

畑作物の生活と「物理的肥沃度」

水 落 勁 美*

Crop Plant Life and "Physical Fertility" of Soils on Upland Fields

Tsuyomi MIZUOCHI

Laboratory of Plant Nutrition, Hokkaido National Agricultural Experiment Station

「麦を作れば麦になりきれ、米を作れば米になりきれ」と栗山町の篤農家、勝部さんは百姓の塔に刻んでいる。これは作物生産のための土壌物理学を志す人にたいしても当てはまる警句であろう。

土地の作物生産力は肥料の少なかった時代には土壌中の可給態養分量に支配されることが多かった。そして、土壌肥沃度は例えば Foth and Ellis⁴⁾ によると "the status of a soil with respect to its ability to supply elements essential for plant growth without a toxic concentration of any element" と定義され、「可給態養分」の量とバランスによって評価されてきた。しかし、土壌型、気象、作物種や栽培管理法などが変わると、化学分析による「可給態養分」の量は実際に作物が吸収する養分量と弱い相関しか示さなくなることが多い。これは土壌からの養分吸収において重要な役割を演じる物理的要因と生物的要因にたいする考慮が欠けていることに起因する。そこで、植物の養分獲得に関係する物理的条件の好適度を仮に「物理的肥沃度」と呼ぶことにする。

「物理的肥沃度」は一定の物理学単位で表現することの困難な複合概念であり、少なくとも①マスフローや拡散のような養水分移動に関する側面、②土壌生物に異質・多様なマイクロ環境を提供し、土壌の物質代謝に影響する側面および、③根系の発達や生理機能など作物体の養分吸収能力に作用する側面を含んでいる。これらの側面を解析し、総合して、各植物にとって居心地のよい空間とはどのようなものかを定量的に表現し、改良可能な制限要因を抽出することが「物理的肥沃度論者」の使命であろう。この領域は多分に学際的であるので、作物栄養と施肥を担当している者の立場から、土壌物理研究者に取り組んで頂きたいと考えているいくつかの問題について述べる。

1. 作物と環境の相互作用

高収技術のカギは作物の遺伝要因 (G) と環境要因 (E) の総合的最適組合せを実現することにある。「物理的肥沃度」は E の重要な構成部分であるが、他要因との連携も忘れてはならない：

$$P = Y \cdot Q = \int (G \cdot E) dt$$

$$= \int (G_b \cdot G_a \cdot E_b \cdot E_{a1} \cdot E_{a2} \cdot E_{a3} \cdots) dt$$

P は作物の土地生産性、Y は収量、Q は品質、 G_b は制御困難な遺伝要因、 G_a は制御可能な遺伝要因、 E_b は制御困難な環境要因、 E_{a1} , E_{a2} , E_{a3} ... は制御可能な個々の環境要因例えば養分、水分、土壌硬度など。

ここで重要なのは、作物生産は G と E とが複雑に相互作用し合う耕地生態系の中で、生育反応の連鎖として時間をかけて行なわれることであり、一つの要因が変化すれば最適組合せの内容も変化することである。たとえば、北海道の良質品種「チホクコムギ」は東北地方では低品質群に分類される⁵⁾。また、多収性品種を選抜するのに、現在の中稈穂数型品種に適合した標準肥培管理をしていたのでは、優れた形質を見逃してしまう。短強稈極穂重型コムギ系統「月寒1号」の生産能力を十分に発揮させるためには、現行の基肥重点 N 施肥法からこれまではタブーとされていた後期重点 N 施肥法へ転換することが必要であった (図-1)¹⁴⁾。

低レベル・単純系の現象の組合せだけから高レベル・複合系の現象を予測することはできないし、短時間反応から長時間反応を推定することはきわめて危険である。たとえば、数日間にわたる乾物生産の温度反応は、短時間の光合成と呼吸の測定値から予想される温度反応とは全く異なっていた¹⁰⁾。したがって、野外の生産現場に適用する農業科学を着実に発展させるためには、トップダウンとボトムアップの両方向の研究を一層連携させながら進めることが望まれる。

*北海道農業試験場 〒004 札幌市豊平区羊ヶ丘1番地
土壌の物理性 第61号 p.3~10 (1990)

2. 温度ストレスの緩和

作物の養分吸収速度はかなり大きな日変化を示すが、その主因は根温の変化である¹¹⁾。気温の変化が養分吸収に反映するには時間を要するが、根温の影響は即時に現われる。根の吸収ポンプの温度感受性は作物種により大

きく異なる。限度を超えた不適温に曝されると、作物根は元の活性を取り戻すことができなくなり、ストレスが蓄積されていく(図-2)¹¹⁾。ストレス強度・持続時間効果の解析と表現法の研究が重要である。

低地温ストレスの緩和は養分の利用効率を著しく高める。それは地温が、上記のような単位根量当りの活性の

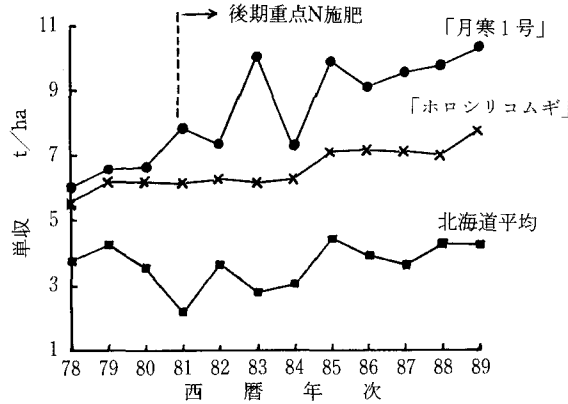


図-1 コムギの北海道農試多収記録と全道農家平均単収の推移

Figure 1. Mean yield of wheat in Hokkaido and the annual highest yields of two wheat genotypes at the Hitsujiogaoka field of National Agricultural Experiment Station.

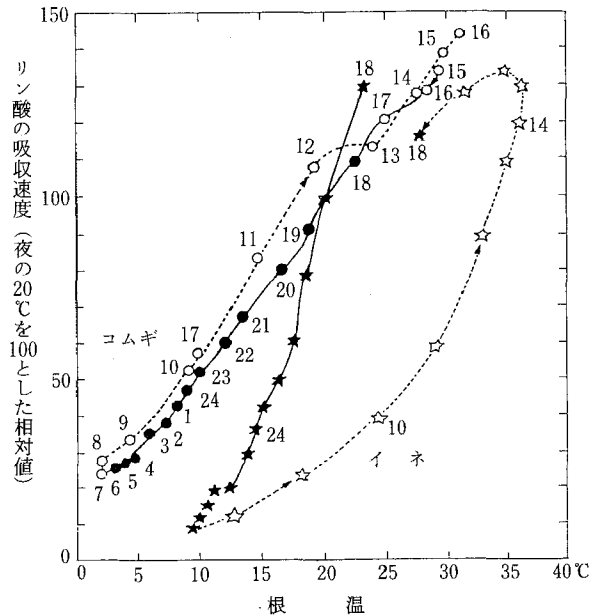


図-2 リン酸吸収速度と根温の関係

数字は時刻、黒印は夜間、白印は日中、低温に弱いイネでは夜の冷え込みがきびしいと、昼の温度が上がってもすぐには元の活性を取り戻せない。水落 1973¹¹⁾

Figure 2. Effects of root temperature on the rates of phoshate absorption by young plants of rice and wheat.

面だけでなく、根の伸長や新根の発生速度などの面でも大きな影響を及ぼすからである。個体の生長を伴う長時間の養分吸収過程においては、これらの相乗効果が顕著に現われるのである。

地温はコムギのような寒さに強い作物の場合にも重要である。分けつ期における根の伸長速度は地温に比例し、10℃では1日当たり約1.8 cmであったが、25℃では4.5 cmに増加した(図-3)。わが国の観測例では、コムギ根の伸長速度は2 cm/日以下の場合が多いが、その主因は播種後の地温の低さにあると考えられる。秋冬期におけるコムギの根の深さや総根長は播種後の積算気温²⁾あるいは積算地温²⁴⁾と高い相関を示す。寒地でコムギの多収を行なうためには、暖地よりもかなり地温の高い時期に播種し、根雪前に十分に根系を発達させ、同化産物を貯蓄しておくことが必要である。しかし、北海道では播種適期の9月上中旬に雨が多く、排水不良のために農作業のできない圃場がかなり見受けられる。また、翌春の再生長を早め、追肥の吸収率を高めるためには、融雪剤の散布と排水の促進により地温を上げることが望ましい。

アズキ、インゲンマメ、ダイズ、トウモロコシなどの冷害の現れかたは地形と土壌および圃場の管理法によってかなり異なるが、主要因の一つは地温の差にあると考えられる。冷害が湿害によって増幅されることはよく知られているが、本来の湿害が発生するほどの水分条件でなくても、多湿土壌では低温の影響を強く受ける。

岡島と石渡¹⁷⁾はダイズの初期生育にたいする地温の

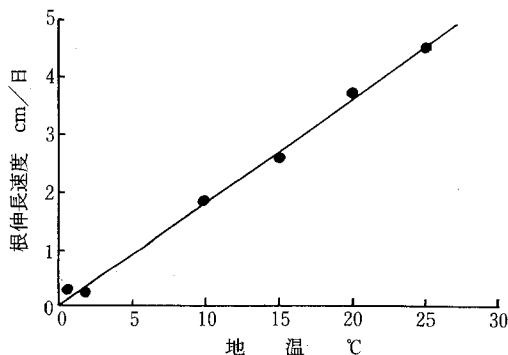


図-3 コムギ種子根の伸長にたいする地温の効果
「月寒1号」、リゾトロン実験(湿性黒色火山性土, Andic Humaquepts,の表土. Clay loam)
Figure 3. Effect of soil temperature on the elongation rate of the seminal root in winter wheat.

効果が土壌のリン酸肥沃度によって大きく相違することを示した。Bray1法による可給態リン含量が2mgP/100g以下の場合には、生育はきわめて悪く、地温の効果も小さい。可給態リン含量が4~13mg/100gに高まり生育がある程度改善されると、ダイズは地温の変化に敏感に反応するようになる。さらに17~31mgP/100gにまで高まると、ダイズの生育は軽度の地温低下によっては抑制されなくなる。この実験でみられた軽度の地温低下によるリン酸吸収と生育の阻害は主として土壌要因にたいする温度効果、すなわち固相からのリン酸放出速度や拡散速度の低下によってもたらされたものと岡島らは推論している。しかし、作物側からみれば、根温の低下が新根の発達と根活性を阻害し、その結果、吸収速度を維持するのに必要な根面のリン酸濃度が上昇したと考えることも可能である。

多窒素状態の作物は一般に低温障害を受け易いが、低温解除後の生育は旺盛で、回復が速い。そのため、開花期間の長いマメ類では、低温障害を免れた花の着実率が窒素多肥によって高められる²⁰⁾。イネの場合とは違って、畑作物の冷害では溶脱などによる窒素不足も被害を助長する要因であり、窒素追肥が減収防止対策として有効であったという事例が報告されている¹⁹⁾。

わが国のコムギの単収はヨーロッパ先進地域に比較すると、50~60%の水準を低迷しているが、この低収要因の一つはコムギの穂が高温ストレスに弱いこと、穂の活動期間が非常に制限されることにある^{14,22)}。SPACモデルによれば、水供給の改善によってどの程度の穂温低下が期待できるのだろうか。

いずれにしても、温度の効果は多面的であるので、土壌・作物両面からの解析が必要である。土壌構造、水熱状態、養分動態を含めた地象特性の解析と土壌物理的手段による温度ストレス緩和技術の開発を期待したい。

3. 水と養分の一体的管理

高生産性畑作の展開にともない、水と養分の需要が大幅に増加する(表-1)。北海道のコムギ作では近い将来において生育後半の水不足が問題になろう。水と養分の間には相互作用があり、畑作物の栽培では特に水とN供給の最適組合せが重要である(図-4)¹²⁾。バレイショのように乾燥年ほど豊作になるといわれている作物²³⁾においても、毎年短期間ではあるが一時的な水ストレスが発生しており、これが大きな収量制限要因となっている。多くの栽培試験の成績から、バレイショの収量限界は40t/ha程度であろうと結論されたこともある

表-1 コムギの多収化にともなう養水分需要の増加 (試算)
 Table 1 Increase in the nutrient and water requirements of wheat crop
 with yield improvement in the future. (Tentative estimation)

収量水準 t/ha	吸 収 量 kg/ha							mm
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	S ₂ O ₂	H ₂ O※
平均 3.3	89	32	87	29	12	29	608	219
多収 10.0	250	97	270	47	31	84	1360	534

注：※北海道における融雪後の要水量，これに対応する降水量は277mm（網走）～327mm（帯広）。
 なお，多収コムギでは吸収養分の生産効率が約30%改善されると仮定した。

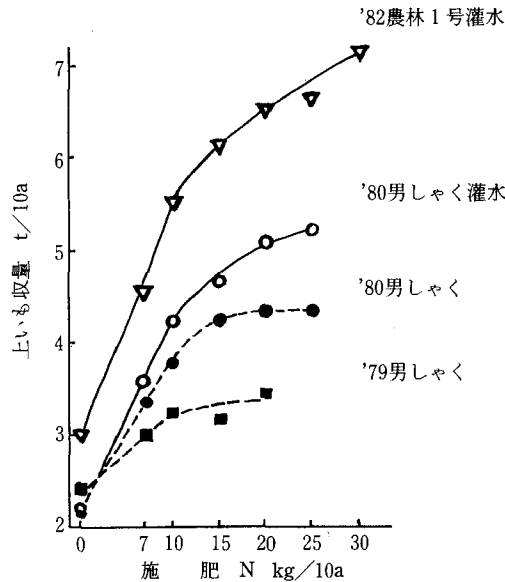


図-4 バレイショの収量にたいする窒素と水の相乗効果
 (下層台地湿性黒色火山性土，表層clay loam，下層clay，Andic Humaquepts)
 Figure 4. The synergistic effect of nitrogen and water on the yield of potato tubers.

が⁸⁾，当時は水と養分がそれぞれ独立に取り扱われ，最適組合せを追求するという視点が弱かった。Nの利用効率を高めるためには水の適切な管理が必要であり，水利用効率を高めるためにはN施肥の適正化が必要である。

水分過剰の場合にはNの流失と脱窒があり，晴天が続くと無機Nの大部分が乾燥した極表層に集積する。その結果，N多施条件下でも作物根の活動域ではN不足が発生することがある^{18,19)}。土壌水分の低下は，溶質の拡散速度を激減させるので，作物根にたいする水分供

給の面だけでなく，PKその他の養分供給の面でも阻害要因となる^{3,7)}。

低収段階の畑地改良では過剰水の排除に重点が置かれていたが，これからは貯水機能を高めて，できるだけ過剰水が発生しない高性能圃場を造成する技術の開発が望まれる。これは施肥効率の改善と環境保全にもつながる課題である。土壌構造の周年的変動と層位別水Nフラックスの予測も重要である。

4. 地下部生活空間の拡大と構造の改善

コムギ根は下層土の条件がよい場合には2 m以上の深さにまで伸びることが確かめられた。灌漑のないところで高収をあげるためには、下層土の理化学性の改良をさらに進める必要がある。作物根は土粒子を押し退けながら生長するので、土壌孔隙の大きさだけでなく、孔隙

の壁の肌ざわりにも敏感である。たとえば、コムギ根は団粒間孔隙を順調に伸長・通過するが、軽石砂粒間孔隙に入るとほとんど伸長できなくなる。作物根と土壤生物の生態を理解するためには、サイズ別孔隙量に加えて、孔隙壁の粘弾性や理化学特性に関する情報も必要であろう。

作土の表層部は根密度が最も高く(図-5)、根系の養水分吸収能力の最も高い部域である(図-6)⁶⁾。し

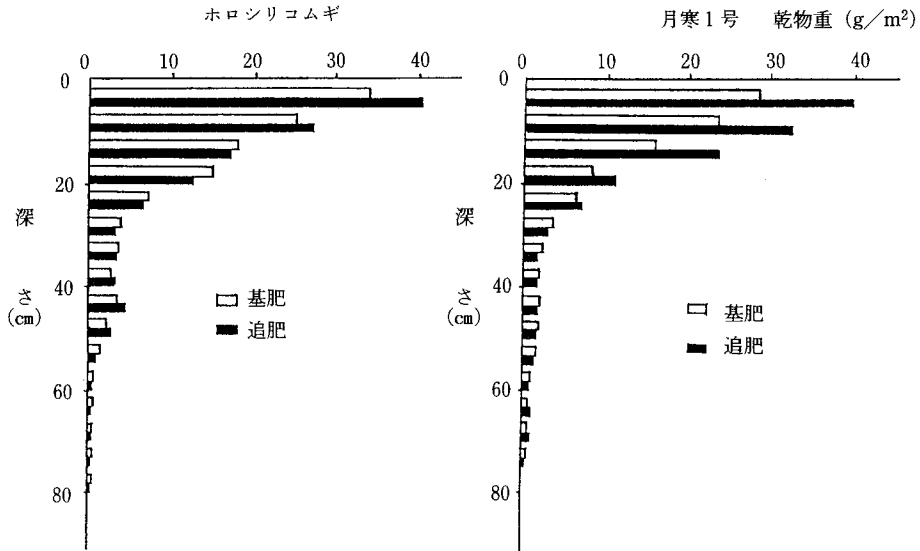


図-5 コムギ根系の土層別分布にたいする品種と窒素追肥の効果
(下層台地湿性黒色火山性土, Andic, Humaquepts) (川内, 1987)

Figure 5. Effects of genotypes and nitrogen top dressings on the vertical distribution of root mass in winter wheat at anthesis.

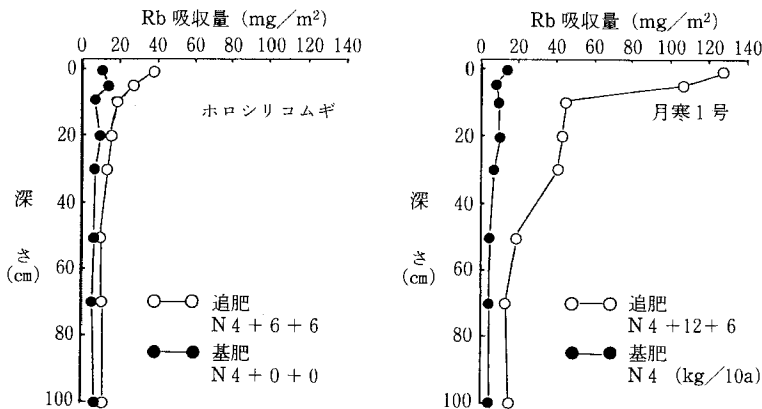


図-6 登熟期におけるコムギ根の土層別ルビジウム吸収能
(下層台地湿性黒色火山性土, Andic Humaquepts)

Figure 6. The vertical distribution within soil of the activities of rubidium absorption by winter wheat during the grain filling period.

たがって、この地域の「物理的肥沃度」の改善を特に重視すべきである。しかし現実には、大型農機の踏圧による土壌の緊密化、地面の凹凸の拡大、あるいは施肥播種精度の低下など、作土表層のストレスは人為によって増加している場合が多い。これを改善するためには、作物と土壌の特性に柔軟に適合できる農機の開発が必要であり、この部門への土壌物理学者の積極的な参画が望まれる。

5. 根圏・根内環境の好適化と輸送機作

作物にとって良い土壌とは根面環境が好適に保たれるような土壌であろう。なぜなら、作物根の原形質体 (symplasm) は非原形質的内部環境 (細胞壁とフリースペースからなる apoplasm) とそれに連なる根面環境を通してのみ土壌環境を感知することができるのであり、根とバルクの土壌との相互作用は根面と根圏の環境を介して行なわれるからである。最近までは、根面や根圏の環境を調査研究する方法が未発達であったために、根圏とそれ以外の土壌を混みにした全土壌の平均的な諸性質を指標として土壌の改良と管理がなされてきたが、ようやく根面・根圏と非根圏を連続的な系としてとらえるモデル¹⁾¹⁶⁾が提案され、根面・根圏の好適化に照準を当てた、より効果的な土壌管理技術の開発が展望されている。

これらのシングルルート・モデルは、作物の養分獲得において、根の養分吸収特性と土壌中の拡散性養分の含量だけでなく、養分の移動速度に関係する物理的諸要因がきわめて重要な役割を演じることを示している。たとえば、ダイズの生育初期におけるリン酸吸収の感度分析²¹⁾によれば、通常のP肥沃度を持つ土壌でのP吸収量は、根の吸収ポンプの性能 (単位根面積当りの最大吸収速度とPにたいする親和力) や吸水速度を高めてもあまり増加せず、根の伸長速度と太さ、土壌溶液P濃度 (P施肥)、土壌のP緩衝力、および有効拡散係数 (P緩衝力、土壌構造と水分率に依存) に大きく左右される。

このように物質移動の速度論に基づくモデルは土壌植物系の管理技術の開発にたいして多くの示唆を与えてくれる。しかし、現在のモデルはその構造が現実の系のそれに比べてあまりにも単純に過ぎるので、実測値と対比させつつ改良を重ねる必要がある。そのさい、次の2点に特に注意を払うべきではなからうか。第1は輸送機作として乱流輸送を考慮すべき場面があるのではないかとすることである。特にエネルギー交換や水の動きの激しい土壌域に根が密集する傾向 (図-5, 6) は輸送機作

と関連させながら解析すると面白いように思われる。第2は植物根が受動的固定的な存在ではなく、極めて積極的適応的な生物器官であるということである。後者の事例をいくつか挙げてみよう。

植物根によるリン酸吸収のpH曲線は単純なリン酸塩溶液においては H_2PO_4^- の存在比率とはほぼ平行し、pH 5付近に極大を示す。しかし、アンモニウムを含む完全水耕液では、至適pH範囲が著しく広がり、pH 8付近でも活発なP吸収が見られるようになる。このことはカチオン・アニオン吸収のアンバランスとプロトン放出によってapoplastと根面のpHが5付近にまで下げられたことを示唆する¹⁵⁾。アンモニウム塩の施用が根圏土壌のpHを低下させ、作物のP吸収を促進する現象はよく知られているが、植物の中には無窒素条件や硝酸塩施用下でも根圏pHを低下させることによってPその他の難溶性養分の吸収に有利な条件を作り出すものがある⁹⁾。植物根の土壌環境にたいする反応は多分に適応的かつ分業的である。1個体のなかに性格の異なる根が存在し、1本の根でも主軸と毛状の側根あるいは部域によって反応が異なる。鉄、マンガン、リンなどに欠乏すると、植物根は酸や溶解作用を持つ有機物の分泌活動を著しく強める。このような場合、ルーピンなどではプロテオイド根 (変形した特殊な側根) を発生させ、そこから特異的に酸と溶解物質を分泌する。培地のPレベルが低いほど、プロテオイド根の発生頻度が高くなる⁹⁾。土壌溶液P濃度の極端に低い火山灰土などにおいても、植物のP欠乏が意外に軽いのは、ミコリザとの共生のほか、このような植物側から土壌への積極的な働きかけがあるからであろう。

植物根の活発な栄養活動は養分の枯渇やアンバランス、酸素濃度の低下、排出物の蓄積など、根面環境の悪化をもたらす方向にも作用する。したがって、根面を終始好適に保つことは難しく、これまで正常と考えられてきた条件においても、根圏には何らかのストレス要因が集積している可能性がある。「正常な作物」の根圏に存在するストレス要因の解明はほとんど未着手の状態にある。そこで、流動水耕法により根圏環境を常に好適な状態に保ったところ、コムギ「農林61号」は通常の土耕や水耕の場合とは著しく異なる旺盛な生育を示し、通常の形質範囲をはるかに超える「お化けコムギ」となった (表-2)。この事実は、作物が遺伝的に持っている生産能力には未発現の部分がかなり残されていること、そしてその能力を引き出し、収量限界を向上させるためには、根圏ストレスの緩和による根機能の増進が必要であることを示している。

表-2 土耕および流動水耕コムギの個体当たり収量と関連形質 (農林61号, 1974-75年)
Table 2 The yield per plant and some related properties in the soil-grown and the flowing-solution-grown wheats. (Cultivar Norin 61, grown from 1974 to 1975)

栽培条件	穂重g	穂/わら	1穂重g	粒重g	千粒重g	
土耕	13.5	1.27	2.51	10.3	39.3	
群落水耕	外縁部	148.5	1.24	3.03	124.5	51.0
	中央部	96.5	1.18	3.27	80.5	50.3
孤立水耕	無処理	517.0	1.47	3.21	418.0	44.3
	茎制限	28.9	1.57	9.64	23.6	54.3

注: 茎制限処理では分けつを除去し, 1個体当たりの茎数を3本にした。

6. おわりに

以上のように, わが国の畑作物は物理的要因と関連した多くのストレスに悩まされており, 本来の生産能力を発揮していない。したがって, 「物理的肥沃度」の改善は高生産性畑作農業の展開にとって最も重要な条件の一つである。

圃場条件における根圏環境解析法の開発とそれによる動態把握, 根圏環境の時空パターンに影響する土壌物理的, 化学的, 微生物的, 植物的および地象的要因の評価に関する研究の進展を期待したい。

引用文献

- 1) Barber, S. A. 1984: SOIL NUTRIENT BIOAVAILABILITY. JOHN WILEY & SONS, New York.
- 2) Barraclough, P. B. and Leigh, R. A. 1984: The growth and activity of winter wheat roots in the field: the effect of sowing date and soil type on root growth of high yielding crops. *J. Agr. Sci.*, 103, 59-74
- 3) Day, W., Legg, B. J., French, B. K., Johnson, A. E., Lawlor, D. W. and Jeffers, W. De C., 1978: A drought experiment using mobile shelters: the effect of drought on barley yield, water use and nutrient uptake. *J. Agr. Sci.*, 91, 599-623
- 4) Foth, H. I. and Ellis, B. G. 1988: SOIL FERTILITY., P. 1, JOHN WILEY & SONS New York.
- 5) 後藤虎男・田野崎真吾 1983: 東北地方産小麦のめん加工適性 [2]. *農及園*, 59, 515-519
- 6) 川内郁緒 1989: コムギ根系の発達と機能. *北海道土壌肥料通信*, 91, 1-6
- 7) Kuchenbuch, R., Claassen, N. and Junk, A.: Potassium availability in relation to soil moisture. 1. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant Soil*, 95, 221-231
- 8) 串崎光男 1965: 北海道の馬鈴薯栽培について. *カリシンポジウム*, 112-134 加里研究会
- 9) Marschner, H., Romheld, V., Horst, W. J., and Martin, P. 1986: Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.*, 149, 441-456
- 10) 水落勤美 1969: 植物計による気象生産力の評価. *農業気象*, 24, 169-175
- 11) 水落勤美 1974: 養分吸収の連続自動測定法-りん酸吸収について. 昭和48年度農技研究作物栄養科研究成績概要, 31-50
- 12) 水落勤美 1984: 作物栄養診断に基づく合理的施肥管理. *総合農業研究叢書*, 2, 54-65
- 13) 水落勤美 1986: 畑作物の栄養診断. *北海道土壌肥料通信*第33回シンポジウム, 36-44
- 14) 水落勤美 1988: 北海道におけるコムギ多収技術開発の可能性. *農業技術*, 43, 337-342
- 15) 水落勤美・吉野実 1974: りん酸吸収にたいする水素イオン濃度の効果. *植物学会発表記録*, 33, 182
- 16) Nye, P. H. and Tinker, P. B. 1977: Solute movement in the soil-root system. BLACKWELL, Oxford.
- 17) 岡島秀夫・石渡輝夫 1979: 土壌温度と作物生育-とくにリン酸肥効について-その1 大豆幼植物の生育と

- 地温. 土肥誌, 50, 334-338
- 18) 岡島秀夫・今井弘樹 1976: 畑土壌の水分状態と養分の可給性. 土肥誌, 47, 563-570
- 19) 大崎玄佐雄 1983: 十勝地方における冷湿害の実態と肥培管理. 北海道土壌肥料通信第30回シンポジウム, 1-12
- 20) 斉藤正隆・大久保隆弘編著 1980: 大豆の生態と栽培技術. 農文協
- 21) Silberbush, M. and Barber, S. A. 1983: Sensitivity of simulated phosphorus uptake to parameters used by a mechanistic-mathematical model. *Plant Soil*, 74, 93-100
- 22) 下野勝昭 1986: 秋播小麦の栄養生理と窒素肥培管理法に関する研究. 道立農試報告, 57, 1-80
- 23) 塩崎尚郎 1983: 寒地畑作農業における冷湿害の克服. 北海道土壌肥料通信第30回シンポジウム, 41-50
- 24) Vincent, C. D. and Gregory, P. J. 1989: Effects of temperature on the development and growth of winter wheat roots. 1. Controlled glasshouse studies of temperature, nitrogen and irradiance. *Plant Soil*, 119, 99-110

Summary

Until recently, chemical fertility of soil had generally been the primary environmental factor limiting crop productivity of upland farming in Japan. Now, however, with abundant fertilization, "physical fertility", the degree to which the physical factors of the soil are suitable for optimum plant nutrition and root functioning, is becoming the major limiting factor along with the climatological factors. Therefore, the future development of high yield, upland farming will require a multidisciplinary, organic approach in order to assemble the best combinations among the plant's genetic factors and the environmental factors, including the physical, chemical, and biological components.

Some of the problems concerning plant nutrition and production ecology that must be solved with the participation of soil physicists are presented:

- 1) The alleviation of temperature stresses by the integrated management of soil, water, and nutrients.
- 2) The unified management of plant nutrients, of which nitrogen is the most important, and soil water for maximum economic yield and pollution control.
- 3) The expansion of the "living space" for the subterranean part of the plant — particularly in relation to protecting the most fertile, surface layer that is often disturbed by machinery.
- 4) The elimination of the rhizosphere stress through improvement of transport and metabolism within the soil.

Using a flowing solution technique, a giant wheat plant yielding more than 400 g. of grain was raised. This implies that a reduction of the rhizosphere stress below the "normal" level might be a key factor in a breakthrough in the yield limit of the current crop methods.

(*Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn.*, 61, 3-10, 1990)