

# GPGPUコンピューティングによる 数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の高速化 —第2報 マルチGPUによる大規模計算の試み—

九州大学応用力学研究所  
新エネルギー力学部門 風工学分野  
内田 孝紀

連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp, 092-583-7776

## 1. はじめに

我々の研究グループでは、RIAM-COMPACT®<sup>1)</sup> (リアムコンパクト)と称する数値風況予測技術の開発を進めている。そのコア技術は、九州大学応用力学研究所で開発が続けられており、2006年に著者らが起業した九州大学発ベンチャー企業の(株)リアムコンパクト (<http://www.riam-compact.com/>)が、(株)産学連携機構九州(九大TLO)から独占的ライセンス使用許諾を受けている。2006年にRIAM-COMPACT®の商標と実用新案を取得した。

現在では、九州電力グループの西日本技術開発(株)、(株)環境GIS研究所と開発コンソーシアムを作り、「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」と名付け、風力業界の標準モデルの一つとして広く普及に努めている。主な納入先には、(株)ユーラスエナジーホールディングス、電源開発(株)、日本風力開発(株)、エコ・パワー(株)、ミツウロコグリーンエネルギー(株)などがある。

非定常な乱流シミュレーションに主眼を置いたRIAM-COMPACT®では、計算時間の問題が懸念されてきた。現行の流体計算ソルバーは、Intel Core i7などのマルチコアCPU(Central Processing Unit)に対応しており、計算時間は劇的に短縮され、実用面での利用において特段の問題は無くなってきた。

前報<sup>2)</sup>ではGPGPUコンピューティングへの対応として、シングルGPUによる高速化を報告した。GPGPU(General Purpose computing on GPU:GPUによる汎用計算)のコンセプトとは、グラフィック・レンダリングのみならず、GPU(Graphics Processing Unit)が有する浮動小数点演算能力を、他の数値演算にも幅広く利用することである。

その後、研究開発を続け、マルチGPU(シングルGPU×4枚)を用いた大規模計算の高速化に成功したので、本報ではその結果を報告する。

## 2. 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアの概要

本研究では、数値不安定を回避し、複雑地形上の局所的な風の流れを高精度に数値予測するため、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用いた。ここでコロケート格子とは、計算格子のセル中心に物理速度成分と圧力を定義し、セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は差分法(FDM; Finite-Difference Method)に基づき、乱流モデルにはLES(Large-Eddy Simulation)を採用する。LESでは流れ場に空間フィルタを施し、大小様々なスケールの乱流渦を、計算格子よりも大きなGS(Grid Scale)成分の渦と、それよりも小さなSGS(Sub-Grid Scale)成分の渦に分離する。GS成分の大規模渦は、モデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う。一方で、SGS成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用は、SGS応力を物理的考察に基づいてモデル化される。

流れの支配方程式は、空間フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式(式(1))とナビエ・ストークス方程式(式(2))である。本研究では、平均風速6m/s以上の強風を対象にしているので、大気が有する高度方向の温度成層(密度成層)の効果は省略した。また、地表面粗度の影響は地形表面の凹凸を高解像度に再現することで取り入れた。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} \approx \overline{u_i' u_j'} \approx \frac{1}{3} \overline{u_k' u_k'} \delta_{ij} - 2v_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$v_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (7)$$

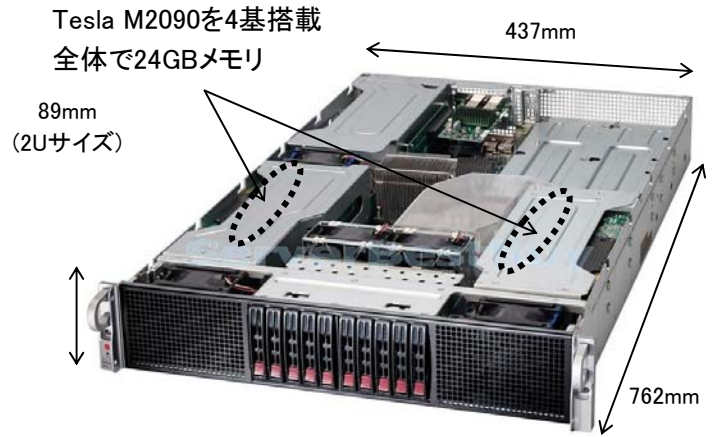
$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (8)$$

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)<sup>3)</sup>に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化は式(2)の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし、対流項は3次精度風上差分とする。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分は、梶島による4点差分と4点補間に基づいた補間法<sup>4)</sup>を用いる。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは、通常使用される河村-桑原スキーム<sup>5)</sup>タイプの $\alpha=3$ に対して、 $\alpha=0.5$ とし、その影響は十分に小さくする。LESのサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデル<sup>6)</sup>を用いる。壁面減衰関数を併用し、モデル係数は0.1とした。

### 3. 本研究で使用した計算機環境の概要

ここでは、本研究で使用した計算機環境を説明する。図1と図3にGPU搭載の機種を示す。図1に示す機種はGPUには、図2に示す「NVIDIA® Tesla M2090 6GB (512CUDAコア)」が4枚搭載されている。図3に示す機種はGPUには、「NVIDIA® Tesla M2075 6GB (448CUDAコア)」が4枚搭載されている。

図4には、本研究で比較のために使用したベクトル計算機の概要を示す。NEC製SX-9Fは、九州大学応用力学研究所が所有している汎用機であり、現在も稼働中である。



#### 【構成】

CPU : Intel Xeon X5690@3.47GHz x 2 (total 12cores)

MEM : 24GB DDR3 1333MHz Registered ECC

OS : Windows 7 Professional SP1 64bit

GPU : Tesla M2090 x 4 (total 24GB memory)

CUDA : 4.1

Compiler : Visual Studio C++ Professional Edition 2008

PGI Fortran Compiler 11.10

図1 本研究で使用した GPGPUラックマウントサーバEvoHG4(エヴォーグ4)



図2 本研究で使用したGPU, Tesla M2090 (512CUDAコア, 6GBメモリ) x 4枚

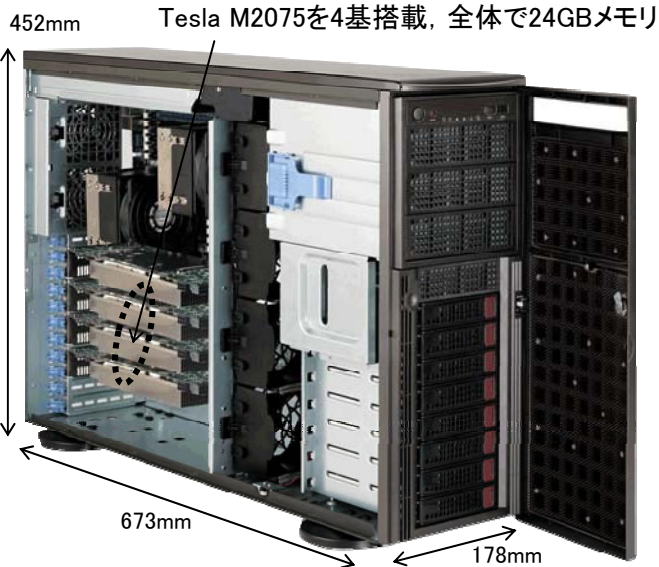


図3 本研究で使用了  
GPGPUワークステーションEvoHG2(エヴォーグ2),  
Tesla M2075 (448CUDAコア, 6GBメモリ) x 4枚



図4 本研究で使用了NEC製SX-9F  
(ベクトル計算機, 2007年リリース)

【構成】

CPU数 : 6CPU (92.16GFLOPS/単体 x 6=552.96GFLOPS)  
Mem : 256GB  
外付けディスク装置 : iStorage D3-10 4TB (RAID5)

4. 本研究で対象とした流れ場と計算条件

本研究では, 3次元の孤立峰を過ぎる流れ場<sup>9)</sup>を対象として, 計算時間の比較を行った. 孤立峰の形状は下記の関数で表現される.

$$z(r)=0.5h \times \{1+\cos(\pi r/a)\}, r=(x^2+y^2)^{1/2}, a=2h \quad (9)$$

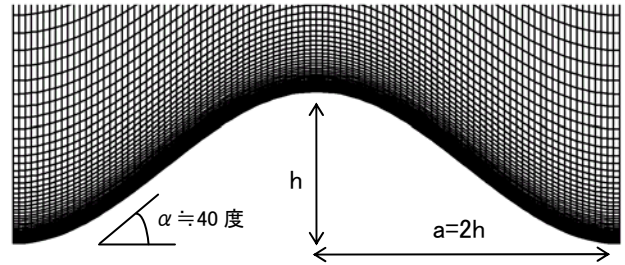


図6 孤立峰近傍の計算格子,  
主流直交方向(y)の中央面(y=0)

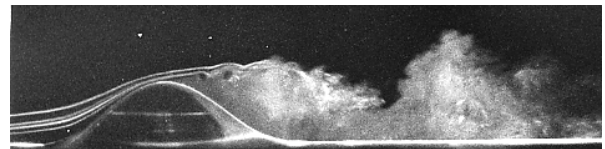
表1 計算格子数とメモリサイズなど

計算格子数	5,821 x 121 x 71点 (約5,000万点)
メモリサイズ	約15GB
計算ステップ	5,000ステップ

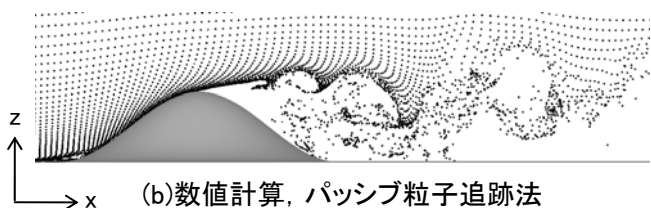
計算領域, 座標系, 境界条件を図5に示す. 主流方向(x), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)に5,601h x 9h x 10hの空間領域を有する. ここで, hは孤立峰の高さである. 格子点数はx, y, z方向に5,821 x 121 x 71点(合計約5,000万点, 使用するメモリ容量は約15GB)である(表1を参照). 孤立峰の近傍における計算格子を図6に示す. x方向の格子幅は不等間隔に(0.04~1) x h, y方向の格子幅は不等間隔に(0.05~0.5) x h, z方向の格子幅は不等間隔に(0.0035~0.5) x hである.

境界条件に関して, 流入境界面には一様流入条件, 側方境界面と上部境界面は滑り条件, 流出境界面は対流型流出条件とした. 地面には粘着条件を課した. レイノルズ数は, 孤立峰の高さhと流入境界面における高さhでの風速Uに基づき,  $Re(=Uh/\nu)=10^4$ とした. 時間刻みは  $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U$ とした.

⇒ Flow



(a)風洞実験, スモークワイヤー法



(b)数値計算, パッシブ粒子追跡法

図7 孤立峰近傍における流れ場の可視化, 瞬間場

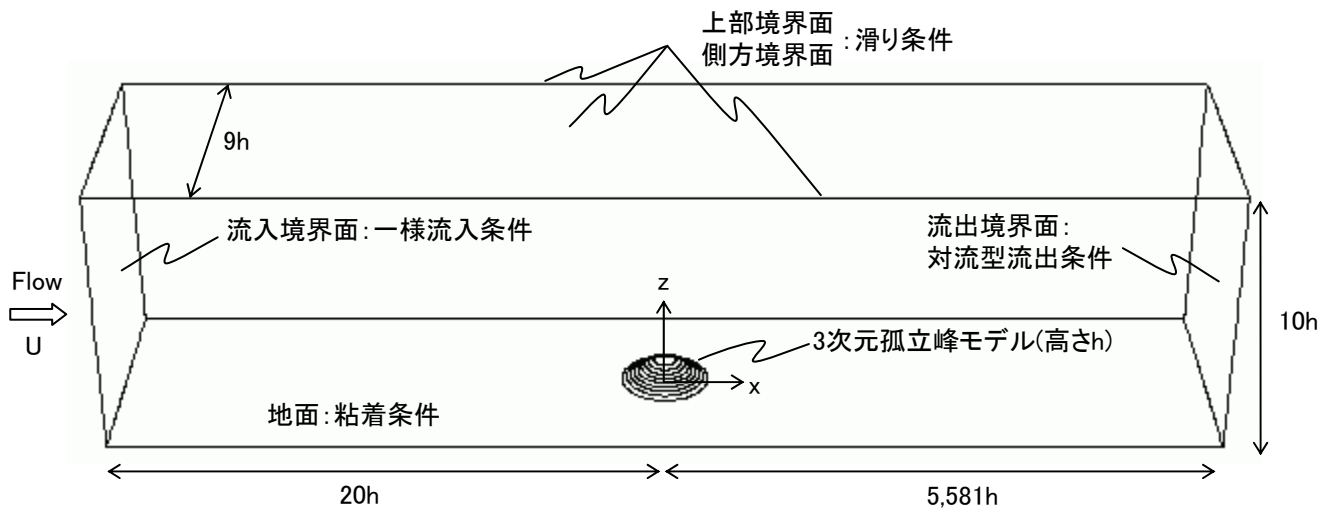


図5 計算領域, 座標系, 境界条件など

本研究で対象とした孤立峰周辺に形成される流れパターンについて説明する(図7を参照). 図7(a)に示す風洞実験では, スモークワイヤー法により流れ場の可視化を行った. この方法では以下のように流れ場を視覚化する. モデルのすぐ上流で高さレベルを変えて数本のワイヤー(0.3mmのニクロム線)を平行に配線する. これに流動パラフィンとアルミ粉を混ぜたものを塗り, ワイヤーに通電して加熱し, 気化した煙で流れ場を可視化する. 照明装置としてスリットを付けた1kWのプロジェクターを風洞上部に3~4台設置し, これからの光でモデルの主流直交方向(y)の中央面(y=0)を可視化した. カメラによる撮影は標準レンズを用い, 絞りは1.2でシャッタースピード(露出時間)は1/125sとした. 風速は1.5m/sとし, 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアによる数値シミュレーションと同じ条件( $Re=10^4$ )とした. 特に孤立峰の頂部付近で剥離した境界層(剥離せん断層)の挙動に注目するため, 煙が孤立峰の表面近くを流れるようにワイヤー高さを調節した.

一方, 図7(b)に示す実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアによる数値シミュレーションでは, パッシブ粒子追跡法により流れ場の可視化を行った. パッシブ粒子の放出間隔は $\Delta t=0.1h/U$ とし, 合計100コマ(時間 $t=50\sim 60h/U$ )の結果である. 数値シミュレーションと風洞実験で得られた流れの定性的な挙動は, 非常に類似している. すなわち, 流れは孤立峰の頂部付近で剥離する. この剥離したせん断層は, 孤立した渦に巻き上がる. 孤立渦は合体して大規模渦を形成し, これが孤立峰の下流に周期的に放出されている.

## 5. マルチGPUの驚異的な計算速度

本研究では, 5,000万点の計算格子を使った孤立峰周辺気流( $t=50h/U$ )を初期値とし, そこから5,000ステップの計算(時間 $t=50\sim 60h/U$ )を実行し, その経過時間を比較した. 得られた結果を表2に示す.

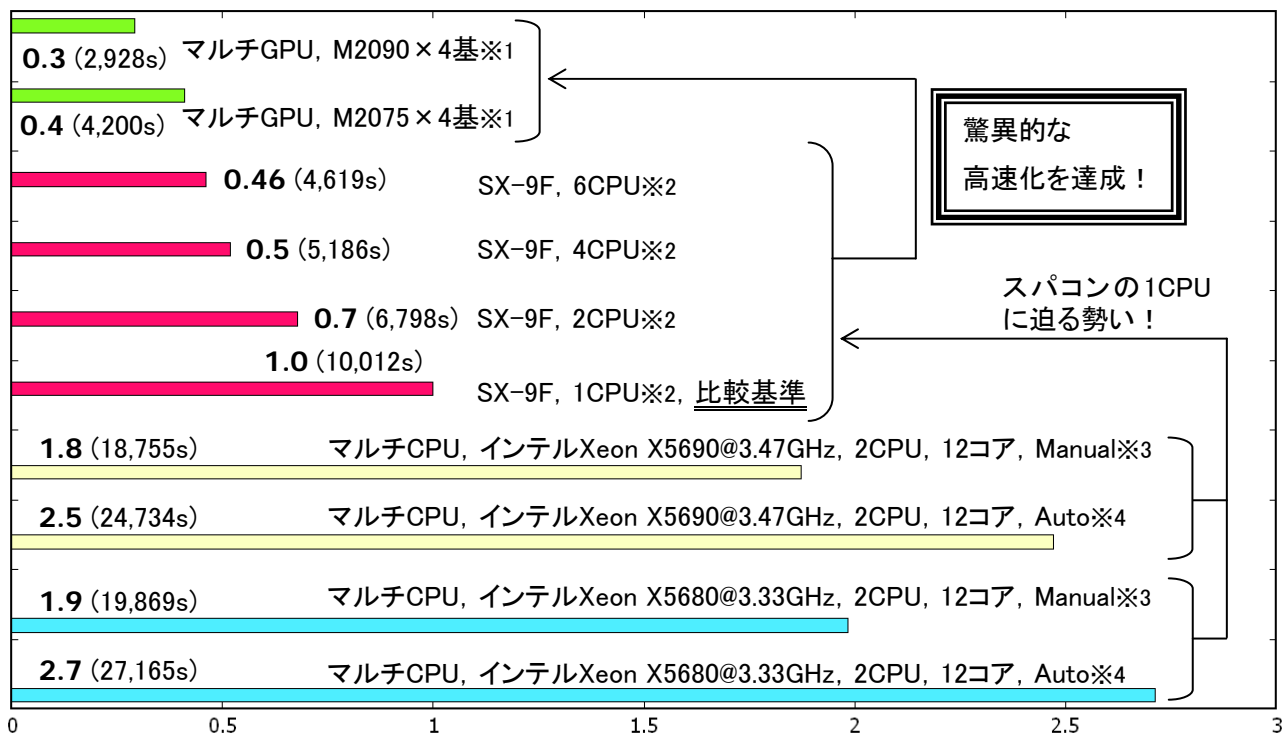
表2には, 比較のために最近のマルチCPUの結果も同時に示している. マルチCPUの結果において, 「Auto」とは, Intel Fortranコンパイラの自動並列化オプション「/Qparallel」を利用した並列計算(OpenMP)の結果である. 一方, 「Manual」とは, 計算プログラムにOpenMP用の並列化指示行(directive)を事前に挿入し, Intel Fortranコンパイラの「/Qopenmp」オプションの指定により, それらを有効にした場合の結果である. 得られた結果に注目すると, 「Auto」に比べて「Manual」の方が2~3割程度高速な結果を示している. 両ケースともに, スーパーコンピュータの1CPUの結果に迫る性能を有することが分かる. 現在では, Intelの新たなウルトラハイエンドCPU「Sandy Bridge-E」が発表されており, さらなる性能向上が期待される.

次に, マルチGPUの結果に注目して頂きたい. ここで改めて強調しておきたい点がある. 前報<sup>2)</sup>では, 「NVIDIA® Tesla C2050 (448CUDAコア)」および「NVIDIA® GeForce GTX580 (512CUDAコア)」によるシングルGPUの計算速度を紹介した. ただ, いずれのGPUの場合においても, VRAM(Video Random Access Memory, ビデオメモリ)の容量が3GBメモリであったために, 800万格子点以上の計算は難しい状態であった. 最近になり, 新しいNVIDIA製GPUの登場, CUDA (Compute Unified Device Architecture)のバージョンアップ, これに伴うGPU Direct機能によるGPU間高速通信の実現によって, マルチGPU環境下において約5,000万格子点の乱流シミュレーションが実現した.

図1に示す「NVIDIA® Tesla M2090 6GB (512CUDAコア)」を4基搭載した機種と, 図3に示す「NVIDIA® Tesla M2075 6GB (448CUDAコア)」を4基搭載した機種ともに, 驚異的な高速化に成功した. 両ケースともに, スーパーコンピュータSX-9Fの6CPUを利用した並列計算を凌ぐ高速化が得られた.

表2 計算速度の比較, 5,000万点の計算, メモリサイズ約15GB

(太数字はSX-9Fの1CPUに対する速度比を表す. 括弧内の数字は実際の計算時間を表す)



※1 「CUDA CとFortranを組み合わせたマルチGPU対応コード」を使用. ECC(Error Checking and Correcting)設定=OFF.

CUDAの部分はNVIDIA CUDAコンパイラを適用. Fortranの部分はPGIコンパイラを適用.

※2 FORTRAN90/SXの「-Pauto」を適用.

※3 インテル Composer XE 2011 SP1 UPDATE8の「/fast /Qopenmp /fpp」を適用.

※4 インテル Composer XE 2011 SP1 UPDATE8の「/fast /Qparallel」を適用.

## 6. おわりに

本研究では, マルチGPUを利用した数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の大規模計算を試みた. その結果, NVIDIA社のTesla M2090やM2075を利用したマルチGPU環境下において, 約5,000万格子点の乱流シミュレーションが可能であること, また, 最新のスーパーコンピュータの4~6CPUを利用した並列計算を凌ぐ高速化が達成されていることが示された.

### 謝辞

本研究の一部は, 風力等自然エネルギー技術研究開発/次世代風力発電技術研究開発/基礎・応用技術研究開発(数値シミュレーション技術を用いた風車性能評価技術等の国際標準化に係る研究開発)の援助を受けました.

HPCシステムズ(株)には, 計算時間の評価などで多大な協力を得ました.

ここに記して感謝の意を表します.

### 参考文献

1) Uchida, T. and Ohya, Y. : Micro-siting Technique

for Wind Turbine Generators by Using Large-Eddy Simulation, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008.

2) 内田 孝紀, 大屋 裕二: GPGPUコンピューティングによる数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の高速化, 風力エネルギー協会誌, Vol.35, 通巻98, pp.78-84, 2011.

3) Kim, J. and Moin, P. : Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, J. Comput. Phys., Vol.59, pp.308-323, 1985.

4) 梶島岳夫, 太田貴士, 岡崎和彦, 三宅裕: コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析, 日本機械学会論文集, (B編), 63巻, 614号, pp.3247-3254, 1997.

5) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K. : Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986.

6) Smagorinsky, J. : General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963.