

電波レンズ搭載型対流圏ウィンドプロファイラレーダー(WPR LQ-7)の開発

今井克之・中川貴央・橋口浩之

Development of Troposphere Wind Profiler Radar that Uses Lens Antenna (WPR LQ-7)— by Katsuyuki Imai, Takao Nakagawa and Hiroyuki Hashiguchi — Sumitomo Electric Industries, Ltd., in joint research with Kyoto University's Research Institute for Sustainable Humanosphere, has developed "LQ Series", a new model of wind profiler radar system, for measuring the velocity and direction of winds using radio waves. This new model, which employs a Luneburg lens antenna, has substantially lower price, improved characteristics and increased user-friendliness than previous models. In this paper, the authors explain technical information of the new model wind profiler (WPR LQ-7).

1. 緒言

地球を覆う大気は、地表面から順に対流圏・成層圏・中間圏・熱圏の4層に大別される。特に最下層の対流圏（～約10km）は、複雑な形状を有する地表面との摩擦や、地面からの熱の放射・吸収の影響により、内部の大気運動は複雑化し、集中豪雨やウィンドシア（局地的乱流）等、様々な気象変化がもたらされる、社会生活に密接した領域である。近年のリモートセンシング技術の目覚ましい躍進により、この対流圏内部の大気運動を高精度、且つ高時間分解能で観測する気象観測機器が欧米・日本を中心に開発され、その中でも風向・風速の3次元プロファイルリアルタイムに提供できるウィンドプロファイラレーダー（以下、WPR）は、今や世界各国で必要不可欠な存在となっている。当社では1994年に、超高層電波研究センター（現：京都大学生存圏研究所）と共同開発に着手し、境界層（～3km）WPRや、世界初の車載型SバンドWPRの開発に成功した。また2002年以降は、観測高度を大幅に改善した汎用モデル（現業用）の対流圏WPR（型番：WPR L-28）を製造・販売し、現在も日本・中国・韓国等で観測業務に供している。

しかしながら上述WPRの汎用化に伴い、更なる観測高度の向上と特に低廉化の要求が高まったため、我々も従来のWPR L-28のフルモデルチェンジに踏み切った。当社がこの度開発に成功した新モデルWPR LQ-7は、当社の保有する高度な材料技術をベースに、ルネベルグレンズと呼ばれる電波レンズをWPRのアンテナ部に採用し、その結果、大幅な低廉化（従来の40% CR）、観測高度向上への拡張性、機器の長寿命化、そしてメンテナンス性の向上が実現した。

本論文では、新モデルWPR LQ-7（写真1）の技術内容と、その観測結果を報告する。



写真1 WPR LQ-7外観写真

2. WPRの原理

WPRの原理図を図1に示す。WPRから上空に向けて放射されたパルス状の電波は、大気乱流に伴う屈折率の揺らぎにより、極めて微弱ではあるが散乱される。その散乱波（以下、エコーと称す）は、その散乱高度に対応した時間遅延を伴ってWPRに戻るため、散乱波強度を時間の関数として測定することにより、高度別のデータ列を採取することができる。また乱流は大気の流れ（風）に乗って移動するため、エコーはドップラー効果により、散乱点に於ける風速 V に比例した周波数変位（以下、ドップラーシフトと称す）を受ける。

ここで、ドップラーシフト Δf と視線方向風速（風速の電波放射方向成分） V_r の間には、次の関係式が成り立つ。

$$\Delta f = f_0 \left(\frac{c + V_r}{c - V_r} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 f_0 はレーダー周波数、 c は光速である。さらに視線方向風速 V_r は光速 c に比べ無視できるため、(2.1) 式を近似・変形して以下の如く視線方向風速 V_r を得る。

$$V_r = c \frac{\Delta f}{2f_0} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

従って、WPR から放射されるビームの方位を天頂に向けると、(2.2) 式から風の鉛直成分 V_z が求まる。次に、ビーム方位を天頂から角度 $\pm \theta$ だけ傾いた方向にビーム走査し、それらの視線方向風速 $V_r(\theta)$ を測定することにより、ビーム走査範囲内の風の水平一様性を仮定して、風の水平成分 V_h を次式により求めることができる。

$$V_h = \frac{V_r(\theta) - V_r(-\theta)}{2 \sin \theta} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

以上の原理に基づき、各高度に於ける風向・風速の高度分布を観測することが可能となる。特に風速の鉛直成分は、他の観測手段では直接観測不可能であり、WPR の特筆すべき特長の1つである。

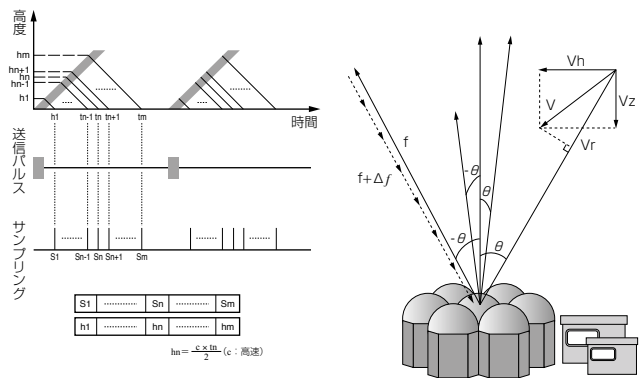


図1 WPRの原理図

風速検出の基礎となる散乱波は極めて微弱であるうえに、周波数の増加と共に散乱レベルが低下していくため、符号理論を応用した『パルス圧縮』を導入し、S/Nの向上を図っている。

パルス圧縮の概念図を図2に示す。サンプリング時間 t_i における受信電圧には高度 h_i から h_{i+N-1} の範囲からの散乱波成分が含まれている。今、送信パルスを時間 τ 毎に位相変調をすると、これら散乱波成分にはその位相が係数 C_p ($p=0,1,\dots,N-1$)として乗じられることになる。この係数 C_p に適当な性質を持たせ、 $t_i - p + 1$ における受信電圧を組み合わ

せて各高度における散乱波成分を算出すると、散乱波成分は同位相で加算されるのに対し、雑音成分等の位相には相関性が無いため、高度分解能を犠牲にすることなく、散乱波成分のS/Nを向上させることができる。さらに Spano and Ghebrebrhan 「1996」⁽¹⁾らの考案した最適符号系列(Complementary Code)を用いれば、低高度でのパルス圧縮が可能となるほか、サイドローブや干渉波の影響を抑制することが可能であり、本システムでもこの最適符号系列を採用している。

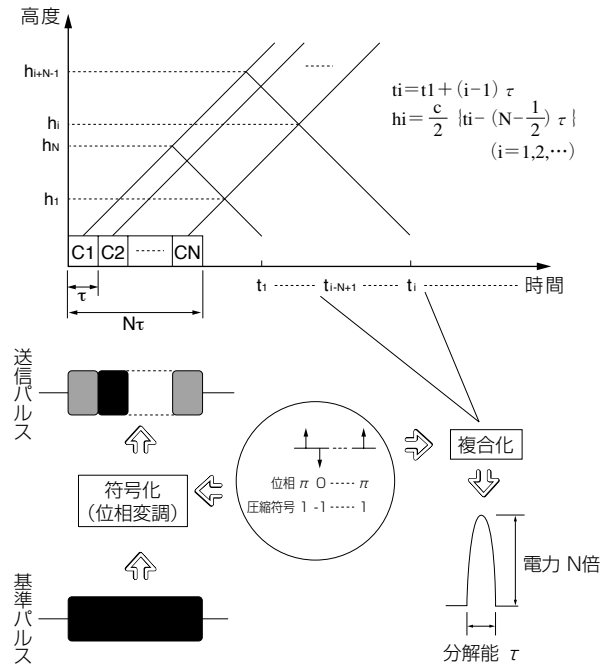


図2 パルス圧縮の概念図

3. ルネベルグレンズ(電波レンズ)の原理

ルネベルグレンズ(電波レンズ)の原理図を図3に示す。1944年に R. K. Luneberg が考案した誘電体レンズであり、球状誘電体の中心からの距離に応じて比誘電率を変化させることで、平面波で入射した電波が、誘電体の中心に対して対称な表面上の焦点に集まる。誘電体の形状が球であることから、あらゆる方向からの到来電波は、個々の焦点を持つことになり、従ってレンズ表面上の任意の点が焦点になり得て、且つ独立的に電波を受信できうる。逆に焦点から放射された電波は、レンズを透過することで平面波となって、放射される。これらの特徴は、本レンズがマルチビームを形成する送受信アンテナとして機能することを示唆している。

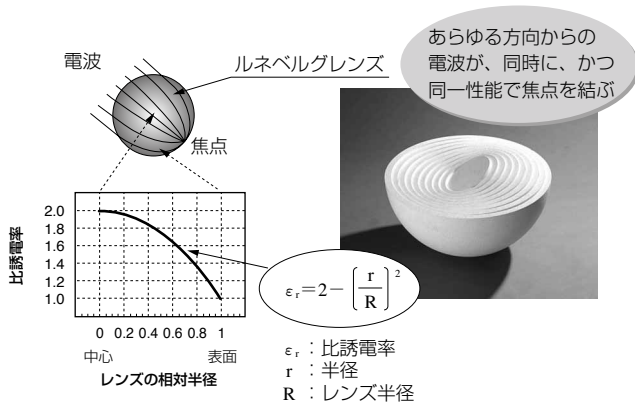


図3 ルネベルグレンズ（電波レンズ）の原理図

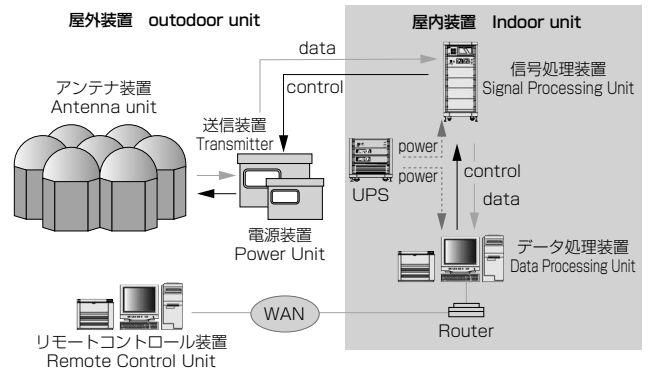


図4 システム構成

4. システム概要

WPR LQ-7の主要諸元を表1に、システム構成、ブロックダイアグラムを図4、図5に示す。WPR LQ-7は、アン

表1 WPR LQ-7主要諸元

周波数 (Operational Frequency)	1.3575GHz / 1.290GHz
アンテナ (Antenna)	アクティブ・フェーズド・アレイ (Active Phased Array)
アンテナ利得 (Antenna Gain)	> 30dBi
ビーム方位 (Beam Directions)	(Az, Ze) = (0°, 0°), (0°, 14°), (90°, 14°), (180°, 14°), (270°, 14°)
偏波 (Polarization)	直線 (Linear)
ピーク電力 (Peak Power)	> 2000W
平均電力 (Average Power)	> 700W
パルス幅 (Pulse Length)	333ns, 666ns, 1000ns, 1333ns, 2000ns, 2666ns, 4000ns
パルス繰り返し周期 (IPP)	50, 80, 100, 120, 150, 200 μs
パルス圧縮 (Pulse Compression)	(1), 2, 4, 8, 16 bits (Optimum Complementary codes)
雑音指数 (Noise Figure)	< 2.0dB
ダイナミックレンジ (Dynamic Range)	> 60dB
コヒーレント積分 (Coherent Integration)	可変 Variable (< 200)
FFT点数 (FFT Points)	64, 128, 256 (default), 512
電源 (Power Supply)	1φ -200V
動作温度 (Operational Temp.)	-30℃ ~ 50℃ (屋外装置 (Outdoor unit))
耐風性 (Wind Durability)	> 90m/s (瞬間 (moment))

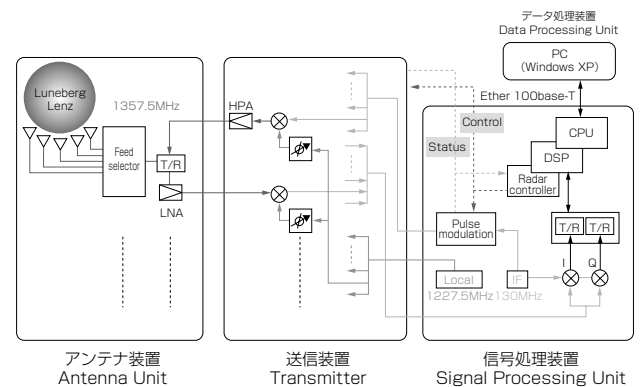


図5 ブロックダイアグラム

テナ装置（7式）、及び送信装置、電源装置、信号処理装置、及びデータ処理装置（PC）各1式から成る。

4-1 アンテナ装置 1式のアンテナ装置にはφ800mmの電波レンズが装備されており、アンテナ利得は約21dBiである。このアンテナ装置7式を900mmピッチで配列し、アンテナ装置全体として30dBiのアンテナ利得を確保している。ここで特筆すべきは、所望の観測高度に応じて、任意にアンテナ装置の数量を選択できる拡張性を有することである。図6に代表的な配列例（LQ-4、LQ-7、LQ-13）を示す。また図7に、LQ-7のアンテナパターンを示す。

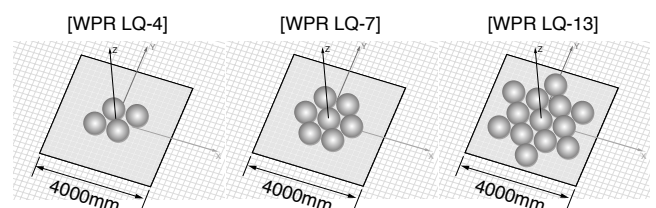


図6 アンテナ装置配列代表例

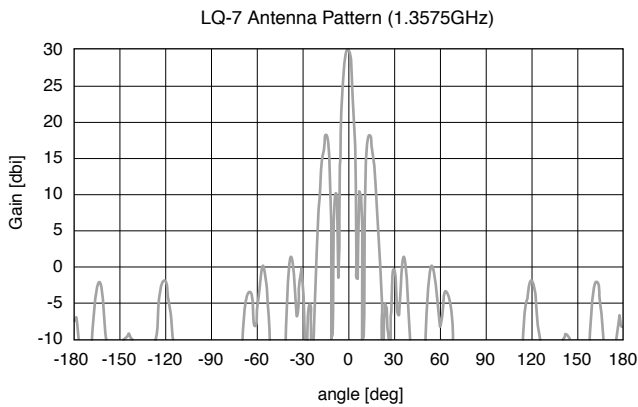


図7 WPR LQ-7アンテナパターン

電波レンズの下部には5つの一次放射器（天頂・東西南北、計5ビームに対応）が天頂角14度で配置されており、電波を送受信する一次放射器を高周波スイッチで電子切替することにより、高速ビーム走査を実現している。切り替え周期の高速化は、各ビーム方位間でのデータの同時性向上のためである。また、対向2ビームのデータを用いることで気象学上重要な風速水平モーメントの鉛直フラックスが精度良く測定できる。

また各アンテナ装置は、各々雑音指数1.5dBの受信機を装備し、アンテナ直下に装備することで、給電損失を抑制している。

4-2 送信装置 送信装置はWPR LQ-7に対応し7系統（周波数変換器、及び送信機各7台）からなる。アクティブ・フェーズド・アレイ方式により送信機を複数に分散させることで、各送信機の小電力化（ピーク出力：400W、Duty比：35%）を図っており、アンテナ出力端での合成出力は2000W（ピーク出力）以上である。送信機には、当社関連会社であるユーディナデバイス株式会社製のGaNパワーデバイスを採用することで、従来のGaAsと比し、大幅な電源効率の改善を実現している。

アンテナ装置・送信装置をアクティブ動作させる各種制御信号は、後述する信号処理部に内包されるレーダーコントローラーで生成し、A/Dとのタイミング同期を図っている。

また、送信周波数、送信機出力、DC電源異常、内部温度異常、及び冷却ファンの異常等、各装置の状態をレーダーステータス信号として検出し、後述信号処理部を介し、無人運転を前提とした遠隔モニタリングを可能にしている。

4-3 信号処理装置 信号処理装置は、IF（130MHz）及びベースバンド系統のアナログ部と、データサンプリング・信号処理を行う信号処理部からなる。アナログ部では、IF（130MHz）の発信器と変調器により、前述パルス圧縮のためのエンコードパルス（2値BPSK：最大16bit）を生成し、送信装置に伝送する。また受信信号をIQ直交検波してA/Dへと伝送する。

信号処理部はWindows® XPベースのPCで構成され、PCI-BusでA/D-DSPボード、及びレーダーコントローラーボードが接続されている。図8に信号処理フローを示す。IQ直交検波された信号は、A/D変換器（2ch、14bit、3MHz）でサンプリングされた後、DSPでパルス圧縮の復号（デコード）・コヒーレント積分、ソフトウェア上でFFT・インコヒーレント積分等の処理が行われ、観測基本要素であるRAWデータ（スペクトルデータ）が生成される。RAWデータはHDDに保存されると同時に、後述するデータ処理装置にLANを介して毎分伝送される。

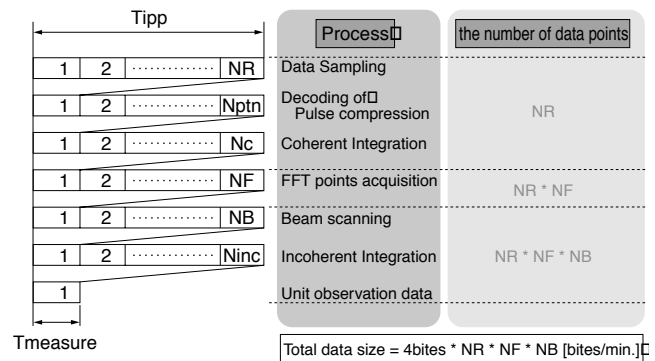


図8 信号処理フロー

4-4 データ処理装置 データ処理装置は汎用のPC（Windows® XP）を採用している。信号処理装置より送られてきたRAWデータ（スペクトルデータ）を元に、非線形最小2乗フィッティングを施し、風向・風速演算の基礎データとなるMomentデータ（Peak Value：P0, Doppler Shift：fd, Spectrum Width：σ）の算出、及び保存を行う。

さらに、得られたMomentデータに対して、データの品質管理処理（エラー判定）を行う。はじめに個々のMomentデータの各要素に対して、異常データを検出・削除する。次いで10分間のデータ（上述Momentデータ（1分値）を10個）を採取して時空間での連続性を検証し、異常データの削除を行う。最後に異常データ削除後の10分間データの平均を行い、Averageデータとして保存する。

データ処理装置では、上述観測データのリアルタイム表示が可能である。WPR LQ-7にて実際に観測されたデータを以下に示す。図9はRAWデータ（スペクトルデータ）を5ビーム同時表示した例であり、各図の横軸は視線方向風速を表し、負の風速はレーダーから遠ざかる方向、正の風速はレーダーに近づく方向を表す。また縦軸はエコー強度（受信強度）を表し、奥行き方向が高度を表している。同図より、風速が高度変化している様子が見て取れる。

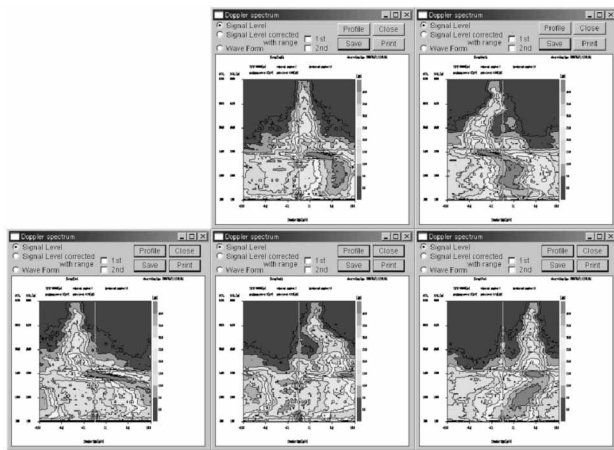


図9 RAWデータの5ビーム同時表示例

図10は水平風（矢羽根で表示）の時間-高度断面図に、エコー強度（受信強度）をスーパーインポーズした図である。各々の矢羽根は水平面内の風向を表し、紙面上方向が北向き、紙面右方向が東向きの風を表現している。エコー強度はカラーグラデーションで表示されている。本ソフトウェアでは、エコー強度以外に、鉛直風速、S/N、Cn2、等のスーパーインポーズが可能である。

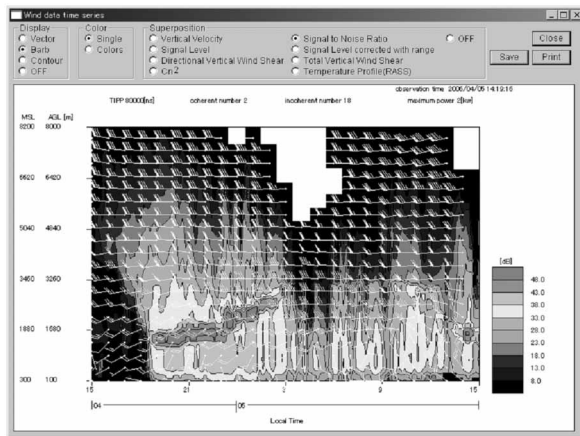


図10 水平風の時間-高度断面図（背景：受信強度）

5. 結 言

ルネバルグレンズ（電波レンズ）をアンテナとして搭載したWPR LQ-7を開発した。晴天時の観測データより、高度7km以上のエコー検出が達成されており、対流圏内大気観測用レーダーとしての有用性が証明された。

Windows XPは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における商標または登録商標です。

参 考 文 献

- (1) E.Spano and O.Ghebrebrhan, Sequences of complementary codes for the optimum decoding of truncated range and high sidelobe suppression factors for ST/MST radar systems, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., 34,330-345 (1996)

執 筆 者

今井 克之*：SEIハイブリッド(株) 技術部

中川 貴央：住友電工システムソリューション(株) システム機器事業部

橋口 浩之：京都大学 生存圏研究所 助教授（工学博士）

*主執筆者