

地球温暖化が穀物生産能に及ぼす影響について

Climate change impact on crops productivity

松岡 譲¹

高橋 潔¹

Yuzuru MATSUOKA¹

Kiyoshi Takahashi¹

Abstract - Climate change impact on crops production may be one of the most serious problems in the next century. In order to evaluate this problem, we estimated potential crops yield with a model based on local climatic, hydrological and soil characteristics. According to the estimation, potential crop yield of winter wheat will decrease 7.41~16.82%, while that of maize for tropical cultivation and rice will increase 4.70~8.36%, 2.71~6.79% respectively.

Keywords: Global Environment, Climate Change, Food Production

1 はじめに

この論文では、気候変動により世界の潜在穀物生産性が長期的にどの程度変化するかを定量的に解析した結果を報告する。潜在穀物生産性の算定手法は、国連食料農業機構 (FAO) が行っている農生態地域プロジェクト (AEZ) に基づき独自開発を行った。この方法では、平年気温、降水量、日射量及び土壌情報を用い、一定の農業努力の投入下の収量 (潜在生産性) を求める。年々変化などの影響及び二酸化炭素濃度増大の直接影響 (二酸化炭素肥沃化効果) は考慮していない。同様の試みは世界の各地域に対して多数行われているが、それらは地域的な適用を目的としたものが主である。一方、地球規模的な観点からは、より長期的・広域的な視野にたった将来環境の見通しを得ることが必要である。したがってこの論文では、対象地域を全世界、検討時期を来世紀末とする。そのため、他の地域的・短期的な適用を目的とした算定方法に比べ精度に劣る面もあるが、地域的な適用においてもある程度の推定が行えると考えている。

2 気候変動が穀物生産力に及ぼす影響研究の概況

気候変動は穀物生産及び世界食料需給に大きな影響をもたらす可能性がある。この効果を検討するためには、関連する直接、間接影響を段階的に評価するフレームを策定しなければならない。図-1 は、その例である。この図中の上半分は、現在及び気候変動後の気候資源、土壌資源における各作物の潜在的な生産能を算定する段階であり、代表的な地点についてスポットの

算定を行ったり、地理情報システムなどと組み合わせて空間的に網羅的な算定を行ったりする。この段階では、日気温、日降水量、土壌水分量、放射量などの気候因子、土壌ユニット、土壌相などの土壌因子、灌漑、施肥、耕運などの農業努力投入量などを作物層などにそって与え、作物生長・収穫の動的シミュレーションを行う場合が多い。大気中二酸化炭素濃度の変化による肥沃化効果の見込み、土中水分利用効率の変化、将来の灌漑シナリオの想定などに基づく結果の変化をどのようにに評価するかが、一つのポイントとなる。図-2 は本論文で使用したモデルについてそのフレームを示したものであり、表-1 に示すイネ、コムギ、トウモロコシなど 12 の作物について、世界全域をほぼ 50km メッシュに分け計算を行っている。このような作業は、現在、大変精力的に行われつつある。表-2 にはそれらの作業で使用されている穀物生産シミュレーションモデルの例を掲げる。これらはいずれも図-1 の上半分に示されている一次影響評価モデルとして位置づけられるものである。

二次的な影響である生産・消費機会の変化、それ起因する価格変化と生産者・消費者余剰の変化などの評価には、既往の世界農業経済モデルをベースにした作業が多い。BLS (Fischer ら、1994) あるいは米国農務省の SWOPSIM (Kane ら、1992)、FARM (Darwin ら、1994) などの適用は有名である。Kane らの検討では、世界 13 地域、20 産物に関する部分均衡モデルを使用した。その結果、気候変動により大きな生産量減少を被る地域はあるものの、その総体的影

¹ 名古屋大学工学部 Faculty of engineering, Nagoya University

¹ 京都大学大学院工学研究科 Graduate student, Faculty of engineering, Kyoto University

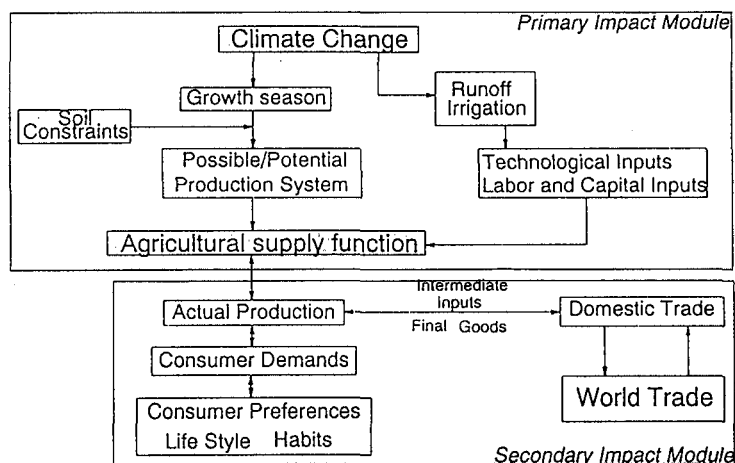


図-1 気候変動の農業部門への影響評価算定フレーム

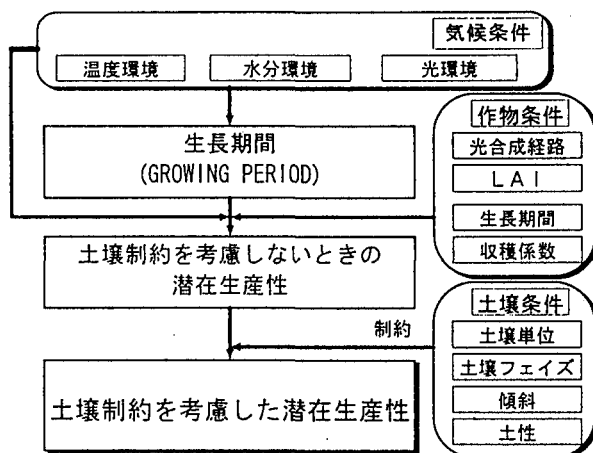


図-2 本論文で使用了穀物潜在生産性算定モデル

表-1 本論文で使用了モデルにて取り上げた作物パラメータ

作物略称	日本名	作物グループ	光合成経路	標準生長期間 N(日)	最低生長期間 間(日)	LAI _{max}	h _i (ave.)	最低温度 T _{min} (℃)	最高温度 T _{max} (℃)	
Wheat SC	春コムギ	I	C3	100	*	100	5	0.4	5	25
Wheat WC	冬コムギ	I	C3	150		120	5	0.4	5	25
White potato	ジャガイモ	I	C3	150		90	5	0.6	7	30
Phaseolusbean TEC	温帯性インゲン	I	C3	90	*	90	4	0.3	7	32
Phaseolusbean TRC	熱帯性インゲン	II	C3	120		90	4	0.3	7	32
Soybean	ダイズ	II	C3	120		90	4	0.35	13	38
Rice	イネ	II	C3	130		100	5	0.3	13	36
Sweet potato	サツマイモ	II	C3	150		120	4.5	0.55	10	40
Cassava	キャッサバ	II	C3	330		180	3	0.55	10	35
Pearl millet	トウジンビエ	III	C4	90		70	4	0.25	15	45
Sorghum TRC	熱帯性モロコシ	III	C4	120		90	4	0.25	15	38
Maize TRC	熱帯性トウモロコシ	III	C4	120		90	4	0.35	12	40
Sorghum TEC	温帯性モロコシ	IV	C4	110	*	110	3	0.25	15	38
Maize TEC	温帯性トウモロコシ	IV	C4	110	*	110	4	0.35	12	40

*印の作物の標準生長期間Nは、生長期間中の平均気温によって変化する。この表に示された値は20℃の時のNである。春コムギ、温帯性インゲンは、平均気温が20℃から0.5℃低下することにNを6日間長くする。例えば、平均気温15℃の時、春コムギでは、表に示されたN(20℃でのN)が100日であるから、 $N=100+12 \times (20-15)=160$ (日)となる。ただし、Nは、春コムギで最大190日まで、温帯性インゲンでは最大180日までとする。

温帯性モロコシと温帯性トウモロコシも春コムギ、温帯性インゲンと同様の方法を採用するが、この2つの作物では、20℃から1℃低下することにNを40日間延長する。また、これら2つの作物のNの最大は310日とする。

表-2 気候変動による農業影響評価作業で使用されている

穀物生産シミュレーションモデルの例		
穀物名	モデル名称	開発者
アルファルファ	ALSIM	Fick(1981)
	ALFALFA	Dennison and Loomis(1989)
オオムギ	CERES-Barley	Ritchie et al.(1989)
	GOSSYM	Baker et al.(1983)
ワタ	COTCROP	Brown et al.(1985)
	COTTAM	Jackson et al.(1988)
豆類	BEANGRO	Hoogenboom et al.(1989)
	CERES=Maize	Jones and Kiniry(1986); Ritchie et al.(1989)
トウモロコシ	-	Stockle and Campbell(1985)
	CORNF	Stapper and Arkin(1980)
	SIMAIZ	Duncan(1975)
	CORNGRO	Childs et al.(1977)
	CORNMOD	Baker and Horrocks(1976)
	-	Morgan et al.(1980)
	VT-Maize	Newkirk et al.(1989)
	GAPS	Buttler(1989)
	CUPID	Norman and Campbell(1983)
	PNUTGRO	Boote et al.(1989)
	-	Young et al.(1979)
	CERES-Millet	Ritchie and Alagarswamy(1989)
ジャガイモ	RESCAP	Monteith et al.(1989)
	-	Ng and Loomis(1984)
コメ	SUBSTOR	Griffin et al.(1993)
	CERES-Rice	Godwin et al.(1990)
モロコシ	RICEMOD	-
	-	Aggarwal and Penning de Vries(1989)
	-	Horie(1988)
	SORGF	Arkin et al.(1976)
	CERES-Sorghum	Ritchie and Alagarswamy(1989)
	SORKAM	Rosenthal et al.(1989)
	RESCAP	Monteith et al.(1989)
	SOYGRO	Wilkerson et al.(1983), Jones et al.(1989)
	GLYCIM	Acock et al.(1983)
	REALSOY	-
	SOYMOD	Curry et al.(1975)
	CANEMOD	Inman-Bamber(1991)
サトウキビ	CERES-Wheat	Ritchie(1985), Godwin and Vlek(1985)
	-	Stockle and Campbell(1989)
コムギ	TAMW	Maas and Arkin(1980)
	-	van Keulen and Seligman(1987)
一般モデル	SIMTAG	Stapper(1984)
	EPIC	Williams et al.(1984)

響は貿易によってかなり緩和され、世界GDPの変化は-0.17~0.09%程度となっている。この種の作業には、世界各国の直接影響の見通しが必要となり、大規模な労力が必要となる場合が多い。また、穀物種、栽培方法の変更、国内消費製品と貿易用製品への影響メカニズムの違い、各国農業政策の推移などの問題をどのように実際・現実的にモデル化あるいはシナリオとして設定しうのかなどが問題となる。また、対策・適応策の取り扱いも大きな問題となる。これには、大きく農業生態学的及び経済的な方法の二通りが想定され、前者には、栽培層や栽培種・灌漑・施肥などの改変があり、後者には穀物種、耕作法の変化に伴う生産費用、収益からの適応がある。Fisherらの検討では、一般均衡型の世界食糧貿易モデルであるBLSと、USAIDが開発したIBSBAT穀物モデルを組み合わせ、適応などをも考慮に入れた影響評価を行っている。彼らの結果によれば、2060年時点の世界穀物生産量は、適応・対策を行わない場合、温暖化により1~8%減少し、穀物価格は24~145%上昇する。農場レベルの対応策を行えば、生産量変化は+1~2.5%、価格変化は

-5~35%まで抑制することが出来るとの結果を得ている。

3 シミュレーションとその結果

3.1 モデルの概容 (1995, 高橋・松岡)

図-2に記すように、本論文で使用したモデルは穀物種によって定められる標準的成長過程が気候、土壌条件によって制限されるプロセスをシミュレートしている。気候条件を示すパラメータである毎日の日平均気温、日中平均気温、土中水分量、光合成に利用可能な放射量をもとに図-3に示す道筋によって土壌制約を考慮しないときの潜在生産性を求める。さらに土壌パラメータとしては土壌単位(106種)、フェイズ(12種)、傾斜(3段階)、土性(3段階)の4種をあげ、穀物種及び投入労力に応じた収量割引値を準備した。

3.2 シナリオと気候分布

現在気候としては、Legates及びWillmott(1990)による月平均気温、月平均修正降水量、Leemans及びCramer(1991)による月平均雲量を用いた。将来の月平

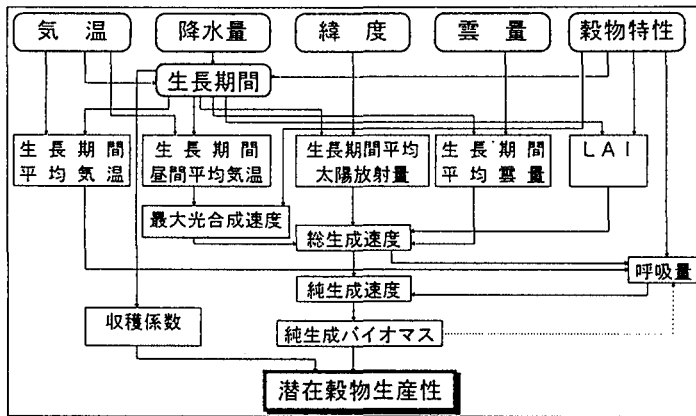


図-3 気候資源に依存する潜在穀物生産性の推定

均気温と月平均降水量については、温室効果ガスの排出シナリオを IS92a とし、二酸化炭素濃度倍増時の気候感度は 2.5℃ とした。また、気候変動の地域的分布としては、CCC、GISS、GFDL、GFDL R30、GFDL Q-flux、OSU、UK-MET の 7 つの 2xCO₂ 平衡大循環モデル (GCM) の出力を利用した。ただし、これらの GCM の出力結果は分解能が低いので、これらを内挿し、緯経度 0.5° メッシュに補間したものを利用した。将来の月平均雲量については、現在のものをそのまま用いた。土壌条件は FAO/UNESCO 世界土壌図を緯経度 5 分メッシュにデジタル化し使用した。なお穀物生産能算定は 5 分メッシュで行った。

3.3 気候変動による潜在穀物生産性変化の算定

前節に示したシナリオとモデルを使い、2100 年時の環境下での各作物の潜在生産性を推定し、現在の潜在生産性からの変化を求めた。そのうち、本報ではイネ、冬コムギ、春コムギ、熱帯性トウモロコシ、温帯性トウモロコシについて報告する。表-3 は、モデル計算によって求められた潜在生産量の地球全体での増加率を

各作物ごとに示したものである。また、いくつかの国の土壌制約を考慮しない場合の潜在生産量増加率を表-4 に、高入力下で各作物の土壌制約を考慮した場合の潜在生産量増加率を表-5 に示した。

表-3 から、イネの潜在生産量は、どの GCM による推定によっても増加が予測され、地球平均では 5.88% の増加である。各国の影響を示した表-5 によると、カナダと旧ソ連において大幅な増加が推測される。この 2 国の増加は地球平均での増加に寄与している。イネを主要な食糧としている東・東南アジアの国々においては、大きな変化はみられない。わが国では、3% の微増であり、中国においては耕作限界が北に移動するため 7% の増加であった。

コムギについて、地球全体の潜在生産量は冬コムギで 13.2%、春コムギで 5.05% 減少すると算定された。インド、ネパールなどの南アジアでは冬コムギで 50% ~60% の減少が推定されている。ほとんどの GCM が同様の推測を行うことから、この地域のコムギの潜在生産性が大幅に減少する可能性は高い。合衆国、旧ソ連、カナダを除いた現在の主要なコムギ作地帯（アルゼン

表-3 世界全体の穀物生産力の変化 (%)

	Rice		WheatWC		WheatSC		MaizeTRC		MaizeTEC	
	free	high	free	high	free	high	free	high	free	high
CCC	9.42	4.30	-18.39	-16.82	-1.24	-9.40	11.39	5.61	2.85	-10.57
GISS	9.22	6.56	-11.11	-7.41	7.43	0.92	11.56	8.36	3.29	-6.50
GFDL	9.68	5.20	-12.38	-13.20	3.93	-5.28	10.82	5.84	12.38	2.44
GFDL-R30	11.92	6.33	-8.54	-8.50	8.94	-1.15	13.70	8.25	13.47	0.00
Q-FLUX	9.83	6.79	-10.79	-8.14	5.28	-1.15	10.68	7.33	8.54	-1.22
OSU	8.71	2.71	-16.01	-15.01	-0.54	-8.26	10.05	4.70	4.05	-8.94
UK-MET	11.87	5.88	-14.27	-13.20	3.61	-5.05	13.22	7.45	15.99	0.81
min	8.71	2.71	-18.39	-16.82	-1.24	-9.40	10.05	4.70	2.85	-10.57
max	11.92	6.79	-8.54	-7.41	8.94	0.92	13.70	8.36	15.99	2.44
median	9.68	5.88	-12.38	-13.20	3.93	-5.05	11.39	7.33	8.54	-1.22

(ただし、free とは土壌制約を考慮しない場合、high とは高入力下で土壌制約を考慮した場合。)

表-4 土壌制約を考慮しない場合の各国潜在生産力変化 (%)

	Rice	WheatWC	WheatSC	MaizeTRC	MaizeTEC
Argentina	1	-7	-19	2	-46
Bangladesh	-3	-88	—	-1	—
Brazil	-3	-52	-57	-2	-76
Canada	427	23	30	104	210
China	13	-7	-12	3	-19
France	3	-8	-7	-4	80
India	-6	-45	-36	3	—
Italy	4	-7	-7	-2	50
Japan	2	3	-6	-4	-45
Nigeria	-5	-42	—	-2	—
Thailand	-4	—	—	-1	—
USA	6	2	5	14	-19
USSR	185	26	35	73	165
Vietnam	-3	-55	—	-2	—

表-5 土壌制約を考慮した高入力下での各国潜在生産力変化 (%)

	Rice	WheatWC	WheatSC	MaizeTRC	MaizeTEC
Argentina	-7	-8	-24	1	-60
Bangladesh	1	-88	—	0	—
Brazil	-3	-42	-48	-2	-73
Canada	204	14	19	95	166
China	7	-10	-13	0	-31
France	1	-5	-4	-5	78
India	-10	-60	—	0	—
Italy	1	-10	-4	-3	29
Japan	3	3	-5	-5	-51
Nigeria	-4	-55	—	-1	—
Thailand	-4	—	—	5	—
USA	1	-4	0	4	-36
USSR	151	13	8	35	130
Vietnam	-2	-58	—	-3	—

チン、フランス、中国、イタリアなど) ではほぼ10%の減少が見られた。これらの国では、GCM 毎に、若干ばらつきはあるが、どの GCM を用いた推定も潜在生産量が減少することを示している。合衆国・カナダでは潜在生産量は大きな変化が見られないが、適作地が北に若干移動した。スウェーデンなどヨーロッパ北部では明確な増加がみられた。

表-3によると、トウモロコシの世界潜在生産量は、熱帯性トウモロコシでは7.33%増加し、温帯性トウモロコシは1.22%の減少があった。しかしながら、温帯性トウモロコシについては、GCM により推定値にばらつきが大きく、信頼性が低い。熱帯性トウモロコシの増加は主として高緯度地方で起こり、低緯度地方はあまり変化を示さない。その結果世界全体では増加した。大きく増加するのは、カナダの95%、旧ソ連の35%などである。現在の多収地域を保持したまま、将来その潜在生産性を持つ範囲が広がる熱帯性トウモロコシは、温暖化により最も利益を受ける作物の一つであろう。温帯性トウモロコシについては、北半球では潜在生産性を持った土地が全体的に帯のようにして高緯度帯に移動した。南米のアルゼンチン、ウルグアイ、ブラジ

ルの国境近辺の多収地帯では、気温の上昇のために、温帯性トウモロコシが熱帯性トウモロコシに変わっている。

4 おわりに

本論文では、気候変動による農業影響を判定するために、気候変動による潜在穀物生産性の変化の推定を、長期かつ地球規模的な立場から行った。ここまで示した潜在穀物生産性の推定結果により、気候変動が農業に与える影響について考える。

本論文で取り扱ったように、二酸化炭素排出量中位、気候感度中位というシナリオで気候変動が起きるとすると、地球全体の穀物生産力という観点でみた場合、コムギの生産においていくらか生産力が低下するものの、致命的な影響を与えないと判断できる。しかしながら、それは気候変動が農業に与える影響は無視できる程度であると判断できるということでは決してない。この論文の結果によっても、潜在穀物生産性を持った土地が移動することがわかった。その移動による影響を評価する場合には、潜在生産性の変化だけでなく、輸出入、消費者需要などを含めた評価を行う必要があ

る。同じ量の潜在穀物生産性の変化が、各国に同じ程度の影響を与えるとは限らないのである。例えば、ある国の潜在生産性が低下したとして、その国が輸入によりその低下した分を補充できないくらい貧しい国であったり、今後急激に人口が増加するような場合、その国にとっては致命的な影響であるといえる。そのような状況は十分に起こりうると考えられる。今回の推定結果で言えば、インドにおけるコムギの生産力の激減などは、注意して、今後の取り組みを真剣に考える必要がある。また、耕作地の移動に伴う、森林伐採などの環境への影響も含める必要があろう。これらの影響を評価するために、この論文で用いた潜在穀物生産性算定モデルとリンクして用いることができる影響算定の手法を今後開発することが早急の課題であると考ええる。

さて将来の世界農業を左右する因子としては、気候変動以外に多くの要素がある。第二次世界大戦後の40年間で農業生産量は年2.7~2.1%の増加率を示し、その実質価格は78%の低下があった。飢餓人口は、1979年の8.44億人から7.86億人と低下しているが、飢餓原因は多岐にわたっている。世界の食料需給に関し、最近のIFPRI (International Food Policy Research Institute) から発表されたいくつかの推計 (Islam, 1995) では、今後の20~30年について、供給は需要を上回り、農産物価格は低下すると楽観的な見通しを述べているが、耕作・灌漑面積及び収量の伸び悩みに起因する悲観的な推測も少なくない。世界の耕作可能面積は現耕作面積に比べはるかに大きいのが、耕作地転換に要する費用は高く、また現耕作地への耕作強度の強化がもたらす土地劣化の影響もしばしば指摘されている。また、従来から灌漑は農業生産性向上に大きな役割を果たしてきた。現在、17%の農地が灌漑され、そこから30%以上の食料が生産されており、この灌漑面積を増加させることは可能ではあるがその費用は高い。こうした世界農業をめぐるさまざまな因子の中で、気候変動は、農業可能地域あるいは潜在生産量を変化させる。世界全域にわたり、稠密な穀物生産量変化の推定を行っている計算としては、本論文の他に Leemans and Solomon (1993) の検討がある。いずれも国連食糧農業機構 (FAO) が開発してきた気候-作物の適性算定法と GCM シナリオを組み合わせ、全世界での農業地帯の遷移、穀物生産能の変化を計算したものである。これらの結果によれば、高緯度帯では生長期の伸びなどから収量増加があり、低緯度、中緯度地域では、土中水分変化などにより収量減少の地域なども生ずる。ただし、これらの計算では、二酸化炭素肥沃化、水分摂取効率などの変化による効果は考慮していない。これらの計算及び Rosenzweig and Parry (1994) らが行っている計算結果を総覧する限りでは、不明な点は多くあるものの、気候変動による世界全域

の農業生産性に対する危機を、浮かび上がらせるのにいまだ成功しているとは言えない。

引用文献

- Darwin, R., J. Lewandowski, M. Tsigas and A. Ranases: Shifting uses for natural resource in a changing climate, *World Resource Review*, 6(4), pp. 559-569, 1994.
- FAO: Report on the Agro-Ecological-Zones project, Vol. 1~4, FAO, 1978-1981.
- FAO/UNESCO: Soil map of the world, 1:5,000,000, FAO, 1974.
- Fisher, G., K. Froberg, M.L. Parry, and C. Rosenzweig: Climate change and world food supply, demand and trade, *Global Environmental Change*, 4(1), pp. 7-23, 1994.
- Islam, N. (ed.): Population and Food in the Early 21st Century: Meeting Future Food Demand of an Increasing World Population, Occasional Paper, International Food Policy Research Institute, Washington D.C., 1995.
- Kane, S. J. Reilly and J. Tobey: Climate change: economic implications for world agriculture, USDA/ERS, Agricultural Economic Report, 647, 1991.
- Leemans, R. and A.M. Solomon: Modeling the potential change in yield and distribution of the earth's crops under warmed climate, *Climate Research*, 3, pp. 79-96, 1993.
- Leemans, R. and W. Cramer: The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid, Research report, RR-91-18, Laxenburg, Austria.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott: Mean seasonal and spatial variability in gauge corrected, global precipitation, *Int. J. Climatol.*, Vol. 10, pp. 111-127, 1990.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott: Mean seasonal and spatial variability in global surface air temperature, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol. 41, pp. 11-21, 1990.