

人工衛星から見る私たちの生存圏

塩谷 雅人*

1. はじめに

人工衛星からの観測は、「神の目」ともいえる俯瞰的な視点で、大気圏、水圏、地圏、生態圏など人間生活に深く関わる領域(生存圏)に生起する現象を把握するための必須の手段となっている。我々が衛星からの地球観測という革命的な視点を持つようになって半世紀近くが経過しようとしており、これまでに 5000 を超える人工衛星が打ち上げられた。現在、われわれの身の回りには、身近なところでは気象衛星からの雲画像や、南極上空のオゾン分布を通してみるオゾンホールなど、いたるところに衛星からの観測情報があふれている。本講演では、人工衛星からの観測原理を簡単に紹介し、いくつかの観測事例にもとづきながら、来るべき将来に対する学術的な評価と理解を得るための研究基盤としての衛星からの観測について考える。

2. 衛星観測の原理

地球に関わるさまざまな情報を観測する衛星は、基本的には地球(あるいはその大気)からやってくる光や電波(電磁波)を測定する。たとえば、大気中の微量気体(水蒸気やオゾンなど)は特定の波長をもった電磁波を吸収あるいは射出しており、その強度を測定することによって存在量を求めることができる。人間には可視光しか見えないわけだが、さまざまな原理にもとづくセンサーを用いることによって特定の波長をもった電磁波の観測が可能になり、そこにはわれわれの眼に映るものとは異なる地球の姿が浮かび上がってくる。以下の図 1 は、気象衛星ひまわりから同じ時刻に 2 種類のカメラで見た地球の姿である。雲のパターンだけを見ると両者とも似ているが、よく観察すると異なるところがいくつか見つかる。(図の下の方は、どちらも欠けている。) どのような違いに気がつくだろうか？

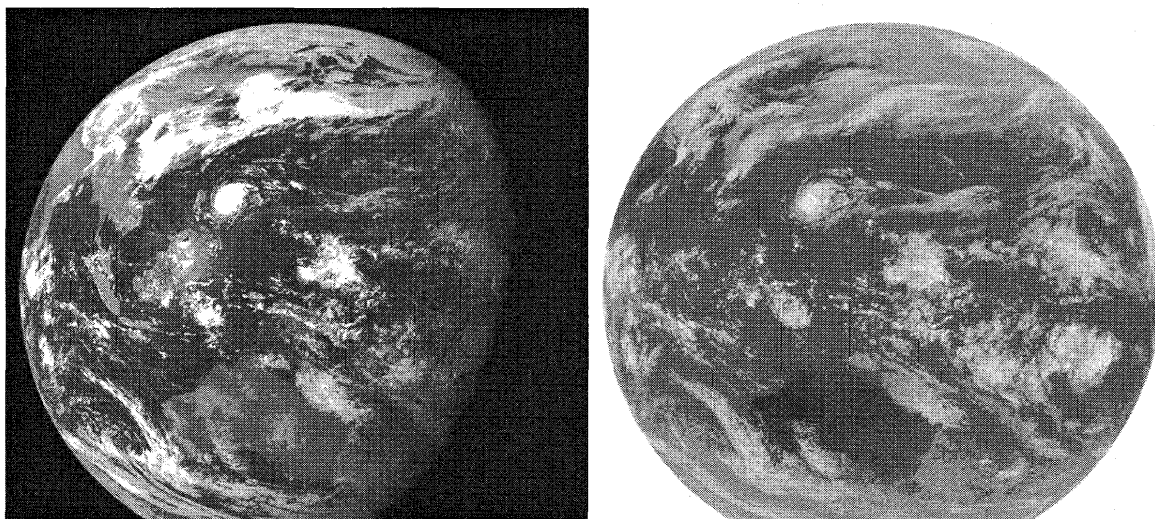


図 1 : 気象衛星ひまわりの画像(左が可視画像, 右が赤外画像)

* 京都大学生存圏研究所大気圏環境情報分野

よく見ると右側の画像は地球がまん丸く映っているのに対して、左側の画像は右の方が欠けて見える。また、単純なことではあるが、右の画像の背景は白いのに対して、左の背景は黒くなっている。さらに、たとえばオーストラリア大陸(図の真ん中より下)を見ると、右は黒っぽく写っているのに対して、左は白っぽく写っている(海と陸の白黒度合いが逆になっている)。タネを明かすと、左側はわれわれがふつうに白黒写真で撮る地球の映像で可視画像と呼ばれる。いっぽう右側は赤外線領域の波長に感度を持つカメラで撮った地球の映像で赤外画像と呼ばれるものである。

可視画像はまさにわれわれの眼で見る地球が写っていて、衛星から見ると満ち欠けがあり夜の部分は黒くなっている。また、背景も黒い。雲は白く輝き、陸地は白っぽく、海は黒っぽく見える。いっぽう赤外画像は、可視画像で夜のところも含めて地球が丸く写っている。また背景は白い。ここにはちょっとしたトリックがあって、実は雲のパターンを可視画像と似せて見せるために、赤外線の強度と白黒の表現が可視画像とは違って逆になっている。つまり赤外線の強いところが黒く、弱いところが白くなっている。赤外線は、たとえば人間の体温ほどのものからも出ていて、物体の温度が高いほどたくさん射出される。つまり、夜の部分の地球もそれなりの温度ではあるので赤外線が射出されている。白黒が赤外線の強度と逆であることを念頭に置けば、背景は白く、暖かい陸地が黒っぽく、それよりも冷たい海が白っぽく、さらに夜の部分も見えることは理解できるであろう。それではなぜ雲が白い(赤外線の強度が弱い)のか？雲頂の気温はおおよそその高さのまわりの気温と同じくらいなので、背の高い雲ほど雲頂の気温は低い。つまり、そこから出てくる赤外線の量は、背の低い雲あるいは地表から出てくる赤外線の量と比べると少なくなる。結果的に赤外線の強度と白黒を反転させると、雲のあるところが(冷たくて)白く、雲のないところは地表付近の温度情報が見えるために(暖かくて)黒くなる。

そもそも、「昨夜からの雲の動きは…」とお天気番組ではやっているけど、夜なのにどうして雲が見えるの？という種明かしが、それは赤外線で観測しているからということになる。このように、さまざまな波長の電磁波の強度を観測することで、それまで見えなかった情報が見えてくるわけである。大気の観測では、紫外線や赤外線、マイクロ波などさまざまな波長帯の電磁波を観測することによって、大気中の微量成分(オゾンや水蒸気、メタンなど)の時間・空間分布が求められている。

3. 衛星観測の長所と短所ーオゾンホールを例として

ひまわりの画像に次いで有名かと思われるのが、南極オゾンホールの衛星観測(オゾン全量分布)であろう。いまや、中学や高校の理科の教科書だけでなく、社会の教科書にまで取り上げられている。ここでは、オゾンホールの発見に関連したエピソードを通して、衛星観測の長所と短所について考えてみたい。

オゾンホールを最初に発見したのは、1982年から1983年にかけて南極昭和基地に越冬し自身がオゾンの観測をおこなった日本人研究者の忠鉢氏である。彼は、1982年の9月から10月にかけてのオゾン全量(ある断面積をもった大気柱の中のオゾン量を鉛直方向に足し合わせたようなもの)が、それまでの観測値にくらべて極端に低いことに気がついた。帰国後その結果を発表したものの、科学者共通の認識になるまでには少し時間がかかり、同じ南極域で観測を続けてきたイギリスのグループによる有力雑誌への発表によってこのオゾンの減少傾向がセンセーショナルに取り上げられるところとなった。オゾンホールと現在では称されるが、この段階では定点での観測からオゾンが急激な減少傾向にあることを示しただけであって、オゾンの少ない領域がぽっかりと穴の開いたようになっているという認識にまでは達していなかったと思われる。

さてそれでは、衛星観測は何をしていたのか？実は1970年代の後半から衛星によるオゾンの観測は継続的におこなわれていた。しかし、データ処理の段階であまりに低いオゾン濃度は有効な値ではないとしてはじくようになっていたらしい。そのため最初の発見から2年ほど遅れて、衛星からのオゾンホールの報告がなされた。一地点で観測されたオゾンの減少が、じつは南極大陸規模で起こって

いたことが明らかになって、大きな社会問題にもなったのはみなさんもお存知のところかと思う。

図2を見ていただきたい。これは、南半球(南緯30度よりも極側)10月平均のオゾン分布を1979年から1985年まで示したものである。南極上空を中心として、南極大陸の規模をもった非常に濃度の低いオゾンの領域が観測され、さらにその値が年々減少し、1979年には270という等値線値を読めるところが、1985年には180にまでなっている。オゾンはその後も減少を続けて1990年ごろには1970年代の約3分の1近くにまで減少した。現在その減少傾向は下げ止まっているようにも見えるが、その原因物質であるフロン(の一種)の利用制限を国際的な協定のもとでおこなったにも関わらず、現在もなおオゾン量は以前のレベルからは遠く低い値の状態にある。

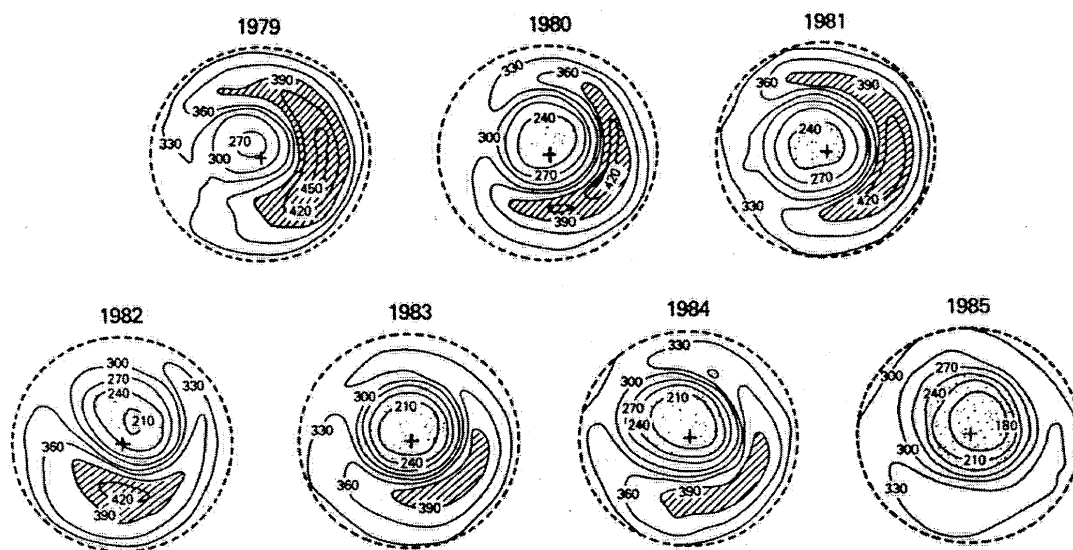


図2：人工衛星(TOMS)からの南半球域10月平均オゾン全量の観測
(Stolarski など, 1986)

その空間的な広がりを見せつけられると、この現象の持つ意味合いが私たちにも直接的に伝わってくるように感じられる。衛星観測から得られるこのようなインパクトのある描像があったからこそ、オゾンホールと命名されたのであろう。このオゾンホールの例のように、グローバルな視点を持って現象を把握できることこそが、まさに衛星観測の最大の長所であるといえる。しかしいっぽうで、最初の発見が実は定点での地道な観測であったことは、衛星があまりに多量のデータを生成するがゆえに、じっくりとした考察を通してそこから浮かび上がる現象を見つめる視点にややもすると欠けてしまうという短所をあらわしている。ただしこれは衛星データの責任なのではなくて、それを見つめるわれわれの側に問題があるといえるだろう。大量の情報に埋もれることなく俯瞰的かつ総合的な視点を持ちながらそこから浮かび上がる物事の本質を見抜く作業と、いっぽうで少ない情報量の中でも想像力を膨らませる作業とが、それぞれどちらも重要であることをいまさらながらに認識させられるエピソードであるといえる。

4. 地球を俯瞰する衛星観測

衛星観測は大気圏のみならず、水圏、地圏、生態圏などわれわれの生活に関わるさまざまな領域における広域的な情報を提供してくれる。以下では、先に見た大気圏におけるオゾンホールの例に加えて、水圏、生態圏に関連した例を2つほど見てみたい。

海は地球上の表面積の約7割を占め、大気との熱の交換を通して地球の熱収支に大きな影響を及ぼ

しており(また逆に大気は海洋の流れに対しても影響を及ぼしている), 海洋の広域にわたる観測はわれわれ地球の気候変動を考える上で重要な情報を提供する. 衛星からの観測としては, ほとんどは海面付近の情報となるが, 簡単などころでは海面水温の情報を得ることができる. 図3には衛星から観測された今年5月中旬の日本の太平洋側における海面水温の分布を示している(白っぽいところの温度は低く, 黒っぽいところの温度は高い). 遠州灘沖に南から流れ込んだ暖水塊が大きく蛇行している様子を見ることができる. いわゆる黒潮の大蛇行とよばれる現象である.

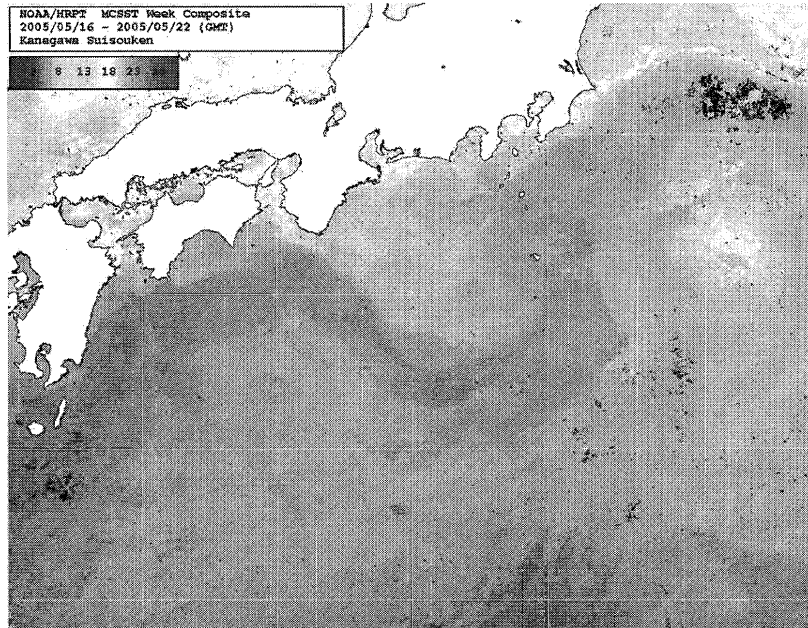


図3: 日本の太平洋側における海面水温分布(黒っぽく見えるところの水温が高い)
(<http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/noaa/noaa.asp>)

このほかに, 衛星から海面の高度を正確に求め, さらにそれにもとづいて表層の流れが推定されたり, 植物プランクトンの色素であるクロロフィル濃度の分布などが求められたりしている. 水温, 流れ, プランクトンに関するこれらの情報は魚の生息域と密接な関係にあるため, 漁業資源探査の観点からも広く活用されている.

衛星観測は生態圏に関してもさまざまな情報を提供してくれる. 植生の有無・活動性をあらわす指標として有名なものが正規化植生指標(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)である. これは, 植物の緑葉が青領域と赤領域の波長(R)を吸収し, 近赤外線領域(IR)の波長を強く反射する性質を利用したもので, $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ のように求められる. この指数を広域で観測することによって, 季節とともに変化する植生の活動性を観察することができる. さらに植生指数の年々変動から, 雨が多く緑の豊かであった年や, 逆に雨が少なく旱魃に見舞われ緑の少なかった年の様子なども全球規模で把握することができる.

図4は1984年8月のアフリカ域における植生指数の平年値(長期間の平均値)からの偏差を描いたものである. カラーの原図を白黒にしたために少し分かりにくい, サヘル(サハラ砂漠の南端)から東アフリカにかけて植生指数が平年に比べ非常に低くなっている(黒っぽく見える)のが分かるかと思う. これはこの年その領域において雨が少なく, 緑も少なかったことをあらわしている. 実際のところ, この大旱魃によって飢饉が訪れ70万人もの死者が出たといわれている.

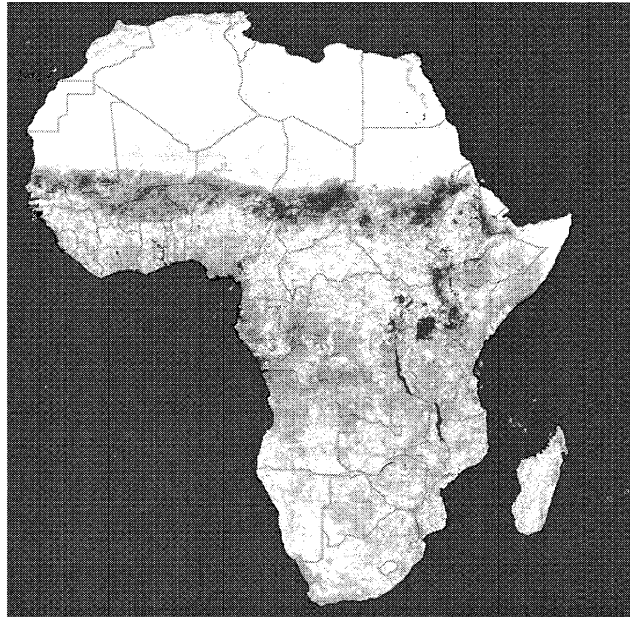


図 4 : 1984 年アフリカ域における植生指数の平年からの偏差
(<http://earthobservatory.nasa.gov/>より)

これらの例は衛星から得られる情報のほんの一端であるが、衛星からのオゾンホール観測がその問題に対してわれわれの注意をひきつけたときと同じように、それぞれがもつ圧倒的な情報量を通してわれわれの地球に起こっている現象のすさまじさや重要さを認識させてくれる。

5. おわりに

衛星からの観測によって、我々を取り巻く環境とその変化はさまざまな観点から明らかにされつつあるが、そこから得られる大量の情報の理解にはおのずと総合的、大局的な視点が要求される。これは、ちょうど地球環境科学に関わる研究(あるいは生存圏科学に関わる研究)に要求される視点と共通する。すなわち、個別の学問領域にとどまることなく分野横断的で学際的な観点が必要とされる状況に似ている。ただし、圧倒的な情報を提供する衛星観測といえども万能ではない。精度・分解能といった点で地上からの定点観測や航空機観測などに及ばない場合も多い。少ない情報量の中で想像力を膨らませる作業と、大量の情報から俯瞰的に物事の本質を見極める作業を相補的に組み合わせることが重要である。こういった作業を通じ、私たちを取り巻く環境の変化を把握しそのメカニズムを解明することによって、この地球を将来にわたってどのように保全し治療してゆくべきかという問題に対する科学的な指針が得られるのである。

参考文献

- 1) Stolarski, R. S., Krueger, A. J., Schoeberl, M. R., McPeters, R. D., Newman, P. A., and Albert, J. C.: Nimbus 7 SBUV/TOMS measurements of the springtime Antarctic ozone hole, *Nature*, p. 811, 1986.