

〔研究〕

常温環境における微弱赤外分光放射測定技術の研究

The Examination of the Weak Infrared Spectral Radiometry in Normal-Temperature Environment.

湊 秀幸 石堂 能成 西本 昭男
H. MINATO Y. ISHIDO A. NISHIMOTO

The purpose of this study is the development of precision measurement system of infrared radiation and the examination of the weak infrared spectral radiometry in normal-temperature environment. The result of this study is summarized as follows.

First, for precision measurement of low temperature radiation, the spectral radiometric system which is consisted of a precision Fourier transform infrared spectrometer, HgCdTe semiconductor (MCT) detector and cryogenic composite bolometer detector has been set up. Then spectral radiometry of weak radiation in middle infrared area is available. As reference source of low temperature radiation, a cavity type radiation source for various low temperature levels also has become available. The cavity type radiation source can be operated in vacuum from 40°C to -20°C with a cooling device. This radiation source also can be operated at fixed point of temperature, with the aid of ice, dry ice, and liquid nitrogen. In experiment, the procedure of radiometry taken account of the elimination of background radiation in spectral radiometric device for various low temperature levels has been developed. In the normal temperature, by using this system, it seems to be possible to measure the infrared radiation at -70°C. In the wavelength from 5 to 25 μm , the reproducibility of this measurement was less than 0.5 %.

§ 1 はじめに

300K 付近の温度の物質からの放射は、赤外域を中心とした微弱な放射であるが、対象物の温度や、成分等を検出するためによく利用されている。このような赤外放射の精密分光計測技術は、地球環境計測技術の向上と地球温暖化問題の正確な把握や各種産業の発展においても重要と考えられる。我々は、最近、雲及び大気などの微弱赤外放射の高感度測定と精密校正技術の開発にあたり、操作性にすぐれ、高性能な赤外分光器、高感度赤外検出器等を導入し、近赤外～中赤域における精密分光放射測定を実施可能にすることが必要であった。そこで筆者らは、現在の赤外分光器の主流と考えられフーリエ変換赤外(FT-IR)分光器、極低温複合式ボロメータ検出器の設置・製作を行う共に、低温放射の参照光源として各低温レベルを設定可能な空洞型放射光源を整備し、常温環境における低温放射測定

の実験的検討を試みた。また、このような低温の赤外分光放射測定では、分光測定器自身の放射、即ちバックグラウンド放射の正確な補正が必要となるが、装置の性能評価実験では、このような補正を厳密に行い、測定可能な放射温度レベルや、測定の限界性・再現性等を明らかにした。

本報告では、上記のような精密赤外分光放射測定装置の開発の現況を中心に、この装置の特性に関する実験結果と検討の詳細について述べる。

§ 2 測定装置の構成

常温以下における低温放射の赤外分光計測では、放射強度が微弱となるため、放射束利用効率の高い、いわゆる明るい光学系で構成された分光器、及び高感度で安定性に優れた検出器等が必要である。ここでは、低温レベルの赤外放射の精密測定を可能にするため、FT-IR分光器を使

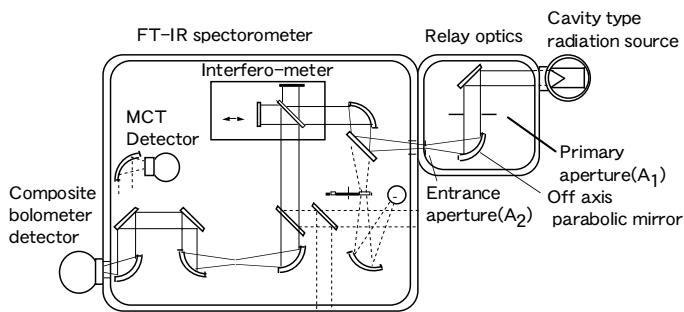


図1 精密赤外分光放射測定システムの光学系

Fig.1 Optical diagram of precision infrared spectral radiometry system

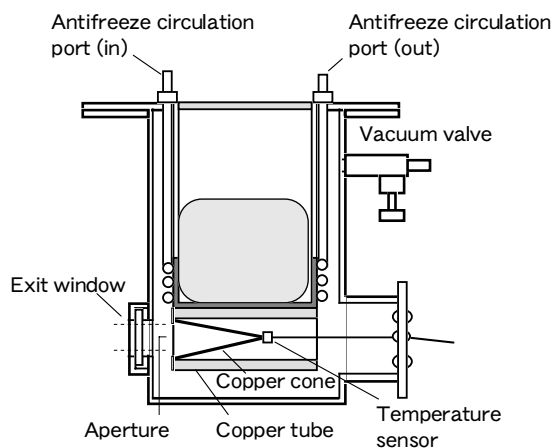


図2 空洞型低温度放射光源の断面図

Fig.2 A cross section of cavity type low temperature radiation source

用した放射測定光学系，極低温複合式ボロメータ検出器¹⁾，低温度放射の参照光源とするための円錐形状の空洞型低温度放射光源等から構成した精密赤外分光放射測定装置の詳細について述べる²⁾。

図1は、今回の装置の根幹となるFT-IR分光器を用いた精密赤外分光放射測定装置の構成を示す。図において、FT-IR分光器(Bruker社、IFS 66V)は、真空耐圧構造で、図に示すような光学系を有し、ビームスプリッタの交換により、 $10000\text{cm}^{-1} \sim 80\text{cm}^{-1}$ の範囲の分光測定が可能となっている。最小波数分解は、 0.1cm^{-1} であり、高波数分解の測定も可能である。また、このFT-IR分光器には、外部からの放射束(次に述べる黒体型光源等より)を導入可能とすると共に外部光源との光学系の整合性を図るため、リレー光学系を設置し、外部からFT-IR分光器への入射放射束は平行放射束として導入するようにした。すなわち、このリレー光学系における入射開口(面積 A_2)は、 $1 \sim 24\text{mm}$ まで可変とし、パラボリック反射鏡は焦点距離 $f=160\text{mm}$ であり、入射放射束限定用開口(面積 A_1)は直径 $D=35\text{mm}$ となっている。

図2は、図1に示されている黒体型光源として用いた円錐形状の空洞型低温度放射光源の構成を示している。この

円錐形状の光源は、図に示すように、 10^{-3}torr の真空度を達成し得る真空容器内に設置され、その温度は、外部の冷凍器と不凍循環液によって $40 \sim -20$ の温度範囲を ± 0.3 の精度で制御可能となっている。さらに、この真空容器(出射窓材は直径 60mm 、厚さ 6mm のKBrを使用)では、氷、ドライアイス、及び液体窒素などを用いてそれぞれの定点の温度を設定することが可能になっている。円錐形状の光源部は、 0.2mm 銅板を用いて作製し、開口径 40mm 、頂角 30° であり、内部はカーボンを主成分とする黒色塗料でコーティングされている。この円錐形状光源部の温度は、水晶発振式温度センサーを用い、図2に示している位置で測定されるようになっている。このような構造の空洞型低温度放射光源は、低温度放射の参照光源として、極めて有効に利用することができた。

§ 3 測定

本節では、上記赤外分光放射測定装置における各低温度レベルでの精密な赤外分光放射測定の方法および実験結果についてのべる。

3.1 測定方法

図1の測定装置の構成において、入射開口における分光放射束 B は、次式のように表される(波長あるいは波数表示は省略)。

$$B = k \Omega_2 W A_1 \quad (1)$$

ここで、 k は比例定数、 W は、黒体型光源の分光放射輝度を表し、 Ω_2 は、パラボリック反射鏡の中心に対する入射開口の立体角($\Omega_2 = A_2 / f^2$)であり、 A_1 、 A_2 は、それぞれ、パラボリック反射鏡(焦点距離 f)側、および入射開口の実効面積に対応する。そこで、実験では、低温度光源の赤外分光放射輝度の精密計測と測定可能な低温度放射レベルを把握するため、FT-IR分光器に上記極低温複合式ボロメータ検出器を設置し、常温環境で図2の円錐形状の空洞型低温度放射光源に対する赤外分光放射束 B の測定を行い、分光放射測定系の安定性、測定可能な低温度放射レベルなどについて検討した。一方、このような低温度放射の測定、すなわち微弱赤外分光放射測定では、測定器自身によるバックグラウンド放射の存在が大きな問題となるが、この問題の状況を図3に示す。図3は、空洞型低温度放射光源を 10 と液体窒素の温度 -196 に設定して測定した場合の放射束 B に対応する極低温複合式ボロメータ検出器の出力特性(インターフェログラム)の測定例を示しているが、同図において、液体窒素の温度 -196 での放射は非常に小さく無視できると考えられ、この場合の検出器出力は測定器自身によるバックグラウンド放射に対応する。こ

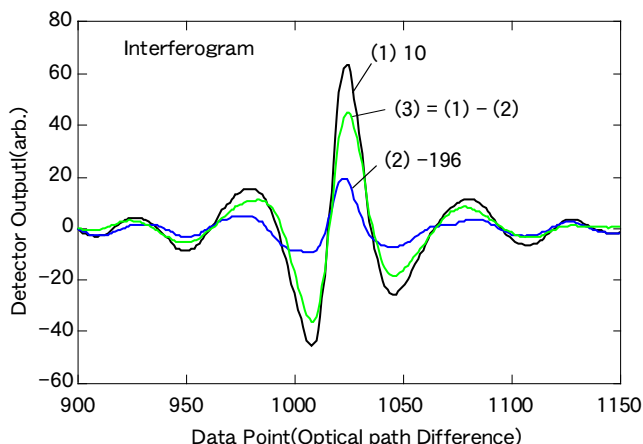


図3 空洞型低温放射光源の10 と-196 における分光放射輝度に対するインターフェログラムの測定例

Fig.3 Measurement example of interferogram for spectral radiance in 10 and -196 of cavity type low temperature radiation source

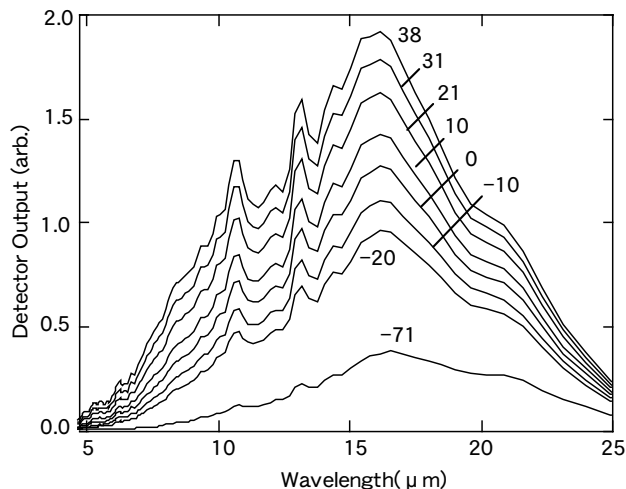


図5 空洞型低温放射光源の各温度レベルの分光放射輝度に対する真の検出器出力

Fig.5 True detector output corresponding to spectral radiance in each temperature level of cavity type low temperature radiation source

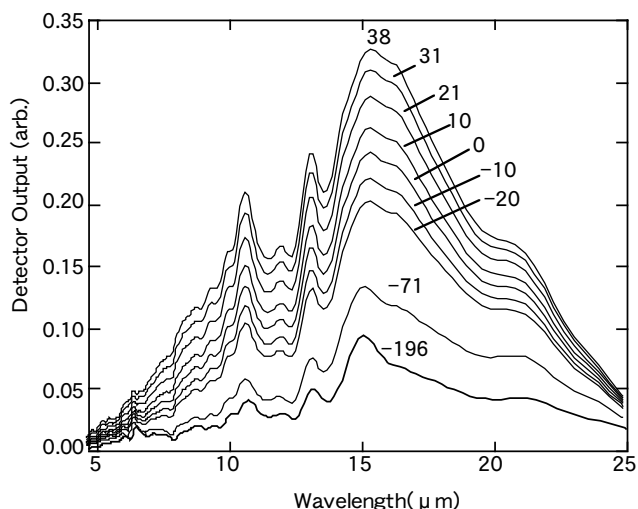


図4 空洞型低温放射光源の各温度レベルの分光放射輝度に対する見かけの検出器出力

Fig.4 Apparent detector output corresponding to spectral radiance in each temperature level of cavity type low temperature radiation source.

のようなバックグラウンド放射を除去する方法の一つとして、まず測定されたインターフェログラムをフーリエ逆変換し、スペクトルに変換の後位相補正を導入してバックグラウンド放射の除去を厳密に行うという方法があるが、この方法の手順はやや煩雑であると推察された³⁾。そこで我々は、各温度レベルにおける赤外放射に対応する真の検出器出力の波長特性は、図3の曲線(3)のように、測定器自身の放射に対応するインターフェログラムとの差をとり、その結果についてフーリエ逆変換を行った結果が(1)式にあるような真の分光放射束Bに対応する検出器出力の波長(FT-IR分光法では波数で得られる)特性であるとした^{4,5)}。

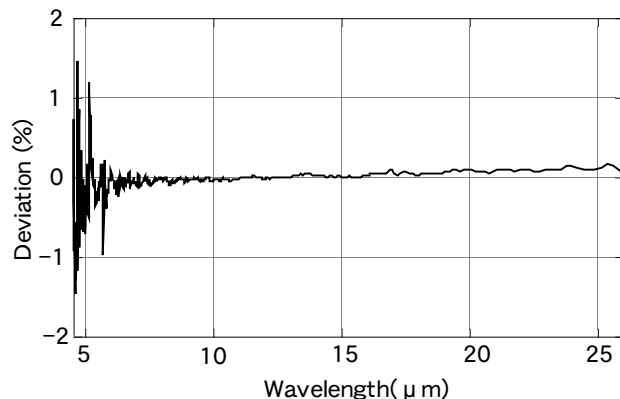


図6 測定の再現性

Fig.6 Reproducibility of the measurement

3.2 測定結果

図4は、図1の測定装置の構成において、38 から-196の各温度レベルでの円錐形状の空洞型低温放射光源に対する見かけの検出器出力の測定結果を示す。ただし、-196での検出器出力測定結果は、光源の放射成分は極めて小さく、ほとんど測定器自身におけるバックグラウンド放射に対応する放射成分のみと考えられる。なお、これらの測定結果は、インターフェログラムの測定を、それぞれ、波数分解 32cm^{-1} 、加算数60回で行い、その結果をフーリエ逆変換して算出したものである。また、これらの結果は、図1の測定システムにおいて、FT-IR分光器および空洞型低温放射光源は真空とし、リレー光学系は大気の状態(この時点では真空に出来なかったため)で測定されたものである。

図5は、図4の測定結果とは異なり、上記3.1のようなバックグラウンド放射の除去方式を適用し、空洞型低温放射光源の赤外放射に対する真の検出器出力の波長特性

を示している。これらの測定結果の確からしさについては、次節でのべる。

§ 4 検 討

前節の測定結果から、各温度レベルの赤外分光放射に対する検出器出力測定の再現性、円錐形状の空洞型放射光源を黒体と見なした場合の測定結果の確からしさ、及び常温環境における低温度放射測定の限界性についての検討を述べる。

4.1 測定の再現性・安定性

図6は、測定の再現性を知るため、円錐形状の空洞型低温度放射光源の設定温度6において図4の様な測定を2回繰り返した場合の結果を%偏差で示す。同図より分かるように、繰り返し測定の再現性は、波長範囲7~25 μm において $\pm 0.2\%$ 以内であり、この様な測定としては極めて良好な再現性であると考えられる。

また、測定系全体の安定性を知るため、図1の測定装置において、円錐形状の空洞型低温度放射光源の設定温度6での上記のような測定を5分間隔で12回測定した。図7はこの結果を平均偏差で示す。

すなわち、同図から伺えるように、一時間以内における装置の安定性は波長範囲7~25 μm において $\pm 0.5\%$ 以下であると見積もられるが、この偏差は、主として図2の空洞型低温度放射光源の冷凍器の不凍循環液による温度制御(± 0.3)の不十分さに起因するものと考えられ、光源以外のシステムの安定性は図7よりさらに良好であると推察される。

4.2 低温度放射測定の確度と限界性

図8は、図5における38の温度の検出器出力結果が同温度の黒体の分光放射輝度に対応するとみなし、各温度における検出器出力と38の温度における検出器出力との比から算出した各温度レベルにおける光源の分光放射輝度の比較結果を示す。図8において、印は測定値から得られた結果に対応し、実線はプランクの輻射式から算出した各温度レベルの分光放射輝度に対応する。両者は、よく一致しており、これらの実験結果は極めて信頼性が高いことを示していると考えられる。

図9は、図4の液体窒素の温度(-196)の検出器出力に対応する測定系のバックグラウンドと等価な分光放射輝度(信号と雑音との比 $S/N=1.0$ に対応)を示す。この結果は、図8の場合と同様に、図5に示した38の温度放射に対する真の検出器出力と図4の液体窒素温度(-196)に対する検出器出力の比から算出し、これをバックグラウンド放射

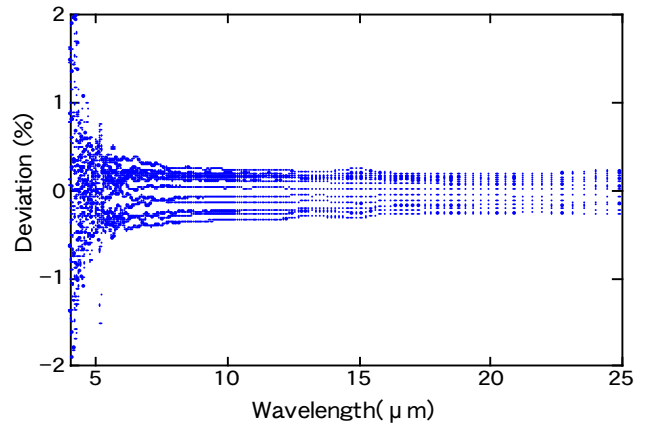


図7 測定システムの安定性(1時間)
Fig.7 Stability of the measuring system(for 1 hour).

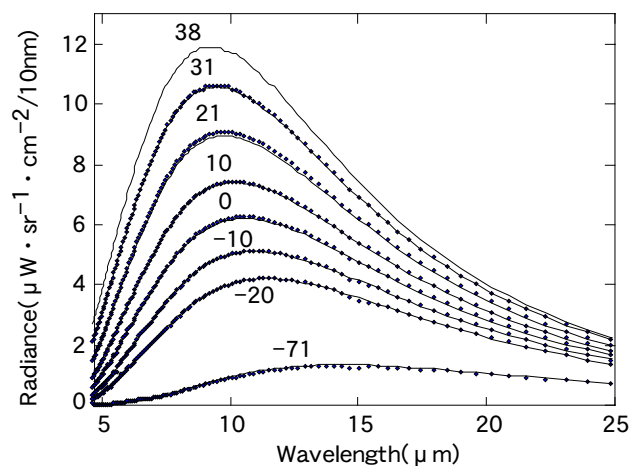


図8 図5の測定結果(印)とプランクの輻射公式(実線)によって算出された各温度レベルにおける分光放射輝度の比較
Fig.8 Comparison of spectral radiance in each temperature level calculated by measurement result of figure 5 (mark) and radiation formula of Planck(solid line).

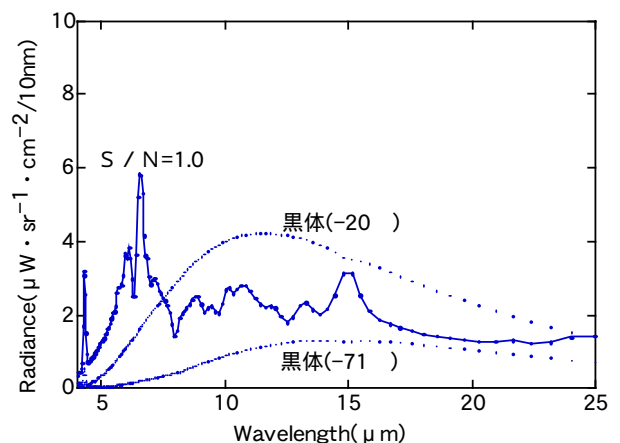


図9 バックグラウンド放射と等価な分光放射輝度
Fig.9 The spectral radiance which is equivalent to the background radiation.

と等価な分光放射輝度($S/N=1.0$)として示したものである。また、図9には、図8の結果との比較のため、-20と-71の黒体型放射光源の分光放射輝度を重ねて示し

た。図に示すように、 $S/N=1.0$ に対応する分光放射輝度は、図1の測定装置における光学系内部のバックグラウンド放射、ことにリレー光学系における $4.3\mu\text{m}$ 、および $15\mu\text{m}$ 付近の炭酸ガスによる放射、および $6\mu\text{m}$ 帯の水蒸気による放射等の大気の放射が重畳し、波長によって大きく変化することが分かる。一方、同図に示した-71 黒体型放射光源の分光放射輝度の結果は、各波長において $S/N < 1.0$ であると推察されるが、すでに図8でも示した理論的算出結果との比較結果はかなりよく一致している。すなわち、バックグラウンド放射と等価な $S/N=1.0$ に対応する分光放射輝度は測定限界の指標となると考えられるが、 $S/N < 1.0$ であっても、感度と安定性に優れた測定システムを構築することにより、我々の行った常温環境における低温度放射測定では、少なくとも-70 レベルに至る赤外分光放射輝度が十分測定可能であると推測される。

§ 5 むすび

FT-IR分光器を使用した赤外分光放射測定光学系、極低温複合式ボロメータ検出器、及び円錐形状の空洞型低温度放射光源等について整備し、常温環境において測定可能な低温度放射レベルについて明らかにすると共に、-70 レベルに至る低温度放射の精密な赤外放射測定が可能であることが示された。低温度における微弱な赤外放射測定におけるこのような実験的検証は、地球環境計測技術の向上と地球温暖化問題の正確な把握や各種産業の発展においても重要と考えられる。今後は、このような感度と安定性に優れた測定システムと高度な微弱赤外放射測定技術に基づき、天空の赤外放射観測システムの構築に資すると共に、雲等の分光観測機器のより精密な校正や実用放射基準の作成のため、新しい方法による赤外分光放射輝度校正方法の確立が続く課題である。

謝 辞

本研究の推進にあたっては、電子技術総合研究所の遠藤忠基礎計測部長、山根 茂大阪ライフエレクトロニクス研究センター長らのご指導とご援助に負うところが大きく、また大変有益なご意見、ご鞭達を頂いた南條 基元主席研究官(現福井工業大学電気工学科教授)、並びに武林正峯大阪ライフエレクトロニクス研究センター主任研究官(元環境エレクトロニクス研究室長)に対し、ここに深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 湊,西本,石堂: " 極低温複合式ボロメータ検出器の開発 ",平成9年度(第30回)照明学会全国大会講演論文集153.
- 2) 湊,西本,石堂: " 低温度放射の赤外分光計測システムの開発と実測定 ",平成9年度電気関係学会関西支部連合大会講演論文集S10-3
- 3) H.E. Revercom,H. Buijs,H.B. Howell, D.D. LaPorte, W.L. Smith, and L.A. Sromovsky:"Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder", Appl. Optics, 27, 15(1988)3210.
- 4) 平石次郎編: フーリエ変換赤外分光法 - 化学者のためのFT-IR -:日本分光学会測定法シリーズ10 (1985)
- 5) Peter R. Griffiths, James A. de Haseth:"Fourier Transform Infrared Spectrometry", John Wiley & Sons, New York(1986).

(1998.10.26 受付)

著 者 紹 介



湊 秀 幸

Hideyuki MINATO

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 赤外放射計測ラボ

minato@etl.go.jp

微弱赤外分光放射計測技術に関する研究、及び赤外応用計測技術等の研究に従事。



石 堂 能 成

Yoshinari ISHIDO

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 赤外放射計測ラボ

ishido@etl.go.jp

微弱赤外分光放射計測技術に関する研究、及び赤外応用計測技術等の研究に従事。



西 本 昭 男

Akio NISHIMOTO

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 赤外放射計測ラボ

nishimoto@etl.go.jp

微弱赤外分光放射計測技術に関する研究、及び赤外応用計測技術等の研究に従事。