

課題番号：2A-1201

課題名：CMIP5マルチモデルデータを用いたアジア域
気候の将来変化予測に関する研究

研究代表者：高薮 縁 東京大学大気海洋研究所

研究実施期間：平成24年度～平成26年度

累積予算額：138,349千円

研究体制 (研究協力機関)

サブテーマ1

東京大学大気海洋研究所 高薮縁, 渡部雅浩

東京大宅先端科学技術研究センター 中村尚, 西井和晃

サブテーマ2

気象庁気象研究所 尾瀬智昭, 楠昌司, 安田珠幾, 仲江川敏之, 遠藤洋和
(気象庁気候情報課 前田修平他)

サブテーマ3

筑波大学生命環境系 植田宏昭

サブテーマ4

JAMSTEC 大気海洋相互作用研究分野 城岡竜一, 安永数明, 佐藤尚毅, 横井寛

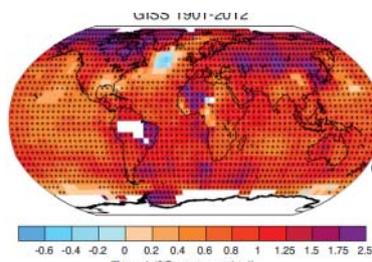
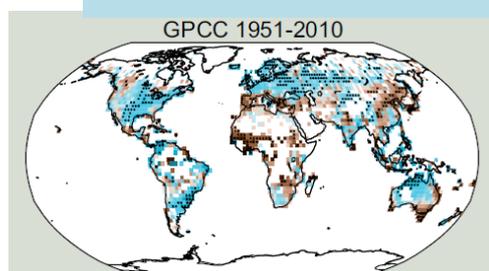
サブテーマ5

JAMSTEC 統合的気候変動予測研究分野 河谷芳雄, 野田彰

研究の背景

- 温暖化による気候変動についてのよりの確な対策のためには温暖化の影響に関する具体的な情報が必要。
- 社会生活への気候変化の影響は、現象（台風、低気圧、梅雨、豪雨、豪雪、干ばつ、熱波など）の変化を通して顕在化する。
- タイの洪水の例のように、日本の気候のみならずアジアの様々な地域の気候変化は、日本社会・経済に直接的な影響をもつ。
- CMIP5気候モデル実験が集約され、IPCC AR5が発行されたが、アジア域の気候（特に降水の）将来変化についての知見はまだ不十分である。

20世紀に観測された降水量変化と気温変化
(IPCC AR5 WG1)



降水は地域差のある複雑な変化をする

本研究の目的

- 持続可能な社会の実現に貢献するため、地球温暖化に伴ってアジア域の気象がいかに変化する可能性をもつかを調査研究する。
- 最新のCMIP5マルチモデルデータと最新の観測データとを利用して得た研究成果を政策策定者および一般市民にわかりやすく報告する。
- 特に日本の社会生活に直接的な影響があるアジア域の雲・降水に関わる現象（気候モデルでの再現性が十分でない）に焦点を当てる。
- 気象学的整合性・物理的合理性を信頼度の根拠とする。

Future Earth

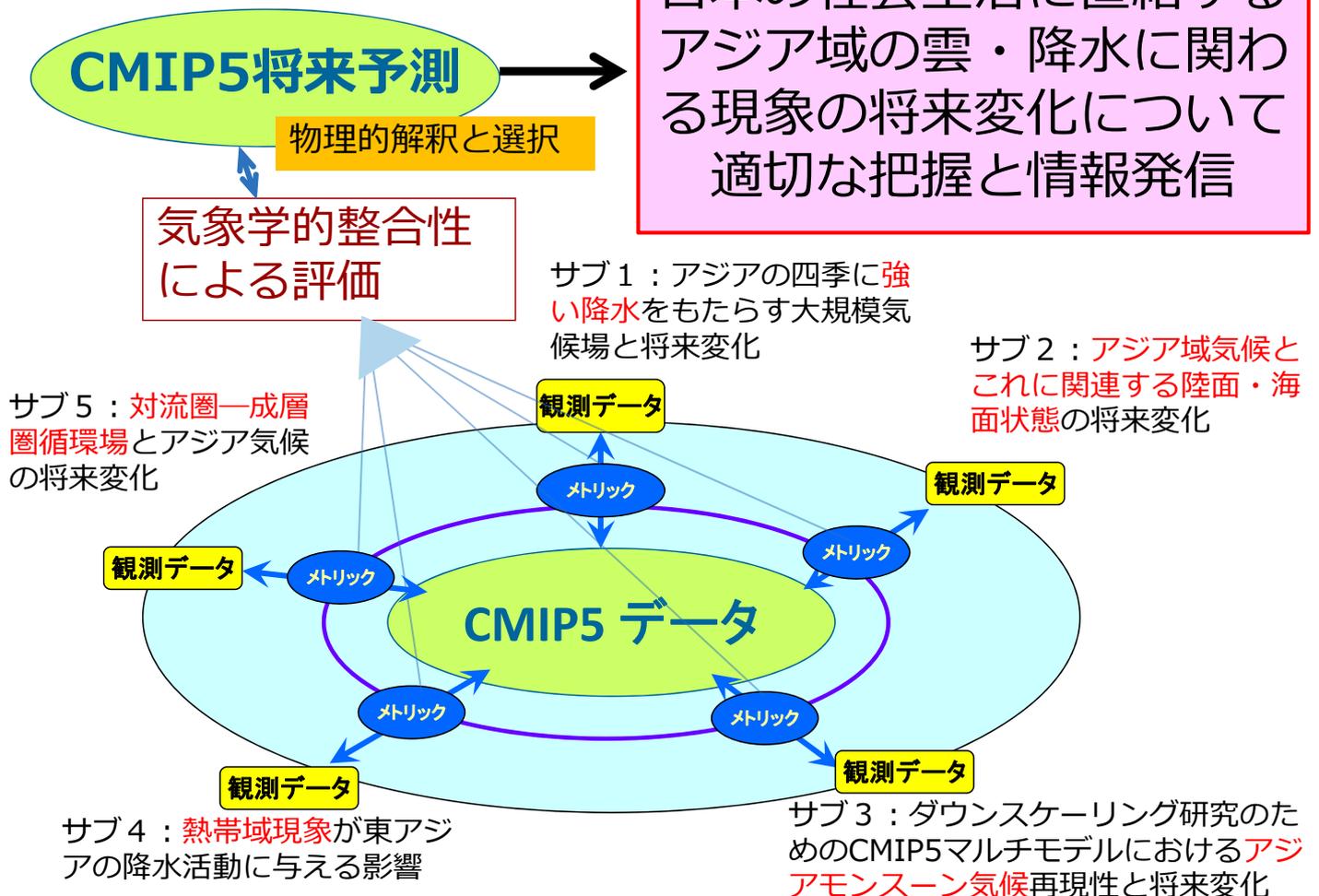
To provide the knowledge required for societies in the world to face risks posed by global environmental change and to seize opportunities in a transition to global sustainability

(FE資料より転載)

Future Earth

社会が地球規模の環境変化によって引き起こされる危険に対峙し、持続可能な世界への移行の機会を的確に掴むため、必要となる知見を社会に提供すること（意識）

研究手法



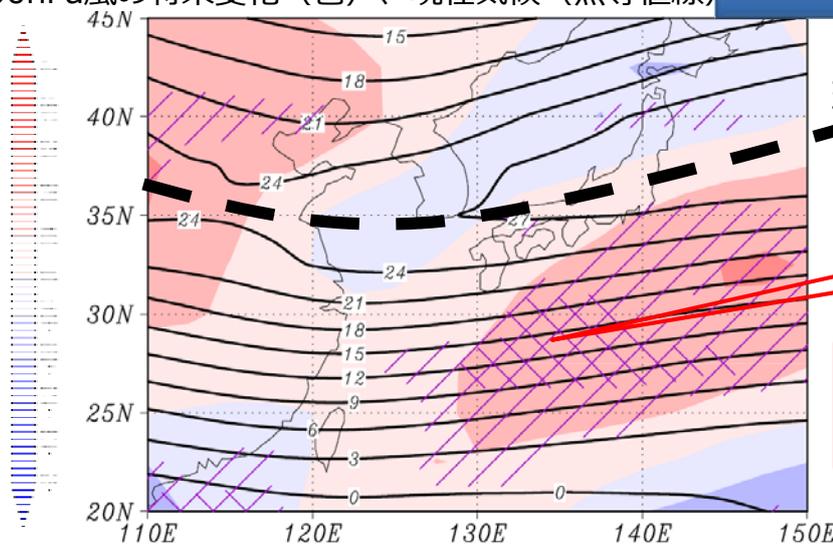
サブテーマ毎の研究成果例

(1-1) 梅雨前線に伴う降雨の将来変化

前提

- 梅雨前線の南北比較 (Yokoyama et al. 2014, J. Climate) : 前線の南側 (下層がより対流不安定) では、背が高く強い対流雨が多い。
- 梅雨前線の位置は大気の循環によって決まる。

200hPa風の将来変化 (色)、現在気候 (黒等値線) **6月の将来変化**



現在の亜熱帯ジェット中心

現在より南で西風強化
(降雨帯は南に)



海面水温上昇に伴う
下層対流不安定度強化
(全般に強い雨が増加)



- 沖縄諸島 (現在は平均的に前線南側に位置)
⇒強雨のさらなる増加とともに、雨量が大きく増加。
- 九州・四国・本州 (現在は平均的に前線北側に位置)
⇒雨量増加。今までは比較的少なかった強雨の頻度も増える可能性。

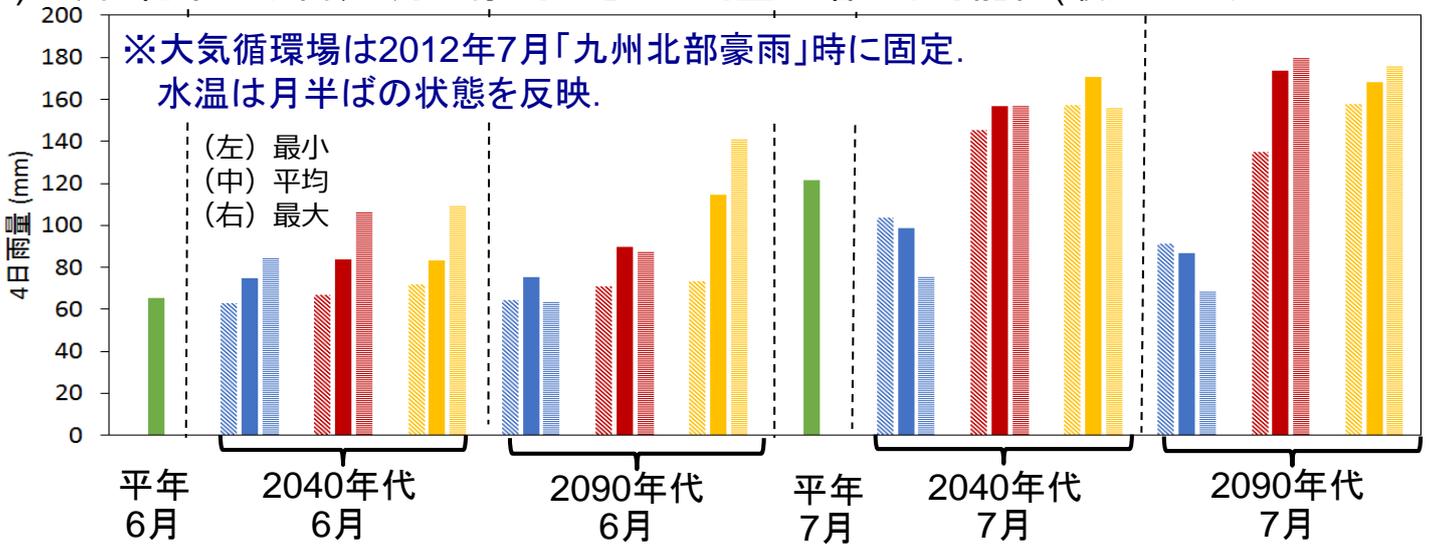
温暖化すると
梅雨が長くなりそうね。
雨の降り方にも注意が必要ね。



(1-2) 将来の東シナ海の温暖化が九州の梅雨期降水量に及ぼす影響

衛星観測に基づく現在の平年水温場に、32のCMIP5モデルによる予測(RCP4.5)に基づく東シナ海の水温上昇を加えた領域大気モデル実験 (3km WRF):

- 1) 今世紀末には「九州北部豪雨」に匹敵する豪雨が6月下旬にも起こり得る。
- 2) 今世紀半ば以降、7月の豪雨はさらに雨量が増える可能性(最大30%)。



●現在の気候条件 — ■

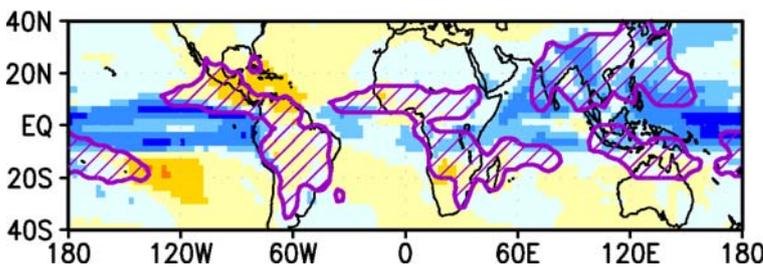
- 将来の気候条件 — ■
 - 大気のみ昇温 (水平一様な成層変化)
 - 大気・海洋共に昇温 (最も現実的)
 - 海洋のみ昇温



(2-1) 「アジア域気候とこれに関連する陸面・海面状態の将来変化の研究」

モンスーン～増加するアジアの雨～

降水量の将来変化 (mm/day)
CMIP5モデル平均 (RCP8.5, 21C末)

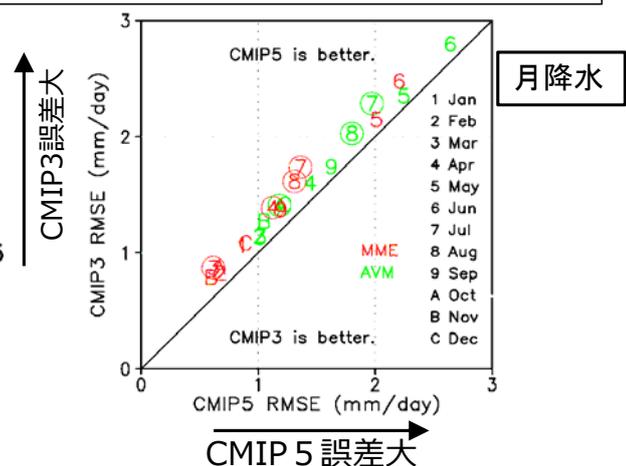


斜線はモンスーン域、暖色系は減少、寒色系は増加

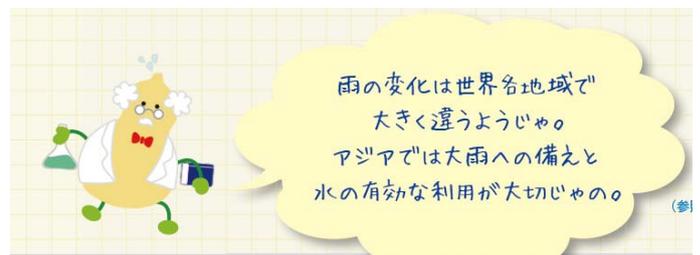
- 温暖化によって水蒸気量が増加するため、世界のモンスーン地域では雨季の降水量は概ね増加するが、力学的効果による地域性も大きい。
- **東アジアを含むアジアモンスーン域**では力学的効果が比較的小さいため、降水量の増加は大きく、その信頼度も高い。

Endo and Kitoh(2014)

CMIP5 vs CMIP3 アジア降雨再現性



アジア域の降雨再現性はCMIP5で改善
Kusunoki and Arakawa (2015, JC)



熱帯の成層の安定化 > 降水量の増加

西太平洋の上昇流の弱化

Knutson and Manabe(1995)
Sugi et al.(2002)
Held and Soden(2006)
...

ウォーカー循環の弱化

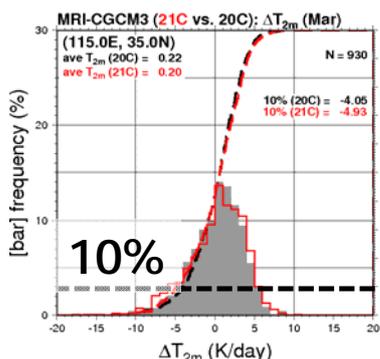
発散風によって励起される赤道波の振幅の低下

1. エルニーニョ側への変化

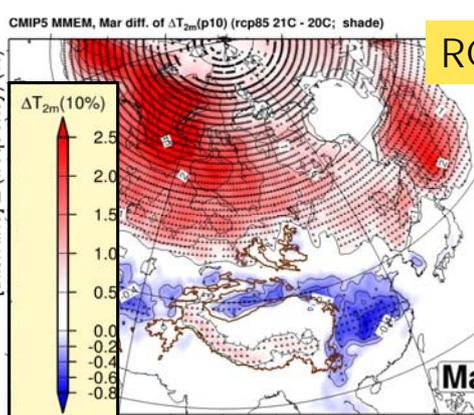
- 夏：チベット高気圧の弱化（北縁を流れる亜熱帯ジェットの南下）
- 冬：日本付近での熱帯起源のロスビー波（気圧の谷）の振幅の低下

ゾーナル温暖化 + 暖冬冷夏傾向への変化

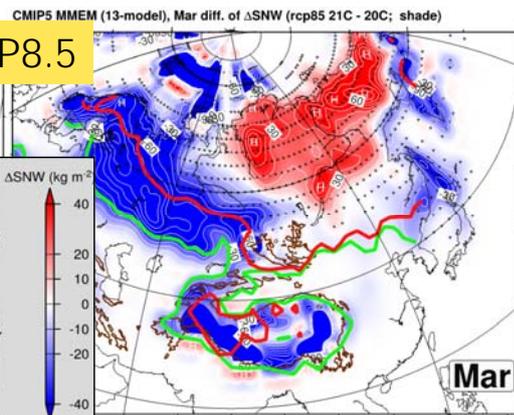
(3) 冬季モンスーン期における日々の気温変動幅の将来変化



- 日平均 T_{2m} の前日からの差，月別に集計
- 顕著な気温低下（例：10パーセントイル値， $\Delta T_{2m}(10\%)$ ）を20C & 21C（各30年）の差で比較



$\Delta T_{2m}(10\%)$ の将来変化，7モデル平均。

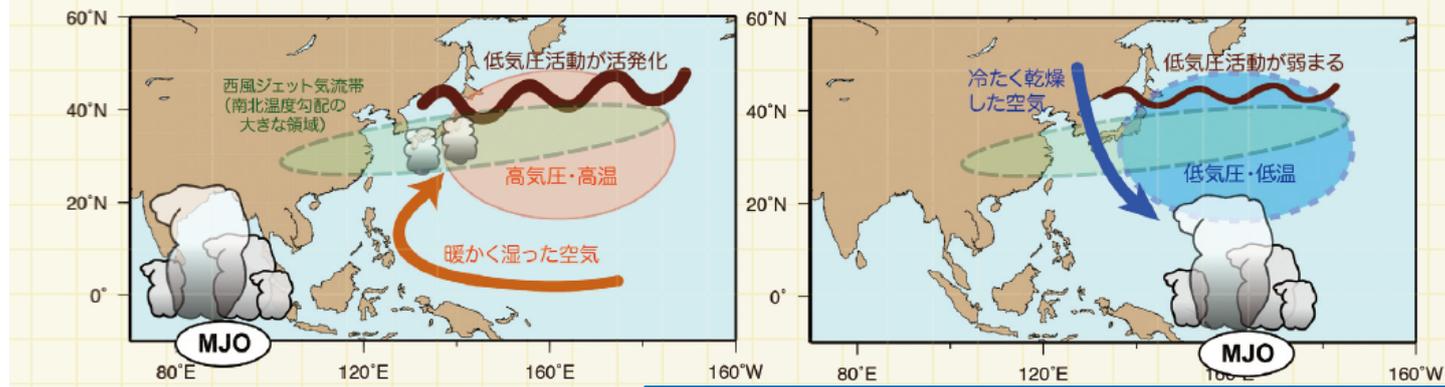


積雪量(kg m^{-2})の将来変化（陰影）．13モデル平均．緑，赤線：20C，21C雪線

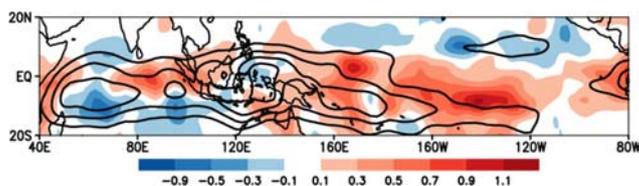
- 高緯度域：海氷 & 陸上積雪の減少域の周辺部で気温低下幅が弱化的。
 - 温暖化すると，日々の気温変動も穏やかに
- 中緯度域（特に中国東部）：2，3月で気温低下幅が現在気候よりも拡大。
 - 温暖化しても，「急に寒くなった」と感じる日は同程度以上発生

温暖化時，北東シベリアでは冬季積雪が増加．積雪被覆域からの寒冷気塊の流出（寒気吹き出し）時，中緯度で顕著な気温低下

(4) MJOが北半球中緯度域の冬季ストームトラック (低気圧活動) 変動に及ぼす影響の将来変化

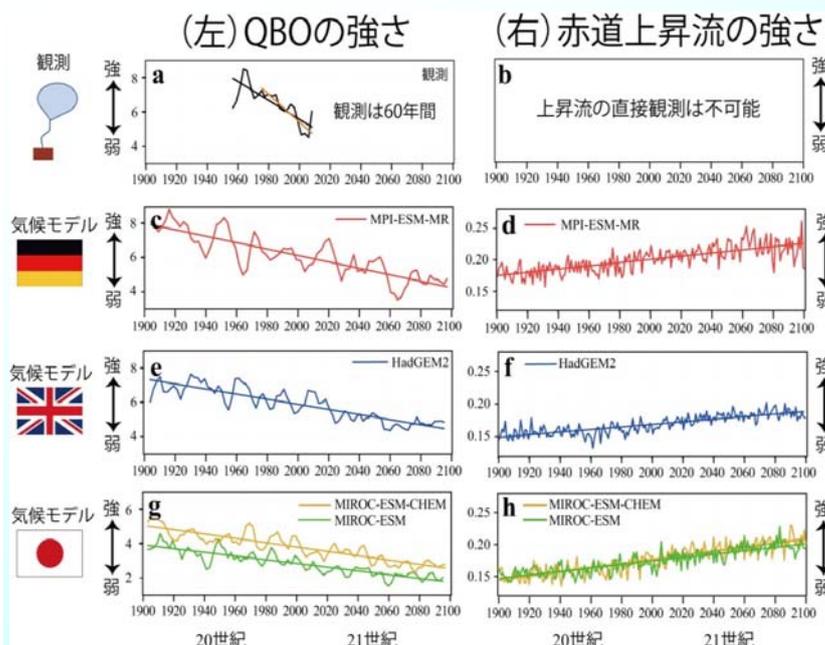


MJO=赤道域を東進する大規模雲群
冬季MJO降水活動の変化 (赤増加、青減少)

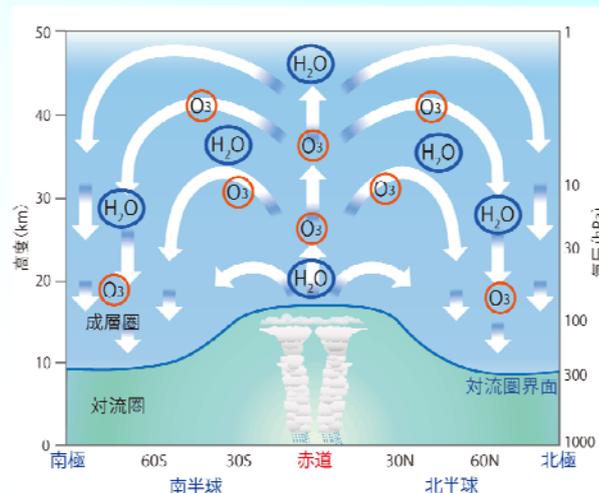


- MJOが熱帯インド洋で活発な時は、東アジア～北西太平洋域で**低気圧性擾乱**の活動が**活発**。MJOが西太平洋で活発な時は低気圧性擾乱は不活発。
- MJO再現性の比較的良い**5つのモデル平均**では、冬季MJO活動 (降水変動) は**中部インド洋と太平洋域で増加**。
- 将来気候では、MJOに伴う中緯度**ロスビー波**応答として、北太平洋域の**循環・気温偏差**の振幅が**増加**する。

(5) 新たな温暖化シグナルを成層圏に発見！地球規模循環場の変化



成層圏地球規模の子午面循環
O₃, H₂O等が全球へ運ばれる



- 観測データから初めて**QBOの弱化傾向を発見**
- 温暖化に伴う**成層圏子午面循環の強化**が原因
- 新たな**地球温暖化シグナルを成層圏**で発見
- **オゾンホール回復に関する検討**に大きな示唆

成層圏水蒸気は放射強制力が大
成層圏水蒸気の年々変動の実態とそのメカニズムを解明

温暖化時のQBO振幅の弱化に伴い
下部成層圏の年々変動も弱化へ

研究成果（科学的貢献）

- (1) 梅雨前線に伴う降水特性分布と再現性・経年変化
- (1) CMIP5モデルにおける梅雨期の大気場と降雨の将来変化
- (1) CMIP5モデルの熱帯積雲対流の表現と熱帯降水分布の再現性
- (1) ユーラシア大陸の夏の降水バイアスの要因の解明・日変化の再現性
- (1) 梅雨末期の九州の豪雨に対する東シナ海の季節的昇温の影響の同定と将来の温暖化の影響評価
- (1) 沖縄付近の黒潮が梅雨期の対流性降水帯の組織化に与える影響の同定
- (1) 冬季東方海上における雲・降水系形成への海洋前線帯の影響
- (1) CMIP5モデルにおける地表面蒸発の将来変化の分析
- (1) CMIP3・5モデルにおける夏季北極域ストームトラックの再現性と将来変化の評価
- (1) 太平洋大気海洋系10年規模変動の長期変動の同定
- (1) 秋雨降水帯の形成メカニズムとCMIP3・5モデルにおける再現性
- (2) 冬季・夏季モンスーン降水量の再現性と将来変化
- (2) 熱帯の海面水温分布変化に伴う東アジアの降水量変化
- (2) 日本域海面高度の将来変化
- (2) 東アジアの梅雨期降水量および極端降水現象の再現性（CMIP5 vs CMIP3）
- (2) 日本域・アジア域のジェット気流の再現性と将来変化
- (2) 将来の熱帯大気大循環の弱体化が東アジアと北太平洋気象に与える影響の評価
- (3) アジアモンスーン循環と雨の将来変化
- (3) 冬季モンスーン期における日々の気温変動幅の将来変化
- (4) 冬季の熱帯対流活動に影響される東アジア-北西太平洋域の温帯低気圧活動と降水量将来変化
- (4) 台風通接近数のマルチモデル将来予測
- (5) 成層圏での地球温暖化シグナルを観測データから初めて発見
- (5) 成層圏現象を解像する気候モデルにより温暖化に伴う成層圏循環変化の効果を解明
- (5) 成層圏の水蒸気量（気候に効果大）の年々変化の実態を解明

一般向パンフレット「暑いだけじゃない地球温暖化2」



研究成果の概要

アジア域の降水に係る様々な現象の将来変化予測
↓
政策策定者・市民への発信

大規模赤道雲群 (MJO)の温帯低気圧への遠隔影響の増加

気候モデルのユーラシア雲不足→アジアの夏降雨過大

気候モデルの成層圏表現の重要性

アジア域降水再現性 CMIP5で3より改善

冬の気温の日々変動幅の増幅

アジアモンスーンの将来の雨量増加・集中

海面水温上昇 → 豪雨増加

暖冬傾向
梅雨前線付近で急な雨特性変化

台風経路は東よりに

成層圏に温暖化シグナルを発見

梅雨前線の将来の雨量増加

気候モデルの積雲対流表現の重要性

熱帯循環の弱化

夏 冬
観測的発見
気候モデルへのフィードバック

環境政策への貢献

- 最新のデータを用いた科学的な研究に基づき、地球温暖化に伴ってアジア域の降水や気象がいかに変化するかについて具体的な知見の多くを得た。これはFuture Earthに謳われている「社会が地球規模の環境変化によって引き起こされる危険に対峙し、持続可能な世界への移行の機会を的確に掴むため、必要となる知見を社会に提供する」ことに貢献する。
 - 日本域の雨の様相の急激な変化の可能性について
 - 日本周辺の海水温上昇に伴う豪雨季節の変化の可能性について
 - 温暖化に伴う日本域の海面水位上昇について
 - 温暖化時の台風の発生と経路の変化について
 - 熱帯気象が温帯低気圧活動に与える遠隔影響の増幅について
 - アジア域は気温上昇に伴う水蒸気増加に従って雨が増加：雨の備えが必要
- (参考) 当グループによるIPCC AR4引用論文 17本
- 一般講演、新聞報道、パンフレット作成配布などにより、温暖化に伴う生活環境変化について（身近な現象の変化を通しての）国民レベルでの理解の促進のための活動を行った。
- 成層圏の地球規模の流れの強化の観測的な実証から地球温暖化の傍証およびオゾンホール回復に関する示唆を得た。

1. Nature 2013年5月23日号に本推進費の研究が掲載&メディア多数



LETTER

Weakened stratospheric quasi-biennial oscillation driven by increased tropical mean upwelling

Yuhua Kawazumi¹ & Kevin Handberg²

The semi-annual wind in the tropical stratosphere switches between prevailing westerlies and easterlies with a period of about 28 months¹. In the lower stratosphere, the vertical structure of this quasi-biennial oscillation (QBO) is linked to the mean upwelling², which itself is a key factor in determining atmospheric composition. Evidence for changes in the QBO have still not been equated with questions as to the extent of atmospheric circulation changes in a global warming context. Here we report an analysis of an equatorial zonal wind observation for 1953–2012 and reveal a long-term trend of weakening amplitude in the semi-annual QBO in the tropical lower stratosphere. The trend is particularly notable at the 50 hPa level, where the QBO amplitude dropped by roughly one-third over the period. This trend is also apparent in the global warming simulations of the four models in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) that realistically simulate the QBO. The weakening is most seasonally explained as the lower stratosphere. Almost all comprehensive climate models have predicted an intensifying tropical upwelling in global warming scenarios³. We attempt to estimate changes in the upwelling by using observational data for equatorial zonal winds, temperature and moisture⁴. Our diagnosis of a weakening trend in the lower stratosphere QBO amplitude provides strong support for the existence of a long-term trend of enhanced upwelling near the tropical tropopause.

Like the semi-annual cycle, the QBO has an interdecadal periodicity. The mean wind accelerations during the QBO are thought to be largely forced by interactions of the mean and wind with vertically propagating waves generated in the tropical troposphere (Dobson circulation). This mechanism has been incorporated into simple dynamical models^{5,6} and has been shown to reproduce the interdecadal variability of the QBO^{7,8}. The period and vertical structure of the oscillation depend on the same basic physics entering the tropical troposphere and also on the mean tropical upwelling, which is associated with the mean meridional circulation of the atmosphere, or lower-Dobson circulation. The wave-induced QBO decaying phase is opposed to the mean upwelling⁹, and, therefore, the generation of the QBO is very strongly dependent on the strength of the mean upwelling.

A number of earlier studies have looked at whether the period of the QBO exhibits systematic long-term trends or dependence on such factors as solar activity or the El Niño/Southern Oscillation (ENSO)^{10–12}. These data sets were used to draw long-term trends in the period of the QBO, and we will look at a detailed explanation of the cycle-to-cycle variability of the QBO period apparent in the observations. Whether the variability of the period has been studied extensively, there are apparently no earlier studies on the question of systematic long-term QBO amplitude changes, possibly from a simple inspection of the raw time series data (Supplementary Fig. 2). This indicates that cycle-to-cycle amplitude may change more rapidly than the period. The issue of possible long-term changes in amplitude arose from our initial analysis of the response of the QBO to the mean upwelling in our dynamical model. We found a predicted small increase in the mean period, but one that would be hard to detect against the large cycle-to-cycle variability in the observed wind. This apparent was a significant reduction in QBO amplitude, particularly near the lower stratospheric levels. In the model, the reduction in the QBO amplitude is clearly caused by an enhancement of the mean upwelling rate of the tropospheric air into the stratosphere (Supplementary Fig. 3).

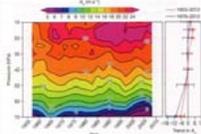
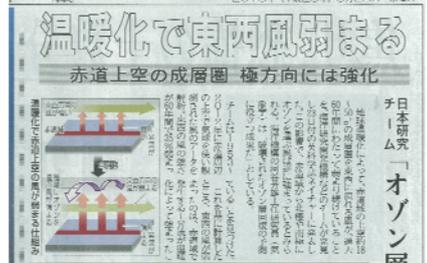


Figure 1 | Time-height section of the zonal wind in the tropical stratosphere. The color scale indicates the zonal wind speed in m/s. The x-axis shows the year from 1953 to 2012, and the y-axis shows the pressure in hPa from 1000 to 100. The plot shows a clear oscillatory pattern with a period of approximately 28 months, characteristic of the QBO.



Acknowledgements This work was supported by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology through its support of the International Pacific Research Center, by the Environment Research and Technology Development Fund (A-1201) of the Ministry of the Environment, Japan and by JSPS KAKENHI grant nos 23740363

朝日新聞、産経新聞、毎日新聞、科学新聞他の朝刊
共同通信、時事通信、Science Daily他の多くのメディア →研究成果を一般市民へ

2. Nature Com2014年7月号に本推進費の研究が掲載&メディア多数

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN

Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon

Aoyoshi Manda¹, Hisashi Nakamura², Naruhiko Asano³, Satoshi Iizuka⁴, Toru Miyama⁵, Osamu Motoki⁶, Mayumi K. Yoshida⁷, Kazuhiko Nishii⁸ & Takafumi Miyasaka⁹

¹Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies, Nagasaki University, Nagasaki, 852-8521, Japan, ²Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8604, Japan, ³Monitoring and Forecast Research Department, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba, 305-0006, Japan, ⁴Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, 230-0001, Japan, ⁵Department of Coupled Ocean-Atmosphere-Land Processes Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, 237-0061, Japan, ⁶Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, 980-8578, Japan.

Monsoonal airflow from the tropics triggers torrential rainfall over coastal regions of East Asia in summer, bringing flooding situations into areas of growing population and industries. However, impacts of rapid seasonal warming of the shallow East China Sea (ECS) and its pronounced future warming upon extreme summertime rainfall have not been explored. Here we show through cloud-resolving atmospheric model simulations that observational tendency for torrential rainfall events over western Japan to occur most frequently in July cannot be reproduced without the rapid seasonal warming of ECS. The simulations also suggest that the future ECS warming will increase precipitation substantially in such an extreme event as observed in mid-July 2012 and also the likelihood of such an event occurring in June. A need is thus urged for reducing uncertainties in future temperature projections over ECS and other marginal seas for better projections of extreme summertime rainfall in the surrounding areas.

Global climate model projections for the 5th Assessment Reports (AR5) of the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) indicate that the global hydrological cycle will intensify in future under the 'global warming', with increasing precipitation over wet climate regions at present, especially in the tropics and summertime subtropical/midlatitude Asia¹, a region of growing economy and population. In these regions summertime precipitation is produced mostly by meso-scale convective systems, which occasionally yield extremely heavy rainfall locally causing serious flooding and/or landslides with casualties. Owing to their smallness, however, convective systems are not represented explicitly in any of the current IPCC global climate models. To assess future occurrence of convective precipitation extremes, one currently needs to rely on effective use of a cloud-resolving regional model into which future changes in large-scale atmospheric state projected by global climate models are somehow incorporated, for example, through the 'pseudo-global warming (PGW)' approach².

Extreme rainfall events occur under convectively-unstable stratification, which requires warm, moist air near the surface. Through the nonlinear Clausius-Clapeyron relationship between saturated vapor pressure and temperature, amount of near-surface moisture available for convective rainfall is highly sensitive to sea-surface temperature (SST) over the warm ocean³. During the last century, ECS has undergone persistent warming that is greater than the averaged warming over the global ocean⁴, and the climate model projections suggest that the pronounced warming is likely to continue into future⁵. Resolutions of the current IPCC models are, however, insufficient for reproducing fine SST distributions along the warm western boundary currents and continental marginal seas, including the Kuroshio and ECS, respectively.

The IPCC climate models project a future increase in summertime precipitation over East Asia¹, including Japan, where the Asian summer monsoon brings the wettest season in June and July (Fig. 1). Heavy convective rainfall often occurs when near-surface monsoonal southwesterlies carry moist air from the tropical oceans toward a quasi-stationary seasonal rain front called 'Baiu (Meiyu) front'⁶, extending from subtropical China to Japan (Fig. 1a). The moist airflow is most likely to affect the western portion of Kyushu, the westernmost main island of Japan facing ECS. Due to its bathymetric effect⁷, the shallow ECS is cooled off strongly by

東シナ海水温上昇で九州に豪雨 7月発生、研究結果

2012年の九州北部豪雨など、九州で例年、梅雨が明ける7月に発生する集中豪雨は、東シナ海の水温上昇が重要な要因となっているとする研究結果を、長崎大と東京大などの研究チームがまとめた。18日、都内で記者会見して発表した。

研究チームは、地球温暖化の影響による水温上昇が続けば、今世紀半ば以降は現在より雨量が増える恐れがあると指摘。今世紀末には豪雨の発生時期が6月下旬に早まる可能性もあるとした。

長崎大の万田敦昌准教授らは、コンピューターを使ったシミュレーションで、12年7月中旬の九州北部豪雨の気象状況を再現、東シナ海海面水温のみを変化させ、雨量を調べた。

2014/07/18 19:58 【共同通信】

共同通信、NHK他の多くのメディアへ→研究成果を一般市民へ

活動報告 1 (2012.6-2015.3)

研究会議開催

- ◎研究打ち合わせ会議 2012/6/7,12/26, 2013/7/11, 2014/5/8,2015/2/24
- ◎アドバイザー会合 2012/10/10, 2013/9/9,2014/10/3
- ◎国際会議主催
 1. 2013.3.26-27 つくば国際会議場 (8カ国、62名参加)
International workshop on CMIP5 model inter-comparisons for future projections of precipitation and climate in Asia
 2. 2014.1.13-17 TKP Garden City 竹橋 (70名参加 海外から15名)
Second International Workshop on CMIP5 Model Inter-comparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia
in collaboration with "The 4th Global Precipitation Measurement (GPM) Asia Workshop on Precipitation Data Application Technique"
 3. 2015.3.27 TKP Garden City御茶ノ水
Third International Workshop on CMIP5 Model Inter-comparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia (開催予定)
- ◎日本気象学会2013年度春季大会 専門分科会主催
「CMIP5マルチモデルデータによる将来変化予測研究の展望」
- ◎日本気象学会2015年度春季大会 専門分科会主催

活動報告 2 (2012.6-2015.3)

アウトリーチ活動 (一般向け講演他) 「国民との対話」

- ◎2012.10.17 並木中等教育学校 SSH講演会 参加160名
「雨はどうしてふるのでしょうか？」 (高薮)
- ◎2013.5 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 白教授に一般向けパンフレット
「暑いだけじゃない地球温暖化」を送付。講義および演習に利用される。
- ◎新聞発表: 1.降水特性について(高薮) 2.成層圏循環変化について(河谷 Nature論文)
- ◎2013年10月12日 JAMSTEC施設一般公開サイエンスカフェで講演(一般向け)
「雲より高い場所で地球温暖化のシグナルが見つかった！」(河谷) 参加約100名
- ◎2013年11月5日 九州大学理学部惑星科学教室談話会(専門外の聴衆)(河谷)
「成層圏で新たに発見された地球温暖化シグナル」
- ◎2014年8月30日 NHKスペシャル「巨大災害」第1集「異常気象」(中村、植田)
- ◎2014年6月7日 東京大学駒場第2キャンパス公開 公開講演会
"異常気象: その仕組みと地球温暖化との関係"(中村)
- ◎2014年5月16日 交詢社 講演(東京) タイトル同上(中村)
- ◎2015年2月20日 並木中等教育学校 SSH見学講習 参加21名 (高薮)

成果発表

- ◎査読付国際誌 33件
 - Nature誌 (Kawatani and Hamilton, 2013)
 - Nature Com誌 (Manda, Nakamura et al. 2014)
- ◎口頭発表(学会等) 183件