

| | |
|---------|---|
| 氏名・(本籍) | え 江 ぶち 淵 なお 直 と 人 |
| 学位の種類 | 博 士 (理 学) |
| 学位記番号 | 理 第 9 8 4 号 |
| 学位授与年月日 | 平 成 4 年 3 月 10 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 2 項該当 |
| 最 終 学 歴 | 昭和61年 3 月 東北大学大学院理学研究科 (前期 2 年の課程) 地球物理学専攻修了 |
| 学位論文題目 | Microwave Backscattering from Laboratory Wind-Wave Surfaces with Reference to Physical Processes of Air-Water Interface (風波表面からのマイクロ波後方散乱および水面の物理過程に関する研究) |
| 論文審査委員 | (主査) 教 授 鳥 羽 良 明 教 授 田 中 正 之 教 授 近 藤 純 正 |

論 文 目 次

Chapter 1. General Introduction

- 1.1. Models of Microwave Backscattering from the Ocean Surface
- 1.2. Physical Processes in the Turbulent Boundary Layers above and below the Wind-Wave Surface and Generation of the Surface Configuration
- 1.3. Scope of the Present Study

Chapter 2. Fine Structure of Laboratory Wind-Wave Surfaces Studied by Using on Optical Method

- 2.1. Introduction

2.2. Experiment

2.3. Results and Discussions

2.4. Summary

Chapter 3. Physical Processes of the Turbulent Boundary Layer beneath the Laboratory
Wind-Wave Surface Relating to the Surface Configurations

3.1. Introduction

3.2. Flow Visualization by a Hydrogen-Bubble Method

3.3. Measurement of the Velocity and Vertical Shear

3.4. A Simple Model of Descending Process of the Bursting Phenomena

3.5. Conclusion

Chapter 4. Statistical Properties of Microwave Backscattering from the Laboratory Wind-
Wave Surfaces

4.1. Introduction

4.2. Experiment

4.3. Result and Discussion

4.4. Summary and Conclusion

Chapter 5. Physical Processes of Microwave Backscattering from the Laboratory Wind-
Wave Surfaces

5.1. Introduction

5.2. Experiment

5.3. Microwave Backscattering at Large Incident Angles

5.4. Microwave Backscattering at the Normal Incidence

5.5. Microwave Backscattering at Intermediate Incident Angles

5.6. Summary and Conclusion

Chapter 6. A Simple Model for Microwave Backscattering at Large Incident Angles

6.1. Introduction

6.2. Summary of Experimental Results

6.3. A Simple Model

6.4. Results

6.5. Discussion and Conclusion

Appendix to Chapter 6

Chapter 7. Conclusion

Acknowledgments

References

Tables and Figures

論文内容要旨

気候変動などの地球環境の諸問題を解明する上で、大気・海洋間の運動量、エネルギー、熱、水蒸気あるいは二酸化炭素などの気体を含む諸物質などのフラックスを全球的に見積ることが、大気海洋相互作用の重要な研究課題となっている。その際、マイクロ波散乱計、マイクロ波高度計、合成開口レーダなどのアクティブマイクロ波センサーによるリモートセンシングが、きわめて有効な手段になると考えられている。アクティブマイクロ波センサーは、センサーから海面へ向けてマイクロ波を放射し、海面で散乱・反射されて帰ってきた信号から、海上風や波浪など海面の情報を観測するもので、雲などの影響を受けずに広域を繰り返して観測できる特徴を持っている。しかしながら、その基本原理ともいべき海面におけるマイクロ波後方散乱の機構については、いくつかの単純なモデルが提案され、実用に供されているが、必ずしも十分に解明されているわけではなく、このことが物理量抽出アルゴリズムに反映して、観測精度の低下の原因となっている。海面でのマイクロ波後方散乱の機構を解明するには、風波の存在する複雑な形状の海面における電磁波散乱の物理過程と、その散乱を起こす海面形状の生成の物理過程の両方を合わせて理解する必要がある。

本研究では、風波表面におけるマイクロ波後方散乱の物理過程およびそれに関連する風波表面付近の物理現象について、風洞水槽における室内実験を中心に研究を行った。特に、風波というきわめて非線形性の強い現象に対して、その非定常性・非一様性に注目した実験・解析・考察を行った。マイクロ波の周波数は、測風用など一般に海面境界の諸現象との対応がよいと言われる X-バンド、約10GHz (波長 3 cm) を選んだ。マイクロ波の後方散乱には、マイクロ波の波長と同程度の波長をもつ水面の構造が重要であると言われている。そのような風波表面の微細構造は、水面の上下に存在する乱流境界層の様々な物理過程を反映して形成されていると考えられる。

第1章では、海面からのマイクロ波後方散乱の機構、および風波表面上下の乱流境界層と表面の微細構造の生成の物理機構について今までの研究をレビューし、本研究の位置づけを行った。

第2章では、風洞水槽内で起こした風波の表面の微細構造を、光学的手法を用いて2次元的に捉え、その空間分布の特徴を定量的に抽出して、その生成の機構について考察した。その結果、風波の発達状況に対応して、特徴的な微細構造が形成されている様子が明らかになった。

低風速時には菱形の3次元的な構造が見られる。この構造は、それ以上の風速における代表的な風波（主要波）の持つ2次元的な形状とは著しく異なる低風速時に特有のものである。

ある程度風速が発達すると、主要波は長い峰を持つ2次元的な形状を持つようになる。その表面には、峰の前面に捕捉された表面張力波および、背から谷にかけて滑らかな筋状の構造が見られる。この2つの構造は、主要波と一定の位相関係を保ちながら、主要波の位相速度で移動していることが明らかになった。また、これらの構造は、水面直下の乱流境界層の構造を反

映して形成されていることが示唆された。

風速が大きくなると、気泡の取り込みを伴う砕波が起ころはじめ、風波表面はほぼ前面にわたって一様に細かい凹凸に覆われる。この細かい凹凸は、水面下の局所的な乱れを反映して形成され、組織的な維持・伝搬の機構を持たない寿命の短い構造と考えられる。

第3章では、風波表面の微細構造の形成に大きな影響を与えている水面直下の乱流境界層の構造を、水素気泡法による可視化と、熱線流速計による流速及びその鉛直シアの計測によって調べた。その結果、水面近傍から高速の流体が下層へと突っ込むバースト現象が検出された。このバーストは、マクロ的には風波の砕波調節、ミクロ的には気流の剝離や再付着、高渦度領域の発達・減衰などのごく表層の微妙な過程によって起こるもので、風から波・水中への運動量輸送に大きな役割を担っているものと考えられる。

2種類の実験の結果から、バーストは主要波の位相に相対的に、ほぼ一定の経路を通して進入することが明らかになった。主要波の軌道運動と吹送流からなる基本場に理想化したバーストを加えた単純なモデルを用いて、このバーストの進入の過程について考察を行った。

第4章では、風洞水槽内の風波表面からのマイクロ波後方散乱の特性、特に散乱強度の風速・入射角依存性を統計的に調べた。その結果、全体的には、今までに提案されている風波表面での後方散乱モデルとよく符合する結果が得られた。すなわち、入射角の小さいとき、鏡点散乱モデルから予想されるように、散乱強度は風速とともに減少する。入射角の大きいときは、ブラッグ散乱モデルから予想されるように、散乱強度は風速とともに増加する。

散乱強度の時系列のスペクトル解析から、入射角の大きいときに後方散乱に寄与する水面の微細構造の伝搬速度は、自由伝搬するブラッグ波として位相速度とは一致しないことが明らかになった。風上向き入射のときは、後方散乱に寄与する構造の伝搬速度は、主要波の位相速度に一致する結果が得られた。これは、ブラッグ共鳴を起こす高波数の波と主要波との線形な重ね合わせを仮定した複合散乱モデルとは物理的に矛盾するが、水面の微細構造についての第2章、第3章における実験結果とは矛盾しない。風下向き入射のときも、ブラッグ波の位相速度とは一致しないが、主要波の位相速度よりはやや遅い伝搬速度を持つことが示された。

第5章では、風波表面からマイクロ波後方散乱の過程を、散乱強度およびドップラースペクトルの時系列の詳細な解析によって調べた。回転楕円面アンテナを用いてマイクロ波のビームを絞り、主要波の位相と後方散乱信号との対応を明らかにすることを試みた。以下、入射角が大きいとき (45°)、水面に垂直に入射するとき (0°)、両者の中間の入射角のとき (15° , 30°) に分けて結果をまとめた。

入射角の大きいとき、散乱強度・ドップラー速度とも水位と同位相の変動を示した。個々波の峰付近で観測したドップラー速度の大きな値は、波高計で独立に計測した個々波の峰速度と一致した。以上から、主要波の峰に捕捉され主要波ともに伝搬する水面の微細構造が、マイクロ波後方散乱に大きく寄与していることが示された。この結論は、散乱信号の時系列のスペクトル解析の結果からも支持され、また、風波表面の微細構造や水面上下の乱流境界層の構造に

ついでの実験結果とも一致するものである。

後方散乱の信号の特性が、入射方向によって対称でなく、風上向き入射と風下向き入射で異なる性質を持つことも示された。全時系列から求めた風下向き入射のときドップラー速度は、風上向きの入射のときよりも小さな値を示した。この非対称性の原因は、峰の前面に捕捉された微細構造が位置する水面の傾斜の効果によって、入射方向によって入射角が局所的に変わるためであることが示唆された。

マイクロ波後方散乱に対する、気泡の取り込みを伴う砕波の効果を、水面の下から撮影したビデオ映像を用いて調べた。その結果、散乱信号に対する目立った砕波の効果は見られなかった。造波機で起こした規則波を用いた従来の実験的研究では、砕波によって生ずる水面の構造が強い散乱を起こすことが報告されている。しかし、風波の場合は、第2章の光学的実験でも示されたように、気泡の取り込みを伴う砕波が発生する段階で、すでに水面は非常に凹凸の激しい状態になっており、砕波が起こることによって凹凸の度合がそれほど増すことはないと考えられる。

水面に垂直にマイクロ波が入射するとき、散乱強度の時系列は水位変動と特有の位相関係を示した。すなわち、強度の時系列は、個々波の峰と谷の2ヶ所でピークを持ち、谷におけるピークの方が峰よりも大きい。この結果は、水面の傾斜が入射方向に垂直になるところで散乱が強くなるというもので、鏡点散乱モデルと一致するものである。また、谷のピークの方が強いのは、風波では一般に峰の方が谷よりも尖っているということによって説明できる。

中間の入射角では、鏡点散乱とブラッグ散乱の後方散乱に寄与していることが示された。散乱過程は、より複雑であり、今後も詳細な研究が必要であると考えられる。とくに、第2章で用いた光学的手法をマイクロ波後方散乱実験と組み合わせて鏡点散乱を識別することによって、その寄与を見積もることができるであろう。

第6章では、第2章から第5章までの実験結果をもとに単純なマイクロ波後方散乱モデルを作り、このモデルを用いて入射角の大きなきの散乱過程、特に風上・風下向き入射の非対称性について考察を行った。主要波の位相にともなった散乱強度およびドップラー速度の変動とその入射方向に対する非対称性がモデルによって再現された。その結果、主要波の峰前面に捕捉された微細構造が、波面勾配によって局所的に入射角を変える効果によって、散乱特性の風向きに対する非対称性が生じていることが示された。

主要波の周期よりも長い時系列から求めたドップラーспекトルの入射方向に対する非対称性についても、このモデルを用いて説明することができる。風上向き入射のときは、峰前面の波面勾配が、入射角を小さくする方向に働くので、峰前面に捕捉された構造の寄与は相対的に大きくなる。逆に、風下向き入射のときは、局所的な入射角が大きくなり、峰前面の構造の寄与は小さくなる。その結果、峰に捕捉されていない構造からの寄与を含めた長時間の平均としてのドップラーспекトルでは、風上向き入射のときの方が主要波の位相速度により近い周波数にピークを持つと考えられる。

第7章では、本研究全体の結果をまとめるとともに、今後の研究課題を記した。

以上のように、本研究では、風洞水槽実験を中心に、風波表面からのマイクロ波後方散乱の物理過程およびそれに関連する風波表面の諸現象について調べた。その結果、風波表面からのマイクロ波後方散乱の物理過程は、線形の成分波の重ね合わせではなく、きわめて非線形性の強い風波表面の物理過程を反映していることが明らかとなった。今後も、海面におけるマイクロ波散乱の過程およびその海面境界過程との関連についての基礎的な研究を重ねることによって、アクティブマイクロ波センサーによって観測されたデータの特徴を理解し、マイクロ波の後方散乱信号と海面の物理量を結びつけるアルゴリズムを改良していくことができるものと考えられる。

論文審査の結果の要旨

江淵直人提出の論文は、風洞水槽を用いた室内実験によって、風波表面からのマイクロ波後方散乱と、それに関わる風波表面およびその上下の乱流境界層の物理過程を明らかにしようとしたものである。

風波表面からのマイクロ波後方散乱の機構を明らかにするためには、複雑な形状の風波表面からの電磁波の散乱過程、およびその表面形状を形成する風波表層の流体力学的過程の両方を理解する必要がある。従来の海面でのマイクロ波後方散乱のモデルの多くは、水面を成分波の線形な重ね合わせとして表現し、その統計的性質を散乱強度と結び付けるものであった。これに対し本論文では、風波というきわめて非線形性の強い現象について、その非定常性・非一様性に注目した実験・解析・考察を行い、いくつかの新知見を得ている。

まず、風波表面の微細構造の生成の過程および、水面直下の乱流境界層の構造について調べ、風波の表面形状は、風波上の気流の剝離や再付着、峰直下の高渦度領域の存在などの水面上下の乱流境界層の様々な物理過程を反映して形成されていることを示している。

次に、実験室用の X バンドマイクロ波散乱計を用いて、散乱信号を計測する実験を行い、以下のような知見を得ている。後方散乱強度の入射角・風速依存性を中心とした統計的性質については、従来提案されているモデルと基本的には一致する結果となっているが、風速の主要波の非対称性や、表面の微細構造の分布の非一様性などを反映したものとなっている。

マイクロ波後方散乱の物理過程について、散乱強度およびドップラースペクトルから求めた散乱体の速度の時系列をもとに、どのような水面の構造が後方散乱に寄与しているかを調べた。入射角の大きい時には、風波の主要波の峰前面に捕捉され、峰とともに伝播する微細構造が、後方散乱に大きく寄与しているという新しい結果を得ている。この結果は、本論文前半で調べた風波表面の微細構造の分布や、風波表面上下の乱流境界層の物理過程を反映しているが、従来提案されている散乱モデルとは物理的に異なるものである。また、散乱特性が入射方向に対して非対称性を持つことも示している。これについて単純なモデルを用いた考察から、表面の微細構造の分布の不均一性と、風波の主要波の波面勾配によって局所的な入射角が変わることが原因であることを示している。

以上のように、本論文は、風波表面からマイクロ波後方散乱の物理過程についていくつかの重要な知見を見出したものである。これは申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって江淵直人提出の論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。