

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文

リモートセンシングと土木技術

REMOTE SENSING IN CIVIL ENGINEERING

村井俊治

Shunji MURAI

工博 アジア工科大学 (AIT) 教授

(Division of Computer Science)
(G.P.O Box 2754
Bangkok 10501, Thailand)

Keywords : remote sensing, satellite data, the Earth planning

はじめに

リモートセンシングは、直接触れずに地表面あるいは対象物面の電磁波分光特性を測定する技術である。多くは航空機あるいは人工衛星に搭載されたセンサーから、地表面あるいは水面を測定するのに応用されているが、トンネル内やボーリング孔内など、いわゆる産業リモートセンシングの分野でも応用可能である。

リモートセンシング技術は、他の方法では得られない情報が得られる特長があるが、一方当然限界もある。したがってリモートセンシングを単独で利用する場合の便益より、地理情報システム (Geographic Information System : GIS) や統計資料等と組合せて利用すると多くの有益な情報が得られることが報告されている。

リモートセンシングが宇宙から本格的に利用されてから 20 年の歴史がある。種々のセンサーから異なる時期の異なる解像力、異なる波長帯で地球の観測が行われてきた。これらの衛星画像を多時、多次、多元的に融合 (data fusion) させることが、より多くの情報を得る累積効果を期待させる。

地球規模での土地利用計画 (本稿では地球計画と新たに呼ぶことにする)、衛星画像を利用した気象水文学、大規模な災害監視、衛星海洋学およびボーリング孔内、リモートセンシングによる岩盤工学などは、土木工学の新しい発展を示唆している。

残念なことに、わが国の教育界においては、リモートセンシングを組織化する試みがなされていない。個々の教官の興味と熱意のみで、異なる学部、および学科で教育、研究が行われている。土木工学においても、特別に講座や部門があるわけではない。土木工学の中にある測量学が旧態な技能を教えていることを反省すると、リモートセンシングを含めて、地球観測工学 (仮称) へと

発展させることが適切と考える。

本稿は、リモートセンシングの動向、リモートセンシングの技術的課題をのべた後、土木工学とリモートセンシングとの係わり、地球環境時代の土木工学の新しい展開について著者の考えをのべ、最後に土木教育におけるリモートセンシングの取組みについて提言をしたい。

1. リモートセンシングの動向

リモートセンシング、とりわけ衛星リモートセンシングは、一言でいえば多様化、多機能化、多目的化しているといえる。

最近の動向を列挙すると以下のとおりである。

- (1) ますます多くの国で、多くの地球観測衛星計画が進められている (表—1 参照)。
- (2) ますます地上解像力、スペクトル分解能が高いセンサーの開発が進められている。
- (3) ますます地球規模の現象を監視するための衛星およびセンサーが計画されている。
- (4) ますます国際協力と国際的ネットワーク化が進められている。

まず (1) の点では、長寿命 (10~20 年) 型の極軌道衛星プラットフォームが将来 (20 世紀末) 打上げら予定されている。米国とロシアの主導で行われた地球観測衛星は、今やフランス、日本、インド、中国、欧米宇宙機構 (ESA)、ドイツ等が独自に打上げており、将来カナダやブラジルなど他の国も参入する勢いである。一方 LANDSAT や SPOT などの衛星受信局は一部の地域を除いて殆ど全地球をカバーできるほど多くの国に建設されている。

先進工業国においては、衛星技術、センサー技術、送受信伝送技術が先端科学技術として位置づけられており、一方途上国では天然資源および環境の監視あるいは

表一 地球観測衛星計画

(1992年現在)

	~1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
日本	●GMS ●ETS-III		●EXOC-C			●MOS-1			●MOS-1b	●JERS-1					◎ADEOS	○ADEOS-II						
アメリカ	●GMS-2		●GMS-3					●GMS-4					◎GMS-5			◎TRMM-1						
	●LANDSAT-1 ●GOES-3		●LANDSAT-5									◎LANDSAT-6				◎TRMM-2	○LANDSAT-7					
	●LANDSAT-2 ●HCMM		●GEOSAT-1								●UARS	◎SeaStar				◎EOS-AM	○EOS-PM					
	●LANDSAT-3 ●SEASAT-1		●ERBS													◎EOS-AM	○EOS-PM					
	●LANDSAT-4 ●NIMBUS-7																○ATT/PL					
	●MAGSAT																					
	●SMS-1 ●GOES-4	●NOAA-8			●NOAA-10	●NOAA-11			●NOAA-12			○NOAA-J			○NOAA-L						○NOAA-FF	
	●SMS-2 ●GOES-5		●NOAA-9							◎NOAA-I	○NOAA-K					○NOAA-M						
	●GOES-1 ●TIROS-N	●GOES-6				●GOES-7				◎GOES-I						○GOES-K						
	●GOES-2 ●NOAA-6									◎GOES-J						○GOES-L					○GOES-M	
	●GOES-3 ●NOAA-7																					
	●OSTA-1(STS-II)		●OSTA-3(STS-17)								◎TOPEX	◎SRL-1	◎SRL-2	◎SRL-3								
フランス					●SPOT-1				●SPOT-2			◎SPOT-3			◎SPOT-4							
										◎Poseidon		○MAGNOLIA	○GLOBSAT	○BEST								
E S A	●METEOSAT-1						●METEOSAT-3		●METEOSAT-5			◎ERS-2		○ARISTOTELES			○POEM				○EPOP-NI	
	●METEOSAT-2											◎METEOSAT-6	○MSG-1	○MSG-2								
		●FSLP(STS-9)						●METEOSAT-4														
ドイツ												◎SRL-1	◎SRL-2	◎SRL-3								
		●MOMS-01(STS-7)										◎Spacelab-D2										
		●MOMS-02(STS-11)																				
インド	●BHASKARA-1					●IRS-1A			◎IRS-1B	◎IRS-1C												
	●BHASKARA-2								●INSAT-1D	◎INSAT-2TS1												
	●INSAT-1A		●INSAT-1B			●INSAT-1C							◎INSAT-2TS2									
中国							●FY-1					◎CBERS-1	◎CBERS-2									
ブラジル												◎CBERS-1	◎CBERS-2									
イタリア												◎SRL-1	◎SRL-2	◎SRL-3								
カナダ													◎RADARSAT									

●：打ち上げ済み ◎：開発中 ○：計画中または検討中

リモートセンシングと土木技術/村井

管理に不可欠な技術として受け入れられている。

(2) の点では、地上解像力はフランスの SPOT が 10 m が最も良いが、1996 年予定の日本の ADEOS は 8 m であるし、インドは 6 m、ドイツは 4.5 m と高分解能のセンサーを企画している。一方、ステレオ視機能を付加して地形の 3 次元形状を測定する試みが、SPOT から始められたが、日本の ADEOS の AVNIR、インドの IRS-IC、ドイツの MOMS-02 でステレオセンサーが計画されている。5 万分の 1 地形図を作るには、6 m の地上解像力が必要といわれているので、ほぼその水準に達しつつある。

一方スペクトル分解能は、64 チャネル、128 チャネル、256 チャネルと数多くの波長帯を有するイメージングスペクトルメータの技術開発が米国、ドイツ、中国等で進められ、鉱物資源探査、海上調査、環境監視等へ利用する試みが企画されている。また、最近実験が再開された、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : SAR) は雲の有無にかかわらず観測できることから、抽出できる情報の性質の研究に多くの期待が集められている。

(3) の点は、グローバルな視点で衛星リモートセンシングを利用しようとするもので、他の方法では不可能なことから多くの期待が寄せられている。ニンバス (NIMBUS) やノア (NOAA) の周回衛星は解像力は 1 km あるいは 10 km と低いものの、観測幅が 3,000 km と広いので、地球全体をカバーする情報を抽出するのに効果的であった。ニンバスの沿岸海上色計 (Coastal Zone Color System : CZCS) および改良型高分解放射計 (Advanced Very High Resolution Radiometer : AVHRR) はそれぞれ海域と陸域の全球的植生分布の地図化に成功している。

このような視点では、日米共同開発の熱帯降雨測定ミッション (Tropical Rainfall Measuring Mission : TRMM) や米国の環境観測衛星 (Environmental Observation Satellite) は地球環境監視用の衛星計画といえる。

静止気象衛星は主として雲と海の観測に用いられてきたが、陸域観測に不可欠な近赤外バンドを付加すれば、静止地球観測衛星へと発展できるであろう。

(4) の点では、極軌道プラットフォームや宇宙ステーションのように、米国、欧州、日本、カナダなどの国際協力なしには負担が大きすぎるようになってきている。また衛星データベースをネットワーク化するため、米国、欧州、日本を極に各国に支局を設けてデータアクセスできる態勢が取られつつある。

国連の UNDP, UNFAO, UNESCAP, UNEP など、さらに世界銀行やアジア開発銀行などが途上国への援助としてリモートセンシングデータを利用した資源管理や持続可能な開発へと資金提供をしたり教育、研修の機会

を与えたりしている。

以上のべたように、リモートセンシングは、宇宙時代の今日、そして地球環境を考えなければならない時代の要請に対して、ますますその役割は増大しており、土木工学の分野においても積極的かつ組織的に取組まなければならないと考える。

2. リモートセンシングの技術的課題

リモートセンシングには次にのべる技術的な課題が存在する。

(1) 表面に関する情報しか得られない。

地表面あるいは水面からの放射あるいは反射の情報が得られるが、内部の情報は直接分らない。ただし内部の情報が表面に何らかの徴候を示す場合もある。

(2) 雲が存在すると可視・赤外領域では地表面が見えない。

マイクロ波の場合、いかなる条件下でも見えるが、可視・赤外領域では雲に邪魔され見えない。このため雲を取り除いてモザイク画像を作成することが膨大な作業を伴う。

(3) 大気の影響を完全に補正できないので、放射および反射に関する物理量を完全には再現できない。

いわゆるグラントルースが必要とされる理由であるが、特に水質等に関しては物理量の再現は困難である。しかし相対的な量であっても 2 次元的分布がリモートセンシングで得られることは大きな収穫といえる。

(4) 利用者の欲する情報とリモートセンシングデータの間で定量的定義を確立しえないことがあるため、完全自動分類を達成できない。

たとえば土地利用分類の分類項目の定義は必ずしもリモートセンシングデータと 1:1 に対応しておらず、人間の判断が不可欠となっている。

(5) 衛星の軌道あるいは天候条件等により、利用者が望む時の画像が得られるとは限らない。

雲のない快晴時の衛星画像は、わが国の場合、LANDSAT や SPOT 画像で一年間に高々 3 シーンであり、熱帯地方ではわずかに 1~2 シーンしかない。NOAA のように 2 個の衛星がそれぞれ 1 日 2 回周回しても全世界の雲なくモザイクを作るには、毎月 1 回程度である。

以上に示した技術的課題があるにもかかわらずリモートセンシングを利用する上で決定的な障害とはなっていない。これは以下にのべるようなりモートセンシング特有の利点があるからである。

(1) 非常に広い範囲の 2 次元分布に関する情報を一定の間隔で (雲があるにもかかわらず) 与えてくれる。

(2) 全地球的規模のデータを得るには他の方法では不

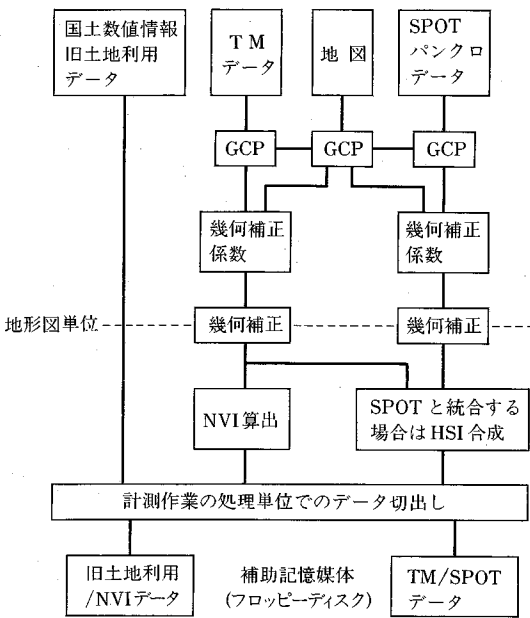


図-1 計算機支援判読システム

可能である。

- (3) 多次元的データ（マルチスペクトル、マーケティングボウル、マルチソース、ステレオなど）を面的に与えてくる。
- (4) 与えられるデータはデジタルの形で与えられコンピュータ処理が容易である。
- (5) 従来の方法では計測しえなかった大規模な地球現象を視覚的な形で提供してくれる。

3. 土木工学とリモートセンシングの係わり

土木工学の中でリモートセンシングが取り上げられ、応用される機運ができたのは、そう古いことではない。どちらかと言えば、二、三の研究者を除いて消極的であった。局地的な問題の解決に迫られている土木工学の分野で、空の上や宇宙から概観するリモートセンシングに対して、否定的な態度を取る者もいた。しかし、他の方法では得られないような情報（たとえば水温分布など）が得られることが知られるにつれ、従来の土木工学の枠を越えて新しい土木工学の発展が考えられるようになった。

以下に土木工学と関連が深いと思われるリモートセンシングの応用を紹介したい。

(1) 土地利用図の作成と変化検知

土地利用の最新の状態を常に把握することは、土地利用計画で最も重要な事であり、地図化の要請が高い。昭和49年に国土庁が発足して以来、継続して衛星データから土地利用データベースを作成する可能性が研究されてきた。衛星データを計算機で自動分類された土地利用

図は、国土庁の規定する分類項目に対して精度の信頼性が低く、長い間採用されることがなかった。しかし、計算機と判読を組合せた方法が開発され、平成3年度から、国土情報の中の土地利用データベースは、フランスのSPOTと米国のLANDSAT TMを用いて変化部の抽出により本格的に整備されることになった（図-1参照）。

これは調査研究費でなく、一般業務費から支出されているのであり、行政の中にリモートセンシングが定着した例といえる。

(2) 水文気象リモートセンシングへの発展

従来の水文学あるいは河川工学を越えた新しい発展がいくつか提案されている。

雲の分布は衛星データから容易に把握できる。雲の分布から降雨を推定する研究が、アフリカを中心に進められている。精度検証など問題が残されているとはいえ、数少ない気象観測所のデータを補間できるし、海面上に降る雨の推定はこの方法以外むずかしい。

雪氷の分布を調べるのは、分解能が低いとはいえ、他の方法では困難であるため有効である。将来、雪氷に関するリモートセンシング技術が進歩することを期待したい。

降雨レーダーを衛星に搭載する計画、熱帯降雨測定ミッション（Tropical Rainfall Measuring Mission：TRMM）が1977年に打上げの計画がなされている。これはマイクロ波を用いた技術であり、新しい挑戦といえる。

土壌の含水率を衛星データから推定する試みがなされており、水収支を明らかにする上で新しい発展が期待できる。

一方、黄河、揚子江、メコン川、ガンジス川など巨大河川の流域内の土地利用が森林伐採や土地開発、人口増加などのために急変しており、洪水や干ばつとの因果関係を明らかにする必要に迫られている。このような巨大流域を解析するには衛星データが適しており、新しいモデルの構築が必要になっている。

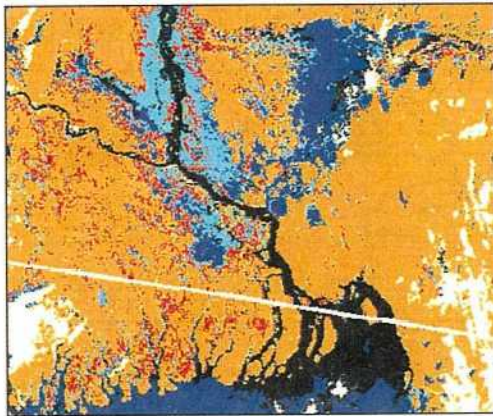
(3) 防災リモートセンシング

ピナツボ火山の噴火やバングラデシュの大洪水など巨大な自然災害は衛星画像で明瞭に見ることができる。

行政界、人口、土地利用、地質、地形、交通などいわゆる地理データを組合せた地理情報システム（GIS）とリモートセンシング画像を結合させると、危険度予測や被害予測などが可能になる。

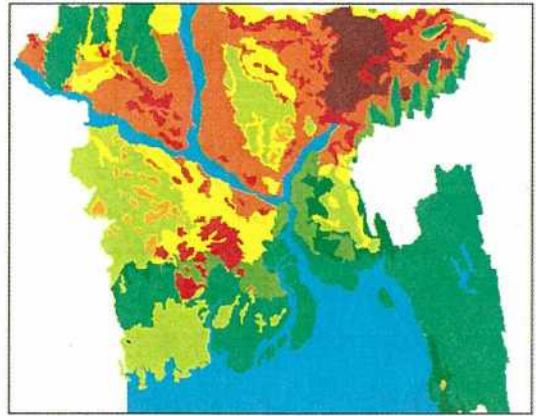
図-2 (a) は1988年のバングラデシュの洪水のNOAA画像であり、図-2 (b) はGISによって得られた洪水危険度図である。

海面上昇によりバンコクのように低湿地帯がどれだけ損害を受けるかを推算するには、衛星画像から得られる



■ Shallow Flood ■ Deep Flood ■ No Flood
■ Midium Flood ■ Water Course □ Cloud

(a) 1988 年大洪水



Serious ← → Slight

(b) 危険度図

図-2 バングラデシュ洪水と危険度予測

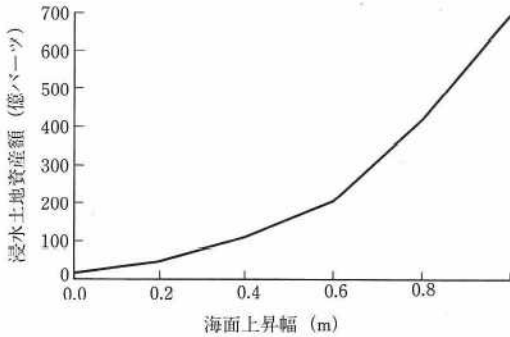


図-3 バンコク市の海面上昇による被害額の推算

土地利用図と、汎地球測位システム (Global Positioning System : GPS) から得られる地形点 (位置と標高) を用いれば概略わかる。つまり土地利用毎の財産単価を場所毎に求め、水没による被害額を累加してゆくのである。

図-3 はバンコク市の海面上昇による被害額を推算したものである。

(4) 衛星海洋学

海洋学 (Oceanography) は従来土木工学でなく地球科学として分類され、海岸工学が土木工学の中に取り入れられてきた。海洋学は今では衛星データぬきでは考えられない状況にあり、衛星海洋学なる言葉が作られている。

海洋工学は当然海洋学と係わりがあり、特に沿岸部に関する流れや堆積あるいは侵食の情報を必要とする。河川濁水の拡散はきわめて明瞭に衛星画像で把握され、拡散の解明に役立てられるであろう。

途上国の大河川、たとえば黄河やガンジス川は上流部の森林伐採とそれに伴う土壌流出のため川口部に大量の

土砂堆積があり、衛星画像による海岸線の変化追跡が有効である。

図-4 は黄河河口の土砂堆積による海岸線変化を示したものである。

(5) 岩盤工学

ボーリング孔の壁面を、小さなスキャナで画像化するいわゆるポアホールスキャナが開発された。著者はその特許の発明者の一人であるが、これもリモートセンシングの応用技術である。

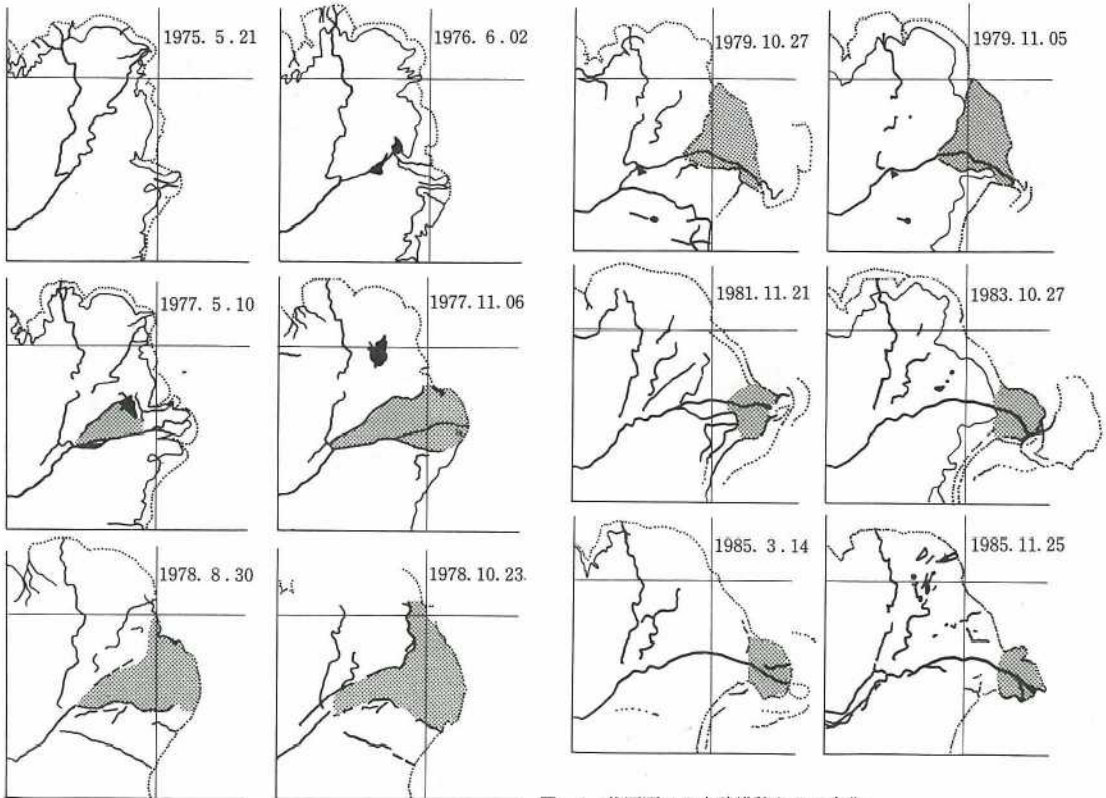
図-5 は、ボーリング孔壁面の展開画像を示しており、われ目の大きさや走行傾斜等が画像から計測できる。8 ミリビデオに記録が可能であり、コアを保存しておかなくてもよくなる。

トンネル切羽を画像化して、そのわれ目解析からトンネル掘削に関する施工にフィードバックさせることも行われており、リモートセンシングの岩盤工学への応用が期待できる。

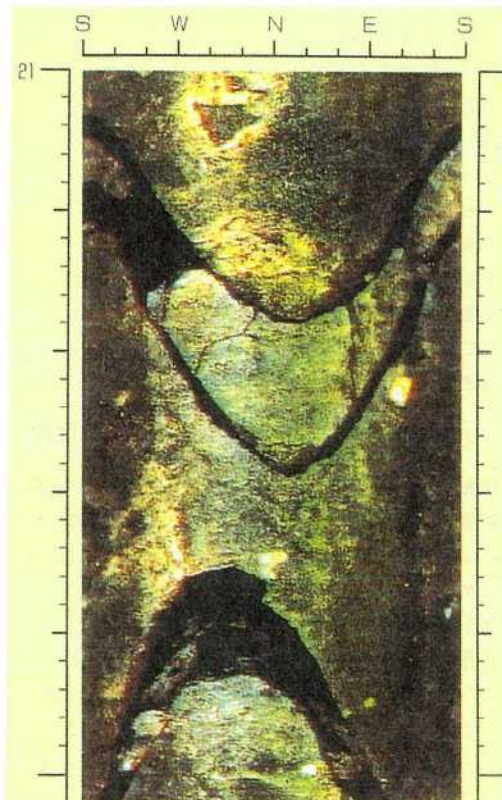
4. 地球環境時代の土木工学の新しい展開

—リモートセンシングの導入による地球計画学への発展—
地球規模の環境問題は殆どすべての学問分野に直接あるいは間接に関係してきている。当然土木工学においても、グローバルな視点で地球環境問題をリモートセンシングを利用して考えるべきであろう。

著者は、従来地域計画、都市計画、国土計画があるように、これからは「地球計画」、あるいは地球利用計画学を始めるべきであると提言する。現在のように人口増加率約 1.7% のプレッシャーの中で、無制限に森林破壊を続け、一方で工業開発および資源消費を続けるならば地球の経営は破綻する。地球のどこの森林を保存し、ど



図—4 黄河河口の土砂堆積とその変化



図—5 ボアホールスキャナ画像

こに農業開発とすべきかを計画しなければならない。また農業開発による穀物生産限界から人間が何億人まで生存可能か予知しておく必要がある。

現在著者はトヨタ自動車株式会社から東京大学生産技術研究所に寄付研究部門として「グローブエンジニアリング (Global Engineering)」の名称で多額の研究費を援助してもらっているが、「地球計画」が主たる内容である。

上記研究の結果、現在までに次のような成果が得られている。

(1) 地球の現存植生分布がNOAAのGVI (Global Vegetation Index: 汎地球植生指標) を利用することにより明らかにされた。この結果、熱帯林は全陸地の5.9%、森林全体で34%、草地34%、砂漠32%と丁度1/3ずつが森林、草地 (農地を含む)、砂漠 (半砂漠を含む) であることがわかった。

(2) 気温、降雨、標高、塩の分布などから本来生育すべき植生、すなわち潜在植生分布が求められた。潜在植生と現存植生の差が人間活動による影響であると考えられる。これによると、熱帯林は本来13.4%あるべきなのが現在は5.9% (7.5%減少)、その他の森林は本来35.9%あるべきが現在28.1% (7.8%減少)、草地は本来28.7%あるべきが現在33.9% (5.2%増加)、半砂漠は本来10.6%あるべきが14.9% (4.3%増加)、砂漠は

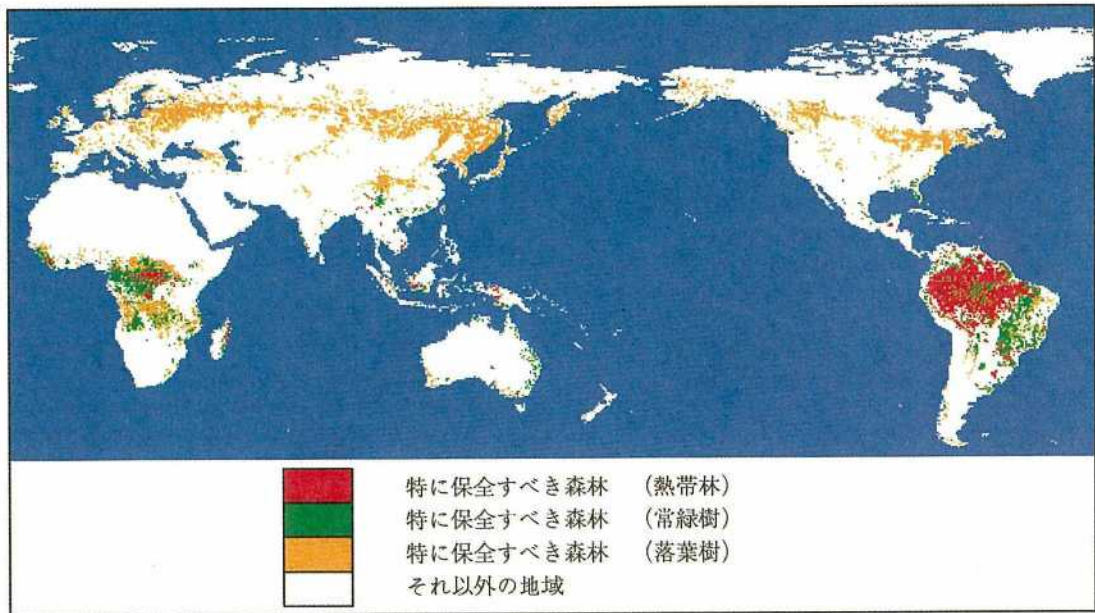


図-6 保存すべき森林

本来 11.4% あるべきが現在 17.2% (5.8% 増加) であることが明らかにされた。

(3) これ以上森林を伐採せず、現在の草地を農地に変換できると仮定して、また各国の人達が現在と同じ程度に今糧を取るとすると、約 73 億人の人間が生存可能であると推算できた。現在約 53 億人であるから、あと 20 億人で地球は満杯と考えられる。

(4) 陸域の植生が固定できる二酸化炭素 (純一次生産量) は、現在植生図から 48 GtonC/年と推算された。一方海上のプランクトンが固定できる二酸化炭素 (純一次生産量) は 31 GtonC/年と推算された。これは衛星画像を用いた最初の試算である。

(5) 地球計画の一例として、土壤データと、現存植生および潜在植生とを重ね合わせるにより保存すべき森林と、森林最適地の 2 つを提案した。すなわち、現在森林であるが土壤が貧しいところは一旦破壊すると回復が困難となるので、保存すべき森林と区分できる。図-6 は保存すべき森林の位置を示している。現在森林でなく、潜在的には森林でかつ土壤が肥沃であるところは森林が容易に生育しやすいところであり森林適地である。おそらくこのようなところは農地に転換されていると考えられるが、もしそうでなければ植生適地である。

5. 土木教育におけるリモートセンシングの取組み

土木工学の教育の中で、講座はないが講義を必ずしているものに測量学がある。従来測量学は理論よりも測定技能を教えることが多かった。しかし電子技術、宇宙技

術、情報化の中で測量に関連する技術は単なる地形、地物の測定のみならず、デジタル写真測量、コンピュータマッピング、リモートセンシング、施工計測システム、地理情報システムなど先端技術を必要とする分野に拡大発展している。このため従来のトランシット、レベル、平板測量を中心とする古典的測量を改廃して新しい学問体系として講座を擁する科目に独立させる必要が生じている。

学問の対象は、土地、地形、都市、地球などいずれにしても Geo という冠のつく内容であり、いまやデジタルな形の情報を体系的に取得、処理、分析、出力する情報処理システムとなっている。このためすでに外国では測量系の学科は Geoinformatics という新しい学問として改変されつつある。

考え方をかえれば、結局は広くは地球観測技術、狭くは土地計測技術であり、得られた情報を体系的に扱う技術である。日本語でどのような言葉をあてはめるかは議論を待たなければならないが、現在の測量を改変すべき時がきていることに異論はないであろう。土木学会を通じて議論されることを期待したい。

おわりに

リモートセンシング技術は、土木工学の中で新しい学問体系を導入する契機となっており、解決すべきあるいは挑戦すべき課題が山積している。

本稿にのべた以外の応用例もあることと思う。

いずれにしても、土木工学の中で、教育界 (大学、高等教育など) で体系的にリモートセンシングを含めた「地

球観測技術,あるいはGeoinformaticsを取り入れるべき時期に来ていると考える。

参 考 文 献

- 1) 日本リモートセンシング研究会編：図解リモートセンシング, (社)日本測量協会出版, 1992年.
- 2) 長幸平：国土情報整備を目的とした判読支援型衛星画像処理システムの開発 (学位論文), 1992年.
- 3) 越智士郎・Nizam M. Rahman・垣内博昭：バングラデッシュにおける洪水危険度の分析, 写真測量とリモートセンシング, Vol.30, No.6, pp.34~38, 1991年.
- 4) 地球の温暖化による海面上昇等の影響予測に関する研究作業報告書, 建設省国土地理院, 1992年.
- 5) 唐新橋：LANDSAT画像を用いた黄河三角州の変遷 (学位論文), 1986年.
- 6) サーベイ・ハイテク70選, pp.114~115, pp.122~123, (社)日本測量協会出版, 1992年.
- 7) 本多嘉明・村井俊治・加藤喜久雄：世界植生モニタリング, 写真測量とリモートセンシング, Vol.31, No.1; pp.4~14, 日本写真測量学会, 1992年2月.
- 8) Shunji Murai and Yoshiaki Honda: Global Eco-climate Mapping and Assessment of Human Activities, Asian-Pacific Remote Sensing Journal, Vol.4, No.2, United Nations ESCAP/UNDP, pp.39~46; Jan., 1992.
- 9) 後藤真太郎・村井俊治・本多嘉明・朝倉堅五：NOAA衛星データを利用した人工収容限界の予測, 写真測量とリモートセンシング, Vol.31, No.23-28, 日本写真測量学会, 1992年4月.
- 10) 後藤真太郎・本多嘉明・村井俊治：人工衛星を用いたグローバルなCO₂固定量の推算, 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, pp.39~42, 1992年5月.
- 11) Isao Abe, Ryosuke Shibasaki, Yoshiaki Honda and Shunji Murai: A Global Map for Forest Conservation, The 13th ACRS, pp.D-2-1~D-2-6; Mongolia, Oct. 1992.
(1993.1.13受付)