

我が国におけるパン蒸発量の長期変動と水循環変動との関わり

浅 沼 順*・上米良 秀 行**・陸 旻 皎***

要 旨

水循環の長期間にわたるトレンドの指標として、我が国の気象庁所管気象官署13地点における1967年から2000年までのパン蒸発計蒸発量の長期トレンド解析を行った。これによれば、都市化の影響の強い一部の地域を除いて、全国的なそして季節によらないパン蒸発量の減少傾向が見られた。統計解析の結果、西日本太平洋岸ではこのパン蒸発量の減少傾向が飽差の増加を伴っており、パン蒸発量の長期的な減少傾向は陸面蒸発量の増加を示唆する。しかしながら北東日本、輪島以北の地域では飽差の増加に加え、雲量の増加に伴う日射量の減少が観測されており、パン蒸発量の減少傾向の解釈が地域によって異なる可能性を示唆している。

1. はじめに

過去50年の間に、全球平均地上気温が約 $0.015^{\circ}\text{C}/\text{年}$ の割合で上昇していることは、すでに確認された観測事実である (Houghton *et al.*, 2001, など)。またこのような気候変動に伴い水循環過程がどのように変動するかは、気候学のみならず、水循環科学としての水文学上の興味の対象であるとともに、防災や水資源利用といった実用上の立場からも重要である。

単純に考えるならば、気温の上昇は飽和蒸気圧の増加、大気中の可降水量の増加、そして降水量の増加をもたらす。陸面の土壌水分量および河川流量の増加に結びつくと考えられる。また、土壌水分の増加と気温の上昇に伴う飽差の増加は陸面からの蒸発を促進し、また気温の上昇は極域・高地での水の固相から液相への相変化を促進させる。このような点から、地球の温暖化は水循環全体の加速につながるとの見方が有力であるが、その一方で雲・降水活動の活発化は、雲量の

増加、そして日射量の減少に結びつき、ネガティブフィードバックも存在する。また、水循環に変動があったとしても、その時空間分布が一様であるとは限らない。

このような水循環各要素の長期的な変動を観測データから見いだそうとする試みは、比較的計測が容易で長期的なデータが整備されている陸上の降水量について、既に多くの研究が行われている (例えば Lettenmaier *et al.*, 1994; Karl *et al.*, 1996; Houghton *et al.*, 2001; 米谷ほか, 2002, などを参照)。その中で共通しているのは、全球平均で陸上降水量の増加傾向が見られることである。我が国国内の降水量についても、年平均降水量の解析 (近年では、徐ほか, 2002, など) にとどまらず、極値イベントの変動傾向についても研究がなされている (例えば早野ほか, 2002, など)。

これとは対照的に、蒸発量の変動については長期間にわたる観測データが存在せず、このような議論がなされて来なかった。近年になって、パン蒸発計蒸発量 (パン蒸発量) を陸面蒸発量の指標として用い、その長期変動から陸面蒸発量の長期的な経年変化を議論しようという試みが注目されている。しかしながら、後述べるようにパン蒸発量は、長い間物理的な意味が曖昧なまま残されてきた計測量であり、その長期トレンドの解釈は未だに議論の余地を残している。ここでは、

* asanuma@suiri.tsukuba.ac.jp, 筑波大学陸域環境研究センター。

** 長岡技術科学大学大学院エネルギー・環境工学専攻。

*** 長岡技術科学大学環境・建設系。

—2003年9月1日受領—

—2004年7月14日受理—

まずパン蒸発量の長期トレンドと水循環変動に関する近年の議論についてまとめ、論点を整理することとする。

2. 蒸発パラドックス

パン蒸発量の計測値の長期的な変動傾向に着目し、最初に水循環変動と結びつけたのは Peterson *et al.* (1995) である。彼らは、旧ソビエト連邦とアメリカ合衆国の大陸部（アラスカを除く）における約50年間の観測値から、旧ソ連のヨーロッパ地域、シベリア地域および合衆国東西地域において、パン蒸発量が減少していることを報告した。彼らはさらに、この広範囲にわたるパン蒸発量の減少を、全球の陸面蒸発量の減少を示唆するものと解釈するとともに、1) これらの地域の夏季の最高気温の低下、2) シベリアや旧ソ連ヨーロッパ地域の積算暖度の減少、そして3) 過去20年間の旧ソ連ヨーロッパ地域や合衆国北部における河川流量の増加、といった観測事実と矛盾しないとした。また、パン蒸発量の減少が気温の日較差の減少と相関が高く、雲量の増大と負の相関があることも報告している。Peterson *et al.* (1995) に続き、インド (Chattopadhyay and Hulme, 1997) やベネズエラ (Quintana-Gomez, 1997) でも、過去のパン蒸発量の観測に減少トレンドがみられることが報告されている。

Peterson *et al.* (1995) の解釈は、パン蒸発量を可能蒸発量ととらえ、その減少は陸面蒸発量の減少につながるものとしているものである。ここでいう「可能蒸発量」とは、「十分に湿った地表面（湿潤地表面）からの蒸発量」と定義され、蒸発抑制のない状態での最大可能な蒸発量と考えられる。可能蒸発量の計算式としてペンマン式 (Penman, 1948) など様々な経験式や半理論式がこれまで提案されており、パン蒸発量も可能蒸発量の一つと考えられている。しかしながら、土壌水分の減少によって蒸発抑制が働き陸面蒸発量が減少するに従って、パン蒸発量などの一部の可能蒸発量は、逆に増加傾向を示すことが知られている。これは地表面熱収支の顕熱、潜熱交換量以外の項が一定であると仮定すれば、陸面蒸発量（潜熱交換量）の減少分が大気加熱（顕熱交換量）となり気温を上昇させ、パン蒸発量の増加へと結びつく。第一近似的に、陸面蒸発量の減少分がパン蒸発量の増加分に転換されたと考えれば、陸面蒸発量とパン蒸発量の間に補完的な関係が成立することになる (Brutsaert, 1982, p. 224参照)。

乾燥地における気象観測値を用いてペンマン可能蒸発量を計算すると、非現実的に大きな値となるが、これは同じ理由によるものである。

このような補完関係仮説は Bouchet (1963) によって最初に提唱され、その後いくつかの定式化を経て (Brutsaert and Stricker, 1979; Parlange and Katul, 1992, など)、気候学的な応用 (Morton, 1975, 1976) や農学・工学分野での応用 (例えば大槻, 1988, など) に用いられてきた。詳しい解説は、Brutsaert (1982) p. 224や Brutsaert and Stricker (1979) を参照頂きたい。Bouchet (1963) の仮説は概念的な仮説に留まりながらも、蒸発抑制に伴う陸面蒸発量の減少とそれに伴うパン蒸発量の増加を単純に説明する点で、今日でも大きな意義を持つ。

Brutsaert and Parlange (1998, 以下 BP98) は、Peterson *et al.* (1995) の解釈が正しく、パン蒸発量の減少が陸面蒸発量の減少を示すならば、これは観測されている降水量の増加 (例えば Karl *et al.*, 1996) と矛盾するとし、“蒸発パラドックス (Evaporation Paradox)”と呼んだ。彼らは、前述の補完関係を用いて、パン蒸発量の減少は陸面蒸発量の増加として解釈できるとし、観測されている降水量の増加と矛盾しないとした。Lawrimore and Peterson (2000) は合衆国の大陸部（アラスカを除く）ほぼ全域において、過去50年間の暖候期降水量とパン蒸発量の間に逆相関関係があることを見だし、暖候期降水量が陸面蒸発量と正の相関にあるとすれば、パン蒸発量と陸面蒸発量の間に逆相関関係が成立することを意味するとし、BP98の解釈の正当性を示した。同様に Golubev *et al.* (2001) は、旧ソ連および米国で、パン蒸発量とライシメーターによって計測された陸面蒸発量の間に長期にわたる補完関係を確認し、この補完関係を用いて旧ソ連南部および米国のほぼ全域において、陸面蒸発量が増加していることを見いだした。

Lawrimore and Peterson (2000) および Golubev *et al.* (2001) による結果は、補完関係が乾燥域のみならず様々な気候帯で、長期的な時間スケールにおいて成り立つことを確認したことになる。しかしながらこの補完仮説は、主に地表面の乾湿に伴う陸面蒸発量とパン蒸発量の関係であり、陸面蒸発量の支配要因は、地表面の乾湿だけでは無いことを忘れてはならない。Roderick and Farquhar (2002) は雲量とエアロゾルの増加によってもたらされる日射量の減少 (Stanhill and Cohen, 2001; Cohen *et al.*, 2002) がパン蒸発量

と陸面蒸発量双方の減少をもたらしている可能性を指摘した。パン蒸発計（水面）からの蒸発でも、裸地面からの蒸発でも、あるいは植生からの蒸散であっても、蒸発は水の気化を伴いその気化熱は日射から与えられる。よって、日射量に統計的な増減があるならば、パン蒸発量も陸面蒸発量もその影響を直接受けるはずである。もしもこのようなメカニズムが支配的であれば、パン蒸発量の減少は陸面蒸発量の減少を示していることとなり、これは BP98 の解釈とは全く異なるパン蒸発量変動の解釈である。日射量の減少のパン蒸発量への影響は、既に Szilagyi *et al.* (2001) に示唆されており、米国での過去のデータの解析から、BP98 の提示するメカニズムと日射量の減少による影響が混在している可能性を報告している。

Ohmura and Wild (2002) は、このような温暖化に伴う水循環過程の変動に関する議論について、以下の 4 点に整理している。1) 蒸発量の長期変動傾向は気温のみによって決まるものではなく、変動しつつある気候の様々な側面の影響を受ける。2) 陸面蒸発と海面蒸発は異なる因子に支配されており、全球の蒸発量の増減を考えるならば両者を分離して考えるべきである。3) 気温の日較差の長期変動は、日射と熱移流それぞれに関する要素を含んでおり、分離した議論が必要である。4) 1990 年頃に雲量の増加トレンドが反転しており、過去 10 年間の日射量と蒸発量の変動傾向に関する解析が必要である。

近年、東ユーラシア大陸からも、パン蒸発量とその他の気象要素の長期トレンドに関する報告が蓄積され始めている。徐 (2001) 及び Xu *et al.* (2004) は、中国全土における気象観測値を用いて、近年(それぞれ、1979-1995 年と 1971-2000 年)の気候変動傾向を整理した。この中で Xu *et al.* (2004) はパン蒸発量が、南東部沿岸の湿潤地域と東北部北端、新疆ウイグル自治区で減少傾向、それ以外の中国中央部で増加傾向にあることを報告している。また、パン蒸発量の変動傾向が降雨量とは逆相関にあり、パン蒸発量の減少が陸面蒸発量の増加を示しているとする BP98 の解釈が、モンスーンアジアでも成立する可能性を報告している。パン蒸発量ではないが可能蒸発量に関して Thomas (2000) は、ペンマン=モンティース式による可能蒸発量が中国全国的に過去 1953-1994 年の間に減少しており、日照時間の減少と関連すること、また、北緯 35 度以南における可能蒸発量の経年変動の原因がモンスーンの強弱の経年変動に関連する日射量の変動と相関が



第 1 図 解析対象地点.

あることを指摘している。中国以外の東ユーラシア大陸からの報告として、手計ほか (2004) はタイの Chao Phraya 流域におけるパン蒸発量の長期変動と年内変動を調べ、長期的なパン蒸発量の減少が見られること、乾季の後半から雨季の始まりにかけてパン蒸発量のピークが見られることを報告している。

本論文ではこれらに続き、我が国を含む東アジア・北西太平洋地域の水循環過程の長期変動傾向を探る一つの手段として、我が国のパン蒸発量の長期的な変動傾向を調べる。そして、その長期変動傾向がどのような外部条件によってもたらされているかを明らかにすることによって、パン蒸発量の長期トレンドの水文気候学的な意味を明らかにする事を目標とするものである。

3. 解析データ

解析に用いたデータは、第 1 図に示す気象庁所管の気象官署 14 地点における日パン蒸発量およびその他の気象要素の日平均値であり、(財) 気象業務支援センターから「地上気象観測時日別資料」として CD-ROM で配布されているものである。我が国の気象官署のパン蒸発量観測は、1965 年頃にそれまでの小型パン蒸発計による観測を終了し、WMO 標準のクラス A パンに変更して 2002 年 3 月まで観測を継続した。14 地点のうち東京以外の地点では、気象庁の永年気候監視業務の一環としてパン蒸発量観測を行っており、ほぼ全国的

第1表 連続性検定 (99%有意性, 本文参照) によって検出された, データ上の不連続点. 例えば1980年は, 1979年と1980年の間に不連続が検出されたことを意味する.

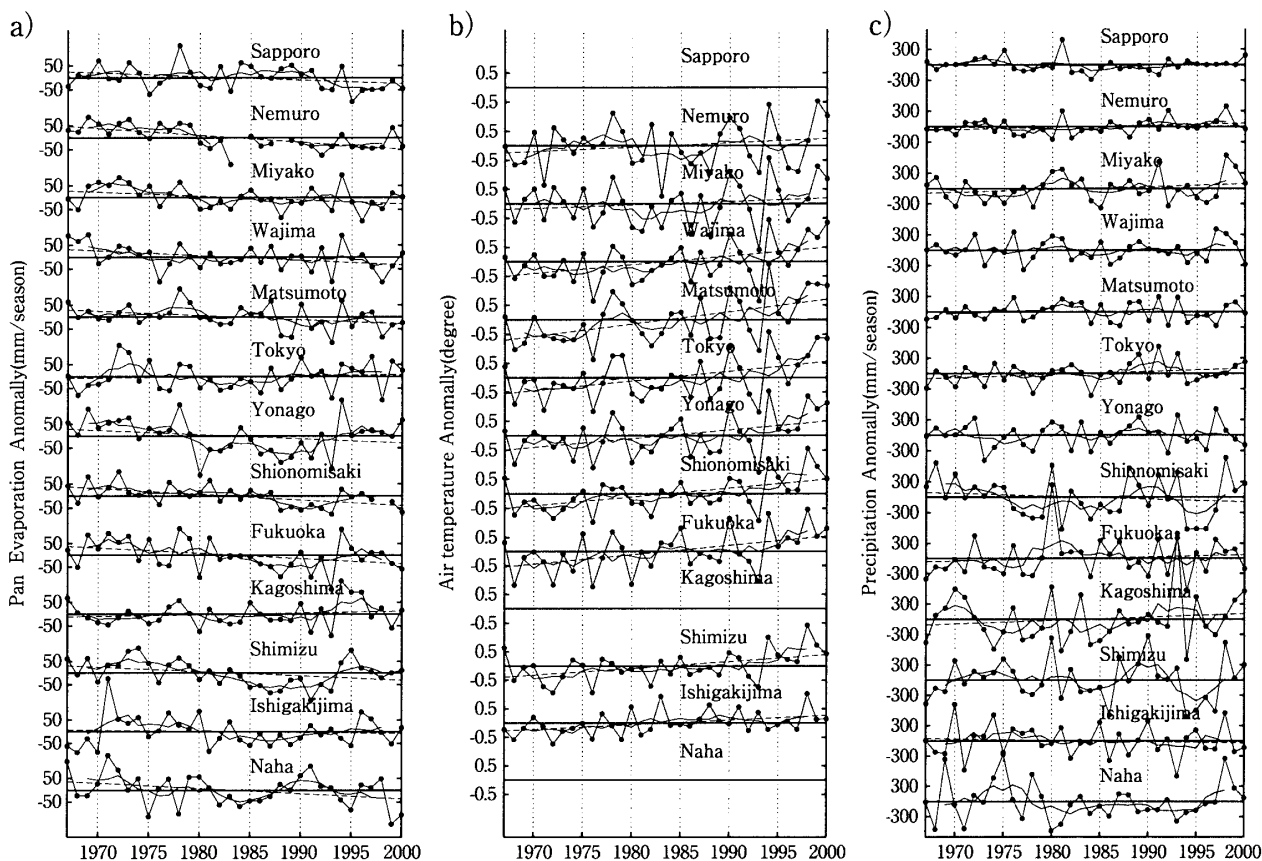
Variable	項目	Station	地点	不連続点
PE	パン蒸発量	Nemuro	根室	1980
		Akita	秋田	1984,1989
AT	気温	Sapporo	札幌	1989
		Kagoshima	鹿児島	1977,1984
		Naha	那覇	1987
CA	雲量	Sapporo	札幌	1985

に地域の偏りなく配置されている. また, 松本以外の地点は全て沿岸域に位置している.

解析対象期間はクラス A パンの観測が全ての地点で始まった1967年から2000年までの34年間とした. 日観測値を通年, 春季 (MAM, 3~5月), 夏季 (JJA, 6~8月), 秋季 (SON, 9~11月), 冬季 (DJF, 12~2月), そして暖候期 (5~10月) の5つの季節毎に平均 (あるいは積算) し, その年々変動を調べることとした. 北日本の観測点では寒候期にパン蒸発観測が休止となるが, 暖候期とした5-10月は全14地点でパン蒸発量

データが得られる期間である. また, 気温 (AT), 降水量 (PR), 日照時間 (SD), 雲量 (CA), 気温の日較差 (DTR), 飽差 (VPD), 蒸気圧 (VP) の各気象要素についても同様な季節平均を取り, 解析の対象とした. このうち日照時間は解析対象期間中に測器がジョルダン日照計から回転式日照計に変更されており, 両者の系統的な差異を経験式 (田森, 1996) によって補正するとともに, 雲量と相互に補完しながら用いることとした.

測器の変更や観測地点の移動など, 人為的な観測環境の変化によって生じるデータの不連続性を統計検定によってチェックした. t 検定 (Devore, 1991, p. 337, など) と非パラメトリック検定である Wilcoxon 検定 (Man-Whitney 検定; Devore, 1991, p. 609; 徐ほか, 2002, など) によって, 全ての季節で99%の有意性で判定された不連続点を第1表に示す. 第1表は季節によらない不連続点であり, 人為的な観測環境の変化が起こった可能性を示すが, 気候レジームの短期間でのシフトなど, 実際の自然現象である可能性も否定できない. 第1表に挙げる不連続点のうち, 秋田の1989年は観測点の移動と時を同じくしているため, 秋田は解



第2図 各地点における暖候期平均パン蒸発量 (a), 気温 (b), 降水量 (c) のアノマリ. 黒点付きの実線はアノマリ, 点なしの実線は5年移動平均, 破線は線形回帰直線を表す.

析対象から除外した。また、根室のパン蒸発量についてはそれに相当する事象が気象庁の資料にも記録されていないため、そのまま解析対象とすることとした。これ以外の第1表に挙げる不連続点が存在する各気象要素は、解析対象から除外することとした。

4. トレンド解析

第2図に示す暖候期平均のパン蒸発量、気温、降水量のアノマリから、これらの観測値の大まかな性質を見ることができる。パン蒸発量(第2図a)の那覇と石

垣島を除く全地点のアノマリには、1993年の冷夏と1994年の暑夏(第2図b, 例えば、安成, 1997)の影響がはっきりと認識できる。また1978年の極大や1980年の極小のように、広い地域で共通の時系列変化があることが確認できる。このような特徴は、降水量のアノマリ(第2図c)では比較的希薄である。例えば、1980年の特徴的な西日本での多雨は、東日本にはさほど影響が見られないし、また1994年の渇水(例えば葛葉ほか, 2001, など)は東京・松本以西でのみ、大きな負のアノマリとして認識される。このように降水量は比較的局地的な気象情報であるのに対し、パン蒸発量は広域の水文気候変動のような現象に関する情報を含んでいる。もちろん、パン蒸発量計測値も、都市化のような局所的な周囲の影響も受けている可能性もあり、これについては後で議論する。このように、第2図はパン蒸発量の水文気候変動のインデックスとしての可能性を示すものである。

各地点のパン蒸発量およびその他の気象要素の季節平均から長期トレンドを決定し、その統計的有意性を調べた。時系列に含まれるトレンド成分を最小自乗法により線形回帰直線の傾きとして求め、その傾きの統計的有意性を片側t検定(Devore, 1991, など)により検定した。線形トレンドの傾き(以下簡単にトレンド)と有意水準を99%, 95%として行った検定の結果を第2表および第3表に示す。また、暖候期のパン蒸発量、気温、降水量のトレンドの地理分布を第3図に図示し

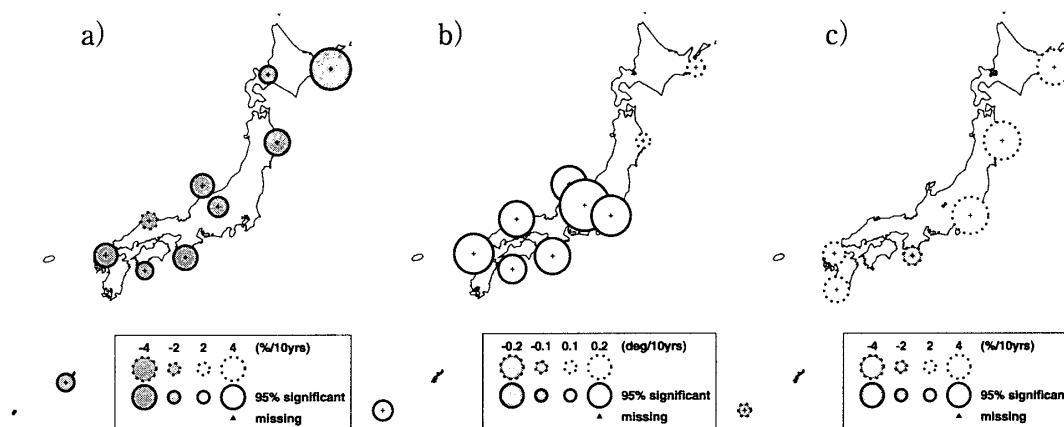
第2表 平均値で無次元化した暖候期平均気温(AT)、降水量(PR)、日照時間(SD)、雲量(CA)、気温日較差(DTR)、飽差(VPD)、蒸気圧(VP)の線形トレンド(単位は%/10年)。ただし気温については無次元化していない(単位は°C/10年)。**太字+下線**、太字はそれぞれ、t検定によって判別された有意水準99%, 95%の上昇あるいは下降トレンド。

Station	地点	AT 気温	PR 降水量	SD 日照時間	CA 雲量	DTR 気温日較差	VPD 飽差	VP 蒸気圧
Sapporo	札幌	-	-1.24	-3.47	-	-	-	1.21
Nemuro	根室	0.15	5.86	-3.50	2.35	-2.98	1.89	0.87
Miyako	宮古	0.12	6.29	-2.90	2.45	-0.45	-0.28	1.01
Wajima	輪島	0.30	0.09	-4.02	2.23	-1.95	3.35	1.44
Matsumoto	松本	0.43	0.69	-0.89	0.61	-0.39	5.04	1.66
Tokyo	東京	0.33	6.21	1.53	1.29	-2.99	2.65	1.80
Yonago	米子	0.30	0.72	-4.86	-	-2.11	3.20	1.12
Shionomisaki	潮岬	0.30	-3.20	1.78	-0.37	-0.18	3.89	1.35
Fukuoka	福岡	0.33	3.81	-0.32	-0.17	-3.72	4.50	0.96
Kagoshima	鹿児島	-	4.26	0.80	0.59	-	-	0.52
Shimizu	土佐清水	0.24	0.07	0.62	-0.93	2.20	4.61	0.49
Ishigakijima	石垣島	0.17	-2.21	0.09	3.73	-4.38	7.97	-0.92
Naha	那覇	-	-0.54	-3.64	-1.48	-	-	0.10

第3表 平均値で無次元化したパン蒸発量(PE)の季節ごとの線形トレンド(単位は%/10年)。**太字+下線**、太字の意味は、第2表に同じ。カッコ内の数値は標準偏差。

Station	地点	通年 All	暖候期 Warm	春季 MAM	夏季 JJA	秋季 SON	冬季 DJF
Sapporo	札幌	-	-2.9 (1.6)	-	-1.7 (2.0)	-	-
Nemuro	根室	-	-6.8 (1.6)	-	-7.8 (2.0)	-	-
Miyako	宮古	-	-4.3 (2.1)	-	-4.1 (2.9)	-	-
Wajima	輪島	-	-3.9 (1.7)	-	-3.5 (2.3)	-4.2 (1.7)	-
Matsumoto	松本	-	-3.3 (1.5)	-	-2.6 (2.1)	-3.8 (2.3)	-
Tokyo	東京	2.4 (1.5)	0.8 (1.7)	0.3 (1.7)	0.5 (2.4)	5.7 (2.0)	-
Yonago	米子	-2.2 (1.7)	-2.8 (2.0)	-2.7 (1.6)	-3.0 (2.6)	-2.0 (1.9)	-
Shionomisaki	潮岬	-4.0 (0.9)	-4.1 (1.1)	-3.7 (1.6)	-4.6 (1.4)	-3.6 (1.2)	-4.5 (1.9)
Fukuoka	福岡	-5.5 (1.4)	-3.8 (1.8)	-3.6 (1.8)	-3.8 (2.4)	-6.3 (1.6)	-
Kagoshima	鹿児島	1.1 (1.3)	1.2 (1.4)	1.9 (1.8)	-0.4 (1.6)	3.1 (1.8)	-
Shimizu	土佐清水	-2.1 (1.3)	-2.9 (1.4)	-1.1 (1.6)	-3.7 (1.7)	-2.4 (1.3)	-2.1 (1.7)
Ishigakijima	石垣島	-1.6 (1.3)	-0.6 (1.5)	-4.1 (2.3)	0.3 (1.9)	-1.5 (1.4)	-2.6 (2.2)
Naha	那覇	-2.8 (1.3)	-2.9 (1.5)	-3.6 (1.9)	-3.3 (2.0)	-2.6 (1.5)	1.0 (1.9)

た。なお、時系列の正規分布やトレンドの線形性を仮定しない検定方法として、Man-Kendall 検定(Mann, 1945; Kendall and Gibbons, 1990; Lettenmaier *et al.*, 1994; 徐ほか, 2002, など)を用いて増加・減少トレンドの有意性の検定を行ったが、t検定とほぼ同様の結果が得られている。



第3図 各地点での暖候期パン蒸発量 (a), 気温 (b), 降水量 (c) の平均値で無次元化したトレンド。各地点の円の大きさは、増加/減少トレンドの大小を示し、白抜きの円は増加、灰色の円は減少を示す。また縁の太さはトレンドの有意性を示す。降水量のトレンドが有意でないことに注意。

第2表では、解析対象地点のすべてにおいて、ほぼ通年にわたり、気温が統計的に有意な上昇傾向を示している。これが、局地的な都市化の影響か地球温暖化の影響かの議論は別として、少なくともパン蒸発量は、このような気温が上昇している環境下で計測されていることは事実である。このように気温の上昇が明確であるのに対し、降水量には統計的に有意な増加あるいは減少トレンドがほとんど見られない。これは、第2図cに示されるように降水量の年々変動がその平均値に比べて大きい（縦軸の目盛りに注意）ことに起因する。また第2表では、13地点中6地点で日照時間と雲量のトレンドの間に逆相関関係が見られ、大まかに東日本で日照時間の減少および雲量の増加、西日本で日照時間の増加と雲量の減少がみられる。この西日本での減少傾向の有意性は強くないが、すでに報告されている中国南部での日照時間の減少 (Thomas, 2000) との整合性の確認が必要である。

気温の日較差 (第2表第7列) は土佐清水を除く全地点で減少傾向が見られる。特に減少傾向が強い地点の中で、東京、米子、福岡のような主要都市では都市化による最低気温の上昇が要因になっていると考えられる。飽差 (第2表第8列) は、宮古ではほぼ変化がないのを除いて全国的な上昇が見られる。これは、蒸気圧のトレンドには統計的に有意な上昇/下降トレンドが見られない (第2表最右列) ことと、飽差のトレンドは蒸気圧のトレンドよりもはるかに大きいことから、飽差の上昇傾向は主に気温の上昇によるものと考えられる。

パン蒸発量のトレンドを示したのが第3表である。

まず、統計的に有意性のないトレンドも考えに入れると、全国的にまた季節によらず減少傾向を示す地点が圧倒的に多いことがわかる。特に、根室、潮岬において全ての季節で統計的に有意な減少傾向がみられるほか、有意でない減少傾向もあわせると、東京、鹿児島、石垣島、那覇以外の地点では季節によらず減少傾向がみられる。宮古は夏季において、これらの地点とほぼ同程度の減少を示しているが、統計的に有意と見なされていない。これは年々変動が大きいことが原因であり、おもにヤマセによる夏季の気温の年々変動が大きい (徐, 2001; 花輪, 1997) ことと関係がある。暖候期のみ注目すれば、札幌、根室、宮古、輪島、松本、潮岬、福岡、土佐清水、那覇の9地点で統計的に有意な減少傾向がみられる。

5. 考察

5.1 都市化とパン蒸発量

解析対象となる気象官署のうちの多くは、都道府県庁所在地などの都市に位置し、観測値への都市化の影響は無視できない。第3表および第3図に示されたパン蒸発量の長期トレンドが、都市スケールの局地的な都市気候の変化と、それよりも大きなスケールでの水文気候変動のどちらの影響を強く受けたものであるかについては、議論が必要である。一般に、都市化によって道路舗装面や建造物の屋根面など不浸透面積が増加すると、自然状態の地表面に比べ、大気中への蒸発散量は減少する (例えば虫明ほか, 1987, など)。そのため相対的に大気は乾燥し、パン蒸発量は増加すると考えられる。また気温の上昇は飽差の増加をもたらし、

これもまたパン蒸発量の増加をもたらす要因となりうる。それぞれの都市において、都市化のこのような効果が定量的にどの程度になり、都市よりも大きなスケールでの水文気候変動の影響と相対的にどちらが大きくなるかは、都市の内的条件（規模、密集度など）や外的条件（周辺地形、局地気候など）に支配されると考えられる。

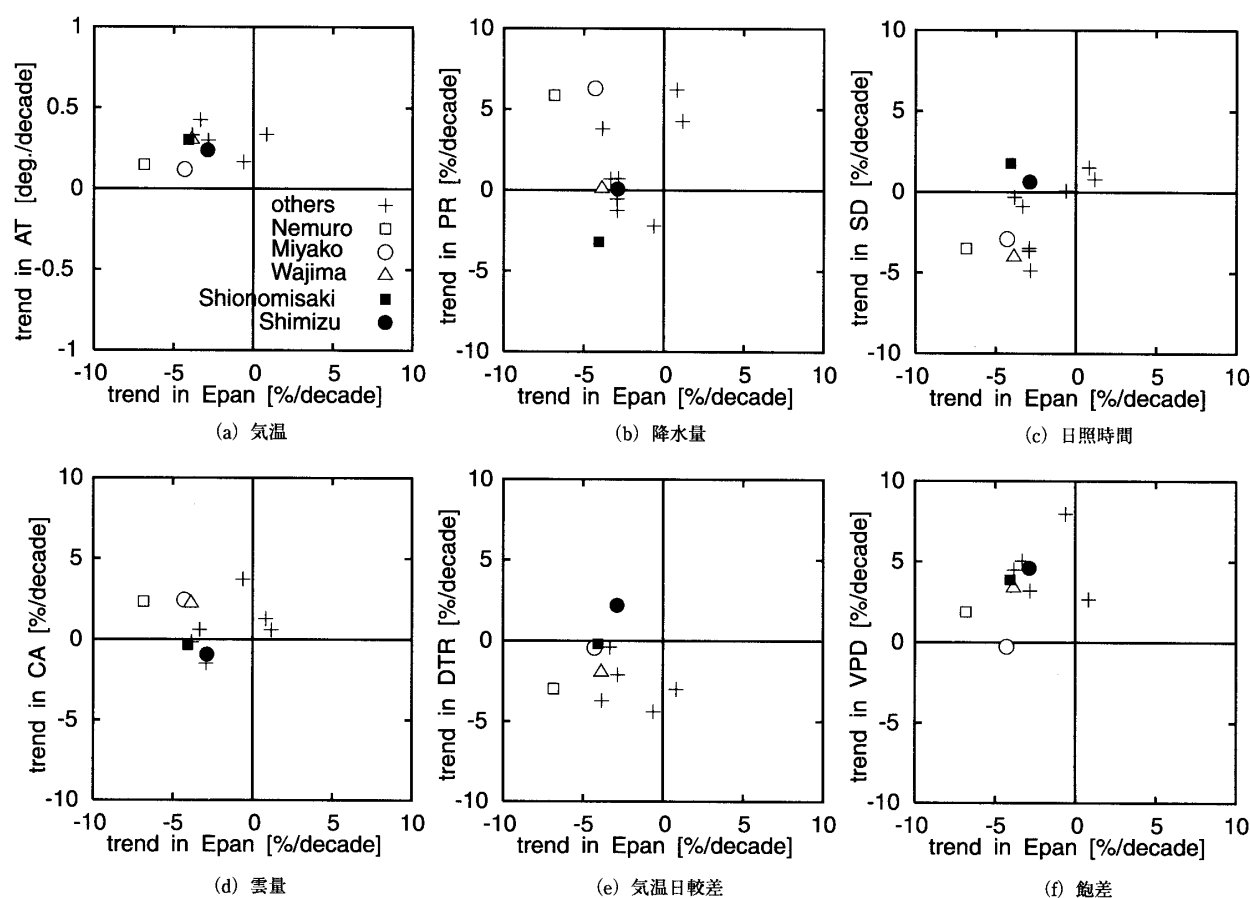
解析対象地点のうち、札幌、東京、松本、米子、福岡、鹿児島、那覇といった地点は、中小以上の都市域に属し、前記のような都市化の影響を受けていると考えられる。このうち、東京と鹿児島のパン蒸発量トレンド（第3表）は、1）春季から夏季に弱い増加ないしは減少、2）秋季に強い増加がみられる（冬季はともに欠測）という点で共通の季節変化を示している。東京では、秋季の気温上昇が $0.54^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ と年間を通じて最も大きく（鹿児島の気温は解析対象外）、秋季の大きなパン蒸発量の増加は、温暖化と都市化の共通の特徴である秋季から冬季にかけて顕著な気温上昇によ

ってもたらされていると考えられる。すなわち、これは都市における平均気温の上昇がパン蒸発量の増加につながるとい、前述の都市化の効果が顕著に現れた結果であろう。

単純に、局所的な都市化の影響と広域の水文気候変動の影響が重ね合わされた結果が、第3表に示す長期トレンドであると考えたとすれば、都市化の影響の強い地点での広域の水文気候変動に相当する長期トレンドは、第3表の値よりも、増加が少ないかあるいは減少が大きいと予測される。特に、松本、米子、石垣島の全ての季節と東京、鹿児島の秋季以外の季節では、統計的に有意な上昇・下降トレンドが見られないが、都市化の影響を排除するとこれらの地点ではパン蒸発量の減少傾向が強くなることが予測され、我が国周辺の水文気候変動傾向として、パン蒸発量が長期的に減少しているという観測事実を支持するものである。

5.2 パン蒸発量長期トレンドの解析

ここではまず、観測されたパン蒸発量の長期トレ



第4図 パン蒸発量と他の気象要素の暖候期無次元化トレンドの関係。横軸は、パン蒸発量の無次元化トレンド。縦軸はそれぞれ、(a) 気温、(b) 降水量、(c) 日照時間、(d) 雲量、(e) 気温日較差、(f) 飽差の無次元化トレンド。根室、宮古、輪島、潮岬、土佐清水の5地点をその他の地点と区別して表示してある。なお、気温のトレンドは無次元化していない。

ドが、他の気象要素のどのような長期トレンドを伴っているかを調べることによって、パン蒸発量の減少トレンドの解釈について考えることとする。

第4図は、横軸に平均値で無次元化した暖候期平均パン蒸発量のトレンド(第3表)、縦軸に同じく平均値で無次元化した他の気象要素の暖候期平均値のトレンド(第2表)をそれぞれプロットしたものである(ただし、気温のトレンドはそのままの値)。不明確な都市化の影響を排除するため、暖候期のパン蒸発量の減少トレンドが明確な9地点のうち、中規模以上の都市に属する札幌、松本、福岡、那覇を除く、根室、宮古、輪島、潮岬、土佐清水の5地点を特に区別してプロットしてある。第4図aから、これら5地点においては、パン蒸発量の減少が気温の上昇を伴っていることがわかる。これは、気温の上昇とともにパン蒸発量の減少が観測されるという、全球の様々な地域での観測事実が我が国の沿岸域においても観測されていることを立証する。第4図b(降水量)はパン蒸発量が減少傾向にあるにも関わらず、降水量は減少・増加傾向がまちまちであることを示しており、降水量の長期トレンドが有意でないことも含めて考えると、降水量とパン蒸発量の長期トレンドの間に一意的な関係がないことになる。合衆国大陸部では、過去50年間でパン蒸発量の減少と降水量の増加が同時に進行していることが確認されており、これはパン蒸発量と陸面蒸発量の補完関係を用いれば、降水量の増加、陸面蒸発量の増加、パン蒸発量の減少が相互に矛盾なく説明できる(Lawrimore and Peterson, 2000)。我が国においてこのような単純な図式が成立しないのは、陸面が十分湿潤なために降水量の増加が陸面蒸発量の増加に直接結びつきにくいこと、陸上の降水の起源の多くが海洋にあることなどが理由として考えられる。

第2表において日照時間・雲量のトレンドが、東日本と西日本で明確に異なることが示されたが、これと同様の特徴が第4図c(日照時間)およびd(雲量)においても示されている。すなわち前述の5地点が、雲量の増加と日照時間の減少がみられる北方地域(根室、宮古、輪島)と、雲量の減少・日照時間の増加がみられる南方地域(潮岬、土佐清水)の2つに明確に分類できる。前者に比べて後者ではトレンドが小さく、また統計的にも有意でない。同様の地域的な特徴が第4図e(気温日較差)においても見いだすことができるが、日照時間や雲量ほど明確ではない。第4図c, d, eは、日照時間、雲量、気温日較差のトレンドのいずれ

もが、全5地点の全てにおいてパン蒸発量の減少を一義的に説明するものではないことを示している。

これに対して第4図f(飽差)は、5地点の中で宮古を除く4地点で飽差の増加がパン蒸発量の減少と同時に起こっていることを示している。一般に飽差の増加は陸面蒸発量の増加に結びつくと考えられるため、これは陸面蒸発量の増加とパン蒸発量の減少が同時に生起していること、すなわちパン蒸発量と陸面蒸発量の間に補完的な関係が成り立っていることを示しており、BP98の解釈が正しいことになる。ただし本研究の場合は、この補完関係が降水量の増加に続く土壌水分の増加に伴うものというよりも、気温の上昇により飽差が増加(大気が乾燥)することによって、もたらされたと考えられる。南方2地点(潮岬・土佐清水)においては、日照時間・雲量の変化から日射量が暫増していると考えられ、これは陸面蒸発量とパン蒸発量を共に増加させる要因となり得る。しかしながら、日射量の増加によるパン蒸発量の増加よりも、上記のような飽差の増加が陸面蒸発量の増加につながり、そして補完関係を通じてもたらされるパン蒸発量の減少の方が大きかったことになる。これに対し、北方3地点(根室、宮古、輪島)では、日照時間の減少と雲量の増加が観測されており、飽差の増加に加えて日射量の減少もパン蒸発量を減少させている要因となっている可能性が考えられる。

5.3 パン蒸発量の年々変動の解析

パン蒸発量の長期トレンドの支配要因をさらに明らかにするため、暖候期平均値の年々変動について解析を行った。

各地点において、パン蒸発量と他の気象要素間の1対1の相関係数を示したのが、第4表である。また、パン蒸発量を従属変数としたステップワイズ回帰によって、各地点で上位2つまでの説明変数を選択した結果を第5表に示す。ステップワイズ回帰とは多変量線形回帰の応用で、従属変数 y が説明変数 x_i の線形結合 $y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_mx_m$ で表されるとしたとき、多くの互いに独立でない説明変数の候補から、互いに独立な情報を有し、従属変数を最も適切に表す説明変数の組 $(x_1, \dots, x_m)$ を探索するアルゴリズムである(Devore, 1991; Neter *et al.*, 1990, を参照)。探索の基準は、回帰係数 (a_i) について両側 t 検定を行い、有意水準約90%以上の説明変数を有意性の高いものから順々に加えていくという方法を用いた。

第4表と第5表に示すパン蒸発量と他の変数との相

第4表 根室、宮古、輪島、潮岬、土佐清水での暖候期におけるパン蒸発量と気温(AT)、降水量(PR)、日照時間(SD)、雲量(CA)、気温日較差(DTR)、飽差(VPD)、蒸気圧(VP)との間の相関係数。

Station	地点	AT 気温	PR 降水量	SD 日照時間	CA 雲量	DTR 気温日較差	VPD 飽差	VP 蒸気圧
Nemuro	根室	0.38	-0.30	0.61	-0.56	0.78	0.21	0.33
Miyako	宮古	0.64	-0.29	0.67	-0.63	0.51	0.68	0.44
Wajima	輪島	0.27	-0.33	0.67	-0.62	0.71	0.54	0.06
Shionomisaki	潮岬	0.01	-0.33	0.23	-0.21	0.46	0.17	-0.14
Shimizu	土佐清水	0.19	-0.34	0.43	-0.23	0.35	0.23	0.00

第5表 各地点において、パン蒸発量を従属変数として行ったステップワイズ回帰の結果、降水量(PR)、日照時間(SD)、雲量(CA)、気温日較差(DTR)、飽差(VPD)、蒸気圧(VP)を説明変数の候補として行い、選択された説明変数の組を有意性の高い説明変数から順に並べてある。

Station	地点	1	2
Nemuro	根室	DTR	VPD
Miyako	宮古	VPD	CA
Wajima	輪島	DTR	VPD
Shionomisaki	潮岬	DTR	
Shimizu	土佐清水	SD	

関関係・依存関係は、第4図と同様に全5地点が同様に北方3地点(根室、宮古、輪島)と南方2地点(潮岬、土佐清水)に明確に分かれることを示す。すなわち、南方2地点においては、パン蒸発量はいずれの変数とも明確な相関を有しない(第4表)だけでなく、ステップワイズ回帰の結果も1変数のみが選択されている(第5表)。これに対して北方3地点においては、パン蒸発量の年々変動がいくつかの変数と比較的高い相関を示すとともに、2変数がステップワイズ回帰で選択されている。このような南北でのパン蒸発量の年々変動に対する相関関係・依存関係の明確な相違は、パン蒸発量に対する影響因子がそれぞれの地域で明らかに異なることを示している。

第4表から、北方3地点におけるパン蒸発量は日照時間、雲量、気温日較差の3つと同程度に高い相関係数を有し、宮古ではこれに加えて気温・飽差とも同程度の相関を示していることがわかる。ステップワイズ回帰の結果(第5表)からは、これらの3地点のいずれにおいてもパン蒸発量の変動が飽差の影響を受けていることがわかる。飽差に加えて、根室、輪島では気

温の日較差が説明変数として選択されている。気温日較差と日射量の変動の間に相関関係があると考えられるので、日射量の変動が気温日較差を通じてパン蒸発量の支配因子となっている可能性は否定できないが、それは副次的なものである。一方、宮古においては、

雲量が説明変数に選択されており、雲量の増加に伴う日射量の減少がパン蒸発量の長期的な減少傾向に影響を与えている可能性が示唆される。このように北方3地点では、飽差の増加がパン蒸発量の減少の主要因になっているが、日射量の減少も要因の一つになっている可能性がある。すなわちこれは、パン蒸発量と陸面蒸発量が補完的な関係にあるとするBP98と、日射量の減少がパン蒸発量と陸面蒸発量の双方の減少を引き起こしているとするRoderick and Farquhar (2002)の双方のメカニズムが同時に働いている可能性を示唆するものである。Szilagyi *et al.* (2001)は米国の主要流域におけるパン蒸発量の減少割合と流域蒸発量の増加割合の定量的な関係を調べ、日射量の減少がパン蒸発量と陸面蒸発量の双方を減少させる方向に作用していることを指摘している。本研究の結果はSzilagyi *et al.* (2001)と同様、日射量の変動がパン蒸発量の変動に影響を与えている可能性を示すが、日射量の変動傾向に地域差があることから、そのパン蒸発量への影響にも地域によって相違があることになる。

詳細な解析を行った5地点のいずれも海岸線近くに位置し、また根室を除く4地点は海洋を望む斜面あるいは丘の上に位置していることから、今回の解析対象であるパン蒸発量および他の観測項目は、直接的あるいは間接的に、水文気候学的な時間・空間スケールでの海洋の影響を受けていることは想像に難くない。これらの地点で、パン蒸発量が降水量の変動とは強い相関を持たないという結果が、第4図と第4表そして第5表から得られた。また、本論文中には示さないが、降水量と飽差、降水量と湿度の間の相関係数もそれほど高くない。降水量とパン蒸発量、あるいは湿度・飽差の間に相関が見いだせないことは、陸面上での降水・蒸発を含む一次元的な水収支が成立していないことになる。これは、パン蒸発量と降水量の間に逆相関関係が見いだされたLawrimore and Peterson (2000)

とは対照的である。このように本研究の結果は、米国や旧ソ連邦などでの大陸部での結果とは異なる側面も持っている。海洋からの水蒸気移流の影響がその原因であるかどうかについては今後の課題である。Ohmura and Wild (2002) が示唆するように陸面と海洋の蒸発量の変動傾向を区別するとすれば、本研究の結果は Lawrimore and Peterson (2000) の結果と同程度には陸面を代表してはいないことになる。

6. おわりに

過去5年あまりの間、水循環変動の指標としてパン蒸発量が利用できないか、という期待が高まってきた。本研究では、気象庁が所管する気象台あるいは測候所13地点で計測された34年間のパン蒸発量の統計解析を行った結果、都市化の影響の強い一部の地域を除いて、季節を問わずパン蒸発量の全般的な減少傾向が見いだされた。このパン蒸発量の減少は、都市化の影響とは明らかに異なり、より広域の気候条件によってもたらされたものと考えられる。またパン蒸発量の減少傾向は、中国南東部沿岸地域(徐, 2001; Xu *et al.*, 2004)、タイ・チャオプラヤ流域(手計ほか, 2004)やインド(Chattopadhyay and Hulme, 1997)の各地域と共通しており、中国東北部-内モンゴル-河北地域-チベット高原(Xu *et al.*, 2004)および旧ソ連の中央アジア地域(Peterson *et al.*, 1995)などユーラシア大陸内陸部で報告されているパン蒸発量の増加とは対照的である。よってパン蒸発量の減少傾向が、東アジアから東南アジア、南アジアにわたるアジアモンスーンの影響を強く受ける地域での長期的な水文気候変動特性の1つであると考えられる。

減少トレンドが明白でかつ都市化の影響が少ないと考えられる5地点について、パン蒸発量の減少傾向の要因を調べたところ、ほぼ全ての地点で飽差の増加がみられた。これはBP98によれば、パン蒸発量の減少が陸面蒸発量の増加と解釈できることになる。その一方で、北方3地点においては雲量の増加に伴う日射量の減少が同時に起こっており、Roderick and Farquhar (2002)が主張するように日射量の減少が陸面蒸発量とパン蒸発量の減少を引き起こしているというメカニズムが起こっている可能性も否定できない。また、相関・回帰解析によれば、北方3地点と南方2地点の間でパン蒸発量と他の気象要素の関係が明確に異なり、両者の間でパン蒸発量の変動要因が明らかに異なることを示した。これは、水文気候システムの従属変数の1つ

であるパン蒸発量の変動の解釈が、属する水文気候システムによって異なる可能性を示すものである。また、日射量が減少傾向にある地域でのパン蒸発量の減少トレンドの解釈に注意が必要であることも意味する。

パン蒸発計は地表面における放射エネルギーの分配結果を反映した「熱収支計」(近藤・徐, 1997)であり、また本論文の結果にあるように広域の水文気候変動に関する情報を内包している。そして何よりも、世界各地で同一の規格で長期的に計測されていることは、気候・水循環研究にとって重要な情報であることが、近年の研究で明らかになりつつある。今後は、統計解析のみでなく物理的な解析(近藤・徐, 1997, など)を含めた研究が必要となるであろう。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、W. Brutsaert 教授(コーネル大学)、徐 健青博士(地球環境フロンティア研究センター)、近藤純正東北大名誉教授、桑形恒男博士(農業環境技術研究所)、早野美智子博士(防災科学技術研究所)、高田久美子博士(地球環境フロンティア研究センター)の皆様に貴重な情報・コメントを頂いた。また、気象庁観測部観測課の土井元久氏には、気象庁資料の閲覧に関するご助力を頂いた。ここに記し感謝の意を表するものである。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究B(代表:浅沼, 課題番号13750482)の援助を受けた。

参 考 文 献

- Bouchet, R., 1963: Evapotranspiration reelle at potentielle, signification climatique, Int. Assoc. Sci. Hydro. Pub., 62, 134-142.
- Brutsaert, W., 1982: Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel-Kluwer, Hingham, Mass, 299 pp.
- Brutsaert, W. and M. B. Parlange, 1998: Hydro-logic cycle explains the evaporation paradox, Nature, 396, 30.
- Brutsaert, W. and H. Stricker, 1979: An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration, Water Resour. Res., 15, 443-450.
- Chattopadhyay, N. and M. Hulme, 1997: Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change, Agri. and Forest Meteor., 87, 55-73.
- Cohen, S., A. Ianetz and G. Stanhill, 2002: Evapor-

- ative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998, *Agri. and Forest Meteor.*, **111**, 83-91.
- Devore, J. L., 1991 : Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. Brooks/Cole Pub. Co., 3rd edition, 716 pp.
- Golubev, V., J. Lawrimore, P. Groisman, N. Speranskaya, S. Zhuravin, M. Menne, T. Peterson and R. Malone, 2001 : Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR : A reassessment, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(13), 2665-2668.
- Houghton, J., Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, van der P. Linden, X. Dat, K. Maskell and C. Johnson, editors, 2001 : Climate Change 2001—The Scientific Basis—, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge U. K, 881 pp.
- Karl, T., R. Knight, D. Easterling and R. G. Quayle, 1996 : Indices of climate change for the united states, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **77**(2), 279-292.
- Kendall, M. and J. D. Gibbons, 1990 : Rank Correlation Methods. Oxford Univ. Press, 202 pp.
- Lawrimore, J. and T. Peterson, 2000 : Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States, *J. Hydrometeor.*, **1** (6), 543-546.
- Lettenmaier, D. P., E. F. Wood and J. R. Wallis, 1994 : Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948-88, *J. Climate*, **7**, 586-607.
- Mann, H. B., 1945 : Nonparametric test against trend, *Econometrica*, **13**, 245-259.
- Morton, F., 1975 : Estimating evaporation and transpiration from climatological observations, *J. Appl. Meteorol.*, **14**, 488-497.
- Morton, F., 1976 : Climatological estimates of evapotranspiration, *J. Hydraul. Div., Proc. ASCE*, **102** (HY3), 275-291.
- Neter, J., W. Wasserman and M. H. Kutner, 1990 : Applied Linear Statistical Models. Irwin Inc., 3rd edition, 1181 pp.
- Ohmura, A. and M. Wild, 2002 : Is the hydrological cycle accelerating?, *Science*, **298**(5597), 1345-1346.
- Parlange, M. B. and G. G. Katul, 1992 : Advection-ridicity evaporation model, *Water Resour. Res.*, **28**(1), 127-132.
- Penman, H. L., 1948 : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. London*, **A193**, 120-146.
- Peterson, T., V. Golubev and P. Groisman, 1995 : Evaporation losing its strength, *Nature*, **377**, 687-688.
- Quintana-Gomez, R., 1997 : Changes in evaporation patterns detected in northernmost south America. homogeneity testing, In *Proc. 7th International Meeting on Statistical Climatology*. Whister, BC, Canada, p. 97.
- Roderick, M. and G. Farquhar, 2002 : The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years, *Science*, **298**(15 Nov.), 1410-1411.
- Stanhill, G. and S. Cohen, 2001 : Global dimming : a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences, *Agri. and Forest Meteor.*, **107**, 255-278.
- Szilagyi, J., G. G. Katul and M. B. Parlange, 2001 : Evapotranspiration intensifies over the conterminous United States, *J. Water Resour. Planning and Management*, **127**(6), 354-362.
- Thomas, A., 2000 : Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China, *Int. J. Climatol.*, **20**, 381-396.
- Xu, J., S. Haginoya, K. Saito and K. Motoya, 2004 : Surface heat and water balance trends in eastern Asia in the period 1971-2000, *Hydrol. Processes*, in press.
- 大槻恭一, 1988 : 補完関係を利用した流域蒸発散量の推定, *水文・水資源学会誌*, **1** (1), 83-93.
- 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄, 早野美智子, 2001 : 少雨の空間分布に関する研究, *水文・水資源学会誌*, **14** (2), 142-150.
- 近藤純正, 徐 健青, 1997 : ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿度, *天気*, **44**, 875-883.
- 徐 宗学, 竹内邦良, 石平 博, 2002 : 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプおよびトレンドに関する研究, *土木学会水工学論文集*, **46**, 121-126.
- 徐 健青, 2001 : ポテンシャル蒸発量からみた東アジアにおける近年の気候変化, *水文・水資源学会誌*, **14**(2), 151-170.
- 田森俊彦, 1996 : 気象測器—地上気象観測篇, 日照計, 鈴木宣直(編), *気象研究ノート*, (185), 第9章, 119-122.
- 手計太一, 吉谷純一, スヴァンピモルチャンチャイ, 2004 : タイ王国・Chao Phraya 川流域とその周辺におけるパン蒸発計蒸発量の時空間分布に関する研究, *水文・水資源学会誌*, **17**, 印刷中.
- 花輪公雄, 1997 : 東北日本の夏季の気温の長期変動特性—気温変化率の数十年スケール変動—, *気象研究ノ*

ト, (189), 192-198.
 早野美智子, 岸井徳雄, 葛葉泰久, 2002: 多雨年・少雨
 年における5月, 8月降水量と平均気温の長期変化に
 ついて, 防災科学技術研究所研究報告, **63**, 21-29.
 虫明功臣, 石崎勝義, 吉野文雄, 山口高志(編), 1987:

水循環の保全と再生. 山海堂, 352 pp.
 安成哲三(編), 1997: 1993年/94年夏の異常気象の解明,
 気象研究ノート, (189), 290 pp.
 米谷恒春, 葛葉泰久, 岸井徳雄(編), 2002: 気候変動と
 水災害. 新山社サイテック, 256 pp.

Pan Evaporation Trends in Japan and its Relevance to the Variability of the Hydrological Cycle

Jun ASANUMA*, Hideyuki KAMIMERA** and Minjiao LU***

* (Corresponding Author) *Terrestrial Environment Research Center (TERC), University of
Tsukuba 1-1-1 Tennohdai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577, Japan.*

** *Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology.*

*** *Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology.*

(Received 1 September 2003 ; Accepted 14 July 2004)

Abstract

As a possible indicator of the terrestrial evaporation trend, pan evaporation measured over the past 34 years at 13 stations operated by Japan Meteorological Agency were analyzed in terms of its long term trends. It was clearly shown that, except some stations under strong influences of the local urbanization, the past records of the pan evaporation measurements contain a clear decreasing trend all over the Japan for all seasons. Detailed analyses show that the decreasing pan evaporations were accompanied with the increasing vapor pressure deficit that is the indication of increasing terrestrial evaporation. In the northern regions, however, increasing cloudiness, i. e., decreasing solar radiation, was also found to have an influence on the decreasing pan evaporation trend. A correlation/regression analysis also indicates that there is distinction in the controlling factors of pan evaporation between the northern and the southern region of Japan.