

開水路急拡部における剥離流の3次元測定

Three-Dimensional Measurements of Separated Flow in a Sudden Expanded Open Channel

川西 澄*・Mahmoud F. MAGHREBI**・余越 正一郎***

By Kiyosi KAWANISI, Mahmoud F. MAGHREBI and Shōtirō YOKOSI

Instantaneous three-dimensional velocity fields of separated flow in a sudden expanded open channel are obtained by using multi-section flow visualization and the Mass-Consistent model. The three-dimensional distributions of instantaneous velocity, vorticity and Reynolds stress are given at a short time interval and their characteristics are investigated. The instantaneous flow at downstream is highly three-dimensional and unsteady. The end-view of instantaneous velocity (v and w components) at $x/B = 6$ shows a counterclockwise rotating field. The upper portion of the separated shear-layer does not reattach to the channel side wall and its spanwise oscillation is larger at $x/B > 4 \sim 5$.

Keywords : *Separated flow, Channel expansion, Three dimensional, Instantaneous velocity, Flow visualization*

1. はじめに

河川・開水路においては、高水敷と低水路の境界部、蛇行部、凹岸部や合流部などをはじめとして、流れの横断方向に強い速度勾配を持つ水平せん断層が形成される。流水抵抗や土砂の輸送などを考えるうえで、このような水平せん断層における瞬時速度場や渦構造に関する知識は重要である。開水路流れに形成される水平せん断層は、水路床と水面という性質のことなる境界に接しており、それらの境界付近では、3次元的な性質が強く複雑な構造をしていると考えられる。したがって、瞬時流速3成分の3次元空間内における分布の測定が望まれる。本論文は、複数断面可視化法とMASCONモデルを用いて、開水路流の水平せん断層の一例である開水路急拡部に形成される剥離再付着流れの瞬時3次元速度場の測定を試みたものである。剥離再付着流れに関しては従来から後ろ向きステップ（段落ち部）や厚板前縁部の流れが数多く研究されてきたが¹⁻⁴⁾、開水路急拡部における流れは、水面と水路床の存在により、後ろ向きステップに形成される剥離再付着流よりもさらに複雑な構造をしていると考えられる。

* 正会員 工博 広島大学助手 工学部四類（建設系）

（〒724 東広島市鏡山1-4-1）

** 学生員 工修 広島大学大学院 環境工学専攻

（〒724 東広島市鏡山1-4-1）

*** 正会員 工博 広島大学教授 工学部四類（建設系）

（〒724 東広島市鏡山1-4-1）

2. 実験装置および方法

長さ 30 m, 幅 700 mm の可変勾配水路の上流端から 15 m 下流の側壁に拡幅量 $B = 50$ mm のステップを設け, 剥離流を発生させた。流量は 19.5 l/s , 水路勾配 $1/10000$, 水深 $H = 120$ mm, ステップにおける断面平均流速 U_m は 271 mm/s である。瞬時速度場を測定するため, ナイロン 12 粒子 (粒径約 0.5 mm) を水に分散させた状態で, 複数の管 (内径 3 mm) を通してステップ上流 3 m の位置に注入し, その流跡を連続的に撮影した。水路の測定部は側壁, 水路床ともガラス製である。

図-1 (end view) に示すように, 左側壁がわの 3 つの水平断面と 1 つの縦断面をステッピング・モーターに取りつけた鏡で切り替えながら, それぞれの断面を 4 台のモータードライブ付きカメラで連続撮影した。スリット光の厚みは $5 \sim 7 \text{ mm}$ である。カメラのシャッターの開閉とステッピング・モーターの回転はパーソナル・コンピュータで制御した。撮影は, 図-1 に示す断面-1, 2, 3, 4 の順に行ない, 断面-4 の撮影が終わると再び断面-1 から撮影を繰り返した。各カメラのシャッター開閉のタイミング・チャートを図-2 に示す。なお, 測定水平断面の鉛直方向間隔は 30 mm である。座標系は左側壁がわのステップ剥離線の水路底面を原点とし, 水路床に沿って流下方向を x , 水路横断方向を y , 水路床に垂直上向きを z とした (右手系)。また座標軸 x, y, z 方向の流速成分をそれぞれ u, v, w とした。

各断面とも 37 枚連続撮影し, ASA3200 まで増感現像した後, 四号印画紙に焼き付けた。印画紙上の流跡は, イメージスキャナーを用いて 256 階調のグレースケール画像として読み込み, ノイズ, 重なり合った流跡の修正・除去を行なった後, 2 値画像に変換した。画像解像度は実寸で, 1 cm あたり 34 ドットであり, えられた流跡線の平均密度は 1.3 本/cm^2 である。レイノルズ数 $Re = U_m B / \nu$ は 1.36×10^4 , フルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gH}$ は 0.25 である。

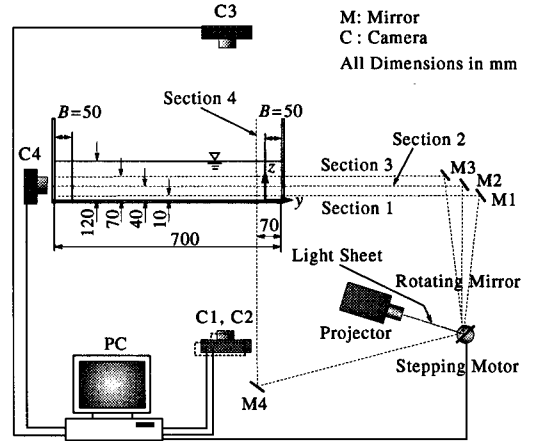


図-1 実験装置 (end view)

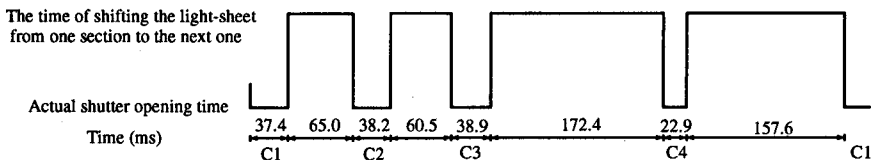


図-2 シャッター開閉時間

3. データ処理

流速ベクトルの方向は, 既知方向ベクトルから速度の連続性を利用した判定法を補助的に使い, 流跡写真を見ながら対話的に決定した。その後, 各測定水平断面 ($x-y$) 内において, 流跡処理の結果得られた流速 (u, v) を, 10 mm ($= B/5$) 間隔の格子点上の値に補間した。補間方法は, 補間格子点に最も近い流速値を各象限から 1 つずつ選び, それらを補間格子点との距離の逆数で重み付け平均するものである。次に, 3 次スプライン関数を用いて, z 方向に 10 mm 間隔で内挿補間を行なってえられた 3 次元格子点上の補間値に MASCON 法を適用し, 瞬時流速の 3 成分を求めた⁵⁾。なお, 以上の処理において 3 つの測定断面間の時間差は考慮してある。

MASCON(Mass-Consistent) モデルは、流速補間値を (u_0, v_0, w_0) とすると、連続式を拘束条件として、速度の修正量の体積積分を最小とする条件付き変分モデルである^{6,7)}。すなわち、

$$\int_V [\alpha_1^2(u - u_0)^2 + \alpha_2^2(v - v_0)^2 + \alpha_3^2(w - w_0)^2] dV = \min. \tag{1}$$

ここに、 V は計算領域、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は修正量に対する重み係数である。本実験では、鉛直方向の流速成分は測定されていないので、 $w_0 = 0$ として計算を行なった。重み係数の比は修正量の配分割合を決めることから、この比は補間値の精度を考慮して決定されるべきものである。流れ方向の流速成分 u の値は v より大きいので誤差もより大きく、したがって修正量の配分もより大きくする必要がある。また w も 0 と仮定されているので、大きく修正される必要がある。このような事情を考慮したうえで、本実験では断面-4 の流跡処理結果を参考にして重み係数の比を決めた ($\alpha_1/\alpha_2 = 0.3, \alpha_1/\alpha_3 = 1.2$)。

4. 実験結果および考察

4・1 瞬時速度場の3次元特性と非定常性

図-3 に3次元空間内における $u/U_m = 0.08$ の等値面を示す。ただし、図-3 は撮影開始からの経過時間 $tU_m/B = 12.8 \sim 22.4$ における一連のものである。図-3 から死水域の形状が3次元的で、非定常性が強いことがわかる。剥離直後にくらべ、下流部でその時間変化はより大きくなっており、3次元性も強い。経過時間 $tU_m/B = 22.4$ の上流部を除き、等値面の下部は上部より側壁がわに寄っており、等値面は鉛直面から傾いている。このことから、水路床付近では底面境界の影響で死水域の幅が狭くなっていることがわかる。

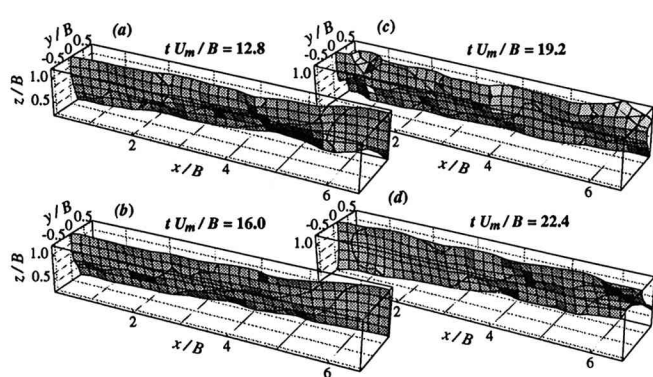


図-3 死水域の3次元形状 ($u/U_m = 0.08$)

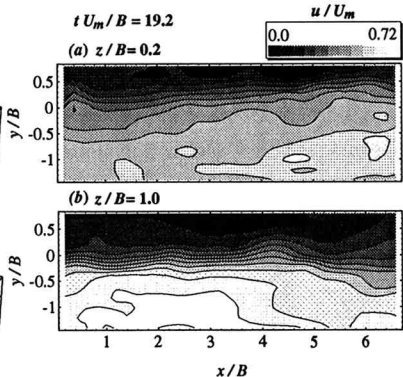


図-4 瞬時流れ方向流速の水平断面内分布

図-4, 5 はそれぞれ、瞬時主流速 u の水平断面内分布 ($tU_m/B = 19.2$; $z/B = 0.2, 1.0$) と横断面内分布 ($tU_m/B = 12.8, 19.2$; $x/B = 2, 6$) を示したものである。上述したように、図-4 から、水路床付近の断面では上方断面に比べ死水域の面積が小さいことがわかる。水路中央側における u の分布をみると、 $z/B = 0.2$ と $z/B = 1.0$ の断面では対照的な傾向を示している。すなわち、高速領域が水路床付近では下流側に、上方では上流側に位置している。したがって、図-5 の横断面内分布をみてもわかるように、水路中央側の流速は上流部では上方ほど大きい、下流部では流速の最大値は下方に移動している。上方水平断面の下流側で流速が低減

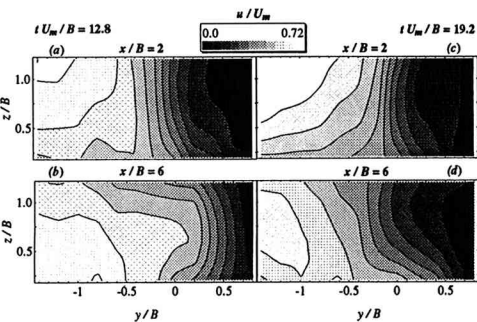


図-5 瞬時流れ方向流速の横断面内分布

しているのは、あとで述べるように死水域の低速流体が上方で水路中央側に運ばれるためである。ここには示さないが、 $tU_m/B = 12.8, z/B = 1.0$ の水平断面においては、側壁に向かう高速流のため $u/U_m \leq 0.48$ の等値線が $x/B \approx 5$ で急激に側壁がわに曲がっている。図-5 (b),(d) から、 $x/B = 6$ （後述するように、この付近で剥離せん断層が側壁に再付着する）において、側壁への高速領域の広がりが高くなる高さは、 $tU_m/B = 12.8$ では $z/B \approx 0.7$ 、 $tU_m/B = 19.2$ では水路床付近である。あとで述べるように、これらの高さに側壁に向かう流速の最大値がある。

図-6 は瞬時横方向流速 v の等値面 ($v/U_m = -0.03, 0.07$) を示したものである。強い横方向流速の領域が下流部 ($x/B > 5$) に広く分布していることがわかる。図-6 (a), $tU_m/B = 12.8$ の下流部にみられる大きな $v/U_m = 0.07$ の等値曲面は $z/B \approx 0.7$ の高さで最も幅が広く、これは図-5 (b) に示されている高速領域の横

方向の広がりに対応している。また、($x/B \approx 4 \sim 5$) の水路床付近にも側壁に向かう流れが存在しており、これが図-3 (a) の対応する部分にみられる死水域の幅の縮小に関係している。上流部 ($x/B \approx 2$) にみられる水路中央に向かう流れの領域は剥離せん断層中の渦によって誘起されたもので、ほぼ鉛直に伸びている。図-6 (b), $tU_m/B = 19.2$ の下流部では、水路床近くに側壁に向かう流れがみられるが、上方では $tU_m/B = 12.8$ の場合とは逆に、水路中央部に向かう流れが広く分布している。

図-6 と同じ経過時間における瞬時鉛直方向流速 w の等値面 ($w/U_m = \pm 0.03$) を図-7 に示す。両時刻とも上流部には下降流が存在している。下流部 $x/B > 4$ では流れ方向に伸びた上昇流と下降流の領域が、横方向に並んで存在しているのがわかる。図-7 (a), $tU_m/B = 12.8$ では側壁がわに上昇流、水路中央側に下降流がみられ、 $tU_m/B = 19.2$ ではこの逆である。図-7 (a), $tU_m/B = 12.8$ における下降流は $x/B \approx 5.5$ の位置で水路床近くにまで達している。この下降流は図-5 (b) および図-6 (a) とあわせて考えるとわかるように、側壁に向かう高速流である。

図-5 (b), (d) に対応する横断面内速度ベクトル分布を図-8 (a), (b) に示す。さきに述べたように、側壁に向かう流れは高速で、側壁から水路中央部に向かう流れは低速である。図-8 (a), $tU_m/B = 12.8$ では測定した鉛直方向範囲全体にわたって側壁に向かう下降流がみられる。この側壁に向かう流れは側壁に近づくとも側壁に沿った上昇流となっている。上方に中心を持つ渦巻き流れの一部のようにもみえるが、水深全体にわたる測定結果がないのではっきりしたことは言えない。一方、 $tU_m/B = 19.2$ では、水路床付近で側壁に向かう流れ、上方で水路中央部に向かう流れがみられ、 $z/B \approx 0.7$ に中心を持つ反時計回りの渦巻き状の流れが観察される。上方の水路中央に向かう流れは $y/B > 0.0$ では下降流であるが、 $y/B \approx -0.7$ で側壁に向かう流れとぶつかり、上昇流を形成している。このような流れにより、運動量や物質の3次元的な輸送や混合が起きていると考えられる。

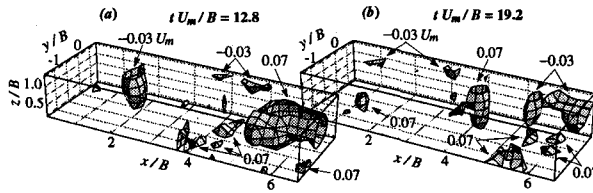


図-6 瞬時横方向流速の等値面

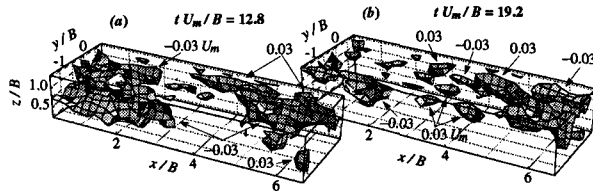


図-7 瞬時鉛直方向流速の等値面

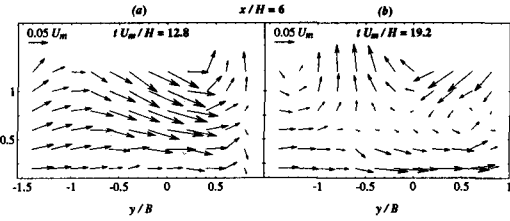


図-8 横断面内の瞬時流速ベクトル (end view)

4・2 剥離せん断層の3次元構造と非定常性

剥離せん断層の3次元構造とその経時変化を観察するために、渦度ベクトルの絶対値を計算し、その等値面を描いたものが図-9である。速度の空間微分は格子点データに3次スプライン関数をあてはめて求めた。等値面の値は $|\omega|B/U_m = 0.7$ である。またさらに、渦度分布を詳しくみるために、図-10に $tU_m/B = 19.2$ の2つの高さ($z/B = 0.2, 1.0$)における水平断面内のコンターを示してある。図-9は図-3と同じ時間の一連の3次元ビューであるが、この図から剥離せん断層のダイナミックな運動が観察される。すなわち、図-9(c),(d), $tU_m/B = 19.2, 22.4$ の剥離せん断層は比較的まっすぐに伸びているが、図-9(a),(b), $tU_m/B = 12.8, 16.0$ においては $x \approx 5$ の位置で急激に側壁方向に押しやられ、折り畳まれたようになっている。これは、さきに述べた側壁に向かう高速下降流に関係している。図-9からはよくわからないが、図-10に示されている水平断面内のコンターからわかるように、水路床付近の剥離せん断層は上方のものより側壁に近く、流下するにしたがって側壁に接近し、再付着する。これに対して、上方の剥離せん断層は側壁に再付着することなく流下する。剥離線に近い上流部では水路床付近の渦度は弱いですが、下流にゆくにしたがって、強くなる傾向がある。一方、上層部における剥離せん断層の渦度は、流下するにしたがって減少している。ただし、 $tU_m/B = 12.8, 16.0$ では側壁に侵入する高速流のため、横方向のシアが維持され、流下にとまなう剥離せん断層の渦度の減少は小さい。

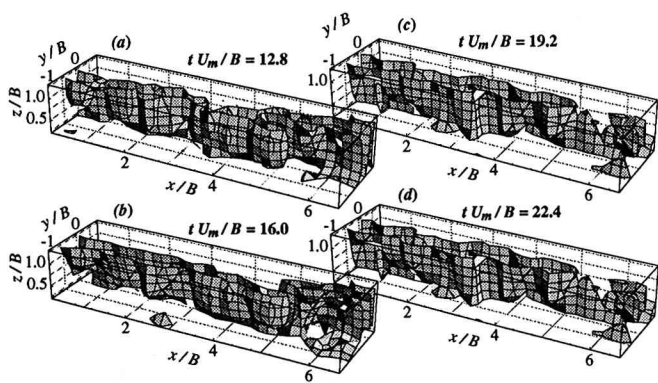


図-9 瞬時渦度ベクトルの絶対値の等値面 ($|\omega|B/U_m = 0.7$)

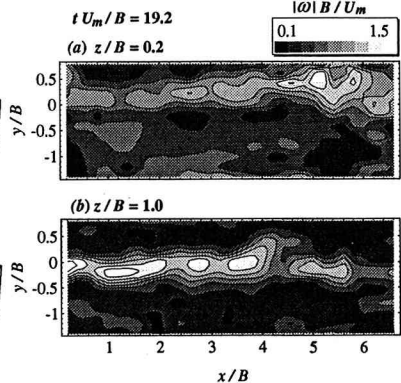


図-10 瞬時渦度ベクトルの絶対値の水平断面内分布

4・3 瞬時レイノルズ応力の3次元分布と非定常性

図-11, 12は $tU_m/B = 12.8, 19.2$ における瞬時レイノルズ応力 $-u'v'$, $-u'w'$ の等値面を示したものである(正しくは、速度変動成分ではなく瞬時速度成分の積を瞬時レイノルズ応力と呼ぶべきであろうが、慣例に従い本論文でも速度変動成分の積を瞬時レイノルズ応力とする)。ただし、等値面の値はそれぞれ、 $-2 \times 10^{-3}U_m^2$ と $8 \times 10^{-4}U_m^2$ である。これらの図から、剥離せん断層に沿うように強い瞬時レイノルズ応力が分布しているのがわかる。瞬時レイノルズ応力 $u'v'$ と $-u'w'$ はほぼ同じ場所で同時に大きくなっており興味深い。強い瞬時レイノルズ応力の領域は下流にゆくにしたがって大きくなる。測定範囲が限られているのははっきりしたことは言えないが、水路床付近の剥離せん断層が側壁に再付着するあたり($x/B \approx 6$)でレイノルズ応力が最大になると推測される。後ろ向きステップと異なり、水路床付近を除いて剥離せん断層は側壁に再付着しないので、流下にとまなうレイノルズ応力の減少は緩慢であると考えられる。

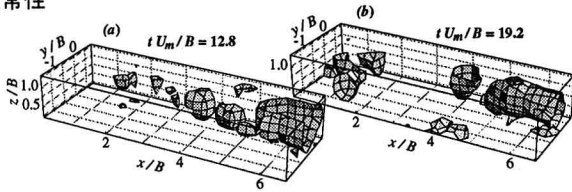


図-11 瞬時レイノルズ応力の等値面
($u'v'/U_m^2 = 2 \times 10^{-3}$)

これまでの結果からわかるように、 $(x/B \approx 6)$ にみられる大きなレイノルズ応力は図-11 (a)、図-12 (a) の場合、側壁に向かう高速下降流によるもので、一方、図-11 (b)、図-12 (b) の場合は側壁から水路中央部に向かう低速上昇流に対応している。

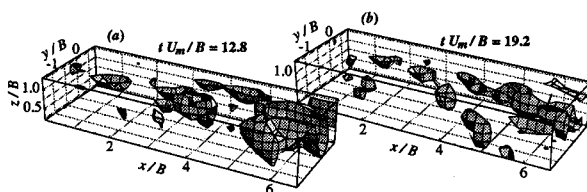


図-12 瞬時レイノルズ応力の等値面 ($-u'w'/U_m^2 = 8 \times 10^{-4}$)

5. おわりに

複数断面可視化法と MASCON モデルを用いて、開水路急拡部（左側壁がわ）における剥離流れの3次元瞬時速度場の連続測定を試みた。可視化断面の間隔が3cmと大きく、断面数も3つと少ないために、細かな流れの構造を知ることにはできないであろうが、瞬時流れ場のおおまかな3次元構造を知ることができたと思われる。しかしながら今後、えられた結果の精度の評価を行わなければならない。本方法でえられた3次元瞬時速度場を実験的に直接確認することは困難であるが、流速計によって測定された乱れ特性量の分布などと比較・検討する必要がある。

測定した瞬時流速から、瞬時渦度と瞬時レイノルズ応力を計算し、それらの3次元空間分布を観察した結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 死水域の形状は剥離線から下流にゆくにしたがって3次元性、非定常性ともに強くなる。水路床付近の剥離せん断層は拡幅量の6倍程度の距離で側壁に再付着するが、上層の剥離せん断層は再付着することはない。
- (2) 水路床付近の剥離せん断層が側壁に再付着する $x/B \approx 6$ では、瞬時速度場は3次元性が強く、水路中央部に向かう流れが生じるときには、横断面内のend viewに反時計回りの渦巻き状の流れがみられる。
- (3) 剥離せん断層の横方向位置の変動は下流部 $x/B > 4 \sim 5$ で大きく、特に、側壁に向かう流れにより剥離せん断層が側壁に押しやられた時には大きく屈曲し、折り畳まれたようになる。
- (4) 瞬時レイノルズ応力 $u'v'$ 、 $-u'w'$ はともに剥離せん断層に沿って大きな値をとり、水路床付近の剥離せん断層が側壁に再付着するあたり ($x/B \approx 6$) で最大になる。

参考文献

- 1) Eaton, J. K. and Johnston, J. P.: A Review of research on subsonic turbulent flow reattachment, AIAA J., Vol. 19(9), pp. 1093-1100, 1981.
- 2) 有江 幹男・木谷 勝：剥離流れ，谷一郎編 流体力学の進歩 境界層，丸善，pp. 139-189, 1984.
- 3) 木谷 勝：はくり離・再付着流れの乱流構造，日本機械学会論文集，第55巻，第511号，pp. 559-564, 1989.
- 4) 川西 澄・余越正一郎：段落剥離剪断層の非定常特性，水工学論文集，第34巻，pp. 271-276, 1990.
- 5) Kawanisi, K., et al.: An instantaneous 3-D analysis of turbulent flow in the wake of a hemisphere, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 64(1/2), pp. 1-14, 1993.
- 6) Sasaki, Y.: An objective analysis based on the variational method, J. Meteorol. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 77-88, 1958.
- 7) Sherman, C. A.: A Mass-Consistent Model for Wind Fields Over Complex Terrian, J. Appl. Meteorol., Vol. 17, pp. 241-253, 1978.