

平成19年度 卒業論文

次世代大気大循環モデルNICAMの
予報精度に関する解析的研究

筑波大学第一学群自然科学類

地球科学主専攻

200410454

渡辺 美南子

2008年1月

目次

Abstract	iv
表目次	vi
図目次	vii
1 はじめに	1
2 目的	3
3 使用モデル	4
3.1 支配方程式	4
3.2 計算方法の概要	10
3.3 正 20 面体の分割化	11
3.4 時間積分法	12
3.5 本研究で用いた NICAM の物理過程や計算方法の設定	14
3.5.1 荒川・シューベルト積雲対流モデル	15
4 使用データ	18
4.1 解析データ	18
4.1.1 長期再解析データ	18
4.1.2 再解析データ	18
4.1.3 JRA-25 データの詳細	19

4.2	予報データ	21
4.2.1	JMA-GSMの詳細	21
5	解析手法	27
5.1	NICAMの初期値・解析用予報データ作成	28
5.1.1	初期値作成	28
5.1.2	解析用予報データ作成	28
5.2	予報精度の評価	29
5.2.1	RMSE	29
5.2.2	AC	29
5.2.3	季節平均・年平均	29
5.2.4	予報誤差	30
6	結果	31
6.1	NICAMの出力結果	31
6.2	RMSE・AC	31
6.2.1	24 予報事例	31
6.2.2	季節平均・年平均	32
6.3	5日予報の予報誤差	37
6.3.1	24 予報事例	37
6.3.2	季節平均・年平均	41
7	考察	43

8 結論	47
謝辭	49
参考文献	50

Analysis of the Forecast Skill for the Next Generation Atmospheric General Circulation Model NICAM

Minako WATANABE

Abstract

A new type of ultra-high resolution atmospheric global circulation model is developed by Center for Climate System Research, University of Tokyo and Frontier Reserch Center for Global Change/Japan Agency for marine-Earth Science and Technology. The new model is designed to perform “ cloud resolving simulations ” by directly calculating deep convection and meso-scale circulations, which plays a key role not only in the tropical circulations but also in the global circulations of the atmosphere. Since cores of deep convection have a few km in horizontal size, they have not directly been resolved by existing atmospheric general circulation models (AGCMs). In order to drastically enhance horizontal resolution, a new framework of a global atmospheric model is required; they adopted nonhydrostatic governing equations and icosahedral grids to the new model, and call it Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM).

In the present study, there are results from the unique 3.5-km mesh global experiments -with $O(10^9)$ computational nodes- using realistic topography and land/ocean surface thermal forcing. The results show realistic behaviors of multi-scale convective systems in the tropics, which have not been captured by AGCMs.

In this article , I reviewed governing equations and numerical techniques in reference to Satoh et al. (2007), and investigated the results of the forecast skill for NICAM (horizontal grid interval-224 km [grid division level 5]) without cloud microphysical processes. The results show that annual mean of the deterministic predictability of NICAM is 5.00 day against annual mean of that of JMA-GSM is 6.75 day. The winter (DJF) mean of the predictability of NICAM is 6.25 day while the summer (JJA) mean is 3.75 day.

The results are for the forecast skill of NICAM at present, where the physical processes are under the development. But I hope that the forecasting skill of the new model in the next generation atmospheric sciences would be improved in near future.

Key Words : NICAM, Nonhydrostatic model, Cloud resolving model, Icosahedral grids,
predictability
Atmospheric general circulation models

表 目 次

1	NICAM の支配方程式に用いられている記号	4
2	NICAM の支配方程式に用いられている記号	5
3	解像度”glevel-n”と水平格子間隔の関係	11
4	JMA-GSM の支配方程式に用いられている記号	23
5	予報事例の初期値	27
6	幾何学的 z 系 [m]	28
7	予報事例毎における RMSE・AC の予報限界時間 [day]	34
8	JMA-GSM の予報限界時間が NICAM の予報限界時間より 3 日以上長かつ た事例とそのときの予報限界時間 [day]	35
9	予報精度が悪かった事例とそのときの予報限界時間 [day]	35
10	予報精度が良かった事例とそのときの予報限界時間 [day]	36
11	季節平均・年平均した RMSE・AC の予報限界時間 [day]	36

目 次

1	格子間隔 3.5km の OLR (外向き長波放射) [5 日目の 0:00 ~ 1:30 の 90 分平均]	51
2	2 °N-2 °S の平均降水量の Hovmöller diagrams (左 : 格子間隔 7km の 60 ~ 90 日 180 °W ~ 180 °E の全域図、右上 : 格子間隔 3.5km の 80 ~ 90 日 180 °W ~ 180 °W の部分域図、右下 : 格子間隔 7km の 64 ~ 67 日 40 °E ~ 80 °E の拡大図)	51
3	2004/4/1 00UTC の NCAR/NCEP の再解析データを初期値とした 4/5 00UTC の OLR (格子間隔 : 3.5km)	52
4	速度ベクトル v の 3 成分と直交基底 $\{e_1, e_2, e_3\}$ の定義	52
5	正 20 面体格子の生成法 (glevel-0(a), 1(b), 2(c), 3(d))	53
6	鉛直レベルとローレンツ格子における要素配置	53
7	時間積分方法	54
8	バネ力学を用いた格子点の修正したバネ結合	54
9	バネ力学によって修正した正 20 面体格子 (glevel-5)	55
10	六角形の場合の水平コントロールボリュームと定点の配列	55
11	季節平均した NICAM における東西風の 14 日予報の平均場 - 2006 & 2007 冬 (DJF) - (赤の実線:西風, 青の破線:東風)	56
12	季節平均した NICAM における東西風の 14 日予報の平均場 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (赤の実線:西風, 青の破線:東風)	56
13	季節平均した NICAM における気温の 14 日予報の平均場 - 2006 & 2007 冬 (DJF) -	57
14	季節平均した NICAM における気温の 14 日予報の平均場 - 2006 & 2007 夏 (JJA) -	57

15	2005年12月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	58
16	2005年12月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	58
17	2006年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	59
18	2006年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	59
19	2006年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	60
20	2006年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	60
21	2006年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	61
22	2006年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	61
23	2006年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	62
24	2006年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	62
25	2006年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	63
26	2006年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	63
27	2006年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	64

28	2006年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	64
29	2006年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	65
30	2006年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	65
31	2006年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	66
32	2006年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	66
33	2006年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	67
34	2006年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	67
35	2006年10月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	68
36	2006年10月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	68
37	2006年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	69
38	2006年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	69
39	2006年12月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	70
40	2006年12月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	70

41	2007年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	71
42	2007年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	71
43	2007年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	72
44	2007年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	72
45	2007年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	73
46	2007年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	73
47	2007年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	74
48	2007年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	74
49	2007年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	75
50	2007年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	75
51	2007年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	76
52	2007年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	76
53	2007年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	77

54	2007年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	77
55	2007年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	78
56	2007年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	78
57	2007年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	79
58	2007年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	79
59	2007年10月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	80
60	2007年10月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	80
61	2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	81
62	2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	81
63	季節平均した北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図 - 2006 & 2007冬(DJF) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	82
64	季節平均した北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図 - 2006 & 2007冬(DJF) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	82
65	季節平均した北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図 - 2006 & 2007春(MAM) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	83
66	季節平均した北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図 - 2006 & 2007春(MAM) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	83

67	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	84
68	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	84
69	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 秋 (SON) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	85
70	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 秋 (SON) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	85
71	NICAM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])	86
72	JMA-GSM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])	86
73	NICAM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])	87
74	JMA-GSM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])	87
75	年平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	88
76	年平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)	88
77	2005 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)	89

78	2005年12月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	89
79	2006年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	90
80	2006年01月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	90
81	2006年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	91
82	2006年02月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	91
83	2006年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	92
84	2006年03月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	92
85	2006年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	93
86	2006年04月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	93
87	2006年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	94
88	2006年05月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	94
89	2006年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	95
90	2006年06月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	95
91	2006年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	96
92	2006年07月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	96
93	2006年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	97

94	2006年08月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	97
95	2006年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	98
96	2006年09月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	98
97	2006年10月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	99
98	2006年10月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	99
99	2006年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	100
100	2006年11月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	100
101	2006年12月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	101
102	2006年12月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	101
103	2007年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	102
104	2007年01月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	102
105	2007年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	103
106	2007年02月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	103
107	2007年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	104
108	2007年03月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	104
109	2007年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	105

110	2007年04月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	105
111	2007年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	106
112	2007年05月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	106
113	2007年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	107
114	2007年06月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	107
115	2007年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	108
116	2007年07月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	108
117	2007年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	109
118	2007年08月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	109
119	2007年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	110
120	2007年09月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	110
121	2007年10月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	111
122	2007年10月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	111
123	2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の 誤差図(左:NICAM, 右:JMA-GSM)	112
124	2007年11月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図	112
125	季節平均した北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図 - 2006 & 2007 冬 (DJF) - (左:NICAM, 右:JMA-GSM)	113

126	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 春 (MAM) - (左:NICAM, 右:JMA-GSM)	113
127	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (左:NICAM, 右:JMA-GSM)	114
128	季節平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 秋 (SON) - (左:NICAM, 右:JMA-GSM)	114
129	年平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 - (上:NICAM, 下:JMA-GSM)	115

1 はじめに

大気大循環モデル (AGSMs) の解像度アップは、常に求められてきていた。数年前までは AGSMs における解像度は 100km であったが、最近の発展したコンピュータによると 10km の解像度での数値計算が可能になった。しかしながら、解像度 10km 以下に従来の AGSMs では対応できなかった。解像度を上げていくことによって、静力学平衡が成立しなくなる。また、従来の AGSMs では積雲パラメタリゼーションを用いているため、大気大循環で鍵となる熱帯の対流活動を直接分解していない。そのため、解像度を上げることで、この影響が大きくなっていく。

計算方法に関しては、現在の AGSMs の大半は球面を表現するのにスペクトル法を用いている。しかしながら、水平解像度を上げていくことで、スペクトル変換がコンピュータの高パフォーマンスを必要とするため、非効率になる。問題点としては、ルジャンドル変換の計算量が膨大で、大量のデータ交換が必要となることである。

水平解像度を徹底的に上げるためには、支配方程式と計算方法を再考する必要があった。まず、支配方程式に非静力学コアを採用した。次に、スペクトル法の代わりに、将来的に超高解像度のモデルに用いられるであろう格子点法を採用した。等緯度経度法では、極問題を抱えているため、超高解像度では用いることができない、とされているからである。

東京大学気候システム研究センター (CCSR) と地球環境フロンティア研究センター・海洋研究開発機構 (FRCGC/JAMSTEC) では、非静力学を用いた正 20 面体大気モデルの開発が進められた (M. Satoh et al., 2007)。この新しいモデルが NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) である。実験を繰り返し、正 20 面体格子系は、オペレーターによる計算精度が改良され、またバネ力学を用いた修正が行われた。

NICAM は、地球シミュレータの計算力を用いることにより、水平格子間隔を 5km 以下に解像度を上げ、“全球雲解像モデル”として用いられることを目的としている。また、NICAM は一週間程度の気象システムにおける短期予報と同時に、準平衡な気候システムを表現する長期予報を目的として作られた。将来的には温暖化に対する雲応答について、より信頼に足る結果を得られると期待されている。

H. Tomita et al. (2005) では、水平格子間隔 3.5km の解像度における全物理過程 (放射, 境界層, 雲微物理過程) を含む水惑星実験を行った。図 1 は、5 日目の 0:00 ~ 1:30 の 90 分平均した格子間隔 3.5km の OLR の図である。図 1 より、メソスケールであるクラウドクラスターやスーパークラウドクラスター、またプラネタリースケールであるケルビン波

が表現されており、マルチスケールの雲の表現に成功した。また、図2は、2°N-2°Sの平均降水量のHovmöller diagramsである。図2の左の全体図より、ケルビン波が東進していることがわかり、右下の拡大図よりメソスケールのクラスターが西進していることがわかる。図2からも、マルチスケールの雲の表現に成功していることがわかる。

続いて、H. Miura et al. (2007)では、水平格子間隔3.5kmの解像度における地形と海洋を含む条件下での全球雲解像予備実験を行った。物理過程は水惑星実験と同様である。地表過程には簡単なbucket法を用いている。図3は、24時間予報の格子間隔3.5kmのOLRの図である。図3では、台風が現実的に表現され、また温帯低気圧も上手く表現されている。

これらの超高解像での全球雲解像予備実験は、将来の全球雲解像モデルに大きな期待が持てる結果となった。

2 目的

NICAMの物理過程は開発途上のため、モデルの欠点を把握し改善するための基礎的なデータ解析が必要である。本研究では、NICAMの出力を解析し、観測や他の全球予報モデルと比較することで、現時点でのその予報精度を評価することが目的である。

具体的には、JMA-GSMの初期値をNICAMの初期値として入力し、その予報値とJMA-GSMの予報値及び解析との比較を行う。予報精度の評価に、定量的にはRMSEやACを用いて解析し、また予報誤差図を作成し、地域性やモデルによる予報特性を解析する。本研究では、CCSR 佐藤 正樹 准教授から頂いたリアルタイム予報バージョンのNICAMを使用し、解像度は水平格子間隔 224km、雲微物理過程は実装していない。

第2章では、M. Satoh et al. (2007) を参照に使用モデルNICAMの詳細について述べた。雲微物理過程を実装する支配方程式とその計算方法をまとめ、最後に本研究に用いたNICAMの物理過程について述べた。第4章では使用データを、第5章では解析手法を述べた。そして、第6章、第7章で結果、考察を述べ、第8章で結論としてまとめた。

3 使用モデル

この節では、M. Satoh et al. (2007) を参照に、NICAM の物理過程、力学過程をまとめる。まず、NICAM で用いられている雲微物理過程を含む非静力学的な支配方程式について述べる。次に、計算方法の概要を述べた後、正 20 面体の分割方法、時間積分法についての詳細を述べていく。最後に、本研究で用いた NICAM の物理過程や計算方法の設定についてまとめる。

3.1 支配方程式

NICAM では、雲微物理過程の実装だけでなく、深い大気で、なおかつ地形に従った方程式を用いている。方程式に用いられている記号は次の表 1 と表 2 で示す通りである。

表 1: NICAM の支配方程式に用いられている記号

r	: 地球の中心からの距離
r_0	: 地球の半径
$z = r - r_0$: 平均海水面からの高さ
t	: 時間
ϕ	: スカラー量
\mathbf{u}	: ベクトル量
z_T	: モデル領域の最頂点の高さ
z_S	: 地表面の高さ
ρ	: 湿潤空気の全密度
q_v	: 水蒸気の比湿

表 2: NICAM の支配方程式に用いられている記号

l_{max}, k_{max}	: 液体/固体の水の構成要素の全数
$q_{l,j} (j = 1, \dots, l_{max})$: 液体の水の j 番構成要素の比湿
$q_{i,k} (k = 1, \dots, k_{max})$: 固体の水の k 番構成要素の比湿
$q_l = \sum_{j=1}^{l_{max}} q_{l,j}$: 水の液体の相の比湿
$q_i = \sum_{k=1}^{k_{max}} q_{i,k}$: 水の固体の相の比湿
$q_w = q_v + q_l + q_i$: 水全体の比湿
$q_d = 1 - q_w$: 乾燥空気の比湿
s_n	: n 番構成要素の質量源の項
\mathbf{v}	: 速度ベクトル
w	: 鉛直速度
\mathbf{v}_h	: 水平速度ベクトル
p	: 気圧
T	: 気温
g	: 重力加速度
Ω	: 地球の角速度
\mathbf{f}	: 摩擦力
$\mathbf{a} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v})$: 運動方程式の移流項
$\mathbf{c} = 2\rho\Omega \times \mathbf{v}$: コリオリ力
L_v, L_f	: 蒸発/融解の潜熱
L_{v00}, L_{f00}	: 0K における蒸発/融解の潜熱
C_{pd}	: 乾燥空気の定圧比熱
C_{pv}	: 水蒸気の定圧比熱
C_l, C_i	: 液体/固体の水の比熱
R	: 気体定数
$C_v = q_d C_{vd} + q_v C_{vv} + q_l C_l + q_i C_i$: 全空気の定積比熱
$e_a = C_v T$: 内部エネルギーの顕熱部分
$h_a \equiv h - (q_v L_{v00} - q_i L_{f00})$: エンタルピーの顕熱部分
$\dot{\rho}$: 密度の摂動
\dot{p}	: 気圧の摂動

まず、特徴的な NICAM 独自の 2 つのメトリック記号を紹介する。深い大気を表現するための $\gamma \equiv \frac{r}{r_0}$ 、地形に従った座標系にするための $G^{\frac{1}{2}} \equiv \left(\frac{\partial z}{\partial \xi}\right)_h$ である。ここでの 2 つのメトリック、鉛直座標系 ξ は次のように関係づけられている。

$$\gamma \nabla_h \phi = \nabla_{h0} \phi, \quad \gamma \nabla_h \cdot \mathbf{u} = \nabla_{h0} \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{z_T(z - z_S)}{z_T - z_S} \quad (2)$$

$$G^{\frac{1}{2}} \nabla_{h0} \phi = \tilde{\nabla}_{h0}(G^{\frac{1}{2}} \phi) + \frac{\partial}{\partial \xi}(\mathbf{G}^z G^{\frac{1}{2}} \phi) \quad (3)$$

$$G^{\frac{1}{2}} \nabla_{h0} \cdot \mathbf{u}_h = \tilde{\nabla}_{h0} \cdot (G^{\frac{1}{2}} \mathbf{u}_h) + \frac{\partial}{\partial \xi}(G^{\frac{1}{2}} \mathbf{u}_h \cdot \mathbf{G}^z) \quad (4)$$

$$G^{\frac{1}{2}} \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \quad (5)$$

そして、 $G^{\frac{1}{2}}$ 、 γ^2 を用いた NICAM 独自の物理変数を次に示す。

$$(R, P, \mathbf{V}_h, W, E_a, Q_n) = G^{\frac{1}{2}} \gamma^2 (\rho, \dot{p}, \rho \mathbf{v}_h, \rho w, \rho e_a, \rho q_n) \quad (6)$$

ここでの q_n の n は、雲微物理過程の実装のため、次のような水の状態による区分を表している。

$n = 1$:	水蒸気
$2 \leq n \leq j_{max} + 1$:	液体の水
$j_{max} + 2 \leq n \leq j_{max} + k_{max} + 1$:	固体の水 (氷)

NICAM の支配方程式系は、全密度における連続の式、水平・鉛直方向の運動方程式、内部エネルギーの顕熱部分における方程式、水の状態別における連続の式から成り立つ。

- 全密度における連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\rho \mathbf{v}_h) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho w)}{\partial z} = - \sum_{j=1}^{j_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{l,j} w_{l,j}^*)}{\partial z} - \sum_{k=1}^{k_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{i,k} w_{i,k}^*)}{\partial z} \quad (7)$$

- 水平方向の運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \mathbf{v}_h)}{\partial t} + \mathbf{a}_h + \mathbf{c}_h = & -\nabla_h p + \mathbf{f}_h \\ & - \sum_{j=1}^{j_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{l,j} w_{l,j}^* \mathbf{v}_h)}{\partial z} - \sum_{k=1}^{k_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{i,k} w_{i,k}^* \mathbf{v}_h)}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

- 鉛直方向の運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + a_z + c_z = & -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + f_z \\ & - \sum_{j=1}^{j_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{l,j} w_{l,j}^* w)}{\partial z} - \sum_{k=1}^{k_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{i,k} w_{i,k}^* w)}{\partial z} \end{aligned} \quad (9)$$

- 内部エネルギーの顕熱部分における方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho e_a)}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\rho \mathbf{v}_h h_a) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho w h_a)}{\partial z} \\ = \left(\mathbf{v}_h \cdot \nabla_h p + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \left[\sum_{j=1}^{j_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{l,j} C_l T w_{l,j}^*)}{\partial z} + \sum_{k=1}^{k_{max}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_{i,k} C_i T w_{i,k}^*)}{\partial z} \right] \\ - \left(\sum_{j=1}^{j_{max}} \rho q_{l,j} g w_{l,j}^* + \sum_{k=1}^{k_{max}} \rho q_{i,k} g w_{i,k}^* \right) - (\mathbf{v}_h \cdot \mathbf{f}_h + w f_z) + q_{heat} - L_{v00} S_v + L_{f00} S_i \end{aligned} \quad (10)$$

- 水の状態別における連続の式

$$\frac{\partial (\rho q_d)}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\rho q_d \mathbf{v}_h) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_d w)}{\partial z} = S_d \quad (11)$$

$$\frac{\partial (\rho q_v)}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\rho q_v \mathbf{v}_h) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho q_v w)}{\partial z} = S_v \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho q_{i,j})}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\rho q_{i,j} \mathbf{v}_h) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial[r^2 \rho q_{i,j} (w + w_{i,j}^*)]}{\partial z} = S_{l,j}, \quad \text{for } 1 \leq j \leq j_{max} \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho q_{i,k})}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\rho q_{i,k} \mathbf{v}_h) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial[r^2 \rho q_{i,k} (w + w_{i,k}^*)]}{\partial z} = S_{i,k}, \quad \text{for } 1 \leq k \leq k_{max} \quad (14)$$

そして、これらの式 (7)、(8)、(9)、(10) と (11) から (14) に要素 $G^{\frac{1}{2}}\gamma^2$ をかけ、また、式 (1) から式 (5) を用いて、次の地形に従った座標系で深い大気の支配方程式系を得る。

- 全密度における連続の式

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W}{G^{\frac{1}{2}}} \right) = G_R \quad (15)$$

- 水平方向の運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial t} + \tilde{\nabla}_{h0} \frac{P}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mathbf{G}^z \frac{P}{\gamma} \right) = G_{V_h} \quad (16)$$

- 鉛直方向の運動方程式

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \gamma^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{P}{G^{\frac{1}{2}}\gamma^2} \right) + Rg = G_W \quad (17)$$

- 内部エネルギーの顕熱部分における方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_a}{\partial t} + \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(h_a \frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[h \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \\ - \left\{ \mathbf{V}_h \cdot \left[\tilde{\nabla}_{h0} \frac{P}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mathbf{G}^z \frac{P}{\gamma} \right) \right] + w \left[\gamma^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{P}{G^{\frac{1}{2}}\gamma^2} \right) + Rg \right] \right\} \\ + Wg = G_{E_a} \quad (18) \end{aligned}$$

- 水の状態別における連続の式

$$\frac{\partial Q_n}{\partial t} + \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(q_n \frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[q_n \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] = G_{Q_n} \quad (19)$$

ここでは、

$$\mathbf{G}^z \equiv \nabla_{h0} \xi = \frac{\tilde{\nabla}_{h0Z}}{G^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

とする。

そして、この方程式系の右辺は次に示す。

$$G_R = - \sum_n \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{W_n^*}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (21)$$

$$G_{\mathbf{V}_h} = \tilde{\mathbf{F}}_h - \tilde{\mathbf{A}}_h - \tilde{\mathbf{C}}_h - \sum_n \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mathbf{V}_h \frac{W_n^*}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (22)$$

$$G_W = \tilde{F}_z - \tilde{A}_z - \tilde{C}_z - \sum_n \frac{\partial}{\partial \xi} \left(w \frac{W_n^*}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (23)$$

$$G_{E_a} = - \sum_n \frac{\partial}{\partial \xi} \left(C_n T \frac{W_n^*}{G^{\frac{1}{2}}} \right) - \sum_n W_n^* g - \left(\mathbf{V}_h \cdot \tilde{\mathbf{F}}_h + w \tilde{F}_z \right) - L_{v00} \tilde{S}_v - L_{f00} \tilde{S}_i + \tilde{Q}_{heat} \quad (24)$$

$$G_{Q_n} = \tilde{S}_n - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{W_n^*}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (25)$$

ここでの W_n^* は降水の構成状態による質量フラックス、 $\tilde{\mathbf{A}}$ は運動量の移流ベクトル、 $\tilde{\mathbf{C}}$ はコリオリ力のベクトルを表している。定義は次に示す。NICAMでは、図4に示すように地球を直交基底 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ で定めている。ここでの \mathbf{e}_3 は Ω と同じ方向で、速度の3成分は $(v_1, v_2, v_3) = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ で表す。

$$W_n^* = G^{\frac{1}{2}} \gamma^2 \rho q_n w_n^* \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{A}} \equiv & \left\{ \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(v_1 \frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_1 \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \right\} \mathbf{e}_1 \\
& + \left\{ \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(v_2 \frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_2 \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \right\} \mathbf{e}_2 \\
& + \left\{ \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(v_3 \frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[v_3 \left(\frac{\mathbf{V}_h}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \right\} \mathbf{e}_3
\end{aligned} \tag{27}$$

$$\tilde{\mathbf{C}} \equiv \rho G^{\frac{1}{2}} \gamma^2 \left(-2|\Omega|v_2 \mathbf{e}_1 + 2|\Omega|v_1 \mathbf{e}_2 \right) \tag{28}$$

3.2 計算方法の概要

支配方程式を解くには、様々な方法があるが、NICAMでは水平分割に正20面体格子法を用いている。図5は正20面体格子の生成法を示している。NICAMでは、オリジナルの名称で、解像度を”glevel-0”(grid division level 0)と呼ぶ。各々の正三角形を4つの小さな正三角形に分割していくことで、解像度が1上がる。この作業をn回繰り返すことにより、解像度が”glevel-n”(grid division level n)となる。このときの格子点の全数は $N_g = 10(2^n)^2 + 2$ である。解像度”glevel-n”と水平格子間隔の関係は次ページの表3で示す通りである。また、鉛直格子配置にはローレンツ格子を用いている(図6)。水平方向では、コントロールボリュームの質量中心に全予報要素を同じ配列で定義している。一方の鉛直方向では、図6で示すように、整数レベルに R 、 \mathbf{V}_h 、 E 、 Q_n 、半整数レベルに W と配列を定義している。

また、NICAMでは支配方程式を積分するために、split-explicit法を用いている。図7は時間積分法の概略図である。fast mode項は時間間隔 Δ_T のsmallタイムステップ毎に求め、一方のslow mode項はより大きい時間間隔 Δ_t のlargeタイムステップ毎に求めている。ここでの分割数は $N_s = \frac{\Delta_t}{\Delta_T}$ となる。smallタイムステップ積分においては、horizontally explicit and vertically implicit法(HEVI法)とflux division法を基盤としたforward-backward法を用いている。一方のlargeタイムステップ積分においては、2次精度のRunge-Kutta法(図7)を用いており、数値安定性のためのオプションとして3次精

度の Runge-Kutta 法も考慮している。運動量の移流項と物理過程は large タイムステップ積分で求めている。

表 3: 解像度”glevel-n”と水平格子間隔の関係

解像度	水平格子間隔
glevel-5	224km
glevel-6	112km
glevel-7	56km
glevel-8	28km
glevel-9	14km
glevel-10	7km
glevel-11	3.5km

3.3 正 20 面体の分割化

NICAM では、NICAM では水平分割に正 20 面体格子法を用いている。この小節では NICAM で用いられている正 20 面体格子の詳細について述べる。

正 20 面体格子は recursive division 法により作られた。しかし、各々の三角形の面積が滑らかに分割されていなかったため、二次精度の分割に格子配列を修正する必要があった。そこで、図 8 で示すように、バネ力学を用いて格子点の配置を修正した。修正後、コントロールボリュームは 3 要素の質量中心を結合することで範囲を決定する。コントロールボリュームの形は、正 20 面体における最初の 5 角形以外は 6 角形となる。また、コントロールボリュームの質量中心に予報要素の定点を再配置した。図 9 は、glevel-5 における修正した正 20 面体格子である。

図 10 は定点と水平コントロールボリュームの概念図である。図 10 において、三角形 P_i の全頂点にベクトル \mathbf{u} が与えられたとき、コントロールボリューム Q_i の頂点のベクトル \mathbf{u} は次のように内挿される。

$$\mathbf{u}_h(Q_i) \cong \frac{s_0 \mathbf{u}_h(P_0) + s_1 \mathbf{u}_h(P_i) + s_2 \mathbf{u}_h(P_{1+mod(i,6)})}{s_0 + s_1 + s_2} \quad (29)$$

ここでの s_0 、 s_1 、 s_2 は、 $Q_i P_i P_{1+mod(i,6)}$ 、 $Q_i P_{1+mod(i,6)} P_0$ 、 $Q_i P_0 P_i$ の各々の面積である。コントロールボリュームが五角形の場合は6が5に置き換わる。また、ガウス理論から発散を計算すると、次になる。

$$\nabla_{h0} \cdot \mathbf{u}_h(P_0) \cong \frac{1}{a(P_0)} \sum_{i=1}^6 b_i \frac{\mathbf{u}_h(Q_i) + \mathbf{u}_h(Q_{1+mod(i,6)})}{2} \cdot \mathbf{n}_i \quad (30)$$

ここでの b_i は $Q_i Q_{1+mod(i,6)}$ の2点間の最短距離である弧の長さ、また、 \mathbf{n}_i は $Q_i Q_{1+mod(i,6)}$ の中点におけるこの弧の外向き単位垂直ベクトルを意味する。また、 $a(P_0)$ は点 P_0 と結合するコントロールボリュームの面積である。

3.4 時間積分法

この小節では、NICAMの時間積分法の詳細について述べる。

式(15)から式(18)において、左辺の項は伝播の速い波として考えられ、一方の右辺の項は遅い運動と考えられる。そこで、前者を fast mode 項、後者を slow mode 項とみなす。fast mode 項は時間間隔 Δ_T の small タイムステップ毎に求め、一方の slow mode 項はより大きい時間間隔 Δ_t の large タイムステップ毎に求めている。分割数 $N_s = \frac{\Delta_t}{\Delta_T}$ は通常4となる。

small タイムステップ積分においては、HEVI法を基盤とした forward-backward 法を用いており、一方の large タイムステップ積分においては、Runge-Kutta 法(2次精度または3次精度)を用いている。式(7)で示すように、 $t = t_A$ における、ある予報要素を設定する。ここで、slow mode tendency $S(t_A)$ を見積もることができる。fast mode tendency は small タイムステップ毎に随時更新していき、要素は $S(t_A)$ を用いて t_A から t_B まで積分される。このようにして $t = t_B$ における予報要素の値を得ることができる。そして、これらの値を用いて slow mode tendency $S(t_B)$ を得て、さらに $S(t_B)$ を用いて要素は t_A から t_C まで積分される。

また、small タイムステップ積分では flux division 法も用いているので、紹介する。予報要素 ϕ としたとき、ある large タイムステップにおける予報要素 ϕ^t 、そこからの偏差 $\phi^* (= \phi - \phi^t)$ とする。時間 t の周りでフラックスを膨張させることにより、式(15)から式(18)を一時的に離散化したものが次である。

$$\begin{aligned} \frac{R^{*T+\Delta T} - R^{*T}}{\Delta T} + \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T}}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T}}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W^{*T+\Delta T}}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \\ = - \left[\tilde{\nabla}_{h0} \cdot \frac{\mathbf{V}_h^t}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mathbf{V}_h^t}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W^t}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] + G_R^t \quad (31) \end{aligned}$$

$$\frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T} - \mathbf{V}_h^{*T}}{\Delta T} + \tilde{\nabla}_{h0} \frac{P^{*T}}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mathbf{G}^z \frac{P^{*T}}{\gamma} \right) = - \left[\tilde{\nabla}_{h0} \frac{P^t}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mathbf{G}^z \frac{P^t}{\gamma} \right) \right] + G_{V_h}^t \quad (32)$$

$$\frac{W^{*T+\Delta T} - W^{*T}}{\Delta T} + \gamma^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{P^{*T+\Delta T}}{G^{\frac{1}{2}} \gamma^2} \right) + R^{*T+\Delta T} g = - \left[\gamma^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{P^t}{G^{\frac{1}{2}} \gamma^2} \right) + R^t g \right] + G_W^t \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{E_a^{*T+\Delta T} - E_a^{*T}}{\Delta T} + \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(h_a^t \frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T}}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[h_a^t \left(\frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T}}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W^{*T+\Delta T}}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] + \tilde{g}^t W^{*T+\Delta T} \\ = - \left[\tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left(h_a^t \frac{\mathbf{V}_h^t}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[h_a^t \left(\frac{\mathbf{V}_h^t}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W^t}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \right] \\ + \frac{\mathbf{V}_h^t}{\rho^t G^{\frac{1}{2}} \gamma^2} \cdot \left(\tilde{\nabla}_{h0} \frac{P^t}{\gamma} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mathbf{G}^z \frac{P^t}{\gamma} \right) \right) - \tilde{g}^t W^t + G_{E_a}^t \quad (34) \end{aligned}$$

ここでは、

$$\tilde{g}^t = g - \frac{1}{\rho^t G^{\frac{1}{2}} \gamma^2} \left[\gamma^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{P^t}{G^{\frac{1}{2}} \gamma^2} \right) + R^t g \right] \quad (35)$$

式 (34) の気圧傾度力や浮力によって働く項、また、音速 $c_s^2 = \left(\frac{R_d}{C_v} h_a^t \right)$ の役割をもつ移流項のエンタルピーは large タイムステップで得られる。

まず、forward 法によって式 (32) を積分する。このように定義された $\mathbf{V}^{*T+\Delta T}$ を用いて、式 (31)、式 (33)、式 (34) を連立させて、 $R^{*T+\Delta T}$ と $P^{*T+\Delta T}$ を除いた $W^{*T+\Delta T}$ に関する一次の Helmholtz 方程式を得る。こうして、式 (34) を気圧に関する方程式に書き換えることができる。得られた式が次である。

$$\frac{P^{*T+\Delta T} - P^{*T}}{\Delta T} + \frac{R_d}{C_v} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[h_a^t \left(\frac{W^{*T+\Delta T}}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] + \frac{R_d}{C_v} \tilde{g}^t W^{*T+\Delta T} = G_P \quad (36)$$

ここで、次の P^* と E_a^* の近似式が得られる。

$$E_a^* \approx \frac{C_v}{R_d} P^* \quad (37)$$

一次の Helmholtz 方程式を解くことによって、式 (31) から $R^{*T+\Delta T}$ を得る。式 (31) はフラックス形式なので、この方法で全積分は保存される。

内部エネルギー $E^{*T+\Delta T}$ の方程式においては、全エネルギーを保存するために conservative 法を用いる。全エネルギーの方程式は次のようにフラックス形式で書くことができる。

$$\begin{aligned} \frac{E_{tot}^{T+\Delta T} - E_{tot}^T}{\Delta T} + \tilde{\nabla}_{h0} \cdot \left[(h_a + \phi + k)^t \frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T}}{\gamma} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[(h_a + \phi + k)^t \left(\frac{\mathbf{V}_h^{*T+\Delta T}}{\gamma} \cdot \mathbf{G}^z + \frac{W^{*T+\Delta T}}{G^{\frac{1}{2}}} \right) \right] = G_{E_a+K+\Phi}^t \quad (38) \end{aligned}$$

ここでは、 $E_{tot} = E_a + K + \Phi$ である。また、 $(K + \Phi)^{T+\Delta T}$ は与えられているので、 $E_a^{*T+\Delta T}$ は次より得られる。

$$E_a^{*T+\Delta T} = E_a^{T+\Delta T} - E_a^t = E_{tot}^{T+\Delta T} - (K + \Phi)^{T+\Delta T} - E_a^t \quad (39)$$

正確な one-dimensional conservative semi-Lagrangian 法を用いて離散化すると、全エネルギーは数値的に保存する。

3.5 本研究で用いた NICAM の物理過程や計算方法の設定

本研究では、CCSR 佐藤 正樹 准教授によるリアルタイム予報バージョンの NICAM を使用し、解像度は glevel-5 (水平格子間隔 224km) である。そのため、非静力学系の方程式は用いるが、雲微物理過程は実装しない。通常、雲微物理過程が実装されるのは、解像度 glevel-9 (水平格子間隔 14km) 以上を用いる場合である。そこで、積雲パラメタリゼイ

ションに Arakawa-Schubert を用いた。また、地表面過程には Louis、境界層には Mellor-Yamada level2.0、放射過程の計算には Sekiguchi-Nakajima MSTRN-X を用いた。SST と陸地大気境界条件については JMA-GPV で代用した。そして、large タイムステップ積分には、3 次精度の Runge-Kutta 法を用いた。

3.5.1 荒川・シューベルト積雲対流モデル

個々の対流雲の水平スケールは 10km 以下であり、対流雲は組織化して集団を形成するが、そのスケールも通常格子点間隔以下なので、対流雲集団の効果をパラメタライズする必要がある。その際、巨大積乱雲の効果を取り入れ、深い層にわたって条件付不安定がある場合、それを解消するように気温と水蒸気を変化させる方式が、荒川・シューベルトの方式である。以下、横山(1992)を参照に、荒川・シューベルト積雲対流モデルの詳細について述べる。

モデルの概要 積雲の集団を考える。個々の積雲の根は PBL にあり、PBL の空気が柱状に上昇して積雲を形成する。雲は周囲の空気を取り込み、マスフラックスを増大させつつ上昇し、浮力を失う高さですべてを周囲に放出して混合して上昇をやめる。取り込み率 λ が大きい雲は、周囲の空気とよく混合し、背の低い雲となる。 λ が小さい雲は背が高く、 $\lambda = 0$ は周囲からの気塊の取り込みが全くないという場合で、雲頂が最も高い雲に相当する。

モデルの格子間隔程度の領域で積雲の占める面積(正確には上昇域)は 1 より十分小さいと仮定する。したがって、雲の周囲の状態は領域平均の場合(一般場)とほぼ等しい。雲のある層では、積雲によって誘起される補償下降流によって昇温、乾燥化する。また、雲頂から下降される飽和した気塊の蒸発、混合によって周囲の場が冷却、湿潤化する。ここで、雲の内部での凝結熱の放出は、直接には一般場を暖めずに積雲というエンジンを駆動しているだけであることに注意する。また、積雲対流は直接には境界層の温度、湿度場を変えないが、境界層の厚さを変えることによって間接的に PBL に影響している。この積雲対流モデルでは、雲底でのマス・フラックスを決定することが中心的問題となる。

積雲マス・フラックスの決定 取り込み率が λ である積雲集団を、以後簡単のために、 λ 雲とよぶことにする。 λ 雲の積雲仕事関数を次のように定義する。

$$A(\lambda) = \int_{Z_B}^{Z_D} \frac{g}{C_p \bar{T}(z)} \eta(Z, \lambda) [S_{VC}(Z, \lambda) - \bar{S}_V(Z)] dz \quad (40)$$

ここで、 Z_B はPBL上端の高度、 $Z_D(\lambda)$ は λ 雲の雲頂高度、 S_{VC} は雲中の浮力エネルギー、 \bar{S}_V は一般場の浮力エネルギーである。また、 $\eta(Z, \lambda)$ は Z_B の高度で1と規格化された λ 雲の高度 z でのマスフラックスである。

$A(\lambda)$ は浮力を雲の厚さ全体にわたって積分したもので、単位マスフラックス当り、浮力によって作られる λ 雲の運動エネルギー生成量である。したがって、 $A(\lambda)$ は成層状態の潜在不安定を示すものである。 $A(\lambda) = 0$ は中立状態を表している。もし $A(\lambda) < 0$ であれば λ 雲は生じない。摩擦に打ち勝って積雲が存在するためには $A(\lambda) > 0$ でなければならない。 $A(\lambda)$ は成層状態が与えられれば計算可能な量である。

大規模な場の変化(3次元移流や放射・PBLでの過程)によって $A(\lambda)$ は変化するし、また積雲による成層の安定化作用によっても変化する。

$$\frac{dA(\lambda)}{dt} = \left(\frac{dA(\lambda)}{dt} \right)_{cloud} + \left(\frac{dA(\lambda)}{dt} \right)_{L.S.} \quad (41)$$

$$= \int_0^{\lambda_{max}} K(\lambda, \lambda') m_B(\lambda') d\lambda' + \left(\frac{dA(\lambda)}{dt} \right)_{L.S.} \quad (42)$$

右辺第1項は積雲の物理量だけに依存し、第2項は周囲の大気だけに依存する。ここで $m_B(\lambda')$ は、雲のPBL上端でのマスフラックス、 $K(\lambda, \lambda')$ は雲の単位 m_B による $A(\lambda)$ の変化量で、 λ' と λ 雲の間の相互作用を表す。 λ' 雲があると、周囲の補償下降流により一般場は昇温・乾燥し、成層は安定化する。この成層安定化は、 λ 雲を抑制するように働くので、一般的には $K(\lambda, \lambda')$ は負の値をもつ。しかし、 λ' が大きい雲(背が低い雲)から λ が小さい雲(背が高い雲)への作用の場合には、低い雲の上端から放出される飽和した空気が周囲を冷湿にして、高い雲の不安定度を増加させる場合もある。このような時は、 $K(\lambda, \lambda')$ は小さな正の値をとる。逆に、高い雲から低い雲への作用は、いつも抑制的に働く。したがって、 $K(\lambda', \lambda) \neq K(\lambda, \lambda')$ であることに注意する。

積雲群が持続的に存在する場合、 $\left(\frac{dA(\lambda)}{dt} \right)_{L.S.}$ は正であるが、積雲による項は負であり、差し引きほぼ0のバランスが成り立っていると考えることができる。そこで、準平衡の仮定 $\frac{dA}{dt} = 0$ を導入すると、この式は $m_B(\lambda)$ を決定する方程式となる。 $A(\lambda) > 0$ でも

$\frac{dA(\lambda)}{dt} < 0$ なら、雲は生じないと考え、 $m_B(\lambda) = 0$ とする。
 結局、 $m_B(\lambda)$ を決める式は、

$$m_B(\lambda) > 0 \text{ かつ } \int_0^{\lambda_{max}} K(\lambda, \lambda') m_B(\lambda') d\lambda' + \left(\frac{dA}{dt} \right)_{L.S.} = 0 \quad (43)$$

または

$$m_B(\lambda) = 0 \text{ かつ } \int_0^{\lambda_{max}} K(\lambda, \lambda') m_B(\lambda') d\lambda' + \left(\frac{dA}{dt} \right)_{L.S.} \leq 0 \quad (44)$$

となる。 $K(\lambda, \lambda')$ は、雲による $A(\lambda)$ の変化率なので、モデルでは $m_B(\lambda')$ があつた場合の一般場の温度、水蒸気の変化を計算し、改めて $A(\lambda)$ を計算して、元の $A(\lambda)$ との差をとり、 $m_B(\lambda')$ でわって、 $K(\lambda, \lambda')$ を求めている。

$\frac{dA(\lambda)}{dt}_{L.S.}$ は積分以外の過程での $A(\lambda)$ の変化率であるので、モデルでは、 $\frac{(A^*(\lambda) - A_o(\lambda))}{\Delta t}$ として計算できる。ここで、 Δt は積分パラメタリゼーションを行う時間間隔 (60 分)、 $A_o(\lambda)$ は 1 ステップ前の積雲パラメタリゼーションが終了した段階での $A(\lambda)$ 、 $A^*(\lambda)$ は現ステップでの $A(\lambda)$ である。

結局、積雲対流モデルは 1 つの格子点の成層状態だけで計算できる事になる。したがって、一種の対流調節的な方法であるといえる。このように簡単化すると、大規模上昇流 ω や水平移流などを計算しないですみ、計算時間および記憶量の節約ができる。

モデルの不十分点 荒川・シューベルトの積雲対流モデルは、最も物理的なパラメタリゼーションと考えられるが、なお不十分な点がある。その最大の点は、雲量の問題である。雲量はゼロに近いとした仮定の上に理論は作られているが、実際には、全領域の 1 割以上を占める場合もあり、雲による放射の効果を考えるときは無視できない。400mb 以上の高さに達する積雲の頂から放出された水分は絹雲となって広がると仮定し、その場合の雲量を 1 としているが、雲頂より低い層での雲量を積雲モデルから決めることはできない。

4 使用データ

4.1 解析データ

4.1.1 長期再解析データ

本研究で用いた気候データは、JRA-25 (Japanese Re-Analysis 25 years) の長期再解析データである (Ohnogi et al., 2005)。長期再解析とは、気象機関において現業的に実施される数値予報・データ同化システムのプログラムを用いて、同一のシステムで10年以上の長期間に渡る過去の観測データを与え、品質の様な大気循環場と境界条件のデータセットを作成することを指す。JRA-25 長期再解析プロジェクトは、季節予報モデルの高度化や気候研究のための高精度の気候データセットを作成し、気候の推移を正確に把握することを目的に、気象庁と電力中央研究所との共同研究を核に2001年度より5ヵ年計画でスタートし、2006年3月に計算が終了したため、研究利用のための正式版データが公開されている。

使用データの詳細は以下の通りである。

期間	: 1979年1月1日~2004年12月31日 (12UTC)
内容	: 気圧面解析値
水平格子系	: 等緯度経度系
水平格子間隔	: 2.5° × 2.5°間隔
鉛直格子間隔	: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50 hPa の14層
要素	: ジオポテンシャル高度 (HGT)

4.1.2 再解析データ

本研究で用いた解析データは、JCDAS (JMA Climate Data Assimilation System) の再解析データである。使用データの詳細は以下の通りである。

期間	: 2005年12月1日～2007年11月15日(12z)
内容	: 気圧面解析値
水平格子系	: 等緯度経度系
時間間隔	: 00, 06, 12, 18の6時間間隔
水平格子間隔	: 2.5° × 2.5°間隔
鉛直面	: 500hPa面
要素	: ジオポテンシャル高度(HGT)

4.1.3 JRA-25 データの詳細

仕様 JRA-25 データの作成に使われた数値モデルは、気象庁の現業の天気予報で使われるモデルに基づく。2001年3月時点で更新されたモデル(気象庁, 2002)に対して、再解析用にいくつかの変更が施されている。主な変更点は、台風ポーガスの廃止、積雪観測データを活用した陸面解析の導入、ラジオゾンデの誤差補正の自動化、不正な浮遊ブイデータの自動除去などである。データ同化手法には、3次元変分法(竹内, 2002)が用いられている。空間解像度は、水平 T106 (東西 320、南北 160 のガウス格子で表現される)、鉛直 40 層 (上端は 0.4 hPa) である。

再解析の入力データとして使用された観測データは、従来型観測と衛星リモートセンシングによる観測に大別される。

従来型データは、陸上の固定地点からの地上観測、船舶・ブイからの海上観測、気球による高層観測、航空機による観測などである。JRA-25 で使われた従来型データは、気象庁で蓄積されたものと、欧州中期予報センター (ECMWF) の最新の再解析 (ERA-40, Uppala et al., 2004) で整備されたものが中心である。

衛星観測としては、TOVS (米国海洋大気庁 (NOAA) の極軌道環境観測衛星に搭載された TIROS 型現業鉛直サウンダ) および ATOVS (改良型 TOVS) と呼ばれる鉛直放射探査計による放射輝度温度、SSM/I (米国国防省気象衛星 DMSP のマイクロ波放射計センサー) による可降水量と積雪域情報、散乱計による海上風、静止気象衛星の雲画像の時間変化から算出される風速 (Atmospheric Motion Vector, AMV)、MODIS (極軌道の地球観測衛星 Terra と Aqua に搭載されている中分解能撮像分光放射計) による赤外画像と水蒸気画像から算出される極域の風速が含まれる。

この他、通常の観測データとは性質の異なるものとして、Fiorino (2002) による熱帯低

気圧周辺で推定された風速（以下、台風周辺風）、および中国の文献記録から気象庁によってデジタル化された積雪深データが使われている。これらは、他の再解析では使われていない、JRA-25 独自の特徴である。

品質 従来型データが豊富に利用される対流圏では、全球平均気温の時間変化などの基本的特性は、他の再解析データとほぼ同等である。それに対して、衛星観測の比重が増す成層圏では、TOVS データの欠測や特性変化の影響を受けて、気温が大きく変動する傾向がある。これは、データ同化において、数値モデルによる推定値が成層圏で比較的大きな誤差をもつことに起因する。月平均降水強度の空間分布については、他のどの再解析データよりも現実的であり、総合的品質に優れている。また、台風周辺風が効果的に機能し、世界中の熱帯低気圧が他の再解析データと比べて現実的に表現されている。しかしながら、対象期間を二分して計算（1979–1990 年と 1991–2004 年）したことによる不連続性には注意する必要がある。幸い、JRA-25 では、気温や風速などの主要な出力要素については、両期間の境となる 1990 年末時点で、問題となる不連続性は認められていない。しかし、別の問題として、成層圏水蒸気やアマゾン域の土壤水分が、時間とともに減少する欠点が明らかになっている。これらはデータ同化システムの不備によるものであり、1990 年末の接続時点での不連続は避けられない。

< 鉛直放射探査計データの変遷の影響 >

観測データの変遷による最も大きな影響は、鉛直放射探査計データ (TOVS/ATOVS) に関係するものである。この観測データは、JRA-25 の対象期間にわたって存在するが、測器の搭載される衛星が時代とともに変化する。また、TOVS からその改良型の ATOVS への切り替えでは、搭載される測器も大きく異なり、データ同化処理手順も大幅に異なる。鉛直放射探査計データは、従来型観測データの少ないところでは、再解析データの品質を大きく左右する重要なデータであるため、搭載衛星の変化や ATOVS への切り替えが再解析データの品質に与える影響は非常に大きい。

< 成層圏 >

JRA-25 の再解析システムでは、モデル面 40 層のうち約 13 層が成層圏に相当する。

成層圏の再解析データには、予報モデルの境界条件として与えられるオゾンデータ、同化計算に直接取り込まれる高層ゾンデの気温と水平風、それに衛星による各波長帯の輝度温度が大きく影響する。ゾンデデータは、約 8 割が北半球中高緯度の陸上のものであり、また、各同化サイクルで使用データ数が大きく異なる。例えば、10 hPa レベルに届くデー

夕の数は、00 Z と 12 Z では 100–200 個程度であるのに対し、06 Z と 18 Z では 10 個程度である。一方、衛星データの観測データ数は、サイクルあたり 2000 程度もあり、熱帯や南半球中高緯度にも多くの観測データが得られるので、大気場に与える影響が大きい。成層圏の水蒸気量は、物質循環や放射の研究者にとっては利用価値が高いが、JRA-25 では実用的な品質が得られなかったため、残念ながら公開される出力データ要素からは削除されている。なお、JRA-25 の計算に使われた予報モデルの放射過程では、オゾン以外の主要成分が固定値として扱われている（成層圏の水蒸気は 2.5 ppm）。

4.2 予報データ

本研究で用いた予報データは、日本気象庁の全球数値予報モデル（JMA-GSM）による格子点データ（GPV）である。

使用データの詳細は以下の通りである。

期間	: 2005 年 12 月 1 日 ~ 2007 年 11 月 15 日 (12z)
解像度	: TL319L40 (日本付近 60km 格子)
水平格子系	: 等緯度経度系
鉛直座標系	: 気圧系
時間間隔	: 96 時間まで 6 時間間隔, 以降 168 時間まで 12 時間間隔, 以降 192 時間まで 24 時間間隔
水平格子間隔	: 2.5° × 2.5° 間隔
鉛直格子間隔	: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10hPa の 17 層
要素	: ジオポテンシャル高度 (HGT)

4.2.1 JMA-GSM の詳細

ここでは、室井ちあし（1997）を参照に JMA-GSM の詳細についてまとめた。

基礎方程式系

プリミティブ方程式 JMA-GSM の基礎方程式系は、球面座標系 (緯度 θ , 経度 λ , 気圧 p) で表された水平方向の運動方程式、熱力学第一法則の式、質量保存則、状態方程式、静力学平衡の式から成り立つ。

- 水平方向の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} - 2\Omega \sin \theta v + \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = -\mathbf{V} \cdot \nabla u - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\tan \theta}{a} uv + F_u \quad (45)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + 2\Omega \sin \theta u + \frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\mathbf{V} \cdot \nabla v - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\tan \theta}{a} uv + F_v \quad (46)$$

- 熱力学第一法則の式

$$\frac{\partial c_p T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla c_p T + \omega \frac{\partial c_p T}{\partial p} = \omega \alpha + Q \quad (47)$$

- 連続の式

$$\frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial v \cos \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (48)$$

- 状態方程式

$$p\alpha = RT \quad (49)$$

- 静力学平衡の式

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\alpha \quad (50)$$

これらの方程式に用いられている記号は表 4 に示す。

表 4: JMA-GSM の支配方程式に用いられている記号

θ : 緯度	ω : 鉛直 p 速度
λ : 経度	F_u : 東西方向の摩擦
u : 東西方向の風速	F_v : 南北方向の摩擦
v : 南北方向の風速	Q : 非断熱加熱率
\mathbf{V} : 水平方向の風速	Ω : 地球の自転角速度 ($7.29 \times 10^{-5}[\text{rad/s}]$)
p : 気圧	a : 地球の半径 ($6.371 \times 10^6[\text{m}]$)
t : 時間	c_p : 定圧比熱 ($1004[\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}]$)
T : 気温	R : 乾燥気体の気体定数 ($287.04[\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}]$)
α : 比容	

鉛直座標系 JMA-GSM では、鉛直座標系にハイブリッド座標系 η を用いている。
鉛直座標系を決定する際に重要なこととして、次のようなことがあげられる。

1. なるべく鉛直内挿を行わない
2. 地形を正しく取り込む
3. 質量保存、エネルギー保存則を満足する
4. より少ない鉛直レベル数でより正しく表現できる

以上の全てを完全に満たすことは難しい。Kasahara (1974) ではプリミティブ方程式で用いられている様々な鉛直座標系についてレビューしている。

- z 座標系はシンプルであるが、 z 座標が用いられたモデルはない（非静力モデルでは頻繁に用いられる）。
- p 座標を用いると連続の式が p の診断方程式になり、鉛直運動が簡単に求められる。しかし、地形の境界条件を正確に取り込むことができない。

- σ 座標は p 座標を変形して、地形を座標の下端となるように設定したものである。地形は正しく取り込まれるが、運動方程式中の気圧傾度力と重力をバランスさせることが難しい。
- そこで、下層は σ 座標、上層は p 座標という η 座標系が考えられた (Simmons and Burridge, 1981)。これにより下層では地形をより正しく取り込み、上層では地形の険しいところでも気圧傾度のエラーを少なくすることに成功した。

この σ は

$$\sigma = (p - p_I) / \pi \quad (51)$$

但し

$$\pi = \begin{cases} p_S - p_I & p > p_I \\ p_I - p_T & p < p_I \end{cases} \quad (52)$$

で定義される。 p_S は地表面気圧、 p_T はモデルの上端の気圧、 p_I は最高の山の高さよりも高いある適当な気圧である。JMA-GSM では、 $p_T = 1mb$ 、 $p_I = 100mb$ と選んでいる。この座標系では地表面が $\sigma = 1$ 、上端が $\sigma = -1$ 、 $p = p_I$ が $\sigma = 0$ となる。気圧が p_I と p_T の間では π は一定なので普通の p 座標系と本質的に同じである。 $p = p_I$ のレベルより下の部分では等 σ 面は地形を反映するようになっている。

ここで、 z 座標系、 p 座標系、 σ 座標系の間関係を示しておく。

$$\frac{\partial}{\partial z} = -\rho g \frac{\partial}{\partial p} = -\frac{\rho g \partial}{\pi \partial \sigma} \quad (53)$$

ガラーキン法 区間 $[a \leq x \leq b]$ で定義される関数 $u(x, t)$ を考える。非線形項と線形項を含む支配方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - c \frac{\partial u}{\partial x} \quad (54)$$

を解くことを考える。そして $u(x)$ を直交基底関数 $\phi(x)$ を用いて

$$u(x) = \sum_{j=1}^N u_j \phi_j(x) \quad (55)$$

と展開する。 u_j は j 番目の基底関数の係数である。これを支配方程式に代入する（ただし非線形項は除く。）と

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^N u_j \phi_j(x) + u \frac{\partial u}{\partial x} + c \frac{\partial}{\partial x} \sum_{j=1}^N u_j \phi_j(x) = 0 \quad (56)$$

ガラーキン法とは、この左辺（基底関数で展開した残差）と基底関数が直交している u が方程式の解であることを用いた方法である。すなわち

$$\int_a^b \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^N u_j \phi_j(x) + c \frac{\partial}{\partial x} \sum_{j=1}^N u_j \phi_j(x) + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \phi_i(x) dx = 0, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (57)$$

が成立するような u を求める。

u_j は x の関数ではないからこの式は

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^N u_j \int_a^b \phi_j(x) \phi_i(x) dx + c \sum_{j=1}^N u_j \int_a^b \frac{\partial \phi_j(x)}{\partial x} \phi_i(x) dx = - \int_a^b u \frac{\partial u}{\partial x} \phi_i(x) dx \quad (58)$$

と書き換えられる。 $\phi(x)$ として直交関数を選んでいるから適当にスケールして

$$\int_a^b \phi_j(x) \phi_i(x) dx = \delta_{ij} \quad (59)$$

を用いれば左辺第一項の積分が求まる。

スペクトル法 基底関数として「グローバルな」関数を選ぶことをスペクトル法という。JMA-GSM では球面調和関数（東西方向には三角関数、南北方向にはルジャンドルの陪関数）が選ばれている。係数のことを波数、その世界のことを波数空間などという。

さらにスペクトル法では適当な関数を選ぶと

$$\int_a^b \frac{\partial \phi_j(x)}{\partial x} \phi_i(x) dx = a \delta_{ij} \quad (60)$$

とすることができる。これらを代入して

$$\frac{\partial}{\partial t}u_i + acu_i = - \int_a^b u \frac{\partial u}{\partial x} \phi_i(x) dx, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (61)$$

となり、線形項の空間微分がなくなって左辺は直交基底の係数だけの計算となる。時間微分については普通は適当な有限差分で近似する。

右辺の非線形項については、基底関数を代入して展開してしまうと計算量が膨大になるので、代入せずに計算した値に基底関数をかけて積分するという手法を用いている。これを変換法という。

スペクトル法の最大の利点は、やはり空間微分を含まないことである。空間差分による誤差や非線形不安定のようなものもない。欠点としては、境界条件に対して柔軟でないことがあげられる。

鉛直差分 大気上端を $k = KMAX + \frac{1}{2}$ 、下端を $k = \frac{1}{2}$ とラベル付けし、 $k = \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots, KMAX, KMAX + \frac{1}{2}$ の η 面を考える。 k が整数のレベルをフルレベル、半整数のレベルをハーフレベルと呼ぶ。

また、予報変数（風速・温度・比湿）はフルレベルで定義され、鉛直フラックスなどはハーフレベルで定義される（Lorenz Grid）。

5 解析手法

JMA-GSM の初期時刻における予報値を NICAM の初期値として入力し、その予報値と JMA-GSM の予報値及び解析との比較を行った。NICAM はまだ開発途上であるため、NICAM の予報精度検証には JRA-25 と JCDAS を用いた。予報精度の評価に、定量的には RMSE (二乗平均平方根誤差) やアノマリー相関 (以下、AC とする。) を用いて解析し、また予報誤差図からは地域性や予報の特性を解析した。解析に用いた NICAM の解像度は glevel-5 である。予報事例は、以下の表 5 に示す 2005 年 12 月 01 日 12z ~ 2007 年 11 月 01 日 12z を初期値とした 14 日予報であり、事例数は 24 である。

表 5: 予報事例の初期値

2005 年 12 月 01 日 12z	2006 年 12 月 01 日 12z
2006 年 01 月 01 日 12z	2007 年 01 月 01 日 12z
2006 年 02 月 01 日 12z	2007 年 02 月 01 日 12z
2006 年 03 月 01 日 12z	2007 年 03 月 01 日 12z
2006 年 04 月 01 日 12z	2007 年 04 月 01 日 12z
2006 年 05 月 01 日 12z	2007 年 05 月 01 日 12z
2006 年 06 月 01 日 12z	2007 年 06 月 01 日 12z
2006 年 07 月 01 日 12z	2007 年 07 月 01 日 12z
2006 年 08 月 01 日 12z	2007 年 08 月 01 日 12z
2006 年 09 月 01 日 12z	2007 年 09 月 01 日 12z
2006 年 10 月 01 日 12z	2007 年 10 月 01 日 12z
2006 年 11 月 01 日 12z	2007 年 11 月 01 日 12z

5.1 NICAMの初期値・解析用予報データ作成

5.1.1 初期値作成

本研究では、NICAMの初期値をJMA-GSMの初期時刻における予報値を用いて作成した。具体的には、等緯度経度系 ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 間隔) でさらに p 系 17 層である JMA-GSM の初期時刻における予報値を、正 20 面体格子系でさらに地形に従った座標 ξ 系 (幾何学的 z 系) 40 層に変換して、NICAMの初期値を作成した。

5.1.2 解析用予報データ作成

NICAMの出力は、等緯度経度系 ($2.25^\circ \times 2.25^\circ$ 間隔 [glevel-5])、幾何学的 z 系 (鉛直 40 層) の GrADS 形式である。幾何学的 z 系の詳細は以下の表 6 に示す。 $2.25^\circ \times 2.25^\circ$ の水平格子間隔、幾何学的 z 系では解析の際不都合なので、JMA-GSM や JCDAS、JRA-25 のデータと同じ $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の水平格子間隔、 p 系に内挿して、NICAMの解析用予報データを作成した。

表 6: 幾何学的 z 系 [m]

80.841	248.821	429.882	625.045
835.409	1062.158	1306.565	1570.008
1853.969	2160.047	2489.963	2845.575
3228.883	3642.044	4087.384	4567.409
5084.820	5642.530	6243.676	6891.642
7590.074	8342.904	9154.367	10029.030
10971.815	11988.028	13083.388	14264.058
15536.685	16908.430	18387.011	19980.750
21698.616	23550.278	25546.154	27697.477
30016.355	32515.835	35209.986	38113.969

5.2 予報精度の評価

5.2.1 RMSE

予報精度の評価に用いた RMSE とは、予報誤差を 2 乗しその総和を全面積で割った値 (2 乗平均) の平方根である。以下に式を示す。RMSE は予報誤差の標準的な大きさを示し、値が 0 に近いほど正確で精度の高い予報といえる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (X_i^f - X_i^a)^2} \quad (62)$$

ここでの X_i^f は予報値、 X_i^a は実況値である。

5.2.2 AC

同じく予報精度の評価に用いた AC とは、予報値の編年偏差と実況値の平年偏差の相関係数である。以下に式を示す。値が 1 ならば予報は完全に適中していることを示し、一般に値が 0.6 以上であれば予報として価値があるものとみなされる。

$$AC = \frac{\sum_i (X_i^f - X_i^c)(X_i^a - X_i^c)}{\sqrt{\sum_i (X_i^f - X_i^c)^2} \sqrt{\sum_i (X_i^a - X_i^c)^2}} \quad (63)$$

ここでの X_i^f は予報値、 X_i^a は実況値、 X_i^c は気候値である。本研究では NICAM の気候値を作成することができなかったため、JRA-25 の気候値を使用した。

5.2.3 季節平均・年平均

季節性や統計的な解析をするため、RMSE と AC の季節平均・年平均を計算した。季節の区分は最も一般的な、12・1・2 月が冬、3・4・5 月が春、6・7・8 月が夏、9・10・11 月

が秋とした。事例数は季節平均では季節毎に 6、年平均では 24 (2006 年・2007 年分) である。

5.2.4 予報誤差

予報誤差の対象予報時間は、年平均した AC の時系列の図 76 において、NICAM が 0.6 を下回った日時、つまり予報限界時間として決定した。また、予報誤差における季節平均・年平均については、前小節と同じである。

6 結果

6.1 NICAMの出力結果

まず、NICAMにおける出力結果の一例として鉛直断面図を作成した。

図11と図12は、季節平均したNICAMにおける東西風の14日予報の平均場の図である。図11が冬(DJF)と図12が夏(JJA)である。図の見方は、赤の実線が西風、青の破線が東風を表し、コンター間隔は4m/sである。冬と夏を比べると季節性が表れているのがわかった。亜熱帯ジェットに関してみると、冬は北半球の方が、夏は南半球の方が強くなっている。したがって、両季節とも東西風の鉛直分布をよく再現されているのがわかった。

図13と図14は、季節平均したNICAMにおける気温の14日予報の平均場の図である。図13が冬(DJF)と図14が夏(JJA)である。コンター間隔は6Kである。冬と夏を比べても、大きな季節性はみられないが、気温の鉛直分布をよく再現されているのがわかった。

6.2 RMSE・AC

6.2.1 24予報事例

図15から図62は、2005年12月01日12zから2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEとACの時系列図である。予報事例の初期値は解析手法の表5に示す通りである。図の見方は、実線がNICAM、破線がJMA-GSMにおける予報を表している。ここでのJMA-GSMは8日予報となっている。図15から図62をみると、予報事例によってRMSEとACの値が大きく異なることがわかる。

そこでまず、全予報事例についてRMSEとACの結果を表でまとめた(小節末の表7)。RMSEの予報限界の指標として、値が100mを超えることと任意に定めた。また、ACについては、一般的に予報限界の指標として用いられている、値が0.6を下回ることにした。表7より、2007年11月01日12zを初期値とした予報以外は、JMA-GSMよりNICAMの方が予報限界に達する時間が早いことがわかった。つまり、24事例中23事例は、NICAMの方が予報精度が悪いことがわかった。

また、ACに関してみると、JMA-GSM と NICAM の予報限界時間の差が、3.00 日以上と大きく差が出た事例が 8 つあった（表 8）。表 8 をみると、6 月から 10 月と夏から秋にかけて NICAM と JMA-GSM の予報精度の差が大きいことがわかった。

次に、AC の指標より、予報限界時間が短かった事例、つまり精度が悪かった事例を表にまとめた（小節末の表 9）。閾値は、NICAM に関しては 3.75 日以下、JMA-GSM に関しては 5.75 日以下とした。表 9 をみると、NICAM と JMA-GSM とともに予報精度が悪かったと考えられる事例は、2006 年 08 月 01 日 12z、2006 年 10 月 01 日 12z を初期値とする予報事例であった。その他の事例は、NICAM の予報限界時間が極端に短い、一方の JMA-GSM は約 8.00 日と精度が良かったことがわかった。これらの事例に関しては、表 8 で示した事例とほぼ一致する。したがって、6 月から 10 月と夏から秋にかけては、NICAM の予報精度が悪いことがわかった。

続いて、予報限界時間が長かった事例、つまり精度が良かった事例を表にまとめた（小節末の表 10）。閾値は、NICAM に関しては 7.00 日以上、JMA-GSM に関しては 8.00 日以上とした。表 10 をみると、NICAM と JMA-GSM とともに予報精度が良かったと考えられる事例は、2007 年 02 月 01 日 12z を初期値とする予報事例であった。2007 年 07 月 01 日 12z を初期値とした予報に関しては、NICAM のみ予報精度が良かった。その他の事例に関しては、JMA-GSM が良い精度となっているのに対し、冬から春にかけては NICAM も 6.00 日を上回っているが、夏に関しては、精度が悪い結果となっていることがわかった。

全 24 事例のなかで、最も予報精度が悪かった事例は、NICAM に関しては 2006 年 10 月 01 日 12z（予報限界時間：3.25 日）、JMA-GSM に関しては 2006 年 08 月 01 日 12z（予報限界時間：4.75 日）を初期値とする予報事例であった。一方、最も予報精度が良かった事例は、NICAM に関しては、2007 年 02 月 01 日 12z（予報限界時間：7.50 日）、JMA-GSM に関しては、予報限界時間 8 日以上の 7 事例（小節末の表 10 参照）であった。

6.2.2 季節平均・年平均

図 63 から図 70 は、24 の予報事例を季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE・AC の時系列図である。冬（DJF）、春（MAM）、夏（JJA）、秋（SON）の順である。図の見方は、実線が NICAM、破線が JMA-GSM における予報を表している。また、図 71 から図 74 は、季節平均した RMSE・AC の時系列を NICAM、JMA-GSM ごとに載せた図である。図の見方は黒線が冬（DJF）、赤線が春（MAM）、緑線が夏（JJA）

青線が秋 (SON) となっている。そして、図 75 と図 76 は、24 の予報事例を年平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE・AC の時系列図である。図の見方は同じく、実線が NICAM、破線が JMA-GSM における予報を表している。図 63 から図 74 をみると、季節によって予報精度に大きな差ができていくことがわかる。また、年平均した図 75 と図 76 をみると、NICAM と JMA-GSM の統計的な予報精度の違いが明らかになった。

ここで、全予報事例と同様、季節平均・年平均した RMSE と AC の結果を表でまとめた (小節末の表 11)。RMSE と AC の指標も全予報事例と同様にし、RMSE が 100m を超えること、AC が 0.6 を下回ることにした。小節末の表 11 の季節平均より、まず RMSE の値に関しては、NICAM では季節性はあまりみられなかったが JMA-GSM で季節性がみられた。冬 (DJF) は早い時間で誤差が大きくなり、逆に夏 (JJA) は 8 日を超えても 100m に達さなかった。図 72 の予報 8 日間における RMSE からは、冬 (DJF) 135m に対し夏 (JJA) 90m と、45m の差があることがわかった。次に、AC の値に関しては、小節末の表 11 の季節平均より、NICAM と JMA-GSM 両方に、季節性をみることができた。夏 (JJA) と秋 (SON) は、両モデルとも他の季節に比べ、予報限界時間が短くなっていることがわかった。NICAM の夏に関しては、全予報事例の結果の際もあらわれていたが、季節平均することにより、より予報精度が悪いことが統計的に結果にあらわれた。NICAM の予報限界時間は冬 6.25 日、夏 3.25 日という結果になった。したがって、AC についてみると、JMA-GSM より NICAM の方が、季節による予報精度の差が大きいことがわかった。そして、小節末の表 11 の年平均 (全予報事例の平均) については、JMA-GSM より NICAM の方が予報精度が悪いことが統計的にわかった。予報限界時間は、NICAM で 5.00 日、JMA-GSM で 6.75 日という結果になった。約 2 日の予報限界時間の差があることがわかった。また、図 75 より、初期時刻における RMSE の値が JMA-GSM で 10m、NICAM で 20m となっていることがわかった。

表 7: 予報事例毎における RMSE・AC の予報限界時間 [day]

初期値	RMSE>100m		AC<0.6	
	NICAM	JMA-GSM	NICAM	JMA-GSM
2005年12月01日12z	4.50	5.50	5.50	6.00
2006年01月01日12z	4.75	6.50	5.50	7.00
2006年02月01日12z	5.50	7.00	6.00	over8.00
2006年03月01日12z	6.00	over8.00	6.25	over8.00
2006年04月01日12z	7.25	over8.00	6.50	over8.00
2006年05月01日12z	6.00	over8.00	6.25	over8.00
2006年06月01日12z	6.50	over8.00	3.75	7.75
2006年07月01日12z	4.75	over8.00	3.75	over8.00
2006年08月01日12z	5.50	6.25	3.50	4.75
2006年09月01日12z	4.50	5.50	4.50	5.50
2006年10月01日12z	6.00	7.50	3.25	5.50
2006年11月01日12z	5.75	6.75	7.00	7.50
2006年12月01日12z	6.75	7.25	6.00	6.75
2007年01月01日12z	6.25	6.25	6.75	7.50
2007年02月01日12z	5.75	6.00	7.50	over8.00
2007年03月01日12z	4.00	5.50	6.50	6.75
2007年04月01日12z	5.75	6.50	6.75	7.00
2007年05月01日12z	4.75	over8.00	4.00	7.00
2007年06月01日12z	5.00	over8.00	4.75	over8.00
2007年07月01日12z	5.50	over8.00	3.75	over8.00
2007年08月01日12z	5.25	over8.00	3.75	over8.00
2007年09月01日12z	6.00	over8.00	3.75	7.75
2007年10月01日12z	5.25	over8.00	4.75	8.00
2007年11月01日12z	7.25	5.75	7.00	6.25

表 8: JMA-GSM の予報限界時間が NICAM の予報限界時間より 3 日以上長かった事例とそのときの予報限界時間 [day]

	予報限界時間		予報限界時間の差
	NICAM	JMA-GSM	JMA-GSM-NICAM
初期値			
2006 年 06 月 01 日 12z	3.75	7.75	4.00
2006 年 07 月 01 日 12z	3.75	over8.00	over4.25
2007 年 05 月 01 日 12z	4.00	7.00	3.00
2007 年 06 月 01 日 12z	4.75	over8.00	over3.25
2007 年 07 月 01 日 12z	3.75	ovr8.00	over4.25
2007 年 08 月 01 日 12z	3.75	over8.00	over4.25
2007 年 09 月 01 日 12z	3.75	7.75	4.00
2007 年 10 月 01 日 12z	4.75	8.00	3.25

表 9: 予報精度が悪かった事例とそのときの予報限界時間 [day]

初期値	予報限界時間	
	NICAM(3.75 日以下)	JMA-GSM(5.75 日以下)
2006 年 06 月 01 日 12z	3.75	(7.75)
2006 年 07 月 01 日 12z	3.75	(over8.00)
2006 年 08 月 01 日 12z	3.50	4.75
2006 年 09 月 01 日 12z	(4.50)	5.50
2006 年 10 月 01 日 12z	3.25	5.50
2007 年 07 月 01 日 12z	3.75	(over8.00)
2007 年 08 月 01 日 12z	3.75	(over8.00)
2007 年 09 月 01 日 12z	3.75	(7.75)

表 10: 予報精度が良かった事例とそのときの予報限界時間 [day]

初期値	予報限界時間	
	NICAM(7.00 日以上)	JMA-GSM(8.00 日以上)
2006 年 02 月 01 日 12z	(6.00)	over8.00
2006 年 03 月 01 日 12z	(6.25)	over8.00
2006 年 04 月 01 日 12z	(6.50)	over8.00
2006 年 05 月 01 日 12z	(6.25)	over8.00
2006 年 07 月 01 日 12z	(3.75)	over8.00
2006 年 11 月 01 日 12z	7.00	(7.50)
2007 年 02 月 01 日 12z	7.50	over8.00
2007 年 06 月 01 日 12z	(4.75)	over8.00
2007 年 07 月 01 日 12z	(3.75)	over8.00
2007 年 08 月 01 日 12z	(3.75)	over8.00
2007 年 11 月 01 日 12z	7.00	(6.25)

表 11: 季節平均・年平均した RMSE・AC の予報限界時間 [day]

季節	RMSE>100m		AC<0.6	
	NICAM	JMA-GSM	NICAM	JMA-GSM
冬 (DJF)	5.50	6.25	6.25	7.00
春 (MAM)	5.50	7.25	5.75	7.75
夏 (JJA)	5.25	over8.00	3.75	6.25
秋 (SON)	5.50	6.75	4.50	6.25
ALL	5.50	7.00	5.00	6.75

6.3 5日予報の予報誤差

ACの年平均より、NICAMの予報限界時間は5.00日だとわかったので、5日予報を対象に予報誤差図を作成し、地域性や予報の特性を解析していくことにした。

6.3.1 24予報事例

図77から図124は、2005年12月01日12zから2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図と、その日時の解析図である。予報事例の初期値は解析手法の表5に示す通りである。誤差図の見方は、左がNICAM、右がJMA-GSMにおける予報、また、赤の実線が正の差、青の破線が負の差を表している。コンター間隔は、誤差図が40m、解析図が50mである。

図77から図124は、予報事例ごとに誤差図・解析図に違いが見られるため、地域性や予報の特徴を解析するために、予報事例ごとにみていくことにする。

<初期値：2005年12月01日12z>

図77、図78より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで正負の大きな誤差があることがわかった。また、高緯度から極にかけての地域で、正負160mを超える誤差があった。

<初期値：2006年01月01日12z>

図79、図80より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、両モデルで同じ地域に正負の誤差があることがわかった。

<初期値：2006年02月01日12z>

図81、図82より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、中緯度から高緯度にかけてほぼ全経度域で、NICAMで負の誤差があることがわかった。

<初期値：2006年03月01日12z>

図83、図84より、トラフが起きている北日本付近を除いて、中緯度以北のほぼ全域で、NICAMで負の誤差があることがわかった。また、この日は傾圧不安定波の蛇行が強かつ

たが、対応した誤差は日本付近以外では顕著には見られなかった。

< 初期値：2006年04月01日12z >

図85、図86より、中緯度以北のほぼ全域でNICAMで負の誤差があった。NICAMの極大域は480m以上の負の誤差をもつ北大西洋付近である。また、トラフが起きている日本付近の予報精度が良かったのはJMA-GSMでなくNICAMであった。

< 初期値：2006年05月01日12z >

図87、図88より、中緯度以北のほぼ全域でNICAMで負の誤差があった。また、NICAMで大西洋の低緯度でもわずかながら負の誤差があった。

< 初期値：2006年06月01日12z >

図89、図90より、中緯度以北のほぼ全域でNICAMで負の誤差があった。また、NICAMで西太平洋と大西洋の低緯度でもわずかながら負の誤差があった。

< 初期値：2006年07月01日12z >

図91、図92より、ほぼ全域でNICAMで負の誤差があった。また、西太平洋赤道付近でも40mを超える負の差があった。

< 初期値：2006年08月01日12z >

図93、図94より、ほぼ全域でNICAMで負の誤差があった。また、西太平洋の低緯度でも80mを越える負の差があった。

< 初期値：2006年09月01日12z >

図95、図96より、ほぼ全域でNICAMで負の誤差があった。また、日本の北東付近の太平洋上のトラフに対応して、NICAMでは大きな正負の誤差があることがわかった。その地域には380m以上の負の誤差があった。また、大西洋の低緯度で40mの負の誤差が広がっている。

< 初期値：2006年10月01日12z >

図97、図98より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで正負の大きな誤差があることがわかった。また、東ロシア上でNICAMで320m以上の大きな負の誤差があった。

< 初期値：2006年11月01日12z >

図99、図100より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで正負の大きな誤差があることがわかった。また、東アジア上の大きなトラフ付近で、NICAMで正の誤差があることがわかった。

< 初期値：2006年12月01日12z >

図101、図102より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで正負の大きな誤差があることがわかった。また、NICAMで正負同じくらいの割合で誤差があった。

< 初期値：2007年01月01日12z >

図103、図104より、NICAMで中緯度から高緯度にかけて全体的に負の誤差があったが、目立つ大きな誤差はなかった。

< 初期値：2007年02月01日12z >

図105、図106より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、両モデルで正負同じくらいの割合で、ほぼ同じ地域に誤差があることがわかった。

< 初期値：2007年03月01日12z >

図107、図108より、激しく蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで正負の大きな誤差があることがわかった。ロシア付近に400mを超える正の誤差、カナダ付近で400mを超える負の誤差、東アメリカで240mを超える正の誤差があった。また、NICAMで太平洋と大西洋の低緯度でも負の誤差があった。

< 初期値：2007年04月01日12z >

図109、図110より、東太平洋上のトラフに対応して、NICAMで正の誤差があるが、その他の中緯度から高緯度にかけてのほぼ全域で負の誤差があることがわかった。

< 初期値：2007年05月01日12z >

図111、図112より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、両モデルで正負同じくらいの割合で、ほぼ同じ地域に誤差があることがわかった。また、リッジに対応する地域で正の誤差、トラフに対応する地域で負の誤差があった。

< 初期値：2007年06月01日12z >

図113、図114より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで中緯度から高緯度で正負の誤差があることがわかった。その地域では、NICAMで負の誤差の割合が大分多い。

< 初期値：2007年07月01日12z >

図115、図116より、NICAMで低緯度から高緯度で、大きな誤差はないが、負の誤差が一体に広がっているのがわかった。また、

< 初期値：2007年08月01日12z >

図117、図118より、NICAMで低緯度から高緯度で、大きな誤差はないが、負の誤差が一体に広がっているのがわかった。また、低緯度の太平洋上に80mを超える負の誤差があった。

< 初期値：2007年09月01日12z >

図119、図120より、日本の北東付近と西ロシアにおけるトラフに対応して、NICAMで280mを超える大きな正の誤差があるが、その他の全域において負の誤差があることがわかった。また、NICAMで西太平洋上と大西洋上の赤道付近において、40mを超える負の誤差があった。

< 初期値：2007年10月01日12z >

図121、図122より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで中緯度から高緯度で正負の誤差があることがわかった。また、NICAMで日本付近において380mを超える負の誤差があり、全体的に負の誤差の割合が多い。

< 初期値：2007年11月01日12z >

図123、図124より、蛇行する傾圧不安定波動に対応して、NICAMで中緯度から高緯度で正負の誤差があることがわかった。一方のJMA-GSMで、極付近一帯に正の誤差があることがわかった。

以上の全予報事例の結果よりNICAMの特徴をまとめると、傾圧不安定波動が活発なとき、つまり秋・冬は、傾圧不安定波の蛇行に対応した誤差が起きている傾向があった。そのため、地域によって誤差の大小が異なっていた。また、活発でないとき、つまり春・

夏に関しては、低緯度に誤差が起きている傾向があった。地域による誤差の大小はなく、全域に誤差が広がっていることが多かった。全事例に共通することは、中緯度から高緯度にかけての地域で大きな誤差が起きていたことである。

6.3.2 季節平均・年平均

図 125 から図 128 は、24 の全予報事例を季節平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図である。冬 (DJF)、春 (MAM)、夏 (JJA)、秋 (SON) の順である。図の見方は、左が NICAM、右が JMA-GSM における予報、また、赤・実線が正の差、青・破線が負の差を示す。コンター間隔は 20m である。そして、図 129 は、24 の予報事例を年平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図である。図の見方は、季節平均した図と同じである。

図 125 から図 128 は、季節ごとに誤差図が異なるため、予報誤差の季節性を解析するため、季節ごとにみていくことにする。また、図 129 についても、モデルによる予報の特徴をみていくことにする。

< 季節平均：冬 (DJF) >

図 125 より、NICAM で他の季節平均と比べて正の誤差の割合が多く、全体的に誤差自体少なく、それほど大きな誤差もないことがわかった。

< 季節平均：春 (MAM) >

図 126 より、NICAM で正の誤差はあるもののほとんどが負の誤差であり、北アメリカ・北大西洋・西アジア付近に 120m を超える負の誤差があることがわかった。

< 季節平均：夏 (JJA) >

図 127 より、NICAM で全域において負の誤差のみがあることがわかった。極付近に大きな誤差が集まっているが、他の季節平均と比べて低緯度の西太平洋・大西洋上で負の誤差が広がっているのがわかった。

< 季節平均：秋 (SON) >

図 128 より、NICAM で、図 126 の春の季節平均図に近い結果であることがわかった。また、北大西洋・東アジア付近に 120m を超える負の誤差があることがわかった。

< 年平均（全予報平均） >

図 129 より、JMA-GSM と比べて NICAM は、誤差が大きいことが顕著にあらわれているとともに、負の誤差の地域が大分多いことがわかった。したがって、NICAM は高度を低めに予報する傾向があることがわかった。また、低緯度の西太平洋・大西洋上で負の誤差が広がっていることがわかった。そして、低緯度のインド洋上でわずかながら正の誤差が広がっていることもわかった。負の極大域は北大西洋上の 120m を超える地域であり、また北半球全域をみると、中緯度から高緯度にかけての地域で大きな負の誤差が広がっていることがわかった。

7 考察

NICAM と JMA-GSM の予報精度を解析した結果、全 24 予報事例の平均予報限界時間が NICAM で 5.00 日、JMA-GSM で 6.75 日と、NICAM の方が予報精度が悪いことが明解にあらわれた。また、NICAM は初期時刻から誤差が大きく、初期時刻における全平均 RMSE が 20m であった。初期時刻から大きな誤差をもって出発した予報は、時間が経つにつれ、実況の値から大きく離れていき、早い時間で予報限界に達してしまっていた。予報誤差の発達過程においては、RMSE の時系列の傾きでみる限り、NICAM と JMA-GSM 間ではそれほど変わらない。初期値の誤差分を差し引いた RMSE の時系列では、NICAM も JMA-GSM に近い値になっていたと考えられる。したがって、NICAM の予報精度が悪かった要因の 1 つに、初期値誤差が考えられる。

ここでまず、NICAM の初期値に大きな誤差が生じた要因について考えていく。本研究では、NICAM の初期値は JMA-GSM の初期時刻における予報値より作成した。NICAM と JMA-GSM では、計算方法が異なり、水平格子点が一致しないため、内挿してデータを作成した。その過程で誤差は生じていたと考えられる。しかし、ほぼ等しい格子間隔におけるデータの内挿によって生じたこの誤差はわずかで、次に述べることの方が大きな誤差が生じた直接的な要因だと考える。それは NICAM の初期値と JMA-GSM の初期時刻における予報値間の鉛直層の違いである。JMA-GSM は p 系 17 層、それに対して NICAM は幾何学的 z 系 40 層である。17 層と 40 層ではデータ数が異なりすぎていて、足りない層分のデータを内挿して作成することになる。この過程の中で、大きな誤差は生じたのだと考えられる。NICAM は水平正 20 面体格子系で、鉛直幾何学的 z 系 40 層と独自の形態を持っているので、他の全球データから初期値を作成することが大変難しい。NICAM 用に作成された初期値があれば、NICAM の予報精度は一気に向上すると考えられる。

次に、NICAM の予報精度に対する季節的特性を、地域性やモデル自身の特性に着目して解析・考察していく。予報限界時間や 5 日予報の予報誤差は、予報事例によって、大きく異なる結果となった。しかし、年間を通して予報事例を行った結果、ある程度、近い結果が何ヶ月か続いたり、と予報精度に季節性があることがわかった。そこで、予報限界時間や 5 日予報の予報誤差を季節平均した結果をみると、違いは明らかだった。予報限界時間 [day] については、冬 (DJF) は NICAM : 6.25、JMA-GSM : 7.00、春 (MAM) は NICAM : 5.75、JMA-GSM : 7.75、夏 (JJA) は NICAM : 3.75、JMA-GSM : 6.25 秋 (SON) は NICAM : 4.50、JMA-GSM : 6.25 であった。NICAM の予報限界時間 [day] に関

しては、冬と夏に 2.50 日という大差があらわれ、夏より冬の方が予報精度が良いことがわかった。そしてそれは、NICAM が夏の予報に関して、4.00 日にも満たずに限界がきてしまう程に、予報精度が大変悪いということでもある。JMA-GSM の予報限界時間 [day] に関しては、NICAM と同様、夏・秋より春・冬の方が予報精度が良いことがわかるが、季節による NICAM ほどの大差はみられなかった。

ここで、季節別に予報誤差の要因を考えていく。

< 冬 (DJF) >

冬は NICAM と JMA-GSM の両モデルにおいて、他の季節よりも予報精度が良かった。NICAM と JMA-GSM の予報限界時間の差は、0.75 日とそれほどの差がなかった。基本的に、予報に与える誤差影響の比率として、力学作用よりも熱応答の作用の方がはるかに大きい。しかし、冬は一般的に、熱応答の作用よりも力学作用の方が強く働く。そのため、予報精度は他の季節に比べて良いことが言われている。JMA-GSM の予報限界時間が 7.00 日となっているのも、そのためである。NICAM においては、独自の非静力学の支配方程式を用いており、雲微物理学を実装していない支配方程式に関しては、十分な結果が得られたと考えられる。熱応答に関しては、今回用いた NICAM の物理過程では、不十分なところがあったため、熱応答の影響が一番小さい冬が予報精度が良いということが明確にあらわれた結果であった。

また、5 日予報の予報誤差の季節平均をみると、NICAM に関しては、他の季節と比べて冬のみが正負両方の誤差平均があらわれていた。傾圧不安定波の蛇行に関する誤差は、全予報事例に対して解析を行った。その結果、傾圧不安定波のリッジに対応する付近で NICAM では高めに予報し、正誤差が生じていた傾向があった。冬の傾圧不安定波に関しては、急激な蛇行に NICAM の予報が正負に振られたのだと考えられる。

< 夏 (JJA) >

冬と対照的な結果となったのが、夏である。他の季節と比べ、圧倒的に予報精度が悪かった。NICAM の予報限界時間は 3.75 日と、4.00 日を切る精度の悪さだった。JMA-GSM に関しても、他の季節と比べると悪かったが、それでも 6.25 日となっていた。NICAM の予報精度が悪かった要因は、冬を考察したときにも述べたが、季節によって異なる、予報に与える影響である。夏は一般的に、力学作用よりもはるかに熱応答の作用の方が強く働く。ここで、本研究に用いた NICAM の不十分な点が浮き彫りになってしまった。熱応答に関しては、本研究ではしっかりしておらず、仮過程を多様していた。その点、JMA-GSM では熱応答等は確立されているため、その差は歴然となってしまった。予報限界時間の差は

両モデル間で 2.50 日である。

そして、その熱応答に関して不十分だった結果が、5 日予報の予報誤差の季節平均をみると、よくあらわれている。予報誤差をみると、ほぼ全球が負の誤差で覆われている。そして、他の季節平均と大きく異なるのが、赤道付近の低緯度から誤差が広がっていることである。インド洋付近を除いて低緯度から高緯度に向かって負の誤差が強まっているのが、明確にあらわれている。それに対して、JMA-GSM は他の季節と大きくは異ならず、低緯度付近に関してもほぼ誤差はない結果となっている。雲微物理学を仮定していない、簡易な物理過程を用いた NICAM の結果なので、納得できる結果であった。熱応答による作用が強くない時期の結果においては、ある程度、NICAM の予報精度に関する解析の対象になると考えられる。

< 春 (MAM)・秋 (SON) >

間の春と秋については、結果も中間であった。冬の季節に続いて力学作用が強い春は、予報限界時間が NICAM で 5.75 日、JMA-GSM に関しては季節間で最大となる 7.75 日であった。また、夏から続いて熱応答の作用が強いのが残る秋は、予報限界時間が NICAM で 4.50 日、JMA-GSM で夏同様 6.25 日であった。春・秋の全予報誤差図をみると、傾圧不安定波動に対応して、予報誤差が生じ、トラフ・リッジ付近で予報を大きくはずす傾向があった。傾圧不安定波動と熱応答の作用の強まりによって、予報精度は夏よりは良いが、冬よりは低い結果となったと考えられる。

また、5 日予報の予報誤差の季節平均をみると、春と秋両方とも近い結果となった。わずかながら、正の誤差を持つ地域もあるが、大半の地域は負の誤差であった。そして、赤道を含む低緯度付近に関しては、夏よりは負の誤差の大きさは小さいが、同じ地域で誤差があらわれており、熱応答による作用によって生じた誤差があったと考えられる。そして、熱応答による作用に関して十分に対応している JMA-GSM では、低緯度にはほとんど誤差が見られなかった。ここでも熱応答による作用の取り扱いについて、考えさせられる結果となった。

最後に、全 24 予報事例を平均した結果について、モデルの予報特性を考察していく。予報限界時間については最初に述べた通りである。ここでは、5 日予報の予報誤差に着目していく。全平均したところ、JMA-GSM では正負同じ割合で誤差が生じているのに対し、NICAM ではほぼ全域が負の誤差であった。NICAM は、高度場を実況よりも低く予報する傾向・特性があることがわかった。また、NICAM に関して述べると、西太平洋の

中緯度付近において正の誤差があり、北大西洋から北欧にかけて負の誤差が大きいことがわかった。傾圧不安定波動に対して誤差は生じる傾向があり、さらにリッジには正の誤差が生じていた事例も数事例あった。そのため、西太平洋の中緯度付近で正の誤差が生じていたのは、その付近にリッジが起きている事例が多かったことが要因だと考えられる。そして、太平洋と大西洋の赤道を含む低緯度域からの負の誤差の広がり、熱応答の作用による影響誤差であると考えられる。

そして、NICAMの全予報事例に関して共通する予報精度の悪さの要因に、解像度の低さもあげられると考える。本研究に用いたのは glevel-5 で水平格子間隔は 224km であった。対する JMA-GSM は解像度 60km である。解像度がそこまで異なると、解像度が良い JMA-GSM の方が予報精度が良い結果になることは予想がつく。現時点での NICAM に関しては、この解像度の違いは、予報精度にそこまで大きな影響は起こさないかもしれないが、少なからず、結果にあらわれたことだと考えられる。

8 結論

本研究では、NICAMの出力を解析し、観測や他の全球予報モデルと比較することで、現時点でのその予報精度を評価することを目的とした

具体的には、JMA-GSMの初期時刻における予報値をNICAMの初期値として入力し、その予報値とJMA-GSMの予報値及び解析との比較を行った。予報精度の評価に、定量的にはRMSEやACを用いて解析し、また予報誤差図からは地域性や予報の特性を解析した。使用したNICAMの解像度はglevel-5(水平解像度224km)である。予報事例は、2005年12月01日12z~2007年11月01日12zを初期値とした14日予報で、事例数は24とした。

その結果、全24予報事例の平均予報限界時間がNICAMで5.00日、JMA-GSMで6.75日と、NICAMの方が予報精度が悪いことが明解にあらわれた。予報精度が悪かった要因として、いくつか考えられる。まず、NICAMの解像度が244kmとJMA-GSMの解像度60kmと比べて大変低かったことが考えられる。この要因はNICAMの他の要因から比べると、そこまで影響を与えたようには考えられない。次に、初期値誤差が考えられる。NICAMのRMSEの時系列をみると、初期値から誤差が大きく、初期値における全平均RMSEが20mとなっていた。本研究では、NICAMの初期値はJMA-GSMの初期時刻における予報値より作成した。JMA-GSMの予報値とNICAMでは、計算方法が異なるため水平格子点が異なり、また鉛直層に関しては、 p 系17層と幾何学的 z 系40層と、大きく異なるため、内挿してデータを作成する際に大きな誤差が生じてしまっていたと考えられる。NICAMは水平正20面体格子系で、鉛直幾何学的 z 系40層と独自の形態を持っているので、他の全球データから初期値を作成することが大変難しい。そのため、NICAM用に作成された初期値があれば、NICAMの予報精度は一気に向上すると考えられる。そして、第3の要因として、物理過程の不十分さであった。季節平均を行った結果、NICAMにおいて冬(DJF)と夏(JJA)の間で、予報限界時間が2.50日と大差があった。冬が6.25日、夏が3.75日である。JMA-GSMの季節平均に関してはそこまで大差はなかった。基本的に、予報に与える誤差影響の比率として、力学作用よりも熱応答の作用の方がはるかに大きい。しかし、冬は一般的に、熱応答の作用よりも力学作用の方が強く働く。そのため、予報精度は他の季節に比べて良いことが言われている。また、反対を言うと、夏は力学作用よりも熱応答の作用の方が強く働くため、予報精度が悪くなるということである。そのことが明確にあらわれた結果となった。NICAMにおいては、独自の非静力学の支配方程式を用いており、雲微物理学を実装していない支配方程式に関しては、十分な結果が得られたと考えられる。熱応答に関しては、今回用いたNICAMの物理過程では、仮過程

を多用するなど不十分なところが多数あった。これらの条件が予報精度が悪かった要因だと考える。

また、全 24 の予報事例の解析結果より、NICAM の予報特性を見つけることができた。5 日予報の予報誤差に着目し、全平均したところ、JMA-GSM では正負同じ割合で誤差が生じているのに対し、NICAM ではほぼ全域が負の誤差であった。NICAM は高度場を実況よりも低く予報する傾向・特性があることがわかった。また、NICAM では、中緯度から高緯度にかけての地域が予報精度が悪かったという結果が得られた。

今後の課題としては、次のことが挙げられる。本研究では、用いた予報事例数が少なく、季節平均や年平均結果は、まだ信頼が足りないものとなっているため、より多くの予報事例を用いてモデルの特性、季節性をより明解化していく必要がある。また、短期予報のみの解析となっているため、長期予報に対する予報精度を解析していく必要がある。そして、NICAM 用初期値・物理過程を確立して、超高解像度モデルのみならず、解析用モデルとしても使用できるモデルになっていくことを期待したい。

謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教員である筑波大学計算科学研究センター 田中 博 教授には、卒論テーマの設定、モデルの概要、研究手法、考察などについて適切な御指導を賜り、心から感謝しております。

そして、本研究で使用したリアルタイム予報バージョンの NICAM を提供して頂いた、CCSR 佐藤 正樹 准教授に、感謝の意を表します。

また、気象研究所 松枝 未遠 氏、同大学生命環境科学研究科 寺崎 康児 氏、加藤 真悟 氏、近藤 圭一 氏、山崎 真吾 氏、同大学環境科学研究科 鈴木 一步 氏、瀬田 繭美 氏には研究手法、数多くの図の作成などに関して多数の御助言を頂き、誠にありがとうございました。

さらに、同大学生命環境科学研究科 木村 富士男 教授、林 陽生 教授、上野 健一 准教授、植田 宏昭 講師、日下 博幸 講師には、方針発表、中間発表、最終発表およびポスター発表の場で、貴重なご意見を頂き、ありがとうございました。

最後に、同大学の大学院生の先輩方、ともに卒業研究を進めた筑波大学地球科学主専攻 気候学・気象学分野の 4 年生の皆様、さらにはこの論文を書くにあたって関わっていただいた方すべてに、感謝の意を表します。

なお、本研究で用いた主な図は、The GMT System (Wessel and Smith, 1991) にて作図しました。

参考文献

- [1] Satoh,M., T.Matsuno, H.Tomita, H.Miura, T.Nasuno, S.Iga, 2007: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme events
- [2] Miura, H., Masaki Satoh, Hirofumi Tomita, Tomoe Nasuno, Shin-ichi Iga, and Akira T. Noda 2007: A short-duration global cloud-resolving simulation with a realistic land and sea distribution. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02804, doi:10.1029/2006GL027448
- [3] Tomita, H, Miura, H., Iga, S., Nasuno, T.,and Satoh,M. 2005: A global cloud-resolving simulation: preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, vol.32, L08805, doi:10.1029/2005GL022459.
- [4] Onogi, K. and Coauthors, 2005: JRA-25: Japanese 25-year re-analysis project-progress and status. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3259–3268.
- [5] 小倉 義光, 1978: 気象力学通論. 東京大学出版会
- [6] 横山 長之, 1992: 地球シミュレーション. 白亜書房
- [7] 室井 ちあし, 1997: 数値予報モデルの力学過程. 地球流体電脳倶楽部 (<http://www.gfd-dennou.org/arch/comptech/nwp-dyn/dynamic.pdf>)

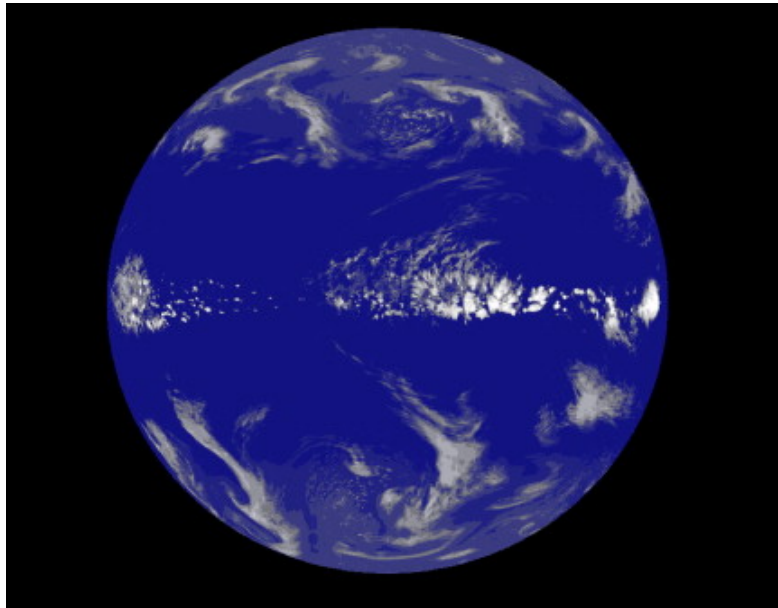


図 1: 格子間隔 3.5km の OLR (外向き長波放射) [5 日目の 0:00 ~ 1:30 の 90 分平均]

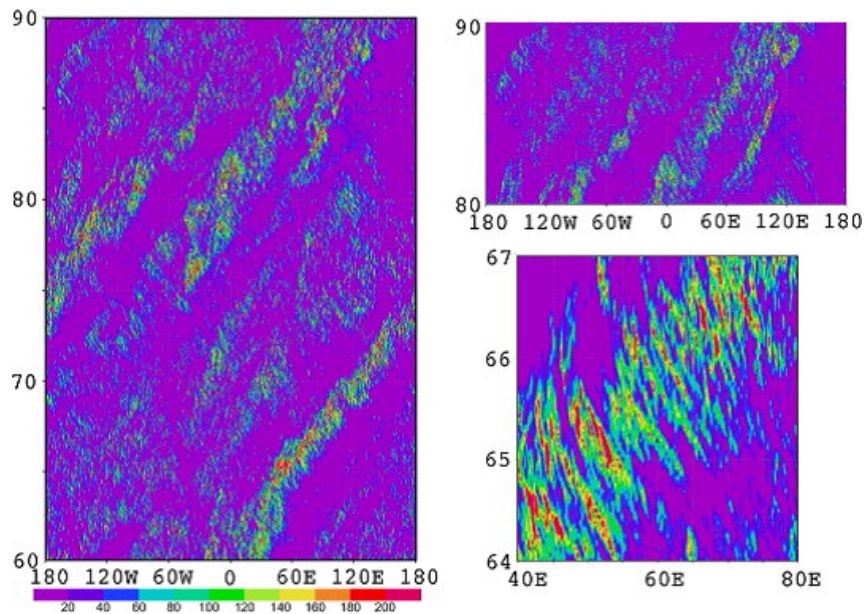


図 2: 2 °N-2 °S の平均降水量の Hovmöller diagrams (左: 格子間隔 7km の 60 ~ 90 日 180 °W ~ 180 °E の全域図、右上: 格子間隔 3.5km の 80 ~ 90 日 180 °W ~ 180 °E の部分域図、右下: 格子間隔 7km の 64 ~ 67 日 40 °E ~ 80 °E の拡大図)

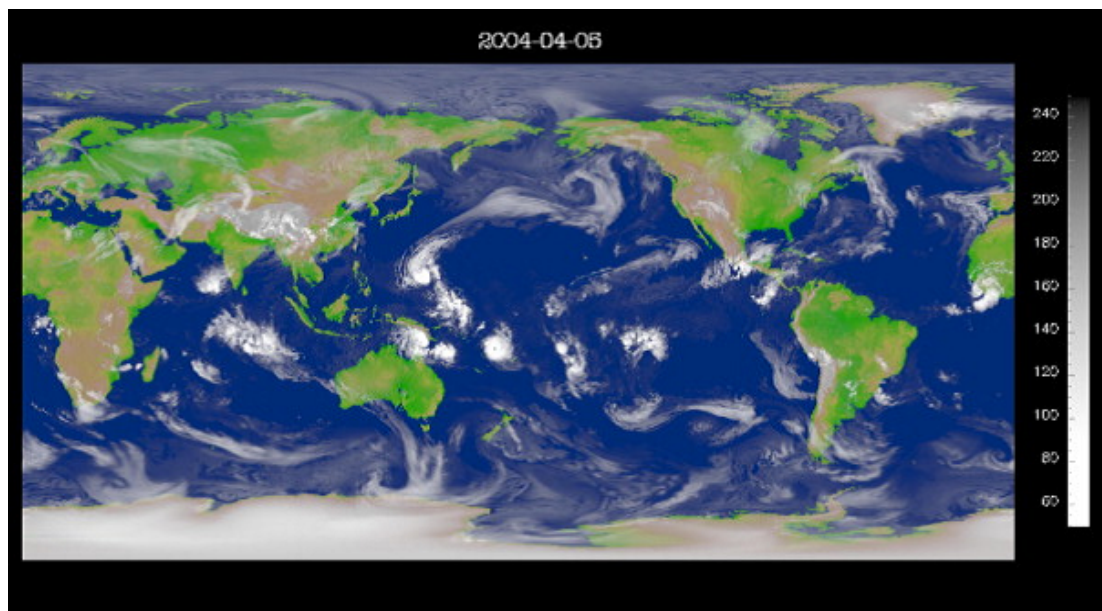


図 3: 2004/4/1 00UTC の NCAR/NCEP の再解析データを初期値とした 4/5 00UTC の OLR (格子間隔 : 3.5km)

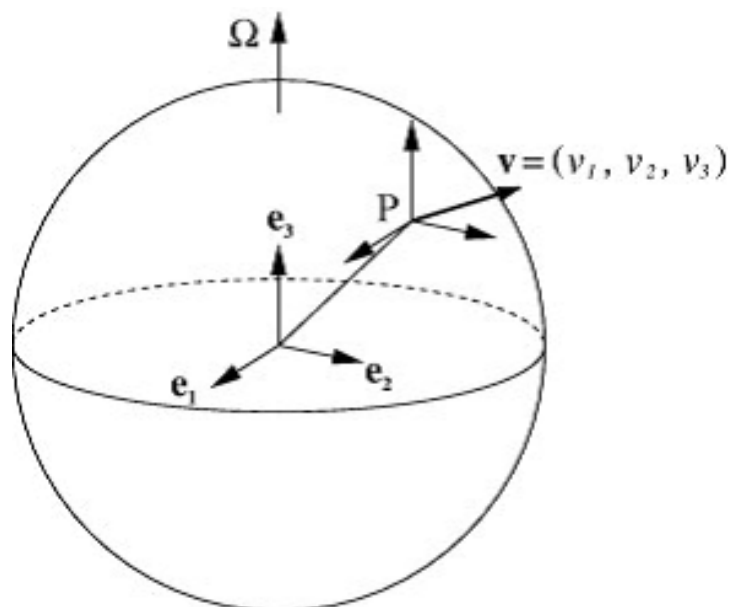


図 4: 速度ベクトル \mathbf{v} の 3 成分と直交基底 $\{e_1, e_2, e_3\}$ の定義

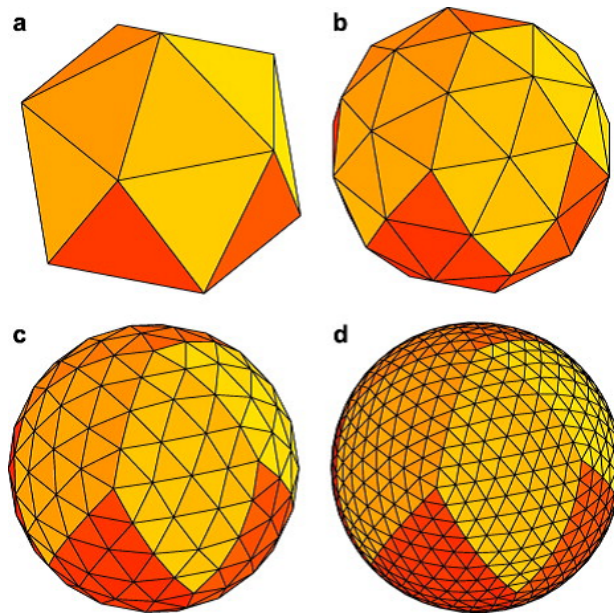


図 5: 正 20 面体格子の生成法 (glevel-0(a), 1(b), 2(c), 3(d))

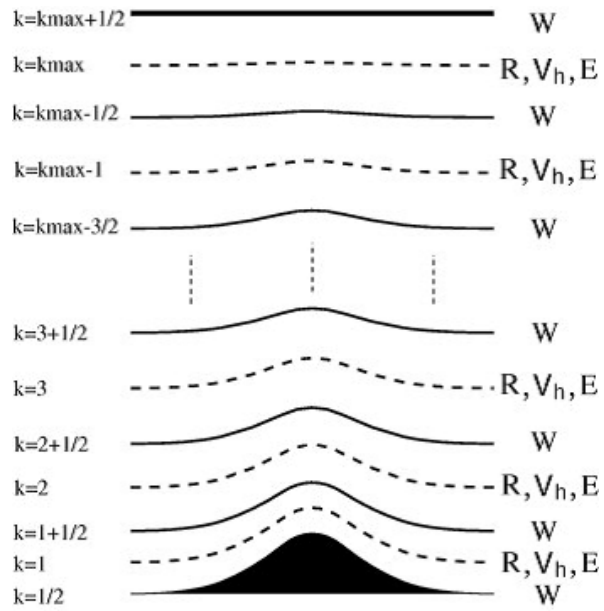


図 6: 鉛直レベルとローレンツ格子における要素配置

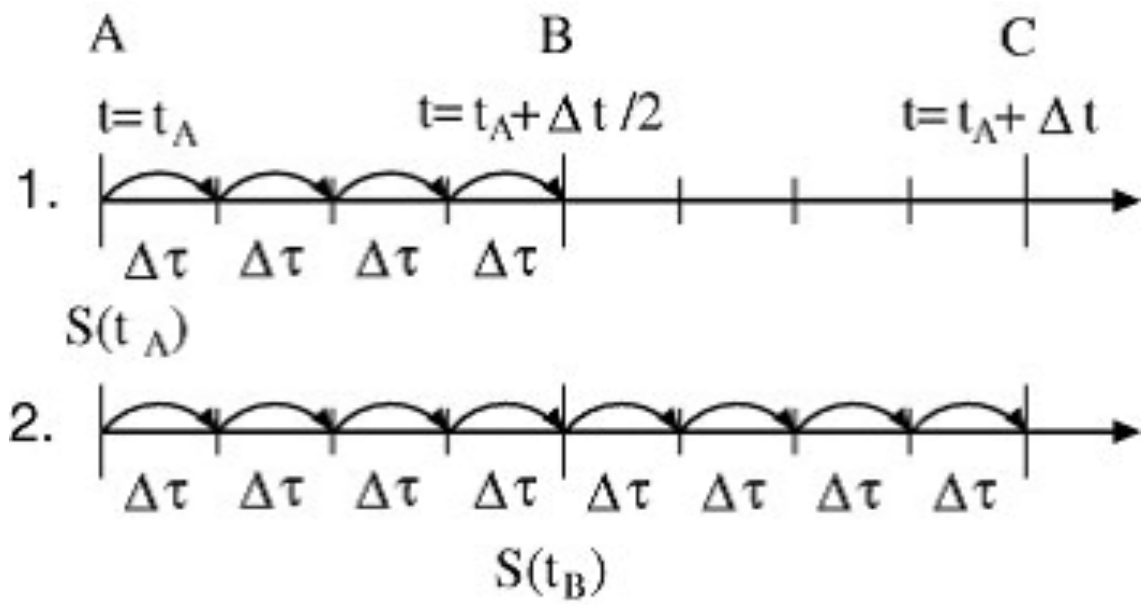


図 7: 時間積分方法

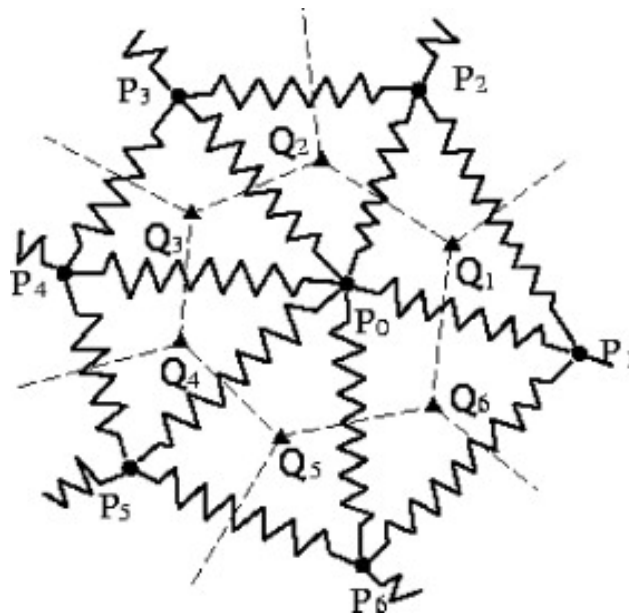


図 8: バネ力学を用いた格子点の修正したバネ結合

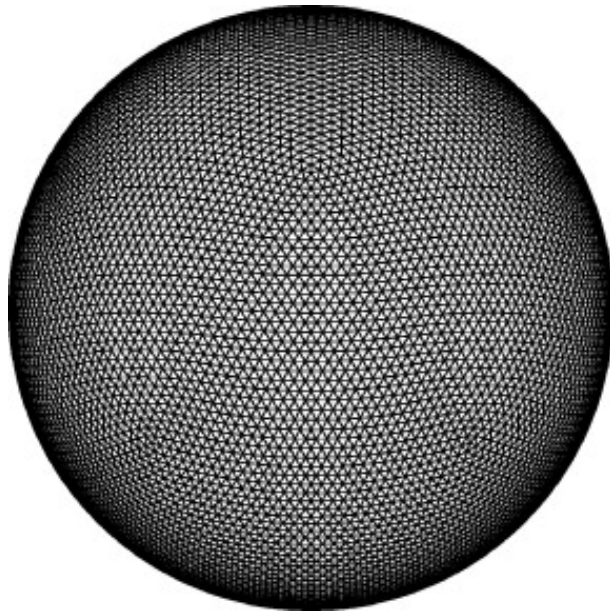


図 9: バネ力学によって修正した正 20 面体格子 (glevel-5)

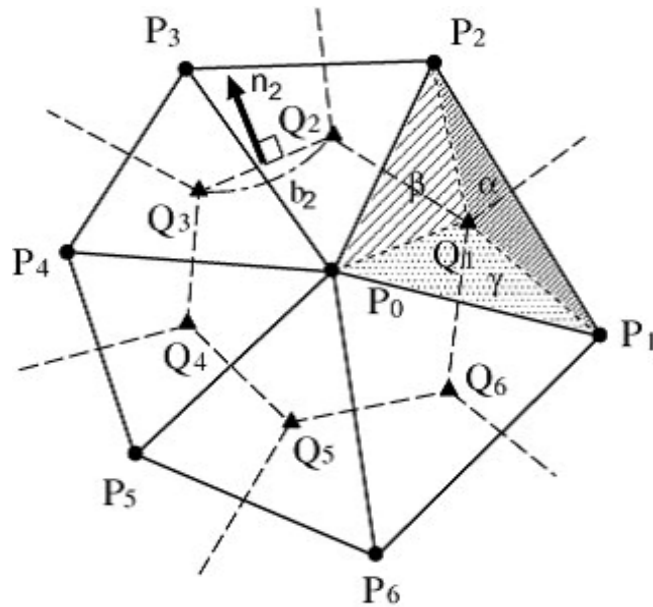


図 10: 6 角形の場合の水平コントロールボリュームと定点の配列

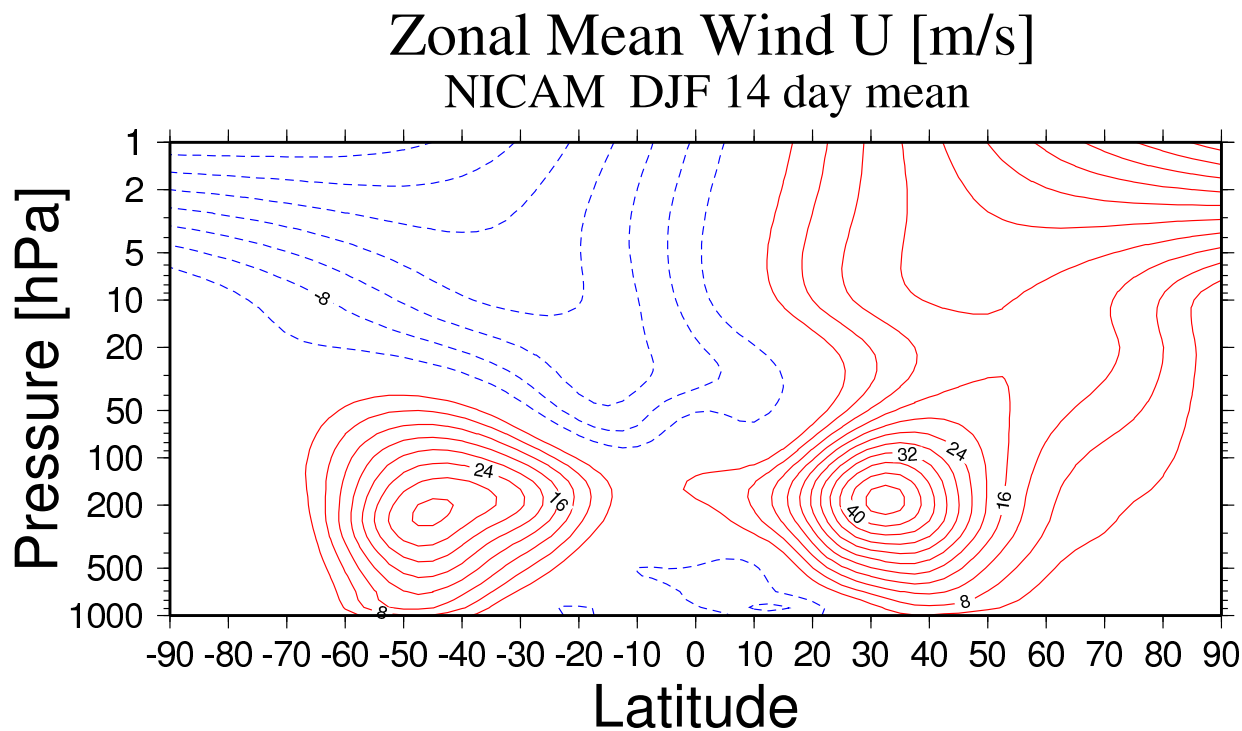


図 11: 季節平均したNICAMにおける東西風の14日予報の平均場 - 2006 & 2007 冬 (DJF)
- (赤の実線:西風, 青の破線:東風)

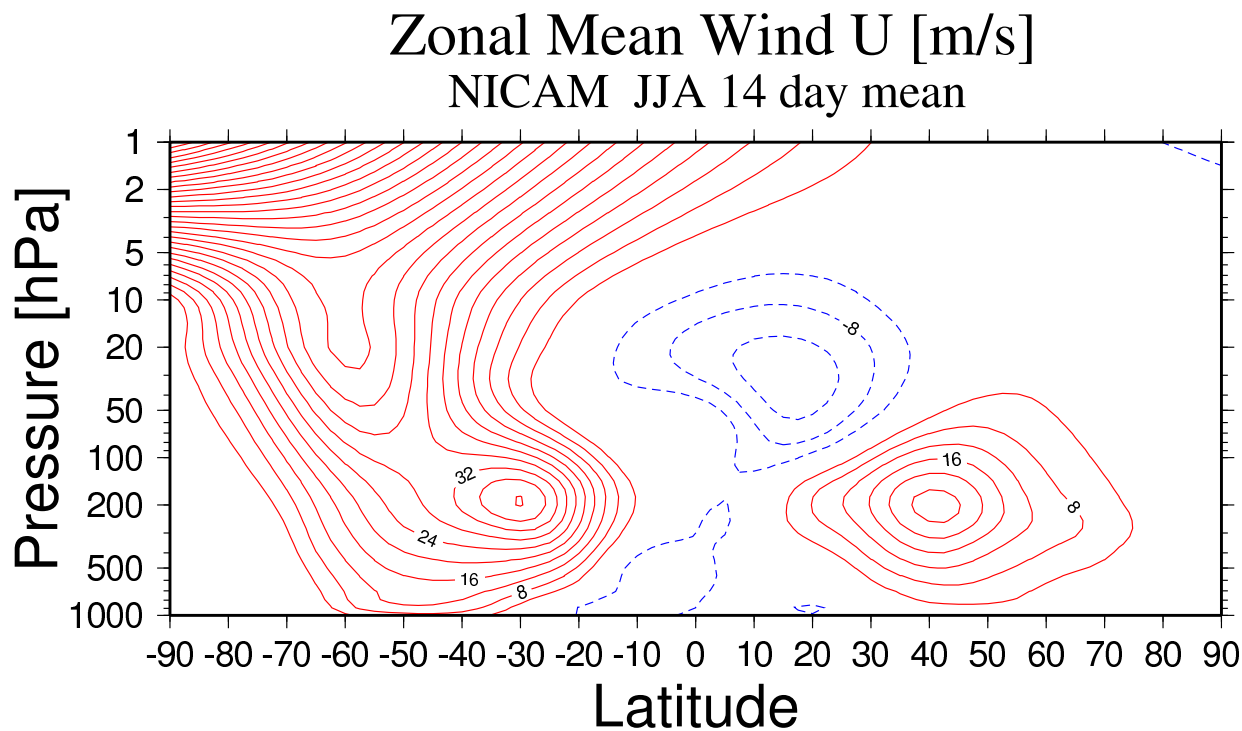


図 12: 季節平均したNICAMにおける東西風の14日予報の平均場 - 2006 & 2007 夏 (JJA)
- (赤の実線:西風, 青の破線:東風)

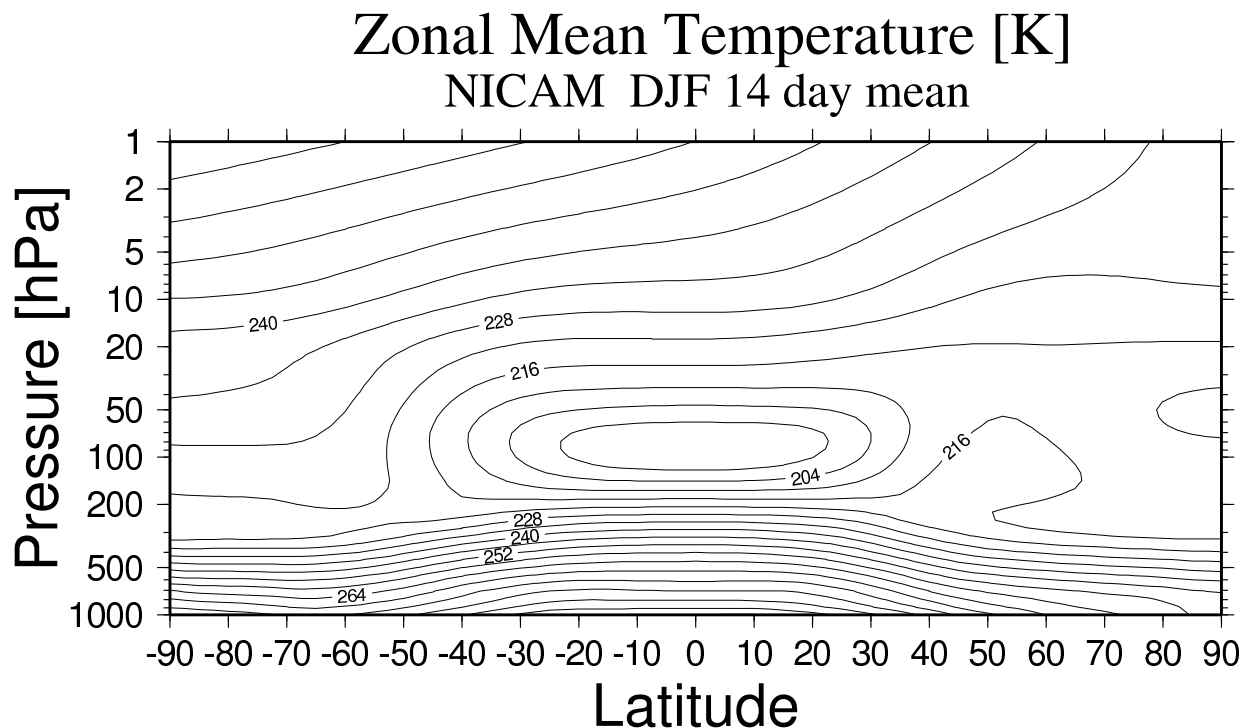


図 13: 季節平均した NICAM における気温の 14 日予報の平均場 - 2006 & 2007 冬 (DJF) -

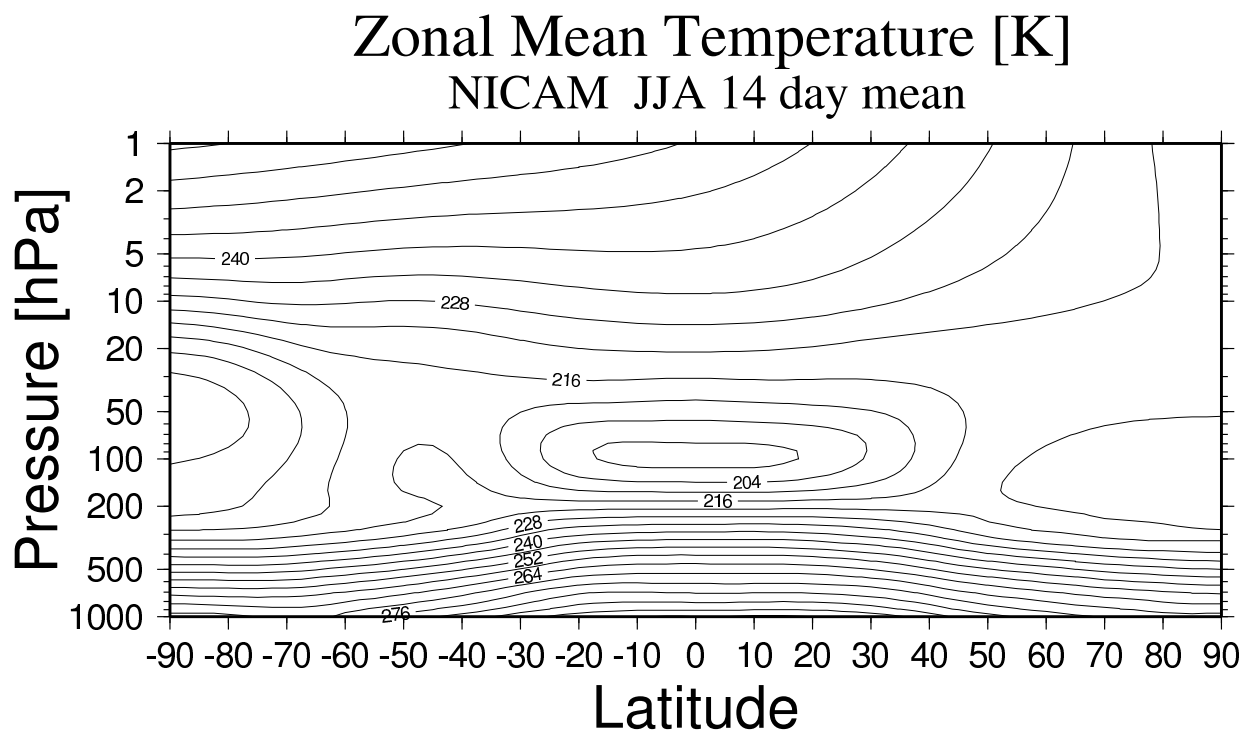


図 14: 季節平均した NICAM における気温の 14 日予報の平均場 - 2006 & 2007 夏 (JJA) -

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2005.12.01.12 z

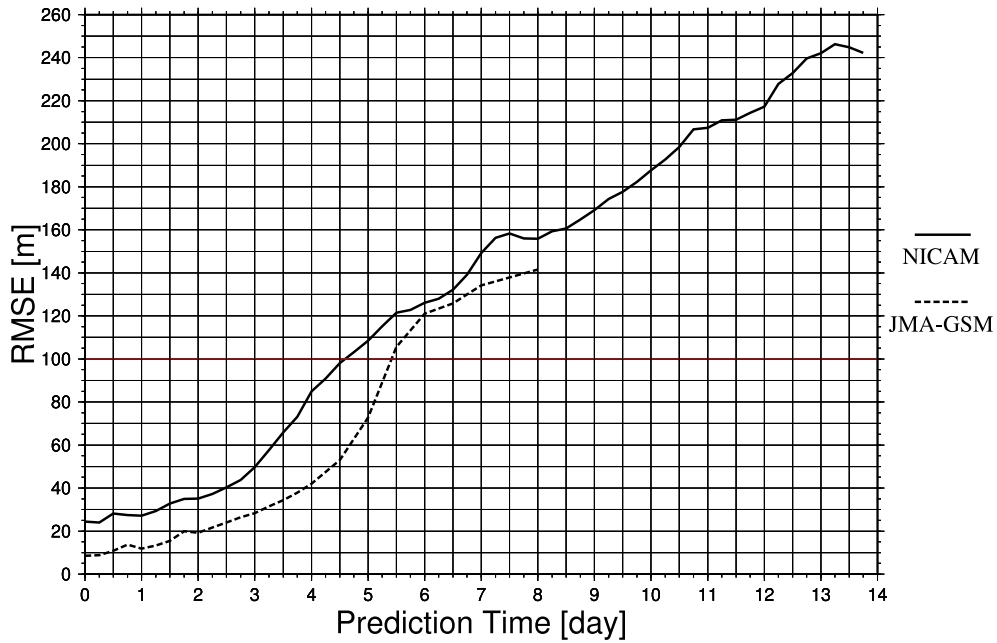


図 15: 2005 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2005.12.01.12 z

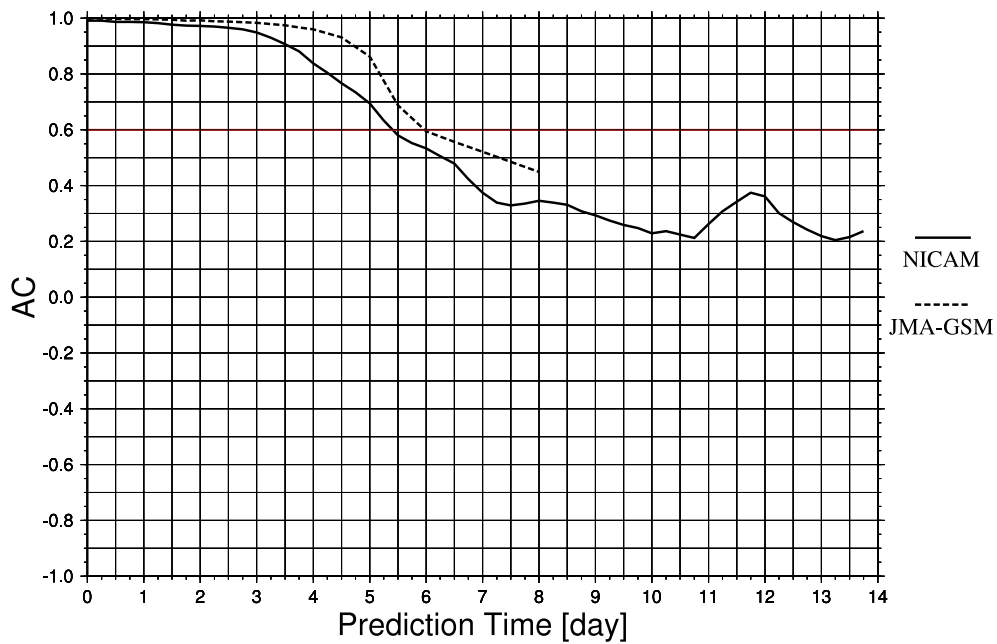


図 16: 2005 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.01.01.12 z

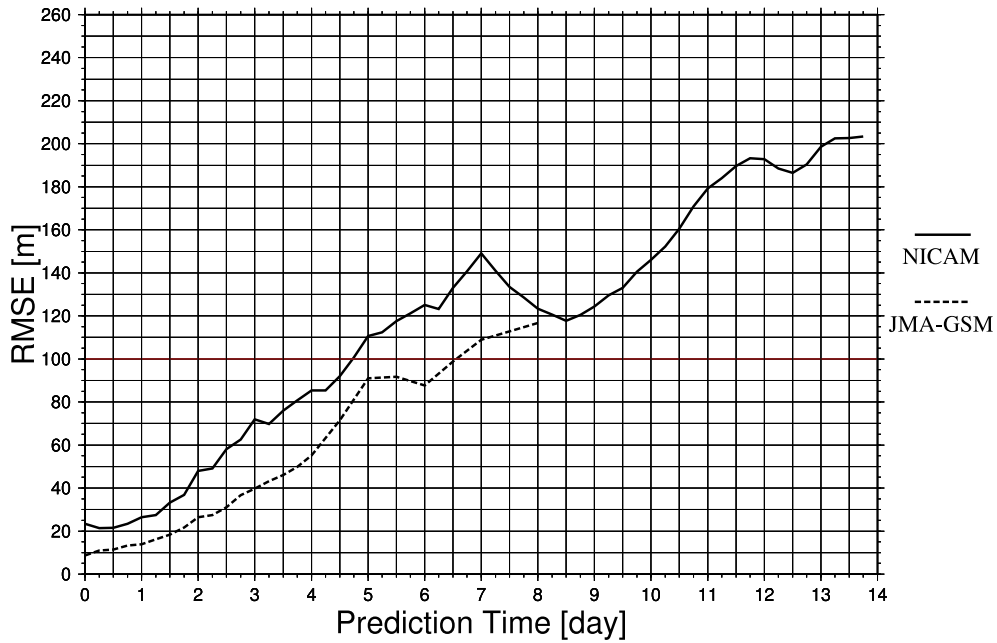


図 17: 2006 年 01 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.01.01.12 z

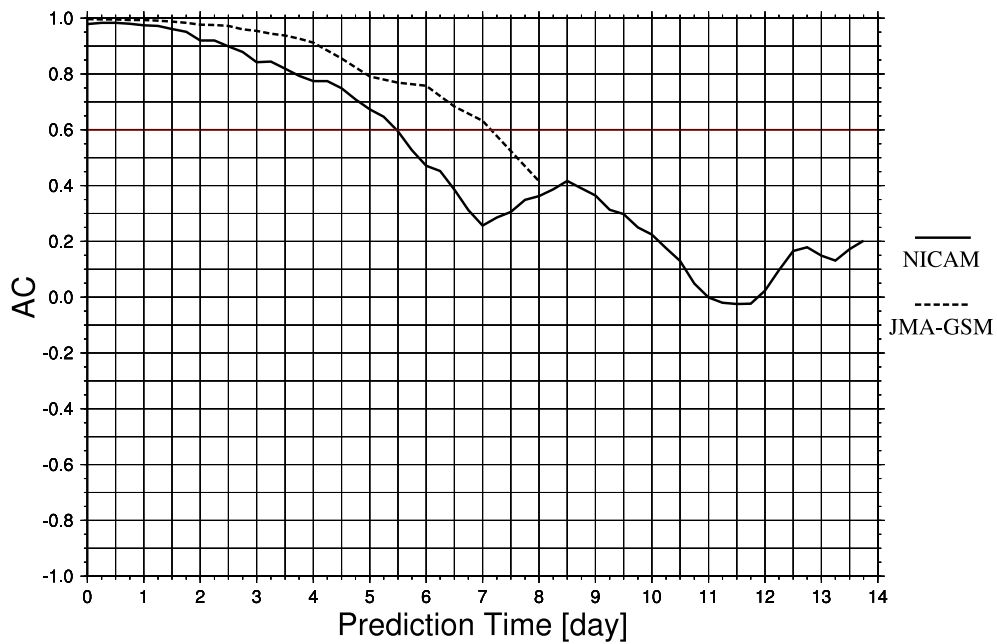


図 18: 2006 年 01 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.02.01.12 z

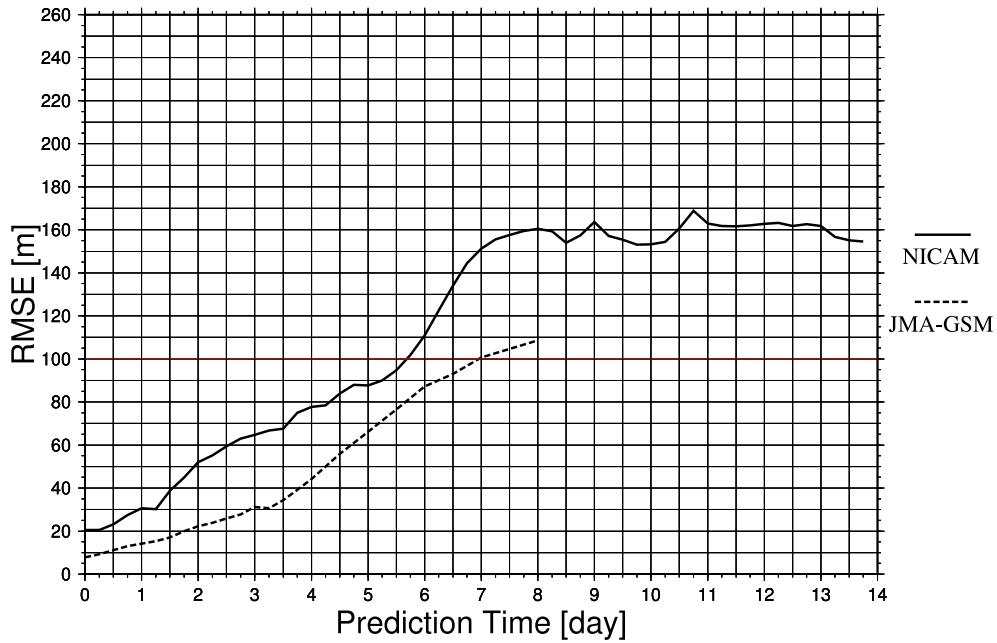


図 19: 2006 年 02 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.02.01.12 z

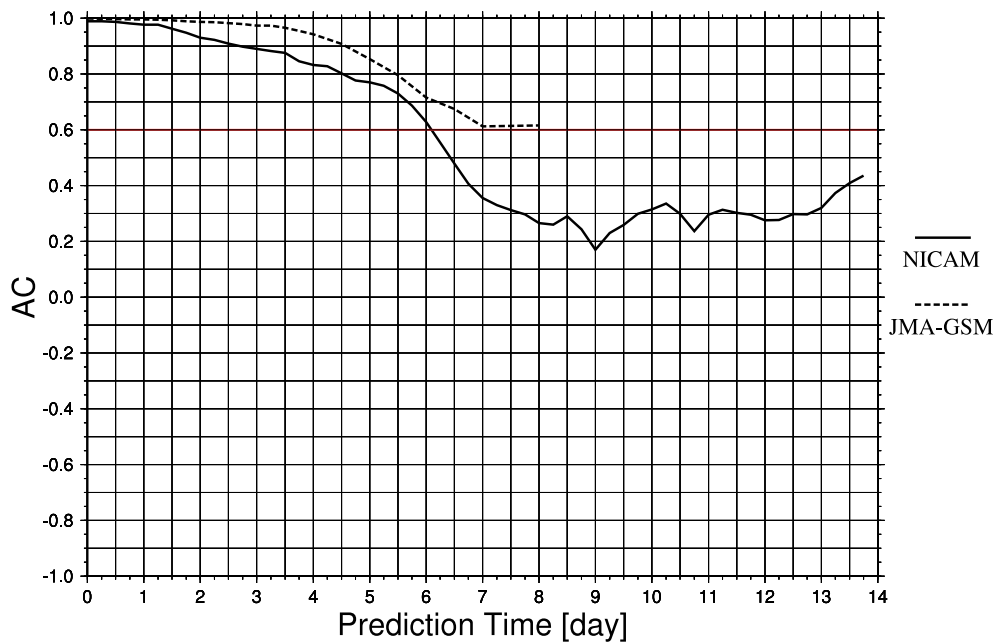


図 20: 2006 年 02 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.03.01.12 z

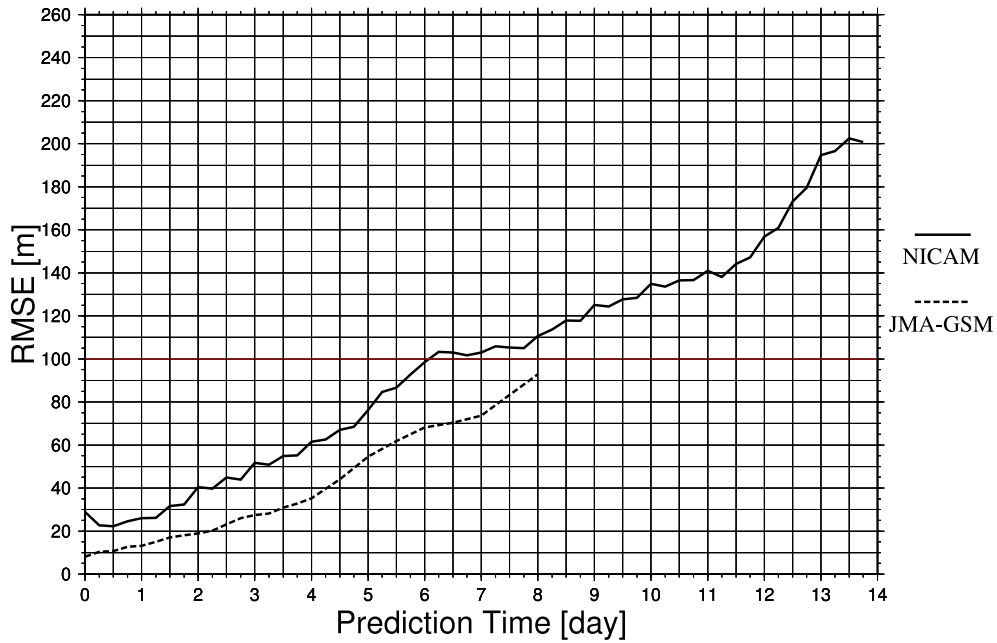


図 21: 2006年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.03.01.12 z

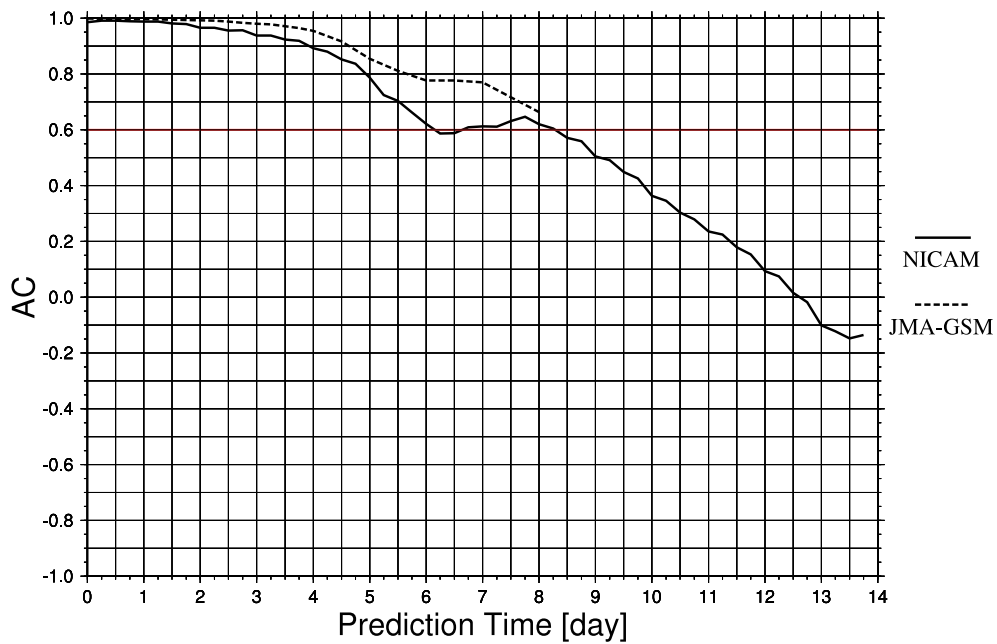


図 22: 2006年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.04.01.12 z

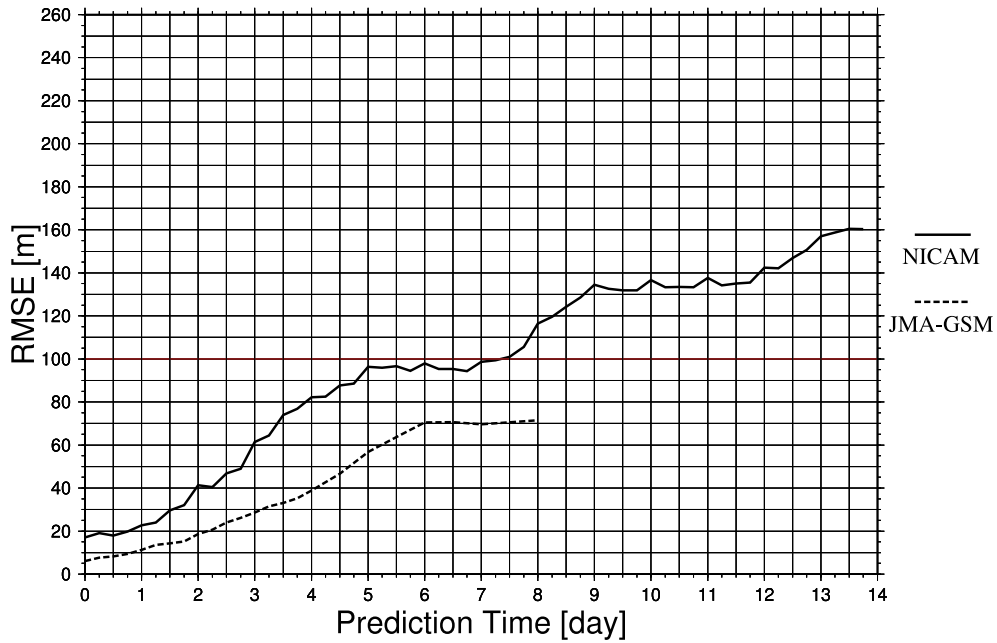


図 23: 2006年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.04.01.12 z

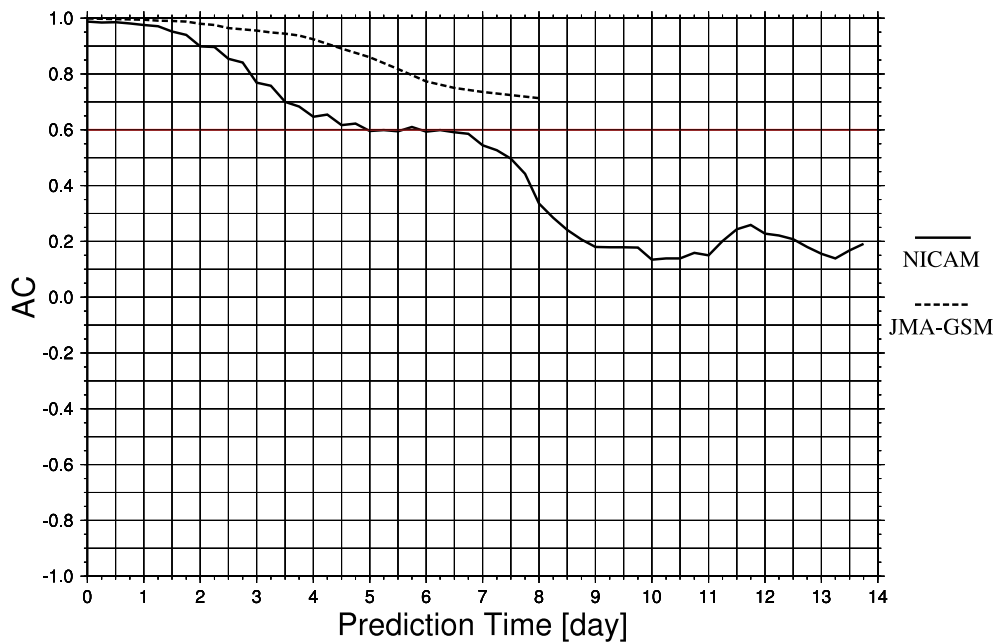


図 24: 2006年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.05.01.12 z

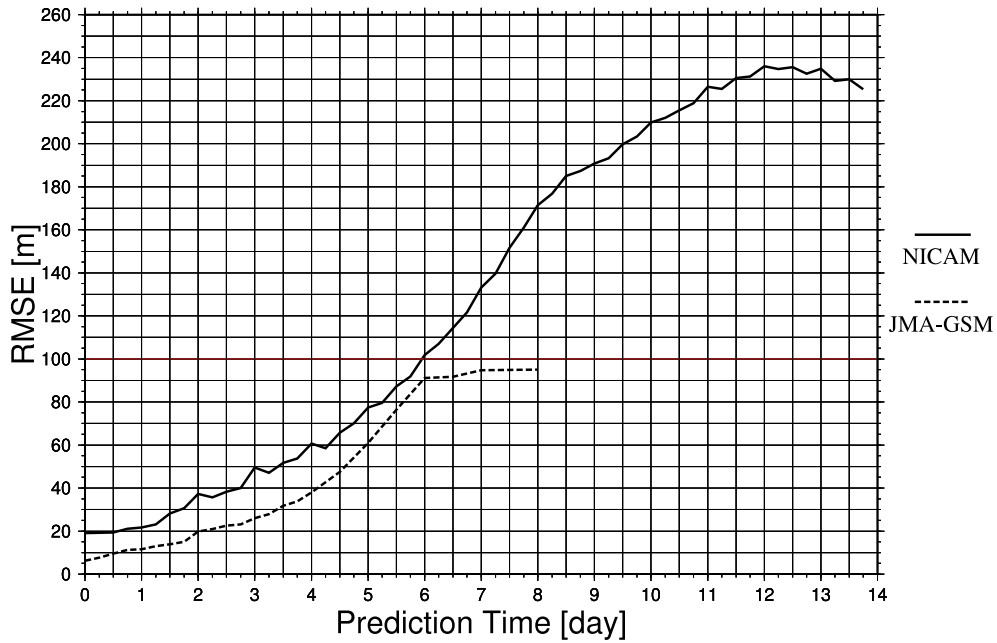


図 25: 2006 年 05 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.05.01.12 z

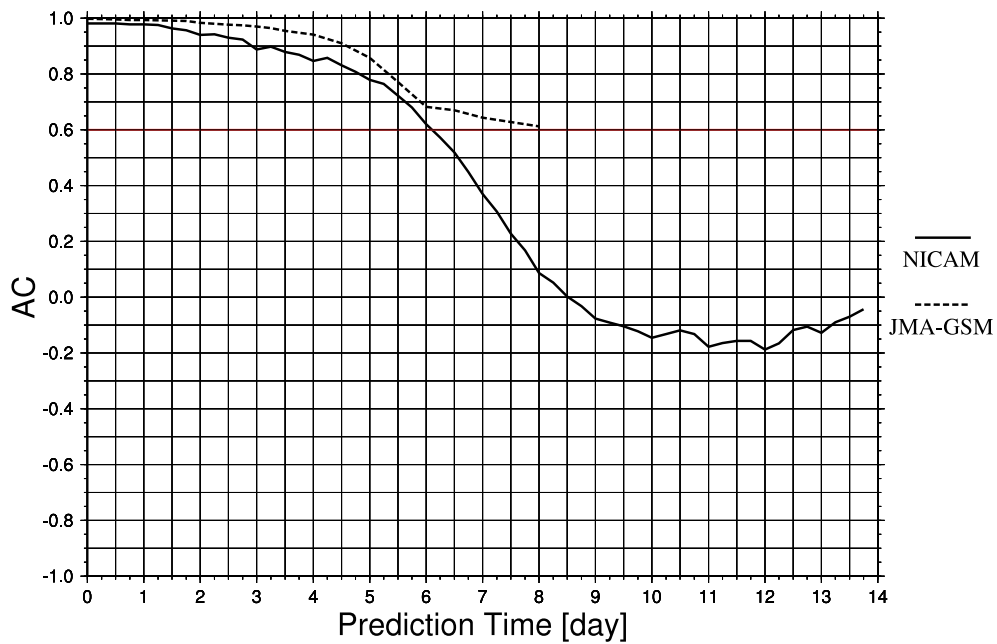


図 26: 2006 年 05 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.06.01.12 z

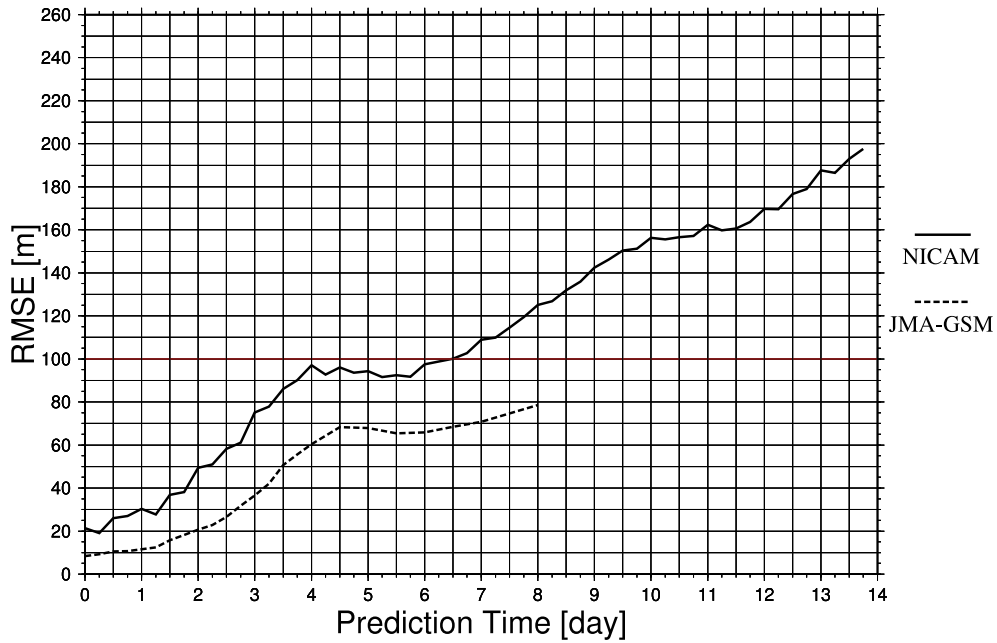


図 27: 2006年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.06.01.12 z

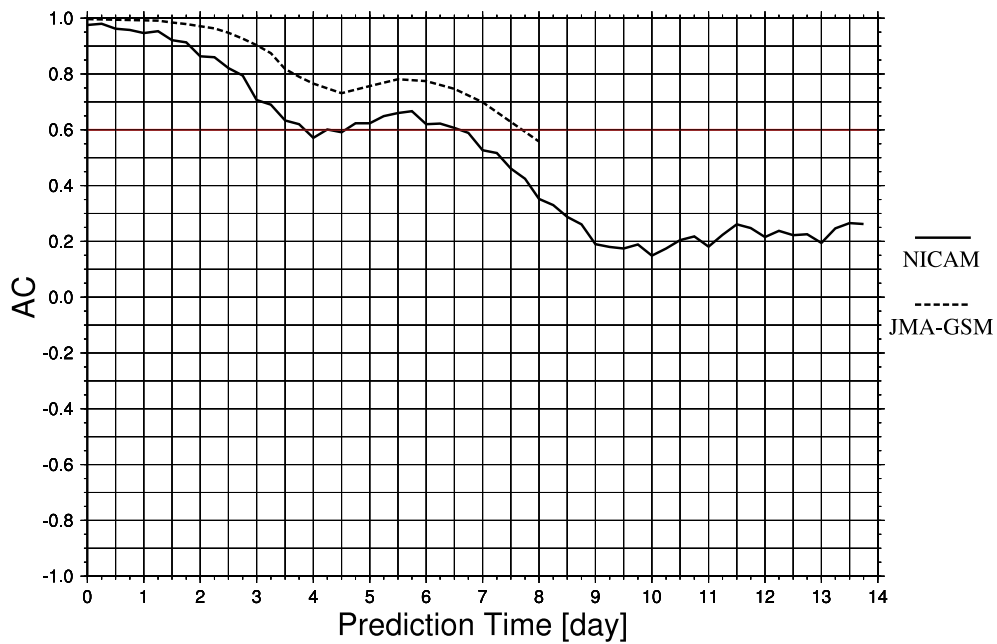


図 28: 2006年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.07.01.12 z

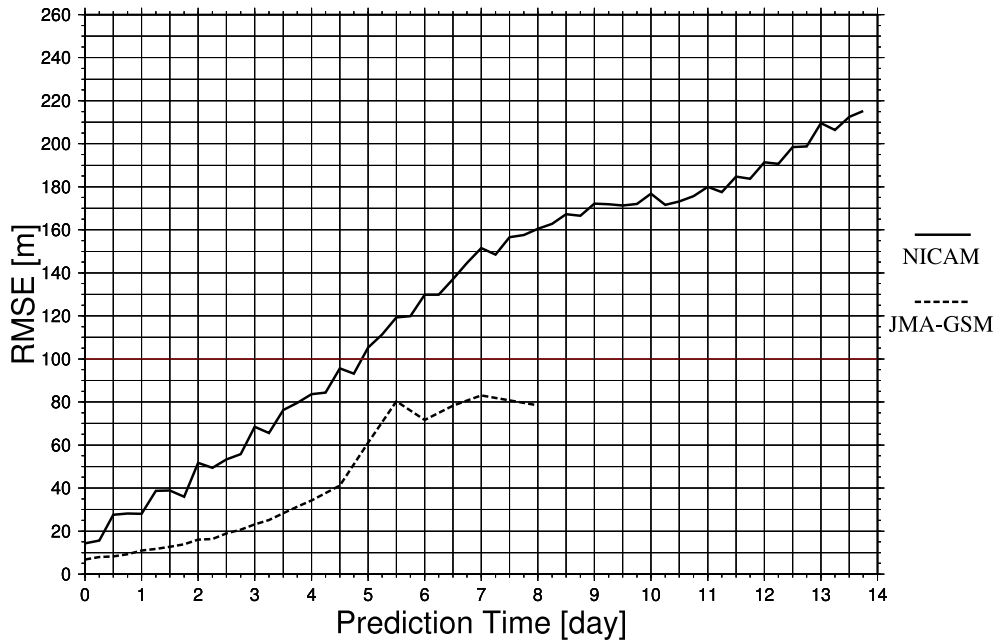


図 29: 2006年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.07.01.12 z

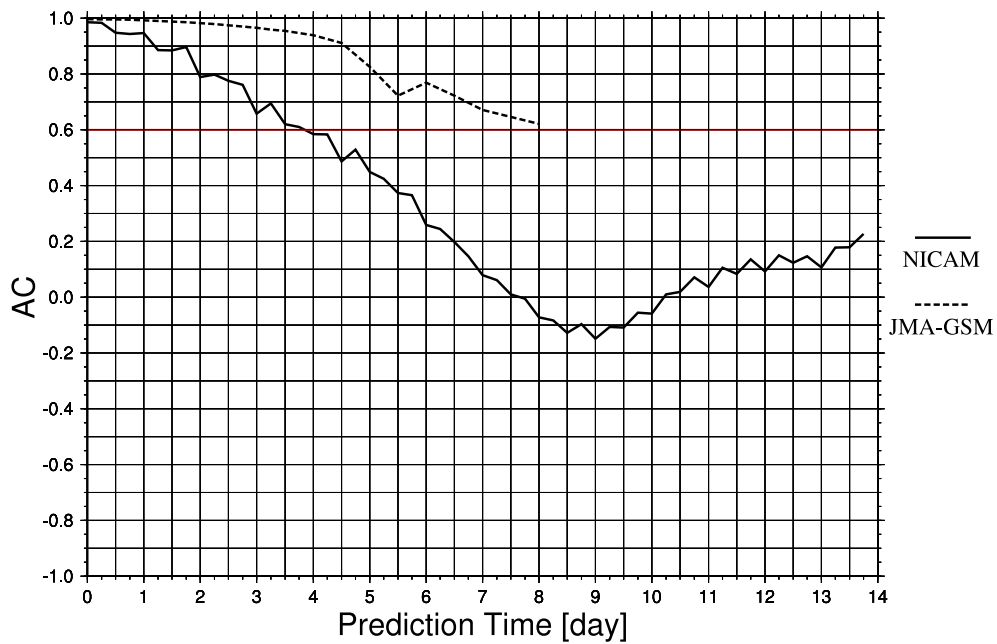


図 30: 2006年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.08.01.12 z

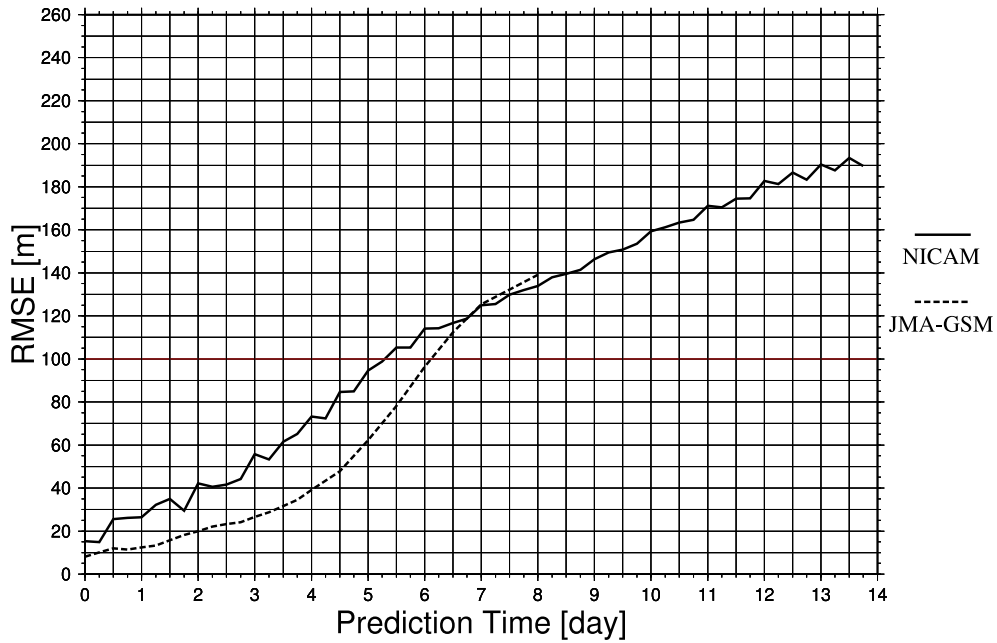


図 31: 2006年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.08.01.12 z

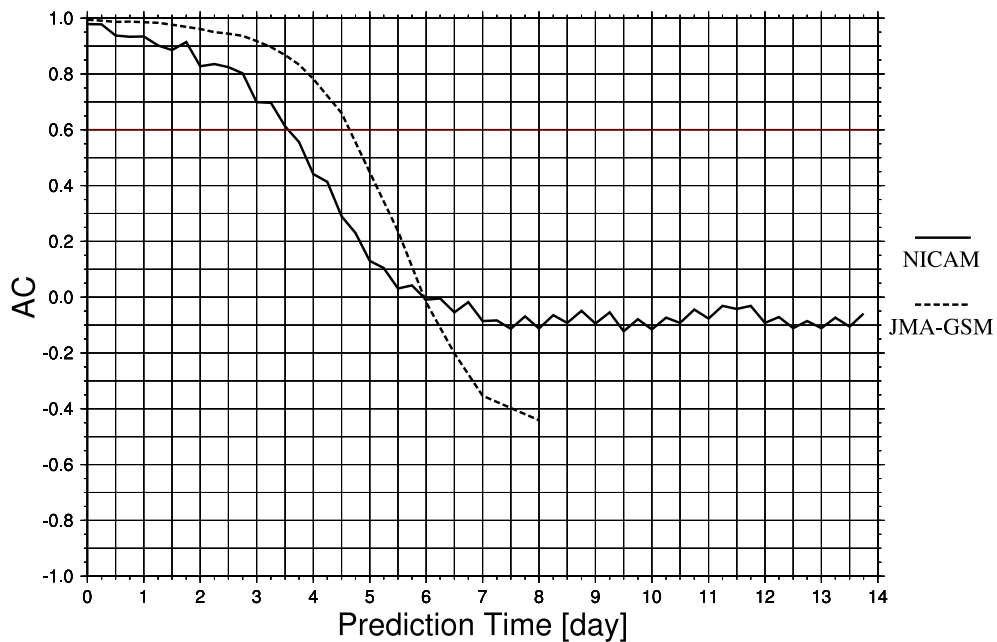


図 32: 2006年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.09.01.12 z

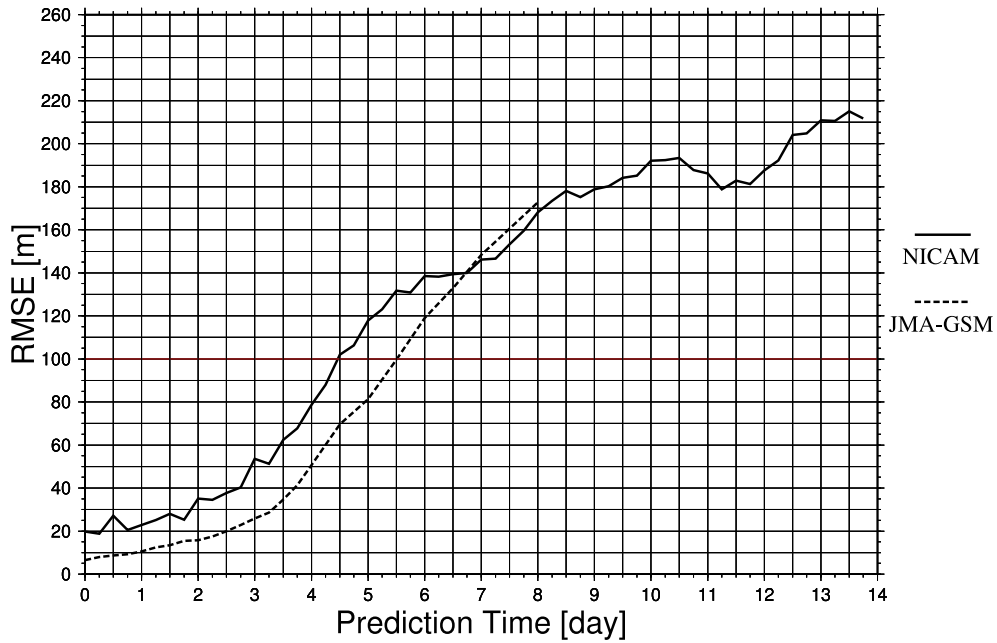


図 33: 2006 年 09 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.09.01.12 z

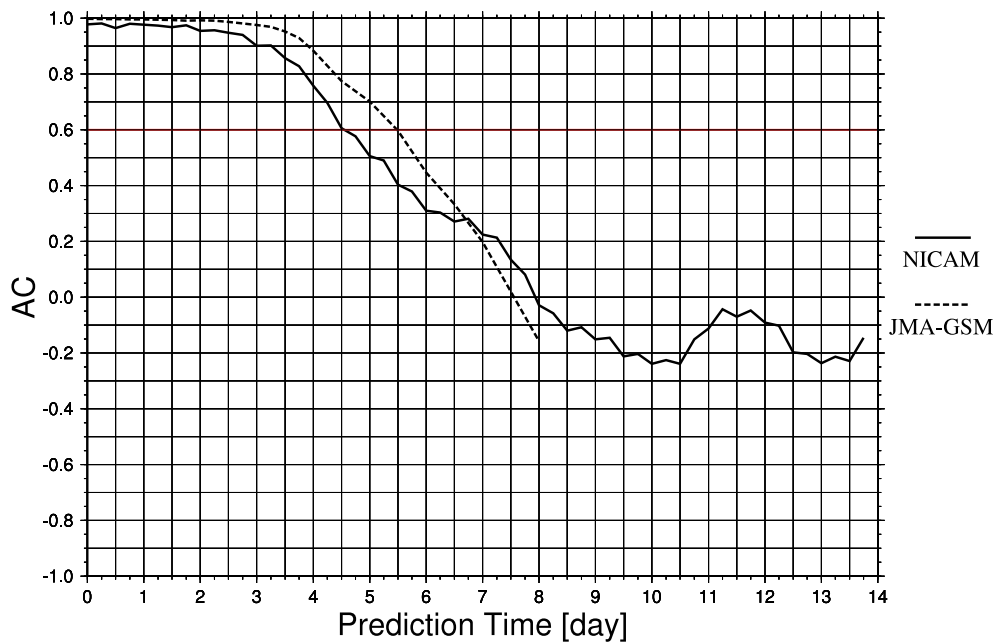


図 34: 2006 年 09 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.10.01.12 z

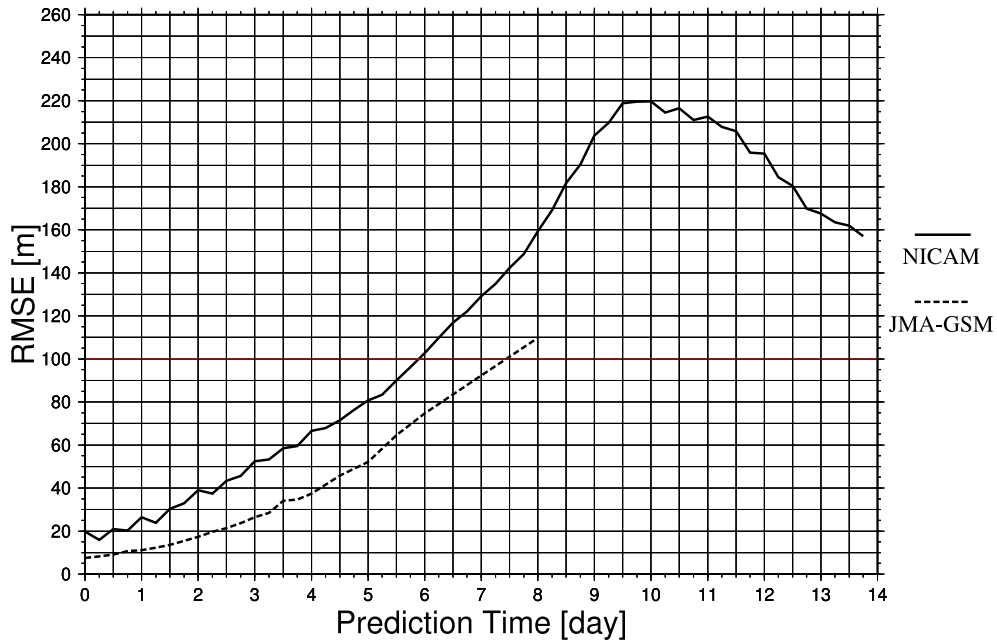


図 35: 2006 年 10 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.10.01.12 z

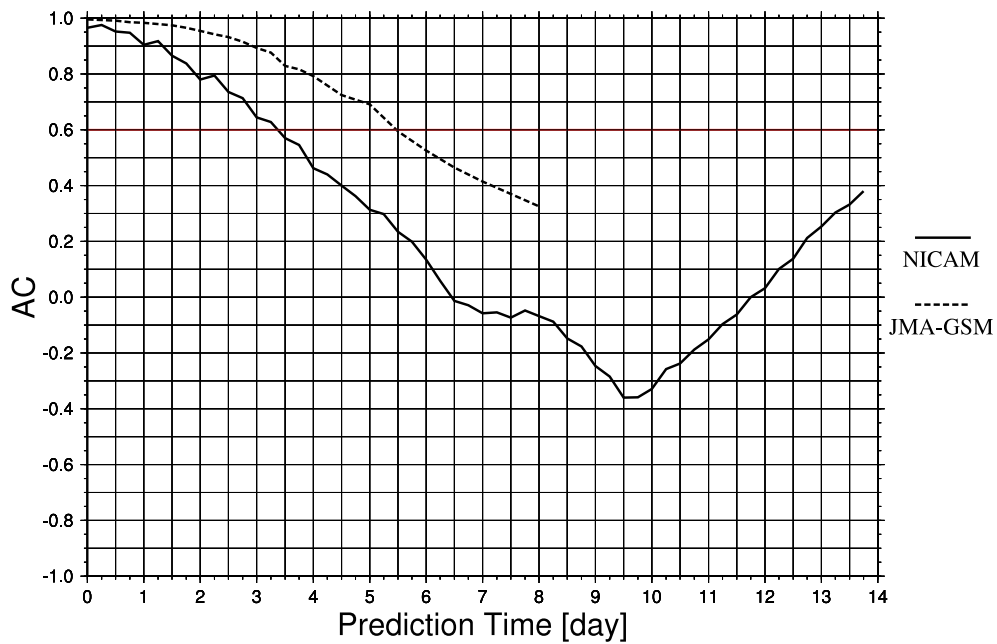


図 36: 2006 年 10 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.11.01.12 z

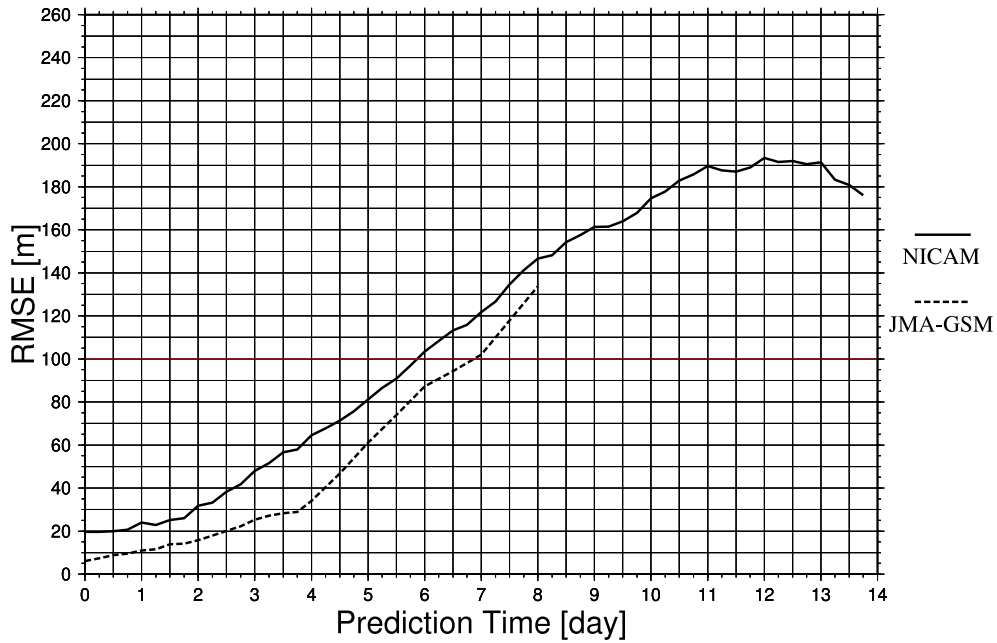


図 37: 2006 年 11 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.11.01.12 z

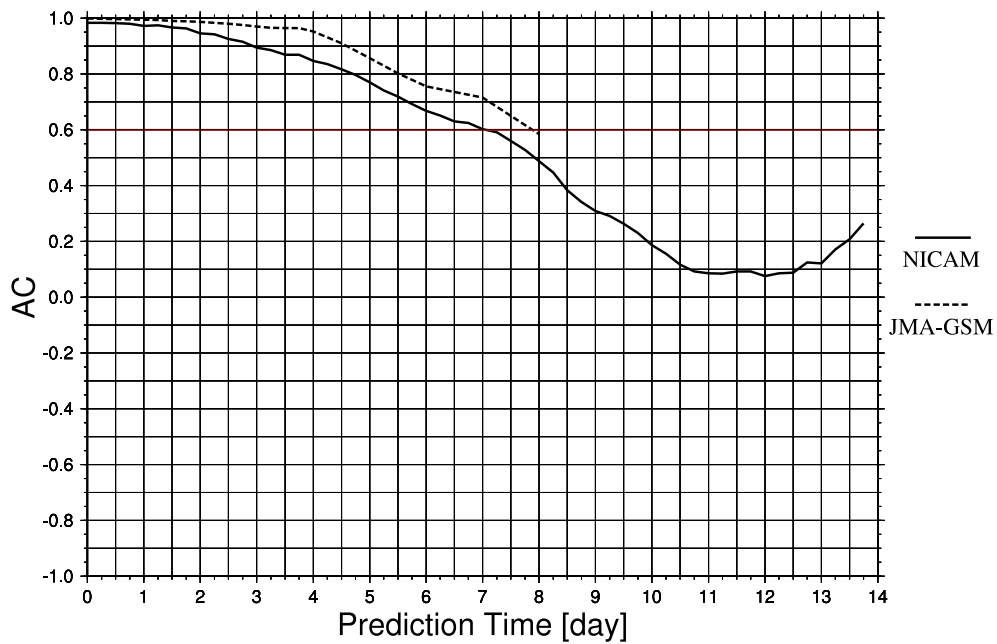


図 38: 2006 年 11 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2006.12.01.12 z

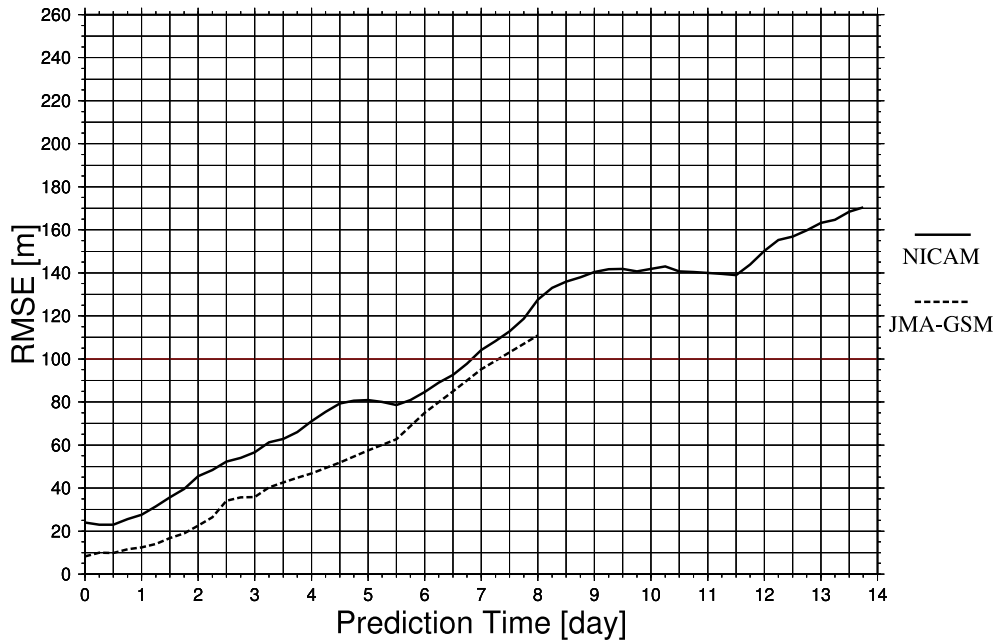


図 39: 2006 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2006.12.01.12 z

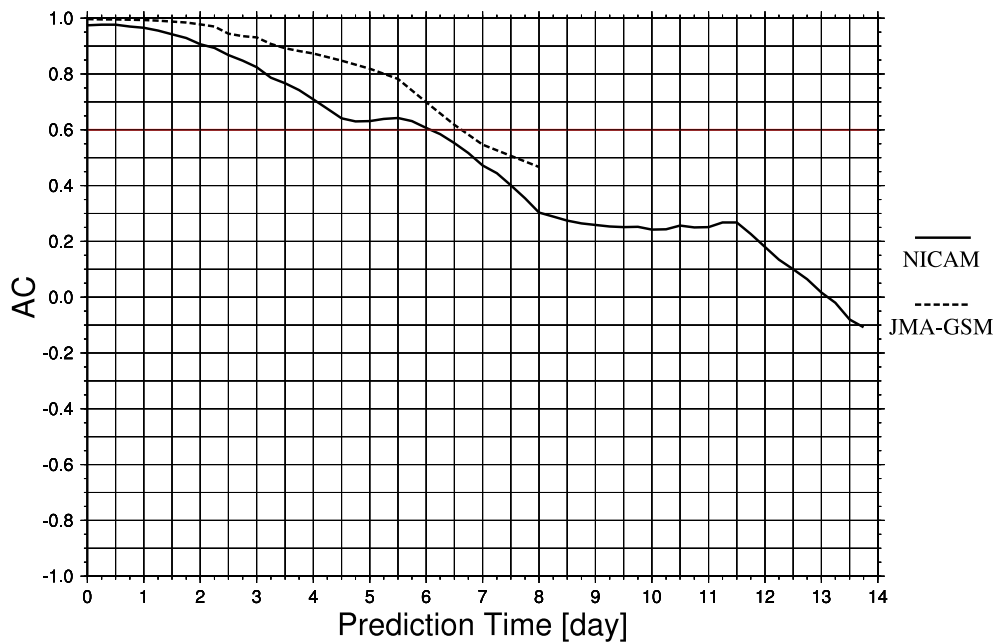


図 40: 2006 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.01.01.12 z

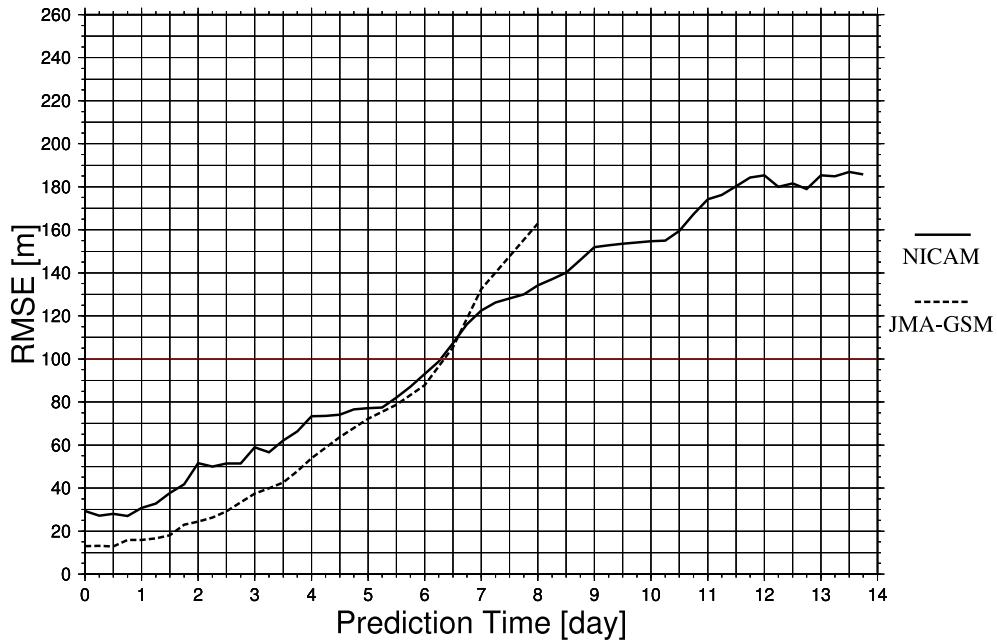


図 41: 2007年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.01.01.12 z

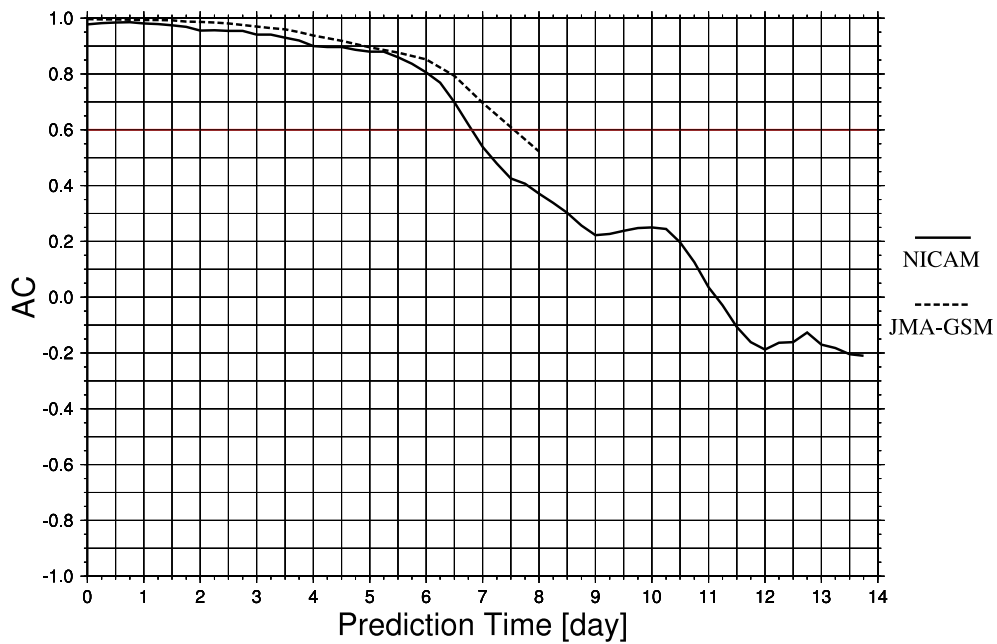


図 42: 2007年01月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.02.01.12 z

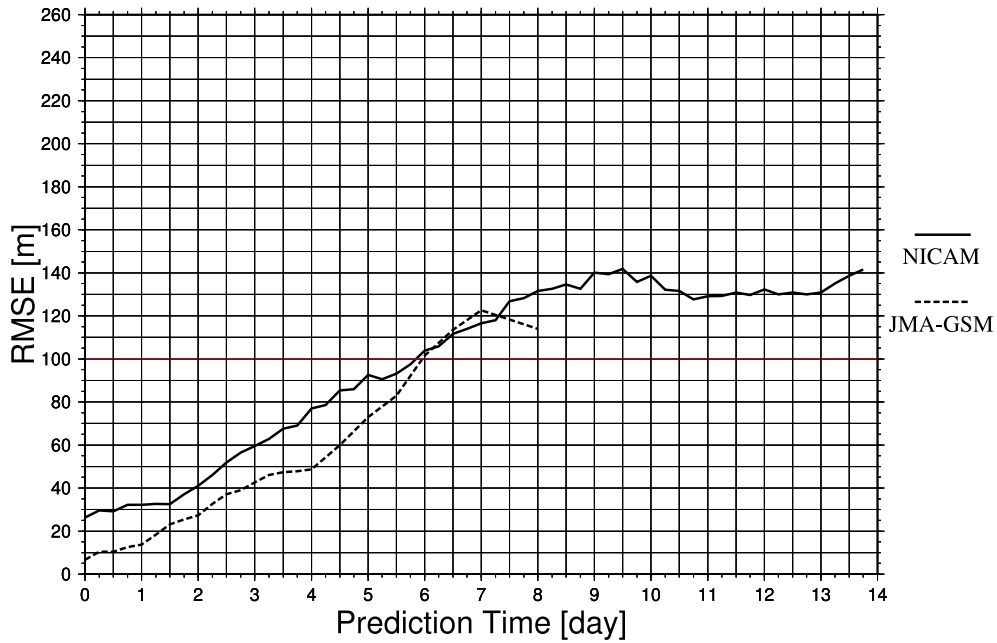


図 43: 2007年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.02.01.12 z

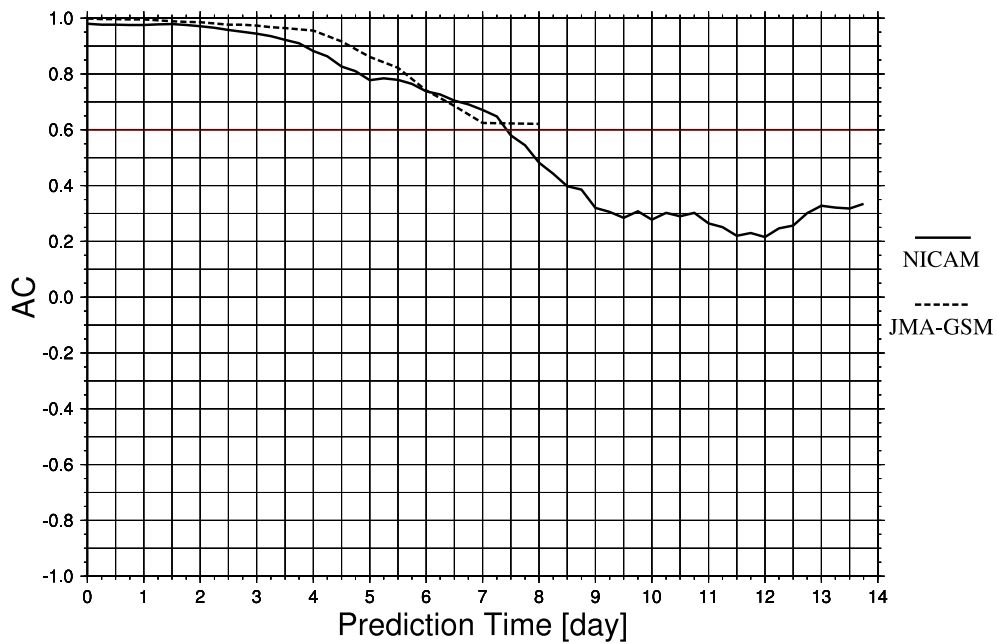


図 44: 2007年02月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.03.01.12 z

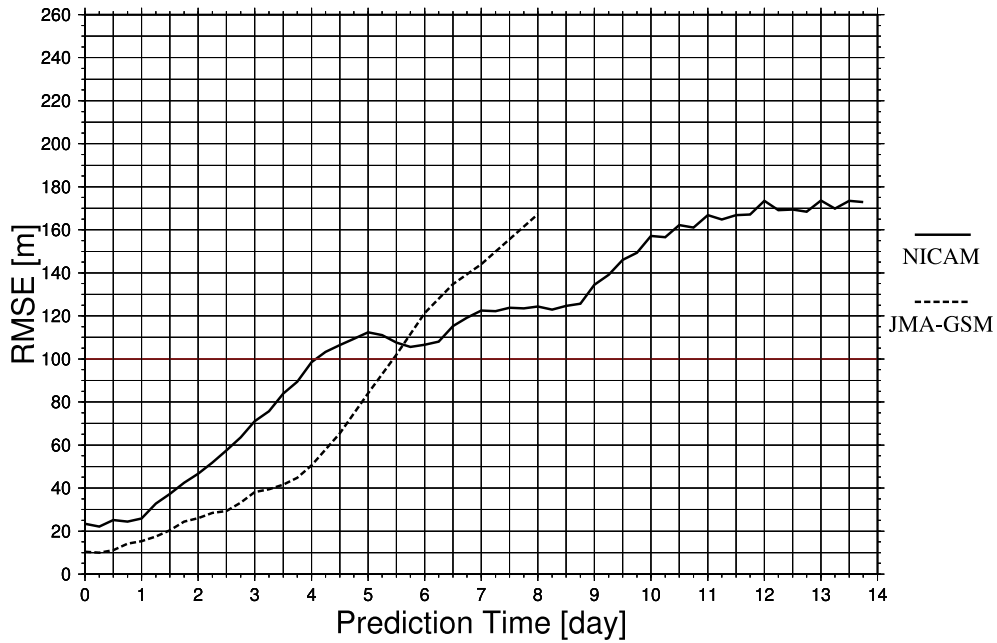


図 45: 2007年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.03.01.12 z

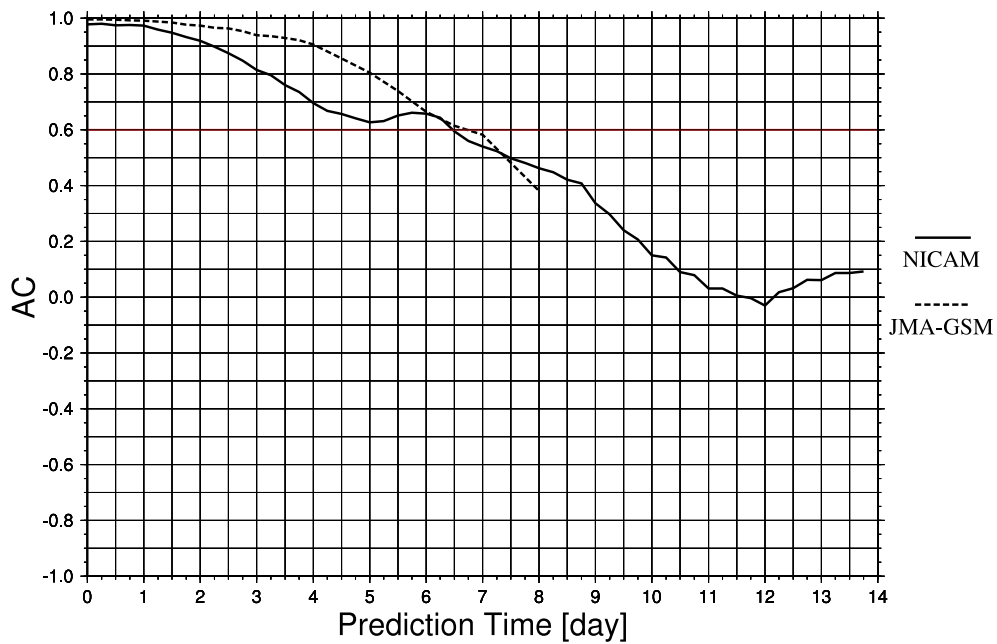


図 46: 2007年03月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.04.01.12 z

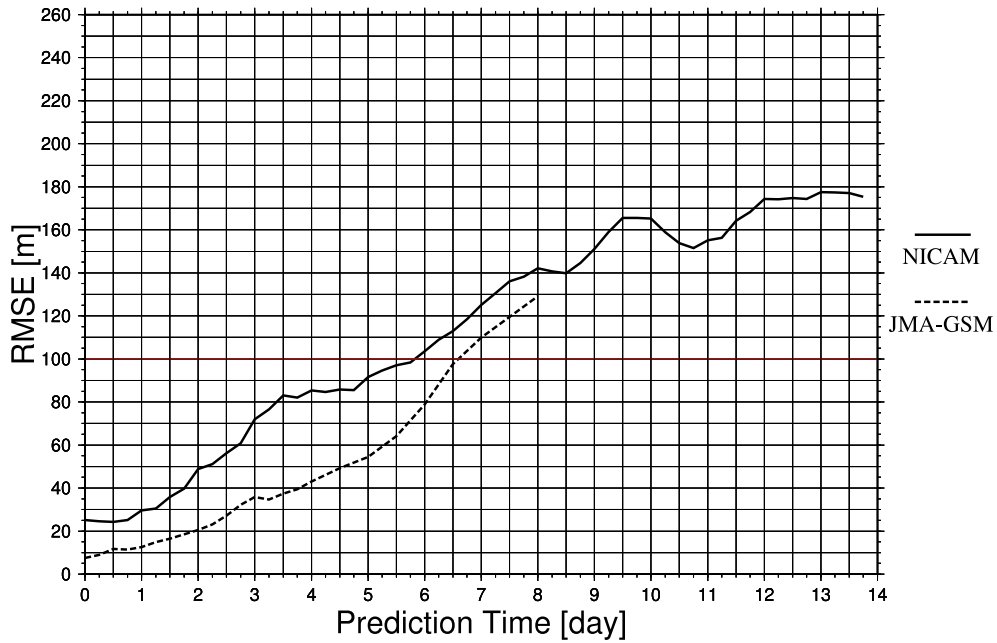


図 47: 2007年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.04.01.12 z

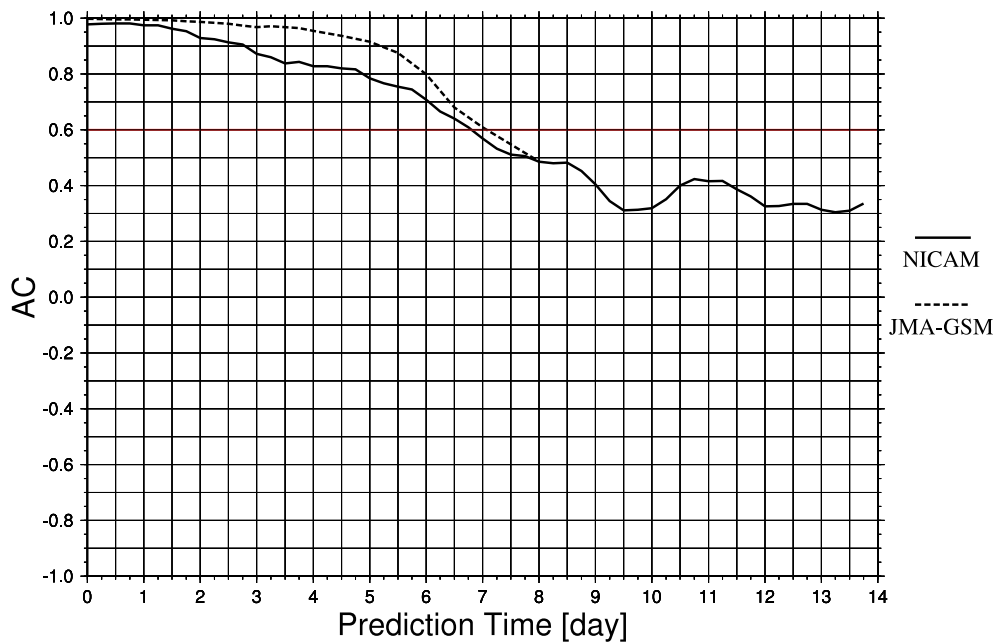


図 48: 2007年04月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.05.01.12 z

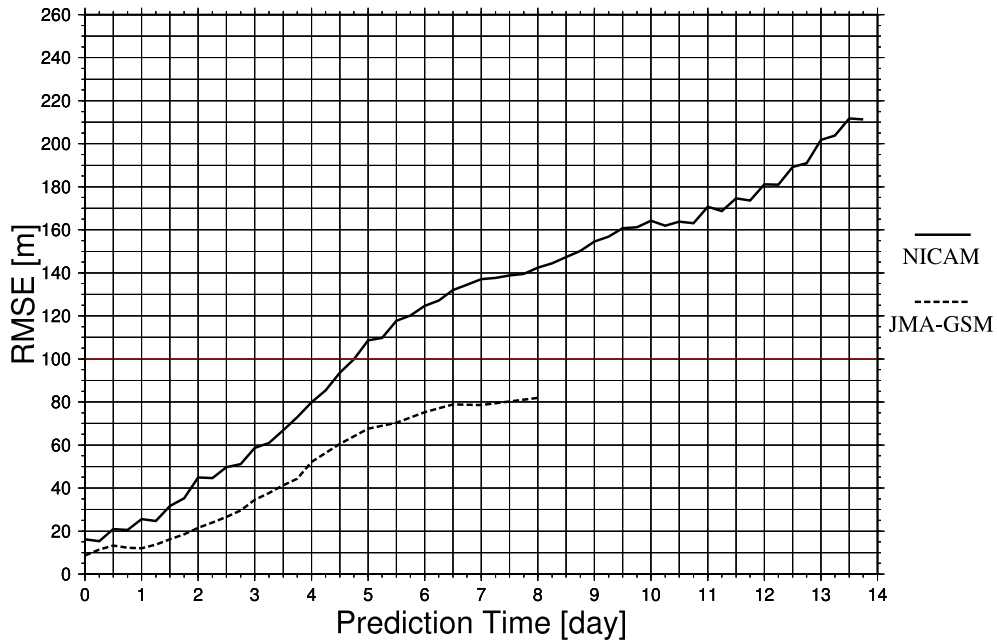


図 49: 2007年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.05.01.12 z

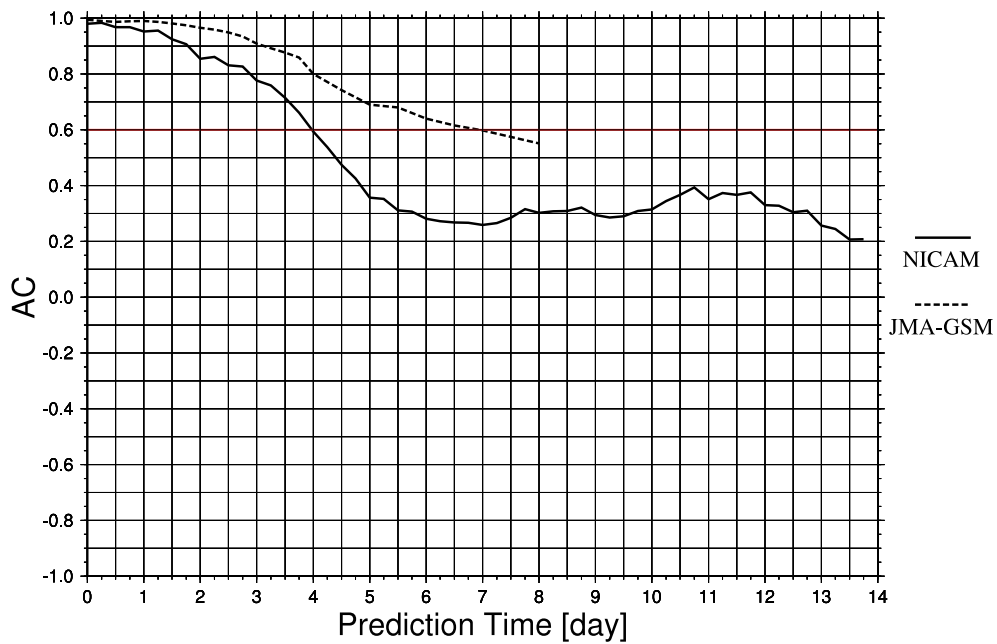


図 50: 2007年05月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.06.01.12 z

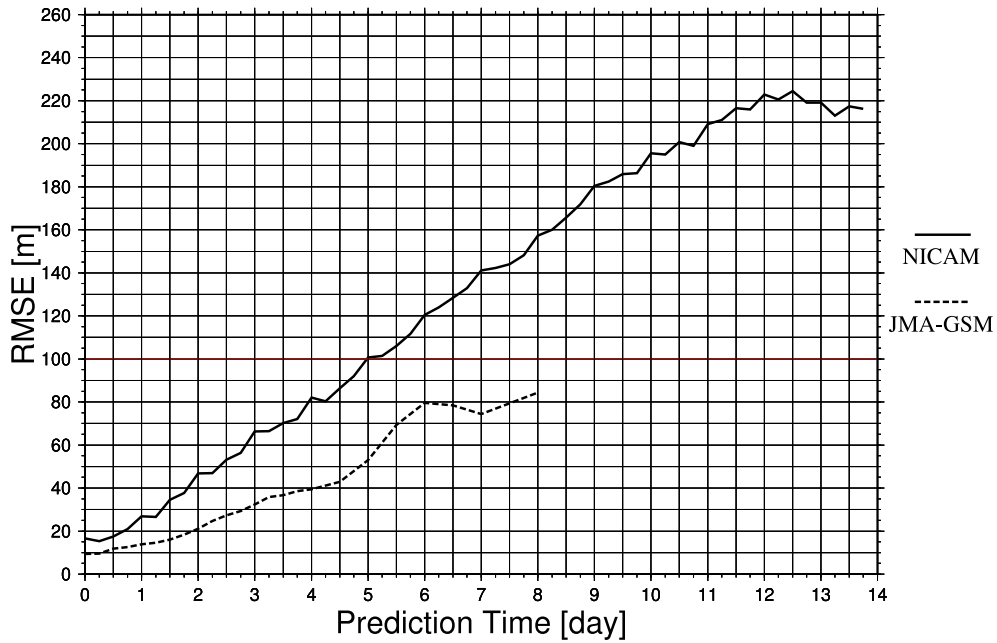


図 51: 2007年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.06.01.12 z

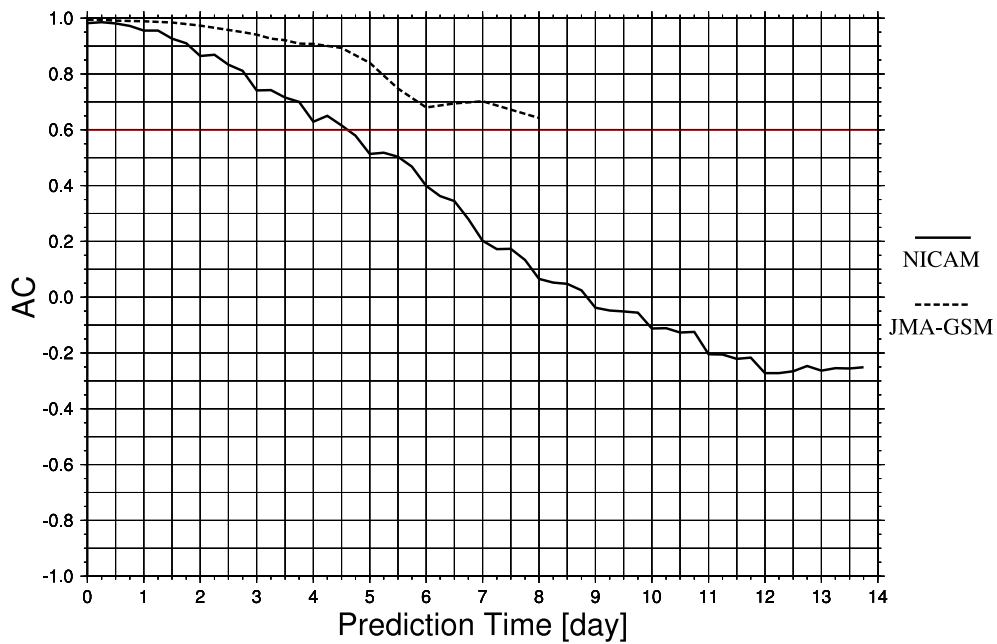


図 52: 2007年06月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.07.01.12 z

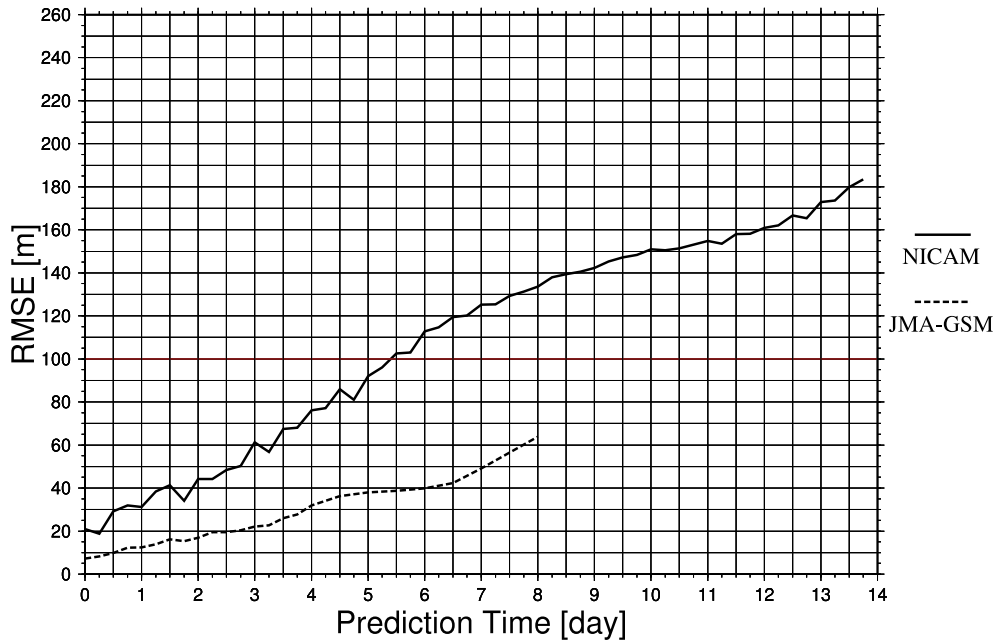


図 53: 2007年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.07.01.12 z

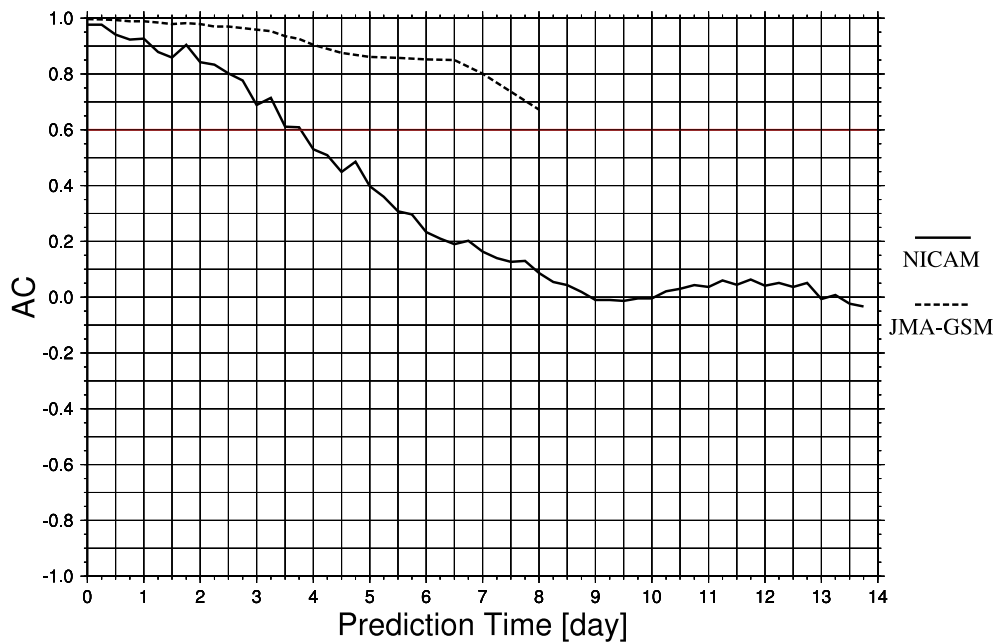


図 54: 2007年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.08.01.12 z

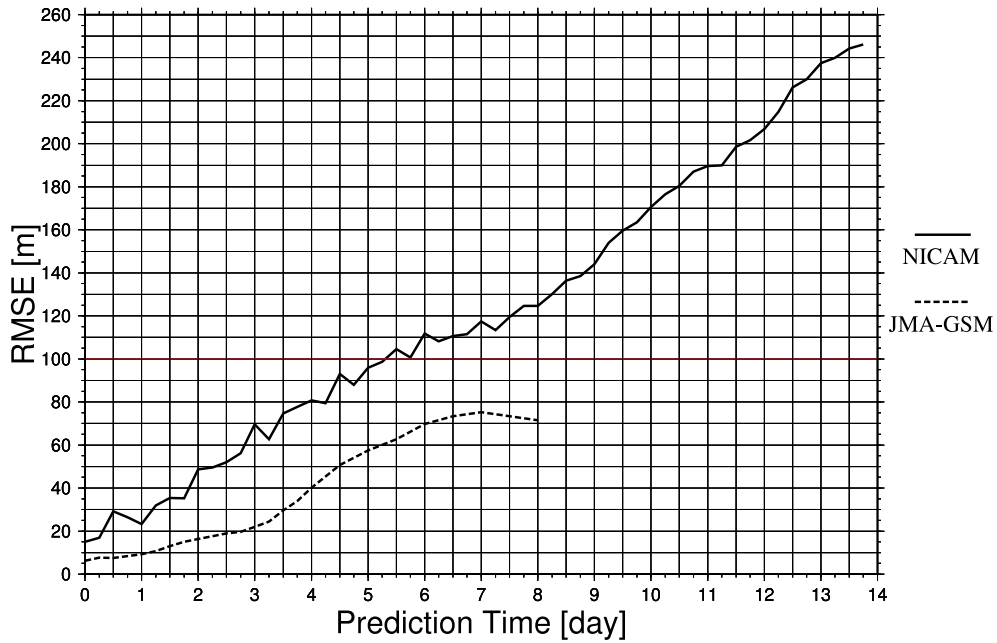


図 55: 2007年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.08.01.12 z

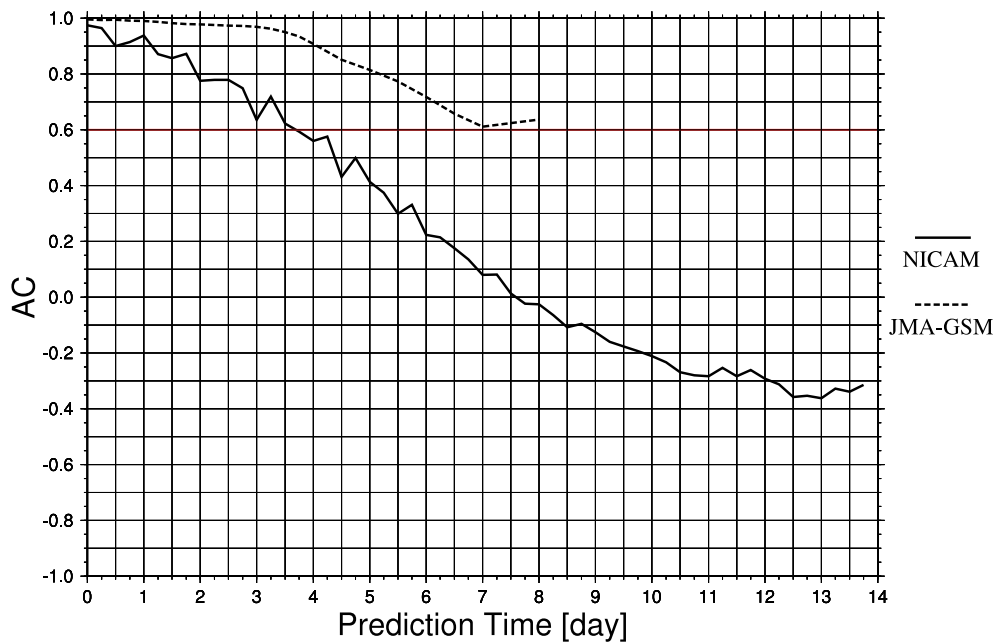


図 56: 2007年08月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.09.01.12 z

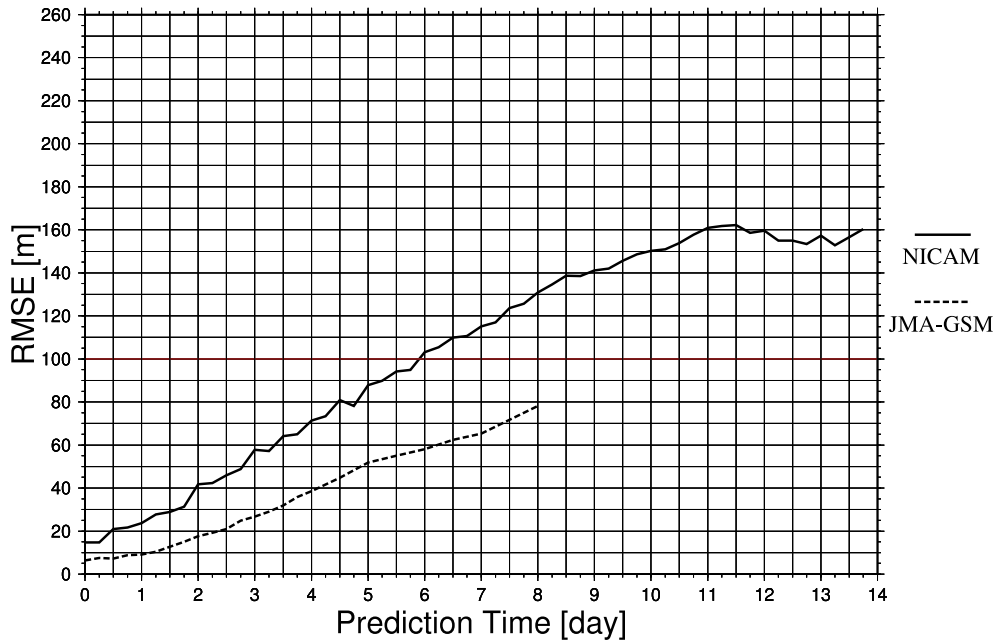


図 57: 2007年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.09.01.12 z

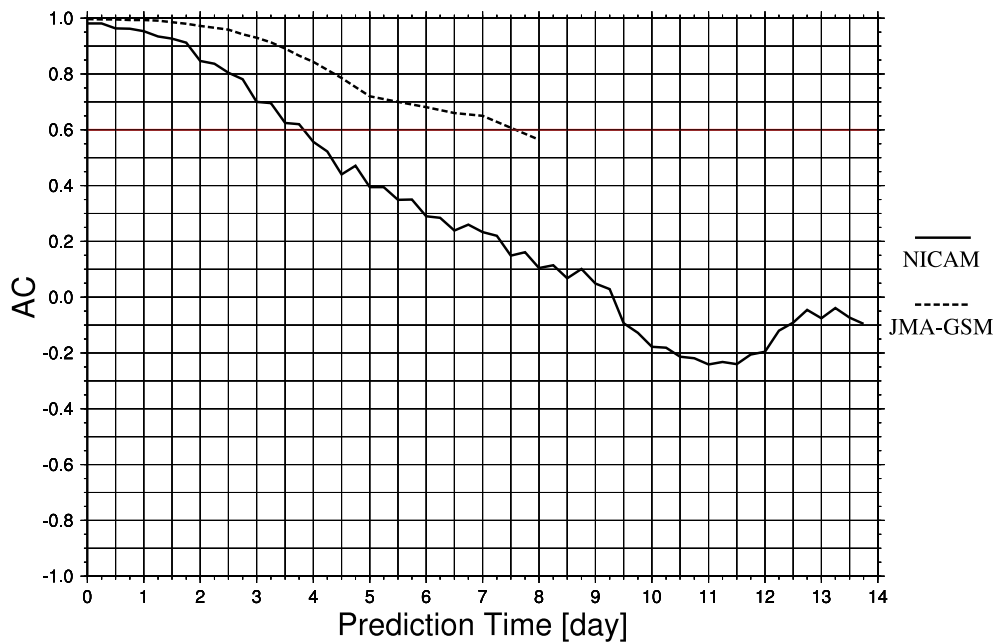


図 58: 2007年09月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.10.01.12 z

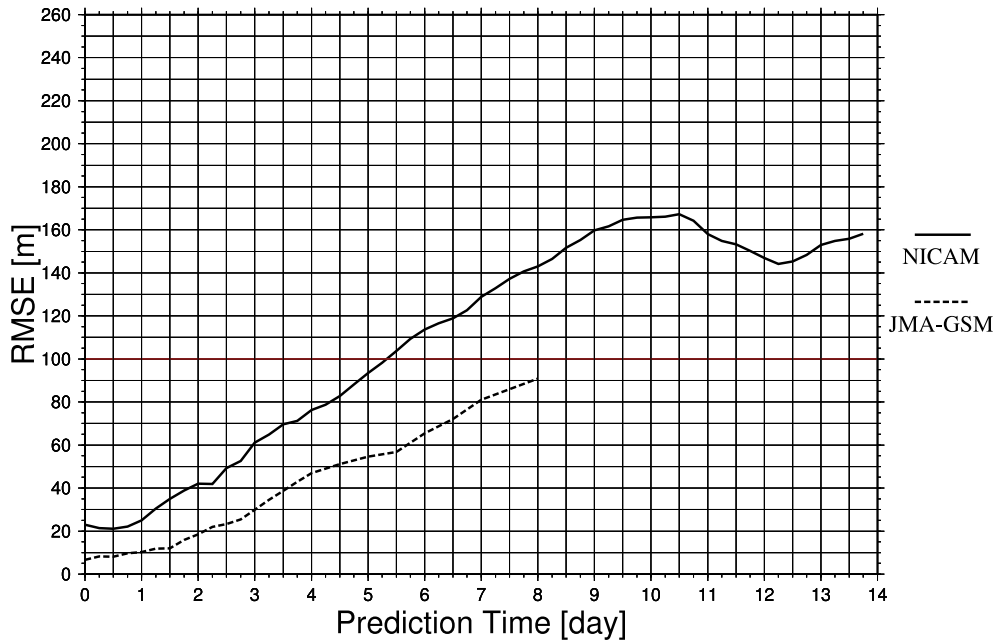


図 59: 2007 年 10 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.10.01.12 z

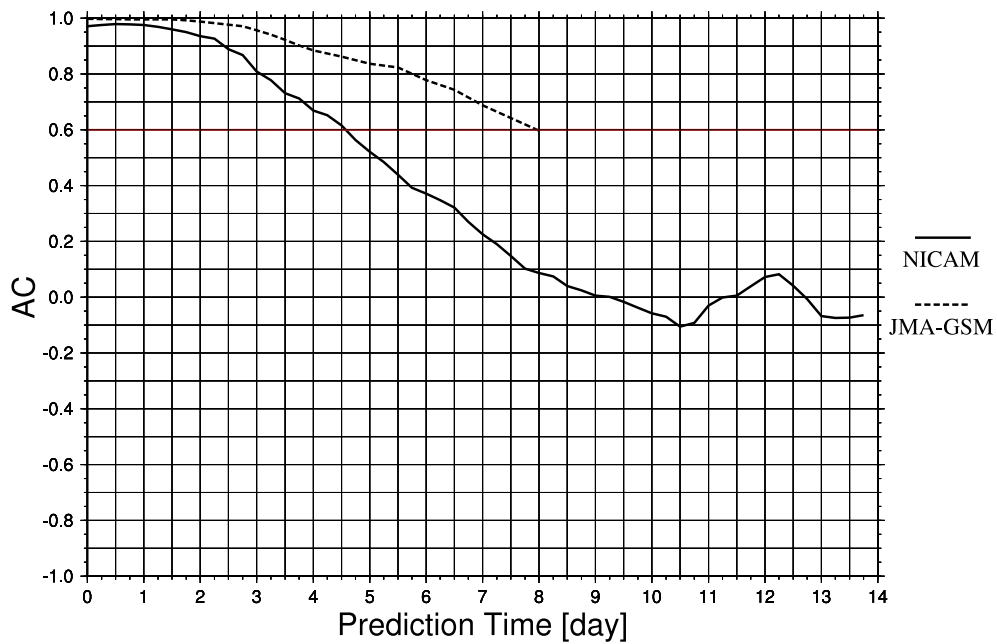


図 60: 2007 年 10 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

Initial 2007.11.01.12 z

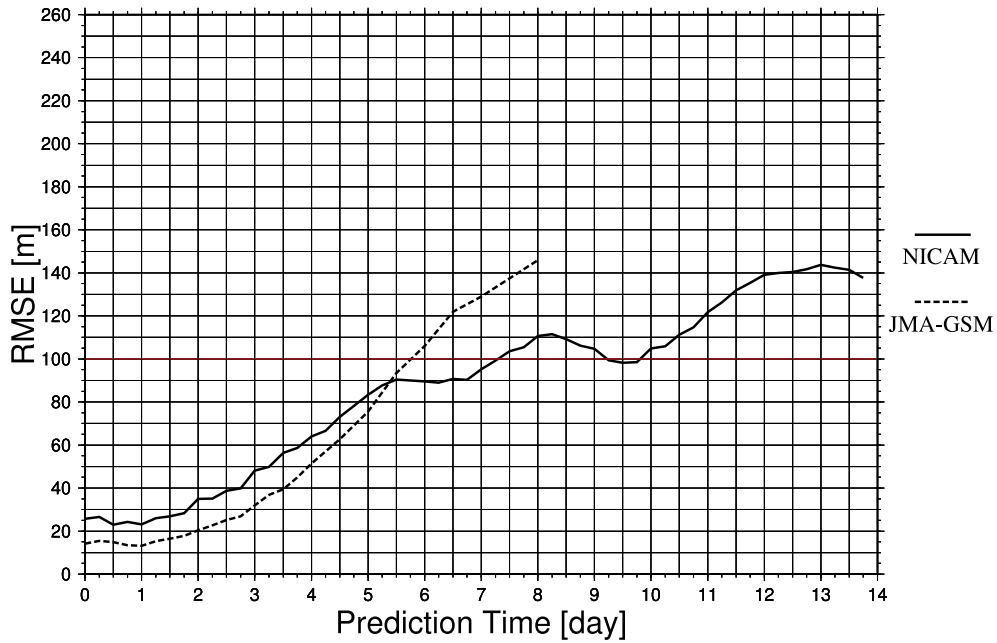


図 61: 2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するRMSEの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

Initial 2007.11.01.12 z

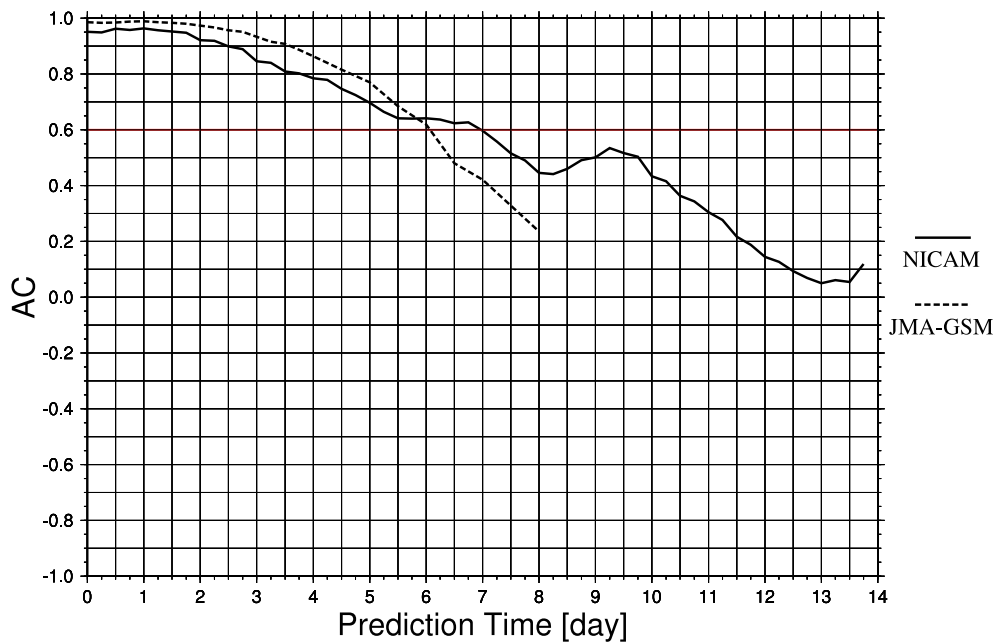


図 62: 2007年11月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の14日予報に対するACの時系列図(実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

2006 & 2007 DJF

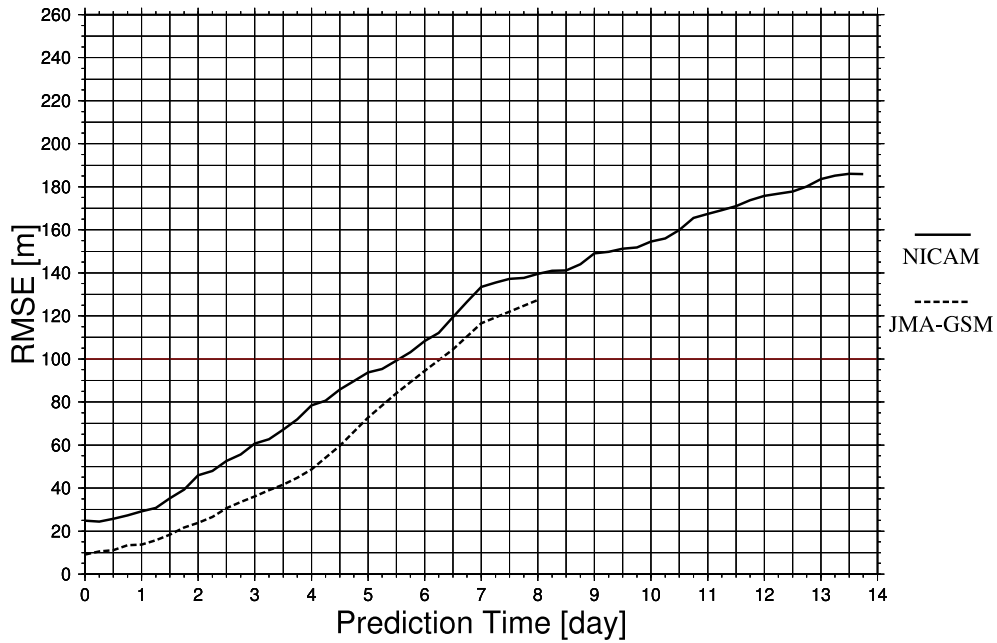


図 63: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 冬 (DJF) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

2006 & 2007 DJF

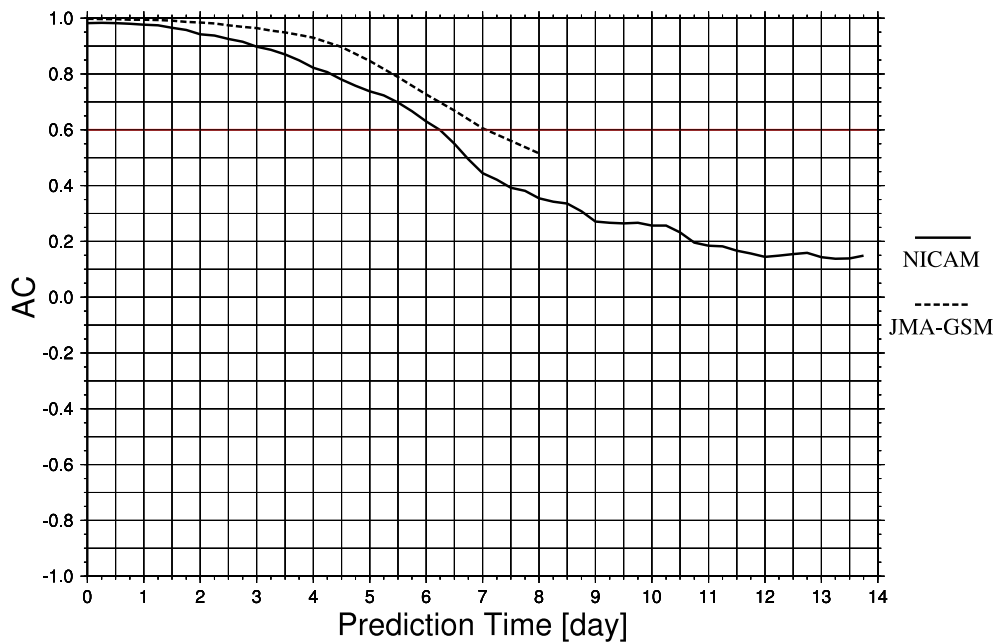


図 64: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 冬 (DJF) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

2006 & 2007 MAM

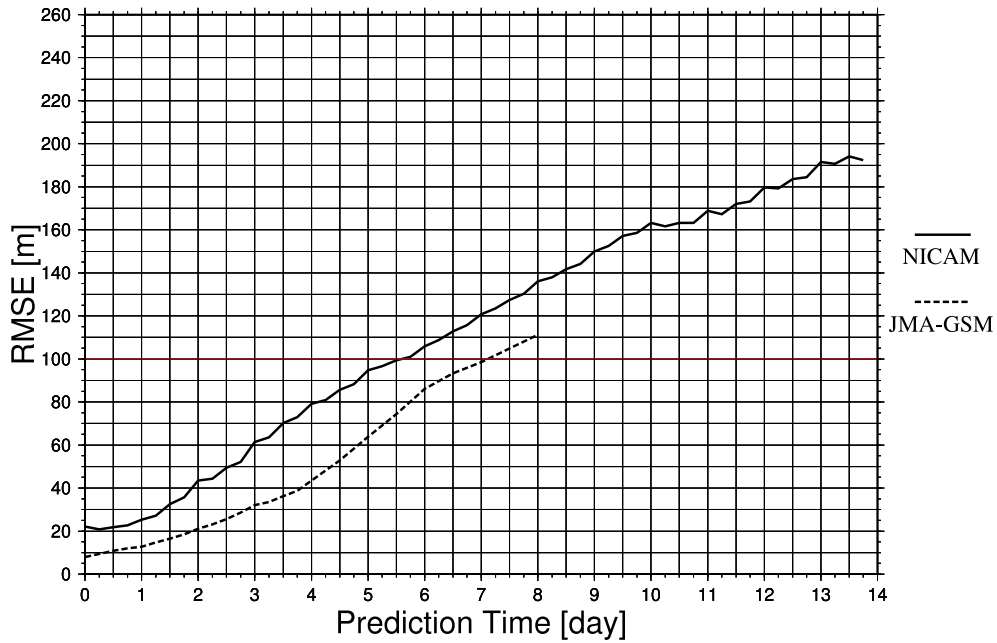


図 65: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 春 (MAM) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

2006 & 2007 MAM

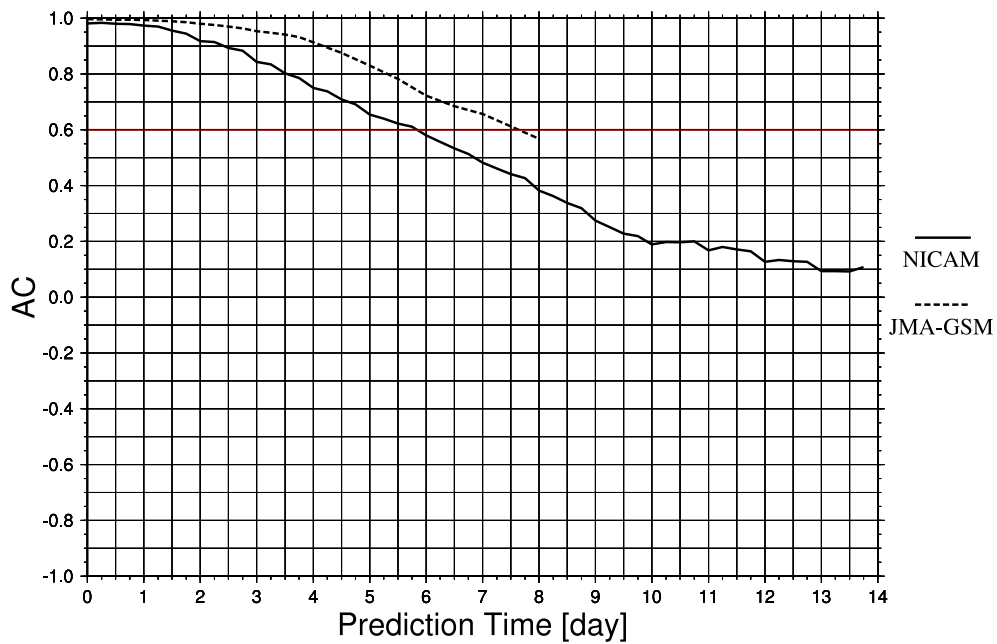


図 66: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 春 (MAM) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

2006 & 2007 JJA

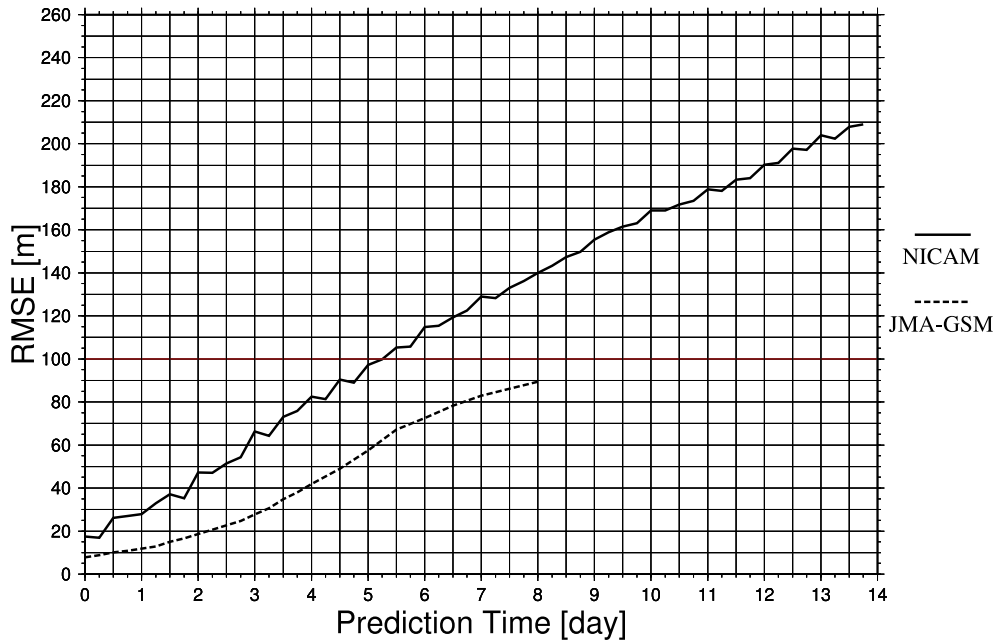


図 67: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

2006 & 2007 JJA

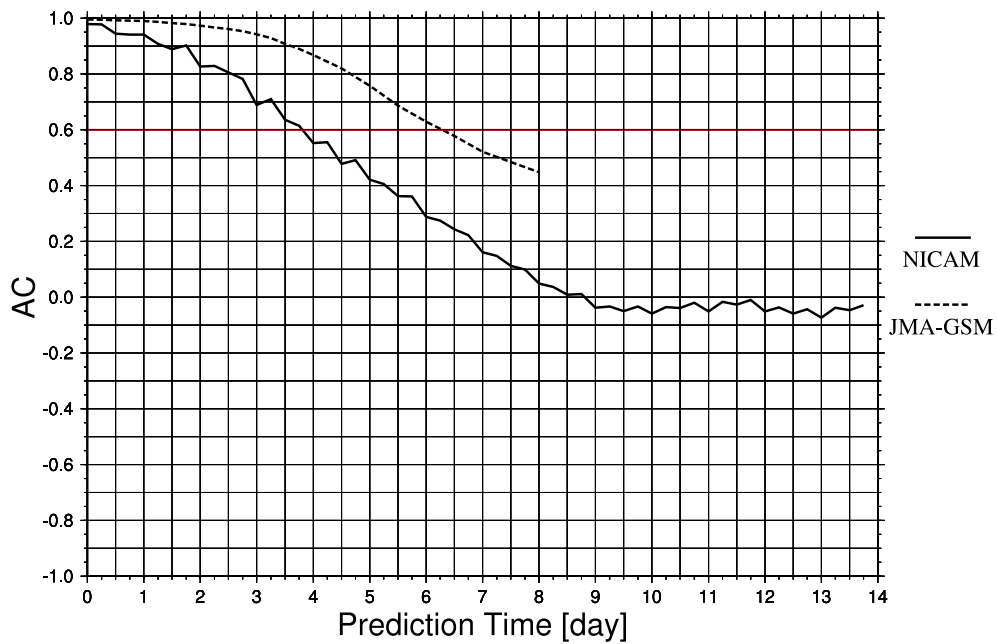


図 68: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

RMSE at 500 hPa Height

2006 & 2007 SON

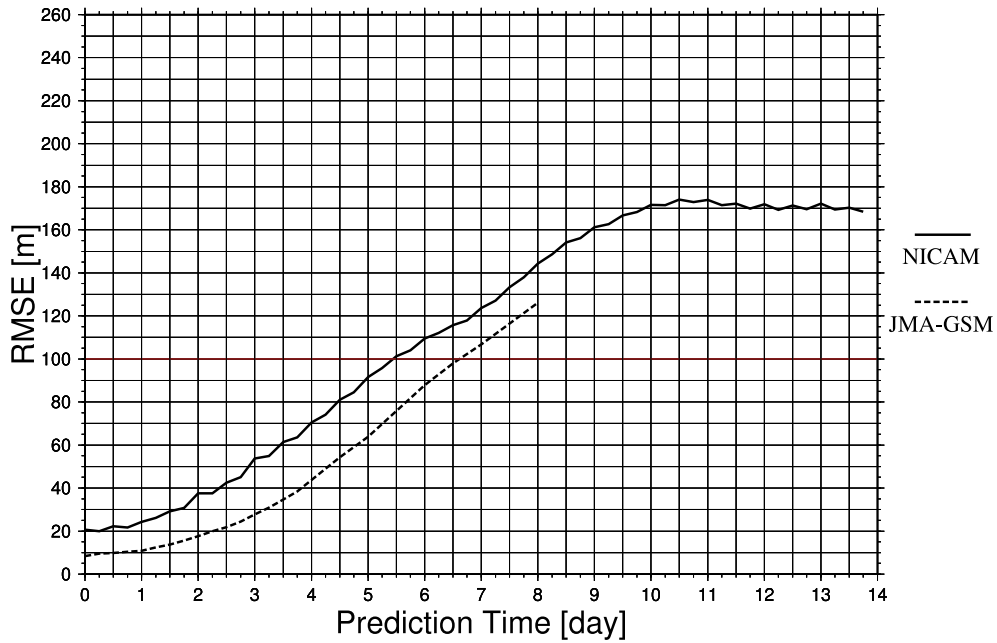


図 69: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 秋 (SON) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height

2006 & 2007 SON

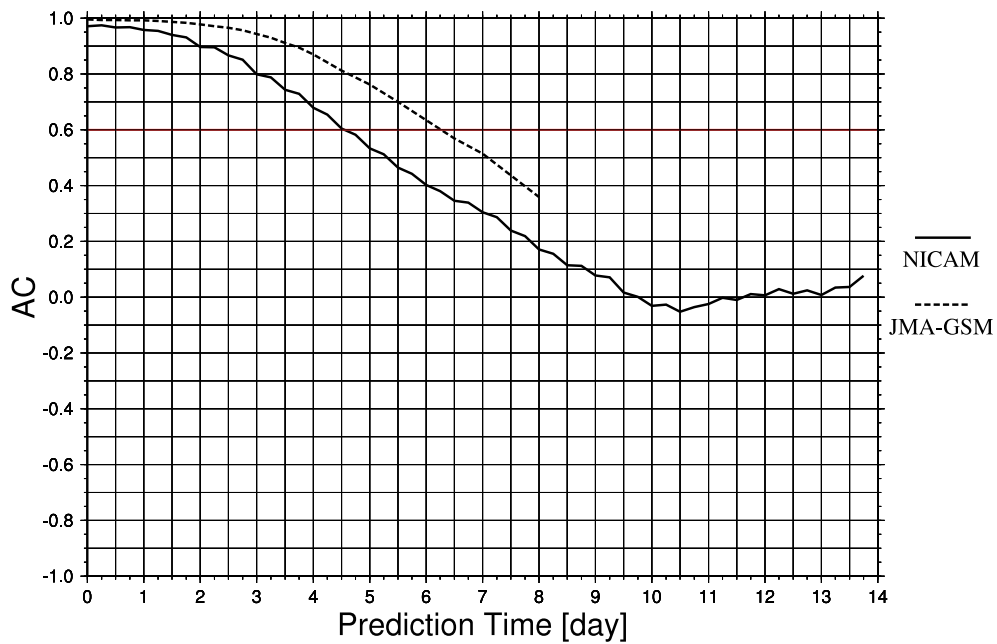


図 70: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 秋 (SON) - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

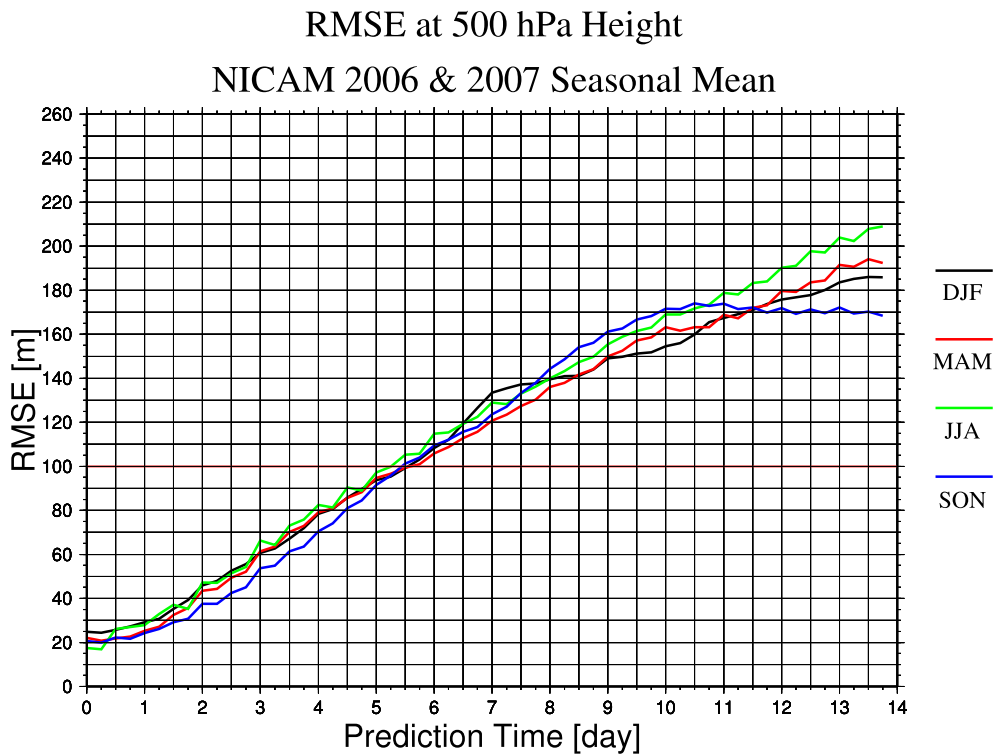


図 71: NICAM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])

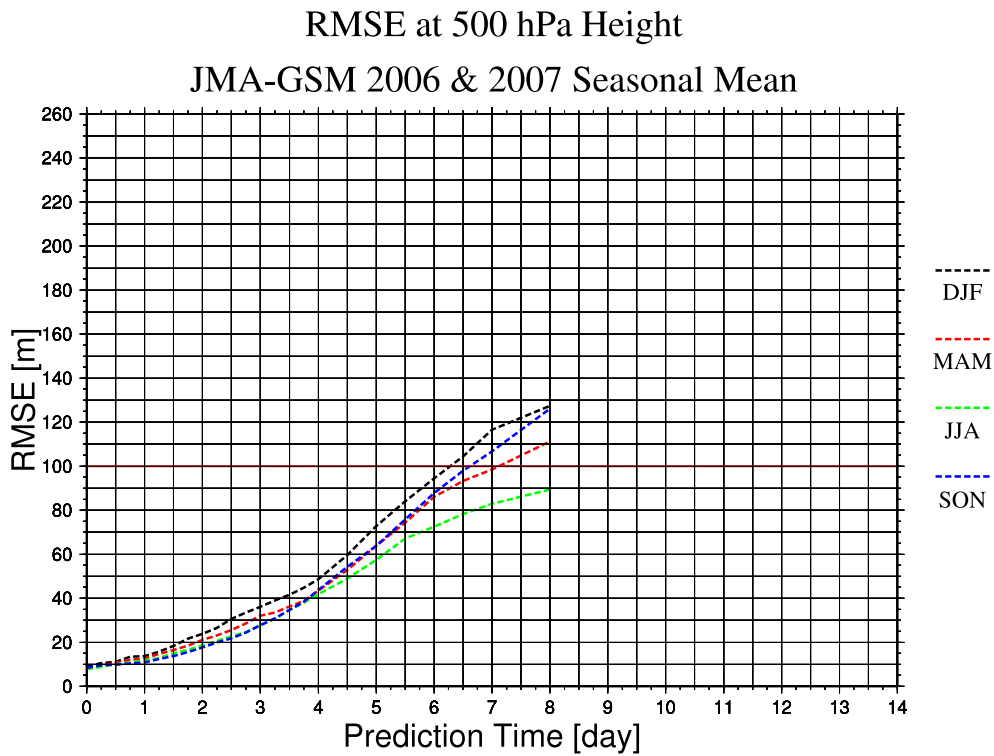


図 72: JMA-GSM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])

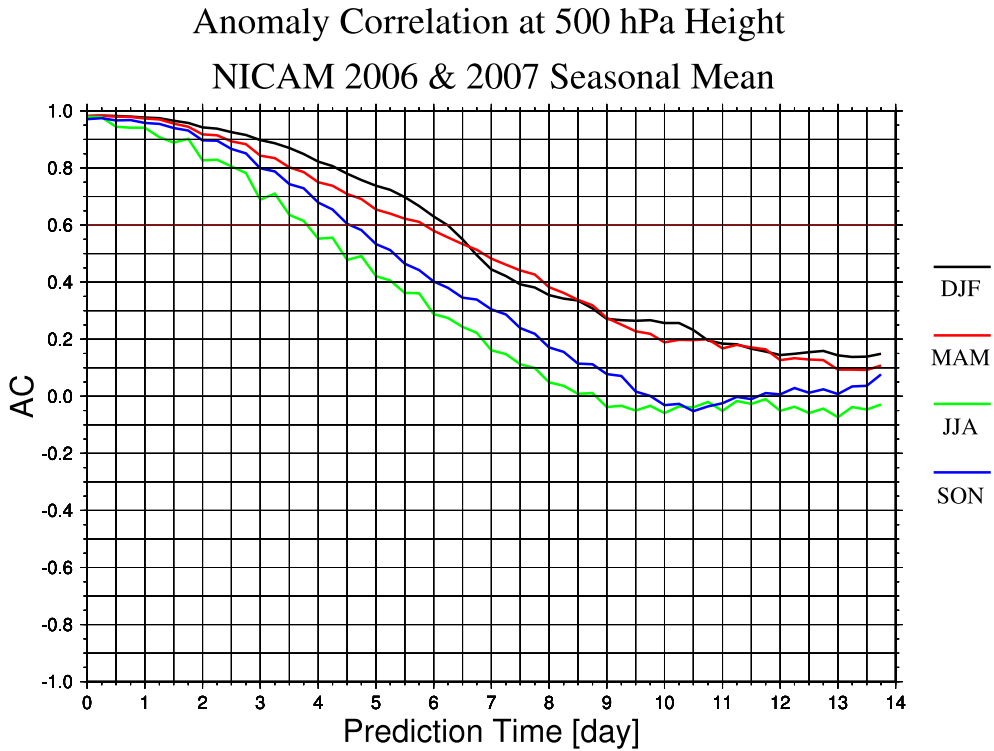


図 73: NICAM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])

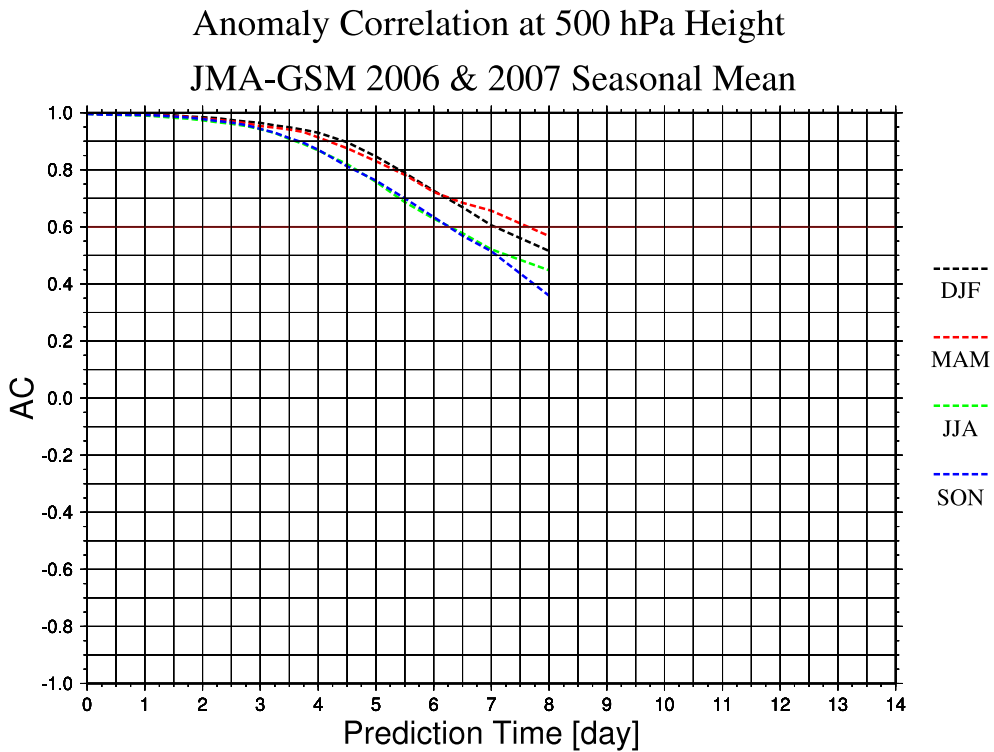


図 74: JMA-GSM における季節平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 - (黒:冬 [DJF], 赤:春 [MAM], 緑:夏 [JJA], 青:秋 [SON])

RMSE at 500 hPa Height
2006 & 2007 Annual Mean

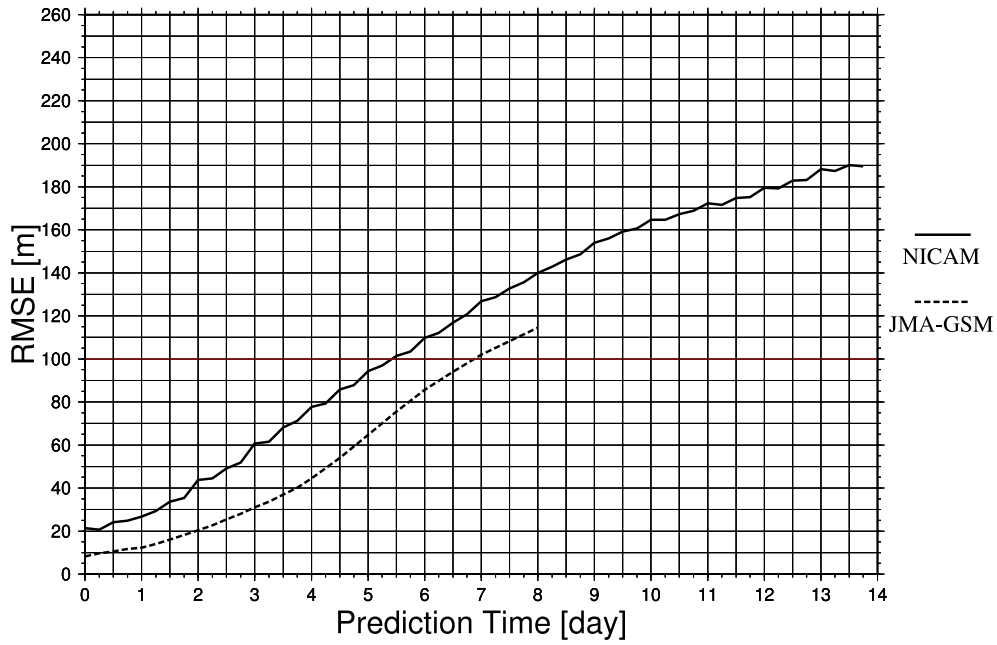


図 75: 年平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する RMSE の時系列図 - 2006 & 2007 - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

Anomaly Correlation at 500 hPa Height
2006 & 2007 Annual Mean

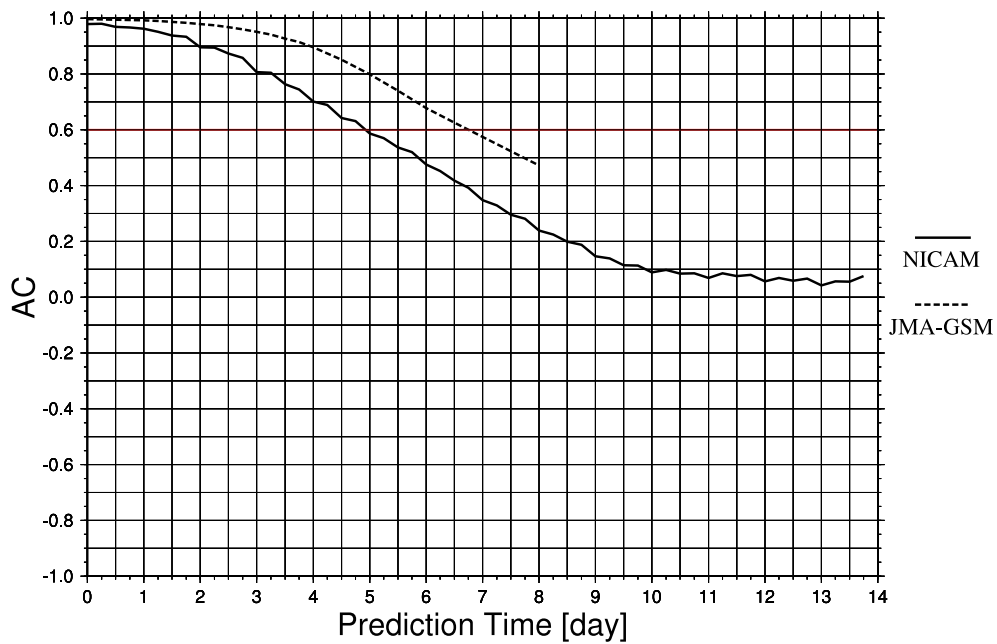


図 76: 年平均した北半球 500hPa 高度場の 14 日予報に対する AC の時系列図 - 2006 & 2007 - (実線:NICAM, 破線:JMA-GSM)

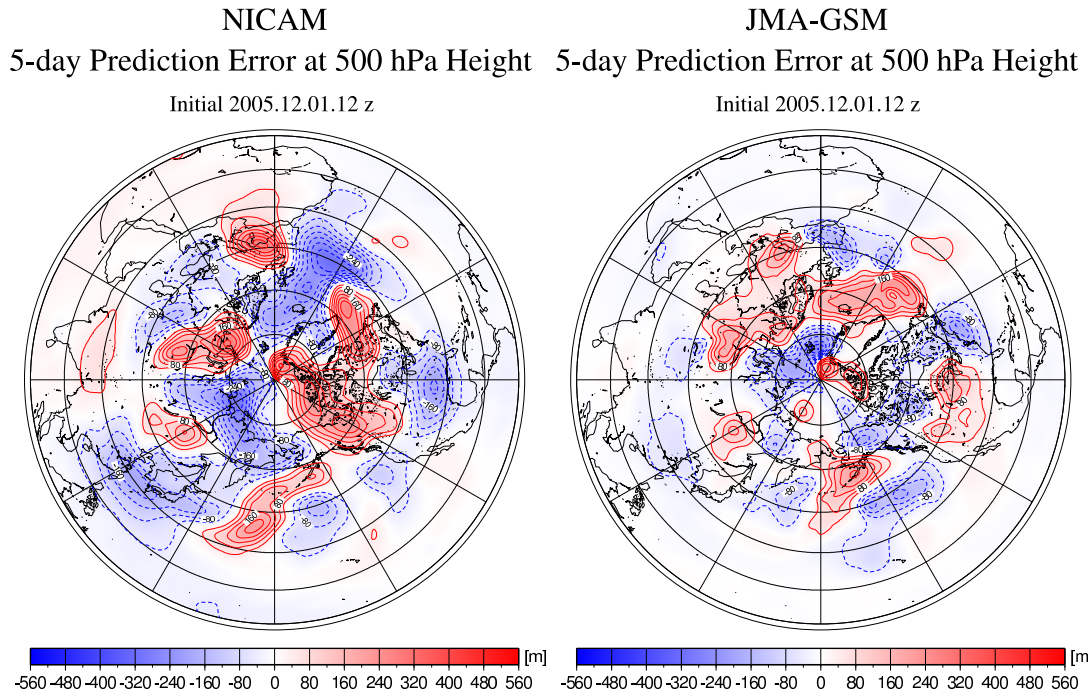


図 77: 2005 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

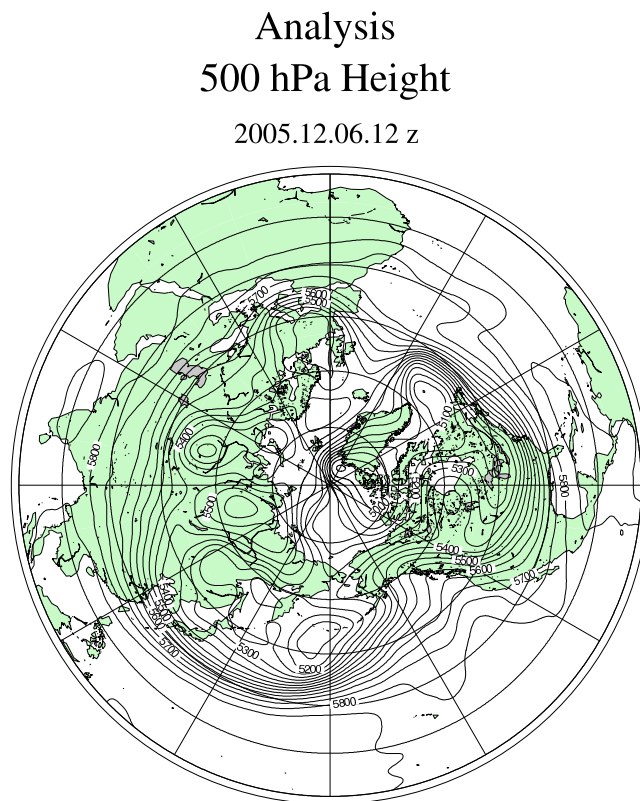


図 78: 2005 年 12 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

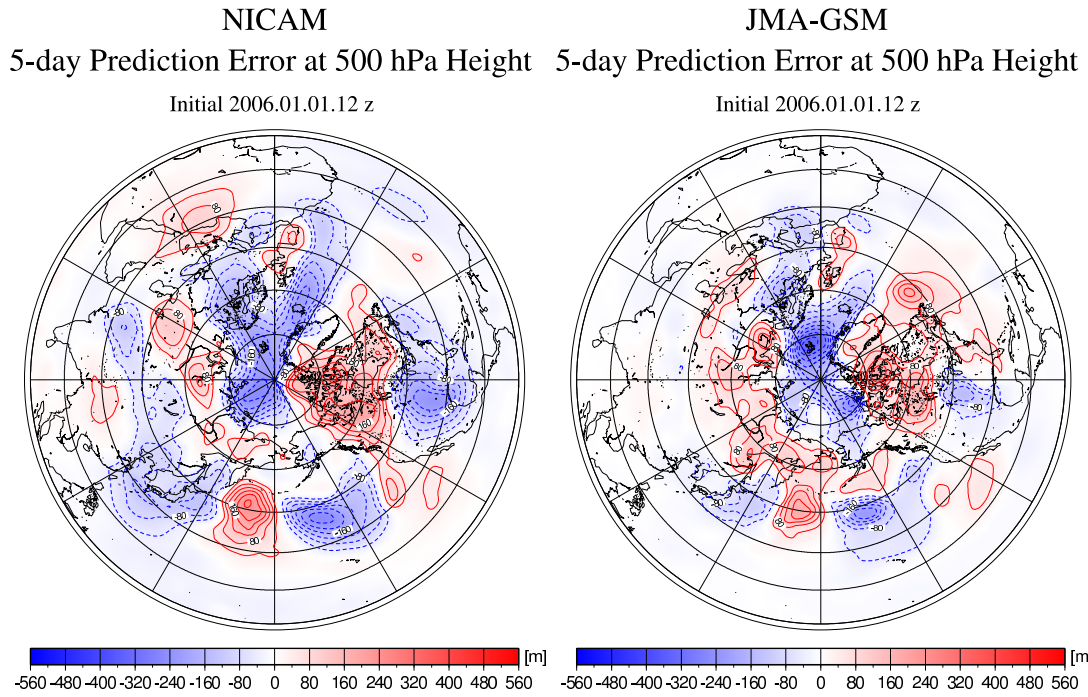


図 79: 2006 年 01 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

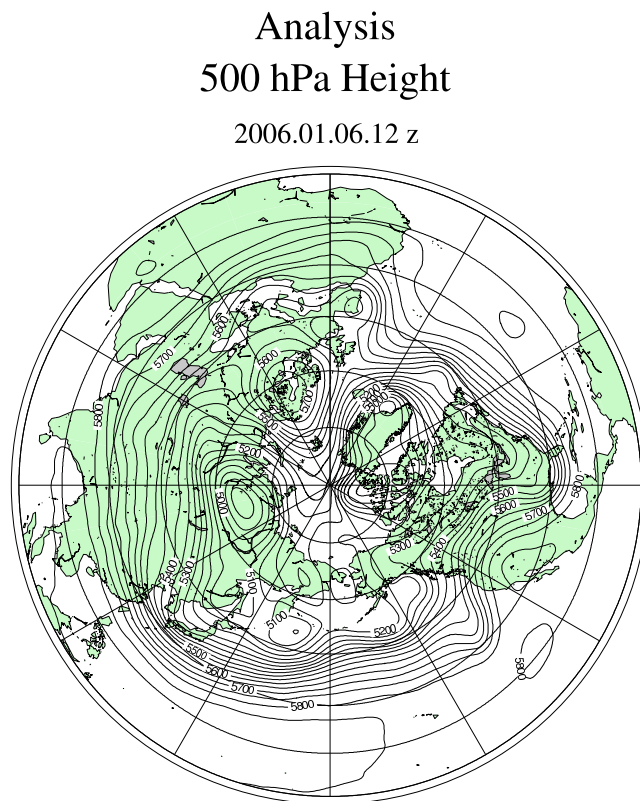


図 80: 2006 年 01 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

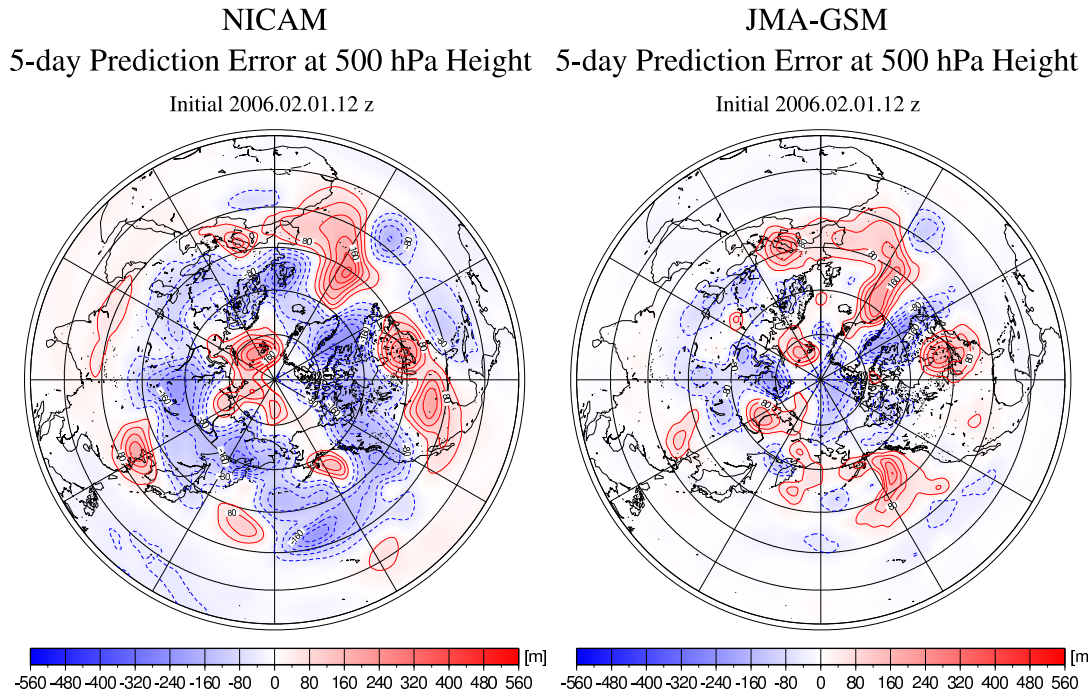


図 81: 2006 年 02 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

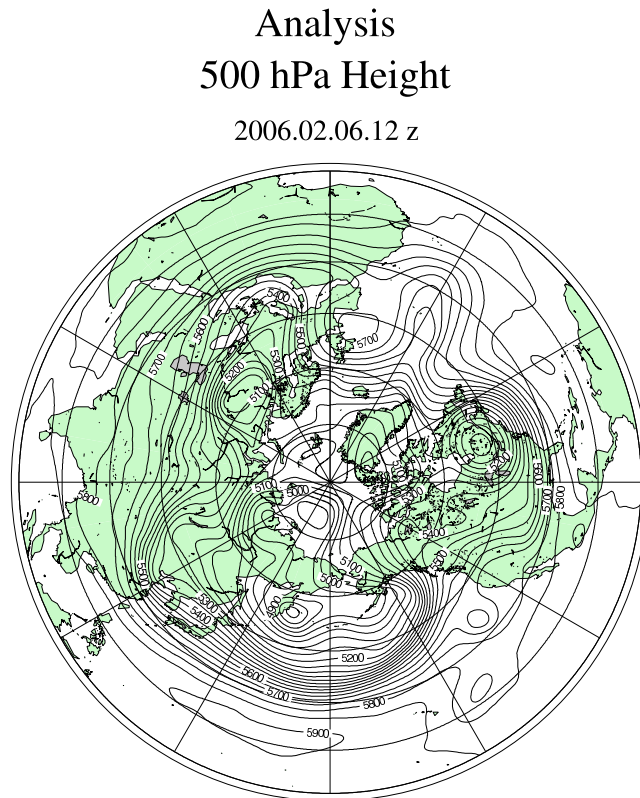


図 82: 2006 年 02 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

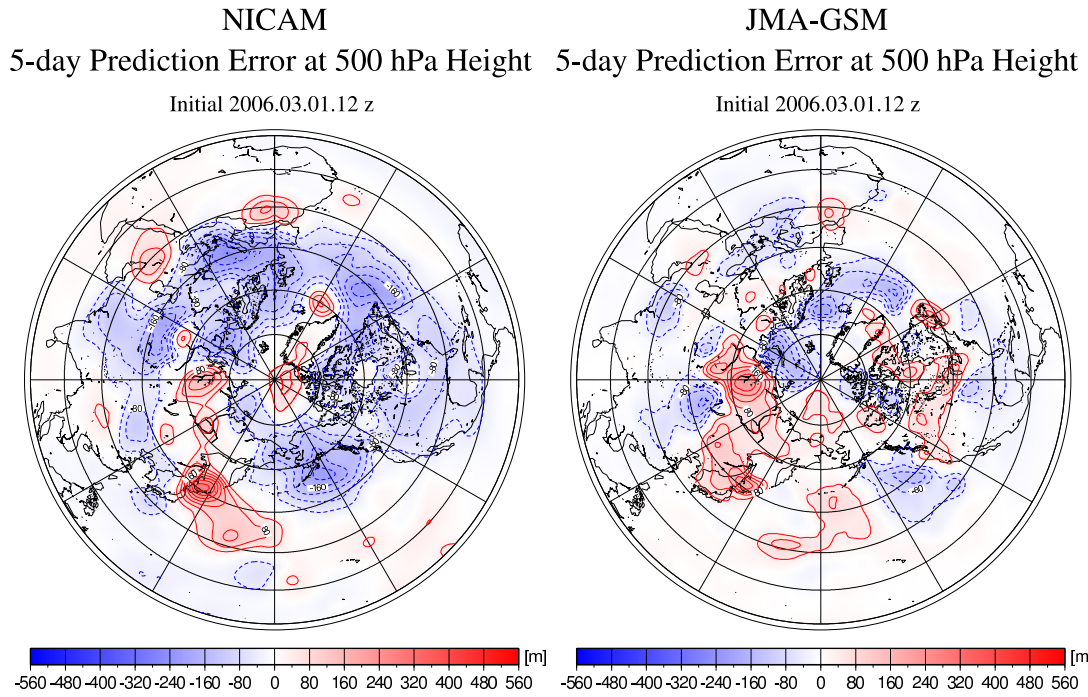


図 83: 2006 年 03 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

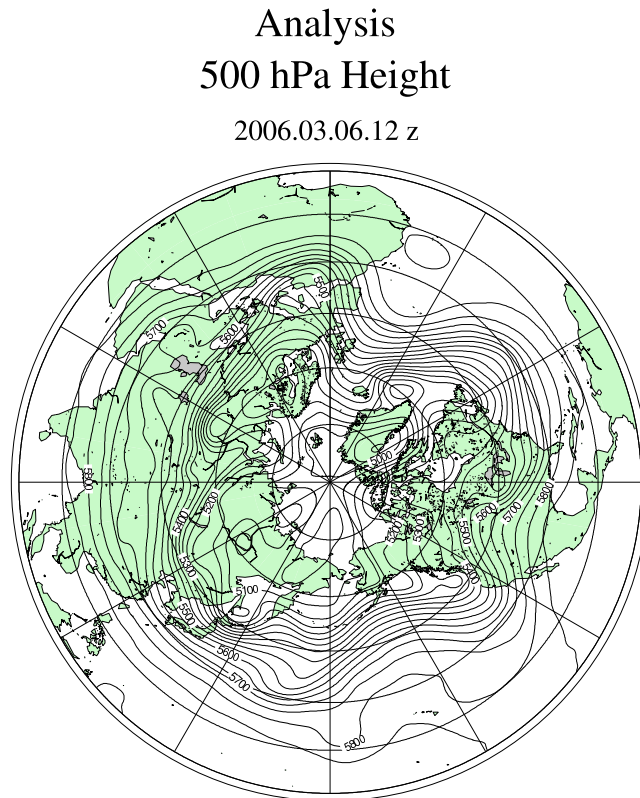


図 84: 2006 年 03 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

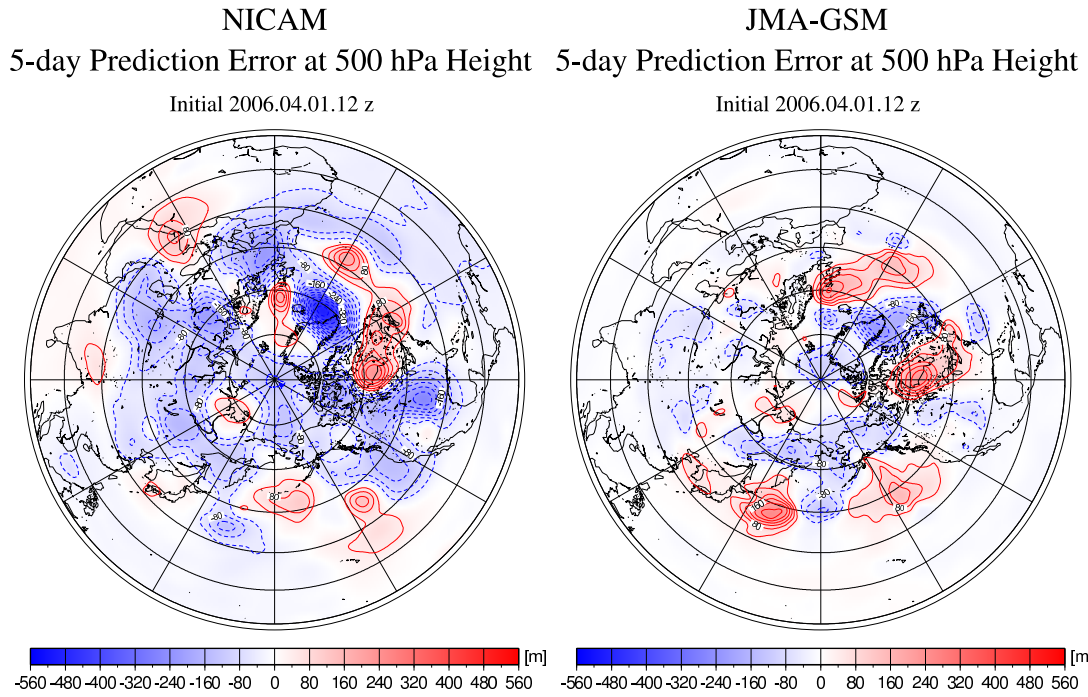


図 85: 2006 年 04 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

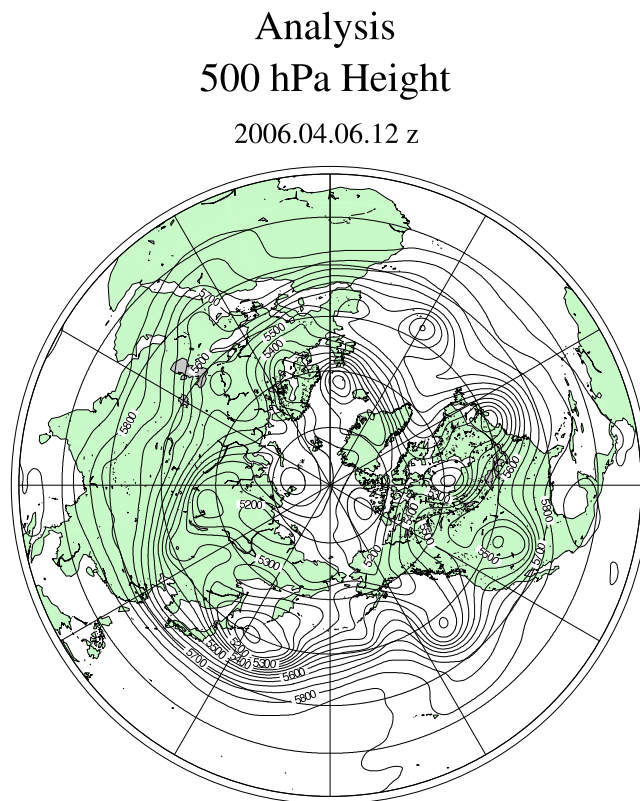


図 86: 2006 年 04 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

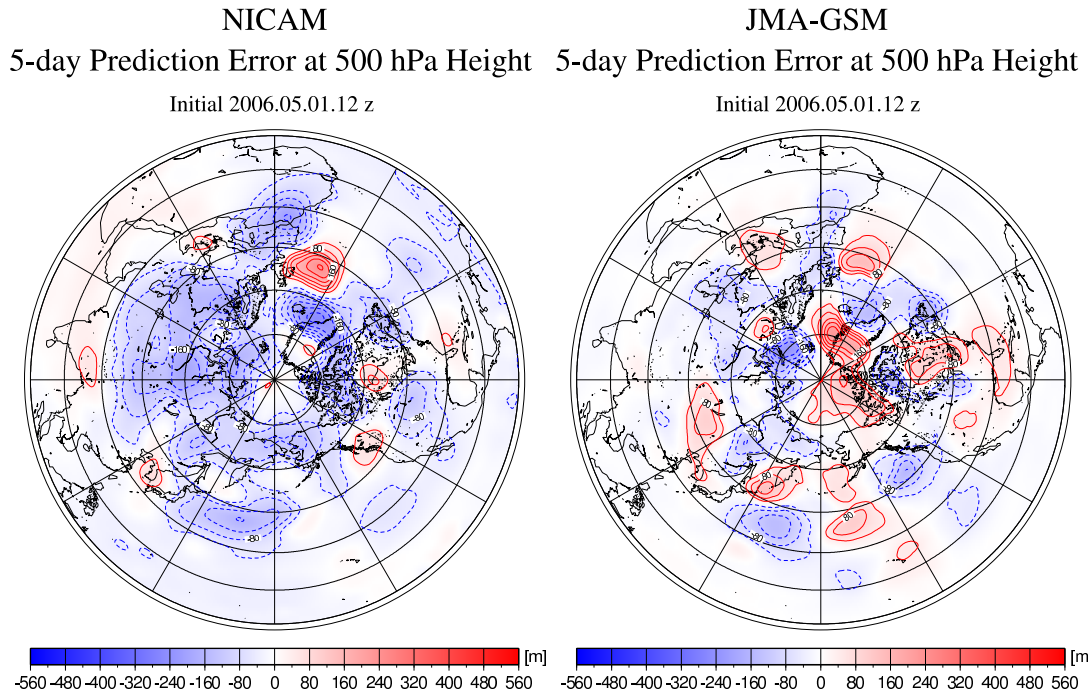


図 87: 2006 年 05 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

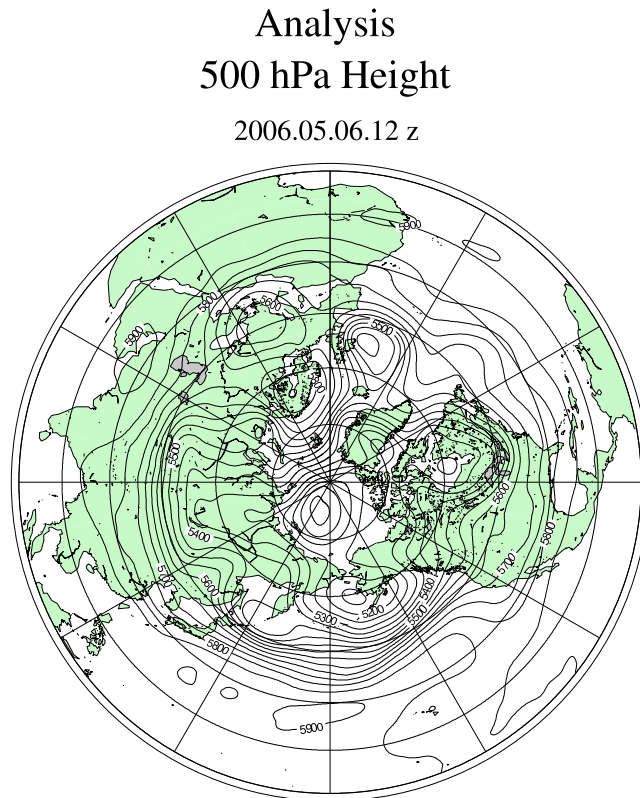


図 88: 2006 年 05 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

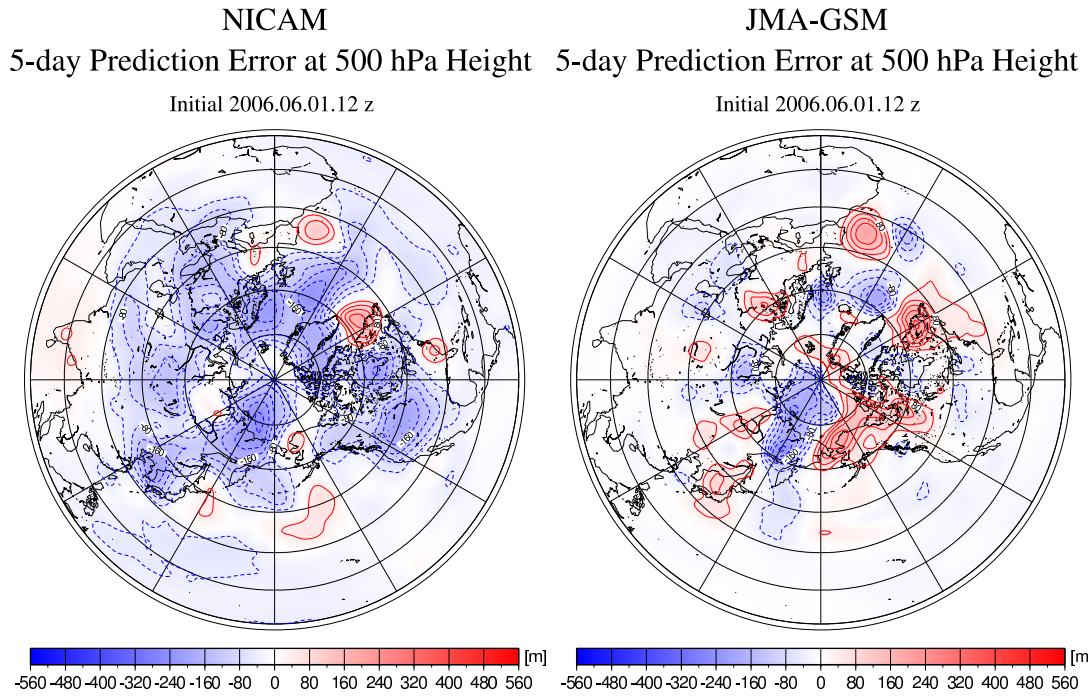


図 89: 2006 年 06 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

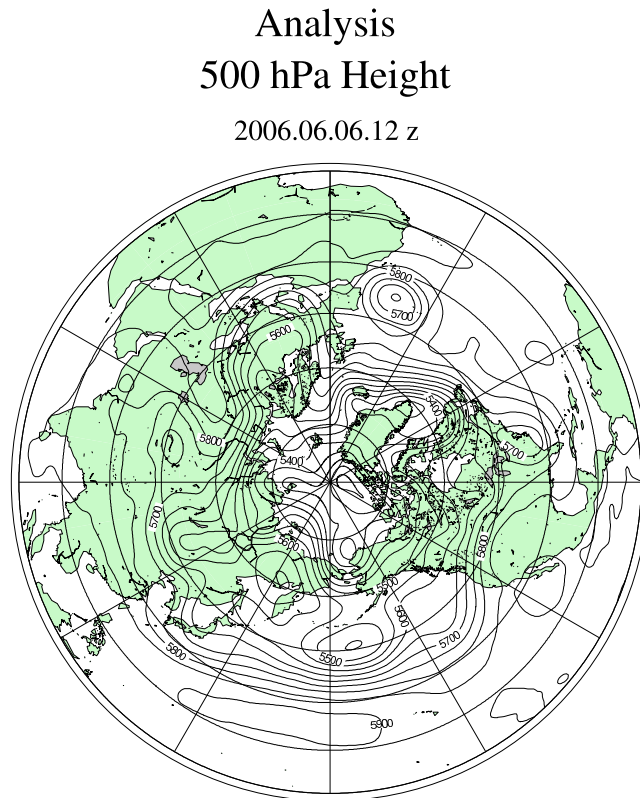


図 90: 2006 年 06 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

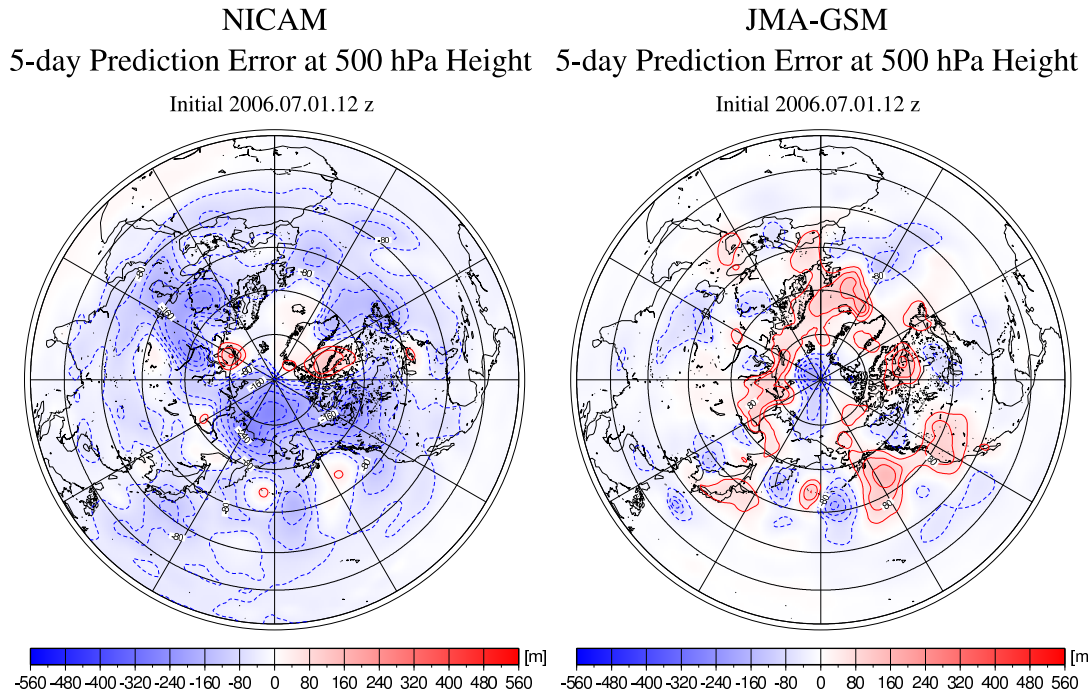


図 91: 2006 年 07 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

Analysis
500 hPa Height

2006.07.06.12 z

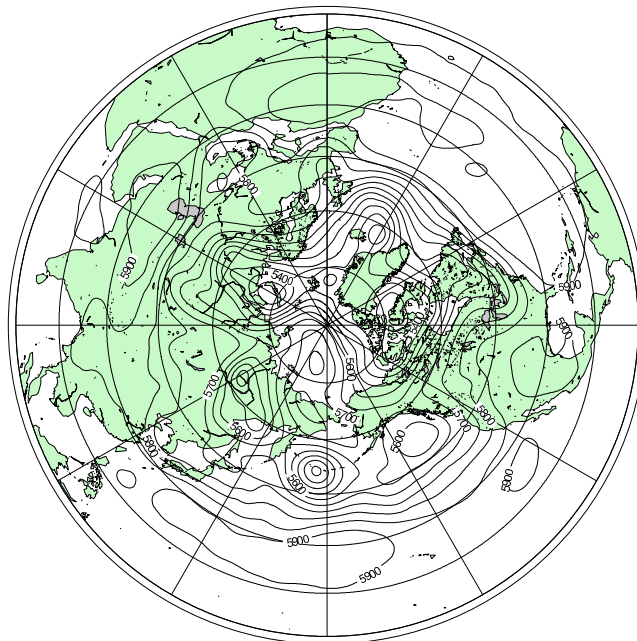


図 92: 2006 年 07 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

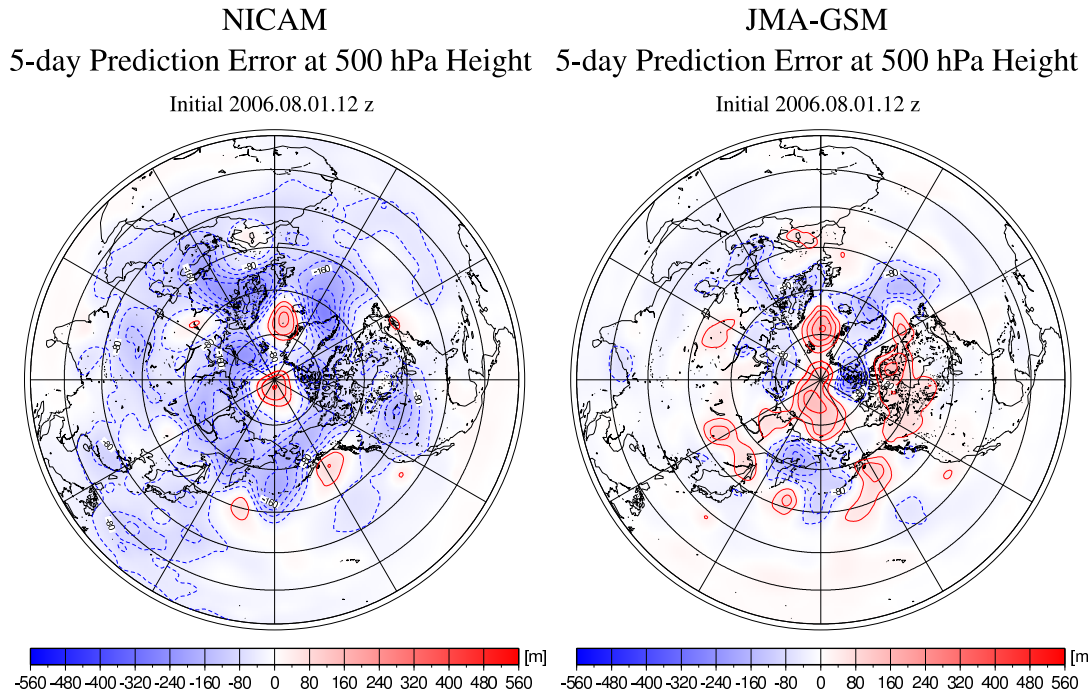


図 93: 2006 年 08 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

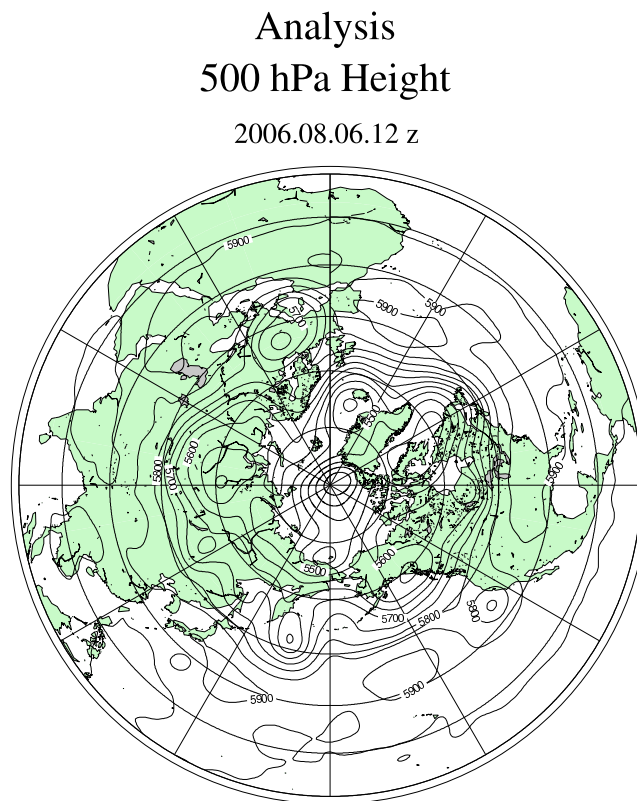


図 94: 2006 年 08 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

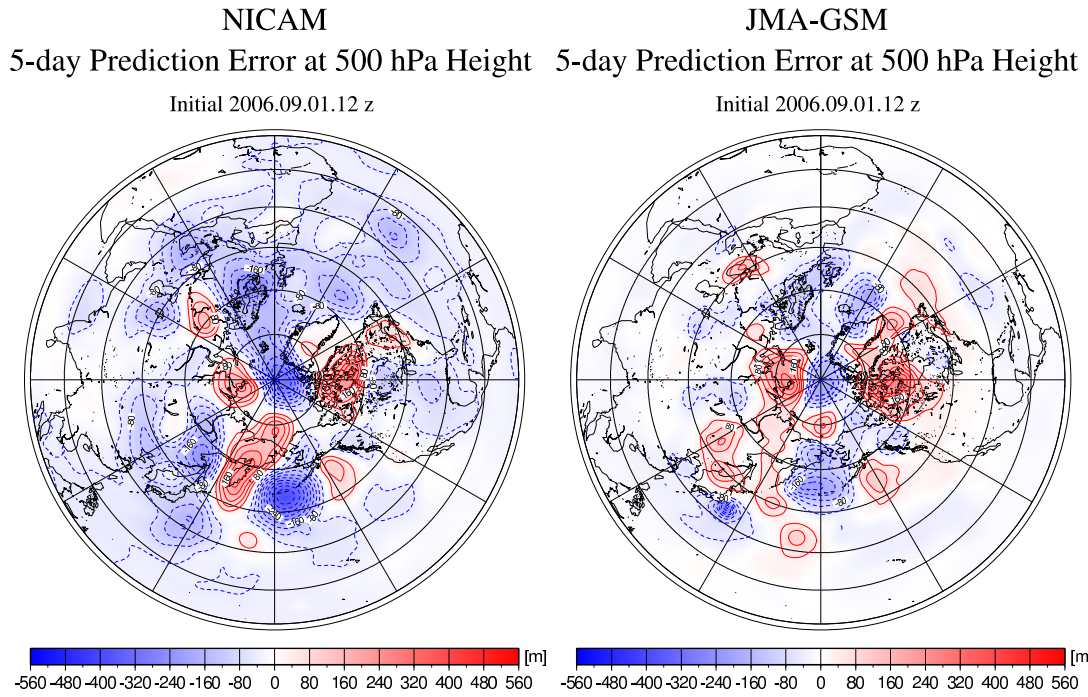


図 95: 2006 年 09 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

Analysis
500 hPa Height
 2006.09.06.12 z

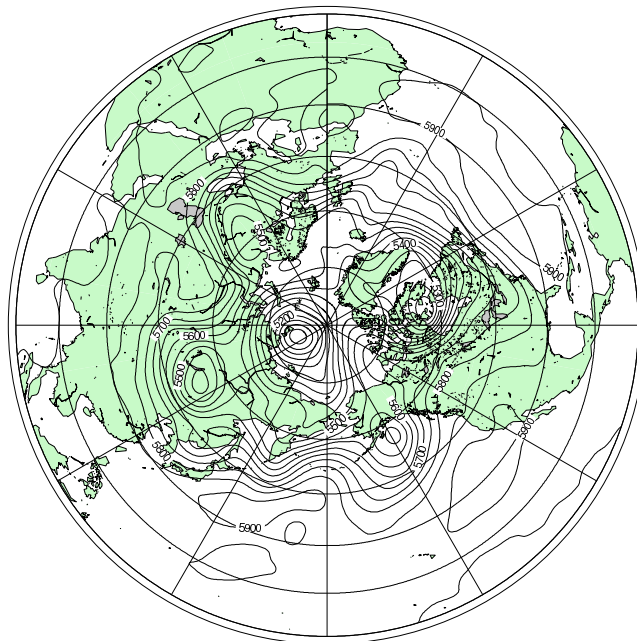


図 96: 2006 年 09 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

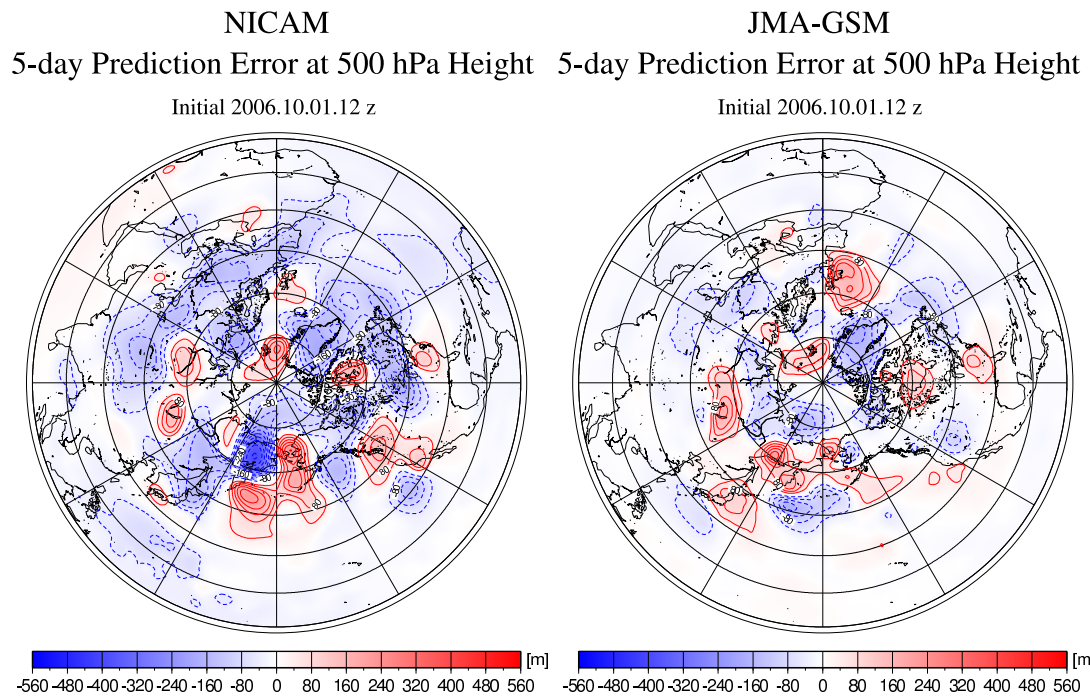


図 97: 2006 年 10 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

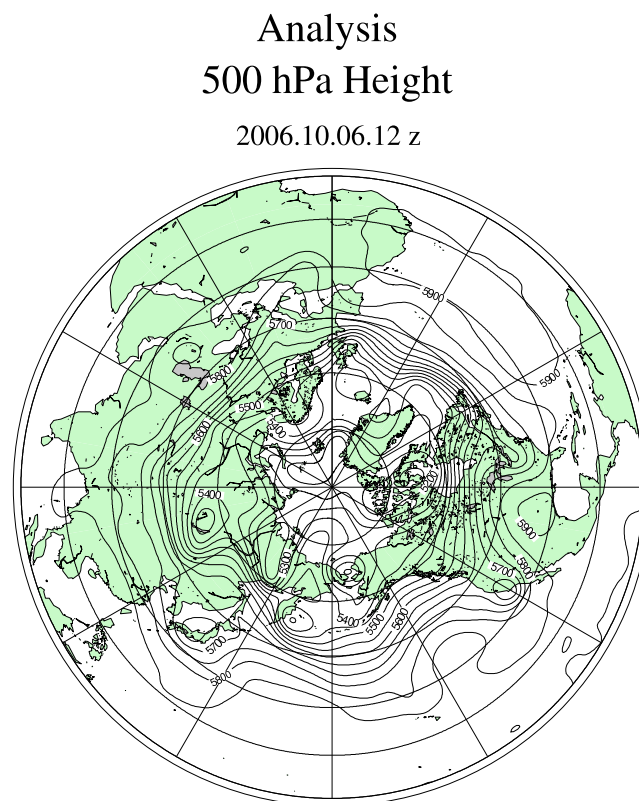


図 98: 2006 年 10 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

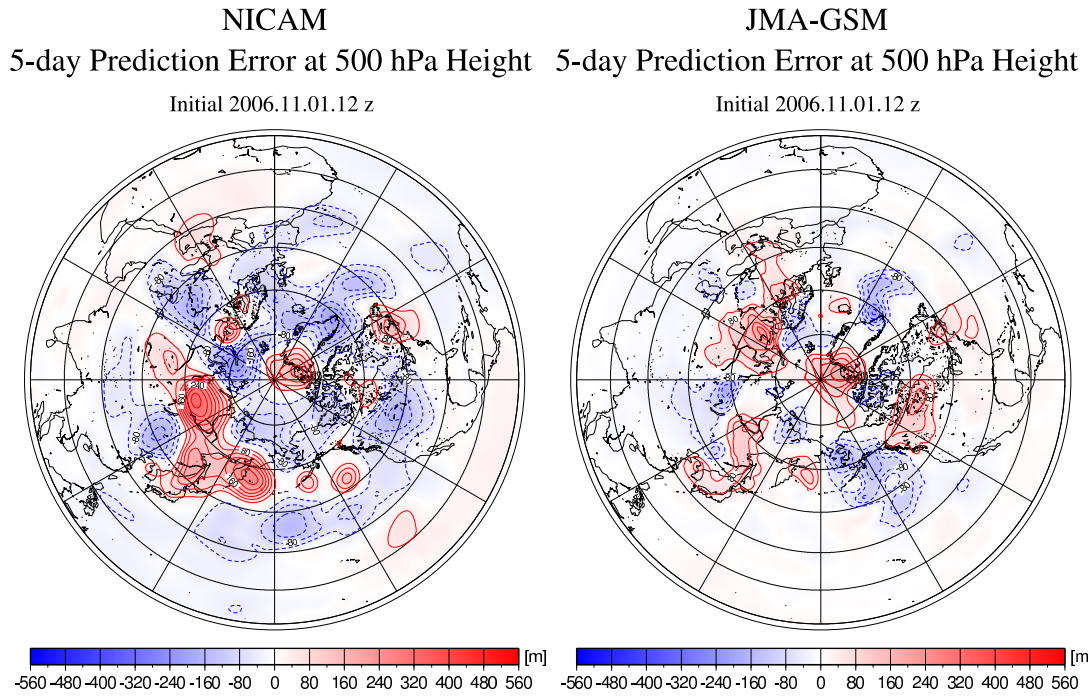


図 99: 2006 年 11 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

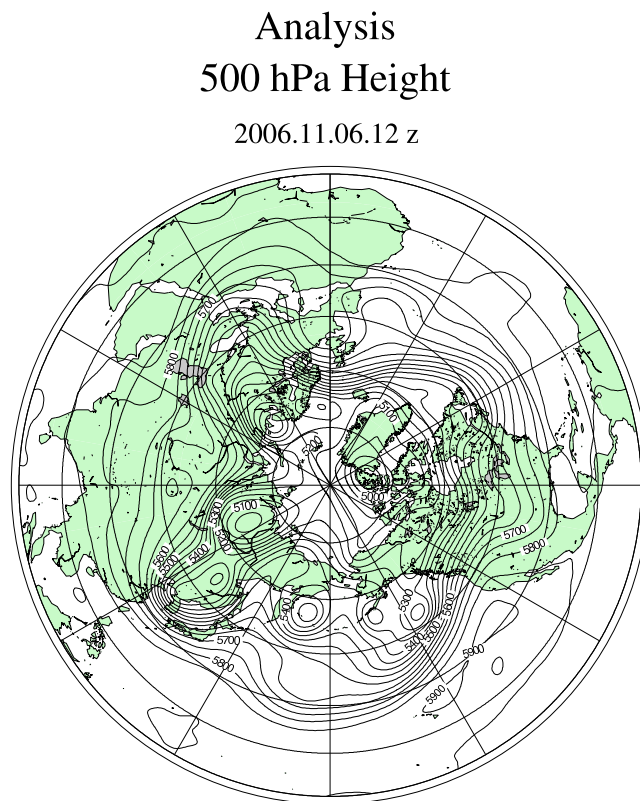


図 100: 2006 年 11 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

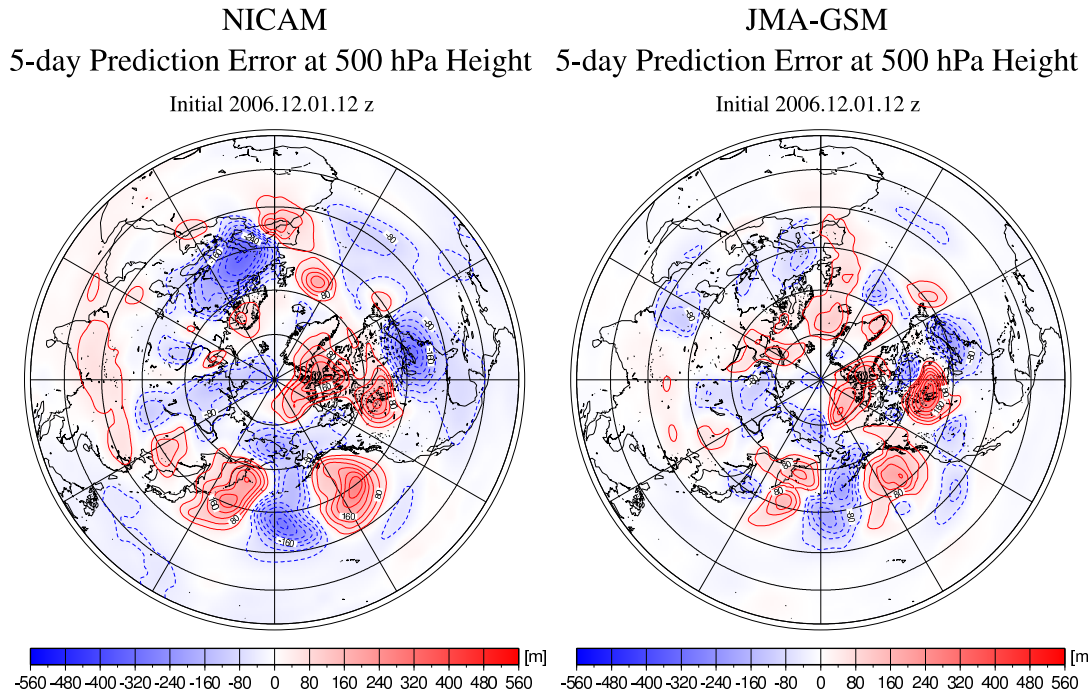


図 101: 2006 年 12 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

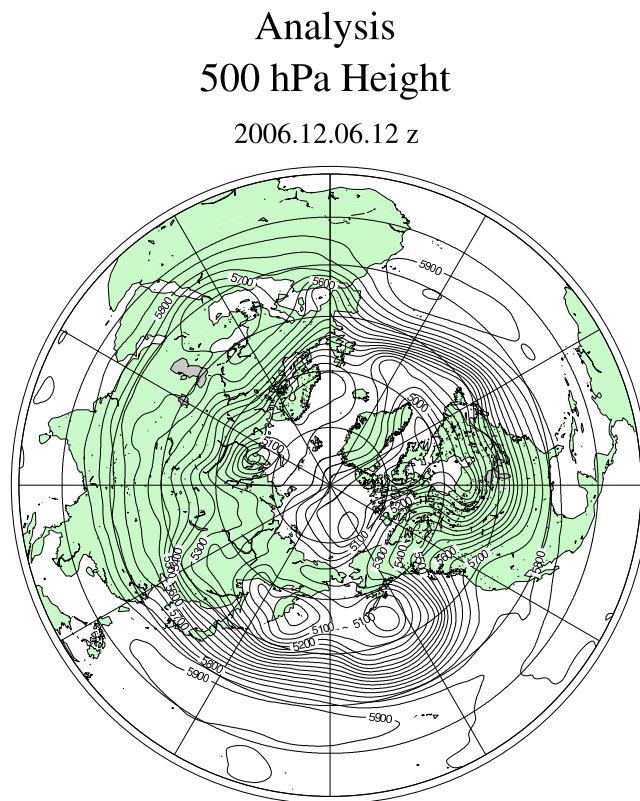


図 102: 2006 年 12 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

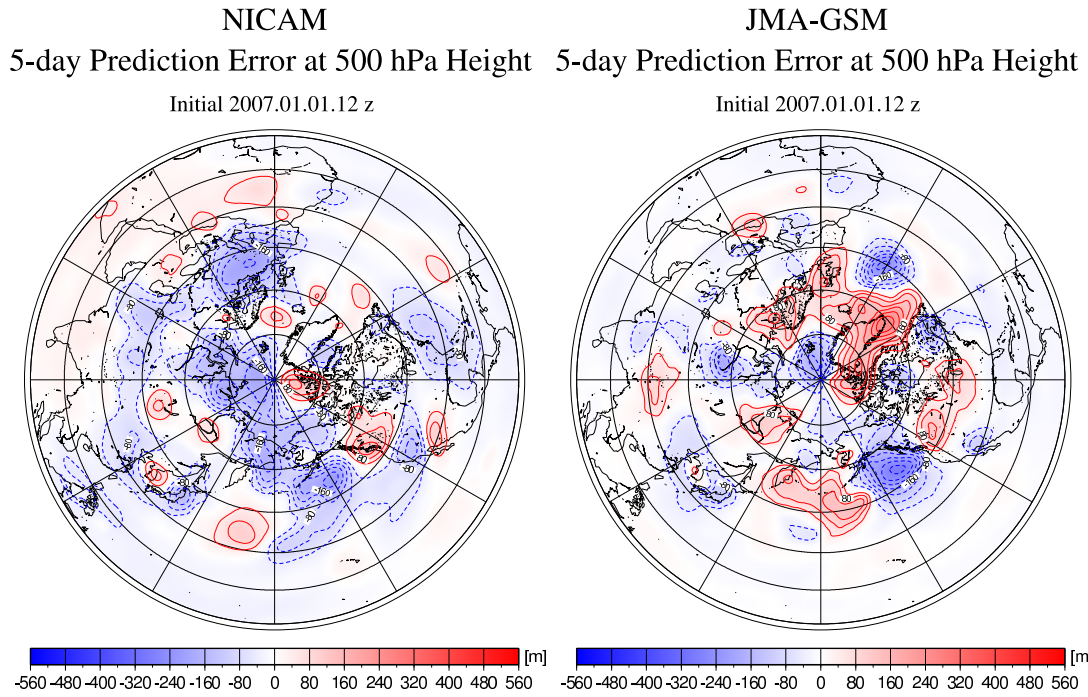


図 103: 2007 年 01 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

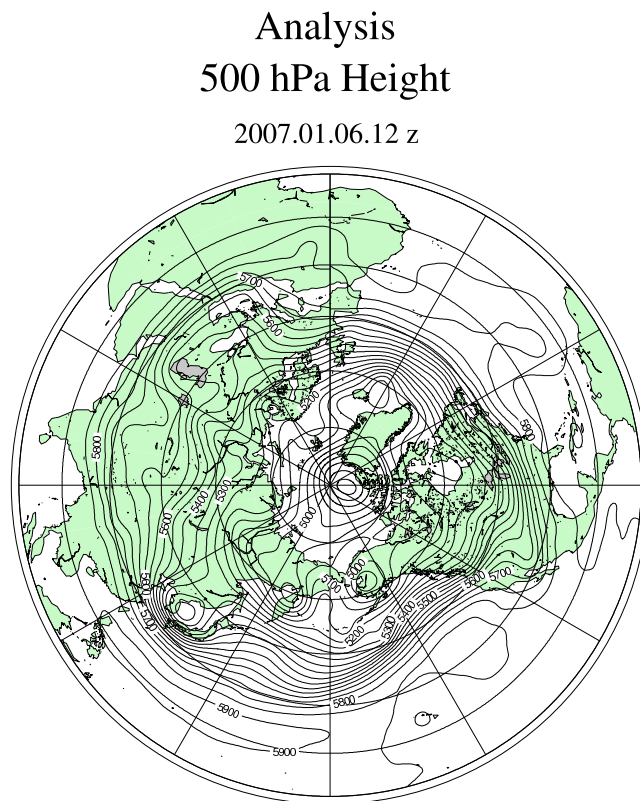


図 104: 2007 年 01 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

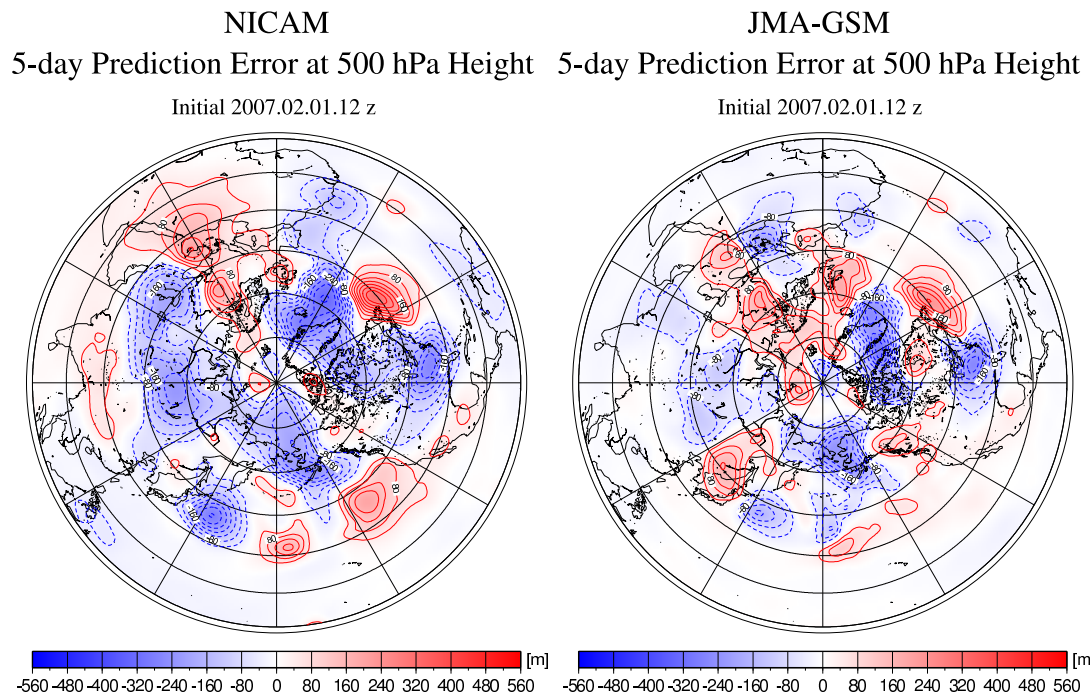


図 105: 2007 年 02 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

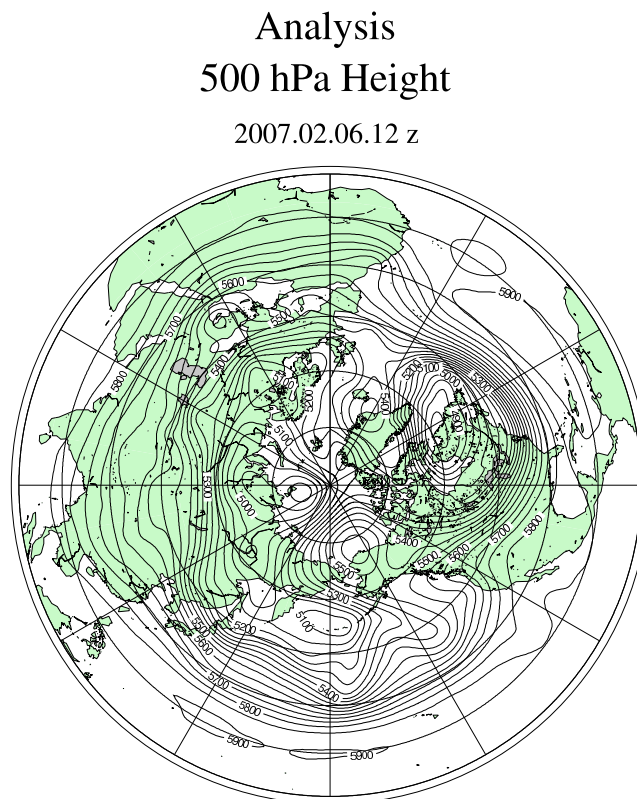


図 106: 2007 年 02 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

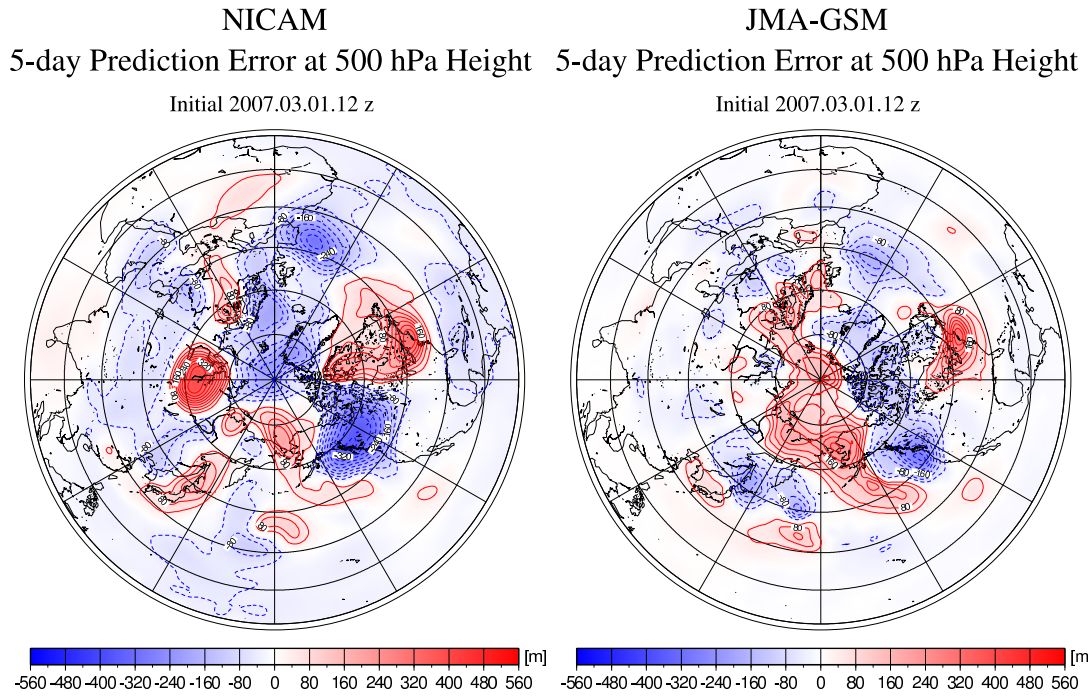


図 107: 2007 年 03 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

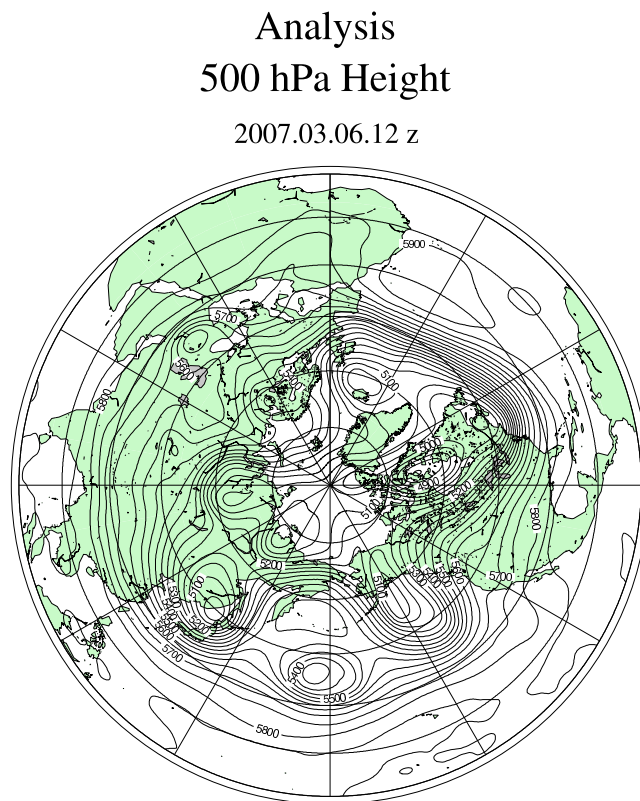


図 108: 2007 年 03 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

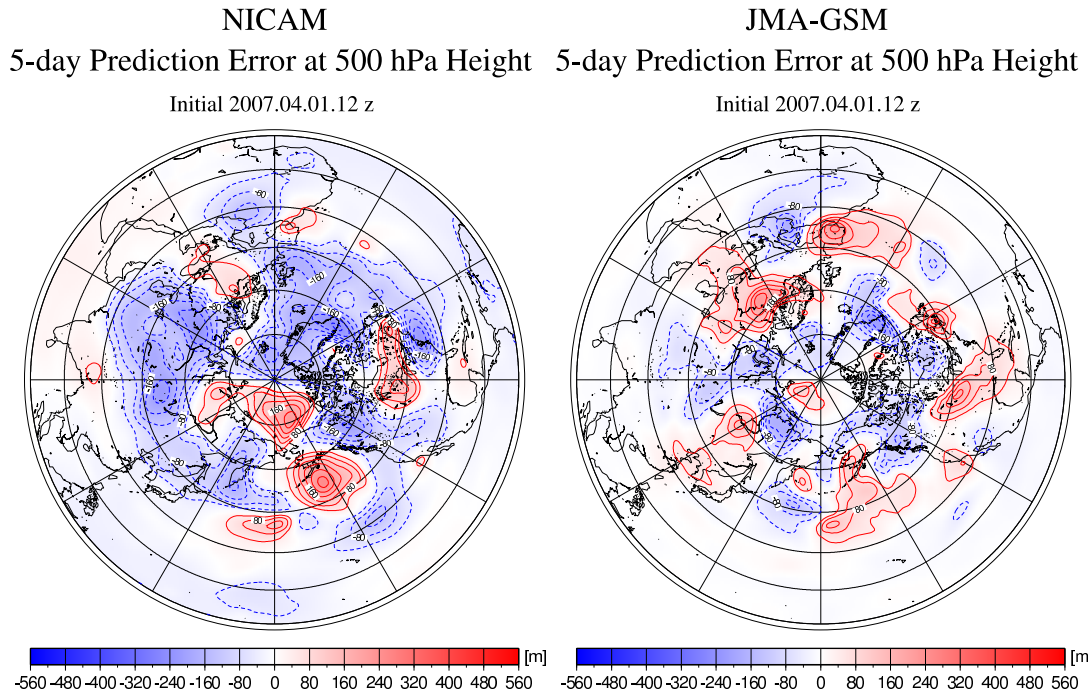


図 109: 2007 年 04 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

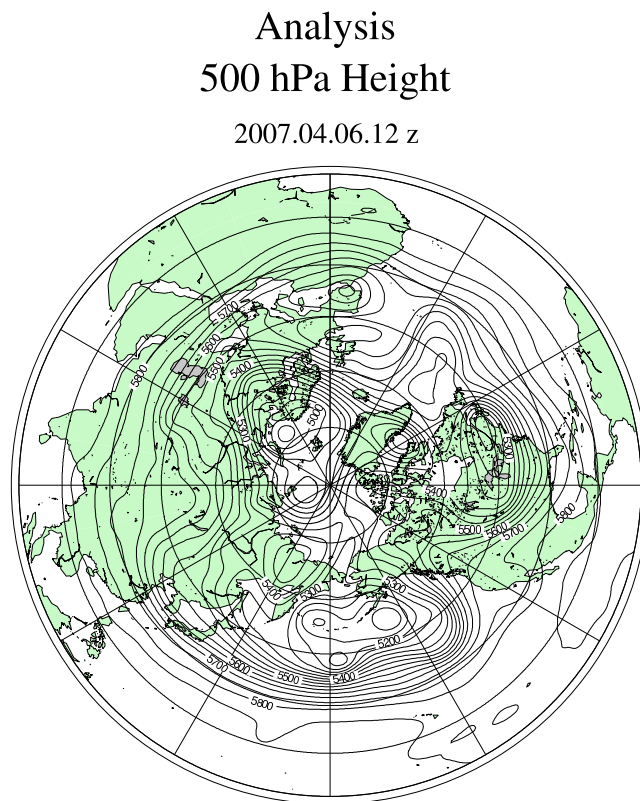


図 110: 2007 年 04 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

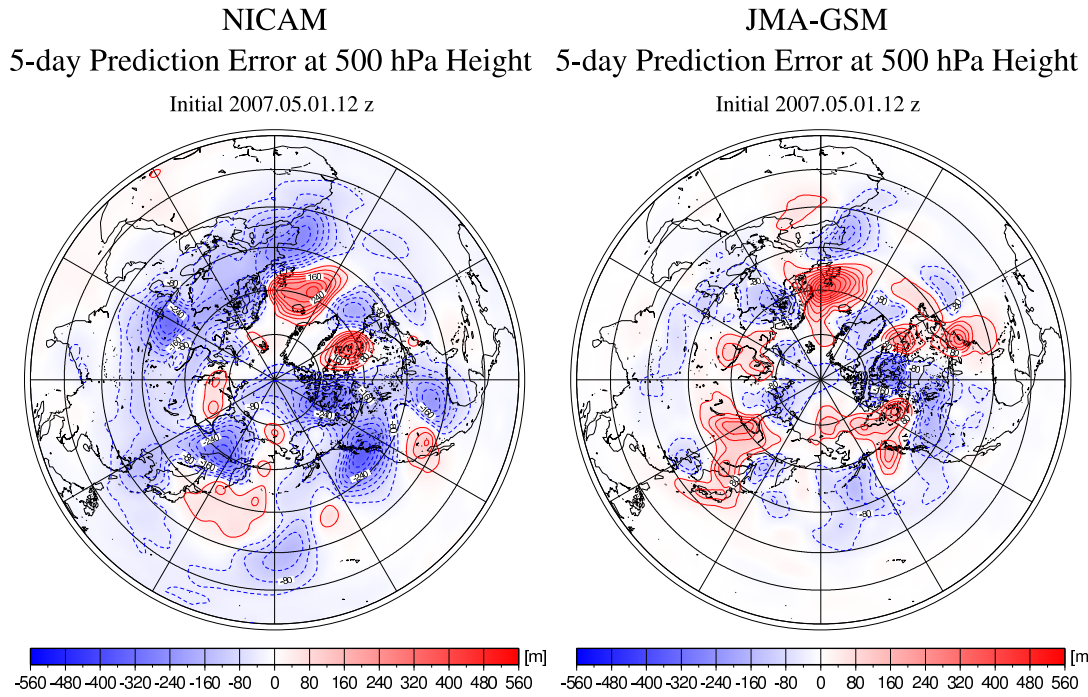


図 111: 2007 年 05 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

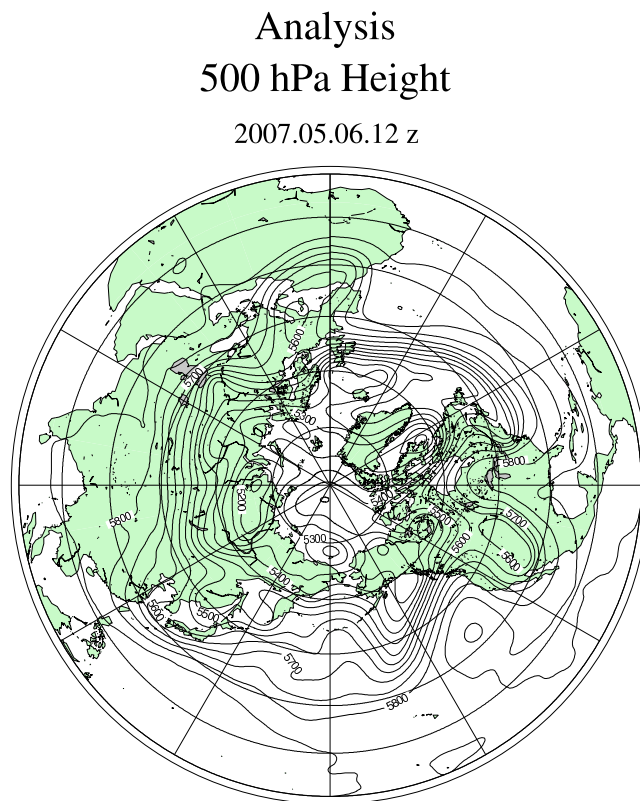


図 112: 2007 年 05 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

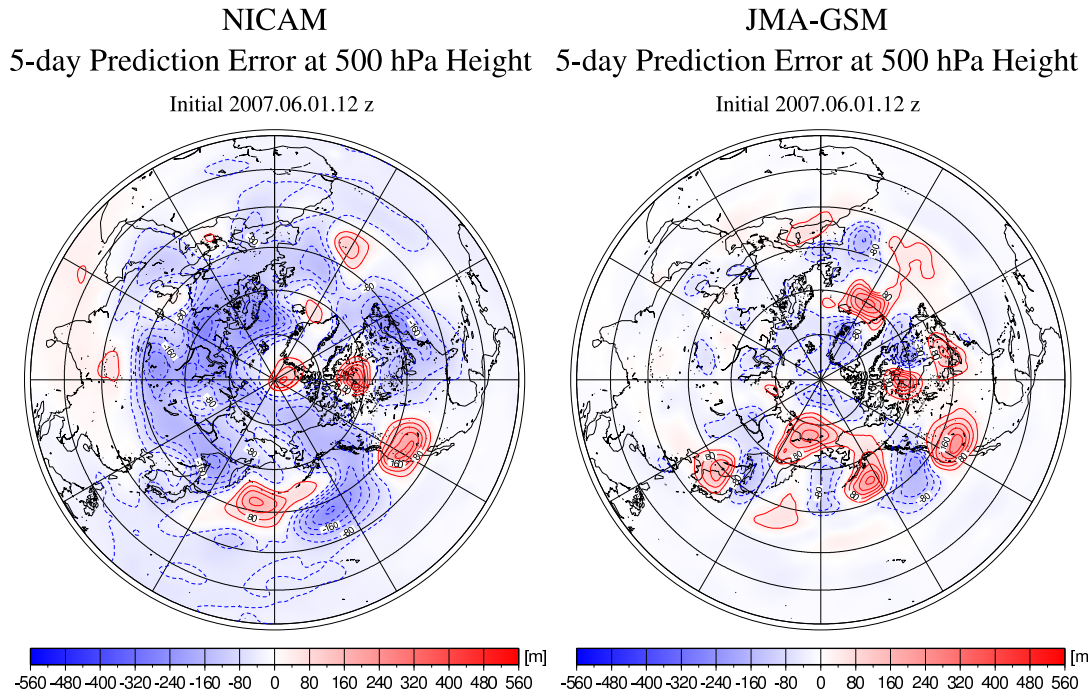


図 113: 2007 年 06 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

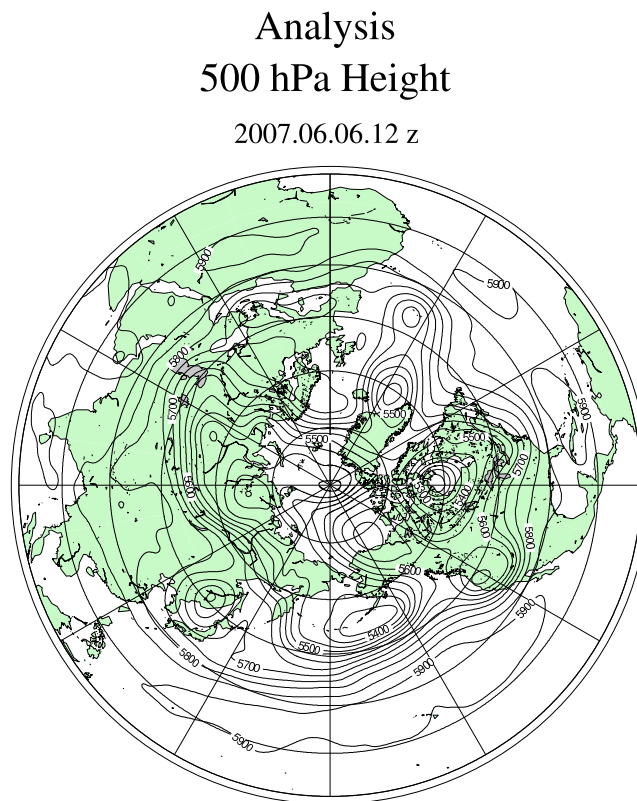


図 114: 2007 年 06 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

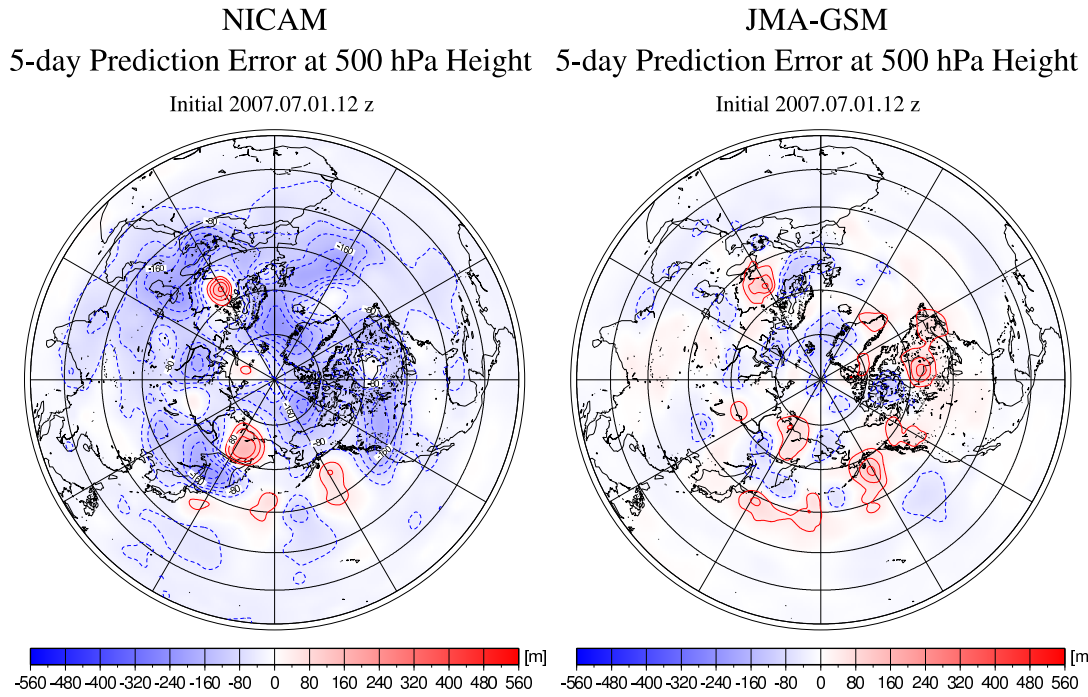


図 115: 2007年07月01日12zを初期値とした北半球500hPa高度場の5日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

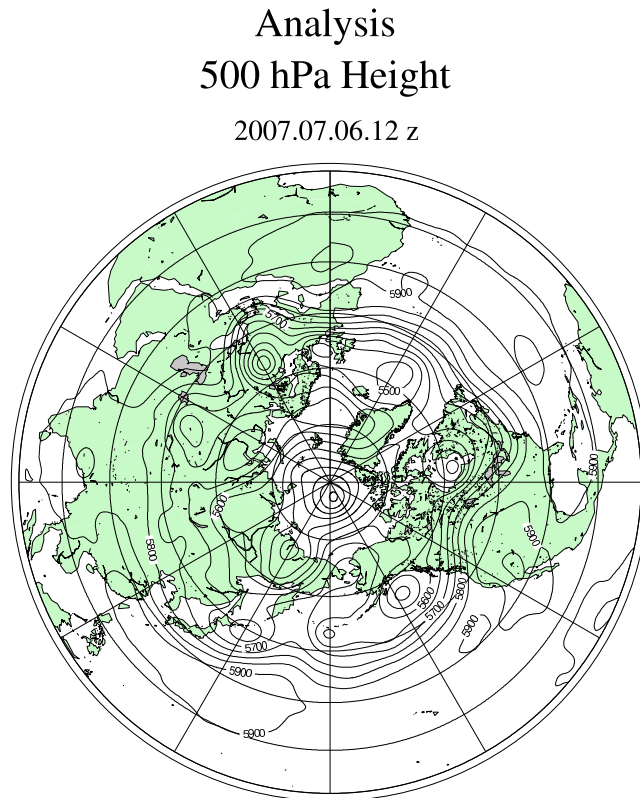


図 116: 2007年07月06日12zにおける北半球500hPa高度場の解析図

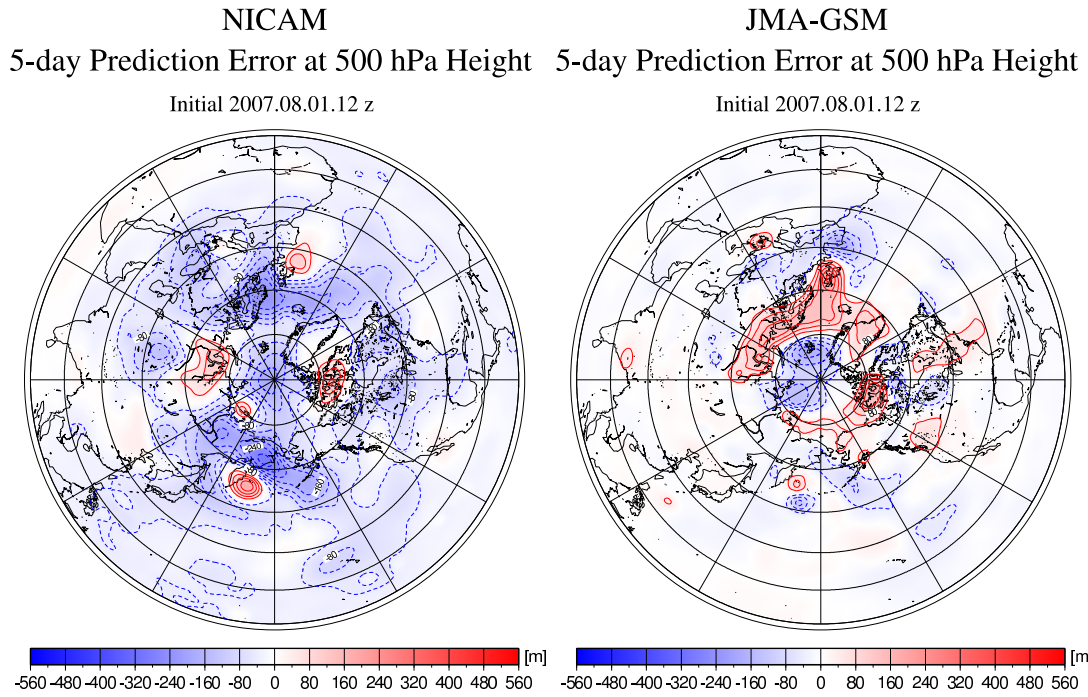


図 117: 2007 年 08 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

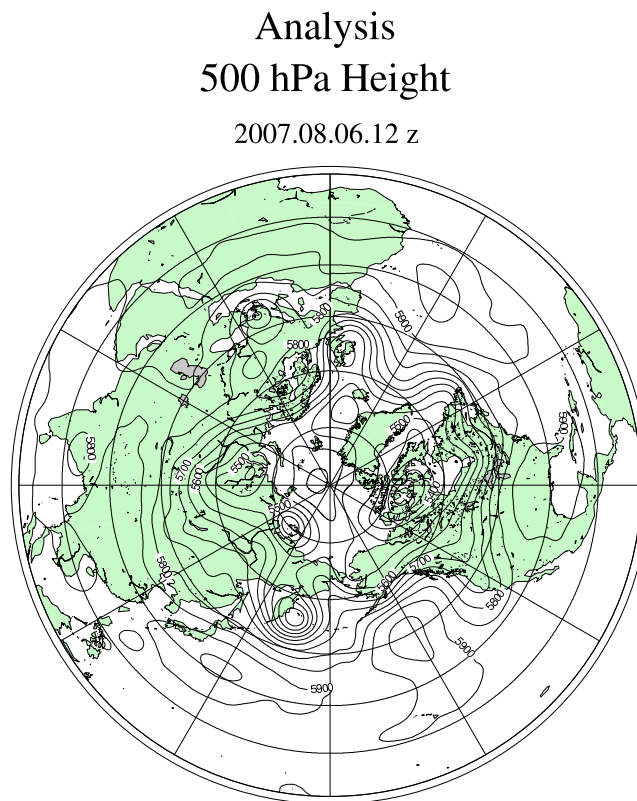


図 118: 2007 年 08 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

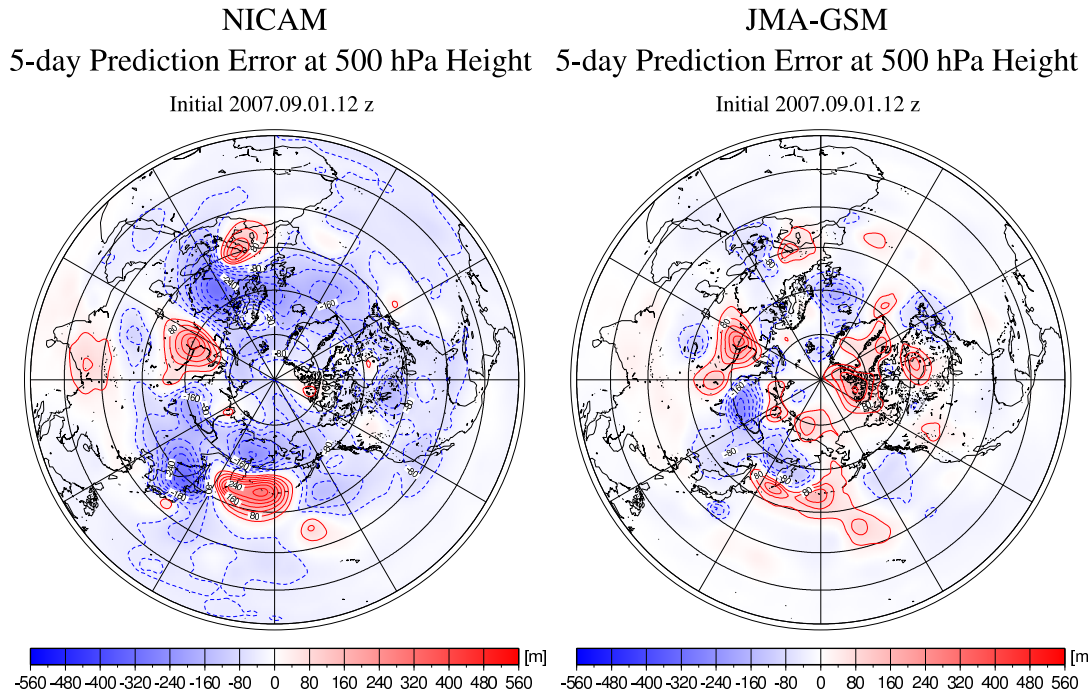


図 119: 2007 年 09 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

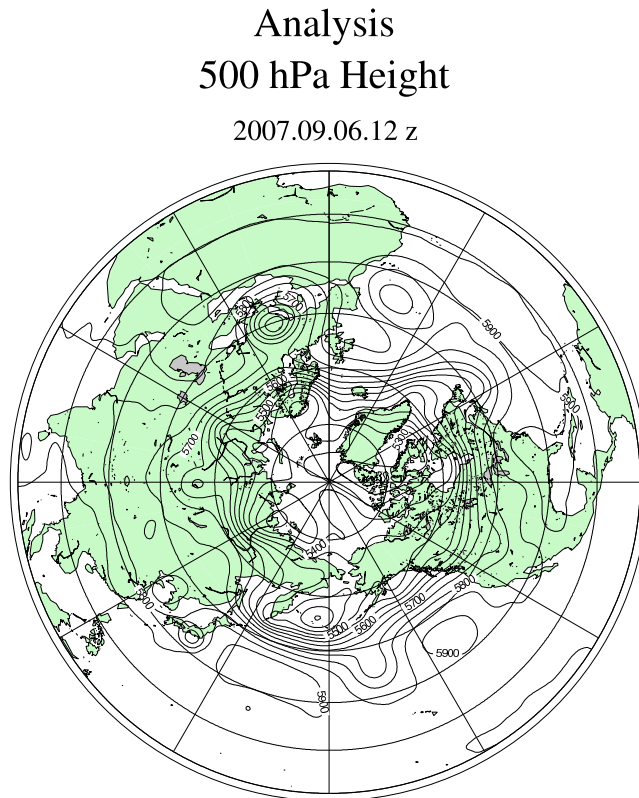


図 120: 2007 年 09 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

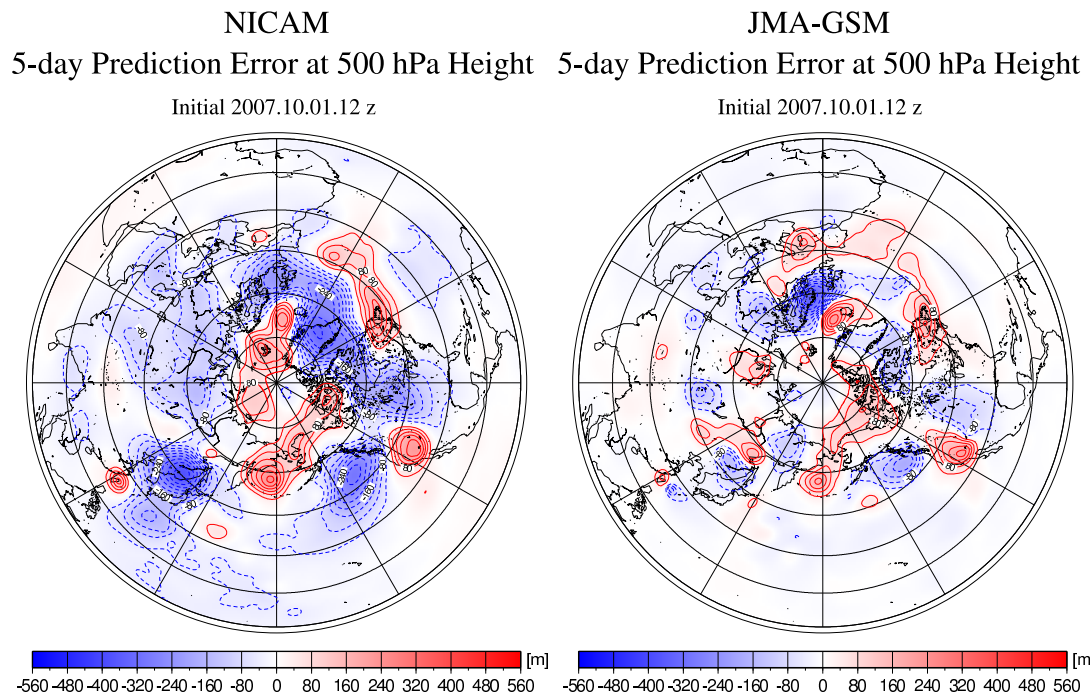


図 121: 2007 年 10 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

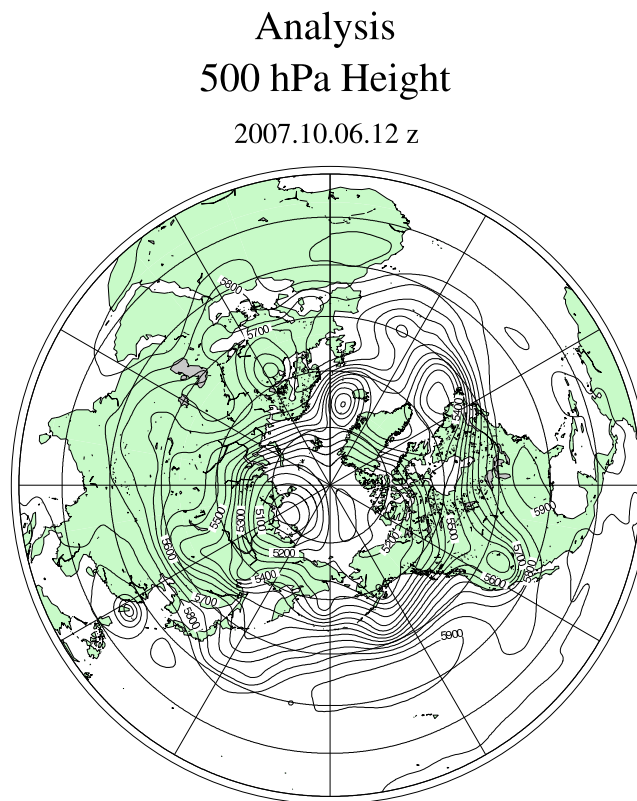


図 122: 2007 年 10 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

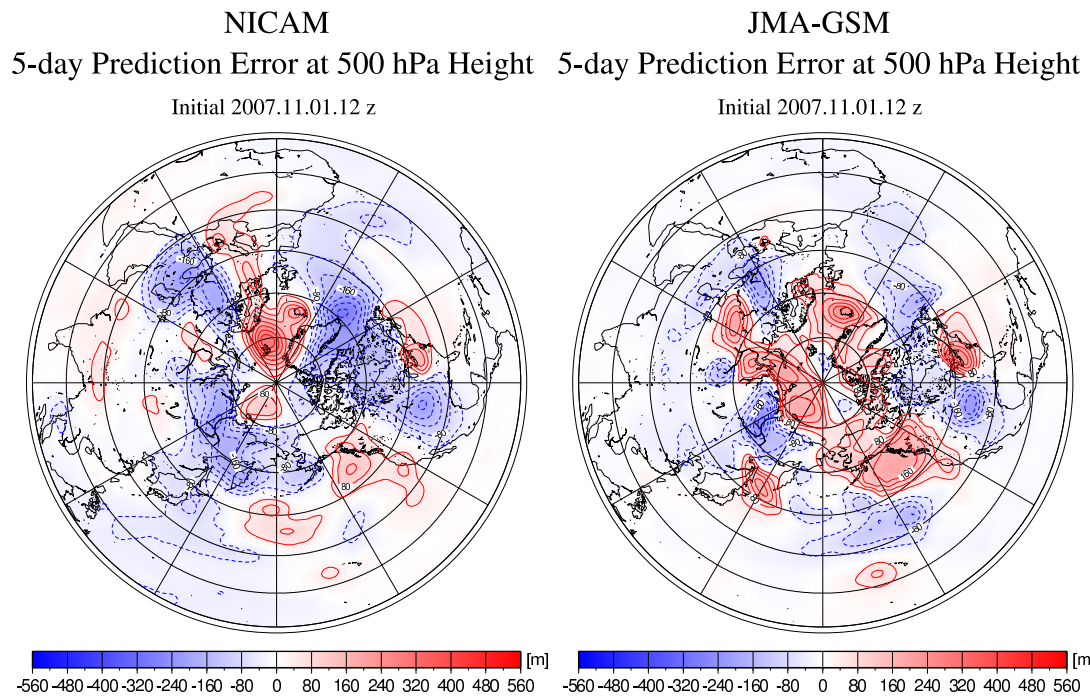


図 123: 2007 年 11 月 01 日 12z を初期値とした北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

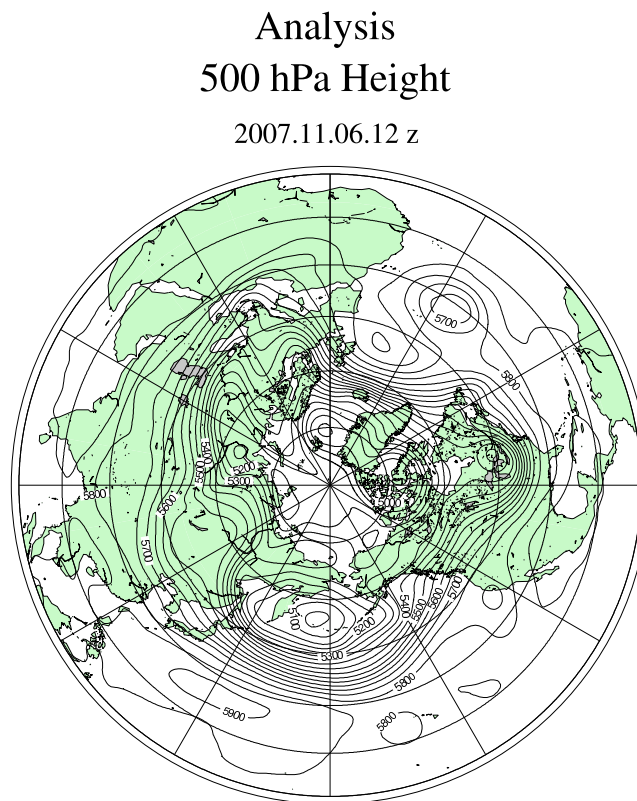


図 124: 2007 年 11 月 06 日 12z における北半球 500hPa 高度場の解析図

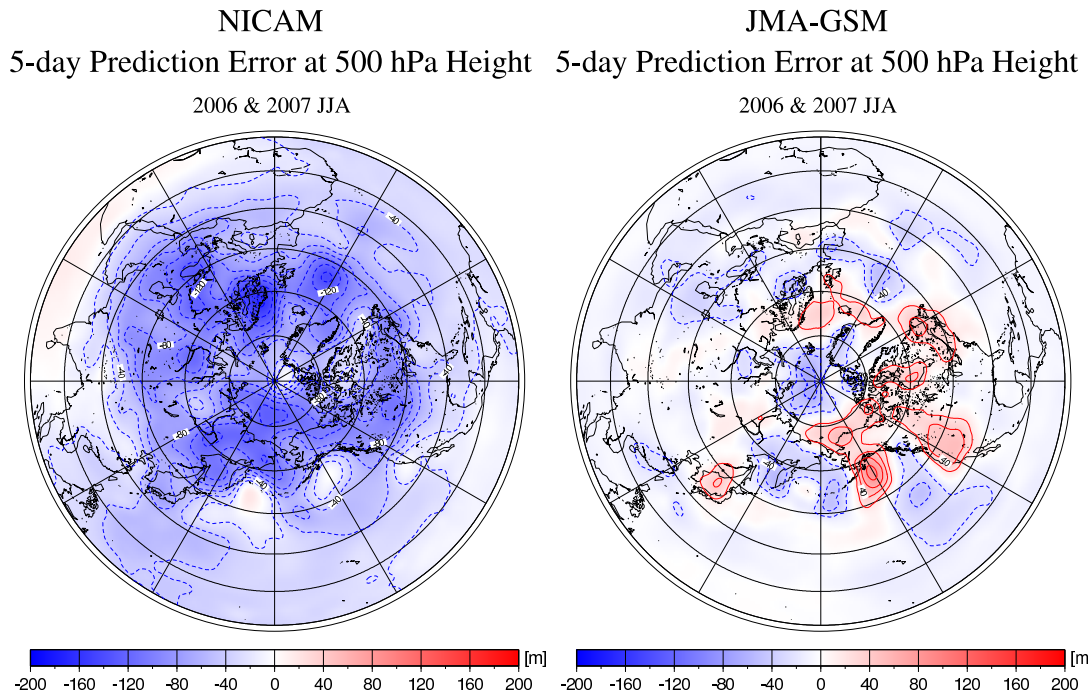


図 127: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 夏 (JJA) - (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

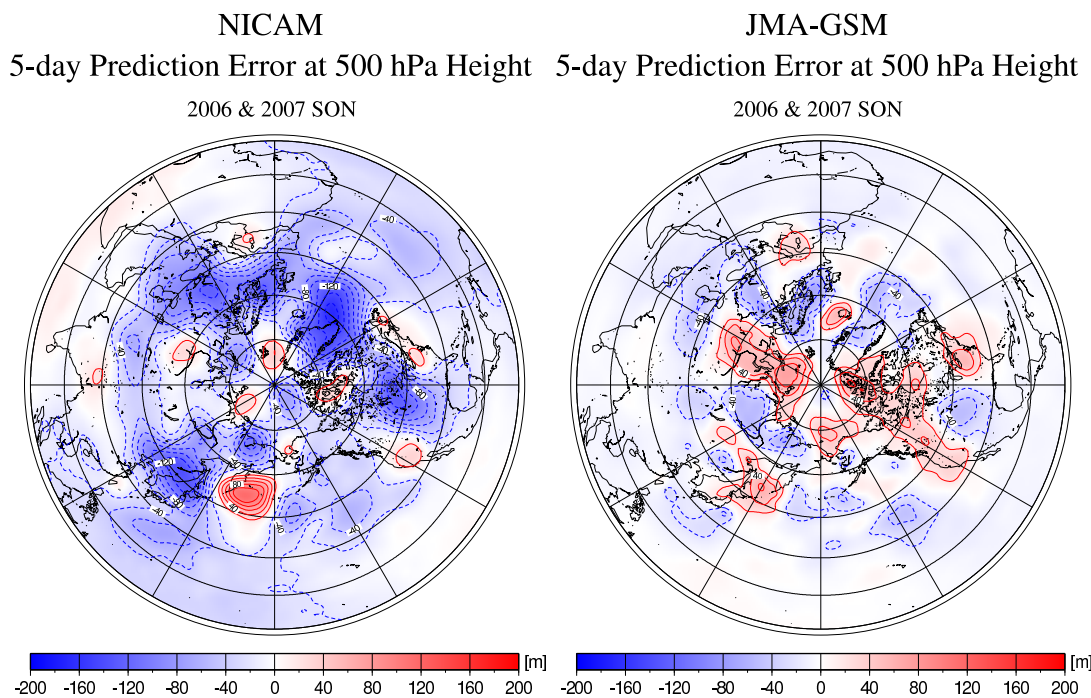
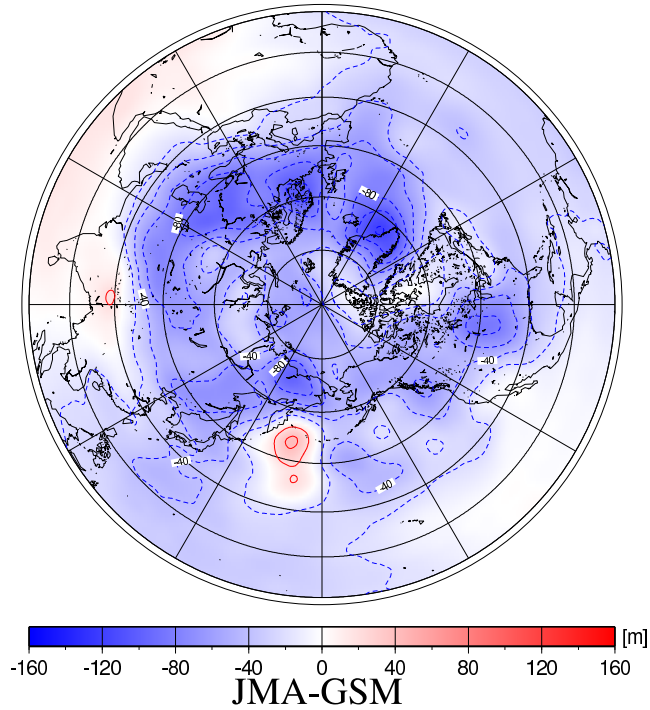


図 128: 季節平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 秋 (SON) - (左:NICAM, 右:JMA-GSM)

NICAM
5-day Prediction Error at 500 hPa Height
2006 & 2007 Annual Mean



JMA-GSM
5-day Prediction Error at 500 hPa Height
2006 & 2007 Annual Mean

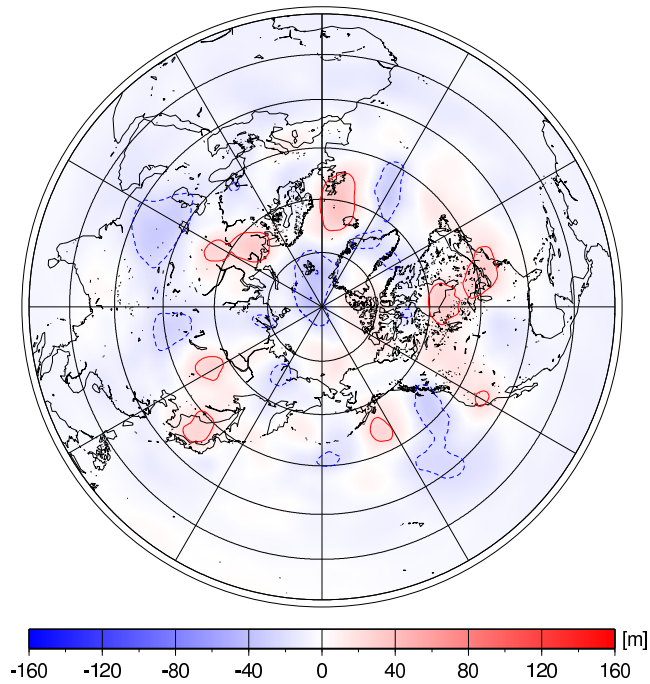


図 129: 年平均した北半球 500hPa 高度場の 5 日予報の誤差図 - 2006 & 2007 - (上:NICAM, 下:JMA-GSM)