

土壌物理性を考慮した精密農業の研究動向

丹羽 勝久*

The Recent Studies on Precision Agriculture Based on Soil Physical Properties

Katsuhisa Niwa

* Zukosha Co., Ltd. 17, Kita-1, Nishi-18, Obihiro, Hokkaido 080-0048, Japan

1. はじめに

我が国の精密農業研究は現在緒についたばかりであり、1998年に農業機械分野を中心に研究が開始されたことに端を発している(澁澤, 2003)。

精密農業はミネソタ大学の土壌学者ら(Pierre C.R. *et al.*, 1996)が提唱した、「①作物・土壌情報センシング」、「②診断と意志決定」および「③可変投入」の3つのカテゴリから成る営農マネジメント戦略であり、圃場内に発生した作物生育の差異を是正していくことが目的の一つである。また、その中でも最終的アウトプットである「③可変投入」は、「②診断と意志決定」に基づいた局所的施肥管理が主である。

近年の国内における精密農業の研究事例としては、「①作物・土壌情報センシング」では、衛星(安積・志賀, 2004a; 安積・志賀, 2004b; 丹羽ら, 2004; 奥野・本郷, 2005)、航空機(石田ら, 2005)、産業用無人ヘリコプタ(深川ら, 2004; 石井, 2005)、トラクタ搭載型センサ(原, 2005)等を利用したリモートセンシング技術の開発が挙げられる。「②診断と意志決定」では、作物生育の圃場内差異の要因を解析するために、リモートセンシング等で得られた作物生育や土壌情報、施肥量および前作等の管理情報等を一元管理する地理情報システムについて検討が行われている(Yokobori *et al.*, 2004; 丹羽・横堀, 2005)。「③可変投入」では前述したトラクタ搭載型センサのリモートセンシング結果に基づいた小麦追肥の可変施肥試験が取り組まれている(原, 2005)。

一方、我が国の中でも比較的大規模畑作経営が行われている北海道を例にすると、基盤整備が進んだ現在においても、作物生産は未だに土壌物理性の影響を受けており(菊地・丹羽, 2002)、その結果、作物生育に圃場内差異が発生している。

以上のことから、圃場内に発生した作物生育の差異を

是正していくためには、土壌物理性を考慮した精密農業の展開が重要と考えられる。しかし、土壌物理性を考慮した精密農業の研究事例は数少ないのが現状である。

そこで本報告では、従来の「土壌の物理性」で取り上げられなかった新たな視点として精密農業に着目し、作物生育の圃場内差異と土壌物理性の関係の研究事例等について紹介する。

2. 作物生育の圃場内差異と土壌物理性の関係

2.1 土壌基盤(土層の物理的特徴)

高解像度衛星イコノスを利用して、土壌基盤が作物生育の圃場内差異に与える影響について検討した事例を下記に述べる(丹羽, 2003a)。

図-1に、北海道十勝管内音更町の音更川流域の低地において、2000年7月11日と2001年4月23日に高解像度衛星イコノスが撮影した画像の拡大図(トゥルーカラー, 解像度:4m)を示す。なお、図に示す区域は地力保全基本調査から、礫質褐色低地土が分布する区域と位置づけられている。

小麦刈り取りの15日程度前に相当する2000年7月11日の画像から、目視判読により、圃場内における小麦成熟の早晩の筋状の差異を容易に読み取ることができる。また、2001年4月23日の画像から表層土の圃場内差異を把握することが可能であり、双方の画像を比較すると表層土の色が薄い区域で小麦成熟が早いことを確認することができる。

そこで、衛星画像が捉えた表層土の濃淡が相対的に示す情報を検討するために、表層土の色が薄い区域と濃い区域で、それぞれ土壌調査を実施した。

その結果、表層土の濃淡に対応した項目として、有効土層(礫層深度)が明らかになり、表層土の色が薄い区域ほど有効土層が薄く、土壌表面の礫含量が多くなる傾向が得られた。

* 株式会社ズコーシャ、〒080-0048 北海道帯広市西18条北1丁目

キーワード: 精密農業, 作物生育の圃場内差異, 有効土層, 下層土の物理性, 微地形

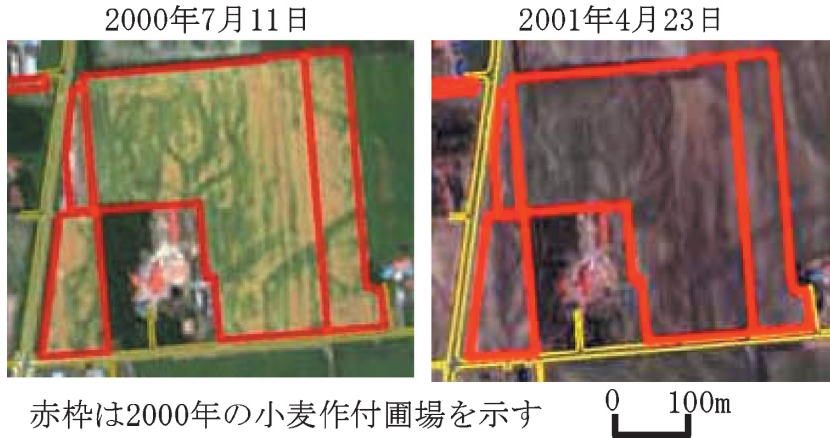


図-1 十勝管内音更町の低地における2000年7月11日と2001年4月23日の高解像度衛星画像（トゥルーカラー画像）

Fig. 1 High-resolution satellite images (true color) of lowlands in Otohuke Town, Tokachi district, on July 11, 2000, and April 23, 2001.

一方、表層土の有機物含量は有効土層の厚さに関係なく5%前後と同程度であった。

このことから衛星画像が捉えた表層土の濃淡は、有効土層の厚さを原因とした①表層の土壤水分、②土壤表面の礫含量、等の違いを反映していると考えられた。

以上のように、高解像度衛星を農業利用することにより、作物生育や土壌の圃場内差異の明確化や、作物生育のバラツキに対する土壌基盤の影響を解析することが可能になる。

衛星画像から土層の物理的特徴を推定する他の研究事例として、Hatanaka *et al.* (1995)、畠中 (2002) により、土壤水分状態の異なる2時期の衛星画像を用いることで、表層土の有効水分や土壤水分を把握できることが示されている。

次に、十勝管内帯広市の母材が火山灰で、黒ボク土と多湿黒ボク土が混在する暗渠排水施工圃場（約3ha）について、土壌の差異とテンサイ生育の関係について検討した結果を述べる（保井ら、2000）。

図-2には降雨後（25mm）の土壤型別の気相率推移、図-3には土壤型別のテンサイ根系発達状況（7月下旬）を示す。なお、図-3で示す根長は、テンサイ株直下の土壌を縦25cm、横50cm、深さ10cmごとに採取し、そこに含まれる総根長を測定したものである。

各土壌型の土層の物理的特徴として、多湿黒ボク土の深さ42~71cmの土層では重力水孔隙率（ $-0.1 \sim -3.1$ kPa）が $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 未満と極端に小さいことが挙げられる。それに対して黒ボク土では全層で $0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以

上と比較的大きい。

多湿黒ボク土では、深さ100cmに埋設された暗渠排水の効果により、70cm以深の気相率が降雨終了直後から増大傾向にあるが、重力水孔隙率の少ない土層では気相率の増大がほとんど認められなかった。それに対して黒ボク土では、降雨終了直後から気相率が全層で $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上確保されていた。

テンサイの根系は、多湿黒ボク土で重力水孔隙率の少ない土層により発達が阻害されていたのに対して、黒ボク土では深さ80cm以深まで到達が確認された。

このように暗渠排水が施工された圃場においても、作物生育は一部で土層を原因とする排水不良に影響を受けている。

2.2 微地形

十勝管内音更町の傾斜圃場において作物生育の不均一性と微地形の関係について検討した結果について述べる（丹羽ら、2003b）。

図-4に、供試圃場の地形図、供試作物および湿害発生を原因とする生育不良区域を示す。なお、両圃場では暗渠排水が施工されている。

調査圃場①の湿害は、谷が東に横切る部分で発生している。またその部分では、傾斜が急激に緩傾斜に変化する特徴があり、降雨時、谷に沿って流れた浸潤水が湧出しやすい区域である。

調査圃場②の湿害は急激に急傾斜に変化する区域で発生しており、その上部の緩傾斜の区域で比較的大きな谷が消える。すなわち湿害発生区域は、降雨時、谷部を

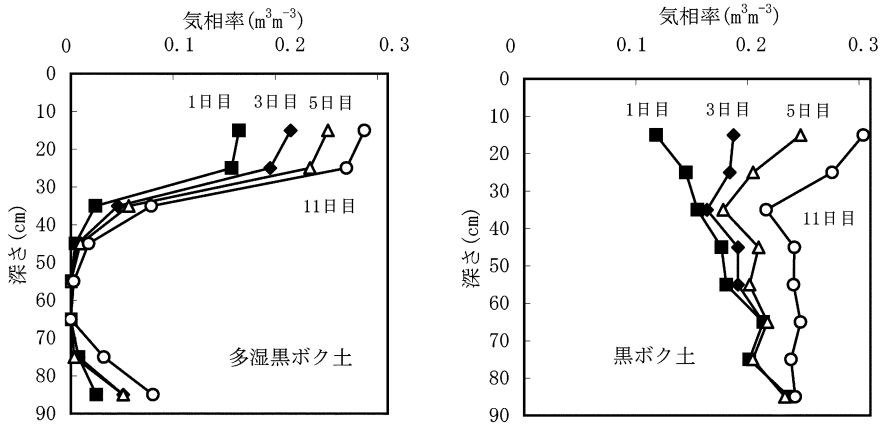


図-2 土壌型別の降雨後 (25 mm) の気相率の推移 (保井ら, 2000)

Fig. 2 Changes in gaseous phase ratio of each soil type after 25 mm rainfall (Yasui et al., 2000).

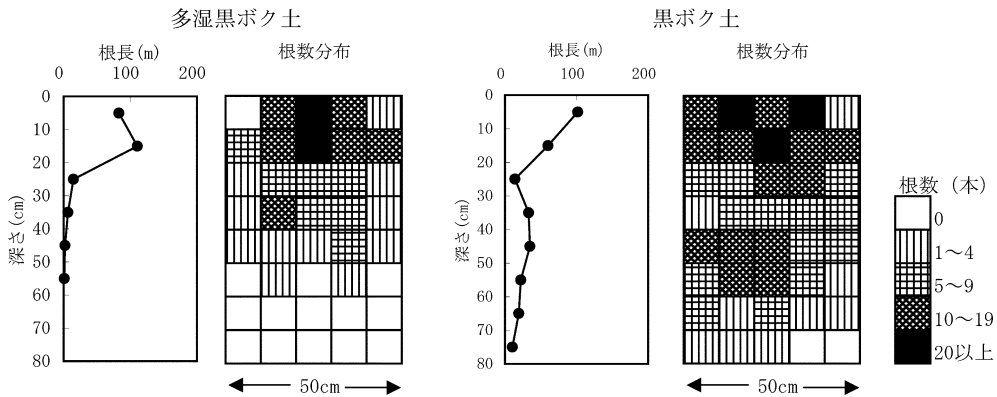


図-3 7月下旬における土壌型別のテンサイ根系の発達状況 (保井ら, 2000)

Fig. 3 Sugar beet root development of each soil type in late July (Yasui et al., 2000).

浸潤した水が湧出しやすい条件である。

以上のことから本傾斜圃場の作物生育は、暗渠排水施工後も微地形を原因とする局所的な排水不良の影響を受けていると判断できる。

3. 土壌基盤および地形の情報取得に関わる研究事例

前章から、作物生育の圃場内差異は、未だに土壌基盤や微地形の影響を受けていることが示された。

そこで本章では、作物生育に影響する土壌物理要因として、土壌基盤や微地形に着目し、その情報の把握に関わる研究事例を紹介する。

3.1 土壌基盤情報

前項で示したように、土壌情報を内在する衛星画像を

用いて (図-1)、表層土が相対的に示している情報を現地調査から明確にしていくことで、少数の調査地点から効率的に大縮尺の土壌地図を作成していくことが可能である。その事例として、図-5には十勝管内芽室町の火山灰を母材とする台地における大縮尺土壌図作成フローを示す (丹羽ら, 2004)。

土壌断面調査から、対象地区の土壌は腐植質普通黒ボク土、多腐植質普通黒ボク土、多腐植質厚層黒ボク土および多腐植質厚層多湿黒ボク土に分類された。また理化学性分析から、多腐植質厚層多湿黒ボク土の下層土では各黒ボク土のタイプに比べて重力水孔隙率が少なく、その傾向は下層土が洪積堆積物のタイプで顕著であることが明らかになった。

このことから、衛星画像から推定する土壌の分類単位

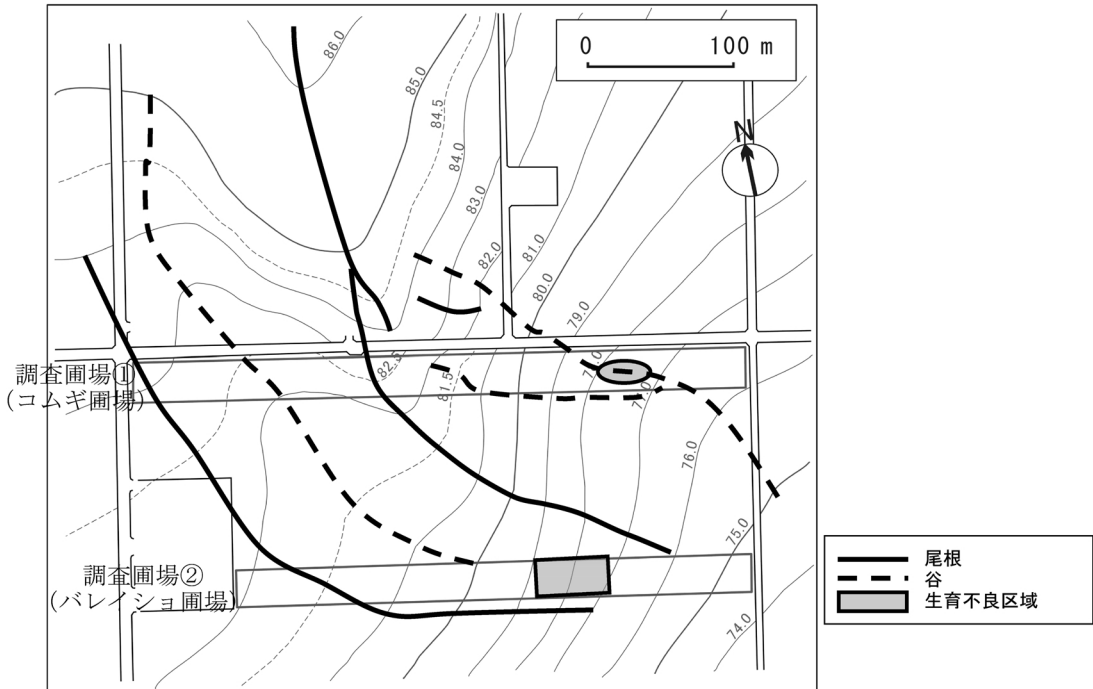


図-4 供試圃場の地形，供試作物および湿害を原因とする生育不良区域（丹羽ら，2003b）

Fig. 4 Topography, surveyed crop fields and areas of poor crop growth caused by wet injury in surveyed fields (Niwa *et al.*, 2003 b).

として、土壌基盤の観点から多腐植質厚層多湿黒ボク土を2区分に細分した。

図-5に基づいて作成した土壌図を図-6に示す

作成した土壌図は現状の土壌分布を精度良く反映しており、その分布を20mメッシュで図示していることから、圃場内の土壌基盤の異なる複数の土壌分布を把握することが可能であった。

衛星リモートセンシング以外の事例として、10mメッシュのデジタル標高データ (http://www.hcc.co.jp/style2_4.html) を利用し、空知管内浦臼町の褐色森林土と灰色台地土が混在する台地で、少数の調査地点から土壌分布と地形の関係を検討し、その関係を基に大縮尺土壌図を作成した研究がある（菊地ら，2004）。

その結果では、標高データから算出した傾斜と土壌分布が対応しており、平坦地形になるほど下層土で土壌構造が壁状となる灰色台地土が出現し、傾斜地形では下層土で土壌構造の発達が比較的に見られる褐色森林土が出現した。さらに、その関係から10mメッシュで未調査区域の土壌分布の図示を行った結果、その精度は一筆圃場内における土壌基盤の異なる土壌型の混在を十分捉えていた。

以上のように、衛星画像や10mメッシュのデジタル標高データ等を利用することで、少数の調査地点から未調査区域の土壌分布を大縮尺で推定することができるようになり、これらの土壌図を利用することにより作物生育に及ぼす土壌基盤の影響を圃場単位で解析することが可能になる。

3.2 地形情報

地形に関しては、前述したように10mメッシュ標高データ等の高解像度の情報収集が容易になり、それらの解析ができるソフトを利用することで、高解像度の傾斜図や表面水の流水経路図を作成することが可能になった (<http://www.microimages.com/>)。

一方、近年のリモートセンシングによる効率的な微地形情報の収集技術として、農業防除用に開発された産業用無人ヘリコプタ（YH300，（株）ヤンマー，写真-1）を利用した標高のセンシングシステムが挙げられる（Sugiura *et al.*, 2003）。

ヘリコプタには慣性センサと地磁気方位センサが標準装備されており、機体のロール角、ピッチ角および絶対方位角の計測ができる。そこにRTK-GPS（Trimble社）とレーザレンジファインダ（Leica社）を搭載すること

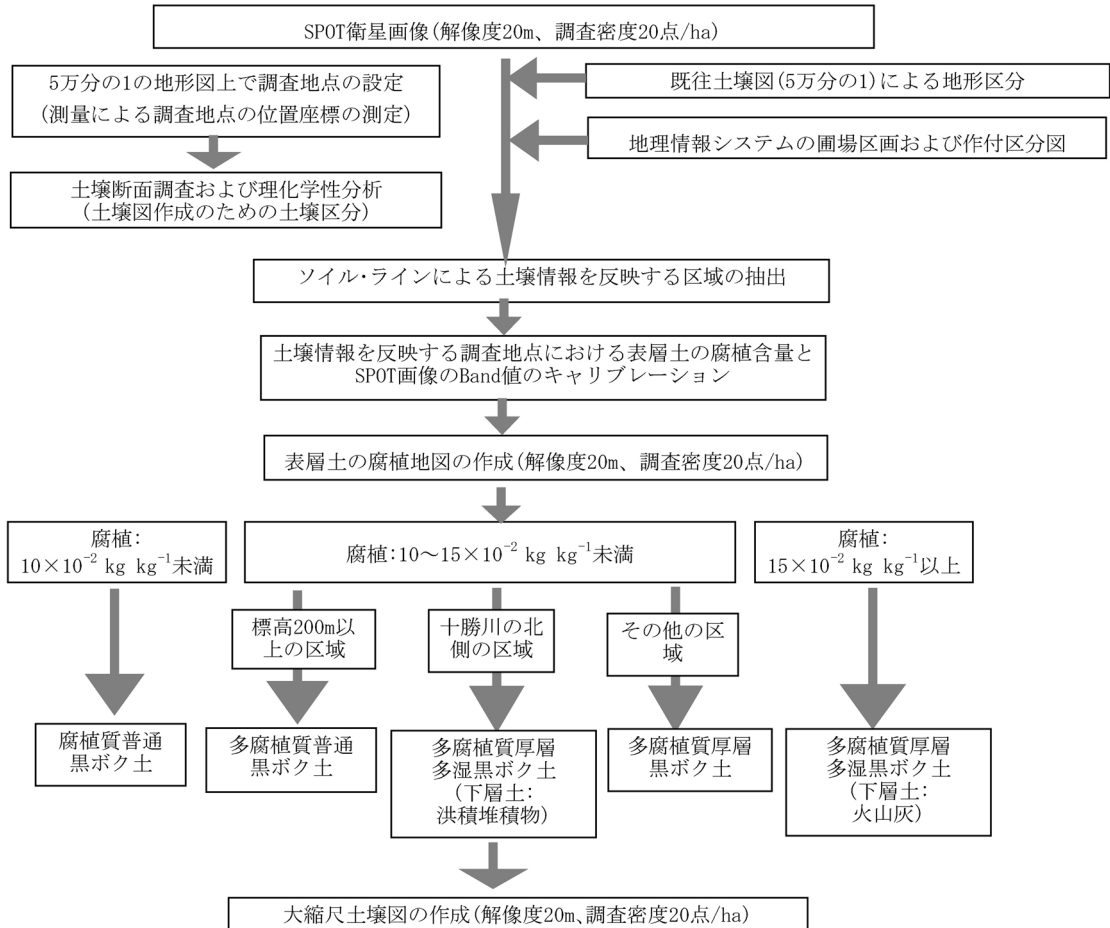


図-5 十勝管内芽室町の火山性土地帯における解像度 20 m の衛星画像を利用した大縮尺土壌図作成のフロー図 (丹羽ら, 2004)

Fig. 5 Flowchart for the drafting of large-scale soil map on volcanic ash soil area in Memuro Town, Tokachi district, using satellite images with resolution of 20 m (Niwa et al., 2004).

で、機体の絶対位置と機体から地表面までの距離が把握できるようになり、それらのデータから、調査地点の標高を算出することができる。

実際、杉浦ら (2004) は、2.3 ha の圃場で 30 分程度、産業用無人ヘリコプタによる標高のセンシングを行った結果、圃場全体を網羅するように 507 地点の標高データを取得することが可能であり、高精度に圃場内の微地形を再現することができることを示している。

さらに、産業用無人ヘリコプタによるセンシングシステムは、マルチスペクトルイメージングセンサ (DuncanTech 社) を機体に搭載することで、作物生育状況や表層土の土壌を数 cm の解像度でセンシングすることが可能になることから (深川ら, 2004 ; Abe et al., 2004),

ヘリコプタリモートセンシングベースの作物、土壌および地形情報から、圃場単位の「診断と意志決定」を行うシステムが検討されている (Yokobori et al., 2004)。

4. おわりに

今回、土壌物理性関連の精密農業の研究事例をいくつか紹介したように、圃場内の作物生育の差異は、施肥管理以外に土壌物理性の影響を受けているのが現状である。

その対策を検討していくためには、例えば図-3、図-4のように、下層土の物理性不良や微地形により局所的排水不良が発生している場合、第 1 段階として「作物・土壌情報センシング」の中で土壌基盤地図、微地形地図お

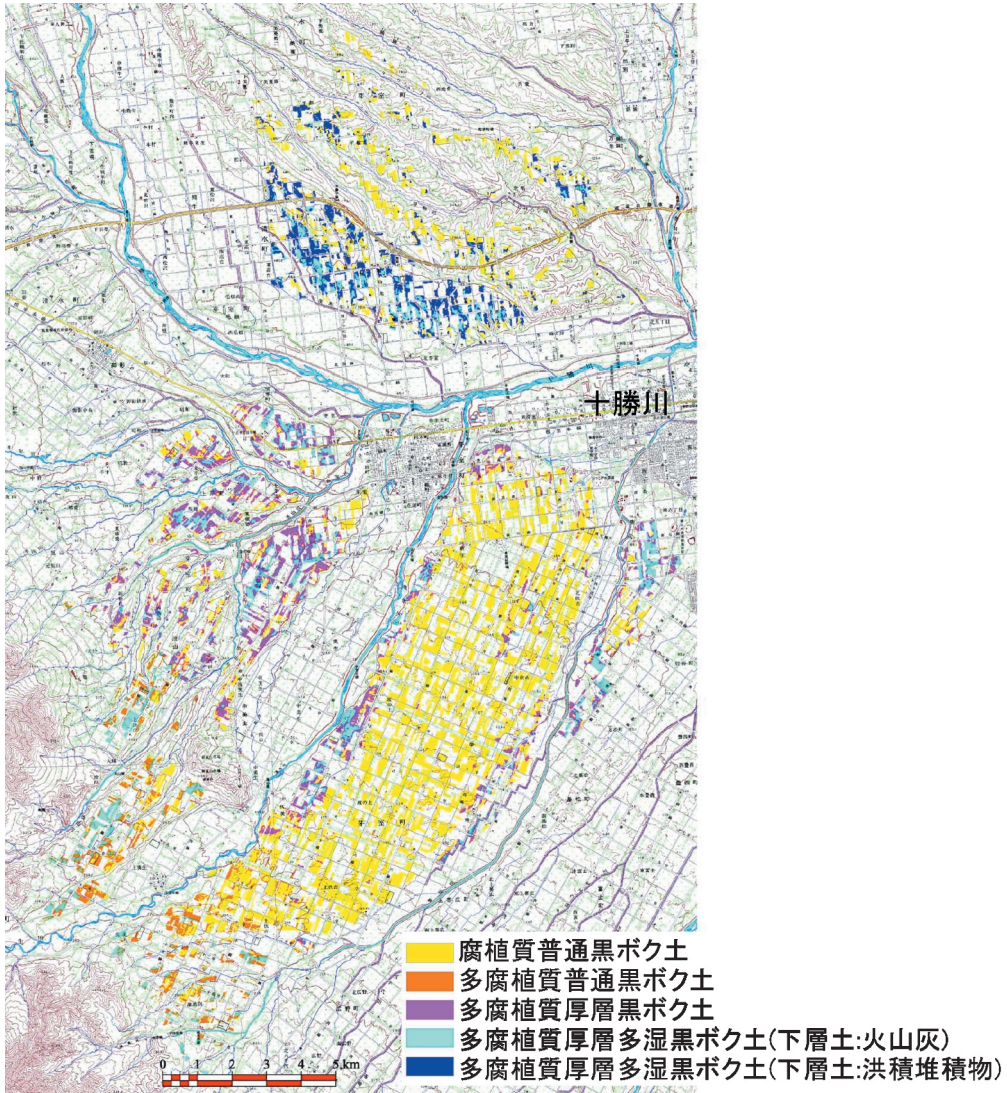


図-6 衛星画像を利用した作成した大縮尺土壌図 (丹羽ら, 2004)

Fig. 6 Large-scale soil map drafted by using satellite images (Niwa *et al.*, 2004).

よび作物情報地図を作成し、それらに基づいて「診断と意志決定」の中で、各地図の関係を解析することで物理性不良型および微地形型の排水不良区域を抽出（診断）することが必要である。次に診断結果と既往の研究事例を照らし合わせ、抽出した排水不良区域に対して要因別に排水不良回避の対策を意志決定していくことが重要である。例えば、下層土の物理性不良を原因とする排水不良の回避には土層改良を併用した排水改良が（菊地・丹羽, 2002, Niwa *et al.*, 2004）、微地形を原因とする排水不良の回避には暗渠排水の施工間隔を従来に比べて密に

すること（丹羽ら, 2003b）が提案されている。

以上のことから、我が国で精密農業を展開していくためには、従来の精密農業の「可変投入」による施肥管理の正だけでは作物生育の圃場内差異を改善するには不十分であり、「作物・土壌情報のセンシング」に基づいて、土壌物理環境の改良も考慮した「診断と意志決定」の視点を持つことが必要である。そのためにはリモートセンシングや地理情報システム等のテクノロジーの分野と土壌物理学分野との融合が必要である。このことから、精密農業の展開に対して「土壌物理学」の貢献が今



写真-1 産業用無人ヘリコプタ
Photo 1 Unmanned helicopter.

後重要になるものと考えている。

引用文献

- Abe, M., Sugiura, R., Ishii, K. and Noguchi, N. (2004) : Enhancement of satellite imagery using an unmanned helicopter for environment monitoring. Proceedings of ASAE Conference of Automation Technology for Off-road Equipment, 232-237.
- 安積大治・志賀弘行 (2004 a) : 衛星リモートセンシングによる秋まき小麦生育区分図の作成技術. 日本土壤肥料学会誌, **75** : 103-108.
- 安積大治・志賀弘行 (2004 b) : 水稻成熟期の SPOT/HRV データによる米粒蛋白含有率の推定. 日本リモートセンシング学会誌, **23** : 451-457.
- 深川知久・野口 伸・石井一暢・杉浦 綾・寺尾日出男 (2004) : マルチスペクトルイメージングセンサを用いた作物診断システム. 農業機械学会北海道支部会報, **44** : 51-58.
- 石田哲也・石渡輝夫・大塚健二・丹羽勝久 (2005) : リモートセンシング技術を用いた排水改良工の効果の確認. 転換畑での小麦生育の航空写真解析. 北海道開発土木研究所月報, **621** : 32-36.
- 石井一暢 (2005) : 産業用無人ヘリコプタを用いた圃場環境モニタリング. 農業機械学会北海道支部会報, **45** : 113-117.
- 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** : 577-586.
- 畠中哲哉 (2002) : 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. 北農研研究報告, **175** : 1-115 (2002).
- 原 圭祐 (2005) : 地上センシング技術を活用した精密農業. 農業機械学会北海道支部会報, **45** : 109-112.
- 菊地晃二・丹羽勝久 (2002) : 北海道を例とした積雪寒冷畑作地帯における農地整備. 農土誌, **70** : 313-316.
- 菊地晃二・丹羽勝久・横堀 潤・大淵清志 (2004) : メッシュ標高データを用いた土壌図の大縮尺化. 農業土木学会北海道支部研究会講演集, **53** : 94-99.
- 丹羽勝久 (2003 a) : 地域流域を対象とした新しいペドロロジー, 作物生産力向上のための土壌図のアプリケーション, 北海道十勝管内を例とした 2, 3 の事例. ペドロジスト, **47** : 46-54.
- 丹羽勝久・大淵清志・明石憲宗・保井聖一・菊地晃二 (2003 b) : 北海道十勝管内の傾斜圃場における微地形と土壌分布から見た湿害発生のメカニズム. ペドロジスト, **47** : 70-79.
- 丹羽勝久, 清野伸孝, 明石憲宗, 菊地晃二 (2004) : 北海道十勝管内の火山性土地帯における大縮尺土壌図の作成. 土肥誌, **75** : 69-78.
- Niwa, K., Seino, N., Yokobori, J., Kikuchi, K. and Noguchi, N. (2004) : Determining countermeasure to non-uniform wheat maturation in Tokachi, Japan, using a large-scale soil map. Proceedings of ASAE Conference of Automation Technology for Off-road Equipment, 455-462.
- 丹羽勝久・横堀 潤 (2005) : 十勝管内を例とした IT を利用した圃場管理. 農業機械学会北海道支部会報, **45** : 131-135.
- 奥野林太郎・本郷千春 (2005) : 衛星リモートセンシングの利用. 農業機械学会北海道支部会報, **45** : 119-125.
- Pierre C.R., Rust, R.H. and Larson, W.E., Ed. (1996) : Precision agriculture. Proceedings of the 3rd International Conference, June 23-26, Minneapolis, MIUSA, ASA/CSSA/SSSA, 1-1222.
- 澁澤 栄 (2003) : 精密農業の研究構造と展望. 農業情報研究, **12** : 259-274.
- Sugiura, R., Fukagawa, T., Noguchi, N., Ishi, K., Shibata, Y. and Toriyama, K. (2003) : Field information system using an agricultural helicopter toward precision farming. Proceeding of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1073.
- 杉浦 綾・野口 伸・石井一暢 (2004) : 三角ポリゴンを用いた地形マップの簡略化手法. 農業情報研究,

13 : 291-300.

保井聖一・丹羽勝久・大淵清志・菊地晃二 (2000) : 十勝管内における湿性畑土壌の物理的特徴と作物生育, 第1報, 多湿黒ボク土の物理性とテンサイ根系. 土壌の物理性, 85 : 31-40.

Yokobori, J., Niwa, K., Chiba, Y. and Noguchi, N.

(2004) : Variable management for uniform potato yield using remote sensing images with unmanned helicopter. Proceedings of ASAE Conference of Automation Technology for Off-road Equipment, 447-454.

要 旨

精密農業は作物生育の圃場内差異を改善するための営農マネジメント戦略であり, その改善方法は「可変投入」による施肥管理の是正が主である。

しかし, 我が国の既存研究から, 作物生育の圃場内差異は, 土壌基盤(土層の物理的特徴)および微地形に影響を受けていることが示されている。このことから, 精密農業の展開のためには, 土壌物理性についても考慮することが必要であり, そのためには土壌物理情報を詳細に把握することが重要である。土壌基盤情報の把握に関する研究事例として, 衛星画像および10mメッシュのデジタル標高データから, 土壌基盤の違いを考慮した大縮尺土壌図作成方法が検討されている。微地形情報の取得では, 前述した標高データ以外に, 無人ヘリコプタを利用したセンシングシステムの有効性が示されている。

受稿年月日: 2005年4月15日

受理年月日: 2005年5月27日