HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ミリ波雲レーダFALCON-Iの開発 ： 現状と展望
Author(s)	鷹野, 敏明; 高村, 民雄
Description	Ⅳ. リモートセンシングで観るエアロゾル・雲相互作用
Citation	低温科学, 72, 219-224
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55058
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_024.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 72 （2014） 219-224

ミリ波雲レーダ FALCON-I の開発
── 現状と展望 ──

鷹野　敏明[1)]，高村　民雄[2)]

地球温暖化に影響を与える高層の薄い雲を調べるには，周波数の高い電波を用いるレーダによる観測が適している．気象観測でこれまでに使用されている最も高い周波数 95 GHz を用いた千葉大学ミリ波雲レーダ FALCON-I は，高い感度と空間・時間分解能を備えている．FALCON-I の概要と観測例，雲底からの降雨が約 200 m 落下して終端速度の到達する様子，積乱雲の発達過程で上昇する雲の内部運動速度幅が 10 m/s に達している様子，衛星搭載雲レーダとの同時観測で良い一致を示す例，などの結果を示し，今後の展望を概観する．

Development of Millimeter Wave Cloud Profiling Radar FALCON-I
── Present Stage and Future Plan ──

Toshiaki TAKANO[1] and Tamio TAKAMURA[2]

Observation of clouds using high frequency radars is one of powerful methods for investigating thin and high-altitude clouds, which affect greenhouse effect. FALCON-I is a millimeter wave cloud profiling radar of Chiba University at 95 GHz, which is the highest frequency for normal meteorological use and has high sensitivity and spatial-, temporal-resolution. The system of FALCON-I and examples of observations are presented; accelerating rain drops to the terminal velocity in about 200m from the cloud bottom, Doppler velocity width reaches 10 m/s in cloudlets in ascending phase of a cumulonimbus, good correspondence of cloud profiles obtained FALCON-I and satellite observations, and so on. Future developments of FALCON are also mentioned.

1．はじめに

竜巻や集中豪雨など日本において近年大きな被害を出している局所的な気象変化を，高い感度と空間分解能で捉えることは，気象災害の予防と軽減のために重要な課題である．また，地球温暖化に影響を与える，高層の薄い雲の基本的性質などを詳しく調べることは，極めて重要な課題である．このような課題に寄与する大気現象や雲などの詳細観測には，周波数の高い電波を用いるレーダによる観測が最も適している．光や赤外線による受動観測では，雲の内部構造と運動を捉えることができず，また，可視光付近のライダーなどの能動観測では，雲の光学的厚みが厚くなると，やはり内部のデータを得ることが難しい．しかし，従来多く用いられている，C バンド（周波数 5 GHz 帯）や X バンド（周波数 10 GHz 帯）レーダでは，雨雲は捕捉できるが比較的薄い雲に対

連絡先
鷹野　敏明
千葉大学大学院工学研究科
e-mail：takano@faculty.chiba-u.jp
1）千葉大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Chiba University
2）千葉大学環境リモートセンシング研究センター
Center ofr Environmental Remote Sensing, Chiba University



図 1：ミリ波雲レーダ FALCON-I．周波数は 95 GHz で，送受信は直径 1 m のアンテナ 2 台をそれぞれに用いている．
Fig. 1：Cloud profiling radar FALCON-I. It has two 1-m diameter antennas which transmit and receive radio waves at 95 GHz.

しては感度が十分でなく，捉えられない．

このような背景から，我々は，気象観測でこれまでに使用されている最も高い周波数といえる 95 GHz を用いた，高感度，高空間・時間分解能を備えたミリ波雲レーダ FALCON-I（図 1）を開発し，これを用いて様々の場所で種々の雲の観測を行ってきた．

2. FALCON-I の開発

千葉大ミリ波雲レーダ FALCON-I（FMCW（Frequency Modulated Continuous Wave）Radar for Cloud Observations）は W バンド 95 GHz のレーダで，高い空間分解能と感度が特徴である．FALCON-I は，（独）情報通信研究機構（NICT）の 95 GHz 雲レーダ SPIDER[1)~3)] のシステムを参考にして，同グループの協力の下に設計・製作された．SPIDER はパルス方式のレーダであるが，FALCON-I は周波数変調連続波（Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW）方式を採用している．その原理を図 2 に示す．送信波（実線）は，中心周波数 f_0 から $\pm F$ の幅で直線的に変調される．目標物の雲に散乱されて受信アンテナに達する受信波（破線）は，送信波から t の時間遅れで戻ってくる．この受信信号を送信信号と混合してビート周波数 f_b を得て，これを FFT することにより，雲のレンジング方向のプロファイルを得ることができる．FALCON-I のブロックダイアグラムを図 3 に，性能の SPIDER との対比を表 1 にまとめる[4)~7)]．

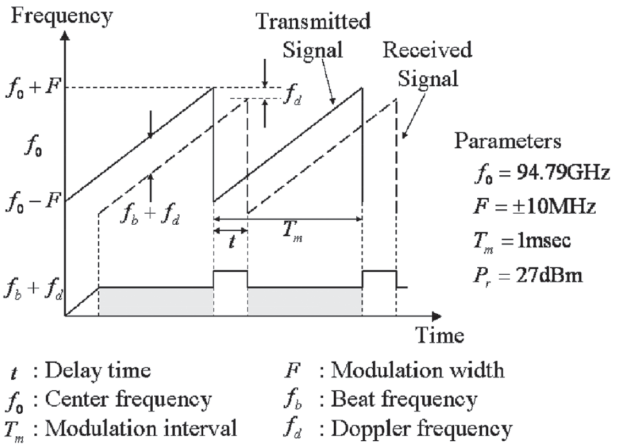


図 2：FMCW 方式の原理．
Fig. 2：Principle of FMCW Type Radar.

表 1：FALCON-I と SPIDER の比較．
Table 1：Comparison of Two Millimeter-wave Radars.

	FALCON-I	SPIDER
Purpose	Ground based Obs.	Airborne Obs.
Obs. Direction	Zenith	Downward to Horizon
Type of radar	FM-CW	Pulse
Antenna	1 m×2 antennas	0.4 m×1 antenna
Frequency f_0	94.79 GHz	95.04 GHz
Output Power P_t	0.5 W (27 dBm)	1600 W (62 dBm)
Duty Rate	Continuous	1/100～1/1000
Spatial Resolution $\Delta r \times \theta$	9.1 m×0.2°	150 m×0.5°
Temporal Resolution	1 msec	1 msec
Sensitivity (at 5km)	−34 dBZ	−35 dBZ

3. 可搬型装置である FALCON-I の有用性

FALCON-I は可搬型装置であり，トラックに搭載して目的地に行き，100 V 20 A 電源のみで立上げ 30 分で観測体制に入ることができる．これまで，奄美大島，沖縄などでの観測を実施してきた．また，コンテナに入れて，（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC）の海洋地球研究船「みらい」に搭載し，太平洋，インド洋，北極海での観測を 2004～2011 年に実施してきた（図 4～7）．さらに最近では，発電機を用いることで，100 V 商用電源のない場所でも，観測を実施することができるようになっている．FALCON-I のこの可搬性は，局所的現象

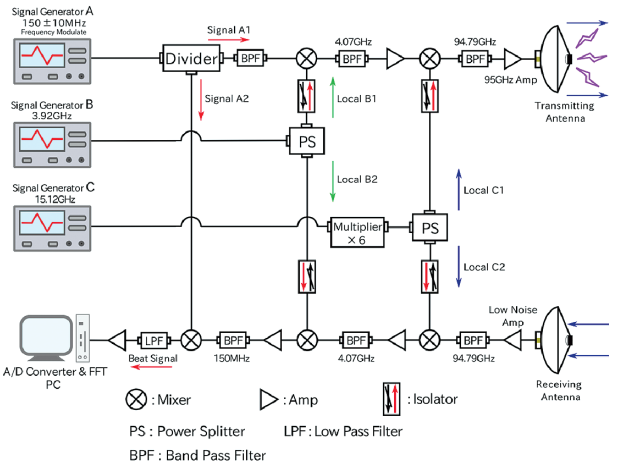


図 3：FALCON-I のブロックダイアグラム．
Fig. 3：Block Diagram of FALCON-I.



図 4：トラックに搭載した FALCON-I．後方の白いコンテナは，船舶搭載用のコンテナ．
Fig. 4：FALCON-I installed on a truck. The container behind the truck is housing of FALCON-I for MIRAI observations.



図 5：JAMSTEC の研究船「みらい」（上）に搭載した FALCON-I（下の写真，矢印）．
Fig. 5：Research vessel “MIRAI” belong to JAMSTEC (upper panel) and FALCON-I container on board of MIRAI (lower panel).

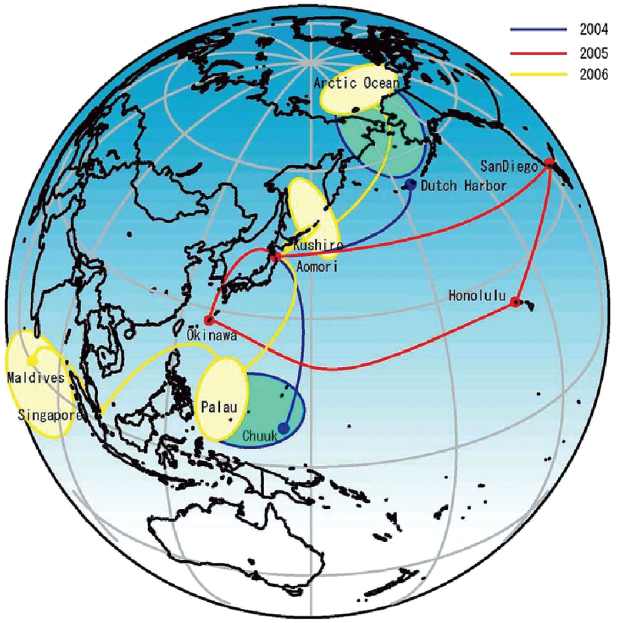


図 6：FALCON-I 搭載の JAMSTEC の研究船「みらい」の航路．
Fig. 6：Cruise track of “MIRAI” of JAMSTEC on which FALCON-I installed.



図 7：沖縄本島北端の国立環境研究所（NIES）辺戸観測所での FALCON-I（2008 年春の集中観測）．
Fig. 7：FALCON-I set in the Cape Hedo Station in Okinawa, Japan, of National Institute for Environmental Studies (NIES) during the campaign in spring, 2008.

の観測や衛星通過との同期観測など，様々のニーズに対応できる点で，極めて有用と言える．

4. FALCON-I の性能と観測例

前節までに述べた FALCON-I の特長である，可搬性と高感度および高空間分解能を発揮している観測例を，以下に紹介する．

4.1　積乱雲の観測―2010 年 7 月 25 日

図 8 に，2010 年 7 月 25 日の FALCON-I による積乱雲の観測例を示す．a，b の時刻はアンビルが捉えられていて，ドップラスペクトルを見ると速度幅 1〜2 m/s を持つことがわかる．c の時刻は雨の降り始めで，高度 4.5 km の雲底から高度幅 200 m 程度の薄い層で，できたばかりの雨滴が落下して加速していることがわかる．

4.2　積乱雲の観測―2012 年 8 月 30 日

図 9 に，2012 年 8 月 30 日千葉県君津市ロマンの森での集中観測でのデータを示す（この観測は防衛大小林文明氏らとの共同研究）[8,9]．この日は積乱雲が観測場所の上空で発達したのを FALCON-I で捉えることができた．12：00〜12：40（JST）頃まで高度 1–2 km に積雲が見えていて，12：40 直前に高度 4 km に達する積乱雲が FALCON-I の直上に掛かった様子がわかる．12：40 のドップラースペクトル（図 9．左下図）を見ると，高度 2.5〜4 km にかけて厚みが 200 m 程度で高度間隔が 500 m 程度の層が A，B，C の 3 層に見えている．これらのドップラ速度は幅が 12 m/s 程度と広く，中心速度は 4 m/s で最大速度は 9 m/s で上昇していることがわかる．これは，速度幅とその大きさから，発達する積乱雲のモクモクと上昇する，いわゆる Tuft（図 10．小

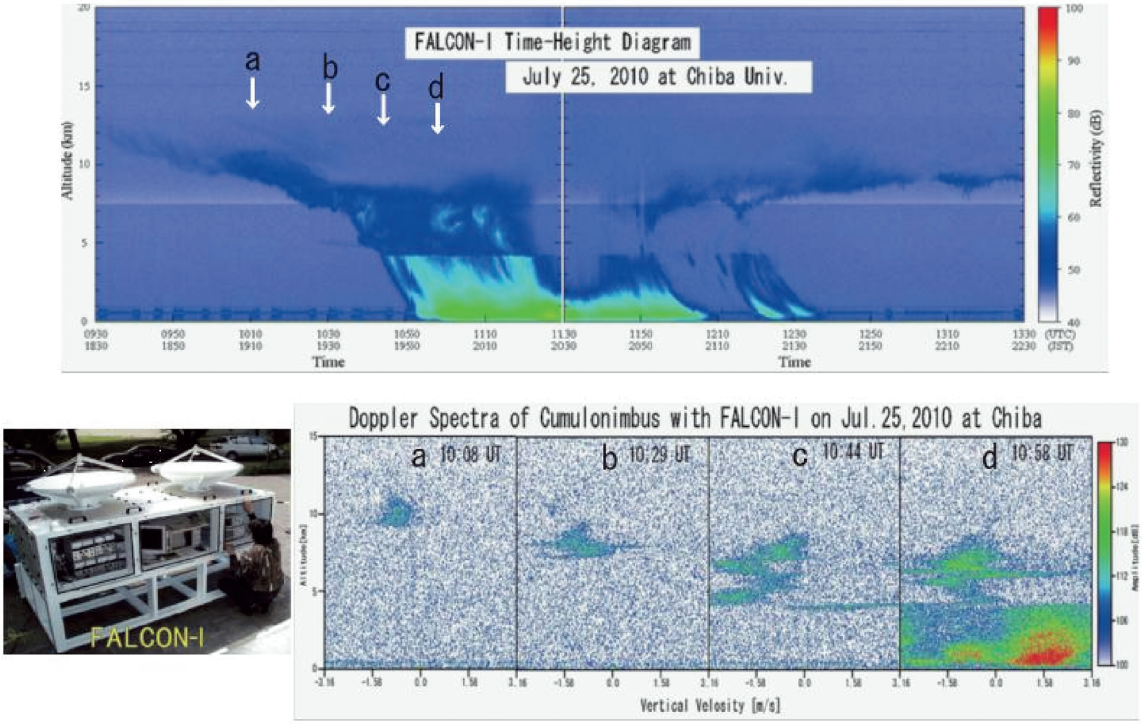


図 8：FALCON-I での 2010 年 7 月 25 日の積乱雲の時間－高度強度図（上の図）と，a～d の時刻のドップラスペクトルマップ（下の図）．スペクトルマップの横軸はドップラ速度で，ゼロが中央で±3.2 m/s の速度範囲である．

Fig. 8：Examples of cloud radar FALCON-I.　Upper panel shows the time-height cross section of radar reflectivity (dB) for the cumulonimbus over Chiba University at July 25, 2010, and the lower panel shows the Doppler spectra of the same day. The alphabets “a” to “d” in the upper panel correspond to the same ones of the lower panels.

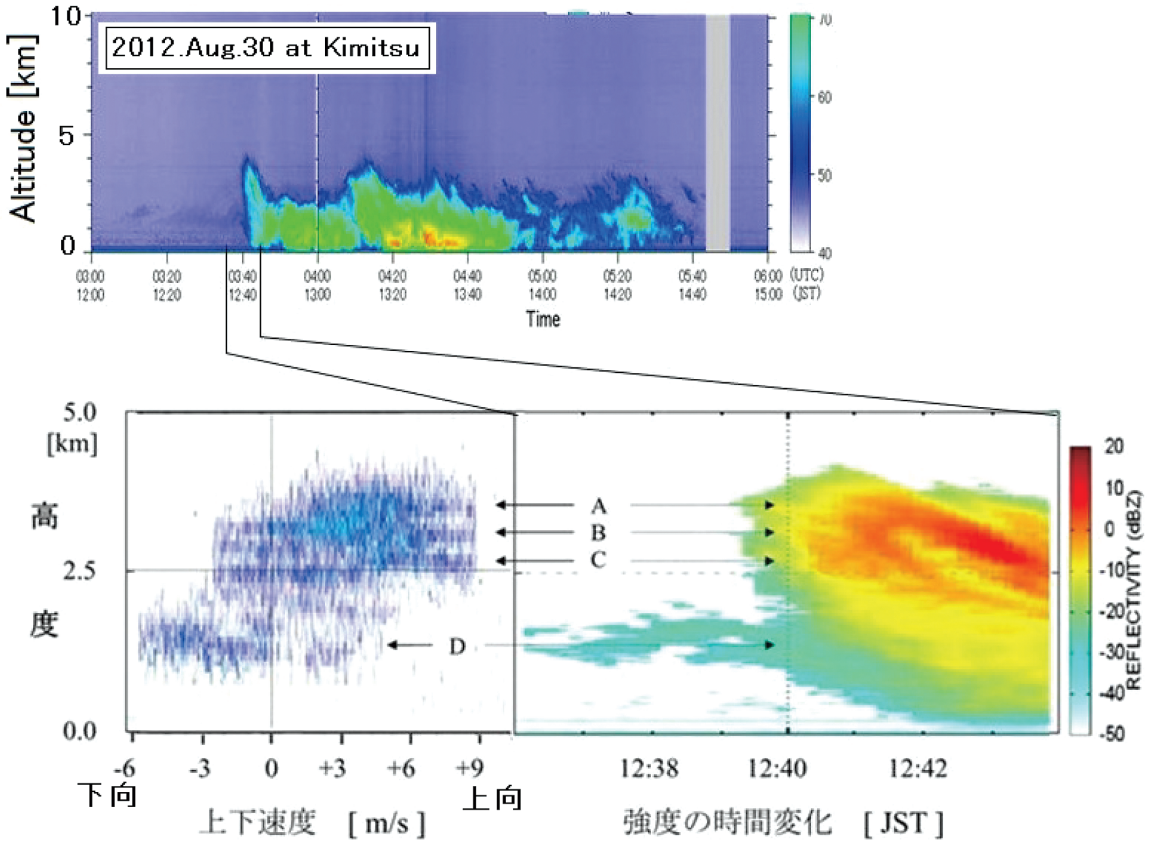


図 9：FALCON-I での 2012 年 8 月 30 日の積乱雲の時間－高度強度図（上段），その拡大図（下段右）と 12：40（JST）でのドップラ図（下段左）．高度 2.5-4 km にある A～C の構造は，Tuft 3 個を貫いて見ていると考えられる．

Fig. 9：Time-Height Intensity map obtained with FALCON-I in Aug. 30. 2012 (upper panel) and its enlarged map (lower right panel). Doppler velocity map (lower left panel) shows A-C structures in 2.5-4 km in altitude, which are thought to be three tufts observed with the FALCON-I needle beam.

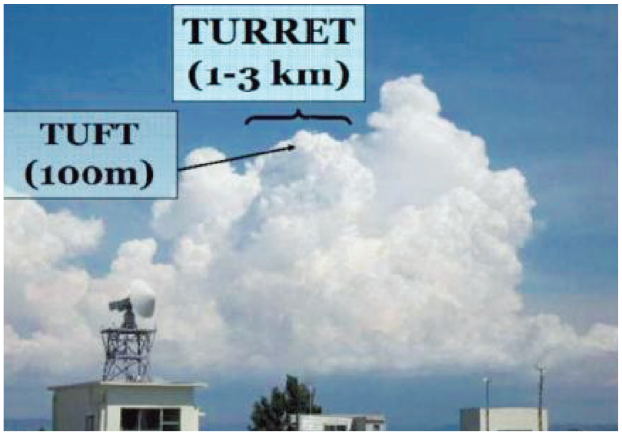


図 10：積乱雲を構成する Turret（径 1–3 km 程度）とその中の構造 Tuft（径 100–300 m 程度）
Fig. 10：Turrets (1–3 km) and Tufts (100–300m) in a cumulonimbus.

林氏提供）と呼ばれる構造 3 個を，FALCON-I のビームが貫いて見ていると解釈することができる．

4.3　衛星 CloudSAT との同時観測

FALCON-I は既に述べたように可搬型の装置である．95 GHz 雲レーダを搭載した衛星 CloudSAT との同時観測を行うには，その軌道直下での観測が必要である．図 11 に，2008 年 4 月 11 日に沖縄県辺戸で行った CloudSAT と FALCON-I の同時観測結果を示す（図 7，山口潤氏提供）．このキャンペーン中には，CloudSAT は 6 回上空付近を通過したが，そのうち 4 月 11 日は特に近く，CloudSAT の軌道直下から約 100 m の地点で FALCON-I の観測を行うことができた．CloudSAT のフットプリントは 1.3 km×1.7 km で，FALCON-I のビームは 0.2 度なので，高度 5 km で観測空間は約 15 m と小さい．観測している空間体積は大きく異なるが，図 11 では両者のデータは非常によく一致していることがわかる．

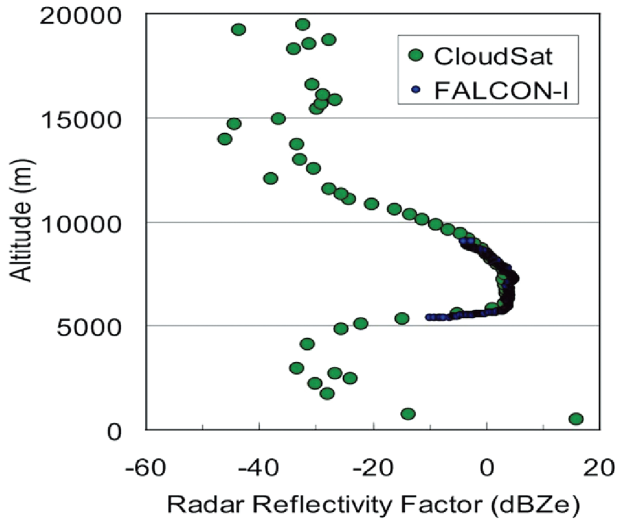


図 11：沖縄辺戸観測所での FALCON-I と ClouSAT の同時観測結果（2008 年春の集中観測）．
Fig. 11：Example of simultaneous observations of FALCON-I and CloudSAT at the Cape Hedo Station in Okinawa during the campaign in spring, 2008.

5．雲レーダ FALCON の今後の発展方向

雲レーダ FALCON-I の高い感度や分解能は，これまでに十分示されてきた．今後は，そのデータを十分生かして，他の観測機器のデータと統合することで，雲物理量の導出と解析に貢献することが必要である．

FALCON-I の装置としての発展は，①レーダ観測のみならず受動観測を行うことで，水蒸気や雲の定量化ができるようにする，②レーダ（能動）観測と受動観測組み合わせることで，大気中の水の様相を精度よく捉えるようにする，③現在の 2 アンテナを 1 アンテナ方式にすることで，より早く機動的に走査を行えるようにする，などが考えられる．このような改良により，例えば，高速の走査により竜巻などの速い現象を詳細に捉えることが可能になる．

FALCON-I の開発と製作・運用では，東京大学の中島映至，情報通信研究機構の熊谷博，大野裕一，堀江宏昭，各氏に多大な援助を頂きました．深く感謝します．

参考文献

1）Horie, H., T. Iguchi, H. Hanado, H. Kuroiwa, H. Okamoto, and H. Kumagai, 2000: Development of a 95-GHz cloud profiling radar (SPIDER) — Technical aspects, *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, **E83-B(9)**, 2010.

2）Kumagai, H., H. Okamoto, H. Horie, H. Kuroiwa, and S. Iwasaki, 2001: Vertical profiling of liquid cloud properties retrieved from 95-GHz cloud radar and microwave radiometer, 2001 *Asia-Pacific Radio Science Conference* (Tokyo), **PF-27**, 333.

3）堀江宏昭，黒岩博司，大野裕一，2002：航空機搭載雲レーダ（SPIDER）の観測，*通信総合研究所季報*，**48(2)**，71–80．

4）Takano T., J. Yamaguchi, H. Abe, K. Futaba, S. Yokote, Y. Kawamura, T. Takamura, H. Kumagai, Y. Ohno, Y. Nakanihsi, and T. Nakajima, 2008: Development and Performance of the Millimeter-Wave Cloud Profiling Radar at 95 GHz: Sensitivity and Spatial resolution, *IEEJ Trans., FM*, **128(4)**, 257–262 (in Japanese), translated to *Electronics and Communications in Japan*, **93(3)**, 2010.

5）Abe, H., F. Yamazaki, J. Yamaguchi, Y. Kawamura, Y. Nakanishi, T. Takano, T. Takamura, and Y. Ohno, 2009: Doppler observations with the millimeter-wave cloud profiling radar FALCON-I", *IEEJ Trans., FM*,

129(4), 177–182 (in Japanese).

6）Yamaguchi J., T. Takano, Y. Nakanishi, H. Abe, Y. Kawamura, S. Yokote, H. Kumagai, Y. Ohno, H. Horie, 2009: Evaluation of radar reflectivity (Z) for FMCW millimeter-wave cloud radar FALCON-I", *IEEJ Trans., FM*, **129(4)**, 183–189 (in Japanese).

7）Yamaguchi, J., T. Takano, T. Takamura, Y. Nakanishi, Y. Kawamura, H. Abe, H. Horie, and Y. Ohno, 2009: Evaluation of parallax on the dual-antenna 95 GHz MMCR FALCON-I", *IEICE Trans*, J92-C, **12**, 806–812, (in Japanese).

8）Kobayashi, F., T. Takano, and T. Takamura, 2011: Isolated cumulonimbus initiation observed by 95-GHz FM-CW radar, X-band radar, and photogrammetry in the Kanto region, Japan. *SOLA (Scientific Online Letter on the Atmosphere)*, **7**, 125–128.

9）Kobayashi, F., A. Katsura, Y. Saito, T. Takamura, T. Takano, and D. Abe, 2012: Growing speed of cumulonimbus turrets, *J. Atmospheric Electricity*, **32(1)**, 13–23.