

この章で学習すること

この章では衛星データの種類と可視化手法について紹介します。衛星データにはさまざまな波長帯（バンド）があり、異なる波長帯のデータを組み合わせることで植物や水、土壌などを検出できます。本章では各波長帯の特徴や、バンドの組み合わせ例を紹介します。人工衛星で撮影した一般的な画像はそのまま私たちが利用できる形になっているものは少なく、前処理をして初めて解析しやすい形になります。代表的な前処理について説明したあと、衛星データを解析するうえでの考え方について紹介します。

2-1 衛星データの基礎

2-1-1 衛星データの種類

衛星データと言っても、私たちが目にしている太陽光の反射である「可視光領域」の光を撮影するデータから、非接触で体温を測定する際に利用する「熱赤外領域」をとらえるデータ、衛星が「能動的に電波を照射した際の反射」をとらえるデータまでさまざまな種類^{注1}があります（図2-1）。

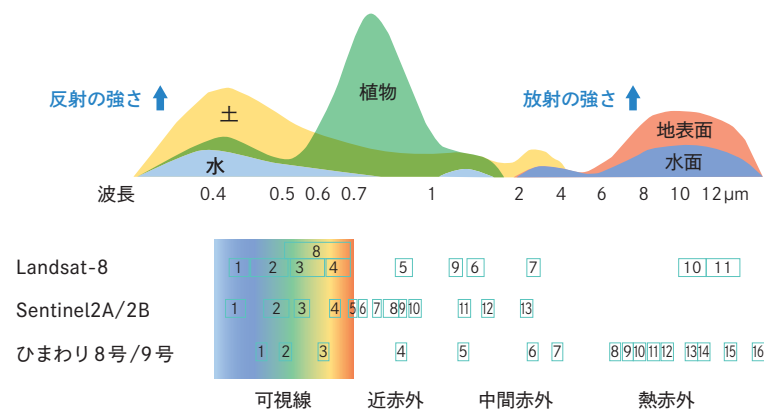


図2-1 光の波長における反射と放射の特性

注1 「センサの違いで見る（可視光・赤外・電波）」https://www.sapc.jaxa.jp/use/data_view/ も参照。より詳細な情報はNASAのランドサット情報も参照（<https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>）。

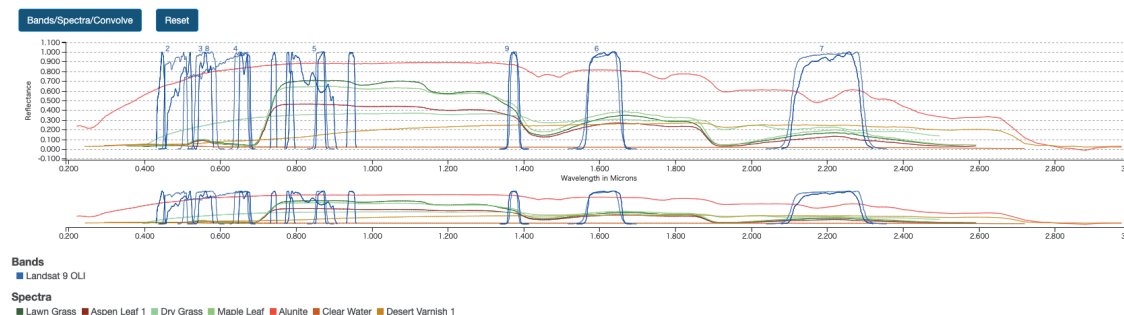
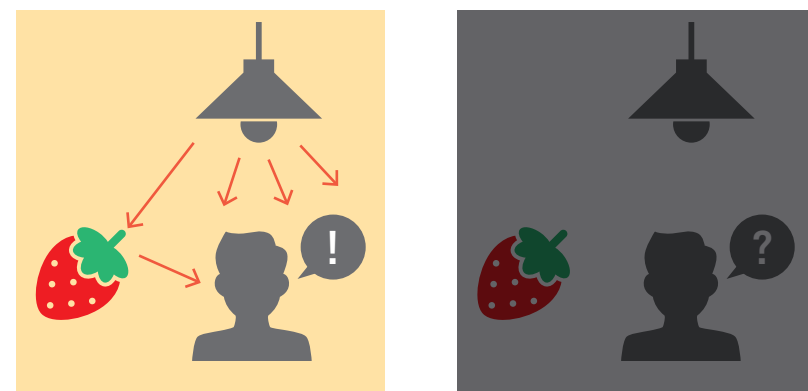


図2-2 光の波長と波長による観測しやすい観測対象を表すグラフ (USGS)

衛星データについて解説をする前に光と物体の色の関係について説明します。私たちがモノの色を認識するとき、どのように把握しているかご存じですか？ 私たちは、光が物体に当たって反射した特定の波長の反射光を眼が信号として受け取り、初めて色がわかります（図2-3）。このように、物体によって反射する波長は異なり、これを反射特性^{注2}と言います。これは私たちに見える可視領域限った話ではなく、目に見えない近赤外領域の波長であったとしても、物体（の状態）に応じて反射特性が異なります。



モノに反射した光を眼でキャッチすることで、「モノが見える」

図2-3 モノが見えるしくみ (<https://sorabatake.jp/19255/>)

これに対して、温度などに応じて物体から放射される特性もあり、放射特性と言います。夏に触れていなくとも地面が暖かいと感じたり、非接触の体温計で体温を計測できたりするのは、地面や人体が熱を放射しており、それをセンサでとらえているからです。

つまり人工衛星には、太陽光が地表面に当たって反射した光をとらえる場合と、地表面の物体が放射する電磁波をとらえる場合とがあります。物体は状態に応じて異なる反射特性や放射特性を有するため、人工衛

注2 宙畑参照 (<https://sorabatake.jp/19255/>)

星から観測することで、物体の状態を推定できるのです。

これ以外に衛星が能動的に電波を放射してその反射をとらえる場合や、ほかの衛星が発した電波をとらえることで大気の状態減衰を観測している場合などもありますが、今回は説明を省略します。

2-1-2 光学衛星が観測しているデータの種類

光学衛星は、主に可視光や近赤外の波長帯 (=データの種類) を観測しています。光学衛星は、太陽光の反射を観測する受動型のセンサを搭載し、地表面にある物体の色や大きさ、数や形状のほか、植物の活性度 (植物がどれほど元気か) や水の濁度などを把握できます。

撮影した画像は私たちにとって直感的にわかりやすいため、多くの衛星が光学で撮影していますが、雲があったり夜だったりすると地上の様子を撮影できないほか、撮影時刻や季節によって撮影される画像の見た目が少し異なるという課題もあります。

光学衛星によっては、複数の波長帯 (バンド) で撮影しています。代表的な光学衛星と観測しているバンドを図2-4に示します。

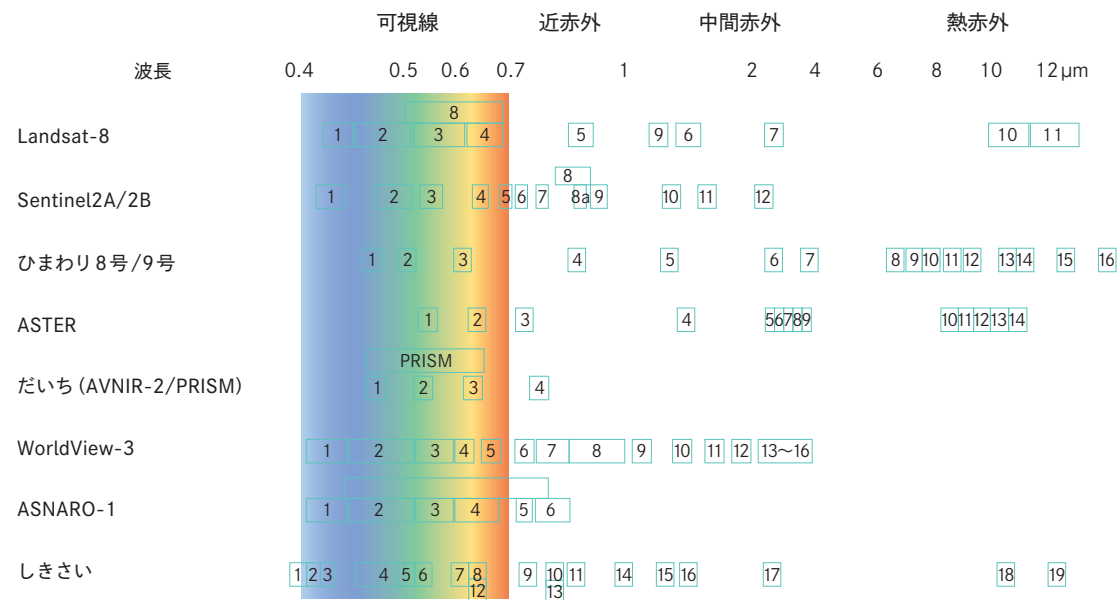


図2-4 光の波長における反射と放射の特性

人工衛星によって、それぞれ異なるバンドを観測していることがわかります。中には可視光や近赤外だけでなく、熱赤外の情報も合わせて観測している人工衛星もあります。たとえば、私たちにもっとも馴染みがある「気象衛星ひまわり」は雲を観測するため、雲画像や水蒸気情報を観測できる放射計を搭載しています。放射計は文字通り、地上からの放射を観測する観測装置で、波長帯としては熱赤外の領域を観測します。

次の節では、可視光から近赤外までのバンドの組み合わせることで、どのような画像を生成できるのか紹

介します。

2-1-3 波長帯の組み合わせでわかること

バンドの組み合わせを変えることで、同じ地域の画像であったとしても、異なる情報を認識しやすくなります。具体的に見ていきましょう。

可視光だけで画像を生成する

まず、私たちが目にして可視光のバンドを組み合わせで画像化したものは図2-5のようになります。Sentinel-2の赤色帯域 (バンド4) をRed、緑色帯域 (バンド3) をGreen、青色帯域 (バンド2) をBlueに割り当てた合成画像です。

航空写真やGoogle Mapsで見ると同じような色合いで、草木が生えているところは緑色に、河川があるところは青色に見えることがわかります。しかし、全体的に同じような色合いのため、植物が生えていそうな場所や水辺を今すぐに塗りつぶして！と言われても、少し時間がかかってしまう方が多いのではないのでしょうか。そこで、バンドの組み合わせを工夫してみます。



図2-5 Sentinel-2衛星をバンド4 (R)、3 (G)、2 (B) に割り当てた画像 (Produced from ESA remote sensing data)

植生被覆の視認性を上げる

冒頭で示した物体の反射特性に関する図を思い出してみてください (図2-1)。植物は近赤外の帯域で強く反射するという特徴を持ちます。

そこで、近赤外のバンドを赤色に割り当てた画像を生成してみます。近赤外帯域 (バンド8) をRed、赤色帯域 (バンド4) をGreen、緑色帯域 (バンド3) をBlueに割り当てた合成画像です (図2-6)。

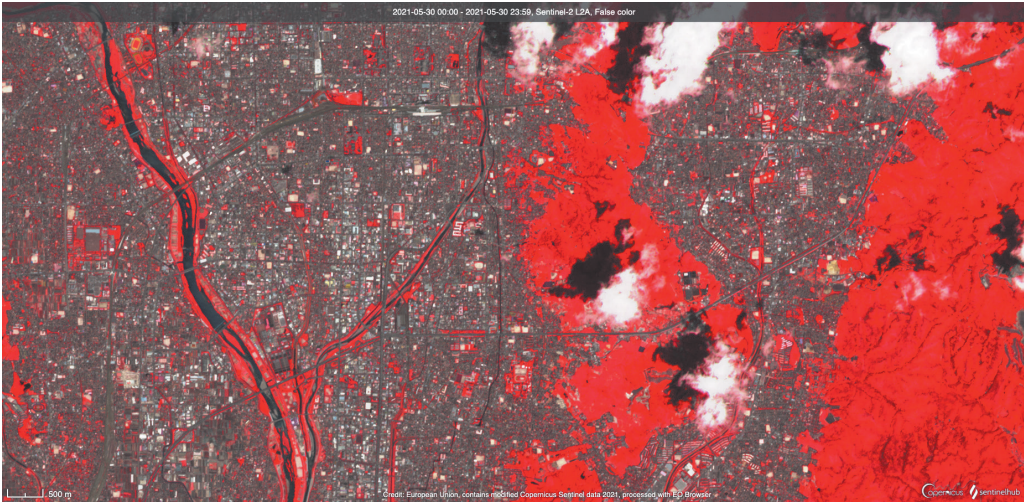


図2-6 Sentinel-2衛星をバンド8 (R)、4 (G)、3 (B)に割り当てた画像 (Produced from ESA remote sensing data)

先ほどに比べていかがでしょうか？ こちらの画像では、近赤外の反射が強い場所、つまりは植物が生えている（植生被覆が高い）場所が赤色に目立って見えます。そのため、先ほどの画像に比べれば、植物が生えている場所を塗りつぶすのは容易でしょう。

また、単純に植物が生えているだけでなく、植物が繁っている場所を次のように可視化することもできます。英語ではNormalized Difference Vegetation Index (NDVI)、日本語では正規化植生指標と言います。近赤外のバンドと赤色のバンドの反射率から算出できます (図2-7)。

$$NDVI = \frac{Red - NIR}{Red + NIR}$$

これらについては、第4章で詳しく解説します。

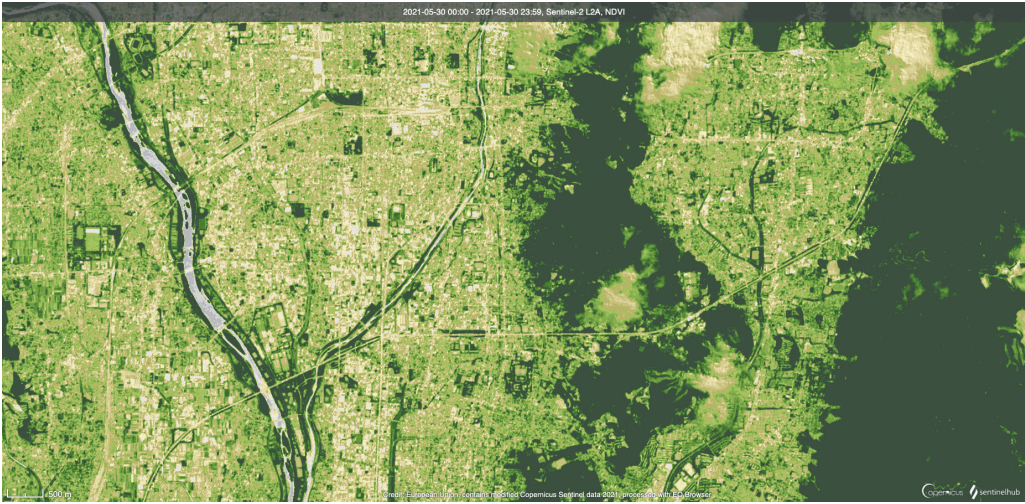


図2-7 NDVI (正規化植生指標) を可視化 (Produced from ESA remote sensing data)

2-1-4 水域の視認性を上げる

次に、水辺を把握するべく、水が目立つバンドの組み合わせに変更して衛星データを可視化します。水域を可視化したい場合には、赤外の中でも短波長赤外線 (SWIR) と呼ばれる波長帯のデータを利用します。水はSWIRの波長を吸収することから、SWIRは植物や土壤に含まれる水の量を推定するのに役立ちます。

図2-8はSentinel-2のSWIRを利用して画像を生成した例です。短波長赤外帯域 (バンド12) をRed、近赤外帯域 (バンド8A) をGreen、赤色帯域 (バンド4) をBlueに割り当てた合成画像です。

この合成画像では、植生は緑、土壌や工業地帯は茶色、水は黒に見えます。そのため、黒い場所が水のある場所だな、とわかりやすいです。

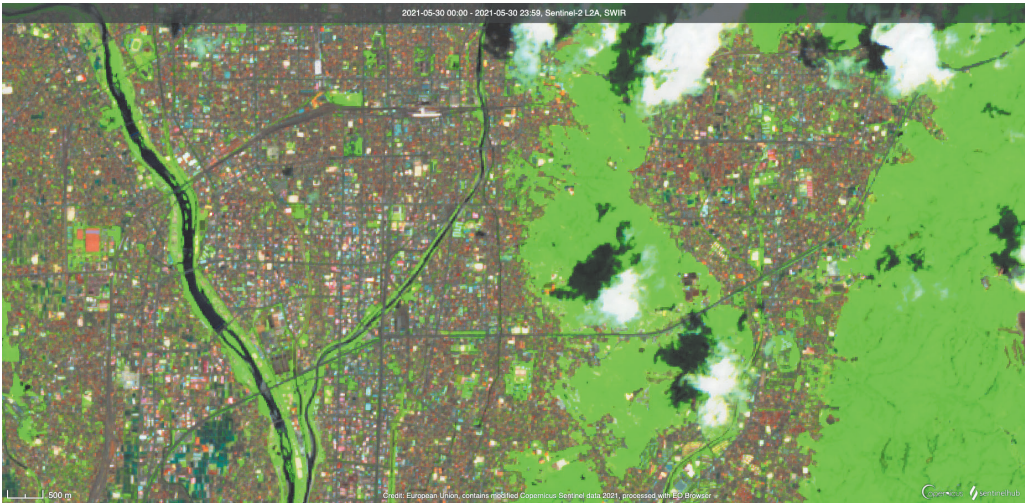


図2-8 バンド12 (R)、8A (G)、4 (B) に割り当てた画像 (Produced from ESA remote sensing data)

また、単純に水があるというだけでなく、地表面における水域(雪を含む)や、植生に含まれる水分量の存在度合いも可視化できます。Normalized Difference Water Index (NDWI) は、日本語では正規化水指数と言われています。図2-1に示したように、水や雪などによる光の反射は可視光帯で最も大きく、SWIR(短波長赤外線)で最小の値を持ちます。SWIRの波長帯は0.9μm～2.5μmです。

地表面における水域について算出する場合には、SWIRのバンドと赤色のバンド情報を用いて演算します。植生に含まれる水分の指標について算出する場合には、SWIRのバンドと近赤外のバンド情報を用いて演算します(図2-9)。

$$NDWI(地表面) = \frac{Red - SWIR}{Red + SWIR}$$
$$NDWI(植生) = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

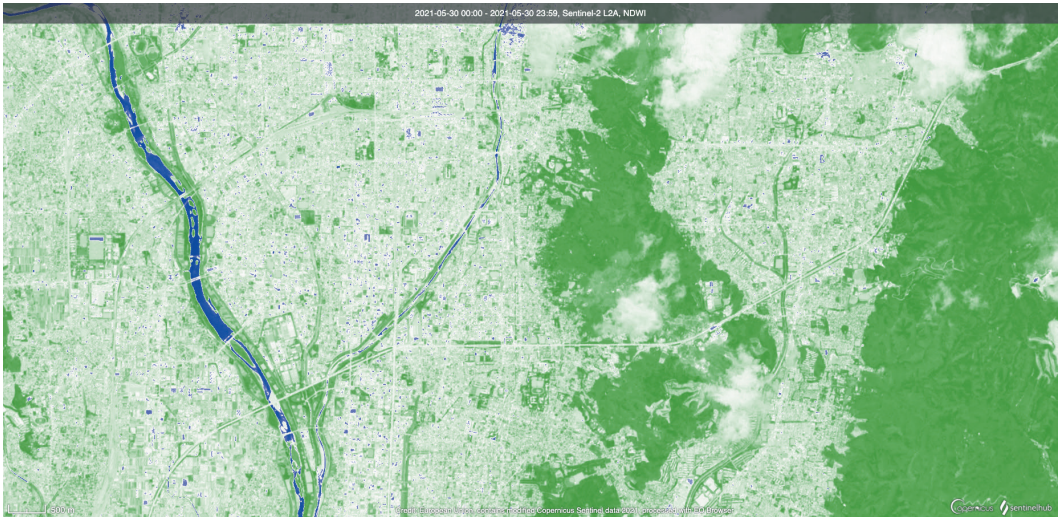


図2-9 正規化水指数を可視化 (Produced from ESA remote sensing data)

2-1-5 複数バンドを組み合わせた演算

物体ごとに異なる反射特性を有することが上記までの例でわかりました。上記では、水なら水を、植物なら植物を目立つように可視化していましたが、そもそも水や植物がわかるように可視化できるのであれば、同時に目立つように可視化できるのではないかと思います。この解析する手順を、土地被覆分類と呼びます。図2-10

そこで、物体ごとの反射特性が異なるという特徴を利用し、土地被覆のタイプごとにバンドの特徴を抽出して解析し、結果を可視化する方法があります注3。この解析する手順を、土地被覆分類と呼びます。図2-10

は厳密的には土地被覆分類した結果ではありませんが、植物、水域、都市域(植生ではない場所)、雲、雲の影、土壌・砂漠などを分類して可視化しています。

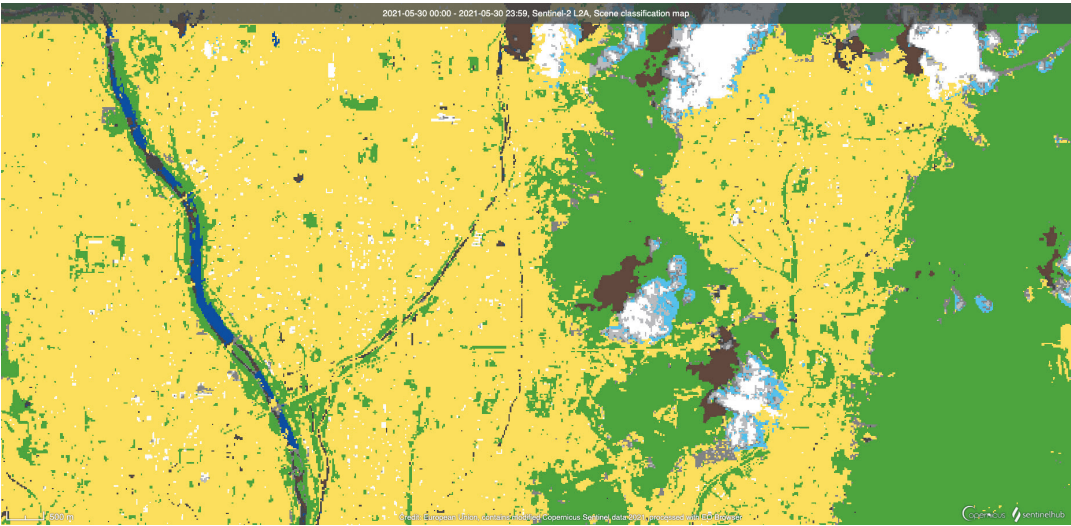


図2-10 分類した結果を可視化 (Produced from ESA remote sensing data)

今回はよく利用される植生や水の指数についてだけを紹介しましたが、その他に土壌や雪、都市化(人工物)に関するものもあります。興味のある対象物が決まったら、それを可視化しやすい波長の組み合わせについて調べてみると良いでしょう。

2-1-6 利用する衛星データ

衛星データには有料のもの・無料のものがあります。この節では本書籍でも利用する、無料で入手できる衛星データを紹介します。

ALOS

ALOS、だいちシリーズは、JAXA(宇宙航空研究開発機構)が打ち上げている陸域観測衛星です注4。2006年に打ち上げられたALOSには、光学の他、衛星が電波を放射してその反射を観測する装置(SAR)の両方の観測センサが搭載されていました。同一地点は46日に1回程度撮影していました。現在は後継機であるALOS-2が運用中です。ALOSの光学センサは表2-1のバンドを持っています。

注3 課題に応じて変幻自在? 衛星データをブレンドして見えるモノ・コト「マンガでわかる衛星データ」(<https://sorabatake.jp/5192/>)

注4 ALOS : <https://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos/>

表 2-1 ALOSの光学センサのバンド数

バンド番号	波長域	解像度	特徴
バンド1	420～500nm	10m	青色
バンド2	520～600nm	10m	緑色
バンド3	610～690nm	10m	赤色
バンド4	760～890nm	10m	近赤外域

 Landsat

ランドサット
Landsat シリーズは、NASA (アメリカ航空宇宙局) が打ち上げている陸域観測衛星です^{注5}。2021 年現在 1972 年に打ち上げられた Landsat 1 から現在運用中の Landsat 7 (1999 年 4 月打ち上げ) と Landsat 8 (2013 年 2 月打ち上げ) まで、およそ 40 年間にわたり継続して地球の状態を観測しています。Landsat は 16 日程度の周期で同一地点の観測を行います。Landsat シリーズはすべて光学センサを搭載した地球観測衛星で構成されます。現在 Landsat 7 と Landsat 8 が運用されています (2021 年時)。

Landsat 7 に搭載されているセンサ「Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)」は、表 2-2 の 8 つのバンドを持っています。

表 2-2 Landsat 7の光学センサのバンド数

バンド番号	波長域	解像度	特徴
バンド1	450～520nm	30m	青色
バンド2	520～600nm	30m	緑色
バンド3	630～690nm	30m	赤色
バンド4	770～900nm	30m	近赤外
バンド5	1550～1750nm	30m	中間赤外
バンド6	10400～12500nm	60m	熱赤外
バンド7	2090～2350nm	30m	中間赤外
バンド8	520～900nm	15m	パングロマトリック

Landsat 8 に搭載されているセンサ「Operational Land Imager (OLI)」は 9 つのバンドを、「Thermal Infrared Sensor (TIRS)」は 2 つのバンドを持っています (表 2-3)。

表 2-3 Landsat 8のバンド数

バンド番号	波長域	解像度	特徴
バンド1	430-450nm	30m	沿岸／エアロゾル
バンド2	450-510nm	30m	青色
バンド3	530-600nm	30m	緑色
バンド4	630-680nm	30m	赤色
バンド5	850-880nm	30m	近赤外域
バンド6	1560-1660nm	30m	中間赤外
バンド7	2100-2300nm	30m	中間赤外
バンド8	500-680nm	15m	パングロマトリック
バンド9	1360-1390nm	30m	中間赤外
バンド10	10600-11190nm	100m	熱赤外
バンド11	11500-12510nm	100m	熱赤外

 Terra/Aqua (テラ／アクア)

Terra (1999 年)／Aqua (2002 年) はそれぞれ NASA が打ち上げた地球観測衛星です。陸域だけでなく、大気・海洋環境も観測しています。この両衛星に搭載されている、MODIS^{注6}というセンサから取得されたデータが解析にはよく利用されます。

MODIS は 36 種類の異なる波長帯 (バンド) で地球を観測しており、観測データから生成される高次プロダクトは次の 5 種類に大別されます。

- 放射輝度データ等 (レベル 1 データ)
- 大気プロダクト
- 陸域プロダクト
- 氷圏プロダクト
- 海洋プロダクト

空間分解能は 0.5～1km ほどと Landsat などと比べると粗いものの、同一地点を 1 日に 1、2 回と観測頻度が高いという特徴があります。さらに、MODIS の観測データから処理されるデータプロダクトには、表面反射率、植生指数、土地被覆図、異常熱源など、すぐに GIS 解析に使えるデータが多数あります。長期にわたる全球データプロダクトのため、多くの研究や情報サービスで利用されています。

 Sentinel

センチネル
Sentinel シリーズは、ESA (欧州宇宙機関) が打ち上げている地球観測衛星シリーズです^{注7}。光学観測する

注5 Landsat : <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8>

注6 MODIS : <https://modis.gsfc.nasa.gov/>

注7 Sentinel : <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>

衛星以外に、SAR観測する衛星や、大気の状態を観測する衛星、海洋環境（海面温度や波高）を観測する衛星などがあります。Sentinel-1やSentinel-2は12日に1回程度の頻度で同一地点を観測しています。Sentinel-1やSentinel-2は2機体制で観測しているため、実際には6日に1回程度の頻度で同一地点を撮影しています。

本書では、光学観測する衛星Sentinel-2のデータを扱います。Sentinel-2は可視光、近赤外を含む12のバンドで観測しています（表2-4）。

表2-4 Sentinelのバンド数

バンド	中心波長	解像度	特徴
バンド1	443nm	60m	エアロゾル
バンド2	493nm	10m	青色
バンド3	560nm	10m	緑色
バンド4	665nm	10m	赤色
バンド5	704nm	20m	レッドエッジ
バンド6	740nm	20m	近赤外域
バンド7	783nm	20m	近赤外域
バンド8	833nm	10m	近赤外域
バンド8a	865nm	20m	近赤外域
バンド9	945nm	60m	中間赤外
バンド10	1374nm	60m	中間赤外
バンド11	1610nm	20m	中間赤外
バンド12	2190nm	20m	中間赤外

2-2 衛星データ解析の概要

2-2-1 衛星データ解析の流れ

衛星データは私たちにとって、最初から扱いやすい形になっているわけではありません。たとえば食肉を例にとりましょう。同じ肉と言っても、牛の状態から、スーパーの店頭で並んでいる状態、さらには調理済みの状態まであります。同様に衛星データにもさまざまな状態が存在します。いくつかの段階を経ることで、私たちが普段で目にするデータになります^{注8}。その過程を本書では、図2-11の4つの段階に分けて説明します。

衛星で撮影した状態のデータを生データと言います。これに前処理を加えることでデータを解析可能な形にします。その後は解析を行って処理したデータを、サービスに組み込むことで、普段私たちが目にするデータとなります。

次の節では、主に前処理までの流れについて示していきます。

注8 衛星データの前処理とは～概要、レベル別の処理内容と解説～（<https://sorabatake.jp/9192/>）



図2-11 衛星データ処理の流れ

2-2-2 衛星データの前処理までの流れ

解析可能な状態になるまでに、衛星データには複数の状態が存在します。衛星データ前処理の流れは図2-12のようになります。

L0の“L”は、Level（レベル）のことで、処理のステップを意味します。L0から1、2とレベルが上がることで処理は高次に進んでいきます。

それぞれについて詳しく解説します。なお、本書籍では高次処理済みのデータだけを利用して解析を進めます。そのため、本節の知識はなくとも解析できます。

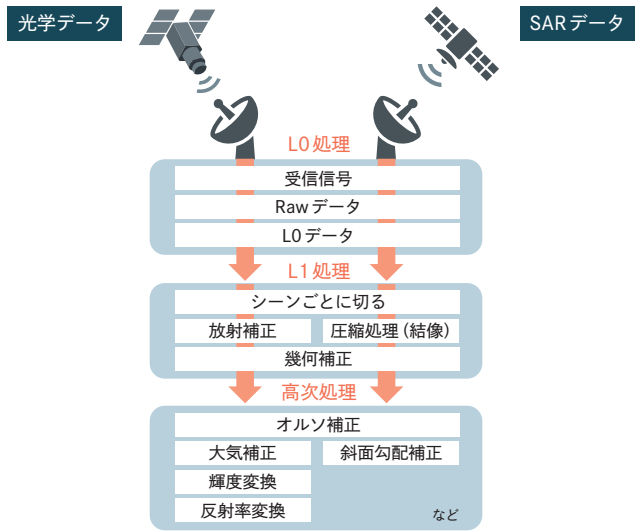


図2-12 衛星データ前処理まとめ

大気補正は大気による散乱や吸収による効果を仮定して、これを相殺する処理です。大気補正をすることによって、大気の状態に依存しない地表面での太陽光からの反射特性を得られます。これは季節によっても違いますし、日によって薄雲がかかったり、雲がなかったりすると太陽光からの反射は変わります。これらの影響を排除し、衛星データ同士を比較できるような形にしたのが大気補正済みのデータとなります。

他に、輝度変換や反射率変換なども存在しますが、今回は説明を省略します^{注9}。

2-2-3 解析からサービス提供までの流れ

本書ではARD (Analysis Ready Data) を用いて解析を進めます。ARDのデータは基本的に幾何補正やオルソ補正、大気補正など、画像として解析するのに必要となる前処理をされた状態のもので、前処理のプロセスを意識する必要はありませんが、解析するにはデータをどのように組み合わせるのか？——ということを意識する必要があります。そのため、この節では衛星データ解析の設計のポイントを説明します。

大まかな流れとしては次のようになります。

- テーマを設定する
- 観測ターゲットを定める
- ターゲットをとらえられる衛星データを調べる

① テーマを設定する

何をするにもまずは衛星データを役立てるテーマを定めなければなりません。テーマは何か解決したいものでも良いですし、興味があるものでも良いです。本書はSDGsに貢献する解析の事例を紹介しているので、何かしら社会課題に紐づいた課題となっていますが、自分の身の回りで気になることを調べてみるのにも衛星データは有用です。たとえば、自分が住んでいる街と同じような街を探してみたい、といったものでも良いでしょう。

② 観測ターゲットを定める

衛星データの特性を理解していれば「近赤外帯のデータを用いると植生の解析ができる」「熱赤外帯のデータを用いると地表面温度の解析ができる」など、衛星データと物理現象が直接的に紐づいた課題であればターゲットを定めやすいでしょう。ただし、このようなターゲットはごく一部です。この際に重要になるのがターゲットの変換です。ターゲットを把握したい目的に照らし合わせた際に、他に何か関連しそうなターゲットはないかを、ターゲットを具体化したり、抽象化したり、置き換えたりしながら考えます(図2-15)。

たとえば「獣害被害が発生しそうなタイミングを把握したい」ことがテーマだったとします。この際には野生の動物が被害を与えるわけですから、野生動物をターゲットに設定しようとする場合が多いでしょう。

注9 <http://www.cr.chiba-u.jp/whatsnew/2004/kenshu2004/05imgepros.pdf>

テーマの課題に関連する直接的なターゲットが衛星により観測可能な場合は良いですが、ただし、動物を衛星データで直接撮影することは困難のように、直接的に観測可能ではないターゲットが世の中の大半です。この際には、テーマに関連する間接的なターゲットを考えてみましょう。たとえば「獣害が多く発生する際には、動物たちの餌となる果樹が減ったときだ」ということを見つけたとします。そうすると、果樹が減ったことを検出することで、獣害被害が発生しそうかわかるわけです。果実の状態だけでなく、果樹そのものを衛星で特定するのは困難だったとしても、このような気象状態が続くと果樹は生育しないだろう、ということはわかるでしょう。そうすると、このテーマを解くターゲットは「動物を検出する」ではなく「果樹が生育できない気象状態となったことを検知する」ことに変わるわけです。ターゲットの定め方についてはのちほど具体例を交えて紹介します。

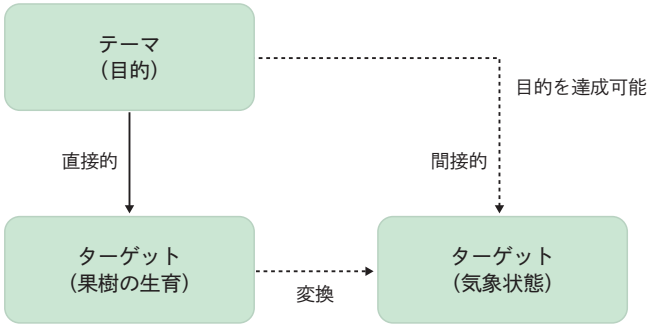


図2-15 衛星データを用いた解決策の検討方法

③ ターゲットをとらえられる衛星データを調べる

たとえば図2-16のような流れ^{注10}で扱うデータを考えることもできます。

もちろんすべてのターゲットが直接的に衛星データと紐づくわけではありません。ただし、直接的に衛星データで推測できない課題であったとしても、ターゲットを違った側面にとらえる、もしくは課題の抽象度・具体度・詳細さを変えることで、間接的に推定可能なものもあります。

注10 衛星データの学び方と読むべき記事を整理しました2019 (<https://sorabatake.jp/5982/>)