

## ラジオゾンデ放球による鈴鹿おろし多点同時観測の回想記 — 三重大学農場と三重大学伊賀拠点を利用して —

立花 義裕<sup>1</sup>, 小松 謙介<sup>1</sup>, 山田 祐司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 三重大学・大学院生物資源学研究科・共生環境学専攻,

<sup>2</sup> 株式会社青山高原ウィンドファーム

### A narrative of simultaneous multiple-radiosonde observation on Suzuka Oroshi wind

Yoshihiro TACHIBANA<sup>1</sup>, Kensuke KOMATSU<sup>1</sup> and Yuji YAMADA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507, Japan,

<sup>2</sup> Aoyama-Kogen Wind Farm Co., Ltd., Hakatacho 5-63, Tsu, Mie 514-0053, Japan

#### Abstract

In the north and central parts of Mie Prefecture Japan, northwesterly extremely strong wind called as “Suzuka-oroshi” blows in winter. Suzuka-oroshi is said to be generated by the Suzuka Mountain range. For this reason, a big wind power plant “Aoyama-kogen Wind Farm” is located at the top of the Suzuka Mountain range. We took a “simultaneous multiple-radiosonde observation” in order to measure horizontal and vertical atmospheric structures from a windward side to a leeward side in the central part of Mie Prefecture in March 2010. The observation was conducted in a narrow area with about 35 km horizontal distance between the windward and leeward observatories. The simultaneous multiple-radiosonde observation is a new observational method in which we simultaneously launched balloons with GPS radiosondes at four observatories along the prevailing wind from the windward to leeward. This observation gives us horizontal and vertical atmospheric structures of Suzuka-oroshi. This short report gives a narrative of our observation.

**Key Words:** 局地風, 嵐, 狭域多点同時放球, 風力発電, 強風のメカニズム

#### 1. はじめに

津市が風の強い場所であることは津市に移り住んできた方の多くが感じることであろう。筆者らもその一人である。これは「鈴鹿おろし」と呼ばれる局地的強風が吹くからであると古くから云われている。鈴鹿おろしは三重県北中部において主として冬季に鈴鹿山脈から伊勢湾沿岸部に吹く強い西北西～北北西の風の事を指している。そのため、津市の西側の山脈に位置する青山高原は日本でも有数の風力発電施設の設置地帯となっている。

日本には青山高原周辺以外にもこのような局地的強風域があることが知られている（図 1）。図 1 からわかるように、青山高原の風力発電所は日本でも有数の好条件な場所に立地している。

津市周辺で吹く強風の吹き方や強風の詳細な構造を理解することは、強風の科学的な予測のために非常に重要である。それを理解するためには地上風ばかりではなく、地上から上空にかけてどのような風が吹いているのかについてまず知る必要がある。何故なら強い風が吹く理由がわかることが、科学的な予測へと繋がり、それが予測精度を

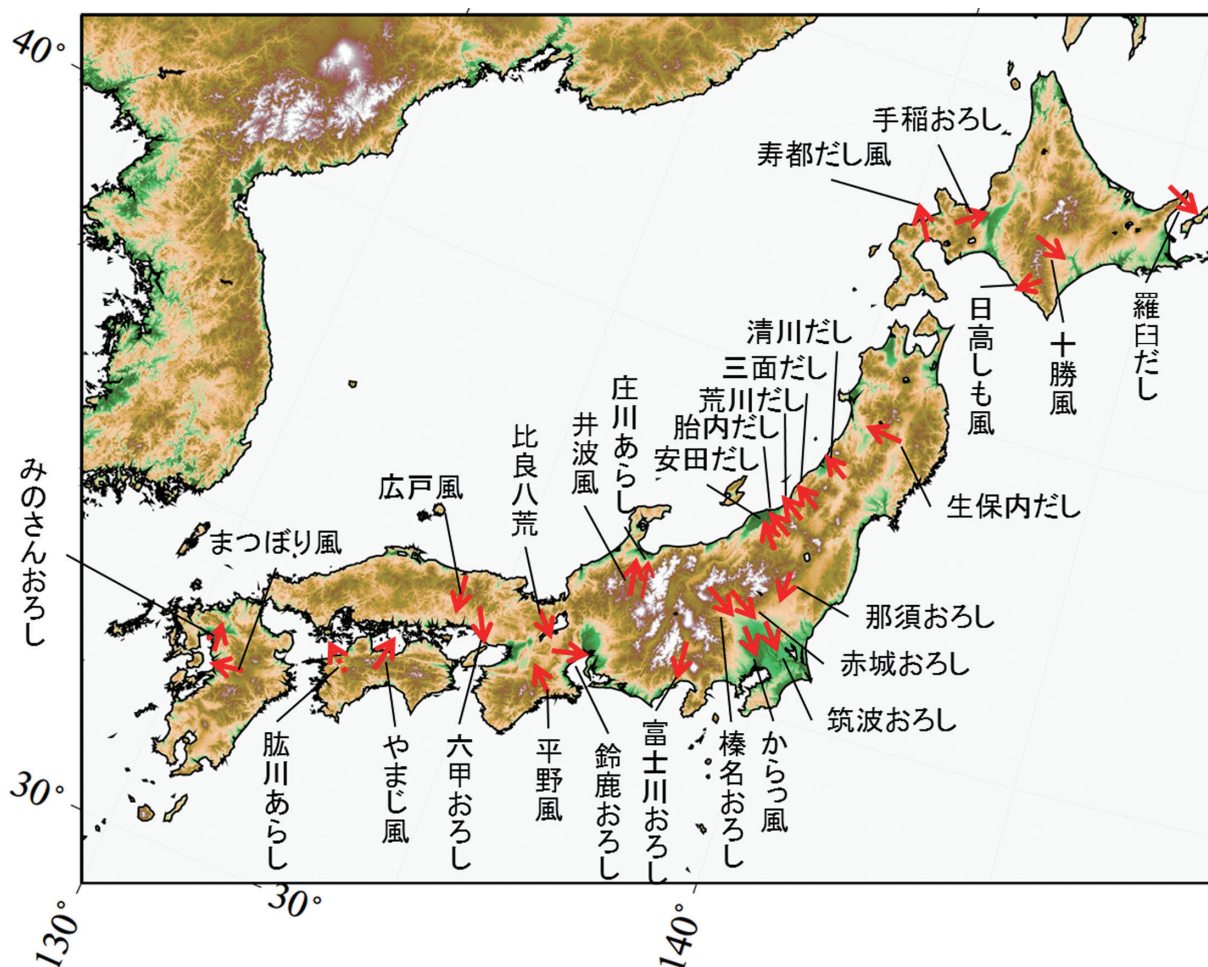


図1 日本各地で知られる局地風（吉野 1978 を修正）

上げるための王道であるからである。しかし鈴鹿おろしの実態に迫った過去の研究は少なく、鈴鹿おろし吹走時の気圧パターンを分類し、津市周辺の扇形樹分布から風道を推定した大和田・原田（1978）や Owada（1990）のみである。また、おろし風のように小さなスケールで発生する現象をより理解するためには、水平鉛直方向共に密な観測を実際に行い、どのような内部構造になっているのかを知る必要がある。このため強風を科学的に理解するために、鈴鹿おろしに代表されるこの地域の局地風の三次元立体構造を、気球による立体観測によって明らかにする事に挑戦した。

これまで日本で行われてきた観測手法では、水平鉛直スケール共におろし風をより理解するためには不十分なものである。そこで本研究では、気球に取り付けて観測する気象測器「ラジオゾンデ」を7つ用い、4か所の地点から同時に放球することで上空の大気を観測するという新しい観測手法を導入した。この観測から得られる水平鉛直方向

に密なデータを元に鈴鹿おろしの鉛直構造を調べ、強風が吹くメカニズムを解明する。

上記の研究内容の詳細は、気象学の専門の学術論文誌に投稿予定であるが、観測実施に付随するさまざまな事柄については、論文以外のどこかに記録しておくべきである。そこで本稿は観測点選りなど、論文そのものには記述することができない観測逸話や裏話などのエピソードについて記述する。

## 1. 2. 鈴鹿おろしの吹く時期と、その時の気圧配置

鈴鹿おろしを観測するためには、「いつ」「どこで」観測すべきかを決めなければならない。実はこれは研究に関する自己矛盾なのである。「いつ」「どこで」鈴鹿おろしが吹くのかわかっているということは、鈴鹿おろしのメカニズムがわかっていることを意味し、わかっていることの後追い観測では、研究的な魅力は激減する。つまり、そもそも鈴鹿おろしのメカニズムがわかっていない

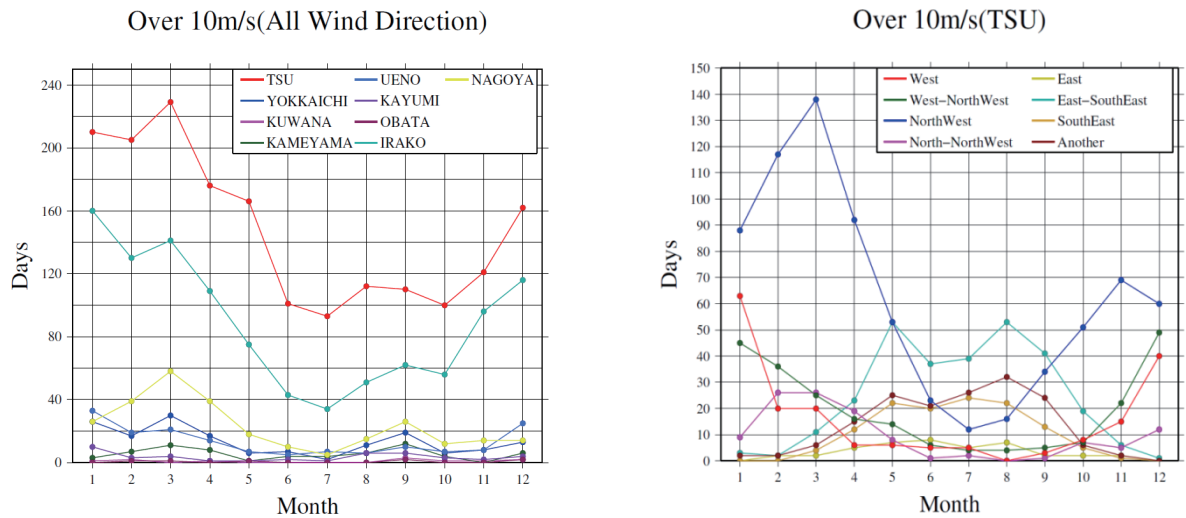


図2 三重県内のアメダスにおいて、各月で日最大風速が 10 m/sec 以上であった日数（1985～2005 年）[左図]  
津市において、各月で 10 m/sec 観測された時の風向別日数（1985～2005 年）[右図]

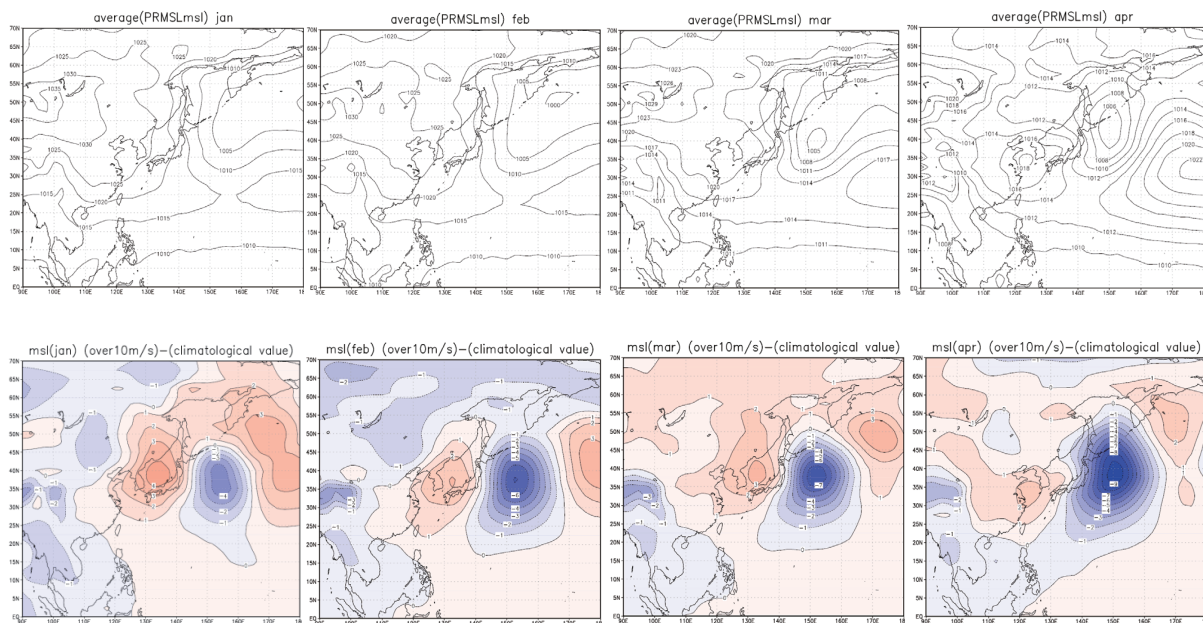


図3 津で 10 m/s 以上の北西風が観測された日の平均天気図（1 月～4 月）[上段]，  
各月の気候値からの偏差図 [下段]。色は暖色系が高気圧，寒色系が低気圧偏差を示す。

のであるから当然予測も困難であり、観測点の配置も、過去に言われている結果を基に考えるしかない。

我々はまず気象庁のアメダスのデータを用いて、三重県内の各地点で日最大風速が 10 m/sec 以上観測された日数を各月で調べた（図 2（左））。津市が周辺の他の都市に比べて圧倒的に風が強いことがわかる。また強風は主として冬季に吹くことも理解できる。津市で 10 m/sec 以上の風が吹いていた場合の風向を調べたのが図 2（右）である。

これによると、風速が大きい日は冬季の北西風時が圧倒的であることがわかる。直感的にも冬に風が強いと常々感じていたが、この予備的調査で観測の主たるターゲットは、冬であることを改めて理解した。冬季に最も強風が吹きやすいが、津市では初春である 3 月が最も強風が吹くこともこの図から理解できる。

次に北西の強風が吹くときの平均的な地上天気図を示す（図 3（上段））。冬季の全ての月に共通なパターンは、日本の東のアリューシャン海域や

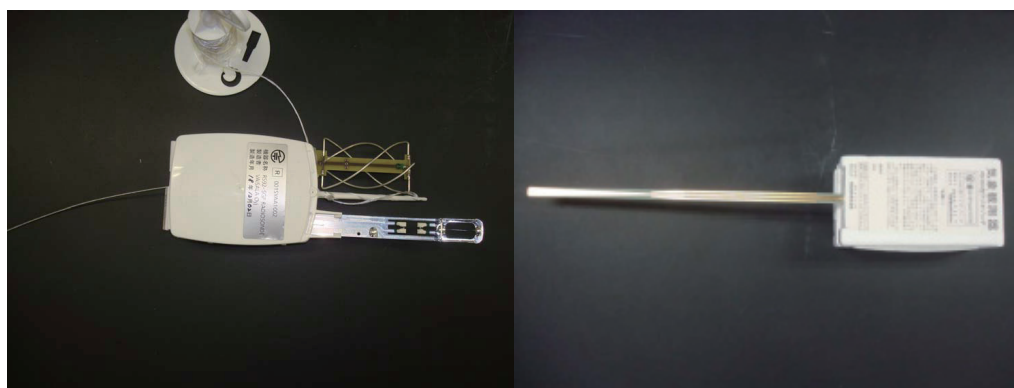


図4 左がフィンランドのバイサラ社のラジオゾンデ (サイズ:220×85×70 mm), 右が明星電気社のラジオゾンデ (155 (325)×98×85 mm)。どちらも, GPS と気象測器が内蔵されており, 各高度での気温, 湿度, 風, 高度, 気圧を測定できる。

本州東方に低気圧があり, 日本の西側にはシベリア高気圧があることである。これらの図をより詳細に見ると, 1~4 月に関して北西風の強風が吹くためには太平洋上に低気圧の存在が必要であり, その中心位置は東経 155 度, 北緯 37 度付近である。この図からも理解できるように, どの月も典型的な冬型の気圧配置の場合に強風が吹く。また, 図 3 (下段) は強風が吹く場合のそれぞれの月の平均的な気圧配置からのずれ (偏差) を示している。冬季は西高東低の気圧配置になることがほとんどであるため, 強風が吹く場合のより特徴的な大気の大規模な場を理解するためには, 偏差の図が重要となる。この図をみると, どの月も日本の東側の気圧がより低く, 強い高気圧が西側に位置していることがわかる。さらに詳細に図をみると, 日本の西半分は暖色系であることから, 日本は低気圧が通り過ぎた直後というよりも, むしろ高気圧が西から張り出してきた時に際だった強風が吹くということも読み取れる。一般には低気圧がやってくると強風が吹くことはよく知られているが, 津市周辺では低気圧が通り過ぎた後の高気圧場においても, 強風が吹き続けることを意味する。通常は高気圧場に入ると風は弱まってくるのであるが, この地域特有の「何か」によって高気圧場でも強風が吹くことが分かった。

## 2. 観 測

### 2. 1. 観測装置 (ラジオゾンデ)

図 4 がラジオゾンデの写真である。このラジオゾンデをヘリウムガスで充填した気球に取り付け

て上空へと放球し (図 5), 地上から上空までの風, 気温, 湿度, 気圧を 1 秒毎に測定する。それをアンテナが受信し (図 6 (左)) 地上受信機 (図 6 (右)) へと観測データを電波で送信する。そして受信機とデータ処理制御 PC によって観測データを取得できる。

### 2. 2. いつ観測すべきか?

ラジオゾンデ観測には多くの人員が必要である。風船にヘリウムを入れる係や計算機のオペレーター等, 一個のバルーンを上げるには最低でも 3 名の人員が必要で, それを 24 時間体制で実施するには, さらに多くの人員が必要である。また, 後述するようにバルーン 7 個を複数の観測点で同時にあげることを企画したために, 約 20 名程度の観測人員が必要である。20 人というのがまず難題となった。たとえば, 1 月 31 日に観測を実施することを予定し, 12 月中にあらかじめ 20 人の協力学生を確保することはさほど困難なことではない。しかし, 鈴鹿おろしが吹く日を, 1 ヶ月前から予知することは不可能である。吹いている日の朝に, 20 人の人に急に集まってくれといってもそれは無理であることは明らかである。そこで, 1 週間の観測スタンバイ期間を設定した。観測スタンバイ期間のすべての日に 20 名の観測を協力してもらえる学生を募った。1 週間全て空いている学生はほとんどいないので, 前半数日可, 後半数日可, 等の観測可能学生名簿をのべ 20 人×7 日分作成した。観測を実施するか否かは, 前日の夕方に連絡することとした。このようなスタンバイ期間を 2 セット (2 月と 3 月) 用意した。実際



図5 ラジオゾンデの放球の様子。  
(左上：青山高原ウィンドファーム，右上：伊賀研究拠点，下：大学附属農場)



図6 上空のラジオゾンデから発信された電波を受信するアンテナ。(左写真)  
受信機と処理 PC。黒色の PC の下にあるクリーム色の装置が受信機。  
その右隣にある装置が地上温度と湿度のチェック機器。(右写真)

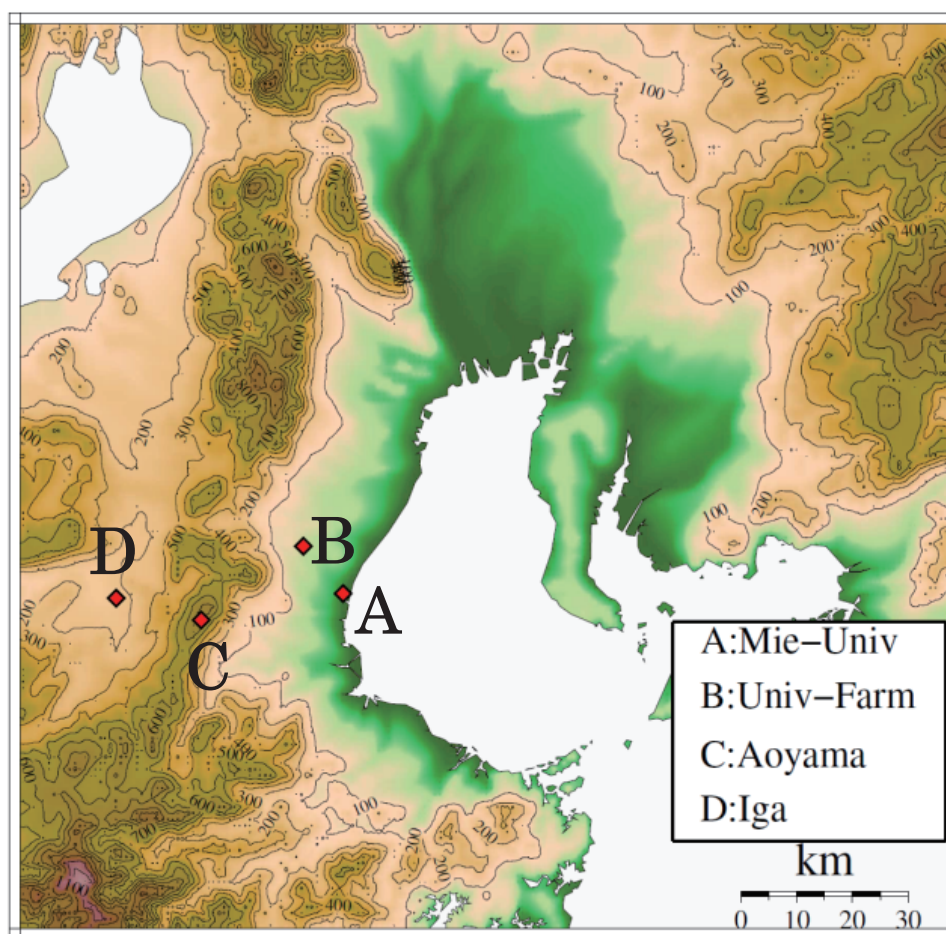


図7 観測場所として利用した大学施設の配置図と三重県の地形図

に観測を行った日は、いずれも2010年の、1) 2月18日～19日、2) 3月17日 3) 3月21日～22日であり、スタンバイは、2月は18日午前からであったが、3月は双方とも前日から観測場所にて待機していた。これらの日以外にスタンバイ登録した協力学生は、残念ながら観測に参加することができなかった。理想的には冬期の一番寒い時期である、1月にも観測スタンバイ期間を設けたかったが、卒業論文や修士論文作成学生への配慮をせねばならないため、人員確保の困難が予測された。そのため、それらが一段落する2月中旬以降をスタンバイ期間とせざるをえなかった。

スタンバイ期間を1週間としたのは、結果的に失敗であった。当初は、1週間程度を確保すれば、その間には低気圧が一度程度は通過し、図3のような天気図になる日がある期間に一度程度はあるであろうと考えていた。またそれを2セット用意すれば、まず観測期間の「網」に鈴鹿おろし現象が引っかかるであろう、との見通しがあった。気象学的な中緯度の統計的な大気場の状態は、確か

に概ねその通りであるのである。しかし、ある期間は、1週間たまたま春めいた日が継続することもある。その1週間が、二つのスタンバイ期間に偶然当たる可能性も否定できない。観測が終わってからの反省として、2週間連続で期間を確保しておけばよかったと感じた。2週間連続で春めくことはよほどの異常気象でもない限り起こらないからである。そのような異常気象がもし起こればそれはまた別の研究テーマが生まれることをも意味する。

### 2. 3. どこで観測すべきか？

三重県内での気象庁の通常観測では、上空の大気を観測するラジオゾンデ観測点は一カ所も存在しない。冬の卓越風は上述したように北西風や西風であることから、観測地点が風の上流側かつ鈴鹿山脈の西側と山頂、そして津市街地でデータが取得できることが理想である。図7が示すように、三重大学の施設が、上流側の伊賀研究拠点、農場、大学にかけて、南北に微妙にずれているが、

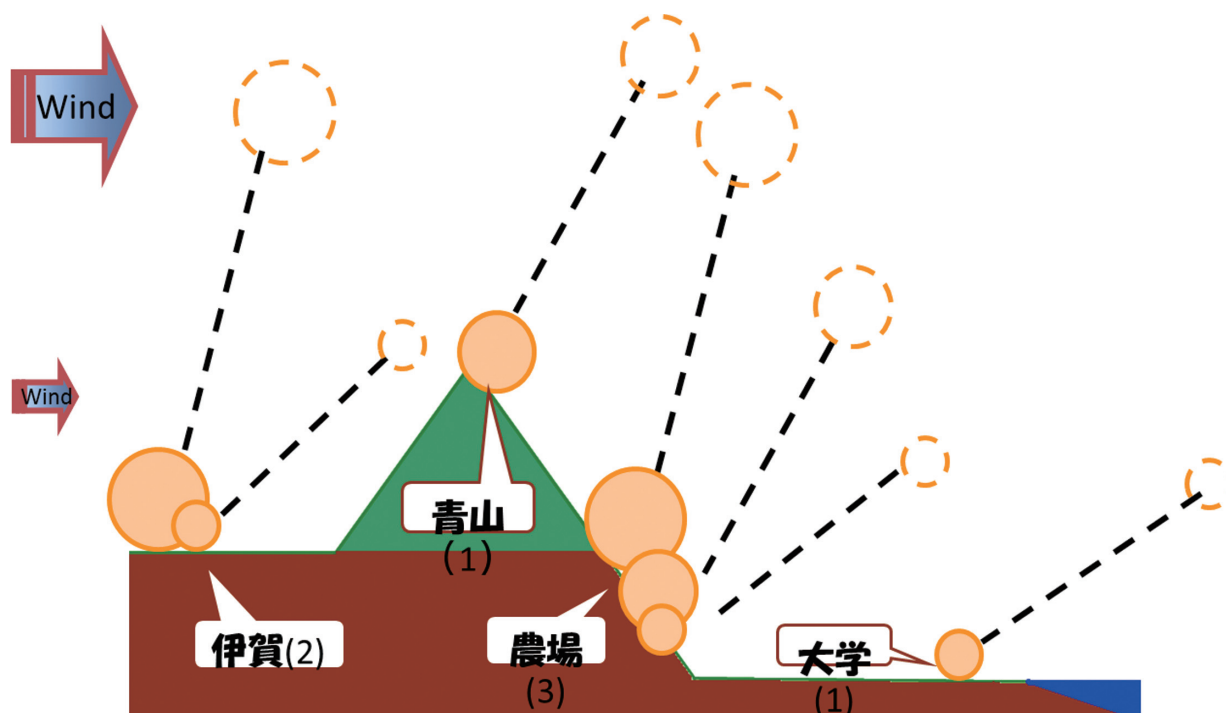


図8 複数地点で浮力の違うバルーンを同時に放球した場合のバルーンの軌跡の模式図

ほぼ東西に並んでいる。これはまるで我々の観測のために大学の施設を配備してくれたかのような好条件である。また、風力発電の施設が青山高原の山脈の山頂近くに配備されており、その施設を用いると東西に4地点の列状の観測網を敷くことができる。なお観測は24時間体制で実施するため、仮眠や休憩そして軽食をとるための最低限の施設が必要とされる。またデータ通信にはFMアンテナを用いるため高い受信レベルの確保のために開けた場所が要求される。なお広い場所はバルーン放球の場所確保のためにも必要である。また、バルーンにヘリウムを充填させる場所や、放球準備の為の風が弱い場所も必要である。このような条件をこれらの場所が満たすかどうかについて我々は数回下見を行った。結論としてそれらの場所はすべて観測要件を満たしていた。特に三重大大学伊賀拠点の観測環境はベストであった。たとえば伊賀研究拠点にはグリーンハウスがあり、そこをヘリウム充填場所として利用させていただくことができた。また、農場も開けた場所であり、観測拠点として十分な宿泊施設とヘリウムガス充填をもってこの資材庫を利用させていただいた。

このような経緯で上流側の三重大大学伊賀拠点(D点)、青山高原(C点)、下流側の三重大大学農場(B点)、三重大学生物資源学研究科の建物の

屋上(A点)の4地点を観測地点に選んで、観測を行った。観測はヘリウムガスを注入したバルーンに観測器を取り付け、放球することで高層気象を観測するラジオゾンデ観測(観測項目:気温、気圧、湿度、風速、風向、高度、緯度、経度)を3時間毎に行った。さらに上空の気象データをより密に取得するため、各観測地点で同時に放球するバルーンの数と各バルーンに注入するヘリウムガスの量を変えた。ヘリウムガスの量を変えることでバルーンが持つ浮力に差がつき、たくさん注入したものは早く上昇し、少ないものほど遅く上昇する。これらのバルーンを複数地点で同時に放球した場合、風による流され方が異なるためバルーン毎で異なった軌跡で上昇する。ラジオゾンデはGPS機能を有していることから位置情報取得することができるため、同時に放球した場合でも各高度で異なる位置の気象データを取得することが可能になる(図8)。このような観測手法を用いB地点では3つ、D地点では2つ、AC各地点では1つずつの計7個のラジオゾンデを同時に放球した。各観測地点での観測の様子が図5である。

余談であるが、ヘリウムガスをたくさん入れたバルーンはもちろん大きくなり、風が吹けば他のバルーンよりも激しく暴れる。バルーンが割れないためにも、瞬間的に強い風が吹いた場合には風

下にバルーンと共に移動し、弱まった隙を見て放球場所に戻るという作業を二人掛かりで行った。しかし、このような悪戦苦闘の苦労も虚しく、結局放球場所の手前で手元からバルーンがちぎれてしまうハプニングもあった。また、ヘリウムガスを少なくしたバルーンも、ぎりぎりまで浮力を抑えて放球してしまい、バルーンがほとんど上昇せずに水平に流れていってしまった事もあった。

### 3. 世界初の狭域同時ラジオゾンデ放球

#### 3.1. 空振り

1回目と2回目の観測は結果として「空振り」であった。1回目と2回目は観測態勢を敷き観測を行ったが、求めているような現象である鈴鹿おろしは吹かなかった。1回目は全く初めての観測場所、観測手法であった事もあり、鈴鹿おろしが吹きそうな前兆が感じられた時から全員配備を敷き、受信機の設置など観測準備から始めて、バルーンのテスト放球も行った。そして丸一日ラジオゾンデを3時間おきに全地点で放球し、観測に関する様々な不備な点を洗い出しつつ、強風を待った。しかしながら一日待っても青山高原の観測地点以外は強風とはならず、観測を終了した。残念な事に観測終了翌日に強風を伴う鈴鹿おろしが吹き始め、もう一日粘ればよかったと後悔した。しかしながら、24時間体制で不眠不休の観測者たちの疲労が限界に達しており観測継続は不可能であったので、致し方ないであろう。そのため2回目の観測では、観測開始を宣言する時刻についてかなり慎重になった。急いで観測を始めるよりも強風が吹き始めてから観測開始を宣言し、それまでは各観測所には詰めてはいるが休憩しながら観測開始を待つような体制を敷いた。しかし2回目は逆にあまりにも慎重になりすぎてしまい、観測開始宣言が遅れてしまった。結果として観測を開始した時刻においては、強風のピークは既に過ぎていた。この2回の観測の空振りを通して、自然現象を狙い打ちする観測の難しさを改めて痛感した。

#### 3.2. 鈴鹿おろしの三次元立体構造

3回目の観測は成功だった。一例として、3月17日00時と03時に放球したラジオゾンデの軌跡の図を掲載する(図9)。図のように、ラジオ

ゾンデは放球後は上空の西風に流され概ね東方へと移動する。図中の赤色の軌跡は浮力を大きくしたラジオゾンデの軌跡であり、上昇速度がハイスピードであるために、あまり東には流されていないことが確認できる。このように、ほぼ同一時刻における複数の観測線上での風、温度、湿度データを取得することができた。伊賀、青山、農場、三重大学はほぼ西から東に向かい一直線上に並んでいる。従って、これら取得データから東西鉛直の二次元の断面上に、風などの気象要素をプロットすることで、その分布の詳細な構造を得ることができる。

放球されたバルーンは風により水平方向に流されながら上昇を続ける。放球後のバルーンの水平流跡線は放球時の大気場の流れによって決定され、ほぼ全てのバルーンがその時の風下側に流されていく。全てのラジオゾンデが位置情報を持っている事から、1回の観測につき7本の流跡線を得ることができ(図9)、その流跡線に沿った気象要素を得る事が可能である。このことからバルーンが流された方向(風下方向)をx軸、高さをz軸とした場合、流跡線に沿った疑似的なx-z断面を作成することができ、この断面を本研究では準断面とした(図10)。次節では準断面を用いて鈴鹿おろしの鉛直構造に関して解析を行っていく。なおこのような多数のラジオゾンデを一直線上に配備しての「おろし」観測はおそらく世界で初めてである。

観測結果の解析の詳細は、別途専門の論文に譲るが、一例として3回目にあたる3月21日06時の結果を示す。下層(約2,000m以下)が西北西風であるのに対し、上空では西南西の風が吹いていた。また、そのときの風速偏差分布(図11)を見ると山を境界に風下にかけて吹き降りるような強風分布が見られる。これは下層の西北西風に対応していると考えられる。

山越え気流発生時には山を越えた流れが斜面に沿って滑降し風下側で跳ね上がる「跳ね水現象」(ハイドロリックジャンプ)を伴うことがある。また、ハイドロリックジャンプ発生時には、跳ね上がる直前の場所で最も流れが強くなることが知られている。

今回、観測された時間においてもハイドロリックジャンプが発生していたか確認する必要がある。

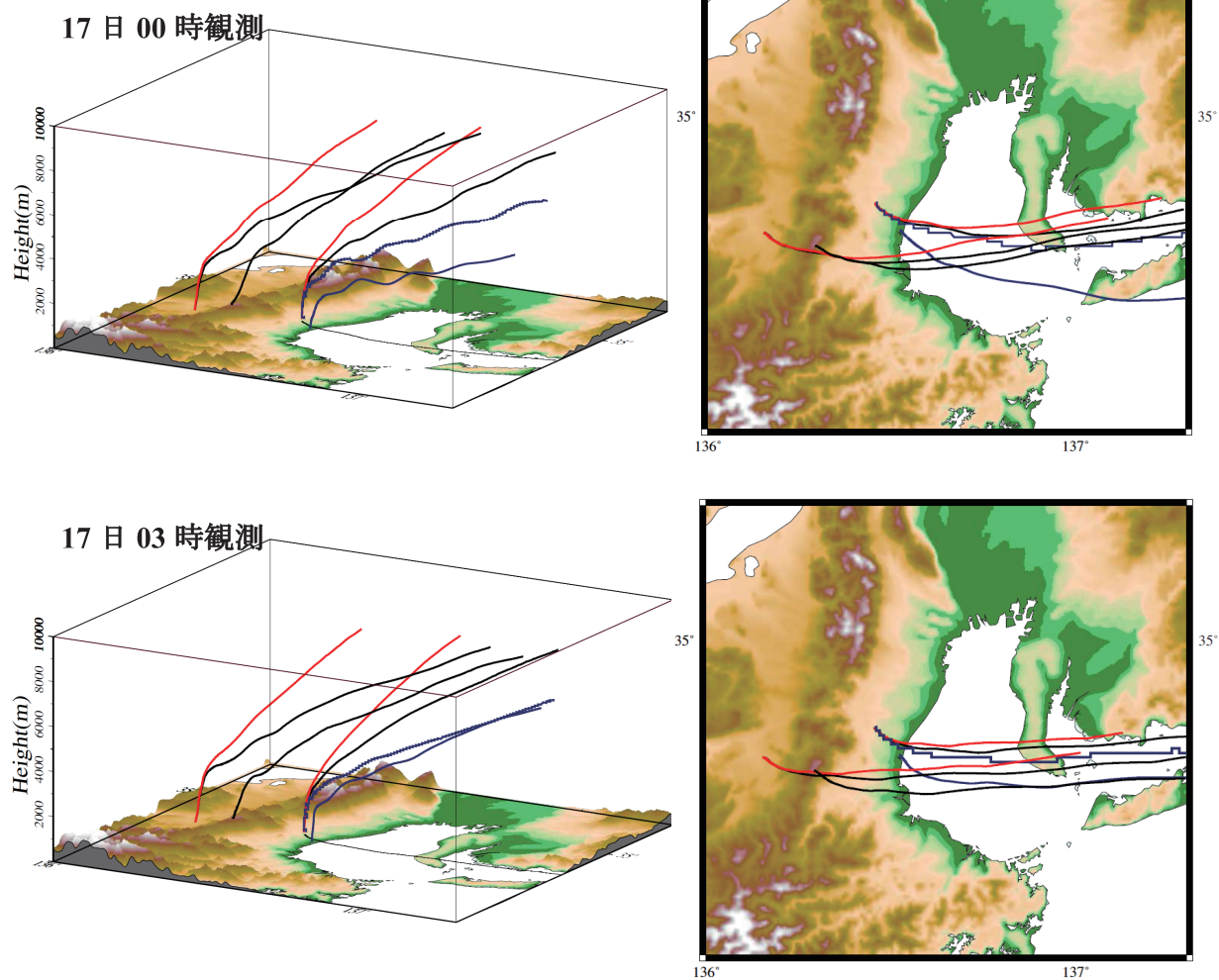


図9 地図上にプロットしたラジオゾンデの軌跡。この例は3月17日00時と03時の観測時の軌跡を表している。一番左の地点から2本の線が出ている箇所が伊賀拠点、次が青山高原、次が農場、一番右の海岸部が三重大学である。伊賀と農場はそれぞれ2本、3本の軌跡が描かれている。これはそれぞれの地点から複数のラジオゾンデを同時放球したからである。

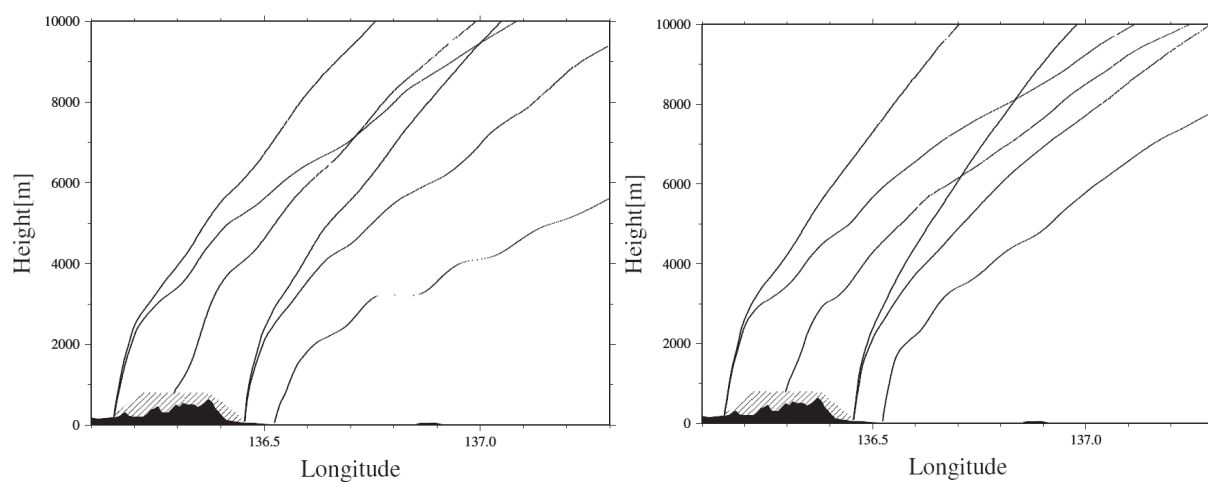


図10 3月17日00時〔左図〕と03時〔右図〕におけるバルーンの鉛直方向の流跡線

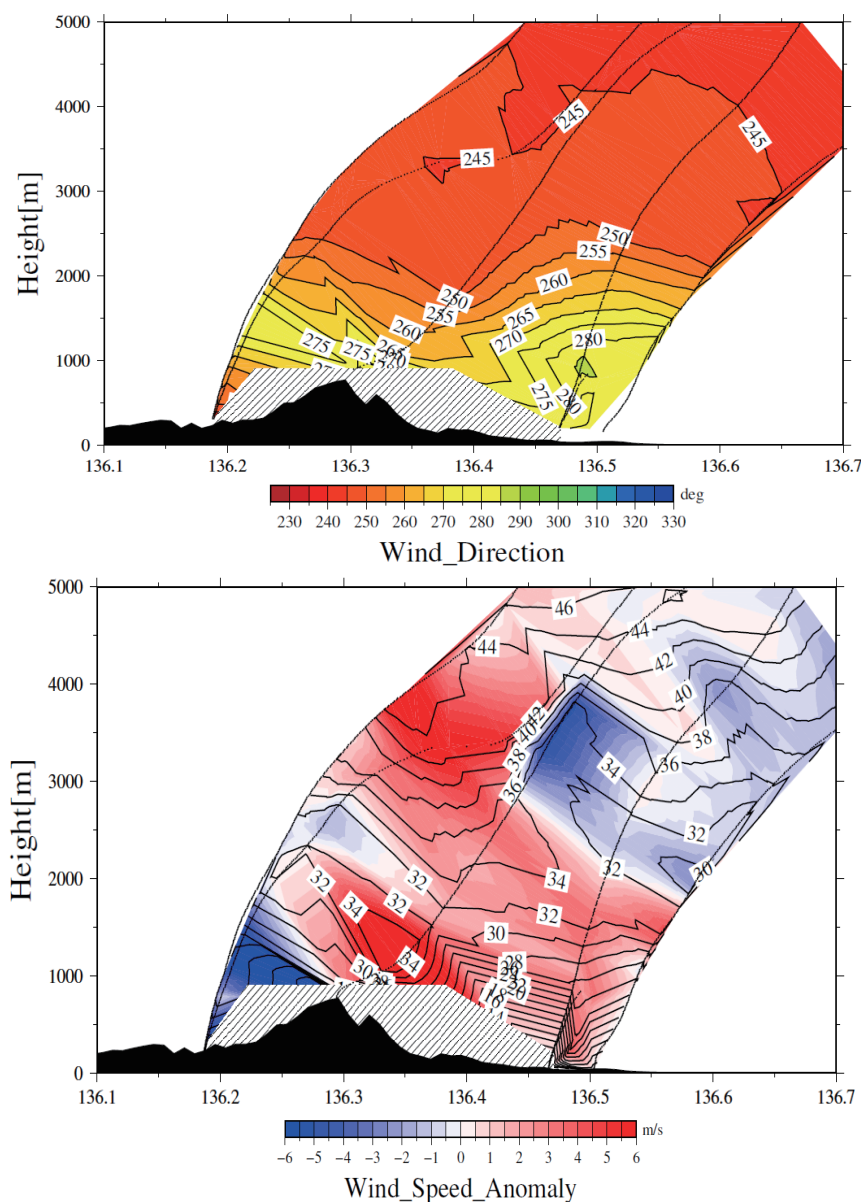


図11 3月21日06時観測における風向の準断面 [上図], 同時刻における風速(線)と水平風速偏差(色) [下図]。風向の数字は北を0°とし, 時計回り最大360°で示される風が吹いてくる方角, 水平風速偏差は各高度における平均風速からの偏差。(赤色ほど風が強く, 青色ほど弱い)

そこで観測された気温, 気圧, 湿度から相当温位を計算し, ハイドロリックジャンプが発生していたかを確認した。相当温位は偽断熱過程(系外との熱のやりとりは無いが, 水蒸気の凝結などの相変化がある場合)のもとでは保存量であるため, ある相当温位を持つ空気はその等相当温位線に沿うことでしか動くことができない。よって相当温位の準断面を見ることで大気が断面上をどのように流れていたか確認することが可能である。今回は式(1)で定義される相当温位式を用いた。

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{2.675 w}{T_l}\right) \quad (1)$$

$\theta_e$ : 相当温位 (K),  $\theta$ : 温位 (K),  
 $w$ : 混合比 ( $\text{g kg}^{-1}$ ),  $T_l$ : 凝結温度 (K)

21日06時では風上の上空(2,000 m~2,500 m付近)の等相当温位線が山頂風下側の下層まで下降してきており, これに対応するように風下層で強い風が観測された(図省略)。また山を越えた後, 等相当温位線が跳ね上がっている様子も見られた。これは過去の研究で示されてきたハイドロリックジャンプの特徴に類似している。このこ

とから、06 時観測においてはハイドロリックジャンプが発生していた可能性が高いことが示唆される。

#### 4. 勢水丸を用いた次の観測計画

ラジオゾンデ受信機を大量に用いての上流から下流にかけての同時気球放球観測による「おろし風」の研究はおそらく世界で初めてである。これらは、三重大大学の生物資源学研究科所属の施設が幸運にも伊賀拠点、農場、大学キャンパスの位置が東西に並んでいたことと、伊賀拠点と農場のスタッフや研究者のご協力の賜である。次なる手、それは生物資源学研究科所属の他の施設の利用である。その最大候補は、勢水丸である。今回の観測での「最下流」観測点は、三重大大学であった。さらに下流は伊勢湾である。伊勢湾上でもラジオゾンデ観測ができれば、より東西方向に幅広い観測が可能となる。普通の大学では海上での観測は不可能であるが、我々生物資源学研究科は練習船勢水丸をもっている。それを利用した観測を将来是非試してみたい。もしそれが実現されれば、陸海空すべての分野を兼ね備えている生物資源学研究科の特色を生かすことにもなろう。

#### 謝 辞

本研究は、株式会社青山高原ウィンドファームとの共同研究のもとで行いました。観測点のひとつに青山高原事務所を使わせていただきました。青山高原ウィンドファームの多くの方々の協力に依るところが大きかった。また、本研究を進めるにあたり JAMSTEC の研究者の方々には貴重なご意見をいただきました。また、三重大学生物資源学部共生環境学科自然環境システム学講座の福山薫教授をはじめとして、当講座の多くの方々に観測を協力していただきました。さらに、伊賀拠点や農場のスタッフや研究者の方々のご協力無しには成し遂げることができなかったと思います。本研究に協力していただいた多くの皆様に感謝いたします。

#### 引用文献

- Owada, M., 1990: A CLIMATOLOGICAL STUDY OF LOCAL WINDS (OROSHI) IN CENTRAL JAPAN, Doctoral Thes. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba
- 大和田道夫・原田香子, 1978: 伊勢平野に卓越する局地風「鈴鹿おろし」の局地気候学的研究, 愛知教育大学研究報告, 27, 173-182
- 吉野正敏, 1978: 気候学, 大明堂, p 217