

各国の地球観測動向シリーズ(第5回)

インドの地球観測活動の方向性 —持続可能な資源利用に貢献する 世界有数の地球観測衛星群—

辻野 照久

概要

インドの地球観測活動は、政府の宇宙庁とインド宇宙研究機関が主導しており、地球観測衛星の開発や運用、応用プログラムの開発などを行っている。インドの地球観測衛星はロシアを上回る質と量を有しており、地球観測画像に関しては低価格のメリットを生かして有力な供給国となっている。インド政府は地球観測画像データが国民生活にとって重要な情報であることに鑑み、2011年に利用や配布に関するデータポリシーを策定し、国営企業のアントリクス社が画像販売を行うこととなった。

インド政府は持続可能な農業・漁業の構築を目指しており、現場観測とリモートセンシングにより得られた地球観測データを活用して、機械化の導入による資源枯渇や乱伐・産業排水などによる環境悪化の防止に役立てている。特に漁業では持続可能な最大漁獲量を超えないように、操業可能な海域を漁業従事者に多言語で伝達するシステムを構築している。

我が国はインドに比べて農業・漁業など社会応用面で後れを取っているが、2016年打上げ予定の「第1期地球環境変動観測衛星(GCOM-C1)」により国際的な貢献を果たすことが期待されている。

キーワード：インド宇宙研究機関, リモートセンシング, 海色モニタ, クロロフィル濃度, 海洋汚染

1 はじめに

インドにおける農業や漁業は、機械化の導入による資源枯渇の懸念や乱伐・産業排水などによる環境悪化の影響を受けている。インド政府は持続可能な農業・漁業の構築を目指しており、現場観測とリモートセンシングにより得られたデータを活用した科学的な農業や漁業を行う戦略を立てている。農業では、気象予報や作物の生育状況の監視などで観測データが役立てられている。漁業では、海洋のクロロフィル（葉緑素）の濃度測定や沿岸の環境監視などで観測データが利用されている。

インドのリモートセンシングは、政府の宇宙庁(Department of Space: DOS)¹⁾とインド宇宙研究機関(Indian Space Research Organisation: ISRO)²⁾

が主導しており、地球観測衛星の開発や運用、応用プログラムの開発などを行っている。インドの地球観測衛星群は現時点でロシアを上回る質と量を有しており、地球観測画像に関しては低価格のメリットを生かして有力な画像供給国となっている。

インド政府は地球観測データが国民生活にとって重要な情報であることに鑑み、2011年に利用や配布に関するデータポリシーを策定し、国営企業のアントリクス社が画像販売を行うこととなった。

インドがリモートセンシング技術を活用してどのように社会的課題に対応しているのか、本稿では海洋での漁業における持続可能な資源利用の事例などからインドの地球観測活動の方向性を分析する。

2 インドの宇宙開発利用の概況

インドの最初の衛星は、1975年にソ連のロケットで打ち上げられた「アーリアバータ1号」である。以来2013年7月までに64機の衛星を軌道に投入している。このうち地球観測衛星は22機、静止気象衛星10機（一部は通信放送衛星を兼ねる）と約半数を占める。インド独自のロケット打上げはインド東南部の射場から1980年以来2013年11月までに40回行われている。静止衛星を国産ロケットで自国の射場から打ち上げた実績を有する国は、米国・ロシア・フランス・日本・中国・インドの6か国しかなく、インドは宇宙先進国の一つに数えられる。

2013年11月5日に打ち上げられた火星探査機「Mangalyaan」は2014年9月にアジア初の火星周回軌道投入を目指している。

3 地球観測関係の活動状況

3-1 5か年計画に基づく地球観測活動

インドの地球観測活動が本格的に開始されたのは、1988年に国産のインドリモートセンシング衛星（Indian Remote Sensing Satellite：IRS）の初号機「IRS-1A」が打ち上げられてからである。以来、「国家天然資源管理システム（NNRMS）」の枠組の下で民生用の地球観測が継続的に行われてきた。地球観測衛星の開発や地球観測応用システムの開発などの中長期的な地球観測活動の実施計画は5年単位で策定され、現在は2012年から始まった「第12次5か年計画」期間となっている。

3-2 地球観測予算

インドの宇宙予算は毎年政府が発表している当年度の予算書の中で「Space」という1項目に集約されている。2013年度（2013年4月1日～2014年3月31日）の宇宙予算は総額679億ルピー（約2,000億円）で、そのうち約2割が地球観測関連の予算である。最近5年間の宇宙予算とその中に含まれる地球観測関連の予算額を図表1に示す。

図表1 インドの宇宙予算（単位：百万ルピー）

5ヶ年計画期間	年度	当初予算	地球観測予算内訳
第11次	2009	49,590	10,410
	2010	57,780	11,553
	2011	66,260	11,001
第12次	2012	67,150	10,809
	2013	67,920	13,265

出典：2009年度から2013年度のインド政府予算書を基に科学技術動向研究センターにて作成

3-3 地球観測に関する組織

3-3-1 宇宙庁／インド宇宙研究機関

インドの宇宙開発利用活動の長期計画や予算は、宇宙庁（DOS）が策定する。インド宇宙研究機関（ISRO）はロケットや衛星の開発、各センターでの研究開発、製造部門などを含め職員数が18,560名にも達する世界有数の宇宙機関である。DOS長官とISRO総裁は同一人物が兼任している。ISRO内で地球観測に関する組織は、各種の衛星の設計・製造・試験などを行うISRO衛星センター（ISRO SATellite Center：ISAC）、ハイデラバード近郊に受信局を擁する国家リモートセンシングセンター（National Remote Sensing Center：NRSC）³⁾、東西南北および中央の5箇所の地域リモートセンシングセンター（Regional Remote Sensing Center：RRSC）、地理空間情報システム（GIS）と連携した地球観測応用の教育を行うインドリモートセンシング研究所（Indian Institute of Remote Sensing：IIRS）、衛星応用センター（Satellite Application Center：SAC）などがある。また宇宙庁の管轄機関の一つとして、北東衛星応用センター（North East SAC：NESAC）がある。

国際的な宇宙ビジネスの面でも、インドは積極的な活動を行っている。宇宙庁傘下の国営企業であるアントリクス社⁴⁾はISROが製造するロケットを用いた外国衛星の商業打上げ、外国から受注した衛星バスや衛星画像の販売などを行っている。インド衛星が取得した画像販売は同社の全売上げの約10%を占める。

3-3-2 地球観測活動の関連省庁

地球観測活動に関連している省庁としては、地球科学省（MoES）⁵⁾と傘下のインド気象局（IMD）⁶⁾

および国立海洋情報サービスセンター (INCOIS)⁷⁾、環境・森林省 (MoEF)⁸⁾、農業省 (MoA)、水資源省 (MoWR)、科学技術省 (MoST)、都市開発省 (MoUD) などがある。これらの省庁は必要により宇宙庁から地球観測画像の配信を受けるほか、独自の応用システムを開発して農業・林業・漁業従事者や科学者・技術者などの最終利用者に情報を提供している。

インドの地球観測関連組織の体制を図表2に示す。

3-4 地球観測情報の流れとデータポリシー

3-4-1 地球観測情報の流れ

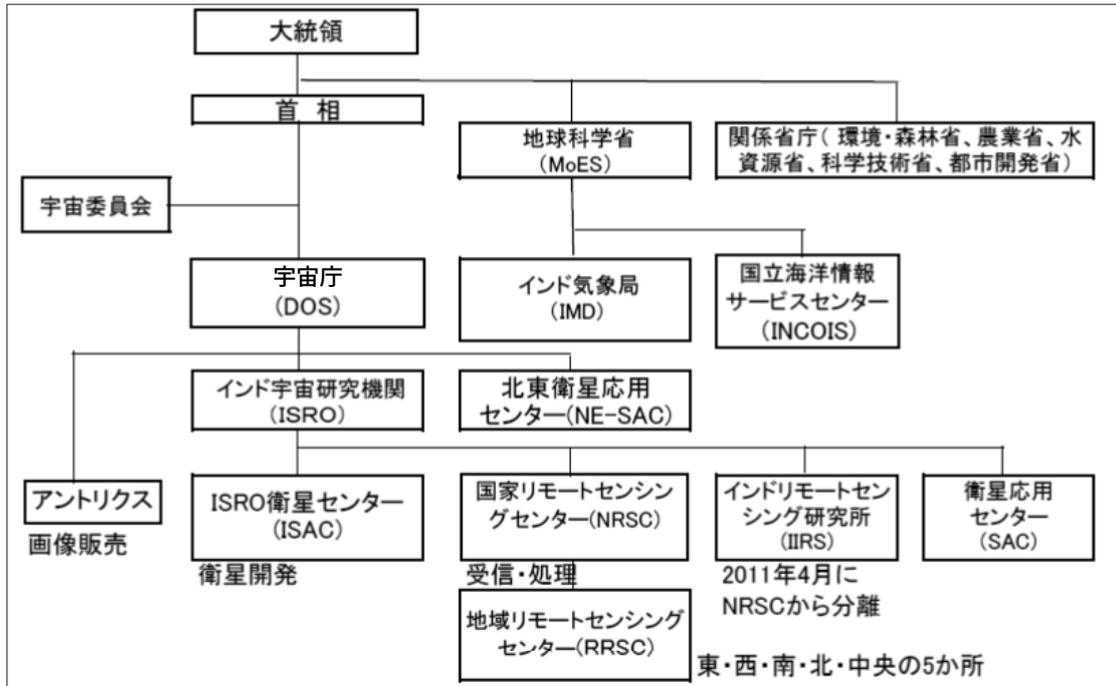
地球観測データは源泉データの取得からいくつかのプロセスを経て、最終ユーザの利用が可能となる。

インドにおける各組織役割分担の概念を図表3に示す。左側は情報の流れの「上流」、右側は「下流」と呼ばれる。インド気象局以外の省庁や研究機関は地球観測画像データを宇宙庁／インド宇宙研究機関から入手する。気象局は静止気象衛星「Kalpana-1」などを運用し、宇宙から見た雲画像などの気象データを取得している。

3-4-2 データポリシー

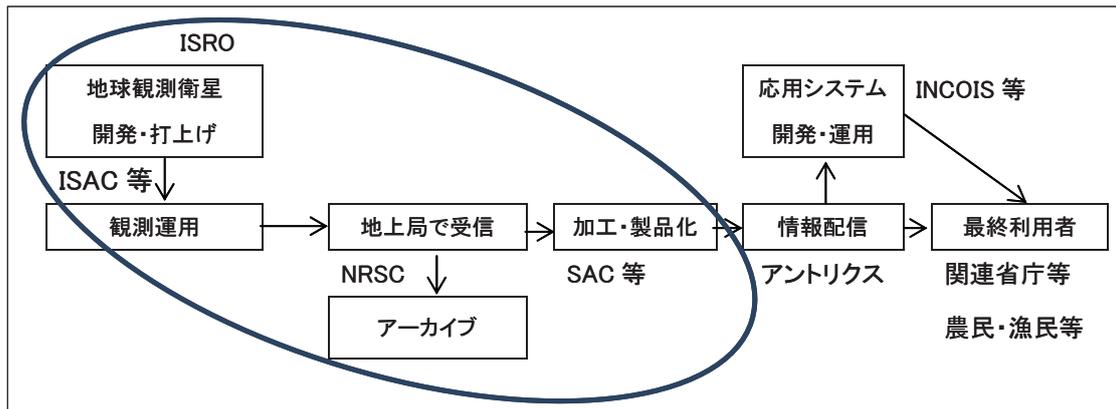
インドの地球観測政策は、2011年に制定されたリモートセンシングデータポリシー (RSDP-2011)⁹⁾において公式文書化されている。このデータポリシーは、政府内外の多くのユーザが、社会にとって有用なさまざまな活用を行うことを目的として定められた。インドが保有する地球観測衛星と外国保有の地球観測衛星の画像データを利用する上で、

図表2 インドの地球観測関連組織



出典：各種資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 地球観測衛星が取得した情報の流れ



出典：各種資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

所有権や配布権を持つ機関を定め、その機関が画像取得と配布を適切に管理できるようにしている。宇宙庁は保有衛星の画像データの唯一の所有者となる。国家安全保障や外交政策上必要な場合は、衛星画像取得およびデータ配布に制限をかける権限も保持している。また、データの配布に係る料金徴収に関する手続きを規定することもできる。

インド宇宙研究機関の内部組織である国家リモートセンシングセンター(NRSC)は、インド衛星および外国衛星の観測データを取得し、配布する権限を有する。また取得・販売記録のアーカイブの保管も行う。

国営企業のアントリクス社は、政府の政策の範囲内で政府に代わってユーザとの認可協定を結ぶことができ、インド国外でのインド保有観測データの申込みを受け付ける権限を有する。

分解能が1mより粗いデータはそのまま配布することができるが、分解能が1mよりも細かいデータに関しては、NRSCと他のユーザ間で、個々に販売/非公開協定が結ばれる。

なお、政府ユーザ(省庁、公的機関、独立機関、政府系研究開発機関、国立教育研究機関)は、認可なしにデータを取得できる。また、開発活動の支援のために少なくとも1つの政府機関に推薦された民間機関も認可なしにデータを取得できる。その他のユーザは、機関間高分解能画像認可委員会(High Resolution Image Clearance Committee : HRC)による認可後にデータを取得できることになっている。

3-5 地球観測衛星

3-5-1 運用中の地球観測衛星

現在運用中のインドの民生用地球観測衛星は図表4に示すように13機ある。インドの運用中の民生用地球観測衛星・気象衛星数は、ロシアの2倍以上である。衛星の製造はすべてISROが中心になり、イスラエル、フランス、イタリアなどが観測機器を提供する形で協力している。観測機器の分解能などの性能や種類の多様さもロシアや日本を上回る。気象衛星は「Kalpana-1」が主力で、最新の「Insat-3D」は2013年8月22日に初画像を送信し、その後も軌道上試験が行われている。

3-5-2 新たな地球観測衛星の開発計画

インドの地球観測衛星はつねに数機が並行して開発されている。継続的に運用すべき衛星の後継機や新規の衛星がそれぞれISROにおいて開発が進んでいる。現在は資源衛星「Resourcesat-2A」、地図作成衛星「Cartosat-3」、海洋観測衛星「Oceansat-3」、レーダ観測衛星「RISAT-1A」、静止地球観測衛星「GISAT」および大気・海洋観測衛星「Scattsat」などの開発が行われている。「GISAT」は2016年度打上げを予定しており、インド上空の静止軌道から分解能60mで地上を監視し、森林火災や洪水などの災害が発生した場合、発生後5分以内に発見することを目標にしており、静止気象衛星とは役割が異なる。

図表4 インドの主要な地球観測衛星の運用状況(2013年10月1日現在)

分野	衛星シリーズ名	初号機打上げ年月	センサ	空間分解能	衛星・機器製造機関	打上げ数	現在運用中の衛星数
陸域	IRS-P3 以前	1980年7月	光学	25m-100m	ISRO	10	0
	Resourcesat	2003年10月	光学	5.8m	ISRO	2	1
	Cartosat	2005年5月	光学	1m	ISRO	4	4
	RISAT-2	2009年4月	SAR*	3-8m	ISRO/IAI*	1	1
	RISAT-1	2012年4月	SAR	3-6m	ISRO	1	1
海洋	Oceansat	1999年5月	光学	200-300m	ISRO/ASI*	2	1
	SARAL	2013年2月	高度計	-	ISRO/CNES*	1	1
大気	Megha-Tropiques	2011年10月	光学	40km	ISRO/CNES	1	1
気象	Insat-1B~3A	1983年8月	光学	1km-8km	ISRO	8	1
	Kalpana-1	2002年9月	光学	1km-8km	ISRO	1	1
	Insat-3D	2013年7月	光学	1km-4km	ISRO	1	1
計						32	13

*SAR=合成開口レーダ、IAI=イスラエル・エアクラフト・インダストリーズ社、ASI=イタリア宇宙機関、CNES=フランス国立宇宙研究センター

出典：Union of Concerned Scientistsの衛星DBなどを基に科学技術動向研究センターにて作成

4 地球観測データの利用事例

4-1 漁場探査のためのクロロフィル濃度観測

海洋観測衛星「Oceansat-2」に搭載された海色モニタ（Ocean Color Monitor：OCM）は、海洋表面のクロロフィル濃度の測定に利用されている。クロロフィルを含む植物プランクトン（微細藻類）が多い場所は魚類が集まりやすく、海色が緑色に近くなる¹⁰⁾。インドでは国立海洋情報サービスセンター（INCOIS）がインドの「第11次5ヶ年計画」期間（2007年度～2011年度）中に実施した「ChloroGIN（Chlorophyll Global Integrated Network）」¹¹⁾プログラムにおいて、海面のクロロフィル濃度に関するリアルタイムに近い衛星データを収集しウェブによる配信を行った。OCMのデータと並んで米国の中分解能撮像分光放射計「MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）」のデータも利用された。これにより沿岸海域に設置された時系列測定局における現場観測の補完・補充がより高い頻度で可能になった。

OCMのデータから光学活性物質（Optically Active Substance：OAS）のバイオ光学特性データベースが作成され、検索アルゴリズム「OC3M」¹²⁾が開発された。INCOISの参加機関は海洋研究所（ゴア州）、ゴア大学、インド熱帯気象研究所、マンガロール大学、水産技術中央研究所（コーチン）、アンナマライ大学高度海洋生物学研究センター、アンディラ大学、ベランブル大学などである。

また、このプログラムにより有害藻類ブルーム（Harmful Algal Bloom：HAB）の識別などの成果も得られた。このプログラムを通じて参加機関の研究能力の強化が図られたことも成果の一つである。さらに漁業だけでなく、油流出、生態系の研究などのアプリケーションにも利用された。

4-2 水産資源枯渇防止と海洋環境監視

インド政府は地球観測データを活用して持続可能な漁業を行うための具体的な方策として、INCOISの「ChloroGIN」プログラムで構築された「PFZ（Potential Fishing Zone）助言システム」すなわち海洋の物理的・化学的な分析により「漁獲の可能性のある海域（PFZ）」の助言を行うシステ

ムを運用し、12の州や島嶼の漁業従事者を対象に、漁獲の生産性を高めるために多言語でPFZに関する助言を行う一方で、機械化された漁船の乱獲による海洋資源の枯渇を防止するため「持続可能な最大漁獲量（Maximum Sustainable Yield：MSY）」を超えない範囲で漁業を行うことを求めている。

また、海から離れた内陸部の工場からの汚染物質排出や河川洪水により引き起こされる海洋汚染の監視や対策措置を行うことも地球観測データ活用の課題の一つである。ISROの国家リモートセンシングセンター（NRSC）は、インドのリモートセンシング利用の黎明期である1989年頃に、インド南部のケララ州にあるイドゥッキダムの環境影響調査を行い、リモートセンシングデータによる解析で土壌が深刻なまでに浸食を受けているという結果を得た。その要因はダムの近辺で行われた森林の乱伐である¹³⁾。この問題によってダムの貯水量が低減し、水力発電所の寿命が短くなり、下流では頻繁な洪水が発生した。さらにその結果は海にまで影響が及び、漁業が成り立たなくなる懸念もあった。また、内陸部にある工場は水銀などを含む汚染物質を川に排出しており、その結果河口から沿岸にかけて海洋汚染が進行している。インドではリモートセンシング技術を活用して、情報提供や規制を行って、持続可能な農業・漁業を構築することを目指している。

5 我が国との対比

インドに比べて、我が国の地球観測が遅れている課題点は以下に示すように3つある。

- ① 我が国は観測データを社会へ応用する研究を行っているが、衛星の継続性が保証されていないこともあって研究成果を水平展開する力が不足している。我が国は国土が狭く、地上インフラがある程度整っているため、衛星利用の必要性が感じられないことも一因である。インドは地上インフラが貧弱である反面、効率的な衛星利用を社会応用に組み込んでいるため、我が国よりも衛星の社会貢献度が高い。
- ② 我が国はデータポリシーがケースバイケースであると外国から指摘されており、インドのような法的拘束力のある文書化がなされていない。衛星画像をビジネスに活用したい企業は政府に対してデータポリシーの制定を求めている。
- ③ 我が国は（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）の地球観測衛星、内閣官房の情報収集衛星お

よび国土交通省の気象衛星で合計8機の地球観測衛星を運用しているが、インドの地球観測衛星群に対して数が少なく、海洋観測や資源探査などの機能が不足している。

現時点で海洋観測衛星を保有していない我が国は、米国の地球観測衛星「Terra」や「Aqua」に搭載された「MODIS」の海色データを利用して大学などで海洋観測研究を行っている。JAXAが2016年に打上げを予定している「第1期地球環境変動観測衛星(GCOM-C1)」は、多波長光学イメージャ「SGLI」(Second generation Global Imager)を搭載し、偏光機能を利用して陸域・海域の色を同一のセンサーで観測できる。「SGLI」は米国の「MODIS」の後継として性能向上を目指している。例えばクロロフィルaの濃度観測の分解能は沿岸で250m、外洋で1kmである。

6 おわりに

インドの地球観測活動の特徴は、先進国との技術協力を通じて自国の宇宙インフラのレベルを高め、豊富な人材を活用して経済レベルに見合った社会応用を実現していることである。インドでは、農業や漁業の従事者が他の産業よりも圧倒的に多く、地球観測データを活用して農業や漁業を持続可能でかつ効率的に行う必要がある。社会応用システムの水平展開に力を入れているインドの地球観測活動は、我が国の農業・漁業における衛星利用の在り方を考える上で参考になる。

参考文献

- 1) 宇宙庁のウェブサイト：<http://dos.gov.in/>
- 2) インド宇宙研究機関のウェブサイト：<http://www.isro.org/>
- 3) 国家リモートセンシングセンターのウェブサイト：<http://www.nrsc.gov.in/>
- 4) アントリクス社のウェブサイト：<http://www.antrix.gov.in/>
- 5) 地球科学省 (Ministry of Earth Science : MoES) のウェブサイト：<http://dod.nic.in/>
- 6) インド気象局 (India Meteorological Department : IMD) のウェブサイト：<http://www.imd.gov.in/>
- 7) 国立海洋情報サービスセンター (Indian National Center of Ocean Information Service : INCOIS) のウェブサイト：
<http://www.incois.gov.in/>
- 8) 環境森林省 (Ministry of Environment and Forestry : MoEF) のウェブサイト：<http://envfor.nic.in/>
- 9) インドのデータポリシー (RSDP-2011)：<http://www.isro.org/news/pdf/RSDP-2011.pdf>
- 10) 微細藻類 (マイクロアルジェ) が開く未来、鷲見芳彦、科学技術動向2009年9月号
- 11) ChloroGINのウェブサイト：<http://www.incois.gov.in/Incois/ChloroGIN.jsp>
- 12) Detection and Monitoring of HAB:Remote Sensing Component & in situ efforts :
http://www.incois.gov.in/Incois/Detection_and_Monitoring_of_HAB-Phase-I.pdf
- 13) Fishing for Resources: Indian Fisheries in Danger, Kocherry Thomas 他, 2010 :
<http://www.culturalsurvival.org/publications/cultural-survival-quarterly/india/fishing-resources-indian-fisheries-danger>

執筆者プロフィール



辻野 照久

科学技術動向研究センター 客員研究官

<http://members.jcom.home.ne.jp/ttsujino/space/sub03.htm>

専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理、旧宇宙開発事業団で世界の宇宙開発動向調査などに従事。現在は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 調査国際部調査分析課特任担当役、科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター特任フェローも兼ねる。趣味は全世界の切手収集。インド切手は1855年のイギリス東インド会社発行切手以降2,500種類以上を保有。