

大項目	1	地図と地理情報システムの活用 (GIS)			
中項目	1-1	地球上の位置の特性と地図/地理空間情報			
小項目	1-1-2	位置情報の取得と位置情報の特性を学ぶ			
細項目 (発問)	リモートセンシング	リモートセンシングの概要、データの特徴、活用事例はなにですか			
作成者名	小口 高	作成/修正年	2017/2021/2023/2024	Ver.	1.3
キーワード 5~10 個程度	リモートセンシング、衛星、画像、電磁波、信号、センサ、バンド、プラットフォーム、土地利用、時間変化				

発問の意図と説明

(1)リモートセンシングの概要を理解する

①リモートセンシングの定義

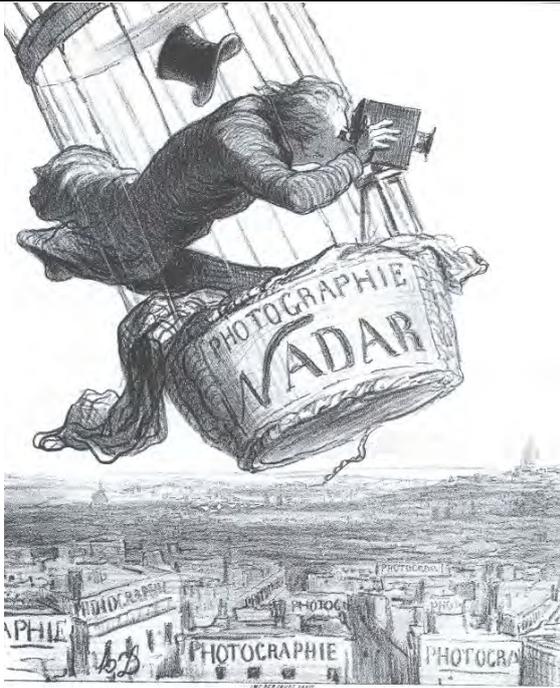
リモートセンシングはリモセンと略されることもあり、本などの出版物、マスコミの報道、インターネットの記事などによく出てくる言葉です。これは英語の **Remote** (離れた) と **Sensing** (知覚する) を合わせた語で、ある場所を、その場には行かず知覚することを意味します。これを字句通りとらえれば、風景写真の撮影などもリモートセンシングになりますが、そこまで広い意味で使われることはほとんどありません。リモートセンシングは、通常は地表、水面、低層の大气といった、地球の表層もしくはそれに近い場所の環境の状況を、宇宙空間を含む上空から観測することを意味します (狭義のリモートセンシング)。たとえば、土地利用を調査するために、人工衛星から地表を観測する行為はリモートセンシングの典型です。さらに海中の様子を船から音波で探査したり、陸上でレーザー機器を使って地形測量を行うような行為を含めることもあります (広義のリモートセンシング)。ここでは上空から行う狭義のリモートセンシングを対象にします。

②リモートセンシングの歴史

リモートセンシングと密接に関連するのが写真と人類の飛行の歴史です。世界最初のリモートセンシングは、1858年にフランスの写真家のナダールが気球に乗ってパリを上空から撮影したことです (図 1、2)。20世紀に入るとライト兄弟が航空機を開発し、それが急速に発展したため、第一次大戦の頃には航空機から撮影した偵察写真を頻繁に用いるようになりました。同じ頃に、航空機から撮影した写真を用いて地表の高さを含む測量を行う空中写真測量も実用化され、各国の行政機関が地形図の作成に活用したため、軍事目的以外の空中写真の撮影もさかんになりました。空中写真の撮影は今日まで活発に行われていますが、近年、無人の小型航空機 (UAV、ドローン) に小型のデジタルカメラをつけて行う撮影が急速に普及し、簡便なりモートセンシングが可能になりました。

一方、1950年代に米国とソ連が宇宙開発を始めると、宇宙から地表を撮影する試みが始まりました。1960年代には宇宙からの軍事偵察のために米ソが衛星を打ち上げ、とくに米国のコロナ衛星が有名です。これは長大なフィルムでアナログの白黒写真を撮影し、フィルムが入ったカプセルを地球に帰還させるもので、当時は軍事機密でした (図 3)。一方、気象観測を目的とする衛星も 1960年代に打ち上げが始まり、天気予報の精度の向上などに貢献し始めました。1972年になると、より広い科学研究や社会的な応用を目的とするランドサット衛星の打ち上げが始まり、現在までに 8機が運用されました。ランドサットはデジタル画像を撮影し、電波で送信するため、フィルムの帰還が不要になりました。また、カラー画像の取得も可能となりました (図 4)。その後はリモートセンシングを目的とする多数の衛星が打ち上げられており、多様な画像を入手できるようになりました。また、画像の質や詳しさも向上し、1972年のランドサット 1号は地表上の距離で約 80 m おきにデータが記録されている画像を主に取得しましたが、最近の商用衛星の一部は、記録の距離が 30 cm 程度の画像を取得しています。

図と表のページ



NADAR. élevant la Photographie à la hauteur de l'Art

図1 ナダールによる1858年の世界初の空中写真撮影を描いた風刺画（パブリックドメイン）



図2 ナダールによる1868年のパリの空撮写真（パブリックドメイン）

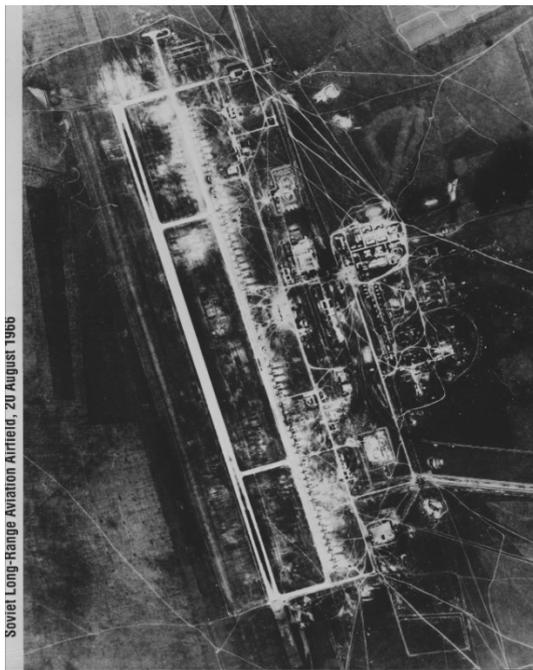


図3 コロナ衛星が1966年に撮影したソ連軍の空港（パブリックドメイン）

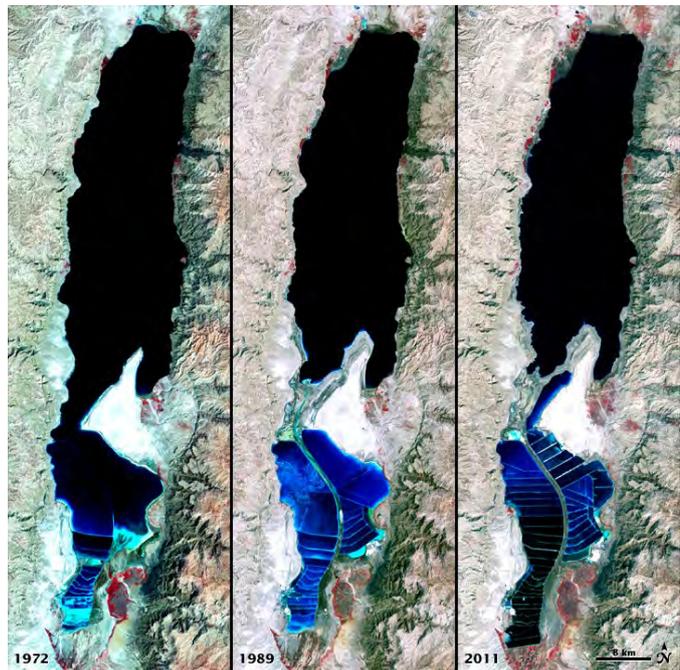


図4 ランドサット1号、4号、7号が撮影した死海（NASA's Earth Observatoryによる。パブリックドメイン）

③リモートセンシングの原理

リモートセンシングは空中を伝わる波である電磁波を利用します。電磁波には波長もしくは周波数が異なるものがありますが、リモートセンシングで画像を取得する際に使われるのは可視光、赤外線、および電波（とくにマイクロ波）です。リモートセンシングには、「受動的」と「能動的」の二種類があります。受動的リモートセンシングは、主に太陽が発する電磁波が地表にあたって反射されたものを観測します。これは通常の写真と同じ原理で、ランドサットなどの多くの衛星が受動的なリモートセンシングを行っています。一方、能動的なリモートセンシングは、衛星や航空機に地上に向けて電磁波を発する機器（レーダーやレーザー）を搭載し、その電磁波が地上から反射されたものを観測します。能動的なリモートセンシングは、より複雑なシステムを要しますが、最近では比率が高まっています。能動的なリモートセンシングは、画像の取得のみならず測量にも活用されます。この際には、衛星や航空機から電磁波が発せられた時間と、その反射波が戻ってきた時間の差を計測し、それを距離に換算して地表の高度を計測します。

④センサ

リモートセンシングで電磁波を観測する機器をセンサと呼びます。センサは入射した電磁波を検知して記録する機器で、カメラもセンサの一種とみなせます。古典的なセンサには、コロナ衛星のようにアナログのフィルムを使うものもありましたが、今はデジタル形式で画像を記録して送信するのが基本です。画像の取得には、電磁波を検知すると電流が変化する半導体（フォトダイオードやCCD）が広く使われています。

リモートセンシングのセンサの特徴は、特定の波長・周波数を持つ電磁波に特化した機能を持つことです。通常のカメラは、可視光の領域の電磁波を偏りなく取得することを目的としています。リモートセンシングのセンサは、青色の光といった特定の波長の電磁波の強さのみをとらえる機能を持つものを含んでいます。このような特定の波長の電磁波をバンドと呼びます。多くのセンサは複数のバンド（マルチバンド）に対応しています。たとえばランドサット衛星は、青、緑、赤、近赤外、中間赤外、熱赤外といった複数のバンドをとらえるセンサを搭載しています（表 1）。能動的なリモートセンシングで使われるセンサも、送信される波長のみで特化しています。一方、ドローンに搭載されるカメラの多くは、一般のものとはほとんど変わらないデジタルカメラです。リモートセンシングでは多様なセンサが利用されます。

⑤プラットフォーム

センサを搭載している人工衛星を航空機やプラットフォームと呼びます。プラットフォームには観測対象との距離が大きく異なるものが含まれます。たとえば地球を周回する人工衛星は地表から 700~900km の高さにあります。航空機は地表から 12km 以下の場所を飛び、ドローンは地表に非常に近い場所を飛びます（図 5）。

プラットフォームには単発的に使われるものと連続的に使われるものがあります。航空機やドローンは、画像の取得が必要となった際に単発的に稼働します。上記のコロナ衛星は、写真のフィルムに限りがあるために使い捨てでした。かつてスペースシャトルを使って行われたリモートセンシングも単発でした。たとえば 2000 年の日本人の毛利衛飛行士も搭乗して行われたミッションでは、レーダーによるリモートセンシングを用いて全球の地形を測量しました。一方、ランドサットのような衛星は長期にわたって連続的に使うことを意図しています。機器の故障などで短命になる場合もありますが、ランドサット 5 号のように約 30 年間も運用されたものもあります。

衛星のプラットフォームには、ランドサットのように地球を周回するものが多くあります。これは、同じ場所を繰り返し観測することを意図しており、地球上での位置を移動させながら、全球をカバーする形で画像を撮影します。同じ場所を撮影する周期は衛星の高度が高いほど長くなりますが、たとえばランドサット 8 号では 16 日間です（表 1）。一方、衛星を高度約 36000km の高さに置くと、地球の自転と同じ速度で動くようになり、地球上での位置が常に固定されます。これを静止衛星と呼び、「ひまわり」のような特定の場所の気象を連続観測する衛星などが該当します。

図と表のページ

表1 ランドサット9号に搭載されている2つのセンサのスペクトル帯

スペクトル帯	波長 (nm)	解像度 (m)
陸域イメージャ (OLI)		
バンド1: コースタル/エアロゾル	435~451	30
バンド2: 青	452~512	30
バンド3: 緑	533~590	30
バンド4: 赤	636~673	30
バンド5: 近赤外	851~879	30
バンド6: 中間赤外	1566~1651	30
バンド7: 中間赤外	2107~2294	30
バンド8: パンクロマチック	503~676	15
バンド9: 中間赤外	1363~1384	30
熱赤外センサ (TIRS)		
バンド10: 熱赤外	10600~11190	100*
バンド11: 熱赤外	11500~12510	100*

* データの提供時にはリサンプリングにより 30 になる

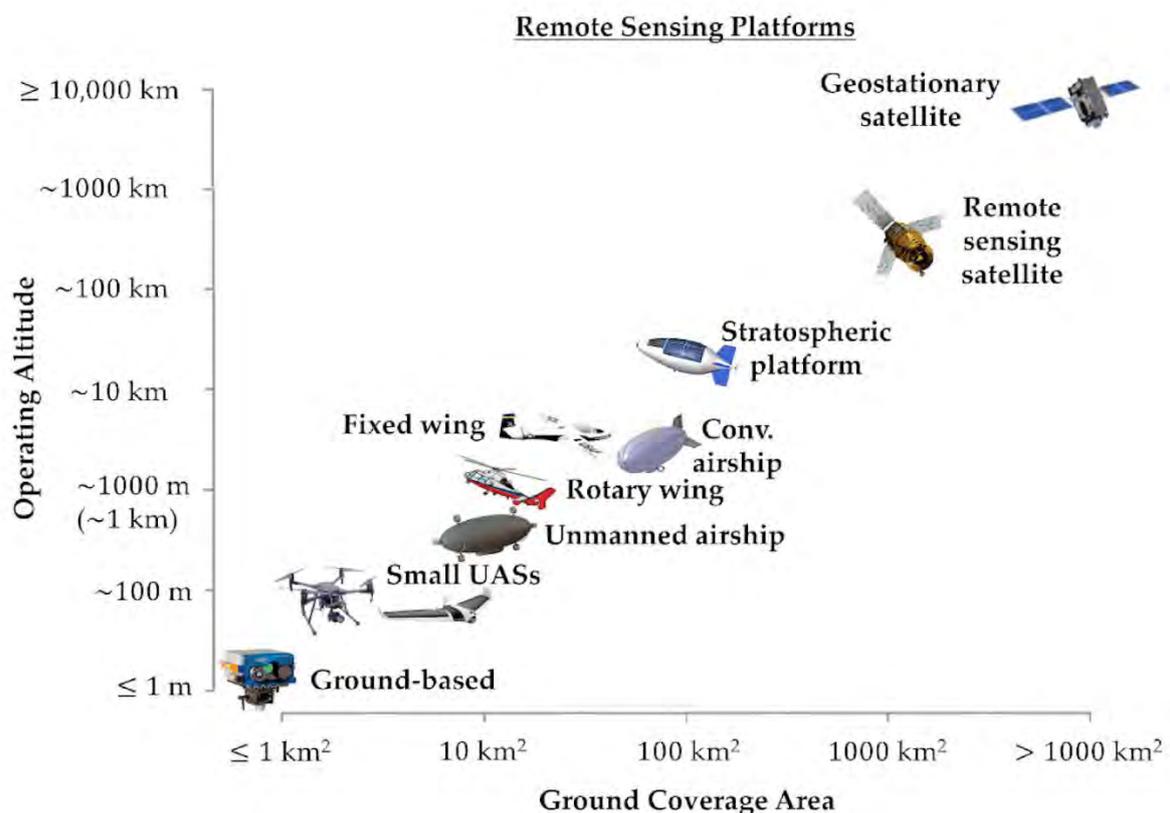


図5 リモートセンシングのプラットフォーム (Gili P, Civera M, Roy R, Surace C. An Unmanned Lighter-Than-Air Platform for Large Scale Land Monitoring. Remote Sensing. 2021; 13(13):2523. <https://doi.org/10.3390/rs13132523>

による。CC-BY ライセンス)。宇宙空間の人工衛星、航空機、ヘリコプター、気球、ドローンなど、上空に位置するものが主体。広義のリモートセンシングでは地上を動く車や海上を動く船などを含めることもある。

(2) リモートセンシングのデータの特徴を理解する

①解像度

リモートセンシングのデータでは、その記録の詳しさを表す解像度が重要です。解像度には空間解像度と信号解像度の二つがありますが、単に解像度と記した場合、普通は空間解像度を指します。空間解像度は、データを構成するピクセルの間隔で、通常は地表におけるメートル法の距離で表現します。たとえば上記のように、初期のランドサットは地表の距離で約80 mおきにデータを取得しましたが、これを（空間）解像度が80 mであると記します。リモートセンシングのデータの空間解像度は、GISのラスター・データにおけるメッシュの間隔と同等の概念です。一方、信号解像度は個々の地点における信号の記録の細かさを示すものです。記録される信号はセンサで計測された電磁波の強度ですが、完全な連続値ではなく、8段階、64段階、256段階といったコンピュータで扱いやすい数（2のn乗）の段階で強弱を表現します。

リモートセンシングのデータの空間解像度は、センサと対象との距離に依存します。たとえばドローンであればセンチメートル単位の解像度のデータも取得可能ですが、地球を周回する衛星では数十 cm～数十 m となり、静止衛星であれば数百 m～数 km になります。これは遠方のものは見えにくいという単純な原理によります。また、センサの技術的發展によっても解像度が変わります。たとえば初期のランドサットに搭載されていた MSS と呼ばれるセンサの空間解像度は80 m でしたが、1982年のランドサット4号以降に搭載された TM と呼ばれるセンサでは空間解像度が30 mに向上しました。空間解像度が向上すると、画像から読み取れる情報が増加します（図6）。さらに前記のように、最近では解像度30cm程度の解像度のデータを取得する衛星も複数運用されています。信号解像度もセンサの発展とともに向上しており、MSS センサでは64段階でしたが、TM センサでは256段階になり、最新のランドサット8号に搭載されているセンサは1024段階になっています。

②記録されている電磁波の強度

リモートセンシングのデータに記録されている電磁波の強度は地表の状態に依存しています。センサで観測される波長の電磁波が、地表で強く反射されれば強度が上がり、弱く反射されれば強度が下がります。この反射の強度は地表を構成する物質と電磁波の波長によって変化します。たとえば水は赤外線をほとんど全て吸収し、可視光はある程度反射しますが、土や岩の場合は可視光よりも赤外線の反射が強くなります。

データに記録される電磁波の強度は、それが伝わる場所である大気の状態にも依存します。たとえば大気中に水蒸気が多く、霧や霏がかかっていると、可視光などの電磁波が空中で反射される量が増えるため、その影響を含む情報が記録されることになります。

③データの補正

センサが取得したデータを用いて地表の状態を理解する際には、最初にデータを補正する必要があるかもしれません。たとえば上記のように霧や霏がある場合には、地表が暗い状態であっても大気中での光の反射により、明るいという情報がデータに記録されています。このため、記録された電磁波の強度を下げるような補正が必要です。また、データに含まれる電磁波の強度が狭い範囲の値に集中していると、画像として可視化した際に、コントラストが弱くなって判読が難しくなります。この場合には、電磁波の強度のヒストグラムを大きな幅を持つものに変換すると、適切な画像を作れるようになります（図7）。

さらに、リモートセンシングの画像を他の地理空間データと重ね合わせる際には、画像に示されている地点の位置を他のデータに合わせる必要があります。この際には、位置を平面上での幾何学的な変形によって動かす幾何補正や、標高の違いも考慮してより正確な補正を行うオルソ化の作業を行います。

④データの入手方法

リモートセンシングのデータには、無償で入手できるものと購入が必要なものがあります。最近ではランドサットなどの中程度の解像度のデータは、無償の場合が多くなっています。複数のバンドの情報を含む元データではなく、そこから生成された画像であれば、グーグル・アースや地理院地図などのインターネットのサービスから容易に入手できます。

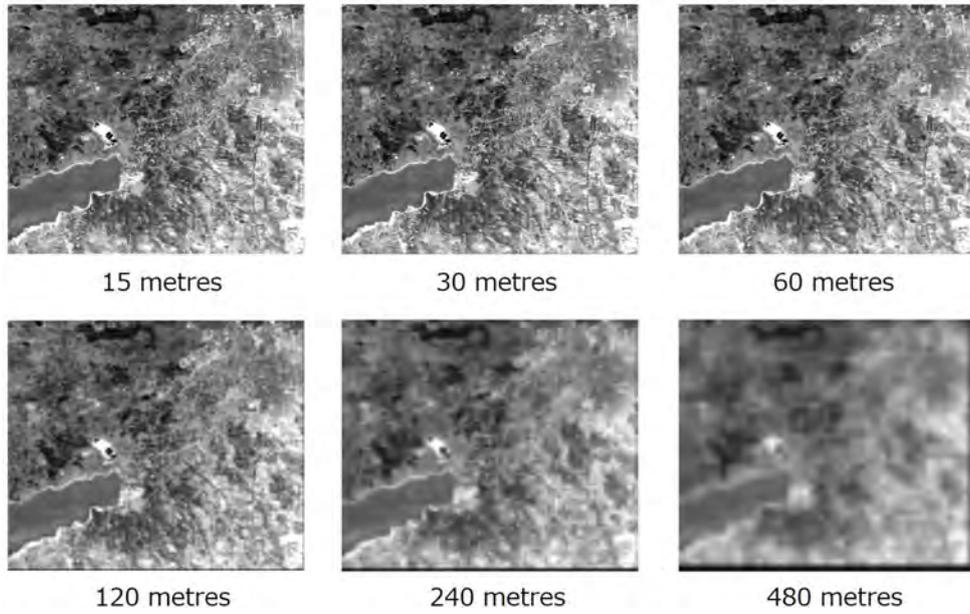


図6 解像度の異なるリモートセンシング画像の比較 (Wikimedia Commons の Arbeck 氏による)

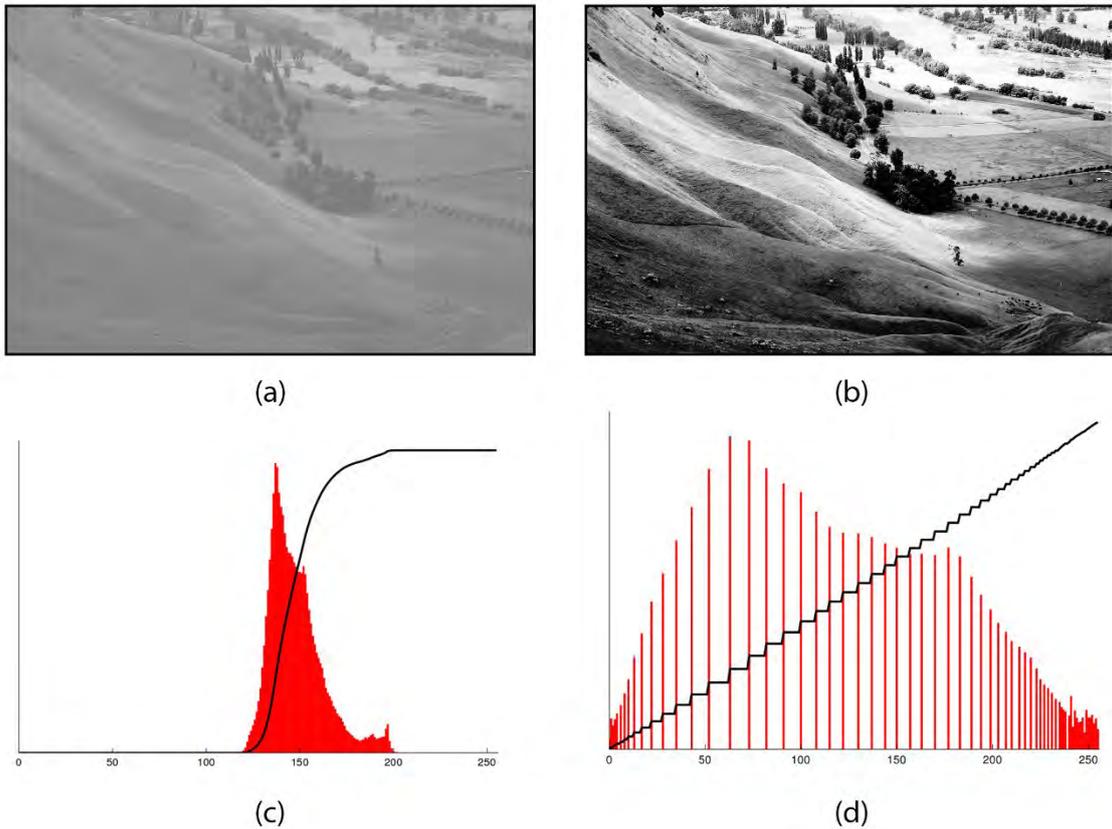


図7 ヒストグラムと画像の変換の例。(a)が元の画像で、記録されている電磁波の強度が中程度に集中しているためにコントラストが弱く判読が難しい。右の画像は、電磁波の強度の幅を広げて判読しやすい画像を作成した例 (Wikimedia Commons の Phillip Capper 氏による)

(3) リモートセンシングの活用事例を理解する

①カラー合成

リモートセンシングの最も典型的なデータは、人工衛星によって得られた複数のバンドの信号です。一つのバンドの信号は、そのバンドにおける電磁波の強度の空間分布を示しており、それは土地の輝度の分布に対応します。したがって、単バンドの信号の空間分布を示す画像を作成する際には、電磁波の強度が強いほど白く、弱いほど黒いグレイスケールの画像とするのが一般的です。一方、3つのバンドの情報を合わせて用いると、カラーの画像を生成できます。この際に使われる原理は、テレビ、パソコン、スマートフォンなどで使われているディスプレイの原理と同様であり、赤、緑、青という光の三原色に対応する三つの信号の強度を変えると全ての色が表現できるというものです。

現実の地球の表面の色彩を再現した画像を作る際には、赤、緑、青の光の波長に対応したセンサの信号（たとえばランドサット8号のバンド4、3、2。表1参照）を、同じ色に割り当てて可視化します。このようにして生成された画像をトゥルーカラー画像と呼びます（図8の左）。一方、赤、緑、青の各色とは対応しない波長のバンドの信号を意図的に割り当てると、現実とは異なる色の画像ができます。これをフォルスカラー画像（擬似カラー画像）と呼びます。フォルスカラー画像の代表的な例は、近赤外線バンド（たとえばランドサット8号のバンド5）を赤に割り当てたものです。これを行うと、植生が近赤外線を強く反射するという特徴に注目した画像ができ、植生の種類や活性度の判読に有用です（図8の右）。

②画像分類

上記のような形で作成された画像を目視で判読すると、地表の特徴を理解できますが、この方法には主観が入ります。そこで、各バンドの信号をコンピュータで処理し、地表の特徴を客観的に可視化することも行われています。その代表例が、土地利用（土地被覆）の分類です。たとえば近赤外線バンドの信号強度が高い場所には、密な植生が存在する可能性があります。このような関係が、複数のバンドの信号と各種の土地利用について明らかになれば、バンドの信号から土地利用を面的に分類した図を作成できます。土地利用と信号との関係には、一般論として認知されているものと、対象地域に固有なものがあります。後者を分類に反映させる際には、対象地域の中で土地利用がわかっている場所の情報を用いてバンドの信号と土地利用との関係を明らかにします。このような手続きを経て行われる分類を「教師つき分類」と呼びます。一方、実際の土地利用に関する既存の情報が乏しいといった理由により、一般論のみを用いて行う分類を「教師なし分類」と呼びます。リモートセンシングで土地利用の分布を調べる際には、通常は教師つき分類を行います。この際には、ある地点のバンドの信号の特徴と、特定の土地利用とが対応する確率の高低を踏まえた手法（最尤法）や、人工知能の技法などが用いられます。図9は作成された土地分類図の例です。土地利用を地上での調査によって面的に把握することは、労力などの点で困難なことが多いため、リモートセンシングの活用が大きな利点になります。

③諸分野への応用

リモートセンシングで作成された土地利用のデータは、地域の基本情報として有用であり、都市や農村に関する地理学的な研究や、行政の計画立案などに幅広く活用できます。また、リモートセンシングのデータは、地球を周回している衛星などにより異なる時期のものが繰り返し取得される場合が多いため、時間的な変化の検討にも有用です。たとえば土地利用のデータを異なる時期について作成して比較すると、土地利用が変わった場所を抽出したり、変化の傾向を把握したりすることができます。これらの情報に基づいて、変化を生じさせた原因の推定や、今後の土地利用の予測が可能になります。この際には、GISを用いて土地利用図に地形や道路網といった他のデータと重ね合わせて分析すると、より効果的な検討ができます。

土地利用図を作成するような作業をしなくても、リモートセンシングのデータが有用な場面が数多くあります。たとえば自然災害の直後に取得された画像を目で判読することにより、現地調査が困難な被災地の状況を短時間で把握し、迅速な救援活動や復興に役立てることができます。現在は地球環境問題も重要な課題になっていますが、アラル海や死海などで問題となっている水域の縮小（図4参照）や、温暖化による氷河後退や植生の変化などの調査にも、リモートセンシングの画像が活用されています。リモートセンシングをとりまく状況は日進月歩であり、それを活用した応用も今後さらに発展していくと期待されます。

図と表のページ

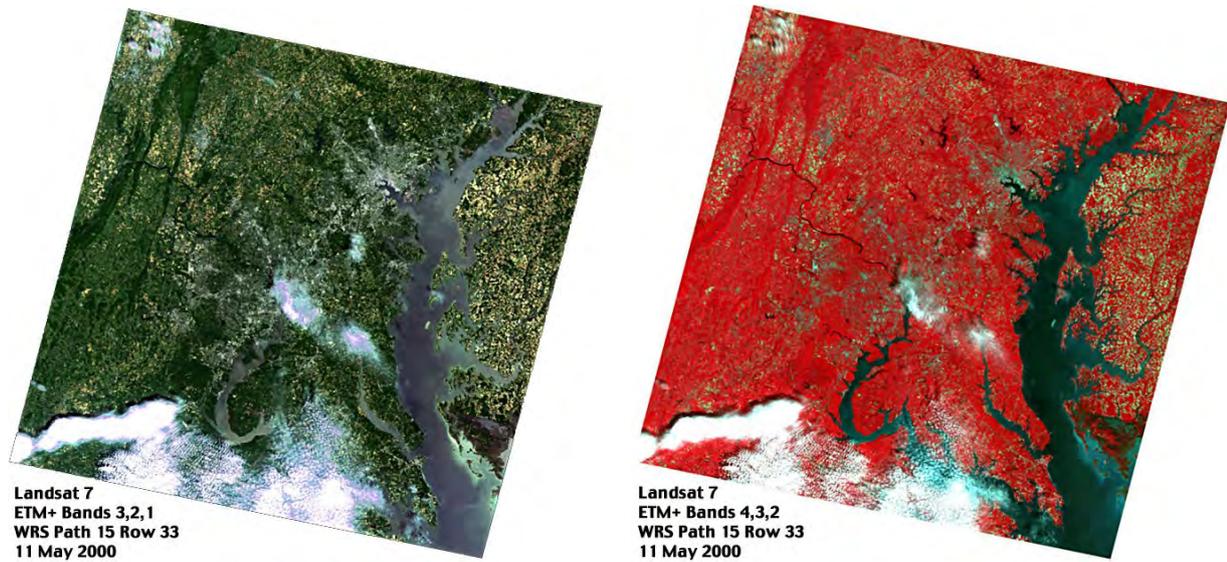


図8 ランドサット7号のデータから作成されたトゥルーカラー画像（左）とフォルスカラー画像（右）
 (NASAのLandsat Science <https://landsat.gsfc.nasa.gov> による。パブリックドメイン)

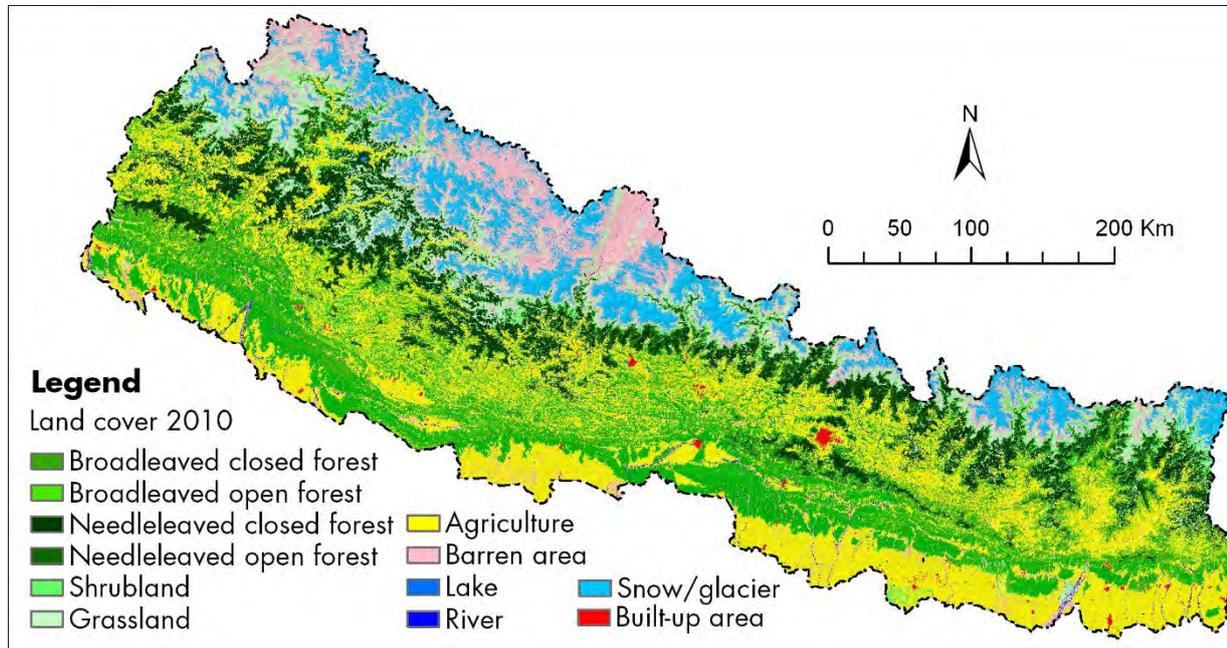


図9 ランドサット衛星画像から作成したネパールの土地利用図
 (Wikimedia CommonsのUddinkabir氏による)

参考 URL (2024 年 1 月参照確認)

東京大学空間情報センター・地形学・地理学研究グループ HP

<http://oguchaylab.csis.u-tokyo.ac.jp/>

参考文献

小口 高 (2001) : 「地形学と GIS」 高阪宏行, 村山裕司編『GIS-地理学への貢献』古今書院, 24-37

小口 高・小松安希・小口千明・佐藤一幸 (訳) (2004) : R. ディカウ・H. ザオラー (編著)『GIS と地球表層環境』古今書院, 157p.

高木哲也 小口高 松本淳 M H サーカー M A マ ー チ ン(2006) 「GIS とリモ ー トセンシングを用いたバングラデシュ・ブラマプトラ川の動態解析」地形 27-2, pp. 187-273.

[file:///C:/Users/usuit/Downloads/digidepo_10807484_pn_ART0007420929%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/usuit/Downloads/digidepo_10807484_pn_ART0007420929%20(2).pdf)

Oguchi, T. and Waskiewicz, T. (2010): Geographical Information Systems in geomorphology. In: The SAGE Handbook of Geomorphology. Sage Publications. (in press).

小口高 (2018) GIS の歴史、『環境・防災のための GIS』山岸宏光編、古今書院