

# 館野における下向き長波長放射の長期変化の特徴と 気温や温室効果ガスの寄与について

大河原 望\*・高野 松美\*\*

## Long-term trends of downward longwave radiation at Tateno

Nozomu OHKAWARA and Matsumi TAKANO

### Abstract

Long-term trends of downward longwave radiation at the earth's surface from 1979 to 2004 at Tateno are analyzed after applying bias correction by using radiative transfer calculation. Downward longwave radiation decreases from 1979 to the middle of the 1980's, and then it increases to 2004. From a long-term viewpoint, the trends are similar to those of downward shortwave radiation at the Earth's surface except for a turning point from decreasing to increasing. The turning point for downward longwave radiation is around the early 1980's while that of downward shortwave radiation is around the early 1990's. The trends of total downward radiation are almost same as those of downward longwave radiation including the turning point. The main causes of change in downward longwave radiation are air temperature change near the surface and change of greenhouse gases concentration in the atmosphere and they affect it to the same extent.

### 1. はじめに

地表における下向き長波長放射は、地球大気や雲から地表面に向けて射出される放射エネルギーである。その大きさは、大気や雲の温度、大気内の水蒸気及び人為的起源の二酸化炭素に代表される温室効果ガスの濃度に依存している。その長期変化を解析することにより、近年注目を浴びている地球温暖化に伴う下層大気や雲の温度上昇等の地球環境の変化傾向を見ることが出来る。高層気象台(観測地点名：館野)では、国際地球観測年(IGY, 1957)の2月から下向き長波長放射の観測を開始し、1976年2月から現在まで24時間の連続観測を継続している。さらに、高層気象台は、1996年には世界気候研究計画(WCRP)および世界気候観測システム(GCOS)の地上放射観測網である基準地上放射観測網(BSRN)地点として登録され、BSRNの基準を満たした高品質の放射観測データを取得している(Ohmura *et al.* : 1998)。長波長放射を長期間にわたり連続観測している観測点は非常に少なく、高層気象台は世界的に見ても貴重な観測地点である。

館野における下向き長波長放射の変化については、Ichiki A.(1988)により1977年から1981年までの5年間の経年変化および季節変化の解析結果が示されているが、10年を超えるような長期についての解析結果は存在しない。本稿では、高層気象台における1979年から2004年までの25年間の長波長放射観測データを解析することによってその長期変化傾向について述べ、さらに長波長放射の大きさに影響を与える水蒸気と温室効果ガスの寄与の大きさについて評価結果を報告する。

### 2. 過去データのバイアス補正

長波長放射の観測には、その正確な測定の困難さから長い間世界的に共通な観測基準が存在しなかったが、2004年にWMOにより確立された。それまでは各機関がそれぞれ独自の基準により観測を行っていた。また、本研究の解析期間において、高層気象台の長波長放射観測には3種類の異なる型式の測器が用いられてきた。一般に、観測データには、測器の型式に応じた真値からの系統的なずれ(バイアス)が存在する。このため、長期の長波長放射観測データを解析するには、事前にこのバイアスを除いておく必要がある。今回の解析では、以下の手法

\*高層気象台観測第三課(現 地球環境・海洋部 環境気象管理官)

\*\*高層気象台観測第三課(現 観測部計画課南極観測事務室)

により測器の型式毎のバイアス補正量を見積り、バイアス補正を行った後、下向き長波長放射観測データの解析を行った。

### 2.1 バイアス補正の手法

過去データのバイアス補正として、下向き長波長放射量の放射伝達モデルによる理論計算を行い、算出された理論計算値を基準として観測値との差をとることにより、観測測器の型式毎の過去の観測値のバイアス補正量の見積りを行った。バイアス補正量は、同一型式の観測測器が使用された期間毎に平均され、観測測器の型式毎に求められた。

観測データと理論計算値との比較の条件として、長波長放射の理論計算結果に大きな誤差を及ぼす日射および雲の影響がない夜間の快晴時を選択した。また、大気温度や大気中の水蒸気量の急激な変化も誤差につながることから、終日安定した大気状態であった日を、比較対象日として選択した。

具体的には、高層気象台で行っている 06 時から 21 時までの 3 時間毎の目視観測による雲量データを用いて、終日快晴であった日を選択し、21 時(12UTC)のレーウィンゾンデによる高層気象観測データを用いて放射伝達モデルによる理論計算を行い、各測器の使用期間毎に観測データとの比較を行うことで、バイアス補正量の見積りを行った。バイアス補正量の信頼性を向上させる目的のため、バイアス補正量を見積りするための期間としては、長波長放射の 24 時間連続観測が開始された 1976 年 2 月から 2005 年 12 月までの期間とした。なお、放射伝達モデルとしては MODTRAN (Kneizys *et al.* : 1996)を採用した。放射伝達モデル計算の条件は、次のとおりである。

- ・地表面温度：地上気温
- ・地表面射出率：0.98
- ・温度・湿度プロファイル：高層気象観測データ
- ・二酸化炭素濃度：北半球中緯度における月平均値 (気象庁・環境気象管理官作成、1981 年以前についてはマウナロアにおける観測値から北半球中緯度とマウナロアとの年平均偏差および北半球中緯度の季節変化を考慮して独自に算出した)
- ・水蒸気、二酸化炭素以外の吸収ガス濃度：MODTRAN モデル組み込み値
- ・エーロゾル：考慮せず

以下に、放射伝達モデル計算に使用したモデル組み込み値以外の入力データについて、その詳細を述べる。

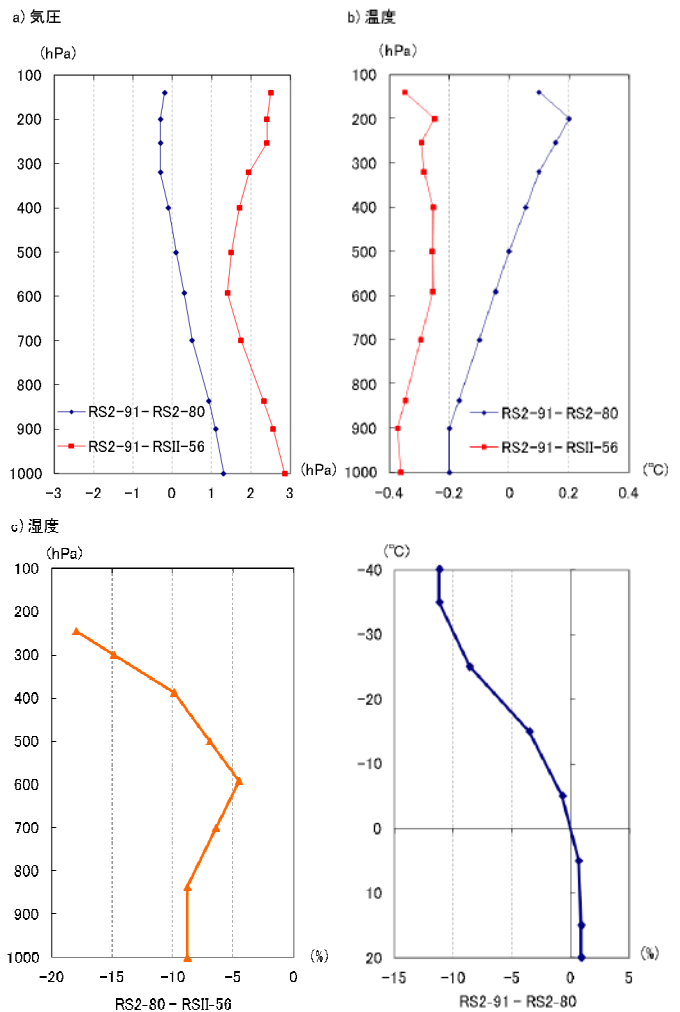


Fig. 1 Mean differences in upper-air observation at 12UTC among 3 types of rawinsonde used at Tateno(Meisei RSII-56, RS2-80 and RS2-91).

a) air pressure, b) air temperature and c) humidity.

#### 2.1.1 放射伝達モデル計算の入力データ

##### (1) 高層気象観測データ(気圧・気温・湿度プロファイル)

高層気象台における高層気象観測では、その観測時期によって 3 種類のレーウィンゾンデが使用された。レーウィンゾンデの型式毎の観測値の差については、同時比較観測による結果がまとめられている(観測部高層課:1983, WMO:1996)。今回の評価では、これらの結果の中の、全季節を通じた夜間の年平均値を使用して最新の型式(Meisei RS2-91)による観測値との系統的な差がなくなるように、放射伝達モデルに入力する前に、バイアス補正を行った。Fig.1 に、レーウィンゾンデの指定気圧面ごとのバイアス補正量を示す。なお、高層気象観測データは、誤差の少ないオリジナル分解能の気温・湿度観測点データを放射伝達計算の入力データとして使用した。高層気象観測データは、先ず各気圧の値のバイアス補正

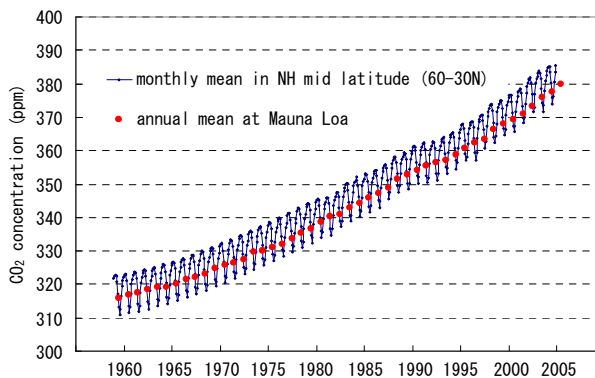


Fig. 2 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration in the mid-latitude area of the Northern Hemisphere used in the radiative transfer calculation, in ppm. Red circles show the annual means at Mauna Loa as reference.

を行い、次いで気温・湿度のバイアス補正量を、その上下の指定気圧面における補正量から気圧の対数による内挿により求めてバイアス補正を施した後、入力データとして使用した。

## (2) 二酸化炭素濃度

大気中の二酸化炭素は、産業革命以降、人間の生産活動により急速に濃度が上昇しており、長波長の領域での吸収率が大きいので、長波長放射に最も大きな影響を与える温室効果ガスである。大気中の二酸化炭素濃度は、本解析期間においても増え続けており、長波長放射の理論計算時に濃度上昇を無視することはできない。放射伝達モデル計算において、この長期変化の影響をなるべく正確に取り入れるため、二酸化炭素濃度のデータとして信頼度の高い、気象庁・環境気象管理官作成の北半球中緯度帯(60°N-30°N)の月平均値を利用した。ただし、1981年以前はデータが存在しないので、米国海洋大気庁地球システム研究所(NOAA/ESRL)が公開しているマウナロアの月平均値を解析して得られた年々変化のトレンドに基づいて北半球中緯度の年平均値を作成し、さらに北半球中緯度における平均的な年変化を考慮して、独自に月平均値を作成した。Fig.2 に今回使用した北半球中緯度の二酸化炭素濃度月平均値をマウナロアの年平均値と合わせて示す。

### 2.1.2 バイアス補正量の見積り

Fig.3 に、比較期間において使用された放射計(1992年までは全波放射計、1993年からは赤外放射計)とレーウィンゾンデの型式と、長波長放射観測値と放射伝達モデル計

Radiometer	wind shield-type	Funk-type	Eppley PIR
Rawinsonde	RSII-56	RS2-80	RS2-91

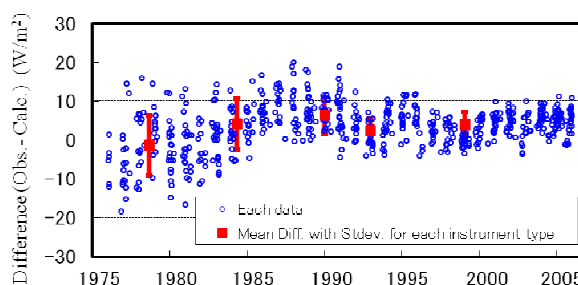


Fig. 3 Differences of longwave radiation between observations and MODTRAN calculations at 21UTC under clear sky condition, in W/m<sup>2</sup>.

The upper table shows used instrument type for each period. In the lower graph, the each circle shows difference between observation and MODTRAN calculation for each data, and the square and the vertical bars represent the mean and the standard deviation for each instrument type, respectively.

Table 1 Estimated biases and standard deviations for each radiometer and rawinsonde type.

Period	Bias(W/m <sup>2</sup> )	Standard deviation
- 2 Mar/1981	-5.34	7.71
3 Mar/1981 - 31 Dec/1987	0.13	6.58
1 Jan/1988 - 30 Sep/1992	2.34	4.69
1 Oct/1992 - 31 Dec/1992	-1.46	2.99
1 Jan/1993 -	0.00	3.38

算値との差を示す。観測値と計算値との差は、1970年代から1980年代は標準偏差が6~8 W/m<sup>2</sup>と、ばらつきが大きい。一方、1993年に、観測精度の高い現行の赤外放射計に移行してからは、標準偏差が3 W/m<sup>2</sup>程度とばらつきが小さく、差の値も平均して約4 W/m<sup>2</sup>で経年変化はない(Fig.3)。近年、世界気象機関(WMO)で定められた世界基準との比較から、現在の高層気象台の観測値の正確さが確認されている(大河原・高野:2008)。それぞれの測器の型式毎のバイアス補正量として、現行の測器の型式における観測値と計算値との差を基準にして、そこからの偏差と定義した。Table 1に、それぞれの測器の型式毎のバイアス補正量を示す。

### 2.2 バイアス補正の妥当性の検証

2.1で設定した各測器型式に対するバイアス補正量の妥当性を検証するため、雲量や昼夜を問わず全ての長

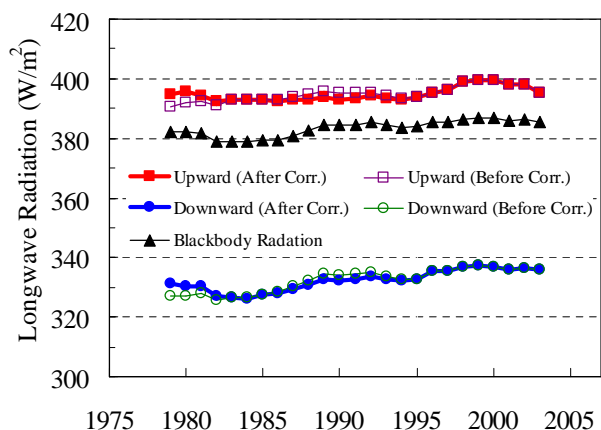


Fig. 4 Time series of 5-year running mean upward, downward longwave radiation and blackbody radiation emitted by a blackbody with surface air temperature under all sky condition at Tateno, in  $W/m^2$ .

Thick lines represent upward and downward longwave radiation after applying the bias correction and thin lines represent those without the correction, respectively.

波長放射観測値に対してバイアス補正を行い、基準となる長波長放射の値と比較した。

**(1) 年平均地上気温から算出された黒体放射との比較**

年平均地上気温に相当する黒体から射出される黒体放射の値は、地表から射出される上向き長波長放射に近い値となることが知られている。Fig. 4 に、年平均地上気温から算出された黒体放射とバイアス補正前後の下向き・上向き長波長放射観測値の年平均値を示す。バイアス補正によって、長波長放射観測値は気温の変化とよく対応するようになった。特に、昼夜連続観測開始当初の 1970 年代後半から 1980 年代前半にかけて大きく改善されている様子がわかる。このことから、設定した測器型式毎のバイアス値が適切であることが確認された。バイアス補正後の長波長放射の長期変化を見ると、1980 年代前半までは、気温は若干下がる傾向が見られるが、これに対応して長波長放射は緩やかに減少している。それ以降 2000 年頃までは、気温の上昇に対応して増加している。この増加している期間の変化量を見ると、下向き長波長放射(約  $11 W/m^2$ )は、地上気温から算出した黒体放射の変化量(約  $7 W/m^2$ )に比べて大きいことがわかる。これは、下向き長波長放射には、大気温度変化による情報に加えて、大気中の温室効果ガス濃度の変化に関する情報も含まれていると考えられるためである。

**(2) 長期再解析データ(ERA-40, JRA-25)との比較**

長期再解析データは、様々な観測データを初期値とし

Table 2 Latitude and Longitude ( $^{\circ}$ ) of Tateno and used grids of ERA-40 and JRA-25.

Name	Latitude	longitude
Tateno	$36.050^{\circ}$ N	$140.133^{\circ}$ E
ERA-40	$37.500^{\circ}$ N	$140.000^{\circ}$ E
JRA-25	$35.327^{\circ}$ N	$139.500^{\circ}$ E

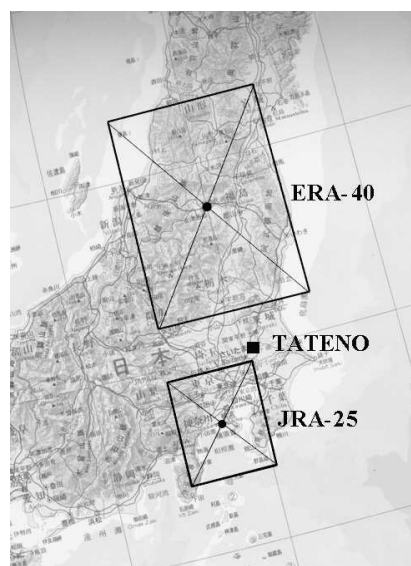


Fig. 5 Location of Tateno and the grids of ERA-40 and JRA-25 used in the comparisons of downward longwave radiation.

て、最新の予報-解析システムを使用して作成した気候データセットである。特に、最新の長期再解析データである JRA-25 および ERA-40 は、数十年にわたる大気状態をよく再現しており、高品質であることが報告されている(Uppala *et al.* : 2005, Onogi *et al.* : 2007)。ここでは、これら 2 つの長期再解析データには測器の変遷などに起因するデータの不連続が無いものとして、比較を行った。比較に使用した長期再解析データは、高層気象台に最も近い陸上の格子点におけるデータを用いた。また、使用した格子点の大きさは、ERA-40 が 2.5 度緯度経度格子、JRA-25 が T106(110km 緯度経度格子に相当)である。Table 2 に高層気象台と比較に使用した長期再解析データの格子中心の緯度経度を、Fig.5 に高層気象台と長期再解析データ格子の地理上の位置関係を示す。

Fig. 6 は、バイアス補正後の下向き長波長放射観測値と長期再解析データとの比較結果を示す。2 つの長期再解析データの長波長放射には、採用している放射伝達過程や雲モデルの違い、およびエアロゾルや二酸化炭素の取り扱いなどに起因すると思われる差が存在する。しかし、両者の長期的な変化傾向はほぼ同様であり、バイアス補正後の観測値も、これらと同一の変化傾向を示している。

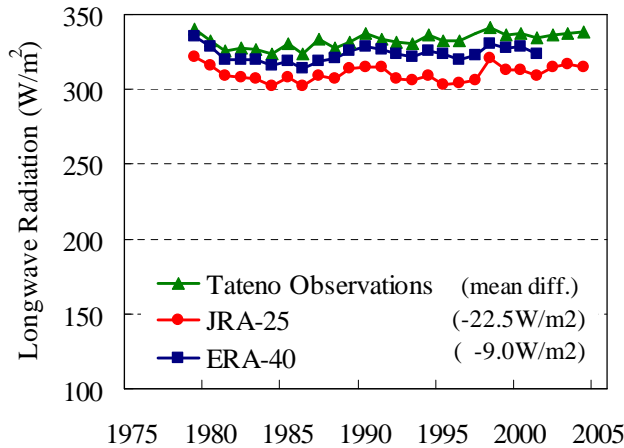


Fig. 6 Time series of annual mean downward longwave radiation under all sky condition, in  $W/m^2$ . Mean differences for the whole comparison periods are also denoted.

(1)の結果と合わせて、夜間快晴時の条件下で求められた観測値についての測器型式の違いによるバイアス補正量は適切であり、全ての条件下の観測値に対してバイアス補正が適用可能であることが確認された。また、バイアス補正後の観測データは、解析期間における長波長放射の長期変化を解析するために十分な精度を持っていることが確認された。これ以降に示す下向き長波長放射の長期変化の解析には、バイアス補正済みの観測データを用いている。

### 3. 解析結果

Fig.7 に、解析期間における高層気象台の下向き長波長放射の年平均値と5年移動平均値を示す。長波長放射は、1970年代の終わりから1980年代前半まで減少し、その後増加している。世界的に見ると、長波長放射は長期間の観測データが極めて少なく、赤外放射計が開発され、またBSRNが整備された1990年代以降、ようやく精度の高い連続観測データが得られるようになった。Wild M.の解析結果(WCRP:2010)によれば、1990年代以降の全世界のBSRN観測地点における下向き長波長放射の変化は、多くの地点で増加傾向を示している。また、全地点平均の増加率は約 $0.3 W/m^2/year$ であり、この値は欧州中期予報センター(ECMWF; the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)における最新の気候モデル(ECHAM5;European Centre / Hamburg Model, version 5)による予測結果の全球平均値と一致している。今回の解析期間の内、館野において観測精度の高い現行の赤外放射計に移行後の1993年から2004年にかけての長波長放射の増加率は約 $0.4W/m^2$ である。この値は、これらの解析

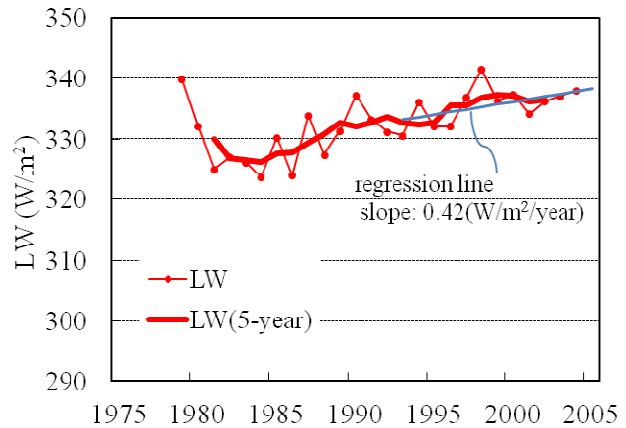


Fig. 7 Time series of annual and 5-year running mean downward longwave radiation (LW) under all sky condition, in  $W/m^2$ . A regression line was decided after linear regression analysis for observation data after 1993.

結果および予測結果と非常に良く一致している。

## 4. 議論

### 4.1 全天日射(下向き短波長放射)の長期変化傾向との比較

長波長放射観測と異なり、日射(短波長放射)観測においては、古くから世界共通の観測基準が存在し、観測初期から統一された基準で観測が行われてきた。観測基準は数回の見直しが行われたが、観測値は全て現在の観測基準に基づく値に直すことが可能である。このため、短波長放射の長期変化傾向については、これまで多くの研究がなされており、1960年頃から1990年頃にかけては減少傾向(Global Dimming)、以後は増加傾向(Global Brightening)にあることが知られている。最近では、世界各地の長期変化傾向がOhmura A.(2009)によって報告されている。その中で、日本の40観測地点の平均的な長期変化は、1960年から1990年代初めにかけて急激に減少し、その後現在まで回復傾向にあること、また、2次的な小さなピークが1970年代後半から1980年代初めにかけて見られることが記述されている。

Fig.8 に、解析期間における高層気象台の下向き長波長放射と短波長放射の年平均値と5年移動平均値を示す。館野の短波長放射の長期変化は、日本の40観測地点の変化とほぼ同様な傾向を示しており、1980年代に増加傾向の2次的なピークがあるものの1990年代初めにかけて減少し、その後増加している。これに対し、館野の長波長放射は、短波長放射と異なった変化傾向を示している。最大の相違点は、減少から増加に転じる時期で、長波長放射は1980年代前半まで減少し、その後現在まで増加傾向にあり、減少から増加に転じる時期が短波長放射に比



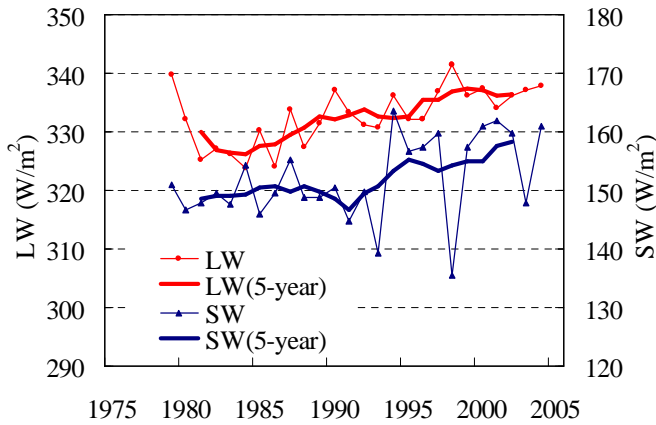


Fig. 8 Time series of annual and 5-year running mean downward longwave(LW) and shortwave(SW) radiation under all sky condition, in  $W/m^2$ .

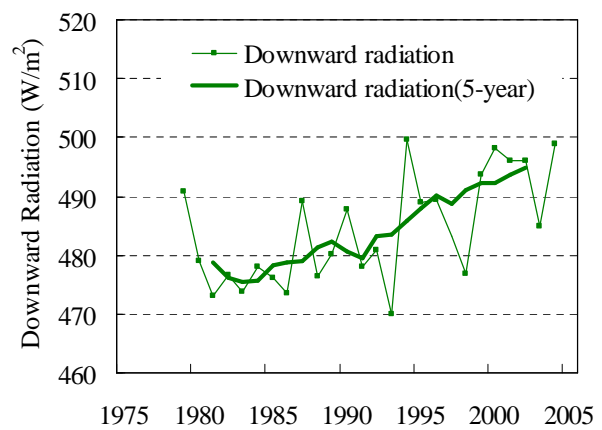


Fig. 9 Same as Fig. 7 but for total downward radiation, in  $W/m^2$ .

べて 10 年ほど早い。この間の増加量については、 $10W/m^2$  程度で、1990 年代初め以降の短波長放射の増加量と同程度である。また、2000 年以降の長波長放射の変化量は、それ以前の変化量に比べて小さい。さらに、2 次的なピークでの変化傾向が、短波長放射のフェーズと逆になっている。これは、短波長放射に対しては減少の原因となる大気中の雲、水蒸気等の要素が、長波長放射に対しては逆に増加の原因となることに起因するものと思われる。

短波長放射と長波長放射を合わせた下向き放射全体の長期変化傾向は(Fig.9)、長波長放射の変化傾向と同様に 1980 年代前半まで減少し、その後増加している。増加量については、1980 年代前半から 1990 年代初めまでは緩やかに増加し(約 10 年間で  $5W/m^2$  程度)、その後急激に増加している(約 10 年間で  $15W/m^2$  程度)ことが確認できる。また、この間の増加量(約 20 年間で  $20W/m^2$  程度)は、短波長放射・長波長放射ともに  $10W/m^2$  程度で、地表面に対して同程度の加熱効果をもたらしていた。

#### 4.2 下向き長波長放射の変化における気温変化と温室効果ガス濃度変化の寄与の割合

地表における下向き長波長放射の変化には、大気下層の気温の変化と、大気中の温室効果ガスやエアロゾルの濃度変化および雲量の変化が寄与している。ここでは、夜間快晴時の観測データを用いて、気温と温室効果ガスの濃度変化が寄与する大きさの見積りを行った。

夜間快晴時における下向き長波長放射の総変化量( $\Delta DL_{total}$ )に主に寄与しているのは、気温変化による変化量( $\Delta DL_{temp}$ )と温室効果ガス濃度変化による変化量( $\Delta DL_{GHG}$ )である。これは次式のように表すことが出来る。

$$\Delta DL_{total} = \Delta DL_{temp} + \Delta DL_{GHG}$$

下向き長波長放射の総変化量は実際の観測値から求めることが可能であるので、2つの要素による変化量の内、どちらか一方が分かれば、もう一方の変化量も見積もることが可能である。ここでは、気温変化による変化量として、観測時刻における実際の気温プロファイルを用いた放射伝達モデル計算値と、基準となる気温プロファイルを用いた計算値との差とした。基準となる温度プロファイルとしては、1971年から1980年までの10年間の12UTCの高層気象観測データの指定気圧面における気温と地上気温の月平均気温を用いた。放射伝達モデル計算の条件は、2.1と同様であるが、快晴日の選択については、データ数を増やして求めた結果の信頼性を向上させる目的で、12UTC および 12UTC のレーウィンゾンデ飛揚時(11時30分(UTC)頃)の目視観測による雲量データのみで決定した。なお、1979年については、選択された快晴日が他の年に比べて著しく少なく、データの信頼性が低いと判断されたので、解析の対象期間から除外した。

Fig.10に、夜間(21UTC)快晴時における下向き長波長放射の総変化量および大気下層の気温変化と温室効果ガス濃度変化による変化量の5年移動平均値時系列図を示す。Fig.11に、夜間(21UTC)快晴時における高層気象観測データから算出した可降水量と、昼夜および天候を問わず全ての地上気温データの5年移動平均値時系列図を示す。Fig.10から、夜間快晴時における下向き長波長放射量は、大きく見ると1982年から1995年頃にかけて増加し、その後はなだらかな変化を見せており、Fig.7に見られる昼夜および天候を問わない全てのデータの変化と同様な傾向を示している。ただし、夜間快晴時の下向き長波長放

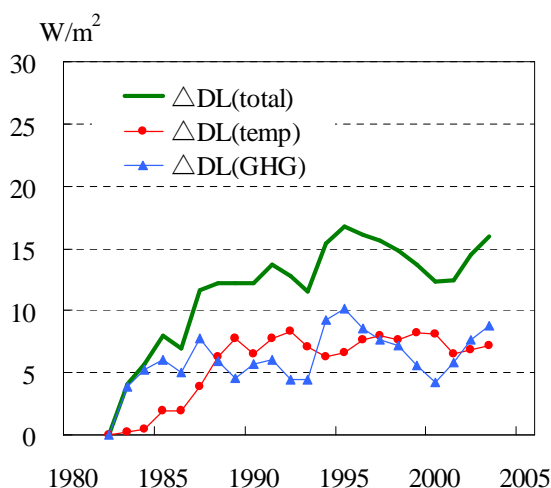


Fig. 10 Time series of 5-year running mean change of downward longwave radiation ( $\Delta DL(\text{total})$ ), that due to air temperature change ( $\Delta DL(\text{temp})$ ) and that due to change of greenhouse gases concentration ( $\Delta DL(\text{GHG})$ ) at 12UTC under clear sky condition, in  $\text{W}/\text{m}^2$ .

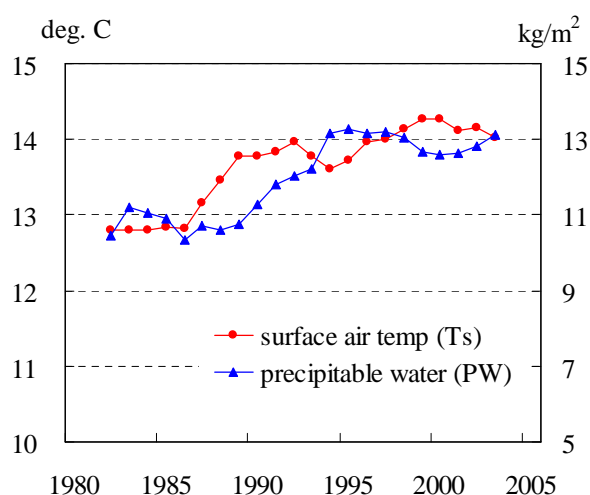


Fig. 11 Time series of 5-year running mean of daily mean surface air temperature under all sky condition ( $T_s$ ) in deg. C and precipitable water (PW) retrieved from aerological observation of rawinsonde at 12UTC under clear sky condition in  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

射量は、気温と温室効果ガス濃度の変化に敏感であり、二次的なピークの増減量は全てのデータの場合に見られる変化に比べて、大きな変化を示す。Fig.11 から、この二次的なピークは、気温変化や長波長放射量の変化に最大の影響を持つ温室効果ガスである大気中の水蒸気量(可降水量)の急激な増減に対応していることが分かる。また、下向き長波長放射量の変化には、気温の変化と温室効果ガス濃度の変化が同程度に寄与していることが確認できる。

#### 4. 結果およびまとめ

1979年から2004年かけての25年間の期間について、高層気象台(観測地点名:館野)における下向き長波長放射量の長期変化傾向の解析を行った。

館野の下向き長波長放射は、1970年代終わりから80年代前半まで減少し、その後増加に転じていることが分かった。Wild M. (WCRP: 2010) による世界のBSRN観測地点の解析結果と比較すると、1990年代前半からの変化傾向および変化量は多くの観測地点のものと同じであり、これはECHAM5を用いた最新の気候変動予測結果とも一致している。

下向き短波長放射量の長期変化傾向との比較では、増加に転じる時期が長波長放射は1980年代前半であり、1990年代前半に増加に転じている短波長放射に比べて10年程度早い。

短波長放射量と長波長放射量を合わせた下向き放射量の変化傾向は、長波長放射量の変化傾向と同様に、1980年代前半まで減少し、その後増加に転じている。1980年

代前半から2004年にかけての下向き短波長放射と長波長放射の増加量はともに $10\text{W}/\text{m}^2$ 程度であり、短波長放射と長波長放射が地表面に対して同程度の加熱効果をもたらしていた。

夜間快晴時のデータ解析から、下向き長波長放射量の変化には、大気下層の気温と温室効果ガス濃度の変化と同程度に寄与していることが確認された。

#### 謝 辞

本稿を草するに際し使用した ERA-40 データはヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)より提供されたものであり、JRA-25 データは、気象庁及び電力中央研究所による JRA-25 長期再解析プロジェクトにより提供されたものである。また、二酸化炭素濃度データは、気象庁環境気象管理官および NOAA/ESRL から提供いただいた。観測第三課の中野辰美研究官(当時)には、高層気象観測データの電子ファイル化にご助力いただいた。高層気象台観測第三課の皆様には、観測データの収集に多くのご協力を頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

#### 引用文献

- Ichiki, A (1988) : Radiation Measurements at Tateno and a Climatological Interpretation of the Radiation Data, *Japan Meteorological Agency, Geophysical Magazine*, **42**, 105 - 171.
- 観測部高層課(1983): RS2-80型とRSII-56型レーウインゾングの比較観測について。測候時報, **50**, 373 - 384.
- Kneizys, F. X., D. C. Robertson, L. W. Abreu, P. Acharya, G. P.

- Anderson, L. S. Rothman, J. H. Chetwynd, J. E. A. Selby, E. P. Shettle, W. O. Gallery, A. Berk, S. A. Clough, and L. S. Bernsterin (1996) : The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model. *Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscombe AFB*, 261 pp.
- 大河原望・高野松美(2008) : 長波長放射観測の世界基準への移行. *高層気象台彙報*, **68**, 37 - 41.
- Ohmura, A. (2009) : Observed decadal variation in surface solar radiation and their causes, *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D05, doi:10.1029/2008JD011290.
- Ohmura, A., E.G. Dutton, B. Forgan, C. Frohlich, H. Gilgen, H. Hegner, A. Heimo, G. Konig-Langlo, B. McArthur, G. Muller, R. Philipona, R. Pinker, C.H. Whitlock, K. Dehne, and M. Wild (1998) : Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP), a new precision radiometry for climate research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 2115 - 2136.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007) : The JRA-25 Reanalysis., *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369 - 432.
- Uppala *et al.* (2005) : The ERA-40 re-analysis., *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961 - 3012.
- WCRP (2010) : Summary Report from the Eleventh Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Scientific Review and Workshop, *WCRP, WCRP Informal Report No. 08/2010*, 21pp.
- WMO (1996) : WMO International Radiosonde Comparison — Phase IV: Final Report (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue), *WMO, WMO/TD-No. 742*, 130pp.