

SWAP モデルによる気温、降雨変化が作物収量に与える影響評価

—地球温暖化が作物生産に及ぼす影響—

郡山 益実, 田中 明, 矢野 友久*

(海浜台地生物環境研究センター)

* (鳥取大学乾燥地研究センター)

平成15年10月31日 受理

Impact Evaluation of Temperature and Rainfall Change on Crop Yield with the SWAP Model (The Impact of Global Warming on Crop Production)

Masumi KORIYAMA, Akira TANAKA and Tomohisa YANO*

(Marine and Highland Bioenvironment Center)

(Arid Land Research Center, Tottori University)

Received October 31, 2003

Summary

The impact of global warming (change of temperature and rainfall) in Saga on crop yield was numerically investigated using the SWAP model. The mean temperature in Saga increased from 1961 to 1999. It was estimated that the mean temperature in 2100 is higher than 2.15°C than that in 2003. Since 1967, mean and standard derivation of rainfall obtained by the probability distribution was nearly 0.76 and 0.43, respectively. Day of daily precipitation of not less than 20 mm and 50 mm increased, and it had been noticeable since 1980. Change of soybean yield with increasing mean temperature was simulated by the SWAP model. As a result, crop yield decreased in year of high annual average temperature and less annual precipitation and it increased in year of low annual average temperature and much annual precipitation with increasing mean temperature. From the probabilistic approach, daily rainfall occurrences were represented by a Markov process, and daily rainfall was simulated by Monte Carlo method. On the basis of the above method, relationship between rainfall pattern and crop yield was investigated. As a result, crop yield changed greatly with increasing and decreasing precipitation in growing period of crop. Thus, it is clear that not only an amount of annual precipitation but also interval of rainfall was one of the important factors for crop yield.

Key words: global warming, crop yield, SWAP model, temperature, rainfall

緒 言

化石燃料の燃焼, 土地利用の変化などを含む人間活動によって, 大気中の CO₂, メタン, フロンなどの温室効果ガスやエアロゾルの濃度が増加し, これによる地球規模の温暖化が予測されている. IPCC (気候変動による政府間パネル) は地球温暖化に関する第3次評価報告書¹⁾において, 人間活動の影響により地球の平均表面温度は19世紀後半から現在までに約0.6°C上昇

し、2100年には1990年と比較して1.4~5.8℃上昇すると予測している。また同報告書には、21世紀中に起こり得る気候変動として、北半球の積雪域や海水域の縮小、北半球中・高緯度及び南極での冬の降水量の増加、大部分の陸域における気温の日較差の縮小が挙げられている。

このような地球温暖化に伴う気候の変化は、陸上生態系、農林水産業、水文・水資源と水環境、海洋環境、社会基盤施設や社会経済さらには人体の健康などに影響を及ぼす。特に農業生産は気候変動の影響を強く受け、多くの寒冷地域における生産性の向上が期待される反面、暖地や半乾燥地帯では高温ストレスや早魃の被害が大きくなり、現在よりも生産性が大きく低下する地域が拡大すると予測されている。したがって、増加する地球人口のもとで安定した食料供給を確保するためには、地域別に気候変動に伴う農業への影響を予測し、それに必要な対策を講じることが重要な課題となる。

これまでに地球環境変化の作物収量への影響に関する研究は数多く行われている^{2)~6)}。例えば、岡田ら⁷⁾は、高温・高CO₂濃度環境が水稻の光合成及び乾物生産に及ぼす影響について調べ、個葉光合成、群落光合成及び乾物生産の環境反応を明らかにした。また、清野⁸⁾は環境要因と作物の生長過程の相互作用をシミュレートするCRESモデルを用いて、地球温暖化が国内の作物生産に及ぼす影響について評価した。さらに、吉本ら⁹⁾は温度及びCO₂濃度の上昇による大気—植物群落間の物理的物質交換と植物の生化学反応の変化について数値実験を行い、群落内外の物質輸送やエネルギー収支に関する知見を得た。これらの研究は、温暖化による作物生産への影響を評価した興味深い研究であるが、それぞれの研究手法や対象地域の各種条件が異なるため、容易に結果を比較することはできない。

本研究は、地球温暖化に伴う佐賀の気候の変化が作物収量に及ぼす影響について、土壌—水—大気—植物を一体化したシミュレーションモデル(SWAPモデル)を用いた数値実験より検討したものである。特にここでは、作物の生長過程と密接に関係する気象要素のうち気温及び降水量の作物収量に対する影響評価を行う。

佐賀における気温と降水量の変化

1993年夏季の顕著な低温及び1994年夏季の顕著な高温はともに日本の社会に大きな影響を与えた。この他に1978、1990年の暑夏、1980、1988年の冷夏など1970年以後からの夏季気温の変動が大きくなっている。一方冬季に関しては、1987年以降はほぼ全国的に平均値を上回る暖冬傾向で推移しており、日本における気温変動は近年大きくその傾向を変えている。そこで、佐賀における気温と降水量の変動傾向を把握するため、Fig. 1及びFig. 2に1961年~1999年までの年平均気温と年降水量の経年変化を示す。Fig. 1から明らか

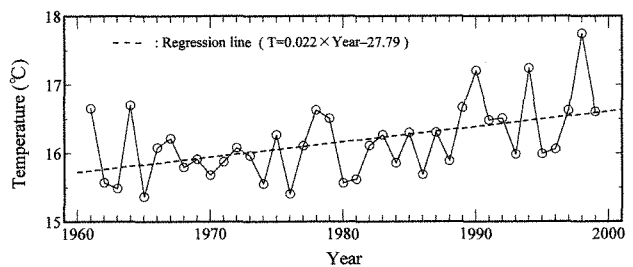


Fig. 1 Variation of temperature in Saga from 1961 to 1999.

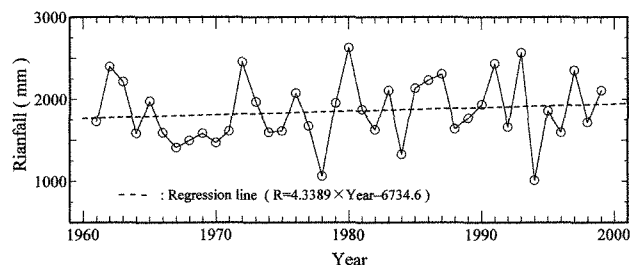


Fig. 2 Variation of rainfall in Saga from 1961 to 1999.

なように, 年平均気温は年毎に変動しているが, 全体的に気温が上昇する傾向を示した. また, 回帰直線より, 2100年には現在(2003年)の平均気温より 2.15°C 上昇することが示された. 一方, 年降水量は Fig. 2から明らかなように, 全体的に若干増加する傾向が見られ, 年毎の変動が大きい.

Fig. 3は, 年間の降雨日数と雨量の確率分布を対数正規分布とみなした平均値と標準偏差の経年変化を表したものである. 図示されるように, 1967年以降, 降雨日数は120日, 平均値は0.76, 標準偏差は0.43前後を推移している. Fig. 4は, 20mm以上及び50mm以上の日降雨日数の経年変化を表したものである. 図示されるように, 両発生日数は長期的に見て増加する傾向を示し, 特に1980年以降その傾向は顕著である. このことから, 降雨時には集中的に激しく降る一方で無降水期間が長いことが近年の特異な降雨特性の1つであると考えられる.

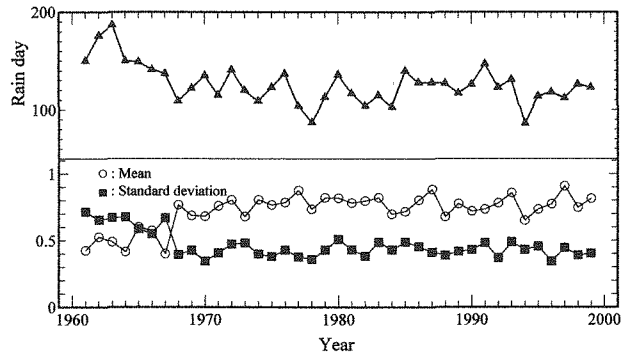


Fig.3 Variation of rain day, mean and standard deviation in Saga from 1961 to 1999.

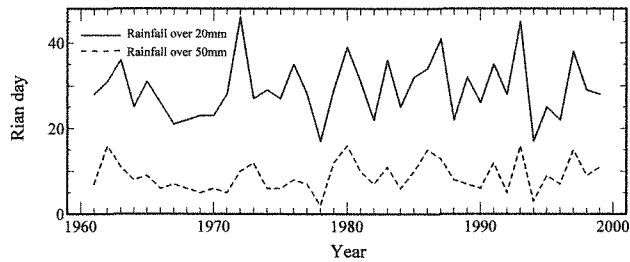


Fig.4 Variation of rain day of rainfall over 20mm and 50mm in Saga from 1961 to 1999.

SWAP モデルの概要

SWAP モデル¹⁰⁾は Fig. 5に示されるように, 土壌 (Soil) - 水 (Water) - 大気 (Atmosphere) - 植物 (Plant) 系を一体化し, 系内の水収支や環境要因と多くの植物の生長過程 (例えば, 光合成, 呼吸, 生育, 葉の展開, 茎, 根, 子実の成長, 土壌水分の吸収, 蒸発散, 光の吸収など) との相互作用をシミュレーションする数値モデルである. SWAP における作物発育モデルの概要を表わすと Fig. 6となる. 図示されるように, キャノッピーにより吸収された放射エネルギーと光合成葉特性により可能光合成となる. ここで, 可能光合成は水分もしくは塩分ストレスにより減少し, 実光合成となる. 次に, 光合成により生成された炭水化物は現存するバイオマスの維持に必要なエネルギーとして用いられ, 残りの炭水化物は植物を形成している器官に転換される. 転換された物質は, 作物の生物季節学的発育段階の関数である分配係数に基づき, 根, 茎, 葉, 貯蔵器官へ分配され, 葉への分配は葉面積の成長や遮光を決定する要因となる. また, 植物器官の乾重量は, 同化された炭素のうち呼吸や老化で消費されない分, すなわち炭素収支の余剰分が植物の乾物量となり, 植物の成長と貯蔵に用いられる. Table 1は, SWAP モデルにおいて気温が影響する主なパラメータを一覧したものである.

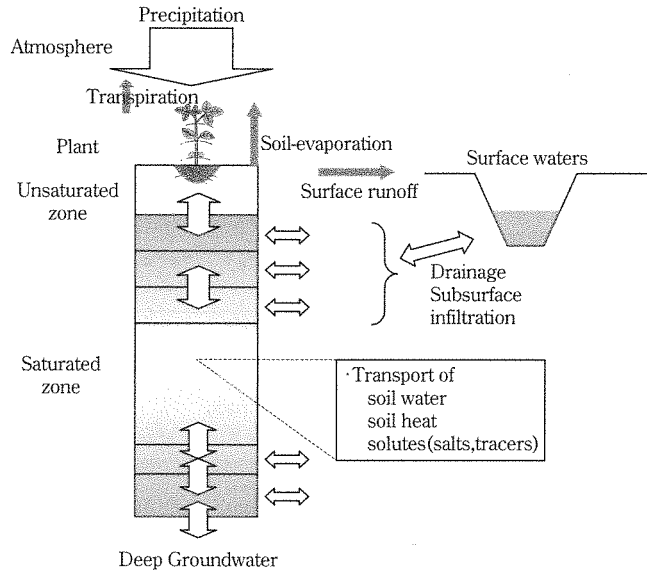


Fig.5 Outline of the SWAP model.

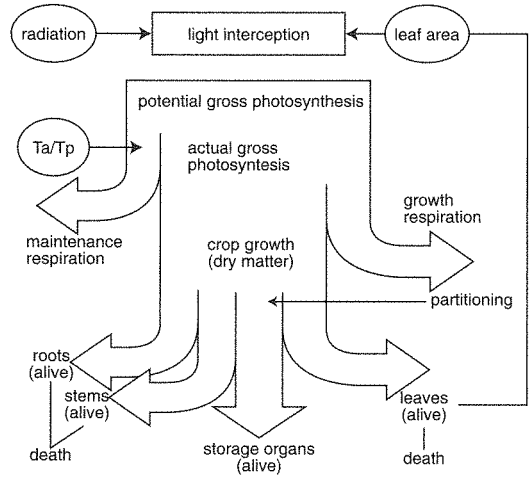


Fig.6 Outline of crop growth processes as simulated by SWAP.

Table 1 Influence of temperature in SWAP model

溶質輸送	→ 溶質輸送に関する連続の式 (溶質の sink 項)
土壤熱流	→ 土壤表面温度の解析解 (年平均温度, 温度変動の振幅)
蒸発散量	→ Penman-Monteith 方程式の空気力学項
土壤水分移動	→ Darcy 方程式における根の土壤水分吸収速度
作物生長	→ 生物季節学的発育ステージ (栄養生長や生殖生長の積算気温)
	→ キャノッピーの全同化速度
	→ 維持呼吸 (気温増加に伴う呼吸速度の増加係数)
	→ 老化 (水分ストレスによる葉のポテンシャル枯死速度)
	→ 寿命 (生理的加齢係数)
	→ 植物器官の実生長 (日有効気温)

SWAP モデルによる検討

1. 解析条件

SWAP モデルに必要なデータは, 気象データとして日射量, 日最低, 最高気温, 相対湿度, 日平均風速, 日雨量, 土壌データとして土壌分布及び土壌水分特性 (サクシオン水頭 h , 体積含水率 θ , 不飽和透水係数 K , 飽和透水係数 K_{sat}), 作物のデータとしては作物の品種特性や栽培管理に関する情報である. 今回, 気象データは佐賀市気象観測所の実測データ (1961年~1999年) を用いた. また, 土壌は単層のマサ土土壌を仮定し, Fig. 7に示されるようなコンパートメントに分割した. ここで, マサ土の土壌水分関数は, (1)~(3)式で表される van Genuchten と Mualem の式を用いて算出し, 式中の係数 α , n は実測データを非線形最小自乗法で求めた. Fig. 8は, h , θ , K の実測値と計算値を表したものである. なお, 作物はダイズを用い, 出芽日 8 / 1 ~ 収穫日 11 / 1 とした.

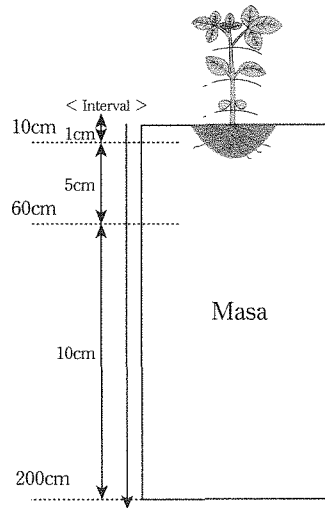


Fig.7 Cross section used in the analysis.

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \tag{1}$$

$$K = K_{sat} S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \tag{2}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \tag{3}$$

ここに, θ_{res} は乾燥状態における残留含水量 ($=0.125\text{cm}^3/\text{cm}^3$), θ_{sat} は飽和含水量 ($=0.495\text{cm}^3/\text{cm}^3$), $\alpha=0.06182$, $n=1.51465$, $m=1 - 1/n$, $K_{sat}=1500\text{cm}/\text{day}$, S_e は相対飽和度, $\lambda=0.5$ である.

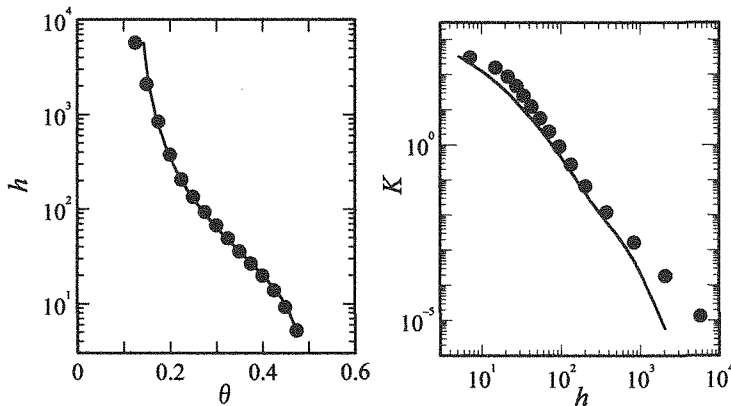


Fig.8 Soil hydraulic function (●:measured data, —:calculated value)

2. 気温上昇が作物収量に及ぼす影響

植物の栄養成長を左右する環境要因の中でも気温は最も重要なものの1つであり、気温は植物の生育日数、光合成反応、呼吸速度などへの影響を通じて収量に直接的及び間接的な影響を与える。そこで、ここでは気温上昇と作物収量との関係を SWAP モデル¹⁰⁾による数値実験より検討する。

Fig. 9は、1961～1999年の実測された気象データの日別気温データに1～4℃加算した場合のダイズ収量のシミュレーション結果を表したものである。図示されるように、全般的に気温の上昇に伴いダイズの収量は減少する傾向を示し、気温を4℃上昇させた場合、収量は平均して9.1%減少した。特に、年平均気温が比較的高く年降水量が少ない1967, 1978, 1990, 1998年では、気温上昇に伴う作物収量の減少が著しく、それぞれ4℃上昇時に51.9%, 18.9%, 15.1%, 29.7%減少した。一方、年平均気温が低く年降水量が比較的多い1976, 1980, 1981年では、気温の上昇に伴い作物は若干増収し、4℃上昇時にはそれぞれ3.7%, 8.2%, 5.6%増加した。このような結果は、植物の発育過程を規定する積算気温と降水量の大小が密接に関連する。すなわち、植物の発育過程の出芽期、開花期、成熟期は積算気温によって決定されているため、気温が増加すると作物の発育が促進され、開花期、成熟期が早まる。その結果、低温・多雨の年では、気温の増加に伴い作物の生育速度が促進されるため収量は増加する。しかし、高温・少雨の年では、気温の増加に伴い植物の利用可能な水供給が不足し水ストレスが助長されるため作物の生育が不十分となり収量は減少すると考えられる。したがって、十分な水資源確保の有無は、気温上昇に伴う作物の収量を考える上で極めて重要である。

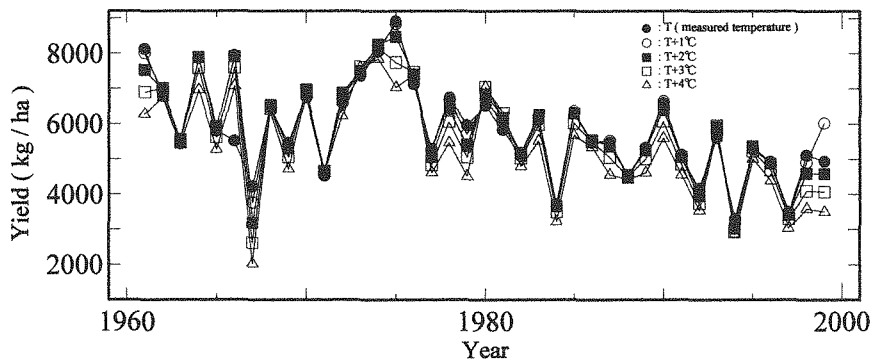


Fig.9 Relationship between rising temperature and soybean yield.

3. 降雨データ解析及び降雨模擬発生モデル

2.で示されたように、植物に利用可能な水供給量の大小は、植物の生産性を大きく左右する一方、作物には水ストレスが減収をもたらす原因となるような生育段階があるため、水の供給期間も作物の収量に大きく影響する。前述したように、特に近年の降雨特性は集中的降雨と無降水期間の長期化であるため、降雨パターンの作物収量への影響を考慮することは不可欠である。そこで、ここでは降雨パターンを確率論的アプローチより解

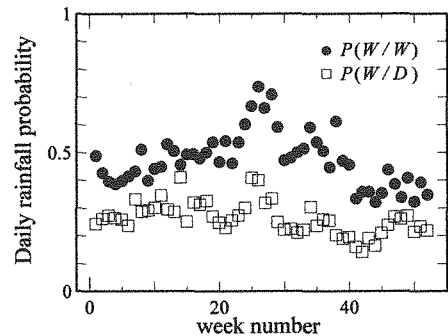


Fig.10 Rainfall probabilities for rainfall greater than 0.25 mm at Saga.

析し, 降雨の模擬発生を行う。

降雨は統計的に通常, 降雨現象の発生確率と雨量の確率分布により特徴付けられる。まず0.25mm以上の降雨がある日を雨天日とみなし, 0.25mm未満の日を晴天日とする。1年間を52週として各週の推移確率 $P(W/D)$, $P(W/W)$ を1961~1999年の実測された気象データより求めた。ここで, $P(W/D)$ は前日が晴天で当日が雨天である確率, $P(W/W)$ は前日が雨天で当日が雨天である確率である。Fig. 10は, 佐賀市における降雨の推移確率を表したものである。

次に, 降雨発生モデルとしてマルコフモデル¹³⁾を用いる。そこで, 降雨の持続性をマルコフ過程によって表し, 雨量の確率分布を対数正規分布とし, モンテカルロ法によって日降雨を100回模擬発生させた。ここで, モンテカルロ法¹²⁾とは, 通常解析的な方法では困難な数学的, 物理的, 社会的問題に対して乱数列を用いた数値実験を多数回行うことにより, 所要の解や問題の法則性を見出す手法であり, その利点は観測データの個数が少ない場合にも, 長期間の間にまれに起こり得る現象を含めて, 不確実性を有する現象を定量的に再現できることである。

4. 降雨変化が作物収量に及ぼす影響

Fig. 11は, 1999年の日別降雨量データを3.の解析で得られた日降雨量に置き換え, 日降雨パターンの変化に伴う作物収量の変動について表したものである。なお, ここでは日雨量以外の気象データは, すべて1999年の実測データを用いた。図示されるように, 降雨パターンの変化に伴い収量も大きく変動している。6000kg/ha前後の高収量の場合, 模擬発生させた年降水量は平均1407mm, 4000kg/ha以下の低収量では平均1380mmであり, 模擬発生させた年降水量にさほど大きな違いは見られない。しかし, 月別降水量で見ると, 高収量の場合, 9月及び10月の平均月降水量は138mm, 132mmであるのに対して, 低収量はそれぞれ76mm, 37mmと高収量のそれと比較して非常に小さい。このことから, 作物(ダイズ)の生育期間である9月及び10月における降水量の極端な減少が作物収量の減収に大きく反映したと考えられる。

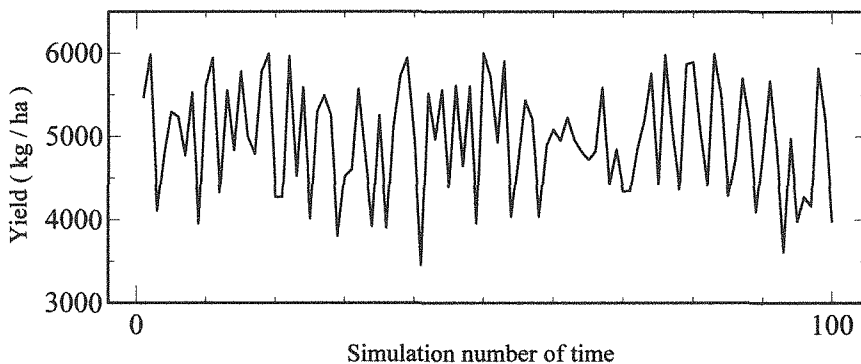


Fig. 11 Relationship between rainfall pattern and soybean yield.

以上の結果から, 気温及び降雨の変化に伴う作物収量の変動には, 気温上昇量と年間降水量の増減だけではなく, 降雨パターンの変化が大きく影響することが把握された。今後, SWAPモデルを用いて地球温暖化に伴う作物収量を予測する際, 気象データは決定論的アプローチではなく確率論的アプローチで得る必要があり, そこで得られた気象データを用いてシミュレーションを繰り返し行うことにより深刻な収量の減収の有無を調べる必要がある。

謝 辞

本研究は、総合地球環境学研究所が推進している研究プロジェクト「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」の成果の一部である。

摘 要

本研究では、地球温暖化に伴う佐賀の気候変動（気温及び降雨変化）が作物収量に及ぼす影響について SWAP モデルを用いた数値実験より検討した。1961～1999年における佐賀の平均気温は全体的に上昇する傾向を示し、2100年には2003年の平均気温より2.15℃上昇すると予測された。また、1967年以降の雨量の確率分布を対数正規分布とみなした平均値と標準偏差は、それぞれ0.76、0.43前後であった。さらに、20mm及び50mm以上の日降雨量日数は増加傾向にあり、特に1980年以降のそれは顕著であった。次に、気温の増加に伴うダイズの収量を SWAP モデルでシミュレーションした結果、気温の増加に伴い高温・少雨の年では収量は減少し、逆に低温・多雨の年では増加した。さらに確率論的アプローチより、降雨発生事象をマルコフ過程とみなし、モンテカルロ法により降雨の模擬発生を行い、降雨パターンと作物収量との関係について調べた。その結果、作物の生育期間における降雨量の増減により作物収量は大きく変動した。このことから、作物収量には年間降雨量の大小だけでなく、降雨期間も重要な影響因子の1つであることが把握された。

引 用 文 献

1. 20世紀の日本の気候 (2002). 気象庁. 81-104.
2. 杉原保幸 (1991). 水稻の気候生産力に与える気候変動の影響. 地学雑誌. 100, 851-867.
3. Rosenzweig, C and Parry, M.L.(1994). Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*. 367,133-138.
4. Stitt, M(1991).Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cell. *Plant Cell Environ.* 14,741-762.
5. 原菌芳信, 大政憲次 (1987). 大気と植物のガス交換. 国立公害研報告. 108, 53-72.
6. Wall, G.W., Amthor, J.S. and Kimball, B.A.(1994). COTCO 2:a cotton growth simulation model for global change. *Agric. For. Meteorol.* 70, 289-342.
7. 岡田邦子, 中川博視, 上田恭史, 堀江 武 (2001). 高温・高CO₂濃度環境が水稻の光合成および乾物生産に及ぼす影響. 近畿作物研究. 46, 59-62.
8. 清野害谷 (1995). 気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響. 農業気象. 51(2), 131-138.
9. 吉本真由美, 原菌芳信, 河村哲也 (2000). 大気-植生-土壌系モデルによる高温・高CO₂濃度条件下のダイズ群落におけるCO₂収支の解析. 農業気象. 56(3), 163-179.
10. Van Dam,J.C, J, Huygen, J.G, Wesseling, R.A, Feddes, P. Kabat, P.E.V, VanWalsum, P.Groenendijk and C.A, van Diepen(1997). Theory of SWAP version 2.0.Technical Document 45.Netherlands. Wageningen Agriculture University and OLD Winand Staring Centre.
11. Gabriel,K.R. and J. Neuman(1962). A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quart.J.R.Met. Soc.* 88, 90-95.
12. 津田孝夫 (1995). モンテカルロ法とシミュレーション. 培風館. 7-12