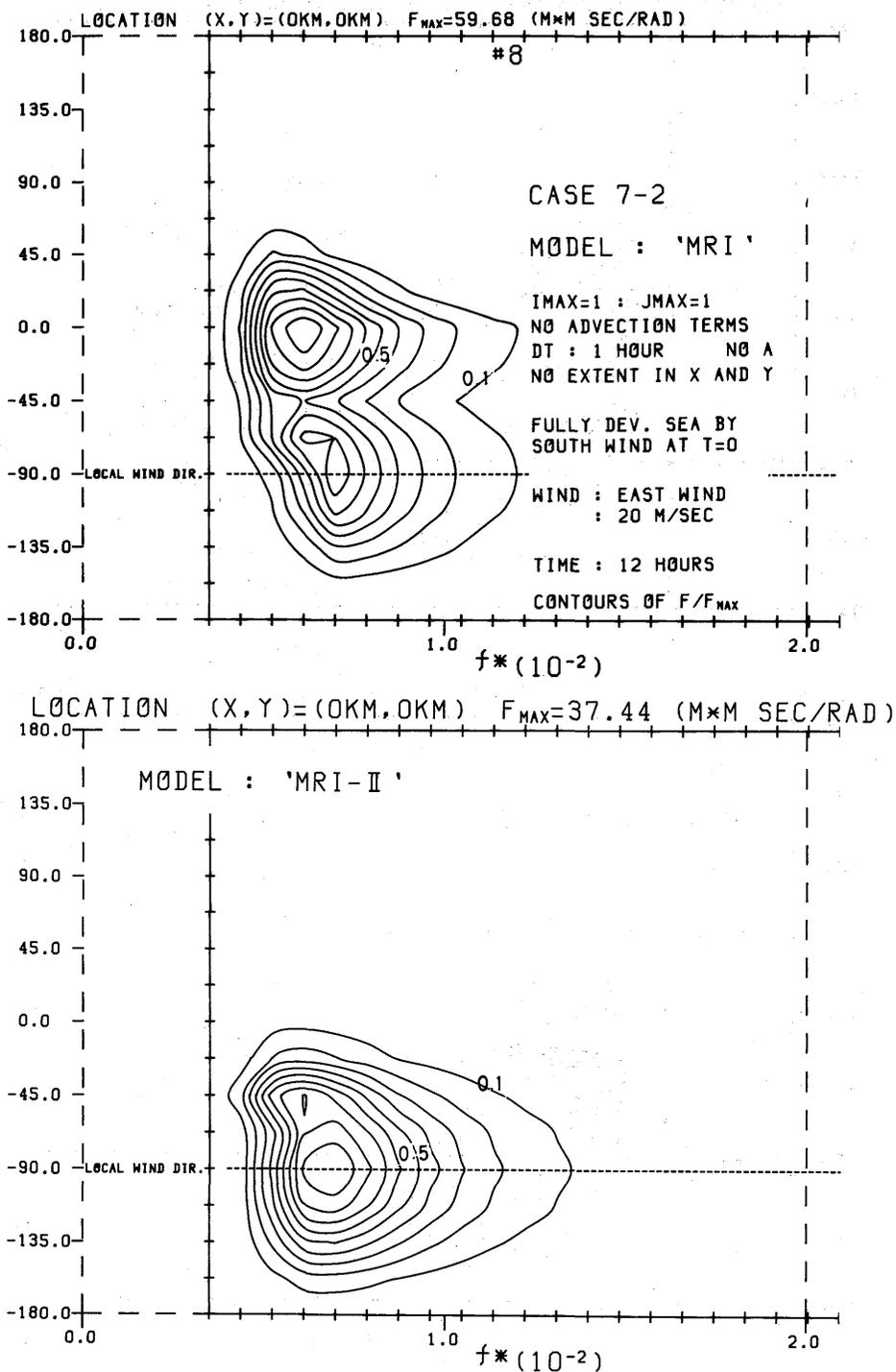


Fig. 88-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for 12 hrs

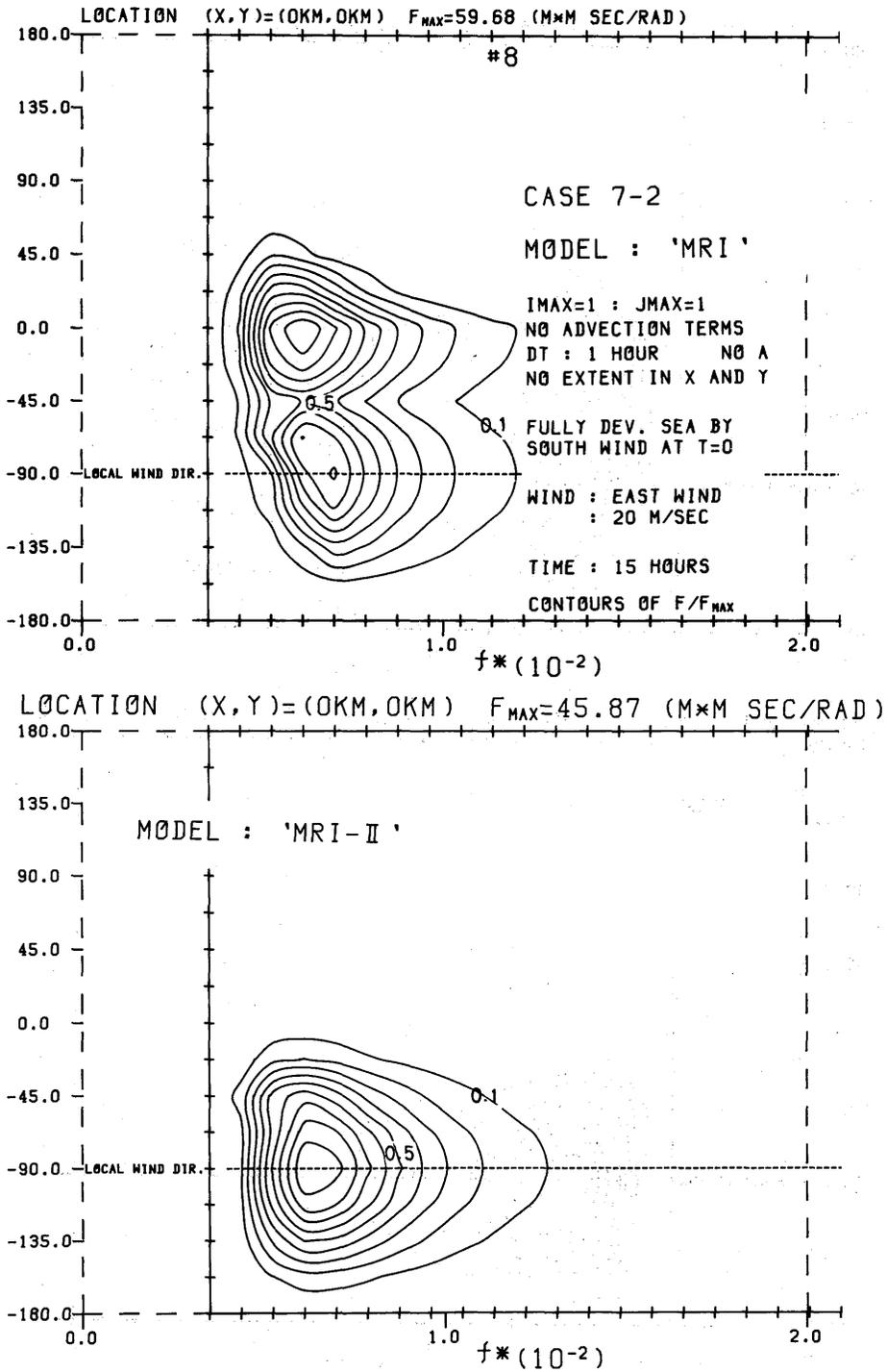


Fig. 89-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 15 hrs

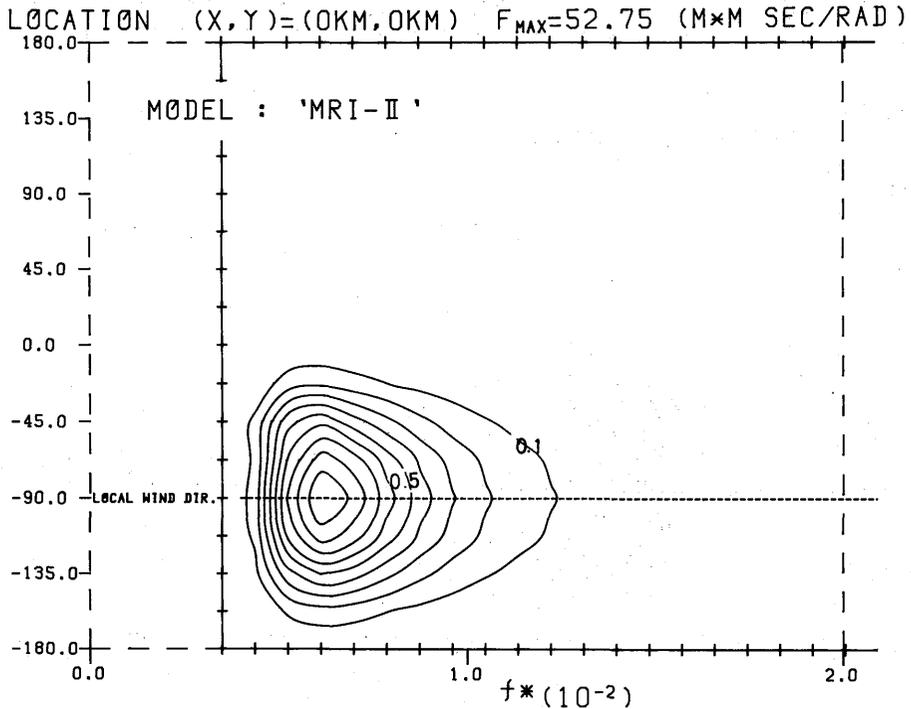
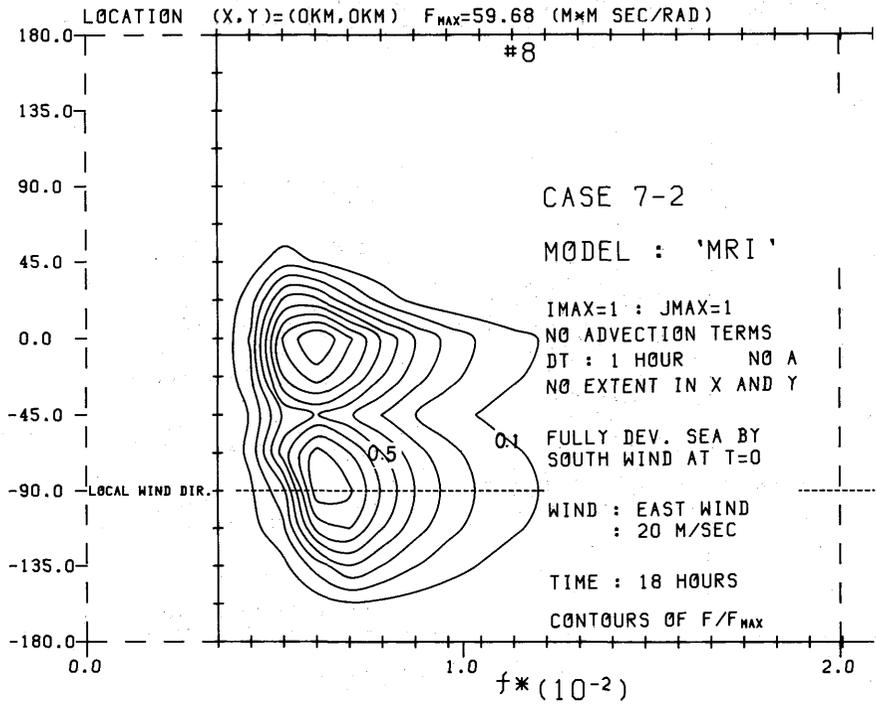


Fig. 90-0-62 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 18 hrs

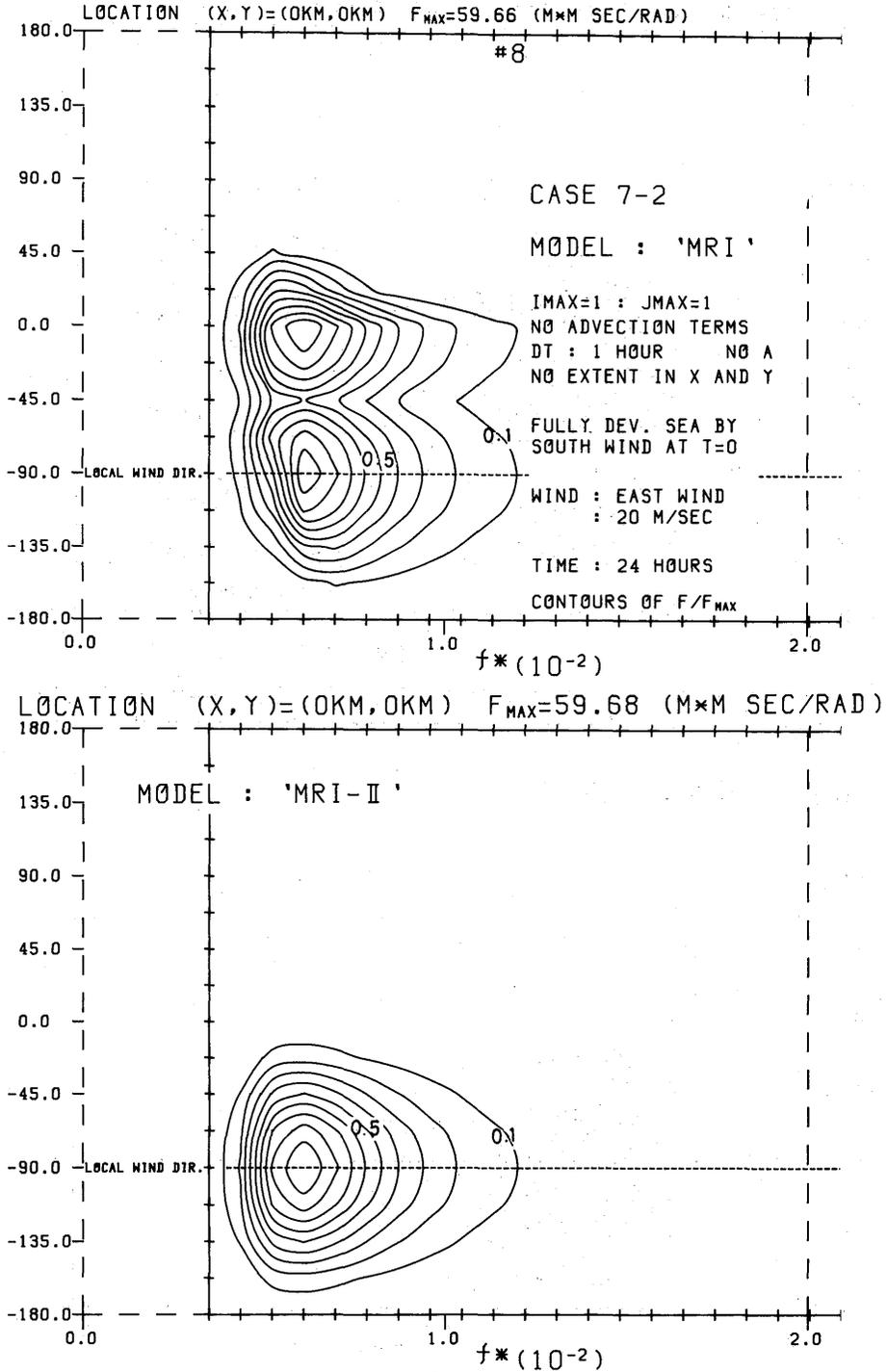


Fig. 91-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 24 hrs

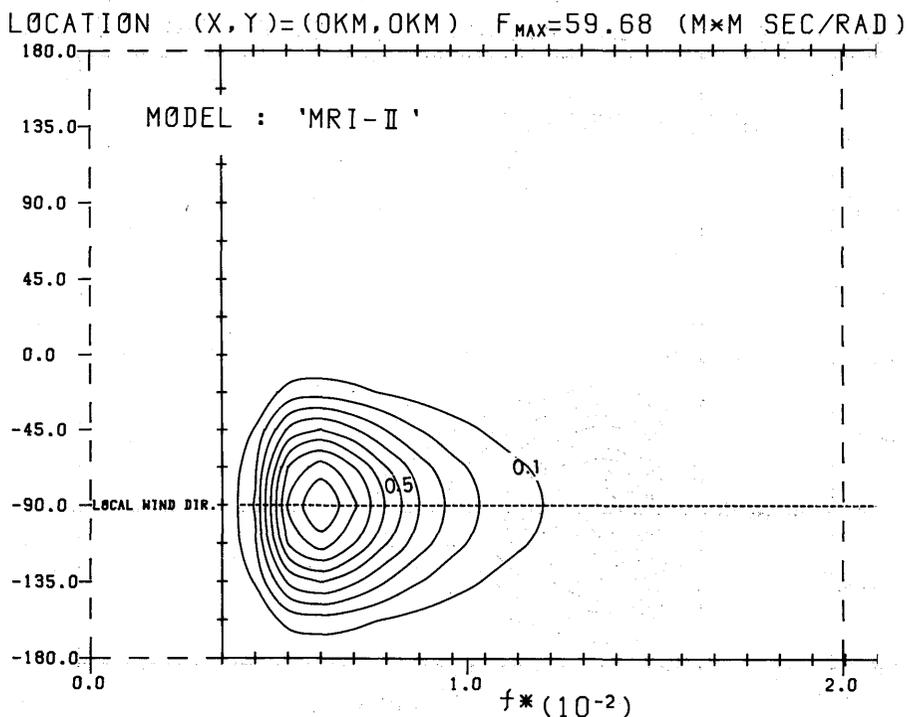
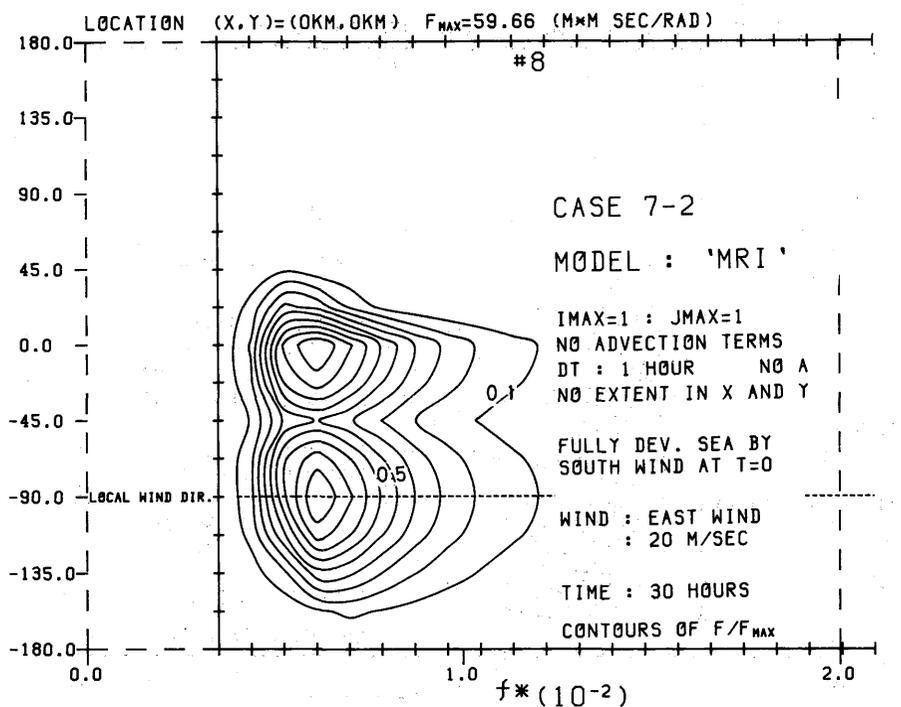


Fig. 92-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for 30 hrs

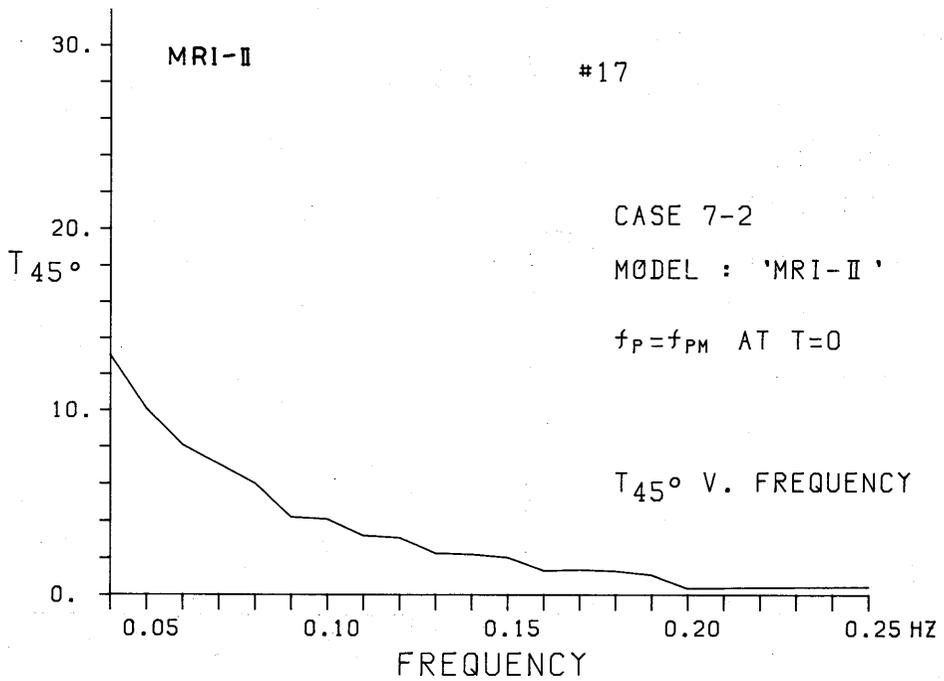
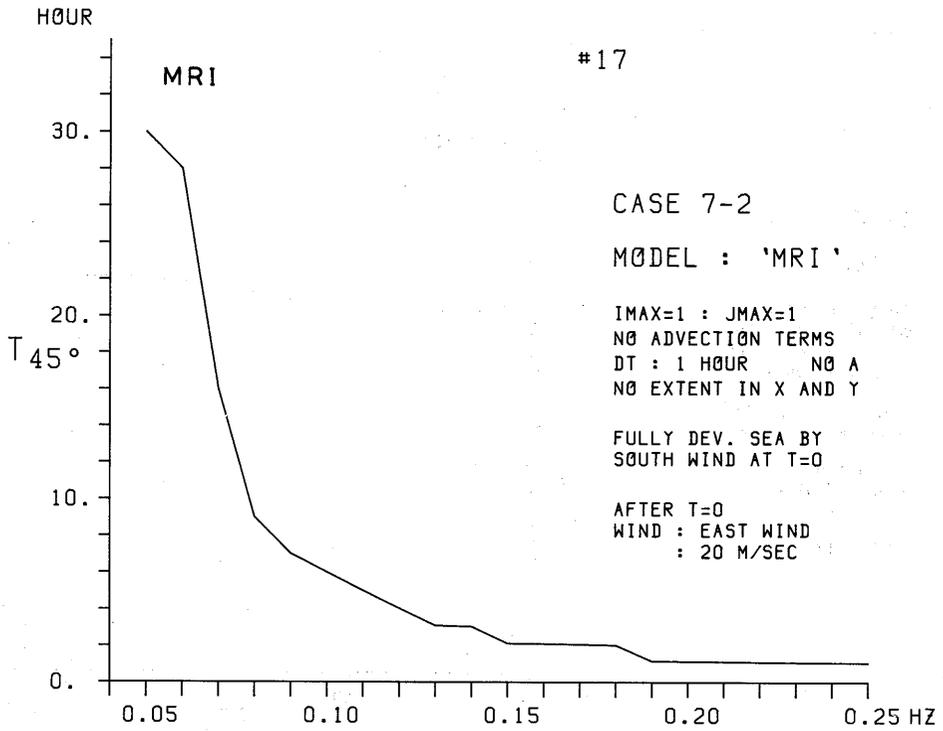


Fig. 93-0-0 T_{45° vs. f

#2

CASE 7-2

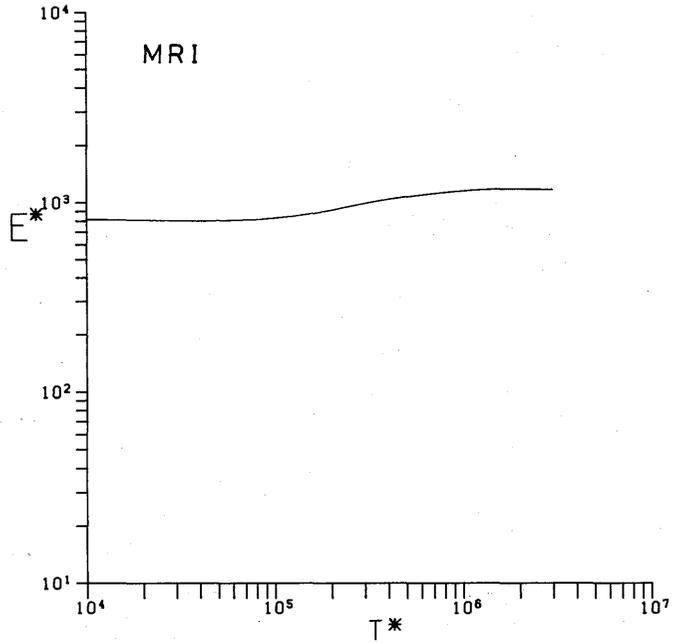
MODEL : 'MRI'

IMAX=1 : JMAX=1
 NO ADVECTION TERMS
 DT : 1 HOUR NO A
 NO EXTENT IN X AND Y

FULLY DEV. SEA BY
 SOUTH WIND AT T=0

AFTER T=0
 WIND : EAST WIND
 : 20 M/SEC

E* VS TIME



#2

CASE 7-2

MODEL : 'MRI-II'

$f_P = f_{PM}$ AT T=0

E* VS TIME

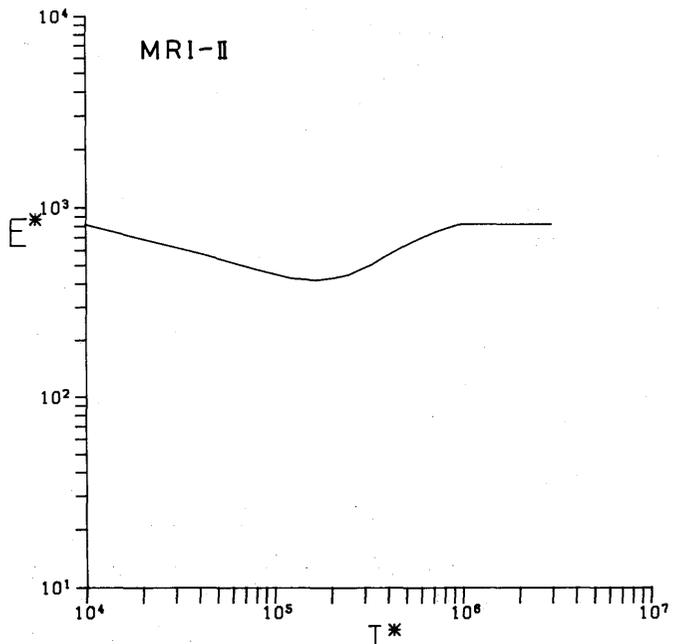


Fig. 94-0-0 E* vs. T*

#18

CASE 7-2

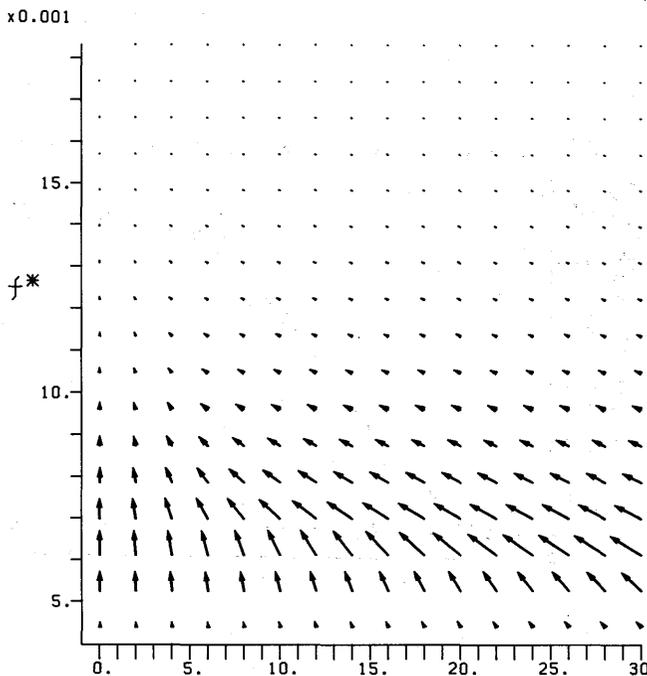
MODEL : 'MRI'

IMAX=1 : JMAX=1
 NO ADVECTION TERMS
 DT : 1 HOUR NO A
 NO EXTENT IN X AND Y

FULLY DEV. SEA BY
 SOUTH WIND AT T=0

AFTER T=0
 WIND : EAST WIND
 : 20 M/SEC

CUSTER DIA. IN f^* - T *



#18

CASE 7-2

MODEL : 'MRI-II'

$f_P = f_{PM}$ AT T=0

CUSTER DIA. IN f^* - T *

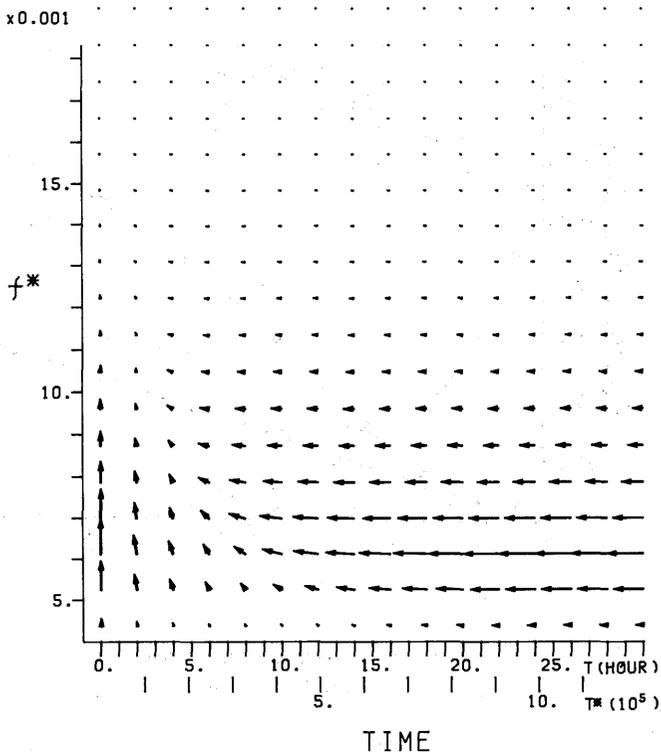


Fig. 95-0-0 custerdiagram of $F(f)$ and $\bar{\theta}$ vs. T^* and f^*

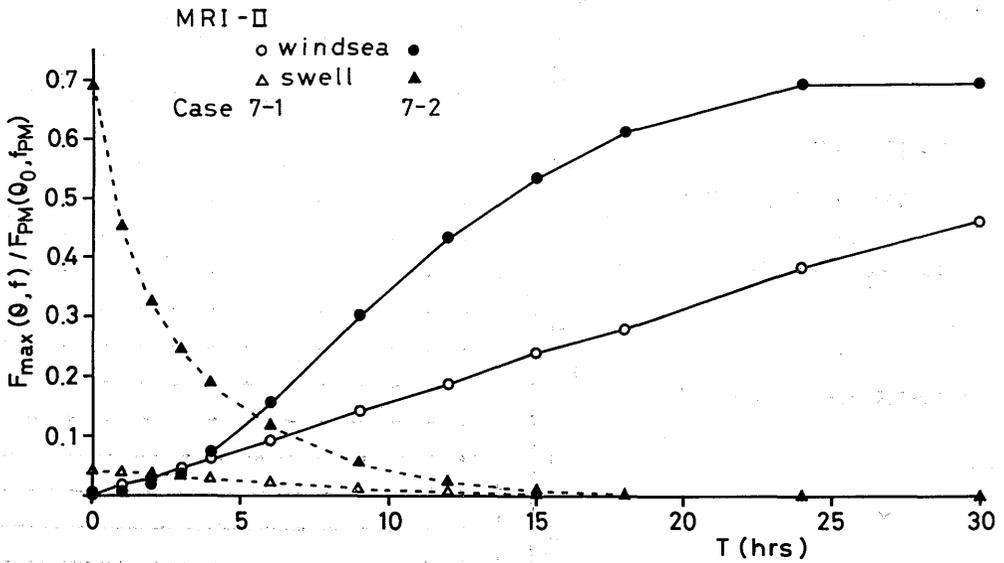
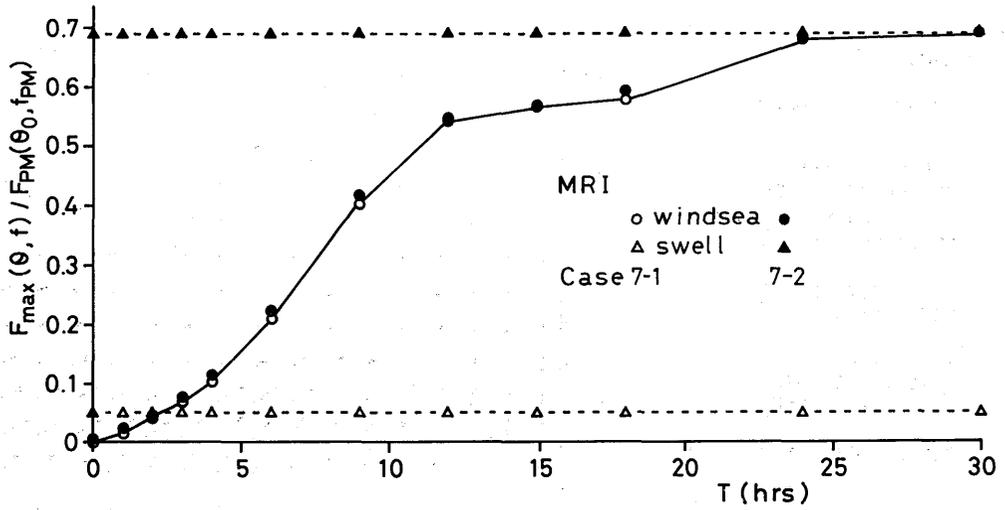


Fig. 96-10.11-0 peak spectral densities $F_{\max}(f, \theta) / F_{PM}(f_{PM}, \theta_w)$ for windsea and swell vs. time

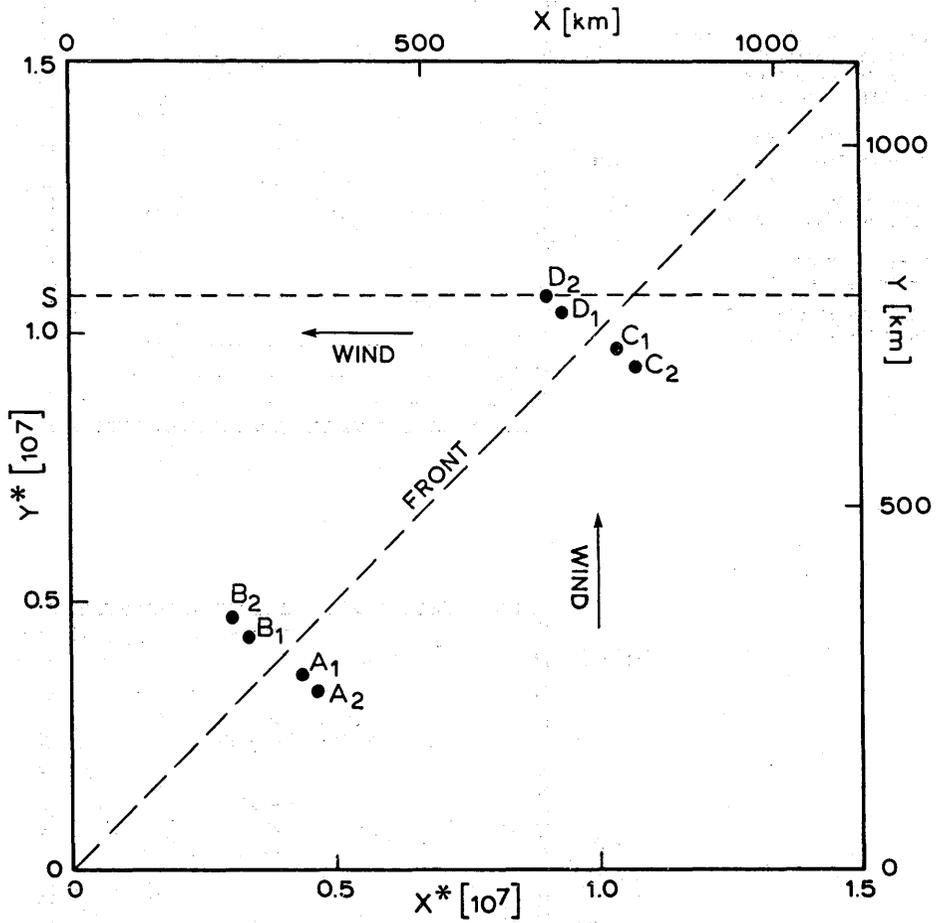


Fig. 97-11.1-0 wind field geometry for the diagonal front Case V

#9

1.5 -

CASE 5

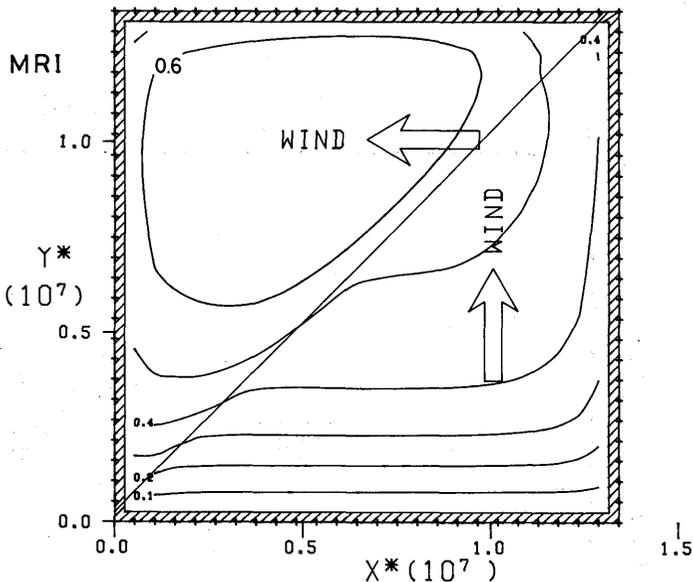
DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTH
 BELOW THE FRONT EAST

ABOVE THE FRONT
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

CONTOURS OF SCALED E
 ON INTERVAL 0.1



1.5 -

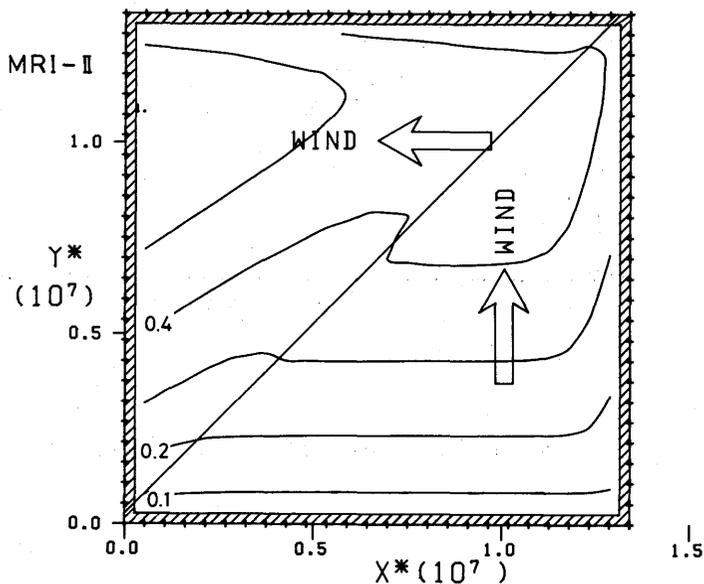


Fig. 98-0-26 contours of E/E_{PM} vs. X^* and Y^*

#10

1.5 -

CASE 5

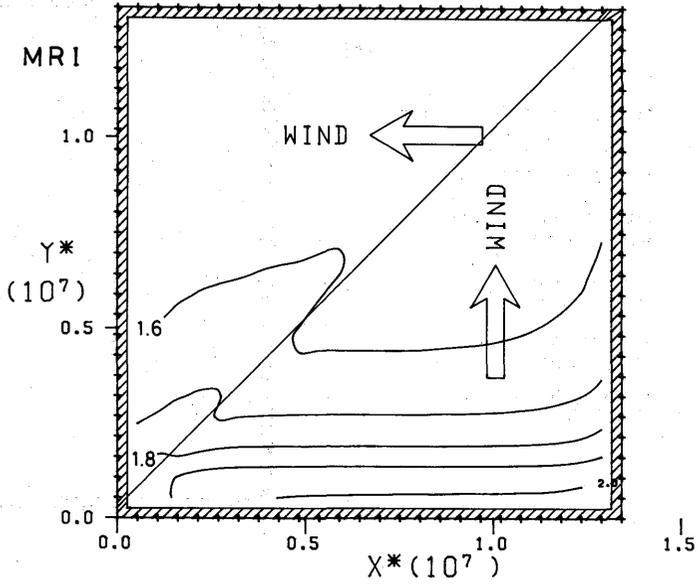
DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTH
 BELOW THE FRONT EAST

ABOVE THE FRONT WEST
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

CONTOURS OF \bar{f}/f_{PM}
 ON INTERVAL 0.1 FOR
 RANGE 1 TO 2, 0.5 FOR >2



1.5 -

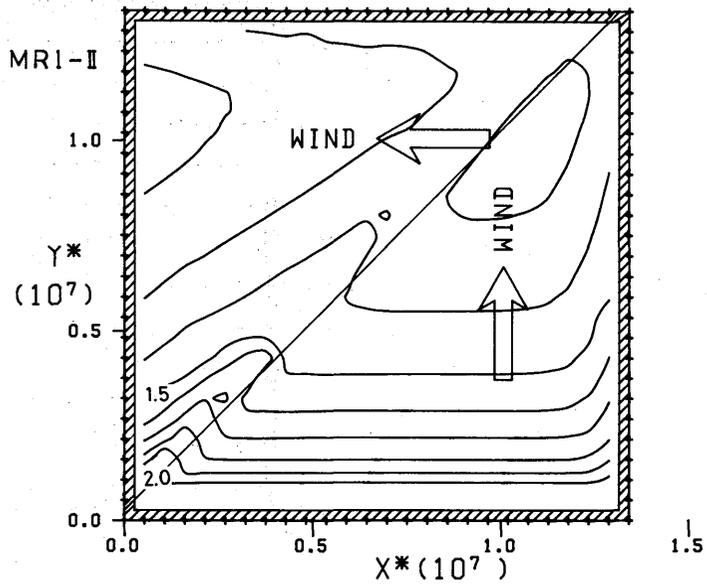


Fig. 99-0-27 contours of \bar{f}/f_{PM} vs. X^* and Y^*

#11

1.5 -

CASE 5

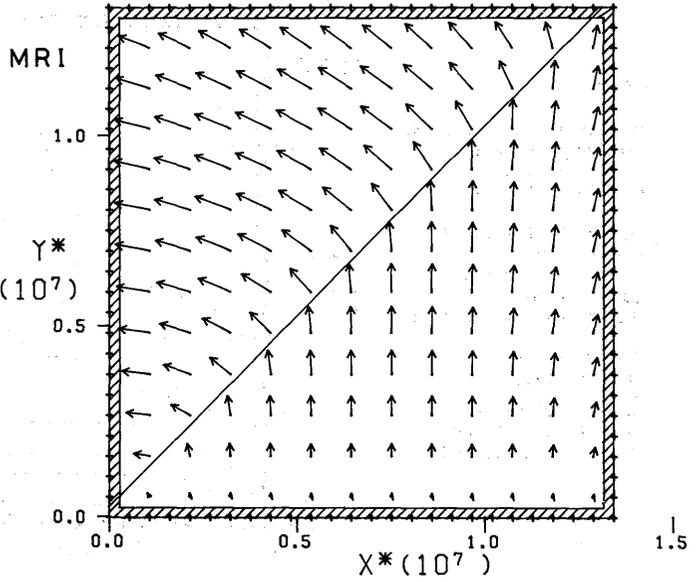
DX : 40 KM, DT : 1.0 HOUR
 IMAX=26 : JMAX=26
 X EXTENT:0-1000 KM
 Y EXTENT:0-1000 KM

DIR. OF WIND : SOUTH
 BELOW THE FRONT EAST

ABOVE THE FRONT
 VEL. OF WIND : 20 M/SEC

TIME 72 HOURS
 T* IS 2972764.

ARROW LENGTH : E/E_{PM}
 DIRECTION= θ



1.5 -

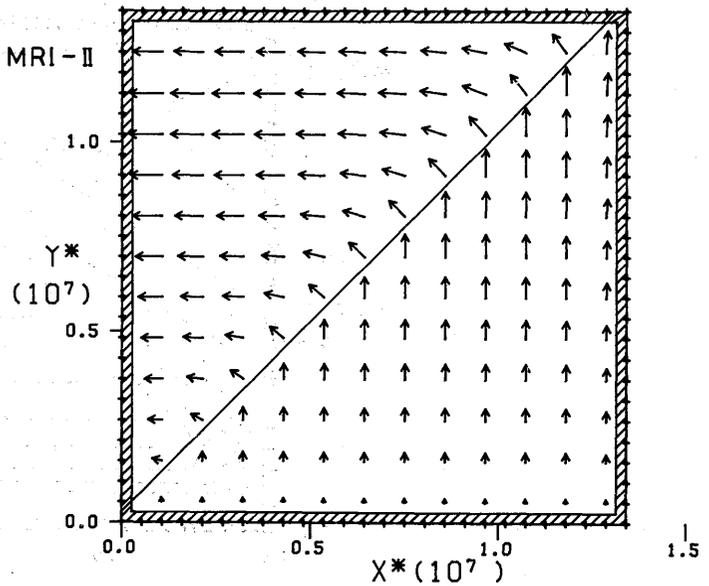


Fig.100-0-28 custer diagram of E/E_{PM} and $\bar{\theta}$ vs. X^* and Y^*

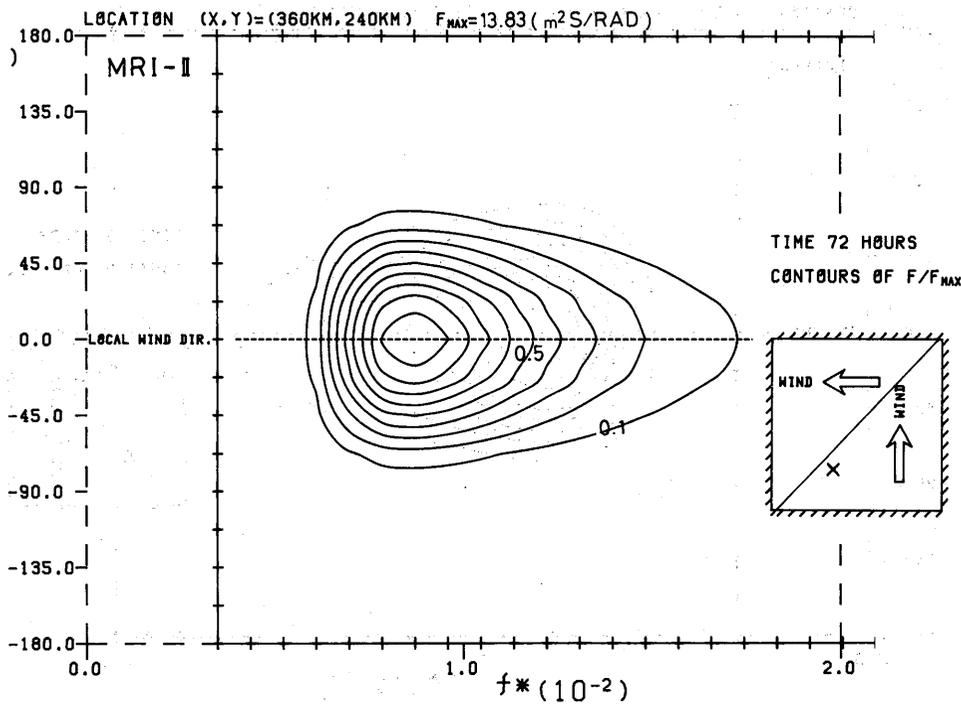
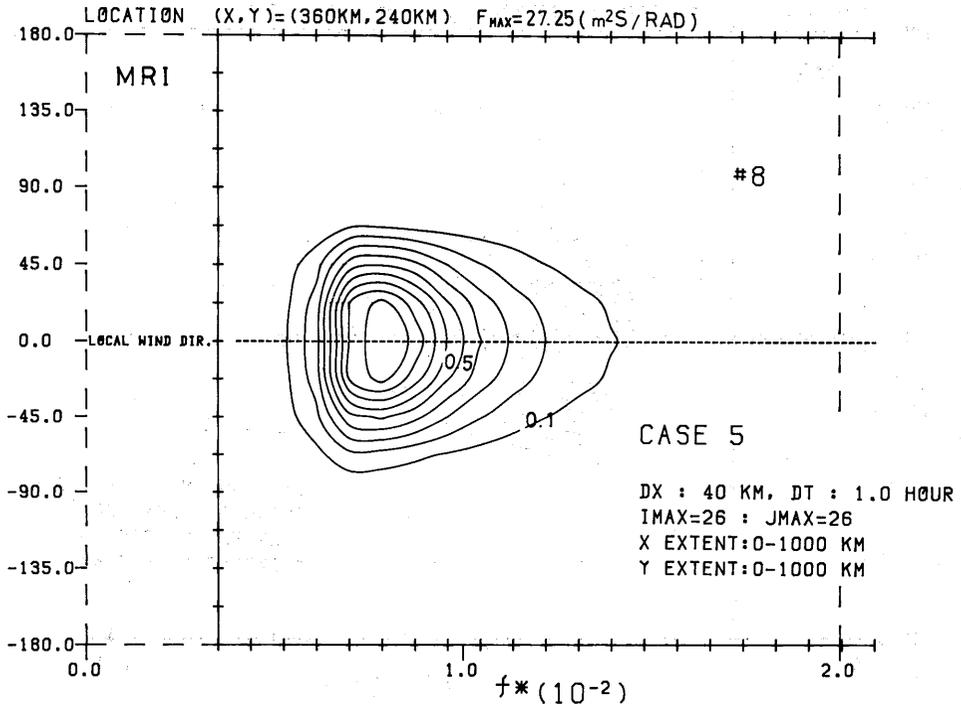


Fig. 101-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (360,240)

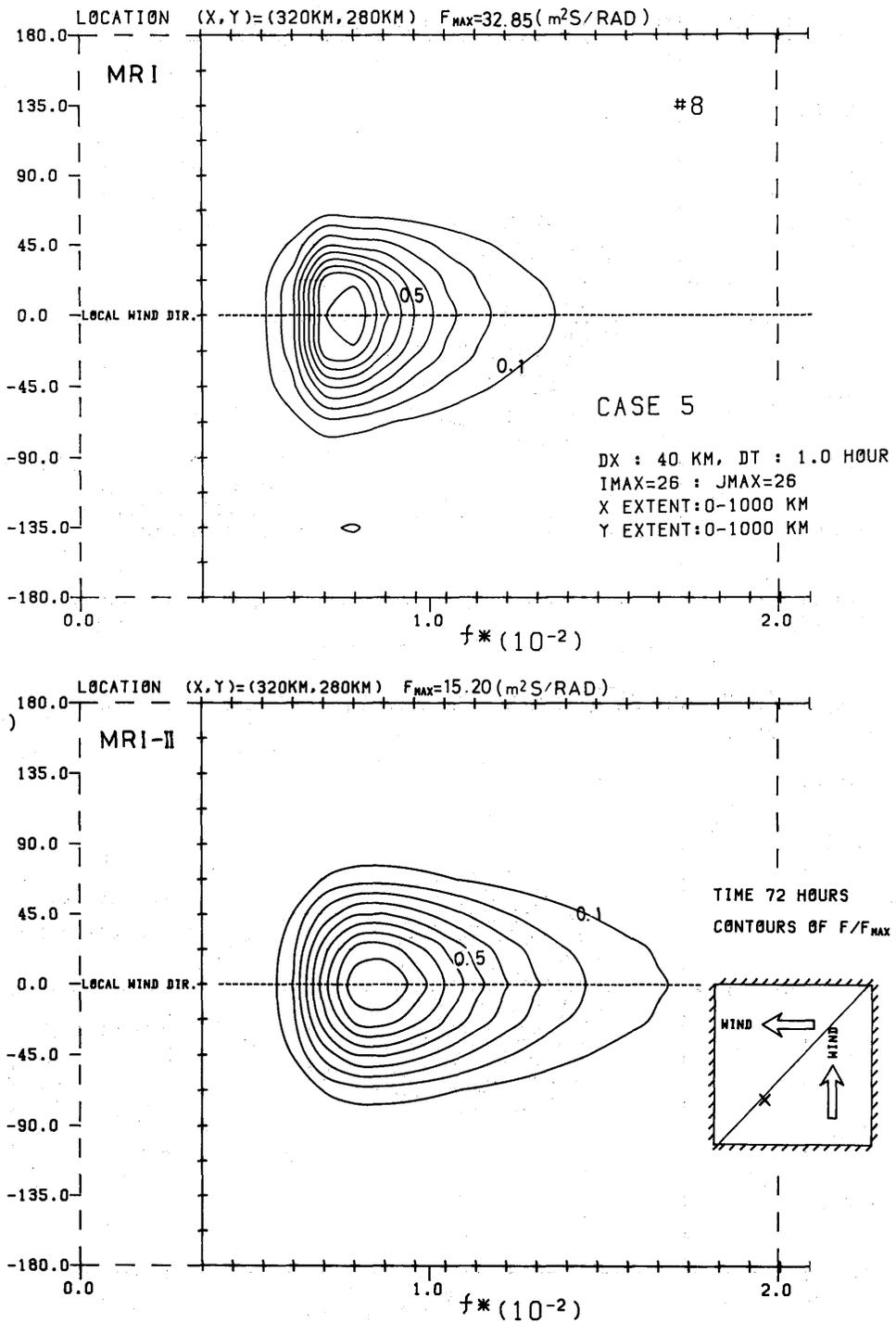


Fig. 102-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (320, 280)

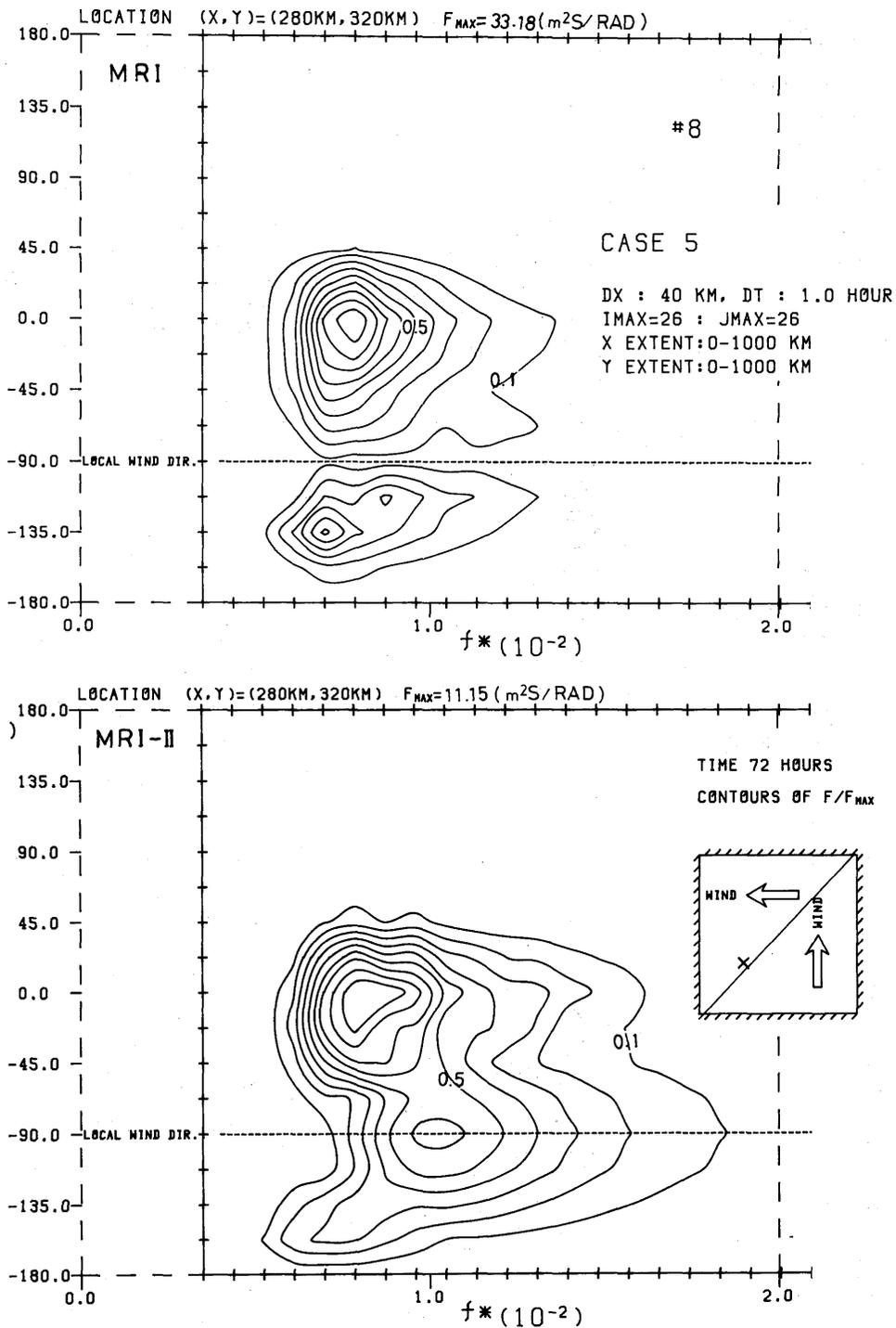


Fig. 103-0-30 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (280,320)

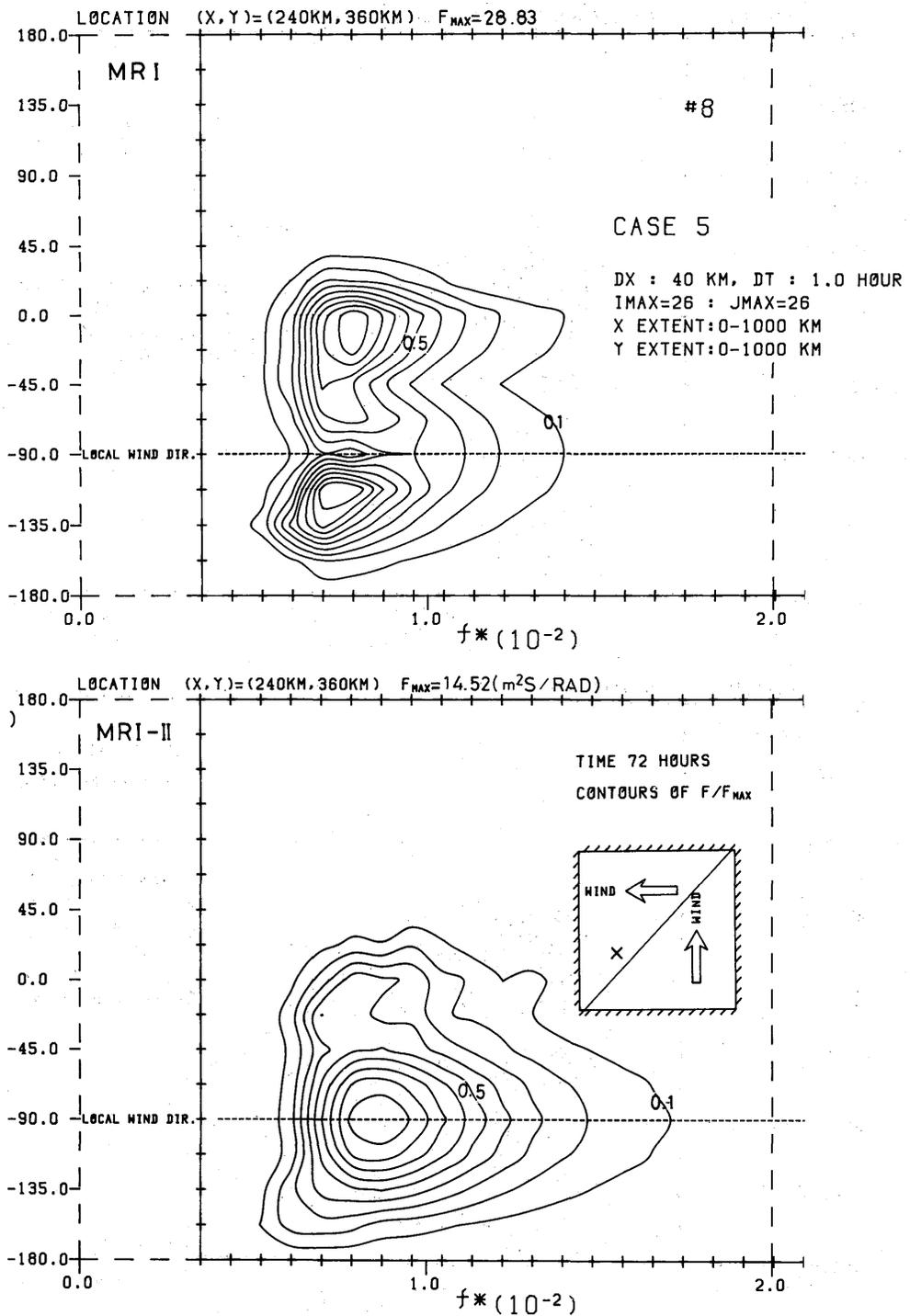


Fig. 104-0-31 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (240, 360)

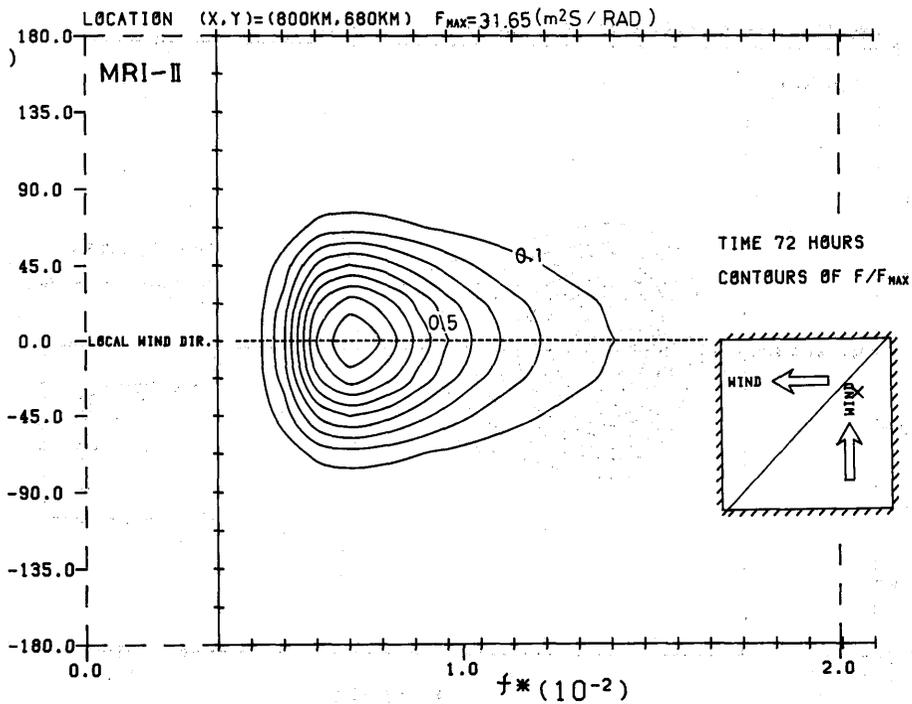
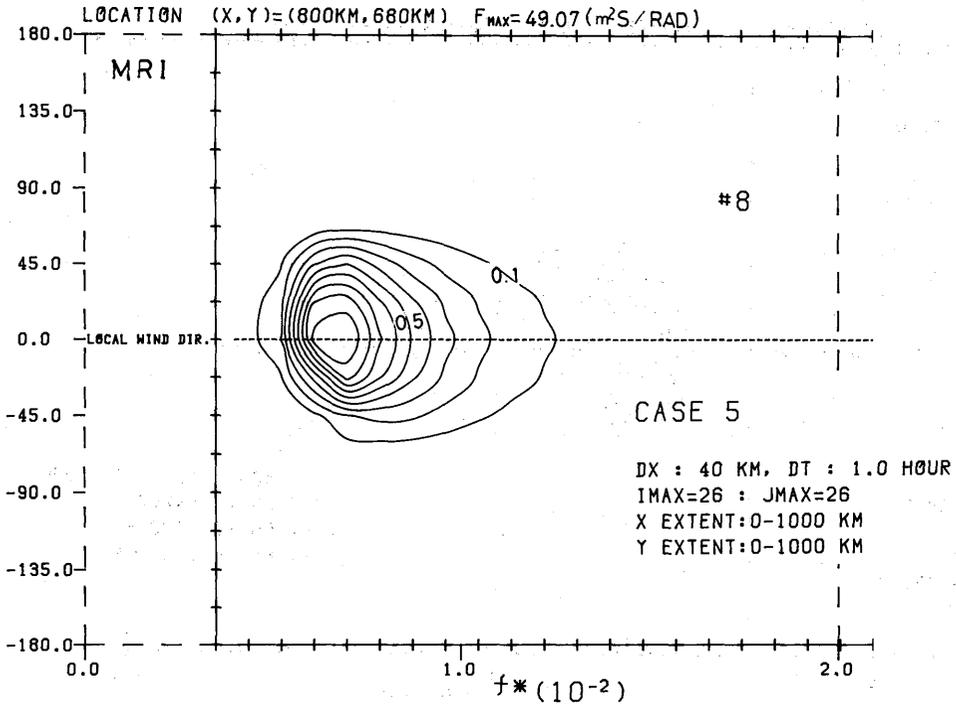


Fig. 105-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (800, 680)

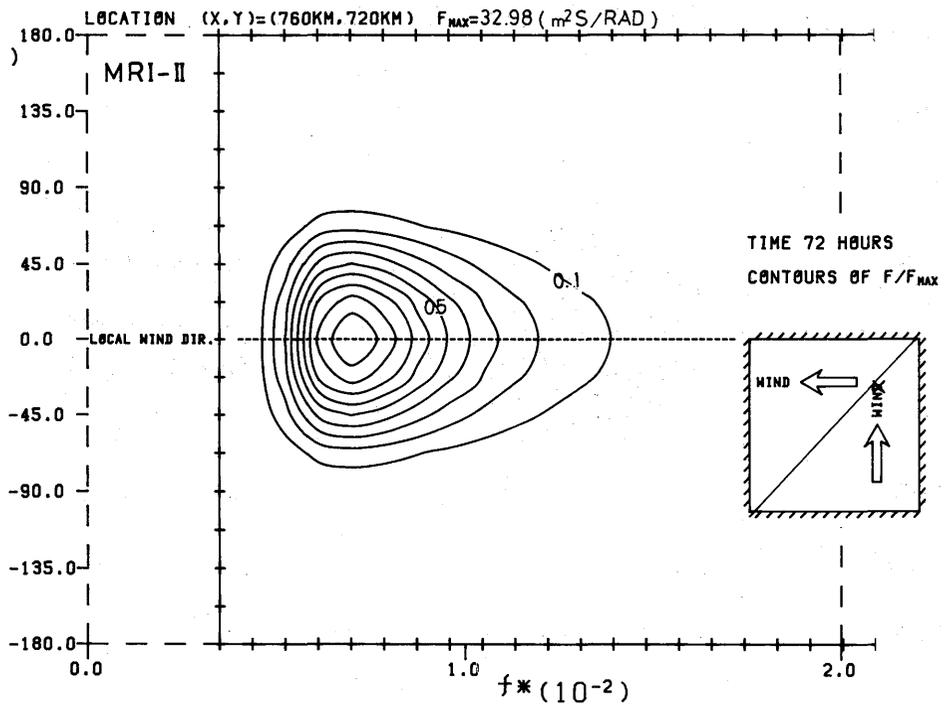
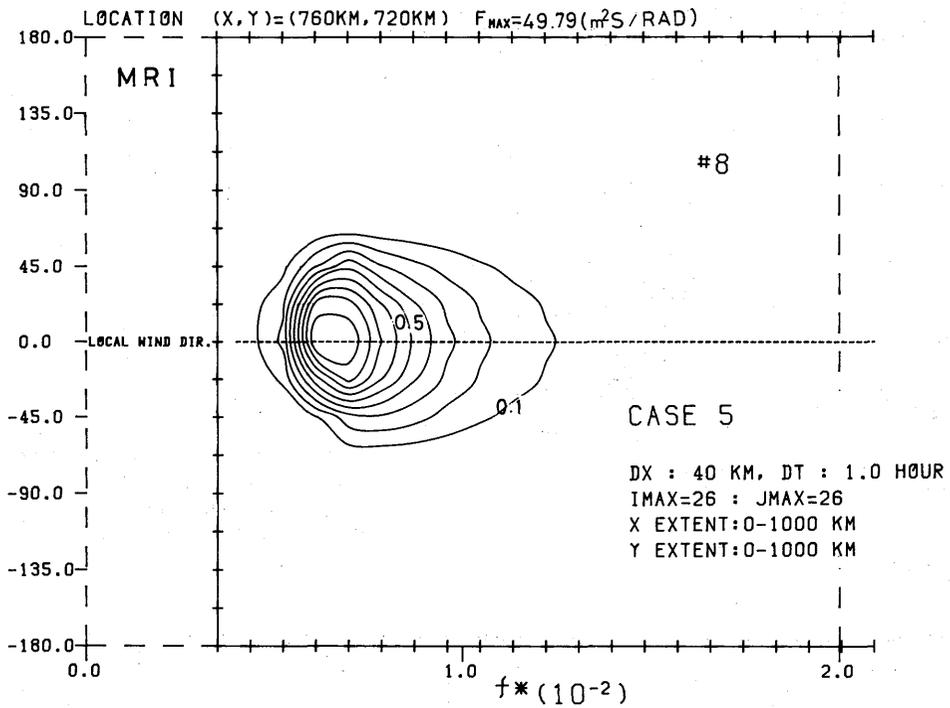


Fig. 106-0-29 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (760,720)

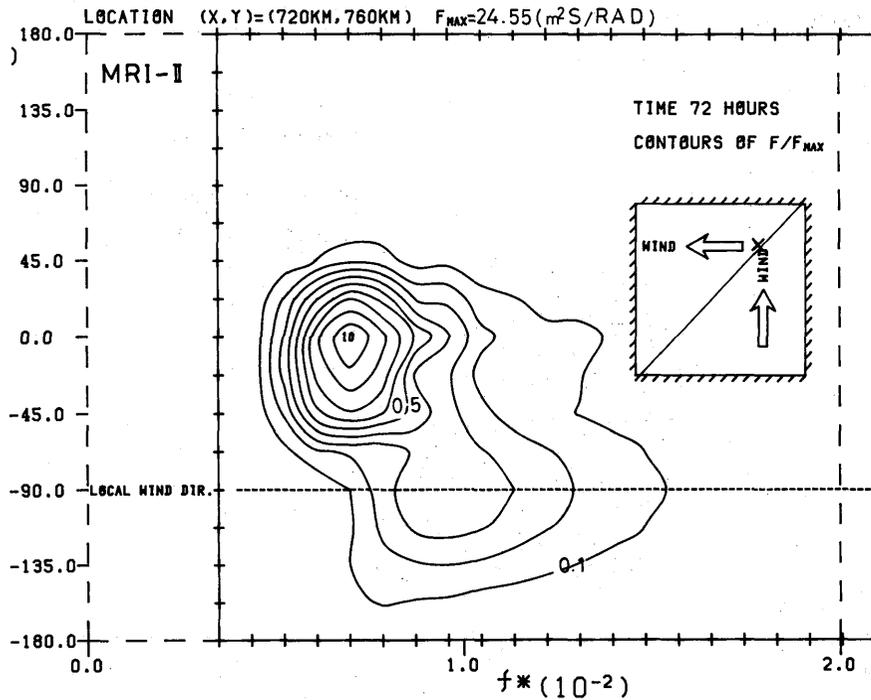
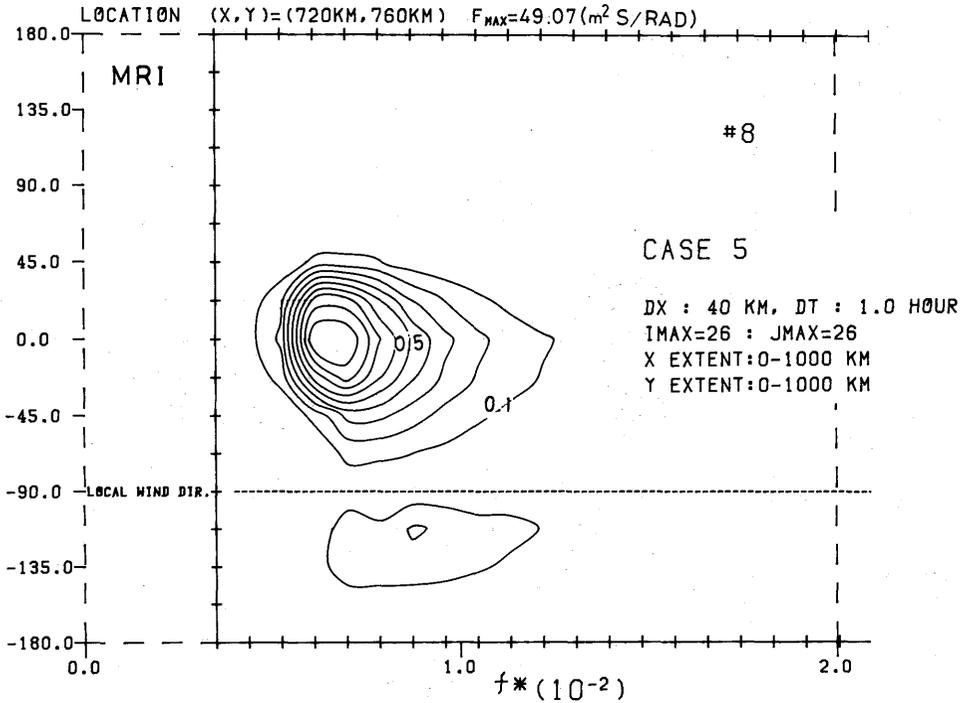


Fig. 107-0-33 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for $T = 72$ hrs and point (720,760)

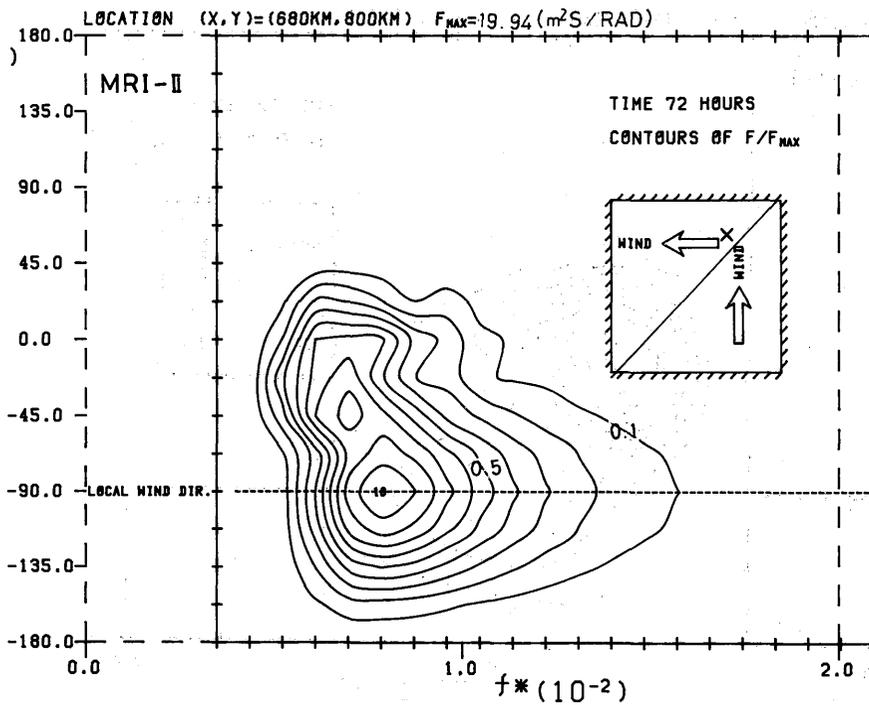
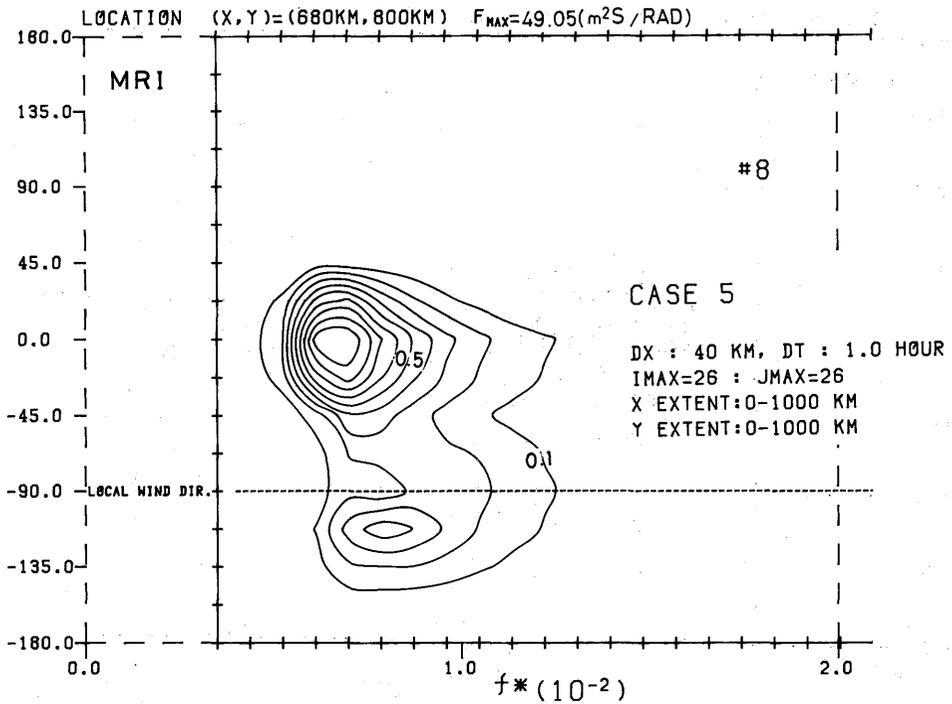


Fig. 108-0-32 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for T = 72 hrs and point (680,800)

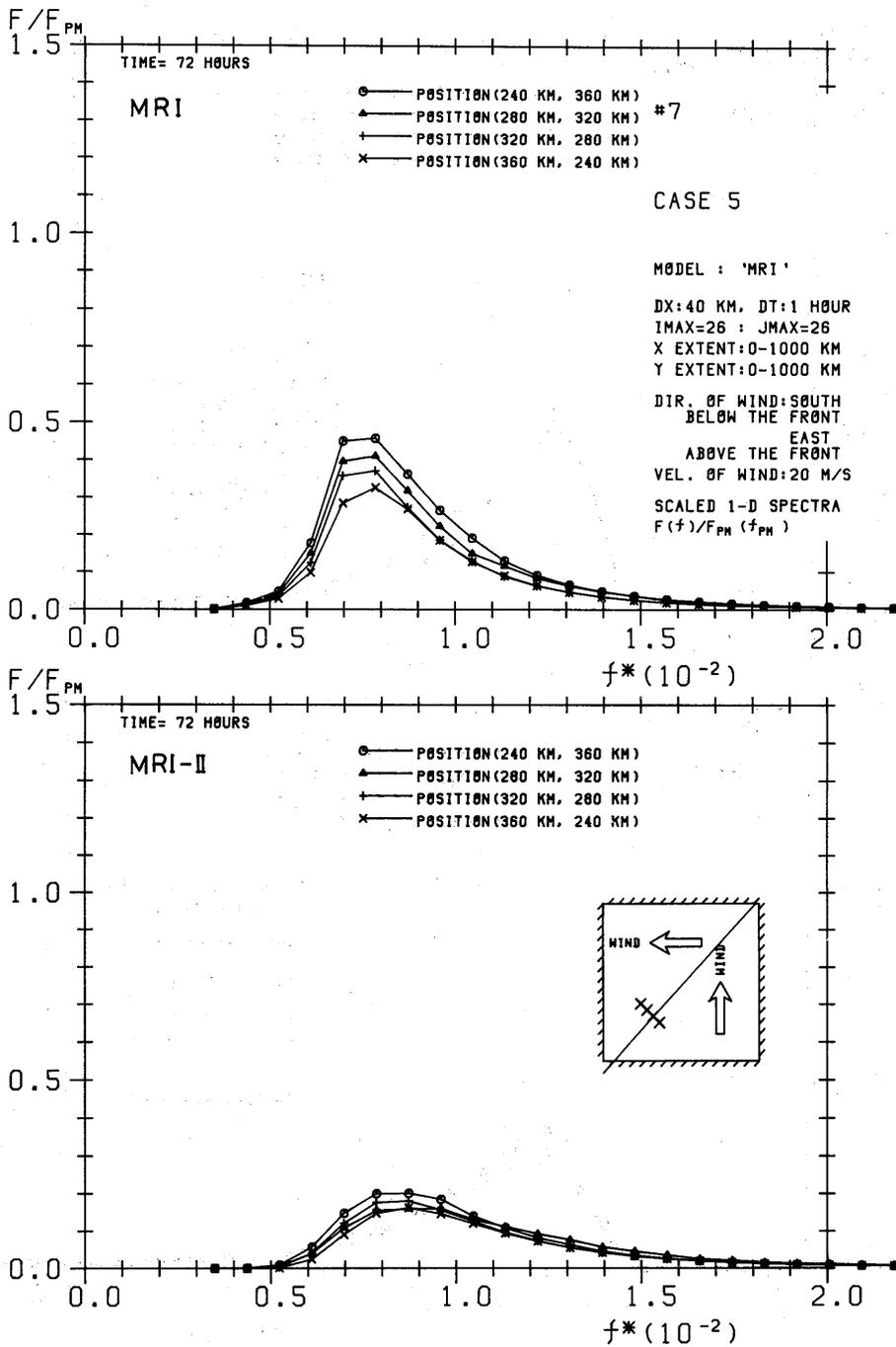


Fig. 109-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for points (360,240), (320,280), (280,320) and (240,360)

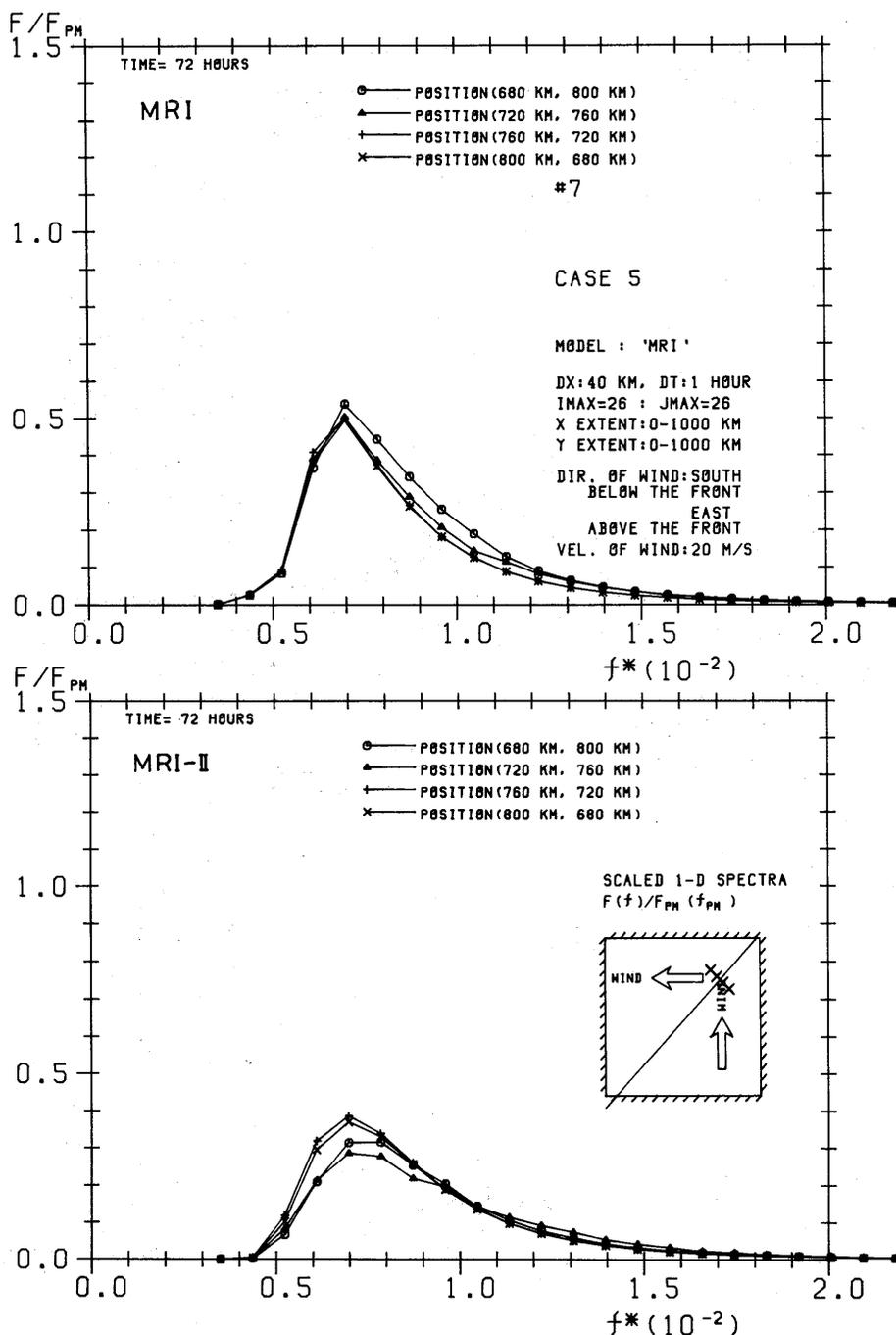


Fig. 110-0-34 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f_{PM})$ for points (800,680), (760,720), (720,760) and (680,800)

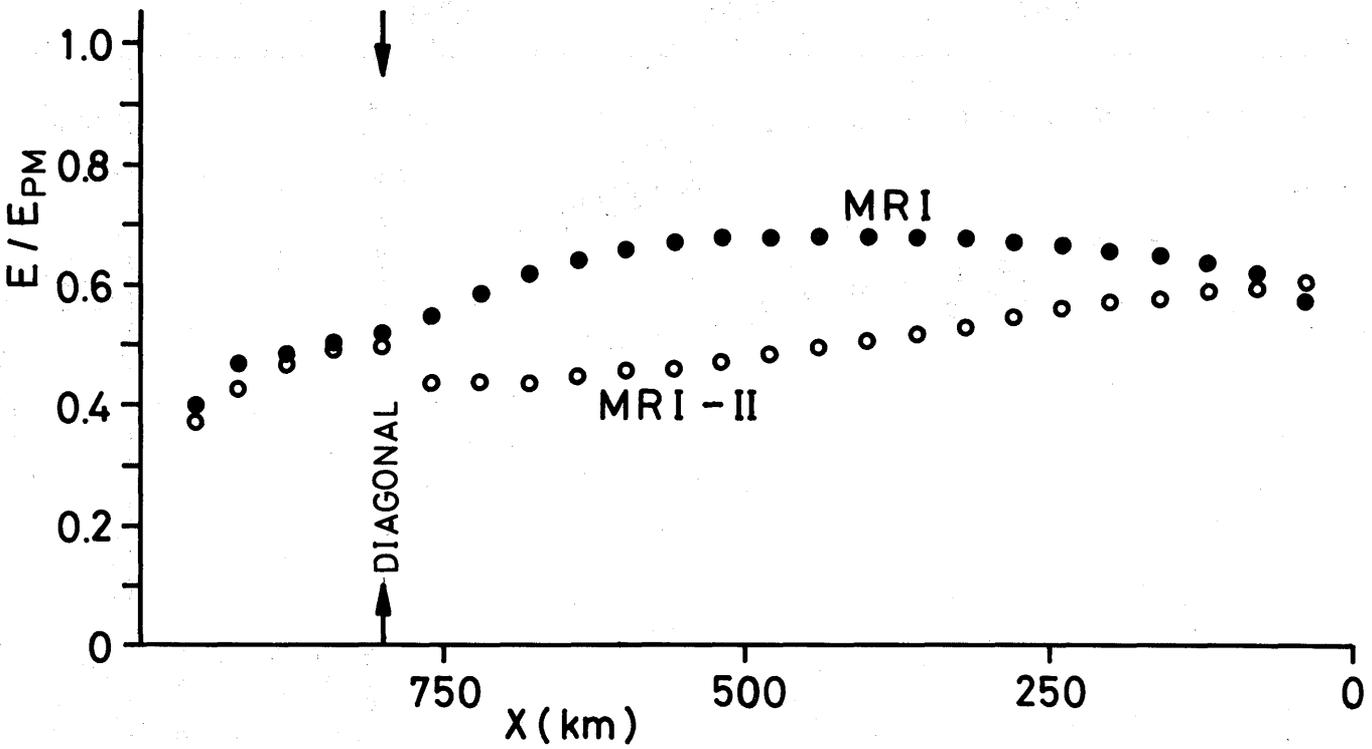


Fig. III-11.5-0 E along the section S(cf. Fig. 97-11.1-0). Note that fetch increase to the right (decreasing X^*).

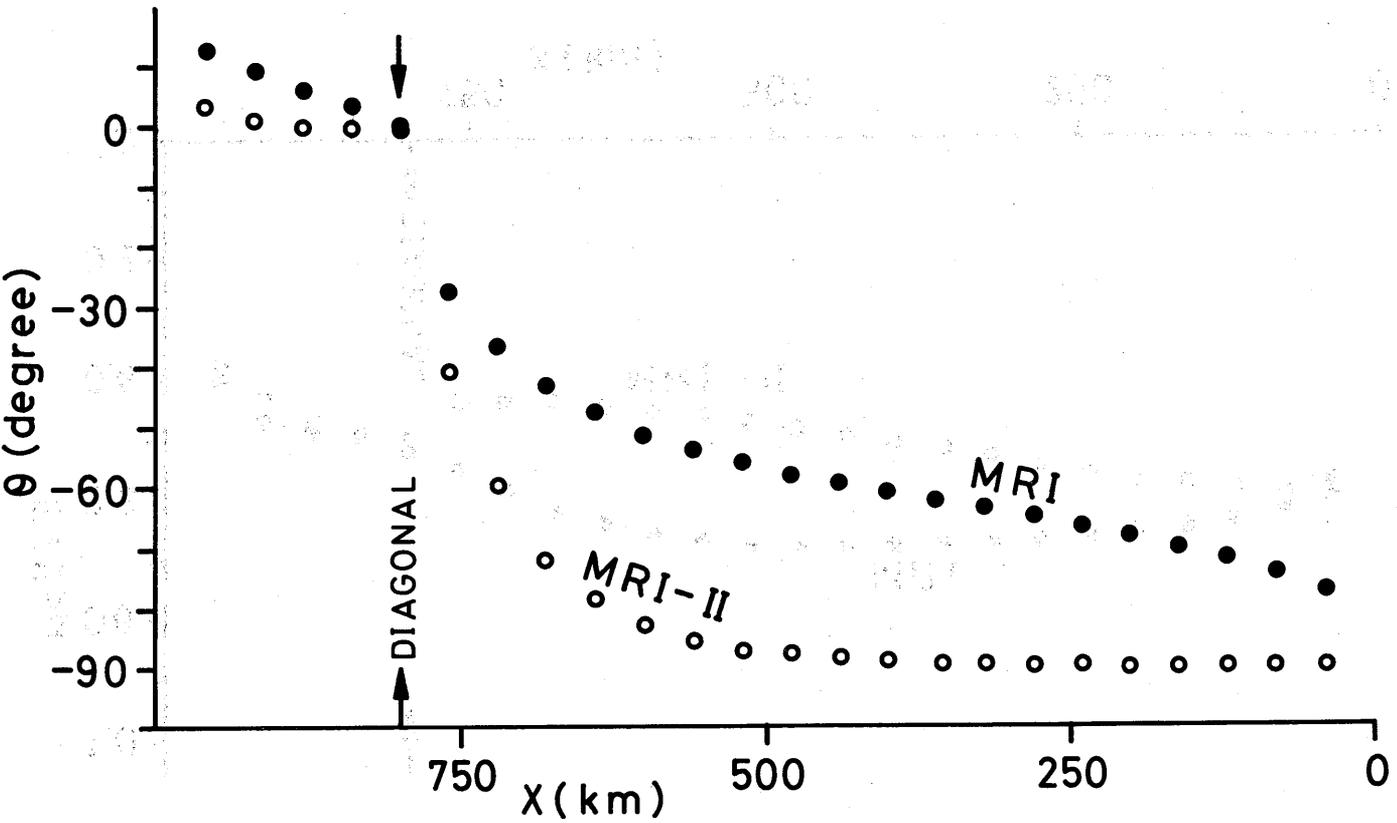


Fig. 112-11-6-0 Relaxation of mean wave direction along the section S

WIND FIELD OF HURRICANE

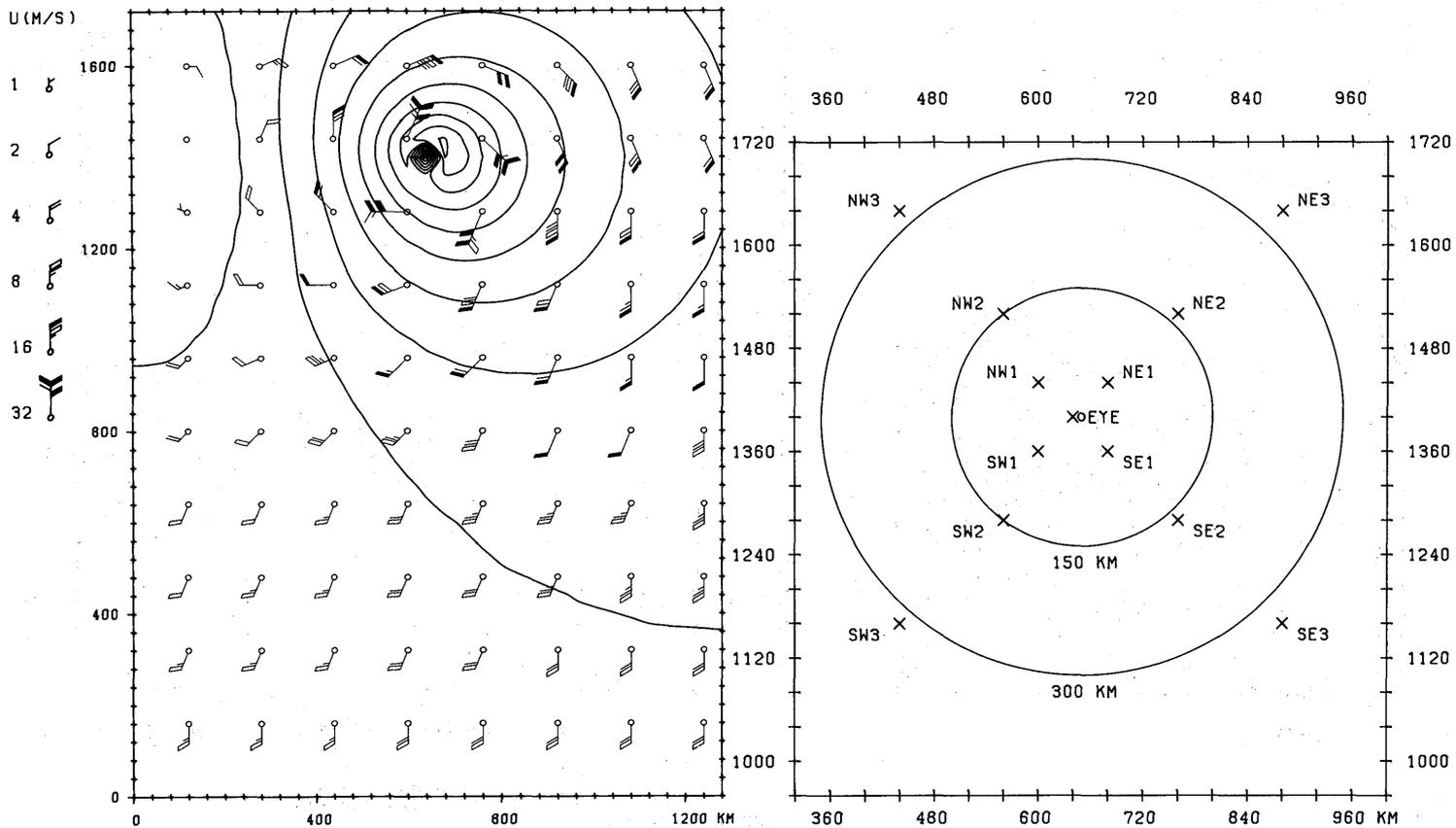


Fig. 113-12.1-0 Hurricane wind field and selected output points for spectra

#12

CASE 6-1

H₅₁₀.

X EXTENT:0-1280 KM

Y EXTENT:0-1720 KM

CARDONE MODEL STORM
SPEED 00 KM/H

DT : 1 HOUR

DX:40 KM

INTERVAL 1.0 M

MODEL 'MRI'

IMAX=33 : JMAX=44

AT 24. HOURS

MRI-II

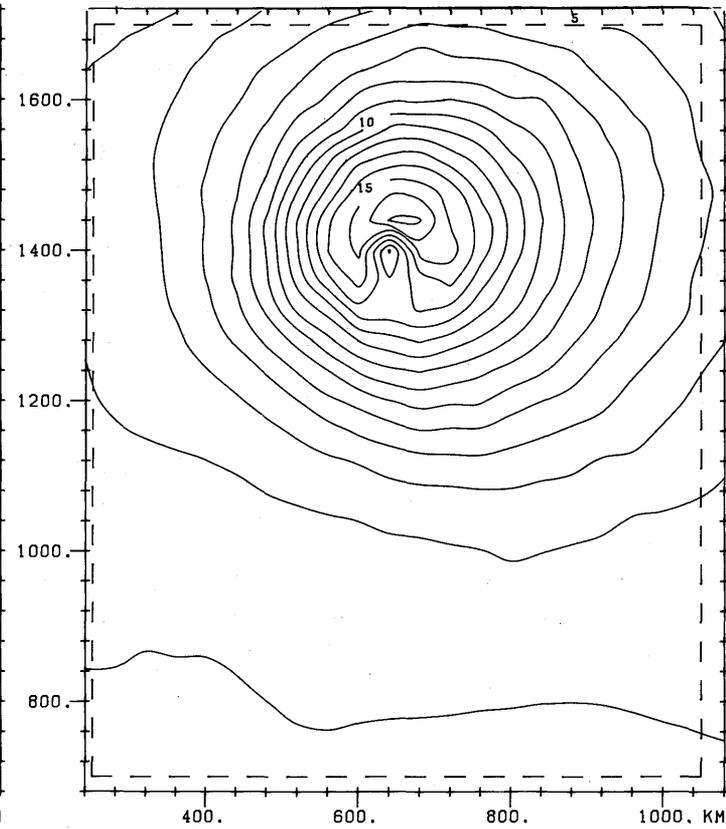
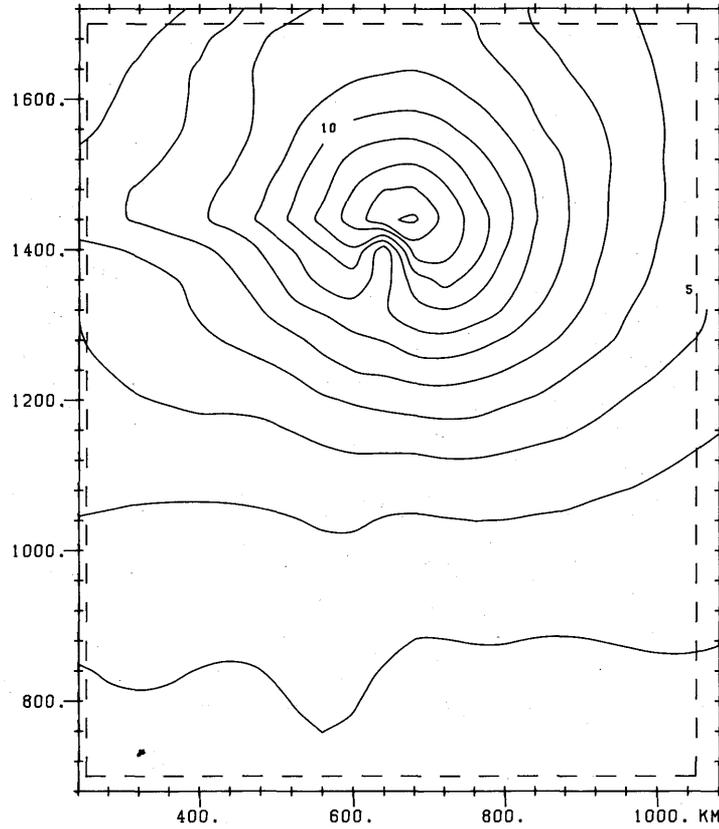


Fig. 114-0-35 contours of H₅ vs. X and Y

#13

CASE 6-1 F

X EXTENT:0-1280 KM

CARDONE MODEL STORM
SPEED 00 KM/H

Y EXTENT:0-1720 KM

DT : 1 HOUR

DX:40 KM

INTERVAL 0.01 HZ

MODEL 'MRI' IMAX=33 : JMAX=44

AT 24. HOURS

MRI-II

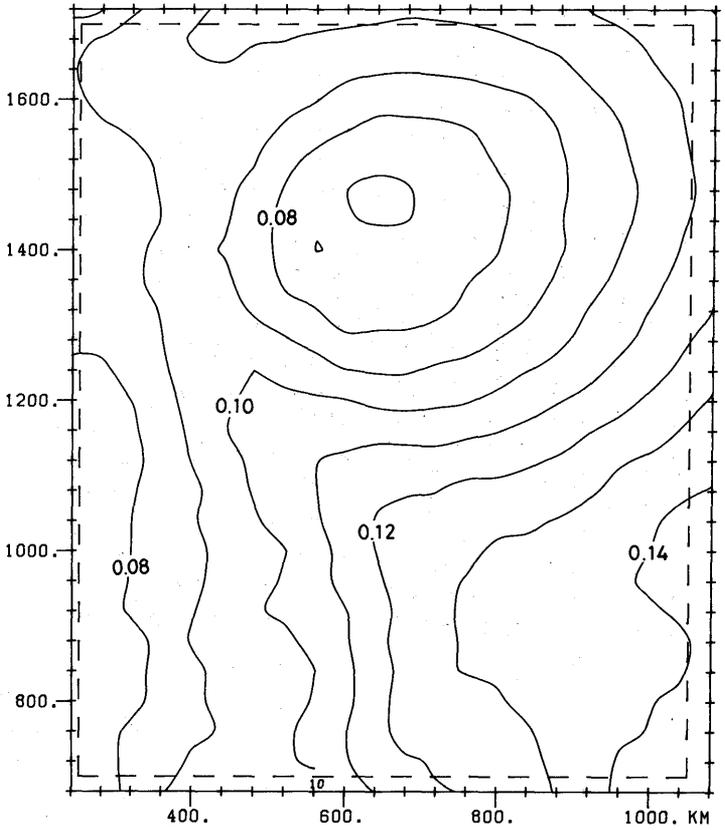
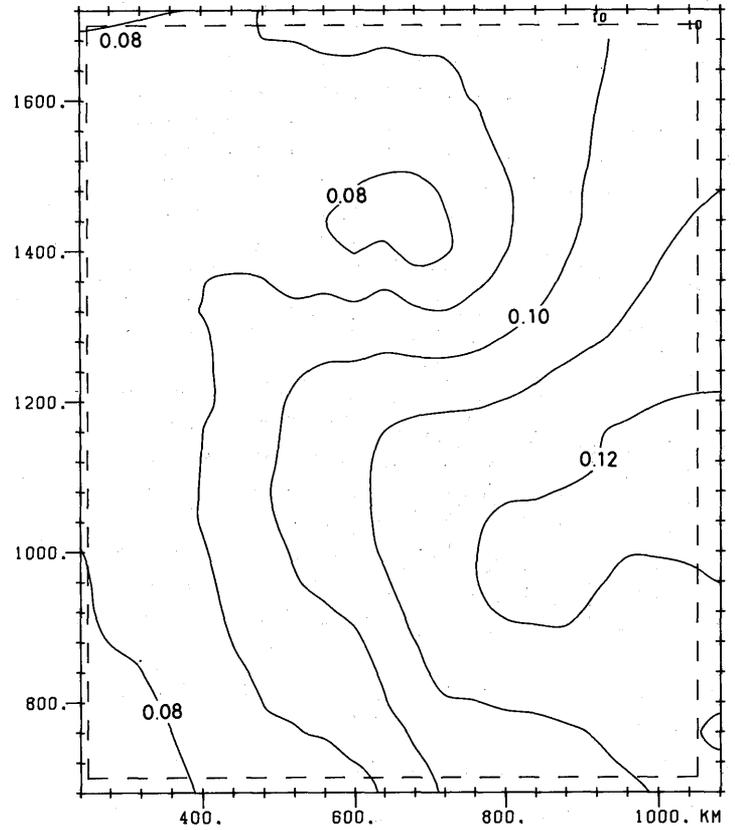


Fig. 115-0-36 contours of f vs. X and Y

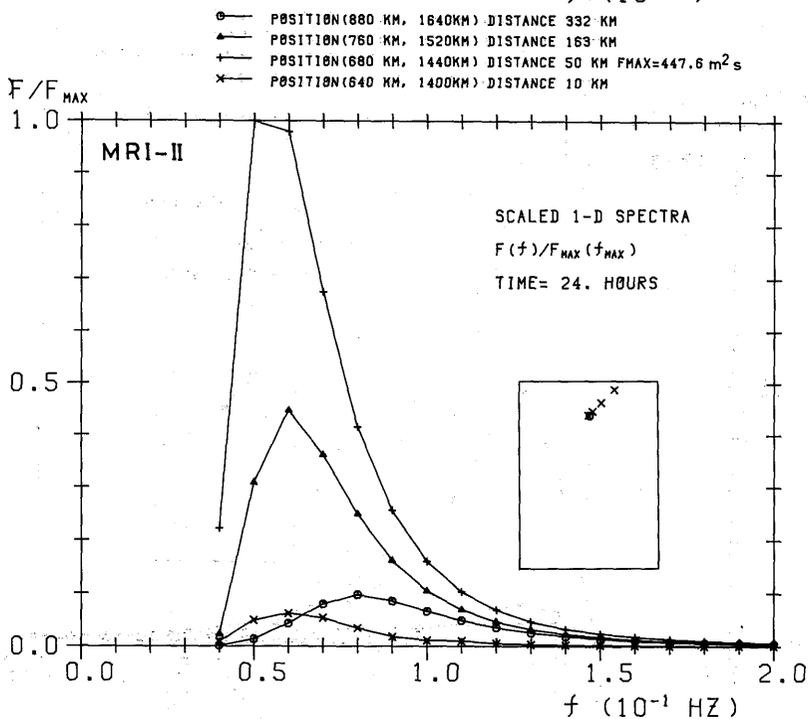
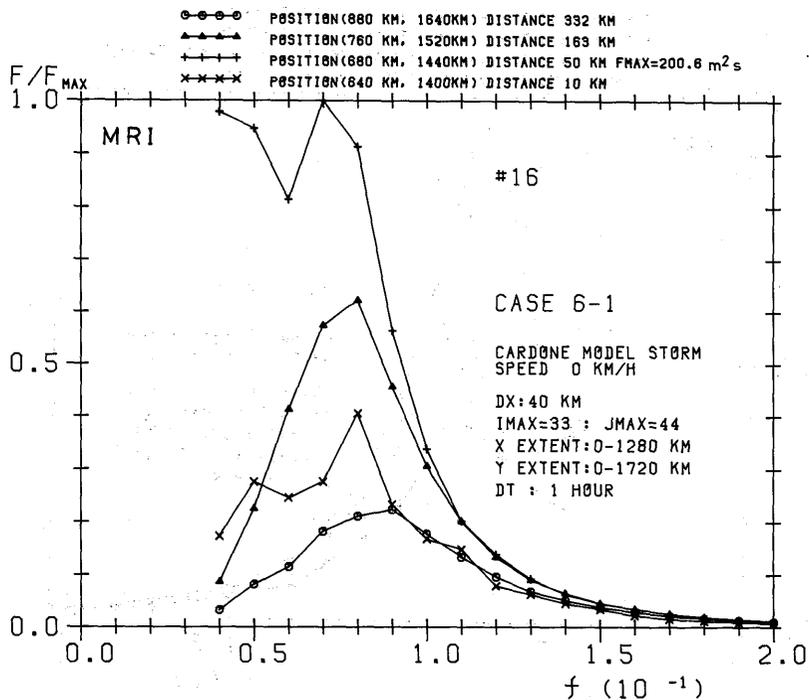


Fig. 117-0-47 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400), (680, 1440), (760,1520) and (880,1640) (eye and NE direction)

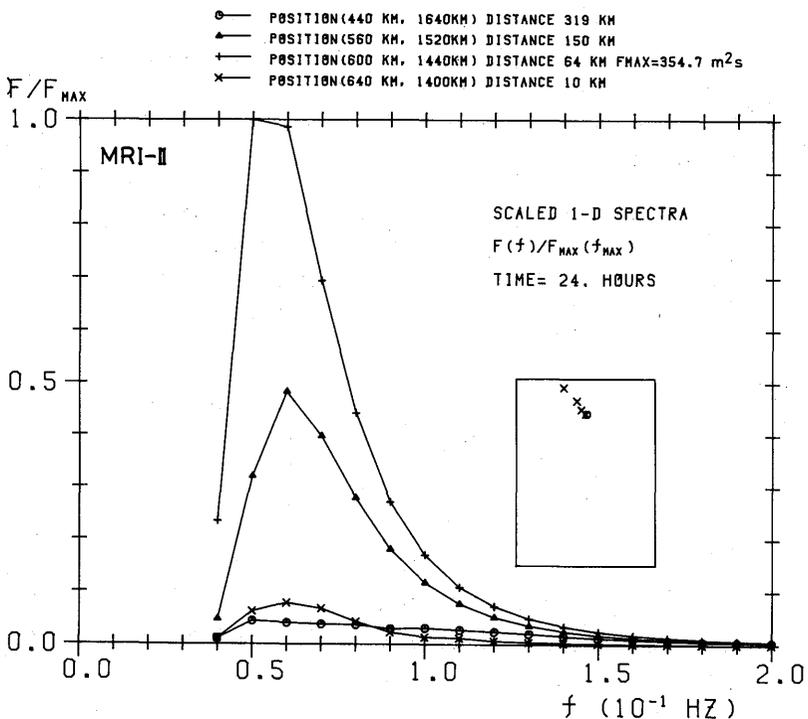
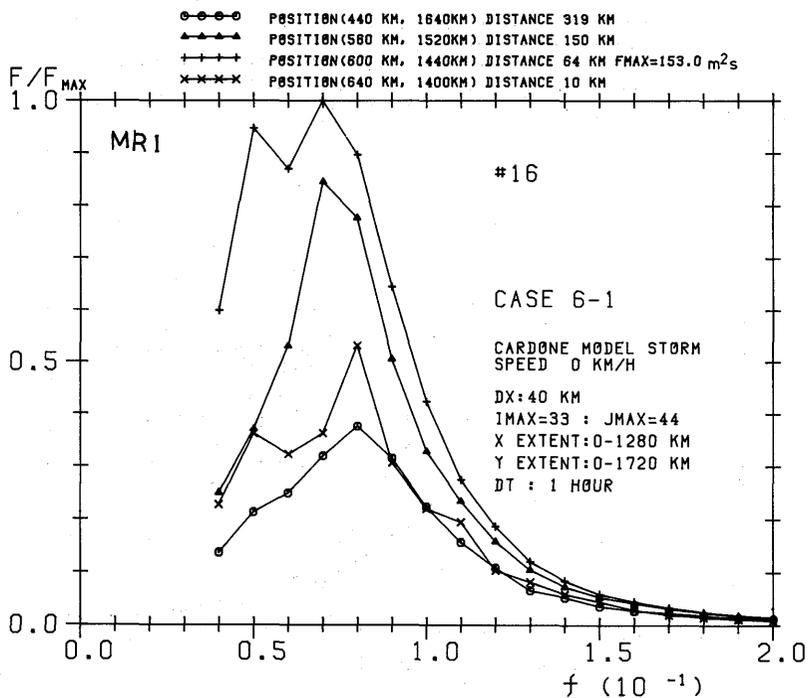


Fig.118-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400),(600,1440),(560,1520)and(440,1640) (eye and NW direction)

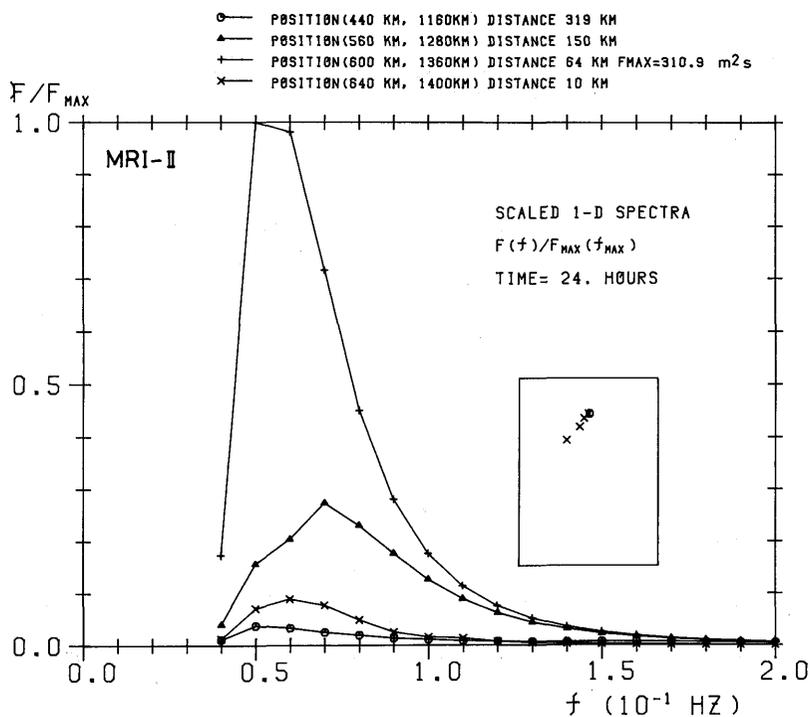
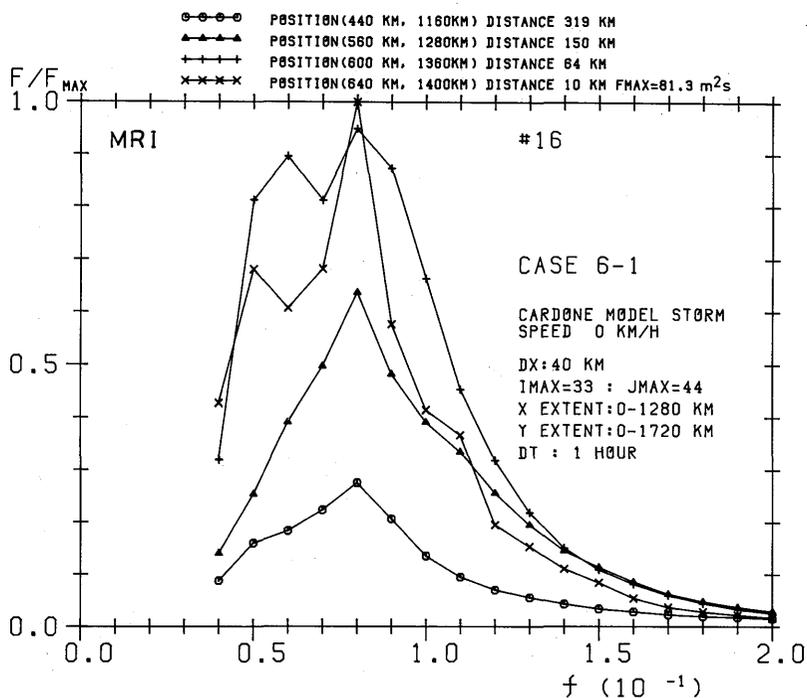


Fig. 119-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400), (600, 1360), (560,1280) and (440,1160) (eye and SW direction)

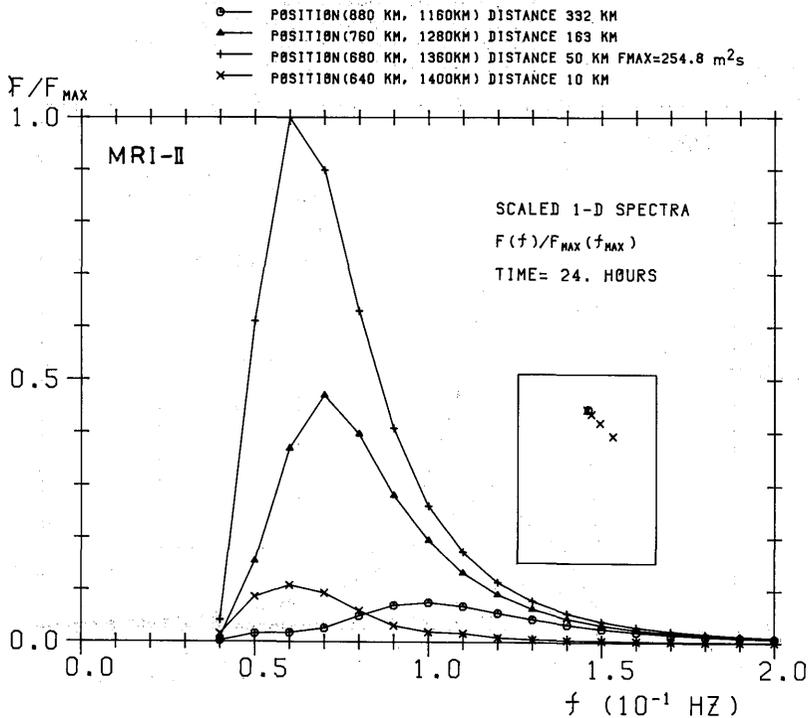
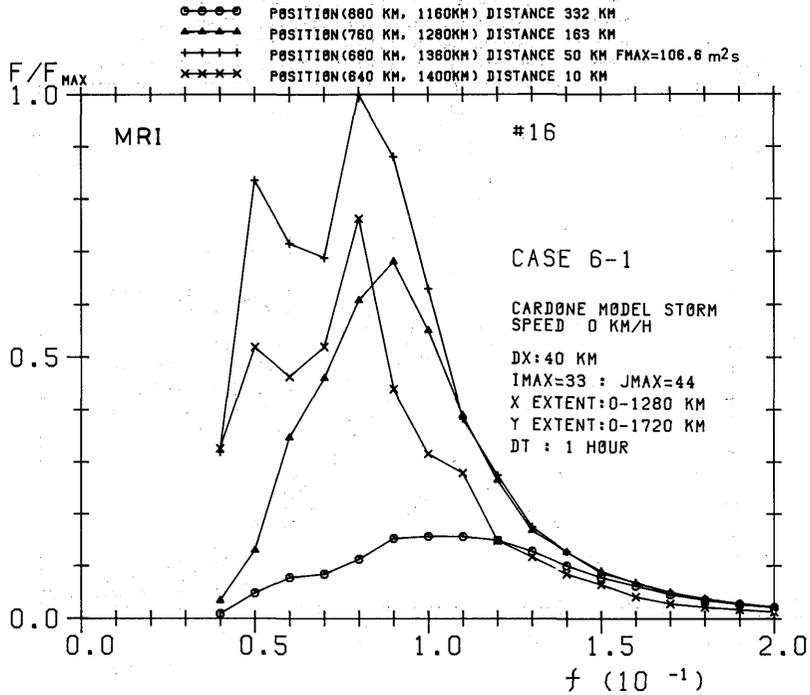


Fig. 120-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400), (680, 1360), (760,1280) and (880,1160) (eye and SE direction)

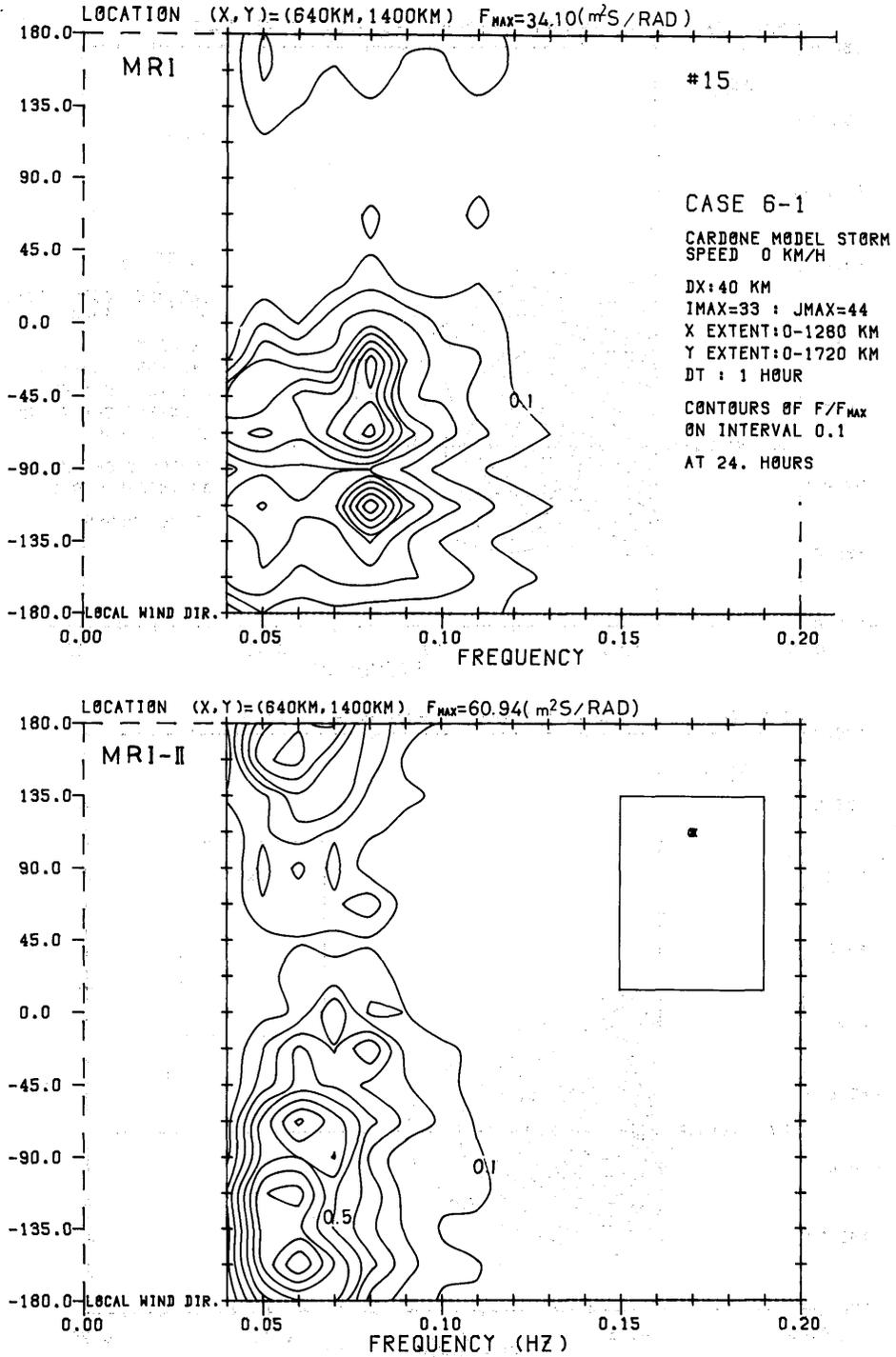


Fig. 121-0-38 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (640, 1400) (eye)

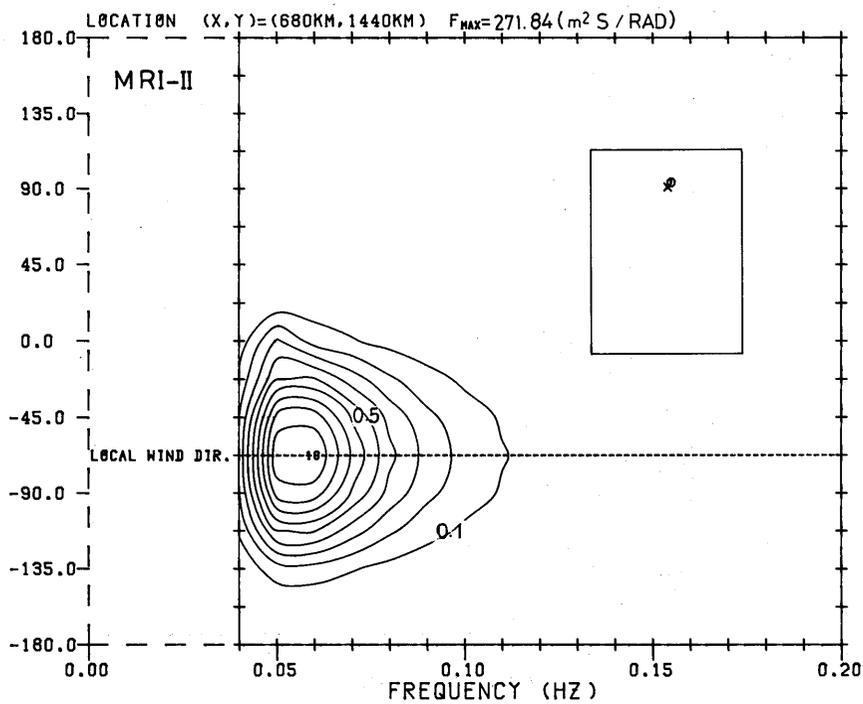
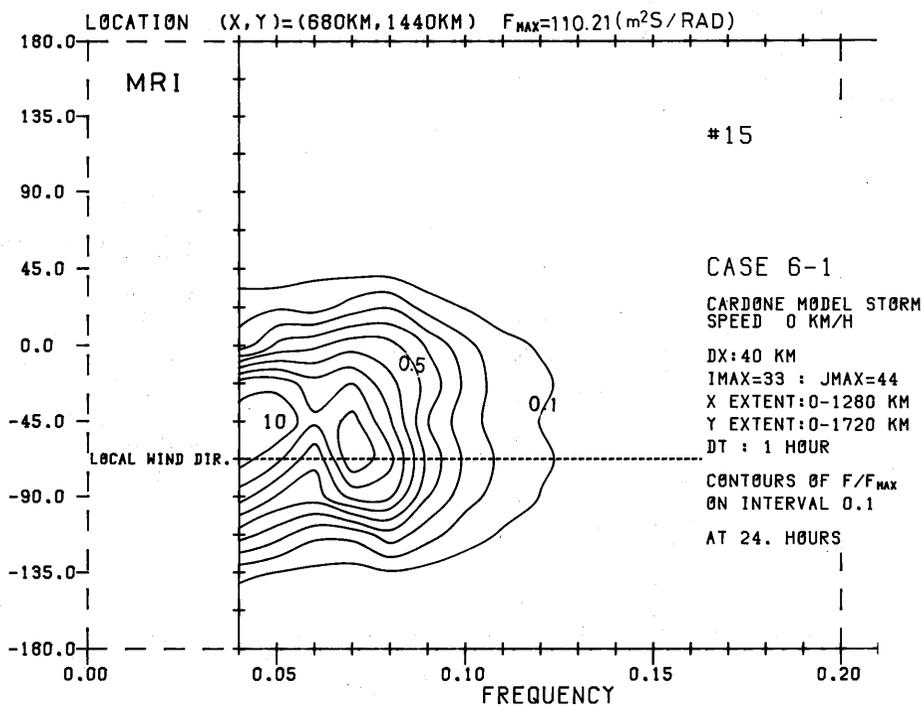


Fig. 122-12.5-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (680, 1440) (NE1)

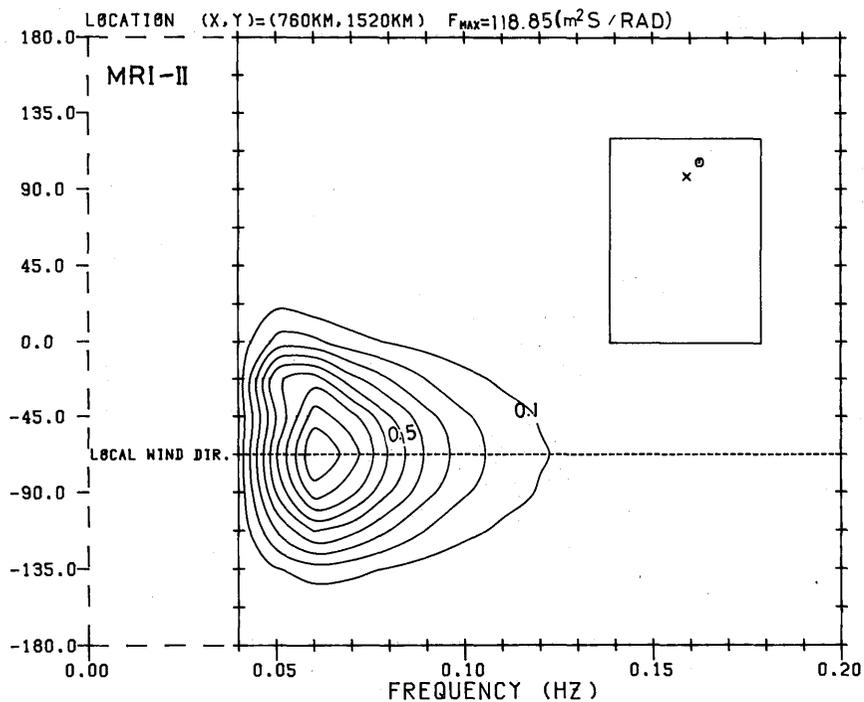
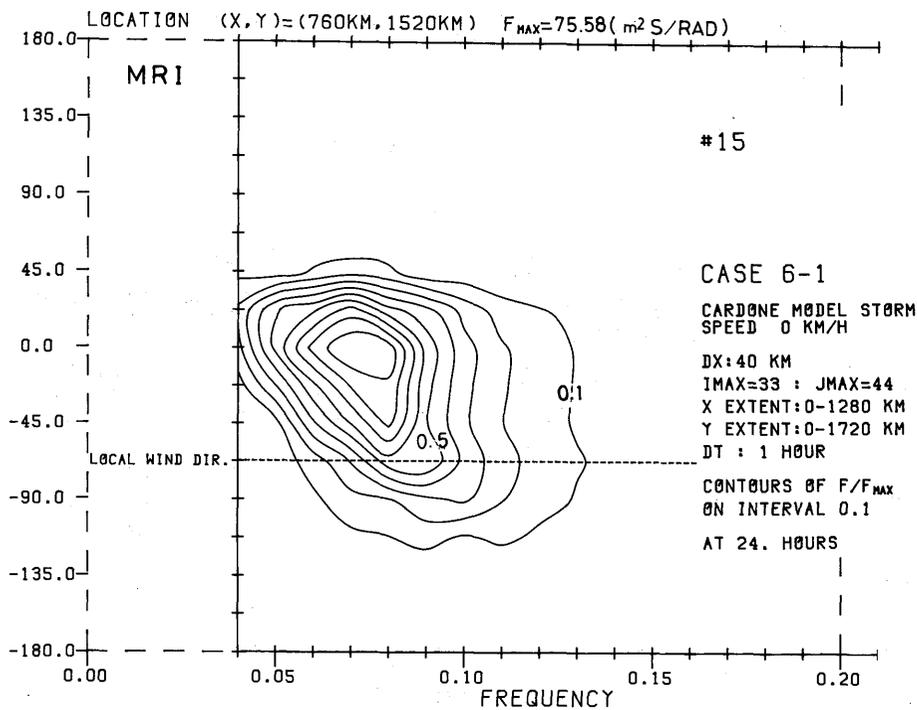


Fig. 123-0-39 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (760,1520) (NE2)

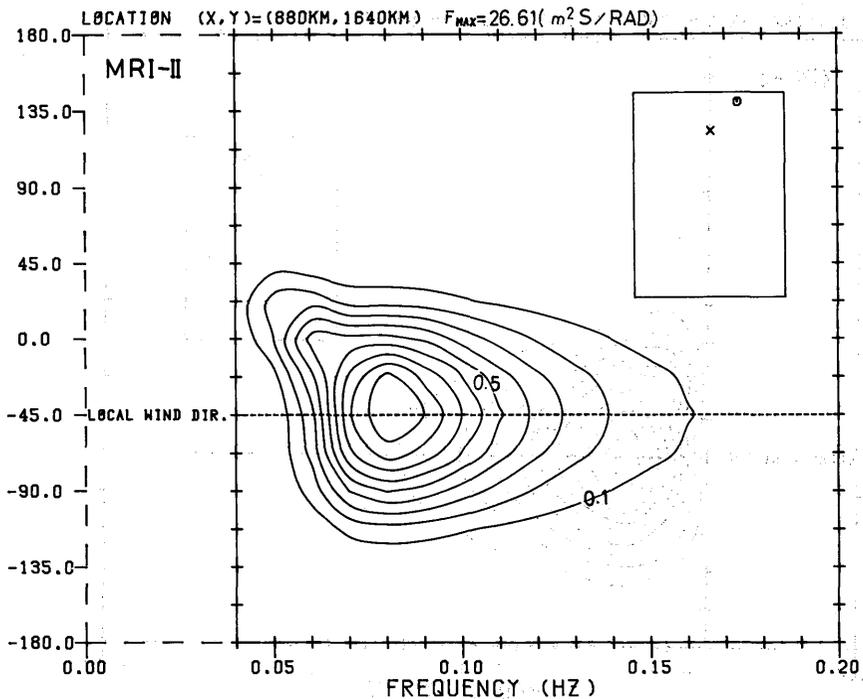
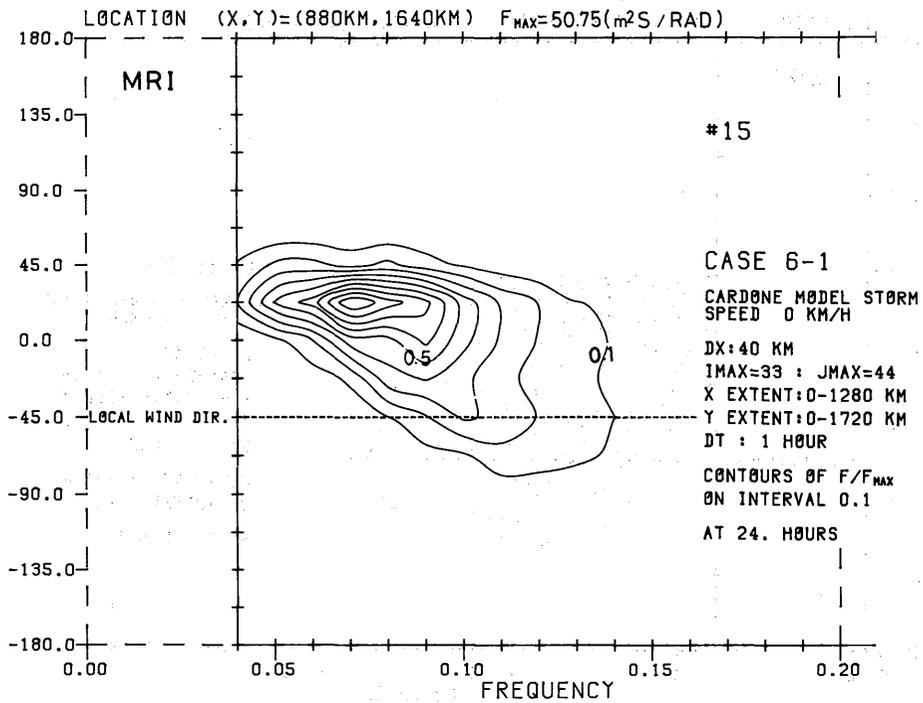


Fig. 124-0-40 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (880,1640) (NE3)

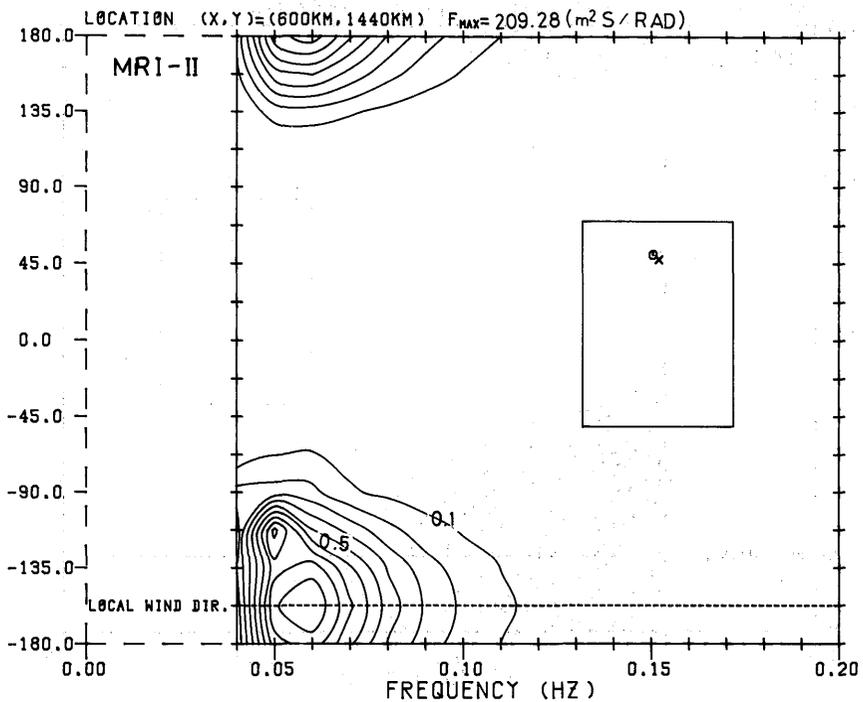
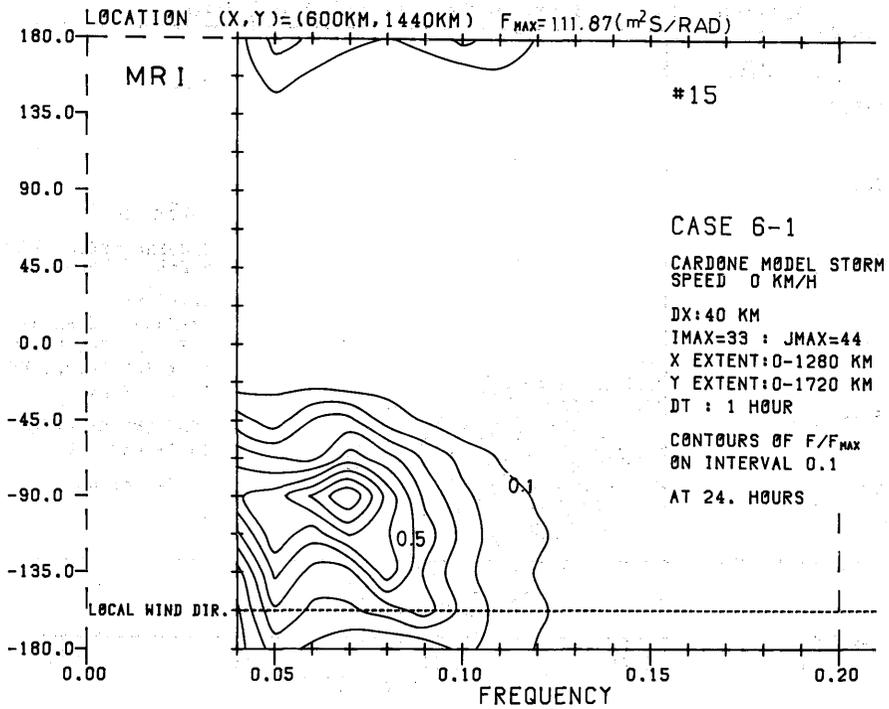


Fig.125-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (600,1440) (NW1)

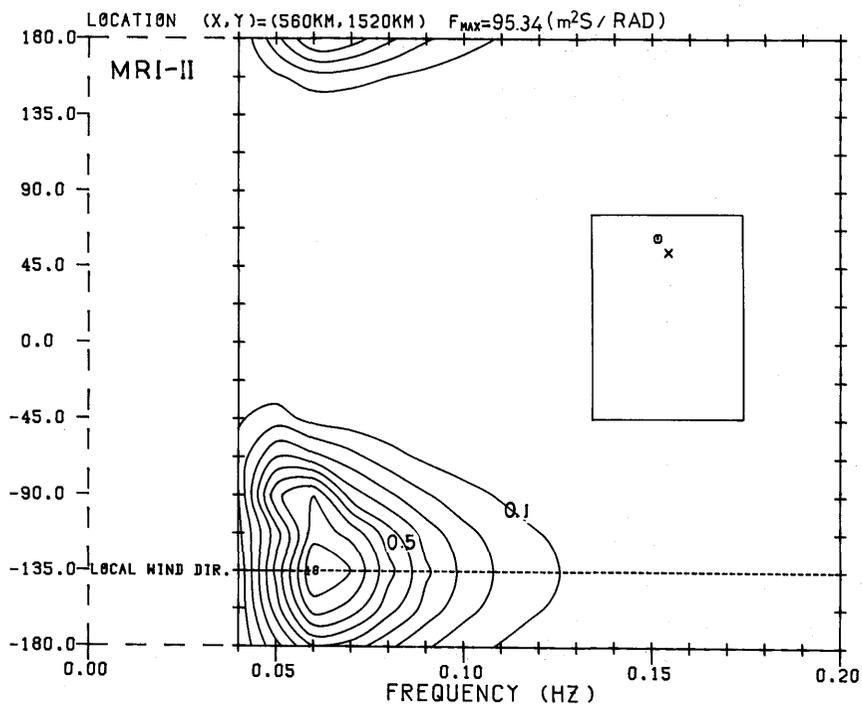
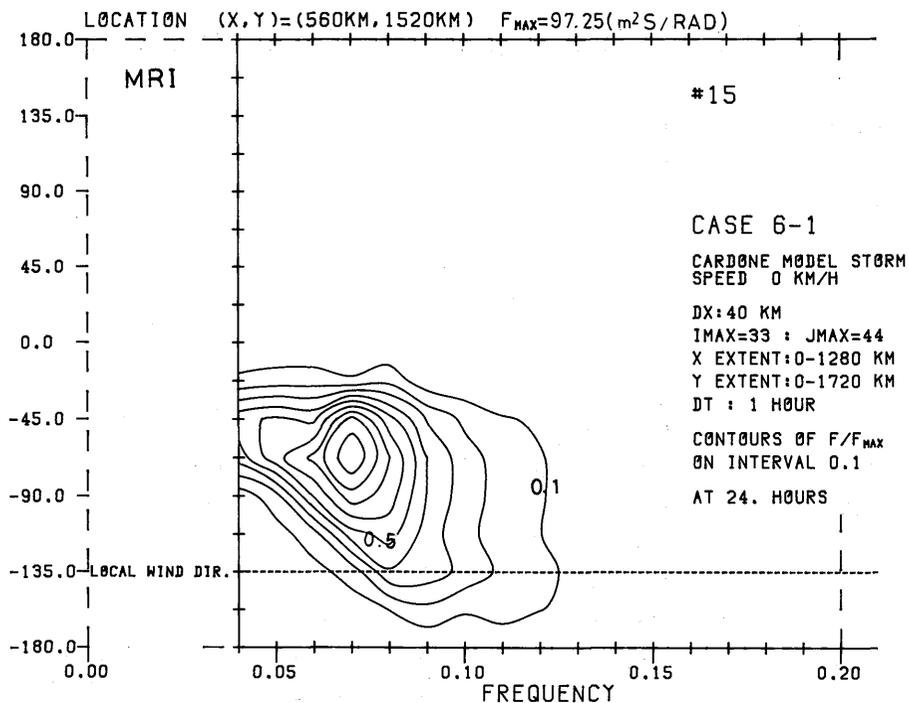


Fig. 126-0-41 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (560, 1520) (NW2)

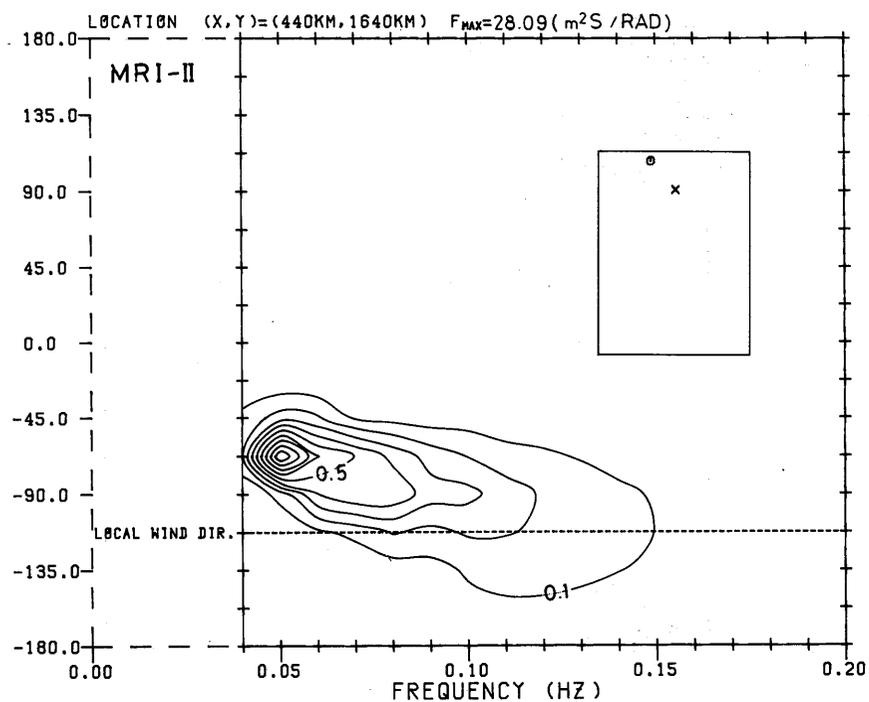
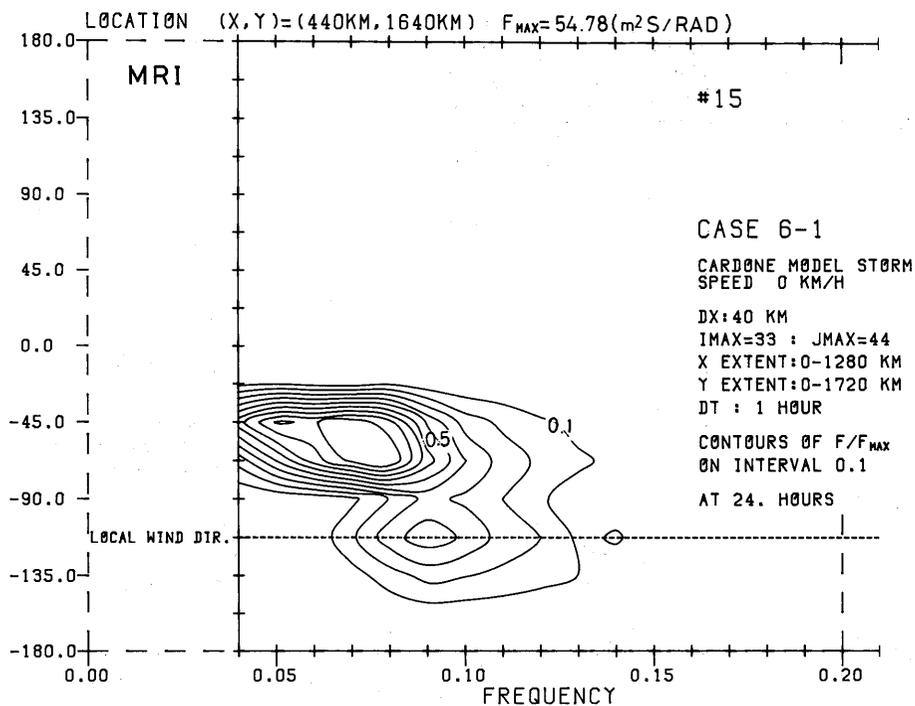


Fig. 127-0-42 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (440,1640) (NW3)

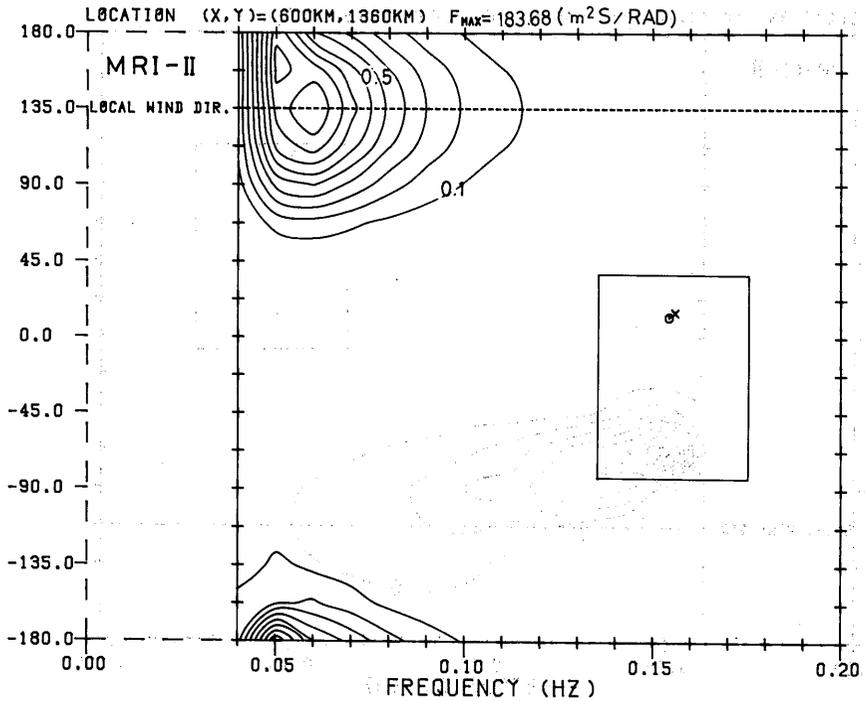
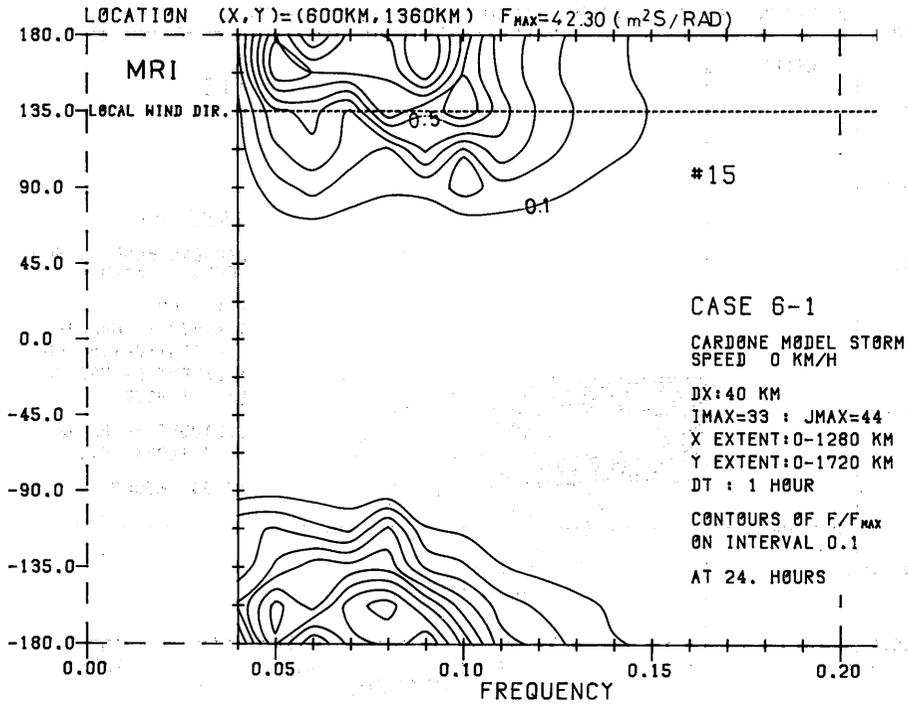


Fig:128-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (600,1360) (SW1)

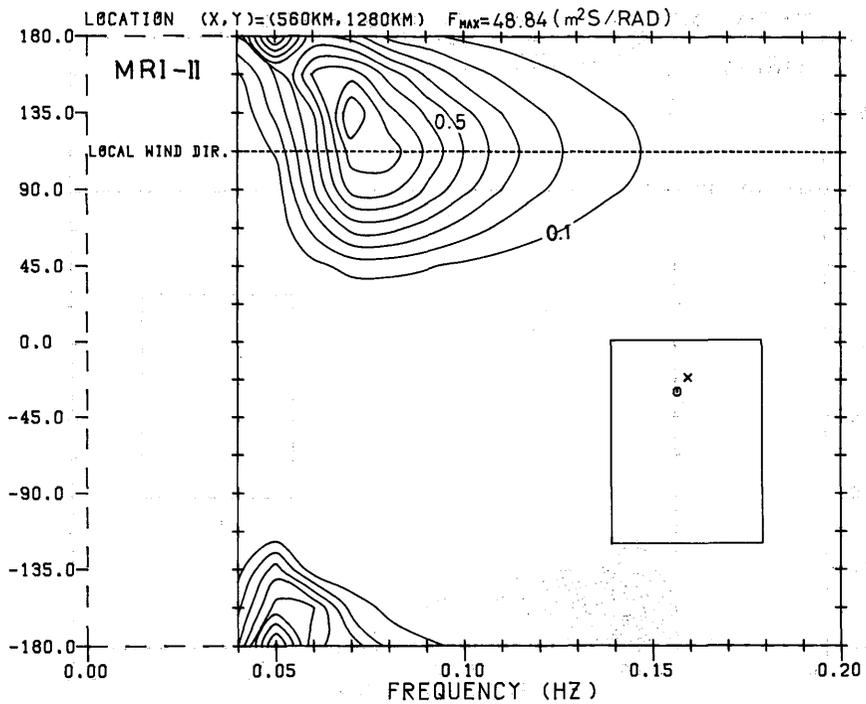
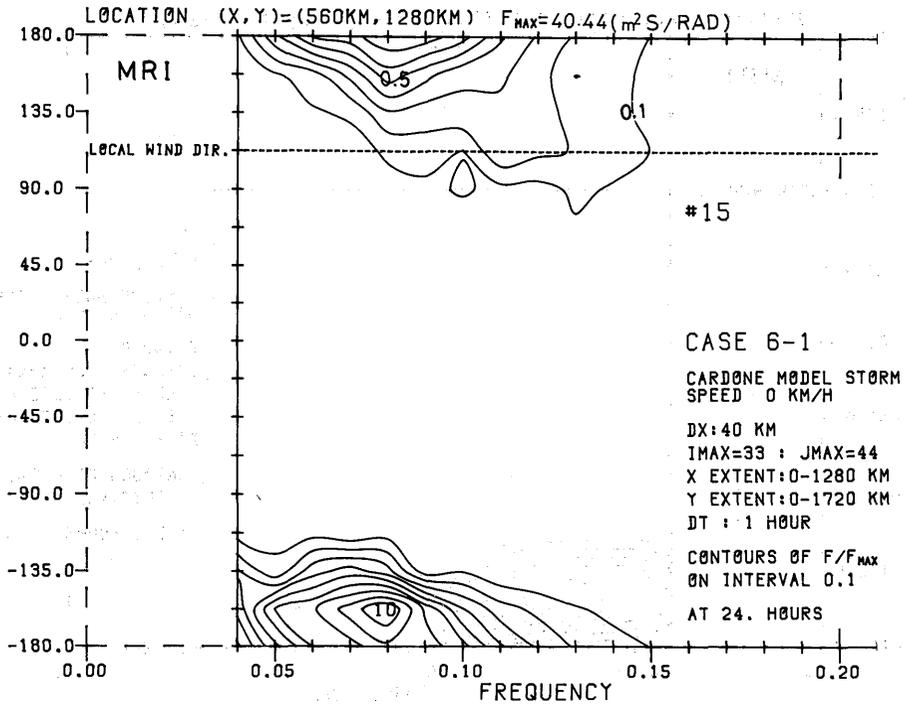


Fig. 129-0-43 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta)/F(f, \theta)_{MAX}$ for point (560, 1280) (SW2)

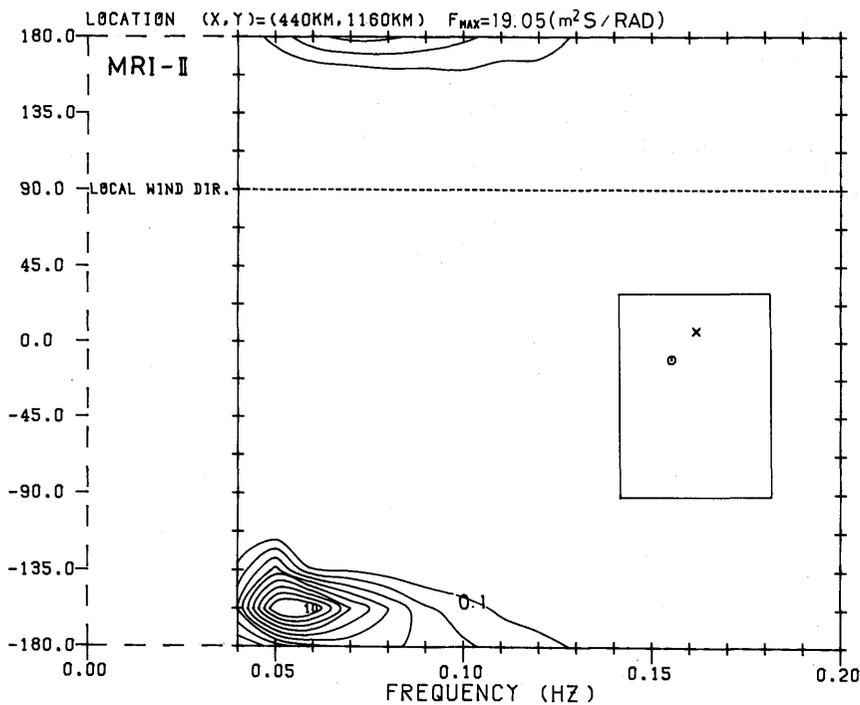
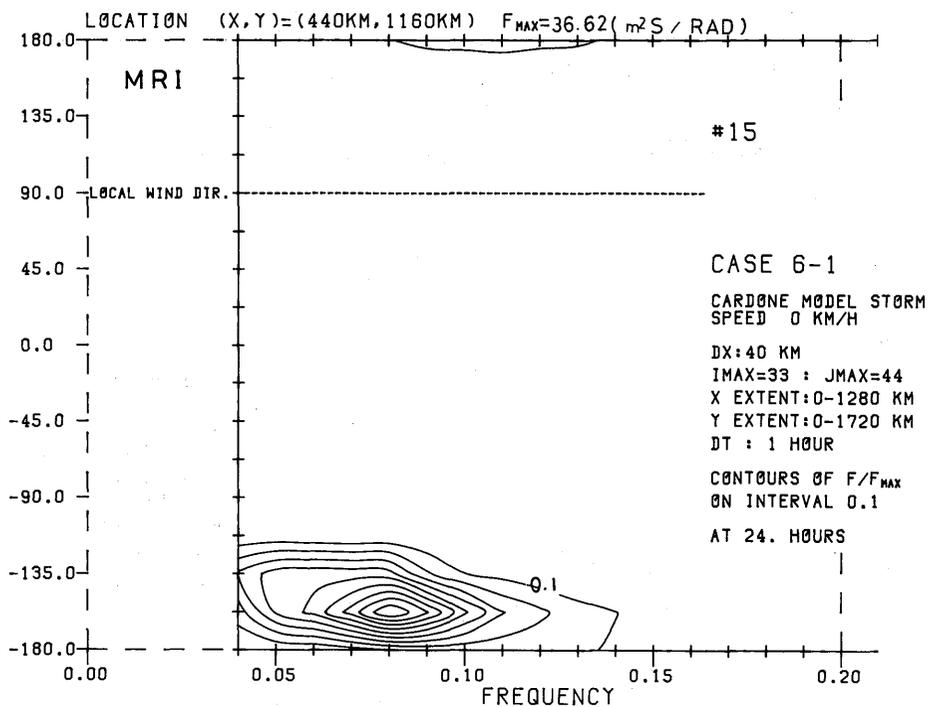


Fig.130-0-44 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (440,1160) (SW3)

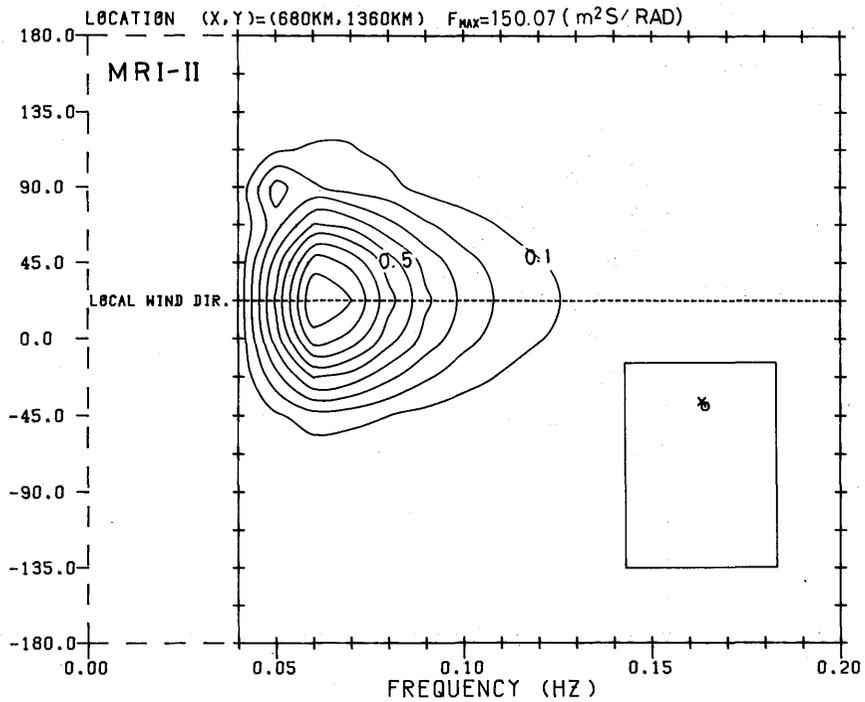
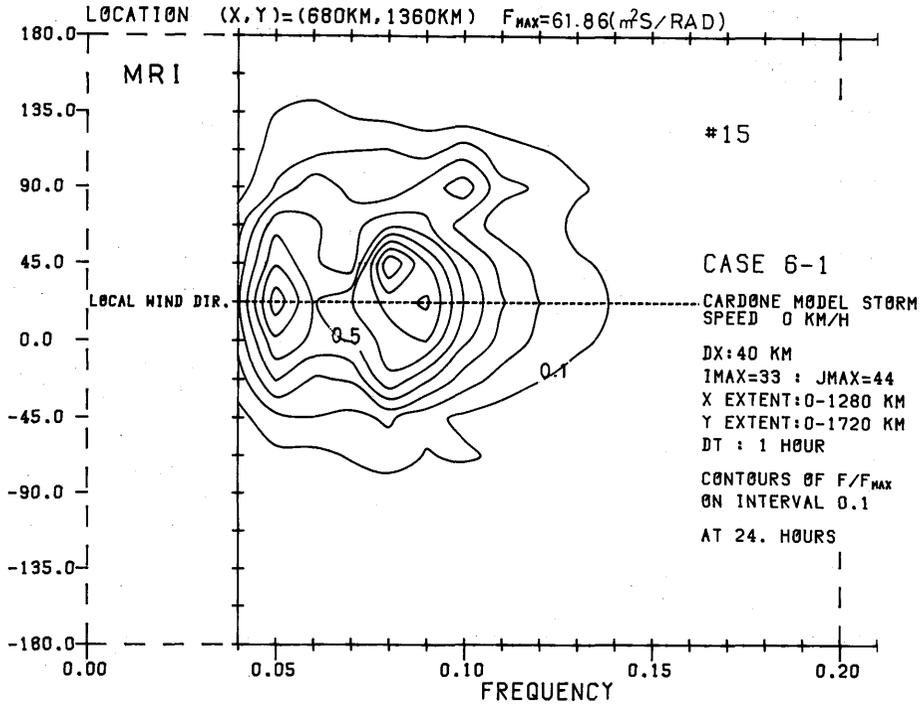


Fig. 131-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (680,1360) (SE1)

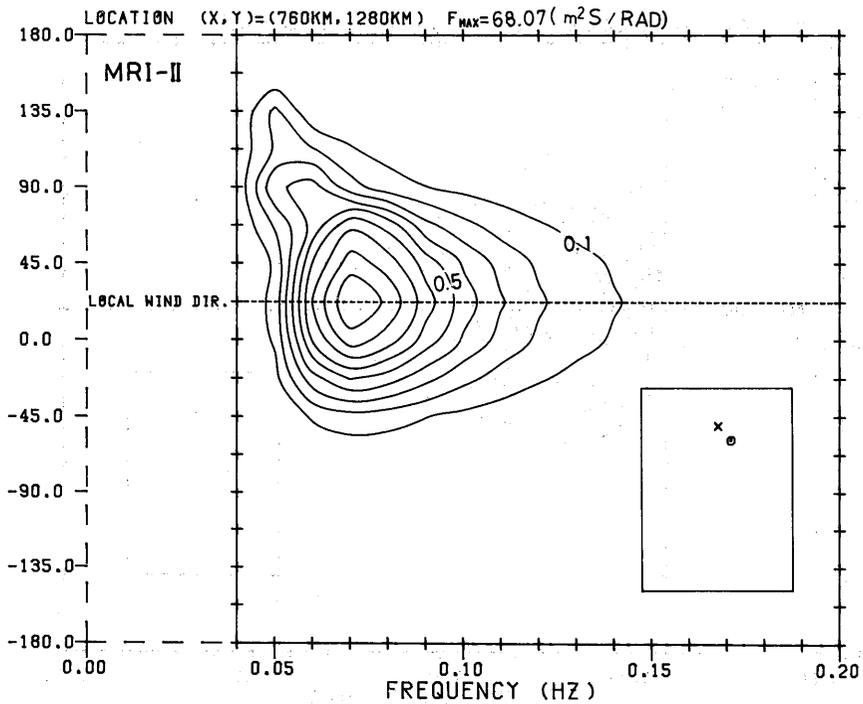
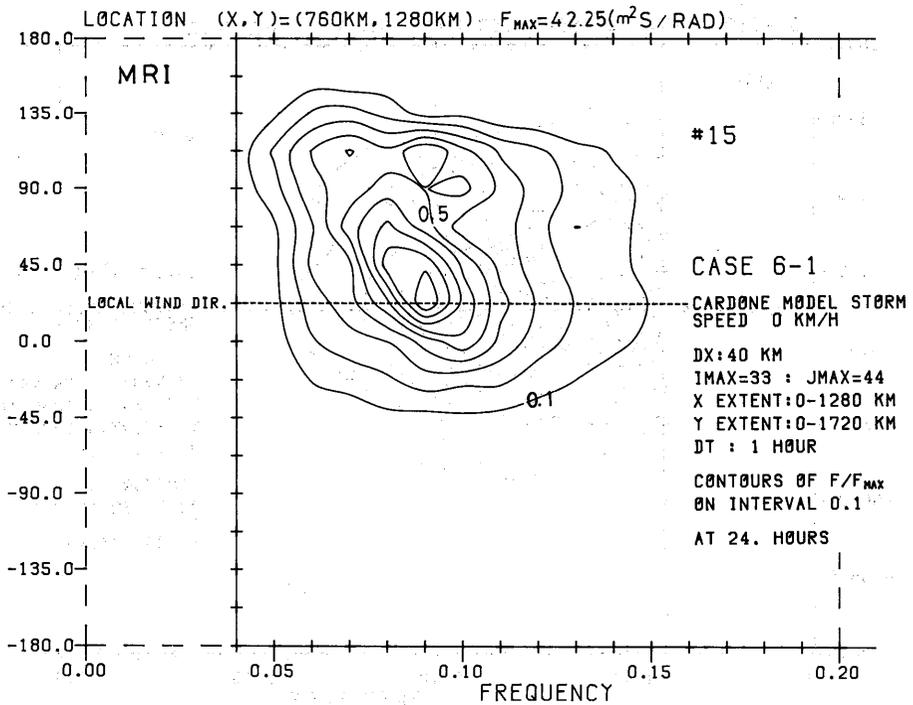


Fig. 132-0-45 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (760, 1280) (SE2)

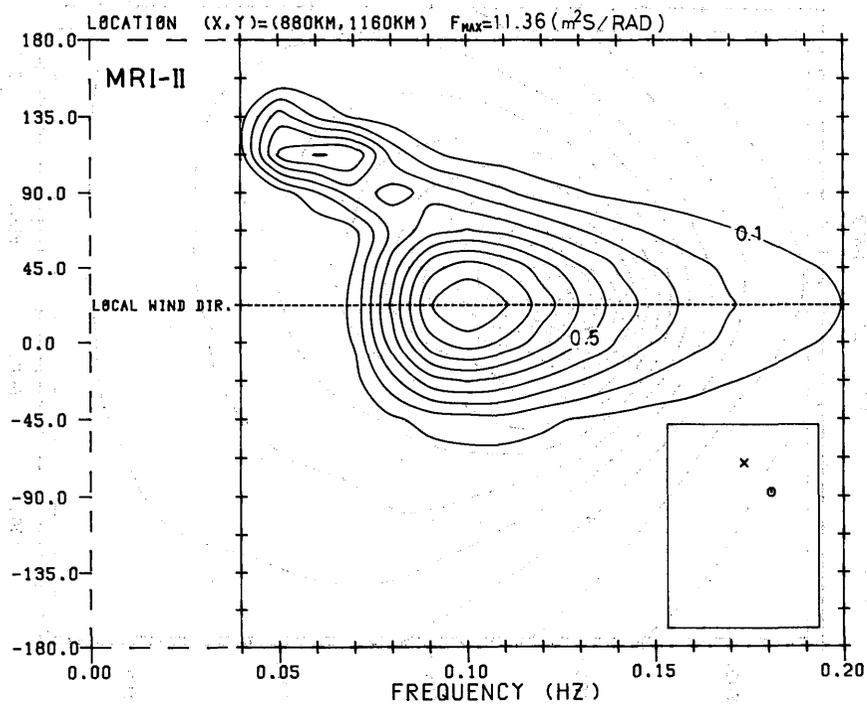
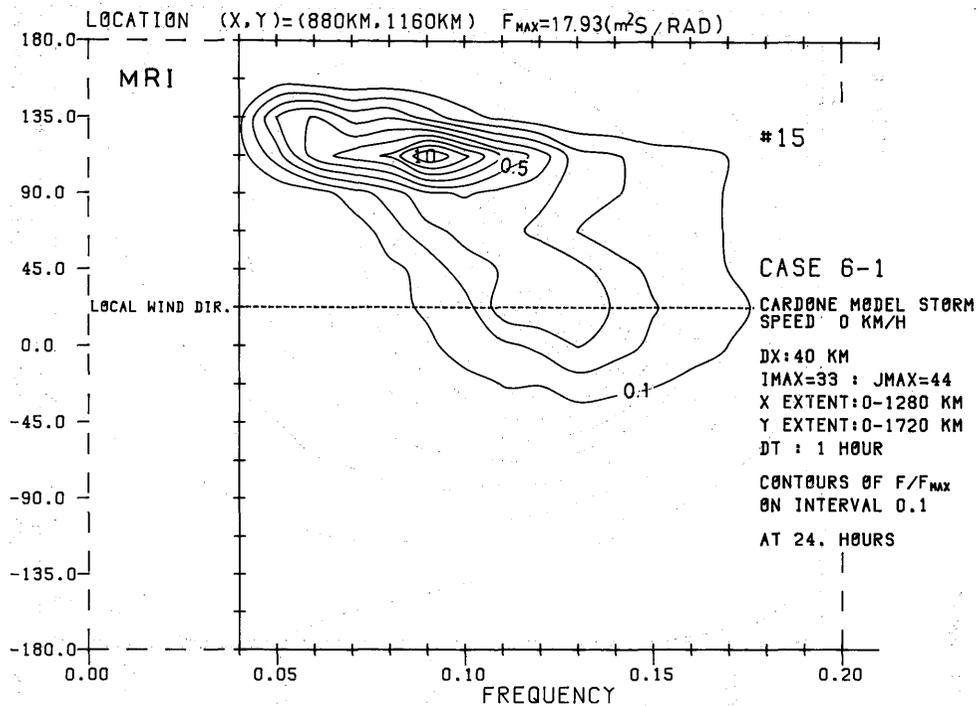


Fig. 133-0-46 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (880, 1160) (SE3)

#12

CARDONE MODEL STORM
SPEED 54 KM/H

INTERVAL 1.0 M

DX: 40 KM

AT 24. HOURS

IMAX=33 : JMAX=44

X EXTENT: 0-1280 KM

Y EXTENT: 0-1720 KM

DT : 1 HOUR

CASE 6-2

H_{STG.}

MRI-I

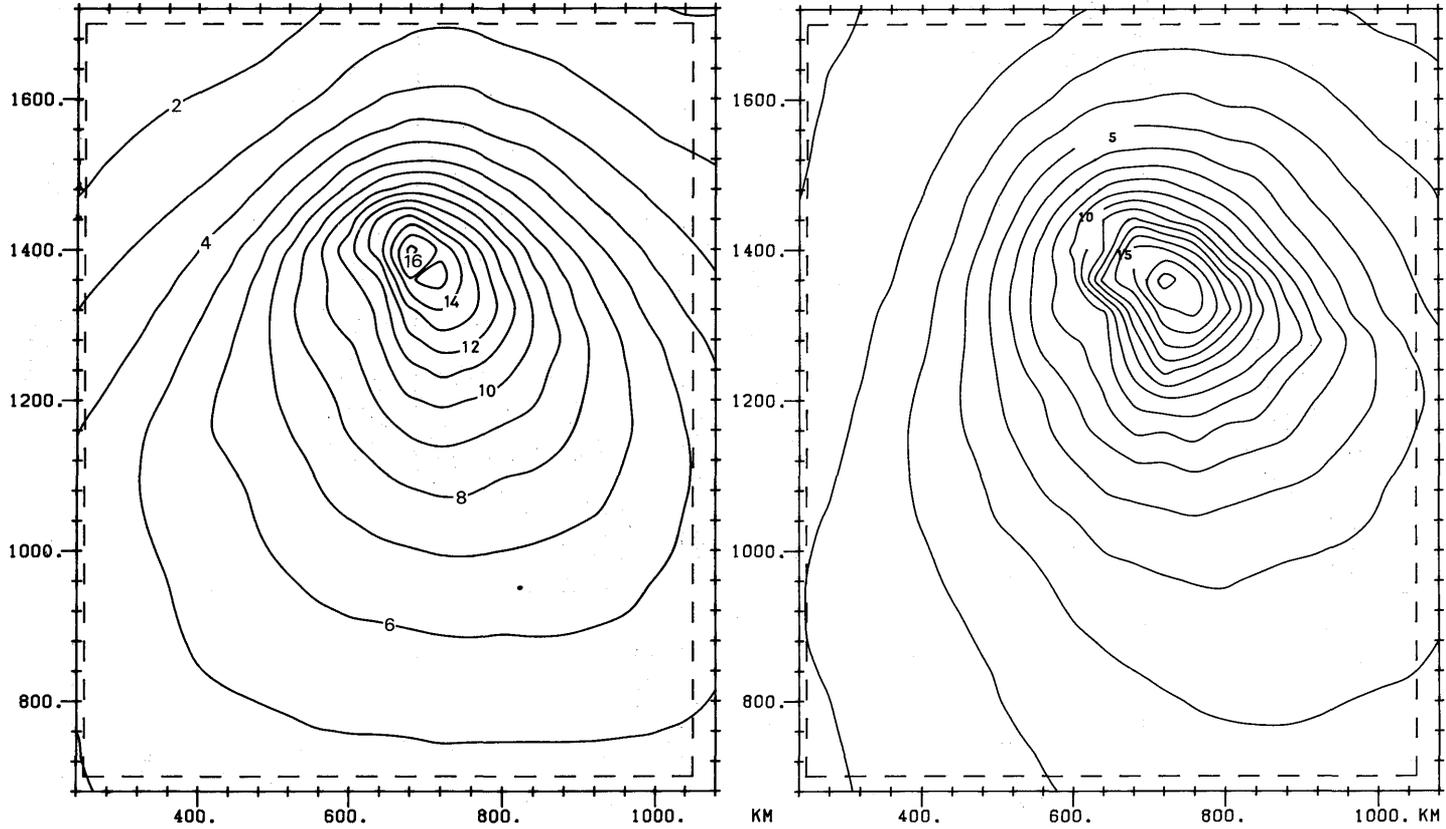


Fig. 134-0-48 contours of H_s vs. X and Y

#13

DX: 40 KM
IMAX=33 : JMAX=44
X EXTENT: 0-1280 KM
Y EXTENT: 0-1720 KM
DT : 1 HOUR

CASE 6-2 \bar{f}

INTERVAL 0.01 HZ

CARDONE MODEL STORM
SPEED 54 KM/H

AT 24. HOURS

MRI-II

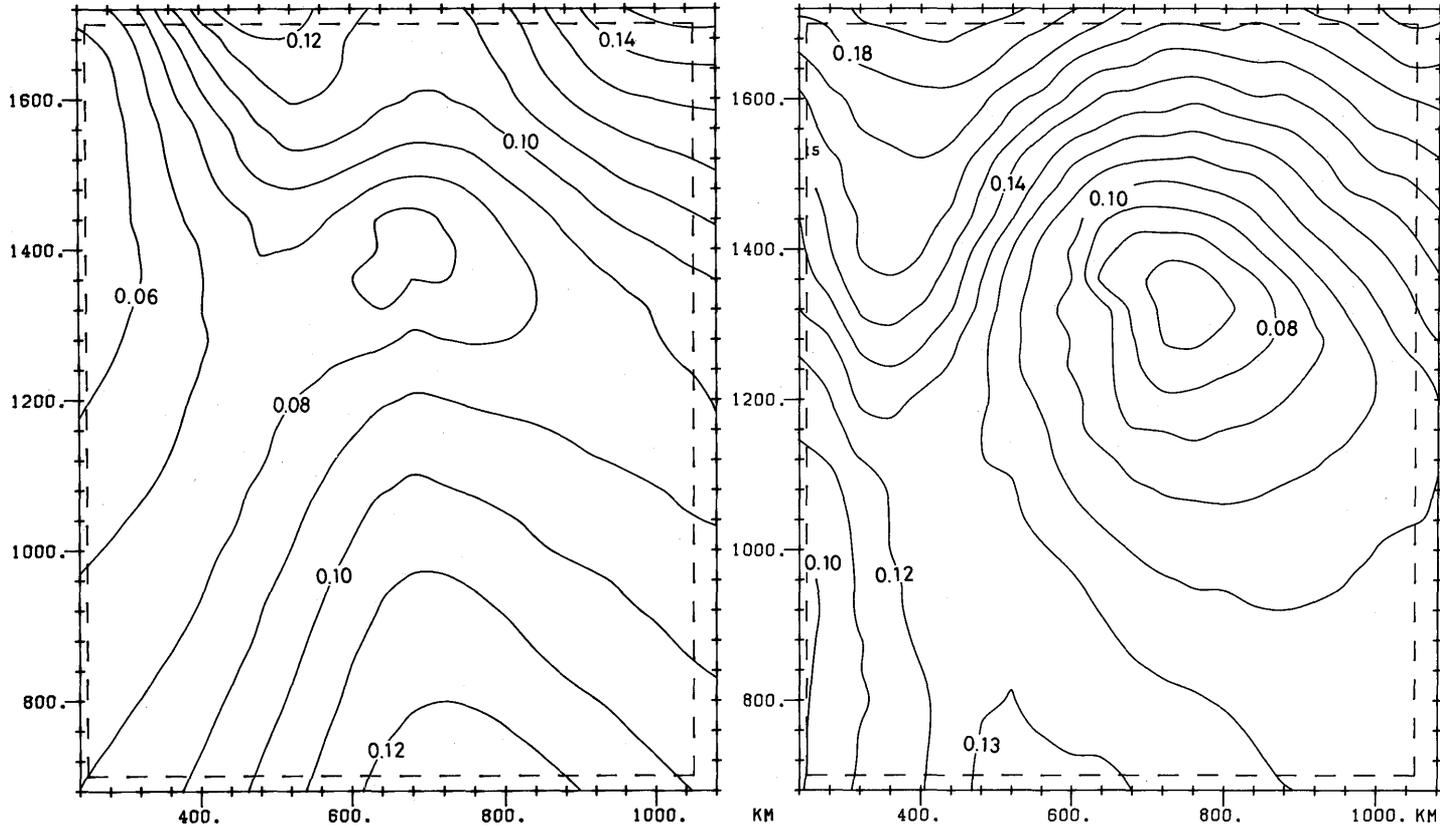


Fig. 135-0-49 contours of \bar{f} vs. X and Y

#14

DX:40 KM
IMAX=33 : JMAX=44
X EXTENT:0-1280 KM
Y EXTENT:0-1720 KM
DT : 1 HOUR

CASE 6-2 CUSTER DIA.

CARDONE MODEL STORM
SPEED 54 KM/H

H_s AND MEAN DIRECTION
AT 24. HOURS

MRI-II

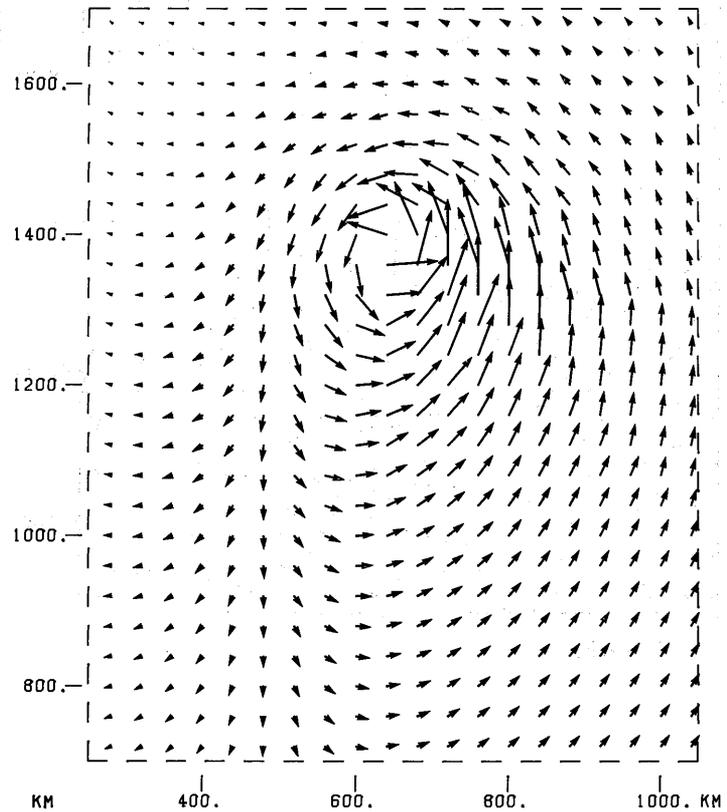
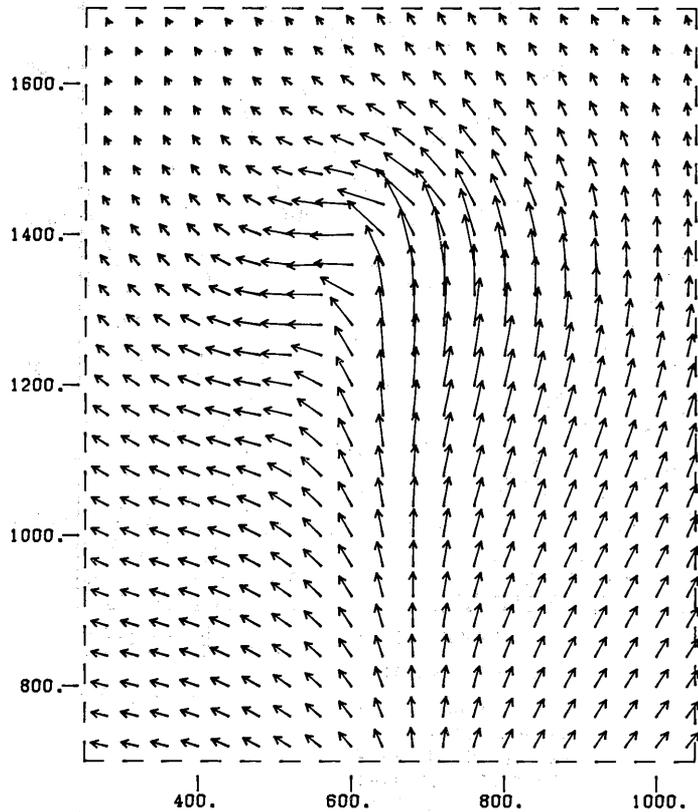


Fig. 136-0-50 custer diagram of H_s and $\bar{\theta}$ vs. X and Y

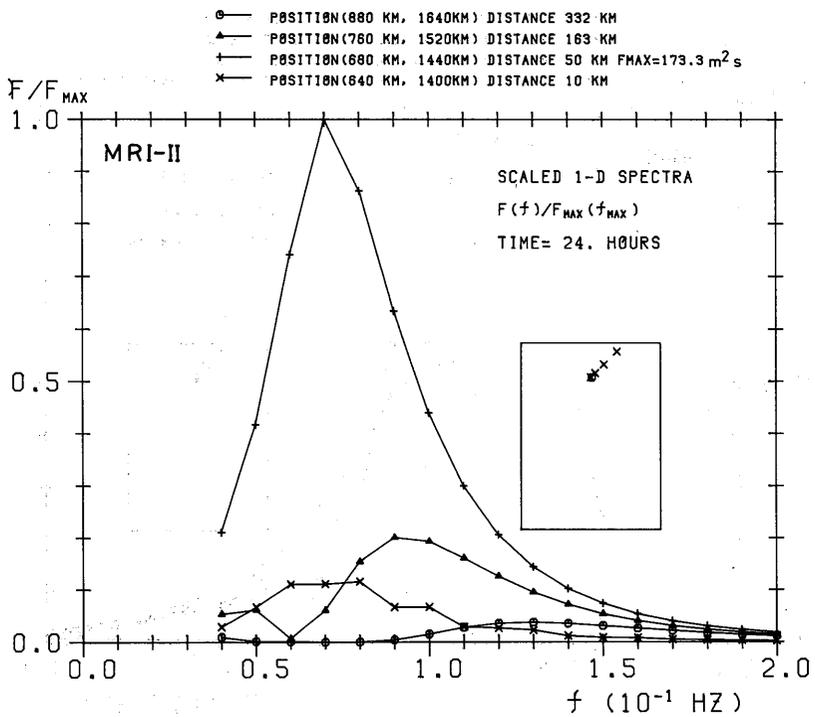
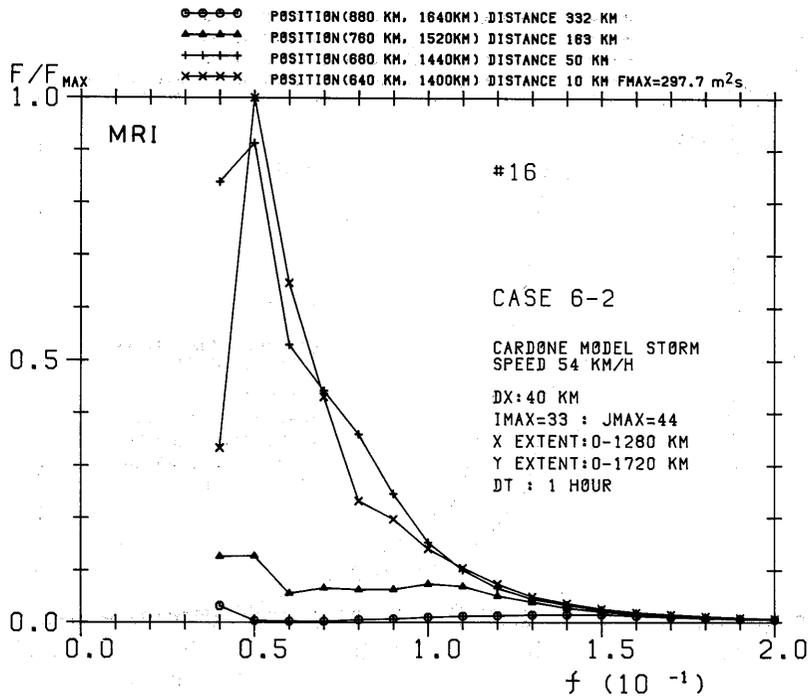


Fig.137-0-54 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400),(680,1440),(760,1520) and (880,1640) (eye and NE direction)

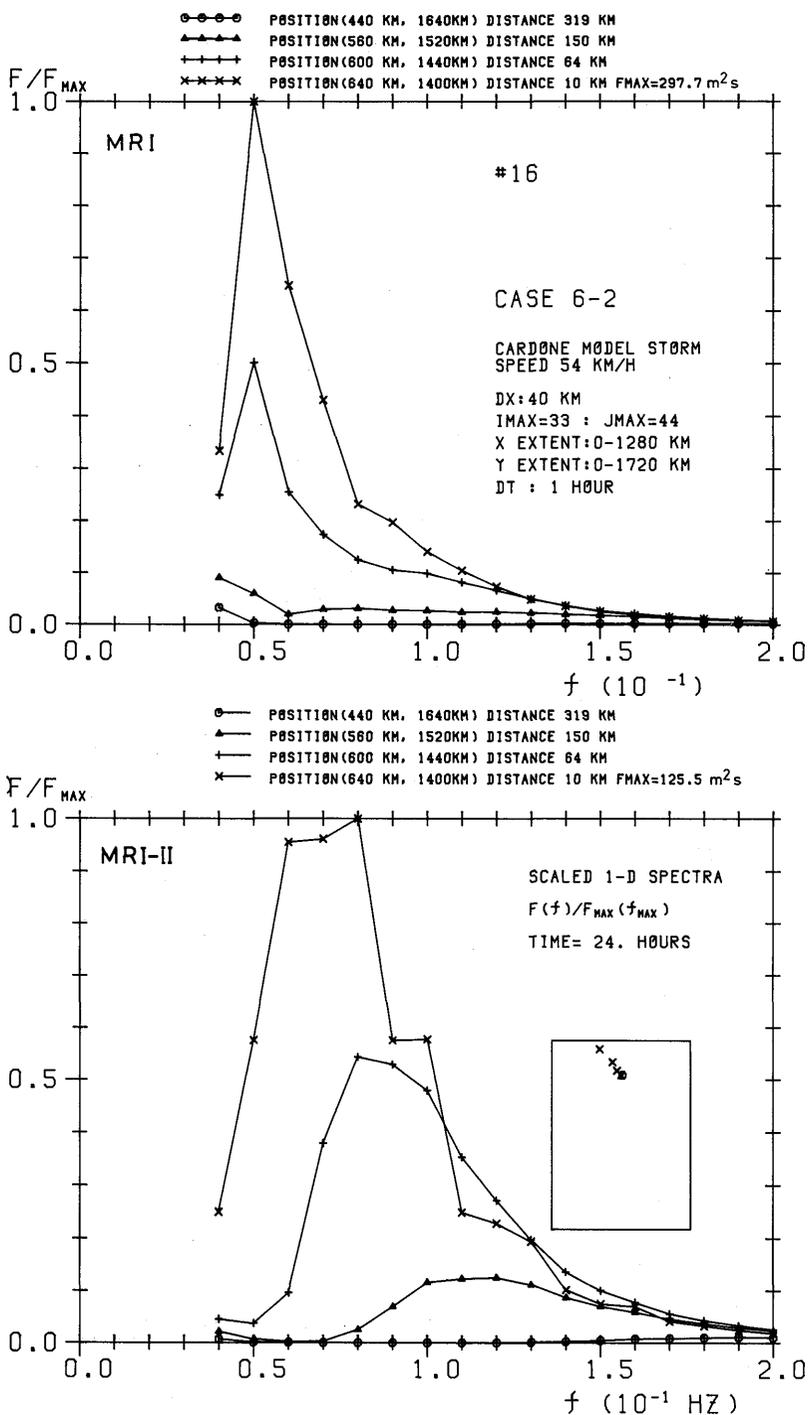


Fig.138-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400),(600,1440),(560,1520)and(440,1640) (eye and NW direction)

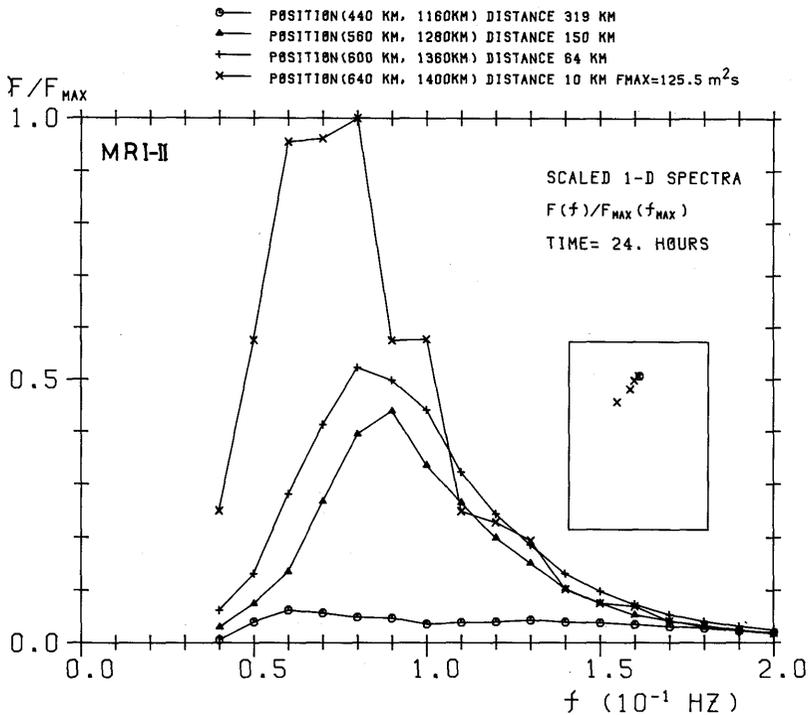
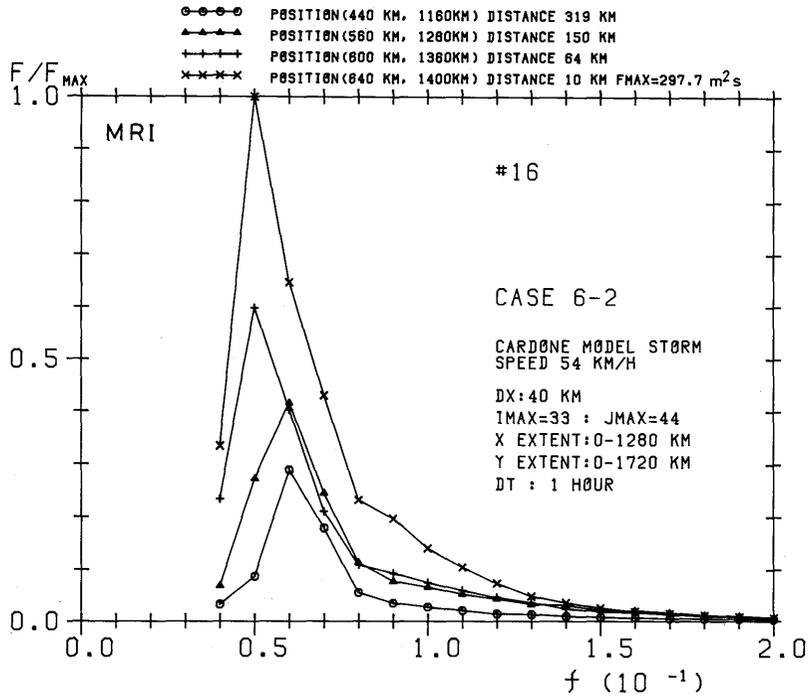


Fig. 139-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400),(600,1360),(560,1280)and(440,1160) (eye and SW direction)

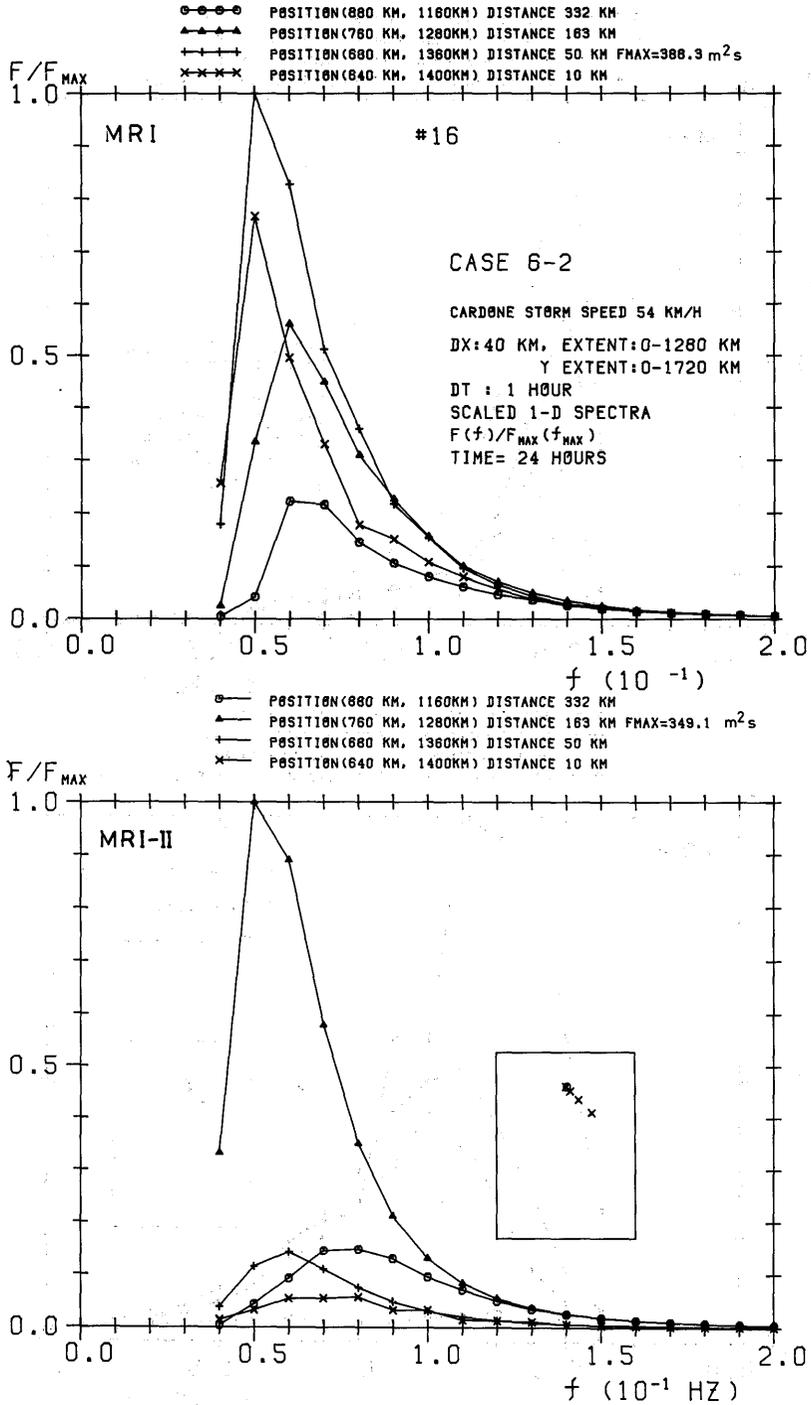


Fig. 140-0-0 scaled 1-D spectrum $F(f)/F(f)_{MAX}$ for points (640,1400), (680, 1360), (760,1280) and (880,1160) (eye and SE direction)

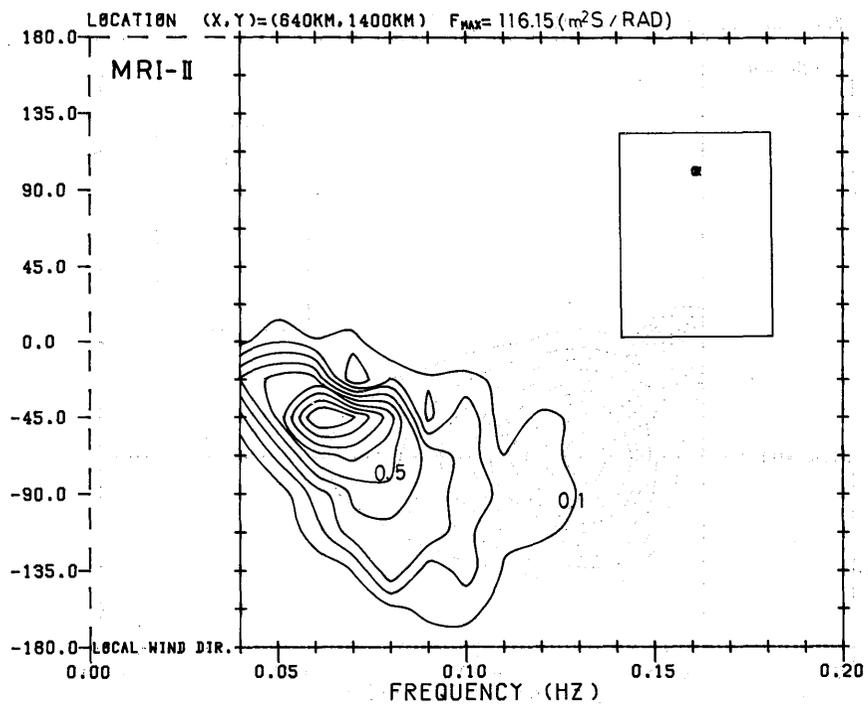
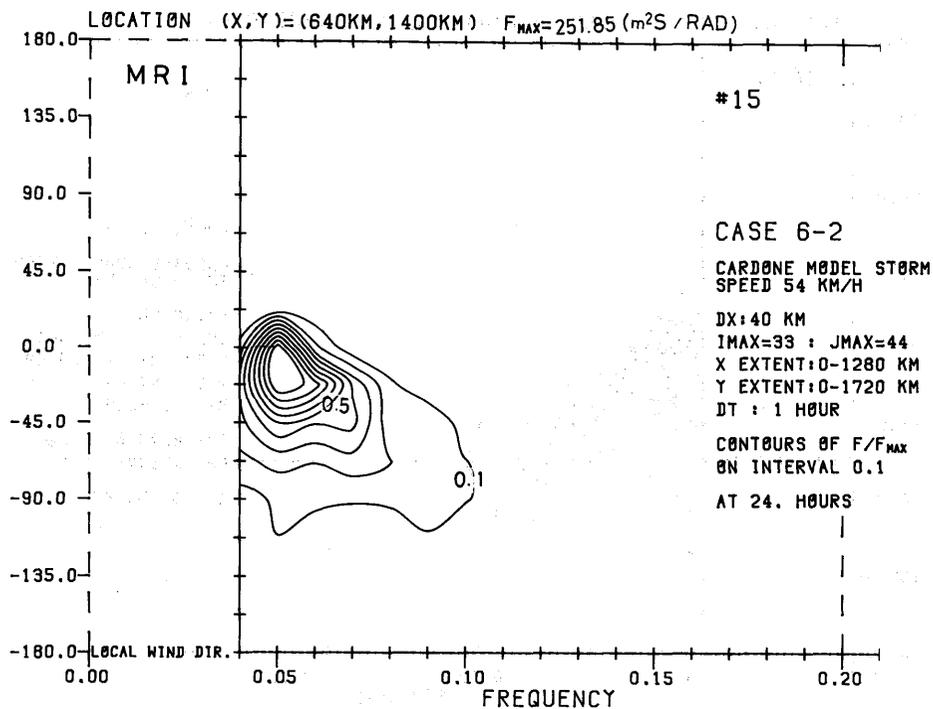


Fig. 141-0-51 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (640, 1400) (eye)

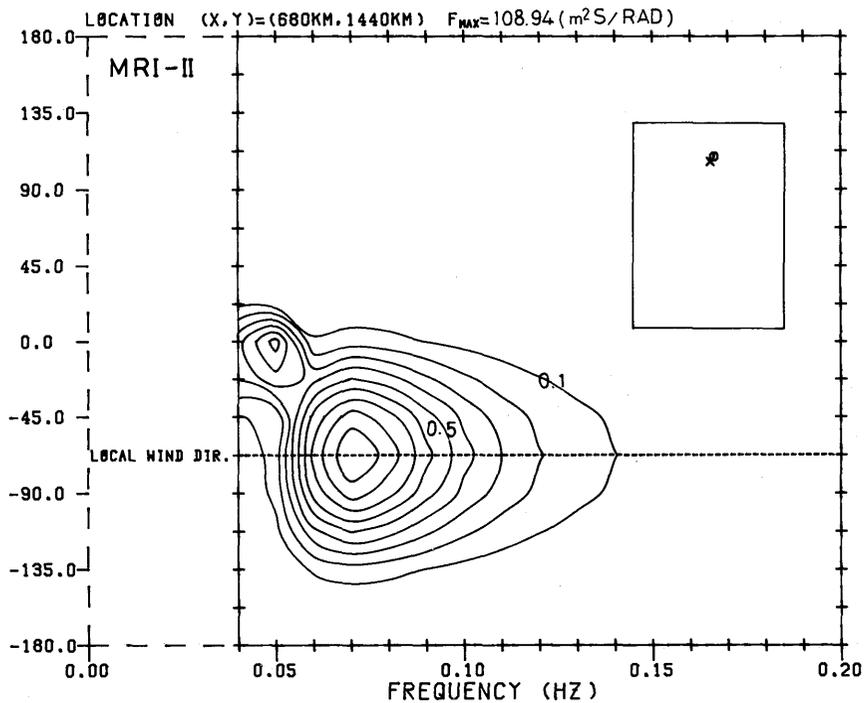
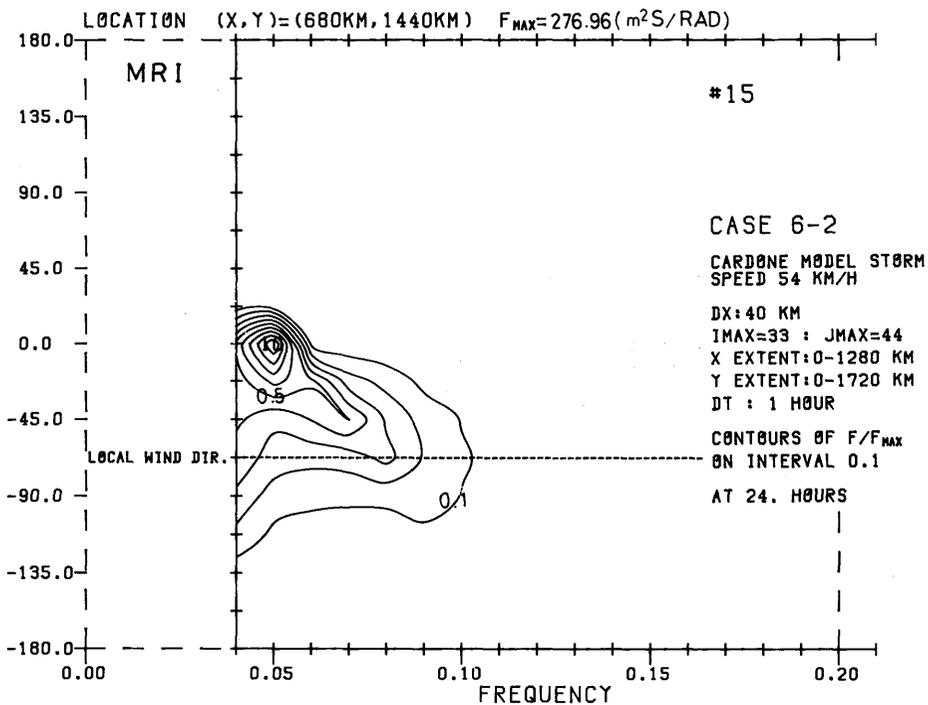


Fig. 142-0-53 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (680,1440) (NE1)

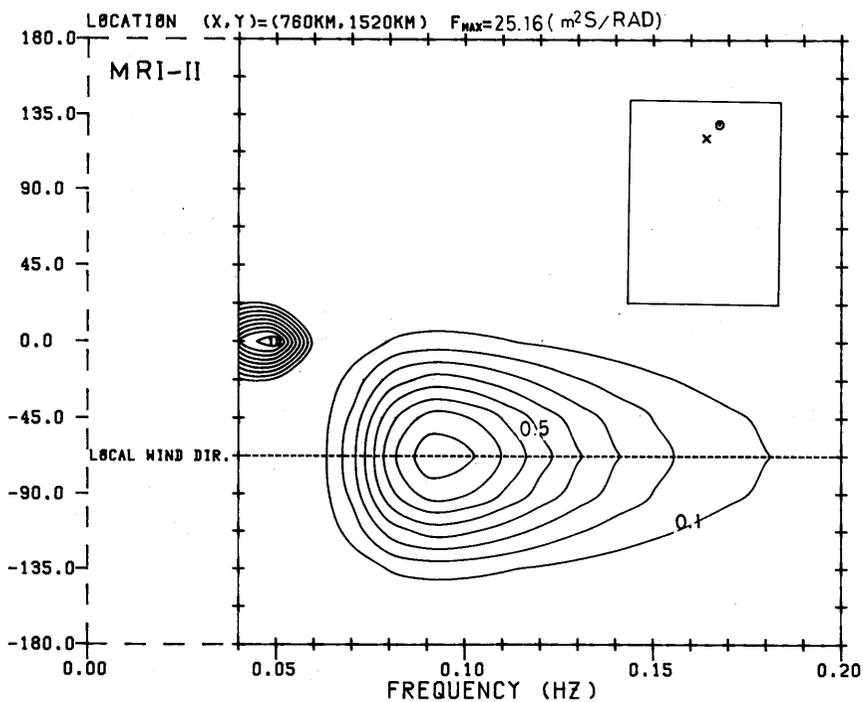
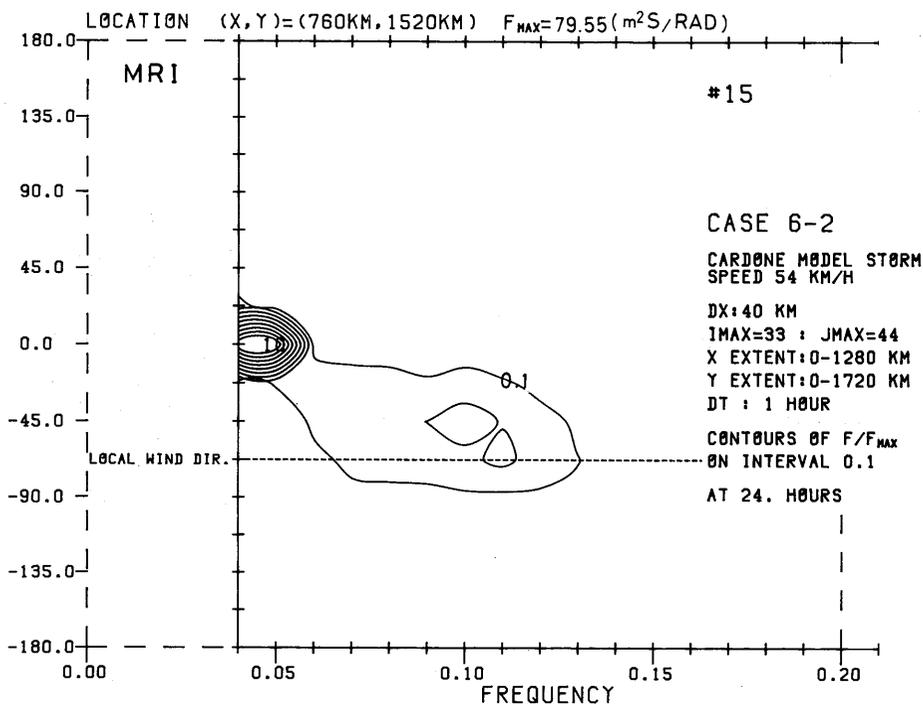


Fig. 143-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (760, 1520) (NE2)

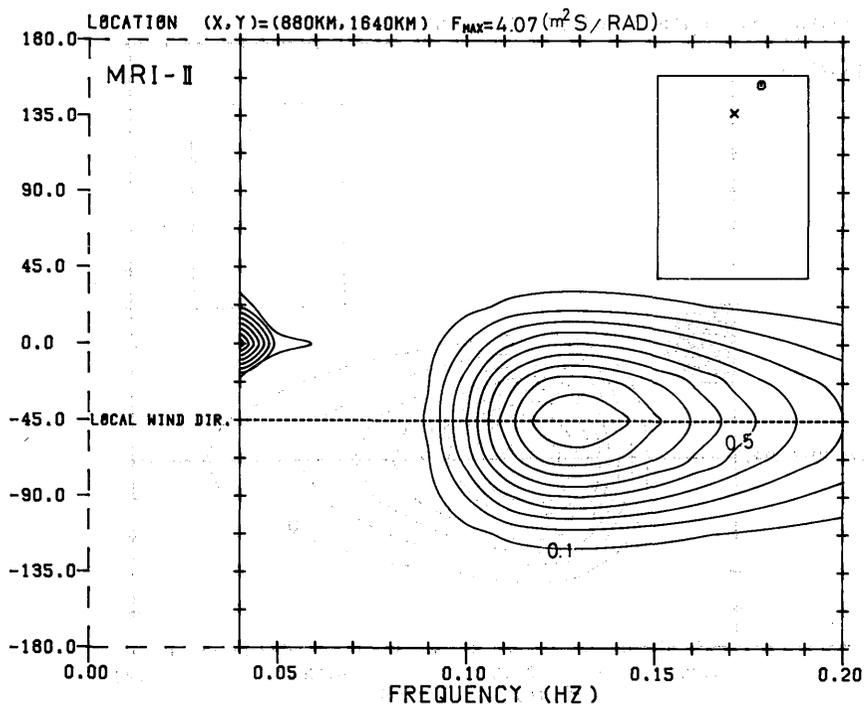
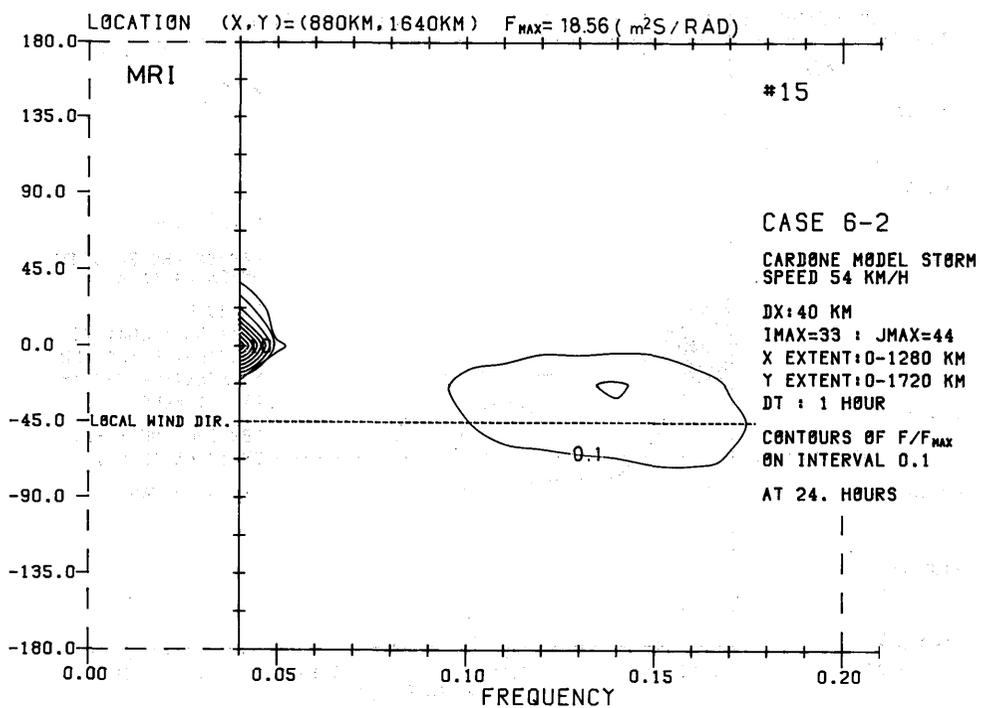


Fig.144-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (880,1640) (NE3)

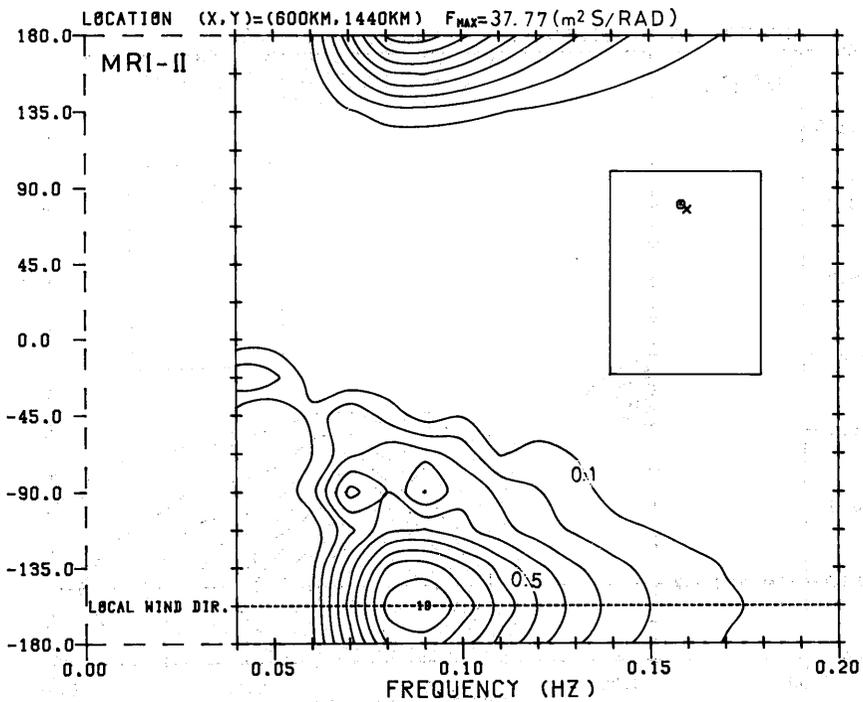
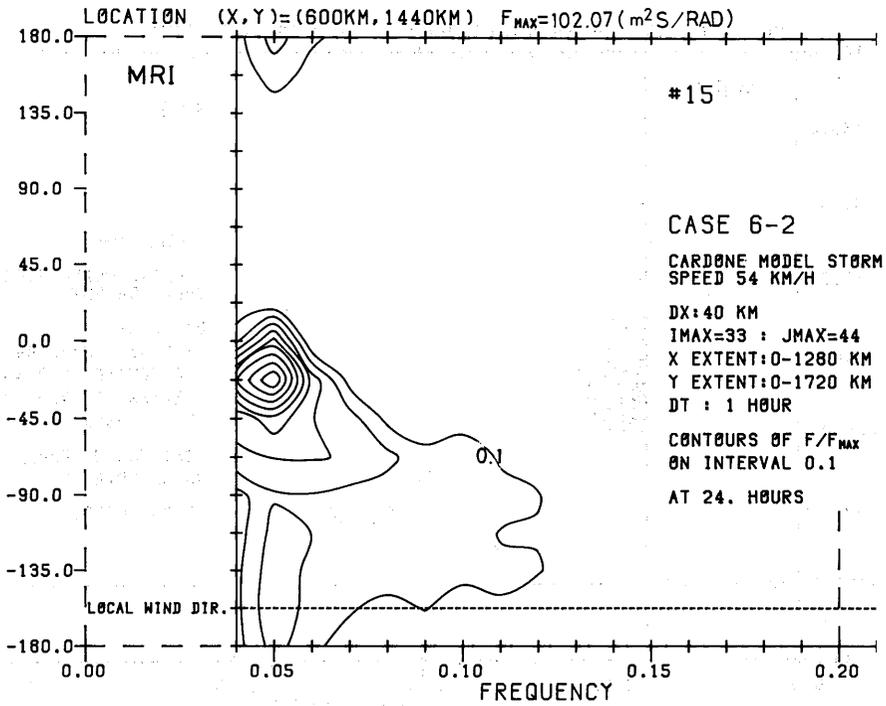


Fig. 145-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (600, 1440) (NW1)

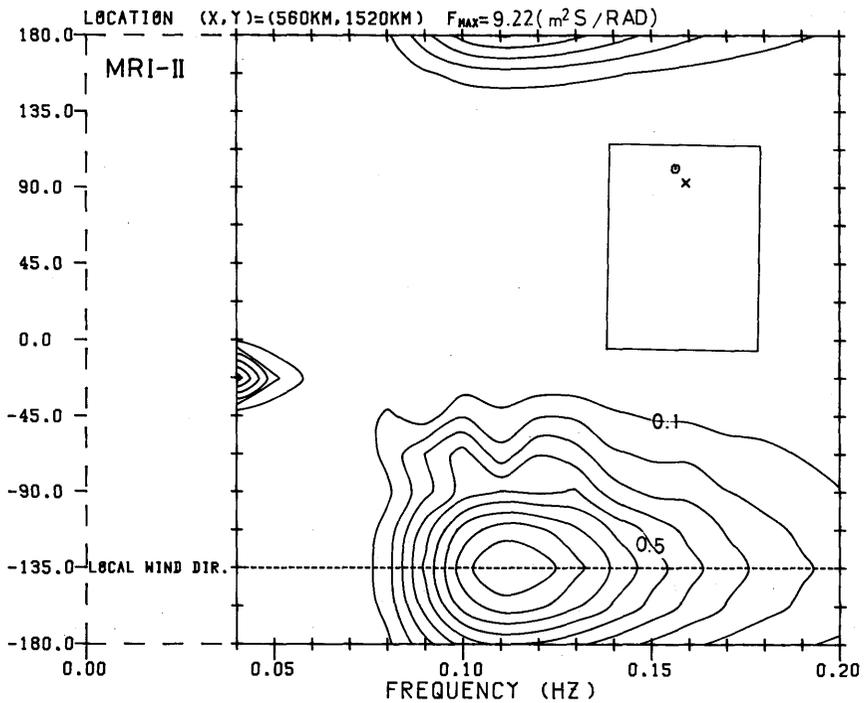
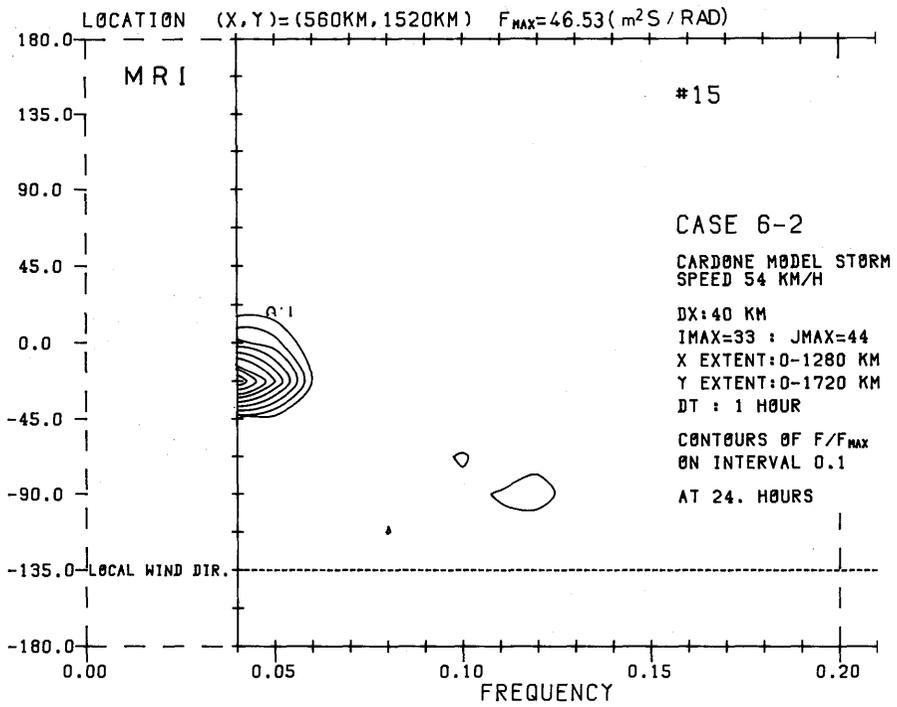


Fig. 146-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (560, 1520) (NW2)

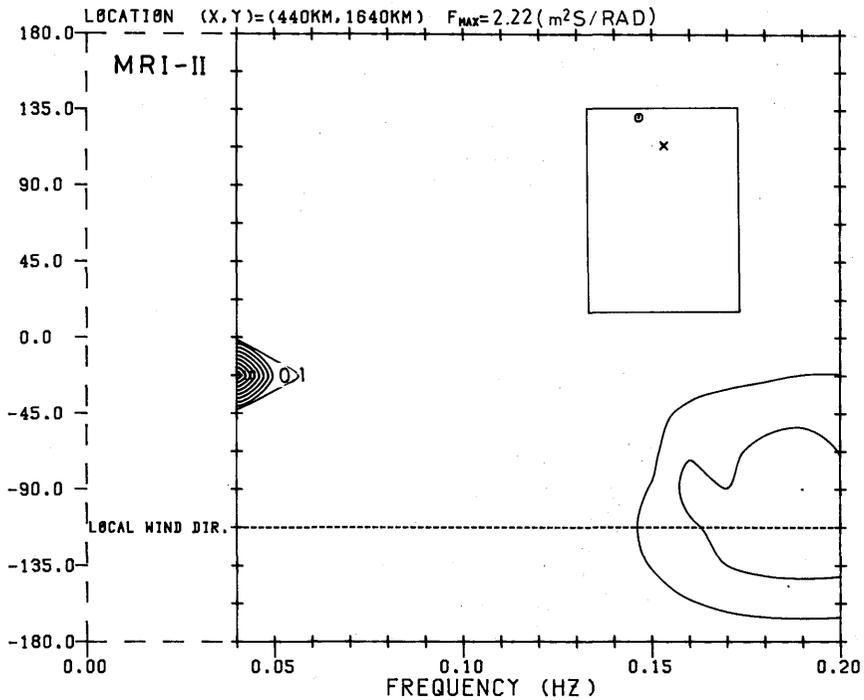
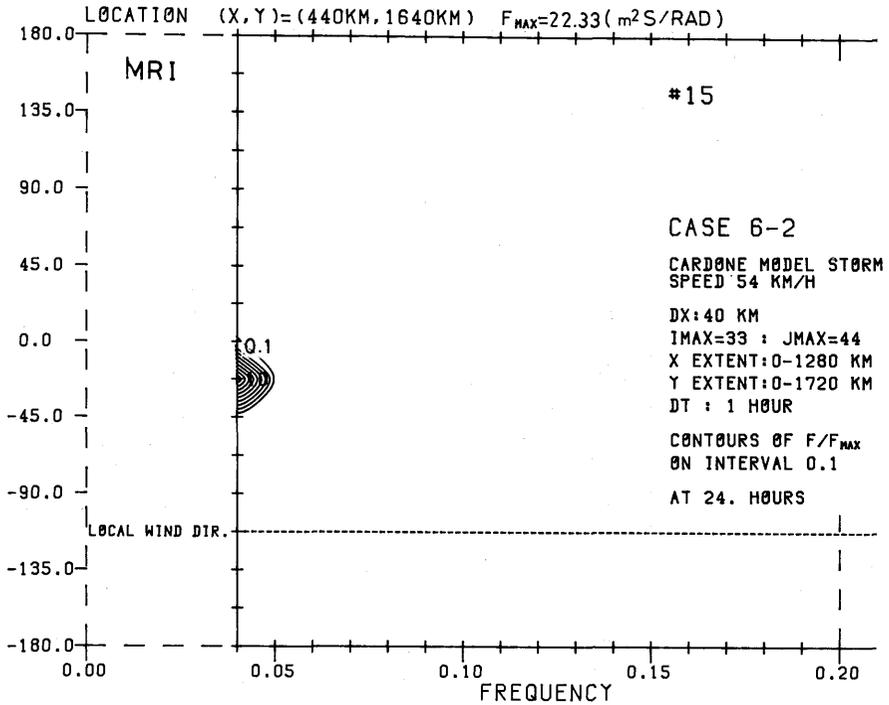


Fig. 147-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (440,1640) (NW3)

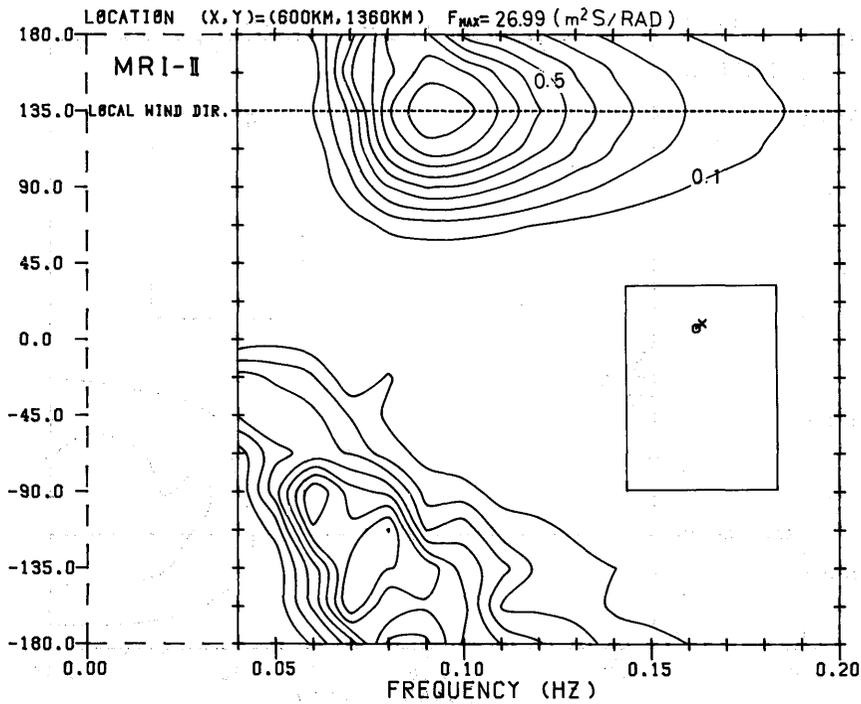
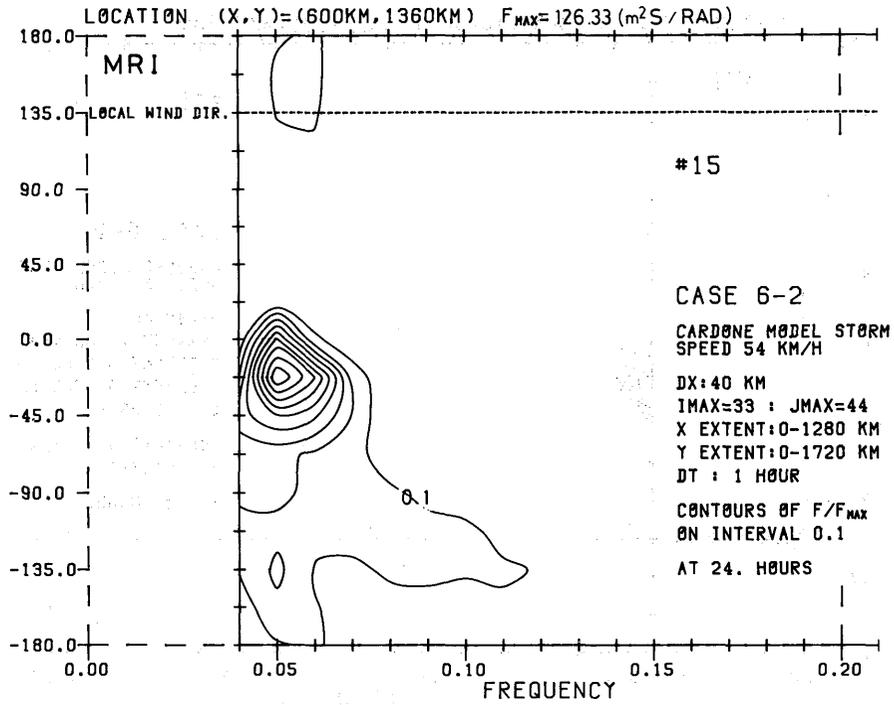


Fig. 148-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (600,1360) (SW1)

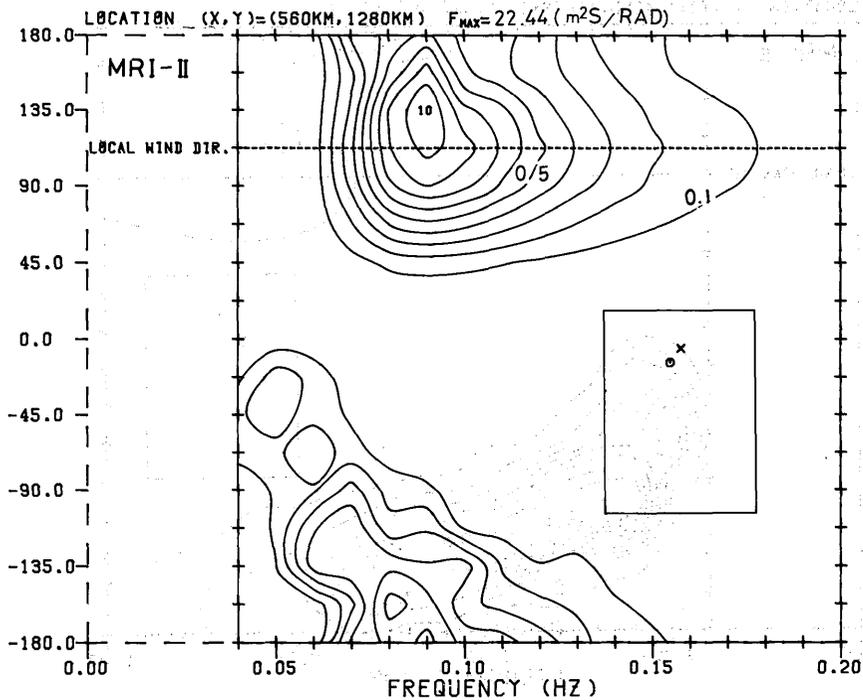
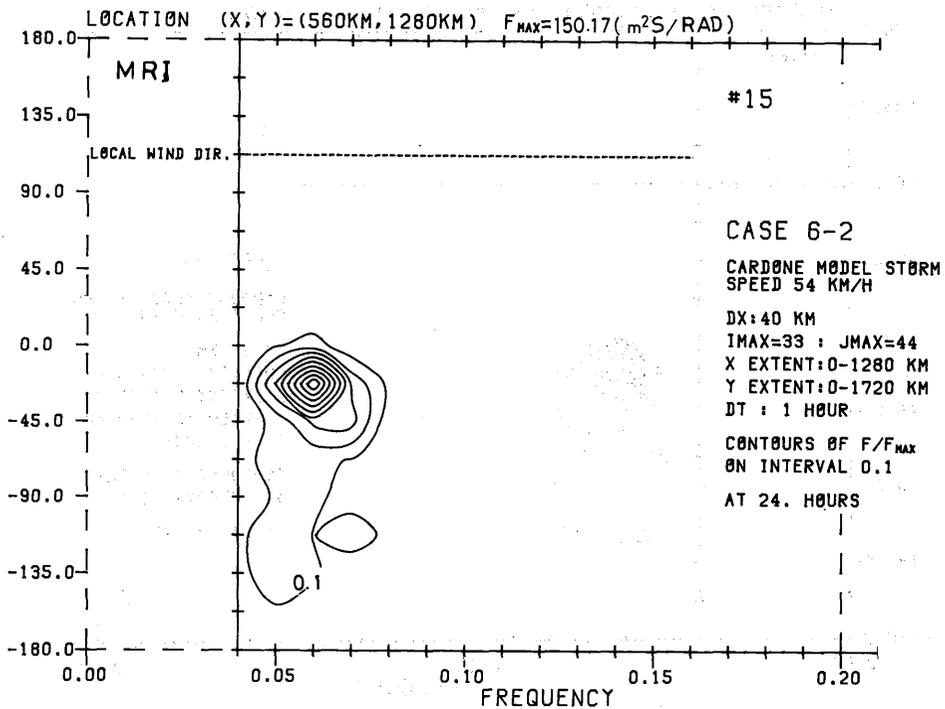


Fig. 149-0-52 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (560,1280) (SW2)

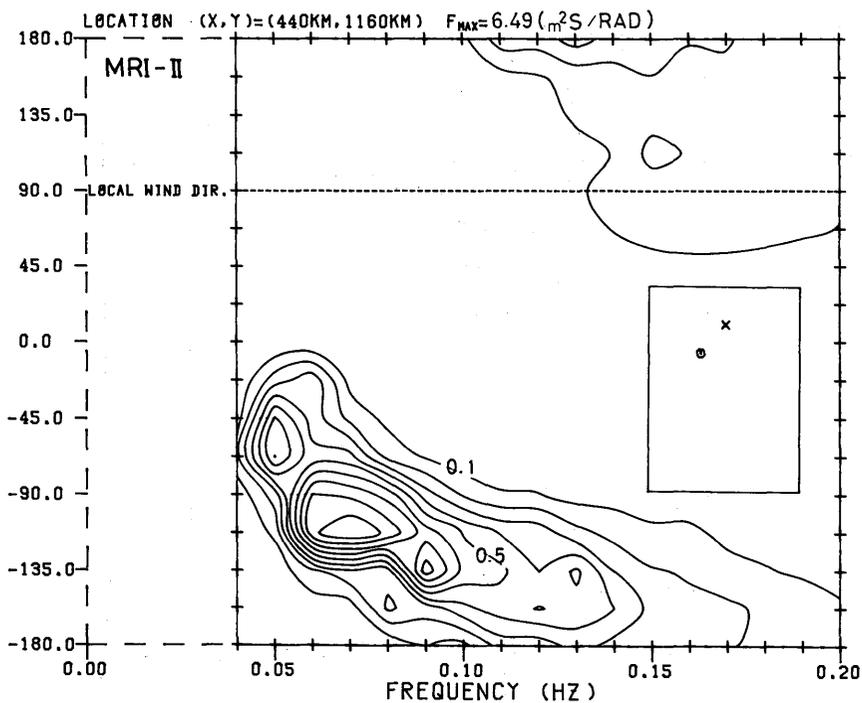
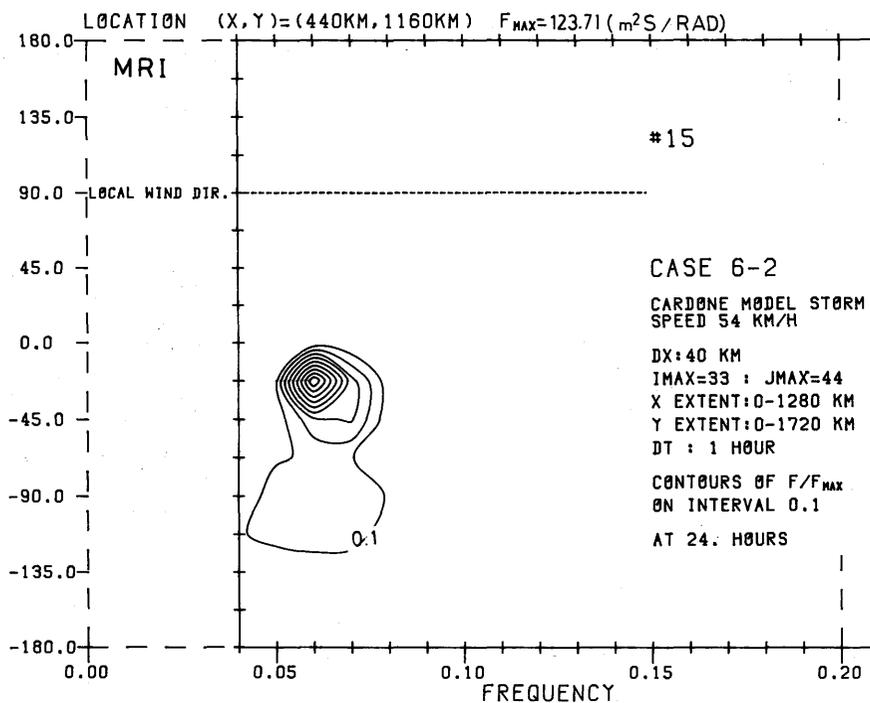


Fig. 150-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (440,1160) (SW3)

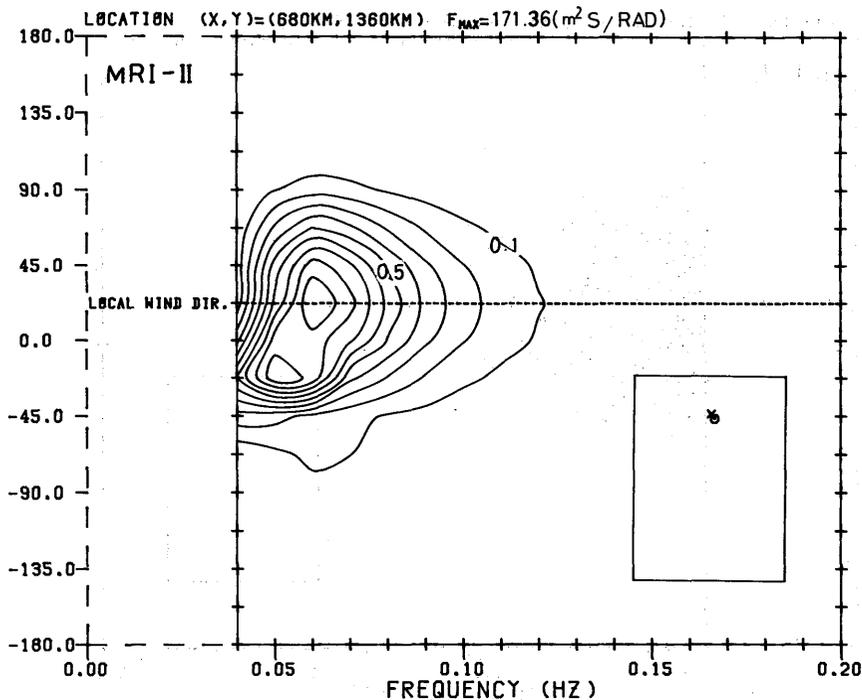
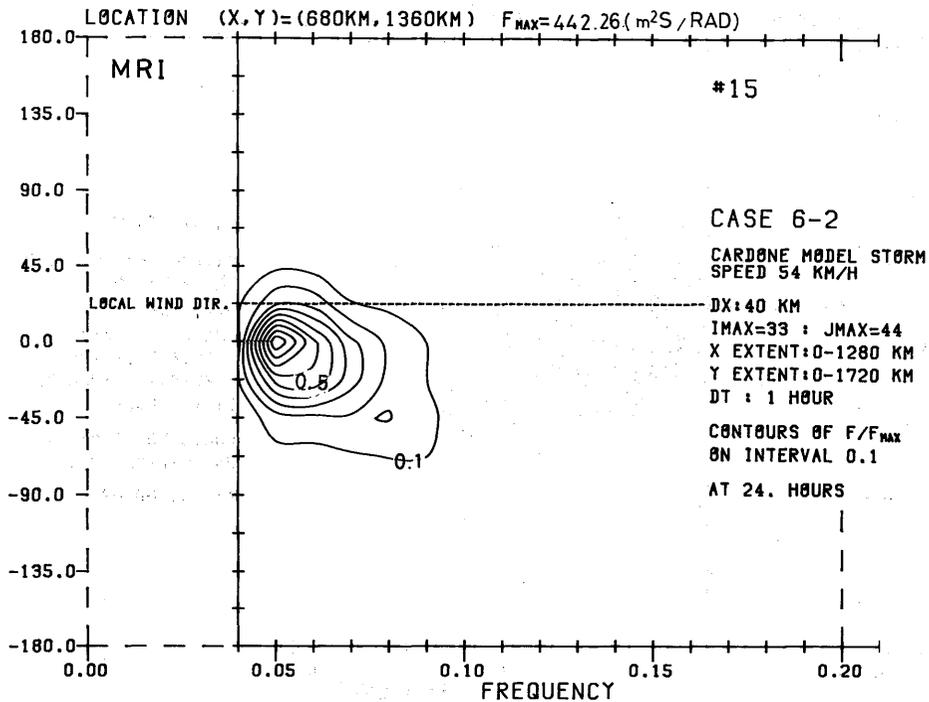


Fig. 151-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (680,1360) (SE1)

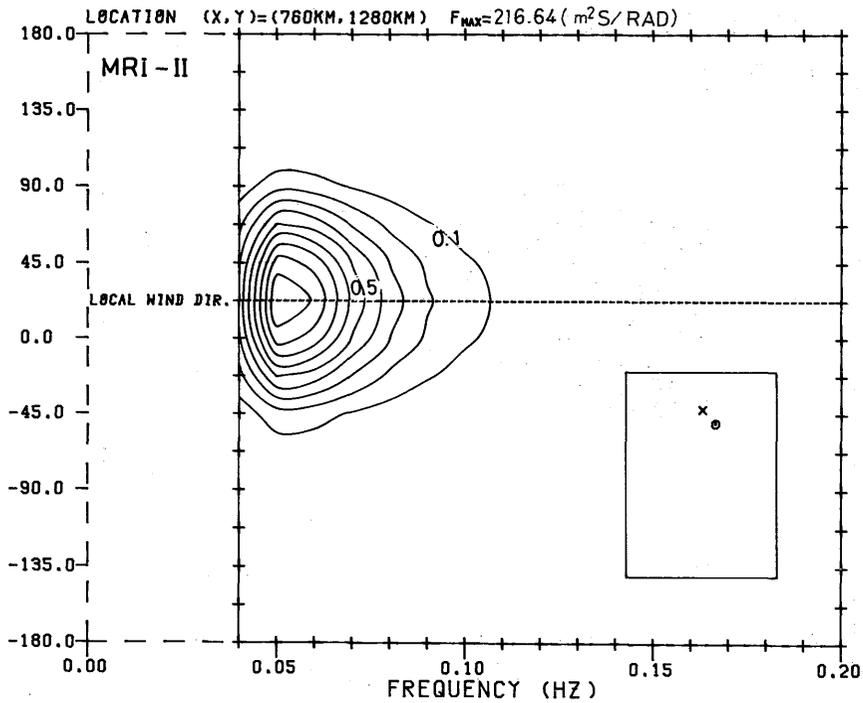
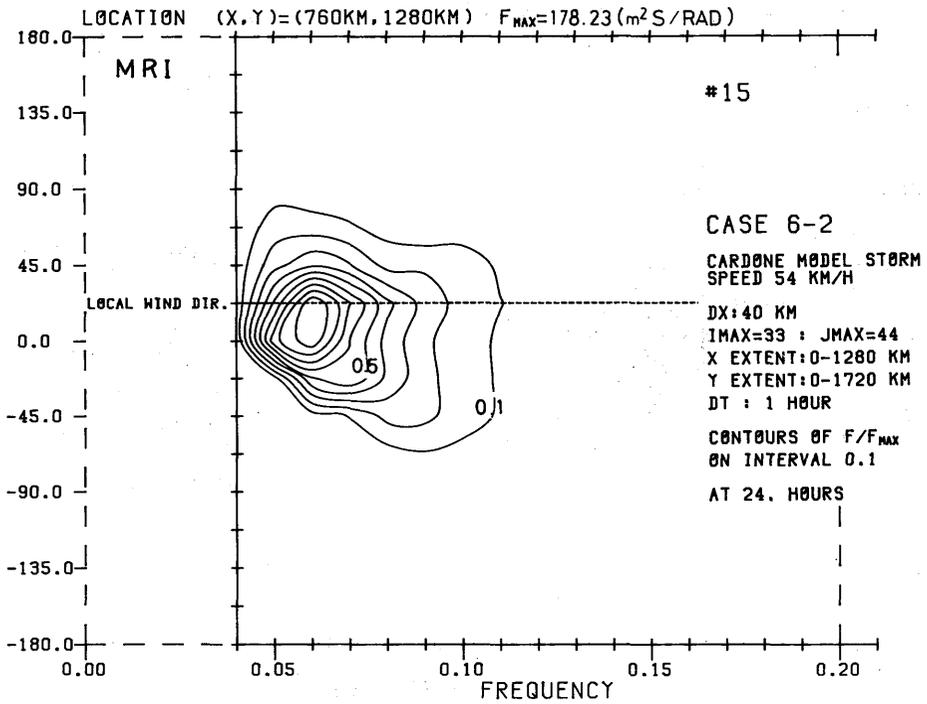


Fig. 152-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f, \theta) / F(f, \theta)_{MAX}$ for point (760, 1280) (SE2)

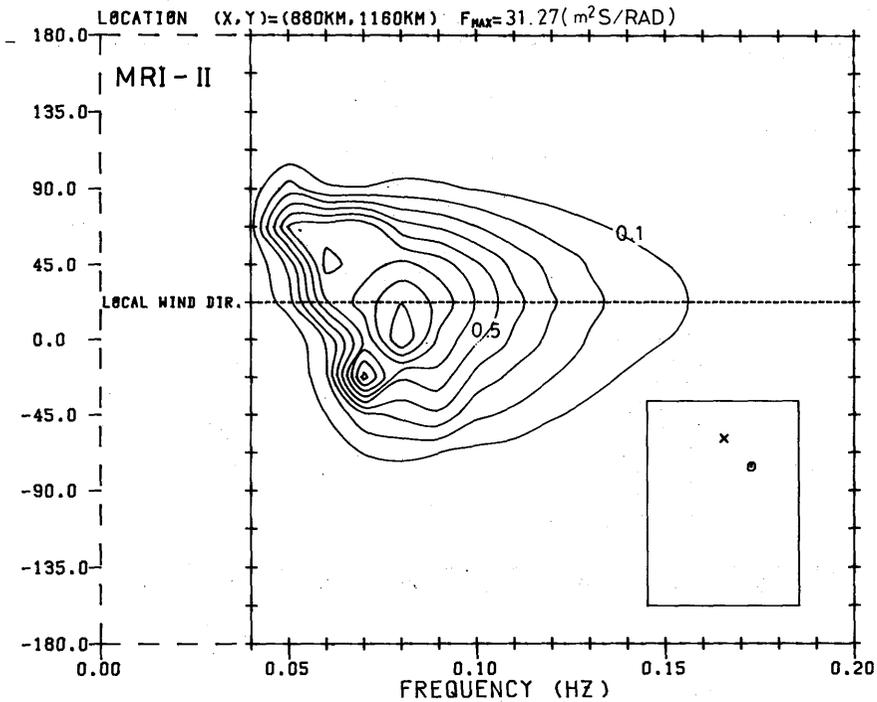
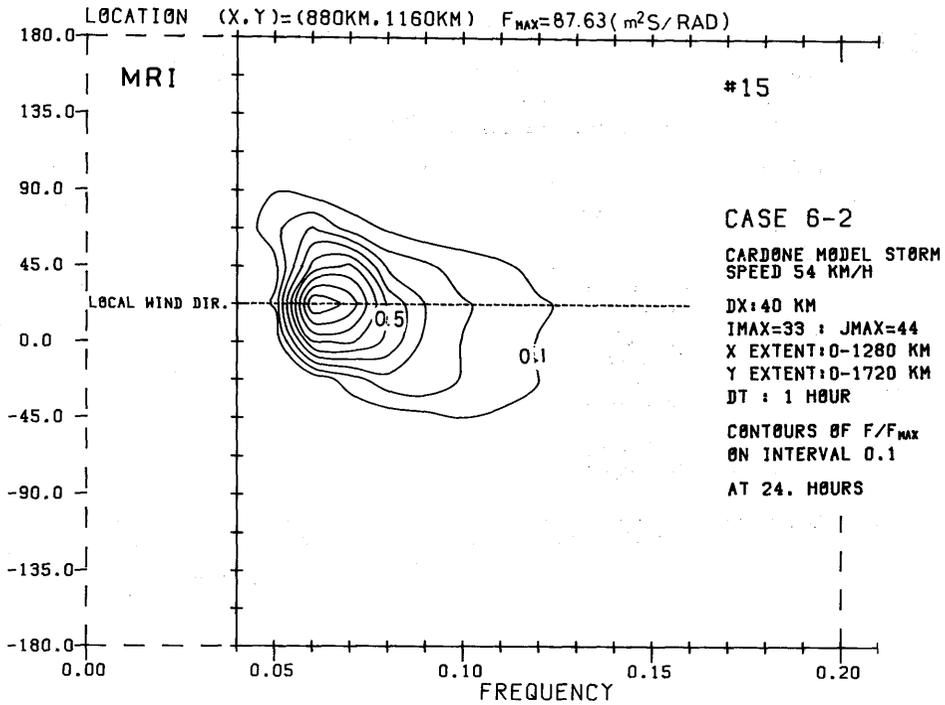


Fig. 153-0-0 scaled 2-D spectrum $F(f,\theta)/F(f,\theta)_{MAX}$ for point (880,1160) (SE3)

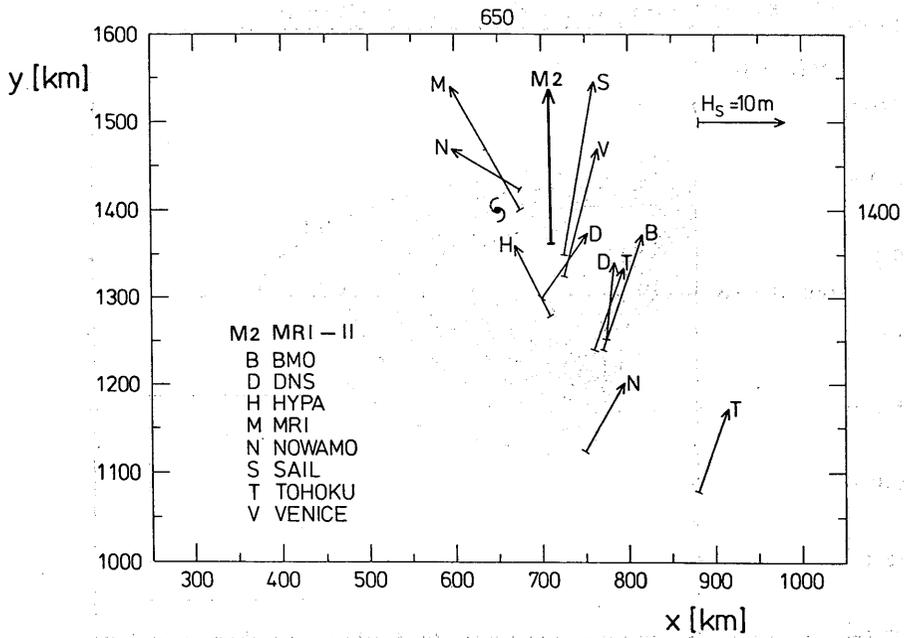
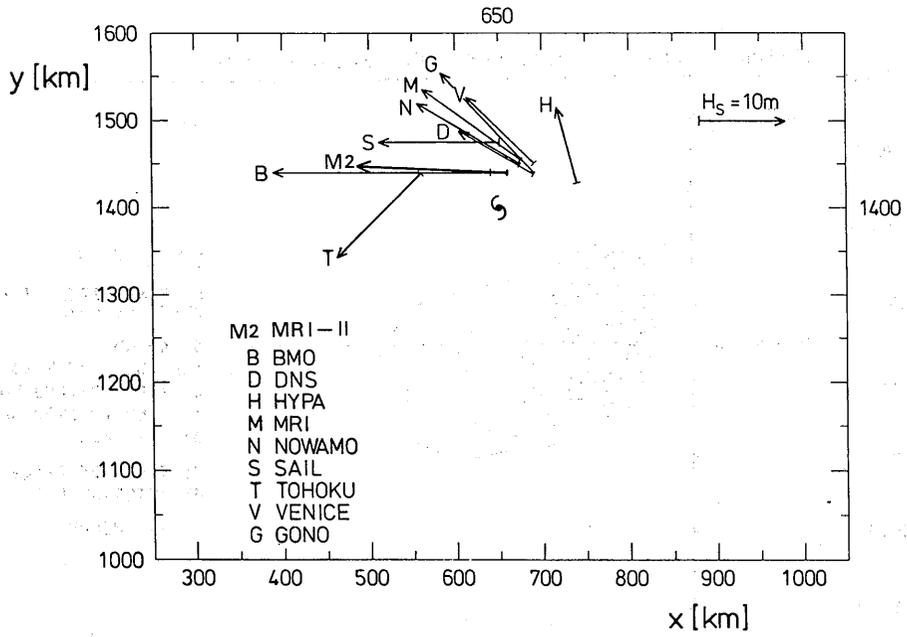


Fig. 154-12.4-0 Positions of $(H_s)_{MAX}$ for different models. Arrows point in $\bar{\theta}$ and are proportional to $(H_s)_{MAX}$ in length

気 象 研 究 所

1946 (昭和21年) 設立

所 長 : 理 博 竹 内 清 秀

予報研究部	部 長 :	吉 田 泰 治
台風研究部	部 長 :	理 博 相 原 正 彦
物理気象研究部	部 長 :	理 博 岡 林 俊 雄
応用気象研究部	部 長 :	真 島 恒 裕
気象衛星研究部	部 長 :	工 博 内 藤 恵 吉
地震火山研究部	部 長 :	理 博 市 川 政 治
海洋研究部	部 長 :	理 博 飯 田 隼 人
高層物理研究部	部 長 :	理 博 嘉 納 宗 靖
地球化学研究部	部 長 :	秋 山 勉

気象研究所技術報告

編集委員長: 真 島 恒 裕

編集委員 : 山 崎 孝 治 近 藤 洋 輝 伊 藤 朋 之
吉 川 友 章 青 柳 二 郎 岡 田 正 實
遠 藤 昌 宏 小 寺 邦 彦 伏 見 克 彦

事務局 : 西 田 圭 子 湯 原 有 哉

気象研究所技術報告は、気象学、海洋学、地震学、その他関連の地球科学の分野において、気象研究所職員が得た研究成果に関し、技術報告、資料報告及び総合報告を掲載する。

気象研究所技術報告は、1978年(昭和53年)以降、必要の都度刊行される。

昭和60年3月30日発行 I S S N 0386-4049

編集兼発行所 気 象 研 究 所

茨城県筑波郡谷田部町長峰1-1

印 刷 所 東 京 都 港 区 西 新 橋 2-5-10

日青工業株式会社