

琵琶湖プロジェクト'95における大気境界層観測

田中 賢治・大石 哲・中北 英一・池淵 周一

SYNTHETIC OBSERVATION OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN THE LAKE BIWA PROJECT '95

By Kenji TANAKA, Satoru OISHI, Eiichi NAKAKITA, and Shuichi IKEBUCHI

Synopsis

The synthetic observation of atmospheric boundary layer was carried out in the Lake Biwa Project from 23th to 30th October in 1995. The vertical profiles of atmospheric variables (air temperature, humidity) and their daily variations were observed in three ways - mooring balloon, airship, and radio sonde. Especially, the use of the airship in the atmospheric boundary layer observation was the first attempt in the world.

Comparing the airship observation with existing observation, it can be said that the airship has much advantage in the observation of atmosphere especially for the temperature field.

Three dimensional LCM-SiBUC coupled model was applied to this study area By making use of the observation data as initial conditions, some numerical simulations were carried out for the cloudy and sunny weather conditions. The predicted evolutions of atmospheric boundary layer correspond to the observation results.

1. 序論

琵琶湖プロジェクトは、大気との相互作用という視点はいうまでもなく、洪水や水資源に関わる諸問題という視点をも考慮しながら、現象面、応用面に対する水文学独自の興味をベースに、琵琶湖流域の持つ100 km スケールまでの流域水循環のUp-Scalingをはかることにより、さらに進めて行かなければならないマクロ水文学の確立の基礎を築き、結果としてGEWEX およびその関連計画(GCIP, GAME など)の目的とするグローバルな水・エネルギー循環の解明にも重要な情報を提供することを目的としている。

本プロジェクトはこれまで、滋賀県長浜市から伊香郡木之本町にわたる約20 km × 20 km の領域 (Fig. 1) を対象に、全国の工学、農学分野の水文学者が一同に会して、1992年から毎年共同集中観測を実施してきた。

特に琵琶湖プロジェクト'95では、世界初の試みとして、飛行船の地球科学観測への利用可能性を明らかにすることを目的に、日本飛行船事業株式会社所有の飛行船 (SKYSHIP 600) をプラットフォームとし、大気境界層内の物理量や各種フラックスの観測も実施した。飛行船は比較的低い高度を自由に低速度で飛行できるため、従来の地上観測や航空機観測では不可能であった観測方法が可能になった。

本報では、境界層観測の実施内容と一次的な解析結果を報告する。さらにプロジェクト対象領域に数値モデルを適用し、観測データを初期値としてモデルを走らせ、予測される大気場と観測値との比較を行う。

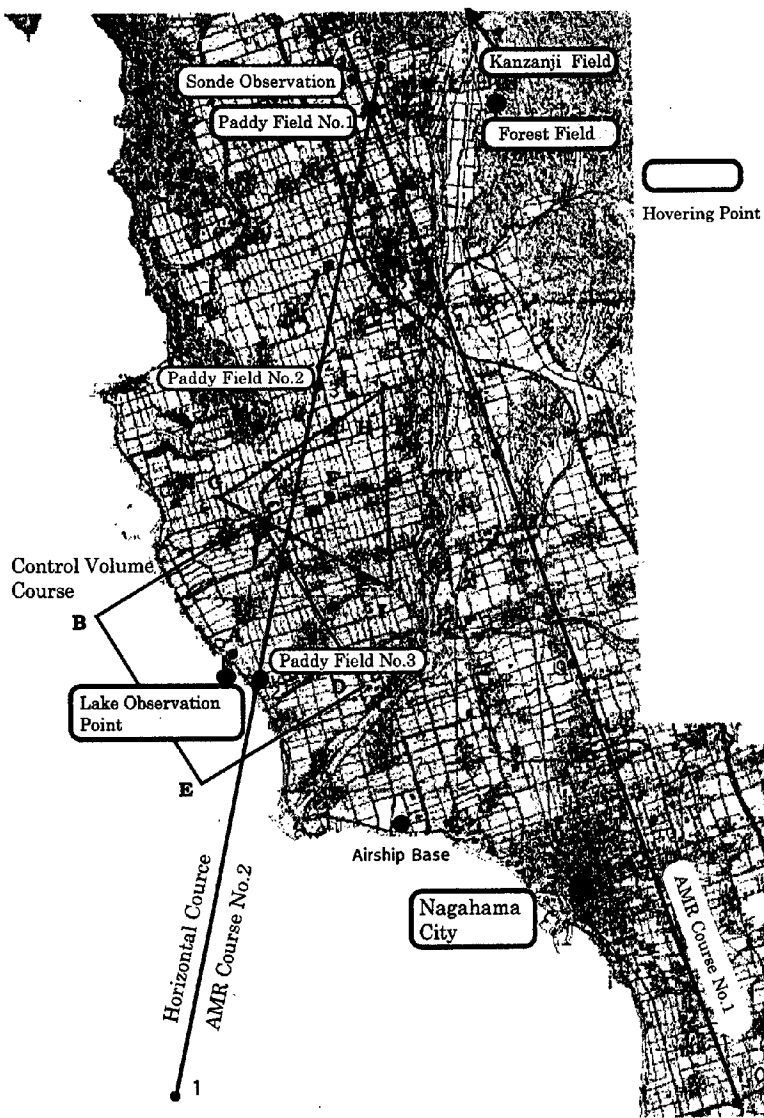


Fig. 1 : Experimental field of Lake Biwa Project 95.

The flight lines and hovering points for airship observation are also shown.

2. 琵琶湖プロジェクト'95の概要

観測体制は Fig. 1 に示した通りであり、以下の観測が実施された。

地上観測

- ・ 水田(3地点)、森林、湖面、都市の代表点における放射収支、熱収支、水蒸気、顕熱、運動量の各フラックスを渦相関法、傾度法、ボーエン比法、ヒートパルス法等により正確に観測した。
- ・ 土壌水分の鉛直プロファイル観測(テンシオメータ)や水平分布観測(サンプリング、TDR法)を行い、航空機 AMR 観測のグランドトゥルスデータを取得した。

- ・ラジオゾンデ, 係留気球による大気物理量(風速, 気温, 湿度)の鉛直プロファイル観測(飛行船との同期観測を含む)を行った。

人工衛星観測

- ・地球環境観測委員会水文過程サイエンスチームの支援により, プロジェクト期間中に琵琶湖上空に飛来した衛星のリモートセンシングデータが取得された(**Table. 1**)。

Table 1: List of acquired satellite data during Lake Biwa Project'95

| Date | Satellite | Remarks |
|-------|---------------|--|
| 10/23 | Landsat-5 TM | good for north-west side from AMR2 course |
| | Landsat-5 MSS | good for north-west side from AMR2 course |
| | SPOT-2 HRV | good for total area |
| 10/25 | JERS-1 SAR | good for total area |
| 10/26 | JERS-1 SAR | good for total area |
| | ERS-1 SAR | good for total area |
| | MOS-1b MESSR | good for total area |
| 10/28 | SPOT-2 HRV | good for within the circle (center: paddy3, diameter: 5km) |
| 10/29 | SPOT-2 HRV | good for the south part (2/3) of AMR1 course |

飛行船観測

- ・高度 1000 m 以下の大気境界層の観測(ゾンデ, 気球との同期観測を含む)を行った。
3D-SAT¹, 熱線風速計(クリモマスター), ロビンソン風速計, 温湿度センサー, CO₂ 濃度計
- ・地表面からの放射フラックスの観測(航空機 AMR との同期観測を含む)を行った。
日射計, 赤外放射計, 放射温度計, サーモトレーサー, 近赤外カメラ

航空機 AMR 観測

- ・6.9, 10.6, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 GHz の全周波数に対して水平および鉛直偏波によって, 2本の観測コース(地上観測幅は約 300 m)に沿って4日間観測を行った。

3. 境界層観測の概要

異なる3つの観測手段(ラジオゾンデ, 係留気球, 飛行船)を用いて, 1995年10月23日から10月30日の8日間にわたり, 境界層観測は実施された。**Fig. 2**は境界層観測の概要を示している。境界層観測の目的は以下の通りである。

1. 湖面から水田, 森林と変化する地表面条件の違いから生じる内部境界層を捉える。
2. 各種土地利用上空における大気物理量の鉛直プロファイルの日変化とそれらの差を捉える。
3. 飛行船観測と従来の観測(ラジオゾンデ, 係留気球)の同期観測を行い, 飛行船の地球科学観測への利用可能性を調べる。

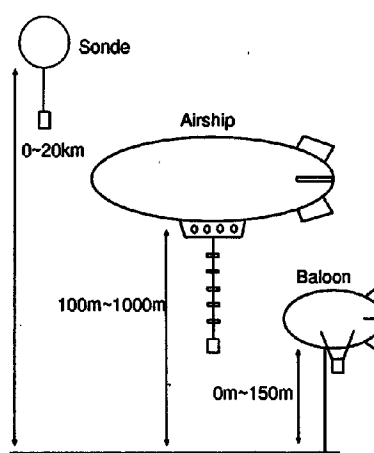


Fig. 2 : Formation of ABL observation.

以下にそれぞれの観測内容とデータ取得状況を示す。

¹3-Dimensional Sonic Anemometer Thermometer (3次元超音波風速温度計)

3.1 ラジオゾンデ

ラジオゾンデは境界層から自由大気にかけて、大気物理量(気圧・気温・湿度)の鉛直プロファイルの領域代表値を観測する。観測担当は京都大学防災研究所水資源研究センターチーム(以後京大水資源チームと称す)であり、受信設備は水田域にある滋賀県立伊香高校千田農場(Fig. 1参照)の建物内に設置されていた。気象条件や風船のガス圧に依存するが、上空約20 kmまでの範囲が観測可能であり、1回の観測に1時間30分程度を要する(データのサンプリング間隔は1秒)。ただし、境界層(約1000 m以下)のプロファイルは数分程度で観測できるため、ゾンデによるプロファイルは瞬時の状態を観測しているとみなせる。なお、風船の動きをトランシットで追跡したデータ(仰角、方位角の時間変化)から境界層内の風向・風速の鉛直プロファイルを推定できる。

京大水資源チームが行ったラジオゾンデ観測に関して、観測高度、観測開始・終了時刻、気象条件などをTable. 2にまとめて示す。表中で“no wind data”と記述されているのは、トランシットによる追跡に失敗したり、記録紙の紙送りの調子が悪かったことが原因で、データを取得できなかったことを示している。また、雲底高度は風船が雲に隠れた時刻とゾンデの気圧データから推定した。

なお、10月25、26日の2日間は、日本気象協会チーム(以後JWA チームと称す)がレーウィンゾンデによる観測を実施した。レーウィンゾンデは風船の動きを自動追尾できるため、より正確に風向・風速を観測することが可能であるが、観測範囲はラジオゾンデに比べて低い(約3 kmまで)。

Table 2: List of radio sonde observation (Kyoto univ. WRRRC team)

| Date | Obs. Range(km) | Start-End Time | Remarks |
|-------|----------------|----------------|---|
| 10/23 | 0~19.4 | 09:00~10:12 | sunny |
| | 0~19.0 | 10:49~11:58 | sunny, no wind data, synchronized with airship |
| | 0~19.9 | 13:14~14:29 | sunny, north-east wind, synchronized with airship |
| | 0~19.0 | 17:14~18:33 | sunny, synchronized with airship |
| | 0~16.5 | 20:44~21:55 | sunny, no wind data |
| 10/24 | 0~19.8 | 06:00~07:15 | cloudy, cloud bottom: 1679m |
| | 0~19.7 | 12:08~13:15 | rainy, east wind, cloud bottom: 977m |
| 10/25 | 0~13.4 | 11:19~12:13 | sunny |
| | 0~14.5 | 16:13~17:18 | cloudy, cloud bottom: 1890m |
| 10/26 | 0~16.3 | 15:45~16:52 | sunny, synchronized with airship |
| | 0~16.2 | 19:16~20:26 | sunny, no wind data, synchronized with airship |
| 10/27 | 0~19.0 | 06:59~08:12 | sunny, synchronized with airship |
| | 0~19.1 | 09:07~10:24 | cloudy, north wind |
| | 0~20.8 | 12:02~13:19 | clear sky, north wind, no wind data |
| | 0~22.0 | 15:02~16:22 | sunny, north wind |
| | 0~17.2 | 18:04~19:26 | sunny, north wind, no wind data |
| 10/28 | 0~18.5 | 06:02~07:20 | sunny, no wind data |
| | 0~20.3 | 09:02~10:23 | sunny, no wind data |
| | 0~21.1 | 12:31~13:50 | sunny, synchronized with airship |
| | 0~20.5 | 15:01~16:22 | cloudy, cloud bottom: 2490m |
| | 0~16.7 | 18:01~19:12 | sunny |
| 10/29 | 0~19.9 | 09:06~10:22 | cloudy/rainy, cloud bottom: 1255m |
| | 0~20.7 | 12:01~13:14 | cloudy, cloud bottom: 1436m, no wind data |
| | 0~23.5 | 15:00~16:26 | cloudy/rainy, cloud bottom: 1129m |
| 10/30 | 0~21.1 | 09:04~10:26 | cloudy/sunny, cloud bottom: 775m |
| | 0~19.0 | 12:17~13:34 | sunny |
| | 0~22.4 | 14:58~16:27 | sunny |

3.2 係留気球

係留気球を用いて、大気境界層下部の大気物理量の鉛直プロファイルを取得した。京大水資源チーム、芝浦工業大学・東京大学連合チーム(以後芝工大チームと称す)、埼玉大学・東京都立大学連合チーム(以後埼玉大チームと称す)が観測を担当した。

Table 3: Mooring point of balloon observation

| Team | Mooring Point | Obs. Range(m) | Obs. Items |
|---------------------|--------------------|---------------|---------------------------------|
| Kyoto Univ. WRRC | Ground(near Lake) | 0~150 | wind speed, air temp., humidity |
| Shibaura Tech. Univ | Paddy 1 | 0~50 | wind speed, air temp., humidity |
| Saitama Univ. | Nagahama City Hall | 20~60 | air temp. |

なお、芝工大チームは、2つの気球を風向方向に配置し、水蒸気と熱の水平移流を観測した。

京大水資源チームの係留地は、湖岸に隣接したスポーツの森グラウンド(**Fig. 1**参照)であり、遠洋漁業用の電動リールをサッカーゴールに取り付けた。係留ロープ(600 m 巻き)は電動リールを用いて巻き上げられた。気温・湿度センサーと3杯式風速計で構成される観測台が気球から吊るされた。電動リールを使用して、係留ロープの長さを調節し(10 m 毎にロープの色が変えてあり、さらに1 m 毎に印が付けられている)、気球を上下に移動した。

- ・観測高度(各高度で3分間静止)
5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 60 m, 90 m, 120 m, 150 m
- ・データロギングモード
サンプリング(インターバル 10 sec)

観測に用いた気球は大型のもの(22 m³)であり、浮力は10 kg 以上得られる。静穏時には気球は真上に上昇するが、風が出てくると気球は風下側に押し流され、観測高度が正確でなくなる。これを回避するために、気球の先端に補助ロープをつけ、補助ロープを風上側から引っ張ることにより、係留ロープの鉛直を維持した(**Fig. 3**)。気球観測では、この鉛直を維持する作業が極めて重要でありまた困難でもある。また、地上風速が5 m/sec 以上になると、観測をするのは極めて危険である。

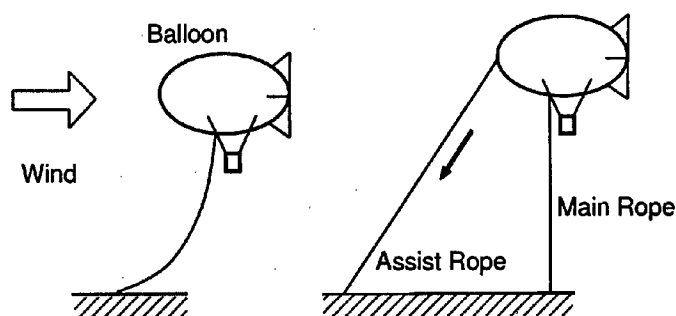


Fig. 3 : Mooring balloon observation.

京大水資源チームが行った係留気球観測に関して、観測高度、観測開始・終了時刻、天候などを Table. 4 にまとめて示す。ラジオゾンデ観測に比べて取得したデータが少ないのは、バルーンが破損するというトラブルにもよるが、強風時や降雨時には観測を行えないなど、気象条件に大きく左右されることがもっとも大きな原因である。

Table 4: List of mooring balloon observation (Kyoto Univ. WRRC)

| Date | Obs. Range(m) | Start-End Time | Remarks |
|-------|---------------|----------------|---|
| 10/23 | 10~90~10 | 15:33~16:17 | sunny, short of buoyancy, synchronized with airship |
| | 10~110~10 | 17:03~17:56 | sunny, short of buoyancy |
| 10/24 | 10~150~5 | 06:35~07:46 | cloudy |
| | 10~150~20 | 09:24~10:36 | cloudy, stop (strong wind) |
| 10/25 | | | no observation (strong wind) |
| 10/26 | 5~150~5 | 06:15~07:39 | clear sky |
| | 5~150~5 | 09:02~10:36 | clear sky |
| | 5~150~5 | 12:03~13:22 | clear sky |
| | 5~150~5 | 13:54~15:34 | clear sky, strong wind, synchronized with skyship |
| | 5~150~90 | 16:33~17:41 | sunny, synchronized with airship |
| 10/27 | 5~150~5 | 06:47~08:25 | clear sky, stop (balloon broken) |
| 10/28 | | | no observation (unable to use the ground) |
| 10/29 | 5~150~5 | 10:06~11:34 | sunny |
| | 5~150~5 | 12:04~13:15 | cloudy |
| | 5~150~60 | 15:01~15:51 | cloudy, stop (rain) |
| 10/30 | | | no observation (short of members) |

3.3 飛行船

観測に使用した飛行船は日本飛行船事業株式会社が運行している SKYSHIP 600(全長 60 m)であり、高度 100 m から 1000 m まで飛行可能である。飛行船による境界層観測は世界初の試みであり、以下の目的のもと観測が実施された。

- ・ 土壌水分および各種地表面フラックスの日々および日周変化の把握と陸面過程モデルへの情報提供
- ・ 境界層の発達・衰弱および内部構造の日々および日周変化の地上観測とタイアップした詳細把握
- ・ 境界層下層と上層との乱流構造の相違の明確化
- ・ 複合した土地被覆からの平均フラックスの観測
- ・ 地上観測が容易でない森林域直上のプロファイル観測
- ・ AMR 航空機観測とのリモートセンサーによる同期観測
- ・ 飛行船の地球科学観測におけるフィージビリティの明確化

これらの目的を達成するべく、飛行船観測では4つの観測モードを用意した(Fig. 1, Fig. 4 参照)。

・ 定点観測モード

土地被覆の異なる4つの地点(水田, 森林, 都市, 湖面)の上空を複数高度でホバーリングすることにより、フラックスおよび大気物理量の鉛直プロファイルを観測する。1地点の鉛直プロファイルを取得するのに1時間程度を要する。

・水平観測モード

湖面から水田、森林に至る約 20 km のコース (AMR コース 2) 上を複数高度で水平移動しながら観測し、鉛直 2 次元断面における大気構造 (内部境界層) を観測する。1 断面のデータを取得するのに 2 時間程度を要する。

・体積観測モード

湖面と水田を含む正方形領域を底面とした高さ 500 m (高度 200 m から 700 m) の 4 角柱、ほぼ水田だけの正三角形領域を底面とした高さ 500 m の 3 角柱をコントロールボリュームとしてとらえ、角柱各側面において垂下ロープに設置したセンサーにより、水蒸気とエネルギーの出入りを観測する。

・AMR 同期モード

航空機搭載 AMR² との同期観測を行う。2 本の観測コース (Fig. 1 参照) 上空を飛行しながら観測し、地上観測地点 (土壌水分量, 地表面熱収支) 上空ではホバーリングして、地上観測とも同期させる。

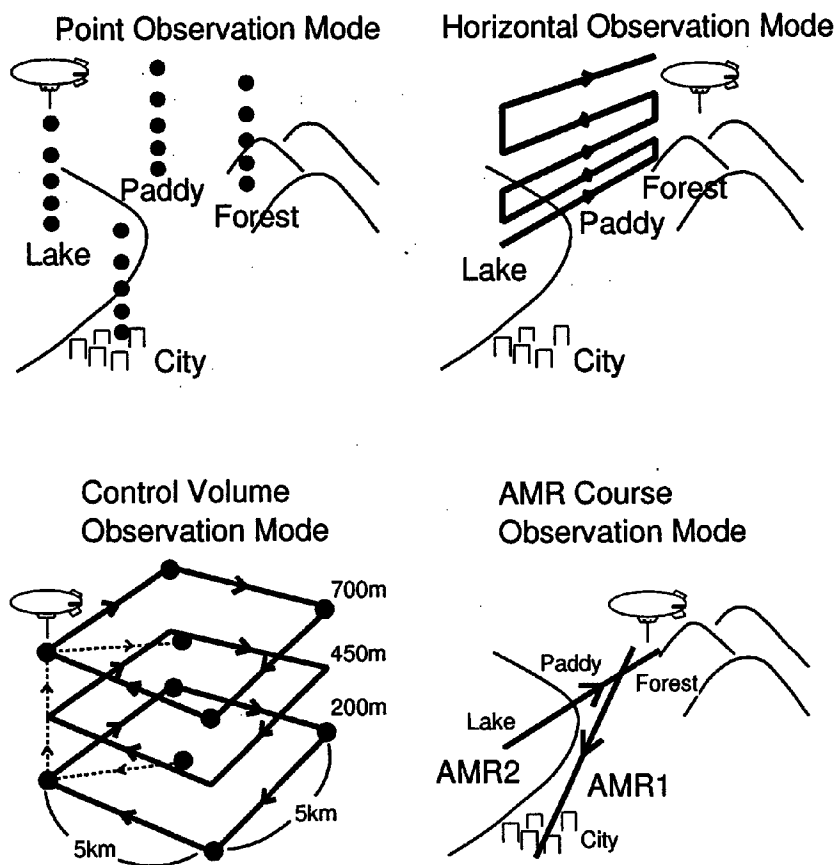


Fig. 4 : Four modes of airship observation.

²AMR (Airborne Microwave Scanning Radiometer) は 21 世紀初頭に打ち上げを予定している ADEOSII に搭載予定の AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) の開発のために試作され、土壌水分量、地表面温度、地表面粗度が主な観測対象となる。

飛行船は大気境界層観測だけでなく、地表面放射フラックス観測、リモートセンサー(航空機 AMR)との同期観測など、様々な目的で利用された。飛行船に搭載されたセンサーを **Table. 5** にまとめる。

各観測モードを組み合わせて観測計画を立てたが、計画したスケジュールが非常にタイトなものであったために、天候悪化や移動の遅延により逐次計画変更を余儀なくされた。特に、風上側に向かって飛行する場合には非常に長い時間を要することになり、地上風速が10 m/sec 以上になると飛行不可能となる。飛行船観測に関して、実施された観測モード、観測時刻等を **Table. 6** にまとめる。

Table 5: List of sensors for airship observation

| Instruments | Obs. Items | Team | Remarks |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------|
| pygeometer | upward longwave radiation | Tokyo Univ.Agr. | bottom of airship cabin |
| pyranometer | upward shortwave radiation | | |
| radiative thermometer | surface radiative temperature | | |
| NIR video camera | upward NIR radiation | Chiba Univ. | |
| VIS video camera | crossing condition | Kyoto Univ. WRRC | |
| Thermotracer | surface radiative temperature | Ehime Univ. Agr. | window of airship cabin |
| CO2 analyser | CO2 concentration | Tohoku Univ. | |
| Climomaster × 5 | wind speed, air temp., humidity | Shibaura Tech. Univ. | Rope(10m interval) |
| Robinson anemometer | wind speed | Tokyo Tech. Univ | Rope(50m from cabin) |
| hygrothermometer | air temp., humidity | | |
| 3D-SAT | flux(momentum, sensible heat) | Tokyo Univ Agr. | Rope(30m from cabin) |

Table 6: List of airship observation

| Date | Observation Mode | Remarks |
|-------|---|--|
| 10/23 | Point Obs. Lake Forest Paddy City | 9hr, 16hr 10hr 11hr, 13hr, 17hr, 20hr 12hr, 19hr |
| 10/24 | maintenance day | engine trouble (oil leakage) |
| 10/25 | no observation | strong wind |
| 10/26 | Horizontal Obs. AMR Course Obs. Point Obs. Lake Forest Paddy City | 6 : 17~8 : 18 synchronized with AMR (9 : 36~11 : 23) 14hr, 17hr 12hr 15hr, 19hr 16hr |
| 10/27 | Point Obs. Lake Paddy City | 6hr 7hr 8hr, Stop (strong wind) |
| 10/28 | Horizontal Obs. AMR Course Obs. Point Obs. Forest Paddy | 5 : 58~7 : 32, 16 : 08~18 : 32, 19 : 07~20 : 55 synchronized with AMR (9 : 39~12 : 19) 8hr, 14hr 13hr |
| 10/29 | Control Volume Obs. Quadratic prism Triangular prism | 10 : 36~13 : 12 13 : 21~15 : 18 |
| 10/30 | AMR Course Obs. | synchronized with AMR (11 : 28~13 : 32) |

4. 観測結果および考察

4.1 同期観測

10月26日には、湖岸の係留気球観測が14時と17時に、水田域のゾンデ観測が15時と19時にそれぞれ飛行船の定点観測と同期することができた。ただし、それぞれの観測時刻はTable. 7の通りである。

Table 7: Synchronized time

| Location | Means | Time | Remarks |
|----------|---------|-------------|-----------------------|
| Lake | airship | 13:55~14:41 | 100m → 800m |
| | balloon | 13:54~15:34 | 150m at 14:48 |
| Paddy | airship | 15:03~15:54 | 800m → 100m |
| | sonde | 15:45~ | a few minutes for ABL |
| Lake | airship | 17:20~18:33 | 100m → 800m |
| | balloon | 16:33~17:41 | 150m at 17:26 |
| Paddy | airship | 18:37~19:26 | 800m → 100m |
| | sonde | 19:16~ | a few minutes for ABL |

気球観測では各高度で3分間静止させていたが、最後の1分間のデータ(サンプリング間隔10秒で6データ)の平均値をその高度の観測値とした。

飛行船のデータとして解析に使用したのは垂下ロープに設置していた5つの熱線風速計のデータ(サンプリング間隔は30秒)である。飛行船観測では各高度で6分間ホバーリングしていたが、その間の50データ(5台分)の平均値をその高度の観測値とした。Fig. 5, Fig. 6にそれぞれ、気温と湿度の同期観測結果を示す。

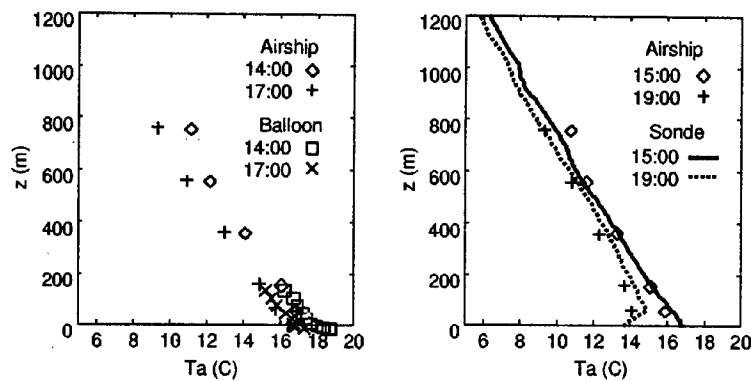


Fig. 5 : Synchronized observation of air temperature.

(left-side:airship and balloon, right-side:airship and sonde)

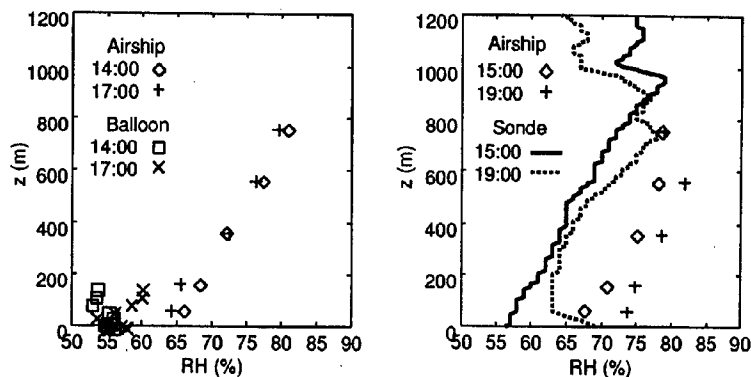


Fig. 6 : Synchronized observation of air humidity.

(left-side:airship and balloon, right-side:airship and sonde)

Fig. 5 から、飛行船による気温観測が従来の観測(ゾンデ, 気球)とよく一致しており、気温に関しては飛行船を用いた観測が非常に有効であることがわかる。ただし、Fig. 6 では、飛行船データの方が全体的に高い値を示している。ゾンデとの同期観測結果を注意深く見ると、湿度プロファイルの変化傾向を良く表しているため、測器の検定をしっかりと行えば、精度良い観測が可能であると考えられる。ただし、気球観測では14時に比べ17時の方が湿度が高くなっているのに対して、飛行船観測では17時の方が低くなっている。日中に比べ夕方湿度が高くなるという一般的傾向を考慮すると、気球観測のデータの方が信頼性が高いといえるが、飛行船観測の結果が逆の傾向を示した原因が、飛行船をプラットフォームにしたことにあるのか、測器自身にあるのかは、現時点では判断できない。いずれにせよ、測器の検定によりデータ補正をしてから、改めてデータ解析をやり直す必要があると言える。

4.2 大気境界層の発達

ラジオゾンデ観測の結果を用いて、大気境界層の発達の様子について考察する。ゾンデデータ(気温, 湿度, 気圧)から、温位, 比湿に変換すると、大気境界層の発達の様子が明瞭になる。温位がほぼ一定の値を示す領域は、乱流拡散が激しく空気が良く混合されており、混合層と呼ばれる。この混合層の高さと温位の値の変化により、大気境界層の発達を把握できる。

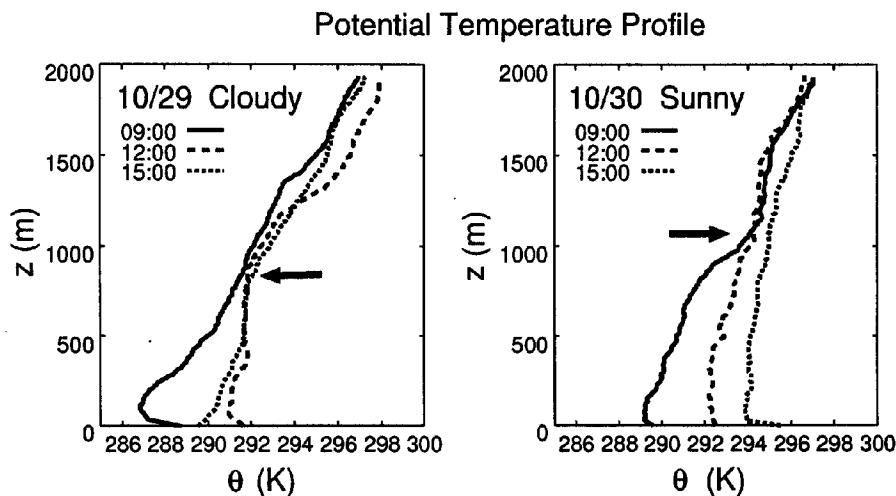


Fig. 7 : Observed evolution of ABL for different weather conditions.

(left-side:10/29 cloudy, right-side:10/30 sunny)

Fig. 7 は、大気境界層の発達を比較したもので、左側は10月29日、右側は10月30日の温位プロファイルの日変化(9時, 12時, 15時)を示している。29日の午前中は晴れていたため、12時に混合層は800m程度まで発達しているが(図中の矢印)、午後からは曇ってきたため、それ以上混合層は発達せず、15時には12時よりも低温位となっている。これに対して、30日は終日晴れていたため、午後になってもさらに混合層は発達を続け(12時よりも15時の方が高温位となっている)、混合層は1000m以上に達している。

このように、ラジオゾンデ観測は大気境界層の発達の様子を的確にとらえており、この領域の代表的な大気情報を提供しているが、ラジオゾンデだけでは本プロジェクトが目的として掲げている、内部境界層の発達の様子を捉えることはできない。

琵琶湖プロジェクト95では、ラジオゾンデだけでなく、飛行船や係留気球を用いて、総合的な大気境界層観測を実施した。これらの観測データの総合的な解析の結果は現時点ではまだ得られていないが、一次的成果物として、芝工大チームが飛行船に搭載していた熱線風速計のデータをもとに、鉛直断面2次元内の大気物理量（気温・湿度）の分布図（Fig. 8）が芝工大チームにより求められている。この図は、10月26日早朝の水平観測（Table. 6 参照）の結果であり、飛行船の運航記録（GPSによる位置データ）などを用いてデータ取得位置を決定した。ただし、2次元断面1シーンの観測に約2時間を要したが、時間補正はまだ行われていない（ある時刻の瞬時の断面状態ではない）。今後もさらに解析が進められることを期待する。

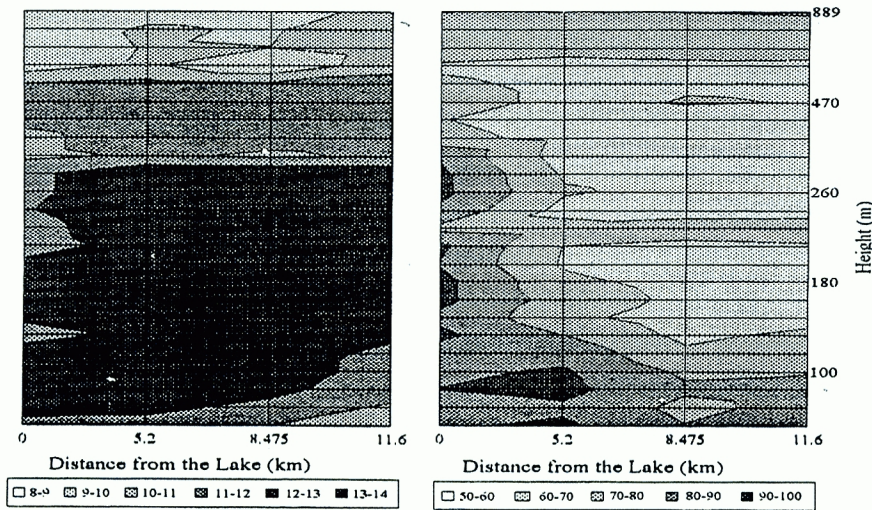


Fig. 8 : Atmospheric field of early morning on 26th Oct. from airship observation (climomaster).

(left-side:temperature, right-side:humidity)

5. 数値モデルの活用

琵琶湖プロジェクトでは、毎年多くのチームが参加し、対象領域にかなりの数の測器を投入しているが、それでもなお、観測エリア全体をカバーすることはできない。どれだけ測器の数を増やしても、やはり、観測だけですべてを測ることは不可能である。

数値モデルを対象領域に適用し、観測結果をもとに適切な条件で計算すれば、観測できなかった地点の情報や、観測されなかった時間帯の情報も再現することができる。いうまでもなく、モデルを用いれば必ず結果は出てくるが、それを検証して初めてモデルの出力が意味を持つ。したがって、対象領域全体の状態量やフラックスを数値モデルを介して推定する場合、モデルを走らせるための初期条件や境界条件として、観測データが必要であるばかりでなく、モデルを検証するための観測データを取得しておくことがそれにもまして重要となる。

5.1 数値モデルの概要

用いた数値モデルは、3次元大気-陸面結合モデル（Fig. 9 参照）で、大気モデルは局地循環モデル（以後 LCM と称す）、陸面過程モデルは SiBUC で構成されている¹⁾。

局地循環モデルの基礎式は Boussinesq 近似、静力学平衡を仮定したもので、地表面に沿った z^* 座標系で表現されており、地形の効果を取り込むことができる。ただし、本モデルは降水過程を含まないドライなモデルであるため、降水強度は境界条件として与える（Fig. 9 中の P ）。

SiBUCでは地表面条件は6つのカテゴリー(木, 草, 土, 建物, 道路, 水面)に分類されており, 各カテゴリー毎に定義された状態変数を用いてフラックスを計算する。SiBUCは, 1つのグリッド内に複数の土地利用が存在することを前提にモデル化されているため, 都市や湖を含め, 実流域の条件を適切に表現できる²⁾。

5. 2 琵琶湖プロジェクト対象領域への適用

計算対象領域を, 南西端を東経 136°7'30", 北緯 35°20', 北東端を東経 136°22'30", 北緯 35°30' とする約 20 km × 20 km の領域に設定し, 20 × 20 のグリッドで表現した($\Delta x = 45'', \Delta y = 30''$)。地表面場の条件として国土数値情報を用いた(Fig. 10)。

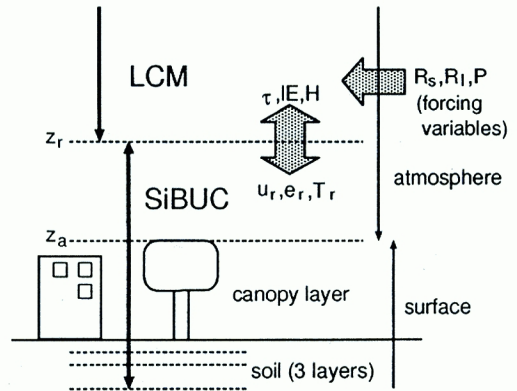


Fig. 9 : LCM-SiBUC coupled model.

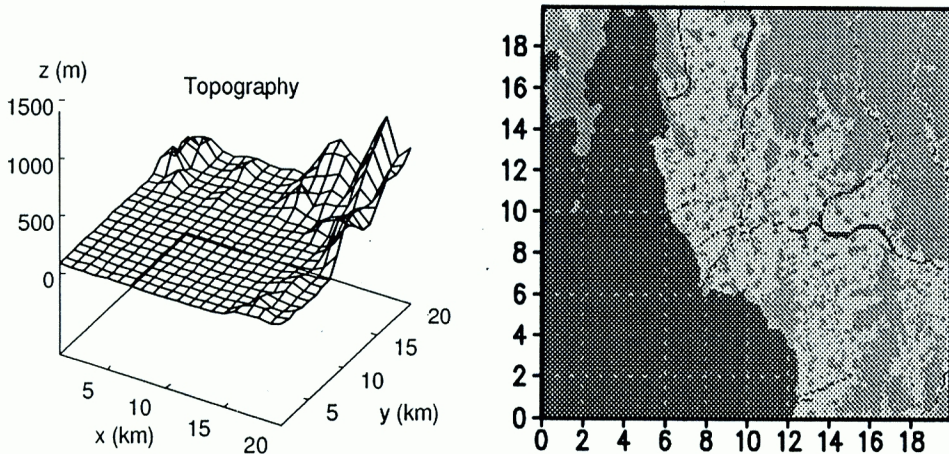


Fig. 10 : Simulation domain.(left-side:topography, right-side:landuse)

- ・ 1/4 細分区画標高データ…グリッド平均標高
- ・ 1/10 細分区画土地利用データ…土地利用各カテゴリーの面積割合

5. 3 初期条件

ラジオンゾンダや地表面熱収支観測のデータを活用して, 適切な初期条件を与えることを心掛けた。時定数が長く, 初期値の影響を長く引きずるもの(水温, 土壤水分量など)については, 特に注意が必要であり, LCM など短期間の計算では初期値からほとんど変化しない(初期値だけで決まってしまう)。

大気場(風速, 温位, 比湿)の初期値の与え方は, 対象としている現象にも依存するが, 初期値として水平方向に分布したものを与えることは困難である(観測値がない)。本研究では, 昼間の混合層の発達を対象としているため, 混合層が消え, 内部境界層がほとんど無視できる(水平方向にほぼ一様な)時間帯(午前 0 時)をモデルの計算開始時刻とした。

リモートセンサーによる観測から、状態量(温度, 土壌水分量)の分布が得られれば、それを初期値とすればよい。ただし、モデルのグリッド領域を代表するような温度をリモートセンシングデータから与えようとする場合、モデルのグリッドサイズよりも分解能の高い(サブグリッドの)データをカテゴリー別に平均化するという処理が必要になる(カテゴリー別に温度を定義しているため)。

今のところ分布量のデータが利用できないため、領域全体について、同一カテゴリーのものには同一の温度を与え、土壌水分も領域全体で一定値を与えた。観測データを参考にして設定した主な条件を **Table. 8** に示す。

Table 8: Initial conditions for numerical model

| | 10/29 | 10/30 | Remarks |
|------------------------|----------------|----------------|------------------------------------|
| potential temp. | 287K at 15m | 288K at 15m | +5 (K)/1000 (m) (15m~5000m) |
| specific humidity | 7.0g/kg at 15m | 8.0g/kg at 15m | -1.5 (g/kg)/1000 (m) (1000m~5000m) |
| Water temp. | 291K | 291K | |
| Canopy, Grass temp. | 283K | 283K | |
| Building, Road temp. | 288K | 288K | |
| Soil Moisture(wetness) | 0.9 | 0.9 | constant (no distribution) |

5.4 境界条件

LCM の下端の境界条件は SiBUC から与えられるフラックスである (**Fig. 9** 中の τ , IE , H)。領域上端、側方端の境界には放射境界条件³を採用しているため、特に境界値を設定する必要はない。ただし、GPV データなどの 4 DDA データ (GCM, JSM の出力値) が利用できる場合は、このデータを境界値とした方がよい。

SiBUC の境界条件のうち、大気物理量(風速, 水蒸気圧, 気温)は LCM から受け渡されるので (**Fig. 9** 中の u_r , e_r , T_r)、下向き放射フラックス(短波・長波)と降雨強度だけを外力として与えればよい (**Fig. 9** 中の P , R_s , R_l)。ここでは、水田の熱収支観測で得られた放射フラックスのデータを外力として与えた(計算領域内の分布は考慮していない)。

5.5 計算結果および考察

Fig. 11 は数値モデルによる、温位プロファイル(ゾンデ放球地点に対応するグリッド)の日変化の計算結果である。左側は 10 月 29 日、右側は 10 月 30 日についてのもので、30 日の混合層高度がやや低いが、**4.2** で見たような境界層の発達の特徴を良く再現している。

ゾンデ観測では領域代表値としての 1 つのプロファイルしか得られず、また飛行船では複数地点のプロファイルを同時に観測することはできない。これに対し数値モデルでは、計算領域内の全ての地点、時刻に対してプロファイルを得ることができる(観測されていない地点、時刻のデータも推定できる)。

Fig. 12 は、別の地点上空の温位プロファイルの日変化(10 月 30 日)の計算結果であり、左側は森林上空、右側は湖面上空のものである。湖面と森林では地表面からの顕熱・潜熱フラックスに大きな差があり、プロファイル形状にも大きな差が表れている。湖面は陸面に比べて熱容量が大きく、温度変化の位相が遅れるため、18 時にさらに温位が高くなっていることが、水田や森林との大きな違いである。

Fig. 13 は、 $y = 12$ における鉛直2次元 ($x-z$) 断面内の温位の分布の日変化(6 時, 9 時, 12 時, 15 時)を表している。早朝から日中にかけて、湖面-陸面境界 ($x = 5$) から内部境界層が発達していく様子が良く表されている。さらに注意深く見ると、水田-森林境界 ($x = 13$) にも内部境界層を確認できる。15 時の図では、等温位(291 K)の領域が広く分布しており、混合層高度が 850 m 付近であることがわかる。

³地表面の起伏により生み出された内部重力波が、領域境界で反射されて内側に戻って来ないようにする。

ある時刻, ある断面についての詳細な観測結果を用いてこのような分布図が検証されれば, モデルを介することにより, その他の時刻, 断面についても同様の観測を行ったことに匹敵するといえる。

したがって, 今後もプロジェクトを進めていくにあたり, 数値モデルと観測を一体化した観測計画, すなわち, 観測のみで全てを明らかにしようとせず, 観測できない部分はモデルが補うという前提に立ち, モデル検証を強く意識した観測計画を立てていくことが重要である。

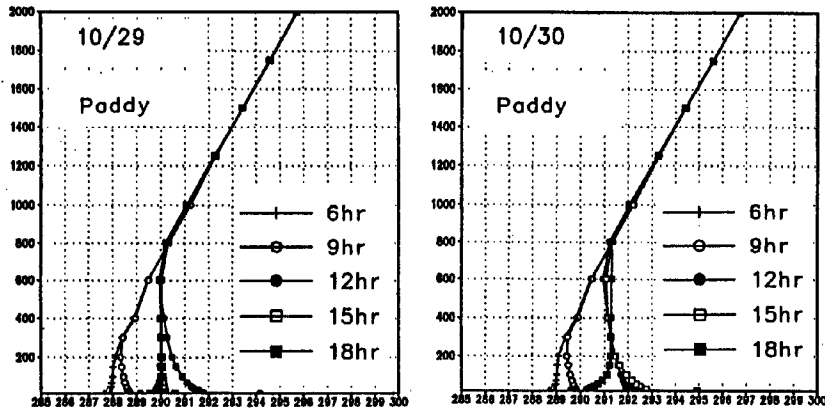


Fig. 11 : Predicted evolution of ABL for different weather conditions.

(left-side:10/29 cloudy, right-side:10/30 sunny)

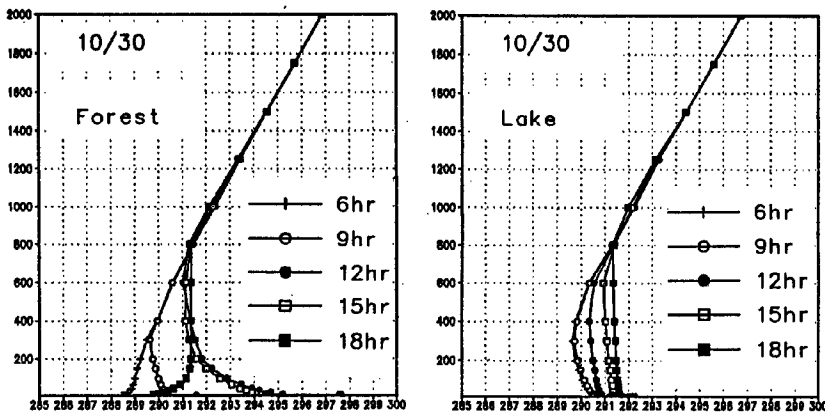


Fig. 12 : Predicted evolution of ABL above different landuse condition.

(left-side:forest, right-side:lake)

6. 結論

以上, 本報では, 琵琶湖プロジェクト'95で行われた大気境界層観測の内容をまとめた。

ラジオゾンデ, 係留気球との同期観測の結果, 飛行船により正確な気温観測が行われることが示され, 大気温度構造を探る上で飛行船は非常に有力な手段となることがわかった。ただし, 飛行船観測では瞬時に広範囲の観測はできないため, 温度構造を探る際には, 時間補正を適切に行う必要がある。

プロジェクト対象領域に, 数値モデル(3次元 LCM-SiBUC 結合モデル)を適用し, 観測データを初期値とし, 水田域で得られた下向き放射フラックス(短波・長波)を外力として数値計算を実行した。温位の鉛直プ

ロファイルの日変化から、混合層の発達や湖面－水田境界からの内部境界層の発達などがよく再現された。

謝 辞

なお本研究は、文部省科学研究補助金総合研究 A (課題番号 07305020) の補助により行われた。芝浦工業大学教授菅和利氏からは飛行船観測の熱線風速計のデータを提供していただいた。飛行船観測の実現にあたり、計画段階から実行に至るまで、日本飛行船事業株式会社、宇宙開発事業団の方々を始め、プロジェクト関係各位には多大なご尽力を賜りました。現地観測期間中、高月町、びわ町、長浜市などの地元の方々には、日夜騒音等でご迷惑をおかけしました。ここに感謝の意を表します。

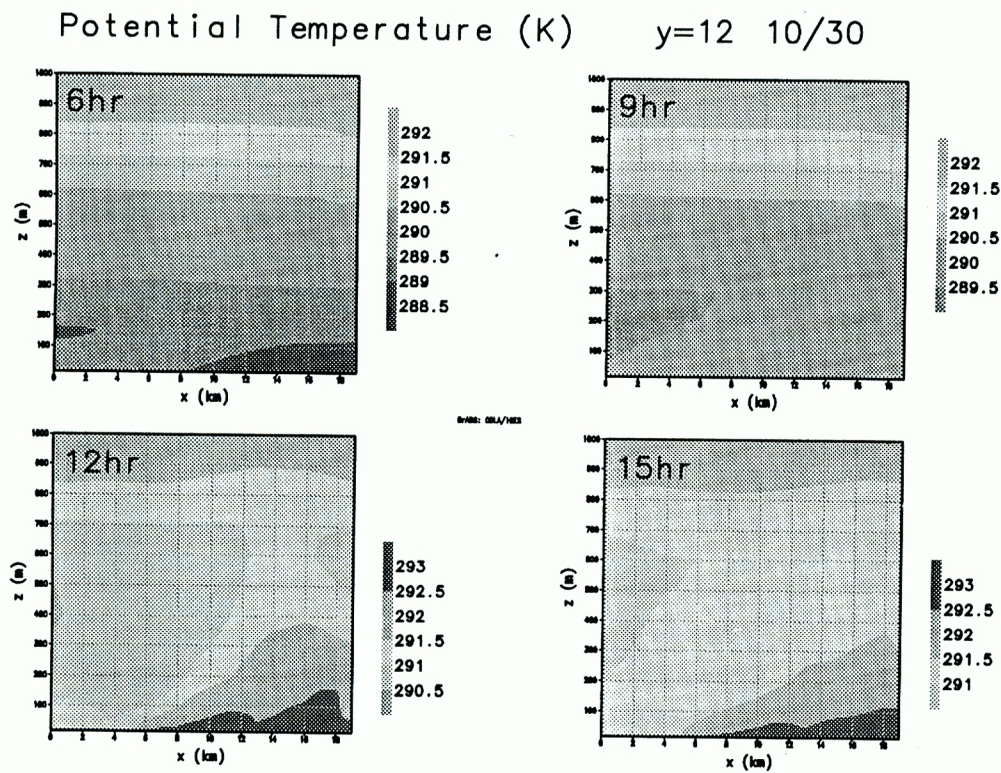


Fig. 13 : Predicted evolution of IBL (Internal Boundary Layer).

参考文献

- 1) 田中賢治・田中敬也・池淵周一：土地利用スケールと広域熱フラックスとの関係，京都大学防災研究所年報第 38 号 B-2，1995 年 4 月，pp 317-331.
- 2) 田中賢治・池淵周一：都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用，京都大学防災研究所年報第 37 号 B-2，1994 年 4 月，pp 299-313.