

衛星リモートセンシングによる海洋観測

Ocean Observation by Satellite Remote Sensing

向井幸男*
Yukio Mukai

ABSTRACT

As the ocean is vast and the ocean phenomena change quickly, the satellite remote sensing is considered to be very useful for monitoring the ocean. The remote sensing technologies are characterized by wavelength regions of the electromagnetic waves being used. The remote sensing is generally classified into visible near infrared, thermal infrared, active and passive microwave remote sensings. The characteristics of the ocean observation by satellite remote sensing are explained and the ocean phenomena which can be observed by each remote sensing are described. The sea surface temperature, one of the important ocean phenomena, can be observed using the thermal infrared remote sensing. The active and passive microwave remote sensing are effective for monitoring the ocean owing to their observation capability under all weather condition. The satellite remote sensing data available for monitoring the ocean at present and in future are also described.

Keywords : Satellite remote sensing, Ocean observation

1. はじめに

宇宙船ジェミニの飛行士がはるかな宇宙から地球を撮った一枚の写真に触発されて、開発された最初の地球観測衛星ランドサット1号が1972年に打ち上げられて以来、衛星リモートセンシングは地球をグローバルに観測するための有効な手段として注目され、その研究開発が盛んに行なわれて来た。地球表面の3分の2を占める広大で変化の激しい海洋の観測に関しては、これまで船による定点や航路に沿った、所謂点と線の観測データしか得られなかったわけだが、衛星リモートセンシングにより2次元的に、またある程度短い周期で観測したデータが得られるようになった。本稿では、衛星リモートセンシングによる海洋観測の特徴、色々な波長域のリモートセンシングによる海洋の観測および海洋観測に利用可能な衛星データ等について述べる。

2. 衛星リモートセンシングによる海洋観測の特徴

衛星リモートセンシングによる海洋観測には陸域観測に比べて以下のような特徴がある。

(1) 海洋は広大で海洋現象は変化が早い

海洋は広大であり、その現象が陸域に比べて早く変化するので、出来るだけ広い範囲を頻繁に観測してデータが得られるようにする必要がある。衛星により地球表面を観測する場合通常図-1に示すように、衛星の直下点を中心としてある範囲（走査幅）を衛星の進行方向と直角な方向に走査しながら、衛星の進行方向に沿って帯状に観測する。海洋観測の場合広範囲をカバーするために走査幅が2～3000kmと広がっている。衛星は1日に10数回地球を周回しながら観測するので、走査幅が広いと、1日に少なくとも1回は地球全域をカバーする。しかし走査幅を広くした場合、地球表面を瞬時的に見る角度（瞬時視野角）を大きくする必要があり、瞬時視野角が見る地球表面の大きさ（空間分解能）が大きくなる。通常この値は数100m～1km程度になっているが、これは海洋観測では十分であると考えられている。

(2) シートルースデータの取得が難しい

リモートセンシングにより地球表面の状況を把握する場合、リモートセンシングによる観測と同期して地上で必要な情報（グラントルースデータといい、対象が海の場合シートルースデータという）を取得し、リモートセンシングデータをグラントルースデータに関連づける事により、リモートセンシングによる地球表面の状況把握を正確にし、又リモートセンシングデータをグラントルースデータに関連する物理量に変換したりする事が出来る。対象が海洋の場合、状態が刻々変化するので衛星観測と同期して

シートルースデータを収集するために、は船を対象海域に航行させてデータを収集する、あるいはヴィで測定したデータを衛星で収集する等の準備が必要であり、これはかなり困難な作業である。

(3) 海洋からの信号は非常に弱い

リモートセンシングはいろいろな物質の分光反射あるいは放射特性がその物質に固有であることを利用して、観測対象物が何であるかを探る技術である。図-2に芝生、裸地、水等の代表的土地被覆物の可視・近赤外域での分光反射特性を示すが、その図から分かるように海水の反射率は3%程度で、芝生、裸地等陸域の物質の反射率に比べて非常に小さい。最も良く利用される可視・近赤外の波長域を使用したリモートセンシングでは、図-3に示す様に衛星に入射する輝度は海面からの反射光成分と途中の大気による放射輝度（パスラディアン）の和となる。観測対象物の情報を持っているのは反射光成分であり、パスラディアンは雑音成分である。海洋を観測した場合、水の反射率は小さいので反射光成分が小さくなり、雑音成分であるパスラディアンの割合が大きくなる。表-1に海水と芝生の Marine Observation Satellite-1 (MOS-1) MESSRの各バンドの衛星への入射輝度の中でのパスラディアンの占める割合の計算による推定値を示す。海水では、バンド1、2（可視域）で約70%、バンド3、4、（近赤外域）で50~60%程度となっている。海洋観測においてはパスラディアンを除去する処理（大気の影響を補正する意味で大気補正処理という）が重要になって来る。

(4) マイクロ波リモートセンシングが重要である

波長の短い可視・近赤外域や熱赤外域を使用したリモートセンシングではパスラディアン、あるいは雲の存在が大きな障害となるので、波長の長いマイクロ波（波長1mm~1mの電磁波）を海洋観測に応用する研究が進められて来た。マイクロ波は途中の大気による影響を受けないし、又雲を透過するので、変化の激しい海洋の状況を天候に左右されずに観測することが出来る利点を持つ。マイクロ波リモートセンシングには、対象物が放射するマイクロ波を観測する受動型と、マイクロ波を発射し、対象物からの反射信号を受信する能動型とがある。

受動型は対象物から放射されるマイクロ波の信号は非常に微弱であり、又空間分解能は数10kmと大きくなるが、対象が海洋や気象では利用可能であると考えられる。

(5) 海洋の表面のみの情報が得られる

これは海洋観測に限られたことではなく、リモートセンシングにより得られるのは地球表面の情報のみである。海洋現象の解明には海洋内部の情報も重要であり、リモートセンシングにより観測される

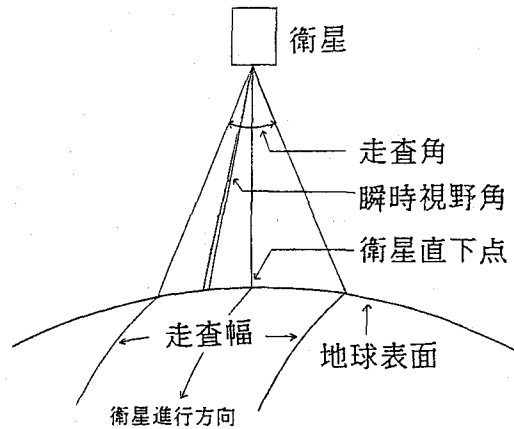


図-1 衛星による地球表面の観測

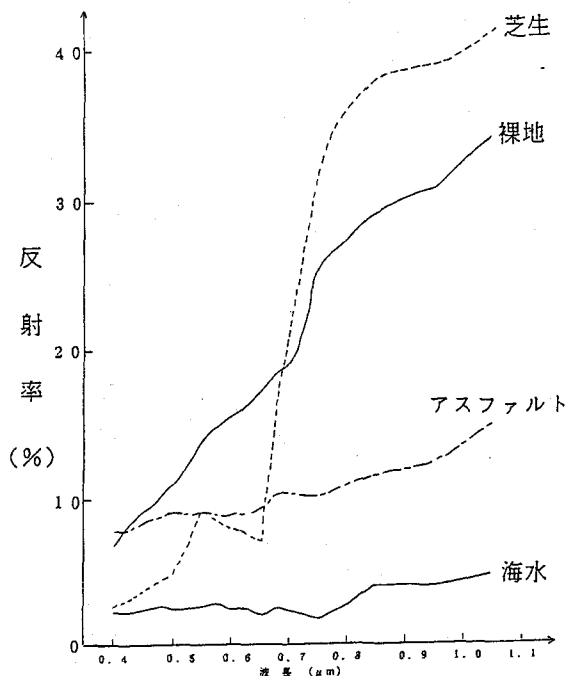


図-2 代表的土地被覆物の分光反射特性

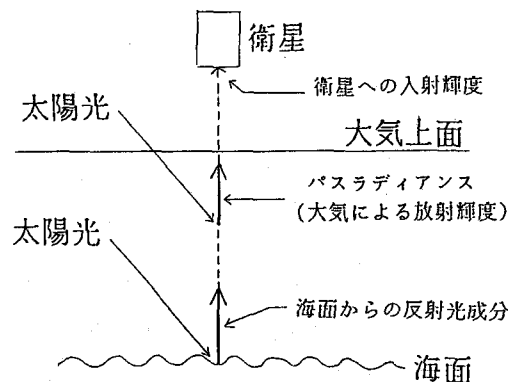


図-3 衛星観測における反射光成分とパスラディアン

海表面の情報から海洋内部の現象を推定する研究を進める必要がある。

3. 色々な波長域のリモートセンシングによる海洋現象の観測

リモートセンシングは使用する波長域によって可視・近赤外リモートセンシング、熱赤外リモートセンシング、能動型および受動型のマイクロ波センシングに大別される。それぞれのリモートセンシングによりセンサーの技術、観測の対象となる物理現象が変わって来る。表-2にそれぞれのリモートセンシングの特徴を示す。ここではそれぞれの波長域によるリモートセンシングにより観測可能な海洋現象の観点からまとめた。

表-1 海水と芝生の MOS-1 MESSR の各バンドでの衛星への入射輝度の中でバスラディアンスの占める割合

	単位 %			
バンド	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4
波長域(μm)	0.51~0.59	0.61~0.69	0.71~0.80	0.80~1.1
海水	7.6	6.8	6.5	4.4
芝生	4.7	2.3	1.1	6

表-2 可視・近赤外域、熱赤外域、能動型マイクロ波および受動型マイクロ波によるリモートセンシングの特徴

	使用波長域	観測信号	空間分解能	バスラディアンス	雲の透過性
可視・近赤外	0.4~3.0μm	太陽光の反射	数10m	有	無
熱赤外	7.0~15.0μm	地球の熱赤外放射	数100m~1km	無	無
能動型マイクロ波	1mm ~ 1m	送信波の反射	数10m	無	有
受動型マイクロ波	1mm ~ 1m	地球のマイクロ波放射	数10km	無	有

(1) 可視・近赤外リモートセンシングによる海洋の観測

これにより観測可能な海洋現象は海色、クロロフィル、海洋汚濁、河川水流出、海水、油汚染、潮目、赤潮、船舶等である。海色とクロロフィルは互いに相関があり、クロロフィル量の分布は海洋の一次生産力の推定に非常に重要な情報であり、現在海色の観測が重要な課題となっている。水色、透明度、およびクロロフィル量と水の反射特性の関係を図-4に示す。透明な水は全般的に反射率が小さく(約3%)、波長特性としては波長の短い領域で高く、波長が長くなるに従い反射率は徐々に小さくなっていく。水色の値が大きく透明度が悪くなると、全般的に反射率が高く(約10%)なると共に、反射率のピークが緑あるいは黄色の領域に移る。これはクロロフィルの分光反射特性を示しており、440nm(青色)付近に吸収帯があり、560nm(緑色)付近に反射帯がある。クロロフィルの分布を求める方法としてこの吸収帯と反射帯の比をとって強調する方法がよく用いられる。沿岸海域に流入する河川水の分布はそれらの反射特性のピークの波長(550nm)付近の観測データを使って、汚濁の程度を4段階程度に分ける事が出来る。このリモートセンシングによる海洋の観測においては、波長の短い可視域に海洋の情報が多く含まれているが、この波長域では大気の影響が大きくなり、大気の補正が重要な課題となる。

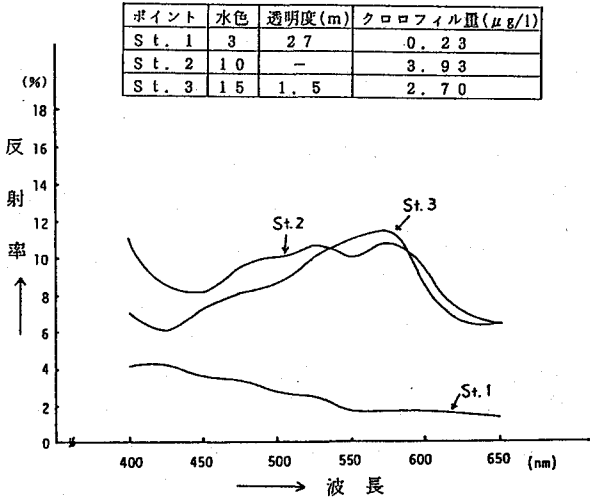


図-4 水色、透明度、クロロフィル量と水の反射特性

(2) 熱赤外リモートセンシングによる海洋の観測

これにより観測可能な海洋現象は海面温度、海流、海洋フロントである。海面温度は海洋の現象の中で最も重要であり、海面温度が分かれば海流、海洋フロントも海面温度の急勾配部分から把握することが出来る。熱赤外リモートセンシングでは地球の熱赤外放射を観測しており、地球放射のエネルギーは10μm付近にピークがあるので熱赤外放射計は通常10~12μmの波長域を使用している。地球放射

を利用しているので夜間でも観測可能である。

この波長域ではまだ雲を透過しないので雲があると観測できない。熱赤外放射は大気中の水蒸気により吸収され、衛星の観測値は真の海面温度より数度低く観測されるのでこれを補正する方法が研究されている。代表的な方法がスプリットウィンドー法¹⁾であり、これは熱赤外の放射を $10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$ と $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ の2つのチャンネルに分けて観測し、各チャンネルで水蒸気による吸収が異なることを利用して、補正する方法である。現在熱赤外放射計による海面温度の観測の誤差は約 1°C である。日本の最初の地球観測衛星MOS-1に搭載したVisible and Thermal Infrared Radiometer (VTIR) による日本周辺の海域の海面温度観測画像を図-5に示す。日本列島の南岸沿いに高温の黒潮の流れを観測することが出来る。熱赤外放射計により観測される温度は厚さ $20 \mu\text{m}$ 程度の非常に薄い水の表面の温度(表皮温度)であり、ヴィで観測されるのは海面下1mの海水の温度がありこれを通常海面温度と呼んでおり、表皮温度と海面温度の間には少し差がある。表皮温度は大気-海洋相互作用により海面直上の大気の温度に影響される。



図-5 MOS-1 VTIRによる
日本周辺海域の海面温度分布画像

(3) 能動型マイクロ波リモートセンシングによる海洋の観測

これにより観測可能な海洋現象としては海面状態、表面波、内部波、海氷、潮目、油汚染、海上風、海面トポグラフィ、波高等である。能動型マイクロ波リモートセンサーとして映像レーダ、散乱計、電波高度計があり、映像レーダにより海面の荒さや波の状態等の海面状態、表面波、内部波、海氷、潮目、油汚染等、散乱計により海上風、電波高度計により海面トポグラフィおよび波高を観測することが出来る。これらのセンサーは雲を透過するマイクロ波を使用するので全天候下で観測することが出来、絶えず変化する海洋現象を観測するのに適している。能動型センサーによる海面状態の観測は照射されたマイクロ波が海面に当たって反射するときの後方散乱係数 σ_0 が、照射方向と海面のなす角度、海面のあらさ、絶縁特性や波の大きさなどによって異なって来ることを利用している。図-6に海洋観測を主目的とするEuropean Remote Sensing Satellite-1 (ERS-1)のActive Microwave Instrument (AMI)の映像モードの観測の概念を示す。

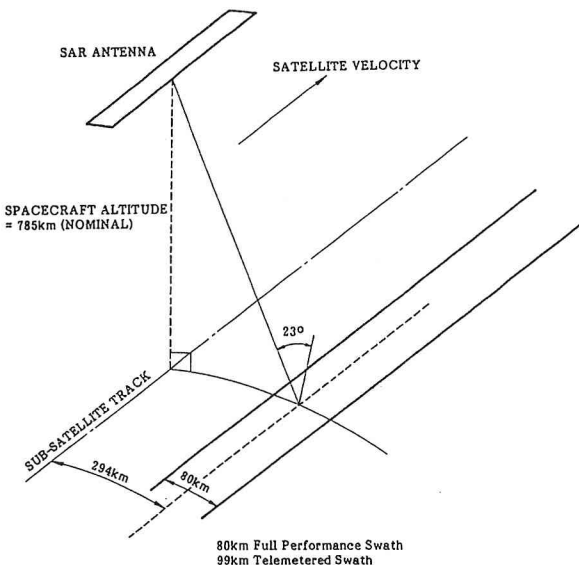


図-6 ERS-1のAMIの映像モードの観測

図-6に海洋観測を主目的とするEuropean Remote Sensing Satellite-1 (ERS-1)のActive Microwave Instrument (AMI)の映像モードの観測の概念を示す。

映像レーダは図-6に示すように衛星の進行方向に沿って衛星の直下から衛星の進行方向と直角な方向にある角度(オフナディア角)ずらして、幅を持ったファンビームを照射し、その反射信号を映像としてとらえる装置である。数100 kmの衛星の高度から実用可能な数10 mの分解能を得るためには大きなアンテナを必要とするが、衛星搭載可能な大きさ($2\text{m} \times 12\text{m}$ 程度)のアンテナで上記の分解能を得る合成開口技術が開発されて実現可能となったもので、合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar:SAR)と呼ばれている。海面は波やうねりにより常に変動し電波の到来方向に対して直角に近いほど、反射は強くなり、滑らかな海面に対しては鏡面反射し、反射は弱くなる。海上風の観測は、風と波の間には密接な相関があり、海上の波を観測することにより、海上風の大きさや方向を推定できることを利用している。散乱計は σ_0 を計測する装置であるが、 σ_0 の後方散乱断面積は観測対象領域に対する電波の入射角の関数であり、また σ_0 は波の大きさに比例する。ERS-1の場合、衛星の進行方向に沿って衛星の真横方向、 45° 前および 45° 後の3つの方向について同時に観測し、それらの観測結果を解析する

ことにより、海上風の大きさと方向を推定している。観測精度は方向が $\pm 20^\circ$ 風速は $4 \sim 24 \text{ m/s}$ の範囲に対して 2 m/s である。

電波高度計による海面トポグラフィの観測は、衛星に搭載した電波高度計により衛星と海面間の距離を計測し、別途正確に測定された衛星の軌道から逆算して、海面トポグラフィを計測しようとするものである。海面トポグラフィの計測精度は 10 cm なので、これより大きな波に対しては波の最低時と最高時で時間差が生じ、その差を調べることで波高を推定することが出来る。

(4)受動型マイクロ波リモートセンシングによる海洋観測

これにより観測可能な海洋に関する情報としては、海洋上の大気中の水蒸気や雲水量、海水、海面温度等である。受動型マイクロ波リモートセンシングは地球表面及び大気から放射されるマイクロ波領域の放射の強さを観測するもので、空間分解能は数 10 km と大きい、全天候下で観測可能であるという特長がある。ある物質からのマイクロ波の放射の強さは、その物質の温度、観測周波数および、その物質の組成物や形状などによって定まる放射率によって違って来る。この型のリモートセンシングにより最も良く観測されるのは大気中の水蒸気量である。大気中の水蒸気量、雲水量、海水等観測対象にセンシティブな周波数が選択される。地球表面および大気からの放射を同時に観測するので背景となる地球表面が海洋の場合、相対的に放射強度が小さいので結果的に海洋上の大気中の水蒸気等が観測される。背景が陸の場合、陸からの放射と大気からの放射との区別が難しい。これにより観測された大気中の水蒸気量は、熱赤外放射計による海面温度の観測の際の大気中の水蒸気による減衰量の補正等に使用される。この型のリモートセンシングで今1つ注目されているのは海水の観測である。海水分布の密集度や1年氷と多年氷の区別等がマイクロ波放射の観測により可能であり、天候条件が良くない極域の海水分布の密集度を観測し、これらの海域での船舶の航行の安全に役立たせる事が期待されている。またこの型のリモートセンシングにより海面温度を観測する事も可能であるが、熱赤外放射による観測に比べて空間分解能や温度分解能がまだ遙かに良くない。

4. 海洋観測に利用可能な衛星データ

4.1 現在観測中の衛星データ

(1)ランドサット-TM、MSSデータ、MOS-1
MESSRデータ、スポット HRVデータ

米国の衛星ランドサット、日本の衛星MOS-1およびフランスの衛星スポットに搭載している可視・近赤外放射計による観測データである。これらのデータは主として陸の観測に使用されるが、可視域のデータは海洋観測に利用可能であり、沿岸海域の汚濁、河川水の流出、海色、クロロフィル、赤潮、油汚染等を観測できる。代表的なランドサットTMデータの主要諸元を表-3に示す。走査幅は 180 km 、空間分解能は 30 m （熱バンドは 120 m ）観測周期は16日である。これらのデータは現在利用可能であり、データ提供の窓口は(財)リモート・センシング技術センター（東京都港区六本木7-15-17、03-3401-1387）である。

(2)NOAA-AVHRRデータ MOS-1
VTIRデータ

米国の気象衛星NOAA、およびMOS-1に搭載されている可視・近赤外・熱赤外放射計による観測データである。代表的なNOAA AVHRRデータの主要諸元を表-4に示す。熱赤外域のデータにより海面温度を観測できる。走査幅は 2800 km と広く、空間分解能は 1.1 km 、観測周期1日と短く温度分解能は 0.12° K である。これらのデータは現在利用可能でありデータ提供の窓口はNOAAデータは(財)気象協会、MOS-1

表-3 ランドサットTMデータの主要諸元

観測波長域	0.45~2.35 μm 6バンド 10.40~12.50 μm 1バンド
空間分解能	30 m (熱バンドは120 m)
走査幅	180 km
観測周期	16日

表-4 NOAA AVHRRデータの主要諸元

観測波長域	0.58~1.1 μm 2バンド 10.5~12.5 μm 2バンド
空間分解能	1.1 km
走査幅	2800 km
温度分解能	0.12 $^\circ \text{ K}$
観測周期	16日

表-5 ERS-1 AMIの映像モードの主要諸元

周波数	5.3GHz (Cバンド)
偏波	VV (垂直-垂直)
入射角	23 $^\circ$
空間分解能	30 m
走査幅	80 km
観測周期	35日

V T I Rは(財)リモート・センシング技術センターである。

(3) ERS AMIデータ、JERS-1 SAR データ

欧州宇宙機関の衛星ERS-1および日本の地球資源衛星JERS-1に搭載されているSARによる観測データであり、海面状況、波以外に潮目、油汚染等を観測できる。ERS-1は海洋観測を主目的とする衛星で、SAR以外に散乱計、赤外放射計、電波高度計、および受動型マイクロ波センサーを搭載している。ERS-1 AMIの映像モードの主要諸元を表-5に示す。海洋観測に適切な周波数、偏波、入射角が選択されている。観測周期は35日となっているが、氷観測用として3日周期のモードを持っている。JERS-1 SARは陸を観測するのに適切な周波数、偏波、入射角が使用されており、海洋の情報は余り得られない。これらのデータは現在研究用に使用されているが、近い将来一般利用も可能になるだろう。

現在取得されている受動型マイクロ波センサーのデータとしてはMOS-1 MSRおよびERS-1のMS (Microwave Sounder) がある。いずれも大気中の水蒸気量を観測することを目的としている。

4.2. 将来も利用可能な衛星データ

(1) SeaStar

SeaStarは米国で1994年に打ち上げ予定の衛星で可視・近赤外放射計を搭載し、海色、クロロフィル等の観測を行なう。取得されたデータは漁業、海運、海上石油・ガス施設、海洋掘削、産業環境モニタリング等の分野で実用的に利用される。

(2) ADEOS OCTS

ADEOSは1996年に日本が打ち上げ予定の地球環境監視に関する色々な情報を取得するセンサーを多数搭載した衛星で、これに海洋観測用のセンサー Ocean Color Temperature Scanner (OCTS) を搭載する。OCTSは可視・近赤外域および熱赤外の放射計で海色・クロロフィルおよび海面温度の観測を行なう。

(3) RADARSAT

RADARSATはカナダが1994年に打ち上げ予定の衛星で、CバンドのSARを搭載し、北極海の氷の全天候モニタリング、船舶や油汚染の検知、海洋波のスペクトル等の観測を行なう。

5. むすび

近年地球環境問題の顕在化とともに地球表面の2/3を占める海洋の諸現象を解明することが必要となって来た。衛星リモートセンシングは広大な海洋を2次元的に観測するのに有効な手段である。衛星リモートセンシングによる海洋観測の特徴、現在における衛星リモートセンシングにより観測可能な海洋現象とその観測方法および海洋観測に利用可能な衛星データについて述べた。衛星リモートセンシングは海洋観測の手段として益々重要になるであろう。

参 考 文 献

- 1) E. Paul McLain et al., "Comparative Performance of AVHRR-Based Multichannel Sea Surface Temperatures," Journal of Geophysical Research, No. C6, PP. 11587-11601, 1985