

降水過程の定量化に向けたレーダー観測キャンペーン (REQUIPP) における気象レーダー初期観測結果の報告

池野伸幸¹・山本真之¹・妻鹿友昭¹・森谷佑介¹・古本淳一¹・橋口浩之¹・
山本衛¹・LUCE Hubert²・下舞豊志³・中里真久⁴・田尻拓也⁴・深尾昌一郎⁵

1 : 京大生存研 2 : Université du Sud-Toulon Var, France

3 : 島根大学総合理工学部 4 : 気象研 5 : 福井工大

1. 研究の背景

降水における熱力学過程・微物理過程・放射過程は相互に深く関連し、降水の発達・維持を特徴付ける。これらの降水過程の理解のため、モデルを用いた数値実験のほか、航空機や気球を用いたその場 (in situ) 観測・人工衛星やレーダー等を用いたリモートセンシング観測が広く行われている。

降水の発達・維持において、大気鉛直方向の運動(鉛直流)は、凝結物の鉛直輸送を通じて熱力学過程・微物理過程・放射過程の相互作用を決定する点で重要である。鉛直流は、観測手段の制約から水平風の収束・発散を鉛直積分することにより間接的に推定されることが一般的であるが、この手法は、空間・時間分解能に限られる、積分領域の上端あるいは下端における鉛直流の値の仮定が必要などの制約が存在する。一方、屈折率擾乱に伴う散乱エコー(以下、大気エコー)のドップラーシフトから風速を観測する大気レーダーは、仮定のない高い時間・鉛直分解能の鉛直流観測が可能である(Fukao 2007)。大気レーダーは、観測目的に応じた幅広い周波数帯(VHF帯・UHF帯)が使用されるが、降水時においても凝結物エコーと大気エコーの分離が可能な50 MHz帯大気レーダーは、降水領域内で正確な鉛直流の測定が可能な唯一の観測手段である(Cifelli et al. 1994, Nishi et al. 2007)。

降水内の凝結物を観測する気象ドップラーレーダーは、アンテナの3次元走査により降水領域内の凝結物や風速変動を高い時間・空間分解能で知るほぼ唯一の観測手段である(Houze et al. 1989)。さらに、アンテナビームを鉛直方向に指向した気象レーダーで得られる凝結物エコーの周波数パワースペクトル、凝結物の粒径分布(Particle Size Distribution; PSD)をリトリバルする有用な情報である(Gossard et al. 1994)。しかし、PSDのリトリバルにあたり、従来の観測では鉛直流の正確な情報がないことが、PSD推定精度の劣化要因となる。50 MHz帯大気レーダーでは、同時に得られる凝結物エコーと大気エコーを用いた雨滴に対するPSDのリトリバルが可能である(Wakasugi et al. 1986)。しかし、50 MHz帯大気レーダーは凝結物エコーに対する感度が低く、PSDの推定は一般に10 mm h⁻¹を超える強い降水に限られる。そのため、50 MHz帯大気レーダーと気象レーダーを併用し、弱い降水・強い降水の双方の状況下で風速・凝結物の変動を同時に観測する必要がある。

2. 降水過程の定量化に向けたレーダー観測キャンペーン (REQUIPP)

Radar-observation Experiment toward QUantification In Precipitation Processes (略称REQUIPP)は、滋賀県甲賀市信楽町の信楽MU観測所(34°51'N, 136°06'E)において2009

年 10 月から 11 月にかけて実施された、50 MHz 大気レーダーである MU レーダー（以下 MUR; Fukao et al. 1990）と気象レーダーによる同時観測キャンペーンである。REQUIPP における課題は以下の通りである。

- (1) MUR の鉛直流観測データと気象レーダーの凝結物観測データを組み合わせ、凝結物の鉛直輸送を通じた熱力学過程と微物理過程の相互作用の定量的評価を行う。
- (2) MUR と気象レーダーの観測結果を併用して弱い降水・強い降水の双方において PSD をリトリバルすることにより、雲微物理量を定量化する。
- (3) MUR は、送信周波数をパルス毎に切り替えるレンジイメージング観測 (Luce et al. 2007) により、乱流・風速を高鉛直分解能で観測する。風速・乱流強度に見られる大気擾乱が PSD に与える影響を観測的に明らかにする。
- (4) 凝結物エコーの周波数パワースペクトルが得られる 9.8GHz 帯気象レーダー（以下 9.8G-R）・35GHz 気象レーダー（以下 35G-R）におけるデータ解析手法を確立する。

REQUIPP では、凝結物エコーの周波数パワースペクトルをそれぞれ観測可能な住友電工製 1.3 GHz 帯大気レーダー（通称 LQ7；以下 1.3G-R と表記）・9.8G-R・35G-R が運用された。観測は、降雨時にレーダーを運用する形で行い、2009 年 10 月 7–8 日にかけての台風観測（ただし、9.8G-R の観測は実施せず）、2009 年 10 月 25–26 日・11 月 1–3 日にかけての降雨観測、11 月 13–15 日にかけての Radio Acoustic Sounding System (RASS) による温度と、レンジイメージングによる大気擾乱・風速の同時観測が実施された。

1.3G-R は、50 MHz 帯大気レーダーでは観測できない高度 2 km 以下の風速を観測することを本来の観測目的としており、観測システムは Yamanaka et al. (2008) に詳述されている。しかし、降雨時における 1.3G-R の観測は、大気エコーより凝結物エコーが卓越し、かつ 1.3 GHz 帯の周波数は雨滴による電波減衰が無視できる特長を持つ。そのため、雨滴減衰の影響がないレーダー反射因子 (Z) の観測が可能である。

9.8G-R は、集中豪雨などの局地的降雨現象の観測のため、可搬性と低コスト化を目的に開発されたレーダーである。観測システムは、アンテナと送受信 RF (Radio Frequency の略) 部が一体化した屋外部と、レーダーシステム制御・受信信号のデジタル処理を行うインタフェースカードを備えた汎用 PC (屋内設置) で構成されており、数名の人力で移動・設置が可能な可搬性を実現している。屋外部の概観を図 1a に示す。アンテナは、直径 1.2 m のフロントフィードパラボラアンテナであり、屋外部の重量は 138 kg である。送信管には、低価格・高出力を両立するためピーク出力 20.56 kW・送信周波数 9.8 GHz の汎用マグネトロンを用いている。マグネトロンは、送信毎に送信パルスの位相（送信位相）が異なるため、送信位相をサンプリングにより記録し、送信位相と受信信号の位相を比較することによりドップラー速度を算出する方式 (Hamazu et al. 2003) を採用している。また、64 MHz の中間周波数 (Intermediate Frequency ; IF) サンプリングにより、IF 周波数における受信信号の位相検波を実現している。IF サンプリングにより、IF 周波数からビデオ周波数への変換及び位相検波に必要となるアナログ回路を不要とし、コスト削減を実現している。

35G-R は、35 GHz 帯（波長 8 mm）の周波数を用いたミリ波レーダーである。強い降水時には雨滴による電波減衰が観測上限高度の制約や Z の測定に問題となるものの、粒径の小さい（一般に 1 mm 以下）凝結物の検出が可能である。35G-R は、長期に亘る連続観測と低

コスト化を実現するため、衛星通信に用いられるピーク出力約 100 W の TWT (Traveling Wave Tube)を用いている。さらに、Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) 方式で送信することにより、感度の向上を達成している。具体的には、送信時間を $40.96 \mu\text{s}$ とし、送信中に 3 MHz の周波数掃引を行うことで、高いレンジ分解能 50 m ($1/3 \text{ MHz}=50 \text{ m}$) と信号帯雑音比 (SNR) の向上 ($40.96 \mu\text{s} / 0.33 \mu\text{s}=21 \text{ dB}$) の両立が見込まれる。送信信号と受信信号の干渉を低減するため、送信アンテナと受信アンテナが別個に設置されている。図 1b に 35G-R の外観を示す。FMCW 方式の送信を行うレーダーでは、送信・受信における周波数差がレーダーとターゲット間の距離 (レンジ) に相当する。35G-R は、 $40.96 \mu\text{s}$ の送信中にサンプリング周期 100 MHz・4096 点のデジタルサンプリングを行い、デジタルサンプリングされた受信信号に FFT を行うことで送受信の周波数差をレンジに変換している。

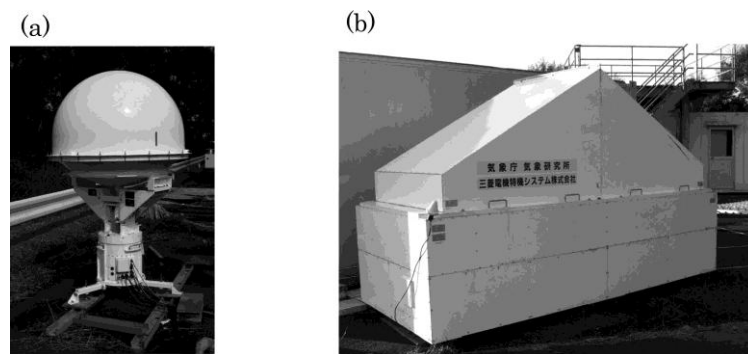


図 1 : (a) 9.8G-R の屋外部の外観。アンテナはフィドームに覆われており、筐体下部の円筒部に送受信 RF 部が設置されている。(b) 35G-R の屋外部の外観。アンテナはスロープを持つレドームに覆われている。筐体下部に送受信 RF 部が設置されている。

9.8G-R・35G-R とも、各レンジにおける時系列信号を保存する機能を有しているため、周波数パワースペクトルの観測が可能である。MUR・9.8G-R・35G-R の周波数パワースペクトルの観測例を図 2 に示す。MUR は、鉛直流変動に伴う、ドップラー速度 (V_d) が -2 m s^{-1} から 3 m s^{-1} に分布する大気エコーを捉えている。MUR は高度 4 km 以下でドップラー速度 (V_d) 6 m s^{-1} 以上の凝結物エコーを一部捉えており、凝結物エコーは、特に高度 3.5 km から 4 km の融解層で顕著である (図 2a)。1.3G-R・9G-R・35G-R とも、凝結物の落下速度分布を MUR より詳細に捉えており、MUR と気象レーダーの同時観測の重要性を示している (図 2b-d)。図 2 に示した降水のケースは強い降水の事例であるため、35G-R では電波減衰により観測高度が融解層に留まっている。弱い降水における観測事例を図 3 に示す。MUR は、ほぼ大気エコーのみを観測している (図 3a)。1.3G-R 及び 9.8G-R では高度 4 km 以下のエコーは弱い、あるいは検出されない (図 3b 及び c) が、粒径の小さい凝結物の検出感度に優れる 35G-R は高度 10 km 付近まで連続して凝結物エコーを検出している (図 3d)。

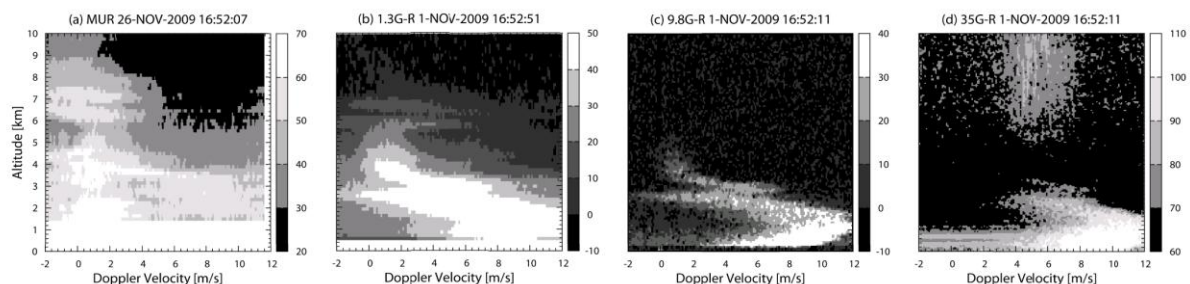


図 2：強い降水時における(a) MUR、(b) 1.3G-R、(c) 9.8G-R、(d) 35G-R で観測された周波数パワースペクトルの観測例。カラースケールは、エコー強度補正を行わない相対値により描画されており、 Z との対応はない。

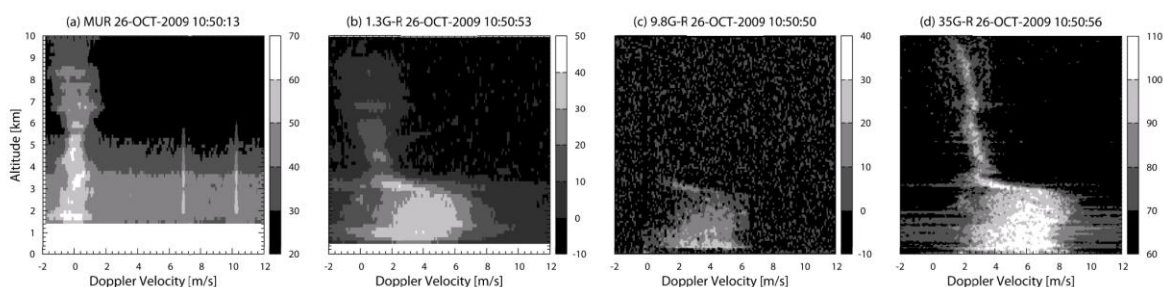


図 3：図 2 に同じ。ただし弱い降水時における観測例。

3. 9.8GHz 帯気象レーダーにおけるレーダー反射因子 (Z) とドップラー速度 (V_a) 観測

9.8G-R は、周波数パワースペクトルを用いたモーメント法により、 Z と V_a の計算が可能である。一方、従来の気象レーダーの多くは、時間方向に隣接する受信信号の位相差から V_a を計算するパルスペア法を用いている。そのため、9.8G-R において、モーメント法とパルスペア法の比較を行った。図 4 に、モーメント法とパルスペア法の各々で計算した、 Z と V_a の散布図を示す。 Z においては、SN 比が 0 dB 以下でばらつきが若干 (1 dB 以内) 出るものの、双方は良く一致しており、相関係数はほぼ 1.0 である。 V_a においても双方は期待される通り良く一致しており、相関係数もほぼ 1.0 である。しかし、SN 比が 2 dB 以下の場合における若干 (0.5 m s^{-1} 以内) のばらつきが見られる。これは、 V_a の計算において、受信信号の SN 比が高い周波数領域のみを取り出して V_a を計算するモーメント法と比較して、パルスペア法の推定精度がより劣化するためである。図 4 に示す結果は、受信信号の周波数パワースペクトルの取得が、PSD のリトリーバルのみならず、気象レーダーの観測量として広く用いられる Z と V_a の推定に有用であることを改めて示している。

9.8G-R において、 Z と V_a を導出し、1.3G-R の観測結果と比較した。 Z の算出に必要な 9.8G-R 及び 1.3G-R の諸元は、アンテナ利得については設計値を、そのほかの値については実測値をもとに算出した。図 5 に 2009 年 10 月 26 日の 0000 JST–0300 JST の期間における Z と V_a の散布図を示す。 Z と V_a の計算にはモーメント法を用いた。図 5(a)において 1.3G-R と 9.8G-R で得られた Z の相関は高く、相関係数は $r = 0.967$ であった。35 dBZ_e 以上で 9.8G-R で得られた Z が 1.3G-R で得られた Z より小さい傾向を示すのは、9.8G-R において

は粒径の大きい凝結物によるミー散乱効果が存在するためであると考えられる。また、30 dBZ_e 以下で 9.8G-R の Z が 1.3G-R の Z と比べて大きく推定されるのは、9.8G-R における信号検出下限に近い領域で受信部増幅器の非直線性が存在するためである。受信部増幅器特性の非直線性は、実測により補正を行う予定である。図 5(b)において 1.3G-R と 9.8G-R で得られた V_d の相関係数は $r = 0.997$ と高く、さらに V_d は測定された全ての速度範囲にわたりよく一致している。この事実は、9.8G-R のドップラー速度測定における大きな特徴である、マグネトロンを送信位相の記録と、IF サンプリングによるドップラー速度算出の妥当性を示している。

4. まとめ

REQUIPP の概要を述べるとともに、1.3G-R と 9.8G-R で得られた Z 及び V_d の比較を行い、9.8G-R で得られた V_d の妥当性を示した。また 9.8G-R の周波数パワースペクトルデータが、モーメント法を用いた V_d の観測精度向上に寄与することを示した。今後は 35G-R についても、解析を進めていく予定である。また、PSD の導出を行う。

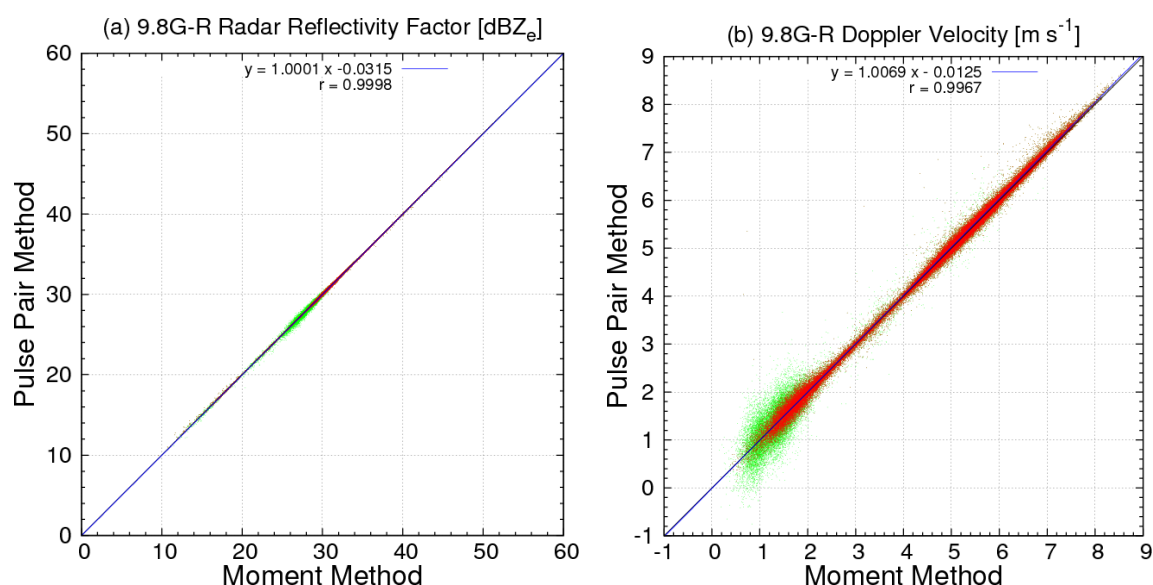


図 4：9.8G-R においてモーメント法とパルスペア法で計算した(a) Z 、(b) V_d の散布図。比較データは、図 4 に示す範囲である。(a) においては、SN 比が 0 dB 以上のデータ点は赤、0 dB 未満のデータ点は緑で示している。(b)においては、SN 比 2 dB 以上の点は赤、2 dB 未満の点は緑で示している。

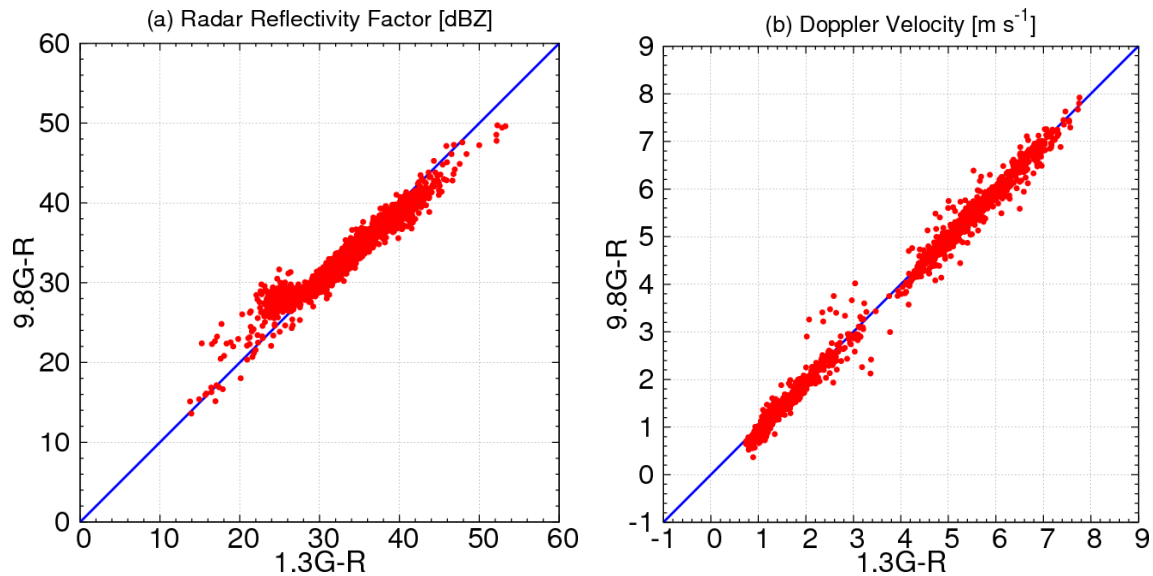


図 5 : 9.8G-R と 1.3G-R で得られた、(a) Z 、(b) V_d の散布図。左図は Z を、右図は V_d の観測結果を示す。高度 1 - 7 km の範囲において、高度 300 m、時間 1 分毎に平均したデータを用いている。

謝辞

REQUIPP 観測キャンペーンは、京都大学生存圏研究所が実施する生存圏科学萌芽研究の助成により実施された（課題名：MU レーダー・新型気象レーダーを用いた降水領域における風速分布の観測的研究）。9.8G-R 及び 35G-R は、文部科学省科学技術振興調整費重要課題解決型研究「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」により開発された。

参考文献

- Cifelli R., and S.A. Rutledge, 1994: Vertical motion structure in maritime continent mesoscale convective systems: Results from a 50-MHz profiler, *J. Atmos. Sci.*, **51**(18), 2631-2652, doi:10.1175/1520-0469(1994)051<2631:VMSIMC>2.0.CO;2.
- Fukao, S., 2007: Recent advances in atmospheric radar study, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **85B**, 215-239, doi:10.2151/jmsj.85B.215.
- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, M. Yamamoto, M. Yamanaka, and S. Kato 1990: MU radar: New capabilities and system calibrations, *Radio Sci.*, **25**(4), 477-485, doi:10.1029/RS025i004p00477.
- Gossard, E. E., 1994: Measurement of cloud droplet size spectra by Doppler radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**(3), 712-726, doi:10.1175/1520-0426(1994)011<0712:MOCDSS>2.0.CO;2.
- Hamazu, K., H. Hashiguchi, T. Wakayama, T. Matsuda, R. J. Doviak, and S. Fukao, 2003: A 35-GHz Scanning Doppler Radar for Fog Observations, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**(7), 972-986, doi:10.1175/1520-0426(2003)20<972:AGSDRF>2.0.CO;2.
- Houze R. A., M. I. Biggerstaff, S. A. Rutledge, and B. F. Smull, 1989: Interpretation of Doppler Weather Radar Displays of Midlatitude Mesoscale Convective Systems, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **70**(6), 608-619, doi:10.1175/1520-0477(1989)070<0608:IODWRD>2.0.CO;2.
- Luce, H., G. Hassenpflug, M. Yamamoto, M. Crochet, and S. Fukao 2007: Range-imaging observations of cumulus convection and Kelvin-Helmholtz instabilities with the MU radar, *Radio Sci.*, **42**, RS1005, doi:10.1029/2005RS003439.
- Nishi, N., M. K. Yamamoto, T. Shimomai, A. Hamada, and S. Fukao, 2007: Fine structure of vertical motion in the stratiform precipitation region observed by a VHF Doppler radar

installed in Sumatra, Indonesia, *J. Appl. Meteor. Clim.*, **46(4)**, 522-537, doi:10.1175/JAM2480.1.

Wakasugi, K., A. Mizutani, M. Matsuo, S. Fukao, and S. Kato, 1986: A direct method for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **3(4)**, 623-629, DOI: 10.1175/1520-0426(1986)003<0623:ADMFDD>2.0.CO;2.

Yamanaka, M. D., H. Hashiguchi, S. Mori, P.-M. Wu, Fadli Syamsudin, Timbul Manik, J.-I. Hamada, M. K. Yamamoto, M. Kawashima, Y. Fujiyoshi, N. Sakurai, M. Ohi, R. Shirooka, M. Katsumata, Y. Shibagaki, T. Shimomai, Erlansyah, Wawan Setiawan, Bambang Tejasukmana, Yusuf S. Djajadihardja, and Jana T. Anggadiredja, 2008: HARIMAU Radar-Profiler Network over the Indonesian Maritime Continent: A GEOSS Early Achievement for Hydrological Cycle and Disaster Prevention, *Journal of Disaster Research*, **3(1)**, 78-88, 2008.