

人工衛星 TRMM データ (PR・LIS) を用いた flash rate の パラメタリゼーション

森本 健志*・吉田 智*・佐藤 陽介*
河崎 善一郎*・牛尾 知雄**

要旨

熱帯降雨観測衛星 (TRMM; Tropical Rainfall Measuring Mission) に搭載されている降雨レーダー (PR; Precipitation Radar) 及び雷観測装置 (LIS; Lightning Imaging Sensor) のデータを用いて, 単位時間単位雷雲セル当たりの発雷数である flash rate のパラメタリゼーションを行う. 現在まで flash rate と降雨頂高度 (storm height) の関係に対する議論はなされてきたが, 未だ明確な結論は出ていない. 本論文では定義を見直した flash rate と, storm height だけでなく freezing level から降雨頂までの距離に相当する snow depth との関係について考察する. 季節及び地域を分類しないとき, flash rate は storm height 及び snow depth のそれぞれ 7.5 乗, 5.2 乗に比例する. しかし, 季節・地域の分類を行うと storm height の冪数は大きく変化するのに対し snow depth のそれは大きく変化しない. よって storm height よりも snow depth でより正確なパラメタリゼーションが可能であり, flash rate は snow depth の約 5 乗に比例することが明らかとなった.

1. はじめに

雷放電は雷雲内に蓄積されている正負電荷の中和現象であり, 雲内の電荷同士で中和する場合を雲放電, 雷雲と大地間で中和が起こる場合を対地雷撃 (落雷) と呼ぶ. 通常落雷の場合には, 雷雲と大地の間に 10 kA を超える大電流が短時間に流れる (Goto and Narita, 1995) ため, 放電路では大気中の窒素が酸化し大気汚染物質の一つである NO_x が発生する (Wang *et al.*, 1998). この過程により全球的には年間 1~40 Tg (1 Tg=10¹² g) もの NO_x が生成されると言われており, 雷放電は主要な NO_x 生成原因の一つであると考えられている (Franzblau and Popp, 1989). そこで, 地球規模での NO_x 生成量をより定量的に推定するために, 総雷放電数を全球的に把握することが必要となる. この目的から Williams (1985) は, 単位時間単位雷雲セル当たりの発雷頻度である flash rate を R, 地上に

設置したレーダーのエコー頂高度を storm height H とし,

- 雷雲内では電荷が二重極分布.
- 電荷密度は雲の大きさによらず一定.
- 雲の体積は H^3 に比例.
- 上昇気流速度は H に比例.
- R は雷雲内の電気エネルギーに比例.

という仮定のもと,

$$R \propto H^5 \quad (1)$$

であると推察し, フロリダ, ニューメキシコ, ニューイングランドで観測を行い, flash rate が雲頂高度のそれぞれ 4.9 乗, 4.7 乗, 5.0 乗とおよそ 5 乗に比例することを確認している.

これに対し Price and Rind (1992) は, 国際衛星雲気候計画 (ISCCP; International Satellite Cloud Climatology Project) のデータを用いて大陸上だけでなく海洋上においても同様の解析を行い, 観測事実から (1) 式の関係は海洋上では必ずしも成り立たないと指摘している. また, この原因を大陸上と海洋上では上昇気流速度に大きな違いがあり雷雲発生メカニズ

* 大阪大学大学院工学研究科, (morimoto@comf5.comm.eng.osaka-u.ac.jp).

** 大阪府立大学大学院, 工学研究科.

—2002年8月8日受領—

—2003年9月10日受理—

ムが異なるためとし、それぞれ異なるパラメタリゼーションが必要であるとの結論を導いている。

一方、Ushio *et al.* (2001) は熱帯降雨観測衛星 (TRMM; Tropical Rainfall Measuring Mission) 搭載の降雨レーダー (PR; Precipitation Radar) 及び雷観測装置 (LIS; Lightning Imaging Sensor) による 1998年8月の1か月間の観測結果について同様の解析を行い、大陸上、海洋上、熱帯、温帯、それぞれで異なった特徴を示し (1) 式のような関係は成り立たないと結論している。

以上のように、これまでの解析は地域や季節を限定したものであり、地域や季節の違いで放電メカニズムが異なり、flash rate が変化する (Rivas and Pablo, 2002) ことを考慮すると不十分である。そこで本論文では、1999年10月1日から2000年9月30日までの1年間の長期間、且つ南緯35度から北緯35度までの広範囲の解析を TRMM により実現し、storm height 及び snow depth をパラメータとして flash rate のパラメタリゼーションを行う。

2. 解析方法

2.1 TRMM 搭載の PR, LIS について

TRMM は1997年11月、日米共同プロジェクトとして打ち上げられて以来、宇宙から降雨、雷放電、地球の放射エネルギーなどを観測し、今日に至るまで大量のデータを蓄積している。TRMM には本論文で使用する PR, LIS を始めとして可視赤外観測装置 (VIRS; Visible and Infrared Scanner)、マイクロ波放射計 (TMI; TRMM Microwave Imager)、雲及び地球放射エネルギー観測装置 (CERES; Clouds and Earth's Radiant Energy System) の5つのセンサが搭載されている。これらのセンサによるデータは同時観測という特徴を生かし、降雨現象の三次元解析を始めとして気象学の研究に大きく貢献している。PR は通信総合研究所と宇宙開発事業団の協力により開発された13.8 GHzの降雨レーダーで、アクティブフェーズドアレイを用いてアンテナビームを操作することにより約215 kmの観測幅を実現し、高度20 kmまでの降雨を距離分解能250 m、感度0.5 mm/hで観測している (川西, 1999)。一方、LIS は雷放電を衛星から観測するために開発された望遠鏡と CCD からなる光学装置であり、600 kmの観測幅を有し、空間分解能10 km、時間分解能2 msで雷放電の発生位置と時刻を観測する (Christian *et al.*, 1992; 河崎・吉橋, 1998)。また、

その検出効率は90%以上に達していると報告されている (Christian and Goodman, 1987)。

2.2 Storm height 及び snow depth について

PR, LIS による観測結果のうち、本論文で用いるパラメータは storm height (H) と snow depth (D) である。ここに前者は、PR の降雨タイプの分類を示すプロダクトである2A23により提供されている height of storm を用いる。これは平均海面からレーダー反射強度16 dBzの最高点までの高度であり、降雨頂高度に相当する。Williams (1985), Price *et al.* (1992) は、パラメータとして本論文の storm height に相当する降雨頂高度を地上レーダーや ISCCP などにより決め、パラメタリゼーションを行っている。後者は同じく2A23で提供されており、地表温度から推定される気温零度の高度である height of freezing Level (F) を用いて

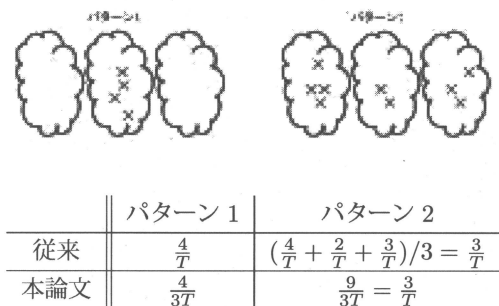
$$D = H - F \quad (2)$$

として定義する。前述の通り、snow depth とは freezing level から降雨頂までの距離であり、雷雲を構成する降水成分が固体として存在し得る厚さに相当するパラメータである。上昇する氷晶と下降するあられが衝突することにより電荷分離するとされている (Takahashi, 1978) ことから、雷雲内の電気エネルギーを考えるにあたり、降水粒子よりも氷粒子の鉛直積分量が、より重要な因子であると考えられるため snow depth を導入する。ここで、2A23の freezing level は気候値であるため、storm height より大きくなることもあるが、この場合は snow depth の値を0とする。

2.3 Flash rate の定義の変更

本論文を進めるにあたり今まで良く知られている flash rate の定義を変更する。従来の flash rate は一連の雷活動について、「発雷数をその最初の発雷から最後の発雷までの時間で除したもの」として定義されている。しかし、この定義では対流性であるが放電を伴わない対流性セルの存在時間は雷雲の活動時間に含まれない。そこで本論文では、独立した対流セルであれば放電の有無にかかわらず雷雲セルとし、「総発雷数を雷雲セルの全活動時間で除したもの」を flash rate として新たに定義する。

Flash rate の新定義について、第1図に示す互いに独立した3個の雷雲セルが観測の対象であるパターン1とパターン2の例を挙げ説明する。独立とは、時間

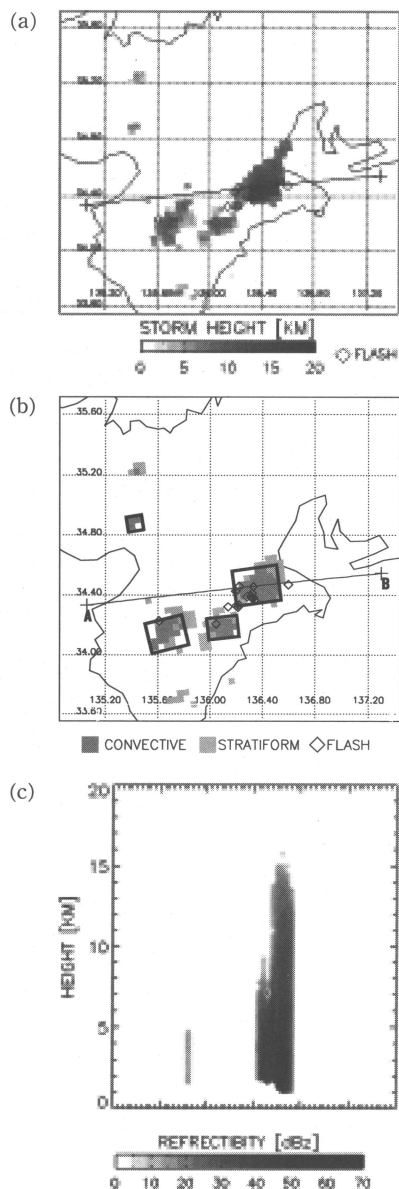


第1図 Flash rate の定義変更の概念図。

的及び空間的に独立していることを意味し、日常生活的な観点からは時刻と場所を変えて、夕立が3回あったと考えて良い。簡単のため、この雷雲の活動時間は全て等しく T であったとするが、この仮定で一般性を失うことはない。パターン1では3個の雷雲セルのうち、2個の雷雲セルは雷放電を伴わず、図中真中に示された雷雲セルにのみ×で示す4回の雷放電が観測され、一方、パターン2では全ての雷雲セルに複数回の雷放電が記録されているとする。この2パターンについて、まず従来の定義による flash rate を求める。パターン1では、真中の雷雲セルにのみ雷放電が記録されているため、両端の雷雲セルの存在時間は考慮されず $4/T$ が求める flash rate となる。一方パターン2では、それぞれの雷雲セルの flash rate の平均として、 $3/T$ が flash rate となり、パターン1とパターン2ではパターン1の方が flash rate は大きくなる。flash rate は雷活動の激しさを示すパラメータであるため、パターン1がパターン2より雷活動が激しいということになる。パターン1とパターン2でどちらの雷活動が激しいかという議論は、主観も入るため一概に結論できないが、統計的に指標を求めるという作業にあって、パターン1が2より活動度が高いという従来の定義の結果に納得できない。一方、本論文で提案する新しい定義によれば、パターン1が $4/3T$ 、パターン2が $9/3T$ と求まり、パターン2の雷嵐活動がより活発であるという直感に矛盾しない。また新しい定義の flash rate を用いれば全球的な雷雲セルの分布からその雷放電頻度を直接求めることもできる。

2.4 雷雲セルの同定方法

本論文では独立した雷雲セルの同定には、2A23で提供される rain type flag を使用する。これは対流性及び層状性など雲の形状を与えるもので、その水平分解能は約4.3 km である。隣接する2つ以上のグリッドに



第2図 PR, LIS による雷雲セルの観測例。
(a) Storm height と雷放電, (b) Rain type flag による雷雲セルの同定, (c) 線分 AB での断面図。

対して rain type flag が対流性を示した場合、その全グリッドを含む最小の長方形で囲まれる領域を雷雲セルと同定する。雷雲セルの水平方向の大きさはおよそ 10 km 以上と考えられており、1グリッドだけ独立して対流性と判定しているものは誤認している可能性が高いため、2グリッド以上隣接している場合のみを雷

第1表 データ概要.

解析期間	1999.10.1 ~2000.9.30
PR の軌道上で発生した全セル数	1,328,462
PR の軌道上で発生した全雷放電数	317,578
セル中で発生した雷放電数	254,647
雷放電がセル中に存在する割合	80.1%

第2表 データ欠損期間.

1999年11月17日20:44:57~1999年11月18日07:22:49
2000年04月22日01:22:20~2000年04月22日22:40:39
2000年04月28日11:05:52~2000年04月28日12:35:46
2000年08月23日12:35:39~2000年08月23日14:05:27
2000年08月24日12:56:46~2000年08月24日14:26:40
2000年08月26日13:38:46~2000年08月26日15:08:33
2000年08月26日22:46:34~2000年08月31日22:59:00
2000年09月17日07:39:44~2000年09月19日17:29:54
2000年09月22日09:25:15~2000年09月22日17:01:54

雲セルと判定する。また、雷雲セル全体での雷放電数を求めるため、その全体がPRの観測範囲内に入っているものだけを対象とする。従ってPRの観測幅は約215 kmであることから、スーパーセルのように異常に発達したセルとそのセル内の雷放電は解析から除外され、水平スケールが10 kmから215 km程度までの雷雲セルに関して解析を行うこととなる。一方、各雷雲セルの活動時間は、上述のように定義される雷雲セルがPRの観測域に入ってから出るまでの時間として定義する。

第2図に雷雲セルの観測例を示す。同図は2001年7月14日の北緯34.5度、東経136.4度付近(近畿・中部地方)のPR, LISによる観測結果を重ねて示したものである。第2図aはstorm height, 第2図bは同位置同時刻のrain type flagで提供される対流性(convective), 層状性(stratiform)を示したものであり、両図中の菱形(◇)はLISで検出された同時刻の雷放電位置を示している。対流性と判定されるグリッドが2つ以上連続した場合に雷雲セルと同定するため、第2図b中、太線で囲まれる領域を雷雲セルと同定する。第2図cは第2図a, 第2図b中線分ABで示す垂直断面のレーダー反射強度を示している。同図より和歌山県から三重県にかけて高度約16 kmに及ぶ雷雲セルが発達しており、セル内で雷放電が発生していることが確認できる。同図で示す事例のように、PRの検知範囲外にも雷放電が標定されることもあるが、大半の雷放電が雷雲セル内に標定されていることが認められ、雷雲セルの同定法が妥当であることが確認できる。

本論文で解析に使用したデータの概要を第1表に示す。PRの軌道上で発生した全雷放電数317,578の内、同定されたセル中で発生した数は254,647で、雷放電が同定されたセル内で発生している割合は80.1%であり、これは本節で定義する雷雲セルの同定方法を統計的に支持するものである。

2.5 パラメタリゼーション

本論文で行うパラメタリゼーションは、Williams (1985), Price and Rind (1992), Ushio *et al.* (2001)等の考え方を踏襲しflash rate (R)を以下の形で表現することとする。

$$R = A \times X^\alpha \quad (3)$$

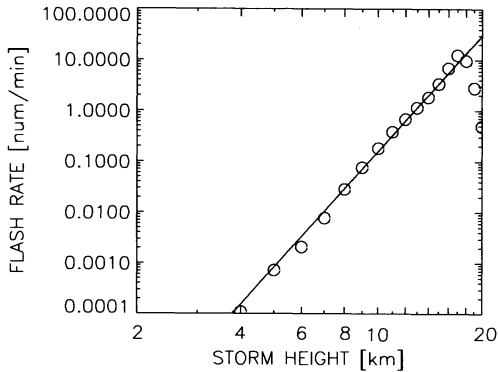
ここで X は storm height または snow depth であり、 α , A は観測結果から統計的に求める数値である。

まず、対象とする全ての期間・地域について解析し、その後季節・地域で分類して解析する。ここで地域による分類とは大陸型、海洋型、両者の性質を併せ持つ海岸型での分類である。(3)式において X が適切なパラメータであれば α は季節・地域に依存しない。また、大陸上では海洋上に比べ flash rate が高い (Price and Rind, 1992) ため大陸型の A が海洋型の A よりも大きくなることが予測される。本論文では、(3)式において上記2つの条件を満たした場合、 X が適切なパラメータであると考え、パラメータ X とその α , A を求める。

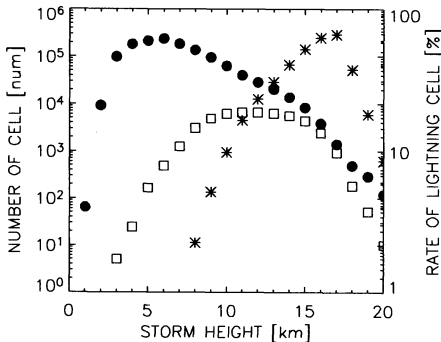
解析期間は第1表に示すように1999年10月1日から2000年9月30日の1年間とし、PR, LISのいずれかまたは双方のデータが欠損した第2表に示す期間は省いている。本期間中に観測された雷雲セル数は130万以上、雷放電数は25万以上に達し、これは flash rate の統計的傾向を検討するために十分なデータ量であると考えられる。

本論文で行うパラメタリゼーションの新規性として

- ・長期間かつ広範囲を対象とする。
 - ・パラメータとして storm height だけでなく snow depth を導入する。
 - ・Flash rate の定義を変更する。
- が挙げられる。



第3図 1年間の storm height と flash rate の関係。



第4図 Storm height と雷雲セルの総数 (●), 雷放電を伴う雷雲セル数 (□), 及び LIS の通過時間内に雷放電が発生する確率 (*) の関係。

3 解析結果

3.1 Storm height の解析

第3図に storm height に対する flash rate を両対数グラフで示す。図中直線は storm height の定義域を 3 km から 17 km とし最小二乗法により求めたもので、傾き $\alpha = 7.6 \pm 0.2$, $A = 4.5 \times 10^{-9}$ であり、最小二乗法による直線と観測値とが高い相関を示している。よって (3) 式におけるパラメータ X を storm height (H) として、

$$R = 4.5 \times 10^{-9} \times H^{7.6} \quad (4)$$

となる。(4) 式の結果は、Williams (1985) の結論である $\alpha = 5$ とは約 1.5 倍の差があるが、これは flash rate の定義を変更したためである。第4図に、storm height に対する雷雲セルの総数 (●), そのうち雷放電を伴う雷雲セル数 (□), LIS の通過時間内 (最大約 83

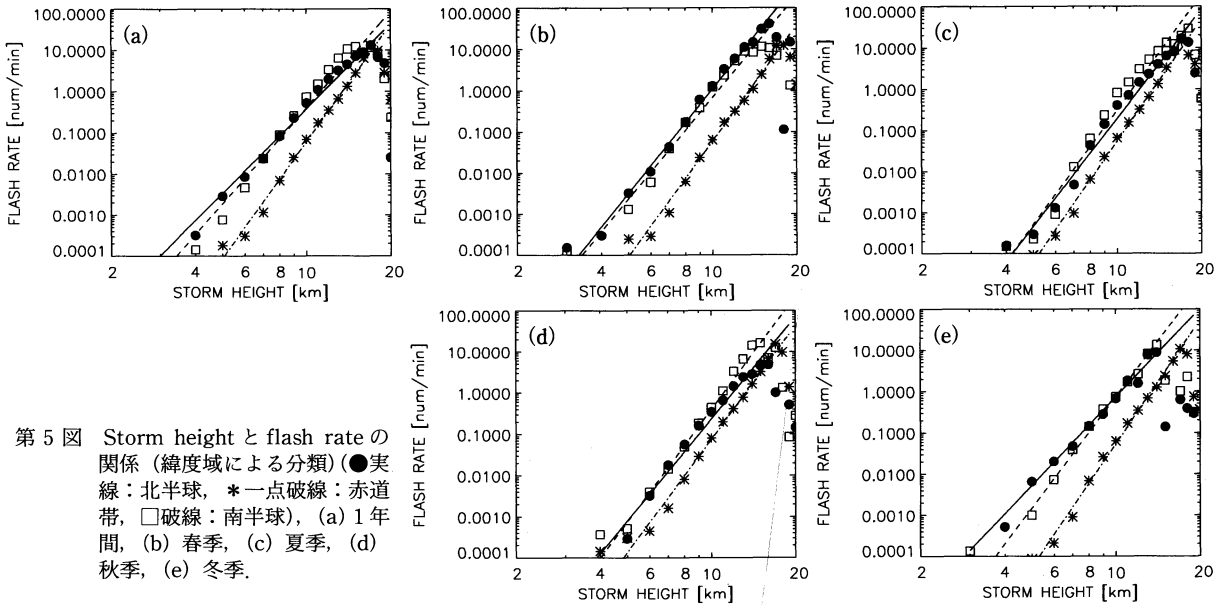
第3表 分類区分。

(a); 季節の分類		(b); 緯度による分類	
春期	3・4・5月	北半球	北緯25°～北緯35°
夏期	6・7・8月	赤道帯	南緯15°～北緯15°
秋期	9・10・11月	南半球	南緯35°～南緯25°
冬期	12・1・2月		

s) に雷放電の起こる確率 (*) を示す。ここで、LIS の通過時間内に雷放電の起こる確率とは、雷放電を伴う雷雲セル数を雷雲セルの総数で除したものである。同図より、storm height が 17 km 以下において、LIS の通過時間内に雷放電の起こる確率と storm height は共に増加している。新定義の flash rate では、雷放電数が 0 の雷雲も解析対象としているため、従来の定義と比較して storm height が小さいところでは小さくなったのに対し、storm height が 17 km 付近ではあまり減少せず、結果として傾きが大きくなったと考えられる。また第3図において高高度域では回帰直線からの差が大きい傾向が確認でき、この傾向は、以後に示す全ての解析結果に共通している。この原因として、このような高高度の対流セルの発生確率が低いことによる標準化誤差、また高高度の雷雲セルは光学的に厚くなることによる LIS の検出効率の低下 (牛尾ほか, 2001) などが考えられる。

次に季節で分類して同様の解析を行う。第3表には本論文で適用する季節 (a) 及び緯度 (b) の区分を示す。四季は北半球に対応しているため南半球ではここから 6 か月ずらしている。第3図の結果を北半球 (●), 赤道帯 (*), 南半球 (□) について分類した結果を第5図 a に示す。第5図 b から第5図 e は第5図 a をさらに季節に分類したものである。これらの図から、いずれの分類を行ったときも flash rate が storm height の冪乗に比例していることは明らかである。しかし、傾き α は赤道や夏季で大きいなどの傾向が見られ、一定の値であるとは考えられない。 α の平均値は 8.9, 分散は 0.8 である。

次に地域により分類し解析を行う。地域の分類は Mohr *et al.* (1999) の分類に従い、その詳細を第4表に示す。Mohr *et al.* (1999) は、降雨の特徴からこれらの地域を Congo Basin, India/Southeast Asia, Sub-Saharan Africa が大陸型, East Pacific, SPCZ, Atlantic, Central Pacific が海洋型とし、Amazon Basin は地形的には大陸でありながら海洋型に近い傾向を持つことを示し、Maritime Continents, Central



第5図 Storm height と flash rate の関係 (緯度域による分類) (●実線：北半球, *一点破線：赤道帯, □破線：南半球), (a) 1年間, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季, (e) 冬季.

第4表 地域の種類

大陸型	Congo Basin	8°S-5°N	10°E-28°E
	India/Southeast Asia	12°N-35°N	70°E-122°E
	Sub-Saharan Africa	15°N-8°N	18°W-45°E
海洋型	East Pacific	3°N-15°N	150°W-90°W
	SPCZ	35°S-12°S	180°W-120°W
	Atlantic	0°-15°N	50°W-7°W
	Central Pacific	2°N-12°N	155°-150°W
海岸型	Amazon Basin	15°S-3°N	75°W-45°W
	Maritime Continent	15°S-2°N	95°E-155°E
	Central America	2°N-12°N	85°W-75°W

America は大陸型, 海洋型それぞれの特徴を併せ持つとしている. 本論文では Congo Basin, India/Southeast Asia, Sub-Saharan Africa を大陸型, East Pacific, SPCZ, Atlantic, Central Pacific を海洋型, 大陸型と海洋型の両者の性質を持つと考えられる Amazon Basin, Maritime Continents, Central America を海岸型と定義し解析を行う. 第6図aにこの分類による1年間の解析結果を示し, 第6図bに第6図aのうち大陸型および海洋型と定義した地域をそれぞれ総合して解析を行った結果を示す. 第5表はこれらの結果をまとめたものである. 第6図aについて, flash rate が storm height の冪乗に比例していることは明らかではあるが, α はそれぞれの地域で変化し, 一定とは考えられない. α の平均値は8.5, 分散は1.3である. 第5表より, A の値は海洋型に属する Central Pacific の値がすべての A で最も高い値をとり不適切

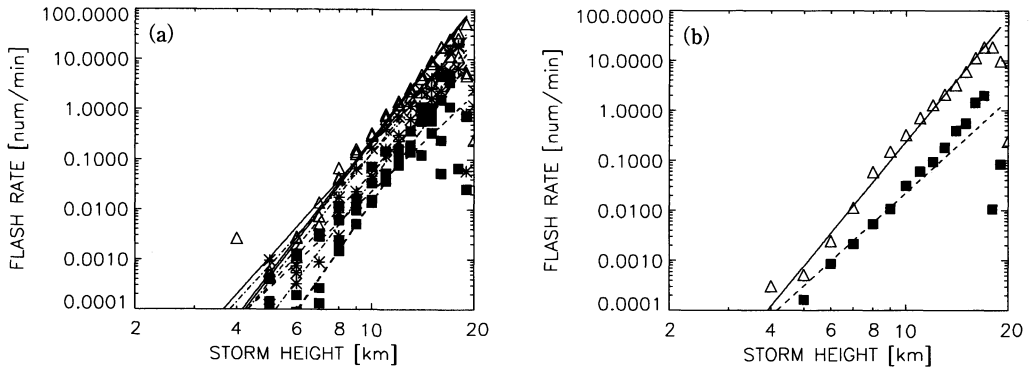
第5表 Storm height の解析での諸量

(a); 季節の分類での諸量

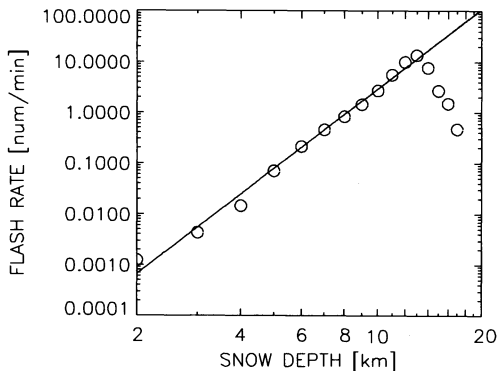
地域	季節	観測雷雲セル数	α	α の分散	A	定義域
北半球	一年間	210,974	6.8	0.3	5.7×10^{-8}	5~18
	春季	39,805	8.4	0.2	4.0×10^{-9}	5~16
	夏季	55,328	8.8	0.4	3.4×10^{-10}	5~18
	秋季	57,477	8.2	0.4	1.4×10^{-9}	5~16
	冬季	58,364	7.1	0.3	5.6×10^{-8}	5~14
赤道帯	一年間	657,449	9.4	0.3	2.3×10^{-11}	5~18
	春季	171,908	9.3	0.3	2.8×10^{-11}	5~18
	夏季	157,115	9.8	0.3	9.4×10^{-12}	5~18
	秋季	164,037	9.1	0.3	5.6×10^{-11}	5~18
	冬季	164,389	9.9	0.3	6.1×10^{-12}	5~14
南半球	一年間	185,481	7.7	0.5	7.3×10^{-9}	5~18
	春季	33,225	8.2	0.5	4.3×10^{-9}	5~16
	夏季	39,975	9.3	0.5	1.7×10^{-10}	5~18
	秋季	53,810	9.1	0.4	3.3×10^{-10}	5~16
	冬季	58,471	9.0	0.3	8.0×10^{-10}	5~14

(b); 地域の種類での諸量

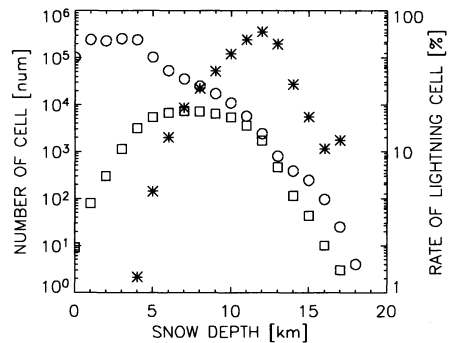
地域	観測雷雲セル数	α	α の分散	A	定義域	
大陸型	Congo Basin	10,897	8.9	0.3	3.1×10^{-10}	6~18
	India/Southeast Asia	61,980	7.6	0.3	5.2×10^{-9}	5~18
	Sub-Saharan Africa	19,674	9.0	0.2	2.3×10^{-10}	5~18
海洋型	East Pacific	43,405	9.9	0.7	1.6×10^{-12}	7~18
	SPCZ	46,732	7.5	0.3	1.7×10^{-9}	6~15
	Atlantic	38,139	9.9	0.7	2.0×10^{-12}	7~18
	Central Pacific	149,952	6.4	0.3	8.2×10^{-9}	5~18
海岸型	Amazon Basin	42,955	8.6	0.3	3.7×10^{-10}	5~18
	Maritime Continent	93,091	9.1	0.2	3.1×10^{-11}	5~18
	Central America	9,146	7.5	1.3	4.6×10^{-9}	6~18
大陸地域合計		92,551	8.3	0.2	1.3×10^{-9}	5~18
海洋地域合計		278,228	6.2	0.1	1.5×10^{-8}	5~18



第6図 Storm height と flash rate の関係 (地域による分類). (a) 地域での分類, (b) 大陸, 海洋での分類 △実線:大陸型, ■破線:海洋型. *一点破線:海岸型.



第7図 1年間の snow depth と flash rate の関係.



第8図 Snow depth と雷雲セルの総数 (○), 雷放電を伴う雷雲セル数(□), 及び LIS の通過時間内に雷放電が発生する確率 (*) の関係.

である. 第6図bの結果においても A (海洋型) $>$ A (大陸型) となり, A の値は適切ではない.

以上より, storm height をパラメータとしたとき, 季節・地域に依存しない統一的な α は存在せず, A も適切な値を持たない. よって flash rate の storm height をパラメータとするパラメタリゼーションは不適切である.

3.2 Snow depth の解析

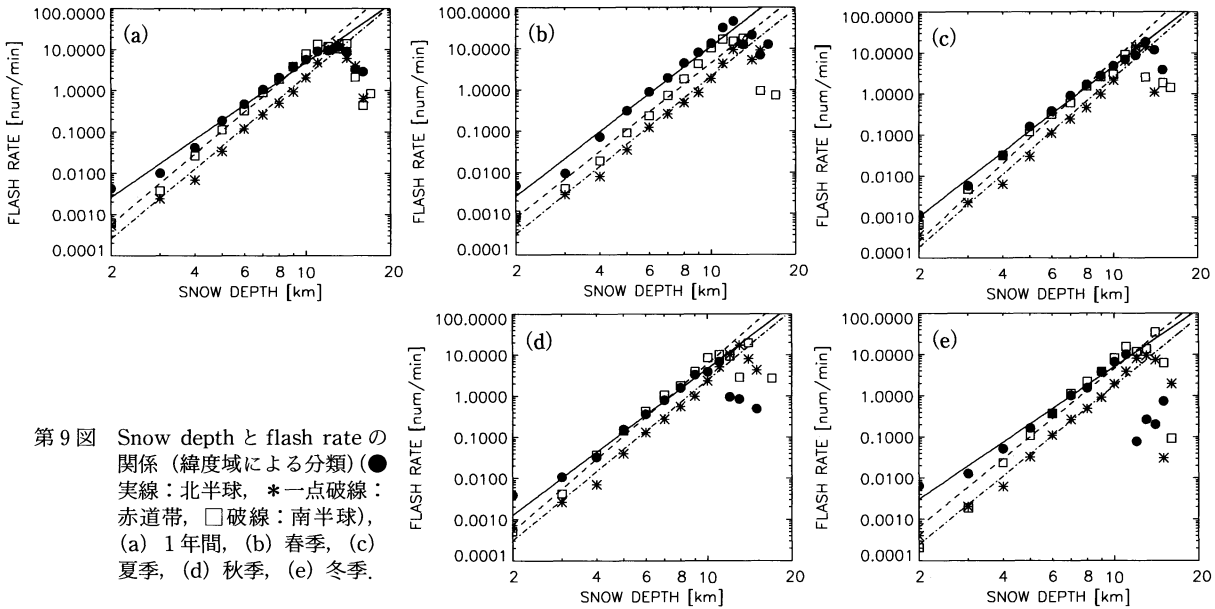
次に snow depth に対して storm height と同様の解析を行う. 以下に示す第7図から第10図はそれぞれ第3図から第6図に, 第6表は第5表にそれぞれ対応している. 第7図は snow depth と flash rate の関係を両対数グラフで示したもので, 図中の直線は snow depth の定義域を 2 km から 13 km とし, 最小二乗法により求めたものである. 傾き $\alpha = 5.2 \pm 0.2$, $A = 1.8 \times 10^{-5}$ であり, 最小二乗法で求められた直線と観測値が高い相関を示している. よって (3) におけるパラ

メータ X を snow depth (D) とすると

$$R = 1.8 \times 10^{-5} \times D^{5.2} \quad (5)$$

となる. 次に緯度域で分類し snow depth との関係を探ったものが第9図aで, これをさらに季節で分類したものが第9図bから第9図eである. これらの図より flash rate は snow depth の冪乗に比例するのは明らかであり, storm height をパラメータとした場合に見られたように赤道帯や夏季で α が大きくなることはなく, 一定に近い. 季節の分類での α の平均値は 5.5, 分散は 0.4 である.

最後に地域の分類による解析結果を第10図に示す. これらの図より flash rate は snow depth の冪乗に比例することは明らかで, α は East Pacific で 6.4 と大きい値をとるもののほぼ一定であり, 各地域合計の α は約 5 となっている. α の平均値は 5.2, 分散は 0.7 で



第9図 Snow depth と flash rate の関係 (緯度域による分類) (●) 実線: 北半球, *一点破線: 赤道帯, □破線: 南半球), (a) 1年間, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季, (e) 冬季.

ある. さらに A の値は大陸型・海洋型すべての地域で A (大陸型) $>$ A (海洋型) が成り立ち適切な値である.

また, 大陸型・海洋型に属さない Amazon Basin, Maritime Continents, Central America での A の値は Central Pacific を除く海洋型と大陸型の間の値であり, 各3地域は大陸型と海洋型の両者の性質を有していると考えられる.

以上より, flash rate の snow depth をパラメータとするパラメタリゼーションが可能であり, flash rate は snow depth の5乗に比例することが明らかとなった. すなわち, 季節・地域によらず

$$R \approx A \times D^5 \tag{6}$$

の関係が成り立つ.

4. 理論的解釈

前節において flash rate が snow depth の5乗に比例することを統計的に示した. 本節ではその理論的解釈を示す.

まず,

- ・雲内では電荷が二重極分布.
- ・正負電荷領域間の距離は D に比例.
- ・正負電荷領域の体積は $D \times S$ に比例.
- ・Flash rate は雷雲内の電気エネルギーに比例.
- ・雲中の電荷密度 (ρ) は大陸や海洋など地域特性に

依存.

と仮定する. ここに, S は雷雲の底面積であり, 雷雲のアスペクト比を1とすると

$$S \propto D^2 \tag{7}$$

となる. よって, 正負の電荷量 $Q, -Q'$ は

$$Q \approx Q' \propto \rho \times SD \tag{8}$$

である. ここで, 雷雲をコンデンサーで理解してよいとすると, 電磁気学によるコンデンサーに蓄えられる電気的エネルギー, すなわち正負電荷が存在する雷雲セル内の電気的エネルギー W は

$$W = 1/2 \times Q^2 / C \tag{9}$$

で表される. ここに C は静電容量で, 誘電率 ϵ を用いて

$$C = \epsilon S / D \tag{10}$$

である. (9) (10) 式より

$$W \propto Q^2 D / S \tag{11}$$

第6表 Snow depth の解析での諸量.

(a); 季節の分類での諸量.

地域	季節	α	α の分散	A	定義域
北半球	一年間	4.7	0.2	1.0×10^{-4}	2~13
	春季	5.2	0.3	7.1×10^{-5}	2~13
	夏季	5.2	0.1	2.7×10^{-5}	2~13
	秋季	5.1	0.1	3.7×10^{-5}	3~11
	冬季	4.6	0.2	1.3×10^{-4}	2~11
赤道帯	一年間	5.6	0.2	5.2×10^{-6}	2~13
	春季	5.5	0.2	7.2×10^{-6}	2~13
	夏季	5.9	0.2	3.1×10^{-6}	2~13
	秋季	5.6	0.2	6.3×10^{-6}	2~13
	冬季	5.5	0.2	5.3×10^{-6}	2~11
南半球	一年間	5.7	0.2	1.1×10^{-5}	2~13
	春季	5.4	0.4	1.9×10^{-5}	2~13
	夏季	6.3	0.2	3.3×10^{-6}	2~13
	秋季	5.8	0.2	9.0×10^{-6}	2~13
	冬季	5.5	0.1	1.4×10^{-5}	2~11

(b); 地域での分類での諸量.

地域		観測雷雲セル数	α	α の分散	A	定義域
大陸型	Congo Basin	10,897	5.0	0.1	6.7×10^{-5}	2~13
	India/Southeast Asia	61,980	4.6	0.1	9.1×10^{-5}	2~13
	Sub-Saharan Africa	19,674	4.8	0.1	1.0×10^{-4}	2~13
海洋型	East Pacific	43,405	6.4	0.4	3.4×10^{-7}	3~11
	SPCZ	46,732	5.8	0.4	1.4×10^{-6}	4~11
	Atlantic	38,139	5.5	0.3	1.9×10^{-6}	2~13
	Central Pacific	149,952	4.3	0.2	1.4×10^{-5}	2~13
海岸型	Amazon Basin	42,955	5.2	0.1	1.5×10^{-5}	2~13
	Maritime Continent	93,091	5.2	0.2	8.6×10^{-6}	2~13
	Central America	9,146	5.9	0.3	3.1×10^{-6}	3~13
大陸地域合計		92,551	4.8	0.1	7.8×10^{-5}	2~13
海洋地域合計		278,228	4.7	0.4	7.9×10^{-6}	2~13

となり, (7) (8) 式の関係から

$$W \propto \rho^2 \times D^5 \tag{12}$$

以上より,

$$R \approx A \times D^5 \tag{13}$$

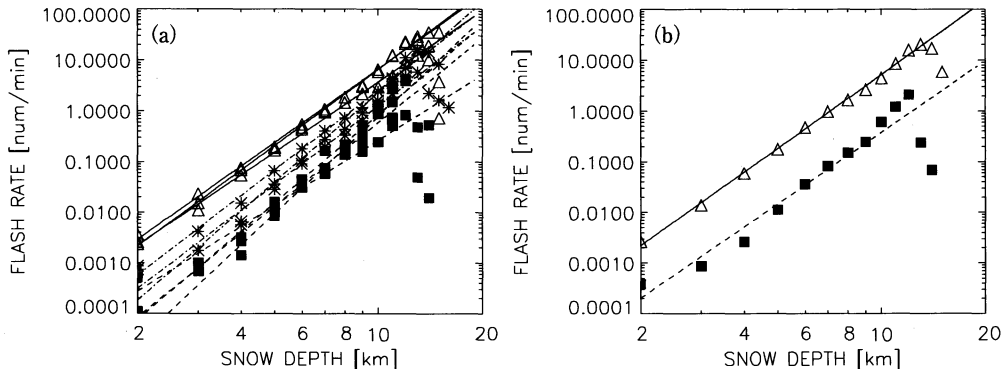
となり理論的に (6) 式の正当性を示すことができる.

5. むすび

本論文では, 1999年10月1日から2000年9月30日まで, 1年間の TRMM 衛星搭載 PR, LIS による観測結果を用いて, flash rate のパラメタリゼーションを行った. Williams 以来, 数々の研究者によりこのようなパラメタリゼーションについて議論がなされているが, flash rate が雲頂高度の冪乗に比例するという(1)式のような関係を示さなかった. 今回の解析結果においても, 定義を変更した flash rate と雲頂高度に相当する storm height はこの関係にない. しかし, 今回新たに導入した snow depth について考察することにより, flash rate はその5乗に比例するという関係を導いた. この関係は, 季節・地域によらず不変で, 比例定数 A が変化する.

謝 辞

本研究は, TRMM 3rd Research Announcement の援助のもとに遂行されており, この場を借りて NASDA に感謝の意を表します. また, 貴重なご意見をいただいた2名の査読者と編集委員の方々に深くお



第10図 Snow depth と flash rate の関係 (地域による分類), (a) 地域での分類, (b) 大陸, 海洋での分類 (△実線: 大陸型, ■破線: 海洋型, *一点破線: 海岸型).

礼申し上げます。

参 考 文 献

- Christian, H. J., R. J. Blakeslee and S. J. Goodman, 1992 : Lightning Imaging Sensor (LIS) for the earth observation system, NASA Technical Memorandum, 4250pp.
- Christian, H. J. and S. J. Goodman, 1987 : optical, observations of lightning from a high altitude Airplane, *J. Atmos. Ocean Tech.*, **4**, 701.
- Franzblau, E. and C. J. Popp, 1989 : Nitrogen oxides produced from lightning, *J. Geophys. Res.*, **94**, 11089-11104.
- Goto, Y. and Narita K., 1995 : Electrical characteristics of winter lightning, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **57**, 449-458
- Mohr, K. I., J. S. Famiglietti and E. J. Zipser, 1999 : The contribution to tropical rainfall with respect to convective system type, Size, and intensity estimated from the 85-GHz ice-scattering signature, *J. Appl. Met.*, **38**, 596-606.
- Price, C. and D. Rind, 1992 : A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions, *J. Geophys. Res.*, **97**, 9919-9933.
- Rivas, L. S., and F. D. Pablo, 2002 : Study of lightning event duration and flash rate in the Iberian Peninsula using cloud-to-ground lightning data, *Atmos. Res.*, **61**, 189-201.
- Takahashi, T., 1978 : Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- Ushio, T., S. J. Heckman, D. J. Boccippio, H. J. Christian and Kawasaki Z., 2001 : A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data, *J. Geophys. Res.*, **106**, 24089-24095.
- Wang, Y., A. W. DeSilva, G. C. Goldenbaum and R. R. Dickerson, 1998 : Nitric oxide production by simulated lightning : Dependence on current, energy, and pressure, *J. Geophys. Res.*, **103**, 19149-19159.
- Williams, E. R., 1985 : Large-scale charge separation in thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6013-6025.
- 牛尾知雄, 岡本謙一, 河崎善一郎, 2001 : 熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載雷観測センサ (LIS) の地上検証, 電子情報通信学会論文誌 B, **J84-B**, 1683-1689
- 河崎善一郎, 吉橋幸子, 1998 : TRMM 衛星搭載 LIS による雷活動の観測, 日本リモートセンシング学会誌, **18**, 86-93.
- 川西登音夫, 1999 : TRMM 衛星の概要, *海洋*, **31**, 319-323.

Parameterization of the Lightning Flash Rate Using TRMM (PR/LIS) Data

Takeshi MORIMOTO*, Satoru YOSHIDA**, Yosuke SATO**,
Zen KAWASAKI** and Tomoo USHIO***

* (Corresponding author) Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamada-Oka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan.

** Graduate School of Engineering, Osaka University.

*** Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University.

(Received 8 August 2002 : Accepted 10 September 2003)