

# 非定常で短寿命の対流セルのもたらす降雹の水平規模と雹の大きさ

—2002年5月26日の阪神間の降雹事例について—

出 世 ゆかり\*・坪 木 和 久\*\*

## 1. はじめに

降雹は農業や地上の構造物に大きな被害をもたらすことがある。しかしながら、降雹は非常に局所的で(小元, 1990) その観測や調査は容易ではない。このためわが国ではその水平規模や雹粒の大きさについての調査は多くない。このような比較的まれにしか起こらない突発的な現象を、事前に設定した観測網で観測することは容易ではない。むしろ発生の事後解析を積み重ねることで、実体を明らかにしていくことが必要である。

降雹は激しく発達した積乱雲やその群によってもたらされる。小元(1984)は関東地方で100 kmを超えるような帯状の降雹が、スーパーセル型ストームによってもたらされたことを報告した。小元(1990)は帯状の降雹がマルチセルやスーパーセルによってもたらされ、1つの帯状降雹域のなかでも降雹の強度は変動することを指摘した。このような降雹の空間変動について、Changnon(1970)は高密度な地上観測を行い、hailswath(降雹帯)がいくつかのhailstreak(降雹条痕)の集合で構成されていることを示し、それらの水平規模を詳細に調べた。菊地ほか(1989)とKobayashi *et al.*(1996)は、石狩平野で発生した降雹がいくつかの降雹域で構成されており、それをもたらした積乱雲内にメソサイクロンが観測されたことを報告した。

森・高谷(2004)は関東地方でスーパーセルがもた

らした降雹を3事例について調べ、最も被害の大きかった2000年5月24日の事例では、雹の大きさがピンポン玉からミカン大であったことを報告した。菊地ほか(1989)の石狩平野の降雹事例では、雹の大きさが最大で直径3 cmほどであった。渡辺(1995)は福島県南部で1992年8月7日に発生した降雹とダウンバーストを調べ、直径5 cmの雹を報告している。この降雹をもたらしたレーダーエコーは少なくとも2時間以上は持続していた。

このようにこれまでに報告された降雹事例の多くが、マルチセル型やスーパーセル型などの長寿命の積乱雲や積乱雲群によってもたらされたものであり、それに伴う雹の大きさは農業被害をはじめとするさまざまな雹害をもたらすほど大きなものである。一方、非定常で短寿命な対流セルがもたらす降雹がどのような水平規模で、またどのくらいの大きさの雹をもたらすのかについてはほとんど明らかにされていない。

近年の雲解像モデルでは、降水粒子のカテゴリにあられと区別して雹を設定し、降雹をもたらすマルチセルやスーパーセルのシミュレーションが行われつつある(たとえばHeever and Cotton, 2004)。一方、非定常で短寿命の対流セルがもたらす降雹については、雹粒の大きさやそれによる雹害の実態があまり知られていないので、雲解像モデルを用いたシミュレーション実験がほとんど行われていない。降雹予測において、短寿命の対流セルを考慮する必要があるのかどうかは防災上重要な問題である。この問題に答えるためには、非定常で短寿命の対流セルによる降雹の実体を明らかにすることが必要である。本論文ではそのような事例として、2002年5月26日に阪神間で発生した降雹について、その降雹域の水平規模と雹の大きさを調べた。本論文の目的は、非定常で短寿命の対流セルのもたらす降雹の水平規模と雹の大きさがどの程度であ

\* 名古屋大学地球水循環研究センター(現所属: 独立行政法人情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センター)。

\*\* 名古屋大学地球水循環研究センター。

—2005年6月17日受領—

—2006年9月14日受理—

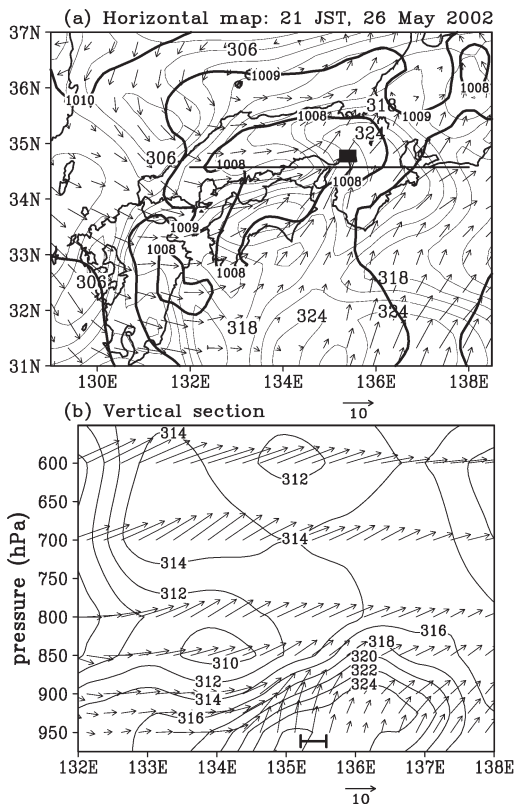
るのか、またどのようなインパクトを地上の物に与えるのかを示すことである。

## 2. 大気場と降水システムの概要

本研究の調査対象とした降電は、2002年5月26日21~22JST (Japan Standard Time ; JST=UTC+9時間) に、兵庫県尼崎市とその周辺の地域で発生した。このときの大気場を気象庁の領域客観解析を用いて示す。第1図aは2002年5月26日21JSTの地上気圧、900 hPaの相当温位とそのレベルの水平風ベクトルである。降電のあった領域は弱い低気圧の東部にあ

たり、その付近では高相当温位の南西風がある。降電域付近で、その南西風と西風の合流・収束がみられ、相当温位の東西傾度が大きい。この低気圧は顕著な前線を伴わず、背の低い低気圧である。第1図bは第1図aの直線に沿う相当温位と水平風の鉛直断面である。134°E~137°Eの800 hPa以下に高相当温位の南風があり、その領域の対流不安定が強化されていることが分かる。

尼崎市周辺に降電をもたらした強い対流セルについて、レーダーエコーの時間変化を第2図に示す。ここでは降水強度  $R$  とレーダー反射因子  $Z$  の関係が  $Z=200R^{1.6}$  のように与えられる。破線で示すように、2109JST に枠で示した領域西端に強いエコーがあるが、これは東進とともに急速に弱まり、2127JSTにはほぼ消滅する。2115JSTにはその強いエコーの南西側に対流セルが発生し、2121JSTに枠内に入って強まる。2133JSTにはそのエコーが強化され、2145JSTまで発達し、その後約15分間ほどの最盛期を經過し、2203JSTに衰弱しはじめ、2209JSTにはほぼ弱まっている。この対流セルの寿命は1時間程度で、その間に発生期、発達期、最盛期、衰弱期がみられるような、非定常な時間変化を示した。第2図のレーダーエコーと次節で示す降電域との対応から、この強い対流セルがみられた2133JSTから2203JSTの時間帯で降電が発生したと考えられる。



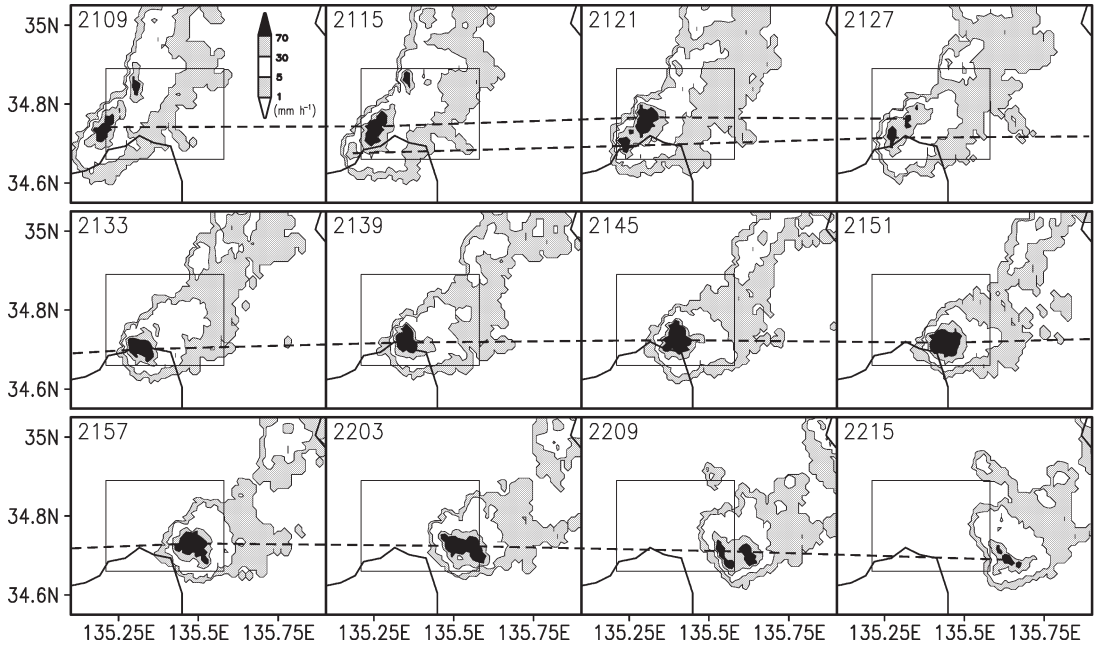
第1図 気象庁領域客観解析 (RANAL) から作成した、2002年5月26日21JSTの (a) 地上気圧 (太実線; hPa)、900 hPaの相当温位 (細実線; K) と水平風ベクトル (矢印)。塗りつぶした矩形は降電の起こった領域で、第3図の表示領域を示している。(b) 相当温位 (実線; K) と水平風ベクトルの (a) の直線に沿う鉛直断面。図下部に第3図の表示領域の経度範囲を横線で示した。風速のスケール ( $\text{ms}^{-1}$ ) を各図の下に示した。

## 3. 降電調査の方法

本研究では前節に示した降電について、アンケートによる調査を行った。アンケートは尼崎市と豊中市の小学校、中学校、高等学校の教職員を対象として、合計80校、各学校5名について行った。このような学校を対象としてアンケート調査を行う方法は菊地ほか (1989) で行われている。本研究でのアンケート内容は下記の5つの質問である。

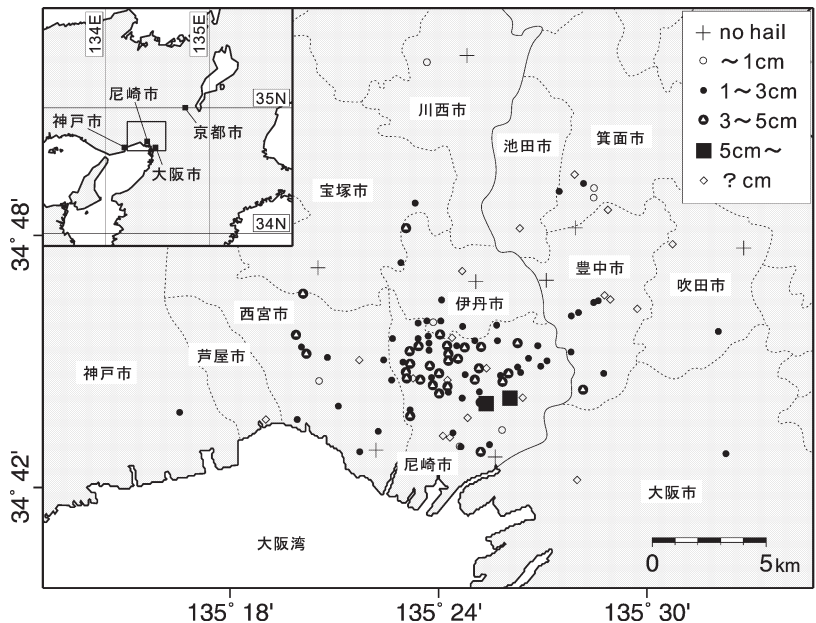
- 質問1. 電が降ったことに気がつきましたか?
- 質問2. あなたが見た一番大きな電の直径はどれくらいでしたか?
- 質問3. そのときあなたはどこにいましたか?
- 質問4. 電が降った時の様子、被害の程度は?
- 質問5. 資料 (写真など) の有無について。

菊地ほか (1989) では降電の時間が質問事項にあったが、今回は質問に含めなかった。本研究の降電事例ではレーダーから推定される時間以上に精度の高い時間情報を得ることは困難と考えたからである。ただし



第2図 中部電力株式会社の三国山レーダーで観測された、2002年5月26日2109~2215JSTのレーダーエコー強度 (mm hr<sup>-1</sup>) の高度1 kmのCAPPIの時間変化。点線は2つの主要な対流セルのレーダーエコーを追跡したもの。図中の枠は第3図の表示領域。

一般的には時刻情報が調査項目にあることが望ましい。また、今回は質問4の内容を新たに加えた。上記のアンケートを対象とした教職員に、降雹後に送付した。降雹の発生した時間は日曜日の夜で、多くの回答は教職員の学校外（おそらく自宅など）における情報である。このため回答は兵庫県の尼崎市、神戸市、芦屋市、西宮市、川西市、宝塚市、伊丹市、大阪府の池田市、大阪市、豊中市、箕面市、吹田市の広域に渡り、送付した400通のうち、173通の回答が得られた。なお、質問1~5に対する回答は、質問1：173件、質問2：158件、質問3：



第3図 アンケート調査から得られた、大きさ毎に区分した雹の分布。質問1の回答数173件のうち、位置を正確に決められた地点は162点で、そのうちの場所の重複を除いて119点をプロットした。

162件，質問4：148件，質問5：12件であった。

#### 4. 降電調査の結果

上記のアンケートの質問1から3に対する回答から，どの地域にどれくらいの大きさの電が降ったのかわることができた。それを地図上にプロットしたものを第3図に示す。これを見ると降電域は，第2図に示した降水域に比べて局所的であることが分かる。降電域は，神戸市の1例を除くと東西方向に西宮市から吹田市の約20 kmに渡り，南北方向には川西市の1例を除くと尼崎市から箕面市南部の約13 kmの領域に渡っている。さらに主要な降電領域は尼崎市北部の東西約7 km，南北約4.5 kmの領域に集中しており，これを矩形とするとその面積は約32 km<sup>2</sup>である。これは第2図に示したレーダーエコーの最も強い部分に対応している。

このような非定常で短寿命の対流セルでも，大きさが3 cmを超える電をもたらした。この降電がどのくらい地上物に対してインパクトを与えるものであるのかをアンケートの質問4から知ることができる。

まず，質問4から得られた気象学的特徴についての回答を第1表にまとめた。第1表よりこの降電が，激しい雷雲によってもたらされたことがわかる。その降水量は降電により地面が一面電で覆われる程度に大きかった。回答のコメントには「瞬刻間に電がつもり，あたりが白くなりました。」，また，「一番強く降ったときは前が見えないほどであった。」などの回答があり，降水強度は大雨程度に大きなものであったと推定される。降電の持続時間について，「尼崎市で電は10～20分続いたように思われる。」や「西宮市で，10～20分間隔で2～3回降ってきた。」などの回答があった。また，気温が低下したという回答が複数あり，豊中市の1つの学校からは「1時間に7度以上の気温の降下がみられた。」という報告があった。第1図bの134°Eの850 hPa付近には顕著な低相当温位の西南西風があり，その相対湿度は40%程度であった。この乾燥空気が降水システムに取り込まれ，降水粒子の蒸発冷却により地上の気温低下をもたらされたことが示唆される。

次に降電によってどのような被害をもたらされたかを第2表にまとめた。これより電の大きさは相当の被害が出る程度に大きなものであったことがわかる。特に車に電の跡が残るという回答が多く，また「スーパーや薬局のテントが穴だらけで，ぼろぼろになって

第1表 降電時の気象についての主要な回答と同様の内容の件数。ただし，質問4の回答数は148件で，複数の回答についてはそれぞれを1つとして数えた。

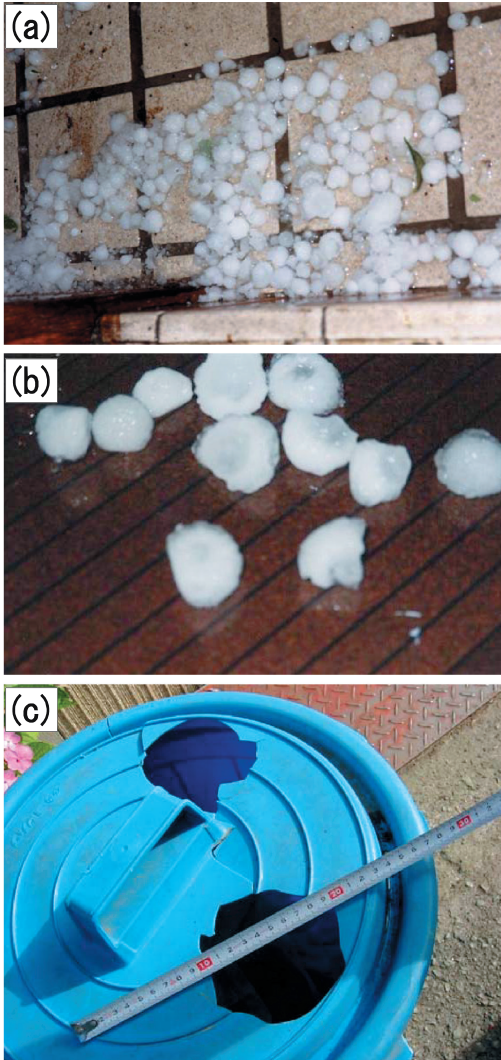
雷が激しかった。	37件
大雨を伴っていた。	7件
道路や広場などに電が積もって，一面真っ白になった。	26件
気温が低下した。	4件

第2表 降電による被害についての主要な回答と同様の内容の件数。ただし，質問4の回答数は148件で，複数の回答についてはそれぞれを1つとして数えた。

花，植木，家庭菜園，街路樹などの被害があった。	46件
車の被害（ボディにへこみができるなど）があった。	15件
倉庫，自転車置場，ベランダなどのプラスチック板や波板などに穴があいた。	45件

いた。」「公園も学校の運動場にも電の落ちた後と分かる5 cmほどの穴が全面にできていた。」「屋根瓦にヒビが入って，屋根全体を交換しなければいけない。」「ごみ箱のポリエチレン製のふたに穴があいた。」「商店街のアーケードに穴があいた。」などの回答があり，この降電の地上物へのインパクトの大きさが伺える。このように今回のような短寿命の対流セルでも，大きな被害が出るほどの降電をもたらすことができることがわかる。

質問5に対して，電や被害の写真（7件），ビデオ（2件）さらに冷凍した電（4件）が提供できるという回答（重複あり）が得られた。このような情報が得られるのもアンケート調査の利点である。電の写真はアンケートの回答者以外からも提供があった。第4図に降電直後の電の写真を示す。第4図aは軒下に溜った電であるが，大きな粒径の電が多量に降ったことが分かる。第4図a，bよりその直径が2 cm程度であることが分かる。小西ほか（2003）はここで採取された電の粒径を調べ，最大が3.2 cmと報告している。第4図cは電の被害の一例であるが，プラスチック製のごみ箱に大きな穴があいている。電のインパクトがいかに大きなものであったかということが分かる。



第4図 (a) 2002年5月26日の尼崎市における降雹の様子。タイルの一辺は11 cmである。(b) 同市内で採取された雹。床の線の間隔は1.5 cmである。(c) 雹により穴のあいたポリバケツ。

## 5. 考察

本研究で調査した降雹をもたらした対流セルは1時間程度の短寿命で、レーダーエコーから非定常であったことが分かる。これがもたらす局地的な降水をAMeDASなどの気象庁の定常観測で捉えることは困難である。本研究で行ったようなアンケート調査では定量的な降水強度を得ることはできないが、降雹の水平規模を高い空間解像度で得ることができる。Changnon (1970) では1967年の観測で4096 km<sup>2</sup>に361個の

雹の観測点を展開した。これは3~4 km四方に1つの観測点を置いたことになる。単純には比較できないが、今回のアンケート調査では全降雹域で大雑把には平均1.5 km四方に1つのデータが得られている。降雹の主要部である尼崎市北部ではおよそ0.5 km四方に1つという高い空間解像度である。また、降雹による被害の程度や雹の大きさおよび気象状況などの情報が得られている。本研究の事例では、アンケートの回答から最大6 cmの大きさの雹が報告された。どのように測定したのかは分からないので、数値には誤差が大きいと考えるべきであるが、雹の大きさの情報が広域に渡って高密度に得られた点は、アンケート調査の有効性を示している。

降雹の水平規模については、小元 (1984) の報告にあるスーパーセルによる100 kmを超えるものに比べて、今回の事例は1桁小さい。大規模な降雹帯には、空間的な変動がある。Kobayashi *et al.* (1996) の竜巻を伴う降雹では、降雹帯の全体は50 km以上に渡るが、菊地ほか (1989) が指摘しているように、降雹は直径数 kmの領域に集中しており、それが複数で降雹帯を構成している。その1つの水平規模は本事例の降雹域の主要な部分の規模と同じ程度である。本事例のような非定常な対流セルのもたらす降雹の水平規模は、大きな降雹システムのもたらす降雹帯のひとつかたまり程度の大きさであるといえる。観測からChangnon (1970) は、hailswathを構成するhailstreakの大きさが10~20 km<sup>2</sup>の規模が最も高頻度と報告している。本事例の降雹の主要な部分の水平規模は、hailstreakの規模に対応していると考えられる。

本事例の雹の大きさは、小西ほか (2003) の報告と第4図の写真から2~3 cm程度のものが記録されている。またアンケートから3~5 cmのものが多数の地点で見られる。Kobayashi *et al.* (1996) の事例では雹の大きさは2~3 cm、渡辺 (1995) では5 cm、森・高谷 (2004) では2000年の事例でピンポン玉 (直径約4 cm) ~ミカン大と報告している。これらの降雹はスーパーセルや長寿命の対流システムによりもたらされたものであるが、本事例の短寿命の対流セルでも同じ程度の大きさの雹がもたらされていることが分かる。

このように本事例のような非定常で短寿命の対流セルでも、スーパーセルや長寿命の降雹システムがもたらす雹と同じ程度の大きさの雹をもたらすことがあり、アンケートで明らかになったような被害をもたら

すことがある。このような対流セルについても、マルチパラメータレーダー等による観測的研究が望まれると同時に、防災の観点から数値モデルによる降雹予測が強く望まれる。予測に用いられる雲解像モデルはこのような短寿命の対流セルによる降雹も十分シミュレーションできるものであることが必要である。

## 6. まとめ

2002年5月26日21JSTから22JSTに阪神間において激しい降雹が発生した。これについて小・中・高等学校の教職員を対象としてアンケート調査を行い、降雹の水平規模と雹の大きさ、及び雹がもたらした被害について調べた。今回のような突発的でまれにしか起こらない局地的降水現象の実体を調べるためには、定性的ではあるがこのようなアンケートによる方法が有効であることが示された。

レーダーエコーの時間変化から、降雹をもたらした対流セルは非定常で1時間程度の短寿命を持つものであった。降雹は「一番強く降ったときは前が見えない」というほど強いもので、植物、車、建物などに多くの被害をもたらした。雹の直径は3cm程度のものが多くの地点でみられた。

降雹の主要な地域は尼崎市北部に集中しており、その面積はChangnon (1970) の指摘した hailstreak の1つの規模に対応する。この水平規模はスーパーセルや積乱雲群のもたらす降雹帯のひとかたまり程度の大きさといえる。アンケートの回答から、雹の地上物に与えるインパクトは大きく、災害も大きなものであった。雲解像モデルを用いた降雹予測では、このような短寿命で非定常な対流セルのもたらす降雹も予測される必要があるといえる。

## 謝 辞

本研究では中部電力株式会社のレーダーを使用させていただきました。このデータ提供には(株)中電シーティーアイの物江大輔氏にお世話になりました。名古屋大学の上田 博教授にはアンケート調査において、多大なご支援をいただきました。ここに記してお礼申し上げます。また、多忙の中、アンケートで貴重な情報を提供していただきました、各学校の多くの皆様方に深くお礼申し上げます。また第4図の写真は出世邦子様より提供していただきました。

## 参 考 文 献

- Changnon Jr., S. A., 1970: Hailstreaks, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 109-125.
- Heever, S. C. and W. R. Cotton, 2004: The impact of hail size on simulated supercell storms, *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1596-1609.
- 菊地勝弘, 上田 博, 小林文明, 岩波 越, 城岡竜一, 高橋暢宏, 松浦 馨, 金村直俊, 1989: 札幌付近に発生した降雹と竜巻, *天気*, **36**, 215-217.
- Kobayashi, F., K. Kikuchi and H. Uyeda, 1996: Life cycle of the Chitose Tornado of September 22, 1988, *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 125-140.
- 小西啓之, 土橋千恵, 出世ゆかり, 高谷美正, 2003: 2002年5月26日に阪神間で観測された雹の特徴, *日本気象学会2003年度秋季大会講演予稿集*, 195.
- 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.
- 小元敬男, 1984: ひょう害, *農業気象*, **40**, 163-172.
- 小元敬男, 1990: 降ひょうと下降流突風(ダウンバースト)による災害に関する研究, *文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果報告書*, 169pp.
- 渡辺 明, 1995: 雹痕から求めたダウンバーストの風速, *天気*, **42**, 627-632.

Hail Size and Horizontal Scale of Hailfall Caused by a Short-Lived  
and Non-steady Convective Cell : A Case Study of the Hail Storm  
in the Hanshin Area on 26 May 2002

Yukari SHUSSE\* and Kazuhisa TSUBOKI\*\*

\* *Hydrospheric Atmospheric Research Center (HyARC), Nagoya University (Present affiliation : National Institute of Information and Communications technology, Okinawa Subtropical Environment Remote-Sensing Center).*

\*\* *Hydrospheric Atmospheric Research Center (HyARC), Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan.*

(Received 17 June 2005 ; Accepted 14 September 2006)

---