

京都大学防災研究所

一般共同研究（課題番号：2020G-05）

RTK 搭載バルーンによる 高密度 3 次元風速場実測

令和 2 年 4 月 1 日 ～ 令和 4 年 3 月 3 1 日

研究代表者：大風 翼（東京工業大学）

所内担当者名：西嶋一欽（京都大学防災研究所）

本報告書は、京都大学防災研究所一般共同研究（課題番号：2020G-05）の助成を受け、下記の研究組織により実施された研究成果をまとめたものである。なお、研究成果の取りまとめにあたって、下記の関連する研究成果の一部を加筆修正している。

研究組織

研究代表者

大風 翼 東京工業大学・准教授

研究分担者

西嶋一欽 京都大学防災研究所・准教授

中嶋唯貴 北海道大学・准教授

関連する研究成果の公表

西嶋一欽，大風翼，中嶋唯貴，RTK-GNSS 搭載バルーンの飛行経路に基づく風速観測の基礎的検討，令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概，B301，2021

大風翼，西嶋一欽，中嶋唯貴，RTK-GNSS 搭載バルーンの軌跡情報による風速推定の可能性，令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概，D212，2022

目次

1. 研究の目的.....	1
2. 開発した RTK-GNSS 搭載バルーンの概要.....	1
3. プロトタイプ RTK-GNSS 搭載バルーンを用いた放球実験.....	2
3.1. 実験概要.....	2
3.2. 実験結果.....	4
4. RTK-GNSS 搭載バルーンの軌跡情報による風速推定の検討のための放球実験.....	7
4.1. 実験概要.....	7
4.2. 実験結果.....	8
5. まとめ.....	11

1. 研究の目的

台風などの強風に伴う都市内の被害低減には、大気境界層内の風速の 3 次元構造の把握が重要である。従来、ラジオゾンデによる観測が行われているが、上空およそ 20km までの対流圏全体を対象としており、大気境界層内を高解像に捉えることは目的としておらず、一般に、水平方向に 100m 程度、高さ方向に 50m 程度の空間の代表的な風速を測定している。風速の時空間分布を詳細に取得可能なドップラーライダー等は、反射波を利用するため降雨時はノイズにより測定が困難である。一方、準天頂衛星システム「みちびき」により、RTK 法による衛星測位の精度は数 cm の精度まで向上している。また、コンシューマ向けメーカーの参入で、1 台 100 万円ほどだった受信機も 5 万円程度で販売されはじめ、複数台の活用が現実的になってきた。

本研究では、RTK (Real Time Kinematic) 法による衛星測位センサを搭載したバルーンを複数地点で放出し、地上 200m 程度までの大気境界層内の流れ場の 3 次元構造を把握する手法を開発する。本研究は、2 カ年で実施した。1 年目は、RTK 搭載バルーン的设计および試作、試作した RTK 搭載バルーンを用いた予備的実験、予備的実験で得られたバルーン飛行軌跡データに基づく風速推定精度の検討を実施した。2 年目は、1 年目に開発した RTK-GNSS 搭載バルーンのモジュール構成や回収装置の機構の見直しを行った後、バルーン 5 つを、周辺に気流障害物の少ない裸地の大気境界層に放球し、バルーンの軌跡から地上 200 m 程度までの大気境界層の平均風速の鉛直分布を推定した。また、推定された風速について、ドップラーライダーによる観測結果との比較から、妥当性の検討を行った。

2. 開発した RTK-GNSS 搭載バルーンの概要

RTK-GNSS 搭載バルーンの概観を図 1 に示す。バルーンは、ヘリウムガスを充填したバルーン本体の上部に GNSS 信号受信用アンテナを装着し、バルーン本体下部に測位モジュール・計測用マイコン・バッテリーと浮力調節用の重りを装着する (図 1 は重りを装着していない状態のものである)。また、測位バルーンには係留・回収用の糸を取り付けるが、十分に軽い釣り糸を取り付けており、バルーンの軌跡を記録する際には一時的に張力を開放し、釣り糸がバルーンに及ぼす影響は可能な限り小さくした。実験に用いた測位システムは、以下の通りの構成である：(1) 基準局はジオセンス社の M5F9P を用いて構築、(2) 基準局の座標は VRS 方式により測位、(3) 基準局と移動局(RTK-GNSS 搭載バルーン)はインターネットや 920MHz 帯無線で通信する。概要は、図 2 に示す。

なお、実験前に使用した測位システムを用いて、地上で観測を行い、測位精度 (Fix 解) が水平鉛直方向ともに数 cm 程度以下であることを確認した。

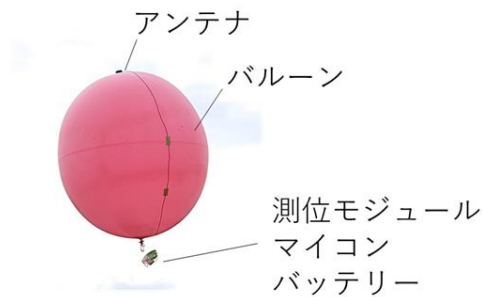


図 1 開発した RTK-GNSS 搭載バルーン

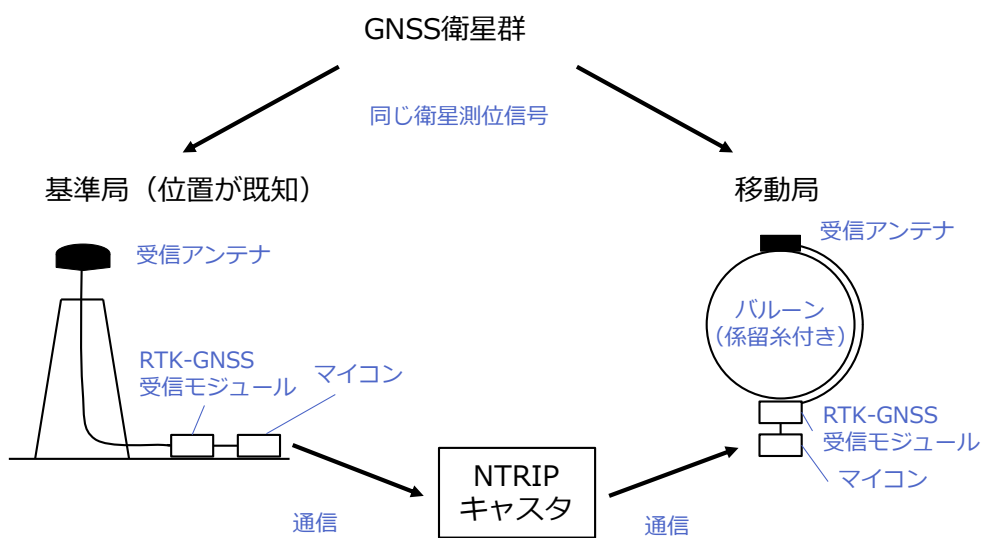


図 2 測位システム概要

3. プロトタイプ RTK-GNSS 搭載バルーンを用いた放球実験

3.1. 実験概要

RTK-GNSS モジュールを用いてバルーンの軌跡を計測する手順を確立し、得られた軌跡に基づく風速計測の可能性を検討するために、RTK-GNSS 搭載バルーンの放球実験を行った。実験は、2020 年 12 月 11 日京都大学防災研究所潮岬風力実験所で実施した。図 3 に放球実験場所ならびに風力実験所に設置されている超音波風速計の位置、本実験のために設置した RTK-GNSS 基準局の位置を示す。

放球実験は 2 組の測位バルーンを用いて合計 7 回実施した。それぞれの試行において、2 個のバルーンを同時に放球した。1 回目から 3 回目までの試行では、釣り糸の巻き出し長さが約 10m の状態で放球し、巻き出し長さが約 20 m になるまでの間釣り糸の張力を解放した。4 回目から 7 回目までの試行では、同約 20 m の状態で放球し、同 30 m になるまでの間張力を解放した。なお、すべての試行において、5-10 Hz で測位した。

実験に用いたバルーンの諸元を表 1 に示す。直径は 1.2~1.3 m 程度である。ヘリウムガスを充てんし、浮力を与えた。重力と合成した正味の浮力は、各々、76、95 gf である。なお、係留用の釣り糸の重さは、浮力には加えていない。

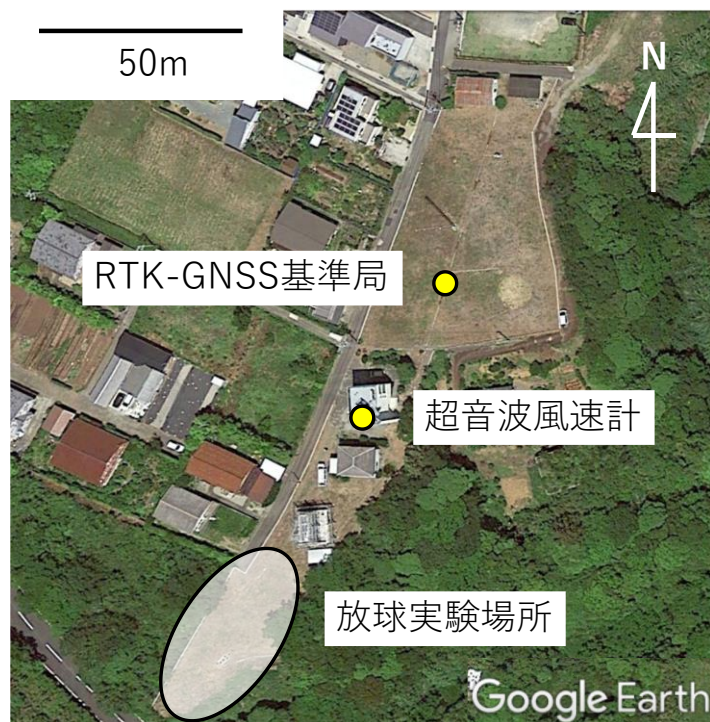


図 3 実験場所

表 1 測位バルーン諸元

	バルーン 1	バルーン 2
直径 (水平方向) (mm) ※1	1350	1255
重量 (gf) ※2	1665	1128
浮力 (gf)	1741	1223
上向きの合力 (gf)	76	95

※1 バルーンは球体ではなくやや鉛直方向に伸びた回転楕円体状である。

※2 係留用釣り糸の重さ (約 1g/m) は含めていない。

3.2. 実験結果

放球実験の様子を図 4 に示す。バルーンは放球直後から風に流され移動していた。RTK-GNSS モジュールによって測位されたバルーンの飛行経路（正確には、バルーンに搭載されたアンテナの位置の時間的変化）を図 5 に示す。グラフにおける原点は図 3 の放球実験場所内に定義した 1 点である。特に、図中の 7-1 および 7-2 は 7 回目の試行におけるバルーン 1、2 の軌跡である。なお、4 回目の放球時のバルーン 2 に関するデータはデータ保存に失敗し記録されていない。

次に、これらの飛行経路をもとにバルーンの移動速度を算出した。7 回目の放球におけるバルーン 1 および 2 の移動速度の水平成分および方向を図 6 に示す。また、同図には風力実験所本館屋上に設置（地上高さ 20m、図 3 参照）された超音波風速計によって計測された同時刻における風速と風向（180 度シフト）も併せて記している。



図 4 放球実験の様子

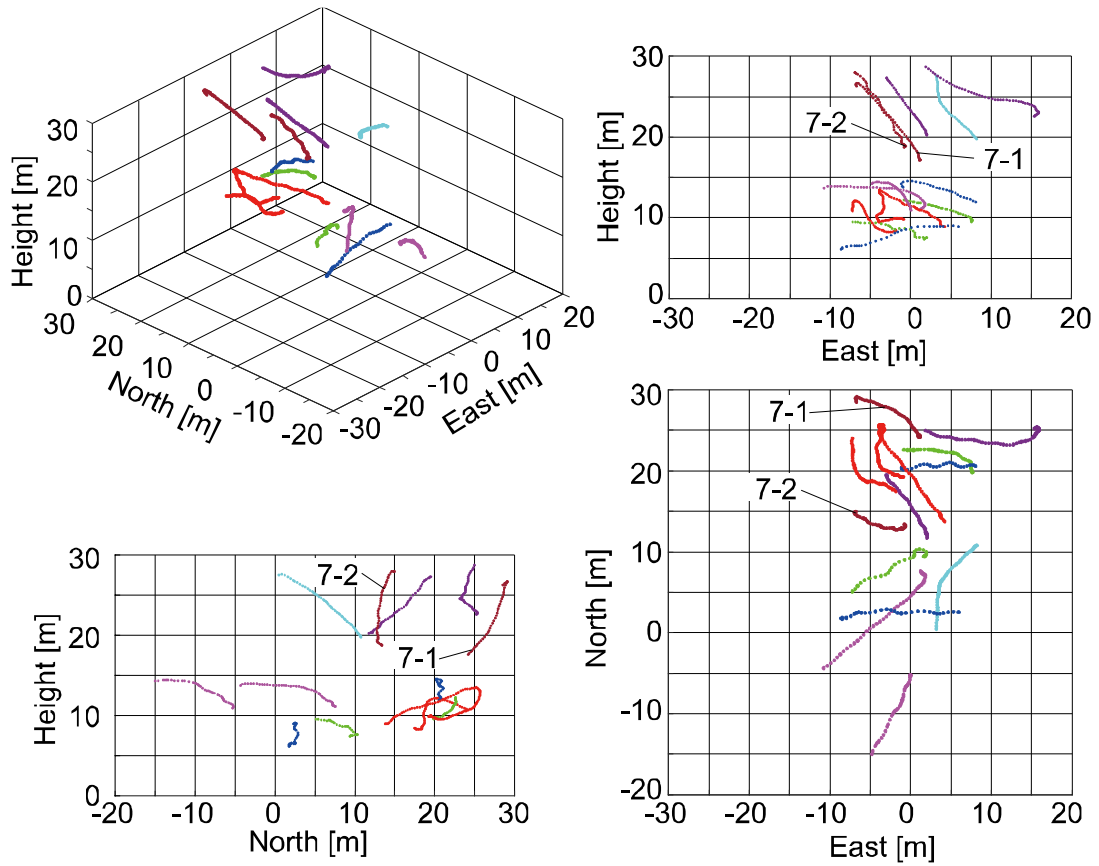


図5 バルーンの飛行経路

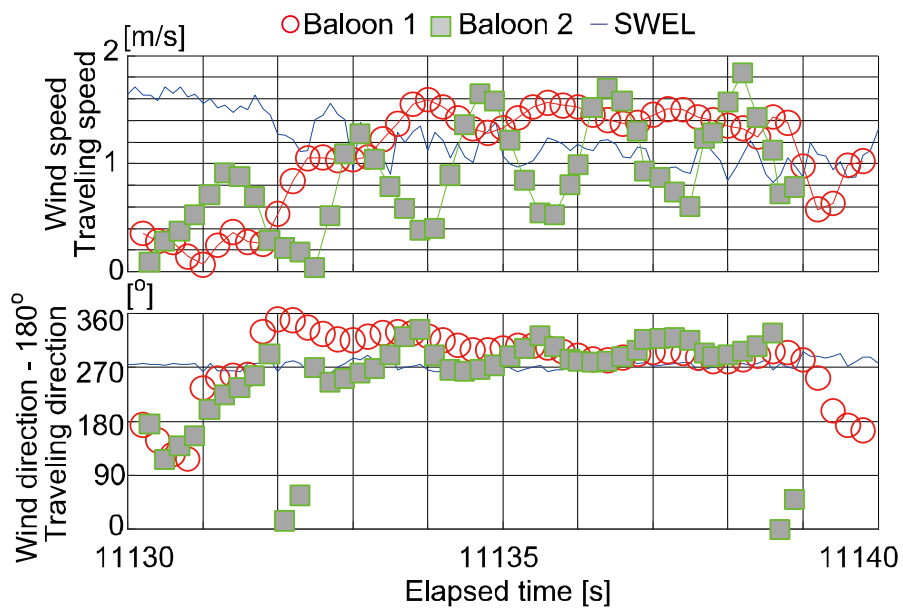


図6 バルーンの水平移動速度

バルーンは釣り糸の張力を解放後加速し、約 4 秒後（経過時間 11134 秒）に水平移動速度は安定的な周期変動に落ち着いている（周期的変動の原因考察は後述）。安定した時点での水平移動速度の平均値は概ね超音波風速計で計測された風向風速と一致している。

アンテナ位置の水平移動速度が測位バルーンの重心の並進運動成分と重心に対するアンテナ位置の相対運動成分が重ね合わさったものであるならば、アンテナ位置の相対運動は首振り運動と振り子運動が合わさったような運動であるから、水平 2 方向の相対変位は近似的に同一周期で、ある位相差を有した挙動を示すと考えられる。その際、鉛直方向の相対変位は水平 2 方向の相対運動と呼応した挙動を示す。このことを検証するために、バルーンの飛行経路の 1 秒平均値からの偏差（高さ・南北・東西方向）を計算したものを図 5 に示す。この図から水平 2 方向の相対変位について、バルーン 1、2 ではある位相差、特にバルーン 2 では経過時間 11131.5 秒から 11135 秒の間はほぼ同位相で運動（=ある方向に対する振り子運動）していることがわかる。また、いずれも周期約 1.6 秒（振り子運動とした場合の測位バルーンの固有周期にはほぼ一致）で運動している。他のいずれの試行においても水平運動の周期は約 1.6 秒である。これらの結果は、アンテナ位置の運動は測位バルーンの重心の並進運動成分と重心に対するアンテナ位置の相対運動成分が重ね合わせであることを支持している。このとき、測位バルーンの重心の水平移動速度は、アンテナ位置の移動速度の 1 周期ごとの代表値、例えばアンテナが重心に対して相対的に静止しているときの値あるいは近似的に 1 周期の時間平均値で近似することで、風速の水平成分の推定値とすることが可能である。

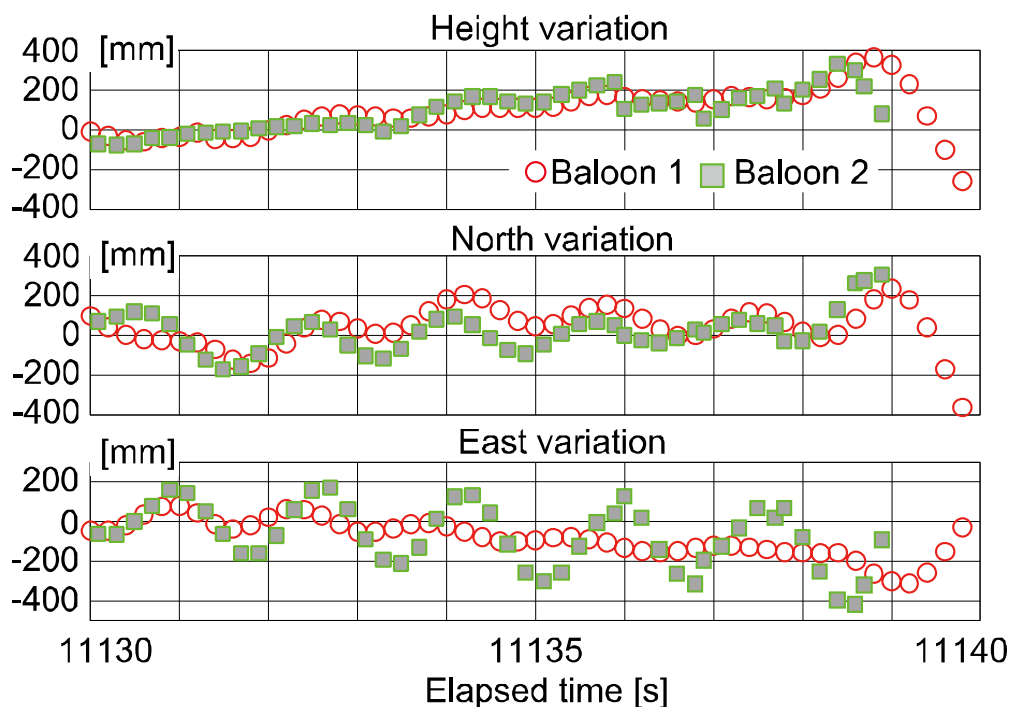


図 7 アンテナ位置の水平・鉛直運動

4. RTK-GNSS 搭載バルーンの軌跡情報による風速推定の検討のための放球実験

4.1. 実験概要

本章では、前章で放球実験を行った RTK-GNSS 搭載バルーンを 5 つ、周辺に気流障害物の少ない裸地情報の大気境界層に放球し、バルーンの軌跡から大気境界層の地表面近傍 100 m 程度の平均風速の鉛直分布を推定した。

バルーン放球実験は、2021 年 11 月 15 日～17 日にかけて、図 8 に示す鹿児島県桜島黒神地区で実施した。実験に用いた RTK-GNSS モジュールは、前章で予備実験を行ったものを基本として、(1) 基準局はジオセンス社の M5F9P を用いて構築、(2) 基準局の座標は VRS 方式により測位、(3) 基準局と移動局(RTK-GNSS 搭載バルーン)はインターネット回線を介さず 920MHz 帯無線で直接通信するように変更した。バルーンにヘリウムガスを充填することで浮力を得、GNSS 信号を受信しやすいようにアンテナはバルーン上部に取り付け、それ以外のモジュールはバルーン下部に取り付けた。すべてのモジュールを取り付けたのち、バルーン一式の実質浮力が約 70 gf～100 gf になるように重り等で浮力を調整した。このときのバルーンの直径は約 1 m であった。バルーンにはリールに巻き付けた糸の一端を取り付け、浮力によって上昇するバルーンの運動に応じて自動で巻きだされる。糸に作用する張力を最小限に抑えるために、観測者はバルーンの移流に合わせて移動した(図 9)。



図 8 ドップラーライダーの位置と放球場所

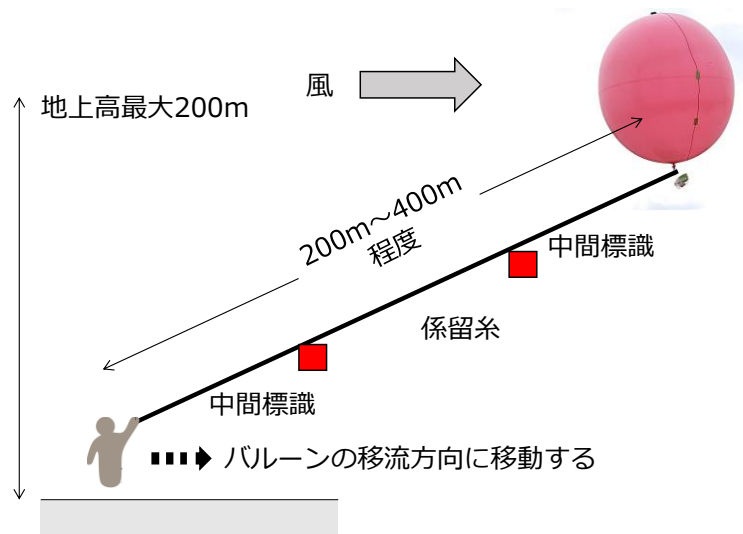


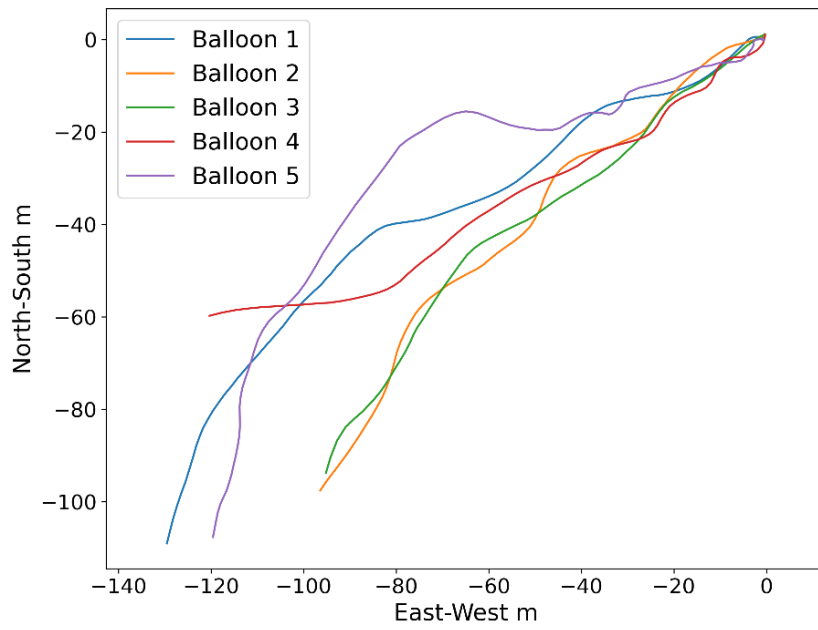
図9 放球イメージ

4.2. 実験結果

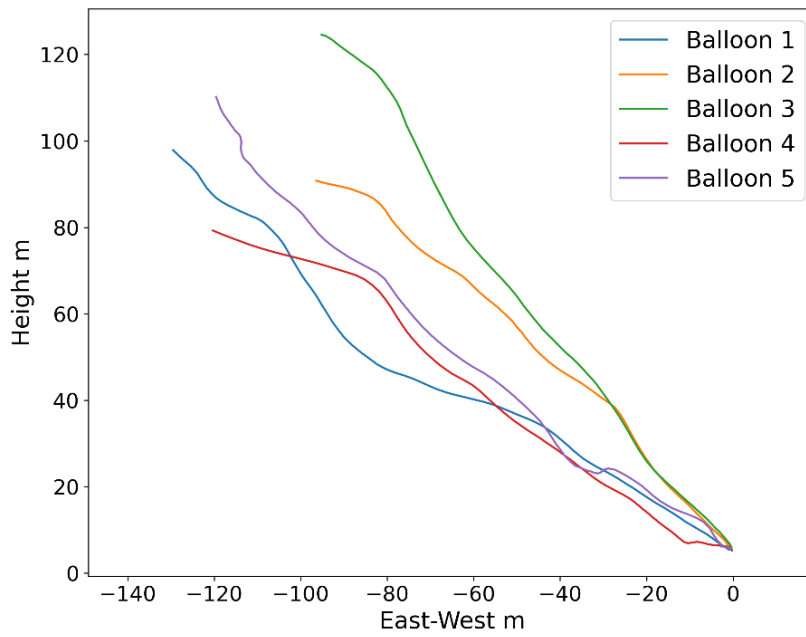
同一地点より、5つのバルーンを等間隔の時間で放球し、その軌跡を記録した。いずれのバルーンも概ね糸が150 m程度放出された時点で回収を開始した。放球時間は、概ね90 s程度であった。

図10は、30 s間隔で5つのバルーンを放球した際の各々の軌跡である。前章で示したような振り子運動に伴う軌跡の周期的変動は見られなかったため、本章で得られた軌跡は、補正せずに以降の分析で用いている。南西に150 m程度移流される間に100 m程度バルーンが上昇しており、上昇速度は概ね1 m/s程度であることがわかる。到達高度の違いはバルーンの浮力のわずかな違いによるものと考えられる。水平方向の軌跡を見ると、いずれのバルーンも20から50 m程度の間隔で蛇行しながら風下に流されており、時折、その向きをやや大きくかえている。原点近傍の放球地点に近い方が、蛇行波長が短く、離れるにつれて長い。これは、バルーンの上昇とともに、代表的な渦のスケールが大きくなっているためと考えられる。

図10に示したバルーンの変位の差分をとり、水平方向の風速を推定した結果を図11に示す。いずれのバルーンも高度の上昇とともに徐々に水平方向の速度が大きくなり、同程度の範囲でばらついているように見える。平均的な傾向を抽出するため、各々のバルーンの速度について、すべてのバルーンで観測された高度の区間を対象に、高さ方向に0.1 m間隔でリサンプルし、上下5 mで空間平均を施した結果を図5に示す。バルーンによる空間平均値5つのアンサンブル平均も示した。アンサンブル平均風速を見ると、高度の上昇とともに水平方向の平均風速は増加している。2つのドップラーライダーによる平均風速と比較すると、傾向は捉えているものの、0.5 m/sほどバルーンによる風速の方が小さい。今回の観測では、平均風速が2.0 m/s程度と小さく、バルーンへ働く張力の影響が無視できなかったためと考えられる。



(1) 水平面の軌跡



(2) 鉛直面の軌跡(水平方向は、東西方向)

図 10 バルーンの軌跡

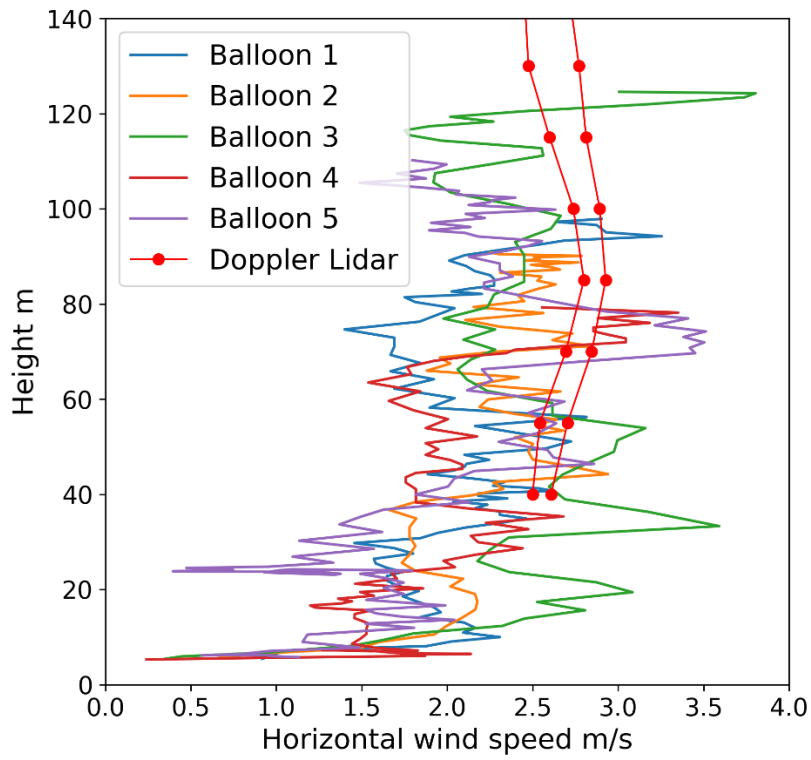


図 11 バルーンの変位より算出した水平風速

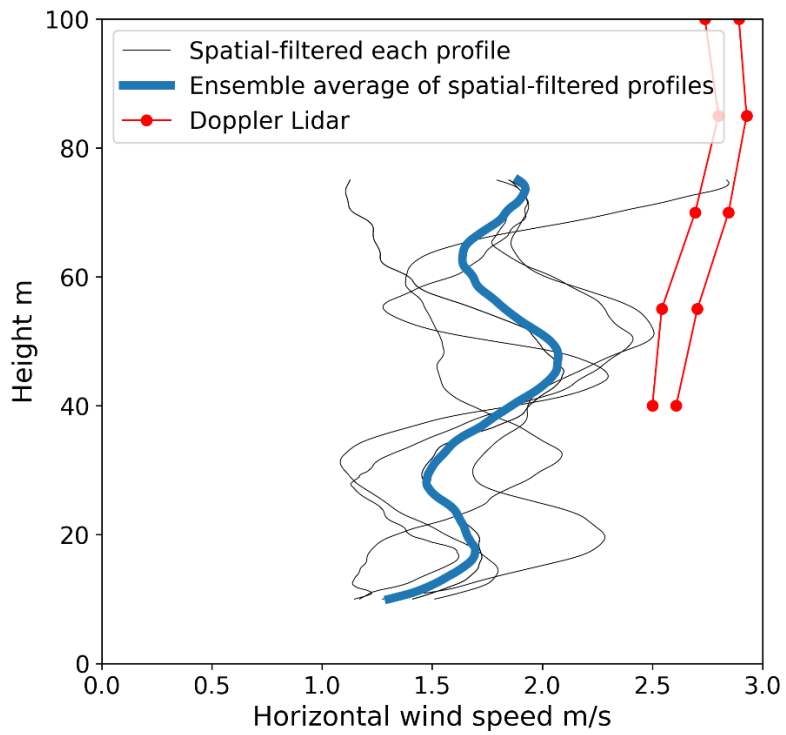


図 12 平均風速の比較

5. まとめ

GNSS 搭載バルーンの軌跡を用い、地上 100 m 程度までの大気境界層の風速の鉛直分布の算出を行った。弱風下で張力の影響はあったものの、概ねドップラーライダーと同様の傾向を得た。

1 年目は、RTK 法による衛星測位を行うための通信を行い、測位データを記録するバッテリー駆動モジュールを作成し、バルーンに組み込んだ。また、実験場所でオンデマンドに RTK 測位のための基準局を設置し、RTK 搭載バルーンに信号を送信する手順を確立した。続いて、2020 年 12 月 10 日から 11 日にかけて京都大学防災研究所潮岬風力実験所敷地内にて RTK 搭載バルーンを放球し、バルーンの飛行軌跡データを取得した。同所本館屋上に設置されている風速計のデータとの比較から、バルーンの移動速度が概ね、風速計による風速と同程度であることを確認した。

2 年目は、RTK モジュールの基準局と移動局との通信について、インターネット回線を用いない手法 (920MHz 帯による直接通信) へ変更し、RTK 搭載バルーン 5 つを周囲が開けた土地で放球し、バルーン の 5 つ飛行軌跡データをアンサンブル平均することで、平均風速の鉛直分布を推定した。実験は、2021 年 11 月 15 日～17 日にかけて鹿児島県桜島黒神地区で実施した。弱風下で係留用糸の張力の影響はあったものの、バルーンの軌跡より推定した風速は、放球地点近傍に設置したドップラーライダーと概ね同様の傾向を示していた。

本研究で開発した手法は、将来的に、降雨の衝撃力の考慮により、降雨を伴う台風時の都市上空の風速の空間分布が取得への展開も期待でき、地上の突風発生のメカニズム解明や数値モデルの精度向上など、大型化するとされている台風被害の低減に大いに寄与する。海風の空間構造の把握への展開も期待され、ヒートアイランド緩和への活用など、風工学・気象学への本研究の波及効果は極めて大きい。