

5. 日射・放射観測

気象学で扱う放射は、太陽を起源とする太陽放射(波長領域は、約 $0.4\mu\text{m}$ 以下の紫外領域から約 $4\mu\text{m}$ 以上の赤外領域まで及ぶが、一般には全エネルギーの約 97% を占める $0.29\sim 3.0\mu\text{m}$ の波長領域を日射または短波放射という)、地球大気系を起源とする地球放射(長波放射または赤外放射ともいう。波長領域は、およそ $3\sim 100\mu\text{m}$)に大別される。本節では、高層気象台における日射と地球放射の観測・調査・研究、及び関連する国際動向について、四つの年代(1920～1957 年, 1958～1974 年, 1975～1988 年, 及び 1989～2020 年)に分けて述べる。それら四つの年代を通した、観測測器と日射基準、放射基準の変遷について表 3.5.1 にまとめたので必要に応じて参照されたい。なお、地球放射については測器や観測業務の変遷により、「長波放射」、「赤外放射」、あるいは地球を省いた「放射」などの異なる用語が使われてきた。本節でも統一はせず、当時主に使用された用語を使う。

(1) 調査・研究と IGY による観測の開始(1920 年～1957 年)

高層気象台における日射・放射観測の開始は、昭和 18(1943)年の地上気象観測としてバイメタル式自記日射計(図 3.5.1, 別名ロビッチ自記日射計)を用いた水平面全天日射量観測となるが、同年末には観測を中止した(高層気象台: 1943)。その後、昭和 24(1949)年 12 月に、成層圏上部から大気最上部に至る大気の研究を行うため、超高層係と工務係から成る第二観測課が設置され、同年 3 月に新築された 33m^2 の観測(実験)室を使用して、オゾン量観測とともに日射・放射観測の調査及び研究が開始された。

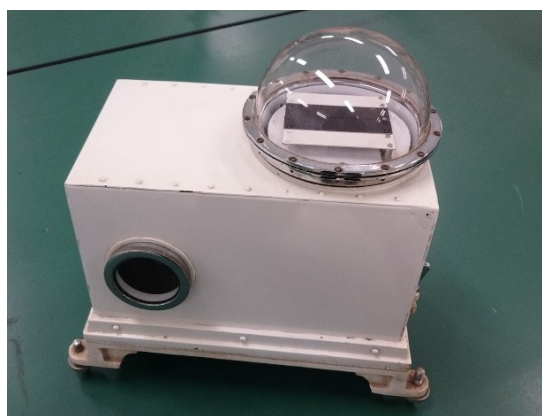


図 3.5.1 バイメタル式自記日射計

白と黒に塗分けたバイメタルを利用した日射計で、1931 年から国内で使用された。観測精度は高くなかった。

昭和 25(1950)年頃、長波長放射量観測のため、気象研究所においてオゾン量観測用として試作された夜間輻射計に対し感度向上及び地上の気象要素の影響除去等の改良を加え(桑名, 1954), さらに昭和 32(1957)年 7 月 1 日～昭和 33(1958)年 12 月 31 日に行われた IGY の夜間の長波長放射量観測に備え感雨計を利用した自動雨よけ装置を考案・開発し(桑名他, 1957), IGY 開始前に夜間輻射計を利用した夜間における下向き長波長放射量の定常的な観測を開始した。これは、それまで容易に定常的な観測ができなかった長波長放射量観測の先駆けであった。なお、この夜間輻射計は狭い立体角から入射する直達放射を測定するリンケ・ホイスナー型(筒型)放射計で、平常は天頂方向に固定し、定時の 21 時に手動で天空を走査することによって、夜間の下向き長波長放射量を測定した。

IGY を契機に、上記の長波長放射量観測に水平面全天日射量観測と直達日射量観測を加え、大気の放射バランスを解明するための本格的な日射・放射の総合観測を開始した。なお、IGY には、高層気象台以外にも札幌、仙台、鳥島、鹿児島 の 4 地点(仙台は東北大学、その他は気象庁、下向き長波長放射量の観測にはギヤ・ダンクル型放射計を使用)が参加した(他に、根室・秋田・宮古・東京・松本・輪島・潮岬・清水・米子・福岡が直達日射量観測で参加)。この IGY では、昭和 7(1932)年から翌昭和 8(1933)年にかけて実施した第 2 回国際極年(2nd IPY)の国際共同観測を機に日本で製造され全国の気象官署で使用されてきた精度の高い銀盤式直達日射計(図 3.5.2)が使用された。また、水平面全天日射量観測は、1930 年代から全国の気象官署が使用していたバイメタル式全天日射計ではなく、比較的精度の良い熱電堆を使用したエプリー型日射計(図 3.5.3)に電子管式記録計を組み合わせで実施した(気象庁, 1960)。なお、IGY 以降、日本の日射基準はスイス・ダボスで開催された国際放射委員会が勧告された国際日射スケール IPS-1956 (International Pyrheliometer Scale 1956)に準拠させている(地球環境・海洋部環境気象管理官, 2012)。国際日射スケールの変遷については、(3)項で後述する。

(2) IGY 以降の観測継続と観測項目の拡充(1958 年～1974 年)

高層気象台は、IGY 期間が終了した昭和 33 (1958) 年以降も、昭和 34(1959)年に実施された国際地球観測協力(IGC)に札幌、仙台(東北大学)、鹿児島とともに参加した(気象庁: 1961)。なお、長波長放射量観測に使用する測器は、夜間輻射計からギヤ・ダンクル型放射計(図 3.5.4)

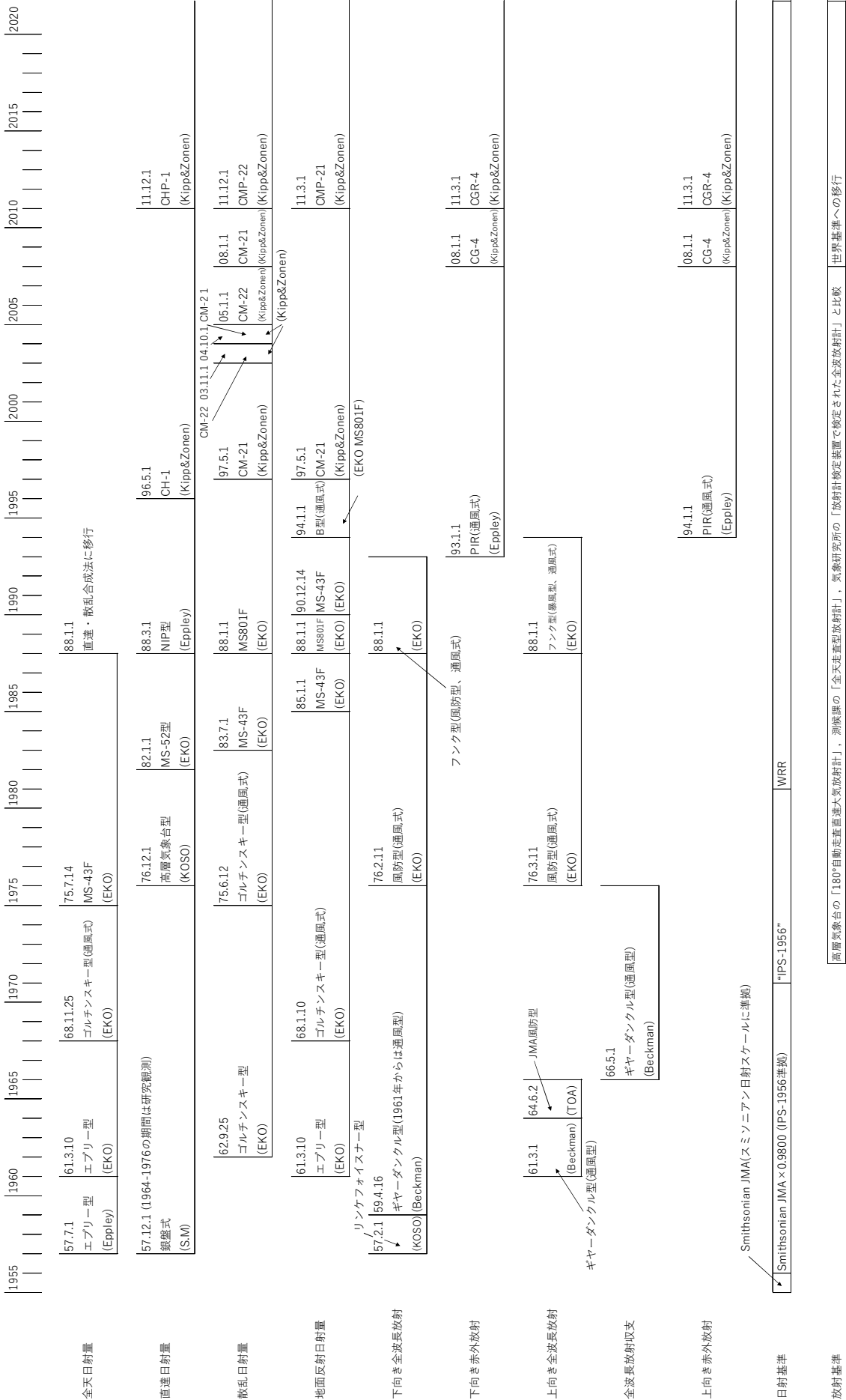


表 3.5.1 日射・放射観測における使用測器の変遷



図 3.5.2 銀盤式直達日射計

日本で製作された直達日射計で、1932 年から国内で使用された。高い観測精度を誇っていた。



図 3.5.3 エブリー型日射計

国内で使用されていたバイメタル式自記日射計に比べ観測精度は高かった。



図 3.5.4 ギャ・ダンクル型放射計

雨天を除く夜間の長波長放射量観測に使用された。黒色塗装された受光板とシールドされた遮蔽板の温度差を熱電対で計測した。

に変更した。さらに IGC が終了した昭和 35 年(1960)以降も、観測のための予算が認められ日射・放射観測を継続している。高層気象台では、IGY 以降も日射・放射に関する調査及び研究を継続し、散乱日射量を観測するための太陽直射光遮蔽環装置(図 3.5.5)(穂田ほか: 1963)、風防ガラス表面への着霜防止のための通風装置(池田ほか: 1972)、直達日射の連続観測を行うための自記直達日射計(藤本ほか: 1972)、放射観測の基準となりうる 180° 自動走査直達大気放射計などの開発を行った(池田ほか: 1972)。また、より精度の高い測器への変更等を行いつつ、地面反射日射量、地面放射量(上向き長波長放射量)の観測を開始するなど逐次観測種目を広げ、地表面での放射収支の全観測要素を定常的に精度よく観測する世界でもごく稀な観測地点となっていた。



図 3.5.5 太陽直射光遮蔽環装置

天空の散乱日射量を観測するため、直射光を遮るための遮蔽リングを取り付けた装置。季節により日射計の位置の調整が必要であった。

この頃より、日射観測の信頼性と均質性を確立するために世界で標準化の流れが加速し、昭和 40(1965)年には、日本(気象庁)はインドと共に WMO 第 II 地区(アジア)放射センターに指名された(関根他: 1973)。これに関連し、昭和 43(1968)年の二国間日射計相互比較(日本-タイ)、昭和 45(1970)年の第 2 回アジア地区日射計準器比較観測(日本-インド)がつくばで開催され、高層気象台が参加・協力している。なお、気象庁は、昭和 45(1970)年にダボスで開催された第 3 回国際日射計比較に 2 台のオングストローム日射計で初めて参加し、昭和 46(1971)年より日射基準として“IPS-1956”(IPS-1956 から 7 台のオングストローム日射計の平均を基準とする国際日射スケールに変更したもの。前後に“ ”を付し、それまでの IPS-1956 と区別している)を採用している。

放射観測に関しては、遡ること昭和 30(1955)年に西ドイツのハンブルクにおいて各国で使用されている放射計の比較観測が実施され、理論・製作・測定の各方面について討議されたものの、標準化までは達成できていなかった。国内では観測精度を維持するため、長年定常的な業務に使用したギヤ・ダンクル型放射計を本庁が保管する同型測器と比較し、測器定数を補正する対応にとどまっていた。その後、昭和 45(1970)年頃に高層気象台で 180°自動走査直達大気放射計を開発した。これは、天空の走査を自動化し、小型軽量で可搬性があり、シャッター方式により自動的にゼロ線を取るモル型熱電堆を持つリンケ・ホイスナー型で、全天式に比べ測器定数が求め易く原理的に見て精度が高い測器であった。これとは別に、気象研究所の地方共同研究として測候課・気象測器工場で昭和 43・44(1968・1969)年に全天走査型放射計が製作されている。両者は測定原理こそ類似しているものの、全く独立した方法で測器定数が決定されたものであったが、その比較観測結果の差はほとんどが 1%以内であった。これ以降、1990 年代初めにかけて放射計の校正は、高層気象台の「180°自動走査直達大気放射計」、測候課の「全天走査型放射計」、気象研究所の「放射計検定装置で検定された全波放射計」との比較観測によって行われた(関根他：1973)。

なお、昭和 49(1974)年に気象官署観測業務規程が一部改定されて全天日射量観測業務が規定業務となり、全天日射量観測データの世界放射データセンター(WRDC)への報告が開始されている。

この時期の日射量観測(水平面全天日射、地面反射日射、天空散乱日射)、直達日射量観測、放射量観測における主な調査・研究や測器の変遷は、下記の通り。なお、当時の観測は、銀盤式直達日射計を除きすべての測器が連続自記方式であったため、観測室に記録部を置き、観測室の南に直達日射計を、北の檣の上に全天日射、散乱日射及び大気放射の感部を置き、観測室の北東約 70m 地点の露場に地面反射日射と地面放射の感部を置いた(図 3.5.6)。



図 3.5.6 観測小屋

日射・放射観測を開始した当時の観測施設。

(ア) 日射量観測

日射量観測においては、昭和 36(1961)年にそれまで鹿児島で使用していたエプリー型日射計を利用して地面反射日射量の観測を開始し、翌昭和 37(1962)年には黒色リングにより直達日射を遮断する太陽直射光遮蔽環装置を開発してゴルチンスキー型全天日射計を用いた天空散乱日射量観測を開始した。また、昭和 43(1968)年には、冬季の早朝における日射計の風防ガラス表面への着霜防止のため、小型電気ファンにより日射計の下から風を送る通風装置を開発するとともに、水平面全天日射量及び地面反射日射量観測に使用する測器を、この通風装置の設置が容易で小型、かつ入射角特性にも優れていたゴルチンスキー型日射計に変更した。

(イ) 直達日射量観測

直達日射量観測においては、昭和 32(1957)年 12 月から昭和 38(1963)年末まで定常的に観測が行われたが、それ以降は昭和 51(1976)年まで、銀盤式直達日射計では連続記録をとることができなかったことから、定常的な観測を中断し研究観測とされた。特に昭和 39・40(1964・1965)年は、直達日射計を用いて全天日射計を検定するための比較観測で利用した以外に観測は行われていない。昭和 45(1970)年に高層気象台で同期電動機により太陽の見かけの動きを追い、モル型熱電対を用いて連続記録が取れる自記直達日射計(図 3.5.7、ゴルチンスキー型感部を用いた高層気象台型自記直達日射計(KOSO G-1))を開発し、銀盤式直達日射計との比較による精度検証を行った。ただ、この自記直達日射計を用いた直達日射量の定常的な観測の再開は、遅れること昭和 51(1976)年からとなる。



図 3.5.7 高層気象台型自記直達日射計(KOSO G-1)

高層気象台で開発した直達日射計で、太陽を自動追尾することで直達日射量の連続観測を可能にした。

(ウ) 放射量観測

放射量観測においては、IGC 開始からは IGY で鳥島において使用していた手動による天空走査を必要としないギヤ・ダンクル型放射計(バックマン社製)に変更している。昭和 36(1961)年には、通風型放射計(ギヤ・ダンクル型放射計に通風装置を付加)に変更し、同年に少し遅れて地面放射量(上向き放射量)の観測も通風型放射計により開始している。昭和 41(1966)年には、上向き放射量観測の方法を、ギヤ・ダンクル型放射収支計から得られる放射収支量と下向き放射量の差を計算で求める方法に変更した。

(3) 研究学園都市建設に伴う庁舎移転と日射基準の統一(1975 年～1988 年)

昭和 50(1975)年 3 月、新庁舎完成に伴い、銀盤式直達日射計、自記直達日射計、全天日射計、散乱日射計、下向き放射計等が新庁舎屋上に移設され(図 3.5.8)、これらの記録は露場の地面反射日射量及び上向き放射量のデータとともに 3 階に設置された日射・放射デジタル集録装置で記録されることとなった。この日射・放射デジタル集録装置によって、日射量(全天日射量・散乱日射量・地面反射日射量)と放射量(下向き長波長放射量・同エレメント温度・上向き長波長放射量・同エレメント温度)の 7 要素の 1 分間 12 回(5 秒間隔)のデータサンプリング、時間積算量のタイプライター出力(日表の作成)、アナログの打点式自動平衡型記録計による瞬間値の記録・モニターができるようになった。



図 3.5.8 新庁舎屋上の観測風景

観測を自動化し、測器を新庁舎屋上に配置した(反射日射、上向き長波長放射は露場)。

その後老朽化が進んだ同集録装置は、昭和 59(1984)年度より 3 年度計画で新たな整備が進められ、アナログ記録とデジタル記録(パーソナルコンピュータで収録)による日射・放射データ集録装置とし、昭和 60(1985)年に主要部が運用開始した。昭和 63(1988)年 1 月にはこの装

置を用い、日射計の入射角特性の影響を軽減させるために水平面全天日射量を直達日射量と散乱日射量から合成して求める方法に変更し、精度向上を図っている。

この頃、観測データを使用した調査研究も行われており、昭和 57(1982)年にメキシコのエル・チチョン火山の噴火が発生した際は、大気混濁度のみならず直達・散乱・全天日射量を用いての影響評価が行われ、直達日射量が約 16%減少したことなどが確認された(図 3.5.9, 小畑実: 1984)。また、日射・放射だけでなく日照時間を観測するための測器の調査・研究も行われており、昭和 53(1978)年に高層気象台職員であった池田弘氏が回転式日照計(図 3.5.10)を発案・開発している(池田: 1978)。この回転式日照計は、後に地上気象観測装置(80 型, 10 型)や地域気象観測装置(04 型)等に広く採用されている。

また、日射観測のアジア地区内の標準化のため、昭和 50(1975)年には中国との二国間日射計比較観測を、昭和 58(1983)年には香港との二国間日射計比較観測がつくばで開催され、高層気象台が参加・協力している。

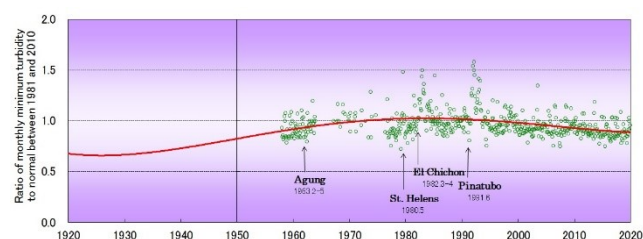


図 3.5.9 大気混濁度計数の月最小値平年比の経年変化
1982 年 3～4 月のエル・チチョン火山噴火(メキシコ)等の影響が分かる。

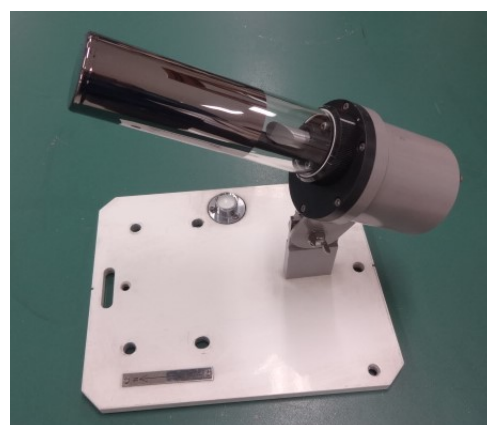


図 3.5.10 回転式日照計

高層気象台で開発された日照計で、日照有無を直達日射量 0.12kW/m^2 の閾値で正確に観測ができる。

なお、昭和 50(1975)年から気象庁測候課輻射係担当官 2 名が北相馬郡利根町から移転し当台と同じ建物に駐在することとなり、検定システムも前述の日射・放射デジタル集録装置と同時に更新され、被検定器 10 台を一度に検定できるシステムが完成した。これにより、日射・放射業務における本庁測候課と高層気象台の協力体制が強化されている。

ここで、この時代までの日本の日射基準の変遷について整理しておく。昭和 7(1932)年の銀盤式日射計による観測開始以来、国産の銀盤式日射計 No.757 を基準器とし、ストックホルムから輸入したオングストローム日射計で測器定数を仮決定し、さらにそれをスミソニアン日射スケールに変換した Smithsonian JMA を日射基準として採用していた。昭和 31(1956)年にダボスで開催された国際放射委員会による IPS-1956 の勧告を受け、昭和 32(1957)年からは、それまでの Smithsonian JMA に 0.9800 を掛けて IPS-1956 に準拠させている。気象庁は、昭和 45(1970)年にダボスで開催された第 3 回国際日射計比較に 2 台のオングストローム日射計で初めて参加し、国際日射スケールが“IPS-1956”に変更されたのを受け、昭和 46(1971)年より比較観測で校正された 2 台のオングストローム日射計を基準に“IPS-1956”を採用している。以降、気象庁は 5 年毎の国際日射計比較に参加している(表 3.5.2)。昭和 53(1978)年には、世界放射基準(WRR)が WMO で勧告され、我が国でも昭和 56(1981)年から採用することになった。これに従い測定単位もカロリーから国際単位系(SI)ワット及びジュール単位に変更され、現在に至っている。なお、昭和 60(1985)年の第 6 回国際日射計比較から、国際比較に持ち込む測器をオングストローム日射計から絶対放射計(高精度な直達日射計)に変更している。

この時期の日射量観測、直達日射量観測、放射量観測における調査・研究や測器の変遷は、下記の通り。

(ア) 日射量観測

昭和 50(1975)年、全天日射量観測に使用する全天日射計を通風装置付きゴルチンスキー型日射計から通風式 A 型日射計(MS-43F(EKO))に変更した。散乱日射計については昭和 58(1983)年に、地面反射日射計については昭和 60(1985)年に、それぞれ MS-43F に変更した。昭和 63(1988)年 1 月には、散乱日射計及び地面反射日射計を B 型(図 3.5.11、精密型、通風式、MS-801(EKO))に、散乱日射計の遮蔽装置を受光面の小型化に合わせ高層気象台製の大型遮蔽リングから英弘精機製の小型遮蔽バンド(MS-11B)に変更している。なお、気象庁では、受光面が黒色と白色に塗り分けられているものを A 型、黒一色の

表 3.5.2 日本が参加した日射計の国際比較

	開催年	参加測器の種類	参加
第 3 回	1970 年	オングストローム日射計	測候課
第 4 回	1975 年	オングストローム日射計	測候課
第 5 回	1980 年	オングストローム日射計	測候課
第 6 回	1985 年	絶対放射計	測候課
第 7 回	1990 年	絶対放射計	測候課
第 8 回	1995 年	絶対放射計	測候課
第 9 回	2000 年	絶対放射計	環境気象課
第 10 回	2005 年	絶対放射計	環境気象管理官
第 11 回	2010 年	絶対放射計	環境気象管理官
第 12 回	2015 年	絶対放射計	高層気象台

※ 開催地は全てスイス・ダボス。

※ 2020 年は、コロナウイルス感染症の影響で延期。



図 3.5.11 MS-801F(B 型)

面積の異なる 2 枚の受光板(黒・黒)間の温度差を熱電堆により日射量として検出。

ものを B 型と呼んでいる。全天日射計の感度設定方法として、定常的な散乱光観測を行っている高層気象台において、散乱光に対する測器感度を利用する方法が 1970 年に調査された。しかしながら、昭和 60(1985)年代においても、全天日射計の精度改善は構造的にも技術的にも困難と考えられており、全天日射計の特性を補正するための信頼できる評価方法や検査方法は確立されていなかった。このため、全天日射量を全天日射計に特有の入射角(高度角・方位角)特性の補正を必要としない、直達日射計による水平面直達日射量と全天日射計による散乱日射

量を合成することで精度向上が図れるものと考えた。

これに基づき、昭和 61(1986)年に新たに整備された日射放射データ集録装置を用い、直達日射計(MS-52(EKO))と全天日射計(MS-43F)に遮蔽リングを取り付けた天空散乱日射測定装置で得られた観測結果を合成した合成全天日射量と、各種の全天日射計(CM11(Kipp & Zonen), MS-801F(EKO), MS-43F(EKO))による全天日射量を比較し、全天日射計の精度評価を行った。また昭和 63(1988)年 3 月の直達日射計の MS52(EKO)から NIP(エプリー)への変更(後述)を受け、全天日射計(CM11, MS-801)について、合成全天日射量や気象測器工場の分光放射照度標準ランプ(EPI-1747)、コリメーションチューブ式全天日射計検定検査装置などを用いて同年一年分の観測データで感度比較を行っている。

(イ) 直達日射量観測

直達日射量観測は、昭和 51(1976)年末に銀盤式直達日射計のボディ内にゴルチンスキー型全天日射計感部を組み込んだ高層気象台型自記直達日射計(KOSO G-1)を用いて定常的な観測を再開した。昭和 57(1982)年には気象庁型自記直達日射計(官署用: MS-52)に測器を変更し、積算量の自動記録が可能となった。また、上述のとおり昭和 63(1988)年 3 月には、直達日射計を NIP(エプリー)に変更している。銀盤式直達日射計による直達日射量観測は 1 日 3 回の 10 分間平均値のみであったが、気象庁型自記直達日射計に変更してからは 1 時間積算値及び 10 分間平均値または瞬間値から算出した 1 日 3 回の大気透過率及び大気混濁度計数を求めた。

(ウ) 放射量観測

放射量観測に使用されていた通風型放射計(ギヤ・ダンクル型)は、風に伴う感度の変動が大きいことが明らかにされており、また雨やほこりが直接感部に触れるため受感部黒色塗料の退色や汚れが早く、吸収率を一定に保つことが困難であった。このため、昭和 51(1976)年 2 月に下向き放射量の測定を風防用として、長波長放射をよく透過するポリエチレンドームを感部保護に使用した風防型通風式放射計(図 3.5.12)に変更した。さらにその翌月に上向き放射量の測定も同放射計で再開し、降水時及び日中の観測も可能とした。これらにより、24 時間連続の放射観測(下向き放射量、上向き放射量、放射収支量観測)を同年 5 月に開始した。なお、風防型通風式放射計による観測は全波放射量であり、長波長放射量は全波放射量から日射量を差し引く方法で求めた。また、放射収支量は下向き放射量と上向き放射量の差から算出する方法に変

更した。一方、このポリエチレンドームは厚さが 0.1mm(頂部は 0.05mm より薄い)で柔らかく、自力で半球形を保てないため、ポリエチレンドーム内側の結露防止を兼ね、乾燥空気を送りこみ、内圧を外気圧よりごくわずかに高めて形状を維持させた。また、放射計受感部の外周においては、除霜及び風による放射計感度の変動を小さくするため、小型ファンによる送風を行った。

風防型通風式放射計の測器定数決定にあたって、検定器、測器の特性(ポリエチレンドームの透過率、受感部黒色塗料の分光吸収率、放射計感度の温度特性、放射計周囲の送風の有無)などの影響を調べ、放射計の特性及び測器定数決定に係る当時の課題がまとめられている(一木, 1978)。また、ポリエチレンドームは、透過率は良いが柔らかく、形状維持するために送風を一定に保つことが難しいという課題をかかえていた。このため、ポリエチレンの硬化を目指し、昭和 51(1976)年に、日本原子力研究所ラジオアイソトープ研修所で γ 線の照射を行い、都立工業技術センターに透過率検査を依頼している。しかしながら当初の目的はかなえられず、昭和 52(1977)年にはスズメと思われる野鳥にポリエチレンドームを食い破られる被害が発生し、回避用障害物(鳥よけ)を取り付けるなどの対策も行った。放射収支量は全天日射量・反射日射量・上向き及び下向き長波長放射量からの合成によりもめているが、測定精度はこの合成値より劣るものの、欠測を補完する手段として併用する簡便な測器として、昭和 63(1988)年 1 月に風防型有効放射計(フンク式: CN-11(EKO))の運用を開始している。この測器は上下両面に特性の等しい受光面を備え、上向き・下向き放射の差を直接測定する構造で、ポリエチレンドームと通風装置を備えていた。



図 3.5.12 防風型通風式放射計

感部保護のためポリエチレン製ドームが被せられており、鳥による被害を軽減するため感部周辺に針金を設置した。

(4) 国際観測網への参画(1989年～2020年)

この頃より、国際的な比較観測が本格的に行われるようになる。アジア地区内の日射観測の精度維持のため、平成元(1989)年に気象庁が WMO 第 II 地区(アジア)放射センターとして第一回 WMO 第 II/V 地区日射計国際比較を 1 月 23 日から 2 月 7 日まで筑波山で実施し、高層気象台はこれに参加協力している。以降、第四回までの WMO 第二地区日射計比較と、4 回の地区内比較が実施された(表 3.5.3)。

表 3.5.3 日本で開催した日射計の国際比較

開催年	参加国等	備考
1989 年	中国, 香港, 韓国, インド, イラン, ソ連, オーストラリア, マレーシア, ニュージーランド(測器のみ)	第一回 WMO 第 II 地区日射計比較(WMO 第 IV 地区と合同開催)
1994 年	タイ	地区内比較
1995 年	韓国, 中国	地区内比較
1997 年	韓国, 香港	地区内比較
2002 年	韓国, 香港	地区内比較
2007 年	中国, 韓国, 香港, 世界放射センター	第二回 WMO 第 II 地区日射計比較
2012 年	韓国, 香港, タイ, 世界放射センター	第三回 WMO 第 II 地区日射計比較
2017 年	中国, 韓国, 香港, タイ, オーストラリア, ニュージーランド, ソロモン諸島, 世界放射センター	第四回 WMO 第 II 地区日射計比較(WMO 第 IV 地区と合同開催)

平成元(1989)年に西ドイツで開催された「地球規模気候変動における地表面放射収支(SRB)に関する宇宙空間研究委員会(COSPAR)/WCRP ワークショップ」(国立極地研究所から出席)において、SRB 地上観測点のグローバル・ベースライン・ネットワークについて議論された。また、米国海洋大気庁(NOAA)の J.Deluisi 博士が、各国に対して行った事前調査に基づき、WCRP による「地上における放射フラックスの長期トレンドの監視」及び「地表面放射収支を衛星から決定するための検証値の提供」を目的とした、地球上の各気候帯を代表する、10 から 20 地点からなる地上放射観測網を設立する計画案を提示した。我が国においては、既に多くの観測を実施しており、条件を満たしうる観測所として、高層気象台と南極昭和

基地が紹介された。翌平成 2(1990)年には WMO から「WCRP のための WMO/ICSU 合同科学委員会」で提案された全球基礎地上放射観測網(GBSRN: 1990 年に BSRN と変更)計画の目的と観測種目とその精度等、及び計画への参加と観測地点の推薦について、各国あてに協力要請文が送付された。平成 7(1995)年の WMO 第 8 回日射計国際比較(本庁測候課から参加)の期間中には BSRN 臨時会合が開催され、我が国は計画に参加する意思があり準備を進めていること、間もなくデータ送付が可能になることについて報告された。さらに翌平成 8(1996)年 8 月に米国・ボルダーで開催された BSRN の 4 回目の会合(科学及び評価ワークショップ)には気象庁(高層気象台)から初めて参加して取組の現状を報告し、その直後の 9 月には国内関係者による会議において高層気象台が BSRN のコンタクトパーソンを務めることとなった。以後、BSRN ワークショップは 2 年毎に開催されている(表 3.5.4)。

表 3.5.4 日本が参加した BSRN ワークショップ

	開催年	開催地	参加
第 4 回	1996 年	アメリカ・ボルダー	高層気象台
第 5 回	1998 年	ハンガリー・ブダペスト	高層気象台
第 6 回	2000 年	オーストラリア・メルボルン	高層気象台
第 7 回	2002 年	カナダ・レジェイナ	高層気象台
第 8 回	2004 年	イギリス・エクセター	高層気象台
第 9 回	2006 年	ドイツ・リンデンベルク	高層気象台
第 10 回	2008 年	オランダ・デビルト	高層気象台
第 11 回	2010 年	ニュージーランド・クイーンズタウン	高層気象台
第 12 回	2012 年	ドイツ・ポツダム	環境気象管理官
第 13 回	2014 年	イタリア・ボローニャ	環境気象管理官
第 14 回	2016 年	オーストラリア・キャンベラ	環境気象管理官
第 15 回	2018 年	アメリカ・ボルダー	気象研究所 気候研究部

※ 2020 年に予定していた第 16 回会合は、コロナウイルス感染症の影響で延期され、主要課題のみリモートで議論。

高層気象台は、平成 8(1996)年 4 月に、日射・放射観測値(直達日射・散乱日射・下向き長波・上向き短波・上向き長波)の BSRN ファイル形式による世界放射監視センター(WRMC, スイス連邦工科大学)への報告を、16 TAT(TATENO)/JAPAN として当年分のデータから開始した。報告開始以降、BSRN の仕様を満たすよう各種改善がなされている。とりわけ、それまで 5 秒であったサンプリング間隔が 1 秒となることにより増大するデータ量を迅速に処理するため、データ取得、測定値等の表示・チェック、データ処理、BSRN 報告ファイルの編集・作成など一連の作業を効率的に行う「日射放射データ集録装置」の運用を平成 9(1997)年に開始している。その際には、電気ノイズの混入を防止しデータ通信の信頼性を向上させるため、屋上及び露場から観測室までの信号ケーブルを光ファイバー化した。この処理システムにより、毎月のデータ送付が可能となり、また以前の報告を世界時に基づき編集し直し再送付した。同様に、南極においても平成 10(1998)、11(1999)年に BSRN 基準に合致した観測に移行している。また、平成 10(1998)年の BSRN 第 5 回ワークショップにおいて、高層気象台が開発した BSRN 観測点用データ処理ソフトについて、他の観測点で利用できるよう世界放射監視センターから提供依頼があり、一部改良を加え汎用化したものを平成 11(1999)年に提供している。

大気中のエアロゾルは、太陽放射を散乱・吸収し地上に到達する日射量を減少させるなどで、気候に影響を与える。また、エアロゾルの種類により影響を受ける波長も異なる。このため、平成 6(1994)年に観測項目を増やし、特定波長の日射強度測定が可能な、サンフォトメータによるエアロゾルの研究観測を開始した。

エアロゾルによる気候変動への影響、光合成による生態系の炭素循環、太陽電池パネルの発電効率などは、波長別の日射強度が大きく影響する。また、数値予報モデルでは紫外域から近赤外域までを波長帯別に分けて利用している。こうしたことから、平成 23(2011)年に分光放射強度を把握するため分光放射計による波長別放射照度の研究観測を開始した。

日射観測に関しては古くから国際的な観測基準(IPS-1956 等)が存在したが、長波長放射観測に関しては観測基準の策定が遅れた。このため、測器定数の決定は、平成 5(1993)年以前は前述の通り「180° 自動走査直達大気放射計」等による比較観測により、平成 5(1993)年からは気象研究所及び高層気象台において開発された低温黒体炉(図 3.5.13)を用いた赤外放射計検定装置により行われた。また平成 9(1997)年には新しい校正装置により、世



図 3.5.13 赤外放射計検定装置(黒体炉)

長波長放射計を検定するために高層気象台等で開発された装置。左から、制御部、黒体炉、サーキュレーター(恒温槽)。

界放射センターで開発され BSRN 観測マニュアルに掲載された新たな測定方程式に基づき長波長放射計の校正を行った。

その後、平成 10(1998)年の第 5 回 BSRN ワークショップにおいて長波長放射計の校正に関する作業グループが組織され、長波長放射計の国際比較が計画された。平成 11(1999)年に米国オクラホマ州で、平成 13(2001)年に米国アラスカ州・バローで開催された長波長放射計の 2 回の国際比較(IPASRC-IandII)に、高層気象台から赤外放射計検定装置で校正した長波長放射計が参加した。この国際比較では、世界放射センターが開発した長波長放射観測値の絶対誤差を見積もることができる絶対天空走査型放射計(ASR)を基準に比較が行われた。

高層気象台は、平成 12(2000)年から平成 13(2001)年に世界放射センターの校正式に加えて、ドーム内非放射熱伝達(空気による熱伝導)とドーム内金属面での反射を組み込んだ PIR 校正式を作成し、さらに校正の基準となる円錐空洞をもつ黒体炉の空洞と蓋部間の多重反射を組み込んだ、入射放射フラックスの計算方法を理論的にまとめ、この独自の校正手法をもって得られた校正値により、平成 14(2002)年にダボス物理気象観測所(PMOD)及び NOAA 気候監視診断所(CMDL)による校正値との比較測定を屋外で行った。ここでは、校正手法に関する技術的な議論・検討も行われ、参加した各機関ともほぼ同じ測器定数を決定することが可能となり、赤外放射計の校正技術が確立された。同年の WMO 測器観測法委員会(CIMO)第 13 回会合において、長波長放射の統一した観測基準の制定、世界赤外放射計校正センター(WIRCC)の設置が勧告され、平成 16(2004)年に世界放射センター内に設立された赤外放射部門(IRS, WIRCC の役割を担う)

により、平成 18(2006)年に長波長放射観測の世界基準が WMO/CIMO において制定された。この世界基準の確立には、上記の平成 14(2002)年の PMOD, CMDL との比較観測等で示した高層気象台の校正手法を含む技術が利用されている。

WIRCC では長波長放射計の世界赤外基準器群(WISG)を整備し、IPASRC に参加した絶対放射計(ASR)と定期的に比較を行い観測のトレーサビリティを確保しつつ、WISG との比較観測によって地区放射センターが保有する地区赤外放射計準器の校正を行うこととなった。高層気象台では、それまで用いてきた独自の観測基準と、新たに制定された世界基準による観測値の差異を評価した。具体的には、WIRCC で校正された長波長放射計(PIR)において、平成 19(2007)年に様々な観測条件下で取得した観測データ(長波長放射計の出力電圧値)に、WISG との比較観測により校正された世界基準による校正係数と、高層気象台の赤外放射計検定装置を用いて決定した独自の基準による校正係数を適用して、それぞれで長波長放射量を算出し比較した。その結果、両者の差が長波長放射量の大きさや長波長放射計ボディ温度に依存する程度は極めて小さいことが確認され、高層気象台で独自に維持してきた観測基準の確かさが実証された。またこれにより、気象庁が維持している赤外放射計校正装置により校正された観測値と世界基準を導入した場合の観測値が十分な精度で連続性を持つことが確認されたため、高層気象台において、平成 20(2008)年 1 月より観測基準の世界基準への移行が行われた(大河原他, 2008)。さらに平成 21(2009)年には、赤外放射計の黒体炉の改造が完了し、黒体炉を精密な日射・放射観測に用いる新たな赤外放射計(CG4, CGR4)の温度特性検査に使用することが可能になった。

なお、平成 8(1996)年に、高層気象台における観測開始からの水平面直達日射量、直達日射量、天空散乱日射量、地表面反射日射量、全天日射量、上向き・下向き長波長放射量及び放射収支量の 1 時間積算値、日積算値の月平均値を掲載した「高層気象台日射・放射資料集」を刊行して、関係機関等に配布している。ここには、それまでの高層気象台における日射・放射観測機器や観測手法の変遷が書かれている。また後年、このデータをもとに経年変化の傾向等の解析が行われている。

この時期の日射量観測、直達日射量観測、放射量観測等における調査・研究や測器の変遷は、下記の通り。

(ア) 日射量観測、直達日射量観測

日射量観測、直達日射量観測については、BSRN への

参加を機に、観測精度の向上が図られている。平成 6(1994)年、スイス BRUSAG 社で開発・制作された、方位・高度角 2 軸制御の全自動で高精度な太陽追跡装置に散乱日射用遮蔽ディスクを装備した精密全天日射観測装置(INTRA II)を一般官署用追跡装置に代えて導入した(精密全天日射計は MS-801)。この直達日射観測用の太陽追跡装置は、太陽位置を計算して追跡制御を行うため赤緯変化の手動調整が不要であり、サンセンサーにより追跡誤差の補正を自動的に行う。また散乱日射は太陽面以外の遮蔽部分について補正が必要であった遮蔽バンド(EKO BM11)から、直達日射だけを遮蔽するディスク方式に変更となったため、一年間両者の比較観測を行って精度を確認している(志村他, 1994)。また平成 8(1996)年には、国内で直達日射観測を実施する 13 官署の電気式直達日射計の更新計画に伴い、高層気象台にもこれらの官署で使用しているブリード社製電気式直達日射計が整備された。この自記直達日射計には、Kipp & Zonen 社の感部(CH-1)と自動太陽追跡装置が採用されており、高層気象台においては BSRN に対応できるよう 1 秒間隔のサンプリングとされた。

散乱日射については、平成 15(2003)年にガラスドームに光学石英を用い、ドームとセンサー間の温度差による夜間ゼロオフセットの低減を図ることができる CM22(Kipp & Zonen)を採用している。平成 22(2010)年には、直達日射計の感部は Kipp & Zonen 社製 CH1 から CHP1 に更新され、直達日射観測における大気混濁係数の算出における太陽面の雲の有無の自動判別アルゴリズムに関する精度が、BSRN の要件である一秒値で検証された。

(イ) 放射量観測

放射量観測については、長波長放射のみを単体で測定できる測器をエプリー社が開発した。この赤外放射計(PIR)は、BSRN において長波長放射測定における精度目標を達成できる可能性がある測器として推奨された。高層気象台においも、長波長放射量を風防型通風式放射計による全波放射量から日射量を差し引く方法で求めていたが、長波・短波の感度差による誤差を避けることができなかったため、長波長放射のみを直接測定できるシリコン製ドーム付赤外放射計の導入が検討された。赤外放射計においてもドームからの二次放射の問題があり、昭和 62(1987)年に高層気象台が採用した英弘精機社製 MS-200 では二次放射の補正に必要なドーム温度の測定ができなかったため、平成 3(1991)年にドーム測温機能が付いた PIR に更新した。

平成 4(1992)年, このドーム効果の定量化の研究を行っていた気象研究所に検定を依頼し, 全波放射計と PIR による下向き長波長放射の比較観測を行った。またドーム付近の水切れが悪い PIR の水濡れ・着霜・結氷への対策のため, 英弘精機に依頼してファン付き台座への取り付け及び測器全体をカバーで覆う通風装置を製作した。これにより平成 5(1993)年には, 下向き長波長放射観測器を赤外放射計(PIR)に, 平成 6(1994)年には上向き長波長放射観測器を同じく赤外放射計(PIR)に変更した。

BSRN はドームの昇温防止のためドームを直達日射から遮蔽することを推奨しており, 平成 9(1997)年にプリード社による長波長放射観測用太陽遮蔽装置(ASTX-200S)の運用を開始した。さらに平成 11(1999)年には BSRN の勧告に従い, PIR のドームの温度分布が一様でないことから生じる誤差の減少を図るため, ドーム内側の高度角 45° の位置に方位角 120° 毎に測温サーミスタを配して, より正確にドーム温度測定を行えるよう改造を行った。

平成 11(1999)年後期から翌平成 12(2000)年初めには, 遮蔽装置の使用有無に関する比較観測データを用いて, 遮蔽装置による測定値の安定化を示し, 遮蔽装置を使用した長波長放射量を基準として, 遮蔽装置を使用しない PIR の最適な校正係数(世界放射センターによる校正式のドーム効果に関わる係数)を求め, 高層気象台の PIR の校正精度と測定精度が BSRN の目標を満たしていることを確認した。一方, Kipp & Zonen 社においてボディとドームの熱的接触を緊密にし, 両者間に実質的な温度差を無くしドームからの二次放射の影響を考慮しなくてよい赤外放射計(CG4)が開発され, 南極昭和基地に導入された。この測器を南極へ持ち込む前に, 高層気象台で PIR との比較観測を行った。CG4 は PIR のように円錐黒体炉を用いた校正手段がなく, 他の赤外放射計との比較観測により測器定数を求めるしかなかったため, 特性把握の調査も兼ねて平成 16(2004)年に 3 台の CG4(2 台は高層気象台購入, 1 台は南極観測事務室購入)と PIR との比較観測を行った。この結果を受け, 平成 20(2008)年に上向き及び下向き長波長放射観測に CG4 を導入した。

高層気象台において, 昭和 63(1988)年に導入された放射収支計(CN11)の老朽化による Kipp & Zonen 社製 CNR1 への更新にあたって, CNR1 と直達日射(CH1), 散乱日射(全天日射計 CM21・CM22), 上・下向き長波長放射(PIR), 反射日射(全天日射計 CM21)の合成値あるいは各基準値との比較, 及び CN11 との比較観測を平成 14(2002)年から数年間実施した(長井ほか: 2006)。

(ウ) エーロゾルの光学的厚さ観測

高層気象台では, 平成 5(1993)年から翌年にかけて気象研究所の「関東平野上空の成層圏エーロゾル粒子の直接採取」のためのゾンデ飛揚への協力を行うとともに, 同年にサンフォトメータ(MS-110(EKO))を用いたエーロゾルの光学的厚さ(AOD)の研究観測を開始し, 翌平成 6(1994)年には太陽追跡装置(INTRAI)に取り付け, データをマルチログガーにより自動集録した。高層気象台における MS-110 の校正は, 観測当初は現地でのラングレー法による検定は困難との判断から, 木曽駒ヶ岳千畳敷カール(標高 2612m)においてラングレー法により検定された気象研究所のサンフォトメータと一年毎に比較観測を行い測器定数を決定した。一年毎に決定されるサンフォトメータの測器定数の監視方法として, つくばのような低地でも可能な手法を検討したが, MS-110 は干渉フィルターの感度の経時変化が大きく, 年一回の校正だけでは測器定数の把握が困難であることがわかった。

平成 14(2002)年には, 感度の経時変化が大きい干渉フィルターを用いて分光するサンフォトメータに変えて, 感度の経時変化が小さい回折格子を用いて分光するサンフォトメータ(プリード社製 PGS100)を導入し, 性能調査及び MS-110 との比較観測, 経年変化把握のための直達日射量からの推定, 可降水量の算出, 太陽面の雲の有無の判別手法などの調査を行った。PGS100 は木曽駒ヶ岳千畳敷カールでラングレー法により検定されたが, 出力値のばらつき, 長波長や紫外域の出力が小さい問題, 波長ずれなどの問題があり, 平成 16(2004)年に検出器及び拡散板の改良を, また平成 17(2005)年には測器内部へヒーターを設置して測器温度の恒温化による改善を図った。このように PGS100 は導入後に測器改良が行われたが, データの特性についてまだ疑問点が残し, また高地でのラングレー法による校正が必要なことなど, データの品質管理に困難な部分があった。このため, 高品質で長期間安定した AOD 観測が可能な測器として, PMOD で開発されたフィルター型のサンフォトメータ(PFR)を平成 20(2008)年 9 月に導入した。PFR のフィルターには劣化を防止するためのイオンアシスト蒸着加工が施され, 測器定数の管理も比較的容易である。

平成 21(2009)年に PFR と, 比較観測で国内基準器により校正された MS-110 との AOD の比較観測を一年間行って, MS-110 から PFR へのデータ接続の可能性について調査し, データの連続性を確認した。PFR は, 3 年に一度 PMOD により国内基準器の測器定数の校正を行い, この国内基準器と年一回比較観測を実施して確認していたが, 国内基準器がスカイラジオメーターに変更されたことから, 現在は PMOD で最後に校正した PFR と定期的

に比較を行うとともに、環境気象管理官がマウナロアで定期的に校正したスカイラジオメーターと比較(測定波長が一致しないため、内挿処理して比較)し補正する方法で観測精度を維持している。

(エ) 波長別放射照度の観測

高層気象台では、平成4(1992)年に全天日射量(MS-801)から近似式による波長別放射照度の推定を試み、デジタル照度計(T1H)との比較観測を行っている。平成23(2011)年には分光放射計(英弘精機社製 MS710: 350-1000nm)が導入されたが、分光放射計の精確な校正方法や、温度特性及び入射角特性の補正方法は確立されていなかったことから、産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センターの協力を得つつ、校正方法を開発して定常的な観測を開始した。また、この調査と並行して、平成24(2012)年から宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び国立環境研究所(NIES)と「陸域生態系の生産量推定等に関する共同研究」を開始し、平成26(2014)年からは気象研究所と「分光日射観測とデータ同化によるエロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究」を共同研究として開始し、分光放射計の光学特性等の把握及び校正方法を確立するための調査を担った。平成30(2018)年には、英弘精機社製の MS-710, MS-711, MS-712 及びプリード社製の PGP-200NIR2 を使用し、測定波長範囲を近赤外域まで広げている(居島ほか: 2019)。

(5) 日射・放射観測の成果と将来展望

IGY以降高層気象台は、日射・放射の観測項目を増やす取り組みとともに観測精度を高める努力を重ね、現在まで日射・放射観測を地道に継続し、世界的にも数少ない長期間で精度がよい観測データを提供できる地点になっている。こうした取り組みの成果は、スイス工科大学大村教授らが日射量の長期変動を解析した「曇りから晴れへ：地球表面での太陽放射の10年変化(サイエンス(2005年5月6日号))」において、世界で僅か5地点の一つとして高層気象台のデータを利用したことでも知ることができる。また、平成22(2010)年3月には、地表面に入射する全ての放射エネルギーを精密に把握するため、それまで積み重ねた高層気象台の知見を活かし国内で初めての精密日射放射観測網が整備されることとなり、つくば以外の札幌(令和2(2020)年度に移転計画有)・福岡・石垣島・南鳥島の4地点においても日射・放射の総合的な観測(直達日射、散乱日射、下向き赤外放射)が開始された(口絵27)。また、同年4月にはBSRN観測点に登録されている。

日射・放射観測の目的は、気温変動を含む地球の様々な大気現象を引き起こす源となる地球が受け取る(あるいは放出する)エネルギーを把握することであり、気候変動を監視するうえで重要なことである。今後も、精度の良い放射収支の総合的観測を継続するとともに、BSRNで提供されるデータベースを利用・解析し、既に起こっている、あるいは起こりつつある気候変動を把握することも重要である。また、衛星プロダクトの検証や数値予測モデルの精度向上に寄与すべく得られた観測データの提供を積極的に進めていくことも重要と考える。

参考文献

- 一木明紀 (1978): 風防型放射計による全波長放射の昼夜連続測定についての諸問題. 高層気象台彙報, **39**, 41-48.
- 居島修 (2012): 分光型全天日射計(MS-710)の温度特性及び入射角特性について. 高層気象台彙報, **70**, 37-42.
- 居島修・島村哲也 (2013): 分光型全天日射計(MS-710)の測器常数校正とつくばにおける太陽光スペクトルの試験観測. 高層気象台彙報, **71**, 11-20.
- 居島修 (2014): 分光型全天日射計(MS-710)を用いた太陽光スペクトルにおける直達成分と散乱成分の試験観測. 高層気象台彙報, **72**, 25-32.
- 居島修・松元誠 (2015): つくばにおける太陽光スペクトルの直達成分と散乱成分の季節変化. 高層気象台彙報, **73**, 35-44.
- 居島修・高野松美 (2016): 分光型全天日射計(MS-712)を用いた太陽光スペクトルの近赤外域における試験観測. 高層気象台彙報, **74**, 27-36.
- 居島修・高野松美・山崎明宏・石田春磨・工藤玲 (2018): 分光放射計用校正装置の開発及び分光放射計の校正精度. 高層気象台彙報, **75**, 63-76.
- 居島修・高野松美 (2019): 分光放射計の校正手法の開発. 高層気象台彙報, **76**, 29-44.
- 池田弘・福田寿彦・田村竹男 (1972): 180°自動走査直達大気放射計について. 高層気象台彙報, **9**, 27-37.
- 池田弘 (1978): 隔測日照計の一考察. 測器技術資料, **5305**
- 池田弘 (1979): 隔測日照計の一考察. 測候時報, **46**, 199-203.
- 気象庁 (1960): Report of IGY Radiation Observation in Japan
- 気象庁 (1961): Resort of IGC Radiation Observation in Japan
- 高層気象台 (1943): 地上気象観測原簿 1943 年
- 桑名十郎 (1954): 大気輻射の観測装置について. 高層気

象台彙報, **5**, 3, 189-198.

桑名十郎・福田寿彦 (1957): 大気輻射計用自動雨よけ装置. 高層気象台彙報, **6**, 1, 63-67.

長井勝栄・長沼弘 (2004): 放射収支計 CNR1 の特性について(第二報). 高層気象台彙報, **64**, 69-74.

長井勝栄・長沼弘 (2005): 放射収支計 CNR1 の特性について(第三報)－結露防止用ヒーターの影響調査と日射遮蔽装置の試作－. 高層気象台彙報, **65**, 53-60.

長井勝栄・長沼弘 (2006): 放射収支計 CNR1 の特性について(第四報)－日射遮蔽通風装置の試作－. 高層気象台彙報, **66**, 81-86.

長沼弘・廣瀬保雄 (2003): 放射収支計 CNR1 の特性について(第一報). 高層気象台彙報, **63**, 19-24.

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**, 37-42.

関根正幸・志村英洋・鈴木宣直 (1973): 日射・放射観測の基準化と観測網の展開. 天気, **20**, 653-679.

志村英洋・上野丈夫・寺坂義幸 (1994): 精密全天日射観測装置(INTRAI)について－全天日射及び散乱日射観測の精度向上－. 高層気象台彙報, **54**, 31-38.

地球環境・海洋部環境気象管理官 (2012): 新しい日射放射観測の開始について. 測候時報, **79**, 15-37.