

# 雷放電の概要と 冬季雷の特徴について

流体地球物理学教育研究分野

M1 本間友子

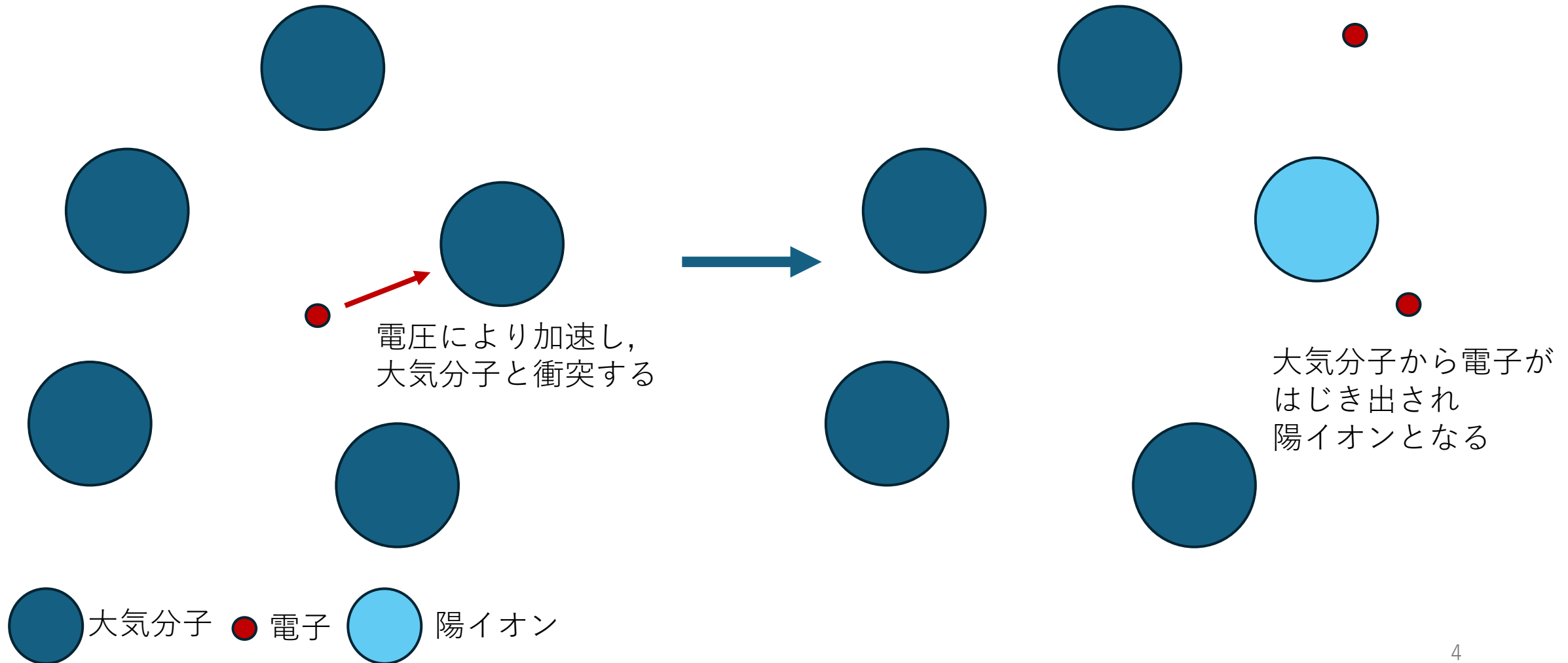
# 目次

1. 雷放電とは
  - 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識
  - 1-2. 雷放電について
  
2. 冬季雷について
  - 2-1. 冬季雷について知られている特徴
  - 2-2. 冬季雷を対象とした先行研究
  
3. 今後の研究について

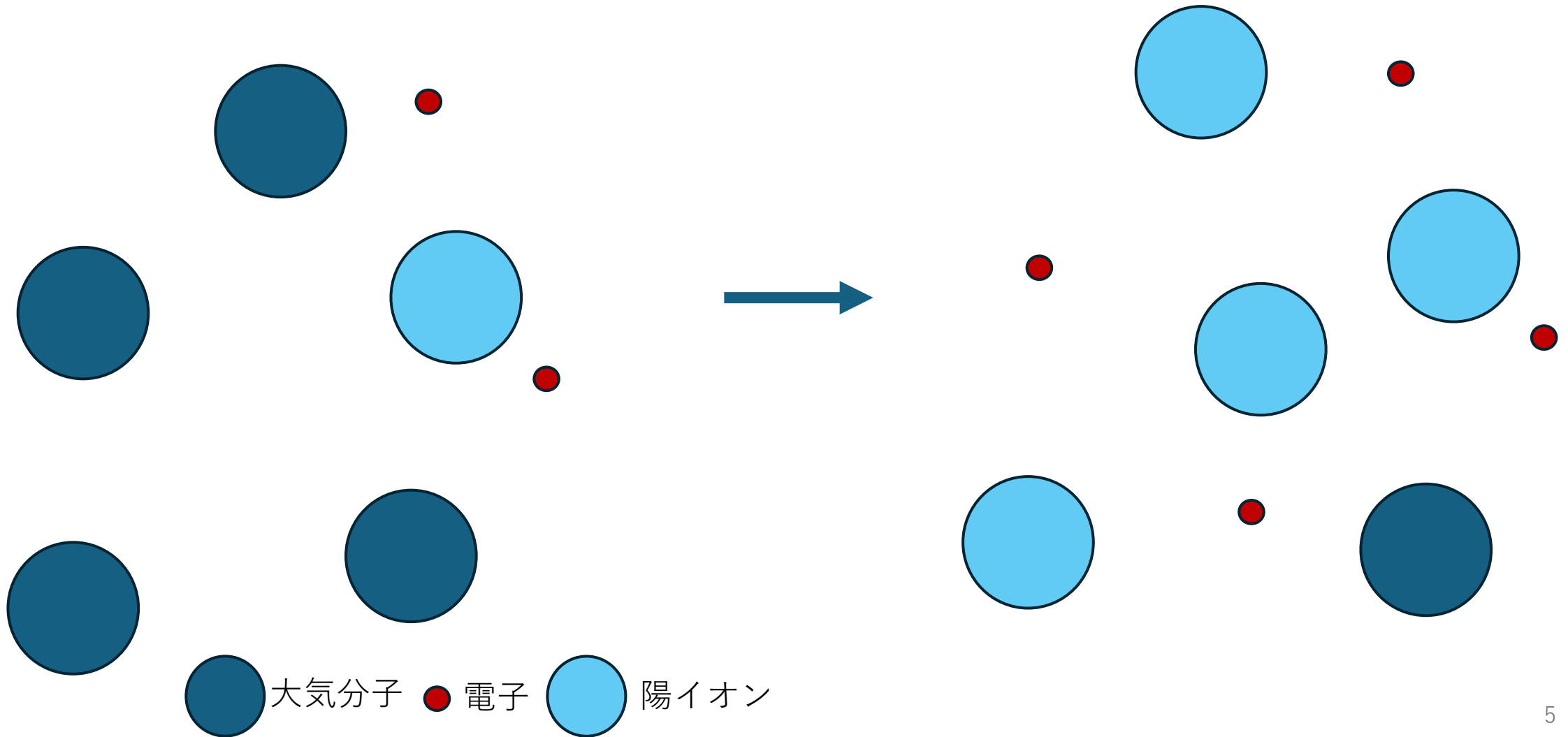
# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識

- 放電 = 絶縁体で電離が継続して増加, 維持されている状態のこと
- 大気は絶縁体であり, 大気分子内で電子が強く結びついている
- そこに高電圧がかかることで, 大気中のわずかな電子が大気分子にぶつかり, 分子内の電子をはじき出す (衝突電離)
- これにより大気内の電子数が大幅に増加し, 電流が流れる
  - 高電圧により絶縁状態が維持できなくなる事 = 絶縁破壊

# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識



# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識



# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識

- 電離した大気は大気分子, 陽イオン, 電子が混ざっている状態, すなわちプラズマである
- 雷雲内の電荷によりプラズマが発生, 伸展, 維持, 消滅  
= 雷放電過程
- 雷放電に関わるプラズマは 2 種類ある
  - ストリーマ (streamer)
  - リーダ (leader)

# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識

- ストリーマ (streamer)
  - 電気伝導度が低いプラズマ
    - 電圧がかかると大気分子からはじき出された電子が, さらに他の大気分子から電子をはじき出す (電子雪崩)
    - 電離するのは大気分子のごく一部であり, さらに加速されるのも電子だけで, 熱分離は発生しない
  - ストリーマの先端の電荷の極性で, ストリーマの極性は定義される
    - 負ストリーマ
    - 正ストリーマ

# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識

- ストリーマ (streamer)
  - ストリーマを発生させる実験

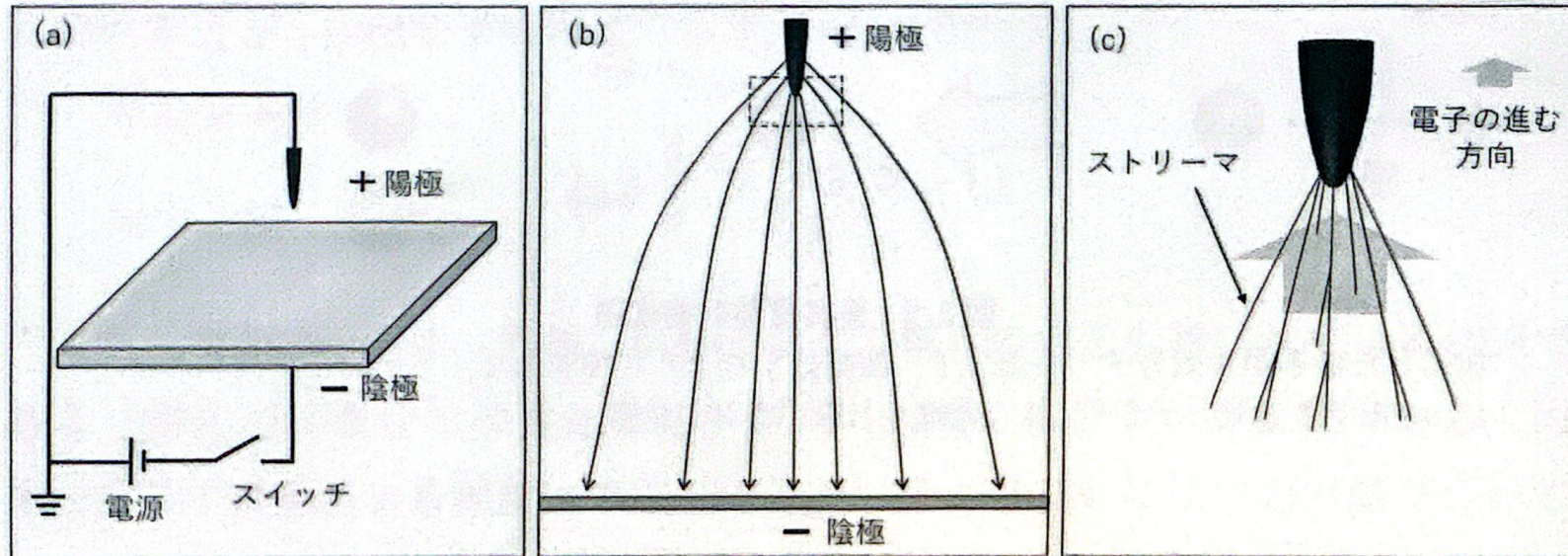


図 2.3 高電圧を用いた実験の模式図

(a) 針と平板間に電界をかける実験. (b) 針と平板電極間の電気力線. (c) 陽極付近((b)の破線の四角)に発生するストリーマの様子.



# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識

- リーダ (leader)
  - 先端の電荷の極性によってリーダーの極性が定義される
    - 正リーダー
    - 負リーダー
  - 伸展の過程が, 正リーダーに比較して, 負リーダーの方が複雑である
- 正リーダーの伸展の過程
  - 高電圧がかかるとき, 多数のストリーマが発生する
  - 電流が集中し, 大気分子も加熱されるため熱電離が発生する
  - 電子密度が高くなり, 電気伝導度が高くなる
  - 伸展するときは, 発生元から正リーダーが直接伸びる

# 1-1. 放電現象全般についての基礎的な知識

- リーダ (leader)

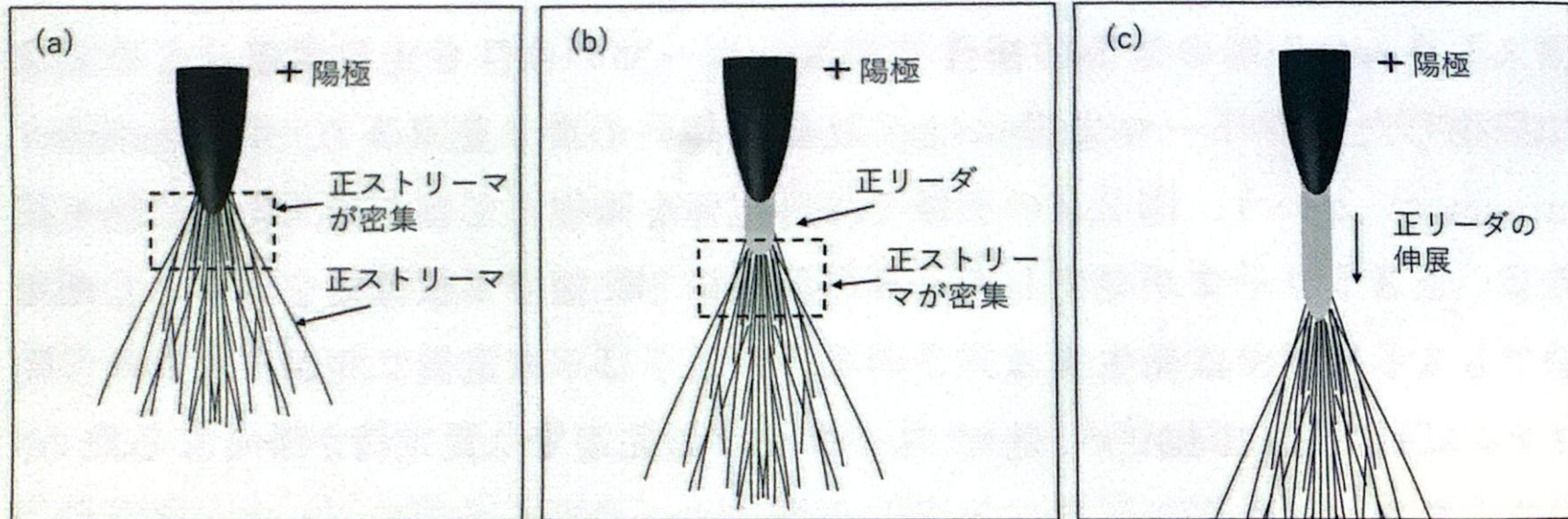


図 2.4 実験室で加える電圧を大きくした場合の正リーダの発生と伸展の模式図

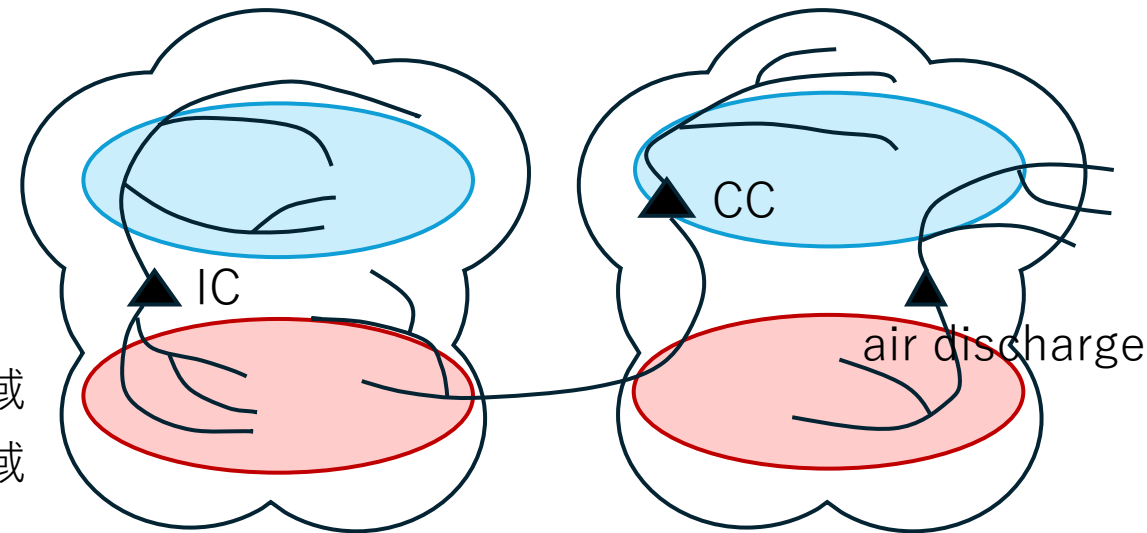
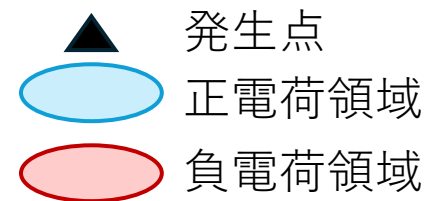
(a) 針電極の先端付近で正ストリーマが密集する. (b) ストリーマが密集した部分がリーダに変換. (c) その後も正リーダ先端で正ストリーマが発生して正リーダに変換し, 正リーダは伸展する.

# 1-2. 雷放電について

- 雷放電の種類
  - 大まかには雷放電が起こる場所で分類される
    - 雲内放電
    - 雲間放電
    - 空中放電
      - 上記3つをまとめて雲放電と呼ぶこともある
  - 地面とつながる放電

# 1-2. 雷放電について

- 雲内放電 (IC : irtracloud lightning)  
一つの雲内で完結する
- 雲間放電 (CC : cloud-to-cloud lightning)  
雷雲と別の雷雲の間で発生する
- 空中放電 (air discharge)  
雷雲で発生し, 雷雲外で終了する

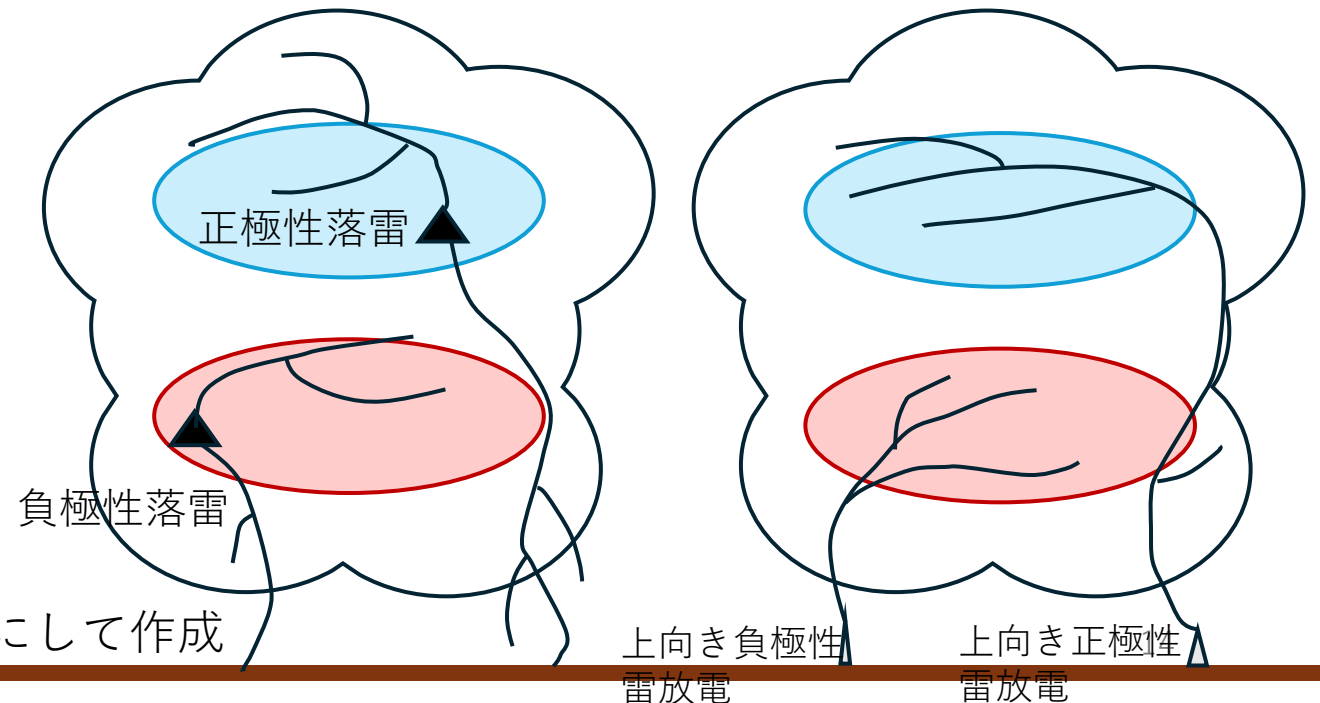
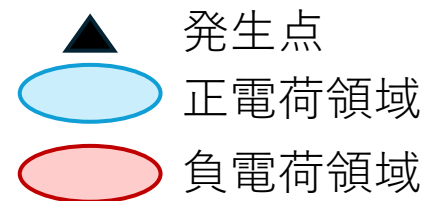


# 1-2. 雷放電について

- 地面とつながる放電
  - 雷放電の最初のリーダの向きによってさらに2つに分類される
  - 落雷 (対地雷, 対地放電) (CG : cloud-to-ground flash, downward lightning)  
雷雲から地面に向けて下向きにリーダが進む
  - 上向き雷放電 (上向き雷, 上向き落雷)  
(upward lightning, ground-to-cloud lightning)  
樹木や建造物などからリーダが発生する

# 1-2. 雷放電について

- 落雷, 上向き落雷は雷放電が中和する電荷領域の極性による分類もある
  - 負極性落雷
  - 上向き負極性雷放電
  - 正極性落雷
  - 上向き正極性雷放電



『雷放電の物理』 (吉田 智 著(2024)) を参考にして作成

## 2-1. 冬季雷について知られている特徴

- 冬季雷とは
  - 冬季 (12月～2月) に発生する
  - 世界的にも稀
- 特徴 (Yoshida et al. (2019) より)
  - 上向き雷放電が頻発
  - 負極性 CG と比較して正極性 CG が多い
  - 双極性雷が発生する
  - 雷が誘発され複数の雷放電が生じる
  - 放電されるエネルギー量が多い
    - 地上の建物への被害が大きい

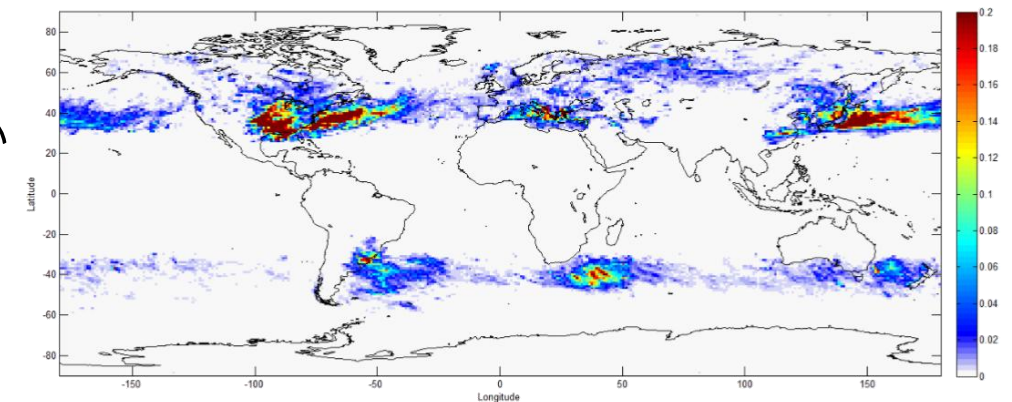
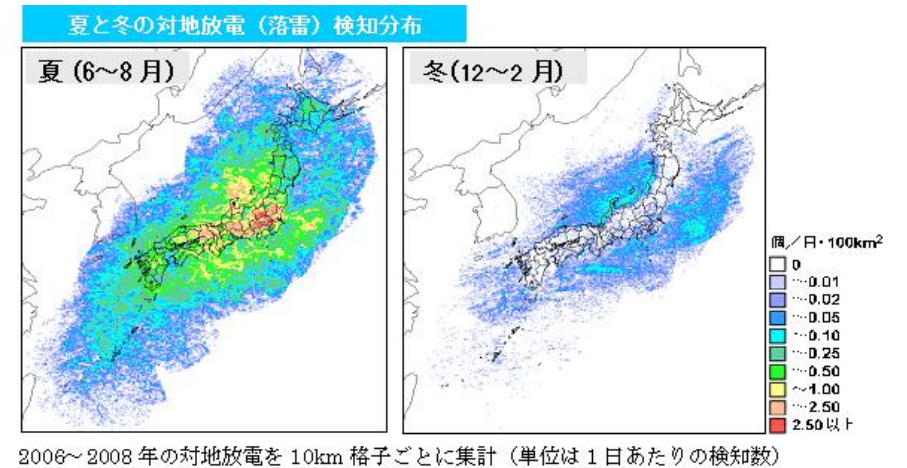


Figure 3. Global distribution of winter lightning stroke density (strokes·km<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup>) for the period 2009-2013.

上: 『雷検知数の季節的特徴』 (気象庁) より引用  
下: Montanyà et al.(2016) より引用

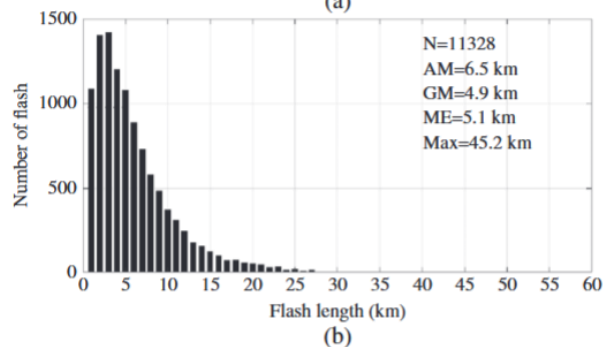
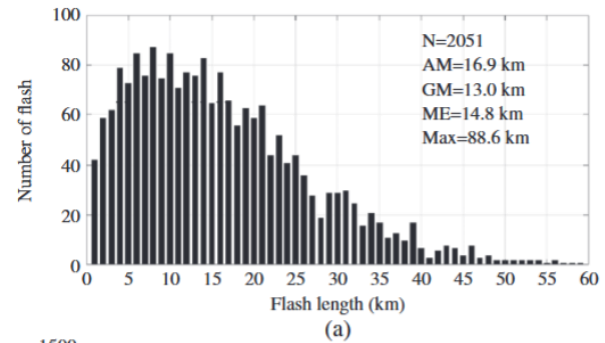
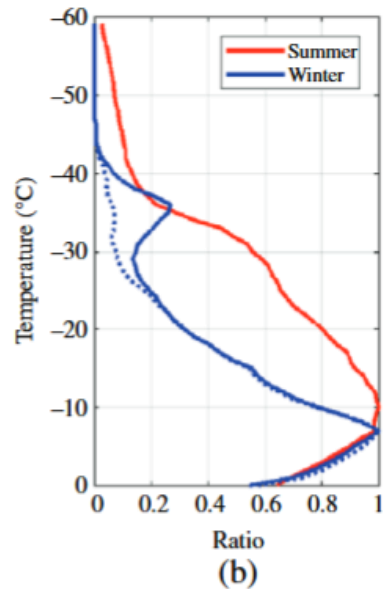
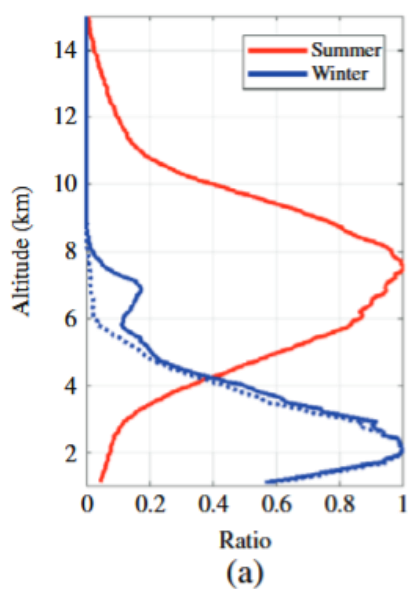
## 2-2. 冬季雷を対象とした先行研究

- 冬季雷の特徴がなぜできるのかの仮説
  - 冬の間電荷領域が地面に近い
  - 電荷領域の水平範囲が夏季に比べて大きい



## 2-2. 冬季雷を対象とした先行研究

- Yoshida et al. (2019)
  - 夏季雷（北関東）と冬季雷（山形県日本海側）の雷放電の三次元標定を行った
  - 冬季雷の方が、標定点の高度が低く、水平方向にも広く進展している



左: Yoshida et al. (2019) より引用  
右: Yoshida et al. (2019) より引用

## 2-2. 冬季雷を対象とした先行研究

- Brook et al. (1982)
  - 北陸の冬季雷の観測
  - 正極性雷放電, 負極性のものと比較し, 短い間で大きな電流が流れ, 電荷が加熱される
  - (夏季雷に似ている通常の変極性構造のように) 正電荷が負電荷より上方にある
  - 本研究の結論として, 鉛直風シアの結果として正極性対地ストロークが流れることが示唆される
- Kitagawa and Michimoto (1994)
  - 日本海沿岸南東部での冬の雷雲についての観測
  - 雷雲の発達段階に応じて内部の電荷構造が異なる
  - 電荷構造と雷放電活動はどちらも気温  $-10^{\circ}\text{C}$  となる高さによって制限される
    - 高度 1.8 km 以下の時雲の中での雷活動が弱い or 無い
    - 1.4 km 以下では通常の雷活動も, 三重極電荷構造も存在しない

## 2-2. 冬季雷を対象とした先行研究

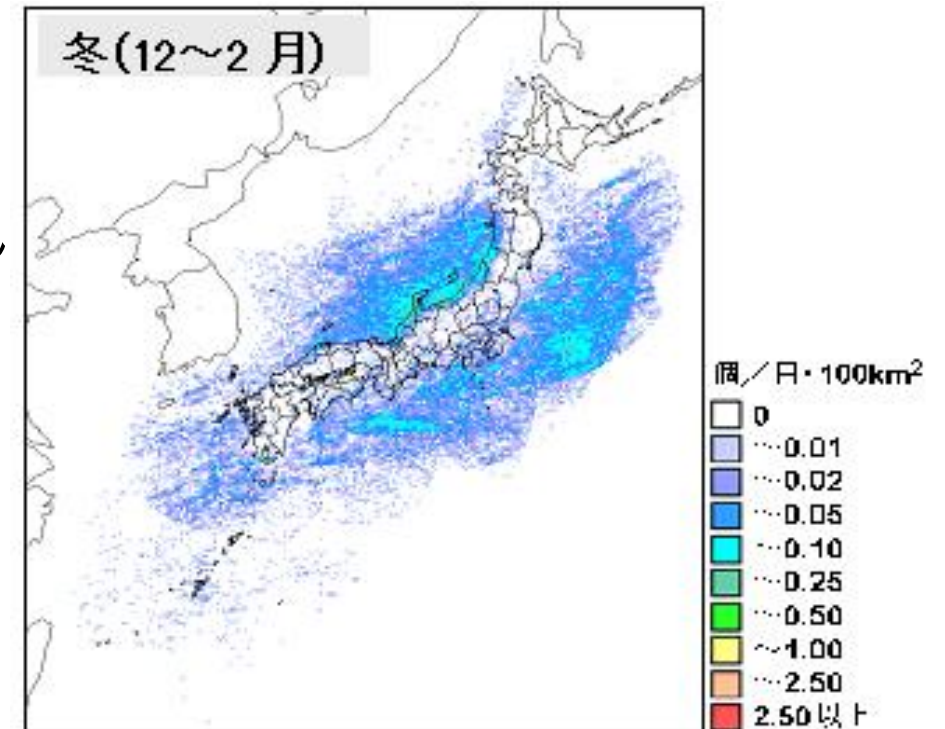
- Hunter et al. (2001)
  - アメリカ南東部の冬季雷を対象にした観測
  - CG と凍った降水（雪, 凍った雨, 氷の粒（あられ））との関係を調べた
  - 結果雷雲の形成段階によって CG と凍った降水の位置関係が異なっている
    - arctic front (AF) と migratory cyclone (MC)
    - 前者は氷点下の気団表面に同時に存在, 後者では CG が後退する
- Morgenstern et al. (2022)
  - アルプス山脈北部, 中央ヨーロッパの冬季雷を対象とした研究
  - ERA5 大気再解析データとドイツ北部の雷データの解析を行い, 夏と冬の雷雲形成にかかわる変数の違いを調べた
    - Wind-field (風速場) 雷雲と CAPE (対流有効位置エネルギー) 雷雲
    - 冬の雷雲は主に Wind-field 雷雲であり, 気象学的な条件としては低気圧を伴う強い西風

## 2-2. 冬季雷を対象とした先行研究

- Wang and Takagi (2011)
  - 日本での風車と避雷タワーに直撃した冬季雷の観測
  - 結論として, 風速が冬季雷の上向きリーダに関係がありそう
  - 建築物の高さによってリーダが伸びる速度も変わる
    - 高い方がより早く上向きリーダが始まる
  - どのように観測されたパルス放電を防ぐのかについても議論されている
- Montanyaà et al. (2016)
  - 雷の相互作用について評価し, 既知の冬季雷エリアをまとめる
  - 雷の位置データと気象の再解析データを用いて地図を作製

### 3. 今後の研究について

- 日本海沿岸部の冬季雷について多くの研究がされてきた
  - 関東地方の太平洋沖にも起こっているがあまり取り上げられていない
- 吉田先生と相談しながら進めていきたい



# 参考

- Yoshida et al., Three dimensional radio images of winter lightning in Japan and characteristics of associated charge structure, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 14, 2, p. 175-184
- Brook et al., The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorm. Journal of Geophysical Research, Journal of Geography Research, 1982, 87, p.1207-1215
- Kitagawa and Michimoto, Meteorological and electrical aspect of winter thunderclouds, Journal of Geophysical Research, Journal of Geography Research, 1994, 99, p.10713-10721
- Hunter et al., Winter Lightning and Heavy Frozen Precipitation in the Southeast United States, Weather and Forecasting, 16, 4, p.478-489

# 参考

- Morgenstern et al., Differentiating lightning in winter and summer with characteristics of the wind field and mass field, *Weather and Climate Dynamics*, 3, 1, p.361-375
- Wang and Takagi, Characteristics of Winter Lightning that Occurred on a Windmill and its Lightning Protection Tower in Japan, *IEEJ Transactions on Power and Energy*, 132, 6, 2012, p.568-572
- Montanyaà et al., Global Distribution of Winter Lightning: a threat to wind turbines and aircraft, 2016, 01, 19

# 参考

- 吉田 智, 雷放電の物理, 朝倉書店, 2024, -177p.
- 気象庁, 雷検知数の季節的特徴(URL: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/thunder1-3.html>), (2026/01/28 閲覧)