

リモートセンシング技術の原理と活用例

～今、リモートセンシング技術により 何がどこまでわかるのか～

東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 准教授 竹内 渉

抄録

本稿では、近年の宇宙技術発達とともに利活用が進みつつある、リモートセンシング技術を取り上げ、計測の原理を理解し、主に陸域のリモートセンシングについて、国内外での技術活用、研究開発事例を紹介することを目的とする。

1. はじめに (本稿の趣旨と論点)

内閣府の試算によると、宇宙産業の国内市場は2017年度におよそ1.2兆円であり、15年後の2030年初頭には、倍増の3兆円を目指すという。宇宙産業は大きく2つに分けられ、一つが人工衛星や打上げ用ロケット等を製造する「宇宙機器産業」、もう一つが人工衛星を利用してデータの送受信を行いそれを利用する「宇宙利用産業」である。宇宙利用産業の規模の大きなものには、通信放送、測位、リモートセンシングがあり、消費者向けのサービスの割合が圧倒的に大きいため、ビッグデータや人工知能などの技術を活用した新たな関連市場の創出に熱い視線が寄せられている。

本稿では、近年の宇宙技術発達とともに利活用が進みつつある、リモートセンシング技術を取り上げ、計測の原理を理解し、主に陸域のリモートセンシングについて、国内外での技術活用、研究開発事例を紹介することを目的とする。

2. リモートセンシング技術とは

リモートセンシング (Remote sensing) とは、「非接触センサシステムが計測した電磁エネルギーをスペクトルとして読み込み、画像として解釈し、対象物や場について信頼性のある情報を得る技術」と定義される。例えば、コンクリートや金属などの強度

を調べる際には、圧縮あるいは引っ張りなどの非可逆的な破壊試験を行うのとは対照的である。

非接触センサとは、直接物体に触れることなく熱、エネルギーなどの物理的刺激を計測し、パルスとして伝達する計測機器のことであり、能動型と受動型がある。能動型は自らエネルギーを発生し跳ね返るエネルギーを計測するもので、レーザ距離計や音波ソナーがそれに当たる。受動型は物体表面から反射・放射される電磁エネルギーをスペクトルとして計測するものであり、デジタルカメラやサーモグラフィが代表的なものである。

陸域のリモートセンシング技術は、大きく分類すると、形状、色・温度、距離を計測する3つのシステムから構成される。

1) 可視赤外のリモートセンシング

可視から熱赤外領域で反射・放射されたスペクトルを利用し、対象物の色・温度を計測する技術

2) 写真測量

可視領域で撮影された複数の写真の視差を利用し、対象物の形状を計測する技術

3) 合成開口レーダ (SAR)、ライダー (LiDAR)

マイクロ波、近赤外あるいは可視光で照射された信号が跳ね返るまでの時間を利用し、対象物までの距離を計測する技術

表1に示すように、リモートセンシングの歴史は、

写真撮影技術が発明されたおよそ190年前に遡る。その後、およそ150年をかけて気球、航空機、レーダー、カラー画像、衛星搭載と、センサもプラットフォームが進化してきた。これらは、その間の2回の世界大戦、その後の米ソ冷戦を主体とした軍事技術としての発展に他ならない。我が国が高度成長を謳歌していた1972年に米国が初めて非軍事衛星であるERTS-1(後のLandsat)運用を開始し、衛星リモートセンシング時代が到来した。近年では、20年ほど前の1999年に軍事衛星に近い1m解像度を持つ商用衛星IKONOSの運用が開始され、程なく2000年代中盤にGoogle Earthが登場、2010年代になるとUAVや小型衛星が普及し、いわゆるビッグデータ時代の先駆けとなった。この半世紀の間に驚くべき変化を遂げた技術の一つであると言える。

筆者が所属する東京大学生産技術研究所は、日本のリモートセンシング発祥の地である。戦後70年の歴史に照らし合わせると、1947年の新制大学制度

と同時に発足した生産技術研究所(旧第二工学部)では、それまで陸軍で行われていた測定の研究を大学で開始した。1950-1970年代の測量(丸安隆和)、1970-1990年代の写真測量(村井俊治)、1990-2010年代のリモートセンシング基礎研究(安岡善文、沢田治雄)、2010年代以降の応用研究へと、研究を発展させてきた歴史を持つ。

2.1 衛星リモートセンシングシステム

図1は、極軌道衛星の場合の人工衛星の軌道を表している。地球を観測するセンサが搭載された人工衛星は、第1宇宙速度と呼ばれる速度で航行し、その速さは、重力と遠心力が釣り合う均衡点から算出される。南極と北極を周回する衛星は極軌道衛星と呼ばれ、多くの地球観測衛星はこの軌道を描く。極軌道衛星は上空700kmをおよそ7.9km/sの速度で航行し、地球をおよそ100分で一周する計算になる。これに地球の自転を組み合わせると、ちょうどりんごの皮を剥いていくような形で舐めるように地球を観測することができる。地軸に対して傾きを変えることにより、飛来時間の調整を行う。地球の半径がおよそ6,400kmであるから、350km上空を周回するスペースステーションと同様に、極軌道衛星は意外と地球と近い位置にすることがわかる。衛星は、大きいもので4t(マイクロバスくらいの大きさ)、小さいもので数キロ(マイクロ/ナノサテライトと呼ばれる)様々なサイズがあるが、軌道がわかれば大きい衛星だと地上から肉眼で確認できる場合もある。

一方で、ひまわりのような静止衛星は、地球の自転と同じ速度で周回し、常に同じ位置にいるように軌道が制御され、地球全体を一度で観測するために

表1 リモートセンシングの歴史

1826 - Joseph Niepce (仏) が人類最初の写真撮影を行う
1858 - Gaspard Tournachon (仏) が気球から写真撮影を行う
1913 - 航空写真撮影開始
1935 - レーダー計測の発明
1942 - Kodak社がカラーフィルムの特許を取得
1950 - 航空機搭載熱スキャナが開発される
1957 - 合成開口レーダー計測が発明される
1962 - Corona衛星シリーズが運用開始
1972 - ERTS-1(後のLandsat)運用開始、衛星時代の到来
1999 - 1m解像度の衛星IKONOS運用開始
2006 - Google Earth開始
2013 - UAV、小型衛星技術の開発、ビッグデータ時代の到来

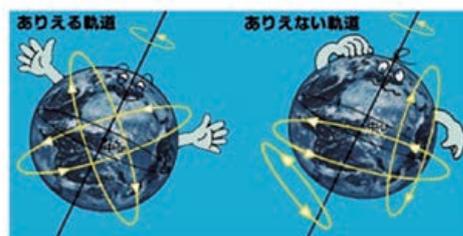
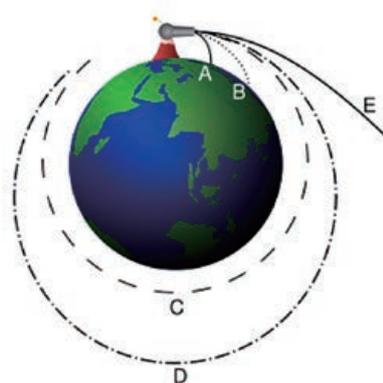


図1 極軌道衛星の場合の人工衛星の軌道

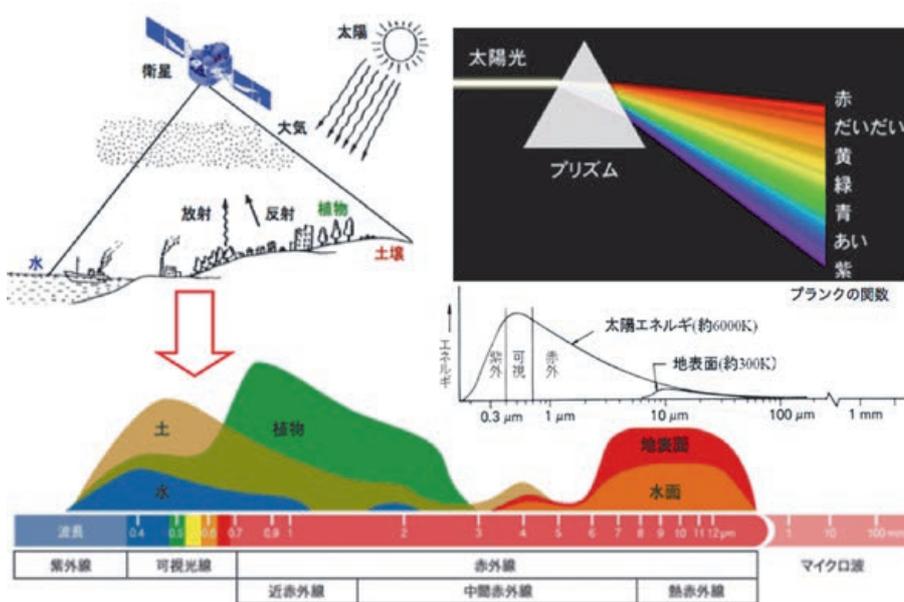


図2 宇宙からのリモートセンシングの概念図

高度およそ36,000km上空を周回している。参考までに、測位衛星であるアメリカのGPS、日本のQZSS（みちびき）などは、およそ22,000kmを航行している。

図2は、衛星リモートセンシングシステムの概念図を示している。

図2の左上に示すように、宇宙からのリモートセンシングでは、地物からの反射あるいは放射エネルギーを電磁波の波長別に（分光して）感知する。衛

星、航空機、UAV（Un-manned Aerial Vehicle）など上空から撮影する際の機器のことをプラットフォームと呼んでいる。昼間の計測では太陽光が光源となり反射エネルギーが卓越するため、Google Earthで目にするような画像を取得することができる。夜間は光源がないため、放射エネルギーのみが観測されることになる。図3に示すようにビル、街灯、自動車、漁船など人間活動によって発せられる微小な光を観測する特殊なセンサも存在する。データ取得の

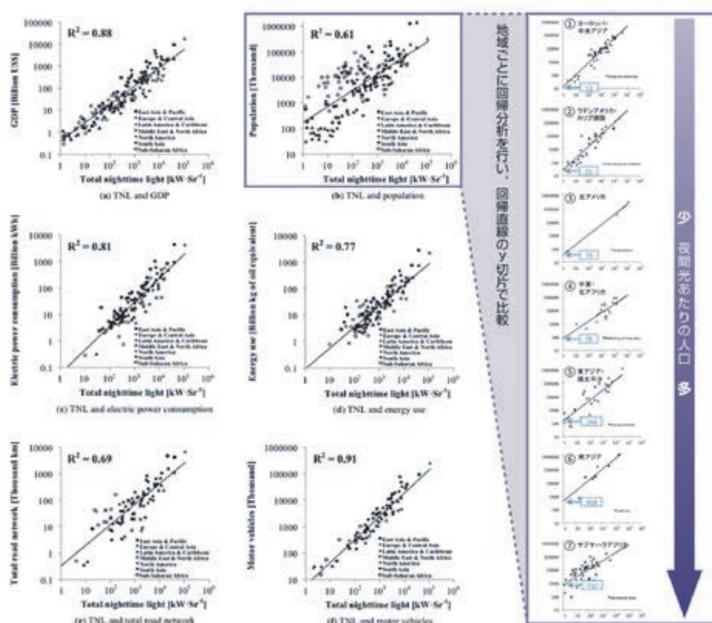


図3：夜間光総和（TNL）と各社会経済指標との散布図。(a) 夜間光総和とGDP。(b) 夜間光総和と人口（地域別の散布図）。(c) 夜間光総和と電力消費。(d) 夜間光総和とエネルギー消費。(e) 夜間光総和と道路総延長距離。(f) 夜間光総和と自動車台数

- 🍏 国内総生産GDP
- 🍏 人口
- 🍏 電力消費
- 🍏 エネルギー消費
- 🍏 道路総延長距離
- 🍏 自動車台数

データ取得の網羅性、調査頻度の低さ、途上国等におけるデータの信憑性、統計調査の費用面・時間面の問題から、統計調査に代わる方法として衛星からの夜間光観測への期待が高まっている。

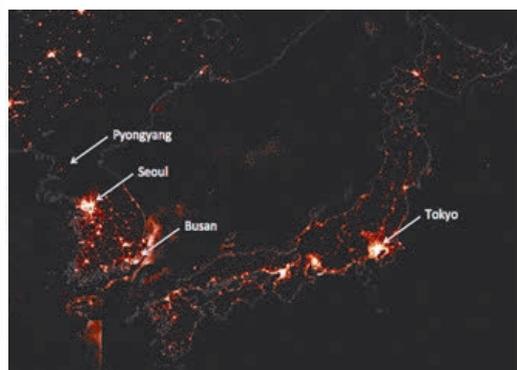


図3 米国VIIRS/DNBによる夜間光の観測と社会経済指標との関連

網羅性、調査頻度の低さ、途上国等におけるデータの信憑性、統計調査の費用面・時間面の問題から、統計調査に代わる方法として衛星からの夜間光観測への期待が高まっている。

2.2 可視光の計測原理

図2の右上に示すように、我々人間の目で認識できる波長領域は可視のリモートセンシングと呼ばれ、高校の物理の実験でもおなじみのプリズム実験で計測が可能である。あらゆる光の集合体である白色太陽光は、プリズム中を通過する際に異なる屈折率を持ち、波長の短い光ほど大きく屈折することが知られている。その結果、遠方では赤橙黄緑青藍紫（せきとうおうりょくせいらんし）に白色光が分光されることが知られている。雨上がりに空に現れる虹は、空中にある雨滴がプリズムの役割を果たすことによって分光された例である。ここに Charged coupled device (CCD) と呼ばれる電荷結合素子を用いたセンサを配置することにより、CCDの各素子が光にさらされ、蓄えられた光の強度が電荷として記録される。電荷は増幅されてアナログ信号からデジタル信号に変換される。たいいていのCCDは1次元または2次元のシリコンチップ上に配列されている。CCDの発明により、リモートセンシング画像はフィルムからデジタルデータになり、1980年第以降、画像処理技術、コンピュータ処理速度、データアーカイブ設

備の飛躍的な発展とともに、リモートセンシング技術は大きく発展した。

2.3 反射と分光スペクトル

図2の下に示すように、電磁波は、横軸に示す波長別に名前がつけられており、紫外線 (0.1-0.4 マイクロメートル)、可視 (0.4-0.7 マイクロメートル)、近赤外 (0.7-1.6 マイクロメートル)、中間赤外 (1.6-8 マイクロメートル)、熱赤外 (8-12 マイクロメートル)、マイクロ波 (1 センチメートル-数メートル) と呼ばれている波長別の反射または放射の強さをスペクトルと呼んでいる。

図4に示すように、衛星リモートセンシングで観測されるスペクトルは、波長方向に離散的な値として計測され、バンドあるいはチャンネルと呼ばれる。最近では、スペクトル分解能を従来よりも10倍以上向上させたハイパースペクトルセンサを地上での計測のみならず、衛星に搭載する計画もある。ハイパースペクトルセンサは、スペクトルの連続的なデータが得られ情報量が多い一方で、データ量が増大することから、衛星から地上へのデータ転送がボトルネックになる点が問題である。

図2の下のスペクトルに戻る。地球観測の場合は、紫外線の多くは大気中のオゾンに吸収されてしまうため、地上には届かず、それよりも長い波長帯が観測で使用される。

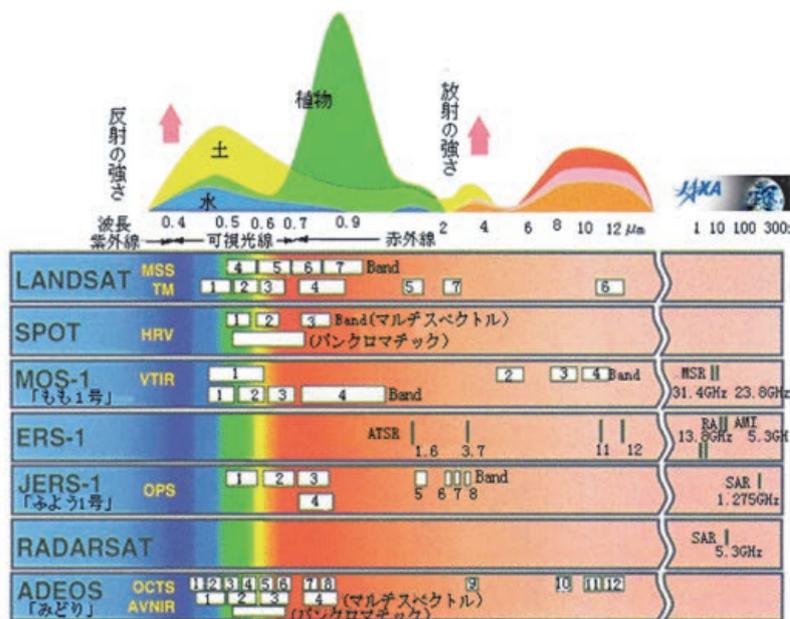


図4 衛星ごとの波長分解能の比較

可視領域では、地表の対象物が太陽光を光源とした電磁エネルギーを吸収し、その残りが反射として衛星から計測される。例えば、クロロフィルが活性化した状態の植物は、光合成を行うために太陽光のうち、緑よりも青と赤の光を多く選択的に吸収し、相対的に多くの緑が反射されることになり、緑色に見えることになる。また植物は、細胞を構成するセルロースが人間の目で見えない近赤外で高い反射を示すことも知られている。こうして、異なる波長での反射特性、すなわち分光スペクトルの違いから、地表物の特性を区分することが可能になる。

2.4 放射エネルギーと熱赤外の計測

図2の下に示すように、中間赤外（1.6-8マイクロメートル）、熱赤外（8-12マイクロメートル）と呼ばれる放射エネルギーは夜間の計測に利用される。電磁エネルギーは、プランク関数と呼ばれる上に凸の緩やかな関数で記述され、物体の温度と放射率によって決まる。放射率は、理論値に近い水の放射率はほぼ1とみなしてよく、森林、草地、河川、湖沼、海洋の放射率は 0.95-0.99となる。砂漠、露出した岩、金属など、放射率が低い対象物を計測するときには、見かけ上の温度の取り扱いに注意が必要である。図3にあるように、ほとんどの地球観測センサが、10から12マイクロメートル付近に計測バンドあ

るいはチャンネルを持つのは、地球の温度に関する。地表面、海面の温度は、摂氏マイナス60度からプラス70ほどに分布すると考えてよく、これをプランクの式に代入すると、図1の右に示すように、およそ10から12マイクロメートル付近に電磁エネルギーのピークが来るためである。

2.5 大気と陸域計測

図2の右上に示すように、宇宙からの地球計測を考えた場合、地表から反射あるいは放射されてきた電磁エネルギーは、大気中に存在する水蒸気、オゾン、二酸化炭素、メタンなど、特定の気成分が固有の波長のエネルギーを吸収する放射伝達過程を考える必要がある。この吸収分がないと、地球から放射されるエネルギーは宇宙空間へと失われて、地球の温度は大変低い状態になってしまう。図5は、大気中のガスによるエネルギーの吸収を示している。値が高いほど吸収される割合が高く、波長依存性がある。この性質を利用して、水蒸気、オゾン、二酸化炭素、メタンなど大気の濃度分布を計測するのが大気のリモートセンシングである。一方で、陸域のリモートセンシングでは、大気成分をノイズとして取り除く必要がある。大気成分、陸・海成分は、お互いにとってノイズかシグナルか、これらを互いに分離して計測することが、永遠の課題である。

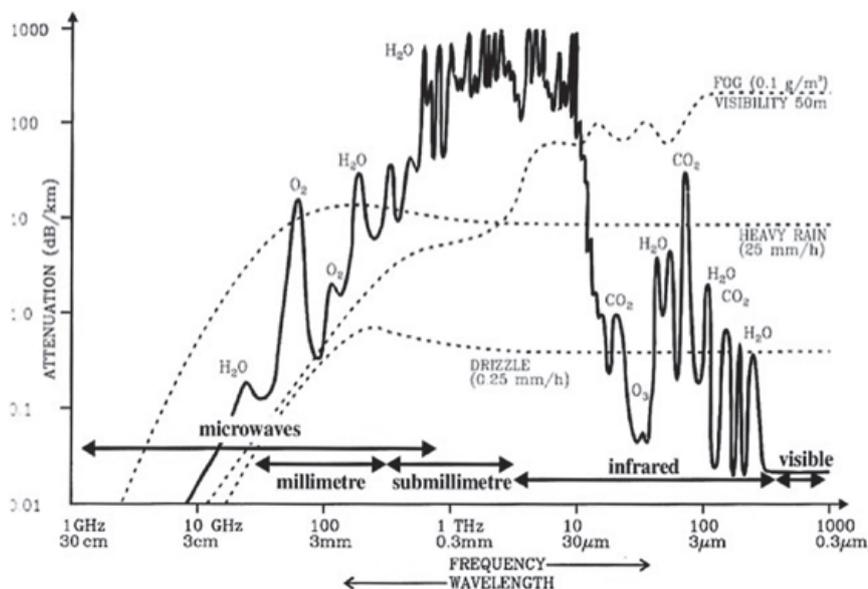


図5 大気中のガスによるエネルギーの吸収

図6は、日本の環境省とJAXAのプロジェクトであるガス観測衛星GOSATが捉えたシベリア永久凍土地帯のメタンガスの様子である。背景のLandsat画像を見ればわかるように、湿地性森林を切り開き、油田開発を行なっているが、メタンガスの発生が指摘されている。性能の異なる衛星搭載センサを利用すれば、大気成分を観測するのみならず、陸域での変動情報を同時に追いかけることが可能となる。

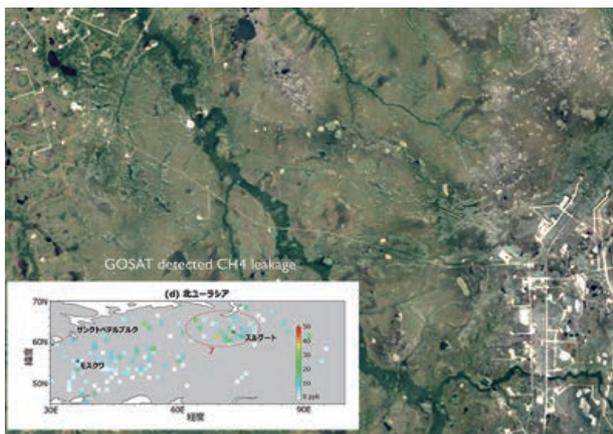


図6 GOSATが捉えたシベリア永久凍土地帯のメタンガス

3. リモートセンシングの種類と応用事例

2で触れたように、陸域のリモートセンシング技術は、1) 可視赤外のリモートセンシング、2) 写真測量、3) 合成開口レーダ (SAR)、ライダー (LiDAR) の3つに分けられる。それぞれについていくつか応用事例を紹介する。



3.1 可視赤外のリモートセンシング

可視赤外のリモートセンシングは、可視から熱赤外領域で反射・放射されたスペクトルを利用し、対象物の色・温度を計測する技術である。例えば、図7は東大駒場キャンパス周辺の航空写真と衛星画像を比較したものである。航空機から衛星へ、モノクロ画像からカラー画像へ、空間解像度分解能も格段に向上した撮像が可能になった。キャンパス内の建物、樹木、グラウンドなどが目視でも識別できる。現在世界最高解像度は、米国のGeoeye衛星で、700km上空から30cmの物体を認識することができる。すなわち東京から望遠鏡で覗くと大阪の人間の有無がわかることになる。これら民生利用の衛星画像もすでに軍事利用転用可能なレベルまで技術レベルが向上しており、1km²あたり5,000円ほどで誰でも購入できるようになった。こうした衛星画像は、Google Earthをはじめとして時系列変動を簡単に可視化できるサービスがウェブ上に充実している。一方で、ビジネス利用する上でセキュリティやプライバシーの問題が指摘されるようになってきたため、我が国では、2016年にリモートセンシング法が成立している。

衛星リモートセンシングは、スペクトルの情報を定期的かつ均質に取得できるため、森林や農地など季節変化を伴う地物の判別を行う点で有利である。季節変化を捉えた複数の画像から、画素ごとに可視近赤外スペクトルの時系列変動をモデル化し、類型化する作業のことを土地被覆分類と呼んでいる。



図7 東大駒場キャンパス周辺の航空写真と衛星画像の比較

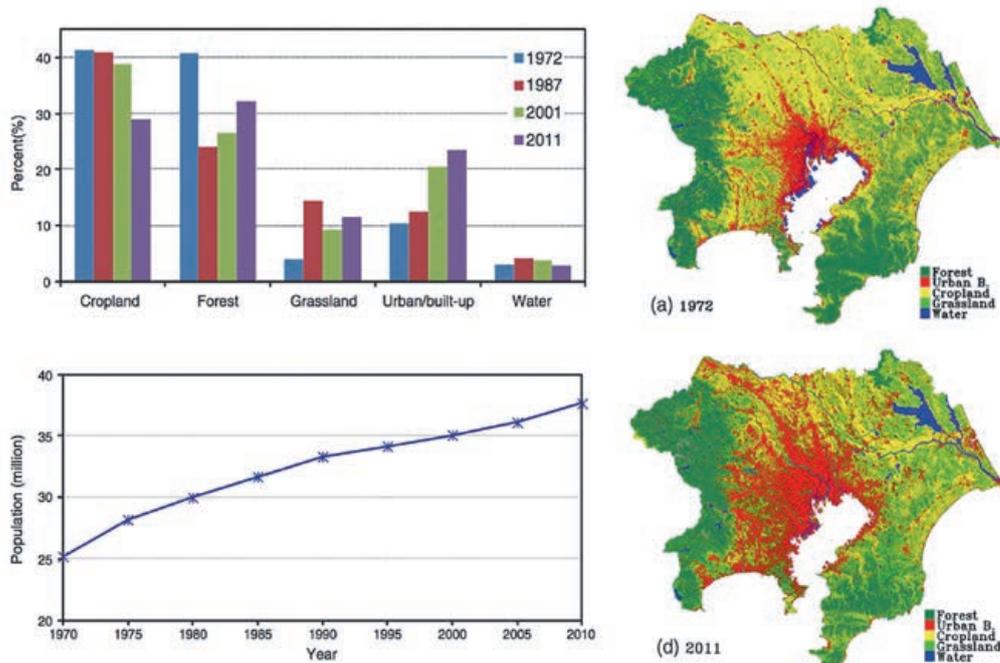


図8 首都圏の人口増加と土地利用の変化

1970年代以来の蓄積がある衛星画像を大規模に処理することにより、経年変化を追うことができる。例えば、図8は、首都圏の人口増加と土地利用の変化を表している。1972年から2011年のおよそ40年間で首都圏の人口はおよそ2500万人から3700万人になったが、人口の増加とともに都市域 (Urban/built-up) の面積がおよそ2.2倍になり、農地が30%ほど減っている事がわかる。

また、熱赤外スペクトルを利用すると、林野火災、油田でのガス燃焼、大規模発電などの熱源を感知す

ることも可能である。火災が起こると、地物の表面温度が上昇し、プランク関数のピーク波長が短波長側へ移動することが知られている。これをウィーンの変位則と呼んでいる。この特性を活かし、中間赤外と熱赤外に搭載された複数の波長を利用して大規模な熱源を感知する。図9は、米国の地球環境衛星 Terra MODIS から作成したアジアの林野火災分布図と土地被覆分類図を示している。左側の林野火災分布図は、明確な季節性を持っている。例えば、タイやベトナムなどは3月から5月にかけて火災が多

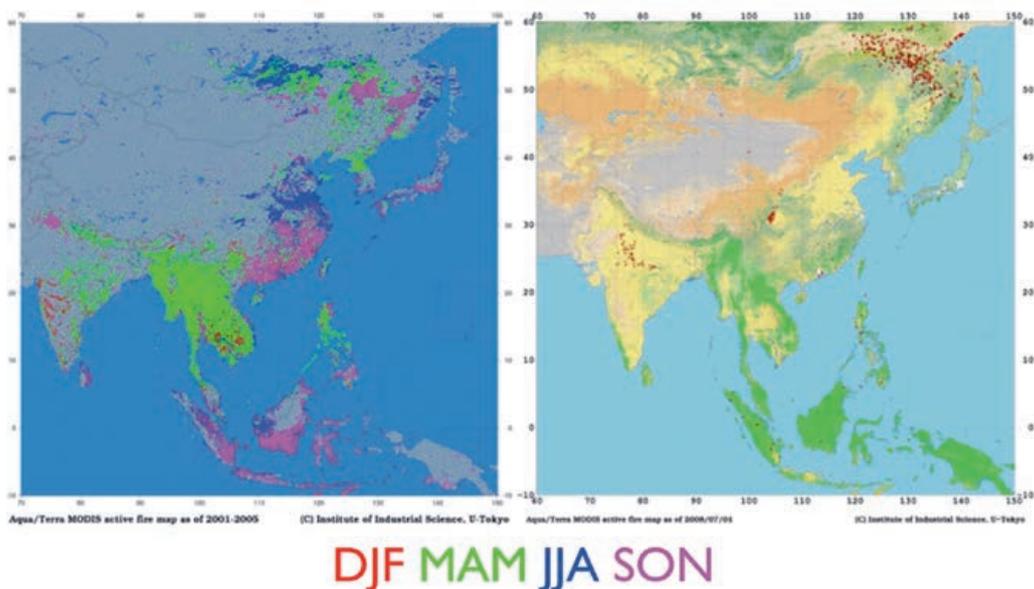


図9 アジアの林野火災分布図と土地被覆分類図

く、赤道を跨いだマレーシアやインドネシアは9月から11月にかけて火災が多い。これは、乾季と雨季の季節変動をしっかりと反映した結果となっている。北朝鮮・韓国の軍事国境線もくっきり現れており、極東ロシアでも多くの火災が起こっている事が確認できる。一方で、右側の土地被覆分類図をみると、黄色く着色された部分が農地、緑色が森林であるが、ほとんどの火災はそのどちらかで起こっている事がわかる。森林の場合、自然発火というケースもなくはないが、多くは開墾のために人為的に着火されたものであると考えられており、二酸化炭素の大きな放出であることが長年問題視されている。我が国は、宇宙技術を用いた森林の保護活動（Reduction of emission from deforestation and degradation, REDD）にも国際的な協力のもと力を注いでおり、カーボンオフセットを通じた国際的な科学技術外交の一つの柱になるものと期待されている。

3.2 写真測量

写真測量とは、可視領域で撮影された複数の写真の視差を利用し、対象物の形状を計測する技術のことである。我々の目も写真測量を行う最も優れたシステムの一つと言える。写真測量の歴史は古く、1950年ごろから長らく航空機搭載型のカメラから撮影した手法が主要な地位を占めてきたが、JAXAが2006年に打ち上げた衛星搭載トリプレットセンサALOS/PRISMが世界の常識を覆した。

図10の左に示すように、ALOS/PRISMは、衛星の進行方向に対して前方、直下、後方と3方向のカ

メラを搭載し、ステレオ以上のトリプレット観測が可能となった。図10の右に示すように、直下画像ではビルの屋上が見えているが、前方、後方画像ではビルの側面が観察できる。衛星とカメラの位置と姿勢正確にわかれば、ステレオ視の原理で建物、地盤の高さを推定する事ができる。現在運用されている衛星には、スタートラッカーと呼ばれる恒星のデータベースが搭載され、GPSによる時計誤差も非常に小さい。衛星の姿勢制御技術は、2000年以降格段の進化を遂げ、衛星画像を地図に投影するための位置合わせ、幾何補正と呼ばれる前処理の手間は大幅に減った。

また計算機資源も従来とは比べ物にならないほど発達し、JAXAとNTTデータは100万枚以上取得されたPRISM画像を膨大な時間をかけて全球処理を行い、世界最高解像度5mのデータをAW3Dとして作成し、2015年から販売（30m解像度は無料）している。こうして作成された地形データ（Digital Elevation Model, DEM）は、洪水氾濫解析、森林バイオマス量推定、地盤工学的な解析など、多種多様にわたる利用が始まっている。

狭い範囲であれば、近年普及が進んだUAVによる撮影画像からもStructure from Motion（SfM）という画像処理技術を使用して、このような立体画像を作成する事が容易に可能である。図11にマレーシアのオイルパーム林におけるUAV立体視画像を示した。作成された高さ情報と画像から得られるスペクトル情報から、樹木の成長量、健康状態、本数、場所などを3D GIS上に表現でき、森林管理や精密農業への利用が近年進みつつある。

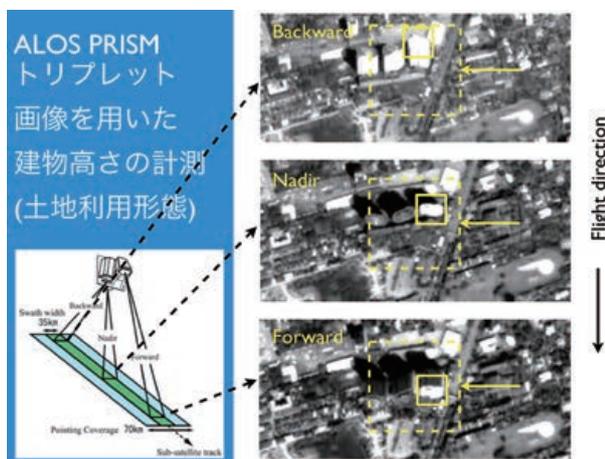


図10 ALOS/PRISMを用いた衛星からの立体撮影



図11 マレーシアのオイルパーム林におけるUAV立体視画像

3.3 合成開口レーダー(SAR)、ライダー (LiDAR)

合成開口レーダ (SAR) は、衛星が軌道を移動しながらマイクロ波を地表に照射し、同じ地点を複数回観測することにより、見かけ上大きなアンテナを持っていることと等しい画像を得る技術のことである。マイクロ波は、雲や雨を透過するため、曇っていても地表を観測することができる。また、センサからマイクロ波を能動的に発射し、その後方散乱を観測しているため、昼夜を問わず観測が可能である。また、SARは、後方散乱と共に、衛星から地表までの距離を示す位相を取得でき、2つの画像から干渉SAR (Interferometry SAR, InSAR) 解析を行うことで、地盤変動を計測することができる。

図12は、東日本大震災前後の、横浜市・根岸埠頭の地盤沈下をDInSAR解析で分析した結果である。画像はTerra SAR-Xの高分解能モードの5km四方の微小変動量を解析したもので、観測期間は2010年11月から2012年9月となっている。画像の赤丸が、経年微小変化の大きい箇所を抽出したもので、海岸付近に大きな変動が確認できる。SARは、洪水モニタリングや森林のモニタリングには以前からよく利用されてきたが、衛星の姿勢・軌道制御技術、レーダそのものの改良が大幅に進み、ダムの堤体、工場設備、道路舗装、空港設備など、より高い計測精度が求められるインフラヘルスマニタリングへの利用が脚光を浴びている。

衛星SAR画像には、Xバンド (3cm) , Cバンド (6cm) , Lバンド (24cm) の主に3つの波長分解能があり、Terra SAR-Xは波長分解能3cmのXバンドレーダである。波長分解能が高いほど高精度に地盤変動成分を検出できるが、波長分解能より大きい変動成分が検出された場合の解釈が難しくなること、波長分解能が相対的に高いX, Cバンドでは、雲の影響を受けやすくなることが知られている。

ライダー (Light Detection and Raging, LiDAR) とは、レーダー (RADAR) がマイクロ波を照射するのに対し、可視または近赤外のレーザー (Laser) パルス照射し、反射されるエネルギーの強さと時間を計測する技術のことである。図13にライダー (LiDAR) を用いた森林の形状計測の事例を示す。図13左に示すように、複数のパルスがあるときに、林床あるいは樹木に当たって跳ね返ってくるまでの時間差を距離に換算すると、図13右に示すような樹木の形状を把握することができる。2000年代以降、航空機に搭載されたセンサが開発されてきたが、費用が高額であることが問題であった。衛星に搭載されたものとしては、2002年から2008年まで運用されたIceSATがあり、南極やグリーンランドなどの雪氷高さの変化を計測する唯一の手段として、高い性能を発揮した。一方で、近年は、自動運転技術に必要な不可欠な技術であるため、自動車への搭載を目指した技術開発によってレーザー機器の値段が格段に下がり、地上の測機器として利用できる3次元

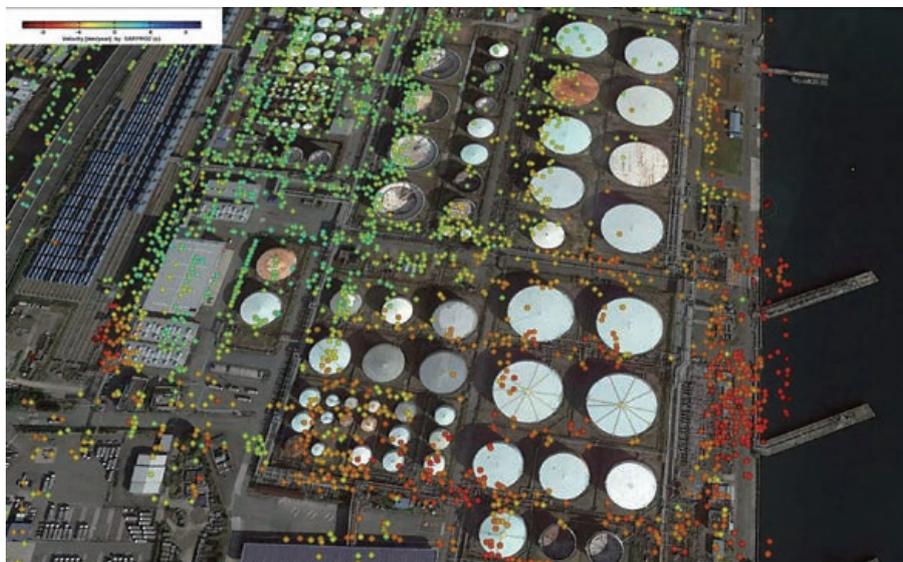


図12 合成開口レーダ (SAR) 用いた横浜市・根岸埠頭の地盤沈下DInSAR解析結果

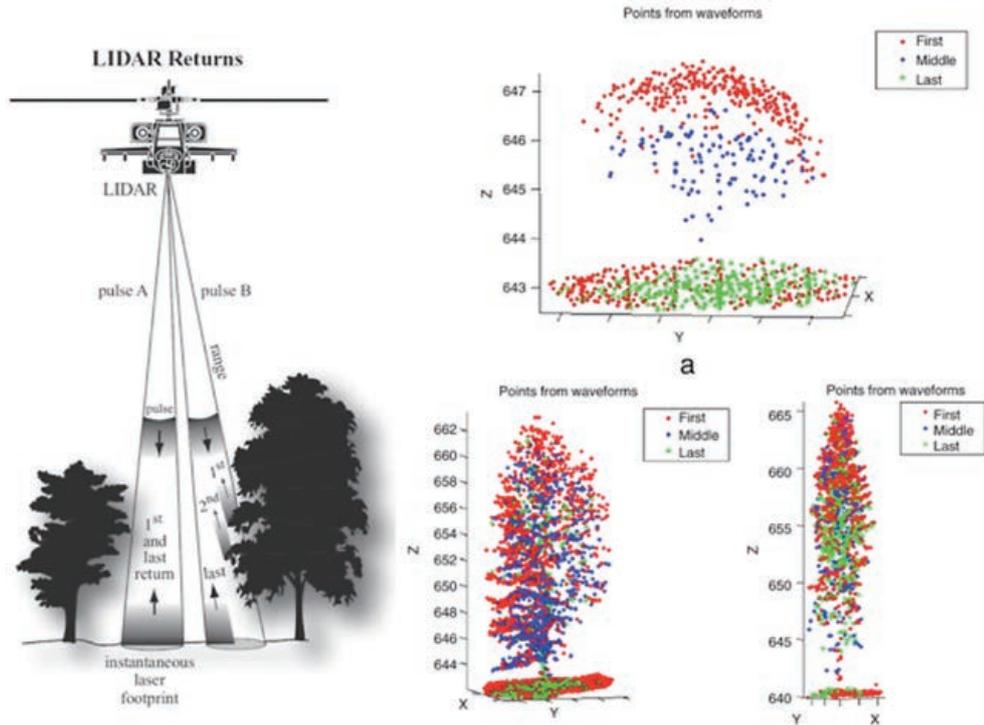


図13 ライダー (LiDAR) を用いた森林の形状計測

レーザー測量、UAVに搭載する機器なども市場に流通し始めた。今後も利用が広がると考えられる有望な技術である。

4. さいごに

本稿では、リモートセンシング技術について、どのような技術があるのか、どのような工夫があるのか、計測の原理を理解し、主に陸域のリモートセンシングについて、国内外での技術活用、研究開発事例を紹介した。リモートセンシング技術の内容により興味をもって頂くきっかけとなれば幸いである。

Profile

竹内 渉 (たけうち わたる)

- 1994年3月 石川県立七尾高等学校 理数科 卒業
- 1995年4月 東京大学教養学部 理科一類 入学
- 1999年3月 東京大学工学部 土木工学科 卒業
- 2001年3月 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻 修士課程修了 修士 (工学)
- 2004年3月 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻 博士課程修了 博士 (工学)
- 2004年4月-2005年3月 東京大学生産技術研究所 特任研究員
- 2005年4月-2006年12月 東京大学生産技術研究所 特任助手
- 2007年1月-2010年5月 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 専任講師
- 2007年1月-2007年2月 短期専門家 (リモートセンシング・GIS), 国際協力機構 (JICA), アジア工科大学院 (タイ王国)
- 2007年1月-2009年7月 客員講師, アジア工科大学院 (タイ王国)
- 2010年7月-2012年6月 日本学術振興会 (JSPS) バンコク研究連絡センター長 (兼務)
- 2010年6月-現在 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 准教授