

関東平野において夏期の午後に発生する 局地降水の発生環境場に関する研究

野村昇平*・竹見哲也

* 現 成田国際空港株式会社

要 旨

本研究では、夏期の午後に関東平野において総観規模擾乱の影響が弱い状況下で発生する局地豪雨を対象とし、発生環境場の特徴を調べた。事例抽出にはアメダスデータを使用した。環境場の計算にはMSMデータを用いた。環境場として11種の安定度指数および気温・相対湿度を計算し、非降水日・降水日・強雨日におけるカテゴリ間の差の有意性をT検定により調べた。非降水日と降水日（強雨日）の差を最も有意に表す安定度指数はKIであることが分かった。また、気温・相対湿度について調べた結果、降水日（強雨日）は非降水日より中層の気温が有意に低く、下層から中層の相対湿度が有意に高いことが明らかとなった。

キーワード：局地豪雨，関東平野，夏期，MSMデータ，統計解析

1. はじめに

人口や社会基盤が集中した都市域において、局地豪雨を事前に予測し早期に警戒することは被害軽減のために欠かせない。これまでの気象予報においては、低気圧・前線・台風などの総観規模擾乱に起因する降水の予測精度は絶えず向上してきた。しかし、総観規模擾乱の影響があまり顕著でなく突発的に発生する降水の予測精度は、総観規模擾乱に起因する降水のそれと比べると不十分であり、予測精度の向上が望まれる。予測精度の向上には局地豪雨という現象の一般的な特徴を理解することが重要である。

関東地方における局地豪雨については、これまで多くの研究がなされてきた。Seko et al. (2007) は、1999年7月21日関東平野に豪雨をもたらした雷雨の構造を調べ、雷雨の発達・維持には中層の冷氣移流が重要な役割を果たしていることを明らかにした。しかし、これは1事例の解析結果であり、中層の冷氣移流がこの地域で発生する全ての雷雨において必要な条件であると結論することはできない。

豪雨をもたらす雷雨の環境場を診断する指標として、CAPE・CIN・SSI・LIなどの安定度指数が世界で広く使われている (Reap and Foster 1979; Bluestein and Jain 1985; Fuelberg and Biggar 1994; Huntrieser et

al. 1997; Kodama and Barnes, 1997)。

Chuda and Niino (2005) はラジオゾンデデータを用いて日本における安定度指数の空間分布および季節変化の特性を調べた。その結果、安定度指数の値は地域によって異なること、また、季節によっても異なることが分かった。したがって、安定度指数を使用する際は、地域および季節を限定する必要がある。

夏期に関東平野で発生する雷雨の環境場に関する研究はいくつか行われている。Yonetani (1975) はつくば（館野）でのラジオゾンデデータによる観測データを使用し、夏期の関東平野北部を対象に、雷雨が発生した日における環境場を調べた。その結果、雷雨の発生と大気の安定度には密接な関係があることを示した。Taguchi et al. (2002) およびKawano et al. (2004) は、いくつかの安定度指数について関東平野で発生する雷雨の環境場を診断する際の有用性を統計的に評価した。Kawano et al. (2004) は総観規模擾乱の影響が弱い状況において発生する気団雷を対象としている。その結果、安定度指数によって有用性に差があり、特に、SSI・SLI・KIの有用性が高いことが分かった。

これらの研究で使用したラジオゾンデデータは、館野で観測されたものであり、この1地点以外のデ

ータは使用されていない。館野は東京から北東に約50km離れた場所に位置しており、この1地点のデータが関東平野全域を代表しているかどうか疑問が残る。また、使用したデータの期間はTaguchi et al. (2002) で3年, Kawano et al. (2004) で5年と短い。よって、より長い期間のデータを用いて解析を行うことで、解析結果の時空間的信頼性を得ることも大事である。

一方、気象庁の数値予報で用いられているメソスケールモデル (MSM) は常に発展を続けており、その予測精度も向上し続けている。近年ではメソスケールの解析が可能となり、解析および予測データは対流場の解析にも有効となった。また、MSMデータは等間隔に並んだ格子点データであり、広範囲な領域を解析の対象とすることができる。そのため、MSMデータは領域内全域の環境場を評価する際に有用性が高いと想定される。

そこで本研究では、夏期の関東平野において総観規模擾乱の影響が弱い日の環境場の計算にMSMデータ (2002年～2010年：9年分) を利用し、既往の研究ではなかったような期間・領域での解析を行う。さらに、35年分 (1976年～2010年) のラジオゾンデデータ (館野) を用いて解析を行い、MSMデータを使用した解析から得られた結果の妥当性を検討する。

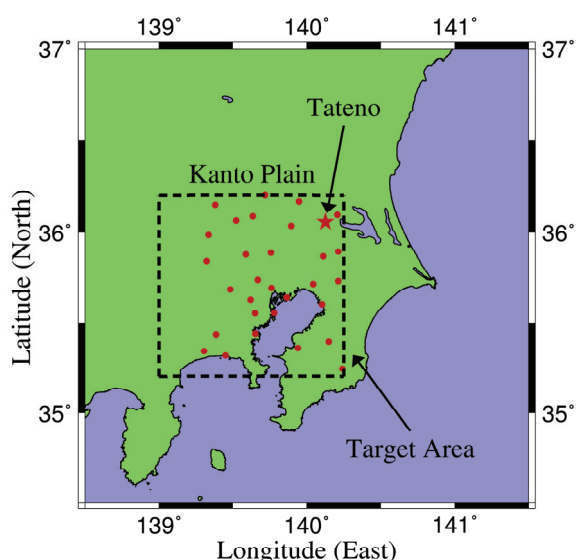


Fig. 1. Map in and around the Kanto Plain. A broken line indicates the analysis area, red points the positions of the AMeDAS stations, and a star the position of the AMeDAS and radiosonde site at Tateno.

2. 使用データ・解析方法

本研究では、解析領域として関東平野を覆う約100km四方の領域を選んだ (北緯35.20度～36.20度, 東経139.00度～140.25度) (Fig. 1)。事例抽出には観測データを使用した。地表の観測データとしてAMeDASデータを、上空の観測データとして館野のラジオゾンデデータを使用した。使用したAMeDAS観測地点及び館野の位置を Fig. 1 に示す。地形の影響を最小限に抑えるためにAMeDAS観測地点は標高100m以下のものを選んだ。一方、環境場の計算にはMSMデータを使用した。対象期間はMSMデータが存在する2002年～2010年の7, 8月である。環境場として大気の安定度を求める際に使用するMSMデータの精度を確かめるために、0900JST (JST: Japan Standard Time (JST = UTC - 9 hours)) における館野のラジオゾンデデータを使用した。本研究で計算した安定度指数は、対流有効位置エネルギー (CAPE: Convective Available Potential Energy), 対流抑制 (CIN: Convective INhibition), 持ち上げ凝結高度 (LCL: Lifting Condensation Level), 自由対流高度 (LFC: Level of Free Convection), 中立浮力高度 (LNB: Level of Neutral Buoyancy), ショワルター安定指数 (SSI: Showalter Stability Index), リフトド指数 (LI: Lifted Index), K指数 (KI: K-Index), トータルトータルズ指数 (TT: Total-Totals Index), 気温減率 (TLR: Temperature Lapse Rate), 可降水量 (PW: Precipitable Water) の11種類である (Bluestein 1993)。以上の安定度指数は過去の研究においても広く用いられている。本研究で使用するMSMデータは2002年～2005年と2006年～2010年で水平解像度・鉛直層の数・時間解像度が異なる。水平解像度は2002年～2005年で10km×10km, 2006年～2010年で5km×5kmである。鉛直層の数は2002年～2005年で14層, 2006年～2010年で16層である。時間解像度は2002年～2005年で6時間, 2006年～2010年で3時間である。本研究は午後に発生する降水を対象とし、発生前の環境場を調べるために、0900JSTを対象時刻とした。

午前中晴れていたにも関わらず、午後に降水が発生した事例を抽出するために、以下の4つの条件を順番に適用した。

[1] 使用する観測地点 (31地点) のうち1地点以上で日最高気温が30 [°C]以上である日 (AMeDASの気温データを使用)。

[2] 使用する観測地点 (31地点) の全てにおいて午前中 (0000JST ～ 1200JST) に降水が観測されなかった日 (AMeDASの降水量データを使用)。

[3] 梅雨前線・台風・温帯低気圧などの総観規模擾乱の影響が弱い日 (気象庁の梅雨入り・梅雨明け

データ・台風経路図・地上天気図を使用) (Kanae et al. (2004))。

[4] AMeDASデータとMSMデータで降水の有無が一致した日 (AMeDASの降水量データ・MSMの降水量データを使用)。

以上の条件により124日が抽出された。次に、この124日について午後の最大降水量を基にカテゴリー分類を行った。降水がある日とは、解析領域内の任意の1地点以上の地点で降水があった場合のことであり、一方降水が無い日とは、解析領域内のすべてのAMeDAS地点で降水量が無かった場合のことである。まずは、午後に降水が無かった日とあった日で分類した。降水が無かった日をNo-Rain (以下、略してN)、あった日をRain (以下、略してR) とし、それぞれ84日、40日が該当した。さらに、Rのうち午後の時間最大降水量が10mm以上であった日をStrong-Rain (以下、略してS) として分類した。Sは22日である。それぞれの日の安定度指数は、解析領域内におけるMSMの各格子点値を平均して求めた。そして、各カテゴリー毎に安定度指数の平均値を求め、N・R・Sそれぞれの値とした。カテゴリー間の安定度指数の比較には統計解析を用いた。

本研究では、MSMデータの精度を確かめるために、館野のラジオゾンデデータとMSMの格子点のうち館野に最も近い地点のデータを比較した。上記の4つの条件により抽出された124日を対象に11種類の安定度指数を計算し各事例における両者の値を比較した。その結果、どの安定度指数においても両者の相関は高く、ほとんど差が無いことが分かっている (図省略)。よって、MSMデータは実際の大気状態をよく表せており、実事例を対象とする本研究を行う上で使用するに相応しいデータであるといえる。

格子点データであるMSMデータは空間解像度が高い一方、データを使用できる期間が9年分と短い。そこで、各安定度指数の頻度分布について、9年分のMSMデータを使用して計算したもの (124日) と1976年～2010年の35年分のラジオゾンデデータが使用して計算したもの (699日) を比較した。その結果、ど

の安定度指数においても両者は同様の頻度分布を示しており、本研究で使用した9年分のMSMデータは十分な時間代表性を持っていることが分かった。

ある要素の平均値についてカテゴリー間に差が表れた場合、その有意性を評価することは重要である。本研究ではRとN、またSとN (以下、R-N、S-Nと記述する) について、カテゴリー間に生じた差の統計的有意性を定量的に評価した。有意性の解析のために、本研究ではT検定を行った。T検定とは2つの母集団の平均値の比較に関する検定手法であり、次の式で表される検定統計量Tを使用する (以降、T値と呼ぶ)。

$$T = (X_A - X_B) \left(\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

カテゴリーA、Bについてと X_A と X_B はそれぞれの平均値を、 σ_A と σ_B は標準偏差を、 n_A と n_B は事例数を表す。Tの絶対値が大きいくほど有意性も大きくなる。本検定は有意水準5[%] (信頼区間95[%]) で行う。有意水準は比較する2つの母集団のサンプル数 (事例数) で決まる。MSMデータを使用したR-N間およびS-N間における解析の有意水準は1.99である。式(1)で求まるTの絶対値が有意水準以上の時、2つの母集団における平均値の差に有意性が認められる。逆にTの絶対値が有意水準に満たない時、有意性が認められない。

3. 結果・考察

Fig. 2は各カテゴリーにおけるいくつかの安定度指数の箱髭図である (0900JSTのMSMデータを使用)。箱髭図は母集団の頻度を表す図であるが、最

大値・75[%]値・中央値・25[%]値・最小値・平均値が明確に示されている。LFC・KI・TTは値が大きいくほど、SSIは値が小さいほど不安定である。カテゴリー間において最も不安定な値 (LFC・KI・TT: 最大値, SSI: 最小値) の差は小さいが、最も安定な値

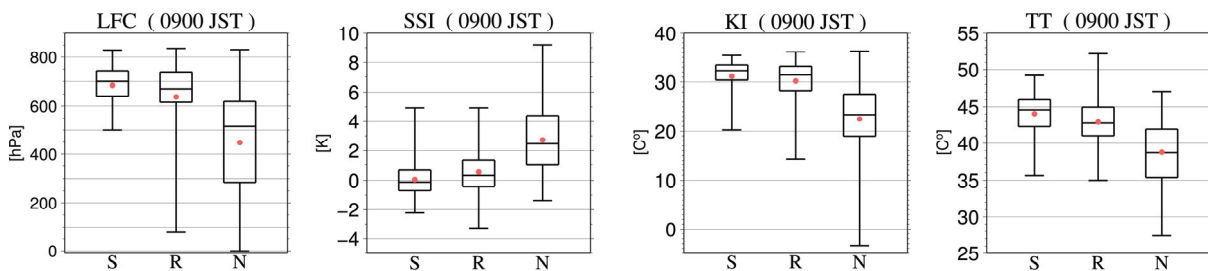


Fig. 2. The box-and-whisker plot of LFC, SSI, KI, and TT at 0900JST for the S, R, and N days. The whiskers at the upper and lower ends indicate the maximum and the minimum, respectively. The top and bottom lines of each box mean the 75 and 25 percentiles, respectively. The middle line and the point in each box show the median and the mean, respectively.

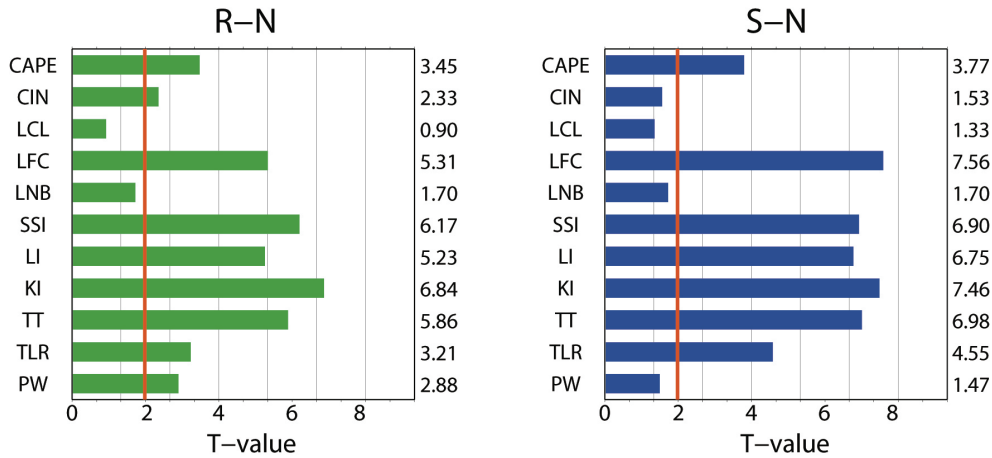


Fig. 3. The T values of stability indices and parameters for using the MSM data at 0900 JST between 2002 and 2010. The green and blue graphs express the results of R-N and S-N, respectively. The figures at the right out of graph are the T values of each stability indices and parameters. The threshold for the statistical significance is indicated by a red line.

(LFC・KI・TT: 最小値, SSI: 最大値)には大きな差が表れた。以上のことから、いくら待機が不安定であっても降水が発生するとは限らないと言える。逆にRおよびSの最小値がNのそれより大幅に大きいことから、LFC・KI・TT・SSIが安定な値を示す日では降水が発生する可能性が低いと考えられる。さらに重要な点は、R-N・S-N間における中央値・平均値および25[%]値・75[%]値の差が顕著に大きいことである。この結果から、非降水日Nと比べると降水日R・Sは平均的に不安定な大気状態であったことが示唆される。

次に、Fig. 2の箱髭図で見られる平均値の差にどの程度の有意性があるのか。MSMデータによる安定度指数の数値に対して有意性を示すためにT検定を行った。Fig. 3はR-NおよびS-Nのカテゴリー間の各安定度指数のT値を示す。いずれの安定度指数においてもR・Sの方がNより不安定であった。したがって、Fig. 3で示したT値が大きいほどR・Sの不安定度が高い。また、赤線は本検定の有意水準(=1.99)を示しており、T値がこれを超えたときに有意な差異が認められる。LCL・LNBはT値が1.99より小さいため、両比較において有意な差異がない。S-NにおけるCIN・PWについても同様のことが言える。一方で、他の安定度指数はT値が1.99以上であり、カテゴリー間に有意な差異が認められる。また、それぞれのT値はR-NよりS-Nで大きい。この結果から、強雨の環境場は弱雨の環境場より不安定であることが示唆される。各安定度指数のT値に注目すると、R-Nにおいて最もT値が大きい安定度指数はKIである。LFC・SSI・LI・TTはR-NおよびS-Nで大きなT値($T \geq 5$)を示し、CAPEとTLRのT値は中程度に大きい($T = 3 \sim 5$)。

上記のT検定において顕著な有意性を示したSSI・

LI・KI・TTは、雷雨の発生を診断する安定度指数として広く使われている。例えば、KIは次の式で表される。

$$KI = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (2)$$

Tは気温、 T_d は露点温度、下付き数字はそれぞれの高度[hPa]である。このように、KIは大気下層の気温減率と700[hPa]以下の温度で定義される。考慮している気圧高度は異なるが、SSI・LI・TTもKI同様に気温減率と湿度で定義される指数である。よってここでは、気温と相対湿度の鉛直分布の特徴を明らかにし、安定度指数の解析結果と関連付ける。Fig. 4の(a)・(b)は各カテゴリーにおける気温・相対湿度の鉛直分布である。また、(c)・(d)はそれぞれ(a)・(b)で表れたR-N(緑破線)およびS-N(青破線)の差を示す。RおよびSの地表付近の気温はNのそれより僅かに高い(約+0.5[K])。しかし、700[hPa]~400[hPa]では1[K]以上低い(Fig. 4(c))。一方、R・Sの相対湿度はほぼ全層に渡ってNより高く、そのピークはそれぞれ500[hPa]、700[hPa]で+15[%]、+16[%]である(Fig. 4(d))。次に、R-N・S-Nの差の有意性を調べるために、高度別にT検定を行った。Fig. 4の(e)・(f)はそれぞれ気温・相対湿度についてR-N(緑破線)およびS-N(青破線)におけるT値の鉛直分布を示す。R・Sの気温・相対湿度がNより大きい(小さい)時にT値は正(負)とした。また、赤破線は本検定の有意水準(=±1.99)を示している。気温は650[hPa]~450[hPa]においてT値が有意水準(=-1.99)より小さく、500[hPa]で負の最大値をとる($T = -3.5$) (Fig. 4(e))。これはRおよびSにおける中層の気温がNより有意に低いことを示

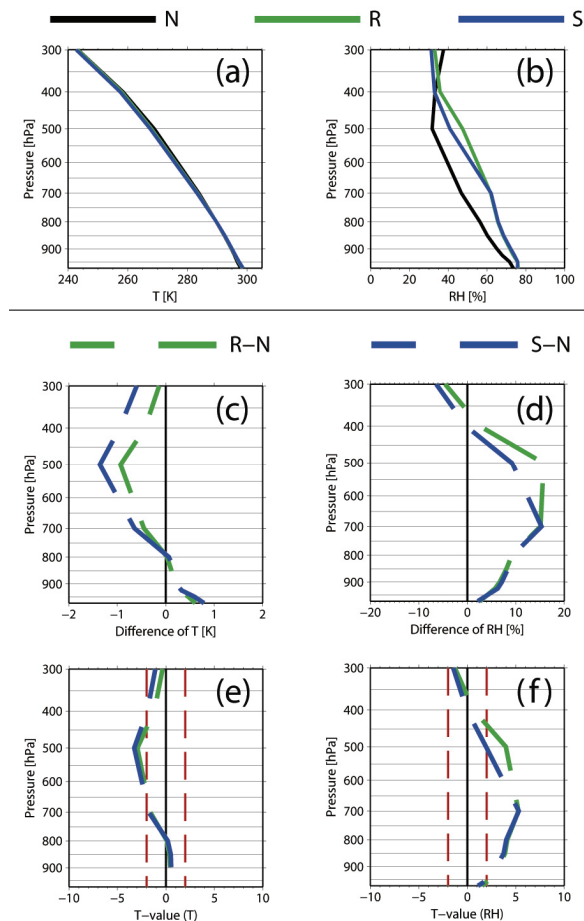


Fig. 3. The vertical profile of the mean (a) temperature and (b) relative humidity of each category N, R, and S. The vertical profile of the difference of mean (c) temperature and (d) relative humidity between the categories R-N and S-N from the analyses of the MSM data at 0900 JST. The vertical profiles of the T values for (e) the temperature difference and (f) the relative humidity difference between the R-N and S-N categories. In (e) and (d), the threshold for the statistical significance is indicated by a red line.

す。相対湿度に関しては950[hPa]~500[hPa]で有意水準より大きく、700[hPa]でT値が最大となる (Fig. 4 (f))。この結果からR・SとNでは700[hPa]の相対湿度に大きな差異があると分かる。

Fig. 4で示された結果から、R・SはNより中層の気温が低く、下層の相対湿度が高いということ統計的に示された。SSI・LI・KI・TTは気温減率および下層の相対湿度に依存するため、R-N・S-Nの比較において高い有意差を示したものと考えられる。また、気温・相対湿度において最も高い有意性が表れたのはそれぞれ500[hPa]・700[hPa]である。KIは500[hPa]の気温と700[hPa]の相対湿度を用いて計算される指数であるため、本解析においてKIに最も高い有意性が表れたことも頷ける。

4. 結論

本研究では関東平野において夏の午後に発生する局地降水の発生環境場について調べた。特に梅雨前線や台風などの総観規模擾乱の影響が弱い状況下で発生するものに注目した。安定度指数および気温・相対湿度の計算にはMSMデータを使用した。MSMデータは観測データである館野のラジオゾンデデータとよい相関があることが分かっている。また、R-NおよびS-Nのカテゴリー間の差の統計的有意性を定量的に示すために、T検定を行った。

多くの安定度指数がR-N・S-Nにおいて有意な差異を示した。特に、LFC・SSI・LI・KI・TTに統計的に高い有意差が表れた。最も有意性が高い安定度指数はKIであった。また、各高度の気温・相対湿度を比較した結果、中層の低い気温、および下層から中層にかけての高い湿度がRとSの特徴的な環境場であることが明らかになった。最も高い有意性が表れたKIは500[hPa]の気温と700[hPa]の相対湿度を用いて計算される指数である。さらに、高い有意性が表れたLFC・SSI・LI・KI・TTをはじめ、多くの安定度指数がR-NよりS-Nで大きなT値を示した。このことから、強雨の環境場は弱雨の環境場より不安定であることが示唆された。

統計解析の結果から、本研究で対象とした局地降水には中層の冷たい空気と下層の高い相対湿度が大きく影響していると言える。さらに言えば、東京を中心とした関東平野域では、中層の冷氣移流および下層の水蒸気移流により非降水日・降水日の環境場が特徴づけられることが考えられる。このような環境場の特徴は先行研究でも示唆されている。しかし、先行研究ではSeko et al. (2007)のように一つの事例に着目したものであり、一般的な環境場については言及されていなかった。一方、本研究では空間的・時間的代表性が高いと想定されるMSMデータを使用し、統計解析により環境場の特徴を明らかにした。今回明らかとなった環境場の特徴は、あくまで降水が発生しやすい状況であり、豪雨発生の十分条件ではない。しかし、本研究で対象とした総観規模擾乱の影響が弱い状況下で発生する局地降水は、突発的に発生し甚大な被害をもたらすだけに、局地豪雨が発生しやすい状況があるか否かが分かるということは、防災上大きな意味があると考えられる。

謝 辞

京都大学防災研究所気象・水象災害研究部門暴風雨・気象環境研究分野の石川裕彦教授・堀口光章助

教, 大阪市立環境科学研究所の奥勇一郎氏には, 建設的なご意見を頂戴いたしました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- Bluestein, H.B., and M. H. Jain, 1985: The formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1711-1732.
- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- Fuelberg, H. E., and D. G. Biggar, 1994: The preconvective environment of summer thunderstorms over the Florida Panhandle. *Wea. Forecasting.*, 9, 316-326.
- Huntrieser, H., H. H. Schiesser, W. Schmid, and A. Waldvogel, 1997: Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. *Wea. Forecasting.*, 12, 108-125.
- Kanae, S., T. Oki, and A. Kashida, 2004: Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1990. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 241-247.
- Kawano, K., Y. Hirokawa, and H. Ohno, 2004: Diagnosis of air-mass thunderstorm days using radiosonde data: The summer Kanto area under the Pacific subtropical anticyclone. *Tenki*, 51, 17-30.
- Kodama, K., and G. M. Barnes, 1997: Heavy rain events over the south-facing slopes of Hawaii: Attendant conditions. *Wea. Forecasting.*, 12, 347-367.
- Reap, R. M., and D. S. Foster, 1979: Automated 12-36 hour probability forecasts of thunderstorms and severe local storms. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1304-1315.
- Seko, H., Y. Shoji, and F. Fujibe, 2007: Evolution and airflow structure of a Kanto thunderstorm on 21 July 1999 (the Nerima heavy rainfall event). *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 455-477.
- Taguchi, A., K. Okuyama, and Y. Ogura, 2002: The thunderstorm activity observed by SAFIR and its relation to the atmospheric environment over the Kanto area in the summer. Part II: Thunderstorm prediction by stability indices. *Tenki*, 49, 649-659.
- Yonetani, T., 1975: Characteristics of atmospheric vertical structure on days with thunderstorms in the northern Kanto Plain. *J. Meteor. Soc. Japan*, 53, 139-148.

Environmental Conditions for Afternoon Rain Events in the Kanto Plain in Summer

Syohei NOMURA* and Tetsuya TAKEMI

* NARITA INTERNATIONAL AIRPORT CORPORATION

Synopsis

The environmental stability for afternoon rain events over the Kanto Plain in summer was investigated. The AMeDAS data were used to extract the hot, sunny days under synoptically undisturbed conditions, and the gridded mesoscale analysis data that cover the Kanto Plain were used to examine the difference of the characteristics of environmental stability between no-rain, rain, and strong-rain events in the afternoon by calculating commonly used stability indices and parameters. Statistical analysis by t-test statistic was conducted to determine the significance of the different features of the stability parameters among the events. Among the parameters, K-index indicated the highest significance level. The analyses on the difference of temperature and humidity at each height among the events indicated that the temperatures and moistures at low to middle levels clearly distinguish the stability conditions for the afternoon rain events.

Keywords: local heavy rainfall, Kanto Plain, summer, MSM data, statistical analysis