

植物の栄養塩吸収と土壌中物質移動

NUTRIENT ABSORPTION BY PLANTS AND SOLUTE TRANSPORT IN A SOIL LAYER

東 博紀¹・岡 太郎²・城戸 由能³
Hironori HIGASHI, Taro OKA and Yoshinobu KIDO

¹学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

²フェロー会員 農博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

This paper describes consumption of water and nutrient by plants. Water and solute balance measurements were made for a crop of corn using a weighing lysimeter. The results of the measurements show that 283-389kg of water, 13.1-20.8g of nitrogen, 1.9-12.3g of phosphorus and 8.0-18.8g of potassium are consumed in producing 1kg of a dry corn. Nutrient absorption during corn growth was measured using hydroponics culture. The absorption rate increases with the increase in the solute concentration outside the roots, and is proportional to the growth rate of a corn. A numerical model for nitrogen transport is propounded on the basis of the measurement results by the hydroponic culture. The calculated results of the plant absorption, the nitrogen concentration in the groundwater runoff and the nitrogen storage in the soil are in close agreement with the observed ones.

Key Words : *solute transport, plant growth, nutrient absorption, hydroponic culture, weighing lysimeter*

1. はじめに

近年、畜産廃棄物や過剰施肥による地下水汚染が全国的に発生し、地下水利用を脅かしている。とりわけ飲用水の大部分を地下水に頼っている地域では、住民の健康に影響するため、深刻な問題である。

植物による水・物質吸収を定量的に予測することは、地下水汚染対策のみならず圃場における灌漑・施肥管理などを考えるうえで、きわめて重要である。これまで植物の栄養塩吸収特性について室内実験を中心とした研究は多数行われており、根の複雑な物質吸収メカニズムが解明されつつある^{1),2)}。しかし、自然状態で生育している植物の栄養塩吸収量を直接計測することはかなり困難であるといわれている。さらに、これは土質・土壌水分・栄養塩濃度・気象・植物体の成長などと複雑に関連しているため、フィールドにおける植物の栄養塩吸収量を定量的に評価する手法は確立されていないといっても過言ではない。

我々は植物の成長と水・物質消費、雨水浸透・流出、蒸発散、土壌中の物質移動機構を明確にすることを目的として、1999年4月よりウェイングラシメータ (weighing lysimeter) を用いて自然気象条件下で観測研究を行っている (写真-1)。ここで、写真-1に示される右側手前の土壌槽をE(east)、中央をC(center)、左側奥をW(west)と呼称することにする。土壌槽の構造・測定項目、充填土壌の物理特性および観測内容については文献^{3),4)}に

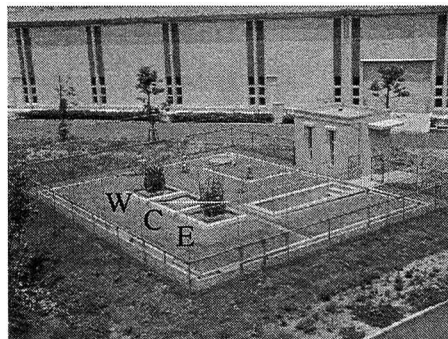


写真-1 ウェイングラシメータの全容 (2000年6月)

詳述してあるので省略する。

本研究では、植物の生育に必要な栄養塩量を調べるとともに植物の栄養塩吸収が土壌中の物質移動に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目的とする。まず、ウェイングラシメータの水・物質収支観測結果について述べる。次に、ライシメータ付近の圃場で水耕栽培を行い、自然気象条件下の植物の成長と栄養塩吸収量の関係について議論する。最後に、水耕栽培実験で得られた栄養塩吸収特性を応用して、ライシメータ土壌中の窒素移動解析を行う。

2. 植物の成長と水・物質収支の観測

(1) 水収支

2002年6月10日～8月14日、土壌槽EとCにトウモロコシをそれぞれ9, 5本植栽し、水文観測を行った。土

表-1 水収支と植物重量(2002年6月10日～8月14日)

Soil tank		E	C
Rainfall	(mm)	269.0	269.0
Irrigation	(mm)	130.0	130.0
Surface runoff	(mm)	39.4	103.2
Groundwater runoff	(mm)	42.3	40.1
Soil storage	(mm)	-52.5	-8.6
Evapotranspiration, etc.	(mm)	359.8	264.4
Crop density	(plant / m ²)	9	5
Weight of corns	(kg)	5.32	3.02
Dry weight of corns	(kg)	1.27	0.68
Dry weight of corn seeds	(kg)	0.20	0.08

壤槽 W は 5 月 9 日にトウモロコシを 9 本植栽したが、施肥などに問題があり、成長不良であったため、ここでは取り扱わない。

表-1 に観測期間中に得られた土壌槽 E と C の水収支を示す。トウモロコシが 9 本植栽された土壌槽 E と 5 本植栽された土壌槽 C の水収支を比較すると、土壌槽 C の表面流出量は土壌槽 E の 2.61 倍、土壌槽 E の蒸発散量は土壌槽 C の 1.36 倍であり、植栽密度による土壌槽の水収支への影響が見られる。また表-1 には、植物の収穫時における根を含む総重量、それを空気乾燥させた重量および穀果の乾燥重量を併示してある。これによるとトウモロコシの場合、全乾燥重量の 283～389 倍、穀果乾燥重量の 1799～3305 倍の水が消費されたことが明らかになる。

(2) 物質収支

2002 年 6 月 10 日～8 月 14 日の観測では、肥料として窒素(N)、リン(P)、カリウム(K)をそれぞれ 13.6、10.0、11.2g 土壌槽 E と C に投入した。投与した肥料は、流出水とともに槽外へ排出、植物による吸収、土壌中への残留の 3 種に分けて考えることができる。

槽外への排出量は、定期的に表面・地下水流出を採取し、イオンクロマトグラフィ(PIA-1000、島津製作所)を用いて水質イオン濃度分析を行って求めた。測定できる陽イオンは Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、陰イオンは H₂PO₄⁻、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、Br⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻である。

植物による吸収量は植栽時と収穫時の植物体内貯留量の差に等しいと考えられるので、植物体内の物質貯留量を次の方法で測定した。まず、乾燥させた個体を根、葉、茎、穂、雌軸、穀果の 6 部位に分けてそれぞれの重量を計測した後、各部位に含まれる全窒素および全リンの量を湿式分解法を用いて測定した⁵⁾。カリウムは、試料を 1.0mol/liter の塩酸に浸し、試料中のカリウムを抽出して測定した⁵⁾。

土壌中の残留量は、施肥前(6月5日)と観測終了時(8月14日)に土壌中の物質量を測定し、それらの差をとって求めた。なお、これらの測定は深さ 0.1 から 1m まで 10cm ごとに土壌を採取し、各土壌サンプルに含まれる陽

表-2 物質収支

Soil tank	E (Observed) (Jun.10 - Aug.14, 2002)			C (Observed) (Jun.10 - Aug.14, 2002)			W (Observed) (May 3 - Jul. 9, 2001)		
Crop density (plant / m ²)	9			5			9		
Dry weight of corns (kg)	1.27			0.68			1.54		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Supplied fertilizer (g)	13.6	10.0	11.2	13.6	10.0	11.2	30.0	63.9	30.0
Absorption by corns (g)	16.7	2.4	10.1	9.0	2.8	5.8	32.0	19.0	28.9
Storage in soil (g)	0.7	11.1	2.0	4.4	2.7	11.7	-	-	-
Solute drawn with groundwater runoff (g)	0.4	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	-	-	-
Residual, etc. (g)	-4.2	-3.9	-1.0	0.0	4.5	-6.4	-	-	-

イオンおよび陰イオンをそれぞれ 0.1mol/liter の HCl、0.001mol/liter の NaOH 溶液を用いて抽出して行った⁵⁾。

このようにして得た土壌槽の物質収支を表-2 に示す。なお、表面流出による槽外への排出量はわずかであったため省略する。土壌槽 E の施肥量と植物の吸収量を比較すると、投入した N と K はほぼ全量、P は投入量の 24 % が植物に吸収されていることが分かる。土壌槽 C では、施肥量はいずれの物質も植物の吸収量を上まわっており、かなり多くの肥料が土壌中に残留しているのが分かる。

表-2 には 2001 年 5 月 3 日～7 月 9 日の観測において土壌槽 W で生育したトウモロコシの N、P、K の体内貯留量と施肥量を併示してある。植栽密度が同じである 2001 年(W)と 2002 年(E)の体内貯留量を比較すると、2001 年(W)の貯留量はすべての物質において 2002 年(E)より大きいことが分かる。これは、施肥量の差が原因であり、施肥量が多いほど吸収量は増加すると考えられる。また、これらの結果よりトウモロコシの乾燥重量 1kg を生産するために N、P、K がそれぞれ 13.1～20.8g、1.9～12.3g、8.0～18.8g 消費されたことが明らかになる。

(3) 植物の成長

植物の成長と栄養塩吸収量の関係を表わすためには、植物の成長過程を定量的に表示することが必要である。本研究ではライシメータ付近に圃場を設け、ライシメータに植栽されている植物と同じものを多数育成するとともに定期的に 2・3 本採取し、各個体の丈、葉数、葉面積、乾燥重量、茎径および根群域の深さを測定した。採取する個体はライシメータに植栽されている植物の葉数、丈、雌軸数がほぼ一致するものを選別した。なお、根群部の採取については微細な根まで取り出すことは困難であり、若干土壌中に残ったが、これはやむをえないものと考えている。

図-1(a)～(c)に 2001 年 5 月 3 日～7 月 9 日、2002 年 6 月 10 日～8 月 14 日の根を含むトウモロコシの乾燥重量、丈、葉面積の計測結果をそれぞれ示す。なお、図中の乾燥重量、丈、葉面積はそれぞれ計測で得られた最大

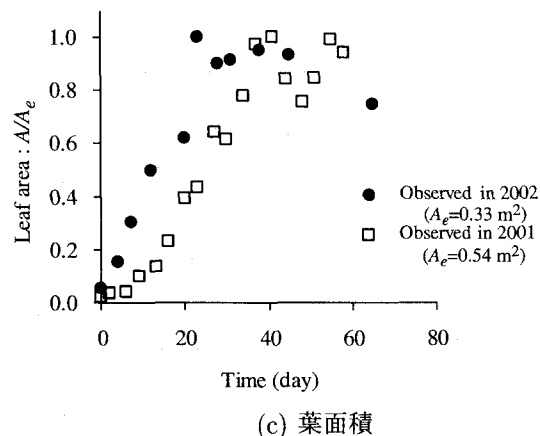
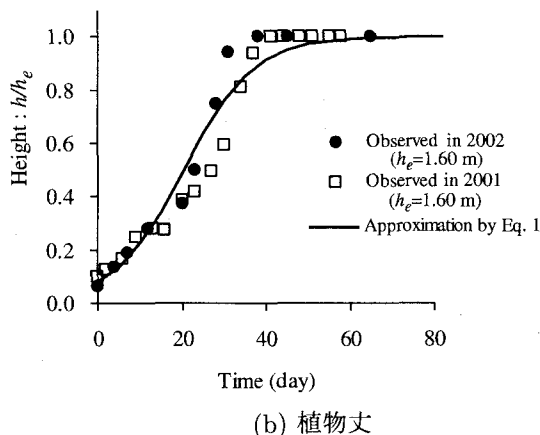
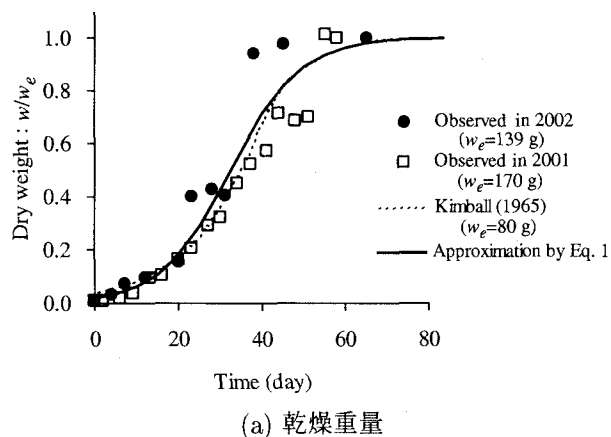


図-1 トウモロコシ1個体の成長

値で除して無次元化し、時間については植付け日を0としてある。また、図中には1965年にKimballが提案したトウモロコシの乾燥重量の成長曲線⁶⁾を併示してある。図-1(a)を見ると、2001年、2002年の乾燥重量の計測値およびKimballによる成長曲線はよく一致している。(b)の植物丈についても2001年、2002年の計測値はかなりよく一致しているが、(c)の葉面積では2001年と2002年の計測値に若干違いが見られる。また、乾燥重量と植物丈は、時間が経過するにつれて増加し、1に近づくが、葉面積については植付け後40日までは単調に増加し、それ以降は減少する傾向にある。この生育後期の葉面積の減少は、葉の枯死によるものである。

植物の乾燥重量および丈の成長はロジスティック成長

曲線で近似される⁶⁾。乾燥重量 $w(g)$ は(1)式で表わされる。

$$\frac{w}{w_e} = \left\{ 1 + \left(\frac{w_e}{w_0} - 1 \right) \exp(-rt) \right\}^{-1} \quad (1)$$

ここに、 w_e :乾燥重量の最大値(g)、 t :時間(day)、 r :成長率(1/day)、 w_0 : $t=0$ の時の乾燥重量(g)である。植物丈を(1)式を用いて表わすときには、式中の w, w_e, w_0 をそれぞれ h :植物丈(m)、 h_e :植物丈の最大値(m)、 h_0 : $t=0$ の時の植物丈(m)に置き換える。図-1(a)(b)には(1)式を用いた計算結果を併示してある。これにより、乾燥重量では $r = 0.12\text{day}^{-1}$ 、 $w_0 = 0.02w_e$ 、植物丈では $r = 0.12\text{day}^{-1}$ 、 $h_0 = 0.08h_e$ という値が得られた。

3. 植物の栄養塩吸収特性

(1) 植物の栄養塩吸収量の計測

植物の栄養塩吸収特性を明らかにするために、次の方法で植物の栄養塩吸収量の時間変化を調べた。周囲をアルミホイルで覆ったガラス瓶(容量1.3liter、深さ15cm)に栽培液を入れ、根全体が栽培液に浸るようにトウモロコシを挿入して固定した。ライシメータ付近の圃場にこのガラス瓶を6個埋設して、2002年6月10日～8月14日に自然条件下でトウモロコシを水耕栽培した。栽培液に投入する栄養塩量は植物の成長に応じて変更した。例えば、7月11日にはN、P、Kがそれぞれ3.0、4.3、4.0%含まれる肥料を10g補給した。定期的に栽培液の重量および栄養塩の減少量を測定して、蒸散量および植物の栄養塩吸収量を求めた。なお、根は栽培液中の酸素を用いて呼吸するため、1liter/minのエアポンプを用いて栽培液に空気を送り、栽培液中の酸素が欠乏しないようにした。

(2) 栄養塩吸収量の計測結果とその考察

水耕栽培実験を行った6本のトウモロコシのうち2本は土壌槽に植栽されているトウモロコシと葉数、丈、雌軸数がほぼ一致して成長した。ここではこの2本のトウモロコシにおけるNとKの吸収特性について議論する。なお、栽培液中のNにはアンモニア態窒素と硝酸態窒素が存在するが、栽培液中のアンモニア態窒素は硝化されて硝酸態窒素に変わるうえ、植物のアンモニア態窒素と硝酸態窒素の吸収は競合するなどの理由により、ここでは両者をとくに区別しないで取り扱うことにする。

6月12～14日、6月22～23日、7月3～12日、7月18～19日、7月22～24日の5期間においてNとKの吸収量および蒸散量を測定した。吸収量と蒸散量の関係を図-2に示す。いずれの物質についても、蒸散量がない時にも物質吸収量は0でなく、蒸散量と栄養塩吸収量には明確な関係は見い出せなかった。

図-3に測定期間ごとのN、Kの栽培液の濃度と吸収量

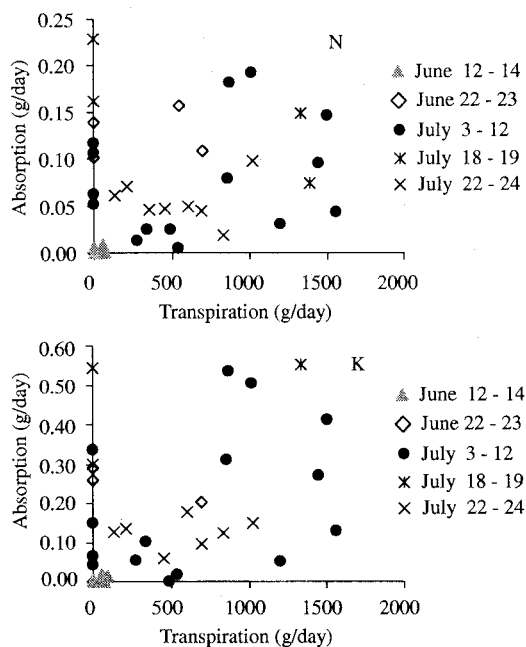


図-2 蒸散量と栄養塩吸収量

との関係を示す。同じ期間については、いずれの物質も栽培液の濃度上昇に伴って吸収量が増加しており、植物の栄養塩吸収量は根の外側の物質濃度に依存していると考えられる。

植物の物質吸収量の推定には Michaelis-Menten 式 (2) がよく用いられる²⁾。

$$I = \frac{I_{max}C}{K_m + C} \quad (2)$$

ここに、 I : 植物1個体あたりの吸収量 (g/day), C : 根の外側の物質濃度 (g/m³), I_{max} : 植物1個体あたりの最大吸収量 (g/day) である。 K_m は Michaelis-Menten 定数 (g/m³) であり、対象とする物質によって異なる値をとるが、全成長期間にわたってほぼ一定の値であるといわれている²⁾。ここでは、N および K の K_m をそれぞれ 40⁷⁾, 390²⁾ g/m³ とした。これらの K_m を用いて、期間ごとに最小2乗法で決定した I_{max} を表-3 に示す。また、図-3 には表-3 に示してある I_{max} を用いて (2) 式で推定した結果を併示してある。7月3-12日の推定値は観測値とよく一致しており、(2) 式の適用性が認められる。他の期間については、植物の吸収量が小さく栽培液の濃度変化が小さかったため、議論の余地はあるが、ここでは (2) 式を用いて考察を進めることにする。

(3) 植物の成長と栄養塩吸収量

表-3 の I_{max} を見ると、7月18日まで各物質の I_{max} は増加するが、7月22日以降の I_{max} は大きく減少することがわかる。この傾向は Barber(1995)²⁾ の研究結果と一致している。図-4 に I_{max} 値と植物の乾燥重量の増加量との関係を示す。 I_{max} 値と乾燥重量の増加量はほぼ1本の直線 (3) 式で表されることが分かる。

$$I_{max} = a \frac{dw}{dt} \quad (3)$$

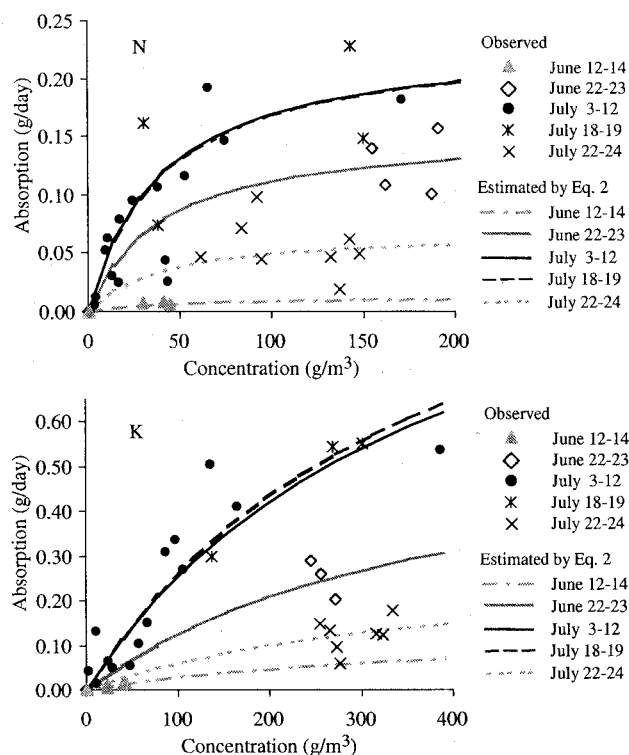


図-3 栽培液の栄養塩濃度と植物の栄養塩吸収量

表-3 各期間の I_{max} (Eq. 2)

	Jun. 12-14	Jun. 22-23	Jul. 3-12	Jul. 18-19	Jul. 22-24
N	0.011	0.156	0.236	0.235	0.068
K	0.139	0.623	1.241	1.279	0.293

(g/day)

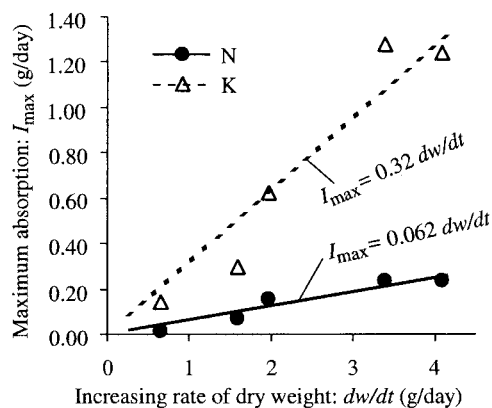


図-4 植物の乾燥重量と I_{max}

ここに、 w : 乾燥重量 (g), a : 定数 (dimensionless) であり、図-4 より N および K についてそれぞれ 0.062, 0.32 という値を得た。

4. 植物の吸収を考慮した窒素移動解析

(1) 基礎式

これまでの考察結果を応用して、2002年6月5日～8月14日の土壌槽Eの窒素移動解析を行う。

土壌水流动の基礎式にはRichards式(4)を用いる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} - S \quad (4)$$

ここに、 $K(\theta)$:不飽和透水係数(m/day)、 ψ :圧力水頭(m)、 θ :土壌水分量(m^3/m^3)である。 S :根群域における単位体積あたりの吸水強度(1/day)である。

土壌溶液中のアンモニアイオンは短時間で硝化と言われており²⁾、ここでは肥料に含まれているアンモニア態窒素は瞬時に硝酸態窒素になると仮定する。さらに、脱窒、窒素固定および有機化・無機化などの微生物による作用は、植物の吸収に比べて小さい⁷⁾ので、ここでは考慮しない。これらの仮定にもとづくと窒素の土壌中移動は(5)式で表される。

$$\frac{\partial (\theta C)}{\partial t} + q \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - Q \quad (5)$$

ここに、 C :土壌水の窒素濃度(g/m^3)、 q :Darcy則より算出される単位面積あたりの流量(m/day)、 D :分散係数(m^2/day)、 Q :根群域単位体積あたりの植物による窒素吸収強度($\text{g}/\text{m}^3 \text{ day}$)である。

(2) 解析条件

土壌槽に作物が植栽されている期間中の、 S および Q を決定する必要がある。ここでは、植物の窒素吸収量と蒸散量とは明確な関係が見られないこと、植物の窒素吸収量は(1)~(3)式で表わされることを考慮し、さらに根の分布は根群域内で均等である、蒸散量と根からの吸水量は等しいと仮定して(6)、(7)式で算出する。

$$S = E_t / l_r \quad (6) \quad Q = nI / l_r \quad (7)$$

ここに、 E_t :蒸散量(m/day)、 n :単位面積あたりに植栽されている作物個体数($1/\text{m}^2$)、 I :単位時間当たりの栄養塩吸収量(g/day)、 l_r :根群域の長さ(m)である。なお、根群域内における深さごとの I については、(2)式中の C に(5)式で求められる各位置の窒素濃度を与え、(1)~(3)式を用いて算出する。根群域は収穫時に計測したところ地表面から深さ50cmの範囲であるという結果を得ている。

(4)式の解析では、地表面の境界条件として雨量・蒸発量を与える。土壌物理特性は充填土壌について得られている測定値⁸⁾を用いる。地表面からの蒸発量および(6)式中の蒸散量は我々が提案した方法⁹⁾で推定する。(5)式中の分散係数 D は、中野らの方法¹⁰⁾で計測した結果より、 $2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{day}$ を用いる。

(3) 解析結果

図-5(a)~(g)に雨量および灌漑量の観測値、および土壌槽重量の変化、蒸発散量、地下水流出量、深さ10、30、60cmの土壌水分量の観測値と計算値を示す。なお、図中の土壌槽重量は計算開始時を0として示してある。土壌槽重量、蒸発散量、地下水流出量、土壌水分量の

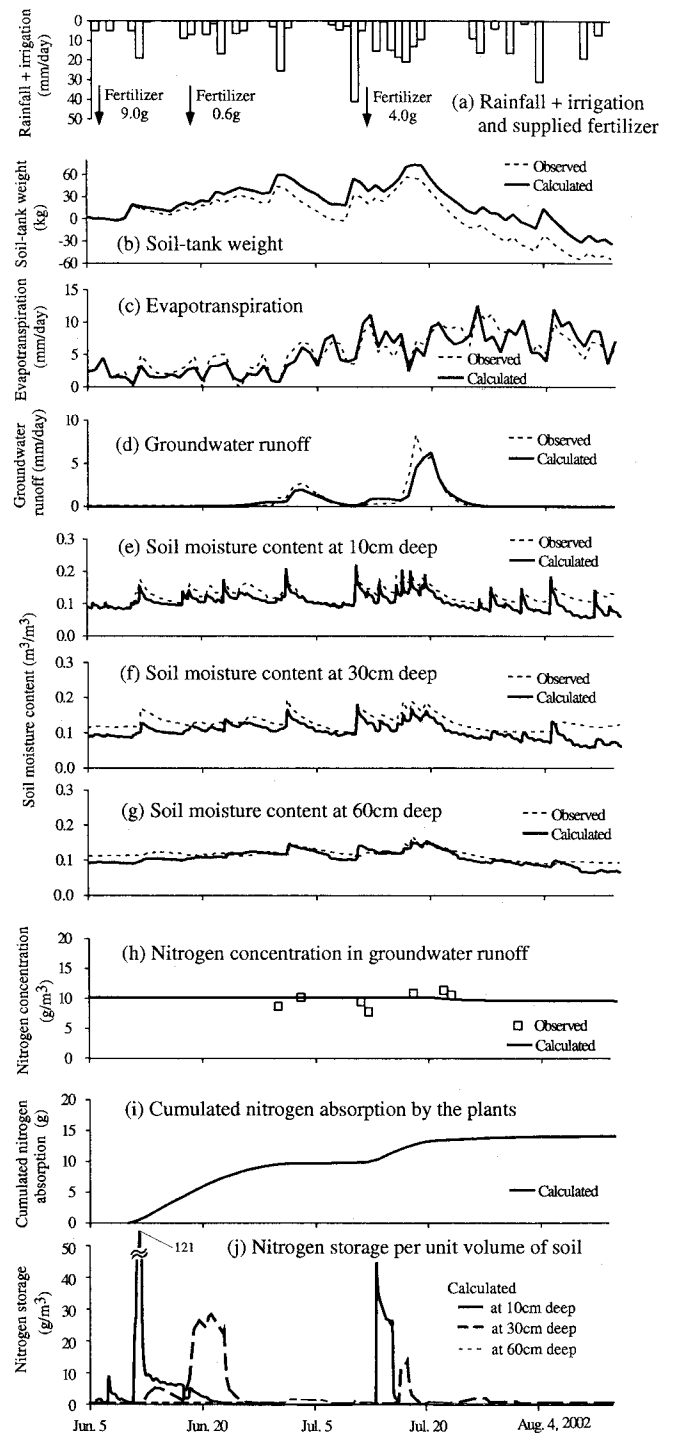


図-5 計算値と観測値の比較

計算値はそれぞれの観測値とよく一致している。

図-5(a)、(h)~(j)には施肥量、地下水流出の窒素濃度の観測値と計算値、植物の窒素累加吸収量の計算値、深さ10、30、60cmの土壌単位体積あたりの窒素貯留量の計算値を示してある。また、図-6に解析によって得られた7月11日~8月14日における窒素貯留量の鉛直分布およびトウモロコシの収穫日(8月14日)に土壌層毎に測定した窒素残留量を示す。

図-5の植物の窒素累加吸収量(i)を見ると、吸収量は施肥後に大きく、時間の経過とともに次第に減少して

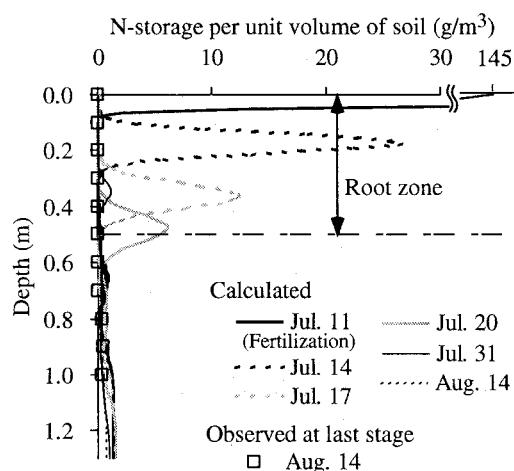


図-6 窒素貯留量の鉛直分布

いることが分かる。図-5の植物の窒素累加吸収量(i)と土壌単位体積あたりの窒素貯留量(j)を比較すると、吸収量が小さいときは深さ10, 30cmの窒素貯留量が0になっており、ライシメータ土壌中の窒素は欠乏していたと考えられる。

図-5の土壌単位体積あたりの窒素貯留量(j)の計算値を見ると、深さ10, 30cmの窒素貯留量はかなりの増減が見られるが、深さ60cmではほとんど変動していない。図-6を見ると、投入された窒素は、植物に吸収されつつ、降雨・灌漑にもとづく土壌水流動によって鉛直下方に移動するが、深さ60cmに到達する前に全量が植物に吸収されていることが分かる。図-5に示してある地下水流出の窒素濃度(h)にも変動は見られず、観測値、計算値はともにほぼ10g/m³で一定であり、上記の結果を反映している。また、8月14日の窒素貯留量の観測値でも土壌中に窒素が残っていないことが示されており、植物の栄養塩吸収が土壌中の物質移動に及ぼす影響はかなり大きいといえる。

2002年6月5日～8月14日のトウモロコシの窒素吸収量は計測値、計算値それぞれ16.7, 14.1gであり、両者はほぼ一致している。したがって、ここで提示したモデルは、植物による窒素吸収量および土壌中の窒素移動をうまく表示しているといえる。しかし、ここで用いた仮定、とくに水耕栽培で得られた栄養塩吸収特性のフィールドへの適用性の吟味は十分とはいえず、今後検討する余地を残している。

5. 結論

本研究は、植物の栄養塩吸収量および植物の栄養塩吸収が土壌中物質移動に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目的として、ウェイングライシメータによる水・物質収支観測および水耕栽培による植物の栄養塩吸収量の測定を行った。さらに、これらの測定結果より植物の栄養塩吸収の規則性を見出し、窒素移

動解析に応用した。本研究で得られた結論をまとめると次のとおりである。

- トウモロコシの生育には全乾燥重量の283～389倍、穀果乾燥重量の1799～3305倍の水が必要である。水資源を考えるうえで無視できない。
- 植物体内の物質貯留量および肥料の土壌残留量を測定し、土壌槽の物質収支を求めた。1kgの乾燥重量をえるためにN, P, Kがそれぞれ13.1～20.8, 1.9～12.3, 8.0～18.8gほど必要であることが明らかになった。
- 自然気象条件下でトウモロコシの水耕栽培を行い、栄養塩吸収量を測定した。植物の栄養塩吸収は、蒸散とは無関係であり、根の外側の栄養塩濃度が高くなるにつれて増加することが分かった。
- 植物の栄養塩吸収はMichaelis-Menten式を用いてうまく表わせること、および栄養塩吸収量は植物の成長速度に比例することが明らかになった。
- 水耕栽培実験によって得られた植物の成長と窒素吸収量の関係を応用して、植物の吸収を考慮した土壌中の窒素移動解析を行った。植物の吸収量、地下水流出の窒素濃度、土壌の窒素貯留量の計算値は観測値と一致した。しかし、水耕栽培で得られた栄養塩吸収特性のフィールドへの適用性については、測定が少ないためかなり問題が残されていると考えられる。これについては今後さらに吟味を重ねる予定である。

参考文献

- Miller, D. M.: Studies of Root Function in *Zea mays*, *Plant Physiology*, vol.77, pp. 162-174, 1985.
- Barber, S. A.: Soil Nutrient Bioavailability, *John & Sons Inc.*, pp. 1-403, 1995.
- 岡 太郎, 石井 将幸, 東 博紀: ウェイングライシメータによる植物の成長と水収支に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第44号, B-2, pp. 445-454, 2001.
- 東 博紀, 岡 太郎: 植物の成長と茎内流量を考慮した蒸発散特性と土壌水分流動に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp. 55-60, 2002.
- 財団法人 日本土壌協会: 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法, pp. 1-321, 2001.
- Mohr, H. and Schopfer, P. 原著, 網野 真一・駒嶺 穆監訳: 植物生理学, シュプリンガーフェアラーク東京株式会社, pp. 1-598, 1999.
- Wang, F., Bear, J. and Shaviv, A.: A N-dynamics model for predicting N-behavior subject to environmentally friendly fertilization practices, *Transport in Porous Media*, vol 33, pp. 309-324, 1998.
- 岡 太郎, 野口 美具: 不飽和浸透流の拡散係数と透水係数の測定, 第24回水理講演会論文集, pp. 363 - 368, 1980.
- Higashi, H. and Oka, T.: Measurement and modeling of evapotranspiration during plant growth, *Proceedings of 13th IAHR-APD congress*, vol.1, pp. 499-504, 2002.
- 中野 政詩, 宮崎 毅, 塩沢 昌, 西村 拓: 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, pp. 1-236, 1995.

(2002. 9. 30受付)