

愛知工業大学 大学院経営情報科学研究科
博士論文

リモートセンシングシステムにおける
データ処理の高効率化及び高精度化に関する研究

A Study on Improving Efficiency and Accuracy of Data
Processing in Remote Sensing Systems

2026年3月

酒巻 洋

指導教員 梶 克彦 教授

目次

図目次	3
表目次	5
頭字語	6
第1章 序論	7
1.1 研究の背景及び目的	7
1.2 従来の研究の概観	13
1.3 論文の構成	16
第2章 リモートセンシングに関する基本技術	20
2.1 リモートセンサ概観	20
2.2 レーダ／ライダから得られる基本的なパラメータ	27
第3章 気象レーダデータを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズム	34
3.1 序言	34
3.2 Kaバンド気象ドップラーレーダによる霧の観測	35
3.3 霧による悪視程状況検出アルゴリズム	38
3.4 実測データを用いたアルゴリズム検証	49
3.5 結言	55
第4章 電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズム	56
4.1 序言	56
4.2 従来航跡検出法の問題点	57
4.3 2次元FFTを用いた航跡検出法	60
4.4 実測データを用いたアルゴリズム検証	67
4.5 結言	76
第5章 リモートセンシングデータに対する不要応答除去アルゴリズム	77
5.1 序言	77
5.2 VAD法による風向・風速推定における問題点	79

5.3	プラットフォームの動揺補正アルゴリズム	86
5.4	不要応答スクリーニングアルゴリズム	91
5.5	データスクリーニングアルゴリズム検証	98
5.6	結言	104
第6章	結論	105
謝辞		109
参考文献		110
研究業績		124

目次

2.1	レーダで使用される電波の周波数とその周辺の周波数帯	23
2.2	Kaバンド気象ドップラーレーダの外観	24
2.3	ドップラーライダの外観	24
2.4	パルスドップラーレーダの基本構成	26
2.5	ドップラーライダの基本構成	26
2.6	パワースペクトルの模式図	30
2.7	VAD法による風（風向・風速）計測の概念図	33
2.8	DBS法による風（風向・風速）計測の概念図	33
3.1	CAPPI走査モードの概念図	37
3.2	別府湾での観測状況概念図	39
3.3	視程距離の時間変化（別府湾）	40
3.4	降雨強度の時間変化（別府湾）	40
3.5	エコー強度の時間変化（別府湾）	41
3.6	エコー頂高度の時間変化（別府湾）	41
3.7	12時30分付近のエコー画像（別府湾）	44
3.8	22時30分付近のエコー画像（別府湾）	45
3.9	エコー面積の時間変化（別府湾）	46
3.10	悪視程検出アルゴリズムのブロック図	48
3.11	霧（悪視程状況）検証結果（別府湾）	49
3.12	釧路での観測状況概念図	51
3.13	視程の時間変化（釧路）	52
3.14	エコー特徴量の時間変化（釧路）	52
3.15	04時40分付近のエコー画像（釧路）	53
3.16	06時45分付近のエコー画像（釧路）	54
3.17	霧（悪視程状況）検証結果化（釧路）	55
4.1	Kelvin波の模式図	58
4.2	Localized Radon変換の概念図	60

4.3	線分パラメータ推定の流れ	63
4.4	航跡画素とウィンドウの位置関係の模式図	66
4.5	航跡検出前の原画像	68
4.6	提案手法による航跡検出結果	68
4.7	検出性能指標 $T_C(C)$ の分布	74
4.8	雑音を付加した画像例	75
4.9	シミュレーション結果（検出性能）	75
5.1	視線速度の観測誤差により、風向風速推定を誤る状況を示す模式図	82
5.2	高度250mを焦点距離とした場合の S/N の模式図	83
5.3	視線速度の劣化がない場合の風向・風速推定シミュレーション結果	84
5.4	視線速度の劣化がある場合の風向・風速推定シミュレーション結果	85
5.5	浮体式ドップラーライダの装置構成	90
5.6	動揺の定義	90
5.7	浮体式ドップラーライダの機能系統	91
5.8	ドップラーライダで風を計測する際の観測ジオメトリ	94
5.9	不要応答スクリーニングアルゴリズムの概念図	95
5.10	不要応答スクリーニングアルゴリズムの処理フロー	96
5.11	図 5.4 の視線データに対して不要応答スクリーニングアルゴリズムを適用した結果	97
5.12	視線データの25%が劣化した場合の風向・風速推定結果	101
5.13	視線データの50%が劣化した場合の風向・風速推定結果	102
5.14	視線データの75%が劣化した場合の風向・風速推定結果	103

表目次

2.1	S帯、C帯、X帯の比較	23
3.1	Kaバンド気象ドップラーレーダの主要諸元	37
3.2	悪視程時の各霧エコー特徴量の傾向／値域	48
4.1	計算量の比較	71
4.2	シミュレーション条件（検出処理時間）	71
4.3	シミュレーション結果（検出処理時間）	71
4.4	シミュレーション条件（検出性能）	74
5.1	劣化した視線速度を用いた風向・風速シミュレーション諸元	83
5.2	風向・風速推定精度検証シミュレーションパラメータ	100

頭字語

AI	Artificial Intelligence
AMeDAS	Automated Meteorological Data Acquisition System
CAPPI	Constant Altitude PPI
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
DBS	Doppler Beam Swinging
DSD	Drop Size Distribution
FFT	Fast Fourier Transform
GEO	Group on Earth Observations
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse FFT
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LIDAR	Light Detection and Ranging
LOS	Line of Sight
LRT	Localized Radon Transform
PPI	Plan Position Indicator
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
PRT	Pulse Repetition Time
QA4EO	Quality Assurance Framework for Earth Observation
RADAR	Radio Detection and Ranging
RCS	Radar Cross Section
RHI	Range Height Indicator
SAR	Synthetic Aperture Radar
SODAR	Sonic Detection and Ranging
VAD	Velocity Azimuth Display
VVP	Velocity Volume Processing

第1章 序論

1.1 研究の背景及び目的

近年、暴風、豪雨、豪雪、洪水、高潮、地震、津波、噴火などの自然災害は激甚化、頻発化し [1,2]、悪天候・異常気象などを原因とする事故 [3-7]、更には、地政学的要因を背景とする安全保障上の脅威 [8] が増加している。このような我々の安全・安心な社会生活を脅かすリスクに対しては、広範囲に渡り気候変動や環境変化などの継続的なモニタリングを行い、災害・事故の予測や想定、被害抑止・軽減策の検討、予兆となる現象の監視といった事前対策と、災害・事故の発生後は速やかに被害状況の把握や、救助・救援などの応急対応、復旧・復興といった事後対策を講じることが重要である。このような広域性・迅速性が求められる両対策に資する技術として、リモートセンシング技術が期待されている。

リモートセンシング (remote sensing) とは、離れた (remote) 所から直接触れずに対象物を同定あるいは計測 (sensing) し、またその性質を分析する技術である [9]。リモートセンシングという言葉は、1950~1960年代、米国海軍研究所の地理学者を起源とする技術用語で、それ以前に用いられていた写真測量、写真判読、写真地質などを統合した形で提唱された。特に1972年、最初の地球観測衛星 Landsat が打ち上げられてから急速に普及し、今日では、天気予報、漁場予測、資源探査、収穫量予測、森林管理、災害状況把握など、社会活動に直接関係するような分野で用いられている。リモートセンシングという用語は、狭義では上空から地球表面を観測することを意味するが、広義では地上の観測装置で離れた位置の地上または大気を観測することを含む [10]。本研究では広義のリモートセンシングを対象とする。

文部科学省がまとめた「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書では、災害・事故、人の生存を脅かす問題、人為的な脅威に対

し、共通して取り組むべき重点課題として、被害予測・影響評価・脆弱性発見のための解析手法・シミュレーション技術の研究開発、及び、異常を迅速に検知するための計測・センシング技術の研究開発が抽出され、前者では具体的に、自然現象の監視・観測とその社会的影響の予測モデルの研究開発が、後者では、リモートセンシング技術の研究開発が挙げられている [11]。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は、社会課題の解決に向けて、市場、技術、政策の動向を俯瞰的に把握した上で、新たに取り組むべき領域や、追加・加速・融合を図るべき既存領域を提案する NEDO Innovation Outlook Version 1.0 を策定し、その中で、社会インパクトが大きく、優先的に取り組むべき領域として、社会インフラのモニタリング・予測基盤を選定している [12]。

一例として、河川の氾濫や洪水、土砂災害などを引き起こす原因になり、「ゲリラ豪雨」とも呼ばれる局地的大雨や、集中豪雨の発生過程を概観し、観測条件や役割について考える [13, 14]。まず、地表面付近の空気が太陽などで温められ軽くなり上昇を始めることで上昇気流が発生し、空気が上昇気流によって上空に押し上げられ、雲が発生する。その後、下層（地表面付近）へ暖かく湿った空気が流入したり、上層（上空）へ冷たい空気が流入し、大気の状態が不安定になると、上昇気流が強まり雲が成長を続け、積乱雲となり雨を伴うようになる。積乱雲が更に発達を続けると、狭い範囲に短時間で強い雨を降らせ、これが局地的大雨となる。発達した積乱雲は、強い雨の他に、竜巻などの激しい突風、雷、ひょうなど、激しい気象現象をもたらすこともある。一つの積乱雲が発生してから、雨を降らせ消滅するまでの寿命は数十分程度である。一方、集中豪雨は、前線や低気圧などの影響や雨を降らせやすい地形の効果によって、積乱雲が同じ場所で次々と発生・発達を繰り返すことにより発生し、激しい雨が数時間にわたって降り続く。

個々の積乱雲や雷雨、集中豪雨、海陸風や山谷風などの局地風、台風などは水平方向の広がりが2 kmから2000 kmのメソスケールと呼ばれる水平スケールの現象である [15]。主な気象観測手段としては、気象庁が展開する地域気象観測システム・アメダス（Automated Meteorological Data Acquisition System; AMeDAS）があり、地表付近の降水量、風向・風速、気温、湿度の観測を自動的に行っている [13, 16]。アメダスは全国約1300か所に約17 km間隔で設置されている。また、

上空の気圧、気温、湿度、風向・風速などの高層気象観測を行うものとしては、ラジオゾンデがあり [16]、全国 16 か所の気象官署や南極昭和基地において、日本標準時の 9 時及び 21 時に観測を行っている。アメダスやラジオゾンデは継続的に多くの気象要素を取得するものとして欠かせないものではあるものの、その観測範囲は設置位置周辺に限られるため、メソスケールの現象を面的に隙間なくカバーするためには大変多くの観測点を設ける必要があり、対応が困難であると考えられる。それに対して、気象レーダのようなリモートセンサは、広い観測範囲を高い時間及び空間分解能で遠隔計測可能であるため、メソスケールの現象の効率的な把握が可能である [17-19]。ただし、後述するようにリモートセンサで主に用いられる（周波数の高い）電磁波には直進性があるため、遠方では地球の丸みの影響で観測高度が変わったり、見通し外となることがある。また、1 台のレーダのビーム走査によって観測を行う場合には、同じ角度区分でも近傍と遠方とはカバーする領域（面積）が異なる。よって、両者を組み合わせることでお互いのデメリットを補完し、観測の効率化を図る検討も行われている [20,21]。

リモートセンシングでは、対象物からの反射（reflection）または放射（radiation）される電磁波が主として用いられる。これらの電磁波を送受する装置をリモートセンサ（remote sensor）といい、レーダ（Radio Detection and Ranging; radar） [22-30] やライダ（Light Detection and Ranging; lidar） [31-33] などのように自ら観測対象に電磁波を放射し、そこからの反射を受ける能動型のリモートセンサの他、太陽や地表面などから自然に放射される電磁波を観測する受動型のリモートセンサが実用化されている。また、これらのセンサを搭載するものをプラットフォーム（platform）と呼び、航空機や人工衛星、車両、船舶などの移動体や、固定式（地上設置型）のものが用いられている [34,35]。リモートセンシングでは、あらゆる物質は電磁波を受けると、それぞれの種類と性質に応じて、波長に特有の反射または吸収、放射をする性質を利用する。すなわち、リモートセンシングとは、物体から反射または放射される電磁波の固有性に着目し、電磁波を観測して、物体の識別やそれが置かれている環境条件を把握する技術であるといえ、その適用先は、漁業、気象、農業、林業、防災、資源探査、管制、地図作成など、多岐にわたる [36-40]。

電磁波（electromagnetic wave）は、真空中あるいは物質中を電磁場の振動が伝

搬することにより電磁エネルギーを運ぶ波であり、周波数（または波長; 光の速度を波長で除したものが周波数となる）、伝搬方向、振幅及び偏波面（光の場合は偏光面）という4つの要素によって特徴づけられる。周波数（または波長）からは、特にマイクロ波領域では、対象物体とプラットフォームの相対的な動きに関する情報を、周波数上に現れるドップラー効果を用いて得ることができる。伝搬方向からは、電磁波伝搬の直線性にに基づき、物体の空間的な配置を把握することができる。振幅は、電磁波の強さを示すもので、そこから物体の大きさ（断面積）や、空間的な配置・材質などを把握することができる。偏波（偏光）情報からは、物体の幾何学的形状を得ることができる。以上のような電磁波の特性により、降水粒子を観測対象とする気象レーダの場合には、単体で雨滴、雪片、あられ、ひょう、雲、霧といった大まかな種類を把握することができる [26,41-43]。しかし、ここから降水量や視程（目標物を肉眼で識別できる最大距離）といったより実用的な指標を得るには何らかの換算（変換）が必要である。従来、この換算には、取得した電磁波の特性から特徴量を抽出する、ヒューリスティックを含むルールベース型のアルゴリズムが適用されていたが [26, 41]、近年は、AI (Artificial Intelligence) の飛躍的な進展により、大量のデータから自動的に導出する試みも行われている [44-48]。

ここで、パルスドップラーレーダを例に一般的なデータ処理の流れを概観する。パルスドップラーレーダでは、主にマイクロ波帯の周波数をもつ電磁波をパルス状に変調したパルス波を空間に放射し、観測対象によって反射されたパルス波を受信後、距離分解能に対応する所定のサンプリングレートのデジタル信号に変換する。受信後のパルス波の信号強度（電力）は、レーダと観測対象間の相対距離（近いほど強い）や、観測対象の面積（レーダ断面積 (Radar Cross Section; RCS) ; 大きいほど強い）などに応じて変化する。また、観測対象に動き（相対速度）がある場合には、ドップラー効果が生じ、受信後のパルス波の周波数が偏移する。よって、受信後のパルスの強度情報やドップラー周波数情報から、観測対象の有無や動きなどが抽出できる。その後、取得したデータに観測対象以外の物体や雑音が存在する場合や、観測対象が複雑な特性を持つ場合には、検出された物体が所望の観測対象であるか否かを認識・識別する処理を行い、最後に結果を表示・配信する。なお、取得したデータ中に含まれる雑音や、観測対象以外

の物体が存在し、観測対象の検出に支障がある場合にはデータ処理の過程で適宜それらを抑圧する処理を行う。以上は、パルスドップラーレーダのデータ取得からデータ解析（以降、データ処理と総称する）の概要であるが、他の種類のリモートセンサにおいてもほぼ同様の手順となる。

リモートセンシング技術が有用である、すなわち、安全・安心な社会生活を支えるための事前／事後対策に資するためには、リモートセンサ出力であるデータ処理結果が“正しい”ものである必要がある。ここで、データ処理結果が備えるべき特性を、国際写真測量・リモートセンシング学会 ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) がまとめたガイドライン [49] を参考に検討する。このガイドラインは、ISPRS が電気電子学会 IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers)、地球観測衛星委員会 CEOS (the Committee on Earth Observation Satellites)、地球観測に関する政府間会合 GEO (the Group on Earth Observations) などの他の組織によるこれまでの研究、特に CEOS によって構築された地球観測品質保証フレームワーク QA4EO (the Quality Assurance Framework for Earth Observation) や一般的な情報技術分野の成果を基盤として策定したガイドラインをリモートセンシングデータの物理的・技術的特性を加味してに拡張・補完したものである。本研究におけるデータの考え方・扱い方とも合致することから、本研究ではこれを採用することとする。当該ガイドラインでは、Resolution（解像度: 観測の細かさ）、Accuracy（正確性: 真値との一致度）、Completeness（完全性: 観測の網羅度合い）、Redundancy（冗長性）、Readability（可読性）、Accessibility（アクセス可能性）、Consistency（一貫性）の7項目を品質次元（Quality Dimension）、すなわち、データが利用目的にどれだけ適しているか、換言すると“正しい”ものであるかを示す基準としている。これらのうち、Completeness、Readability、Consistency は、現象の可観測性に関するものであり、データが現象を適切に捉えられていること（現象を説明できること）を示す要件と解釈できる。また、Accessibility は、データへの障壁の低さを表すものであるが、文献では迅速性が求められる監視システムにおける時間的、技術的、法的条件が例示されていたことから、本研究ではこれを必要な時に必要な情報が提供される要件と解釈する。最後に、Resolution、Accuracy、Redundancy は、いずれも現象の観測精度に関する要件と解釈できる。以上をまとめると、観測データが備え

るべき条件は、① データが現象を捉えていること（現象を説明できること）、② データの提供が時宜にかなっていること（処理が十分早いこと）、③ データが十分な精度を備えていること（不要なものが含まれていないこと）、の3つに集約できる。

以上の考察から、リモートセンシングシステムには上記の3つの条件を満たすデータを出力するデータ処理が求められると考えられる。以降では、①～③の各条件を満たすデータ処理を明らかにするとともに、課題を抽出する。

まず、①データが現象を捉えていること（現象を説明できること）について考える。前述の通り、取得した電磁波から得られる情報としては、周波数（または波長）、伝搬方向、振幅及び偏波面という4つの要素（以降、パラメータと呼ぶ）がある。このとき、現象を適切に説明するパラメータがこれら4つの中にあれば、現象とパラメータの対応付けは比較的容易である。例えば、観測領域内に所定受信強度以上の目標物があるかないかのみを問題とする場合である。しかし、放射霧、移流霧、滑昇霧（上昇霧）といった霧の種類のように、現象に複数の相・種類があり、電磁波の4つのパラメータのみでは現象を直接説明できない場合や、パラメータの値に規則性が見出せない場合は、データ処理結果と現象との関連が低く、現象を捉えているとは言い難い [50]。このような場合には、現象を説明するための新たなパラメータの導入や、判定ロジック（アルゴリズム）の構築を行う必要がある。本研究では、気象レーダデータを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズムの構築を目的として、雲や霧を観測するのに適した周波数帯である Ka バンド（35 GHz 帯）の気象レーダで霧を観測し、電磁波のパラメータから直接導出することができない、霧による視程の悪化状態の検知を試みる。視程とは、大気の状態によって決まる量で、ある顕著な目標が見え、それが何であるかを識別できる能力を距離で表したものである [51]。

次に、②データの提供が時宜にかなっていること（処理が十分早いこと）について考える。リモートセンシング技術の進展により、観測可能な範囲が拡大し、それに伴い取得データ量も増大している。例えば、先進レーダ衛星の「だいち2号」（ALOS-2、2014年打ち上げ）と「だいち4号」（ALOS-4、2024年打ち上げ）とでは、分解能は同じ（高分解能モードでは3 m）であるが、観測幅は 50 km から 200 km へ 4 倍に、観測頻度は 4 回/日から 20 回/日へ 5 倍に向上している [38,39]。

しかしながら、先進レーダ衛星データの利用用途、すなわち、データ提供タイミングは変わっておらず、これは単純に単位時間あたりのデータ処理量が増加していることを意味している。よって、時宜にかなった情報提供を行うためには、データ処理の高速化（演算量低減）が必要となる。なお、データ処理量の増加とそれに伴うデータ処理の高速化は、合成開口レーダだけでなく、他のリモートセンシングシステムにおいても同様に課題となっている。本研究では、電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズムの構築を目的として、合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar; SAR）の電波画像から、船舶の進行に伴って発生する船舶航跡を高速に自動検出する方式の構築を試みる。

最後に、③データが十分な精度を備えていること（不要なものが含まれていないこと）について考える。データ処理結果の精度が高いというとき、それは物体検出性能が高いことや、物体検出位置やドップラー速度などの推定値と真値との差が小さいことを意味する。これを実現するためには、観測からデータ処理の過程で混入する雑音や干渉波などの誤差要因を取り除く必要がある [52]。上記のような雑音や誤差要因を本研究では不要応答と総称する。したがって、③おける課題は、不要応答の除去である。本研究では、リモートセンシングデータに対する不要応答除去アルゴリズムの構築を目的として、風を計測するドップラーライダーにおいて、プラットフォームの動揺による観測値の誤差を低減する方式、及び、信号対雑音比が低下することで観測データに重畳する誤差要因を低減する方式の構築を試みる。

課題①及び②は、効率的なデータ処理を行うことによって実現され、課題③は、高精度なデータ処理を行うことによって実現される。いずれも観測データの価値を向上させるための施策であり、本研究は、リモートセンシングシステムにおいて、データ処理の高効率化、及び、高精度化を通じて、観測データの価値を向上させ、安全・安心な社会生活の実現を目指すものと言える。

1.2 従来の研究の概観

本節では、リモートセンシングシステムにおけるデータ処理の高効率化及び高精度化に関する従来の研究を概観する。

① 気象レーダデータを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズム

従来、霧の監視は目視または視程計や工業用テレビにより行われている [53]。また、霧予測手法としては、アメダス情報や天気図を基に、霧の判別図や、概念モデル、ワークシートなどを構築し、そこから予測する方法が用いられている [54, 55]。例えば、海霧の場合には、海上で発生した霧が移流して上陸することが知られており、一般に霧の発生及び運動には、メソスケール (mesoscale) といわれる 2~2000 km の中間規模の気象現象が介在していると考えられている [15, 56]。そのため、霧の監視予測においては、ある注目する地点だけでなく、周辺一帯の広い範囲に渡る観測が不可欠である。しかしながら、視程計や工業用テレビは、設置点付近のごく狭い範囲しか観測できないという問題がある。広範囲を観測できるものとしては、地上設置のレーダや衛星搭載赤外センサが挙げられる、衛星により監視可能なものは上方から見た霧または雲の表面のみであり、高度方向の空間的な構造をとらえることができない。以上のことから、霧観測においては、観測範囲が実用上十分に広く、しかも、霧の高度方向を含めた 3 次元空間分布を捉えることができる地上設置のレーダの利用が期待されている [53]。

霧粒は、粒径が数十 μm と雨粒に比べてはるかに小さいため、気象観測で一般的に用いられる C バンド (4~8 GHz 帯) や X バンド (8~12 GHz 帯) などのマイクロ波帯の気象レーダでは観測することが難しい。また、光学系のセンサとして、視程計、ライダ、シーロメータなどがあるが、いずれも霧による光の減衰を利用する方式であるため、霧の動態を把握するために必要な内部構造まで観測することは困難である。以上のような観点から、波長が短く、かつ、大気減衰が比較的小さい Ka バンド帯のレーダが最適と考えられる。浜津らは、粒径の小さな雲や霧を探知することができる Ka バンド気象ドップラーレーダを開発した [57-59]。霧をレーダで観測する場合、そのエコー強度は水滴の粒径と密度に依存する。しかしながら、視程とは必ずしも 1 対 1 には対応しないため、レーダの観測量と霧による視程の悪化とを直接的に対応させるのは難しく、いまだ確立されていない [45, 46, 60]。

② 電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズム

演算量を低減するための自動検出方式の構築に関し、海洋における船舶の管

制・取締りの効率向上を目的として、海面のリモートセンシング画像から航行中の船舶を自動検出する技術が提案されている [61–67]。近年は、デジタル信号処理技術の進歩により、昼夜・天候に関りなく海面の画像を撮ることのできる SAR (Synthetic Aperture Radar; 合成開口レーダ) のリアルタイム画像再生処理が容易に実現できるようになった。そのため、この SAR 画像を用いた航行船舶の自動検出技術の実現に期待が高まっている。SAR 画像から船舶を検出する方法としては、船体そのものを検出する方法と、船舶の進行に伴って現れる航跡を検出する方法とが提案されている。一般に、船体部分は他の部分に比べ輝度が高い反面、散乱波の干渉によって生じる斑点状の雑音であるスペckル雑音などとの識別が困難であることが知られている。一方、航跡部分は、船体よりも画素数が多いので検出が比較的容易であり、船舶の速度や進行方向などの情報が抽出できる利点を有する。

SAR 画像からの船舶航跡検出について、従来の代表的な航跡検出法では、航跡部分を二次元画像中の線分とみなし、Radon 変換や Hough 変換などにより線分部分の画素の濃度値を積分して航跡を検出している [62–66, 68–71]。しかしながら、これらの手法を用いる場合、検出に要する演算量は画像の画素数に比例するため、大量の大規模画像を処理する場合には演算時間が膨大になる。そのため、最初に輝度の高い画素を船体とみなして検出し、次にその周辺の画素に対して Radon 変換などを行うことで、演算量の問題を回避する手法も提案されている [65, 66]。しかし、このような方法では、初段で検出が困難な船体を見逃すことや、誤検出する可能性があり、全体の検出精度が劣化する問題が生じる。近年では、SAR の高機能化を背景とした新たな船舶検出方式の開発 [72]、Radon 変換や Hough 変換以外の方式を用いた航跡検出の改良 [73, 74]、船舶航跡の物理特性を加味したより詳細なシミュレーションの利用 [75]、Radon 変換をベースとした検出方式の改良 [76]が行われている。

③ リモートセンシングデータに対する不要応答除去アルゴリズム

リモートセンシングデータから不要応答を除去するためには、要不要の明確化、すなわち、検出目標とそれ以外の物標の特性の把握が必須であり、一般にこれらは現象のモデル化によって行われる。例えば、“風”のモデル化に関しては、

70年代から航空機事故に繋がるマイクロバーストやウインドシアといった乱気流の研究とデータ蓄積が行われ [3, 4, 77-79]、レーダやライダーの品質管理に利用されている [80-82]。

一方、観測データに重畳し観測精度を劣化させる要因については、特定後に除去する必要がある。観測中にプラットフォームが動揺すると、その影響が観測値に重畳する。観測値に動揺補正に関しては、センサとは別に設けた動揺センサの計測値を用いて観測値の補正を行う方式が開発されている [83-91]。ランダム誤差も観測精度を劣化させる要因である。ランダム誤差に対する一般的な対策は、検出対象である所望信号成分をコヒーレントに積算するコヒーレント積分、もしくは、不要応答の信号成分の分散（標準偏差）を平均化により低減するインコヒーレント（ノンコヒーレント）積分である [26]。ただし、これらの方法が有効なのは、不要応答成分が平均0のガウス分布に従う場合であり、不要応答成分にバイアスがある場合には、効果が大幅に低下することが知られている。また、積算するためのデータが少ない場合にも、十分な積分効果を得ることができず、精度劣化に繋がる。不要応答成分にバイアスがある場合や、積算するためのデータが少ない場合の対策としては、観測対象の性質を阻害しない何らかの仮定を置くことや、先見情報などを利用する方法であるが、一般的な方式は確立されておらず、先に挙げたモデル化やデータ蓄積を通して観測対象特有の性質や、時間的・空間的特性などを利用した不要応答除去方式の検討が行われている [52, 92-97]。

以上のように、本研究で取り上げた3つの課題はいずれも長く検討されているものであり、その間、得られた知見を加味しつつ、ルールベースのアルゴリズムから機械学習をはじめとしたAI技術に至るまで様々な手法を導入しながら進められてきた。しかしながら、いまだ確立（課題解消）には至っておらず、今後も検討は継続されると考えられる。本研究は主に開発初期段階におけるもので、説明性・透明性に重きを置いたルールベースのアルゴリズム構築に関するものであるが、根本的な考え方は近年の関連研究においても継承されている。

1.3 論文の構成

本研究は、リモートセンシング技術によって安心・安全な社会生活を支える、高効率、高精度なデータを得るための実用的なアルゴリズム構築を目的として行ったものである。具体的には、以下のアルゴリズムの検討を行う。

- ① データが現象を捉えていること（現象を説明できること）に関連する、気象レーダデータからを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズム
- ② データの提供が時宜にかなっていること（処理が十分早いこと）に関連する、電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズム
- ③ データが十分な精度を備えていること（不要なものが含まれていないこと）に関連する、リモートセンシングデータに対する不要応答除去アルゴリズム

本論文の構成を以下に示す。

第1章は、序論であって本研究の背景と目的及び構成について述べる。

第2章では、リモートセンシング技術を概観するとともに、第3章から第5章で展開するリモートセンシングシステムにおけるデータ処理の関する課題解消に向けた議論で用いる基本技術について説明する。

第3章では、課題① データが現象を捉えていること（現象を説明できること）に関連する、気象レーダデータを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズムの構築について述べる。霧の発生による視程の悪化は様々な交通障害の原因となることから、霧の動体把握及び発生・消滅・移動予測技術の確立が望まれている。これに対し、粒径の小さな雲や霧などの気象因子を探知することができる Ka バンド気象ドップラーレーダを用いて収集した霧の実観測データから、3つの特徴量（エコー強度、エコー頂高度、エコー面積）を抽出し、それらの論理積と霧によって視程が悪化した状況（以降、悪視程状況と称す）の関係を見出し、悪視程状況検出アルゴリズムとして提案する。エコー強度は、基本電磁波情報として得られる受信強度であり、霧の存在有無に対応する。エコー頂高度は、霧発生時にレーダの方位角及び仰角を走査し3次元ボリューム観測を行った際、最も高高度でエコーが検出された高度であり、霧の高度方向の空間的な存在条件を反映する。エコー面積は、ビームを所定の仰角で水平走査したときに観測されるエコー

の全覆域に対する面積占有率であり、霧の水平方向の空間的な存在条件を反映する。

また、構築したアルゴリズムを、霧発生時のレーダデータに適用し、悪視程状況を適切に判定できることを示す。霧には、発生メカニズムによりいくつかの種類があることが知られているが、別府湾の滑昇霧、釧路湿原の移流霧の双方に対して、適切な判定結果が得られていることから、アルゴリズムの頑健性が示唆されることも併せて示す。

第4章では、課題② データの提供が時宜にかなっていること（処理が十分早いこと）に関連する、電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズムの構築について述べる。近年、海洋における船舶の管制や不審船の監視業務の効率向上を目的として、海洋のリモートセンシング画像から船舶を自動検出する技術が注目されている。船舶を検出する方法としては、船体そのものを検出方法と、船舶の進行に伴って現れる航跡を検出する方法に大別される。前者は画像上の輝度は高いものの占有画素は少ないことから、雑音などとの識別が困難であることが知られている。本研究では、船体に比し検出が容易で、かつ、進行方向などの情報も抽出することができる船舶航跡を検出することとする。

SAR画像において、船舶航跡は背景である海洋部分に対して、明線もしくは暗線として現れることが知られている。そのため、SAR画像からの船舶航跡検出は、二次元画像からの線分検出問題に帰着させることができる。本研究では、2次元FFT（Fast Fourier Transform）と1次元（逆）FFTを順次適用し、周波数空間上で線分を決定する要素である傾きとy切片を推定する方式を提案する。これにより、探索空間を削減することで、演算量が削減され、従来手法よりも10倍以上の高速化が期待できることを示す。また、提案手法は、航跡の画素を積分する効果を有することから、雑音により劣化した画像に対しても有効であることを併せて示す。

第5章では、課題③ データが十分な精度を備えていること（不要なものが含まれていないこと）に関連する、リモートセンシングデータに対する不要応答除去アルゴリズムの構築について述べる。気象レーダが風情報を得るのは降雨時のみであるため、ドップラーライダは晴天時に遠隔の風向・風速を観測できる手段として期待されている [98,99]。ドップラーライダは空気中の塵や埃からなるエアロ

ゾルの動きから、元となる大気中の風情報を得る。エアロゾルからの反射波は非常に微弱であることから、数千～数万ヒットの受信パルスを積算して検出能を高めることが一般的であるが、これは雑音などの不要応答の影響を受けやすいことを意味する。

単一のドップラーライダーを用いて大気の風向・風速を推定する方法としては、取得した複数方向の視線速度（LOS（Line-of-Sight）速度、ラジアル速度）をベクトル合成する手法が用いられる [80,100–103]。1968年にBrowningらによって提案されたVAD（Velocity Azimuth Display）法は、観測領域内の風は一様であるという仮定の下、仰角を固定して方位角方向にビームを走査して得られた視線速度はサインカーブとなる性質を利用し、最小二乗法によるフィッティングにより求めたサインカーブの振幅、初期位相、オフセットから風向・風速を算出するものであり、現在でも広く使われている [80]。しかし、大気中のエアロゾル量の低下、降雨・降雪時などの状況で受信信号の S/N（Signal-to-Noise）比が低下すると、不要応答の影響を受けた視線速度データが増加し、フィッティング精度が劣化し、その結果、風向・風速推定精度も劣化する。

この問題に対し、単純に S/N 比に閾値を設け、劣化した視線速度を除去する対策では、VAD法の実行に必要なデータ数が減少し、フィッティングの精度が劣化する恐れがある。そこで、ドップラーライダーの隣接するレンジの情報を活用することで、データのスクリーニングを行う方法を提案する。これは、ドップラーライダーの高分解能な性質と、風の空間的（特に鉛直方向）の変化は小さいことを利用したものである。シミュレーションにより、総視線数の 25～75%が劣化した場合でも、良好な風向・風速推定結果が得られることを示す。

第6章は、結論であり、本研究の成果と結論の要約を述べる。

第2章 リモートセンシングに関する基本技術

本章では、第3章 気象レーダデータを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズム、及び、第4章 電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズム、及び、第5章 リモートセンシングデータに対する不要応答除去アルゴリズムの各章の前提となるリモートセンシングに関する基本技術について述べる。

2.1 節において、リモートセンシングで多く用いられる電磁波の特性と、それを利用したリモートセンサについて概観し、2.2 節において、リモートセンサとして代表的なパルスドップラーレーダと、ドップラーライダに着目し、それらから得られるパラメータ・特徴量を説明する。

2.1 リモートセンサ概観

リモートセンシング (remote sensing) とは、離れた所から直接接触せずに対象物を同定あるいは計測し、またその性質を分析する技術である [9]。対象物からの情報収集には、対象物からの反射 (reflection) または放射 (radiation) される電磁波が主として用いられる。対象物から反射または放射される電磁波などを受ける装置をリモートセンサ (remote sensor)、センサを搭載する移動体をプラットフォーム (platform) と呼ぶ。

観測手段として電波 (radio wave) を用いるものはレーダ (RAdio Detection And Ranging; radar) と呼ばれ、対象物にある波長の電波を放射し、対象物からの散乱波を受信して、対象物を検知すると共に、対象物の距離を測定する [104–106]。特に、コヒーレントなパルス状の電波を断続的に放射し、対象物の動きによって変化する受信パルスの位相を周波数解析することにより、対象物のドップラー速度 (Doppler velocity) を抽出するレーダはパルスドップラーレーダと呼ばれ、大気・気象、車両、航空機、船舶など、様々な対象を観測する目的で用いられている。本研究では、リモートセンサとして、降水粒子を対象物として雨量強度、

風向などを取得する気象レーダ [41, 107]、衛星や航空機に搭載し、地表面や海面の電波画像を得る合成開口レーダ、大気中の風に乗って動くエアロゾル（塵や埃）を対象物として、観測対象範囲の風速や風向を取得するドップラーライダー（Doppler lidar）を取り上げる [31, 98, 99]。リモートセンサには、他に、音や赤外線などを感知するセンサ、光学カメラなどがあり、計測対象によって使い分けられている。なお、「レーダ」などの表記について、内閣告示第二号（H3.6.28）「外来語の表記」によれば「レーダー」と長音符号を用いた表記が原則であるが、慣用に応じて省くことも許されており、学会・機関によって対応が異なるのが実情である。本論文では、「レーダ」「ライダー」「センサ」のように長音符号を省くことを原則とする。

図2.1に、レーダで使用される電波の周波数とその周辺の周波数帯を示す [26]。HF (3~30MHz)・VHF (30~300MHz)・UHF (300~1000MHz)帯の主な用途は、地表面に沿って電波が伝搬する地表波や電離層反射を利用して見通し外を探知するOTH (Over The Horizon) レーダや大気・海洋観測、超長距離探索に、L (1~2GHz)帯は、長距離探索や航空路管制、大気観測に、S (2~4GHz)帯は、中距離探索や航空管制、広域気象観測に、C (4~8GHz)帯は、長距離追尾や気象観測に、X (8~12GHz)帯は、短距離追尾や気象観測に、Ku (12~18GHz)帯は、高解像衛星高度計測に、K (18~27GHz)帯は、空港面監視に、Ka (27~40GHz)帯は、近距離追尾や気象観測に、V (40~75GHz)・W (75~110GHz)帯はその他のリモートセンシング（W帯は雲観測にも用いられる）である [26, 106]。周波数帯は“C帯”もしくは“Cバンド”、“C-band”のように表記され、本研究においても区別しないこととする。表2.1に、S帯、C帯、X帯の比較をそれぞれ示す [108]。実際には、C帯の場合 5.250~5.3725 GHz のように、上記周波数帯の中で更に気象レーダ用途に使用可能な周波数帯が存在する [109]。日本においては、周波数資源が逼迫していることもあり、総務省による周波数割り当ての見直しが積極的に行われている。

一般に、気象レーダという場合、日本ではC帯や、X帯、海外（特に赤道域や米国）では広域の台風やトルネードといった“シビアウェザー”に対応するため波長の長いS帯 (7.5cm~15.0cm) の電波を用いて、雨滴を観測するレーダを指すが、本研究（第3章）では、C帯 (3.75cm~7.5cm) や、X帯 (2.5cm~3.75cm) よりも波長の短いKa帯 (0.75cm~1.11cm) の電波を用いて、雨滴よりも小さな霧・雲・氷晶など

の観測に適したレーダを取り上げる [57-59,110]。図2.2に、本研究においてデータ取得に使用した Ka 帯気象ドップラーレーダ（京都大学保有）の外観を示す。気象レーダは、地上設置型、車載型、航空機搭載型、船舶搭載型などがあるが、同図の Ka 帯気象ドップラーレーダは、様々な地域での観測を考慮した車載型としており、トラックの荷台に搭載した、電波を送受信するアンテナと、送受信機や信号処理装置、モニタを含むコンテナで構成される。

衛星に搭載した合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR) は、電波の透過性を利用することで昼夜・天候を問わず対象物（地表、海洋）の高分解能な電波画像（SAR画像）を取得することができる [9,37-39]。周波数としては、L帯、S帯、C帯、X帯がよく用いられる。一般に、アジマス方向（方位方向）の分解能は波長を λ 、距離を r 、アンテナ径を D_A として $\lambda r/D_A$ で表すことができる。SARでは、プラットフォーム（人工衛星や航空機）が移動することで仮想的に大きなアンテナ径を形成することにより、高分解能化を実現している。SARは、災害発生時の被害状況把握や、地盤・構造物の変状検知、土地利用モニタリング、資源探査、海洋監視などに利用されている。

風観測用の（ドップラー）ライダは、光学領域の電磁波（光波）を用いて大気中の風の挙動を計測するセンサであり [31]、光波レーダやレーザーレーダとも呼ばれる。図 2.3 に、可搬型のドップラーライダの外観を示す [32, 98, 99]。図 2.3 のドップラーライダは、三脚に載せた光アンテナと車内に設置した光送受信機及び信号処理装置という構成である。なお、大気中の風の挙動を把握するものには他に、音波を用いるドップラーソーダ (Doppler sodar; Doppler Sonic Detection and Ranging) や、電波を用いるウィンドプロファイラ (wind profiler) がある。ドップラーソーダは、音波を大気中に発射し、風によって生じる大気の粗密によって反射される音波を計測することで風を観測する。ウィンドプロファイラは、大気中に電波を発射し、風による大気の乱れによって反射される反射波を計測することで風を観測する [26,111]。

以上のように、霧、海表面、大気中の風のように、異なる対象・現象であっても、同じ電磁波で観測することが可能であり、それを区分しているものは、周波数（波長）のみと言える。本研究では、霧を観測するセンサとして、Ka帯の気象レーダを、船舶航跡を捉えた電波画像を得るセンサとして、L帯のSARを、大

気中の風情報を得るセンサとして、波長1.5 μmのドップラーライダーを、それぞれ取り上げる。

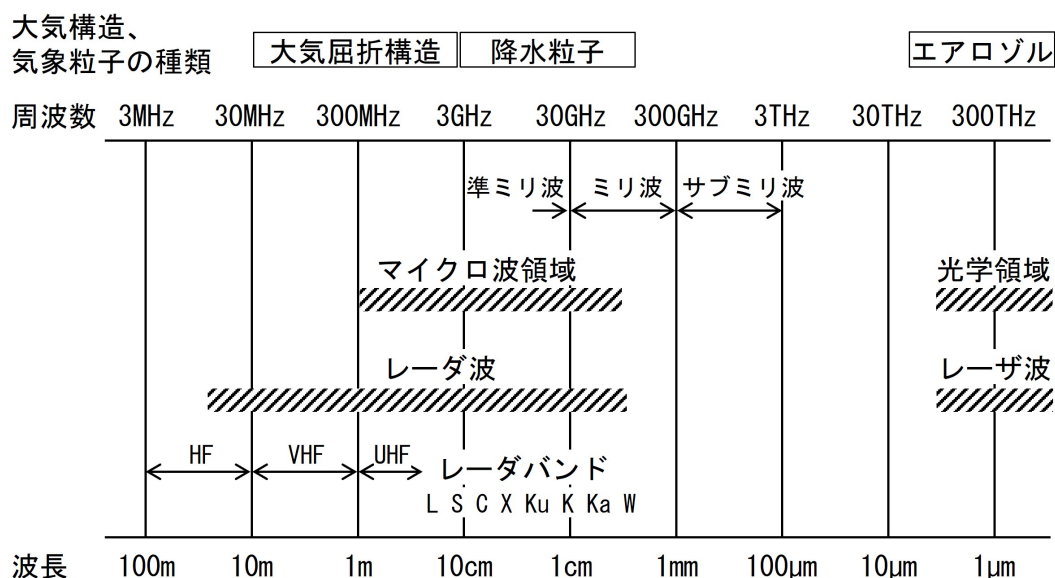


図 2.1 レーダで使用される電波の周波数とその周辺の周波数帯
(文献 [26] 図 1.2 を改変)

表 2.1 S 帯、C 帯、X 帯の比較
(文献 [108] を改変)

周波数帯	メリット	デメリット
S	<ul style="list-style-type: none"> 降雨減衰が小さい ドップラー速度の検出範囲が広い 	<ul style="list-style-type: none"> 高い角度分解能を得るには大型のアンテナが必要 大量の電力供給が必要 堅牢なタワーが必要 初期費用と維持費が高い
C	<ul style="list-style-type: none"> 降雨減衰は中程度（二重偏波利用により減衰効果を軽減可能） 中型アンテナで十分 十分な覆域 費用対効果が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 非常に激しい雨では減衰する ドップラー速度の検出範囲は中程度
X	<ul style="list-style-type: none"> 小型のアンテナでも高い角度分解能が得られる 雪や弱い雨も捉えることができる システムを小型化できる 	<ul style="list-style-type: none"> 降雨減衰が大きい 観測範囲が狭い



図 2.2 Ka バンド気象ドップラーレーダの外観（京都大学保有）



図 2.3 ドップラーライダの外観

図 2.4 に、一般的なパルスドップラーレーダの基本構成を、図 2.5 に、一般的なドップラーライダの基本構成をそれぞれ示す。パルスドップラーレーダでは、送信時、送信機において基準信号をパルス状に変調し増幅したものを送受切換器からアンテナ（空中線）へ送り、その後大気中に放射する。受信時はアンテナで受けた散乱波を送受切換器から受信機に送り、基準信号の位相との差を取り出す（位相検波）。その後、距離分解能に相当する時間間隔でサンプリング（A/D 変換）し、時系列複素信号とする。時系列複素信号に対しては、適宜前処理としてデータ補正やノイズ除去を行った後、受信強度、ドップラー速度、スペクトル幅といったモーメントの算出や、受信強度を輝度に変換し電波画像として再生を行う。続いて、データ解析処理として、例えば、霧（悪視程）の検出、船舶航跡の検出、風速場の推定などを行い、結果を表示するとともに、他のシステムへ伝送・保存などを行う。一方、ドップラーライダでは、送信時、単一で狭線幅の基準光の一方をパルス変調及び増幅後、送受切換器を通して光アンテナから大気中に放射する。受信時はアンテナで受けた散乱光を送受切換器から光受信機へ送り、基準光源からのもう一方の出力をミキシングし、周波数差を抽出する（ヘテロダイン検波）。その後、信号処理／データ処理装置では、フーリエ変換後のスペクトルに対してパルスドップラーレーダと同様に、データ補正、ノイズ除去といった前処理、受信強度、ドップラー速度、スペクトル幅などのモーメントを算出した後、風速場の推定、乱気流の検出、雲底の推定といったデータ解析を行い、結果を表示するとともに、他のシステムへ伝送・保存などを行う。以上のように、レーダとライダの処理は共通する部分も多いことから、データ処理においても同様に適用できるものが多く、以降では第3で霧レーダ、第4で電波画像（合成開口レーダ）、第5でドップラーライダを取り上げるものの、データ処理の観点からは多くが適用可能である。

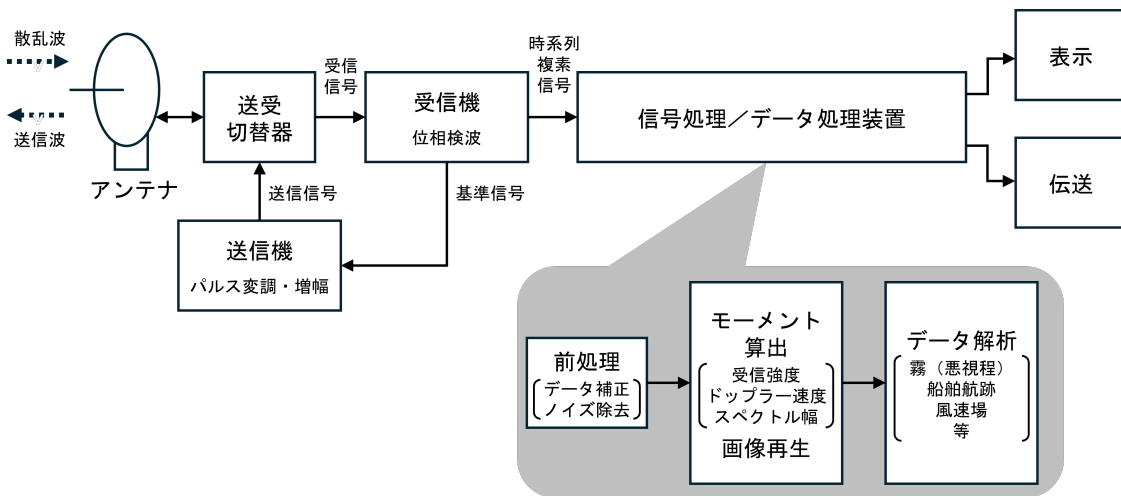


図 2.4 パルスドップラーレーダの基本構成

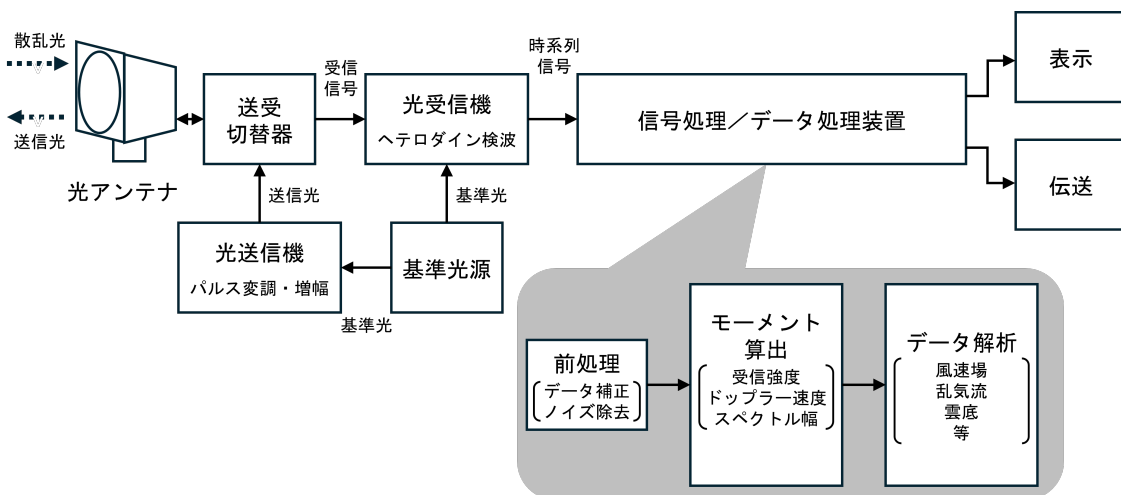


図 2.5 ドップラーライダーの基本構成

2.2 レーダ／ライダから得られる基本的なパラメータ

パルスドップラーレーダ (pulse Doppler radar) やパルスドップラーライダ (pulse Doppler lidar) では、対象物までの距離 (range) r は、アンテナ (空中線) から放射されたパルス状の電波が対象物で後方散乱されて散乱信号となり、再びアンテナで受信されるまでの時間 t から式(2.1)によって求められる [37,37,107]。

$$r = \frac{ct}{2} \quad (2.1)$$

ここで、 c は光速である。また、観測できる最大距離 r_a は、送信パルスがその距離を往復するのに要する時間で決まり、パルス繰返し時間 (pulse repetition time; PRT) を T 、パルス繰返し周波数 (pulse repetition frequency; PRF) を f_p とするとき式(2.2)で与えられる。

$$r_a = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2f_p} \quad (2.2)$$

一方、対象物のドップラー速度は、レーダの送信周波数と受信周波数の差 (周波数偏移) を検出すれば、パルス間の受信信号の位相の変化を推定できるため、ドップラー効果を利用して求めることができる。送信波長 λ のレーダから距離 r に存在する対象物までの往復距離を波長で規格化すると $2r/\lambda$ であり、このときの位相は 2π を乗じた $4\pi r/\lambda$ [rad] となる。したがって、送信信号の初期位相を φ_0 [rad] とすると、受信信号の位相 φ [rad] は式(2.3)のように表される。

$$\varphi = -\frac{4\pi r}{\lambda} + \varphi_0 \quad (2.3)$$

このとき、位相の時間変化 (微分) はドップラー周波数 f_d 、更に、距離 r の時間変化はドップラー速度 v_d の関係を用いると、式(2.4)を得る。

$$\frac{d\varphi}{dt} = 2\pi f_d = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{dr}{dt} = -\frac{4\pi v_d}{\lambda} \quad (2.4)$$

測定可能なドップラー周波数 f_{dmax} は、サンプリング定理により、レーダのパルス繰返し周波数 $f_p = 1/T$ の半分となることから式(2.5)の関係となる。

$$f_{dmax} = \frac{f_p}{2} = \frac{1}{2T} \quad (2.5)$$

ドップラー周波数 f_d が f_{dmax} を超える場合は、レーダで測定される周波数に折り返し（周波数エイリアシング）が生じる。折り返しなく測定できるドップラー速度はナイキスト速度 v_N と呼ばれ、式(2.6)となる。

$$v_N = \frac{\lambda}{4T} = \frac{\lambda f_p}{4} \quad (2.6)$$

このとき、式(2.2)と式(2.6)から、 r_a と v_N には次式の関係がなり立つ。

$$v_N r_a = \frac{c\lambda}{8} \quad (2.7)$$

これは“Doppler Dilemma”とも呼ばれるもので、一定のパルス繰り返し周波数のレーダでは、ナイキスト速度 v_N と最大観測距離 r_a を同時に大きくすることはできないことを意味する [20]。

次に、レーダの送信電力に対する受信電力の関係を表すレーダ方程式について説明する。孤立型標的（大きな単一目標）のレーダ方程式は次式のように表される。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma \quad (2.8)$$

式(2.8)において、 P_t は送信電力を、 P_r は受信電力を、 G はアンテナによる電波の集中度合いを示す指標であるアンテナ利得を、 σ は標的の面積（後方散乱断面積）を表す。

雨粒のような離散分布型標的（空間に分布するレイリー散乱が適用できる小さな目標）の場合には、散乱体積と呼ばれるレーダのビーム幅とパルス幅で決まる円筒形の空間内に含まれる降水粒子からの散乱の総和と考える。散乱体積内の微小散乱断面積の総和 $\sum \sigma_i$ は、散乱体積 V_{ol} とレーダ反射率（radar reflectivity）と呼ばれるパラメータ η （単位 m^{-1} ）の積で定義される [26]。このとき、式(2.8)は次式のように表現される。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} V_{ol} \eta \quad (2.9)$$

散乱体積 V_{ol} は、パルス幅 τ 、ビーム幅 θ を用いて式(2.10)のように、また、レーダ反射率 η は、散乱体がどの程度電波を散乱させるかを示すパラメータである誘導係数 $|K|^2$ と、気象レーダに特有なパラメータであるレーダ反射因子 Z （radar reflectivity factor）を用いて式(2.11)のように表せることが知られている [26,107]。

$$V_{ol} = r^2 \frac{c\tau}{2} \frac{\pi\theta^2}{8 \ln 2} \quad (2.10)$$

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} Z \quad (2.11)$$

レーダ反射因子 Z は次式のように定義されるもので、 D は粒子径（単位: mm）、 $N(D)$ は粒径分布（drop size distribution; DSD、単位: m^{-4} ）、 D_{min}, D_{max} はそれぞれ単位体積中の粒子径の最小値及び最大値である。レーダ反射因子 Z の単位は $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ であり、 dBZ のように対数表示するのが一般的である。式(2.12)は、雨粒のような降水因子の受信強度は直径の6乗に比例することを意味する [26, 41]。

$$Z \equiv \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^6 N(D) dD$$

よって、式(2.10)と式(2.11)を式(2.9)に代入し、離散分布型標的に関するレーダ方程式を得る。

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t G^2 c \tau \theta^2 |K|^2 Z}{2^{10} \ln 2 \lambda^2 r^2} \quad (2.12)$$

気象レーダでは、受信信号から得られる受信強度（電力）をレーダ反射因子に変換したものを、経験的な変換式（ $Z-R$ 関係）を用いて降水強度 R を導出する。

気象レーダや、ドップラーライダにおいては、対象物である降水粒子（雨滴・雹・霰など）やエアロゾル（塵や埃）からの反射信号は雑音や非対象物などに比して微弱であるため、複数の受信パルスに対してFFT (Fast Fourier Transform) を適用した後、積分効果（インコヒーレント／ノンコヒーレント積分）を利用し検出能を高めることが一般的である。対象物が様々な粒径を持つ降水粒子やエアロゾルの場合や、複数のパルスを送受信する間に対象物の動きが変動する場合には、FFT適用後に得られるパワースペクトル内には様々なドップラー速度が存在することになる。このような場合には、周波数偏移の平均値である平均ドップラー速度を求めるのが通例である。平均ドップラー速度は、モーメント法を用いることで容易に算出することができ、パワースペクトルの0次モーメント（面積）は受信強度、1次モーメント（重心）はドップラー速度、2次モーメントはスペクトル幅（速度幅）となる [26]。図2.6に、パワースペクトルの模式図を示す。3次以上の高次モーメント情報を抽出することも可能であるが、降水粒子やエアロゾルなど、微弱な反射信号をターゲットとする気象レーダや、ドップラーライダにおいて、安定して得られ、かつ、有用性が高いものは、受信強度、ドップラー速度、スペクトル幅の3種類である。

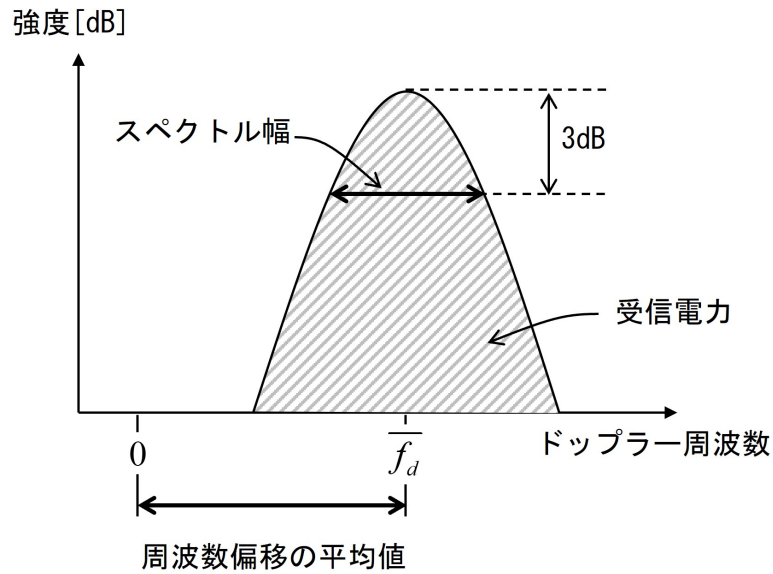


図 2.6 パワースペクトルの模式図

次に、レーダで観測したドップラー速度から風ベクトルへの変換について考える。レーダで直接得られるドップラー速度は、電波を放射した方向（視線方向）の速度であり、視線速度（ラジアル速度、LOS (Line-of-Sight) 速度）と呼ばれる。3次元空間内の速度情報を得るためには、異なる3方向以上で視線速度を計測し、直交する3軸方向（気象の場合は、水平面内の東西方向、南北方向と、鉛直方向の3軸）の成分を推定する必要がある。

同じ領域をそれぞれ設置位置の異なる複数台のレーダで観測することにより、3次元風速を取得することは可能であるが、同期をとって観測し合成するのは手間のかかることであり、また観測可能範囲も単一レーダの探知範囲よりも狭いものとなる [93]。

これまで単一のレーダで3次元風速を推定する方式がいくつか考案されており、ここでは代表的なVAD法とDBS法について取り上げる。

VAD (Velocity Azimuth Display) 法は、観測空間内の風（風速・風速）が一様との仮定の下、単一のドップラーレーダで仰角を固定して得られる視線速度はサインカーブを描くことを利用して、3軸成分を推定する手法である [52, 80, 92, 94, 95]。図2.7に、VAD法による風（風向・風速）計測の概念図を示す。

風の3軸成分を (u, v, w) と置くととき、仰角 θ 、方位角 ϕ の視線速度 V_{los} は、式

(2.13)のように表すことができる。

$$V_{los} = u \cos \phi \cos \theta + v \sin \phi \cos \theta + w \sin \theta \quad (2.13)$$

式(2.13)において、 $A = u \cos \theta, B = v \cos \theta, C = w \sin \theta$ と置くと、式(2.13)は式(2.14)のように変形でき、サインカーブを成していることがわかる。

$$V_{los} = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\phi + \alpha) + C, \left(\cos \alpha = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \sin \alpha = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right) \quad (2.14)$$

なお、一様な水平風、鉛直風が存在する環境下では、図 2.7 右側の横軸を方位角、縦軸を視線速度としたグラフ上にプロットした 1 周期分のサインカーブの振幅が水平風速に仰角の余弦をかけたものを、極小となる位相が風向を、サインカーブのオフセットに仰角の正弦をかけたものが鉛直風をそれぞれ表す。実際の観測では、ドップラーライダーの視線速度は未知パラメータ数 (3)) 以上得られることが多く、また、平均化によるランダム誤差低減効果を狙い、以下のように最小二乗法を用いて解くことが多い。求める風ベクトルを $\mathbf{V} = (u, v, w)^T$ に対し、任意の視線速度 V_{los} は、 $\mathbf{e} = (\alpha, \beta, \gamma)^T$ を単位ベクトルとして $V_{los} = u\alpha + v\beta + w\gamma$ と表現できる。このとき、実際に取得した n 本の視線速度 $V_{obs,i}$ との差の二乗和

$$\Psi = \sum_{i=1}^n (V_{los} - V_{obs,i})^2$$

を最小とするベクトル \mathbf{V} が、求める風ベクトルとなる。 Ψ が極小値を持つ条件から、独立変数 u, v, w それぞれについて偏微分したものは次式のように置くことができる。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial w} = 0$$

これを展開して整理することにより、式(2.15)のように風ベクトル \mathbf{V} を求めることができる。

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 & \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i & \sum_{i=1}^n \gamma_i \alpha_i \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i & \sum_{i=1}^n \beta_i^2 & \sum_{i=1}^n \beta_i \gamma_i \\ \sum_{i=1}^n \gamma_i \alpha_i & \sum_{i=1}^n \beta_i \gamma_i & \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n V_{obs,i} \alpha_i \\ \sum_{i=1}^n V_{obs,i} \beta_i \\ \sum_{i=1}^n V_{obs,i} \gamma_i \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

ただし、 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)^T$ ($i = 1, 2, \dots, n$) は任意の視線方向の単位ベクトルである。式(2.13)より、 $\alpha_i = \cos \phi_i \cos \theta$, $\beta_i = \sin \phi_i \cos \theta$, $\gamma_i = \sin \theta$ であることから、これらを式

(2.15)に代入すると、次の式(2.16)を得る。

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \cos^2 \phi_i \cos^2 \theta & \sum_{i=1}^n \sin \phi_i \cos \phi_i \cos^2 \theta & \sum_{i=1}^n \cos \phi_i \sin \theta \cos \theta \\ \sum_{i=1}^n \sin \phi_i \cos \phi_i \cos^2 \theta & \sum_{i=1}^n \sin^2 \phi_i \cos^2 \theta & \sum_{i=1}^n \sin \phi_i \sin \theta \cos \theta \\ \sum_{i=1}^n \cos \phi_i \sin \theta \cos \theta & \sum_{i=1}^n \sin \phi_i \sin \theta \cos \theta & \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n V_{obs,i} \cos \phi_i \cos \theta \\ \sum_{i=1}^n V_{obs,i} \sin \phi_i \cos \theta \\ \sum_{i=1}^n V_{obs,i} \sin \theta \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

DBS (Doppler Beam Swinging) 法は、VAD法よりも少ないビーム数で実現でき、ドップラーライダーやウインドプロファイラなどで採用されている [96, 102, 103]。図 2.8 に、DBS 法による風計測の概念図を示す。DBS 法では、図 2.8 のように、東 (E) 西 (W) 南 (S) 北 (N) 方向の斜方ビームと、鉛直 (V) 方向の 5 本、もしくは、斜方ビームのみの 4 本で風を計測する。このとき、風速の鉛直成分がビーム走査範囲内で一定であると仮定すれば、それぞれ東向き及び西向きビームの視線方向速度成分である V_E 及び V_W は、鉛直方向の平均風速成分 w 及び水平面内の東向き風速成分 u を用いて次式のように表される。

$$V_E = w \sin \theta + u \cos \theta \quad (2.17)$$

$$V_W = w \sin \theta - u \cos \theta \quad (2.18)$$

これを u について解けば式(2.19)が得られる。

$$u = \frac{V_E - V_W}{2 \cos \theta} \quad (2.19)$$

同様に、北向き及び南向きビームの視線方向速度成分である V_N 及び V_S は、鉛直方向の平均風速成分 w 及び水平面内の東向き風速成分 v を用いて次式のように表される。

$$V_N = w \sin \theta + v \cos \theta \quad (2.20)$$

$$V_S = w \sin \theta - v \cos \theta \quad (2.21)$$

これを v について解けば式(2.22)が得られる。

$$v = \frac{V_N - V_S}{2 \cos \theta} \quad (2.22)$$

最後に、鉛直方向の平均風速成分 w は、式 (2.17)(2.18)(2.20)(2.21) を用いて、次式のように求めることができる。なお、鉛直ビームを使用している場合は直接 $w = N_V$ のように鉛直方向の平均風速成分 w を求めることもできる。

$$w = \frac{V_N + V_E + V_S + V_W}{4 \sin \theta} \quad (2.23)$$

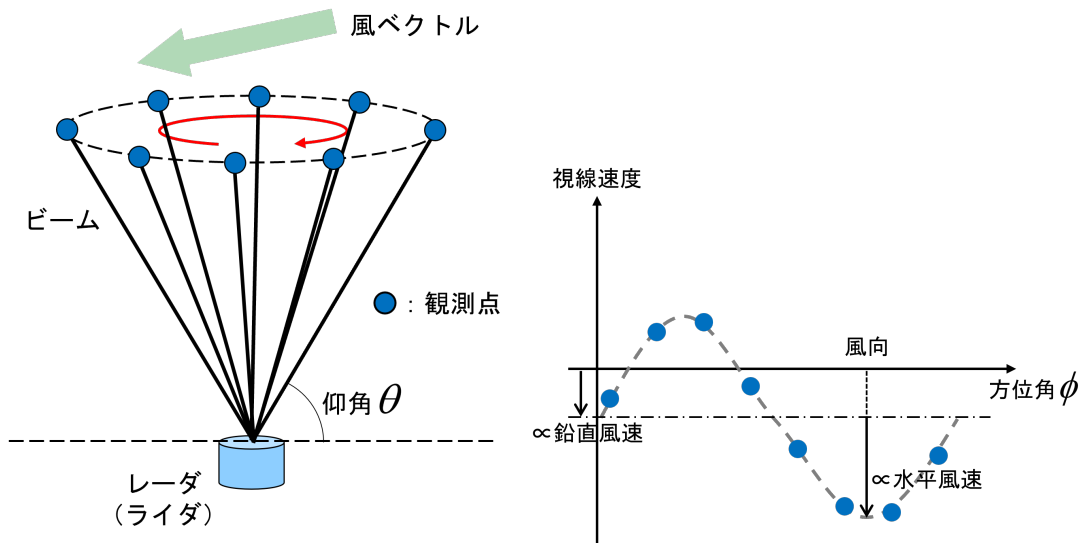


図 2.7 VAD 法による風（風向・風速）計測の概念図

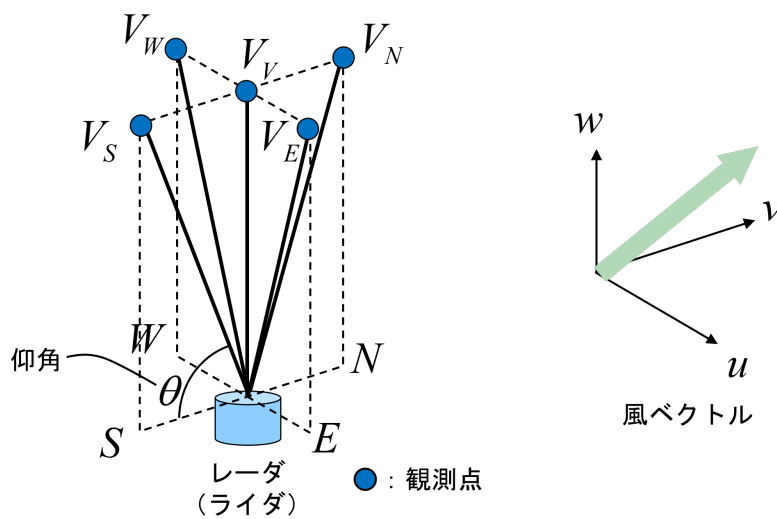


図 2.8 DBS 法による風（風向・風速）計測の概念図

第3章 気象レーダデータを用いた霧による 悪視程自動判定アルゴリズム

3.1 序言

本章では、霧の発生によって視程が悪化した状況（以降、悪視程状況と称す）の自動検出方式の確立を目的として、まず、霧のレーダ観測結果と霧発生の関係を論じ、レーダデータから抽出した特徴量であるエコー強度・エコー頂高度・エコー面積を用いた、悪視程状況の検出アルゴリズムを提案する。併せて、実測データに対し、本提案法による悪視程状況検出処理を行い、その有効性を示す。

空港、港湾、道路などで霧が発生すると、視程が悪化し、交通障害の原因となる。そのため、霧の動態把握や発生・消滅・移動予測技術の確立が望まれている。霧は、ごく小さな水滴が大気中に浮遊する現象であり、地上に発生した雲と考えることができる。また、発生する地域、季節などにより様々な様相を呈することが知られている。そのため、事前に霧の特性を把握し、発生する霧の種類に合わせた検出及び予測手法を開発することが必要である [45, 46, 55, 60, 112–116]。

従来、霧の監視は目視または視程計や工業用テレビにより行われている [53]。また、霧予測手法としては、アメダス情報や天気図を基に、霧の判別図や、概念モデル、ワークシートなどを構築し、そこから予測する方法が用いられている [54, 55]。例えば、海霧の場合には、海上で発生した霧が移流して上陸することが知られており、一般に霧の発生及び運動には、メソスケールといわれる中間規模の気象現象が介在していると考えられている [56]。そのため、霧の監視予測においては、ある注目する地点だけでなく、周辺一帯の広い範囲に渡る観測が不可欠である。しかしながら、視程計や工業用テレビは、設置点付近のごく狭い範囲しか観測できないという問題がある。広範囲を観測できるものとしては、地上設置のレーダや衛星搭載赤外センサが挙げられる。衛星により監視可能なものは上方から見た霧または雲の表面のみであり、高度方向の空間的な構造をとらえるこ

とができない。以上のことから、霧観測においては、観測範囲が実用上十分に広く、しかも霧の高度方向を含めた3次元空間分布を捉えることができる地上設置のレーダの利用が期待されている [23,53]。

霧粒は、粒径が数十 μm と雨粒に比べてはるかに小さいため、気象観測で一般的に用いられるCバンドやXバンドなどのマイクロ波帯の気象レーダでは観測することが難しい。また、光学系のセンサとして、視程計、ライダ、シーロメータなどがあるが、いずれも霧による光の減衰のため、霧の動態を把握するために必要な内部構造まで観測することは困難である。以上のような観点から、波長が短く、かつ、大気減衰が比較的小さいKaバンド帯のレーダが最適と考えられる [28, 47, 117–119]。浜津らは、粒径の小さな雲や霧を探知することができるKaバンド気象ドップラーレーダを開発した [58, 59]。霧をレーダで観測する場合、そのエコー強度は水滴の粒径と密度に依存する。しかしながら、視程とは必ずしも1対1には対応しないため、レーダの観測量と霧による視程の悪化とを直接的に対応させるのは難しい。そこで、レーダによる観測結果と霧の特性との関係究明、更に検出アルゴリズム構築を目的として、各地で霧観測を行い、実観測データの蓄積及び解析が行われている [58, 110]。

以下、3.2節において、Kaバンド気象レーダを用いた霧観測試験の概要について説明し、3.3節において、実観測データに基づいて構築した悪視程状況判定アルゴリズムを示す。その後、3.4節において、3.2節で用いたのとは別の場所で観測した実観測データを用いた悪視程状況判定処理を行い、3.3節で提案した手法の有効性を検証する。

3.2 Kaバンド気象ドップラーレーダによる霧の観測

表3.1に、Kaバンド気象ドップラーレーダの主要諸元を示す。以降、Kaバンド気象ドップラーレーダを霧レーダ／雲霧レーダと称することがある。気象レーダでは、受信強度として、 1 m^3 に含まれる降水粒子の直径の6乗の和で定義され、降雨強度に変換されるパラメータであるレーダ反射因子Z（単位：dBZ）が用いられる。霧レーダの最小検出レーダ反射因子は、単位体積中の雲粒の含水量である雲水量 0.15 g/m^3 の一様な霧が存在する状況下では、距離1 kmで約 -50 dBZ 、距離

3.5 kmで約 -35 dBZとなる [57-59]。

次に、観測方法について考える。霧レーダでは、空中線の放射ビームを走査することで観測値の空間分布を得ており、PPI (Plan Position Indicator)、RHI (Range Height Indicator) といった7つの走査モードがある [58]。霧の監視及び予測に際しては、全方向に広い観測範囲を持ち、かつ、霧の内部構造を把握する必要があると考えられる。よって、ビームを各仰角で水平走査し、仰角を順次変えることによって立体的に走査するCAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 走査モードを採用する。図 3.1 に、CAPPI 走査モードの概念図を示す。同図において、半球底面の中心がレーダ位置である。また、一般に、霧エコーの受信強度は弱いことから、数パルスのインコヒーレント積分による検出能向上が必須であり、高速に走査することは困難である。一方で、走査速度が遅い場合は、時間分解能が低下するデメリットが考えられる。以上を踏まえて、以降に示す別府湾及び釧路での観測試験では、水平走査速度を1 rpm、CAPPI観測時の仰角数を3~4とした。

表 3.1 Ka バンド気象ドップラーレーダの主要諸元

項目	値/内容
送信周波数	34.75 GHz (Ka バンド)
パルス幅	0.5 μ s
パルス繰り返し周波数	450 pps/4500 pps (ダブルパルス送信)
受信サンプリング間隔	0.83 μ s
空中線方式	カセグレン (直径 2m)
ビーム幅	0.3°
空中線走査範囲	方位角方向 0~360° 仰角方向 -2~92°
空中線回転速度	方位角方向 2.4°/s~36°/s 仰角方向 3°/s~6°/s
最小受信感度	-98 dBm
方位平均化区分	0.352°(360°/ 1024)
インコヒーレント積分数	26 (1 rpm で水平走査時)

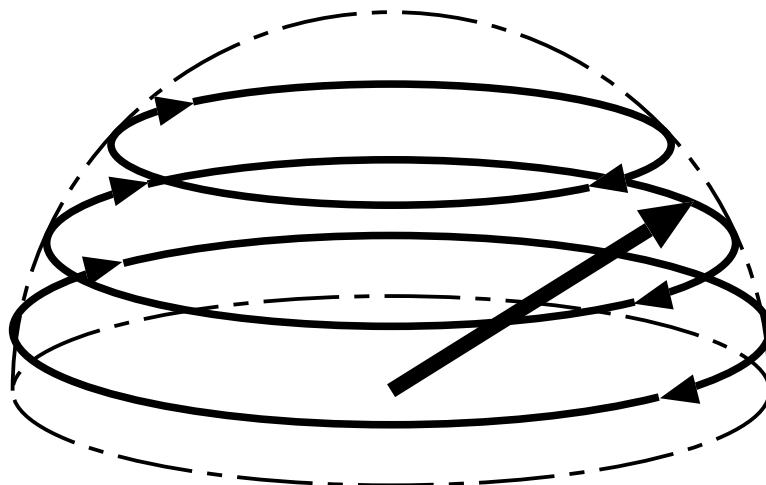


図 3.1 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator) 走査モードの概念図

3.3 霧による悪視程状況検出アルゴリズム

本節では、大分県別府湾で取得した実観測データを用いて、レーダエコーと視程計による観測値とを対比させながら、レーダエコーから悪視程と関係のある特徴量を抽出し、悪視程状況検出アルゴリズム（以降、霧検出アルゴリズム）を構築する。

別府湾での観測試験では、周りを山々で囲まれたなだらかな丘陵の中腹にあたる、海拔高度約 400 m、別府湾から距離約 3000 m の大分自動車道別府湾サービスエリア駐車場に運転席を北向きしてレーダ車両を設置した。運転席から見て車両の左側、すなわち、南西から北北東にかけては、レーダ車両運転席及び建造物、山の斜面による死角となるものの、車両の右側（ほぼ東側）は別府湾を臨む広い見通しが確保されている。この地域の霧は、滑昇霧（上昇霧）及び移流霧に分類され、実験時はレーダ設置位置を含む山の斜面に吹き溜りのように分布する滑昇霧が発生した [15]。図 3.2 に、別府湾での観測状況概念図を示す。

別府湾で発生する滑昇霧は地表面の影響を受けて発生するため、特に地表面付近の観測が必要であると考えられる。また、先行研究では、霧発生時は、雲頂高度がほぼ一定に分布する特徴が現れると報告されている [110]。以上により、別府湾では、仰角を 0.6、2.0、4.9、20.0° に設定し、低高度から雲頂高度までを観測した。このとき、最低仰角 0.6° では、ほぼ霧の壁面を観測することになる。

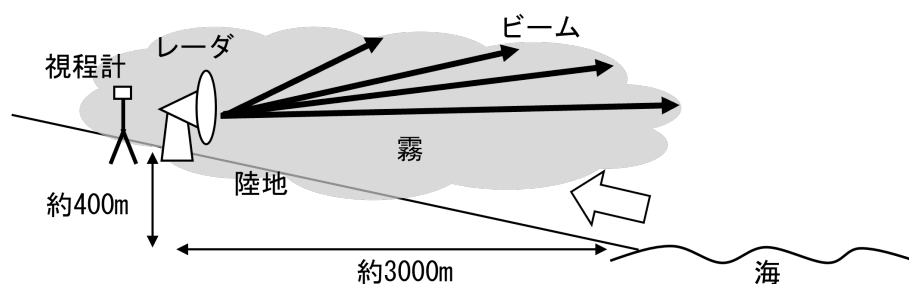


図 3.2 別府湾での観測状況概念図

3.3.1 エコー特徴量の時間変化

図 3.3 に、視程計によって計測された視程距離の時間変化を示す。同図の横軸は現地観測時間（単位：時間）を、縦軸は視程距離（単位：m）を表しており、視程が良好な場合は視程距離 500 m と計測される。一般に、悪視程による交通規制が行われる視程距離は数 10～150 m 以下とされている。図 3.3 では、①～⑤の記号を付した 5 つの時間帯において、視程距離 150m 以下の悪視程が記録されている。

次に、図 3.4 に、図 3.3 の視程計データと対応する時間帯の降雨強度（単位：mm/h）の時間変化を示す。一般に、霧発生時は相対湿度がほぼ 100% になり、断続的な霧雨または降雨を伴うことが多い。図 3.4 より、19 時以前では 5 mm/h 以上のやや強い降雨が断続的に存在しているのに対して、19 時以降は 1 mm/h 以下の弱い霧雨があるのみである。このことから、19 時付近を境として、その前後で降雨状態が変化していることがわかる。図 3.3 と図 3.4 とを比べると、19 時以前の悪視程時間帯①及び②は継続時間が 1 時間未満で、かつ、視程距離が 100 m 未満となることはほとんどないのに対し、19 時以降の③～⑤では、1 時間以上継続しており、また、視程距離が 100 m 未満となる時間も多くなっている。

以上の視程計データ及び雨量計データを照らし合わせながら、この時間帯のレーダエコーを解析する。

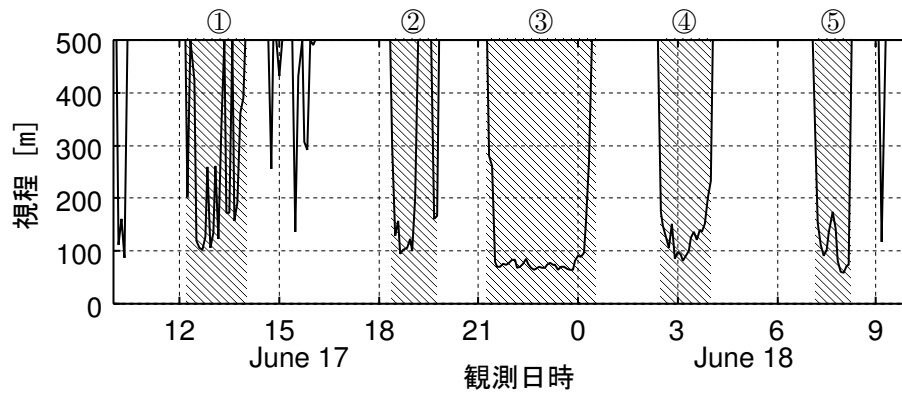


図 3.3 視程距離の時間変化 (別府湾)

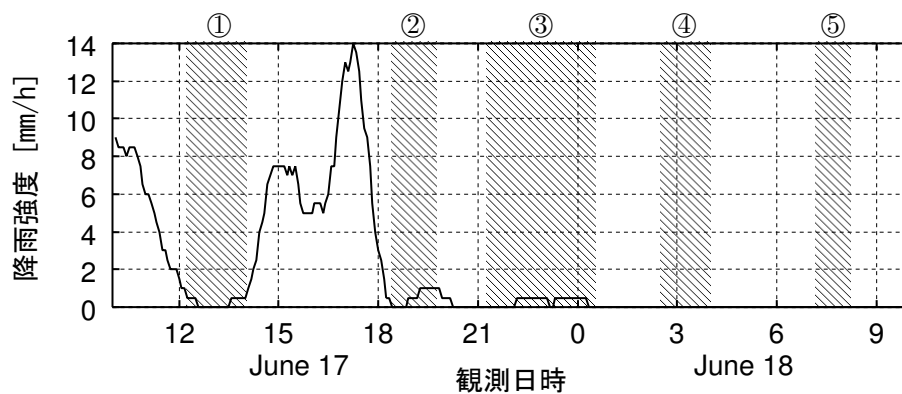


図 3.4 降雨強度の時間変化 (別府湾)

レーダエコーから得られる代表的な特徴量として、エコー強度（レーダ反射因子）が挙げられる [26, 41, 107]。図 3.5 に、この時間帯のエコー強度（単位：dBZ）の時間変化を示す。このエコー強度値は、後に比較を行う視程計データの計測地点付近（仰角 0.7° 、方位角 45° 、距離 1 km ）の値を抽出した。図 3.5 を見ると、19 時以前のエコー強度値は、図 3.4 で降雨強度が急激に減少している 13~14 時を除いて約 10 dBZ 以上に分布しており、13~14 時及び 19 時以降のエコー強度値は約 10 dBZ 以下に分布している。このことから、図 3.5 に示されるエコー強度の時間変化と、図 3.4 に示される降雨強度の時間変化との間には何らかの相関があることがわかる。図 3.3 の視程計計測値と比較すると、①~⑤の悪視程時間帯のエコー強度値は、降雨時よりも更に小さい約 $-30\sim 0\text{ dBZ}$ であることがわかる。

また、レーダエコーから得られるエコー強度以外の特徴量としては、レーダエコーの上限の高さであるエコー頂高度が挙げられる。図 3.6 に、エコー頂高度（単位：km）の時間変化を示す。このエコー頂高度値は、方位角 45° 方向の高仰角

(20.0°) 観測時のエコーから算出したものであるが、全方位角についてほぼ同様であった。図3.6からも、図3.5と同様に、19時付近を境とする値の変化が認められる。すなわち、19時以前は、エコー頂高度値が全体的に高く、また一定しないのに対して、19時以降は、エコー頂高度値は約1 km前後となり、時間変化が小さい。先行研究では、霧発生時のエコー頂高度の特徴として、エコー頂高度値の時間変化が小さいことが報告されており、19時以降のデータはその特徴を有していると考えられる [110]。図 3.3 の視程計測値と比較すると、悪視程時間帯のエコー頂高度値は、約0.5~1.5 kmの範囲内であることがわかる。

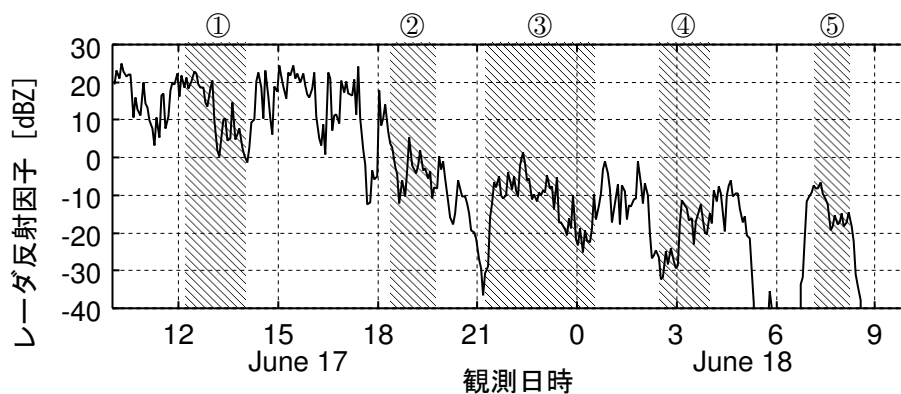


図 3.5 エコー強度の時間変化 (別府湾)

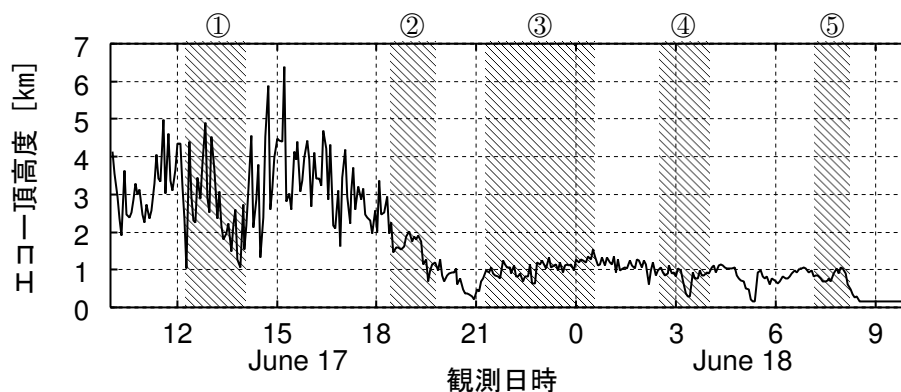


図 3.6 エコー頂高度の時間変化 (別府湾)

以上のエコー強度値及びエコー頂高度値からは、比較的強い降雨と霧・霧雨などの大まかな弁別はできるものの、これらだけでは①～⑤の各悪視程時間帯を判定することは困難である。そこで、新たな特徴量の抽出を試みる。霧は一般に、発生原因及び発生地域、季節などにより様相が異なることが知られている [55]。しかしながら、エコー強度やエコー頂高度といった、ある一地点の特徴量からは、このような霧の種類・地域特異性といった情報を読み取ることは困難である。そのため、エコーの空間分布状態を表すエコー画像からの特徴抽出を試みる。

図3.7に、仰角の異なる12時30分付近のエコー画像を、また、図3.8に、同じく22時30分付近のエコー画像を、それぞれ示す。仰角はそれぞれ0.7, 2.0, 4.9°の3種類とし、表示範囲はレーダ位置を中心とした15 kmの範囲で、方位角0°が北方向、90°が東方向である。なお、実際のビーム走査の際には仰角方向に $\pm 0.1^\circ$ 程度の機械的な誤差が生じるため、各図に表示している仰角の数値には $\pm 0.1^\circ$ 程度の差がある。

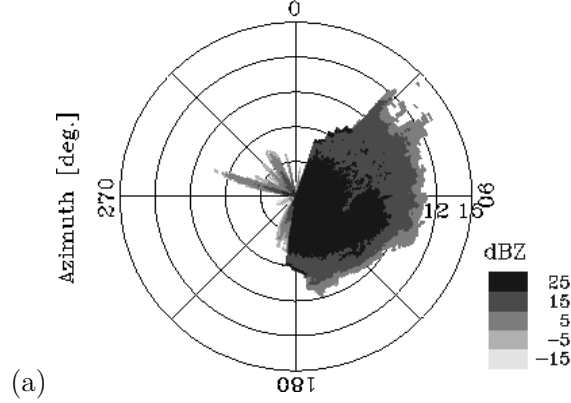
図3.7及び図3.8では、西側の広い範囲（方位角0～15°、210～360°）で観測車両運転席や建造物などによる死角があるものの、それぞれ、エコー形状及びエコー強度分布の仰角依存性が小さい。また、両図において、共にエコーはレーダ設置位置を中心として分布しており、形状のみが変化している。このような現象は観測期間中のほぼ全てのデータにおいて観測された。図3.7と図3.8を比較すると、エコー領域の面積及びエコー強度の分布に違いが見られる。すなわち、比較的強い降雨があった図3.7では、霧雨・霧と考えられる図3.8に比べてエコー領域が広く、かつ、中心のレーダ位置からの距離が大きくなるにつれて強度が弱まっているのに対し、図3.8では必ずしもそうなっていない。

降雨時はターゲットである降水粒子の粒径が大きくなり、また、雨雲は高高度まで発達するため、エコー強度、エコー面積共に大きくなる。一方、霧及び霧雨時は、エコー強度、エコー面積共に降雨時に比べると小さい。そこで、これらを反映する特徴量として、仰角毎のエコー面積を導入する。観測領域全体のエコー面積を採用することで、方位によるエコーのばらつきをなくす狙いがある。図3.9(a)～(c)に、仰角（0.7, 2.0, 4.9°）毎のエコー面積の時間変化を示す。各図において、横軸は時刻を、縦軸は観測領域中に占めるエコー面積の割合（単位：%）

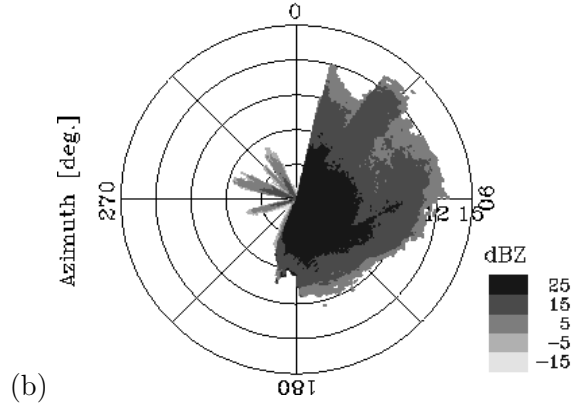
を示す。図 3.9(a) は、全観測時間のエコー面積の時間変化を、同図 (b) は、6月17日10時から21時までを、同図(c)は、6月17日21時から翌日10時までを拡大したものである。

ここで、図 3.2 の別府湾の観測状況を考えると、滑昇霧発生時は、霧が山の斜面に沿って分布すること、また、霧発生時はエコー頂高度が一定高度に分布する性質があること [56] を考慮すると、観測する仰角が低くなるに従ってエコー面積値が大きくなることが考えられる。一方、降雨時は、雨雲が高高度まで発達するため、高仰角のエコー面積値が大きくなることが予想される。このことから、例えば図 3.9 の 22時から23時のように、低仰角のエコー面積値が大きくなる時間帯は、霧が発生している可能性が高く、10~19時及び23~翌日5時のように仰角によるエコー面積値の大小関係が一定しない時間帯では、降雨である可能性が高いと考えられる。

Sat Jun 17 12:26:17-12:27:14 2000
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 0.7



Sat Jun 17 12:27:19-12:28:16 2000
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 2.0



Sat Jun 17 12:28:21-12:29:18 2000
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 4.8

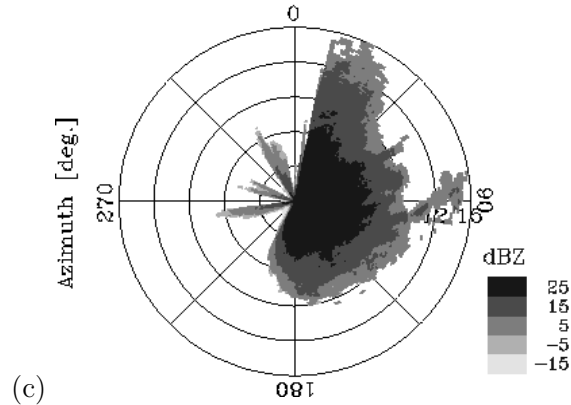
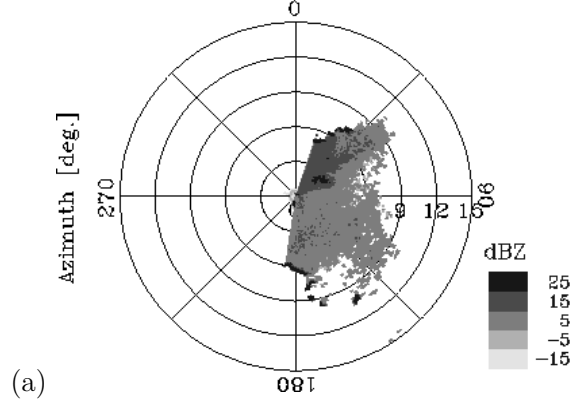


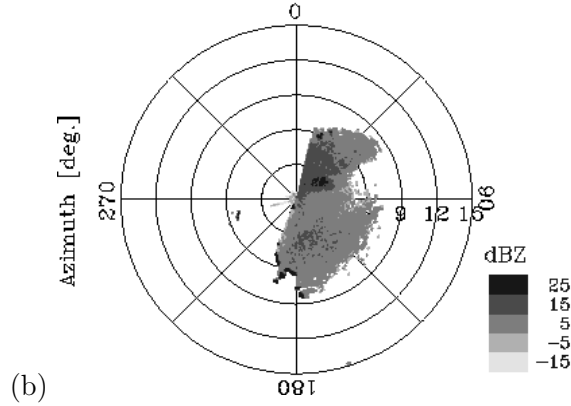
図 3.7 12時30分付近のエコー画像(別府湾)

(a) 仰角 0.7°, (b) 仰角 2.0°, (c) 仰角 4.9°

Sat Jun 17 22:33:38-22:34:34 2000
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 0.7



Sat Jun 17 22:34:39-22:35:35 2000
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 2.0



Sat Jun 17 22:35:41-22:36:38 2000
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 4.9

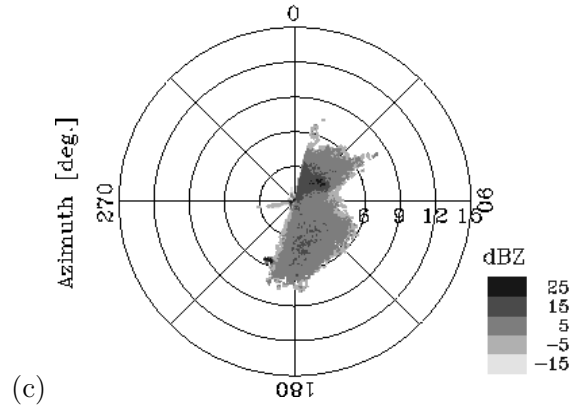
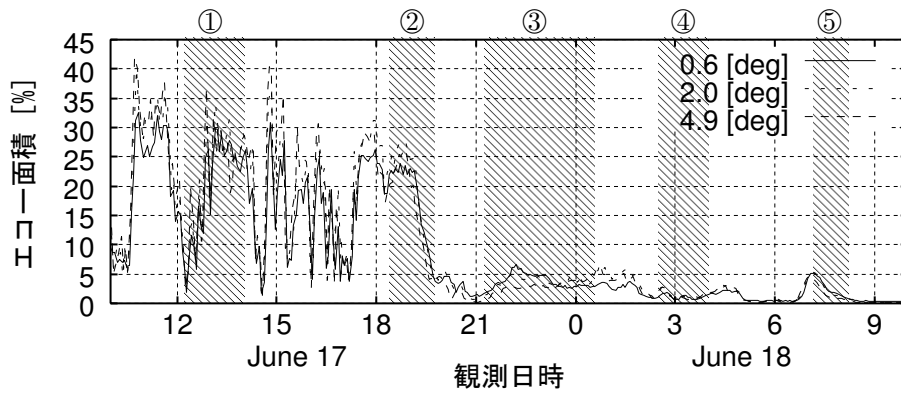
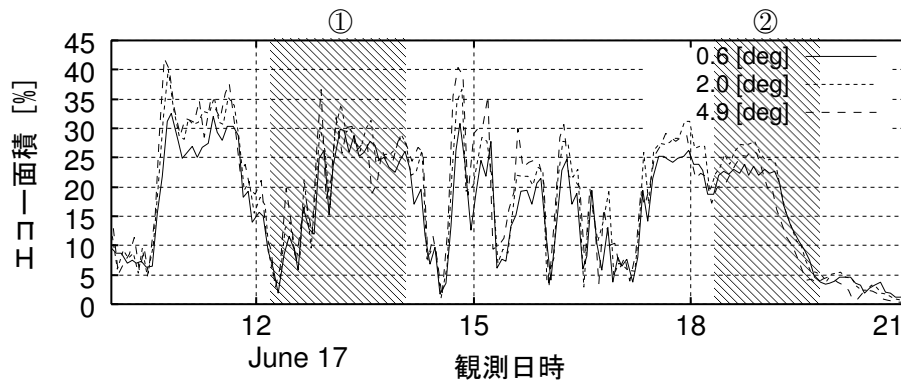


図 3.8 22 時 30 分付近のエコー画像 (別府湾)

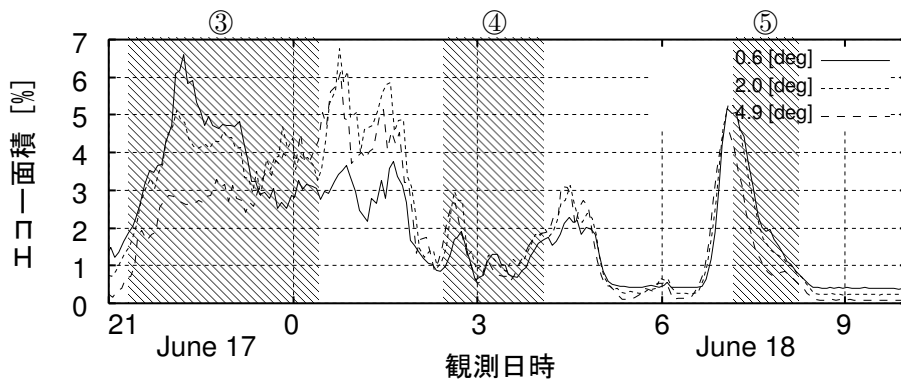
(a) 仰角 0.7°, (b) 仰角 2.0°, (c) 仰角 4.9°



(a)



(b)



(c)

図 3.9 エコ面積の時間変化 (別府湾)

(a) 全時間帯, (b) 10~21 時台, (c) 21~9 時台

3.3.2 エコー特徴量を用いた霧検出アルゴリズム

3.3.1節では、レーダエコーから悪視程状況に関連が深いと考えられる3つのエコー特徴量（エコー強度、エコー頂高度、エコー面積）を抽出した。各エコー特徴量については、視程計データとの対比及び悪視程状況の解釈から、悪視程時（霧発生時）の傾向／値域を設定することができる。表3.2に、各エコー特徴量の悪視程時（霧発生時）の傾向／値域をまとめる。

表3.2の各エコー特徴量とその傾向／値域は、別府湾で発生した滑昇霧を原因とする悪視程状況における必要条件と考えることができる。したがって、各エコー特徴量が表3.2の傾向／値域を満たす場合は、悪視程状況が起きている可能性が高いと考えられる。以上のことから、各エコー特徴量を用いた悪視程状況検出アルゴリズムを提案する。図3.10に、悪視程検出アルゴリズムのブロック図を示す。

提案法では、まず視程状況判定を行う地点を選択し、続いて観測によって得られたレーダエコーデータから、3つのエコー特徴量である、エコー強度、エコー頂高度、エコー面積を算出する。次に、それぞれの特徴量について、表3.2に示す各基準値を満たすか否かを判定し、最後に各特徴量の基準を満たす時間帯の論理積を取ることで、悪視程状況検出結果を得る。

ここで、エコー強度及びエコー頂高度は、選択した判定地点の状況を最も良く反映する特徴量と考え、選択した地点付近の値を用いる。また、エコー面積は、霧の空間分布情報やその種類を表す特徴量と考え、観測域全体の値を用いる。ここではある一地点における判定について述べたが、観測域全体で同様の処理を行うことにより、レーダと同様の分解能で悪視程判定結果の水平分布が得られることになる。

別府湾の実観測データを用いて、提案法の動作検証を行う。図3.11に、アルゴリズム適用結果を示す。図3.11には、上段に図3.3と同じ視程計データを、以下、提案法によって判定された悪視程時間帯、エコー強度値が条件を満たしている時間帯、エコー頂高度値が条件を満たしている時間帯、エコー面積値が条件を満たしている時間帯をそれぞれプロットした。

図3.11より、①の悪視程時間帯は見逃しているものの、②～⑤の悪視程時間帯

は捉えていることがわかる。時間帯①については、エコー頂高度及びエコー面積の条件が満たされていない。その理由として、比較的強い降雨が断続的に存在しており、図 3.2 のような典型的な滑昇霧存在状況とは異なっていたためと推測される。今後の課題として、更に実観測データを収集・解析し、判定条件の改善を行う必要があると考えられる。

表 3.2 悪視程時の各霧エコー特徴量の傾向／値域

エコー特徴量	値
エコー強度	-25~10 dBZ
エコー頂高度	0.5~1.5 km
エコー面積	仰角 θ_1 の面積 $> \dots >$ 仰角 θ_n の面積 (ただし, $\theta_1 < \dots < \theta_n$)

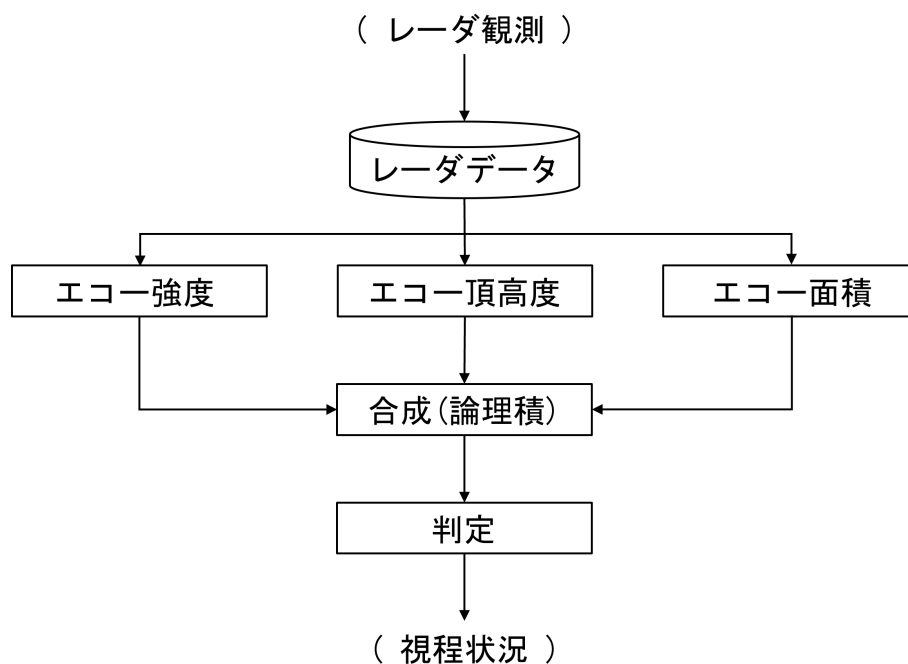


図 3.10 悪視程検出アルゴリズムのブロック図

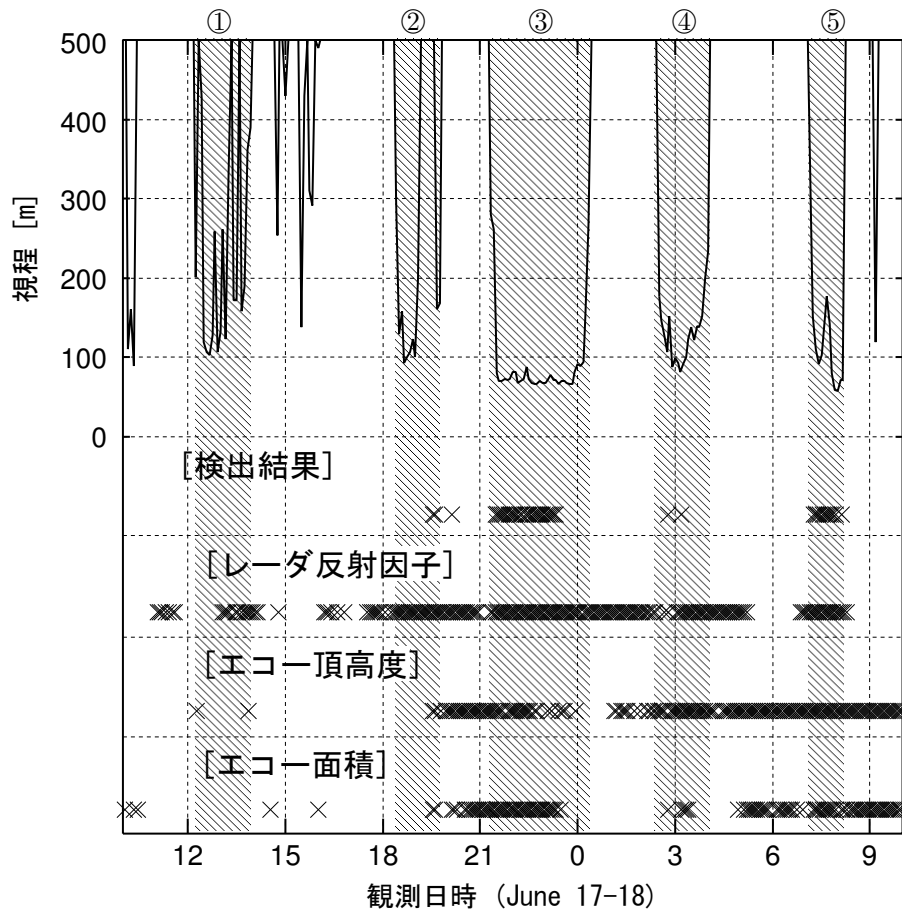


図 3.11 霧（悪視程状況）検証結果（別府湾）

3.4 実測データを用いたアルゴリズム検証

本節では、霧多発地帯として知られる釧路で取得した実観測データに対して 3.3 節で提案した霧検出アルゴリズムを適用し、その動作及び有効性を検証する。釧路では、海上から内陸へと流れ込む移流霧（海霧）及び海上からの湿った大気が陸地に侵入した際の滑昇により発生する滑昇霧（上昇霧）といった移流性の霧が発生することが知られている [23, 53]。別府湾で観測した滑昇霧と比較すると、その種類は異なるものの、湿った空気が地表面で冷やされ、水分が凝結するという霧の発生機構は類似している [15]。霧検出アルゴリズムのロバスト性を確認するために、別府湾の霧で用いた判定条件をそのまま適用することにする。

釧路での試験観測では、霧レーダを海拔高度約 46 m、海岸線から北へ約 1 km の地点に設置した。このとき、西から西北西にかけてレーダ車両運転席による死角

が生じる。観測試験中、レーダ設置場所を含む広い範囲を覆う移流霧（海霧）が発生した。しかし、最も悪い場合でも1 km以上の視程があった。図3.12に、観測状況の概念図を示す。

図3.13に、釧路における観測試験時の視程計データを示す。ただし、視程計設置位置は、レーダ設置位置よりも約3.5 km離れ、約60 mほど高い場所であった。また、当時の状況として、観測期間中は、断続的な霧雨があったことが記録されている。図3.13では、図3.3の別府湾のような悪視程状況はないものの、4~6時（図3.13①）及び7~9時（同図②）の時間帯において視程距離約2.5 km程度の視程距離の減少が見られる。

図3.14に、エコー特徴量の時間変化を示す。同図(a)はエコー強度であり、この値は、ほぼ視程計設置位置にあたる、水平距離3.5 km、方位角20°、仰角2.8°の地点の値である。図3.14(a)では、全体的にエコー強度値が-10 dBZ以下に分布していることから、観測期間中に強い降雨はなく、霧または霧雨のみが発生していることが推測でき、これは実際の観測状況と一致する。また、図3.13視程計データの①及び②に対応する悪視程時間帯において、局所的なエコー強度値の増加が見られる。

図3.14(b)は、エコー頂高度の時間変化である。この値は、視程計設置位置上空のエコー頂高度値を仰角8.4°のエコーから算出したものである。図3.14(b)より、エコー頂高度は、2時から10時にかけては0.5~0.7 kmに分布していることがわかる。10時以降は急激に低下しており、同時時間帯の視程距離及びエコー強度値と照らして、この時間帯は霧または霧雨が晴れ上がったものと推測される。エコー頂高度0.5~0.7 kmは、釧路における霧エコーの典型的な値である [56]。

続いて、エコー画像及びエコー面積を調べる。釧路での観測試験では、1仰角あたり1 rpmで走査する3仰角（2.8, 4.2, 8.4°）のCAPPI走査を行った。釧路で発生した移流霧はレーダを覆うように分布していたため、別府湾の滑昇霧のように霧の全域を観測することはできなかった。ここで設定した仰角は、1999年に同じ場所で観測を行なった先行研究らの結果を受け、雲頂（エコー頂）をほぼ等間隔にサンプルするように設定したものである [110]。

図3.15に、それぞれ仰角の異なる04時40分頃のエコー画像を、また、図3.16に、同じく06時45分頃のエコー画像を示す。同図において、左側（方位角265~320°）

のエコー欠損領域は、観測車両による死角（ビーム遮蔽）である。図 3.15 は、図 3.13 ①の悪視程時間帯に対応するエコー画像であり、図 3.16 は図 3.13 ①と②の間の視程回復時間帯のエコー画像である。図 3.15 及び図 3.16 を見ると、図 3.7 及び図 3.8 に示した別府湾のデータとは異なり、視程状況に因らず仰角毎のエコーの分布範囲に顕著な時間変化は見られないことがわかる。

以上のエコー特徴量に対して、前節で構築した提案法を適用する。図 3.17 に、釧路観測データに対する悪視程時間帯検出結果を示す。図 3.17 では、図 3.13 と同じ視程計データの下部に検出結果を重ねてプロットした。図 3.17 より、3 時頃及び 9 時 30 分頃において若干の誤検出が現れているものの、2つの悪視程時間帯①及び②が正確に検出されていることがわかる。釧路のデータの判定では、エコー強度値が支配的であったが、その他のエコー頂高度値、エコー面積の関係についても表 3.2 で設定した判定基準は満たしている。

このように、異なる場所及び種類の霧（視程状況）を、ほぼ同じ条件によって検出（判定）できたことは、一般的な霧に対する提案法の有効性、ロバスト性を示唆するものと考えられる。ただし、事例数が少ないことから、今後更に多くのデータを収集・解析し、検出アルゴリズム強化及び検証を行う必要がある。

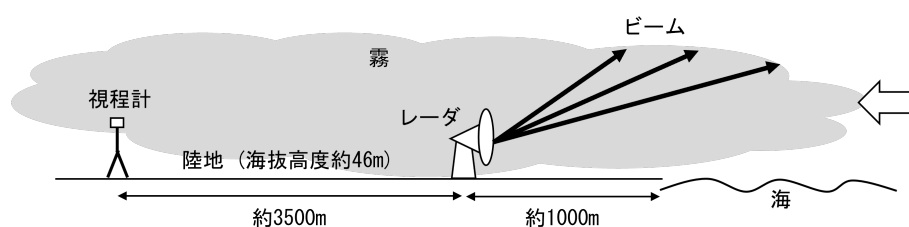


図 3.12 釧路での観測状況概念図

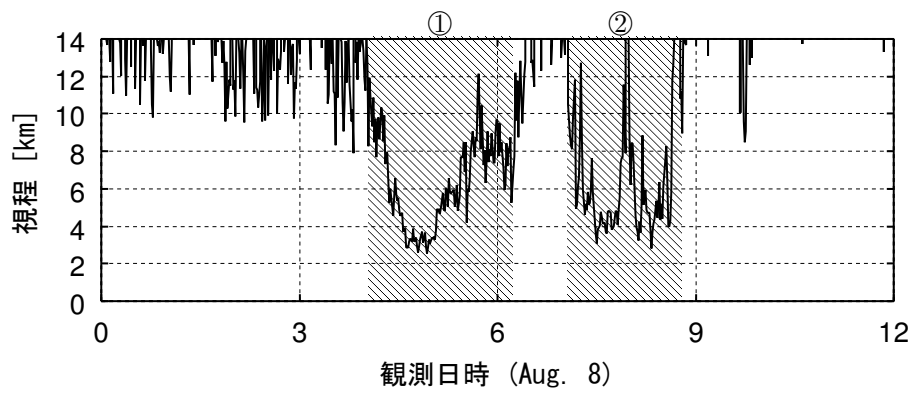


図 3.13 視程の時間変化 (釧路)

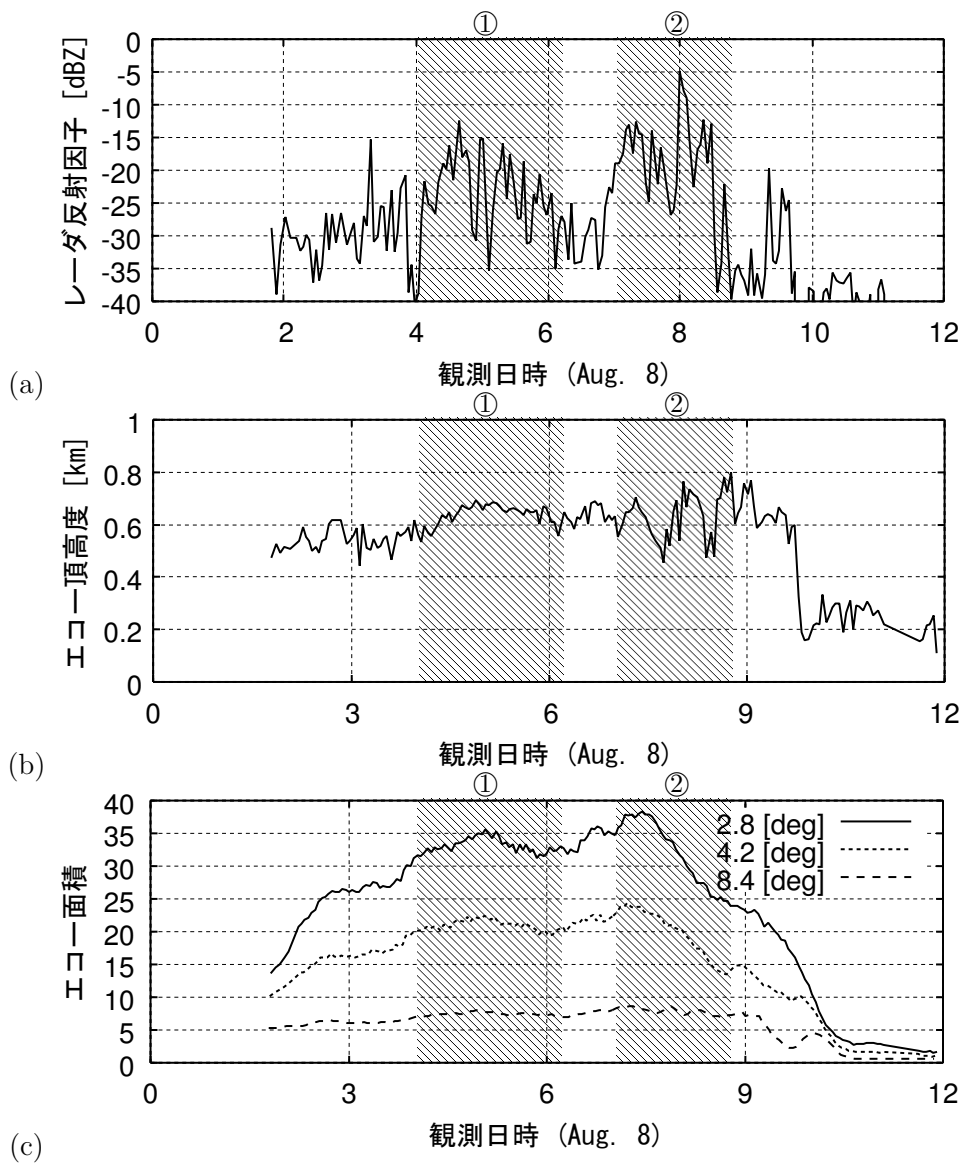
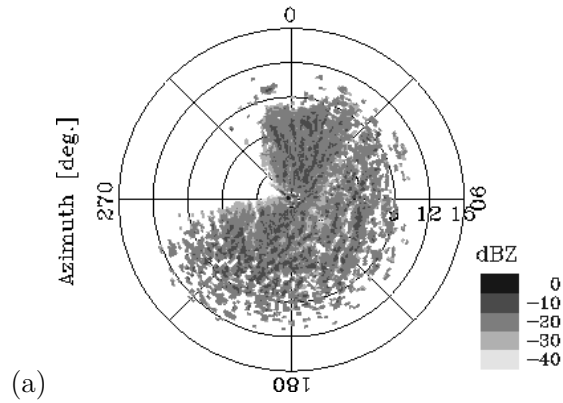


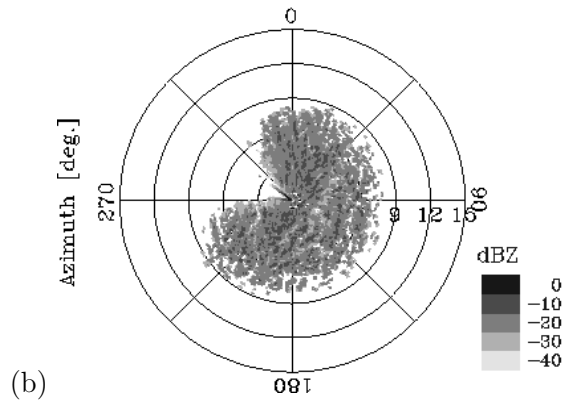
図 3.14 エコー特徴量の時間変化 (釧路)

(a) エコー強度, (b) エコー頂高度, (c) エコー面積

Wed Aug 8 04:41:46-04:42:42 2001
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 2.8



Wed Aug 8 04:40:45-04:41:41 2001
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 4.2



Wed Aug 8 04:39:43-04:40:39 2001
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 8.4

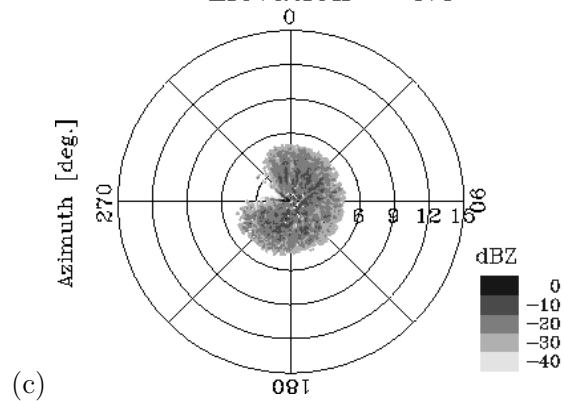
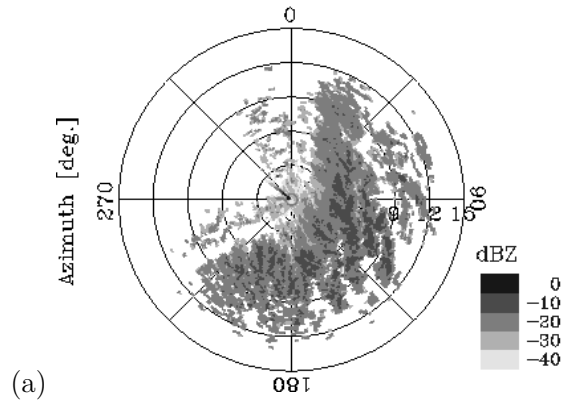


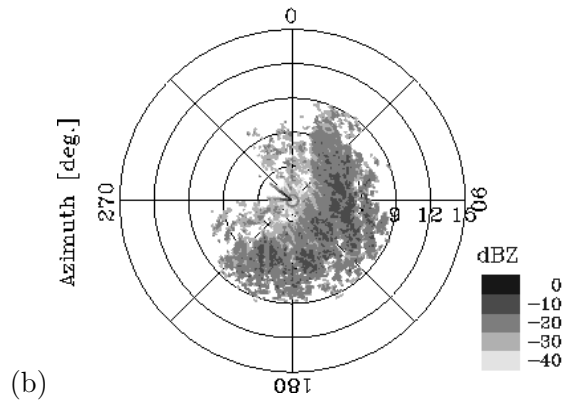
図 3.15 04 時 40 分付近のエコー画像 (釧路)

(a) 仰角 2.8°, (b) 仰角 4.2°, (c) 仰角 8.4°

Wed Aug 8 06:45:30-06:46:26 2001
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 2.8



Wed Aug 8 06:44:29-06:45:25 2001
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 4.2



Wed Aug 8 06:43:27-06:44:23 2001
CAPPI Azimuth -0.2 - 359.5
Elevation 8.3

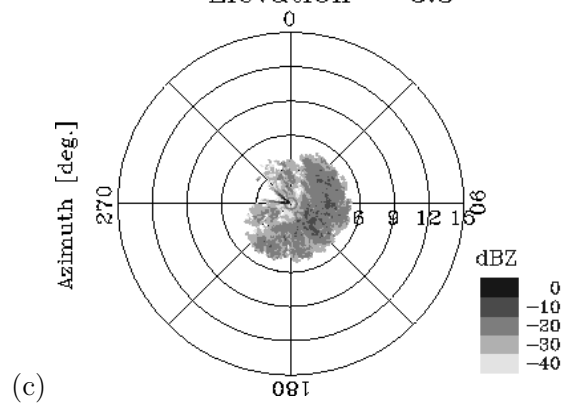


図 3.16 06 時 45 分付近のエコー画像 (釧路)

(a) 仰角 2.8°, (b) 仰角 4.2°, (c) 仰角 8.4°

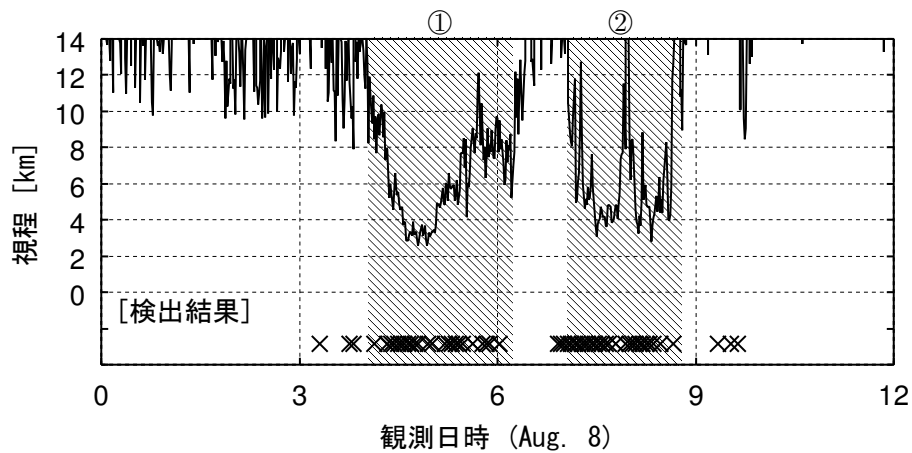


図 3.17 霧（悪視程状況）検証結果化（釧路）

3.5 結言

本章では、Kaバンド気象ドップラーレーダによる霧の観測データから、3つのエコー特徴量である、エコー強度、エコー頂高度及びエコー面積を抽出し、それらの論理積をとることで霧による悪視程状況を検出する悪視程状況検出アルゴリズムを提案した。

別府湾で観測した滑昇霧については、降雨あるいは強い霧雨が断続的に存在する時間帯以外の悪視程状況を正しく判定することができ、また、同じ判定基準により、釧路で観測した移流霧のデータについても、ほぼ正確に悪視程状況を判定することができた。このことは、霧発生要因に共通性が見られる別府湾の滑昇霧と釧路の移流霧については、同じような枠組により判定可能であることを示唆している。

霧の形態は、その発生原因及び地勢などによって様々であることから、本章で示したエコー特徴量及びその傾向／値域については、今後更に多くの観測データを収集・解析して強化、高精度化する必要がある。

第4章 電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズム

4.1 序言

海洋のリモートセンシング画像から航行中の船舶を自動検出する一手法として、船の進行に伴って現れる航跡を検出する方法が知られている。画像上では航跡が線分として現れるため、従来の航跡検出法の多くは、Radon 変換や Hough 変換といった直線（線分）検出手法を用いて航跡検出を試みるものである。しかしこれらの方法では、傾き・切片・端点といった航跡（線分）を確定するパラメータを三次元特徴空間において探索するため、多大な処理時間を要していた。

本章では、航跡検出処理の高速化を目的として2次元高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform; FFT) を用いて線分パラメータの各変数を、各々独立に一次元特徴空間内で探索する方法を提案する。また、航跡の長さや画像サイズをパラメータとして含む検出性能指標を定義することで提案法の航跡検出性能を確保する方法を示す。SAR (Synthetic Aperture Radar; 合成開口レーダ) 画像に本検出法を適用し、航跡が検出できるとともに、従来手法に比べて高速化が図れることを示す。

近年、海洋における船舶の管制・取締りの効率向上を目的として、海面のリモートセンシング画像から航行中の船舶を自動検出する技術が注目されている [62–67]。特に最近では、デジタル信号処理技術の進歩により、昼夜・天候を問わず海面の画像を撮像することのできる SAR のリアルタイム画像再生処理が簡単に実現できるようになった。そのため、この SAR 画像を用いた航行船舶の自動検出技術の実現に期待が高まっている。SAR 画像から船舶を検出する方法としては、船体そのものを検出する方法 [65, 66, 72, 75, 120] と、船舶の進行に伴って現れる航跡を検出する方法 [62–67, 73, 74, 76, 121–124]、両者を併用するものなどが提案されている [125–127]。一般に、船体部分は他の部分に比べ輝度が高い反面、反射信号の干渉によって生じる斑点状のスペckル雑音などとの識別が困難であるこ

とが知られている [128, 129]。航跡部分は、船体よりも画素数が多いので検出が比較的容易であり、船舶の速度や進行方向などの情報が抽出できる特徴をもつ。よって、ここでは、航跡を検出する方法について考える。

船舶の航行によって発生する航跡により海面の状態が変化することでSAR画像において、航跡は背景である海洋に対して明線または暗線として観測されることが知られている [64]。従来の代表的な航跡検出法では、航跡部分を二次元画像中の線分とみなし、Radon 変換や Hough 変換などにより線分部分の画素の濃度値を積分して航跡を検出している [62–66, 69, 130–133]。しかしながら、Radon 変換を用いる場合、検出に要する演算量は画像の画素数にほぼ比例するため、大量の画像を処理する場合、演算時間が膨大になる。そのため、例えば文献 [65, 66]では最初に輝度の高い画素を船体とみなし、その周辺の画素に対して Radon 変換などを行うことで、演算量の問題を回避している。ただし、この方法ではスペックル雑音などにより船体の見逃しや誤検出が多くなる問題がある。

本論文では、このような問題を解決する方法を提案する。すなわち、画像上の線分は、2次元フーリエ変換により周波数領域において原点を通る直線に変換されること [134]に着目して、二次元フーリエ変換を用いた航跡検出法を提案する。

以下、4.2節において、従来手法の問題点について考察し、4.3節において、2次元FFTを用いた航跡検出法を示した後、4.4節において、従来手法と提案手法との検出性能及び演算量の比較を行い、提案手法の有効性を検証する。

4.2 従来の航跡検出法の問題点

まず、船舶航跡が直線（線分）として表現可能であることについて説明する。船舶航跡は Kelvin 波としてモデル化される [65, 66, 135]。図 4.1 に、Kelvin 波の模式図を示す。Kelvin 波は主に発散波と横波から構成され、それらが船体から遠方まで広がる。発散波と横波が重なり合う部分は明瞭化され、SAR 画像において明線または暗線として現れる。

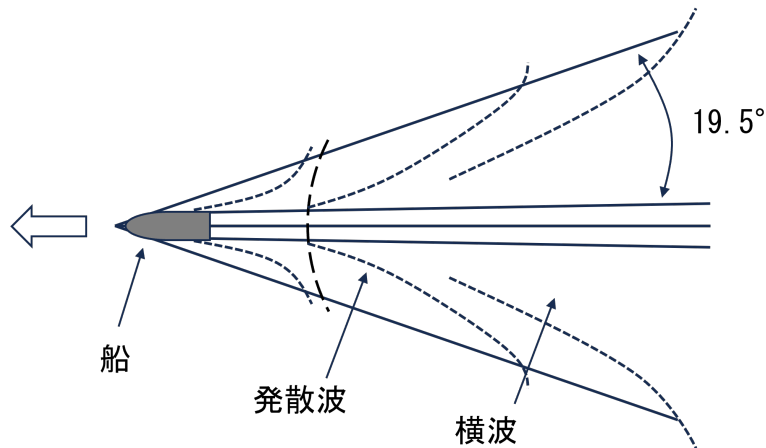


図 4.1 Kelvin 波の模式図
(文献 [135] 図 3 を改変)

従来の航跡検出法としては、Radon 変換を直線検出型から線分検出型へと拡張した、Localized Radon 変換（以下、LRT）に基づく手法が多く用いられている。本節では、LRT の特徴とその問題点について説明する。

画像平面上に x, y をとり、点 (x, y) における画像の輝度値をスカラ量 $\mathbf{F}(x, y)$ で表す。このとき、 $x_S < x_E$ として $(x_S, y_S), (x_E, y_E)$ を 2 つの端点とする線分が直線 $l: ax + by + c = 0$ 上にあるとき、LRT $\mathbf{R}(F)$ は次式のように定義される [63]。

$$\mathbf{R}(F) = \int_{x_S}^{x_E} \int_{y_S}^{y_E} \mathbf{F}(x, y) \delta(ax + by + c) dy dx \quad (4.1)$$

ただし、 $\delta(\cdot)$ は Dirac のデルタ関数を表す。

式 (4.1) は二重積分で表されているが、Dirac のデルタ関数が含まれているため、以下に示すように 1 次元の積分（線積分）に書き換えることができる。ここで、直線 l をその傾き $\alpha (= -a/b)$ と y 切片 $\beta (= -c/b)$ を用いて表し、 $l: y = \alpha x + \beta$ とする。 $0 \leq |\alpha| < 1$ の場合について考えるが、 $|\alpha| \geq 1$ の場合は x と y を入れ換えた $y-x$ 平面を考えることで同様に議論することができる。また、1 画素の大きさを $\Delta \times \Delta$ とするとき、画素 (p, q) における輝度値 $F(p\Delta, q\Delta)$ を $f(p, q)$ と表すことにすると、画像サイズ $M \times M$ のデジタル画像 $f(p, q); p = 0, 1, \dots, M-1, q = 0, 1, \dots, M-1$ である場合、式 (4.1) は α, β, p_S をパラメータとして、式 (4.2) のように書くことができる [64]。

$$R(\alpha, \beta, p_S) = \sum_{p=p_S}^{p_S+L} f(p, \alpha p + \beta) \quad (4.2)$$

ただし、図4.2のLocalized Radon変換の概念図に示すように、直線 l と p 軸とのなす角を θ 、線分の長さを \mathcal{L} とする。また、従来手法 [63] と同様に、デジタル画像中の航跡の線幅を1画素分とし、画像中の航跡の長さを物理的な長さ \mathcal{L} に替えて、航跡部分の画素数 L で表す。 \mathcal{L} を p 軸上へ射影した長さを $\mathcal{L}_p = \mathcal{L} \cos \theta$ とすると、航跡部分の画素数 L は $L = \mathcal{L}_p / \Delta$ となる。点 $(x_S, y_S), (x_E, y_E)$ に対応する画素をそれぞれ $(p_S, q_S), (p_E, q_E)$ とすると、次式の関係が成り立つ。

$$\begin{cases} q_S = \alpha p_S + \beta \\ p_E = p_S + L \\ q_E = \alpha p_E + \beta = \alpha(p_S + L) + \beta \end{cases} \quad (4.3)$$

式(4.2)より、LRTにより画像上の線分は、図4.2に示すように線分を確定するためのパラメータ α, β, p_S を各軸とする3次元特徴空間に写像される。以下、これらを線分パラメータと呼ぶ。

SAR画像では、航跡は背景に対して明線または暗線として表示されるため[64]、 $R(\alpha, \beta, p_S)$ の値が所定のしきい値よりも大きいかまたは小さきかを判定して航跡を検出する。このときのしきい値をそれぞれ $T_{R,max}, T_{R,min}$ とすると、しきい値処理は次式を満足する三項組 (α, β, p_S) の集合を求めることになる。

$$\begin{cases} R(\alpha, \beta, p_S) > T_{R,max} \\ \text{または} \\ R(\alpha, \beta, p_S) < T_{R,min} \end{cases} \quad (4.4)$$

このようにLRTを用いた検出法では、線分パラメータによって張られる3次元特徴空間において、式(4.4)を満たす三項組 α, β, p_S を、考えられる各定義域内で全探索することで航跡を検出している。 α の定義域は $0 \leq \alpha < \pi$ であり、 β, p_S の定義域はそれぞれ画像の一辺の長さ $0 \leq \beta, p_S < M$ である。したがって、この3次元特徴空間の大きさは概ね画像サイズ M^2 に比例し、画像が大きくなるにつれてその演算量・演算時間が膨大になることがわかる。

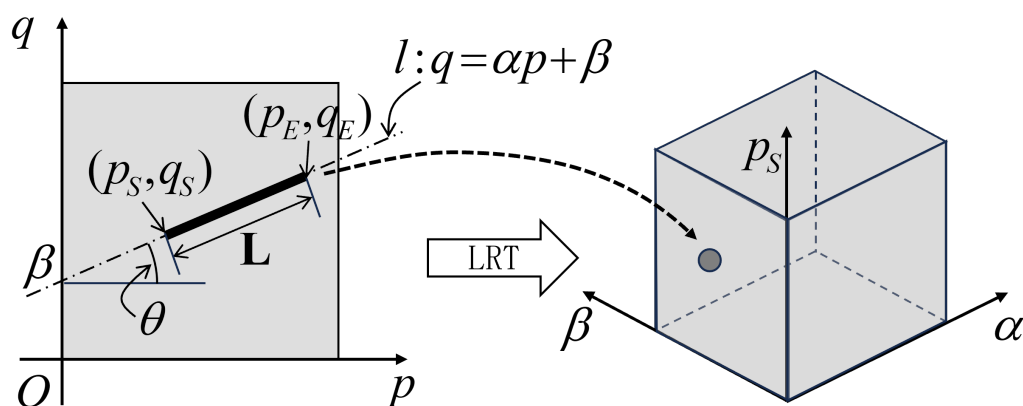


図 4.2 Localized Radon 変換の概念図
(LRT: Localized Radon Transform)

4.3 2次元FFTを用いた航跡検出法

4.3.1 原理

2次元FFTを用いることにより、線分パラメータ（傾き α 、切片 β 、端点 p_S ）を個別に探索できる。ここでは簡単のため、航跡部分及び背景（海洋）部分は、それぞれ一定輝度値 m_L 及び m_B であるとして提案手法の原理を説明する。

提案手法では、以下に述べる（1）から（3）の手順に従って線分パラメータを推定する。

（1）傾き α の推定

原画像に対して2次元（離散）フーリエ変換を行う。ここで、原画像 $f(p, q)$ を、航跡部分 $f_L(p, q)$ と背景部分 $f_B(p, q)$ の和 $f(p, q) = f_L(p, q) + f_B(p, q)$ で表す。 $f(p, q), f_L(p, q), f_B(p, q)$ の2次元フーリエ変換結果をそれぞれ $F(u, v), F_L(u, v), F_B(u, v)$ とすると、原画像の2次元フーリエ変換結果は次式の

ようになる。

$$\begin{aligned}
F(u, v) &= \frac{1}{M} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{M-1} f(p, q) e^{-j2\pi \frac{pu+qv}{M}} \\
&= \frac{1}{M} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{M-1} f_L(p, q) e^{-j2\pi \frac{pu+qv}{M}} + \frac{1}{M} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{M-1} f_B(p, q) e^{-j2\pi \frac{pu+qv}{M}} \\
&= F_L(u, v) + F_B(u, v)
\end{aligned} \tag{4.5}$$

$f_L(p, q)$ は航跡部分を表すことから、 $f_L(p, \alpha p + \beta)$ とすると $F_L(u, v)$ は以下のよう
に展開される。

$$\begin{aligned}
F_L(u, v) &= \frac{1}{M} \sum_{p=p_S}^{p_E} f(q, \alpha p + \beta) e^{-j2\pi \frac{(u+\alpha v)p+\beta v}{M}} \\
&= \frac{m_S}{M} e^{-j2\pi \frac{\beta}{M} v} \sum_{p=p_S}^{p_S+L-1} e^{-j2\pi \frac{u+\alpha v}{M} p}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

次に、

$$\Psi(z) \equiv \Psi_{0,z} = \begin{cases} 1 & (z = 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

で定義される Kronecker のデルタを導入する。このとき、 $F(u, v)$ の振幅
 $|F(u, v)|$ は、次式のように表すことができる [136].

$$|F(u, v)| = \left| \frac{m_S L}{M} \Psi(u + \alpha v) + F_B(u, v) \right| \tag{4.7}$$

式(4.7)は、2次元FFT後の画像において、航跡は原点を通る傾き $-1/\alpha$ の直線
として再現されることを示している。したがって、周波数領域において原点
を通過する直線を抽出することで、航跡を検出することができる。よって、
探索角度数を A として、下式(4.8)のように $|F(u, v)|$ に対して線積分を行ない、
所定のしきい値 T_α を満たす α_i を抽出することにより、航跡を検出する。

$$\Phi(\alpha_i) = \left\{ \alpha_i \mid \sum_{u=0}^{M-1} |F(u, v)| \Psi(u + \alpha_i v) > T_\alpha, \quad i = 0, 1, \dots, A-1 \right\} \tag{4.8}$$

(2) 切片 β の推定

(1) で検出された傾き $\alpha_c (\in \Phi(\alpha_i))$ に対して、 $u + \alpha_c v = 0$ を満たす $F(-\alpha_c v, v)$
を抽出して、次式の $G(v)$ を得る。

$$G(v) = F(-\alpha_c v, v) = \frac{m_S L}{M} e^{-j2\pi \frac{\beta}{M} v} \tag{4.9}$$

この $G(v)$ を1次元逆フーリエ変換して、次式の $g(q)$ を導出する。

$$\begin{aligned} g(q) &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{v=0}^{M-1} G(v) e^{j2\pi \frac{q}{M} v} \\ &= \frac{m_S L}{M\sqrt{M}} \sum_{v=0}^{M-1} e^{j2\pi \frac{q-\beta}{M} v} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$g(q)$ の振幅 $|g(q)|$ は、式(4.7)と同様に考えることにより、次式のように表すことができる。

$$|g(q)| = \frac{m_S L}{\sqrt{M}} \Psi(q - \beta) \quad (4.11)$$

式(4.11)は、 $q = \beta$ においてピークをもつことから、次式のように最大値となる q_j の値を抽出することで切片 β を推定することができる。

$$\max_{q_j} [|g(q_j)|], \quad q_j = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4.12)$$

(3) 端点 p_S の推定

(2) で推定される切片を β_c とすると、(1)、(2) により直線の傾き α_c と切片が求められるので、航跡を含む直線 l が確定する。よって、直線 l 上において次式のように線分の長さ L 分だけ線積分を行い、積分値が最大となる p の値を抽出することで端点 $p_S = p_{S_k}$ が推定できる。

$$\max_{p_{S_k}} \left[\sum_{p=p_{S_k}}^{p_{S_k}+L-1} f(p, q) \Psi[q - (\alpha_c p + \beta_c)] \right], \quad p_{S_k} = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4.13)$$

このように、提案手法では、各線分パラメータ α, β, p_S が各々1次元特徴空間での探索によって求まるので、3次元特徴空間を全探索する従来手法よりも探索空間を大幅に削減でき、探索処理の高速化が期待できる。提案手法による線分パラメータ推定の流れと、各手順における処理データの概念図を図4.3に示す。

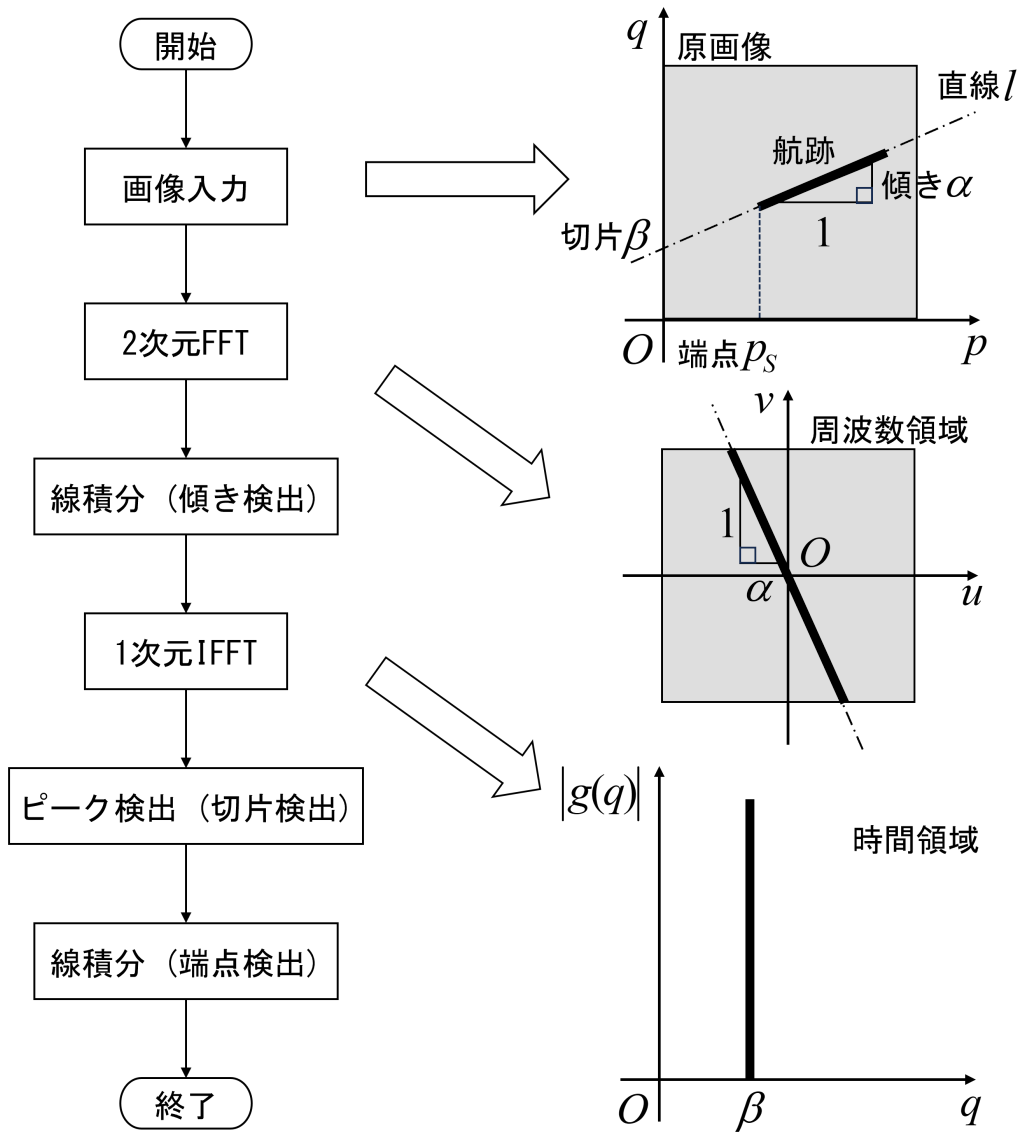


図 4.3 線分パラメータ推定の流れ

4.3.2 画像の分割処理

従来手法と提案手法における検出処理を比較する。従来手法の処理は、式(4.2)に示すような L 画素分の線積分である。それに対し提案手法は、式(4.5)及び式(4.7)に示すように、 L 画素分の航跡成分がフーリエ変換後の画像において、原点を通る直線上に写像される。この直線に重畳する背景の成分 $F_B(u, v)$ は M^2 個の航跡を含まない画素の積分結果であることから、従来手法に比べて背景の影響が大きくなると考えられる。そこで、本節では、航跡の長さ L と画像サイズ M をパラメータとして含む検出性能指標を導入し、提案手法の検出性能を解析する。また、その結果を踏まえて、提案手法の検出性能を確保する方法として画像を分割する方法を示す。

従来手法の検出性能は、式(4.4)から、線分部分の輝度値の総和と背景部分の輝度値の総和の差と、これらの総和のゆらぎとの比に依存することがわかる。ここで、原画像上の航跡部分の輝度値の期待値を m_L 、背景部分の輝度値の期待値を m_B 、背景のゆらぎの標準偏差を σ_N とし、次式に示す検出性能指標 I_R を定義する。SAR 画像の背景のゆらぎの主な要因としては、スペckル雑音と、受信機熱雑音が考えられ [105]、これらの標準偏差をそれぞれ σ_S, σ_T とすると、 $\sigma_N = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_T^2}$ と表すことができ、このとき、検出性能指標 I_R を次式のように定義する。

$$I_R = \frac{Lm_L - Lm_B}{\sqrt{L}\sigma_N} = \sqrt{L} \frac{m_L - m_B}{\sigma_N} \quad (4.14)$$

一方、式(4.8)を用いる提案手法では、線分部分の2次元フーリエ変換後の振幅値の期待値を $|F_L|$ 、背景部分の期待値を $|F_B|$ 、画像の背景のゆらぎ成分のフーリエ変換後の標準偏差を σ_N^F とすると、式(4.14)と等価な検出性能指標は次式の I_F で与えられる。

$$I_F = \frac{M(|F_L| + |F_B|) - M|F_B|}{\sqrt{M}\sigma_N^F} = \frac{Lm_L}{\sqrt{M}\sigma_N^F} \quad (4.15)$$

$f(p, q)$ の統計的性質が画像内で同じであるとすると、従来手法では、航跡の長さの $1/2$ 乗に比例して I_R が向上するのに対し、提案手法の I_R は、航跡の長さ L に比例し、画像サイズ M の $1/2$ 乗に反比例する。したがって画像サイズ M に対して航跡の長さ L が小さい場合には、提案手法の検出性能が従来手法に比べて劣化することは明らかである。そこで、 I_R と I_F における画像サイズ M と航跡の長さ L

に着目し、従来手法の検出性能指標を基準とした提案手法の相対検出性能指標 I_C を導入する。式(4.16)に、相対検出性能指標 I_C を示す。

$$I_C = \sqrt{\frac{L}{M}} \quad (4.16)$$

提案手法の検出性能の劣化を低減するには、航跡の長さを画像サイズに対して相対的に大きくすればよく、以下に示すように画像を分割処理することを考える。サイズ $M \times M$ の画像を k^2 分割し、 $W \times W$ ($M = kW$) の画像（以下、ウィンドウと呼ぶ）を生成する。ただし、ただ分割しただけでは航跡が分断され、航跡の検出性能が劣化する可能性があるため、各ウィンドウを C ($0 \leq C < W$) だけ重複させる。このとき、 L を一つのウィンドウに含まれる航跡部分の画素の期待値とし、 M にウィンドウサイズ W を代入して、式(4.16)の I_C を補正する。図4.4に、航跡画素とウィンドウの位置関係の模式図を示す。図4.4では、長さ C で横方向に重畳する3つのウィンドウ $N-1, N, N+1$ と、長さ L の航跡画素を表している（縦方向の重畳は省略している）。また、以下に示す航跡の長さウィンドウサイズ及び重畳サイズの関係ごとに場合分けしている。

(a) $0 \leq L < C$ の場合

航跡の長さは、ウィンドウの重畳部分よりも短いため、いずれの位置にあっても、いずれかのウィンドウ内に含まれる。

(b) $C \leq L < 2W - C$ の場合

航跡の位置によってウィンドウに含まれる航跡画素の割合が変化する。

(c) $2W - C \leq L$ の場合

航跡の長さは隣接するウィンドウの長さよりも長いため、いずれかのウィンドウではウィンドウサイズ W 分の航跡画素が含まれる。

以上をまとめると、次式の関係を得る。

$$I_C = \begin{cases} \sqrt{\frac{L}{W}}, & (0 \leq L < C) \\ \sqrt{\frac{L}{W}} - \frac{(L-C)^2}{4\sqrt{LW}(W-C)}, & (C \leq L < 2W - C) \\ \sqrt{\frac{W}{L}}, & (2W - C \leq L) \end{cases} \quad (4.17)$$

このとき、 I_C の最大値を重複 C の関数 $I_C(C)$ とすると、 $I_C(C)$ は次式のようになる。

$$I_C(C) = \frac{2(C^2 - 2W(W + \sqrt{C^2 - CW + W^2}) + C(2W + \sqrt{C^2 - CW + W^2}))}{3\sqrt{3}(C - W)\sqrt{W(-C + 2(W + \sqrt{C^2 - CW + W^2}))}} \quad (4.18)$$

重複 C を 0 から W へ変化させると、 $I_C(C)$ は単調増加し、1 に漸近することから、提案手法の検出性能は、従来手法の検出性能とほぼ同等になると考えられる。しかしながら、重複を増加させるとウィンドウの数が増えることになり、演算量増加に繋がる。このため、ウィンドウサイズ W は、航跡の長さ L に最も近い値をとるように決定すればよいが、重複 C については、計算量と検出性能を考慮して決定する必要がある、これについては次章で検討する。

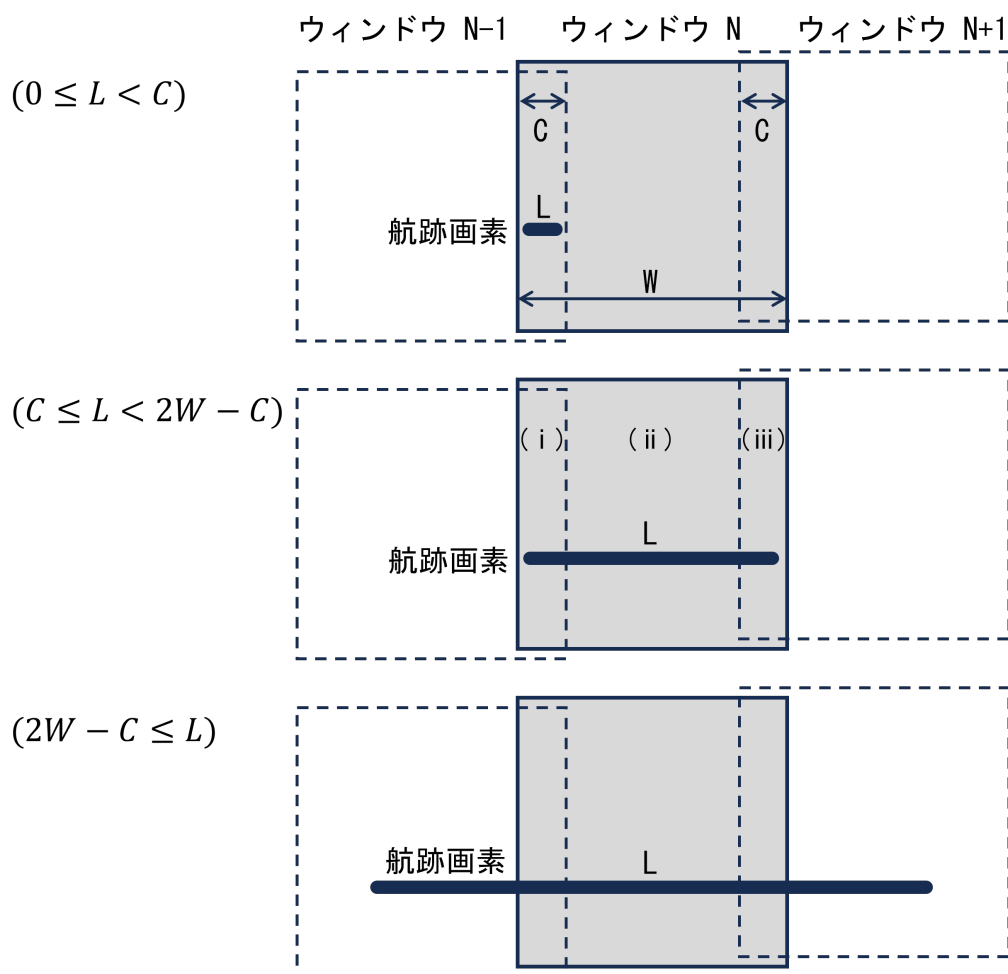


図 4.4 航跡画素とウィンドウの位置関係の模式図

4.4 実測データを用いたアルゴリズム検証

提案手法の有効性を検証するため、(1) 実データによる航跡検出、(2) 疑似画像を用いた検出速度比較、及び、(3) 検出性能（確率）比較シミュレーションを行う。

4.4.1 実データによる航跡検出

SAR実画像に提案手法を適用し検出処理を行う。原画像とその検出結果を、それぞれ図4.5及び図4.6に示す。原画像は、船体と思われる部分の輝度値が他に比べて突出していたことから、見易さのため極端にレベルの高い輝度値を抑圧している。画像サイズは512×512 [pixel]であり、1 [pixel]の実サイズは約12.5 mである。航跡の長さは、一般に5~15 km程度であることを踏まえて [62]、400 [pixel]（約5 km）として検出処理を行った。ここでは、すべての航跡要素を同じ長さとして処理しているので、図4.5と図4.6に現れる2本の航跡の傾き、及び、交差位置は一致しており、航跡が適切に検出できていることがわかる。

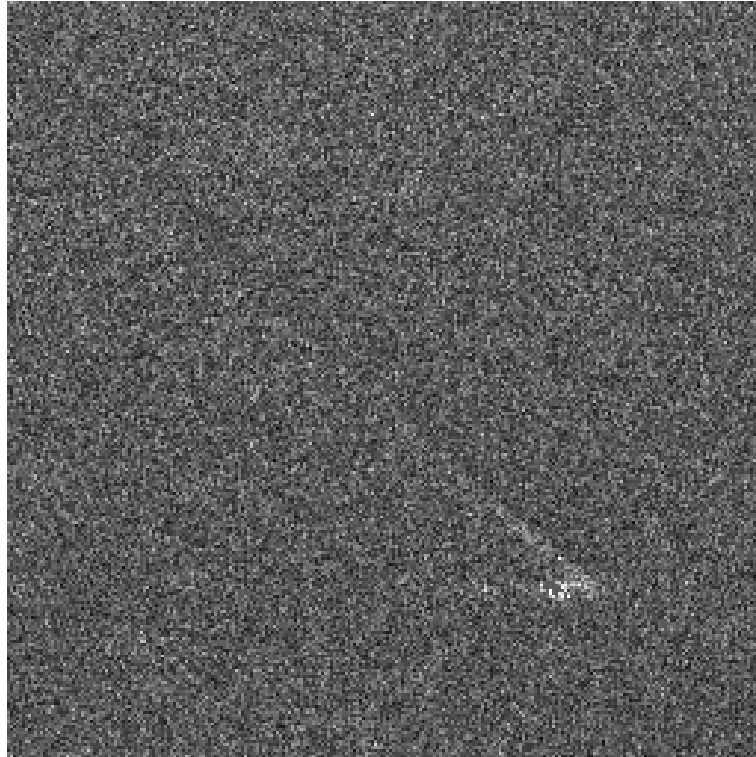


図 4.5 航跡検出前の原画像
(JERS-1, 512 x 512 pixel)

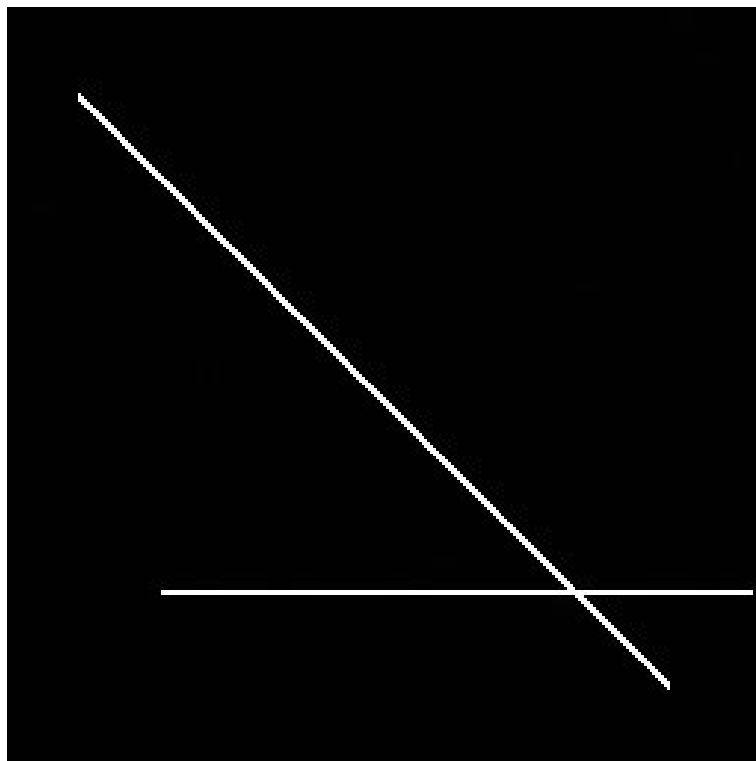


図 4.6 提案手法による航跡検出結果

4.4.2 検出処理時間の比較

ここでは、従来手法と提案手法における主要な処理にかかる計算量、及び、擬似データによるシミュレーションから、両者の検出処理時間を比較する。画像サイズを $M \times M$ 、傾きを求める際の探索数を A 、航跡の長さを L 、また、簡単化のため、1回あたりの実加算演算の計算量を C_A 、実積算演算の計算量を C_M とする。

従来手法では、式 (4.2) の線積分処理と式 (4.4) のしきい値処理が主要な操作である。式 (4.4) では航跡の候補数回の比較であるのに対し、式 (4.2) では航跡の長さ分の加算を航跡の候補数回行うので、式 (4.2) の線積分処理が支配的となることがわかる。また、一つの画素の座標の算出にかかる計算量は、直線（線分）を $y = \alpha(x - x_0) + y_0$ とすると2回の加算と1回の積算、すなわち $C_M + 2C_A$ 要するので、従来手法の計算量 C_R は、 $C_R = (C_M + 2C_A)ALM^2C_A$ と概算することができる。

一方、提案手法では、式 (4.6) で M^2 の大きさの2次元FFTを行った後、式 (4.8)～式 (4.13) においてたかだか大きさ M の演算を行うことから、式 (4.6) の2次元FFTにかかる処理が支配的である。長さ w のFFTは、 $\frac{w}{2} \cdot \log_2 w$ 回の複素積算演算と $w \log_2 w$ 回の複素加算演算からなり [137]、1回の複素積算演算は4回の実積算演算と2回の実加算演算に、1回の複素加算演算は2回の実加算演算に、それぞれ置き換えて考えると、式 (4.6) にかかる計算量は、 $4M^2 \log_2 MC_M + 6M^2 \log_2 MC_A$ と見積ることができる。

また、4.3.2 節で考察した分割処理を行い、ウィンドウサイズを $W \times W$ ($M = kW$)、ウィンドウの数を n^2 とすると、 $nW - (n - 1)C = M$ が成り立つ。よって、提案手法の計算量は、 $C_F = n^2(4W^2 \log_2 WC_M + 6W^2 \log_2 WC_A)$ と概算することができる。

加算演算も積算演算も1クロックで実現可能であると仮定し、 $C_M = C_A = 1$ とする。このとき、両手法の計算量の比 $C_C = C_R/C_F$ は、 $n = (kW - C)/(W - C)$ であるから、次式のような C に関する単調減少関数を得る。

$$C_C(C) = \frac{3k^2 AL(W - C)^2 10(kW - C)^2 \log_2 W}{(4W^2 \log_2 WC_M + 6W^2 \log_2 WC_A)} \quad (4.19)$$

$M = 64 \sim 1024, A = 8, L = 43, W = 32$ のときの従来手法と、分割処理をしない場

合の提案手法、及び、ウィンドウを $1/2$ だけ重複させて分割した場合の提案手法の計算量の比較を、表4.1に示す。文献 [62]では、実際の航跡では、 $L \leq 400$ の場合もあることが報告されているが、ここではシミュレーションの簡便化を図り、航跡の長さを小さく設定した。 C_R 及び C_F において、 L を含むのは C_R だけである。したがって、 $L = 43$ とした場合、従来手法の計算量は実際の場合よりも小さく見積られることになる。表 4.1 より、計算量の観点からみた場合には、提案手法で分割処理を行わない場合約10分の1程度、分割と重複を行う場合は約5分の1程度、従来手法よりも削減されることがわかる。

次に、SAR疑似画像を用いた計算機シミュレーションにより、従来手法と提案手法の処理速度を比較する。シミュレーション条件を表 4.2 に示す。疑似画像中の航跡（線分）の傾き・端点はランダムに与え、またSAR画像における海面反射によるシークラッタは k -分布に従うといわれていることから [104]、疑似画像は、航跡部分・海面部分共に k -分布に従うデータから作成した。背景部分の形状パラメータは $\nu = 6.00$ 、尺度パラメータは $b = 2.35$ 、航跡部分は $\nu = 10.0, b = 18.1$ であり、背景部分の画素の輝度値の期待値に対して航跡部分の画素の輝度値の期待値を約10倍になるよう設定した。

シミュレーション結果を、表 4.3 に示す。なお、表 4.3 の結果は、シミュレーション実施時の汎用 PC で実施したものであるため、数値自体は現在通用するものではないものの、従来手法と提案手法の比較は可能である。結果から、例えば 512×512 のサイズの画像では、分割しない場合で約30分の1、分割及びウィンドウの $1/2$ だけ重複させた場合でも約4分の1に処理時間が短縮され、提案手法により検出時間が高速化されているのがわかる。

また、画像サイズが変化することによる処理時間の短縮率の傾向は、表4.1における計算量削減率の傾向とほぼ同様であることが確認できる。しかしながら、同じ画像サイズで表4.1と表4.3を比較した場合、各手法における短縮率が表4.1の値よりも大きくなっている。これはデータの読み出しや転送時間といった、ハードウェアに起因する影響と考えられ、従来手法では線積分を行う際に画素の値の読み出しを多用し、提案手法の分割処理においても同様に、データの読み出しが多くあることから、単純な和積による見積もりには反映されなかったものと考えられる。しかし、いずれの場合も演算の高速化が成されていることが確認された。

表 4.1 計算量の比較

サイズ	従来手法	提案手法 (削減率)	
		分割なし	分割 + 重複
1024 ²	1082130432	104857600 (10.3)	203212800 (5.3)
512 ²	270532608	23592960 (11.5)	49203200 (5.5)
256 ²	67633152	5242880 (12.9)	11520000 (5.9)
128 ²	16908288	1146880 (14.7)	2508800 (6.7)
64 ²	4227072	245760 (17.2)	460800 (9.2)

表 4.2 シミュレーション条件 (検出処理時間)

項目	値
画像サイズ (一辺)	1024, 512, 256, 128, 64
画像枚数	各 30 枚
航跡 (線分)	1 本/枚, 長さ $L = 43$, 幅 1
探索角度数	8 ($\pi/8$ [rad])
分割方法	$W = 32$, 重複 $W/2$
環境	言語: C 言語, CPU: Pentium II 333 MHz, RAM: 384 MB

表 4.3 シミュレーション結果 (検出処理時間)

サイズ	従来手法 [s]	提案手法 [s] (短縮率)	
		分割なし	分割 + 重複
1024 ²	163.742	5.757 (28.4)	37.157 (4.4)
512 ²	39.352	1.386 (28.4)	9.003 (4.4)
256 ²	9.136	0.339 (26.9)	2.082 (4.4)
128 ²	2.162	0.074 (29.2)	0.454 (4.8)
64 ²	0.483	0.018 (26.8)	0.087 (5.6)

4.4.3 重複 C の最適化と検出性能の比較

検出性能や処理時間（ ∞ 演算量）に制約がない場合には、そのいずれかに重きを置いた検出を行えばよいが、どちらも考慮する必要がある場合、検出条件を適切に設定する必要がある。ここでは、検出性能及び演算量を考慮した検出条件の設定法について考察する。

式(4.18)及び式(4.19)において、検出性能及び演算量は重複 C の関数として表せることを示した。相対検出性能指標 $I_C(C)$ は単調増加関数であり、演算量の比 $C_C(C)$ は単調減少関数であることから、両者の積は凸関数となり、最大値をもつ。そこで、 $I_C(C)$ の値域が閉区間 $[0, 1]$ となるように正規化したものと、 $C_C(C)$ の値域が同様に $[0, 1]$ となるように正規化したものとの積を考え、重複 C を決定する一指標として、関数 $T_C(C)$ を次式のように定義する。

$$T_C(C) = \frac{I_C(C) - I_C(0)}{I_C(W) - I_C(0)} \cdot \frac{C_C(C) - C_C(W)}{C_C(0) - C_C(W)} = \frac{I_C(C) - I_C(0)}{1 - I_C(0)} \cdot \frac{C_C(C)}{C_C(0)} \quad (4.20)$$

$T_C(C)$ が最大となる位置は、単位時間あたりに検出性能を最大にする重複量 C と考えることができる。例として、ウィンドウサイズ $W = 64$ 、航跡サイズ $L = 85$ のときの検出性能指標を図4.7に示す。ここから、最適な重複量は $C = 26$ と導出される。以下、最適な重複量による分割処理を最適分割と呼ぶ。

$T_C(C)$ を基に、従来手法、分割処理しない場合の提案手法、最適分割した場合の提案手法における検出性能の比較を行う。レーダによる観測画像に加わる雑音には、スペckル雑音のように信号と一緒に外から入る外部雑音の他に、受信機自体から発生する内部雑音がある。内部雑音としては受信機熱雑音 (thermal noise) が優勢であり、雑音電力分布はその確率密度関数がガウス分布になることが知られている [105]。スペckル雑音については、航跡部分と背景部分をともに k -分布に従う不規則変数で与えることでモデル化を行った [104]。本節では、疑似画像に様々なレベルのガウスノイズを付加し、受信機熱雑音に対する、従来手法と提案手法の検出確率を比較する。

シミュレーション条件を、表4.4に示す。ここでも、航跡の長さ L は文献 [62] で報告されているよりも小さい値を設定したが、式(4.14)及び式(4.15)より、その影響は従来手法に対してのみ有利に働くことがわかる。検出処理速度比較の場合と

同様に作成した擬似画像に、次のようにガウスノイズを付加した。まず、振幅のみからなる画像に対して位相を $[0\sim 2\pi]$ の一様分布で与えて複素画像を作る。次に、その複素画像に2次元逆FFTをかけてホログラムを作成し、それに標準偏差 σ_T のガウスノイズを実部虚部それぞれ独立に与え、それを2次元FFTすることで擬似画像を生成する。

ここで、航跡部分の画素の輝度値の期待値を m_L 、背景部分の画素の輝度値の期待値を m_B とする。また、付加したガウスノイズの標準偏差は、ホログラムで付加したガウスノイズの標準偏差 σ_T と等価になる。よって、1画素あたりの航跡部分の信号とそれに付加する雑音を考え、ここでの画像のS/N比を次式のように定義する。

$$S/N = 20 \log_{10} \frac{m_L - m_B}{\sigma_T} \quad (4.21)$$

シミュレーションで用いたS/N比の異なる画像例を図4.8に示す。航跡検出の基準は、設定した航跡と傾きが等しく、かつ、開始位置のずれが5画素以内とする。それ以外はすべて誤警報とし、従来手法・提案手法共に誤警報確率が 10^{-4} となるようにする。

シミュレーション結果を、図4.9に示す。図4.9は、横軸にS/N比 (dB)、縦軸に検出確率をとり、従来手法、分割処理しない場合の提案手法、最適分割させた場合の提案手法をそれぞれプロットした。図4.9から、例えばS/N比が -15 dBにおける各手法の検出確率は、従来手法 0.97、分割処理を行った提案手法 0.71、分割なし提案手法 0.24 となっている。図4.9の横軸のS/N比が 0 dBよりも小さい場合でも検出できているのは、両手法の航跡画素積み上げによる積分効果のためである。図4.9に示すように、検出性能は従来手法、画面分割及び重複を行った提案手法、画面分割のない提案手法の順に高く、画面分割及び重複処理は提案手法における検出性能低下軽減策として有効であることがわかる。

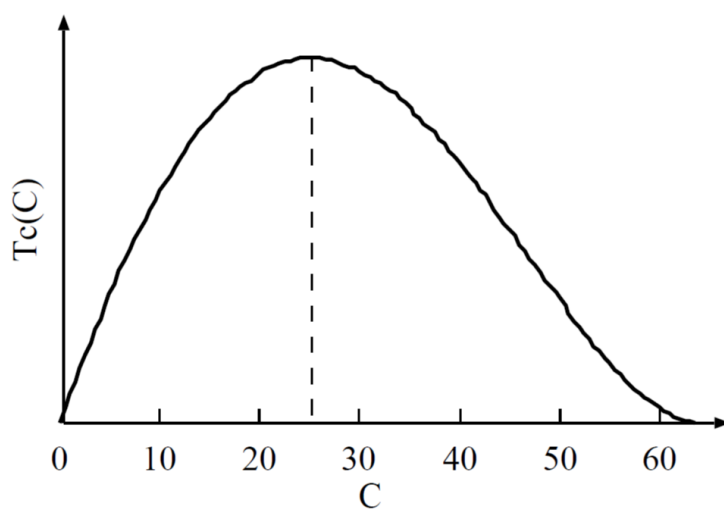


図 4.7 検出性能指標 $T_C(C)$ の分布
 (ウィンドウサイズ $W = 64$ 、航跡サイズ $L = 85$ 、最適重複量 $C = 26$)

表 4.4 シミュレーション条件 (検出性能)

項目	値
画像サイズ	256 × 256 [pixel]
画像枚数	70 枚
航跡 (線分)	長さ $L = 85$, 幅 1 [pixel]
分割方法	分割数 16, ウィンドウサイズ $W = 64$, 重複量 $C = 26$

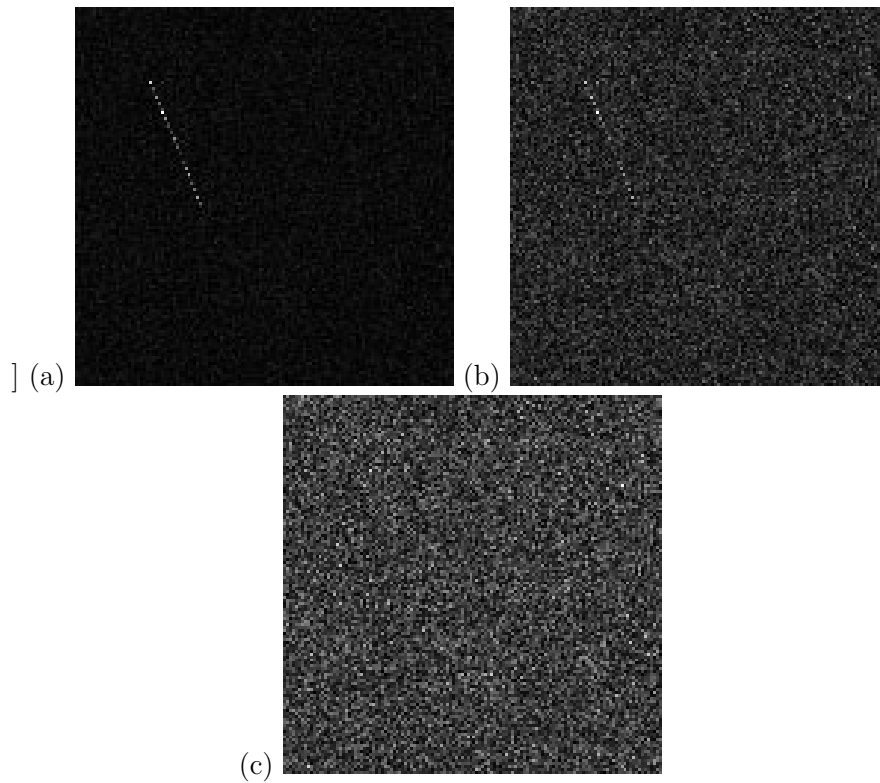


図 4.8 雑音を付加した画像例
 ((a)S/N 20 dB, (b)S/N 10 dB, (c)S/N 0 dB)

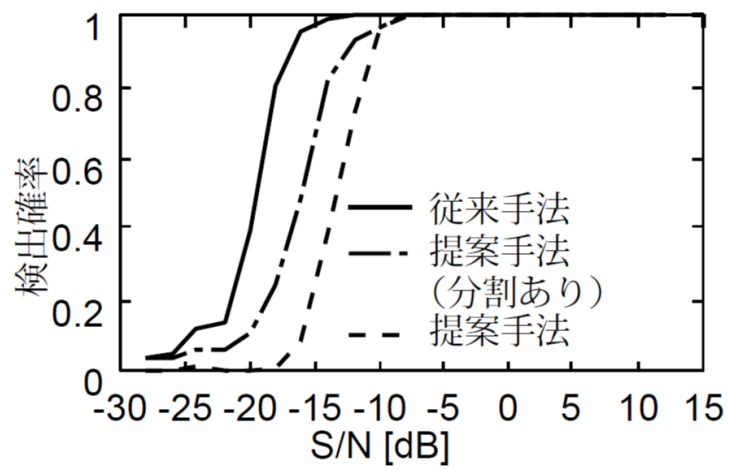


図 4.9 シミュレーション結果 (検出性能)

4.5 結言

リモートセンシング画像である SAR 画像から航跡を検出するにあたり、2次元 FFTを用いて、航跡を確定するための複数のパラメータを、独立に推定することで、探索空間を削減し、高速化を図る手法を提案した。提案手法を SAR 実画像に適用した結果、航跡が適切に検出されることを確認した。また、計算量の面からは、約10倍の高速化効果が見込め、擬似画像を用いたシミュレーションでは、最大約30倍高速化されることを確認した。

一方、雑音により画像が劣化した場合、提案手法の検出性能は、従来手法のものに比べ低下する問題があったが、画面分割処理を行い、画像サイズに対する航跡の長さを相対的に大きくすることで、その影響を低減する方法を示した。シミュレーションにおいて、画像の S/N 比が -10 dB 以下では、検出性能が従来手法に比べて最大約 70%低下するものの、画面分割処理により 20~30%に低減できることを確認した。

提案手法では、検出性能と処理時間との間にトレードオフの関係がある。そこで、実用に際しては、特に制約がない場合には、検出性能、または処理時間に重きを置いた検出処理を行い、両者を考慮する場合には、本文で示したトレードオフ関数を用いて検出条件（重複）を設定することで、検出性能及び処理時間に関して最適な検出処理ができると考えられる。

第5章 リモートセンシングデータに対する 不要応答除去アルゴリズム

5.1 序言

ライダ (Light Detection and Ranging; lidar) は、レーザ光を大気中に照射して空気分子やエアロゾルからの散乱光を光アンテナ (テレスコープ) で集光し、光検出器でレーザ発光からの遅延時間に基づき、大気中の各種気象要素の距離分布を測定する装置である [31, 36, 98, 99, 138]。大気中の風向・風速分布を計測するコヒーレントドップラーライダは、照射したパルス状のレーザ光に対するエアロゾルによる散乱光のドップラーシフト量から、視線方向 (レーザ照射方向) の風のドップラー速度を測定する。大気中の風 (風向・風速) の空間分布を得るには、第2章に示したVAD (Velocity Azimuth Display) 法 [34, 80, 94, 97, 139] や、東西南北の4ビームもしくは東西南北鉛直のビームを用いるDBS (Doppler Beam Swinging) 法 [26, 103]、解析体積 (analysis volume) として設定した比較的小さな3次元空間内で風速が線形に変化するモデルを仮定し、複数のパラメータを含む連立方程式を解いて風ベクトルを得るVVP (Velocity Volume Processin) 法が用いられる。

VAD法では、観測領域内の風が一様であるという仮定の下、仰角を固定してビームを方位角方向に走査して得られた視線速度がサインカーブを描く性質を利用し、最小二乗法によるフィッティングにより求めたサインカーブの振幅、初期位相、オフセットから、風向・風速を算出する。VAD法は、第2章の図2.4及び図2.5では、1次モーメントとして算出したドップラー速度 (視線速度) を用いて風速場を推定するデータ解析の段階にあたる。一般に、VAD法のように最小二乗法によって真値を推定する方式は、前段の観測値に重畳した誤差に対しては頑健な特性を持つ。しかしながら、許容量を超える誤差が観測値に乗ると、後段の処理結果は真値に対し大きく乖離したものとなる。このような場合には、前処理としてデータ補正やノイズ除去を行い、観測値の精度を改善する必要がある。本

章では、第1章で挙げた3つの条件のうちの③データが十分な精度を備えること（不要なものを含まないこと）を、前処理によって実現するための検討を行う。ドップラーライダーを例に議論を進めるが、レーダにも適用可能である。

高精度化に関する検討に先立ち、観測値に重畳する誤差の種類を整理する。観測の際に生じる誤差は、以下の3つに分類される [52]。

- (a) 観測値が真値のまわりにばらついて分布するランダム誤差（量子化誤差もこれに含まれる）
- (b) 機器校正の不備などにより発生する、観測値の平均値が真値との間に偏差を持つ系統誤差
- (c) クラッタと呼ばれる目標以外の物体からの信号の混入・干渉や、目標からの信号が相対的に小さいために雑音成分を拾うことにより、観測値が真値と大きくかけ離れた値を示す大誤差

高精度なデータ解析結果を得るためには、以上の誤差要因を取り除くことが必要であり、そのための様々な品質管理手法が提案されている [52,81,82]。例えば、文献 [81]では、風速値が0m/sに近く信頼性の低いデータの除去、利用可能なデータポイント数による制御、閾値処理などにより上記(a)及び(c)に起因する誤差要因を取り除いている。文献 [52]では、上記誤差要因(a)及び(c)に起因する異常値を曲線フィッティングと二乗平均平方根誤差（Root Mean Squared Error; RMSE）を閾値とする閾値処理で除去する操作を3回繰り返すことで誤差要因を取り除いている。文献 [82]では、2種類以上の仰角の観測値を用いることで風ベクトルの推定精度改善を図っている。しかしながら、既出の品質管理手法は、所望観測領域以外の補助観測を必要とするものが多く、また、観測頻度が低下するなどのデメリットを有し、汎用的かつ実地的な手法はいまだ確立されていない。

本研究では、上記誤差要因に対応する実地的な方式を検討する。(a)には、最小二乗法や平均化のように誤差要因を相殺する方式が効果があることから、本研究では特に取り上げないこととする。(b)は、系統誤差要因がわかれば除去は可能である。本研究では、センサを搭載したプラットフォームの動揺により観測値に誤差が重畳する場合を考え、動揺補正方式を提案する。(c)に関しては、大誤差が乗った観測値は一般に補正不可能であり、劣化した観測値の除去と、残存す

る有効な観測値を用いた精度の確保が課題となる。本研究では、観測対象の性質を利用したデータスクリーニング方式を提案する。

5.2 VAD 法による風向・風速推定における問題点

本節では、前節で挙げた誤差要因のうち、対応が困難と考えられる大誤差の影響をシミュレーションによって把握するとともに、改善策の方向付けを行う。以降、特に断らない限り、VAD法を用いた風速場の推定を扱うこととする。

VAD法を用いた風速場推定における大誤差の影響は、大誤差が重畳した視線速度を用いて第2章の式(2.16)により算出する風向風速推定結果は、重畳した誤差以上に真値とかけ離れた異常値となることである。

図 5.1 に、視線速度の観測誤差により、風向風速推定計算が正しく行われなかった場合、すなわち、視線速度が描くサインカーブを誤推定する状況を模式的に表した図を示す。図 5.1(a) は、横軸が方位角、縦軸が視線速度で、黒で塗りつぶした丸印は正常な観測値を、灰色で塗りつぶした丸印は誤差を含む観測値を示す。通常は、正常な観測値と異常な観測値を区別することは困難であるため、風向風速推定、すなわち、サインカーブフィッティングの結果、図 5.1(b) の破線で示した正しいサインカーブではなく、実線で示した誤ったサインカーブが抽出され、結果として、風向・風速推定値は真の値から大きく乖離する。

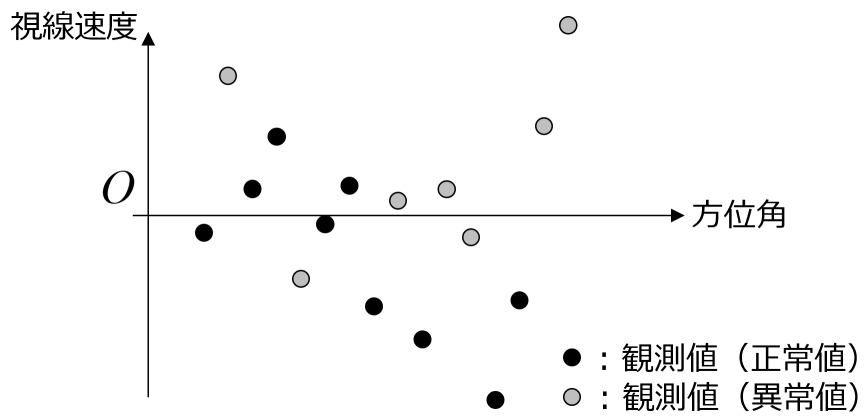
次に、シミュレーションにより、視線速度が劣化した場合の風向・風速推定の模擬を行う。表 5.1 に、劣化した視線速度を用いた風向・風速推定シミュレーション諸元を、図 5.2 に、ドップラーライダの焦点距離、すなわち、もっとも感度が高く、観測精度の高い距離を 250m に設定したときの信号対雑音比 (S/N と表記) の模式図を示す。表 5.1 には、ライダの観測パラメータとして、視線数、レンジ数、レンジ分解能、仰角、視線速度計測精度を、風速場の設定値として、水平風速、水平風向、鉛直風速を、劣化模擬パラメータとして、劣化レンジ (劣化視線数)、劣化模擬方法を、それぞれ示している。ライダの観測パラメータは、風計測用のドップラーライダとして一般的な値とした。また、風速場については、視線速度が劣化した場合の風向・風速推定状況を模擬する目的から単純化し、高度によらず同一の風向及び風速を設定した。

次に、視線速度の劣化模擬について説明する。一般に、ドップラーライダーで風計測を行う際は、観測領域内のある距離にレーザ光の焦点を設定することで、観測距離の調整を行う。このとき、受信信号の信号対雑音比 (Signal-to-Noise ratio, S/N) は、図5.2のように、設定した焦点距離をピークとしてそれよりも遠方及び近傍に向かうに従い低下し、機器に固有な正常に観測できる信号対雑音比基準値 (図5.2の破線) を下回ると計測精度が劣化する。本シミュレーションでは、焦点距離を高度250m (8, 9レンジ) とし、焦点距離から遠い1,2レンジ、及び、15~20レンジにおいて、あらかじめ定めた本数の視線データにガウス雑音を重畳させ、劣化させた。全30視線の中で、どの視線を劣化されるかについては、試行毎にランダムに変化するようにした。また、重畳させるガウス雑音の標準偏差は、劣化時の視線速度となるような経験的な値を設定した。

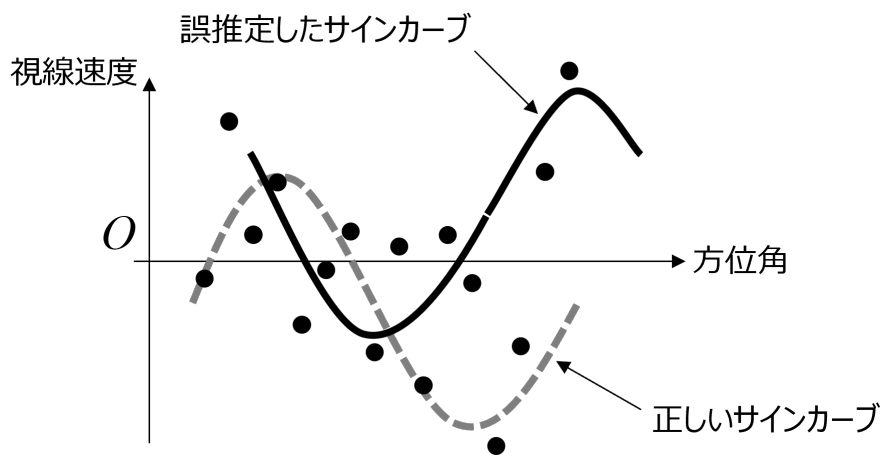
図 5.3 に、視線速度の劣化がない場合の風向・風速推定シミュレーション結果を、図 5.4 に、視線速度の劣化がある場合の風向・風速シミュレーション結果をそれぞれ示す。図 5.3(a) は、視線速度の劣化がない場合の視線速度で、横軸を方位角、縦軸を視線速度とした図であり、図 5.3(b) は、横軸を高度、縦軸を視線速度とした図である。図 5.3(a) から、観測点がサインカーブを形成していることがわかる。また、図 5.3(b) では、全高度に渡って観測点の値域に変化がなく、これは視線速度の変化 (劣化) がないことを表している。図 5.3(c) は推定した水平風速結果、図 5.3(d) は推定した水平風向結果である。図中のマゼンタ色の丸印はそれぞれの設定値を示す。これらの結果から、水平風速及び水平風向ともに、ほぼ設定値どおりの 10 m/s、200 deg となっていることがわかる。

一方、図 5.4(a) は、視線速度の劣化がある場合の視線速度で、横軸を方位角、縦軸を視線速度とした図であり、図 5.4(b) は、横軸を高度、縦軸を視線速度とした図である。図 5.4(a) には全 20 レンジ分の劣化した視線速度が重畳しているため、図 5.3(a) に現れていたサインカーブから外れた観測値が全体的に分布していることがわかる。また、図 5.4(b) では、表 5.1 で設定したレンジの観測点が、劣化のない状況の図 5.3(b) に比べて大きく変化しており、正しく劣化状況が模擬できていることがわかる。このとき、図 5.4(c) の水平風速の推定結果、及び、図 5.4(d) の水平風向の推定結果は、表 5.1 で設定したレンジの推定値が真値 (マゼンタ色の丸印) から大きく乖離していることがわかる。

本シミュレーションでは、劣化させた視線は全 30 視線中の 5~20 視線と限定的であるにもかかわらず、推定値は大きく劣化することが確認できた。これを回避するためには、風向・風速推定処理（フィッティング）前に誤差を含む、すなわち、品質の悪い観測値を取り除く必要がある。しかしながら、前述のように、正常な観測値と誤差を含む観測値を事前情報なしに見分けることは困難である。また、ただ品質の悪い観測値を除去しただけではサンプル点数が減少し、フィッティングの精度が劣化する恐れがある。このような問題に対し、従来実施される対策（品質管理手法）では、データ取得を冗長化（データ取得機会を増加）し、不要データ除去に伴うデータ取得率低下を軽減している [92,95]。また、異なる対策として、判定しきい値を変化させながらデータ除去を反復的に行うことで、過剰なデータ欠損を防ぐ工夫も行われている [52]。しかし、これらの品質管理手法は、精度改善効果は期待できるものの、データの更新レートを低下させることに加え、風向・風速の変化が大きい状況では、それに追従できなくなるデメリットが考えられる。以上のことから、実際の観測の中でデータ更新レートを低下させない品質管理手法が望まれる。



(a) 不要応答を含む観測値の模式図



(b) (a) に対するサインカーブフィッティング結果の模式図

図 5.1 視線速度の観測誤差により、風向風速推定を誤る状況を示す模式図

表 5.1 劣化した視線速度を用いた風向・風速シミュレーション諸元

項目	値
ライダの観測パラメータ	
視線数	30
レンジ数	20
レンジ分解能	30 m
仰角	80 deg
視線速度計測精度 (RMS)	0.1 m/s
風速場設定値	
水平風速	10 m/s (全レンジ共通)
水平風向	200 deg (全レンジ共通)
鉛直風速	1 m/s (全レンジ共通)
劣化模擬パラメータ	
劣化レンジ (劣化視線数)	1(10), 2(5), 15(10), 16(15), 17(20), 18(20), 19(20), 20(20)
劣化模擬方法	平均 0 m/s, 標準偏差 15 m/s のガウス雑音を視線速度に重畳

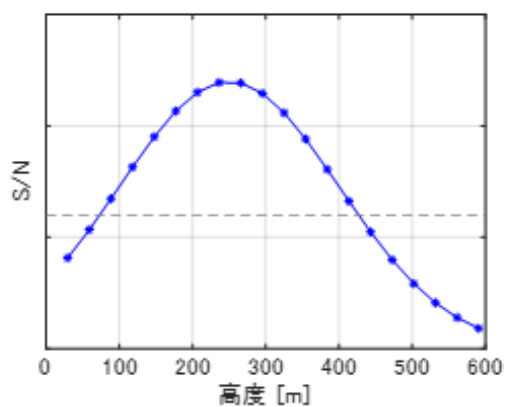
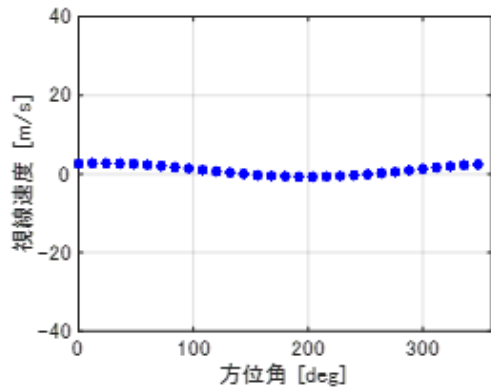
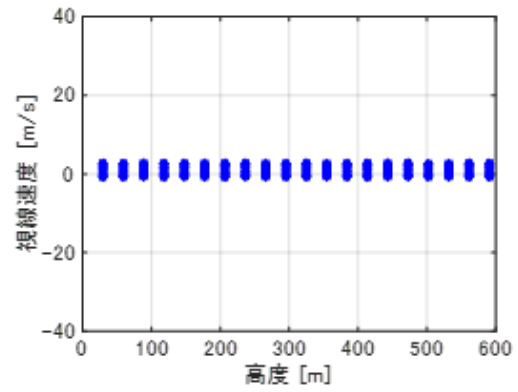


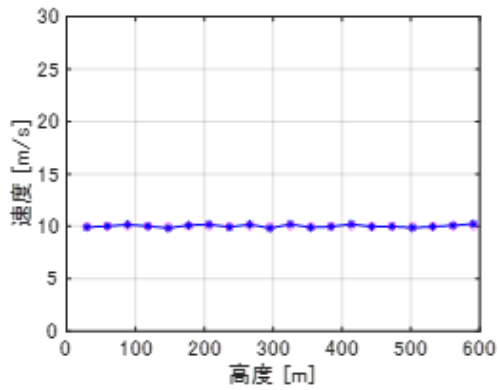
図 5.2 高度 250m を焦点距離とした場合の S/N の模式図
破線より上 (高度 180~420m) は十分な S/N が取れており、
観測値が正常である可能性が高い。
破線より下 (高度 180m 未満及び高度 420m 以遠) は十分な
 S/N が取れておらず、観測値が異常である可能性が高い。



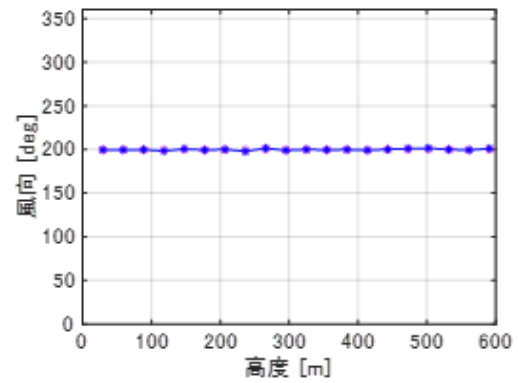
(a) 方位角毎の視線速度
青点は計測値



(b) 高度毎の視線速度
青点は計測値

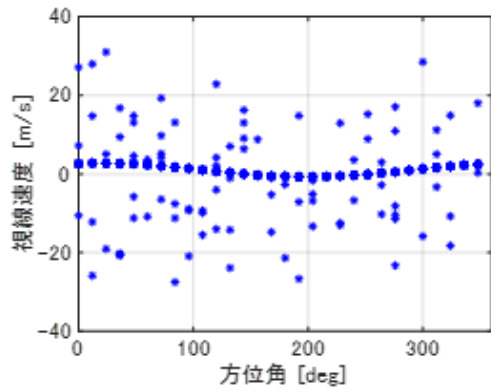


(c) 風速推定結果
赤丸は設定値、青点は推定値

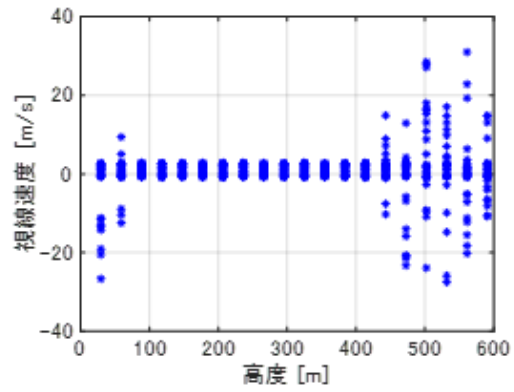


(d) 風向推定結果
赤丸は設定値、青点は推定値

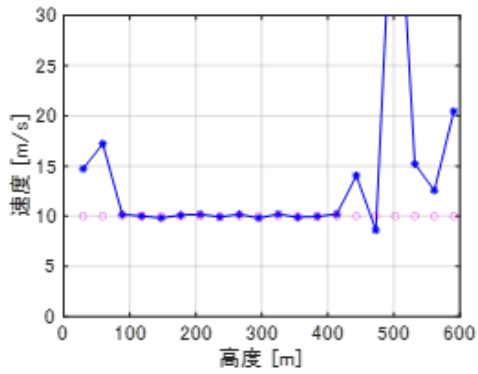
図 5.3 視線速度の劣化がない場合の風向・風速推定シミュレーション結果



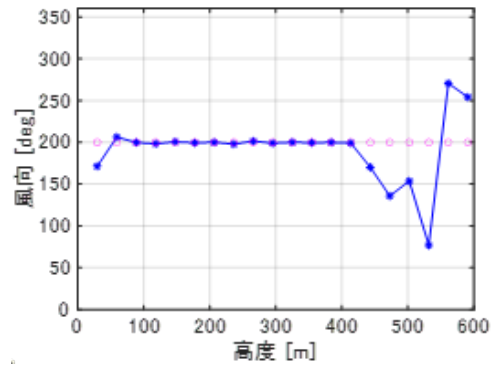
(a) 方位角毎の視線速度
青点は計測値



(b) 高度毎の視線速度
青点は計測値



(c) 風速推定結果
赤丸は設定値、青点は推定値



(d) 風向推定結果
赤丸は設定値、青点は推定値

図 5.4 視線速度の劣化がある場合の風向・風速推定シミュレーション結果

5.3 プラットフォームの動揺補正アルゴリズム

本節では、(b) 系統誤差対策に関し、センサを搭載したプラットフォームの動揺により観測値に誤差が重畳した場合の改善策として、動揺補正方式を提案する。

系統誤差の補正（抑圧）に際しては、当該誤差の把握（モニタリング）が必須である。本研究では、洋上の船やブイなどの浮体にドップラーライダ（以降、単にライダと称することがある）と、動揺センサがともに搭載されているものと仮定する。図5.5に、浮体式ドップラーライダの装置構成を、図5.6に、動揺の定義を、図5.7に、浮体式ドップラーライダの機能系統をそれぞれ示す。図5.5では、ドップラーライダ及び動揺センサはプラットフォームの動揺中心からの位置ベクトルで表しているが、後に説明するように動揺補正では両者の相対的な位置関係（動揺センサに対するライダの位置ベクトル）のみを使用するため、動揺中心は既知である必要はない。また、図5.7のように、本節では簡単化のため東西南北鉛直の5ビームを用いた観測を例示するが、風向風速推定法に制約はない。動揺センサで計測する動揺は、図5.6のように、横揺れ（roll）、縦揺れ（pitch）、偏揺れ（yaw）の姿勢角と、姿勢角速度、また、前後揺れ（surge）、左右揺れ（sway）、上下揺れ（heave）の並進速度の9種類で、取得レートは、ライダの1視線速度取得レート以上とする。

動揺補正の考え方は、周囲の風速場は一様であるとの仮定の下、補正前のライダの観測データは、視線速度と動揺によりずれた（誤った）方位情報の組であるが、観測方位を動揺センサの計測結果を用いて修正することで、視線速度と実際に観測した（正しい）方位情報の組に変換するものである。そのため、最終段では風ベクトルは視線速度と正しい方位を用いて算出され、式(2.16)と同様に、未知の風速場を計測した視線速度データと、実測した動揺補正後の視線速度の差の二乗和が最小となる条件から未知の風速場を求める。

動揺補正の詳細を説明する。図5.7のとおり、5つのビームで計測する視線速度

と、対応する単位ベクトルをそれぞれ

$$V_L = \{V_N, V_E, V_S, V_W, V_V\}$$

$$\vec{e}_L = \{\vec{e}_N, \vec{e}_E, \vec{e}_S, \vec{e}_W, \vec{e}_V\}$$

とし、 x 軸、 y 軸、 z 軸周りの姿勢角及び姿勢角速度、並進速度をそれぞれ

$$\{A_{pitch}, A_{roll}, A_{yaw}\}$$

$$\{\Omega_{pitch}, \Omega_{roll}, \Omega_{pitch}\}$$

$$\{V_{sway}, V_{surge}, V_{heave}\}$$

とする。また、ライダの1視線計測時間内に取得した動揺データ数を m とする。ここでは簡単化のため全ての視線において動揺データ数を同数としているが、視線毎に異なってもよい。

動揺補正前の風ベクトルを \vec{V} 、動揺補正後の風ベクトルを \vec{V}_c とすると、動揺補正後の風ベクトルは、動揺補正前の風ベクトルにライダの動揺による移動速度が重畳したものであり、この動揺成分を \vec{V}_X とすると、

$$\vec{V} = \vec{V}_c - \vec{V}_X \quad (5.1)$$

となる。

次に、回転成分を求める。 L を任意の視線方向、すなわち、 $L \in \{N, E, S, W, V\}$ とすると、姿勢角による回転運動 T_L は、

$$T_L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{y,i} R_{p,i} R_{r,i}$$

と表すことができる。ただし、 $R_{r,i}$ は姿勢角rollの*i*番目 ($i = 1, 2, \dots, m$) の回転行列、 $R_{p,i}$ は姿勢角pitchの*i*番目の回転行列、 $R_{y,i}$ は姿勢角yawの*i*番目の回転行列である。

$$R_{y,i} = \begin{pmatrix} \cos(A_{yaw_i}) & -\sin(A_{yaw_i}) & 0 \\ \sin(A_{yaw_i}) & \cos(A_{yaw_i}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{p,i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_{pitch_i}) & -\sin(A_{pitch_i}) \\ 0 & \sin(A_{pitch_i}) & \cos(A_{pitch_i}) \end{pmatrix}$$

$$R_{r,i} = \begin{pmatrix} \cos(A_{roll_i}) & 0 & \sin(A_{roll_i}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(A_{roll_i}) & 0 & \cos(A_{roll_i}) \end{pmatrix}$$

また、補正前の各視線方向の単位ベクトルを

$$\vec{e}_L \in \{\vec{e}_N, \vec{e}_E, \vec{e}_S, \vec{e}_W, \vec{e}_V\}$$

補正後の各視線方向の単位ベクトルを

$$\vec{e}_L \in \{\vec{e}_{cN}, \vec{e}_{cE}, \vec{e}_{cS}, \vec{e}_{cW}, \vec{e}_{cV}\}$$

とすると、

$$\vec{e}_{cL} = T_L \cdot \vec{e}_L, \quad L \in \{N, E, S, W, V\}$$

である。

ベクトル \vec{V}_1 と \vec{V}_2 の内積を $\langle \vec{V}_1, \vec{V}_2 \rangle$ と表現すると、ライダで計測する視線速度 V_L について次式が成り立つ。

$$\langle \vec{V}, \vec{e}_c \rangle = V_L \quad (5.2)$$

式(5.1)を式(5.2)に代入すると、式(5.3)が成立する。

$$\begin{aligned} \langle \vec{V}_c - \vec{V}_X, \vec{e}_c \rangle &= \langle \vec{V}_c, \vec{e}_c \rangle - \langle \vec{V}_X, \vec{e}_c \rangle = V_L \\ \therefore \langle \vec{V}_c, \vec{e}_c \rangle &= V_L + \langle \vec{V}_X, \vec{e}_c \rangle \end{aligned} \quad (5.3)$$

ここで、ライダの動揺による移動速度 \vec{V}_X に戻ると、これはプラットフォームの並進速度 \vec{V}_{pf} と、姿勢角の変化によるライダと動揺センサの相対速度 \vec{V}_r の合成と考えることができる。

$$\vec{V}_X = \vec{V}_{pf} + \vec{V}_r \quad (5.4)$$

図5.5より、動揺センサに対するライダの位置ベクトルは次式となる。

$$\vec{SD} = \vec{OD} - \vec{OS} \quad (5.5)$$

プラットフォームの動揺中心の移動速度を \vec{V}_{pf0} 、姿勢角の変化による動揺中心と動揺センサの相対速度を \vec{V}_{rS} とすると、プラットフォームの速度ベクトルは

$$\vec{V}_{pf} = \vec{V}_{pf0} + \vec{V}_{rS} = \vec{V}_{pf0} + T_L \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{OS}) \quad (5.6)$$

ここで、

$$\vec{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_{pitch} \\ \Omega_{roll} \\ \Omega_{yaw} \end{bmatrix}$$

であり、 \times は外積を表す。一方、姿勢角の変化によるライダの相対速度を \vec{V}_{rD} とすると次式が成り立つ。

$$\vec{V}_X = \vec{V}_{pf0} + \vec{V}_{rD} = \vec{V}_{pf0} + T_L \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{OD}) \quad (5.7)$$

よって、式 (5.5) から式 (5.7) により、ライダの移動速度 \vec{V}_X は、以下のように求められる。

$$\vec{V}_X = \vec{V}_{pf} + T_L \cdot (\vec{\Omega} \times (\vec{OD} - \vec{OS})) = \vec{V}_{pf} + T_L \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{SD}) \quad (5.8)$$

式 (5.4) と式 (5.8) の比較により、姿勢角の変化によるライダと動揺センサの相対速度 \vec{V}_r は

$$\vec{V}_r = T_L \cdot (\vec{\Omega} \times (\vec{OD} - \vec{OS})) = T_L \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{SD}) \quad (5.9)$$

よって、式 (5.3) 右辺第2項は、以下のように展開される。

$$\begin{aligned} \langle \vec{V}_X, \vec{e}_c \rangle &= \langle \vec{V}_{pf} + \vec{V}_r, \vec{e}_c \rangle \\ &= \langle \vec{V}_{pf}, \vec{e}_c \rangle + \langle \vec{V}_r, \vec{e}_c \rangle \\ &= \langle \vec{V}_{pf}, \vec{e}_c \rangle + \langle T_L \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{SD}), T_L \cdot \vec{e} \rangle \end{aligned}$$

ここで、右辺第2項について、ベクトルの内積は2つのベクトルの大きさとなす角で決まることから、回転行列 T_L は意味がなくなるため除くことができ、次式を得る。

$$\langle \vec{V}_X, \vec{e}_c \rangle = \langle \vec{V}_{pf}, \vec{e}_c \rangle + \langle \vec{\Omega} \times \vec{SD}, \vec{e} \rangle \quad (5.10)$$

式 (5.10) 右辺第1項は、プラットフォームの並進速度を動揺補正後の視線方向に射影した成分で、第2項は、姿勢角の変化によるライダと動揺センサの相対速度を元の視線方向に射影した成分であり、それぞれ V_{pfL} 、 V_{rL} と置くと、式 (5.3) は

$$\langle \vec{V}_c, \vec{e}_c \rangle = V_L + V_{pfL} + V_{rL} \quad (5.11)$$

と表される。式 (5.11) は、動揺補正後の視線速度は、ライダで直接計測した視線速度 V_L に V_{pfL} と V_{rL} を加えたものとなること、すなわち、視線速度 V_L は

$V_L + V_{pfL} + V_{rL}$ に補正されることを意味する。以上により、動揺補正後の風ベクトルは、視線速度としてこれを式(2.16)に代入することで得られる。

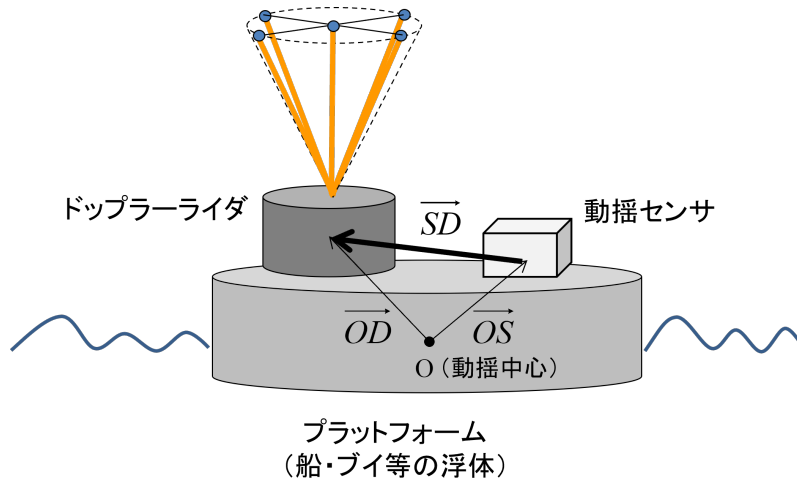
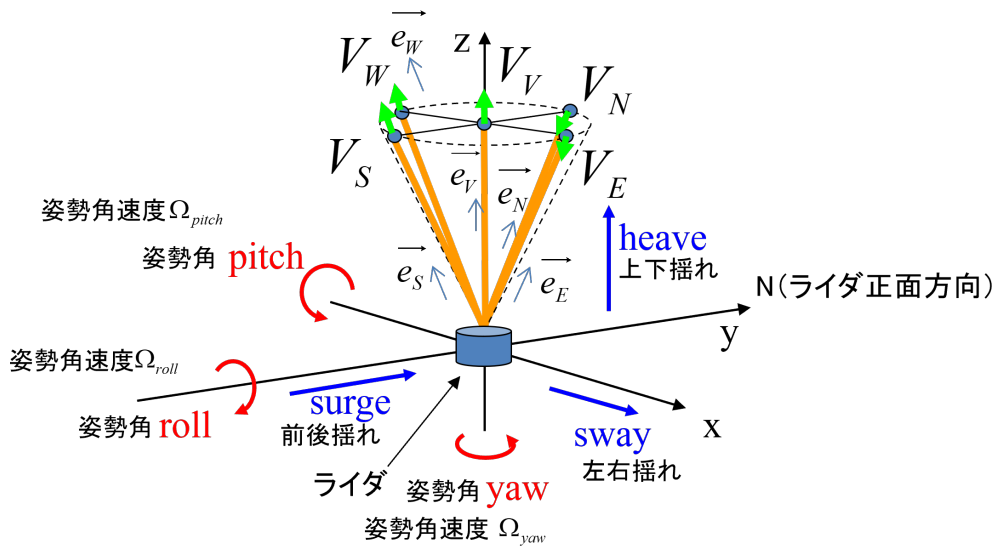


図 5.5 浮体式ドップラーライダの装置構成



V_N, V_E, V_S, V_W, V_V : N, E, S, W, Z 各方向の視線速度

$\vec{e}_N, \vec{e}_E, \vec{e}_S, \vec{e}_W, \vec{e}_V$: 各視線方向の単位ベクトル

図 5.6 動揺の定義

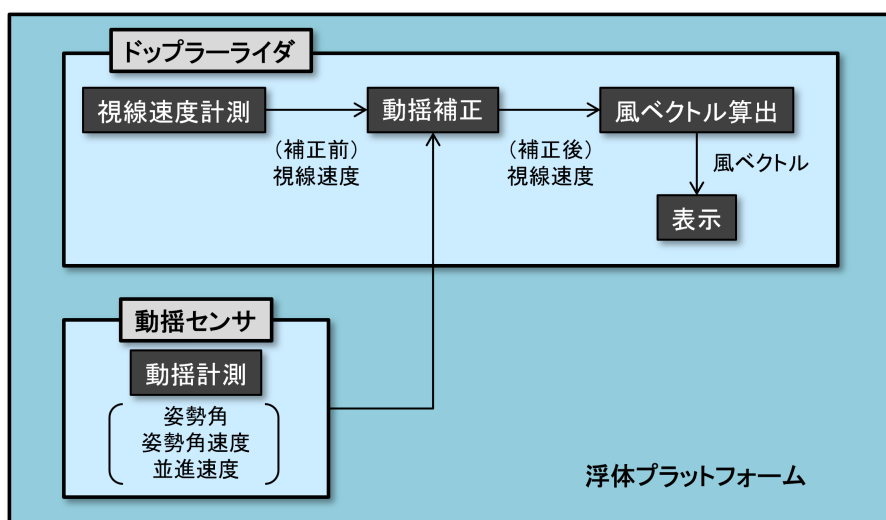


図 5.7 浮体式ドップラーライダーの機能系統

5.4 不要応答スクリーニングアルゴリズム

本研究では、風観測の際に観測領域周辺の冗長観測や、データ更新レートを落とすことなく劣化した不要な観測値（以降、不要応答と呼ぶ）を除去する、実用性の高い不要応答スクリーニング法を検討する。なお、風向・風速推定計算で用いるVAD法は、本来一様風だけでなく、風の水平発散や収束なども扱うことができるが [80, 93]、ここでは簡単化のため、一様風の場合に特化して議論を進めることとする。

アルゴリズム構築に際しては、ドップラーライダーによって観測されるデータの性質に立ち返って考える。図 5.8 に、第 2 章の図 2.7 の VAD 法による風（風向・風速）計測の概念図を距離方向（高度方向）に拡張した、ドップラーライダーで風を計測する際の観測ジオメトリを示す。VAD 計算を行うためには、図 5.8 のように、仰角を一定に保ったまま方位角方向にビームを走査し、丸印で示した観測点において視線速度を取得する。図 5.8 では距離方向（高度方向）に連続する 3 レンジの観測点を示しているが、一般に、風計測用のドップラーライダーでは数 10 レンジ分（高度数 100 m 分）のデータを取得可能である [32, 98, 99]。ドップラーライダーの距離分解能、すなわち、連続する観測点間の距離は 30 m（パルス幅 200 ns）～150 m

(パルス幅 1 μs) が一般的であるが、受信信号をパルス幅で決まる距離分解能よりも細かい間隔でオーバーサンプリングし、後段でパルス幅分の信号をオーバーラップさせて切り出すことで、信号対雑音比を確保しつつパルス幅で決まる距離分解能よりも高い(細かい)数mごとの観測値を得ることもできる [98,99]。一方、観測対象である大気中の風においては、水平風の変動に比べ、鉛直風の変動は小さいことが知られている [79]。このような風の性質と、ドップラーライダーの距離方向(高度方向)に高分解能観測が可能な特性を鑑みると、隣接するレンジの風向・風速はほぼ同一と考えることができ、隣接レンジのデータをも処理に含めることで、冗長観測などをすることなく利用できるデータを増やすことが可能となる。以上の考え方に基づき、不要応答スクリーニングアルゴリズムを構築する。

方位角方向へビーム走査して観測される視線速度は、理想状態では水平風成分を反映したサインカーブと、鉛直風成分を反映したオフセット値の和となる(第2章 図 2.7)。よって、1周ビーム走査して得られた視線速度を方位角方向に平均すると、1周期分のサインカーブ成分が相殺され、オフセット値のみが残る。更に、前述した風の鉛直方向の変動が小さい性質と、ライダーの距離方向(高度方向)に高分解能観測が可能な特性を利用すると、注目するレンジに隣接する周囲(上下)のレンジのオフセット値はほぼ等しいという仮定を置くことができる。第2章の式(2.8)に示したとおり、正常な視線速度は、このオフセット値を中心として分布することから、オフセット値の上下に閾値を設け、閾値を外れたデータを除外することで、異常な視線速度を除去することができる。以上が不要応答スクリーニングアルゴリズムの基本的な考え方である。

図 5.9 に、不要応答のスクリーニングアルゴリズムの概念図を示す。図 5.9(a)~(c) はそれぞれ、注目するレンジ r を含む前後1レンジの視線速度分布であり、横軸を方位角、縦軸を視線速度、観測値を丸印で表している(図 5.8 と対応している)。図 5.9(d) は、視線速度閾値の概念図であり、オフセット値(平均値) m_r を中心として、上下に $k \cdot s_r$ の値を視線速度閾値とする。 k は係数、 s_r は標準偏差であり、これは視線速度のばらつきの大きさに応じて閾値を設けることを意味する。図 5.9(e) は、視線速度閾値処理の概念図であり、(d) で設けた閾値の上限を上回る視線データ、及び、下限を下回る視線データを無効化(除去)する。図 5.9(f) は、風向・風速推定処理の概念図であり、残った r レンジの視線データに対して通常

の風向・風速推定処理（VAD演算）を施すことを表す。なお、(e)において無効化した視線データ数が多い場合は風向・風速推定精度の劣化が懸念されるため、隣接レンジの有効視線データも含むこともできるが、以降のシミュレーションではこの処理は実施していない。

次に、図 5.10 に、不要応答スクリーニングアルゴリズムの処理フローを示す。まず方位方向に一周分ビーム走査した視線データ（視線速度）を入力する（ステップ①）。以降は、レンジ毎に以下の処理を繰り返す。あるレンジ r について、隣接するレンジ $r - \alpha$ からレンジ $r + \beta$ の範囲の視線データの平均及び標準偏差を求める（ステップ②）。1 回のビーム走査によって取得される視線数を n_{los} 、レンジを i 、ビーム走査開始から取得される視線データに順次番号を付し、視線番号 j の視線速度を $V_{i,j}$ 、視線速度の平均値を m_r 、標準偏差を s_r とすると、これらは次式(5.12)及び式(5.13)のように表すことができる。

$$m_r = \frac{1}{n_{los}(\alpha + \beta + 1)} \left(\sum_{i=r-\alpha}^{r+\beta} \sum_{j=1}^{n_{los}} V_{i,j} \right) \quad (5.12)$$

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n_{los}(\alpha + \beta + 1)} \left(\sum_{i=r-\alpha}^{r+\beta} \sum_{j=1}^{n_{los}} (V_{i,j} - m_r)^2 \right)} \quad (5.13)$$

ただし、 $i = r - \alpha, r - \alpha + 1, \dots, r + \beta - 1, r + \beta,$

$$j = 1, 2, \dots, n_{los}$$

次に、不要応答を除去する際の視線速度閾値を設定する（ステップ③）。前述のとおり、 k を係数として、平均値 $m_r \pm k \cdot$ 標準偏差 s_r を視線速度閾値として設定する。その後、全視線データに対して閾値処理を行い、閾値範囲外の視線データを除去する（ステップ④）。最後に、残った有効な視線データのみを用いて風向風速を算出する（ステップ⑤）。

図 5.4 に示した視線速度の劣化がある視線データに、不要応答スクリーニングアルゴリズムを適用し動作検証を行う。図 5.11 に、アルゴリズム適用結果を示す。スクリーニングで用いるパラメータは $\alpha = \beta = 2$ 、すなわち、前後に隣接 2 レンジまでのデータを用いて、係数を $k = 1$ とした。図 5.4 と同様、図 5.11(a) は、横軸を方位角、縦軸を視線速度とした図であり、図 5.11(b) は、横軸を高度、縦軸を視線速度とした図である。図 5.11(a)(b) では、図 5.4(a)(b) に現れていた不要応答

が除去され、劣化のなかった図 5.3(a)(b) の状態に近くなったことがわかる。図 5.11(c) の風速推定結果、及び、図 5.11(d) の風向推定結果では、図 5.4 で劣化の大きかったレンジ 1, 2, 15~20 の推定結果が、劣化前の図 5.3 までではないものの、大きく改善している。以上により、提案した不要応答スクリーニングアルゴリズムにより、視線速度が劣化した場合において、風向・風速推定結果の改善効果があることが確認できた。

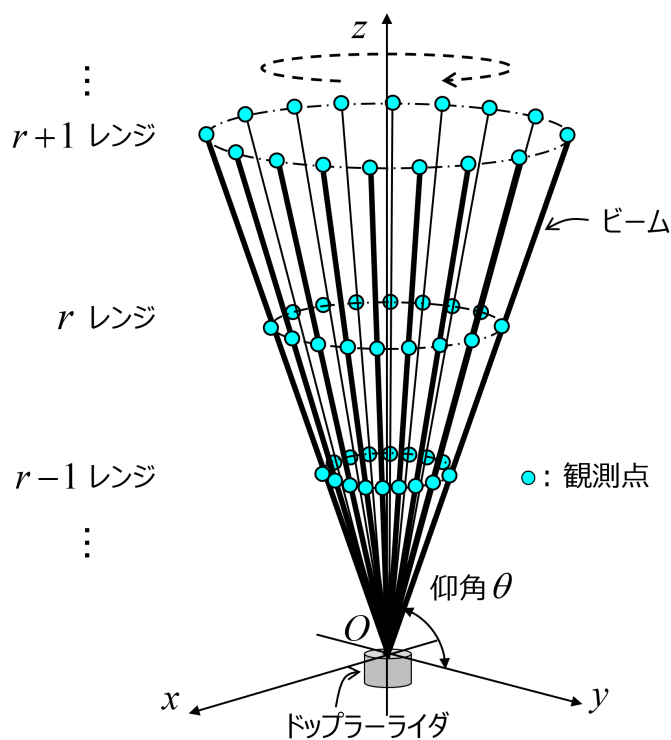
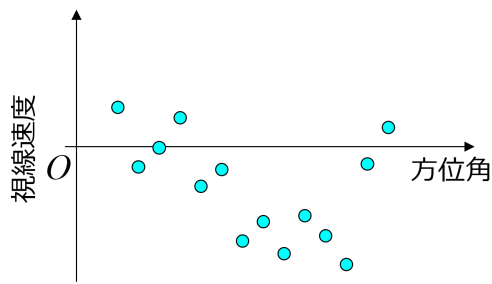
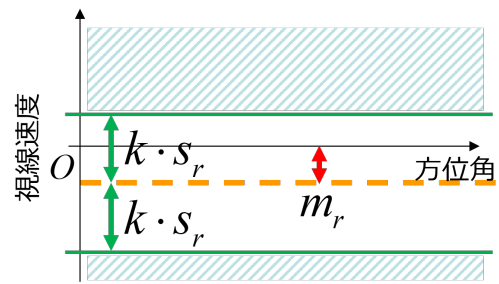


図 5.8 ドップラーライダで風を計測する際の観測ジオメトリ

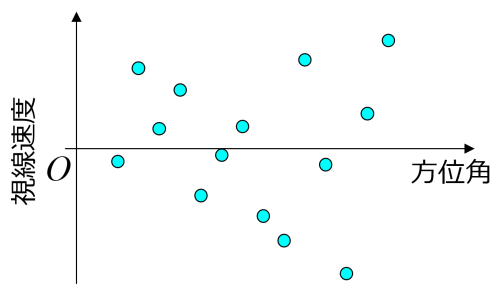


(a) $r + 1$ レンジの視線速度分布

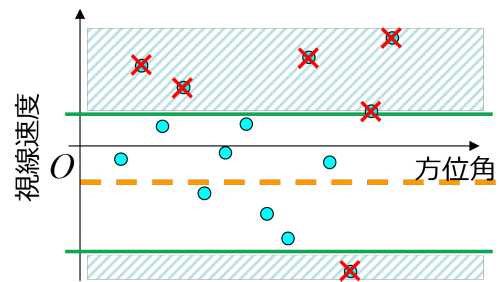


(d) 視線速度閾値の概念図

オフセット値 (平均値) m_r を中心として上下に $k \cdot s_r$ を閾値とする

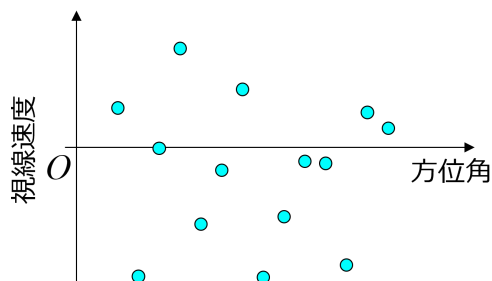


(b) r レンジの視線速度分布
(着目するレンジ)

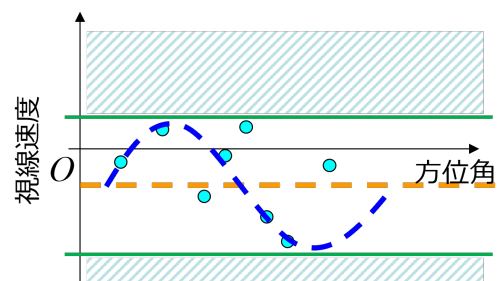


(e) 視線速度閾値処理の概念図

視線速度閾値の上限・下限を超える視線データを無効化 (除去) する



(c) $r - 1$ レンジの視線速度分布



(f) 風向・風速推定処理の概念図

残った r レンジの視線データを用いて風向風速推定

図 5.9 不要応答スクリーニングアルゴリズムの概念図

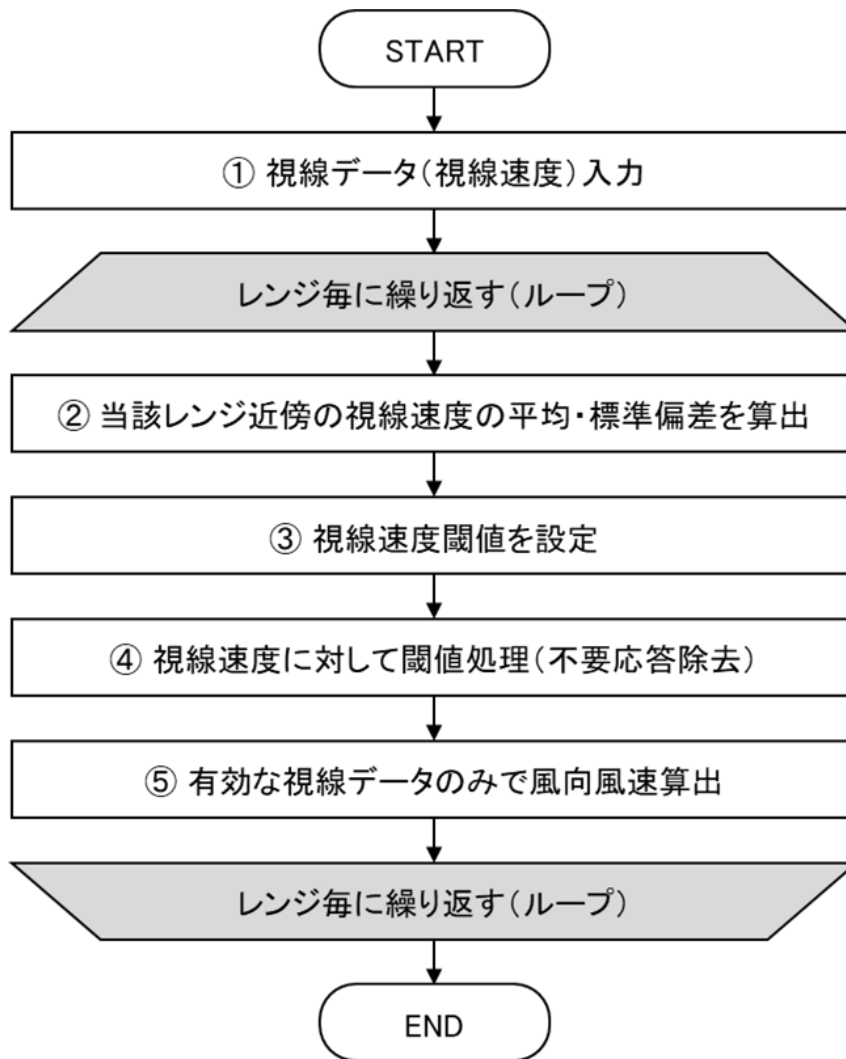
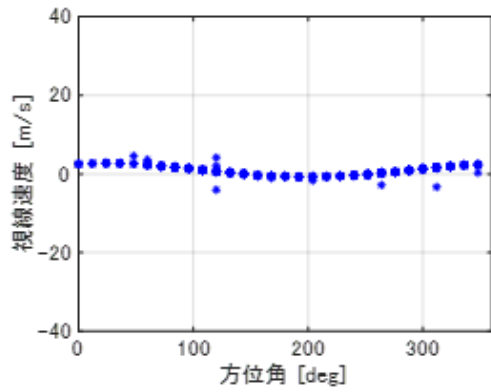
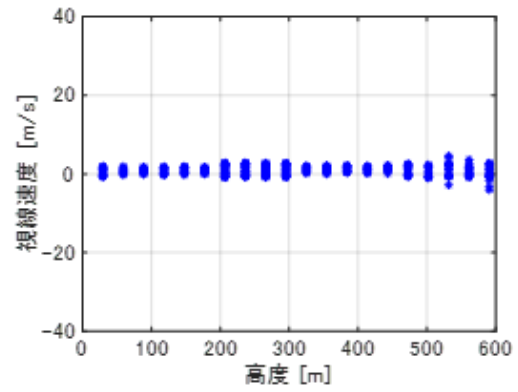


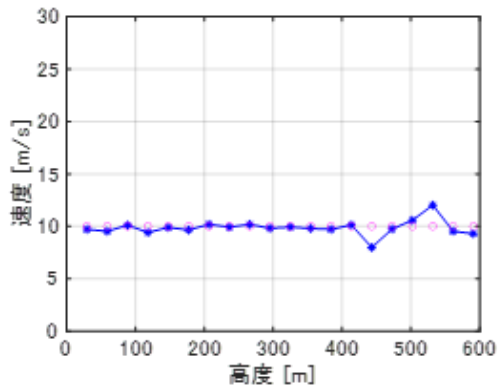
図 5.10 不要応答スクリーニングアルゴリズムの処理フロー



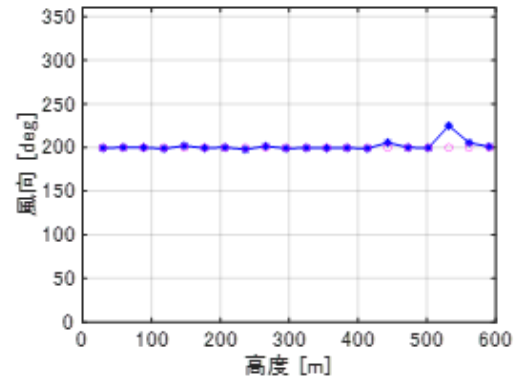
(a) 方位角毎の視線速度
青点は計測値



(b) 高度毎の視線速度
青点は計測値



(c) 風速推定結果
赤丸は設定値、青点は推定値



(d) 風向推定結果
赤丸は設定値、青点は推定値

図 5.11 図 5.4 の視線データに対して不要応答スクリーニングアルゴリズムを適用した結果

5.5 データスクリーニングアルゴリズム検証

前節において、不要応答スクリーニングアルゴリズムの有効性が確認できた。本節では、計算機シミュレーションにより、劣化視線データの数（割合）を変化させ、アルゴリズムのロバスト性について検証する。

表 5.2 に、風向・風速推定精度検証シミュレーションパラメータを示す。ライダの観測パラメータは、表 5.1 と概ね同様とした。ただし、レンジ分解能の概念は本シミュレーションでは不要であるため設けておらず、精度検証という目的に鑑み、低 S/N 状況を模擬するため視線速度計測精度は 0.3 m/s と表 5.1 よりも低めに設定した。風速場を表すパラメータとしては、水平風速の設定値は 5 m/s から 5 m/s 刻みで 6 段階に、水平風向は 60 deg から 60 deg 刻みで 5 段階とした。鉛直風速は評価対象としていないものの実観測に近い条件とするため、 $-0.5 \sim 0.5$ m/s の範囲内で試行毎に変化させた。スクリーニングアルゴリズムのためのパラメータとしては、隣接レンジ数及び閾値係数は、5.4 節の動作検証と同じく隣接レンジ数 $\alpha = \beta = 2$ 、閾値係数 $k = 1$ とした。視線速度の劣化を模擬するパラメータとしては、設定した（水平）風向に対し、総視線数 30 本のうちの 25% (8 本)、50% (15 本)、75% (23 本) に経験的な値として標準偏差 15 m/s のガウス雑音を重畳し劣化させた。評価方法は、同一風速及び風向設定で 100 試行ずつ行い、設定値とスクリーニングせずに推定した結果、及び、設定値とスクリーニング後に推定した結果について、回帰直線（正しく推定できれば傾き 1、y 切片 0 の直線となる）と、決定係数（寄与率） R^2 を求め、スクリーニング前後の変化を比較した。

図 5.12 に、視線データの 25% が劣化した場合の風向・風速推定結果を、図 5.13 に、視線データの 50% が劣化した場合の風向・風速推定結果を、図 5.14 に、視線データの 75% が劣化した場合の風向・風速推定結果を、それぞれ示す。各図において、(a) は横軸を風速設定値、縦軸をスクリーニング処理なしの風速推定値、(b) は横軸を風向設定値、縦軸をスクリーニング処理なしの風向推定値、(c) は横軸を風速設定値、縦軸をスクリーニング処理した風速推定値、(d) は横軸を風向設定値、縦軸をスクリーニング処理した風向推定値としたものである。

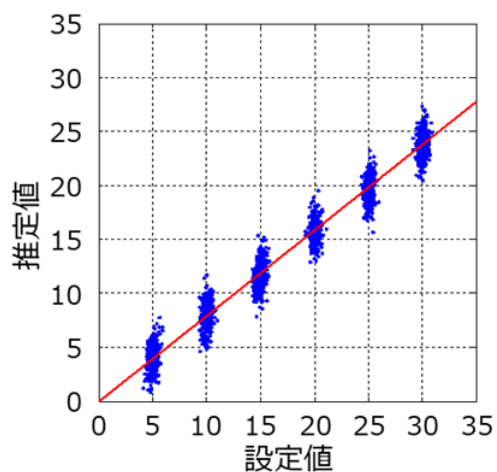
すべてのケースにおいて、スクリーニング実施前は、風速、風向ともに過少推

定する傾向があり、その傾向は視線データの劣化割合が大きくなるほど高いことがわかる。しかし、スクリーニング実施後は、風速、風向ともに大きく改善、すなわち、設定値に近い風速、風向が得られている。ただし、風速については、劣化視線データの割合が多くなるほど、スクリーニング実施後でも過少推定傾向が高くなる結果となった。例えば、図 5.14(c) より、視線データの 75%が劣化した場合、30m/s の風速を 25m/s 程度に過少推定する可能性がある。しかしながらこれは、スクリーニングアルゴリズムだけでなく、フィッティングを利用した風速・風速推定法、すなわち、VAD法自体の課題と考えられるため、今後改めて検討する必要がある。

以上の結果から、劣化視線データが全体の 25%程度であれば、スクリーニングアルゴリズムの適用により、大変精度良く風向・風速値を推定できることが確認できた。また、その精度は、設定した風速、風向に依存することはない。劣化視線データの割合が 50%、75%と高い場合においても、スクリーニングをしない場合はそれぞれ 6 割弱、5 割弱に過少推定する風速の値を、スクリーニング後はそれぞれ 9 割、8 割以上まで回復できる可能性があり、ロバスト性も備えることが確認できた。

表 5.2 風向・風速推定精度検証シミュレーションパラメータ

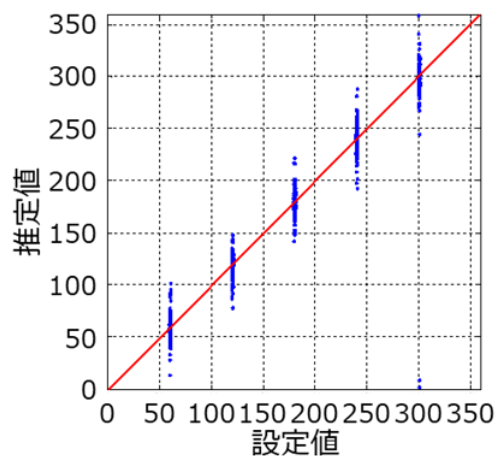
項目	値
ライダーの観測パラメータ	
視線数	30
レンジ数	20
レンジ分解能	30 m
仰角	80 deg
視線速度計測精度 (RMS)	0.3 m/s
風速場設定値	
水平風速	5, 10, 15, 20, 25, 30 m/s
水平風向	60, 120, 180, 240, 300 deg
鉛直風速	試行毎に $[-0.5, 0.5]$ の一様乱数として与える
スクリーニングパラメータ	
隣接レンジ数	$\alpha = \beta = 2$
閾値係数	$k = 1$
劣化模擬パラメータ	
劣化模擬方法	全視線数の 25 / 50 / 75 % に対し平均 0 m/s、標準偏差 15 m/s のガウス雑音を付加
評価方法	水平風速と水平風向に対し回帰直線と決定係数（寄与率） R^2 を算出
試行回数	各 100 回



(a) 風速推定結果 (スクリーニングなし)

$$y = 0.80x - 0.12$$

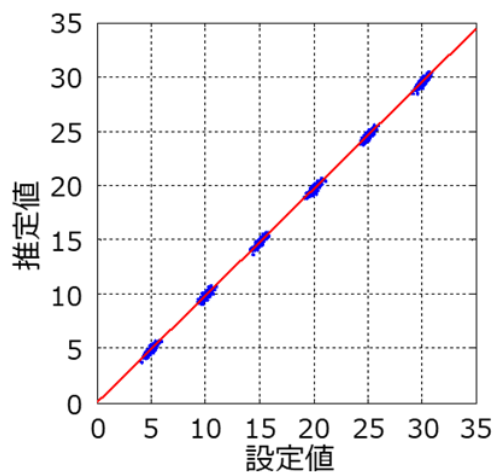
$$R^2 = 0.969$$



(b) 風向推定結果 (スクリーニングなし)

$$y = 1.01x - 1.45$$

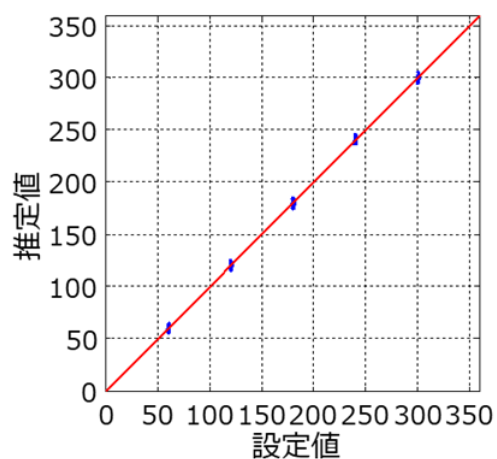
$$R^2 = 0.976$$



(c) 風速推定結果 (スクリーニングあり)

$$y = 0.98x - 0.01$$

$$R^2 = 1.000$$

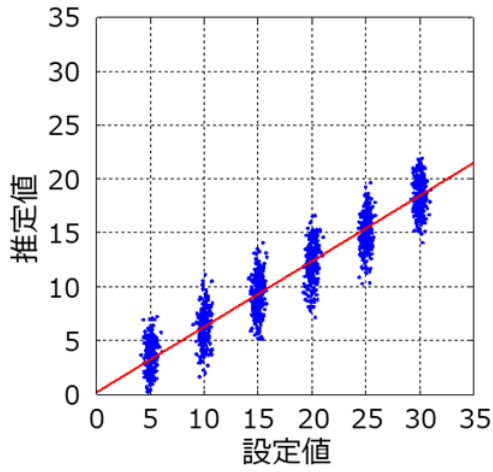


(d) 風向推定結果 (スクリーニングあり)

$$y = 1.00x - 0.10$$

$$R^2 = 1.000$$

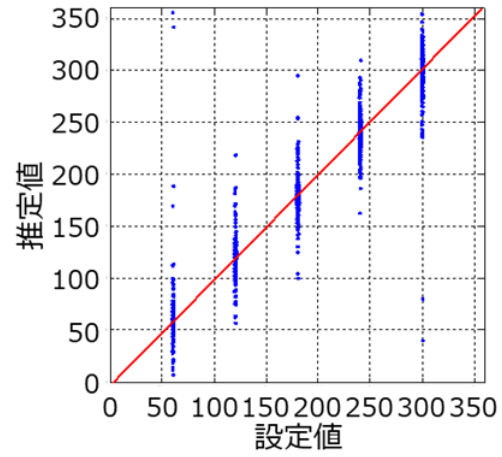
図 5.12 視線データの 25%が劣化した場合の風向・風速推定結果



(a) 風速推定結果 (スクリーニングなし)

$$y = 0.61x + 0.18$$

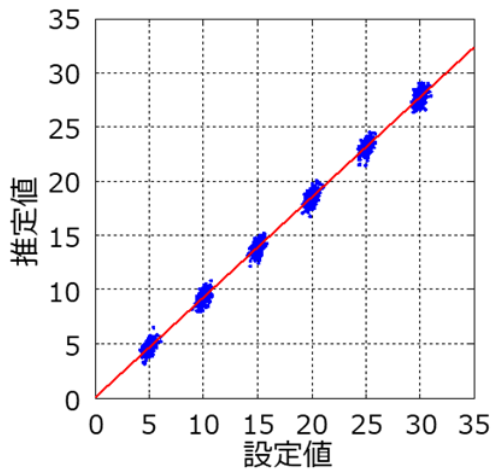
$$R^2 = 0.908$$



(b) 風向推定結果 (スクリーニングなし)

$$y = 1.02x - 2.78$$

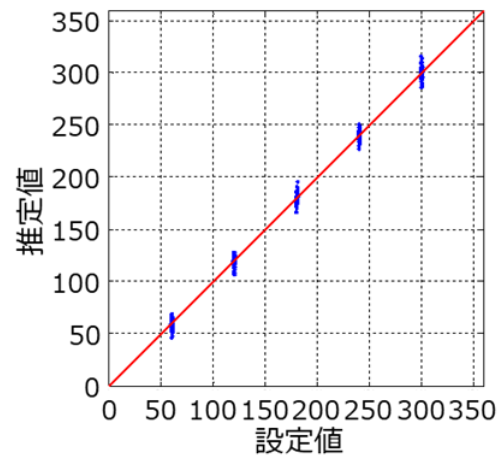
$$R^2 = 0.944$$



(c) 風速推定結果 (スクリーニングあり)

$$y = 0.92x - 0.02$$

$$R^2 = 0.997$$

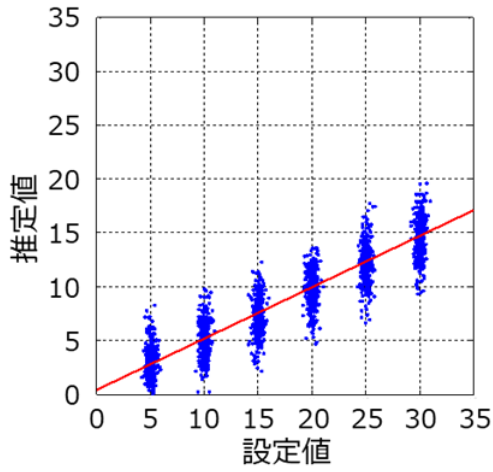


(d) 風向推定結果 (スクリーニングあり)

$$y = 1.00x - 0.31$$

$$R^2 = 0.999$$

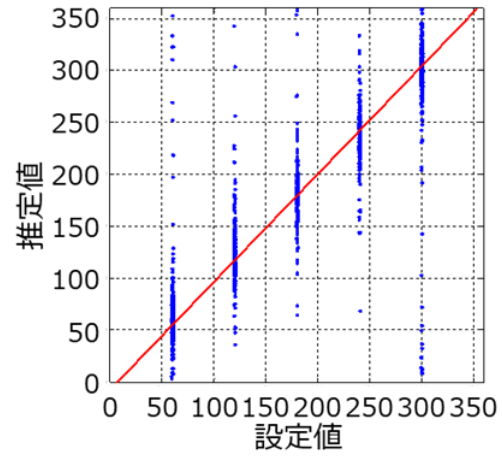
図 5.13 視線データの 50%が劣化した場合の風向・風速推定結果



(a) 風速推定結果 (スクリーニングなし)

$$y = 0.48x + 0.38$$

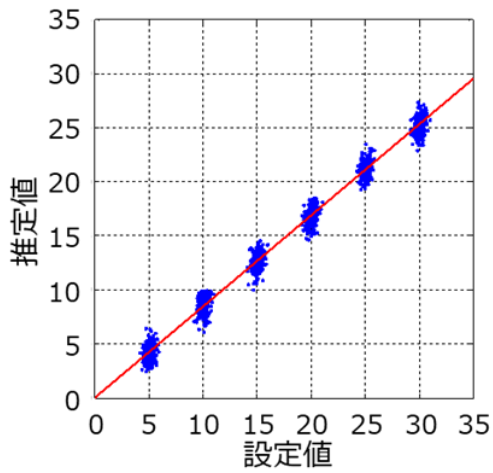
$$R^2 = 0.826$$



(b) 風向推定結果 (スクリーニングなし)

$$y = 1.03x - 5.80$$

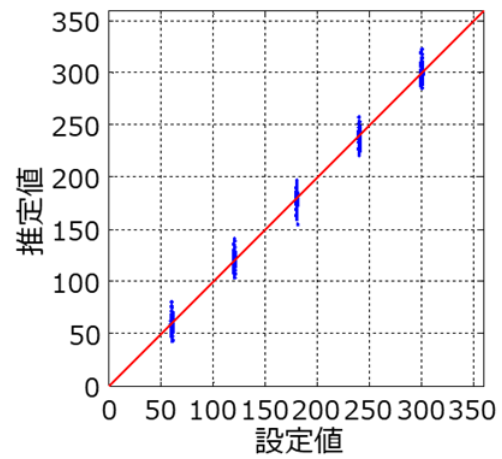
$$R^2 = 0.826$$



(c) 風速推定結果 (スクリーニングあり)

$$y = 0.84x + 0.01$$

$$R^2 = 0.990$$



(d) 風向推定結果 (スクリーニングあり)

$$y = 1.00x - 0.62$$

$$R^2 = 0.997$$

図 5.14 視線データの 75%が劣化した場合の風向・風速推定結果

5.6 結言

主に大気中の風計測に利用されるリモートセンサであるドップラーライダーは、大気中のエアロゾル（塵や埃）の動きから大気中の風を推定するセンサである。しかし、エアロゾルからの反射信号が微弱であるため、低信号対雑音環境下では観測値が雑音などの影響を受けやすく、風速・風向推定値が異常値となることがある。本研究では、風向・風速推定法として一般に用いられるVAD法によって風向・風速を推定する場合に、風の性質とドップラーライダーの距離方向（高度方向）に高分解能観測が可能な特性を利用し、隣接レンジのデータを用いることで、冗長観測などを行うことなく異常観測値（不要応答）を除去し、精度の高い風向・風速を推定可能な手法を提案した。

計算機シミュレーションにより、劣化した視線データ数が全体の25%程度であれば、提案法の適用により、精度良く風向・風速値を推定できることが確認できた。また、その精度は、設定した風速、風向に依存することではなく、劣化視線データの割合が50%、75%と高い場合においても、スクリーニングをしない場合はそれぞれ6割弱、5割弱に過少推定する風速の値を、スクリーニング後はそれぞれ9割、8割以上まで回復できたことから、提案法にはロバスト性があることも確認できた。

今後は、一様な風速場を仮定できない環境や、暴風、突風、乱気流といった、安全・安心な社会生活を営む上で障害となる現象においても適用可能となるよう、データ蓄積とアルゴリズムを継続する必要がある。

第6章 結論

本研究では、激甚化・頻発化する自然災害、悪天候・異常気象を原因とする事故、地政学的要因を背景とする安全保障上の脅威などに備え、安全・安心な社会生活を支えるためにリモートセンシング技術が果たすべき役割が、リモートセンシングデータに関する3つの条件に帰着されることを明らかにした。3つの条件とは、① データが現象を捉えていること（現象を説明できること）、② データの提供が時宜にかなっていること（処理が十分早いこと）、③ データが十分な精度を備えていること（不要なものが含まれていないこと）、である。更に、それぞれの条件に対して具体的な事例及び課題を設定し、解決策を検討した。条件①では、リモートセンシングで使用される電磁波から直接得られるパラメータでは捉えられない現象に対し、新たなパラメータの導入や、現象を判定するアルゴリズムの構築が課題であった。条件②では、リモートセンシング技術の進展により大量のデータ取得が可能になったことに伴い、データ処理（アルゴリズム）の高速化が課題であった。条件③では、データ処理結果の健全性を担保するための雑音や干渉波などの誤差要因の除去アルゴリズムの開発が課題であった。条件①及び条件②はデータ処理の高効率化、条件③はデータ処理の高精度化と位置付けることができる。

第1章では、本研究の背景となっている社会的課題からリモートセンシング技術の役割と解決すべき課題を抽出した後、従来の研究について概観した上で、本研究の位置付けと目的について述べた。

第2章では、リモートセンシング技術を概観した後、後段の第3から第5で展開するリモートセンシングシステムにおける基礎技術について述べた。

第3章では、条件①に対する課題である、電磁波のパラメータでは捉えられない現象に対する新たなパラメータの導入や、判定アルゴリズムの構築に関し、気象レーダデータを用いた霧による悪視程自動判定アルゴリズム構築を検討した。霧の発生による視程の悪化は様々な交通障害や事故の原因となることから、霧の

動体把握及び発生・消滅・移動予測技術の確立が望まれている。これに対し、粒径の小さな雲や霧などの気象因子を探知することができる Ka バンド気象ドップラーレーダを用いて収集した霧の実観測データを解析し、視程悪化に関連する3つの特徴量（エコー強度、エコー頂高度、エコー面積）を抽出し、それらの論理積と霧による視程悪化状況の関係を見出し、悪視程状況検出アルゴリズムを提案した。エコー強度は、電磁波の基本パラメータの一つとして得られる受信強度に基づくパラメータであり、霧の存在有無に対応する。エコー頂高度は、霧発生時に最も高高度でエコーが検出された高度であり、霧の高度方向の空間的な存在条件を反映する。エコー面積は、ビームを所定の仰角で水平走査したときに観測されるエコーの全覆域に対する面積占有率であり、霧の水平方向の空間的な存在条件を反映する。構築したアルゴリズムを、霧発生時のレーダデータに適用し、悪視程状況を適切に判定できた結果から、提案方式の有効性を示した。また、霧には、発生メカニズムによりいくつかの種類があることが知られているが、別府湾の滑昇霧（上昇霧）、釧路湿原の移流霧の双方に対して、適切な判定結果が得られていることから、アルゴリズムの頑健性を示すことができた。

第4章では、条件②に対する課題であるデータ処理の高速化に対し、高速に直線（線分）を検出する方式の適用により、SAR（合成開口レーダ）電波画像から船舶航跡を自動検出するアルゴリズムを構築した。これは、海洋における船舶の管制や不審船の監視業務の効率向上を目的として開発したものである。船舶を検出する方法は、船体そのものを検出方法と、船舶の進行に伴って現れる航跡を検出する方法に大別される。前者は画像上の輝度は高いものの占有画素は少ないことから、雑音などとの識別が困難であることが知られている。本研究では、船体に比べ検出が容易で、かつ、進行方向などの情報も抽出することができる船舶航跡の検出を試みた。SAR 画像において、船舶航跡は背景である海洋部分に対して、明線もしくは暗線として現れることが知られている。そのため、SAR 画像からの船舶航跡検出は、2次元画像からの線分検出問題に帰着させることができる。本研究では、2次元FFT（Fast Fourier Transform）と1次元（逆）FFTを順次適用し、周波数空間上で線分を決定する要素である傾きと y 切片を推定する方式を提案した。これにより、探索空間、すなわち、演算量が削減され、従来手法よりも10倍以上の高速化が期待できることを示した。また、画像を分割処理すること

で、雑音により劣化した画像に対して検出性能を改善する効果があることを示した。

第5章では、条件③に対する課題である、データ処理からの不要応答除去に対して、風計測用ドップラーライダを取り上げ、プラットフォームの動揺補正アルゴリズムと、データスクリーニングアルゴリズムを構築した。空気中の塵や埃からなるエアロゾルの動きから大気中の風情報を得ることができるドップラーライダは、突風は晴天乱気流といった非降水時に有効なセンサとして期待されている。しかしながら、エアロゾルからの反射波は非常に微弱であることから、雑音などの不要応答の影響を受けやすいデメリットを有している。単一のドップラーライダを用いて大気の風向・風速を推定する方法としては、取得した複数方向の視線速度をベクトル合成する手法が用いられる。中でもVAD法は、観測領域内の風は一様であるという仮定の下、仰角を固定して方位角方向にビームを走査して得られた視線速度はサインカーブとなる性質を利用し、最小二乗法によるフィッティングにより求めたサインカーブの振幅、初期位相、オフセットから風向・風速を算出するものであり、現在でも広く使われている。プラットフォームが浮体に搭載されている場合、取得した視線速度データはプラットフォームの動揺の影響を受け、そこから算出した風向・風速の精度は大きく劣化する。これに対し、動揺センサで取得した姿勢角などの動揺データを用いて各視線速度データを補正することで、風向・風速推定精度を改善する動揺補正アルゴリズムを提案した。また、大気中のエアロゾル量（散乱体）の低下、降雨・降雪時などの状況で受信信号のS/N比が低下すると、視線速度計測精度も低下し最終的な風向・風速推定精度も劣化する。この問題に対し、風の性質とドップラーライダの高分解能観測が可能な特性を活用するデータスクリーニング法を提案した。計算機シミュレーションにより、総視線数の半数以上が劣化した場合でも、風向・風速推定精度を改善可能であることを示した。

第3章から第5章において構築した悪視程状況検知、高速航跡検出、風向・風速推定精度改善の各アルゴリズムは、前例が乏しく、かつ、異なる課題でありながら、ほぼ同じアプローチによって構築したものである。そのアプローチとは、気象学のような専門領域の知見・研究成果を、リモートセンサの特性を利用して具現化・仮説立案したものを、実測データを用いて検証・強化することによりルー

ルベース型のアルゴリズムを構築するというものであり、ドメイン知識と観測特性と実測検証とを掛け合わせ、透明性と運用性を両立させる手法に分類される。その中で本研究の特徴は、リモートセンサの観測特性に重きを置いている点と考える。観測対象や周囲の環境の電磁波特性を鑑みリモートセンサの選定（もしくは開発）、観測諸元の設定、適切な信号処理・データ解析手法の適用といった項目を組み込んだアルゴリズム開発は希少であり、ドメイン知識と実測検証を繋ぎ、継続的な改善ループを回す鍵と言える。今後、適用分野の拡大、取得データ量・種類の増大、データ利活用技術の進展、環境の変化などにより、リモートセンシング技術が担う役割はますます大きくなることが予想されるが、本研究で得られた知見や方法論は有効であり課題解決に貢献すると考えられる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、懇切なるご指導と励ましを賜りました愛知工業大学 情報科学部 情報科学科 教授 梶克彦 博士に心より感謝申し上げます。

また、論文全般にわたり適切なご序言とご鞭撻を賜りました愛知工業大学 名誉教授 水野 忠則 博士、情報科学部 情報科学科 教授 内藤 彩乃 博士、同科 教授 菱田 隆彰 博士に深く感謝申し上げます。

本論文作成の機会を与えていただきました三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 スマートセンシング技術部 河東 晴子 博士、同部長 澤 良次 氏、三菱電機 デジタルイノベーション株式会社 諏訪 啓 氏に厚く御礼申し上げます。

三菱電機株式会社 在職中より、多くのご指導とご鞭撻を賜りました電気通信大学 産学官連携センター 特任教授 桐本 哲郎 博士に深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、多くのご指導とご教示を賜りました三菱電機株式会社 人材統括部 岡村 敦 博士に厚く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、著者の三菱電機株式会社入社以来、多くのご指導、ご支援を賜りました三菱電機株式会社 鎌倉製作所 真庭 久和 博士、同所 若山 俊夫 博士、株式会社 エムテック 田中 久理 氏に深く感謝の意を表します。

以上のほか、著者の職場をはじめとする数多くの方々のご指導、ご協力のもとに本研究をまとめることができました。ここに謹んで御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省総合政策局政策課, “令和4年版国土交通白書2022～気候変動とわたしたちの暮らし～,” <https://www.mlit.go.jp/statistics/hakusyo.mlit.r4.html>, 2022, 参照: Nov. 25, 2025.
- [2] 環境省地球環境局総務課気候変動適応室, “気候変動による災害激甚化に関する影響評価結果について勢力を増す台風～我々はどのようなリスクに直面しているのか～,” <https://www.env.go.jp/content/000175543.pdf>, 2023, 参照: Nov. 25, 2025.
- [3] T. T. Fujita and F. Caracena, “An Analysis of Three Weather-Related Aircraft Accidents,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 58, no. 11, pp. 1164–1181, 1977.
- [4] T. T. Fujita, *The Downburst: Microburst and Macrobust*, Satellite and Mesometeorology Research Project (SMRP) Research Paper. no. 210. Chicago: University of Chicago, 1985.
- [5] 新野 宏, “竜巻,” *天気*, vol. 54, no. 11, pp. 933–936, 2007.
- [6] 竹見 哲也, “ダウンバーストとガストフロント：積乱雲による突風現象,” *日本風工学会誌*, vol. 37, no. 3, pp. 172–177, 2012.
- [7] 萩田 賢司, “気象条件に着目した交通事故分析,” *IATSS Review* (国際交通安全学会誌) 気候変動適応と都市・交通, vol. 50, no. 1, pp. 29–35, 2025.
- [8] 防衛省, “令和7年版日本の防衛—防衛白書—,” <https://www.mod.go.jp/j/press/wp/wp2025/pdf/R07zenpen.pdf>, 2025, 参照: Nov. 25, 2025.
- [9] 日本リモートセンシング研究会(編), 改定版 図解リモートセンシング 東京: 日本測量協会, 2004.
- [10] 日本リモートセンシング学会(編), 基礎からわかるリモートセンシング 東京: 理工図書, 2011.
- [11] 文部科学省 科学技術・学術政策局政策課, “「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書,” https://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/anzen/houkoku/04042302.htm, 2004, 参照: Nov. 25, 2025.

- [12] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) イノベーション戦略センター, “Innovation Outlook Version 1.0,” <https://www.nedo.go.jp/content/800027825.pdf>, 2025, 参照: Nov. 25, 2025.
- [13] 気象庁, “局地的大雨から身を守るために—防災気象情報の活用の手引き—,” https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/ooametebiki_main.pdf, 2009, 参照: Nov. 25, 2025.
- [14] 加藤亮平, “局地的大雨のメカニズムと予測技術,” 安全工学, vol. 56, no. 6, pp. 455–462, 2017.
- [15] 小倉義光, 一般気象学 東京: 東京大学出版会, 1984.
- [16] 気象庁 観測部 計画課, “気象観測データの利用について～主な観測データの概要とその利活用～,” https://www.wxbc.jp/wp-content/uploads/2019/09/seminar_190925_01.pdf, 2019, 参照: Nov. 25, 2025.
- [17] 竹田厚, 宝馨, 立川康人, 石川裕彦, 浦野慎一, 田中和夫, 目黒公郎, “自然災害防止・軽減のためのリモートセンシング技術の可能性,” 自然災害科学, vol. 20, no. 2, pp. 131–160, Aug. 2001.
- [18] 新野 宏, “2. 防災・生活情報のためのメソ気象学,” 天気, 日本気象学会2001年度春季大会シンポジウム「21世紀の気象学—将来展望—」の報告, vol. 49, no. 1, pp. 13–22, 2002.
- [19] 新野 宏, “2. 「シビア現象」の理解・予測への課題と期待,” 天気, 2010年度春季大会シンポジウム「災害軽減に向けた現象予測の将来」の報告, vol. 59, no. 7, pp. 11–17, 2010.
- [20] H. B. Bluestein, F. H. Carr, and S. J. Goodman, “Atmospheric observations of weather and climate,” *Atmosphere-Ocean*, vol. 60, no. 3-4, pp. 149–187, 2022.
- [21] F. Samadzadegan, A. Toosi, and F. D. Javan, “A critical review on multi-sensor and multi-platform remote sensing data fusion approaches: current status and prospects,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 46, no. 3, pp. 1327–1402, 2025.
- [22] R. G. Strauch, D. A. Merritt, K. P. Moran, K. B. Earnshaw, and D. V. D. Kamp, “The Colorado Wind-Profiling Network,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 37–49, 1984.
- [23] 柳沢 善治, “ミリ波レーダーによる海霧の観測,” 天気, vol. 33, no. 11, pp.

- 603–612, 1986.
- [24] M. R. Hjelmfelt, “Structure and Life Cycle of Microburst Outflows Observed in Colorado,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 27, no. 8, pp. 900–927, 1988.
- [25] J. Wurman, J. M. Straka, and E. N. Rasmussen, “Fine-Scale Doppler radar observations of tornadoes,” *Science*, vol. 272, no. 5269, pp. 1774–1777, 1996.
- [26] 深尾昌一郎, 浜津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング 京都: 京都大学学術出版会, 2005.
- [27] 石原正仁, 藤吉康志, 新井健一郎, 吉本直弘, 小西啓之, “関西空港付近に発生したマイクロバーストの形態と構造 — 空港気象ドップラーレーダー単独による自動検出とデュアル解析の比較,” *天気*, vol. 56, no. 9, pp. 727–742, 2009.
- [28] Y. Li, P. Hoogeboom, and H. Russchenberg, “Radar observations and modeling of fog at 35 GHz,” in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, pp. 1053–1057, 2014.
- [29] 足立透, “気象災害予測のための最新のレーダー技術,” *安全工学*, vol. 56, no. 6, pp. 475–481, 2017.
- [30] 石原正仁, 藤井康志, 上田博, 立平良三, Eds., 気象レーダー60年のあゆみと将来展望, 気象研究ノート第237号 東京: 日本気象学会, 2018.
- [31] T. Fujii and T. Fukuchi, *Laser Remote Sensing*, Optical Science and Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [32] S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka, “Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing,” *Applied Optics*, vol. 46, no. 11, pp. 1953–1962, 2007.
- [33] C. M. Shun and P. W. Chan, “Applications of an Infrared Doppler Lidar in Detection of Wind Shear,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 637–655, 2008.
- [34] L. H. Huddleston, W. P. Roeder, D. D. Morabito, L. R. D’Addario, J. G. Morgan, R. E. B. Jr., R. K. Decker, B. Geldzahler, M. A. Seibert, and M. J. Miller, “Remote sensing at the NASA Kennedy Space Center: a perspective from the ground up,” in

- Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII*, R. Meynart, S. P. Neeck, and H. Shimoda, Eds., vol. 9241, International Society for Optics and Photonics. SPIE, p. 924102, 2014.
- [35] H. B. Bluestein, F. H. Carr, and S. J. Goodman, “Atmospheric Observations of Weather and Climate,” *Atmosphere-Ocean*, vol. 60, no. 3, pp. 149–187, 2022.
- [36] P. J. M. Clive, “Lidar and resource assessment for wind power applications: the state of the art,” in *Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IV*, U. N. Singh and G. Pappalardo, Eds., vol. 7111, International Society for Optics and Photonics. SPIE, p. 711107, 2008.
- [37] 平木直哉, 木寺正平, 松田庄司, 小菅義夫, 小林文明, 松波勲, 佐藤源之, レーダの基礎 — 探査レーダから合成開口レーダまで —, 大内和夫(編). 東京: コロナ社, 2017.
- [38] 宇宙航空研究開発機構 JAXA, “ALOS-2 SOLUTION BOOK だいち2号 SAR データの利用提案 3rd edition,” https://www.satnavi.jaxa.jp/files/document/pdf/ALOS_JP_web.pdf, 2018, 参照: Nov. 25, 2025.
- [39] 宇宙航空研究開発機構 JAXA, “ALOS-4 SOLUTION BOOK だいち4号 SAR データの利用提案,” https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/wp-content/uploads/sites/3/2022/04/ALOS-4_solutionBook.pdf, 2022, 参照: Nov. 25, 2025.
- [40] 高橋暢宏, 山内洋, 大東忠保, 入江仁士, 西澤智明, 神慶孝, 別所康太郎, 早坂忠裕, 森本真司, 鈴木賢士, 青木輝夫, 平沢尚彦, 勝俣昌己, 川合義美, 吉田聡, “日本の気象学における観測の現状と展望2024,” *天気*, vol. 72, no. 6, pp. 277–298, 2025.
- [41] H. Sauvageot, *Radar Meteorology*, Artech House radar library. Artech House, 1992.
- [42] 小池 哲司, “ベイズ分類を用いた二重偏波気象レーダーによる降水種別判別 — クラスター分析による教師データの作成 —,” *測候時報*, 第88巻, pp. 1–18, 2021.
- [43] 梶原 佑介, “固体素子二重偏波気象レーダーの導入と今後の展望,” *測候時報*, 第90巻: 6, pp. 1–68, 2023.
- [44] X. X. Zhu, D. Tuia, L. Mou, G.-S. Xia, L. Zhang, F. Xu, and F. Fraundorfer, “Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources,” *IEEE*

- Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 8–36, 2017.
- [45] Z. Xu, K. Duan, and D. Li, “Autonomous obstacle avoidance assistant system for unmanned surface vehicle based on Intelligent Vision,” in *2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)*, pp. 1396–1405, 2022.
- [46] H. Gao and Y. Hong, “Convolutional Neural Network-Based Novel Framework for Ship Recognition in Poor Visibility Maritime Surveillance Videos,” in *2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA)*, pp. 933–938, 2023.
- [47] T. Li, J. Qiu, and J. Xue, “Sea Fog Recognition near Coastline Using Millimeter-Wave Radar Based on Machine Learning,” *Atmosphere*, vol. 15, no. 9, 1031, 2024.
- [48] C. Xu and X. Wang, “OpenSARWake: A Large-Scale SAR Dataset for Ship Wake Recognition With a Feature Refinement Oriented Detector,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 21, pp. 1–5, 2024.
- [49] C. Batini, T. Blaschke, S. Lang, F. Albrecht, H. M. Abdulmutalib, A. Barsi, G. Szabó, and Z. Kugler, “Data Quality in Remote Sensing,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W7, pp. 447–453, 2017.
- [50] 中山 章, “運航の障害になる現象を気象レーダではどのようにしてみつけているか,” 航空気象ノート, vol. 28, pp. 65–82, 1984.
- [51] 中山 章, 飛行機と気象, 気象ブックス 035 東京: 成山堂書店, 2010.
- [52] 梶原 佑介, 大野 洋, “気象ドップラーレーダーから算出される vad 風の品質管理手法の開発及びデータ特性の調査,” 測候時報, 第 82 巻, pp. 15–53, 2015.
- [53] 気象庁気象研究所海霧研究グループ, “釧路地方における海霧の観測,” 天気, vol. 32, no. 2, pp. 3–14, 1985.
- [54] 松山 裕幸, 前野 宏司, 天野 和祐, “数値予報を用いた高速道路沿いの濃霧発生予測手法の検討,” 日本道路公団試験研究所報告, vol. 33, pp. 137–152, 1996.
- [55] 中田 隆一, “霧予測の現状と可能性討,” 日本気象学会 1998 年春期大会講演

- 予稿集, vol. 73, p. 72, 1998.
- [56] 沢井 哲滋, “霧の理解のために,” *天気*, vol. 29, no. 7, pp. 57–73, 1982.
- [57] 浜津 享助, 若山 俊夫, 渡邊 伸一郎, 橋口 浩之, 深尾 昌一郎, “雲霧観測用 Ka バンドドップラーレーダの開発,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. J83-B, no. 4, pp. 554–566, 2000.
- [58] 浜津 享助, 若山 俊夫, 橋口 浩之, 田中 久理, 深尾 昌一郎, “雲霧観測用 Ka バンドドップラーレーダの初期観測評価,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. J84-B, no. 3, pp. 582–593, 2001.
- [59] K. Hamazu, H. Hashiguchi, T. Wakayama, T. Matsuda, R. J. Doviak, and S. Fukao, “A 35-GHz Scanning Doppler Radar for Fog Observation,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 972–986, 2003.
- [60] 椎野 広大, “霧の発生による高速道路の通行止め予測モデルの作成とその評価,” *大学院研究年報 理工学研究科編*, no. 55, 2025.
- [61] R. Peltzer, W. Garrett, and P. Smith, “A remote sensing study of a surface ship wake,” in *OCEANS 85 - Ocean Engineering and the Environment*, pp. 277–286, 1985.
- [62] M. Rey, J. Tunaley, J. Folinsbee, P. Jahans, J. Dixon, and M. Vant, “Application of Radon Transform Techniques to Wake Detection in Seasat-A SAR Images,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 553–560, 1990.
- [63] A. C. Copeland, G. Ravichandran, and M. M. Trivedi, “Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 1, pp. 35–45, 1995.
- [64] A. Scherbakov, R. Hanssen, G. Vosselman, and R. Feron, “Ship wake detection using Radon transforms of filtered SAR imagery,” in *Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar, Proc. SPIE*, vol. 2958, pp. 96–106, 1996.
- [65] K. Eldhuset, “An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Spaceborne SAR Images in Coastal Regions,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 4, pp. 1010–1019, 1996.
- [66] I.-I. Lin, L. K. Kwok, Y.-C. Lin, and V. Khoo, “Ship and ship wake detection in the ERS SAR imagery using computer-based algorithm,” in *IGARSS’97. 1997 IEEE In-*

- ternational Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development*, vol. 1, pp. 151–153, 1997.
- [67] 真庭久和, 岩本雅史, 桐本哲郎, “SAR画像振幅値の総和と2乗総和を用いた航跡検出法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J83-B, no. 1, pp. 96–105, 2000.
- [68] 金出 武雄, “デジタル画像における線の扱い,” テレビジョン, vol. 31, no. 5, pp. 385–392, 1977.
- [69] J. Skingley and A. Rye, “The Hough transform applied to SAR images for thin line detection,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 61–67, 1987.
- [70] 景山 陽一, 西田 眞, 大井 貴文, “リモートセンシングデータを用いたリニアメント抽出のための線分要素解析,” 電気学会論文誌C, 電子・情報・システム部門誌, vol. 122, no. 4, pp. 639–647, 2002.
- [71] 村上 研二, 網干 誠, 木下 浩二, 一色 正晴, “画像間演算を用いたHough変換による直線抽出の高速化,” 電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, vol. 133, no. 8, pp. 1539–1548, 2013.
- [72] M. Daniela Graziano, R. Del Prete, and A. Renga, “Multimission/Multifrequency SAR for Improving the Monitoring of Coastal Areas,” in *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, pp. 7480–7483, 2021.
- [73] W. Ma, A. Achim, and O. Karakuş, “Exploiting the Dual-Tree Complex Wavelet Transform for Ship Wake Detection in SAR Imagery,” in *ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 1530–1534, 2021.
- [74] Y. Guan, H. Xu, and C. Li, “A Method of Ship Wake Detection in SAR Images Based on Reconstruction Features and Anomaly Detector,” in *IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 6398–6401, 2023.
- [75] Y. Wei, Y. He, and M. Li, “SAR Imaging Simulation and Speed Inversion of Ship Wake,” in *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC - URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, pp. 97–98, 2024.
- [76] H. Xu, S. Xiao, Y. Guan, and W. Li, “A Ship Wake Detection Method in SAR Images

- Based on Joint Sparse Representation,” in *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 9879–9882, 2024.
- [77] C. A. Wan and C. C. Chang, “Measurement of the Velocity Field in a Simulated Tornado-Like Vortex Using a Three-Dimensional Velocity Probe,” *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 29, no. 1, pp. 116–127, 1972.
- [78] H. Uyeda and D. S. Zrnić, “Automatic detection of gust fronts,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 36–50, 1986.
- [79] 近藤 純正, “大気境界層の気象 (I) 風はどのように吹くか,” *天気*, vol. 46, no. 9, pp. 585–594, 1999.
- [80] K. A. Browning and R. Wexler, “The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 7, no. 1, pp. 105–113, 1968.
- [81] I. Holleman, “Quality Control and Verification of Weather Radar Wind Profiles,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 22, no. 10, pp. 1541–1550, 2005.
- [82] N. A. Baranov, G. A. Petrov, and I. F. Shiryaev, “Recovery of wind field characteristics by lidar data,” in *Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIII*, U. N. Singh and D. N. Nicolae, Eds., vol. 10429, International Society for Optics and Photonics. SPIE, p. 104290J, 2017.
- [83] 川東 龍則, 石原 孟, “浮体式ドップラーライダーの動揺補正に関する研究,” *風力エネルギー利用シンポジウム*, vol. 35, pp. 355–358, 2013.
- [84] 若林 蘭, 川東 龍則, 山口 敦, 石原 孟, “6自由度の動揺を考慮した浮体式ドップラーライダーの計測に関する研究,” *風力エネルギー利用シンポジウム*, vol. 36, pp. 329–332, 2014.
- [85] P. Achtert, I. M. Brooks, B. J. Brooks, B. I. Moat, J. Prytherch, P. O. G. Persson, and M. Tjernström, “Measurement of wind profiles by motion-stabilised ship-borne Doppler lidar,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 8, no. 11, pp. 4993–5007, 2015.
- [86] J. Tiana Alsina, M. A. Gutiérrez, I. Würth, J. Puigdefàbregas, and F. Rocadenbosch, “Motion compensation study for a floating Doppler wind LiDAR,” in *2015 IEEE*

- International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 5379–5382, 2015.
- [87] M. A. Gutiérrez, J. Tiana-Alsina, O. Bischoff, J. Cateura, and F. Rocabenbosch, “Performance evaluation of a floating Doppler wind lidar buoy in mediterranean near-shore conditions,” in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 2147–2150, 2015.
- [88] 大西 健二, 上原 謙太郎, 井上 実, 田中 裕樹, 大井 信明, 渋谷 早苗, 小玉 亮, “ドップラーライダーと低動揺型スパーブイを組み合わせた洋上風況観測システムの開発,” *風力エネルギー*, vol. 42, no. 3, pp. A33–A41, 2018.
- [89] F. Kelberlau, V. Neshaug, L. Lønseth, T. Bracchi, and J. Mann, “Taking the Motion out of Floating Lidar: Turbulence Intensity Estimates with a Continuous-Wave Wind Lidar,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 5, 2020.
- [90] A. Salcedo-Bosch, F. Rocabenbosch, and J. Sospedra, “Enhanced Dual Filter for Floating Wind Lidar Motion Correction: The Impact of Wind and Initial Scan Phase Models,” *Remote Sensing*, vol. 14, no. 19, 2022.
- [91] C. Benzo, F. Delbos, and S. Yahiaoui, “Applying motion compensation to offshore wind lidar reconstructed wind measurements,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2767, no. 4, p. 042025, 2024.
- [92] T. Matejka and R. C. Srivastava, “An Improved Version of the Extended Velocity-Azimuth Display Analysis of Single-Doppler Radar Data,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 453–466, 1991.
- [93] 立平 良三, 鈴木 修, “単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度,” *天気*, vol. 41, no. 11, pp. 761–764, 1994.
- [94] 中井 専人, “VAD 解析による特徴的なメソスケール風速場の抽出,” *防災科学技術研究所 研究報告*, vol. 55, pp. 9–23, 1995.
- [95] J. N. Chrisman and S. D. Smith, “Enhanced Velocity Azimuth Display Wind Profile (VADP) Function for the WSR-88D,” in *American Meteorological Society 34th Conference on Radar Meteorology*, p. P4.7, 2009.
- [96] ゴイト プラカス ジェイ, 山口 敦, 石原 孟, “スキャニングドップラーライダーの精度検証と風況計測への応用,” *風力エネルギー*, vol. 42, no. 1, pp.

- A7–A16, 2018.
- [97] X. Zhang, Y. Sang, Z. Lin, and C. Gao, “All-fiber mobile Doppler wind lidar for combined measurement of the wind field and precise distance to hard targets,” in *2024 International Conference on Optoelectronic Information and Optical Engineering (OIOE 2024)*, H. B. Ahmad and M. Jiang, Eds., vol. 13182, International Society for Optics and Photonics. SPIE, p. 1318206, 2024.
- [98] 今城勝治, 崎村武司, 廣澤賢一, 田中久理, 柳澤隆行, 安藤俊行, 亀山俊平, “コヒーレントドップラーライダーの最新技術,” *レーザー研究*, vol. 48, no. 11, pp. 591–594, 2020.
- [99] 田中久理, 今城勝治, 廣澤賢一, 柳澤隆行, 亀山俊平, “気象観測用ドップラーライダーの原理と応用,” *計測と制御*, vol. 59, no. 5, pp. 346–350, 2020.
- [100] P. Waldteufel and H. Corbin, “On the Analysis of Single-Doppler Radar Data,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 18, no. 4, pp. 532–542, 1979.
- [101] A. J. Koscielny, R. J. Doviak, and R. Rabin, “Statistical Considerations in the Estimation of Divergence From Single-Doppler Radar and Application to Prestorm Boundary-Layer Observations,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 21, no. 2, pp. 197–210, 1982.
- [102] T. E. Van Zandt, “A brief history of the development of wind-profiling or MST radars,” *Annales Geophysicae*, vol. 18, no. 7, pp. 740–749, 2000.
- [103] B. L. Cheong, R. D. Palmer, T.-Y. Yu, K.-F. Yang, M. W. Hoffman, S. J. Frasier, and F. J. Lopez-Dekker, “Effects of Wind Field Inhomogeneities on Doppler Beam Swinging Revealed by an Imaging Radar,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, no. 8, pp. 1414–1422, 2008.
- [104] 関根松夫, *レーダ信号処理技術*, 電子情報通信学会(編). 東京: コロナ社, 1991.
- [105] 吉田孝, *改訂レーダ技術*, 電子情報通信学会(編). 東京: コロナ社, 1996.
- [106] M. Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*. New York: The McGraw-Hill, 2008.
- [107] 石原正仁(編), *ドップラー気象レーダー*, 気象研究ノート 第200号 東京: 日本気象学会, 2001.
- [108] K. Akaeda, “Basics of weather radar,” in *WMO/ASEAN Training Workshop on*

- Weather Radar Data Quality Control and Radar Data Exchange held in Bangkok, Thailand, with JMA support*, 2024, https://www.jma.go.jp/jma/en/photogallery/WMO-ASEAN_Radar_Workshop_Jan2024/3_2_Basics%20of%20Weather%20Radar.pdf, 参照: Nov. 25, 2025.
- [109] 総合通信基盤局電波部電波政策課, “総務省 電波利用ポータル 周波数割当て 使用状況の詳細 (令和7年3月1日現在),” <https://www.tele.soumu.go.jp/jadm/freq/search/myuse/use/index.htm>, 2025, 参照: Nov. 25, 2025.
- [110] 若山 俊夫, 田中 久理, 平島 弘一, 渡邊 伸一郎, 浜津 享助, 橋口 浩之, 深尾 昌一郎, “Ka バンド気象ドップラレーダによる霧観測,” 電子情報通信学会技術研究報告, SANE99-102, vol. 99, pp. 45–52, 2000.
- [111] 小林 隆久(編), ウィンドプロファイラー — 電波で探る大気の流れ —, 気象研究ノート 第205号 東京: 日本気象学会, 2004.
- [112] G. Galati, I. Dalmaso, G. Pavan, and G. Brogi, “Fog Detection Using Airport Radar,” in *2006 International Radar Symposium*, pp. 1–4, 2006.
- [113] X. Wang, “Several experience of ship collision avoidance,” in *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, pp. 2838–2841, 2012.
- [114] M. Negru, V. Benea, and S. Nedevschi, “Fog assistance on smart mobile devices,” in *2014 IEEE 10th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, pp. 197–204, 2014.
- [115] R. Belaroussi and D. Gruyer, “Road sign-aided estimation of visibility conditions,” in *2015 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, pp. 202–205, 2015.
- [116] A. J. Dratnal, J. Nielsen, and M. Okoniewski, “A liquid crystal switched passive van Atta array for automobile radar target enhancement in heavy rainfall,” in *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, p. 153, 2015.
- [117] Y. Li, P. Hoogeboom, and H. Russchenberg, “Observations and modeling of fog by cloud radar and optical sensors,” in *2014 11th European Radar Conference*, pp. 521–524, 2014.
- [118] Y. Li, P. Hoogeboom, H. W. J. Russchenberg, and H. K. Baltink, “Retrieval of

- fog microphysical properties from cloud radar and optical sensors,” in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 4860–4863, 2015.
- [119] Y. Li, P. Hoogeboom, and H. W. J. Russchenberg, “A Novel Radar-Based Visibility Estimator,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 6, pp. 3150–3168, 2017.
- [120] W. Li, M. He, and S. Zhang, “A Heterogeneity-Based Ship Detection Algorithm for SAR Imagery,” in *2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing*, pp. 1–5, 2009.
- [121] J. Nan, C. Wang, B. Zhang, F. Wu, H. Zhang, and Y. Tang, “Ship wake CFAR detection algorithm in SAR images based on length normalized scan,” in *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, pp. 3562–3565, 2013.
- [122] G. Yang, J. Yu, C. Xiao, and W. Sun, “Ship wake detection for SAR images with complex backgrounds based on morphological dictionary learning,” in *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 1896–1900, 2016.
- [123] Y.-H. Zhao, X. Han, and P. Liu, “A RPCA and RANSAC Based Algorithm for Ship Wake Detection in SAR Images,” in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, pp. 1–4, 2018.
- [124] O. Karakuş and A. Achim, “Ship Wake Detection in X-band SAR Images Using Sparse GMC Regularization,” in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 2182–2186, 2019.
- [125] M. Sciotti, G. Capecchi, and P. Lombardo, “Ship wake detection in SAR images: a segmentation-based approach,” in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, pp. 110–112, 2002.
- [126] A. Jiaqiu, Q. Xiangyang, Y. Weidong, D. Yunkai, L. Fan, S. Li, and J. Yafei, “A Novel Ship Wake CFAR Detection Algorithm Based on SCR Enhancement and Normalized Hough Transform,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 681–685, 2011.

- [127] Y. Liu, H. Ma, Y. Yang, and Y. Liu, “Automatic ship detection from SAR images,” in *Proceedings 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services*, pp. 386–388, 2011.
- [128] F. Chaillan and P. Courmontagne, “On the use of the stochastic matched filter for ship wake detection in SAR images,” in *OCEANS 2006*, pp. 1–6, 2006.
- [129] O. Karakuş, I. Rizaev, and A. Achim, “A Simulation Study to Evaluate the Performance of the Cauchy Proximal Operator in Despeckling SAR Images of the Sea Surface,” in *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1568–1571, 2020.
- [130] A. Warrick and P. Delaney, “Detection of linear features using a localized Radon transform with a wavelet filter,” in *1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, pp. 2769–2772, 1997.
- [131] W. Jianguo, L. Linjie, Y. Jinhao, and H. Shunji, “Detection of ship-wake in SAR images,” in *Proceedings of International Radar Conference*, pp. 697–699, 1996.
- [132] P. Wu, J. Wang, Y. Zhang, and H. Duan, “An improved method of ship wake detection based on localized radon transform,” in *2009 IET International Radar Conference*, pp. 1–4, 2009.
- [133] X. Xing, K. Ji, H. Zou, J. Sun, S. Zhou, and Z. Li, “An enhancing normalized radon transform method for ship wake detection in SAR imagery,” in *EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 559–562, 2012.
- [134] 山本 和彦, 岩本 雅史, 藤坂 貴彦, “二次元フーリエ変換を用いたISAR運動補償方式,” 電子情報通信学会技術研究報告, 354 (SANE97 60-74), vol. 97, pp. 75–82, 1997.
- [135] Y. Wei, Y. He, X. Zheng, T. Wu, J. Ning, Y. Wang, and J. Cao, “Study on Electromagnetic Scattering Characteristics of Kelvin Ship Wake,” in *2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, pp. 1–4, 2023.
- [136] 長尾 真, 画像認識論, 情報工学講座 16 東京: コロナ社, 1983.
- [137] Henri J Nussbaumer, 佐川 雅彦, 本間 仁志, 高速フーリエ変換のアルゴリズム 東京: 科学技術出版社, 1989.

- [138] B. Klaas, C. Baulig, K. Predehl, and S. Schwarzer, “Development of a multispectral scanning lidar system for measuring wind velocity, air temperature and moisture,” in *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIV*, A. Comerón, E. I. Kassianov, K. Schäfer, R. H. Picard, K. Weber, and U. N. Singh, Eds., vol. 11152, International Society for Optics and Photonics. SPIE, p. 111520M, 2019.
- [139] R. G. Strauch, B. L. Weber, A. S. Frisch, C. G. Little, D. A. Merritt, K. P. Moran, and D. C. Welsh, “The Precision and Relative Accuracy of Profiler Wind Measurements,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 563–571, 1987.

研究業績

論文	
(1)	酒巻 洋, 真庭 久和, 岩本 雅史, 桐本 哲郎, “2次元FFTを用いた高速航跡検出法,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J84-B, No. 4, pp. 785-793, 2001.
(2)	酒巻 洋, 若山 俊夫, 岡村 敦, 田中 久理, 橋口 浩之, 深尾 昌一郎, “Kaバンド気象レーダを用いた霧の検出,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J87-B, No. 5, pp. 695-705, 2004.
(3)	Takayuki Masuo, Fang Shang, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, Hiroshi Sakamaki and Nobuhiro Suzuki, “Parametric Wind Velocity Vector Estimation Method for Single Doppler LIDAR Model,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, Vol. E100-B, No. 3, pp. 465-472, 2016.
(4)	Nobuki Kotake, Hiroshi Sakamaki, Masaharu Imaki, Yoshichika Miwa, Toshiyuki Ando, Yoshiyuki Yabugaki, Masayuki Enjo and Shumpei Kameyama, “Intelligent and compact coherent Doppler lidar with fiber-based configuration for robust wind sensing in various atmospheric and environmental conditions,” Optics Express, Vol. 30, No. 11, pp. 20038-20062, 2022.
(5)	Omaki Masayuki, Yoshitaka Kajiyama, Masaharu Imaki, Yoko Inoue, Shota Nakahara, Natuki Honda, Eiji Niikura, Yoshiaki Hirata, Junia Nomura, Michinori Yoshida, Hiroshi Sakamaki, Sato Kobayashi, Hirobumi Matui, Yuichiro Horiguchi, Masahiro Kawai, Shohei Tsukamoto, Yoshitaka Tsuboi, Yosuke Tsuzaki, Yosuke Takagawa, Hiroaki Inoue, Yohei Miki, Takayuki Yanagisawa, Takaki Sugino, Hiroshi Sakanoue, Kozo Ishida and Shumpei Kameyama, “Compact and MEMS-Scanner-Based 3-D Imaging LiDAR With Wide Scanning Angle of $147.5^\circ \times 11.6^\circ$ Using Multiple Transmitters and a Single Small Photodetector With Diameter of 0.5 mm,” IEEE Sensors Journal, vol.22, no.21, pp.20389-20400, 1 Nov.1, 2022.
講演（国際学会）	
(6)	Hiroshi Sakamaki, Toshio Wakayama, Hisamichi Tanaka, Atsushi Okamura, Hiroyuki Hashiguchi and Shoichiro Fukao, “FOG DETECTION BY KA-BAND METEOROLOGICAL DOPPLER RADAR,” American Meteorological Society 31th Conference on Radar Meteorology, 2003.
(7)	Wakasa Kise, Hiroshi Sakamaki, Atsuo Ozaki and Akitoshi Mitsuishi, “Application of case-based retrieval to thundercloud tracking for lightning flash forecast,” SICE 2004 Annual Conference, pp.1168-1171, vol.2, 2004.

(8)	Hiroshi Sakamaki, Toshio Wakayama, Takashi Sekiguchi, Hisamichi Tanaka, Yoshihito Hirano, "Development of a Wake Vortex Detection Algorithm using Coherent Laser Radar," 13th Coherent Laser Radar Conference, 2005.
(9)	Hiroshi Sakamaki, Shumpei Kameyama, Kimio Asaka, Teruyuki Hara and Toshio Wakayama, "Development of Portable Eye-Safe Depolarization Coherent Doppler Lidar and Observations of Asian Dust," American Meteorological Society 35th Conference on Radar Meteorology, 2011.
(10)	Hiroshi Sakamaki, Hisamichi Tanaka, Teruyuki Hara, "Development of data screening method for wind lidar under low S/N environment," American Meteorological Society 36th Conference on Radar Meteorology, 2013.
(11)	Marie Kato, Hiroshi Sakamaki, Nobuhiro Suzuki, Ikuya Kakimoto and Tomoya Matsuda, "A Second Trip Echo Suppression Method for Radars Using Two Kinds of Code Sequence," American Meteorological Society 37th Conference on Radar Meteorology, 2015.
(12)	Takayuki Masuo, Fang Shang, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, Hiroshi Sakamaki, Nobuhiro Suzuki, "Parametric Wind Velocity Vector Estimation Method for Single Doppler LIDAR Model," IEICE ICSANE2015, vol.115, p.65-69, 2015.
(13)	Taro Matsuo, Guanghao Sun, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, Hiroshi Sakamaki and Teruyuki Hara, "Acceleration for Wind Velocity Vector Estimation by Neural Network for Single Doppler LIDAR," International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP), 2016.
(14)	Naoya Nomura, Masato Gocho, Takuya Uesugi, Kei Akama, Tetsutaro Yamada and Hiroshi Sakamaki, "Toward the real-time local weather forecasting using CReSS on GPU clusters," HPC Asia, 2023.
講演（国内）	
(15)	酒巻 洋, 真庭 久和, 岩本 雅史, 桐本 哲郎, "二次元FFTを用いた高速航跡検出法," 電子情報通信学会 1999 ソサイエティ大会, D-12-8, 1999.
(16)	酒巻 洋, 真庭 久和, 岩本 雅史, 桐本 哲郎, "二次元FFTを用いた航跡検出法の画面分割による検出性能改善," 電子情報通信学会 2000 総合大会, D-12-45, 2000.
(17)	若山 俊夫, 酒巻 洋, 藤坂 貴彦, 大鋸 康功, "乱気流の時間変化を考慮したテンプレートマッチングによる後方乱気流検出：各種テンプレートの比較," 電子情報通信学会 2021年ソサイエティ大会, B-2-25, 2001.
(18)	酒巻 洋, 若山 俊夫, 藤坂 貴彦, 田中 久理, 渡邊 伸一郎, 橋口 浩之, 深尾 昌一郎, "Kaバンド気象ドップラーレーダによる霧の検出," 電子情報通信学会 2001 総合大会, B-2-21, 2001.

(19)	酒巻洋, 若山俊夫, 藤坂貴彦, 田中久理, 渡邊伸一郎, 橋口浩之, 深尾昌一郎, “Ka バンド気象ドップラーレーダを用いた霧の検出,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会 SANE2001-13, vol. 101, pp. 9-15, 2001.
(20)	若山俊夫, 酒巻洋, 藤坂貴彦, 大鋸康功, “乱気流の時間変化を考慮したテンプレートマッチングによる後方乱気流検出,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2001-35, vol. 101, pp. 19-26, 2001.
(21)	白石将, 酒巻洋, 田中久理, 植松明久, 手柴充博, 橋口浩之, 深尾昌一郎, 鈴木修, “SVMによるミリ波レーダデータからの悪視程判別,” 情報科学技術フォーラム (FIT), I-28, 2002.
(22)	酒巻洋, 若山俊夫, 野村博盛, 岡村敦, 関口高志, “発雷判定要素を用いた雷予測アルゴリズム,” 電子情報通信学会 2003 ソサイエティ大会, B-2-27, 2003.
(23)	木瀬若桜, 酒巻洋, 尾崎敦夫, 三石彰純, “移動予測手法への事例検索法の適用による発雷予測精度改善,” 電子情報通信学会 2003 年ソサイエティ大会, B-2-28, 2003.
(24)	酒巻洋, 若山俊夫, 岡村敦, 柳澤隆行, 浅香公雄, 平野嘉仁, 大鋸康功, 加来信之, “光波レーダを用いた航空機後方乱気流の観測,” 電子情報通信学会 2003総合大会, B-2-72, 2003.
(25)	酒巻洋, 若山俊夫, 岡村敦, 柳澤隆行, 浅香公雄, 平野嘉仁, 大鋸康功, 加来信之, “光波レーダを用いた航空機後方乱気流の観測,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2002-84, vol. 102, pp. 47-51, 2003.
(26)	酒巻洋, 安藤俊之, 若山俊夫, 亀山俊平, 古田匡, “風況精査用光波レーダの開発および計測精度の検証,” 第25回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 137-140, 2003.
(27)	酒巻洋, 若山俊夫, 野村博盛, 関口高志, 岡村敦, “発雷判定要素を用いた雷予測アルゴリズム,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会 (SANE), vol. 103, pp. 1-5, 2003.
(28)	酒巻洋, 安藤俊行, 若山俊夫, 亀山俊平, 平野嘉仁, 関口高志, 古田匡, 大鋸康功, 山本文雄, 磯修, “風況精査用光波レーダの開発(1) - システム構成および初期評価,” 日本気象学会 2004年度春季大会, 2004.
(29)	酒巻洋, 若山俊夫, 柳澤隆行, 平野嘉仁, “レーザレーダにおける乱気流検出アルゴリズム,” 第23回レーザセンシングシンポジウム, 2004.
(30)	酒巻洋, 若山俊夫, 関口高志, “曲線あてはめによる台風中心検出方式の検討,” 日本気象学会 2006年度春季大会, 2006.
(31)	若山俊夫, 酒巻洋, “風向時間平滑による高時間分解能な風速計測,” 電子情報通信学会 2008年ソサイエティ大会, B-2-18, 2008.

(32)	若山 俊夫, 酒巻 洋, 小竹 論季, “ダブルパルス送信による風計測レーザレーダの高分解能化の検討,” 電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会, B-2-11, 2009.
(33)	磯田 健太郎, 田口 海人, 酒巻 洋, 原 照幸, “2次エコーを抑圧する合成帯域レーダの実験検証,” 電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会, B-2-3, 2009.
(34)	酒巻 洋, 原 照幸, “NLFMパルス圧縮におけるドップラー周波数補償方式,” 電子情報通信学会 2010年ソサイエティ大会, 2010.
(35)	若山 俊夫, 酒巻 洋, “1 次エコー領域に地形クラッタが存在する状況における 2 次エコー抑圧レーダ信号処理,” 電子情報通信学会 2010 年ソサイエティ大会, B-2-22, 2010.
(36)	小竹 論季, 酒巻 洋, 原 照幸, “3D Imaging LADAR用目標検出アルゴリズムの改良,” 電子情報通信学会 2010年ソサイエティ大会, B-2-5, 2010.
(37)	小竹 論季, 酒巻 洋, 原 照幸, “3D Imaging LADARを用いた目標検出アルゴリズムの開発,” 電子情報通信学会 2010年総合大会, B-2-47, 2010.
(38)	小竹 論季, 酒巻 洋, 亀山 俊平, 原 照幸, “3D Imaging LADAR用目標検出アルゴリズムの開発,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2010-129, vol. 110, pp. 13-18, 2010.
(39)	酒巻 洋, 若山 俊夫, 亀山 俊平, 浅香 公雄, “可搬型偏光ライダーの開発,” 日本気象学会 2011年度春季大会, 2011.
(40)	酒巻 洋, 原 照幸, 田中 寿和, 野中 親房, “3D Imaging LADAR用目標検出アルゴリズムの誤検出低減法,” 電子情報通信学会 2012年総合大会, 2012.
(41)	酒巻 洋, 原 照幸, 田中 久理, “空間情報を用いたドップラーライダーのデータスクリーニング法の開発,” 日本気象学会 2013年度春季大会, 2013.
(42)	加藤 万莉絵, 酒巻 洋, 平田 和史, “2種類の符号系列を用いたレーダの2次エコー抑圧法,” 電子情報通信学会 2013年ソサイエティ大会, B-2-35, 2013.
(43)	加藤 万莉絵, 酒巻 洋, 平田 和史, “2種の符号系列を用いるレーダの2次エコー抑圧方式,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2013-117, vol. 113, no. 387, 2013.
(44)	酒巻 洋, 田中 久理, 平田 和史, “視線速度スクリーニングによる風推定精度改善に関する検討－実観測データによる検証－,” 日本気象学会 2013年秋季大会, 2013.
(45)	酒巻 洋, 原 照幸, 田中 久理, “低S/N環境下における風計測ライダーのデータスクリーニング法,” 電子情報通信学会 2013年総合大会, 2013.
(46)	酒巻 洋, 田中 久理, 小竹 論季, 浅田 均, 平田 和史, “浮体式ドップラーライダーにおける動揺補正アルゴリズムの開発,” 日本気象学会 2014 年度春季大会, 2014.

(47)	酒巻 洋, 田中 久理, 平田 和史, “浮体式ドップラーライダーにおける動揺補正アルゴリズム,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 2014.
(48)	酒巻 洋, 加藤 万莉絵, 鈴木 信弘, 柿元 生也, 浅田 均, “偏光ドップラーライダーによる噴煙観測 — 初期観測結果 —,” 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 2014.
(49)	加藤 万莉絵, 酒巻 洋, 鈴木 信弘, “ライダーを用いた雲底雲量推定法,” 日本気象学会 2014年度秋季大会, 2014.
(50)	加藤 万莉絵, 酒巻 洋, 平田 和史, “2次エコー及び地形クラッタを抑圧するレーダの1次エコー推定精度の改善,” 電子情報通信学会 2014年総合大会, B-2-37, 2014.
(51)	増尾 崇幸, 木寺 正平, 桐本 哲郎, 酒巻 洋, 鈴木 信弘, “単一ドップラーライダーのためのパラメトリック風速ベクトル推定法,” 電子情報通信学会 2015 年ソサイエティ大会, B-2-4, 2015.
(52)	加藤 万莉絵, 酒巻 洋, 鈴木 信弘, 柿元 生也, 松田 知也, “二重偏波を用いた交互送信交互受信時のナイキスト速度回復法,” 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 2015.
(53)	加藤 万莉絵, 酒巻 洋, 原 照幸, 柿元 生也, 松田 知也, “交互送信交互受信時の送信時間ずれが観測データに与える影響,” 日本気象学会 2016 年度春季大会, 2016.
(54)	松尾 太郎, 孫 光鎬, 桐本 哲郎, 酒巻 洋, 原 照幸, “単一ドップラーライダーのためのニューラルネットワークを用いたパラメトリック風速ベクトル推定法,” 電子情報通信学会 2016年ソサイエティ大会, B-2-5, 2016.
(55)	酒巻 洋, 藪垣 吉幸, 圓城 雅之, 原 照幸, “ドップラーライダー用動揺補正方式の改良,” 日本気象学会 2016年度秋季大会, 2016.
(56)	北村 堯之, 今城 勝治, 酒巻 洋, 諏訪 啓, “ドップラーライダーによる到来風予測,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2019-101, vol. 119, pp. 25-30, 2020.
(57)	河尻 翔太, 酒巻 洋, “混雑ゲームのための最適応答戦略の分散化に関する初期検討,” 電子情報通信学会 2021年ソサイエティ大会, A-10-15, 2021.
(58)	酒巻 洋, 川合 万莉絵, 中溝 尚道, 芝田 博志, 松田 知也, “気象レーダーにおける地形エコー除去の高度化,” 日本気象学会 2021年度秋季大会, 2021.
(59)	上杉 卓也, 後町 将人, 河上 裕太, 酒巻 洋, “SoC 環境におけるGPUベース物体検出CNNの性能評価,” 2023年度人工知能学会 全国大会, 2023.
(60)	野村 直也, 後町 将人, 赤間 慶, 山田 哲太郎, 酒巻 洋, “気象シミュレータ CReSS のGPU向け並列化検討,” 電子情報通信学会 CPSY2023-14, vol. 123, pp. 37-42, 2023.