

「地球大気の化学・物質輸送・放射から惑星大気科学を展望する」

山下陽介（国立環境研究所）

太陽系には地球のように地表と大気を持つ惑星として金星、火星がある。本発表では比較惑星学を見据えた視点から地球大気化学・物質輸送・放射をレビューした。地表付近の大気を地球と比較すると、金星は高温高压で火星は低温低圧である。自転周期と大気加熱の違いから、金星では潮汐波や重力波が、地球と火星では共通して傾圧波が卓越している。他の2惑星と比較して、地球大気鉛直気温分布には、上空ほど気温の高くなる成層圏と気温の低くなる中間圏が中層に存在する特徴的な構造があり、その構造にはオゾンによる紫外線の吸収が大きな役割を果たしている。成層圏オゾンは、太陽放射の強い赤道域で生成され大規模な大気循環によって中高緯度域に運ばれる。極域ではハロゲン化合物の化学反応により春季にオゾン破壊が進む。また、太陽プロトンイベントといった高エネルギー粒子の流入により NO_x が生成され、オゾン破壊反応が進むことがある。こうした大気中の物質輸送や化学反応、放射伝達などを表現できるモデルとして、大気化学輸送モデルが用いられる。このモデルでは、ガス成分の他エアロゾルも扱うことができ、傾圧波による物質の輸送なども調べることができる。発表では、地球の傾圧波による対流圏界面をまたぐ物質の輸送や前線にトラップされたエアロゾルの輸送を紹介した。輸送シミュレーションの性能を上げるためには、対象とする現象を十分に表現できるだけの解像度のモデルを選択する必要がある。スケールや構造は異なるものの、火星にも傾圧波があり、ダストの輸送シミュレーションなどに応用可能かもしれない。本発表が惑星大気科学の議論の叩き台になれば幸いである。

2023/02/21惑星圏シンポジウム2023

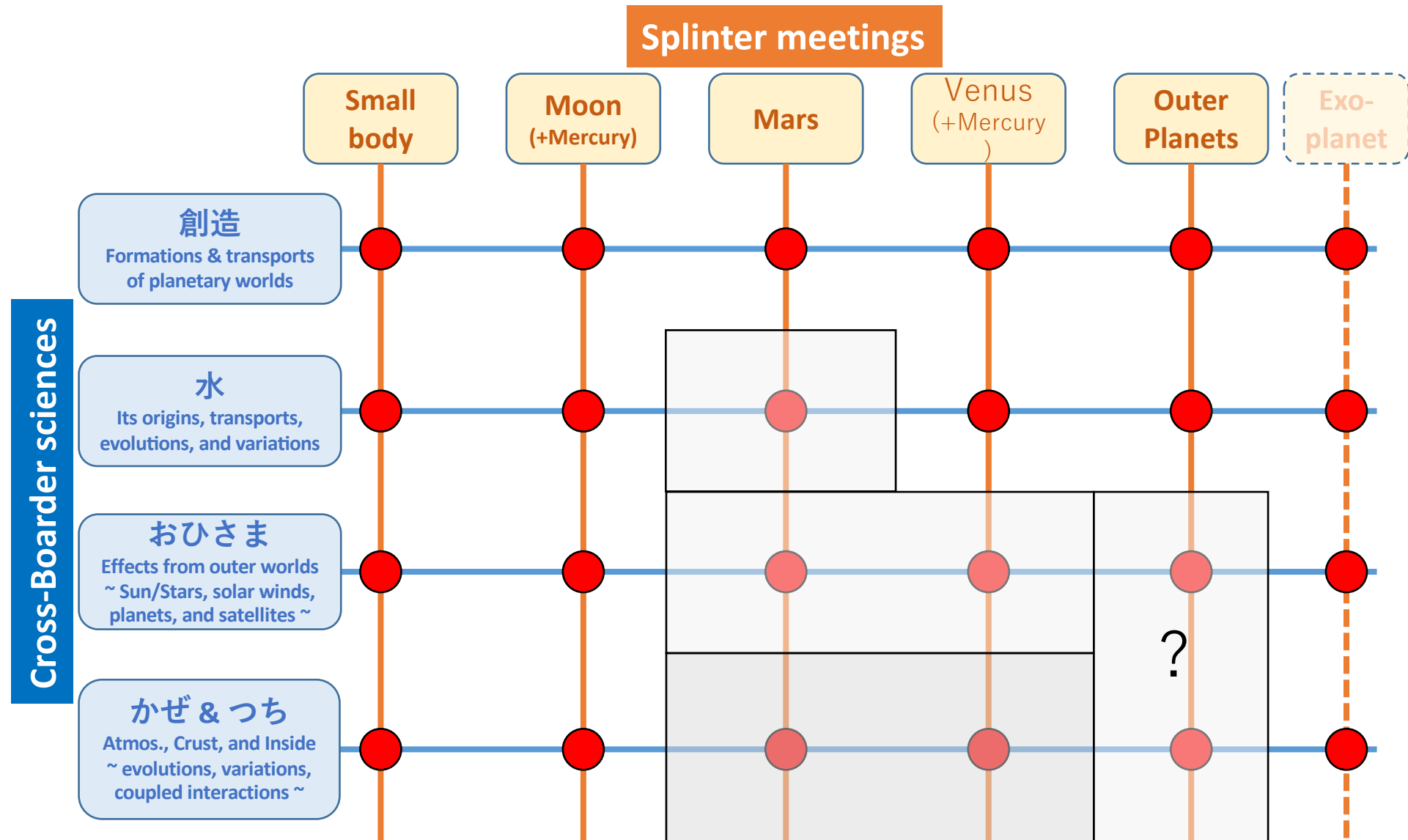
地球大気の化学・物質輸送・放射から 惑星大気科学を展望する

山下陽介

国立環境研究所

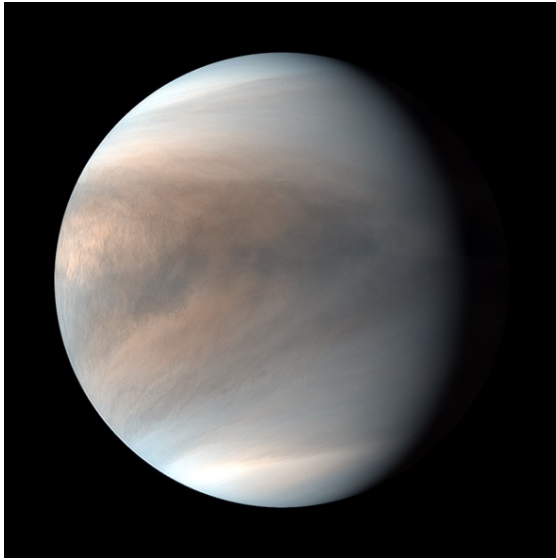
Focus of the Symposium 2023

Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy



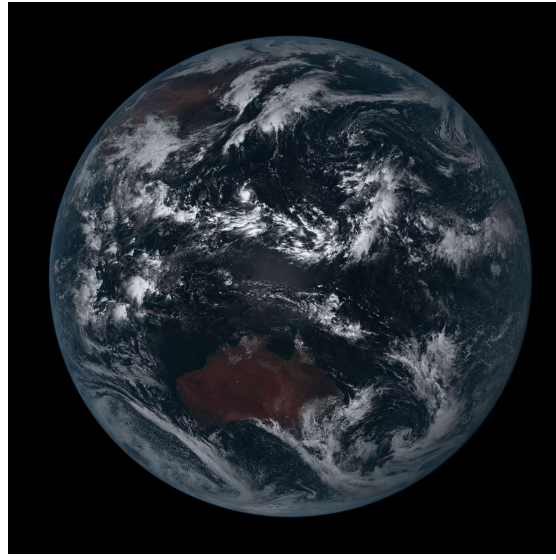
Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

はじめに：惑星大気の比較



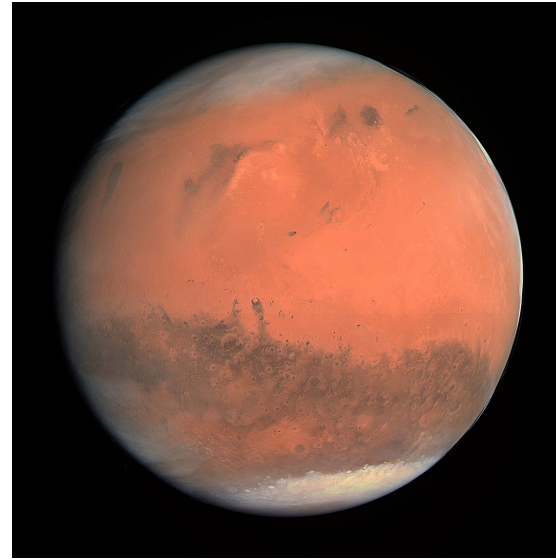
金星（あかつきUVI）

主成分: CO_2 、 N_2
地表気圧: 92000hPa
地表温度: $\sim 730\text{K}$
自転周期: 243.02日
ロスビー数: 60
雲: 45–70km、濃硫酸
擾乱: 重力波、潮汐波
スーパーローテーション



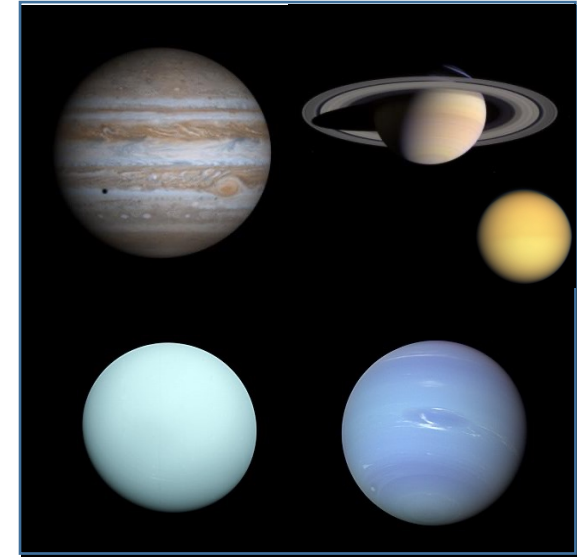
地球（ひまわり可視）

主成分: N_2 、 O_2
地表気圧: 1013hPa
地表温度: $\sim 290\text{K}$
自転周期: 0.9973日
ロスビー数: 0.07
雲: H_2O
擾乱: 傾圧不安定など
オゾン層、QBO



火星（ロゼッタOSIRIS）

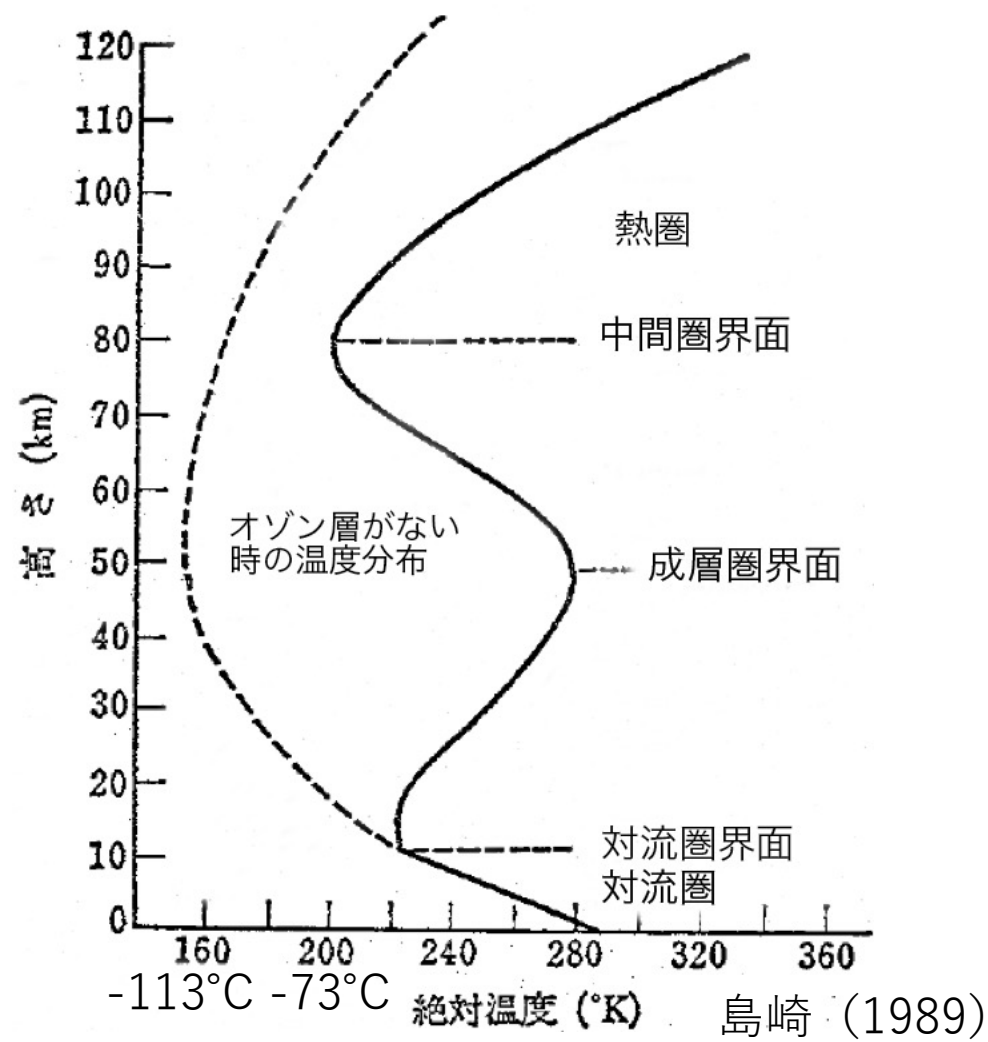
主成分: CO_2 、 N_2
地表気圧: 6hPa
地表温度: $\sim 200\text{--}240\text{K}$
自転周期: 1.0260日
ロスビー数: 0.2
雲: CO_2 、(H_2O)
擾乱: 傾圧不安定など
ダストストーム



木星型惑星、タイタン
(NASA/JPL)
木星型惑星には地表なし
(雲の高さで定義)
主成分: H_2 、 He
(タイタン除く)
タイタンではスーパー
ローテーション

ロスビー数: 赤道での自転
速度に対する風速の比

地球大気の鉛直構造



金星

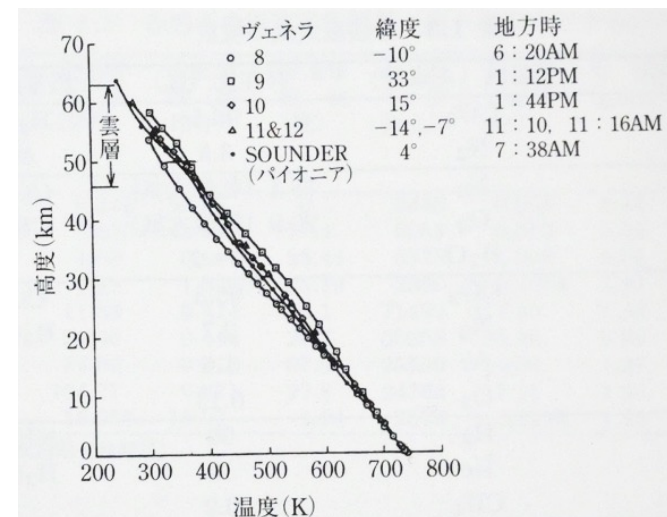


図 1.1 金星の温度の高さ分布 (Seiff, 1983)

松田 (2014)

火星

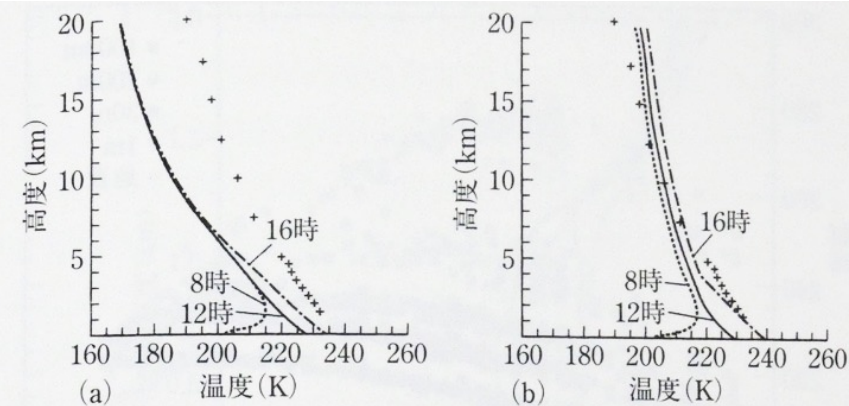
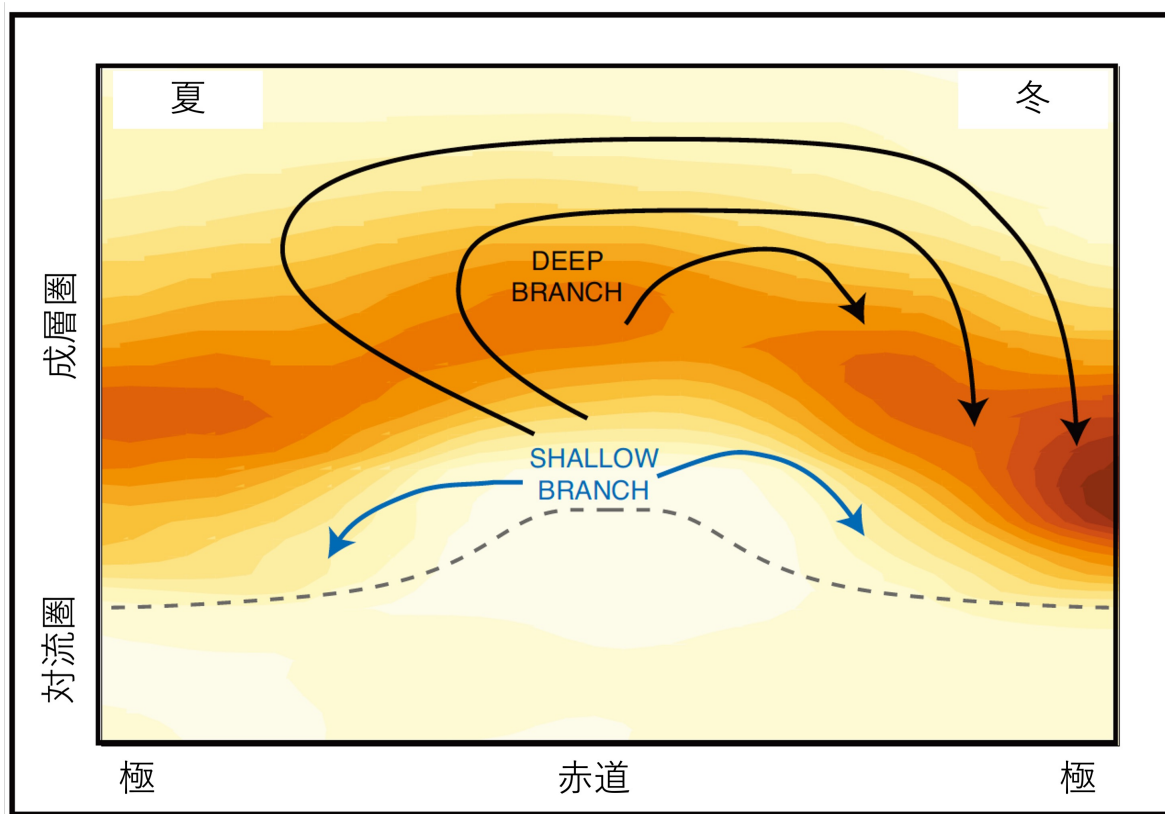


図 3.9 放射と対流の効果を取り入れた計算による火星の鉛直温度分布 (小高・高橋, 2005): 8 時, 12 時, 16 時の温度分布を示す. +印は観測結果. (a) ダストの放射の効果을考慮しなかった場合. (b) ダストの放射の効果을考慮した場合.

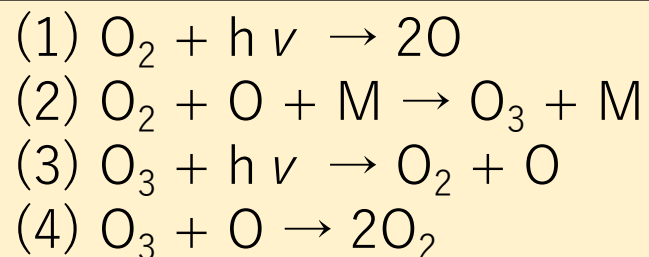
オゾン層



矢印：赤道域から極域に向かう成層圏大気の循環
陰影：オゾン濃度（濃い色ほどオゾンが多い）
WMO (2014)のFigure 4-7を元に作成

赤道付近で生成されたオゾンが大気の循環で
中高緯度域に運ばれる

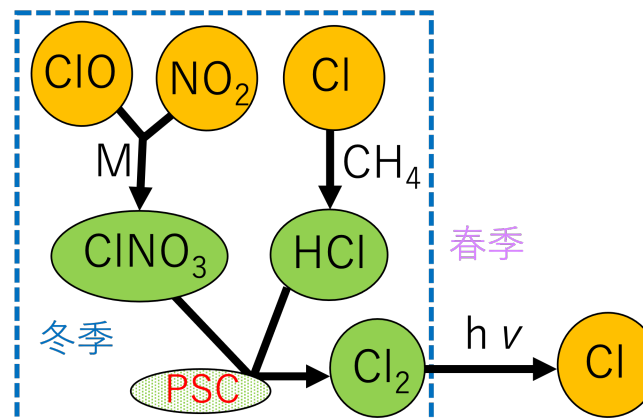
オゾン層の形成（チャップマン機構）



MはO₂やN₂分子

* 実際の大気では、水素酸化物（HOx）、窒素酸化物（NOx）、塩素ラジカル（ClOx）等によるオゾン消失反応が起こっている

極域でのオゾン破壊

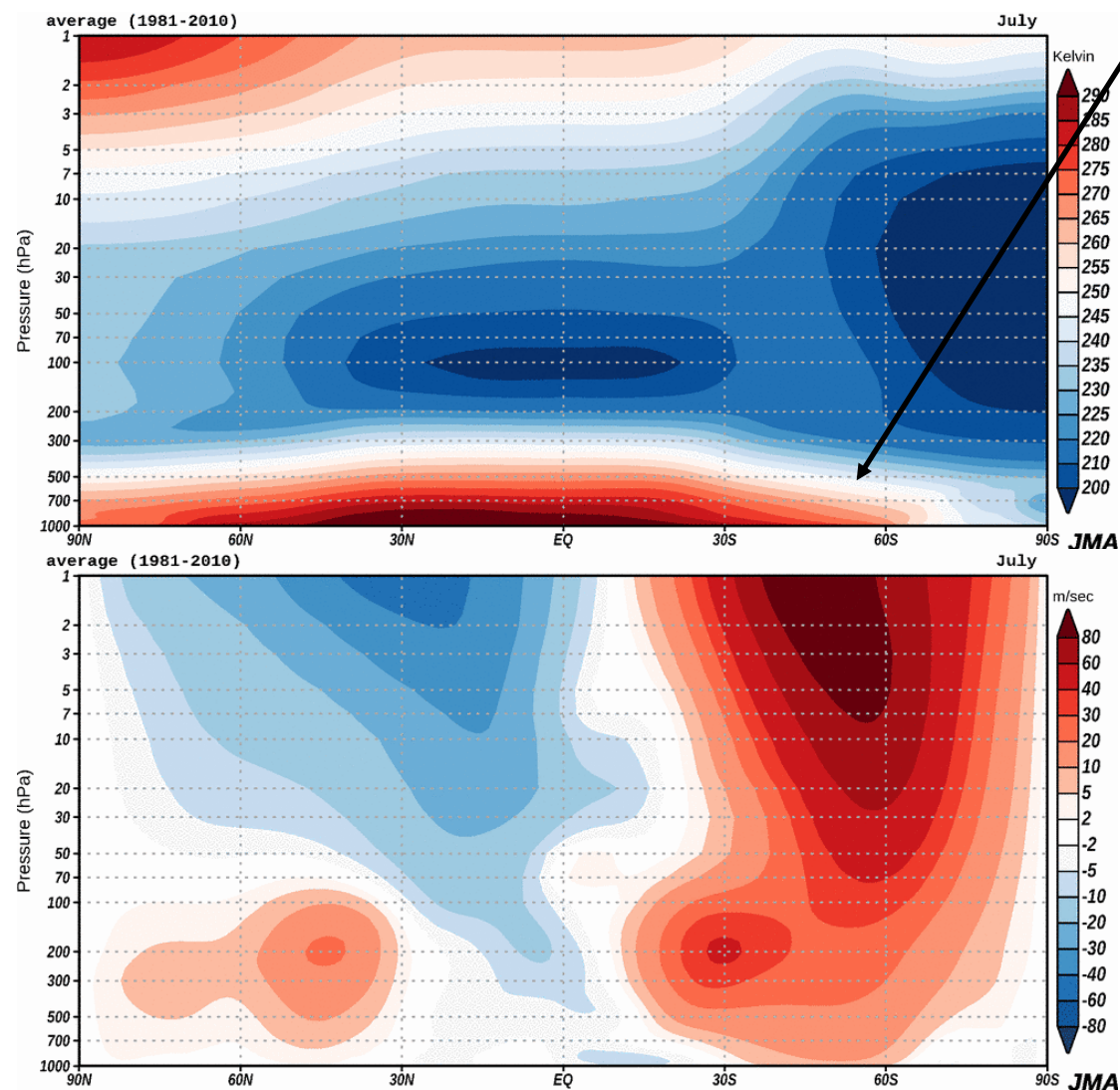


極成層圏雲(PSC)



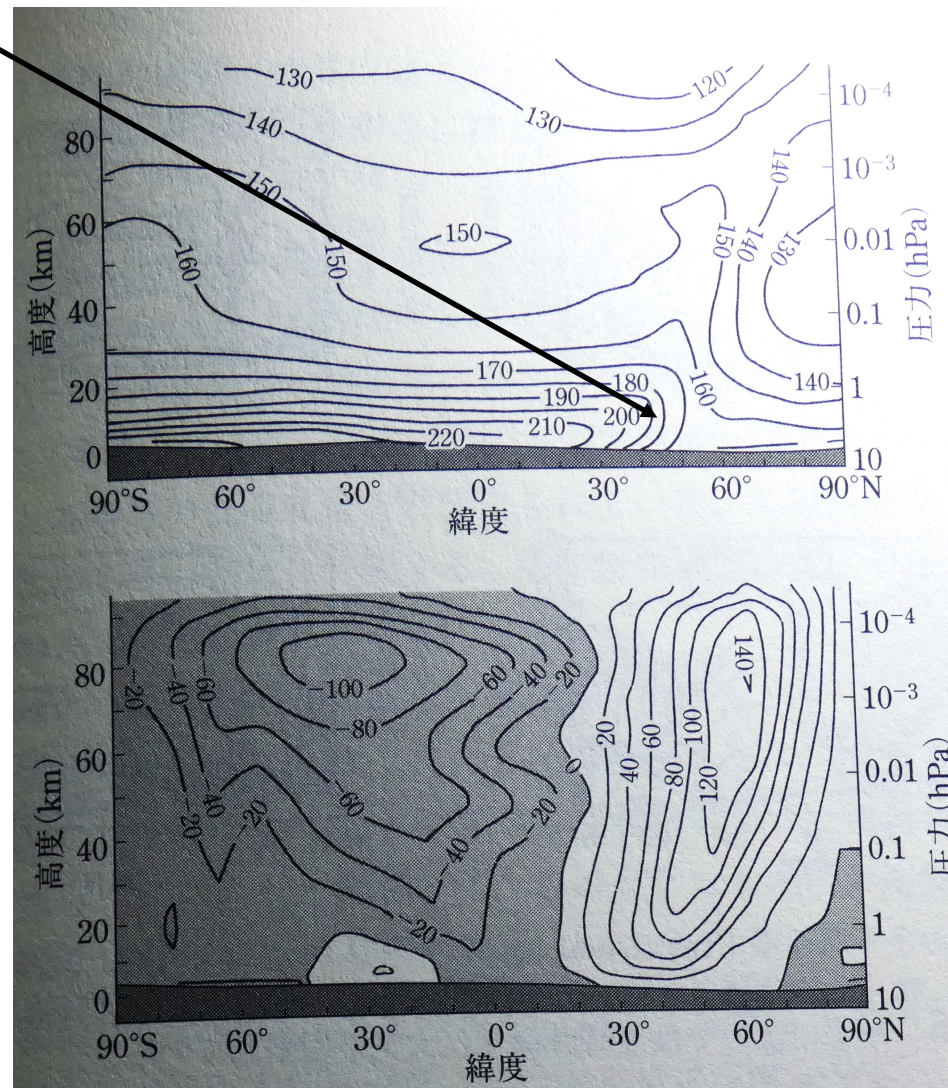
啓林館「地学」

気温と東西風の比較：地球と火星



地球の温度分布と東西風速分布（7月）
気象庁JRA-55アトラス

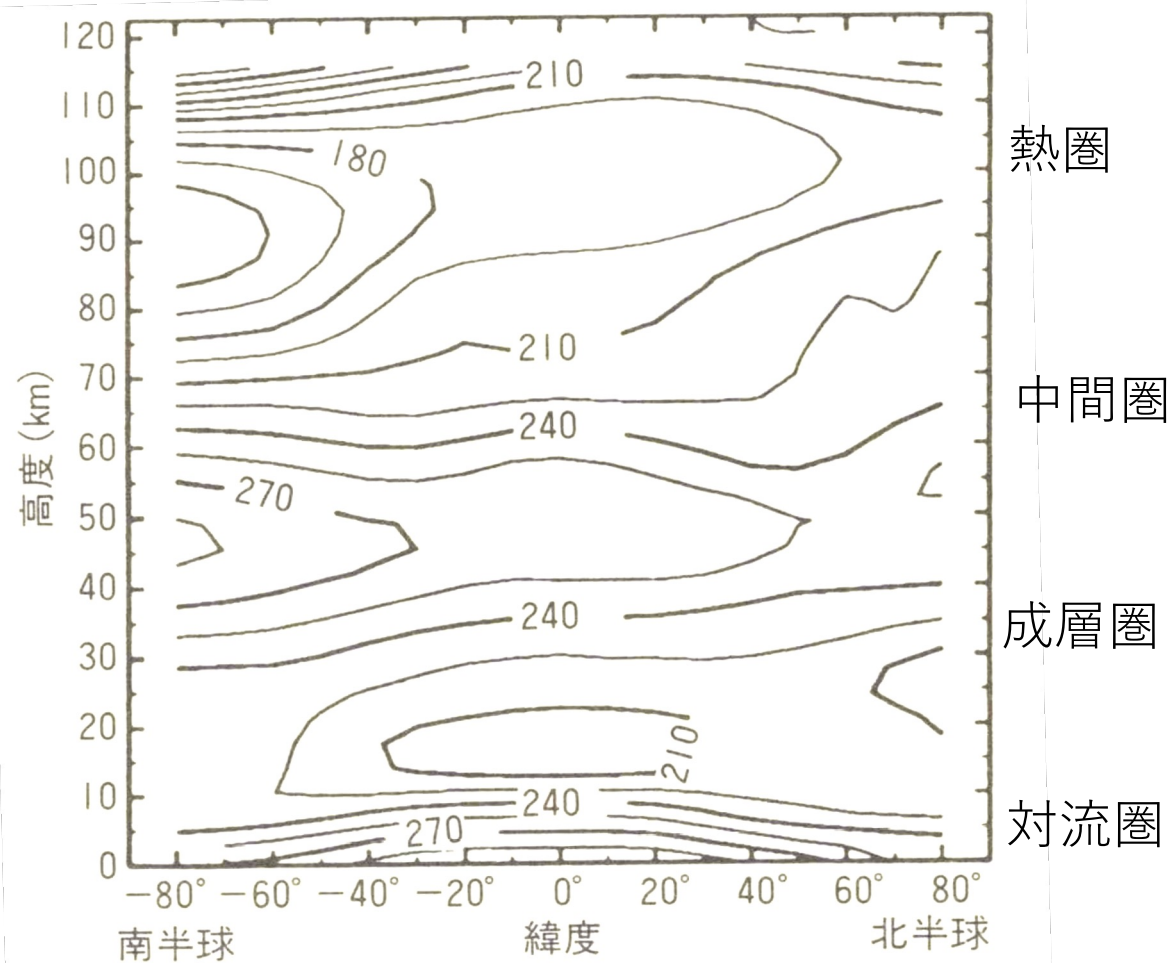
傾圧性



火星の温度分布と東西風速分布、北半球が冬、南半球が夏の時期（松田, 2014）

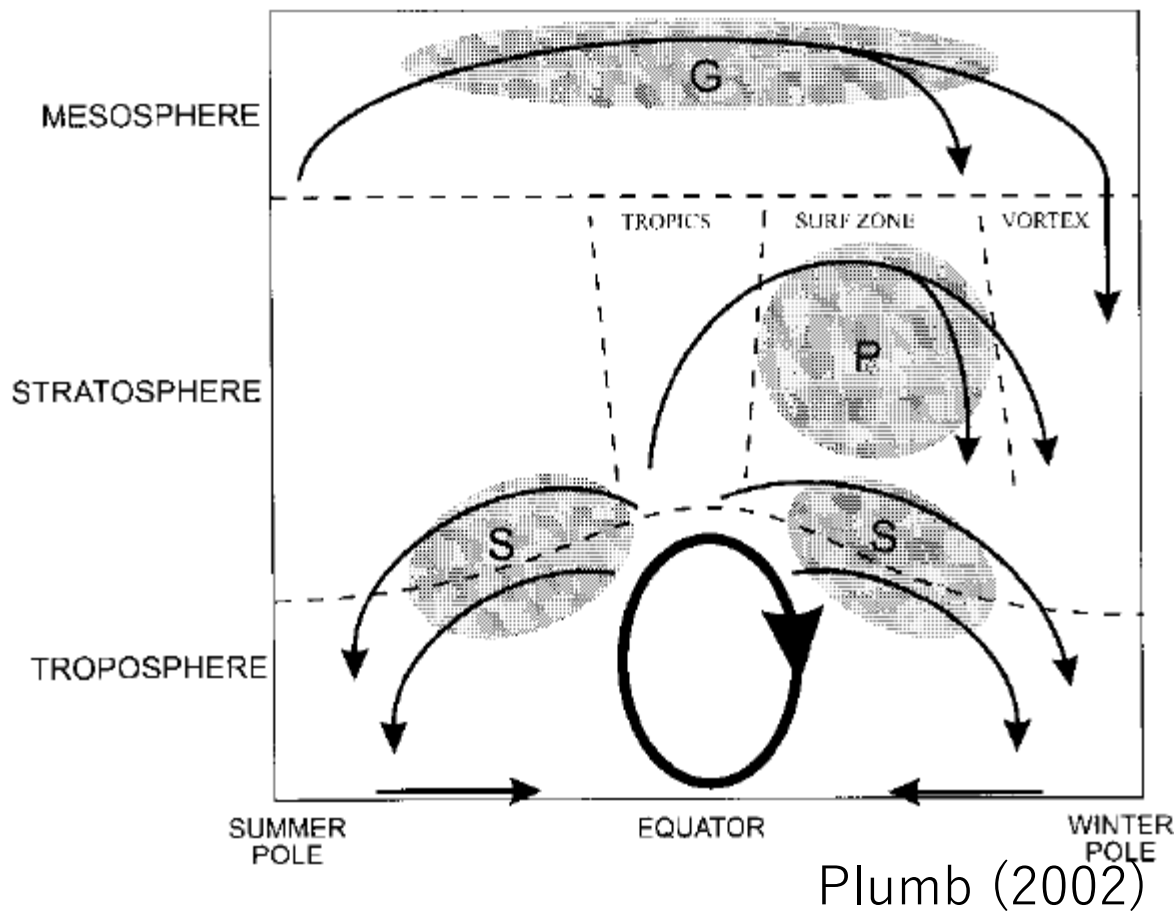
地球大気の循環と波

1月の平均気温



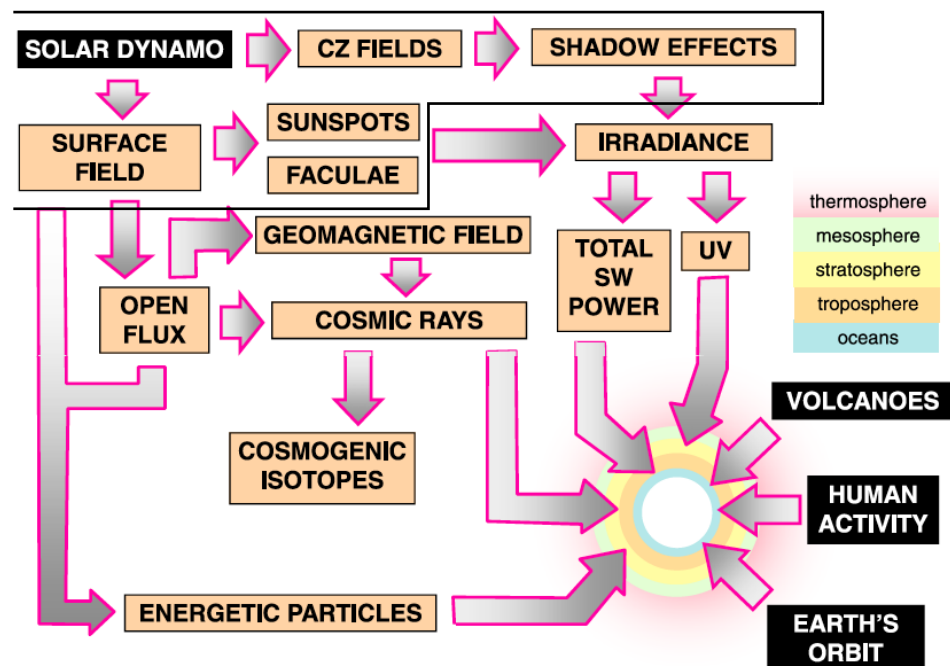
一般気象学

波と子午面循環

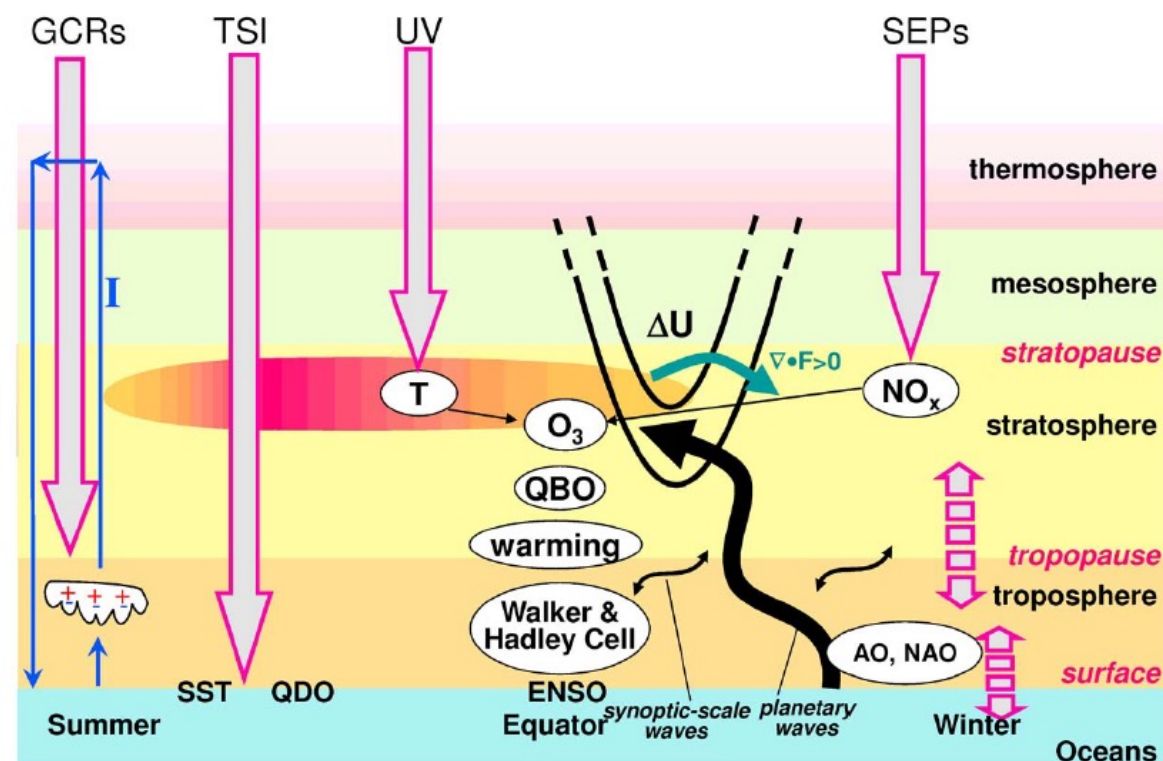


P：惑星波、G：重力波、S：総観規模擾乱

太陽活動の地球大気への影響



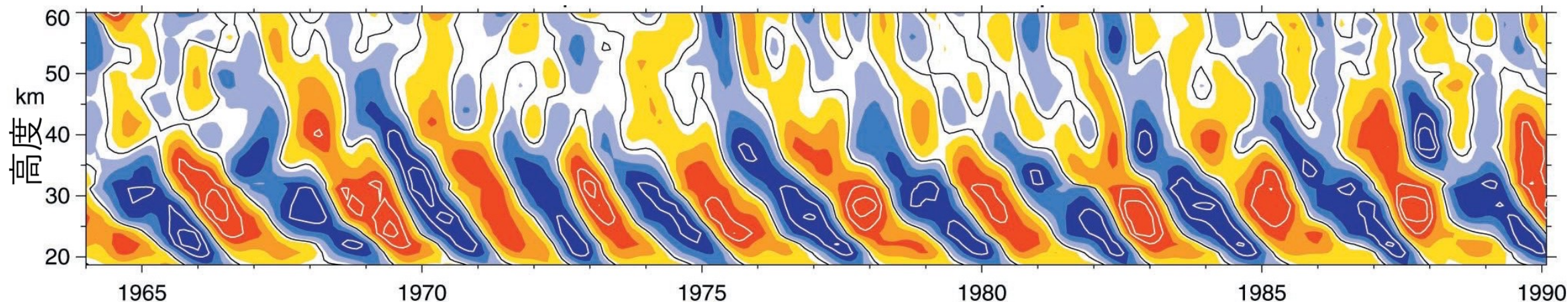
Gray et al. (2010)



- ・ 外気圏、熱圏：太陽活動の影響はrobust（放射、ジュール熱）
- ・ 太陽プロトンイベント：イベントに伴うSEP流入→NO_x増加→オゾン破壊促進、観測あり
- ・ 成層圏オゾン→大気：紫外線（UV）放射量の変化が要因、比較的理解が進んでいる
- ・ 海表面→大気：太陽定数（TSI）の変化が要因、まだ理解が進んでいない
- ・ 銀河宇宙線（GCR）→雲：定量的に十分に雲形成を説明できる証拠が見付かっていない

成層圏準 2 年周期振動 (QBO)

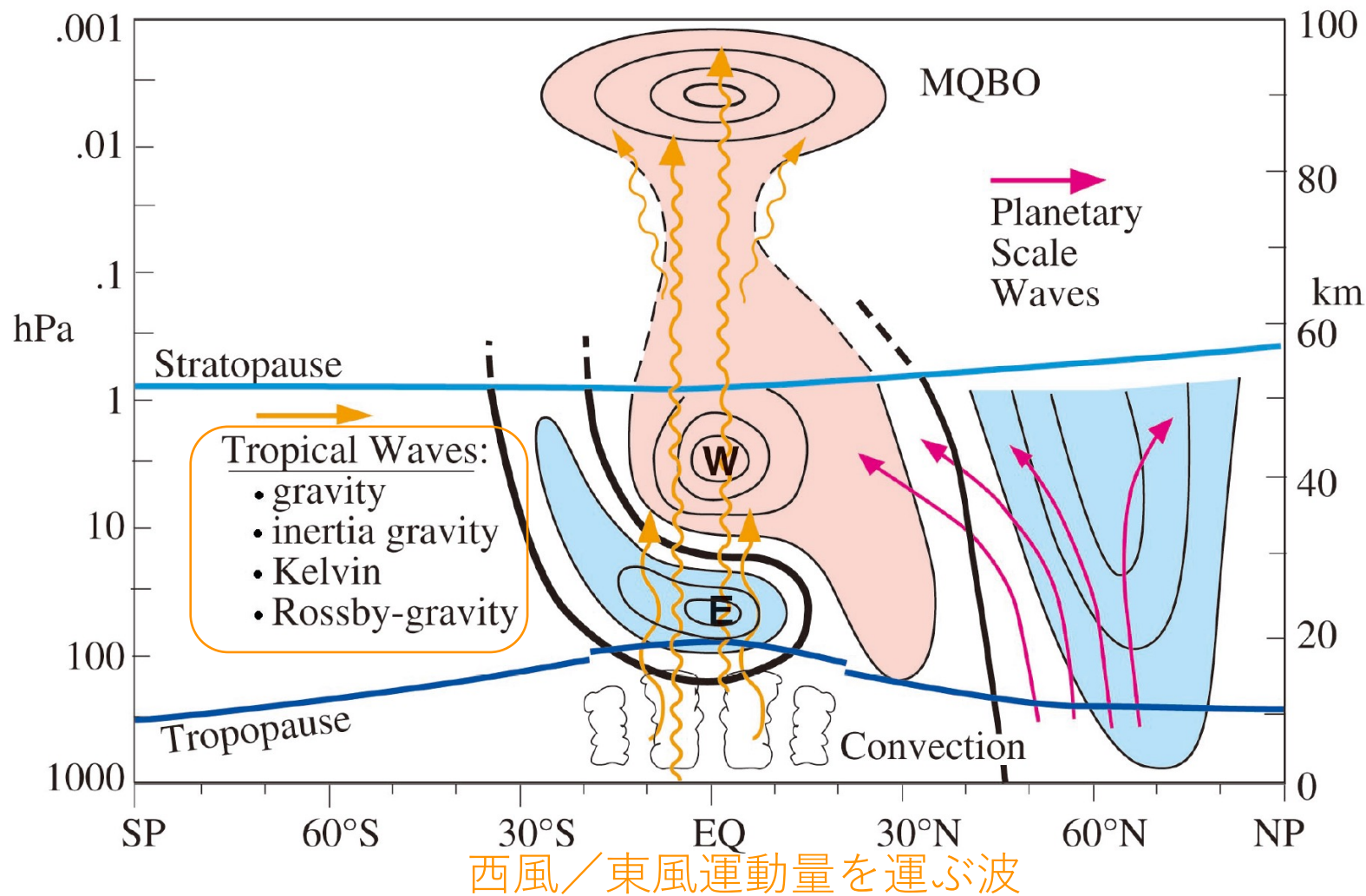
赤道域東西風の時間—高度断面図 (9~48カ月成分)



Baldwin et al. (2001)

- ・ 上空で現れた東風や西風の風系が徐々に下降。同一の位相が下降する速度は1ヶ月約1 km
- ・ 東風と西風が一巡する周期は、50 hPa付近の高度（約21 km）では22~34ヶ月（平均28ヶ月）
- ・ QBOに伴う東西風の振幅は赤道付近で最大で、5~40 hPa（約22~37 km）では約20 m/s
- ・ 赤道域だけの現象：赤道付近で最大の振幅は、南北約12度の緯度で半分程度

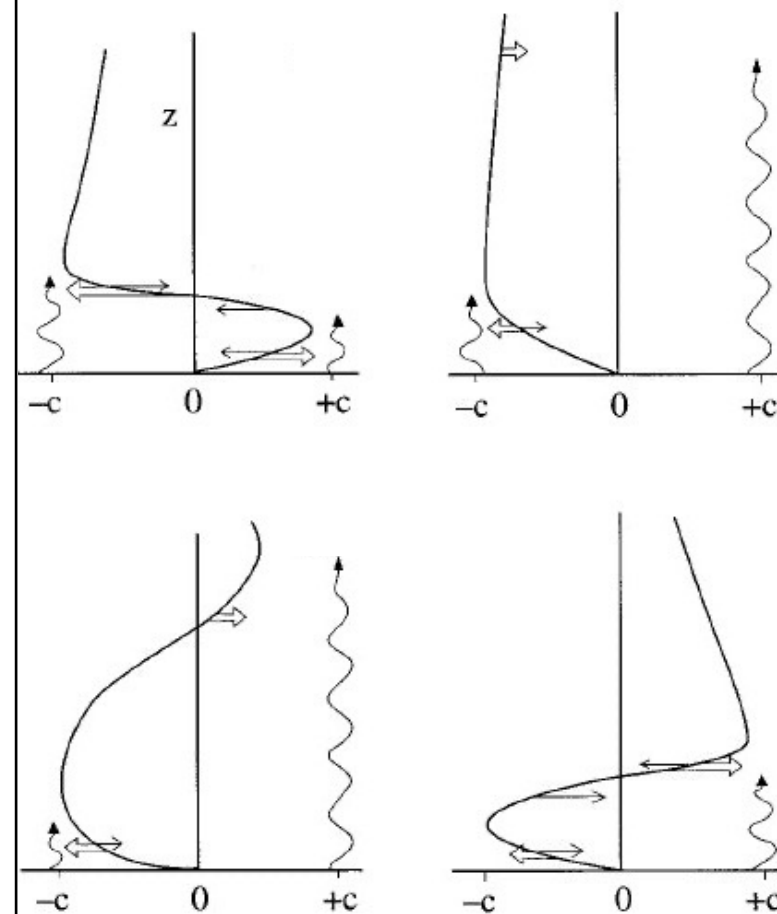
QBOの発生要因



時間スケールの短い波が時間スケールの長い平均流を維持する特徴

Baldwin et al. (2001)

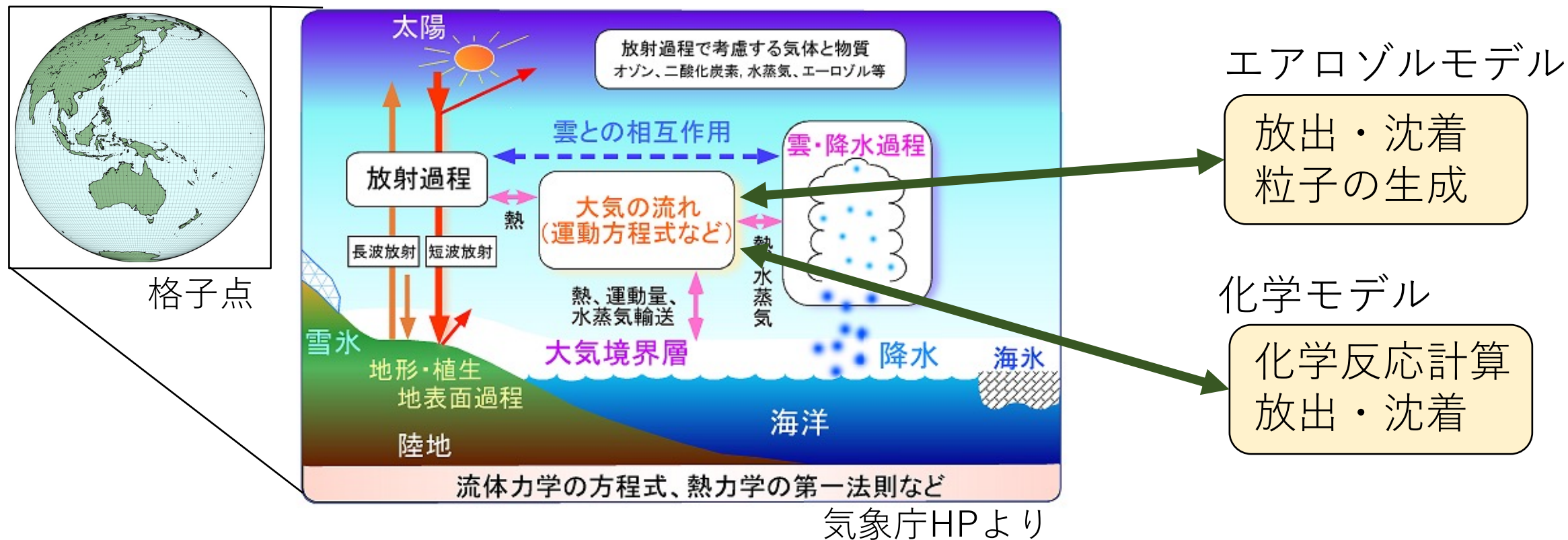
東風と西風を交互に励起するメカニズム



Plumb (1984)

物質輸送のシミュレーション

大気化学輸送モデル

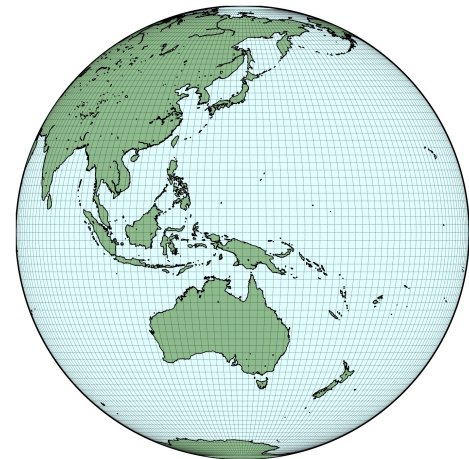


エアロゾル濃度の時間変化 = 輸送・拡散 + 放出 - 沈着 + 粒子の生成

化学成分濃度の時間変化 = 輸送・拡散 + 放出 - 沈着 + 化学反応による変化

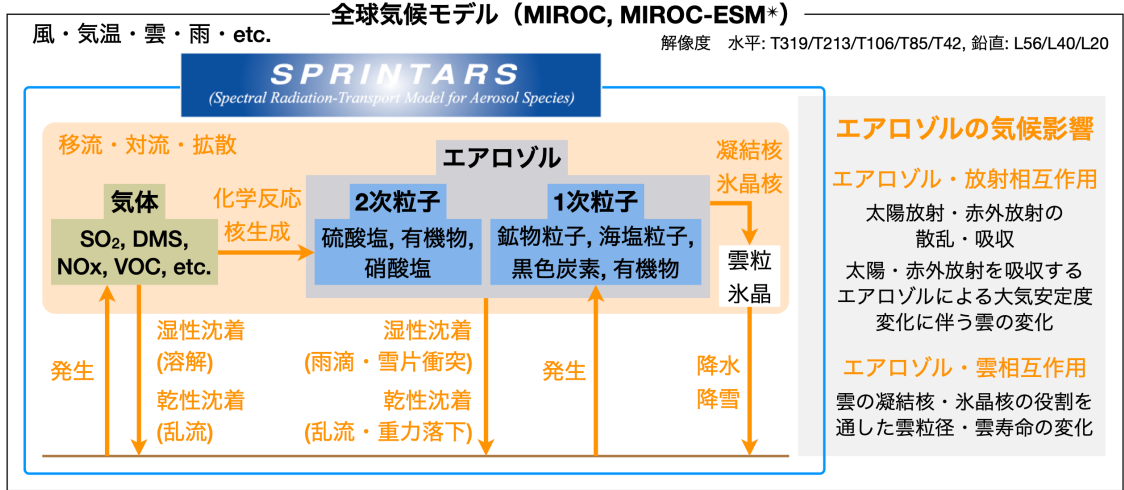
エアロゾル輸送のシミュレーション

全球モデル



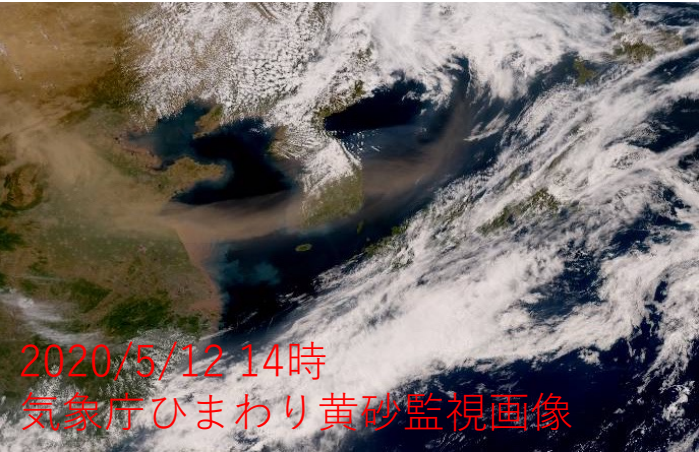
<http://sprintars.net>

参考文献: Takemura et al. (JGR, 2000; JCLI, 2002; JGR, 2005; ACP, 2009)
CGER's Supercomputer Monograph Report Vol. 24

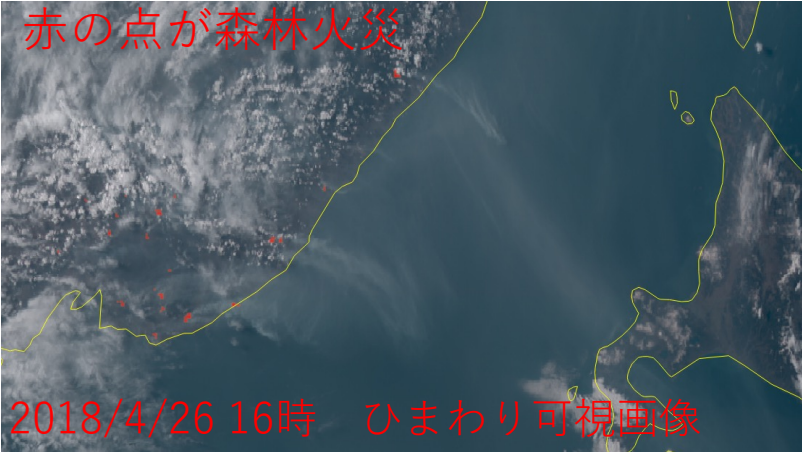


* MIROC, MIROC-ESM: 東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構などにより開発されている全球気候モデル・地球システムモデル

ダスト輸送



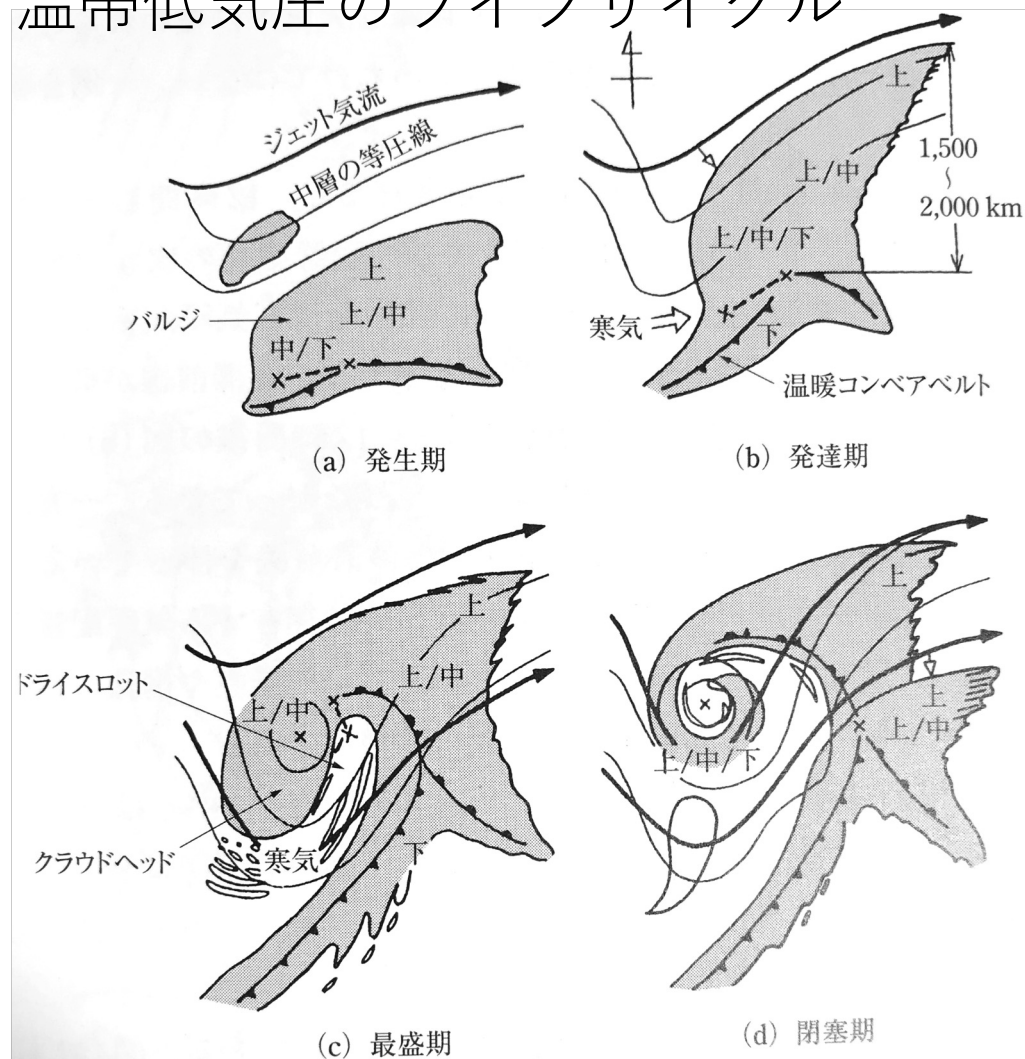
森林火災のエアロゾル輸送



<https://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/>

傾圧不安定擾乱によるエアロゾル輸送

温帯低気圧のライフサイクル



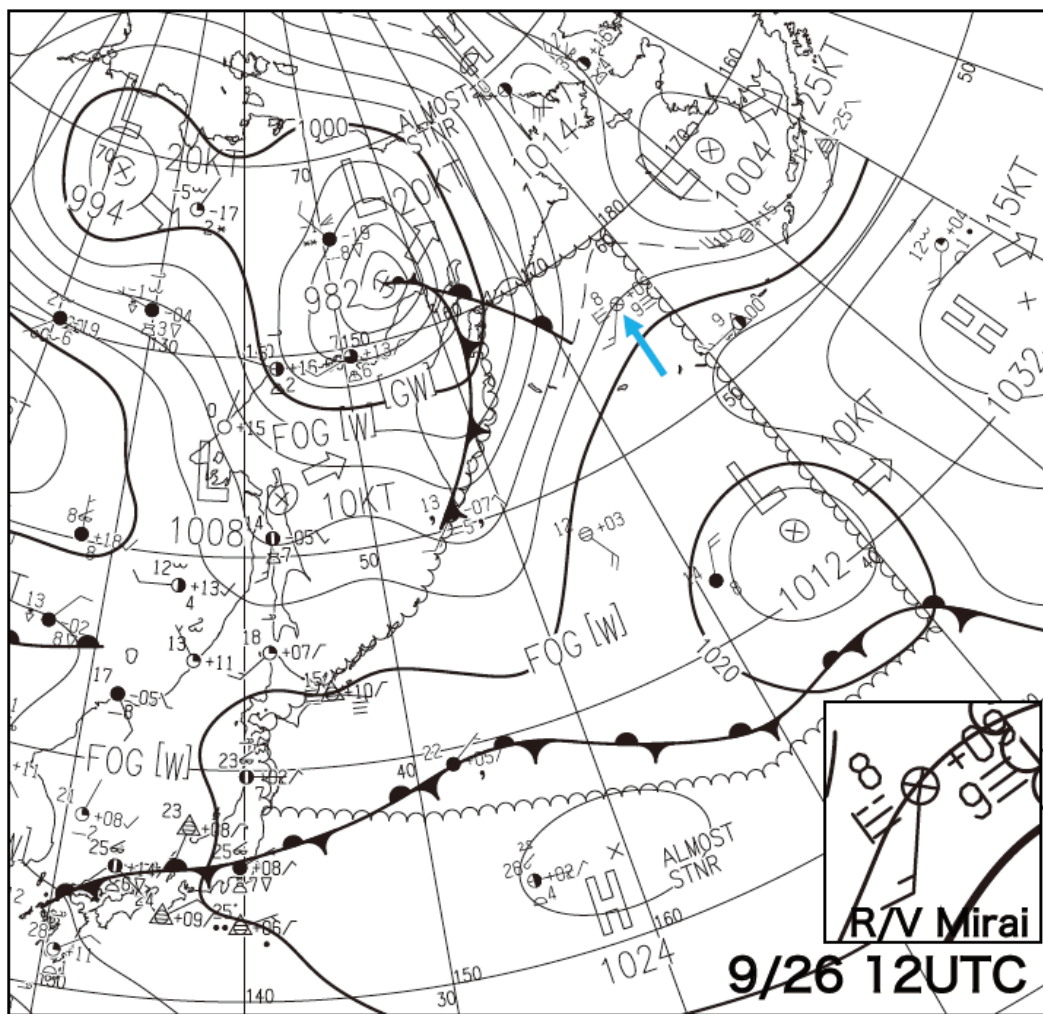
低気圧中心の東側で上昇流、西側で下降流

閉塞期には中心に乾燥空気を巻き込む

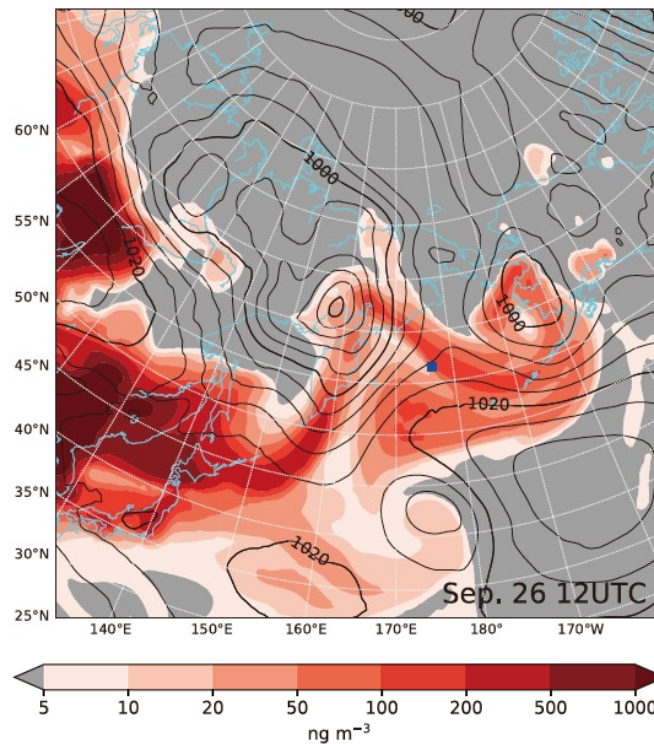
寒冷前線の後面、温暖前線から閉塞前線の前面に物質をトラップする特徴

56km程度の高解像度が必要

傾圧不安定擾乱によるエアロゾル輸送

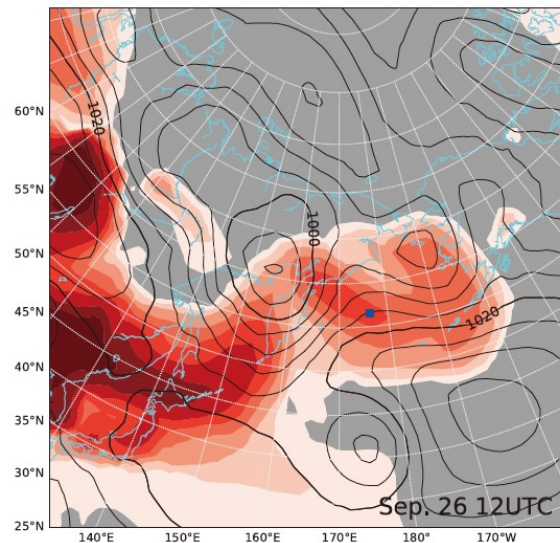


56 km



色：地表BC

220 km

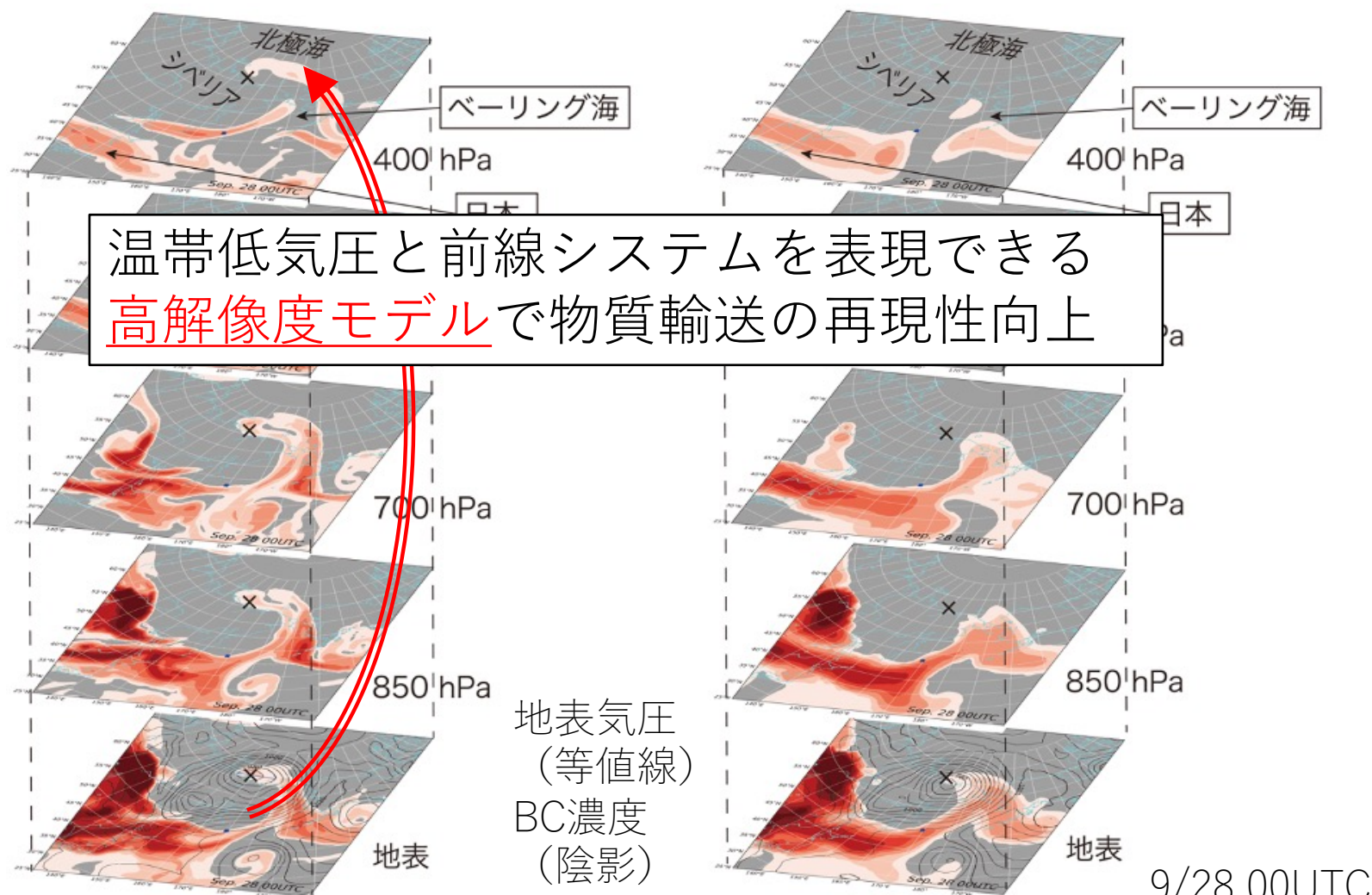


Yamashita et al. (2021)

傾圧不安定擾乱によるエアロゾル輸送

高解像度 (56km)

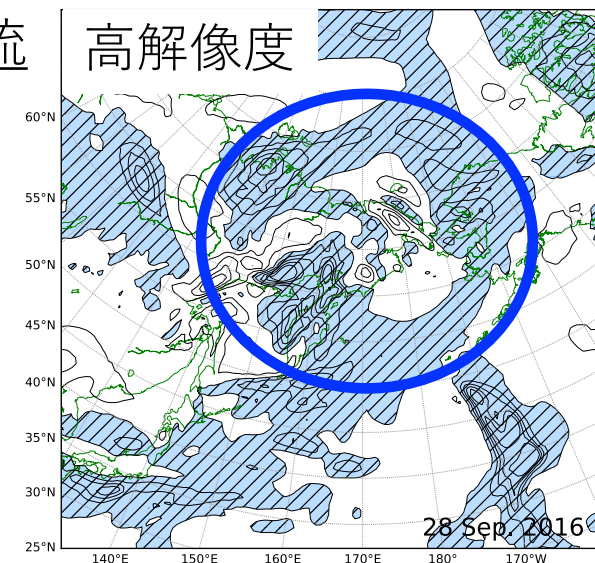
低解像度 (220km)



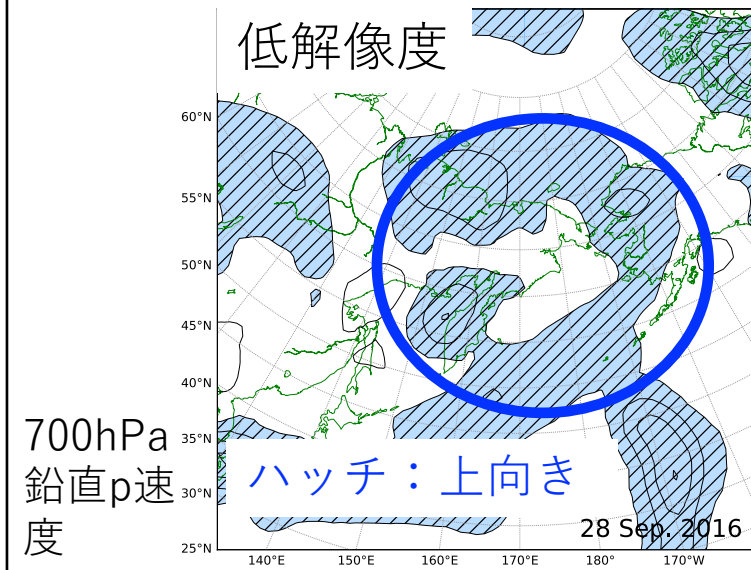
Yamashita et al. (2021)

鉛直流

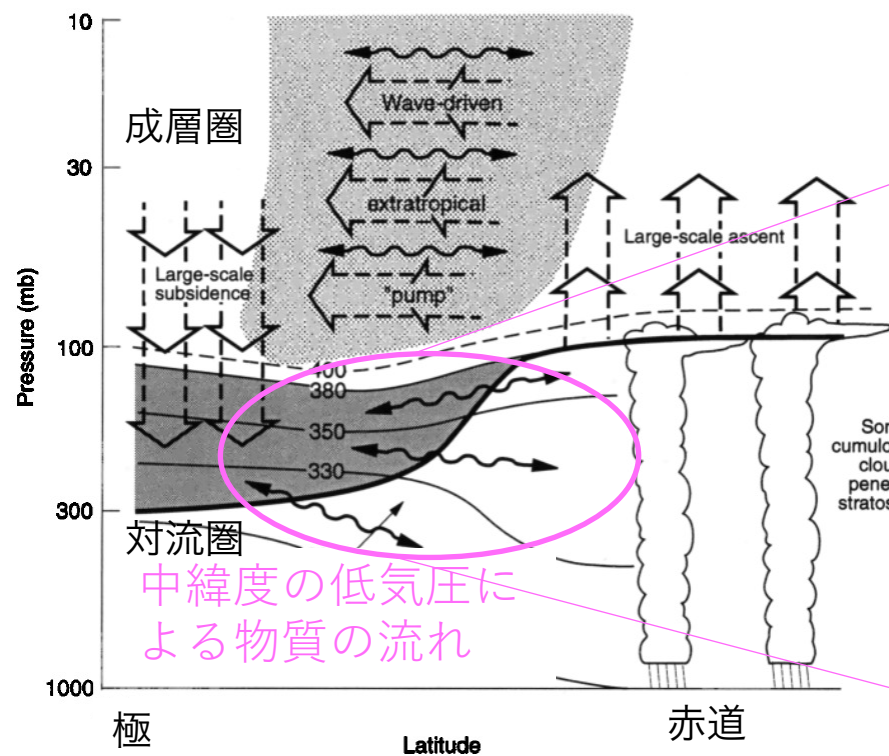
高解像度



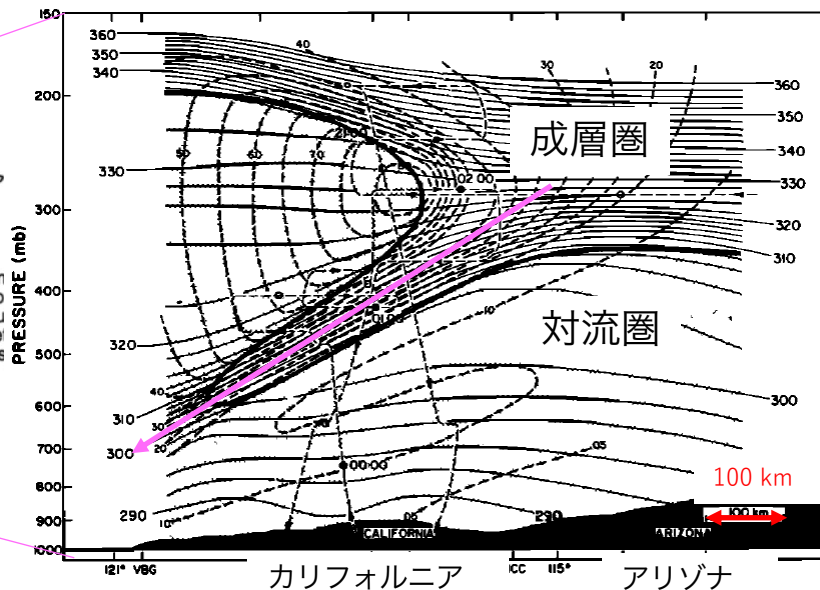
低解像度



対流圏と成層圏の物質循環



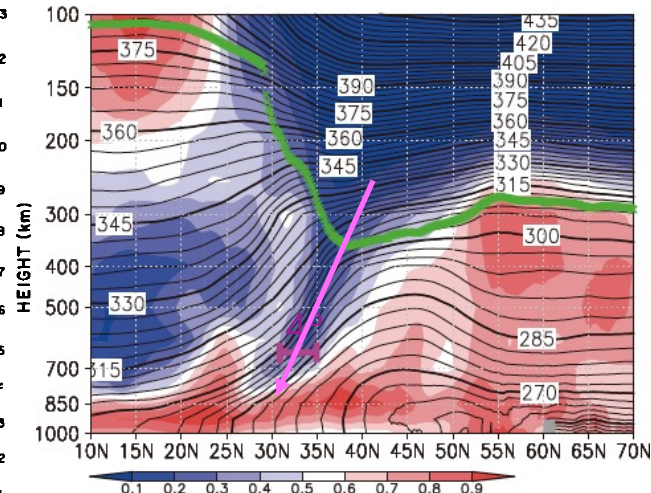
低気圧に伴う圏界面高度低下イベント
1978年3月13日



Holton et al. (1995)

成層圏：オゾン個数密度高、相対湿度低
対流圏：オゾン個数密度低、相対湿度高

全球14km実験



色：相対湿度
黒線：温位(K)
緑：圏界面の場所

Yamashita et al. (2017)

発達した低気圧により対流圏界面をまたぐ物質循環生じる

まとめと展望

- 地球大気の特徴：オゾン層、QBOなど
- 火星大気との共通点：大気の傾圧性、傾圧不安定波。構造やスケールは地球大気と異なるかもしれないが、物質輸送の観点では共通する部分もある
- 他の惑星大気への応用の可能性：波によって駆動される循環、太陽活動に伴う化学・放射変化など
- エアロゾル輸送モデル：ダスト輸送モデルなどへの応用の可能性（対象とする擾乱を捉えられるだけの解像度は必要）