
 解 説

雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法

笠原 真吾*

要 旨

雷ナウキャストは、竜巻発生確度ナウキャストと共に平成 22 年（2010 年）5 月から提供を開始した分布図形式の予報である。1km 格子単位で雷の激しさや雷の可能性を解析し、1 時間先までの予測と合わせて、10 分ごとに最新の情報を提供する。解析及び予測では、雷の発生可能性と雷の激しさを 4 つの階級で表現する。

雷ナウキャストの解析では「LIDEN 雷解析」、「レーダー雷解析」及び「雷可能性の解析」の 3 つの手法を用いる。1 時間後までの予測は、移動予測が主となるが、雷雲の発達ステージに応じて雷活動の盛衰の傾向を取り入れる。

本稿では、これらの技術の概要と利用方法について紹介する。

1. はじめに

2006 年に発生した北海道佐呂間町における竜巻や、2008 年の兵庫県神戸市都賀川における局地的な大雨による急な増水など、近年、積乱雲に伴う激しい気象現象による甚大な災害が発生し、社会的関心が高くなっている。また、落雷による災害については、平成 11 年～20 年の平均で 15 人程度の方々が被害を受けている。このように狭い範囲に発生し刻々と変化する現象から身を守るには、観測と直近の変化傾向に基づき最新の情報を提供する短時間予報（ナウキャスト）の利用が有効である。

気象庁では、気象レーダーの観測に基づく雨の短時間予報として従来から提供している「降水ナウキャスト」に加え、平成 22 年 5 月から竜巻などの激しい突風に対して「竜巻発生確度ナウキャスト」、雷に対して「雷ナウキャスト」の提供を開始した。これらのうち、本稿では「雷ナウキャスト」の解析・予測手法とその特徴、事例、利用

方法などを紹介する。

雷ナウキャストの解析では「LIDEN 雷解析」、「レーダー雷解析」、「雷可能性の解析」の 3 つの手法を用いる。LIDEN 雷解析とは、雷監視システム（以下、「LIDEN」という。）で検知する雷放電を 10 分ごとに集計し、単位面積当たりの密度を基にして雷の激しさを解析する技術である。レーダー雷解析とは、雷放電の検出がなくても、レーダーの 3 次元観測などから、数十分以内に落雷を発生させる雷雲を解析する技術である。雷可能性の解析とは、発雷のポテンシャル及びレーダー 3 次元観測などから、今後雷雲に発達する可能性のある雨雲を解析し、時間的余裕を持って雷の発生する可能性のある領域を推定するものである。

雷ナウキャストの予測では、雨雲の移動方向に沿って、各解析手法で解析した結果を移動させる（これを移動予測という）手法に加え、放電活動の激しさの盛衰傾向を統計的手法によって予測する手法を導入した。

* 予報部予報課（現 予報部業務課）

雷活動の解析・予測は、雷雲の特徴をとらえた手法であり、雷の性質について理解する必要があるため、第2章では雷雲の特徴及び雷放電の検知について解説する。第3～7章で雷ナウキャストの各解析・予測手法、第8章で利用方法等について解説する。

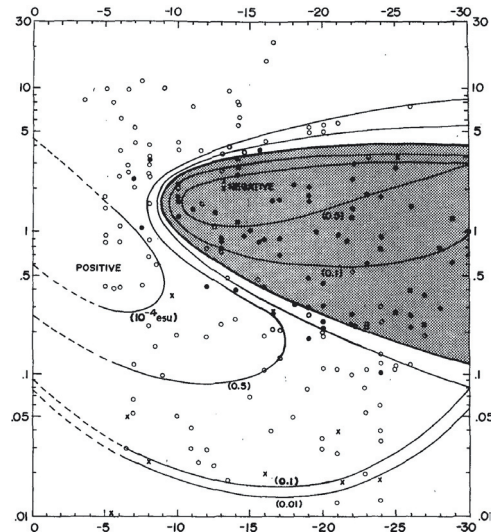
本稿における報告内容の一部は、笠原 (2010a), 笠原 (2010b), 平原ほか (2010) で既に述べられている部分もある。これらの報告は平成22年5月の雷ナウキャスト開始当初におけるもの(調査内容はそれ以前のもの)であり、本報告では、平成22年3月のLIDEN処理手法の更新への対応、平成23年3月の雷ナウキャストの解析・予測手法の高度化を含むものである。過去の報告における調査と一致しない部分は、新しいデータ・手法で再調査した部分であり、本報告における調査が最新のものである。

2. 雷放電と雷雲の特徴

2.1 雷雲の構造と雷

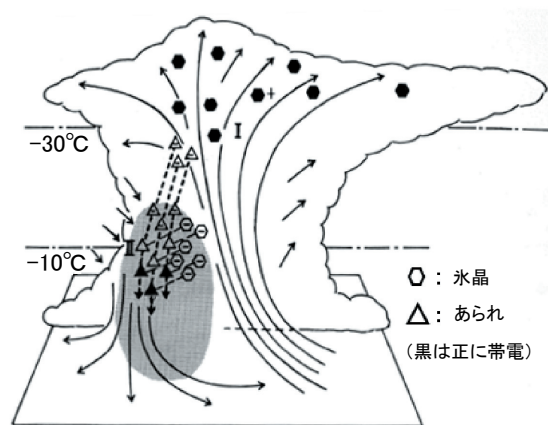
雷放電は、雲の中に蓄積された電荷やそれによって地表に誘起された電荷の影響で空気中の電界が大きくなり、空気の絶縁耐力を超えたときに発生する。雷を伴う発達した積乱雲を雷雲といい、雷雲中の電荷の分布については、上層部から下層部にかけて順にプラス、マイナス、プラスとなることが知られている(Williams, 1989)。高度を上空の温度で表現すると、雷雲の構造は、 -30°C \sim -50°C の上層部に正電荷が拡散して分布し、 -10°C \sim -20°C の中・下層部に負電荷が分布し、 0°C 付近の狭い領域に正電荷が存在する。電荷が分離する機構については、これまで様々な議論がなされてきたが、現在では、Takahashi (1978) の着氷電荷発生機構が最も有力な理論となっている(大気電気学会, 2003)。この理論の概要を、第1図に示す。あられと氷晶が衝突するときに帯電する電荷符号は、一般的な雷雲の雲水量においては -10°C 付近で逆転する。つまり、 -10°C 層(上空で -10°C となる大気層)より下層(つまり -10°C より高温)では、あられは正に氷晶は負に帯電する。このため、 -10°C 層の

下層で負に帯電し上昇気流で上方に持ち上げられた氷晶は、 -10°C 層の上層で負に帯電し降下したあられと合流し、 -10°C 層付近に大きな負電荷が蓄積される。さらに、第2図は -10°C 層の上層で負に帯電したあられが -10°C 層の下層に降下した場合でも、 -10°C 層付近に負の電荷が



第1図 あられの電荷符号 (Takahashi, 1978)

着氷電荷発生機構によるあられの電荷符号(白丸は正, 黒丸は負)と大きさ(氷晶の一個衝突あたりの電荷分離の大きさを等値線で示す。影部では電荷が負となる)。縦軸は雲水量(ログスケール, g/m^3)、横軸は気温($^{\circ}\text{C}$)。



第2図 雷雲内の電荷の三極構造 (高橋, 1986)

-10°C 層付近では、下層からの負に帯電した氷晶と上層から降る負に帯電したあられとで負電荷が蓄積される。さらに、 -10°C 層から下に落下するあられは、氷晶との衝突で負から正に電荷が反転するので、あられが落下しても、負電荷は -10°C 層付近に留ることになる。

留まることを示している。

これらのことから、雷の発生や盛衰の傾向を把握するためには、 -10°C 層における降水粒子の多少に着目することが重要と考えられる。

2.2 雷監視システム (LIDEN) の概要

前節において、雷が雲や地表などの電荷が影響して発生する放電現象であると述べた。このうち、地面と雲の間の放電を対地放電 (落雷) といい、それ以外の雲内の放電や雲と雲の間の放電などを雲放電という。雷監視システム (LIDEN) は、全国 30 か所の空港に設置した検知局において、この雷放電から発生する電磁波を受信して、放電の発生位置などを決定する (第3図)。雲放電は、指向性のある複数の VHF アンテナを用いて雷放電に伴う電磁波の発生方位を検知する方式なので、2 箇所の検知局で位置を推定できる。一方、対地放電は、雷放電に伴う電磁波の受信時間差を利用する方式なので、3 箇所の検知局から位置を推定できる。さらに、これらの推定を複数の検知局の組合せで行い、位置の推定誤差を小さく

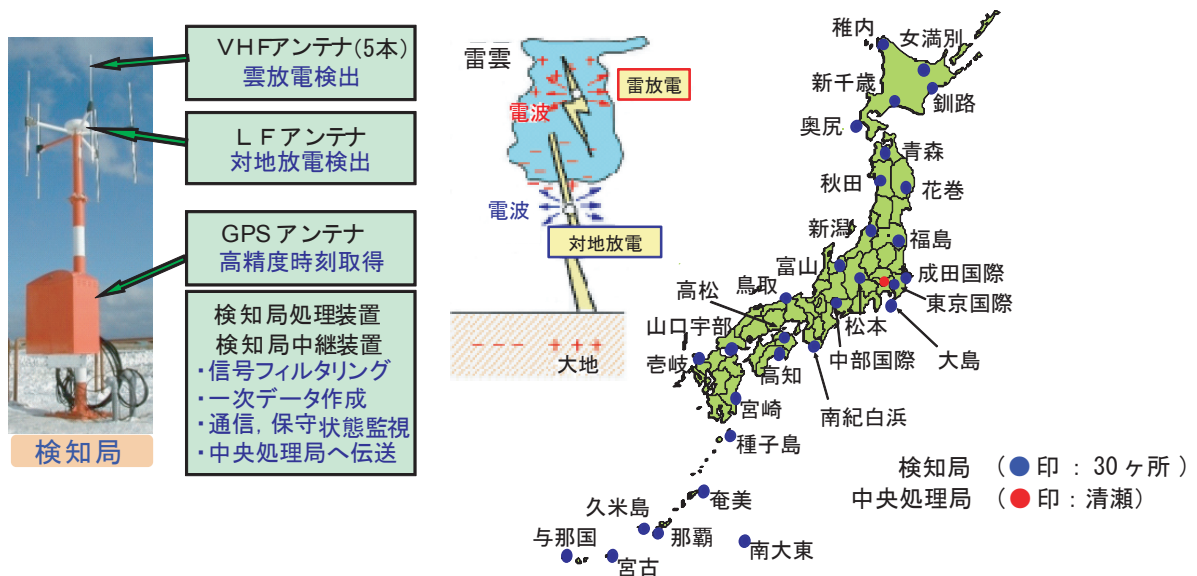
して標定を行っている。

また、検知局でとらえた電波の波形から、電界の強度や放電の継続時間などを決定する。対地放電については、電界の強さから放電の電流値についても推定している。

雷放電の継続時間は数十～数百 ms 程度であるが、その中で実際は短い放電が複数回発生する場合がある。その短い放電を雷撃 (stroke) といい、一連の雷撃をあわせて放電 (flash: 対地放電又は雲放電) という。LIDEN は、個々の雷撃の標定の時間差と距離に一定の基準値を設けて、一連の雷撃の判定を行っている。

雷ナウキャストで使用する LIDEN のデータは、雷撃単位のデータではなく、放電単位のデータ、つまり第一雷撃 (一連の雷撃の最初の雷撃) のデータを使用している。

平成 14 年度に行った航空官署における目視観測との比較調査 (時間分解能 20 分、官署から半径 20km 以内を対象とした) では、LIDEN の対地放電に関する捕捉率は、全国平均で 7 割程度であった。



第3図 雷監視システム (LIDEN) の概要

2.3 LIDEN の放電検知処理の変更

平成21年3月にLIDENの中央処理局を更新し、標定の条件を変更して運用を開始した。この結果、標定の品質は向上した（誤標定が減少した）ものの実際の落雷をとらえられない事例があった。そこで、平成22年3月に再度標定の条件を調整し、誤標定を極力抑える範囲で雷の見逃しが少なくなるようにした。

雷ナウキャストは、LIDENの標定する放電の個数密度を基に解析・予測処理を行っている。したがって、LIDENの標定の特性の変化は雷ナウキャストの品質にとって大きな問題となる。そこで、平成22年3月の調整による特性の変化を調査するため、平成22年3月に調整した標定手法でそれ以前のデータを作成し（以下、これを「再標定LIDEN」という。）、中央処理局更新前の標定データと比較した。

第1表は、再標定LIDENと従来のLIDENの標定数について2007～2008の月別、地域別に比較したもの（「再標定の集計数」/「従来の標定の集計数」）である。対地放電で従来の1.5倍程度、雲放電で2.3倍程度と、いずれも増加する。この増加率について、季節的特徴をみると、対地放電は月ごとの変化はないが、雲放電は夏季よりも冬季において増加率が大きい。地域的特徴をみると、南西諸島で対地放電の増加率が大きい。南西諸島は検知局が直線状に並ぶため、位置標定の誤差が大きく、標定できない雷があるが、新しい手法では見逃しを改善し標定数が増加したと考えられる。

2.4 雷の地域・年・季節・時別の特徴

日本で発生する雷雨は、夏季と冬季でその特徴が大きく異なる。第4図は、2006年～2010年の再標定LIDENによる対地放電の検知数を10km格子単位で集計したものである。夏季は熱雷、界雷などが多く、特に関東平野、濃尾平野などの広い平野では山岳域で発生した雷雨が、マルチセルストームとなって大規模な激しい活動になることが多い。一方、晩秋から初冬にかけて日本海沿岸域でも雷雲が発達するが、これは冷たいシベリア気団が相対的に暖かい日本海上を移流すること

第1表 LIDENの再標定データの比較

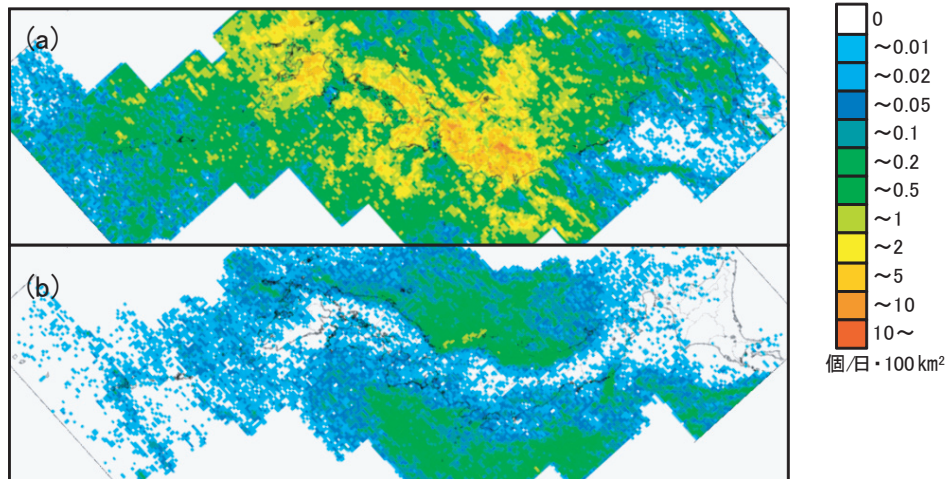
従来のLIDEN標定数に対する、再標定LIDENの標定数の比率、2007年～2008年の陸域の放電について地域別（左表）・月別（右表）で集計した。

	対地放電	雲放電		対地放電	雲放電
北海道	1.53	2.76	1月	1.73	7.48
東北	1.14	2.71	2月	1.69	5.74
関東	1.37	2.22	3月	1.59	2.59
東海	1.53	2.05	4月	1.51	2.96
北陸	1.35	2.25	5月	1.46	2.84
近畿	1.51	2.35	6月	1.45	2.42
中国	1.77	2.03	7月	1.47	2.27
四国	1.58	2.71	8月	1.57	2.20
九州北部	2.45	2.41	9月	1.41	2.32
九州南部	2.54	1.68	10月	1.45	2.75
沖縄	3.82	1.45	11月	1.38	4.92
全域	1.51	2.29	12月	1.59	6.23

が主因である（北川，2001）。なお、1月・2月の厳冬期は日本海側でも雷は少なくなる（道本，1998）。

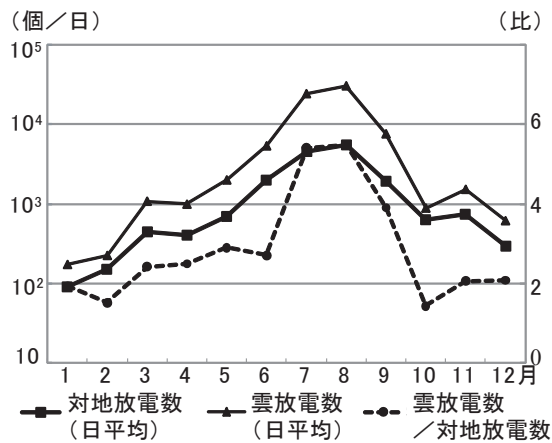
第5図は月別の再標定LIDEN放電数の推移を示したものである。対地放電数でみると、夏季は冬季に比べて100倍近い個数となる。一方、対地放電と雲放電の割合をみると、夏季は1対5程度であるが、冬季は1対2程度であり、夏季と比べて相対的に対地放電の割合が大きくなる。第6図は、再標定LIDEN対地放電の発生時刻別のヒストグラムである。夏季は15～16時に明瞭なピークがあるが、冬季は夏季に比べて明瞭な時間的傾向はない。

雷の特性は地域・季節に依存するが、発生数の年変動も大きい。第7図は、2006～2010年の夏季・関東の対地放電数と冬季・北陸の対地放電数の年推移である。2008年は夏季雷が多い一方、冬季雷が少ない傾向であった。また、2008年の夏季雷は2009年に比べ、放電数が8倍以上もあり、年により発生数の変動が大きい。したがって、雷の統計的傾向を調査したり、予測の評価をしたりする際は、短い期間で行うのは適切でないといえる。



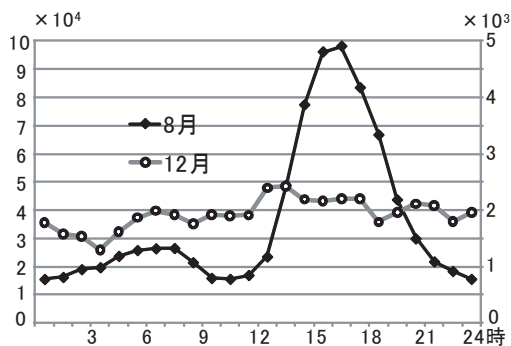
第4図 季節別の放電分布

2006～2010年の(a)は8月、(b)は12月について、対地放電を10km格子単位で集計。単位は個/日・100km²。



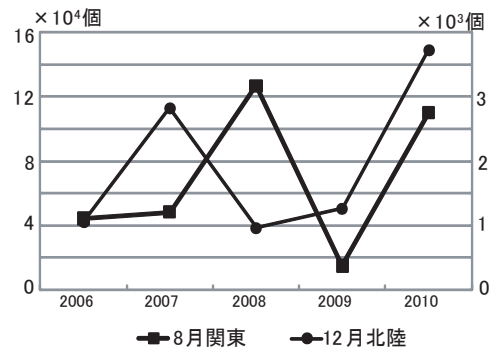
第5図 月別の放電数

2006～2010年の月別の放電数の推移。対地放電数(太線)、雲放電数(細線)は対数スケール(左軸)、対地放電数に対する雲放電数の比率は破線(右軸)。



第6図 発雷時刻別の対地放電数

2006～2010年の発雷時刻別の対地放電集計数。発雷時刻は1時間単位で集計。黒線は8月(左軸)、灰色線は12月(右軸)、陸地+沿岸40km以内で集計。



第7図 地域別対地放電数

8月関東地方(左軸)及び12月北陸地方(右軸)における対地放電数の2006年～2010年の推移。

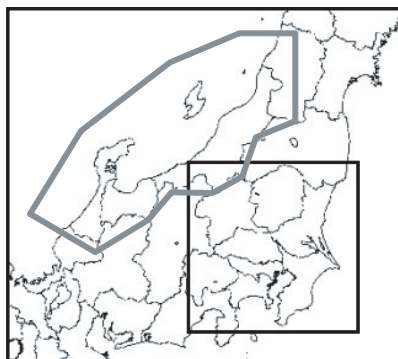
2.5 夏季雷と冬季雷の規模や継続時間の特徴

雷ナウキャストは、全国を対象に年間を通じて提供する。一方、前述のように雷は季節や地域によってその特性が大きく異なっており、LIDENデータを解析・予測のプロダクトに活用するためには、季節・地域による雷の規模や継続時間などの特徴を理解することは大変重要である。

ここでは夏季の雷として、7・8月の関東地方について、また、冬季の雷（晩秋～初冬）として、11・12月の北陸地方について、雷雨の規模や継続時間を比較してみる。それぞれ、夏季・冬季で雷活動が激しい地域である(第4図)。調査期間は、2005～2008年の4年間とした。

調査の対象とする範囲を第8図に示す。まず対象範囲内10分単位で放電（対地放電及び雲放電）を集計し、30分連続で放電を検知した時刻を発雷開始、30分連続で放電を検知しなくなった時刻を発雷終了とする。次に、この発雷開始から終了までの雷雨を一つの事例として、事例ごとに継続時間や放電数などを集計した（第2表）。調査の対象となる面積や時間数は両地方とも同程度である。

第2表で関東と北陸を比較すると、関東地方の夏季雷は激しく、対地放電数の総数では北陸地方の冬季に比べ8倍になるが、雷雨の事例数、継続時間の事例平均値は両地方とも同程度となる。



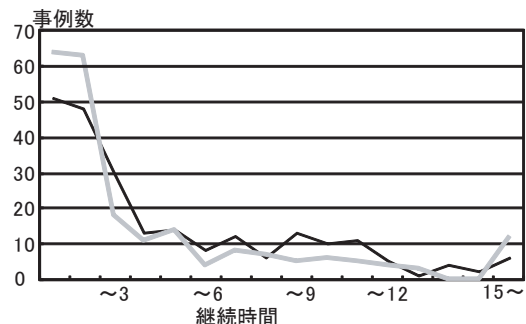
第8図 調査エリア
黒枠内が関東地方、灰色枠内が北陸地方。

さらに、事例ごとの発雷時間について、1時間ごとに集計した度数分布を第9図に示す。関東地方の夏季、北陸地方の冬季ともに雷の継続時間は、平均的には4時間程度で、その度数も同様の分布となった。

関東地方の夏季の事例では、昼前後に北部・西部の山添いの地域で形成される積乱雲が、夕方にかけて南部・東部の平野部・沿岸部に達し、長い場合は深夜にかけて続くことが多い。一方、北陸地方の冬季の事例では、日本海で形成される個々の積乱雲は内陸に進むにしたがって急速に消滅するが、同じ地域に海上から次々と雷雲が侵入するため、雷が同じ地域で比較的長い時間続くこともある。第10図は各事例の開始時刻・終了時刻を3時間単位で集計したものである。関東の夏季事

第2表 集計した広さ・時間数と事例単位の集計結果

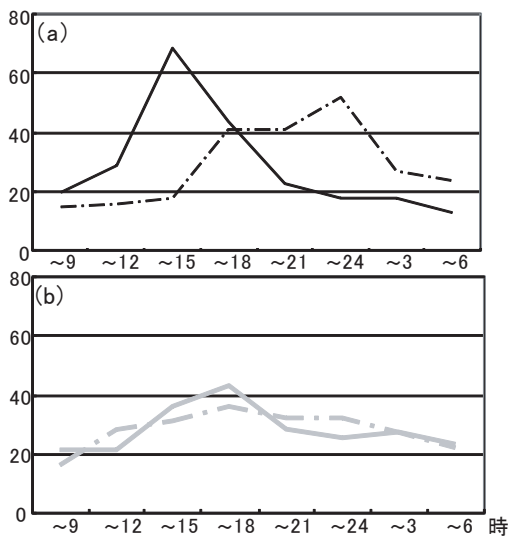
	関東夏季	北陸冬季
集計面積 (km ²)	64,400	66,800
集計時間数 (10min)	35,712	35,136
事例数	234	224
発雷時間数	6,151	5,186
対地放電総数	245,645	32,115
雲放電総数	799,713	15,267
継続時間の事例平均	4h37m	3h59m
対地放電数の事例平均	1,050	143
雲放電数の事例平均	3,418	68



第9図 事例数のヒストグラム
継続時間で分類したときの事例数のヒストグラム。1時間区切りで集計。黒線は関東夏季、灰色線は北陸冬季。

例は、12～15時に開始時刻のピークがあり、21時～24時に終了時刻のピークがある。一方、北陸の冬季事例は、発生・終了時刻とも夕方ころにやや多くなる。

雷ナウキャストにおける移動予測は、雷現象が1時間程度継続することを前提とする手法である。夏季雷、冬季雷とでは雷の特性は異なるものの、広い範囲としては継続性を持っており、移動予測の手法が有効であると期待できる。



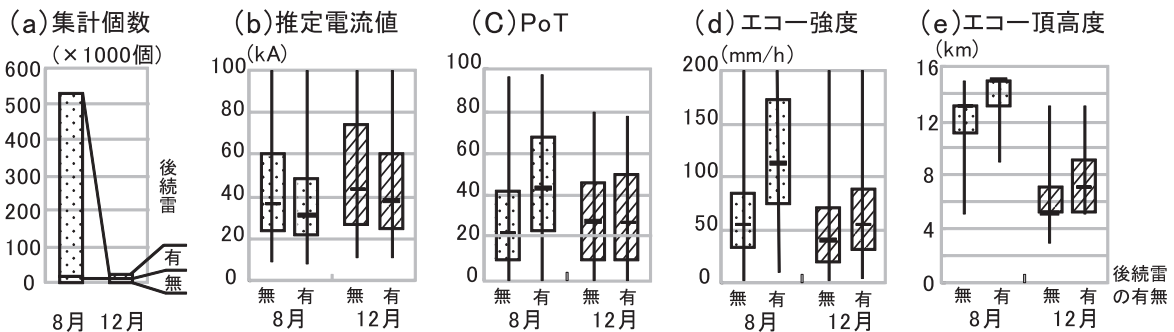
第10図 発雷開始・終了時刻の度数分布
発雷開始時刻・終了時刻の度数分布を3時間区切りで集計。(a)は関東夏季の事例、(b)は北陸冬季の事例。実線は開始時刻事例数、鎖線は終了時刻の事例数。

2.6 放電とレーダーデータ等の指標の関係

雷の解析や予測技術を考える上では、レーダー等のデータと雷雲の関係について、特徴を理解することが必要である。ここでは、放電検知時のレーダーデータ等に注目して、放電との関係について述べる。

放電との関係を調べる指標としては、解析・予測に利用するものとして、レーダーエコー強度、エコー頂高度、LIDENによる対地放電の推定電流値(絶対値)に加え、環境場の指標としてMSM発雷確率ガイダンス(以下、PoTという。)を対象とした。雷の季節的な特徴をみるために夏・冬の季節に分類し、さらに継続性の特徴をみるために、後続雷の有無で放電を分類する。後続雷の有無は、対地放電を検知した場所から60km以内・30分以内における対地放電の有無で判別する。また、PoT(20km格子値)は6時間予報値で1kmに内挿した値を用い、エコー強度・頂高度は放電の周囲10km内の最大値を用いる。

各指標の統計量を第11図に示す。まず8月と12月で季節的な特徴を比較すると、推定電流値は12月の方が大きい傾向にあるが、PoT、エコー強度、エコー頂高度は8月の方が大きい傾向にある。一般に、冬季雷は放電あたりの電流値・継続時間が大きく、エネルギーが大きくなるため、夏季雷よりも大きな被害につながる可能性がある。次に後続雷の有無で比較すると、後続雷がある場



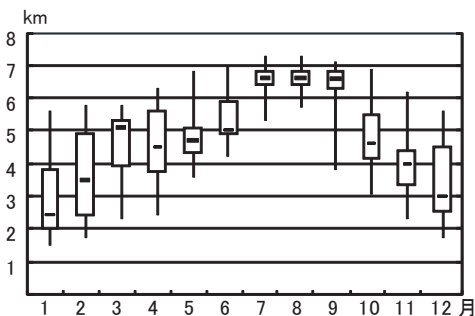
第11図 対地放電検知時の各パラメータの統計値
2006～2008年の対地放電を、8・12月について後続雷の有無で分類して集計した。(a)は集計数。(b)～(e)は各指標の箱ひげ図。ひげの上部・下部は99%値、1%値を、箱の上部・下部は第3四分位点、第1四分位点を、バーは中央値を示す。

合は、電流値は小さい傾向があり、PoT、エコー強度、エコー頂高度は大きい傾向にあることが分かる。いずれの指標においても、後続雷「無」と「有」の中央値の差は、12月よりも8月の方が大きく、冬季よりも夏季の方が雷が継続するかどうかを判定しやすいと考えられる。放電と関係のあるこれらの指標は、レーダーを用いた雷雲の解析(レーダー雷解析)や、放電の継続性の予測(LIDEN雷解析の盛衰予測)などに利用する。

2.7 -10℃高度による雷の特性

第2.1節で述べたように、積乱雲の内部では-10℃層付近に負電荷が多く蓄積される。したがって、-10℃高度(-10℃層の高度)は、雷雲の特徴を分類する上で重要な要素となる。

第12図に対地放電検知時の月別の-10℃高度の分布を示す。冬期でも発雷時には-10℃高度はおおむね2km以上あり、厳冬期など下層が寒気に覆われ、-10℃高度が地上付近になるような状況では雷雲に至らないことが分かる。また、夏季の熱雷に対応する7~9月では、-10℃高度は6km以上で、1%値と99%値の幅は小さくなる。4月及び11月についてみると、99%値は6km以上で1%値は3km以下と分布幅が大きくなっており、日々の気象状況や地域的な違いが大きいと考えられる。さらに、第5図と比較して放電数の月別変化は-10℃高度の月別変化と類似しており、-10℃高度が高い季節ほど雷活動が活発



第12図 対地放電検知時の-10℃高度の分布

2006年~2008年対地放電検知時の-10℃高度(km)の月別のパーセンタイル値を示した箱ひげ図。ひげ上部は99%点、下部は1%点。箱上部は第3四分位点。下部は第1四分位点。バーは中央値を示す。

であることが分かる。

このように、雷活動と-10℃高度には密接な関係があることから、雷ナウキャストの解析・予測では、-10℃の高度に着目して雷の密度値の補正や、統計モデルの層別化などを行う。

3. 雷ナウキャストの概要

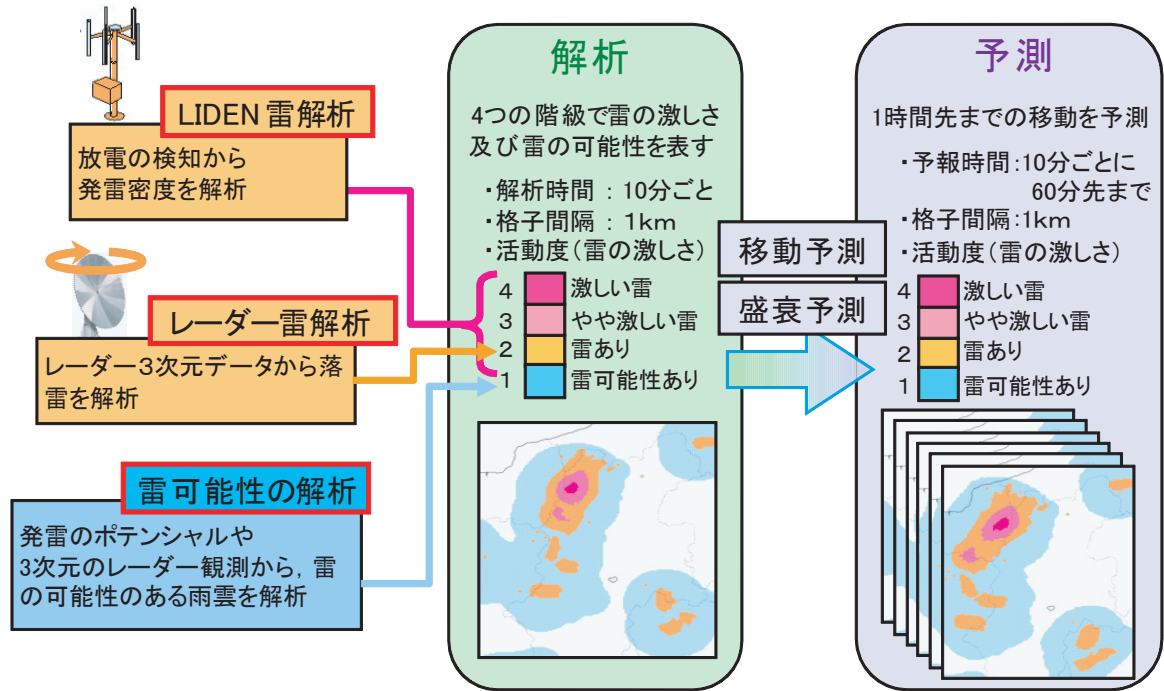
雷ナウキャストのプロダクトの概要を第13図に示す。雷ナウキャストは、1km格子単位(全国合成レーダーエコー強度や降水ナウキャストGPVと同じく第3次地域区画と一致)で雷の激しさや雷の可能性を解析し、1時間先までの予測と合わせて、10分ごとに最新の情報を提供する。解析及び予測では、雷の発生可能性と雷の激しさを「活動度」として4つの階級で表現する。計算領域は、LIDENやレーダーの探知範囲を考慮して、沿岸200km以内とした。

3.1 雷の活動度

雷ナウキャストでは、雷雲や雷雲に発達する前の雨雲を解析し、活動度2~4で雷の激しさを、活動度1で雷の可能性を表現する。

第1章で述べたとおり、雷ナウキャストの解析では、放電数密度を雷の激しさとして3つの階級(活動度2~4)で表現する。雷被害に直接つながる対地放電は活動度3以上、雲放電は活動度2以上となるようにする(第4章)。さらに、気象レーダー等のデータから解析する雷雲は活動度2とする(第5章)。

活動度2~4は発達した雷雲を解析する一方、活動度1は、雷雲に発達する可能性のある雨雲を解析するプロダクトである。発達した雷雲を基にした予測手法(活動度2~4)では、雷雲が急発達する場合など、事前に発雷を予測できない場合も多くある。一方、一回の落雷でも人命にかかわる重大な災害につながることもある。雷から身を守るための情報として、雷ナウキャストを有効に使うためには、発達初期の雷雲を極力見逃さないようにして、発雷が始まる30分から1時間程度前から予測することが必要である。このようなことから、雷可能性の解析(活動度1)は、発雷を事前に高い捕捉率で予測することを目的として導



第13図 雷ナウキャストの解析・予測プロダクトの概要

入した技術である(第6章)。

雷の活動度は、放電密度と対応して雷の激しさを表すとともに、ある程度広がりを持った雷雲の分布を表現するように設定した。したがって、活動度についての一般的なユーザに対する説明においては、放電密度として物理的意味と対応させるのではなく、防災上の意味として雷の危険性(リスク)と対応させるのが適切である。雷について防災上の注意点や雷ナウキャストの利用については、第8章で述べる。

3.2 雷ナウキャストで使用するデータ

雷ナウキャストで使用するデータを第3表に示す。各手法において、説明変数や判定条件などの直接的利用のほか、品質管理や層別化、条件化のための資料なども示す。

LIDENの標定データは、検知した放電の時刻、位置、放電種別(雲放電・対地放電)、及び推定電流値を利用する。全国合成レーダーエコー強度(以下、エコー強度という。)は1kmメッシュ、全国合成レーダーエコー頂高度(以下、エコー頂高度という。)は2.5kmメッシュである。-10℃高

第3表 各手法で使用するデータ

“○”は説明変数などプロダクト作成に直接使用するデータ。“品”は品質管理に使用するデータ。“層”は回帰分析や判別条件の層別化に使用するデータ。“条”は条件として使うデータである。

	LIDEN 雷解析	レーダー 雷解析 指数	雷可能 性の 解析	移動 予測	LIDEN雷 盛衰予 測
LIDEN標定 時刻、位置 放電種別 推定電流	○	条	○		○、層
エコー強度	品	○	○		○
頂高度					○
-10℃高度	層	層	層		層
-10℃層強度		○	○		○
-15℃層強度		○、条	○、条		
-20℃層強度		○	○		○
VIL		○			○
TOP		○	層		
RLA10			○		
PoT		条	○		○
移動ベクトル			○	○	

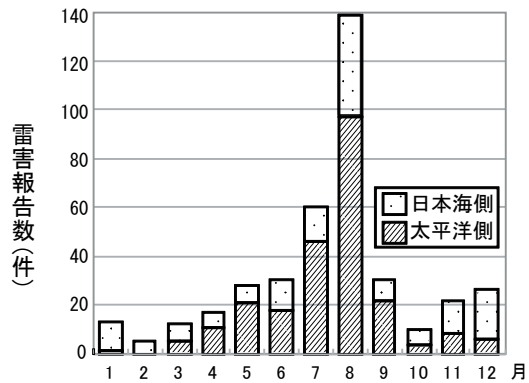
度など温度を一定とする高度データ（以下、等温度面高度という。）は、MSMの等気圧面温度及び等気圧面高度から計算する。各等温度面高度におけるエコー強度データ（以下、等温度面エコー強度という。）は、等温度面高度及び全国合成高度別15層CAPPI（以下、CAPPIという。）から計算する。VIL（鉛直積算雨量）及びTOP（CAPPIから計算するエコーの頂高度で、前述のエコー頂高度とは異なる。）は、CAPPIから計算するもので、いずれも1kmメッシュのデータである。RLA10はレーダー雷解析指数の回帰分析を10kmメッシュで適用した計算値である（第5.1節参照）。PoTは、MSMの発雷確率ガイダンスで最新の初期値の予報（通常、予報時間は6時間）を使用する。移動ベクトルは、降水ナウキャストで作成するもので、雨雲の動きから作成するものである。

4. LIDEN 雷解析

LIDEN 雷解析は、10分間・1km格子当たりの放電の個数（以下、「放電密度」という。）を基に、3段階（活動度2～4）で雷雲の分布を解析するものである。活動度が大きくなると、雷災害の発生する危険も増大し、活動度は雷害に対する危険を示す指標でもある。まず、第4.1節で、放電密度と雷の災害発生との関係について述べる。第4.2節で放電密度から雷雲の面的分布として表現する手法を解説し、第4.3節で、対地放電の分布と雲放電の分布を合成する手法を示す。第4.4節で品質管理について、第4.5節で放電密度との関係について述べ、第4.6節で事例を紹介する。

4.1 放電密度と雷害の関係

2005～2007年の3年間に、全国53官署における気象災害報告のうち、雷害（人的被害だけではなく、火災や停電なども含む）について、日単位・県（担当官署）単位で集計（以下、「雷害報告数」という。）すると、392件であった（第14図）。このうち、全体の約35%が8月に集中しているが、



第14図 月別の雷災害報告数

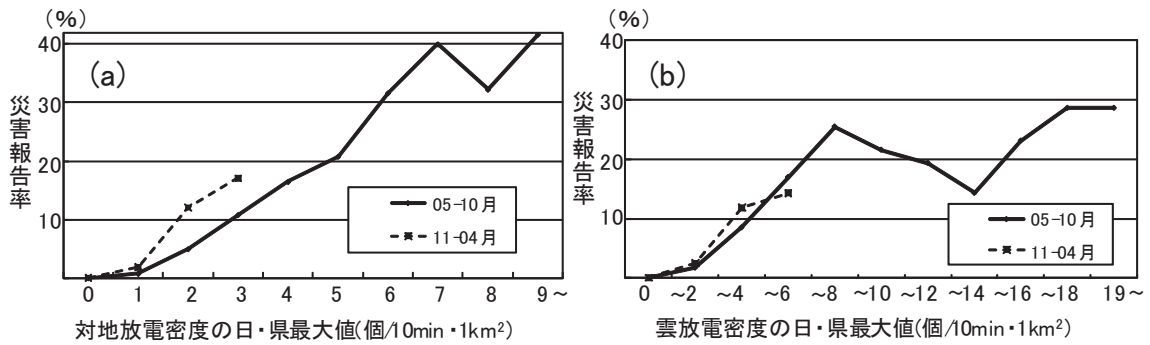
県・日単位で、2005～2007年について集計。

第5図で示したように対地放電数が8月の100分の1程度となる冬季においても、日本海側を中心に被害が発生している。

次に、10分間・1km格子の放電密度の日・県における最大値と、雷災害の報告とを比較する。放電密度の最大値ごとに、日・県単位で雷災害報告の有無から災害報告率を集計したものが、第15図である。雷害に直接関係するのは対地放電（落雷）であるが、雷雲の発達には雲放電の密度にも依存すると考えられるので、雷害との関係を対地放電・雲放電それぞれで調べた。これから、次の特徴をみることができる。

- ・日最大放電密度が大きいほど、雷災害が発生しやすい（グラフの傾きが正）。
- ・雲放電密度よりも対地放電密度の方が雷災害の発生との対応が良い（対地放電のグラフは、横軸のほぼ全スケールにわたって単調増加し、雷災害報告率は雲放電を上回る）。
- ・同程度の放電密度においては、夏季よりも冬季の方が、雷災害が発生しやすい（災害の報告率が大きい）。

以上の特徴に注意して、放電密度を基にした解析である「LIDEN 雷解析」を開発した。



第 15 図 放電密度別の災害報告率

日・県単位での対地放電 (a), 雲放電 (b) の放電密度最大値と災害報告率の関係. (a) と (b) の縦軸のスケールは同一. 横軸のスケールは, 日最大放電密度の出現する頻度が同程度になるよう調整した. つまり, 対地放電の日最大放電密度 9 以上の発現する頻度と, 雲放電の日最大放電密度 19 以上の発現する頻度は同程度である.

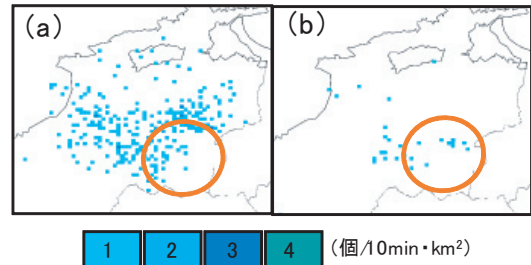
4.2 放電密度から密度分布の導入

災害に直接結びつく現象は対地放電であり, 実際落雷に伴って様々な事故や災害が発生している (雷害リスク低減コンソーシアム, 2003). 一方で, 雷雲が発達すると, まず, 上層の雲放電が発生し, その後対地放電に至る場合もある (高橋, 1986). したがって, 雲放電は雷災害に至る危険性が高まっていることを示すものであり, LIDEN データを用いた雷ナウキャストの解析では, 対地放電と雲放電の検知データから危険性を適切に表現できるように合成する必要がある.

第 4.1 節の調査から, 放電密度が大きいくほど雷の災害が発生しやすいことが分かった. しかし, 10 分・1km 格子単位で集計する放電密度は, 雷雲の活動がかなり活発にならないと, 分布図上の雷の表現は離散的なものとなり, 雷の危険性を面的に表現するには適さない. 第 16 図は, 雷災害発生時の雲放電・対地放電の 1 km メッシュ放電密度の事例である. 夏季の雷で放電を多数検知しているものの, 離散的な分布であり, 活発な雷雲を適切に表現しているといえない.

そこで, 放電の検知位置から約 10km 以内の格子 (約 350 格子) に対して, 重みをつけて密度値を積算する. この手法の効果として次の 2 点がある.

- ・ 離散的な放電の分布を面的に連続な表現にすることで, 雷雲の活動の強弱が識別しやすく, 時間的な変化も滑らかになる.



第 16 図 放電密度の事例

2008 年 8 月 8 日 15 時 30 分島根県の事例. 奥出雲町 (図の赤印) で 11000 戸が停電. 10 分・1km² 単位での (a) 雲放電密度, (b) 対地放電密度を示す.

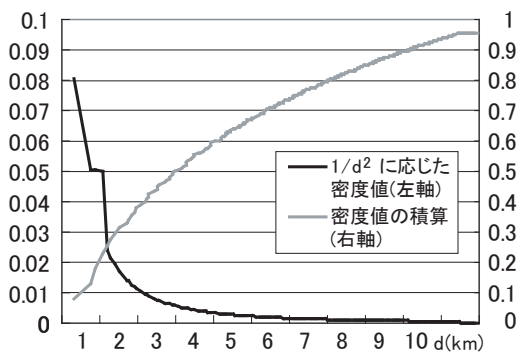
- ・ 放電の検知位置はポイントであるが, 雷雲には広がりがある. また雷雲からある程度離れた場所 (数 km ~ 10 km) でも, 落雷の被害が生じることがある. したがって, 放電の周囲にも密度値を積算することで, 雷害が発生する可能性のある広がりとして表現できる.

個々の放電に対して積算する密度値は, 検知位置と周辺格子の距離を d として, d^2 に反比例するもので, 1 個の放電について密度値を積算すると 1 となる. ただし, 検知位置に近い格子では, 値が発散しないよう固定値としておく. この検知格子近傍の値は, LIDEN 雷解析の活動度のしきい値に対応するものである (第 4.3 節で述べる). d と密度値の関係を第 17 図に示す. $d \leq 3$ km の範囲 (約 30 格子) での積算値は 0.5 となり, これ

は雷発生の近傍の格子で危険な状況をより強く表すものとなっている。

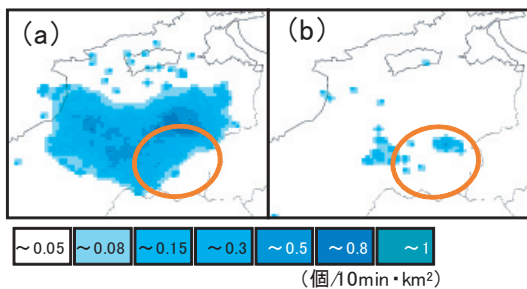
第16図の事例で、個々の格子について密度値を積算して、重ね合わせたものが第18図である。本稿では、この分布を「(放電の)密度分布」と呼ぶ。雲放電 (a) についてみると、第16図で離散的だった分布が、放電が密集している部分は連続的になり、雷の活発な領域がより認識しやすくなっている。一方、対地放電 (b) についてみると、雲放電に比べて分布の範囲が狭く雷雲の広がりをとらえきれていない上、このままでは雲放電よりも災害との関連が強いことを表現できない。

そこで、次節に示す手法によって、雷雲の広がりを表現できる雲放電の密度分布と、雷災害の危険性を表す対地放電の密度分布とを適切に合成して、LIDEN 雷解析を作成する。



第17図 積算に使う密度分布関数

放電の標定位置までの距離と格子の中心点との距離を d (km) として、 $1/d^2$ に応じた密度値 (黒線) と、放電位置に近い格子から密度値を積算した値 (灰色線)。



第18図 密度分布の事例

第16図と同事例で、(a) 雲放電の密度分布、(b) 対地放電の密度分布。

4.3 対地放電密度分布と雲放電密度分布の合成 (−10℃高度に応じた補正)

第4.2節で導入した対地放電・雲放電の密度分布のそれぞれに補正倍率をかけて合成したものを「発雷密度」とする。対地放電は雲放電よりも災害との関係が強いため、雲放電密度よりも対地放電密度の重みを大きくするよう、対地放電密度と雲放電密度の補正倍率を決める。その際、次の3点に注意する。

- (1) 季節の特徴に応じて、補正倍率を適切に設定する。雲放電の個数は対地放電の個数よりも統計的に多く、夏季は5倍程度、冬季は2倍程度である (第5図)。例えば、冬季の補正倍率を夏季に適用すると、雲放電の密度が支配的になり、対地放電の分布が表現できない。
- (2) 雲放電に対する対地放電の重みは数倍〜10倍程度とするのが適当である。例えば、対地放電の重みを10倍以上にすると、雲放電の密度分布による雷雲の活発な領域が表現されなくなる。
- (3) 放電密度に対する、雷災害の発生状況は季節によって変動する (第15図)。

(1) については、対地放電と雲放電の密度値の補正倍率を、−10℃高度に応じて決める。これは、−10℃高度が季節的に変化するとともに (第12図)、冬季雷においては対流雲の雷活動の状態を決める主要因になっているためである (Michimoto,1993 ; 北川, 1996)。また、(3) については、夏季に比べ冬季は対地放電密度が小さい割に災害の発生率が高くなることから、−10℃高度が低いほど補正倍率を大きくする。

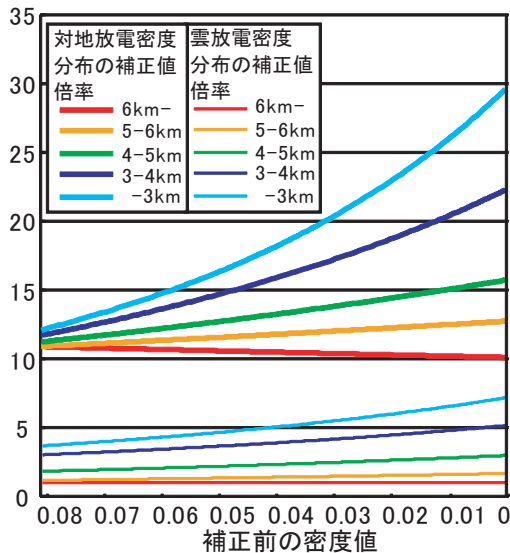
一方、−10℃高度に応じて補正倍率を決めると、LIDEN 雷解析による活動度 (雷害の危険性を含めた雷の激しさ) と単位時間当たりの放電数 (実際に人が感じる雷の激しさ) との対応が、季節によって変動することになる。放電数の頻度と活動度の対応の季節変動をなるべく小さくするためには、放電を検知した中心格子付近の補正倍率は、−10℃に対してなるべく一定値とすることが望ましい。

以上の要件から、補正の倍率を第19図のお

りとした。横軸に補正前の密度値を、縦軸に補正倍率を示す。補正前の密度値は第17図に示したもので、横軸は中心格子の値(0.08)を左側にとり反転して表示している。1個の放電における補正後の密度値の積算値について、雲放電と対地放電で比較すると(第20図)、その比は4~10倍となり、冬季よりも夏季の方が対地放電の倍率は相対的に大きくなる。

この補正を第18図の密度分布事例に対して行くと、第21図(表示値は、第17図の密度値を第19図の倍率で補正したもの)のようになる。図の(c)は雲放電・対地放電の補正後の密度分布を積算したもので、これを「発雷密度」と呼ぶことにする。(c)は、(a)の雷雲の広がり、及び(b)の落雷の危険性、の両者の特徴を併せ持つ分布となる。この発雷密度について、しきい値で区切って表現したものをLIDEN雷解析による活動度2~4とする。このしきい値は、次の条件を満たすように決定した値である。

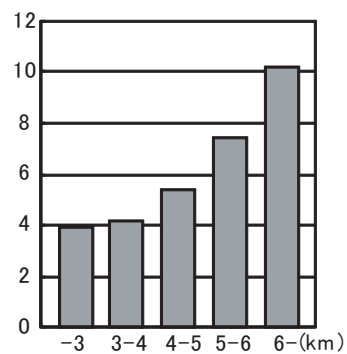
- ・ 単独の雲放電の検知格子の周辺で、活動度2となるように、活動度2のしきい値を決める。



第19図 放電密度分布の補正倍率

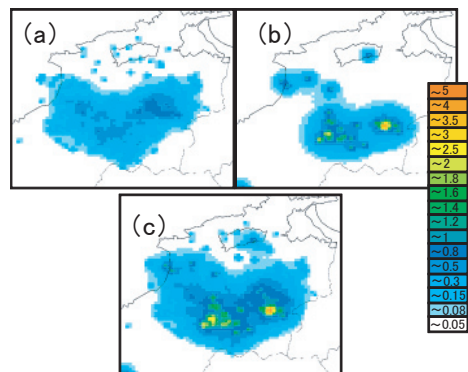
放電検知格子における-10℃高度に応じた、密度分布を補正する倍率。横軸は、補正する前の密度の値で、第17図の縦軸で示したもの。

- ・ 単独の対地放電の検知格子の周辺で、活動度3となるように、活動度3のしきい値を決める。
 - ・ 狭い範囲(2~3km)に複数の対地放電(3~6個程度)を検知した場合に活動度4となるように、活動度4のしきい値を決める。
- ここで、単独の放電とは周辺10kmの領域において他の放電検知が無いものをいう。



第20図 対地・雲放電の密度積算比

一つの放電について、対地放電の密度を積算した値と、雲放電の密度を積算した値の比。グラフは、横軸に-10℃高度をとり、(対地放電の積算値)/(雲放電の積算値)を示す。補正倍率は、-10℃高度ごとに異なるので積算した値の比も-10℃高度ごとに異なる。



第21図 発雷密度の事例

第16図と同事例で、(a)補正した雲放電の密度分布、(b)補正した対地放電の密度分布、(c)は、(a)と(b)を積算した発雷密度。

4.4 品質管理と放電密度に応じた補正

LIDEN 雷解析では、LIDEN 標定のノイズを軽減するために、エコー強度の品質管理による標定ノイズのカットと、放電密度を積算して発雷密度を求める際に補正を行っている。

4.4.1 レーダーエコーによる品質管理

LIDEN の標定処理において、ノイズ（雷以外の電磁波の影響による誤標定）の影響を軽減するための処置が行われているが、完全にノイズをカットすることはできない（気象庁観測部，2003）。LIDEN 雷解析に使用する標定データは、標定位置の半径 10 km 以内の領域にレーダーエコーの観測があることを条件とする。

4.4.2 積算時の放電密度補正

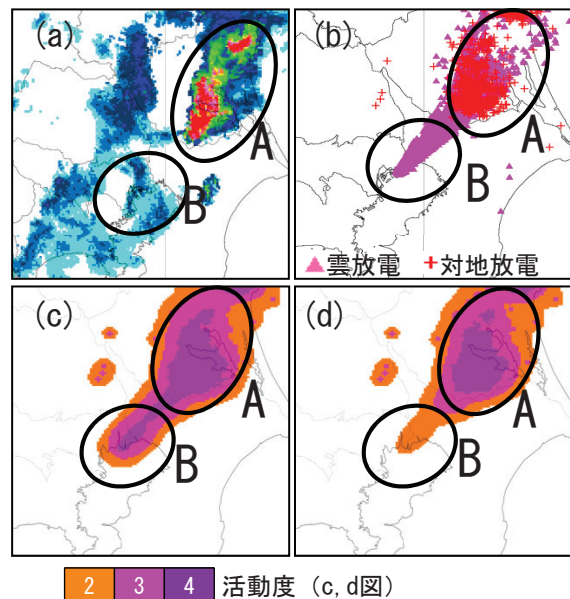
レーダーエコーによる品質管理の条件を満たす場合でも、常に標定が正しいとは限らない。近くに雨雲がある場合に、単発の放電を標定した場合、その標定が雷かノイズかの判定は困難となる。一方、余り発達していない雨雲から大量の放電を標定した場合は、ノイズが混入している可能性がある。単純に密度値を積算する手法では、雷雲ではない雨雲の近傍で大量の放電検知があると、放電密度が大きくなり、“激しい雷”として活動度 4 を解析するため、雷ナウキャストの品質が低下する。特に、平成 22 年 3 月の LIDEN の放電検知処理の変更以降、標定数が増加したため、誤標定に対する品質管理を強化する必要がある。

そこで、活動度 3 や 4 が放電検知のノイズで解析されることを抑えるため、放電密度を補正して発雷密度を求める方法を平成 23 年 3 月に導入した。具体的には次のような処理である。

- ・ 離散的な放電に対しては、補正は行わない。
- ・ 対地放電に対しては、ほとんど補正は行わない。ただし、余り発達していない雷雲で活動度 4 が解析されにくくするため、放電の密集度合いに応じて、対地放電密度の積算値をやや下方に補正する。(0.8 ~ 1 倍)

- ・ 雲放電は、多数の誤標定（位置ずれも含む）を含む場合があるので、余り発達していない雷雲に対して、積算値を下方に大きく補正する。雷雲の発達程度については、対地放電の密度や、レーダー雷解析指数（第 5 章参照）で判定し、補正值は条件に応じて 0 ~ 1 とする。この補正により、対地放電やレーダー雷解析が無い状況では雲放電の標定のみで活動度 4 を解析することはなくなる。

第 22 図は、この補正が有効に働いた事例である。単純に第 4.3 節で解説した手法で放電密度を積算すると、(c) のように雲放電のノイズで活動度 4 を解析するが、放電密度の積算時に補正を行うことで過大な表現を抑えることができる (d)。



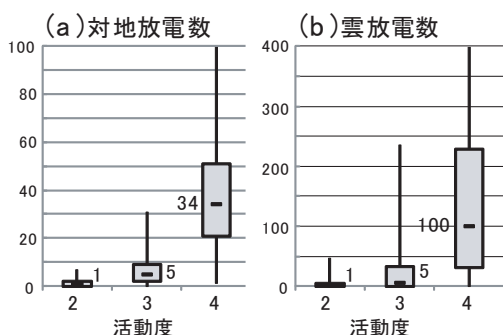
第 22 図 積算時密度補正の事例

雲放電を雷雲の外側に多数検知した事例（2008 年 8 月 19 日 18 時 10 分）。(a) はレーダーエコー強度、(b) は対地放電 (+) と雲放電 (Δ) の分布、(c) は積算時の放電密度補正を入れていない発雷密度、(d) は対地放電・雲放電のそれぞれの密度分布の積算時に補正効果を入れた発雷密度。黒線で囲った部分 A は雷雲をとらえているが、B の部分は雲放電のノイズと考えられる。

4.5 LIDEN 雷解析の活動度 2～4 と放電密度の関係

第 4.1 節～第 4.3 節で述べたように LIDEN 雷解析は、雷雲の分布と発雷の規模を表現し、雷災害の危険性と対応した防災上のプロダクトとして作成した。LIDEN 雷解析の活動度 2～4 のしきい値は、第 4.3 節で述べたように、一つの雲放電の検知に対して活動度 2、一つの対地放電の検知に対して活動度 3、狭い範囲で複数の対地放電の検知に対して活動度 4 が対応する。実際には、対地放電・雲放電の放電密度を補正して積算・合成しているため、放電数と活動度の間に直接の対応関係があるわけではない。本節では、LIDEN の放電検知から発雷の規模をイメージする参考となるよう、活動度と放電密度との統計的な対応関係について紹介する。

第 23 図は活動度 2～4 に対する対地放電密度・



第 23 図 活動度別の対地放電数の密度の分布

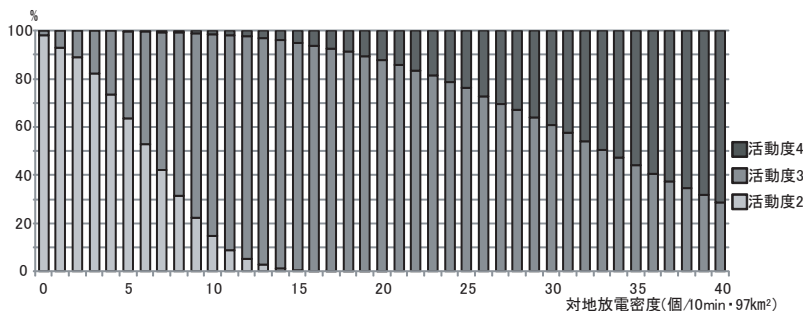
活動度 2～4 の格子について、対地放電 (a)、雲放電 (b) のそれぞれの放電数の密度 (集計する格子の半径 5 km 領域における各放電数) の度数を集計したときの、中央値、第 1・4 四分点 (箱図)、1・99% 値 (ひげ図) を示した。箱図の左又は右の数字は中央値。集計した範囲は 2008～2010 年の陸地及び沿岸 40 km 以内の格子。

雲放電密度の度数分布を箱ひげ図で示したものである。ここでの「放電密度」は集計対象の格子を中心として半径 5 格子の領域 (この領域の格子数は 97) における放電数で、対地放電と雲放電はそれぞれ独立して集計した。放電密度から活動度を算出する段階で、補正処理 (−10℃ 高度, エコー強度, 周囲の放電数に依存する)・合成処理を行っているため、活動度に対応する放電密度の値の分布は幅広くなる。したがって、活動度に対応する放電密度の値をはっきりと定めることはできない。第 23 図からおおよその対応を取ると、活動度 2 に対しては雲放電が (周囲 97 格子中) 数格子程度、活動度 3 に対しては対地放電が数個～十数個程度、活動度 4 に対しては対地放電が数十個程度となる。

第 24 図は、対地放電密度に対する活動度の対応を調べたものである。対地放電密度が 7 (個/10min・97km²) 以上では活動度 3 以上となることが多くなり、対地放電密度が 33 (個/10min・97km²) 以上では活動度 4 となることが多くなる。

4.6 LIDEN 雷解析の事例

2008 年 5 月 17 日 釧路地方の事例を第 25 図に示す。北日本の上空に寒気が入り、東北北部から北海道にかけて雷雨が散発的に発生した。12 時ころに釧路地方で発生した雷雨は、対地放電に先行して雲放電を多数検知した。最初に雲放電を検知した時刻は 11 時 40 分である。12 時 10 分では対地放電は検知されていないものの、発達したエコーに対応して雲放電が密集して検知されており (第 25 図 c)、活動度 2 に加えて活動度 3 も解析した (e)。対地放電を最初に検知した時刻は 12

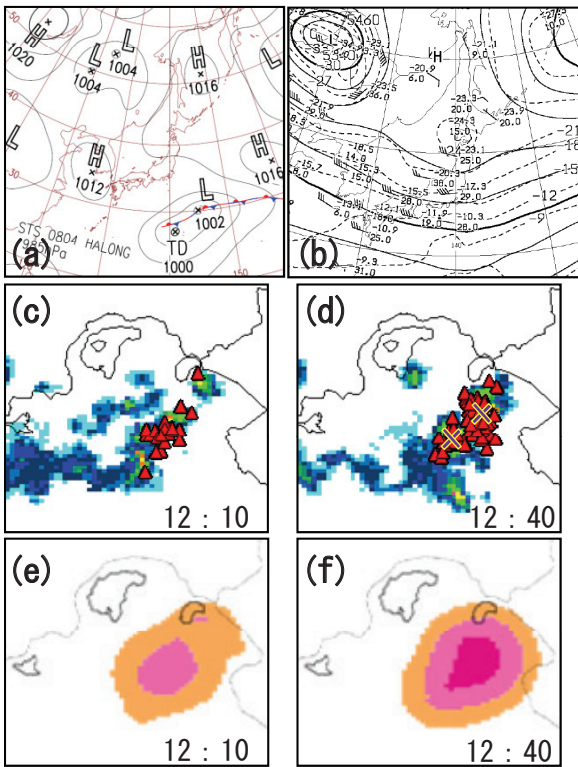


第 24 図 対地放電数の密度別の活動度の分布

対地放電数の密度 (半径 5 格子領域内の対地放電数) の値ごとに、活動度 2～4 を集計したときの度数の割合。集計範囲は第 23 図の集計範囲と同じ。

時 30 分で、その 10 分後の 12 時 40 分には雷雲が更に発達し対地放電と雲放電の検知から活動度 4 を解析した (f)。すなわち、LIDEN 雷解析の活動度の変化に着目すると、雲放電数の増加や対地放電の開始・増加など、雷雲としての発達を把握することができる。

このように、雲放電と対地放電を適切に組み合わせた LIDEN 雷解析により、雷雲の発達・衰弱傾向をとらえることができ、さらに、対地放電だけでは表現しきれない雷雲の分布の様子を表すことができる。



第 25 図 LIDEN 雷解析の事例

2008 年 5 月 17 日釧路地方の事例。(a)・(b) は 9 時の天気図(地上及び 500hPa)で、(c)・(d) はエコー強度と再標定 LIDEN の放電位置(△は雲放電、×は対地放電)、(e)・(f) は LIDEN 雷解析である。(c)、(e) は 12 時 10 分、(d)、(f) は 12 時 40 分の解析。

5. レーダー雷解析

LIDEN 雷解析では、雷放電の検出を基にして解析を行っているため、LIDEN が放電現象を捉えられない場合や、急に対地放電が始まる場合など、事前に雷の解析・予測を表現できないことがある。そこで、放電が検出されていなくても今後対地放電を発生させる雷雲を、レーダー 3 次元データを用いて検出し(レーダー雷解析)、LIDEN 雷解析の活動度 2 と合成して、雷ナウキャストの解析とする。レーダー雷解析は、LIDEN による対地放電及びレーダー 3 次元データを利用した統計的手法による予測式から算出する「レーダー雷解析指数」を基にして解析するもので、解析手法の概要を第 26 図に示す。

レーダー雷解析指数は平成 22 年 5 月の雷ナウキャスト運用開始に向けて、観測部観測課観測システム運用室が中心となって開発したものである。本稿で示すレーダー雷解析は、平成 23 年 3 月に改修した雷ナウキャストで運用されているバージョンである。雷ナウキャスト運用開始当初のレーダー雷解析については、笠原(2010a)で紹介している。本稿で述べるバージョンでは、平成



第 26 図 レーダー雷解析の流れ

22年3月のLIDEN中央処理局のパラメータ変更に対応した再標定データを使うとともに、説明変数の作成手法、予測式の適用手法、レーダー雷解析のしきい値などを更新するなど、多岐にわたって改善を行った。

第5.1節で統計モデルの構築について述べ、第5.2節～第5.4節で示す手法で、予測式の計算値を1km化しレーダー雷解析指数とする。第5.5節で指数の解析事例について、第5.6節で雷ナウキャストへの適用方法について示す。

5.1 統計モデルの構築 (10km 格子のレーダー雷解析指数：RLA10)

雷雲の発達ステージを把握する手法として、レーダー3次元データの有効性が数多く報告されている。特に、Gremillion and Orville (1999) は米国フロリダ州の夏季雷について、-10℃から-20℃までの温度高度面のエコー強度と対地放電開始までの時間対応を比較すると、-10℃高度で反射強度40dBZを条件とするのが最も対応がよいとしている。一方、Michimoto (1991) は北陸地方の夏季及び冬季の雷を調査し、30dBZの反射強度が-20℃高度を超えると落雷に至ることを明らかにした。さらに、エコー頂高度やVILが大きいほど、落雷の割合が多くなることも示されている (Watson *et al.*,1995)。

そこで、等温度面エコー強度などのレーダー3次元データを説明変数として用い、LIDENによる対地放電の有無を目的変数とした予測式を、ロジスティック回帰分析で作成することとした。

5.1.1 回帰分析の概要

回帰分析の手法を第4表にまとめた。目的変数を「対地放電の有無」とするため、回帰分析で決定する式による計算結果は、「対地放電の発生する確率」に対応する。目的変数が2値変数であることから、モデル関数には、確率の回帰分析に使用されるロジスティック関数を用いる (次式)。

$$p = 100 \times \frac{\exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k)}{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k)} \quad (k=4) \quad \dots (1)$$

第4表 レーダー雷解析指数 (10 km) の作成手法

統計手法	ロジスティック回帰分析
データ単位	10km格子・10min
標本資料	2007～2008年のサンプル格子
層別化(季節)	-10℃高度1km毎7層
層別化(地域)	なし(統計式の適用時に補正する)
目的変数	LIDENによる対地放電検知の有無(気象レーダー観測時刻後30分以内・30km四方)
説明変数候補	・等温度面強度 (-10℃, -15℃, -20℃のうちのいずれか一つ) ・VIL ・TOP(CAPPIから作成) ・全国合成強度 (いずれも10km格子内最大値)
フィッティング変数選択	フィッティング(回帰係数の決定)はAICが最小となる条件を用いる。変数については、AICが最小となる組み合わせを選択する。(変数増減法)

p : 現象 (30分以内の落雷) が起こる確率 (0 ~ 100)

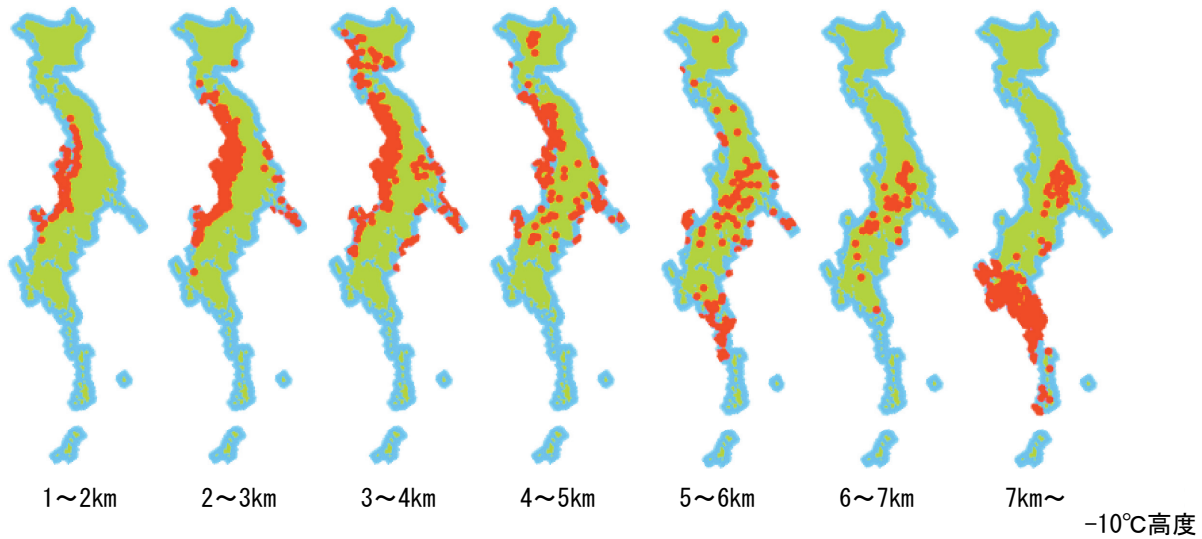
x_i : 説明変数 ($i = 1 \sim 4$)

b_i : 回帰係数 ($i = 0 \sim 4$)

回帰分析に使用する説明変数と目的変数の格子サイズについて、雷雲の移動や標定誤差を考慮すると、10 km単位程度で十分であり、説明変数は10 km格子内での最大値 (又はその変換値：第5.1.5節) を用いる。

5.1.2 層別化

-10℃高度で7層 (1 ~ 2km, ..., 6 ~ 7km, 7km ~) に層別化する。各層はおおむね季節に対応しており (第12図)、層ごとに雷雲の発達する地域をサンプル格子として抽出する (第27図)。サンプル格子は、対地放電を検知した回数 (10分単位で集計) が多い順に周辺格子も含めて抽出し、回帰分析で十分なサンプル数になる範囲で決定した。地域の層別化は行わず、予測式の適用段階で地域別に補正する (第5.2節参照)。



第 27 図 レーダー雷解析指数 (10 km) ロジスティック回帰分析におけるサンプル格子

5.1.3 目的変数の作成

目的変数は、サンプルとして抽出した 10km 格子について、10 分ごとの各時刻に対して、30 分後までの対地放電の有無とする。対地放電の有無については、説明変数との対応をよくするため、以下の処理を行っている。

(1) 移動の考慮

雷雲の移動を考慮し、LIDEN の検知位置を降水ナウキャストの移動ベクトルを用いて、説明変数の観測時刻までさかのぼって移動させる。

(2) 位置の誤差の考慮

LIDEN の標定位置の誤差と移動ベクトルの誤差を考慮し、対象格子を含む周囲 9 格子 (30 × 30 km) の中で、LIDEN 検知格子数と対象の説明変数の値に応じて、対地放電の有無を決定する。具体的には、周囲 9 格子のうち LIDEN 検知のある格子数を N として、説明変数 (等温度面エコー強度など) の値を 9 格子の中で比較して、対象格子の値が上位 N 位以内であれば対地放電有とする。

5.1.4 説明変数の候補と選択法

説明変数の候補は第 4 表のとおりである。等温度面エコー強度は AIC (赤池情報量規準：統計モ

デルを評価する指標の一つ。坂本ほか, 1983) が最小となるものを選択する。つまり、-10, -15, -20°C 面エコー強度のそれぞれについて、残りの説明変数を組み合わせてロジスティック回帰分析を行ったときの AIC で比較するものである。

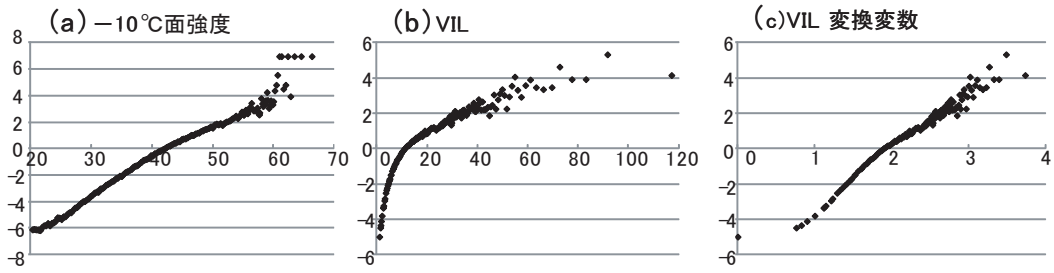
各説明変数は 10km 格子内の最大値又は、次節で導入する変換手法で得られる変数のうち、単回帰分析の AIC が小さい方を選択する。

5.1.5 説明変数の変換

式 (1) を変形すると、現象の発生確率 (p) のロジット (第 2 式左辺) は、各説明変数の線形結合 (第 2 式右辺) で表される。

$$\ln\left(\frac{p}{100-p}\right) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad \dots (2)$$

つまり、各説明変数 (x_i) と現象の発生確率 (p) のロジットとの線形関係が強いほど、ロジスティック曲線でのフィッティングが良くなると期待できる。第 28 図は「-10°C 面エコー強度, VIL」と「目的変数で放電有となる確率のロジット」との対応関係である。-10°C 面エコー強度はほぼ線形であるが (a 図)、VIL は線形ではない (b 図)。そこで、b 図の対応関係と類似する関数 (第 3 式)



第 28 図 説明変数と目的変数の対応関係の例

−10°C 高度 6～7 km における説明変数（−10°C 面エコー強度，VIL，VIL 変換変数）と目的変数の関係．縦軸は，目的変数「放電有」比率のロジット．横軸は (a) −10°C 面強度 (dBZ)，(b) VIL (kg/m²)，(c) VIL の変換値 (無次元)．

を導入して変換することで， p のロジット（以下，logit と記す．）との対応が線形に近くなるような変数を作成する．

$$y = \begin{cases} (x-a)^b & (x \geq a) \\ 0 & (x < a) \end{cases} \quad \dots (3)$$

$$\text{logit} = A(x-a)^b + C \quad \dots (4)$$

ここで， a は p が 0.5% を越える x の値とする． b は y と logit の回帰分析（第 4 式による）で決定する．この方法で変換した変数 y と logit との関係はほぼ線形となる（第 28 図 c）．説明変数 x ，又は x を変換した変数 y のうち，単回帰分析の AIC が小さい方を最終的に説明変数とする．

5.2 統計モデルの地域補正

雷ナウキャスト開始当初のレーダー雷解析では，全国の格子単位で地域的層別化を行っていたが，格子単位で細分化すると，標本数が少なくなり，統計誤差が大きく予測の精度は必ずしも改善するとは限らない．発雷の少ない地域でも適用できるように，サンプル格子で作成した予測式 (1) に定数項を加えて補正して (第 5 式) 各地域ごとに適用する．モデルを補正する地域のブロックは全国 20 レーダーの観測範囲の重なる組合せから全国を 120 に分割した．この地域ごとの補正項を加えて算出する指数を 10 km 格子のレーダー雷解

析指数とし，RLA10 と記す．

$$\text{RLA10} = 100 \times \frac{\exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_4 x_4 + C)}{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_4 x_4 + C)} \quad \dots (5)$$

地域ごとの補正項 C は，LIDEN の検知格子数と， $\text{RLA10} \geq 50$ を満たす格子数と同じになるように設定する．つまり，補正項 C は次のように決定できる．式 (5) の多項式部分を F と置いて，

$$F = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad \dots (6)$$

統計モデル式 (1) のしきい値以上の格子数が，LIDEN 検知格子数と等しくなるときの F の値を f ，そのときの式 (1) の値を prla とする．

$$\text{prla} = 100 \times \frac{\exp(f)}{1 + \exp(f)} \quad \dots (7)$$

f に補正值 C を加えて，統計モデルの出力を 50 と調整するので，

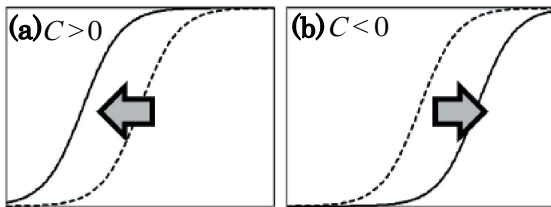
$$50 = 100 \times \frac{\exp(f+C)}{1 + \exp(f+C)} \quad \dots (8)$$

となる．したがって， C は次式で計算できる．

$$C = -\ln\left(\frac{\text{prla}}{100 - \text{prla}}\right) \quad \dots (9)$$

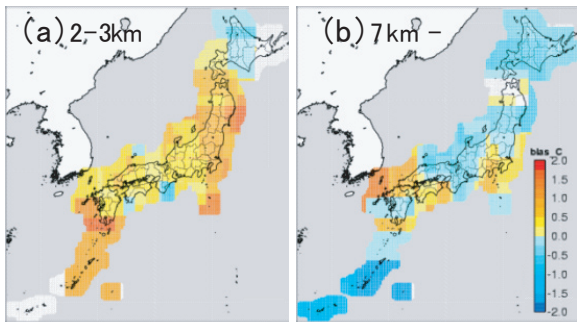
ただし，標本数が少ない地域で，過剰に補正しないように，120 地域の補正值のうち上位・下位 5% に入る地域では，5% 値・95% 値の値を適用することとした．

地域ごとに補正值 C を加える操作は、ロジスティック曲線を平行移動する変換を意味している(第29図)。回帰式(1)よりもRLA10を大きくする場合は $C > 0$ 、小さくする場合は $C < 0$ である。 -10°C 高度 $2 \sim 3 \text{ km}$ 及び 7 km への C の分布を第30図に示す。暖色系の地域は $C > 0$ であり、サンプル地域 ($2 \sim 3 \text{ km}$ は北陸, 7 km は九州・関東)の平均的特徴と比べて、雷の発生傾向が大きい、又は雷雲の発達に対してレーダー指数が小さいなどの傾向が考えられる。



第29図 RLA10の補正効果

10 km格子レーダー雷解析指数 (RLA10) の地域別の補正。破線は補正前のロジスティック曲線。実線は補正したときの曲線で、(a) は補正項 $C > 0$ のとき、(b) は補正值 $C < 0$ のとき。



第30図 補正值の分布

RLA10の地域別の補正值 C 。(a) は -10°C 高度面 $2 \sim 3 \text{ km}$ 、(b) 7 km の場合。暖色系は $C > 0$ 、寒色系は $C < 0$ を表す。

5.3 環境場による補正 (PoT による 0 値補正)

第5.2節までで説明したRLA10は、説明変数にレーダー3次元データの値(10 km格子の最大値など)を使っているため、雷を伴わない層状性エコーでもエコー強度などが大きい値になれば、RLA10(0 ~ 10程度)が計算される場合がある。このような場合は、数値予報(MSM)から計算されるPoTを利用して発雷する環境場となっているかどうかを判定して0に補正する。RLA10を0に補正するためのPoTのしきい値は -10°C 高度ごとに設定しており、 -10°C 高度 $2 \sim 3 \text{ km}$ の場合(冬季雷に対応)を第5表に示す。この場合だと、例えばRLA10の値が10でPoTが20未満のとき、RLA10を0に補正する。このPoTのしきい値は、補正後のRLA10に対して、10分後の同格子におけるLIDEN検知有無予測のスレットスコアが最も高くなる値を基に設定した。

PoTの値でそのまま0値補正を行うと、MSMの予想が外れた場合に不適切に補正をかけることになる。そこで、前60分以内・半径70 km以内にLIDENの検知があり、PoTの値が30未満の場合は、PoTの値を仮想的に大きく補正してから、第5表にしたがってRLA10の0値補正を行う。

第5表 0値補正するRLA10の値とPoTのしきい値の例

0に補正する RLA10のしきい値	1	2	3	4	5	6	7	8
PoTしきい値	91	83	62	62	52	41	33	28
0に補正する RLA10のしきい値	9	10	11	12	13	14	15	16 ~
PoTしきい値	21	20	15	11	9	5	3	2

PoT による補正 RLA10 の例を第 31 図に示す。層状性のエコーに対応して、中国地方などで 0～5 程度の値を解析するが、この地域では PoT が低く発雷の可能性がないため、0 に補正する。一方、屋久島付近のエコーは PoT が高く発雷の可能性があるので補正は行わない。

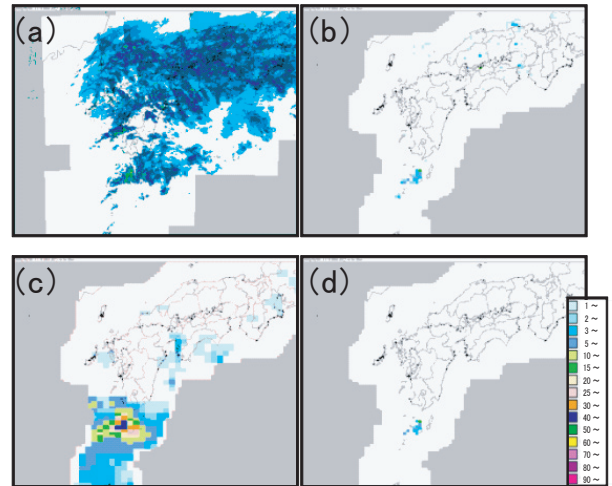
5.4 対流性エコーの判別と RLA

第 5.3 節の補正によって、発雷の可能性の低いエコーによる過大解析を抑えることができる。本節では、さらにレーダーの情報を使って層状性・対流性の判別を行い、対流性エコー域と第 5.3 節の補正 RLA10 と重ねることで、1km 格子単位のレーダー雷解析指数（以下、RLA という）を算出する手法を示す。対流性エコー域の判別は、Steiner *et al.* (1995) を参考に改良したものである。この手法は、対流性中心格子 (convective center) を検出して、その格子の周辺のレーダーエコーを対流性とみなすものである。対流性中心格子の検出条件は、以下の「等温度面エコー強度の条件①」又は、「等温度面エコー強度の空間的ピーク性の条件②」を満たすものである。エコー強度は、ブライトバンドの影響を除くため、 -15°C 高度面エコー強度 Z (dBZ) を用いる。対流中心格子の条件は Z について、

- (1) $Z \geq 35$
- (2) $Z - Z_{bg} \geq 6.8 - Z_{bg}^2 \div 180$

ここで、 Z_{bg} は、半径 11km 以内における -15°C 高度面エコー強度の平均値（背景エコー強度）である。①又は②の条件を満たした対流性中心格子に対して、その格子を中心とし、第 6 表で示す半径の領域内のエコーを対流性エコー域とする。

このようにして、層状性・対流性を判別した事例を第 32 図に示す。(a) は 15 時 30 分のエコー強度、(b) は対流性エコー領域である。(b) の赤の格子は条件①で対流性中心と判定された格子、オレンジの格子は条件②で対流性中心と判定された格子、青の格子は対流性エコーの領域である。



第 31 図 RLA10 の補正事例

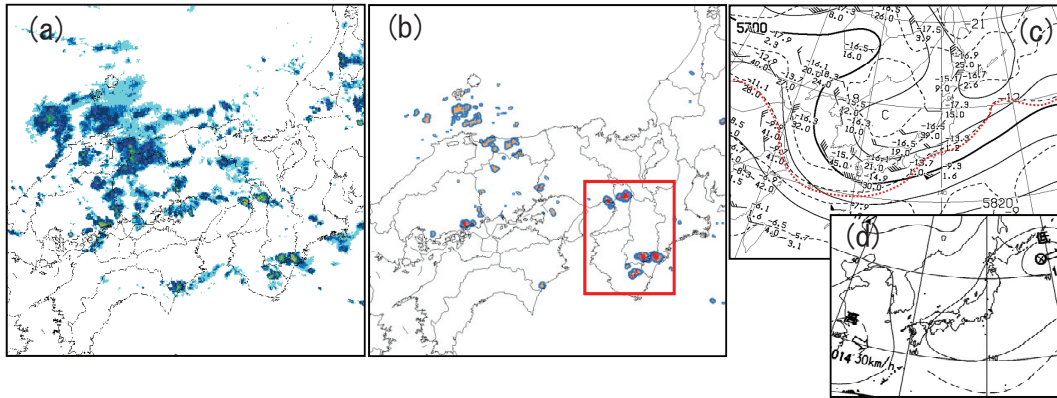
2008 年 5 月 10 日 11 時 10 分の事例を示す。(a) 全国合成エコー、(b) 補正前の RLA10、(c) PoT (10 km 内挿値)、(d) 補正後の RLA10。

第 6 表 Z_{bg} に応じた対流性エコー域

背景エコー強度 (dBZ)	対流性エコー域の半径
$Z_{bg} < 25$	1km
$25 \leq Z_{bg} < 30$	2km
$30 \leq Z_{bg} < 35$	3km
$35 \leq Z_{bg} < 40$	4km
$40 \leq Z_{bg}$	5km

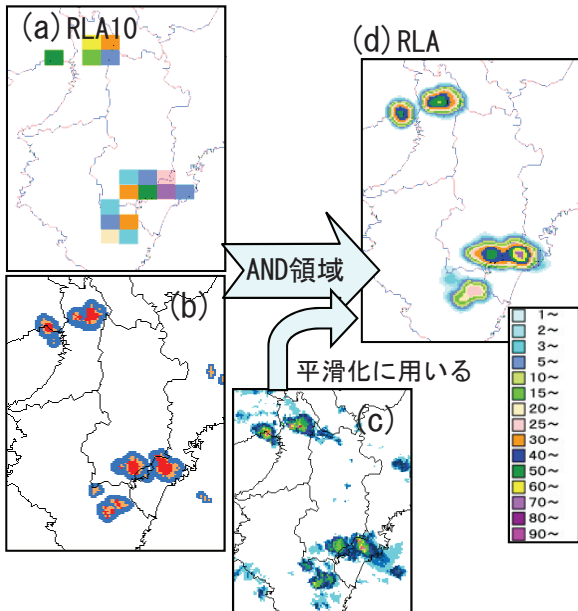
(a) と (b) を比較して、対流性エコー域はエコー域を大きく絞り込む形となる。

実際に発雷に至る雨雲のほとんどは対流性エコーであるため、RLA10 と対流性エコーを重ねて AND 条件を取ることで、層状性エコーによる空振りを減らすことができる。第 32 図と同事例で、RLA を算出する様子を第 33 図に示す。ここで、RLA は 1 km メッシュの分布とするため、エコー強度の分布を用いて RLA10 の 10 km の分布を滑らかにしている。



第32図 対流性エコー域の事例

2009年5月24日9時の500hPa天気図(c)、15時の地上天気図(d)と、15時30分の全国合成エコー(a)、対流性エコー域(b)の様子。(c)の赤点線は -12°C 線を表し、(b)の赤枠の部分は第33図で拡大して示す領域である。



第33図 RLAの事例

第32図と同事例。RLA10(a)と対流性エコー域(b)のAND領域から、レーダー雷解析指数(RLA)(d)を求めるときに、エコー強度(c)を用いて平滑化を行う。

5.5 RLAの解析事例

RLAの解析事例として、第33図の前後の時刻を示す(第34図)。2009年5月24日9時の500hPa天気図では -12°C 以下の強い寒気が西日本を覆っており(第32図c)、大気の状態が不安定となり、西日本では昼過ぎから夕方にかけて局地的に雷雨が発生した。兵庫県芦屋市では落雷に

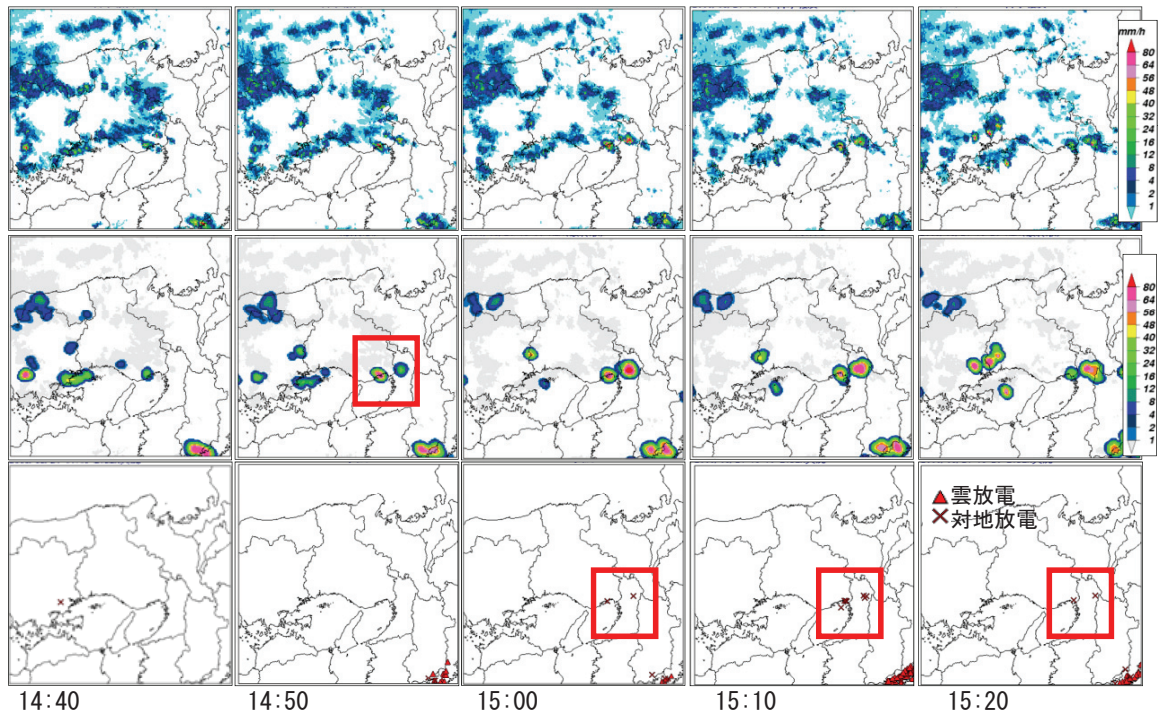
よって人的被害が発生している。LIDENが放電を検知した時刻の前後の時刻では、放電の検知は少なく、積乱雲は短時間で発達して落雷に至ったと考えられる。このような事例では、LIDEN雷解析では事前の予測(雲放電から落雷発生前の活動度2を解析すること)はできない。一方、RLA指数は放電を検知する50分前から正の値を解析しており、10分前の14時50分には73という大きな値となった(中段)。発雷に至る雷雲では、RLAの方が大きい値を示す傾向がある一方、発雷に至らない雨雲では小さな値を解析している。

このように、レーダー雷解析により、発雷に至る前に雷雲を解析することが可能となる。

5.6 RLAのしきい値とレーダー雷解析

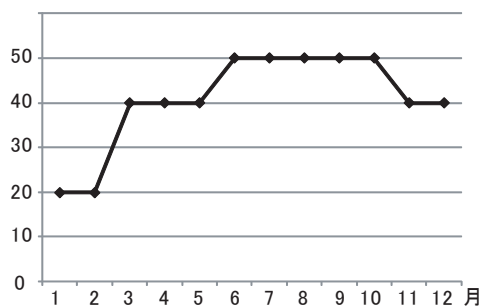
前述のRLAを基にしたレーダー雷解析は、解析時刻の前後において、落雷を発生させる雷雲を解析していることから、予測ではなく実況解析(活動度2)として扱うこととした。RLAのしきい値は、雷ナウキャストの予測精度が最も高くなるように、月別に調整している(詳細は第7.3節で述べる)。第35図に月別のしきい値を示す。1・2月を除いて、しきい値は40~50となる。

第36図は、日本沿岸域において、月別の活動度2以上の格子集計数(実線)と、集計数に占めるレーダー雷解析による活動度2の格子の割合(破線)である。夏季は雷の継続時間が長い

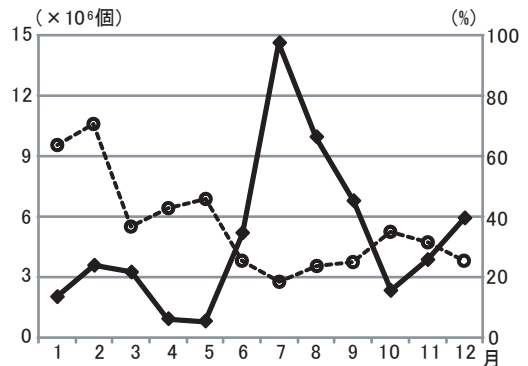


第34図 RLAの事例

第32図と同事例で、エコー強度（上段）、レーダー雷解析指数（中段）、LIDEN（再標定）の検知した放電（下段）を示す。左の列から順に14時40分～15時20分の実況・解析である。



第35図 レーダー雷解析の月別のしきい値



第36図 レーダー雷解析の格子数

2010年1～12月の陸地+沿岸100km以内の領域における活動度2以上の格子数（実線・左軸）と、活動度2以上の格子に対してレーダー雷解析による活動度2の格子が占める割合（破線・右軸）。

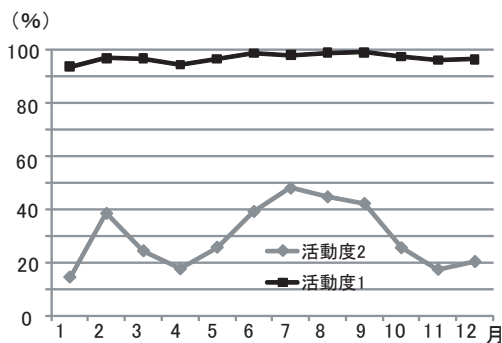
で、全解析数に対してLIDEN雷解析による寄与が大きくなる。したがって、レーダー雷解析におけるRLAのしきい値は高い値とし、レーダー雷解析の占める割合（寄与）を小さくした方が精度は高くなる。一方、冬季は雷の継続時間が短いので、LIDEN雷解析より前に解析されるレーダー

雷解析の寄与が大きい。したがって、RLAのしきい値は低い値とし、その占める割合（寄与）を大きくした方が精度は高くなる。また、しきい値を低く設定することにより、LIDENで検知（捕捉）しにくい冬季の雷を、レーダー雷解析で表現できる場合があるという効果もある。

6. 雷可能性の解析

これまで説明してきた LIDEN 雷解析とレーダー雷解析（すなわち、活動度2～4）は、雷雲の特徴に着眼して解析するものであった。しかし、これらの解析を基にした予測では、急発達する雷雲に対して事前に予測できない場合もある。雷は最初の放電であっても、重大な災害につながる恐れがあるため、その予報はできる限り見逃しを少なくすることが求められる。実際、第34図の事例では、放電の継続時間は短いものの人的被害が発生している。レーダー雷解析は発雷の10分前に雷雲を解析したが、防災の観点からみると、リードタイムは必ずしも十分ではない。

そこで、雷雲に発達する可能性のある雨雲（レーダーエコー域）を広くとらえることで、「雷可能性あり」を活動度1として解析する。この手法を雷可能性の解析といい、30分予測でLIDENにより標定された落雷の9割以上を捕捉できる手法である。雷ナウキャスト運用開始時の手法(笠原, 2010a)による2010年の捕捉率を第37図に示す。活動度2の捕捉率（予測手法については第7章参照）は、20～40%前後であるが、活動度1の捕捉率はすべての月で90%を越えた。



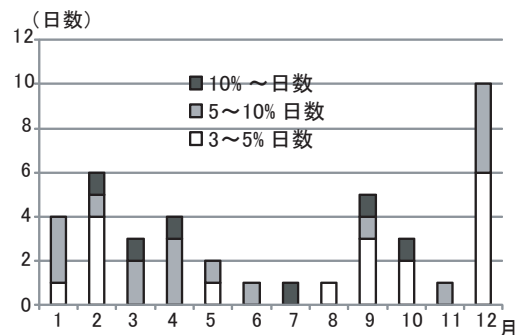
第37図 活動度1・2の捕捉率

従来の活動度1, 2のFT30での捕捉率の比較。2010年1月～12月について、LIDEN雷解析の活動度2を実況として評価した。

6.1 従来の手法の問題点と改善

雷雲に発達する可能性について、雷ナウキャスト運用開始時の手法は、雷注意報の発表の有無とエコー強度で判定するものであった。しかし、雷注意報はリードタイムを数時間取って発表するため、低気圧が接近する場合など、雷が発生しないような雨雲の広がりにより、広範囲に長時間にわたって活動度1が解析される場合があった。低気圧の通過の場合は、実際には発雷する範囲・時間帯が短く、発雷しない場合もあるので、活動度1の解析が過大となりやすい。第38図は雷注意報が発表され、活動度1が広範囲に解析された日のうち、雷の検出がほとんど無かった日数の月別集計である。活動度1が広範囲に解析される日では、1日の全時間・面積に占める活動度1の解析格子の割合は5%を超える状況となる。このような過大な予報を抑えるために、解析条件を厳しくすると、見逃しが多くなってしまい、活動度1の本来の目的からそれてしまう。

このような背景から、雷注意報をベースにエコー強度のみで発雷の可能性を予測する手法とは別に、雷雲の特徴に着目し雷雲の発達状況を複数の指標を組み合わせて詳細に解析することで、捕捉



第38図 活動度1の過大予報の日数

非発雷日における活動度1を過大予報した日数の集計。2007～2008年で、一日の放電格子数（10分・10km格子単位）が10個以下の日のうち、活動度1の発表格子数（10分・10km格子単位で集計）が全格子数の3%以上となる日数を月別に集計。活動度1の割合が3～5%の日数を白、5～10%の日数を薄い灰色、10%以上の日数を濃い灰色で示す。

率を改善しつつ、非発雷日の過大な予報を抑制する手法を調査・開発した。

雷雲の特徴に着目するための事前調査について第 6.2 節で述べ、雷雲の特徴ごとに場合分けした判定条件の手法を第 6.3 節で解説する。精度評価及び事例、雷注意報との関係について第 6.4 節、第 6.5 節で述べる。

6.2 RLA 指数と活動度 1 の比較

第 5 章で導入したレーダー雷解析指数 (RLA) は、発達中の雷雲をレーダーでとらえて、落雷の発生する 30 分程度前から活動度 2 を解析するもので、この指数は落雷の可能性の大小を表している。レーダー雷解析の活動度 2 は、LIDEN の雲放電検知と同等の扱いとするので、空振りを極力少なくするため、RLA のしきい値を 20 ~ 50 程度と高めの設定としている。一方、活動度 1 では、高い捕捉率とリードタイムを確保するため、雷雲の発達の初期段階を解析する必要があり、RLA のしきい値を低くすることで事前に発雷に至る可能性のある雨雲を捉えることができると考えられる。

第 39 図は、RLA10 (10 km 格子のレーダー雷解析指数：第 5.1 節参照) のスコアと、従来の活動度 1 のスコアとを比較したものである。RLA10

のスコアはしきい値を「1」として、10km 格子単元に 3×3 格子の範囲で最大値がしきい値以上のときに発雷ありと予報し、30 分後の LIDEN 雷解析 (活動度 2 以上) を実況として評価したものである。従来の活動度 1 は 10 km 格子単元で 30 分後の LIDEN 雷解析を実況として評価した。

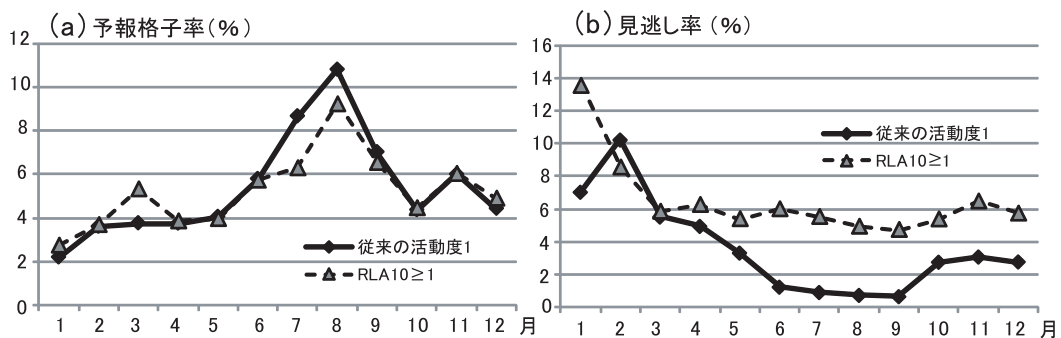
雷の可能性の解析の条件を調査するにあたって、スコアはそれぞれ以下の式で計算される「予報格子率」と「見逃し率」の二つを用いる。

$$\text{予報格子率} = \frac{\text{(予報格子数)}}{\text{(検証期間における全格子数)}}$$

$$\text{見逃し率} = \frac{\text{(実況有格子数)} - \text{(適中格子数)}}{\text{(実況有格子数)}}$$

予報格子の割合が小さいほど絞り込んで予報しているため、見逃し率が等しければ、予報格子率が小さいほど精度が高い (優れた手法) といえる。また、予報格子率が等しければ、見逃し率が小さいほど精度が高いといえる。「RLA10 ≥ 1」での予報は、予報格子率はおおむね等しいが、見逃しが従来の活動度 1 よりも多くなる。

この調査から、RLA10 のみの判定でも予報面積を狭くすることはできるが、従来の手法に対して絞り込んだ分、見逃しが増えることがわかる。



第 39 図 RLA10 と活動度 1 の精度比較

従来の活動度 1 (雷注意報とエコー強度を組み合わせる手法) と、10 km 格子のレーダー雷解析指数 (RLA10) について 3×3 格子最大値のしきい値を 1 で判定した場合の 30 分予測スコアの月別比較。実況有無は LIDEN 雷解析の活動度 2 以上で判定した。(a) は予報格子率 (予報格子数 / 全格子数)、(b) は見逃し率。2008 年のデータを使用。

6.3 雷雲の特性に応じた判定条件

6.3.1 雷雲の分類

第2.7節で述べたように、 -10°C 高度によって雷雲の発達傾向は異なると考えられる。さらに、実際の対流雲の発達程度はTOPと対応する。したがって、雷雲の発達傾向と発達段階を -10°C 高度とTOPを用いて分類し、階級ごとに特徴に応じた雷可能性の判定条件を作成することとした。

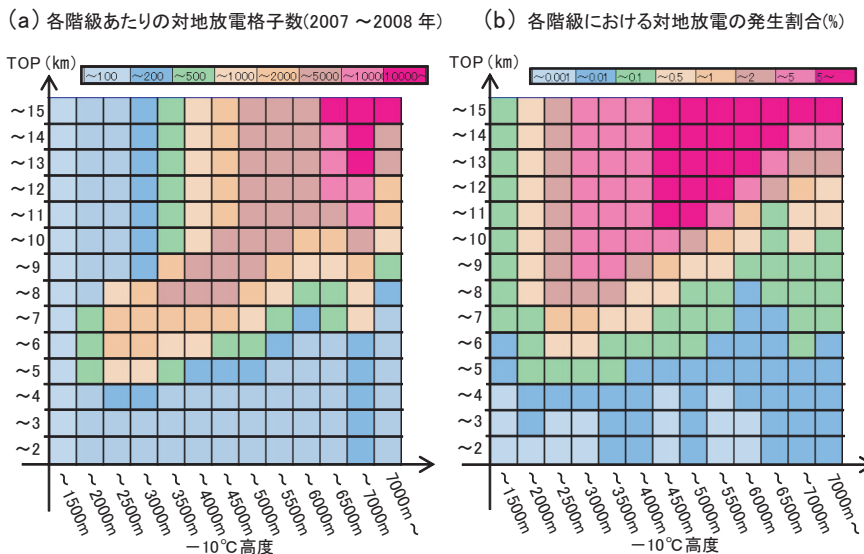
第40図は -10°C 高度・TOPで分類した階級ごとの対地放電数及び、対地放電の発生割合を集計したものである。なお、図でTOPの値を1kmに区切っているが、TOPの値によって、放電の検知格子数が少なくなる階級では、ひとまとめにして集計した。冬季雷に対応する -10°C 高度2km付近では、TOP4~7kmの雷雲が多くなり、夏季雷に対応する -10°C 高度6~7kmでは、TOP12km以上の雷雲が多くなる一方、 -10°C 高度が低

くTOPが高い階級、 -10°C 高度が高くTOPが低い階級では雷雲はほとんど発生しない。対地放電の発生割合は、どの -10°C 高度においてもTOPが大きいほど大きくなる。また、第2.1節で述べたように雷雲は一般には3極構造を持ち、 -10°C 高度に負電荷が蓄積されるため、発雷に至る対流の高さは -10°C 高度に依存すると考えられる。第40図bの発生割合が5%以上となる階級に着目すると、 -10°C 高度4000~4500mでは、TOPが10~11kmであり、6500~7000mでは、TOPが14~15kmである。

このように、雷雲の特徴(TOPに対する雷発生頻度)は -10°C 高度に依存し、雷雲の発達程度はTOPに依存する。

6.3.2 「雷可能性の解析」判定条件の調査

雷雲の特徴を -10°C 高度とTOPで分類して、「雷可能性の解析」の判定条件を考える。雷雲



第40図 -10°C 高度・TOPで分類した対地放電の特徴

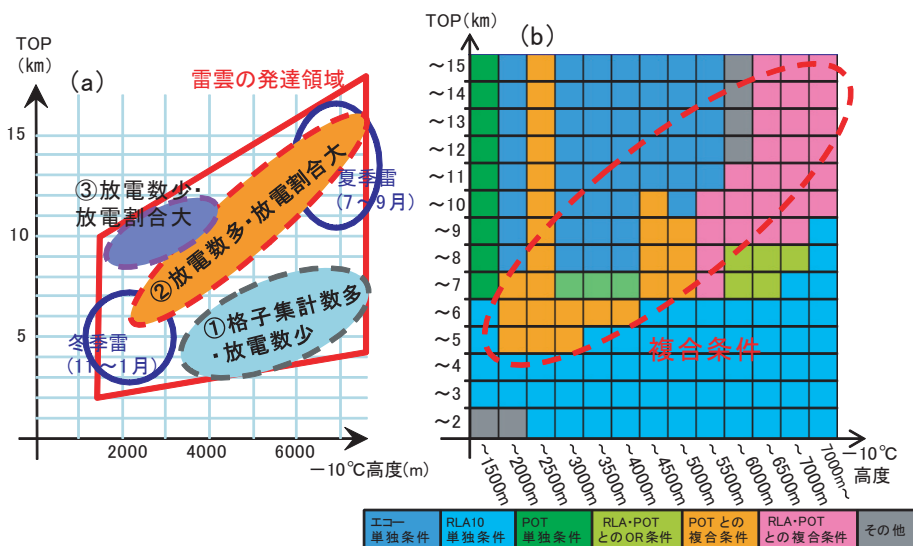
-10°C 高度・TOPで分類した各階級における(a)対地放電数と(b)対地放電発生頻度。2007~2008年で集計。(a)は10分・10km格子単位の集計で、対地放電(LIDEN再標定)を検知した格子数に応じて配色、(b)は階級ごとに10分・10km格子単位で集計した格子数のうち対地放電を検知した格子数の割合(%)に応じて配色。横軸は -10°C 高度、縦軸はTOPで分割。

の特徴のイメージを第41図 (a) にまとめた。FT30のスコアで、従来の雷可能性の解析(活動度1)と比較して「見逃し率」を増やさない範囲で、可能な限り「予報格子率」を減らすように判定条件を決定する。これらのスコアは、10分・10km格子単位(1kmメッシュのパラメータは最大値を取る)で集計し、LIDEN再標定データの対地放電を実況として検証する。判定条件の調査対象とするパラメータは、第7表(a)のとおりである。各パラメータのしきい値を上下させると、「見逃し率」と「予報格子率」が連動して変動する。一方のスコアを改善すると、他方のスコアが改善する傾向にあり、単独のパラメータでは従来の活動度1に比べて、改善できない場合もあるため、複数のパラメータを組み合わせた条件も検討した(第7表(b))。特に、PoTは環境場の指標であり、

他のパラメータと独立性が高く、単独で判定するよりも複数のパラメータ(PoTやRLA10と調査対象パラメータ)を組み合わせた条件(以下、複合条件と呼ぶ)の方が有効である。調査した複合条件を第7表(b)に示す。

調査結果の条件を第41図(b)に示す。第41図(a)の雷雲の特徴と比較すると判定に有効な条件は次のようになる。

1. 集計格子数が多いが放電数が少ない階級(第41図(a)の①)では、RLA10の条件が有効である。
2. 放電数が特に多い階級(第41図(a)の②)では、複合条件が有効である。
3. 放電数は少ないが、放電格子割合(放電格子数/集計格子数)が大きい階級(第41図(a)の③)では、エコー強度や等温度面エコー強



第41図 雷雲の特徴と判定条件の比較
- 10°C高度とTOPで分類した雷雲の特徴(a)と「雷可能性」の判定条件(b)。

第7表 雷可能性の解析における、判定条件の調査対象パラメータ(a)と、複数パラメータの組合せ条件(b)

(a) 調査対象パラメータ	(b) 複合条件
RLA10	PoT ≥ * AND (各パラメータ条件)
PoT	RLA ≥ * AND (各パラメータ条件)
TOP	PoT ≥ * OR (各パラメータ条件)
VIL	RLA ≥ * OR
エコー強度	POT ≥ * AND (各パラメータ条件)
-10°C面エコー強度	
-15°C面エコー強度	
-20°C面エコー強度	

度の条件が有効である。

①は雷雲の発達初期段階と考えられるが、ほとんどの雨雲は発雷には至らない。発雷の可能性が低い状況では、複数のパラメータを説明変数として統計的手法で算出しているRLA10（しきい値1）が有効に働くと考えられる。ある程度発達している段階の②の雷雲に対して、RLA10で判定する場合は、しきい値を大きくする（しきい値5～20程度）必要があるが、その分見逃しが多くなる。そこで、RLA10のしきい値をある程度大きく取り、予報格子数を少なくした上で、RLA10で捕捉できない雷雲を、PoTとエコー等を組み合わせた条件で絞り込む。「 -10°C 高度：6000～6500m・TOP：11～12km」に対するスコアの比較例を第42図に示す。従来の活動度1の精度に対して、PoT、RLA10、 -10°C 面エコー強度のいずれも単独では精度が劣る（見逃し率を同程度とするしきい値では、予報格子率が大きくなる）。一方、 $\text{RLA10} \geq 14$ で捕捉する雷雲に加え、「 $(\text{PoT} \geq 2)$ AND $(\text{R10} \geq \text{しきい値})$ 」の条件で予報を絞り込みつつ捕捉を増やすという複合条件の場合、他の単独パラメータの精度を大きく改善し、従来の活動度1と同じ見逃し率に対して予報格子率を5%程度絞り込むことができる。

6.3.3 対流性判別による絞り込みと活動度1

第43図に第6.4.2節で示した判定（雷可能性の判定）手法によって予報格子を絞り込んだ事例を2つ示す。両事例とも低気圧の通過に伴って、従来の手法では広範囲に活動度1を解析したが、発雷は無かった。上段は2009年4月25日の事例である。従来の活動度1では、九州から四国の広範囲で雷の可能性を解析している。本稿で紹介した雷可能性の判定（10km格子単位）では、空振りを0にはできないものの、予報格子数を大幅に絞り込んでおり、空振りが減った分改善している。下段は2010年5月6日の事例である。北海道西部の活動度1について、雷可能性の判定で面積を狭めているものの、上段の事例に比べて絞り込みは不十分である。

このような発雷に至らない雨域は、対流性エコー判別で絞り込むことができる。ここでの条件

は、第5.4節で示したレーダー雷解析の対流性エコー判別の条件をやや緩和したもので、見逃しが増えない範囲で、対流性判別の絞り込みを行う。第43図下段の事例では、対流性判別で雷可能性有の領域を大幅に狭めることができる。

雷可能性の判定は10km格子単位で行うが、最終的な活動度1は1km格子単位で解析する。具体的には、雷可能性の判定（第6.3.2節）及び対流性の判定を満たした10km格子について、次の指標に応じて、周辺の1km格子も雷可能性有として活動度1を解析する。

- ・対流性判別の結果
- ・放電の有無
- ・10km格子内のRLA指数の最大値
- ・10km格子内でのエコー強度の最大値

また、従来の活動度1の解析と同様に、活動度2以上の解析の周辺には必ず活動度1が表現されるようにしている。

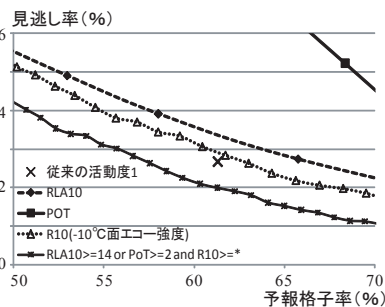
6.4 雷可能性の解析の評価と事例

6.4.1 日ごとの精度

本節では、第6.3節で示した新しい手法による活動度1（以下、「新活動度1」とする。）の精度を従来の活動度1（以下、「旧活動度1」とする。）の精度と比較する。

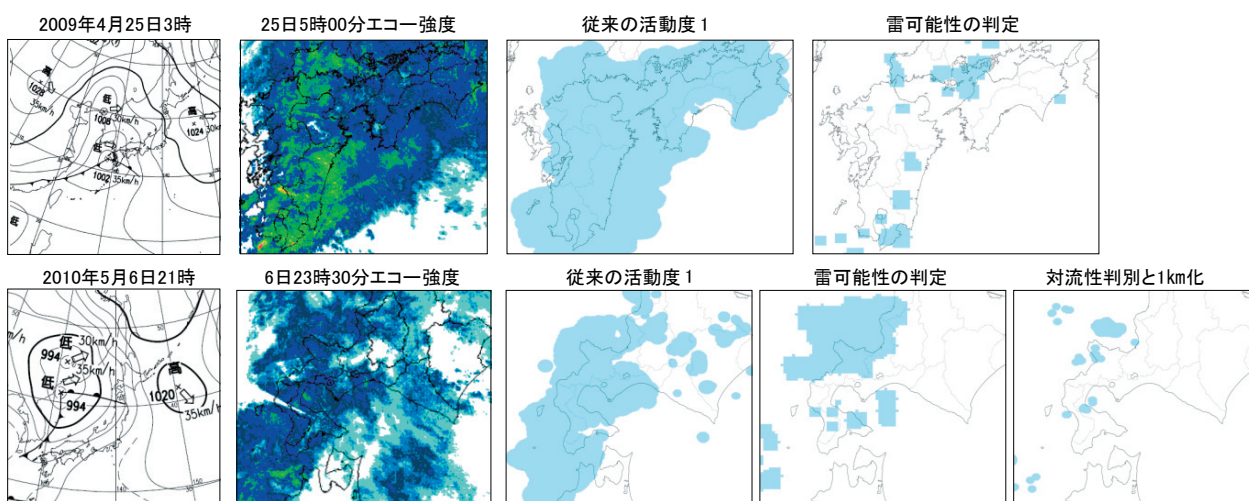
スコアを比較するための予測データは、解析値を予報時刻に応じて移動させた（降水ナウキャストで使用している移動ベクトルを使用）ものである。月単位の評価をする場合、年によって発雷の頻度が大きく異なるため、スコアの比較するには複数年のデータが必要であり、本節における精度評価のスコア集計には2008～2010年のデータを使用した。なお、条件の決定に2007～2008年のデータを使用しているため、2008年のデータのみ従属資料となる。

第6.1節で、旧活動度1の問題点として、非発雷日の予報過多となる日があることを挙げた。この問題点に着目して、まず、日ごとのスコア比較を第44図に示す。新活動度1では、旧活動度1に比べて予報過多日が減少した(a)。また、日ごとに予報格子数（10分・1km単位）、FT30の捕捉数（実況はLIDEN雷解析の活動度2以上の格子）



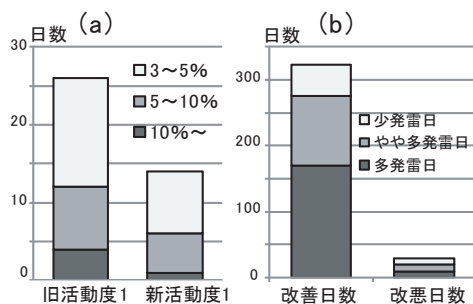
第42図 各予測手法のスコア比較

− 10°C高度 6000 ~ 6500・TOP : 11 ~ 12 kmにおける、各パラメータしきい値別のFT30のスコア。各パラメータのしきい値を変化させたときの見逃し率を縦軸に、予報格子率を横軸にプロットした。2007 ~ 2008年のLIDEN再標定のデータで評価。「従来活動度1」はON・OFFデータなので、グラフ上のスコアは1点のみである。見逃し率・予報格子率が小さいほど精度が改善しているといえる。



第43図 雷可能性の判定と対流性判別の事例

上段に2009年4月25日5時00分九州・四国地方の事例，下段に2010年5月6日23時30分の北海道西部の事例を示す。左から，地上天気図，エコー強度，従来活動度1，雷可能性の判定で，下段の事例については一番右側に対流性判別後の状況を示す。



第44図 日別予報精度の改善・改悪日数

非発雷日の活動度1予報数過多日 (a)，発雷日におけるFT30の予報精度の改善・改悪日数 (b)。1日の全時刻・全格子数の3%以上の格子で活動度1を解析した日を予報過多日とし、10%以上、5 ~ 10%、3 ~ 5%の階級で日数を集計した。(b)の精度改善日は、従来の活動度1と比べて、日単位で予報格子数を減らしFT30で捕捉数が増えた日で、精度改悪日は、予報格子数が増えて捕捉数が減った日である。多発雷日はLIDEN雷解析の活動度2以上の格子が10000個以上の日、やや多発雷日は1000 ~ 10000個の日、少発雷日は1 ~ 1000個の日である。2008 ~ 2010年で集計した。

を集計し、新・旧の活動度1で改善・改悪の日数を比較した (b)。ここで、改善日とは旧活動度1と比べて新活動度1の予報格子数が少なく捕捉数が多い日で、改悪日とは予報格子数が多く捕捉数が少ない日である。新・旧の比較で、改善日数は改悪日数よりも多く、日単位の評価でスコアは大幅に改善している。

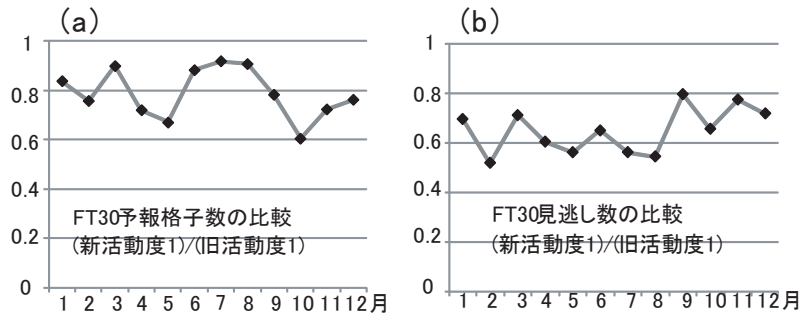
6.4.2 月ごとの精度

2008年～2010年で予報格子数、見逃し格子数を月別に集計し比較した結果を第45図に示す。いずれの月でも比率は1より小さく、予報格子数を減らして且つ、見逃し数を減らしている。新活

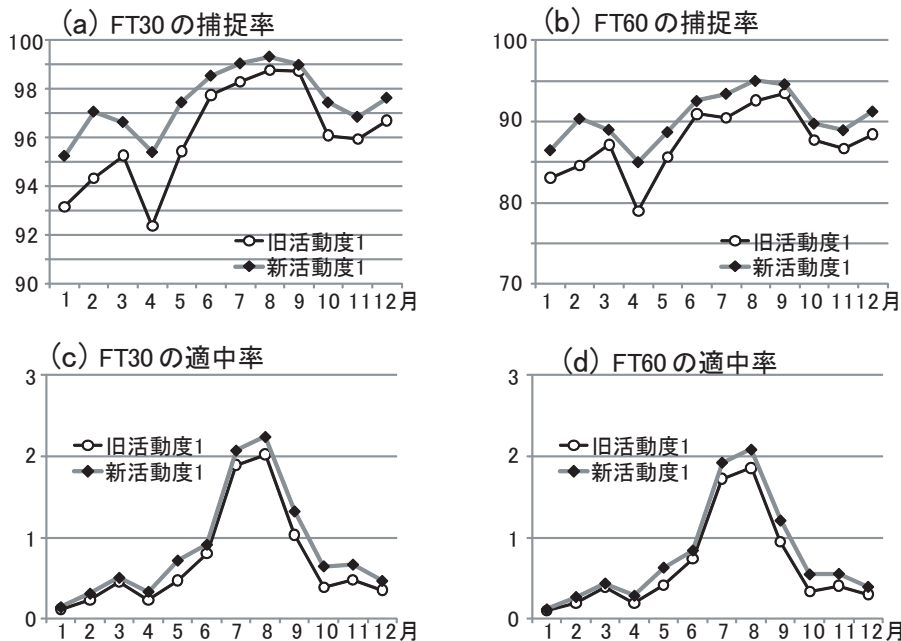
動度1の予報格子数の減少は、予報回数(時間)の絞り込みよりも、面積の絞り込みの効果が大きく影響している(予報時間の比較は第6.5節で示す)。

適中率・捕捉率の月別比較を第46図に示す。すべての月で適中率・捕捉率ともFT30・60で改善している。特に、FT30の捕捉率は90%以上であり、当初の開発目標をクリアしている。

第46図の捕捉率は、すべての放電を対象にしたものであるが、最初の放電で活動度1を解析した後は、単純に移動予測をするだけでも後続の発雷をほぼ予測可能であるため、見かけ上の精度が高くなっている。そこで、雷可能性の「事前の」



第45図 予報格子数・見逃し数の新旧比較



第46図 新・旧活動度1の月別のスコア

LIDEN 雷解析の活動度2以上を実況としてFT30 (a,c) 及び、FT60 (b,d) の捕捉率 (a,b), 適中率 (c,d) を示す。

解析としての評価を行うため、初雷のみの捕捉率を新・旧で比較した(第47図)。ここで、初雷を「周囲150km四方の過去1時間以内において放電が無い状況で発生する放電」とし、捕捉数はLIDEN雷解析の活動度2以上の格子を対象として集計した。第47図aのとおり、初雷の捕捉率の改善に対する効果は大きく、特に5月は旧活動度1の補足率が50%(見逃しが50%)と低いのに対し、新活動度1では補足率を70%(見逃しが30%)程度と大きく改善している。第47図bは、初雷による活動度2以上の格子について新・旧活動度1により捕捉した(予測できた)回数の集計数である。「旧のみで捕捉」は新活動度1の改悪を、「新のみで捕捉」は改善を表す。すべての月において、「旧のみで捕捉」より「新のみで捕捉」の格子数の方が大幅に多く、新活動度1により改善されていることが分かる。

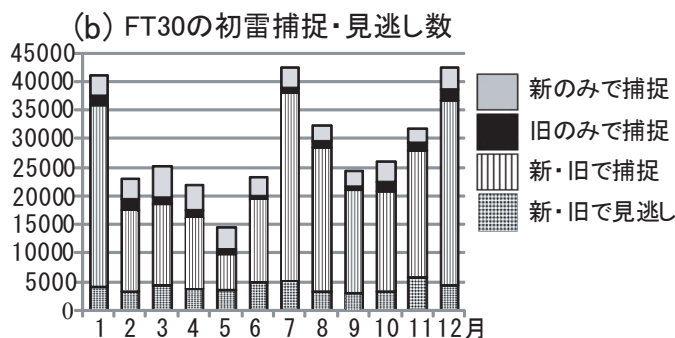
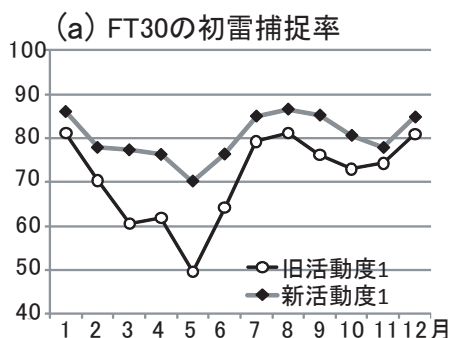
以上をまとめると、10分・格子単位の評価では、新活動度1は予報格子数を絞り込みつつ、捕捉率を改善し、特に初雷の予測を改善しており、精度が向上したといえる。

6.4.3 新旧活動度1の事例比較

第48図に2009年の台風第18号の事例を示す。台風の事例では、広範囲に活発な積乱雲が発達する一方で、実際に発雷に至るものは少ない場合もある。2009年の台風第18号は、強い勢力で紀伊半島の南海上を北東へ進み、10月8日5時過ぎに知多半島付近に上陸し、関東地方から東北地方

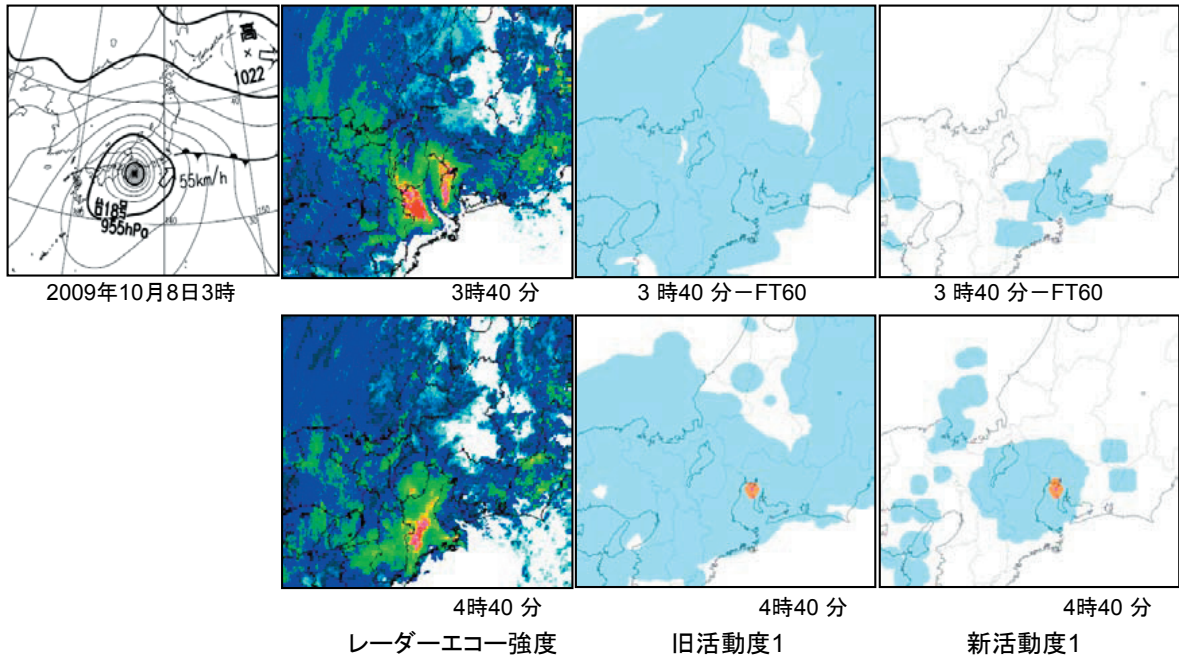
へ進んだ。これらの地域では暴風に加え、1時間に50mm以上の激しい雨が降り、関東地方では4時30分から5時ころにかけて相次いで突風が発生するなど、激しい現象にみまわれた。一方で、雷雲の活動は限定的で、2時10分～3時20分の関東南部と4時40分～5時20分の愛知県で発生したものの、雲放電が中心で対地放電はわずかであった。第48図は4時40分に発雷した事例である。旧活動度1は長時間・広範囲に活動度1を解析したが、新活動度1では実際の発雷と対応して、場所・時間を絞り込んで予測している。

第49図に熱雷の事例を示す。積乱雲が急発達する場合、レーダーエコーの出現から放電開始まで時間が短いため、エコーが発達する前に発雷を予測することは難しい。特に、旧活動度1は雷注意報の発表を条件とするため、雷注意報の未発表時には活動度1が解析されない。この事例では、14時09分に千葉県で雷注意報を発表し、LIDENでは14時20分～30分の間に発雷が検出されている。14時20分の活動度2は発雷直前にレーダー雷解析により解析されたものである。旧活動度1は雷注意報発表直後の14時10分の段階で初めて解析しているが、新活動度1ではエコーが発生した13時50分の時点で解析している。一方、発雷に至らなかった図の右上のエコーに対しては活動度1を解析していない。これは、数時間のリードタイムを確保して雷注意報を発表するのが難しかった事例だが、このような場合でも、新活動度1は、発雷の数十分前に解析できることがある。



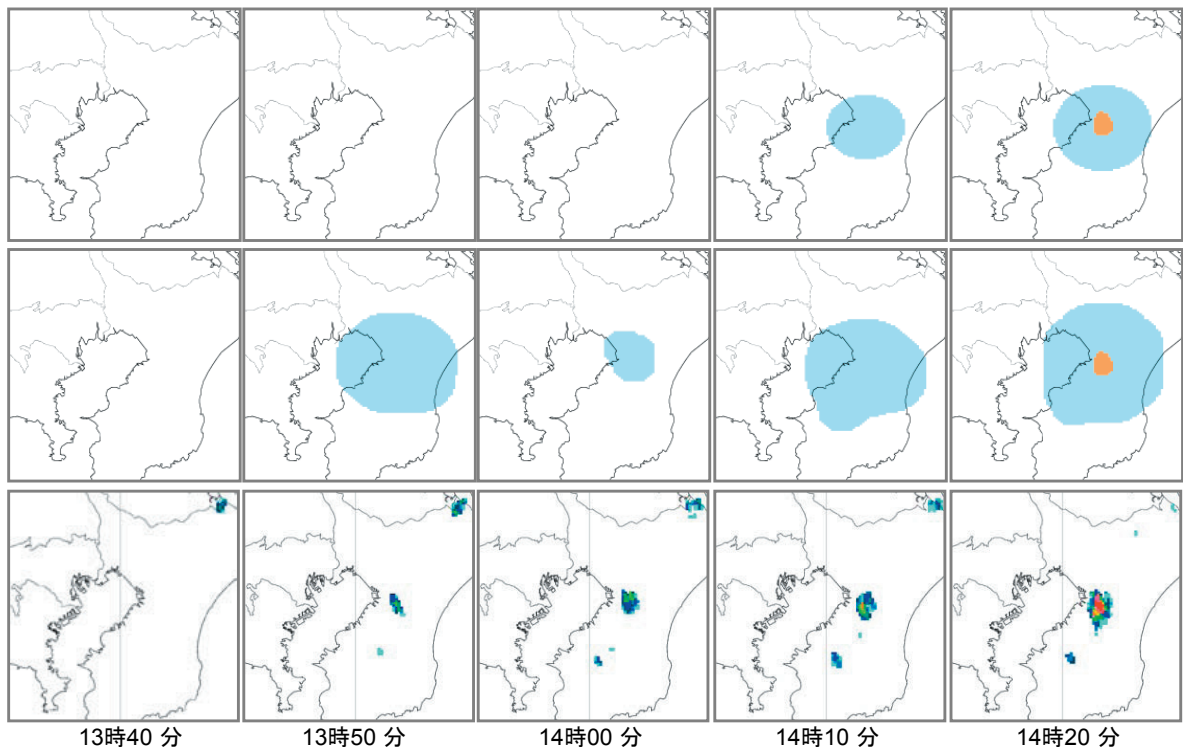
第47図 新・旧活動度1の月別の捕捉率

LIDEN雷解析の初雷による活動度2以上を実況として評価したときのFT30の捕捉率(a)と、捕捉数・見逃し数の新旧比較(b)。



第 48 図 新旧活動度 1 の比較事例

2009 年 10 月 8 日の事例を示す。一番左は地上天気図（3 時）で、その左側は順に、レーダーエコー強度、旧活動度 1 の予報又は解析、新活動度 1 の予報又は解析である。それぞれ、発雷開始時刻の 4 時 40 分（下段）と、その 1 時間前の 3 時 40 分（上段）の状況である。



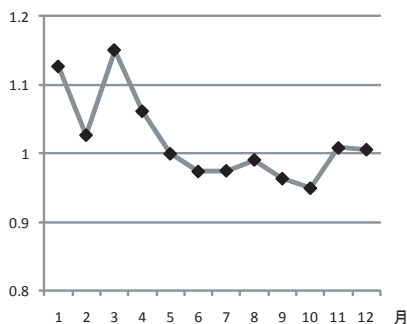
第 49 図 2010 年 8 月 23 日の事例

上段：旧活動度 1，中段：新活動度 1，下段：エコー強度。左から順に 13 時 40 分～14 時 20 分の実況・解析である。

6.5 活動度1と雷注意報との比較

旧活動度1の雷可能性の解析では、雷注意報の発表を条件としていたため、基本的には雷注意報に包含される関係であった。一方、新しい雷可能性の解析では、雷注意報が発表されていない状況で活動度1が解析されることが考えられる。本節では、雷注意報（又は旧活動度1）と比較して、新活動度1の発表時間がどの程度増減しているかを示す。

雷注意報と比較する場合、雷注意報の発表回数が問題になることから、面積的絞り込み（空振り格子数の減少）よりも、時間的絞り込み（空振り予報回数の減少）が重要となる。新旧活動度1の発表時間数を10分・県単位で比較したものが第50図である。新活動度1は1～4月にかけて増加しており、格子単位の集計ではすべての月で空振りが減っているものの（第46図）、発表時間で

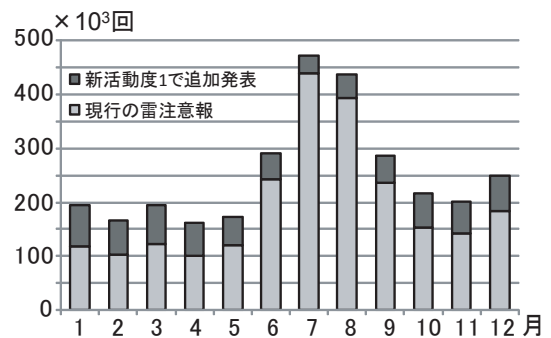


第50図 予報時間数の新旧比較

10分・県単位で予報時間数を集計したときの新旧比較。月別の発表時間数について、（新活動度1）／（旧活動度1）の比率。

比較すると空振りが増える月もある。

第51図は、2008年～2010年に発表された雷注意報に加えて、新しい活動度1が現れた段階で雷注意報を発表すると仮定した場合の、雷注意報の発表のべ時間数を10分・県単位で集計したものである。のべ発表時間数では10分を1単位としている。この調査では、活動度1で雷注意報を発表した場合の解除を、活動度1が消滅してから3時間後としている。このように、活動度1が現れたら自動的に雷注意報を発表すると仮定した場合、夏期の発表増加は小さいものの、10月から5月は雷注意報ののべ発表時間数が3割前後増えることになる。実際には、活動度1が現れても、その他の資料も含めた判断で雷注意報を発表しない場合もあるので、増加率はこれより小さくなる見込みである。



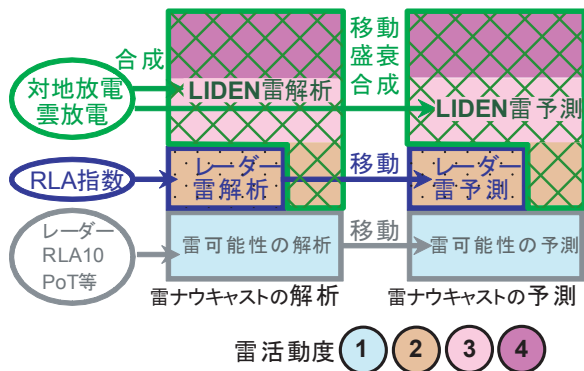
第51図 雷注意報発表のべ時間数（仮想）比較

2008～2010年の雷注意報の発表のべ時間数（府県単位で集計、10分を1単位としている）。薄い灰色は官署が発表した雷注意報ののべ時間数。濃い灰色は、雷注意報に追加して、新活動度1で雷注意報を追加発表した場合の追加のべ時間数。

7. 雷ナウキャストの予測

雷ナウキャストの解析・予測におけるプロダクト作成の概略を第52図に示す。予測のプロダクトは解析を基にした移動予測により作成する。つまり、解析で作成する各プロダクト「レーダー雷解析」、「LIDEN雷解析」、「雷可能性の解析」の移動予測をそれぞれ作成して、合成することで活動度1～4の予測プロダクトとしている。

ただし、LIDEN雷解析については移動予測に加えて、個々の放電ごとに継続性や盛衰傾向などの予測も行う。移動予測は、雷雲（雷の活動）の継続を前提とした手法である。本章では、はじめに予測の前提となる雷放電の継続性について述べる（第7.1節）。次に、統計的手法により個々の雷放電について、継続有無や増減傾向について予測する手法（LIDEN雷予測）を解説する（第7.2節）。さらに、レーダー雷解析や雷可能性解析の移動予測を合成して雷ナウキャストの予測を作成する（第7.3節）。また、雷ナウキャストの精度については第7.4節で、事例については第7.5節で紹介する。



第52図 雷ナウキャストのデータ作成の流れ

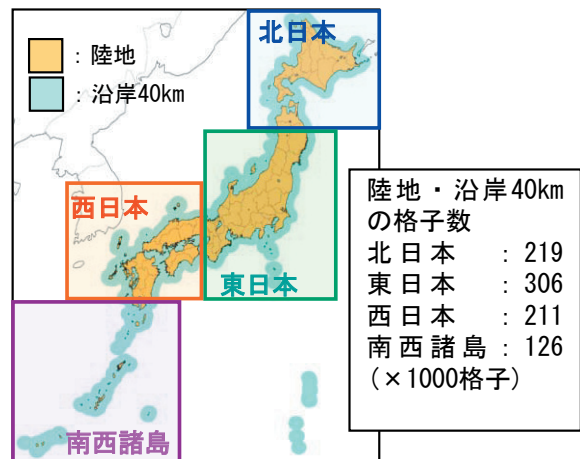
解析・予測に使用するデータと、その処理手法の概要である。解析（左側）・予測（右側）のブロックの色は活動度に対応しており、下から順に1～4である。

7.1 発雷の規模と持続性

第2.5節では、関東地方の夏季と北陸地方の冬季の雷雨について、各地方における雷の継続時間を調査した。続く第2.6節では、放電検出地点から60kmという狭い範囲で30分以内の後続雷の有無に着目し、各種指標との関係を見た。実況を補外する予測手法において、現象の継続性は重要である。予測を行うにあたり、まず始めに発雷の規模と継続性の関係に着目する。

発雷の規模が大きいほど、短時間（数十分）であれば、雷が継続している割合は大きいことが期待される。ここでは発雷の規模として、個々の対地放電について、その周囲10kmにおける10分間の対地放電数を求め、gf10と表す。継続性を調べるために、10分後の60km以内での対地放電の有無を求める。さらに、発雷の規模以外にも、地域や季節による特徴についても調査した。

このような特徴による分類は、予測の統計モデルを作成する際の層別化に有効と考えられる。地域については第53図に示すとおり、4地域に分類する。この分類は、夏季熱雷や冬季雷など季節



第53図 調査や層別化に用いる地域の分類

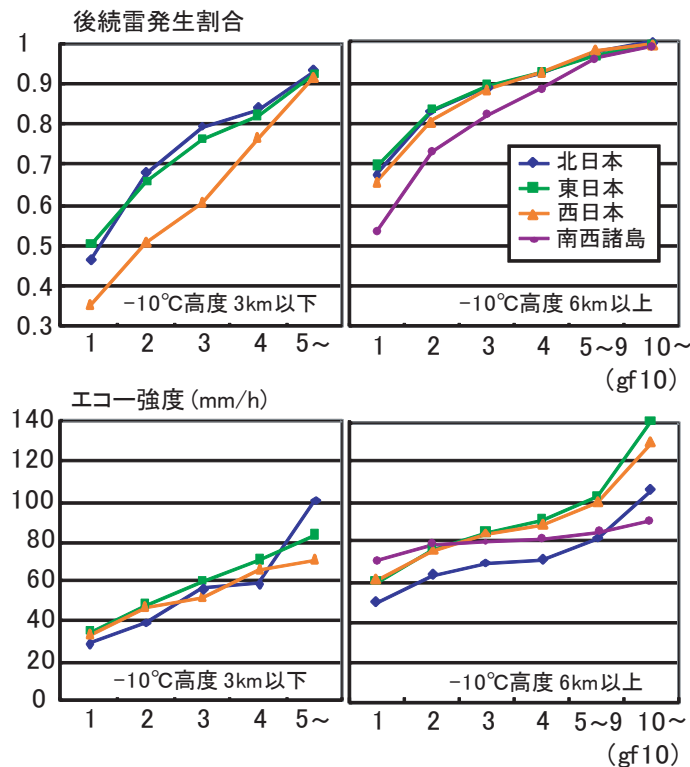
ごとの放電分布に着目したものである。季節については、前節までに解説したように -10°C 高度で分類する。

第54図に、発雷の規模 gf10 と後続雷発生割合、エコー強度との関係を示す。冬季雷として、 -10°C 高度 3km 以下、夏季熱雷として、 -10°C 高度 6km 以上の対地放電を集計したものである。一般的な特徴としては、発雷の規模が大きいほど後続雷発生割合が高く、エコー強度が強いという関係がある。後続雷発生割合について地域的な特徴をみると、冬季雷に対応する -10°C 高度 3km 以下では、雷の規模 (gf10) が同じでも、冬季雷が激しい北日本や東日本に比べて、西日本では継続しにくい傾向にある。一方、夏季に対応する -10°C 高度 6km 以上では、南西諸島の継続性が小さいが、激しい熱雷のある西日本以北では大きな差はない。さらに、エコー強度についてみると、夏季の北日本や南西諸島では gf10 に対応する値

は小さくなっており、特に北日本では、エコー強度が大きくなっても激しい雷雨になることがある。このように、雷雲の規模や継続性が同程度であっても、地域や季節により雷活動の特徴に違いがある。

7.2 LIDEN 雷解析の盛衰予測

第4.3節で説明したように、LIDEN 雷解析は、個々の放電に密度分布を与え、それを集計したものである。LIDEN を用いた雷ナウキャストの予測では、この解析値を単に移動させるのではなく、個々の放電の移動先で、解析と同様に対地放電・雲放電ごとに密度分布を集計して合成し、活動度 2~4 として表現する。予測では、密度分布を集計する際に、盛衰の傾向に応じた係数（盛衰傾向を統計的に予測する式から計算される係数で、以下「盛衰予測係数」という）をかける。この盛衰予測係数は個々の放電に対して算出する。



第54図 発雷規模で分類した雷雲の特徴

2006年~2008年の対地放電を、 -10°C 高度別、地域別に発雷の規模 (gf10: 周囲 10km の対地放電数) で分類して集計したとき、後続雷の発生割合 (上段) と、エコー強度の平均値 (下段)。左側グラフは -10°C 高度 3km 以下、右側は 6km 以上の対地放電についての集計結果。グラフの色は地域別の集計を表す。なお、南西諸島では、 -10°C 高度が 3km 以下の放電はない。

盛衰傾向を表す指標として、次の二つの指標を予測対象とし、地域・-10℃高度等の層別階級ごとに精度の良い方を盛衰予測の計算に適用する。

- ・後続雷の有無（この予測を「継続有無予測」とよぶ）
- ・1個の放電に対応する後続雷の個数（この予測を「継続個数予測」とよぶ）

この盛衰傾向を予測する統計モデルの構築について第7.2.1節で、予測式の適用手法について第7.2.2節～第7.2.4節で、事例について第7.2.5節で紹介する。

7.2.1 盛衰傾向を予測する統計モデルの構築

雷雲を特徴付ける指標として、エコー頂高度や-10℃高度のエコー強度などがあることを第5.1節で述べた。また、第2.6節で示したように、これらの指標は雷の開始だけではなく継続性にも関係がある。そこで、レーダーエコーなどの実況や発雷確率ガイダンス (PoT) などを用いて、盛衰傾向を予測する統計モデルを作成した。モデル作

成の諸元は次のとおりである。

①統計モデル

継続有無予測：ロジスティック回帰分析

継続個数予測：線形重回帰分析

②標本資料

2006年4月～2008年3月の陸地・沿岸40kmにおける対地放電・雲放電

③層別化（第8表）

- ・放電種別（2種：対地放電・雲放電）
- ・-10℃高度（2～5階級）
- ・地域（4地域：第53図）
- ・発雷の規模（gf10, cf10；2～7階級）
- ・予報時間（6時刻：10分後～60分後）

「地域・-10℃高度・発雷の規模」による層別化で、対地放電の分類数は36個、雲放電の分類数は23個で、そのそれぞれで「継続有無予測・継続個数予測」及びFTごと（10分後～60分後）について回帰分析を行う。したがって、回帰分析で作成する予測式の個数は次の通り。

対地放電：36×2×6 = 432

雲放電：23×2×6 = 276

第8表 モデル式の層別化

-10℃高度, 地域, 発雷の規模 (gf10, cf10), 予報時間で層別化する。内側のテーブルで、左側の数字が gf10 (対地放電), cf10 (雲放電) で、右側の数字が標本数である。表中のセルの色は選択する予測モデル (継続有無予測, 継続個数予測) を表していて、青色は継続有無予測を、オレンジは継続個数予測を、黄色は予報時間に応じてモデルを選択することを示している。

対地放電予測式の層別化における分類

雲放電予測式の層別化における分類

-10℃ 高度(km)	対地放電予測式の層別化における分類				雲放電予測式の層別化における分類			
	北日本	東日本	西日本	南西諸島	北・東・西日本			南西諸島
0～4	gf10 標本数	0～3km	1 7,442 2-4 5,873	0～6km 1 1,801 2-4 2,606 5- 3,240	cf10 標本数	cf10 標本数		0～6km 1 1,987 2-4 3,804 5- 21,852
	1 2,528	1 6,089 2-4 7,650	5-10 8,350 11- 13,820					
	2-4 2,862	5- 7,480						
	5- 3,247							
4～5	1 4,330 2-4 9,180 5- 22,484	4～6km	1 6,762 2-4 11,550 5-15 19,533 16- 11,077	4～6	1 27,246 2-4 55,020 5-10 56,995	11-20 80,398 21- 97,395	6～	
	5km～	1 14,262 2-4 25,565 5-15 39,594 16- 25,381	1 24,294 2-4 26,531 5-15 39,094 16- 24,674		1 44,115 2-4 102,414 5-10 135,661 11-20 157,106	21-30 120,813 31-60 260,811 61- 677,081		
		1 4,371 2-4 7,994 5- 11,732	1 36,985 2-4 24,988 5-15 62,616 16- 140,464		1 4,193 2-4 5,493 5- 5,285	1 8,575 2-4 14,998 5-10 15,011 11- 46,883		

④目的変数

「継続有無予測」では、予報時刻（10分後～60分後）の周囲60kmにおける放電の有無、「継続個数予測」では、対応する放電の個数を按分した値。再標定LIDENのデータを使用。

⑤説明変数

放電の周囲10kmにおいて、レーダー3次元データ（エコー強度、エコー頂高度、-10℃面及び-20℃面エコー強度、VIL）の「広がり」と「強度」を併せ持つパラメータ、及びそれらの増減量、PoT、放電の推定電流値、発雷の規模（gf10、cf10）などを候補とし、最適な変数の組合せを増減法によって選択する。

①、④にあるとおり、継続の有無を予測する手法と、放電個数を予測する手法の2つのうち、精度の良い方を層別ごとに選択する（第7.2.4節参照）。

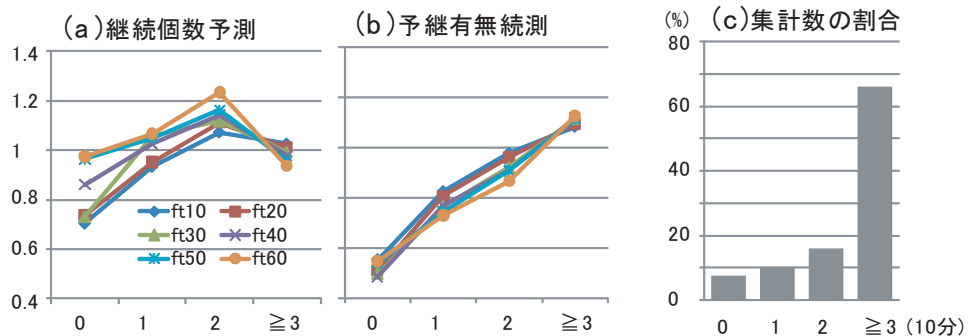
層別化にあたり、地域・季節的特性を示す指標に加え、発雷の規模を表す指標 gf10、cf10 を用いる。gf10 は前節で導入した対地放電の密度を表す指標で、対地放電の周囲10kmにおける対地放電の個数、cf10 は雲放電の周囲10kmにおける雲放電の個数である。

また、層別化の分類における過度の細分化を避けるため、発雷継続時間及び発雷時刻による層別化は行わず、それぞれに補正を加えることで対応する。これらの補正については、次節以降で説明する。

7.2.2 盛衰傾向の発雷継続時間による補正

雷雲の盛衰傾向は、雷雲の発達段階に依存すると考えられる。つまり発雷初期の発達段階では、雷雲の規模が拡大する傾向、発雷終盤の衰弱段階では雷雲の規模が縮小する傾向が強いと考えられる。説明変数の各パラメータの値は雷雲の発達段階に対応すると考えられるが（例えば、第54図下段では発雷の規模とエコー強度の対応を示した。）、これに加えて、発雷開始からの経過時間（以下、「発雷継続時間」という。）が、雷雲の持続性や盛衰傾向を表す指標となりうるかどうか調査した。しかし、発雷継続時間は、次に示すとおり盛衰傾向と単調増加・減少の関係にはないため、直接説明変数に組み入れることはできないことがわかった。第55図は継続個数予測、継続有無予測の目的変数と、対地放電の継続時間の対応関係について月別に調査した結果のうち、3月について示したものである。「継続個数予測」では、継続時間によって盛衰の傾向は変化し、継続時間が30分を超えると、増加傾向から減少傾向に転じる。

このような目的変数と対地放電の継続時間の関係は、説明変数のパラメータとの関係からは抽出できないもので、予測式で計算される値を、目的変数の平均的分布に近くなるように、発雷継続時間に応じて、予測式の計算値に補正を行うこととする。



第55図 対地放電の継続時間による盛衰傾向の特性

横軸は半径30km領域における対地放電の継続時間数（10分単位）。(a)、(b)は目的変数（対地放電についての10分後～60分後の継続個数予測a、継続有無予測b）の継続時間ごとの平均値を全体の平均値で割って規格化したものである。(c)は継続時間ごとの集計数の割合（%）である。2008年3月について集計した。グラフの凡例のft10～ft60は、10分後～60分後を示す。

7.2.3 盛衰傾向の発雷時刻による補正

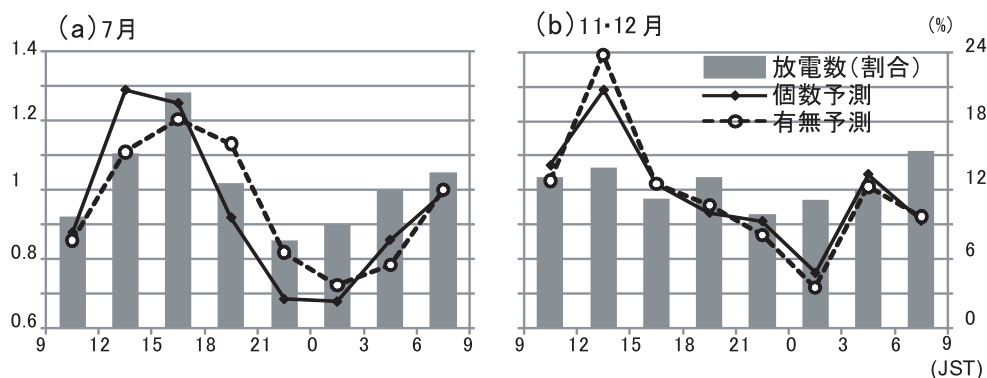
第2.5節における夏季雷と冬季雷の特性調査から、放電数や雷雲の発達程度は時刻に依存することから、発雷時刻ごとに盛衰の傾向を調査し補正することとする。夏季（7月）と冬季（11・12月）における、目的変数の時刻別推移を第56図に示す。放電数の推移（棒グラフ、左軸）をみると、夏季は15~18時に極大値、21~24時に極小値があるのに対し、冬季には明確な時刻変動はない。一方、継続個数予測の目的変数（実線）、継続有無予測の目的変数（破線）で比較すると、夏季も冬季も12~15時、3~6時又は6~9時に極大ピークがある。冬季は、放電の頻度については時刻変動が小さいが、盛衰傾向は時刻ピークを持つことが分かった。このような特徴も第7.2.2節の発雷継続時間による特徴と同様、説明変数との関係からでは抽出できない特徴と考えられることから、時刻に応じて予測式の計算値に補正係数をかけることとする。ここで、盛衰傾向の発雷時刻に対する特徴は通年ほぼ同じ傾向を示しているため、補正係数は季節に依存しない値としている。

7.2.4 予測手法の選択

第7.2.1節で継続有無予測と継続個数予測の2

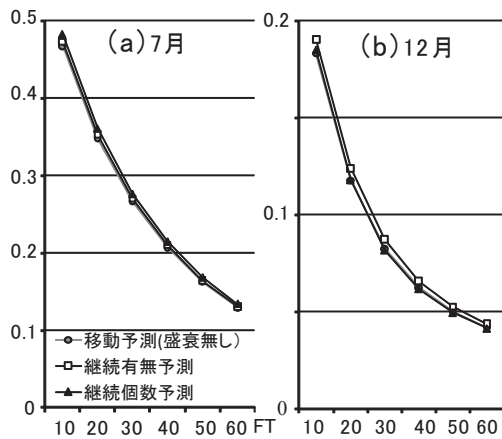
種類のモデルを導入した。これらの予測手法のうち各層別階級ごと、精度の良い方を選択する。冬季のように放電が散发している場合は前者の手法が、夏季のように放電が密集している場合は後者の手法が、適切な予測が得られる。第57図に、それぞれの予測手法のみで計算した場合のスレットスコアを示す。比較のため、単に移動予測のみ施した（盛衰予測無し）スコアも示した。7月は、一度発雷が始まると、長時間持続するため移動予測のみでもスコアが高く、盛衰傾向の予測によるスコアの改善幅は小さい。特に、移動予測と比較して、継続有無予測はほとんど改善がないが、継続個数予測は若干の改善がみられる。逆に、冬季は雷の継続性が低く、移動予測のスコアは低い。移動予測と比較して、継続個数予測はほとんど改善がないが、継続有無予測は若干の改善がみられる。

最終的に盛衰予測係数は、個々の放電ごとの密度を積算する段階で密度値に適用する。盛衰予測係数は1未満で衰弱傾向の予測、1以上で発達傾向の予測となる。継続個数予測の盛衰予測係数は0以上の値で、発達・衰弱の両方を予測するが、継続有無予測の盛衰予測係数は0~1の値で、減衰傾向のみを予測するものである。



第56図 対地放電の発雷時刻による盛衰傾向の特性

2008年7月(a)及び、2008年11・12月(b)の対地放電について集計した(3時間ごとの放電集計数の割合:棒グラフ、右軸)。折れ線グラフは、各時刻ごと、継続個数予測の目的変数の平均値(実線、左軸)、継続有無予測の目的変数の平均値(破線、左軸)で、それぞれ全体の平均値で割って規格化した値である。縦軸のスケールは、(a)、(b)同じである。



第 57 図 継続有無予測と継続個数予測のスレットスコアの比較

LIDEN 雷解析の活動度 2 以上を予測対象とし、1km メッシュ単位で評価。独立資料である 2008 年 7 月 (a) と 12 月 (b) について示す。横軸は予報時間。7 月は継続個数予測の方が、12 月は継続有無予測の方が精度が高い。

7.2.5 予測の作成と予測事例

予測における発雷密度の作成手法は、第 4 章で解説した LIDEN 雷解析とほぼ同じである（以下、これを LIDEN 雷予測という）。LIDEN で検知した個々の放電について、第 7.2.1 節～第 7.2.4 節で説明した継続個数予測又は継続有無予測で、盛衰予測係数を計算し、移動ベクトルと予報時間に依りて移動させ、移動先の場所において、第 4.3 節、第 4.4 節の手法で発雷密度分布を積算する。

予測処理の流れをまとめると次のようになる。

- ・継続個数予測又は継続有無予測の盛衰予測係数を計算
- ・発雷継続時間による補正
- ・発雷時刻による補正
- ・移動処理
- ・移動先で、個々の放電に盛衰予測係数をかけてから、対地放電、雲放電それぞれを密度分布として積算（第 4.2 節参照）
- ・密度による補正（第 4.4 節参照）を対地放電、雲放電にそれぞれかけ、両者を合成（第 4.3 節参照）し、発雷密度を作成する。

ここで、移動ベクトルは降水ナウキャストで作

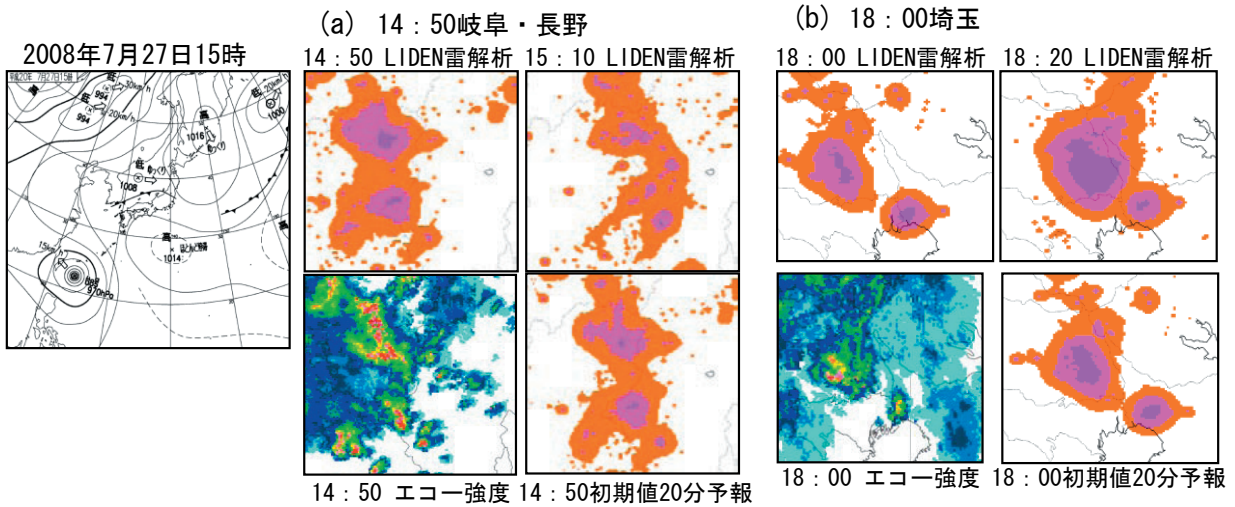
成するものを使用する。

LIDEN 雷予測は実況の放電分布を基にして作成するため、雷雲の盛衰が激しい場合は、個々の雷雲の盛衰を的確に予測するのは難しく、全体の盛衰傾向を予測できる場合があるというのが現状である。雷雲の盛衰傾向をおおむね予報できた事例として、第 58 図に 2008 年 7 月 27 日の 20 分予報を示す。山陰沖から関東付近に停滞する梅雨前線の活動が活発となり、本州の広い範囲で雷雨が大規模に発生した事例である。午前中は山陰地方で、昼ごろから北陸西部から中部地方にかけて、夕方には関東地方で個別のセルは発達と衰弱を繰り返しながら、強い活動を保ったまま雷雲の範囲は長時間かけて東に進んだ。

第 58 図 (a) は 14 時 50 分の岐阜県付近の 20 分予報、(b) は 18 時の埼玉県付近の 20 分予報である。(a) の予報（右下図）では岐阜県から長野県を通過するときは減衰傾向を、(b) の予報（右下図）では埼玉県から千葉県を通過するときは発達傾向を、それぞれ表現している。(a) (b) の 20 分後の解析（右上図）と比較して、盛衰の傾向はおおむね表現されているが、個別のセルの盛衰まで適切に予測するのは困難である。

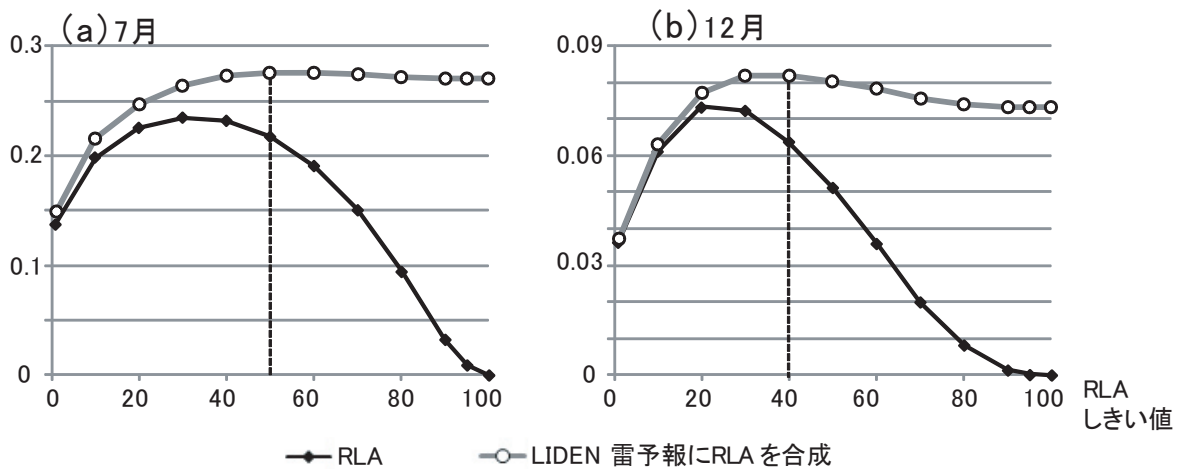
7.3 レーダー雷解析の合成と精度

雷ナウキャストの予測は、レーダー雷解析（活動度 2）と雷可能性の解析（活動度 1）を降水ナウキャストの移動ベクトルで移動させたものに、前節で示した LIDEN 雷予測を合成したものである。レーダー雷解析（RLA 指数のしきい値以上をレーダー雷解析とした）を合成したときに 30 分予報のスレットスコア（LIDEN 雷解析を実況として検証する）が最も高くなるように RLA のしきい値を月ごとに決める。第 59 図は RLA のしきい値別移動予測のスレットスコアと、LIDEN 雷予測に RLA のしきい値別移動予測を合成したときのスレットスコアを比較したものである。ここで、合成した予測のスレットスコア（灰色線）に注目する。RLA の最大値は 100 であるから、しきい値 100 の予測は、LIDEN 雷予測のみの予測と同等である。しきい値を 100 から下げたとき、RLA の合成割合を大きくすることでスコアが上



第 58 図 LIDEN 雷予測の事例

2008 年 7 月 27 日の事例で、左図は 15 時の地上天気図、(a) は 14 時 50 分の中部地方、(b) は 18 時の関東南部の解析・予報 (FT20) である。(a) は減衰傾向を、(b) は発達傾向を予測した。それぞれ上段は LIDEN 雷解析の実況解析。左下はエコー強度、右下は LIDEN 雷予測の 20 分予報である。



第 59 図 レーダー雷解析の合成時のスレットスコア

レーダー雷解析指数 (RLA) のしきい値別のスレットスコア (黒線) と、RLA をしきい値別に LIDEN 雷予報に合成したスレットスコア (灰色線)。LIDEN 雷解析の活動度 2 以上を実況として 1 km メッシュ単位で検証した。2008 年 7 月 (a) と 12 月 (b) の FT30 のスコアを示す。合成した時にスレットスコアが最大となるしきい値を破線で示した。

昇することが分かる。スコアが最大となる値（第59図の破線）をレーダー雷解析のしきい値とする。

しきい値 100（LIDEN 雷予測のみ）としたときのスコアに対し、しきい値を下げたときのスコアの上昇幅は、7月よりも12月の方が大きい。LIDEN 雷予測は雷雲の持続性を基に予測を行うため、雷の持続性の小さい冬季はスコアが小さくなる。一方、レーダー雷解析はレーダー観測等から雷雲の発達を解析しており、雷の持続性の小さい冬季でもスコアの減少は小さい。したがって、レーダー雷解析を合成する予測では、夏季よりも冬季の方が合成によるスコア上昇の効果が大きくなる。

第60図に月別のスレットスコアを示す。LIDEN 雷予測（点線・×印）とレーダー雷解析の移動予測（破線・○印）の合成は、雷ナウキャストの活動度2の予測（黒線・△印）である。おおむねどの月においても、合成後のスコアは高くなる。

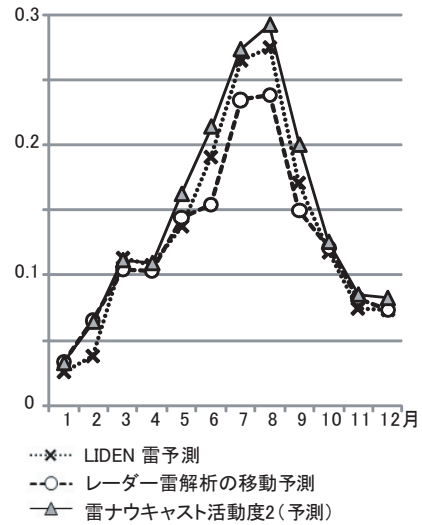
雷ナウキャスト活動度2の30分予測の適中率と捕捉率を第61図に示す。適中率、捕捉率は次のとおりである。

$$(\text{適中率}) = (\text{適中格子数}) / (\text{予測格子数})$$

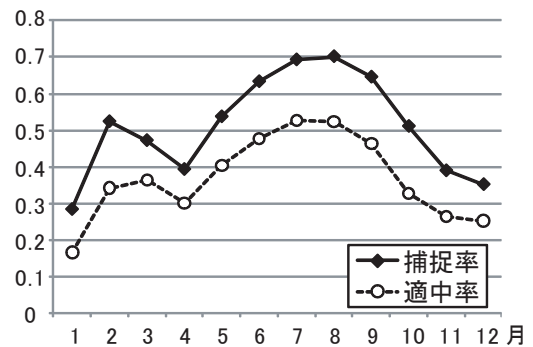
$$(\text{捕捉率}) = (\text{捕捉格子数}) / (\text{実況格子数})$$

ここでは半径5格子以内に実況（レーダー雷解析を含めた活動度2以上）があれば、適中・捕捉として集計した。つまり、活動度2以上を予測した格子（この集計数を予報格子数）のうち、半径5kmの領域に30分後の実況で活動度2以上がある格子を適中（この集計数を適中格子数）とする。また、30分後の実況で活動度2以上である格子（この集計数を実況格子数）のうち、半径5kmの領域で活動度2以上を予測している格子（この集計数を捕捉格子数）を捕捉とする。

検証範囲を半径5kmとしたのは、電光・雷鳴は数km～数十kmは認識できることから、1km格子単位の検証よりもやや広めにみるためである。夏季の捕捉率は7割程度と高く、冬季では若干低くなるものの4割程度の捕捉率である。



第60図 各予測手法の月別スレットスコア
2008年1～12月のFT30のスコア。LIDEN 雷解析の活動度2以上を実況として、1kmメッシュ単位で検証した。



第61図 雷ナウキャストの適中率・捕捉率
雷ナウキャスト活動度2以上を実況として、周囲5格子以内の実況を適中・捕捉として検証した。2008年～2010年の陸地格子を対象に評価した。

8. 雷ナウキャストの利用と事例

8.1 雷の活動度

第4章～第6章で雷ナウキャストの解析について3つの手法を解説した。雷可能性の解析では、雷雲自体を解析するのではなく、雷雲に発達する可能性のあるエコーを基に解析を行い、これを活動度1とする。一方、LIDEN 雷解析とレーダー雷

解析は雷雲を解析する手法で、活動度2～4とする。これらの手法における着眼点から、雷の活動度と雷雲の発達過程との対応を取ると第62図のように、時間的に段階的に表される。それぞれの活動度の意味は次のとおりである。

①活動度1

活動度1は、雷雲に発達する可能性のある雨雲を、発達初期の段階から広く解析するものである。30分予測で見逃しが1割以下と落雷を見逃すことが少ない反面、空振りは多く、実際には雷雲に発達しない場合もある。活動度1は積雲が発達を始めた段階から、雷雲に発達し衰弱するまでの間を対象としている。

②活動度2

活動度2は、上空の放電や、近接する雷雲の周辺、気象レーダーによる雷雲の立体的特徴などから、落雷が間近に迫っている雷雲を解析するものである。上空に電荷が蓄積されている段階（第2図の三極構造参照）であり、雷による人的被害を未然に防ぐためには、この段階で避難等の行動を取る必要がある。

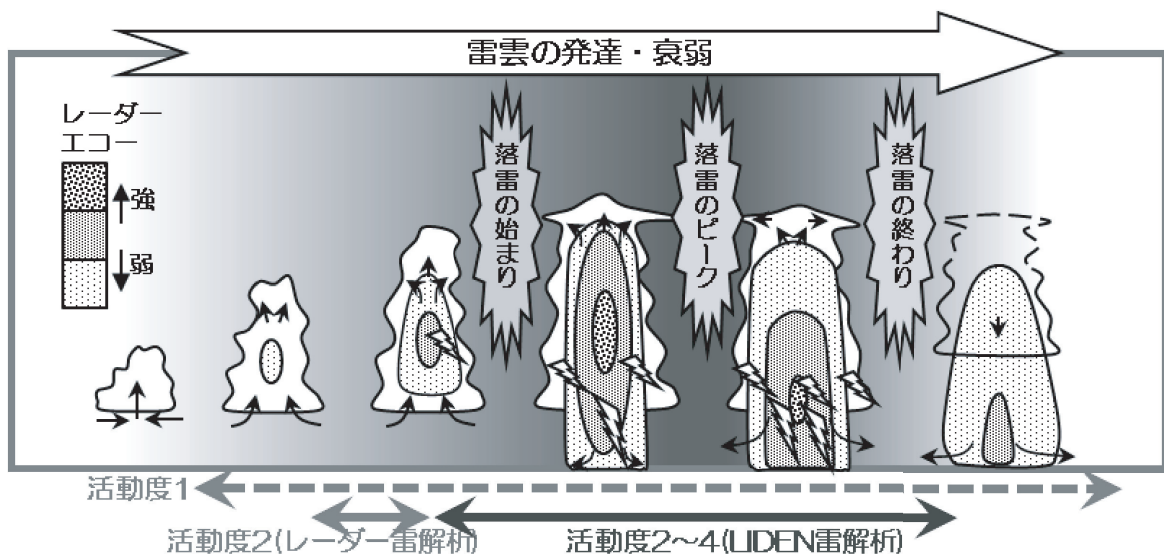
③活動度3, 4

活動度3と4は、既に落雷が発生しているなど、雷雲が活発な段階である。雷の災害が既に発生している可能性が高く、また今後の後続雷による災

害の可能性も高くなっている。活動度2と同様、落雷に対して危険な場所での行動は控える必要がある。

①～③の状況及び屋外・屋内において想定される対応を第9表にまとめた。活動度が大きくなるほど危険な状況であり、活動度2以上では、雷雲が発生している状況なので、屋外では建物の中に避難するなど直ちに安全確保に努めることが重要である。

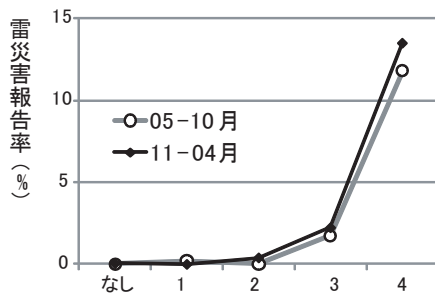
第4.1節で放電密度と災害の報告率との関係を調査したが、同様に、活動度と災害の報告率との関係を第63図に示す。活動度が大きいほど、災害が発生する危険が高いことが分かる。活動度2は活動度3以上に比べて、災害の発生率は低い。この結果から活動度2を安全と考えてはいけない。通常は活動度3や4の前段階として活動度2が現れることが多いので、活動度2の段階で安全確保の行動を取ることが大切である。夏季と冬季の災害報告率について、放電密度でみると冬季の方が大きかったが（第15図）、活動度ではほとんど差がない。これは、LIDEN雷解析の-10℃高度による補正（第19図）が有効に機能しているためである。このように、雷の活動度は雷雲の発達段階や雷の激しさを表現するとともに、雷害の危険性もあらわす指標である。



第62図 雷雲の発達過程と活動度の対応

第9表 活動度と雷の状況及び想定される対応

活動度	雷の状況	屋外において想定される対応	屋内や工場において想定される対応
4 激しい雷	落雷が多数発生。	●屋外にいる人は落雷の危険があるため、建物や車の中へ移動するなど、安全確保に努める。	●パソコンなど家電製品の電源を切る。コンセントを抜く。
3 やや激しい雷	落雷がある。	●屋内にいる人は外出を控える。	●工場の生産ラインなどリスクが大きい場所では、作業の中止や自家発電装置への切替などの対応を取る。
2 雷あり	電光が見えたり、雷鳴が聞こえる。落雷の可能性が高くなっている。	●今後の雷ナウキャストや空の状況に注意。	
1 雷可能性あり	解析時刻では雷は発生していないが、落雷の可能性はある。		

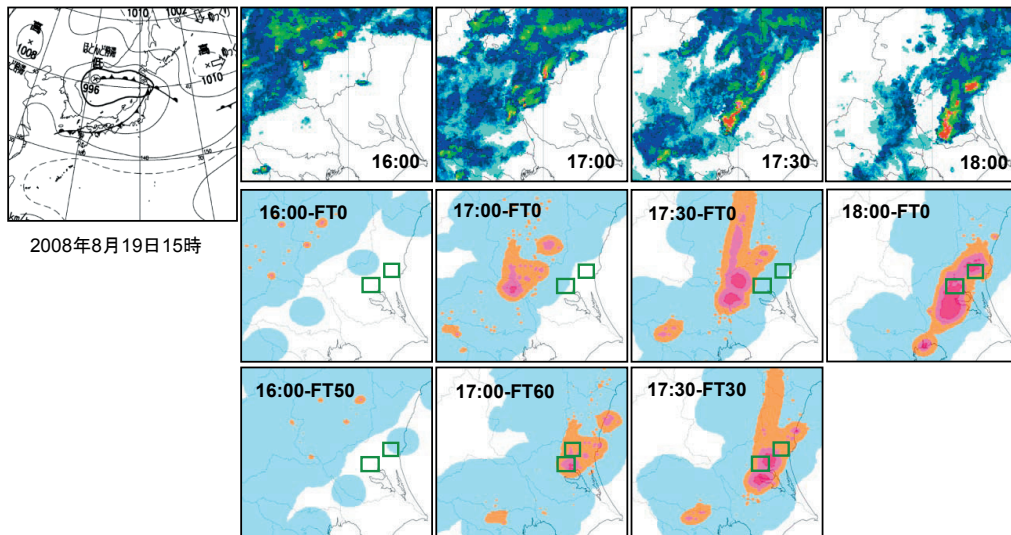


第63図 活動度と雷災害報告率の関係

日・県単位の雷活動度の最大値と雷の災害報告率の関係。灰色線は夏季(5～10月)、黒線は冬季(11～4月)で、2005～2007年について集計。

8.2 雷ナウキャストの事例

雷ナウキャストの解析・予測の事例として、2008年8月19日の茨城県の事例を紹介する(第64図)。8月19日の夕方ころ、寒冷前線の通過に伴う激しい雷雨が発生した。17時ころに栃木・埼玉県境付近で発生した雷雲は、発達しながら東進し、18時ころ最盛期となった。このときの落雷によって、水戸市及び石岡市でそれぞれ民家に火災が発生した。日中、茨城県内で雨は無く、夕方の雷雨はエコーの移動も早いことから突然の雷雨であったと推測される。一方、雷ナウキャストの解析や予測を利用することで、雷雲の発達や移動から危険な状況が近づくことを把握できる。16時の時点で、関東北西部の広い範囲で発雷が始まり、徐々に雷雲が発達を始めた。活動度1の領域は、実況では部分的に茨城県をとらえており、予測では徐々に茨城県に広がる傾向にあることを示している。17時には雷の活動が活発になり、17時初期値の1時間予報で水戸市から石岡市にかけて活動度2以上を示している。17時30分においても、エコーの領域は水戸市・石岡市にはかかっていないものの、南東進している雷雲は非常に発達しており、30分予測で両市付近に到達することを示している。



第64図 雷ナウキャストの事例

2008年8月19日茨城県の雷ナウキャストの解析・予測事例。左上は15時地上天気図。上段はエコー強度、中段は雷ナウキャストの解析、下段は雷ナウキャストの予報。時刻は初期値における時刻、FTの右の数字は予報時間(分)を表す。緑枠は、雷害の発生した水戸市と石岡市。

屋外での活動など雷害に対するリスクが高い場合には、雷ナウキャストの実況の推移や予測を利用した防災対応を取ることで、不意の落雷事故を未然に防ぐことができると考えられる。

8.3 雷ナウキャストの利用

最後に、雷ナウキャストを含め雷に関して段階的に発表される気象情報について、各段階の利用のイメージを第 65 図に示す。

①気象情報や天気予報

広範囲で激しい落雷が予想される場合には、半日～1日前に予告的な気象情報を発表し、「大気の状態が不安定」、「落雷に注意」といった内容で注意を呼び掛ける。また、1日3回発表している天気予報では、「雷を伴う」と表現する。

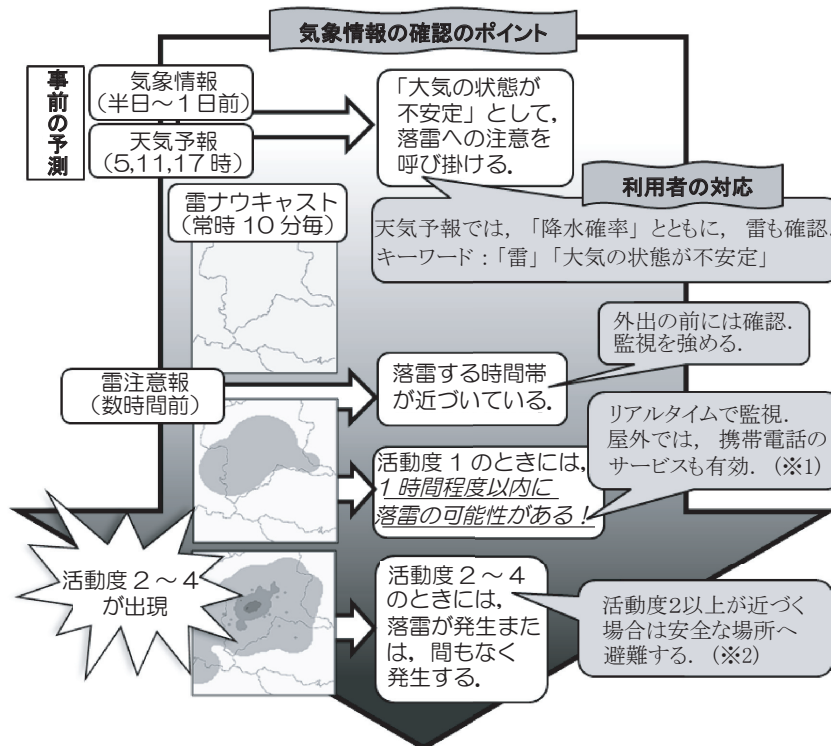
②雷注意報

雷の発生が予測される数時間前には、雷注意報を発表する。この時点で雷ナウキャストによる監視を強めるのが効果的である。

③雷ナウキャスト

実際に雨雲が発達を始めると雷ナウキャストで「活動度 1」を表現する。この範囲内では、おおむね 1 時間以内に発雷の可能性があるため、安全確保に時間を要する場合は、活動度1の段階から行動することが被害防止につながる。実際に雷が発生したり、落雷の可能性が高い状況になったりした場合には、「活動度 2～4」が現れる。活動度 2 以上では落雷の危険が迫っている状況であり、屋外にいる場合には「活動度の大小に関わらず」直ちに身の安全確保の行動を取る必要がある。特に、活動度 2 は雷が発生していてもまだ活発に感じない状況か、落雷が発生する直前という状況なので気を許しがちとなるが、この段階で行動を取ることが被害軽減に重要と考えられる。

これらの情報は気象庁のホームページでも提供しており、雷ナウキャストは、レーダー観測や降水ナウキャスト、竜巻発生確度ナウキャストと同じページで、要素を切り替えて表示できるため雷雨の監視に有効である。



第 65 図 雷に関する気象情報と利用のイメージ

(※1) 予報業務許可事業者等によるサービス。

(※2) 活動度が表示されていない地域でも、急に雷雲が発達して落雷が発生することがあるので、天気の変化に注意。

謝 辞

竜巻などの激しい突風に関する予測技術開発に当たり、平成18年に予報部・観測部・気象研究所を中心とした「レーダープロダクト開発プロジェクトチーム」が設置された。雷ナウキャストは主に、平成20年度から当該プロジェクトチームの枠組みの中で開発したものである。第5章で紹介したレーダー雷解析は平成20～21年度に観測部観測課観測システム運用室の平原淳氏（現所属内閣官房内閣総務官室）が開発を担当し、本稿は上記プロジェクトチーム内の雷に関するサブグループにおける技術報告を基に執筆した。

開発に必要なLIDENの標定・再標定データや、標定アルゴリズムについて観測部観測課航空気象観測室に、レーダー等の観測データについて同課観測システム運用室に、ご協力と有用なアドバイスを頂いた。また、上記プロジェクトチームのメンバーから、各開発段階において貴重なアドバイスを多数頂いた。

雷ナウキャストにおける活動度の表現手法は、平成20年度の「突風等短時間予測情報利活用検討会」での議論を経て構築したものである。田中淳座長（東京大学）を始めとする各委員の皆さまには大変有意義な意見を頂いた。また、雷ナウキャストの一般的利用方法の解説や広報用リーフレット作成にあたって大気電気学会の道本光一郎会長（防衛大学校）にご協力いただいた。

また、業務開始に向けた準備やルーチン運用に関して、部内関係者にご協力いただいた。

以上の関係者の方々のご協力に心からお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- Gremilion, M. S., and R. E. Orville (1999) : Thunderstorm Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning at the Kennedy Space Center, Florida: A Study of Lightning Initiation Signatures as Indicated by the WSR-88D. *Wea. Forecasting*, **14**, 640-649.
- 平原淳, 塚本尚樹, 田中秀一 (2010) : レーダー・LIDEN・数値予報資料を用いた発雷監視技術の開発. 平成21年度観測技術開発推進部会開発報告 No7 シビア現象の監視に関する開発①, 25pp.
- 笠原真吾 (2010a) : 雷ナウキャスト. 平成21年度予報技術研修テキスト, 116-135.
- 笠原真吾 (2010b) : 雷ナウキャストの提供開始. *天気*, **57**, 847-852.
- 気象庁観測部 (2003) : 雷監視システム (LIDEN) データの利用の手引. 26pp.
- 北川信一郎 (1996) : 日本海沿岸の冬季雷雲の気象学的特徴. *天気*, **36**, 89-99.
- 北川信一郎 (2001) : 雷と雷雲の科学. 森北出版株式会社, 47.
- Michimoto, K. (1991) : A Study of Radar Echoes and their Relation to Lightning Discharge of Thunderclouds in the Hokuriku District. Part I: Observation and Analysis of Thunderclouds in Summer and Winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 327-335.
- Michimoto, K. (1993) : A Study of Radar Echoes and their Relation to Lightning Discharges of Thunderclouds in the Hokuriku District. Part II: Observation and Analysis of "Single-Flash" Thunderclouds in Midwinter. *J. Atmos. Electr.*, **13**, 195-204.
- 道本光一郎 (1998) : 冬季雷の科学 (新型コロナシリーズ41). コロナ社, 81.
- 雷害リスク低減コンソーシアム (2003) : 急増する新型被害への対策 雷害リスク. ダイヤモンド社, 286pp.
- 坂本慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎 (1983) : 情報量統計学. 共立出版株式会社, 236pp.
- Steiner, M., R. A. Houze Jr. and S. E. Yuter (1995) : Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1978-2007.
- 大気電気学会 (2003) : 大気電気学概論. コロナ社,

28.

Takahashi, T. (1978) : Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.

高橋 勲 (1986) : 雷の電気. *気象研究ノート*, **154**, 365-379.

Watson, A. I., R. L. Holle and R. E. Lopez (1995) : Lightning from two National Detection Networks related to vertically integrated liquid and echo-top. *Wea. Forecasting*, **10**, 592-605.

Williams E.R. (1989) : The Tripole Structure of Thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, **94** (D11) , 13151-13167.