

草地の水収支・乾物生産モデルを構築するために 解決すべき問題点

中 辻 敏 朗

Study subjects for modeling
water balance and grass production

Toshiro NAKATSUJI

Hokkaido Tenpoku Agricultural Experiment Station
Hamatonbetsu, Hokkaido, 098-57 Japan

Abstract

The soil-crop-atmosphere continuum is a dynamic system in which water is recycling. It is convenient to use models for analyzing dynamic systems like this. There are many models to predict soil water contents profile and crop yields. In this paper, I introduce models which describe water balance and grass production, and discuss some study subjects in order to construct more accurate model. The subjects are summarized as follows :

1) The root zone of grassland has been considered to be shallow. But grass roots in subsoils can absorb nutrients and water as well as roots in shallow layers. We have to know how deep roots can absorb nutrients and water.

2) Unsaturated conductivity is essential to calculate water flux in soil. But it is not so easy to measure unsaturated conductivity, so there are few reports concerning it. It is necessary to increase data on unsaturated conductivity.

3) Transpiration rates change with soil water content and weather conditions. There are some empirical equations for estimating transpiration rates. But it is not clear which equation is best for a certain condition.

4) Water requirement is necessary to convert the water use of grass into dry matter production. Examples of water requirement, measured in Hokkaido, have wide ranges of values. More measurements are needed.

Key words : water balance and dry matter production model, root zone, unsaturated conductivity, transpiration, water requirement

1. はじめに

農耕地において水は循環している。雨として降った水は土壌に浸入し貯留される。その水は大気の蒸発要求に応じて植物により吸収され、蒸散という形で大気中に放出される。同時に土壌表面からも蒸発によって水が失わ

れる。大気に戻った水は再び雨となって土壌に浸入し貯留される。このようなプロセスが滞ることなく連続的に生じている。したがって、植物が順調に生長するためには、大気の蒸発要求と植物への水供給が釣りあうような水収支が達成されなければならない。しかし実際には、大気の蒸発要求に基づく根による吸水、蒸散というプロ

セスはほとんど休みなく生じているのに対して、降雨は不定期にしか生じない。

降雨が変動すればそれに連動して土壌の水分状態も変化する。そして、土壌の水分状態は根張りや養分吸収といった要因をとおして作物の生長に影響をおよぼす。同時に、大気は気温や日射量といった気象因子を介して作物の生長に影響をおよぼす。このように、大気、土壌および作物は循環する水をとおして相互に密接な動的関係にある(図-1)。

このような動的関係にある要因の相互関係を理解するためには、施肥試験で使われているような相対的比較による実験手法だけでは対処しにくい。動的関係にある複数の要因を包括的に表現する手法が必要とされる。そのひとつがモデルである。3要因の関係をモデル化して数値実験を行うことで、様々な気象・土壌条件に対する作物の反応を推測し、収量予測が可能となる。また、ある条件のもとではどのプロセスが作物生育の制限因子になるかを推測することもできる。これは、気象・土壌資源を適正に評価すること、すなわち土地評価にほかならない。筆者はこれがモデルの最終的な目的であると考えている。

本報告では草地を対象として、土壌-牧草-大気の動的関係を記述する既往モデルの概要を紹介する。そして、これまでの研究成果からモデルを動かすことができるのか、不足している知見は何かを考えてみたい。

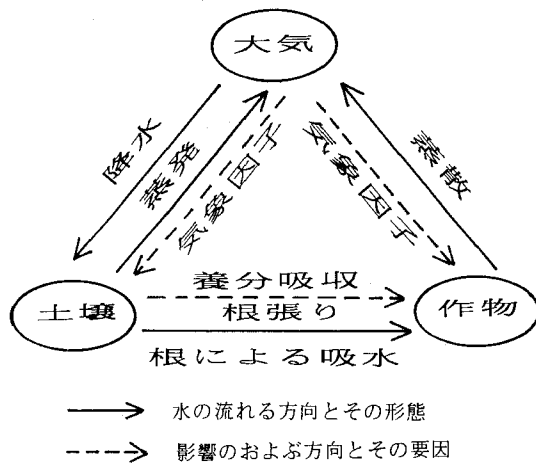


図-1 大気、土壌、作物の動的関係

Fig. 1 Dynamic relationships among the atmosphere, soil and crops.

2. 既往の水収支・乾物生産モデルの概要とモデルを動かすために必要なデータ

モデルには様々な種類がある。ここでは、農耕地において水は循環しているという観点に立ち、水が土壌から作物、そして大気へと移動する過程を通じて作物生産を表現する水収支・乾物生産モデルについて述べる。このモデルは大きく、(1)根圏土層の水収支モデル、(2)乾物生産モデル、の2つの部分に分けて考えることができる。

1) 根圏土層の水収支モデル

牧草に限らず、作物による水吸収を考慮した根圏土層の水収支モデルは数多く報告されている (Belmans *et al.*, 1983; de Jong and Kabat, 1990; Feddes *et al.*, 1988; 佐久間, 1982)。モデルの概念を図-2に示した。まず、根圏土層をその深さに応じて数個の層に分割する。降雨というかたちで土壌に浸入した水は、いくつかの土層に分配される。各土層に分配された水はダルシー則に

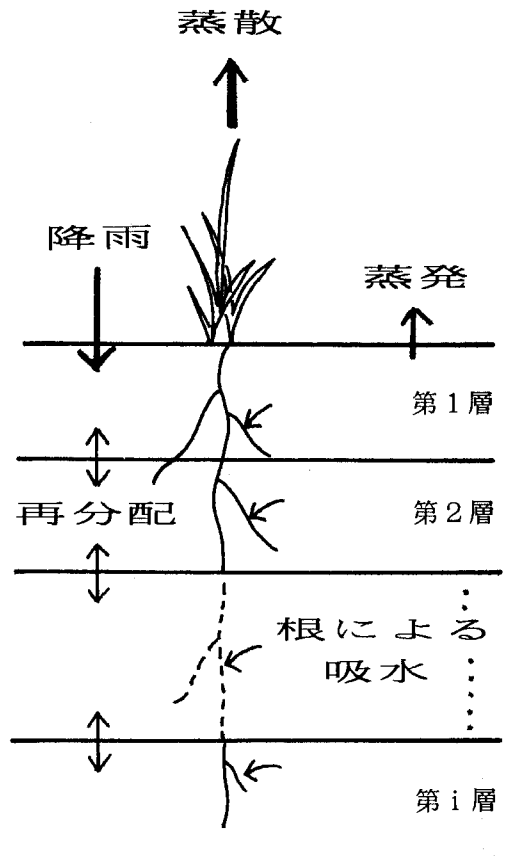


図-2 根圏土層水収支モデルの概念

Fig. 2 Concept of water balance model in root zone.

したがって再び各層に分配される。そして作物の根は、根張りや土壌水分消費型などにしたがって蒸散に相当する量の水を各土層から吸収する。

この一連の過程におけるある土層の水分変化量は次式で表される。

$$\partial\theta/\partial t = \partial/\partial z \{K(h)(\partial h/\partial z + 1)\} - S \dots\dots\dots(1)$$

ここで、z：地表面から鉛直下方への距離 (cm)， θ ：水分率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)，h：土壌水分ポテンシャル ($\text{cm H}_2\text{O}$)，K(h)：不飽和透水係数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)，S：植物根による吸水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) である。(1)式は、ある土層の水分量の時間変化は、ポテンシャル勾配にしたがった水移動量と植物根による吸水量の差し引きであることを示している。

この水収支モデルを動かすためには、(1)pF-水分率曲線や不飽和透水係数-水分率曲線など土壌の物理的性質をあらわすデータ、(2)植物の吸水項となる蒸散量や土壌面からの蒸発量などを推定するための気象データ、(3)根圏土層の深さや土壌水分消費型など根系にかかわるデータ、などが必要である。

2) 乾物生産モデル

前項で述べた根圏土層の水収支モデルは数多くあるが、それを乾物生産量の予測に結び付けた例は少ない。

de Jong and Kabat (1990) は、作物の吸水量が少ないうちはその増加にともなって生長速度も大きくなるが、吸水量が多くなるとそれが生長速度におよぼす影響は小さくなり、最終的には光強度や気温などで決まる最

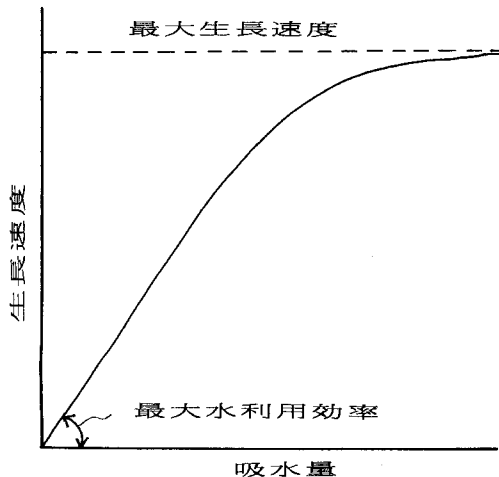


図-3 Jong and Kabat (1990) のモデルにおける吸水量と生長速度の関係

Fig. 3 Growth rate versus water use by de Jong and Kabat (1990).

大生長速度に限りなく近づくとしている (図-3)。すなわち、乾物生産に対する水利用効率は一定ではなく、条件により変化するとし、水収支モデルで推定した蒸散量から牧草収量を予測している。

一方、佐久間 (1994) は、牧草の要水量を $400 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ と一定であると仮定して、気象および土壌水分条件より推定した蒸発散量から牧草収量を試算し、実測収量と比較検討している。

どちらの例にしても、根圏土層の水収支モデルと乾物生産モデルを結び付けるためには、要水量のような吸水量と乾物生産量の量的関係を表すデータが必要である。

3. 土壌-牧草-大気の動的関係を記述するために不足している知見

水収支・乾物生産モデルに入力するデータの精度はモデルの推定精度を左右する重要な要因である。気象データは比較的容易に精度の高いデータが得られる。一方、根系分布や要水量などは実測データの蓄積に乏しい。しかし、モデルを動かすためにはデータが不備であってもなんらかの値を与えざるを得ない。以下では、土壌-牧草

表-1 造成5年目のオーチャードグラス草地における根の分布 (大崎ら, 1975)

Table 1 Root distribution in orchardgrass sward at 5 years after establishment. (Osaki et al., 1975)

層厚 (cm)	根乾物重 ($\text{g}/900 \text{ cm}^2$)	分布割合 (%)
0~5	42.0	80
5~10	8.7	16
10~15	2.3	4

表-2 乾燥条件下のペレニアルライグラスの生育におよぼす硝酸アンモニウムの施用位置の影響 (Garwood and Williams, 1967)

Table 2 The effect of fertilizer (NH_4NO_3) placement on the growth of perennial ryegrass under dry conditions.

施用位置 (土壌表面下 cm)	収量指数 ¹⁾ (%)	窒素回収率 ²⁾ (%)
0	157	35
46	182	75
76	202	80

- 1) 無施肥区乾物収量 (2.2t/ha) を100とした指数
- 2) 施肥量に対する施肥による窒素吸収増加量の割合
- 3) いずれの区も硝安で窒素 112 kg/ha 相当を施用

-大気の動的関係をモデルとして表現するために不足している知見は何か、ということをつくか考えてみる。

1) 根圏土層をどこまでとするか

草地は一度造成すると、数年から数十年にかけて耕起することなく利用されることが多い。その間、採草地では大型機械の走行によって、また放牧地では放牧牛の踏圧などによって表層土壌がち密になる。また、枯れ葉や脱落した根が表層に還元され、肥料も土壌表面に施用されるため、経年化にともなって表層土壌に養分が蓄積する。このような経過をたどって、牧草の根は表層土壌に集中する(表-1)(大崎ら, 1975)。さらに、牧草根の養分吸収活力は根の集中した草地表層が最も高いという報告(近藤ら, 1985)もある。このため、牧草の根圏土層は浅いと見なされ、草地土壌の化学性についての研究は主に0~10 cm 土層をその対象としてきた。しかし、排水の良い草地土壌では、量は少ないものの深さ60 cm程度まで根が伸長しているのがしばしばみられる。

表層は乾燥し下層が湿潤な状態にあるペレニアルライグラス草地では、湿潤な下層に窒素肥料を施用したほうが表層に施用するより収量も窒素回収率も大きい(表-2)(Garwood and Williams, 1967)。この結果は、根と養分が表層に多く存在しても水がなければ養分を吸収できないことを示している。また同時に、下層の根も水と養分があればそれらを吸収することができるということも示唆している。

このように水と養分の土層内分布に着目した場合、草地の根圏土層をこれまでのように0~10 cm程度で十分

とするかどうかは大いに疑問である。様々な土壌における根張りの綿密な観察と類型化や土壌水分消費型を含めた養水分吸収領域についてのデータの蓄積、整理が必要である。

2) 水の動きを計算するための不飽和透水係数

流束是水頭勾配と透水係数の積として表される。したがって、土壌中の水移動量は不飽和透水係数と水分ポテンシャルを測定することで計算できる。しかし、北海道内の主要草地土壌について不飽和透水係数を測定し、土壌中の水移動について定量的に言及した報告はほとんどない。

これまでの報告(岩間ら, 1983;松中ら, 1985;三木ら, 1986)は図-4.Aのように、土壌を単に水のはいる容器と考え、容器の大きさ(保水性)を評価することに主眼が置かれていたと思う。そして、その容器のなかのどこに水がどの程度あるのか、根の吸収によって移動する水の量はどのくらいかということにはあまり関心が払われていなかった。水は土壌中で絶えず動いているため(図-4.B)、不飽和透水係数を測定して水の移動量を知ることが、作物に対する土壌の水分供給力を評価するうえで特に重要である。

また、根圏土層の有効水分が減少すると下層や地下停滞水から毛管上昇によって根圏土層へ水が移動する。これを評価するためにも地下停滞水位の測定とともに不飽和透水係数が必要である。停滞水からの毛管上昇はダルシーの積分式によって表される(Gardner, 1958)。灰色台地土のコムギ畑の例(図-5)では、毛管上昇速度(Q)

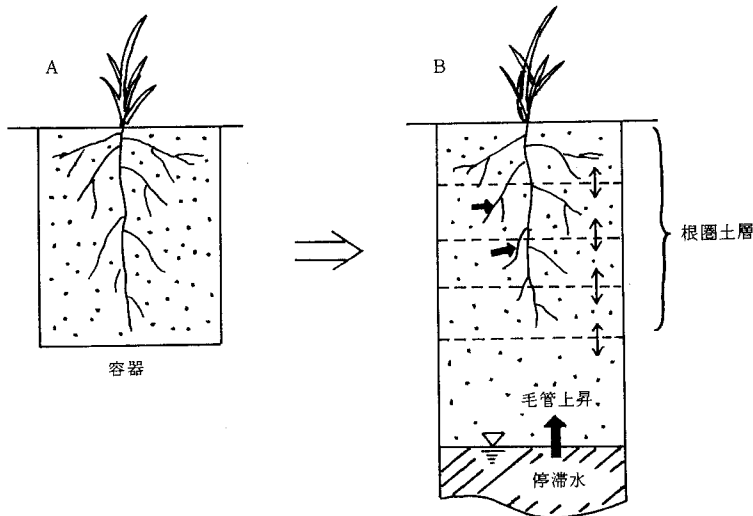


図-4 根圏土層の新しい概念

Fig. 4 New concept of root zone.

ダルシーの積分式

$$Z = \int 1 / \{ Q / K (h) + 1 \} dh$$

Z : 停滞水からの毛管上昇の高さ (cm)

Q : 毛管上昇速度 (cm・s⁻¹)

K (h) : 不飽和透水係数 (cm・s⁻¹)

h : 土壌水分ポテンシャル (cmH₂O)

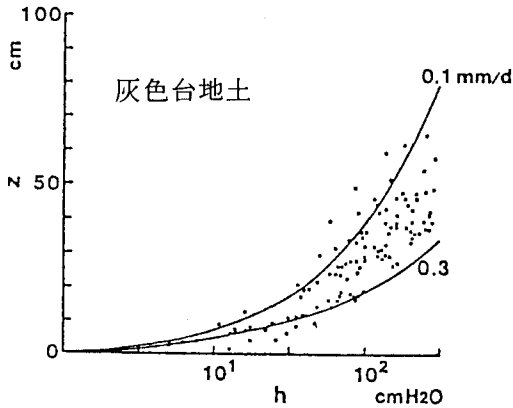


図-5 ダルシーの積分式とその適用 (波多野, 1990)

Fig. 5 Integral expression of Darcy's law and its application (Hatano, 1990).

を0.1および0.3 mm/日としたときの曲線の間、点で示した土壌水分吸引圧の実測値が分布している (波多野, 1990)。すなわち、停滞水からの毛管上昇速度は0.1~0.3 mm/日程度であると考えられる。この情報は不飽和透水係数がなければ得られない。

不飽和透水係数の測定は必ずしも容易ではない。従来一般的に使われている測定方法 (土壌物理性測定法, 1975) に比べ、費用、機能、操作の面で優れる簡便な測定法の開発 (岩間・小川, 1981) が試みられている。また、不飽和透水係数が土壌孔隙の大きさの分布状態を反映しているとの考え方に基づき、他の物理性データから推定するいくつかの方法があり、それら方法の特徴と各方法の相互関係を明らかにした報告 (井上ら, 1982) もある。いずれにせよ、不飽和透水係数のデータを今後増やすためには、簡便な測定法および他の物理性データからの推定法の開発が急務である。

3) 蒸散速度は大気蒸発要求と土壌の水分状態によってどのように変動するのか

蒸散速度は土壌水分が十分なときには大気の放射状

態、接地気層の温湿度条件など外的要因によって支配される。しかし、ある土壌水分以下では土壌側の要因に制限されて蒸散速度は減少することが知られている。トウモロコシの蒸散速度を検討した結果 (Denmead and Shaw, 1962) によると、蒸散速度が減少し始めるときの土壌水分量は太陽の放射状態と湿度によって異なっている (図-6)。つまり、蒸散速度は大気の状態と土壌水分状態の両方によって決まる速度といえる。

この現象は一般に次式のように表現される。

$$T = a \{ 1 - \exp(-b \cdot K) \} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、T: 蒸散速度、a: 土壌水分がTを規制しないときにTが限りなく近づく値、b: 正の定数、K: 有効水分量や有効水分残存率など土壌水分状態を表現する変数である。そして、a, bの値が大気放射状態や接地気層の温湿度条件によって変化する。北海道北部における牧草の蒸発散速度を推定する経験式は次のように与えられている (佐久間, 1982)。

$$ET = PET \{ 1 - \exp(-2.5 \cdot K) \} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、ET: 蒸発散速度、PET: ペンマン式から推定した土壌水分不足がないときの蒸発散速度、K: 根圏土層の各層における有効水分残存率の重みつき平均値である。また、ペレニアルライグラス、トウモロコシ、ダイズなどについて海外で得られた同様の経験式も紹介されている (古藤田, 1982)。

これらはいずれもある特定の土壌、作物、気象条件のもとで得られた経験式である。条件が変化してもこの式

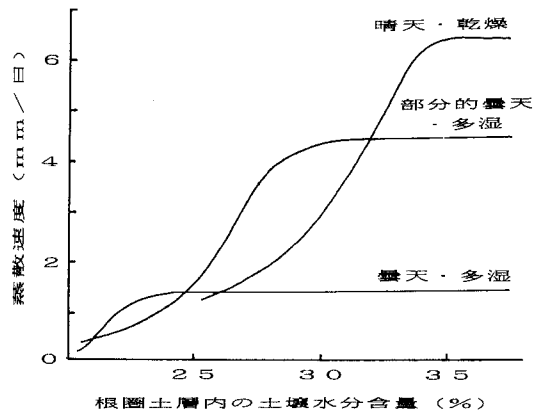


図-6 土壌水分含量と蒸散速度の関係 (Denmead and Shaw, 1962)

Fig. 6 Relationships between soil water contents and transpiration rates as affected by weather conditions (Denmead and Shaw, 1962).

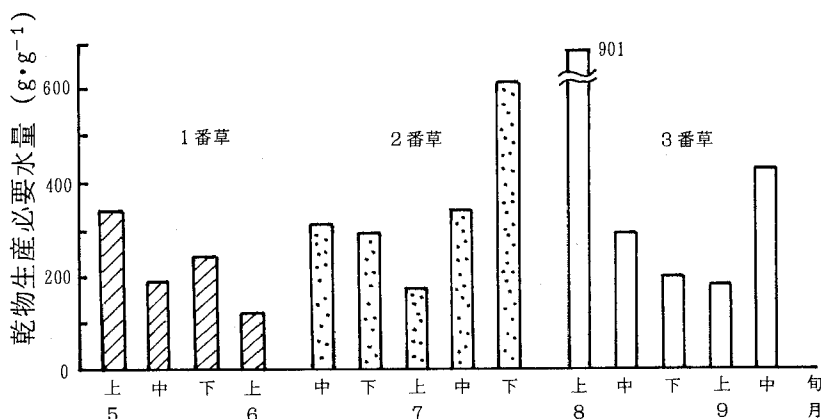


図-7 オーチャードグラスの生育時期別乾物生産必要水量

Fig. 7 Changes in water use for dry matter production at various growth periods of orchardgrass.

が適用できるかどうか、また適用できなければどこに原因があるのかを検討、整理し、ある式が適用できるときの条件を明確にすることが重要である。

4) 吸水量を乾物生産量へ変換するために必要な要水量

要水量は「作物の生育期間中の蒸散量を全乾物重で割った値」と定義されている(農学大事典訂正追補版, 1977)。表現を変えると、要水量は蒸散作用と光合成産物の比である。したがって、両作用を増減させる外的条件によってその値は変動する。

筆者らは、オーチャードグラスについて、蒸散散量を刈取部乾物重で除した値を乾物生産必要水量と定義し、それを生育時期別に求めた。その結果、オーチャードグラスの乾物生産必要水量は生育時期によって変化し、一定ではなかった(図-7)。各番草生育期間を通しての乾物生産必要水量は、1番草は $225 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、2番草は $342 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、3番草は $398 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ であった。この筆者らの測定例も含め、これまで北海道において測定された牧草の要水量(三木ら, 1986; 佐久間ら, 1975)は変動が大きい(表-3)。しかし、現時点ではその変動要因が十分に検討されていない。要水量を変動させる要因の整理と変動の機作を草種ごとに解明することが必要である。

4. おわりに

土壌-牧草-大気の動的関係を表現する手法としてモデルの重要性を指摘した。そして、既往の水収支・乾物生産モデルの概略を説明し、モデル化にあたって現在不足していると思われる知見を抽出した。

不足している4つの知見は、(1)土壌と牧草が接する場としての根圏の把握、(2)根圏内と根圏に向かう水の流れを記述するための不飽和透水係数の測定、(3)牧草が大気

表-3 既往の牧草の要水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 3 Water requirement of grasses.

佐久間ら (1975)	2番草: 370~440
	3番草: 330~380
	オーチャードグラス・チモシー主体
三木ら (1986)	1番草: 469~662
	2番草: 252~951
	オーチャードグラス

に接する場における蒸散変動要因の解明、(4)蒸散を乾物生産に結び付けるための要水量の整理である。これらは、土壌、牧草、大気が互いに接する場における問題である。

すなわち残された問題は、土壌物理学、農業気象学、植物生理学などの学問分野の境界領域である。それぞれの分野の研究者たちが一筆の草地を対象に、連携しながら研究をすすめてゆくような体制が今後必要であると思う。

謝 辞

本シンポジウムでの発表の機会を与えてくださった土壌物理研究会編集委員会の方々に深謝致します。また、天北農業試験場長菊地晃二博士ならびに同土壌肥料科長松中照夫博士には、本稿をまとめるにあたりご指導をいただきました。記して謝意を表します。

引用文献

- Belmans, C., Wesseling, J.G. and Feddes, R.A. (1983): Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.*, **63**: 271~286.

- de Jong, R. and Kabat, P. (1990): Modeling water balance and grass production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**: 1725~1732.
- Denmead, O.T. and Shaw, R.H. (1962): Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.*, **54**: 385~390.
- 土壤物理性測定法委員会編 (1975): 土壤物理性測定法, p 194~197, 養賢堂, 東京.
- Feddes, R.A., de Graaf, M., Bouma, J. and Van Loon, C. D. (1988): Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction. *Potato Research*, **31**: 225~239.
- Gardner, W.R. (1958): Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, **85**: 228~232.
- Garwood, E.A. and Williams, T.E. (1967): Growth, water use and nutrient uptake from the subsoil by grass swards. *J. agric. Sci., Camb.*, **69**: 125~130.
- 波多野隆介 (1990): 土壌中の水とイオンの移動とその不均一性解明へのアプローチ, 土地利用型農業の高度化に対応した土壌および土地資源の評価と利用上の問題点, 北海道農業試験会議平成2年度設計会議, 土壌肥料・環境保全部会, 32~36.
- 井上光弘・矢野友久・吉田 勲・山本太平・筑紫二郎 (1982): 土壌水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算, 土壌の物理性, **46**: 21~29.
- 岩間秀矩・小川和夫 (1981): 定常法による不飽和透水係数測定法の問題点とその改善, 土壌の物理性, **43**: 43~47.
- 岩間秀矩・渡辺治郎・小川和夫 (1983): 寒冷地域における重粘土草地の灌漑 (I)—北海道オホーツク沿岸地域における重粘土の水分特性と牧草の生育—, 農上誌, **51**: 197~203.
- 近藤 熙・木村 武・小山雄生 (1985): アクチバブルトレーサー法を用いた牧草根の養分吸収活力の評価, 土肥誌, **56**: 245~248.
- 古藤田一雄 (1982): 耕地における水収支, 土壌の物理性, **45**: 14~17.
- 松中照夫・三枝俊哉・松原一實・菊地晃二 (1985): 北海道根釧地方に分布する主要火山性土の理化学的性質, 北海道立農業試験場集報, **53**: 81~92.
- 三木直倫・高尾欽弥・西宗 昭 (1986): 天北地方重粘土草地の生産力と気象, 土壌水分特性の関係, 北海道立農業試験場集報, **54**: 21~30.
- 野口弥吉監修 (1977): 農学大事典訂正追補版, p 735~736, 養賢堂, 東京.
- 大崎亥佐雄・奥村純一・関口久雄 (1975): 根圏土壌の理化学性が牧草生育に及ぼす影響 第2報 鈹質土壌における牧草根の発達分布, 北海道立農業試験場集報, **32**: 35~44.
- 佐久間敏雄・小林信也・吉田 亨 (1975): 畑地における水分および熱の動態 第1報 牧草畑の熱収支と蒸発散量, 土肥誌, **46**: 507~513.
- 佐久間敏雄 (1982): 水・熱収支モデルとそれによる2・3の数値実験, 水田転換畑における養水分環境の計算モデルに関する研究, 編著 岡島秀夫, 11~33.
- 佐久間敏雄 (1994): 農耕地の土地評価における土壌物理性および物理的手法の重要性, 土壌の物理性, **69**: 49~54.

(受稿年月日 1994年12月2日)

