

衛星リモートセンシングとは？

スマート農業には位置情報の活用や自動操舵システムなど、さまざまな技術がかかわっています。その中の1つである「衛星リモートセンシング（遠隔観測）」は、圃場自体の状態や作物の生育状況など、農作業や営農のために必要なデータを人工衛星を用いることで収集する技術です。

人工衛星には可視光や赤外線を観測する「光学センサー」や、マイクロ波を使った「レーダー」などのセンサーが搭載されています。これらを使って「広範囲を反復して観測できること」が最大の利点ですが、光学系のセンサーは雲や霧によって観測が妨げられるという短所もあります。

代表的な人工衛星としては、アメリカのNASA（米国航空宇宙局）が打ち上げた「ランドサット（Landsat）」シリーズや、ESA（欧州宇宙機関）の「センチネル1（Sentinel-1）」および「センチネル2（Sentinel-2）」、民間企業プラネット・ラブズ社の「プラネットスコープ（Planet Scope）」などがあります。このうち、センチネル1にはレーダー（合成開口レーダー）が、その他には光学センサーが搭載されています（図1）。

近年では、後で述べるように衛星の数が増えたこともあって、「観測頻度の向上」や「短時間でのデータ配信」が実現しています。また、単に衛星画像を販売・配信するだけでなく、ユーザーのニーズに合わせた加工データを提供するサービスも増えてきています。

用いられている技術——光学センサーと、衛星の連携

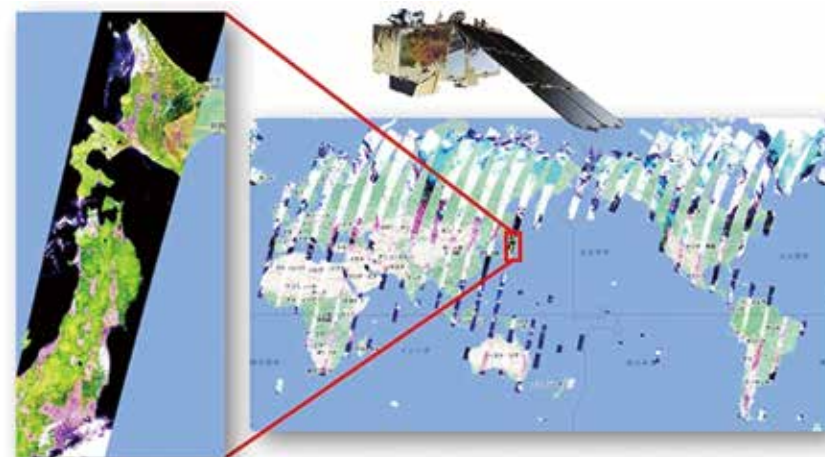
衛星リモートセンシングで使用されるセンサーについて、ここではセンチネル2の光学センサーを例に見てみましょう（図2）。

「バンド」は波長領域ごとの区分です。光の三原色である青、緑、赤（RGB）のほか、赤よりも波長が長い近赤外やレッドエッジ（植物の生育状況を知ることができる。後述）などを捉えることができます。赤・青・緑・近赤外の4つのバンドは解像度10m、レッドエッジと短波長赤外は解像度20mです。

近年では多数の衛星を連携させる「衛星コンステレーション[※]」方式が使

※コンステレーション：「コンステレーション（constellation）」とは、英語で「星座」の意。または星座の配置を表す。また、物や人などの集まりの意味もある。

図1 衛星リモートセンシングの実例——センチネル2



センチネル2は2015年に打ち上げられ、2機がペアで運用されている。高度786kmで、日本の上空をおよそ午前10時半に通過する軌道を取り、2機で世界の主な陸地を5日に1回の頻度で、南北方向に細長く観測している。観測の幅は290kmと広く、図のように1度の観測で北海道と東日本のほとんどを観測することが可能。データは、インターネットで誰でも無償で閲覧できる。

図2 センチネル2における解像度と観測波長帯

解像度	バンドNo.	領域	中心波長 (nm)	
10m	2	青	490	} 多くの地球観測衛星に搭載
	3	緑	560	
	4	赤	665	
	8	近赤外	842	
20m	5	レッドエッジ	705	
	6		740	
	7		783	
	8A		865	
	11	短波長赤外	1,610	
	12		2,190	

上記のほか、大気状態観測用のバンド（解像度60m）が3つある

「解像度10m」は一見、粗いように見えるが、広範囲を一度に観測する衛星リモートセンシングでは十分といえる。衛星観測におけるバンドは「バンド1」「バンド4」などと呼称される。レッドエッジは、可視光と近赤外の間の波長域。

われるようになっていきます。たとえば前出のプラネットスコープは、重量約6kgの超小型衛星を100機以上連携させることで、地球の陸地を毎日観測できるようになっています。また日本の(株)アクセルスペースは5機の衛星によって、指定した地域を2日に1回の頻度で観測しています。

(((人))) ドローンのセンシングとの違い

圃場のセンシング(観測)はドローンでも行いますが、人工衛星とドローンとは特性の違いがあります(図3)。

ドローンは天候が悪化していない限り、いつでも観測できますが、衛星は軌道を回っているため周期的な観測になり、自由度が低くなります。ただし、観測対象のスケールが大きい場合は人工衛星のほうが効率的です。また、ドローンは農家が自前または業者に委託して運用しなければならないのに対して、衛星は各国の政府機関や民間企業が運用しており、そのためユーザーは大きな労力を必要とせずにデータを得られるだけでなく、過去データを入手することも容易となります。

それぞれの長所を生かした利用をすることになりますが、1つの農場を詳細にセンシングするドローンのデータは「戦術的データ」、一定の期間を置いて広大な地域のセンシングを行う衛星リモートセンシングのデータは、長期的な「戦略的データ」と位置付けることができるでしょう。

(((人))) 衛星リモートセンシングにおけるデータの見方

反射特性がポイント

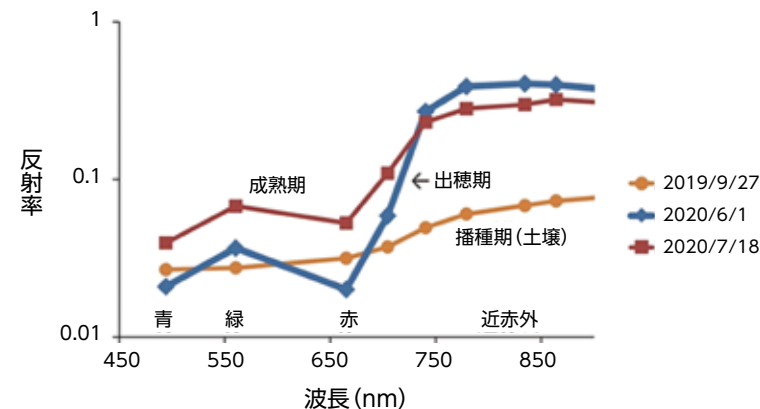
リモートセンシングで植生や土壌のようすを見る際には、可視光(青、緑、赤)や近赤外が対象物で反射される「反射特性」を観測します。

図4は、秋まき小麦の圃場を時期別にセンチネル2でセンシングした結果です。小麦の播種期である9月(27日)には、まだ土壌が見えているので波長ごとの反射率の差はあまりありませんが、翌年6月(1日)の出穂期^{しゅっすい}になると、可視光(特に青・赤)の反射率が低く、近赤外の反射率が高く

図3 人工衛星とドローンを使ったセンシングの違い

	衛星	ドローン
撮影タイミング	周期的	随時
対象スケール	圃場～全球	植物個体～農場
運用主体	外部	自前あるいは委託
過去データ	得やすい	蓄積が必要
天候制約	雲・霧(光学センサーの場合)	風・雨
規制		航空法その他

図4 センチネル2による植生と土壌の反射特性



グラフの3つの折れ線は、それぞれその日における反射特性を示す。成熟期の7月18日の反射特性は、クロロフィルが減少して小麦の色が黄色く変化するので、可視光(青・赤)の反射が強まり、一部の葉が枯れるので、近赤外の反射が低下している。

図5 植生指数とその計算式

正規化植生指数 (NDVI)

$$NDVI = \frac{(\text{近赤外} - \text{赤})}{(\text{近赤外} + \text{赤})}$$

$$GNDVI = \frac{(\text{近赤外} - \text{緑})}{(\text{近赤外} + \text{緑})}$$

拡張植生指数 (EVI)

$$EVI = 2.5 \times \frac{(\text{近赤外} - \text{赤})}{(\text{近赤外} + 6 \times \text{赤} - 7.5 \times \text{青} + 1)}$$

2バンド拡張植生指数

$$EVI_2 = 2.5 \times \frac{(\text{近赤外} - \text{赤})}{(\text{近赤外} + 2.4 \times \text{赤} + 1)}$$

なっています。これはクロロフィル(葉緑素)が青と赤の光を吸収し、近赤外を強く反射するからです。

このように、可視光や近赤外の反射特性から、作物の生育状況が把握できるわけです。

植生指数(植生指標)

リモートセンシングでは、捉えた電磁波の反射特性データから計算して数値を得て、それを作物の状況を示す指標として活用します。この数値は「植生指数(または植生指標)」と呼ばれています。植生指標は、植被率や葉面積指数*など作物の「生育量」や、クロロフィル濃度に関係する「葉色」などを反映しています。

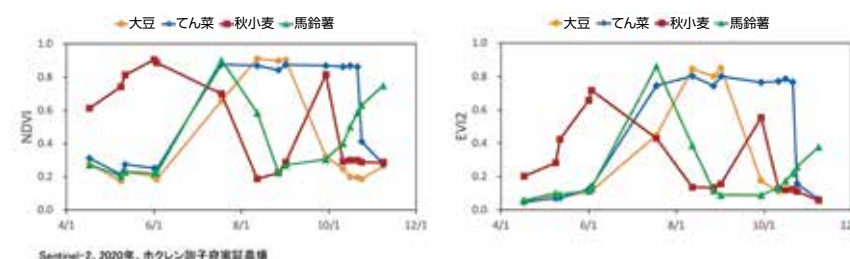
植生指数の代表的なものとして、近赤外と可視光の赤との差を両者の合計で割って算出する「正規化植生指数(NDVI)」があります。NDVIは算出された数値が-1から+1の範囲に収まるので使いやすい指数で、茂った植生では+1に近くなり、植生がない土壌ではおおむね0.3以下の値となります(図5)。

NDVIは、背景の土壌の色や観測時の大気の状態などいろいろな要因の影響を受けやすいので、この点を改良した「拡張植生指数」もあります。これには3つのバンドで算出する「EVI」と、2バンドで算出する「EVI_2」などがあります(図5)。

畑作物のNDVIとEVI_2の季節変化をグラフに示しました(図6)。NDVIでは、秋まき小麦、馬鈴薯、大豆ではおのおのの開花期にピークがあり、各作物の生育プロセスが反映されていることがわかります。グラフでは各作物とも最大値が0.9前後と揃っていますが、これは上限に近づくことで飽和状態、つまりおのおのの作物の繁茂が最大となり、細かい生育量の差が見えなくなったからです。EVI_2ではNDVIよりも飽和しにくいので生育のピークがもう少し明瞭になり、春先や収穫後の植生のない時期の値がもっと安定して低くあらわれます。

*植被率や葉面積指数：植被率は地表がどの程度、植物に覆われているかを表す割合。一方、葉面積指数は、植物の葉の総面積をその土地の面積で割った値で、作物などがどれだけ繁茂しているかを示す。この2つは、作物の生育量に関係する。

図6 作物のNDVIおよびEVI_2の季節変化



NDVI (左) では秋まき小麦が開花時期の6月にピークになるなど、開花時期の前後にNDVIがピークとなっている。てん菜も繁茂期の7月末から3か月ほどNDVIが高い状態が続いている。秋まき小麦の9月末のピークは収穫後にまいた緑肥。飽和しにくいEVI_2のグラフ(右)はNDVIと似ているが、各作物の生育ピークの値が若干異なって出ており、生育量が最大の部分ではNDVIよりもやや詳細に把握できる。

「圃場の不均一性」を調べる

土壌の浸食やもとの地形に起因して、圃場の土壌の性質が不均一になることがあり、それによって生育にばらつきが出たり、部分的な倒伏が起こったりして適切な時期に収穫ができなくなったり、収穫物の品質がそろわなくなったりする恐れがあります。そのため、圃場の均一性やどこがどう不良なのかを把握する必要がありますが、衛星リモートセンシングでは、たとえば土壌の有機物量を示す「腐植含量」を観測することで土壌の状況を把握することができます(図7)。この結果に基づいて可変施肥などを行い、圃場の不均一性を是正することも可能となります。

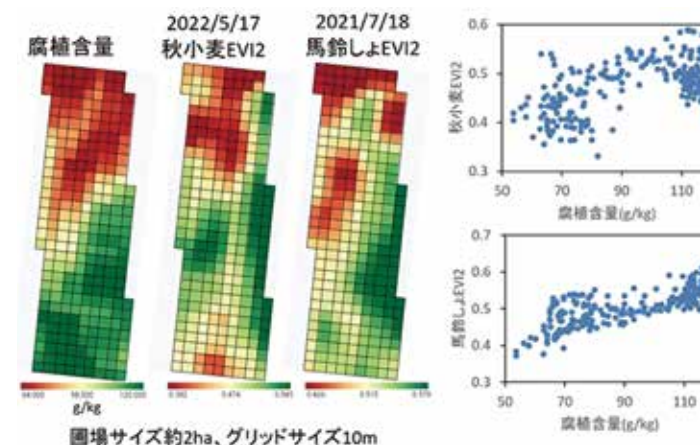
衛星リモートセンシングの実例

衛星画像では、腐植含量が高い、あるいは湿った土壌は黒く映ります。このため、水分量が一定の時期に観測すれば、土壌の腐植含量を可視光の反射率で推測することも可能です。これは30年以上前から知られている方法で、現在農業分野で利用されています(図8)。

また、米のおいしさはデンプンの性質とタンパク質の含有量によって左右されますが、タンパク質含量は稲の葉のクロロフィル含量と対応するため、植生指数によって推定できます(図9)。この手法は20年前に北海道で生まれて各地で利用されています。たとえば青森県では2010年から衛星リモートセンシングによるGNDVIを用いたマップを使用しています。

道東地域では、秋まき小麦の植生指数の低下から最適な収穫時期を決定することで乾燥施設にかかるコストを低減させています。また十勝農協連では組合員の圃場マップにセンチネル2のデータを見る機能を追加することで、組合員の営農支援が行われています。この他にも、民間企業などが衛星リモートセンシングのデータによるサービスを行う例もいくつかあります。いずれにせよ、現代農業では衛星リモートセンシングによるデータが幅広く活用され、「農業の情報化」が進んでいるのです。

図7 土壌の腐植含量と作物のEVI 2の関係



図はホクレン訓子府実証農場をセンチネル2でセンシングしたデータ。左の3つの図の1マスは10m四方を表し、「腐植含量」では値が高いほど緑色となる。秋まき小麦と馬鈴薯のEVI 2は、生育が良いところが緑。腐植含量が高い所でEVI 2の値も高くなっており、圃場の茶色の部分を中心に窒素肥料を増やす可変施肥を行えばよい。

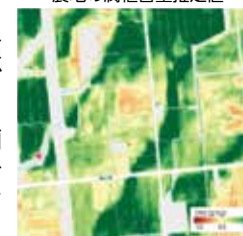
図8 土壌の腐植含量推定

Sentinel-2 トゥルーカラー
2020/6/1



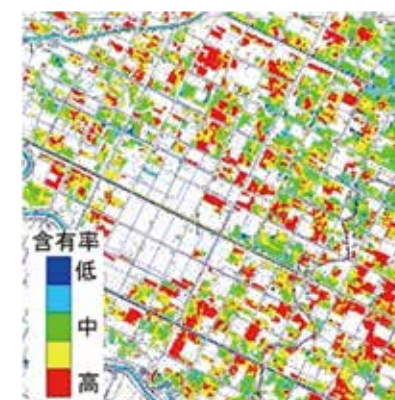
農地の腐植含量推定値

上の画像は腐植含量が低い所が黒く映っており、下の推定値の画像ではその部分が濃い緑で示されている。



志賀ら(2022)

図9 米のタンパク質含量のマップ化



安積・志賀(2003)

タンパク質含量では、かなり細かい圃場の状況が把握できるようになっている。