

ランドサットTMデータを用いた畑土壌生産力要因の 高精度・細密評価法の開発とそれに基づく土壌管理法に関する研究

畠中 哲哉*

目 次

- I. 緒 言
 - 1. 研究の背景
 - 2. 研究の目的
 - 3. 本論文の構成
- II. 研究対象地域と畑作物の生産性に関わる土壌要因
 - 1. 研究の対象地域
 - 2. 畑作物の生産性に関わる土壌要因
- III. 畑土壌の腐植含量の評価法
 - 1. 畑土壌の腐植含量の評価法
 - 2. 考 察
 - 3. まとめ
- IV. 畑土壌の水分特性の評価法
 - 1. 土壌水分張力および土壌水分率の評価法
 - 2. 土壌の乾燥速度の評価法
 - 3. 土壌の保水力（有効水分容量）の評価法
 - 4. 考 察
 - 5. まとめ
- V. 畑土壌の礫深度の評価法
 - 1. 畑土壌の礫深度の評価法
 - 2. 考 察
 - 3. まとめ
- VI. 新しい評価データを用いた農業情報システムの開発とその利用
 - 1. 土壌特性区分図の作成
 - 2. 農業情報システムの開発とその内容
 - 3. 土壌特性区分図の利用
 - 4. まとめ
- VII. 総合論議
 - 1. 総合論議
 - 2. 結 論
- 謝 辞
- 引用文献
- Summary

I. 緒 言

1. 研究の背景

わが国では戦後、農耕地を対象に各種の土壌調査事業が実施された。これまでに、耕地の約8割について基本的土壌分類と生産力阻害要因による土地分級が行われ、5万分の1土壌図約1千枚が作成されている。これらの土壌図は、原則として25haに1点の試坑と若干の試穿を実施して作成されたもので、中縮尺の基本土壌図である。しかし、わが国の地形および土壌母材は複雑であるために、そこに生成し分布する土壌は世界でもまれな特異性と多様性を有している。その上、農家の経営規模は地域にもよるが一般に零細で、農業は高度に集約化されているので、営農のためには厳密な土壌条件の把握が要求される。したがって、これまでの5万分の1の土壌調査結果をそのまま農家の営農指導に役立てようとしても十分な精度を有しているとはいえない。また、化石エネルギー資源は有限であるとの認識に基づき、省資源型農業への移行を目指した農業技術の見直しが迫られている。さらに、環境への関心が高まり、過剰施肥に由来する環境負荷の低減も求められている。そこで、利用目的の変化や新たな要望に対応し、各種の土壌管理対策を樹立するためには、これまでより精度の高い実用土壌図（1万分の1ないし2.5万分の1）を作る必要がある（農林水産技術会議事務局，1987）。

不規則な土壌分布の把握を行うには、電磁波の地表からの反射スペクトル強度の差を面的に捉えることのできるリモートセンシング技術が有効である（日本リモートセンシング研究会，1977）。加えて、パーソナルコンピュータの普及はリモートセンシングデー

タの画像解析を身近にした。したがって、リモートセンシング技術は農業情報収集のための有力な手法であり、なかでも土壌の実態をより正確に把握できることが注目されている。リモートセンシング技術を実用化した農業技術の一例としてプレシジョン・ファーミング (Precision farming, 精密農法) あるいはプレシジョン・アグリカルチャー (Precision Agriculture, 精密農業) がアメリカやヨーロッパを中心とした外国で試みられている。この概念・発想は農業生産において資材の投入量を減らすことを目的とした LISA (Low Input Sustainable Agriculture), すなわち低投入持続型農業から発展してきた農法である。プレシジョン・ファーミング (第1図) は、人工衛星を活用した測位技術を導入して圃場の土壌、水分、肥沃度、収穫量等の地図を作成し、この地図情報に基づいて肥料等の資材を適正に投入するシステムである (Auernhammer ら, 1991)。この結果、除草剤を含む農薬、肥料等の過剰施用をなくし、環境への負荷を軽減しつつ持続的な農業生産を行おうとするものである。プレシジョン・ファーミングは一筆の圃場内で収量むらの大きい土地での作物生産に適した農法であり、環境保全型農業、持続型農

業の展開・発展が叫ばれる今日、これらを具体化したわが国独自の技術開発が切望されている。以下、本研究に関連する項目について、従来の研究をレビューする。

1) 土壌調査・分類について

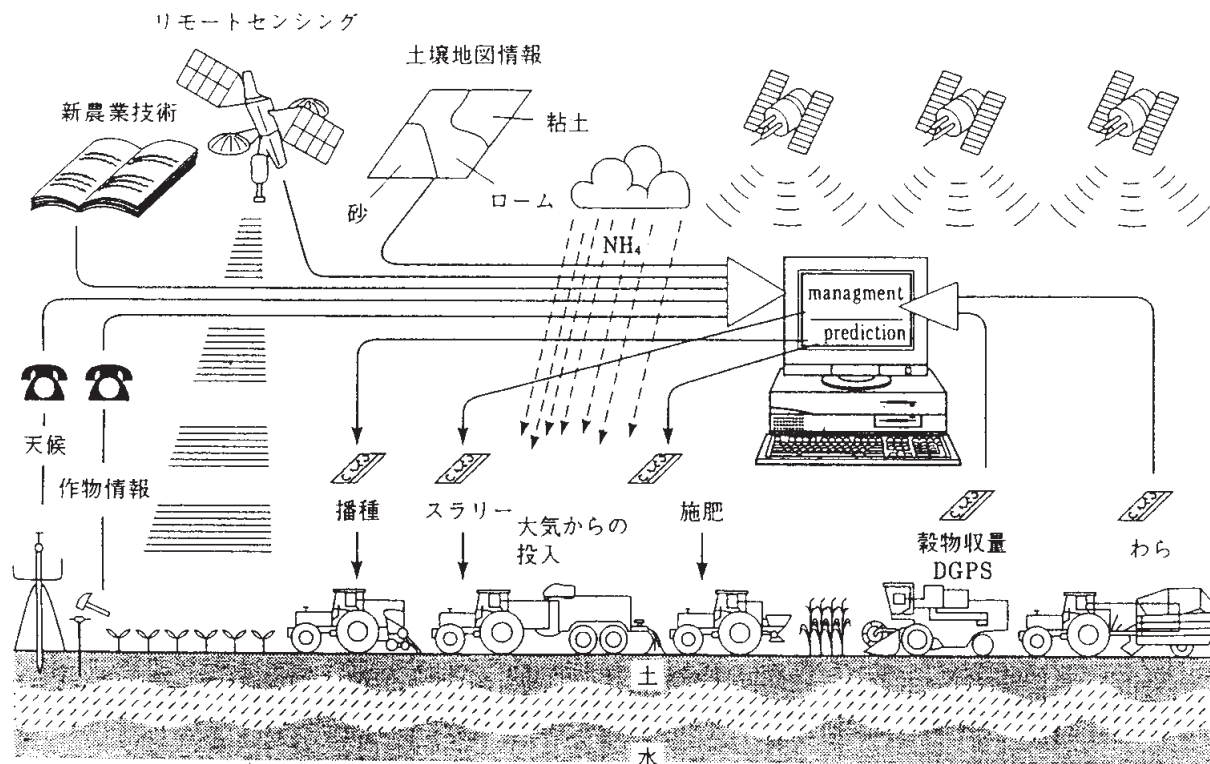
土壌分類に関する考え方や分類方式には各国の特徴がある (浜崎, 1997)。

ロシアでは、生成環境を重視した土壌の成因的基本分類が提唱され、旧ソビエト時代に土壌型を基本的分類単位とした土壌分類体系が確立した。

西ヨーロッパ諸国の土壌分類体系は、土壌断面の発達段階と地下水の高低を重視した土壌分類の影響を受けており、生成過程とそれによって生じた特徴を重視している。

アメリカでは1949年に旧土壌分類が完成し、1994年に「第6次改訂版」が発表された。アメリカの「新土壌分類体系」の特徴は、「特徴層位」や土壌水分状況等の「識別特徴」を設け、それらの有無によって順次分類していく検索表方式を採ったこと、ラテン語やギリシャ語などを語源とする新しい命名法を採用したことにある。

FAO/Unesco は1961年から1981年までに500万分



第1図 コムギにおけるプレシジョン農法 (H. Auernhammer 1991)

1の1世界土壌図を初めて作成した。本土壌分類は、アメリカの新土壌分類体系と同様に特徴層位や識別特徴を定義し、それに基づいて検索表方式で土壌を同定していく方式を採っている。

わが国では、全国のほとんどすべての耕地について実施された地力保全基本調査（昭和34年～53年）により土壌の基本的性格、土壌生産力障害要因とその強度、地力保全対策が明らかにされた。本調査では、土壌の基本的性格を明らかにするため土壌統方式による土壌分類が行われた。生産力に明らかな差異が認められる場合には、土壌統はさらに土壌区に区分された。細分された各土壌区を対象として、一定の分級基準に基づいて生産力可能性分級（I等級～IV等級）が行われ、結果は示性分級式あるいは簡略分級式により表示された。土壌生産力障害要因は14項目にわたり、それぞれの等級値のうちの最低値によって生産力可能性等級が規制される仕組みになっている。地力保全基本調査の特徴は各土壌区の土壌生産力可能性分級を表している点にあるが、これらのデータは25haに1点の密度で試坑調査（調査地点は500m間隔の方眼の交点）された結果である。

2) 土壌生産力について

土壌生産力は「土壌肥沃度」と同じ概念と考えられている。岡島（1976）によれば、「土壌肥沃度」は水と養分に対する植物の要求を満足させる土壌の能力、すなわち、作物の根の培地としての条件を備え、その根をとおして、作物の生育に応じて養水分を作物に供給する能力とされる。また、作物培地としての土壌の働きは、①水の保持と供給、②無機成分の供給、③根の住み家、の3項目に集約される（大垣、1987）。

(1) 水分供給力

土壌水は一般に、重力水、毛管水、吸湿水、化合水の4つに区分されるが、作物が利用できる水は重力水と毛管水の一部である。木下（1973）は作物が吸収利用できる土壌中の有効水分について検討し、 $pF1.8\sim3.0$ の水分を正常生育有効水分、 $pF1.8\sim3.8$ の水分を易有効水分、 $pF3.8\sim4.2$ の水分を難有効水分、 $pF1.8\sim4.2$ の水分を全有効水分に区分した。また、土壌が保持しうる最大量を意味する正常生育有効水分容量、易有効水分容量、全有効水分容量の概念を提案し、北海道内の易有効水分

容量と全有効水分容量の分布図を示した。南ら（1967, 1970）も畑地かんがいに関する研究で、 $pF1.8\sim3.0$ の水分を作物が容易に吸収利用できる水分とした。佐久間ら（1985）は、北海道に分布する多くの土壌の水分特性は、 pF -水分曲線の特徴から4種類に分類できるとし、増島ら（1962）は、粘土、シルトおよび有機物の量が有効水分容量（ $pF1.5\sim3.9$ ）に対して正の相関を、粗砂量が負の相関をそれぞれ示すとした。古畑（1973, 1980）は累積火山灰の種類や土壌型ならびに土壌構造と pF -水分分布曲線との関係を整理した。北海道開発局（1984）は、北海道内に分布する主要な土壌の水分特性とりまとめた。また、国営の畑地かんがい計画の中で主要な土壌の水分供給能（総迅速有効水分量:TRAM, 生長有効水分量:RAM, 透水性）が調査され、斉藤（1987）によりとりまとめられた。

山本（1969）は、畑地で多収を得るための水分特性条件として、表層下30cmの土層の有効水分容量（ $pF2.0\sim3.0$ ）が50mm以上という数値を、また北海道の土壌診断基準（北海道農業試験会議、1989）は、普通畑の作土の易有効水分容量が土層100ml当たり15～20mlという数値を示した。

(2) 養分供給力

土壌の腐植含量に影響を及ぼす有機物施用に関しては、「施用有機物の分解と蓄積についての長期的、定量的関係を明らかにし、有機物の分解にもなつて放出される養分、特に作物の収量・品質を大きく左右する窒素の効果を定量的に把握しておく必要がある（小川、1987）」との観点から、有機物の分解特性と窒素放出量（速見、1985；渡辺ら、1981）、堆きゅう肥施用量の策定（小川、1987）、土壌化学性の改善効果（池ら、1960）、土壌物理性の改善効果（小川ら、1979）、土壌生物性への影響（新田、1986）などの研究が行われた。土壌窒素に関しては、主要畑作物を中心に土壌型別の窒素供給力が研究された。西宗（1987）はテンサイを対象に、土壌窒素への依存度、根中の窒素吸収量と糖分の負の相関関係、糖分生産量を最大とする窒素吸収量ならびに窒素施肥量を論じた。リン酸やカリについては、有効性の評価法、有効態成分の分析法など数多くの研究がなされ、とりまとめられた（北海道農業試験研究推進会議・北海道農試、1988）。

無機養分の供給に関しては、普通畑の土壌診断基準が作成され、ほぼ5年の間隔で改訂されている。平成元年度の改訂では、普通畑の土壌診断基準（北海道農業試験会議，1989）に加えて、土壌診断に基づく施肥対策（北海道土壌・作物栄養診断技術検討会議，1989）も作成され、施肥改善に貢献している。

(3) 根に対する土壌環境

根の生育に影響する土壌環境として、土壌の硬度、空気容量、温度などの物理的環境、有害性化学物質の有無などの化学的環境、土壌病原菌密度などの生物的環境がある（大垣，1987）。

本研究と関係する石礫の分布については、石礫地帯の分布と実態調査および石礫分布図の作成（北海道開発局，1975）、石礫土壌の改善対策（村井，1980）ならびに施肥対策（道立十勝農試，1982）などがある。林ら（1972）は昭和47年に発生した干ばつ調査で、また塩崎ら（1984，1985）は昭和59年に発生した干ばつ調査で、礫層の出現位置が浅いほど干ばつ被害が著しいことを示した。そのほか、根の伸長を阻害する土壌硬度（小川，1969）、土壌ち密度の増大にともなう空気容量・酸素不足・水分供給力の低下（大崎ら，1973）、土壌ち密度と作物の生育反応（小川，1969）などが検討された。また、十勝地方における土壌改良を推進するために、排水改良、土層改良、作土層の管理・改良のための土壌類型区分図（北海道開発局，1973；菊池ら，1973）が作成された。

生物的環境に関しては、有機物施用と微生物の多様性（新田，1986）などが検討された。

3) リモートセンシングを利用した作物および土壌に関する研究

(1) 主な衛星データとセンサの特徴

現在入手できる主な衛星データとこれに搭載されているセンサの特徴について述べる（秋山，1996；志賀，1997）。1972年7月に打ち上げられたランドサット1号（アメリカ）にはMSS（Multispectral Scanners）センサとRBV（Return Beam Vidicon）カメラが搭載された。MSSセンサは可視および近赤外の波長域にそれぞれ2つのバンドを持ち、地上分解能は約80m、観測幅は185kmであった。1982年7月打ち上げのランドサット4号からは、MSSセンサに加えてTM

（Thematic Mapper）センサが搭載された。TMセンサは可視域に3バンド、近赤外および熱赤外域に各1バンド、中間赤外域に2バンドの合計7つのバンドを持ち、地上分解能は30mになった。回帰周期は16日で、観測幅はMSSと同様に185kmである。TMセンサの概要は第6表に示したとおりである。1986年に第1号が、1990年に第2号が打ち上げられたスポット（フランス）はHRV（High Resolution Visible）センサを搭載し、HRVセンサにはマルチスペクトルモードとパングロモードがある。マルチスペクトルモードでは、可視域に2バンド、近赤外に1バンドを持ち、地上分解能は20mである。また、パングロモードでは可視域から近赤外を1バンドでカバーし、地上分解能は10mである。回帰周期は26日で、観測幅は60kmである。

一方わが国では、1987年に打ち上げられたモス1号にはMESSR（Multispectral Electronic Self Scanning Radiometer）、VTIR（Visible and Thermal Infrared Radiometer）、MSR（Microwave Scanning Radiometer）の3種のセンサが搭載されている。中でも高分解能センサであるMESSRは、可視域、近赤外域に各2つのバンドを持ち、地上分解能は50m、回帰周期は17日、観測幅は100kmである。また、1992年2月に打ち上げられたJERS-1にはOPS（Optical Sensor）とSAR（Synthetic Aperture Radar）の2つのセンサが搭載されている。OPSセンサは、可視域に2バンド、近赤外域に1バンド、中間赤外域に4バンドを持ち、地上分解能は18m×24m、回帰周期は44日、観測幅は75kmである。SARセンサは1,275MHzのマイクロ波を用いた能動型のセンサで、地上分解能は18m×18m、観測幅は75kmである。SARセンサは光学センサと異なって雲や霧の影響を受けないとされている（秋山，1996）。現在、蓄積されているデータが多く、しかも手軽に入手できる観測データは、ランドサットTMデータであろう。

(2) リモートセンシングを利用した作物判別・収量推定に関する研究

世界の先進的な農業地帯では、衛星データを用いた広域的な作物生育ステージの把握や生育量の推定、あるいは気象や環境ストレスに対する作物反応の把握等が試みられている。その代表例が、衛

星リモートセンシングによる作物の生育・収量の推定・予測を行った LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) プロジェクトである。これは1970年代後半にアメリカで実施され、農務省、大気海洋庁、航空宇宙局が協力して、当時打ち上げられたばかりのランドサット MSS データを使って世界のコムギの生産高予測を試みたものである (NASA, 1979)。実際には、MSS には4波長のデータしかなく地上分解能も80m と粗かったため、衛星データの解析で作物判読と作付面積の推定部分だけを求め、これに作物統計による平年の単収や予測単収を乗じて、その地域や国の生産高を推定するという手法が取られた (MacDonald ら, 1980)。したがって、農業統計に関する情報量の少ない国や情報が不正確な地域での予測精度は必ずしも高くなかった (秋山, 1996)。続いて実施された AgRISTARS (Agriculture and Resources Inventory Survey Through Aerospace Remote Sensing) では、ランドサット TM データが利用できるようになったのに伴い、作付面積の推定に加えて干ばつなど作物の生育ストレスを検出したり、生育量や生育ステージを直接的に衛星データから判読するなど、より実用性の高い収量予測技術の開発が試みられた (NASA, 1981, 1982)。

一方、わが国における作物判別を目的とした事例では、十勝地方における4つの時期の TM データを利用し、テンサイ、バレイショおよびコムギなどの主要作物で95%以上の判別率を得るなど、実用的な作付図の作成を可能にした岡野ら (1993) の報告がある。収量推定を目的とした事例では、ランドサット MSS データを用いた石狩平野における水稲の冷害被害解析 (深山ら, 1983)、福岡県および佐賀県における水稲収量の推定 (渡辺, 1988)、また TM データを用いた石狩平野における水稲の収量推定 (Mubekti ら, 1991)、石狩川下流域24市町村におけるコムギの収量推定 (志賀, 1993)、十勝地方におけるテンサイの根収量と糖分含有率の推定 (岡野ら, 1994) がある。

(3) リモートセンシングを利用した土壌生産力に関する研究

リモートセンシングは土壌表面の分光反射特性を観測し、その特性から土壌に関する解析を行う手法である。この手法は土壌図の作成、土壌理化学性の定量、土壌水分状態の判定、土地生産力の推

定、土壌侵蝕などの土地荒廃モニタリングなどの調査に利用されている。観測データで土壌と作物を同じように解析できるが、これらの観測データは地形図、土壌図、気象データ、各種の試験データなどの既存資料と組み合わせ、精度の高い情報を得ることができる (秋山, 1996)。しかし、わが国では土壌生産力に関する解析事例が少ない状況にある。

ア. 土壌の分光反射特性について

一般に、土壌の分光反射率曲線は母材や土性、土壌水分量、腐植 (土壌有機物) 量、酸化鉄量などの影響を受け、それらが複合した形で表現されるので一様でない。土壌の分光反射率曲線は植物より単調で、可視域から近赤外域までは波長の増加に伴い分光反射率も増加する。Condit (1972) はアメリカの160の土壌の分光特性を320~1,000nm の範囲で測定し、その曲線の形から3タイプに分類した。また、Stoner ら (1981) はアメリカおよび他の国の240以上の土壌の反射率を520~2,380nm の範囲で測定し、5つのタイプに分類した。マンセル土色で同じ色として観察されても、土壌のもつ成分量の違いから、可視波長域外で差が生じることがあり、分光特性から土壌の同定や成分量の有用な情報が得られる。このほか、Bower ら (1965)、Damen (1975)、Janse ら (1974)、Mathews ら (1973)、Thompson (1983) も土壌の分光反射率曲線について、また Al-abbas ら (1972)、Baumgardnor ら (1970)、Dalal ら (1986) は腐植含量について報告している。一方、福原 (1975) は、土壌の可視-近赤外域における分光反射特性は、腐植量、酸化鉄量、水分量などにより特徴づけられることを明らかにし、①酸化鉄が集積すると500nm 以下の青緑波長で反射率が低下し、ランドサットデータでは緑と赤の比で酸化鉄含量の情報が抽出できる。②一般に腐植含量1.5%以上の土壌では腐植含量が、1.5%以下では酸化鉄が分光反射率変動の支配的要因である。③腐植が集積するといずれの波長でも反射率は低下し、赤より長い波長では酸化鉄の影響がなく腐植含量の推定が可能になる。④土壌水分が多くなるといずれの波長でも反射率は低下する、ことを明らかにした。しかし、分光反射特性が必ずしも土壌本来の特性を反映しないとの理由から、リモートセンシング技術の土壌への適用に否定的な考えもある (Evans, 1990)。

イ. 土壌の腐植含量について

外国では、土壌の腐植含量は生産力の要因として注目され、作物収量との空間分析に用いられることが多い。例えば Bhatti ら (1991) は、Washington 東部の複雑に浸食された丘陵地において、ランドサット TM データから推定した表土の腐植含量と、土壌リン酸、コムギ収量の空間分布との関係を論じ、対象地域全体の表土の腐植含量が、裸地状態の時期に撮影されたランドサットデータの TM バンド 5 (中間赤外) と TM バンド 4 (近赤外) の比から推定されたことを報告している。

一方、わが国では福原 (1975)、Fukuhara ら (1979) の研究が端緒となり、畠中ら (1989)、Hatanaka ら (1990)、志賀ら (1989)、真行寺ら (1989, 1990) の研究がこれに続いた。千葉県北総火山灰台地では、ゴボウの作付け時に深さ90cmにもおよぶ耕起がおこなわれ、下層の不良な土壌の混入による表層土壌の生産力低下が問題となっている。真行寺ら (1989, 1990) は、その実態をランドサット TM データによる腐植含量から推定している。志賀ら (1989) は、室内で携帯分光放射計を用いて湛水下の土壌試料の放射輝度を測定した結果、土壌の分光反射特性は可視波長域では水深 (7 cm 以下) の影響は少なく、また風乾時と湛水時の分光反射率の間には相関が高いことを確認した。したがって、湛水時においても水深の影響を無視して赤波長域の衛星データから腐植含量を推定することが可能である。そこで、石狩川下流域の湛水時水田を対象にして、現地にて採取した腐植含量と TM データ (1987年6月22日) の関係を重回帰分析し、腐植含量と TM バンド 3 とが最も相関が高いことを確認した (志賀 1997)。水田土壌の腐植含量について、浅野ら (未発表) は仙台平野で、藤原ら (未発表) は京都府亀岡市で追試し、それぞれに腐植含量推定式を得ている。

ウ. 土壌の水分特性について

リモートセンシングデータから土壌水分を推定する方法として、①可視～中間赤外波長を利用した反射法、②熱赤外波長による熱量法、③受動及び能動マイクロウェーブ法がある (Mayer, 1983)。ランドサットデータは主として①の方法、ノア (NOAA) のデータは②の方法になる。一般的に、この二つの方法に共通する長所として高解像力が期待できることと原理が理解し易いことであり、一

方、短所は雲があると観測できないことである。また、反射法には土壌水分収支モデルで必要な植被の解析ができる長所があり、極く薄い表層を感じている弱点がある。ノイズ要因としては植被、表面の粗さ、表面地形、有機物、鉍物含量、太陽角などがある。熱赤外法でのノイズ要因は局所気象条件、部分的植被、表面地形などである (畠中, 1996)。

外国では、表層土壌水分の解析に受動及び能動マイクロウェーブ法を用いた報告が多く見受けられる (Blanchard ら, 1983; Dobson ら, 1986; Schmugge ら, 1986; Jackson ら, 1987; Owe ら, 1988; Wang ら, 1989) が、他の方法を用いた報告 (Eagleman ら, 1976; Reginato ら, 1977) もある。一方、わが国では、簡易放射計などで表層における土壌水分を非破壊的に測定する報告 (深山, 1983; 小川茂, 1989; 谷山ら, 1989; 山本晴, 1991) や人工衛星データとの関係についての報告 (Genda ら, 1976; 香西ら, 1989; 福原ら, 1990; 宇都宮, 1982, 1990) もみられるようになったが、有効水分容量や乾燥速度などの水分供給力に関する報告は少ない。とくに、リモートセンシング技術は広域的な農業情報収集のための有力な手段となっており、土壌の水分供給力評価への期待が大きい (福原, 1987)。

エ. 土壌の石礫について

リモートセンシングを利用して畑土壌の石礫について研究した事例は極めて少ない。石黒 (1986) は、航空機で撮影した MSS の熱映像データと畑土壌における作土の礫含量との関係を検討し、土壌表面温度は深さ40cmまでの礫含量と正の相関関係にあることを見出し、土壌表面温度を説明変数とした礫含量の推定式を作成した。Gomi ら (1988) も石黒と同様に、作土層の表面温度と礫含量に高い相関関係があることを認めた。

リモートセンシングは一種の非破壊測定法であるが、同じように礫深度を非破壊的に測定する方法として地中探査レーダー法や電気探査比抵抗法などが挙げられる。地中探査レーダー法については、草場 (1989) や北海道立十勝農試 (1989) で、電気探査比抵抗法については谷山ら (1995) によって研究された。

オ. 土壌図作成のための画像処理について

Baumgardner ら (1985) は、リモートセンシ

グによる土壌調査事例から、土壌調査水準により利用するリモートセンシングデータは異なり、大縮尺にはTMデータのデジタル解析、小縮尺にはMSSデータやTMデータの視覚判読が有効であると指摘している。Fukuharaら(1979)はランドサットデータから土壌図を作成するための土壌情報として、植被による反射の影響を除去した土壌の抽出法や土壌指数(SI)、バイオマスの指数、酸化鉄指数などの情報を見いだした。

以上述べた既往研究のうち、TMデータを用いた主要な解析事例を第1表にまとめた。

第1表 TMデータを用いた主要な解析事例

解析項目	使用したTMバンド	発表者/年次
畑作物作付図	TMバンド1,3,4,5,7	岡野ら/1993
水稲収量	TMバンド2,3,4,5	Mubektiら/1991
コムギ収量	TMバンド1,2	志賀ら/1997
テンサイ根収量	TMバンド1,4,5	岡野ら/1994
テンサイ糖分含有率	TMバンド1,3	岡野ら/1994
腐植含量	TMバンド3	島中ら/1989
"	"	岡本ら/1990
"	"	志賀ら/1989
"	"	真行寺ら/1990
"	"	浅野ら(未発表)
"	"	藤原ら(未発表)
"	TMバンド5/TMバンド4	Bhattiら/1991
土壌水分率	TMバンド2	福原ら/1990
有効水分容量	TMバンド5	島中ら/1990
	"	北海道立中央農試/1993

2. 研究の目的

土壌図に対する利用目的の変化や新たな要望に対応するために、第1節で、これまでより精度の高い土壌図を作る必要があることを述べた。リモートセンシング技術を利用すれば、目的とする実用土壌図を高精度にしかも簡便に作成できる。また、リモートセンシングでは同じ地域を繰り返し調査することができるので、土地改良の効果や土壌生産力の変化などを追跡することが可能であるし、既存の土壌生産力要因データの書き換えも可能である。

本研究では衛星リモートセンシング技術、特に1984年から提供されているランドサットTMデータを用いて、北海道十勝地方における畑作物の生産性を阻害する土壌要因、すなわち腐植含量、水分特性、礫深度を高精度に、しかも細密に把握す

る手法と、それに基づいた土壌管理法を確立することを目的とした。

畑土壌の腐植含量、水分特性、礫深度を、ランドサットTMデータから高精度・細密に評価することは、菊池(1981)が整理したように、より高次の土壌管理を達成するために極めて重要な意義がある。すなわち、窒素供給量および水分環境の指標となる腐植含量、水分特性および礫深度を広域的に、しかも圃場一筆ごとに把握した目的別の実用土壌図が作成できれば、これに基づいたきめ細かな、しかも効率的な土壌管理を個々の農家レベルで低コストに実行することが可能となる。本研究で目的とした手法の開発は、第1図中の、人工衛星から土壌の生産力特性を把握する部分そのものであり、プレシジョン・ファーミングと直接結びつく技術である。

3. 本論文の構成

本論文は7章からなり、研究の全体構成は次のとおりである。

I. では研究の背景と目的、そして関連する研究経過と動向について述べた。II. では、研究対象地域、畑作物の生産性を阻害する土壌要因、すなわち「土壌腐植」・「土壌水分特性」・「礫層の出現位置(礫深度)」をとりあげた理由について述べた。III. では、TMデータから畑土壌の腐植含量を高精度に把握する手法について検討した。IV. では、TMデータから畑土壌の水分特性、とくに水分率、乾燥速度および保水性(有効水分容量)を高精度に把握する手法について検討した。V. では、TMデータから礫深度を高精度に把握する手法について検討した。VI. では、上記3要因の新しい評価データを用いた総合土壌管理システムを構築するとともに、各要因ごとの図化とそれを利用した土壌管理法について検討した。VII. では、得られた結果について総合的に論議するとともに、今後の展望を述べた。

II. 研究対象地域と畑作物の生産性に関わる土壌要因

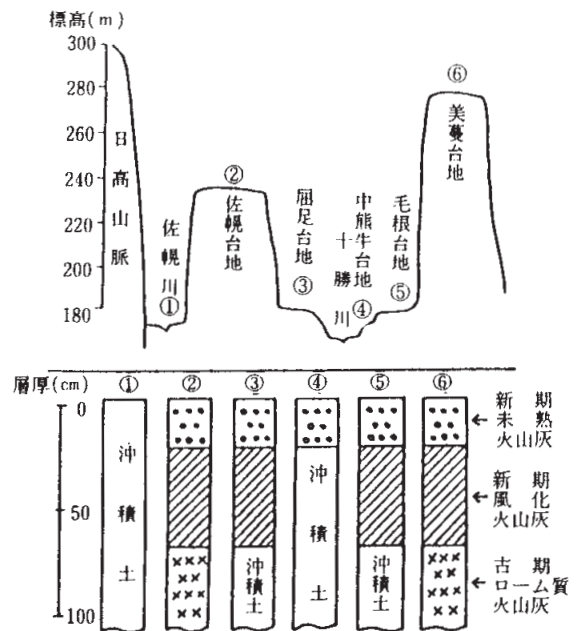
1. 研究の対象地域

研究の対象地は北海道十勝地方の中央部に位置する、わが国最大の畑作地帯である。この中で解析地域として十勝川の南部地域を、検証地域として十勝川の北部地域を選んだ。南部地域には帯広市、中札内村、更別村、忠類村および大樹町の約6万haが、北部地域には音更町および土幌町の約1.3万haがそれぞれ含まれる(第2図)。これらの地域を選定した理由は、①十勝地方に分布する代表的な土壌が分布していること、②地形的に平坦な地域で、衛星による解析に好都合な条件を備えていること、③十勝川の北部と南部では、火山灰の種類や堆積状況(菊池, 1981)が、また石礫の種類や大きさが異なる(北海道開発局, 1975)ことなどである。

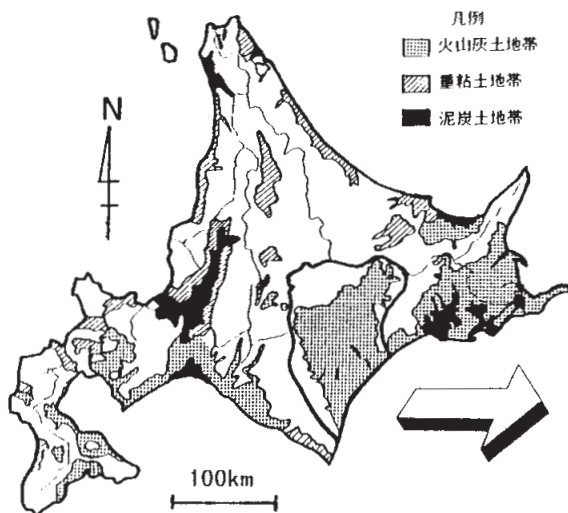
1) 十勝地方の位置と地勢

十勝地方は北海道の東部(北緯 $42^{\circ} 69' \sim 43^{\circ} 38'$, 東経 $142^{\circ} 40' \sim 144^{\circ} 02'$)に位置し、その総面積は $10,830\text{km}^2$ (東西 119.4km , 南北 163.3km)と北海道全体の面積の14%を占めている(第2図)。十勝

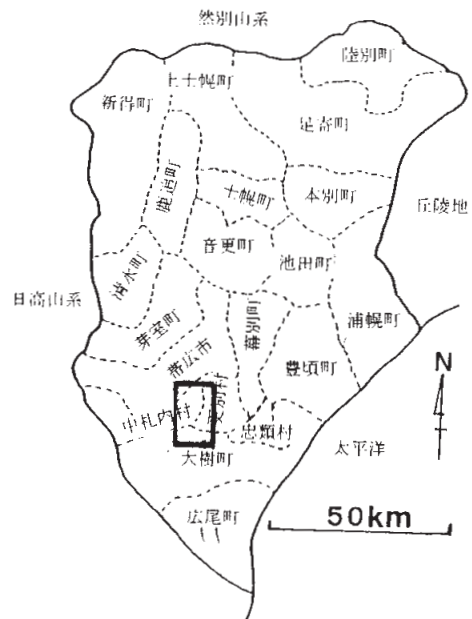
平野は平坦な沖積平野ではなく、新旧さまざまな扇状地や段丘よりなる盆地状の台地平野である。西部地区における地形面の一例を第3図に示した。その中心部を十勝川が平野を西から南東に貫流し、太平洋に注いでいる。



第3図 十勝平野の地形面と火山灰の堆積の一例



十勝地方の位置



十勝地方での解析対象地域

第2図 本研究の対象地域

2) 気象および土壌

十勝地方は年間を通して比較的冷涼で、年平均気温は約6°Cである。夏期の気温は平均20°C前後で、最高30°Cを越す日もしばしばある。冬期は寒さが厳しく、気温の変動が大きい。農耕期間の積算温度は、内陸部では2,400°C以上になる。

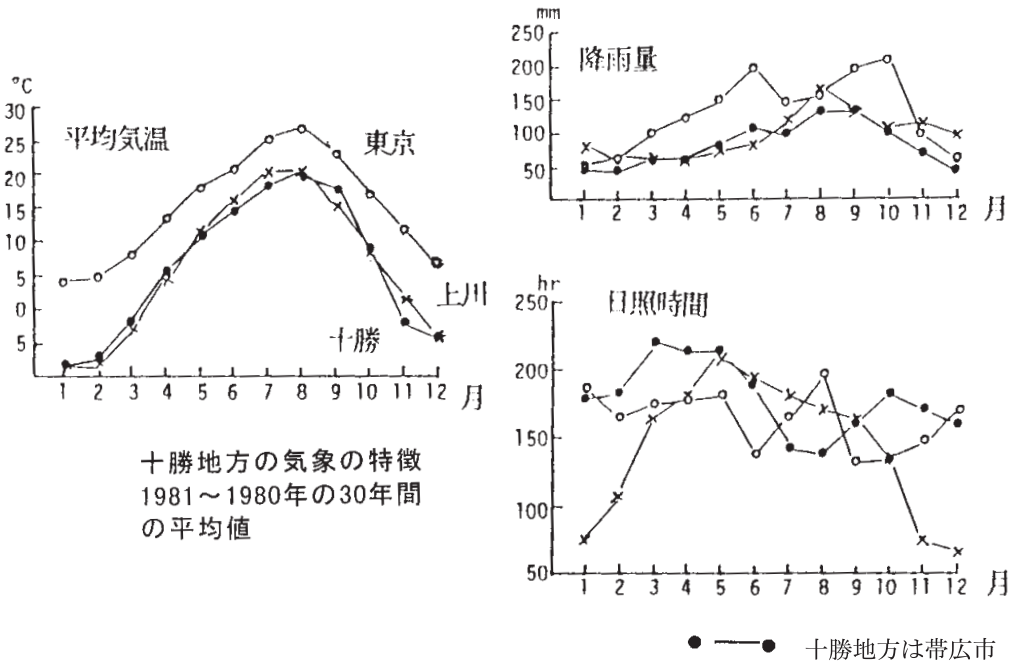
降雨量は年間800~1,000mmで、網走地方に次いでわが国でも最も少ない地域に属する。日照時間は年間約2,100時間である(第4図)。晴天は秋から冬および春先にかけて多く、冬期は快晴の好天候に恵まれ、積雪も少ないことから放射冷却現象による気温の低下と相まって土壌凍結が著しい。風は冬と春先の4~5月に強い。特に春先には東および南東風が強く、土壌の乾燥と相まって風害を起こす。そのため十勝地方には防風林が多く植えられている。

このように、気象条件から見る限り十勝地方は農耕に適していると考えられるが、春先は低温・寡雨で、降雨は7~8月に集中するなど、土壌条件と相まって問題を抱えている。また、内陸部と沿岸部では農耕期間の気象条件に差が見られ、沿岸部では海霧の発生のため内陸部より気温が低く、日照時間も少ない。十勝地方の畑作地帯では冷湿害や干ばつの被害がかなり高頻度で発生する。

十勝地方における農牧地と農牧適地面積の合計は

374,940haであるが、そのうち約53%に相当する197,218haは火山性土で、次いで低地土が32%、台地・丘陵地の土壌が12%、泥炭土が2%となっている。第5図に十勝地方の土壌分類図を示した。十勝平野には新旧の多数の火山灰が累積しており、土壌は大なり小なりこれら火山灰の影響を受けている(第6図)。新期火山灰(200~3,000年前の降下火山灰)には、雌阿寒起源のMe-a, Me-c, 十勝岳起源のTo-b, To-c, 樽前岳起源のTa-a, Ta-b, 有珠山起源のUs-bなどがある。古期火山灰(8,000~30,000年前の降下火山灰)には樽前岳起源のTa-d, 恵庭岳起源のEn-a, 然別起源のSipfa-1, Sipfa-2, 支笏湖起源のSpfa-1, Spfa-2などがある(第7図)。新期火山灰の多くは20cm内外の作土層あるいはその直下層20~40cmを構成している。古期火山灰は地表下50cm以下、あるいは作土直下の下層土を構成している。これら新旧の火山灰は理化学性および粘土鉱物がそれぞれ大きく異なっているため、土壌改良は火山灰層の構成に対応した方法が採られている。火山性土のうち、約80%が降雨時に湿害を受けるか、あるいは受けやすい排水不良な土壌である。

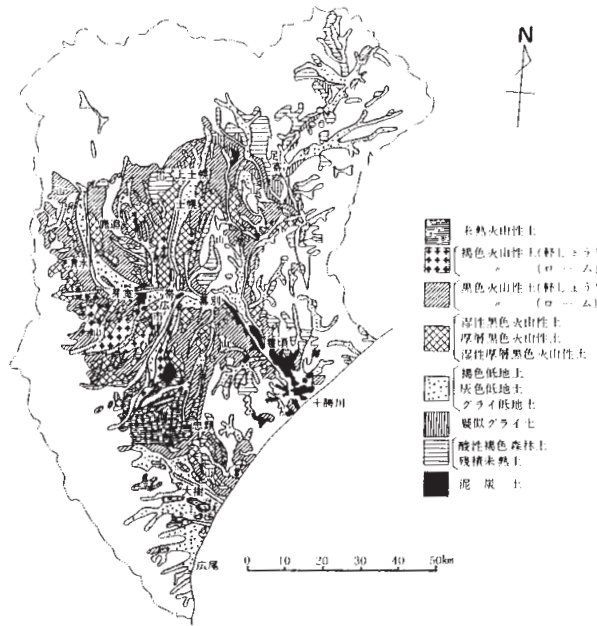
十勝地方の土壌面積とその割合は、褐色火山性土(地力保全調査での土壌名は淡色黒ボク土)84,571ha(十勝管内で占める面積割合22.6%)、黒



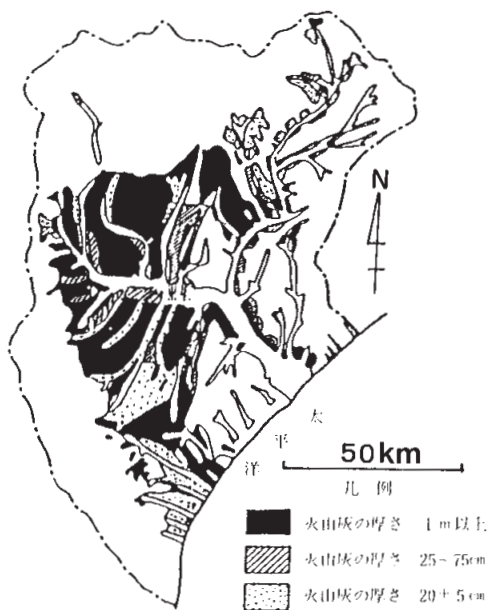
第4図 十勝地方の気象の特徴 1981~1980年の30年間の平均値

色火山性土（黒ボク土）38,198ha（10.2%），湿性黒色火山性土（多湿黒ボク土）13,368ha（3.6%），厚層黒色火山性土（黒ボク土）1,672ha（0.4%），湿性厚層黒色火山性土（多湿黒ボク土）42,726ha（11.4%） 褐色低地土（褐色低地土）101,294ha（27.0%），灰色低地土（灰色低地土）40,151ha（10.7%），褐色森林土（褐色森林土）21,727ha

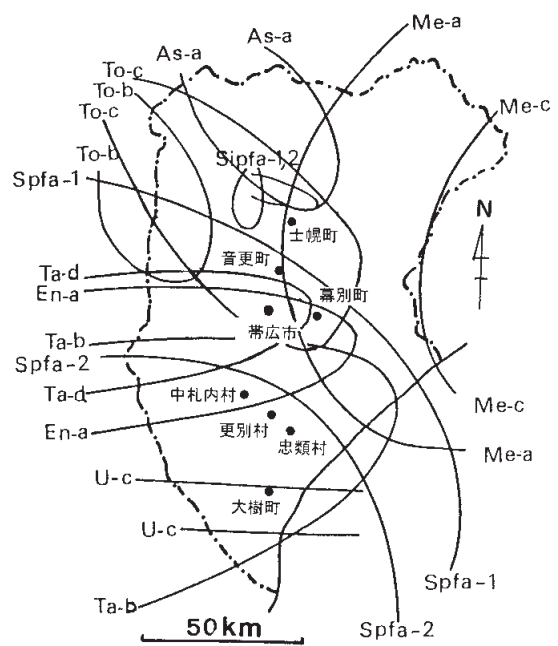
（5.8%）となっている。各調査に供した土壌（土壌群および土壌統群名）は、褐色火山性土，黒色火山性土，湿性黒色火山性土，厚層黒色火山性土，湿性厚層黒色火山性土，褐色低地土，灰色低地土，褐色森林土であり，これらの土壌は十勝地方に分布する主要な土壌を網羅している。



第5図 十勝地方の土壌分布



第6図 十勝地方における火山灰層の厚さ



第7図 十勝地方における火山灰の分布図

3) 農業概況

十勝地方の農業は道内でも屈指の大規模畑作、酪農地帯として発展してきた。気象の良好な内陸部では畑作を中心に、また気象の劣悪な沿岸部と山麓部では酪農、あるいは畑作・酪農を主体とした複合農業経営が行われている。

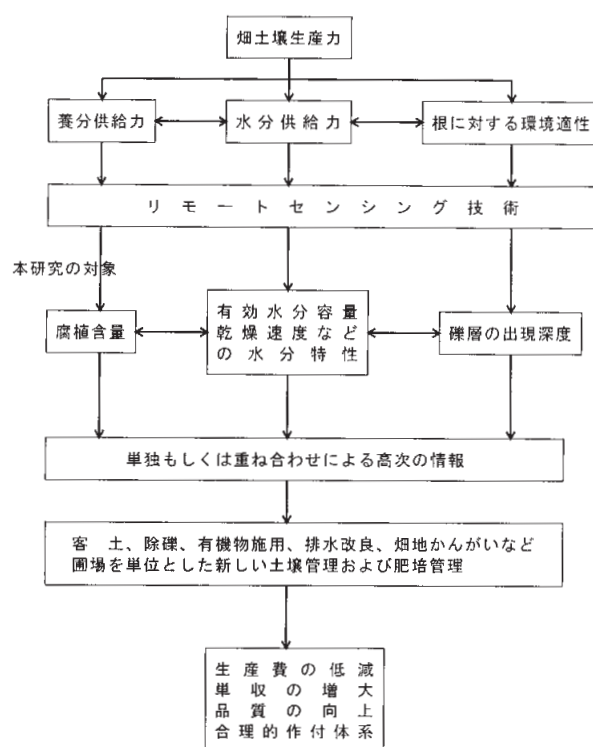
農耕地面積は256,000haに達する。そのうち普通畑は182,000haで北海道全畑の43%、牧草地は73,000haで北海道全草地の14%を占めるが、水田は僅かに600haときわめて少ない。農家一戸あたりの耕地面積は約24haで北海道平均の約2倍、都道府県平均の20倍以上であり、専業農家率も74%ときわめて高い。農家戸数および農業人口は減少傾向にあるが、農耕地面積は微増の傾向にあり、大規模農家が増加しつつある。圃場一枚の面積は十勝の中でも地域により差はあるが、2~5haと広い。主要な畑作物はテンサイ、バレイショ、ダイズ、アズキ、サイトウおよび秋播コムギで、テンサイ・バレイショ・秋播コムギ・マメ類の輪作が基本とされているが、特定な作物への偏重、過作にともなう短期輪作や連作が問題となっている。しかし、農業施策の変化や輸入農産物との競合などにより主要畑作物の生産者価格は低迷しており、畑作農家の収益は頭打ちの状況にある。十勝地方の各地域では、このような状況を打破すべく野菜などの新作物の導入計画や作付が進みつつある。畑作地帯では農作業の大部分が機械化されており、面積比率で飼料作物45%、コムギ16%、テンサイ12%、バレイショ10%、マメ類13%、野菜4%が作付され、大規模畑作農業が展開されている。

2. 畑作物の生産性に関わる土壌要因

十勝地方の畑作農業では高品質、低コスト生産と環境保全型農業の推進が課題とされるが、それに対応するには、作物生産の基盤である土壌の特性を把握した営農計画、肥培管理、各種対策を展開することが重要である。そのためには、圃場一枚ごとの土壌特性と土壌生産力の不均一さを把握することが必要となる。土壌生産力は「水分供給力」、「養分供給力」および「根に対する土壌環境」から構成される作物生産の総合的な能力である（大垣，1987）が、現状では「圃場一枚ごとの土壌特性と土壌生産力を把握すること」（菊池，1986）が達成されておらず、土壌生産力を農家圃場の一枚ご

とに把握することは困難である。

本研究で解析を行った土壌要因は、腐植含量、水分特性（土壌水分張力、水分率、乾燥速度および保水力）、礫深度である。これらの要因の位置づけと相互関係をフローチャートで第8図に示した。土壌生産力の構成要因である腐植含量、水分特性、礫層の出現深度に関して、リモートセンシング技術によって高精度に把握した各質的情報を1次情報（基礎情報）とすれば、複数の1次情報の、または他の既存情報を含めたオーバーレイ（重ね合せ）により、さらに高次の情報が得られる（福原，1996）。高次の情報は、圃場一枚を単位とした新しい土壌管理や肥培管理に反映され、ひいては、畑作農業の課題とされる（北海道フロンティア研究会，1991）①生産費の低減、②単収の増大、③品質の向上、④合理的作業体系に貢献することが期待される。以下、各要因と作物の生産性との関係についてレビューする。



第8図 本研究で取り上げた項目の位置づけとそれらの相互関係

1) 土壌の腐植含量と畑作物の生産性の関係

土壌腐植はそれ自体が土壌の水分保持・砕土性といった物理性を大きく左右し、土地の排水性の指標となる(鈴木, 1970)。また、土壌腐植は土壌窒素の供給源であるとともに、有機物供給の判断指標としても使われ、腐植含量の変化は土壌生産力の判断基準や土壌管理の鍵となっている(Bhattiら, 1991; 真行寺ら, 1990)。

テンサイの場合、腐植含量の少ない土壌で根重が大きく、しかも糖分が高い場合が多い(西宗, 1993b; 岡野ら, 1994)。食品加工用バレイシヨの場合、窒素供給能が低い褐色火山性土では12kgN/10a以下の窒素施用で全いも数、規格内いも数、平均1個重は増加する。でんぷん価は窒素とカリの多施用で確実に低下する(十勝農試, 1982; 大崎, 1987)。また、腐植含量の高い湿性黒色火山性土で栽培された生食用バレイシヨはいも肌が黒くなり消費者に敬遠されるため、農家では下層土を客土して土壌粒子の付着を回避している。

次にマメ類の場合、アズキは開花期以後の生育が旺盛で、栄養生長と生殖生長の重複期間も長いので生育後半の窒素供給が重要とされる。アズキの増収のためには、リン酸増肥による初期生育の確保・増進とともに、土壌の窒素肥沃度を高め生育後半での十分な窒素供給を確保することが重要である(沢口, 1986)。

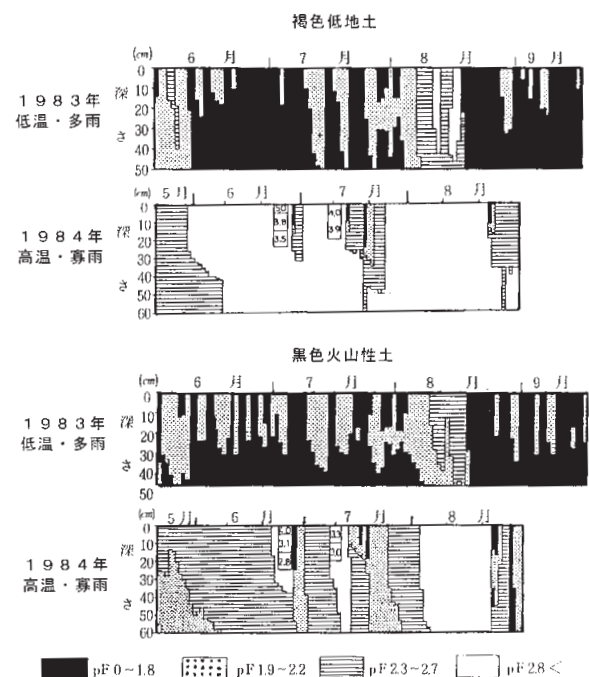
このように、土壌の腐植含量は畑作物の収量のみならず品質まで影響を及ぼすことから、圃場ごとの腐植含量の把握・管理は重要である。作物生産において量ばかりでなく質も重視されるようになり、従来多収が得られるところから一等地とされてきた養・水分供給能の極めて高い褐色低地土に代わって、窒素供給能が低く不良土壌とされてきた褐色火山性土が品質や機械作業性の面から一等地になりつつある(畠中, 1993)。このことを裏付けるように、褐色火山性土では養・水分の自然制御が良好で、実際に高品質の作物が生産されている。したがって、TMデータから圃場一枚ごとに腐植含量の不均一性を評価することが、耕地の窒素供給力を推定し、排水性、砕土性などの諸対策を効率的に進めるために不可欠である。

2) 土壌の水分特性と畑作物の生産性の関係

土壌の水分特性は、作物に対する肥料の肥効性、

品質、湿害、干害、作業機械による耕耘や走行性、土壌の圧密化など、土壌生産力や土壌管理に対して幅広く影響を与える。水分特性は土壌の腐植含量とも密接な関係にあり、腐植含量が高いほど毛管孔隙が増えるため保水力も高まる傾向にある。しかし腐植の過度の集積は、粗孔隙、毛管孔隙を減少させる傾向にある(南, 1970; 北海道開発局, 1984)。

十勝地方は1983年から1985年の3年間に低温・多雨と高温・寡雨の気象を経験した。土壌水分は気象条件を反映して過湿状態から過乾(干ばつ)状態まで変動したが、作物の生育・収量は土壌により異なる反応を示した(北海道開発局, 1986)。褐色低地土は低温・多雨年には著しい湿潤状態で経過し、高温・寡雨年には乾燥状態が連続するなど乾湿の気象条件に対する抵抗性が小さいのに対して、黒色火山性土は作物の生育に有効な土壌水分の日数が多く、気象変動に対する抵抗性が認められた(第9図)。褐色低地土の過湿・過乾には、礫深度、土性、腐植含量、作土層の厚さ、水分供給力などの要因が影響していた。



第9図 褐色低地土および黒色火山性土における土壌水分の年次変動の比較

図中の枠内の数字は土壌のpF-含水比曲線から求めたpF推定値

第2表 年次別の気象特徴とテンサイ根収量の糖分含有率の関係

年次	1983年		1984年	
	根収量 t/10a	糖分含有率 %	根収量 t/10a	糖分含有率 %
気象及び土壌 水分の特徴	低温・多雨 過湿(湿害)		高温・寡雨 過乾(干ばつ)	
土壌の種類				
中粗粒質 ①	5.1	16.4	6.8	14.4
褐色低地土②	4.4	15.9	5.5	15.1
③	4.8	14.7	6.1	14.0
礫質 ①	4.1	17.1	3.4	12.5
褐色低地土②	—	—	4.3	14.1
細粒質 ①	2.8	16.9	5.2	15.3
褐色低地土				
黒色火山性土	3.3	15.9	5.7	14.6
湿性黒色火山性土	3.1	16.7	5.2	15.5
褐色火山性土	—	—	6.4	13.5
褐色火山性土 a)	4.8	17.2	4.8	15.9

a)：北海道農業試験場畑作物部(芽室町)での調査結果

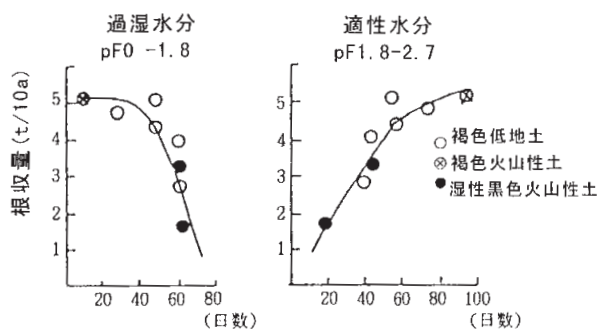
示された。そこで、過湿水分 (pF 0~1.8) の日数および適性水分 (pF1.8~2.7) の日数とテンサイの根収量の関係を検討した結果、過湿の水分状態が50日を越えると急速に収量が低下し、逆に適性水分の日数が多いほど収量は高くなった (第10図)。したがって、低温・多雨年には土壌の水分環境がテンサイの根収量を大きく規制していることが明瞭である。一方、糖分含有率は各年とも土壌間で大きな差はみられなかったが、気象条件の違いの影響は現れた。すなわち、1983年の低温・多雨年に最も高く、高温・寡雨の1984年に最も低かった。とくに干ばつを最も大きく受けた礫質褐色低地土における糖分含有率の低下が大きかった (第2表)。

このように、土壌の水分特性は畑作物の収量に加えてその品質にまで影響を及ぼすことから、「作物の収量×品質」を最大とするような最適な水分環境を作り出すことが重要である。そのために、圃場ごとに水分特性の不均一性を把握することが、排水や畑地かんがいなどの土壌改良対策を効率的に進めるために不可欠である。

3) 畑土壌の礫深度と畑作物の生産性との関係

礫深度は、根菜類を含む作付体系や干ばつ発生、耕起・整地・収穫などの機械作業、除礫や客土などの土地改良、畑地かんがいなどに影響を与える。その点について菊池 (1987) は、「石礫圃場における畑作物栽培は、マメ類やムギ類では物理的な支障は比較的少ないが、テンサイやバレイショのような深根性作物には大きな障害となっており、適切な輪作体系が組めない。そのためムギ類やマメ類の連作を余儀なくされ、連作障害や病害の多発を招き、収量のみならず品質面にも大きな影響を与える。作土層が石礫を多く含み、かつ礫層が浅層から出現する圃場では、一般に保水力や保肥力が小さく透水性が良好なため、寡雨年には干ばつ被害が発生し、多雨年には施肥養分の流亡を招きやすい」と述べている。

十勝地方では1972年、1984年および1985年に干ばつに見舞われた。干ばつ被害の大きかった1984年に撮影した航空写真を判読すると、干害はしま模様状に発生し、圃場内で被害程度が一様でない。すなわち、生育の正常な畑作物は緑色に、干害を受けた部分は被害が大きくなるほど白くなった (写真1)。畑作物の被害度を調査した結果、テン



第10図 土壌の水分状態とテンサイの根収量との関係 (1983年, 北海道農試)

pF は深さ10cm の位置の実測値

テンサイの根収量は低温・多雨で湿害の多発した1983年に細粒質褐色火山性土や湿性黒色火山性土で減収となり、土壌水分の多寡に大きく影響された (第2表)。一方、高温・寡雨年にはテンサイの根収量はいずれの土壌でも増大した。とくに黒色火山性土や細粒質褐色低地土では1984年の根収量が高くなるなど、黒色火山性土や湿性タイプの土壌は高温・寡雨の気象に対して抵抗性のあることが

サイの根収量と糖収量、アズキの子実収量と規格内収量に及ぼす礫深度の影響が明らかに認められた(第3表, 第4表)。とくに, 表層から50cm以内に礫層が出現する場合にテンサイの被害が大きかった(第11図)。干害の発生には礫の出現深度に加えて, 作土層の礫含量も関与する。干害の著しかった圃場における作土層の礫含量は高く(約59%), 浅礫と相まって礫含量が干害を助長する大きな要因となっ

ている。

このように, 礫深度は畑作物の収量に加えてその品質にまで影響を及ぼすことから, 圃場ごとの礫管理は重要である。そのために, 圃場ごとに礫深度や礫含量の不均一性を把握することが, 除礫や客土事業などの土壌改良対策を効率的に進めるために不可欠である。

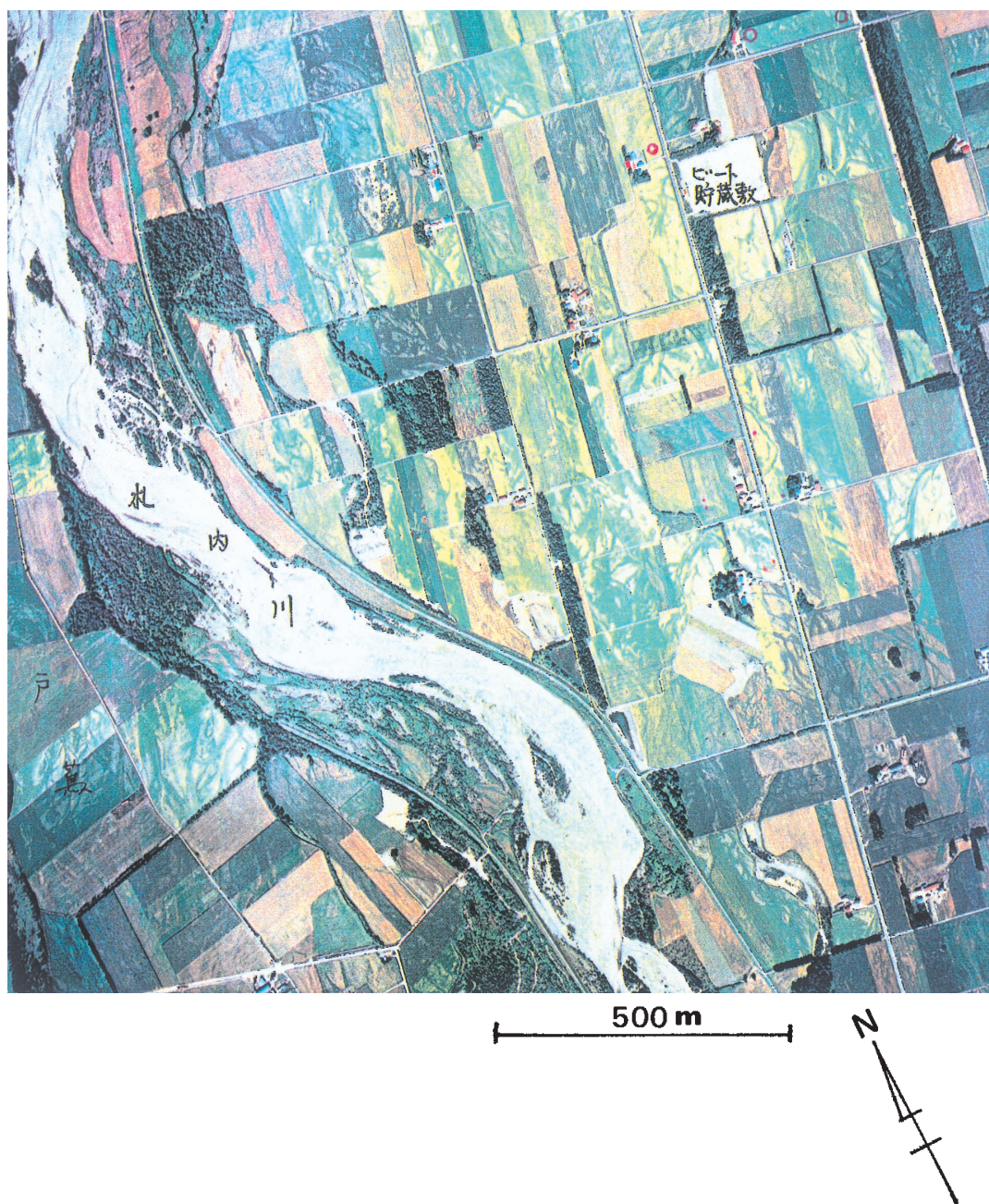


写真1 礫質褐色低地土地帯の干害をとらえたカラー航空写真(1984年8月18日 中札内村)
白い部分が干ばつの発生している圃場

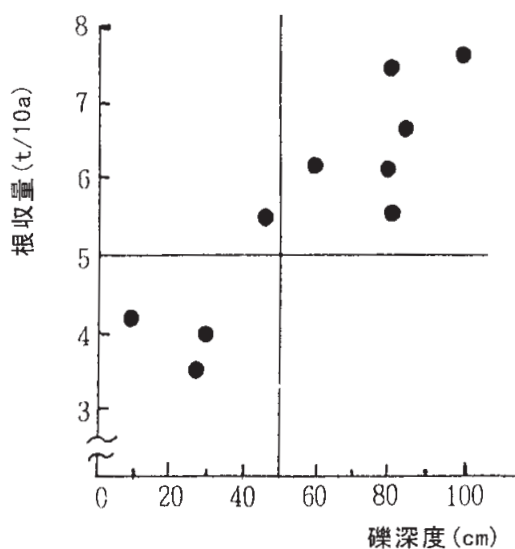
第3表 テンサイの根収量調査結果（1984年）

土 壤	礫層の 出現位置 cm	干害 程度	茎葉重 t/10a	根 重 t/10a	T/R比	糖分 含有率 %	糖収量 kg/10a	備考
中粗粒質褐色低地土	70~100	正常	6.9	7.7	0.90	14.3	1,101	灌漑
	70~100	正常	6.3	6.8	0.93	14.4	979	灌漑
	80	弱	6.3	6.1	1.03	14.0	854	
礫質褐色低地土	80	弱	6.9	7.6	0.91	13.0	988	
	28	甚大	2.9	3.4	0.84	12.5	425	
	35	中	4.4	5.6	0.79	14.8	829	
	46	中	5.5	5.5	1.02	15.1	830	
	13~18	甚大	3.3	4.3	0.76	14.1	606	
細粒質褐色低地土	—	正常	4.6	5.2	0.88	15.3	796	
黒色火山性土	—	正常	5.8	5.7	1.00	14.6	832	
湿性黒色火山性土	—	正常	5.6	5.2	1.08	15.5	806	
	85	正常	6.1	6.7	0.91	14.3	958	
	50	弱	6.4	6.4	1.00	13.5	864	
褐色火山性土 (芽室町畑作部)	30	甚大	3.5	3.7	0.92	15.5	573	
	80	弱	4.6	5.5	0.84	16.3	896	

第4表 アズキの子実収量調査結果（1984年）

土 壤	干害 程度	品種	茎長 cm	分枝数 本/株	着莢数 個/株	千粒重 g	子実 収量 kg/10a	規格内 収量 kg/10a	歩留 %	等級	干害 ^{a)} 減収率 %
礫質 褐色低地土	中	エマ	84	2.7	78	115	212	209	99	3	84
	大	ショウブ	32	3.0	11	112	35	33	94	等外	
中粗粒質 褐色低地土	小	エマ	82	3.3	80	118	240	234	97	3	44
	大	ショウブ	67	4.3	73	131	139	132	95	等外	
礫質 褐色低地土	小	エマ	86	3.7	61	113	206	198	96	3	35
	大	ショウブ	68	4.3	55	103	132	128	97	3	
中粗粒質 褐色低地土	中	エマ	87	4.3	106	112	217	214	99	3	9
	中	ショウブ	84	4.0	94	116	204	194	95	3	
細粒質 褐色低地土	正常	エマ	72	3.7	85	122	314	304	97	3	20
	小	ショウブ	73	2.7	53	127	251	244	97	3	
褐色 火山性土	小	ハヤテ	79	4.7	75	114	260	252	97	3	14
	中	ショウブ	92	3.7	71	111	224	217	97	3	

a) : 干害減収率 = (干害小 - 干害大) × 100 / 干害小



第11図 礫深度とテンサイの根収量との関係

Ⅲ. 畑土壌の腐植含量の評価法

土壌の主要な構成要素である腐植は、その量と質が土壌生成因子と密接に関係しており、土壌の窒素供給量や水分環境の指標（日本ペドロジー学会，1997a）として重要である。フランスやベルギーでは腐植含量を土壌窒素供給力の指標として指数化し、最適窒素施肥量算出の要因としている（鱈場，1986）。腐植含量を広域かつ詳細に、また定量的に把握することは診断から処方過程の誤りを少なくするとともに、物理性および生物性を含めた土壌診断に役立つ。例えば作物の生育異常が発生したとき、腐植含量区分図から現地の地形条件や土壌環境を予め類推することができ、土壌診断の手順の中で重要とされる現地での聞きとり、土壌および作物の観察、調査、ひいては診断・処方・対策確立の一助となる。

本章では、ランドサット TM データを利用して裸地状態にある畑土壌の腐植含量を広域的に、しかも高精度に評価する手法の確立、ならびに植生の影響を消去して腐植含量を推定する方法の確立を目的とした。

1. 畑土壌の腐植含量の評価法

1) 研究方法

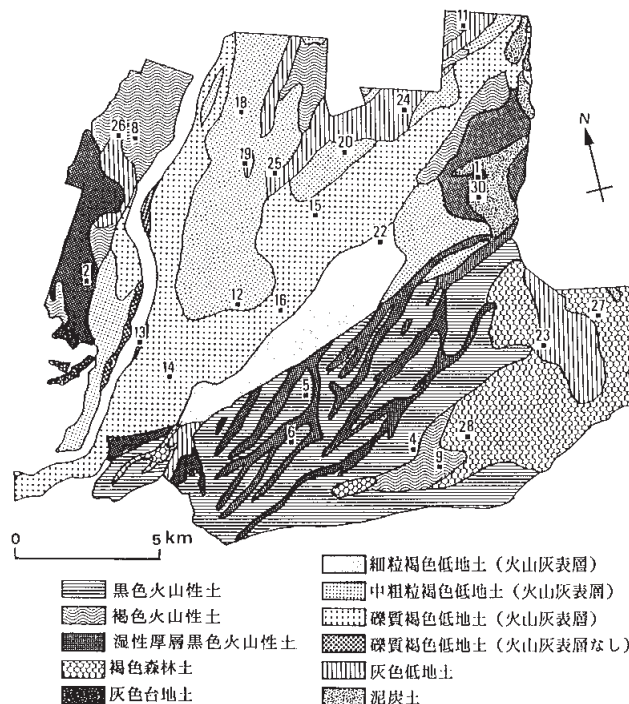
(1) 解析地域

解析地域は中札内村，更別村およびその周辺の地域で、面積はおよそ6万 ha に及び、調査地点として地力保全基本調査成績書（北海道中央農試，1966～1974；北海道，1979）に記載されている13の土壌統群から30地点を選んだ（第12図）。

(2) 腐植含量データ

解析に供試した腐植含量データを第5表に示した。腐植含量のデータとして、地力保全基本調査成績書に記載された第1層目の値（これを表層値とする，乾土%）と、作土層を25cm に設定しその間に含まれる土層の腐植含量を加重平均して求めた値（これを25cm 平均値とする，乾土%）を用いた。25cm 平均値における腐植含量は2.22～17.8%の範囲にあり、概括すると泥炭土や湿性厚層黒色火山性土で高く、褐色火山性土や褐色低地土で低かった。他の土壌の腐植含量は上記両土壌の中間の値であった。

25cm 平均値を用いた理由は、プラウによる耕起深が1960年代の15cm 前後から現在の25cm 前後へ



第12図 解析地域における土壌図上の腐植含量調査地点

土壌図は中札内村，更別村の地力保全基本調査による。数字はサンプルナンバー。

と変化しているためである（島中，1989）。また，7つのTMバンドの平均CCT値との相関係数を比較するために，乾土%の値（表層値と25cm平均値）とその常用対数値も用いた。さらに，求めた推定式による推定値と実測値とが一致するかを検証するために，解析地域内に分布する代表的な土壌に位置する8地点で採土し，腐植含量（乾土%）を分析した。

第5表 解析に用いた30地点の土壌統群名と腐植含量

土壌統群名	腐植含量 (mg/100g 乾土)	
	表層値 ¹⁾	25cm平均値 ²⁾
湿性厚層黒色火山性土	13.72	16.31
湿性黒色火山性土	9.76	12.00
	8.83	11.74
黒色火山性土	5.79	5.62
	7.07	6.71
	8.07	9.31
	5.02	4.93
褐色火山性土	4.12	4.36
	5.03	4.48
	3.21	4.43
	5.19	4.12
礫質褐色低地土	4.71	4.83
	2.22	2.22
	5.77	5.43
	4.71	4.83
	5.77	5.43
	9.34	8.71
中粗粒褐色低地土	4.86	4.52
	6.48	8.83
	5.38	7.24
	4.24	3.93
細粒褐色低地土	7.09	9.21
礫質灰色低地土	8.98	8.67
中粗粒灰色低地土	9.90	11.34
灰色低地土	6.96	7.03
疑似グライド	10.98	10.19
礫質褐色森林土	5.12	6.24
	5.09	4.98
中粗粒褐色森林土	5.46	5.14
泥炭土	11.38	17.79

注1) 表層値は地力保全基本調査成績書（中札内村，更別村，幕別町，忠類村および帯広市）の調査結果を用いた。

2) 層厚による土層25cmの加重平均値である。

(3) 使用した衛星データ

解析には，1984年5月21日と1985年5月24日に観測された，シーン番号（パス・ローウ）106-30のランドサット5号TMデータを用いた。この2シーンともほぼ雲量0のクリアなデータである。畑土壌の腐植含量をリモートセンシングで推定する場合，土壌面はできる限り裸地に近く，しかも耕起・碎

土・乾湿の状態が均一なことが望まれる。その理由は，腐植含量以外に作物による被覆，表面の凹凸度，水分含量も土壌の反射に影響を及ぼすからである（Baumgardnerら，1985）。

十勝地方では土壌が乾燥しており，かつ植生による被覆の少ない，播種および移植間もないこの時期が最も上記の条件を満たしている。また2年分のデータを用いたのは，単年度では植生（主に秋播コムギ）によって得られない裸地のデータをできる限り補完するためである。解析地域における1985年の裸地率は36%で，1984年のデータで補完した後のそれは61%となった。

なお，TMバンドと観測波長帯の関係は，TMバンド1：450～520nm（可視・青），TMバンド2：520～600nm（可視・緑），TMバンド3：630～690nm（可視・赤），TMバンド4：760～900nm（近赤外），TMバンド5：1550～1750nm（中間赤外），TMバンド7：2080～2350nm（中間赤外），TMバンド6：10400～12500nm（熱赤外）である（第6表）。

ランドサットTMデータにおける調査地点の位置特定は，TMバンド1に青，TMバンド4に緑，TMバンド5に赤を割り当てたカラー合成写真とTMバンド3を用いたグレイマップを作成し，これと地形図上の調査地点を重ねて行った。

第6表 ランドサット光学センサーの概要

光学センサー名：セマテック・マップパ(Thematic Mapper)	
地上分解能：30m(TMバンド1～5, 7)	
120m(TMバンド6)	
走査幅：約185km	
画素数×ライン数：6320画素/ライン × 5670ライン	
バンド数：7バンド	
	TMバンド1 450～520(可視・青)
	TMバンド2 520～600(可視・緑)
観測波長帯	TMバンド3 630～690(可視・赤)
(nm)	TMバンド4 760～900(近赤外)
	TMバンド5 1550～1750(中間赤外)
	TMバンド7 2080～2350(中間赤外)
	TMバンド6 10400～12500(熱赤外)

第7表 腐植量として乾土%と常用対数値 a) を用いた場合および表層値と土層25cmの加重平均値を用いた場合の相関係数の比較

年次	バンド	腐植含量(乾土%)		常用対数値 ^{a)}	
		表層値	25cm平均値	表層値	25cm平均値
1984年 5月21日	TM1	-0.778**	-0.786**	-0.782**	-0.809**
	TM2	-0.822**	-0.823**	-0.828**	-0.859**
	TM3	-0.838**	-0.836**	-0.839**	-0.869**
	TM4	-0.835**	-0.835**	-0.835**	-0.863**
	TM5	-0.254	-0.186	-0.221	-0.150
	TM6	-0.017	0.152	-0.028	0.073
	TM7	-0.055	0.052	-0.013	0.098
1985年 5月24日	TM1	-0.898**	-0.919**	-0.899**	-0.958**
	TM2	-0.877**	-0.909**	-0.867**	-0.934**
	TM3	-0.872**	-0.907**	-0.854**	-0.924**
	TM4	-0.865**	-0.908**	-0.839**	-0.921**
	TM5	0.092	0.083	0.154	0.150
	TM6	0.449*	0.585**	0.452*	0.580**
	TM7	0.582**	0.638**	0.608**	0.673**

注) 腐植含量(乾土%)における表層値は地力保全成績書に記載されている第一層の腐植含量で、25cm平均値は土層25cmを加重平均したものである。
 データ数30点, ** : 有意水準1%, * : 有意水準5%
 a) LOG₁₀(腐植含量%)

2) 結果

(1) 腐植含量の推定に最適なバンド

まず腐植含量データと7つのTMバンドの平均CCT値との回帰分析を行い、相関係数について検討した結果を第7表に示す。相関係数はTMバンド1~TMバンド4の方がTMバンド5~TMバンド7よりも高かった。また、相関係数は全体に1984年より1985年が高く、1985年のTMバンド1~TMバ

ンド4で0.9以上となったが、1984年のTMバンド1~TMバンド4では0.8以上となった。30点の腐植含量として、乾土%の値そのものより常用対数値を用いた方が、しかも表層値より25cm平均値を用いた方が相関係数は高まった。したがって、可視~近赤外波長域の方が中~遠赤外波長域よりも腐植含量の推定に適している。第7表の結果から、本解析では腐植含量の推定に1985年のTMバンド3のCCT値を使用し、1985年の植生部は1984年の土壤データで補完することにした。

(2) 腐植含量の推定式の作成

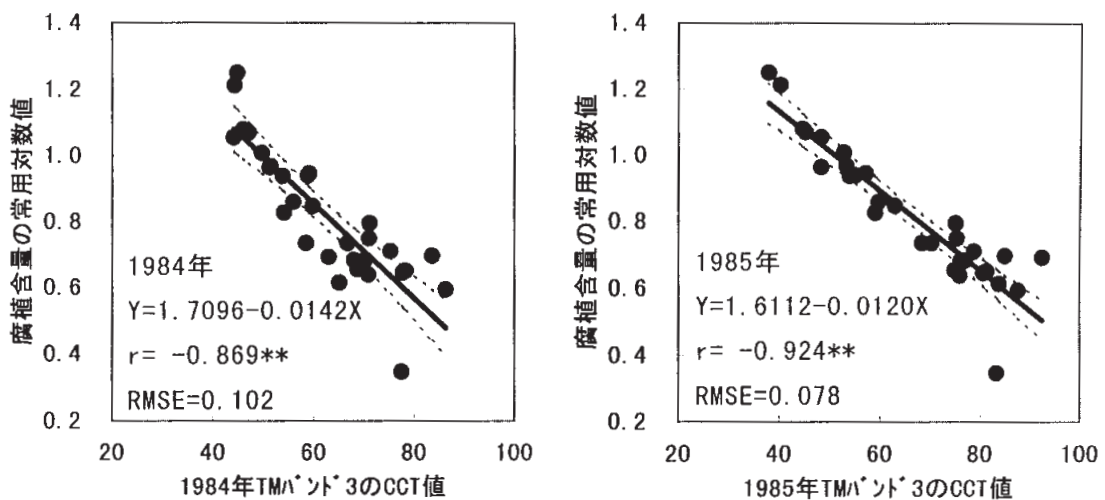
上記(1)項で腐植含量の推定にTMバンド3を用いることを述べた。腐植含量とTMバンド3のCCT値との関係を第13図に示す。兩年ともに推定式が得られたが、1985年の相関係数が高いという理由から次の①式を採用することにした。

LOG₁₀(25cm平均値, 腐植%) = 1.6112 - 0.0120 TMバンド3 (1985)

(R²=0.854 RMSE=0.078 データ数30点) ①

供試した土壤のTMバンド3のCCT値は34から92の範囲にあり、これを腐植含量に読み替えると約3%から約16%に相当する。したがって、腐植含量を0.3%きざみで推定でき、細密な腐植含量の把握が可能である。

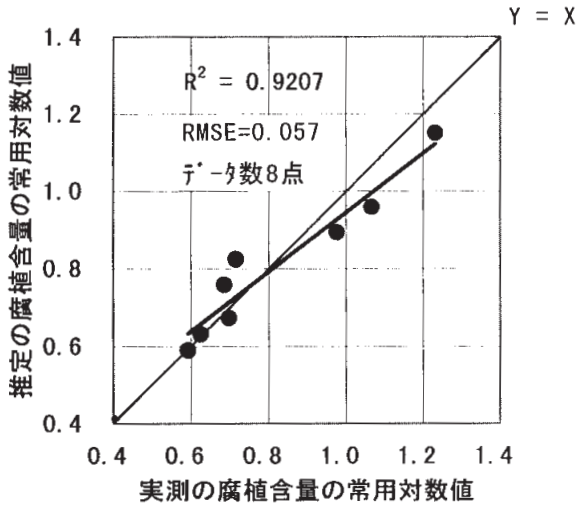
この推定式の精度を確認するために、解析地域内の主な土壤型である褐色火山性土、黒色火山性土、湿性黒色火山性土、褐色低地土などの8地点から採取した土壤の腐植含量の分析値と①式から求



第13図 TMバンド3のCCT値と腐植含量の常用対数値 [LOG₁₀(腐植%)] の関係

破線は95%の信頼限界, データ数30点

めた推定腐植含量が一致するかを検討した。その結果、第14図に示すように相関係数は0.96と高く、RMSE (Root Mean Square Error: 推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根) は0.057 (腐植含量1.14%に相当) と低く、両者はほぼ1:1に対応した。したがって、推定腐植含量を用いても精度の面では問題がなく、TMバンド3から推定した腐植含量は現状の畑土壌の腐植含量と良く一致した。



第14図 TMバンド3による推定腐植含量の検証

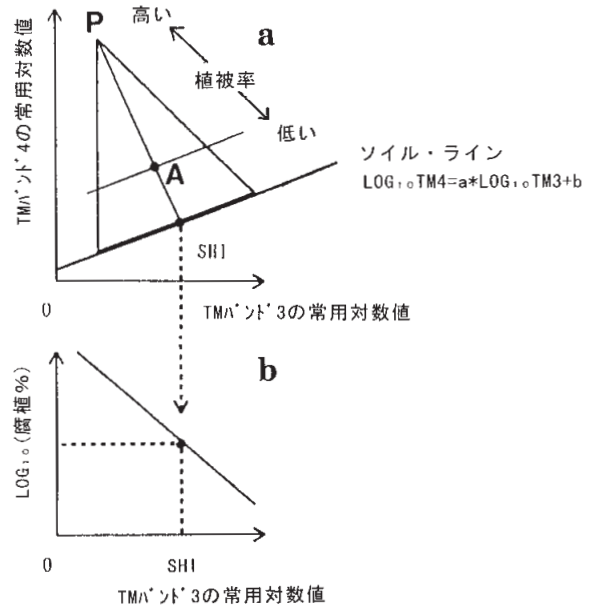
(3) 植生下にある土壌の腐植含量推定法

これまで裸地状態にある畑土壌の腐植含量はランドサットデータのTMバンド3から推定できることを述べた。しかし全ての畑地が裸地状態とはいえ、ランドサットTMデータには植生の部分も含まれている。植生があるとTMバンド3はクロロフィルによる吸収のため反射が低くなり、腐植含量推定の精度が落ちる。そこで植生の影響を消去して植生部を裸地へ変換する必要があるため、その方法を検討した。

ア. 推定原理

第15図 a に示すように、植生が高い反射を示す LOG_{10}TM バンド3 と LOG_{10}TM バンド4 の散布図を作成すると、頂点 P と各画素 A を結ぶ直線の傾きは土壌指数 (SI) と呼ばれ、この直線上の各点の土壌腐植含量は等しくなる (Fukuhara ら, 1979; 福原ら, 1990)。SI の算出は次式による。

$$\text{SI} = (Y_p - Y) / (X_p - X) \quad (2)$$



第15図 植生の影響を除去し、土壌の反射率を強調するための模式図 (福原ら, 1979)

- P: 植生の被覆率が100%の点 (植生)
- A: 植生のある観測点
- SHI: 植生の被覆率が0%の点 (土壌)

ここで、 X_p : 頂点 P の LOG_{10}TM バンド3 座標、 Y_p : 頂点 P の LOG_{10}TM バンド4 座標、 X : 画素 A の LOG_{10}TM バンド3 座標、 Y : 画素 A の LOG_{10}TM バンド4 座標

頂点 P と各画素 A を結ぶ直線がソイル・ラインと交差する点の LOG_{10}TM バンド3 座標 (これを SHI とする) は、この直線上の画素から作物の影響を除去したものである。SHI は土壌指数 (SI) とソイル・ラインから求めることができる。

$$\text{LOG}_{10}\text{TM}3 (\text{SHI}) = \{ (Y_p - b) X - X_p Y + b X_p \} / (a X - Y - a X_p + Y_p) \quad (3)$$

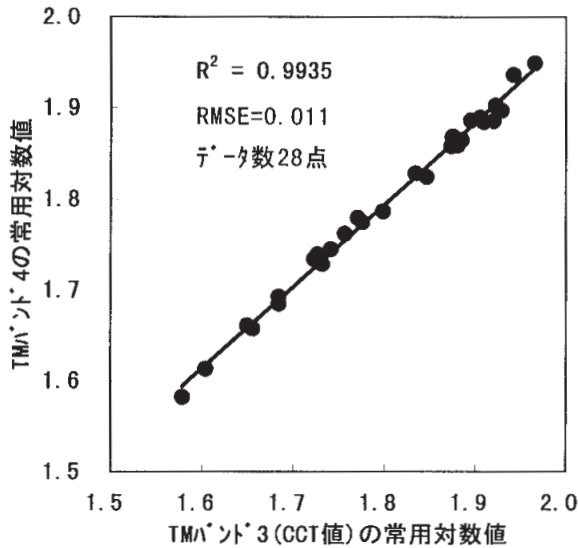
ここで、 a : ソイル・ラインの傾き、 b : ソイル・ラインの LOG_{10}TM バンド4 切片

LOG_{10}TM バンド3 (SHI) と腐植含量との関係は、第15図 b に示すように負の直線関係にある。したがって、この関係から植生がある画素の腐植含量が推定できる。

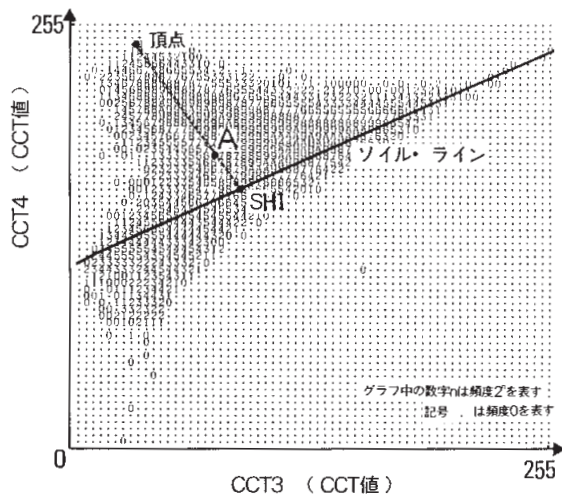
イ. 十勝地方での結果

前出の(2)の解析では、裸地のみを対象にしているため、1984年5月21日と1985年5月24日の2時期のデータを用いても秋播コムギ畑や牧草地は植生があるので腐植含量推定の対象からはずれてしまう。そこで、裸地はソイル・ラインから直接推定し、

植生のある畑の場合には LOG_{10}TM バンド 3 を裸地の LOG_{10}TM バンド 3 に変換することを検討した。



第16図 1985年におけるソイル・ライングラフ



第17図 1985年5月24日の LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4の2次元ヒストグラム

ただし、 LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4の値を0~255の値に変換した。頂点は植被率100%の点で、Aは植被のある任意の画素、SHIはAから植被の影響を除去した裸地の値

まず、第16図に示すように、1985年5月24日の裸地サンプル28地点における LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4を用いてソイル・ラインを検討した結果、1985年のソイル・ラインは次式④で示された。ソイル・ライン上の画素は植被率が0%であり、植被率が大きくなるとその画素はソイル・ラインから離れた位置(上方)にプロットされる。

$$\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}4 = 0.9021\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3 + 0.171 \quad r=0.997^{**} \text{ (データ数28点)} \quad \text{④}$$

次に、主対象地域の1985年5月24日の LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4の2次元ヒストグラムは第17図となった。ただし、 LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4の対数値では狭い範囲に数値が偏るので、図中では対数値を次式により0~255のCCT値に変換してプロットした。

$$\text{CCT}3 = 345\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3 - 432 \quad \text{⑤a}$$

$$\text{CCT}4 = 204\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}4 - 184 \quad \text{⑤b}$$

続いて、第17図のグラフからソイル・ラインから最も離れた頂点の座標を読みとると、その値は LOG_{10}TM バンド3 = 1.415, LOG_{10}TM バンド4 = 2.286であった。

この頂点は植被率100%の地点となり、この頂点と各画素Aを通る直線を引くとその傾きは土壌指数であり、この直線とソイル・ラインの交点SHIの LOG_{10}TM バンド3座標は、この直線上の画素から作物の影響を除去したものである。

ある画素Aの座標を(X, Y), 交点SHIの座標を(LOG_{10}TM バンド3, LOG_{10}TM バンド4)とすると、土壌指数は次式で表される。

$$\frac{Y-2.286}{X-1.415} = \frac{\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}4-2.286}{\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3-1.415}$$

これを LOG_{10}TM バンド4について解き、ソイル・ラインの式④に代入すると、交点SHIの LOG_{10}TM バンド3座標は次のようになる。

$$\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3 = (2.115X - 1.415Y + 0.242) / (0.902X - Y + 1.010) \quad \text{⑥}$$

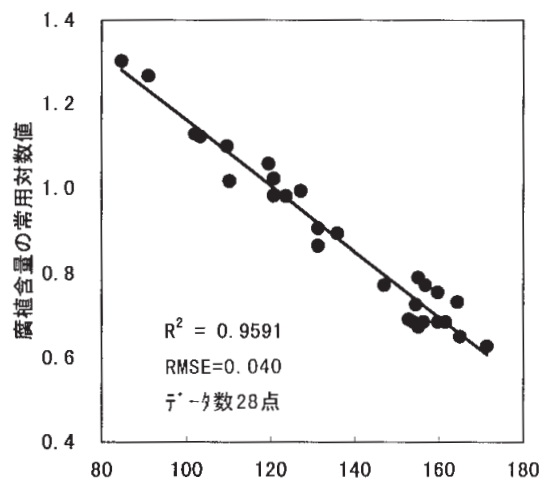
式⑤a, ⑤bをそれぞれ LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4について解き、⑥式のXとYに代入すると、

$$\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3 = (0.006\text{CCT}3 - 0.007\text{CCT}4 + 1.615) / (0.003\text{CCT}3 - 0.005\text{CCT}4 + 1.237) \quad \text{⑦}$$

となった。

⑦式で交点の LOG_{10}TM バンド3座標を求めた後、これを画像データとして扱うために再び⑤a式を適用して0~255の新しいCCT値に線形変換した。この値を変換TM3とすると、変換TMバンド3から腐植含量を推定するために28地点の腐植含量データ(LOG 腐植%)とその地点の変換TMバンド3との回帰式を求めた結果、次の推定式が得られた(第18図)。

変換 TMバンド 3 = 247.772 - 125.540 LOG₁₀ (腐植%)
 r = 0.977 (データ数28点) ⑧



第18図 変換 TMバンド3の CCT 値と腐植含量の常用対数値の関係

変換 TM バンド 3 は、各画素の LOGTM バンド 3 から植被の影響を除去した値を 0 ~ 255 の CCT 値に変換した値である。

2. 考 察

実測した腐植含量データと7つの TM バンドの平均 CCT 値との回帰分析を行った結果、1984、1985年とも TM バンド 1 ~ TM バンド 4 の方が TM バンド 5 ~ TM バンド 7 よりも高い相関係数が得られた。また相関係数は1984年より1985年が全体に高く、しかも TM バンド 1 ~ TM バンド 4 で0.9以上の極めて高い相関係数が得られた。

これまでの研究で、「土壌の腐植含量は、可視および近赤外の波長域における土壌の反射に強く影響する」(Baumgardner ら, 1985) と発表され、可視域の広い波長域で相関がある (Baumgardner ら, 1970, 1985; Mathews ら, 1973; 福原, 1975) とされてきた。今回の検討でも可視域の相関係数が高く、同様な結果であった。また、TM バンド 1 ~ TM バンド 4 の短い波長域では腐植含量と土壌水分がともに反応する (福原, 1975; 福原ら, 1986) ので、土壌が乾燥するほど腐植含量の判別精度は向上すると理解できる。すなわち、土壌表層からの反射は、水分の被膜の小さい土壌粒子からと土壌粒子間隙に保持される土壌水分からの合計量と模式的に考えられる。両年の TM データが得られたときの土壌水分は、いずれの土壌でも1984年が1985年より多い (第8表)。1984年のような多水分時に

は、土壌粒子を包む水分被膜も厚くなり、土壌粒子間隙に保持される水分も多くなるため土壌からの反射強度が低くなる。逆に1985年のような乾燥時には、土壌粒子の水分被膜も薄く、しかも土壌粒子間隙に保持される水分も少なくなるので、土壌からの反射強度は全体に高くなる。このことが、1985年の相関係数が1984年のそれよりも全体に高かった理由と考えられる。

次に、腐植含量として乾土%の値そのものより常用対数値を用いた方が、しかも表層値より土層25 cm の加重平均値を用いた方が相関係数は高まった。常用対数値を用いることにより相関係数が高まった理由としては、供試土壌の腐植含量 (乾土%) が 2% ~ 16% の広範囲にわたるため、対数をとってデータを圧縮した方が CCT 値にうまく対応したものと考えられる。また、表層値を使用するより25 cm 平均値を用いた方が相関係数は高かったが、これは十勝地方における畑作の耕起深は昭和40年代の15cm 前後から現在の25cm 前後へと変化していることから、25cm 平均値が現状の畑土壌の実態を反映したためと考えられる。

第7表の結果から、本解析では腐植含量の推定に1985年の TM バンド 3 の CCT 値を使用し、1985年の植生部は1984年の土壌データで補完することとしたが、TM バンド 3 を使用する理由は以下のとおりである。①1985年の TM バンド 1, TM バンド 2, TM バンド 3, TM バンド 4 の相関係数には差がなく、TM バンド 3 の相関係数も0.924と高かった。②補完する1984年の相関係数は1985年に比べて全体に低い、TM バンド 3 が最高となった。③TM バンド 1 と TM バンド 2 では酸化鉄の影響が現れるが、TM バンド 3 ではこの影響を受けない (福原, 1975; 福原ら, 1986) 利点があり TM バンド 1, TM バンド 2 より安定して腐植含量と高い相関が得られる。このことは、Fukuhara ら (1979) が、1979年の MSS データを用いて十勝地方の代表的な5種類の土壌で検討した結果と一致することから裏づけられる。Bhatti ら (1991) は、Washington 東部の複雑に侵食された丘陵地において、対象地域全体の表土の腐植含量が、裸地状態の時期に撮影されたランドサットデータの TM バンド 5 (中間赤外) と TM バンド 4 (近赤外) の比から推定されたことを報告している。選択されたバンドが異なるが、十勝ではハイドロカテナの発達により、土壌の腐植含

量の多い土壌から少ない土壌まで幅広く分布すること(菊池ら, 1973), 土壌水分が適当にあって過乾にならないことなどが影響しているためと推察された。

Fukuharaら(1979)は, 植生の反射の影響を除去した土壌値の推定が, 赤バンドと近赤外バンドから第15図のようにモデル化できることを報告していた。そこで, 本研究でも第15図のモデルを適用して検討を加えた結果, 各画素のTMバンド3のCCT値をそのまま使う代わりに, $\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3 - \text{LOG}_{10}\text{TMバンド}4$ 座標空間で頂点および各画素を通るソイル・ラインとの交点の $\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3$ 座標を使うことにした。この値を使うことにより裸地だけでなく, 秋播コムギ畑や新しい牧草地のように植被率の低い畑地の腐植含量も植被の影響を除去して推定できた。

3. まとめ

北海道の十勝南部を解析対象地として, ランドサットTMデータから裸地状態の畑地表土の腐植含量を推定する手法を確立した。作土層25cmの腐植含量はTMバンド3から高精度で推定できること, 土壌は乾燥状態の方が推定精度は高まることを明らかにし,

$\text{LOG}_{10}(25\text{cm 平均値, 腐植}\%) = 1.6112 - 0.0120 \text{TMバンド}3$ (1985)

($R^2=0.854$ RMSE=0.078 データ数30点)

の推定式を得た。

裸地に加えて植生下の土壌の腐植含量も推定する手法を検討した結果, 各画素のTMバンド3のCCT値をそのまま使う代わりに, $\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3 - \text{LOG}_{10}\text{TMバンド}4$ 座標空間で頂点および各画素を通るソイル・ラインとの交点の $\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3$ 座標を用いる方法が有効であった。この値を使うことにより裸地だけでなく, 秋播コムギ畑や新しい牧草地のように植被率の低い畑地の腐植含量も植被の影響を除去して推定でき, 裸地はソイル・ラインから直接推定し, 植生のある畑の場合には裸地の $\text{LOG}_{10}\text{TMバンド}3$ に変換してから腐植含量を推定した。得られた推定式は次のとおりである。

変換 $\text{TMバンド}3 = 247.772 - 125.540 \text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$

($R^2=0.959$ RMSE=0.040 データ数28点)

IV. 畑土壌の水分特性の評価法

北海道十勝地方に分布する畑土壌の水分特性に関する調査および試験研究は数多く行われ(増島, 1962; 増島ら, 1962; 林ら, 1972; 菊池ら, 1973; 木下, 1973; 古畑, 1973, 1980; 塩崎ら, 1984; 北海道開発局, 1984, 1986, 1988), 土壌タイプごとの特徴は明らかにされてきた。有効水分容量については木下(1973)の報告や仮比重値を用いて有効水分容量図を作成した神山ら(1993)の報告がある。しかし, 同じ土壌統に属するものでも, 成因, 母材, 地形等の相違から土壌水分特性の異なる場合があり, 一概に包括し得ない難点も指摘されている(農林水産技術会議事務局, 1987)。また, 圃場一枚ごとを対象とする水分供給力の土壌診断は, その必要性は認めながらも, 分析法をはじめとした数々の制約から実施されていない現状にある。

そこで本章では, ランドサットTMデータを用いて, 畑土壌の水分特性, すなわち土壌水分率, 乾燥速度および有効水分容量などを広域的に, しかも高精度に把握する手法の確立を目的とした。

1. 土壌水分張力および土壌水分率の評価法

本節のねらいは, 土壌水分張力および土壌水分率の推定手法を確立することである。

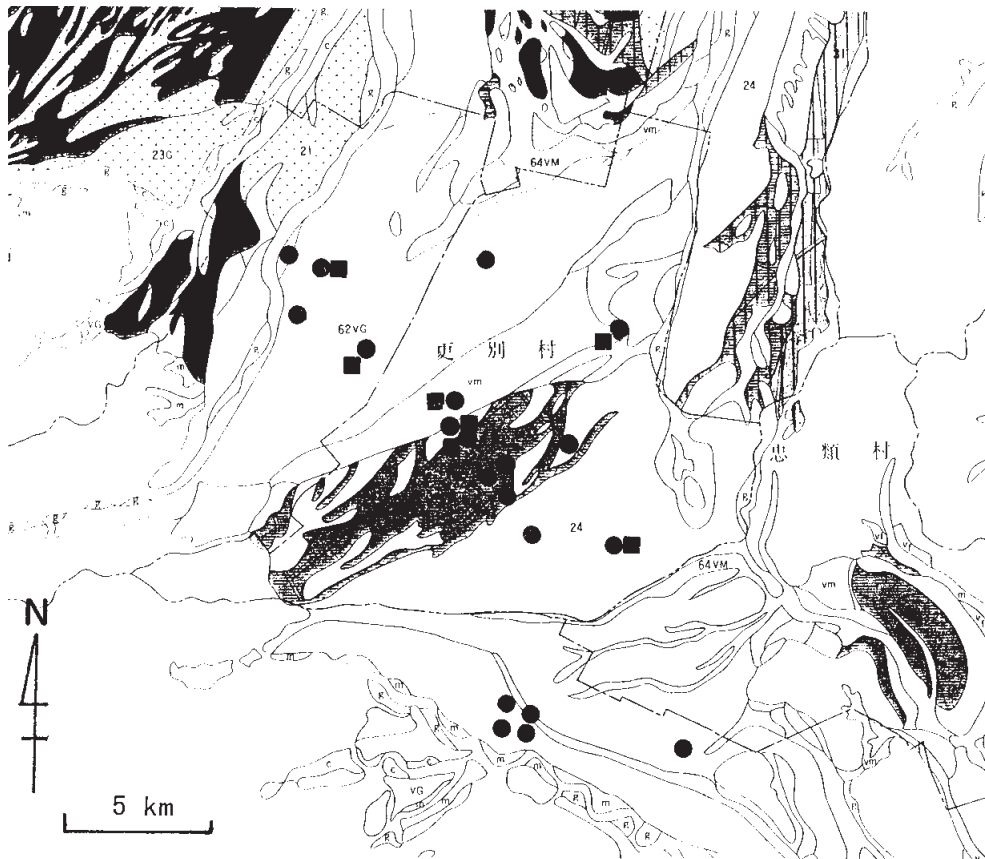
1) 研究方法

(1) 解析地域

解析地域は中札内村と更別村である(第19図)。供試した土壌型と調査点数は, 湿性厚層黒色火山性土が2地点, 黒色火山性土が1地点, 礫質褐色低地土が1地点, 中粗粒褐色低地土が1地点, 細粒褐色低地土が1地点, 礫質灰色低地土が1地点である。以上の7地点はいずれも農家圃場で, 圃場にはテンサイが作付されていたが, 移植後1ヶ月以内であり畑地表面はほぼ裸地状態であった。

(2) 土壌水分データ

土壌水分の測定項目は土壌水分張力(PaとpF), 水分率(Mv%, 土壌水分の土壌容積当たりの百分率)および含水比(Wc%, 土壌水分の乾土重量当たりの百分率)である。これらの値は以下の方法で求めた。まず1984年5月21日および1985年5月24



第19図 解析地域における土壌水分特性調査地点

■土壌水分張力・水分率および乾燥速度 ●有効水分容量

日のランドサット観測日に、調査地点に設置されたテンシオメータによって深さ10cmの土壌水分張力を測定した。これらのデータは札内川地区土壌水分特性調査（北海道開発局，1986）によるもので、測定は1日1回、午前9時から10時の間に行なわれた。

次に、測定されたPaおよびpF値を、別途作成した「pF-水分曲線」を用いて水分率Mvに換算した。「pF-水分曲線」は、未攪乱のまま採取した土壌コアを用いて15.5kPa（pF2.2）までを吸引法、1554kPa（pF4.2）までを加圧板法にて作成した。具体的な方法については第3節で記述した。また、含水比Wcは「pF-水分曲線」をもとに作成した「pF-含水比曲線」により換算して求めた。

(3) 使用した衛星データ

土壌の腐植含量の解析に使用した衛星データと同一である。すなわち、1984年5月21日と1985年5月24日に観測された、シーン番号106-30のランドサット5号TMデータである。

2) 結果

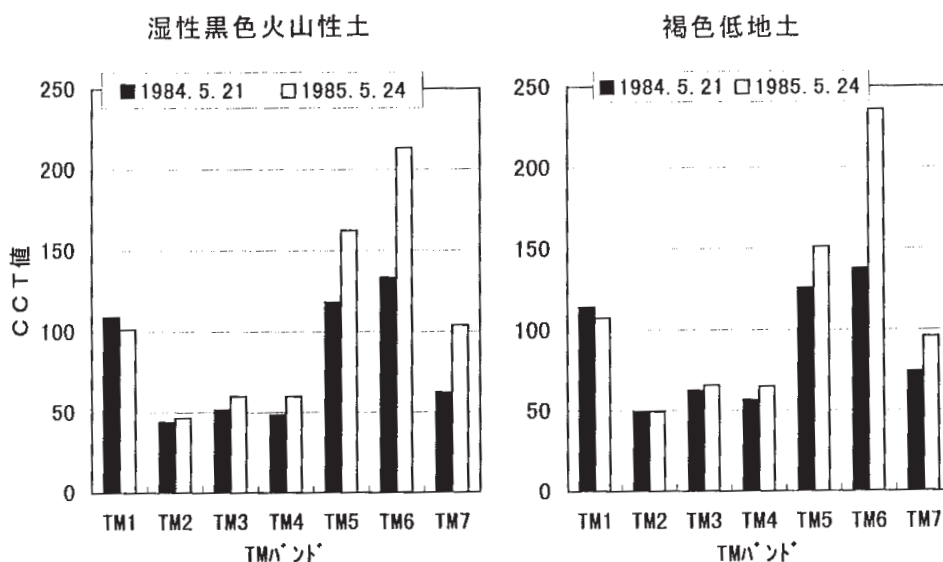
(1) 土壌別の土壌水分張力，水分率および含水比

TM観測日における深さ10cmのkPa，pF，MvおよびWcの測定結果を第8表に示した。pFの全土壌平均値は1984年が2.33，1985年が2.61であり、土壌は1985年の方が乾いた状態にあった。また、両年のMvの差は1%であったが、Wcでは両年で差がなかった。土壌がより乾燥した1985年における深さ10cmの土壌水分を土壌統群別に比較すると、湿性黒色火山性土が最大で礫質灰色低地土が最小であった。その差はMvで約22%，Wcで約34%であった。土壌に保持される水分の大部分は毛管孔隙によって保持されるから、毛管孔隙の多少が土壌水分の多少を左右する。礫質灰色低地土の土壌水分が最小となったのは、4.9kPa（pF1.7）付近の非毛管孔隙は多いが、それに比較して毛管孔隙が少ない（塩崎ら，1984）ことによる。なおデータとしては示さなかったが、深さ10cmにおけるpFとMv

第8表 ランドサット観測日における深さ10cmの土壌kPa, pF, 水分率および含水比

土壌統群名	kPa		pF		水分率(Mv%)		含水比(Wc%)	
	1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985 ^{a)}
湿性厚層黒色火山性土	14.2	22.5	2.16	2.36	53.8	52.8	68.7	67.1
湿性厚層黒色火山性土	14.2	35.6	2.16	2.56	43.1	41.6	53.0	51.2
黒色火山性土	15.5	38.2	2.20	2.59	44.5	43.9	56.5	57.2
細粒褐色低地土	18.3	48.0	2.27	2.69	46.3	45.0	40.8	39.8
中粗粒褐色低地土	27.6	37.3	2.45	2.58	40.3	40.0	37.4	37.1
礫質褐色低地土	33.2	64.8	2.53	2.82	36.6	35.8	34.3	33.4
礫質灰色低地土	34.0	45.9	2.54	2.67	32.0	30.6	33.6	33.5
平均値	22.4	41.7	2.33	2.61	42.4	41.4	45.3	45.6

a) ランドサット観測日：1984年5月21日，1985年5月24日



第20図 湿性黒色火山性土と褐色低地土の分光特性

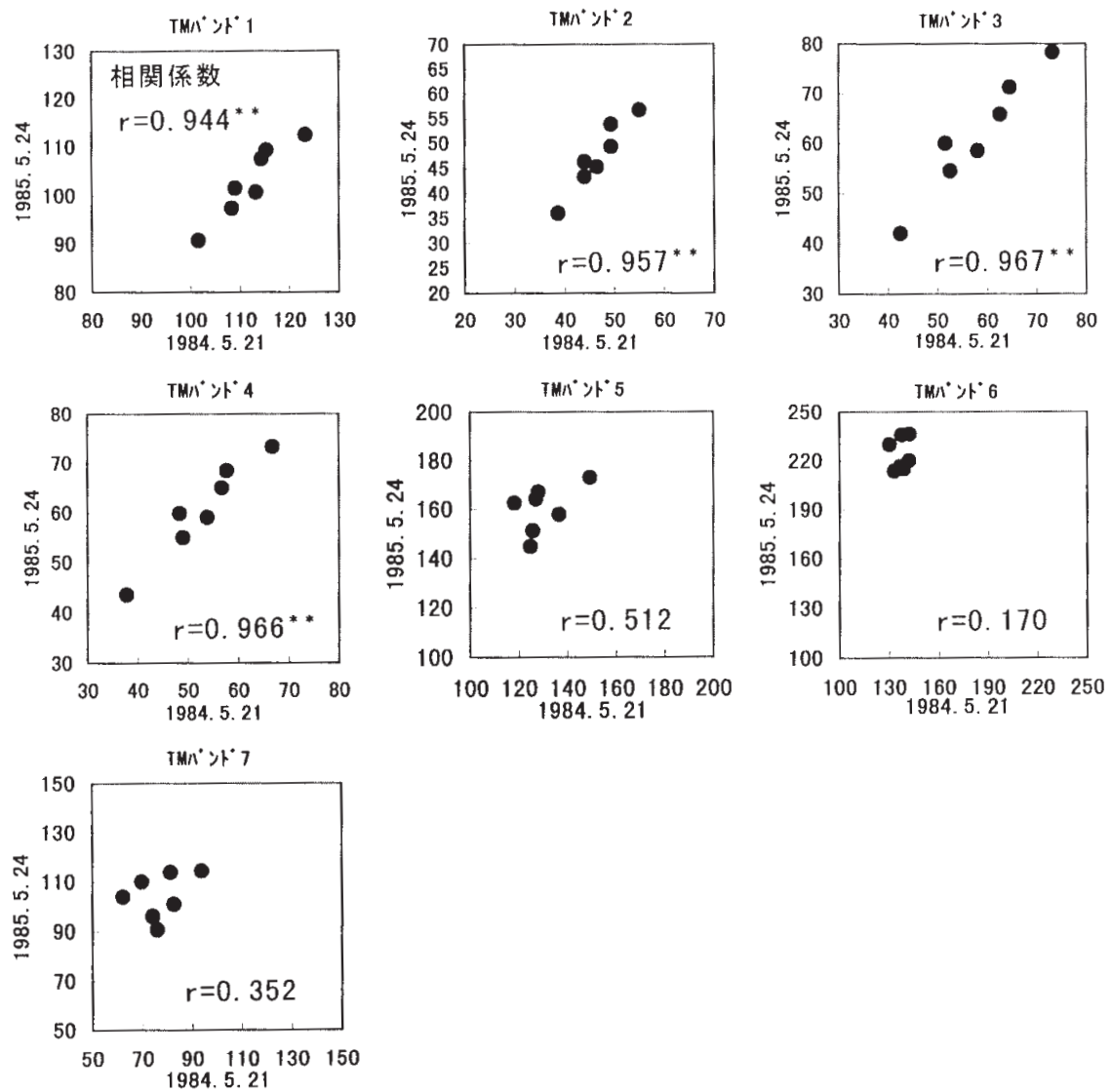
の相関係数は，1984年が-0.851，1985年が-0.734で1984年の方が高かったが，両年を併せると-0.623で有意とならなかった。また，pFとWcの相関係数は1984年が-0.880，1985年が-0.843で1984年の方が高かったが，両年を併せると-0.640で有意とならなかった。

(2) 土壌の水分張力，水分率および含水比の推定に最適なバンド

まず，土壌水分の異なる1984年と1985年に調べた湿性黒色火山性土と褐色低地土の分光特性を第20図に示した。両土壌とも土壌水分の少なかった1985年が，水分の多かった1984年よりも高いCCT値を示した。また，土壌間のCCT値差は7つのバンドとも大きくなかった。調査地点のCCT値を，バンドごとの1984年と1985年との相関図にして第21図

に示した。1984年と1985年のCCT値の相関関係はTMバンド1からTMバンド4までは0.9以上となったが，TMバンド5からTMバンド7では有為な関係は認められなかった。TMバンド5からTMバンド7では，より乾燥していた1985年のCCT値が1984年より明らかに大きな値を示した。

1984および1985両年の7バンドのCCT値を説明変数とし，実測したkPa, pF, Mv, Wcの値を目的変数とする回帰分析を行った。第9表に単回帰分析の相関係数の結果を示した。まずkPaとpFの場合は，1985年より1984年の相関係数が高かったが，1984年のTMバンド1～TMバンド4でも相関係数は0.851から0.916と高くなく，単バンドのみでは満足する相関係数が得られなかった。次にMvとWcの場合は，相関係数は1984年より1985年の



第21図 調査地点における1984年と1985年の CCT 値の関係
データ数7点

第9表 調査地点の CCT 値と深さ10cmの土壌 k P a, p F, 水分率および含水比との相関係数

バンド	k P a			p F			水分率(Mv%)			含水比(Wc%)		
	1984	1985	両年	1984	1985	両年	1984	1985	両年	1984	1985	両年
TM 1	.851**	.703**	.058	.857**	.754**	.073	-.928**	-.961**	-.727**	-.925**	-.937**	-.744**
TM 2	.884**	.751**	.614*	.891**	.798**	.624*	-.945**	-.985**	-.959**	-.925**	-.913**	-.908**
TM 3	.908**	.717**	.684**	.916**	.774**	.714**	-.939**	-.985**	-.956**	-.943**	-.916**	-.915**
TM 4	.858**	.730**	.791**	.869**	.795**	.825**	-.940**	-.974**	-.903**	-.937**	-.933**	-.866**
TM 5	.096	-.476	.495	.135	-.407	.553	.001	.573	.080	-.313	.525	.022
TM 6	.120	-.659*	.617*	.133	-.679**	.642*	.315	.610*	.004	-.054	.514	.022
TM 7	.198	-.604*	.470	.227	-.584*	.533	.097	.742**	.156	-.252	.688**	.078

注) データ数14点, ** : 有意水準 1%, * : 有意水準 5%

第10表 土層10cmの土壌水分張力(kPa, pF), 土壌水分率(Mv%)および含水比(Wc%)推定のためのバンドの選択

項目	kPa	F 検定	pF	F 検定	Mv	F 検定	Wc	F 検定
選択されたバンド①	TM1・2		TM1・4		TM2		TM1・4	
相関係数 R	0.907		0.920		-0.959**		0.935	
寄与率 R ²	0.823	**	0.846	**	0.920	**	0.874	**
RMSE	6.44		0.086		2.00		4.69	
①に「腐植含量」を加えたときの重相関係数 R	0.926		0.934		0.961		0.987	
寄与率 R ²	0.857	**	0.873	**	0.924	**	0.975	**
RMSE	6.05		0.081		1.95		2.17	

注) データ数14点, ** : 有意水準 1%, 腐植含量は乾土%の値
RMSE は推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根

第11表 土層10cmにおける土壌水分張力 (kPa, pF), 土壌水分率 (Mv%) および含水比 (Wc%) の推定式

項目	推 定 式
kPa	$kPa = 132.82 - 1.9563TM1 + 2.8468TM2 - 26.881\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$ (R ² =0.857 RMSE=6.05 データ数14点)
pF	$pF = 3.5215 - 0.0160TM1 + 0.0176TM4 - 0.3729\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$ (R ² =0.873 RMSE=0.081 データ数14点)
Mv	$Mv = 104.73 - 1.2551TM2 + 4.3390\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$ (R ² =0.924 RMSE=1.95 データ数14点)
Wc	$Wc = 34.534 - 0.1188TM1 - 0.2664TM4 + 43.633\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$ (R ² =0.975 RMSE=2.17 データ数14点)

注) TM1, TM2, TM4はそれぞれ TM バンド 1, 2, 4 の1984年と1985年の CCT 値。腐植含量は乾土%, RMSE は第10表と同じ。

方が、また Wc に比べて Mv の方が高く、さらに両年とも TM バンド 1 ~ TM バンド 4 で 0.9 以上と高かった。Mv は TM バンド 2 の相関係数が最も高く、単バンドで推定可能であった。一方 Wc では、両年の相関係数は単バンドは Mv ほど高くなかった。このように、Mv を除いて単バンドのみでは満足する相関係数が得られなかったため、両年のデータを用いてステップワイズ法による重回帰分析を行い、最小限のバンド数で寄与率および F 値が高く、しかも RMSE の小さい組合せを求めた。その結果、kPa では TM バンド 1 と TM バンド 2 が、pF では TM バンド 1 と TM バンド 4 が選択され、寄与率は 0.823 (kPa) ~ 0.920 (pF) とかなり高くなった。Wc も kPa や pF と同様に重回帰分析の結果、TM バンド 1 と TM バンド 4 が選択された (第10表)。

TM バンド 1 ~ TM バンド 4 の可視、近赤外域では土壌水分とともに腐植含量にも反応する (福原, 1975; 福原ら, 1986) ことが知られているので、

腐植含量を組み入れることで土壌水分の推定精度が高まると予想された。そこで腐植含量 (乾土%, 容積%, これらの常用対数値の 4 種類の数値) を説明変数に加えて検討した結果、寄与率は乾土%の常用対数値を用いたときに最高となり、RMSE も低下し、推定精度は高まった (第10表)。

以上、kPa の推定には TM バンド 1 と TM バンド 2 を、pF の推定には TM バンド 1 と TM バンド 4 を、Mv の推定には TM バンド 2 を、Wc の推定には TM バンド 1 と TM バンド 4 を説明変数として用い、さらに推定式には腐植含量 (乾土%の常用対数値) を組み入れることにした。

(3) 土壌水分張力および水分率の推定式

上記の結果を受けて、1つ~2つの TM バンドと腐植含量を説明変数とする重回帰推定式が得られた (第11表)。これらの結果から、ランドサットデータから土壌水分張力と水分率の分布図の作成が可能と判断された。

2. 土壌の乾燥速度の評価法

本節のねらいは、無降雨期間における畑土壌の乾燥速度（日当たり kPa と pF の上昇速度，水分率 Mv%の低下速度）の推定手法を確立することである。

1) 研究方法

(1) 解析地域

解析地域は第1節と同じ中札内村と更別村である。供試した土壌型と調査点数の関係は、湿性厚層黒色火山性土が1地点，黒色火山性土が3地点，細粒質褐色低地土が1地点，中粗粒褐色低地土が4地点，礫質褐色低地土が1地点，褐色火山性土が2地点となっており，合計12地点で測定した。

(2) 無降雨期間における土壌の乾燥速度のデータ

解析に用いた kPa および pF は，ランドサット観測日に調査地点に設置されたテンシオメータで実測された深さ10cm の値である。かなりの量の降雨後，晴天が連続した乾燥過程においては，テンシオメータで観測可能な範囲内で kPa および pF はほぼ直線的に上昇するので，深さ10cm における測定日と前日の差を取り，その10日間（1985年7月20日～7月30日）の平均値を日当たりの kPa 上昇速度（dkPa/day）および pF 上昇速度（dpF/day）とした。また，「pF-水分曲線」を用いて pF を Mv に読みかえ，Mv 低下速度（-dMv/day）を求めた。

(3) 使用した衛星データ

土壌の腐植含量の解析に使用した衛星データと同一である。すなわち，1984年5月21日と1985年5月24日に観測された，シーン番号106-30のランドサット5号 TM データである。

2) 結果

(1) 土壌別の dkPa/day, dpF/day, -dMv/day の値

深さ10cm で測定した dkPa/day, dpF/day および -dMv/day の測定結果を第12表に示した。これらの平均値を土壌別にみると，dkPa/day では中粒質褐色低地土が4.26と最も高く，褐色火山性土がこれに続き，湿性黒色火山性土が3.29と最も低かった。dpF/day では値が0.120～0.099の範囲にあり，土壌間の差が小さかった。-dMv/day では褐色火山性土が1.33と最も高く，湿性黒色火山性土がこれに続き，細粒質褐色低地土が0.74と最も低かった。

(2) dkPa/day, dpF/day, -dMv/day の推定に最適なバンド

1984および1985両年の7バンドの CCT 値を説明変数とし，実測した dkPa/day, dpF/day, -dMv/day の値を目的変数とする回帰分析を行った。第13表に相関係数の結果を示した。相関係数は，dkPa/day と dpF/day については1984年より1985年の方が高かったが，-dMv/day では逆に1984年の方が高かった。1984年の-dMv/day を除いたいずれの項目も相関係数は高くなく，単バンドのみでは満足する結果が得られなかった。そこで，年度ごとにステップワイズ法による重回帰分析を行い，最小限のバンド数で寄与率および F 値が高く，しかも RMSE の小さい組合せを求めた（第14表）。重回帰分析の結果，dkPa/day, dpF/day, -dMv/day のいずれも寄与率は1985年の方が高く，dkPa/day では TM バンド' 1 と TM バンド' 5 が，dpF/day では TM バンド' 1 と TM バンド' 4 が，-dMv/day では TM バンド' 1 と TM バンド' 3 がそれぞれ選択された。また，土壌水分の推定と同様に，腐植含量を組み入れることで推定精度が高まると予

第12表 土壌別の乾燥速度（dkPa/day, dpF/day, -dMv/day）の測定結果

土壌統群名	データ数	乾燥速度 ^{a)}		
		dkPa/day	dpF/day	-dMv/day
湿性厚層黒色火山性土	1	3.63	0.120	0.75
湿性黒色火山性土	3	3.29(2.62～3.92)	0.110(0.102～0.123)	1.22(0.96～1.40)
細粒質褐色低地土	1	3.34	0.099	0.74
中粒質褐色低地土	4	4.26(3.26～4.70)	0.120(0.103～0.129)	1.02(0.94～1.14)
礫質褐色低地土	1	3.34	0.120	1.06
褐色火山性土	2	4.08(3.26～4.90)	0.120(0.094～0.146)	1.33(0.89～1.77)

a)：平均値（最小値～最大値）で表示

第13表 調査地点の CCT 値と深さ10cm の乾燥速度
(dkPa/day, dpF/day, -dMv/day) との相関係数

年次バンド	1984年			1985年		
	dkPa/d	dpF/d	-dMv/d	dkPa/d	dpF/d	-dMv/d
TM 1	0.363	0.520	-0.913**	0.811**	0.799**	-0.835**
TM 2	0.428	0.510	-0.930**	0.765**	0.765**	-0.885**
TM 3	0.315	0.436	-0.911**	0.745**	0.753**	-0.895**
TM 4	0.585*	0.656*	-0.910**	0.680*	0.654*	-0.885
TM 5	-0.849**	-0.616*	0.211	-0.935**	-0.853**	0.549
TM 6	-0.128	0.017	0.617*	0.348	0.351	0.378
TM 7	-0.742**	-0.546	0.252	-0.884**	-0.845**	0.707*

注) データ数12点, ** : 有意水準 1%, * : 有意水準 5%

第14表 土層深さ10cm の土壌の乾燥速度 (dkPa/day, dpF/day, -dMv/day) 推定のためのバンドの選択

項目	1984年						1985年					
	dkPa/d	F 検	dpF/d	F 検	-dMv/d	F 検	dkPa/d	F 検	dpF/d	F 検	-dMv/d	F 検
選択されたバンド①	TM1・5		TM2・4		TM2		TM1・5		TM1・4		TM1・3	
相関係数 R	0.934		0.852		-0.930**		0.938		0.945		0.952	
寄与率 R ²	0.872	**	0.727	**	0.865	**	0.880	**	0.894	**	0.907	**
RMSE	0.272		0.0084		0.107		0.263		0.0052		0.094	
①に「腐植含量」を加えたときの重相関係数 R	0.946		0.861		0.932		0.939		0.965		0.965	
寄与率 R ²	0.894	**	0.741	**	0.870	**	0.881	**	0.932	**	0.932	**
RMSE	0.260		0.0085		0.111		0.276		0.0044		0.084	

注) データ数12点 ** : 有意水準 1% F 検 : F 検定

第15表 深さ10cm における乾燥速度 (dkPa/day, dpF/day, -dMv/day) の推定式

項目	推 定 式
dkPa	$\text{dkPa} = 0.0118\text{TM}1_{85} - 0.0507\text{TM}5_{85} - 0.1229\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%) + 10.375$ (R ² =0.880 RMSE=0.276 データ数12点)
dpF	$\text{dpF} = [5.903\text{TM}1_{85} - 3.842\text{TM}4_{85} + 17.69\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%) - 284.4] \times 10^{-3}$ (R ² =0.932 RMSE=0.004 データ数12点)
-dMv	$-\text{dMv} = 0.1249\text{TM}1_{85} - 0.1075\text{TM}3_{85} + 0.4107\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%) - 5.4217$ (R ² =0.932 RMSE=0.084 データ数12点)

注) TM1₈₅, TM3₈₅, TM4₈₅, TM5₈₅はそれぞれ1985年の TM バンド 1, 2, 4 の CCT 値で, 腐植含量は乾土%である。RMSE は推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根

想されたので、腐植含量（乾土%、容積%、これらの常用対数値の4種類の数値）を説明変数に加えて検討した結果、乾土%の常用対数値のときに相関係数は最高となった（第14表）。

以上から、土壌の乾燥速度の推定には1985年の TM データが有効であり、dkPa/day の推定には TM バンド 1 と TM バンド 5 を、同じく dpF/day の推定には TM バンド 1 と TM バンド 4 を、-dMv/day の推定には TM バンド 1 と TM バンド 3 を用い、推

定式には腐植含量（乾土%の常用対数値）を組み入れることにした。

(3) dkPa, dpF, -dMv の推定式

上記の結果を受けて、TM バンド 2 つと腐植含量を説明変数とする推定式が得られた（第15表）。これらの結果はランドサットデータから土壌水分の乾燥速度が推定できることを示しており、RMSE の値は全土壌平均値の10%以内に収まっていた。

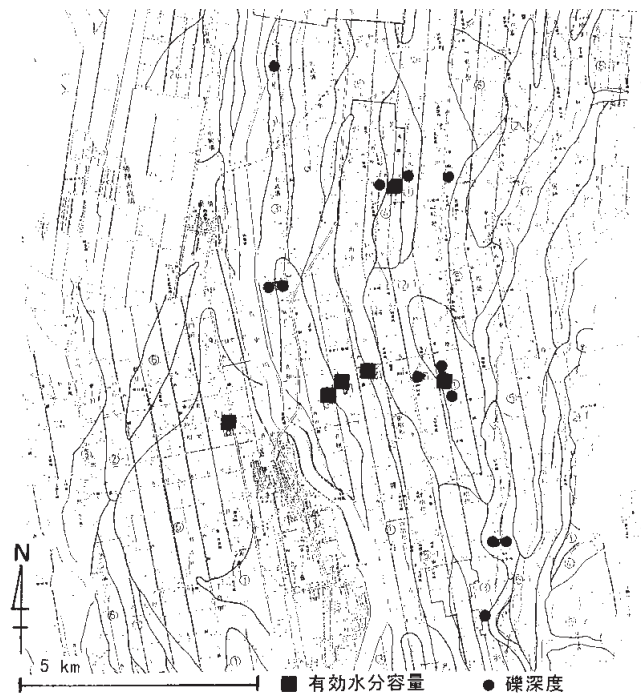
第16表 a 土層の深さ30cm までの土壌型別の有効水分容量

土壌統群名	データ数	有効水分容量 (mm)			礫深度 (cm)
		正常生育	易有効	全有効	
湿性黒色火山性土	4	24~32(28)	39~93(63)	46~121(79)	出現せず
黒色火山性土	2	24~44(35)	63~78(71)	87~ 98(92)	出現せず
褐色火山性土	3	13~21(17)	34~49(41)	47~ 65(57)	出現せず
褐色低地土	7	16~31(24)	49~79(61)	63~ 98(79)	46
灰色低地土	1	31	59	72	出現せず
褐色森林土	3	24~36(32)	52~62(55)	66~ 75(69)	出現せず

注) 数値の表示は最小~最大 (平均)

第16表 b 土層の深さ別の有効水分容量(全土壌の平均値)

土層の深さ	有効水分容量(mm)		
	正常生育	易有効	全有効
15cm	13.5	29.8	38.4
30cm	26.2	58.2	75.4
50cm	39.7	86.0	113.0



第22図 検証地域における土壌水分調査地点 (北部地域)

3. 土壌の保水力 (有効水分容量) の評価法

本節のねらいは、畑土壌における保水性 (有効水分容量) の推定手法の確立である。

1) 研究方法

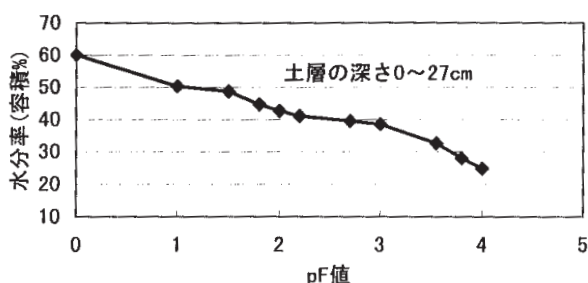
(1) 解析地域

解析地域は中札内村, 更別村, 大樹町である (第19図)。調査地点は「十勝管内土壌分類図」

(北海道開発局, 1973) をもとに選定した20地点で, その土壌群および土壌統群名は, 褐色火山性土, 黒色火山性土, 湿性黒色火山性土, 褐色低地土, 灰色低地土および褐色森林土である。各土壌ごとの試料数は第16表に示した。また, 検証地域である北部地域での調査地点は, 褐色火山性土, 黒色火山性土, 湿性黒色火山性土, 褐色低地土, 灰色低地土に位置する6点である (第22図)。

(2) 有効水分容量のデータ

収穫跡地の圃場から一定の土層ごとに容積100mlのコアで不攪乱土壌を採取し、15.5kPa (pF2.2)までを吸引法、それ以上を加圧板法によって、3～4反復の平均値で「pF-水分曲線」を作成した。同曲線から作物が吸収利用できる正常生育有効水分容量〔6.2kPa (pF1.8)～98.1kPa (pF3.0)、容積%、以下同じ〕、易有効水分容量〔6.2kPa (pF1.8)～618.8kPa (pF3.8)〕、全有効水分容量〔6.2kPa (pF1.8)～1554.2kPa (pF4.2)〕を求めた。第23図に黑色火山性土の「pF-水分曲線」の一例を示した。



第23図 黑色火山性土の pF-水分曲線の一例

作物が吸収利用できる土壌水分および有効水分の区分値の設定は、木下の考え(1973)に従った。さらに、深さ15, 30および50cmの土層が保持する水分量(容積%)を降雨量(mm)に換算して(容積%の値は土層の深さ10cm当たりのmmに相当する)回帰分析に供した。有効水分容量を算出するための土層の深さは十勝地方の耕起深、礫深度等を勘案して決めた。

(3) 使用した衛星データ

土壌の腐植含量の解析に使用した衛星データと同一である。すなわち、1984年5月21日と1985年5月24日に観測された、シーン番号106-30のランドサット5号TMデータである。

2) 結果

(1) 畑土壌における土壌型別および深さ別の有効水分容量

土層の深さ30cmまでの土壌型別の各有効水分容量値を第16表 a に、土層の深さ別の各有効水分容量の値を第16表 b に示した。土壌統群別の有効水分容量を平均値で比較すると、黑色火山性土が最

大で褐色火山性土が最小となり、その他の土壌はこれらの範囲内であった。また、深さ別にみると、各有効水分容量は土層の深さにほぼ比例して増大した。

(2) 有効水分容量の推定に最適なバンド

まず、各有効水分容量のデータを目的変数とし、1984年および1985年の7バンドのCCT値を説明変数とする回帰分析を行った結果、単年度における相関係数は1984年が1985年よりも高く、TMバンド5とTMバンド7で0.60～0.70とやや高い値を示した。しかし、相関係数が低いなど満足する精度が得られず、推定式の作成まで至らなかった。そこで、両年における各バンドのCCT値の差(1985年のCCT値から1984年のCCT値を差し引く)をとって回帰分析した結果、易有効水分容量および全有効水分容量と中間赤外波長域のTMバンド5と高い相関のあることが判明し、相関係数は0.78～0.93と高まった(第17表)。土層の深さ別に相関係数の結果をみると、易有効水分容量および全有効水分容量では深くなるほど相関係数は低下するが、これは礫層の存在の影響、とりわけ褐色低地土の影響が大きかった。なお、正常生育有効水分容量のTMバンド5(CCT値差)の相関係数は0.59～0.71と低かった(第17表)が、正常生育有効水分容量とTMバンド5(CCT値差)の両者の常用対数値を用いることにより相関係数は0.64～0.75へと高まった(第18表)。

第17表 有効水分容量とCCT差(1985年-1984年)の土層の深さ別相関係数

有効水分 ¹⁾ 容量	深さ (cm)	相 関 係 数		寄与率 ¹⁾ $\Delta TM5$ と $\Delta TM7$	F検定
		$\Delta TM5$ ²⁾	$\Delta TM7$ ³⁾		
W 1	15	0.593**	0.583**	0.357	*
	30	0.653**	0.618**	0.426	**
	50	0.706**	0.625**	0.511	**
W 2	15	0.926**	0.860**	0.858	**
	30	0.916**	0.821**	0.852	**
	50	0.863**	0.753**	0.773	**
W 3	15	0.911**	0.831**	0.833	**
	30	0.899**	0.819**	0.814	**
	50	0.859**	0.76**	0.757	**

1) W 1 : 正常生育有効水分容量, W 2 : 易有効水分容量, W 3 : 全有効水分容量

2) $\Delta TM5$: 1985年 TM5-1984年 TM5

3) $\Delta TM7$: 1985年 TM7-1984年 TM7

4) 重回帰分析の寄与率

** : 有意水準 1%, * : 有意水準 5%, データ数20点

第18表 正常生育有効水分容量と CCT 差の深さ別相関係数

有効水分容量	深さ (cm)	相 関 係 数		寄与率 LOG△TM5とLOG△TM7 ¹⁾	F 検定
		LOG△TM5	LOG△TM7		
正常生育	15	0.637**	0.596**	0.410	*
有効水分	30	0.703**	0.654**	0.498	**
容量	50	0.751**	0.569**	0.611	**

1) LOG△TM5=LOG(1985年 TM5-1984年 TM5), LOG△TM7=LOG(1985年 TM7-1984年 TM7)

** : 有意水準 1% * : 有意水準 5% データ数20点

第19表 有効水分容量の土層深さ別推定式

有効水分 ¹⁾ 容量	深さ (cm)	推 定 式 ²⁾	寄与率 (R ²)	RMSE ³⁾
W 1	15	LOGW 1 (mm) = 0.318 + 0.565LOG(△TM 5)	0.406	0.10
	30	LOGW 1 (mm) = 0.513 + 0.630LOG(△TM 5)	0.494	0.10
	50	LOGW 1 (mm) = 0.526 + 0.747LOG(△TM 5)	0.564	0.10
W 2	15	W 2 (mm) = 9.62 + 0.748(△TM 5)	0.858	2.8
	30	W 2 (mm) = 18.78 + 1.464(△TM 5)	0.839	5.9
	50	W 2 (mm) = 23.78 + 2.311(△TM 5)	0.745	12.4
W 3	15	W 3 (mm) = 13.96 + 0.906(△TM 5)	0.829	3.7
	30	W 3 (mm) = 27.50 + 1.778(△TM 5)	0.808	7.9
	50	W 3 (mm) = 36.41 + 2.844(△TM 5)	0.739	15.5

1) W 1 : 正常生育有効水分容量, W 2 : 易有効水分容量, W 3 : 全有効水分容量

2) △TM 5 : 1985年 TM 5 - 1984年 TM 5。データ数20点。

3) RMSE : Root Mean Square Error ; 推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根

以上から、全有効水分容量および易有効水分容量の推定には TMバンド 5 (CCT 値差) を、また正常生育有効水分容量には TMバンド 5 (CCT 値差) の両者の常用対数値を用いることにする。

(3) 有効水分容量の推定式

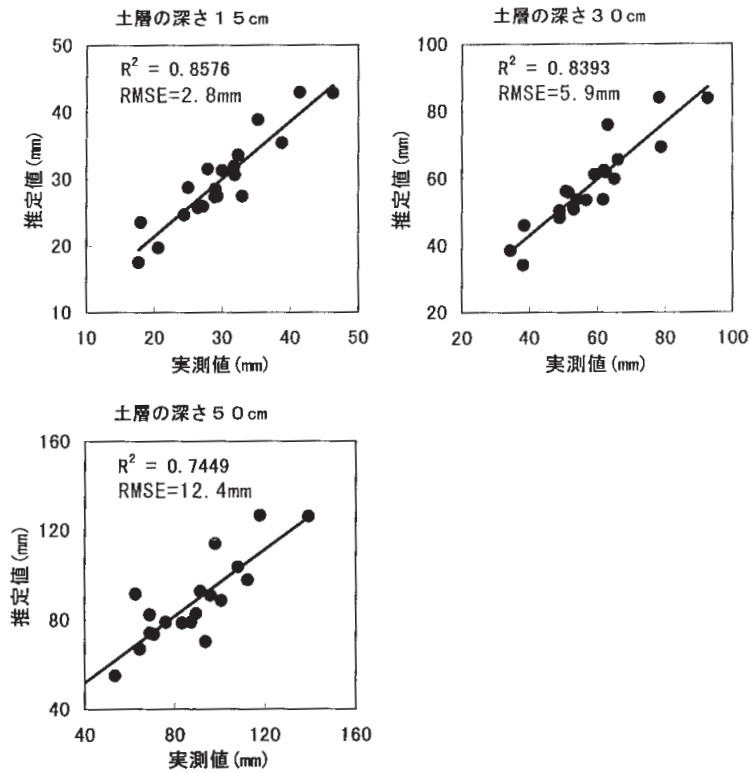
正常生育有効水分容量、易有効水分容量および全有効水分容量の推定式を第19表に示した。推定式はいずれも TMバンド 5 (CCT 値差) による一次回帰式で表され、易有効水分容量の実測値と第19表の推定式による推定値の関係を第24図に示した。RMSE は易有効水分容量の15cm と30cm でそれぞれ2.8mm と5.9mm、全有効水分容量の15cm と30cm でそれぞれ3.7mm と7.9mm と低かったが、50cm で高くなった。

次に、推定式を作成した解析地域と異なる検証地域の6地点から50cm までの土層を10cm ごとに採取し、各有効水分容量の実測値と第19表の式から求めた推定値が一致するかを検討した。その結

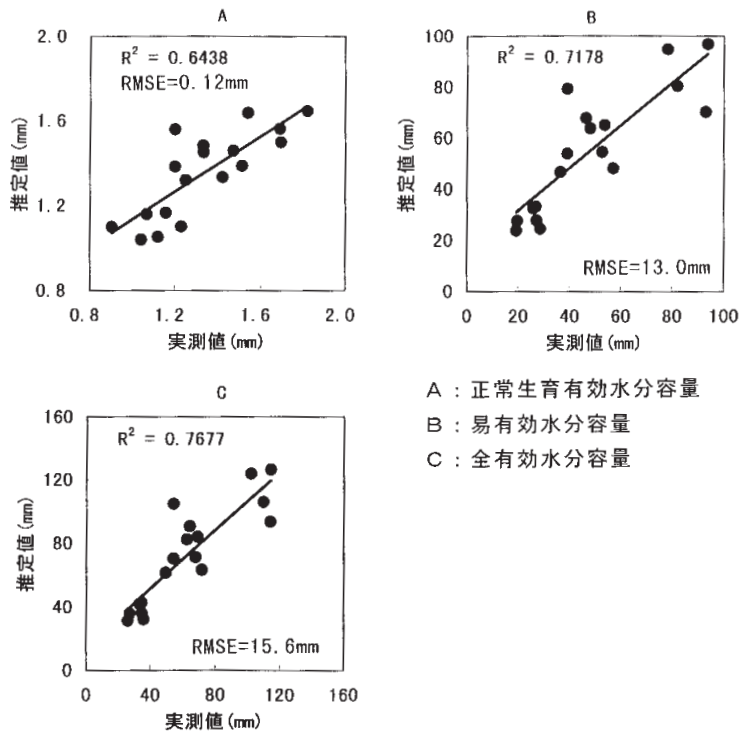
果、寄与率は0.64~0.77とかなり高く、RMSE は正常生育有効水分容量の常用対数値で0.12mm (正常生育有効水分容量1.3mm に相当)、易有効水分容量で13.0mm、全有効水分容量で15.6mm となり、両者はほぼ1 : 1に対応した (第25図)。このように、TM データによる各有効水分容量の推定精度は異なる地域においても高く、TM データから推定した各有効水分容量を用いても精度の面では問題のないことを検証した。

4. 考 察

畑土壌の水分特性—土壌水分率、乾燥速度および有効水分容量—を広域的に、しかも高精度に推定する手法の確立を目指して、ランドサット TM データと農家圃場で実測した水分特性データとの関係について検討した。



第24図 易有効水分容量の実測値と推定値の関係
データ数20点



A : 正常生育有効水分容量
B : 易有効水分容量
C : 全有効水分容量

第25図 検証地域での各有効水分容量の実測値と推定値の関係
土層の深さ50cmまで データ数18点

1) 土壌水分張力および土壌水分率の評価法

1984および1985両年の7つのバンドの CCT 値を説明変数とし、実測した kPa, pF, 土壌水分率, 含水比の値を目的変数とするステップワイズ法による重回帰分析を行ったところ, kPa の推定には TM バンド 1 と TM バンド 2 が, 同じく pF の推定には TM バンド 1 と TM バンド 4 が, 水分率 (Mv) の推定には TM バンド 2 が, 含水率 (Wc) の推定には TM バンド 1 と TM バンド 4 が選択された。

このような結果が得られたのは, 乾燥条件下の畑土壌において水分特性にかかわる土壌タイプの違いが分光反射の差異に反映されたからである。すなわち, 湿性黒色火山性土と褐色低地土における表層からの分光反射特性の結果を第20図に例示したが, 土壌表層からの反射は, 水分の被膜の小さい土壌粒子からと土壌粒子間隙に保持される土壌水分からの合計量と模式的に考えられる。両年の TM データが得られたときの土壌水分は, 第 8 表と第 9 表に示すようにいずれの土壌でも1984年が1985年より多い。1984年のような多水分時には土壌粒子を包む水分被膜も厚くなり, 土壌粒子間隙に保持される土壌水分も多くなるため土壌からの反射強度が低くなる。逆に1985年のような乾燥時には, 土壌粒子の水分被膜も薄く, しかも土壌粒子間隙に保持される土壌水分も少なくなるので, 土壌からの反射強度は全体に高くなる。

TM バンド 1 ~ TM バンド 4 は TM バンド 5 などの中間赤外域と異なって水分による光の吸収は大きくないので, 被膜の厚さ, すなわち水分率 (量) によって吸収量に変化する。土壌の乾燥時には土壌粒子を取りまく水分被膜や間隙間の水分保持量の土壌間差が出やすいので, TM バンド 1 ~ TM バンド 4 により土壌水分が高精度に推定できたものと考えられる。ほとんどの項目に共通して TM バンド 1 が選択されたが, TM バンド 1 では土壌中の酸化鉄含量の違いを, TM バンド 2 ~ 4 では有機物含量の違いを検知できるので, これらの差異に基づく土壌タイプの違いによって水分被膜や保持水量が異なることが理解される。

TM バンド 1 ~ TM バンド 4 の可視, 近赤外域では土壌水分とともに腐植含量にも反応する (福原, 1975; 福原ら, 1986) ので, 仮説として, 腐植含量を説明変数に取り込めば TM データからの土壌水分の推定精度は高まると想定した。重回帰分析

に腐植含量を取り込んだ結果は予想したとおりで, 寄与率はすべての水分項目で高く, RMSE は低くなり仮説の正しいことが確かめられた (第10表, 第14表)。腐植含量としては, 乾土%の値そのものより乾土%の常用対数値を使用した場合に相関係数が最も高くなったが, その理由は第 3 章で考察したとおりである。

土壌水分の推定に関しては, 一般に, ①土壌の極く表面の水分しかわからないし, また, ②土壌水分のための波長帯は中間赤外域や熱赤外域の方が可視域より適している (Carroll ら, 1973; Musick ら, 1986, 1988) と考えられてきた。しかし, わが国のように極端な乾燥のない地域では, 表層の土壌はその土壌の性質に応じた土壌水分を下層から供給されつつ保持しているため, 可視域のランドサットデータから深さ10cmの土壌水分量が推定できたと考えられる。

2) 土壌の乾燥速度の評価法

1984および1985両年の7バンドの CCT 値を説明変数とし, 実測した dkPa, dpF, -dMv の値を目的変数とする回帰分析を行ったところ, 土壌の乾燥速度の推定には1985年の TM データが有効であり, dkPa の推定には TM バンド 1 と TM バンド 5 が, 同じく dpF の推定には TM バンド 1 と TM バンド 4 が, -dMv の推定には TM バンド 1 と TM バンド 3 が選択された。TM バンド 1 ~ TM バンド 4 の可視, 近赤外域のバンドは, 腐植含量とともに土壌水分にも反応することが知られていることから, これらのバンドが選択されたことは理解される。重回帰分析において腐植含量を説明変数に取り込んだ結果, 寄与率が高まった理由は上記の項で述べたとおりである。日あたりの kPa および pF 上昇速度, Mv 低下速度の結果は, 観測当日の TM データと地上調査データとの分析から得られたものではない。それでも高い相関関係の結果が得られたのは, 乾燥過程での保水力の土壌間差が明瞭に現れたからと考えられる。しかし, この分布図は表層10cmの乾燥速度を表示したもので, 土壌は下層から水分が供給されており, 表層だけでは真の水分供給を評価したとはいえない。今後は下層からの水分供給量についての解析が必要であろう。

3) 土壌の保水力(有効水分容量)の評価法

土壌水分の異なる時期に観測された TM データの CCT 差を用いることにより、作物が吸収利用できる有効水分容量がかなり高い精度で推定できた。その理由の一部は第1節に述べたとおりであるが、中間赤外域の TM バンド5における土壌の分光反射は、1984年のような多水分時には土壌粒子間隙に保持される土壌水分により吸収されて反射強度が低くなり、逆に1985年のような乾燥時には土壌粒子間隙に保持される土壌水分による光の吸収が抑えられ、しかも土壌粒子からの反射強度が高くなるので、その反射強度の差が土壌孔隙量を反映したためと考えられる(畠中, 1992; Hatanaka ら, 1995)。近赤外～中間赤外域、とくに1.45 μm や 1.95 μm 付近の波長帯は空気中の水分によって著しく吸収されるため直接には使えないが、この周辺の波長域を用いて比演算などの工夫を加えることにより土壌表層の水分推定が可能なが報告されており(Musick ら, 1986)、これらのデータからも TM バンド5の有効性が裏づけられる。なお、正常生育有効水分容量の TM バンド5 (CCT 値差)の相関係数は0.59～0.71と低かったが、これは正常生育有効水分容量の土壌間差が小さいためと考えられた。しかし、第18表に示すように、正常生育有効水分容量と TM バンド5 (CCT 値差)の両者の常用対数値を用いることにより相関係数は0.64～0.75へと高まった。

以上の結果を受けて、北海道立中央農試(1993)は、十勝と石狩の両地方で、裸地表層10cmの易有効水分容量と TM データ(1985年と1990年の5月観測)の関係を検討した。易有効水分容量は両年における TM バンド5の CCT 値の差(1985年-1990年)とかなり高い相関(寄与率=0.67)があり、TM データの観測日や対象地域が異なっても上記手法が適用可能なことを報告した。すなわち、畑土壌の易有効水分容量の推定に TM バンド5が有効であることが追試された。

このように、手法の確立により農家圃場単位で土壌水分状況や水分供給力を把握することができた。しかし、人工衛星データにより土壌水分を推定する場合に問題になるのは、毎日の土壌水分の変化をカバーできないことである。人工衛星は一定の周期で観測しており、その周期の時しか観測値は得られない。現在では、一つの映像だけでなく観

測衛星の異なる複数データ(マルチテンポラル・データ)を利用し、データ間の差から観測期間に起きた変化を水分変化に判読できるようになってきた(岡本ら, 1991)。しかし、この方法でも毎日は監視できないから、今後はランドサットデータから広域・細密に得られる土壌水分特性データを、植生や気象データと組み合わせた土壌水分評価モデルで推定・評価する必要がある。

5. まとめ

1) 土壌水分張力および土壌水分率の評価法

ランドサット TM データと深さ10cmで実測した水分張力(kPa と pF)と水分率(Mv)および含水比(Wc)の関係について検討した。その結果、土壌水分張力の場合、kPaの推定には TM バンド1, TM バンド2および腐植含量による重回帰式が、pFの推定には TM バンド1, TM バンド4および腐植含量による重回帰式が有効であった。土壌水分率の場合、Mvの推定には TM バンド2と腐植含量による重回帰式が、Wcの推定には TM バンド1, TM バンド4および腐植含量による重回帰式が有効であった。

$$kPa = 132.82 - 1.9563TM \text{ バンド} 1 + 2.8468TM \text{ バンド} 2 - 26.881 \text{ LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$$

$$(R^2 = 0.857 \quad \text{RMSE} = 6.05 \quad \text{データ数} 14 \text{点})$$

$$pF = 3.5215 - 0.0160TM \text{ バンド} 1 + 0.0176TM \text{ バンド} 4 - 0.3729 \text{ LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$$

$$(R^2 = 0.873 \quad \text{RMSE} = 0.081 \quad \text{データ数} 14 \text{点})$$

$$Mv = 104.73 - 1.2551TM \text{ バンド} 2 - 4.3390 \text{ LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$$

$$(R^2 = 0.924 \quad \text{RMSE} = 1.95 \quad \text{データ数} 14 \text{点})$$

$$Wc = 34.534 - 0.1188TM \text{ バンド} 1 - 0.2664TM \text{ バンド} 4 + 43.633 \text{ LOG}_{10}(\text{腐植}\%)$$

$$(R^2 = 0.975 \quad \text{RMSE} = 2.17 \quad \text{データ数} 14 \text{点})$$

ここで、kPa と pF は土壌水分張力、Mv は水分率(容積%)、Wc は含水比、TM バンド1, TM バンド2, TM バンド4 はそれぞれ TM のバンド1, 2, 4 の CCT 値で、腐植含量は乾土%である。

2) 土壌の乾燥速度の評価法

土壌の乾燥程度の違いを広域的に検討するため、深さ10cmの日あたりの kPa と pF 上昇速度(dkPa と dpF)および Mv 低下速度(-dMv)を求め、TM データの CCT 値との関係を検討した。その結果、dkPaの推定には1985年の TM バンド1,

TMバンド 5 および腐植含量による重回帰式が、dpF の推定には1985年の TMバンド 1, TMバンド 4 および腐植含量による重回帰式が、-dMv の推定には1985年の TMバンド 1, TMバンド 3 および腐植含量による重回帰式が有効であった。下式による推定値と実測値はほぼ 1 : 1 に対応した。

$$dkPa = 0.0118TM \text{ バンド } 1_{85} - 0.0507TM \text{ バンド } 5_{85} - 0.1229\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%) + 10.375$$

$$(R^2 = 0.880 \quad \text{RMSE} = 0.276 \quad \text{データ数} 12 \text{点})$$

$$dpF = [5.903TM \text{ バンド } 1_{85} - 3.842TM \text{ バンド } 4_{85} + 17.69\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%) - 284.4] \times 10^{-3}$$

$$(R^2 = 0.932 \quad \text{RMSE} = 0.004 \quad \text{データ数} 12 \text{点})$$

$$-dMv = 0.1249TM \text{ バンド } 1_{85} - 0.1075TM \text{ バンド } 3_{85} + 0.4107\text{LOG}_{10}(\text{腐植}\%) - 5.4217$$

$$(R^2 = 0.932 \quad \text{RMSE} = 0.084 \quad \text{データ数} 12 \text{点})$$

ここで、dkPa は日あたり kPa 上昇速度 (kPa/day), dpF は日あたり pF 上昇速度 (pF/day) および-dMv は日あたり Mv 低下速度 (Mv/day), TMバンド 1₈₅, TMバンド 3₈₅, TMバンド 4₈₅ および TMバンド 5₈₅ はそれぞれ1985年の TMバンド 1, TMバンド 3, TMバンド 4 および TMバンド 5 の CCT 値である。

3) 土壌の保水力 (有効水分容量) の評価法

有効水分容量は、土壌水分状態の異なる 2 シーンの TM データの CCT 値差から推定できることを明らかにした。有効水分容量と1984, 1985両年の TM 各バンド CCT 差 (1985年から1984年を差し引

く) の回帰分析の結果、易有効水分容量および全有効水分容量の推定には TMバンド 5 の CCT 差を用いた単回帰式が、正常生育有効水分容量の推定には TMバンド 5 の CCT 差の常用対数値を用いた単回帰式が有効であった。下記に示した推定式による推定値と実測値はほぼ 1 : 1 に対応すること、しかも解析地域と異なる地域でもこの関係が成立することを検証した。

V. 畑土壌の礫深度の評価法

十勝地方では1984, 1985年と連続して干ばつの被害が発生し、畑作物の収量および品質に多大の影響を及ぼした。干ばつの被害の発生は、無降雨状態が連続した気象的な要因に負うところが大きい。礫層の出現深度が浅い圃場ほど被害が大きいことも調査で明らかにされた (北海道開発局, 1986)。除礫による土地改良を計画的に進めるためには、その前段として作土層の礫含量や大きさ、礫層の出現深度に関するデータを整備しておく必要がある。

そこでランドサット TM データを用いて、畑土壌の礫深度を広域的に、しかも高精度に推定・評価する手法について検討した。

1. 畑土壌の礫深度の評価法

本節のねらいは、畑土壌の礫深度の推定手法を確立することである。

畑土壌の有効水分容量の土層深さ別推定式

有効水分 ¹⁾	深さ (cm)	推定式 ²⁾	R ²	RMSE ³⁾
W 1	15	LOGW 1 (mm) = 0.318+0.565LOG (ΔTM5)	0.406	0.10
	30	LOGW 1 (mm) = 0.513+0.630LOG (ΔTM5)	0.494	0.10
	50	LOGW 1 (mm) = 0.526+0.747LOG (ΔTM5)	0.564	0.10
W 2	15	W 2 (mm) = 9.62+0.748 (ΔTM5)	0.858	2.8
	30	W 2 (mm) = 18.78+1.464 (ΔTM5)	0.839	5.9
	50	W 2 (mm) = 23.78+2.311 (ΔTM5)	0.745	12.4
W 3	15	W 3 (mm) = 13.96+0.906 (ΔTM5)	0.829	3.7
	30	W 3 (mm) = 27.50+1.778 (ΔTM5)	0.808	7.9
	50	W 3 (mm) = 36.41+2.844 (ΔTM5)	0.739	15.5

1) W 1 : 正常生育有効水分容量, W 2 : 易有効水分容量, W 3 : 全有効水分容量

2) ΔTM 5 : 1985年 TM 5 -1984年 TM 5。データ数20点。

3) RMSE : Root Mean Square Error ; 推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根

1) 研究方法

(1) 解析地域

解析地域は南部地域で、帯広市、中札内村、更別村および大樹町が含まれる(第26図)。調査地点は、「十勝管内土壌分類図」(北海道開発局, 1973)と1985年の干ばつ被害状況を撮影した航空写真(北海道開発局, 1986)から選定された農家圃場の30地点である。北海道開発局の調査成績(1975)によれば、解析地域では一般に耕地の石礫が多く、しかも礫もほとんど風化しておらず、とくに現河川の沖積面や最も低位の河岸段丘面では石礫は極めて新鮮で粒径の大きいものが多いとされている。調査圃場の土壌群および土壌統群名は、褐色火山性土、黒色火山性土、湿性黒色火山性土、褐色低地土、灰色低地土、褐色森林土であり、土壌ごとの調査点数は第20表に示したとおりである。検証地域は北部地域の音更町の12圃場とした(第4章の第22図)。本地域は解析地域とは石礫や火山灰の種類、堆積状況が異なる特徴をもつ。

(2) 礫深度データ

選定した収穫跡地の農家圃場で、面積に応じて1圃場当たり6~12点を検土杖または試坑法によって礫層の出現位置を測定した。礫層は土壌断面中の礫含量が50%以上(日本ペドロジー学会, 1997b)とし、表層からの礫層までの深さを礫深度とした。

第20表 土壌別の礫深度実測値

測定地域	土壌群及び土壌統群	データ数	礫深度 (cm)
			平均 (最小~最大) ^{a)}
十勝地方南部	褐色火山性土	3	44 (35~55)
	黒色火山性土	2	93 (85~100)
	湿性黒色火山性土	3	58 (35~100)
	褐色低地土	18	48 (14~100)
	グライ低地土	2	49 (44~54)
	褐色森林土	2	48 (45~50)
十勝地方北部	褐色火山性土	3	64 (47~80)
	黒色火山性土	3	76 (70~85)
	褐色低地土	4	31 (10~53)
	グライ低地土	2	54 (51~57)

注) 1圃場あたり6~12地点で測定, a): 平均値の最小~最大

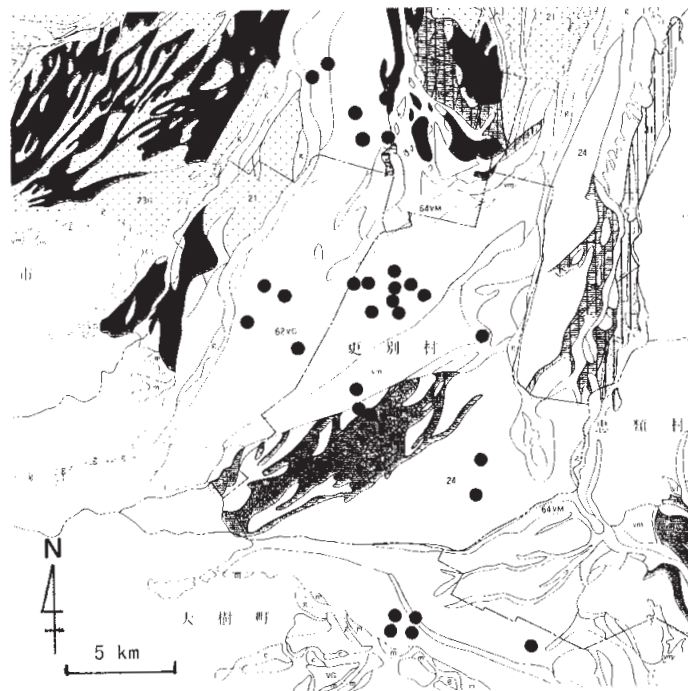
(3) 使用した衛星データ

土壌の腐植含量や土壌水分特性の解析に使用した衛星データと同一である。すなわち、1984年5月21日と1985年5月24日に観測された、シーン番号106-30のランドサット5号のTMデータである。

2) 結果

(1) 畑土壌の礫深度

調査地点の礫深度の結果を地域別に、また土壌型別に整理して第20表に示した。調査点数は一定でないが、調査した範囲内で土壌型別に比較する



第26図 解析地域における礫深度調査地点

と、礫深度は褐色低地土，グライ低地土，褐色火山性土および褐色森林土で浅く，湿性黒色火山性土や黒色火山性土で深い傾向を示した。最も浅い礫深度は，南部地域で褐色火山性土の14cm，北部地域で褐色火山性土の10cmであった。

北海道開発局（1975）が行った作土層中の石礫分布調査によると，石礫耕地は乾燥地の方が湿性・過湿地よりも多く，しかも乾燥地ほど高礫含有率の耕地の割合が高くなっている。さらに高礫含有率の耕地ほど作土深は浅い傾向にあり，平均礫径は3～20cmの範囲内にある。本結果でも乾燥地で礫深度が浅い傾向を示しており，作土中の礫含有率と礫深度は密接な関係にあることが予想される。

作土中の礫含有率とTMデータとの関係の検討は今後の課題である。

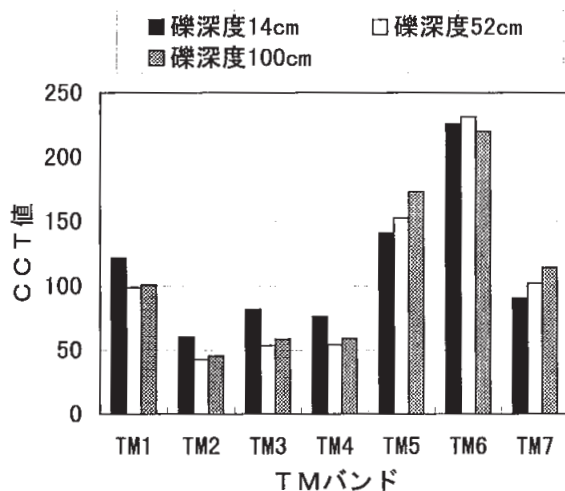
(2) 礫深度の推定に最適なバンド

1984および1985両年の7つのバンドのCCT値を説明変数とし，実測した礫深度の値を目的変数とする単回帰および重回帰分析を行った。両年のTMデータが得られたときの土壤水分は，前章までに述べたように，1985年が1984年よりも少なく土壤は乾いた状態にあった。礫深度別の分光反射特性（褐色低地土）の結果を第27図に示した。礫深度が14cmと浅いほどTMバンド'1～TMバンド'4のCCT値は高かったが，TMバンド'5とTMバンド'7では逆に低かった。礫深度が52cmと100cmでは，

第21表 礫深度の実測値とTMバンドCCT値との相関係数
(解析地域：十勝地方の南部地域)

	使用バンド	1984年	F検定	RMSE	1985年	F検定	RMSE
単回帰分析	TM 1	-0.277			-0.465**		
	TM 2	-0.293			-0.502**		
	TM 3	-0.279			-0.514**		
	TM 4	-0.297			-0.505**		
	TM 5	0.295			0.726**		
	TM 6	0.076			0.213		
	TM 7	0.225			0.674**		
重回帰分析	TM 4・5・7	0.460	**	16.7	0.858	**	8.57
	TM 1・4・5・7	0.461	**	17.0	0.934	**	5.97
	TM 2・4・5・7	0.461	**	17.0	0.939	**	5.68
	全バンド	0.495	*	17.5	0.946	**	5.70

注) 重回帰分析の値は寄与率， **：有意水準1% (データ数30点)
RMSE：推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根(cm)



第27図 礫深度の異なる土壤の分光反射特性
1985年5月24日観測の解析地域の褐色低地土

第22表 礫深度実測値とTMバンドCCT値との相関係数
(十勝地方の北部地域)

	使用バンド	1985年	F検定	RMSE (cm)
単回帰分析	TM 1	-0.241		
	TM 2	-0.207		
	TM 3	-0.041		
	TM 4	-0.082		
	TM 5	0.726**		
	TM 6	0.632*		
	TM 7	0.748**		
重回帰分析	TM 4・5・7	0.907	**	7.55
	TM 1・4・5・7	0.975	**	4.14
	TM 2・4・5・7	0.993	**	2.17
	全バンド	0.994	**	2.64

注) 重回帰分析の値は寄与率， **：有意水準1%，*：有意水準5% (データ数12点)
RMSE：推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根(cm)

TMバンド 5を除くいずれのバンドでも CCT 値は大差なかった。回帰分析の結果を第21表と第22表に示した。第22表によれば、単相関係数は1985年で1984年より高く、しかも TMバンド 5や TMバンド 7が他のバンドより高かった。しかし、TMバンド 5が0.73、TMバンド 7が0.67と単バンドのみでは満足する相関係数が得られず、推定式の作成まで至らなかった。そこで、1985年を主体にステップワイズ法による重回帰分析を行い、最小限のバンド数で寄与率が高く、しかも RMSE の小さい組合せを求めた。その結果、TMバンド 2、TMバンド 4、TMバンド 5および TMバンド 7が選択され、南部地域で寄与率0.940、RMSE5.7cm、北部地域で寄与率

0.993、RMSE2.2cm と極めて推定精度の高い結果が得られた (第21表、第22表)。

以上、礫深度の推定には、より土壤の乾燥した1985年の TMバンド 2、TMバンド 4、TMバンド 5、TMバンド 7を用い、1984年の TM データは1985年の土壤データの補完用 (1985年が植生で土壤データが得られない部分を1984年の土壤データで補う) に使用することにする。

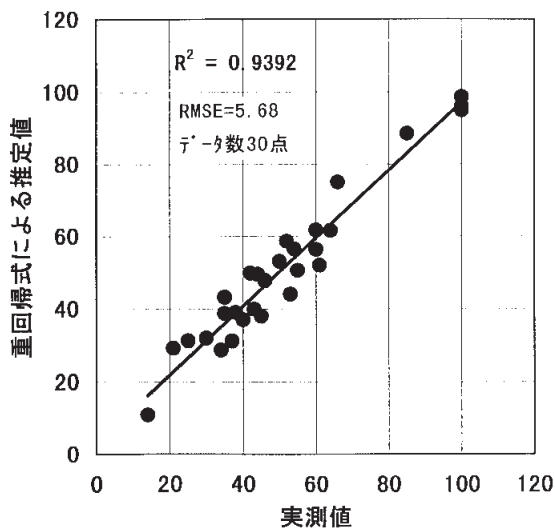
(3) 礫深度の推定式

十勝地方の南部地域と北部地域でそれぞれ高精度の推定式が得られた。推定式は1985年の TMバンド 2、TMバンド 4、TMバンド 5、TMバンド 7を用いた重回帰式で表された (第23表)。解析地域であ

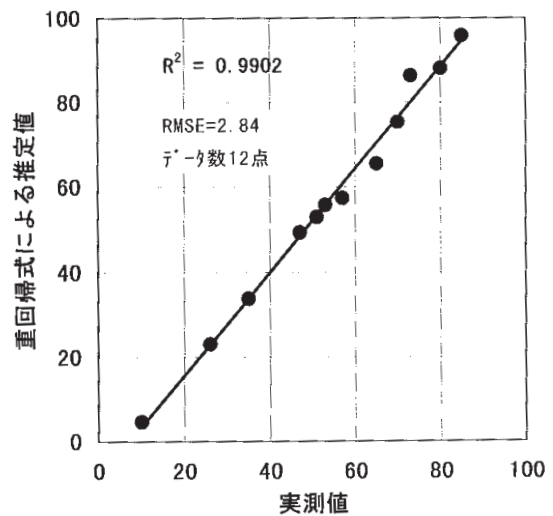
第23表 TMデータによる礫深度推定式

十勝地方南部地域	十勝地方北部地域
礫深度(cm) = 4.725TM _{2 85}	礫深度(cm) = 3.994TM _{2 85}
-6.005TM _{4 85}	-5.006TM _{4 85}
+6.700TM _{5 85}	+5.698TM _{5 85}
-6.808TM _{7 85}	-5.853TM _{7 85}
-145.81	-118.59
R ² =0.939(データ数30点) RMSE=5.7cm	R ² =0.993(データ数12点) RMSE=2.2cm
十勝地方全域	
礫深度(cm) = 4.565TM _{2 85}	ここで、 TM _{2 85} : 1985年 TM バンド 2 の CCT 値
-5.754TM _{4 85}	TM _{4 85} : " TM バンド 4 の CCT 値
+6.265TM _{5 85}	TM _{5 85} : " TM バンド 5 の CCT 値
-6.417TM _{7 85}	TM _{7 85} : " TM バンド 7 の CCT 値
-126.85	
R ² =0.944(データ数42点) RMSE=5.4cm	

RMSE : 推定残差の平方和を残差の自由度で除した値の平方根(cm)



第28図 礫深度の実測値と推定値の関係 (解析地域)



第29図 検証地域における礫深度の実測値と推定値の関係

る南部地域の、礫深度の実測値と推定式による推定値の関係を第28図に示した。寄与率は0.939, RMSEは5.7cmであった。続いて推定式を検証するために、解析地である南部地域と異なる北部地域の音更町の12地点で礫深度を調査し、実測値と式から求めた推定値が一致するかを検討した。その結果、寄与率は0.990, RMSEは2.84と極めて高く、両者はほぼ1:1に対応した(第29図)。ただし、礫深度が70cm以上では実測値より高目に推定された。一方、北部地域で作成した推定式を南部地域で検証した結果、実測値と推定値の寄与率は0.937と高かった(データ省略)。したがって、推定式の精度が異なる地域でも検証されたので、最終的に両地域を統合して十勝地方全域の推定式を作成した。このように、TMデータによる礫深度の推定精度は異なる地域においても高く、TMデータから推定した礫深度を用いても精度の面では問題のないことを検証した。

2. 考察

畑土壌の礫深度とランドサットTMデータとの関係を検討するために、地上で実測した畑土壌の礫深度のデータに対応する1984, 1985両年の5月に観測されたTMデータとの回帰分析を行った。1985年を主体にステップワイズ法による重回帰分析を行い、最小限のバンド数で寄与率が高く、しかもRMSEの小さい組合せを求めた結果、TMバンド2, TMバンド4, TMバンド5およびTMバンド7が選択された。この4つのバンドを使用した寄与率とRMSEは、南部地域でそれぞれ0.940と5.7cm, 北部地域で0.993と2.2cmと極めて推定精度の高い結果が得られた(第21表, 第22表)。

このようにTMバンド2, TMバンド4, TMバンド5およびTMバンド7が選択されたが、前章までの結果から明らかなように、TMバンド2とTMバンド4は容積%や含水比で表わされる土壤水分率の、TMバンド5は土壤の有効水分容量の推定に有効なことから、土壤水分の状態を把握することで礫深度の推定が可能になるものと考えられる。同一の土壤型では礫深度が浅いほど有効水分容量が小さく、しかも土壤水分率が低下する(北海道開発局, 1986)ので、この事実からも選択された上記4つのバンドの有効性が裏づけられる。また、TMバンド1~TMバンド4の短い波長域では土壤水分とも

に腐植含量にも反応する(福原, 1975; 福原ら, 1986)ので、TMバンド2とTMバンド4により腐植含量の違いも検知していると推察される。

石黒(1986)は、航空機で撮影したMSS(マルチスペクトル・スキャナー)の熱映像データと畑土壌作土の礫含量との関係を検討した。その結果、土壤表面温度が深さ40cmまでの礫含量と正の相関関係にあることを見出し、土壤表面温度を説明変数とした礫含量の推定式を作成している。この結果に従えば、礫深度の推定にTMバンド6も有効と考えられるが、本研究では未検討であり、今後の課題である。土壤水分と土壤表面温度の違いはあるものの、本結果も石黒の結果も礫深度や礫含量と相関関係の高い要因を見出している点で共通している。

本研究で、TMデータから礫深度が高い精度で推定できた理由としては、異なる水分状態でのTMデータが得られたこと、とくに土壤の乾燥条件下で、礫深度の違いに基づく土壤水分の差異が明瞭な時期にTMデータが取得できたことが挙げられる。ただし、本結果では礫層の出現深度が1m以内を保証しているが、1m以上の場合や礫層が存在しない場合にも推定される危険性を含んでいる。

3. まとめ

ランドサットTMデータから畑土壌の礫深度を推定する手法について検討した結果、礫深度は乾燥した土壤条件下にある、1985年に観測されたTMバンド2, TMバンド4, TMバンド5, TMバンド7の4つのTMデータから推定できることを明らかにした。この関係に基づく推定値と実測値はほぼ1:1に対応し(寄与率=0.939, RMSE=5.7cm)、しかもこの関係は解析地域と異なる地域でも成立する(寄与率=0.990, RMSE=2.8cm)ことを検証したのち、十勝地方全域を対象とする次の推定式を得た。

$$Y = 4.565TM \text{ バンド } 2_{85} - 5.754TM \text{ バンド } 4_{85} + 6.265TM \text{ バンド } 5_{85} - 6.417TM \text{ バンド } 7_{85} - 126.85$$

(寄与率=0.944 RMSE=5.4cm データ数42点)

ここでYは礫深度(cm), TMバンド₈₅2, TMバンド₈₅4, TMバンド₈₅5, TMバンド₈₅7はそれぞれ1985年のTMバンド2, TMバンド4, TMバンド5, TMバンド7のCCT値である。

VI. 新しい評価データを用いた農業情報システムの開発とその利用法

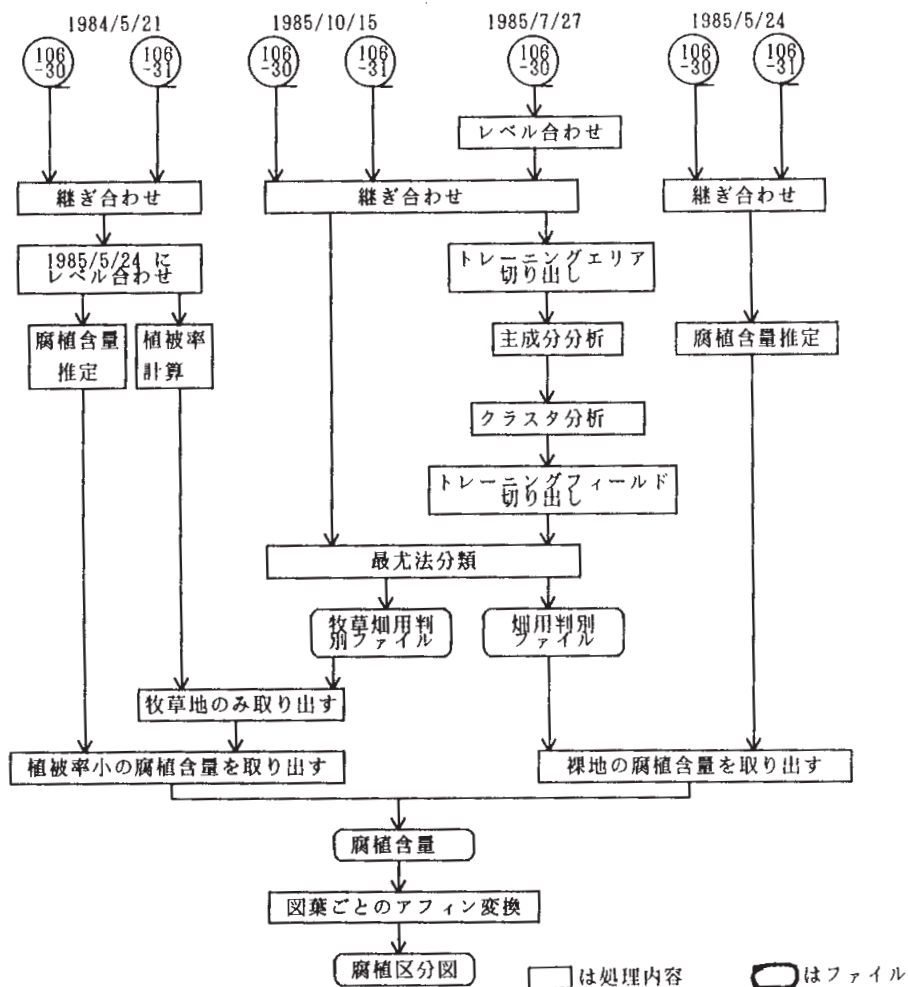
本章では、前章までに作成した腐植含量、水分特性、礫深度に関する推定式を用いて図化し、その区分図をコンピュータ・システムを用いて高度に利用できる総合管理システムの開発とその作物栽培および土壌管理への結びつきについて検討する。

1. 土壌特性区分図の作成

1) 土壌腐植区分図の図化

ランドサット TM データから土壌腐植区分図を作成した手順を第30図に示す。

まず、1984年5月21日と1985年5月24日のそれぞれの TM バンド 3 と TM バンド 4 データは、「十勝管内土壌分類図」の範囲がシーン番号 (パスローウ) 106-30 と 106-31 にまたがっているため、両シーンで重複している部分の CCT 値の単回帰式を使ってシーン番号 106-31 の CCT 値をシーン番号 106-30 の CCT 値レベルにあわせた後、両シーンをつなぎ合わせた。また、1984年5月21日のデータと1985年5月24日のデータでは各画素の CCT 値のレベルが異なっているので、土壌腐植含量を推定する前に両データのレベルをあわせる必要がある。①1984年と1985年では腐植含量は変化しないと考えてよい、②裸地または植被率の小さい地点は LOG₁₀TM バンド 3 と LOG₁₀TM バンド 4 の散布図上でソイル・ライン付近にプロットされる、という2点に着目して、地力保全基本調査試坑地点 (ソイル・ライン上に



第30図 土壌腐植区分図の作成フロー

プロットされている)の両年の LOG_{10}TM バンド3、 LOG_{10}TM バンド4それぞれの単回帰式を求めた。

$$\text{LOG}_{10}\text{TM}$$
バンド3₁₉₈₅ = 1.084 LOG_{10}TM バンド3₁₉₈₄ - 0.156

$$\text{LOG}_{10}\text{TM}$$
バンド4₁₉₈₅ = 0.994 LOG_{10}TM バンド4₁₉₈₄ + 0.048

1985年のデータとこの回帰式により変換した1984年のデータから各年の土壌腐植含量を画素ごとに推定し、それを腐植含量と LOG_{10}TM バンド3との単回帰式をもとに0~255の値に割り当てて土壌腐植含量の推定画像を作成した。

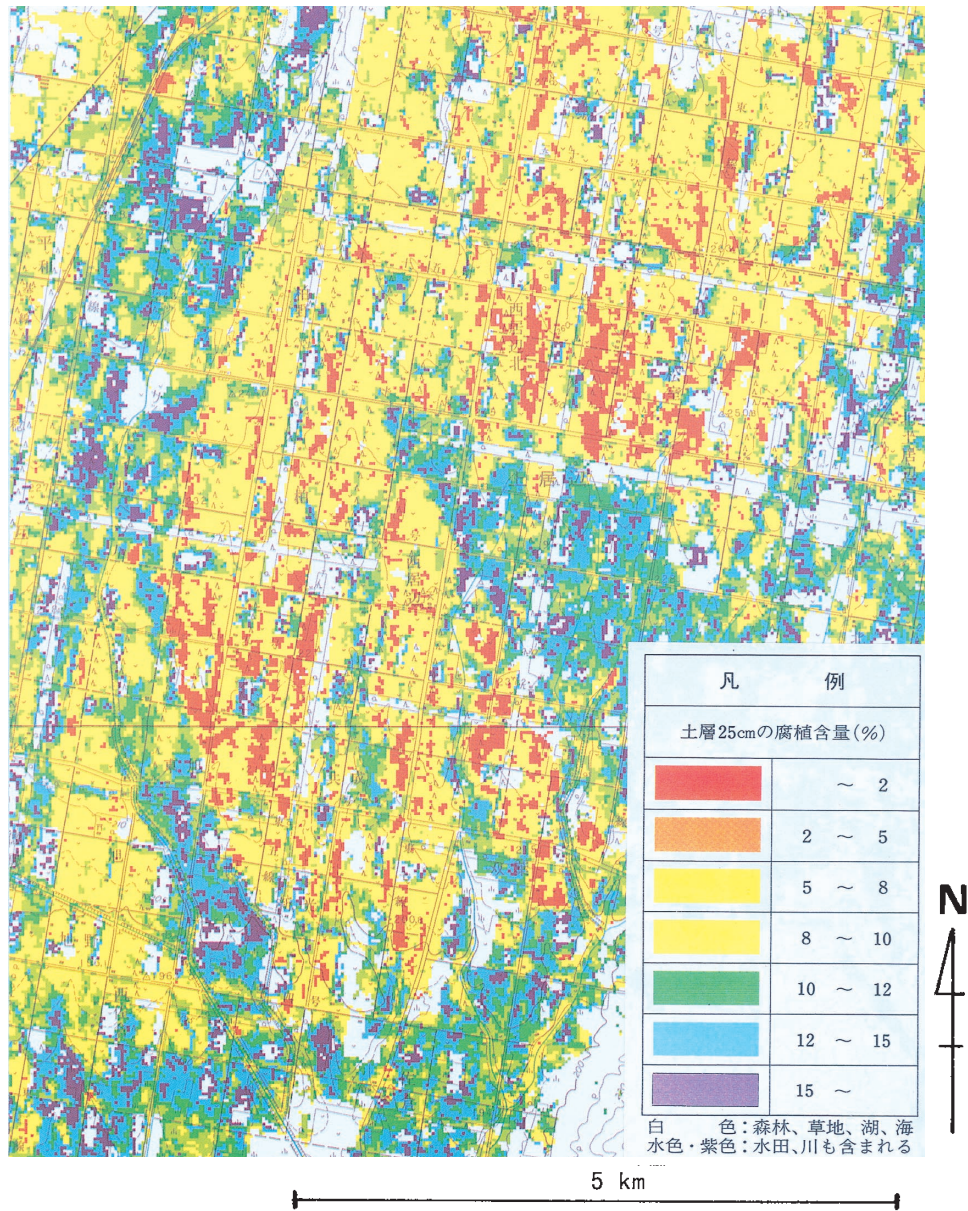
次に、1984年の植被率の判定に用いるために1984年のデータを用いて各画素を通りソイル・ラインに平行な直線のy切片の値VI(植生指数)を次式から計算し、VI画像を作成した。

$$\text{VI} = (\text{LOG}_{10}\text{TM}$$
バンド4 - 0.902 LOG_{10}TM バンド3 - 0.171) × 100 + 100

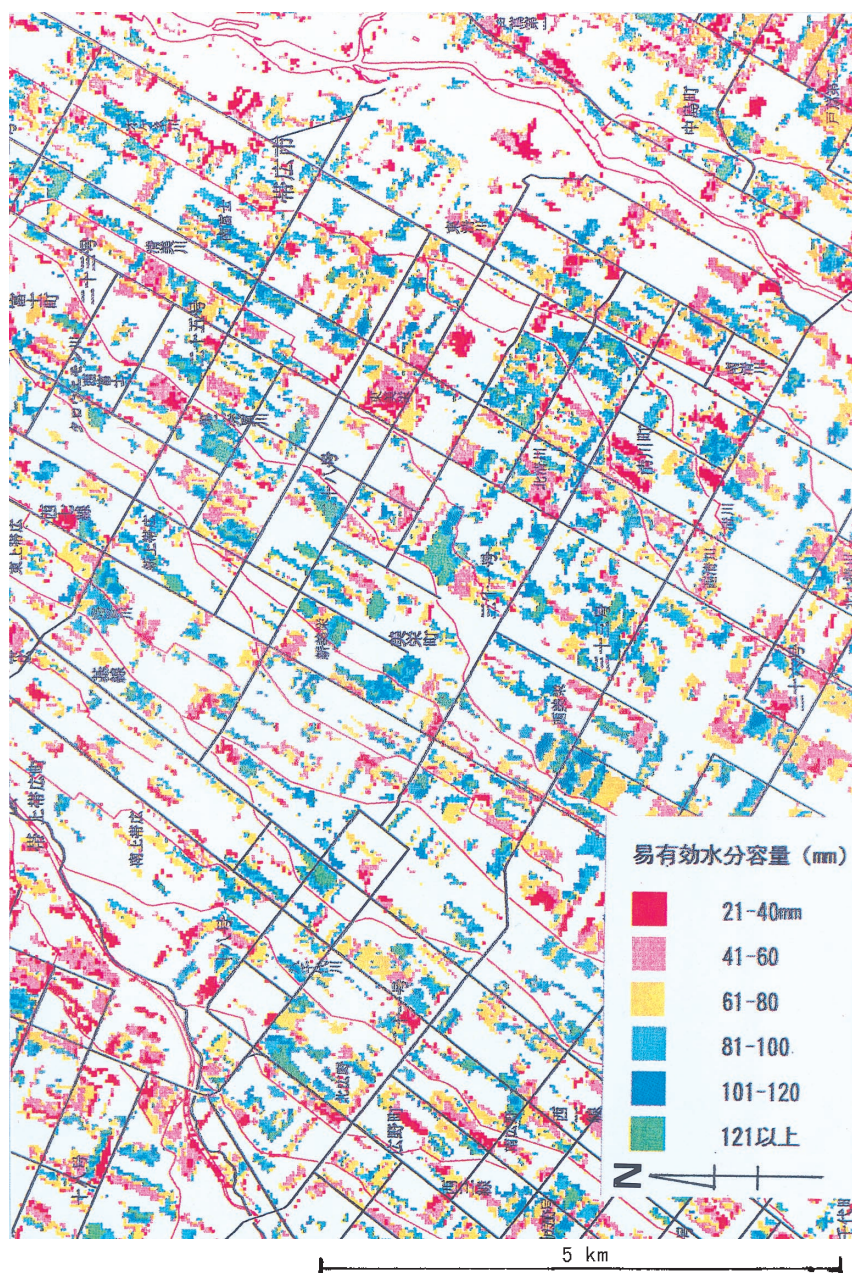
5月の帯広地域の畑は裸地、裸地に近い畑地(秋播コムギ)および植生のある畑地(牧草地)に大別されるので、土壌腐植含量の推定画像から裸地とそれに近い畑地および牧草地を抽出するために1985年10月15日のTMデータを用いて判別ファイルを作成した。土地被覆分類から判別ファイルを作成するために1985年7月27日のデータを1985年10月15日のデータにつなぎ合わせた後、5月のデータと同じ範囲を7バンドについて切り出した。この7バンドデータに対して主成分分析と最尤法分類を行い、畑(ムギ)・畑(裸地)・水はけの悪い畑・疎林・牧草地・藪(新しい牧草地)・溪流河畔の林・森林・ササ地・水面の10カテゴリーに区分した。土地被覆分類結果と現地状況をつきあわせたところ、畑(ムギ・裸地)・水はけの悪い畑・疎林および未分類の地点が裸地とそれに近い畑地に相当したので、これらに区分された画素を取り出して1985年の裸地畑用判別ファイルを作成した。藪と分類された地点には新しい牧草地が多く含まれていたため、牧草地と藪に分類された画素を取り出して1985年の牧草地用判別ファイルを作成した。

1985年の裸地畑用判別ファイルを用いて1985年の土壌腐植含量の推定画像から裸地とそれに近い畑の画素を抽出し、1985年の裸地とそれに近い畑地の腐植含量推定画像を作成した。次に牧草地の腐植含量の推定画像の作成であるが、牧草地は一般に地表がほとんど見えないほど植生に覆われているため、

LOG_{10}TM バンド3と LOG_{10}TM バンド4の散布図上でソイル・ラインから大きくはずれ、推定した腐植含量の誤差は大きい。しかし、1985年は牧草地でも前年の1984年は牧草地になっていなかった可能性がある。そこで、1985年の牧草地用判別ファイルを用いて、1984年のVI値画像から1985年には牧草地になっている地点の1984年のVI値画像を作成した。そして、 $95 \leq \text{VI} \leq 105$ を植被率の小さい地点であるとして、このVI画像を用いて1984年の土壌腐植含量の推定画像から植被率の小さい地点を抽出した。これが「1985年には牧草地となっているが、1984年には植被率が少であった」畑地の腐植含量の推定画像である。この画像に1985年の裸地とそれに近い畑地の腐植含量の推定画像を重ねあわせて帯広地域全体の腐植含量の推定画像とした。この画像の中には、実際には畑地であっても推定対象外と判別されてしまった画素も存在する。そこで、畑地の中に1画素だけ存在するような画素は、当該画素を挟む2画素の腐植含量の平均値で補完した。これを18図葉の基図(縮尺5万分の1の地形図)にあわせて切り出し、画像の向きが地図と同じ北向きになるように、そして1画素が25m四方になるようにアフィン変換(資源観測センター1989, 1990)した。基図との重ね合わせの誤差は1画素(すなわち25m)以内であった。各図葉を個別に変換したのは、隣接した図葉との接合性よりも基図との整合性を重視したからである。最後に推定式(第3章1節の式⑧)を用いて腐植含量を0, 2, 5, 8, 10, 12, 15%で区分し、縮尺5万分の1地形図上にコンピュータマッピングして腐植区分図を作成した。この区分値は、黒ボク土壌の命名において土色から有機物含量を判定するのに使用される「黒ボク土の有機物含量と土色」(日本パドロー学会1997a)を参考にして決められた。第31図は図葉7.土幌の例であるが、印刷色は0~2%が赤色、2~5%が茶色、5~8%が黄色、8~10%が薄緑色、10~12%が緑色、12~15%が水色、15%~が紫色で、対象外部分は白色である。



第31図 5万分の1地形図と重ね合わせた土壤腐植区分図
(No. 7 土幌町の出力例)

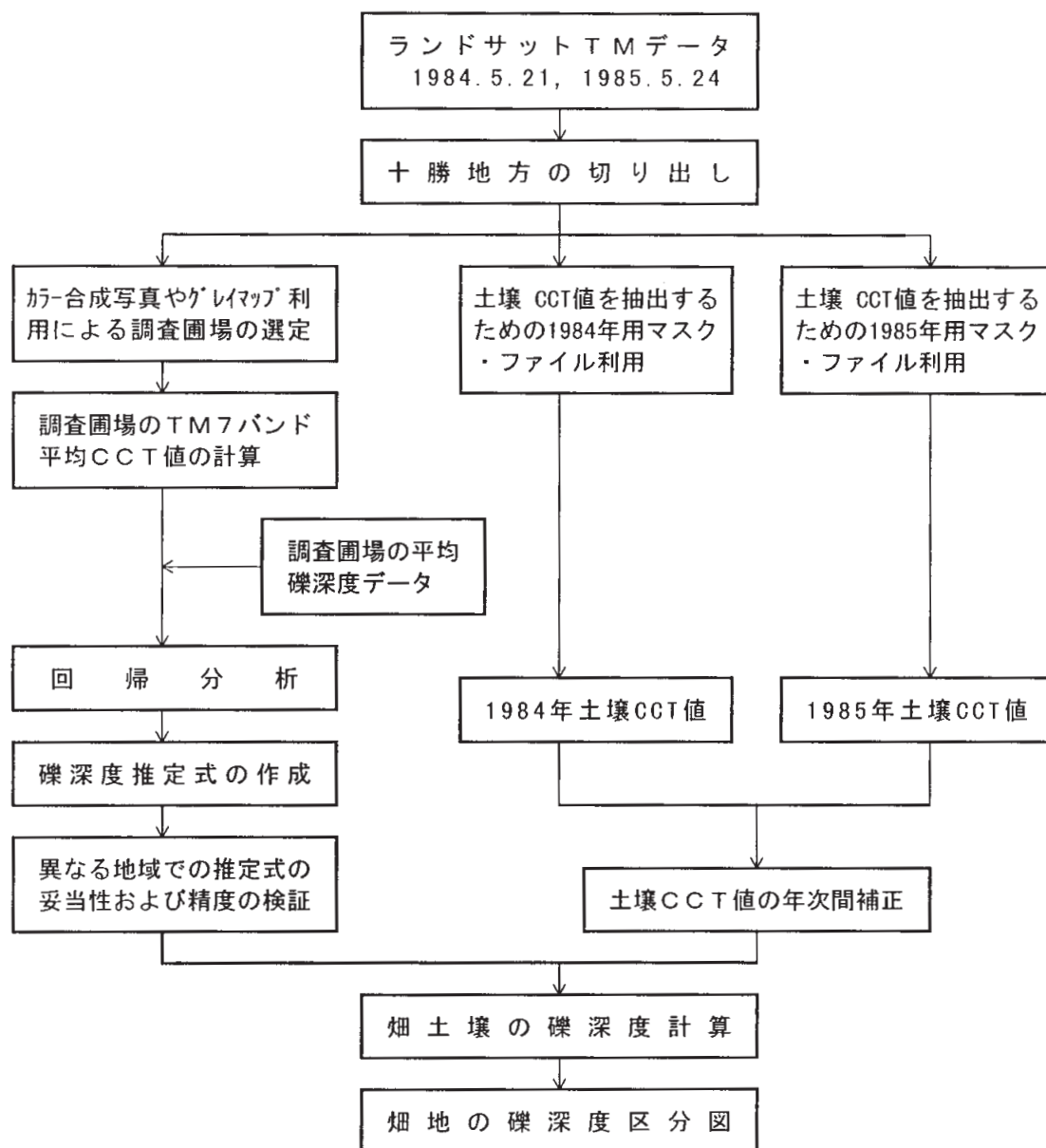


第32図 易有効水分容量の出力例（帯広市南部）

2) 土壌水分特性区分図の図化

次に、土壌水分特性区分図の図化法であるが、ここでは代表して有効水分容量区分図の図化法を述べる (Hatanaka, 1995)。まず、TM 画像から土壌のみのデータを抽出する1984年用および1985年用のマスク・ファイル（土壌を1とし、植生や市街地などを0とする）を作成し、このマスク・ファイルの積により、両年ともに土壌を抽出する中間マスク・ファイルを作成した。この中間マスク・ファイルと1984年と1985年のTMバンド5のCCT値との積により土壌データを抽出した。次に、1985

年の土壌データ（TMバンド5のCCT値）から1984年のそれを差引いて、土壌のCCT差を求めた。このデータを用いて上記第19表の推定式から画素ごとに有効水分容量に読み替え、各有効水分容量区分図を作成した。第32図に易有効水分容量区分図の例を示した。第32図では易有効水分容量の区分値を21~40mm、41~60mm、61~80mm、81~100mm、101~120mm、121mm以上の6段階とし、それぞれ赤色、桃色、黄色、水色、青色、緑色で表示した。

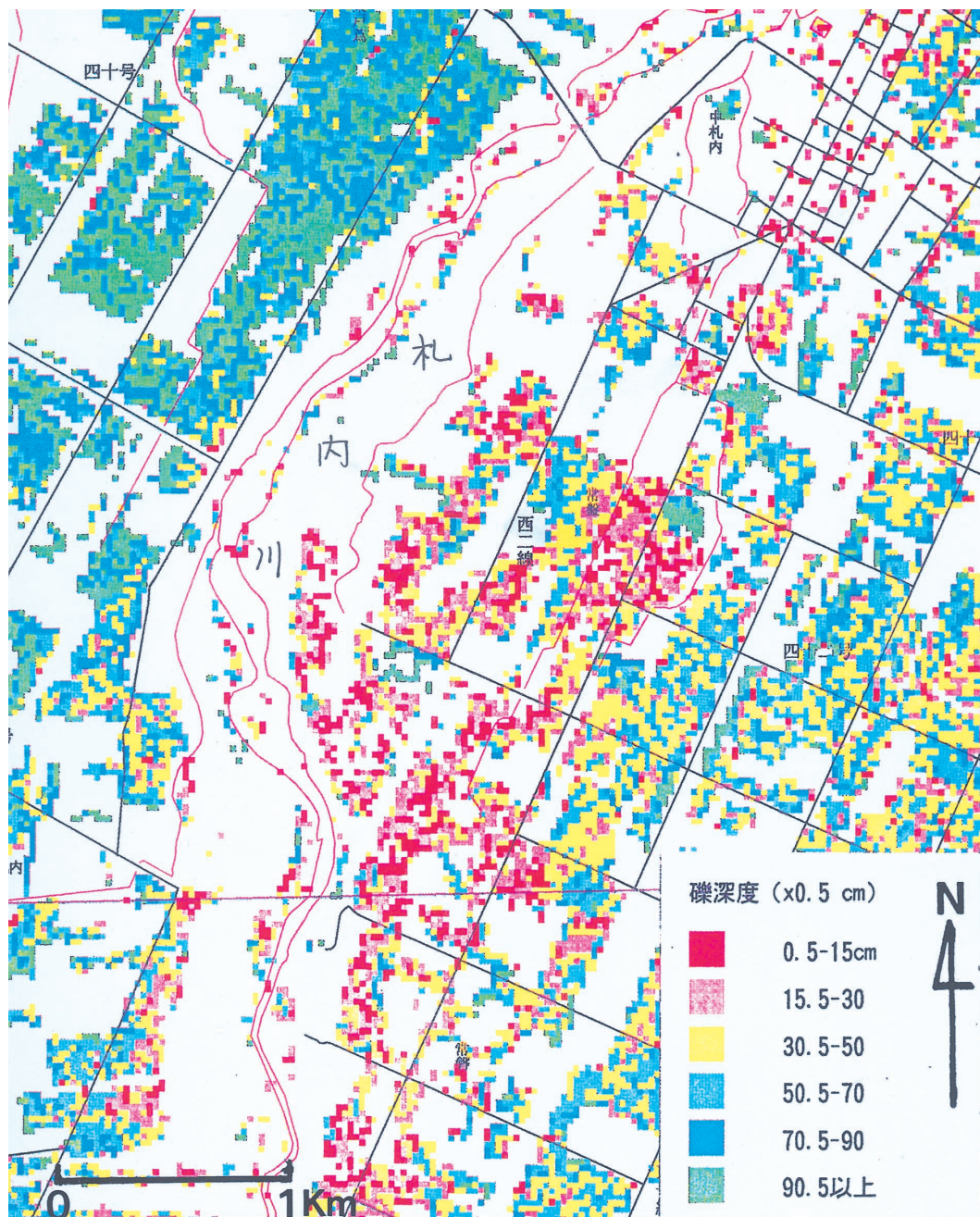


第33図 礫深度区分図作成フロー

3) 礫深度区分図の図化

最後に礫深度区分図の図化法を第33図に示した。まず、1985年用マスク・ファイルと1985年のTMバンド2, TMバンド4, TMバンド5, TMバンド7のCCT値との積により土壌データを抽出した。次に、このデータを用いて第23表の推定式から各画素を礫深度に読み替え、1985年の礫深度区分図を作成した。続いて、1985年が植生で、1984年が土壌用のマスク・ファイルと1984年のTMバンド2, TMバンド4, TMバンド5, TMバンド7のCCT値と

の積により土壌データを抽出した後、これら4バンドの土壌データを1985年用に単回帰式で年次補正し、推定式を用いて各画素を礫深度に読み替え、補完用の礫深度区分図を作成した。最後に、ふたつの区分図を重ね合わせて礫深度区分図を作成した(第34図)。この図では礫深度の区分値を0.25~7.5cm, 7.6~15.0cm, 15.2~25.0cm, 25.2~35.0cm, 35.2~45.0cm, 45.2cm以上の6段階とし、それぞれ赤色, 桃色, 黄色, 水色, 青色, 緑色で表示した。



第34図 礫深度区分図の出力例（帯広市および中札内村）

2. 農業情報システムの開発とその内容

Ⅲ. からⅤ. で述べた畑土壌の腐植含量, 水分特性, 礫層の出現深度の各区分図は, 複数の主題を重ね合わせ解析して土壌管理のための高次の情報を提供するために, コンピュータシステムである農業情報システム (AGRIST: Agricultural Information System for Tokachi) としてとりまとめられた。以下その概要と内容を述べる。

1) 農業情報システムの概要

本システムは十勝地域の土壌情報をモニタ上に表示したり, 道路・地名などを重ね合わせて表示したり, さらに必要な範囲を任意の縮尺で地形図にあわせてカラー出力する, 画像データベース・システムである。第24表にその特長を示した。

第24表 総合土壌管理システムの特長

- | | |
|---|-----------------------|
| ① | 主題図のカスタマイズ (処理・加工) 可能 |
| ② | 複数の主題図の重ね合わせ解析が可能 |
| ③ | 主題図の更新が容易 |
| ④ | 小区画だけで動作可能 |
| ⑤ | 土壌以外の主題図の追加が可能 |
| ⑥ | 他の地域での開発が容易 |
| ⑦ | 個人 (農家) レベルでの利用も可能 |
| ⑧ | ソフトウェアとデータの独立性が高い |
| ⑨ | 特別なハードウェアが不要 |
| ⑩ | 主題図のフォーマットが共通 |

本システムを作動させるのに必要なハードウェアは, パーソナル・コンピュータ (NEC の PC-9800 シリーズまたはこの互換機で, CPU は i80486以上), EMS メモリ (2 MB 以上), ハードディスク (300MB 以上), 光磁気ディスク (主題図の更新・追加用), モニタ, プリンタおよびマウスである。AGRIST で用意されている主題図は, 次の8項目である。

- ① 土壌水分率 (容積 %)
- ② 土壌水分張力 (pF)
- ③ 日あたり土壌水分張力上昇速度 (dpF/day)
- ④ 全有効水分容量 (mm)
- ⑤ 易有効水分容量 (mm)
- ⑥ 正常生育水分容量 (mm)

⑦ 礫層の出現深度 (cm)

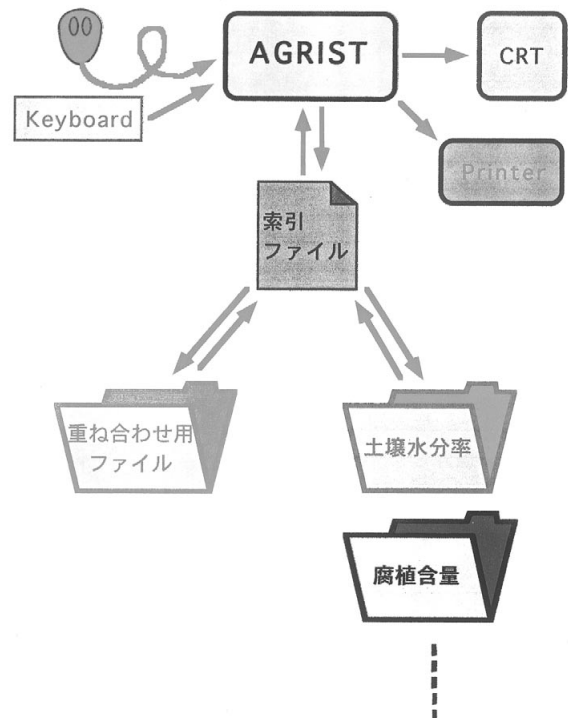
⑧ 土壌腐植含量 (%)

これらの主題図は, 第3章から第5章で得られた腐植含量, 水分特性, 礫深度を図化したものである。ただし, 永年牧草地は植生に100%被覆されて土壌データが得られないことから, 対象外となっている。

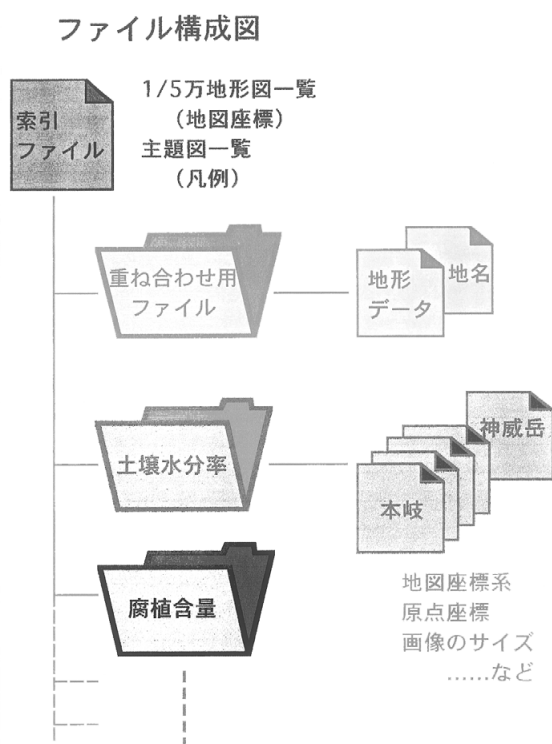
これらの主題図は, 地上での大きさが25m×25mの画素からできている。5万分の1の地形図と重なるように編集され, この地形図の図副単位に分割してファイルに納められている。主題図とともに, 地点を特定するための地理情報も用意されている。この地理情報には, 道路や河川, 市町村界などの線で表された地形データ (ベクタ情報) と, 市町村名や河川名などの地名 (文字情報) が含まれている。

2) 農業情報システムの機能

AGRIST の動作を模式的に示すと第35図のようになる。また, データ・ファイルには, 主題図ファイルと重ね合わせ用ファイルがあり, 索引ファイルによって関連づけられている (第36図)。



第35図 AGRIST の動作概念図



第36図 AGRIST が用いるファイルの構成 (概略)

ユーザーがキーボードやマウスを使って AGRIST に指示を与えると、AGRIST は索引ファイルを参照しながら、指示通りに主題図 (第35図中の土壌水分率や腐植含量など) と地理情報 (図中の重ね合わせ用ファイル) をモニタ上に表示したり、カラー印刷を行う。

AGRIST を使った作業には、以下の4種類がある。

- ① データの入力
- ② 情報の表示
- ③ 情報の編集
- ④ 情報の印刷

以下、各項目について簡単に説明する。

(1) データの入力機能

用意されている地理情報を更新したり、専用の情報をつけ加えたりする機能である。つまり、新しく作られた道路や排水路などの線 (ベクタ情報) を引いたり、地名や圃場の所有者などの文字を書き込めるようになっている。

(2) 情報の表示機能

主題図を表示したり、その上に地理情報を重ねたり、これらを拡大・縮小したり、位置情報を表示したりする機能である。主題図は、4096色の中からすきな色を選んで、最大6色まで表示可能である。同様に、地理情報は最大10色まで色分け表示可能である。また、拡大・縮小の程度に応じて、重ね合わせする地理情報を選ぶことが可能である。例えば、十勝全域を縮小表示するときには、国道と市町村界のみ主題図に重ねたり、芽室町にある北海道農業試験場の圃場を拡大表示する場合にはすべての地理情報を重ねる、という使い方が可能である。また、カーソルがある地点の緯度・経度も表示されるので、地形図上の地点の確認が容易である。

(3) 情報の編集機能

主題図と地理情報の編集を行う機能である。主題図の色分けを変更したり、2つの主題図を重ね合わせて新しい主題図を作ることが可能である。一例として、土壌腐植区分図は初期の設定では6段階に区分されているが、これを例えば、多腐植 (8%以上)、中腐植 (5~8%)、少腐植 (5%以下) という3段階の区分にまとめることが可能である。また、「少腐植」(5%以下) かつ「礫深度91cm以上」という条件で、ナガイモの作付け可能図のような新しい目的の主題図を作ることにも可能である (第37図)。

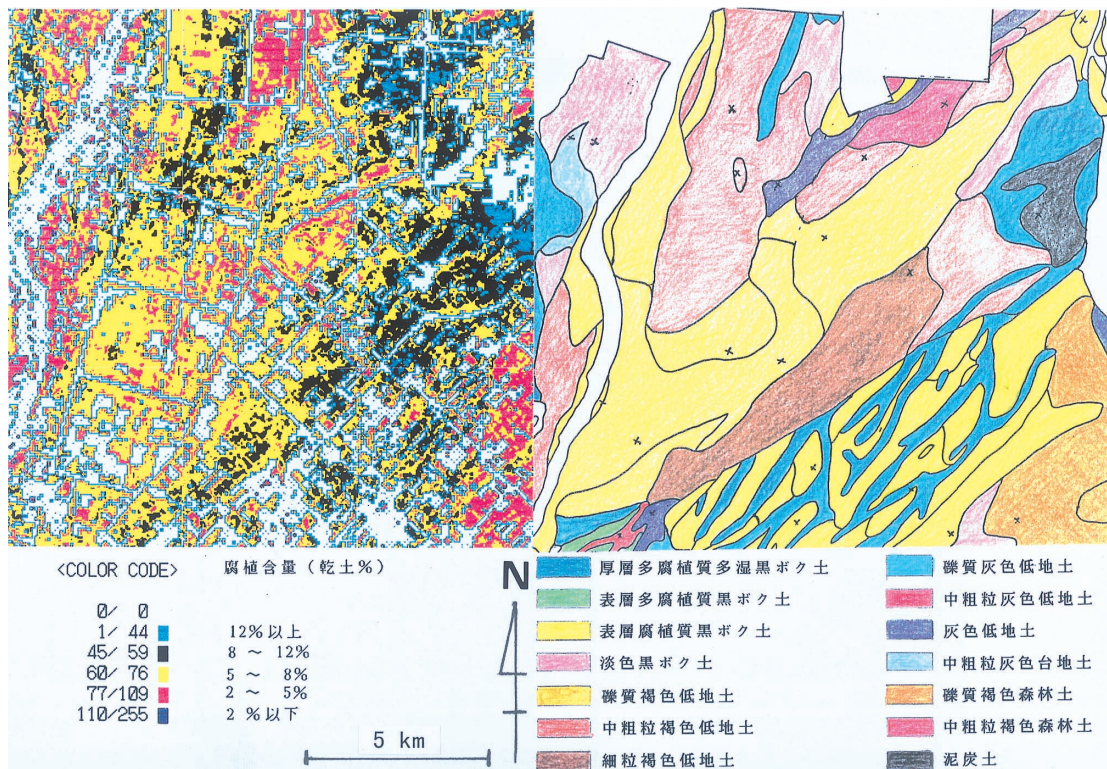
地理情報の編集では、道路の取付け位置が変更になったり、河川の流路が変わった場合など、道路や河川を示す線を移動したり削除することが可能である。また、地名などの文字を見やすい位置に移動することも可能である。

(4) 情報の印刷機能

モニタ画面上で選んだ範囲を希望の縮尺で印刷する機能である。主題図の情報を損なうことなく印刷できるのは、縮尺が30万分の1までである。縮尺がこれ以上になると、もとの主題図から間引いて印刷されるからである。OHPシートに印刷すれば、地形図に重ねるオーバーレイシートを作ることができる。用紙サイズより大きい主題図を印刷すると、複数の紙面に印刷される。この場合には、位置合わせ用のティックマークを目印に紙を張り合わせることが可能である。



第37図 AGRISTによるオーバーレイ出力例 (ナガイモ作付け適地の抽出)
 オーバーレイ条件: 「土壌腐植含量5%以下」と「礫層深度91cm以上」



第38図 TMデータから作成した土壌腐植区分図と土壌分類図の比較

3. 土壌特性区分図の利用

1) 土壌腐植区分図の利用

土壌の腐植含量はその窒素供給能および乾湿の指標であり、作物の生育・収量と品質に大きく関与する。腐植含量が多い土壌の色は黒味を帯びて窒素供給能の高いこと、逆に腐植含量の少ない土壌は赤味を帯びて窒素供給能の低いことを示す。土壌腐植区分図の図化により畑土壌の有機物量、窒素供給、水分環境に関する総合的な状況が把握できる。本土壌腐植区分図と従来の土壌図「十勝管内土壌分類図」を比較すると、同じ土壌統に分類される土壌でも腐植含量がさらに2～3水準に細分されること(第38図)、従来の土壌図の区分単位内に異なった土壌が混在することがわかる。また第2章で触れたように、十勝平野は新旧さまざまな扇状地や河岸段丘よりなる盆地状の台地平野であるが、土壌の腐植含量も地形の影響を受けていることが概観できる。

営農にともなう畑土壌の腐植含量の変化を検討するために、解析地域の土壌腐植区分図に土壌分類図を重ねて土壌統群別の腐植含量の出現度数分布と平均腐植含量を求めた(第25表)。この結果と第5表に示した地力保全基本調査時の腐植含量を比較すると、褐色火山性土と褐色低地土を除くすべての土壌において、TMデータから推定した腐植含量の方が地力保全基本調査時のそれよりも低くなった(第26表)。1984～1985年の畑土壌の腐植含量は、これまでの営農を反映して1960年代より低下していることが認められた。

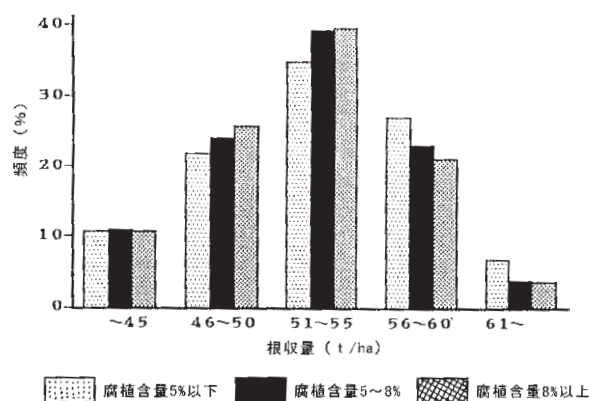
第25表 土壌統群別の腐植含量の出現度数分布と平均腐植含量

土壌統群名	腐植含量(乾土%)の出現度数分布					腐植含量の 平均値
	2以下	2-5	5-8	8-12	12以上	
湿性黒色火山性土	0	28	67	80	12	7.90
黒色火山性土	0	74	105	39	2	6.16
褐色火山性土	1	51	64	29	1	6.15
褐色低地土	6	118	557	219	10	6.98
灰色低地土	0	20	76	52	5	7.48
褐色森林土	0	109	82	3	0	4.87
泥炭土	0	3	4	7	3	8.38

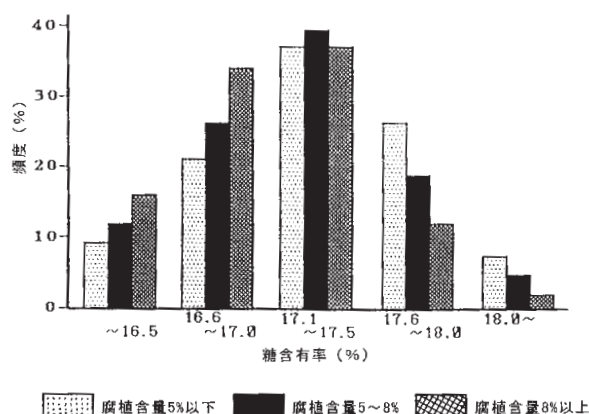
第26表 解析対象地域における腐植含量の変化

土壌統群名	地力保全調査時の腐植含量		TMデータ推定の腐植含量 25cm加重平均値
	表層値	25cm加重平均値	
湿性黒色火山性土	10.77±2.60	13.35±2.57	7.90
黒色火山性土	6.49±1.35	6.64±1.92	6.16
褐色火山性土	4.39±0.92	4.35±0.16	6.15
褐色低地土	5.51±1.80	5.93±2.26	6.98
灰色低地土	8.61±1.50	9.01±2.17	7.48
褐色森林土	5.22±0.21	5.45±0.69	4.87
泥炭土	11.38	17.79	8.38

注) 地力保全基本調査時の腐植含量(平均値±標準偏差)は第5表, TMデータ推定の腐植含量は第25表から引用。



第39図 腐植含量別のテンサイ根収量の頻度分布 (岡野ら, 1993)

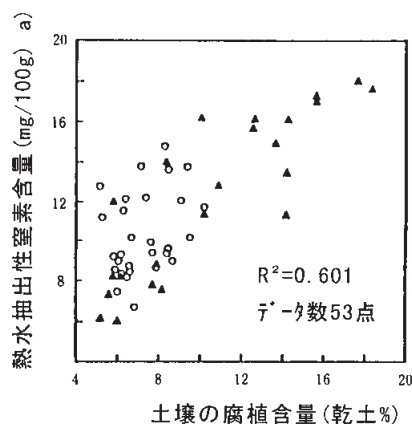


第40図 腐植含量別のテンサイ糖含有率の頻度分布 (岡野ら, 1993)

岡野ら(1994)はテンサイの根収量・糖含量と土壌の腐植含量との関係を検討し、テンサイの根収量が低収量の場合には土壌の腐植含量による差はなく、45～55 t/haの収量水準では腐植含量の高い

土壌が多く、55 t/ha 以上の高収量の場合には腐植含量の低い土壌が多いこと (第39図)、糖分の低い圃場では腐植含量の高い土壌が多く、逆に、糖分の高い圃場では腐植含量の低い土壌が多いことを明らかにしている (第40図)。すなわち、土壌の腐植含量の少ない土壌は根収量が大きく、しかも糖分が高いことを指摘した。一方、製糖行程での糖分の結晶効率を下げることから有害性窒素と呼ばれる根中のアミノ態窒素は、肥料、堆きゅう肥、土壌からの総窒素供給量と関係し、アミノ態窒素が高い土壌は窒素の供給過剰を、低い土壌では窒素の供給不足を示唆した。志賀 (1997) はコムギの空間分布と土壌条件との関係を検討し、コムギ収量は表土の腐植含量が4%未満の範囲では腐植含量の増加に伴って増加し、4%以上では頭打ちまたは腐植含量の増加に伴って漸増することを示している。このように土壌の腐植含量は畑作物の収量・品質と密接な関係を有しているので、本腐植含量区分図は直接利用できる有益な情報となる。

なお北海道では、熱水抽出窒素を指標にしたバレイショ、テンサイの土壌窒素診断を普及に移しており、腐植含量はその窒素診断の指標とされている熱水抽出窒素との相関がかなり高い (西宗ら, 1994) ので (第41図)、窒素診断基準に対応した熱水抽出窒素区分への変換が可能である。その図化例を第42図に示す。なお、土壌窒素供給量の多いことは地温の上昇とともに成熟期まで窒素を供給し



第41図 火山性土壌の腐植含量と熱水抽出性窒素の関係
十勝農協連1984年のデータより作成

a) : オートクレーブ, 120~125°C・1時間法

続けることになり、バレイショのデンプン価やテンサイの糖含有率を低下させる。逆に、マメ類では腐植含量の高いことが有利となりやすい。土壌腐植区分図を利用した土壌管理の効果を高めるには、作物の種類や特性、作付体系なども考慮するとよい。

2) 土壌水分特性区分図の利用

十勝地方の基幹作物であるテンサイの品質を規制する糖含有率は、窒素供給の多少に加えて水分供給にも影響される。根中の糖含有率と水分含有率は負の相関関係を示すので、水分供給力の高い土壌では多汁質で低糖分のテンサイを生産することになる (西宗, 1984, 1987, 1993a, 1993b)。土壌の水分特性を把握した上で適切な施肥管理を行えば、品質の向上と増収が望める。後述する土壌水分特性区分図は土壌中の水分特性を図化したもので、性質に応じた利用法を述べる。

(1) 土壌水分率および土壌水分張力 (pF) 区分図 (出力図略)

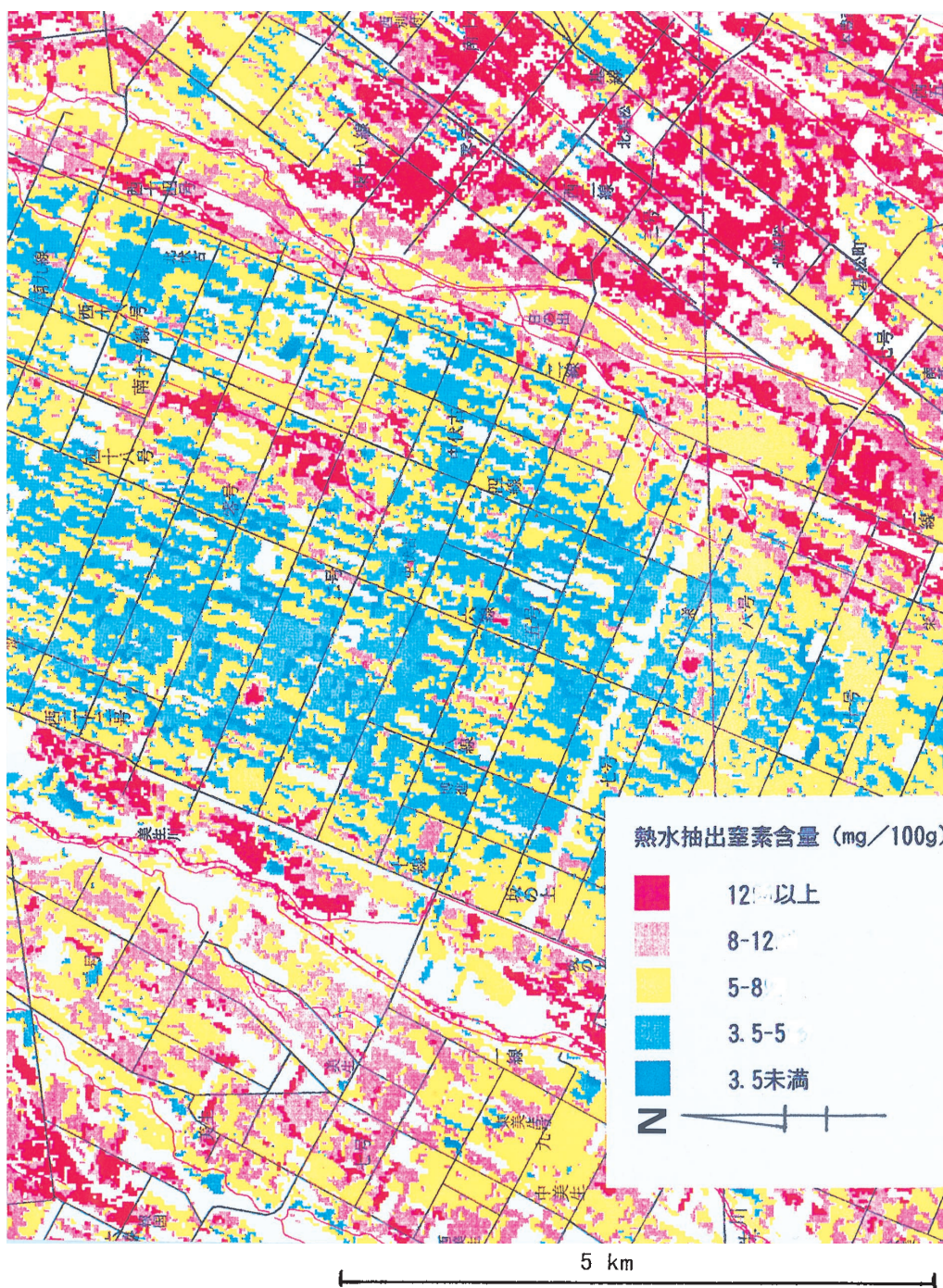
両図ともランドサットによる観測時点での、表層10cmの土壌水分状況を把握できるが、全生育期間を通しての利用場面は限定される。しかし、各圃場の乾湿状況の把握には使える。土壌水分率区分図では褐色低地土と褐色火山性土に差がみられなかったが、pF区分図では褐色火山性土のpFが低く、両土壌の差異が明瞭に認められた。

(2) 乾燥速度 (pF 上昇速度) 区分図 (出力図略)

本区分図から表層10cmの土壌の乾燥程度を知ることができ、水分を多く保持できる土壌ではdpFの値は低く、土壌の乾湿の特性を定量的に把握できる。つまり、十分な降水あるいはかん水を行った24時間後のpFは1.8前後 (圃場容水量) であるから、晴天が連続した場合、dpF0.1の土壌では12日後にpF3.0 (作物が正常な生育を維持できる限界)、20日後に作物のしおれが始まるpF3.8に、24日後に作物が枯死するpF4.2に到達することが想定できる。本情報は、少量かん水やかん水間断日数の延長など、高品質、経費節減、省力のための、きめの細かいかんがい計画の設定に有効である。

(3) 有効水分容量区分図

pF1.8~4.2の土壌水が作物に利用され、有効水分と呼ばれる。有効水分は、生育障害を起こさない



第42図 腐植含量から求めた熱水抽出性窒素含量区分図

までの正常生育有効水分 (pF1.8~3.0), 萎れを起こさせないまでの易有効水分 (pF1.8~3.8), 枯死を起こさせないまでの全有効水分 (pF1.8~4.2) に分けられ, 出力例として示した区分図 (第32図) では表層30cmの土壤が保持できる易有効水分容量を区分でき, 降水量相当に換算している。

主要畑作物の標準収量を得るための日平均かん水量は, アズキと秋播コムギで2mm, テンサイとバレイショで3mmとされ (西宗ら, 1993), また, テンサイの根収量は過湿状態 (土壤水分 pF0~1.8) の日数が50日を越えると急速に収量が低下し, 逆に適性水分 (pF1.8~2.7) の日数が多いほど収量は高くなる (第10図) ので, 有効水分容量区分図は畑作物栽培にとって水分供給力を示す情報となる。

3) 礫深度区分図の利用

作成した礫深度区分図 (第34図) を概観すると, 礫層の出現位置は現河川に近い沖積面で浅く, 段丘が上がるに従って深くなり, 台地の上ではさらに深くなる状況が把握できる。また, 礫層の出現位置の浅い地形・土壤に位置し, 面積が2~3ha程度の大規模圃場内でも礫深度が複雑に変化している状況が認められ, 礫深度の不均一な変化を圃場の1枚単位で把握することができた。なお, 本図において, 湿性黒色火山性土や湿性厚層黒色火山性土, あるいは灰色台地土などの多腐植土壤で浅礫が示される場合には土層攪乱や粘土および下層土の混入・露出が考えられる。逆に, 異常な土壤管理を行えば, その結果が表層に現れるため確認も可能となる。

礫深度と畑作物の生育・収量との関係は, 礫深度が浅いと作土層が制限されるため土壤が乾燥しやすくなり, 畑作物は水分不足で生育遅延に陥り, ひいては収量と品質の低下が想定される。実際に, 干ばつの被害が大発生した1984年に調査した結果 (第3表, 第4表) の一例をみると, 礫深度が浅い場合, テンサイの根収量と糖収量, アズキの子実収量と規格内収量は明らかに低く, 礫深度の影響はテンサイの根収量やアズキの子実収量のみならずテンサイの糖収量やアズキの規格内収量の品質にまで及んでいる。とくにテンサイの場合, 干ばつの被害を軽減するために礫深度は50cmより深い (第11図) ことが必要で, この礫深度区分図はテンサイ栽培にとって直接利用できる有益な情報となる。

また, 礫深度は畑地かんがいや作付計画などに直接効果をもたらすが, 除礫作業あるいは除礫後の客土, 有機物の投入, 施肥設計などにも利用できる。

4) オーバーレイによる実利用例

ナガイモやゴボウなどの深根性の作物の適地は, 水はけが良く, 礫層が1mより浅く出現しない土壤に限定される。十勝の音更町ではナガイモの栽培適地の把握に本システムを利用した。AGRISTでは異なった複数の情報を重ね合わせることが可能なので, 「礫深度91cm以上」と「土壤腐植含量5%以下」の条件を重ねることで適地を絞り込み, 現地での調査効率を高めることに役だった (第37図)。

ところで, わが国の畑作地帯で, テンサイなどの畑作物を対象とした干ばつ被害程度の解析には, ナチュラルカラーの航空写真 (島中, 1983, 1990) やランドサット MSS データ (深山ら, 1985; 小川茂ら, 1988) が使用され, 広域的かつ定量的な干ばつの被害解析法が開発されている。またアメリカでは, William (1990) がコーンベルトと称される Iowa, Illinois, Indiana, Ohio にまたがる広大なエリアでトウモロコシの干ばつ被害を解析している。一方, 岡野らは4時期の TM データを用い, 作物間の生育ステージの差に基づく画像データの論理演算で判別すると判別率の高い作付図ができること (岡野ら, 1993b), テンサイの根収量や品質の指標である糖含有率とアミノ態窒素がリモセンで診断可能なこと (岡野ら, 1993a, 1994) を報告しており, 畑作物の品質評価法の確立と高品質作物の栽培への道を開いている。解析結果は事例の蓄積として農政や営農計画に生かせるように, 圃場カルテルの作成や地域農業情報システムの一環となるデータベース化する必要がある。

4. まとめ

1) 3章から5章で得られた推定式を用いて土壤腐植含量 (%), 土壤水分率 (容積%), 土壤水分張力 (pF), 日あたり土壤水分張力上昇速度 (dpF/day), 全有効水分容量 (mm), 易有効水分容量 (mm), 正常生育水分容量 (mm), 礫層の出現深度 (cm) などの図化法を述べた。TM データはデジタルデータであるから, 本手法では任意のレベルで各主題図を作成することが可能な特

徴を有する。

- 2) 1) で作成した腐植含量, 水分特性, 礫深度に関する区分図をコンピュータ・システムを用いて高度に利用できる農業情報システム (AGRIST) を開発した。AGRIST で用意されている主題図は, 土壌水分率 (容積%), 土壌水分張力 (pF), 日あたり土壌水分張力上昇速度 (dpF/day), 全有効水分容量 (mm), 易有効水分容量 (mm), 正常生育水分容量 (mm), 礫層の出現深度 (cm), 土壌腐植含量 (%) の8項目である。AGRIST には①データの入力機能 (地理情報の更新, 情報の付加機能), ②情報の表示機能 (主題図の表示, 地理情報の累積と拡大・縮小, 位置情報の表示機能), ③情報の編集機能 (主題図の色変更, 2つの主題図の重ね合わせによる新主題図の作成機能), ④情報の印刷機能 (希望する縮尺による印刷機能) の4つの機能が用意されている。
- 3) 1) で作成した腐植含量区分図, 水分特性区分図, 礫深度区分図の利用法について, ①各区分図からわかること, ②単独の区分図の作物栽培や土壌管理への利用法, ③オーバーレイによる実用利用例を中心に考察した。

VII. 総合論議

1. 総合論議

十勝地方の畑作農業では高品質, 低コスト生産, 環境保全型農業の推進が課題とされるが, それに対応するには, 作物生産の土台である土壌の特性を把握した営農計画, 肥培管理, 各種対策を展開することが重要である。そのためには, まず, 土壌特性と土壌生産力を構成する要因をありのままに, しかも圃場一枚の中の不均一性を正確に, かつ迅速に把握・評価することが必要である。次には, 作物の生育・収量・品質に影響を及ぼす土壌要因間の重ね合わせによる土壌生産力の総合的評価とこれに基づく土壌および施肥管理が肝要である。

本研究は, ①土壌生産力を腐植含量, 水分特性, 礫深度という主題に機能分化させ, 各主題ごとに生産阻害要因を広域的に, かつ圃場単位で把握する手法を開発すること, ②腐植含量, 水分特性, 礫層の出現深度の主題を複数重ね合わせ解析して土壌管理のための高次の情報を提供するために,

農業情報システム (AGRIST: Agricultural Information System for Tokachi) を開発すること, ③複数の土壌生産力要因が重複している圃場における営農サポートを示すことを目的とした。

1) 畑土壌の腐植含量, 水分特性および礫深度の評価法

本研究ではまず, 作物の生育初期で土壌が乾燥している5月のTMデータを用いた腐植含量の推定法を検討した。その結果, 腐植含量がTMバンド3の反射強度と強い相関関係があり, この関係から広域的で, かつ細密な土壌腐植区分図が作成が可能なることを示した。以上の解析では裸地状態の土壌を対象としたが, 5月といえどもすべての畑地が裸地状態とはいえず, TMデータには目的とする土壌のほかに作物等の植生データも含まれている。十勝地方全域の土壌腐植区分図を作成するには植生下の土壌腐植含量も推定しなければならず, 植生の影響を除去する工夫が必要となる。そこで植生下にある土壌の腐植含量推定法を検討した。その結果, 土壌腐植含量の推定において各画素のTMバンド3のCCT値をそのまま使う代わりに, $\text{LOG}_{10} \text{TMバンド}3 - \text{LOG}_{10} \text{TMバンド}4$ 座標空間で頂点および各画素を通るソイル・ラインとの交点の $\text{LOG}_{10} \text{TMバンド}3$ 座標を求め, この値を使うことにより裸地だけでなく, 秋播コムギ畑や新しい牧草地のように植被率の低い畑地の腐植含量も植被の影響を除去して推定できた (第16図, 第17図, 第18図)。本研究で, TMデータから腐植含量が高い精度で推定できた理由としては, ①乾燥状態にある土壌を観測したTMデータが得られたこと, ②腐植含量について地力保全基本調査による分析データが整備されていたこと, ③腐植含量として作土層25cmの加重平均の常用対数値を用いるなどの工夫を凝らしたこと, ④植生下の土壌の腐植含量を推定するために, $\text{LOG}_{10} \text{TMバンド}3 - \text{LOG}_{10} \text{TMバンド}4$ 座標空間で頂点および各画素を通るソイル・ラインとの交点の $\text{LOG}_{10} \text{TMバンド}3$ 座標を用いたこと, などが挙げられる。土壌の腐植含量の解析は北海道の水田 (志賀ら, 1989, 1997), 宮城および京都の水田 (未発表), 千葉県畑地 (真行寺ら, 1989, 1990) と事例を増していくが, 本研究は一連の研究の端緒となった先導的な研究であった。

TMデータから推定した腐植含量は, 地力保全基

本調査が実施された時の作土層 (15cm 前後) の腐植含量とはあまり一致せず、現状の作土層 (25~30 cm) の腐植含量と一致していた。営農にともなう畑土壌の腐植含量の変化をみると (第26表)、褐色火山性土と褐色低地土を除くすべての土壌において TM データから推定した腐植含量の方が地力保全基本調査時のそれよりも低く、これまでの営農を反映して現在の腐植含量は1960年代のそれより低下していることが認められた。真行寺ら (1990) は千葉県北総火山灰台地の野菜畑において、従来の分析データと TM データから推定した腐植含量を比較して、深耕・混層耕の影響により腐植含量の著しい低下が認められたことを報告している。十勝地方の畑作地帯でも、千葉県の畑作地帯と同様な現象、すなわち深耕などの土壌管理に伴う作土層の腐植含量の低下が起きていると理解される。

わが国における土壌腐植区分図の実用化第一号である「帯広地域土壌腐植区分図」(福原ら, 1989) の完成・発行により、これを利用した実利用事例をいくつか挙げてみる。まず、帯広市は独自の農業システムにこの土壌腐植区分図を取り入れた。当初の目的は堆肥の確保量の把握とその貯蔵センターの配置計画への活用であった。土壌生産力増強のための堆きゅう肥の施用は腐植含量の少ないところに多く、多いところに少なくといった土壌管理をねらいとしたためである。将来は、基幹作物の収量・品質マップとの重ね合わせ、作目配置、耕地管理などへの活用を目指している。音更町ではナガイモの作付適地の把握に活用した。また、北海道開発局は排水や畑地かんがいなどの基盤整備や土地改良事業に活用している。

次に、本研究では、作物の生育初期で土壌水分が異なる5月の2年分の TM データを用いた水分特性の推定法を検討した。一般に、Myers ら (1983) によると、リモートセンシングデータから土壌水分を推定する方法として、①可視~中間赤外波長を利用した反射法、②熱赤外波長による熱容量法、③受動及び能動マイクロウェーブ法がある。本研究で使用したランドサット TM データは、主として①の方法、NOAA データは②の方法になる。検討の結果、①土壌水分張力 (kPa と pF) や水分率 (容積%) は TM バンド 1, 2, 4 と相関関係にあり、これらと腐植含量を説明変数とする重回帰式が推定に有効である、②土壌の乾燥速度

(日当たりの kPa, pF 上昇速度および Mv 低下速度) は TM バンド 1, 3, 4, 5 と相関関係にあり、これらと腐植含量を説明変数とする重回帰式が推定に有効であること、③土壌の保水力 (有効水分容量) は土壌水分の異なる2シーンの TM バンド 5 の反射強度の差から推定できることを示した (第11表, 第15表, 第19表)。このような各種の土壌水分特区分図の同時作成はわが国最初であるが、本研究で TM データから土壌水分状況や有効水分容量などが高い精度で推定できた理由としては、①水分状態の異なる裸地土壌を観測した TM データが得られたこと、②異なる水分状態で観測された TM データを用い、TM バンド 5 の差を取ったり、常用対数値を用いたり、腐植含量を説明変数に取り入れるなど解析法に工夫したこと、などが挙げられる (Hatanaka ら, 1995)。以上の結果を受けて、北海道立中央農試 (1993) は、十勝地方と石狩地方の両域で易有効水分容量と TM データの関係を検討し、衛星データや対象地域が異なっても上記手法が適用可能なことを確認している。すなわち、畑土壌の易有効水分容量の推定に TM バンド 5 が有効なことが追試され、確認された。しかし、人工衛星データにより土壌水分を推定する場合に問題になるのが、毎日の土壌水分の変化をカバーできないことである。人工衛星は一定の周期で観測しており、その周期の時しか観測されない。岡本 (1991) は、一つの映像だけでなく観測衛星の異なる複数データ (マルチテンポラル・データ) を利用し、データ間の差から観測期間に起きた変化を水分変化に判読できることを報告している。しかし、この方法とて毎日監視できないから、今後はランドサットデータから広域・細密に得られる土壌水分特性データを、植生や気象データと組み合わせた土壌水分評価モデルで推定・評価する必要がある。清野 (1990) はこの点に着目し、土壌の有効水分容量とアメダス気象データ (気温, 降水量, 日照時間) から土壌の水分状態の変化を推定できるサブシステムを開発した。本システムを十勝地方に当てはめた結果、実測値と推定値はよく一致したことから、ランドサット情報とアメダス情報を組み合わせることで、土壌の水分状態の変化をきわめて高い精度で推定・予測することが可能となる。

さらに、作物の生育初期で土壌が乾燥している

5月のTMデータを用いた礫深度の推定法を検討した。その結果、礫深度は乾燥条件下にある土壌を観測したTMバンド2, 4, 5, 7の4つのTMデータから推定できることを示した(第23表)。TMデータを用いて畑地の礫深度推定する手法を開発・報告したのはわが国初めてである。本研究で、TMデータから礫深度が高い精度で推定できた理由としては、異なる水分状態で観測されたTMデータが得られたこと、とくに土壌の乾燥条件下で、礫深度の違いに基づく土壌水分の差異が明瞭な時期にTMデータが取得できたことが挙げられる(島中ら, 1997)。リモートセンシングを利用して畑土壌の石礫について研究した事例は極めて少ない。石黒(1986)は、航空機で撮影したMSSの熱映像データと畑土壌における作土の礫含量との関係を検討し、土壌表面温度は深さ40cmまでの礫含量と正の相関関係にあることを見出した。その関係から土壌表面温度を説明変数とした礫含量の推定式を作成している。Gomiら(1988)も石黒と同様に、作土層の表面温度と礫含量に高い相関関係があることを認めている。以上の研究に共通している点は、土壌水分や土壌表面温度といった礫深度や礫含量と相関の高い要因を見出し、その要因をリモートセンシングすることで礫深度や礫含量を間接的に推定していることである。リモートセンシングは一種の非破壊測定法であるが、同じように礫深度を非破壊的に測定する方法として地中探査レーダー法や電気探査比抵抗法などがある。5章で述べたように、地中探査レーダー法については草場(1989)や北海道立十勝農試(1989)、電気探査比抵抗法については谷山ら(1995)によって報告されているが、広域の面積を迅速にセンシングするには、時間やコストの面からリモートセンシングの方が有利と考えられる。

礫深度区分図の実際の利用例としては、ナガイモの作付可能圃場の選定、秋播コムギの早期登熟にともなうコンバイン収穫期の稼働計画、畑地かんがい計画などが挙げられる。

2) 農業情報システム(AGRIST)を利用したオーバーレイによる営農サポートの可能性

土壌の腐植含量、水分特性、礫深度を重ね合わせた新しい主題図に対するニーズにはさまざまなものがある。本研究で検討した土壌生産力の要因、

すなわち腐植含量、水分特性および礫深度のオーバーレイにより、具体的にどのような営農サポートが可能かを論議する。議論に先立ち、腐植含量、保水性(有効水分容量)、礫深度に関する要因強度を、農作物生育環境指標(日本土壌協会, 1986)を参考にして第27表のように設定した。なお水分特性としては多くの要因が考えられるが、上記の指標で「保水性」の要因強度が整理されているので、本要因を用いることにした。

第27表 腐植含量、有効水分容量および礫深度の要因強度

要因項目	要因強度		
	1	2	3
腐植含量 (乾土%)	11以上 I	5~10 II	4.9以下 III
有効水分容量 (mm/表層50cm)	51以上 A	26~50 B	25以下 C
礫層の深度 (cm)	51以上 1	30~50 2	29以下 3

第28表 主要畑作物の正常な生育・収量を得るための土壌要因

主要畑作物	望ましい土壌要因		
	腐植含量	有効水分容量	礫深度
テンサイ	10%以下	51~120mm	51cm以深
バレイショ	10%以下	51~120mm	51cm以深
コムギ	5~10%	26mm以上	30cm以深
マメ類	5%以上	26mm以上	30cm以深
トウモロコシ	5%以上	51mm以上	51cm以深
ナガイモ	5%以下	51~120mm	100cm以深
ゴボウ	5~10%	100mm以上	100cm以深

次に、主要畑作物の正常な生育・収量を得るために必要な土壌環境を第28表のように整理した。テンサイとバレイショは生育後期の窒素と水分の供給過剰が糖分やでんぷん価に悪影響を及ぼすので、「腐植含量10%以下、有効水分容量51~120mm、礫深度51cm以深」の条件を設定した。コムギはやや乾燥条件を好み、窒素供給力の低い土壌、有効水分容量の小さい土壌や礫深度の浅い土壌では登熟が早まり穂発芽が発生しやすいので、「腐植含量5~10%、有効水分容量26mm以上、礫深度30cm以深」を設定した。マメ類は土壌窒素の依存性が高く、水分供給も良好な条件を好むので、「腐植含量5%以上、有効水分容量26mm以上、礫深度30cm以深」を設定した。トウモロコシは、表土が深く、排水

良好で腐植含量の多い条件を好むので、「腐植含量5%以上、有効水分容量51mm以上、礫深度51cm以深」を設定した。ナガイモは、腐植が少なく、水分供給が適当で、しかも1m以内に礫層が出現しない場所を好むので、「腐植含量5%以下、有効水分容量51~120mm、礫深度100cm以深」の条件を設定した。ゴボウは水分供給が高く、1m以内に礫層が出現しない場所を好むので、「腐植含量5~10%、有効水分容量100mm以上、礫深度100cm以深」の条件を設定した。

最後に、第27表と第28表を組み合わせて主要畑作物の導入可能な土壌条件を第29表のとおり設定した。設定条件に適合する畑地は当該作物の導入が支障なく可能な地点であり、適合しない地点は障害となる要因の改善を行えば導入可能となる地点を意味する。

第29表 主要畑作物ごとの導入可能な土壌条件

主要畑作物	土壌要因を満たす導入可能な場所
テンサイ	IIA1, IIIA1
バレイショ	IIA1, IIIA1
コムギ	IIA1, IIA2, IIB1, IIB2
マメ類	IA1, IA2, IB1, IB2 IIA1, IIA2, IIB1, IIB2
トウモロコシ	IA1, IIA1
ナガイモ	IIIA1
ゴボウ	IIA1

注) 記号は第27表を参照のこと

第30表 主題図の重ね合わせと土壌管理対策の関係

記号	主題図の重ね合わせ	土壌管理対策
III C	腐植少+保水性低	有機物施用・畑地かんがいなど
III 3	腐植少+礫深度浅	除礫・有機物施用・客土など
III C 3	腐植少+保水性低+礫深度浅	除礫・有機物施用・客土・畑地かんがいなど
I 3	腐植多+礫深度浅	除礫・客土・下層土改良など
I 3 C	腐植多+礫深度浅+保水性低	除礫・下層土改良・排水改良など
C 3	保水性低+礫深度浅	除礫・有機物施用・畑地かんがいなど

注) 記号は第27表を参照

一方、各主題図の重ね合わせと具体的な土壌管理対策の関係を第30表のように設定した。例えば、腐植含量が少ない上に有効水分容量が低いところでは、有機物の施用や畑地かんがいの対策が、腐植含量が少ない上に礫深度が浅いところでは、除礫や客土、有機物の施用の対策が有効である。一方、腐植含量が多くても礫深度が浅く、また有効水分の少ないところでは、除礫や客土、心土破碎などの下層土処理、排水改良などの対策が効果的である。地力対策は排水改良、土層改良、土壌改良などが総合的に実施されて、はじめて効果が発現されていく(大垣, 1987)ので、主題図の重ね合わせによる新しい主題図の作成は、総合的な土壌生産力向上に役立つものと期待される。このような土壌生産力のレベルは、菊池(1981)の提案した土地生産力段階IIIに匹敵すると考えられる。

さらにオーバーレイによる営農サポートの可能性の認められる項目について、以下に論議する。

(1) 施肥対策

土壌腐植区分図は、熱水抽出性窒素による土壌診断と併用すれば一歩進んだ施肥対策を出すことが可能である。例えば、土壌診断による処方箋は、対象圃場から数点を採土したその平均値に基づいて出されるのが普通であり、圃場の不均一性に基づく処方箋は困難である。しかし、土壌腐植区分図では、圃場一枚内の腐植含量の不均一性を把握することができ、同時に圃場の窒素供給量の不均一性をも示してくれる。十勝地方の畑作物の施肥量は、北海道の施肥標準量(北海道農務部, 1989)に近づいてきているとの報告(十勝管内土壌診断事業推進協議会, 1989)もあるが、農家の圃場レベルで見ればまだ改善の余地があろう。岡野ら(1994, 1995)はテンサイの根収量・糖含有率と土壌の腐植含量の関係を検討し、テンサイの根収量が45~55 t/haの収量水準では腐植含量の高い土壌が多く、55 t/ha以上の高収量の場合には腐植含量の低い土壌が多いこと(第39図)、糖含有率の低い圃場では腐植含量の高い土壌が多く、逆に、糖含有率の高い圃場では腐植含量の低い土壌が多いことを明らかにしている(第40図)。すなわち、土壌の腐植含量の少ない土壌は根収量が多く、しかも糖含有率が高い。一方、有害性窒素と呼ばれる根中のアミノ態窒素は、肥料、堆きゅう肥、土壌からの総窒素供給量と深い関係がある。根中のアミノ

態窒素が高いテンサイを生産する土壌は窒素の供給過剰を、低い土壌では窒素の供給不足が示唆される。したがって、圃場一枚単位でアミノ態窒素区分と根収量、糖含有率、腐植含量などの区分と重ね合わせれば、施肥管理、土壌管理、土壌の窒素供給能との相互関係について解析ができ、施肥改善が可能と思われる。

また、窒素供給力の低い土壌、有効水分容量の小さい土壌や礫深度の浅い土壌ではコムギの登熟が早まり穂発芽が発生しやすいことを上述したが、このような危険地帯が推測できれば、水分補給や肥料成分の補給などの具体的な対策が可能である。窒素供給量の高いところでは施肥量を少なく、低いところでは多く、というように施肥量を調整して収量を維持しながら登熟、品質を均一にすることが可能となり、一枚の圃場規模が大きくなればなるほどその必要性和実現性が高まる（西宗ら，1994）。Finke（1992）や志賀（1997）もコムギを供試して土壌要因との空間分析を行っているが、施肥までは反映させていない。一方、プレシジョンは土壌要因と作物の収量をオーバーレイして空間分析し、その結果を施肥に反映させている（Auernhammer，1991）。

(2) 畑地かんがいおよび基盤整備対策

十勝地方の農耕地の約40%は排水不良地であり、その農地のほとんどがこれまでに排水改良事業が行われてきた。一方、ここ数年でみると2～3年に1回の頻度で干ばつ被害が発生しており、畑地かんがい事業の導入も計画されている。水分は作物の生産にとって欠くべからざる要素であり、その制御いかんによって収量は大きく左右されるので、畑作物の高品質・低コスト生産のためには土壌水分供給能の定量的な把握が是非必要である。

礫が浅い位置から出現する圃場では、機械作業だけでなく作物の生育・品質にも影響し、導入できる作物も制限されるため、畑地かんがいの導入も必要となる。例えば、十勝地方における降水変動と土壌水分特性を解析したところ、乾燥気象条件下での畑地かんがいは干ばつの発生頻度の高い礫質の褐色低地土で最も有効（タイプⅠ）、粗粒質の褐色低地土では礫の出現深度によっては有効（タイプⅡ）、礫質の褐色森林土では潜在的な水分欠乏の可能性を有する（タイプⅢ）といった、3段階の畑地かんがい事業の導入基準（西宗，1990、

1993a，1993b）が設定されている。また、これらの土壌におけるかん水試験から、浅礫土壌に対応したかん水指標（西宗ら，1993）も示されている。さらに、礫層では作物根の下層への伸長が制限されるので有効水分容量に対する礫混入率による補正も必要となり、礫深度は畑地かんがい計画に不可欠の情報である。したがって、本システムは導入の適地可能性が判読でき、礫深度による有効水分容量の補正にも使用可能といえる。

石礫地帯では有効土層が浅いことから、除礫後の耕土層の厚さが25cm以下の場合にその不足分を補うための客土が実施されている（菊池，1987）。十勝地方での客土材料としては恵庭岳、支笏の古期ローム質火山灰土が多いとされる（菊池，1987）が、礫深度や腐植含量の主題図は客土の対象となる圃場の必要面積から客土材料の量の確保や配置計画などに使用可能といえる。

(3) 作付計画対策

作物の生育は土壌の養・水分供給力の影響を強く受けるので、これらを圃場単位で把握できればよりきめの細かい作付計画や出荷計画が可能になる。例えば、加工場や市場へのお荷に合わせた播種期の調節を行うスイートコーンや野菜類の場合は、腐植含量と生育速度、収量、品質などとの関係を予め押さえておけば、圃場単位ごとに出荷計画に合わせた作付・栽培が可能である。以上は個々の農家だけでなく地域全体にも適用できる。作物別の収量区分図を作成し、これを主題図として追加したのち土壌腐植区分図と重ね合わせれば、作物別の詳細な生産力区分図の作成も可能となる。

以上述べたオーバーレイに関する手法・考えは地理情報システム（GIS）そのものの特徴であり（バーロー，1990）、最近ではリモートセンシングとGISを結びつけた研究も実施されている（志賀ら，1997；Finke，1992）。今後は土壌情報を地形、土壌、植生、気象等既存の基礎資料と重ねて総合評価する地理情報システムの利用も必要であろう。

(4) 農業情報システム（AGRIST）主題図の精度および更新法

ランドサット情報を利用する上で重要なことは、センサーで得られる情報は土壌表面の分光反射データであること、下層の情報は表面のデータから統計手法的に類推した結果であることを認識する必要がある。土壌腐植区分図は、プラウ耕起で均一化

した結果が表面に反映されている作土層25cm までを保証しているが、それ以下の土層については基本的な基本土壌図である「十勝管内土壌分類図」を併用する必要がある。また、腐植含量の少ない褐色低地土と褐色火山性土が同一レベルで表示されるので、両者の区別は地形によるが最終的には基本土壌図を参照する必要がある。土壌水分張力、土壌水分および土壌の乾燥速度についての各分布図は深さ10cm までを、有効水分容量についてのそれは深さ50cm までを保証している。とくに土壌水分については、下層と表層が一定でないこと、気象条件によって時々刻々変化するので、他の情報も併用すべきである。また、礫深度についての区分図では100cm 以内を保証しているが、除礫のための情報としては十分使える。

Baumgardner ら (1985) は、土壌調査水準により利用するリモートセンシングデータは異なり、大縮尺には TM データのデジタル解析、小縮尺には MSS や TM の視覚判読が有効であると指摘している。また、大縮尺で精度の高い土壌図を作成するための調査密度については、火山灰台地で 1 ha あたり 1.2~3.1 点、砂礫台地で 1 ha あたり 6 点 (いずれも 5 千分の 1 の土壌図作成)、微地形変化の小さい沖積低地で 1 ha あたり 1.1 点 (1 万分の 1 の土壌図作成)、全農耕地で 1 ha あたり 1.1 点 (1 万分の 1 の土壌図作成) という値が示されている (農林水産技術会議事務局, 1987)。TM データの画素単位は 30m×30m で、土壌を 900m² に 1 点の密度で調査したことになり、これは 1 ha あたり 9 点の調査密度に相当する。この調査密度は地力保全調査事業や施肥改善事業におけるそれ (25ha に 1 点の密度) のおよそ 225 倍の精度に匹敵し、誤差を勘案しても 5 千分の 1~1 万分の 1 の大縮尺で精度の高い土壌図を作成するのに必要な調査密度を十分クリアしている。

なお、本手法の推定精度および判別精度は極めて高いものであるが、当然限界がある。一つには 25 m 平方の平均値としてデータ処理されるので、その範囲に多くの物が混在すれば全く別の物を推定する可能性があり、極端に異なった物があれば分布割合の多いものの影響を強く受けることになる。とくに、圃場端の植生部や道路などとの境界での誤差が大きくなる。二つには、ランドサットの地表の軌跡は経線とずれているために送られてくる画

像の向きが地形図と一致せず、本図ではコンピュータで軸の修正をしておき、これも誤差の要因となる。三つには地形図そのものの誤差に出力した土壌腐植区分図と地形図を重ねる際の誤差が加わる。したがって、本図では位置関係に 30m 前後の誤差 (すなわち一つの画素単位) が含まれていると理解できる。

農業情報システムに用意された 8 項目の主題図は、すべて 1984 年 5 月 21 日と 1985 年 5 月 24 日に観測されたランドサット TM データから作られている。ランドサット衛星の場合は 16 日の周期で同一地点に回帰するので、観測データが反復して得られやすい特徴を有している。理論的には 1 年に約 20 回反復して同一地点を TM センサで観測することができる (秋山, 1996) が、実際には雲があつたり、夜間であつたりして、使用可能な観測データが得られる確率は数回程度に低下する。それでも観測データは反復して確実に得られるため、これを用いた主題図の補完や更新が容易である。しかも、農業情報システムには、主題図の更新・追加のプログラムが予め備わっているので、土壌の腐植含量や保水性の変化、土壌水分の追跡などが可能と考えられる。

2. 結 論

これまで 5 万分の 1 の基本土壌図をもとに各種対策図が作成され、畑作物の多収性を重視した施肥管理、土壌改良など化学肥料や農薬等の多量投入に基づく大規模畑作農業が展開されてきたが、それでは畑作物の生産費の低減、単収の増大、品質の向上、合理的作付体系、環境保全型農業の推進が求められる現在の課題には、土壌生産力要因の不均一性に基づくきめの細かい土壌管理および施肥管理の点で対応できない。そこで、圃場一枚を単位とする土壌生産力要因の不均一性に基づくきめの細かい各種の土壌管理および施肥管理を樹立し、利用目的の変化や新たな要望に対処するために、これまでより高精度で、土壌生産力要因について圃場内での不均一性を判読し得る地図情報が望まれる。そのために、リモートセンシング技術を活用して、土壌生産力要因を広域に、しかも高精度に把握した地図情報の作成について検討し、ランドサット衛星に搭載されたセマテック・マップ・データから畑土壌の腐植含量、土壌水分特性、礫層の

出現深度を推定する手法を開発した。その手法を用いて畑土壌の腐植含量，土壌水分特性，礫層の出現深度に関わる地図情報を作成した結果，従来の土壌図に比べて，圃場一枚のレベルで上記要因の把握が可能であること，十勝地方が同じ基準で比較でき，同じ土壌型でも要因間の現れ方が異なることなどがわかった。さらに，それらを重ね合わせて作物生産性がいかなる土壌要因により制限を受けているかを面的に判断可能にする統一システムを構築した。このシステムにより，十勝地方の生産性類型化を行った結果，よりの確な管理法が提示でき，土壌改良や肥培管理法の合理化につながるということがわかった。

謝 辞

本報告をとりまとめるに当たり，北海道大学農学部教授波多野隆介博士には終始懇篤なるご指導とご校閲を賜った。また，北海道大学農学部教授但野利秋博士，北海道大学大学院教授堀口郁夫博士および北海道大学農学部教授松田豊博士には，有益なご助言と本稿のご校閲をいただいた。謹んで，深甚なる謝意を表す。

本研究は，農林水産省北海道農業試験場畑作部ならびに畑作管理部において行われたもので，1982年から1990年までの成果をとりまとめたものである。

この間，北海道農業試験場畑作部長および畑作管理部長として在任された中山兼徳博士，茨木和典博士，木村 宏博士および橋本鋼二博士には，研究途上でご指導とご激励を賜った。

本研究の遂行にあたり，北海道農業試験場畑作部の土じょう改良研究室長であった塩崎尚郎博士（元農業センター土壌診断研究室長），畑作管理部の畑土壌管理研究室長であった西宗 昭博士（現農業技術研究機構北海道農業研究センター畑作研究部長），農林水産省農業環境技術研究所の室長であった福原道一博士（現日本土壌協会）には，本研究の端緒を与えていただくとともに，研究の遂行に多大な便宜をはかっていただき，さらに終始変わらぬ懇切なご指導とご激励をいただいた。

また，北海道農業試験場畑作部および畑作管理部の研究員の土屋一成博士（現農業技術研究機構九州沖縄農業研究センター水田作研究部室長），新

良力也博士（現静岡県農業試験場海岸砂地分場主任研究員），草地試験場主任研究官の斎藤元也博士（現農業環境技術研究所生態システム研究グループ長），農業環境技術研究所研究員の岡本勝男博士（現農業環境技術研究所食糧生産予測チーム主任研究官），北海道農業試験場研究員の宮地直道博士（現農業技術研究機構野菜茶業研究所葉根菜研究部室長）には，現地調査やプログラムの作成など研究の遂行に多大な便宜をはかっていただくとともに，有益な論議をともにしていただいた。

北海道開発局帯広開発建設部農業計画課の広瀬峰生氏，池内國夫氏，染井順一郎氏，白崎幸嗣氏ほか関係各位には「帯広地域土壌腐植区分図」の作成に当たり多大な便宜を，帯広市役所の山口 哲氏，音更町農業協同組合の坂井誠司氏，田中寿裕氏，浦幌町農業協同組合の小林三紀夫氏には，土壌腐植区分図の現地適用とその実証にあたり多大なご協力をいただいた。

さらに，故山中トシエ氏には分析の補助を，現地での土壌調査等には北海道農業試験場畑作部および畑作管理部の業務科職員の多大なご協力をいただいた。

以上の諸氏に，心から感謝の意を表す。なお，本論文は学位論文として北海道大学へ提出したものである。

引用文献

- 1) 秋山 侃 (1996) : リモートセンシングと農業, 農業リモートセンシング, 養賢堂, 東京, 1 ~ 12.
- 2) Al-abbas, A. H., Swain, P. H. and Baumgardner (1972): Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils, *Soil Science*, 114, 477~485.
- 3) Auernhammer, H., Demmel, M., Rottmeier, J. and Muhr, T. (1991): Future developments for fertilizing in Germany, In international summer meeting, *The Ameri. Soci. of Agric. Engineers*, 1 ~ 12.
- 4) Baumgardner, M. F., Kristof, S. J., Johannsen, C. J. and Zachary, A. L. (1970): Effects of organic matter on

- multispectral properties of soils, Proc. Ind. Acad. Sci., 79, 413~422.
- 5) Baumgardner, M. F., Silva, L. F., Biehl, L. L. and Stoner, E. L. (1985): Reflectance properties of soils, Adv. Agron., 38, 1~44.
 - 6) Bhatti, A. u., Mulla, D. J. and Frazier, B. E. (1991): Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images, Remote Sens. Environ., 37:181~191.
 - 7) Blanchard, B. J., and Chang, A. T. C. (1983): Estimation of soil moisture from Seasat SAR data, Water Resources Bull., 19, 803~810.
 - 8) Bowers, S. A. and Hanks, R. J. (1965): Reflection of radiant energy from soils, Soil Science, 100, 130~138.
 - 9) バーロー, P. A. (1990): 地理情報システムの原理 - 土地資源評価への応用 (安仁屋政武・佐藤亮 訳), 古今書院, 東京, 98~118.
 - 10) Carroll, D. M. (1973): Remote sensing techniques and their application to soil science, Soils & Fertilizers, 36 (7), 259~320.
 - 11) Condit, H. R. (1972): Application of characteristic vector analysis to the spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of american soils, Applied Optics, 11, 74~86.
 - 12) Dalal, R. C. and Henry, R. J. (1986): Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 50, 120~123.
 - 13) Damen, J. P. N. (1975): Posing tot verklaring van reflectiespectra van een serie bodemonsters, gemeten met de Niwars-spectrometer, Niwars-publ, Nr. 25, 56pp.
 - 14) Dobson, M. C., and Ulaby, F. T. (1986): Active microwave soil moisture research, IEEE Trans. Geosci. Remote Sense. GE-24, 23~26.
 - 15) Eagleman, J. R., and Lin, W. C. (1976): Remote sensing of soil moisture by a 21cm passive radiometer, J. Geophys. res., 81 (21), 3660~3666.
 - 16) 江森康文 (1976): 光学的画像処理, リモートセンシング, 朝倉書店, 東京, 242~245.
 - 17) Evans, R. (1990): Discrimination and monitoring of soil, in Applications of remote sensing in agriculture (Steven, M. D. and Clark, J. A. Eds.). Butterworth, London, 82-83.
 - 18) Finke, P. A. (1992): Spatial variability of soil structure and its impact on transport processes and some associated land qualities, 1~131.
 - 19) 福原道一 (1975): 土壌のリモートセンシング, リモートセンシング, 165~178, キャノンイメージ, 東京.
 - 20) Fukuhara, M., Hayashi, S., Yasuda, Y., Asanuma, I., Emori, Y. and Iisaka, J. (1979): Extraction of soil information from vegetated area, Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, 242~252.
 - 21) 福原道一, 斎藤元也 (1986): リモートセンシング技術の応用 (その3) - 土壌調査, 農土誌, 54, 59~64.
 - 22) 福原道一 (1987): 先端技術による日本農業の展開 (1) - 開発応用の現状 - ランドサット利用による土壌の情報化とその応用, 農業および園芸, 62, 827~830.
 - 23) 福原道一・西宗 昭・畠中哲哉・斎藤元也・岡本勝男・新良力也・白崎公嗣・染井順一郎 (1989): 帯広地域土壌腐植区分図, 北海道開発局帯広開発建設部, pp24.
 - 24) 福原道一・岡本勝男・畠中哲哉 (1990): ランドサットTMデータによる畑土壌の水分特性評価, 日本写真測量学会年次学術講演会要旨集: 5~8.
 - 25) 福原道一・岡本勝男・畠中哲哉・西宗 昭 (1990): TMデータから作成した腐植区分図とその利用, 日本リモートセンシングセンシング学会誌, 10 (2), 239~245.
 - 26) 福原道一 (1996): 土壌の特性, 農業リモートセンシング, 養賢堂, 東京, 57~63.

- 27) 古畑 哲 (1973) : 十勝火山灰土壌の物理性と分類, 近代農業における土壌肥料の研究, 第4集, 1~12.
- 28) 古畑 哲・林 成周 (1980) : 土壌構造と孔隙組成との相互関係, 北海道農試研報, 126, 53~68.
- 29) Genda, H. and Okayama, H. (1976): Simulator for remote sensing and its application to soil moisture measurement. *Applied Optics*, 17, 5, 807~813.
- 30) Gomi, Y., Yamamoto, H., Sato, S. and Ishiguro, S (1988): Estimate of the amount of gravel content in the soil by airborne MSS data, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing 16th Congress*, 205~211.
- 31) 浜崎忠雄 (1997) : 土の基本分類, 土の土壌圏, フジテクノシステム, 東京, 21~26.
- 32) 島中哲哉・塩崎尚郎・土屋一成・福原道一 (1983) : 十勝地方における畑作物の干ばつによる被害の実態 (第3報), 航空写真によるてんさいの干ばつ被害解析, 土肥要旨集, 32, 6.
- 33) 島中哲哉・塩崎尚郎・福原道一・宮地直道・斉藤元也 (1989) : ランドサット TM データによる畑地表土の腐植含量評価, 土肥誌, 60 (5), 426~431.
- 34) Hatanaka, T., Nishimune, A., Shiozaki, H., Fukuhara, M., Miyaji, N. and Saito, G. (1990): Estimation and mapping of organic matter content of upland soil with a Landsat Thematic Mapper data, *In Transaction of 14th ICSS*, V, p. 511~512.
- 35) 島中哲哉 (1990) : 航空写真による畑作物の干ばつ被害解析法—テンサイの被害分布図の作成と被害程度別面積の把握, 農業技術, 45 (12), 562~565.
- 36) 島中哲哉 (1992) : 畑地における保水力の評価, 農業リモートセンシングの現状と将来, 農環研, 51~61.
- 37) 島中哲哉 (1993) : 5. 十勝 (北海道) 宇宙から21世紀の十勝農業を見る, 宇宙から見た日本の農業, 養賢堂, 東京.
- 38) Hatanaka, T., Nishimune, A., Nira, R. and Fukuhara, M. (1995): Estimation of available moisture holding capacity of upland soils using landsat TM data, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 41 (3), 577~586.
- 39) 島中哲哉 (1996) : 土壌水分, 農業リモートセンシング, 養賢堂, 東京, 63~67.
- 40) 島中哲哉・西宗 昭・新良力也・福原道一 (1997) : ランドサット TM データによる畑地礫深度の推定, 土肥誌, 68 (1), 30~36.
- 41) 林 成周・古畑 哲・福原道一 (1972) : 十勝地方の干ばつ調査報告, 北海道開発局帯広開発建設部, 1~42.
- 42) 速見和彦 (1985) : (2) 各種有機物資材の分解特性, 研究成果166, 農林水産技術会議事務局, 20~24.
- 43) 北海道土壌・作物栄養診断技術検討会議 (1989) : 土壌診断に基づく施肥対応, 1~89.
- 44) 北海道フロンティア研究会編 (1991) : 土は求めている, 1~320.
- 45) 北海道開発局農業水産部農業調査課 (1984) : 北海道畑作地帯における主要土壌の水分特性, 1~112.
- 46) 北海道開発局農業水産部農業計画課 (1988) : 帯広地域の土壌—農牧地および農牧適地, 1~210.
- 47) 北海道開発局帯広開発建設部 (1973) : 十勝管内土壌分類図, 1~32.
- 48) 北海道開発局帯広開発建設部 (1975) : 十勝地域石礫調査報告書, 1~52.
- 49) 北海道開発局帯広開発建設部 (1986) : 札内川地区土壌水分特性調査報告書, 1~68.
- 50) 北海道開発局帯広開発建設部 (1994) : ランドサット情報による十勝地域農業情報システム AGRIST, 1~19.
- 51) 北海道農業試験場 (1979) : 北海道の農牧地土壌分類第2次案. 北海道農試研究資料第17号, pp89.
- 52) 北海道農業試験会議 (1989) : 土壌および作物栄養の診断基準, 1~38.
- 53) 北海道農業試験研究推進会議・北海道農試 (1988) : 北海道における土壌・作物栄養診断の現状と問題点, 1~297.
- 54) 北海道農務部 (1989) : 北海道施肥標準, 1~47.

- 55) 北海道土壌・作物栄養診断技術検討会議 (1989) : 土壌診断に基づく施肥対応, 1~89.
- 56) 北海道立中央農業試験場 (1966~1974) : 地力保全基本調査成績書 [十勝中部地域, 幕別町], 1~87; [十勝中部地域, 忠類村], 1~57; [日高山脈東部山麓地域, 更別村], 1~65; [日高山脈東部山麓地域, 中札内村], 1~57; [十勝中部地域, 帯広市], 1~89.
- 57) 北海道立中央農業試験場 (1993) : リモートセンシングによる有効水分区分図作成手法, 平成5年度北海道農業試験会議 (成績会議) 資料, 1~16.
- 58) 北海道 (1979) : 地力保全基本調査, 北海道耕地土壌図 [V] 日高・十勝地域, 縮尺20万分の1.
- 59) 北海道立十勝農試 (1982) : 十勝地方における浅礫地帯の土地改良と施肥対策に関する研究, 1~27.
- 60) 北海道立十勝農試 (1989) : 地中探査レーダーによる土層調査報告書—土壌断面と画像写真集 (第2集) —, 1~21.
- 61) 池 盛重・坂井 弘 (1960) : 北海道農試彙報, 75, 68~78.
- 62) 石黒 悟 (1986) : 熱映像による土壌含礫量調査, 第35回農業土木学会北海道支部要旨集, 144~147.
- 63) Jackson, T. J., and O'Neill, P. E. (1987) : Salinity effects on the microwave emission of soil, IEEE Trans. Geosci. Remote Sense, GE-25, 214~220.
- 64) Janse, A. R. P. and Bunnik, N. J. J. (1974) : Reflectiespectra van enige nederlandse bodemmonsters bepaald met de Niwarsveldspectrometer, Niwars publ, 18, 1~31.
- 65) 菊池晃二・関谷長昭・横井義雄 (1973) : 十勝管内における土壌の分類・特徴及び改良法, 北海道十勝支庁, 287~298.
- 66) 菊池晃二 (1981) : 十勝地方における土壌類型区分図とその土壌改良対策への応用, 北海道立農試報告, 34, 1~118.
- 67) 菊池晃二 (1986) : 土壌調査と土壌診断, 北海道土壌肥料研究通信, 第33回シンポジウム, 30~35, 北海道土壌肥料懇話会.
- 68) 菊池晃二 (1987) : III. 土層改良・客土・除礫, 北海道農業と土壌肥料1987, 北農会, 163~170.
- 69) 木下 彰 (1973) : 土壌の水分特性と水管理, 北海道農試研究資料, 1, 55~80.
- 70) 神山和則・大塚紘雄 (1993) : 仮比重値を用いた有効水分容量図の作成, 土肥誌, 64, 440~443.
- 71) 香西克俊・松田益義・土屋 清 (1989) : 乾燥地域における表層土壌水分分布変動推定のためのNOAA画像解析, 日本リモートセンシング学会誌, 9, 5~15.
- 72) 草場 敬・天野洋司 (1989) : 地中探査レーダーによる深層土のリモートセンシング, 土肥要旨集, 35, 158.
- 73) MacDonald, R. B. and Hall, F. G. (1980) : Global crop forecasting, Science, 208, 670~679.
- 74) 増島 博 (1962) : 十勝火山灰土壌の土壌水分系に関する研究, 北海道農試彙報, 77, 40~47.
- 75) 増島 博・森 哲郎 (1962) : 畑の土壌水分系と作物の生育に関する研究, (1) 十勝火山灰土壌の生産要因としての土壌水分, 北海道農試彙報, 79, 30~35.
- 76) Mathews, H. L., Cunningham, R. L. and Petersen, G. W. (1973) : Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37, 421~424.
- 77) Myers, V. I. (1983) : Manual of Remote Sensing 2nd. (ASP), Vol.2, 2111~2228.
- 78) 南 松雄・沢口正利 (1967) : 駒ヶ岳火山灰地における畑地かんがいに関する土壌肥料的研究 (第1報) かんがいによる土壌水分の動向と消費水量について, 北海道立農試集報, 15, 56~71.
- 79) 南 松雄 (1970) : 北海道におけるろ土の成因、理化学的特性とその生産性向上に関する研究, 北海道立農試報告, 18, 1~126.
- 80) 深山一弥 (1983) : リモートセンシングによる農用地の基盤調査, 土壌の物理性, 47, 15~21.
- 81) 深山一弥・佐藤 博・安田嘉純・江森康文 (1983) : 農用地調査へのリモートセンシング技術の適用性に関する研究—ランドサットMS

- Sデータを用いた水稲冷害分布の調査法一，農業土木学会論文集，105，27～35.
- 82) 深山一弥 (1985)：昭和59年度干ばつ被害の実態と技術解析，北海道農業試験場・北海道地域農業試験研究推進会議，36.
- 83) Mubekti, Miyama, K. and Ogawa, S. (1991):Study on rice yield distribution by using Landsat TM data, Rural Development Research, 5, 101～115.
- 84) Musick, H. B. and Pelletier, R. E. (1986) :Response of some thematic mapper band ratios to variation in soil water content, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52, 1661～1668.
- 85) Musick, H. B. and Pelletier, R. E. (1988) :Response to soil moisture of spectral index derived from bidirectional reflectance in thematic mapper wave bands, Remote Sensing of Environment, 25, 167～184.
- 86) 村井信仁 (1980)：土地の生産力向上に関連する農業機械の開発と改良に関する研究，北海道立農試報告，32，1～248.
- 87) National Aeronautics and Space Administration (1979):Proceedings of the LACIE symposium, JSC-16015, NASA, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas.
- 88) National Aeronautics and Space Administration (1981) :Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas.
- 89) National Aeronautics and Space Administration (1982):Agristars Annual Report-Fiscal Year 1980, AP-JO-04111, 1～59.
- 90) 日本土壌協会編 (1986)：農作物生育環境指標，第1集土壌環境，1～540.
- 91) 日本ペドロロジー学会編 (1997 a)：土壌調査ハンドブック改訂版，博友社，東京，70～72.
- 92) 日本ペドロロジー学会編 (1997 b)：土壌調査ハンドブック改訂版，博友社，東京，75～78.
- 93) 日本リモートセンシング研究会編 (1977)：リモセンシング・ノート，技報堂，東京，2～31.
- 94) 西宗 昭 (1984)：十勝地方における畑作物の生産に対する土壌窒素の評価，北海道農試研報，140，33～91.
- 95) 西宗 昭 (1987)：IV. テンサイ，北海道農業と土壌肥料1987，北農会，250～259.
- 96) 西宗 昭 (1990)：十勝地方における降水変動の解析と土壌の水分特性区分，平成元年度北海道地域主要研究成果情報，北海道農業試験研究推進会議，101～104.
- 97) 西宗 昭 (1993 a)：畑地かんがい試験とランドサットを用いた土壌水分情報，土壌診断の会報，十勝管内土壌診断事業推進協議会・十勝農協連，43，1～31.
- 98) 西宗 昭 (1993 b)：畑地帯土壌水分特性調査，第6回「アリスレポート」（農業・農村イノベーション研究発表会），北海道開発局帯広開発建設部，10～35.
- 99) 西宗 昭・新良力也・増田欣也・畠中哲哉 (1993)：十勝の浅礫土地帯における主要畑作物の土壌水分反応，平成4年度北海道農業試験会議（成績会議），1～133.
- 100) 西宗 昭・畠中哲哉 (1994)：農業生産における土壌管理の将来—北海道十勝地域をモデルに—，北海道農試研究資料，50，97～115.
- 101) 新田恒雄 (1986)：有機物施用による根圏微生物の制御，有機物研究の新しい展望，博友社，東京，43～84.
- 102) 農林水産技術会議事務局 (1987)：土壌管理指針策定のための精密土壌図の作成・利用法の開発，研究成果190，50～69.
- 103) 小川和夫 (1969)：鈹質畑地土壌における地力要因の解析的研究，東海近畿農試研報，18，192～352.
- 104) 小川和夫・岩間秀矩・渡辺治郎 (1979)：沸化作用程度の測定法の検討と二・三の測定結果について，北海道農試研報，124，81～94.
- 105) 小川和夫 (1987)：3-2-II. 有機物管理，北海道農業と土壌肥料1987，北農会，197～208.
- 106) 小川茂男・深山一弥 (1988)：大規模畑地かんがいの効率的推進のための総合調査総括報告書，北海道開発局，180，208.
- 107) 小川茂男・安養寺久男・福本昌人 (1989)：分光反射率による土壌の腐植量および土壌水分

- の推定, 農業土木学会誌, 57, 465~469.
- 108) 大垣昭一 (1987): 2-2-III. 耕地土壌の生産力特性, 北海道農業と土壌肥料1987, 北農会, 70~83.
- 109) 大崎玄佐雄・奥村純一 (1973): 根圏土壌の理化学性が牧草生産に及ぼす影響 (第1報) 土壌ち密度と牧草生育との関係, 北海道立農試集報, 27, 77~88.
- 110) 大崎玄佐雄 (1987): 3-3-III. バレイショ, 北海道農業と土壌肥料1987, 北農会, 240~249.
- 111) 岡島秀夫 (1976): 土壌肥沃度論, 農山漁村文化協会, 東京, 29~32.
- 112) 岡本勝男・福原道一・畠中哲哉 (1990): 帯広地域土壌腐植区分図の作成, 日本写真測量学会平成2年度年次学術講演会発表論文集, 13~18.
- 113) 岡本勝男・福原道一・畠中哲哉・西宗 昭 (1991): 異なる季節のランドサット・データを用いた土壌水分量の推定について, 土肥要旨集, 37, 149.
- 114) 岡野千春・福原道一・西宗 昭・岡本勝男・嶋田典司・渡辺幸雄 (1993 a): ランドサット TM データによるテンサイの収量推定, 土肥要旨集, 39, 106.
- 115) 岡野千春・福原道一・岡本勝男・西宗 昭・嶋田典司 (1993 b): 多時期ランドサット TM データによる十勝平野の作付図の作成, システム農学, 9 (2), 82~91.
- 116) 岡野千春・福原道一・西宗 昭・嶋田典司・渡辺幸雄 (1994): ランドサット TM データによる収穫期におけるテンサイの糖分・根重の推定と生産高の評価事例, システム農学, 10 (1), 11~20.
- 117) 岡野千春・福原道一・西宗 昭・早坂晶志・嶋田典司 (1995): ランドサット TM データによるテンサイの窒素吸収量の評価, システム農学, 11 (2), 137~144.
- 118) Owe, M., Chang, A., and Golus, R. E. (1988): Estimating surface soil moisture from satellite microwave measurements and satellite derived vegetation index, Remote Sense. Envir., 24, 331~345.
- 119) Reginato, R. J., Vedder, J. F., Idso, S. B., Jackson, R. D., Blanchard, M. B. and Goettelman, R. (1977): An evaluation of total solar reflectance and spectral band ratioing techniques for estimating soil water content, Journal of Geophysical Research, 82, 2101~2104.
- 120) 斉藤万之助 (1987): 3-1-IV. 畑地かんがい, 北海道農業と土壌肥料1987, 北農会, 171~178.
- 121) 佐久間敏雄・波多野隆介・小林信也 (1985): 畑土壌における水および熱エネルギーの循環とその制御, 1~35.
- 122) 沢口正利 (1986): 北海道における小豆の栄養生理的特性と施肥法に関する研究, 北海道立農試報告, 54, 1~87.
- 123) Schmugge, T. J., O'Neill, P. E., and Wang, J. R. (1986): Passive microwave soil moisture research, IEEE Trans. Geosci. Remote Sense. GE-24, 12~22.
- 124) 清野 豁 (1990): 気候的作物生産力モデルと土壌物理性-土壌水分の気候学的推定の試み, 土壌の物理性, 61, 11~18.
- 125) 志賀弘行・福原道一・小川茂男 (1989): ランドサット TM データによる湛水下水田の腐植含量推定, 土肥誌, 60, 432~436.
- 126) 志賀弘行 (1997): 衛星データ, 土壌情報および気象情報の組み合わせによる土地生産力の評価に関する研究, 北海道立農試報告, 91, 1~69.
- 127) 資源観測センター (1989): 画像データの処理と解析 (1), 東京, 1~169.
- 128) 資源観測センター (1990): 画像データの処理と解析 (2), 東京, 1~294.
- 129) 真行寺孝・渡辺春朗・福原道一 (1989): 深耕による表土腐植含量の低下に関する調査-ランドサット TM データによる解析-, 土肥要旨集, 35, 10.
- 130) 真行寺孝・渡辺春朗・福原道一 (1990): ランドサット TM データを用いた混層深耕による黒ボク表土の腐植含量低下の実態解析, 千葉農試研報, 31, 1~8.
- 131) 塩崎尚郎・畠中哲哉・土屋一成 (1984): 寒地畑作土壌の理化学特性 (第1報), 十勝畑土壌の水分特性, 土肥要旨集, 30, 1.

- 132) 塩崎尚郎・島中哲哉・土屋一成 (1985) : 昭和59年度干ばつ被害の実態と技術解析, 北海道農業試験場・北海道地域農業試験研究推進会議, 37~47.
- 133) Skidmore, E. L., Dickerson, J. D. and Schimmelpfennig, H. (1975): Evaluating surface soil water content by measuring reflectance, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 238~242.
- 134) Stoner, E. R. and Baumgardner, M. F. (1981): *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1161~1165.
- 135) 鈴木達彦 (1970) : 腐植, 最新土壌・肥料・植物栄養辞典, 博友社, 97~101.
- 136) 谷山一郎・芝山道郎 (1989) : 近赤外反射分光法による土壌水分の定量分析, 土壌の物理性, 59, 28~34.
- 137) 谷山一郎・太田 健・草場 敬 (1995) : 電気探査比抵抗法による礫層分布の把握, 土肥要旨集, 41, 136.
- 138) 鱈場 尊 (1986) : ヨーロッパ土壌作物栄養診断調査報告, 土壌診断の会報, 十勝管内土壌診断事業推進協議会・十勝農協連, 1~12.
- 139) Thompson, D. R., Pitts, D. E. and Henderson, K. E. (1983): Simulation of Landsat Multispectral Scanner response of soils using laboratory reflectance measurements, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 542~546.
- 140) 十勝管内土壌診断事業推進協議会 (1989) : 十勝畑作地帯における施肥の実態, 1~136.
- 141) 宇都宮陽二郎 (1982) : 熱赤外データによる土壌水分の計測手法に関する実験的研究, 写真測量とリモートセンシング, 21, 2, 15~25.
- 142) 宇都宮陽二郎 (1990) : サーマルイナーシャによる土壌水分の解析, 森林航測, 16 (2), 3~6.
- 143) 山本晴彦・本條 均・脇山恭行 (1991) : 分光反射特性による九州の表層土壌水分の推定, 農業気象, 46 (4), 223~227.
- 144) 山本 毅 (1969) : 畑地の土壌改良, 土壌肥料新技術, 技報堂, 177~196.
- 145) Wang, J. R., Schmugge, T. J., Shuie, J. C., and Engman, E. T. (1989): Mapping surface soil moisture with L-band radiometric measurements, *Remote Sens. Envir.*, 27, 305~312.
- 146) 渡辺利通 (1988) : ランドサットMS Sデータを用いた九州地方における水稲収量推定の試み, 農環研研報, 4, 21~35.
- 147) 渡辺治郎・小川和夫・岩間秀矩 (1981) : 重粘性土壌における有機物の分解過程, 北海道農試研報, 132, 1~16.
- 148) William, L, Teng (1990): *Photogramm. Engin. Remote Sens.*, 56, 1143~1146.