

シンポジウム

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

佐久間 敏 雄*

The importance of soil physical properties
and physical methods in land evaluation

Toshio Sakuma

Faculty of Agriculture, Hokkaido University

Summary

The main aim of land evaluation is to assess the capability of land resources in relation to particular land uses referring to use on a sustained basis. The potential productivity of soil-plant systems which are possible to introduce in a land area under consideration is important as a general measure of land evaluation. A model combining agro-climatic approaches, analysis on soil water dynamics, and crop water use was introduced successfully to predict the potential and rainfed production of grassland ecosystems in north eastern Hokkaido.

The model output, i.e. rainfed production of harvesting grassland in this area, agreed well when the water requirement of grasses was assumed at 400g g^{-1} . This approach was effective to compare benefits of several alternatives in management practices and to give long-term predictions based on the limited information provided by short-term experiments.

Data requirements to use this model include climatic items, such as temperature, reinfall, relative humidity, and sunshine hours, hydrophysical properties of soils, such as water content vs. suction and unsaturated hydraulic conductivity vs. suction curves, and water use characteristics of grasses. These physical characteristics of soils and soil-plant systems are indispensable to predict the nutrient limited production of plants, to analyze the dynamics of energy and materials through agro-ecological systems, and assess their impacts to hydrosphere and atmosphere in the context of environmental issues. The importance of soil physical properties and physical approaches in the quantitative land evaluation will grow bigger and bigger in the future.

Keywords : land evaluation, hydro-thermal regime, simulation model, potential productivity

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn, 69,49-54, 1994)

1. はじめに

はじめに、用語の定義を確かめておきたい。ここで用いる「土地」は、気候、地形、土壌、植生、水文などの自然的、物理的環境だけでなく、交通、市場、労力、資金・経営立地などを含む。すなわち人間を主体として考えたとき、それをとりまく環境全体を「土地」としてとらえる。また、評価とは、客観的に決定できる尺度によ

て価値を査定することである。尺度としては物理的なものだけでなく、生物的、社会・経済的なものも重要である。

土地は農林業生産の基盤であるだけでなく、人間活動の全てにかかわる資源である。清浄な空気、良質な水などと違って、土地は古くから貨幣価値が定まっている環境資源である。すなわち、経済的な意味での評価は既に

*北海道大学農学部 〒060 札幌市北区北9条西9丁目

キーワード：土地評価、水熱環境、シミュレーションモデル、可能生産量

存在する。なぜ、改めて評価しなければならないのか。その理由として、現在の土地価格は、充分大きなフロンティアが常に存在することを前提にして形成されてきたもので、今後もそれが妥当な評価であり得るかどうかは分からないことを指摘しておきたい。例えば、熱帯雨林地帯の開発は関係国の経済発展に寄与するが、それ以上に地球環境資源の大きな消耗をもたらすかも知れない。21世紀は「持続可能な開発」(Brundtland 1987)のために人間の土地利用を再編成してゆくべき時期に相当する。新しいパラダイムは、土地の可能性に対する新しい尺度を要求する。今後の土地評価は、これに応えられるものでなければならない。

ここでは、上述のことを踏まえながら農耕地の土地評価について土壌物理の側面からどのようなことが可能なのか、また必要なのかについて考察したい。

2. 評価の目的と方法

(1) 既往の土地評価

優れた土地評価の例としてSSC(Soil Suitability Classification(SCS-USDA))をあげる。よく知られているようにSSCにおける分級の尺度は利用・保全目的に対する土地条件による「制約」の程度である。このような物理的制約による分級は、亜大陸、国レベルで土地適性を客観的に評価し、「見込み生産」型の情報として整備しておくために必要なことであった。しかし、これらの評価は土地生産力については直接答えていない。したがって、表-1の例2, 3のような問題を考える場合には、補足的な作業が不可欠である。

(2) 評価の基本的尺度

我々が当面する問題の規模は拡張しつつあり、土地利用の調整を考えるに当たっては、1)地球、2)大陸・亜大陸、3)生物・気候帯、4)土地系(Land system)、5)土地相・亜相(Land facet, Subfacet)などさまざまなサイズを想定しておかなければならない。また、問題の性質、例えば1)広域の土地利用計画(国際、国家行政)、2)農業地域内の換地や土地利用の調整(地方行政)、3)経営内の生産計画支援(農家)などによっても評価の考え方や方法は異なる。

しかし、問題を農林地に限れば、目的や問題の性質にかかわらず、土地生産力を共通の基本的尺度と考えるこ

とができる。これは、人間を含む生物社会が、その存続の全てを植物-土壌系の一次生産に負っていることから当然のことと考えられる。しかし、人間による農林地の利用は、その土地の自然的条件に最も適した形で行われているとは限らないので、現在の生産力をそのまま土地評価の基準にすることは必ずしも当を得ていない。評価のもとになる土地生産力は可能生産力(PP)として測定されなければならない(FAO 1976)。

3. 可能生産量の推定

(1) 温度・放射レジムによるPP1の推定

いろいろな土地のPPは温度・放射レジムに依存するが、当面、広域にわたってこれらを人工的に調節する方法はない。したがって、これに対しては「適応」が土地利用戦略の主体にならざるを得ない。それ故、温度・放射レジム、広域の気象災害などはPP推定の与件と考えられ、その平均値は植物による乾物生産の温度・光依存性を数値化すること(FAO 1978)によって予測できる(PP1)。PP1は、植物の生物学的特性によって決まる土地生産力の最大値である。

(2) 水条件によるPP2の推定

生物生産は水の循環によって維持されており、水が不

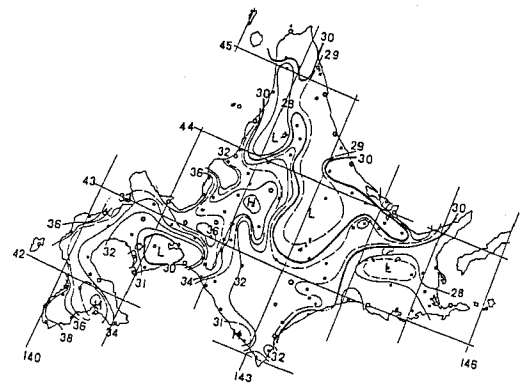


図-1 日平均気温10℃以上の期間の純放射量(R_n , kly)の分布

北海道農業気象観測所107地点の半旬別気象表による。標高、地形などによる調整は行っていない。H: 周辺より R_n が多い、L: 同じく少ない箇所を示す。

表-1 土地評価の目的と方法

| | | |
|-----|------------------------------------|--|
| 例-1 | 地域開発, 再開発のための土地利用の調整 | [適性分級] |
| 2 | 地区(Land system)の土地利用・改良, 景観保全計画の調整 | [適性分級, 可能性分級] |
| 3 | 耕地(Land facet, subfacet)の管理計画の改善 | [可能性分級, 投入・収量水準分析, 市場, 資金, 労働力, 農民の能力分析] |

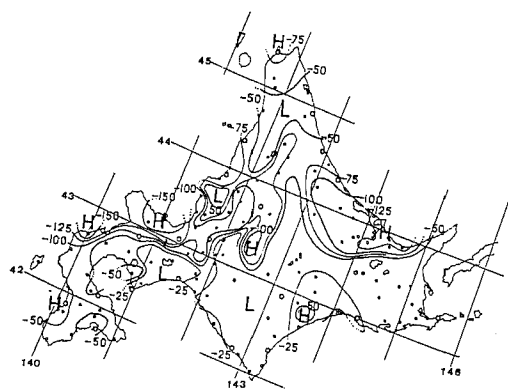


図-2 5-8月の総降雨不足(mm)の分布

降雨不足(R-ET)が引き続いて負である期間の降雨不足の総和、ただし、R:降水量, ET:水分が十分な草地の可能蒸発散量, その他は図-1の註参照。

足すればその多少にかかわらずPPは低下する。次に、北海道を例にして水条件に依存するPP2の推定方法について考える。

日平均気温10℃以上の期間についての純放射(Rn)の分布を図-1に示す。北海道南部から石狩低地帯南部にかけて期間当たり $Rn > 35 \text{ kJly}$ の地域が見られる。この値からエネルギーベースでPPを計算すれば、Tanaka (1986)のPBYP(Potential Biological Yield: 作物の生物学的特性によって決定される可能生産量)とはほぼ等しい値が得られる。図-2に降雨の不足が生じやすい期間(5-8月)についてPenman法によって推定した可能蒸発散量(ET)と降水量の差(降雨不足)の分布を示した。降雨不足が多いのは中央部を東西に走る山地(後志山地-夕張・日高山地-大雪・阿寒山地)の北側の地域で、降雨不足は期間当たり125-150mmに達する。この水不足を考慮して修正した蒸発散量(E^*)をもとに、地上部乾物生産の要水量を 400 g g^{-1} と仮定して求めた非灌漑草地の可能生産量(PP2)は、図-3のように推定される。(3)PP2に対する灌水および土壌水分特性の影響

気象的な水不足を緩衝するのは土壌中に保持された水である。この意味での土壌の機能は、作物による日々の消費水量と土壌水分変化の関係を計算機モデルを用いて再現することによって評価できる(佐久間 1982)。これは畑地灌漑計画モデル(Jensen 1972, Sharma 1985など)の原理を応用したもので、先ずエネルギー収支と浸入水量を推定し、土壌水の収支と層別分布を予測する。これと作物の水分消費型から蒸発散量およびPP2を予測する。これによる数値実験例を図-4に示す。実験条件は次のとおりである。

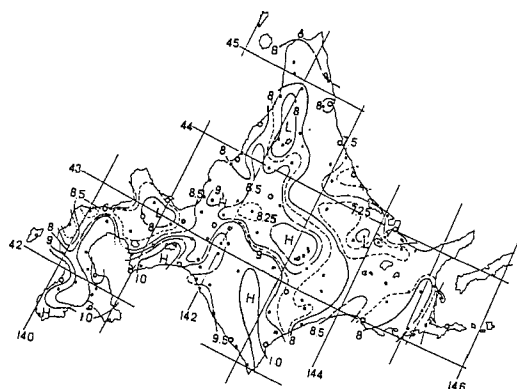


図-3 水収支から求めた可能乾物生産量(Mg ha^{-1})の分布

佐久間(1982)の水熱収支モデルによって求めた E^* (本文参照)を日平均気温10℃の期間について集計し、要水量を 400 g g^{-1} と仮定して計算した。その他は、図-1註参照。

- 1)地点・年次:雄武測候所(北緯 $44^{\circ} 35'$, 東経 $142^{\circ} 56'$), 1979年
- 2)作物:採草用牧草(一番草:6月20日, 2番草:8月20日収穫)
- 3)土壌:疑似グライ土(Psg, 図-4b), 酸性褐色森林土(Bfv, 図-4c)
- 4)初期条件:融雪直後(通日91日)に毛管飽和したものとし、水の斜面方向の再分配は無視する

影を施したETと E^* の差が、土壌水分不足による蒸発散量の低下分を示す。1979年は185-250日にかけてエネルギー供給量が多い無降雨日が続く(図-4a), 200-250日にかけて可能蒸発散量(ET)と蒸発散量(E^*)の差が大きくなっている。とくに、作土が浅く、下層土の低吸引圧有効水分孔隙が少ないPsgでは、早くからETと E^* の差が大きくなり、230-240日にかけて根群域土層の有効水分がほとんど枯渇した。これに対して、Bfvでは、同期間の E^* の最小値が 0.5 mm day^{-1} 程度にとどまったと推定される(図-4c)。

雄武町拓成における現地実験結果と同地点における微気象観測データ(網走開発建設部 1984)によるシミュレーション結果を表-2に示した。なお、このシミュレーションにおける灌水(+)は表層50cmの有効水分不足が20mmを越えた翌日に20mmの人工灌水を行うと仮定したものである。シミュレーション結果は現地試験の結果とかなりよく一致し、そのPP2はPP1より最大40%程度低下すると予測される。ただし、このシミュレーションでは、牧草の要水量を 400 g g^{-1} と仮定しているが、圃場試験による牧草の要水量としてはこれを大きく越える値がし

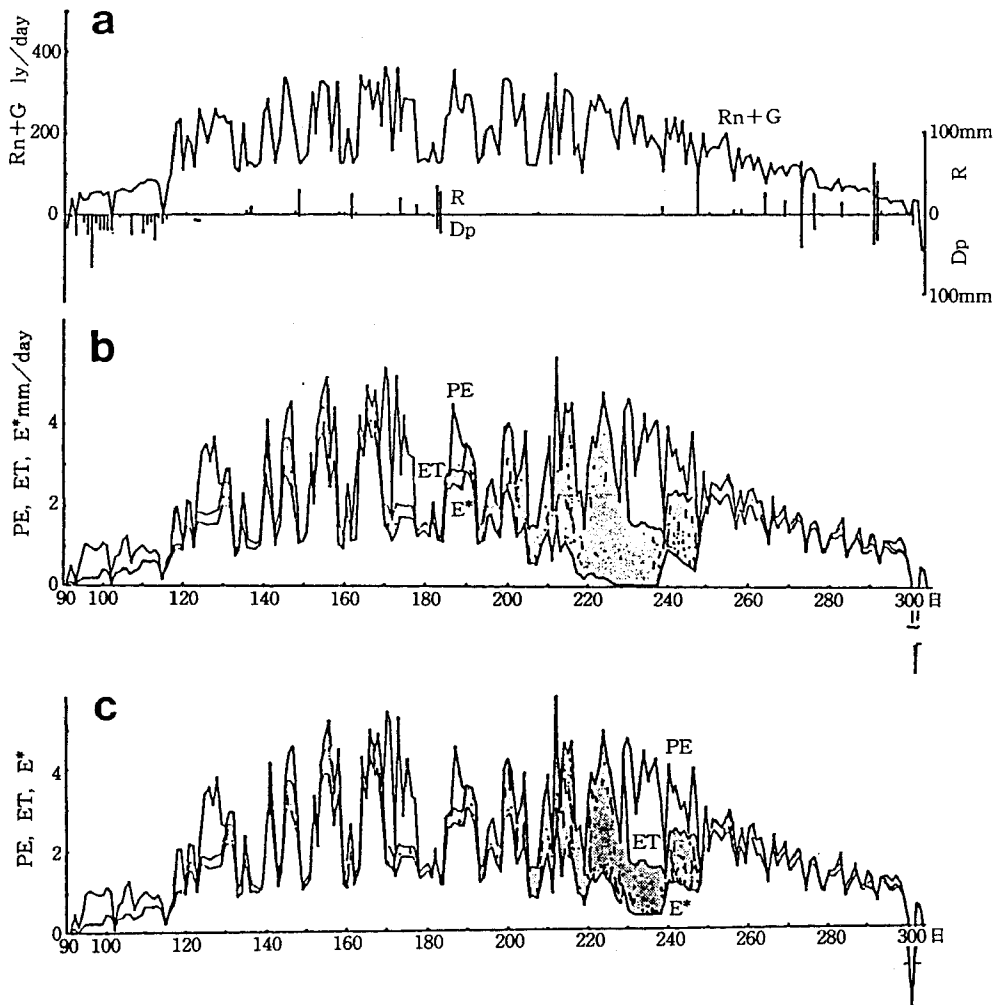


図-4 雄武測候所(1979)の観測資料による水熱収支の推定結果

a : Rn: 純放射, G: 地中熱伝導量 (ly day^{-1}); R: 降水量, Dp: 深層浸透水量 (mm), b : 疑似グライ土草地の PE, ET, E* (本文参照) (mm), c : 酸性褐色森林土草地の PE, ET, E* (mm)。

ばしば報告されている。しかし、ポットや枠試験レベルで得られる蒸散係数は、普通、 $200-250\text{g g}^{-1}$ 程度(田中ら 1970, 塩谷・田中 1977, 川上 1981など)であり、Tanaka(1986)はPBYの推定に際して蒸散係数を 250g g^{-1} と仮定している。このような差が生ずる主な原因は、要水量が収穫部位のみによって計算されていることにあるが、草種による生育パターンや地上部:根部比の違い、刈り取りにともなう蒸発散能の変化、前年度の生育・収量および越冬条件の違いなど、規模の大きな草地に特有な現象も関与していると思われる。圃場レベルの牧草類の要水量についてより精度の高い情報が必要である。

疑似グライ土Psg草地の水収支に関して、同様のシミュレーションを10年間にわたって行った結果を表-3に集計した。

- 1) 平均的にみるとPE/Re, E*/PEはともに約0.6, ET/PEは0.85で, ReはPE, ETに対して充分大きく, E*はReの約40%程度である。
- 2) PEの変動係数は10%以下であるが, R, Reのそれは約25%に達している。レンジは $\text{Re}=1,145-532$, $\text{R}=900-461\text{mm}$ であったから, 水収支の経年的変動因は主として積雪水量と降水量である。
- 3) 平均Dmpは, ETベースでは約 10Mg ha^{-1} , E*ベース

表-2 採草用牧草かんがい試験圃場(雄武町拓成)についてのシミュレーション結果と実測収量¹⁾

| 年次 | 期 間 | 土壌 ²⁾ | 灌水 | Rn | PE | ET | E* | DMp ³⁾ | DMm ⁴⁾ |
|------|--------------------|------------------|----|------|-----|-----|-----|-------------------|-------------------|
| | | | | kly | mm | mm | mm | Mg | ha ⁻¹ |
| 1979 | 7.25 ~ 10.26 | Psg Bfv | - | 15.5 | 247 | 224 | 149 | 3.7 | 3.2 |
| | | | + | | | | 195 | 4.9 | 4.5 |
| 1980 | 5.10 ~ 10.25 | Psg Bfv | - | 26.0 | 356 | 323 | 177 | 4.4 | 5.0 |
| | | | + | | | | 278 | 7.0 | 7.3 |
| | | | - | | | | 204 | 5.1 | nd |
| 1981 | 5.9 ~ 10.20 | Psg Bfv | + | 27.0 | 365 | 333 | 286 | 7.2 | 7.2 |
| | | | - | | | | 280 | 7.0 | 4.7 ⁵⁾ |
| | | | + | | | | 291 | 7.3 | 7.2 |
| | | | - | | | | 290 | 7.3 | nd |
| | | | + | | | | 297 | 7.4 | 6.7 |

1)純放射：Rn, 可能蒸発散量：PE, 牧草の蒸散能によって補正した可能蒸発散量：ETは、試験圃場における微気象観測結果を用いて計算。E*は土壌水分の層別分布と牧草の水分消費型によってETを補正して求めた。2) Psg：疑似グライ土(少有効水分), Bfv：酸性褐色森林土(多有効水分), 3)モデルによる予測乾物収量：E*より平均要水量を400g g⁻¹として計算した。4)実測乾物収量：2-5mm(7日間断)かん水試験圃場の実測収量より、生育期間を補正して計算した。5)前年の干ばつにより草生が悪化し、一番草の生育が不良であった。

表-3 雄武測候所の気象データによる疑似グライ土草地の水収支と可能生産量(1972-1982)¹⁾

| | 可能蒸発 散量(PE) | 可能蒸発 散量(ET) | 蒸発散量 (E*) | 降 水 量 (R) | 有効降雨 (Re) | 土壌有効 水量(AWS) | 深層浸透 水量(Dp) | 可能生産量(DMp) ET | E* |
|---------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | Mg | ha ⁻¹ |
| 平均値 | 453.3 | 388.1 | 276.0 | 656.5 | 712.6 | 37.0 | 433.8 | 9.7 | 6.9 |
| 標準偏差 | 31.1 | 17.4 | 35.7 | 154.0 | 190.0 | 5.6 | 174.3 | 0.43 | 0.88 |
| 変動係数(%) | 6.9 | 4.5 | 12. | 23.5 | 26.7 | 15.1 | 40.2 | 4.4 | 12.8 |

1) Re：R-(Ed+Sf)+WS；ただしEd：直接蒸発，Sf：地表面流去水量，WS：積雪水量，AWS：表層50cmの低吸引圧有効水分(平均値)，Dp：50cm以下の土層に排出された水量，その他の記号は表-2 註参照

では約7Mg ha⁻¹で、土壌-植物系の水条件によるPP1の低下割合は平均約30%である。また、E*から求めたDMpの最低値は5.0Mg ha⁻¹であり、1980年のDMpはこれに次ぐ低い値であるが、採草地の実収量は翌年も大きな影響を受けている(表-2)。多年生植物は前年度の生育、越冬時の障害などによって当年の水・熱条件から予測されるとは異なるPPになることが少なくない。このような生物学的条件を物理的モデルにどう組み込むかは今後の課題であるが、これを考慮するしないとはPP2の評価に大きな違いが生ずる。表-2の例では、疑似グライ土草地のPPが水不足によって大幅に低下する確率は平均3-4年に1回の割合となるが、物理的条件だけからみると干ばつ年の確率は平均6-7年に1回ということになり、当年度の条件だけによる予測は、粗飼料需給の安定性という面で著しく不適切な評価を与えることになる。

4)深層浸透水量DPの平均値は期間当たり400mm以上、レンジは752-233mmで、その変動係数は40%と著しく大きく、灌水によって増加する傾向にある。

以上のように、シミュレーションによる方法の利点は、モデルパラメータを変化させることによって様々な条件に対応するPP2を迅速に予測し、代替案を相互に比較しながら評価できること、短期の実験データから長期の値を数値的に予測できることなどにある。

(2)土壌の物理化学的特性に依存するPP3の推定

表-2の結果のうち、灌水(-)区についてDMpのPsg/Bfv比を計算すると0.86-0.97となり、土壌の含水量が小さいことによる減収効果は、干ばつ年(1980年)には15%程度、平常年でも3-5%に達すると予想される。灌水によってその差は小さくなるが、Psgでは、一回灌水量が小さく、間断日数は短くなり、灌水のコスト、労力が大きくなる。また、計画どおり灌水してもDPが増加することは避けられず、それが集中する箇所では、排水不良や栄養塩の溶脱による悪影響が懸念される。これらのマイナス要因はPsgの下層土が緻密な柱状の構造をなし、重力水および低吸引圧有効水孔隙が少ない(石渡ら1993)ことによるものであり、その条件を取り除くことがPsg改良の要点である。以上のように、植物のPPに

直接影響する土壌の物理的特性を、ここでは「物理的肥沃度」と呼んでおく。

物理的肥沃度は広い意味では土壌構造の特性によって定義されるべきであろうが、当面、1)根張りの可能性および根群域の容積、2)根群域土層の酸素供給能、3)孔隙分布、4)石れきの含有率と分布などによって数値化できるものと考えておく。化学的コントロールが容易になった現在では、物理的肥沃度の管理はPP3の減少を回避する上で極めて重要である。とくに、根張りを制約する物理性は作物の養分吸収に関わるNLP(Nutrient Limited Production)と密接な関係にある。これを含めてPP3を予測するモデルは、FAO、USAID-SMSSなどによって開発されつつある。基本的には、PP1、PP2が実現される過程を計算機シミュレーションによって再現し、それらが土壌条件によって、何時、どれだけ抑制されるかを推定することになる。この段階では、人間による調節が頻繁に行われるので、対話型のモデルが要求され、それを運用するためのデータベース、とくに土壌の物理性と根の発育および生物生産の動的な関係を示す良質な較正曲線が必要になる。

4. 新しい土地評価のために一結びにかえて一

農耕地土壌の物理性改良や保全は、PP3を増大させるとともに、地域環境の保全にも寄与している。しかし、PP3を増加させるための改良・保全などの費用は、普通、農業セクタの負担とされ、それがもたらす環境保全上の効用は必ずしも正当に評価されていない。それだけでなく、近年では、施肥や農地からの排水が栄養塩の排出を促進するとの指摘が多くなされ、デメリットだけが強調されることが多い。これでは農業セクタにおける環境保全のインセンティブを喚起することは不可能である。メリット・デメリットの両面を考慮した公正な評価を確立するには、土壌-植物系の動的特性をよりよく記述できるモデルが必要であり、そのためには、エネルギー、水、空気、土壌中における動態を的確に把握し、それとPPの関係を定量化することが不可欠である。これからの土地評価において、土壌物理の研究がますます重要になることを確信する所以である。

引用文献

Brundtland, G. H.(ed.), Our Common Future, The World Commis. on Environ. & Develop.(1987)

FAO, A Framework for Land Evaluation, FAO Soils Bull. 32, 1-72, FAO, Rome(1976)

FAO, Report on the Agro-ecological Zone Project, 1, Method-ology and Results for Africa, World Soil Res. Rep. 48, 19-90, FAO, Rome(1978)

北海道開発局網走開発建設部, 畑地かんがい(牧草)調査報告書,177-207, 網走開発建設部, 網走(1984)

石渡輝夫, 小林信也, 斉藤万之助, 佐久間敏雄, 北海道の農耕地土壌の孔隙分布特性とその分布図, 土肥誌64, 685-689(1993)

Jensen, E. M., Programing Irrigation for Greater Efficiency, in Optimizing the Soil Physical Environment toward Greater Crop Yield, Hillel, D (ed.), 133-162, Academic Press, New York(1972)

川上理香, 耕地根圏域土壌における水分の動態, 北海道大学大学院農学研究科修士論文, 1-162(1981)

佐久間敏雄, 草地の土壌-植物系におけるエネルギーと物質の循環, 八戸芳夫編著, 北海道における集約的家畜生産技術の確立に関する基礎研究, 181-242, 北海道大学農学部, 札幌(1982)

Sharma, M.L., Estimating Evapotranspiration, in Advances in Irrigation 3, D. Hillel(ed.), 213-282, Academic Press, New York & Tokyo(1985)

塩谷未知, 田中 明, 蒸散係数の作物種間差, 土肥誌, 48, 402-405(1977)

田中 明, 山口淳一, 桑原真人, 蒸散係数による水稲の乾物生産におけるエネルギー効率の試算, 土肥誌, 41, 59-62(1970)

Tanaka, A., Potential Yield of Upland Cropping Systems and Approaches to Its Expression, Proc. Int. Conf. Man. Fert. Upland Soils Trop. & Subtrop., 11-22, Nanjing(1986)

(受稿年月日 1993年12月23日)