

## 夏季アジアジェットに沿った準定常ロスビー波束伝播とPJパターンとの力学的関連性

竹村 和人 (京都大学大学院理学研究科、気象庁気候情報課)

向川 均 (京都大学大学院理学研究科)

### 1. はじめに

盛夏期の日本の天候に大きな影響を与えるテレコネクションパターンとして、シルクロードパターンに代表されるような対流圏上層におけるアジアジェット沿いの準定常ロスビー波列 (Enomoto et al. 2003, Enomoto 2004, Kosaka et al. 2009)、及び対流圏下層において卓越する太平洋・日本 (Pacific-Japan; PJ) パターン (Nitta 1987, Kosaka and Nakamura 2006) の存在が知られている。

この2つのテレコネクションパターンについて、Kosaka and Nakamura (2010)は、月平均データに基づく対流圏下層の相対渦度偏差を対象とした主成分分析を行い、その第1主成分スコアに回帰させた偏差パターンより、PJパターンとアジアジェットに沿う波列パターンが統計的に関連することを示唆したが、両者の力学的関連性及びそのメカニズムは明らかではない。これらのテレコネクションパターンは、いずれも月内の時間スケールにおいて発現するため、日別値を用いた解析を行うことにより、両パターンの力学的関連性を明らかにできることが期待される。また、竹村 (2013) は、2012年8月中旬後半～下旬前半における事例解析を行い、アジアジェットに沿うロスビー波の波束伝播が、日本付近における砕波及びそれに伴う北西太平洋亜熱帯域における積雲対流活動の活発化を通して、PJパターンの発現に寄与した可能性を示唆している。

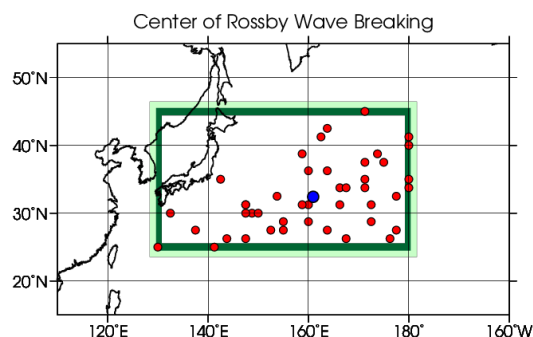
そこで本研究では、再解析データを用いて、過去の同様の事例を含めた統計解析を行うことにより、ロスビー波の砕波を通した両パ

ターンの力学的結合過程の存在と、そのメカニズムを明らかにすることを目的とする。

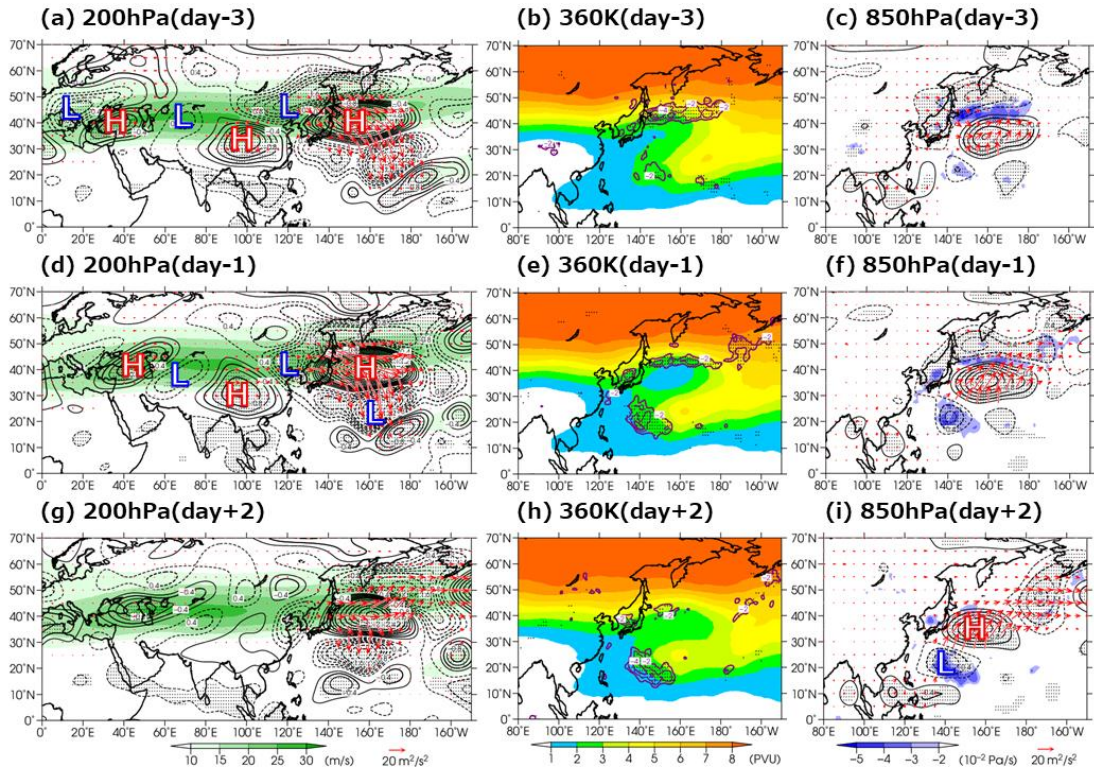
### 2. 使用データと解析手法

大気循環場のデータには、水平解像度  $1.25^\circ$ 、鉛直37層 (1000~1hPa) からなる気象庁55年長期再解析 (JRA-55; Kobayashi et al. 2015) を用いた。海面水温 (SST) のデータには、水平解像度  $1^\circ$  のCOBE-SST (Ishii et al. 2005) を用いた。対象期間は、いずれも1958~2018年の各年夏である。ここで、気候値は1981~2010年平均値に対して60日 (項数121) の低周波フィルター (Duchon 1979) を施した値、偏差は気候値からの差で定義した。準定常ロスビー波の変動に着目するため、大気循環場データに対して、5日移動平均を施した。

本研究では、Pelly and Hoskins (2003) の手法に基づき、7~8月の期間を対象に、以下2つの条件により計44の砕波事例を抽出した。



第1図 砕波事例の抽出における対象領域 (緑枠)、抽出した44事例における砕波の中心位置 (●)、及び全事例で平均した砕波中心位置 (●)。



第2図 (上段) day-3、(中段) day-1、(下段) day+2における、(左図) 200hPa 相対渦度偏差 (等値線; 単位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 破線: 正の値) と東西風気候値 (緑陰影)、(中央図) 360K 渦位 (陰影; 単位: PVU) と 500hPa 鉛直 p 速度偏差 (紫線; 単位:  $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ ; 負偏差域のみ)、及び (右図) 850hPa 相対渦度偏差 (等値線) と 500hPa 鉛直 p 速度偏差 (陰影)。赤矢印は Takaya and Nakamura (2001) の波の活動度フラックス (単位:  $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ )。ドットは、(左・右図) 相対渦度偏差、(中央図) 500hPa 鉛直 p 速度偏差が、95%信頼水準で統計的に有意な領域を示す。’H’、’L’ は、それぞれ着目している波列パターンに伴う高気圧、低気圧偏差の中心付近を表す。

・第1図の緑枠域内 ( $25^{\circ}\text{--}45^{\circ}\text{N}$ ,  $130^{\circ}\text{E}\text{--}180^{\circ}$ ) において、北側  $15^{\circ}$ —南側  $15^{\circ}$  間における力学的対流圏界面 (2PVU 面) 上の温位の差が正、すなわち温位の南北勾配が逆転している。

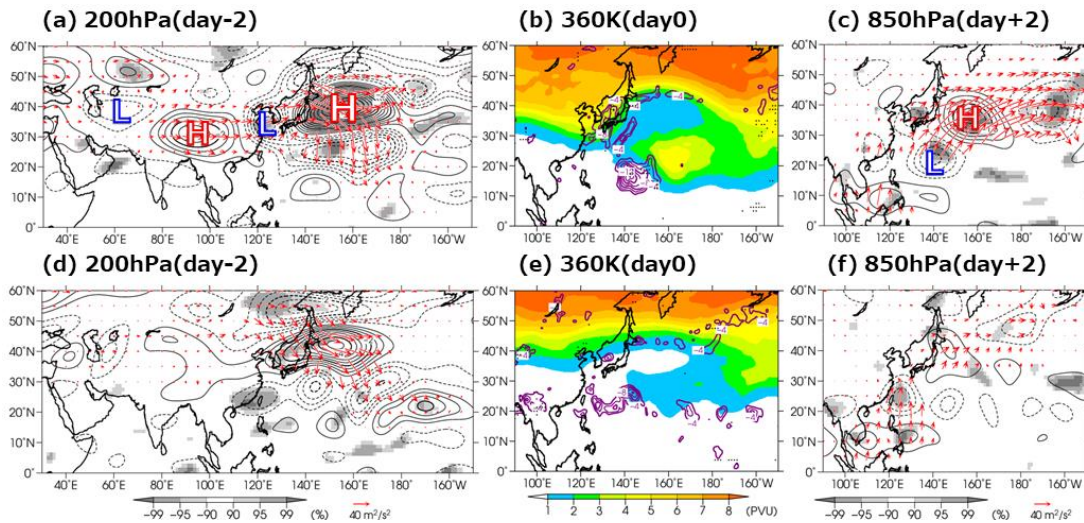
・温位南北勾配が逆転した状態が、少なくとも4日間以上連続して生じている。

第1図において、●は抽出した各事例における碎波の中心位置を、●は全44事例で平均した中心位置を示す。さらに、碎波の中心を合わせるために、各事例における大気循環場を平均位置 (●) ヘシフトさせた後に、統計解析を行った。以後、ラグ合成図解析における day0 を、碎波中心日として定義する。

### 3. ラグ合成図解析

#### 3.1 全44事例の合成図

第2図に day-3、day-1、day+2 における 200hPa、850hPa 相対渦度偏差、360K 渦位及び 500hPa 鉛直 p 速度の負偏差域を示す。day-3 (第2図(a)) では、対流圏上層における気候学的アジアジェット (同図の緑陰影) に沿う準定常ロスビー波束の伝播がみられ、日本の東海上における高気圧偏差の形成に寄与していることがわかる。この波束伝播は、day-1 (第2図(d)) にかけて継続し、日本の東海上における高気圧偏差が最も強まる。このことに対応して、360K 渦位の南北勾配が逆転し、日本の東海上において逆 S 字型の碎



第3図 (上段) Case+, (下段) Case-における、(左図) day-2の200hPa相対湿度偏差(等値線; 単位:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ; 破線: 正の値、(中央図) day0の360K渦位(陰影; 単位: PVU)と500hPa鉛直p速度偏差(紫線; 単位:  $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ ; 負偏差域のみ)、及び(右図) day+2の850hPa相対湿度偏差(等値線)。左・右図の赤矢印は、Takaya and Nakamura (2001)の波の活動度フラックス(単位:  $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ )。灰色陰影(ドット)は、相対湿度偏差(500hPa鉛直p速度の負偏差)の全事例平均からの差が95%信頼水準で統計的に有意な領域を示す。'H'、'L'は、それぞれ着目している波列パターンに伴う高気圧、低気圧偏差の中心付近を表す。

波が生じている(第2図(e)の陰影)。また、砕波に伴う北西太平洋亜熱帯域への高渦位空気塊(High-Q)の侵入を通して、その前面において上昇流偏差が明瞭となり、積雲対流活動が活発化している(第2図(e)の紫線)。その後、day+2には、活発な積雲対流活動と関連して、対流圏下層においてPJパターンが発現している(第2図(i))。一方、対流圏上層では、アジアジェットに沿う波束伝播は弱まっている(第2図(g))。

これらの結果より、約1週間の時間スケールにおいて、アジアジェット沿いの波束伝播は、日本の東海上における砕波及びそれに伴う亜熱帯域における活発な積雲対流活動を通して、PJパターンの発現に寄与することがわかる。

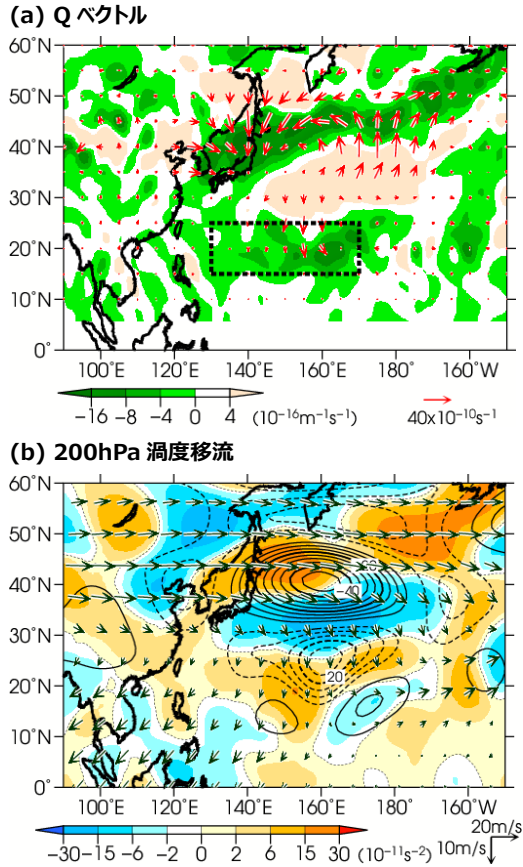
### 3.2 砕波強度で分類した合成図

次に、全44事例間において砕波が強かった事例(Case+)と弱かった事例(Case-)に

分類して比較することにより、PJパターンの発現の強弱に対する、アジアジェット沿いの波束伝播の影響を調べる。ここで、砕波強度を、砕波中心の東西 $20^\circ$ 幅における南北 $15^\circ$ 間の350K渦位差で定義し、Case+(Case-)は、砕波強度が+1(-1)標準偏差以上(以下)の事例(両7事例ずつ)とした。Case+の合成図(第3図上段)をCase-(同図下段)と比較すると、砕波が強い事例では、対流圏上層におけるアジアジェット沿いの波束伝播が明瞭で、砕波に伴う北西太平洋亜熱帯域における積雲対流活動も活発となるため、PJパターンがより明瞭に発現することがわかる。

### 4. 砕波と活発な積雲対流活動との関係

砕波に伴う北西太平洋亜熱帯域へのHigh-Qの侵入と、活発な積雲対流活動との関係について力学的解釈を行うため、Qベクトルに基づく診断を行う。



第4図 day0における、(a)850~200hPaで鉛直重み付き積算したQベクトル偏差(赤矢印; 単位:  $s^{-1}$ )とその収束発散(陰影; 単位:  $m^{-1}s^{-1}$ ), (b)200hPa水平風による渦度移流偏差(陰影; 単位:  $s^{-2}$ ), 相対渦度偏差(等値線; 単位:  $10^{-6} s^{-1}$ ), 及び水平風気候値(矢印; 単位:  $m/s$ )。

非断熱過程を考慮しない $\omega$ 方程式は、次のように書くことができる。

$$\left(\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2}\right)\omega \approx \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left[ \mathbf{v}_g \cdot \nabla \left( \frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi + f \right) \right] + \frac{1}{\sigma} \nabla^2 \left[ \mathbf{v}_g \cdot \nabla \left( -\frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) \right] \quad (1a)$$

$$\approx -\frac{2}{\sigma} \nabla \cdot \mathbf{Q} + \frac{f_0}{\sigma} \beta \frac{\partial v_g}{\partial p} \quad (1b)$$

$$\mathbf{Q} \equiv \left( -\frac{R}{p} \frac{\partial v_g}{\partial x} \cdot \nabla T, -\frac{R}{p} \frac{\partial v_g}{\partial y} \cdot \nabla T \right) \quad (2)$$

ここで、 $\omega$ は鉛直p速度、 $f$ はコリオリパラメータ、 $\beta$ は $f$ の南北微分、 $\sigma$ は静的安定度、 $\mathbf{v}_g = (\mathbf{u}_g, \mathbf{v}_g)$ は地衡風ベクトル、 $\Phi$ はジオポテ

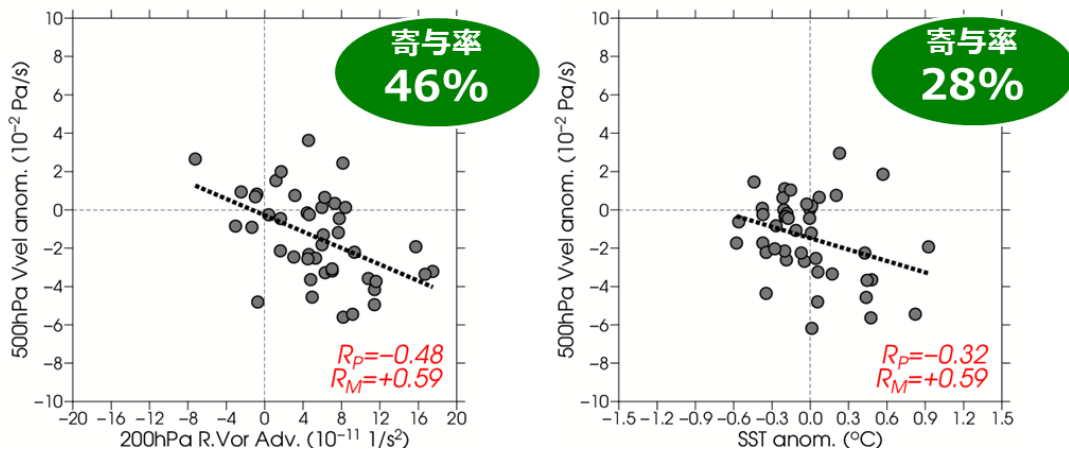
ンシャル、 $T$ は気温を表す。式(1a)より、 $\omega$ は、渦度移流の鉛直差及び温度移流とバランスする。さらに、式(2)で定義されるQベクトルを用いて、式(1a)の右辺を、式(1b)に変形すると、Qベクトルの収束は負の $\omega$ 、すなわち力学的上昇流と対応することがわかる。また、ラグ合成図解析の結果から示されるHigh-Qの亜熱帯域への侵入、すなわち対流圏上層における強い正渦度移流は、式(1a)の右辺第1項と関連し、力学的上昇流の生成に寄与すると推測できる。

第4図(a)に、day0における850~200hPaで鉛直重み付き積算したQベクトル及びその収束発散の偏差を示す。この図より、北西太平洋の20°N帯において、Qベクトルの収束域が带状にみられ、力学的上昇流の存在を示している。さらに、第4図(b)に示した200hPa水平風による渦度移流偏差(陰影)より、砕波に関連した25°N帯における低気圧偏差(破線)の南側、すなわち風下側における正渦度移流は、Qベクトルの収束域とよく対応していることが見て取れる。これらの結果より、砕波と関連したHigh-Qの侵入に伴う力学的上昇流が、北西太平洋亜熱帯域における活発な積雲対流活動に寄与することがわかる。

### 5. 活発な積雲対流活動との偏相関解析

前節では、砕波に伴う活発な積雲対流活動への影響について示したが、亜熱帯域における積雲対流活動には、SSTも大きな影響も与えることが考えられる。そこで、第4図(a)の点線枠域(15°-25°N, 130°E-170°)における領域平均値に基づき、以下の変数の組み合わせによる偏相関解析を行った。

- ・説明変数1: day0における、200hPa水平風による渦度移流偏差(以下、渦度移流)



第5図 (a)day0における、200hPa水平風による渦度移流偏差(単位:  $10^{-11} \text{ s}^{-2}$ )と500hPa鉛直p速度偏差(単位:  $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ )、及び(b)day-15~-6平均のSST偏差(単位:  $^{\circ}\text{C}$ )とday0の500hPa鉛直p速度偏差との散布図。第4図(a)の点線枠域における領域平均値で評価した。(a)はSST偏差と関連する変動を、(b)は渦度移流偏差と関連する変動を、それぞれ除去した。破線は回帰直線、図中の $R_P$ は偏相関係数、 $R_M$ は重回帰係数。偏回帰係数から見積られる各説明変数による鉛直p速度への寄与率を図右上に示す。

・説明変数2: day-15~-6平均のSST偏差(以下、SST)

・目的変数: day0における、500hPa鉛直p速度偏差(以下、上昇流)

ここで、SSTに関しては、活発な積雲対流活動に伴う海面の蒸発冷却の影響を除くために、積雲対流活動が活発となる前の期間であるday-15~-6平均で評価した。

第5図(a)に渦度移流と上昇流、同図(b)にSSTと上昇流の散布図を示す。これらの散布図において、第5図(a)からはSSTと関連する変動、(b)からは渦度移流と関連する変動を、それぞれ除去している。上昇流との偏相関係数(図右下の $R_P$ )を比較すると、渦度移流と上昇流が、より高い相関をもつことがわかる。また、偏回帰係数より見積られる上昇流への寄与率(図右上)を比較しても、渦度移流による寄与率(46%)は、SSTによる寄与率(28%)と比較して大きいことがわかる。

この結果は、北西太平洋亜熱帯域における活発な積雲対流活動には、砕波に伴うHigh-Qの侵入が、SST偏差と比較して、より大き

く寄与することを示している。

## 6. まとめ

本研究では、日本付近及びその東海上における計44の砕波事例を対象とした、ラグ合成図解析を行った。その結果、約1週間の時間スケールにおいて、対流圏上層におけるアジアジェットに沿うロスビー波の波束伝播が、日本付近及びその東海上における砕波と、それに関連した北西太平洋亜熱帯域へのHigh-Q侵入に伴う活発な積雲対流活動を通して、PJパターンの発現に寄与することがわかった。また、砕波強度によって事例を分類したラグ合成図解析より、アジアジェット沿いの波束伝播が明瞭な事例では、強い砕波及びそれに伴う北西太平洋亜熱帯域における活発な積雲対流活動を通して、PJパターンがより明瞭に発現する傾向が示された。

さらに、北西太平洋亜熱帯域における上昇流の強さとの偏相関解析より、活発な積雲対流活動には、SST偏差と比較して、砕波に伴うHigh-Qの侵入がより大きく寄与すること

が、定量的に示された。

#### 参考文献

- 竹村, 2013: 2012年の北・東日本の厳しい残暑の解析. 平成25年度季節予報研修テキスト, **26**, 63-69.
- Duchon, C. E, 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 1016-1022.
- Enomoto, T., B. J. Hoskins, and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 157-178.
- Enomoto, T., 2004: Interannual Variability of the Bonin High Associated with the Propagation of Rossby Waves along the Asian Jet, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1019-1034.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865-879.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **132**, 2009-2030.
- Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2010: Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan pattern. *J. Climate*, **23**, 5085-5108.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.
- Pelly, J. L., and B. J. Hoskins, 2003: A new perspective on blocking. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 743-755.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.