

## 水環境が作物の生理・生態に及ぼす影響

平 沢 正

### Effects of Soil and Atmospheric Moisture Conditions on Ecophysiological Characteristics in Crop Plants

Tadashi HIRASAWA

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology  
3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183, Japan

#### Abstract

Summer crop plants grown in rain-fed fields often suffer from drought during a hot and relatively dry summer in Japan, even though there is much precipitation during their growing seasons compared with the semi-arid regions. Crop plants could withstand soil moisture deficiency by means of developing elongated root system under conditions where soil moisture decreases gradually. However, after they have grown under sufficient soil moisture conditions, they could not adapt under conditions of rapid moisture depletion due to shallow and poorly developed root systems and, therefore, would suffer from water deficits even when soil moisture does not deplete considerably. In many regions of Japan, summer field crop plants grow at their best during the vegetative phase in the rainy season called "Baiu" immediately before the hot and dry summer. This might be one of the reasons why they suffer from water deficits in the summer.

This assumption has been confirmed by the experiment using the soybean plants ; (1) grown under moderate deficient soil moisture before flowering and (2) grown under sufficient soil moisture. Under severe deficient soil moisture conditions during ripening stage, high dry matter production and high grain yield were attained in the former plants due to (1) a well developed root system and, therefore, high capacity to absorb soil water, (2) maintenance of a high leaf water potential and, therefore, a high photosynthetic rate during daytime and (3) a delay in leaf senescence compared with the latter.

The plants with well developed root system also attained higher dry matter production and higher grain yield under well irrigated conditions during ripening stage for the same reasons as in the experiment mentioned above. During the growing seasons of winter crop plants, a rainy season suppressing root system development also exist. Improved cultivation for developing root system, such as drainage in the rainy seasons, would be important in field summer and winter crop plants in Japan.

**Key words** : Root system, Seasonal soil moisture fluctuation, Senescence, Water stress, Water uptake

## 1. はじめに

水は作物の生育に最も大きな影響を及ぼす環境要因の一つである。土壌水分が減少した時などにおこる水ストレスは、生長や光合成などをはじめとする作物の諸過程に影響を及ぼし、これによって作物は生育が抑制されたり、収量が減少したり、著しい場合には枯死したりする。したがって、乾燥地や半乾燥地、そしてその周辺の地域など降雨量の少ないところでは、水は作物の生育や収量にとって最も重要な制限要因の一つとなる。

しかし、干ばつ害は年間降雨量の少ない地域だけでなく、年間降雨量の多い地域でも、そしてさらに作物の生育期間中に比較的多くの降雨があっても問題となる場合がある。わが国の作物を取り巻く水環境をみると、年間降雨量は地域によって異なるが、平均すると約1,750 mmで、年間を通してみれば、降雨量が蒸発量を上回り、湿潤であるといえる。このような条件にもかかわらず、わが国では干ばつ害がしばしば問題となっている (Tazaki *et al.* 1980)。作物統計 (農林水産省統計情報部編) によると、1949年から1994年の46年間に10万ヘクタール以上の作付面積が干ばつ害を受けた年は9回で、約5年に1回の割合でこのような規模の干ばつ害がおこっていることになる。このようなことから、水稲だけでなく、畑作物を対象にかんがい施設が多く設置されてきている (畑地農業研究会, 1988)。

## 2. わが国における干ばつ害の発生要因

わが国において年間降雨量が多いにもかかわらず干ばつ害がおこりやすいことに関係する要因を考えてみたい。

わが国の多くの地域において、蒸発量が降雨量に比べて多く、乾燥する夏は7月中下旬から8月下旬の約1ヶ月から1ヶ月半である (図-1)。半乾燥地などに比較すれば乾燥する期間ははるかに短い。したがって、これらの地域に比べて土壌に水が多く残っているにもかかわらず、わが国の畑作物は水不足の害を受けていることになる。

干ばつ害の発生要因を考える際には、土壌水分の減少だけでなく、作物の生育と土壌水分の減少との関係に着目する必要がある。生育の初期から降雨が少なく、土壌水分が減少していくような条件に作物が生育する場合には、土壌水分がかなり減少しても作物が枯死することはほとんどない。生育期間の降雨量が最大蒸発散量の約1/3しかないアメリカ合衆国西部の半乾燥地ではトウモロコシの子実収量は灌水量が増すと直線的に増加するが、全く灌水しなくても十分に灌水した時の子実収量の20

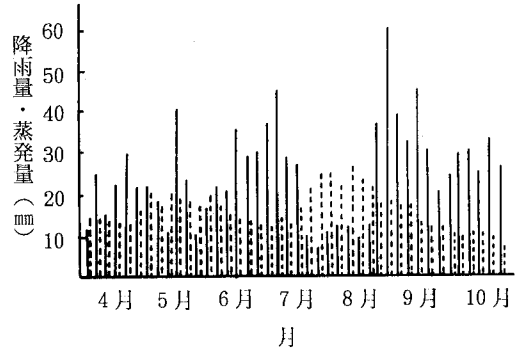


図-1 東京における4月から10月の半月別の降雨量 (実線) と蒸発量 (点線) (Hirasawa *et al.* 1994)

1967年から1976年の10年間の平均値 (気象庁観測表より作成)。

Fig. 1 Precipitation (solid lines) and evaporation (dotted lines) of every 5 days from April to October in Tokyo. Average of 10 years from 1967 to 1976.

~30%程度の収量をあげ得る (Dalsted *et al.* 1987)。半乾燥地に比較して蒸発散量の少ないわが国の条件では、生育初期より降雨を遮断し、灌水を完全に停止しても、土性が壤土の圃場に生育するダイズは灌水したダイズの60~70%もの収量をあげる (飛田ら, 1994)。さらに驚くことに、有効土壌水分の著しく少ない砂土で生育初期より灌水を停止し降雨が遮断された状態でダイズを生育させると、稔実期には表層から少なくとも70 cmの深さの土壌水分張力は永久萎凋点を越えたが、枯死することなく結実に至った (平沢・稲田, 1991)。これは、生育に伴って土壌水分が徐々に減少していくのに対応して、根系が土壌の深くまでよく発達し、茎葉部は吸水量にみあった大きさに形成されるためであると考えられる。

一方、わが国の夏の畑作物を取り巻く水環境は、このような条件とはかなり様相を異にしている。初夏に播種された作物は栄養生長の盛んな時期が梅雨期に当たる (図-1)。降雨量が蒸発量に比べてはるかに多く、空気湿度の高い湿潤な梅雨期には、作物は茎葉は大きく繁茂するが、根系の発達が劣り、根は浅く土壌表層に多く分布することになる。このような作物が梅雨明け直後の高温で、降雨量に比べてはるかに蒸発量が多く、空気湿度が低く、乾燥する条件に遭遇すると (図-1)、茎葉は大きく繁茂しているので、蒸散量は著しく多く、短期間に土壌水分を多く消費することとなる。しかし、根系は浅いので、もっぱら土壌の表層にある水分を吸収し、土壌の深いところの水分は多く残っていても容易には利用できな

い。その結果、土壌の表層の水分が減少しただけで水ストレスを受けることになると考えられる。

高橋 (1976) は千葉県農業試験場で栽培されるラッカセイの収量の年間変動を梅雨期と夏の降雨量に着目して整理し、夏の降雨量が少なくても、梅雨期の降雨量が少ない年は多い年に比較して、収量は3~5割も高くなっていることを明らかにした。このことは、乾燥した夏でも、梅雨期に雨量の少ない年は干ばつ害を受けにくいことを示している。

このように、生育初期から徐々に土壌水分が減少する条件では、作物はこれに応じて茎葉の繁茂が抑制されるとともに、根系を発達させる (Kramer 1983) ことによって水分の多く残っている土壌の深層部から吸水し、土壌水分の減少に耐えることができる。しかし、作物が湿潤条件で生長し葉面積が大きくなった後で急に乾燥条件におかれ土壌水分が減少する時には、根系の分布が浅く、根系の発達が土壌水分の急激な減少に追いつかなくなる。その結果、土壌の深層部に水が多く残っていても、土壌表層の水分が減少することによって大きな水ストレスを受けることになる。これがわが国で干ばつ害がおこる大きな要因であると考えられる。

### 3. 開花前の土壌水分条件の相違が稔実期の乾燥条件における作物の生育と生理、生態的性質に及ぼす影響

以上の推察を検討するためダイズ (品種はエンレイ) を用いて著者らは数年間にわたって以下のような実験を行ってきた (Hirasawa *et al.* 1994)。すなわち、出芽後開花期までダイズを適宜灌水した湿潤土壌 (湿潤区) と灌水せず、低土壌水分条件 (乾燥区のダイズ) とに生育させた。両区とも降雨はその都度サクランボ実割れ防止用の大型テントで圃場を覆い、雨水が圃場に入らないようにした。開花期に両区とも十分に灌水した後、以後の稔実期間中を両区とも降雨を遮断し、灌水を停止して低土壌水分条件に生育させ (図-2)、乾物生産とこれに関わる生理、生態的性質を比較した。

#### (1) 開花前の低土壌水分条件における生育

開花期以前を低土壌水分条件に生育した乾燥区のダイズは、深さ 30 cm の土壌の水ポテンシャルが最低でも -0.1 MPa にも達しなかったが、主茎長、総葉面積、地上部乾物重は、いずれも湿潤土壌に生育した湿潤区のダイズの約 80~85% と小さく、地上部の生長は大きく抑制された。しかし、根の分布密度は図-4 に示すように、乾燥区のダイズは土壌の表層から下層まで湿潤区に比べて高く、乾燥区のダイズの根長密度あるいは根長の湿潤区に対する割合は、表層よりも深さ 20 cm~100 cm で大きく

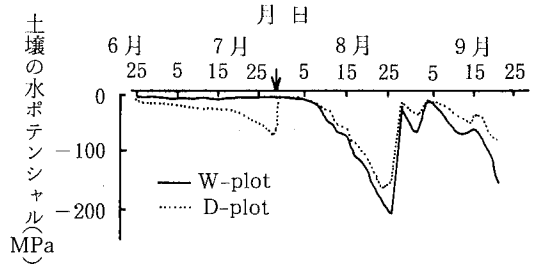


図-2 湿潤区 (実線) と乾燥区 (点線) における深さ 30 cm の土壌の水ポテンシャルの推移 (Hirasawa *et al.* 1994)

図中の矢印は開花開始日を示す。8月28日と9月3日に土壌の水ポテンシャルが高くなったのは、それぞれ台風と雷雨によって圃場に雨がいったため。

Fig. 2 Changes in soil water potential at the depth of 30 cm from the soil surface. Arrow indicates the date when flowering started. Solid line represent the plot where soybean plants were grown under sufficient soil moisture (W-plot) before flowering and dotted line, the plot where the plants were grown under moderate deficient soil moisture (D-plot). Soil moisture increase on August 28 and September 3 was due to rain, which accompanied a typhoon and a thunderstorm.

なっており、根系が土壌の下層までよく発達していた。なお、実験に使用した圃場は地下水位が低く、水はけも良好であった。したがって、開花期でも湿潤区のダイズには土壌の過湿による影響は全く認められず、湿潤区のダイズは葉色は乾燥区とほとんど変わらずに緑色で、葉の生理活性を示す光合成速度は下位葉でも湿潤区のダイズがとくに小さいことはなかった (図-6)。

#### (2) 稔実期の乾燥条件における乾物生産と収量

乾燥区のダイズの個体群生長速度 (CGR) は、湿潤区に比べて、開花前は上述のように葉面積が少ないことによって小さく、その後8月17日までの開花期から稔実初期では純同化率 (NAR) は高いが平均葉面積指数 (LAI) がまだ小さいことによってやや小さかった。しかし、乾燥区のダイズは、土壌水分がかなり減少した8月17日から9月7日の稔実初期から中期には、湿潤区に比べて葉面積の減少が小さく、その結果平均葉面積指数に両区ではほとんど差がなくなったことと、NARが高くなることによって CGR がかなり高く (図-3)、乾燥区のダイズは湿潤区のダイズに比べて、土壌水分が減少しても

乾物生産がかなり大きくなった。その結果、さや重は稔実後期には乾燥区が湿潤区に比較して大きくなり、全さや数には大きな違いはなかったが、着粒数が異なり、乾燥区は湿潤区に比べて個体当り精粒数が増えることによって、子実重は約16%高くなった(表-1)。

### (3) 稔実期の乾燥条件における生理、生態的性質

開花期に十分灌水し以後の灌水を停止した直後における土壌の深さ別の水分の減少は、土壌の表層では早く、急激におこり、深くなるほど緩やかであった。両区の減少を比較すると、根が土壌の下層まで密に分布している乾燥区では湿潤区に比較して、土壌表層の水分の減少速度は小さいが、50 cm 以下の下層での土壌水分の減少が大きかった(平沢ら, 1988)。開花期には乾燥区のダイズの葉面積は湿潤区に比べてまだまだ小さいことを考えると、このことは、乾燥区のダイズは土壌の表層における水分も多く吸収するが、それだけでなく湿潤区に比べて土壌の深い部分から多くの水分を吸収することを示している。開花期から稔実中期にかけての比較的長期間の土壌水分減少量を比較すると、乾燥区は湿潤区に比較して深さ40 cm~80 cmの土壌層の水分が減少することによって総減少量は湿潤区よりも多くなった(表-2)。すなわち、湿潤区のダイズは消費する水分の多くを土壌の表

層から吸収していたのに対して、乾燥区のダイズは土壌の表層とともに比較的深い土壌からも水を吸収し、その結果、積算葉面積が湿潤区よりも小さいにもかかわらず(図-3)、総吸水量が多くなったことになる。

根群が土壌の深くまでよく発達し土壌水分を多く吸収した乾燥区のダイズは、湿潤区に比較して、8月の開花期から稔実初期にかけて晴天日の日中でも葉の木部の水ポテンシャルを高く維持でき(図-5)、その結果、日中に水ストレスによって葉の光合成速度が低下する程度も乾燥区のダイズは湿潤区に比較して小さくなった。

稔実後期には、湿潤区のダイズでも土壌の深い部分で根が増え、根の密度は土壌表層では乾燥区がまだ高かったが、深層部では両区に相違がなくなった(図-4)。その結果と考えられるが、土壌水分減少量には両区に違いがなく(表-2)、日中の葉の水ポテンシャル(図-5)、光合成速度の日中低下の程度にも違いが認められなくなった。

以上の土壌水分吸収量、水ストレスの程度の相違に加えて、注目すべきことは乾燥区のダイズは湿潤区に比較して稔実期の葉の老化が遅かったことである。図-6に示すように、光合成速度は葉が展開を完了した直後が最も高く、葉の展開完了後の日数に伴って低下する。した

表-1 湿潤区(W)と乾燥区(D)のダイズの収量と収量構成要素(Hirasawa et al., 1994)

Table 1 Yield and yield components in the plants of the W- and the D-plots

区	全さや数 (個体当り)	精粒数 (個体当り)	百粒重* (g)	精粒重* (個体当り) A (g)	部分刈収量 (Mg ha <sup>-1</sup> )	茎重 (個体当り) B (g)	A/B (g g <sup>-1</sup> )
W	35.6a**	58.4a	26.3a	15.4a	3.07a	6.6a	2.3a
D	39.0a	67.0b	27.3a	18.3b	3.55b	7.7a	2.4a

\*含水率15%。 \*\*異なるアルファベット間には5%水準で有意差がある。

表-2 7月31日から9月11日まで( A )および9月11日から9月26日まで( B )の湿潤区(W-plot)と乾燥区(D-plot)における深さ別土壌水分の減少量(Hirasawa et al., 1994)

Table 2 Depletion of soil moisture at various soil depth during July 31 to September 11 (A) and during September 11 to September 26 (B)

土壌の深さ (cm)	圃場容水量 (g cm <sup>-3</sup> )	圃場容水量 (mm)	土壌水分減少量(mm)			
			A		B	
			W-plot	D-plot	W-plot	D-plot
0-20	51.9	103.5	42.5	44.5	12.5	19.5
20-40	53.3	107.0	29.0	30.0	15.5	21.0
40-60	58.0	116.0	48.0	56.0	10.5	11.5
60-80	54.9	109.5	35.5	52.5	13.0	2.0
80-100	55.6	111.0	25.0	21.0	0.5	5.5
Total	—	547.0	180.0	204.0	52.0	55.5

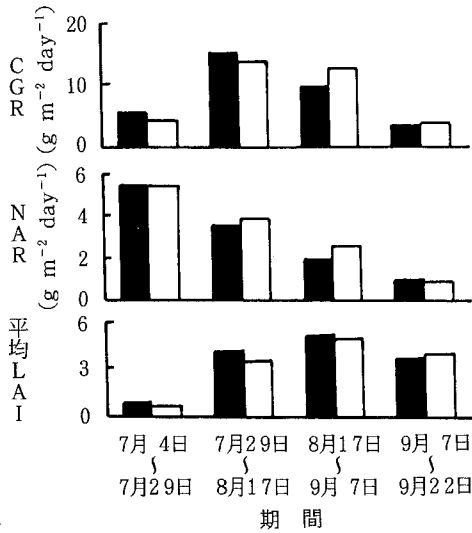


図-3 湿潤区 (■) と乾燥区 (□) のダイズの個体群生長速度 (CGR), 純同化率 (NAR), 平均葉面積指数 (平均 LAI) の推移 (Hirasawa *et al.* 1994)

Fig. 3 Changes in crop growth rate (CGR), net assimilation rate (NAR) and mean leaf area index (LAI) in soybean plants of the W-(solid bars) and of the D-(open bars) plots.

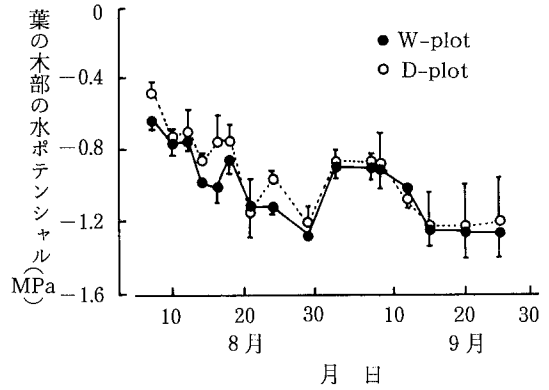


図-5 湿潤区 (W-plot) と乾燥区 (D-plot) のダイズにおける灌水停止後の日中の葉の木部の水ポテンシャルの推移 (Hirasawa *et al.* 1994)  
縦棒線は標準偏差 (測定数は 3) を示す。

Fig. 5 Changes in leaf xylem water potential during daytime after withholding water from soybean plants of the W- and D-plots. Vertical bars represent standard deviations of three replications.

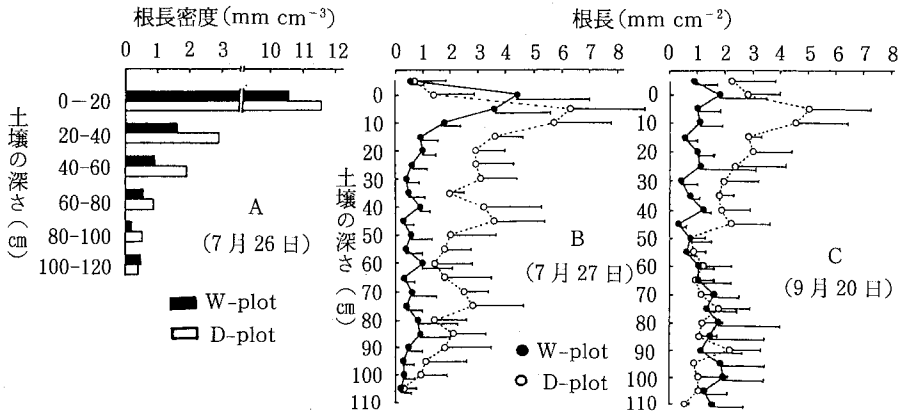


図-4 湿潤区 (W-plot) と乾燥区 (D-plot) のダイズにおける土壌の深さ別の根長密度と根長の比較 (Hirasawa *et al.* 1994)  
A: コアサンプリング法で測定した根長密度. B, C: ミニリゾトロン法で測定した根長. 横棒線は標準偏差 (測定数は 5) を示す。

Fig. 4 Comparisons of vertical root distribution between soybean plants of the W- and D-plots  
A: Root length density measured by the core sampling method. B, C: Root length measured with the minirhizotron root observation tube system. Horizontal bars represent standard deviations of five replications.

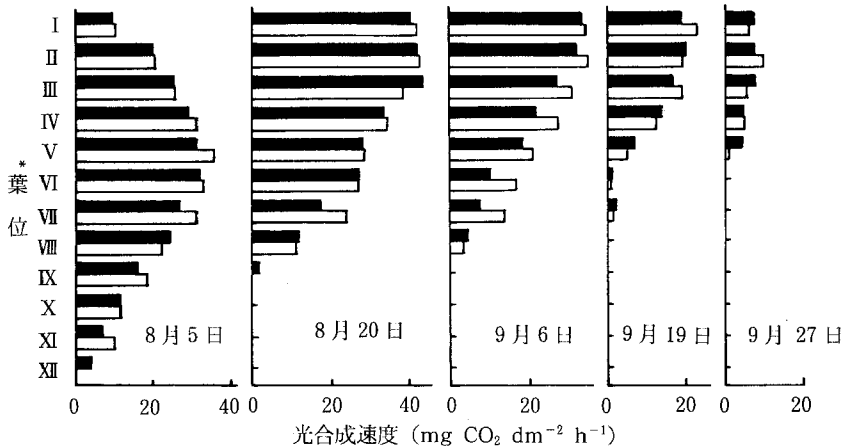


図-6 湿潤区 (■) と乾燥区 (□) のダイズにおける午前の葉位別の光合成速度 (Hirasawa *et al.* 1994) 光強度が  $1,600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上の人工光下で着葉のまま測定した。\* 最上位葉を I 葉とした。

Fig. 6 Photosynthetic rate of leaves at different positions on a stem in the morning under sufficient artificial light of above  $1,600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Solid and open bars represent soybean plants of the W- and D-plots, respectively. \*I, II, ..., XII indicate the position of the leaf counted from the uppermost leaf on a stem.

がって、葉の展開がすべて完了する稔実期には、光合成速度は下位の葉ほど小さくなる。しかし、小さくなる程度は稔実中期には生育条件によって明らかに異なり、根群のよく発達している乾燥区のダイズは湿潤区に比較して下位の葉の光合成速度が高く、葉の老化に伴う光合成速度の低下程度が小さかった。

以上の検討をまとめると、開花期以前を低土壌水分条件に生育した乾燥区のダイズは、湿潤土壌に生育した湿潤区のダイズに比較して、根系が土壌の深くまでよく発達していた。その結果、乾燥区のダイズは湿潤区に比較して、(1)開花期以後低土壌水分条件に生育しても、土壌の深い部分から水を多く吸収した結果、総吸水量が多くなり、葉内水分を高く維持し、水ストレスによる光合成速度の低下が小さいこと；さらに、(2)根系のよく発達している乾燥区のダイズは葉の老化に伴う光合成速度の低下が小さいこと；によって、NAR が高くなり、稔実期の乾物生産量が多く、その結果子実収量が高くなった。

#### 4. 根系の発達と水ストレス

土壌水分が減少する時、圃場では根系の発達が水ストレスの発生に大きな影響を及ぼす。土壌水分が減少していく過程では、根系が土壌深くに分布したり、土壌水分の減少よりもはやく根を水分の多く残っている土壌の深いところに伸ばすことが水ストレスの軽減にとって重要である (Angus *et al.* 1983, Cassel 1983)。また、土壌水分の減少に伴って水の移動速度は著しく低下するので、

根の分布密度を高くすることも重要となる (Newman 1969)。湿潤条件で生育が進み葉面積がかなり大きくなった後に乾燥条件におかれると、土壌水分の消費速度が大きく、根系が浅いことと、根系の発達が土壌水分の減少に追いつかないことによって水ストレスを受けることになる。前項で示した結果はこのような推定を確かめるものであり、梅雨の湿潤条件はわが国の夏作物の干ばつ害を助長しているといえる。

水ストレスは土壌水分が減少する時だけおこるとは限らない。直射光を受け盛んに蒸散する晴天日の日中などには、葉の中の水分量の 4~5 倍の水が 1 時間に葉から失われている。葉内水分を高く維持し、水ストレスがおこらないようにするためには、蒸散によって失われた水は直ちに吸水によって補われなければならない。しかし、このような条件では、土壌水分が十分であっても吸水が蒸散に追いつかず、その結果、水ストレスによって光合成速度が低下することが、近年いろいろな作物で明らかとなり (たとえば、Huck *et al.* 1983, 石原・斎藤 1987)、高い吸水能力をもつ作物ほどこのような光合成速度の日中低下程度が小さいことも明らかとなった (平沢ら 1988, Hirasawa *et al.* 1992)。開花期まで湿潤土壌に生育した湿潤区のダイズは、低水分土壌に生育した乾燥区のダイズに比較して、根系の発達が劣り、根の吸水能力が劣るので、開花期以後を湿潤土壌に生育させても水ストレスによる光合成速度の日中低下の程度が大きく、乾物生産や収量も低くなる (平沢ら 1988)。このこと

から、水ストレスの発生に関しては、土壌水分の多少に関係なく、どのような水分条件でも根系がよく発達するなどして水を多く吸収できる根を作物が持つことが重要であるといえる。わが国の夏の畑作物の栽培においては根系の発達が抑制される梅雨期に排水などを通じて可能な限り根系を発達させておくことが、後の比較的乾燥する夏の作物の生育にとって重要と考える。

## 5. 根と地上部の関係

根は吸水機能だけでなく、地上部の支持、養分の吸収、物質の合成、同化産物の貯蔵などいろいろな機能を持ち、これらを介して地上部と密接な関係を持っていると考えられている。たとえば、葉が老化しにくく長期間葉が高い光合成速度を維持することは、作物が高い乾物生産や収量をあげるための重要な性質であるが、これには根が関係していることを示唆する多くの現象が認められている。土壌改良によって水稻が秋まりの生育を示すことはよく知られているが（本谷 1966）、畑作物でも培土し不定根の発生を促進することによって稔実期の生育が旺盛になる（加藤ら 1959）ことがダイズで認められている。根系がよく発達したり、根の生理的活性の高い作物では葉の老化に伴う光合成速度の低下が抑制されることも見い出され（蔣ら 1988、平沢ら 1988）、このことは根の機能と地上部の老化速度との間に密接な関係があることを強く示唆している。しかし、根のどのような性質、機能が地上部の老化と関係しているかについてはまだ十分明らかではない。水ストレスによって葉の老化が促進されるので（Nooden 1988）、このような根と茎葉の老化との間に認められる関係には根の吸水機能が関与している可能性も考えられる。これだけでなく、老化に関係すると考えられているサイトカイニンやアブジシン酸は根でも合成されるので、このような植物ホルモンを介して両者が関係をもっている可能性がある。実際、根がよく発達し、生理的活性の高い水稻では地上部に送られるサイトカイニンが多いことが示されている（Soejima *et al.* 1992）。

コムギなどの冬作物の生育期間においても、わが国の多くの地域では出穂前の約1ヶ月間の3月中旬から4月上旬にかけて菜種梅雨と呼ばれる雨の多い時期があり、その後は6月の梅雨前まで比較的雨が少なく、また、空気湿度が低く、やや乾燥する条件となる。予備的に検討を行ったところ、出穂前の約1ヶ月間を半年降雨量に準じて灌水し、湿潤条件に生育させたコムギと比較して、その期間灌水を停止し、低土壌水分条件に生育したコムギは、根系がよく発達し、葉の老化が遅く、乾物生産や収量も高かった（平沢ら 1993, 1994）。土壌水分条件、根

の機能、地上部の諸過程との関係については、さらに詳しい検討が必要であるが、この事実はコムギのような冬作物においても生育期間の水環境が問題であることと土壌排水の重要性を示している。

根の生育する土壌環境は地上部の環境条件と異なり、圃場でも人為的にかなり改良できる。作物生産にとって望ましい根の機能を十分発揮させるための水環境をはじめとする土壌の環境を整備していく必要がある。そのためには、地上部の諸過程との関係に着目しつつ、根の持ついろいろな機能を量的に把握し、そしてさらに土壌環境が根長などの根の量的性質、単位根量当りの活性などの根の質的性質にどのような影響を及ぼすかを明らかにしていくことが必要であると考えられる。

## 引用文献

- Angus, J.F., S.Hasegawa, T.C. Hsiao, S.P. Liboon and H.Z. Zandstra (1983) The water balance of post-monsoonal dryland crops. *J. Agric.Sci.*, **101**: 699~710.
- Cassel, D.K. (1983) Effects of soil characteristics and tillage practices on water storage and its availability to plant roots. In Raper, Jr., C.D. and P.J. Kramer, eds., *Crop Reaction to Water and Temperature Stresses in Humid, Temperate Climates*. Westview Press, Colorado. 167~186.
- Dalsted, N.L., P.H. Gutierrez, D.S.R. Sharp and K.L. Holman (1987) Selected 1986 crop enterprise budgets for Colorado. Colorado State Univ. 1~102.
- 畑地農業研究会編集 (1988) 日本の畑地基盤—その現状と動向—。畑地農業振興会, 東京. 1~493.
- 飛田有支・平沢 正・石原 邦 (1994) 低土壌水分条件における地上部と地下部の生育のサイズ品種間差—エンレイとタチナガハの比較—。日作紀, **63** (別2): 119~120.
- 平沢 正・中原正一・石原 邦 (1988) 異なる土壌水分条件に生育したサイズの生育および生理・生態的性質の比較。日作紀, **57** (別2): 155~156.
- 平沢 正・稲山勝美 (1991) 低土壌水分条件における作物の集水能力の品種間差と種間差に関する研究。平成3年度共同研究発表会講演要旨・資料集, 鳥取大乾地研. 3~4.
- Hirasawa, T., M. Tsuchida and K. Ishihara (1992) Relationship between resistance to water transport and exudation rate and the effect of the resistance on the midday depression of stomatal aper-

- ture in rice plants. *Jpn. J. Crop Sci.*, **61** : 145~152.
- 平沢 正・笹倉茂美・石原 邦 (1993) 土壌水分条件がコムギの生育, 乾物生産, 収量に及ぼす影響. *日本作物学会関東支部会報*, **8** : 37~38.
- Hirasawa, T., K. Tanaka, D. Miyamoto, M. Takei and K. Ishihara (1994) Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling. *Jpn. J. Crop Sci.* **63** : 721~730.
- 平沢 正・中村恵美子・石原 邦 (1994) 土壌水分がコムギの乾物生産, 収量に及ぼす影響—出穂前1ヶ月の土壌水分条件を変えた場合—. *日本作物学会関東支部会報*, **9** : 21~22.
- 本谷耕一 (1966) 稲作多収の基礎条件. 農文協, 東京. 1~190.
- Huck, M.G., K. Ishihara, C.M. Peterson and T. Ushijima (1983) Soybean adaptation to water stress at selected stages of growth. *Plant Physiol.*, **73** : 422~427.
- 石原 邦・斉藤邦行 (1987) 湛水状態の水田に生育する水稻の個葉光合成速度の日変化に影響する要因について. *日作紀*, **56** : 8~17.
- 蔣 才忠・平沢 正・石原 邦 (1988) 水稻多収性品種の生理生態的特徴について—アケノホシと日本晴の比較—. 第2報 個葉光合成速度の相違とその要因. *日作紀*, **57** : 139~145.
- 加藤一郎・川原政夫・内藤文男・谷口利策 (1959) 大豆の培土に関する研究. 第IV報 培土の高さ及び時期に関する試験成績. *東海近畿農試研報*, **1** : 1~15.
- Kramer, P.J. (1983) *Water relations of plants*. Academic Press, New York. 1~489.
- Newman, E.I. (1969) Resistance to water flow in soil and plant. I. Soil resistance in relation to amounts of roots : Theoretical estimates. *J. Appl. Ecol.*, **6** : 1~12.
- Nooden, L.D. (1988) The phenomena of senescence and aging. In Nooden, L.D. and A.C. Leopold, eds., *Senescence and Aging in Plants*. Academic Press, San Diego. 1~50.
- Soejima, H., T. Sugiyama and K. Ishihara (1992) Changes in cytokinin activities and mass spectrometric analysis of cytokinins in root exudates of rice plant (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiol.* **100** : 1724~1729.
- 高橋芳雄 (1976) ラッカセイの栽培と生育. 農業技術体系作物編 (ダイズ, アズキ, ラッカセイ). 農文協, 東京. 89~118.
- Tazaki, T., K. Ishihara and T. Ushijima (1980) Influence of water stress on the photosynthesis and productivity of plants in humid area. In Turner, N.C. and P.J. Kramer, eds., *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. John Wiley & Sons, New York. 309~321.

(受稿年月日 1995年1月10日)