

ワークショップ 降雪に関するレーダと数値モデルによる研究(第2回)』

2004年3月8～9日
防災科学技術研究所
長岡雪氷防災研究所

雲解像モデルを用いた筋状雲の 数値シミュレーション

坪木和久

名古屋大学 地球水循環研究センター)

CONTENTS

1. 雲解像モデルCReSSの概要
2. 地球シミュレータへの最適化
3. 地球シミュレータにおけるモデルの性能
4. Dry model によるシアー流の実験
5. 筋状雲の実験
6. Labrador Sea の筋状雲の実験
7. おわりに

雲解像領域気象モデル

Cloud Resolving Storm Simulator “CReSS”

雲スケールからストームスケールの現象のシミュレーションを地球シミュレーターなどの大規模並列計算機で行うことを目的とした雲解像領域気象モデル。

大規模並列計算機に最適な純国産の雲解像領域モデルを開発することを目標として、1998年よりCReSSの開発を行なってきた。

CReSS の目標とするものは

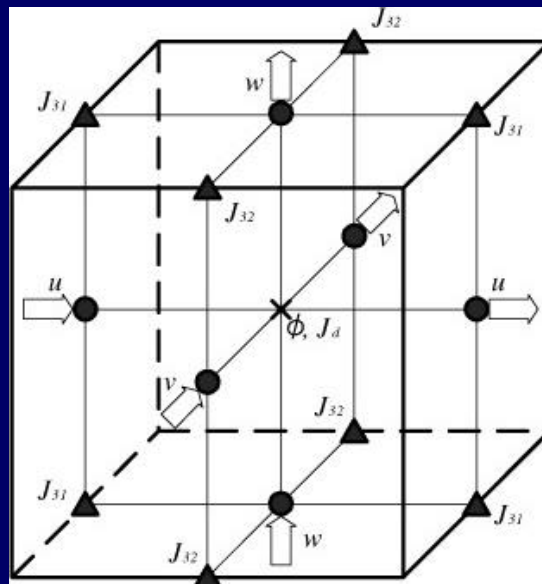
積乱雲とその組織化したメソスケールのストームの数値実験、および実際の激しい気象現象の予報実験を行うこと。

- ◆雲に比べて非常に大規模な領域
(~ 1000 km × 1000 km)
- ◆非常に高い解像度 水平解像度 1 km ~ 10 m)
- ◆詳細な雲物理過程
- ◆大規模並列計算機 地球シミュレーターなど)に最適化

CReSSの特性

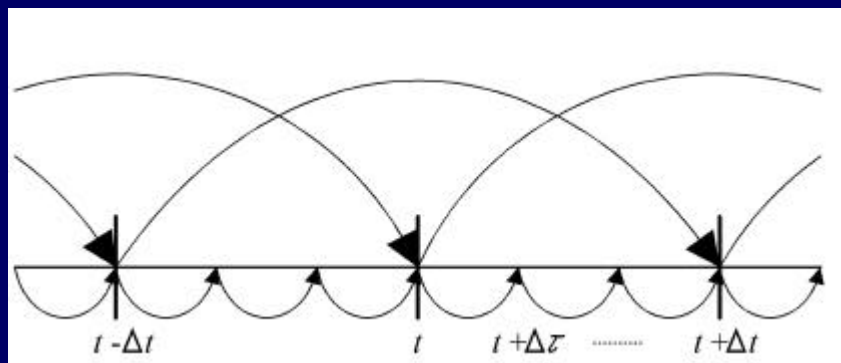
- ◆ 方程式系は非静力学・圧縮系 直交座標系における近似のない系)。
- ◆ 座標系は地形に沿う3次元または2次元のもの。
- ◆ 鉛直にはローレンツ格子、水平にはアラカワC格子。
- ◆ 従属変数:
 - ▶ 3次元の速度成分
 - ▶ 気圧偏差
 - ▶ 温位偏差
 - ▶ 乱流運動エネルギー
 - ▶ 水蒸気および雲 降水物質の混合比
 - ▶ 雪・あられ 雲氷の数濃度

CReSSの格子における物理量の配置



- ◆空間の離散化には有限差分法。
- ◆時間積分は**モード分割積分法** : 音波には短いタイムステップ、それ以外の項には長いタイムステップ。
長いタイムステップにはアセリンの時間フィルターを併用した leap-frog 法。短いタイムステップには、
 - ▶ 水平に陽解法、鉛直に陰解法
 - ▶ 水平 鉛直ともに陽解法
- ◆重力波に関わる項も鉛直に陰解法が可能。
- ◆移流は4次のスキーム。
- ◆乱流はスマゴリンスキーの1次または乱流運動エネルギーを用いた1.5次。
- ◆2次または4次の数値粘性。

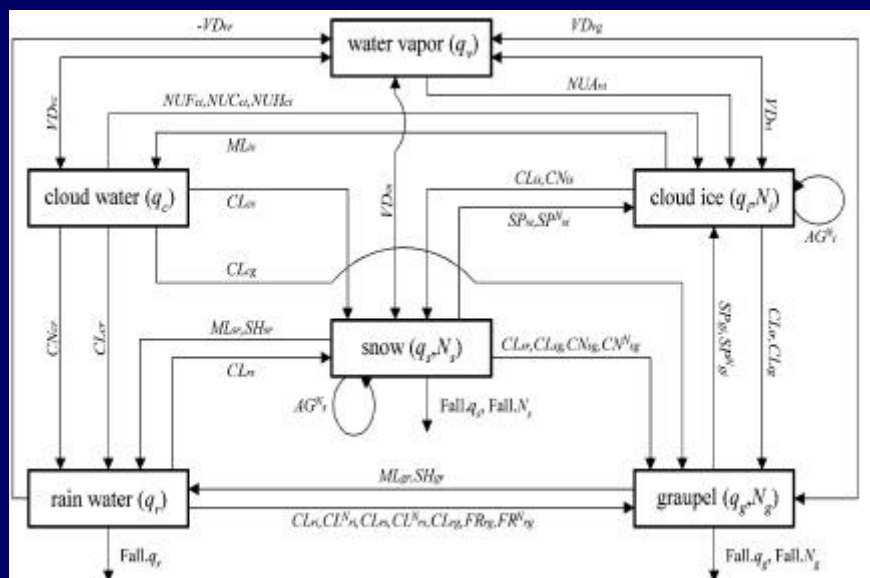
モード分割時間積分法



小さい時間ステップは音波に関する項、大きい時間ステップはそれ以外の項についての時間積分

- ◆ 雲物理は**バルクの冷たい雨のパラメタリゼーション**。
- ◆ 混合比についての従属変数:
 - ▶ 水蒸気
 - ▶ 雲水
 - ▶ 雨
 - ▶ 雲氷
 - ▶ 雪
 - ▶ あられ
- ◆ 数濃度についての従属変数:
 - ▶ 雲氷
 - ▶ 雪
 - ▶ あられ

モデルにおける雲 降水物理学過程の概念図



◆初期条件：

- ▶ 高層観測または理論的関数から水平一様に与える。これは数値実験のときに主に用いる。
- ▶ 3次元の不均一データの内挿。これは主に予報実験のときに用いる。

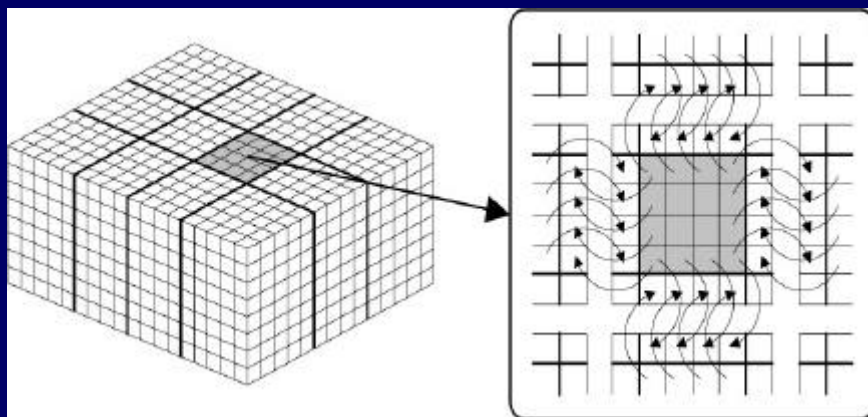
◆側面境界条件：

- ▶ 固定壁、周期境界、傾きゼロ
- ▶ 放射
- ▶ 時間変化する外部データによる境界

◆下面境界として地表面過程（地温・地表面フラックス）を導入。

◆広い領域の計算が可能なように、地図投影（ポーラステレオ図法、ランペルト図法、メルカトル図法）を導入。

並列計算における計算領域の分割とPE間の通信



CReSSの地球シミュレーターへの最適化

- ◆CReSS Ver.2 では、F90への全面的な書き直しを行なった。
- ◆I方向についてはベクトル長を長く取ること
で、ベクトル化率を高くする。
- ◆J方向についてはMPIを用いたノード間並
列を行なう。その効率化を図った。
- ◆K方向については、OpenMPを用いたノ
ード内並列を行なう。
- ◆その他

CReSS Ver.2 のESにおける性能テスト

CReSSの性能試験を地球シミュレーターの128ノード(1024CPU)
と64ノード(512CPU)を用いて性能テストを行なった。

- ベクトル化率 : **99.4%**
- 並列化率 : **99.985%** 申請
可能ノード数は約800ノード>640ノード
- 申請ノード : **128ノード**
- 並列化効率 : **86.5%**
- ピーク性能比率 : **約30%**

CReSS Ver.2 のES小規模ノードにおける並列化率
並列化率とベクトル化率の測定を、小規模のノードを用いて行なった。

➤ベクトル化率 **99.3%**

➤各CPU数間で計算した並列化率：

	24 CPU	32 CPU	48 CPU	64 CPU
16 CPU	1.00067	1.00068	0.99985	0.99984
24 CPU	-----	1.00069	0.99957	0.99967
32 CPU	-----	-----	0.99897	0.99940
48 CPU	-----	-----	-----	0.99982

寒気流中の筋状雲の数値実験

- 冬季の高緯度では、寒気流が海上に流れ出したとき、しばしば筋状雲が形成される。
- これはシアー流中のロール状対流と理解されている一方で、下流にあたる日本海沿岸ではセル状対流で構成されていることが観測されている。
- 大気下面から加熱されて徐々に対流が発達するとき、基本場であるシアーそのものも変化する。その中でどのような対流雲が形成されるのか。
- このような筋状雲がどのように形成されるのか、上流から下流にかけて雲はどのように変質するのか、またその中でどのように降水が形成されるのかを数値実験により調べる。

Observational Background

Kuettner (1959, 1967): Interval of cloud band is 2-3 times of the mixing layer.

Miura (1982): Relation between height and interval of cloud bands.

Satoh (1994): Doppler radar observation of transversal mode.

Yoshimoto et al. (2000): Doppler radar observation of longitudinal mode.

Renfrew and Moore (1999): Roll convection over the Labrador Sea.

Theoretical Background

Jeffreys (1928): The longitudinal roll convection in unstable shear flow.

Asai (1970a): Convection in unstable stratified plane Couette flow.

Asai (1970b): Convection in unstable stratified plane parallel flow.

Asai (1972): Convection in unstable stratified shear flow turning direction.

Modeling studies

Ikawa et al. (1991): Microphysics of convective snow clouds over the sea.

Sykes et al. (1990): cloud street in 2-dimension.

Dry model experiments

Free convections in unstable stratified shear flows

Domain: 3-dim $1103 \times 259 \times 63$

H: 500m, 500m, V: 200m

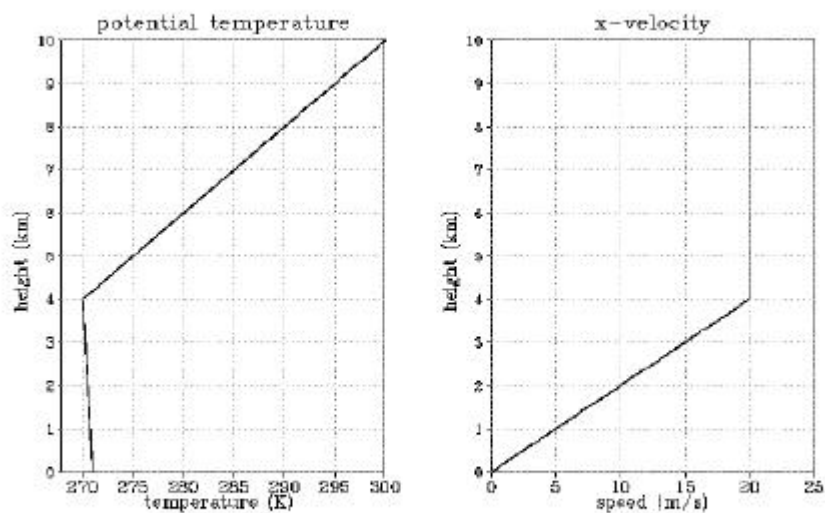
Initial condition: unstably stratified horizontally uniform

Vertical shear: uni-directional linear shear and constant speed with turning direction

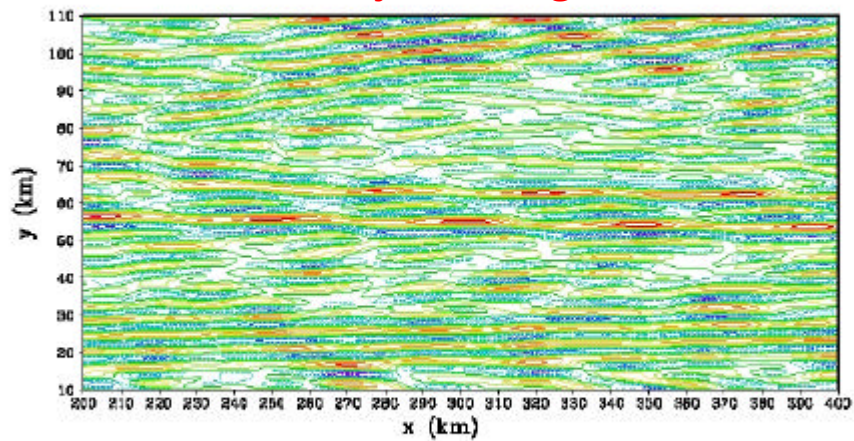
Surface process: not included

Moist process: not included

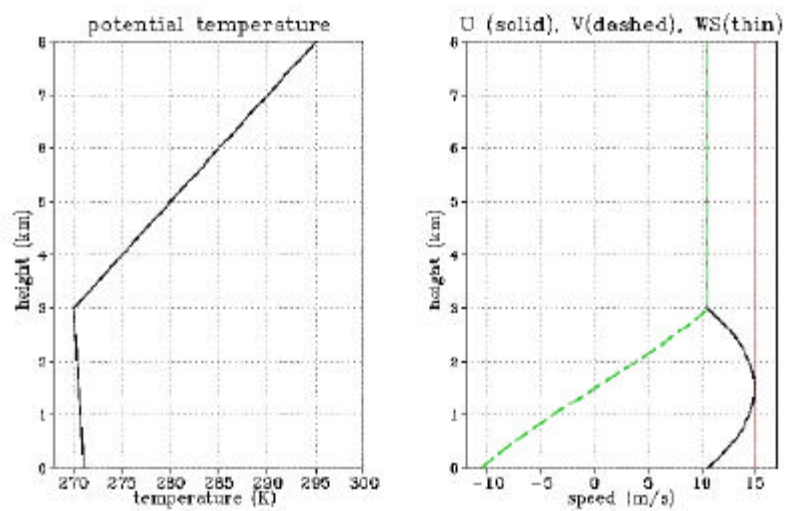
Profiles of basic field



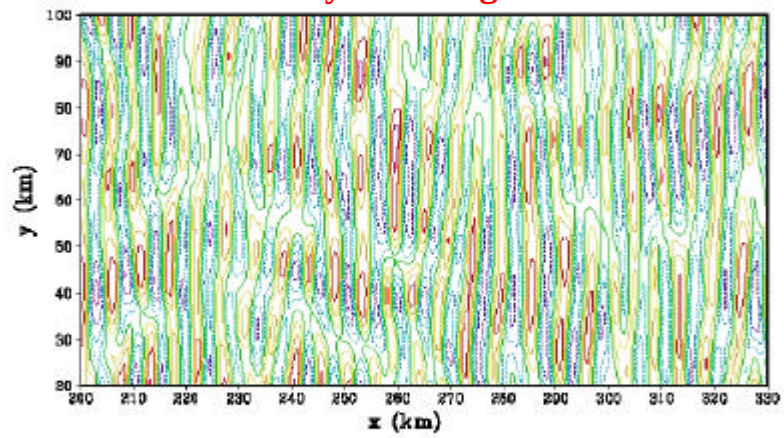
Vertical velocity at a height of 1.5 km



Profiles of basic field



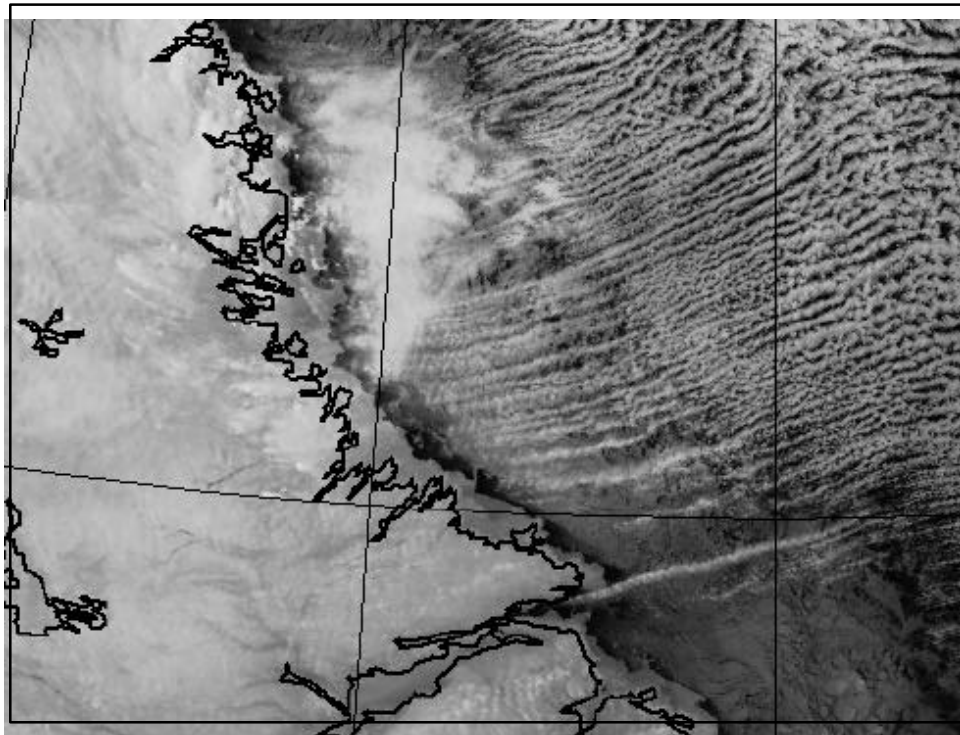
Vertical velocity at a height of 1.5 km

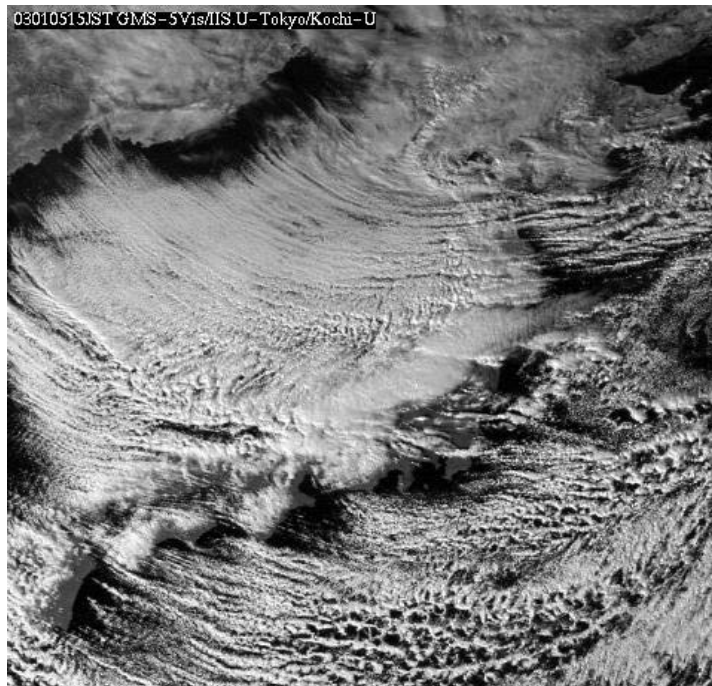


Simulation of snow cloud bands

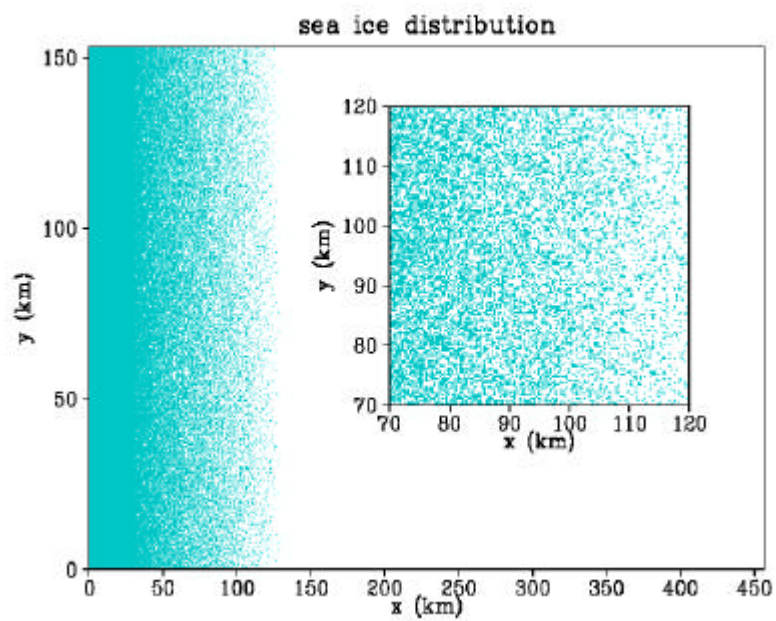
寒気流中の筋状雲の数値実験の設定

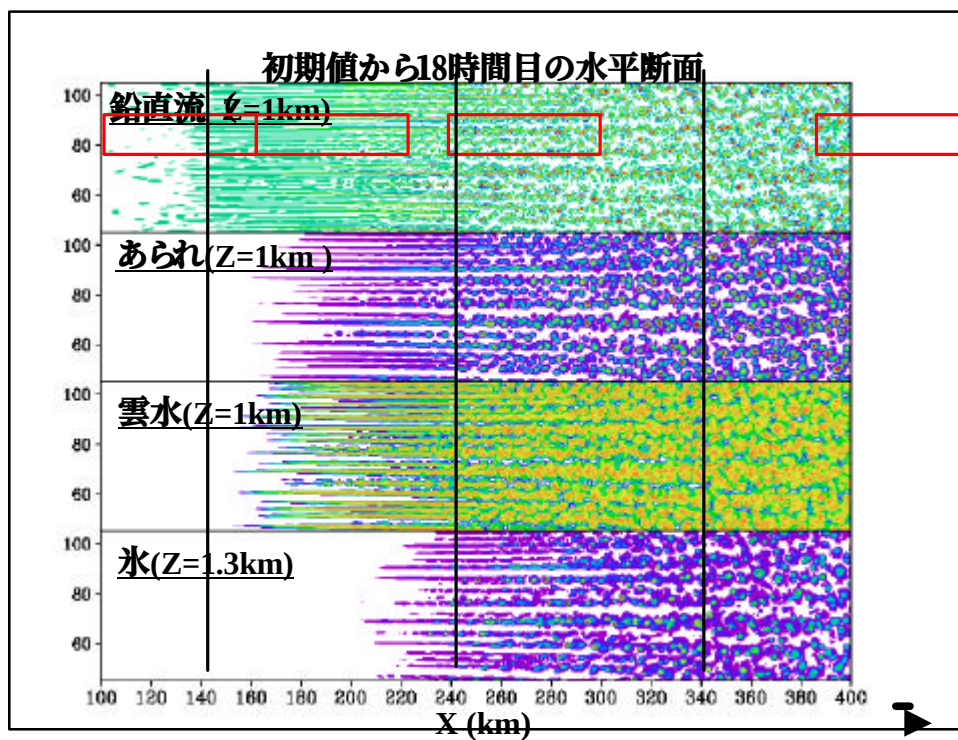
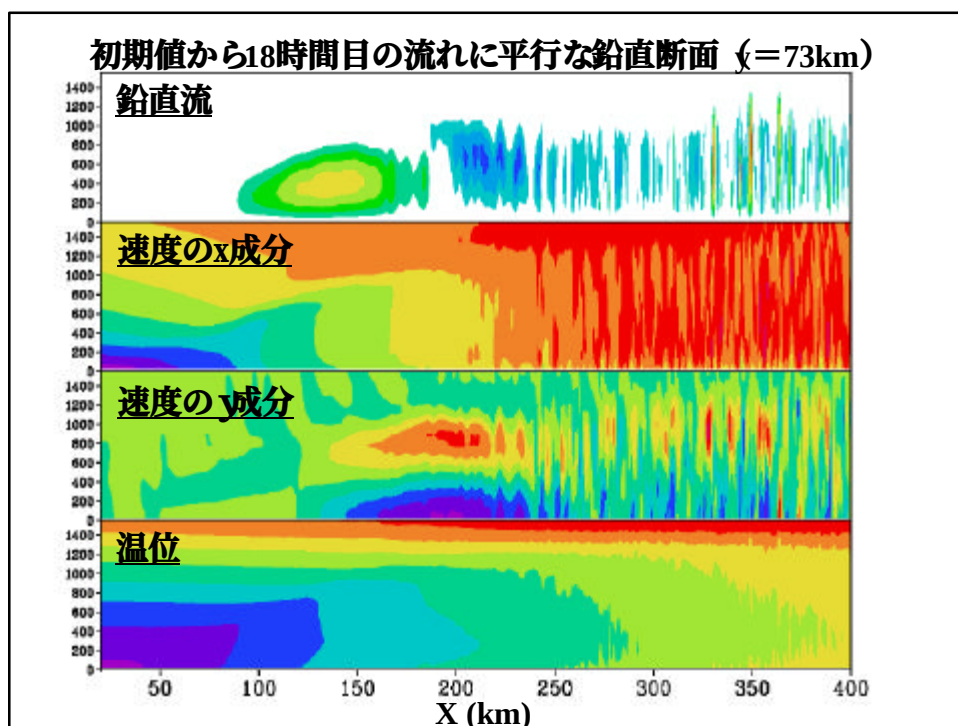
- ▶ 計算領域 水平: 457km × 153km × 鉛直: 11km
- ▶ 水平格子サイズ 300 m
- ▶ 鉛直格子サイズ 50 ~ 150m
- ▶ 格子数 水平: 1527 × 515 × 鉛直: 73
- ▶ 積分時間 20 時間
- ▶ 時間間隔 large: 1sec, small: 0.25sec
- ▶ 雲・降水の物理 冷たい雨のバルク法
- ▶ 初期条件 カナダ東岸の高層観測、初期擾乱なし
- ▶ 境界条件 放射境界条件
- ▶ 地表面条件 海水を存在確率で格子点に配置
- ▶ 計算ノート数 32 ノード (256 CPU)

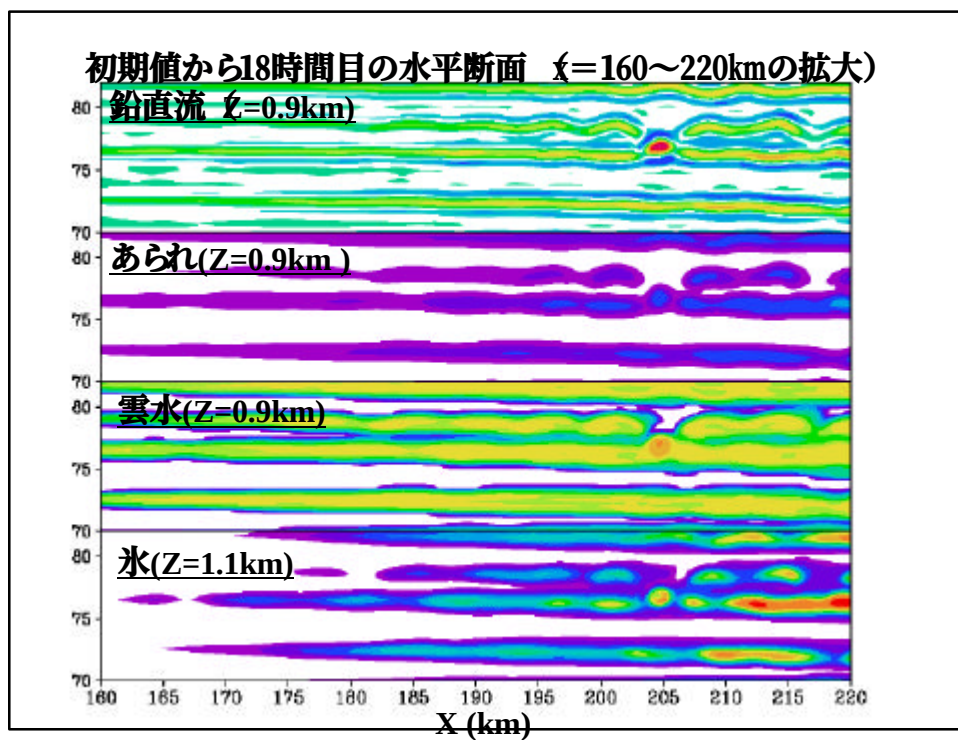
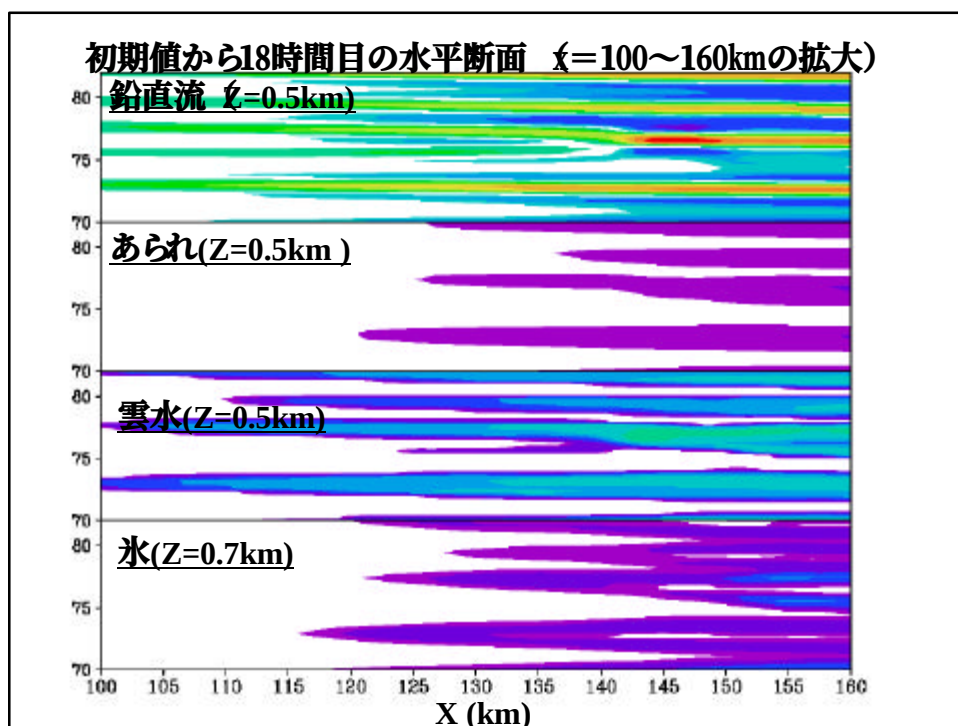


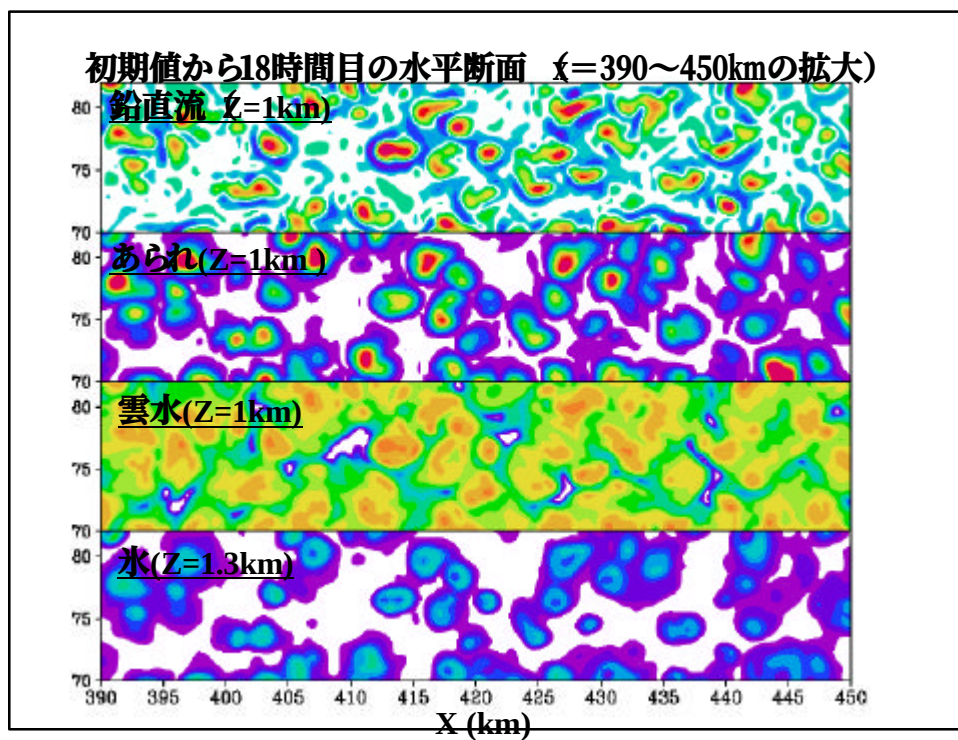
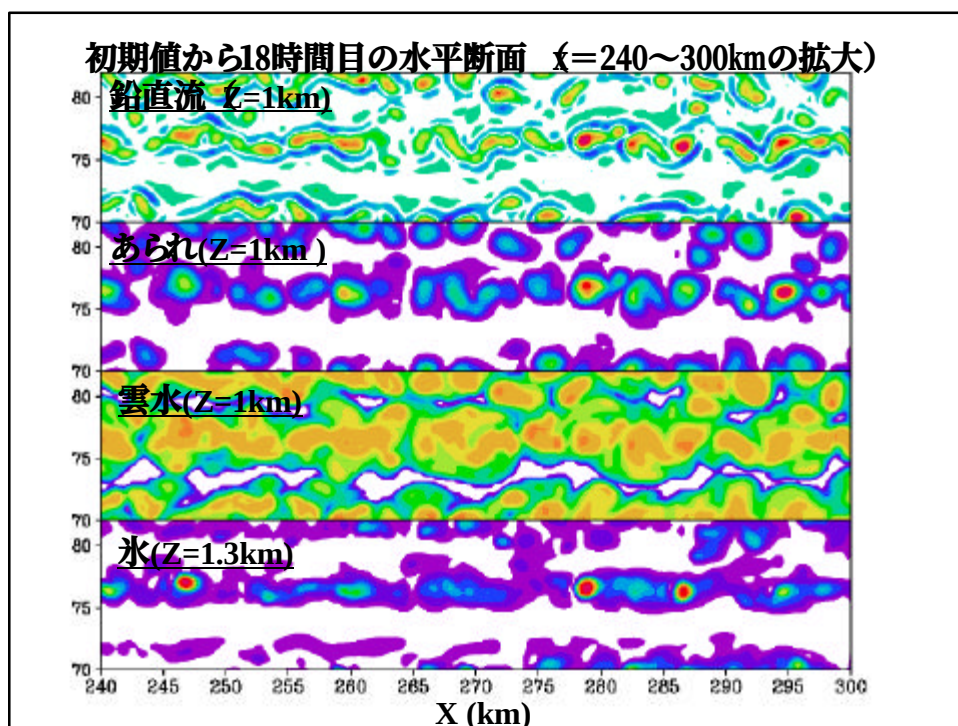


数値実験で下面境界条件として用いた海水の分布 全体と拡大図)

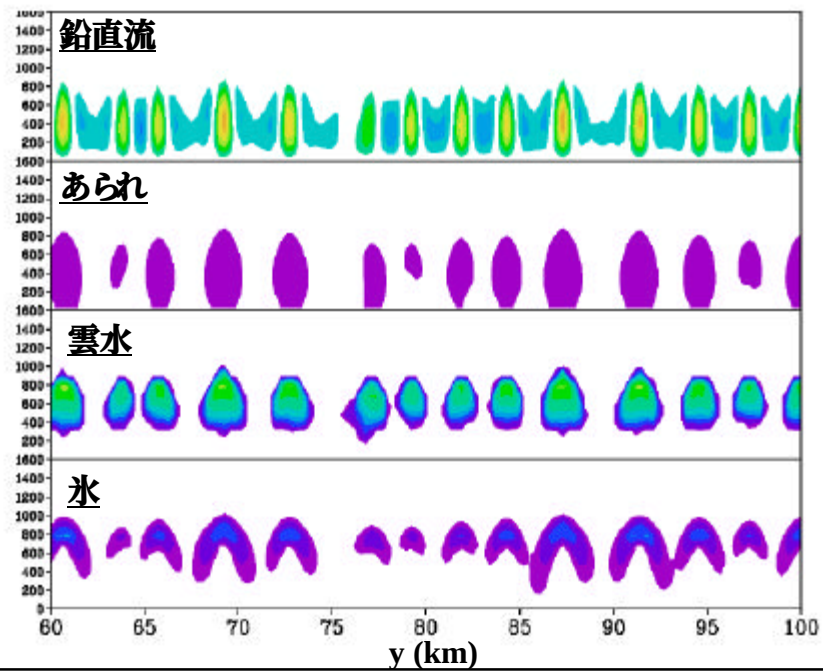




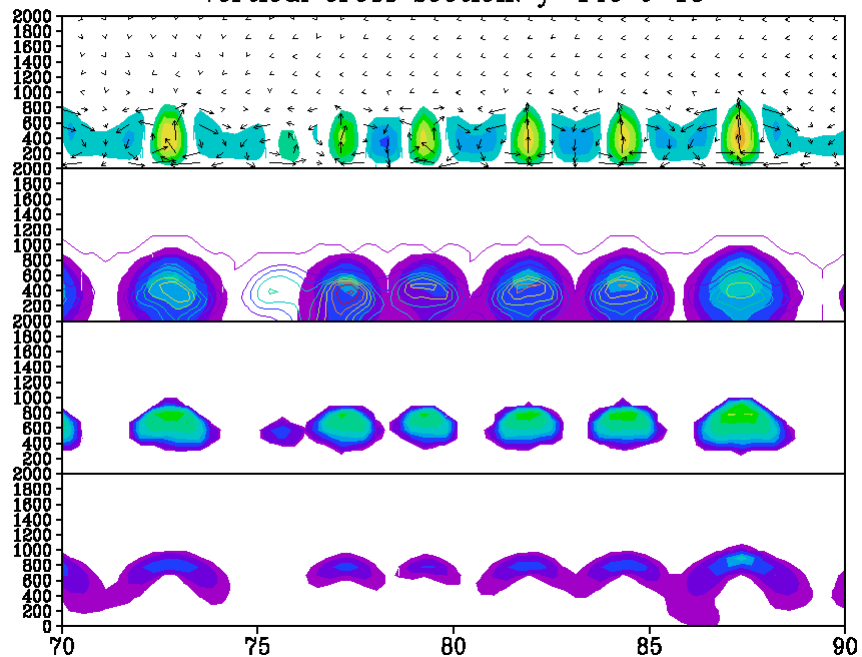


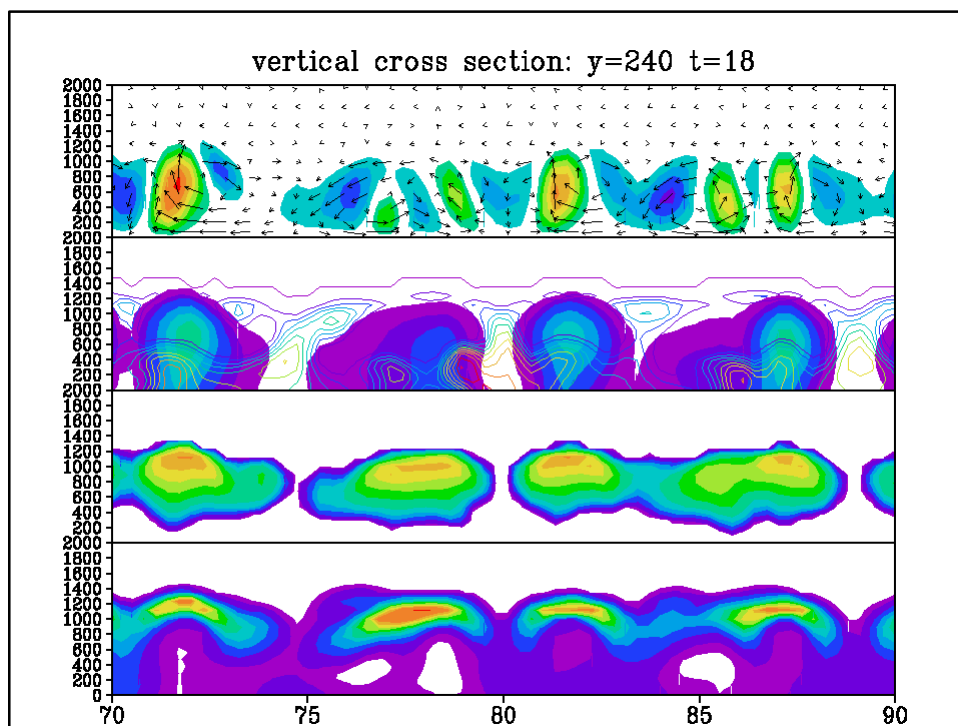
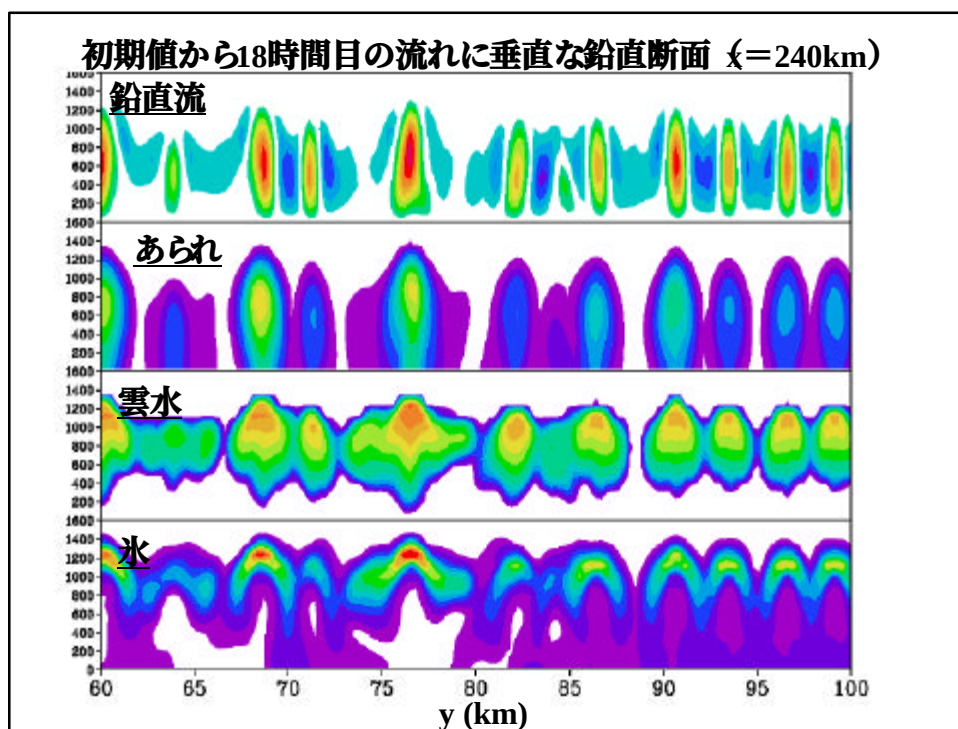


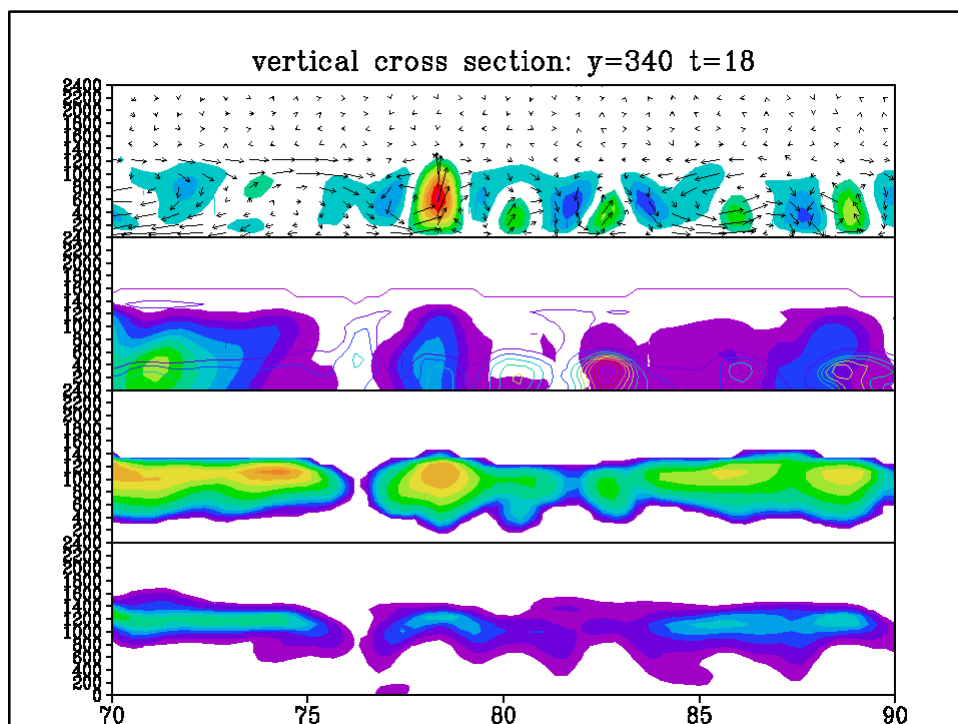
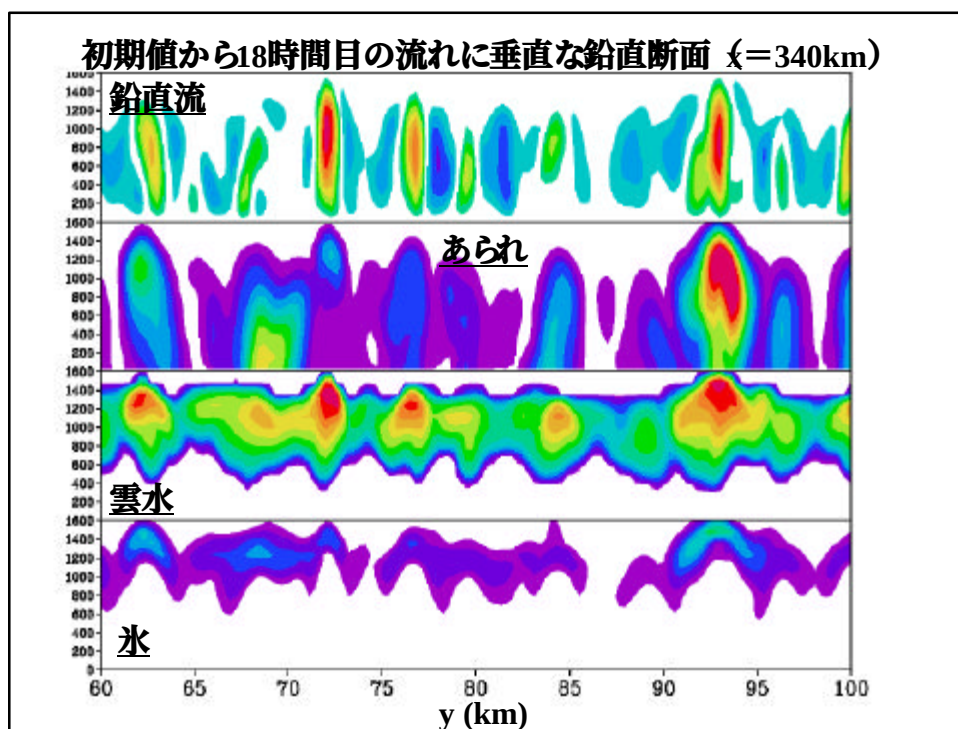
初期値から18時間目の流れに垂直な鉛直断面 ($x=140\text{km}$)

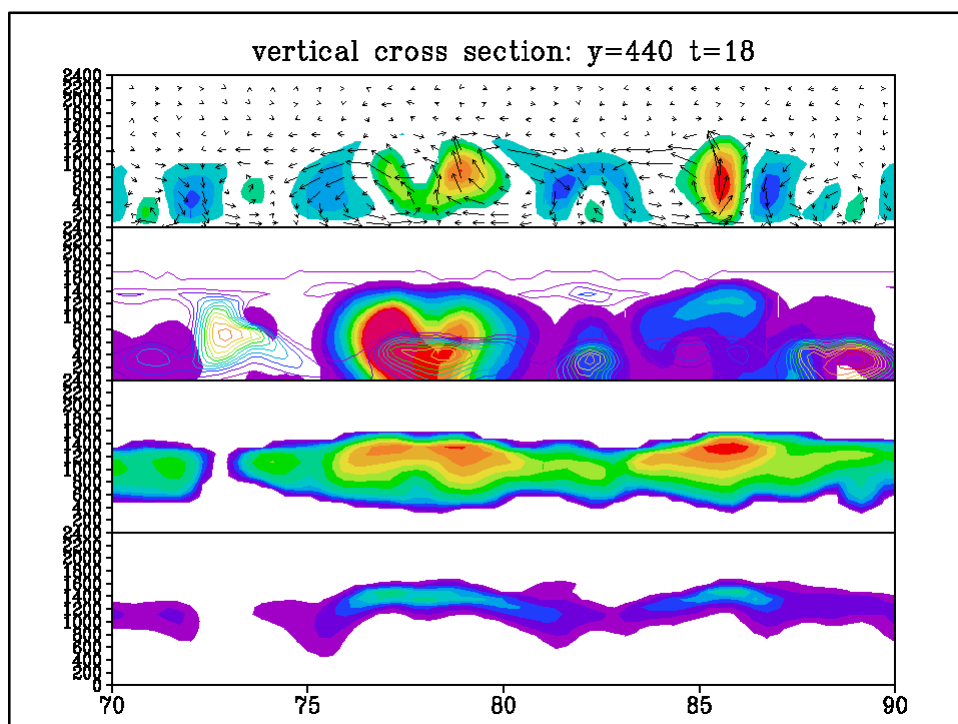


vertical cross section: $y=140$ $t=18$









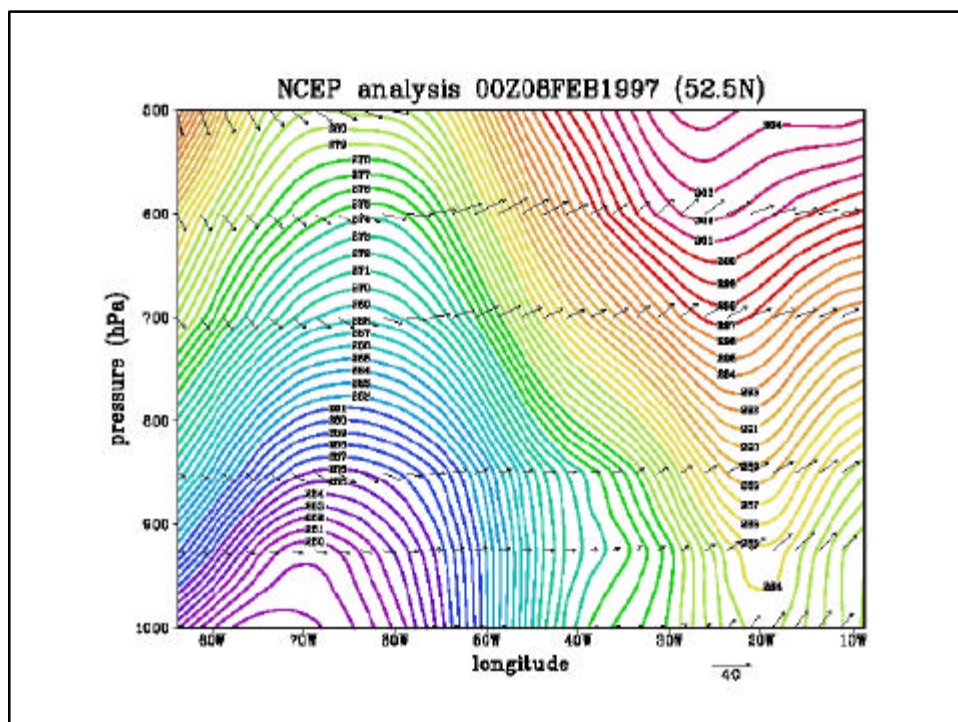
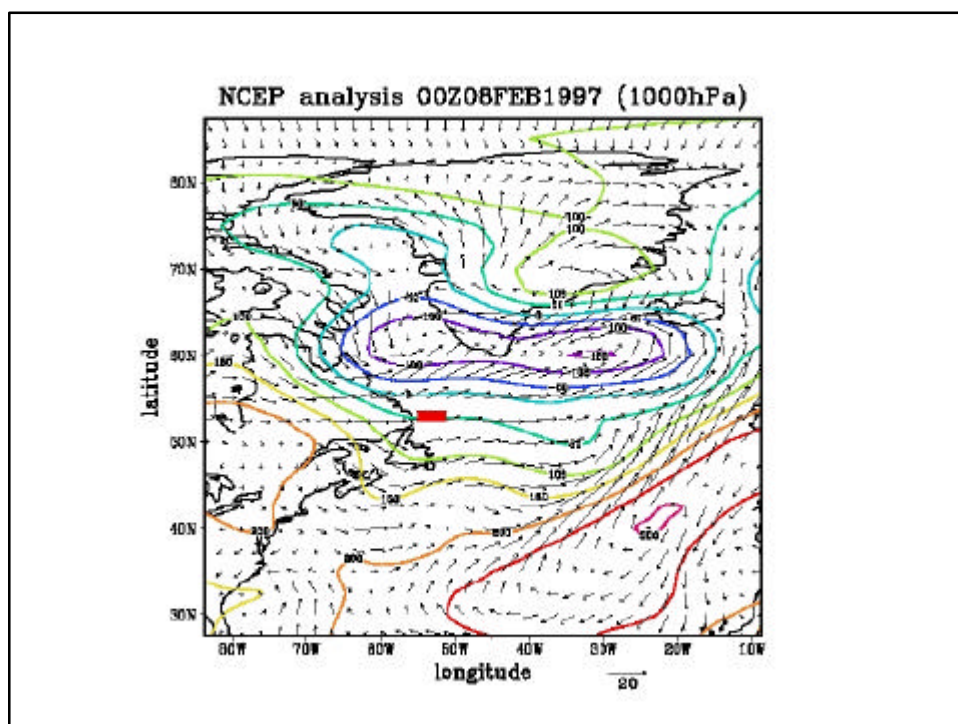
寒気流中の筋状雲の数値実験のまとめ

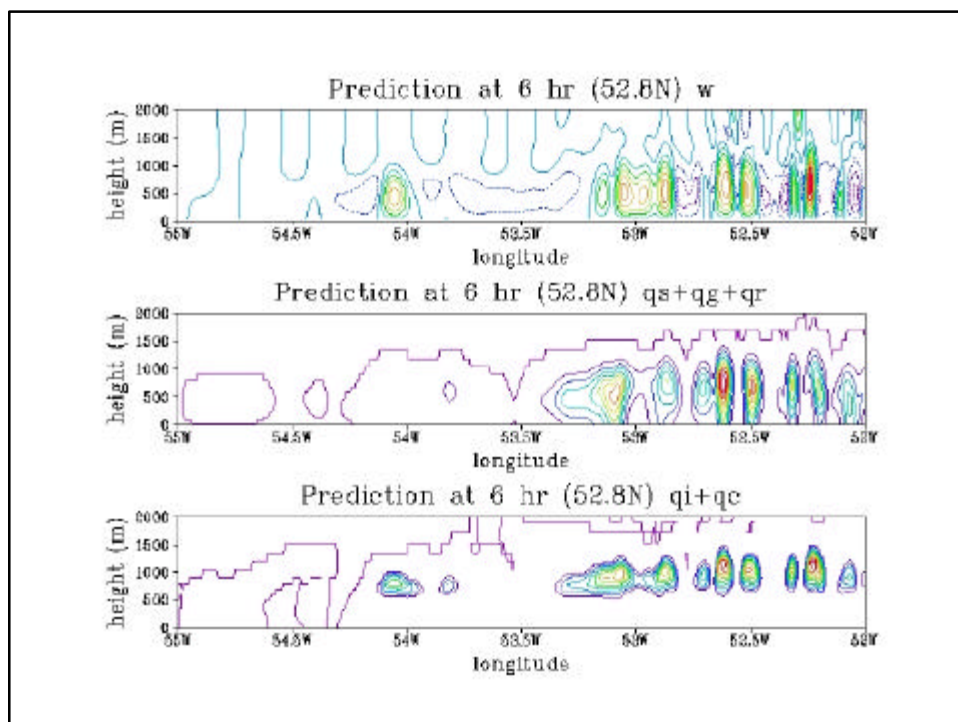
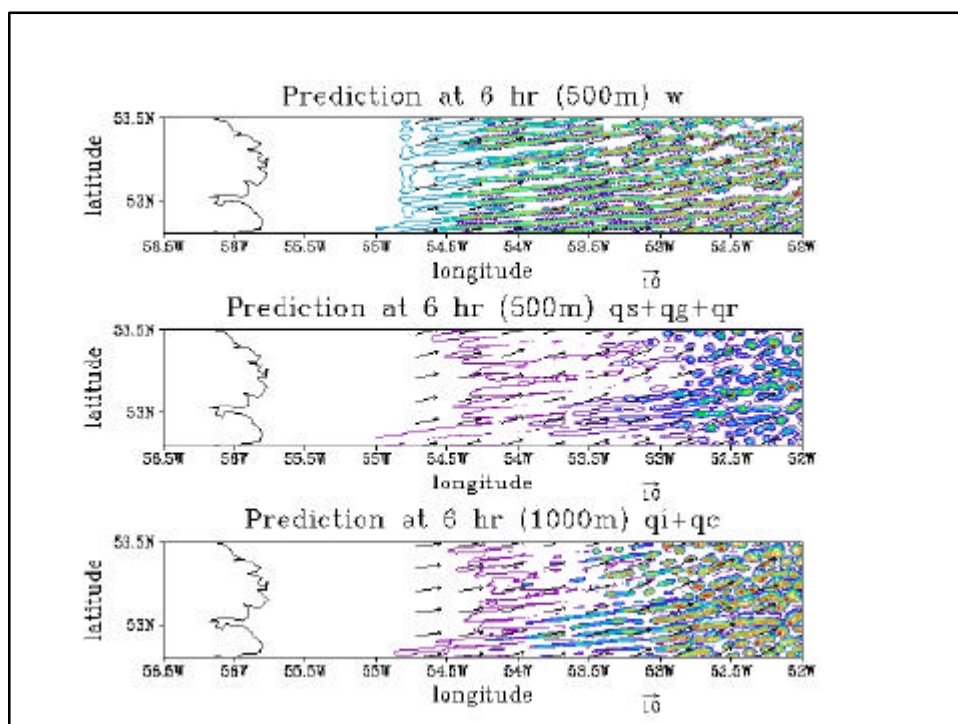
- ▶数値実験において氷野から海上に寒気が吹き出すとき、混合層が発達し、筋状雲が形成された。
- ▶筋状雲は海水の密度が小さくなるあたりから始まり、上流部ではロール状対流、中流部ではセル状対流が列を成したものの、さらに下流に行くとランダムなセル状対流となった。
- ▶また、上流からの距離とともに、個々のバンドが太くなり、本数が減少するのがみられた。
- ▶混合層の発達とともに運動量の輸送により、鉛直シアアが弱まり、セル状対流の部分では、ほとんどシアアが無くなった。
- ▶降水はセル状となるにつれてあられが増加した。

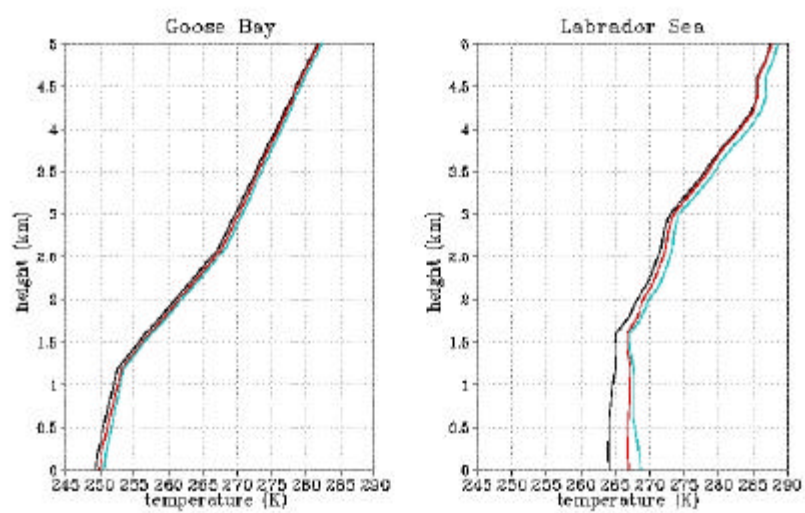
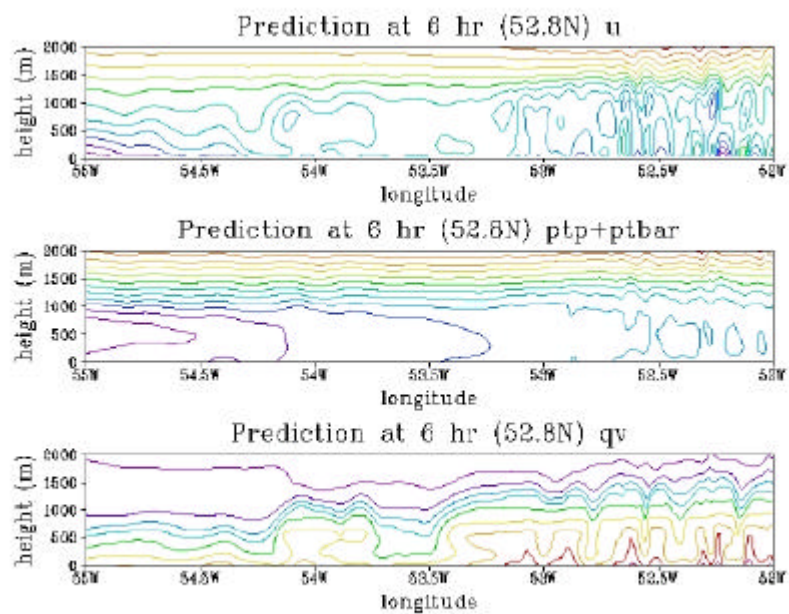
Simulation of cloud bands in Labrador Sea on 8 February 1997

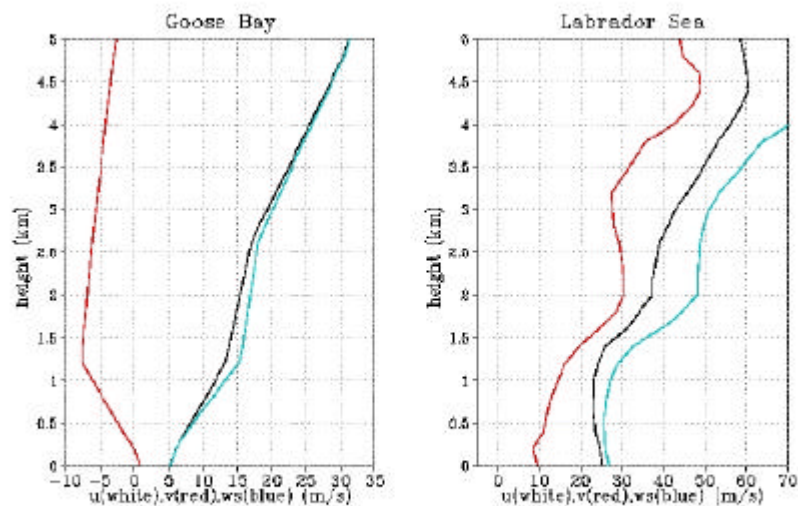
Experimental design of prediction experiment — Labrador Sea Case on 8 February 1997 —

- ▶ domain $250 \text{ km} \times 120 \text{ km} \times 12 \text{ km}$
- ▶ horizontal grid size 500 m
- ▶ vertical grid size 200 m
- ▶ grid numbers $503 \times 243 \times 63$
- ▶ integration time 6 hours
- ▶ time increment large: 2s , small: 0.5s
- ▶ topography sea
- ▶ surface process included
- ▶ sea surface temp. constant at 3 C
- ▶ microphysics the bulk cold rain type
- ▶ initial condition NCEP analysis
- ▶ boundary condition NCRP analysis
- ▶ platform NEC SX6 : 4 CPUs









おわりに

- 高緯度で寒気吹き出し時に見られる筋状雲について、雲解像モデルを用いて数値シミュレーションを行なった。
- 地球シミュレータを用いて大規模シミュレーションを行なうことで、個々の対流を解像してかつ筋状雲全体をシミュレーションした。
- 数値実験では、上流でロール状対流、下流にいくにつれてセル状対流に変化する様子が示された。
- ロール状対流は不安定成層のシアー流中に発生する対流に似ていた。
- 中流は対流セルが並ぶように筋状雲が形成され、下流はランダムにセルが配置された。

Thank you !!