

南極における気球とイリジウム衛星間の通信データの分析

加保 貴奈 (湘南工科大学), 鈴木 貴登 (湘南工科大学), 斎藤 芳隆 (宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所), 富川 喜弘 (国立極地研究所・総合研究大学院大学)

1. はじめに

気候変動の予測のため大気の流れを全球レベルでシミュレーションする研究が進められている。大気重力波は大気波動の一つで大気循環を駆動する。人工衛星からのリモートセンシングや地上からのレーダー観測, 気球による空気塊の直接観測などで大気重力波の推定が試みられている。しかしながら観測データが不足している南極域での大気重力波の不確定性が大きい[1]。また, 従来の気候モデルでは, 大気重力波の鉛直方向の伝搬はパラメータとして考慮されているが, 水平伝搬は考慮されておらず, モデルの精度を下げている要因の一つと考えられている[2,3]。水平伝搬の観測は気球による観測が適している。

LODEWAVE (LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica)は, 南極域において大気レーダーによるリモートセンシングと気球による直接観測を組合せ大気重力波による大気循環駆動の効果を3次元的に明らかにすることを目指すミッションである[4-7]。2022年1月~2月に南極昭和基地で共同観測を行った。気球に搭載した観測装置で得られた観測データはイリジウム衛星ショートバースト通信を用いて収集した。

今後もLODEWAVEは定期観測を予定しており, GPS測位に加えてイリジウム測位データを気球の安全運用に向けた冗長系として検討している。南極は全イリジウム衛星が集まるエリアであり[8], イリジウムの測位誤差や通信エラーの実力値を調べた。本報告は2022年1~2月に実施した3機のスーパープレッシャー気球(SPB)の実測値を分析した結果について述べる。

2. 通信システム, 位置情報

イリジウム衛星ショートバースト通信

LODEWAVE実験は長時間飛行かつ広いエリアでの観測のため運用コスト面から人工衛星経由での観測データ取得を実施した。イリジウム衛星通信は, 現在では音声通話に加え, ショートメールの一種であるイリジウムショート

バースト通信も可能となっており, 端末からのテレメータ通信(1メールあたり最大340 byte), 端末へのコマンド通信(1メールあたり最大270 byte)が可能である。

LODEWAVE実験の搭載装置には, 大気重力波観測のためにGPS/QZSS受信機(position製GSU-141A)およびアンテナ増幅器一体チップ(position製GSU-121B)も搭載されており, その水平位置精度は7.5 mである。本研究では, このGPSによる位置計測とイリジウム測位データとの比較を行った。GPS/QZSS受信機で判定した位置情報データはイリジウム経由でテレメトリデータとして送信し取得した。

また, イリジウム衛星も受信信号のドップラー周波数と時間遅延を分析し位置推定を行い, その結果をUnit Locationとしてショートバースト通信時にメールヘッダー部分に添付してくれるため, 2つの方法でSPBの位置情報を把握することができる。

3. 実験結果: イリジウムの位置情報誤差

期間中3機のスーパープレッシャー気球を上空16~19kmまで飛行させ, 気圧データ等を取得することができた。

図1はLODEWAVEのスーパープレッシャー気球第1~3号機が飛行した軌跡を示す。青線がGPS受信機の位置情報, 赤線がイリジウム衛星による位置情報である。イリジウム測位の位置ばらつきは相対的に大きい。イリジウム測位データとGPS/QZSS受信機の測位データの比較を行った。イリジウムでは測位誤差の見込みをCEP radius (50%の確率で入る半径)として提供しており, それが100km以上となる誤差の大きなデータを除いた。南極上空を飛行中のイリジウム衛星測位データの誤差は16~20kmとなった。表1のデータ数はイリジウムの測位データ数である。今回はGPSのデータ数はイリジウム測位データよりも少なかったため近い時刻のデータで補完した。

比較のため, 南極昭和基地および日本の群馬県で固定位置でのイリジウム衛星の測位誤差を求めた。同様にCEP radiusが100km以上の

測定値を除いた場合，南極昭和基地で 5.9km，日本の群馬県で 5.0km の誤差となった(表 1)．あくまでも平均値であり，データの分布については図 4～7 で示す．南極上空を飛行中の気球では誤差が 16～20km と，地上の固定点の誤差 5.9km に比べると大きい．また，表 1 の平均速度は水平飛行中の速度について平均した．

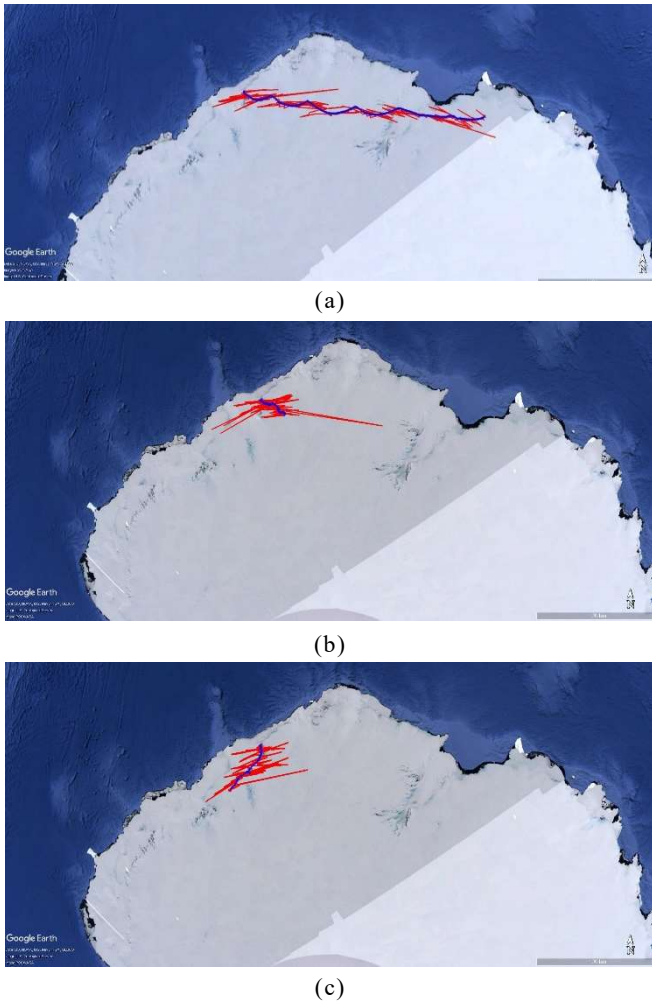


図 1 LODEWAVE 飛行実験の飛跡データ (a)1 機目, (b)2 機目, (c)3 機目, (青線 : GPS 測位, 赤線 : イリジウム測位)

表 1 実験結果サマリ

	SPB No.	Data 数 (Iridium)	Iridium 平均位置 誤差[km] CEP <100	平均 速度 [km/h]	平均 高度 [km]
南極 上空	1st	1297	20	26	18.2
	2nd	1409	16	11	18.6
	3rd	2087	19	7.9	16.8
昭和基地	All	6015	5.9	0	0.02
群馬県	All	5136	5.0	0	0.06

図 2,3 にイリジウムの CEP radius の頻度分布を示す．南極上空では CEP radius が 100km 以上になる頻度は 10% (3 機分)，南極昭和基地では 8.4%，群馬県では 5.2% となった (表 2)．南極の方が日本より 100km 以上となる頻度が高い傾向があること，かつ上空飛行中の方が CEP radius が大きめであった．

図 4 に気球飛行時の位置誤差と高度の関係を示す．上空 18km 付近のデータ数が多いなど，高度に対してのデータの偏りはあるが，相関を調べたところ 1 機目は相関係数 0.06, 2 機目は 0.35, 3 機目は 0.31 であった．相関検定 p 値は 0.028, 3.7E-25, 0 と 0.5 よりも小さく，ばらつきはあるが弱い正の相関があると思われる．

図 5 は位置誤差と気球の移動速度の関係を調べたものである．このグラフについては気球上昇中と下降中のデータは除去した．相関係数は 1～3 機でそれぞれ 0.003, 0.275, -0.115 と小さく，相関検定 p 値は 0.93, 1.2E-12, 0.006 となり，0.5 より大きな値があり，速度に対しては有意な相関が無いと考える．

図 6,7 は位置誤差と CEP radius の関係を調べた．1 機目は相関係数 0.73, 2 機目は 0.67, 3 機目は 0.45, 昭和基地では 0.5, 群馬県では 0.56, 相関検定 p 値は 1E-30 以下でほぼ 0 であり，正の相関がある．気球飛行時は直線近似を行った場合の傾きが大きく，CEP radius が 2～4km と小さい場合でも位置誤差が 20km 以上とイリジウムの推定誤差より大きな誤差になっている．逆に昭和基地や群馬県の固定点では CEP radius の方が位置誤差より大きい場合も多い．

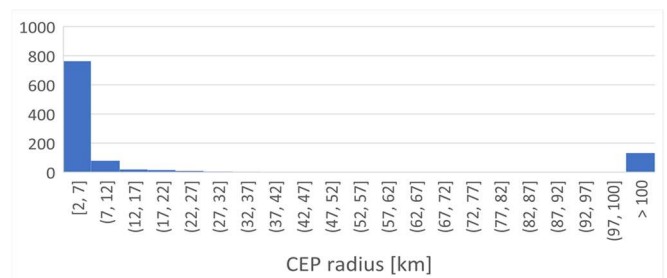


図 2 南極上空の CEP radius の頻度分布

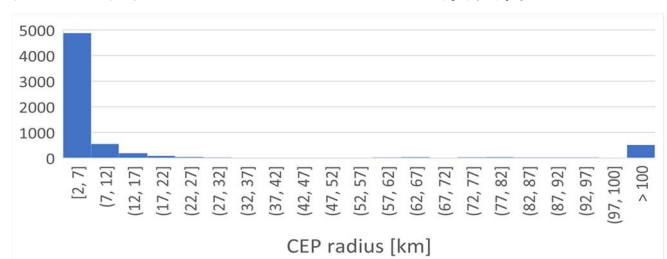
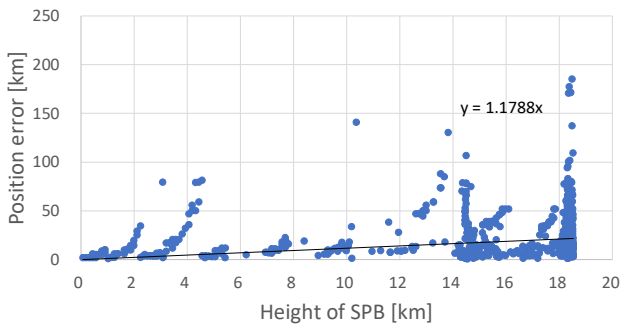


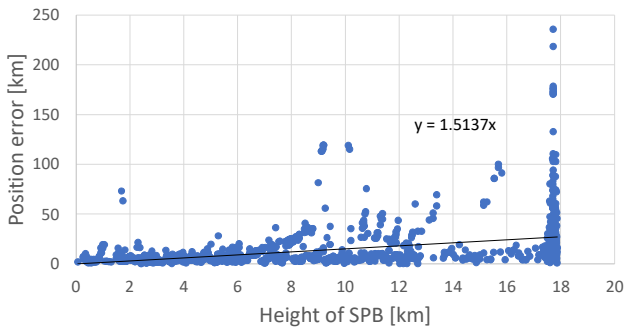
図 3 昭和基地での CEP radius の頻度分布

表 2 CEP radius 分布のまとめ

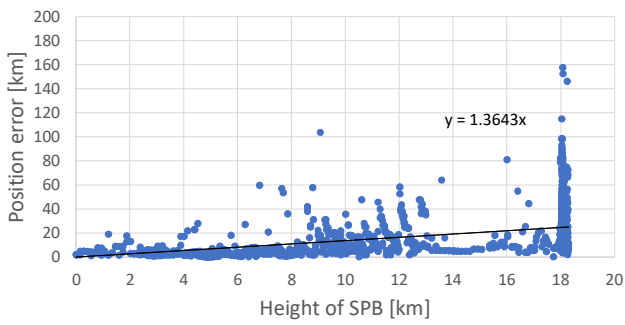
	SPB No.	Data 数 (Iridium)	CEP <7	CEP >100
南極上空	1st	1297	59%	10.2%
	2nd	1409	75%	8.7%
	3rd	2087	72%	11.6%
昭和基地	All	6015	81%	8.4%
群馬県	All	5136	76%	5.2%



(a)

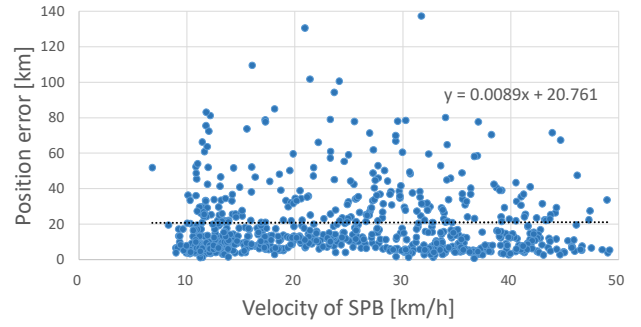


(b)

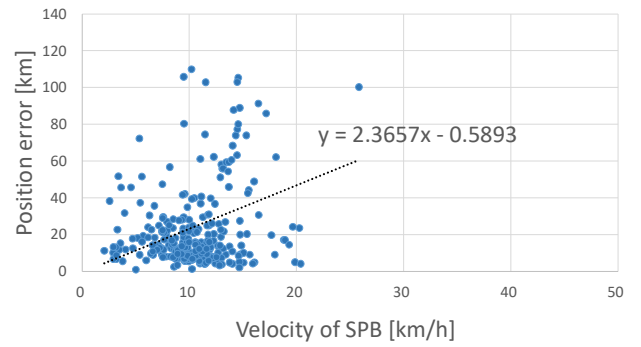


(c)

図 4 気球飛行時のイリジウム位置情報誤差と高度の関係 (a)1 機目, (b)2 機目, (c)3 機目



(a)



(b)

図 5 気球飛行時のイリジウム位置情報誤差と気球移動速度の関係 (a)1 機目, (b)2 機目

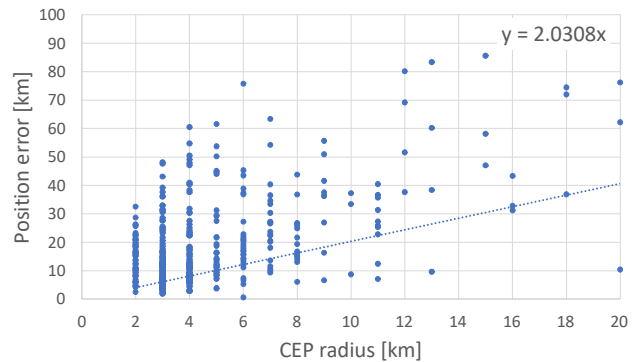


図 6 南極上空でのイリジウム位置情報誤差と CEP radius の関係, 1 機目

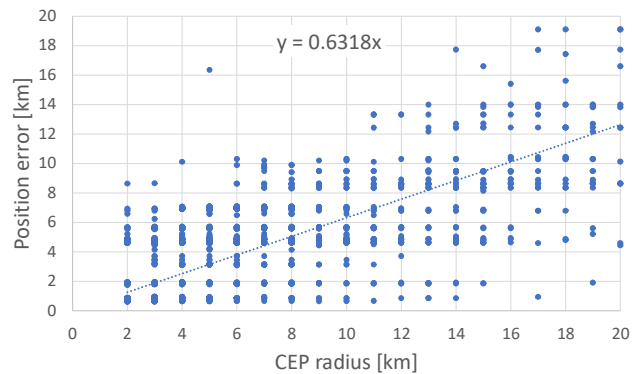


図 7 南極昭和基地でのイリジウム位置情報誤差と CEP radius の関係

相関係数と相関検定 p 値のまとめを表 3 に示す。位置誤差は、気球の高度に対しては 0.06～0.31 とばらつきは大きい p 値は 0.5 より十分小さく、正の相関があると思われる。気球の移動速度に対しては有意な相関は見られなかった。推定誤差半径 CEP radius に対しては相関係数 0.45～0.73 の正の相関があった。

表 3 相関係数まとめ

	データ 1	データ 2	相関係数	相関検定 p 値
SPB 1st	位置誤差	高度	0.06	0.028
SPB 2nd	位置誤差	高度	0.35	3.7E-25
SPB 3rd	位置誤差	高度	0.31	0
SPB 1st	位置誤差	移動速度	0.003	0.93
SPB 2nd	位置誤差	移動速度	0.275	1.2E-12
SPB 3rd	位置誤差	移動速度	-0.115	0.006
SPB 1st	位置誤差	CEP radius	0.73	0
SPB 2nd	位置誤差	CEP radius	0.67	0
SPB 3rd	位置誤差	CEP radius	0.45	0
昭和基地	位置誤差	CEP radius	0.50	0
群馬県	位置誤差	CEP radius	0.56	0

4. 実験結果：通信エラー率

イリジウム衛星と気球間の通信エラーについても調べた。気球側からイリジウム衛星へ送信して Fail となった割合は、1 機目で 26 回 (515 回中)、2 機目で 8 回 (269 回中)、3 機目で 3 回 (194 回中) であった。エラー率としては 5%、3%、1.5% となった。このエラー率が一般的であるかどうかは今後検証したい。

5. おわりに

国内初となるスーパープレッシャー気球を南極の昭和基地より飛翔させ、搭載された気圧計、GPS 受信機のデータをイリジウムショート

バースト通信によって取得し大気重力波観測を行う LODEWAVE 実験を実施した。本報告はイリジウム衛星測位による位置情報の誤差の分析について報告した。今回の実験データでは南極上空での 3 機の気球の飛行中のイリジウム衛星測位による位置誤差は 16～20km であり、地上での固定測定時の誤差 5～6km と比べて大きかった。位置誤差は、気球の高度とイリジウム提供の推定誤差半径 CEP radius に対しては正の相関があった。一方、気球の移動速度に対しては有意な相関は見られなかった。気球からイリジウム衛星に対しての送信時の通信エラー率は 1.5～5% であった。

今後、異なる高度の気球のイリジウム通信データについても比較を行う予定である。

謝 辞

昭和基地での実験にご協力頂きました第 63 次南極地域観測隊 (JARE63) のメンバーに深く感謝致します。また、この研究は情報・システム研究機構の ROIS-DS-JOINT (No. 004RP2022) の支援を受けています。

文 献

- [1] Geller, M. A., et al., “A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models,” J. Climate, 26, 6383–6405, 2013.
- [2] Butchart, N., et al., “Multimodel climate and variability of the stratosphere,” J. Geophys. Res., 116, D05102, 2011.
- [3] McLandress, C., et al., “Is missing orographic gravity wave drag near 60°S the case of the stratospheric zonal winds biases in chemistry–climate models?,” J. Atmos. Sci., 69, 802–818, 2012.
- [4] 富川喜弘, 他, “南極域における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画 (LODEWAVE: LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica), ” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-20-009, 19-33, 2021.
- [5] Sato, K., et al., “Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY),” J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 118, 2–15, 2014.
- [6] 斎藤芳隆, 他, “LODEWAVE 実験にむけたスーパープレッシャー気球の開発(I), ” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-20-009, 35-36, 2021.
- [7] 加保貴奈, 他, “イリジウム衛星ショートバースト通信を用いた南極上空の通信実験,” 信学技報, vol. 122, no. 44, SAT2022-8, pp. 34-39, 2022 年 5 月.
- [8] “「イリジウム高度化システム」の検討状況について”, 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 衛星通信システム委員会作業班 (第 11 回) https://www.soumu.go.jp/main_content/000530537.pdf