

## 20世紀の気候変動と人為的エアロゾルの影響

—気象学史研究会講演より—

大 村 纂\*

### 1. はじめに

本稿は日本気象学会2019年度春季大会期間中に開催された気象学史研究会にて「20世紀の気候変動と人為的エアロゾルの影響」という題で講演した内容に多少加筆したものである。加筆した部分には、研究会では時間の都合で十分話せなかった歴史的背景を意識して加えるよう努めた。

### 2. 観測時代の気候変化

気象観測値に基づいて気候変化を認知しその原因を探求する試みがなされてから80年余りであり (Callendar 1938), 比較的新しい研究方向と言える。気候変化として摘出されたのは20世紀前半の気温の上昇傾向であり二酸化炭素に原因が求められた。二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスによる気候変化の説明が壁にぶち当たるのは1950年代に入って寒冷化が顕著になったためである。初期の頃は寒冷化の原因としては以前から広く受け入れられていた火山灰寒冷化説 (Humphreys 1913; Kimball 1918) で説明されていた。これらの研究は1912年にアラスカで起こったカトマイ山 (Mt. Katmai) の噴火に刺激されたものが多く、噴火によるエアロゾルが起こす光学的行程の変化と、それによる気温低下の推定であり、人為的エアロゾルが寒冷化を引き起こすという観点からではなかった。人為的エアロゾルが寒冷化の原因になり得るという観点を最初に打ち出したのは、1970年代に国際地理学連合

(International Geographical Union)の会長を務めた旧ソ連グルジア共和国 (現国名：ジョージア) のダビタヤ教授であった (Davitaja 1965)。しかしこの先覚の仕事はそれ以前の火山性エアロゾルによる寒冷化の研究のように厳密な放射の観測によるものではなく、定性的なアイデアの提供にとどまっていた。

### 3. ミハイル・ブディコ (Mikhail Ivanovich Budyko) の貢献

熱収支気候学の父として仰がれるブディコの全球熱収支に関する先覚の仕事は1960年代の前半で終わる。ブディコは1960年代の後半には方向を気候変化の諸問題に転換し、彼が主管していた当時のレニングラード (現サンクトペテルブルク) にあったヴァイコフ地球物理観測所を動員して、直達日射、全天日射、全球平均気温 (実際には北半球平均気温) を比較して20世紀前半から1960年に至る気温変化を大気透過率変化で説明した (Budyko and Pivovarova 1967)。この論文の内容は後に教科書風にまとめられて Budyko (1974) に要約されている。この段階でのブディコの解釈は大気透過率の変化には火山活動と人為的過程が共存したとされているが、温室効果ガスによる温暖化については全く考慮されなかった。それどころかブディコは人為的温室効果による気候温暖化説には冷淡でさえあった。彼が考慮した1890年から1960年までの70年は世紀の変わり目のごく短い温暖期とそれに続く短い寒冷化、そして1920年代から1940年代への温暖化と、それに続く1950年代の寒冷化があった時期である。この極めて緩慢ではあるが寒冷化した時期は1980年代までの比較的長期にわたり、気候温暖化は全く影を潜め、それどころか「氷河時代が来る」というような内容の出版物が多く出された。

\* Atsumu OHMURA, スイス連邦工科大学名誉教授。

Institute for Atmospheric and Climate Science  
Swiss Federal Institute of Technology (E. T. H.)  
Universitaetstrasse 16  
CH-8092 Zurich, Switzerland  
ohmura@env.ethz.ch

© 2020 日本気象学会

#### 4. 世界気候計画 (World Climate Programme) を中心とした動き

1979年にジュネーブで開かれた第1回世界気候会議 (World Climate Conference) の直接の結果は World Climate Programme (WCP) の設立であろう。初期の WCP においてすでにプディコを中心とする旧ソ連の流れとは別に、地球表面のエネルギー収支を従来のような実験式による計算だけではなく実測に基づいて見ようという試みが始まっていた。仕事の準備段階として、その時期までに観測機器で測定されたエネルギー収支項をある程度標準化してコンピュータに入れておこうということになり WCP-Water のプロジェクト、Global Energy Balance Archive (GEBA) が出発した。プロジェクトの詳細は Ohmura *et al.* (1989) 並びに Gilgen *et al.* (1998), Wild *et al.* (2017) を参照されたい。初期の1990年までに収集された1,500観測点の250,000月平均値を概観して容易にわかったのは、最も豊富で精度も高いと見られるのは全天日射と直達日射ということであった。データがあまり豊富でなく、精度も高いとはいえないが長波放射や顕熱/蒸発熱はさておき、まず重要で信頼の置ける全天日射を全球分布図にしてみようということになった。

#### 5. 測定値に基づいた全天日射の分布とその派生問題

新しく得られた全天日射の分布 (Ohmura and Gilgen 1993) は、それまで広く受け入れられていた分布と以下の点で異なっていた：

- 1) 年平均全天日射が全球で  $20\text{Wm}^{-2}$  以上少ない
- 2) その理由は大気中の太陽放射吸収が今まで推定されていたより  $20\text{Wm}^{-2}$  以上大きいから
- 3) 放射束は一定していない

即ち、分布図作成の必要上、標準期間をデータが比較的整っている1965年から1985年までの20年間と定義したが、その過程でわかった重要な事実「1951年に始まる20世紀後半は漸次的に全天日射が減少している時代であった」ということである。

1) に関しては、例えば気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC) 第1作業部会 (科学的根拠) による第1次評価報告書から第3次評価報告書までは全球平均  $198\text{Wm}^{-2}$  となっており、版を重ねるごとに減少して、最も新しい第5次評価報告書では  $185\text{Wm}^{-2}$  まで下げてきた。この問題は2)にある大気中の太陽放射吸収の

量の評価が不十分であったため、Missing absorption (吸収欠損) と言われる問題になる。大学院生向けの教科書で最も広く読まれていると言われる Sellers (1965) では大気内での吸収は地球が受ける太陽からの放射の17%となっており、この値は広く受け入れられ、驚くことに今でも引用されている。後に出版された Cess *et al.* (1995) では、この不足している大気内での吸収を、衛星で実測した放射収支に基づいて、雲の中での吸収が過小評価されているためだと結論した。これに関しては個人的に拝聴したのだが、当時気象研究所にいた浅野正二 (後に東北大学) はいち早く、雲の中には Missing absorption など入る余地がないと断言していたのは驚くことに1995年のことだった (浅野 2002)。結局大気中の Missing absorption は水蒸気による吸収が過小評価されていたためだ (Arking 1996) ということになり、現在では大気による太陽放射の吸収は当初よりかなり大きい  $27\%$  ( $90\text{--}95\text{Wm}^{-2}$ ) が妥当な値となっている (Ohmura 2006)。それにしても、水蒸気という重要でしかも最も卑近に接する大気構成物による太陽放射吸収が最近までこうも不正確であったとは驚きである。さて実は次の3)に掲げる問題が今回の話の中心である。地表での太陽放射が10年程のスケールで見ると全球で  $10\text{Wm}^{-2}$  ほどのオーダーで変化しているという事実である。

#### 6. Global Dimming の発見に至る道

全天日射分布の世界地図を作成中に直面した問題の一つは、分布の標準期間として定義した20年の間にも観測が欠落している地点が意外と多いという事実である。そうした欠落を補うために Conrad & Pollak の方法 (Conrad and Pollak 1950) があるが、この方法を使うには程よい距離に精度の高くしかも欠測のない、いわば完璧な観測点が必要である。こうした成績の良い観測点の長い時系列を見ているうちにわかってきたのは、10年以上にわたる変化が全球と言わなくとも半球ぐらいのスケールで存在し、その変化が30年で  $10\text{Wm}^{-2}$  に及ぶことであった。連続性の良いヨーロッパの観測値の時系列を見ると、全天日射は比較的良かった20世紀初頭から徐々に増加して1940年代後半から1950年代前半にかけてピークに達し、その後、この仕事の進行中の1980年代中葉までの約35年間、平均  $10\text{Wm}^{-2}$  も減少しているという事実であった (Ohmura and Lang 1989)。二酸化炭素の放射強制力 (Radiative Forcing ; RF) が1750年を基準としたとき  $1.8\text{Wm}^{-2}$  で

あり、その他の温室効果ガスを加えた全RFが $2.8\text{Wm}^{-2}$ であるとき、全天日射がわずか30年で $10\text{Wm}^{-2}$ 減少していたことは20世紀の気候変化に重要な影響を与えているに違いない。事実CRUTEM4及びHadCRUT4(ともに英国イーストアングリア大学気候研究ユニット・英国気象局作成の全球地表気温データセット)の月別平均気温を見ると、1940年代中葉から1970年代中葉の30年にわたって全球気温が0.2K低下していた。アルプスでは1980年代に向かって、氷河の65%は前進していたのである。世紀全体としてみると、温暖化が進行中の20世紀の真ん中で起こったこの寒冷化を説明できないと温暖化の原因の理解もおぼつかない事になる。これは後にGlobal Dimming(地球暗化)と呼ばれて広く知られる現象になるが、発表当初の学界の反応は完全な拒絶であった。その理由はブディコのほとんど信念と思える「放射は極めて安定したもので10年20年の間の変化は測定の誤差以内である(Budyko 1974)」という意見が放射の専門家の中で強く信じられていたためである。気候の時間スケールで見た放射が変化するという事実が受け入れられるまで10年を要した。また、最後の9節で詳細に述べるが、温室効果が進行すれば、当然ながら大気から地表への長波放射は時代とともに増加しているはずである。これは現在実測で検証されている(Ohmura 2012)。

## 7. Global Dimming の原因

Global Dimming現象を作り出した全天日射の全球分布をその後逐次追って行くと、皮肉なことにGlobal Dimming現象を学界が受け入れた1990年代の終わり頃にはDimmingが終わって放射傾向が反転して増加に転じていた。学界は今度は早くもこれをGlobal Brighteningと呼んでくれている。この全天日射増加の傾向は2005年以降幾らか減速したが現在も続いている。ある意味でこれは幸いなことで、全天日射の減少期と増大期に起こっていた放射現象を追求すれば、20世紀の気候変化の真髄である温暖化の真の姿が理解できることになる。観測されている温暖化は温室効果だけではなくエアロゾルが深く関わっているのである。

Global Dimming及びGlobal Brighteningは連続測定値から出てくる概念で全ての天候状態を含んでいる。そのため当初Dimmingは雲の変化によって引き起こされると考えていた。事実、この期間の全天日射は日照時間と高い比例関係にあり、全雲量とは強い反比例の関係にあった。しかし同じデータから雲量ゼロ

の時間帯のデータを抽出して調べて見ると、DimmingとBrighteningがやはりあったことがわかり、雲とは別に太陽放射の大気における減衰の過程をもっと広い立場から見直さねばならなくなった。そこで直達日射観測から得られる大気の透過率のデータを今までのGEBA以上に世界中から集めることになる。こうした仕事には長い期間の高性能な観測が必要であり、半世紀以上連続して直達日射を観測しているところは世界中挙ってもほんの20箇所強であることがわかった。これらの地点の大気の透過率を総観してみると、まず大きな火山噴火の影響が目に入る。1912年に起こったアラスカのカトマイ(Mt. Katmai)、1963年のインドネシアのアグン(Agung)、1982年メキシコのエル・チチョン(El Cichon)、1991年フィリピンのピナツボ(Mt. Pinatubo)などで、いずれも二酸化硫黄( $\text{SO}_2$ )を大量に出した噴火で成層圏まで達している。しかし、その大気透過率への影響は長くは続かなかった。直達日射計で追って影響が見えなくなるまでせいぜい4年であり、ここで問題にしている10年から半世紀にわたる現象は説明できない。しかし事実10年を越すスケールの透過率変化が存在するのである。大気透過率は1940年を中心に増加し、それ以降1980年代まで減少する、その後現在にかけて再び上昇している。この推移は人為的 $\text{SO}_2$ の放出率とほぼ平行しており、人為的エアロゾルの影響と考えられる。次に大気透過率の永年変化がどのくらい全天日射に影響し、さらに温度の変化をもたらすか見てみよう。

## 8. 大気透過率、全天日射、雲量(日照時間)と気温の関係

この節の題に掲げた4項目の同時観測はエアロゾルが太陽放射や地上気温とどのような関係にあるのかを知る上で必要な最小限の情報であり、しかも半世紀以上の長期間にわたる連続観測が必要である。さらに目的は広域にわたるエアロゾルの影響を見るためであるから、局所的な強いエアロゾル源である大都市の観測所は避けねばならない。従ってワシントンDC、モスクワ、レニングラードなどは、伝統的に優れた放射観測はあるが、ここで扱う測点としては外されねばならない。こうした条件を満たす観測所は筆者の知る限りでは世界に5箇所ある。黒海に面した避寒地のオデッサ、エストニアの大学都市タルトゥとペイプス湖北西岸の寒村テイイリコヤ、スイスの避暑地ダボスと日本の館野高層気象台である。これら5地点は客観的なサ

ンプル抽出の立場から見ると、地理的に甚だ偏ったものである。しかしこれ以外にはないので、無い物ねだりをして無意味だから、これらの観測データからエアロゾルの気候への影響に関してどれだけの情報が得られるか試してみよう。まず全天日射は1955年から2010年にいずれの地点も極めて近似した趨勢を辿っている。すなわち1955年から1980年までの25年間に5地点平均で $10\text{Wm}^{-2}$ の減少、1980年から1990年までの横ばい状態、1990年から2010年までの20年間には $10\text{Wm}^{-2}$ というかなり急激な増加を示している。減少期の1955-1980年と増加期の1990-2010年に起きた透過率の減少と増加は各々0.05であった。平均透過率0.73の近傍における0.05の変動は全天日射に換算して $5\text{Wm}^{-2}$ の変化を引き起こす。実際に起こった全天日射の変化は $10\text{Wm}^{-2}$ であるから、エアロゾルの直接影響は50%であったことがわかる。それでは残りの50%は雲の変化に帰着できるのであろうか？雲に関する情報は極めて主観的で定量的に把握しにくい。太陽放射に関する雲の影響はむしろ日照時間に現れている(Angstrom 1928)。事実、1955年から1980年、さらに1980年から2010年の各々 Dimming 及び Brightening の期間にこの5地点で観測された日照時間の減少と増加は先に述べた全天日射に並行しており平均0.7h/dayの変動であった。日照時間で0.7h/dayという変化は雲量ではほぼ7%に相当する。従って間接的な推定になるがエアロゾルの太陽放射に対する直接/間接的影響力は50%/50%と言ってよいであろう。

### 9. 温暖化時における温室効果ガスとエアロゾルの影響の割合

前節では20世紀の後半から21世紀の現在に至るまでの期間についてエアロゾルが果たした全天日射への影響を実測値に基づいて検討した。この時代は初期においては第二次世界大戦からの復興のために諸国が生産に励んだ時で、環境への考慮は疎かであった。その非なることに気づき各国が大気浄化に踏み出したのは

1980年代に入ってからであった。こうした経緯が1980年代後半をエアロゾルの増加傾向と減少傾向、それに対応した太陽放射減少と増加に変わる分岐点を作ることになった。一方、この時代の長波放射の変化は、1958年から始まったマウナ・ロアの二酸化炭素の測定が単純増加傾向を示すことから、やはりそれに似た一方的な増加傾向を示していると推測される。このような時代では高精度の長波放射測定は極めて少ないが、GEBAに収集された長波放射観測値を見てみよう。第1表に示すように過去70年の長波放射は加速度的増加傾向にある。それにひきかえ太陽放射は波を打って変化しており、ある時期には短波放射の減少が長波放射の増加を上回って入射総量は負に転ずる可能性を持つ。果たして初期の1950年から1990年までの40年間では10年で $-1.5\text{Wm}^{-2}$ と負であり寒冷化の原因となった。その後短波放射と長波放射ともに増加し、入射総量は加速度的に増加していることがわかる。これらの見積りの精度を確かめる必要がある。多くの異なった起源の測定値が使われているため、各項目別に精度を見積るよりも、気温の放射による感度が一定かどうかを見るのが妥当であろう。第1表の4列目がそれであるが、 $0.02\text{K}/(\text{Wm}^{-2})$ とほぼ一定であり、表にした短波放射/長波放射の旬年変化はかなり信頼できるものと思う。放射総量が加速度的に変化していることが最近の急激な昇温の原因と思われるが、もし将来人為的なエアロゾルの放出が増加すれば、昇温も減速され、また寒冷化に転換する可能性があることが示されている(Ohmura 2009)。

### 10. 結びに代えて

20世紀に起こった温暖化は単調な昇温ではなく、世紀の中程で少なくとも30年にわたる寒冷化を包括している。温室効果ガスが増加を続ける中で起こった寒冷化は人為的エアロゾルの増加で引き起こされたという仮説を検討してみた。この仮説を主に実測された放射の解析によって支持することができた。温室効果による昇温幅とエアロゾルによる寒冷変動幅は符号が反対であるが、絶対値が似ているため、温室効果ガスのみでなくエアロゾル放出の強さが将来の温度変化の速度に大きな影響を与えるであろう。気候変化対策の国際的取り決めは今まで温室効果ガスだけにとらわれてきたが、将来のある段階でエアロゾルに関しても規制が必要となるであろう。

第1表 20世紀後半から現在に至る中緯度北半球の地表の放射の収支の旬年変化。単位は放射束が $\text{Wm}^{-2}/\text{decade}$ 、放射の温度感度は $\text{K}/(\text{Wm}^{-2})$ 。

	短波の変化	長波の変化	放射総量	放射の温度感度
1950-1990	-2.5	+1.0	-1.5	0.020
1991-2007	+4.1	+4.5	+8.6	0.021
2008-2018	+2.9	+7.1	+10.0	0.020

## 参 考 文 献

- Angstrom, A., 1928: Recording solar radiation. *Medd. Stat. Meteor. Hydrol. Anst.*, 4 (3), 28pp.
- Arking, A., 1996: Absorption of solar energy in the atmosphere: Discrepancy between model and observations. *Science*, 273, 779-792.
- 浅野正二, 2002: 大気の日射吸収をめぐる話題: 「異常吸収」は無い. *天気*, 49, 83-89.
- Budyko, M. I., 1974: *Climate and Life*. Academic Press, New York, 508pp.
- Budyko, M. I. and Z. I. Pivovarova, 1967: The influence of volcanic eruptions on solar radiation reaching the surface of the Earth. *Meteor. Gidrol.*, 10, 3-7.
- Callendar, G. S., 1938: The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 64, 223-240.
- Cess, R. D., *et al.*, 1995: Absorption of solar radiation by clouds: Observations versus models. *Science*, 267, 496-499.
- Conrad, V. and L. W. Pollak, 1950: *Methods in Climatology*. Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 459pp.
- Davitaja, F. F., 1965: Possible influence of atmospheric dust on the recession of glaciers and the warming of the climate. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.*, (2), 3-22.
- Gilgen, H., M. Wild and A. Ohmura, 1998: Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from Global Energy Balance Archive Data. *J. Climate*, 11, 2042-2061.
- Humphreys, W. J., 1913: Volcanic dust and other factors in the prediction of climatic changes and their possible relation to ice age. *J. Franklin Inst.*, 176, 131-160.
- Kimball, H. H., 1918: Volcanic eruptions and solar radiation intensities. *Mon. Wea. Rev.*, 46, 354-355.
- Ohmura, A., 2006: New radiation and energy balance of the world and its variability. *IRS 2004: Current Problems in Atmospheric Radiation* (H. Fischer and B. Sohn, ed.), 327-330.
- Ohmura, A., 2009: Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *J. Geophys. Res.*, 114, D00D13, doi:10.1029/2008JD011290.
- Ohmura, A., 2012: Present status and variations in the Arctic energy balance. *Polar Sci.*, 6, 5-13.
- Ohmura, A. and H. Gilgen, 1993: Re-evaluation of the global energy balance. *Geophys. Monogr.*, 75, 93-110.
- Ohmura, A. and H. Lang, 1989: Secular variation of global radiation in Europe. *IRS'88: Current Problems in Atmospheric Radiation* (J. Lenoble and J.-F. Geleyn ed.), Deepak Publ., Hampton, VA, 298-301.
- Ohmura, A., H. Gilgen and M. Wild, 1989: Global Energy Balance Archive (GEBA), World Climate Programme-Water, Project A7, Rep. 1: Introduction. *Zurcher Geographische Schriften*, Nr. 34, E. T. H., Zurich, 50pp.
- Sellers, W. D., 1965: *Physical Climatology*. Univ. Chicago Press, Chicago and London, 272pp.
- Wild, M., A. Ohmura, Ch. Schär, G. Müller, D. Folimi, M. Schwarz, M. Z. Hakuba and A. Sanchez-Lorenzo, 2017: The Global Energy Balance Archive (GEBA): a database for worldwide measured surface energy fluxes. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 1-12.