4. ロスビー波と 1.5層モデル

見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

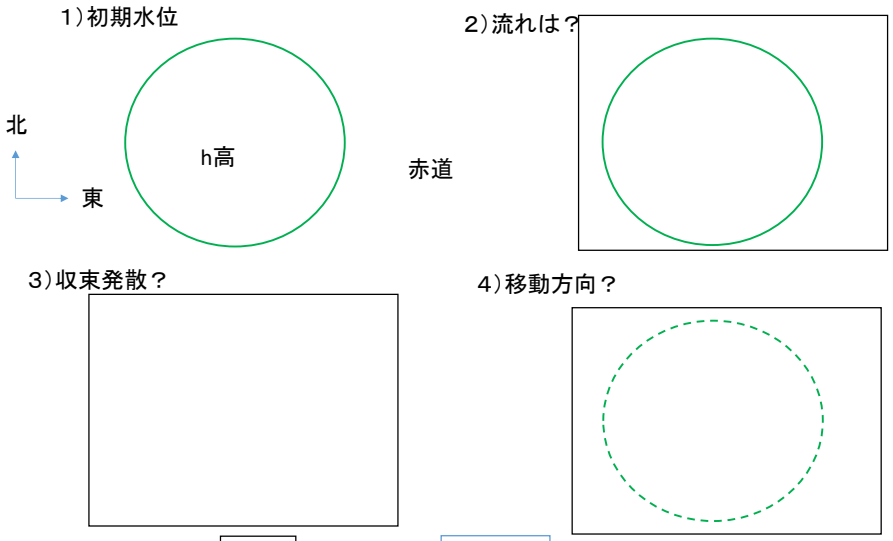
式番号について：異なるスライドで式を引用するときには，(3.1)などと(章番号.式番号)としています．一つのスライドの中，あるいはすぐ次のスライドだけで使うなら①などとしています．

本日の目的

- 今日は，ロスビー波，そして1.5層モデルを導入する．
- 地球流体の特徴は，コリオリ力を受けることで，しかもコリオリパラメータ(f=2Ω sinθ)が 緯度 の関数であることから明白なように，コリオリ力の効果が緯度によって違う．この緯度変化の効果から生じる2つの波がある．一つが前回学んだ赤道を東に進む[　　]波で，もう一つが中緯度を西に進む[　　]波である．
- またエルニーニョを含めて多くの風が海を駆動する現象で，海洋の運動は上層に限られるので，海が上から下まで動くという1層モデルでは都合が悪い．この問題を解決する，上層だけ動く[　　]を導入しよう．

ロスビー波

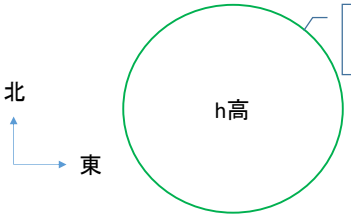
地衡流の収束・発散？（f一定の場合）



収束発散は[　　]，伝播は[　　]

ロスビー波のメカニズム．北半球の場合

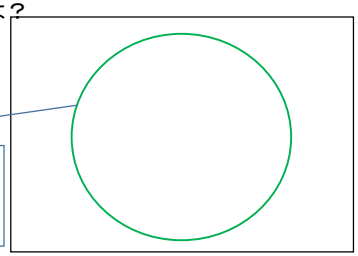
1）初期水位



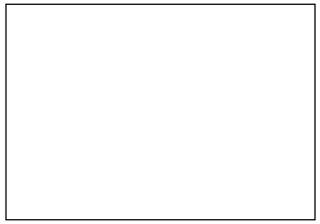
円の中心で圧力が高いことを仮定．

コリオリパラメータの絶対値は北 側で大きい．

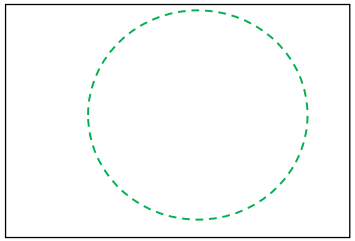
2）流れは？



3）収束発散？



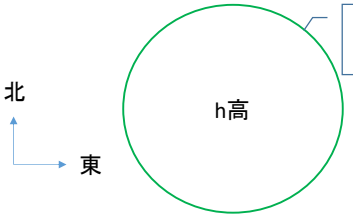
4）移動方向？



伝播方向は［　　］向き

ロスビー波のメカニズム．南半球の場合

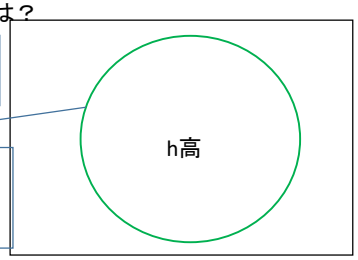
1）初期水位



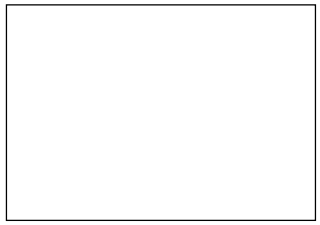
円の中心で圧力が高いことを仮定．

コリオリパラメータの絶対値は［　　］側で大きい．

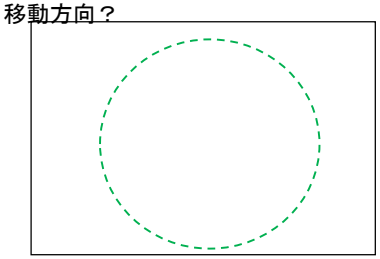
2）流れは？



3）収束発散？



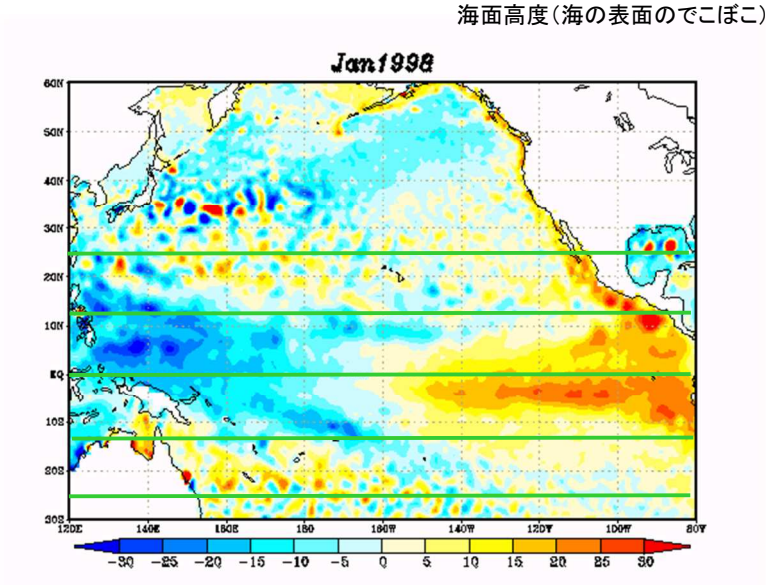
4）移動方向？

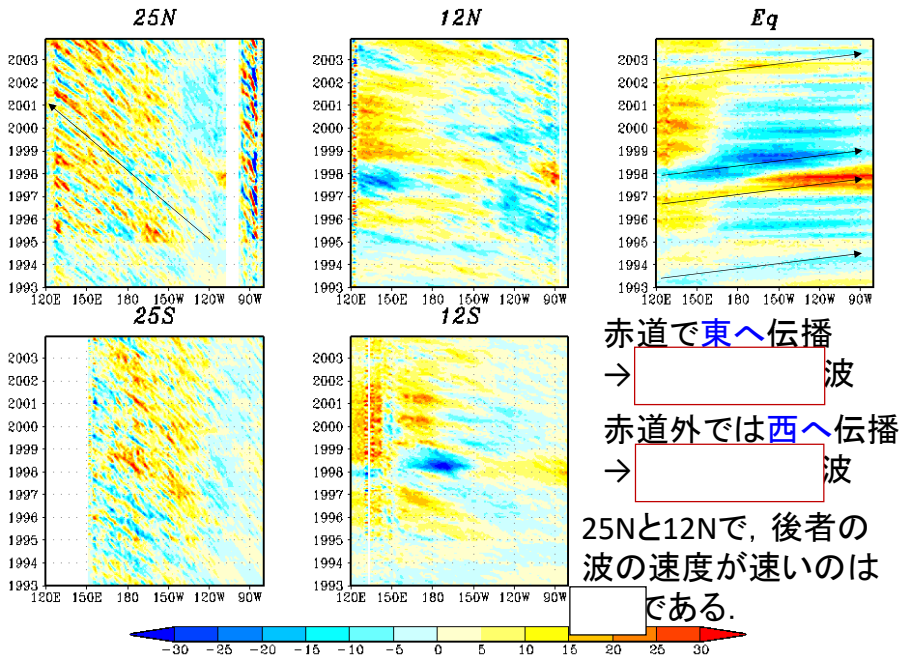


伝播方向は［　　］向き

海に見えるロスビー波

海面高度（海の表面のでこぼこ）





赤道で東へ伝播

→［　　］波

赤道外では西へ伝播

→［　　］波

25Nと12Nで，後者の波の速度が速いのは［　　］である．

定量的に理解するために式を使おう.
前回学んだ, 摩擦・風応力を考えない浅水方程式系は,

東向き運動方程式 $\cancel{u_t} - fv = -gh_x$ ①

北向き運動方程式 $\cancel{v_t} + fu = -gh_y$ ②

連続の式 $h_t = -H(u_x + v_y)$ ③

- 簡素化のために, 運動方程式の時間変化項を無視(消去)したい
- 前回のスケーリングの議論を踏まえると, 時間変化項を無視できるのは, 以下の二つの等価な場合である
  - 時間スケールが □ よりも十分長い
  - 空間スケールが □ よりも十分大きい
- 今回導出するロスビー波は, □ ロスビー波と呼ばれる

長波ロスビー波の伝播速度

$df/dy \equiv$ □ $\neq 0$ に注意

東向き運動方程式 $-fv = -gh_x$ ①

北向き運動方程式 $+fu = -gh_y$ ②

連続の式 $h_t = -H(u_x + v_y)$ ③

- クロス微分の定跡: ∂②/∂x-∂①/∂yで, 必ず □ 消すことができる.
- → $f(u_x + v_y) +$ □ $= 0$
- これを③に代入して $h_t =$ □
- これに①を代入してvを消すと $h_t -$ □ $h_x = 0$ (4.1)
- これは一階線形偏微分方程式(伝播方程式).
- 伝播方向は □ 伝播速度は $\beta \dfrac{gH}{f^2} = \beta$ □

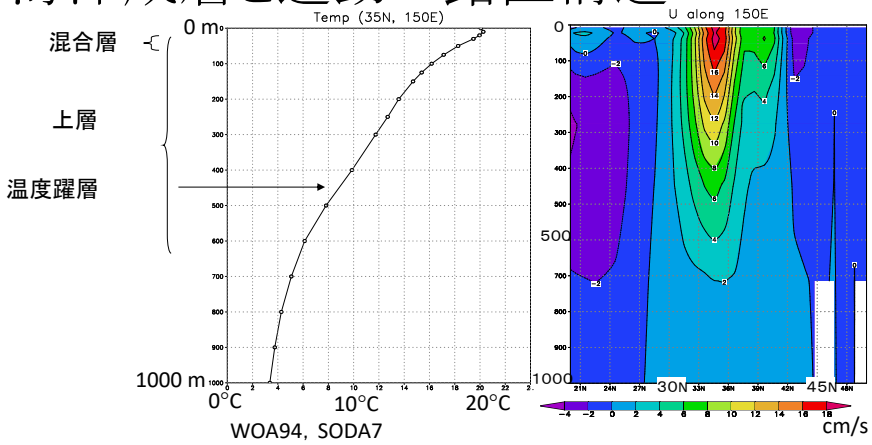
前回登場のロスビーの変形半径R_Oを使うと

海のロスビー波の速度を計算しよう

- Q. 水深4000 m, 重力加速度 10 m/s^2, として25Nでのロスビー波の伝搬速度を求めよ. なお, f=2Ω sinθ = 6×10^{-5} s^{-1}, β=(2Ω/a) cosθ =2×10^{-11} m^{-1} s^{-1} を用いよ(aは地球半径). また, スライド9の図より25Nの伝搬速度を求めよ. この際, 経度1度当たりの距離が, 25Nで100 kmであることを用いる.両者の結果は一致するといえるか?
- □

1.5層モデル

海洋成層と運動の鉛直構造

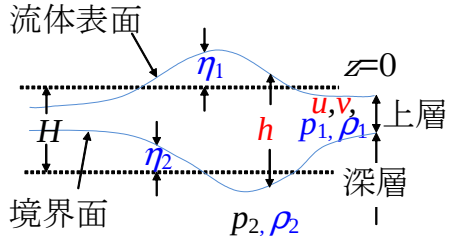


海洋の運動の多くは，上から下まで一様（1層）ではなく，上（上層）だけ速い．

→2層のうち上層だけ動く，[　　] が有効．

1.5層モデル1/3

- 密度が少し異なる，2層流体を考える．
- 2層目の厚さが，無限だと仮定する．→2層目は動かない．



- **この場合，上層の流速をu, v とすると，以下の浅水方程式と同じ形の**

$$u_t - fv = -g'h_x \quad (4.2a)$$
$$v_t + fu = -g'h_y \quad (4.2\ b)$$
$$h_t + H(u_x + v_y) = 0 \quad (4.3)$$

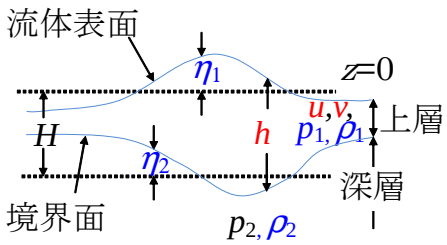
- **方程式系が得られることを示そう．ここで，g'は[　　]と呼ばれる量である．**

$$g' = g\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0} \quad (4.4)$$

1.5層モデル2/3

上層の（線形）運動方程式は1層モデルと一緒で

$$u_t - fv = -g\eta_{1x} \quad ①a$$
$$v_t + fu = -g\eta_{1y} \quad ①b$$



- 一方連続の式は明らかに次式が成り立つ

$$h_t + H(u_x + v_y) = 0, \qquad h = H + \eta_1 - \eta_2$$

下層が動かないので，p_2はゼロ．

- したがって，η_1をhのみで表せればよい．この関係を出すのに，2層目が動かないという条件を使う．まずp_2は(水平変化成分のみに着目して)

$$p_2 = p_1 + \rho_0 g'[\ ] = \rho_0 g[\ ] + \rho_0 g'[\ ]$$ ←四角にη_1かη_2を入れよう

- なので，これがゼロとなるには　$\eta_2 = -\eta_1[\ ]$,
- gはg'よりもずっと大きいので　$|\eta_2| >> [\ ]$
- したがって，hから水平変化に寄与しないHを取り除いて考えると

$$h \approx -\eta_2,\ \eta_1 = hg'/g \quad ②$$

1.5層モデル3/3

- 一つ前スライドの運動方程式①abに，②を代入すると

$$u_t - fv = -[\ ] \qquad v_t + fu = -[\ ]$$

- となって求める運動方程式(4.2ab)が得られた．(導出完了)
- 1.5層モデル方程式系は[　　]重力モデルとも呼ばれる．
- 1層浅水方程式の,重力加速度が[　　]に，全水深が[　　]に，置き換わっただけ．

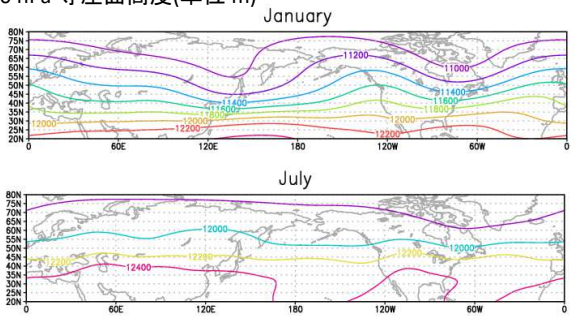
1層モデルvs1.5層モデル

- 1層モデルの層厚をH=4000 m，重力加速度をg=10 m/s^{2}とし，1.5層モデルの層厚さをH=300 m，低減重力を g'=0.03 m/s^{2}とする．
- 共通のパラメータとして，f=2Ω sinθ= 6×10^{-5} s^{-1}, β=(2Ω/a) cosθ =2x10^{-11} m^{-1} s^{-1}とする．（aは地球半径）
- Q1 1.5層モデルで重力波の速度を表す式を書き，速度を求めよ．
-
- Q2 1.5層モデルで長波ロスビー波の速度を表す式を書き，速度を求めよ．この速度は，上で求めたロスビー波速度の観測値と一致すると言えるか？
-

大気のロスビー波

ジェット気流の蛇行

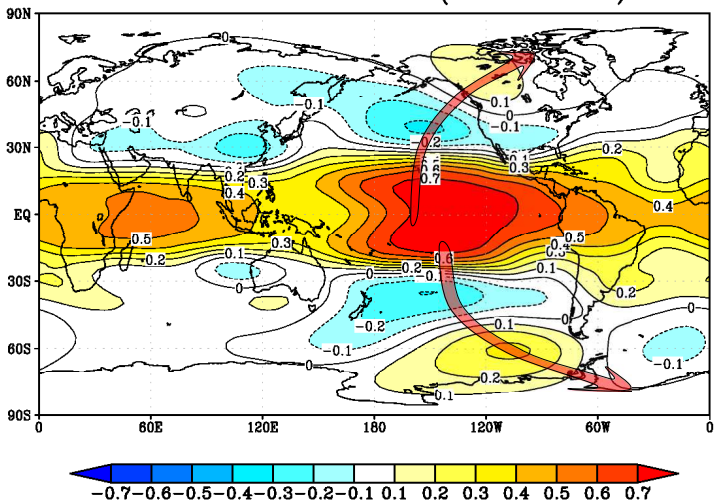
200 hPa 等圧面高度(単位 m)



- 北半球冬季には，ジェット気流の速度が速くチベット高原やロッキー山脈が影響する地形効果と，海洋から大気への熱供給が強いために，ロスビー波によるジェット気流の蛇行が，北半球夏季よりも大きい．

Nino3.4と200 hPa等圧面高度の相関

crr Nino34 vs z200 (1950−2010)

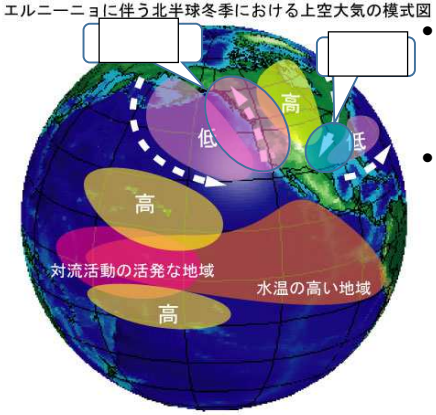


第一回スライド再掲

エルニーニョの影響は中高緯度に及ぶ

テレ・コネクション

エルニーニョに伴う北半球冬季における上空大気の模式図

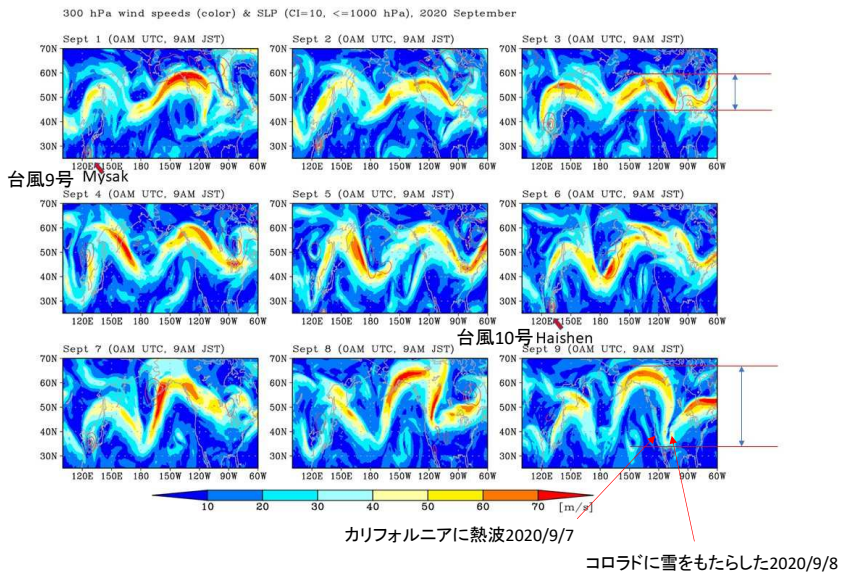


-
  - ある場所の気候状態が離れた地点の気候状態に影響
- 代表格が，エルニーニョに伴って生じる (左図)

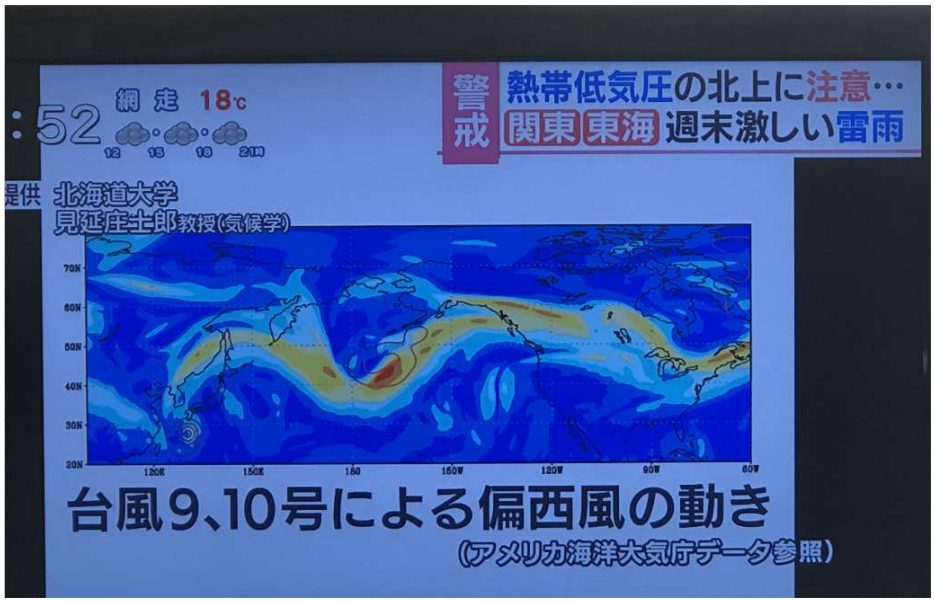
大気のロスビー波

- 中緯度の大気では，東西方向に地球を一周する 風（ 向き）の成分が強い．
  - 陸があるので，海流は地球を東西方向に一周できない．
- その強い西風と，静止流体では西に伝播しようとする 波の速度が逆方向で大きさが等しいと，波の伝播が風に押しとどめられ， 波が生じる．
  - 実際には，ロスビー波は様々な速度（とそれに対応した波長）を持つので，定在する波が選択的に励起される．
- 定在ロスビー波の存在には西風が不可欠なので，貿易風などの 風領域では，ロスビー波は存在できない．
- 定在ロスビー波はエネルギーを必ず に伝えるので，エルニーニョに伴う大気のロスビー波はアメリカ大陸を直撃するけれど，日本には来ない．日本へのエルニーニョの影響は間接的なメカニズムによる．

数日スケールではロスビー波の伝播が見える



9月11日 TBS あさちゃん



2020年(令和2年)9月9日(水曜日)　夕刊　読売新聞

米国で寒波となった主な要因(イメージ)

※見延・北海道大教授への取材に基づく

台風9・10号 北米寒波に影響か

ジェット気流の蛇行招く

9月上旬に九州西岸を相次いで北上した台風9号、10号が、米国中西部で起きた寒波の遠因となったとみられることが、北海道大の見延庄士郎教授（気候学）の分析でわかった。台風が北半球を東西に流れるジェット気流を大きく蛇行させ、北米大陸の大気の流れを変えた可能性があるという。

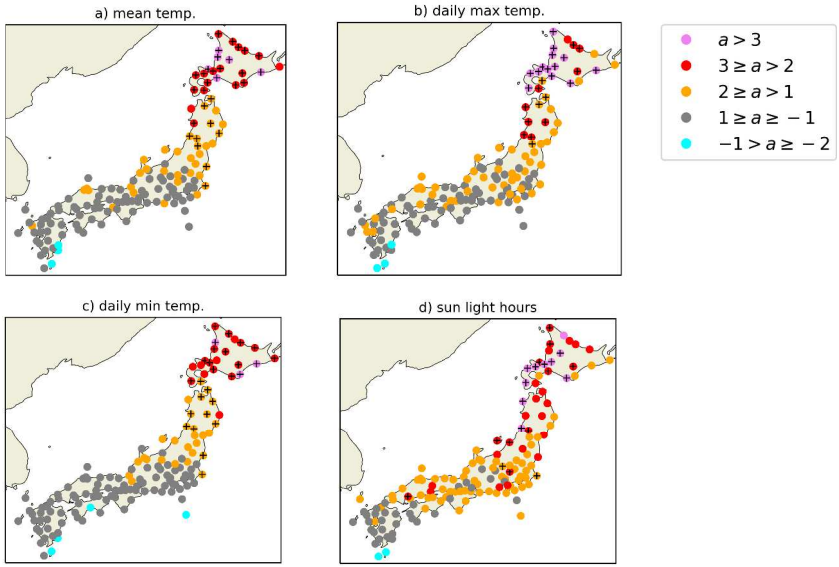
二つの台風は、2日から7日にかけて九州西岸を連続して通過した。米気象局によると、中西部はこの時期として異例の寒波に見舞われ、コロラド州デンバーでは5日（現地時間）の最高気温は約38度の猛暑だったが、8日午前（同）には気温が0度前後まで急低下した。

見延教授は米海洋大気局の気象データを入手し、北緯30～60度の上空を南北方向に蛇行しながら東向きに流れているジェット気流の動きを解析。二つの台風が九州西岸を進んで朝鮮半島付近に達した後、蛇行の振れ幅が通常より強まったことを確認した。

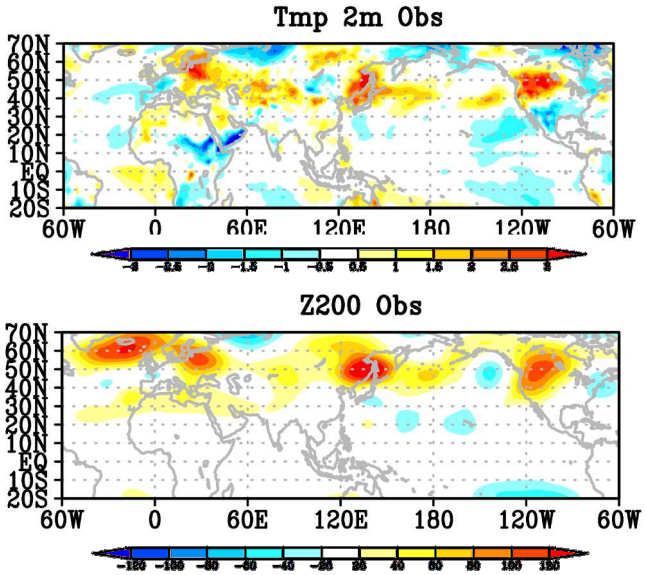
分析の結果、8日頃には気流が米アラスカ付近からカナダ北部を経て南下し、米中西部へと深く進入する経路を取ったことが判明。見延教授によると、二つの台風の激しい上昇気流でジェット気流が蛇行を強め、北側の寒気を南側へ引き込んだとみられるという。

榎本剛・京都大教授（気候力学）の話「台風は激しい気象現象なので、周りの大気の流れや温度に大きな影響を与える。今回は台風通過後にジェット気流が蛇行し、異常気象の連鎖を引き起こしたと言える」

2021年北海道熱波 1/2
2021年7月17日-8月7日平均の規格化



2021年北海道熱波 2/2　2021年7月偏差



ヨーロッパ，北米西部，日本付近で熱波が生じた

それぞれの地域で200 hPa等圧面高度が高偏差となっており，このパターンはCircumglobal teleconnection pattern として知られているものである．

第4回のまとめ1/2

- 赤道に沿って［　］に伝播する波が［　　］波，1層モデルの伝播速度は［　］．岸に沿うのは［　　］波．
- 長波ロスビー波は，［　］に伝播し，その速度はロスビーの変形半径をR_Oとすると，［　］である．ロスビーの変形半径は，重力波が1日のスケールで伝播できる距離を表し，1層モデルでは　$R_O =$［　］である．
- 流体が動く上層と，動かない無限の厚さを持つ2層からなるモデルを，［　］モデルという．このモデルでの重力波の伝播速度は低減重力を g' で表すと，［　］である．
- 海面水位の凹凸が赤道外で西へ伝播する様子は，［　］層モデルの［　］波でよく説明できる．

第4回のまとめ2/2

- 1.5層モデルは1層浅水方程式の重力加速度が に，全水深が に，置き換わったものであり，外力・摩擦がない場合の式は，以下のとおりである．

$$u_t \square = \square \quad (4.2a)$$

$$v_t \square = \square \quad (4.2\ b)$$

$$h_t + H(u_x + v_y) = 0 \quad (4.3)$$

$$g' = \square \quad (4.4)$$

- 月よりも長い時間スケールの大気のロスビー波は，位相が空間的に固定される 波である．
- 大気のロスビー波は，ジェット気流の ，およびある場所の気候状態が離れた地点の気候状態に影響する で重要である．