

南極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）の現況

LODEWAVE（Long-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica）グループ

富川喜弘^{1,2}、佐藤薫³、斎藤芳隆⁴、村田功⁵、
平沢尚彦^{1,2}、高麗正史³、中篠恭一⁶、秋田大輔⁷、
松尾卓摩⁸、藤原正智⁹、吉田理人²

¹ 国立極地研究所、² 総合研究大学院大学、³ 東京大学、
⁴ 宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所、⁵ 東北大学、
⁶ 東海大学、⁷ 東京工業大学、⁸ 明治大学、⁹ 北海道大学

大気重力波の特徴と求められる観測

- 運動量輸送を通じて背景風を変化させ、子午面循環を駆動

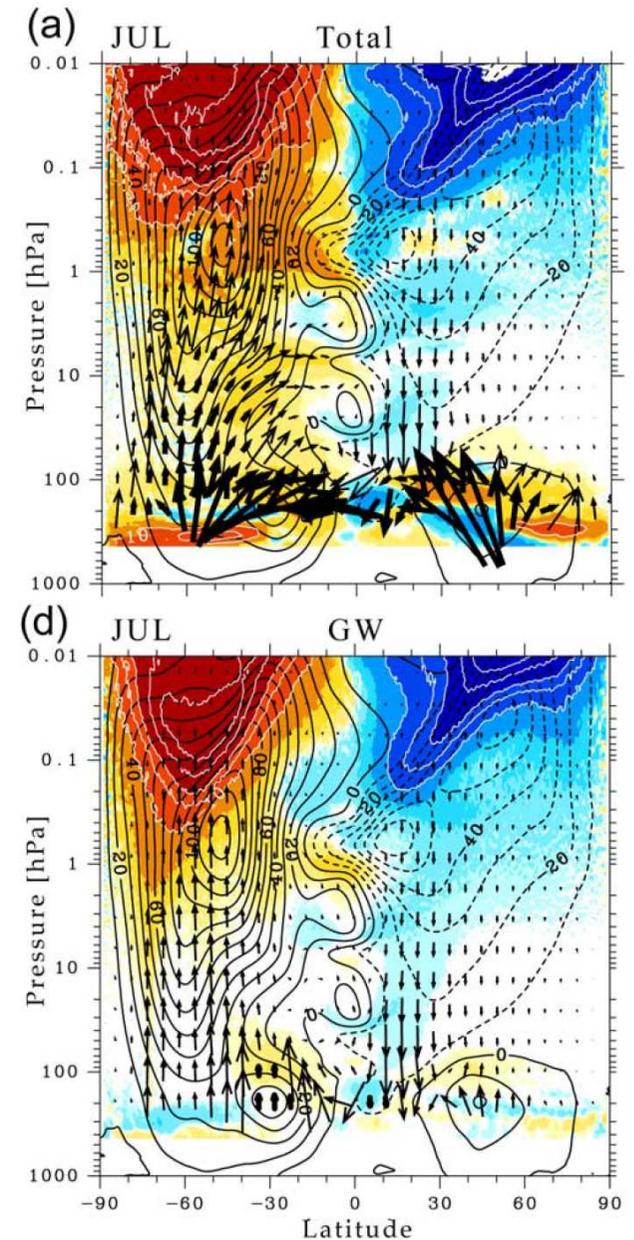
→運動量輸送の観測

- 幅広い時空間スケール
(λ_H : 数km~数千km、 T : 5分~数十時間)

→全周期帯・波長帯をカバーする観測

- 高い間欠性とそれに伴う重力波効果の高度依存性

→平均的描像だけでなく、時空間的非一様性を捉える観測

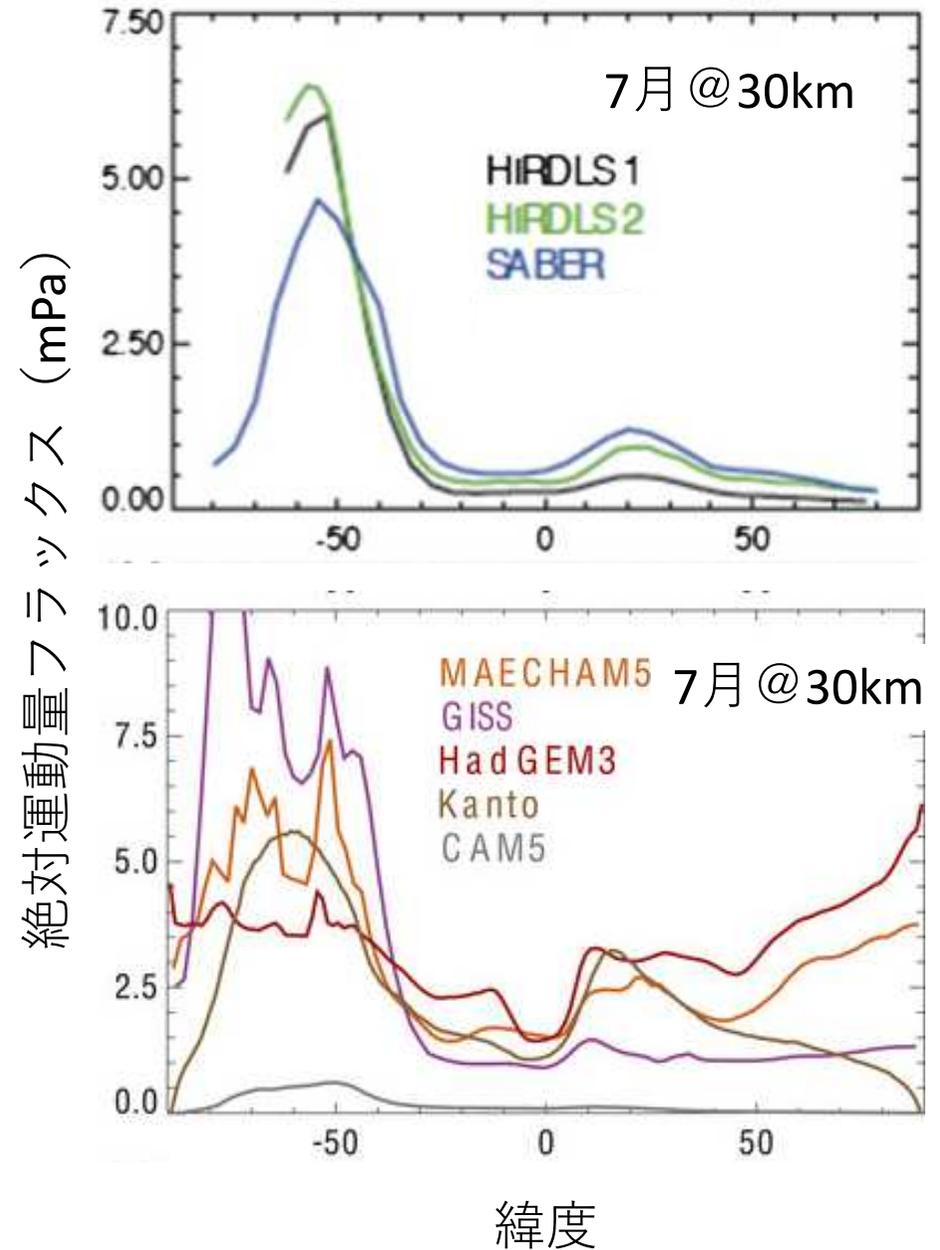


Watanabe et al. [2008]

南極の大気重力波観測の重要性

- 冬季にホットスポットがあり、世界で最も活発
- 衛星観測では全周波数帯の重力波を捉えられない
- モデル間で重力波効果の不確か性大（←重力波パラメタリゼーションの非現実的な仮定）

⇒南極で全周期帯の重力波を捉える観測が必要

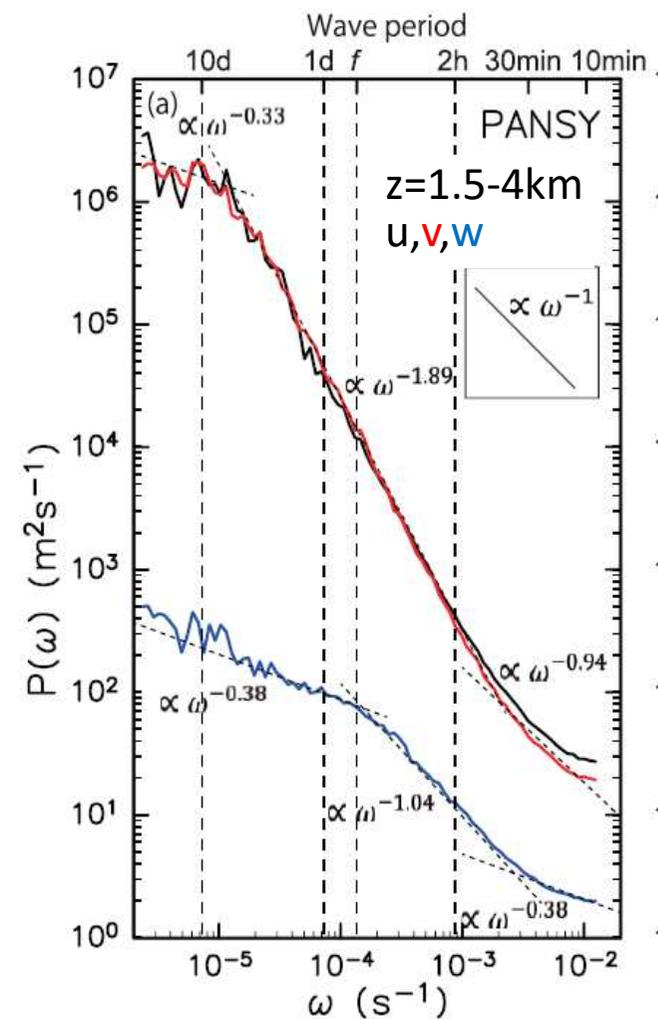


Geller et al. (2013)

全周期帯の重力波観測：PANSY

南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY）

対流圏・下部成層圏の高時間・高鉛直分解能な3次元風速観測により、重力波の全周期帯をカバーし、かつ運動量フラックスを直接推定



Minamihara et al. [2016]

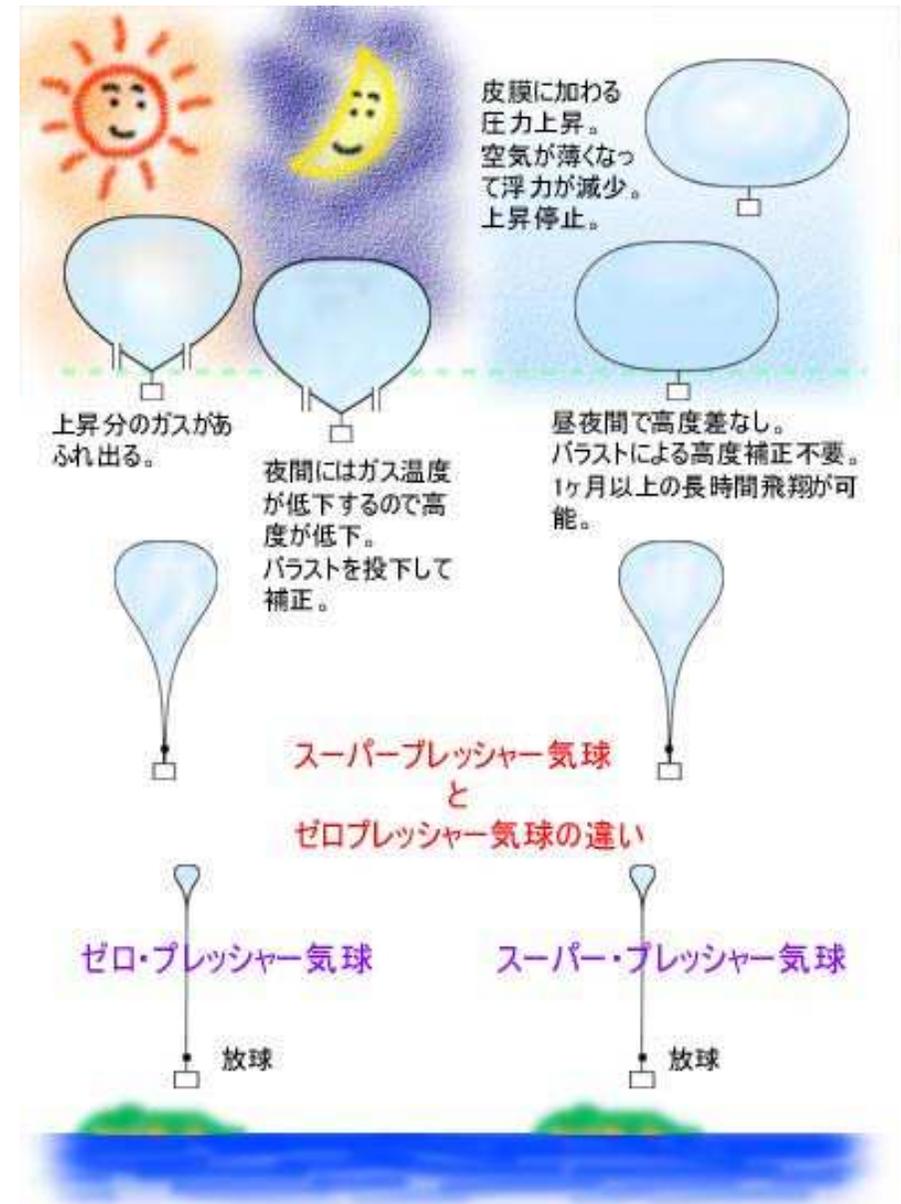
スーパープレッシャー気球

ゼロプレッシャー気球

- 内圧と外圧が同じ
- 底に排気口があり、昼に膨張して排気
- 飛揚時間はバラスト量に依存

スーパープレッシャー (SP) 気球

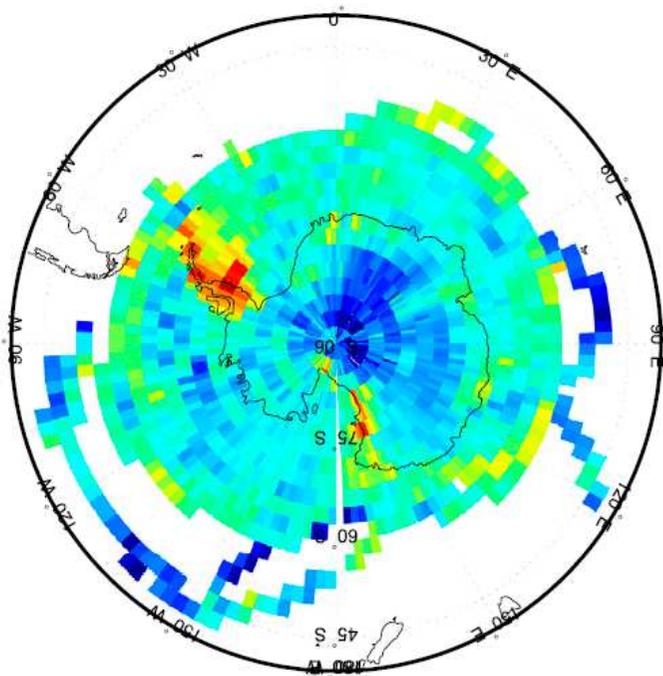
- 内外の差圧があり、昼夜を通じて一定浮力で等密度面を飛揚
- 排気口なし
- 排気しないので長時間飛行が可能



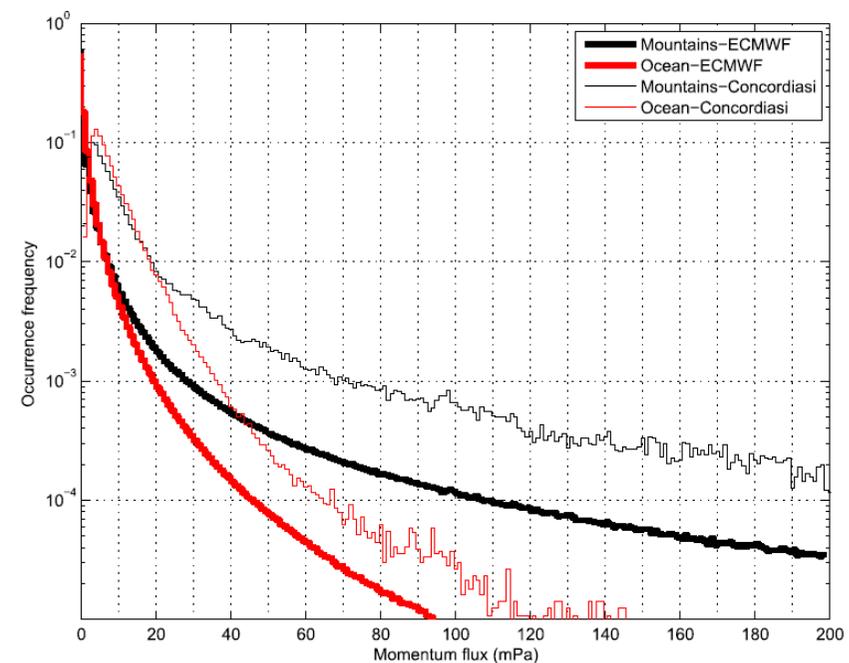
全周期帯の重力波観測：SP気球

スーパープレッシャー（SP）気球観測

一定の密度面を1か月以上の長期にわたって浮遊し、水平風速・気温・**気圧**を30秒間隔で観測することで、重力波の全周期帯をカバーし、かつ**運動量フラックス**の水平分布を取得可能



Concordiasiで得られた運動量フラックス
[Jewtoukoff et al., 2015]

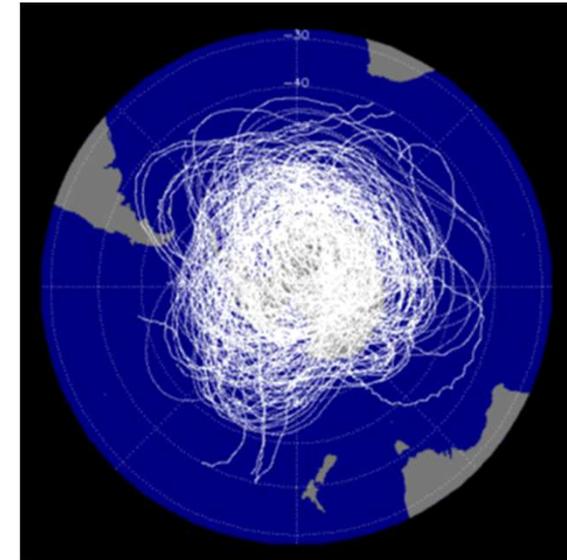


運動量フラックスの確率密度分布
[Jewtoukoff et al., 2015]

南極での重力波のSP気球観測

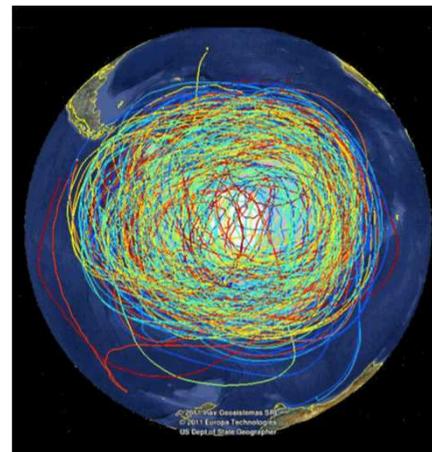
Vorcore@McMurdo

- ✓ Sep. 2005 – Feb. 2006
- ✓ 27 balloons @60 & 80 hPa
- ✓ Observe in-situ u,v,T,P **every 15min**



Concordiasi@McMurdo

- ✓ Sep. 2010 - Jan. 2011
- ✓ 19 balloons @60 hPa
- ✓ Observe in-situ u,v,T,P **every 30s**
- ✓ Driftsonde, ozone, aerosol



運動量フラックスの3次元分布の推定

- SP気球およびPANSYの観測データを用いて、
 - 運動量フラックスの水平分布と高度時間断面
 - 全周期帯の重力波のエネルギースペクトルを取得
- ERA5の低周波域のスペクトルの3次元分布を取得し、SP気球とPANSYの結果に基づき補正
- SP気球とPANSYの観測および重力波のスペクトル理論に基づき全周波数帯のスペクトル形状を仮定
- 上記を組みあわせ、南極域の運動量フラックスの3次元分布を推定

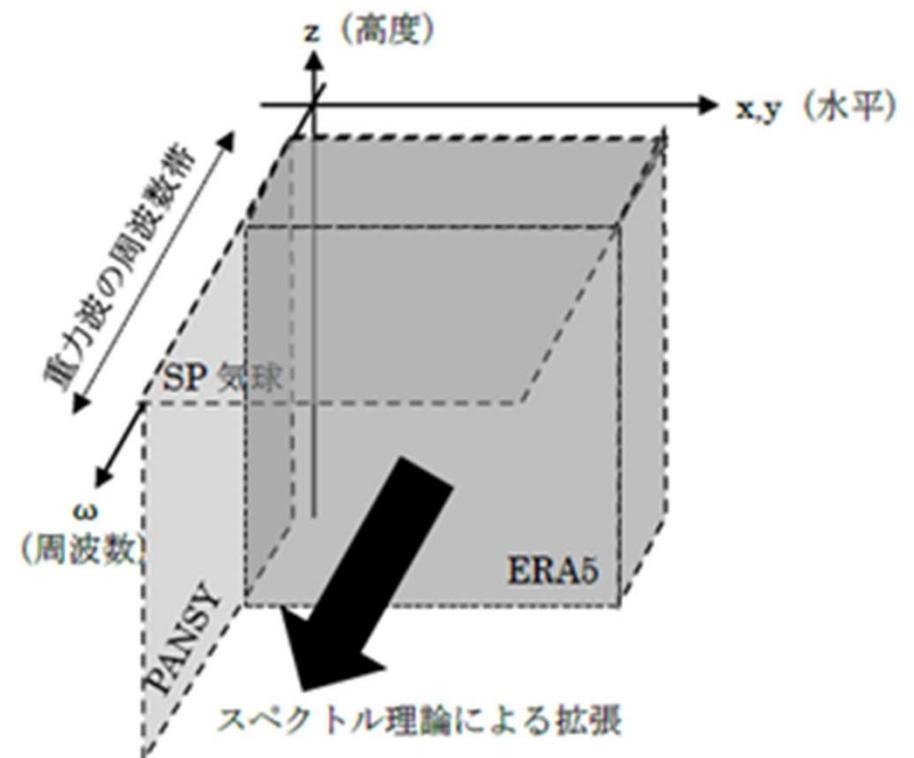


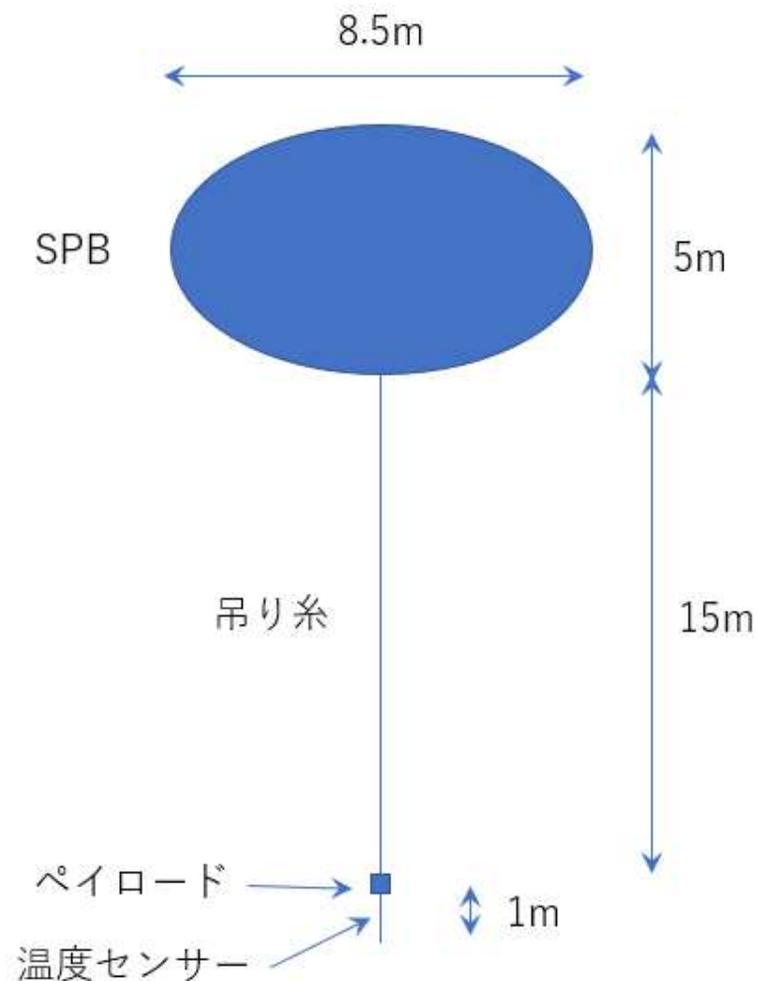
図1：重力波効果の3次元構造推定のイメージ。
陰影はそれぞれのデータがカバーする領域・周波数帯。

本計画の目的

- 南極での**SP**気球観測により、全周期帯の重力波による運動量フラックス、エネルギーなど力学特性の水平分布を取得
- **SP**気球と**PANSY**レーダーの協同観測に、高分解能な気象再解析データと重力波のスペクトル理論を組み合わせ、重力波の運動量フラックスの**3次元分布**を推定
- **SP**気球の気球内外圧力差を測定し、気密性能を検証
- 将来的に、**SP**気球観測データの準リアルタイムの通報により、南極域（+中緯度域）の短期数値予報の改善に貢献
- ペイロードの軽量化、**SP**気球の小型化、取り扱いの簡便化により、将来的な南極での定常的な**SP**気球観測体制の構築

南極域における大気重力波のSP気球観測計画 (LODEWAVE)

- 第63次南極観測隊夏隊により、2021年12月～2022年1月に昭和基地で3回の放球を計画
- 飛揚高度は高度19km (65hPa) を予定 (PANSYが観測可能かつ航空法の制約が緩和)
- 最長30日超の飛揚を想定
- ペイロードは3kg以内とし、ICAO (国際民間航空機関) の軽気球に分類



SP気球の準備状況①

必要条件

- 昼夜の圧力差に耐える耐圧性
- 長時間飛揚を可能にする気密性

気球に網をかぶせることで耐圧性能の向上を、中にゴム気球を入れた二重膜構造とすることで気密性能の向上を実現

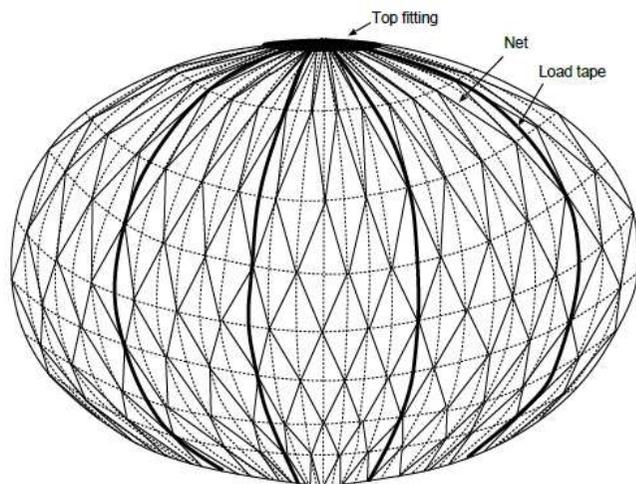


図 5: 網をかぶせた気球の構造。

齋藤他 [2017]

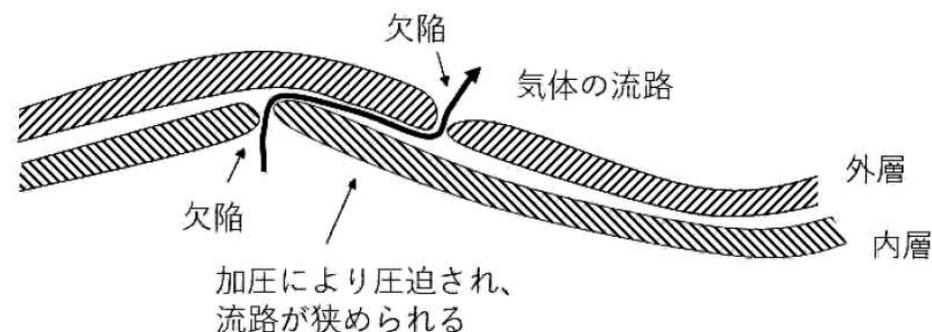


図 1: 皮膜の二層化による気密性向上の原理。

齋藤他 [2020]

SP気球の準備状況②

2021年2月：ガス充填訓練@観測倉庫

2021年3月：気密・耐圧試験@大樹町

2021年5月：気密・耐圧試験@藤倉航装

2021年7月：気密・耐圧試験@藤倉航装

2021年9月：ガス充填・立ち上げ訓練@観測倉庫

2021年10月：ガス充填・放球訓練@小野町体育館

→体積180m³気球が要求仕様
(2400Pa、240時間)を満たす
ことを確認



ICAO

(International Civil Aviation Organization)

ペイロード重量3kg以下の軽気球はATCトランスポンダーの搭載が必要ない

CHARACTERISTICS		PAYLOAD MASS (kilogrammes)					
		1	2	3	4	5	6 or more
ROPE or OTHER SUSPENSION 230 Newtons or MORE		HEAVY					
INDIVIDUAL PAYLOAD PACKAGE	AREA DENSITY more than 13 g/cm ²						
AREA DENSITY CALCULATION $\frac{\text{MASS (g)}}{\text{Area of smallest surface (cm}^2\text{)}}$		LIGHT		MEDIUM			
AREA DENSITY less than 13 g/cm ²							
COMBINED MASS (if Suspension OR Area density OR Mass of individual package are not factors)							

Figure A4-1. Classification of unmanned free balloons

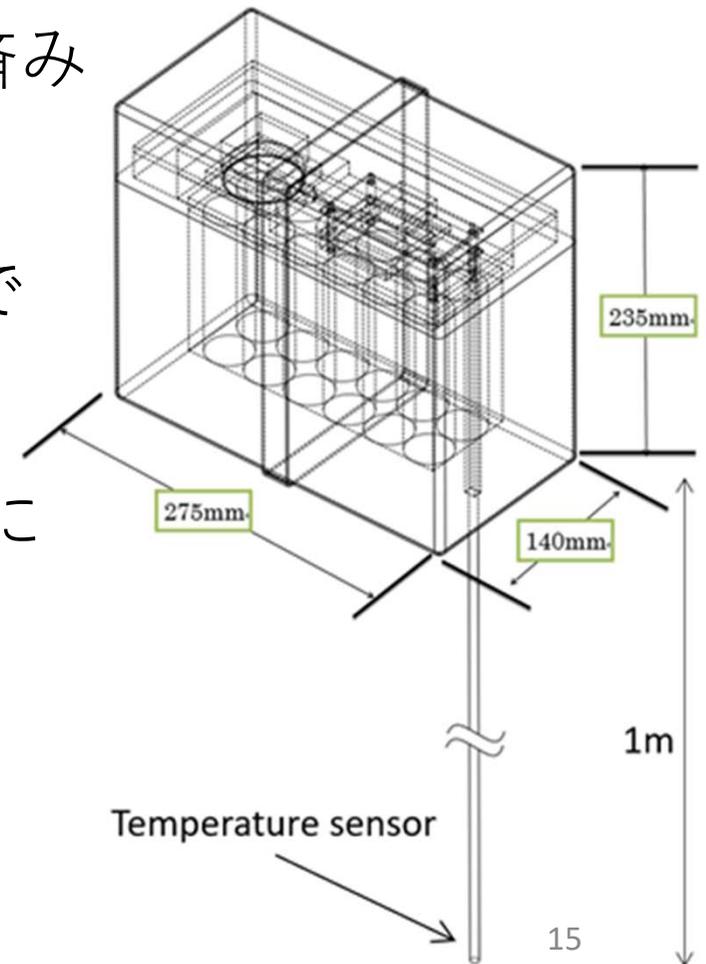
ADS-B outの搭載

- 指定波長の電波の送信により、自身の位置情報を周辺の航空機に知らせる機能のみを持つ機器で、数百g以下程度
- 2019年のATCMにおいて、南極で視界外飛行を行うすべての無人機にADS-B out systemの搭載を求める提案が出され、議論中
→搭載したシステムを開発
- 日本国内ではADS-B搭載に必要な航空機IDが発行されず、豪州での取得を目指したが取得できず
⇒COMNAPと相談し、NOTAMの発出のみでOKとなった



搭載装置の準備状況

- PANSYレーダーと同程度の重力波検出および運動量フラックスの推定に必要な要求精度（気圧・気温は30秒平均値）
気圧：5Pa、気温：0.3K、水平位置：10m
→これらを実現するセンサーを選定済み
- システムはCPUを搭載したデータ収集・処理ボードと通信を行うベースボードで構成
- データ送信はイリジウムSBDで7.5/10分に1回、コマンドの受信もイリジウムSBD経由で行う
- 重量は2800g

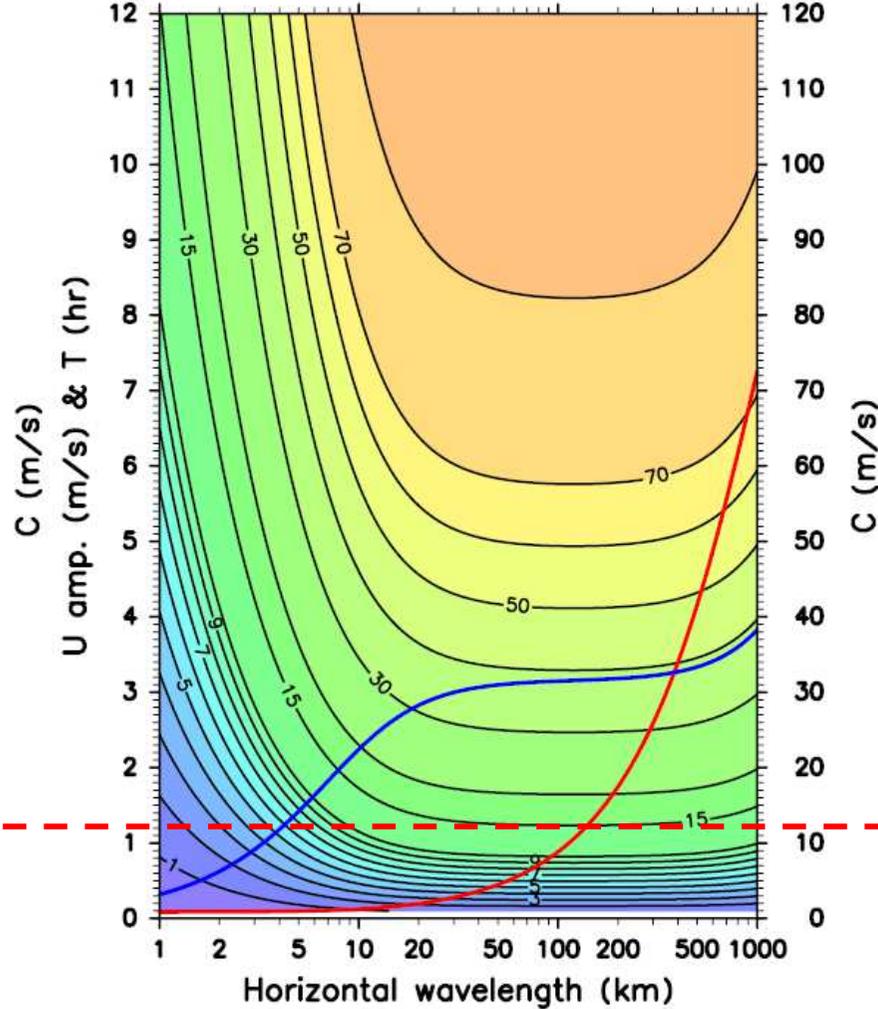
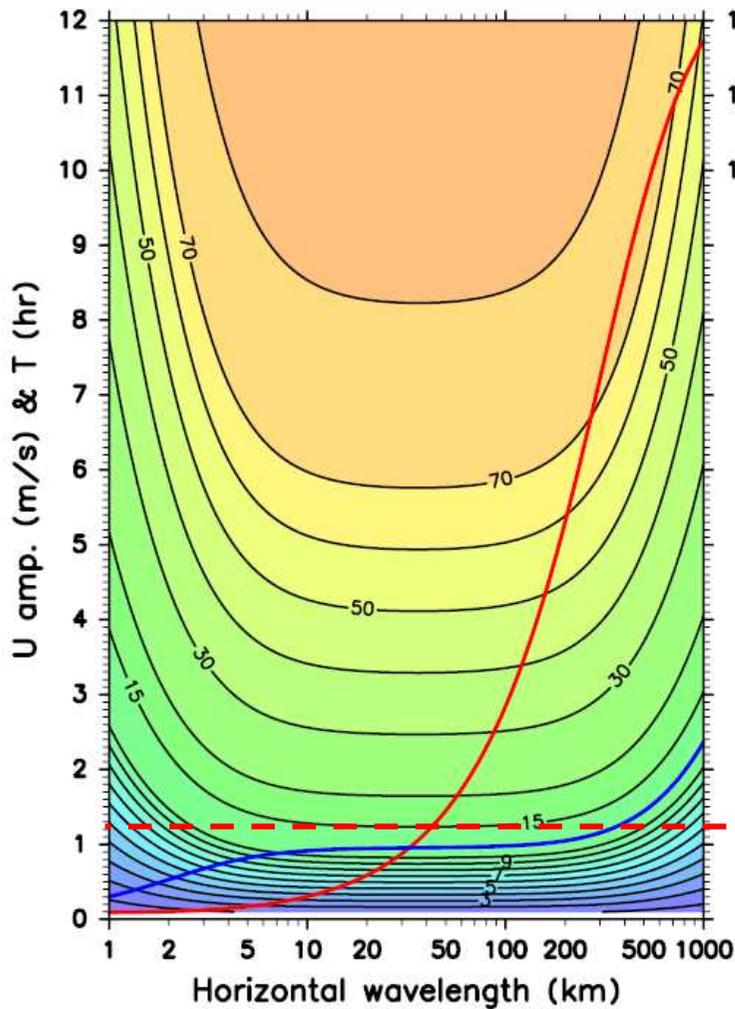


気圧擾乱の振幅

$$p'_l = \left(\frac{1}{2} + imH \right) \bar{\rho} \hat{c} \left(1 - \frac{f^2}{\hat{\omega}^2} \right) u'_{\parallel}$$

P amp. (Pa) for Lz= 3 (km)

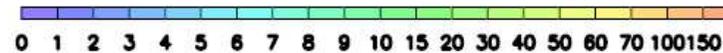
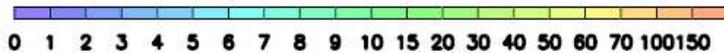
P amp. (Pa) for Lz= 10 (km)



Red: $\frac{2\pi}{\hat{\omega}}$

Blue: \hat{c}

→ ~15 Pa



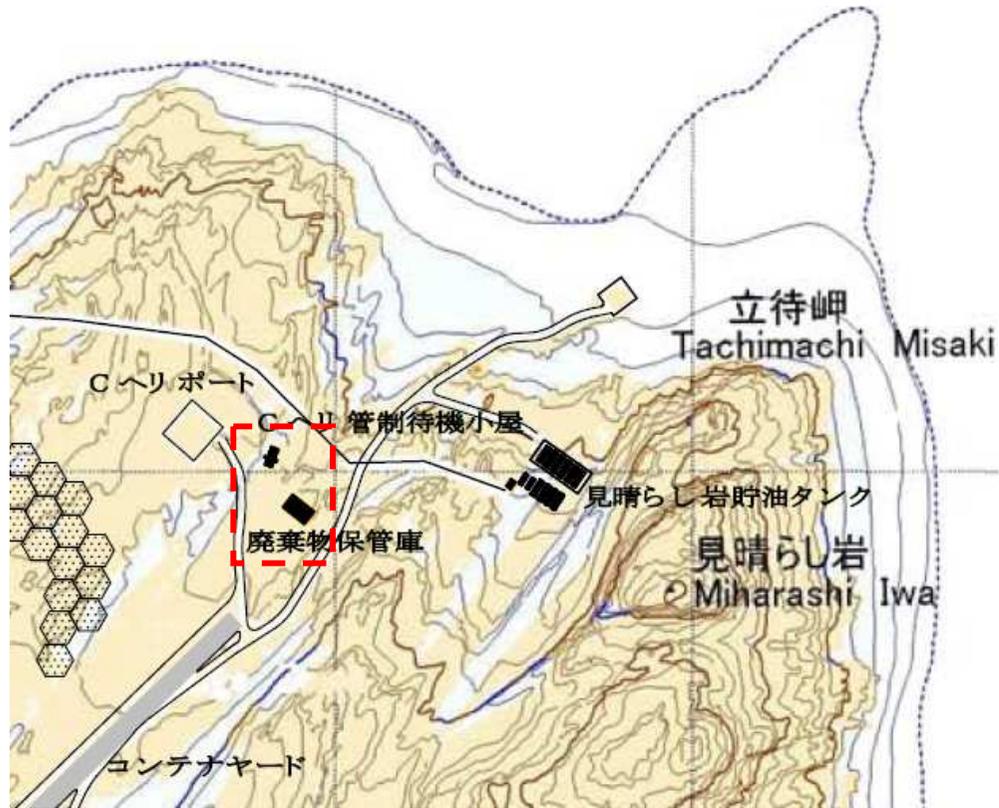
データ・コマンドの送受信

Iridium SBD module (SBD-BASE-2011 developed by JAXA/ISAS and provided by Embedded Technology Co., Ltd.)

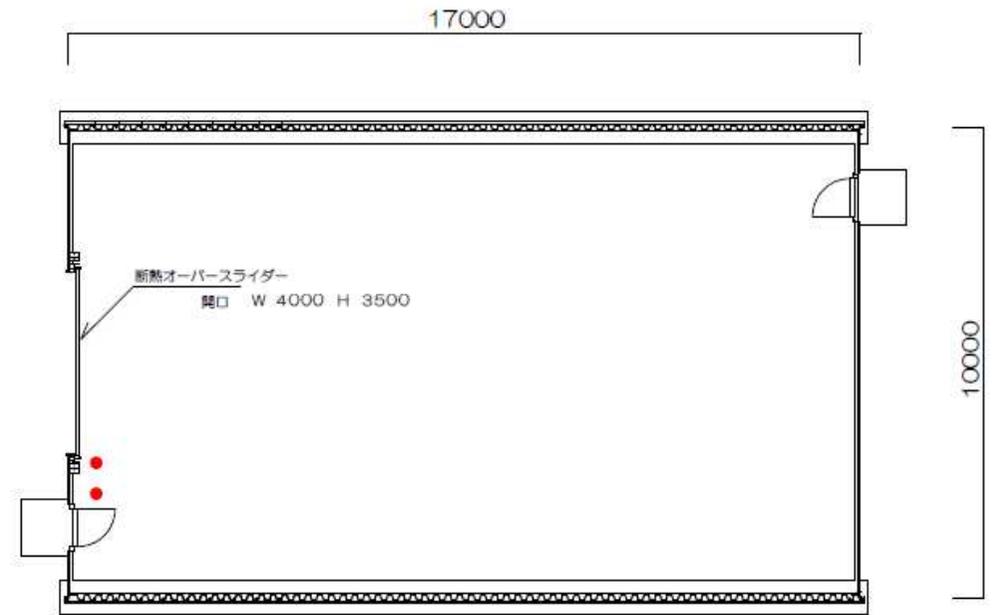
- This module has been used for balloon observations
- Iridium short burst data: 340 byte per one transfer
- Every 10 min × 338 byte → 1426 kB / month
- Charge: ¥120,000 / month
for 1000kB + ¥140 / 1kB
- If 3 SPBs flired for 1 month, data transfer charge will be ¥550,000.



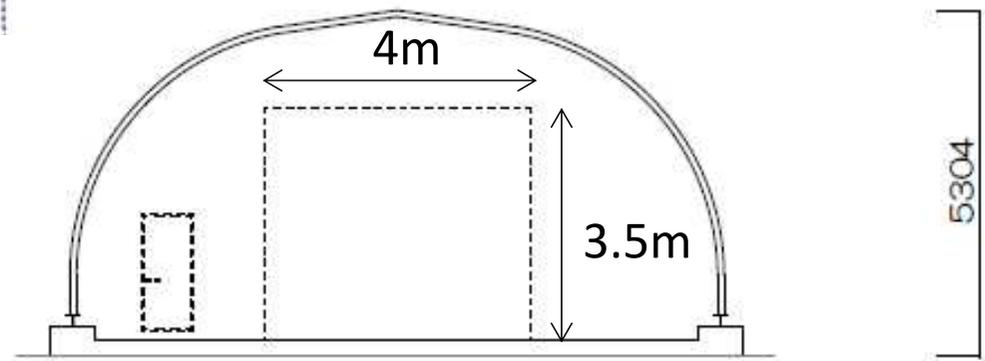
ガス充填・放球場所



南極昭和基地



廃棄物保管庫 平面

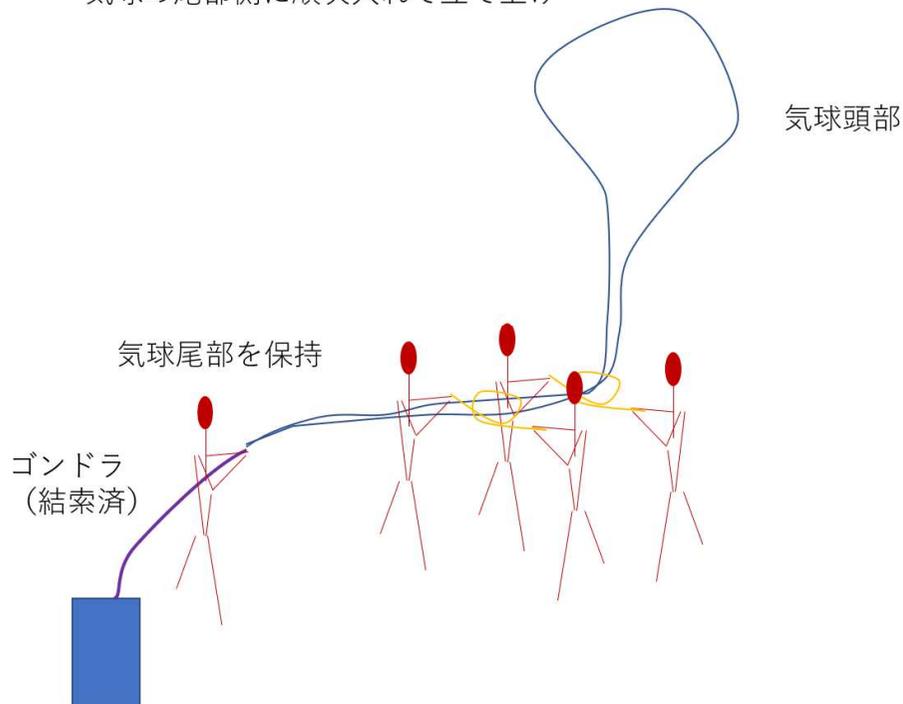


廃棄物保管庫 断面 1/150

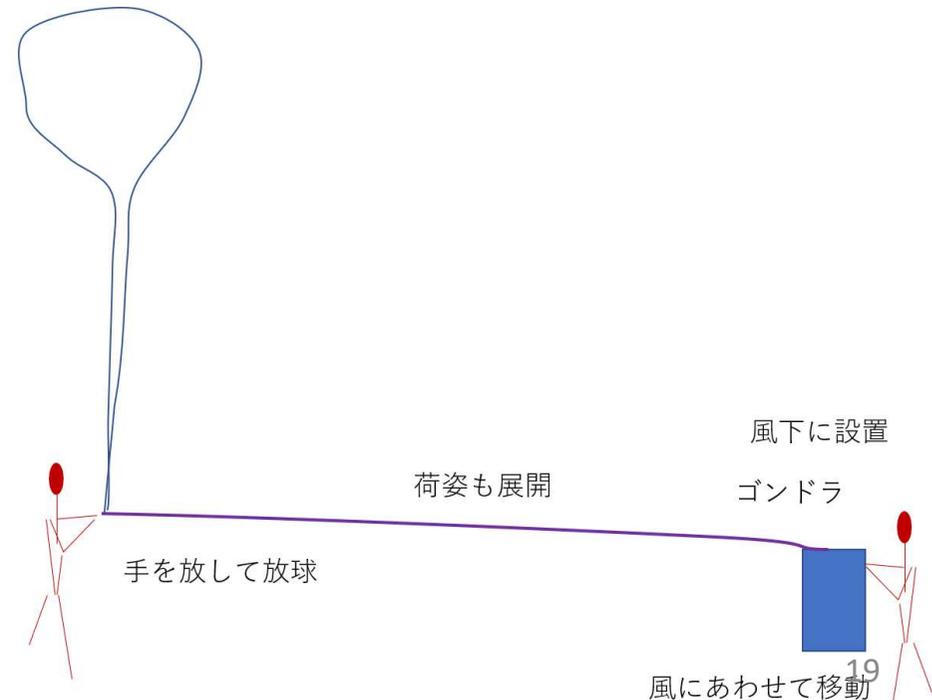
放球手順の検討

- 浮力測定方法・ガス注入手順
- 観測装置の地上試験の内容
- 気球の立ち上げ・放球方法

放球袋をはずし、ループさせた綿布を
気球の尾部側に順次入れて立て上げ



放球袋をはずし、綿布をスライドさせて立て上げ



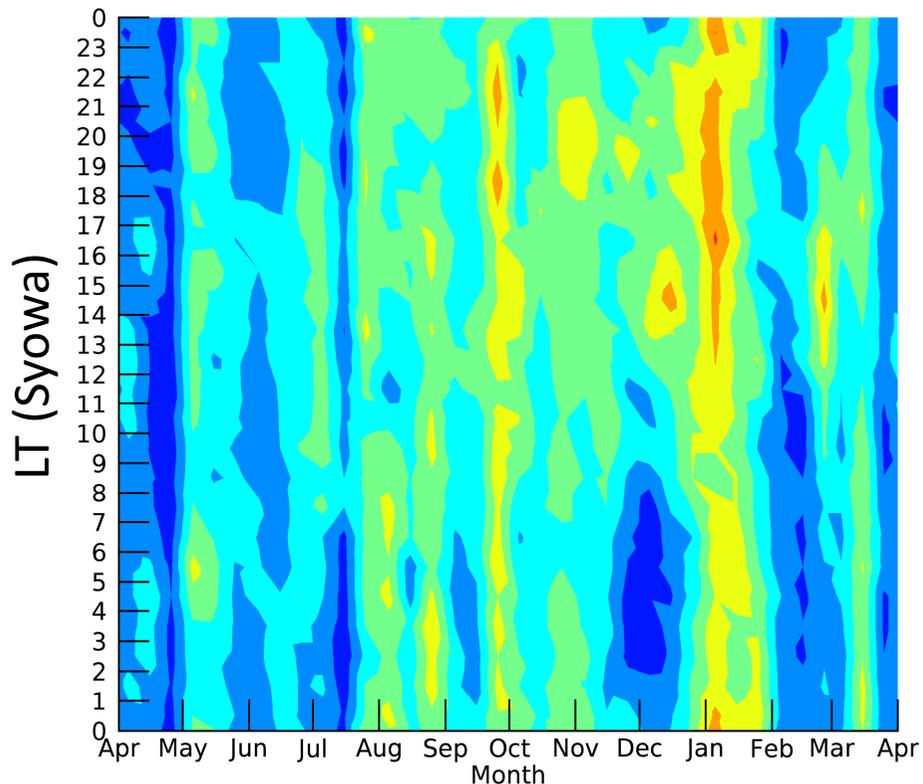
昭和基地の地上気象条件

Surface wind data at Syowa Station

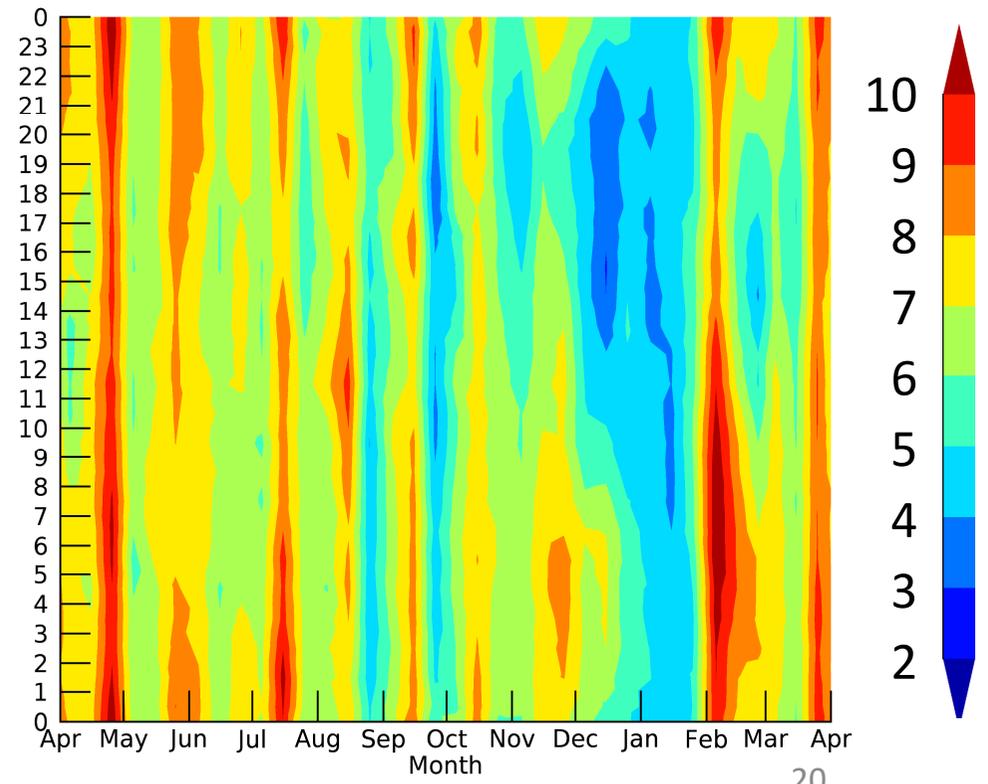
- April 2016 – March 2019 (3 years)
- every 10 min
- Figures based on 10-day mean

→3m/s以下で放球

Fraction of ≤ 3 m/s



Surface wind speed (m/s)



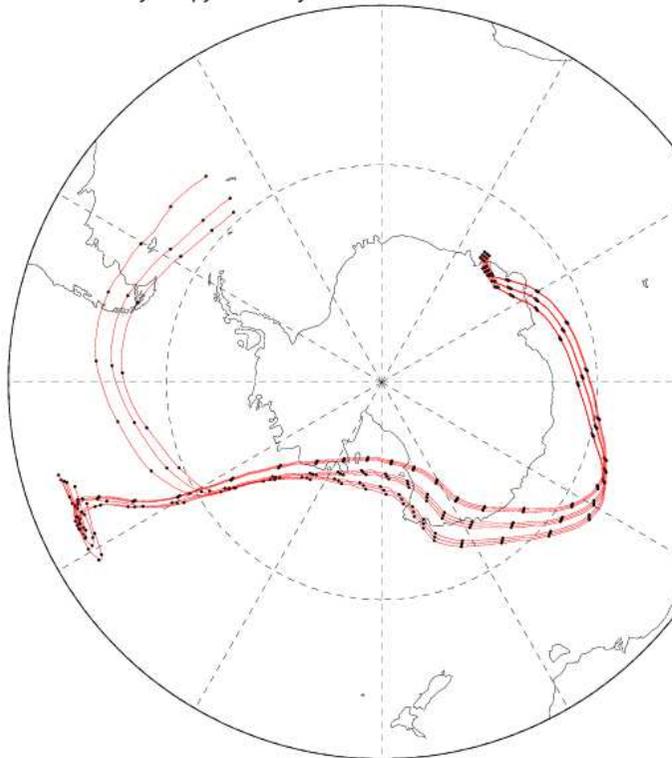
30day forward isopycnic trajectories at 60 hPa from Syowa

Initial 9 air parcels are put at $(39.6\text{E} \pm 1.0 \text{ deg}, 69.0\text{S} \pm 0.5 \text{ deg})$ on 1, 11, and 21 Jan. 2019. Dots are plotted every 1 day.

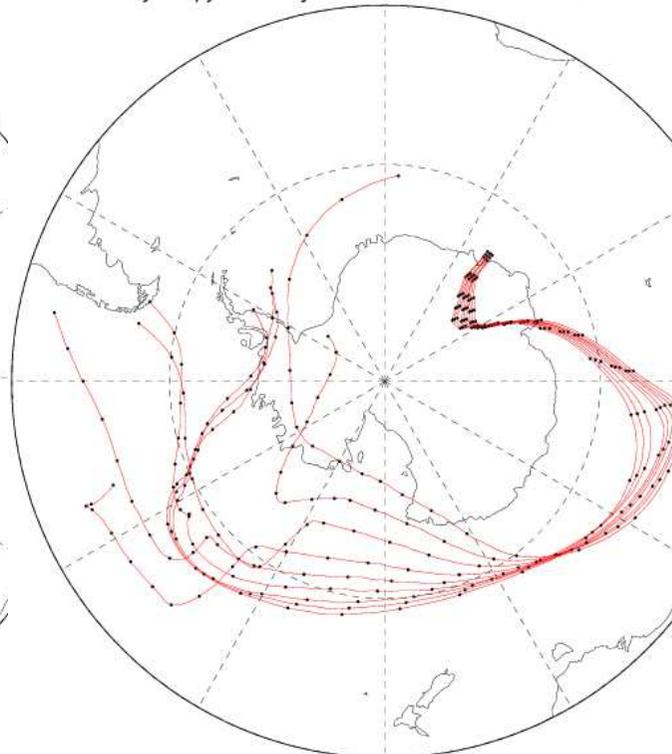
Whether the air parcels remain in the Antarctic region or not depends on the launch timing.

→ Coordination with neighboring countries is required.

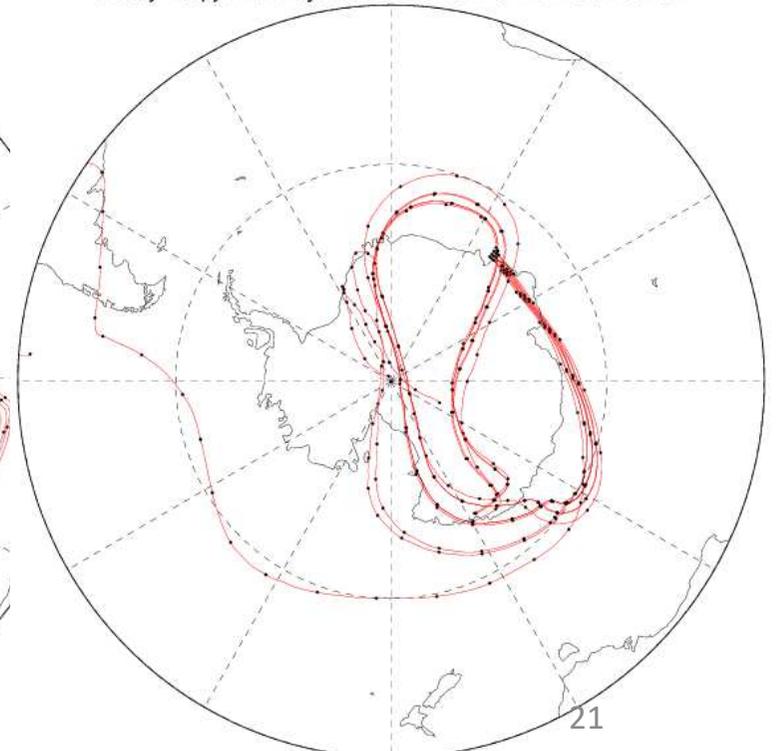
30day isopycnal trajectories at 60hPa from 20190101



30day isopycnal trajectories at 60hPa from 20190111



30day isopycnal trajectories at 60hPa from 20190121

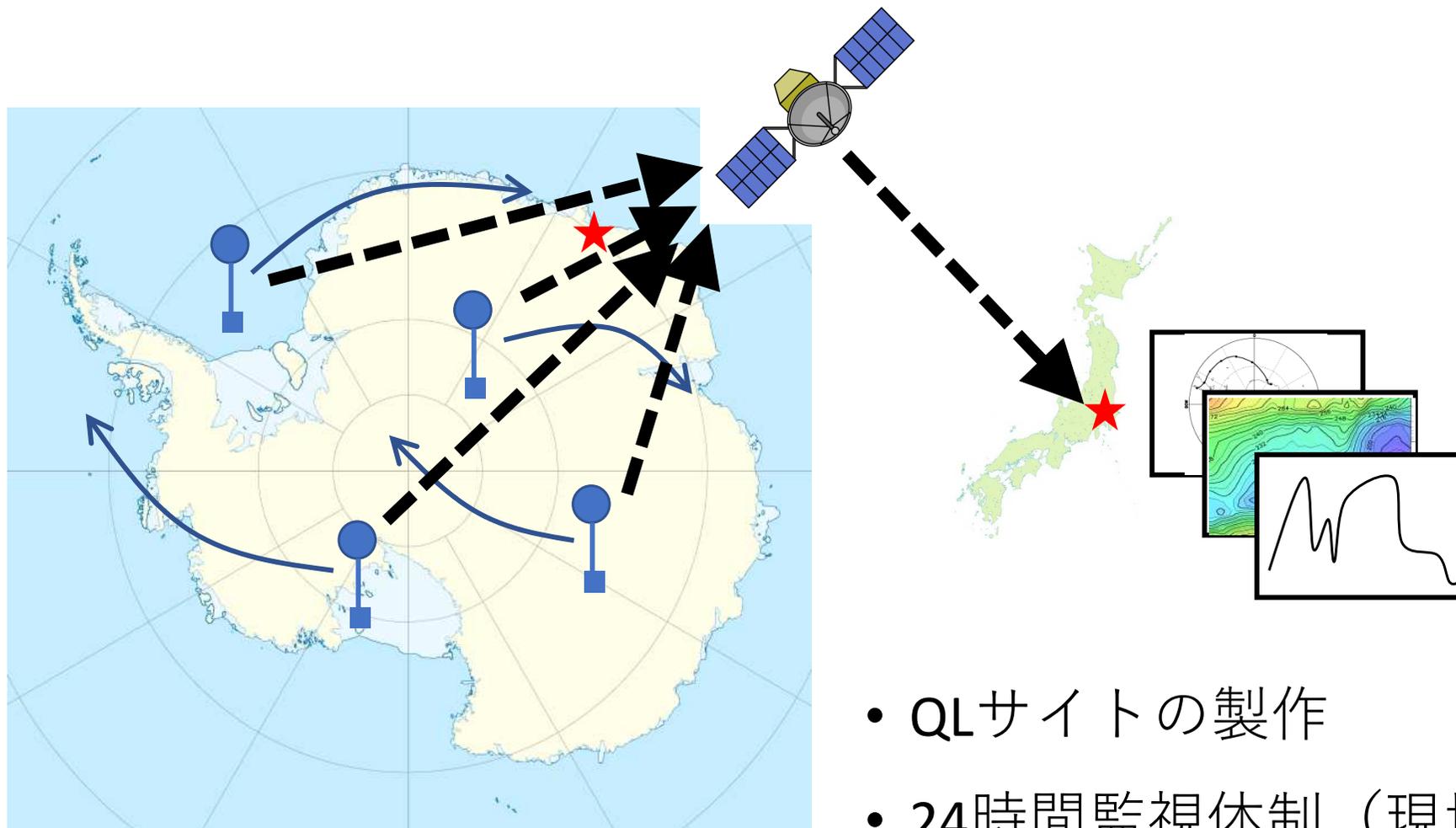


観測終了基準

- 飛行許可空域外に出るとき（60Sを想定）
- 高度が下がった時（15kmを想定）
- 電池の電圧が一定値以下に下がった時
⇒地上からカッターコマンド送信
- イリジウム通信が一定時間以上途絶したとき
⇒観測装置側でカッターコマンド実行

安全に配慮し、上記の条件に達する前に観測を終了することも検討中

気球監視体制の検討



- QLサイトの製作
- 24時間監視体制（現地隊員 + 国内協力者）

重力波抽出アルゴリズム

- 観測された時系列データをウェーブレット変換 $\rightarrow (t, \hat{\omega})$
- SP気球は等密度面を移動と仮定し、重力波の線形理論（分散・偏波関係）を適用

➤ 水平波数ベクトル方向と運動量フラックスの推定

$$\text{Im}(\tilde{p}_T \tilde{u}_{\parallel}^*) = -\bar{\rho} H \frac{N^2}{\hat{\omega}} \text{Re}(\tilde{u}_{\parallel}^* \tilde{w}),$$

➤ 位相速度の推定

$$\hat{c} = \frac{1}{\bar{\rho} \delta_-} \frac{\text{Re}(\tilde{p} \tilde{u}_{\parallel}^*)}{\tilde{u}_{\parallel}^2},$$

➤ 鉛直波数の推定

$$m = -\bar{\rho}^2 \hat{c} \delta_- \left(\frac{N^2 - \hat{\omega}^2}{\hat{\omega}} \right) \frac{\text{Re}(\tilde{u}_{\parallel}^* \tilde{w})}{\tilde{p}^2}.$$

➤ 偏波関係から水平波数の推定

➤ ドップラーシフトから対地位相速度の推定

第X期の計画

- 南極観測第X期6か年計画中のPANSYフルシステム観測終了
(2027年11月頃) までに2回の越冬観測を計画
⇒できるだけ多数・長期間の観測を行い、データを蓄積
- 第65or66次に越冬隊での通年観測 (特に初冬から晩冬にかけて)
⇒南極半島のPSC形成への重力波の寄与が1つのターゲット
- 第67or68次には、複数高度 (上部対流圏・対流圏界面近傍・下部成層圏) での観測も検討中
⇒各高度の重力波源との対応を明らかに

まとめ

- 大気重力波の力学特性（運動量フラックス、エネルギー）の水平分布の取得を目的として、南極域におけるスーパープレッシャー気球観測計画（LODEWAVE）を提案
- PANSYレーダーとの協同観測および最新の気象再解析データや重力波のスペクトル理論を活用し、重力波の力学特性の3次元的描像を明らかにする
- SP気球および観測装置の開発を進め、2021年12月～2022年1月に南極昭和基地での最大3回のSP気球観測を計画
- 第X期には重点研究観測サブテーマ3の中で2回の越冬観測を計画中