

## 3-4 電離圏変動と中低層大気

### 3-4 Ionospheric Variations and Coupling with the Middle and Lower Atmosphere

#### 3-4-1 地球に固定された波数4の電離圏構造

##### 3-4-1 Ionospheric Wavenumber 4 Longitudinal Structure

陣 英克 佐川永一

JIN Hidekatsu and SAGAWA Eiichi

#### 要旨

人工衛星によるリモートセンシングから、電離圏に波数4の経度構造があることが最近分かってきた。一方、下層大気においては、海陸の分布によって積雲対流の活発な領域が経度方向に分かれ、そこから(地方時を固定すると)波数4に見える大気波動の発生が知られていた。従って、波数4の電離圏構造の発見は下層大気から電離圏への影響の可能性を明確に示すものであり、その後の地球大気上下結合についての観測計画やシミュレーション開発など多くの研究を呼び起こしている。本稿では、まずその発端となっている波数4の電離圏構造の観測を紹介する。そして、電離圏の波数4構造を再現する数値シミュレーションを紹介し、波数4構造における大気圏-電離圏結合のメカニズムについて考察する。

Recent satellite observations have revealed the existence of longitudinal wavenumber-4 structure in the ionosphere. On the other hand, it had been known that the region of active moist convection in the lower atmosphere depends on the land-sea distribution, and that it generates nonmigrating atmospheric waves which can be looked as wavenumber-4 when viewed in the local time-fixed frame. Therefore, the discovery of ionospheric wavenumber-4 structure suggests the effects of lower atmospheric activities could reach through the atmospheric layers to the altitude as high as the ionosphere, and motivates a number of subsequent observation and simulation studies. In this paper, we overview the first observation of ionospheric wavenumber-4 structure, and also a recent simulation study which investigates the coupling processes from the lower atmosphere to the ionosphere.

#### [キーワード]

電離圏, 対流圏, 大気圏-電離圏結合, 大気波動, 電離圏ダイナモ  
Ionosphere, Troposphere, Atmosphere-ionosphere coupling, Atmospheric wave, Ionospheric dynamo

### 1 まえがき：電離圏の緯度・経度構造

電離圏は、背景の中性大気が太陽紫外光を受けて電離することによって形成される。従って電離圏密度の分布は、中性大気密度や太陽放射強度の分布に応じて、緯度・高度・地方時に依存する。緯度分布に関して、これ以外に「赤道異常」と呼ば

れる特徴的な構造がある。赤道異常とは、そもそも日本人がイオノゾンデ観測より発見した構造<sup>[1]</sup>で、電離圏密度のピークが太陽放射の強い赤道でなく、磁気赤道を挟んで南北に分かれる構造を指す。その成因については、本特集号の<sup>[2]</sup>に詳しく書かれているが、電離圏ダイナモ過程で生成する電場と深い関わりがある。図1は、IMAGE衛星

から遠紫外光のリモートセンシングによって観測された赤道異常である[3]。図1は夜間の大気光観測であるが、赤道異常は日中の午前に発生し、日没後まで継続する。

電離圏密度の経度分布(地方時は固定する)に関しては、(背景の中性大気)の経度依存性が小さければ電離による経度分布は現れない。過去の経度分布の研究では、イオノゾンデ観測から赤道異常の経度依存性を調べた例があり、その要因として地球磁場の複雑な形状を、すなわち、地理赤道と磁気赤道のずれや、地球磁場の偏角(地理北極と磁北のずれ)、磁場強度などの経度依存を挙げている[4]。しかし、最近衛星によって観測された経度依存性は、磁場形状だけから説明しきれなかったため、何らかの別の効果を考える必要があった。

本稿では、衛星リモートセンシングによって最近発見された波数4の電離圏経度構造を紹介する(2)。この波数4構造の発見は下層大気から電離圏への影響の可能性を明確に示すものであり、その後の多くの研究を呼び起こしている。3では、具体的に電離圏の波数4構造と下層大気における気象活動との関連を述べる。最後に4では、波数

4構造を再現する数値シミュレーションを紹介し、波数4構造における大気圏-電離圏結合の具体的な物理メカニズムについて述べる。

## 2 衛星リモートセンシングにより発見された波数4の経度構造

図2は、前述のIMAGE衛星による遠紫外光の観測(波長135.6nm)から、同じ地方時(2200-2300LT)のデータを抽出して得られた赤道異常の経度分布である[3]。衛星軌道により、データは北半球に限られる。また、縦軸は磁気緯度を表し、経度300°付近は磁気赤道が南に大きくずれるため、観測データが十分でない。図2で大気光強度の強いところが磁気緯度10-20°にあるが、これが赤道異常のクレスト(緯度方向に沿って密度の

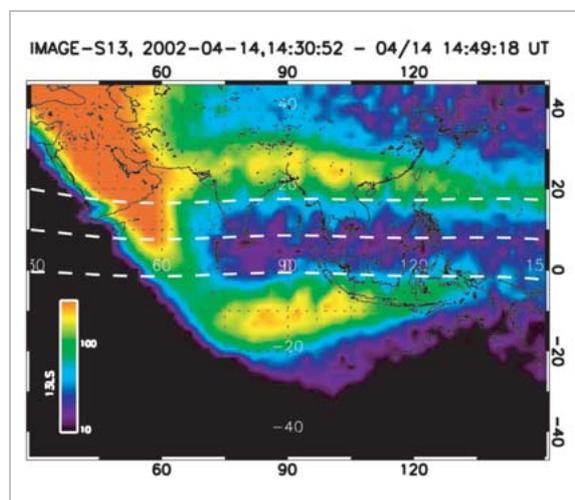


図1 IMAGE衛星の遠紫外光観測で捉えた電離圏の赤道異常[3]

IMAGE衛星の遠紫外光リモートセンシングで捉えた電離圏の赤道異常[3]。2002年4月14日1430-1449 UT (UT:世界時)の平均をとっている。3本の白い点線は、上から磁気緯度+10°、0°、-10°の位置を表す。図の中央付近で、南北に分かれて見える夜間の大気光が、電離圏の赤道異常を示している。左上の明るい部分は、日中の太陽光が当たる領域であり、左中央から下の黒い部分は、観測器の視野から外れた領域である。

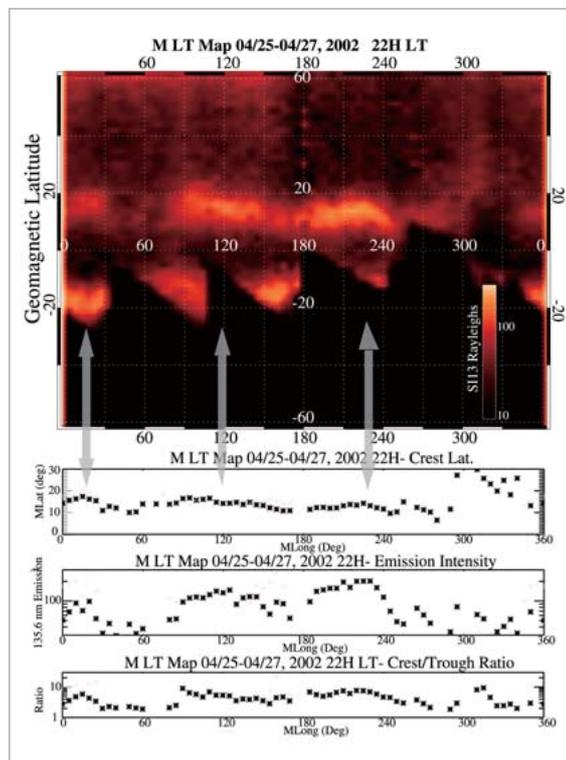


図2 IMAGE衛星の遠紫外光観測から得られた電離圏赤道異常の経度構造[3]

IMAGE衛星の遠紫外光リモートセンシングによる電離圏赤道異常の経度構造[3]。2002年4月25-27日の平均で、夜間(2200-2300LT, LT:地方時)の分布である。縦軸は磁気緯度である。衛星軌道の関係上、南半球のデータは欠けている。経度300°付近は磁気赤道が大きく南にずれるため、観測データも欠けている。下の3つのパネルは、赤道異常のクレスト(密度の濃い部分)の磁気緯度と大気光の強さ、およびクレストとトラフ(密度の薄い部分)の密度比を表している。

最も大きい領域)にあたる。赤道異常の経度分布に関して、クレストの大気光強度が経度 20°、120°、230° で強く、60°、150°、250° 付近で弱くなっており、波数 4 の経度間隔となっている。クレストの大気光強度が強いところでは、クレストの位置がより高緯度側にあり、またクレストとトラフ(密度の最も小さい領域であり、磁気赤道付近)の大気光強度比も大きくなっている。これは、電場の変動が赤道異常の経度依存性と関係している事を示唆している。

過去の地上観測による赤道異常の経度依存性の研究では、全球規模での経度分解能が十分ではなく、波数 4 構造の発見には至らなかった。上記の[3]による波数 4 構造の発見に続いて、他の衛星でも電離圏密度の波数 4 構造が確認されている。他の衛星では、夜間だけでなく日中の赤道異常にも波数 4 構造が見られている[5]。さらに、電離圏密度のみならず、背景の熱圏大気[6]や電離圏電流[7]などにも波数 4 構造が観測されている。なお、電離圏の経度構造は季節に依存し、北半球の春から夏、秋にかけて波数 4 構造が見られ、冬(12月付近)では波数 4 構造が不明瞭になり、波数 3 構造に近くなる[8][9]。

### 3 下層大気における気象活動と電離圏波数 4 構造とのつながり

電離圏の波数 4 構造が注目されるのは、その起源が下層大気にまで遡ると考えられるためである。図 3 は、衛星観測による雲頂温度から推定した年平均の雨量分布(1日周期成分)である[10]。図 3 に見られるように、雨量の多いところは、低

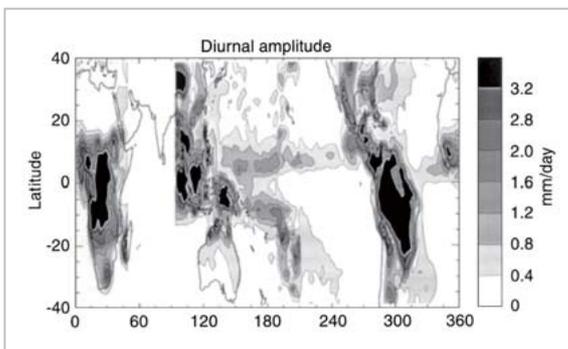


図3 雲頂温度から推定された年平均の雨量分布(1日周期成分)[10]

経度 50°-90° E には衛星データが無い。

緯度のアフリカ大陸、東南アジア、太平洋、アメリカ大陸というように4つの領域がある。これらの対流活動が活発な領域では、雲や雨粒の形成に伴って潜熱が解放され、それが大気波動のエネルギーとなる。対流活動で励起する大気波動が、高度 10 km 付近の対流圏から 100 km 以上の超高層領域にまでエネルギーを伝播し、電離圏の経度構造の形成に寄与すると考えられる。図 3 の雨量分布に基づいて、熱圏領域まで伝播する大気潮汐を調べた例によると、高度 100 km 付近では太陽と同期して西向きに伝播する波数 1 の潮汐(DW1: Diurnal westward propagating tide with zonal wavenumber 1)の他に、太陽と同期せず東に向かって伝播する波数 3 の潮汐(DE3: diurnal eastward propagating tide with zonal wavenumber 3)などが卓越する[10][11]。地方時を固定して見ると DW1 には経度依存性が無いが、DE3 には波数 4 の経度依存性があり、電離圏の経度構造との関連が示唆される。

### 4 数値シミュレーションで再現される電離圏波数 4 構造と形成メカニズム

電離圏波数 4 構造の発見がきっかけとなり、大気圏と電離圏の結合過程に関する数値シミュレーションも盛んになりつつある。図 4 は文献[2]で紹介した電気力学モデルの計算結果であり、電離圏プラズマの鉛直電場ドリフトの分布(高度 300 km、1200 LT)を表している。モデルに入力した中性風分布には、九州大学と東北大学で開発された拡張大気大循環モデル[13][14]の計算出力を使用している。大気大循環モデルの風速は日々変動が大きいが、図 4 は 30 日間(9月)の平均を取っ

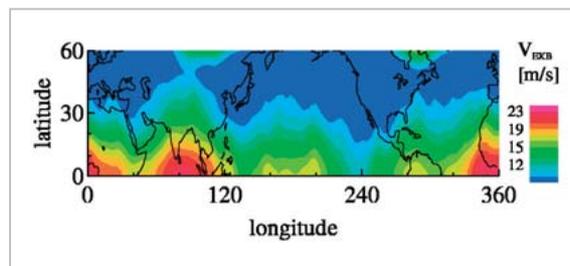


図4 電気力学モデルで再現された電離圏プラズマの鉛直電場ドリフト

(高度 300 km、1200 LT、30 日間の平均)

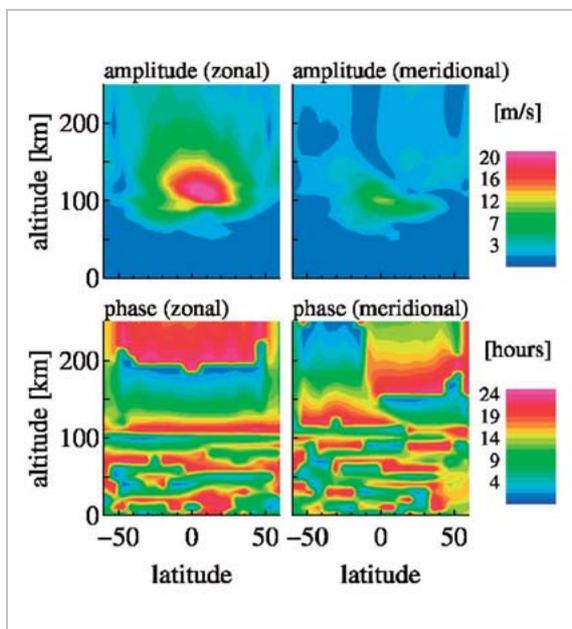


図5 拡張大気大循環モデルの結果から抽出したDE3成分の振幅と位相<sup>[14]</sup>

拡張大気大循環モデルの結果から抽出したDE3(東西波数3の東進1日周期潮汐)成分の振幅と位相<sup>[14]</sup>。(左上:東西風の振幅、左下:東西風の位相、右上:南北風の振幅、右下:南北風の位相)

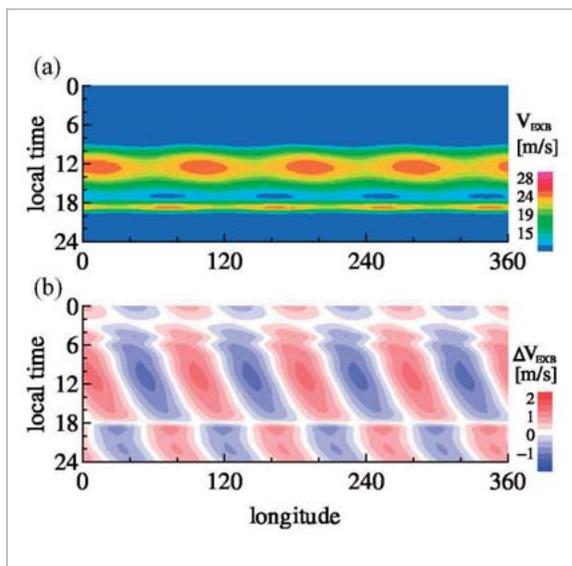


図6 DE3成分によるプラズマの鉛直電場ドリフトの経度-地方時分布<sup>[14]</sup>

(a) 太陽同期伝播の潮汐とDE3のみを入力にした電気力学モデルの計算結果<sup>[14]</sup>。高度300kmにおけるプラズマの鉛直電場ドリフトの経度-地方時分布を示す。(b) (a)から太陽同期成分の寄与を差し引いて、DE3成分の寄与のみを示したもの。

ている。図に示されているように、低緯度においてアフリカ大陸、東南アジア、太平洋、アメリカ大陸の4領域に電場ドリフトのピークがある。赤

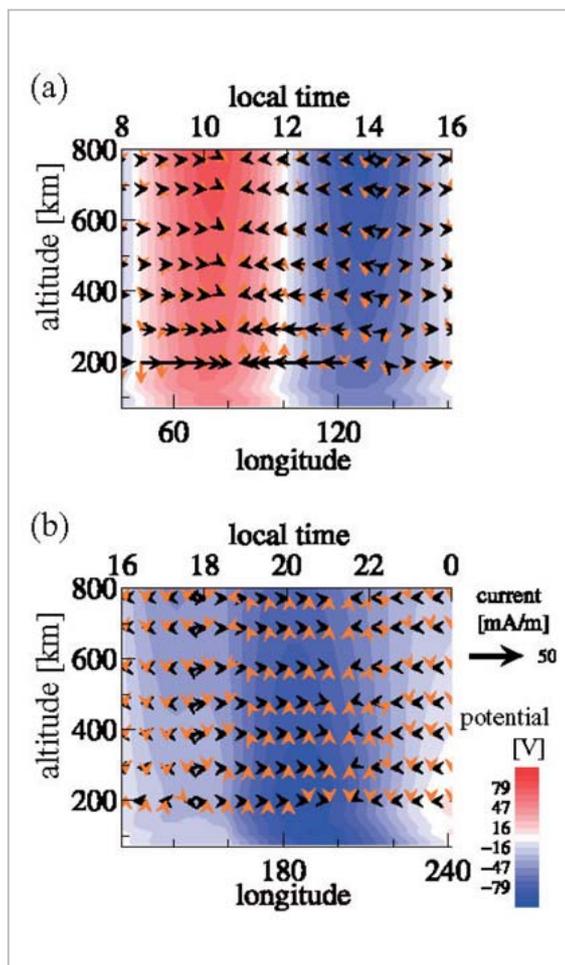


図7 電気力学モデルによって示された東西電場変動のメカニズム<sup>[14]</sup>

コンターは静電ポテンシャルの経度/地方時-高度分布(磁気赤道面)を示し、矢印は磁力線に沿って積分されたダイナモ電流の流れを示す(黒がHall電流でオレンジ色がPedersen電流)。これらの物理量はDE3成分の寄与のみを表している。(a)は0520 UT(図の中央で地方時が12時)、(b)は0800 UT(図の中央で地方時が20時)のスナップショットである。

道における東西電場(鉛直電場ドリフト)は赤道異常の駆動源となるので<sup>[2]</sup>、この電気力学モデルの結果は文献<sup>[3]</sup>の赤道異常の波数4経度構造と結びつく。

図4の計算では、大気大循環モデルの風速をそのまま入力しているため、大気大循環モデルで再現し得る全ての大気波動の寄与を含んでいる。一方<sup>3</sup>で紹介したように、下層大気起源の太陽非同期の潮汐として、DE3の振幅が熱圏において大きい事を述べた。そこで、DE3の電離圏波数4構造への寄与と生成メカニズムを調べるため、文献<sup>[14]</sup>では大気大循環モデルの風速分布から太陽同期の潮汐とDE3を抽出し、電気力学モデルに入力し

た。図5は、抽出されたDE3成分の振幅と位相の分布を表している。DE3の下層から超高層領域への伝播が見て取れる。また、東西風の振幅が低緯度の電離圏ダイナモの卓越する高度(110 km付近)で大きく、位相が緯度方向に一様である。この分布はダイナモ電場を生成するのに好条件である。

図6は、太陽同期の潮汐とDE3を入力した電気力学モデルの計算結果として、高度300 kmにおける鉛直電場ドリフトの経度-地方時分布を表している。そのうち、図6bはDE3の寄与のみを表示している。図6で明らかのように、DE3によって日中の鉛直電場ドリフトの波数4構造が形成されている。また、日中だけでなく、日没後の電場ドリフトにも波数4構造を生成している。

DE3がどのように東西電場(鉛直ドリフト)を作り出すかを示したものが図7である。詳細は文献[14]に譲るが、日中においてはDE3によって東西ダイナモ電流が流れ、ダイナモ電流の収束領域(図7aの経度75°付近)に正の電荷が、発散領域(図7aの経度135°付近)に負の電荷が蓄積する。そして、収束領域から発散領域に向かって分極電場が出来る。図7aでは75°-135°間で東向きに分極電場(上向き鉛直電場ドリフト)であり、日中の東向きの背景電場を強める。従って、この経度でDE3は赤道異常の発達を助長する。

## 参考文献

- 1 Namba, S., and K.-I. Maeda, "Radio Wave Propagation", Corona, Tokyo, 1939.
- 2 陣英克, "電離圏ダイナモについて", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-3-7, 2009.
- 3 Sagawa, E., T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende, "Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV", J. Geophys. Res., Vol.110, A11302, doi:10.1029/2004JA010848, 2005.
- 4 Walker, G. O., "Longitudinal structure of the F-region equatorial anomaly: A review", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.43, p.763, 1981.
- 5 Lin, C. H., C. C. Hsiao, J. Y. Liu, and C. H. Liu, "Longitudinal structure of the equatorial ionosphere: Time evolution of the four-peaked EIA structure", J. Geophys. Res., Vol.112, A12305, doi:10.1029/2007JA012455, 2007.
- 6 H. Liu, M. Yamamoto, and H. Lühr, "Wave-4 pattern of the equatorial mass density anomaly: A thermospheric signature of tropical deep convection", Geophys. Res. Lett., Vol.36, L18104, doi:10.1029/2009GL039865, 2009.

## 5 むすび

本稿で紹介したように、最近発見された電離圏の波数4構造は、下層大気に起源のある事が明らかにされてきた。本稿で紹介した以外にも下層大気から電離圏までのつながりを示す現象例は増加しており、地球大気上下結合の研究が盛んになっている。地上近くの気象は、様々な空間・時間スケールで変動しており、その影響は高度の離れた電離圏にまで及んでいる可能性がある。宇宙天気として重要な電離圏の日々変動についても、その変動要因の幾らかは下層大気と関連している可能性がある。このような地球大気上下結合の研究を今後進展させるには、地表付近の気象から電離圏までを網羅するような全大気領域の統合モデルが必要である。そのために、米国の主要な機関や日本のグループによって大規模なモデルの開発がなされているところであり、今後の発展が期待される。

## 謝辞

本稿4の数値計算では、九州大学と東北大学で開発された拡張大気大循環モデルの計算結果を使用しました。感謝致します。

- 7 Lühr, H., M. Rother, K. Häusler, P. Alken, and S. Maus, "The influence of nonmigrating tides on the longitudinal variation of the equatorial electrojet", J. Geophys. Res., Vol.113, A08313, doi:10.1029/2008JA013064, 2008.
- 8 Scherliess, L., D. C. Thompson, and R. W. Schunk, "Longitudinal variability of low-latitude total electron content: Tidal influences", J. Geophys. Res., Vol.113, A01311, doi:10.1029/2007JA012480, 2008.
- 9 Fejer, B. G., J. W. Jensen, and S.-Y. Su, "Quiet time equatorial F region vertical plasma drift model derived from ROCSAT-1 observations", J. Geophys. Res., Vol.113, A05304, doi:10.1029/2007JA012801, 2008.
- 10 Forbes, J. M., M. E. Hagan, X. Zhang, and K. Hamilton, "Upper atmosphere tidal oscillations due to latent heat release in the tropical troposphere", Ann. Geophysicae, Vol.15, pp.1165-1175, 1997.
- 11 Hagan, M. E., and J. M. Forbes, "Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release", J. Geophys. Res., Vol.107, p.4754, doi:10.1029/2001JD001236, 2002.
- 12 Miyoshi, Y., and H. Fujiwara, "Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase", Geophys. Res. Lett., Vol.30, 1789, doi:10.1029/2003GL017695, 2003.
- 13 Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, "Characteristics of the large-scale traveling atmospheric disturbances during geomagnetically quiet and disturbed periods simulated by a whole atmosphere general circulation model", Geophys. Res. Lett., Vol.33, L20108, doi:10.1029/2006GL027103, 2006.
- 14 Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, "Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure", J. Geophys. Res., Vol.113, A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008.



田 英晃

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ専攻研究員 理学博士  
超高層大気物理

佐川 永一

元電磁波計測部門宇宙天気システム  
グループ主任研究員 理学博士  
宇宙天気