

砂丘畑における日単位降下浸透水量の推定モデル

猪迫耕二*・大槻恭一**・山田 智***・佐古井智子****・神近牧男*****

平成 12 年 6 月 30 日受付

*鳥取大学農学部生存環境学講座, **九州大学農学部付属演習林, ***鳥取大学農学部生産環境化学講座, ****園田コンサル株式会社,
*****鳥取大学乾燥地研究センター自然環境分野

A Prediction Model for Daily Gravitational Water at a Sand Dune Field

Inosako Koji*, Otsuki Kyoichi**, Yamada Satoshi***, Sakoi Tomoko****

and Kamichika Makio*****

* *Department of Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan*

** *Research Institute of Kyushu University Forests, Kyushu University, Fukuoka 811-215, Japan*

*** *Department of Biological and Environmental Chemistry, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan*

**** *Sonoda Consultant Co. Ltd, 205 Nisiwaki, Nisiwaki-city, Hyogo, 677-0015, Japan*

***** *Department of Natural Environment, Arid Land Research Center, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan*

Gravitational water with eluviation of fertilizer is an important problem for the conservation of groundwater. It is remarkable at a sand dune field because it has large permeability and little available water. When the timing of irrigation and rainfall is mismatched, gravitational water is greater than only rainfall. It is essential for the sustainable agriculture at the field to establish the irrigation method minimizing gravitational water. In this study, the prediction model for evaluation of gravitational water at a sand dune field is developed and performed some simulation to clear the irrigation method minimizing gravitational water. The results are summarized as following: 1) The model has good prediction accuracy. 2) It is cleared that the gravitational water at a sand dune field is reached 60% by supply water into it. 3) It is suggested that irrigation method with high flexibility have possibility to decrease the gravitational water.

(Received 30 June 2000)

key words: gravitational water, sustainable agriculture, water balance, root zone, sand dune field

序論

わが国には年平均 1700 mm もの降水量がある。このような地域における露地畑では、天水が水分補給の中心で

あり、灌漑施設はその補助的役割を担うと認識されている。しかし、砂丘畑のように透水性が高く、有効水分量が少ない圃場では、蒸発散量が大きくなる夏期に連日あるいは 2 日に 1 度のローテーションで自動灌漑されるこ

とが多い。その際、降雨が灌漑終了後直ちに発生することもあり、このような場合には根群域下へ排出される降下浸透水量が増大することとなる。排水収支型ライシメータを用いた砂丘地の水収支の実測結果(2年間)によると、植生区で水分供給量(降水量+灌漑水量)の50~60%が降下浸透水となり、裸地区では供給量の約90%近くが根群域下へ排出されていた[8]。

ところで、降下浸透水量の増大は肥料成分の溶脱をも増加させる。このような肥料成分(主として硝酸態窒素)の降下浸透が農業地域における地下水や流域水環境の汚染の主因であるという指摘も多く[1, 2, 4, 6], 農業が環境に与える負の影響は否定しえない事実として認識されつつある。

砂丘畑では、灌漑と施肥なしに安定した作物生産は望めない。このことは、砂丘畑において降下浸透水量の増大に伴う肥料成分の溶脱が発生しやすいことを意味している。すなわち、砂丘畑において環境保全型農業を実現するためには、降下浸透水量を最小化する灌漑管理を行うことが絶対的な条件となる。そのためには、不定期に発生する降雨の影響を最小限に抑えることが必要であり、少なくとも日単位程度の時間ステップで降下浸透水量を的確に予測することが不可欠となる。一般に、このような目的のためには、土壤中の水分移動を精密に再現する理論モデルとシンプルな水収支モデルとが利用可能である。理論モデルでは日単位よりも短い時間ステップでの推定が可能であり、かつ、既に市販・公開されているソフトも多くある[5]。しかし、計算に必要なとされるパラメータが多く、数値計算の基礎知識を持たない者にとっては全くのブラックボックスとなってしまうことなどから、現場での使用に適しているとは言い難い。一方、シンプルな水収支モデルでは、日単位程度の時間ステップでの推定であり、いくつかの経験的な仮定の導入によって、理論的な厳密性を損なうことが多い。しかし、必要とされるパラメータが少なく、モデルの構造を理解するのも容易であるため、現場での使用には適しているといえる。

以上のことから、本研究では、砂丘畑における環境保全型農業を実施するための有効なツールとして、日単位降下浸透水量の推定に主眼を置いたシンプルな水収支モデルの開発を行った。本論文では、モデルの構造、推定精度の検証結果を述べ、本モデルを使った灌漑シミュレーションによる降下浸透水量の評価について検討を加えた。

モデルの構造

一般に、圃場における水収支は次式で表される。

$$I + R = G + ET + SW \quad (1)$$

ここで、 I : 灌漑水量, R : 降水量, G : 降下浸透水量, ET : 蒸発散量, SW : 土壌が保持する水分量である。(1)式のうち、 I, R は容易に実測できる。 ET の算定法には蒸発計法, Makkink法, Penman法などがある[7]。これらのうちから灌漑対象圃場の実状に応じて最適と思われる方法を採用すれば良い。ところで、本モデルの適用対象である砂丘畑は普通畑と比較して透水性が非常に大きいため、圃場容量を越える水分は速やかに下層に排水される。そこで、ここでは、灌漑対象土層を一つの貯水槽とみなし、可能貯水量を超過して供給される水分がすなわち降下浸透水量であると仮定し、次式で決定する。

$$G = R + I + SW - SW_{\max} \quad (2)$$

ここで、 SW_{\max} : 土壌が保持できる最大可能貯水量であり、本モデルでは灌漑対象土層厚さに24時間容量を乗じるものとする。なお、(2)式において $G < 0$ となる場合には、 $G = 0$ とする。

モデルでは、上述の方法で決定された各項を次式に代入して、ある日の水収支がバランスするように土壌水分量を決定する。なお、初期値として計算開始前日における土壌水分量の実測値が必要である。

$$SW_i = SW_{i-1} + I_i + R_i - ET_i - G_i \quad (3)$$

ここで、添字 $i, i-1$: はそれぞれ i 日目, $i-1$ 日目の値であることを意味する。本モデルの主眼は降下浸透水量の推定にある。しかし、圃場の水収支式がベースになるため、土壌水分も同時に推定することとなる。したがって、モデルの構造そのものは、これまで数多く提案されている経験的な水収支モデル[3]と大きな違いはない。しかし、それらのモデルの主眼は、土壌水分量や蒸発散量の推定にある。そのため、各モデルの目的変数である土壌水分量や蒸発散量の推定値が実測値と適合するように降下浸透水量の推定において何らかの調整の方法が導入されているものが多く、そのような方法で推定された降下浸透水量の妥当性を直接評価したものは見当たらない。

本モデルは、日単位降下浸透水量の推定を目的としている。したがって、モデルの推定精度は、実測された日単位降下浸透水量とモデルの推定値との比較によって検証されるべきであろう。しかし、現在のところ、降下浸透水量の実測値を精度よく測定する方法は確立されていない。また、実測された土壌水分量を(3)式に代入し、残差項として計算された日単位降下浸透水量を実測値に準じたものとみなすことも可能と思われる。しかし、本法では、降下浸透水量が負となった場合に、それが下層

からの毛管上昇水による水分補給を意味するのか、各実測項の誤差によるものなのかが明確ではない。したがって、本法による検証も妥当とは言い難い。以上のことに鑑みて、ここでは、本モデルで降下浸透水量と同時に推定する土壌水分量を実測値と比較することとする。上述したように、本モデルでは、第 i 日目の土壌水分量を $i-1$ 日目の土壌水分量と i 日目の降下浸透および他の実測項との収支計算から求める。したがって、土壌水分量の推定値と実測値とが適合しない場合は降下浸透水量の推定法が不適当と判断できる。

本モデルは灌漑技術者や農家による現場での利用を念頭においているため、特別なテクニックを必要とするプログラミングは利用していない。すなわち、各水収支項を市販の表計算ソフトのワークシートに代入するだけで結果が得られるシステムとなっている。本論文における計算では Microsoft Excel 97 を使用した。

検証実験

モデルの推定精度を検証するために乾燥地研究センター内の圃場 (19 m × 20 m) で栽培実験を行った。実験は、1999 年 10 月 1 日～同年 12 月 10 日までの 71 日間行った。ただし、気象データの欠測などの理由から、検証は 11 月についてのみ行った。栽培作物はシュンギクである。降水量は転倒マス式雨量計 (Rain Collector II : DAVIS 社製) で測定した。蒸発散量は、乾燥地研究センター内の気象観測ステーションのデータから Makink 法を用いて推定した。Makink 法におけるパラメータには 0.915,

0.09 を採用した。土壌の体積含水率は ADR センサー (Theta Probe TYPE II, Δ -T 社製) を深さ 10 cm, 20 cm, 30 cm に設置して測定した。24 時間容水量は降雨終了後、24 時間経過した時点での灌漑対象土層の平均体積含水率をもとに決定した。灌漑はドリップチューブで行い、3 つの灌漑区 (1~3 区) と無灌漑区 (対照区) を設定した。ただし、今回の実験期間では降雨日が多かったため、各処理区間における灌漑水量の差は小さくなった。

結果と考察

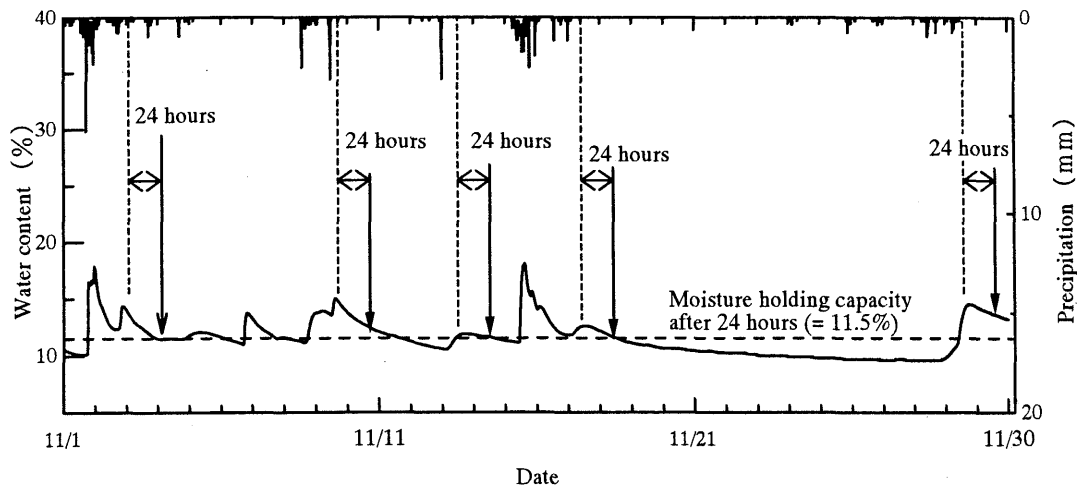
1. 24 時間容水量の決定

上述したように、モデルによる推定に必要な 24 時間容水量は、灌漑対象土層の平均体積含水率の変化から求めた。例として 1 区の平均体積含水率の変化を第 1 図に示した。すべての処理区における 24 時間容水量の平均値は 11.5% であった。モデルでは、すべての処理区に対して同じ 24 時間容水量を用いた。

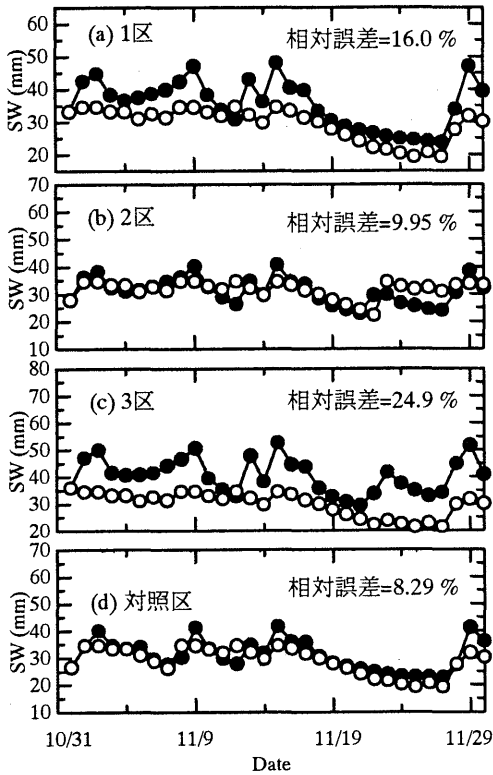
2. 検証結果

モデルの日単位推定精度を検証するために、モデルによる土壌水分量の推定値と実測値との比較を行った。モデルでは、シュンギクの根群域を念頭において、灌漑対象土層厚さを 30 cm とした。これに、前項で決定した 24 時間容水量を乗じて可能貯水量を求めたところ、34.5 mm となった。

第 2 図に各処理区における実測土壌水分量とモデルの推定値の経日変化を示している。図より 3 区以外の各区において、推定値は実測値とよく適合しているといえる。



第1図 実験圃場の24時間容水量 (1区)



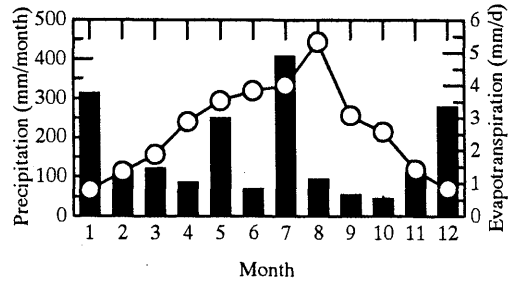
第2図 土壌水分量の経日変化
● Observation ○ Prediction

第1表 各処理区の水収支 (mm)

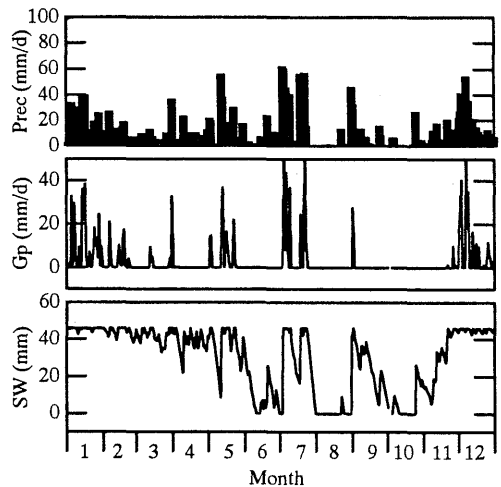
処理区	R	I	ET	Δ SW	Go	Gp
1区	169.2	5.2	38.95	6.18	129.3	134.7
2区	169.2	20.7	38.95	4.48	146.5	144.9
3区	169.2	7.4	38.95	4.97	132.7	139.7
対照区	169.2	0.0	38.95	9.45	120.8	122.9

一方3区では、全体的に土壌水分量を過小評価していた。これは、24時間容水量を全処理区で同一としたことによる。なお、各区の相対誤差は、1~3区および対照区で、それぞれ、16.0%、9.95%、24.9%、8.29%であった。

次に、期間全体での水収支計算によって得られた降水浸透水量 (Go) とモデルによる推定降水浸透水量 (Gp) とを比較する。第1表は、各処理区における水収支項の11月分をまとめたものである。実測データに基づいた収支計算による降水浸透水量とモデルによる推定値との差は、1区から順に+5.43 mm, -1.57 mm, +7.01 mm, +2.09 mmであった。モデルでは降水浸透水量をやや過大評価する傾向が認められるものの、相対誤差では1~5%程度で



第3図 1995年の月降水量と日平均蒸発散量
■ 降水量 ○ 蒸発散量



第4図 砂丘畑における降水量、降下浸透水量および土壌水分量の経日変化 (無灌漑)

第2表 シミュレーションによる年間の水収支 (mm)

R	I	ET	G
1936	0.0	952.3	1158.4

あり、収支計算から算定された結果とよく一致している。

以上のことから、本モデルは、砂丘畑における日単位降水浸透水量を精度よく推定していると判断できる。

3. 灌漑シミュレーション

次に、本モデルを用いて、砂丘畑における降水浸透水量の年間値、および、夏期における灌漑方法の違いと降水浸透水量の関係について検討するために、簡単なシミュレーションを行った。気象データには、1995年に鳥取大学乾燥地研究センター内の気象ステーションで測定された値を利用した。シミュレーションでは、夏期の栽培作物を念頭に置き、根群域を40 cm (最大貯水量46 mm)とした。

第3図に1995年の月降水量と月平均蒸発散量を示した。蒸発散量は、検証実験と同様に Makkink 法で算定した。図に示したとおり、本年は5, 7月の降水量が多いものの4, 5, 8~10月の降水量が少ない。このような気象条件下では、天水のみによる砂丘農業は成り立たない。したがって頻繁な灌漑が必要になるが、その際に、ランダムに発生する降雨による降下浸透水量の増大が懸念される。

(1) 砂丘畑の水収支

第4図に1995年の降水量およびモデルによる降下浸透水量、土壤水分量の計算結果を示した。これによると1~4月では、頻繁な降雨によって土壤は湿潤状態に保たれていることがわかる。この場合、余剰水分の降下浸透も頻繁に発生している。一方、降雨イベントが少なくなる6月から土壤水分は急激に減少し、多少の降雨が発生しても降下浸透は生じていない。すなわち、降雨が有効化されたといえる。しかし、8月には土壤水分量が0となる時期が発生しており、正常な作物生産のためには灌漑せざるを得ない。灌漑を行う場合には、降雨を完全に有効化することは非常に難しく、降下浸透水量の多寡は、灌漑方式・灌漑水量に大きく依存すると思われる。そこで、3つの灌漑方式を想定してシミュレーションを行い、降下浸透水量と土壤水分状態の変動について検討を加えた。

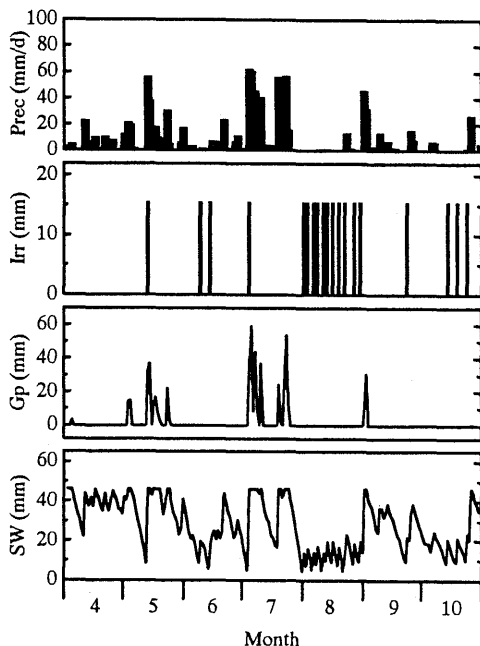
なお、モデルによって推定された砂丘畑の年間降下浸透水量をみると、1158.4 mm となっており、降水量の約60%にも達している(第2表参照)。これは、矢野の実測結果[8]と同様であり、本モデルの妥当性を示すものである。

(2) 随時定量灌漑1

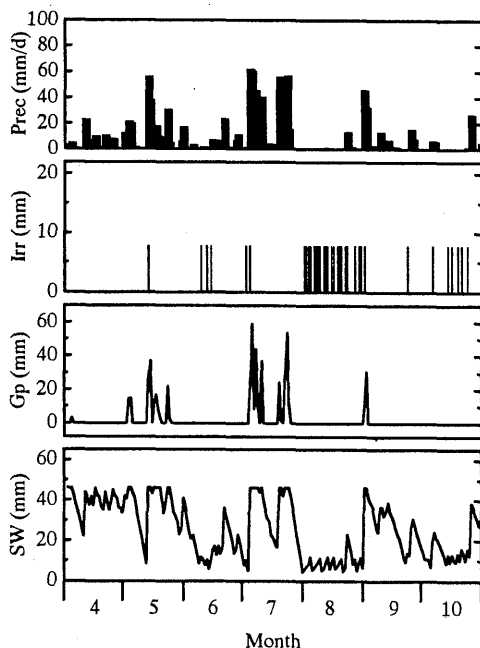
ここでは、土壤が pF3.0 まで乾燥したときに、MTRAM 相当量を灌漑することを想定した。本圃場の MTRAM は 15.7 mm であった。第5図にこのときの灌漑水量、降下浸透水量、土壤水分量の変化を示した。図より、灌漑による降下浸透水量の増大はほとんど認められない。これは、土壤が乾燥した状態で灌漑を行うこと、ならびに、圃場の最大可能貯水量に比べて1回の灌漑水量が少ないことなどに因っている。しかし、5月中旬のように、灌漑直後にやや大きな降雨が発生し、降下浸透水量が大きくなることもあった。

(3) 随時定量灌漑2

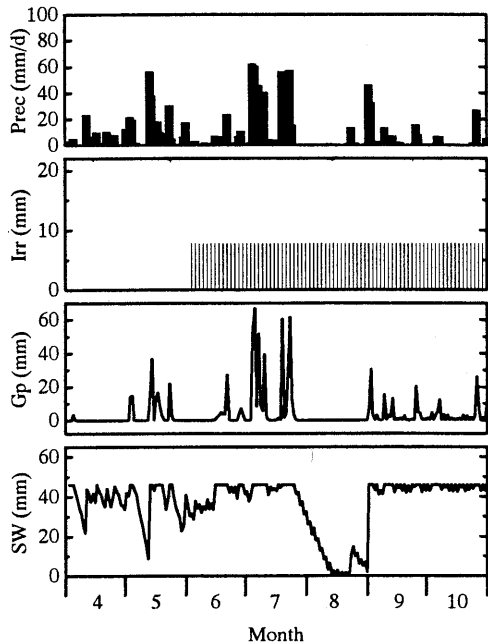
ここでは、前節と同様のシステムで1回の灌漑水量を半分の 7.75 mm とした。いわゆる少量頻繁灌漑に近い方式であるが、本法によれば、灌漑直後の降雨による降下浸透水量の増大を緩和できる。計算結果を第6図に示した。全体的な傾向としては、前節の場合と比べ顕著な差は認められないが、5月中旬、8月下旬に生じている灌漑直後の降雨による降下浸透水量は若干低下した。



第5図 随時定量灌漑における降雨、降下浸透水量、土壤水分量の変化 (灌漑水量 15.7 mm)



第6図 随時定量灌漑における降雨、降下浸透水量、土壤水分量の変化 (灌漑水量 7.75 mm)



第7図 定時定量灌漑における降雨、降下浸透水量、土壌水分量の変化（灌水量 7.75 mm）

(4) 定時定量灌漑

前項までの方法は、比較的理想的な灌漑システムによるものである。しかし、現実の圃場では、定められた時間に定められた量を実際の土壌水分状態とは関わりなしに供給されることが多い。そこで、現行法として2日間断で1/2MTRAMを灌漑する場合について検討した。なお、4、5月では降雨が多く、蒸発散量も小さいため灌漑は行わず、6月から灌漑を開始するものとした。また、灌漑開始後は機械的に灌水を継続しているものと仮定した。第7図に計算結果を示している。これによると、土壌水分は随時定量灌漑に比べて湿潤状態で推移しており、それゆえに、ランダムに発生する降雨によって降下浸透水量は確実に増大している。1回の灌漑水量をさらに減少させることも考えられるが、連続干天状態が続くと1/2MTRAMでさえも土壌水分を維持できず、有効水分量を消費し尽くす事態が生じていることから、灌漑水量を減ずることは非常に困難であるといえる。

(5) 降下浸透水量と灌漑方式

第3表に、これらのシミュレーションによって得られた圃場の水収支をまとめた。灌漑方式の影響をみると、随時定量灌漑1および2、定時定量灌漑で、降下浸透水量はそれぞれ供給水量の40%、39.4%、51.5%となった。随時定量では、1回の灌漑水量を減じた方が、わずかな差ではあるが灌漑水量的にも降下浸透水量的にも有利で

第3表 シミュレーションによる圃場の水収支 (mm)

	R	I	ET	G
無灌水（年間値）	1936	0.0	952.3	1158.4
随時定量1	999	294.5	765.0	517.3
随時定量2	999	271.3	765.0	501.7
定時定量	999	596.8	765.0	821.2

あり、それだけ降雨を有効化できるといえる。また、定時定量灌漑では、灌漑時期を短く設定したにも関わらず灌漑水量で約2倍、降下浸透水量で約1.6倍となることがわかった。

以上のことから、降下浸透水量が供給水分量の50%以上にも達する砂丘畑においては、よりきめの細かい灌漑計画が望ましく、それを可能にする灌漑方式が必要といえる。

結論

本論文では、砂丘畑における降下浸透水量を推定するシンプルなモデルを提案した。次いで、それを用いて砂丘畑における降下浸透水量を評価し、灌漑方式の違いが降下浸透水量に与える影響について検討を加えた。その結果、砂丘畑では、年間で降水量の60%にもおおよぶ降下浸透水が存在することが明らかとなった。このことは、肥料分の溶脱による地下水汚染が砂丘畑で生じ易いことを示唆するものである。また、本モデルを用いたシミュレーションの結果から、きめの細かい灌漑を行うことによって、降下浸透水量を減少させ得ることが示唆された。

灌漑シミュレーションは、灌水方法、灌水量などによる非常に多くの組み合わせがある。ここで示したものはほんの一例であり、今後、さらに詳細なシミュレーションによって降下浸透水量を最小化する灌漑計画・方式をより明確にする必要がある。

なお、本研究の一部は、平成11年度鳥取大学乾燥地研究センター共同研究A-I(4)の補助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 林 光来・山本洋司・日高 伸・加藤 茂・熊澤喜久雄：埼玉県における露地野菜畑土壌からの浸透水量のNO₃-N濃度とδ¹⁵N値、土肥誌，66：146-154 (1995)
- 2) 広城吉成・横山拓史・神野健二・和田信一郎：農地利用形態の変化に伴う地下水中硝酸態窒素濃度及び溶存酸素量の変動、地下水学会誌，38：2-11 (1996)

- 3) 例えば, 猪迫耕二・中野芳輔・黒田正治: 畑地における土壌水分欠損状況の推定モデル, 農土論集, 165: 55-64 (1993)
- 4) 川西琢也・川島博之・尾崎保夫: 地下水の硝酸態窒素濃度の上昇と農業生産, 用水と廃水, 33: 725-736 (1991)
- 5) 溝口 勝・取手伸夫・塩沢 昌: 土壌物理分野におけるシミュレーション手法の現状と課題, 農土誌, 65: 219-225 (1997)
- 6) 中曽根英雄・山下和泉・黒田久雄・加藤 亮: 茶園地帯の過剰窒素施肥がため池の水質に及ぼす影響, 水環境学会誌, 23: 374-377 (2000)
- 7) 大槻恭一: 蒸発散-蒸発散量の推定法-, 農土誌, 57: 1065-1071 (1989)
- 8) 矢野友久: 砂丘地の水収支, 土壌の物理性, 32: 24-28 (1995)