

イリジウム衛星測位情報の時間変動を用いた気球の位置推定の検討

加保 貴奈 (湘南工科大学), 戸田 遥汰 (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), 山谷 昌大 (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

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 LODEWAVE (LONg-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica) のミッションに取り組んでいる[1-6]. 2022年1月~2月に南極昭和基地で共同観測を行った. また JAXA 大気球実験グループは大型で 40km 以上の高高度に到達できる気球を開発運用しており, オーストラリアでガンマ線観測などの様々な観測を行っている[7]. 今後もこれらの気球観測を予定している.

著者らは GPS 測位に加えてイリジウム衛星が提供する測位データを気球の安全運用に向けた冗長系に適応することを検討している. これまでのデータ分析で高高度の気球はイリジウムの位置情報の誤差が大きいことが分かった[5,6]. 本報告ではイリジウム衛星の測位情報の時間変動をもとに, 気球の位置推定の誤差を低減する方法について提案する.

2. イリジウム衛星と GPS の利用

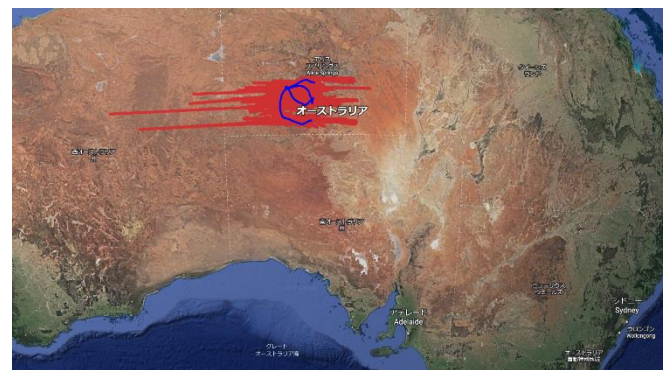
南極およびオーストラリアでの気球実験では, イリジウム衛星ショートバースト通信をテレメトリや観測データ取得用の通信に利用している. この通信は IoT 向けのメールベースの通信システムで, 端末からの通信(1メールあたり最大 340 byte), 端末へのコマンド通信(1メールあたり最大 270 byte)が可能である.

上述の気球実験では GPS 受信機も搭載しており, 水平位置と高度情報を GPS で得ることができる.

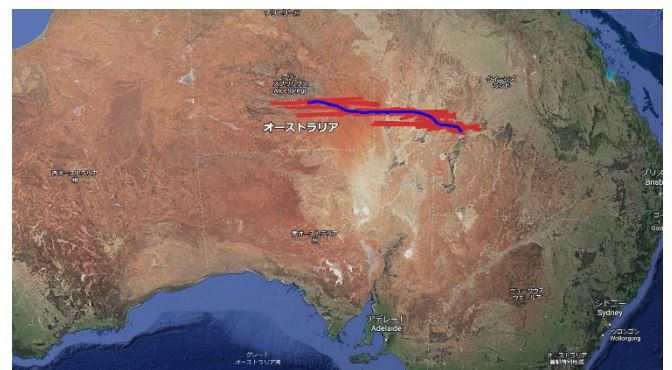
一方, イリジウムは基地局側でドップラー周波数と時間遅延を分析した位置推定を行い, その結果を Unit Location としてメールで提供するため[8], 気球の位置情報把握の冗長系として使うことができる. ただし複数衛星を用いる GPS に比べるとイリジウム測位の位置情報の誤差は大きい. また緯度・経度情報のみで高度情報は提供されない.

3. イリジウムの位置情報誤差

図1は2018年にJAXAが実施した大気球実験で, 合計2機をオーストラリア上空約40kmで飛行させた気球の軌跡を示す. 青線がGPS受信機の位置情報, 赤線がイリジウム衛星側で判定した位置情報である. イリジウム提供の測位データをGPS受信機の測位データが正しいとして誤差を調べた. イリジウム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て算出した測位誤差の平均値は41kmであった[6]. 同様の手法で分析した南極上空での位置誤差は16~20kmであったため, 南極に比べてオーストラリアでの誤差はかなり大きかった. 緯度が異なるなどの可能性もあるが, イリジウム衛星測位では高度が上がると誤差が大きくなると推定している.



(a)



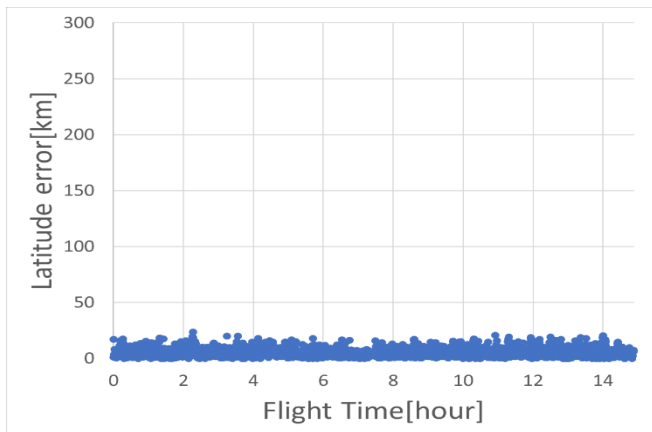
(b)

図1 オーストラリア上空の飛跡データ
(a)1機目: B18-02実験, (b)2機目: B18-03実験
(青: GPS測位, 赤: イリジウム衛星測位)

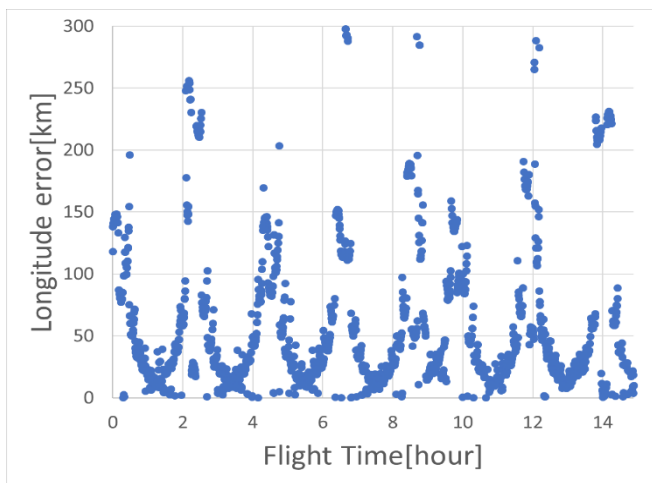
図2はオーストラリア上空飛行時の緯度方向と経度方向を分けた位置誤差と気球の飛行時間（水平飛行となった時刻を0とし、それからの時間）の関係性を調べたものである。気球上昇中と下降中のデータは除外した。

緯度方向の誤差は、経度方向より誤差が小さい。これは、イリジウム衛星の軌道が極軌道であり、ドップラーシフトによって位置を求めているためと考えられる。また、経度誤差には2時間程度の周期性があるのが分かる。イリジウム衛星は極軌道で30度ずつ異なる6つの軌道面に配置されていることを反映していると考えられる。

この周期性はイリジウムから提供されるCEP情報からも推測できるため(図3), CEP情報をもとに約2時間の周期を調べることで、オーストラリア実験時の経度方向の誤差を20km以下程度にできる。



(a)緯度誤差の時間変化



(b)経度誤差の時間変化

図2 オーストラリア上空飛行時のイリジウム緯度経度誤差の時間変化 (B18-02実験)

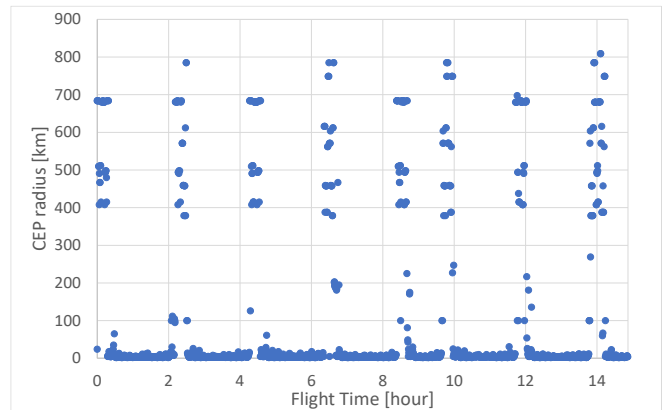
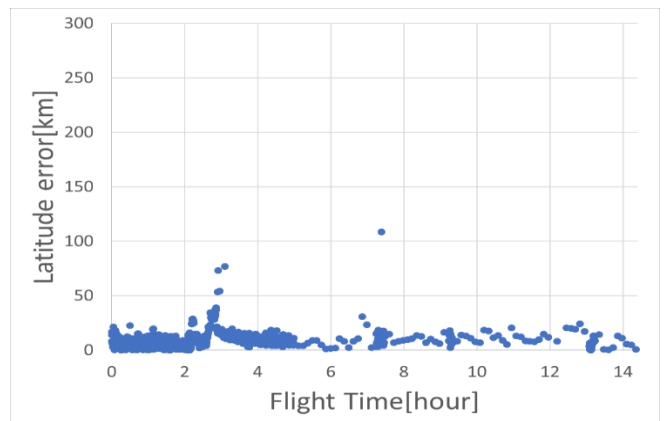
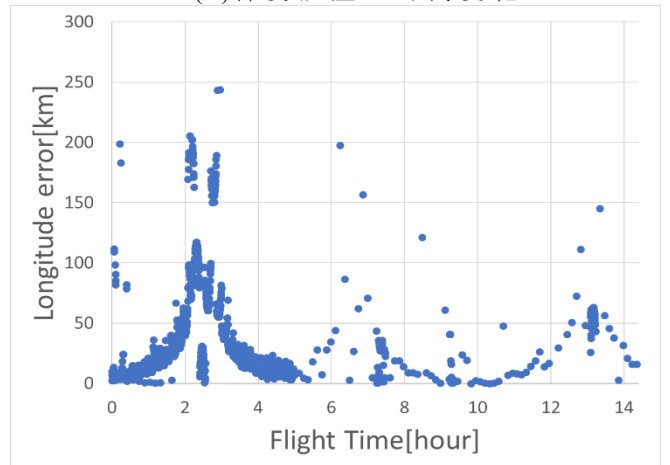


図3 オーストラリア上空飛行時のイリジウム測位の CEP 半径の時間変化 (B18-02実験)

一方、図4は南極上空での緯度方向と経度方向の位置誤差を示している。オーストラリア上空と異なり約2時間の周期性は見られない。南極は全てのイリジウム衛星の軌道が交差するエリアであり同時刻帯に3つ以上の軌道の衛星で測位する可能性がある。また衛星間の干渉や運用の影響も受けている可能性がある[9].



(a)緯度誤差の時間変化



(b)経度誤差の時間変化

図4 南極上空飛行時のイリジウム緯度経度誤差の時間変化 (2022年南極実験3機目)

4. イリジウム測位誤差の低減方法の検討

オーストラリア実験の1機目の気球の経度の時間変化を図5に示す. 赤がイリジウム測位, 青がGPS測位となっている. 図2, 図3で予測されるイリジウム測位誤差が小さい時間帯においても経度方向にギャップが生じていることが分かる. 緯度方向にはこのようなギャップは生じていなかった. 比較として日本の神奈川県にある湘南工科大学の屋上でイリジウム測位実験を行った際の経度方向の情報を図6に示すが, こちらにはギャップは生じていない. よって, オーストラリアの上空約40kmを飛行する気球には, 高度が高いことで経度ギャップが生じたと推定している.

この経度方向のギャップが高度によって生じると仮定して考察する. 図7に示すように, オーストラリア中心部を飛行する気球から見て東側の軌道の衛星で測位する場合と西側の軌道の衛星で測位する場合がほぼ同時刻帯にも生じる可能性がある. イリジウム測位は高度情報を提供していないため, 端末が地上にあると仮定しているとする. 図8で示すように, 東側の衛星から方向を推定した場合は本来の位置から西にずれ, 西側の衛星から方向を推定した場合には東にずれる場合などに, このようなギャップが生じると考えられる. 逆に, 方位ではなく信号遅延量から計算した距離の寄与が大きい場合は, 東側の衛星の測位データが東にずれる可能性もある. どの衛星で測位したかの情報は提供されおらず, 正確な判断は難しいが, このギャップは気球の高度に相関すると推測できる. よって, イリジウム衛星で2時間以上観測し, この経度ギャップを測定すれば, ギャップ幅から気球の高度を推定できる可能性がある.

オーストラリアでの2機の気球観測データを分析し, 経度のギャップ幅を距離に換算し, その時の気球高度と対応させた結果を図9に示す. 直線近似では $y=0.59x$, $y=0.55x$ となった.

一方, 南極ではさほど大きなギャップが生じていなかった. おそらくこの経度方向ギャップは緯度にも依存すると考

えられるので, 同程度の緯度で飛行実験を行う場合の粗い高度推定に有効であると考えている.

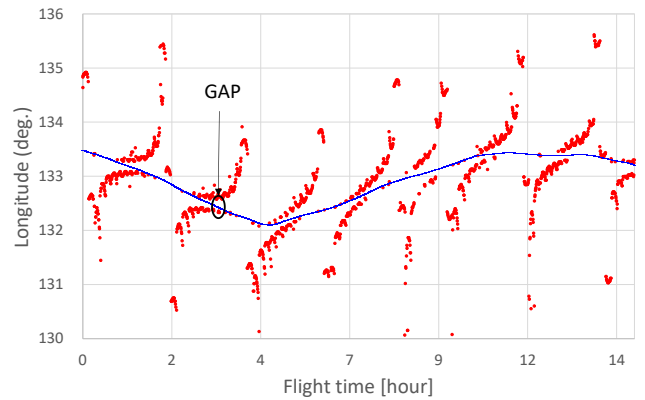


図5 オーストラリア上空飛行時のイリジウム測位の緯度の時間変化 (B18-02 実験) (青: GPS 測位, 赤: イリジウム衛星測位)

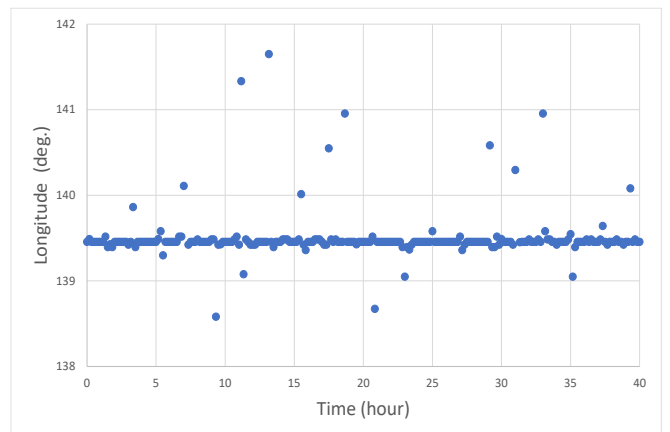


図6 湘南工科大学の屋上(ビル5階相当)でのイリジウム測位の経度の時間変化

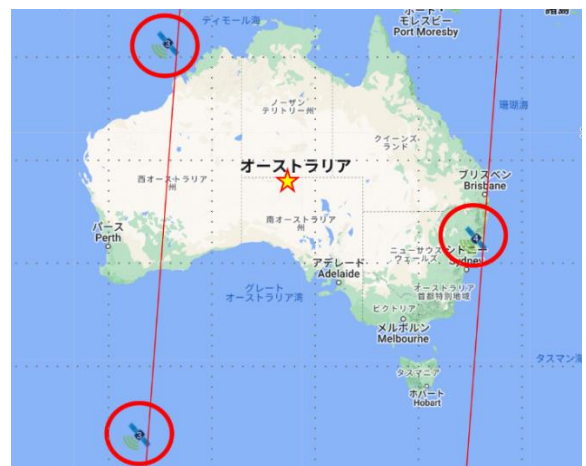


図7 オーストラリア付近のイリジウム衛星の位置の一例

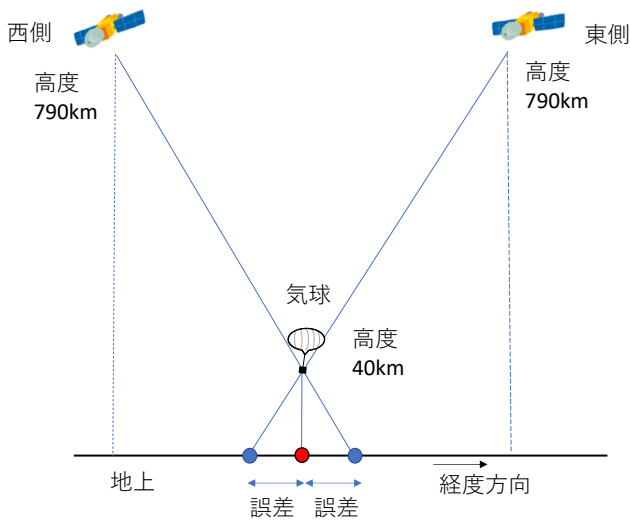


図 8 経度方向において、位置情報にギャップが生じる原因の推定（仮説）

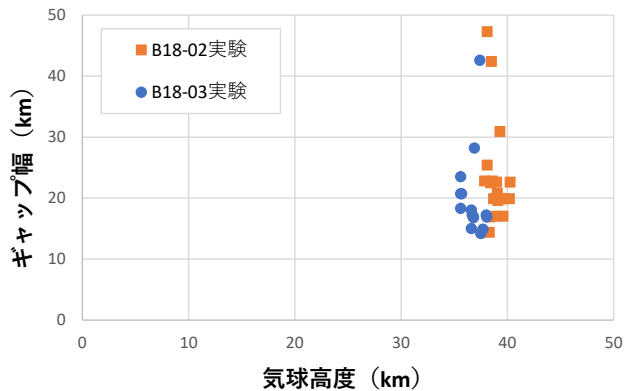


図 9 経度方向のギャップ幅と気球高度の関係（1機目：B18-02 実験，2機目：B18-03 実験）

5. おわりに

オーストラリアおよび南極での気球実験におけるイリジウム衛星測位データを分析した。特にオーストラリアでは約2時間周期の経度方向の誤差の変動があり、その特性を CEP 半径や経度変化をもとに判定することで経度方向の誤差を低減できることが分かった。さらに、経度方向の時間変化を調べたところ同時刻帯域に経度情報のギャップが生じていることが分かった。地上実験ではこの経度方向のギャップは生じていないため、気球高度が約40kmと高いことにより生じたと推定している。そこで本論文では2時間程度のイリジウム衛星での測位を行いこのギャップを測定することで、気球の高度を簡易推定する方法を提案し、その簡易換算式を示した。

ギャップの原因についてはまだ調査が不十分なため、今後、他の気球実験の測位データについても分析を行う予定である。

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）のメンバーおよび実験データを提供頂いた JAXA 大気球実験グループ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）の支援を得ました。

文 献

- [1] 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.
- [2] Y. Tomikawa, et al. “LODEWAVE (LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica),” J. Evol. Space Activ., 1, 14, 2023.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jesa/1/0/1_14/article/-char/en
- [3] K. Sato, et al., “Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY),” J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 118, 2–15, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 鈴木貴登, 他, “気球実験におけるイリジウム測位誤差の高度・場所依存性の評価,” 信学技報, vol. 122, no. 409, SAT2022-61, pp. 34-39, 2023年3月.
- [7] <https://www.isas.jaxa.jp/topics/003316.html>
- [8] D. Meldrum, “Iridium location quality: Is it good enough for drifters?” Proc. Data Buoy Cooperative Panel Scientific and Technical Workshop, Jeju, South Korea, 2007.
- [9] “「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