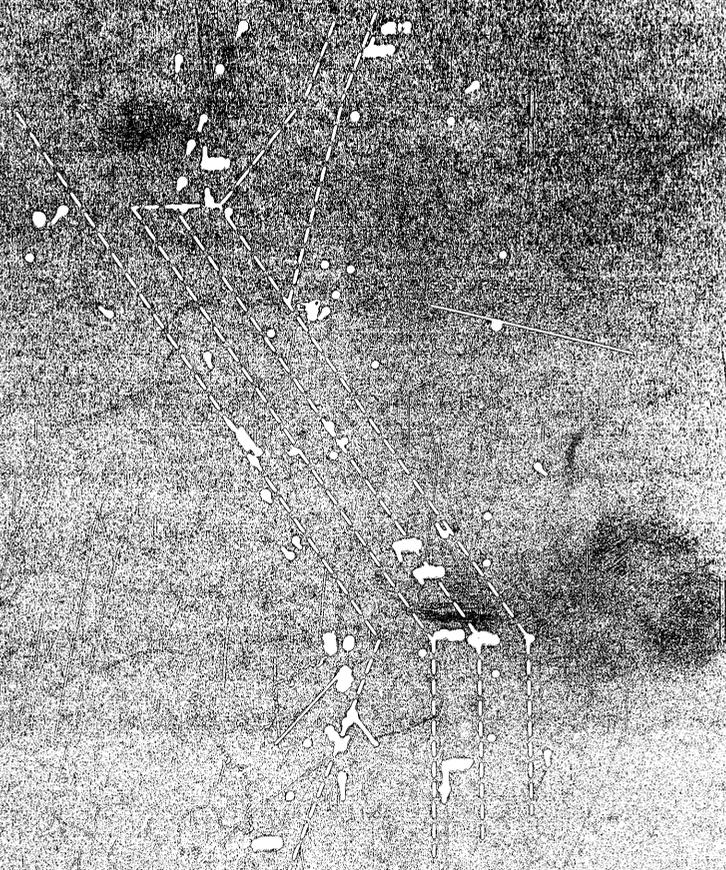


ISSN 0287-6450
Denpa kōhō

ELECTRONIC NAVIGATION REVIEW

電波航法



JACRAN. 32

1986

電波航法研究会 発行

Published by the Japanese Committee
for Radio Aids to Navigation

完全自動 セナー デッカ受信機 SAH-1D



最新の電子技術を結集した完全自動化のデッカ受信機でデッカのレーン，または緯・経度のいずれでも表示でき，さらに航海計算等の種々の機能を内蔵しており，様々な航海情報を得ることができます。

 **セナー株式会社**

本社 〒100 東京都千代田区内幸町2-1-1(飯野ビル)
TEL (03) 506-5331(代表)

札幌営業所 〒060 札幌市中央区南1条西1-1 (東ビル)
TEL (011)231-8421(代表)
仙台営業所 〒980 仙台市中央2-8-16 (仙台東京海上ビル)
TEL (0222)63-0171(代表)
神戸営業所 〒650 神戸市中央区栄町通3-6-7 (大栄ビル)
TEL (078)331-7292(代表)
福岡営業所 〒810 福岡市中央区天神1-14-16 (三栄ビル)
TEL (092)711-1451(代表)

目次

CONTENTS

巻頭言.....副会長 飯島幸人...(2)
Foreword Vice-chairman Yukito IJIMA

研究調査

Research and Investigation

航法衛星などによる国際時刻比較について.....吉村和幸...(3)
On the International Time-Transfers via Artificial Kazuyuki YOSHIMURA
Satellites such as for the Navigation Purposes

赤塚耕輔

Kousuke AKATUKA

浦塚誠

Makoto URAZUKA

森川容雄

Takao MORIKAWA

今江理人

Michito IMAE

三木千紘

Chihiro MIKI

航空管制における音声認識技術の応用について.....東福寺則保...(16)
An Application of Voice Recognition Technique to Air Noriyasu TOFUKUJI
Traffic Control 沖重芳久

Yoshihisa OKISHIGE

出入港自動化に関する一考察.....翁長一彦...(22)
An Aspect for Automatic Navigation on Congested Sea Kazuhiko OHNAGA

デリバリーナビゲーションシステム.....福原裕成...(28)
Delivery Navigation System Hiroshige FUKUHARA

展望

Observation

音声認識技術とその動向について.....橋本清...(35)
An Overview on the Research and Development of Speech Kiyoshi HASHIMOTO
Recognition

時間標準の現状.....佐分利義和...(42)
Present Status of Time Standard Yoshikazu SABURI

戦艦「大和」探索.....遠藤保彦...(46)
The Search for the Battleship "YAMATO" Yasuhiko ENDO

水路部における天文時刻観測.....佐々木稔...(53)
Astronomical Time Observations Conducted by the Hydrographic Minoru SASAKI
Department

研究会記事.....(27) (62)
Records

巻 頭 言

(FOREWORD)

副 会 長 飯 島 幸 人

Vice-chairman

Yukito IJIMA

船舶に始めて装備された電波航法装置は無線方位測定機で、我が国では 1925 年のことであった。その後戦時中に発達したロラン A やレーダなどが戦後急速に普及したが、今や人工衛星を用いる全世界的な航法システムや、通信システムが主流となりつつある。この 60 年を振り返ると、本会の名前に象徴されるように、初期の花形であった Radio Navigation は、今は Electronic Navigation という名前にとって代られ、電波の航法上の地位は、総合航法システムの一部と考えられるようになってきている。そして天文航法や地文航法といった古典的航法は次第にバックアップ的地位に後退し、Electronic Navigation が航法そのものになりつつあるのである。

レーダやロランのような時代の先端装置を有効に船舶に利用する目的で結成された本会の活動は、このような新しい時代を迎えますますますその重要性を増しており、社会的にも期待されているところである。

Navigation といえは従来海や空に限られていたものであるが、最近では陸上でもその有効性が認められるようになって自動車に応用することが検討されている。我々は今まで積んできた航法の実績とノウハウを、海と空だけではなく陸上へも広げて行く機会が訪れている。

一方、船の方は高信頼性知能化船として、殆んど人間の介在なしに航行する船も検討されている。このような状況から、最早 Electronic Navigation という言葉は Intelligent Navigation という言葉に置き代えられる日が来つつあるような気がする。その日のために、本会の使命のますます重くなるのを感じるのである。



Research and Investigation

航法衛星などによる国際時刻比較について

郵政省電波研究所標準測定部

吉村 和幸
赤塚 耕輔
浦塚 誠
森川 容雄
今江 理人
三木 千紘

On the International Time-Transfers via Artificial Satellites such as for the Navigation Purposes

Radio Research Laboratories
Ministry of Posts and Telecommunications

Kazuyuki YOSHIMURA
Kousuke AKATUKA
Makoto URAZUKA
Takao MORIKAWA
Michito IMAE
Chihiro MIKI

1. まえがき

近年における周波数標準器の性能の向上は著しく、精度で 1×10^{-13} 、長期安定度で 1×10^{-14} 台が実現されるようになった。そのため、人工衛星などの地球的規模の結合手段の発達と結びついて、一方では大規模な航法システムや VLBI 観測システムなどの実現を促し、他方ではこれらのシステムを利用した周波数および時刻の比較・供給手段の多様さを産み出し、かつ、精度の著しい向上を可能にした¹⁾。

高精度時刻・周波数の需要の面では、航行や位置決め(しゅんせつ、パイプなどの布設、サルベージ、油田探査などで、必要精度 10 ns 以下)、高速デジタル通信(TDMA で、10 ns 以下)、衛星追尾や VLBI などの宇宙技術(VLBI で、0.1 ns 以下)、相対論の検証などの精密科学分野(相対論検証で、数時間にわたって相対周波

数で約 10^{-16}) などますます多様になり、高精度比較供給の必要性が増している²⁾。

現在、秒は Cs 133 原子の基底状態における放射の振動数に基づいて決められており、これにより刻まれる時刻を原子時と呼んでいる。しかし、我々の生活は平均太陽時に依っているため、原子時にうるう秒を 1 年から 2 年に 1 回挿入して平均太陽時に近づけた時系=協定世界時(UTC)をつくり、運用している。電波研究所で決定する協定世界時 UTC (RRL) は日本標準時の役割を果たし、標準電波などによって通報・供給されている。当然、各国の標準時は精密に合わせる必要がある。また、国際報時局(BIH: フランス、パリ)では、各国の保有する原子時計群の国際比較データを集めて統計平均し、国際原子時 TAI や協定世界時 UTC を決定している。TAI はあらゆる物理量のなかで桁違いに正確なものである(10^{-13} 以下)³⁾。

このように、各国の原子時を精密に比較（または伝送とも言う）する精密時刻比較は、国際的時系を構成し維持する上でも不可欠なものである。従来、ロランC電波航法システムを主に利用してきたが、電波の到達距離（地表波で約 2000 km）や精度（約 0.1 μ s）の点で不十分になり、人工衛星などによる方法がこれに代わってきた。電波研究所では、ATS-1¹⁴⁾、NTS-1¹⁵⁾、BS-1¹⁶⁾、CS-1¹⁶⁾ などによる精密時刻比較の実験を行ない成果を上げてきた。ATS-1 実験では地球回転効果の検出をし¹⁷⁾、BS-1 実験ではドプラー効果の自動的補正を地上局で行ない、更に CS-1 実験では確度 1 ns を得た。

当所では、最近、世界測位システム (GPS) および気象衛星 GMS を利用する国際時刻比較用の受信機を開発し、GPS による国際比較を 1984 年 8 月から、GMS については 1985 年 3 月よりそれぞれ実施するに至った¹⁸⁾⁻¹⁴⁾。精度は 10-20 ns である。また、CS-2 を利用する国内時刻比較のために、新に周波数拡散方式の受信機を製作して確度約 2 ns を得た¹²⁾。その他、超長基線電波干渉計 (VLBI) による国際比較を 1984 年末より米国海軍天文台 (USNO) と約 1 月に一回行ない¹³⁾、国内では文部省緯度観測所などと BS-2 を利用して定期的な時刻比較を実施している¹⁴⁾。

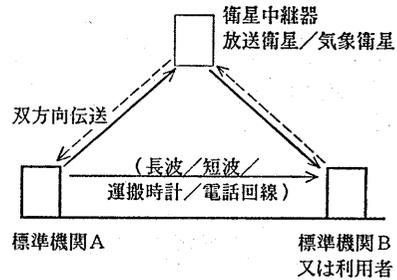
ここでは、衛星などによる精密時刻比較の方式と原理、精度に及ぼす影響要因の補正法、及び当所におけるシステムの概要と比較結果¹⁵⁾などについて述べる。

2. 周波数および時刻の比較・供給の方式と原理

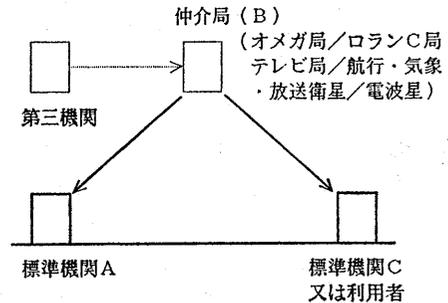
2.1 比較・供給方式

周波数および時刻の比較・供給方式は、直接方式および仲介方式の二つに分けられる (図 1)。直接方式は、直接相手機関または一般利用者に周波数および時刻を送るものであり、標準電波による供給、放送衛星や気象衛星を中継しての供給、通信衛星の中継器を介しての比較などが挙げられる。周波数・時刻比較 (以後、単に時刻比較という) としては、中継器による双方向伝送方式が最も精度が高いものの一つであるが、地上局のコストは高く特定の利用者に限られる。当所の CS 実験はこの例である。標準電波では電離層などの伝播路の影響が大きく、短波で精度が 0.1-1 ms (1 日平均の相対周波数で 10^{-8} - 10^{-7})、長波で約 1 μ s である (表 1)。

仲介方式は、第三者 (仲介局) の出す特定の電波を比較し合う二つ (以上) の機関または利用者が受信し、それを仲介して時刻の比較を行なうものである。電波としては、オメガ、ロラン C、GPS 衛星などの航法電波、地上局および放送衛星からの TV 電波、気象衛星の測距信号などが挙げられる。VLBI も電波星などを仲介とするから、これに含まれてよい。仲介方式による時刻比較



(a) 直接方式



(b) 仲介方式

図 1 時刻比較・供給方式

の原理は、受信局における時計の時刻と仲介電波との時間差を仲介局の位置に変換してから互いの結果の差をとると、仲介電波の影響が消去されて二つの機関の時計の時刻差が求まるということにある。この方式の特長は、概ね受信機が小型で安価であり、かつ高精度が得られることである。したがって、実験例が最も多く、ロラン C や GPS などのように国際比較のシステムとしても採用されてきている。図 2 に、現在ルーチン的に採用されている国際時刻比較網を示す¹⁶⁾。遠距離は GPS、近距離はロラン C 及び TV が主に使用されている。

比較・供給方式の選択で考慮すべきことは、精度及び確度、比較供給可能距離 (カバレッジ)、利用者の費用と利用の難易度などが挙げられる。衛星などの宇宙技術の利用は、精度とカバレッジの点で地上技術の利用に取って代わりつつある。表 1 に、各比較・供給方式の特徴を示す。

2.2 比較原理

直接方式および仲介方式において、受信局で測定される量 T' は次のように表わされる。

$$T' = t_A - t_B + D/c + \Delta\tau_p + \tau_r \quad (1)$$

t_A は A 局の時刻、 t_B は比較を行なう相手局または仲介局の時刻である。 D は両局間の距離、 c は光速、 $\Delta\tau_p$ は伝播路及び相対論効果による遅延の増加、 τ_r は局内遅延である。 cT' は両局間の見掛け上の距離であり、疑似レンジとも言われる。

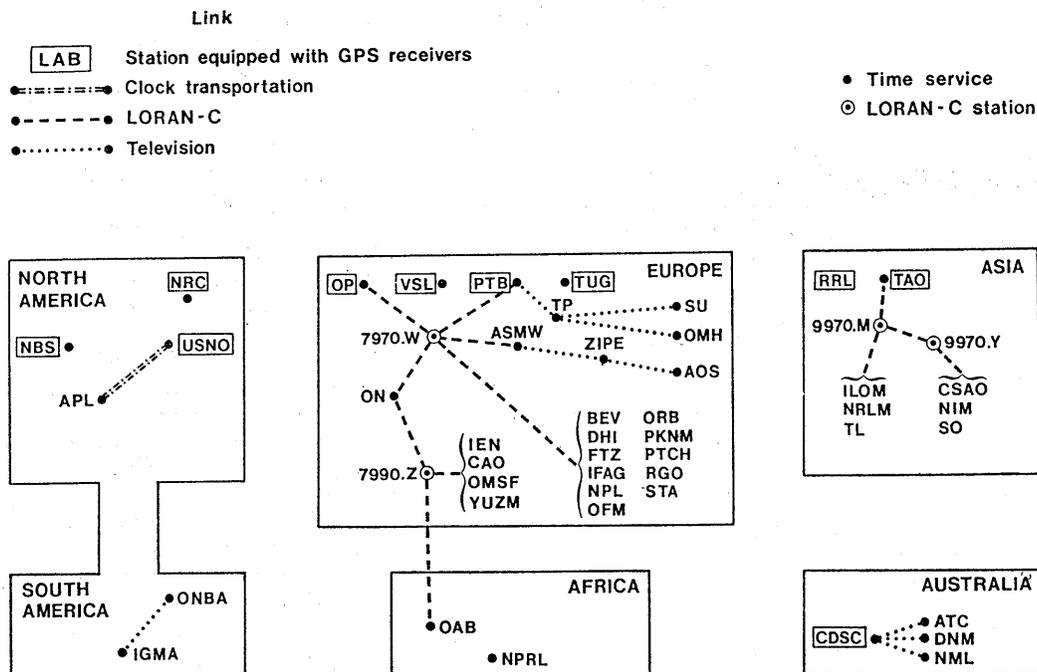


図 2 BIH によって使用されている時刻比較網 (31 Dec. 1984 現在)

このように、地上局や仲介局の位置と局内遅延、電離層や大気圏などの伝播媒質、相対論効果などが精度及び確度に影響するため、これから両局の時刻差を求めるには右辺の第 3 項以下を補正する必要がある。即ち、

$$(t_A - t_B) = T' - (D/c + \Delta\tau_p + \tau_r) \quad (1')$$

仲介方式の場合、 t_B を仲介として、A 局と比較相手の C 局との時刻差は

$$\begin{aligned} \Delta T_{AC} &= (t_A - t_B) - (t_C - t_B) \\ &= t_A - t_C \end{aligned} \quad (2)$$

として計算できる。GPS 衛星の場合、 t_B は GPS Time に統一されているから、(1)' ではこれに対する補正が更に必要である。

双方向伝送方式 (直接方式) では、時計比較を行なう二局が同時に時刻信号を送り合うため、(1)' 式と同じ式 (ただし、 t_A と t_B の順序が入れ変わる) がもう一つ得られる。従って、 $t_A - t_B$ を算出する際、右辺第 2 項以下の共通な部分は打ち消されるので補正する必要はなく、高精度比較が可能になる。

3. 精度及び確度への影響要因の補正

2.2 で述べたように、時刻比較を行なうには (1)' 式の右辺第 2 項以下を補正する必要があり、この補正精度が時刻比較の精度や確度に密接に関係してくる。ただし、静止衛星中継器による双方向伝送方式については、送受信局の局内遅延の補正にほぼ限られてくるため簡単にな

り、高度精がえられる。次に、各影響要因の補正について述べる。

3.1 位置の補正

精密時刻比較の場合、比較を行なう機関などの位置 (地上局または受信機のアンテナ) は一般に固定されているから、かなり正確に決めることができる。この点が測位の利用者と大きく異なる点である。地球規模の比較のため、世界測位系 (WGS-72 など) によって利用者の地心座標 (X_u, Y_u, Z_u) を決めるのが普通である。

一方、中継局または仲介局の位置も、ロラン C 局などのように固定されているときは、同様に問題はない。しかし、衛星などのように位置を絶えず変える場合、その位置決めが精度上大きな問題になる。(1) 式の D は、上記の利用者位置と衛星位置 (X_s, Y_s, Z_s) から、

$$D^2 = (X_u - X_s)^2 + (Y_u - Y_s)^2 + (Z_u - Z_s)^2$$

GPS の場合、衛星位置は衛星から送られてくる軌道 6 要素を使って計算できる。GMS や BS の場合、当所はこれを管理する機関から定期的に 6 要素で送ってもらっている。

衛星軌道誤差による影響は、比較しあう二機関がほぼ同時に衛星からの信号を受信する、いわゆる共通視界法によって軽減できる。このことも高精度時刻比較にとって有利な点である。例えば GPS の場合、衛星軌道誤差の rms が約 26 ns に対し、実際の時刻比較に与える影響は電波研究所と米国国立標準局 (NBS) との共通視界

表 1 精密時刻比較・供給方式と特徴

伝送特質	方式	モード		比較・供給		伝送可能範囲	利用		備考			
		直仲	比供	精	確		費安	容易				
	接介	較	給	度	度		のさ	さ				
宇宙技術の利用	中継器	一方向	○	○		数10us	数10us	衛星による	×	×	精度は処理による	
		双方向	○	○		<数ns	<数10ns	同上	×	×	RRL で確度 1ns	
	放送衛星	○	○	○	○	<数10ns	<0.1us	BS-2:国内(及び韓国)	◎	○	(比較) RRL でBS(供給)-2実験中	
	気象衛星		○	○	○	同上	同上	GMS:アジア・オセオニア	○	○	RRL でGMS による実験実施中	
	航法衛星		○	○	○	同上	同上	全地球的	○	○	(比較) RRL でGP(供給) S 実験中	
	V L B I		○	○		0.1ns	<10ns	全地球的	×	×	RRL で実験実施中	
その他	○		○		1ns	1ns	ヨーロッパ	×	×	LASSO 計画		
地上技術の利用	航法電波	オメガ		○	○		数us	--	大陸間	○	○	
		ロランC		○	○	○	数10ns	数us	-2000km	○	○	国際時刻比較網の一つ
	運搬時計	○	○	○		<数ns	<0.1us	任意	距離依る	◎	◎	確度が最も信頼できる
	地上テレビ		○	○		-10ns	-0.1us	近距離	◎	◎		
	標準電波	長波	○			○	-1us	>1ms	国内	○	◎	要求精度による
		短波	○			○	0.1ms	1ms	全地球的	◎	◎	同上
電話回線	○		○			30us	0.1ms	国内(国際)	◎	◎	RRL で開発の方法	

* LASSO=ヨーロッパにおける衛星使用のレーザー測距による精密時刻比較計画。

法で 3-8 ns である (衛星位置によって異なる)¹⁷⁾。

なお、GPS 測位について付け加えておくと、(1) 式において距離 D または (X_u, Y_u, Z_u) と利用者時計の時刻が未知数になるから、3次元測位の場合(1)の方程式が4つ必要になる。従って、衛星 $s=1, 2, 3, 4$, または1つの衛星なら4か所の異なる位置で観測しなければならない¹⁸⁾⁻²⁰⁾。

3.2 大気圏遅延の補正

大気圏を通過時の電波の EXCESS PATH (通過距離の増加分) は次式で与えられる²¹⁾。

$$L = \int_{\text{Path}} (n-1)dl = L_a + L_w \quad (3)$$

ただし、 n は屈折率。 L_a は乾燥大気による EXCESS PATH, L_w は水蒸気によるものであり、それぞれ次のように興えられる。

$$L_a = 77.6 \times 10^{-6} \int P/T dl$$

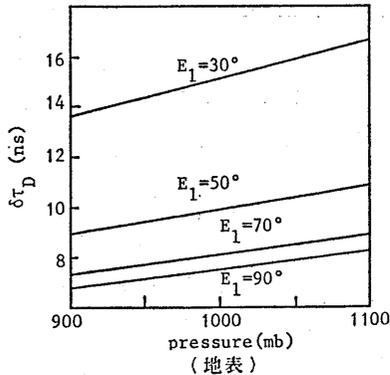
$$L_w = 3.73 \times 10^{-1} \int e/T^2 dl$$

P は大気圧 (mb), T は温度 (K), e は水蒸気圧 (mb) である。これから、大気圏の遅延は

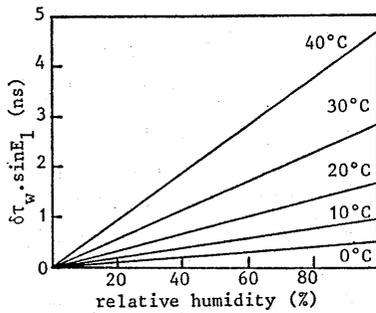
$$\Delta\tau_{\text{trop}} = L_a/c + L_w/c$$

図3に、乾燥大気及び水蒸気による遅延をそれぞれ示す。また図4に、館野において観測された1975年5月から1978年4月にわたる EXCESS PATH を月別に平

均したものを示す(天頂方向)²²⁾。乾燥大気で約 2.2 m (7.4 ns), 水蒸気で最大約 30 cm (1 ns) である。乾燥大



(a) 乾燥大気による遅延



(b) 水蒸気による遅延

図 3 大気圏における遅延

気によるものは比較的正確に補正が可能であり問題はないが、水蒸気によるものの正確な補正は難しい。しかし、絶対値が小さいので時刻比較としては当面あまり問題にならない(VLBIでは0.1 ns以下の精度が必要であり、大いに問題である)。

3.3 電離圏遅延の補正

電離圏による EXCESS PATH は (3) 式と同じ式で与えられる²¹⁾。ただし、

$$(n-1) = -K_1/N_e/f^2 \pm K_2 N_e B \cos \theta / f^3 \quad (4)$$

ここで、 K_1, K_2 は定数、 N_e は電子密度、 f は周波数、 B は地磁気の磁束密度、 θ は磁界と電波のなす角度である。 f^{-4} 以下の項は省略してある。

(4) 式の第 2 項は第 1 項に比し十分小さいので、EXCESS PATH は

$$L = (K_1/f^2) \int N_e dl = 40.5 N_t / f^2 \quad (5)$$

ただし、 $N_t = \int N_e dl$ ($/\text{cm}^2$) は全電子数である。電離圏による遅延は、 $\Delta\tau_{\text{ion}} = L/c$ で与えられ、結局全電子数に比例する。

全電子数は太陽活動度(太陽黒点数)と密接な関係があり、太陽活動度は約 11 年の周期がある。前回の最大活動期は 1979-1980 頃であり、現在は活動の最小期にある。電波研究所では、技術試験衛星 ETS-II (1977 年打ち上げ) からの VHF 波を受信し、ファラデー回転の測定から全電子数を毎日算出している²³⁾。図 5 は、1979 年 3 月及び 1985 年 10 月のそれぞれ 1 か月にわたる全電子

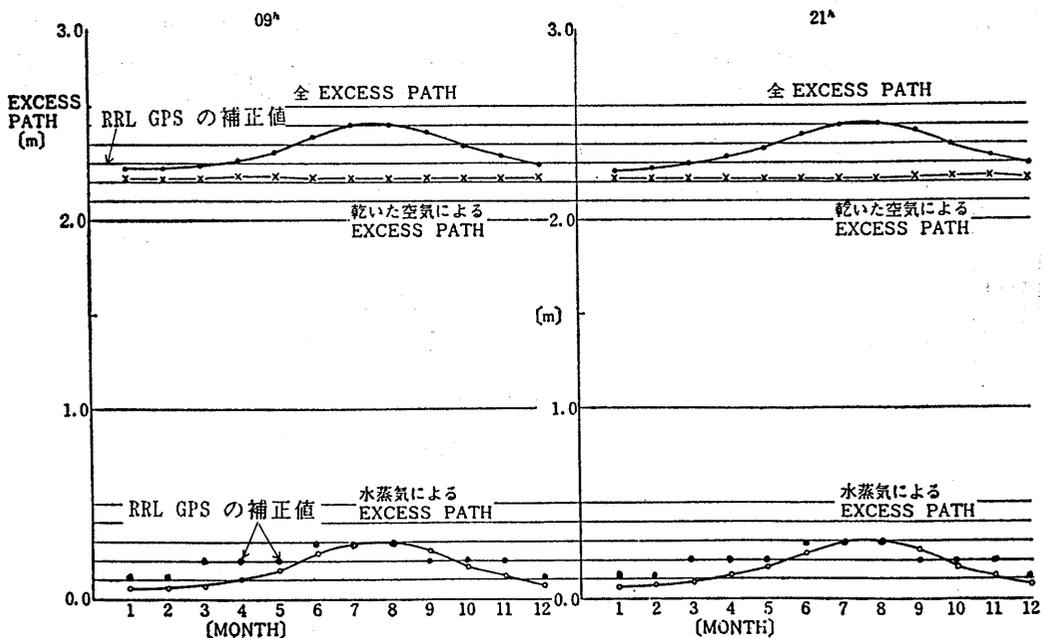


図 4 館野における月平均 EXCESS PATH の年変化 (1975.5-1978.4)

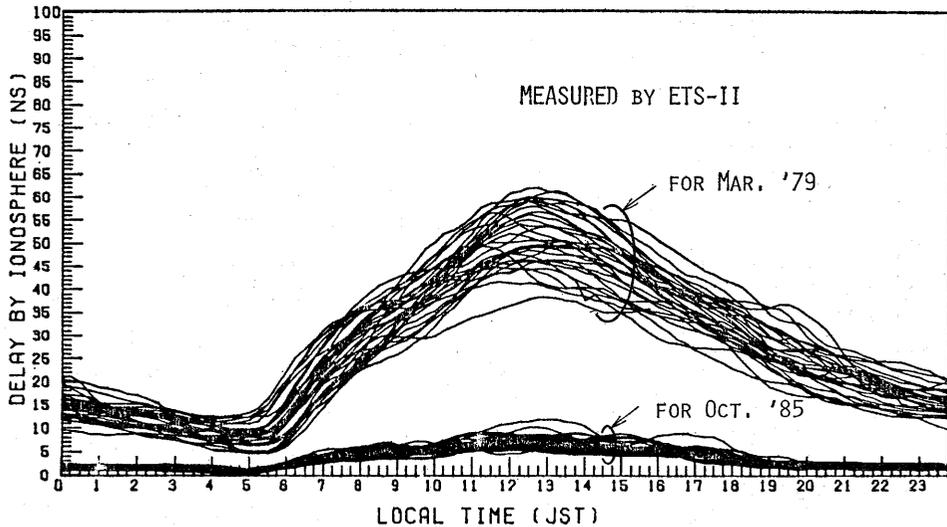


図 5 電波研究所で測定された全電子数の日変化 (GPS 周波数 1.575 GHz で遅延に換算)

数をプロットしたものである。ただし縦軸は、GPS 衛星の測距周波数 1.575 GHz を用いて遅延時間に換算してある ($\Delta\tau_{ion}$)。1979 年で最大 70 ns, 1985 年で最大 10 ns 程度である。これは天頂方向の値であるから、衛星方向の SLANT FACTOR を掛ける必要がある。

このように、太陽活動度の大きい時期では電離層による遅延は非常に重大になる。これに対する効果的な補正は、(5) 式にみられるように遅延の周波数依存性を利用することである。すなわち、衛星から互いにコヒーレントな 2 周波数を同時に受信し、それぞれ T_{m1} 及び T_{m2} を測定したとすると、

$$T_{m1} = T_0 + a_t/f^2 + \delta\tau_{n1}$$

$$T_{m2} = T_0 + a_t/f^2 + \delta\tau_{n2}$$

ただし、 T_0 は求めたい遅延時間、 $a_t = 40.5N_e$ 、 $\delta\tau_{n1}$ 、 $\delta\tau_{n2}$ は無相関ノイズによる遅延である。

これから、無相関ノイズが無視できる場合、 T_0 は

$$T_0 = (f_2^2 T_{m2} - f_1^2 T_{m1}) / (f_2^2 - f_1^2)$$

のように求めることができる。無相関ノイズのある一般の場合、 T_0 のこれによる誤差は、

$$(\Delta T_0)_{rms} = (\delta\tau_n)_{rms} \sqrt{f_2^4 + f_1^4} / (f_2^2 - f_1^2)$$

ただし、 $(\delta\tau_{n1})_{rms} = (\delta\tau_{n2})_{rms} = (\delta\tau_n)_{rms}$ とした。

GPS の場合、 $f_2 = 1.575$ GHz, $f_1 = 1.227$ GHz なので、

$$(\Delta T_0)_{rms} = 10.2 (\delta\tau_n)_{rms}$$

$(\Delta T_0) \leq 1$ ns とするには、 $(\Delta\tau_n) \leq 0.1$ ns の必要がある。

GPS の場合、一般利用者は 1.227 GHz は使用できないので、補正は GPS から送られてくる補正モデルによ

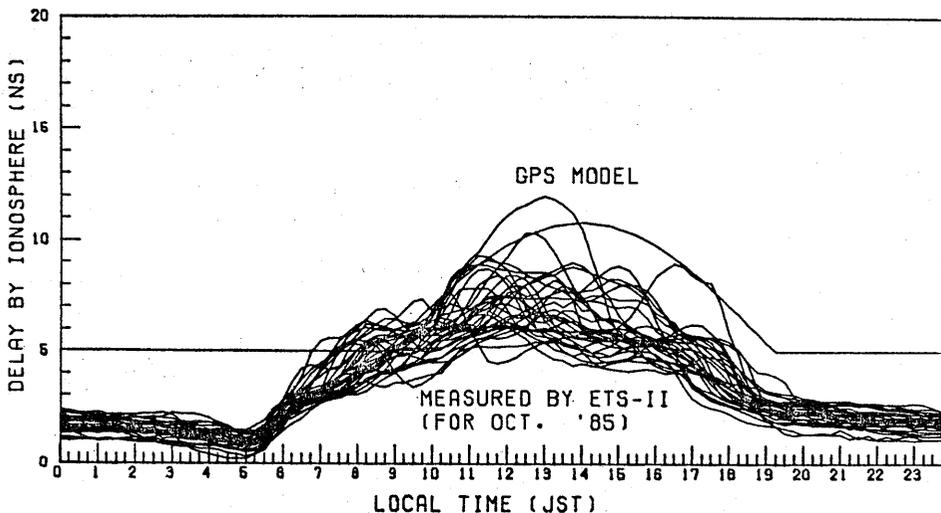


図 6 GPS の電離層遅延補正モデルと同時期における電波研究所での実測値

っている。このモデルは、最低レベルを 5 ns に、最大値のローカル時刻を 14 時にそれぞれ固定し、コサインモデルの最大振幅と周期を変数として利用者の地磁気緯度にたいして衛星から送ってくる²⁴⁾。図 6 に、GPS モデルの例と同じ時期における当所での電離層遅延の実測値を示す。公称 50% 程度の補正と言われているが、図からもそのように読みとれる。太陽活動度の小さい現在とはともかく、今後活動度が上がっていった場合、GPS モデルでは 10 ns (3 m) またはそれ以下を期待することはできないように思われる。当所では、上述の全電子数の実測値を用いて補正する予定である。

3.4 相対論効果の補正

標準周波数・時刻計測の精度は、今や他の追従を許さない程圧倒的なものがあり、このことが精密測位や相対論効果の実験的検証などを大きく前進させる要因の一つになっている。しかし、このことは逆に、時刻比較を行なう場合に精密な位置決めや相対論効果の注意深い補正などを必要としてくる。

時間は重力、速度、座標のとり方などによって影響される。従って、秒を定義する場合や時刻を互いに比較するとき、それぞれを特定の基準系にたいして変換してから行なう必要がある。現在、秒は地心座標のジオイド(平均海面)上で定義される座標時とされている²⁵⁾。従って、時刻比較を行なう場合も測定された量(固有時と関係)を上座標時に変換する必要がある。

地心極座標 (r, θ, ϕ) の位置を速度 v で移動する時計の示す固有時 $d\tau$ と座標時 dt との関係は次式で与えられる²⁵⁾⁻²⁷⁾。

$$d\tau = (1 + \Delta U_T/c^2 - v^2/2c^2)dt - \omega r^2 \cos^2 \theta d\phi/c^2 \quad (6)$$

() 内第 2 項は RED SHIFT と言われるもので、 ΔU_T は地表面からのポテンシャル差である。第 3 項は特殊相対論効果、第 4 項は地球回転による効果でサニャック効果とも言われる。 ω は地球の回転角速度である。+ 符号は進み、- 符号は遅れの効果を表わす。

$$\Delta U_T = -GM_e(1/r - 1/a_1) - \omega^2(r^2 \sin^2 \theta' - a_1^2)/2 + (J_2 GM_e/2a_1)(1 + (a_1/r)^3(3 \cos^2 \theta' - 1)) \quad (7)$$

ただし、 $GM_e = 4 \times 14^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 、 G は重力定数、 M_e は地球の質量、 a_1 は地球半径、 θ' は余緯度。第 3 項は地球の質量分布の影響を考慮したものであり、 $J_2 = 1.083 \times 10^{-3}$ である(2 次の調和項の係数)。地球近傍では、

$$\Delta U_T = g(\theta)h = (9.780 + 0.052 \text{ si}h^2 \theta)h \quad (10^{-14} \text{ の精度を得るには、} h \leq 24 \text{ km})$$

(6) 式の第 2 項以下の効果を相対周波数で表わすには、 dt で割って、

$$\Delta f/f = \Delta U_T/c^2 - v^2/2c^2 - \omega r \cos \theta \cdot v_B/c^2 \quad (8)$$

時計が点 P から Q まで運動したとすると、その間の座標時の動きは (6) 式から、

$$\Delta t = \int_P^Q d\tau(1 - \Delta U_T/c^2 + v^2/2c^2) + (2\omega/c^2)A_B \quad (9)$$

$(2\omega/c^2) = 1.62 \times 10^{-6} \text{ ns/km}^2$ 。また、

$$A_B = \int r^2 \cos^2 \theta d\phi/2$$

A_B は、P、Q、と地心で描く領域の赤道面上への投影面積であり、東向きを正にとる。

次に、数値例を幾つかあげる。RED SHIFT については、地球近傍で、 $\Delta f/f = 1.09 \times 10^{-18}/\text{km}$ 、静止軌道上で、 $\Delta f/f = 5.71 \times 10^{-10}$ となる。今、緯度 $\theta = 40^\circ$ 、高度 $h = 9 \text{ km}$ の位置を飛行機が東向きに $v = 270 \text{ m/s}$ の速度で飛行しているとすると、(8) のそれぞれの項に対応して、

$$\Delta f/f = 9.82 \times 10^{-18} - 4.06 \times 10^{-18} - 1.072 \times 10^{-12} = -4.94 \times 10^{-13}$$

GPS については、高度 $h = 20200 \text{ km}$ のほぼ円軌道を 12 時間の周期で回っているから、これによる RED SHIFT と速度効果は、 $\Delta f/f = 5.27 \times 10^{-10} - 8.4 \times 10^{-11} = 4.43 \times 10^{-10}$ となる。そのため、衛星側で衛星搭載時計の周波数を予め -4.45×10^{-10} オフセットしている。

時計を東向きに赤道に沿ってゆっくりと地球を一周させたとすると、地球回転効果のみになり、その場合の投影面積 A は赤道面の面積に等しくなる。従って、(9) から $\Delta t = -207.4 \text{ ns}$ という大きな値になる。当所における GPS による時刻比較では、 $\pm 70 \text{ ns}$ 、GMS (140°E) では、南北方向のため数 ns にすぎない。

GPS 衛星の場合、離心率が 0.01 以下のほぼ円軌道の移動衛星である。しかし、この円軌道からのわずかのずれによって RED SHIFT は上に述べた一定値から周期的なずれを生ずる。このずれの分を $\delta f/f$ とすると、

$$\delta f/f = -(GM_e/c^2)(1/r - 1/r_0) = -(GM_e/c^2)e \cos u/r$$

r_0 は長軸半径、 e は離心率、 u は離心近点角である。 $r = r_0(1 - e \cos u)$ の関係がある²⁸⁾。

$\delta f/f$ による時刻誤差 δt は $\delta f/f$ を積分してえられるから、ケプラーの方程式 $u - e \sin u = n(t - t_0)$: $n = 2\pi/T = \sqrt{GM_e/r_0^3}$ を用いて次のようになる。

$$\delta t = -(\sqrt{GM_e/c^2})e\sqrt{r_0} \sin u(t) \quad (10)$$

$\sqrt{GM_e/c^2} = 2.22 \times 10^{-10}$ である。GPS の場合、 $r_0 = 2.656 \times 10^7 \text{ m}$ 、 $T = 12 \text{ h}$ (周期)、 $e = 0.01$ 以下であるから、 δt の最大値は 13 ns 程度になる。利用者は、地球回転効果とともにこれを補正する必要がある³⁰⁾。

3.5 局内遅延の補正

局内遅延については実測する必要がある。我々は、GPS 受信機については図 7 のような構成で、GPS 信号シミュレータを用いて、 $651 \pm 15 \text{ ns}$ を得た⁹⁾。また、GMS 受信機については、図 8 の構成で、 $3620 \pm 20 \text{ ns}$ をえた¹¹⁾。得られた確度 15 ns または 20 ns は十分とはいえず、測定法を改善する必要がある。その他、CS 実験

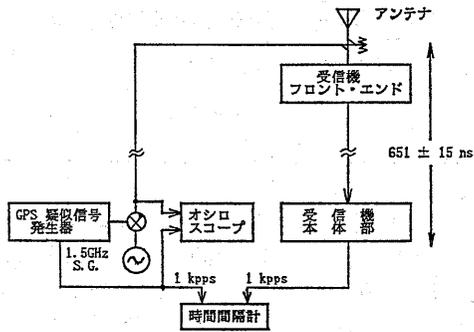


図 7 GPS 受信機の遅延測定系

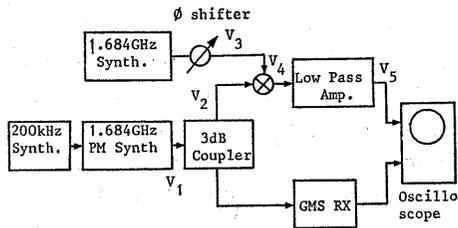


図 8 GMS 受信機の遅延測定系

用の地上局についてもパルス法によって測定したが、精度は不明である。ただし、次に述べる共通時計法（精度約 2 ns）と 4 ns 以下で一致している⁶⁾。

式 (1) 及び (2) から解かるように、時刻比較に与え

る局内遅延の影響は、比較を行なう 2 局の局内遅延の差が関与する。従って、もし一方の局を他方の局のそばへ移動できれば伝搬路は共通になるから、共通の時計を用いて時刻比較実験を行なうことにより、2 局の遅延差が測定できる。このような考えで、我々は CS 用の 1 m 車載局を他の実験局のそばに移動し、図 9 に示すような構成で CS による双方向時刻比較実験を行ない、精度約 2 ns という良好な結果をえた^{6), 12)}。

これと同じ考えであるが、米海軍天文台 (NRL) は GPS 受信機をヨーロッパへ運び、各機関の受信機との遅延差を測定して回った³¹⁾。これは、これまでの運搬時計法 (P.C) による国際比較にたいする精度補正に代わるものであるが、運搬途中の電源がオフでよいなど取り扱いが容易であり、画期的なことである。実験結果は、出発時と帰国時の NRL における 2 つの受信機の遅延差に 10 ns の飛びがあったが、国際比較における P.C の精度の公称 0.1 μs に比べると良好な結果と思われる。

4. 電波研究所における時刻比較システムと比較結果の概要

図 10 に、当所と他機関との間の宇宙技術を利用した周波数及び時刻の比較システムをしめす。比較システムは、国内、アジア、欧米の三つのリンクに分けられる¹⁵⁾。送衛星国内リンクは、従来の地上 TV、ロラン C に加え、放 BS-2、通信衛星 CS-2 を利用する。また、GPS、GMS を利用することも可能である。

アジア・オセオニアリンクとしては、気象衛星 GMS-3 を利用するが、近い将来 GPS も加わってくる予定である。GMS-3 による実験では、すでにオーストラリア連邦産業研究機構 (CSIRO) との間で実験が始まっているが、更に中国上海天文台 (SO) 及び韓国標準研究所 (KSRI) との間でも行なうべく、現在政府間レベルの協定の下でこれらの機関の受信機開発に技術協力しているところである。なお、上海天文台との間では、1986 年末から VLBI による時刻比較も行なう予定である。

欧米リンクは、従来のロラン C に代わって GPS と VLBI を利用するものであるが、これによって初めて当所と欧米が直接結ばれることになった。実験の相手機関は米海軍天文台 (USNO) であり、GPS では 1984 年 8 月から、VLBI は 1984 年 12 月から約月に一回実験を行なっている¹⁸⁾。GPS による比較データは、当初の保有する原子時計のデータとともに国際報時局 (BIH) に送られ、国際原子時 TAI の計算に寄与している。

4.1 GPS による時刻比較

GPS は米国防省による軍事目的の衛星であり、1989 年までに合計 18 個の衛星 (NAVSTAR) を軌道にのせる予定である³⁰⁾。各衛星は Cs 及び Rb 原子時計を搭載

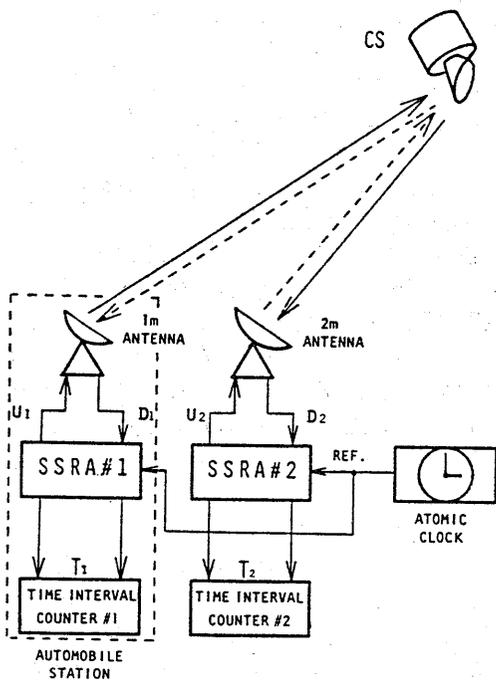


図 9 双方向伝送方式による時刻比較システムの総合遅延測定系

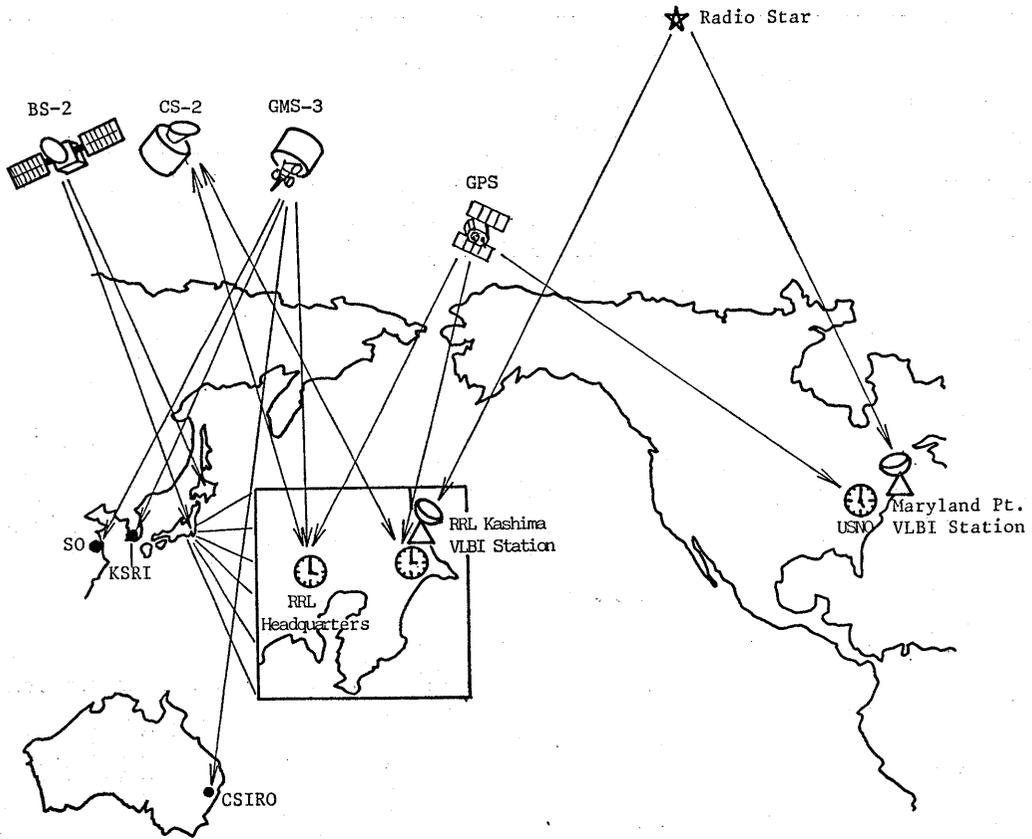


図 10 電波研究所における宇宙技術による時刻比較システム

しており、現在 6 個の衛星の受信が可能である。軌道傾斜角は 63 度 (将来 55 度の予定)、高度 20,200 km のほぼ円軌道で周期は 12 時間である。測距信号周波数は 1.575 GHz (L1) 及び 1.227 GHz (L2) であり、L1 は C/A 及び P コードで、L2 は P コードでそれぞれ周波数拡散変調されている。我々一般利用者は L1 の C/A コードしか利用できないため、二周波による電離層遅延の補正はできない。

L1 はさらに 50 BPS で PSK 変調され、衛星軌道補正パラメータ、衛星時計補正パラメータ、電離層補正パラメータ、他の NAVSTAR 衛星の補正値の概略値などを送ってくる。GPS の使用する測地系は WGS72 であり、時系は協定世界時 UTC と同期した GPS TIME を維持している。衛星時計の補正はこの GPS TIME に対してなされるため、我々は (1)' 式において自局の時刻と GPS TIME の差を計算することになる。

電波研究所では、GPS 受信機の開発に 1983 年に着手し、1984 年秋に一応完成させた。そして、USNO との比較データを、一次周波数標準器を含む原子時計群のデータとともに BIH へ送付し始めた。また、その後も受信機のハード、ソフトにわたる改良を進め現在に至って

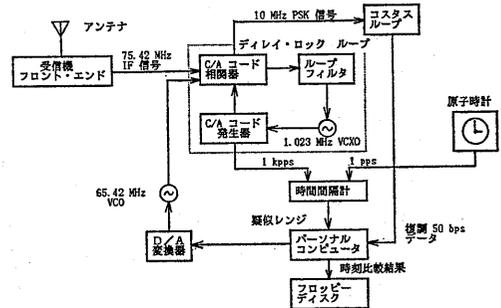


図 11 電波研究所の GPS 受信機の較正

いる。

図 11 に我々の開発した受信機の構成を示す。アンテナは 1 ターンのヘリカルでやはり手製であるが、ビーム幅が約 100 度と少し狭いのでプログラム追尾を行なっている。将来は、この追尾システムを利用して高利得アンテナも使用する予定である。回路は他のものほとんど変わりがなく、C/A コードの復調には遅延ロック回路を、50 BPS の復調にはコスタスループを用いている他、衛星ドプラーの吸収は軌道情報による計算機制御でおこなっている。データ処理も含め、全システムはパソコン

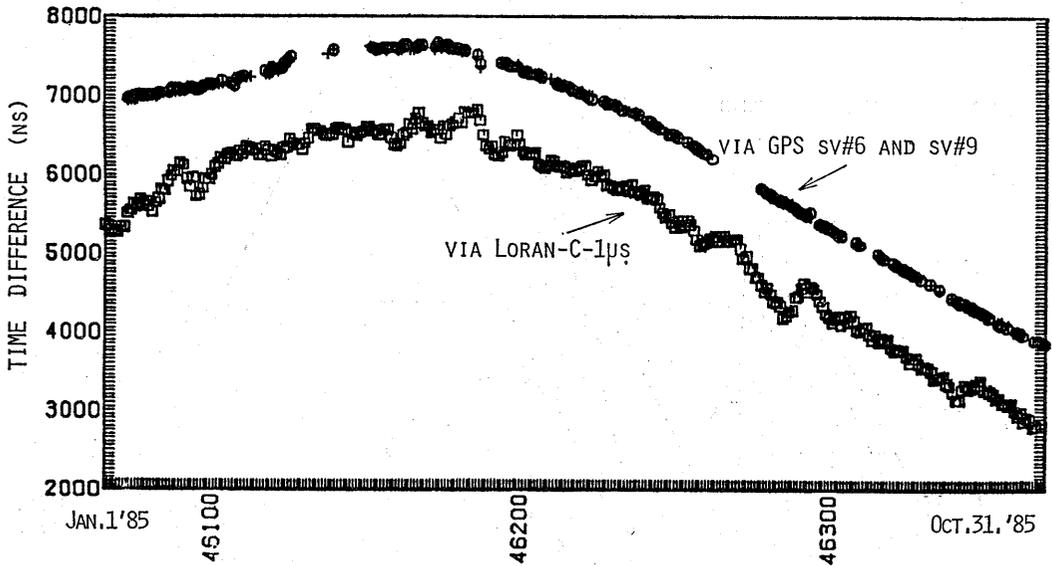


図 12 GPS 及びロランCによる UTC (RRL)-UTC (USNO)

で制御されている。

受信機入力 C/N_0 に対する C/A コード同期系の時間変動 (従って, 出力信号の時間変動) は, 実際に受信可能な $C/N_0=40-50$ dBHz に対し, $10-20$ ns であるが, データの平均化によって大幅に軽減している。受信機の温度特性は約 3 ns/ $^{\circ}\text{C}$ ($15-35^{\circ}\text{C}$) であるが, 室温は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下に制御されている。

次に, 時刻比較結果を示す。比較スケジュールは NBS が用意する共通視界法で, 一回の測定が 15 分間 (初期同期 2 分, 測定 13 分) である。各 13 分間の測定値は平均化され, GE MARK III 計算機ネットワークを通じて国際的にデータの交換が行なわれている。

図 12 は USNO との比較結果で, 1985 年 1 月から 10 月のもので GPS 衛星 6 と 9 を使っている。各衛星にたいし変動幅は, $P-P$ で $50-60$ ns, rms で 20 ns 程度である。しかし, 全衛星による受信値の $P-P$ 幅は 100 ns 程度である。結果は, 我々の時計の二度にわたる周波数調整によって大きく曲がっている。この期間, USNO による運搬時計 (P.C) が 3 度行なわれたが, GPS の結果はこれと P.C の誤差 ($0.1 \mu\text{s}$) 内で一致した。図には, ロランCによる比較結果も示しているが, 我が国が利用する北西太平洋網が欧米機関の利用する北大西洋網とは直接結ばれていないため, 間に入るモニタ局の時計の影響などで長期的の精度がかなり劣化しているのが分かる。

図 13 は, 図 12 から計算した周波数安定度であるが, 平均化時間 τ が 30 日以上上がっているのは時計調整によるもので, この部分をさけて計算した結果を大きな丸で囲んである。×印は, 衛星 6 と 9 の結果の差をとり

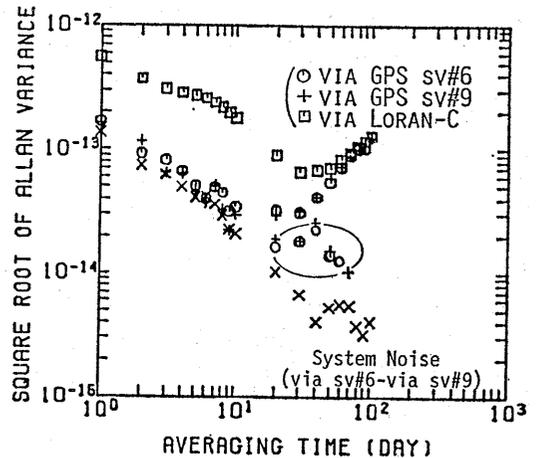


図 13 図 12 の周波数安定度

$1/\sqrt{2}$ したものであるが, 両衛星の受信時間差が 1 時間 40 分と短いため時計の影響は無視でき, GPS 比較システムの特性を示していると思われる。白色雑音のため, $1/\tau$ の特性になるべきであるが³²⁾, 残念ながら 1 日-5 日の範囲ではこれからはずれている。そのため, $\tau=10$ 日で約 2×10^{-14} になっているが, これは約 20 ns の精度に相当している。 $1/\tau$ からのはずれは, 我々の受信機によるものと考えられ, 現在原因を究明中である。図から, Cs 原子時計の特性を伝送するには, 10 日以上必要なことがわかる。

東京天文台 (TAO) との間でも同様に時刻比較を行なっているが, 結果は USNO の場合と比べて長期精度が数 ns 程度改善されている。また, ロランCによる結果

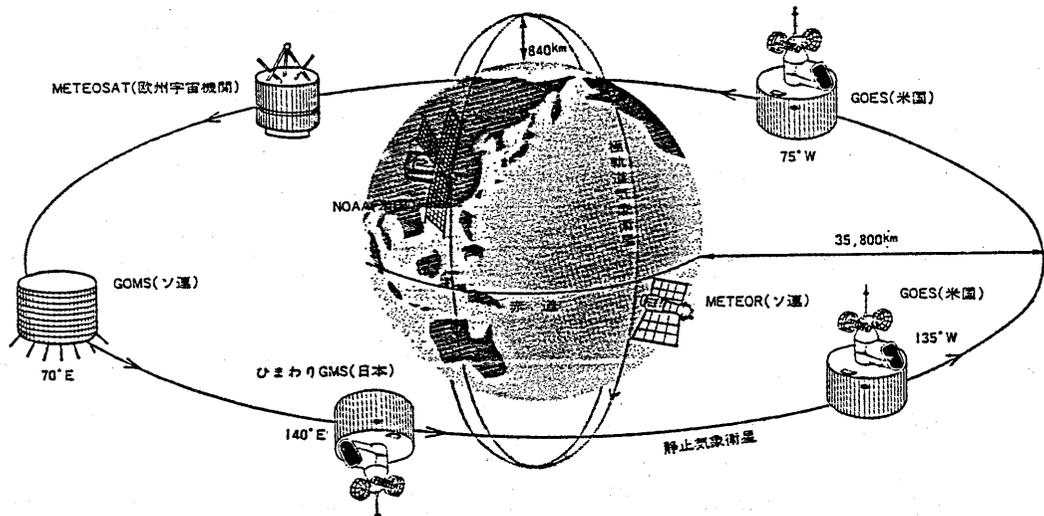


図 14 世界の静止気象衛星の配置

は、平均化時間 10 日でも GPS の場合より 2-3 倍劣化する程度である。

4.2 GMS による時刻比較

気象衛星は、現在 GMS (日本), GOES (米国, 2 個), METEOSAT (欧州), GOMS (ソ連) が静止軌道にある (図 14)⁸⁹⁾。米国 NBS では、GOES を使用して時刻供給サービスを行なっている。GMS はアジア・オセオニア地域をカバーするため、当所では GMS の測距信号 1.684 GHz 用の受信機を開発し、1985 年 6 月からオーストラリアの CSIRO と仲介方式による時刻比較を開始している。GMS に対する三点測距は 1 日 4 回行なわれるため軌道決定精度がよく、これを利用する利点の一つになっている。三点測距による軌道決定の確度は 15 m である。

測距信号は、27.78 kHz など AM 変調された 200 kHz の信号で位相変調されているため、これを検波して時刻比較に用いる。(1)' 式の t_B は、この場合 GMS の位置における 200 kHz トーンの位相になる。27.78 kHz は、200 kHz のアンビギュティを除去するために使用される。図 15 に、時刻比較用 GMS 受信機の構成を示す。アンテナは、1.8 m のパラボラを用いているが、もっと小型のものでも使用可能である。

図 16 に、CSIRO との時刻比較結果を示す。GMS に

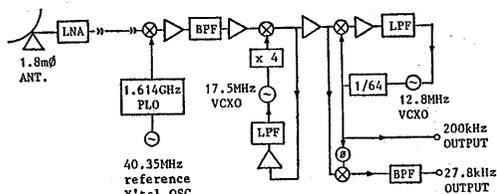


図 15 CMS 受信機の構成

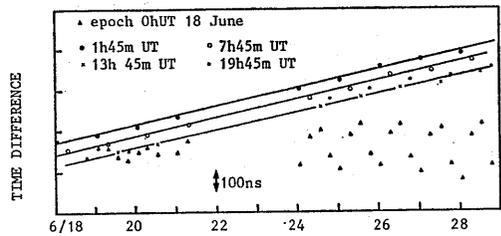


図 16 GMS によるオーストラリア CSIRO との時刻比較結果

対する測距に合わせて 1 日 4 回の受信を行なっているため、衛星の日周運動による $P-P$ 100 ns 程度の変動があるが、毎日 1 回同一時刻における比較を行なうと変動の RMS は 10 ns 以下になる。これは、GPS による結果と同等である。図の Δ 印は、最初の日の 6 要素のみを使用して軌道を予測したときのもので、経過日数とともに誤差が拡大していき、GMS のように高い頻度で測距することの有効性を示している。現在、気象庁から毎日 0 時 UT における軌道 6 要素をもらいうけているが、毎回の測距結果を直接使ってその都度の軌道を決めるようにすれば、日周変動を除くことができると思われ、その方向で検討している。

今後、CSIRO とは GPS による時刻比較も平行して行ない、また中国上海天文台及び韓国標準研究所とも GMS による比較を行なっていく予定である。

4.3 CS-2 による時刻比較

国内通信衛星 CS-2 を使用する、双方向伝送方式による時刻比較システムを図 17 に示す。従来、周波数拡散 (SS) 通信装置を使って、CS-1 による実験を行なってきたが⁶⁾、装置の老朽化のため新しい時刻比較専用の装置を最近製作した¹²⁾。拡散帯域幅は 5 MHz である。地球

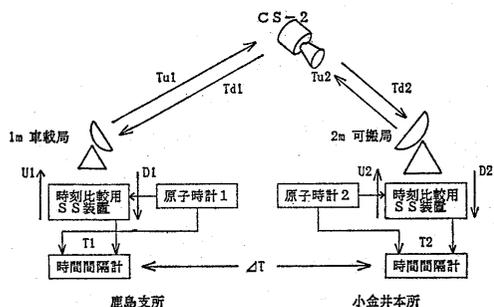


図 17 CS-2 双方向時刻比較実験システム

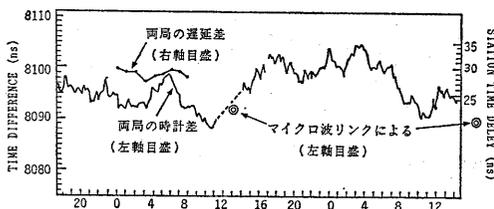


図 18 CS-2 による電波研究所本所-鹿島間時刻比較結果

局は、1m 車載局、2m 局 (RRL 本所)、13m 局 (鹿島支所) であるが、1m 車載局による移動が本システムの特長である。これによって、前に述べたように共通時計法による高精度のシステム遅延の測定も可能になっている。

図 18 に、2m 局 (本所) と 1m 局 (鹿島) との間で行なった実験結果を示す。これから、両局の Cs 時計の時間差は約 $8 \mu\text{s}$ であることが分かる。同時に行なった専用マイクロ回線による比較との差は約 10 ns であった。前に述べたように、共通時計法によるシステム特性の測定により、精度 $2\text{-}3 \text{ ns}$ 、精度約 1 ns をえている。一方、図の時刻差変動を周波数安定度であらわすと、30 分平均で約 1×10^{-12} 、3 時間平均で約 5×10^{-13} となるから、後者は Cs 時計の安定度を表わしていることがわかる (システムによる安定度は、3 時間平均で約 10^{-13} ($1 \text{ ns}/3 \text{ 時間}$))。

SS 装置の特長は周波数共用を可能にすることであり、一般に衛星中継器の使用が有料であることを考えると、他の通信信号との共用は重要な課題である。将来、インテルサット衛星などによる国際時刻比較への適用を考慮し、この点に関しても検討を進めている。

4.4 その他の時刻比較

先に述べたように、VLBI による時刻比較を 1985 年より約毎月 1 回 (各数時間) USNO との間で行なっている。VLBI については、本誌に紹介したことがあるので、参照されたい³⁴⁾。実験結果は、精度についてはまだ評価できていないが、精度は 1 ns 以下をえている。国

内では、建設省国土地理院との間で VLBI 実験の一環として時刻比較もおこなっている。1986 年末からは、上海天文台との間でも行なっていくこととなる。

放送衛星 BS-2 による時刻比較実験は、文部省緯度観測所との間で 1985 年初頭より毎週一回行なっている¹⁴⁾。得られた精度は約 18 ns である。BS-2 の測距は週一回定期的に行なわれているが、時刻比較の実験日は軌道決定の数日後であり、軌道誤差の影響はそれ程大きくはない。BS-2 利用の利点は、受信機が汎用で安いということであり、一般利用者にも比較的容易に高精度比較が可能である。今後、国内の他の幾つかの機関も参加していく予定である。

5. むすび

電波研究所の宇宙技術を用いた時刻比較システムについて、時刻比較の方式や原理、補正法とともに述べた。国際的には現在 GPS が主流になりつつあるが、軍事目的のためその将来はかなり不安定な要素を含んでいる。すなわち、使用を有料化する問題、C/A コードの SN 比を劣化させる問題などがあり、楽観を許さない。CCIR の宇宙技術による時刻供給に関し検討する作業班 IWP 7/4 もその結論 (1985 年) として、特別に優れた比較システムを否定し、将来のいかなる事態にも対処しようように様々な方法による実験研究を進めていくべきことを強調している。上に述べた当所の時刻比較システムは、それぞれ独自の特徴を有しており、これらの実験研究を進めることにより国際的な時刻比較システム確立に寄与していけるものと考えている。

謝辞： GPS に関し、貴重な資料を提供していただいた横河北辰 (株) 木村氏及びアンリツ (株) 小林氏、日頃御鞭撻いただいている岡本部長に感謝します。

参考文献

- 1) 吉村和幸：時刻と周波数の国際比較，電気学会技術報告，II 部第 175 号，1984. 9.
- 2) Report 518-2, CCIR 第 15 回総会, Geneva, 1982.
- 3) 吉村和幸 他：国際時刻比較用 GPS 受信機の開発と比較結果，第 23 回飛行機シンポジウム予稿，1985. 10.
- 4) M. Yamamoto, et al.: A Time Comparison Experiment Performed by SSRA System via ATS-1, J. Radio Res. Labs., Vol. 23, No. 110, March 1976.
- 5) Y. Saburi, et al.: T&F Comparisons via Broadcasting Satellite and Navigation Technology Satellite, Proc. PTIT, Nov. 1979.
- 6) M. Imae, et al.: Time Comparison Experiments with Small K-band Antennas and SSRA Equipments via a Domestic Geostationary Satellite, IEEE

- Trans., Vol. IM-32, No. 1, March 1983.
- 7) Y. Saburi, Observed Time Discontinuity of Clock Synchronization in Rotating Frame of the Earth, J. Radio Res. Labs., Vol. 23, No. 112, Nov. 1976.
 - 8) 浦塚 誠 他: 国際時刻比較用 GPS 受信機の開発と時刻比較結果, 第 63 回電波研研究発表会予稿, 1985 年 6 月.
 - 9) M. Imae, et al.: Development of a GPS Time-Transfer Receiver and Time Comparison Results, Proc. 39th ASFC, May 1985.
 - 10) 三木千紘 他: GPS による長期国際時刻比較結果, 昭和 61 年度全大予稿, 2627.
 - 11) 森川容雄 他: 静止気象衛星 GMS-3 による国際精密時刻比較, 昭和 61 年度全大予稿, 2626.
 - 12) 浦塚 誠 他: CS-2 衛星によるスペクトル拡散時刻比較実験, 昭和 61 年度全大予稿, 2625.
 - 13) 河野宣之, 吉野泰造: VLBI 技術による精密測位と精密時刻比較, 第 132 回放送衛星研究会資, 1985. 6.
 - 14) 佐藤得男 他: 放送衛星 (BS-2a) による精密時刻比較実験, 第 35 回精密周波数応用技術委資 35-2, 1985. 10.
 - 15) K. Yoshimura, et al.: Research Activities on Time and Frequency Transfer using Space Links, Proc. IEEE, Vol. 74, No. 1, Jan. 1985.
 - 16) BIH: Annual Report for 1984, 1984.
 - 17) D. W. Allan and M. A. Weiss: Accurate Time and Frequency Transfer during Common-View of a GPS Satellite, Proc. 34th ASFC, May 1980.
 - 18) J. J. Spilker, Jr.: GPS Signal Structure and Performance Characteristics, Navigation, Vol. 25, No. 2, Summer 1978.
 - 19) C. R. Payne, Jr.: NAVSTAR Global Positioning System; 1982, 3rd International Geodetic Symposium in Satellite Doppler Positioning, Feb. 1982.
 - 20) 運輸省航海術教科書: 新衛星航法システム NAVSTAR GPS.
 - 21) 中村健治: VLBI に及ぼす伝搬の影響, 電波研季, Vol. 26, No. 137, March 1980.
 - 22) 小池国正, 河野宣之: ラジオゾンデデータによる EXCESS PATH の計算, 電波研季, Vol. 26, No. 139, Sept. 1980.
 - 23) H. Minakoshi and K. Shinno: Total Electron Content in the Asian Mid-Latitude Region and its Effects on Earth-Space Propagation, Proc. ISAP, 1985.
 - 24) J. A. Klobuchar: Ionospheric Correction for the Single Frequency User of the Global Positioning System, 1982 IEEE CH 1824-2/82/0000-0226.
 - 25) Relativistic Effects in a Terrestrial Coordinate Time System, CCIR Report 439-3, 1982.
 - 26) N. Ashy and D. W. Allan: Practical Implications of Relativity for Global Coordinate Time Scale, Radio Science, Vol. 4, No. 4, July-Aug. 1979.
 - 27) 佐分利義和: 周波数・時間計測における相対論効果, 電波研季, Vol. 29, No. 149, Feb. 1983.
 - 28) 長沢 工: 天体力学入門, (上) (下), 地人書館.
 - 29) 萩原幸男: 測地学入門, 東京大学出版会.
 - 30) A. J. Van Dierendonck, et al.: The GPS Navigation Message, Navigation, Vol. 25, No. 2, Summer 1978.
 - 31) J. A. Buisson, et al.: Absolute Calibration and Precise Positioning between Major European Time Observatories and the U.S. Naval Observatory using GPS, CCDS/85-17, May 1985.
 - 32) D. W. Allan, et al.: Accuracy of International Time and Frequency Comparisons via Global Positioning System Satellite in Common-View, IEEE Trans., Vol. IM-34, No. 2, June 1985.
 - 33) 知田 久: 気象衛星システム開発の経緯, コミュニケーション, No. 2, 1984. 5.
 - 34) 吉村和幸: VLBI と日米共同実験, 電波航法, No. 29, 1983.

航空管制における音声認識技術の応用について

運輸省 電子航法研究所

東 福 寺 則 保

沖 重 芳 久*

(* 現在, 福岡航空交通管制部)

An Application of Voice Recognition Technique to Air Traffic Control

Electronic Navigation Research Institute
Ministry of Transport

Noriyasu TOFUKUJI

Yoshihisa OKISHIGE*

(* Presently Fukuoka Area Control
Center, Ministry of Transport)

1. ま え が き

安全で効率のよい航空交通の流れを保つことを目的とする航空管制システムは現在に至るまで段階的に大きく発展してきた。この背景には通信技術や情報処理技術の進展がある。特に、近年のコンピュータやこれを用いた情報処理技術の発展はめざましいものがあり、わが国や諸外国でこれらの新技術を航空管制システムに应用する研究・開発が進められている。このうちで音声認識技術に関しては、航空管制システムで用いられている情報処理システムのキー入力に代る情報入力的手段として、また、通信処理への応用技術として、その可能性が注目されている。

本稿では、筆者らが行ってきた航空管制シミュレーションへの応用方法と実験例等について紹介する。

2. 航空管制シミュレーションへの応用目的

航空管制システムの制御系を図1に示す。これは情報処理システムを用いた場合であり、航空機の位置情報はレーダ・センサーとコンピュータを介して表示装置の画面上に表示される。管制官はこの位置情報をもとに将来位置を予測し、安全で効率のよい流れを保つために必要な管制指示を音声通信によりパイロットに通信する。

このほかに管制官の作業としては表示装置を介してコンピュータへの入力、航空機の飛行情報を記載した運航票への記入作業等がある。

このような航空管制システムの解析の一方法として、

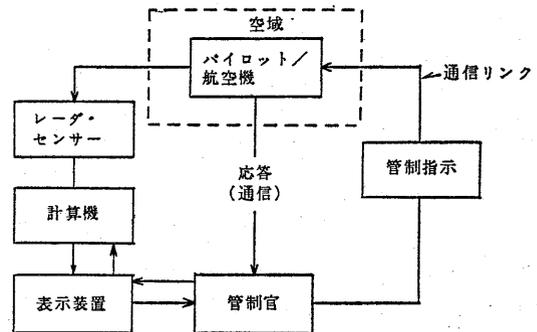


図1 航空管制システムの制御系

また、管制官の訓練用としてはダイナミック・シミュレーションの手法が用いられる。この場合、コンピュータやレーダ表示装置等で構成されるシミュレータを用いて図1の制御系を模擬することになる。シミュレータの制御系を図1と対比させて図2に示す。

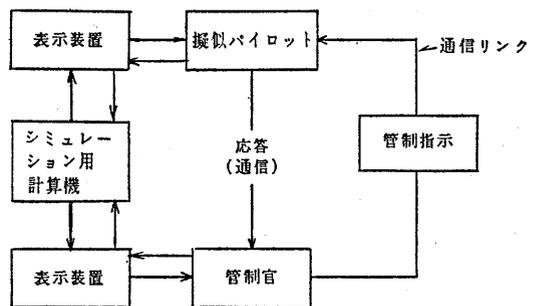


図2 航空管制シミュレータの制御系

管制官はレーダ表示装置に表示される擬似航空機の動きを見ながら管制指示を发出する。シミュレーションの場合は擬似パイロットが必要である。擬似パイロットは管制指示を受けて擬似航空機の制御指示を計算機に入力し、さらに、音声で管制官に応答する。

擬似パイロットへの交通状況の表示にはレーダ表示装置等が用いられる。擬似パイロットの制御指示の入力では、まずトラック・ボールにより制御対象の擬似航空機や高度・速度・針路等の制御項目を指定し、次にキーボードから内容を入力する方法が一般的である。

このように従来は擬似パイロットと擬似パイロット用の表示装置が必要である。また、管制機数が増加すると擬似パイロットの作業量が増えるため、シミュレーションの運用も複雑になる。従って、管制指示の処理に音声認識技術を応用し、指示内容を直接計算機に入力し、擬似航空機の動きを制御できると効率のよいシミュレーションが行える。

航空管制シミュレーションへの音声認識技術の応用に関しては米国連邦航空局で初期の検討がなされている²⁾。わが国では航空管制用語を例題として音声認識装置の評価がなされているが³⁾、まだ実際に用いられていない。また、筆者らは汎用の音声認識装置とマイクロコンピュータを用いた最初の実験を行ったところである³⁾。

3. 航空管制用語

2.で述べた管制官とパイロットとの通信に用いられる航空管制用語は航空機の安全に直結するため、適正かつ確実に伝達する必要がある。このため、国際的には国際民間航空機関で、また、わが国では管制方式基準で使用用語(英語)が定められている。従って、使用用語は特

別な場合を除いて限定される。

管制指示の内容は離着陸、上昇・降下、および巡航という飛行段階や飛行方式により多くの種類があるが、シミュレーションにおける擬似航空機の運動制御に関するものを大別すると、

- ① 高度指示(上昇・降下)
- ② 針路指示(左旋回・右旋回)
- ③ 速度指示(加速・減速)
- ④ 誘導指示(特定の定点に向けて航空機を誘導)

となる。

管制指示は相手方の航空機呼出符号(Aircraft Call Sign, 表1ではC/Sと略す)から始まり、次に指示内容が続き、最後は単語“Over”により終了する。表1に上記の指示の基本的な例を示す。表中で@印は数値を表わす。例えば、(flight level)—(260)は飛行高度レベル260(26,000フィート)を意味する。針路指示の数値は飛行すべき方向(磁方位)、速度指示の数値は速度(ノット)を表わす。#印は定点名(航空機の飛行経路上の指定した点)を表わす。

表1は管制指示が英語の単語、複合語(複数単語で構成)、および数値の組合せで構成されることを示す。実際管制官とパイロットとの通信では一回の通信で一つの指示が送られる場合や二つの指示が一回の通信で連続して伝達されることがある。また、擬似航空機の運動制御に関係しない管制指示やパイロットからの通報がある。

4. 音声認識装置

4.1 音声認識装置の性能⁴⁾

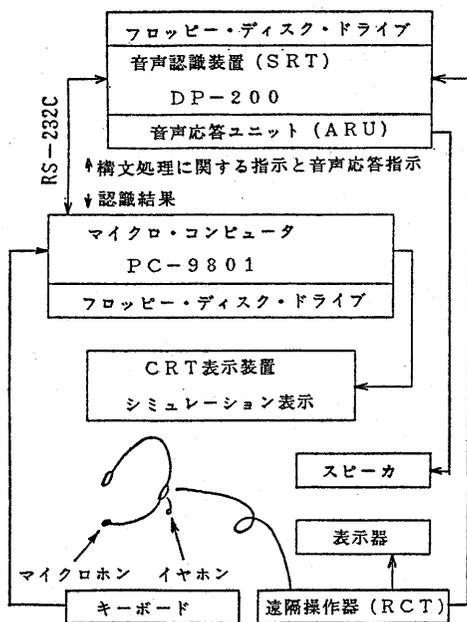
音声認識技術のシミュレーションへの応用実験で用いた装置はDP-200(日本電気(株)製)である。これにマイクロコンピュータ(PC9801)、CRT表示装置、キー

表1 擬似航空機の運動制御に関する基本的な管制指示

区 分	指 示 内 容 例
高度指示	(a) (C/S)—(descend and maintain)—(flight level)—(@ @ @)—(over) (b) (C/S)—(climb and maintain)—(@ @)—(thousand)—(over) (c) (C/S)—(cross)—(###)—(flight level)—(@ @ @)—(over)
針路指示	(a) (C/S)—(fly heading)—(@ @ @)—(over) (b) (C/S)—(turn right heading)—(@ @ @)—(over) (c) (C/S)—(turn left heading)—(@ @ @)—(over)
速度指示	(a) (C/S)—(reduce speed to)—(@ @ @)—(over) (b) (C/S)—(increase speed to)—(@ @ @)—(over)
誘導指示	(a) (C/S)—(proceed to)—(###)—(over) (b) (C/S)—(for vector to)—(###)—(over)

(注1) C/S: 航空機呼出符号(JL 120, NH 282, JD 180等)

(注2) ###: 定点名が入る。@ @ @: 数値が入る。



(注) 実験システムは音声応答機能も有する。

図3 実験システムの構成

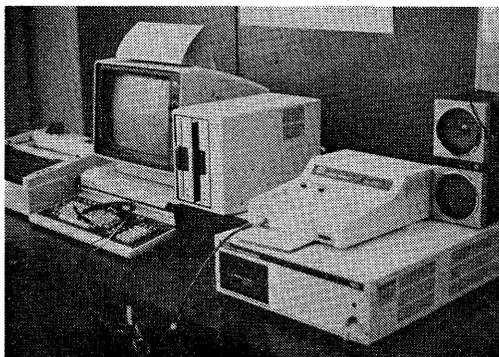


図4 実験システムの概観

ボード等からなる外部処理装置を接続し、実験システムを構成した。図3にシステム構成、図4に外観を示す。

DP-200 単体の主な性能を以下に示す。

- (1) 話者: 特定話者(使用者はそれぞれの音声パターンを登録)
- (2) 認識方法: 離散認識(1単語づつ区切って発声した音声に対して)
連続認識(5単語まで連続発声した音声に対して)
- (3) 発声語長: 0.2秒~4.0秒(平均0.6秒)
- (4) 認識速度: 0.3秒以内
- (5) 認識語数: オプションにより可変(購入した装置では最大語数として連続認識で150単語)

語: 複合語は1単語として)

(6) 単語認識処理方法: 2段 DP (Dynamic Programming) マッチング

(7) 構文処理: 使用可能

また, DP-200 を選定した理由を次に示す。

- (a) 無線電話により送られる管制指示の1送信に要する平均時間が3~4秒であること。
- (b) 航空管制の1管制席に対して想定される単語数は定形的な用語の集まりを一つと考えると150単語で大むね足りること。
- (c) 連続認識と構文処理の能力をもつこと。

4.2 DP-200 のパラメータ⁴⁾

DP-200 では認識処理に必要な音声パラメータがある。表2に音声パラメータと使用値を示す。

表2 音声パラメータ

パラメータ名	値	目的
TH	150	認識を始める入力レベルを定めるしきい値(認識するときの音声パターンの始端と終端が決まる)
IDLA	105	絶対リジェクト値
IDL R	2	相対リジェクト値
K1~K5		連続認識における最大語数(5単語のときK1~K5はすべて“1”に設定)

認識処理は数値データ化された音声パターン間の距離(パターン距離と呼ぶ)に基づき次のように行われる。

まず, ある単語が入力されたとき, これと最もパターン距離が短い登録単語を第1候補, 二番目にパターン距離が短い登録単語を第2候補とする。次に, 第1候補のパターン距離が表2の絶対リジェクト値(最大認識パターン距離に相当)以下のときは認識対象とする。最後に, 第1候補と第2候補とのパターン距離の差が表2の相対リジェクト値より大きいときに第1候補を認識結果とする。それ以外の場合は認識不能とする。

4.3 登録単語

表3は音声認識用に登録した航空管制用語の一例で, 航空路管制を対象とした。表1で示したものに加えて擬似航空機の運動制御に直接関係しない管制指示(レーダ識別指示, 周波数切替指示, 高度報告要求)と位置情報を加えた。これらは単語ファイルとしてフロッピー・ディスクに格納される。数字(0~9)と“Over”は航空管制用語のなかでよく使用されるので, 一つの単語に対して二つの音声パターンを登録した(二重登録)。抑揚の異なる二つの音声パターンを登録し, 抑揚が変化しても正しく認識できるようにした。

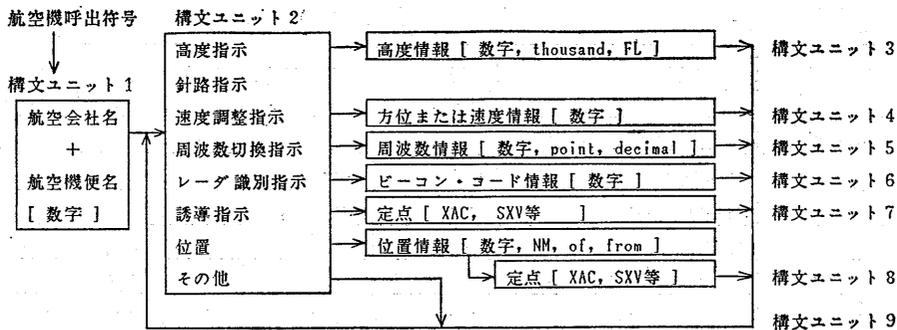
表 3 登録単語（航空路管制の一例）

単語番号	単語	単語 グループ	出力（遠隔制御器）	備考
1~20,35,36	1,2,3,4,5,6,7,8,9,0	WG2	1~9,0	数字等
21	thousand	WG8	000	
24	flight level	WG14	FL	飛行レベル
26	heading	WG9	HD	針路
27,28	point, decimal	WG12	.	小数点
30,31,33	from, of, mile	WG13	FROM, OF, NM	位置指定関連
350	spuawk	WG16	SQ	レーダ識別 指示等
100	and ident		ID	
101	radar contact		RC	
102	not yet radar contact		RY	
103	radar service terminated		RT	
151	descend and maintain	WG4	AD	高度指示関連
152	climb and maintain		AC	
153	maintain		AM	
154	report leaving		AL	
155	report reaching		AR	
156	cross SXV		AX	
200	turn left heading	WG5	HL	針路指示
201	turn right heading		HR	
202	fly heading		HF	
250	reduce speed to	WG6	SR	速度指示
252	increase speed to		SI	
300	contact Tokyo Approach	WG7	CT	周波数切換 指示
301	contact Yokota Approach		CY	
303	contact Tokyo Control		CG	
450	position	WG20	PO	位置情報関連
700	proceed to	WG10	PS	誘導指示関連
710	for vector to		VE	
800~802	JL, NH, JD	WG1	JL, NH, JD	航空会社名
850,852,854	XAC, SXV, SAKIT	WG18	XAC, SXV, SAKIT	定点名
856,858,860	SGR, MJE, SPH		SCR, MJE, SPH	
862,864,866	SAO, KEC, WSN		SAO, KEC, WSN	
900,901,902	cancel, over		FL, FO	通信手順関連
904,906	say again, correction		FA, FC	
954~956	roger, wilco, good day		FR, FW, FG	
	speed		RS	

4.4 構文処理

4.1 で述べたように DP-200 は構文処理の機能をもつ。この構文処理は1単語づつすべての単語と比較するのではなく、入力される文章の構文上の特徴を利用して、比較する単語の数を制限し、認識率を向上させる方法である。従って、航空管制用語のように定形的なものに適

している。表3に示してある単語のグループ分けはこのためである。また、構文処理では航空会社名、便番号、指示単語（高度指示、針路指示、速度指示等）、数値、定点等構文の属性ごとに構文ユニットとして定義する。構文処理のもう一つの利点は構文処理の流れのなかで構文ユニットごとに連続認識と離散認識とを組合せて



“over”の入力で構文ユニットの先頭にもどる。

“cancel”の入力で構文ユニットが一つ手前にもどる。

図 5 構文処理の構成

使用できることである。

DP-200 では構文処理を本体内部または外部の処理装置のいずれでも行えるが、実験では構文処理を外部処理装置で行った。DP-200 は外部処理装置から構文ユニットごとに認識方法（連続か離散か、連続のときは認識語数）と単語グループの指示を受けて単語を認識処理する。

図 5 は表 3 の登録単語で構文処理を行うときの構文ユニットの構成と流れを示したものである。実際の交信と同じように“Over”の発声で 1 送信が終了するようにした。また、“Cancel”で直前に発声した単語を取り消し、構文ユニットをもどして新しい単語を再入力する機能、および連続認識で認識不能の部分だけを再入力する挿入機能を加えた。

5. 実験

まず音声認識装置単体の認識率について、1 桁の数字の離散認識における認識率を調べた。次に航空管制で便番号・高度・針路・速度の表現でよく用いられる 3 桁の数字、および便名と数値の部分を除いた航空管制用語（図 5 の構文ユニット 2 の部分）の認識率を調べた。そして、マイクロ・コンピュータと CRT 表示装置等を用いて、図 5 の構文ユニット構成をもとにシミュレーション実験を行った。各擬似航空機は実験前に作成された飛行計画データ（航空機呼出符号、発生時刻、通過定点、高度、速度等）に従って画面上を移動し、管制指示が入力されたときにそれに従って制御される。

図 6 はシミュレーション実験中の一表示画面を示す。左上の航空機リストは擬似航空機の飛行パラメータ、中央の図が擬似航空機、航空路等の表示、左下は DP-200 が管制指示として認識した単語の表示、右下は現在認識すべき構文ユニットを表わす。実験担当者は構文ユニットの表示に従って逐次該当する単語を音声で入力する。

表 4 に 1 桁の数字、3 桁の数字、便名と数値を除く航

空管制用語、およびシミュレーションでの管制指示に関する認識率の測定結果をまとめて示す。

1 桁の数字では認識率 98% 程度、3 桁の数字の連続認識では認識率 96% 程度であった。3 桁数字の連続認識では、桁による大きな差はないが、3 桁目、1 桁目、2 桁目の項で認識率が下がった。これは、2 桁目の数字が前後で調音結合を伴うためと考えられる。便名と数値を除く航空管制用語では認識率 88% 程度であった。この場合は表 3 に示すように複合語が多いために認識率が低下したと考えられる。

表 4 認識率の実験結果

条 件	認識率	総単語数
1 桁の数字 (離散認識)	98%	400 語
3 桁の数字 (連続認識)	96%	400 語 (3 桁)
航空管制用語 (離散認識)	88%	300 語
模擬実験 (離散・連続認識)	90%	477 語

(注) 航空管制用語は便名と数値を除いたもの。
 認識率=1 回の入力で正しく認識された単語数/総単語数)

シミュレーション実験では擬似航空機 16 機に対して、51 個の管制指示を发出了。総単語数は 477 個である。表 4 の認識率 90% という値はこの単語単位で求めた。図 7 は認識結果の記録例である。上段は記録出力で () 内は再入力結果、下段 [] 内は入力した管制指示、« » 内は認識結果の説明を表わす。

表 4 の実験で話者は 1 名で、システムに習熟してから実験した。このほかに何人かに簡単な実験を依頼したが、この音声認識の特性の一つとして、抑揚に敏感に反応することがある。また、マイクロホンの位置や話者の姿勢により認識率が変化する。このため、使用に際してはこれらの特性に習熟し、できるだけ登録時の音声を保てるように注意が必要である。

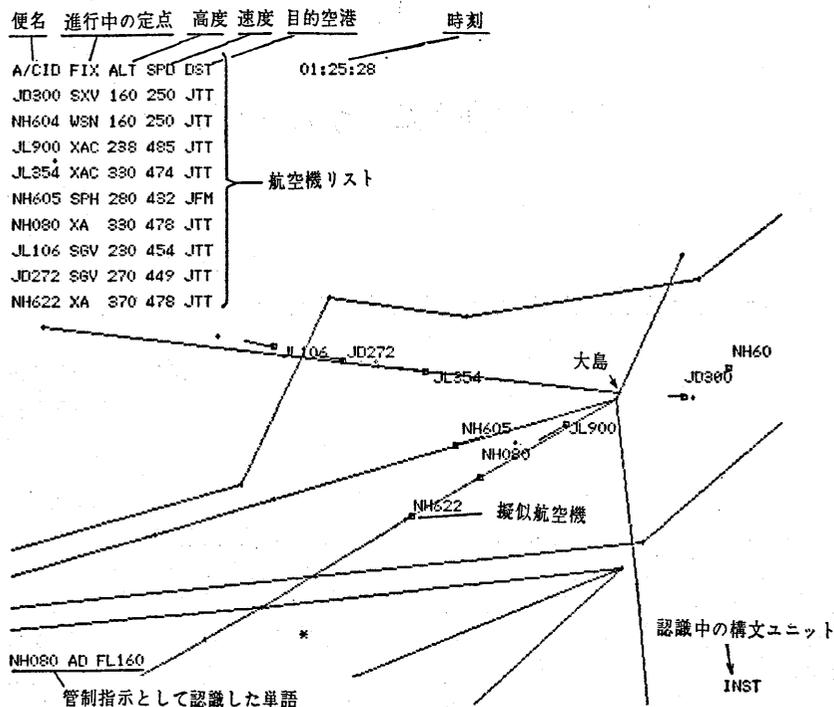


図 6 シミュレーション実験中の一表示画面

管制指示	単語数	認識単語数 (1回入力)	認識率
JD272 PS XAC FO [JD272 proceed to XAC, over]	7	7	100 %
JL506(JL106) HF 180 FO [JL106 fly heading 180, over]	9	8	89 %
《106を506と誤認識》			
JL*54(JL354) *(AD) FL161(FL160) FO [JL354 descend and maintain FL160, over]	10	7	70 %
《3とdescend and maintainが認識不能》			
JD272 AD FL240 FO [JD272 descend and maintain FL240, over]	10	10	100 %

(注) 上段は記録出力で()内は再入力結果, 下段[]内は入力した管制指示, 《 》内は認識結果の説明。

図 7 認識結果の記録例

6. むすび

本稿では航空管制シミュレーションへの音声認識技術の応用について紹介した。筆者らの実験によるとシステムに熟知した話者の実験結果で航空管制用語の認識率は約 90% であった。認識不能や誤認識の単語 (約 10%) は一回の再入力ですべて認識できるが、音声パターン

を比較するという点で、もともと音声パターンが非常に似た単語の間では誤認識や認識不能の発生が避けられない。この点で特に認識の難しい単語を登録するときは関連する単語とのパターン距離が適度にあくように工夫することやキー入力で補完することが必要であろう。

航空管制における音声認識技術の応用は諸外国においても研究・開発の初期段階であり、最初は本稿のようなシミュレーションで管制官の評価を受けつつ試験的に使用して行くことが望ましいと考える。

参考文献

- 1) Donald W. Connolly, Test/Demonstration Plan: Connected Speech Recognition System, FAA Tech. Material, Apr. 1979.
- 2) Hiroaki Sakoe: A Generalized Two Level DP-Matching Algorithm for Continuous Speech Recognition, IECE of Japan-Trans. Vol. E65, No. 11, Nov. 1982.
- 3) 沖重, 東福寺: 航空管制シミュレーションと音声処理について, 第 16 回電子航法研究所研究発表会, 昭和 59 年 5 月.
- 4) 日本電気(株): DP-200 音声入力装置取扱説明書.

出入港自動化に関する一考察

船舶技術研究所

翁 長 一 彦

An Aspect for Automatic Navigation on Congested Sea

Ship Research Institute

Kazuhiko OHNAGA

運輸技術審議会の第13号答申において、高度自動運航システムが提唱されてから、それぞれの分野において熱心な検討や研究が開始されている。高度自動化船または知能化船の全体のイメージについては、運輸省海上技術安全局が多くの解説記事を発表しているが、その中の一つの柱である「出入港自動化システム」に関して、船舶技術研究所では逸早く研究グループを結成し、その評価技術の検討を開始した。その概要は既に発表^{1),2)}されているが、さらに若干の補足を加えて概説を行う事とする。

1. 自動航行の海域条件

船舶の出入港自動化を考える場合、これを広義に考えれば離着機をはじめとして、投錨、荷役などの自動化を含むかもしれない。しかしここでは、出入港の操船のように、狭い水路の中を他の船を避けながら航行する場合の自動化を考える事とする。

したがって、出入港という字句にはあまりとらわれず、一般的に船舶の輻輳する海域を考える。この場合の航行条件は次のように言うことができ、大洋航行の場合と条件が大きく異なる。

1. 他船が輻輳しており衝突の危険が多い。
2. 低速航行を要し、風波、潮流の影響が大きい。
3. 一般に水深が浅く、船体の運動性能が変る（浅水影響）。
4. 陸岸が近く乗揚げの危険が大きい。
5. 針路変更、加速減速等の非正常運動が多い。

このような航行条件において、他船を避けながら目的地点になるべく早く、かつ効率良く到達するように操船する過程を自動化するためには、解決しなければならぬ多くの問題点がある。

2. 自動化の問題点

問題点を簡単に要約してみれば、見張りを中心とした

状態監視の方法（センサーシステム）、針路や船速を決定するための状況分析のやり方（演算処理とソフトウェア）、状況の判断方法（人工知能）、決定した航路（時刻に対応した船位）を維持して航行できるような操船の方法（船体の操縦性にもとずいた制御システム）等があげられる。さらに、各船舶は他船の航行状態や操船意図を把握できる必要があり、このための情報伝達システムや航行管理システムも必要となる。

しかし、すでにより自動化が進んでいる、と思われる他の交通機関の例をいろいろと調べてみても、このような出入港自動化の問題解決に直接応用できそうなものは見当たらない。また自動化と大きく関連する交通管理のシステムについても同様である。これは、出入港の船舶と他の交通機関とは、次のような根本的な違いがあるため、と考えられる。

1. 海上が2次元の移動水面であり、1次元の、かつ立体交差が可能な陸上交通とは異なる。
2. 海上は歴史的に営存空間であり、船舶航路として占有することはできない。陸上の鉄道、高速道路のような扱いは無理である。
3. 航空機のように、歴史が浅く進歩が早いものは高度の交通管制と情報伝達システムが取り入れられているが、船舶では難しい。

出入港自動化のシステムのためには、最も原始的な交通手段つまり人間の行動パターンを思い浮かべると、イメージが明確になるように思われる。具体的には、駅のコンコースのような混雑した広場において、各人が他人と衝突せずに安全に効率よく目的地点まで歩ける方法を考え、そのためには、どのような交通管理や情報伝達システムが良いか、を考えればよい。おそらく、近傍の他人の行動の意図——どちらへ行きたいのか、このままでは衝突すると思うが相手は気付いているのだろうか、右側通行でよいか——などが知りたいはずであり、これら

の問題を解決できるようなシステムを模索することになる。

3. 自動化システムの構成

出入港自動化システムにおいては、ほぼ次のようなサブシステムが必要であると思われる。

3.1 海域監視サブシステム

現状では操船者の見張り、レーダー（船舶用及び港湾用）、測深儀などがこれに該当するが、見張りの機能を自動化するのは大変難しいと思われるため、自動化システムではかなり違った方式が考えられよう。

監視の対象は、他船などの移動物体と、陸地などの固定物体とに大別できる。前者の監視システムはレーダーが最も有力な方法と考えられるが、後者の固定物に対しては海図をデータベース化した方法も有力な手段となる可能性がある。

3.2 航路決定サブシステム

航路を決定する過程には、海域全般の航路を定める場合と、局所的な航路を定める場合とがあろう。

前者では、他の影響要因がないかぎり地形的な要素で求められるが、輻輳海域では他船の行動が大きな影響をもつ。従って大局的に複数の船舶の航路を調整する必要が生じ、航行管制の問題となる。

局所的な航路決定とは、主に他船との衝突を回避するときの問題と考えられる。従って、自船のセンサーシステムに大きく依存している、自己完結性の強い自動化システムにおいては極めて重要なサブシステムとなろう。

いずれの場合においても、その船の運動性能に見合った航路を、つまり十分に余裕のある範囲で変針や変速が可能な航路を決定できるようなシステムでなければならない。

3.3 航行実現サブシステム

上記の航路決定サブシステムにより定められた航路（時間の関数としての船位）に従って、なるべく正確に、かつ忠実に操船するためのシステムである。従って、これは主として操縦性の問題となり、船体の運動性能、加速減速の性能等を推定できるような流体力のデータベースを完備する必要がある。

3.4 情報伝達サブシステム

現状においては、他航との情報伝達の手段はなきに等しく、音響信号と形象物の信号程度しかない。電波を使った情報伝達が難しい理由は、まず他船を識別できないことであり、識別符号を連絡したり、情報伝達を中継できるような管制センターと、自動化船との役割分担の問題となる。

最も現実的なシステムは二次監視レーダー、またはシェドゥービジョンを採用する方法と思われるが、今後の

電子技術の発達により、さらに有力な方法が開発されることが期待される。

4. システムの基本的形態

自動化システムの方式を大別すれば、自己完結型と管制主体型とになる。自己完結型とは海域監視、航路決定、または情報伝達のすべてのシステムを自船で保有し、なんらの陸上の支援システムがなくても航行できる方式である。これは、完全な知能化船ともいえるが、周囲に普通の在来船が航行している限り、いささか理想的過ぎるシステムであろう。

管制主体型はその反対に、交通管理システムが中心となり、船はその指令のままに航行する方式であり、知能的な部分も、データベースも陸上の管理センターが保有する。従って情報伝達（というより指令伝達）システムの重要性は極めて大きくなる。

現実的には両者の中間に適切な方式のシステムがあるものと考えられる。一般的には、海域全体の監視や大略の航路の決定は管制型の陸上のシステムが行い、局所的な自船前方の海域監視や、高精度の船位確認にもとづく航路の決定は自動化船自身が行うこととなろう。

航行実現のサブシステムは自動化船自身でもつものと考えられるが、これに必要な気象海象の外乱要素のデータも、自船でセンシングするものと、管制センターから情報伝達システムを経由してくるものがある。いずれの方式、どんなシステムであっても、情報の伝達、情報の加工および処理のシステムは極めて重要なものとなる。

5. 自動化レベルとマン・マシン系

自動化と称しても、部分的なものから完全な自動化までのいろいろなレベルがあり、かつては単なる遠隔制御でも自動化と称したこともあった。この出入港自動化のシステムはまだ現実的なものでないため、今後どの程度のレベルが期待されるようになるのか、または開発されるのか、あまり明確でない。

しかしおそらく、完全な自動化システムが最初から出現することは考えられず、かなりの程度人間がその間に介在するシステムがまず考えられる、と思われる。例えば、自動化システムがある状況分析なり判断を行ったとしても、それを操船者に示すだけで、最終的な行動や決断は人間が行う、というような相談型または対話型システムなどがまず考えられよう。

また、かなりレベルの高い自動化システムにおいても、無人の自動化船は現実的とは言えず、操船者が常にモニターしているものとなる。従っていろいろの状況分析や予測、制御のフロー等をモニターに判り易く表示

するために、情報の処理や加工の技術が必要となる。

以上のような理由から、自動化システムのマン・マシン・システムは重要な要素となる。さらに、一番大きな問題として、システム故障時の対策が必要であり、故障の規模、範囲等によりマン・マシン系の問題は大きく変化するはずである。一般的にも、自動化のレベルが高いほど、また故障の規模が中枢に近いほど、マン・マシン・システムへと移行するときのギャップが大きく、ヒューマン・エラーを引き起こし易いものと思われる。

6. 自動化のシミュレーション

このような出入港自動化システムはまだ要素技術の開発段階のため、システム設計のための具体的な研究はシミュレーションによるしか方法がない。しかし、操縦性研究の発展、計算機の進歩、またシミュレーション技術の発達等により、かなり高度のシミュレーションが既に実施されている³⁾。

さきに述べたような航路決定システムを中心として、最近試みられた幾つかのシミュレーションの例を次に示す。

6.1 衝突回避の自動操船

行き会った他の船舶との距離を常に一定値以上に保ち、衝突を避けるように避航の航路を決定し、衝突の危険がなくなった時点で原航路に復帰する自動制御系を検討し、そのシミュレーションを行った例がある^{4),5)}。これは自船と相手船の船位、相手船の操船の意図等の状況が確定的であり、自船の操縦性モデルが正確である、と仮定しているが、自動避航が実行可能なことを示したものである。

最も単純な避航の例を図1に示すが、相手船が一定速

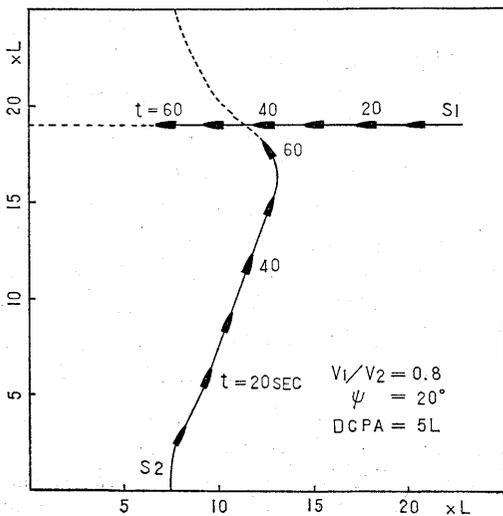


図1. 単純な避航操船のシミュレーション

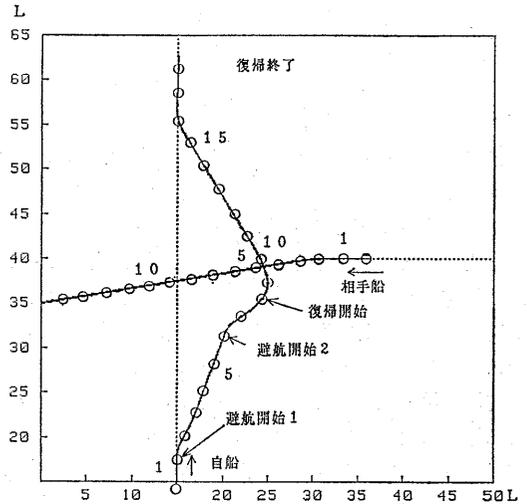


図2 (a) 複雑な避航操船のシミュレーション

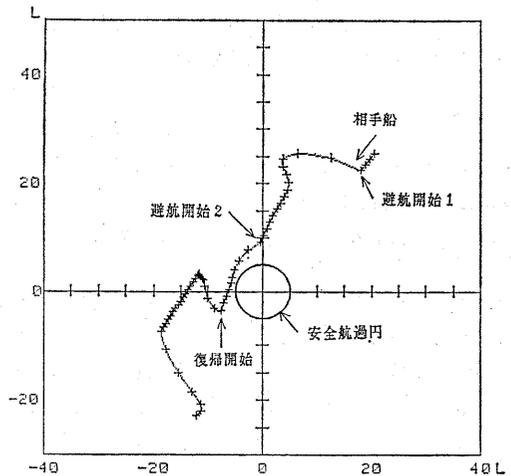


図2 (b) 複雑な避航操船のシミュレーション

度で直進している場合である。図2は、最初の避航開始後に相手船が変針したため、さらに2回目の避航を行ったものであり、これを絶対座標と自船を中心とした相対座標とで示した、このアルゴリズムは、自船を中心としたある危険円内（いわゆる閉塞領域の概念による）に相手船が入らないように針路を決定し、操縦性モデルによって変針量や舵角、変針開始時刻を定めるものである。さらに、このシミュレーションにおいては、このような操船判断の部分を LISP で書かれた別のパソコンで行い、運動計算や航法計算を行う計算機との間でデータ通信を行っている。これは今後のエキスパート・システムへの発展を狙ったものである。

6.2 海域全体の航路決定

ある海域に出入りする総ての船舶について、それぞれ

の出発地点と出発時刻、および到着地点が既知であれば、各船の最短航路の途中で衝突が生じることのないように最適の航路を決定することが出来る。このアルゴリズムは石谷ら⁶⁾によるもので、各船相互の距離が安全な範囲となるような評価関数を用いて最適解を求める方法

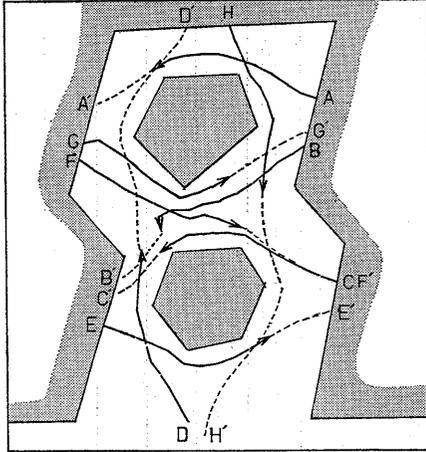


図3 海域形状を与えたときの航路決定シミュレーション

である。

この方法をさらに拡張して、任意の形状の海域に適用できるようにし、船舶が交差する時点では右側通行となるようにしたシミュレーションも行なわれている⁷⁾。図3は任意の形状の海域に適用した例であり、図4は右側通行を守るアルゴリズムを入れた例である。これを総合して、東京湾のような具体的な海域で実施したシミュレーションを図5に示した。

このアルゴリズムには船舶の操縦性能は含まれていないが、航行実現のサブシステムが理想的であると仮定す

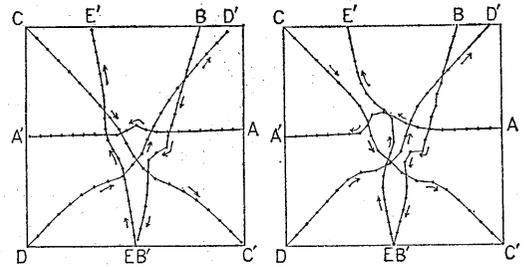
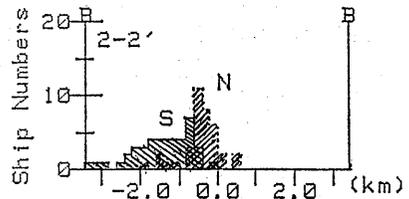
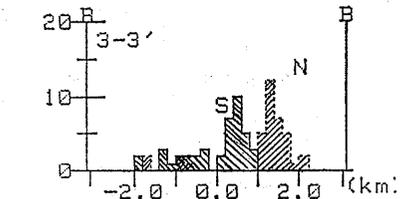
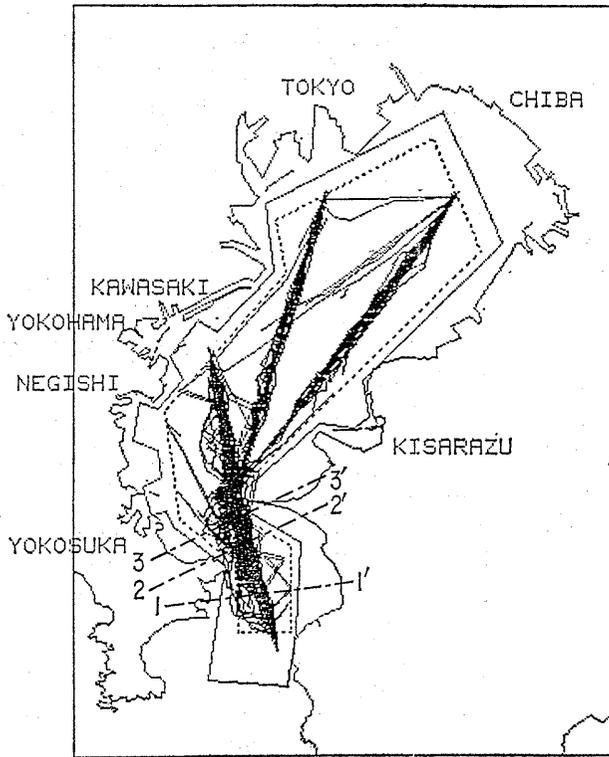


図4 右側通行のアルゴリズムの有無による航路決定シミュレーション (左:無し, 右:有り)



N: Ships to North
S: Ships to South
B: Boundary

図5 東京湾内の出入航船舶データを用いた航路決定シミュレーション

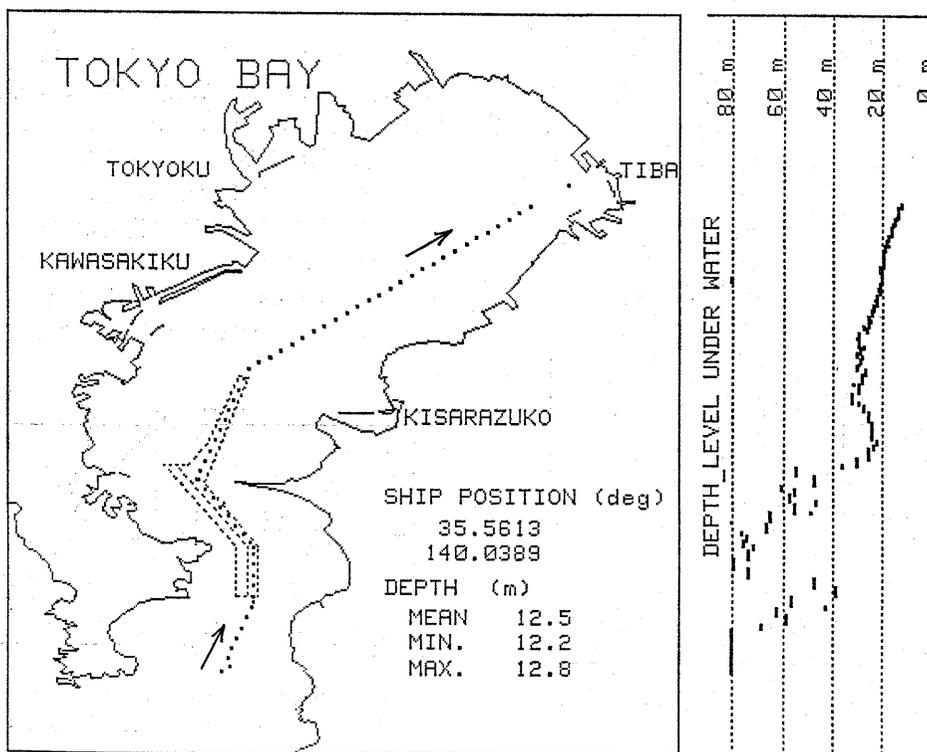


図 6 海図データベースを利用した入港シミュレーション

れば、各船の動静を把握出来る航行管制センターで、自動的に総ての船舶の航路を決定できる可能性が見出される。

6.3 海図情報データベースの利用

海図や潮流、潮位をデジタル化したデータベースは、海域監視システムの情報と照合することにより、情報の精度向上を図る等の利用価値があるが、さらに、海面下の障害物の検知、あるいはその回避にも利用可能である。

このようなデータベースは、海上保安庁内の日本海洋データセンター (JODC) に整備されているため、これを利用して簡単な航行のシミュレーションを行った例を図6に示した⁹⁾。また上記の図5のシミュレーションでもこの海図データベースを用いている。

すなわち、海図のデータ、自船の位置、および操縦性能が正確であると仮定すれば、海面下センサーがなくても乗り揚げを回避しつつ自動航行できる可能性があり、データベースの高度利用方法の検討は自動化システムにとって大きな価値がある。

7. おわりに

出入港自動化システムについて、その背景となる条件や問題点を概説し、システム設計上必要となるシミュレ

ーションの代表例を述べた。しかし、システム開発と並んで重要となるのはその安全性の評価方法であり、さらに運航効率も問題となろう。この目的のためにはより大規模なシミュレーションが必要と考えられ、上記のような断片的なシミュレーション技術を総合化する必要がある。

現在すでに、官民一体となって、このような目的にあったシミュレーション・システムを作り上げる作業が進められており、我々はこれを SISANAM (Simulation System for Automatic Navigation and Marine Traffic Management) と称している。このシステムは自動化システムの開発、機能の検証、改良に役立つと共に、それを備えた知能化船が運航した時の安全性評価、運航効率の推定等のための運航シミュレーションに用いられる予定であり、その段階においては造船者、海運者、及び管制者の緊密な協力が必要になると考えられる。

参 考 資 料

- 1) 翁長一彦： 出入港自動化システムについて、造船研究 16-3 (59-10)
- 2) 翁長一彦： 船舶の出入港の自動化について、船用機関学会誌 20-9 (60-9)
- 3) 不破 健、今津隼男： 幅員域における操縦性能、船舶の航行安全と操縦性能シンポジウム、造船学会

- 運動性能研究委員会 (60-12)
- 4) 不破 健, 田中邦彦: 自動航行に関する一考察, 航海学会論文集 73 (60-5)
 - 5) 田中邦彦, 沼野正義, 不破 健: 船舶の自動航行シミュレーションについて, シミュレーション学会 (60-10)
 - 6) 石谷 久 他: 2次元の自由移動体の管制方式に関

- する考察 第 1, 2, 3 報, 造船学会論文集 153, 155, 157 (58-6, 59-6, 60-6)
- 7) 金湖富士夫: 最適航路モデルによる航行シミュレーションについて, 造船学会論文集 158 (60-12)
 - 8) 桐谷伸夫, 不破 健: 海上交通シミュレーションへの自然環境要素の導入, 船舶技術研究所研究発表会 46 (60-11)

電波航法研究会 昭和 59 年度会計報告および昭和 60 年度予算

[収入の部]

項 目	昭和 59 年度会計報告		昭和 60 年度 予算
	金額 (円)	摘 要	金額 (円)
前年度より繰越	1,177,670		1,376,504
会 費	1,165,000	法 人 95口×12,000 =1,140,000 未収 1口 12,000 個 人 10口×2,000 =20,000 未収 3口 6,000 入会金 一社分 5,000	1,274,000
雑 収 入	19,100	会誌販売等	20,000
広 告 料	78,000	会誌30号掲載分	140,000
銀 行 利 子	12,720		8,000
計	2,452,490		2,818,504

[支出の部]

項 目	昭和 59 年度会計報告		昭和 60 年度 予算
	金額 (円)	摘 要	金額 (円)
会 議 費	150,920	研究会 6回 幹事会 7回	220,000
資 料 費	0		10,000
会誌出版費	599,000	会誌30号分	1,500,000
事 務 費	庶 務	89,370	90,000
	編 集	20,000	20,000
	会 計	20,000	20,000
謝 金	69,000		72,000
通 信 交 通 費	84,490		90,000
雑 費	43,206	特別研究会補助	予備費
次年度へ繰越	1,376,504	会誌31号の出版費の繰越を含む	796,504
計	2,452,490		2,818,504

デリバリーナビゲーションシステム

日産自動車株式会社
中央研究所 電子研究所
福原 裕成

Delivery Navigation System

Nissan Motor Co., Ltd.
Hiroshige FUKUHARA

1. まえがき

高度情報化社会という言葉に代表されるように、キャブテン、CATV、ファクシミリ、衛星通信など数多くのニューメディアが急速に我々の身の廻りを取り巻きつつある。このような環境の変化に伴ない、自動車の持つ機能も単なる輸送、移動のための手段から、居住空間としての機能、コミュニケーション機能などが求められるようになってきた。自動車電話、MCA無線 (Multi Channel Access)、AVMシステム (Auto Vehicle Monitoring) などの普及はその代表的な現われである。

このような自動車の情報化は、事務処理効率や作業効率の向上などが企業の死活問題として求められる営業用の車、いわゆる商用車において一層そのニーズが高い。このことはタクシーへのAVM装着の普及、大手運送会社による集荷情報自動化システム実用化などからもうかがえる。

こうした中で、乗用車、商用車の両面から、いわゆる情報化時代の自動車像、あるいは車載情報システム像を検討し、また各種情報システムの開発を行ってきた。そしてこの研究を進めるにあたっては、これらシステムが、それを使う人 (企業)、使用環境などにより求められる性能・機能がそれぞれに異なるため、ユーザー個々のニーズを聞きながら開発を行ってきた。

本システムの開発は、昨秋西武百貨店から、60年3月に新規開店する筑波店で御用聞き宅配システムを導入するに際して、そのための配送車用ナビゲーションシステムを実用化して欲しいとの要望が寄せられ、これに応えることとした。我々はかねてよりロランC受信機をはじめとしたナビゲーションシステムの開発も行っており、これと情報システムを結合する形で開発することとした。

なお、この御用聞き宅配システムとは、セールスレディと称する女性パートが会員宅に注文の商品を届けると共に、新たな注文を受けてくるという会員制の宅配システムである。こうした動き、即ち女性ドライバの配送業への進出は、宅配業の増加と、それに伴う労働コスト削減への要求、そして顧客との円満な交流が行える点で企業が注目していることそして女性の側からも、彼女らの意識変革とそれに伴う社会進出意欲の高まりなどから増加の一途を辿っている。

本デリバリーナビゲーションシステムは、今後さらに増加が予想されるこのような地理不案内なドライバにも、迅速で正確に宅配業務が行えるようにすることを狙って開発したものである。

本システムの開発にあたっては、ユーザーニーズを充分把握しそれに応えること、女性にもすぐに操作に馴染めるようハイテックハイタッチを念頭に設計したことは言うまでもない。

なお本システムは西武百貨店筑波店に納入したウォークスルーバンの1台に搭載しユーザー評価を実施中である。ここではこのシステムの機能、特徴等について紹介する。

2. 機能

2.1 機能概要

本システムは主に、① 配送情報表示及び処理機能、② 配送経路誘導機能の2つの機能を持ち、9インチカラーブラウン管上に、配送先リスト (氏名、住所、電話番号、会員番号等)、配送ルート (配送区域全域を示す地図上に配送先位置、配送順序を表示)、配送先マップ (配送先付近の手書き略地図) を表示する。

また、ブラウン管上部に設けたファンクションキーとライトペンを用いて、これらの表示切換や配送済または

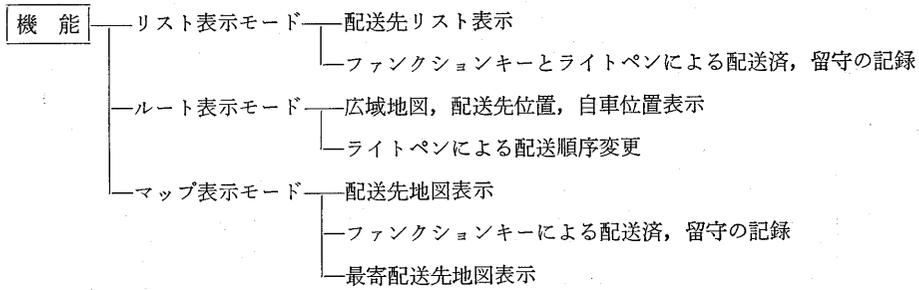


図 1 デリパリーナビゲーションシステムの機能

留守の記録、配送順序の変更等の処理を行う。またここで表示される配送先のデータは、フロッピーディスクに記録されており、これは配送センターで出発前にその一日の予定が書込まれる。

2.2 リスト表示

本モードでは、配送順に配送先の氏名、住所、電話番号、会員番号、積荷荷物番号のリストを表示する。表示例を図2に示す。

一画面には7軒分のリストを表示し、ファンクションキー（**次頁** または **前頁**）により、次の7軒あるいは

は手前の7軒のリストを表示できる。

さらに、ファンクションキー（**配送済** または **留守**）とライトペンを使い、訪問先が配送済か留守かを指定することにより、その結果が記録され、配送、順序も自動的に組み換えが行われる。（配送済、留守の記録がなされると配送順序が一つずつ繰り上がり、処理された配送先はリストの一番最後に付加される。）

また、リスト表示色も、未訪問宅は水色、留守宅は黄色、配送済宅は白色として異なるようにすると共に、ファンクションキー **配送済**、**留守** のキートップの色

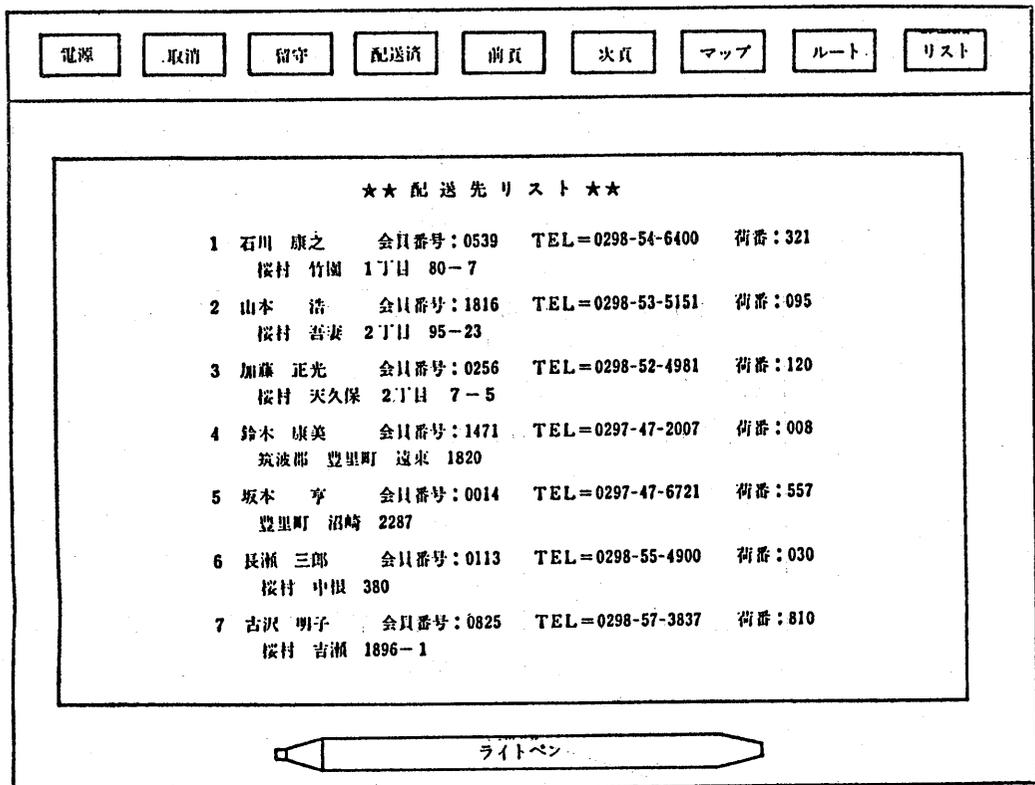


図 2 リスト表示

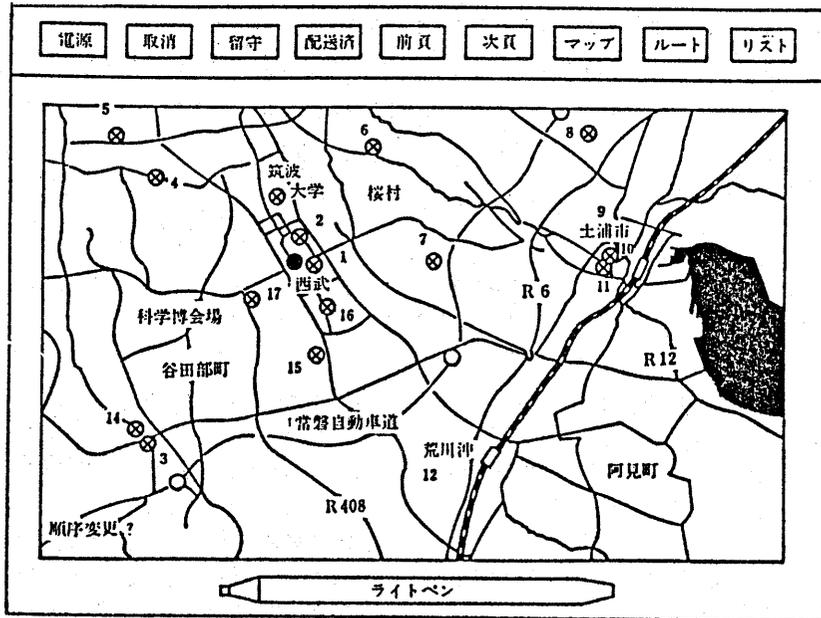


図3 ルート表示

と対応づけることにより見易く、扱い易く設計した。

2.3 ルート表示

本モードは、配送先全体をカバーする広域道路地図、配送先位置と配送順序、さらには、電子研究所で開発を進めてきた自動車用ロランC受信機で計測した自車両の位置を地図上に表示するなどその日の運行ルートの把握、自車両位置の確認を一目で可能にするものである。ルート表示の例を図3に示す。

また、広域地図の仕様を表1に示す。広域地図は道路種別毎に色分けして、配送先位置を配送順序番号と共に赤色の⊗印で示した。また、自車位置を示すマーカーを黄色の円とした。

さらに、訪問先の都合や道路事情に応じて、予め配送センターで決定された順序を任意の順序に変更できる機能も設けた。変更の方法は、ルート表示画面中の「順序変更?」表示部分をライトペンで押すことによって順序

表1 広域地図の仕様

項目	仕様		
表示区域	東経 140°15' から西へ 18.2 km } これらを辺とする長方形の領域 (筑波 北緯 36°00' から北へ 13.0 km } 学園都市付近)		
縮尺	約 13 万分の 1 (CRT 画面上)		
地図解像度	水平 640 ドット × 垂直 400 ドット		
表示内容	表示色	表示幅	備考
有料道路	シアン	3 ドット	インターチェンジを黒ぬきの円で表示
国道	赤	2 ドット	・交差点は国道表示色
地方道	緑	2 ドット	・立体交差は下の道路を交差点前後で黒ぬき
鉄道	白	3 ドット	白黒縞模様 (国鉄式), 駅表示も行う
河川, 湖沼, 海	青	任意	ぬりつぶし
背景	黒		
地名等	白		国道 No. も表示

表 2 配送先マップの仕様

項 目	仕 様
表 示 内 容	配送先付近の手書き略地図 道路、建物、目標物等の任意の対象物を線画で表示
表 示 色	白 (単色) (背景は黒)
縮 尺	Free
表 示 幅	2 ドット

変更モードに切換え、新しく設定したい順序に従って配送番号表示部をライトペンで押していくことによって行う。

2.4 マップ表示

このモードは、本システムの一つの大きな特徴であり、会員入会時に顧客自身が記入した自宅付近の略地図を表示させることにより、容易に配送先への案内を行おうというものである。

配送業務で一番むずかしいのは、近くに着いてからの目的地さがしである。このため従来、ドライバは縮尺 3 千分の 1 程度の住宅地図をめくりながら目的地を探し出す苦勞を強いられていた。このような地図をめくる負担を軽減するため、住宅地図を全て電子的に記憶しておくシステムも開発されているが、これはオフィス用であり、小さなメモリ、小さな表示器しか設けられない自動車用としては不向きである。そこで、

本システムは、訪問先が会員宅に限定されることに着目し、入会時に顧客自身が記入した自宅付近の略地図を

イメージスキャナあるいはデジタイザで読み込み、配送センターのコンピュータメモリにファイルして、フロッピーディスクにはその日の訪問先のみだけを記憶させるようにした。このような方式とすることにより、車載メモリ (フロッピーディスク) の記憶容量を少なく済ませることができると共に、目的地までの目印だけが記述された略地図を表示することで、車載の小さな 9 インチブラウン管でも判り易く、訪問先への到着を容易にすることができる。

さらに、リスト表示の時と同様に、このモードでも配送済と留守の記録を行うことができるものとした。配送先マップ表示中に「配送済」または「留守」のキーを押すと現在表示中の配送先が「配送済」または「留守」としてフロッピーディスクに記録され、次の配送先マップが画面に表示される。

また、通常、配送先マップは次の訪問先が表示されるが、予定を変更して、現在位置に最も近い配送先を先に済ませてしまおうという場合に備え、自車位置に最も近

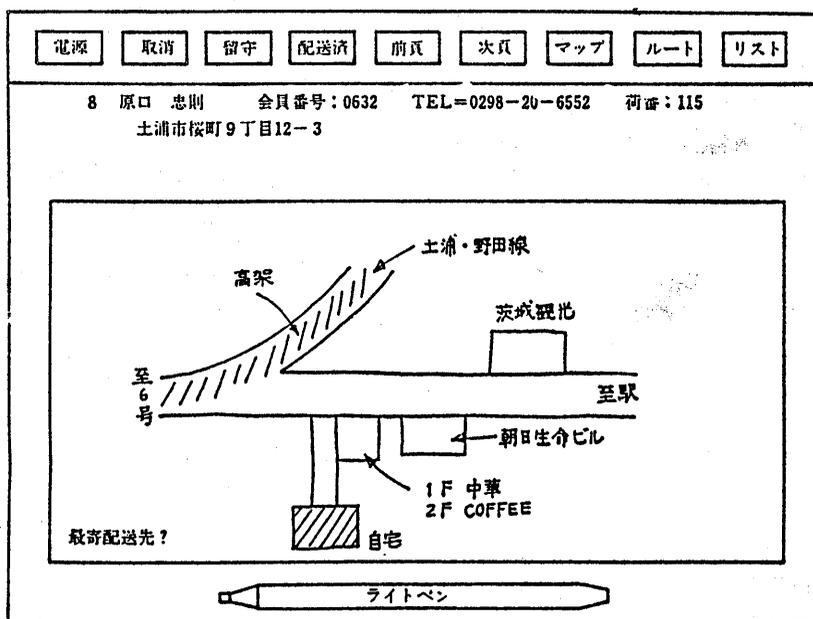


図 4 マップ表示

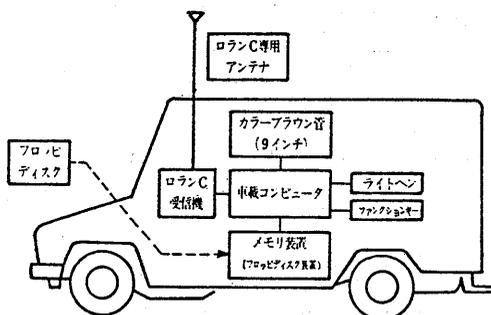


図 5 システム構成図

い配送先のマップも表示できるようにした。
配送先マップの表示例を図 4 に示す。

2. システムの構成

3.1 全体構成

図 5 は、デリバリーナビゲーションシステムの構成ブロック図を示しており、コンピュータとロランC受信機から成る計算処理部、ディスプレイ装置とファンクションキーとライトペンから成る表示操作部、フロッピーディスクドライブ装置、及び電源装置 (図示していない) から成る。

3.2 コンピュータ

フロッピーディスク、ロランC受信機等からのデータを読み込み、リスト表示、地図表示等の画面表示制御を行うもので、ハードウェアは、試作期間を短縮するため PC-9801 E 型コンピュータを利用した。

3.3 ディスプレイ装置

配送先リスト、配送先マップなどの配送情報表示、広域道路地図と自車位置の表示を行うもので、ライトペン、ファンクションキー等を周辺に備える。

表示部は、9 インチの高精細度カラー CRT (640×400 画素) を使用し、小型ながら鮮明な日本語 (漢字) 表示、詳細な地図表示を可能とした。

3.4 フロッピーディスクドライブ装置

フロッピーディスクに記憶したシステムプログラム及びその日一日分の配送データを読み出すためのものであり、フロッピーディスクは車両の中で使用することから、小型で大容量、さらにハードケースに収納されていて取扱いが容易であることなどから 3.5 インチマイクロフロッピーディスクを使用することとした。

また、システムプログラムディスクにオートスタート機能をもたせ、電源 ON だけでシステムが起動し、プロ

表 3 ファンクションキーの機能

名称	機能	ボタン表示色
リスト	リスト表示モードへの切換	緑
ルート	ルート表示モードへの切換	
マップ	マップ表示モードへの切換	
次 頁	リスト、マップ画面のページ送り	橙
前 頁	リスト、マップ画面のページ戻し	
配送済	配送済の記録	白
留守	留守の記録	黄
取 消	入力取消	赤
電 源	システムの電源 ON-OFF	黄緑

グラムロード等のキーボード操作を不要にしてある。

3.5 ファンクションキーとライトペン

カラー CRT の画面上部に押しボタン式のファンクションキー 9 個を設けた。これらのキーはシステムの電源 ON-OFF、表示画面の切換、配送情報の処理など、このシステムの基本操作を行うためのものである。これらのキー配列は図 6 に、また各キーの持つ機能を表 3 に示した。

さらに、配送順序の変更など、より高度の取扱いが必要な場合、システムとしてその操作性を向上させるために、これらの操作のためにはライトペンを使用するようにした。

以上のように、日常の一般的な操作は、CRT 上のファンクションキーだけで済み、より複雑な使い方をする場合にはライトペンをを用いることで操作性を高めた。

3.6 ロランC受信機

3.6.1 ロランCの概要

ロランCは、90~110 kHz の電波を使った電波航法システムで、米国の沿岸警備隊によって運用されており、日本を含めた世界各地にサービスエリアをもつ。

デッカなど他の電波航法と比べ (表 4 参照)、測位精度が良く、利用範囲も数 km 千と広いため船舶や航空機に多く利用されている。

しかしながら、陸上では、都市雑音による受信障害やビル・電線等の遮へい物による電波の減衰・反射が大きいため自動車に應用された例は少ないが、これらの問題を解決することにより、従来の地磁気センサ、ジャイロなどによる推測航法特有の累積誤差のない優れた自車位



図 6 ファンクションキーの配列

表 4 各種移動体位置測定システムの比較

方式	システム名	測位方法	周波数	有効範囲	測位精度
推測航法	ドライブガイド (日産)	地磁気センサと車速センサにより現在位置を推定	—	—	走行距離の数%
	ナビユン (トヨタ)	同上	—	—	同上
	ジャイロケータ (本田)	ガスレートジャイロと車速センサにより現在位置を推定	—	—	同上
電波航法	ロラン C	パルス変調波の位相差測定	90~110 kHz	数千 km	200~300 m
	ロラン A	同上	1.75 MHz 1.8 1.85 1.7	数百 km	数百~数千 m
	デッカ	連続搬送波の位相差測定	70 kHz 84 112 126	数百 km	数百 m
	オメガ	同上	10.2 kHz 11.3 13.6	全世界	1~2 km
衛星航法	N N S S	衛星からの電波のドップラ偏位量を測定	150 MHz 400	全世界	数百 m
	G P S (現在開発中)	電波の到達時間を衛星 4 つについて測定	1.5 GHz	全世界	20~30 m
	サポイスト A V M	主要交差点に設置したサインポストから交差点の位置データを送信	426 MHz	サインポストのある場所	400~500 m

置検出装置を実現できた。

3.6.2 ロランCの測位原理

日本付近のロランCチェーンは、図7に示すように、硫黄島にある主局(M)と南鳥島(W)、北海道(X)、沖縄(Y)及びヤップ島(Z)にある4つの従局とで構成されている。

図8は、ロランC信号の受信波形を示したもので、各局から9ないし8本のパルス群が一定の繰り返し周期(99.7ms)で送信される。図8の+、-の記号は、各

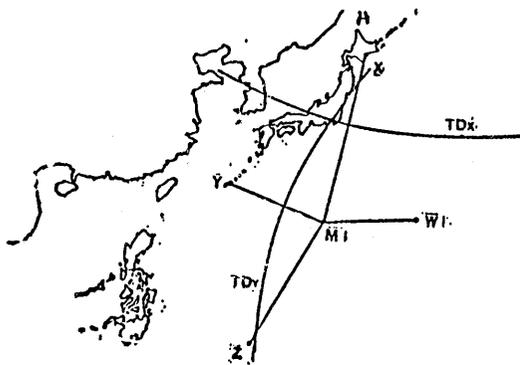


図7 ロランCチェーン

パルスの搬送波 100 kHz の位相の正負を表し、この位相コーディングにより信号の検出及び主・従局の識別が可能となる。

ロランCの測位原理は、主局と従局からの距離の差が一定な点の軌跡は、その2点を焦点とする双曲線になることを利用したものである。

図7において、主局Xと従局からの電波の到達時間差を測定することにより、受信点から主局M及び従局Xまでの距離の差に相当する双曲線TD_xが求まる。同様にして、主局Mと従局Yについて双曲線TD_yを求め、TD_xとTD_yの交点から受信点の現在位置を求めるものである。

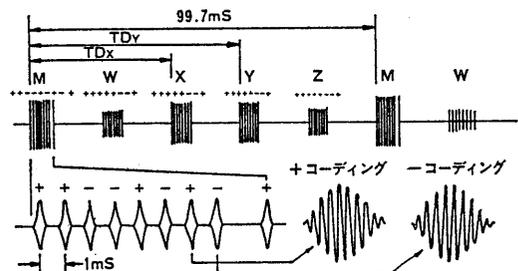


図8 ロランC信号受信波形

3.6.3 ロランC受信機の機能

本システムにおいて、ロランC受信機は、①ロランC信号を受信して自車位置を緯度・経度で算出する。②受信したロランC信号のS/N比を測定する。③以上のデータをコンピュータに送信する。という機能を備えている。コンピュータは、これらの受信データを用いてディスプレイ装置に現在位置を表示すると共にS/N比の悪い時は「電波が弱くなっている」ことを知らせるメッセージを表示する。

3.6.4 本システムの受信機の特徴

本システムに搭載したロランC受信機は、約1mのホイップアンテナで受信したロランC信号を8ビットマイクロコンピュータで処理して、位置計算を行うものであるが、電波の弱い陸上で使用できるように工夫を施した。

一つは、微弱なロランC信号を雑音の中から誤りなく検出するため、ロランC信号に統計的な信号処理を施すようにしたことである。

また、もう一つは、信号が微弱になった時の位相追尾特性を劣化させる原因となる内蔵クロックの誤差を自動補正することにより、高精度で安定した信号追尾性能を得た。

4. あとがき

本システムは現在、ユーザ評価の途中ではあるが、女性でもすぐに取扱いに馴れ、所期の性能を満足している。

またこのシステムに関しては、多方面から多くの問合せが寄せられ、商用車における情報システムの需要が想像以上に大きいことを痛感すると同時に、車両への情報システム導入に各企業共真剣に取り組んでいることが明らかになった。こうした動きから、将来自動車にとって、情報システムが必需品になることは疑う余地もない。さ

らに本システムは、配送センタと車とは、フロッピーディスクというメディアで結ばれているが、ユーザは会社と車とが無線を使って太く結びつくことを切に期待している。社会ではVAN(付加価値通信網)の自由化に伴ない、オンラインシステムが今まで以上に急速に、そして広範囲に拡がろうとしている。こうした中であって、企業の中の車両もこれらのネットワークに組み入れ、一つの端末としての機能が求められることは、極めて自然のことと言えよう。

さらに今までは、業務用車両の情報化という観点から論じてきたが、一般用の車両においても同様である。すなわち、社会の情報化は我々の日常生活そのものをも変えようとしている。キャプテンシステムに代表されるように、ニューメディアはホームショッピングやホームバンキングなどを可能にし、買物、行楽等欲しい情報をいながらにして得られるようになってきた。しかしこれが車に乗った途端に途絶するようでは車の魅力は半減してしまう。身の廻りの情報化が進むにつれ、車の中での情報への欲求が増大し、それと共に一般車での情報システムも充実して来よう。車の中で、宿の予約や交通情報、天気予報など欲しい情報がたちどころに得られる時代も間近と思われる。

我々は、本システムの開発を通し、求められる機能がユーザにより様々に異なることが確認できた。今後はさらにユーザとも接触を深め、ニーズを適確に捉えたシステムを開発するとともに、業務効率化のためのプラン作りをも、ユーザと一体となって行えるようにして行きたい。

最後に、本システムの開発に多大の御協力をいただいた(株)西武百貨店、日立エンジニアリング(株)、クラリオン(株)をはじめとする関係各位に深く感謝いたします。



音声認識技術とその動向について

電気通信大学

橋本 清

An Overview on the Research and Development of Speech Recognition

Univ. of Electro-Communications

Kiyoshi HASHIMOTO

1. はじめに

最近 VLSI 技術の急激な進歩に伴って音声情報処理の技術も大きく向上して来たり。この分野での我が国の研究・開発活動は極めて盛んで、最近では音声処理技術の中でも特に音声認識の進展が著しい。音声認識は人間と電子装置間のマン・マシーン・インターフェースとして現在のキーボードに代わる有力な方式であるから、音声応答などの関連技術と複合した形で、将来自動車や船舶、或は航空機などの運航関係の分野へも本格的に導入されてゆくことと予想される。

以下、本稿ではこれらの問題点を中心に、なるべく上記の船舶や航空機などの運航関係に応用する立場に立って音声認識技術に関する解説を試みたい。なお、本稿よりも更に詳しい専門的な内容を知りたい方は、参考文献の 1)~4) などを読まれることをお勧めする。また、更に詳しい専門的内容については、日本音響学会研究発表会講演論文集や IEEE の ICASSP 誌などを参照されたい。

2. 音声認識技術の概観

音声認識技術と一口に言っても、その内容は極めて多様である。このことをまず語い数や話者数について説明しよう。今迄商品化されている装置はそのほとんどが認識可能な語い数が 100 語以下のもので、そこで用いられる技術はほぼ固まって来ている。しかし、このような少数語いの場合の技術は認識対象の語数がふえて数千、数万などに達すると、そのままではもう全く役に立たなくなり、商品化はおろか研究段階においてすら手探りの状

態となるのである。つまり、そこでは今迄とは質的に異なった原理の新技术を追加することが必要となる。また、話者についても同様なことが言える。すなわち、ある特定の話者だけが発声する音声を認識すればそれだけでいいのか、或は誰の声でも認識できなければならないのかという問題である。この両者の差は実は極めて大きいものであって、後者の場合には原理的に異なる手法を採用する必要があるばかりか、複雑さにおいてもコスト的に見ても桁違いに難しくなるのである。しかも、後者すなわち不特定話者認識装置は現在、せいぜい数十語認識するのがやっとであり、これ以上殖やすためには、まだまだ多くの未解決の問題が残っているのである。さらに、問題はこれだけに止まらず、いわゆる発声様式の問題が控えている。すなわち、認識したい単位ごとに時間的に区切って発声しないと認識できない、いわゆる離散発声音の認識装置は比較的实现が容易であるのに対し、どんなに長く連続して発声しても認識できるという装置は、現在のところまだ極めて実現困難なのである。

さて、自動車や船舶、或は航空機などに音声認識技術を用いようとする場合、認識しようとする単語、すなわち、認識対象単語は、種類としてはそう多くは必要ないであろう。しかし、その代わり認識のスピードと正確さが要求される。認識のスピードはハードウェアなどの製品化技術に関係し、電子装置の処理速度の高速化とともに認識技術とは独立に向上させ得る部分が多いと考えられるのに対し、認識の高精度化の方は認識の方法の改良を必要とするなど、本質的な問題なので、それを達成するのが必ずしも容易ではない。認識の正確さ、すなわち、認識率なるものは、認識装置の中で使われている分

析部の構成，認識の手法，認識対象の語数などにより大きく異なってくるものである。しかし，一般的に言って，対象語数を少なくすればするほど，また発声者を特定化すればするほど認識率は向上すると言えよう。したがって，本稿では認識率を重視する立場から特定話者が発声する少数語いを単語ごとに区切って発声する場合，すなわち，「特定話者用少数語い離散発声声認識」を重点にして解説してゆくこととする。

3. 特定話者単語音声認識技術

3.1 単語音声認識の原理

単語音声認識の原理は図1に示すように，言ってみればあらかじめ幾つかの答を用意しておいて，未知の入力がこの答のどれに近いかをあてさせる一種のクイズであると考えられる。この答がパターン認識という所の標準パターンなのであって，音声の場合その構造は多少複雑となる。市販の単語認識装置の場合幾つかの帯域フィルタを用いるものが多いのでそれを例にとって標準パターンの構造を説明しよう。

図2に示すように単語の長さが例えば1秒だとする。フィルタが5個あって0.1秒ごとに各帯域毎にエネルギーの平均値を出力するものとする。フィルタは0.1秒毎に5個の値を出力し，これを10回繰返して一つの単語が終了するから，いわば5次元の縦ベクトルを横に10個並べた構造となる。これがこの場合の単語音声の標準パターンの例である。標準パターンはその認識装置を使うとする特定話者ごとに作成する。例えば，その話者が自分の選んだ20個の単語を順々に発声すれば，認識装置は20個の標準パターンを作ることになる。これらはすべて認識装置内に記憶される。次に，認識段階では発声者の一回の単語発声音に対して認識装置は1個の入力パターンを作り出し，すでに装置内に記憶してある20



図1 単語認識の原理

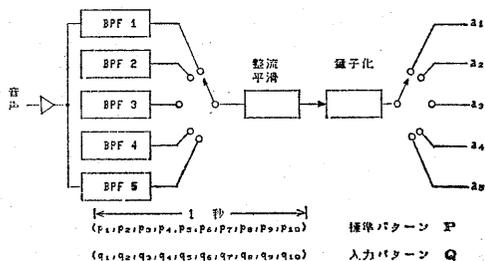


図2 音声分析部と単語音声パターン

個の標準パターンの全てと逐次照合を行い，一番似ている標準パターンを選択する。最後に，認識結果を出力して認識過程が終了するのである。それではこの照合と選択は実際にはどのように行われているのか，次節でもう少し詳しく見てみよう。

3.2 パターン照合の原理

入力パターンと標準パターンとの間の照合は，両パターン間の類似度を計量することに他ならない。そこで，パターン間の類似度なる量を数量的に定義することが必要となる。類似度が大きいことと両パターン間の距離が短いことは同義であるから，類似度を定義することはとりも直さず距離を定義することであると言える。ところで単語のパターンは縦ベクトルを時間的に横に並べたものであったから，2つの単語パターン P, Q 間の距離を求めるには図3に示すように P の中の各ベクトルと Q の中の各ベクトルを一つずつ対にして，その対の距離 $d(p_1, q_1), \dots, d(p_{10}, q_{10})$ を定義し，それらの

$$P = (p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad \dots \quad p_{10})$$

$$Q = (q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad \dots \quad q_{10})$$

$$D(P, Q) = \sum_{i=1}^{10} d(p_i, q_i)$$

図3 入力パターンと標準パターン間の距離

総和を求めればよいことになる。 p_i, q_i などすべてベクトルであるから， $d(\cdot, \cdot)$ はベクトル間の距離を意味し，例えば単純にベクトルの各要素ごとに対を作り，その差の平方和などで定義できる。 $d(\cdot, \cdot)$ と $D(\cdot, \cdot)$ はともに距離であるが，前者は距離の定義の仕方，即ち距離尺度に直接依存するのに対し，後者はどのような加え方をするかによって変わってくる。このことは後述する時間伸縮を考慮する場合に重要となる。以後，本稿ではパターン間の照合のことをパターン・マッチングと呼ぶことにする。このようにして距離尺度さえ定義しておけば，パターン間の距離はこの例では単にベクトル間の距離の総和であるから，その最小なものを求めることにより，入力パターンに最も近い標準パターンが求まり，認識出力が得られる筈である。

ところがここで問題になるのは上で例にあげた単語音声のパターン20個が実際には縦ベクトルを横に10個並べた構造になるとは限らないことである。つまり，単語の長さが丁度1秒で終るといふようなことは実際にはあり得ず，単語の長さには不揃いが生ずる。したがって，マッチングを行うときに著しい不都合が生ずる。これを解決するためにはまず，入力パターンと標準パターンを時間的に同じ形に揃えてしまうことが考えられる。

たとえば、比例的に皆等しく 10 個の横並びになるように、内挿により各ベクトルを作り変えてしまうか、あるいは時間的に一番近いベクトルを運んで短い方の数だけの対を作って済ませるかのいずれかである。このようにいわば線形的に時間軸伸縮を行うことにより一応問題は解決する。しかし、実際の音声で高い認識率を得るには、ここで述べたマッチング、すなわち、線形伸縮マッチングのみではまだ不十分なのである。そこで、登場するのが非線形伸縮マッチングである。

実際の音声ではたとえ同一の発声であっても局部的には伸縮の様子が異なるので、線形伸縮のみでは正しいマッチングが得難い。そこで例えば図 4 のような非線形的

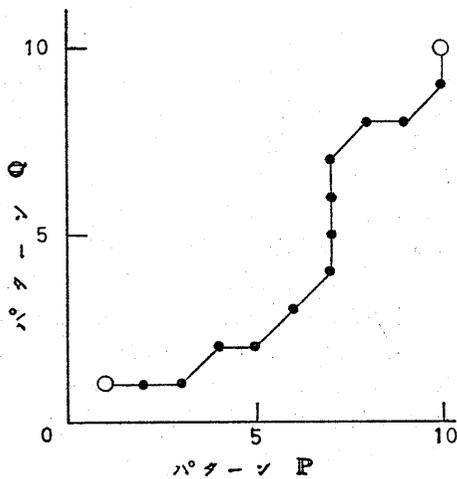


図 4 時間軸の非線形伸縮によるパターンのマッチング

な時間軸の伸縮を行って $d(\cdot, \cdot)$ の距離がなるべく小さいようなマッチングの経路 (パス) を選ぶことにする。もし全体的に見て最適なマッチングすなわち距離尺度の和が最小のパスであれば、そのパスはすべての部分において距離最小なパスとなっている筈である。このことは動的計画 (ダイナミック・プログラミング: DP) 法を支えている最適性の原理に他ならない。この原理を用いると部分的に最小なパスを選んでゆくことにより、総当りに全部を計算するより、はるかに少ない計算量で最適なパスが求まるのである。標準的な DP マッチングの方法を図 5 に示す。実際に音声認識に用いられる場合には、パスが通り得ない領域はそこを通ることを予め禁止するように、いわゆる整合窓を設けたり、パスの部分的な傾斜に制限を設けたりすることが多い。以下では、このような原理を用いたものを中心に特定話者用単語音声認識装置や LSI の製品を紹介しよう。

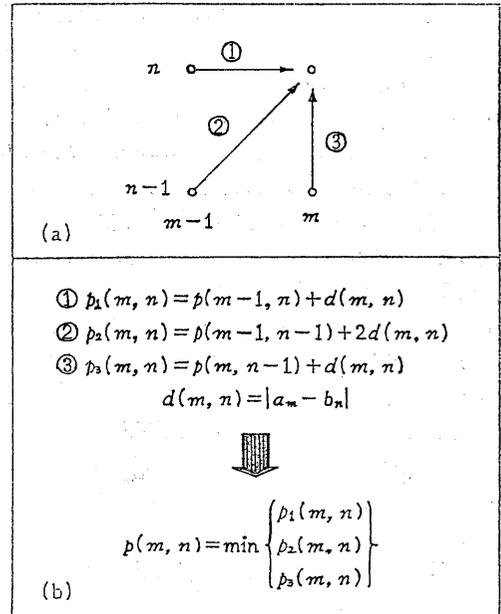


図 5 DP マッチングの原理

3.3 特定話者用単語音声認識装置および LSI

半導体技術の進歩で、高速かつ低価格な LSI が多量に生産され始めた 1970 年代初頭、米国で最初の市販音声認識装置が出現した。Threshold Technology (TTI) 社の VP-100 と呼ばれる製品で、特定 (登録) 話者の最大 32 単語を対象としたものである。音声分析は 19 チャンネルのフィルタ・バンク方式で、32 ビット、16 時点の情報を用いて 98-99% の認識率を達成したという。ただし、これには DP はまだ使われていない。その後 70 年代後半には米国 TTI 社、Centigram 社、Interstate Electronics 社などから、相次いで数種類の装置が発表され、認識語数が増大し、且つ価格も低下していった⁶⁾。この中には DP を使ったものもある。我が国では 1978 年 3 月、5 単語連続発声を許す本格的な単語音声認識装置 DP-100 が日本電気から発売された。この製品の特徴は連続音声を認識できる 2 段 DP マッチング法を用いたことである。2 段 DP マッチング法は単語レベルの通常の DP マッチングの上に、更に単語列レベルでの上位の DP マッチングを重ねて、2 段構造の DP マッチングを行うもので、連続音声で認識できる方法として、まさに画期的な手法であった。1981 年には DP-100 の普及版として小型化、低価格化された DP-200 が発売された。DP-200 の認識語数は離散単語で 250 語以内、連続単語で 50 語となっているが、詳しい性能などについては本年度第 2 回電波航法研究会で東福寺氏らにより航空管制に用いた例の中で説明されているので省略する。また、同じ頃、日本電気から最大 120 単語と 10 数字の離散発声を

認識する特定話者単語認識装置 SR-100 が 50 万円を切る廉価で発表された。

その後 50 単語, 10 数字, 68 単音節を認識する SR-200, 60 単語を認識する PC-8012-03 (9 万 8000 円) が日本電気から, 32 単語を認識する SRB-32 (17 万 9500 円) が三洋電気からそれぞれ発売されている。

以上の外マイコンなどに組み込むことの出来るボード形式のものも幾つか発表され, また, それと同時に音声認識用 LSI も数多く発表されている⁷⁾。中でもウォルシュ・アダマール変換と DP マッチングを用いて 62 語を認識できる松下電器の MN 1263, デジタル・フィルタバンクで分析を行い, 圧縮 DP 法⁹⁾により標本数を間引き, 記憶量 1/3, 処理量 1/10 の条件下で, 125 語を認識率 98% で認識できる日本電気の μ PD 7761 D, DP-200 の方式を採用して 340 語の離散単語と 40 語の連続単語を認識率 98-99% で認識できる同じく日本電気の μ DP 7764 D などが目立つ。また, 松下電器の VRB-1 とシャープの SVR-4 には少語いではあるが, それぞれ零交叉波と定レベル交叉波が用いられている。これらは個人差の影響を受け難く, 特に SVR-4 は不特定話者用(ただし認識率 90%)となっている。音声認識技術は今や LSI 化の波に乗って発展しており, 性能の向上とコストの低減が徐々に進んでいくものと思われる。

さて, 次章では不特定話者用の単語音声認識技術について解説しよう。

4. 不特定話者用単語音声認識技術

4.1 不特定話者の単語音声

特定話者用認識装置の場合には標準パターンとしてはその特定の話者のものを用いた。このため, その話者がどんなに異なった声の持ち主であろうとも, その話者の声の中で単語パターンの間に差があれば, それで十分認識ができ問題はなかった。では不特定の話者の場合には, どのようなことが問題になるであろうか。当然まず, 個人差の問題がある。つまり, 標準パターンを或る一人の声だけから作ると, 他の人の音声と一致せず, 認識に誤りが生じ易くなる。そこで, なるべくバラエティに富んだ複数の人から平均的な標準パターンを作れば, この誤りは多少軽減するであろう。しかし, 語数が多くなれば, これにも限度がある。その他に何か良い考えはないであろうか。たとえば, 個人によって差があるとするならば, むしろそのような各個人の発声から何通りも標準パターンを用意しておいてはどうであろうか。これならば丁度標準パターンを増加した分だけ, パターン・マッチングの手間はかかるが, 従来の特定話者の技術がそのまま生かせるのではないだろうか。これは実は正解なのである。現にこの方式はマルチテンプレート方式と

呼ばれ, 基礎研究の段階ではあるが, その有効性が実証されている方式なのである⁹⁾。このほか 2 つの優れた考えがある。第 1 は単語データの構造を圧縮して, その単語の多くの発声データを空間に分布させ, その単語のみを取り出すような識別関数を個々に構成する方法である。第 2 は統計的識別を行うのみでなく, 他の方法と併用する方式で, ハイブリッド構造マッチング方式と呼ばれている。その併用する具体例としては音響特徴のラベルを識別する「遷移ネットワーク」の例がある。これら二つの方式は次節で述べる市販の装置の中で用いられており, そこで改めて説明したい。

4.2 不特定話者用単語音声認識装置

現在迄に製品化された不特定話者用認識技術は特定話者用の場合に用いられて来た技術をそのまま, もしくは精密化した形で踏襲している部分がある。すなわち, 標準パターンとのマッチングにより, 候補の単語を予備的に選択して候補数を削減したり, 或は, 特定話者用の類似度計算を精密化して複合類似度を定義するなどの例である。しかし, これだけでは多数話者の多様性に対処し切れないので, 前節の不特定話者のための特別な工夫がなされている。また以下に述べる不特定話者の認識装置の例では, いずれも電話回線を通じての音声入力を対象として設計されている。一般に, 不特定話者用システムでは認識語数は最大でも 100 語程度と少なく, また装置が複雑でコストもそれだけ高いものとなっている。以下, 代表的な装置について述べる。

4.2.1 SR-1000 シリーズ (日本電気)

1980 年代初頭に発表された一連の不特定話者用離散発声単語認識装置で, 4 単語用の SR-1101, 16 単語用の SR-1201, 128 単語用の SR-1301 がある。SR-1101 は標準パターンとのマッチング方式, 他の 2 種類はいずれも識別関数方式をとっている。SR-1201 の場合を例にとって学習・認識過程を説明しよう。図 6 にその説明図

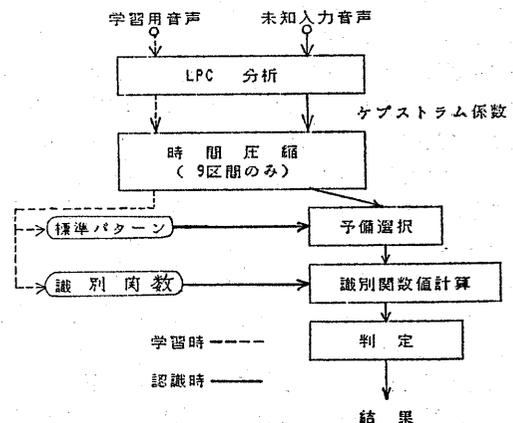


図 6 SR-1201 の学習・認識過程

を示す。まず、音響分析は後に第5章の5.1節で説明する線形予測(LPC)分析を用いている。分析区間長は16ms一定である。この分析により対数スペクトルのフーリエ係数である「ケプストラム係数」と呼ばれるものを抽出する。この場合1分析あたり10個のケプストラム係数を求める。LPC分析は一つの単語当り9個の時点で行い、これにより単語当り9組のケプストラム係数を得る。認識のさいには、まず、標準パターンとのマッチングにより予備的に候補単語を選定し、選定された少数の候補単語についてのみ識別関数により判別を行い最適の単語を決定する。認識率は1000名の男・女について95%、認識率の悪い者を除いた800名の話者では98.5%を得ている。

4.2.2 TOSVOICE (東芝)

本装置も電話入力可能な設計となっているが、その最大の特徴はすでに4.1で述べたハイブリッド構造マッチング方式を採用していることである。すなわち、本装置は標準パターンとのマッチングを行う複合類似度計算機構と、単語を音素系列として認識する遷移ネットワーク機構の二つの部分を用いており、単語認識の最終出力はこれら二つの部分からの結果を総合的に判定して決定する。音響処理部では同じ電話帯域をカバーするのに16帯域と4帯域の計2系統のフィルタバンクを用いる。TOSVOICEの処理の流れを図7に示す。

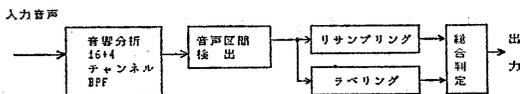


図7 TOSVOICEの処理の流れ

複合類似度の計算には単語音声を16時間区間に分割したときの分割時点に最も近い時点のフィルタバンク出力を用いる。これをリサンプリングと呼んでいる。さて、通常の類似度は或る入力パターンに対して、それと標準パターン1個だけの間の類似度であった。一方、これに対して複合類似度は一つの入力パターンに対して、それと標準パターンの属するカテゴリー内のすべてのパターンとの間の類似度を集め、その平均2乗和の平方根であると定義するのである。この尺度は文字認識において認識率を向上させる上で有効と認められている。一方、16チャンネルのフィルタバンクの出力から類似度計算によって音素のラベルを決定し、さらに4チャンネルのバンクから有声、無声、破裂、無音、摩擦などをはじめ合計12種類の音響的特徴を抽出し、これらを遷移ネットワークに入れて単語の判定を行う。遷移ネットワークとは一種の認識オートマンであって、単語ごとに異なるネットワークを持ち、状態遷移の結果出口に達した

入力ラベル系列があれば、その入力ラベル系列はそのネットワークにより自己と等しいと認識される。このことを入力系列はそのネットワークにより受理されたという。さて、総合判定は複合類似度がある域値より大きいものを候補単語とし、候補単語がなければ認識不可能、1つであればそれを最終出力とする。もし候補単語が複数個あればそれが遷移ネットワークで受理されているかどうかをチェックし、もし受理されていなければ判定不可能、複数個あれば複合類似度の最大なものを最終出力とする。この装置の性能は男女各380人の電話音声16語について実験を行ったところ認識率99%であったという。

さて、以上、主として単語認識を中心に音声認識技術の概要を述べて来たが、現在音声認識技術全体の中では、以上に述べた技術以外にどのような研究が進んでいるか、それらの動向について以下に解説する。

5. 音声認識の基礎研究の進展

5.1 音声分析法の進歩

音声分析については本稿では今迄あまり詳しく説明して来なかった。3章の説明の例は極く簡単な5チャンネルのフィルタバンクを用いたものであった。認識語い数が少ない場合にはフィルタバンクは5チャンネルでも事足りるが、語い数が増えるとそれでは無理で、例えばチャンネル数を増加して分析精度を高くするなどのことが必要となる。しかし、或る程度以上にチャンネル数が多い場合、このようなアナログ的な分析法ではコストも高くなることであり、最近ではこれに代わって高速フーリエ変換(FFT)や線形予測分析(LPC)などを始めとするデジタル信号処理の技術がしばしば用いられるようになった。従来デジタル分析は精度は高いがコストも高く、また速度の遅いのも難点とされて来たが、これらの難点は最近かなり克服されつつあり、今後は、フィルタバンクに代わって全面的に用いられるものと予想される。音声への応用を中心として書かれているデジタル信号分析の参考書としては例えば文献3)などを参照されたい。

さて、デジタル信号分析で得られる特徴ベクトルにはスペクトル関連のものが多いが、対数スペクトルを更にスペクトル分析するケプストラム、波形をずらせて掛け合わせることにより求められる自己相関関数などがある。自己相関関数のフーリエ分析は、ウィナー・ヒンチンの定理により電力スペクトルになることはよく知られているから、自己相関関数は波形とスペクトルの丁度中間にあるといえる。また、音声スペクトルの逆数をフーリエ展開したものは逆スペクトル係数と名づけられる。この係数 $A_i; i=1, 2, \dots, M$ を標準パターンとして用

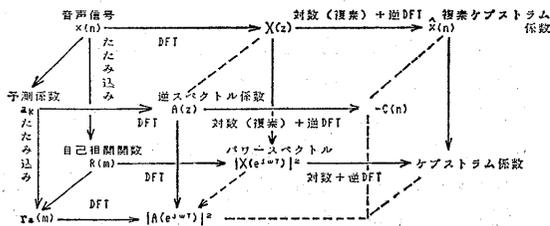


図 8 デジタル信号処理の系統図

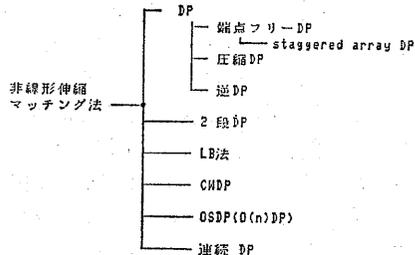


図 9 非線形伸縮マッチング法の種類

いると、入力自己相関関数との積和が丁度標準パターンとの類似度になることが知られている¹⁰⁾。これがいわゆる最尤法と呼ばれるものであって、音声認識によく用いられる。図 8 にデジタル信号処理の系統図を示す。

5.2 距離尺度の改良

フィルター・バンク方式の認識の場合、チャンネルの出力は任意に重みつけて用いられたが、デジタル信号処理を用いた音声認識の研究では、線形予測 (LPC) 分析が多く用いられ、その中でも最尤スペクトル距離 (Itakura-Saito 距離)¹⁰⁾ が多く用いられてきた。しかし、最近 LPC 分析を用いた音声認識の研究がすすみ、距離尺度を変換することにより、認識率を向上させる実験が行われ始めた。その皮切りとなったのが cosh 尺度¹¹⁾である。最尤距離が対数スペクトル上での誤差 δ に対して、 δ の小さいとき δ^2 に比例し、 δ の大きい時、 δ の正側では $|\delta|$ 、負側では $e^{-\delta}$ なる非対称性を持つものに対して、cosh 尺度は δ の大きいとき、正側も負側も等しく $e^{|\delta|}$ に比例する対称な距離となっている点に最大の特徴がある。その他、対数スペクトルの 2 乗誤差である LPC ケプストラム距離も有力な標準的尺度となって来た。

また、最近新しい尺度としてスペクトルの山の部分の距離に重みをつけることのできるピーク重みつき距離 WLR (重みつき尤度比) 尺度が研究されている。スペクトル・ピークにおける距離を重視するのは、スペクトル・ピークの近辺に重要な音声情報が集中しており、ピークに重みをつけることが認識率の向上につながると期待されるからで、実験の結果でも、このことは実証された。これらは極く最近の研究であって、現在、製品化にまで至っていないが今後は徐々に製品に反映されてゆくものと期待される。

5.3 DP マッチング法の改良

距離尺度の改良にも増して DP マッチング法の改良もすすんでいる。図 4 で説明した DP マッチングの場合には両端点は固定されていたが、この拘束は外す方がよいマッチングが得られることが確かめられ、端点フリー DP マッチングとして用いられている。図 9 に改良された種々の DP マッチング法を示す。この中、圧縮 DP についてはすでに 3.3 節で述べた。それ以外の DP 法は主

として連続発声のために考案されたものである。詳細な説明は文献 4) を参照されたい。

5.4 文章や大語い単語認識の研究¹²⁾

文章などの連続発声や 1000 単語以上の大語い単語音声認識する技術は現在まだ実用化されていない。しかし、そのための基礎研究は極めて活発である。文章や大語い単語の認識では、認識のための最小単位を単語とすることは著しく不利なのである。それは登録しておくべき単語の数が増大し、標準パターン作成に大変な労力を要し、さらに装置的にはコストの上昇を招き、さらに、入力単語を標準パターンとマッチングするための計算時間が長くなり過ぎてしまうからである。この問題を解決するには認識のための最小単位を単語とせず、それよりも小さい単位に選ぶのがよい。たとえば単音節すなわちカナ文字の単位で認識すれば、ワープロなどの技術により漢字に変換するのは比較的容易である。この方向で数千から一万語の認識をめざして、最近極めて盛んに研究が行われている。このほか音素 (phoneme) など、いわばアルファベットに相当する小さい単位が考えられる。音素は単音節よりも数が少ないから認識単位としては有利のように見えるが、実は一つの音素には幾つかの異音と呼ばれる変種があり、このため音素の認識はなかなかうまく行かないのが現状である。そこで既成概念たる音素から一応離れて、音素分析の結果得られる特徴ベクトルの空間上の分布から、統計的手法、例えばクラスターリングなどにより自動的に 200-300 程度の細分音種ないし擬音韻なるものを作って、これを用いて単語を認識する方法も考え出されている。これが SPLIT 法と呼ばれる方法で、最近有力となりつつある¹³⁾。その他 VCV (母音+子音+母音) 音節、VCVV 音節などを用いた研究があるが、その数は前記の単音節 (カナ文字) に比較して多くない。また、前記の音素もしくは細分音種は不特定多数の話者について標準パターンを作ってもそれほど数がふえないので、不特定話者の認識にも有望である。

5.5 音声理解システムの研究¹⁾

会話音声の理解システムは米国で ARPA 音声理解プロジェクトの中で提唱された。中でも約 1000 単語の文

章を95%で認識するHARPY(カーネギーメロン大学)が有名である。我が国ではNTT武蔵野通研で開発された新幹線予約システムVOICE Q-Aシステム(認識率96.5%)がその典型的なもので、他に京大のLITHAN(148語)、山梨大の童話理解システム(165語)などがある。

6. おわりに

以上、単語音声の認識に重点を置いて音声認識技術を概観してきたが音声認識の技術は年々加速的に進歩しており、1990年までに第5世代コンピュータの研究計画として約5万語の単語認識が目標とされている。今後、音声認識・理解技術はワープロ技術や翻訳技術などの周辺諸技術の進歩とあいまって、ますます向上することと思われる。また、それとともに例えば船舶の運航関係でも、内陸の指令室もしくは船内の指令室などから音声により操舵するようなシステムが実用化されるかも知れない。その他のいろいろの分野でも、音声認識とその応用にはますます多くの関心が集まることと思われる。

なお、本稿を終えるに当たり、電波航法研究会を通じて、筆者に本稿を書く機会を与えて下さった電気通信大学鈴木 務教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 新美康永: 音声認識, 共立出版(1979)
- 2) 小畑秀文: 音声認識のはなし, 日刊工業新聞社(1983)
- 3) 斎藤・中田: 音声情報処理の基礎, オーム社(1981)
- 4) 古井貞熙: デジタル音声処理, 東海大学出版会(1985)
- 5) 中津: 音声認識技術, 情報処理 Vol. 24, No. 8, pp. 984-991 (1983)
- 6) Wayne, A. L. (ed.): Trends in Speech Recognition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1980
- 7) 小林 勉: 音声処理用 LSI, 情報処理 Vol. 24, No. 8, pp. 1001-1010
- 8) 鶴田七郎 他: 圧縮 DP マッチング法による単語音声認識, 昭和56年信学会情報・システム部門全国大会, pp. 118 (1981.10)
- 9) Rabiner, L. R. et al.: "Speaker-independent isolated word recognition for a moderate size (54 word) vocabulary", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing, ASSP-24, 5, pp. 583-587 (1979)
- 10) 板倉・斎藤: "統計的手法による音声スペクトル密度とホルマント周波数の研究" 信学論, 53-A, 1, pp. 35-42 (昭 45)
- 11) Gray, Jr., and A. H. and Markel, J. D.: "Distance measures for speech processing," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, ASSP-24, 5, pp. 380-391 (1976)
- 12) 「文章や大語いを対象とした音声認識の研究が活発化」日経エレクトロニクス, pp. 126-145 (1982.1.18)
- 13) 菅村・古井: 擬音韻標準パターンによる大語い単語音声認識, 信学論, 65-D, 8, pp. 1041-1048 (1982)

時間標準の現状

アンリツ株式会社

佐分利義和

Present Status of Time Standard

Anritsu Corporation

Yoshikazu SABURI

1. はじめに

一般に時間標準と言うと、時間間隔（又は周波数）標準と時刻標準の2つの意味が含まれる。前者は秒の定義又は周波数標準、後者は天文時、原子時又は標準時を示すことになる。いずれにしても、物理的な基本量としての性格によって種々の物理測定に不可欠なものであるが、原子時計を用いた独立同期システムの導入によって、電波航法、放送・通信、測位、宇宙科学などの技術分野でもその役割は重要なものとなっている。

2. 原子周波数標準器

原子（分子）スペクトル周波数（又は波長）を時間（又は長さ）の基準にするという考えはかなり古くからあったようであるが、実際にはマイクロ波技術による原子や分子のマイクロ波分光学の進歩によって実現の端緒が得られた。すなわち、1949年に初めて米国国立標準局（NBS）で 1×10^{-8} の精度を目標とした原子周波数標準器（原子時計）が試作され、以後今日に至るまで高精度化のための研究開発が続けられてきた。1950年代は種々の方式の開発、1960年代は各方式とも設計改善、1970年代は物理的、技術的難点の解決、さらに1980年代には従来方式にかわる新方式の提案と基礎実験が始められている。

研究内容としては、スペクトルの線巾減少、スペクトル検出の S/N の向上、スペクトルへの各種擾乱の軽減が主なものである。アンモニア分子の利用から始まり、多くの原子について、吸収スペクトルあるいはメーザ発振、ガスセル封入あるいはビーム方式、さらに光ポンピングと光検出などの諸技術の組合せによる種々の観測方式が試みられた。しかしながら、例えば Q 値を向上させるためのある方法をとると、 S/N の低下又は中心周波数のシフトを伴うなどの欠点を生ずる場合もあり、実際に

は利用する原子の特性と観測方式の最適な組合せが必要である。このような条件によって、現在のところ、セシウム・ビーム形、水素メーザ形及びルビジウム・ガス・セル形の3種のみが実用に供されている。

(1) セシウム・ビーム形

真空管内でセシウム原子を細いビーム状にして空洞共振器を通過させ、マイクロ波との相互作用によって遷移した原子数を測定して、吸収スペクトルを観測する方式である。空洞共振器に入力するマイクロ波の周波数と原子固有の遷移周波数の一致の度合によって原子数が増減するので、スペクトル中心周波数を検出することができる。本方式は各国標準研究所での研究期間も長く、原子時計のなかで正確さが最も高いので、1967年に秒の定義に採用されている。すなわち、

「秒はセシウム原子(Cs^{133})の基底状態における2つの超微細構造準位間の遷移に対応する放射の9192631770周期の時間間隔とする」

となっており、ここでセシウム原子の遷移周波数を9192631770 Hzとしたのは、それ以前の地球の公転運動を基礎とした暦表時による秒の定義の1秒と一致させるためである。

第1図に各国標準研究所における大形の実験室形及び商用の小形封じ切り形の正確さの向上を年代的に示してある。現在、実験室形のもの測定と研究を続けている標準研究所は米国（NBS）、カナダ（NRC）、西独（PTB）、電波研究所（RRL）及び計量研究所（NRLM）であり、いずれも正確さは 1×10^{-13} に達している。しかし、図に見られるように数年で1桁という向上は、やや飽和ぎみであり、現方式での実用上の限界に近づいたとも考えられる。商用品については、正確さは 1×10^{-11} 、封じ切りビーム管の寿命は約3年であり、連続運転の容易さから標準時維持のための時計、各種技術分野での独立同期用の基準発振器などに広く用いられている。最近の研究

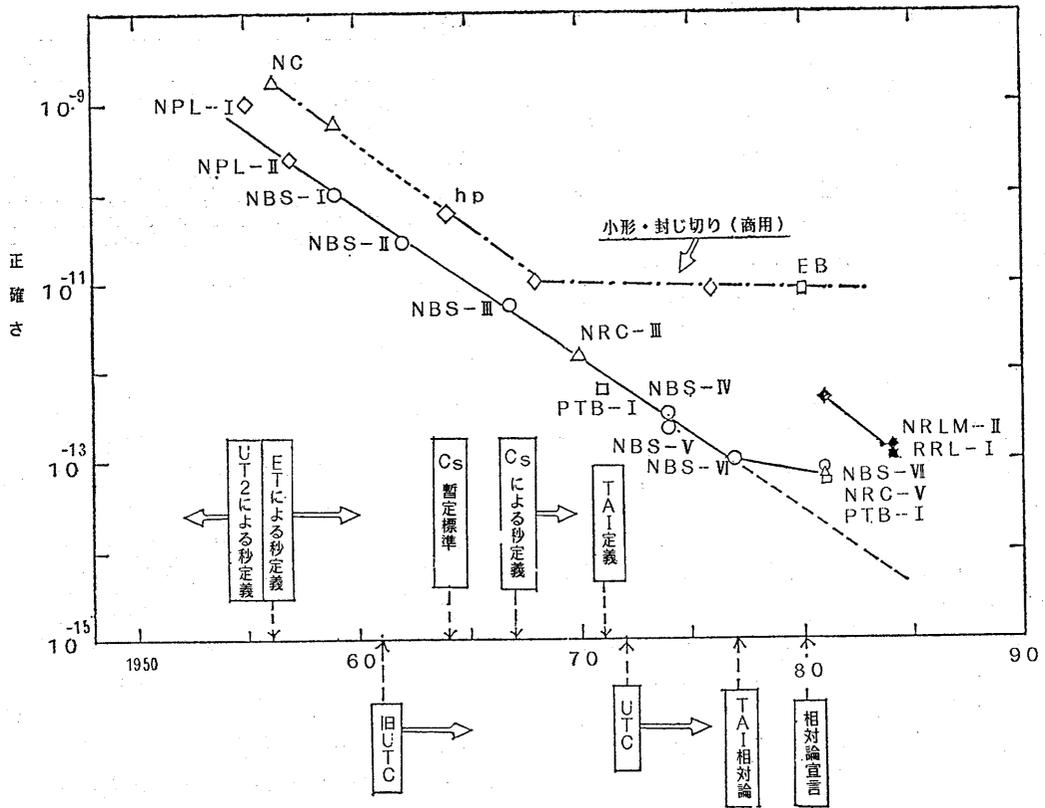


図 1

では、原子の準位選択に用いる磁界の代わりに、レーザー光による方法によって 1×10^{-14} 以上の正確さの向上が目標となっている。

(2) 水素メーザ形

水素原子ビームを偏向磁石を通過させて、高準位の原子のみを選択し、これを空洞共振器内に導き、低準位への遷移による電磁波によって自己発振をさせる能動的な方式である。空洞共振器内におかれたテフロン壁のバルブ内で原子は約 1 秒という長時間にわたり電磁波との相

相互作用が行なわれるので、スペクトルの Q 値が 10^9 と極めて高いことが特長である。したがって、周波数安定度は第 2 図に示すように 10^{-15} 台に達し、原子時計のなかで最高の短・中期安定度を実現している。正確さについては、わずかながら前述のテフロン壁の影響があって、セシウム・ビーム形より劣る。高い周波数安定度を必要とする超長基線電波干渉計、宇宙科学などでの基準発振器として利用されている。最近、極低温で動作する方式の研究もなされ、 10^{-16} 台の安定度が目標となっている。

(3) ルビジウム・ガス・セル形

前述のビーム形ではなく、ルビジウム原子をガラス容器に封入し、その吸収スペクトルを観測するが、ガス・セル内での原子の実効速度を低下させるために不活性ガスを併せて封入すること、さらに検出の S/N を向上させるために放電ランプによる光ポンピングと光検出の方法がとられている。しかし、光強度の変化、不活性ガスによる周波数シフトなどがあり、わずかながら周波数ドリフト ($< 10^{-14}$ /月) がある。小形、軽量かつ寿命も長いので、水晶発振器よりよい長期安定度を必要とする技術分野で広く用いられている。最近、光ポンピング

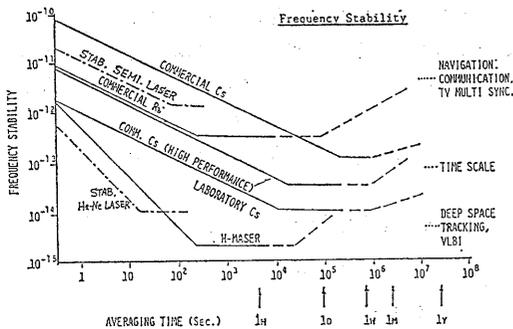


図 2

にレーザ・ダイオード光を用いて高性能化を目指した研究がなされている。

(4) イオン・ストレージ形

この方式はまだ実用化まで達していないが、イオンを電界または磁界によって長時間空間的にトラップし、電磁波との相互作用時間を極めて長くとり、かつ光ポンピング及び光検出を行う方式である。将来は、さらにレーザ光照射による原子の冷却(\sim mK)も行うことが考えられており、安定度 10^{-16} 、正確さ 10^{-15} の実現が目標となっている。

3. 原子時

第1図に示すように、セシウム原子による秒の定義のあと、1971年に国際原子時(TAI: International Atomic Time)が定義された。これは秒の定義に基づく1秒を積算する時間尺度(時計面)であるが、その原点は1958年1月1日0時0分0秒(世界時 UT 2)を同年同月同日0時0分0秒(TAI)としたものである。ただし、TAIの1秒はセシウム原子時計がジオイド(平均海面)上にある場合に示す秒ということが規定されており、相対論効果が考慮されている。すなわち、静止している時計も重力ポテンシャルによる周波数シフトをうけているので、地表上の異なる地点にある時計の歩度差は、それぞれの地点での地球の重力ポテンシャル(自転運動による遠心力も含む)の差に比例することとなる。地表近傍では、ジオイド面にある時計に対して、高さ1 kmあたり 1.1×10^{-13} 周波数が高くなる。秒の定義では各地点での物理計測に必要な固有時が必要なので、相対論効果について言及する必要がなかったが、TAIのように地球上全体といったある座標系に共通な時系を必要とする場合には座標時という考えが必要となり、実用的にジオイドを基準面としたものである。

実際に国際原子時を維持しているのは、パリにある国際報時局(BIH)であり、このために2段階の作業が行なわれている。まず最初は世界各地で連続運用している主として商用セシウム時計(総数約140台)の種々の方法による相互比較値から各時計の安定度が検定され、これに応じた重みづけによって時系が作られる。次に長期的に安定なこの時系の歩度がカナダ、西独、米国、日本などの標準研究所の実験室形セシウム原子時計の測定によって適時校正され、歩度の絶対値に偏差が認められる時には 2×10^{-14} ステップの周波数調整がなされて、TAIの精度を保つようにしている。第3図にTAIから見たセシウム原子時計の動きを示してあり、現在のところ、 1×10^{-13} の精度は確保されていると考えられるが、年周変化が含まれているようであり、その原因は明らかでない。

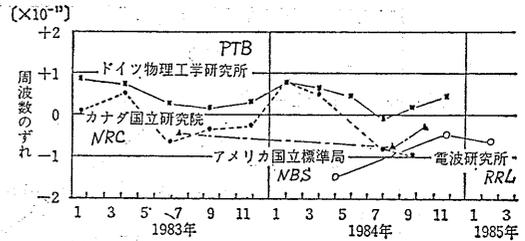


図 3

4. 天文時

第1図に示されているように、1956年以前は地球の自転周期を基礎にした世界時(UT: Universal Time)が秒の定義であり、同時に時刻標準でもあった。UTは各天文台での恒星の位置観測値と天文台の経度とから平均太陽時としての世界時(UT 0)が求められるが、これには極運動によって生ずる各天文台の採用経度の変化による差異が含まれる。したがって、これに対する補正を行なって観測場所によらない一義的な世界時(UT 1)を求めており、これは平均太陽に対する地球の自転角を示すので、現在でも重要な量である。さらに、自転周期変動の一つである季節変化を補正して、できるだけ年間を通じて一様な時系を作るために世界時(UT 2)が以前には求められていたが、これにはかなり大きな不規則変動が残っているし、現在では意味のないものとなっている。UT 1決定の精度は、従来の恒星観測(光学的)では50局ほどのデータを用いても、2~3ミリ秒の精度を出すのに少なくとも数日を必要としていたが、最近では電波星を観測する超長基線電波干渉計(VLBI: Very Long Baseline Interferometer)の方法によって、例えば、24時間の3局観測では0.05ミリ秒という高精度が得られており、数日といった短期間にUT 1が1~2ミリ秒も変ることがあるなどが明らかになっている。

自転周期の不規則変動のために、秒の定義は1956年に地球の公転運動に基礎をおく暦表時(ET: Ephemeris Time)に改められたが、実用上は観測精度の低いことから、特に物理計測には利用できぬものであった。最近では天体力学理論及び天体暦に用いる時刻として、太陽系重心を基準とする太陽系力学時(TDB: Barycentric Dynamical Time)及び地球重心を基準とする地球力学時(TDT: Terrestrial Dynamical Time)が暦表時に代って用いられている。このような天体力学理論に基礎をおく力学時と量子理論を土台とした原子時との長期比較には強い関心が持たれている。

5. 協定世界時

原子時計の精度は第1図に示されているように1950

年後半においては天文時の精度を1桁以上こえ、かつその測定は極めて短時間に行えるという特長をもっている。このような状況から、標準周波数及び標準時の精度向上をはかるため、標準電波では物理測定に必要な時間間隔(周波数)の基準に原子時計を実用することが1961年より公式に始められた。これは予測される世界時(UT2)の年平均の歩度を原子時計を基準にして年間一定に保つという考えによるもので、実際には年間を通じて使用する標準時間間隔(周波数)の原子周波数標準からのオフセット値を定め、さらにこれの刻む時刻と実際のUT2との差をできるだけ小さくするために必要に応じて0.1秒ステップの時刻調整を併用するという方法である。このような時間尺度を協定世界時(UTC: Coordinated Universal Time)と呼び、1971年末まで使用された。しかし、この方法は地球自転周期の変化に応じて、年毎に標準周波数、すなわち1秒の長さも変りうるので、物理計測の面では不便なものであり、改訂の必要性が論議された。

この結論として、時間間隔(周波数)はセシウム原子による秒の定義そのものを用いることとし、時刻としては地球自転角を示す世界時(UT1)との差が1秒をこえ

ぬよう必要に応じて1秒ステップの時刻調整(うるう秒と呼ばれる)を行う協定世界時が1972年より導入され現在に至っている。このUTCは各国の法定時として使用するよう勧告されており、わが国でも時差9時間を進めたUTC時系を標準時として採用している。標準電波の通報する標準周波数及び時刻もUTC時系であるが、UTCとUT1の差は0.1秒単位でDUT1符号として同時に放送されているのでUT1をより精度よく利用する分野に便利ようにしてある。第4図に国際原子時計を基準にした世界時(UT2あるいはUT1)の動きとともに1972年までの旧UTC及びそれ以降のUTCの模様、またUTCでのステップ調整を表に、さらに右上に地球自転時の変化の模様を図に示した。

6. おわりに

時間標準のごく概要を述べさせて頂いたが、精密同期技術を用いたシステムを利用される方も多くなりつつあるので、いささかでも御理解を深めて頂けたら幸である。なお、例えばLoran-C, GPS, Ω のような電波航法システムでは、UTCのような1秒ステップ調整は行なわれていないので御注意頂きたい。

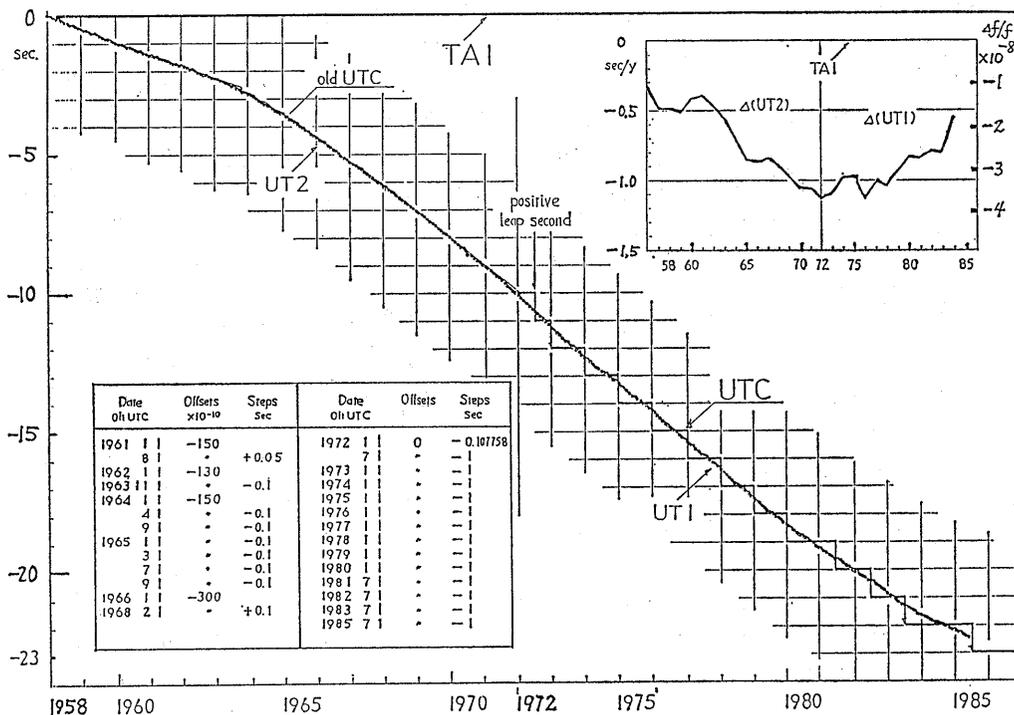


図 4

戦艦「大和」探索

古野電気株式会社 研究技術部
遠藤 保彦

The Search for the Battleship "YAMATO"

Furuno Electric Co., Ltd.
Yasuhiko ENDO

1. はじめに

この原稿は昨年9月11日(水)電波航法研究会にて講演したものを書き下ろしたものである。すでに新聞、テレビ等で報道されている通り、昨年7月24日~8月4日にかけて戦艦「大和」の探索・引き揚げが実施され「大和」の確認と一部遺品の収集に成功した。

戦艦「大和」は昭和20年4月7日、3333名の乗員を乗せ日本の最後の連合艦隊として、沖縄への水上特攻に出撃し、撃沈された。沈没後、救助された乗員は、わずか1割にもみえない260数名であった。

今回の探索行は海の墓標委員会(委員長 辺見じゅん氏、副委員長 阿川弘之氏、内田貢氏、事務局長 角川春樹氏)(鎮魂委員長 戦艦大和会会長 石田恒夫氏)が中心となって実施されたものであるが、「大和の探索と引き揚げ」に当たっては、NHK・読売新聞社等の報道関係をはじめ民間企業各社が全面的に協力することになり、古野電気もこれに協賛し探索装置の提供と技術協力を行なった。

「大和」の探索はこれまで、戦艦大和会を中心として昭和53年以来3回にわたって洋上探索が行なわれた。我社は昭和57年の第3回目の探索に初めて参加し、それまで発見できなかった「大和」らしき大きな沈船を発見することができたが、残念ながら「大和」であるという確証がないまま今回に致った。

今回の探索目的遂行の為我社の果たすべき役割は、前回の探索で得られた沈船位置に探索メンバーを誘導し、超音波探索機器を使って沈船の発見と形状・沈座状況及び付近海底地形等本探索時の潜水艇による作業が安全かつ効率的に行なわれるための情報収集作業であった。前回の探索で「大和」と思われる沈船位置が一応確認されているとはいえ、洋上の真ただ中、しかも水深340mに眠る「大和」を確実に捉えることは、技術的な難さ

が予想された。しかし、今回の探索では昨年開発したばかりの3次元ソナー・その他の探索機器の活躍で、見事その大役を果たすことができた。

海の墓標委員会は戦艦「大和」の確認、遺品の引き揚げに成功し、遺族らによる洋上慰霊祭も無事終わることができた。戦後40年目の海への鎮魂という極めて意義深いものであった。

2. 探索用電子機器

今回使用した探索用電子機器は、船の位置を測定する電波航法関連機器が10機種、大和の艦影を捉える超音波関連機器が6機種の合計16機種。

探索行に先立ち、探索機器は海洋調査船新日丸(424トン)に艀装工事を行なった。ドックスケジュール変更のため3日間連日の突貫工事で、特に超音波機器のセンサーは全て船底に取り付けなければならず、また装備は仮設である為、船底には穴をあけずに舷側パイプを通してケーブルを引き上げる大がかりなものとなったが、丁寧なドック工事のおかげで機器の性能も十二分に発揮することができた。装備した探索用電子機器は、次のとおりである。

● 船位測定用電波航法機器

- 1) 2GRI ロランC受信機(LC-600型)
- 2) ロランA受信機(LA-200型)
- 3) ロランC航法装置(LC-70型)×2台
- 4) ロランC/A 演算装置(LAC-3000型)
- 5) 衛星航法受信装置(FSN-70型)
- 6) カラービデオプロッタ(GD-170型)
- 7) 航跡記録器(FP-170型)
- 8) データ印字用プリンタ(FP-70型)
- 9) 船位信号収録用データレコーダ(MT-100型)
- 10) ジャイロ信号変換用A-Dコンバータ(AD-10型)

● 海中探索用超音波機器

- 1) 3次元ソナー (海底探索装置 HS-100 型)
- 2) サイドロッキングソナー (SL-27 型)
- 3) カラー魚群探知機 (FCV-320 型)
- 4) 記録式デジタル魚群探知機 (FE-881 II 型)
- 5) データ収録用映像再生装置 (MT-12 型)
- 6) カラー潮流観測装置 (CI-30 型)

これらの探索用機器は、新日丸ブリッジに設けられた特設テーブルにところ狭くと並べられた。3次元ソナーは操船のしやすさを考慮して操舵機左側に設置、航法機

器やその他の超音波機器は右舷側と後部に二段重ねで取付けた。

カラービデオプロッタはロラン C, ロラン A, 衛星航法, オメガ, デッカ等あらゆる電波航法装置に接続でき、カラーブラウン管上に自航跡表示することができ、今回の探索を効率よく進める上でなくてはならない装置であった。航跡表示以外に目的地マーク等各種表示マークが入力でき、画面の拡大・縮小・移動は自由に行なうことができる。また、航跡記録器は記録紙上に緯度・経

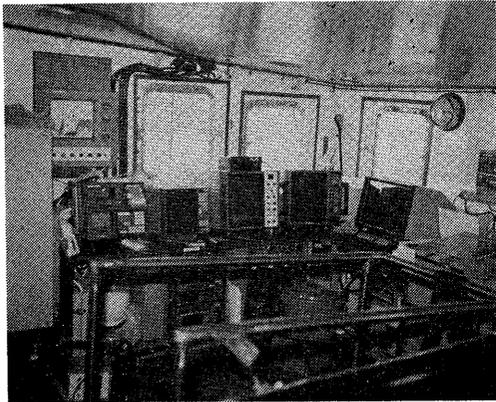


図 1 ブリッジ右舷後方に装備された電波航法機器と海中探索機器

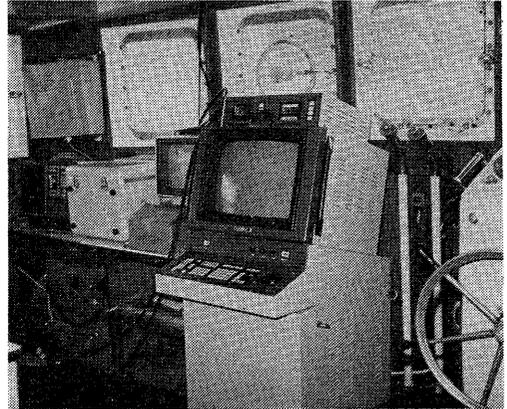


図 2 ブリッジ前方操舵機横に装備された3次元ソナー

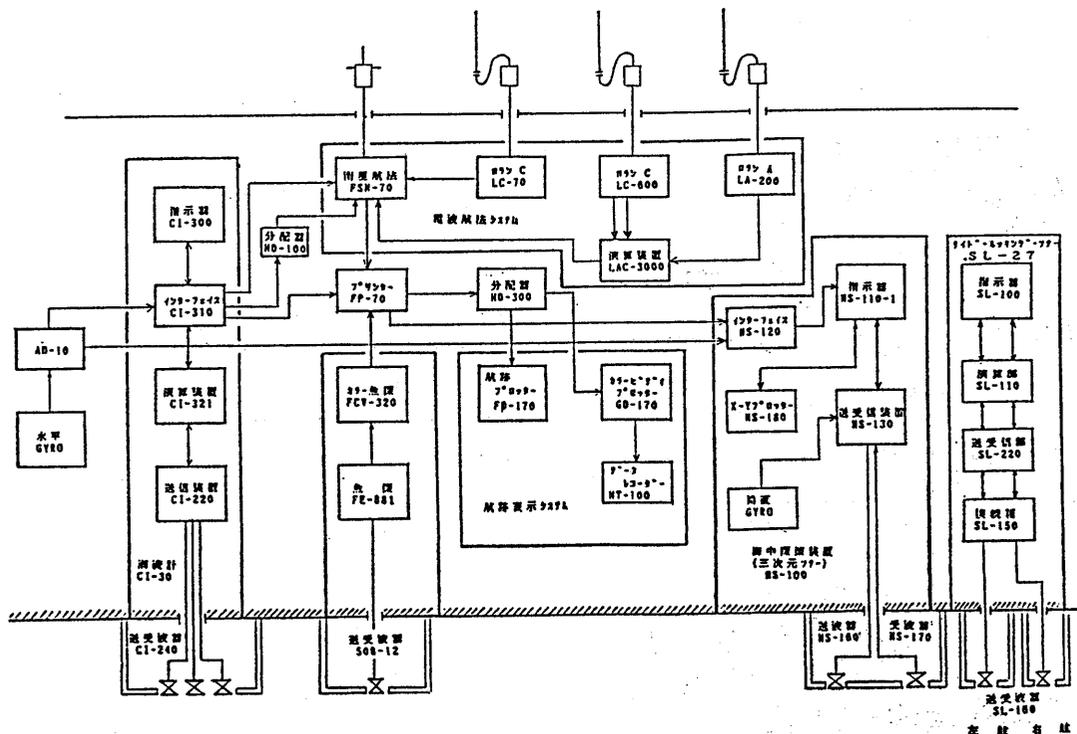


図 3 大和探索用機器システム構成

度線、航跡等を残すことができ、縮尺も自在に選択することができる。

3次元ソナーは開発したばかりの装置で、図4のように船底に装備した送受波器により、図5のような送波ビームは船の左右に120°幅、前後方向に1°幅という左右に広く前後に狭い形となり、一方受波ビームは船の左右が1°幅、前後方向に60°幅という左右に狭く前後に広い形となる。ここで受波ビームを左右120°幅の範囲を電子走査すると、送受で合成される左右120°、前後1°幅の探知ができ、分解能1°×1°の高分解能に自船の左右120°幅の各方向の水深を計測し、各方位の水深とジャイロ、航法装置、潮流観測装置等から得られる方位、位置、船速データをコンピュータで処理することによって海底地形あるいは沈船等を立体的にブラウン管上にカラー表示することができる。表示画面の種類は海底地形を深度によって色を変え3次元・等深線・横断面・縦断面（航跡下垂直断面）等であり、それらを各々単独あるいは併記することができる。

サイドロッキングソナーは図7のように水平面に狭

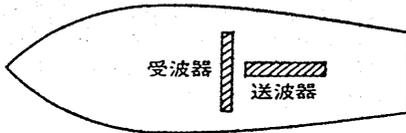


図4 3次元ソナー船底装備概略図

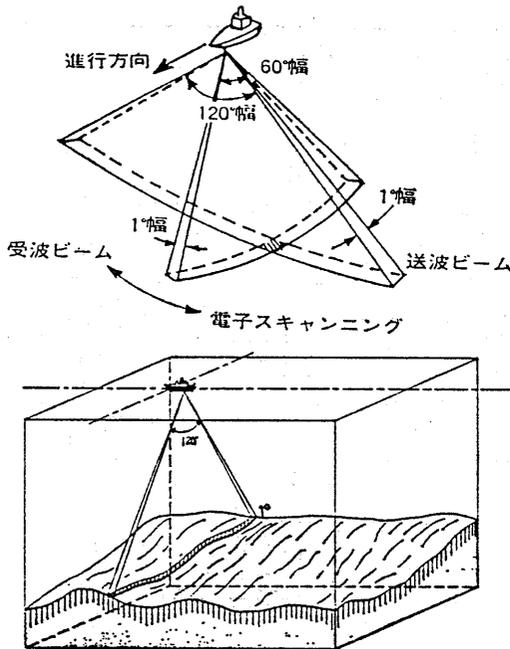


図5 クロスファンビームによる探索状況

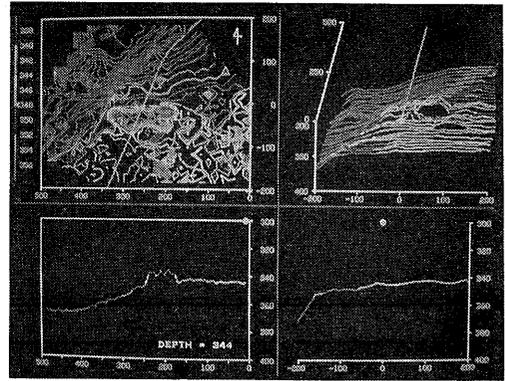


図6 3次元ソナーの4画面併記
(左上: 等深線表示, 右上: 三次元表示)
(左下: 縦断面表示, 右下: 横断面表示)

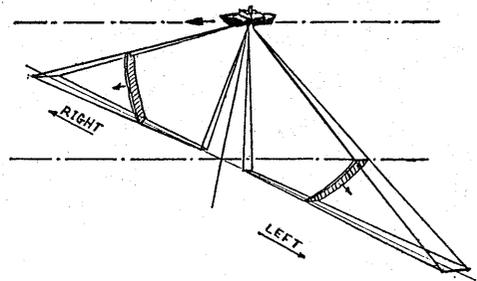


図7 サイドロッキングソナー原理図

く、垂直面に広い送受波ビームを有する送受波器を両舷に装備し、これから水平に超音波を放射し、受信記録すれば海底の状況や海底に沈んだ船の影を広範囲に捉えることができる。

3. 戦艦「大和」の探索

今回の探索は前後2回に分けて実施、初回の先行調査は7月24日～27日、潜水艇を使って遺品の引揚げを含む本探索は7月29日～8月4日に行なわれた。

3.1 先行調査

7月23日、フルノ探索スタッフ笹倉、岡本、葉室、遠藤の4名は大阪から空路奄美大島へ向かった。容赦なく照りつける夏のひざしはさすが南国奄美であった。夕刻入港した新日丸に乗り込む。24日17時、探索船新日丸は奄美大島名瀬港を出港。乗員は新日丸クルー、事務局員、フルノスタッフのほかNHK、読売新聞記者の総勢24名が乗り込んでいる。

前回の探索で確認した大和沈没の海域は、男女群島の南約175km「北緯30度43.17分、東経128度04.00分(世界測地系WGS-72)」で長崎から300km、鹿児島から312kmの遠距離にある。

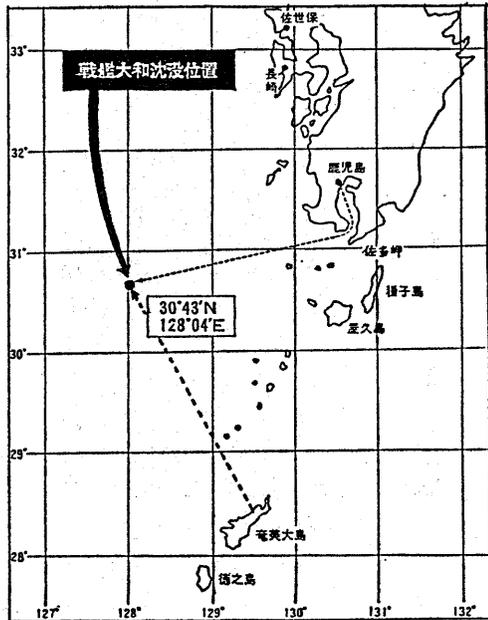


図 8 探索海域

17 時に出港し、現場へは翌朝 7 時頃の到着予定である。名瀬出港と同時にフルスタッフは各機器の点検、調整を行ない、すべての機器は順調に作動を続けている。

船位測定にはロラン C、ロラン A 及び衛星航法 (NNSS) を使用したが、主にロラン C で船位測定を行なった。それも韓国チェーン (GRI-5970) で行う。ロランの信号強度は強く、妨害波もない極めて安心した状態であった。受信しているロラン C の韓国チェーンは韓国東岸に位置する浦項に主局があり、同西岸の光州と沖縄にある従局の 3 局からの電波を受信しながら船位を測定するシステムである。船位は緯度・経度値を自動的に表示する仕組みになっており、場所によって数十 m から 100 m 前後の精度で船位を求めることができる。本船の航行海域は位置線 (LOP) の交角条件もよく、測位精度も高かった。

ロラン C で測定した船位は刻々とカラービデオプロッタに自航跡となって表示され、大和探索海域へ向けて一直線に航行中の様子がよくわかる。ブラウン管上には自船位置から大和の目的地ポイント 0 (N30°43.17', E 128°04.00') へのコースと距離方位値が順次、計算表示されている。

カラービデオプロッタには海図まで入っており、奄美大島、屋久島、種子島から九州南岸がくっきりと映し出され、トカラ群島や男女群島などの小島も点々と現われており、本船の現在位置との重畳表示によってどの方向に航行しているのかが一目でわかる仕組みである。今回の

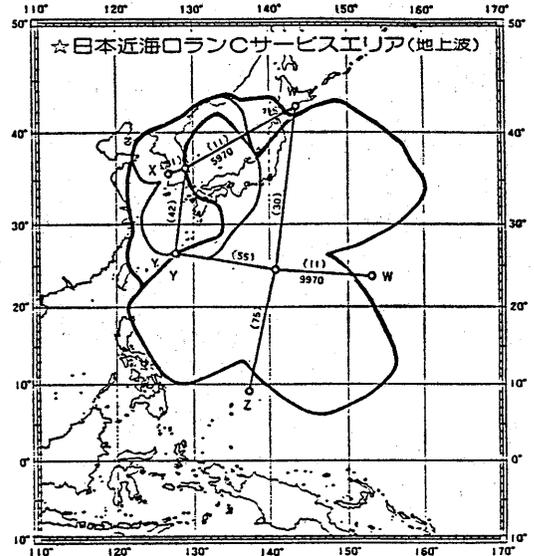


図 9 探索海域ロランCサービスエリア

船位測定は主システムにロラン C (GRI-5970) を使用しているが、そのバックアップとして別のチェーン (GRI-9970 日本チェーン) も受信できる態勢をとっている。これは韓国チェーンが欠射した場合の対策である。またロラン C のいずれもが使用できない場合を想定して、ロラン A や衛星航法システムが使えるようそれぞれの受信装置を準備し、万全の測位システムを搭載してある。

21 時、トカラ群島を左右に見ながら、ナギの東シナ海を航行、さすがに東経 128 度ともなれば夜の暮れるのも遅く、まだまだ島影がハッキリと望める。潮の影響もなく船は設定コース上を一直線に進んで行く快適な航海であった。

7 月 25 日、午前 6 時、目的地はすでに間近にせまっている。ポイント 0 まであと 12 マイル、約 1 時間で到着だ。コースは NNW、船速 12 ノット、水深 340 m の平坦な海底が続いている。

午前 7 時、現場到着、目的地ポイント 0 の手前をそのまま走り、N30°42.08', E128°03.80' で転針、コースを真北にとる。船速 5 ノット、いよいよ探索開始である。

右舷側に大和ポイントをみながら北上しているが、サイドルッキングソナーに沈船反応は現れてこない。ポイント 0 まで 200 m しかなく、接近しすぎたかもしれない。前回 (昭和 57 年) の大和探索では、このサイドルッキングソナーが大きな艦影をキャッチし、その長さ高さで割り出し大和に間違いのないという確証を得ている。今回も、まずサイドルッキングソナーで捉えようという作戦だ。

ポイント 0 を右手にそのまま北上する。N30°44.00'

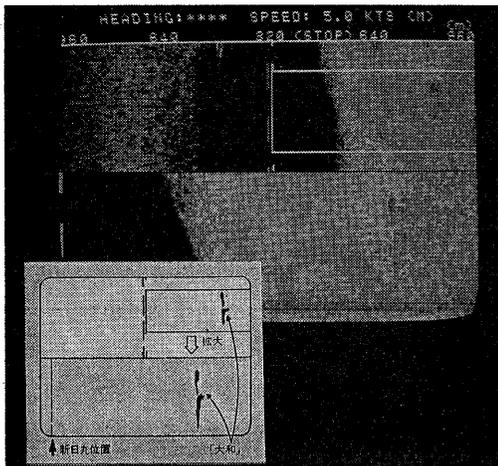


図 10 サイドルッキングソナーが捉えた大和の艦影

付近で 90° 転舵，東進してさらに面舵をとり，サイドルッキングソナーで艦影を捉えやすいコースで進む。E128°04.00' に接近，「出た！ ヤマト！，本船の右舷側 800 m 付近に東西に横たわった直線状の長い構造物が映し出されている。その長さは船速から計算して 170 m もある。時計は午前 7 時 46 分を指している。探索を開始してわずか 46 分で，大和は再び我々の前にその艦影を現わしてきた。

ブリッジ内はクルーや NHK，読売の人達でいっぱいになり，「早くも見つかったの？」「さすがですね」と声がかかる。大和発見の自信は十分あったものの，不安があったのも事実だが，その不安をいっきよにかき消すかのような大歓声が船内に響いた。

午前 8 時 25 分，ポイント 0 上にさしかかる。カラー魚群探知機に水深 340 m の平らな海底が急に大きな盛り上がりをつけた。大和である。今，まさしく大和の真

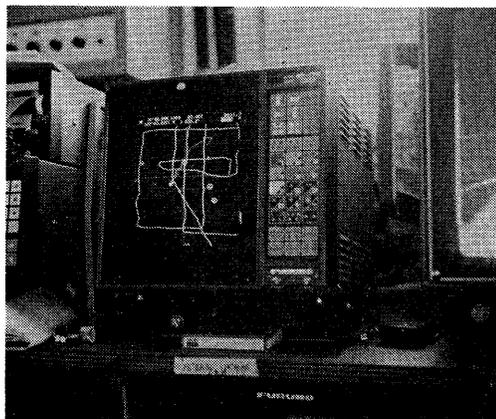


図 11 カラービデオプロッタに映し出された探索の航跡（画面中央上がポイント 0）

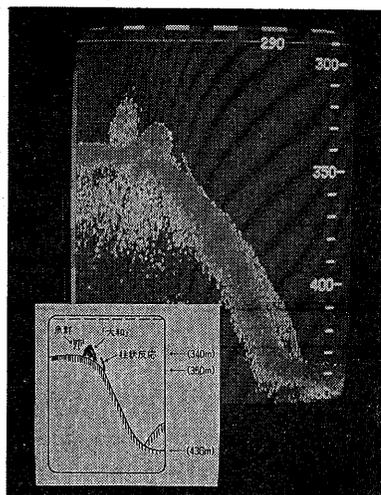


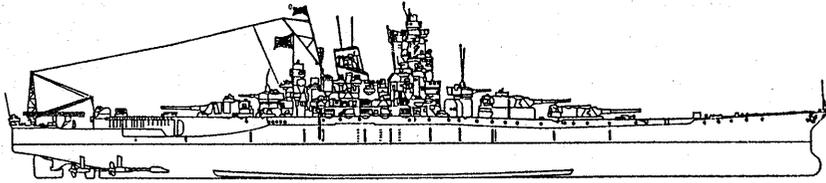
図 12 カラー魚群探知機が捉えた大和の反応

上にさしかかろうとしている。隆起した構造物は海底以上の強い反応を示している。その高さは 17 m もある。通常，カラー魚群探知機での沈船反応は鋭く尖った細い映像として現われるが，この大和の反応はラグビーボールをねかせたような，ゆるやかな丸みをもっており，相当大きな沈船であることは間違いない。沈船反応の上に魚群の反応も見られる。

カラー魚群探知機とともに 3 次元ソナー画面にも大和の艦影をキャッチしている。3 次元ソナーの画面表示は，深度によって色を変えて海底地形を 3 次元，等深線図，左右断面及び航跡下の断面を表示することができ，今，大和の艦影を 3 次元画面で大和の形状を捉えている。3 次元ソナーで捉えた大和の画面から大和の長さ，高さ，幅はもちろん，その形状，沈座状況のすべてが表現される。その結果，大和の沈座している北側は水深 440 m まで斜度約 10 度の大きなくぼみになっており，大和は丁度，水深 340 m の平地の北端にひっかかった格好で沈んでいる様子がわかる。

北緯 30 度 43.17 分，東経 128 度 04.00 分，我々は何度もポイント 0 付近を縦横に走行し，3 次元ソナーであらゆる角度から大和を確認し続けた。

大和は大きく二つに分かれ，東西方向に横たわっている。長い方の沈船反応は 170 m，その幅は 35~45 m もある。大きい反応の南側中央部はくびれており，ここに何かがあることがうかがえる。聞くところによると，大和は左舷側に多くの魚雷攻撃を受けながら沈んでいったという。爆発による船体の変形がここに現われているのであろうか。また 3 次元ソナーで見る限り，西方が細くなっており，甲板のような平らな直線反応が見られる。左舷側の爆発，艦首部の直線的な反応から判断して，大和は艦首を西に向けて沈んでいると推測できる。しかも



▶戦艦大和 要目◀

船体・全長263m・吃水線上の長さ256m・吃水線の最大幅36m・吃水下バルジ最大幅38.9m・深さ18.915m・排水量(公試状態)69,100トン・排水量(満載状態)72,800トン・速力27.46ノット・航続力(16ノットにて)7,200海里
 機関・主機関タービン4基・軸馬力前進4軸153,550馬力、後進2軸45,000馬力
 防御・防御甲板MNC厚200mm・舷側甲鉄VH鋼厚410mm
 砲装・主砲46cm45口径、3連装砲塔3基9門・副砲15.5cm60口径、3連装砲塔4基12門・高角砲12.7cm40口径、連装砲6基12門・機銃25mm24挺13mm8挺
 飛行機・施回式2基・水上機6機
 その他の装備・電波探信機5組・水中聴音機1組・探信機ソナー1組・測距儀15m4基、10m1基
 乗組員・乗組員2,500名・沖繩特攻時3,333名

図12 戦艦「大和」要目

中央付近は壊滅的な攻撃を受けているものと思われる。もう一つの反応は大きい反応から南へ70mのところらみられる。その長さは東西へ70m、高さ15mである。

これはおそらく艦橋もしくは艦の一部ではないだろうかということであった。この他にも、東の方に高さ5m前後の小さな物体が散乱して沈んでいる。小物体は3~4つほどあり、水深340~350mの広範囲に及んでいる。このように、3次元ソナーの活用によって海底に眠る大和は我々の前に、その全容を現わし出した。海面下の大和をここまで詳細に解析することは極めて難作業である。なお、同地点において探索メンバーにより洋上慰霊祭を行なった。

10時45分、もう一つのポイント、大和の随行艦「矢矧」の探索に向う。某放送局の入手資料によると、矢矧

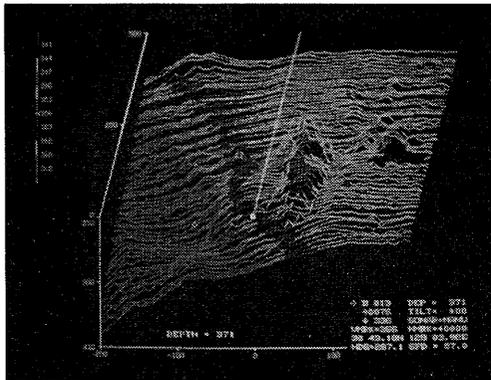


図14 3次元ソナーで捉えた戦艦「大和」(3次元モード)

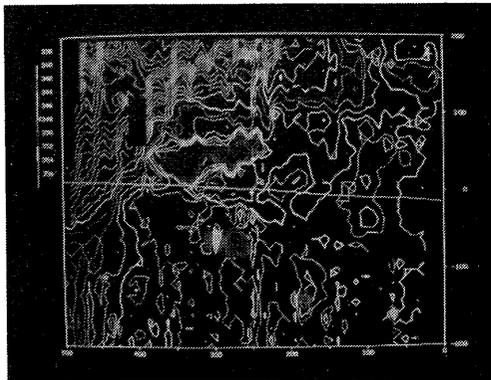
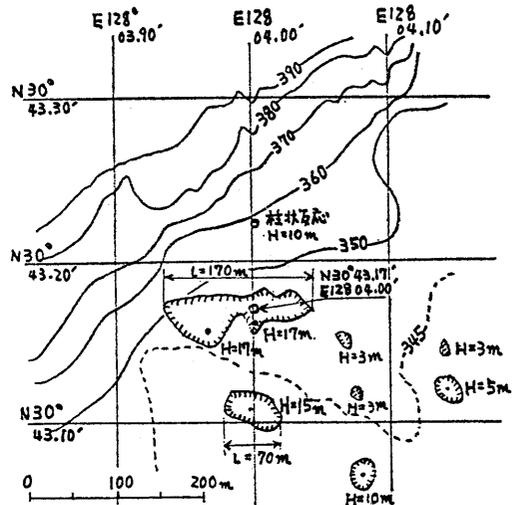


図15 3次元ソナーで捉えた戦艦「大和」(等深線図モード、画面上が北)



FURUNO

図16 探索機器データ、その他情報をもとに描いた戦艦「大和」の反応分布図

は N30°41′, E128°03′ に沈んでいるらしい。大和沈没位置から南々西約 7km の位置である。矢矧は大和の随伴艦のうちの一隻で排水量 7710 トン、随伴艦の中でもっとも大きな巡洋艦である。しかし、そこには反応は全くなかった。11 時 46 分、N30°41.64′, E128°03.39′ でサイドルッキングソナーが沈船反応をキャッチ、東西に 70m の細長い物体が横たわっている。矢矧かどうかは不明であった。

15 時 00 分、再び大和海域へもどり大和位置を確認、後日の潜水艇による本調査のために 3 次元ソナーによる探索データからトランスポンダを大和沈没位置の近くに投入し、着底位置を確認後、探索日程を繰り上げ現場を離れ枕崎に向かった。

7 月 26 日早朝、新日丸枕崎入港、翌日、潜水艇バイセス II (732m 潜水可能、12 トン) 搭載船第 36 正栄丸 (680 トン) と合流枕崎沖合にて潜水テストを実施した後、鹿児島谷山港へ回航する。谷山港で大和関係者を搬送する海洋調査船フィエスタ (300 トン) と合流。

3.2 本探索

7 月 29 日、台風一過の晴天のもと、新日丸、第 36 正栄丸、フィエスタの 3 隻は谷山港を出港、本探索のために一路大和海域へ向う。古野電気からは 1 名が指揮船新日丸に乗船、機器操作にあたる。翌 30 日、午前 8 時 30 分、大和海域到着。即座に 3 次元ソナー、サイドルッキングソナー、カラー魚群探知機で大和艦影を確認し、ブイ投標、バイセス II が第 1 回潜水を開始した。大和の艦尾付近に到着した。

スクリュウ付シャフト 3 本、シャフトのみ 1 本を発見。大和のスクリュウは 4 本であるが、無残にも 1 本はひきちぎられ、スクリュウも大きくねじれていた。46 cm 主砲弾、木甲板、艦橋発見、艦首部菊のご紋章確認等、大和の確信を得た。潜水調査は一部遺品の収集等 8

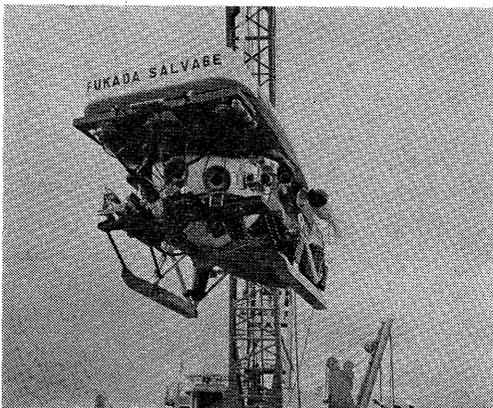


図 17 潜水艇バイセス II (イギリス)

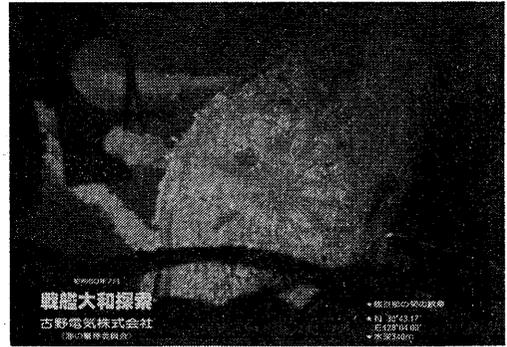


図 18 戦艦「大和」艦首部の菊のご紋章



図 19 引き揚げられた遺品

月 3 日まで計 7 回行なわれ、今回の探索作業を終了し、夕刻、現場海域を離れ一路鹿児島へ向け帰港の途についた。

4. あとがき

今回の探索の様子はテレビや新聞紙上で報道されたので、御記憶の方も多いと思う。前回の探索では大和の確証が得られないままに終わったが、撃沈後 40 年、ようやくその姿を確認することができた。大和の生存者、遺族の方々にとって、やっと終戦を迎えられたという思いで一杯ではないかと思う。

我々、探索スタッフは大和についてあまり知識もなく、海中探食用機器の技術的興味から今回の探索に参加したが、大和発見の瞬間はタイムスリップした思いであった。探索に用いた 3 次元ソナーをはじめ、現在の船用電子機器の発展には目を見張るものがあり、大和探索の過程においても、それらが実証された。

最後に、大和探索行に参加でき、大役を果たせたことを関係各位に感謝致します。

水路部における天文時刻観測

海上保安庁水路部航法測地課

佐々木 稔

Astronomical Time Observations Conducted by the Hydrographic Department

Hydrographic Department, MSA
Geodesy and Geophysics Division

Minoru SASAKI

1. はじめに

水路部では天文航法に供するために、天測暦、天測略暦等の天体の位置を表わした航海暦と、天測計算表、簡易天測表等の高度方位計算表を刊行している。また、航海暦の根拠となる太陽、月、惑星及び恒星の正確な位置は、天体位置表として別に刊行し、学術目的、精密測地、宇宙開発等に用いられるところとなっている。

こうした精密天体暦計算に用いるデータを得るために、海上保安庁の水路観測所のうち地磁気観測を主たる業務としている八丈水路観測所（三管）を除く、白浜水路観測所（三管）、下里水路観測所（五管）、美星水路観測所（六管）と、築地（本庁）において、天体の位置観測を行っている。水路部航法測地課内には、天文学研究の国際学術組織である国際天文学連合の勧告に基づきイギリスのグリニッジ天文台から業務を引き継いだ国際星食中央局が設置されており、世界中の星食観測データがここに送られてきている。

水路部の行う天文観測及び各国から水路部にデータが送られてきている天文観測は、すべて現象の起った時刻を、できるだけ正確に測定することに主眼がおかれている。得られた時刻データは、天体力学及び従来の各種観測値に基づいて作成された天体位置表の予測する予報時刻データと比較され、天体位置表の正確さの検証に用いられるとともに、この差が有意な場合は、天体位置表の改良に用いられる。こうした過程において、天文現象を記述するための基本的な天文時（暦表時と呼ぶ、詳しくは後述）が求められることになる。

本稿では、水路部のやっている天体位置観測、データ解析及びこの結果求められる天文時刻等について紹介することとしたい。

2. 水路部のやっている天体位置観測

2.1 星食観測

星食とは、恒星や惑星が月のうしろに隠される現象をいう。これは、月が星野上を西から東に 27.3 日かかって 1 周していることによるもので、星は月の東縁に潜入り、西縁から出現する。星食観測とは、この潜入あるいは出現の時刻を正確に測定することで、一般には、望遠鏡を通して恒星の潜入または出現を目で確認してこの時刻を何らかの方法で記録する。この観測は、時刻記録の正確さを保つことに留意すればアマチュアにもでき、世界各国で年間 1 万件以上の観測が行われており、これらのデータが水路部へ送られている。

水路部では、これらアマチュアのデータの基準とすると共に、さらに正確な観測値を得るために、3 水路観測所と本庁において、口径 30 cm~60 cm の望遠鏡に光電子増倍管を取り付け星像を小孔を通して導いて、潜入あるいは出現に伴う光量の変化を時刻信号と共にペンオシログラフに記録させている。眼視観測の時刻記録精度はせいぜい 0.1~0.2 秒であるが、この方法では 100 分の 1 秒、さらに、光量の変化波形を A/D（アナログ/デジタル）変換して高分解能でマイクロコンピュータに記録することによって 1000 分の 1 秒の精度を得ている。観測条件に応じて眼視観測も行っているが、水路部の年間の観測数は、光電観測が 600、眼視観測が 400 程度である。図 1 に光電子増倍管からの信号を A/D 変換する装置のブロックダイアグラムを、図 2 にその記録波形例、表 1 にペンオシロと AD 変換による観測の比較を掲げる。

潜入または出現の過渡時間は、一般には恒星の大きさが無視できるほど小さいので、図 2 からわかるような、

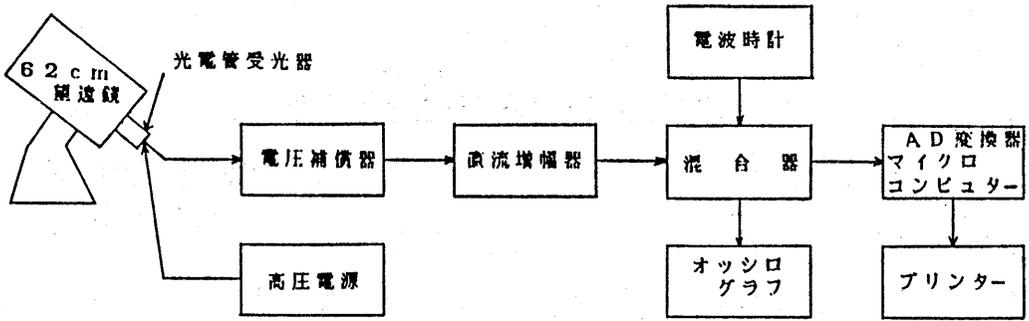


図1 A/D変換による光電星食観測装置概略

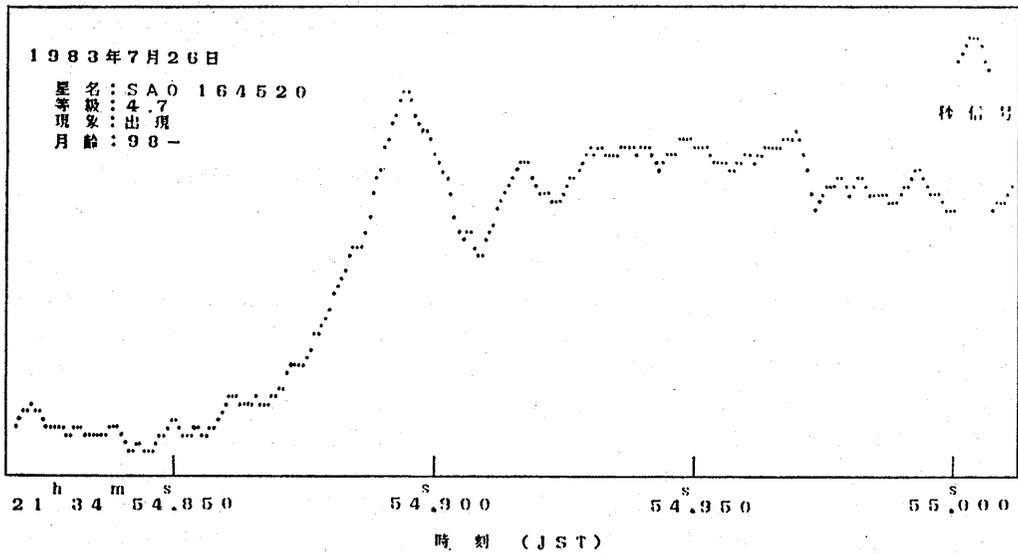


図2 AD変換記録例

表1 ペン書き及びAD変換による観測の比較

月	J日	S時	T分	月齢 (%)	現象	等級	AD精度 (秒)	S/N	ペン精度 (秒)	S/N	時間差 (ペン-AD) (秒)
7	23	19	46	98	D	5.7	±0.031	1.7	±0.03	1.8	+0.002
7	26	21	35	98	R	4.7	±0.001	7.1	±0.01	13.2	+0.002
7	27	1	52	97	R	4.8	±0.001	2.4	±0.02	2.8	-0.002
7	30	2	40	81	R	4.7	±0.005	5.8	±0.01	6.8	+0.001
8	6	3	12	13	R	4.3	±0.002	0.8	±0.01	2.1	-0.003
8	6	4	29	13	R	6.9	±0.004	2.1	±0.01	3.5	-0.001
8	13	4	12	18	D	8.2	±0.010	1.1	±0.01	2.1	-0.004
8	18	19	14	78	D	6.1	±0.004	4.0	±0.01	6.6	+0.002
8	29	3	3	77	R	6.7	±0.007	2.0	±0.01	2.3	+0.001

月縁へ潜入 (出現) する星の回折効果 (平行光線が一枚の無限長の板で回折した場合の無限前方における回折パターンとしてのフレネル回折) による現象時前後の光量のゆらぎが認められる。この場合の現象時刻は理論的に

波高の4分の1に達した時刻とされる。現象星が大きさを持つ場合は、この回折パターンが異なるのでこれから現象星の視直径が、また、ゆらぎの周期から月面上の現象を起している部分の斜面の傾斜角が推定できる。な

お、月には輝面部と暗部があり、月の縁も明縁と暗縁があるが、星食は一般には星が暗縁部に潜入すると明縁で出現し、明縁部に潜入すると暗縁で出現する。明縁での潜入、出現は観測が困難であり、通常、暗縁での現象を観測する。

月は地球からのみかけ上恒星に対して、時間の1秒間にほぼ角度の0.5(秒)動くので、原理的には1000分の1秒の時刻測定精度で0.0005の位置推定ができる計算になるが、実際には、月縁の地形(月の山)の補正の精度が、0.1~0.2程度であり、時刻測定の精度では月の位置測定は行えていない。また、1回毎の星食観測では、原理的に月の位置を決定できないが、多数の星食観測に月の運動理論を組み合わせると月の実際の軌道がかなり正しく推定できる。現代では、地球の自転は、時刻基準としては精度が不十分であることが判明しているが、月の公転は擾乱の要因がなく、地球上で観測できる天体のうち見かけ上最も速く運動しており、一様な時刻の表現として最も適していると考えられている。天球上の月の移動の速さと向きは一定ではないが、月の運動理論を介して、星食観測から得られる推定軌道と一様な天文時刻が結びつけられる。これが暦表時と呼ばれる天文時刻で、星食観測から暦表時が決定されることになる。すなわち、星食観測は、個々の観測には月の山の補正等の問題はあるが、観測数も多く、平均的には天体の公転運動を記述する一様な時刻系の観測に最も有効なものといえるのである。

2.2 接食観測

接食とは、星食観測の特別な場合で、星が月の縁をかすめていくことであり、接食観測は、この接触時刻を図3のように、月の山に見え隠れする恒星の点滅時刻の測定から求めることである。星食も、この接食も、隠される星から発して月に届く平行光線が月による丸い影を地

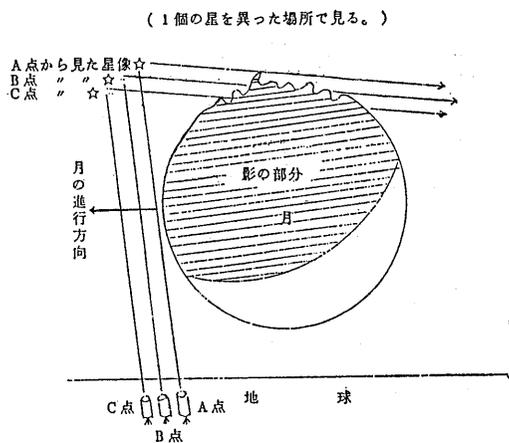


図3 接食観測法

球上につくり、この影が月と地球の運動により地球表面上を走り抜けてゆくと考えるとわかりやすい。この考え方からわかるように、月の影の通る幅3000kmほどの太い道筋の中の地点では星食が起り、外側では星が月に隠されないから星食は起らないが、この接食は丁度、この月の影の道筋の境界線上で起るものである。月の影は、西から東へ走り抜けるが、この道筋の北側の縁を北限界線、南側を南限界線という。したがって、北限界線上の接食はみかけ上月の上(北)側、南限界線上では月の下(南)側で起る。このように接食は、現象の起る地点が限られており、通常、小型望遠鏡をこの限界線上に移動して観測を行うので、眼視で点滅時刻の測定を行う。およそ2年に1回ずつ程度は、各水路観測所でも接食観測に成功し、条件がよければ光電記録が得られることもある。

接食観測からは、月の位置の南北成分(赤緯または黄緯)に関する情報が得られる。観測の時刻精度は眼視観測で0.1~0.2秒、赤緯に換算して、0.01~0.05またはさらに小さくなるが、この場合も星食観測と同様に月の山の補正が重要な意味を持ってきて、個々の観測については、月の山の補正の精度が月の赤緯または黄緯の決定の限界になっている。図4に、実際の観測値とWattsの作った月縁図から求めた月の山を示す。ただし実際は、星の進み方は直線的に、月の縁は円弧で描かれるべきであるが、縮尺と月縁図の表し易さから、星は曲線に、平均の月の縁は直線で表わされている。なお、この接食観測の成果として、月の赤(黄)緯成分に偏差があることが認められている。

1979.12.20 御殿場接食 5.2等星

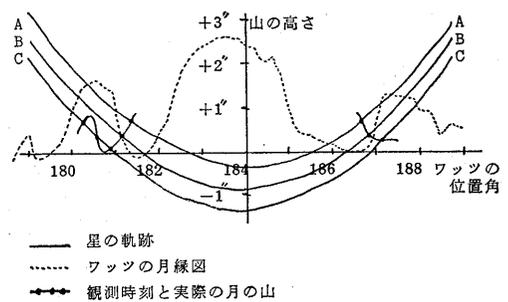
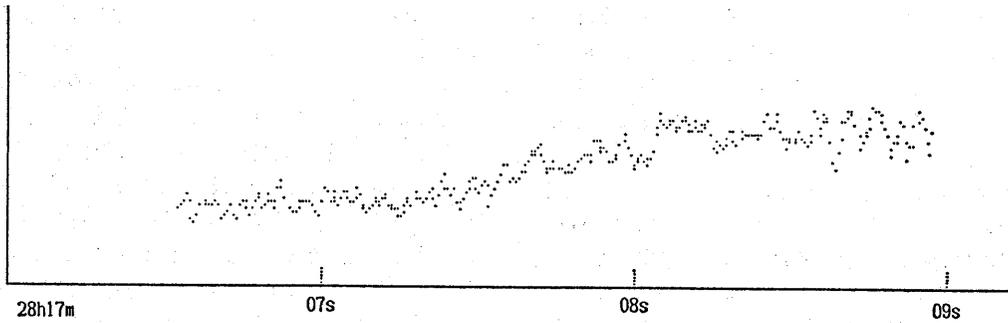


図4 接食観測例とワットの月の山

2.3 小惑星食観測

小惑星は火星軌道の外側にある大小の“岩”で、約2000個についてはその軌道が決められている。中でも最大のものは、直径約1000kmのセレスで、大きさについてはパラス、ベスタ、ジュノーと続く。小惑星食は、(1)小惑星が月の縁に隠されることをいう場合と、(2)小惑星が恒星を隠す場合があり、いずれの小惑星観



ベスタ食 (1984.10.21) の光度曲線
(5点重みつき移動平均)

図5 月による小惑星食観測例 (ベスタ 8.2等星)

測も、現象の時刻が測られる。小惑星は、数 10~1000 km の直径をもち、(1)、(2) いずれの場合も、食は瞬間的には起らない。(1) の場合で 0.2~2 秒程度、(2) で 0.5~10 秒程度の時間を要するのが一般的であり、これらの測定によって求められる小惑星の位置の精度は、概ね $0^{\circ}.1 \sim 0^{\circ}.5$ である。図5には、1984年10月31日に美星水路観測所で測定された月によるベスタの食の光電記録を示す。この測定から得られたベスタの直径は、円形と仮定して $440 \text{ km} \pm 20\%$ で、位置の誤差は、 $0^{\circ}.2 \pm 0^{\circ}.2$ であった。

2.4 木星の衛星の相互食観測

木星は太陽系最大の惑星で、見かけ上の直径は $40''$ にもなり恒星に比べて大きく、また、明るいため写真観測による位置測定の精度は、必ずしも高くない。木星の重心の位置は、むしろ木星本体でなくガリレイ衛星と呼ばれる木星の四大衛星の位置測定とこれらの衛星の軌道の解析から求める方が、精度が高く求められる。ガリレイ衛星は、木星に近い方から、イオ、エウロパ、ガニメ

デ、カリストと呼ばれているが、これらはいずれも円軌道に近く、軌道面はほぼ木星の赤道面内にある。また、木星赤道面と木星軌道面の角が約 3° 、木星軌道面と黄道面の角が約 1.3° とどちらも小さいため、衛星が木星の後や影に入るほか、衛星が他の衛星に隠されるかまたは衛星の影に入る、衛星同士の食が起こる。これを木星の衛星の相互食といい、木星の赤道面内に太陽が来る時 (木星の公転周期 11.86 年に2回ある) の前後に観測され、この食の生じた時刻は、衛星の軌道決定に重要な役割を果たす。また、かつては、この食の時刻と地球・木星間の距離の変化から、光速度が始めて求められたこともあった。

水路部では、木星及び四大衛星の位置を求めるため、1985年3月から約1年間に、5~600回生じる木星の衛星の相互食のうち、条件の良いものの光電時刻観測を行っている。衛星相互の見かけ上の動きはゆっくりで、通常数分から数10分間にわたる現象となり、観測精度は、3秒程度、相対位置は、 $0^{\circ}.01$ 程度である。図6に、1985

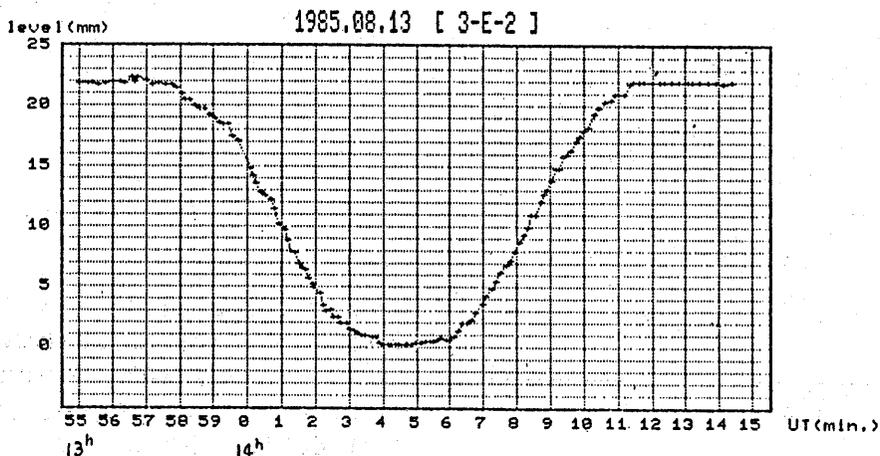


図6 木星の衛星の相互食観測例 (ガニメデの影にエウロパが入る)

年 8 月 13 日に起ったガニメデの影にエウロパが完全に入り、エウロパの光量が大きく減少した時の光電記録の例を示す。美星水路観測で得られたもので、二次式近似法による現象の中心時刻の決定値は、14 時 4 分 37.6 秒 ± 2.5 秒となり、予報時刻との差（観測第一予報値）は、-59.2 秒であった。これらの観測を集めて四大衛星の軌道と木星の重心の位置の改良が行われる。

2.5 日食観測

水路部が行っている日食観測は、月と太陽の相対位置測定を目的としており、日食による光量の変化から現象の時刻を求めるものである。表 2 に、水路部が 1948 年以來実施してきた日食観測の一覧を示す。近年は、月が太陽を隠す時刻のうち、特に月が完全に太陽を隠し終る瞬間の時刻（第 2 接触）及び太陽の一部が月から出現し始める瞬間の時刻（第 3 接触）を測定している。これは、これらの接触時刻が次のようなスペクトル分光法により正確に測られるためである。

即ち、太陽から放射される光は、固体球の部分から発する連続光と、周辺のコロナや彩層と呼ばれる気体部分から発する一定の波長を持った輝線ベクトルの合成であるが、第 2 あるいは第 3 接触時には、図 7 のように、月

縁から太陽の光球と彩層がわずかに見える事になる。これは、いわゆるダイヤモンドリングと呼ばれる現象であるが、この光を同図右側のように波長毎のスペクトル分解すると、内側の光球から発する連続光と外側の彩層からの輝線の消滅、または出現の時刻が異なる。そこで、スペクトル分解写真を時刻表示と共に 16 ミリフィルムに撮影し、後に各コマ毎の連続光部分の強度変化のみを濃度計で読み取り、これから、光球の月の山の間への消滅、または、出現時刻を算出する。この方法により観測時刻精度 0.03 秒、位置精度に換算して、0'01 程度の測定が可能である。

この方法及び上に述べてきた月縁を用いるいずれの食現象も同様であるが、月の山の及ぼす影響は大きく、この月の山による月縁高の補正の精度が、月の中心または恒星等の位置算出の限界となっている。月の山の高さは、月の観測点方向への首振り縦及び横方向の角度毎に、ほぼ全周について読み取れる図として、Watts が刊行しているが、この図による補正の精度は、0'1~0'2 といわれている。Watts の図から読み取ったある方向から見た月縁図を、月の周辺に誇張して表わして、図 8 に示す。

表 2 水路部が実施した日食観測一覧

年月日		観測地点
1948. 5. 9	r	礼文島
1955. 6. 20	t	ベトナム
1958. 4. 19	r	青ヶ島, 宝島, 奄美大島
1958. 10. 12	t	スワロフ (北クック諸島)
1962. 2. 5	t	ラエ (ニューギニア)
1963. 7. 20	t	網走
1965. 5. 30	t	マヌアエ (クック諸島)
1970. 3. 7	t	メキシコ
1973. 6. 30	t	モーリタニア
1976. 10. 23	t	オーストラリア
1980. 2. 16	t	ケニヤ
1983. 6. 11	t	インドネシア

r: 金環食, t: 皆既食

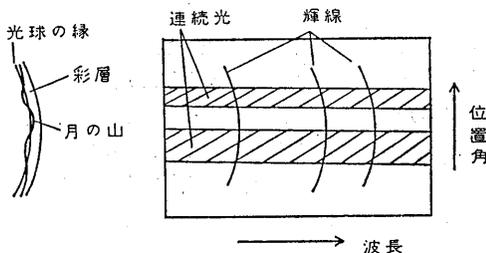


図 7 日食時のスペクトル分光による時刻観測法

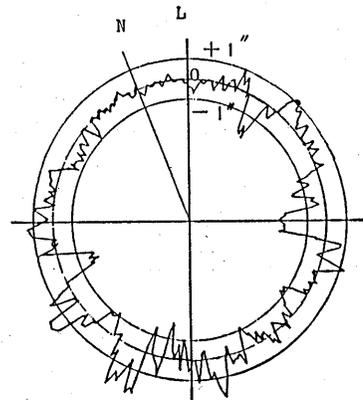


図 8 ケニヤ日食の月縁図 (N: 天の北極, L: 月の北極)

3. データの解析と天文時

3.1 天文時及び他の時刻系の種類、名称と意味

日常、日本において一般に使われている時刻系は、日本標準時 (Japan Standard Time: JST) と呼ばれ、これから正確に 9 時間引いた協定世界時 (Coordinated Universal Time: UTC) と共に、その歩度は国際原子時 (International Atomic Time: TAI) が基になっている。TAI は、厳密には、回転している地球ジオイド上の電磁力の影響のない場において、セシウム 133 原子の基底状態の 2 つの超微細構造準位間の遷移における放射の

9192631770 周期の継続時間を、1 SI (国際単位系) 秒と定義したとき、この 1 SI 秒を積算して作る原子時系とされ、元期は、1958 年 1 月 1 日 0^h UT 2 において TAI の時刻を UT 2 と一致させたものである。実際には、各国で保有するセシウム原子時計の積算値を、フランスの国際報時局 (BIH) が加重平均して発表しているもので、現在、実用上最も信頼されている時刻系である。すなわち、TAI は、元期の取り方は別として SI 秒をその定義にできるだけ忠実に具現化した原子時の積算値の平均値ということになり、地球の自転運動とは全く別のものである。

一方、時刻は古くから天文現象を用いて決められてきている。1 日、1 月、1 年の長さの定義のほか、時刻そのものについても、地球の自転角を基準としたものがある。恒星の位置を基準とし、恒星の観測から天球上の春分点に対する瞬時の地球自転角として定義したグリニジ平均恒星時 (Greenwich Mean Sidereal Time: GMST) と、この地球の自転角を恒星に対してではなく、恒星に対して年に 1 回回転している太陽の平均運動を基準として記述した世界時 (Universal Time: UT) である。この世界時には、地上の観測所から恒星の位置観測を行って直接求めた UT 0 と、この UT 0 に地球の自転軸が地球の南北極において直径 20 m 程の略円を描いて約 14 カ月の周期で移動する (極運動という) 効果を補正して、太陽の平均運動に対する瞬時の地球自転角に直した UT 1、さらに UT 1 に平均的な季節変動項を補正してより一様な値とした UT 2 がある。しかしながら、地球の自転速度は厳密には一定でなく、長年的には減速しつつあり、季節変動以外に予知できない不規則変化があることがわかってきて、一様な時刻系とはいえなくなっている。

旧来からの、地球における太陽の位置を基準とした天文時刻と、より一様な時刻系である原子時を組み合わせるのが前述の協定世界時 (UTC) である。UTC は、歩度は TAI と同じ SI 秒であって 1972 年 1 月 1 日の UTC 0 時において、 $UTC = TAI - 10$ 秒とし、以後 UTC と UT 1 の差が ± 0.7 秒を超えるようになると、原則として 12 月 31 日または 6 月 30 日の最後の秒に 1 秒を追加するか、最後の秒を削除して、TAI と整数秒だけ異なるが UT 1 に近い時刻系として、原子時と地球自転時を組み合わせたものである。

地球の自転運動は一様な時刻系としての標準にはなくなってきたが、より一様と考えられる天体の運動として、地球や月の公転運動が考えられる。この公転運動を基準にした時刻系が暦表時 (Ephemeris Time: ET) である。1900 年 1 月 0 日 (前月 31 日) 12 時 ET に、瞬時の平均春分点に対する黄経 $279^{\circ}41'48''.04$ となり、以後、

その瞬間の太陽平均黄経の速度をもって、一定の速さで黄道上を運動する仮想太陽の黄経で定義され、その時間間隔は 1900 年 1 月 0 日 12 時の世界時間隔に極めて近い。実際には、ET は、星食観測等から求める月の黄経によって決められる。これは、かつて月、太陽の暦を定めた時、月の暦を表わす時刻引数と太陽の平均黄経を表わす時刻引数とは同じものとされており、また、太陽の黄経はその輝度と大きさから精密な観測が難しく、むしろ、地球からの見かけ上最も速く動く月の運動からの方が高い精度で暦表時が求められるからである。天体暦 (日本では天体位置表) の太陽、月、惑星の位置は、この ET を時刻引数として記述されてきた。また、暦表時のあとに定められた SI 秒の定義は、星食観測から求められた暦表時の 1 秒が、その基礎になっている。

ニュートンの運動方程式における時間変数は、空間とは独立に流れるもの、環境とは無関係に連続的に一様に流れるものと考えられている。ところが、最近の計測技術の精度向上に伴い、天体力学の分野においても宇宙空間が一般相対性理論の示す時空から成り立つと考えないと、観測事実を説明できなくなってきた。この理論によれば、時間と空間とは分離することができず、空間が質量の存在によってゆがみ、時間も場所によって進み方が異なり、絶対的に一様な時間というものは存在しない。この理論に基づく天体暦作成のため、天体暦の時刻引数として 2 種の太陽系力学時 (Barycentric Dynamical Time: TDB) と地球力学時 (Terrestrial Dynamical Time: TDT) を導入することとした。理念的には一般相対性理論の運動方程式の独立変数として太陽系重心座標系において用いる TDB を考え、これが地球のジオイド上の時刻系としての TDT と、最大振幅 2 msec の年周項等を介して結合されるものであるが、TDT が TAI と同様の SI 秒の時間間隔を持ち、1977 年の 1 月 1 日 0 時 TAI において、1977 年 1 月 1 日 0 時 0 分 32.184 秒となるよう定められ、実用上、TAI より、32.184 秒大きい値を持つ時刻系と考えてもよいこととなった。水路部では、1985 年版から天体位置表の時刻引数としてこの TDT を用いている。

この項で述べた時刻の呼称と記号、意味等をまとめて表 3 に掲げる。

3.2 星食観測データの解析と暦表時

水路部では、前述のとおり年間約 600 個の光電観測を含む 1000 個程度の星食観測を行い、また、国際星食中央局業務として、アメリカ、東欧、オーストラリアを始めとする世界各国から年間約 1 万件の星食観測データを受領している。これらのデータは、月の暦の改良と暦表時 (ET) の決定に用いられる。

この手順は、まず、星食現象の起った観測時刻を TAI

表 3 時刻系の呼び方と意味

UT	世界時一般名
UT0	天文観測に基づく世界時(補正なし)
UT1	UT0 に極運動を補正したもの(平均太陽に対する瞬時の地球自転軸の回転角)
UT2	UT1 に平均的な季節変動項を補正したもの(地球自転から求めた時刻系のうち最も一様と考えられるもの)
UTC	協定世界時(各国で使用している時刻系の基準, TAI と整数秒異なる)
DUT	UT1-UTC の 0.1 秒単位の子報値
Δ UT	UT1-UTC
JST	日本標準時(UTC+9h)
GMT	グリニッジ平時(世界時のことをいうが, 上記の区別が正確でないので時刻表示には用いない)
GMST	グリニッジ平均恒星時(春分点に対する瞬時の地球自転軸の回転角)
TAI	国際原子時(SI 単位系, 各国の時刻維持機関のもつセシウム原子時計の加重平均時刻)
ET	天体暦の引数に使う天体暦時(天体運動の公転を基にした時刻系)
TD	新に導入された天体暦時(正確にいうと TDT と TDB との区別が必要)
TDT	地球力学時(地球上において理念的に一様と考えられる時刻系, 実用上はこの理念の実現に最も近いと考えられる TAI に, 32.184 秒加えてこの値とすることになっている)
TDB	太陽系力学時(一般相対性理論に基づく太陽系重心座標系における時刻, 地球力学時とは年周差をもつ)
Δ T	ET-UT1 または TDT-UT1

に換算し, TAI と ET の差としてある値を仮定し, これから求まる ET を引数として天体位置表から月の中心の位置を求め, この点と星食の起った星の位置の距離を求めて, これからその時刻の月の視半径を引き, これを $\Delta\sigma$ とする(図 9)。この $\Delta\sigma$ について, L を月の黄経,

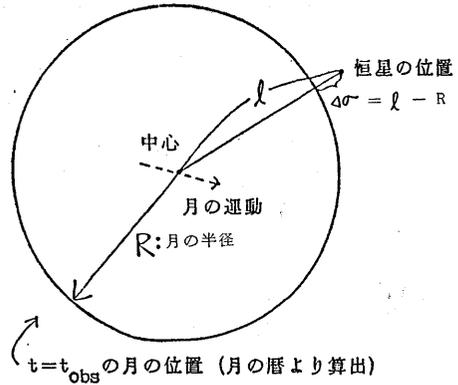


図 9 星食現象時の暦による月の位置と恒星の位置関係

B を月の黄緯, T を暦表時として

$$\frac{\partial \sigma}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial \sigma}{\partial B} \Delta B = \Delta \sigma \quad \text{または} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial \sigma}{\partial B} \Delta B = \Delta \sigma$$

なる観測方程式をすべての観測値についてつくり, 最小 2 乗法を用いて, ΔL , ΔT , ΔB を求める。1984 年の水路部の星食観測データから得た暦表時と黄経の差の値は,

$$ET(j=2) - TAI = 30^{\circ}70 \pm 0^{\circ}04 \quad (\text{m.e.})$$

$$\Delta B = -0^{\circ}30 \pm 0^{\circ}04 \quad (\text{m.e.})$$

である。ただし, $j=2$ は ET の最新の定義を意味する。図 10 には 1960 年以降水路部の星食観測から求めた暦表時と TAI の関係を, 図 11 には月の年平均の黄経の暦からのズレを示す。これにより, 概ね, 暦表時の決まり方は ± 0.2 秒程度であること, また, 月の暦の赤経の年平均の精度が $\pm 0^{\circ}1$ 程度であり, 一方, 赤緯は, $-0^{\circ}2$ の偏位があって, 年平均の精度が $\pm 0^{\circ}1$ 程度である, との推定が成り立つと解釈することも可能であろう。

細かい議論は別の機会に譲るとして, TAI の定義において, 1 SI 秒とセシウム原子から発する周波数の関係を定めた際の関係は, 当時の星食観測から求めた 1 暦表秒を基準にしてあった訳で, 図 10 の ET と TAI の関係が平行であると考えられるようであれば, この時の定義

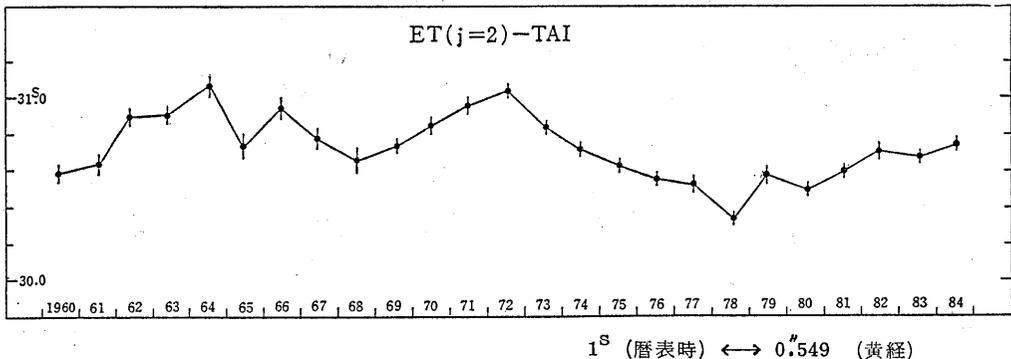


図 10 星食観測から求めた暦表時

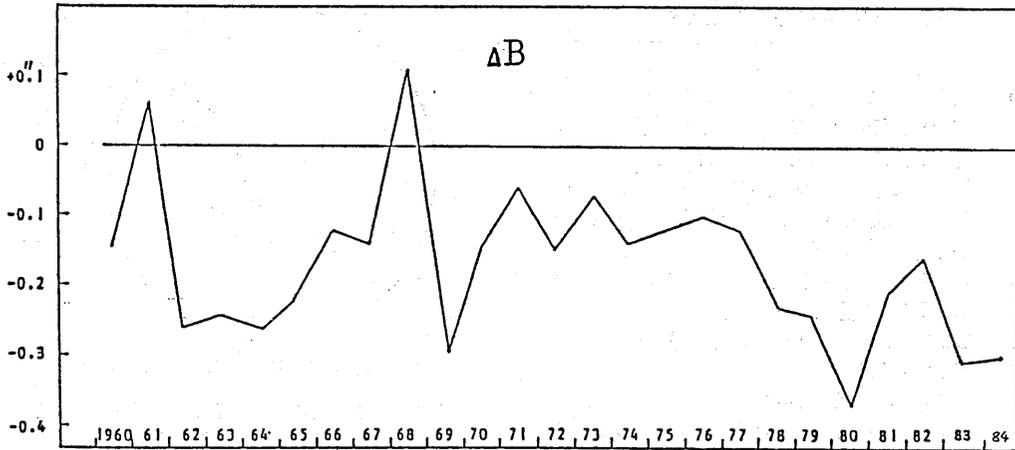


図 11 星食観測から求めた月の年平均黄緯

はほぼ正確であったことになる。ET-TAIについては、ここ 25 年の平均値は、概ね 30.6~30.8 秒と読み取れる。赤緯の偏差については、月の形状の中心と重心とのズレが存在するものと解釈されており、このほか、暦計算の使用天文定数系や運動理論の不整合も考慮されるべきであろう。

3.3 新たな力学時の導入とその検証

前に述べたように、1985 年版の天体位星表からは、精度向上のため一般相対性理論に基づく運動方程式を基礎とし、時刻系も力学時を導入したが、同時に、天体の

質量、長さ、重力場、才差、章動等にも新しい定数と理論を適用することとした。

これらの改良は、天体暦の精度を向上させ、星食観測の解析から得られていた月の暦の観測値からの偏差やバラツキ、そして暦表時の決まり方の変動を、小さくすることが期待されている。特に月の位置についての新しい暦と古い暦の比較によると、やや大きな、月の公転周期と同じ周期をもつ差と一定の偏差が認められ、今回の改良によって新暦による星食観測の解析の黄経、黄緯の残差は、小さいであろうと見込まれていた。

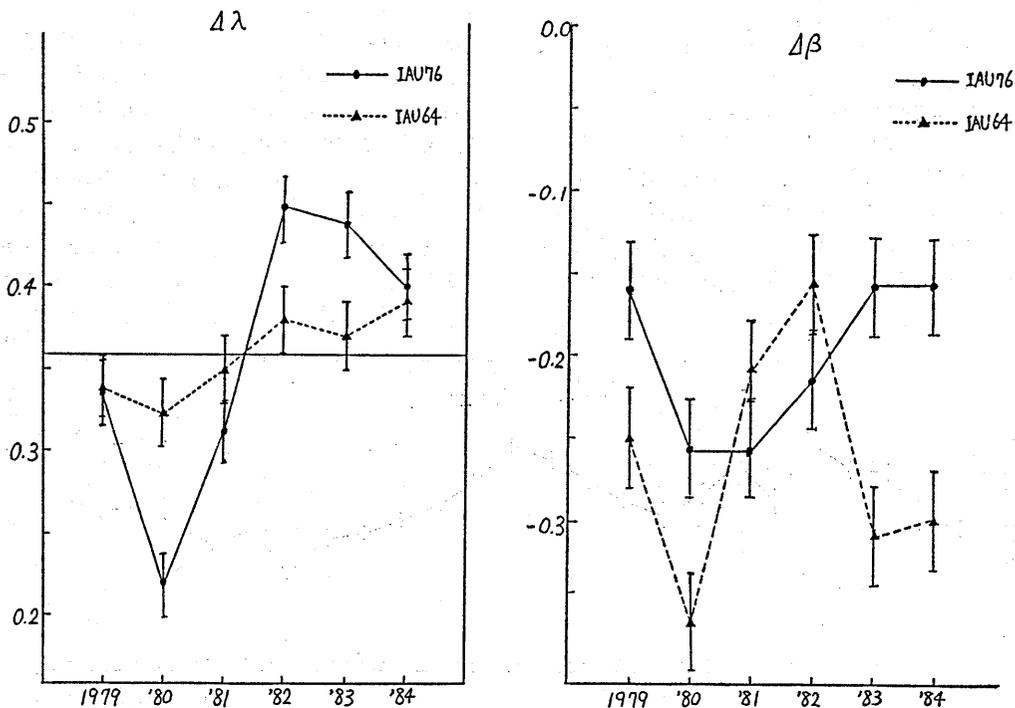


図 12 星食観測から求めた旧暦と新暦による月の経度・緯度の変動

しかしながら、現在までの予備的な結果は、必ずしもこのようにはなっていない。1979年から1984年までの水路部の行った星食観測を新しい暦を基準として解析し、月の黄経 ($d\lambda$) と黄緯 ($d\beta$) についてその年平均の残差を旧暦についての値とともに示したのが、図 12 である。図中、IAU 76 と記したものが新しい暦、IAU 64 としたのが、古い暦を用いた時の残差である。これらから言えることは、暦表時の決定に相当する月の黄経は、残差のバラツキが大きくなり、今のところ力学時、すなわち TAI と定数差を持つ独立変数として記述した新しい暦が、そのシステムまたは星食観測の解析法に何らかの問題点をもっている可能性があること、黄緯のバラツキは小さくなり、偏差も小さくなったこと等である。詳細は今後の検討とより長期間の星食観測データの解析の結果を待つ必要がある。

4. おわりに

水路部では、上に述べてきたような星食観測、接食観測、小惑星観測、木星の衛星の相互食観測、日食観測等の天文食現象の時刻観測を実施し、これを天体位置表に記載したそれぞれの天体の位置と比較している。これらの観測によって、月、太陽、惑星、小惑星の位置の改良がなされるほか、月の暦については、さらに月の形状の中心と重心との偏差の量の測定、月の山の補正量の評価、太陽系天体公転運動時刻系（暦表時及び力学時）と

TAI の比較、TAI の運用上の長期的な評価等の役割を果たしている。太陽、月、惑星、小惑星に対しての新しい天体暦の評価も、こうした観測を長期間行って、より正しく行われることになる。また、天体位置表は、太陽系天体公転運動時刻系で表わされるが、航海用の天測暦、天測略暦の天体の位置は、地球自転時刻系（厳密には UT 1）で表わされていて、この間の時刻変換も、こうした観測を含む天体の位置観測から正しく行われる必要がある。水路部の天文時刻観測は、他の天文観測と同様、国際的な役割を果たしつつ、さらに高精度化する天体暦の改良や未知の問題点の解明に向けて、今後とも引き続き行われてゆくものである。

参 考 文 献

- 1) 海上保安庁 刊: Occultation Observations in 1984, 水路部観測報告天文測地編第 20 号, 1986 年
- 2) 海上保安庁 刊: 天体位置表 1986 年版, 1985 年
- 3) 金沢輝雄: ケニア日食, 水路部技報第 1 号, 1983 年
- 4) 佐々木稔, 松本邦雄, 奥村雅之: AD コンピュータとマイクロコンピュータを用いた星食のデジタル記録, 水路部技報第 2 号, 1984 年
- 5) 仙石 新, 監物邦男: ベスタ食 (1984) の解析, 水路部研究報告第 21 号, 1986 年
- 6) 山崎 昭, 久保良雄: 暦の科学, 講談社, 1984 年
- 7) Watts, C. B.: Astronomical Paper of American Ephemeris, US Naval Observatory, 1963

電波標識

A 5 判 クロス装製 函入
上巻 2,200 円 311 ページ
下巻 2,800 円 313 ページ

編集: 電波標識編集委員会

各種の電波航行援助システムについて、実際的なデータにより、簡潔にわかりやすく説明してあります。航海者や学生の方々に最適の解説書です。

上巻: 総論, 誤差論, 中波標識及び無線方位測定機, ロラン A, C, デッカ

下巻: オメガ, ハーパーレーダ, マイクロ波無線標識, レーダフレクタ, 航行衛星

▶ 購入申し込み方法

一般書店では扱っておりませんので、
右記に直接お申し込み下さい。

〒272 千葉県市川市大野町 2 の 657

鶴巻書房 (代表 川俣貞子)

T L E 0473-37-0268

研究会記事

Record

電波航法研究会 昭和59年度事業報告

電波航法研究会事務局

Record of the Work Carried Out by the Japanese Committee
for Radio Aids to Navigation During Fiscal Year 1984

Secretariat Office of the JACRAN

総 会

昭和59年度総会は昭和59年5月21日14時から、海上保安庁第一会議室で開催された。出席者33名、委任状提出者47名で当会規約第10条第4項により本総会は成立した。

各議題の審議結果は次のとおりであった。

1. 昭和58年度事業報告が事務局により行われ、承認された。
2. 昭和58年度会計報告が会計幹事より行われ、会計監査、森川卓氏、倉繁貴志子氏の監査報告(書面)があつて承認された。
3. 昭和59年度会長、副会長の選出は満場一致で会長に鈴木裕氏が、副会長には木村小一氏(再)、飯島幸人氏が選出された。また、各幹事の委嘱については原案どおり了承された。
4. 昭和59年度予算案及び事業計画案について、会計幹事より説明が行われ、原案どおり承認された。

研 究 会

1. 昭和59年度第1回研究会は、昭和59年5月21日、海上保安庁第一会議室で総会に引続いて開催され、東京商船大学 庄司和民氏の「研究生活をかえりみて」と題する講演が行われた。また、映画「航空衛星システム」及び「技術開発そして実用へ(国内通信衛星)」が上映された。

出席者は40名であった。

2. 第2回研究会は、昭和59年7月23日、海上保安庁第一会議室において開催され電子航法研究所 藤井彌平氏の「世界の船舶交通管理システムについて」、東京湾海上交通センター 奥山隆士氏の「東京湾海上交通センターにおける業務概要について」、電気通信大学

鈴木務氏、荒井郁男氏の「中波ラジオによる海上情報聴取について」、東京商船大学 飯島幸人氏の「海上における音声の伝播実験について」と題する講演が行われた。

出席者は50名であった。

3. 第3回研究会は、昭和59年9月13日、海上保安庁第一会議室において開催され、東京水産大学 鈴木裕氏の「レーダの使用状況について」、東京商船大学 林尚吾氏の「レーダの反射強度について」、沖電気工業株式会社 小野沢和雄氏の「因島大橋における情報提供レーダについて」と題する講演が行われた。

出席者は45名であった。

4. 第4回研究会は、昭和59年12月3日、海上保安庁第一会議室において開催され日本無線株式会社 中村幹男氏の「GPS受信機の評価実験について」、横河北辰電機株式会社 木村小一氏の「航行衛星の動向について」、運輸省海上技術安全局 濱路和明氏の「FGMD SSについて」と題する講演が行われた。

出席者は110名であった。

5. 第5回研究会は、昭和60年1月23日、海上保安庁第一会議室において開催され、東京商船大学名誉教授 庄司和民氏の「IMO. NAV. 小委員会における最近の動向について」、ソニー株式会社 伊賀章氏の「GPS受信機について」、日本鋼管株式会社 松沢正夫氏の「帆装商船について」と題する講演が行われた。

出席者は48名であった。

6. 第6回研究会は、昭和60年3月19日、海上保安庁第一会議室において開催され、電気通信大学 鈴木務氏の「クラッタ及び雑音除去について(イントロダクション)」、千葉工業大学 土屋清氏の「リモートセン

シングにおける雑音の除去と信号検出について」, 電気通信大学 荒井郁男氏の「地中・水中レーダにおけるクラッタ抑圧と信号検出について」, 東京工業大学 関根松夫氏の「ドップラーレーダによるクラッタ抑圧とターゲット検出について」と題する講演が行われた。

出席者は45名であった。

特別研究会

昭和59年度見学会, 特別研究会は, 昭和59年11月16日, 宇宙開発事業団勝浦追跡管制所及び通信放送衛星機構 君津衛星管制センターにおいて開催され各施設についての説明を受け, 引き続き同所の見学を実施した。

参加者は29名であった。

専門部会

1. 船舶用衝突防止装置の技術基準に関する専門部会
IMOで決議された衝突予防援助装置性能基準に対応する研究を行うことを目的とし, 昭和56年度, 専門部会を設置し, 検討を進めており, 昭和58年度は, 4月13日および6月1日検討会を開催して利用者のための「マニュアル」を作成することとなった。現在各社の製品の取扱説明書を取り寄せ専門部会(部会長 木村小一氏以下9名)において原案を作成中である。

2. 固定周波数レーダビーコン受信装置に関する専門部会

昭和57年度, 専門部会(部会長 飯島幸人氏以下9名)を設置し, 検討を進めており, 昭和59年6月13日及び9月18日専門部会を開催, 検討の結果, 電波航法会誌の特集号(レーダビーコンの現状及び動向について)を発行するための専門部会とすることが了承され, 検討を進めることとした。

幹事会

企画及び編集幹事会は, 合同で昭和59年4月23日, 5月21日, 7月23日, 9月13日, 12月3日, 昭和60年1月23日及び3月19日に開催され, 予算案, 事業計画, 研究テーマ, 専門部会の運営, 行事計画及び会誌「電波航法」の編集刊行等について審議が行われた。

会誌発行

会誌「電波航法」第30号の配付及び第31号を作成中である。

会員数

昭和60年3月31日現在

正会員	41社	96口
個人会員	21人	13口
推薦会員	13人	
特別会員	39人	

——電波航法——ELECTRONIC NAVIGATION REVIEW——

昭和61年3月10日 印刷 1986
昭和61年3月15日 発行 No. 32

編集 東京都千代田区霞ヶ関 2-1-3 運輸省9階
発行 海上保安庁燈台部電波標識課気付
電波航法研究会
Japanese Committee for Radio
Aids to Navigation
c/o Radio Navigation Aids Division
of Maritime Safety Agency
2-1-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo, Japan

印刷 東京都新宿区早稲田鶴巻町565-12 啓文ビル
(有) 啓文堂 松本印刷

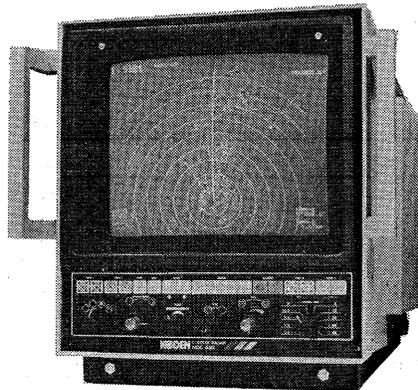
豊かな情報を、見やすく
正確に伝える

コデンのカラーレーダ

- フードなしで
どこでも見られます
- 他船や港に近づくと警報ので
る自動監視
- 他船や港の距離と方向を正確
に測定する電子マーカ
- 他船の進路と相対スピードを
自動的にプロット
- 電子ジャイロ内蔵
- 郵政省型式認定・米国FCC
検定に合格

産業・海用エレクトロニクス
各種コンピュータシステム・周辺機器

KODEN



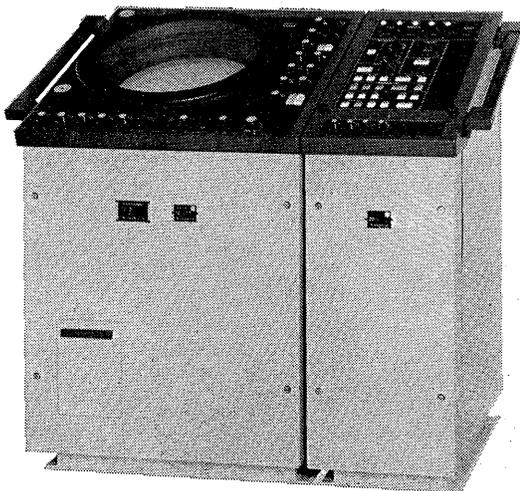
MDC-430/431

株式会社 **光電製作所**

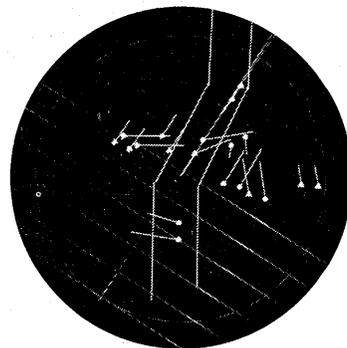
本社 〒141 東京都品川区上大崎2-10-45 TEL 03-441-1131(代)

コスト・パフォーマンスを追求した

JRC 衝突予防装置 JAS-800



IMO と USCG の性能基準に合致



映像表示例

JRC 日本無線

東京都港区虎ノ門1丁目17番1号 第5森ビル
〒105・電話 (03) 591-3451(大代表)
大阪・札幌・仙台・清水・名古屋・神戸・広島・福岡・長崎

— エレクトロニクスの

OKI

沖電気のシステムOA

コミュニケーション世代の
多機能パソコン



新登場

if800 RX110・120

if800RX110・120は、高速・大容量・高解像のハードウェアにより、ビジネスデータの処理能力を飛躍的に高めるとともに、パソコンでは初の、3タイプの通信モデムを収めた『マルチメディアカード』による多彩なコミュニケーションを実現しました——ビジネスのみを見つめてきた沖電気だからこそ誕生した、新しいifです。

マルチウィンドウ：沖電気オリジナルのマルチウィンドウ『Super View-RX』を標準装備。最大3画面(16色モードで80字×25行)を自在にコントロールでき、複数のAPを同時に表示し、それぞれで別々の仕事が処理できます。

カナ漢字変換：このクラスでは初のカナ漢字変換機能

『FEP-RX』を標準装備。最大500文字までのカナの文章を、1回の変換で、漢字かな混りの文章へ変換します。

マルチメディア対応：タイプの異なる3種のモデムを搭載した『マルチメディアカード』(オプション)を本体内に内蔵可能。郵政省プロトコル準拠のPC通信はもちろん、キャプテン、DRESS/DEMOS(DT-1211)、商用データベース(300bps)といった通信形態に対応できます。

高速・大容量・超高解像：CPUには最新のi80286を採用。メインメモリも標準で1MBを内蔵。CRTディスプレイは、1148×754ドット(カラーも4096色中16色を同時表示)の超細密で、24ドットの漢字表示が可能です。

沖電気工業株式会社

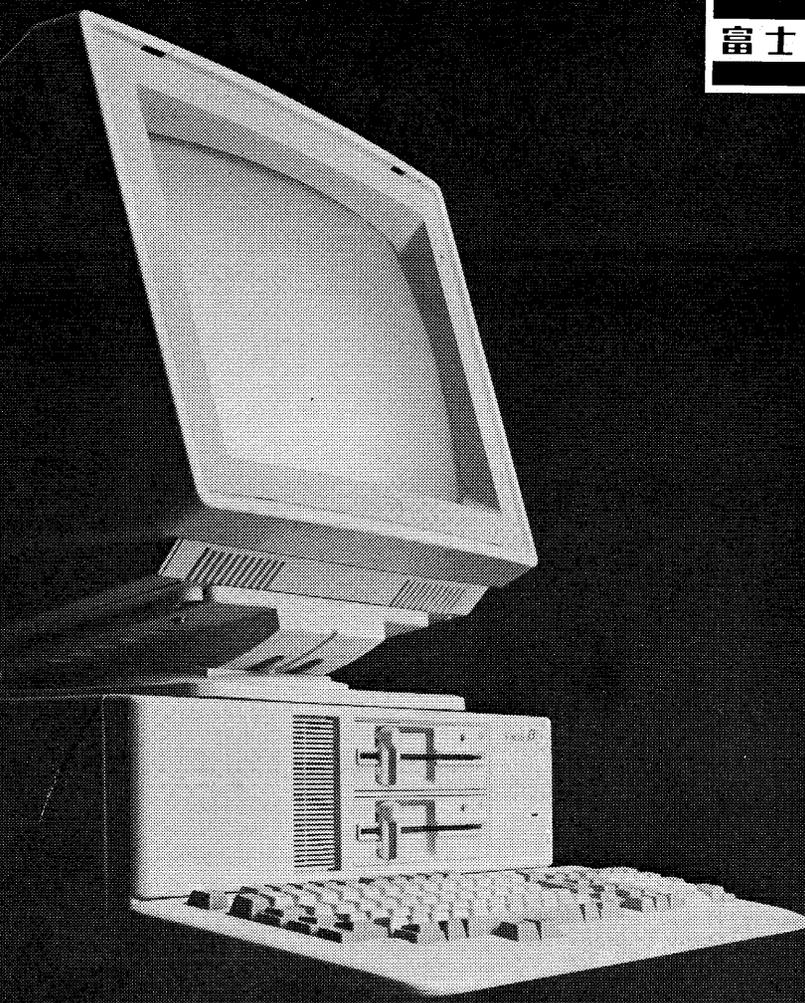
〒105 東京都港区虎ノ門1-17-1(第5森ビル)OA営業第1部 ☎(03)501-3351(代)
パソコンインフォメーションセンタ ☎(03)593-1851・1852(直)

信頼と創造の富士通

富士通

バイタリティあふれる仕事ぶりは、いつも頼もしい。シユアな実力で、ハードワークの先頭に立つ新FM16B

仕事専攻。



①80286-1MBフル装備 新世代高性能16ビットCPU-80286を搭載し、処理スピードが大幅アップ。また、大容量1MBメモリ標準実装により、大規模なアプリケーションソフトが稼動します。②ネットワーク機能を強化 注目のパソコン通信やキャプテンなどにも幅広く対応。③強力なソフトウェア 顧客管理や表計算が簡単にできるアプリケーションソフトが豊富にそろっています。④充実した周辺機 速くて美しいカラー漢字プリンタ、67MBハードディスク装置*(最大268MBまで増設できる)など、充実の周辺機がニーズに応えます。

★発売予定

●ソフトウェアレベルアップサービスのお問い合わせは下記まで。
〒206東京都稲城市大丸1405富士通㈱パーソナル機器事業部
ソフトウェアセンター TEL.0423-78-3695(月～金9:00～17:00)

80286搭載で脚光をあびるパワフルビジネス・パソコン。

FD II

フロッピーディスクタイプ ¥405,000
(キーボード含む。OS別売)
●標準1MB(最大4MB)メモリ実装

HD II

ハードディスクタイプ ¥680,000
(キーボード含む。OS別売)
●10MBハードディスク内蔵

80186搭載、ソフト充実の高性能ビジネス・パソコン。

FD I

フロッピーディスクタイプ ¥355,000
(キーボード含む。OS別売)
●標準1MBメモリ実装

HD I

ハードディスクタイプ ¥630,000
(キーボード含む。OS別売)
●10MBハードディスク内蔵

ハードな仕事をタフにこなす

新登場 **FM16** **B** シリーズ[®]
イチロク ベータ