

人工衛星電波信号前方散乱を利用した沖合有義波連続観測法*

中村 重久**

A monitoring technique of offshore significant waves by using foreward scattering of signal from a satellite*

Shigehisa NAKAMURA**

Abstract: A proposal is introduced on a continuous monitoring of offshore significant waves at a station on the coast or on board by receiving foreward scattering of signal from a satellite. A general remark is given about foreward scattering of the signal from a satellite first. An example of practice on board is cited to note what is the point of this monitoring technique. Several problems should be solved for practical use even after finding an appropriate station at planning and at designing.

1. 緒言

一般に、実際の海の波は、かならずしも単純な初等関数で表わせるようなものではない。時間的にも空間的にも変化している。有義波は、一種の統計的表現であり、これをよりどころにした力学的検討もある（たとえば、SVERDRUP and MUNK, 1947）。それ以前には、海洋波の写真による立体視の手法も考案されている（たとえば、SVERDRUP *et al.*, 1942）。また、別に、波浪についての力学的研究は近年とくに顕著で、その成果をここで紹介できないくらいである。

人工衛星がいろいろの目的で利用されるようになって、海上風や海面波浪の情報もとらえることが可能になってきた（たとえば、STEWART, 1985）。とくに、極軌道衛星の開口合成レーダ（SAR）を利用した例では、衛星の軌道直下の海面波の分布を調べることができる（たとえば、STEWART and SUGIMORI, 1992）。しかし、この手法の基本は、原理的に、衛星電波信号の海面による後方散乱を利用したものである。

これに対して、静止衛星からの電波信号の前方散乱を

利用した海面波浪の研究は、例が少ない（たとえば、KARASAWA and SHIOKAWA, 1984）。

本文では、沖合のある海域について、沖合の海面波の連続観測の方法について検討した結果の要点を述べる。

2. 人工衛星と海面

人工衛星は、1990年代の現在、各種の目的で利用されている。この利用にあたっては、人工衛星からの電波信号の受信が必要である。極軌道衛星の例では、海面赤外画像から海面温度分布がわかるし、また、海面高度計測によって流動の特徴をとらえることも可能になってきている。ここでは、その詳細については述べることはしない。

本文で重要なのは、赤道上の静止衛星である。たとえば、Fig. 1のように、地球（その中心は点Oとする）に対して、静止衛星が点Sにあるものとする。静止衛星からの電波信号が直進するものとするれば、地球表面に対する点Sからの接線上で、接点Tが電波信号受信可能な最遠点になる。したがって、地球表面上の点Pでは、点Sからの電波信号は直接受信できる。この点Pは、海上にえらぶことも考えることはできる。

ところで、この点Pの標高がHのときは、点Sから直接到達した信号のほか、地球表面で一度反射した信号も受信される。この両者の信号は、時として、相互に干渉して、フェージング現象を生じる。普通の受信では、そのために歪んだ信号を受信することになる。海面で反

* 平成6年1月17日受理 Received January 17, 1994

** 〒649-22 京都大学防災研究所付属白浜海象観測所、和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2347-7
Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Katada-Hatasaki, Shirahama, Wakayama, 649-22 Japan.

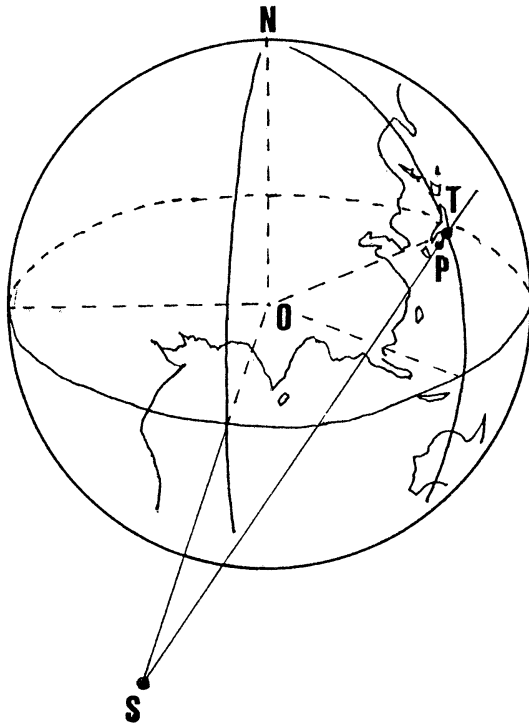


Fig. 1. Relative positions of a satellite S and a station P to the Earth (a sphere with the center: O) and a tangent line "S-T".

射した信号が、海面の状態の情報を、信号の歪としてもたらすならば、これを本文の目的のために利用することは可能であろう（たとえば、KARASAWA and SHIOKAWA, 1984）。

3. 衛星電波信号の前方散乱

ここで、とくに、海面波浪の情報を、衛星からの信号受信によって検知する方法に焦点をおく。受信点 P (cf. Fig. 1) 付近について関連した要因を加えたものが Fig. 2 である。この図では、衛星 S からの信号電波は、ほとんど平行であるとみなしうる。受信点 P に仰角 E' で直接到達する信号 S のほか、海面 da に入射角 G で達した後、反射角 J で、水平面内で角 K だけ偏った位置にある受信点 P に、信号 R として到達するものも考えられる。詳細な解析のためには、直交座標系 OXYZ を導入すると便利であると考えられるが、ここでは、その基本的概念を述べるに止める。

さて、Fig. 2 の海面 da からの信号としてみた R は、前方散乱波の一部と考えられる。このことを模式的に Fig. 3 に示した。海面で反射した信号電波 R は、図中のハッチングでは受信点 P に達する前に周辺の海面波によって遮断されてしまう。

海に面した陸岸に受信点 P をおくと、Fig. 1 および Fig. 2 の条件を満たす衛星信号の前方散乱波が受信できることになり、信号電波のフェージングを検知すること

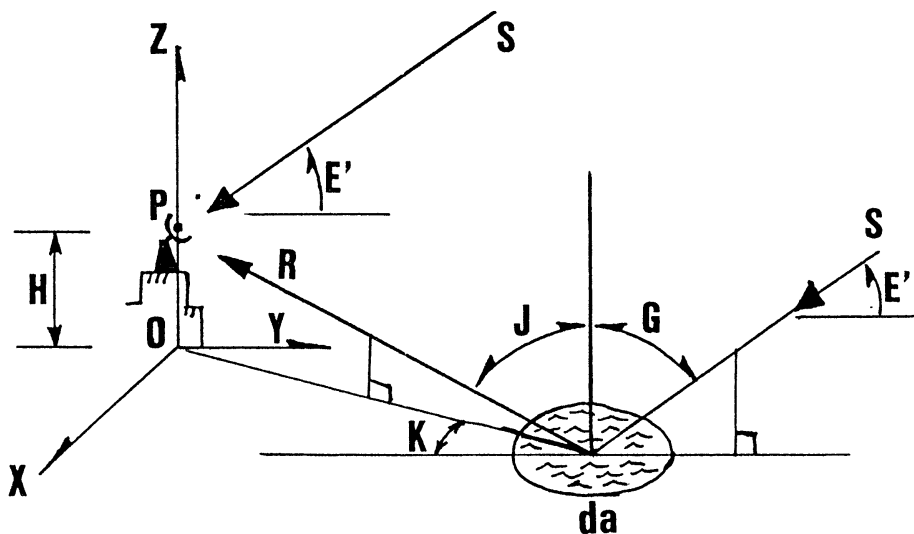


Fig. 2. Geometry of the sea surface reflection of a low elevation angle signal from a satellite (as for the notation, refer to the text).

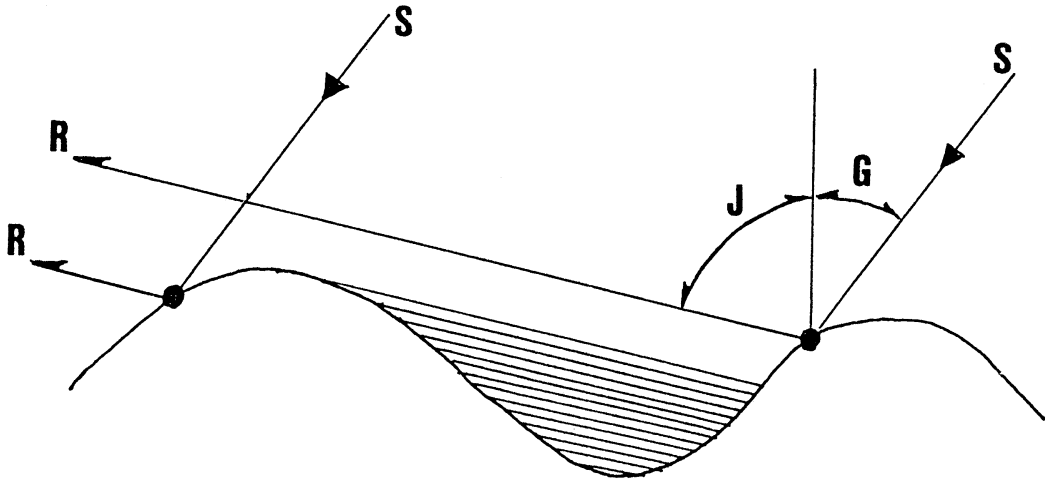


Fig. 3. Forward scattering signal from a satellite on sea surface waves. Hatching area shows a shadow zone.

によって、沖合の海面状況を知ることができる。検知を継続すれば、海面状況の時間的変化を知ることができるわけである。

ところで、上述の手法では、極軌道衛星の SAR（開口合成レーダ）による電波信号の後方散乱波の強さよりも小さい信号を対象とすることになり、さらに高度の電子技術が必要になってくる。また、受信点 P を、海に面した陸岸ではなくて、外洋の船舶に位置づければ、外洋波浪の移動観測の可能性も十分考えることができる。

将来、多数の人工衛星が、極軌道衛星あるいは静止衛星として維持されることになれば、衛星からの受信電波の歪の程度を検知することによって、海面波浪の連続観測をつづけることも可能となる。

4. 船舶での観測例

静止衛星からの電波信号受信における、海面波浪の影響は、KARASAWA and SHIOKAWA (1984) によって検討されている。ここでは、その概要を引用して説明をする。

インド洋赤道東上、 63°E に位置する、人工衛星 INTEL SAT-V (MAC: Maritime Communication System) は、船舶の通信に寄与している。しかし、その通信が、日本近海で、満足にできない場合があり、その主要因が、電波の海面反射によるフェージングであることがわかってきている。これは、衛星と日本近海との位置関係が、さきに示した Fig. 1 のような条件にあるからであろう。ちなみに、人工衛星 INTEL SAT-V の電波信号の入射時の地平面（又は海面）となす角 E' (cf.

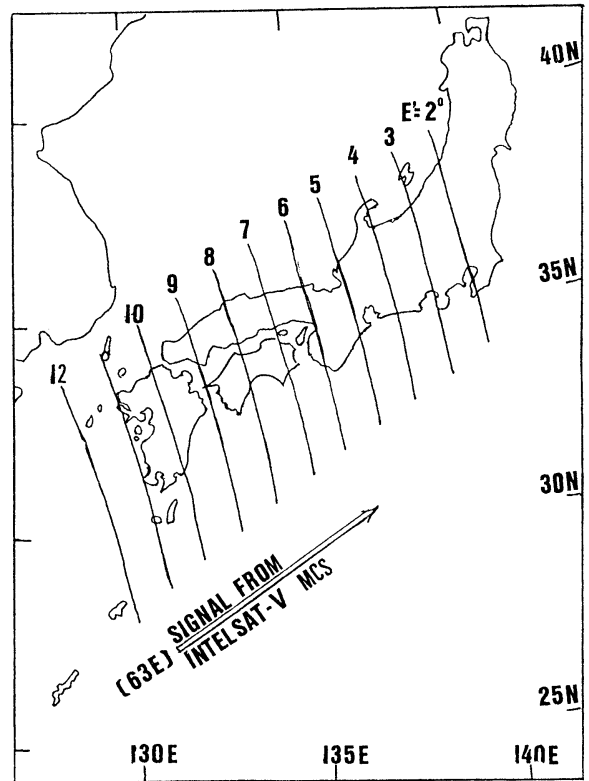


Fig. 4. Elevation angle of the signal from the INTEL SAT-V (MCS) around the Japan Islands (after KARASAWA).

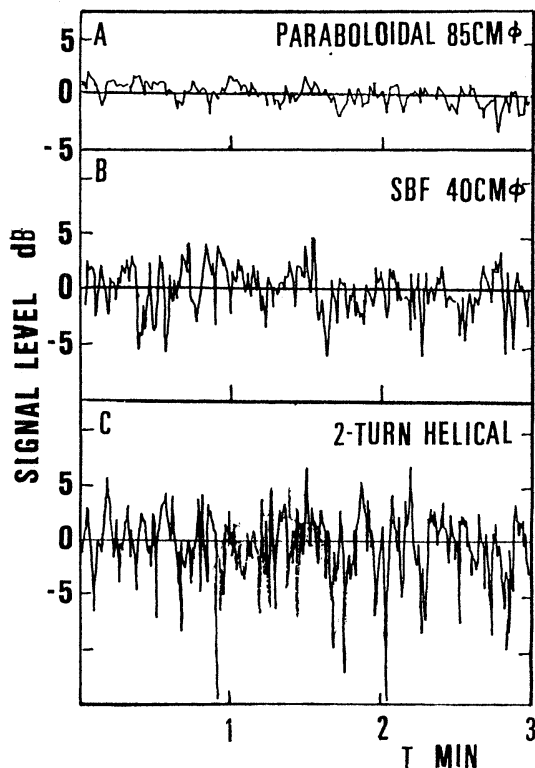


Fig. 5. An example of the recorded signal levels obtained by the three types of the antenna (after KARASAWA).

Fig. 2) は Fig. 4) のようになる (唐沢ら, 1984)。図中には、仰角 E' が $2-12^\circ$ を例示した。

四国南沖での観測記録例を参考例としてあげる。仰角 $E' = 8.3^\circ$ で、海上での波浪・うねりの波高はそれぞれ、 $1\text{ m} \cdot 2\text{ m}$ のとき、船上でのフェージングによる受信信号レベルの時間的変化は Fig. 5) のようなものであった。この図中、A は直径 85 cm のパラボラ・アンテナを用いた場合、B は直径 40 cm の SBF (ショート・バックファイヤ) アンテナの場合、そして、C は 2 巻ヘリカル・アンテナの場合である。なお、この場合、対象とした信号電波は $1.6/1.5\text{ GHz}$ (L バンド) である。

さらに、唐沢・塩川 (1984a) は、海面反射フェージングの周波数スペクトルについて研究をし、電波に対する船舶の効果、スペクトルからみた波浪の高さ・波向の特性についても論じている。ここで、Fig. 6) に、九州東方洋上の $E' = 10^\circ$ の例について、波高 (有義波) をパラメータとして、フェージングの周波数スペクトルを示した。

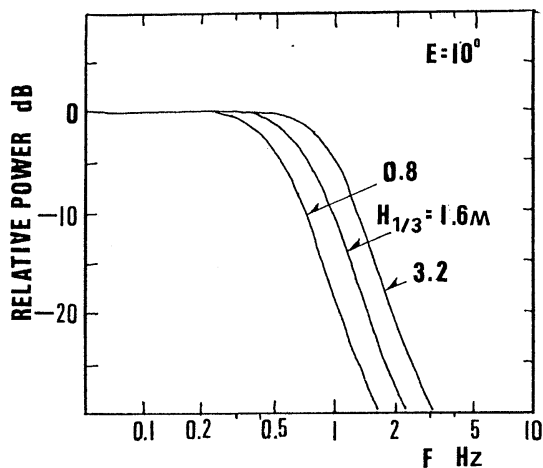


Fig. 6. Frequency spectrum of L-band multipath fading with a parameter of significant wave height for the elevation angle of 10° (after KARASAWA).

5. 今後の問題点

現在、上述のような手法による沖合の波浪の連続観測が可能なのは限られた範囲であると考えられる。受信点を海に面した海岸線にとった場合、海面以外からの散乱波の影響も考慮しなくてはならない。ただ、これから打ち上げられる静止衛星のほか、極軌道やその他の軌道の衛星が長期にわたって維持されることになれば、世界中の海のいたるところで、沖合有義波の連続観測が可能となるものと考えられる。

さらに詳細な波浪の検討のためには、波形勾配や複数の波向なども考えなくてはならないだろう。台風時や暴風時にみられる波高 3 m 以上の高波浪については、さらに検討の必要がある。

ただ、従来の波高計、船舶による観測や波浪ブイなどによる方法に比較して、技術的問題が解決できれば、労力と経費との両面で大きく負担を軽減できるものと考えられる。

6. 結言

静止人工衛星からの電波信号の前方散乱を利用して沖合の有義波を連続観測する方法について検討し、その概要を述べた。衛星電波信号の海面での前方散乱をモデルによって検討し、電波信号のフェージングから海面波浪の検知できる可能性を論じた。船舶による観測例を引用して、定量的な有義波連続観測の可能性をさぐった。な

お解決すべき問題もあるようであるが、人工衛星についての将来の見通しからみて、海面波浪の観測法として、今後、有望なもので、実用化への可能性も高いと考えられる。

終に、本文をまとめるにあたり、郵政省通信総合研究所の思藤忠典博士より有益なコメントをいただいた。また、KDD研究所の唐沢好男氏には、資料利用にあたって、御助力をいただいた。

文 献

- 唐沢好男・野本真一・塩川孝泰 (1984) : 海面反射フェージング軽減方式の海洋実験報告 (II), 電子通信学会技術報告, AP84-85, pp. 7-14.
- KARASAWA, Y. and T. SHIOKAWA (1984) : Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-32, No.6, pp. 618-623.
- 唐沢好男・塩川孝泰 (1984a) : 海面フェージングの周波数スペクトラム, 電子通信学会論文誌, Vol. J67-B, No2, pp. 171-178.
- STEWART, R. H. (1984) : Methods of satellite oceanography, Scripps Institution of Oceanography, Univ. Calif., SD. 360p.
- STEWART, R. W. and Y. SUGIMORI (eds.) (1992) : Proceedings of Conference for Pacific Ocean Environments and Probing, 1292p.
- SVERDRUP, H. U. and W. H. MUNK (1947) : Wind, sea and swell theory of relations for forecasting, US Navy Hydrographic Office, Pub. No. 601, 44p.
- SVERDRUP, H. U., M. W. JOHNSON and R. H. FLEMING (1942) : The oceans, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, NJ, 1060p (especially on p. 524).