

全天日射計測の今昔*

三宅 行 美**

1. 初期の頃

私と日射計測の最初の出会いは昭和30年春、今の会社に入社してまもなくの頃であった。その頃気象庁の本庁はバラック建築、その階段をぎしぎしと音をたてながら、登って行った屋上に米国より輸入された全天日射計があった。これを何とかして国産化したいが、これは気象庁にとっても大切なものであるから、壊さないで外から眺めるだけで、構造を知り作ってもらえないかというお話があった。当時の日本のほとんどの技術がそうであった様に、要するに真似をして国産化するということである。入手した型録と現物を外から眺めるだけで真似をして作るということに若い生意気盛りの私には大きな抵抗があったし、又、私自身気象とはお門違いの分野で当時非常に盛んであったスペクトロスコーピーに興味があり、日射計測にはかかわりのない分野の業務についた。私にとってこの日射計測との出会いは忘れることはできないが、しかし、将来これが一生の仕事になるとは考えもしなかった。一方この開発に直接携わった私の先輩諸氏は大変な苦勞をしてこれを作り上げた。以下の苦勞話は先輩諸氏と私の経験を一緒にしたものである。この全天日射計の構造はガラスのバルブの中に同心の白板と黒板を配備し、日射によって生ずる温度差を各々の板に密着させた熱電堆による起電力を取り出すものであるが(第1図(B)参照)、試作して行く中で二つの難問題が横たわった。一つはガラスのバルブで、フラスコから電球まで何処にでもあると考えていたが、さにあらず、太陽光線を種々バルブに当て中に白い紙を置くと小さい斑点やすじ状の影が見える。即ち、他の分野で使われているあらゆるバルブはこの目的には全く使えないことが判明した。この欠陥を取り除く為、来る日も来る日もガラス屋さんを廻っている内に気がついたことは、愛想が良く調子の

良い所ほど出来上がるものは我々の要望に遠く、気むずかしい所ほど希望に近いものができ上がるという相関関係である。このことは企業のあり方、人間のあり方について大変良い勉強をさせていただいた。さてバルブの方であるが、溶かしたガラスの粘性と作業場の浮遊塵が問題であることがわかり、冬季塵の少ない時まとめて作り100個の中からやっと数個良品が取り出せるという惨状であった。次の問題はバルブと熱電堆を溶着する工程である。縁あって最高の技術を持っている東芝のマツダ研究所(当時)にお願いしたところ、快く引き受けて下さり吉報を待った。連絡を受け行ったところ白板は黄色に変色し、無惨な姿である。聞いてみると溶着の時、温度が上がり絶縁剤が解けて反応したことが判明した。これを解決するには名人芸以外にはないというご託宣を受け名人を探すことにした。名人は東京工業大学に附設されていた工業振興会のガラス加工部におられた。名人安藤さん(前安藤硝子加工技術研究所長)は白板の温度が上がる前にすばやく溶着する技術をお持ちになっていた。ガラスには小文の題名のごとく今も昔もなく何時も苦勞し、その度に安藤さんにお世話になっている。私がこのような失敗例を長々と書くのは、通常の文献の99%はうまく行った過程が述べられるのみで、その裏の多くの失敗は何時も埋もれてしまっているからである。又、失敗例の中からの方がよい情報が得られるという長年の確信があるからである。

さて出来上がった全天日射計はとにもかくにも一応の性能を示し、IGYにも間に合い、第一回の南極観測にも採用され表彰状を会社にいただいた。その後約10年間には改良も何もしないでそのままの状態でも年に10台位を細々と作っていた。

2. 基礎を築いた頃

昭和43年頃と記憶するが、気象庁で日射放射の観測を重要視し観測網を整備する企画が持ち上がった。それに

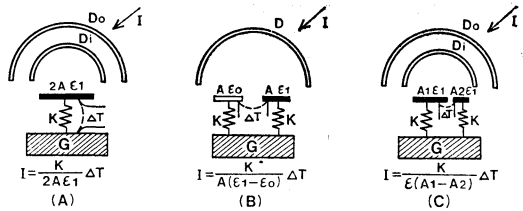
* The personal story of pyranometry.

** Yukiharu Miyake.

先だち私自身、熱伝導率の測定器の開発に関与し齊藤進六先生（現長岡技術短大学長）に伝熱現象の数学的な取扱いについてご指導を受けた後であったので、放射伝達についても少なからぬ興味を持ち熱に対してのアレルギーは消えていた。又、会社の中でも日射計を開発製作する指導的な立場に立たざるを得なくなっていた。

ある日気象庁を訪問した折、今度作る時は真似事でないそして一段と性能のよいものを作りたいことを自ら宣言してしまった。測候課にいらした石井幸男さん（現日本気象協会北海道本部）、測候課から測器工場に転勤された故関根正幸さんやその他の方に、ご指導をいただきながらこれに取り組むことにした。今度は外から眺めるだけでは事がすまないのでは本格的に勉強する事にした。中でも2つの文献にめぐり合った事が、私の全天日射計に関する基本的な知識を培養し、その後の私の行方を決定づけるものになった。一つはBener氏による日射計の中での伝熱現象を数式的に解明し実験的にも裏づけたもので¹⁾、これ以上深くかつ広く書かれたものには以後お目にかからない。更にこれは今を去る1956年に独語で書かれた長いもので、しかも全天日射計という狭い分野でのことであるので、今後も余ほどの物好きでないといふとかないだらうから私の秘密兵器と自負している。もう一つは池田弘さん（元水戸気象台長、現当社技術顧問）がスマートに数式と実験により伝熱現象を解明されたもので²⁾、特に対流についての知見が大いに得られた。全天日射計に最初出合った時はこんな簡単なものかという印象であったが、今はこんな難しいものはないというのが率直な気持ちである。これは今も一緒に日射計の開発に取り組んでいる池田弘さんと行きづまった時にもらす、二人の何時も決まった嘆息である。

全天日射計の構造は、第1図に示す様に非常に簡単なものである。現在広く使われている三つの構造について説明すると、共通する原理は日射量に比例した温度差 ΔT を熱電堆で計測することである。どの様にして温度差をつけるかによって構造が分かれる。(A)の構造は受熱板AとヒートシンクGの間に、(B)では黒と白の受熱板の間に、そして(C)では面積の異なる黒の受熱板の間に温度差が生じる構造である。この(C)の構造は同じ黒の受熱板であっても面積が異なるので、各々の板としての受熱量は異なり、各々の黒い受熱板からヒートシンクGへの熱伝達量を同じにしておけば、受熱量に比例した温度差 ΔT を生ずる。各々の構造の下に、温度差と全天日射量が比例関係を示す原理式を参考までに示してあ



第1図 日射計の検出方法による分類

I: 日射, ΔT : 温度差, D: ガラスドーム, G: ヒートシンク, K: 熱コンダクタンス (支柱), ϵ : 放射率, A: 受熱面積 (受熱板)

る。全天日射計に要求される特性として、1) 天空のあらゆる方向から来る光に対し一様な感度を持つこと、2) $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ の波長範囲で波長に対し一様な感度を有すること、3) 温度、風、その他の気象パラメーターに対し出力が影響されないこと、4) その他一般的なセンサーの特性（直線性、応答速度等）が良好であることが要求される。

この中で2)の特性を満足させる為には波長依存性のある量子型センサーは使えず、感度の低い熱型のセンサーに頼らざるを得ない。この感度の低いセンサーで市販のレコーダに接続できる出力を得る為の構造を決めるには前記の先人等のやられた伝熱現象の解明法が大変役にたった。もう一方の特性1)を満足させるには半球型のドームの中心にセンサーを配置することが必要不可欠の条件となる。ドームの直径に対し、センサーの直径を十分小さくすれば良い特性が得られるが、十分な感度を得る為にはセンサーの表面積を小さくする事は出来ない。この様に種々の条件をかみ合わせて出来上がったものが第1図(B)に示す構造のネオ型日射計で、1971年以来気象庁各官署に展開されて今日に至っている。しかしこの全天日射計も精度の上では十分なものではなく、次のステップを進めねばならなかった。

3. 計測で頭を悩ませた話

日射計測上次に頭を悩ませたのが雷の問題である。誘導雷による高電圧がロガー等の電源ラインを経て、日射計の出力ケーブルから熱電堆にかかり、熱電堆を焼損することである。当初は故障の原因がわからず、雷による断線であると判明したのは設置して2～3年後である。これは熱電堆は $40 \mu\text{m}$ という細い素線で構成されている為である。前記の熱設計の段階から細い素線を使うことは応答速度を早くし、感度をかせぐ為の必要不可欠の

条件であった。この解決には専用の避雷器の開発が必要で専門家にお願いし解決した。次に全天日射計は外気から完全に密封され、且つ、中に乾燥剤を入れてあるのに、しばしばドームの内面に水滴が付着する問題が起こった。これは密封したと考えていたのが大間違いでボディの鋳物のわずかな“す”，パッキンの締め付け方等に問題があった。これも全天日射計を水中に浸し、圧力を加えてテストする方法をあみだして以後は、計算通りの乾燥剤の量で間に合う様になった。今でも解決しないのがドームの表面の汚れをどうするかという問題である。気象研究所におられた村山信彦さん（現駒沢女子短大）のご依頼もあったので、自動車のワイパーにヒントを得た方法をためてみたが、大失敗であった。鳥のふんはワイパーによりドーム一面に広がり、汚れが広がる効果しか得られなかった。現在はドームの周囲を通風することにより霜や多少の雪は防止することが出来るようになったが、正確な測定には毎日ドームの表面を人の力で拭くこと以外に方法はない。

4. 科学と技術のはざま

昭和45年頃よりやかましくなった公害による大気の流れと、昭和48年の第一次オイルショックは日射計測の要望を飛躍的に高めた。ここで起こったことは一面大変根の深い問題であった。それまでは日射計が科学に造詣が深い専門家によって使われており、メーカーとユーザーは気象という枠内、いわば身内同志であったので、日射計測とはこんなに誤差が大きいものであるという話がよく通じたが、全天日射計を一つの道具として使用する技術というか工業の分野では、こんな生ぬるい話は通じないことを幾度も体験した。端的にいうと計測に使うボルトメータはJISでは0.2級(0.2%)なのに、全天日射計はJISもなく、しかも精度が3%とは一桁違うのではないかという疑問である。例えば今はやりの太陽電池の効率を評価するときインプットされる日射量に対し、電力がどれだけ得られるかが効率であるので、分母となる日射計測に大きい誤差があったのでは話にならないのである。太陽電池を開発するエンジニアは、1%効率を上げるのに血眼になっているのであるから無理もない話である。ちなみに、WMOの発行している1983年のガイドブックにある第一級の日射計による日射量一時間あたりの計測誤差は、約8%とされている。こんなものを持ち出してみても、他の分野のエンジニア等には通じない話である。しかしこの事情は日本だけではなく各国とも共

通の問題であるので、OPEC（石油輸出機構）に対抗して設立されたIEA（International Energy Agency）の活動の中で日射計測法の問題がとり上げられ、1981年より専門家が集まって検討を続けている。ちなみに読者の皆さんはOPECの事は新聞、TV等で馴染みが深いと思われるが、IEAについては余り耳にされることがないと思う。ただ、昨年の湾岸危機以来、時折IEAは各国の石油備蓄を二日分だけとりくずすことを決定した等報道される様になり、多少なりともご存知の方もいるかと思う。さて、IEAの中に設立された日射計測部会は、最初の全天日射計測の精度の目標を3%においた。以来10年間、宿題を持ち寄り年に1、2回集まって討議し、報告書をまとめようとしているが、なかなか意見の一致をみない。何故かという、まず全天日射計の性能の評価法が確立していないという事である。例えば前記の如く全天日射計はどの入射角からの日射に対しても感度が同じでなければならないが、この特性を計測することは大変むずかしい。同じ全天日射計を世界的に名の通った研究機関数箇所を回送して測定した結果は、1983年当時30%も開きがある状態であった。その後この角度特性の計測法の検討が進み、1990年の結果では約5%の精度で一致する様になった。この会議の中で得られた技術情報を入れて製作した全天日射計の性能評価装置が、つくばの気象庁測候課の日射計検定室で稼働している。この分野で長年活動している私自身大変お恥ずかしいことであるが、作ることにのみに専念し性能評価がこんなにむずかしいとは夢にも思わなかった。この時代に完成したものが第1図の(C)に示す構造のもので、性能が改善され現在気象庁の全天日射計の準器となっている。

5. 歩みののろい開発

スウェーデンのSP（国立材料研究所）のLiedquist博士は、10年以上も全天日射計の種々な性能を計測することのみに従事されているが、中でも外気温の変化に対する全天日射計の感度定数の変化（温度依存性、通常 $-20^{\circ}\sim+40^{\circ}$ の範囲）の計測精度の向上に10年もかけている。これには大変興味ある問題が内在している。技術的發展の著しい半導体と比較すると、何だこんな単純な事に、しかも余り価値を生まない事に10年もかけて、ということになる。経済的効率からいえば確かにそうであるが、基本的なことを忠実にゆとりを持って取り組める風土が一般的にヨーロッパにはあるということである。日本の工業技術院の各研究所にも、気象研究所にもまずこ

んな全天日射計の温度依存性を10年もかけて取り上げる余裕はない。だからというわけではないが、やめたマーガレット・サッチャー首相をして英国はノーベル賞受賞者は一杯いるが、自動車産業は一向に発展しないと嘆かせることになる。一方日本の科学技術白書は、数年来基礎科学に最も力を入れなければならないと唱えつづけているが、一向にその様に素地が変わったとは思えない。風土の違いとか文化の違いはどうしようもない。

横道にそれたついでにもう一步横道に入ると、年に1～2回とはいえ10年余り一緒に仕事をしていると日常茶飯事の中でも、二つの文化のはざままで苦労することとおびたしい。例えば夏の終りに会議があれば楽しかった夏休みの思い出話がえんえんと続き、こちらに話が向いてきた時は戸惑いながら嘘をつくことになる。本当は江ノ島で半日ぼんやり過ごしたただけなのに、江ノ島で一週間過ごし、“たら”を4本も釣り上げたことになる。これは江ノ島には“たら”はいるはずがないが、“あじ”という単語を知らなかっただけの話である。若し半日だけの夏休みであったといえれば話は発展し、何故にそれ程労働時間が長いのかという議論となり、こちらは日本の今日を説明する為に明治はおろか徳川、平安までさかのぼって稲作文化を語らねばならない。稲作は毎日たんぼに出て水加減を見、草を取らねばならないが、諸氏の狩人の文化は一匹しとめれば、後はゆっくり出来るではないかというところまで持ってくるには、“あじ”が“たら”になる語学力では疲れることとおびたしいから、ほらを多少吹いておしまいにすることにしている。

6. これからの日射計測

さて話を元に戻すと、全天日射量の計測は大変むずかしいということを多少なりともご理解いただけたと思う。今の中心課題は、精度をどの様にして上げるかということもさることながら、現状の誤差をどの様に表現すればよく理解されるかということである。詳しく説明すると、温度に対する誤差、入射角に対する誤差等個別には表現出来るとしても、では全体としてどれ位の誤差で計測できているかを正確に示すことはなかなかむずかしい。そこで、今検討されているのは日射量の絶対値で表現する方法で、例えば 20 W/m^2 の精度を持つという表現法である。ここ1ないし2年位の間には、きちんと表現される方法が IEA の活動の中からも生まれるものと思われる。

又、全天日射計の精度を上げる技術は、その評価方法の精度が進歩して来ているので解決の手法が見いだせるはずである。田中正之先生（東北大学）が何時も放射（日射も含めて）が1%の精度できちんと測れればなあ、会う度に漏らされる願望といただくヒントが行きづまった時の励みとなる。

とにもかくにも目標は1%（絶対値で 10 W/m^2 ）に overtaking している。地球の温暖化の問題が騒がれているが、これとて入って来るエネルギーと出て行くエネルギーのバランスがどうなるかということであり、日射（ $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ ）と、長波放射（約 $3.0 \sim 20 \mu\text{m}$ ）の精度の高い計測は必要かくべからざるものである。この長い波長域における放射計も今製作しているが全天日射計と同じ問題を抱えている。

技術革新の著しい現代においては、他の産業で発展した新しい技術を使えば、そんなことはわけないのではないかと思われるかも知れないし、私自身もそう思う。例えば熱電堆などという代物は、現在の IC を作る技術を使えば、わけなく安く高品質のものが出来るのではないかという発想である。又、先に長々と苦労談義をしたガラスドームの問題にしても同じことがいえる。決して手をこまねいているわけでもなく、新しい試みをするのが失敗に終わることが多い。例えば新しい手法で作った真空蒸着の熱電堆は、屋外にさらしておく、感度が一年もたたない間に半分に落ちてしまう。又、ガラスドームが球形のものから半球のものに変わったのは、球形のものはガラスを溶かしてそれ以上の手は加えられないが、半球のものは研磨することにより高品質のものを作ることが出来るからである。しかし非常に高いものにつく。

これ等のことを解決するには、先に例を上げた温度の特性を測ること一筋にこつこつ10余年をかけている Liedquist 博士の如く、もう少しゆとりがあったらとの結論に到る。嘆き、ぼやき、あせっても致し方ないので、我がペースで今後もこの道を開拓して行きたい。皆様の一層のご支援とご指導をお願いしたい。

参 考 文 献

- 1) P. Bener, 1956: Untersuchung über die Wirkungsweise des Solarigraphen Moll-Gorcgyński. Arch. Met. B2188.
- 2) 池田 弘, 1966: エプリー型日射計の特性. 研究時報, 18. 8. 501.