

第36回
土壤物理研究会シンポジウム

「異常気象下の作物生育と土壤物理」

講 演 要 旨

平成6年8月30日 (火)
北海道大学農学部大講堂

土 壤 物 理 研 究 会

プログラム

- 9:30 開会挨拶
- 9:40～10:20 冷害気象と微気象調節
堀口 郁夫（北海道大学農学部）
- 10:20～11:00 ランドサットを利用したビートの冷湿害解析
安積 大治（北海道立中央農業試験場）
- 11:00～11:40 水環境が作物の生理・生態に及ぼす影響
平沢 正（東京農工大学農学部）
- 11:40～13:00 昼 食
- 13:00～13:30 総 会
- 13:30～14:10 草地をとりまく水分環境 —大きな水循環のなかで—
中辻 敏朗（北海道立天北農業試験場）
- 14:10～14:50 圃場の水分環境と土壌病害の発生
赤司 和隆（北海道立北見農業試験場）
- 14:50～15:00 休 憩
- 15:00～16:30 総合討論 司会 菊池 晃二（北海道立天北農業試験場）
伊藤 純雄（北海道農業試験場）
- 16:30 閉会挨拶
- 17:00 懇 親 会

冷害気象と微気象調節

堀 口 郁 夫 (北海道大学農学部)

1. 平成5年の冷害気象の概要

平成5年の全国の水稲の作況指数は74で、昭和20年来の冷害(推定作況指数84)であった。しかし、東北(作況指数56)、北海道(作況指数40)では、昭和20年より作況指数が低く(東北-作況指数67、北海道-作況指数44)、近年にない未曾有の冷害であった。

1993年の夏の気温を調べると、全国的に7、8月の平均気温が低く、北海道では7月16.1°C、8月17.8°Cと20°C以下であった。また、東北でも7月18.4°C、8月20.1°Cである。7、8月のうちでも、特に7月中旬~8月中旬が低温である。この7月中旬~8月中旬の平均気温が最も低い県は青森県(-4.3°C)で、次いで岩手県(-4.1°C)、宮城県(-4.0°C)、北海道(-3.6°C)の順である。

また、高層の天気図を調べると、平成5年6~8月の偏西風の流れは大きく蛇行し、しかもその軸は平年に比較して南下していた。日本付近で偏西風は北よりと南よりの流れに分流し、北よりの流れは北緯50~60度を大きく蛇行して流れることが多く、オホーック海高気圧をしばしば発達させた。

2. 微気象の改善による冷害防除

1) 地表面付近の熱収支

太陽からのエネルギーは地表面に当たって熱エネルギーに変換する。この熱エネルギーが地中伝熱量(G_0)、顕熱伝達量(L_0)、潜熱伝達量($1E_0$)になり、(1)式で表される。

$$R_n + L_0 + 1E_0 + G_0 = 0 \quad \text{----- (1)}$$

ただし、 R_n は純放射。

この変換過程において土壌の物理性が関係する。すなわち、土壌面の反射率、土壌水分、土壌の熱伝導性などである。また、水田の場合は(2)式で表される。

$$R_n + L_0 + 1E_0 + G_0 + N = W \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 W は水の蓄熱量、 N は流入水の熱量と流出水の熱量の差。

これらの熱収支項を変化させることによって冷害環境が改善できる。

(2) 熱収支項の変化による冷害環境の改善

表-1は熱収支項の変化による冷害環境の改善方法について示した。

①水の蓄熱量(W)による冷害環境の改善-水は熱容量が大きいので、低温が入ってきたときでも水温は気温より高い場合が多い。したがって、深水灌漑することによって低温に弱い幼穂が保護される。また、日中浅水、夜間深水も水の熱容量を利用した改善方法である。

②純放射量(R_n)の変化による冷害環境の改善-栽植密度や方向によって、水面や土壌面に入射する短波量や反射量を変化させて、水温や地温を調節する方法である。

③潜熱量($1E_0$)の変化による冷害環境の改善-防風施設や蒸発抑制剤によって潜熱量を減らし、顕熱量、地中伝熱量、水の蓄熱量などに使用される熱量を多くして、水温、地温や気温を調節する方法である。

④流入水の熱量による冷害環境の改善-温水池、温水路、温水田などを設けて、流入水温を高めてやる方法である。

⑤地中伝熱量(G_0)の変化による冷害環境の改善-漏水防止、排水、客土、床締めなどによって地中に蓄熱される熱量を調節することによって、地温、水温を上昇する方法である。

以上のうち、現在積極的に推奨されている方法は、深水灌漑(管理)と防風施設によ

る冷害環境の改善である。

深水灌漑（13.0～19.8cm）することによって浅水灌漑（1.2～3cm）より最低水温が1.7～3.0℃も高くなる。また、日中も深水にする場合は気温と水温の関係が問題になる。防風施設の効果はオホーク海高気圧から吹き出す東よりの風が卓越するところでは効果が大きい。防風施設による水温上昇は1m/secの減風によって、約1℃の昇温効果があると言われている。

3. 冷害対策の問題点

表-1に示した方法は日本で古くから行われている。たとえば、17世紀頃の会津歌農書に、次のように載っている。「苗代の水はもとより夜深く、昼の浅きをよしとするなり」、苗代の冷える山田のこわ水は、溜池ほりてやわらげてよし」、願わくば湿田の中に堀をあけ、底の冷水をぬきて取りたし」。もちろん、現在は古くからある冷害対策は科学的に解明され、より効果的に実施されているが、基本的手段は変化していない。この古くからある方法の実施状況を見ると、深水管理は昭和51年の調査で約50%である（表-2）。このように古くからある冷害対策でも実施されないことに問題がある。

この様に低い実施率の原因は種々考えられるが、①畦畔の高さ不足のため実施出来ない、②灌漑用水の不足のため実施できない、③1枚の水田面積が大きくて低温時に迅速に実施できない、④高齢化や労力不足のため実施できない、⑤冷害を軽減しようとする意欲が無い、⑥その他、などが考えられる。特に、最近④、⑤の原因による冷害対策の実施率の低下があるように思われる。

今後、冷害対策もこれらの実施されない原因を考慮した方法を研究しなければならない。最近、栽培管理や水管理などをコンピュータで行う全自動稲作の研究が始まったことが報じられた。北海道のような広い地域でコンピュータによる全自動稲作が全面的に採用されるとは思われぬが、高齢化や労力不足でも実施できる方法として注目される。

表-1 熱収支項の変化による冷害環境の改善

1. 蓄熱される水の容量による冷害環境の改善	◎かんがい水深の変化による水温・地温の上昇（日中浅水・夜間深水）
2. 純放射量の変化による冷害環境の改善	◎栽植方向・密度による水温・地温の上昇
3. 潜熱伝達量の変化による冷害環境の改善	◎防風施設による水温・気温の上昇 ◎蒸発抑制剤による水温・地温の上昇
4. 流入水熱量の変化による冷害環境の改善	◎温水池・温水路・温水田による水温上昇
5. 地中伝熱量の変化による冷害環境の改善	◎漏水防止・客土・排水・床締めによる水温・地温の上昇

表-2 支庁別深水灌漑実施率（昭和51年－北海道）

支庁名	深水割合
空知	49.5%
上川	62.8
石狩	32.8
後志	42.2
胆振	19.6
檜山	62.1
留萌	36.6
網走	30.0
渡島	40.1
日高	46.8
十勝	59.4
平均	49.3

1. はじめに

北海道の農耕地土壌は、1960～1975年に行われた地力保全基本調査によって、ほぼ全域の土壌分類とその理化学性があきらかとなっている。道立中央農試では、これらの情報や、その後の土壌環境基礎調査(1975～)等によって得られたデータ、さらには国土数値情報や気象データなどについて、農耕地の多面的な評価を目的として整備・統合をすすめている。

衛星リモートセンシングは広範囲を一時に観測し、面的に均一なデータが得られることや、また反復しての観測が可能なことから、作物・土壌情報の効率的な収集手法として利活用に取り組んでおり、現在までに小麦および水稻の収量推定、水田土壌腐植含量の推定、土壌の有効水分の推定などを行っている。しかしながら、衛星リモートセンシングを利用して農作物の情報を得るには、目的とする農作物がある程度大面積に栽培されており、作物の判別が可能であり、また衛星データから得られる情報が生育・収量と関連していなければならない。

ビートは本道の基幹畑作物の1つとして大面積に栽培されており、また生育期間が長いため他の作物との判別も容易である。さらに精糖各社によって詳細な地上データが取得されており、衛星リモートセンシングの利用には好適な作物の1つである。

リモートセンシングを用いたビートの解析事例は、いくつかの報告がある。斎藤ら(1982)は、近接リモートセンシングを利用して、土壌・施肥管理の異なるビートの分光反射率を測定し、近赤外・赤波長の分光反射率から根重を推定している。また小川ら(1985)は、網走地方のビートの干ばつ被害をランドサットMSSデータで解析しており、さらに岡野ら(1994)は、帯広市周辺のビート収量・糖分含量をランドサットTMデータで推定し、土壌との関連について検討を行っている。

ここでは十勝地方の基幹作物の1つであるビートについて衛星リモートセンシングを利用して冷湿害の広域的解析を試みた。

2. 1993年十勝地方のビート冷湿害の概要

1993年の十勝地方のビートは、移植後の気温が平年よりも2.5℃程度低温に経過したため初期生育が遅れた。さらに6月上旬に南部沿海地域を中心に300mm以上の多雨があったため、圃場の停滞水と過湿、及び肥料成分の流亡などによって、根域の拡大が阻害された。その後の気象経過も低温寡照に推移したために生育は回復せず、十勝地方全域で平年よりも低収となり、特に十勝南部沿海地域では著しく減収した。収穫時の市町村別平均根重は平年比で60～90%にとどまったが、根中糖分は根重が小さかったことや生育後期の日温度較差が大きかったことなどから平年よりも10%程度高くなった。

市町村別統計収量と月別平均気温・降水量との相関を求めたところ、収量は6・7月の平均気温との間に高い正の相関が認められ、また6～8月の降水量との間には高い負の相関が認められた。

3. ランドサットデータを利用したビートの収量推定

解析手法の概要について図1に示す。1993年は天候不順のため、ランドサットデータの取得回数が少なく、十勝地方全域を網羅するシーンは取得されなかった。用いた衛星データは、1993年7月8日・10月28日に観測されたランドサット5号TMセンサ(パス107-0030)データで、十勝東部の一部地域が欠落している。各々のデータについて対象地域を切り出し、UTM座標系に幾何補正を行った後に土地被覆分類を行い、7月8日に弱い植生を示し10月28日に強い植生を示した画素をビート圃場と判別した。ビート圃場に判別された領域について、農道など他の分類項目の影響を除くため境界領域の除去処理を行い、統計面積の約13%にあたる圃場をビート圃場として抽出した。

抽出された画素について、市町村別に平均分光反射値を算出し、市町村別収量との関連について検討したところ、7月8日の植生指数(近赤外と赤波長の比演算で算出)と収量との間に高い正の相関が認められた。植生指数は地上部乾物重やLAIと高い相関があることが知られており、またビートの生育初期の地上部乾物重は、収量と高い相関を示す(齊藤ら(1991))ことから、7月8日の植生指数からビートの収量推定が可能と考えられた。7月8日のランドサットデータから算出された植生指数は、それまでの気象の影響を反映しているが、さらに7月以降の気象経過を考慮して、植生指数と7月以降の気象条件を説明変数とした重回帰式を検討して、植生指数・7月平均気温を説明変数とした重回帰式を得た。

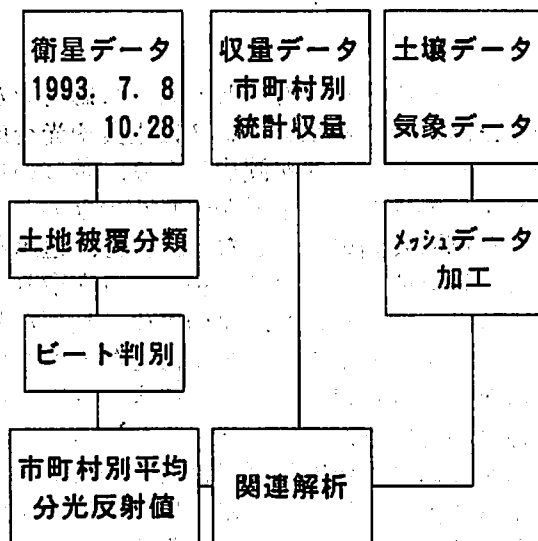


図1 解析手法の概要

4. 収量と土壌要因との関連

ビートの収量は、広域的には気温や降水量などの気象条件によって決定されるが、個々の圃場については土壌条件等によってもその生育は左右される。そこで、気象条件から推定されたマクロな収量区分図に、ランドサットデータから推定された収量区分図を重ね合わせ、各地域における両者の差を算出した。このとき、気象条件から推定された収量よりも低収な地域は、生育を抑制する要因が存在すると考えられることから、これらの地域の土壌要因を検討することによって、ビートの収量に影響を及ぼす土壌要因を明らかにすることができる。

土壌の堆積様式別に収量を比較すると、沖積土の収量が高く、洪積土・泥炭土は低収であった。気象条件から推定された収量に対しては、特に洪積土で減収幅が大きかった。沖積土を土壌群別に比較すると、気象条件から推定された収量に対して、褐色低地土では高収傾向を、グライ土では低収傾向を示し、元来湿性な土壌では、湿害の影響を受けやすかったと考えられた。また、下層土のち密度別に平均収量を比較すると、ち密度の違いによる収量差はほとんど認められなかった。しかし気象条件から推定された収量に対して、ち密度の大きな土壌では減収幅が大きい傾向にあり、下層土が堅密な土壌では排水不良のために減収傾向が大きかったことが推察された。

その他の土壌要因についても同様の検討を行った。また豊作年であった1990年のランドサットデータについて、同様の解析手順によってビート収量を推定し、収量区分図を作成して、冷害年である昨1993年の収量区分図と比較検討をおこなった。

5. おわりに

ランドサットデータは現在16日に1度観測が行われているが、観測当日が晴天でなければ地上のデータが得られない。そのため一地域について利用可能なデータは、年間に数シーンにとどまり、特に冷害年など気象条件が不良な年はデータが得られない場合が多い。しかしながら最近運用されている一部の観測衛星には、雲を透過して曇天時でも観測可能なマイクロ波センサ(SAR)が搭載されており、また将来各国で打ち上げ予定の衛星に搭載されるセンサは、より多波長・高解像度化していくことから、衛星データから得られる情報は質的・量的にもさらに増えていく。今後、定期的に安定した衛星データの供給がなされることによって、収穫時期以前の作物収量推定、生育不良地域の抽出による土地改良計画の策定、追肥判定等の生育診断への利用が期待される

水は作物の生育にもっと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に起こる水ストレスは生長や光合成など作物の諸過程に影響を及ぼし、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、乾燥地や半乾燥地など降水量が著しく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。一方、冠水などによって水が土壌に過剰に存在すると、土壌は嫌氣的状態となり、根とこれを取り囲む土壌における諸代謝が影響を受けることによって、葉のしおれ、葉の黄化、枯死などいわゆる湿害がおり、収量も影響を受ける。このようなかんばつ害や湿害などは水環境が作物の生育に及ぼす影響の顕著な例であるが、これだけでなく、土壌水分や空気湿度などの水環境は作物の生育や生理、生態に種々の影響を及ぼす。

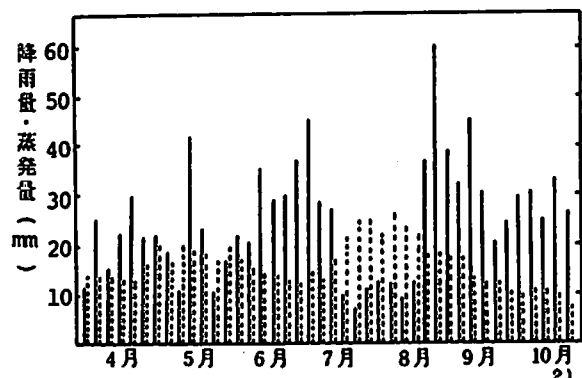
わが国の平均年間降雨量は 1,750 mm で多いが、年間の分布をみると、降雨量は季節によって大きく異なる。降水量の季節分布に着目してわが国の畑作物を取り巻く水環境を考えると、夏、冬いずれの作物の生育も水環境によって無視できない影響を受けていると考えられる。

1. 夏作物の場合 わが国の夏は乾燥地や半乾燥地に比べて乾燥する期間がはるかに短い。それにもかかわらず、夏に晴天が続くと畑作物は水不足の害を受けることがあり、かんがい施設が多く設置されている。しかし、夏に降雨が少なくても梅雨期に雨量の少ない空梅雨の年にはかえって収量が高くなること落花生で認められている⁴⁾。このようなわが国の夏の乾燥、作物のかんばつ害の実態などに基づいて考えると、わが国の夏の畑作物がかんばつによって受ける影響は水環境が湿潤から乾燥へと急激に大きく変化することによって助長されていると考えることができる。すなわち、わが国の多くの地域では初夏に播種された作物は栄養生長の盛んな時期が降雨が多く空気湿度の高い湿潤な梅雨期に当たり、莖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。このように生育した作物は梅雨明け直後の高温で空気湿度が低く乾燥する条件では、短期間の晴天で表層の土壌水分が減少しただけでも著しい水ストレスを受けることになる(第1図)。また、土壌水分が十分にあって、このような作物では根の吸水能力が劣るので、蒸散が増加する日中には水ストレスが大きくなる。

この推定を検証するため、降雨を遮断できる圃場でダイズを開花期まで湿潤土壌(湿潤区)と低水分土壌(乾燥区)に生育させた後、開花期以後両区のダイズを低土壌水分条件あるいは湿潤土壌条件に生育させ、乾物生産と収量およびこれに係る生理生態的性質を比較したところ、以下のような結果が得られた^{1, 2)}。

(1) 開花期まで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、主莖長、葉面積、地上部乾物重が小さく、地上部の生長は大きく抑制されたが、根は土壌の深くまで高い密度で分布し、根系はよく発達していた。

(2) 根系のよく発達した乾燥区のダイズは湿潤区のダイズに比較して、開花期以後の湿潤土壌条件では根は高い吸水能力と高い生理的活性を示し、また、開花期以後の低土壌水分条件では土壌の深層部から多くの水を吸収した。



第1図 東京の半旬別の降雨量(—)と蒸発量(.....)²⁾
1967年~1976年の10年間の平均値(気象庁観測日表より作成)

その結果、乾燥区のダイズは湿潤区に比較して、いずれの土壤水分条件でも晴天日における光合成速度の日中低下率が小さいことと、葉の老化に伴う光合成速度の減少程度が小さいこととによって、稔実期の乾物生産が高くなり、収量も高くなった。

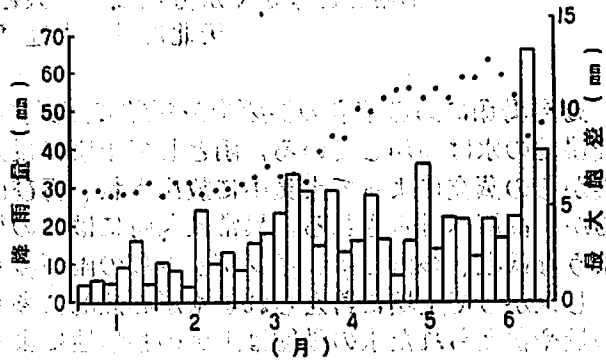
以上の結果は、わが国の多くの地域における夏の畑作物は生育前半に梅雨があることによって根系の発達や根の生理的活性が劣り、その結果生育後半の盛夏に水ストレスが助長されたり、地上部の老化がはやくなることが、収量に対して重要な制限要因の一つとなっていることを示唆している。

2. 冬作物の場合 コムギなどの冬作物の生育期間においても出穂期前後を境として大きな水環境の変化が認められる。すなわち、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(第2図)。夏作物と同様、出穂前の湿潤条件がその後の比較的乾燥する条件における生育に影響すると考え、コムギを出穂前の1ヶ月間を湿潤土壌(湿潤区)と低水分土壌(乾燥区)に生育させた³⁾。その結果、乾燥区のコムギは湿潤区に比較して、出穂期における根の分布密度は著しく高くなったが、草丈や地上部乾物重など地上部の生育の抑制は全く認められなかった。両区のコムギを出穂期以後低土壤水分条件に生育させると、根系のよく発達した乾燥区のコムギでは葉の老化に伴う光合成速度の減少が小さい結果、乾物生産が多くなり、収量も高くなる傾向が認められた。

以上の検討の過程で、コムギは土壤水分が減ると根系はよく発達するが、上述のダイズに認められたようには地上部の生長は抑制されないことがわかった。このことはコムギの生育にとっては比較的乾燥する条件の方がよいことを示唆している。そこで、出穂1ヶ月前から登熟期まで低土壤水分条件で生育させたところ、乾物生産と収量はこの期間通常の降雨条件に生育したコムギに比較して著しく高くなった。この結果はわが国の多くの地域において水環境はコムギの生育にとってはむしろ過湿的な状態にあることを示すものである。

植物の根は地上部の支持、養水分の吸収、植物ホルモンの合成など種々の機能を持つことが知られている。土壤環境はこれらの機能に種々の影響を及ぼすと考えられているが、実態はまだ明らかでないことが多い。以上の結果は、作物の根系の形成が水環境に大きく影響を受け、これが根の水分吸収をはじめとする根の諸機能を介して地上部の諸機能に影響し、その結果乾物生産や収量が大きく影響を受けることを示している。雨が多く、しかもその分布が均一でないわが国においては、とくに植物体が形成される雨の多い期間に土壤の排水などを通じて根系を発達させ、根の生理的活性を長期間にわたって高く維持させることが畑作物の生産を高めていく上で重要であると考えられる。

(引用文献) 1. 平沢 正・中原正一・石原 邦 1988. 日作紀 57 (別2): 155 - 156. 2. Hirasawa T., K. Tanaka, D. Miyamoto, M. Takei and K. Ishihara 1994. Jpn. J. Crop Sci. 63 (In press). 3. 平沢 正・笹倉茂美・石原 邦 1993. 日本作物学会関東支部会報 8: 37 - 38. 4. 高橋芳雄 1976. 農業技術体系, 作物編 6. 農文協. 89 - 118.



第2図 東京の半旬別の降雨量(□)と平均日最大気温(●)³⁾
(1984年~1993年の10年間の平均)
注) 4月21日~25日の降雨量が多いのは1985年, 1989年, 1990年に61~70mmの降雨があったため, 5月11日~15日の降雨量が多いのは1986年, 1989年, 1990年に62~100mmの降雨があったため.

乾燥体験は 1000粒重に効果なし、水ストレスには効果がなかったのじゃないか？
根数に大差なし

水ストレスと根数の関係

1. 動的関係にある複数の要因を包括的に表現する方法としてのモデルの重要性

農耕地の水は循環している。雨として土壤に侵入した水の一部は、植物による蒸散や土壤からの蒸発によって大気中に放出され、再び雨となる。残りの水は土壤中に蓄えられるか、深層へ排水される。異常気象時にはこの循環はどのようになるだろう。1993年のような低温、多雨では、インプット項の雨が多く、アウトプット項の蒸散が少なくなる。したがって土壤に蓄えられる水が必然的に多くなる。しかし、蓄えることのできる水の量や蓄えられた水の動態は土壤の物理性によって異なるため、個々の土壤に特有の水分状態が生じる。土壤の水分状態は作物の生長に対して根張りや養水分吸収といった要因をとおして影響をおよぼす。このように、大気、土壤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。

したがって、ある作物の生育を理解するためには、上記3要因の動的関係を包括的に表現する手法が必要である。そのひとつがモデル化である。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・土壤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。同時に、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。そこにおのずと営農上の対応技術がうまれるはずである。

ここでは、草地を対象として、土壤—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し、これまでの研究成果からこのモデルを動かすことができるのか、不足しているデータは何かを考えてみたい。

2. 既往モデルの概要とモデルを動かすために必要なデータ

(1) 根圏土層の水収支モデル

牧草に限らず作物根による吸水を考慮した根圏土層における水収支モデルの研究は多い (M. N. Nimahら, 1973; 佐久間, 1981; C. Belmansら, 1983; R. A. Feddesら, 1988; R. de Jongら, 1990など)。いずれのモデルも次のような一連の過程を記述している。①降雨というかたちで土壤に浸入した水はいくつかの土層に分配される→②各土層の水はダルシー則にしたがって再び各層に分配される→③根の分布や土壤水分消費型などにしたがって作物根が各土層から吸水する→④降雨があれば①に、なければ②にもどる。

モデルを動かすのに必要な主データは、1) pF-水分率曲線、不飽和透水係数-水分率曲線など、土壤中の水移動を記述するためのデータ、2) 根の吸水項となる蒸散量、およびそれを計算するための気象データ、3) 根圏土層の深さ、土壤水分消費型など、根系分布にかかわるデータ、である。

(2) 作物生産予測モデル

水収支モデルは多いが、それを作物生産量の予測にリンクさせた例は少ない。R. de Jongら (1990) は、作物の生長速度を、水利用効率を初期勾配とし最大生長速度を漸近線とする蒸散速度の双曲線として表現し、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。また、佐久間 (1981, 1994) は、牧草の要水量を 400g g^{-1} と仮定して、JONGらと同様の手順で牧草収量を試算し、実測収量と比較検討している。

どちらのモデルにおいても、吸水量と乾物生産の量的関係を表したデータ、すなわち要水量が必要である。そして、これが生産量予測精度の鍵となる。

3. 土壤—牧草—大気の動的関係を表現するために不足しているデータは何か?

(1) 根圏土層をどこまでとするか

イネ科牧草の根はその大部分が0~10cm土層に分布し、特に極表層の0~5cmに全根量の80%程度が分布するという (大崎ら, 1975)。そのため、草地の根圏土層は浅いとされ、草地土壤の化学性については主に0~10cm土層をその研究対象としてきた。しかし実際に排水の良い土壤を掘って観察すると、量は少ないが深さ60cm程度まで根が伸長している

のがみられる。また、表層が乾燥し下層が湿潤な状態の草地では、湿潤な下層に施用した窒素を比較的容易に吸収したという報告もある (E. A. Garwoodら, 1967)。このように水に着目した場合、根圏土層をどこまでとするかについてはいまだに明確でない。様々な土壌における牧草根分布の綿密な観察と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のに不可欠な不飽和透水係数

不飽和透水係数を測定しておけば、あとは土壌水分吸引圧を測ることで土壌中の水移動を計算できる。北海道内の主たる草地土壌の保水性についてはいくつかの報告 (松中ら, 1985; 三木ら, 1986; 岩間, 1988など) があり、いずれも特定のpF間の孔隙量の多少によって保水性の評価をしている。しかし、不飽和透水係数を測定して水の動きに言及した報告は少ない。これまでは、土壌を単に水のはいるバケツと考え、その大きさ (保水性) を評価することが多く、“水は移動する” という概念が薄かったと思われる。また、根圏土壌の有効水分が減少すると下層から毛管上昇によって水が移動する。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。不飽和透水係数のデータを増やすには、簡便な測定方法の開発 (岩間ら, 1981など) と測定が簡単な他の物理性データから推定する方法の再検討 (井上ら, 1982など) が必要である。

(3) 蒸散速度は大気蒸発要求と土壌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が、ある土壌水分レベル以下では土壌側の要因に制限されて減少することが知られている。この現象は一般に次式のように表現される。

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

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 (外的要因により決まる)、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。(1)式のa、bの値が大気の放射状態、接地気層の温湿度条件によって変化する (Denmeadら, 1962) ことはよく知られ、Kの表現方法を含めているいろいろな式が報告、紹介されている (佐久間, 1981; 古藤田, 1982など)。いずれもある特定の地域、作物、気象条件のもとで得た経験式である。他地域でも適用できるかどうかを検討し、ある式が適用できるときの条件を明確にする必要がある。

(4) 吸水量から乾物生産量への変換係数である要水量の整理

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。要水量は表現をかえると蒸散作用と光合成産物の比であるから、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 (農学大事典, 1977) とされる。筆者らはオーチャードグラスについて乾物生産必要水量 (蒸発散量を刈取部乾物重で除した値と定義) を生育時期別に求めたところ、時期によって変化することが認められた (中辻ら, 1992)。また、乾物生産必要水量は対象草地の立地土壌によって異なる、というデータも得ている。牧草の要水量に関するこれまでのデータは変動幅が大きい。前述したように、要水量が外的条件によって変動するのであれば、その条件と要水量の相互関係を草種ごとに整理することが必要である。

4. おわりに

土壌-牧草-大気系の動的関係をとらえて表現できれば、異常気象時の対策は考案でき、恐いものはないと思う。しかし、そうなるためには、3要因が互いに接する場におけるデータが不足している。すなわち、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“透水係数”の測定、③牧草が大気に接する場での“蒸散”の変動要因の解明、④蒸散を乾物生産に結び付けるための“要水量”の整理、の4つである。これらは、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が1枚の草地に集まって、連携しながら研究をすすめてゆくような体制が必要ではないだろうか。

FA7P22
12/20日
12/20日
林野部/2

土壌中には、作物の根の組織や地上部を侵す寄生性の糸状菌および細菌が生息している。これらを病原とする土壌伝染性病害(土壌病害)は、主に根部の腐敗、地上部の立枯れなどの生育障害をもたらす。一般に、土壌病害の発生程度は、気象および土壌条件に左右される。中でも、降雨後などの多湿土壌条件下で多発する土壌病害は、湿害の主な原因となっている。現在、このような土壌病害の病原として、*Pythium*、*Aphanomyces* および *Phytophthora* 属菌などの一群の鞭毛菌類が生産現場において問題視されている。とりわけ、連作ないし短期輪作が浸透し、専作化が進んでいる野菜作において、これらを病原とする土壌病害の被害は大きい。分類学上、*Pythium* と *Phytophthora* 属菌はツユカビ目に、*Aphanomyces* 属菌はミズカビ目に各々属しており、土壌水分はこれらの鞭毛菌類の生理生態と密接な関係にある。

今回、これらの鞭毛菌類による土壌病害の発生と水分環境との関係並びに生態的防除法について紹介する。なお、多湿土壌条件下でこれらの鞭毛菌類による土壌病害の被害が著しいハウレンソウについて言及する。

1. 多湿土壌条件下で多発するハウレンソウの土壌病害

一般に、土壌病害は連作圃場において多発する。同一圃場における年間の作付回数が多いハウレンソウでは、土壌病害の被害は大きく、廃耕に追い込まれることも少なくない。現在、全国の産地でその被害が問題となっている鞭毛菌類によるハウレンソウの土壌病害は次の通りである。① *Aphanomyces cochlioides* による根腐病 ② *Pythium* spp. による立枯病、③ *Phytophthora* sp. による根腐れ症状。これらの土壌病害は、圃場の水管理が出来ない露地圃場で多発しており、とりわけ、*A. cochlioides* による根腐病の被害は大きい。1984年から1987年にかけて札幌市近郊のハウレンソウ畑において行われた土壌病害の実態調査でも、次のような *Pythium* spp. と *A. cochlioides* による病害が降雨後などの多湿土壌条件下で多発することが明らかにされている。

1) *Pythium* spp. による葉柄腐敗症状

葉柄の地際に近い部位から水浸状の褐変が現れ、しばしば葉部にまで及ぶ。罹病部位は地表面に接している葉柄とその先の葉に限られており、症状が株全体に及ぶことはない。根の異常および生育抑制はほとんど認められない。症状から海草の「わかめ」が連想されるらしく、現地では「わかめ」と呼ばれている。降雨後の露地栽培で多発する。

2) *A. cochlioides* による根腐病

子葉期の罹病個体では地上部が立枯れ症状を呈し、胚軸部は水浸状に褐変する。生育中期以降の罹病個体では地上部が萎ちよう黄化する。根部は全体的に根腐れ褐変して細くなっている。しばしば、地際から主根が切れるために、現地では罹病株は「鎌いらず」と呼ばれている。露地栽培では降雨後、ビニールハウス内における雨よけ栽培では雨水が浸入し易い最も端の畦で多発を見る。

これらの発生事例からもわかるように鞭毛菌類による土壌病害は多湿土壌条件下で多発する。これは、病原菌の感染形態と密接に関係している。すなわち、直接の感染源である遊走子(鞭毛を有する)が多湿条件下で生理的に多く放出され、また物理的に宿主へ移動し易いことに起因する。そのため、鞭毛菌類による病害は、水媒伝染性病害とも言われている。

2. ハウレンソウ根腐病の発生と土壌環境

現地実態調査および接種試験の結果から、根腐病は土壌の無機成分、とりわけ硝酸態

窒素の欠乏条件下で多発し、硝酸態窒素の施用により土壌溶液中の硝酸態窒素濃度が約200ppm以上になると発生が顕著に低下することが判明した。硝酸態窒素の発生抑制効果を *in vitro* で検討した結果、発生抑制の原因として次のことが明らかにされた。① *A. cochlioides* の遊走子生成は、硝酸態窒素の高濃度域で著しく阻害される。②硝酸態窒素濃度が300ppm以上の高濃度域では運動性を有する2次遊走子の被のう化(鞭毛が消失し、運動性を失う)や死滅が起こり、感染ポテンシャルは著しく低下する。③さらに、こうした2次遊走子の運動性の低下は、硝酸塩の浸透圧の影響ではなく、硝酸塩のもつ毒性によることが推察された。

また、硝酸態窒素による2次遊走子の被のう化および死滅といった感染ポテンシャルの低下は、豆類の根腐病を引き起こす *A. euteiches* や各種作物の立枯病を引き起こす *P. aphanidermatum* などの鞭毛菌類でも同様に観察された。

一般に、土壌の無機成分含量は水を介して土壌の物理性の影響を受ける。すなわち、無機成分とりわけ硝酸態窒素は、砂質土壌の圃場では溶脱により減少し、重粘質土壌や透水性の悪い下層土を有する圃場では滞水により希釈され易い。したがって、根腐病発生に対して抑制効果の高い硝酸態窒素が減少、希釈され易いこれらの土壌を有する圃場では根腐病の多発が予想される。そこで、これらの土壌に特有な水分挙動を想定した水分管理を行い、根腐病の発生を観察した。その結果、砂質土壌を想定した溶脱処理区および重粘質土壌を想定した湛水処理区では根腐病が多発し、適灌水区の発病株率30%に比べて高く、それぞれ90、100%であった。これらのことから、硝酸態窒素が減少、希釈され易い土壌を有する圃場では根腐病が多発することが示唆された。さらに、道内主要産地における実態調査でも、砂質土を主体とする札幌市の有明地区における発生圃場数は多く、調査圃場30筆の56.7%を占めていた。

3. 水の動きからみた鞭毛菌類による土壌病害の発生機構

前述した知見から、根腐病発生の引金は、降雨や灌水によってもたらされる水にあると結論される。そこで、水を媒体として発生に関与する諸要因を有機的に関連づけると、圃場におけるハウレンソウの根腐病をはじめとした遊走子で感染する鞭毛菌類を病原とする土壌病害の発生機構を次のようにとりまとめることが出来る。

水は生理的に遊走子の生成を促進し、物理的に遊走子の宿主への移動に対して好条件をもたらす。同時に、溶脱や希釈に伴う土壌の無機成分濃度の低下、とりわけ硝酸態窒素濃度の低下を招くため、遊走子の生成阻害、被のう化および死滅が起こらなくなり、感染ポテンシャルが高く維持される。これらの結果、病害が発生する。とりわけ、土壌の無機成分や硝酸態窒素が溶脱し易い砂質土壌の圃場、および滞水により希釈され易い重粘質土壌あるいは透水性の悪い下層土を有する圃場では多発する。

4. ハウレンソウの鞭毛菌類による土壌病害の生態的防除

根腐病の発生軽減を目的とした窒素施肥法が開発されているが、根腐病が多発する砂質土壌の圃場および水はけの悪い圃場では土壌の物理性改善を主体とした抜本的な対策が必要であると考えられる。太陽熱による土壌消毒および前作収穫時における根部搬出も発生軽減に対して有効である。

土壌病害の病原菌とその拮抗菌は土壌中に生息していることから、病原菌の感染ポテンシャルに対して土壌環境は少なからず影響を及ぼしていると考えられる。したがって、土壌環境の面から土壌病害の発生生態を明らかにすることは、薬剤を使用しない新たな防除法開発にとって思わぬ近道となるかもしれない。この種の研究は土壌肥科学と植物病理学の両山脈の谷間にあたる学際研究であるため、遅れていることは否めないが、今後の発展次第では意外と面白い分野だと思われる。