

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE NO. 30

**STUDIES OF ENERGY EXCHANGE PROCESSES  
BETWEEN THE OCEAN-GROUND SURFACE  
AND ATMOSPHERE**

気象研究所技術報告

第30号

大気と海洋・地表との  
エネルギー交換過程に関する研究

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

APRIL 1992

## Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director-General : Mr. Shunji Konaga

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| Forecast Research Department   | Director : Mr. Ryuji Hasegawa  |
| Climate Research Department  | Director : Mr. Harushige Koga  |
| Typhoon Research Department  | Director : Mr. Shin Ohtsuka    |
| Physical Meteorology Research Department                               | Director : Mr. Takenori Noumi  |
| Applied Meteorology Research Department                                | Director : Dr. Tatsuo Hanafusa |
| Meteorological Satellite and<br>Observation System Research Department | Director : Mr. Toyoaki Tanaka  |
| Seismology and Volcanology Research Department                         | Director : Dr. Masaaki Seino   |
| Oceanographical Research Department                                    | Director : Dr. Takeshi Sagi    |
| Geochemical Research Department  | Director : Dr. Koji Shigehara  |

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

## Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Koji Shigehara

|                    |                                   |                     |                  |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------|
| Editors :          | Isao Takano                       | Shinji Nakagawa     | Masahiro Hara    |
|                    | Toru Sasaki                       | Takahisa Kobayashi  | Hiroshi Nirasawa |
|                    | Toshikazu Odaka                   | Katsunobu Nishiyama | Yoshimi Suzuki   |
| Managing Editors : | Yoshitsugu Nagasawa, Yoshiro Ohta |                     |                  |

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the Meteorological Research Institute.

The Editing Committee reserves the right of decision on acceptability of manuscripts and is responsible for the final editing.

---

© 1992 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of articles in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from articles in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of articles in this journal, that are not for personal use in research, study, or teaching, require permission from the MRI.

## 序

本技術報告は、昭和60年～平成元年度科学技術振興調整費による重点基礎研究「大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程に関する研究」によって行われた成果をまとめたものである。

大気大循環および海洋大循環の数値モデルの開発を進め、その結合モデルを完成させるためには、基本的課題として大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程を解明しなければならない。本研究は、このエネルギー交換過程のパラメタリゼーションの基礎の確立を、観測、室内実験、数値実験の3本柱の研究手法によって、重点基礎研究の名称の示すとおり基礎的観点から取り組んだものである。このため、研究の分野は広く4研究部にわたって行われた。

ここに記しておきたい本研究の特色の1つは、研究の過程を通して多くの海外の研究者と交流を行い、情報交換を行う機会に多く恵まれたことである。4名の研究者が本研究による成果を国際学会において発表し、また、2名の外国人研究者の招聘を行って研究を推進することができた。すなわち、昭和63年度には、韓国海洋研究所の李興宰博士と6ヶ月間の共同研究を行い、北西太平洋の海洋混合層の経年変動・季節変動の水平構造を明らかにした(Lie, H.-J. and M. Endoh, 1991)。また、平成元年度には、成層流体実験の権威である英国ケンブリッジ大学応用数学理論物理学教室のポール・リンデン博士を招聘して、大気・海洋混合層および成層流体の鉛直混合過程の実験に関する有益な意見交換を行い、以後の研究活動の大きな原動力とした。

本研究は、広い研究分野にわたる基礎的研究のため、各研究の成果内容は必ずしも相互の関連を留意して記述されていないが、得られた成果が科学技術振興調整費の「太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究(JAPACS)」や「砂漠化機構の解明に関する国際共同研究(JC-JOSDES)」などの研究において、大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程の解明に十二分に活用され、また、それぞれの研究をますます発展させることを期待する。

最後に、研究推進の上で企画室、総務部の多くの方々、とりわけ企画室野村保夫調査官に御助力頂いたことを記しておく。

平成4年1月

物理気象研究部 加藤 真規子

# 目 次

序

|                |   |
|----------------|---|
| 概要 .....       | 1 |
| Abstract ..... | 3 |

## 第1章 地表面と大気のエネギー輸送の基礎的研究 ..... (三上正男) ..... 5

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1 飽和草地面上のダルトン数とスタントン数 .....          | 5  |
| 1.1 はじめに .....                       | 5  |
| 1.2 理論的基礎 .....                      | 7  |
| 1.3 観測 .....                         | 8  |
| 1.3.1 八郎潟 .....                      | 8  |
| 1.3.2 観測システム .....                   | 8  |
| 1.4 結果 .....                         | 11 |
| 1.4.1 平均プロファイル .....                 | 11 |
| 1.4.2 風速に対する粗度高 .....                | 11 |
| 1.4.3 温度と湿度プロファイルに対する粗度高 .....       | 13 |
| 1.5 議論 .....                         | 15 |
| 2 緩やかな傾斜を持った複雑地形上の粗度パラメーターについて ..... | 17 |
| 2.1 はじめに .....                       | 17 |
| 2.2 観測方法 .....                       | 18 |
| 2.2.1 観測地点 .....                     | 18 |
| 2.2.2 観測 .....                       | 18 |
| 2.3 これまでの研究のレビュー .....               | 19 |
| 2.4 解析と結果について .....                  | 21 |
| 2.4.1 風速のプロファイルデータ .....             | 21 |
| 2.4.2 粗度高とゼロ面変位 .....                | 24 |
| 2.4.3 武蔵丘陵森林公園の地形因子 .....            | 26 |
| 2.5 議論 .....                         | 26 |
| 3 武蔵丘陵森林内の風速分布について .....             | 29 |
| 3.1 はじめに .....                       | 29 |
| 3.2 方法 .....                         | 29 |

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 3.3   | 観測                                | 30 |
| 3.4   | 結果と考察                             | 31 |
| 4     | 森林上の気象特性について                      | 33 |
| 4.1   | はじめに                              | 33 |
| 4.2   | 観測                                | 33 |
| 4.3   | 解析方法                              | 33 |
| 4.4   | 結果と考察                             | 34 |
| 5     | ペンマン法による森林からの蒸発散量評価               | 37 |
| 5.1   | はじめに                              | 37 |
| 5.2   | 方法                                | 38 |
| 5.3   | 解析に用いた事例                          | 40 |
| 5.4   | 結果と考察                             | 41 |
| 6     | まとめ                               | 42 |
|       | Appendix 1: 1985年度観測              | 46 |
|       | Appendix 2: 1986年度観測              | 50 |
|       | Appendix 3: 1987年度観測              | 60 |
|       |                                   |    |
| 第2章   | 大気と海洋とのエネルギー交換過程の基本的観測 (遠藤昌宏)     | 63 |
| 1     | 観測の目的                             | 63 |
| 2     | 四国沖ブイロボットによる表層水温の連続観測             | 64 |
| 2.1   | 観測の概要                             | 64 |
| 2.2   | 観測結果の概要                           | 66 |
| 2.2.1 | 水温の変化                             | 66 |
| 2.2.2 | 熱輸送量の変化                           | 67 |
| 3     | 海上気象データによる水温のシミュレーション             | 68 |
| 4     | まとめ                               | 71 |
|       | Appendix: 熱輸送量の計算方式               | 73 |
|       |                                   |    |
| 第3章   | 大気および海洋混合層におけるエネルギー輸送の室内実験 (新野 宏) | 75 |
| 1     | はじめに                              | 75 |
| 2     | 実験方法                              | 76 |
| 2.1   | 実験装置                              | 76 |
| 2.2   | 実験手順                              | 76 |

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 2.2.1 | 安定成層の形成           | 76 |
| 2.2.2 | 対流混合層の実験          | 78 |
| 2.2.3 | 力学的混合層の実験         | 78 |
| 3     | 実験結果と考察           | 79 |
| 3.1   | 対流混合層             | 79 |
| 3.2   | 力学的混合層            | 81 |
| 4     | まとめ               | 84 |
| 第4章   | 大気大循環モデル (山崎孝治)   | 85 |
| 1     | はじめに              | 85 |
| 2     | 陸面に関するモデルの改良と数値実験 | 86 |
| 3     | 海面水温偏差に対する応答      | 90 |
| 4     | まとめと今後の課題         | 93 |
| 付録    | 成果報告              | 95 |

## 概 要

近年、異常気象が多発し気候変動の機構の解明および予測が世界的に緊急かつ必要な課題となっている。また、わが国において、社会・経済活動の高度化、複雑化に伴い気象の長期予報の改善が強く求められている。このような要求に応えるため、力学的な手法による気候変動の予測および長期予報の実現を目指した大気大循環および海洋大循環の数値モデルの開発を進め、さらに、大気、海洋を含み地表効果を考慮した結合モデルを完成させることが課題となっている。このためには、大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程を解明し、これをパラメタライズして結合モデルに取り入れることが必要である。

本研究は、エネルギー交換過程について基本的観測・実験を行い、これまでに得られている知見と合わせて解析をして、パラメタリゼーションの基礎を確立し、気候変動の機構の解明および長期予報の改善に資することを目的として行った。

本技術報告は4章から成っている。

第1章「地表面と大気のエネルギー輸送の基礎的研究」では、秋田県八郎潟の大麦畑および国営武蔵丘陵森林公園において野外観測を実施し、地表面と大気間のエネルギー輸送を観測的に明らかにした。

八郎潟の観測では、飽和草地面上におけるグルトン数とスタントン数を求め、渦相関法によるフラックスの直接測定の結果と比較することにより、飽和草地面上ではグルトン数とスタントン数を用いたバルクパラメタリゼーションが有効であることがわかった。

森林公園の観測では、繫留気球観測による風速プロファイル観測のデータから、粗度高とゼロ面変位を決定し、平均標高からの偏差の標準偏差を地形因子として用いたパラメタ化を試みた。また、キャノピー層内の風速プロファイルからキャノピーフローインデックスを求め、さらに、記念塔上での気温・湿度・風向風速の連続観測から、ペンマン法による森林上の蒸発散量の簡単な評価を試みた。

第2章「大気と海洋とのエネルギー交換過程の基本的観測」では、比較的安定した海上気象観測の実績がある気象庁の海上気象ブイ（東経135度、北緯29度）を利用して、その係留索に水温計13台・水深計2台を設置し、大気と海洋の間で交換されるエネルギーの量の絶対値を求めた。このエネルギー交換量は大気と海洋それぞれの循環の季節変動と経年変動を決める上で最も大事な量である。

観測は、測器の検定観測およびブイによる予備観測の後、1988年4月から1990年9月まで、2年5ヶ月にわたって行い、水深500mまでの11点で水温の90分毎のデータと、熱フラックスを算定するのに必要な海上気象データの時系列を同時に得た。得られたデータセットから計算される

大気海洋間のエネルギー輸送量と水温の時間変動の解析，鉛直1次元モデルによる水温変動の予備解析の結果を報告する。

第3章「大気および海洋混合層におけるエネルギー輸送の室内実験」では，海洋と大気の相互作用過程の基礎的研究を行うために，大気および海洋に生ずる対流混合層と力学的混合層を内外壁が同心円筒からなる水槽実験によって作り出し，その性質とエネルギー輸送を調べた。

基本場となる安定な密度成層は，水槽の上下の境界を加熱冷却して作り出した。対流混合層は，上端の境界を冷却することにより，また力学的混合層は上端の境界を急に回転することにより作った。測定した物理量は，水槽の平均半径における温度分布（鉛直方向28点）と周方向の水平流速の鉛直分布（鉛直方向36点）である。ここでは，多くの実験結果の中から，対流混合層の実験4例，力学的混合層1例を選んで，その実験結果と解析結果について報告する。

第4章「大気大循環モデル」では，大気と海洋・地表とのエネルギー交換のパラメタリゼーションの基礎を確立するために，気象研究所大気大循環モデル（MRI・GCM）を用いた数値実験やモデルの改良を行った。

大気・海洋間のエネルギー交換に関しては，海面水温偏差が大気循環に及ぼす影響について1983年初夏のエルニーニョ時のケーススタディを行った結果，観測と良い一致を示し，物理過程に大きな問題はないことがわかった。大気・地表間に関しては，地表面アルベド（雪面アルベドも含む）や土壌水分に関する実験を行い，夏の陸地上の気候はアルベドや土壌水分に敏感であることがわかった。アルベドの与え方は観測値に基づくように改良し，土壌の多層モデルのテストを行った。



## Abstract

This technical report describes the direct outcome from the project entitled "Studies of energy exchange processes between the ocean-ground surface and atmosphere", which was sponsored by the Science and Technology Agency from 1985 to 1989. The energy exchange processes are not only important for driving the atmospheric and oceanic circulations but also play a crucial role in controlling the interactions between atmospheric and oceanic motions.

The main purpose of the present study is to clarify the energy exchange processes and to establish the basis for parameterization of these processes. The results of the study will contribute to elucidate the mechanism of the climatic change and to improve long-range weather forecast.

The present report consists of four chapters.

In Chapter 1, observational studies were made over a barley field in Hachiro-gata and over a complex terrain in the Musashi Hill Forest Park to investigate the air-land surface energy interaction.

The values of the Dalton and the Stanton numbers over the saturated barley field in Hachiro-gata were determined. A comparison with the direct flux measurements showed that the bulk parameterization by use of the Dalton and the Stanton numbers is suitable for estimating the evaporative flux over the saturated surface with vegetation.

The roughness height and the zero-plane displacement over the complex terrain in the Musashi Hill Forest Park were determined from the wind profiles obtained from captive balloon observations and the roughness parameters were parameterized with the standard deviation of the ground undulations.

The value of canopy flow index was determined from the wind profiles within the canopy. In addition, a simple estimation of evaporative flux by the Penman method was done from the continuous observations of temperature, humidity and wind velocities at the memorial tower in the Forest Park.

In Chapter 2, thirteen thermometers and two depthmeters on the mooring rope of the marine meteorological buoy which has been maintained by the Japan Meteorological Agency at (135E, 29N) were set in order to obtain long-term in-situ measurement of the flux variables (heat and momentum fluxes between ocean and atmosphere) which control seasonal and

interannual variations of oceanic and atmospheric circulations. The measurement data obtained were scarce due to the difficulty of maintaining a stable observation platform on the sea for more than a year.

The time series of water temperature thus obtained (every 90 minutes for 11 levels in the upper 500m layer) together with meteorological data for the two years and five months from April 1988 to September 1990 were analyzed. Temporal variations of energy and momentum fluxes and water temperature were also analyzed. Preliminary results of simulation of the water temperature variations driven by the observed flux data were shown.

In Chapter 3, convectively- and mechanically-driven mixed layers similar to those observed in the atmospheres and oceans were produced in a water tank, and their characteristics and energy transport were studied. A stable density stratification in the basic state was produced by heating (cooling) the top lid (bottom) of the water tank the sidewalls of which were coaxial cylinders. The convective mixed layer was produced by suddenly cooling the top lid, while the mechanical mixed layer by suddenly rotating the lid. Temperature and circumferential velocity were measured at 28 and 36 levels, respectively, at the mean radius of the water tank to obtain the time evolutions of their vertical profiles. The results of four experiments on the convective mixed layer and one experiment on the mechanical mixed layer are described.

In Chapter 4, numerical experiments and model revisions were made on the energy exchange processes between the atmosphere and the surface using the Meteorological Research Institute Atmospheric General Circulation Model (MRI • GCM). A case study of the 1983 early summer El Niño was performed to investigate the atmospheric response to the sea surface temperature anomalies. The accordance with the observation was satisfactory and the submodel of energy exchange between atmosphere and ocean seemed to offer no serious problems.

Sensitivity experiments on the surface albedo, including the albedo of snow, and the soil moisture were performed. The results showed the large sensitivity of the summer climate over the land surface to the albedo and soil moisture specifications. The specified albedo in the model was modified based on the existing observations. A multi-soil-layer model was also tested.