

世界における降水量と降水特性の長期変化

遠藤 伸彦* 松本 淳** 山本 奈美***
福島 あずさ**** 赤坂 郁美****

Recent Changes of Precipitation Amount and its Characteristics in the World

Nobuhiko ENDO*, Jun MATSUMOTO**, Nami YAMAMOTO***,
Azusa FUKUSHIMA**** and Ikumi AKASAKA****

Abstract

Recent advances in studies on long-term changes in precipitation amount and its characteristics in the world and its regional aspects are reviewed. According to the IPCC Fourth Assessment Report (IPCC, 2007), global annual land precipitation has increased about 1.08–1.10 mm per decade since 1901. Precipitation amount mainly increased in middle and high latitudes. Increases in winter precipitation are obvious in Eurasia, North America and northern Europe. On the other hand, decreasing tendency are observed in southern Europe, northern Africa, and South and Southeast Asia. There is no evident trend in Oceania and Central America. Although a long-term increasing trend is seen in the global land average precipitation, there are distinct decadal-scale temporal variations in precipitation time series.

It is expected that precipitation characteristics, such as precipitation frequency, and intensity, will increase because of an increase in the water holding capacity of the atmosphere in a future warmer world. Changes in precipitation characteristics have been investigated in many regions around the world. The frequency of heavy precipitation has tended to increase in several countries in the middle and high latitudes during recent decades. In Central America and the Caribbean region, interannual variations related to SST variations in the tropical Pacific and the tropical Atlantic were observed.

The contribution of very wet days to annual total precipitation across the globe has sharply increased in recent decades. However, daily precipitation data used for investigating on the precipitation characteristics are very limited, particularly, in African and Southeast Asian regions. Thus, the long-term changes in precipitation characteristics presented in a number of recent global and regional reports are not very reliable for these regions. Data rescue activity, particularly, for the first half of the 20th century is urgently needed in such sparse data regions, as Africa and Southeast Asia.

* 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター

** 首都大学東京大学院地理環境科学専攻・海洋研究開発機構地球環境観測研究センター

*** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

**** 首都大学東京大学院地理環境科学専攻

† 現所属：独立行政法人科学技術振興機構 JST イノベーションサテライト滋賀

* Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine Science and Technology

** Department of Geography, Tokyo Metropolitan University;

Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine Science and Technology

*** Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

**** Department of Geography, Tokyo Metropolitan University

† Present address: Japan Science and Technology Agency, JST Innovation Satellite Shiga

Key words : global warming, climate change, precipitation amount, precipitation characteristics, heavy precipitation

キーワード : 地球温暖化, 気候変化, 降水量, 降水特性, 豪雨

I. はじめに

多くの気候モデルの結果で、地球温暖化時には気温の上昇により大気中の水蒸気量が増加し、また海水温の上昇により蒸発量が増加するため、全球平均降水量が増加すると指摘されている (Trenberth *et al.*, 2003; IPCC, 2007 など)。一方、IPCC (2007) による降水量の解析結果では、1970 年以降にみられる急激な全球平均での地上気温上昇に対応するような全球平均での降水量の変化は認められず、降水量に対する地球温暖化の影響は必ずしも明瞭ではない。本報告では、松本・山本 (2007) の報告に、IPCC (2007) をはじめとする最近の世界各地での研究成果や、著者らによる新たな解析結果などを加えて、過去の観測結果から得られる世界各地における最近の降水量、および降水特性の長期変化の特徴を、主に豪雨の発生傾向に着目して概観する。

II. 降水量の変化

IPCC (2007) では、CRU (Mitchell and Jones, 2005) と GHCN (Peterson and Vose, 1997) の二つの降水量データセットを使用して、陸上における年降水量の長期的な変化傾向を評価している。その結果、CRU データでは 10 年あたり 1.10 mm (統計期間 1901 ~ 2002 年)、また GHCN データでは 10 年あたり 1.08 mm (統計期間 1901 ~ 2005 年) と、統計的に有意な増加傾向が認められた。しかし、年降水量は単調に増加しているわけではなく、近年の急激な気温上昇に対応するような変化は認められていない。年降水量はピークが 1950 年代に出現した後に、1970 年代から 1990 年代前半にかけて減少し、近年再び増加しており、全体として数十年スケールでの変動が卓越している (図 1)。

降水量の長期変化傾向を地域別にみると、北米

中央部および東部、ヨーロッパ北部、アジア北部、中央アジア、南米南部で顕著な増加が認められる。特にユーラシア・北アメリカ・ヨーロッパ北部での冬季の増加傾向が顕著である。逆に南ヨーロッパと北アフリカから東南アジアにかけての熱帯地域では減少傾向にある。また中央アメリカ・オセアニアでは、一貫した変化傾向はみられない (IPCC, 2007)。アフリカ・サヘル地方の降水量は、1960 年代以降顕著な減少傾向にあったが、1990 年代は 1980 年代前半に比べて、サヘル地方平均での降水量が約 50 mm 程度回復した (Nicholson *et al.*, 2000; Dai *et al.*, 2004)。

また、降水量には長期的な変化傾向のほか、十年ないし数十年スケールでの変動もみられる。Kripalani and Kulkarni (1997) によると、東南アジアにおいては、赤道に近い所では十年程度で多雨期と小雨期が入れ替わるが、赤道からやや離れた地域では、多雨期・少雨期はそれぞれ 30 年ほど継続する傾向がある。一般に長期的傾向の変化量に比べ、十年~数十年スケールでの変動の方が変動幅は大きく、長期変化傾向の解析を難しくしている。また Kripalani *et al.* (2003) は、1871 ~ 2001 年の 131 年間の期間では、全インドの夏のモンスーン期の降水量には、地球温暖化の影響は認められないとした。全世界のモンスーン地域について 1948 ~ 2003 年の期間での降水量変化を既存のグローバル・データセットからまとめた Wang and Ding (2006) は、世界の陸上モンスーン地域では降水量が減少傾向にあるものの、1980 年以降にはめだった傾向はみられないこと、他方で海洋上のモンスーン地域で降水量が 1980 年以降に増加傾向にあると報告した。

地球温暖化の降水量への影響は、月や年単位以上の長期間での平均値だけでなく、平均値から大きくはずれた極端な値の出現、すなわち異常多雨や異常少雨の頻発としてあらわれる可能性がある

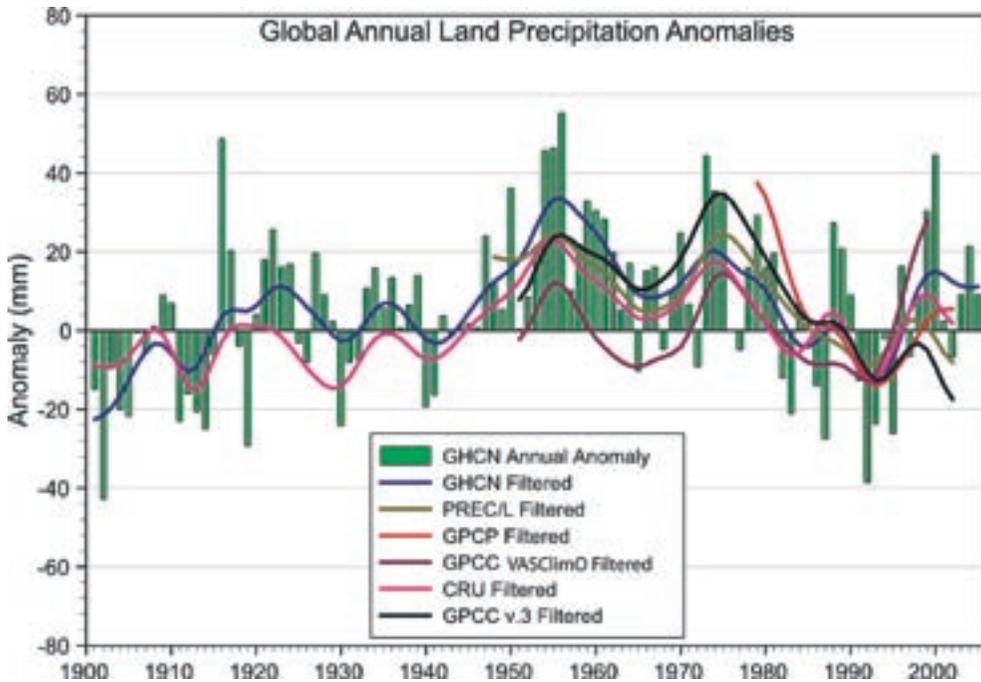


図 1 1900～2005年にかけてのGHCNデータによる全球陸域平均年降水量偏差の時系列(IPCC, 2007).

偏差は、1981～2000年の平均値からの差であり、単位はmm。スムーズな曲線は十年から数十年スケールの変動を示し、それぞれの曲線はGHCN (Peterson and Vose, 1997)、PREC/L (Chen *et al.*, 2002)、GPCP (Adler *et al.*, 2003)、GPCC (Rudolf *et al.*, 1994) and CRU (Mitchell and Jones, 2005) の各データセットによるものである。

Fig. 1 Time series of annual land precipitation anomaly based on GHCN data for 1900–2005 (IPCC, 2007).

The anomaly is the difference from mean precipitation between 1981 and 2000. Smoothed lines indicate decadal to inter-decadal variations. Each smoothed lines is based on GHCN (Peterson and Vose, 1997), PREC/L (Chen *et al.*, 2002), GPCP (Adler *et al.*, 2003), GPCC (Rudolf *et al.*, 1994) and CRU (Mitchell and Jones, 2005), respectively.

る。気象庁(2005)によると、1901～2004年における月単位での異常多雨(上位1～3位)と異常少雨(下位1～3位)は、異常多雨がヨーロッパ・北アメリカ・南アメリカ南部地域で増加する傾向にあり、異常少雨が南アメリカ南部やオーストラリア東部地域で減少する傾向にある。一方、インド域では異常多雨・異常少雨ともにめだつた傾向はみられない。

III. 豪雨発生の変化

地球温暖化の影響はまた、数日以下の短い時間スケールでの降水強度にもあらわれ、豪雨など極

端な現象が増えることが予想されている(Trenberth, 1999; Trenberth *et al.*, 2003; IPCC, 2007など)。Iwashima and Yamamoto (1993)は、日本とアメリカ合衆国での近年の豪雨増加傾向を指摘してこの種の研究の先鞭をつけた。Easterling *et al.* (2000)は、その後の世界各地での研究を総括して豪雨発生傾向の分布を世界地図上にまとめ、Groisman *et al.* (2005)は、それを改訂した図を示した。IPCC (2007)は、さらに最近の研究成果をレビューして図を再改訂した(図2c)。多くの地域で増加傾向がめだつものの、詳細に地域的にみると必ずしも傾向は一様ではない。

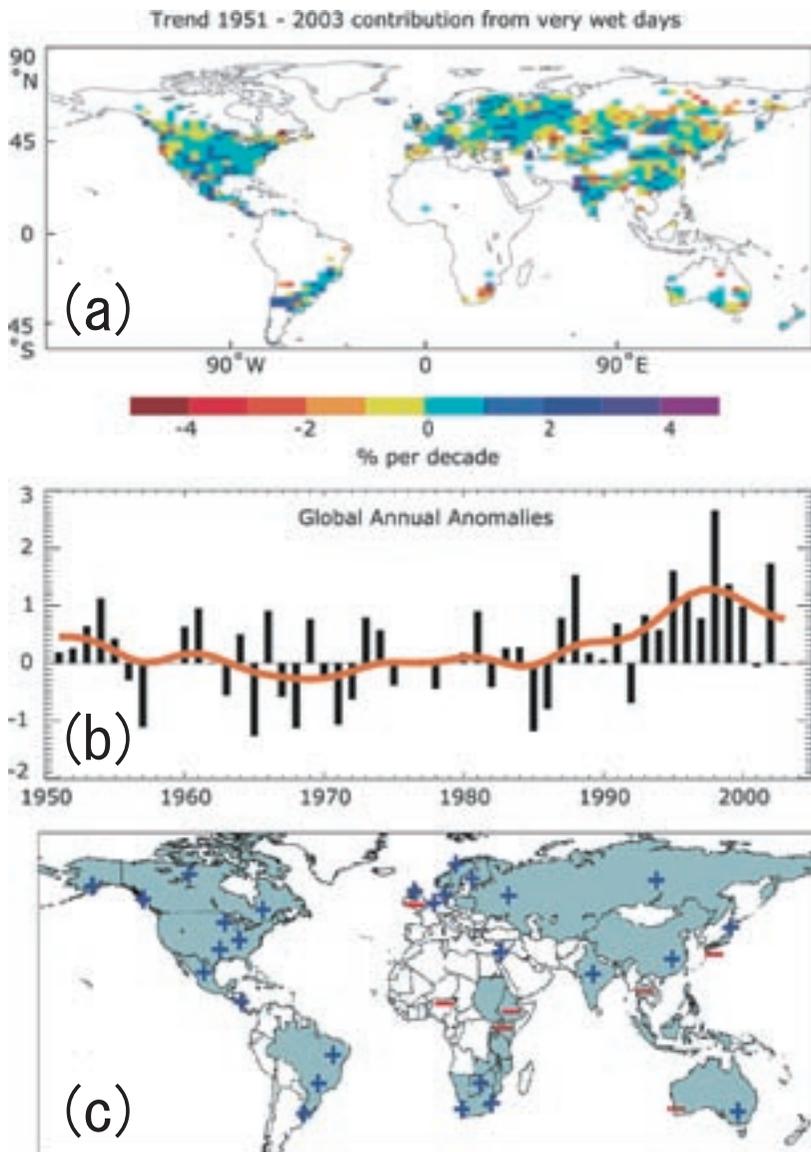


図 2 世界の陸上における降水特性の変化 (IPCC, 2007).

(a) 1951～2003年の期間における、非常に強い豪雨日(95パーセントイル)の降水量が年降水量に占める割合のトレンド。単位は10年あたりの%。(b)非常に強い豪雨日(95パーセントイル)の降水量が年降水量に占める割合の、長期平均値(1961～1990年)からの偏差の全球陸域平均の時系列。単位は%。図中の赤い曲線は十年から数十年周期変動を示す。(c)世界の陸上における観測データによる最近数十年間以上の期間における豪雨の長期変化傾向の分布。アミかけた国がデータのある国で、+は増加傾向を-は減少傾向を示す。

Fig. 2 Changes in precipitation characteristics over the global landmass (IPCC, 2007).

(a) Spatial distribution of trends in the contribution of very wet days to annual precipitation for 1951-2003. Unit is percent per decade. (b) Anomaly time series of the contribution of very wet days to annual precipitation over land. Base period is 1961-1990. Unit is percent. Red line indicates decadal to inter-decadal variations. (c) Long-term tendency of heavy precipitation over the worldwide. Countries examined are shaded, and + (-) indicate increasing (decreasing) trend.

ヨーロッパ全域の研究 (Klein Tank and Konnen, 2003) では、中部ヨーロッパや旧ソ連のヨーロッパ域を中心に 1946 ~ 1999 年の期間に豪雨日の降水量が年降水量に占める割合が増加している地点が多い。またヨーロッパ・ロシアやスカンジナビア諸国でも年降水量・豪雨頻度ともに増加傾向にある (Groisman *et al.*, 2005)。地中海沿岸の多くの地域で年降水量が減少しているにもかかわらず、豪雨による降水量の割合が増加している (Brunetti *et al.*, 2001; Alpert *et al.*, 2002; Maheras *et al.*, 2004)。一方、イギリスでは冬季には強い降水が増加する傾向にあり、夏季には強い降水が 1930 年代以降 1960 年代までは増加傾向、それ以降は減少傾向にある (Osborn *et al.*, 2000)。スイスでは 20 世紀全体を通して、秋季や冬季に降水強度や豪雨頻度の増加傾向がみられる (Schmidli and Frei, 2005)。中東地域では、豪雨の明瞭な変化傾向はみられない (Alpert *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2006)。

アフリカ大陸では、データの不十分さから研究が立ち遅れている。ナイジェリアでは総降水量・豪雨頻度ともに減少傾向がみられ (Tarhule and Woo, 1998)、熱帯東アフリカでも同様の傾向が指摘されている (Easterling *et al.*, 2000)。アフリカ南部・熱帯西部アフリカでは、1961 ~ 2000 年について領域平均でみると降水日数と年最大日降水量が統計的に有意な増加傾向を示す (New *et al.*, 2006)。だが、地点ごとに変化傾向をみると、統計的に有意な増加傾向を示す地点は限られている。

アメリカ合衆国では 1910 年以降、年間を通じて強い降水が増加する傾向にある (Karl and Knight, 1998)。Groisman *et al.* (2005) でも、北アメリカ大陸東部では 1910 年以降、アラスカ・カナダ域では 1950 年以降に豪雨発生の増加傾向が確認されている。一方、豪雨増加傾向が顕著な中部諸州における 1893 年以降の長期変化では、全期間での増加トレンドが認められ、増加傾向が特に最近 30 年間に著しくなっていることも指摘されている。Kunkel *et al.* (2003) は、1895 年からのデータを解析し、同様に近年の豪

雨頻度の増加を指摘する一方、1900 年前後の豪雨頻度が 1990 年代と同程度に高いことも指摘し、自然変動の重要性を示唆している。1940 年代以降のデータが得られるメキシコ中部では、夏の降水量や中程度の豪雨は近年減少傾向にあるものの、強い豪雨は逆に増加傾向にある (Groisman *et al.*, 2005)。

カリブ海諸国では、1950 年代以降、年最大 5 日降水量が統計的に有意な増加を示し、同時に年最大連続無降水日数が減少している (Peterson *et al.*, 2002)。Aguilar *et al.* (2005) は、1961 ~ 2003 年のデータを解析し、中米諸国では総降水量には長期的なトレンドはみられず、年々変動が顕著であると報告している。他方、非常に強い降水は、統計的に有意に増加していることを指摘した。またカリブ海諸国・中米諸国においては、降水量と熱帯太平洋・熱帯大西洋の海面水温の間に相関関係を指摘している。

南アメリカ大陸では、過去 70 年間の良好なデータが得られるようになり、ここでも豪雨発生頻度に増加傾向がみられた (Groisman *et al.*, 2005)。Haylock *et al.* (2006) は、南アメリカ大陸の 1960 ~ 2000 年の日降水量データから豪雨を表現する各種の指数を求めた。総降水量と豪雨を表現する多くの指標が、エクアドル、ペルー北部、ブラジル南部、パラグアイ、ウルグアイ、アルゼンチン北部と中部では増加傾向であった。一方で、ペルー南部とチリ南部では総降水量も豪雨も減少している。ブラジル北東部における増加傾向は前世紀前半に顕著で、近年にはあまり変化はみられない (Groisman *et al.*, 2005)。

オーストラリアでは、1910 ~ 1990 年に東部では年降水量・降水強度ともに増加傾向、南西部では降水強度は減少傾向にあった (Suppiah and Hennessy, 1998)。1998 年まで期間を延長した研究でも、南東部での豪雨増加傾向、南西部での減少傾向がみられている (Haylock and Nicholls, 2000; Groisman *et al.*, 2005)。一方、ニュージーランドでは 1951 ~ 1998 年の期間に豪雨頻度の減少が報告されており (Salinger and Griffiths, 2001)、他方、南太平洋の南太平洋取

東帯 (SPCZ) の周辺地域では、1961～2000年の期間に豪雨頻度の増加が認められている (Griffiths *et al.*, 2003)。

アジアに目を転じると、中国では1951～2000年において、上位5%以上の日降水量の出現頻度が南部・北西部で増加、北部では減少という、地域ごとに異なった変化がみられる (Zhai *et al.*, 2005)。夏の降雨について地域別にみた研究 (Endo *et al.*, 2005) によると、特に揚子江域と北西部で強い降雨の増加する傾向が顕著である。一方、降水量が減少している東北部や北部では、強い降水が減少しているだけでなく、弱い降水もそれ以上に減少している。概して相対的に強い降水が降水量全体に占める割合は中国全域で増加傾向を示している。またモンゴルでは、南部や東部では中国と同様に豪雨の増加がみられるのに対し、北部では減少傾向を示す地域もある (Endo *et al.*, 2006)。気象庁 (2005) は、日本や韓国も含めた東アジア域での1951～2000年における変化を示し、西日本や韓国東北部では、日降水量50 mm以上の日数に減少傾向がみられるなど、中国の同じ緯度帯と必ずしも同じ傾向にはないことを指摘している。

東南アジア域では、1960年以降、インドシナ半島東部で豪雨が増加傾向にあるほか、フィリピンやインドネシア・インドシナ半島西部でいずれも減少傾向にある (Manton *et al.*, 2001)。ただし、山脈が南北方向に走り、夏と冬のモンスーンの影響を受けるインドシナ半島であるのに、Manton *et al.* (2001) において評価に使用された地点数は21地点と少なく、この結果が東南アジアでの広域的な変化傾向を十分に表現しているのか、疑問が残る。第2著者の松本らが収集した東南アジア諸国の日降水量データおよびEndo *et al.* (2005), Endo *et al.* (2006) で使用した日降水量データを用いて、東アジア・東南アジアにおけるより多くの地点でのデータを使用した年降水日数と年平均降水強度の1961～2000年の期間における長期変化傾向を図3に示す。インドシナ半島・フィリピンに注目すると、年降水日数はタイ・フィリピンでは減少傾向、ベトナム中

部・マレーシアで増加傾向を示すが統計学的に有意ではない。年平均降水強度は、インドシナ半島では弱い増加傾向がベトナム南部に、弱い減少傾向がベトナム中部からタイ東北部にかけて分布する。またフィリピンでは太平洋側に弱い増加傾向が、南シナ海側に弱い減少傾向がそれぞれ観測された。図は省略したが、夏のモンスーン、冬のモンスーンに着目して季節ごとにインドシナ半島やフィリピンでのトレンドの空間分布を検討すると、明らかに山岳の走向や夏と冬のモンスーンとの関連性が認められる。Manton *et al.* (2001) よりも多くの地点の日降水量データを使用することにより、東南アジアにおけるモンスーンの挙動に関して地域性をより詳細に検討できる。東南アジア諸国における降水特性の経年変化については、後日別稿として報告する予定である。

南アジア域では、インドにおいては1910年以降、東部を除いて全体的には豪雨が増加傾向にある (Sen Roy and Balling Jr, 2004)。他方、Goswami *et al.* (2006) は、インド気象局 (IMD) が近年公開した1951～2000年の経緯度1度グリッドの日降水量資料を使用して、夏のモンスーン期におけるインドの降水特性の変化を報告した。インド中央部では、モンスーン降水量には顕著な変化傾向はみられないが、非常に強い豪雨 (日降水量100 mm以上) の頻度とその降水量が統計学的に有意な増加を示し、一方で日降水量が5 mmから100 mmの範囲の中程度の降雨での降水日数が統計学的に有意な減少を示し、両者の変化が相殺しあうことで、総降水量には変化が認められないことをみいだした。Klein Tank *et al.* (2006) は、中央アジア・南アジア諸国の1961～2000年の日降水量データから豪雨を表す各種の指標を求めた。代表的な降水指標には、地域的に一貫した変化傾向はみられず、非常に強い降水日 (95パーセントイル以上) の指標だけが統計学的に有意な増加傾向を示した。また総降水量への非常に強い降水日の寄与率が統計的に有意に増加している。

日本における豪雨発生の長期変化については、Iwashima and Yamamoto (1993) が、過去の土

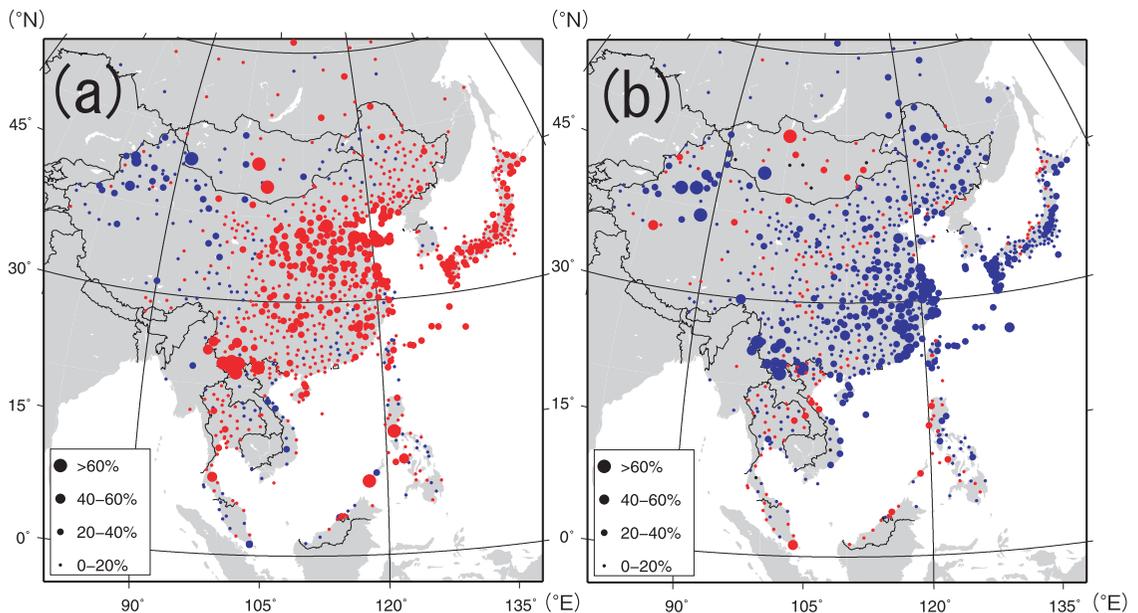


図3 東アジア・東南アジアにおける年平均降水日数 (a) と年平均降水強度 (b) の1961～2000年の期間における長期変化傾向。

青い丸は増加傾向を，赤い丸は減少傾向を示す。トレンドは40年間の気候値で規格化している。単位は%。

Fig. 3 Trends in annual number of wet days (a) and annual mean precipitation intensity (b) in East and South-east Asia for 1961-2000.

Blue (red) circle indicates increasing (decreasing) trend. Trends are normalized by the long-term mean. Unit is percent.

位1位～3位の日降水量出現の長期変化を示し，近年の増加傾向を指摘した。他方，松本・井上(2005)は，1位の出現は1950年代後半にもっとも多いことや，1～5位の出現には，1930年代後半以降にはめだった増加傾向はみられないことを示し，単純な増加傾向ではないことを示唆した。気象庁(2005)では，1901年以降2004年に至る全国51地点における日降水量データを整備し，上位1位～3位の出現にはきわだった長期変化傾向はみられないこと，2004年は過去最大の日降水量最大値の出現年であったことを示した。季節別には秋に増加傾向が認められている。日降水量100mm以上，200mm以上の豪雨の発生頻度にはいずれも全期間では増加傾向が認められるものの，1990年代の出現頻度と1940年代の出現頻度は同程度である。また，東京における時間降水量データによって，1890～1999年

における豪雨発生の長期変化を解析したKanae *et al.* (2004)でも，1940年代と1990年代の豪雨は同程度の強さであり，1886～1999年の日降水量を使用した高橋(2003)でも一方的な変化ではなく，数十年スケールでの変動が卓越していることが示されている。

これらの結果から，1970年代以降の日本における豪雨の増加傾向が，地球温暖化のような長期的変化を反映したものなのか，あるいは数十年スケールでの自然変動を反映したものであるのか，現状での判断は困難である。また，地域的にみると，東京など首都圏で豪雨が増加している可能性があり(藤部，1998；佐藤・高橋，2000；沖ほか，2000)，降水強度の増加には，地球規模での温暖化だけでなく都市化の影響も考えられる。1976年以降のアメダスデータを用いた山本(2006)によると，夏季の北太平洋高気圧におおわれた日

における日最大1時間降水量は、関東平野中部や東京の都心部で有意な増加傾向を示すなど、対流性降雨への都市の影響があらわれている可能性がある。他方、気象庁が整備した観測開始以来のデジタルデータを用い、1898～2003年のデータで日降水量・4時間および1時間降水量の強度別変化傾向を調べた Fujibe *et al.* (2005) では、いずれの時間スケールでも強い豪雨の増加傾向がみられた一方、都市にその傾向が強い事実は認められていない。

Alexander *et al.* (2006) は、上述した地域研究の一部において作成された豪雨を表現する各種の指数をグリッド化した。最近の約十数年では、全球平均でみると95パーセンタイル以上の豪雨によってもたらされる降水の総降水量に占める割合が、明瞭に増加している(図2a, b)。利用可能な地点数においても、データの利用可能な年数においてもデータが豊富な、北半球中・高緯度では、地域的な変化傾向も指摘できる。だが、Alexander *et al.* (2006) の Fig. 6, Fig. 7にあるように、中・南アメリカ・アフリカ・アジア域をはじめとする熱帯域はほとんどデータの得られない空白域となっており、地球全体での傾向を把握する際の大きな障害となっていることが明白である。

IV. おわりに

近年の世界の降水の変化傾向を、主に豪雨発生の長期変化に着目して概観した。中・高緯度地方においては、一部の例外を除いて豪雨の増加傾向が顕著である一方、アフリカや東南アジア地域ではむしろ減少傾向がみられた。多くの従来の研究がデータ利用の制約から、20世紀後半のみを対象としている。しかし、アメリカ合衆国や日本などでの100年以上の期間での結果は、50年程度の期間での結果と一致しない場合もあり、より長期間での解析が望まれる。

都市化やエアロゾルの増加など、地球温暖化以外の局地的要因や、大気大循環や熱帯低気圧の経路の変化などの大規模場の自然変動によっても豪雨発生の変化は起こる。多くの気候モデルでの結

果が地球温暖化に伴う豪雨の増加を示唆しているものの、過去における変化が、はたしてどの程度まで地球温暖化に起因しているのか、さらに詳しいデータやモデルを用いて、より定量的に検討していくことが必要である。

日本においても、日単位よりも細かい時間スケールでの観測データは、近年まで1960年以降のデータしかデジタル化されていなかった。気象庁による最近の全観測データのデジタル化は、100年以上の時間スケールでの気候変化の検討に重要で、すでに気象庁(2005)などに成果の一部が発表されている。さらに、より詳細な地域的な変化特性の把握のために、アメダスよりも稠密な観測網があった区内観測によるデータを掘り起こしてデジタル化されはじめた(藤部ほか, 2007)。このように、時間的にはより長く、空間的にはより密なデータを過去の資料から整備していくことは、局地性の強い降水量の長期変化の研究にとっては大変に重要で、今後はこれらのデータを用いたより詳細な研究の進展が期待される。

ここで、降水変動を評価する際にグリッドデータを使用する場合、グリッドデータを作成する際に用いた地点データの量と品質、またグリッド化の手法によっても得られる変化傾向は異なったものになることにも注意を払う必要がある。例えば、図4はインドシナ半島における6月から8月の平均月降水量のトレンドの空間分布図である。図4aは第2著者である松本らが主に東南アジア各国の気象台から収集した地点データから評価した夏期(6～8月)の降水量の長期変化傾向であり、気候値で規格化して図化した。統計期間は1961～2000年(ミャンマーのみ1966～2000年)である。CRU TS2.1データ(Mitchell and Jones, 2005; 図4b)とGPCC VASCLimOデータ(Beck *et al.*, 2005; 図4c)では、インドシナ半島の大半の地域ではトレンドは小さい。ところがGPCCデータ(Rudolf *et al.*, 1994; 図4d)では、ベトナム中部では増加傾向が顕著であるのに対して、カンボジア南部・タイ西部・アラカン山脈に顕著な減少傾向があらわれている。この空間分布は、CRUデータ・GPCC VASCLi-

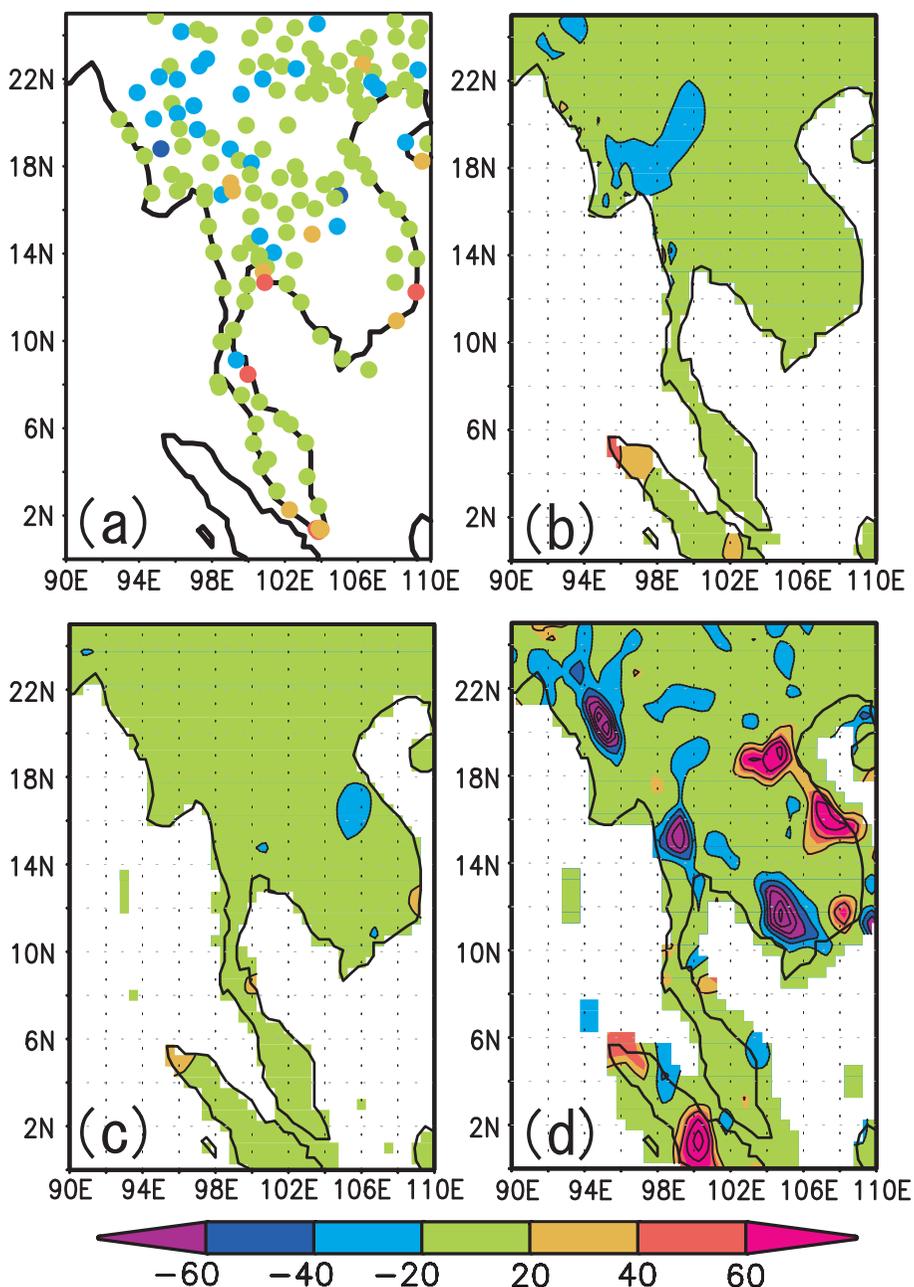


図 4 インドシナ半島における夏期(6~8月)の降水量の長期変化傾向。(a) 地点データ。(b) CRU TS2.1 データ。(c) GPCP VASclimO データ。(d) GPCP Full products データ。統計期間は1961~2000年。トレンドを40年間の気候値で規格化して図示した。単位は%。

Fig. 4 Trends in summer (June-August) precipitation over the Indochina Peninsula for 1961-2000. (a) Using station data. (b) Using CRU TS2.1. (c) Using GPCP VASclimO. (d) Using GPCP Full products. Trends are normalized by long-term mean. Unit is percent.

mO データと大きく異なる。GPCC データの作成時に使用可能なデータをすべて使用しているために、トレンドの細かな地域性が表現された可能性もある。だが3種類のグリッドデータにおいて使用した地点数は異なる上に、グリッド化の手法も異なるため、いずれのグリッドデータが現実世界の変動をよりよく再現しているのかを判断することは難しい。また IPCC (2007) によると、前世紀後半 (1951 ~ 2005 年) における全球陸域降水量のトレンドは、5つのデータセットによって 10 年あたり -6.63 mm から 1.82 mm とトレンドの値のバラツキが非常に大きく、時間的にも空間的にも変動が大きい降水のモニタリングの難しさを指摘している。

世界的な視野からみると、グローバルなデータセットへのデータ提供が少ない東南アジアやアフリカにおける研究が立ち遅れている。一方で、東南アジア諸国では、1950 年代以前のデータは、いまだにほとんどがデジタル化されていない状態にある (例えば Page *et al.*, 2004 の Fig. 1)。今後、モンスーンアジア水文気候研究計画 (MAHASRI) などの国際研究プロジェクトの下で、現地機関との密接な連携の上でこれらのデータをデジタル化し、より長期における信頼性の高いデータセットを作成することに、重点的に取組んでいく必要がある。

謝 辞

本研究では、環境省研究総合推進費問題対応型研究領域「人間活動によるアジアモンスーン変化の定量的評価と予測に関する研究」、文部科学省国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」「データ統合・解析システム」、科学技術振興機構 JST-CREST プロジェクト「熱帯モンスーンアジアにおける降水変動が熱帯林の水循環・生態系に与える影響」、文部科学省科学研究費補助金「極端な気象現象の発生頻度とその長期変動に関する研究」からご支援をいただいた。また、本論説に用いた図 1、図 2 は IPCC から掲載許可をいただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

Adler, R.F., Susskind, J., Huffman, G.J., Bolvin, D., Nelkin, E., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Xie,

- P.P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S. and Arkin, P. (2003): The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydrometeorol.*, **4**, 1147-1167.
- Aguilar, E., Peterson, T.C., Ramírez Obando, P., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., Soley, J., González García, I., Araujo, R.M., Rosa Santos, A., Valle, V.E., Brunet, M., Aguilar, L., Álvarez, L., Bautista, M., Castañón, C., Herrera, L., Ruano, E., Sinay, J.J., Sánchez, E., Hernández Oviedo, G.I., Obed, F., Salgado, J.E., Vázquez, J.L., Baca, M., Gutiérrez, M., Centella, C., Espinosa, J., Martínez, D., Olmedo, B., Ojeda Espinoza, C.E., Núñez, R., Haylock, M., Benavides, H. and Mayorga, R. (2005): Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *J. Geophys. Res.*, **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.
- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D.B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. and Vazquez-Aguirre, J.L. (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S. and Manes, A. (2002): The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2001GL013554.
- Beck, C., Grieser, J. and Rudolf, B. (2005): A new monthly precipitation climatology for the global land areas for the period 1951 to 2000. *Climate Status Report, 2004*. German Meteorological Service, 181-190.
http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb04/28_precipitation.pdf [Cited 2007/10/02].
- Brunetti, M., Colacino, M., Maugeri, M. and Nanni, T. (2001): Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *Int. J. Climatol.*, **21**, 299-316.
- Chen, M., Xie, P. and Janowiak, J.E. (2002): Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J. Hydrometeorol.*, **3**, 249-266.
- Dai, A., Lamb, P.J., Trenberth, K.E., Hulme, M., Jones, P.D. and Xie, P.P. (2004): The recent Sahel drought is real. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1323-1331.
- Easterling, D.R., Evans, J., Groisman, P., Karl, T., Kunkel, K. and Ambenje, P. (2000): Observed variability and trends in extreme climate events: A

- brief review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **81**, 417-425.
- Endo, N., Ailikun, B. and Yasunari, T. (2005): Trends in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rainfall events during summer in China from 1961 to 2000. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **83**, 621-631.
- Endo, N., Kadota, T., Matsumoto, J., Ailikun, B. and Yasunari, T. (2006): Climatology and trends in summer precipitation characteristics in Mongolia for the period 1960-1998. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **84**, 621-631.
- 藤部文昭 (1998): 東京における降水の空間偏差と経年変化の実態—都市効果についての検討—. *天気*, **45**, 7-18.
- Fujibe, F., Yamazaki, N., Katsuyama, M. and Kobayashi, K. (2005): The increasing trend of intense precipitation in Japan based on four-hourly data for a hundred years. *SOLA*, **1**, 41-44.
- 藤部文昭・松本 淳・小林健二 (2007): 区内観測による日降水量データのデジタル化と降水長期変動解析への利用. 日本気象学会 2007 年度秋季大会講演予稿集, **92**, 344.
- Griffiths, G.M., Salinger, M.J. and Leleu, I. (2003): Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific Convergence Zone. *Int. J. Climatol.*, **23**, 847-869.
- Groisman P.Y., Knight, R., Easterling, D., Karl, T., Hegerl, G. and Razuvayev, V. (2005): Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.*, **18**, 1326-1350.
- Goswami, B.N., Venugopal, V., Sengupta, D., Madhusoodanan, M.S. and Xavier, P.K. (2006): Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, **314**, 1442-1445.
- Haylock, M. and Nicholls, N. (2000): Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910-1998. *Int. J. Climatol.*, **20**, 1533-1541.
- Haylock, M.R., Peterson, T.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J., Barros, V.R., Berlato, M.A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V.J., Grimm, A.M., Karoly, D., Marengo, J.A., Marino, M.B., Moncunill, D.F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J.L., Trebejo, I. and Vincent, L.A. (2006): Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J. Clim.*, **19**, 1490-1512.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Iwashima, T. and Yamamoto, R. (1993): A statistical analysis of the extreme events: Long-term trend of heavy daily precipitation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **71**, 637-640.
- Kanae, S., Oki, T. and Kashida, A. (2004): Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **82**, 241-247.
- Karl, T.R. and Knight, R.W. (1998): Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **79**, 231-242.
- 気象庁 (2005): 異常気象レポート 2005. 大蔵省印刷局.
- Klein Tank, A.M.G. and Konnen, G.P. (2003): Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999. *J. Clim.*, **16**, 3665-3680.
- Klein Tank, A.M.G., Peterson, T.C., Quadir, D.A., Dorji, S., Zou, X., Tang, H., Santhosh, K., Joshi, U.R., Jaswal, A.K., Kolli, R.K., Sikder, A.B., Deshpande, N.R., Revadekar, J.V., Yeleuova, K., Vandasheva, S., Faleyeva, M., Gomboluudev, P., Budhathoki, K.P., Hussain, A., Afzaal, M., Chandrapala, L., Anvar, H., Amanmurad, D., Asanova, V.S., Jones, P.D., New, M.G. and Spektorman, T. (2006): Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia. *J. Geophys. Res.*, **110**, D16105, doi:10.1029/2005JD006316.
- Kripalani, R.H. and Kulkarni, A. (1997): Rainfall variability over South-East Asia - connections with Indian Monsoon and ENSO extremes: New perspectives. *Int. J. Climatol.*, **17**, 1155-1168.
- Kripalani, R.H., Kulkarni, S., Sabade, S.S. and Khandekar, M.L. (2003): Indian Monsoon Variability in a Global Warming Scenario. *Nat. Hazards*, **29**, 189-206.
- Kunkel, K.E., Easterling, D.R., Redmond, K. and Hubbard, K. (2003): Temporal variations of extreme precipitation events in the United States: 1895-2000. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL018052.
- Maheras, P., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Vafiadis, M., Patrikas, I. and Flocas, H. (2004): On the relationships between circulation types and changes in rainfall variability in Greece. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1695-1712.
- Manton, M.J., Della-Marta, P.M., Haylock, M.R., Hennessy, K.J., Nicholls, N., Chambers, L.E., Collins, D.A., Daw, G., Finet, A., Gunawan, D., Inape, K., Isobe, H., Kestin, T.S., Lefale, P., Leyu, C.H., Lwin, T., Maitrepierre, L., Ouprasitwong, N., Page, C.M., Pahalad, J., Plummer, N., Salinger, M.J., Suppiah, R., Tran, V.L., Trewin, B., Tibig, I. and Yee, D. (2001): Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *Int. J. Climatol.*, **21**, 269-284.
- 松本 淳・井上知栄 (2005): 異常気象と地球温暖化. *科学*, **75**, 1142-1145.
- 松本 淳・山本奈美 (2007): 世界における最近の降水現象の特徴. *天気*, **54**, 612-616.
- Mitchell, T.D. and Jones, P.D. (2005): An improved

- method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. *Int. J. Climatol.*, **25**, 693-712.
- New, M., Hewitson, B., Stephenson, D.B., Tsiga, A., Kruger, A., Manhique, A., Gomez, B., Coelho, C.A.S., Masisi, D.N., Kululanga, E., Mbambalala, E., Adesina, F., Saleh, H., Kanyanga, J., Adosi, J., Bulane, L., Fortunata, L., Mdoka, M.L. and Lajoie, R. (2006): Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *J. Geophys. Res.*, **111**, D14102, doi:10.1029/2005JD006289.
- Nicholson, S.E., Some, B. and Kone, B. (2000): An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Clim.*, **13**, 2628-2640.
- 沖 大幹・西元正明・鼎信次郎 (2000): 長期間の日降水量記録に基づく東京の大雨の経年変化に関する研究. 日本気象学会 2000 年秋季大会講演予稿集, **78**, 159.
- Osborn, T.J., Hulme, M., Jones, P.D. and Basnett, T.A. (2000): Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *Int. J. Climatol.*, **20**, 347-364.
- Page, C.M., Nicholls, N., Plummer, N., Trewin, B., Manton, M., Alexander, L., Chambers, L.E., Choi, Y.G., Collins, D.A., Gosai, A., Della-marta, P., Haylock, M.R., Inape, K., Laurent, V., Maitrepierre, L., Makmur, E.E.P., Nakamigawa, H., Ouprasitwong, N., McGree, S., Pahalad, J., Salinger, M.J., Tibig, L., Tran, T.D., Vediapan, K. and Zhai, P. (2004): Data rescue in the Southeast Asia and South Pacific region. Challenges and opportunities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **85**, 1483-1489.
- Peterson, T.C. and Vose, R.S. (1997): An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 2837-2848.
- Peterson, T.C., Taylor, M.A., Demeritte, R., Duncombe, D.L., Burton, S., Thompson, F., Porter, A., Mercedes, M., Villegas, E., Fils, R.S., Klein Tank, A., Martis, A., Warner, R., Joyette, A., Mills, W., Alexander, L. and Gleason, B. (2002): Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *J. Geophys. Res.*, **107**, D214601, doi:10.1029/2002JD002251.
- Rudolf, B., Hauschild, H., Rueth, W. and Schneider, U. (1994): Terrestrial precipitation analysis: Operational method and required density of point measurements. in *Global Precipitations and Climate Change* edited by Buboïs, M. and Désalmand, F., *NATO ASI Series I*, **26**, Springer Verlag, Berlin, 173-186.
- Salinger, M.J. and Griffiths, G.M. (2001): Trends in New Zealand daily temperature and rainfall extremes. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1437-1452.
- 佐藤尚毅・高橋正明 (2000): 首都圏における夏の降水特性の経年変化. *天気*, **47**, 643-648.
- Schmidli, J. and Frei, C. (2005): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, **25**, 753-771.
- Sen Roy, S. and Balling Jr., R.C. (2004): Trends in extreme daily precipitation indices in India. *Int. J. Climatol.*, **24**, 457-466.
- Suppiah, R. and Hennessy, K.J. (1998): Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia, 1910-1990. *Int. J. Climatol.*, **18**, 1141-1164.
- 高橋日出男 (2003): 東京とその周辺における夏季 (6 ~ 9 月) 日降水量の階級別出現特性の経年変化. *天気*, **50**, 31-41.
- Tarhule, A. and Woo, M.K. (1998): Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. *Int. J. Climatol.*, **18**, 1261-1271.
- Trenberth, K.E. (1999): Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Clim. Change*, **42**, 327-339.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M. and Parsons, D.B. (2003): The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **84**, 1205-1217.
- Wang, B. and Ding, Q. (2006): Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06711, doi:10.1029/2005GL025347.
- 山本奈美 (2006): 中部日本域における夏季対流性降雨の降雨日数と時間降水量の経年変化. 日本地理学会 発表要旨集, **69**, 125.
- Zhai, P., Zhang, X., Wan, H. and Pan, X. (2005): Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J. Clim.*, **18**, 1096-1108.
- Zhang, X., Aguilar, E., Sensoy, S., Melkonyan, H., Tagiyeva, U., Ahmed, N., Kutaladze, N., Rahimzadeh, F., Taghipour, A., Hantosh, T.H., Albert, P., Semawi, M., Ali, M.K., Al-Shabibi, M.H.S., Al-Oulan, Z., Zatari, T., Khelet, I.A.D., Hamoud, S., Sagir, R., Demircan, M., Eken, M., Adiguzel, M., Alexander, L., Peterson, T.C. and Wallis, T. (2006): Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *J. Geophys. Res.*, **110**, D22104, doi:10.1029/2005JD006181.

(2007 年 10 月 15 日受付, 2007 年 11 月 22 日受理)