

# 小型衛星による鯨生態観測

林 友直\*、岡本良夫\*、横山幸嗣\*、細川 繁\*、富田秀穂\*、升本喜就\*\*

Tomonao Hayashi\*, Yoshiwo Okamoto\*, Koji Yokoyama\*, Shigeru Hosokawa\*, Yoshinari Masumoto\*\*

\* 千葉工業大学、 \*\* 升本技術士事務所

\* Chiba Institute of Technology, \*\* Professional Engineer

## Abstract

We have developed a small satellite of 50 kg weight for observing whale ecology, which was successfully put into a polar orbit of 800km high by H-IIA-4 rocket as one of the piggyback satellites on Dec.14, 2002 from Tanegashima Space Center.

This paper describes the outline of the total system, preliminary results obtained up to present, and future prospect of its application.

## はじめに

鯨はその生息域が余りに広いため、これまでその生態の多くが謎に包まれてきた。われわれは極軌道衛星を用いて、鯨にとり付けたプロ-ブから送られるデ-タを収集することにより、その生態情報を地球規模で取得するシステムを開発中である。衛星は平成 14 年 12 月 14 日に NASDA の H-IIA-4 号機により高度 800km の太陽同期軌道に投入された。引き続き姿勢運動の調整を経てマストを伸展し重力傾度安定化を達成した結果、アンテナは常時地球に指向して周回している。その動作は正常で、プロ-ブからのデ-タを収集するための予備的作業を着実に進めている。ここではシステムの構成と、現在までの主な動作状況と、今後の応用面の展開について述べる。

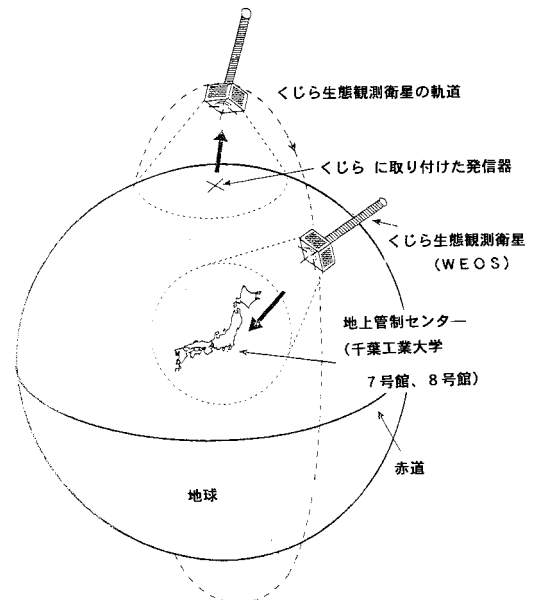


図 1 衛星軌道概念図

## システムの構成

本システムは衛星、地上管制局、および海上のプロ-ブから成る。[1]

高度 800km の衛星は極軌道を周期約 100 分で周回するが、地球はその内側で自転するため衛星のデ-タ取得守備範囲は地球全面となる。ただし衛星との間でいつでも信号のやり取りができるためには衛星のアンテナは常時地球面と対向していなければならない。ここでは長さ 3m のマストを伸展させることによって生ずる重力傾度トルクを利用してアンテナの地球指向を達成している。[2] 鯨に取り付けるプロ-ブには、鯨が海中を潜行するときの深度、温度などを測定するセンサ、そのデ-タを記録するメモリ装置、鯨が呼吸のため浮上したときの位置を測定する GPS 受信機を備えておく。このときメモリ内容、位置デ-タ、および鯨個体識別符号をあわせて衛星に送信する。

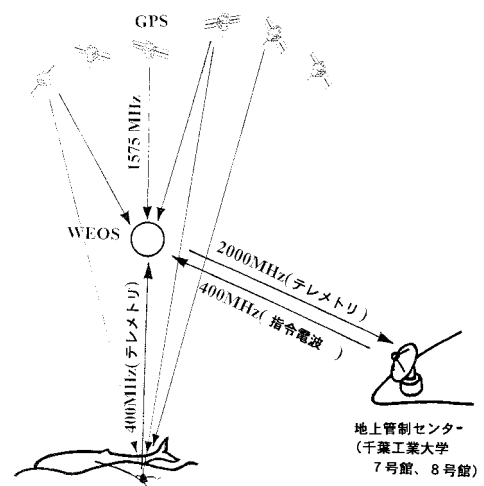


図 2 信号伝送系

鯨の浮上時間がプロ - プに搭載した GPS 受信機のロックオン時間より短い場合も考慮して、衛星にも宇宙用 GPS を搭載して軌道上数箇所の緯経度を求め、さらに衛星に搭載した位相同期受信機からアップリンク 400MHz のドプラシフトを併せてテレメトリ電波で地上に送り、逆演算によって発信源としてのプロ - プ位置を計算するという仕組みも備えている。[3]

### 衛星の構造

本衛星の発端は平成 3 年に行われた第一回衛星設計コンテストに対する千葉工大からの応募にあった。このコンテストはアリアンロケットにおいて可能なピギ - バック小型衛星を予想して、一辺 50cm、重量 50kg という枠内で募集されていた。実現させるための要諦は予算的に膨大なものとしなないことで、それには構造、材料、部品、組立、調整、試験等に際して、人件費を初めとする経費が嵩むことなく、確実に動作し、運用できるようにという方針で設計を進めた。細部において多少の変遷があったが、最終的な構造は図 3 に示す通りである。衛星下面のアンテナが常時地球を指向するよう、マストの伸展によって生ずる重力傾度トルクで姿勢の安定化を図った。衛星上下面にはアルミニウム合金で剛性の高いパネルを用い、それらの間をアルミニウム板金製の正方形柱で接続し、その側面と内側に各種搭載機器を取り付けた。内側の上部には伸展マスト収納部を、下部には統合化制御装置としての電子計算機を搭載した。4 側面はアルミニウムハネカムパネルとし太陽電池を実装した。

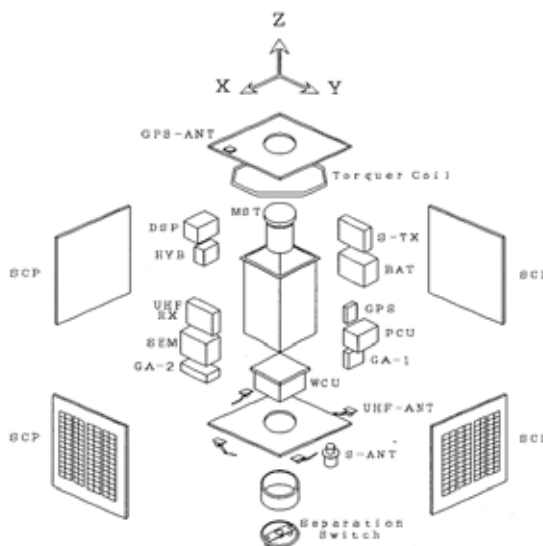
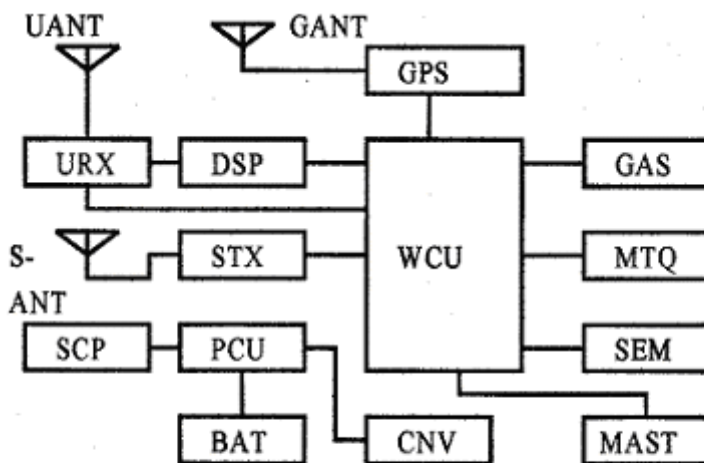


図 3 衛星の構造

### 搭載機器

この衛星は基本的には諸デ - タを収集、記録し、転送するもので、デ - タ項目、取得タイミングなどの多くはコマンドによって可変となる。ブロック構成を図 4 に示す。各サブシステムには対価格効率の向上を意識して積極的に民生用部品を用いている。また機器の製造、組み立てに関しては経験豊富なベンチャ - 企業数社がそれぞれの特技を生かして取り組んでいる。振動衝撃、熱真空、放射線等の宇宙環境試験については、それら企業の技術者のほかに、教育も兼ねて学生諸君の協力を得た。[4][5]



UANT	400MHzアンテナ	GPS	GPS受信機	SCP	太陽電池パネル
GANT	GPSアンテナ	WCU	統合処理計算機	PCU	電力制御器
S-ANT	Sバンドアンテナ	GAS	地磁気センサ	BAT	二次電池
URX	400MHz受信機	MTQ	磁気トルカコイル	CNV	電圧変換器
DSP	400MHz復調機	SEM	環境計測器		
STX	Sバンド送信機	MAST	伸展マスト		

図 4 衛星ブロック構成図

表 1 . 通信方式

通信リンク	用途	周波数	符号とビット速度
鯨プロ - ブより衛星へ	テレメトリ	401 MHz	PCM(NRZ-S)-BPSK ビット速度：300bps シンボル速度：600bps
衛星より地上局へ	テレメトリ	2285 MHz	PCM(NRZ-S)-BPSK 1200bps
地上局より衛星へ	コマンド	401 MHz	PCM(Bi )-FSK 1200bps

衛星は海上の鯨に装着したプロ - ブから送られる生態データを含む 400MHz 帯アップリンクを受信して、その内容を衛星搭載メモリに記録する。衛星が地上局上空を通過するとき、地上局からの 400MHz 帯アップリンクでコマンドを送信すると、衛星はメモリの内容を 2 GHz 帯のダウンリンクで地上に送信する。これらに用いられている通信方式を表 1 に示す。搭載機器サブシステムごとの重量と電力消費は表 2 に示す通りである。

表 2 サブシステムの重量と消費電力

サブシステム	重量[kg]	消費電力[W]
電源	10.0	0.2
通信	2.8	4.1
データ処理	2.3	3.3
姿勢制御	6.5	0.7
計測	2.3	1.7
構造	16.6	0
バランス重量	5.0	0
機内配線	2.2	0
総計	47.7	10.0

### 熱制御

搭載機器の熱制御は完全受動方式とし、構体部品の熱的絶縁、サブシステムの表面処理、断熱多層膜による被覆、シリコン樹脂膜による接触部熱抵抗の均一化などの処置を施した。その結果重力傾度安定化という、太陽からの熱入力条件としてはやや不利な事情を克服し、搭載機器は適正な温度環境で動作を続けている。図 5、6 に軌道上における太陽電池の温度、電流ならびに支柱部の温度状況を示す。

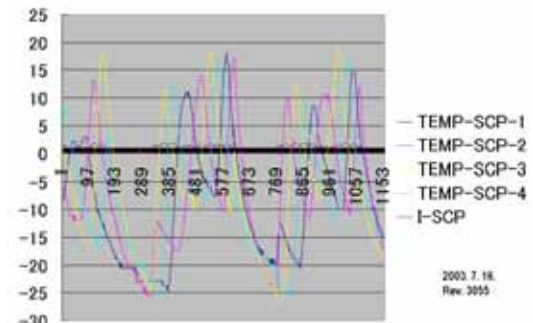


図 5 . 太陽電池の温度と電流

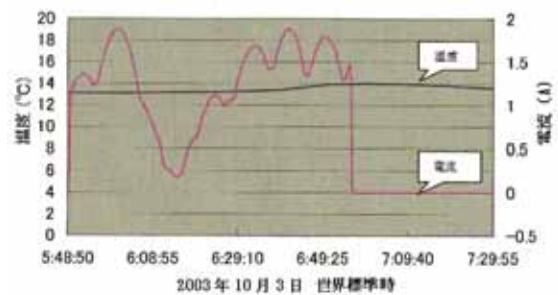


図 6 . 太陽電池電流と支柱部温度

WEOS の動作はきわめて順調で、2003 年 11 月下旬から 12 月上旬にかけて発生した大きな太陽フレアに際しても問題なく推移している。

### 地上管制局

400MHz 帯コマンド送信アンテナ、2GHz 帯受信アンテナはいずれもバックラッシュ・レスの駆動機構をもつ AZ-EL 方式で、千葉工大 7 号館屋上に設置し、光ケーブルにより別棟の受信管制装置に接続して運用している。軌道傾斜角が高いので、将来データ取得率を上げるためには高緯度地域における受信を検討する必要があると考えられる。

## プローブ

プローブには海中の深度、温度などを計測するセンサを搭載し、データはメモリに記録する。鯨が呼吸のため浮上するときにはプローブのアンテナが海面上に出て、搭載したGPS受信機が浮上位置の緯経度を求め、これにメモリに記録されたセンサデータを加え、鯨ごとの識別符号をつけ、400MHzのアップリンクにより衛星に向け送信する。これらの動作に必要な電力は海中における鯨の運動を利用して発電し、得られた電力をリチウム・イオン二次電池に充電して利用する。

これらの機能を果たすための条件を満たすとともに、当面生態観測の対象としている抹香鯨が2000m近く潜水するという事実から、プローブは耐圧容器であり、しかも海面に浮上したときにはアンテナを空中に出す浮力も併せもつものでなければならない。プローブの構成を図7に示す。

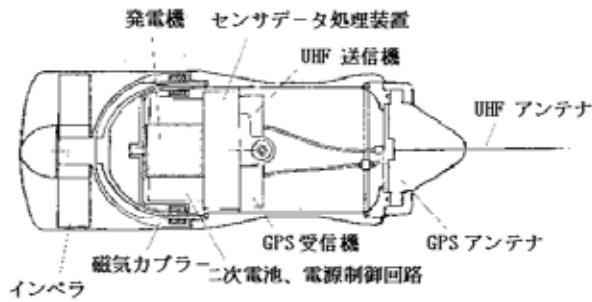


図7. プローブの構成

鯨に対するプローブの装着は船上に設けたエアガンによって行う。エアガンには鯨の脂肪層の厚さに対応した長さをもったピンを装填する。ピンの後端にとり付けたソケットに予めコードを通しておき、その一端に特殊なプラグを介してプローブを繋ぐ。このソケットとプラグがピンとプローブを繋ぐクランプの働きをする。エアガン発射時にはプローブとコードの自由端はどちらも十分なゆとりをもって船上に置かれている。ピン装着後自由端を引くことによってプローブはピンに手繰り寄せられるが、プラグがピン末端のソケットに侵入するとバネでしっかりと固定される仕組みとなっている。ソケットを通してプラグを引き寄せた道糸は強く引くことによって切り離される。エアガンによるピンの装着という方式は、体内への埋め込み、接着、吸盤、ボルト・ナット等を含む選択肢の中で、長期間のデータ取得を達成するためには最適との判断から採用したものである。しかし鯨体への侵襲性を最小とすべく種々の配慮を施している。その形状は図9に示す通りである。

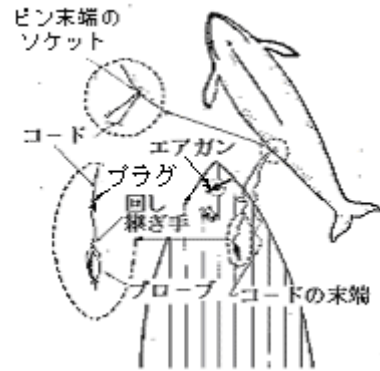


図8. プローブ装着概念図

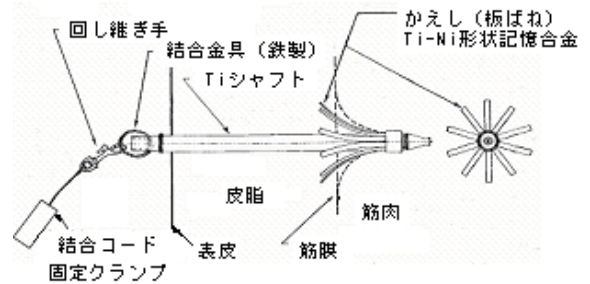


図9. 装着ピン

図に示すようにピンの先端部にはチタン・ニッケル形状記憶合金製の“かえし”をつけ、周囲温度が30℃を超えると1/4円周となるよう記憶させておく。ピンが脂肪層通過後37℃の体温の中で少し引き戻されると反り返って脂肪層裏面に位置する筋膜に寄りかかって定着する。シャフト部は生体適合性に優れたチタンのパイプで、感染を防ぐため内部に抗生物質を入れておき、“かえし”の付け根から染み出すようになっている。

ピンが鯨の脂肪層の少し先まで侵入して止るようにするため、落下試験装置を用い、重量と速度を変えてピンを鯨の脂肪層に落して侵入深度を測定した。その結果を用いることにより、ピンに対して脂肪層のもつ二つの抵抗係数を推定する。さらにエアガンのエネルギー変換効率を測定すると、エアガンのガス圧を与えれば、ピ

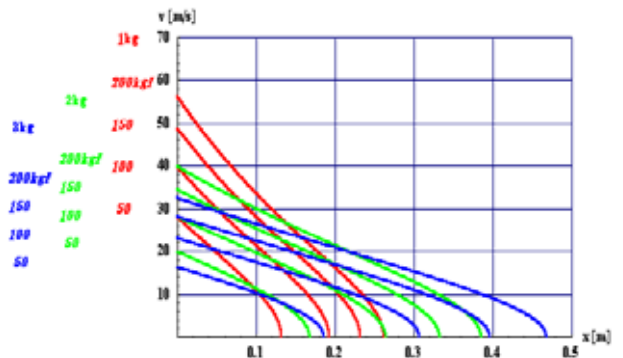


図10. 抹香鯨脂肪層に対するピン侵入速度

ンが皮脂に侵入してから停止するまでの飛程と速度履歴を計算することができる。抹香鯨における計算例を図 10 に示す。

図から明らかなようにピン侵入時の質量が大きいほど速度は小さいが深度は増すことがわかる。また質量が大きいほど迎え角があっても偏向が抑えられるので、ピン発射時にはその後端に、装着後離脱できるウェイトが取り付けられている。そのためエアガンによる大きな飛程は望めなくなるが、鯨に極力接近すれば鯨体の法線とピン軸のなす角は小さくなり、反跳を防いで、より確実な装着が可能となる。

なおプローブ牽引コードとピン末端は図 9 に示すように鉄製の金具で結合し、海中では数年後に腐食し、プローブは鯨から離脱するよう配慮してある。

### 装着実験

プロ - ブの装着は日本近海の鯨について取り掛かることとし、標津、室戸、小笠原、室蘭などで実地に調査を行った。

図 11 は抹香鯨への装着をめざして小笠原父島で行った装着実験作業状況である。現在のところまだ装着に成功していないが漂流ブイによる総合動作試験で基礎データを取得している。



図 11 . 小笠原父島における作業

なお本システムでは個体識別用に 12 ビットの符号を用意してあるので、鯨も含めて 4000 種類の対象についての各種データが取得できるので、各方面への応用に多くの期待が寄せられている。

### 応用

プローブ追跡の基礎データ取得を兼ねて、2004 年 12 月に小笠原父島東方海上で、プローブと同様の機能をもつ GPS 受信機、温度センサ 400MHz 送信機、データ処理装置を装備した直径 35cm の漂流ブイを放流した。WEOS によりその軌跡を追跡した結果を図 12 に示す。

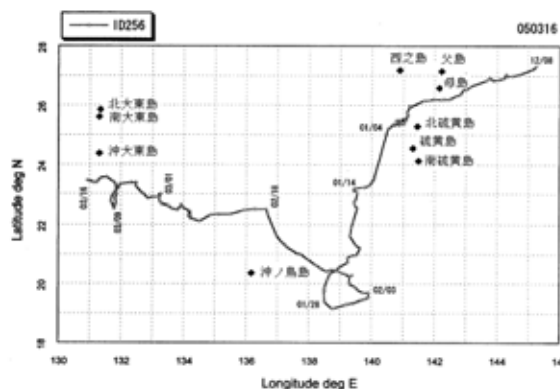


図 12 漂流ブイの追跡

このブイにはドローグをつけてないので、データは海流と風の影響を受けた軌跡で、いわば海上のゴミの経路に対応するもので、航行の安全等にも資すると考えられる。

### 結び

衛星 WEOS により対価格効率の高い小型衛星の可能性を実証した。

マストを用いた重力傾度姿勢安定化を行うと姿勢運用の手間が省け、さらに宇宙用 GPS を衛星に搭載することにより追跡運用が省力化出来ることも確認した。[6]

民生用部品を採用し、適正な試験と実装上の配慮を施せば小型衛星に対して優れた機能をもたせることも可能である。これにより宇宙開発活動がより活性化することも期待できる。

WEOS 計画を契機として、世界標準時と 1  $\mu$ s 以内で同期して位置情報を与える宇宙用 GPS の開発が進められている。これを用いれば WEOS と同等の規模の小型衛星を編隊飛行させることにより、地上に配備された多数の環境観測データ網とリンクさせることにより時間分解能の高い災害監視システムを構築することができるばかりでなく、同時に衛星にガンマ線センサを搭載すれば、突発的に発生するガンマ線バ - スト源の天球上の方位を極めて高い角度精度で求めることも可能となる。[7]

### 文献

- (1)鯨生態観測衛星システム  
 林 友直\*, 岡本良夫\*, 横山幸嗣\*, 細川 繁\*, 富田秀穂\*, 升本喜就\*\*  
 \*千葉工業大学, \*\*升本技術士事務所  
 電子情報通信学会 信学技報 pp.19 - 25, SANE2003-88(2003-12)

(2) 鯨生態観測衛星における姿勢制御  
細川 繁<sup>\*</sup> 林 友直<sup>\*</sup>, 竹沢 進<sup>\*\*</sup>, 羽地和彦<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup> 千葉工業大学、 <sup>\*\*</sup>株式会社ウェルリサーチ  
電子情報通信学会 信学技報 pp.37-42,  
SANE2003-90(2003-12)

(3) 衛星搭載GPSを用いた衛星軌道推定法  
とその応用  
岡本良夫、林 友直、横山幸嗣、細川 繁  
千葉工業大学  
電子情報通信学会 信学技報 A-P2004-25,  
pp. 19-24, SAT2004-14(2004-05)

(4) Hopes on Small Satellites  
Tomonao Hayashi  
Chiba Institute of Technology  
Acta Astronautica, **52**, pp.833-837, 2003

(5) 鯨生態観測衛星(WEOS)開発における対価  
格効率向上手法  
林 友直<sup>\*</sup>、横山幸嗣<sup>\*</sup>、細川繁<sup>\*</sup>、升本喜就<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup> 千葉工業大学、 <sup>\*\*</sup> 升本技術士事務所  
電子情報通信学会論文誌 B J88-B No.1,  
pp.33-40, Jan. 2005

(6)衛星搭載GPSによる衛星軌道要素の決定法  
とその精度  
岡本良夫、林 友直  
千葉工業大学  
電子情報通信学会 信学技報 pp.31-35,  
SANE2003-90(2003-12)

(7) Data Collection by Means of Formation  
Flight of Small Satellites with Gravity  
Gradient Attitude Stabilization  
Tomonao Hayashi<sup>\*</sup>, Yoshiwo Okamoto<sup>\*</sup>, Koji  
Yokoyama<sup>\*</sup>, Shigeru Hosokawa<sup>\*</sup>,  
Tadayuki Takahashi<sup>\*\*</sup>, Kazuhiro Nakazawa<sup>\*\*</sup>,  
Takeshi Takashima<sup>\*\*</sup>, Shin Watanabe<sup>\*\*</sup>,  
Tatsuaki Hashimoto<sup>\*\*</sup>, Masaharu Nomachi<sup>\*\*\*</sup>,  
Yoshinari Masumoto<sup>\*\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>\*\*</sup>JAXA,  
<sup>\*\*\*</sup>Osaka University, <sup>\*\*\*\*</sup>Professional  
Engineer, Japan  
International Aeronautical Congress,  
Vancouver, IAC-04-IAA.4.11.4.04