

大気海洋結合モデルによる近未来の台風変化予測

*森正人¹・木本昌秀¹・石井正好^{2,3}・望月崇²・近本喜光¹・坂本天²・小室芳樹²
 ・建部洋晶²・渡部雅浩¹・野沢徹⁴・塩竈秀夫⁴・野津雅人²・小山博司²
 (1:東大大気海洋研究所, 2:海洋研究開発機構, 3:気象研究所, 4:国立環境研究所)

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 4 次評価報告書 (AR4) では、2100 年、あるいはそれより先の未来の気候予測に主眼が置かれていたが、第 5 次評価報告書 (AR5) では、そのような長期の気候変動に加え、2035 年までの近未来の気候変動に対するアセスメントが行われる。近未来のリアリティのある予測情報は、我々市民はもちろん、気候変動に対する影響の軽減策や適応策を立案する政策決定者にとって有益なものになると期待される。

2100 年程度の長期の気候応答の不確実性は、エアロゾルや温室効果ガスの排出シナリオなどの外部強制や、モデルの気候感度によって規定される。それに対して近未来の気候の応答は、与える排出シナリオやモデル依存性が比較的小さく、近未来の気候を精度良く予測するためには、外部強制に対する応答に加え 10 年規模の時間スケールを持つ内部変動の予測が重要になってくる (Stott and Kettleborough 2002; Hawkins and Sutton 2009)。そのため我々のグループでは、観測された海洋の水温・塩分の情報をモデルにデータ同化することで、内部変動を予測するのに最適な初期値を作成し (初期値化)、内部変動の予測精度の向上を図っている。

地球温暖化によって、熱帯低気圧の発生数や経路、強度などが将来どのように変化するかという問題は、科学的な興味はもちろん、社会的にも重大な関心事である。これらの問題について、これまで多くの研究が行われてきた。北西太平洋で発生する台風に関しては、現在よりも発生数が減少し、勢力がより強くなるという報告が多い (e.g., Knutson et al. 2010)。また、発生域が今よりも東よりになることも指摘されている (Yokoi and Takayabu 2009; Murakami et al. 2011a)。しかしながら、結果が将来の海面水温 (SST) パターンに強く依存することが指摘されており (e.g., Sugi et al. 2009; Murakami et al. 2011b)、依然として予測の不確実性が大きい問題である。

そこで本研究では、3 種類の大気海洋結合モデル MIROC を用いて、モデルやシナリオ依存性が比較的小さいと言われている近未来の台風の変化予測を行う。また予測の不確実性低減のために、モデルアンサンブルで台風の将来変化を評価し、変化の原因について議論する。

2. モデルと実験の概要と台風の定義

東京大学気候システム研究センター (現大気海洋研究所)・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同開発した大気海洋結合モデル MIROC の 3 つのバージョンを用いた。AR4 で用いられた大

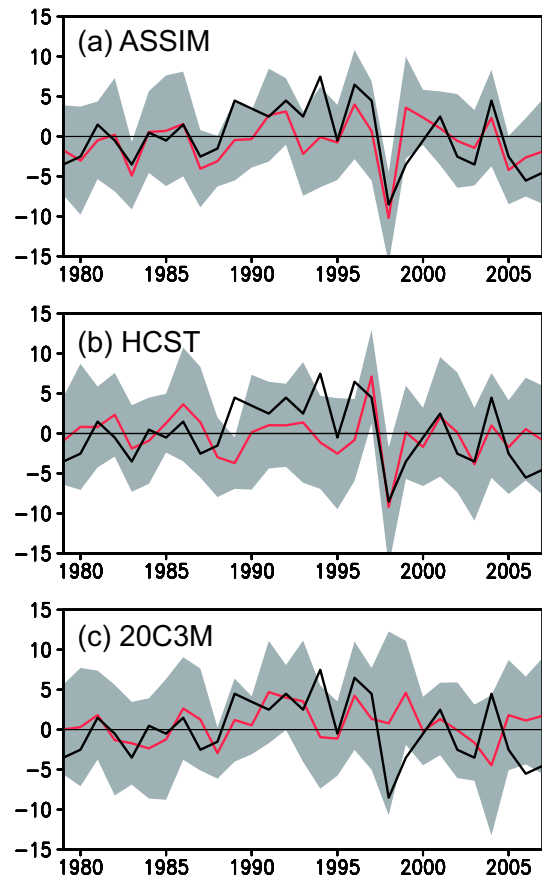


図 1: 北西太平洋における台風発生数偏差 (個数) の年々変動。(a) ASSIM(赤線)、(b) HCST(赤線)、(c) 20C3M(赤線)。観測は黒線で、スプレッドを灰色で表す。

気海洋結合モデルの中で、我々のグループが開発した高解像度版の MIROC3.2 は最も水平解像度が高いモデル (大気:T106、海洋:約 $1/4^\circ \times 1/6^\circ$) であったが、今回はそれをさらに上回る解像度のモデル (MIROC4h) が用いられた。海洋部分の解像度は変わらないが、大気部分が T213 (約 60km) と倍近く細かくなった (Sakamoto et al. 2011)。また、モデルの物理過程をほぼ全て改良した新モデル (MIROC5、大気:T85、海洋:約 $1^\circ \times 1^\circ$; Watanabe

members	MIROC3m	MIROC4h	MIROC5
20C3M	10	1	3
ASSIM	10	1	3
PRED	10	4	6
A1B/RCP	10	3	3
HCST	10	4	6

表 1: 各実験のアンサンブルメンバー数

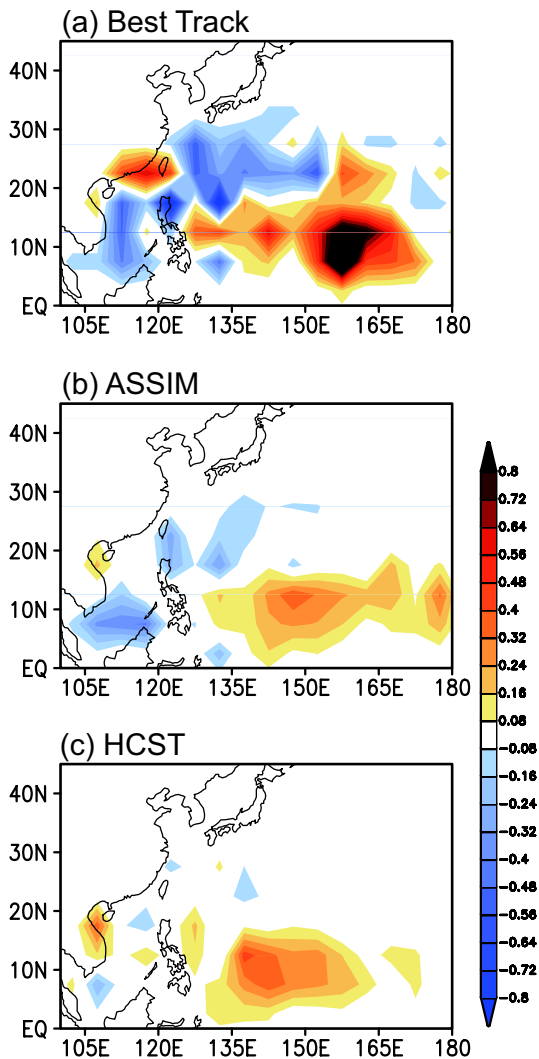


図 2: ENSO イベント時の台風発生頻度偏差の合成図。El Niño 年と La Niña 年の差 (El-La) を示している。(a) 観測、(b) ASSIM、(c) HCST。

et al. 2010) も開発、採用された。新に開発した MIROC4h、MIROC5 に加え、AR4 時に使用した MIROC3.2 の中解像度版 (MIROC3m、大気: T42、海洋: 約 $1^\circ \times 1^\circ$; Hasumi and Emori 2004) も用いて、それぞれのモデルで、同化・予測実験が行われた。

現在気候の評価には外部強制のみを与えた実験 (20C3M; 1950-2005 年) とデータ同化実験 (ASSIM; 1950-2005 年) を用いた。データ同化は、観測された海洋の水温と塩分の気候値からの偏差をモデル偏差に同化するアノマリ同化の手法が採用された (Tatebe et al. 2011)。また将来気候の評価には、温室効果ガスやエアロゾルなどの排出シナリオのみを与えた実験 (A1B/RCP4.5; 2006-2035 年) に加え、初期値化によって得られた初期値から予測した実験 (PRED; 2006-2035 年) を用いた。

これらに加え、モデルのパフォーマンスをチェックするために、ハインドキャスト実験 (HCST; 1960-2011) も行われた。MIROC3m、5 については 1 年毎に、MIROC4h については 5 年毎に初期値を取り、それぞれ 1 月 1 日から 10 年間の予測を行った。MIROC3m では、適当な 10 個の異なる初期値からスタートしたデータ同化実験のスナップ

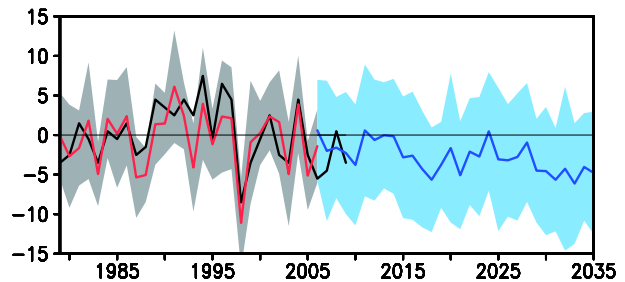


図 3: 北西太平洋における台風発生数偏差 (個数) の時系列。MIROC3m、4h、5 のモデルアンサンブル。観測 (黒線)、ASSIM (赤線)、PRED + A1B/RCP4.5 (青線)。陰影はスプレッドを表す。

ショットから 10 個の初期値が作成された。一方、MIROC4h、5 では初期値は数ヶ月間隔の LAF 法によって作成された (例: MIROC5 の 1991/1/1 予測開始の場合、91 年/1 月/1 日、90/10/1、90/7/1 の同化のスナップショットから予測)。表 1 に、各モデル・各実験のアンサンブル数をまとめる。以後、特にことわらない限り、結果は 3 種類のモデルのモデルアンサンブルで示される。

モデルのアウトプットから台風を同定する手法は、主に Murakami et al. (2011a) の手法に従った。北西太平洋における年間発生数が約 27 個になるように、それぞれのモデルで台風を同定するための各種閾値の値が変えてある。以後、特にことわらない限り、台風の統計量は年平均の値で示される。また観測データとして、Joint Typhoon Warning Center (JTWC) のベストトラックデータを使用した。

3. 台風の年々変動の予測

まずモデルのパフォーマンスをチェックするために、ASSIM と HCST から台風の年々変動の再現性・予測可能性を MIROC5 と MIROC3m のモデルアンサンブルで評価した。ASSIM から得られた台風発生数偏差の年々変動を観測と比較した (図 1a)。海洋の水温と塩分しか同化していないにも関わらず、ASSIM は観測の年々変動をよく再現している (1979-2007 年で相関係数は 0.66)。ASSIM のスナップショットを初期値とした HCST の 1 年予測の結果を図 1b に示す。予測と観測の間の相関係数は 0.44 で、時期によっては観測の変動をよく予測できている。一方、初期値化を行わないで予測した場合 (20C3M) は相関係数が 0.14 と低くなることから (図 1c)、HCST の比較的よい予測スキルは偶然などではなく、初期値化によってもたらされたことが分かる。

台風の年々変動には El Niño and Southern Oscillation (ENSO) の影響が大きいことが知られている (e.g., Wang and Chan 2002; Camargo et al. 2007)。そこで、台風の発生頻度偏差分布を ENSO が卓越した年でコンポジットし、ENSO に伴う変動の予測可能性を検証した。図 2 に MIROC5 と MIROC3m のモデルアンサンブルの結果を示す。観測では、El Niño (La Niña) の時には発生域が北西太平洋の南東 (北西) 側にシフトすることが知られているが、この様子が ASSIM でもよく再現さ

れており、HCSTでも、北西側の負偏差が弱い、比較的良好に予測されている。これらの結果は、北西大西洋における台風の総発生数だけでなく、発生域の分布も比較的良好に予測できていることを示しており、MIROCで台風の季節予報が可能であることを示唆している。現状ではデータ同化手法や初期値の取り方が季節予報向きではないため、今後、データ同化手法や初期値作成法などのさらなる精緻化により、よりよい精度で台風の季節予報ができるようになることを期待される。

また、年々より長い時間スケール(3年平均場)での台風の予測可能性を調べたところ、初期値化により、ENSOや90年代に北西太平洋で起きた気候シフト(Chikamoto et al. 2011)に伴う台風の変動が予測可能であることが分かった(図示せず)。このように、ある特定の大規模現象に伴う台風の変動に関しては、数年の予測可能性が示され、これは海洋の初期値化に由るところが大きい。

4. 台風の将来変化予測

今節では、2035年までの将来予測(2006年初期値からの30年予測)の結果を示す。30年先にはもはや初期値化のインパクトは残っていないと考えられるため、PREDとA1B/RCP4.5の結果をまとめて示す。台風の年間発生数偏差の時系列(図3)の2006年からの予測には負のトレンドが存在し、将来的には台風の数が増えるという結果が得られた。この傾向はモデル毎に見た場合でも同様であった(図省略)。台風の発生頻度、存在頻度分布の将来(2016-2035年平均)と現在(1955-1989年平均)の差(図4)を見ると、北西太平洋全域で発生・存在頻度が減少しているのが分かる。また北西太平洋で積算した総発生数、総存在数で規格化した確率密度関数(PDF)の差では、発生位置や存在位置が相対的にやや北より、東よりになる傾向が見られた。この結果は、先行研究(Yokoi and Takayabu 2009; Murakami et al. 2011a)の結果と定性的には一致するが、定量的には小さい。これは温暖化がそれほど顕著でない近未来だからだと考えられる。

次に、台風の数が増える原因について、環境場の変化の観点から調べた。台風の発生に好まれる環境場の条件として、1) 高いSST、2) 対流圏下層で低気圧性循環(モンスーントラフ)、3) 対流圏の下層から中層で高い相対湿度、4) 弱い風の鉛直シア、5) 低い静的安定度、などが知られている(e.g., Gray 1975)。そこで、これらいくつかの変数について現在と将来の差を調べた(図5)。SSTは他の多くの結合モデルがそうであるように(Meehl et al. 2007)、「El Niño型」と呼ばれる変化パターンになる(図5a-b)。OLRの変化は、やはりEl Niñoの時のような偏差パターンを示し、西太平洋では対流が現在より不活発になる(図5c-d)。またこれらに対応して、上層の速度ポテンシャルの変化は西太平洋で収束偏差になり(図5e-f)、Walker循環が弱まることを示している。また、対流活動の弱体化が対流圏下層に高気圧性循環偏差を励起することで、モンスーントラフが弱体化し(図5g-h)、下降流偏差により相対湿度が減少す

る(図5i-j)。これらはどちらも台風の発生を抑制するセンスである。したがって、温暖化によるEl Niño-likeなSSTの変化に伴い、西太平洋における大規模循環場が台風の発生しにくい状態に変わることが、台風の数が増える一因になっていると考えられる。また台風の発生域がやや東よりになるのは、統計的に有意でないが、El Niñoの時のように下層の相対湿度が西太平洋の東側で強くなるためだと考えられる。また、将来台風の勢力は強くなるという結果が報告されているが、生涯最大風速のPDFの現在と将来の比較は、統計的に有意な差を示さなかった(図省略)。これには、近未来であることや、大気と海洋を結合していることなどいくつかの原因が考えられるが、まだはっきりとしたことは分かっていない。今後の課題である。

謝 辞

本研究は「21世紀気候変動予測革新プログラム」として行われたもので、文部科学省のサポートを受けた。

参考文献

- Camargo, S. J., K. A. Emanuel, and A. H. Sobel, 2007: Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis. *J. Clim.*, **20**, 4819–2834.
- Chikamoto, Y., M. Kimoto, M. Ishii, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Mochizuki, H. Tatebe, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, H. Shiogama, M. Mori, S. Yasunaka, Y. Imada, H. Koyama, M. Nozu, and F-F. Jin, 2011: Predictability of a stepwise shift in Pacific climate during the late 1990s in hindcast experiments using MIROC. *J. Meteor. Soc. Japan.*, in press.
- Gray, W. M., 1975: Tropical Cyclone Genesis, Dept. of Atmospheric Science Paper, 234, Colorado State University, Fort Collins, CO, 121 pp.
- Hasumi, H., and S. Emori, 2004: K-1 coupled model (MIROC) description. K-1 Tech. Rep., 34 pp. [Available online at <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/agcmadm/>].
- Hawkins E. and R. Sutton, 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *B. A. Meteor. Soc.*, **90**, 1095–1107.
- Knutson, T., J.L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J.P. Kossin, A.K. Srivastava, M. Sugi, 2010: Tropical cyclones and climate change. *Nature Geosci.*, **3**, 157–163.
- Meehl, G.A., and co-authors, 2007: *Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., and co-editors (eds.)].

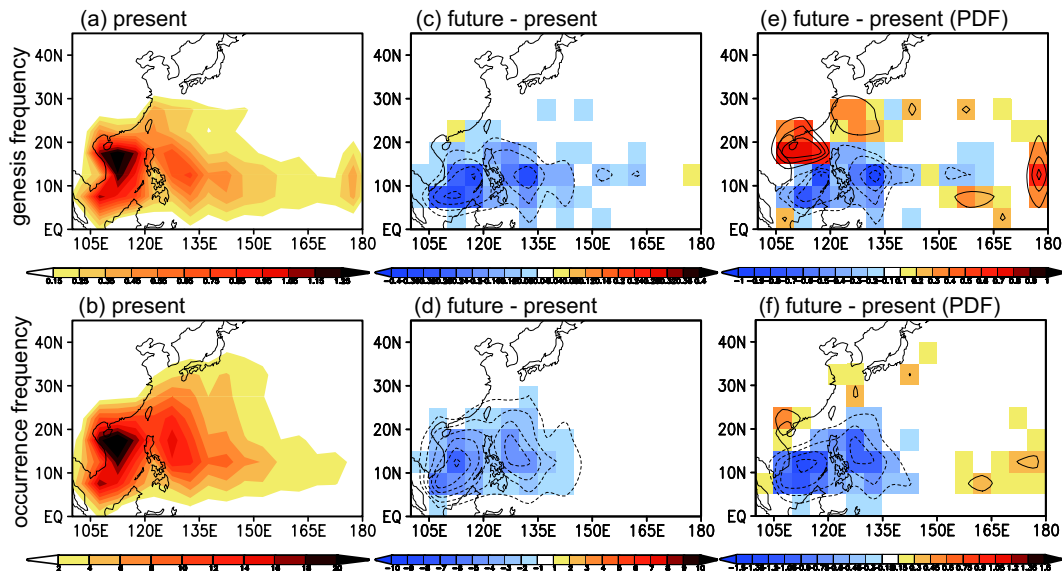


図 4: 台風発生頻度・存在頻度分布の将来変化。発生頻度(上段)と存在頻度(下段)の、(a-b)現在気候、(c-b)現在と将来の差、(e-f)PDFで表した現在と将来の差。(c-f)は90%の信頼限界で有意なところのみ陰影。

- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Murakami, H., B. Wang, A. Kitoh, 2011a : Future change of western North Pacific typhoons: projections by a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Clim.*, **24**, 1154–1169.
- Murakami, H., R. Mizuta, E. Shindo, 2011b : Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM. *Clim. Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-011-1223-x
- Sakamoto, T.T., Y. Komuro, M. Ishii, H. Tatebe, H. Shiogama, A. Hasegawa, T. Toyoda, M. Mori, T. Suzuki, Y. Imada-Kanamaru, T. Nozawa, K. Takata, T. Mochizuki, K. Ogochi, T. Nishimura, S. Emori, H. Hasumi, and M. Kimoto, 2011 : MIROC4h - a new high-resolution atmosphere-ocean coupled general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan.*, *in press*.
- Stott, P.A. and Kettleborough, J.A., 2002 : Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty-first century temperature rise. *Nature*, **416**, 723–726.
- Sugi, M., H. Murakami, J. Yoshimura, 2009 : A reduction in global tropical cyclone frequency due to global warming. *SOLA*, **5**, 164–167.
- Tatebe, H., M. Ishii, T. Mochizuki, Y. Chikamoto, T.T. Sakamoto, Y. Komuro, M. Mori, S. Yasunaka, M. Watanabe, K. Ogochi, T. Suzuki, T. Nishimura, and M. Kimoto, 2011 : Initialization of the climate model MIROC for decadal prediction with hydrographic data assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan.*, *in press*.
- Wang, B., and J. C. L. Chan, 2002 : How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. *J. Climate.*, **15**, 1643–1658.
- Watanabe, M., T. Suzuki, R. O’ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe, and M. Kimoto, 2010 : Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate.*, **23**, 6312–6335, DOI 10.1175/2010JCLI3679.1
- Yokoi, S. and Y.N. Takayabu, 2009 : Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **87**, 525–538.

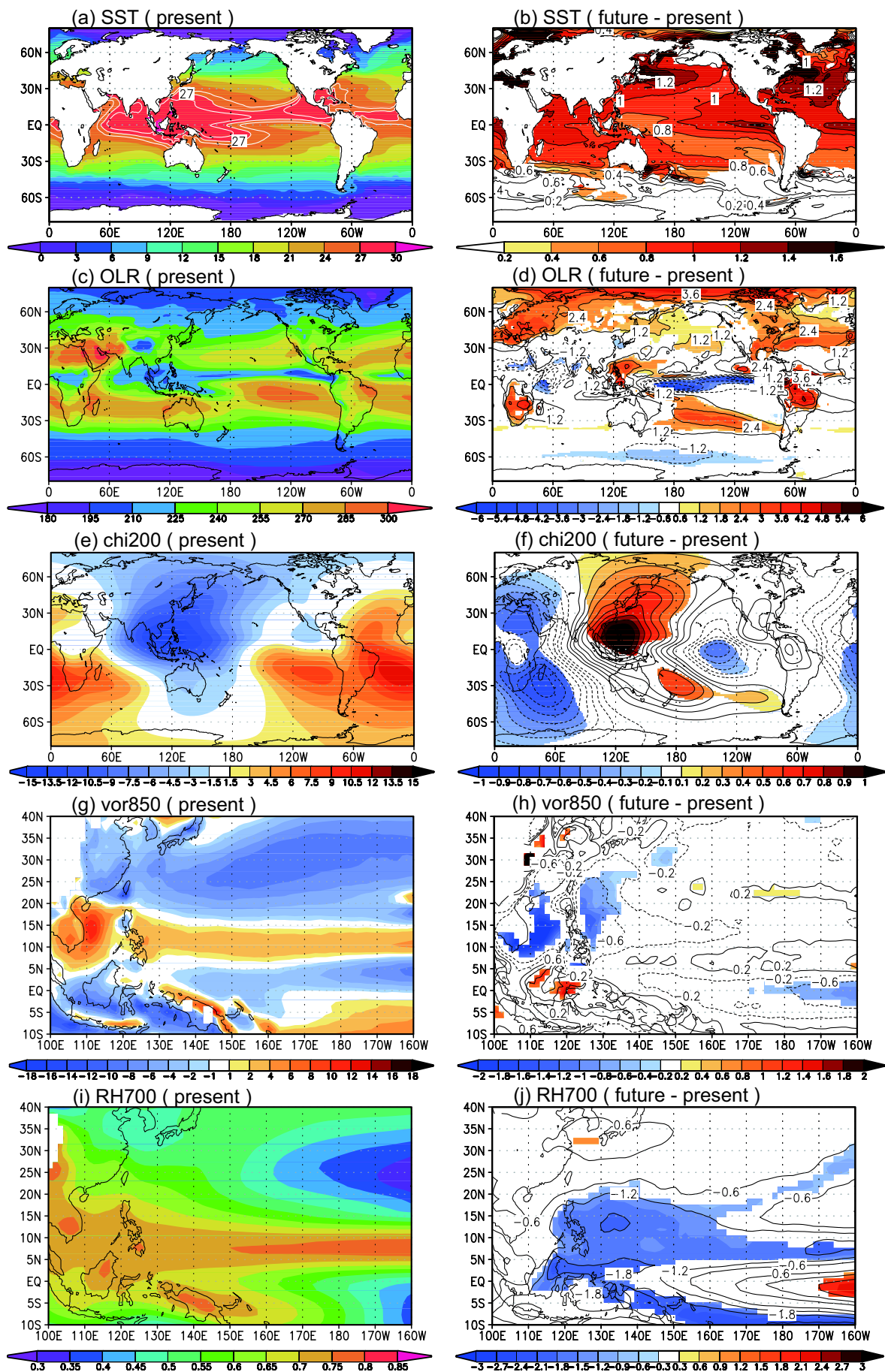


図 5: 大規模場の将来変化。各物理量の現在気候の状態(左列)と、その将来変化(右列)。(a-b) SST、(c-d) OLR、(e-f) 200hPa 面における速度ポテンシャル、(g-h) 850hPa 面における相対渦度、(i-j) 700hPa 面における相対湿度。90%の信頼限界で有意なところのみ陰影。