

気象レーダーによる雹（ひょう）の監視の試み*

内 田 顕 司^{*1}・溝 本 悟^{*2}・澤 田 睦 子^{*3}・石 原 正 仁^{*4}

1. はじめに

積乱雲の中で雹が形成され地上に落下すると、ときとして農作物やビニールハウスなどへの被害、建物のガラス窓や車の車体を損傷する被害、さらに路面に散乱することによる交通障害などをもたらす。気象庁では積乱雲の発生が予想されるとき、雷注意報を発表している。その中で降雹について言及することはあるが、雹の発生を直接監視することはしていない。

気象庁において次の2点の課題に対応するため、雹を監視する技術を導入することが必要と思われる。ひとつは、雷注意報で降雹を言及しても、実際の降雹の報告は農業等被害、気象官署の地上気象観測、一般市民からの通報などに限られており、降雹予測を検証するための資料が少ないことである。もうひとつは、レーダー観測の際に雹は特に大きなレーダー反射因子（反射強度）[†]を示すことが多く、それがもとで見かけ上大きな降水強度が算出され、その結果解析雨量などの雨量プロダクトに誤差を与えることである。特に後者に関しては、大雨警報・大雨注意報の発表基準に解析雨量の値が使用されているため、大きな解析雨量値が出力されたとき、それが実際の大雨なのか、あるいは雹による見かけ上の大雨なのかを判別する技術が求められている。

気象庁のレーダー気象観測業務においては、2005年に全国20のレーダーから得られるデータの処理を東京の本庁で一元化するとともに、水平・鉛直方向に1 km メッシュの反射強度データ（以後「3次元レーダーデータ」という）を全国規模で作成することを始

めた。それにともない、3次元レーダーデータを予報業務に利用するための調査を、レーダー観測担当者と予報担当者が共同で続けている（気象庁観測部 2007, 2009）。

この調査のひとつとして、3次元レーダーデータから1 km メッシュで算出される鉛直積算雨水量（Green and Clark 1972）等のレーダープロダクト（ここでは便宜的に「レーダー指数」という）を使う雹検出手法、及び雹にともなって現れる特異なエコーパターンによる手法の二つが提案され、調査の結果それらが雹の検出に有効であることが分かった。ここでは、これらの調査結果を紹介し、レーダー観測による降雹監視の可能性を検討する。第1表は今回の調査で使用するレーダー指数である。

2. レーダー指数による統計調査

2.1 これまでの調査研究

Geotis (1963) はレーダーによって雹を検出する際の反射強度の目安として、55dBZ という値を提案した。この値は、わが国において降雹をもたらした積乱雲の事例解析（森・高谷 2004；山下 2007）においても降雹との対応がよいことが示されている。Waldvogel *et al.* (1979) は反射強度45dBZ の高度と0°C の高度の差によって降雹の出現可能性を見積もった。さらに、2つの異なった波長のレーダーを利用する手法（Feral *et al.* 2003）や2重偏波レーダーによる手法（Doviak and Zrníć 1993）が研究されているが、現業化には至っていない。米国気象局の現業レーダー

* A trial of hail detection using weather radars.

^{*1} 気象庁観測部、現：静岡地方気象台。

^{*2} 気象庁観測部、現：大阪管区気象台。

^{*3} 気象庁観測部、現：気象庁総務部。

^{*4} 気象庁観測部、現：気象研究所。

© 2010 日本気象学会

[†] レーダー波の散乱断面積はレーリー散乱を適用すると降水粒子の直径の6乗に比例する。雨滴の最大直径が7 mm 程度であるのに対し、雹の直径は数十mm に達することがあるため、水の誘電率が水のその1/5であることを差し引いても、雹の反射強度は雨の反射強度より大きくなることが多い。ただし、大きな雹ではより複雑なミー散乱が起こる。

NEXRAD では, Wal-dvogel *et al.* (1979) を発展させる形で各高度の反射強度に温度の重みをつけて積分し, 激しい雹が発生する指数を算出している (Lenning *et al.* 1998). 一方, 第 1 表に示す VILD を使用し, その値が 4 gm^{-3} 以上では直径 19mm 以上の降雹があり, 3.5 gm^{-3} より小さいとほとんど降雹はないという報告がある (Amburn and Wolf 1997). 村島・岸 (2007) は森・高谷 (2004) をもとに, レーダーエコーが 55dBZ 以上を示す高度に雹が存在し, 60dBZ 以上の領域の面積が中層から下層に向かって急減するとき降雹被害が発生するとして雹の監視を試みた. 吉田ほか (2006), 岡田 (2007) は 5 年間の調査をもとに, VIL と VILD の値が大きくなるとき大きな雹が発生する傾向があることを示した.

2.2 今回の調査

まず降雹事例を抽出する. 2006年に全国の気象台がまとめた気象災害報告において雹害として報告された 30 事例について, 降雹の時刻と地点から降雹をもたらしたレーダーエコーを特定し, それぞれについて各レーダー指数の最大値を調べた (第 2 表). 同災害報告の中に詳細な時刻や場所の記述がない事例については, その日の県内で最大の値を示したレーダーエコーに関する値を採用した.

雹の検出手法については観測や予報の現業の場で簡単に雹の有無を判別することを前提とし, 前節で述べた調査研究をもとに, Zmax と VILD のしきい値をそれぞれ 55dBZ, 3.5 gm^{-3} とし, さらに暖候期に雲頂が 0°C 層を超えていることを確認するため TOP のしきい値を 8 km とし, これら 3 つの指数の組み合わせを「雹指数」とし, それぞれが各しきい値を超えたとき「降雹あり」と判定することにした.

第 2 表の降雹 30 事例を雹指数によって判定したところ, 22 件で降雹ありと判定された. 通年での検出率は 73% である. 暖候期 (5~10 月) に限れば, 20 事例中の 19 事例を雹指数によって検出した. VILD のしきい値を 3.4 gm^{-3} に下げると検出率は 100% となる.

第 1 表 本調査で使用するレーダー指数.

プロダクト (レーダー指数)	略号	定義	単位
反射強度	Z	受信信号から算出したレーダー反射因子	dBZ ($10 \log Z [\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]$)
最大反射強度	Zmax	鉛直方向で最も大きな Z	dBZ
鉛直積算雨水量	VIL	$\Sigma (M \cdot \Delta H)$ ただし ($M = 3.44 \times 10^{-6} Z^{4/7}$) * $\Delta H = 1 (\text{km})$	kgm^{-2}
VIL 密度	VILD	VIL/TOP	gm^{-3}
エコー頂高度	TOP	Z=12dBZ をしきい値とするエコーの高さ	km

* Green and Clark (1972)

第 2 表 2006年に全国の気象台から報告された降雹の事例と, 対応するレーダー指数の最大値. 斜線部は「雹あり」のしきい値を下回った値を示す.

月	日	時間	場所	Zmax (dBZ)	VIL (kgm ⁻²)	VILD (gm ⁻³)	TOP (km)
3	28	1540	滋賀県	57	26.2	2.5	11
		1600	和歌山県	60	32.7	3.8	11
4	25	1150	栃木県	55	22.7	2.3	10
		1120	神奈川県	55	15.6	2.0	9
		1240	茨城県	53	13.7	1.5	12
		0810	福井県	51	6.7	1.2	6
5	24	1730	山梨県	59	34.5	4.0	11
		1650	栃木県	62	60.5	5.2	12
		1840	長野県	63	42.1	4.4	11
6	6~7	1400	福島県	64	66.4	5.8	12
	6	1600	長野県	60	31.1	3.5	11
	11	1830	山口県	62	36.1	3.4	12
		1640	鳥取県	59	34.2	3.8	10
	19	1310	茨城県	65	92.2	7.2	13
	22	1820	岩手県	70	165.2	13.0	15
	27	1450	群馬県	61	53.1	5.1	11
	28	1810	埼玉県	71	248.7	16.6	15
7	3	1300	栃木県	70	179.0	12.3	15
	14	1400	栃木県	70	234.6	15.6	15
	15	1300	東京都	70	164.0	10.9	15
	17	1050	網走支庁	61	36.0	3.5	13
8	11	1440	鳥取県	68	133.0	8.9	15
	12	1110	山形県	64	69.3	4.6	15
		0450	愛知県	63	77.4	5.2	15
		1100	長野県	62	53.1	4.8	12
	24	1630	大分県	61	63.9	4.3	15
11	2	1710	愛知県	62	31.8	4.5	9
	5	2050	和歌山県	61	43.7	4.9	10
	6	0040	佐賀県	59	32.7	3.1	11
	11	0020	愛媛県	59	29.9	3.0	11

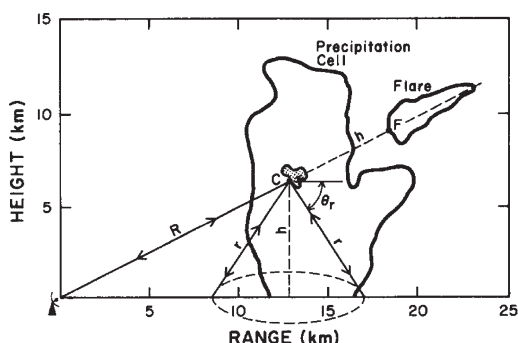
Zmax の値については30事例のうちの21事例で60dBZ以上、26事例で55dBZ以上、すべての事例で50dBZ以上を示した。TOPは30事例中の29事例において8 km以上であった。

今回の雹指数によって検出できなかった「見逃し」事例は30事例中8つである。Zmaxについては、4月の2事例においてしきい値である55dBZを下回った。VILDについては 3.5gm^{-3} 以下でも降雹のあった事例が3、4月に5事例、11月に2事例あった。3月28日の滋賀県と4月25日の栃木県などの4事例では、VILDがそれぞれ $1.5\sim 2.5\text{gm}^{-3}$ と特に小さかった。3月28日の事例は寒冷前線通過に伴う降雹であり、4月25日の事例は上空の寒冷渦の通過に伴う積乱雲がもたらした降雹であった。Amburn and Wolf (1997)は3次元レーダーデータからVILを計算するとき、エコーの移動速度が大きいと1回のボリューム走査中にエコーが大きく移動するため、直立したレーダーエコーが見かけ上傾き、反射強度を単純に鉛直方向に積算するとVILの値に誤差が生じることを指摘した。3月28日と4月25日の5事例においてVILDが小さいにもかかわらず降雹があった理由として、エコーの移動速度が50km/h程度と大きかったことが原因である可能性がある。今回は実施しなかったが、移動速度が大きなエコーでは移動速度を考慮してVIL、VILDを計算することが必要である。

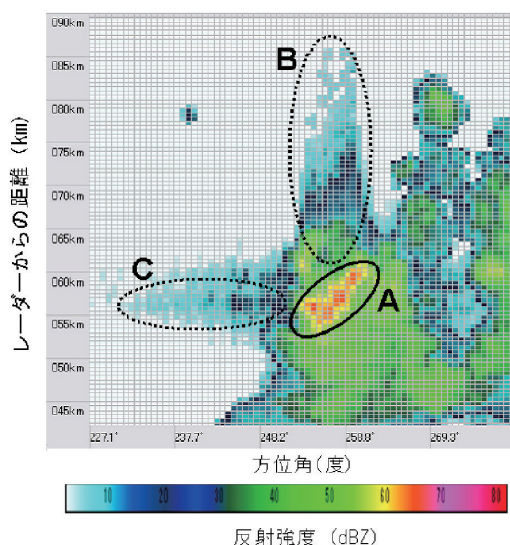
降雨の場合と異なり、降雹の場合には発生するすべての事例について報告が届くわけではない。このため、雹指数では「降雹あり」と判定したが実際には「降雹なし」の割合、すなわち「空振率」を求めることはむずかしい。そこで試みに、2006年に東京管区気象台が雷鳴・電光を観測した時刻前後のレーダーエコーの雹指数を調べた。同年には延べ20日に雷鳴・電光が観測されており、このうち雹指数が「降雹あり」と判定した事例は2件であった。同気象台は東京都区部のほぼ中心に位置するので、同気象台が雷鳴・電光を観測した前後に都区部で降雹があれば新聞やTVニュースなどを通じ、気象台の気象災害報告に記録される可能性がある。実際にはこの年には都区部における降雹の報告はなかった（第2表の7月15日の1件は多摩地区で発生）。このことから、この年には都区部で延べ20日に積乱雲が発生し、そのうち2例において雹指数は空振りの判定をしたことになる。

3. 雹に伴うTBSS・サイドローブエコー

米国では雹の発生時にTBSS (three-body scatter spike) またはflare (第1図)と呼ばれる特異な形状のレーダーエコーが出現することが報告されている (Zrnić 1987; Wilson and Reum 1988)。レーダーから発射された電磁波が雹→地表面→雹と3回散乱さ

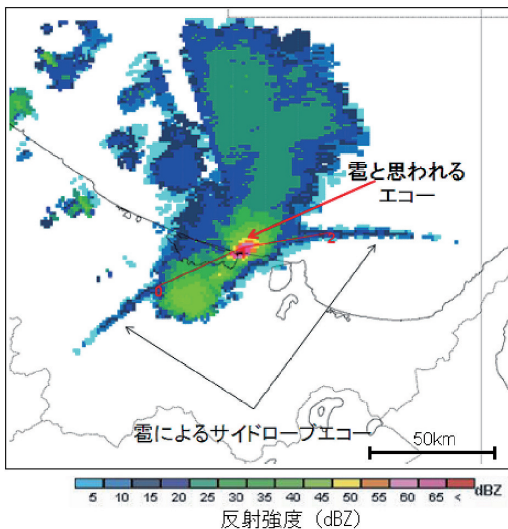


第1図 TBSS (flare) の概念図。1986年7月20日米国アラバマ州ハンツビルにおいてNCARのレーダーCP-4が観測した積乱雲のエコーとTBSS。斜線は60dBZ以上の領域 (Wilson and Reum 1988)。

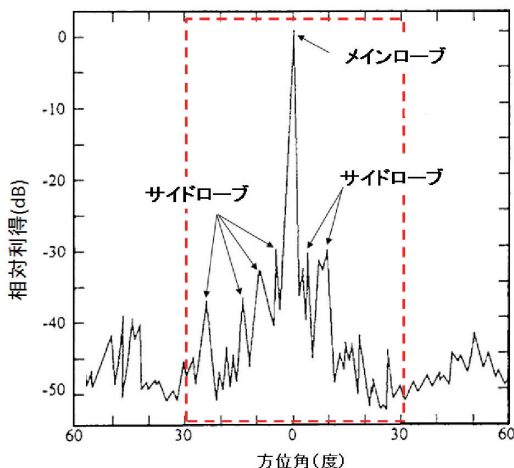


第2図 2006年7月15日に東京都多摩地区に出現した積乱雲にともない、12時50分に東京レーダーの仰角4.8度の反射強度データに現れた雹エコー (A)、TBSS (B)、サイドローブエコー (C)。横軸はアンテナの方位角、縦軸はレーダーからの距離。

れ、最後にレーダーに戻ってくる現象である。今回の調査事例について極座標上のレーダーデータ（1次データ）を丹念に調べた結果、TBSSと認められる事例があった（第2図）。距離55～60km付近に反射強度が70dBZに達する雹と考えられるエコーAがある。この雹エコーの高度は5kmであることから、その後方の距離65～85kmの位置する弱いエコーBはTBSSである可能性が高い。



第3図 2006年6月28日14時20分に釧路レーダーの高度7kmの反射強度画面に現れた北海道佐呂間町を中心とする雹エコーとサイドローブエコー。



第4図 気象庁釧路レーダーのビームパターン。

第3図は2006年6月28日に北海道佐呂間町に発生した積乱雲のレーダーエコーである。68dBZに達する雹と考えられるエコーを中心として、その左右30度までの位置に円弧状のエコーが出現した。第4図に示すレーダービームパターンによると、アンテナのメインビームから利得が40dB低下するまでのサイドローブ群が雹を捉え、本来の雹エコーの位置とは異なった位置に擬似エコー（サイドローブエコー）を出現させたと考えられる。第2図にもどって見ると、雹エコーAから動径方向左側に弱いエコーCが伸びている。これも雹に伴うサイドローブエコーと思われる。

TBSSやサイドローブエコーはひとつの積乱雲において両者ともに出現する場合と、どちらかが出現する場合とがある。第2表の30事例では、TBSSは8事例に、またサイドローブエコーは13事例に出現していた。

4. レーダー観測業務における降雹監視への応用

気象庁のレーダー観測現業では、全国20のレーダーから送られてくるデータにまずシステムによる自動品質管理を施し、その後観測者による品質管理を行い、3次元レーダーデータを作成している。今回提案した「雹指数」は降雹を自動判定する指標としてある程度利用できると思われる。これによって雹の存在が疑われるときには、人手の作業が介在するが、雹エコーの周辺を丹念に調べTBSSやサイドローブエコーの存在を確かめれば、さらに信頼度の高い雹の判定が行える。

5. まとめ

気象庁の3次元レーダーデータから得られるレーダー指数をもとに、TBSSやサイドローブエコーといった特異エコーも利用することで、予報・観測の現場において雹を含むエコーをある程度監視できることが分かった。今回の調査では雹を判別するときのレーダー指数のしきい値として、暖候期においては $Z_{max} = 55$ (dBZ), $VILD = 3.5$ (gm^{-3}), $TOP = 8$ (km)が適当であると考えられる。今後より多くの事例を調査し、地域別、季節別などに分類すれば、さらに適切な値を設定できるであろう。

なお、今回の調査では「積乱雲の中で雹が上空に形成されること」と地上に雹が落下する「降雹」とを区別して議論していない。気温と湿度の鉛直プロファイルによっては、上空で形成された雹が落下途中で融解

して地上では降雨となるケースもある。上空の雹を検出する手段が確立されていない現状では、両者を混用せざるを得なかった。

謝 辞

雹にともなう TBSS の出現については気象研究所の山内 洋氏から情報をいただきました。感謝いたします。

参 考 文 献

- Amburn, S. A. and P. L. Wolf, 1997 : VIL density as a hail indicator. *Wea. Forecasting*, **12**, 473-478.
- Doviak, R. J. and D. S. Zrnić, 1993 : Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press, 255-264.
- Feral, L., H. Sauvageot and S. Soula, 2003 : Hail detection using S- and C-band radar reflectivity difference. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 233-248.
- Geotis, S. G., 1963 : Some radar measurements of hailstorms. *J. Appl. Meteor.*, **2**, 270-275.
- Green, D. R. and R. A. Clark, 1972 : Vertically integrated liquid water —A new analysis tool. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 548-552.
- 気象庁観測部, 2007 : 新しいレーダー観測資料の利用に関する検討. *測候時報*, **74**, 35-92.
- 気象庁観測部, 2009 : レーダーデータの品質管理と新しいレーダー観測資料の利用. *測候時報*, **76**, 1-114.
- Lenning, E., H. E. Fuelberg and A. I. Watson, 1998 : An evaluation of WSR-88D severe hail algorithms along the northeastern Gulf Coast. *Wea. Forecasting*, **13**, 1029-1044.
- 森 真理子, 高谷美正, 2004 : 関東地方で発生した降ひょう・ダウンバーストを伴ったスーパーセルの事例解析. *天気*, **51**, 567-581.
- 村島 巧, 岸 隆幸, 2007 : 平成18年(2006年)6月28日網走西部の降雹の事例. *測候時報*, **74**, 44-46.
- 岡田 京, 2007 : 降雹時の新しいレーダー観測資料の特徴～過去5年間の統計調査から見出せること. *測候時報*, **74**, 61-62.
- Waldvogel, A., B. Federer and P. Grimm, 1979 : Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 1521-1525.
- Wilson, J. W. and D. Reum, 1988 : The flare echo : Reflectivity and velocity signature. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **5**, 197-205.
- 山下浩史, 2007 : 2005年5月15日東京都八王子市に降雹と突風をもたらした積乱雲の特徴について. *天気*, **54**, 781-796.
- 吉田公一, 谷 善典, 岡田 京, 2006 : 降雹時のレーダー3次元データの特徴. 平成18年度東京管区調査研究会誌, 関東甲信地区調査研究会.
- Zrnić, D. S., 1987 : Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. *Radio Sci.*, **22**, 76-86.