

## 3-2-5 FMCW イオノゾンデの開発

### 3-2-5 FMCW Ionosonde for the SEALION Project

野崎憲朗

NOZAKI Kenro

#### 要旨

持ち運び・設置が容易な低出力 FMCW 方式イオノゾンデが開発され、各地の無人観測点で用いられている。FMCW 方式は送信電力が低いので、既設の無線設備との干渉が発生しにくい。ベースバンド信号を記録するので、観測後に測定パラメータを設定する自由度が大きいなどの利点がある。出力するイオノグラムは情報通信研究機構の運用する定常観測機との共通化が計られ、ほぼ同等の読み取り精度が得られる。FMCW 方式による電離圏観測技術は九州大学にも技術移転され、主としてドップラ観測に使われている。

A low power FMCW ionosonde has been developed and deployed mainly in the unmanned observation points. Due to the low power of transmitting signals, there are very few interference from existing radio systems around the FMCW ionosondes. The FMCW observation has wide possibility to manipulate the observation data because the FMCW ionosonde records the baseband signal. Output ionograms are equivalent to these of the NICT routine ionosondes. The FMCW technology was transferred to Kyushu University and they use mainly to observe Doppler motion of the ionosphere.

#### 【キーワード】

FMCW, イオノゾンデ, DDS

FMCW, Ionosonde, DDS

## 1 はじめに

一般的にイオノゾンデはターゲットとなる下部電離圏の性質により、中-短波帯の広い範囲の周波数が使われる。情報通信研究機構 (NICT) においては定常観測用に、広い周波数帯域にわたって安定に動作する観測機が開発され続けているが[1]-[3]、国内 4 カ所と南極昭和基地に固定した定常観測用であり、必要な場所で、必要な時に直ちに観測を行うことは難しい。また、定常観測機は送信出力が 10 kW のパルスレーダであるので、観測時に近隣の無線設備との干渉を調整する必要があり、連続観測には適さなかった。

パルス圧縮技術の一つである FMCW 方式は低出力化が可能であり[4]、近隣の無線局と相互に干渉することなく、連続観測可能である。データ処

理方式を適当に選べば運用の融通性にも富んでいる。短波帯 FMCW レーダの測定技術は 1970 年代には確立し、Barry は文献[4]では市販のシンセサイザの周波数切り替えを高速に改造し、後にシンセサイザの帰還ループとは別に掃引信号電圧を VCO に注入するマイクロフェーズ型シンセサイザを採用して実用化を進めた。

送信点と受信点を十分に引き離すバイスタティックな観測で FMCW 方式はその特性を發揮する。遠距離の斜入射サウンディングに適応性が高く、航行中の南極観測船「ふじ」やドイツからの FMCW 電波を日本で受信し、伝播モードや最高、最低使用可能周波数 (MUF, LUF) を計測する実験が行われた。一之瀬らは文献[5]でドイツ回線について磁気じょう乱の季節変化を解析した。また、バイスタティックな FMCW レーダは空間波によ

る海洋波浪観測<sup>[6]</sup>にも応用された。

垂直に電波を打ち上げるモノスタティックな観測では、Poole<sup>[7]</sup>と Poole and Evans<sup>[8]</sup>がピーク出力 20 W の FMCW イオノゾンデで偏波分離、ドップラ観測、到来角測定のできることを示した。また、南極サナエ基地と南アフリカのグラハムスタウンの間で斜入射サウンディング観測を行った。FMCW 方式は上記のように一部用途には使われていたが、掃引周波数発生器と観測後のデータ処理が簡便になるまで普及が遅れた。

国内では京都大学の MU レーダに付属するイオノゾンデが FMCW 方式で開発されたが、周波数掃引シンセサイザの有効な周波数掃引範囲が 100 kHz 程度であったため、掃引開始周波数を切り替えながら観測した<sup>[9]</sup>。電波研究所(現 NICT)が南極観測用に開発した FMCW イオノゾンデ<sup>[10]</sup>は 20 W の低出力で連続観測を行い、昭和基地上空の下部電離圏の波動現象を見いだした<sup>[11]</sup>。これも周波数掃引シンセサイザとデータ処理の制約から、100 kHz 程度の周波数を掃引し、データ処理後、次の周波数を掃引するので、1 イオノグラムの観測に 15 分程度かかった。

1990 年代に短波帯でも使える Direct Digital Synthesizer (DDS) が普及して帯域全体を高精度に周波数掃引できるようになり、また、パソコンの進化と共に観測の制御、データ処理も自由度が増した。日本国内では送信電波の質に厳しい制約があり、数十倍に広がる観測周波数全域にわたって送信電力<sup>[12]</sup>とスプリアス強度<sup>[13]</sup>を規定値に抑えても、電波監理局の理解を得て最初の国内無線局免許を取得するのに時間がかかったため、海外での観測が先行した。1997 年から開始した WestPac 磁気赤道観測<sup>[14]</sup>、1998 年開始の福井県での MU レーダとの共同観測<sup>[15]</sup>では国産の DDS を搭載し、送受信機をそれぞれトランクケースに組み込み、一人でも手持ちで輸送可能なイオノゾンデを開発した。2002 年に SEALION 計画<sup>[16]</sup>用に開発した観測機では受信/制御部のデジタル化が進み、第 2IF 以降を PLD (Programmable Logic Device) 化した。

本論では SEALION 計画用に開発した FMCW イオノゾンデを中心に、**2** 動作原理、**3** 装置構成、**4** 観測例を概説する。

## 2 動作原理

図 1 に示すように周波数  $f$  が  $f = f_0 + \dot{f} \cdot t$  と時間  $t$  に対して直線的に変化する観測電波で距離  $r = r_0 + v \cdot t$  で遠ざかるターゲットからの反射波を観測すると、送信波と受信波の周波数差  $f_b$  は  $v \ll c$  であるとき、

$$f_b(r, v) = \frac{2}{c} (r \cdot \dot{f} - v \cdot f_0) \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $v$  はターゲットの速度、 $c$  は光の速度である。(1) 式の括弧内の第 1 項が距離による周波数偏倚、第 2 項がドップラシフトを表す。通常の観測では  $\dot{f} = 100 \text{ kHz/s}$  程度に設定するのでドップラの項を無視すると、観測する下部電離圏の最大高さ 1000 km に対してベースバンド周波数は 667 Hz となり、パルス方式のイオノゾンデに比べて IF 段のバンド幅が狭くてすみ、混信の影響が軽減される。

ベースバンド信号を時間  $\tau$  の間サンプリングし、周波数解析によりターゲットまでの距離を、またそれを時間  $T$  の間繰り返してドップラ速度を決定する。ベースバンド信号を  $\tau$  毎に周波数解析して得られる信号はパルスレーダの受信信号と同等に扱える。Poole<sup>[7]</sup>と Poole and Evans<sup>[8]</sup>は FMCW イオノゾンデを 3 セル法で掃引し、短時間に偏波分離、到来角探知、ドップラ観測の可能なことを示したが、本イオノゾンデではベースバンド信号を 2 回周波数変換してドップラ解析する観測<sup>[17][18]</sup>を想定している。

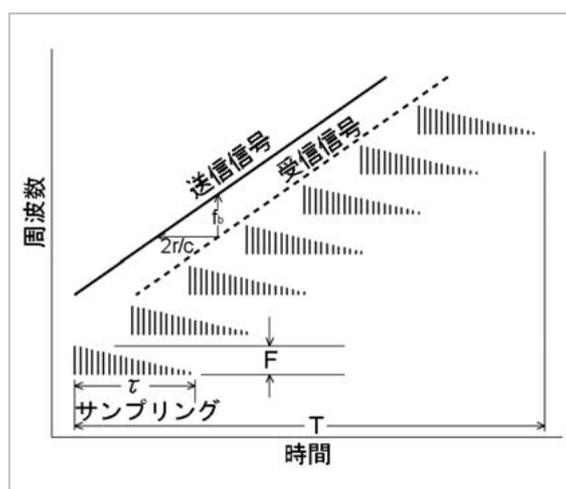


図 1 FMC レーダの模式図

## 2.1 分解能

距離分解能  $\Delta r$  と速度分解能  $\Delta v$  は  $f_b(\Delta r, 0) \cdot \tau = 1$  及び  $f_b(0, \Delta v) \cdot T = 1$  となる条件で決まり、

$$\Delta r = \frac{c}{2\dot{f} \cdot \tau} = \frac{c}{2F} \quad (2)$$

$$\Delta v = \frac{c}{2f \cdot T} \quad (3)$$

で与えられる。図1に示すように  $F = \dot{f} \cdot \tau$  は1 サンプルング区間にスキャンする周波数である。(2)式から距離分解能は解析に使った周波数スキャン幅のみで決まり、観測後に距離分解能を決定できることを示している。パルスレーダでは分解能をあげるためにはパルス幅を狭める必要があり、必要な信号強度を得るために大きな送信ピーク電力となるが、FMCW レーダでは高分解能のための大電力化は必要ない。

速度分解能はパルスレーダ同様、ドップラ観測時間  $T$  で決まる。

## 2.2 データ処理利得

FMCW は周波数拡散方式の一種であり、ベースバンド信号の周波数解析が周波数拡散通信の整合フィルタに相当する。整合フィルタによるデータ処理利得  $G$  は

$$G = F \cdot \tau \quad (4)$$

で与えられる[19]。代表的な値として  $\dot{f} = 100 \text{ kHz/s}$ 、 $\Delta r = 1 \text{ km}$  とすると  $\tau = 1.5 \text{ sec}$ 、 $F = 150 \text{ kHz}$  から、 $G = 2.25 \times 10^5$  となり、計算上は送信出力  $10 \text{ W}$  の FMCW レーダはピークが  $2.35 \text{ MW}$  のパルスレーダに匹敵する。

## 2.3 送受信の切り替え

送信した電波を受信するモノスタティックな運用においては、イオノゾンデが使う中-短波帯では送受信アンテナ間のカップリングが避けられないので、送信アンテナから発射された電力の一部が受信アンテナに回り込み、送信時には受信できない問題が生じる。 $40 \text{ dBm}$  ( $10 \text{ W}$ ) 程度の送信電力を、広く使われるデルタアンテナに給電して観測すると、受信機入力端ではエコー強度として  $-100 \text{ dBm}$  程度の信号強度となる。直交した送受

信アンテナ間の結合損失は  $30 \text{ dB}$  程度なので送信アンテナから受信アンテナに回り込む直接波の強度は  $10 \text{ dBm}$  のレベルとなり、受信機のダイナミックレンジを大きく越えてしまう。この問題を避けるため、図2に示すように送信と受信を交互に切り替える方式が一般的に使われ、Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave 略して FMICW 或いは Pulsed Chirp レーダと呼ばれる。

距離  $r$  にあるターゲットからのエコーは  $\Delta t = 2r/c$  だけ遅れて到着するが、受信の窓に入れば有効に受信され、送信時に到着した信号は観測には寄与しない。送受信の切り替え信号  $g(t)$  を

$$g(t) = 1 \quad \text{: 送信時}$$

$$g(t) = 0 \quad \text{: 受信時}$$

とすると、距離  $r$  にあるターゲットからのエコーの受信時間率  $\rho(r)$  は

$$\rho(r) = \frac{\int g(t-2r/c)(1-g(t)) dt}{\int dt} \quad (5)$$

で表される。送受信を一定の矩形波で切り替えると距離によって  $\rho(r)$  は最大で  $0.5$ 、最小で  $0$  の間を周期的に変化する。一様な距離感度特性を得るために、送受信をランダムに切り替えることが有効である[20]。 $g(t)$  にシンボル送出間隔  $t_0$ 、 $n$  段シフトレジスタによる系列長  $N=2^n-1$  の  $M$  系列疑似ランダム符号を使うと (5) 式は

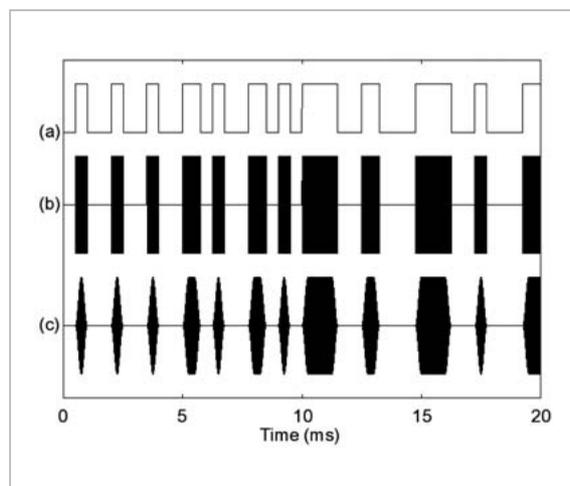


図2 送受切り替え FMCW の模式図

- (a): 送受切り替え信号
- (b): (a)に従って断続した送信信号
- (c): エンベロープを整形した送信信号

$$\rho(r) = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{N}\right) \frac{|2r/c - kNt_0|}{t_0} & (kN-1) \leq \frac{2r}{c} \leq kNt_0 \quad (k=0,1,2,\dots) \\ \frac{N+1}{4N} & \text{他の } r \end{cases} \quad (6)$$

となり、 $N$  が十分に大きければ距離  $r_0 = ct_0/2$  から先は  $\rho(r) = 25\%$  (一定)となる。

図3に  $t_0 = 0.5$  msの時の受信時間率の距離変化を示す。細線は一定の矩形波(図2a)、で、太線は  $n = 10$ の疑似ランダム符号(図2b)で切り替えた場合を示す。Pooleは文献[20]でM系列を変形したQ系列信号で送受信を切り替えると、距離による受信時間率が変わることを示した。

FMICWでは周波数掃引する搬送波を送受切り替え信号でパルス変調をかけるので、送信信号は搬送波  $f_c$ の周りにサイドバンドが生じ、井口[21]によると

$$S(f) = \frac{N+1}{N} \pi^2 A^2 \left\{ \delta(f-f_c) + \frac{1}{N} \left[ \frac{\sin(\pi(f-f_c)t_0)}{\pi(f-f_c)t_0} \right]^2 \sum_{k=-\infty, k \neq 0}^{\infty} \delta\left(f-f_c - \frac{k}{T}\right) \right\} \quad (7)$$

で表されるスペクトル  $S(f)$ を持つ。但し、 $A$ は搬送波の振幅である。(7)式右辺括弧内の第1項は搬送波成分で、有効な信号であるが、第2項のサイドバンドは疑似ランダムパルスによる断続で生じるスペクトルとなる。 $n = 10$ のM系列疑似ランダム符号で搬送波を断続(図2b)すると図4の黒線で示すように、サイドバンドは搬送波から30 dB下がったレベルから  $(\sin f/f)^2$ の形で広い周波数に広がり、観測する距離範囲では一様なレベルと見なせる。ターゲットからの反射信号も(1)式で示されるベースバンドの周りに同様なスペクトルの広がりを持ち、最も強い反射信号から30 dBより低い反射信号は総てマスクされてしまう。送信信号の強度を上げてもサイドバンドも上昇し、見かけのダイナミックレンジが30 dBである事には変わらない。成層した電離圏のように、ある観測周波数では反射信号強度に変化が少ない場合は差し支えないが、海洋レーダのように距離による強度変化の大きな散乱波を広い距離範囲で観測するときには、このスペクトルの広がり観測の障害となるので、図3の細線で示すように距離感度特性が生じてでも一定の周波数で送受信を切り替えて観測する。一定の周波数で切り替える

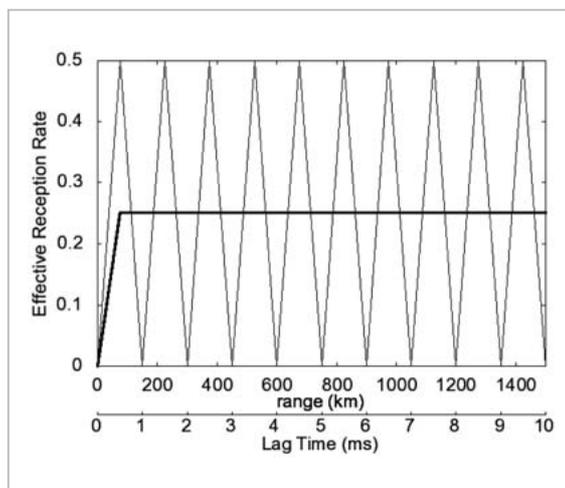


図3 送受切り替えによる受信時間率の変化

細線はシンボル送出間隔 0.5 msの繰り返し矩形波、太線は10段シフトレジスタによるM系列疑似ランダム符号による送受信の切り替え。

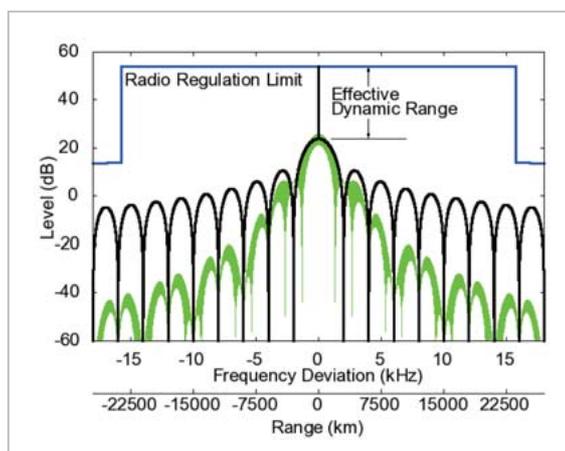


図4 疑似ランダム符号で送受信を切り替えたときの搬送波の周りのスペクトルの広がり

黒線は搬送波を断続(図2b)した場合、緑線は滑らかなエンベロープ(図2c)で振幅変調した場合。青線は無線設備規則[13]による帯域外輻射の限界を示す。

とサイドバンドは切り替え周波数の整数倍の孤立した周波数群となり、IFの帯域外に切り替え周波数を設定すれば、微弱な受信信号も観測可能となる[21][22]。

送受切り替え信号のスペクトルの広がりにはスプリアスとなって周囲の無線設備に妨害を与えるだけでなく、観測装置ではパルス波形を図2(c)に示すような滑らかなエンベロープに整形して不要なスペクトルの広がりを抑圧している(図4緑線)。

受信機内部では送受切り替え信号の逆のタイミングで受信信号を変調する。井口は文献[21]でこ

の問題を考察し、ベースバンド信号に含まれるサイドバンドが更に上昇することを示した。

### 3 装置構成

イオノゾンデは通信・電力事情の悪い辺鄙なところに設置されることが多いので、長期間無人観測に耐えるよう、自立的に動作する設計とした。ネットワークが接続できればリモートからの制御、データ収集も可能である。観測所一カ所当たり、観測機本体となる FMCW イオノゾンデに送受信アンテナ、アンテナ切り替え SW / アッテネータ、通過型電力計、同軸避雷器、制御 PC、ネットワーク PC 等が付属する。一例としてタイ国のモンクット王工科大学チュンポン校 (CPN : 10.73°N, 99.38°E) に設置したイオノゾンデの構成を図 5 に、アンテナと装置の写真を図 6 に示す。また、主要緒元を表 1 に示す。通常は 2 MHz から 30 MHz の間を 100 kHz/s の周波数掃引速度で観測するので、一観測に要する時間は 4 分 40 秒となる。

アンテナは 30 m 鉄塔から直交して展張する 2 面の終端抵抗付き折り返しダイポール、或いはデルタループアンテナを使う。観測周波数範囲が 10 倍以上あるので、効率が悪いが進行波型アンテナを使い、簡単な構造で平坦な周波数特性を得る。

アンテナ切り替え SW / アッテネータは観測時だけ送受信機とアンテナを接続し、待機時は切り離して落雷からの被害を防止する。また、アッテネータは昼夜のエコー強度の差を補償する。

受信制御部は図 7 に示すように予備として同じ受信機 2 セットを内蔵しており、受信アンテナを追加すれば方探、偏波分離等の観測が可能である。第 1IF は 70.1 MHz、第 2IF は 100 kHz で、第 2IF を 1 MHz、14 bit でサンプリングし、その後は PLD 上でデジタル的に周波数変換と帯域制限を行い、ベースバンド信号を出力する。第 2IF 以降をデジタル化したので、かさばるアナログ部品が無くなり、調整も不要となった。受信機入力部分は非同調なので、観測信号以外の放送波、通信が常時かぶってくる。入力段に 2 MHz の High Pass Filter (HPF) をおき、放送波帯の強い混信を遮断している。また、初段の Head Amp は強い入力信号でも飽和しないモジュールを選んだ。強

表 1 FMCW イオノゾンデ主要緒元

観測モード	リニア FMCW / FMICW
観測周波数	2MHz ~ 30MHz (プログラマブル)
周波数掃引速度	100/200/500 kHz/s
送受切り換え信号	連続パルス/M 系列疑似ランダム符号
シンボル送出速度	0.5 ms
送信電力	20 W (ピーク)
受信感度	-132 dBm
ダイナミックレンジ	84 dB
受信帯域幅	500/1k/2k Hz (周波数掃引速度に連動)
ホストとのデータ送受信	USB による
ホストへの時刻信号	RS-232C による
ハウスキーピングデータ	送信/反射電力, 制御部/パワーアンプ温度
電源	AC 50/60Hz 85~240V
質量	40kg 以下

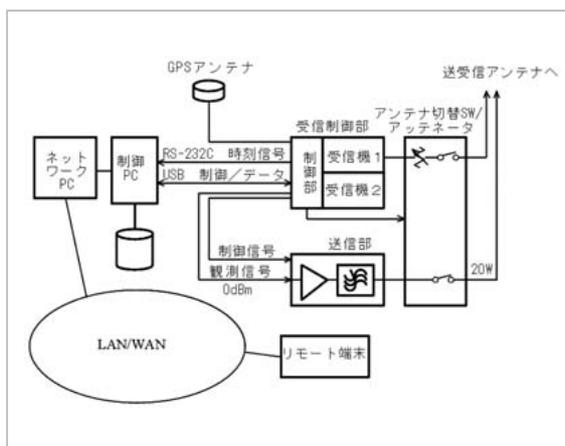


図 5 FMCW イオノゾンデの構成



図 6 タイ国チュンポン (CPN) に設置した FMCW イオノゾンデ

上 : 30 m アンテナタワー

下 : 上から通過型電力計、送信部、受信制御部、アンテナ切替 SW // アッテネータ

左は制御 PC に表示されたクイックルックイオノグラム

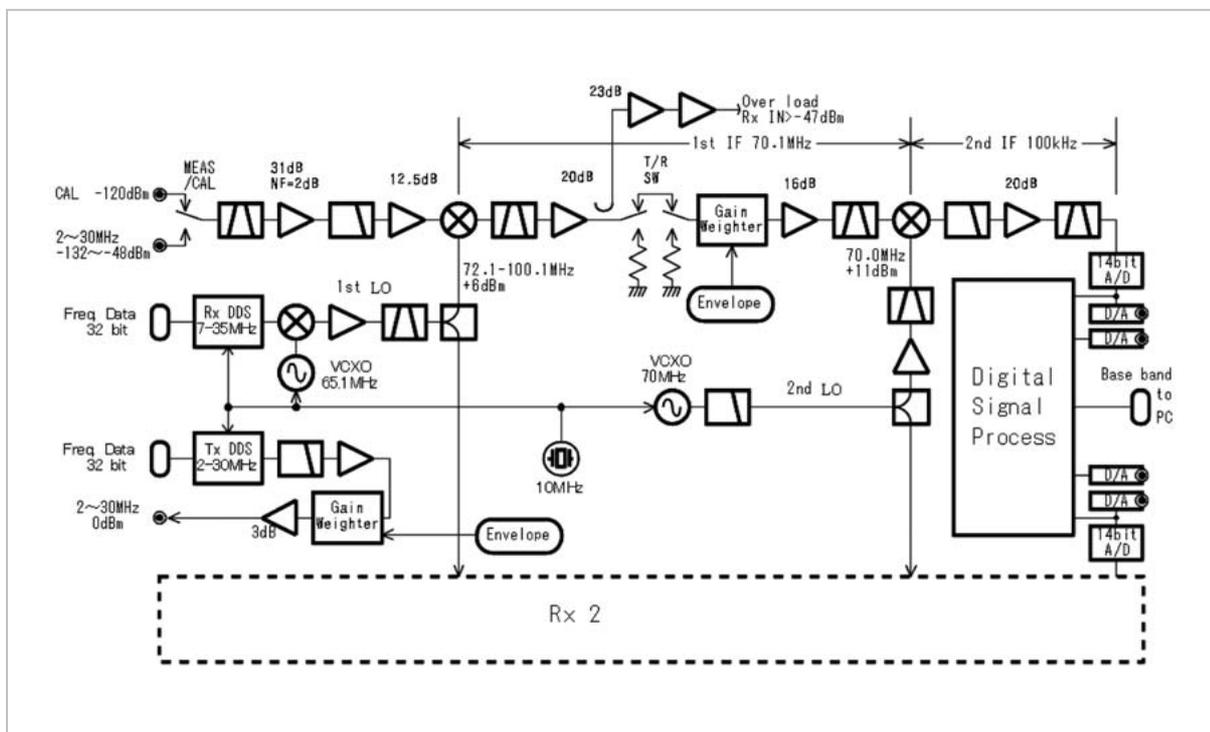


図7 受信制御部ブロック図

い搬送波を通過するときのパルス状の混信は、第1IF段でピックアップし、ノイズブランカで後段の送受切り替え用ゲートスイッチをオフにして、影響が後段に波及することを防止している。モノスタティックな観測では送信と受信を交互に切り替えるが、送信時には送信信号が受信機内に漏れ込まないよう、ゲートスイッチを切ると共に受信DDSのD/A変換を止める。ゲートスイッチの後段にはアナログ乗算回路によるエンベロープ整形回路を置き、切り替え信号パルスによるリングングを抑圧している。

制御PCとはUSBインターフェースを通してコマンド、ベースバンドデータ、ハウスキーピングデータを送受信する。制御部はPCからのコマンドを解釈して周波数掃引シンセサイザの制御、送受切り替え信号とエンベロープ整形信号を発生しながら、受信データの信号処理を行う。制御PCが観測ごとにパラメータをセットして観測開始信号を送ると、GPS時計の1秒パルスに同期して観測を開始し、ベースバンド信号を制御PCに送る。時刻情報はGPS時計からRS-232/C信号で毎秒制御PCに送られる。観測は1秒パルスから $\mu$ 秒単位ずらして開始時刻を設定可能なので、隣接した観測点間でオフセット時間を調整し、相

互の混信を避けることができる。

受信制御部内部の信号は総て内蔵の10 MHz高安定水晶発振器の信号に同期して作られる。

FMCWレーダの根幹となる掃引周波数は、送信と受信にそれぞれ独立にDDSを使い、位相の連続した掃引周波数を1 Hzステップで発生する。試験時には送受信の周波数をずらして疑似エコーを発生させることができる。DDSのクロック周波数は80 MHzなので、送信周波数は2 ~ 30 MHzを直接発生させるが、受信用第1ローカル周波数は2通倍した後、固定周波数と周波数変換して72.1 ~ 100.1 MHzを生成している。このDDSは周波数に32 bit、振幅に12 bitのデータ幅があり、DビットのD/A変換によるスプリアス *Spur* は文献[23]によれば、たかだか

$$Spur \approx -20 \log(2^D) \quad [\text{dBc}] \quad (8)$$

なので、DDSに起因するスプリアス強度は-70 dBc以下となる。

送信DDSで作られた掃引周波数信号は図2に示すように疑似ランダム符号で断続され、エンベロープ整形されて送信部に送られる。送信部は制御部から入力する0 dBmの掃引周波数信号を増

幅し、Low Pass Filter (LPF) ブロックを経て 20 W のピーク出力でアンテナに給電する。広帯域で使用するので非同調増幅器であり、全周波数にわたってスプリアスを低減するために電力効率は悪いが、終段は C-MOS FET による AB 級プッシュプル回路としている。上述のように簡単なアンテナを想定しており、アンテナインピーダンスが整合しなくても動作するが、極端に定在波比 (VSWR) が劣化する場合は保護リレーにより、送信を止める。LPF ブロックは遮断周波数が  $2^{1/2}$  倍ずつ異なるフィルタから成り、高調波を抑制する。観測周波数を掃引するに連れて制御部より適当なフィルタが選択される。

制御 PC はあらかじめ設定された観測スケジュールにしたがって制御部にコマンドを送り、1 観測終了毎にクイックルック用イオノグラムを作成し、ベースバンド信号を圧縮してファイルに蓄積する。ベースバンドの記録はデータ量は大きくなるが、解析時にイオノグラムや  $h_p$  プロットなどの生成に自由度が大きい。制御 PC はイオノゾンの制御/データ受信に専念するので、外部とのデータの送受信や、観測スケジュールの変更、インターネットへのファイアウォール機能などはネットワーク PC が担当する。

## 4 観測例

### 4.1 イオノゾンデ観測

FMCW 方式のイオノゾンデはベースバンド信号をそのまま記録するので、後処理の自由度が大きい。国内の定常観測イオノゾンデと同等のイオノグラムを生成し (<http://wdc.nict.go.jp/IONO/index.html>)、パラメータの読み取りも国内用イオノゾンデ用の読み取りシステムを流用している。イオノグラム表示上の周波数ステップと距離分解能に必要な周波数掃引幅を両立させるため、図 1 に示すようにサンプリングした信号を一部重複して周波数解析している。

図 8 に CPN での 2003 年 7 月 8 日に観測したスプレッド F 現象を示す。20 分ごとの観測を抜き出し、3 MHz ~ 9 MHz の周波数範囲を連続して描画した。時刻は UT で表示し、この日の日没時刻は 11 時 49 分 UT である。日没後の E×B ドリフトにより F 領域のエコーが上昇しながら分裂し、頂点付近でスプレッド F に発達する様相が捉えられている。各イオノグラムの縦のすじは強い混信である。スプレッド F 前後の成層状態では十分なエコー強度が得られるが、スプレッドした状態では個々の散乱体の散乱断面積が小さく、送信パワーを上げるか、描画時の細かい閾値処理

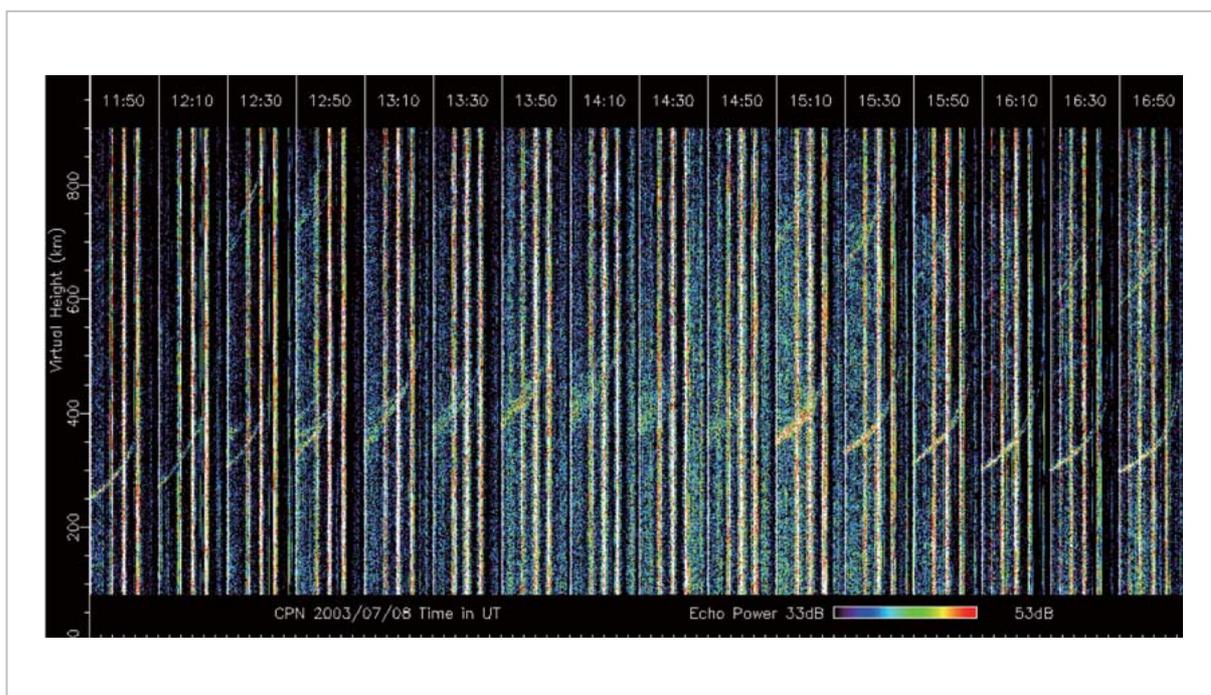


図8 CPN 上空のスプレッドF発生時の変化

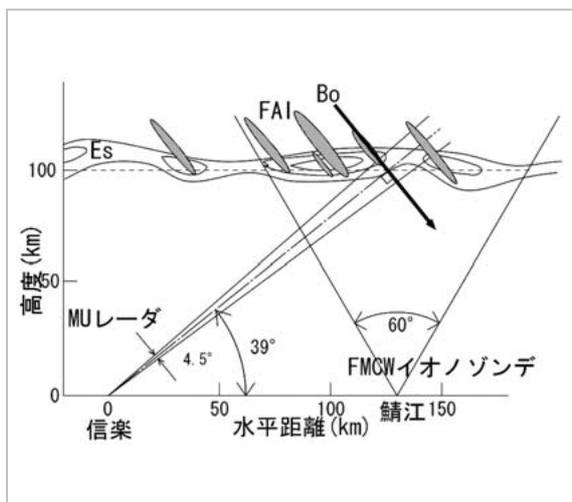


図9 MUレーダとFMCWイオノゾンデ共同観測の位置関係

(FAI) 観測領域の直下にある福井県鯖江市 (36.0°N, 136.3°E) に FMCW イオノゾンデを設置し、MU レーダと共同観測を実施した [15]。図 9 に位置関係を示すが、FAI は地球磁力線 Bo に沿った構造となり、磁力線と直角方向に散乱断面積のピークがあるので、MU レーダは北に向けたビームで鯖江上空の E 領域 FAI からの散乱信号を強く観測する。MU レーダのビーム幅は 4.5° である。FMCW イオノゾンデのビーム幅は 60° 程度であるが、視線方向に直角な面からの反射波を観測する。

鯖江ではイオノゾンデの送受信アンテナは、5階建てビルのエレベータータワーの上に約 15 m のアルミポールを建て、ビルの屋上に終端抵抗付き折り返しダイポールを展張し、冬になって雪の降り出す前に撤収した。Es の発達を精密に観測するため、イオノゾンデは毎分狭い周波数範囲を掃引し、いくつかの固定周波数での高度変化を 1.5 km の高度分解能でプロットした。MU レーダで観測した FAI の QP エコーとの同時観測結果を図 10 に示すが、QP エコーは 2000 年 6 月 1 日 19:45 ~ 20:25 LT、20:40 ~ 21:30 LT、6 月 2 日 00:10 ~ 02:10 LT に観測された。この時鯖江上空の Es は高度 120 km から 100 km までゆっくり降下したが、MU レーダでの QP エコー発生時は QP エコーの最も強い高度とよい一致を示している。ただし、4、5、6 MHz の反射高度変化は QP の発生とよく対応するが、3 MHz のみは QP エコーの出現と一致せず、QP の発生にはある程度以上電子密度の濃いことが必要とされる。

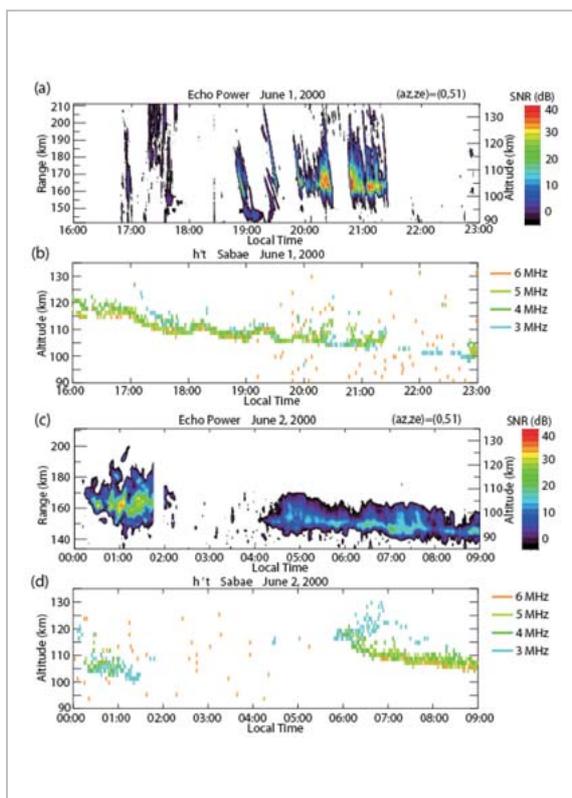


図10 (a) (c) MUレーダ観測時に、(b) (d) 複数の周波数でみた Es の高度変化(文献[15]による)

が要求される。

## 4.2 h't 観測

1998 年から 2002 年の夏期のスポラディック E (Es) の卓越する期間、滋賀県信楽町にある MU レーダ (34.9°N, 136.1°E) の E 領域沿磁力線構造

## 4.3 ドップラ観測

電離圏は東西方向に電場がかかると E×B ドリフトにより磁場と垂直方向に運動する。ドップラ観測により移動速度を測定して電離圏にかかる電場の測定が可能となる。イオノゾンデによるドップラ観測は標準電波のドップラ観測に比べ、反射高度と速度が同時に観測できる利点がある。図 11 に福岡県篠栗 (SSG : 32.56°N, 129.24°E) で観測された地磁気 SC 時のドップラ変動を示す [24]。上段は SSG が日中の現象で、電場は東向きにかかる。SC 時には地球の磁気圏が圧縮されるので SSG 近くの久住 (KUJ : 32.71°N, 133.19°E)、地球の裏側にあるブラジルのサンタマリア (SMA :

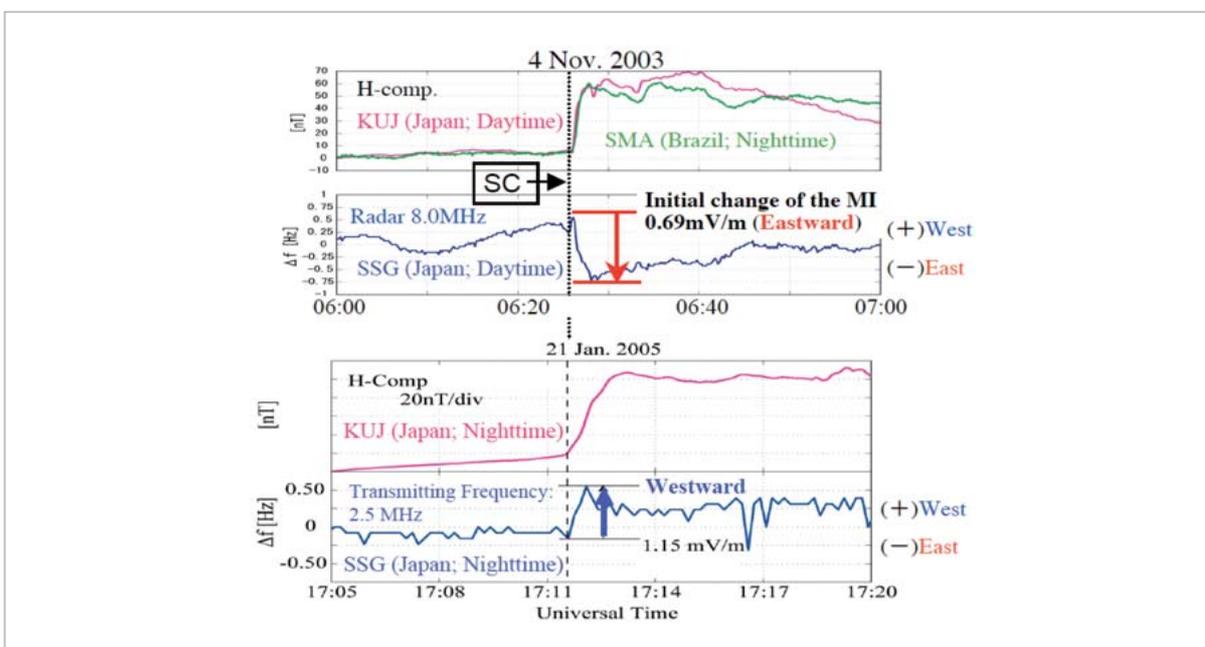


図 11 地磁気 SC 時の FMCW レーダドップラモードでの電場の観測

上段：電場観測点 (SSG) が日中  
下段：電場観測点 (SSG) が夜間 (文献 [24] による)

28.97°S, 57.86°W) 共に地磁気は増加する。下段は SSG が夜間の SC 現象であり、日中とは反対向きに電場がかかることがわかる。

## 5 むすび

FMCW 観測は時間と周波数に信号エネルギーを拡散して送信するので、距離分解能が細かく、観測間隔が長いほど、小電力観測の特徴を発揮する。短波帯でのモノスタティック FMCW 観測は送受信の切り替えが必須であり、FMCW のパルス圧縮機能の利点を完全には生かすことができない。それでも低電力での観測が可能であり、小型ポータブル観測機として利用価値は大きい。送信電力が小さいので、近隣の無線設備との干渉が小さく、これまで国内、東アジア地域に展開して混信を指摘されたことはない。SEALION 計画 [16] では移動観測で観測地点を決定し、本観測に移行

する手順で使われている。観測機は日本の電波法に規定する送信電力や不要輻射の要件を全観測周波数にわたってクリアする仕様であり、必要なときに必要な所での観測が可能となった。

FMCW 方式による観測技術は九州大学でも採用された。九州大学では福岡県篠栗をはじめとして、海外ではロシア、フィリピンでドップラ観測を行い、SC の他、DP2 の低緯度への伝播、地磁気脈動等、様々な地磁気現象と電離圏電場との相関の研究を進めている [24][25]。

FMCW 方式の低電力による EMC 性、高信頼性を評価して次期南極観測用の据え置き型 FMCW 観測機の開発が進められている。受信機入力段に観測周波数に同期して変化するバンドパスフィルタを入れ、耐混信性能を強化した。また、南極の電離圏の特性に合わせて観測周波数の下限を 0.5 MHz に、上限を 16 MHz に下げる計画である。

## 参考文献

- 1 古関輝男, 竹内鉄雄, 石澤薫, 伊藤勝一, 倉谷康和, “9-B 型電離層観測機”, 電波研季報, Vol.26, No.139, pp.679-691, 1980.
- 2 郵政省電波研究所編, “我が国における電離層観測機の変遷”, 1984.

- 3 加藤久雄, "5-1 電離層観測と観測情報処理システム", 通総研季報, Vol.48, No.4, pp.121-127, 2002.
- 4 G. H. Barry, "A low-power vertical-incidence ionosonde", IEEE Geosci. Electron., Vol.GE-9, No.2, pp.86-89, 1971.
- 5 M. Ichinose, S. Fujii, and K. Nozaki, "Geomagnetic disturbance effects on usable frequency bands for a long-distance HF path", Jour. RRL, Vol.30, No.130/131, pp.143-150, 1983.
- 6 上瀧寛, "見通し外短波レーダ", 電波研季報, Vol.29, No.151, pp.447-465, 1983.
- 7 A. W. V. Poole, "Advanced sounding 1. The FMCW alternative", Radio Sci., Vol.20, No.6, pp.1609-1616, 1985.
- 8 A. W. V. Poole and G. P. Evans, "Advanced sounding 2. First results from an advanced chirp ionosonde", Radio Sci., Vol.20, No.6, pp.1617-1624, 1985.
- 9 佐藤亮, 深尾昌一郎, 津田敏隆, 加藤進, "低電力デジタル化アイオノゾンデ", FY86 RASC 第1回 MU レーダ合同シンポジウム集録, pp.59-65, 1986.
- 10 K. Nozaki and T. Kikuchi, "A new multimode FM/CW ionosonde", Mem. Ntnl. Inst. Polar Res. Spec. Issue, No.47, pp.217-224, 1987.
- 11 K. Nozaki and T. Kikuchi, "Preliminary results of the multimode FM/CW ionosonde experiment", Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., No.1, pp.204-209, 1988.
- 12 無線設備規則第14条17
- 13 無線設備規則別表第3号
- 14 T. Maruyama, K. Nozaki, M. Yamamoto, and S. Fukao, "Ionospheric height changes at two closely separated equatorial stations and implications in spread F onsets", JATP, Vol.64, pp.1557-1563, 2002.
- 15 T. Ogawa, O. Takahashi, Y. Otsuka, K. Nozaki, M. Yamamoto, and K. Kita, "Simultaneous middle and upper atmosphere radar and ionospheric sounder observations of midlatitude E region irregularities and sporadic E layer", JGR., Vol.107, No.A10, pp.1275, 2002.
- 16 丸山隆, 齋藤享, 川村眞文, 野崎憲朗, 上本純平, 津川卓也, 陣英克, 石井守, 久保田実, "SEALION プロジェクトの概要と初期解析結果", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-2-1, 2009.
- 17 梅原俊彦, 大野裕一, 井口俊夫, "短波海洋レーダ 5. 海洋レーダのデータ処理", 通総研季報, Vol.37, No.3, pp.383-391, 1991.
- 18 D. E. Barrick, "FM/CW radar signals and digital processing", NOAA Tech. Rep. ERL 283-WPL 26, 1973.
- 19 M. Skolnik, "Introduction to radar systems 2<sup>nd</sup> Edition", McGraw-Hill, 1971.
- 20 A. W. V. Poole, "On the use of pseudorandom codes for 'chirp' radar", IEEE Trans. Antennas Prop., Vol.AP-27, No.4, pp.480-485, 1979.
- 21 井口俊夫, "短波海洋レーダ 3. FMCW 方式海洋レーダの送受切り替え信号について", 通総研季報, Vol.37, No.3, pp.361-374, 1991.
- 22 野崎憲朗, "短波海洋レーダ 4. 短波海洋レーダ装置の構成", 通総研季報, Vol.37, No.3, pp.375-382, 1991.
- 23 "Motorola 120DDSEVK Direct Digital Synthesizer Users Manual", Motorola Inc., 1992.
- 24 K. Yumoto, A. Ikeda, M. Shinohara, T. Uozumi, K. Nozaki, S. Watari, K. Kitamura, V. V. Bychkov, and M. Shevtsov, "Electric and magnetic field variations at low and equatorial latitudes during SC, DP2, and Pi2 events", Adv. In Geosciences, Vol.14(Solar Terrestrial), 2009, 掲載予定.

- 25 A. Ikeda, K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, A. Yoshikawa, M. G. Cardinal, B. M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon Jr, and D. McNamara, "Ionospheric observation using FM-CW radar array", Adv. In Geosciences, 2011, 掲載予定.



の びき けん じょう  
野崎憲朗

テレコムエンジニアリングセンター  
宇宙環境科学