

A④ (チーム名:雲解像モデリング)
「雲解像モデルの高度化と
その全球モデル高精度化への利用」

研究代表者：坪木和久(名古屋大学 地球水循環研究センター)

参画研究者：増永浩彦(名古屋大学 地球水循環研究センター)

篠田太郎(名古屋大学 地球水循環研究センター)

渡部雅浩(東京大学気候システム研究センター)

青木尊之(東京工業大学 学術国際情報センター)

榎本剛(海洋研究開発機構地球シミュレータセンター)

研究目的

雲を精度よくシミュレーションできるように雲解像モデルを高度化し、その利用、及び全球モデルとの結合により全球モデルの高精度化に寄与すること。

➤ **雲解像モデル高度化**: 雲解像モデルの改良と高度化。

- 雲物理過程の改良 (完全2モーメント化、雹、氷晶生成)
- 力学過程の改良 (セミラグランジュ化)

➤ **パラメータ改良**: 雲解像モデルの計算から得られるデータを利用して、全球モデルの雲についてのパラメータを改良する。

➤ **非斉一モデル結合**: 非静力学雲解像モデルと静力学全球モデルを結合し、全球モデルの高精度化を図る。

- 1格子埋め込み (スーパーパラメタリゼーション)
- 領域埋め込み結合 (双方向通信)

➤ **比較検証実験**: 現在気候と温暖化気候における全球モデル出力値を用いて、主に台風の雲解像実験を行いGCMの検証を行う。

雲解像モデル “CReSS”

Cloud Resolving Storm Simulator

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、非静力学・圧縮方程式系の雲解像モデル。

地球シミュレータに最適化した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年より雲解像モデルの開発を行なってきた。（一からの開発）

- 詳細な雲物理過程の導入。
- 地球シミュレータでの実績。高精度で高効率の並列化。
- 多様なシミュレーション：台風、集中豪雨、雪雲、竜巻など。
- 毎日の気象予報実験。国内外での利用。

計画の概要

	雲解像モデル改良	パラメータ改良	非斉一モデル結合	比較検証実験
H19年度 (2007)	<ul style="list-style-type: none"> ●雲物理の2モーメント化(雲水・雨水) ●セミラグ法導入 	<ul style="list-style-type: none"> ●広領域予報実験、パラメータ抽出 ●衛星による検証 	<ul style="list-style-type: none"> ●雲解像モデルの重並列化 ●双方向通信の方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ●観測された台風の実験と検証(衛星・地上による検証)
H20年度 (2008)	<ul style="list-style-type: none"> ●1次氷晶改良、2次氷晶導入 ●セミラグ法のパラメータ調整 	<ul style="list-style-type: none"> ●高解像度の予報実験、パラメータ抽出 ●衛星による検証 	<ul style="list-style-type: none"> ●雲解像モデルのGCMとの1格子点結合 ●領域結合のためのモデル改良 	<ul style="list-style-type: none"> ●観測された台風と現在気候の台風の実験(衛星・地上による検証)
H21年度 (2009)	<ul style="list-style-type: none"> ●雹のカテゴリーの導入と豪雨や降雹へのインパクト検証 	<ul style="list-style-type: none"> ●予報実験継続 ●パラメータの解像度依存性検討 	<ul style="list-style-type: none"> ●1格子点結合による長期積分 ●領域結合による東アジア域の実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●現在気候と温暖化気候の台風の実験
H22年度 (2010)	<ul style="list-style-type: none"> ●雲物理の検証実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●GCMの雲表現パラメータ改良 	<ul style="list-style-type: none"> ●1格子点結合の実験の継続と検証 ●領域結合による熱帯の実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●現在気候と温暖化気候の台風の実験(台風発生に重点)
H23年度 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ●雲物理の検証実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●GCMの雲表現改良のインパクト検証 	<ul style="list-style-type: none"> ●1格子点結合によるGCM改善の検証 ●任意領域の領域結合による実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●現在気候と温暖化気候の台風発生と熱帯の雲の高解像度実験

CRess(ver 3.0_2) 性能向上 台風SF002

ES2最適化作業後(2009/09/08)

ES2	16node		4node		
	before	modified1	modified1	modified2	
実行時間(Real time (sec))	3084.393	223.129	350.639	308.127	短縮
CPU時間 (User Time (sec))	9250.294	1188.761	2185.640	1841.477	短縮
ベクトル化率(%)	97.011	98.877	99.276	99.361	増加
MFLOPS (concurrent)	959.0654	18434.885	40010.348	54948.062	増加
ピーク性能比	0.12%	2.27%	4.83%	6.72%	向上
バンクコンフリクト率	23.41%	13.17%	26.44%	24.26%	改善

実事例の計算を1/4ノードで実行、最適化

- 1時間積分(450step)
- x=643, y=611, z=67 (4km x 4km x 500m)

- バンクコンフリクトの減少
- ベクトル化率向上
- ノード内インバランス改善

CRess(ver 3.0_2) 性能比較

台風Tw

ES2最適化作業後(2009/09/08)

	ES(8node)	ES2(2node)	ESx4との比較
	before	modified	最適化による改善
実行時間(Real time (sec))	18144.769	14764.235	4.92倍 (=ESx4/ES2)
CPU時間 (User Time (sec))	142517.474	117453.752	20.60%(=ES2/ESx4)
ベクトル化率(%)	96.333	99.018	増加
MFLOPS (concurrent)	9220.040	50244.042	増加
ピーク性能比	14.4%	6.14%	最適化により向上
バンクコンフリクト率	1.08%	32.33%	最適化により減少

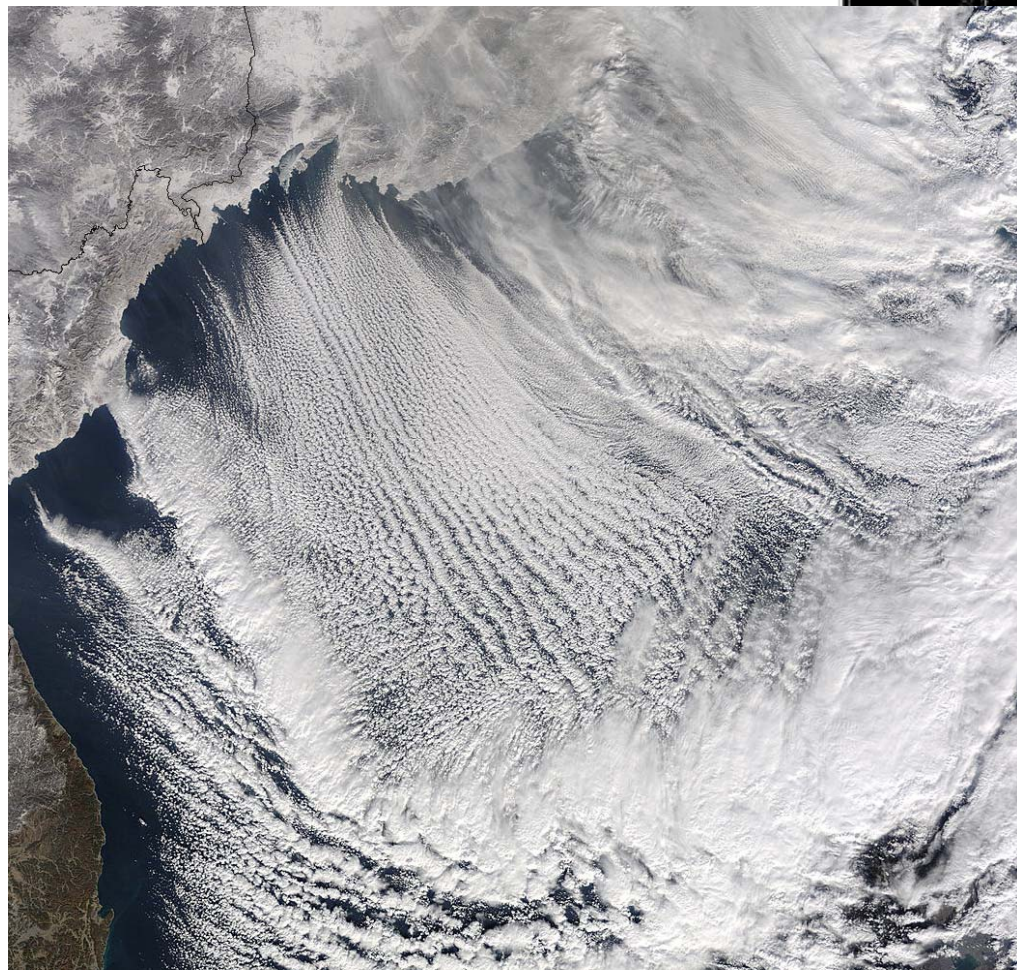
実事例の計算を少ないノード数で効率よく実行
ESの1/4ノード数で1.2倍速く実行可能(いわゆる5倍)

ES2 で64ノードまでの利用を許可
(2009/4/8)

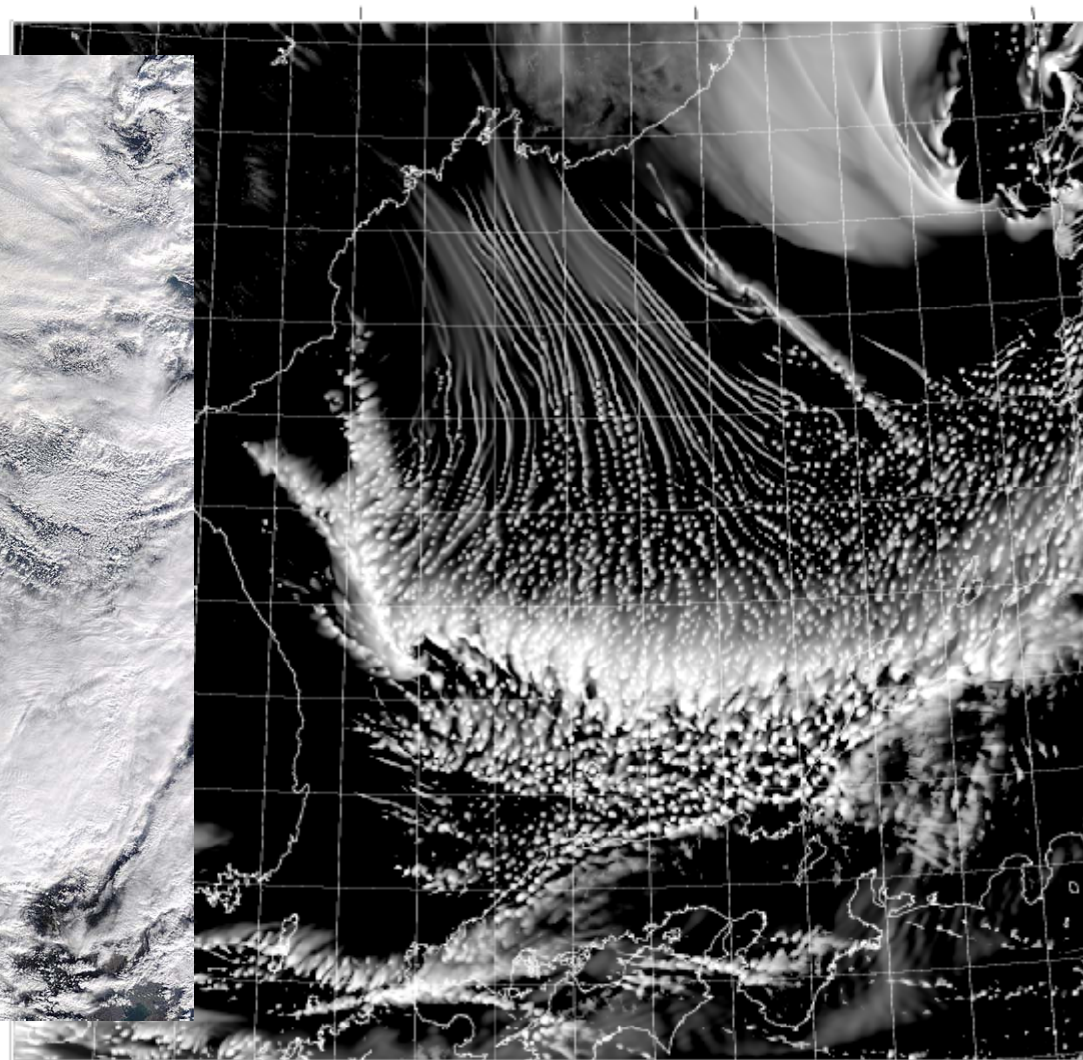
- 48時間積分
- x=515, y=515(4km),
z=67(500m)

CReSSを用いた毎日のシミュレーション実験(結果の例)

INTEGRATED MIXING RATIO OF QC, QR, QI, QG, AND QS
05 JST 31 DEC 2009



水平解像度1kmの衛星画像



130° 135°
水平解像度1kmのCReSSの結果

全球-領域結合モデル開発の目的

- 局所的に高解像度な全球シミュレーション

- 大規模な運動は静力学全球モデル(AFES)

台風など積乱雲を主要な要素とするシステムは非静力学雲解像モデル(CReSS)でシミュレーション

全球-領域結合モデルに期待されること

- (対流の活発な領域で)雲を陽に表現する

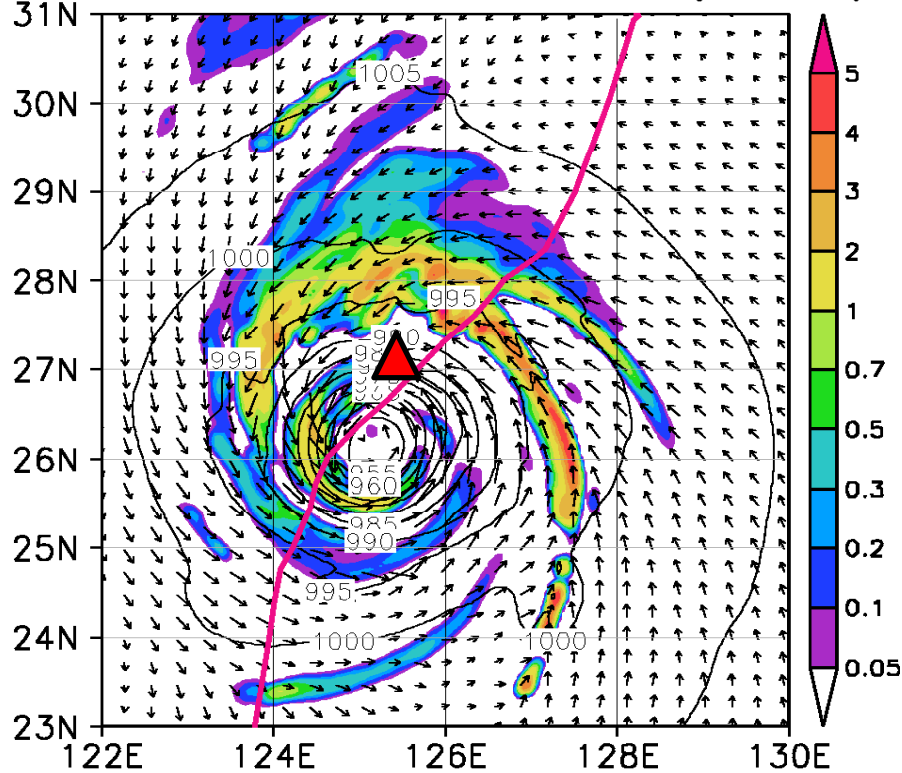
- マルチスケールの相互作用を表現する

- 個々の雲→メソスケール→・・・→惑星波スケール

シミュレーションの結果：JMAベストトラックとの比較

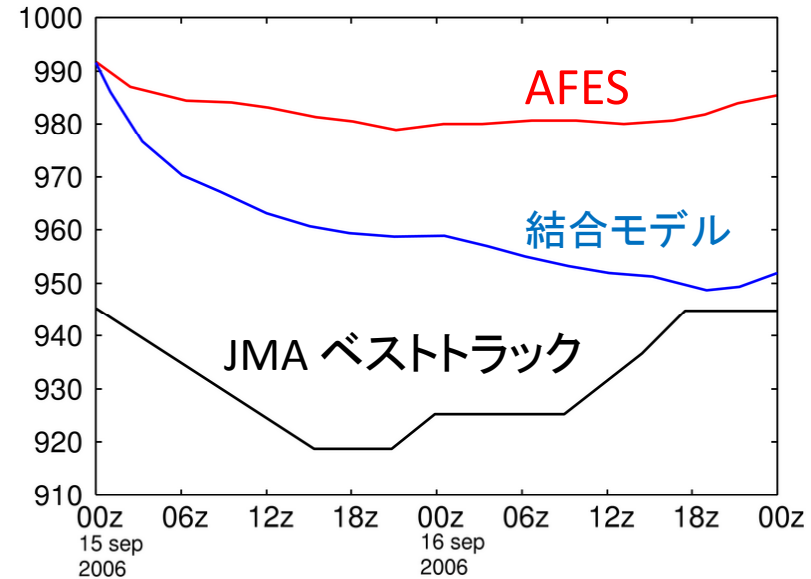
2006年9月16日09UTCの
スナップショット

09:00Z 16SEP 2006 SLP, Qr (:T0613)

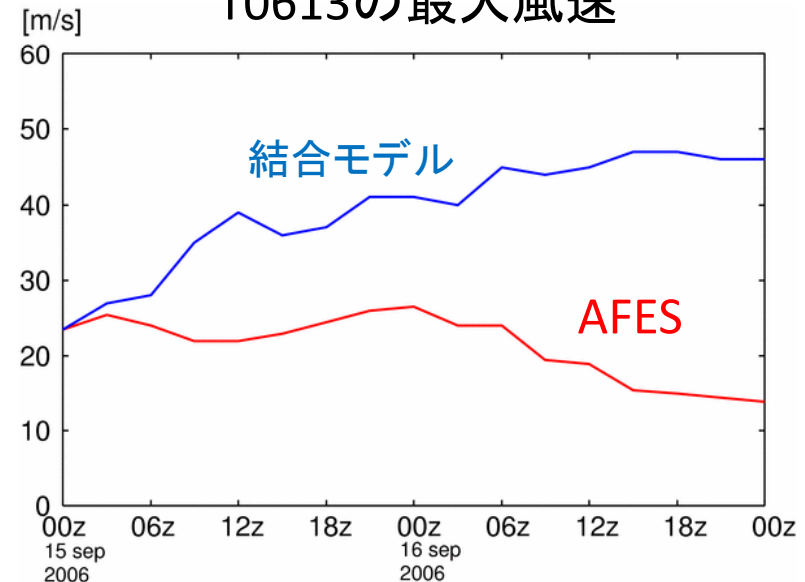


- ・ベクトル: 高度1kmにおける風速[m/s]
- ・シェード: 高度2kmにおける雨水量[g/kg]
- ・コンター: 海面気圧[hPa]
- ・▲: ベストトラックの中心位置

T0613の中心気圧



T0613の最大風速

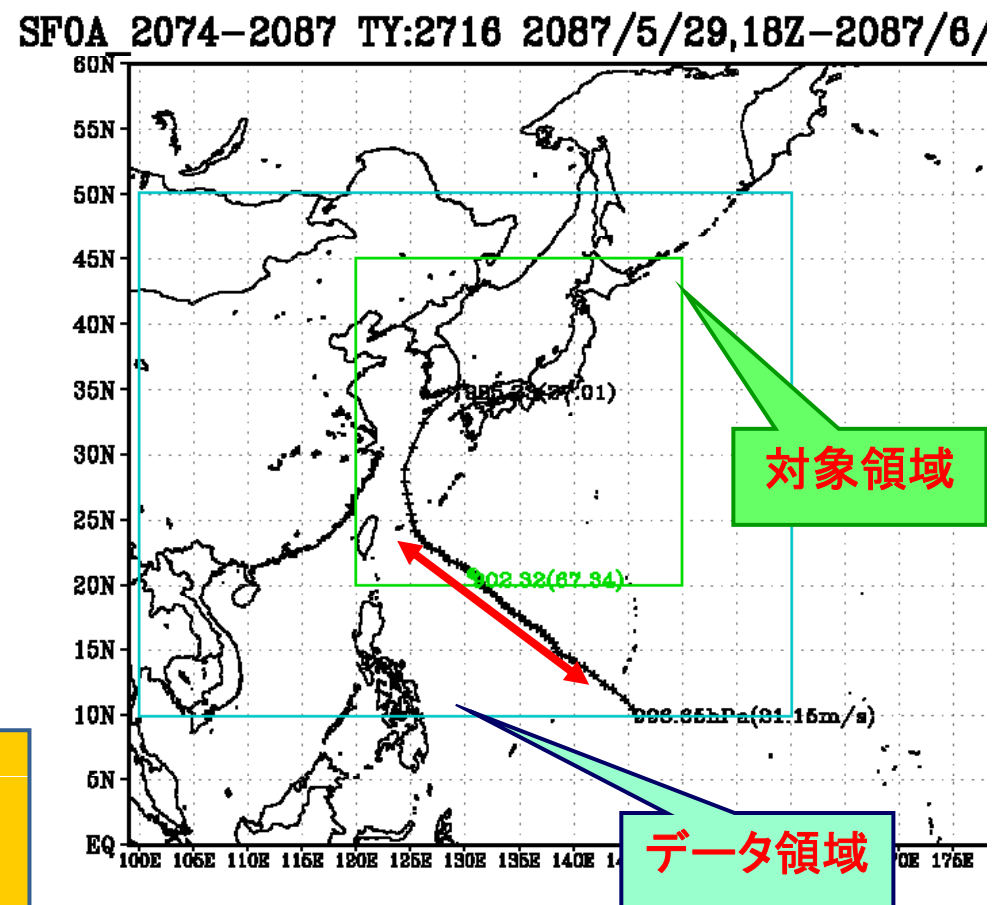


GCMの現在気候・温暖化気候の台風についての雲解像実験

気象研究所20kmGCMを用いた現在気候・温暖化気候の各10数年間で抽出された台風(現在気候:266個、温暖化気候:176個)のうち、次の条件で、CReSSを用いた雲解像実験を行うための台風を選択した。

1. 台風のライフタイムの中で、最低中心地上気圧が**970hPa**以下になること。(発達した強い台風であること。)
2. そのときの中心の位置が、**東経120-150度、北緯20-45度**の領域(図中の緑の枠)にあること。(シミュレーションを行うために、十分データがある領域に最発達時があること。)

現在気候:33事例の台風
温暖化気候:32事例+1事例

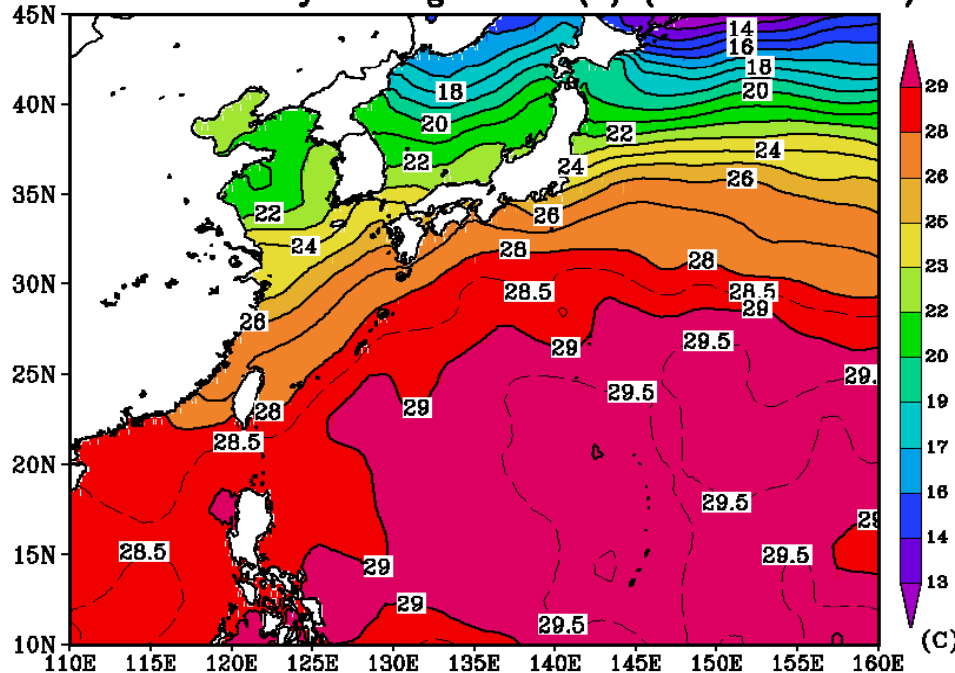


現在気候と温暖化気候の海面水温分布例

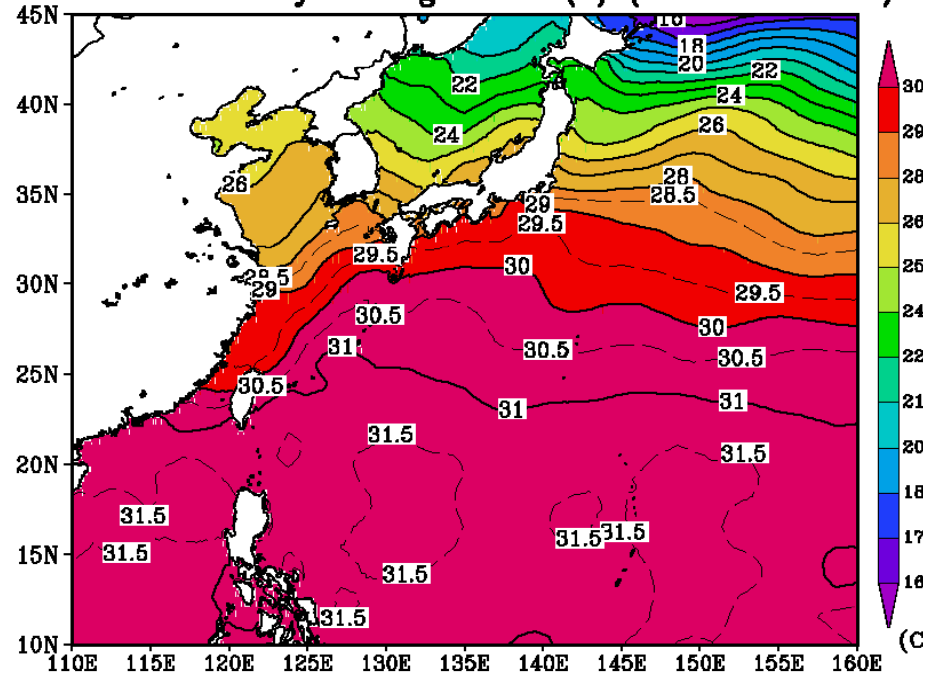
現在気候: 1980年9月

温暖化気候: 2083年9月

SEP1980 Monthly Averaged SST (C) (MRI GCM 20km)



SEP2083 Monthly Averaged SST (C) (MRI GCM 20km)



西太平洋では、現在気候より温暖化気候のほうが2°Cほど海面水温が高い。
日本海から北海道周辺では2~4°Cも海面水温が高い。

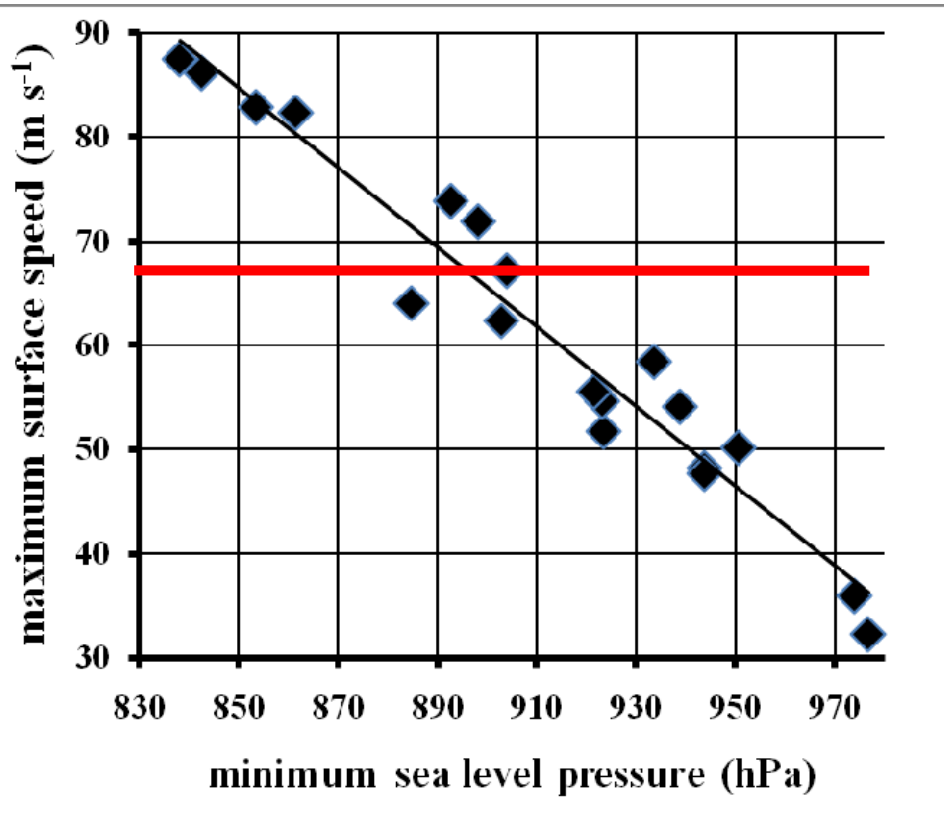
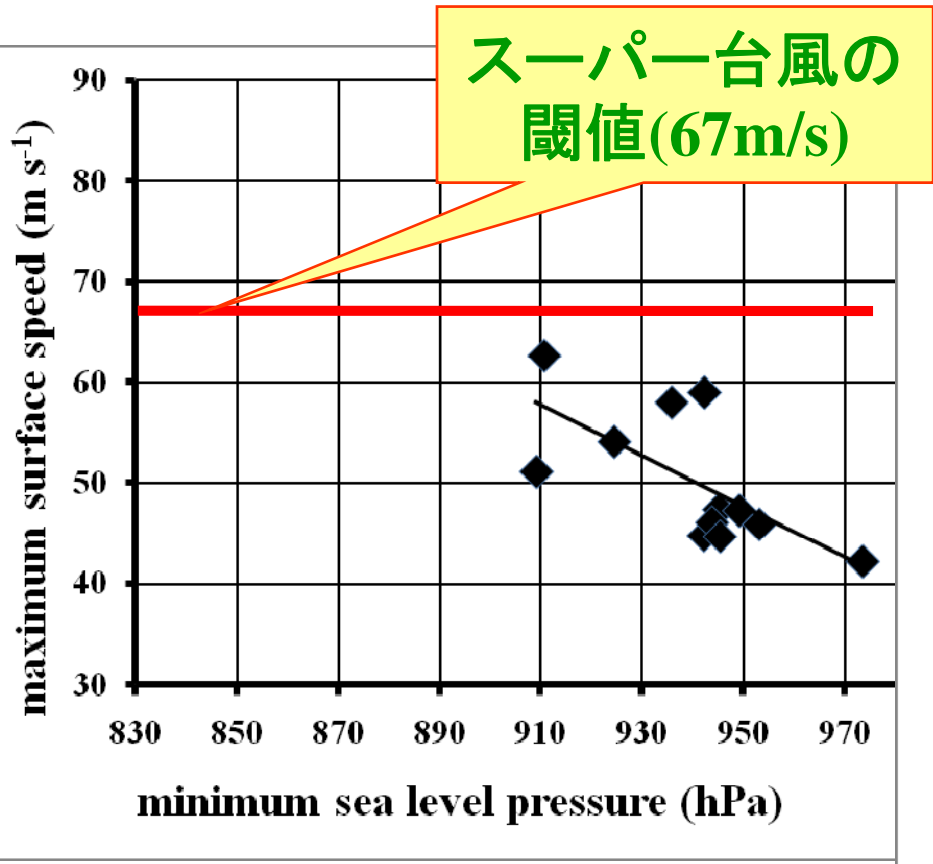
雲解像モデルを用いた現在・温暖化気候の台風実験

- ◆ 計算領域：移動する台風を十分おおおう領域。
- ◆ 水平格子解像度：2 km
- ◆ 鉛直格子数：67
- ◆ 鉛直格子間隔：200 ~ 450 m
- ◆ 積分期間：GCMで最低気圧になる時刻から3日前を初期値とし、1~2日後まで積分。最低気圧到達後まで。
- ◆ 地形とSST：実地形。GCMの出力SST。
- ◆ 初期値・境界値：MRI GCM 20km 実験出力(6時間)。
- ◆ 雲物理過程：冷たい雨
- ◆ 海洋モデル：1次元拡散モデル (60 layers, 30m)
- ◆ 陸面モデル：1次元熱伝導モデル (60 layers, 9m)
- ◆ 計算機：地球シミュレータ (ES2:16 nodes)

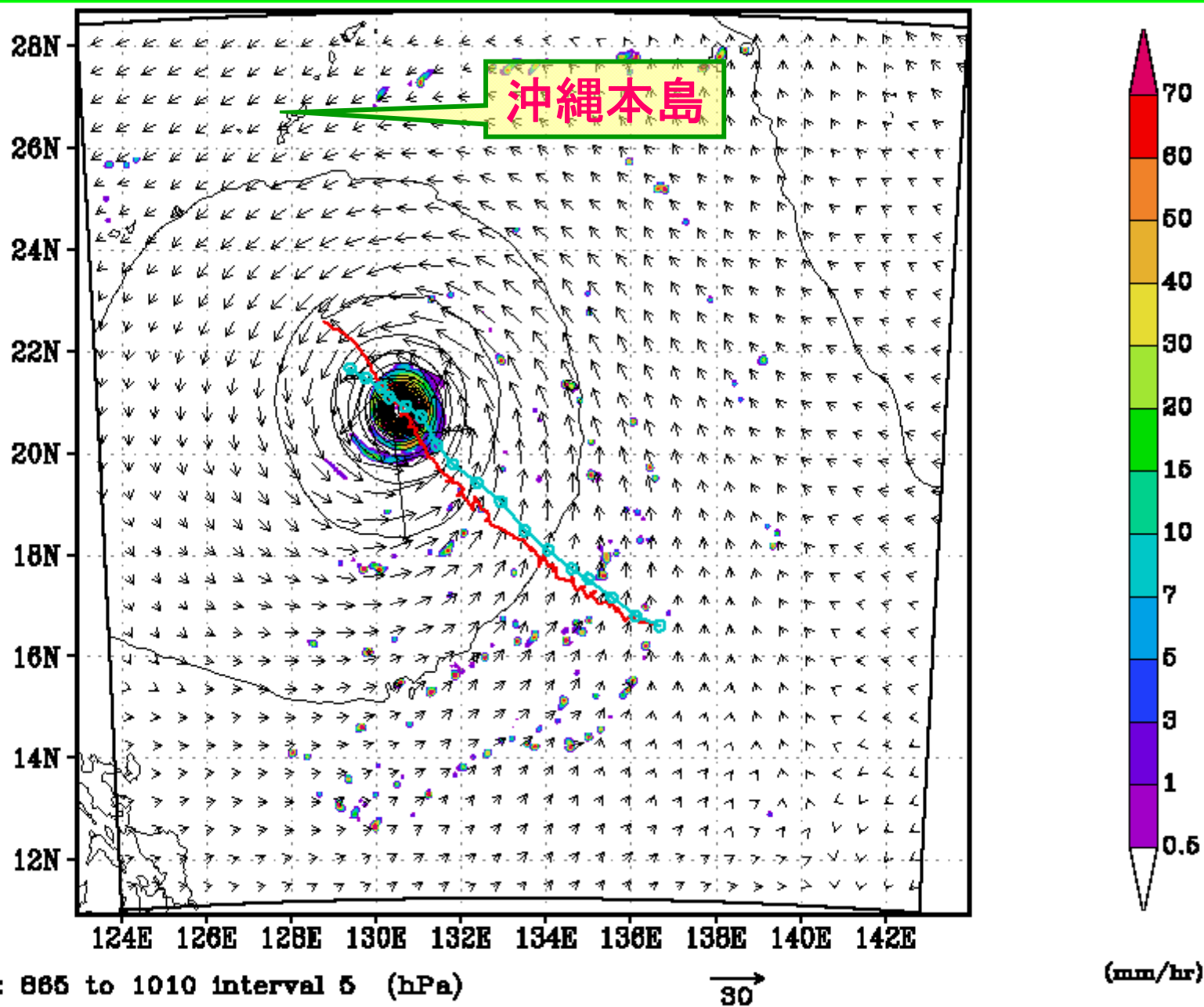
台風の最低中心気圧と最大地上風速(雲解像モデル)

現在気候の台風 (12個)

温暖化気候の台風(19個)



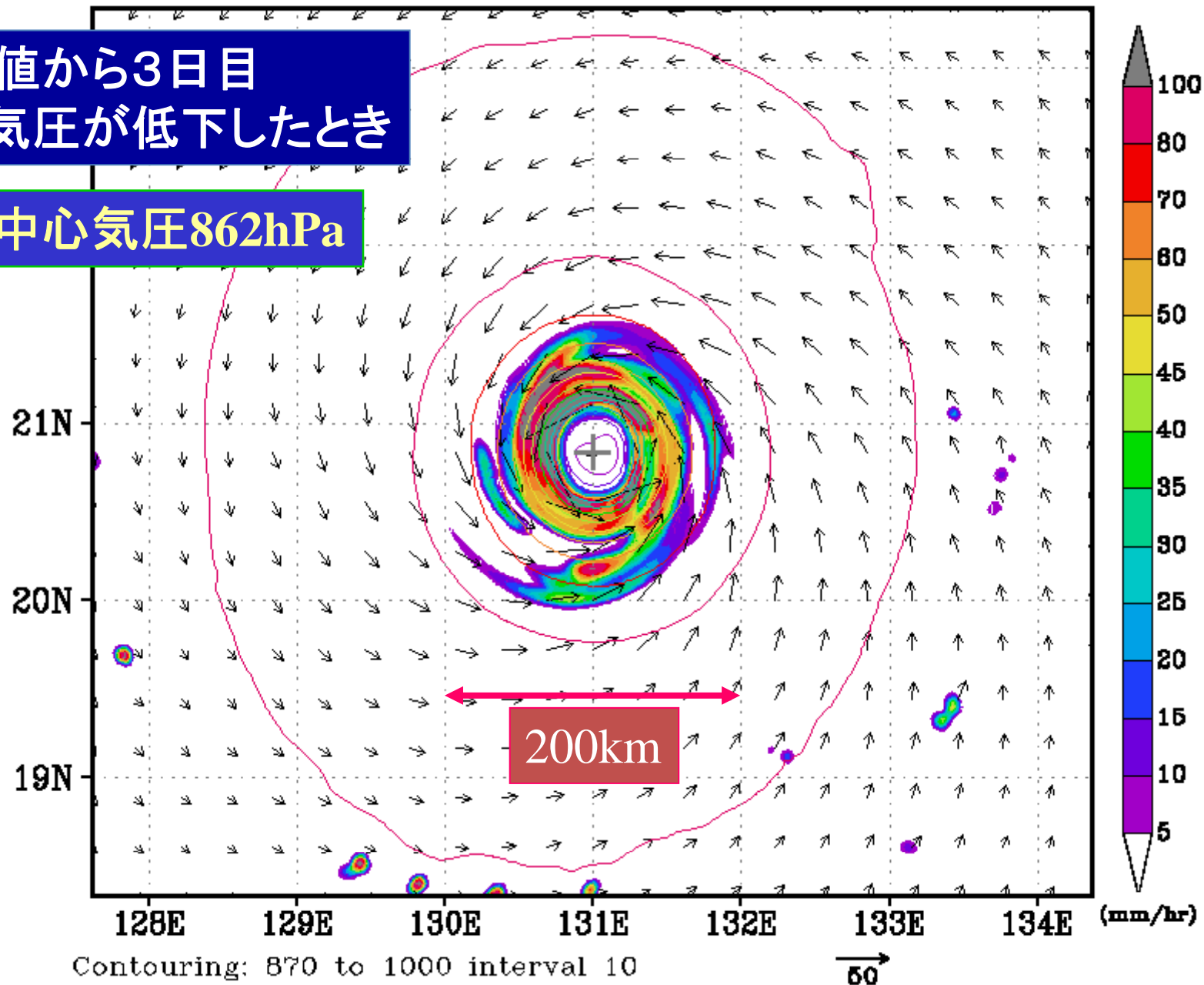
温暖化気候の台風SF2716の実験：地上気圧(等値線)と降水強度



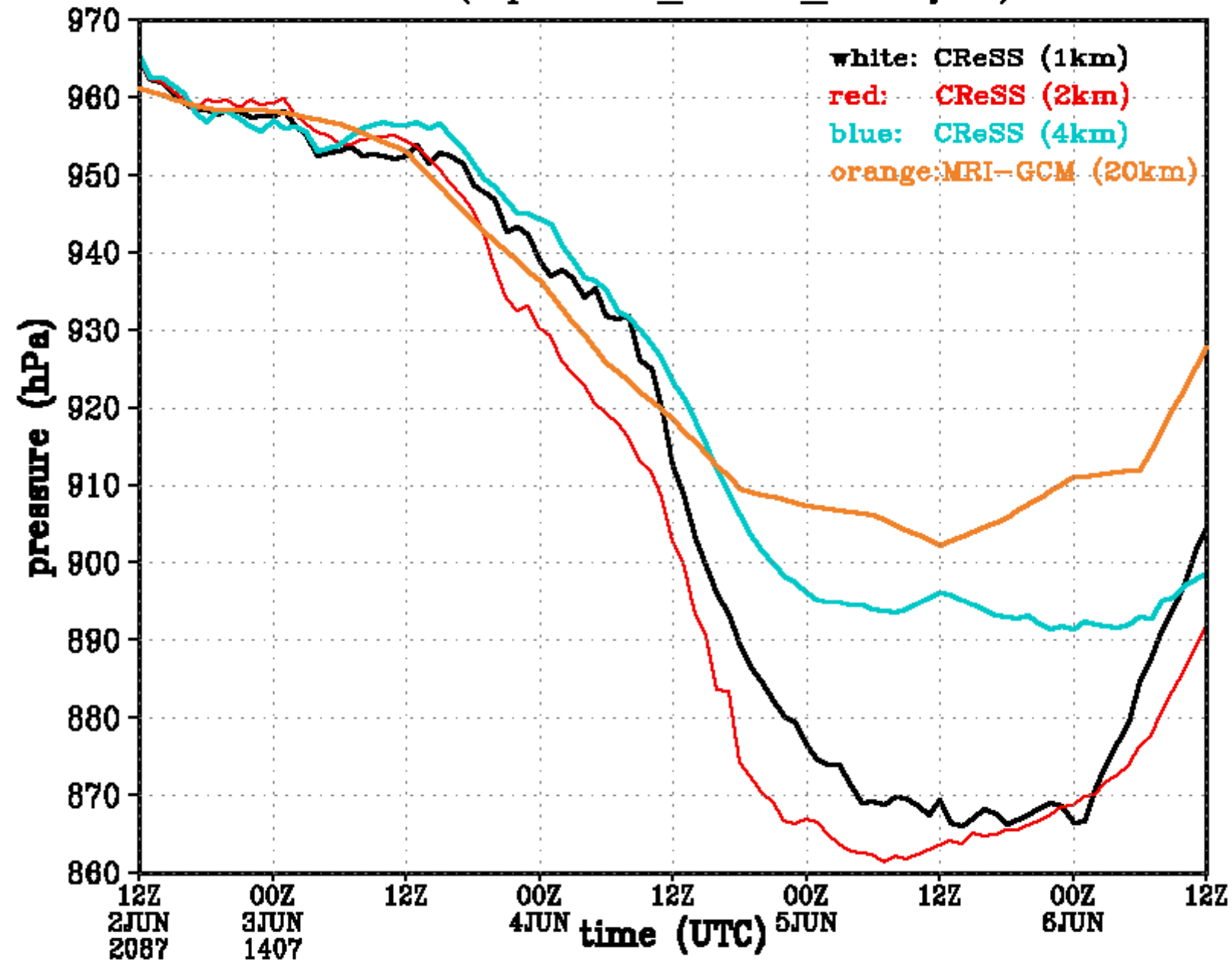
温暖化気候の台風SF2716の実験: 地上気圧(等値線)と降水強度

初期値から3日目
最も気圧が低下したとき

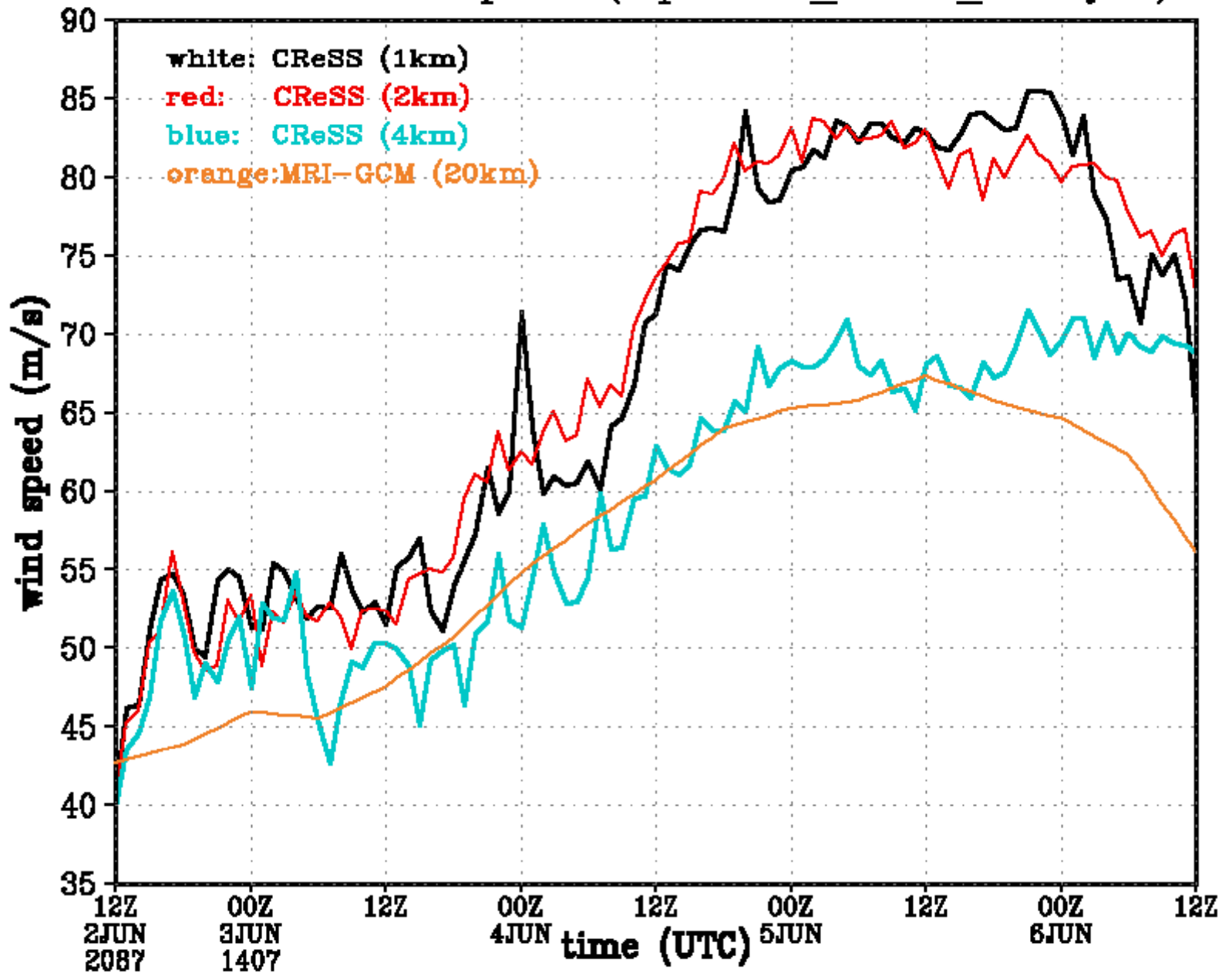
最低中心気圧862hPa



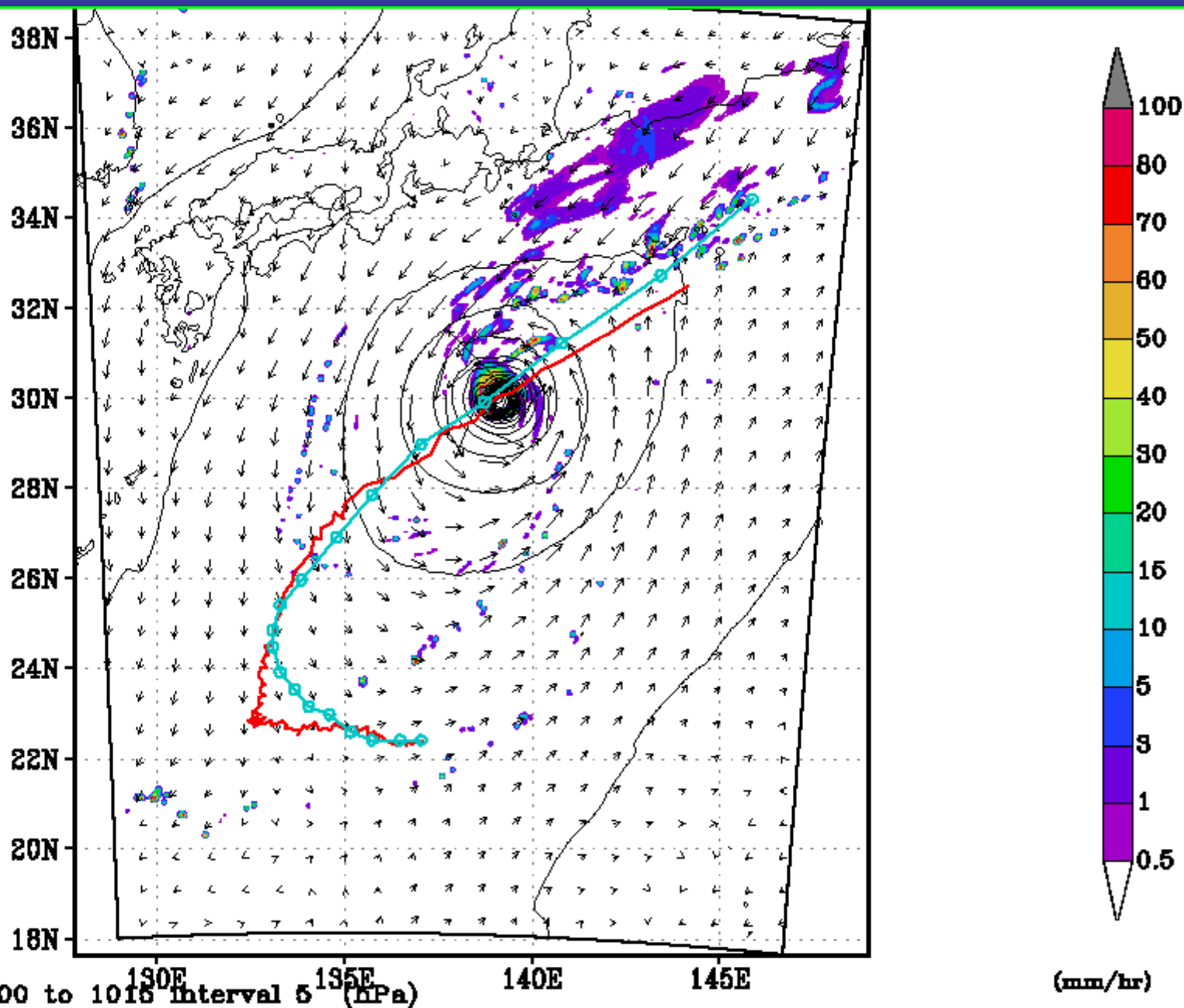
central SLP (slp.sf001_t2716_2087jun)



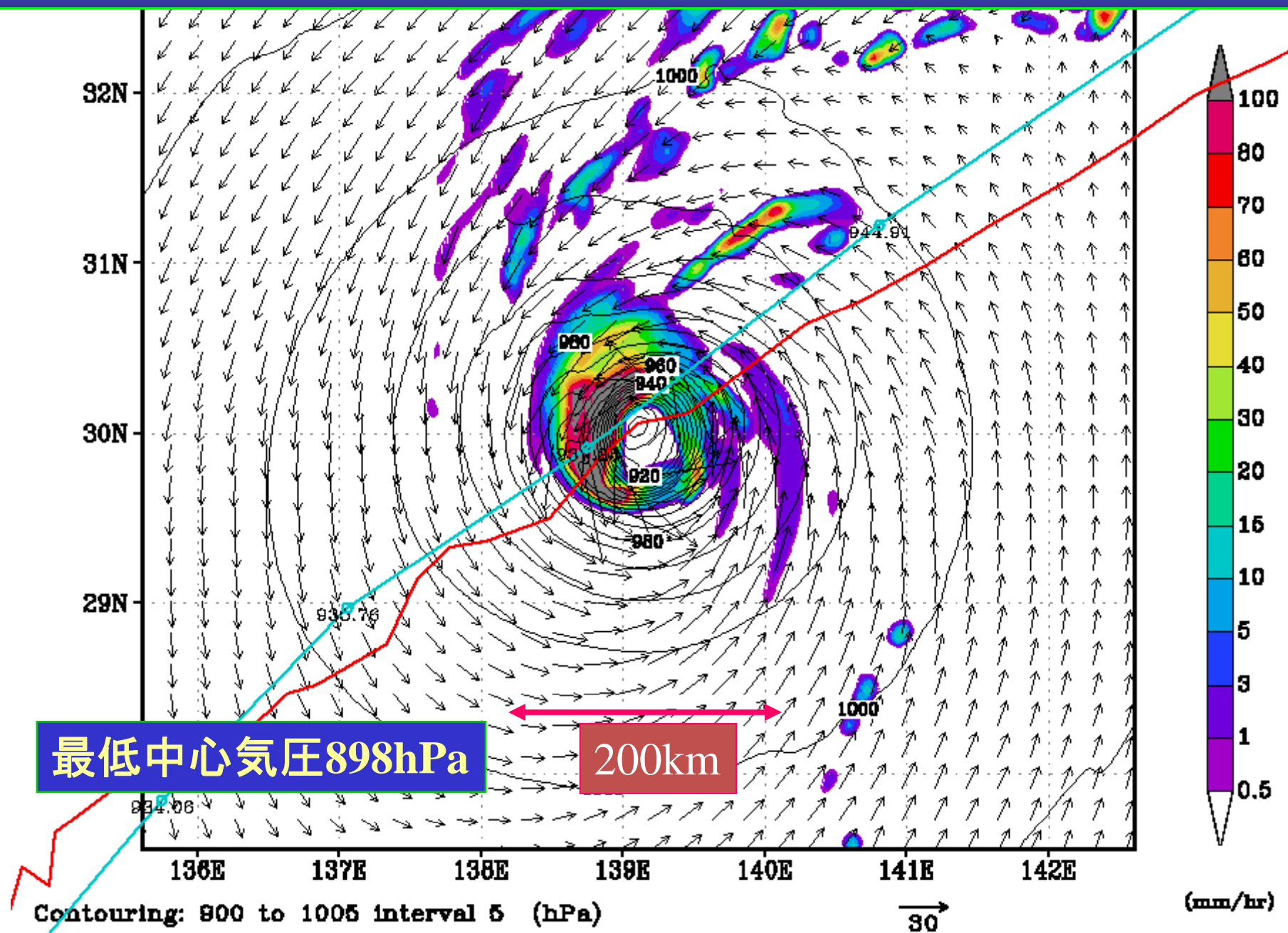
Max. surface speed (slp.sf001_t2716_2087jun)



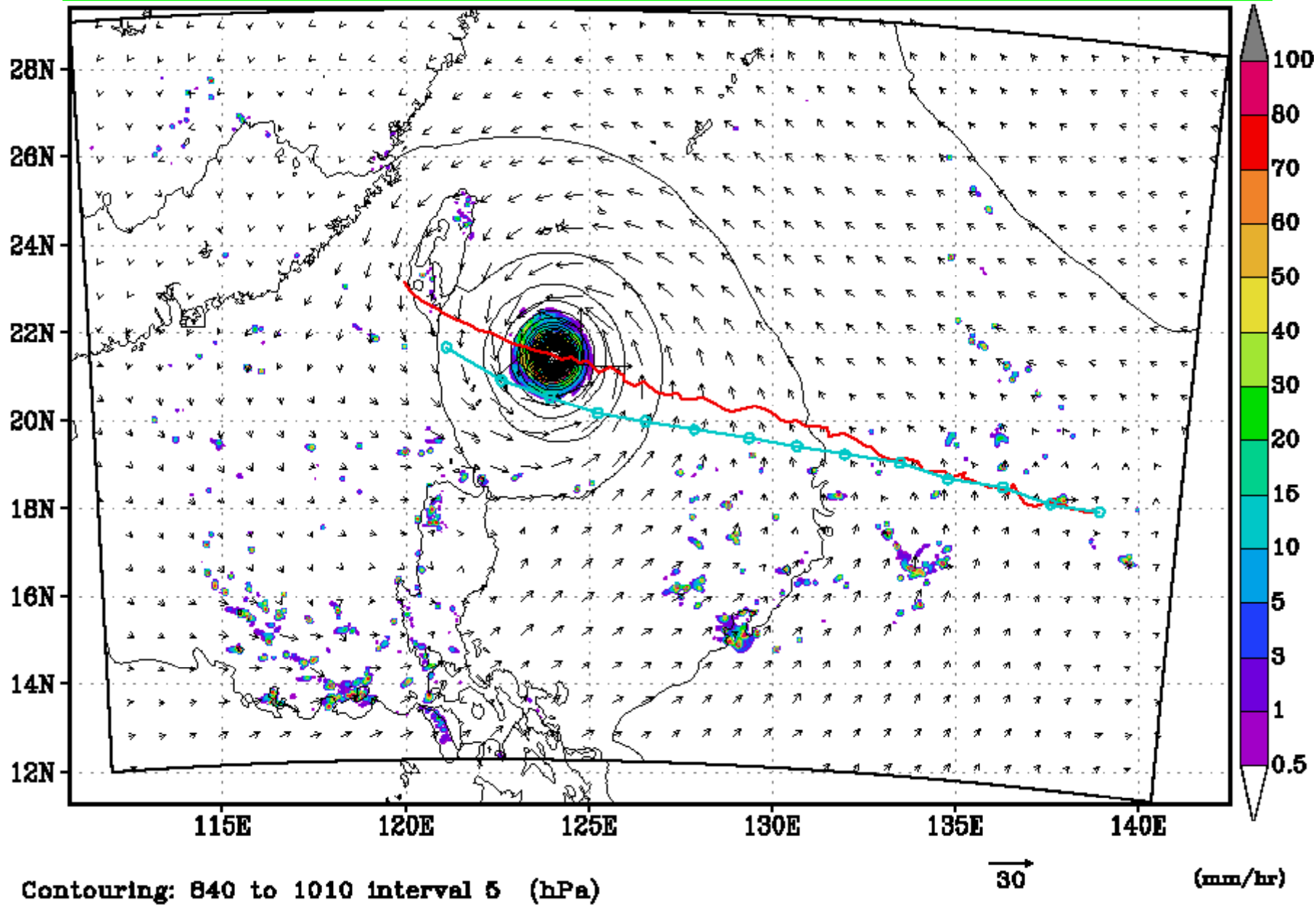
温暖化気候の台風SF2417の実験: 地上気圧(等値線)と降水強度



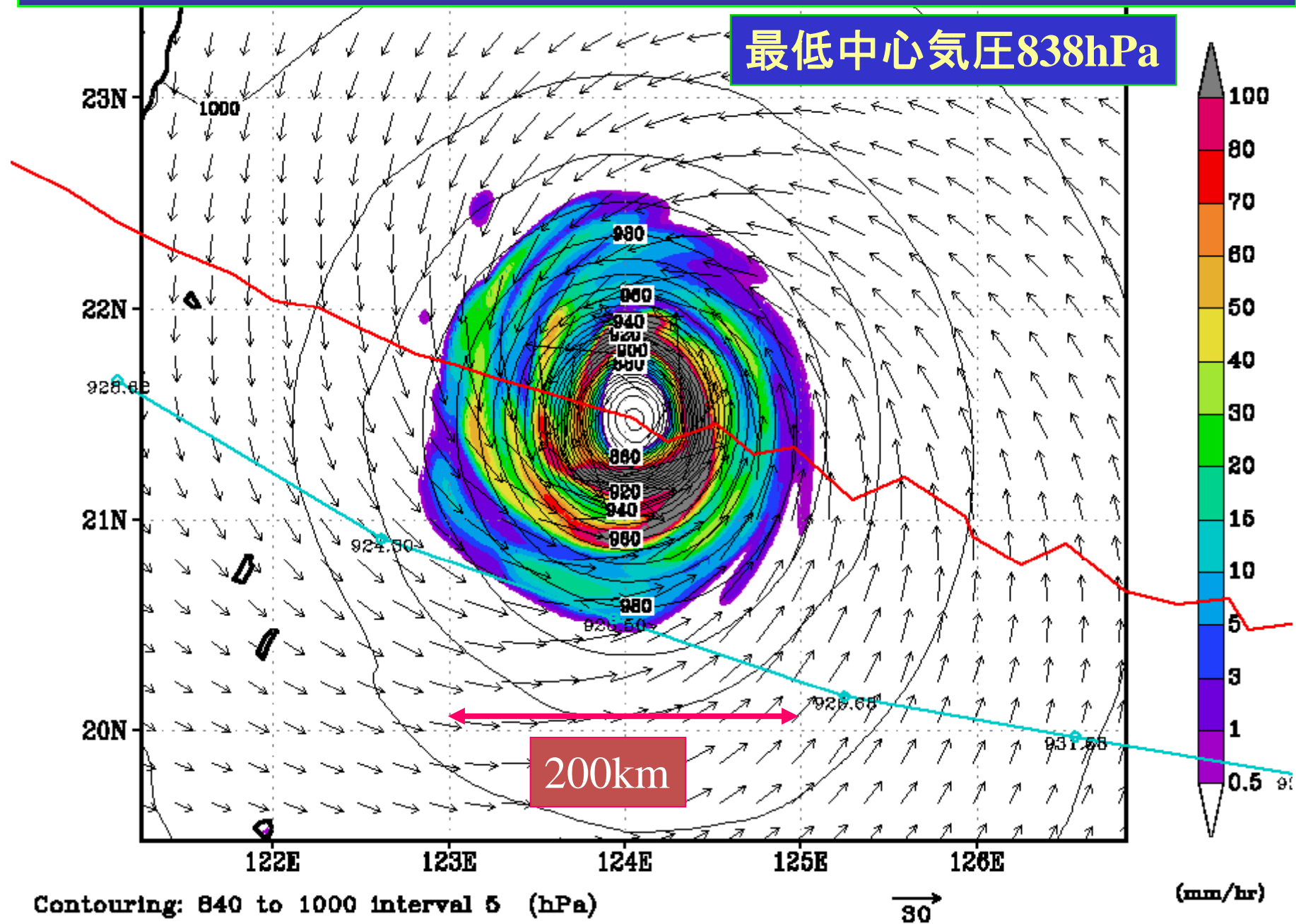
温暖化気候の台風SF2417の実験: 地上気圧(等値線)と降水強度



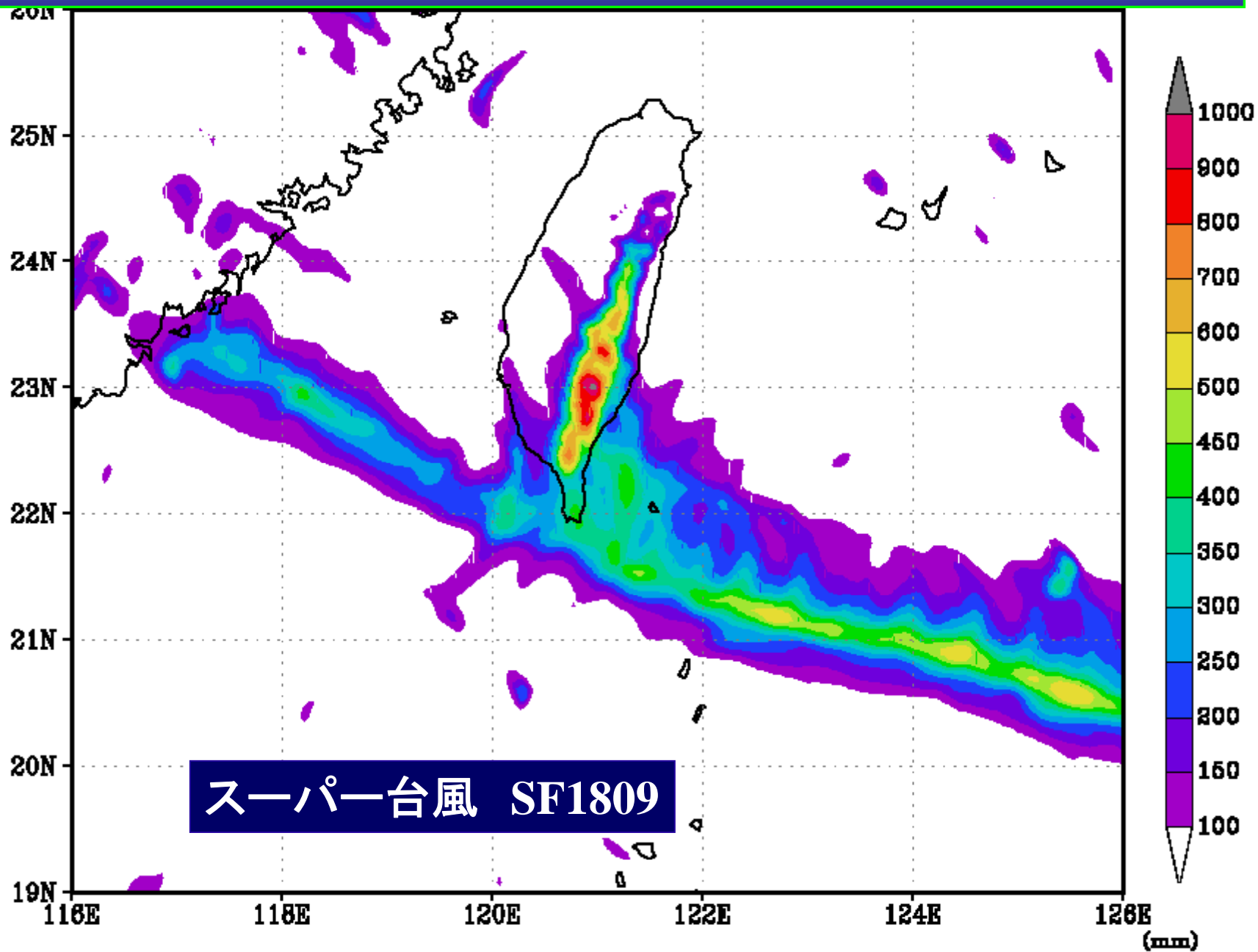
温暖化気候の台風SF1809の雲解像モデル実験：中心気圧の時間変化



温暖化気候の台風SF1809の実験: 地上気圧(等値線)と降水強度

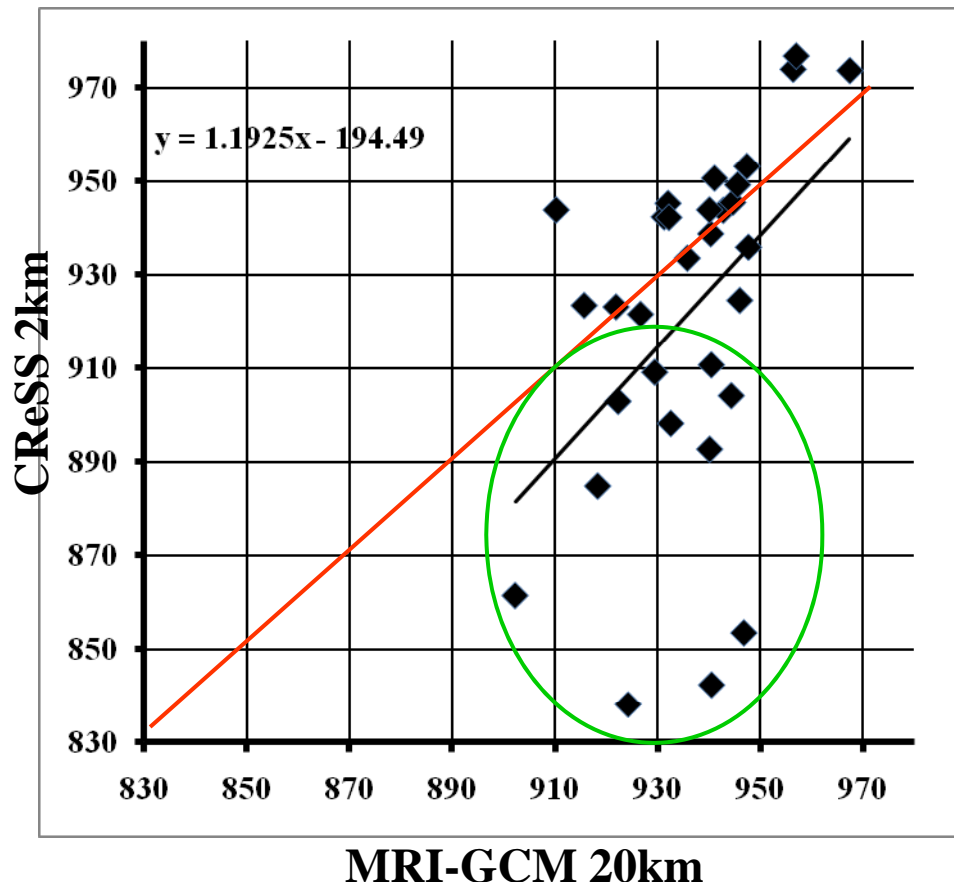


GCM温暖化気候の台風のCReSS実験: 台風SF1809による総降水量(mm)

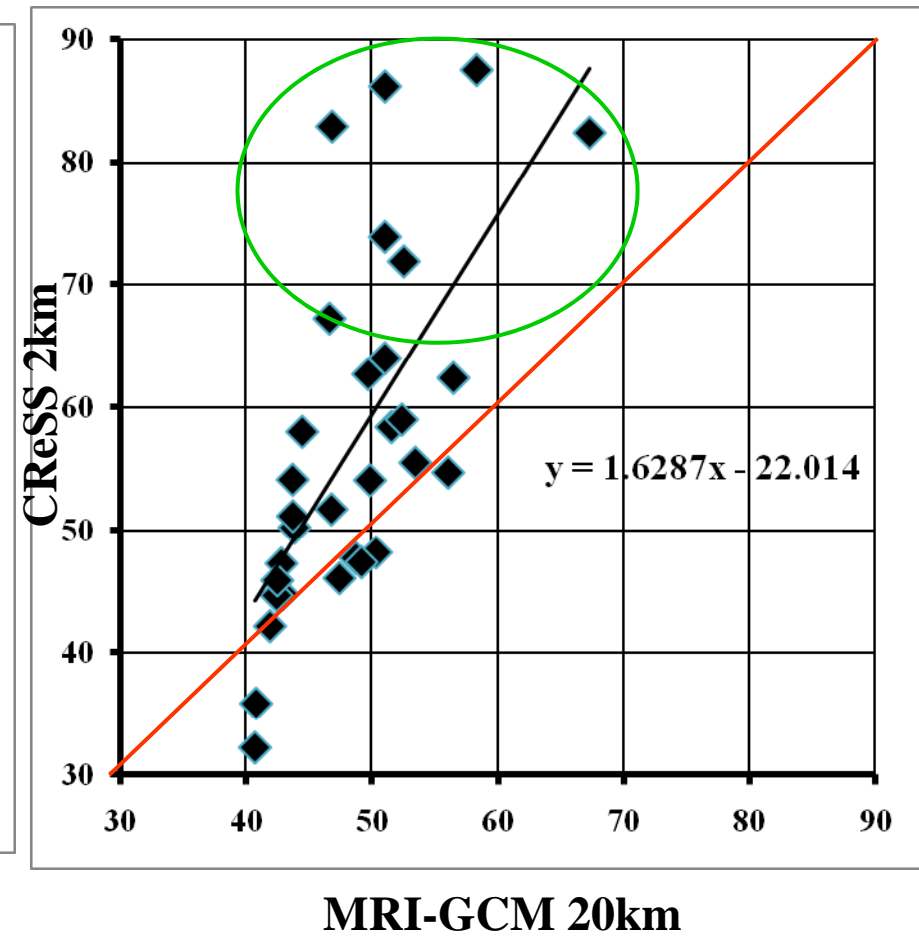


全球モデル(解像度20km)と雲解像モデル(2km)の比較

最低中心気圧



最大地上風速



- ◆要素モデル開発として、雲解像モデルの開発を行っている。今年度はES2への対応を行い、また、静力学全球モデルー非静力学雲解像モデルの結合を進めた。
- ◆日々の気象シミュレーションとして、解像度4km, 1kmを実施している。
- ◆GCMの現在気候・温暖化気候で現れる台風について雲解像モデルを用いた実験を行うためそれぞれ33事例を抽出した。
- ◆温暖化気候のほうが現在気候より、海面水温が2°Cほど高い。
- ◆雲解像モデルを用いた実験で、温暖化気候ではスーパー台風(風速67m/s以上)が発生した。19事例のうち約1/3程度がスーパー台風となった。その雨域の大きさは小さい(200km程度)。
- ◆一方、現在気候では一つもスーパー台風は発生しなかった。
- ◆スーパー台風のひとは北緯30度を超えて、日本付近に接近した(関東の南、約500km付近を北東に通過)。