

非常に大きな大気現象火球によって出される不可解な音を説明することにおける進展

COLIN S. L. KEAY

Department of Physics, University of Newcastle, N. S. W., Australia

要約

約10km離れて観測される火球。そのキラキラと流れていく火球と同時に奇妙な音が聞こえるが、それは2世紀以上謎であった。現在、その奇妙な音を説明するため、「電磁波音」という言葉が広く用いられ、火球が通過して後に聞こえる通常の音とは区別されている。流れる火球から発生する電磁波音の物理的原因については観測と実験により究明され証明がなされてきた。流星科学の中でも遅れた分野であるこの問題の歴史は、ある程度詳しく示されている。そしてかなり最近まで問題を解決するため多くの困難があったことに注目が集められている。

始めに

大きな火球の大気圏への突入は、大きな危険にさらされることなく人間が目撃することのできる最も印象的な自然現象の1つである。最も大きくそして最も壮大な火球をみることは非常に稀であり、ほとんどの人は、生きている間に遭遇することはない。実際に光りを放つ非常に明るい火球を目撃した人々のおよそ10パーセント (LamarとRomig, 1964年) は、火球が上空を通過する際に生じる音(ヒュー、シュー、ポン)により精神状態が高められる。このような音は、必ず光速で伝達されるという点で非常に特異である。この例外的な現象は、2世紀以上前から認識されていたにも拘わらず、ごく最近まで説明ができなかった。この論文の目的は、明るい火球から生ずる特異な音の観測に関する長い歴史を説明すること、そしてこのミステリーが自然科学的に分かりやすく解釈されるに至った過程を記述することである。

しかし、先ず最初に用語についてである。火球の飛行に伴い聴くことができる特異な音は、今後「電磁波音」と呼ぶこととし、火球の光が消えて数秒ないし数分してから音波として伝えられるドーンとかゴロゴロという音と区別する。「電磁波音」は「電子効果」と混同されてはいけない。「電子効果」とは、「電子聴覚」として理解されており、体内を適当

な規模と周波数の電流が通過することにより生ずる音に関連するものである(Adrian1977年: Walker1988年)。又、言葉を短くするために「bolide」という用語を「大きく明るい火球」の代わりに用いることとする。

歴史

明らかに火球の飛行による電磁波音であると思われる記述は、紀元817年の中国によるものが最初である。火球が見えると同時に鶴の群れが喧嘩をしているような音がしたとある(Astapovich, 1951年: LaPaz1958年)。更にそれより遡り、古代においても電磁波音が聞かれていた可能性がある。天空の音として、ヘシオドスの著作やキリスト教聖書(例: 2章の2)で記述されているもののいくつかは、火球音であったかもしれない。

1719年3月19日に、英国中で大火球による電磁波音が発生したことは疑いがない。エドモンド・ハレー(1719年)の報告によれば、何人かの目撃者が、火球が飛行しながら「シュ

ー」という音を発するのを手にとるような近くで聞いたという。しかし、彼はこの主張を空想の結果として退けた。これは、多くの観測点からの慎重な三角測量の結果、火球の飛行高度は60イングリッシュマイルを超える高さであることを証明し、この高さは音源がすぐに到達するには離れすぎているからである。ハレーは、他の大気中の現象と比べ流星が非常に高い高度で発生すること、そして、それらの速度が1分間に300マイル以上という信じがたいものであることを最初に示した者のひとりであった。

次の50年の間に、王立協会が発行する学術論文集「フィロソフィカル トランザクション(Philosophical Transactions)」(Short1740年とPringle1759年)に電子火球に関する記述が2箇所あり、更に非常に強いオーロラから発生する電磁波音と思われるものに対する注意を喚起した記述もあった。

1783年に、人の目を引きつけて離さないような火球がスコットランド、東イングランドそしてヨーロッパについてはその一部の上空を飛行した(この出来事に対する最近の評価と流星天文学に及ぼした重要性については、1989年のBeech論文を参照)。1784年に、英国学士院会長Thomas Blagdonにより、電磁波音に関する報告が集められた。Blagdonは以前軍医であり、遠くにある大砲が火を放って発射された後、その音が遅れて聞こえることをよく知っていた。それ故、50マイル以上離れた火球が視覚的に認知されると同時に音が聞こえることにハレー同様当惑した。彼は目撃者の証言を真実であると確信し、その例外的事実を拒絶しなかった。そして、この問題の解明を未来の観測者に委ねた。再び、ハレーに続きBlagdonも、音の知覚が恐怖心による精神的なものであると考え、この課題の解決にはよい影響を与えなかった。著名人によるこれらの結論は以後2世紀に及び、電磁波音の研究に絶えずつきまとうこととなった。

ハレーとBlagdonの見解は、1784年までの科学水準の限界により制限されたものであることを理解されなければならない。Coulombは静電気の基本原理を発見していなかったし、Hertzが電波の存在を実証するまでには、更に1世紀必要であった。

この間に、数多くの流星からの電磁波音や大変明るいオーロラからの同種の音に関する報告があったが、いずれも原因は不明であった。1833年11月13日に発生したしし座流星雨の際にも、大火球の発生と同時に聞こえた音について多くの報告がなされた。エール大学の数学と自然哲学の教授であるDenison Olmsted(1834年, 1835年)はこれらの現象を集め、次のように記載した。「数名が聞こえたと言われる音は、ロケット花火が突進する際の音かロケット花火が爆発する際の小さな爆音に例えられる。これらは多くの例で一様に発生しているため、我々は想像上のものか外部要因によるものであると考えてしまう。

Hertzの実験から1年後に、Samuel Sexton(1885年)は、ネーチャー誌に投稿をした。これによると、オーロラから聞こえる音は、耳鳴りの際の苦痛な響きと同一の原因ではないかと示唆しており、注目を集めた。

電界と電波というものがよく理解されるに至っても、火球から一瞬の間の発する音の問題を解決することは容易ではないままであった。唯一の証拠が一部の人々の証言であり、音の発生を全く予知できず、実際に音を聞いたという人もお互い近くで観測し、火球を発見したグループの中でもわずか1人か2人であった。火球の電磁波音の発生は、10~100 km離れた火球の視覚的認知と同時に起きる。このため、Denning(1903年)のような著名な流星観測者をして、ハレーやBlagdonの判断を支持させることとなった。「庭を歩いていると遠くからシューという音が聞こえ、見上げると流星が飛んでいた」(1903年Denning著から引用)という否定的な証言が数多く存在するにもかかわらず。

一方で、W. F. Denningは、素晴らしいアマチュアの天体観測者の一人であり、天文学の数々の分野で世界的な尊敬と名声を得ており、流星天文学の分野における実績については、

おそらく最も現在記憶にとどめられている。(Beech、1990年)それ故、「シューというような音は、想像によるもの」又は、「観測上の幻像」(1907年)と結論付けたことは、流星学者に大きな影響を与えることとなった。彼は、後に、流星から発する電磁波音に関するオーロラ音を次のように表現した。「想像上のものか又は観測される現象と直接結びつかない理由によるもの」(Denning 1915年)

こういった考えは、1917年10月1日にテキサス州全域の夜空を明るくした大きな火球が現れた時の世論であった。テキサス大学で工学を専門とするUdden教授は、テキサス中央部で影響を受けるポイントがあるとして、その地点を突き止める目的で60以上の事例を集めた。彼は、次のように記述した。「320km以内で明るい物体を見た5~6のグループからその物体からの音を聞いたとの報告を受けた。そして、その音は光と同時に聞こえたと思われる。」音に関する9つの報告を分析した結果、彼は次のような結論を出した(1917年)。

「もし、これらの観測が主観的なものでないとしたら、音の原因は火球が地球に接触する際の波動か、植物や人工物のような地上にあるものに求められる。これら植物や人工物は、火球が大気中で音波に変換される際に、その一部が分解されるのではないか。」彼の非常に適切な結論は、「この音は、地上にある物体に関係している」と考える観測者の一人に非常に刺激を受けたものである。(Udden 1917年b)

Uddenの鋭い仮説は、直ちに試された訳ではなかった。なぜなら、電磁波音を発する火球を一定の箇所で観ることは稀であったからである。科学雑誌に電磁波音を発する火球に関する報告が載ることは毎年ある訳ではない。そして、直接の経験なしにアマチュアの流星学者ができることは、報告を集め照合することのみであった。そのような例としてUddenの同僚であるアメリカ人のC.C. Wylieを挙げることが出来る。彼はアイオワ大学の数学と天文学の教授であったが、Popular Astronomy誌に「流星からの音」という論文を投稿し、「流星からの音は、間違いなく心理学上のものである」と断言した。

UddenよりもDenningの見解に従ったWylieは、明らかに彼の初期の大火球調査の影響を受けた。この火球は、1929年7月にイリノイ州中央部で発生したものであった。彼はこの現象の概要を次のような記事にまとめた。「多くの手紙により、ヒューとかシューといった火球の音は報告されている。また、これとは異なる音の報告もある。しかし、同じコミュニティから静かな環境の中でポーチに座っていたが、全く何も聞こえなかったという報告も多数寄せられている。更に、火球の出現と音を聞き取るまでの時間的間隔はかなり必要と思われるが、それについての報告はない。そのケースもその間隔は数分であるはずだ。従って、これらの音は、流星からのものと認める訳にはいかない。

後に、Wylie は彼が体験した事例について話をまとめ上げた(1939年)。すなわち一般人は心理的誤りを犯しやすく、火球の音についてもそういった事が根拠となるものである。更に彼は、流星が50マイル以上離れていることを知っている人は決して音が聞こえたなどという報告はしないと主張した。

DenningやWylieのような世間に認知された流星専門家の否定的見解は、電磁波音を発する火球の課題から多くの流星学者を遠ざける事となった。しかし、例外もあり、その1人がH. H. Niningerであった(1939年)。彼は突出した流星学者の1人であり、この問題を心理学ではなく、物理学として考えようとした。そして、ついに、観測者の環境がよければこのような音は現実的であると確信した。Niningerの見解は、音が聞こえたのは建物の後方か中からだとする報告に根拠をおく。更に、昼間の流星の場合、音は光が見える前に聞こえたとの報告も論拠となった。

Niningerは「音の空気伝播と同様な伝播が流星に関してあるかもしれない」と1939年に語った。後の彼の論文では「1934年にアメリカ国立標準技術研究所のエルモア.R. ウェーヴァー氏は会話の中で『おそらくエーテル波は観測者の周辺で物体が発火する際、電流に

変わる』と示唆した。」と記述した。Niningerは更に「無線技術者の間では常識とされていることではあるが、強い電波発信機の近くにある様々なタイプの受信機は時々放送されている番組を停止するとし、これらの例は無線の信号が調整され、音として再構築されるとした。同様の見解はマイクロ波やミリ波に関してもAnyzeskiにより示されている(1946年)。

Weaverの仮説は成功するようか期待を持たせた。しかし、最も大きな火球から発せられる無線信号についての証拠が不足するため受け入れられなかった。更に、彼がとなえる変換プロセスが明快ではなかったためこの問題は依然結論が出ないままであった。

ここで、名称の問題に戻りたい。Niningerは「エーテル」という言葉をエーテル波が音波に自然変換する際に発生する音を示す時に使うおうと提案した。そして彼自身もこのような音は聞こえると理解していたと思われる。その後直ぐ、1940年にOmsk大学のDravert教授は、「電磁波音火球」という言葉を紹介し、この言葉は火球音現象を語る際に急速に受け入れられることとなった。

BarringerとHart(1949年)は、流星から音が発生する仕組みについて議論する過程において、心理学を論拠とする考え方には消極的となった。入手した多数のデータをまとめた後、彼らは次のように結論付けた。すなわち、流星からの音は、観測者の想像上の産物として退けることは出来ないと。彼らはこのような音は電波によって運ばれると推定した。そして、大きな火球は、約10億ワットの単位でエネルギーを簡単に分散させると判断した。この高いエネルギーレベルの中で、熱電波の構成要素は、とても弱く、彼らは火球の光は音の周波数に調整されると考えた。この考えは、科学の世界では馴染みがなく、発生と発覚の構造に関し大きな問題となった。それ故、彼らは火球が電離化される際銀河系宇宙間での物質を放射するのかもしれないとした。これは、火球の音は地球外で発生しているという意味である。

BarringerとHartの示唆は、ホーキンスによって真剣に取り上げられた。ホーキンスは火球からの放射物の測定を実施した。その測定は、磁石発電メーターにより、475,715メガヘルツ、30メガヘルツそして1ヘルツの周波数で行われた。ホーキンスが観測した火球は等級がマイナス1等級から5等級のものであった。彼はこう結論づけた。「火球が1ヘルツから500メガヘルツの周波数の間で音を発生していないということはおそらく真実であろう。500メガヘルツはこういった測定の感度の限界を超えるものであるが、したがって、火球は驚くべき低い効率で運動エネルギーを放射エネルギーに変えている。」

その間に、電磁波音を発する火球の問題は、ソビエトで精密に調査された。Astapovich教授が始めた調査が最も注目されるものであり、彼は電磁波音を発する火球について、広範な資料をひとつにまとめたのであった。そして詳細な調査から重要な結論を改めて導き出した。例えば、電磁波音を持続して発する火球は、絶対光度マイナス9等級より明るいものに限るとか、火球の軌道は水平線に対しほんの小さな傾きで進むが、中緯度地点で観測された以降は低い傾きで進むということである。他のソ連の科学者は、火球から聞こえる鋭い音や大きな響きは火球の崩壊や爆発と結びつけて考えた。彼らはこういった音を単に心理学上の効果と促えていたが、火球から発する他の種類の電磁波音については、確実に存在することを認めた。電磁波音に関するソ連の火球科学者間での論争は西欧諸国と同様強行われた。学士院会員であるレビンは、心理学上の理由であることを支持し、電磁波音の存在を熱心に支持するAstapovichと議論を交わした。

雑誌の記事の中で、経験豊かな隕石学者であるLapazは、一般の考えは隕石の特異な音に関する事案に基づいて、Uddenの考えを受け入れる方向に強く向かっていると記載した。大火球を目撃した多くの人達と直後に直接することが増加するに従い、彼はこの火球の音

が実際にある得るものと考えた。そして、この原因を合理的に説明するための試みが数回にわたり行われたと述べた。

この様な状況の下で、アメリカ国防省がこの課題を調査すべきであると決定した。それは、ソ連の科学者が自然発生する電磁波音現象を活発に研究した際に作成した文献からもよく知られている。アメリカ国防省はランド社と契約を締結し、Mary Romig と Donald Lamarがこの仕事を担当することとなった。この現象の解明は、大気圏に突入する大きな物体の大きさ、性質、軌道を測定する新しい技術につながる可能性があり、このことが彼らの研究を後押しした。

RomigとLamarは、65頁の未分類のリポートを作成した。そこで、88の参考文献、41の特異な音の観測例(7箇所の詳細地図を付録Aとして添付)、そして63のロシアにおける観測例(付録Bとして添付)を示した。彼らが得られた証拠を基に完施した詳細な研究は、当時もそして今もこの問題を研究する学生にとって必須の図書となっている。彼らは、音の発生メカニズムに関して確固たる結論に到達した訳では無かったが、音は電磁気の変動に起因すると考えた。そして、今後はプラズマのさやに関する特性、イオン化された軌跡について研究がなされることをすすめた。RomigとLamarから発生プロセスに関しての指示はなかったが、彼らは次のように語った。「乱気流によって通常のプラズマ放射エネルギーが非常に強められることがある。RomigとLamarの論文には 論が無かったため、多くの流星学者は火球からの電磁波音に関する説明を心理学に求めようとした。

こういった点から火球からの音を研究する観測者が直面する困難な点を要約することは意味がある。

- 1 電磁波音の発生はまれである。火球、オーロラ、稲妻からの電磁波音を聞いた人は殆どいない。あるいは電磁波音を録音するためのテープレコーダーを持っていた人もいなかった。
- 2 電磁波音の発生は予知できない。観測グループの全ての人が音を聞く訳ではない。
- 3 音の伝播は光の伝播と同様、瞬間的である。しかし電磁気の変動により発生する音は、静電気となるブラシ放電以外に知られていない。そして、そのような放電が伝わるのは長くて300kmである。
- 4 大きな火球やオーロラからは大規模な電磁気変動は見られなかった。
- 5 電磁気エネルギーが音に変換する筋道が全く不明確である。
- 6 火球やオーロラから強い電磁気エネルギーを発生する物理的メカニズムが知られていない。

こういった課題が1980年にKeayにより出版されて問題の解答に先立ち残されていた。

1978年、ニューサウスウェールズ大火球

1978年4月7日朝、ニューサウスウェールズ州東部の空は、月もなく、真っ暗であったが、大火球の出現により日中と同様の明るさとなった。その火球は南西から飛来し、シドニー上空を通り、ニューキャッスルを過ぎ海中へ数珠つなぎ状態で落ちていった。日の出90分前の早朝であったにもかかわらず、数百人の目撃者によりマスコミには電話が殺到した。火球は最大等級が少なくともマイナス15等級の明るさで、多くの目撃者は一時的に目が見えなくなった。

このような明るい火球が発生した時の常として、火球が視界にある間は奇妙な音を聞いたという報告が相当数あった。当初は、私も世の趨勢に従い心理学上の問題と促えた。しかし、火球やその光が出現する前に音を聞いたという明らかな例がある事を知り、音の存在を確信した。

火球の地上レベルでの軌跡から20Km離れたシドニーのローズ湾でS・Mc-Grathは、光を見

る前に轟音を聞いた。それはまるでアパートの隣人が網戸をパタンと閉めるような音であった。すなわち、音の大きさはさほどではなく、むしろガタガタというような音であった。この証人は、窓に近づき、火球が遠のいて、そして消えるのを見た。

火球の軌跡から20km離れたシドニーのエッジクリフではA. Hayesが高速で走行する特急列車か旅行用高速バスのような音を聞いた。その次に電気が放電するような音を聞き、裏庭が昼間のように明るくなった。

火球の軌跡から40km離れたヴェールズポイントでは、J. Irelandは車が近づいてきたような音を聞き、右肩後方から光が煌めくのを見、全てが月光に照らされたように明るくなった。

ニューキャッスル州のKotaraは火球の軌跡から40km離れているが、N. Jonesは火球がぱっと燃え上がった時、ボンという音を聞いた。しかし、それは寝ている人を起こすような大きな音では無かった。一方、自動車の反対側のドア近くに立っていた友人は何も聞かなかった。

火球の出現と同時に発生する音の印象として次のようなものがある。「大きなヒューという音」、「変圧器や遠くからのサイレンのようなブンブンうなる音」、「10数えるため列車のエンジンから聞こえるシューという蒸気音」、「突然強風に襲われるようなヒューという音」、「テープレコーダーに録音できるヒューという低いなり声」、残念ながら最後の証人はその時すぐにテープレコーダーを用意できなかった。

1978年に発生した火球が広く知られると共に、これ以前に発生した火球の証人達の記憶を呼び戻し、彼らも上述の例に極めて類似した音を火球の発生と同時に聞いた事が判明した。このことから私は、火球の原因を心理的な要因に求めることは現実的ではなく物理的要因に求めるべきと確信した。

火球音の説明に関する調査

明らかに、火球からのエネルギーを火球音を聞いた人々の周辺へ伝達するのは、電磁機によるものに違いない。音として聞こえるブラシ放電を引き起こした高い静電気の場を可能性から除外することはできない。しかし、これらだけによって30km~40kmの高度を飛来する火球の北上面での軌跡から100km以上離れた場所でも火球音がよく聞こえたことを説明するのは難しい。大気圏に垂直に突入する流星体が生み出す静電気の場については、Ivanov とMedvedevにより研究されてきた。そして、そのような高度で誘導されたエネルギーは、大きな流星体で4~500ボルトであり、これは火球効果を発生させるにはとても充分なものはいえないことを示した。

電磁波音は火球が急勾配の軌道や垂直な軌道をとる場合よりも傾斜度の低い飛行経路をとる場合に確認される (Romig と Lamar, 1963年)。急勾配の軌道や垂直な軌道をとる場合、電子的本質を有する音の継続時間も一般的にとっても短い。

既に活用されていたホーキンスの研究成果では、少なくとも調査された周波数においては、流星から電磁気のエネルギーは発生しないと広く考えられていた。しかし、私は大気に低く突入した非常に大きい流星や火球は、プラズマ振動を喚起すると考える。ホーキンスが観測したような小さい物体が高い高度で突入する場合はプラズマ振動を喚起しないであろうが。

文献調査によると、火球はラジオやテレビの周波帯以上の周波数では電磁波を放射することはない。少なくともマイクロ波帯までは放射しない。一方、音が発生した事実は電磁波のエネルギーは10ヘルツから1万ヘルツの間である音が聞こえる範囲に存在することを示している。そして、この場合、信号を確認するための調整は必要なく、単純な変換行為があれば充分であることも。極長波帯において電磁波がないという観測結果は存在しない。従って、この電波帯においてエネルギー移転があるということは仮説として成立する。そ

のエネルギー移転とは観測者の聴覚器官の近く又はその中で発生した音のエネルギーへの変換である(Keay 1979年)。この考えに対して有力な火球研究者は否定的であった。「この分野は物理学者よりも心理学者にとってより実りが多いのではないかと。(anon 1979年)

この点において、Romig と Lamarが「音は観測者の近くで電氣的に伝わり、交換されたとの示唆は注目されるべきことである。周波数は必ずしも一定ではない。なぜなら電磁周波が存在しない音の周波数帯においては変換という言葉が必要であるからである。後に発表された文書のなかで、Romig と Lamarは電磁波が直接脳に作用した可能性について言及している。しかし一方で、これとは関係なく「火球というよりも火球周辺の物体から発生したと思われる音を聞いたと報告した者も数多くいる」と主張した。Ingallsはコーネル大学の放射物理学者であるB. W. Hapke博士の発言を引用している。博士は、妻とともに電磁波音を発する火球を目撃した訳であるが、博士曰く、「シューあるいはパチパチという音は明らかに火球と結びついている。ただ、その音が火球そのものから発しているのか周辺のものから発しているのかはわからない」

超長波電磁エネルギーが音へ直接変換する証拠は少なくとも2つの原因が考えられる。まず一つは、稲妻は電磁エネルギーを非常に広い範囲へ放出することである。これについては、何年間も雷に先立ち「ヴィート」、「カチッ」、「慌ただしい音」、「シュー」という例が報告されている。もう一つは、放電の前に急激に増加する地球上の電磁場の拡大によるものである。しかし、鋭い音は通常閃光と同時に起こる。カチッという音は、大気中における核兵器の爆発時においても聞こえると言われている。そして、この爆発から強い電磁の圧力が観測され、およそ12キロヘルツにも達すると知られている(Johler と Morganstern 1965年)。

電磁エネルギー発生プロセス

大火球は、数100ギガワット以上の運動エネルギーを放散する。この内、光を発生させるために使われるエネルギーすなわち伝達速度が合成に使われるものは数パーセントに過ぎない。イオン化されるために使われるエネルギーも同様である。そして残ったエネルギーは、主に熱として放散される。プラズマの通り道には非常に高い密度のエネルギーが存在しており、可能な限りの振動形態を引き起こす。それは聴覚が可能な周波数を含んでいる。問題は、現実的に発生の仕組みをみつけることである。一つの可能性として火球の軌跡にあるプラズマ内の混合磁気液体波の刺激を通じて発生することが考えられる。高度30 kmにおけるイオン密度 10^{23}m^{-3} に対してプラズマの振動はマイクロ波層において 10^{11} ヘルツである。地球の磁場内におけるイオン加速振動は約100ヘルツである。しかし、それらは少なくとも 10^8 ヘルツの高い衝撃波によって妨げられる。

Alfven(アルヴェーン)波を発生させるプラズマの軌跡内において、巨大な振動の可能性を調べると5500度の温度で完全にイオン化されたプラズマ内で上記の高度において衝撃波の周波数は

$$\sigma = \frac{e^2 n}{m_e v_c} = 7.5 \times 10^3 \text{ } \bar{\sigma} \text{m}^{-1}$$

とする。

200mの軌跡を横切る効果的な振動の柱の長さを仮定すると、30kmの高度から典型的な軌跡密度値は、磁気流体波発生の可能性を決定し、数値は

$$L u = \frac{B L \sigma}{2 \pi^2} \sqrt{\frac{\mu_o}{\rho_o}} = 0.25$$

である(Alfven と Falthammar 1963年)。

このメカニズムだけでは音を発生するには充分ではない。

なぜなら、音を発生させるためには更に大きなエネルギーを必要とするからである。他に考えられる発生メカニズムを捜し、核爆発からの電磁放射の振動の生成について研究

が行われた。プライスによって議論されたメカニズムの中では、これらのX線やγ線放射は火球に関しては除外されるかもしれない。しかし、3番目のメカニズム、それは火球を取り巻くイオン化された地帯から地磁気帯を排除することを必要としているものであるが、これは調査の価値がある。

火球のプラズマ内にある一団毎の電磁エネルギーに対する熱の比率は次の条件によって与えられる。

$$\frac{3 \mu_0 \rho_p R T}{B^2 M} = 1.3 \times 10^8$$

その条件とは、分子重量 M が標準地の29であり、地磁気帯の強度 B が 0.3γ である。これは、プラズマ内のエネルギー密度が8等級であり地磁気帯の密度より大きい。それ故地磁気帯は簡単に火球により押しよけられてしまう。

火球を取り囲むプラズマから追い出された地磁気帯は非常に僅かな割合ではあるがプラズマの中に戻る。

$$t_p = \frac{\mu_0 \pi r^2}{2} = 5 \times 10^3 \text{ s}$$

追い出された地磁気帯は、火球軌跡プラズマを瞬時に突き通る。そしてガンマ線が最初の軌跡である距離(16等級の火球については1メートル)よりも大きな強度で、そしてイオン化される総量は上限であると考えられる。この結果は、地磁気の場合は、火球の軌道の最初の数10メートルのあたりから放出されることを示している。放出されるエネルギーは $u_m A v$ 以下に相当する。 A はプラズマの断面積であり、 v は火球の速度である。これは、16等級の火球でいえば100ワットに足りない電力を産出することになる。軌跡が拡大し、多くのエネルギーを地磁気場に抗するよりも周囲の気圧に抗することによって費やした結果である。明らかに核の火球から超長波の放射エネルギーを生産する仕組みはそのサイズとエネルギーが比較できるものでない限り流星火球にとって重要ではない。指摘されたように、最初の地球磁場の排除は一時のもので、地球磁場はプラズマ内に再び戻る。プラズマは火球の後方の僅かに離れたところにあり、後方乱気流の起こる僅かな間に戻る。再び定着した地球磁場は、 Re_p が1を越えるプラズマの動きによりコントロールされる。

乱気流 L_p の初期のサイズを火球そのもののサイズと似通ったものと仮定すると、すなわち、直径1mであるとすると乱気流運動の速度 v_p は火球の速度の10分の1であり伝導率は上記の値である。

$$R_m = \mu_0 L_p V_p = 20$$

この値は、電気の伝導力が高く留まっている限り、乱れ飛ぶエネルギーが電磁エネルギーに移行するのに充分である。

軌跡の中でおこる乱気流はエネルギーが小さな渦巻きに変わる際、特定の周波数を持つ。それはおよそ500Hz以上である。この乱気流は磁場の振動にエネルギーを持たせ、超長波又は極超長波の範囲で電磁エネルギーを放出する。蓄えられた磁気エネルギーの放出は伝導性が減少する時に起こる。伝導性の減少はプラズマが冷え、磁気レイノルズ数値が1未満となり、組み替えや電気結合の結果発生する。ねじれもつれた「磁気スパゲティ」は、ひずみエネルギーを電離層の穴の中で地磁場での振動として放出しながらゆるむ。この振動も100km超の波長を持ち、これは電磁波の同波長である3kHzと調和する。

上記で述べた大火球からの電磁放射エネルギーの生成に関する仕組みは、電磁波音は大火球によるものに限られているという観察結果とも一致する。

Astopovich(1958年)は次のように主張した。絶対等級マイナス9等級以上の明るさを持つ火球のみが持続する電磁波音を発生すると。この経験による基準は、その後標準計算によっても支持されてきた。この標準計算では、火球が大気を通過するために必要なものであり、磁場が動いたり止まったりし、乱れた跡を生成するために必要なものである。

上記の火球放射メカニズムが著者によって示された直後にBronshtenにより、これは裏付けられた。Bronshtenは、典型的な音を発する火球(マイナス13等級)もスペクトルの超

長波帯で100万ワット以上の放射能力を生み出すことを明らかにした。

電磁波音は、マイナス9等級以上の火球から発すると報告されている。その音は通常火球の燃焼や爆発と一致し、持続時間は短い。このような状況の下で、プラズマ火球は高速で飛行し、電波を発生するために必要な不安定な状態を作り出す。日本人の観測者は、ペルセウス座流星群の流星の写真を撮影することに成功した。その流星は爆発し「ボン」という火球音を発した。一方同時に別の2ヶ所から電波の記録が得られた。これは注目に値する功績である。というのも、電磁波音を発する火球は珍しく、そして無作為に生ずるからであり、それ故、電波放出を記録することはとても難しいからである。

現在、流星は飛行と結びついた電気と電磁石に係る現象に視点が終わりBronshen(1991年)はこのような効果の徹底的な調査を指揮し、この問題は解決されるまで程遠いと結論付けた。多くの試みが流星とその軌跡における電場と電流を調査するために行われたが、決定的な結論は得られなかった。流星は地球の電場で永久的でないパルツ(電流)を作り出すという主張が真実であるとは証明されていない。

電磁波音の変換プロセス

強い静電気が毛髪を逆立たせることはよく知られている。人間による電磁波音の聴覚(静電気の直接の知覚は音声周波数により異なる)は、1964年に Sommer と von Gierkeにより報告されているが、必要とされる静電気の強さは1メートルにつき数キロボルトといった強いものである。実験室で44人のボランティアを対象に行われた試験では1、2、4、8キロヘルツでの反応を調べたが、被験者によりその結果は様々であった。Sommer と von Gierkeによる発見は、少なくとも最も敏感でない被験者により確認された。4や8キロヘルツといった高い周波数では性格がゆるいか縮れ毛の被験者3名(内2名が女性)が最も感受性が高かった。彼らの電気の強さを感じる限界値は160 V/mであった。男性の被験者1名は、眼鏡を掛けた時、2と4キロヘルツで3から4デシベルの音を感じた。

これらの研究成果は、体内での電磁波音聴取過程よりも耳に近い体外でのエネルギー変換がより有力な論拠となることを示している。これは、Sommer と von Gierkeの観察から正しいと裏付けられ、電極から発生する聴覚エネルギーを除去することは大変困難であると証明された。又、上記の実験で電極の音を抑えるためには防音材が必要であることが分かった。後にこのような電磁波音が聞こえていることがより明らかになった。興味深いことにIngallsは同様の実験における同じ問題について、20から2万ヘルツの通常の音以外の効果を生ずることはないと言及した。

同じ実験で、異なる音の周波数で磁場の音を聞くことができるかどうか確認する実験が行われた。最大の磁力である0.1mTに到達するまで(これは入手可能な装置で到達できる最大値である)被験者からの顕著な反応はなかった。

後に、別の無響室で植物を含む日常のものを対象とする実験が行われ、エネルギー変換を可能とするか否かが確かめられた(Keay と Ostwald, 1991年)。ピーク時で0.5、1、2そして4キロヘルツと変化する400 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-4}$ の電磁場ではアルミのクッキングホイールやタイプ紙は40から60デシベル(音区レベルは20マイクロニュートン)の音を生み出した。一方カサリナ松やギンバイカの小枝は10から25デシベルの音を生み出した。これらは最小の反応である。つまりこれらの例は変換能力を高めるため特殊な手法を用いた訳ではないから。勿論、更に大きな多量の実験体を用いれば、より少ない電氣的刺激で同様の音を発生させることが期待できる。更に音の領域内や振動周波数と反響する物体があれば、より高い反応を示し、音に対して影響を与えるであろう。

上記の実験で明らかになったのは、火球電磁波音の観測者の身近にあるありふれた物体のエネルギー変換率は70デシベル以上で変化し、それが、一見予測不能にみえる電磁波音の報告についてある程度まで説明できるということである。このことは、目撃者の報告にある音の強さの範囲から裏付けられる。その音の範囲とは、エネルギー変換が観測者の近くで起こると仮定し聴覚レベルに及び、20デシベル(かろうじて聞くことができるシューという音あるいは微かなため息)から少なくとも80デシベルかせいぜい90デシベル(10' 3w

ait)までである。例えば、1986年の西オーストラリア南西地区で発生した火球に際して、全く異なった場所に3人の証人がいたが、それぞれ「猛烈な爆発」、「とても大きな音」そして「轟き」と火球音を表現した。そして、3人とも90秒後にソニックブーム効果の音を聞いた。100を超える電磁波音に関する記録は、大きな音よりも微かな音の方が遥かに多いことを示している。これは、周囲のノイズレベルが多くの場合電磁波音を消していることを示唆している。

関連する現象

火球の爆発と同時に時々聞こえる音はさておき、以前言及したように火球音に明らかに関連する現象は、非常に明るいオーロラからの音である。その存在はオーロラの研究者により、熱心に議論されているが、オーロラから発生される音についての報告は、少なくとも1000年前に遡る(Dall' Olmo, 1980年)。オーロラの音に関する全ての課題は、SilvannanとTuanにより徹底的に調べられた。その結果次のような結論に至った(1973年)。

「観測に基づく証拠はオーロラからの音が実在することを裏付けている」

「最も可能性のある音の発生源は放電である」

「放電はオーロラに起因した電界が発生する」

このことは、生涯こういった音の研究を続けたトロント大学の故C. A. Chant教授の結論でもあった(Keay, 1990年)。1メートルあたり10kVというような非常に大きな電界が強烈なオーロラから観測された(Olson, 1971年)。しかし、彼が使用した装置は電界から大きな音の周波数を除外できなかったかもしれない。60年前、BurtonとBoardmanは、オーロラの光がきらめく時に発生する爆発による超長波の放射について報告した(1933年)。その後、多くの同様の観察結果があり、地球の極地は時として10億ワットの出力レベルでの強い放射源であることを証明した(Gurnett, 1974年)。発生メカニズムについては、4つの案が提案された(Gurnett, 1978年)が、この問題は解決されていない。

極超長波や超長波のエネルギーが音に直接変換するかもしれないという興味深い現象はしばしば報告される。強い放射線の放出とそれに続く地震との間の相関関係のようなものである(Corliss, 1983年)。地震に先立って聞こえる音に言及した多数の報告は、Milneにより集められた(1841年)。最近になるとこのような音の報告は少なくなってきた。これは人工的に発せられた、似たような音が増え、地震に由来する音の関心が減少したからである。しかしながら、地震から連想される音の周波数の電磁波による乱れは、この専門誌(PalTot, 1990年)の中で議論された。一方、Johnston(1987年)や他の研究者により言及された実験室での研究では、岩石の破壊が電磁気信号を生み出すことを示している。Cressとその同僚は900ヘルツから5キロヘルツの間でピークに達する信号を記録した(1987年)。大きな岩を爆発させる際にO' Keefe と Thielが行った現地調査結果(1991年)から5キロヘルツの周波数と数ボルトの電圧を持った電気波動が発生することが明らかになった。地震の際のより大きなエネルギー発散は、マグニチュードが高いほど何らかの徴候を発生させると期待されている。人の観察する地震音に関する報告は少ないため、こういった経験則と地震直前の動物が示す警告との問題は現段階では確定されていない。

最後に、この論文のテーマと同じような現象がNASAのスペースシャトルがフロリダに着陸しようとした時に最初の報告がなされた(Keay, 1985年)。ジョンソン宇宙センターのJ. Oberg と D. Potterは、シャトルが北テキサスとオクラホマ上空で大気圏に再突入しようとした際、ヒューっという音が聞こえたという人々の報告を受け始めた。音や放射信号を記録しようと数回にわたって試みたがミッションの変更やチャレンジャー号の大惨事により挫折した。スペースシャトルの再突入に関しては、火球の発生に比べ予測がし易く、録音装置の設置がやりやすいにも拘わらず現在のところ試みは成功していない。大きなロケ

ットが大気圏に再突入する際の破壊的な局面においても電磁波音は発生する。このような事案に関する報告書が証人の1人（クィーンズランド州Townsville のD. Deane）により間もなく発行される。これはCosmos 2204ロケットが大気圏に再突入した1992年7月31日の早朝、北クィーンズランド一帯で観測された事案に基づくものである。

結び

火球から証人の耳へ管腔のスピードで様々の段階でエネルギー移動することの物理的に認められる説明が現在見いだされた。その説明は決して全てのケースを網羅しているものではなく、多くの点で更なる調査が必要となる。特に「マグネットスパゲティ」と呼ばれている電磁発生メカニズムについて、プラズマによる乱流作用も十分考慮に入れながら包括的に論ずる必要がある。そして電気負荷がかかった日常の物体が音響反応を起こすことについての分析も必要である。

質の高い観測データ収集が重要であり、優先順位も高い。火球の発生を記録することは難しく、発生自体がまれであるため、ほとんど困難ともいえる。又、質の高い観測データの収集は、低周波の記録との相互関係は時間の正確さが求められる電磁波音の観測結果を集めるという点からも重要である。

これについては、ロシアの流星科学者により長い間認められてきた。この科学者は600以上の電磁波音を発する火球の観測結果を含む5つのカタログを現在までに発行した（Bronshnten, 1991年）。欧米における唯一のこの様なカタログはRomg と Lamarの包括的研究の中に含まれる。しかし、100以上事例が集められたカタログが編纂され、国際流星機構(IMO)のWGNレポートの執筆者によりまもなく発刊される（Heerbaan74, B-2530 Boechout, Belgium）。

Wang, Tuan そしてSilvermanは、グリーンランドのスールにある低周波監視ステーションから集められたデータを用いて、限られた範囲であるが調査を行った。しかし、その結果は否定的であった（1984年）。火球の現像の発生する場所からは離れすぎていたし、観測された周波数は多分高すぎた。電磁波音の発生が確認された報告に関する火球について、より正確な電磁観察を行う必要性が高まっている。

最後に、地球科学者は、音に関する報告を更に真剣に考える必要がある。このことにより物理的なメカニズムを突き止めることが幾分進むであろう。火球からの電磁波音については、現在では流星学者の間でまともな課題として考えられている（Keay, 1992年b）。そしてオーロラや地震学者の間でも、この問題をもっと早く受け入れるべきであったと思われる。

謝辞

まず、カナダオタワ市のBruce McIntosh氏、イリノイ州デカルブ市のDoug ReVelle氏、イギリスシェーフィールド市のBill Jones氏、モスクワ市のVitaly Bronshnten氏、そしてイギリスエジンバラ市のBill Napier氏にこの研究を進める過程で有意義な議論をしていただいたことに感謝します。又、カナダオタワ市のIan Halliday氏、チェコアンドレジョブ市のZdenek Cepelcha氏には、貴重な火球に関するデータを頂きました。ありがとうございます。Newcastle大学には重要な議論がなされる会議等への出席に際し助成をいただきました。感謝します。特にお礼を申し上げたいのは、オタワにあるカナダ国立研究評議会のHerzberg天体物理研究所に対してです。親切に受け入れていただき、そのすばらしい蔵書のおかげで全く手に負えないと思われるような問題についても解決の糸口を見いだすことができました。そして最後に、寛大な態度で接し励ましていただきました旧ソビエト科学アカデミーの地球物理学委員会にお礼を申し上げます。

Progress in Explaining the Mysterious Sounds Produced by Very Large Meteor Fireballs

COLIN S. L. KEAY

Department of Physics, University of Newcastle, N.S.W., Australia

Abstract — Strange sounds, heard simultaneously with the sighting of brilliant meteor fireballs many tens of kilometers distant, have been an enigma for more than two centuries. The term "electro-phonetic sounds" is now widely used to describe them and distinguish them from the normal sonic effects heard after the fireball has passed by. A physically viable explanation for meteor fireball electro-phonetic sounds has been developed and verified by observation and experiment. The history of this neglected branch of meteor science is presented in some detail, drawing attention to the difficulties which stood in the way of a solution until fairly recently.

Introduction

The entry into the atmosphere of a large meteor fireball is one of the most awesome natural phenomena that a human being can witness without being greatly endangered. The largest and most spectacular meteor fireballs are very rare events, and few people ever see one during their lifetime. For about ten percent (Lamar and Romig, 1964) of those who do witness a very luminous meteor fireball, the mental impression is heightened by strange swishing, hissing and popping noises coincident with its passage across the sky. Such sounds are quite anomalous in that they imply acoustic propagation at the speed of light. This anomaly was first recognized more than two centuries ago, and has defied explanation until quite recently. It is the purpose of this essay to relate the long history of observation of anomalous sounds from bright meteor fireballs, and to recount the course of events which led to a viable physical solution of the mystery.

But first, terminology. For reasons that will emerge, the anomalous sounds heard to accompany the flight of a meteor fireball will from here onwards be called electro-phonetic sounds to differentiate them from the acoustically propagated booms and rumbles which are heard from seconds to minutes after the light of the fireball has extinguished. Electro-phonetic sounds should not be confused with the electro-phonetic effect, otherwise known as electro-phonetic hearing, which relates to the sensation of hearing arising from the passage of an electric current of suitable magnitude and frequency through the body (Adrian, 1977; Walker, 1988). Also, in the interests of brevity, the word bolide will be used in lieu of "large, bright meteor fireball", since that is its accepted meaning.

History

The first lucid account of electrophonic sounds related to the flight of a bolide originated from China in 817 A. D. At the same time as it was seen, the bolide made "a noise like a flock of cranes in flight" (Astapovich, 1951; LaPaz, 1958). It is very probable that electrophonic sounds were heard in more ancient times. Some of the celestial noises mentioned in the writings of early authors such as Hesiod and in the Christian Bible (for example Acts 2:2) may well have been electrophonic of bolide origin.

There is no doubt about the electrophonic effects of a large bolide seen over England on the 19th of March, 1719. Edmund Halley (1719) reported some eye-witnesses "hearing it hiss as it went along, as if it had been very near at hand," but he dismissed such claims as "the effect of pure fantasy." This rejection is related to Halley's realization, by careful triangulation from many observations, that "they abundantly evince the height thereof to have exceeded 60 English miles", which is far too distant for sound waves to arrive instantly. Halley was one of the first to show that meteors occur at a great height compared to most other atmospheric phenomena and that their velocity was "incredible", being "above 300 such miles in a minute."

During the next half century there were two further accounts of electrophonic bolides in the Philosophical Transactions of the Royal Society (Short, 1740 and Pringle, 1759) and another drawing attention to what now would seem to be electrophonic sounds emitted by an intense auroral display (Derham, 1727).

In the year 1783 a spectacular bolide passed over Scotland, eastern England and part of Europe (for a recent evaluation of this event and its importance to meteor astronomy, see Beech, 1989). Many reports of electrophonic sounds were gathered by the Secretary of the Royal Society, Thomas Blagdon (1784). Blagdon, a former army surgeon who was quite familiar with the delay between the flash and the boom of distant artillery, was, like Halley, perplexed by the simultaneous perception of hissing sounds with the visual appearance of a bolide more than 50 miles distant. He was so convinced of the veracity of the witnesses that he did not reject the anomaly and decided that he "would leave it as a point to be cleared up by future observers." Again, following Halley, Blagdon did a disservice to the subject by suggesting that the sound perception may be psychological through "an affrighted imagination." These conclusions, by eminent men, bedeviled studies of electrophonic sounds for two centuries.

It must be realized that the views of Halley and Blagdon were circumscribed by the limits of existing scientific knowledge: by 1784, Coulomb had not yet discovered the fundamental law of electrostatics, and a further century was to elapse before Hertz demonstrated the existence of radio waves.

Over the intervening period there were a number of inconclusive reports of electrophonic sounds from bolides and similar hissing noises from very bright aurorae. The great Leonid meteor shower of November 13th, 1833, gave rise to many reports of sounds accompanying some of the largest meteors. Denison

Olmsted (1834, 1835), Professor of Mathematics and Natural Philosophy at Yale, gathered many reports and wrote, "The sounds supposed to have been heard by a few observers, are ... represented either as a *hissing noise*, like the rushing of a sky rocket, or as slight explosions like the bursting of the same bodies. These comparisons occur too uniformly, and in too many instances, to permit us to suppose that they were either imaginary or derived from extraneous sources."

About a year after Hertz' experiment, a letter to *Nature* from Samuel Sexton (1885) drew attention to the similarity of sizzling, hissing and buzzing sounds to the affliction of *tinnitus aurium*, suggesting this to be the explanation for auroral sounds.

Even when electric fields and radio waves became well understood, the solution to the problem of instantaneous sounds from bolides remained elusive. The only evidence was anecdotal and the incidence of the sounds remained highly capricious, being sometimes heard by only one or two members of a group of eye-witnesses in close proximity to each other. This feature of the electrophonic bolide sounds, together with their simultaneity with a visual event tens to hundreds of kilometers away, undoubtedly led respected meteor observers such as W. F. Denning (1903) to uphold Halley and Blagdon's judgment, despite the existence of a number of reports suggesting otherwise, such as "While walking in my garden my attention was attracted by a distant hissing sound, and on looking up I saw the meteor" (quoted in Denning, 1903).

Although "W. F. Denning was one of those rare amateur astronomers who achieved world-wide respect and fame in several areas of astronomy ... he is probably best remembered today for his work in the field of meteor astronomy" (Beech, 1990). Therefore Denning's conclusion that "hissing and similar noises ... may be dismissed as imaginary," and is an "observational illusion" (1907) carried considerable weight among meteor scientists. He later likened auroral sounds with electrophonic sounds from meteors, stating, "They are either imaginative or due to causes not directly connected with the phenomena observed" (Denning, 1915).

Such was the climate of opinion when a spectacular bolide lit up the night sky of almost the entire State of Texas on the first of October, 1917. Engineering Professor J. A. Udden of the University of Texas gathered more than 60 reports of the event with the intention of locating its impact point somewhere in central Texas. He noted that "Several parties who saw the bright body at a distance of about 200 miles (320 km) or less, report hearing a swishing or buzzing sound, which seems to have been simultaneous with the appearance of the light." After analyzing nine reports of these sounds, he concluded (1917a), "If these observations are not subjective, the cause of the sound may perhaps be sought in either waves that, on meeting the earth, or objects attached to the earth, such as plants or artificial structures, are in part dissipated by being transformed into waves of sound in the air." His very apt conclusion was evidently prompted by one of the observers who "seems to refer this sound to objects attached to the ground" (Udden, 1917b).

Udden's perceptive hypothesis was not readily tested because of the rarity of electrophonic bolides at any given location. Every few years a report of an electrophonic bolide would appear in a scientific journal and, without first-hand experience of the event, all a meteor scientist could do was to gather and collate such reports. One such was Udden's fellow American, C. C. Wylie, Professor of Mathematics and Astronomy at the University of Iowa, who wrote an article "Sounds from Meteors" in *Popular Astronomy* (1932). In it, Wylie asserted "The explanation is without doubt psychological."

In following Denning rather than Udden, Wylie was undoubtedly influenced by his earlier investigation of the large bolide seen over central Illinois in July 1929. He concluded his summary of that event (Wylie, 1929) with the paragraph "Many letters report a swishing or hissing sound. Some report other noises; but we often have from the same community a definite report that no sound was audible to some one sitting on a porch where everything was quiet. Further, there is no mention of an appreciable interval of time between the appearance of the meteor and the hearing of the sound. In all cases the interval should have been minutes. Hence, none of these sounds can be accepted as from the meteor."

Later, Wylie (1939) embellished his case by lumping electrophonic bolides with other, better founded, examples of psychological errors affecting meteor reports from the general public. He also claimed that persons knowing that a meteor must be fifty or more miles away never report hearing such sounds.

The negative opinions of acknowledged meteor experts such as Denning and Wylie led many meteor scientists to shun the subject of electrophonic bolides. Among the exceptions was H. H. Nininger (1939), one of the first prominent meteor scientists to begin "to regard the matter as a problem in physics rather than psychology" and to "finally become convinced of the reality of such sound where the environment of the observer is favorable." Nininger based his view on the "Many cases (that) are on record where the informants insist that the sound attracted them from behind or within buildings, and, in some instances of daylight meteors, the sound was commented upon before any light was seen or known about."

Nininger had earlier (1934) proposed "that there may be, in connection with meteors, ethereal as well as aerial propagation of sound." In his later paper he revealed, "In 1934, Mr. Elmer R. Weaver of the U. S. Bureau of Standards suggested to me in conversation that possibly ether waves are transformed into sound waves upon striking objects in the environment of the observer." Nininger went on to report that it is a matter of common knowledge among radio engineers that many different kinds of object, in the vicinity of powerful radio transmitters, serve as receivers, "sometimes giving out very good reproductions of programs which were being broadcast." In these instances the radio signals were being rectified by the objects in order to demodulate and produce the audible sounds. Similar speculations involving microwave and millimeter-wave energy were presented by Anyzeski (1946).

Weaver's hypothesis came tantalizingly close to success: it was not accepted for want of evidence of radio signals from even the largest bolides. Nor had he been explicit about his suggested transformation process, so the subject remained open to speculation.

Returning now to the problem of nomenclature, Nininger (1939) proposed "that 'ethereal' be used as a designation for sound produced by the natural transformation of ether waves into audible sound" suggesting that he, too, must have been close to realizing how such sounds may be heard. Soon after, in 1940, Professor Peter Dravert, of Omsk University, introduced the term 'electrophonic fireball' (Bronshten, private communication) and this quite rapidly became the accepted practice in describing such events.

Barringer and Hart (1949), in discussing the mechanism of sounds from meteors, were unimpressed by psychological arguments. After summarizing the "mass of data" available, they concluded that "a meteor's audible accompaniment can scarcely be dismissed as a product of the imagination of the visual observers." They presumed that such sounds were carried by radio waves and estimated that a large bolide could easily dissipate energy at the rate of several gigawatts. Of this high level of energy, the thermal radio wave component was far too weak leading them to consider that the light of the bolide might be modulated at audio frequencies. This, of course, led to severe problems of generation and detection mechanisms quite unknown to science. They retreated to suggesting that the ionized wake of the bolide "may reasonably be expected to give off radiation of the intragalactic type," probably alluding to the early discoveries in radio astronomy of hissing signals of extra-terrestrial origin.

Barringer and Hart's suggestion was taken up in a serious way by Hawkins (1958a, b), who conducted a search for radio emissions from meteors at several frequencies, namely 475, 218 and 30 MHz and also at 1 Hz using a magnetometer. The meteors Hawkins observed had visual magnitudes between -1 and +5. He concluded "Thus it is probably true to state that meteors do not emit radio noise within the frequency range 1 Hz - 500 MHz above the limits of sensitivity of these measurements. Meteors therefore show a surprisingly low efficiency in converting kinetic to radio energy."

In the meantime, the problem of electrophonic bolides was under scrutiny in the Soviet Union. The most notable work was undertaken by Professor I. S. Astapovich, who compiled an extensive catalog of electrophonic bolides and drew several important conclusions from his detailed investigations (Astapovich, 1958): only bolides brighter than -9 absolute visual magnitude produce sustained electrophonic sounds; the majority of reports noted that the bolide trajectories had very small inclinations to the horizontal; and, since all of the bolides were observed at mid-latitudes, their low inclinations meant that they were moving at a large angle to the earth's magnetic field lines. Other Soviet scientists noted that the sharp crack or "peal" sometimes heard is always associated with the disintegration and detonation of the bolide. They considered these sounds to be a purely psychological effect, but accepted the physical

reality of other electrophonic sounds from bolides (see Romig and Lamar, 1963, p. 53). The controversy over the nature of electrophonic sounds was contested as strongly among Soviet meteor scientists as it was in Western countries: Academician B. Yu. Levin supporting the psychological explanation, while Astapovich, an ardent defender of the reality of electrophonic sounds, argued in favour of a physical explanation (Bronshen, personal communication).

In a review article, the experienced meteoriticist L. LaPaz (1958) observed that opinion had turned strongly towards accepting with Udden the objective reality of anomalous meteoritic sounds. He attributed this as a possible result of the "ever-increasing amount of prompt, first-hand interrogation of numerous witnesses of large fireball falls" and noted that "several attempts have been made to give rational explanation of their cause."

Such was the situation when the United States Department of Defense decided that the matter should be examined, not least because it was well known from the literature on the subject that Soviet scientists were actively investigating naturally occurring electrophonic phenomena. A contract was awarded to the Rand Corporation, which assigned Mary Romig and Donald Lamar to the work. Their "study was motivated by the possibility that a better understanding of these phenomena will lead to new techniques for determining the size, nature and path of any large body entering the earth's atmosphere" (Romig and Lamar, 1963).

Romig and Lamar's 65-page unclassified report presented 88 references, a catalog of 41 anomalous-sound observations with seven detailed maps (their Appendix A), and a further catalog of 63 Russian observations (Appendix B). Their detailed study of the evidence available was, and still is, essential reading for any student of the subject. However they reached no firm conclusion on the physical mechanism for producing the sounds except to attribute them to an "electromagnetic disturbance," and recommended that "the properties of the plasma sheath and ionized wake should be the subject of further research." Romig and Lamar gave no indication of the generation process other than to state (without a reference) that "the presence of turbulence can greatly enhance normal plasma radiations." As Romig and Lamar's report was inconclusive, many meteor scientists continued to invoke the time-honored psychological explanation for electrophonic sounds from bolides.

At this point it is worth summarizing the difficulties which faced any investigator studying electrophonic sounds, specifically those from bolides:

1. They are rare. Few people have ever heard them, either from bolides, aurorae or lightning. Nor has anyone ever had the good fortune to have had a tape recorder in readiness to record them.
2. They are evidently capricious. Not all witnesses in a group may hear them.
3. Their propagation is instantaneous, implying transmission at the velocity of light, but no electromagnetic disturbance had been known to pro-

duce sound except for electrostatic brush discharges. Such discharges do not propagate over distances of up to 300 km.

4. No electromagnetic disturbance of sufficient magnitude had ever been detected from large bolides or aurorae.
5. The method of conversion of electromagnetic radiation into sound was quite obscure.
6. No physical mechanism was known for the production of strong electromagnetic radiation from bolides or aurorae.

This is where matters stood prior to the initial resolution of the problem published by the author in 1980 (Keay, 1980b).

The Great New South Wales Bolide of 1978

On the morning of 1978 April 7, the dark moonless night sky above eastern New South Wales became as bright as day when a large bolide arriving from the southwest passed over the city of Sydney and headed seaward past Newcastle (Keay, 1980a). Despite the early hour, ninety minutes before sunrise, hundreds of witnesses deluged the news media with telephoned sightings. The bolide reached a maximum brightness of at least -15 mag (absolute) and many observers were temporarily blinded by it.

As usual with such a bright bolide event, there were a number of reports of strange sounds heard while the bolide was in view. At first I rather fashionably dismissed these as a psychological effect, until persuaded otherwise by some clear examples of sounds being noted prior to any visual acquisition of the bolide or its light.

At Rose Bay, Sydney, 20 km from the ground track of the bolide, S. McGrath "Heard a bang before seeing the light. It was like a person in the next apartment slamming a door like a screen door: rather rattley but not loud." This witness had time to get to a window and watch the bolide recede and disappear.

At Edgecliff, Sydney, 20 km from the ground track, A. Hayes "Heard a noise like an express train or bus travelling at high speed. Next an electrical crackling sound, then our backyard was as light as day."

At Vales Point, 40 km from the ground track, J. Ireland "Heard a sound like an approaching vehicle and saw a flash of light (from behind his right shoulder) as everything was lit up like daylight."

At Kotara, Newcastle, 40 km from the ground track, N. Jones heard a noise like a "phut" when the bolide flared, but "It was not loud enough to wake anyone." However a friend standing by the door on the other side of their car heard nothing.

Other impressions of the sound simultaneous with the sighting were "a loud swishing noise"; "a humming sound like a transformer or distant siren"; "like steam hissing out of a railway engine for a count of about ten"; "a swishing sound like the onset of an unexpected high wind"; and "a low moaning,

whooshing transcribable on a tape recorder." It is most unfortunate that a tape-recorder was not immediately available to the latter witness.

Publicity surrounding the 1978 bolide elicited recollections from witnesses of earlier bolides, who provided descriptions of simultaneous sounds quite similar to the above examples. It became clear to me that the psychological explanation was not realistic and a physical explanation had to be sought.

The Search for an Explanation of Electrophonic Sounds

Clearly, the transmission of energy from a bolide to the vicinity of an observer of electrophonic sounds must be by electromagnetic means. High electrostatic fields causing audible brush discharges may not be ruled out, but it is difficult for these alone to explain electrophonic sounds heard well over 100 km from the ground track of a bolide travelling at an altitude of only 30 or 40 km. Electrostatic fields produced by meteoroids entering the atmosphere vertically have been studied by Ivanov and Medvedev (1965) who showed that the induced potentials over distances of the order of the scale height may be several hundred volts for large meteoroids, hardly enough to cause electrophonic effects.

Sustained electrophonic sounds accompany bolides in trajectories having very small inclinations (Romig and Lamar, 1963) rather than very steep or vertical paths. In the latter case, sounds of an electrophonic nature are generally of very brief duration.

The work of Hawkins, already referred to, was widely considered to rule out the generation of electromagnetic radiation by meteors, at least at the frequencies examined. However it seemed to me entirely plausible that very large meteors which penetrate low into the atmosphere — bolides — could excite plasma oscillations not possible with the smaller bodies at higher altitude which were observed by Hawkins.

A literature search disclosed instances where bolides produced no electromagnetic radiation at frequencies in the broadcast band and above, up to at least the microwave region of the spectrum (Keay, 1980b). On the other hand, the acoustic effects suggest that the electromagnetic energy may lie within the audible range from 100 to 10,000 Hz, in which case no rectification is needed to detect the signals: simple transduction suffices. There exists no observational evidence ruling out em radiation at frequencies in the ELF/VLF range, so energy transfer in this region of the spectrum was accepted as a working hypothesis, with transduction to acoustic energy taking place close to or within the hearing organs of some observers (Keay, 1979). The response to this idea was mixed: a prominent meteor scientist dismissed it with the words, "Or is this a more fruitful field for psychologists rather than physicists?" (anon., 1979).

At this point, it should be noted that Romig and Lamar (1963) did suggest "that the sound is electrically transmitted and transduced near the observer." Equality of frequency was not implied because they elsewhere employed the

word transduction for examples where the em frequency did not lie in the audio frequency range. In a later paper, Romig and Lamar (1964) mentioned the possibility that "perhaps the electromagnetic waves act directly on the brain." But Lamar and Romig (1964) claimed (without references) that "There are also many individuals who report that the sounds seemed to have originated from surrounding objects rather than the fireball." Ingalls (1967) quotes a Cornell Radiophysicist, Dr. B. W. Hapke, who, with his wife, witnessed an electrophonic bolide. He stated, "The hissing and crackling noises were definitely associated with the meteor, although we cannot be sure whether or not they appeared to be coming from the meteor or from all around us."

Evidence for direct transduction of ELF/VLF em radiation into sound has been available from at least two sources. Lightning strokes emit em energy over a very broad spectrum and for many years instances of "vits," "clicks" (McAdie, 1928) "tearing noises" and "swishes" (Cave, 1926) preceding thunder have been reported. The latter are probably due to a rapid increase in the geoelectric field just prior to the discharge (Schonland, 1964), but the sharp sounds are usually coincident with the flash. Similar clicks are said to be heard at the instant of atmospheric nuclear weapon detonations from which the strong em pulse is well studied and known to peak at around 12 kHz (Johler and Morganstern, 1965).

The Electromagnetic Energy Generation Process

A large bolide sheds its kinetic energy at rates upwards of tens of gigawatts. Its luminous efficiency, a function of velocity and composition, is of the order of a few percent. Ionization is of the same order, while the remaining energy is mainly liberated as heat. The extremely high energy density residing in the plasma trail should excite all oscillatory modes possible, including those at frequencies in the audio range (ELF/VLF radiation). The problem is to discover a realistic generation mechanism. One possibility appeared to be through excitation of a hybrid-mode magnetohydrodynamic wave within the plasma of the bolide trail. For a typical ion density of 10^{23} m^{-3} at an altitude of 30 km, the plasma frequency is of the order of 10^{11} Hz, in the microwave region of the spectrum. Ion cyclotron oscillations in the Earth's magnetic field have a very low frequency, about 100 Hz, but they are prevented by the high collision frequency of at least 10^8 Hz.

Turning to the possibility of bulk oscillations in the trail plasma generating Alfvén waves, the collision frequency at the above altitude in a fully ionized plasma at a temperature of 5500° K is found to be $1.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$. This yields a conductivity

$$\sigma = \frac{e^2 n}{m_e v_c} = 7.5 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ m}^{-1} \quad (1)$$

Assuming an effective oscillating column length across the trail of 200 m, and taking, from the chosen altitude of 30 km, a typical value for the trail den-

sity of $2 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$, the Lundquist number, which determines the likelihood of magnetohydrodynamic wave generation (Alfven and Falthammar, 1963), is

$$Lu = \frac{BL\sigma}{2\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_o}{\rho_p}} \approx 0.25 \quad (2)$$

This is quite insufficient, as it needs to be much greater than unity.

In the search for other possible generation mechanisms the production of the pulse of electromagnetic radiation from a nuclear explosion was investigated. Of the principal mechanisms discussed by Price (1974), those involving X- and gamma-radiation may be ruled out for bolides. But the third mechanism, involving the expulsion of the geomagnetic field from the ionized region surrounding the bolide, bears examination.

The ratio of thermal to magnetic energy per unit volume in the plasma sheath of the bolide is given by

$$\frac{3\mu_o \rho_p RT}{B^2 M} \approx 1.3 \times 10^8 \quad (3)$$

where the molecular weight M is taken as the standard value of 29 and the strength of the geomagnetic field B is taken as 0.3 gamma ($3 \times 10^{-6} \text{ G}$). This indicates that the energy density in the sheath is 8 orders of magnitude greater than the geomagnetic field energy density and therefore the geomagnetic field is easily pushed aside by the bolide.

The geomagnetic field expelled from the plasma sheath surrounding a bolide leaks back into the trail plasma at a rate which may be estimated from skin depth considerations. It can be shown that the expelled field will penetrate the bolide trail plasma in a time no greater than

$$t_p = \frac{\mu_o \pi r_o^2}{2} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ s} \quad (4)$$

where r_o is the initial trail radius which is taken as 1 meter for a magnitude -16 bolide and total ionization is assumed as an upper limit. This result indicates that the geomagnetic field can be expelled only from the first few tens of meters of the bolide trail. The power radiated amounts to no more than $u_m A v$, where A is the cross-sectional area of the plasma and v is the bolide velocity. This yields less than 100 watts for a bolide of magnitude -16, a consequence of the trail expansion expending most of its energy doing work against the ambient air pressure rather than against the geomagnetic field. Clearly, the mechanisms which operate to produce VLF radiation from a nuclear fireball are unimportant for a meteor fireball unless it is of comparable size and energy.

As indicated, the initial expulsion of the geomagnetic field is very temporary and the field leaks back into the plasma only a short distance behind the bolide body during the brief interval before the onset of wake turbulence. The re-established field is then controlled by plasma motion provided the magnetic Reynolds number Re , is well above unity.

Assuming the initial scale size of the turbulence L_p is of the order of the size of the bolide itself, around 1 meter in diameter, the velocity of the turbulent motion v , is one tenth of the velocity of the bolide, and the conductivity has the value given above, the magnetic Reynolds number is

$$R_m = \mu_o L_p v_p \approx 20 \quad (5)$$

This value is adequate for the transfer of the abundant turbulent wake energy into magnetic field energy for as long as the electrical conductivity remains high.

The turbulent motions in the wake have characteristic frequencies upwards of $v_p/2\pi L_p$, around 500 Hz, as energy is transferred to smaller eddies. The turbulence excites vibrations of the geomagnetic field giving rise to the emission of electromagnetic radiation in the ELF/VLF region of the spectrum. A major release of stored magnetic energy occurs when the conductivity falls, due to recombination or electron attachment as the plasma cools and the magnetic Reynolds number falls to less than unity. The twisted and tangled "magnetic spaghetti" then relaxes, releasing its strain energy as vibrations of the geomagnetic field within the earth-ionosphere cavity. These field vibrations have wavelengths of the order of 100 km, corresponding to an electromagnetic wave frequency of 3 kHz.

The above mechanism for the generation of electromagnetic radiation from large bolides is in accord with the observational finding that only very large bolides give rise to reports of electrophonic sounds. Astopovich (1958) claimed that only those bolides having an absolute visual magnitude brighter than -9 produce sustained electrophonic sounds. This empirical criterion has since been upheld by model calculations (Keay, 1992a) based on the need for the bolide to penetrate the atmosphere deeply enough to produce a turbulent wake (see, for example, ReVelle, 1979) in order for geomagnetic field trapping and scrambling to occur.

Soon after the development of the above bolide radiation mechanism by the author (Keay, 1980b) it was confirmed by Bronshten (1983a and b), who showed that a typical electrophonic bolide of magnitude -13 could generate well over a megawatt of radio power in the ELF/VLF region of the spectrum.

Electrophonic sounds have been reported from bolides fainter than magnitude -9. The sounds are usually of brief duration coincident with flaring or an explosion. Under these circumstances the expansion of the plasma fireball, still travelling forward at high velocity, would create the turbulent conditions

necessary for the generation of radio waves. Japanese observers (Watanabe, Okada and Suzuki, 1988) have succeeded in photographing a large Perseid meteor (a borderline bolide) which exploded and produced an electrophonic "phut" sound, while simultaneously from two other locations radio records were obtained (see Keay, 1992c). This was a remarkable feat given the rarity and random incidence of electrophonic bolides which makes it very difficult to record their radio emissions.

Turning now to other electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight, Bronshten (1991) has conducted an exhaustive investigation of such effects, concluding that the problem is far from a solution. Many attempts have been made to investigate electric fields and currents in meteors and their trails without conclusive results. Claims that meteors can produce transient pulses in the geoelectric field (Hopwood, 1989) have not been independently verified.

The Electrophonic Sound Transduction Process

It is common knowledge that high electrostatic fields make dry hair stand on end. Human electrophonic hearing (the direct perception of electrostatic fields varying at audio frequencies) has been reported (Sommer and von Gierke, 1964) but the field strengths required are large: several kilovolts per meter. Tests undertaken in an anechoic chamber with 44 volunteers to check their response at frequencies of 1, 2, 4 and 8 kHz showed quite wide variability between subjects (Keay, 1980c). The findings of Sommer and von Gierke were confirmed for the least sensitive subjects. At the higher frequencies, 4 and 8 kHz, the greatest sensitivity was shown by three subjects (2 female) whose common characteristic was very loose or "frizzy" head hair. Their threshold peak-to-peak electric field strength was 160 V/m. Another subject (male) was found to be 3 to 4 db more sensitive at 2 and 4 kHz when wearing glasses.

These findings point towards external transduction near to the ears as being more effective than internal electrophonic hearing processes. This is borne out by Sommer and von Gierke's observation that it proved extremely difficult to eliminate direct acoustic radiation from the electrodes employed. This was also true in the above tests, which required acoustic insulation to suppress electrode sounds. Later it became clear that such electrically excited sounds were really those being sought! Interestingly, Ingalls (1967) alludes to the same problem in his similar tests, which "failed to produce effects which which could be attributed to other than normal aural paths from 20 to 20,000 Hz."

In the same anechoic chamber, tests were also conducted to check the ability of the volunteers to hear magnetic fields varying at audio frequencies. Up to peak magnetic fields approaching 0.1 mT (the maximum attainable with the equipment available) there was no significant response from any of the subjects.

Later, in another anechoic chamber, tests were conducted to test a number of mundane objects, including vegetation, for their ability to act as transducers

(Keay and Ostwald, 1991). Under electric fields of 400 kV m^{-1} peak-to-peak varying at 0.5, 1, 2 and 4 kHz, samples including aluminium cooking foil and typing paper produced sound levels in the 40 to 60 dB (SPL ref. 20 micronewton m^{-2}) range, while sprigs of casuarina pine and coastal myrtle produced from 10 to 25 dB (SPL). These represent minimal responses because the samples were not shaped or mounted in any special way to enhance their transduction ability. Of course, larger or more extensive amounts of the sample materials could be expected to produce similar sound levels at lower levels of electrical excitation. Furthermore, objects having resonant frequencies of vibration in the audio range would exhibit an enhanced response and color the sounds emitted.

From the above tests it is clear that for mundane objects, which may be close to observers of electrophonic fireballs, their transduction efficiencies may vary by ratios of more than 70 dB (power) accounting to some extent for the seemingly capricious incidence of reports of electrophonic sounds. This is borne out by the loudness range of witness reports, which span acoustic power levels (assuming the transduction occurs close to the observer) from as low as 20 dB (10^{-10} watt), "barely audible hissing" or "like a very faint sighing," to at least 80 or even 90 dB (10^{-3} watt). For example, from quite different locations, three independent witnesses of the 1986 fireball over the south-west region of Western Australia reported "a violent explosion," "very loud sounds" and "a roar" during the passage and about 90 seconds later all heard the sonic boom effects. A collection of over 100 electrophonic sound observations indicates that reports of faint sounds are far more common than loud sounds, suggesting that ambient noise levels mask electrophonic sounds in many instances.

Possibly Related Phenomena

Apart from the instantaneous sound occasionally heard to accompany a lightning stroke, as mentioned earlier, the phenomenon most obviously related to electrophonic sounds from bolides is the existence of many disjuncts of sounds from very bright aurorae. Although their existence is hotly disputed by many auroral scientists, accounts of such sounds date back at least one thousand years (Dall'Olmo, 1980). The whole subject of auroral sounds has been exhaustively investigated by Silverman and Tuan (1973) who conclude "that the observational evidence supports the reality of auroral sounds and that the most likely source of these seems to be brush discharges, and that these are generated by aurorally associated electric fields." This was also the conclusion of a life-long student of such sounds, the late Professor C.A. Chant of Toronto (Keay, 1990). Very large electric fields of the order of 10 kV per meter from intense aurorae have been measured (Olson, 1971) but the equipment he used may well have been unable to rule out a large audio-frequency component of the field. Sixty years ago, Burton and Boardman (1933) reported bursts of VLF emission accompanying flashes of auroral light and there have been many similar observations since then proving that the polar regions of the

Earth are at times a very strong radio source with power levels in the gigawatt region (Gurnett, 1974). Four possible generation mechanisms have been proposed (Gurnett, 1978) and the subject is far from resolved.

An intriguing phenomenon, which may also result in the direct transduction of ELF/VLF electromagnetic energy into sound, is the correlation often reported between strong radio emissions and subsequent earthquakes (Corliss, 1983). A number of reports mentioning a "rushing" sound preceding earthquake shocks were gathered by Milne (1841). More recent accounts of such sounds may be lacking because of greater incidence of similar man-made artifacts reducing public alertness to sounds of seismic origin. However, audio frequency electromagnetic disturbances associated with earthquakes have been discussed in this journal (Parrot, 1990), while laboratory studies mentioned by Johnston (1987), and others, show that rock fractures generate electromagnetic signals. Cress and his coworkers (1987) recorded signals peaking in the range from 900 Hz to 5 kHz. Field studies conducted by O'Keefe and Thiel (1991) during large rock-blasting operations revealed a series of electrical pulses with a repetition frequency as high as 5 kHz and an amplitude of several volts. The substantially greater energy release in an earthquake could be expected to generate signals many orders of magnitude higher in amplitude. The connection has yet to be confirmed between these experimental observations and the alarm frequently exhibited by animals immediately prior to an earthquake and, of course, the sparse reports of earthquake sounds by human observers.

Lastly, a phenomenon which is almost certainly identical to the subject of this essay, was first reported when NASA space shuttles began landing in Florida (Keay, 1985). J. Oberg and D. Potter of the Johnson Space Center began receiving reports of people hearing a "swishing" sound as the shuttles re-entered the atmosphere over northern Texas and Oklahoma. Several attempts to record the sounds and the radio signals were thwarted by mission changes and the Challenger disaster. This quest has not yet succeeded, though the relative predictability of space shuttle re-entries makes the deployment of recording equipment more likely to be rewarded than for random bolide events. The destructive re-entry of large rocket stages also may produce electrophonic sounds: such a report was forthcoming from one of the witnesses (D. Deane of Townsville, QLD) to such an event over north Queensland on the early morning of 31 July 1992, when the Cosmos 2204 rocket reentered the atmosphere.

Conclusions

Physically acceptable explanations have now been found for each stage of the transfer of energy at luminal speed from a bolide to the ears of a witness. The explanations are, as yet, far from exhaustive, and there is ample scope for

further investigations. In particular, there is need for a comprehensive treatment of the "magnetic spaghetti" radio generation mechanism taking turbulent plasma processes fully into account, and a need for thorough analysis of the acoustic response of mundane physical objects to impressed electrical stress.

The collection of high-quality observational data is an important priority. The difficulties of capturing records of bolide events are quite formidable given their rarity. Also important for correlation with synoptic ELF/VLF records are catalogs of electrophonic observations for which the times should be as accurate as possible. This has long been recognized by Russian meteor scientists who have now published five catalogs containing over 600 observations of electrophonic bolides (Bronshten, 1991). The only such catalog of Western origin is contained in Romig and Lamar's (1963) comprehensive study, although a new catalog containing more than one hundred entries has been assembled and is shortly to be published by the author in the WGN Report series of the International Meteor organization (Heerbaan 74, B-2530 Boechout, Belgium).

A limited search, with negative results, was conducted by Wang, Tuan and Silverman (1984) using data collected from a VLF monitoring station at Thule, Greenland. The distances from the bolide events were large and the frequencies examined were probably too high. There is a pressing need for better radio observations of bolides known to have been associated with confirmed reports of electrophonic sounds.

Lastly, it is essential for geo-scientists to take reports of audible phenomena more seriously in order that some progress can be made in identifying the physical mechanisms involved. The subject of electrophonic sounds from bolides is now considered respectable within the meteor science community (Keay, 1992b), and a similar shift in acceptance is now overdue within the communities of auroral and seismic scientists.

Acknowledgements

I should like to thank Bruce McIntosh, Ottawa; Doug ReVelle, De Kalb; Bill Jones, Sheffield; Vitaly Bronshten, Moscow; and Bill Napier, Edinburgh, for helpful discussions at various stages of the development of this research; also Ian Halliday, Ottawa, and Zdenek Cepelcha, Ondrejov, for supplying valuable meteor fireball data. Thanks are also due to the University of Newcastle for grants subsidizing my attendances at conferences and meetings at which many of the important seminal arguments took place. In particular, I should like to express my gratitude to the Herzberg Institute of Astrophysics of the Canadian National Research Council in Ottawa, whose hospitality and splendid library facilities enabled real progress to be made on the problem at a time when it was widely considered to be completely intractable. And I thank the Geophysical Committee of the former Soviet Academy of Science for their unstinting generosity and encouragement.

References

- Adrian, D. J. (1977). Auditory and visual sensations stimulated by low-frequency electric currents. In *Biological Effects of Electromagnetic Waves*. Am. Geophys. Union, D. R. Justesen & A.W. Guy (eds.), 243-250.
- Alfven, H. and Falthammar, C. G. (1963). *Cosmical electrodynamics*. Oxford, Clarendon Press (2nd edition).
- Anon. (1979). "Meteore" No. 9, I.A.U. 17th General Assembly, Montreal.
- Anyzeski, V. (1946). Speculations regarding ethereal sound from bolides. *Popular Astronomy*, 54, 433-435.
- Astapovich, I. S. (1951). Acoustical phenomena occurring simultaneously with the flight of bolides. *Meteoritika*, 9, 71-101.
- Astapovich, I. S. (1958). Meteoric phenomena in the earth's atmosphere. *Fizmatgiz*, Moscow (in Russian).
- Barringer, B. & Hart, H. C. (1949). The mechanism of the sounds from meteors. *Popular Astronomy*, 57, 507-512.
- Beech, M. (1989). The great meteor of 18th August 1783. *Jour. Brit. Astron. Assoc.*, 99, 130-134.
- Beech, M. (1990). William Frederick Denning: In quest of meteors. *Jour. Roy. Astron. Soc. Canada*, 84, 383-396.
- Blagdon, C. (1784). An account of some late fiery meteors; with observations. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 74, 201-232.
- Bronshnten, V. A. (1983a). A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs. *Astronomicheskii Vestnik*, 17, 94-98; English trans: *Solar System Research*, 17, 70-74.
- Bronshnten, V. A. (1983b). *Physics of meteoric phenomena*. Dordrecht, Reidel Publishing Company.
- Bronshnten, V. A. (1991). Electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight. *Astronomicheskii Vestnik*, 25, 131-144; English trans: *Solar System Research*, 25, 93-104.
- Burton, E. T. & Boardman, E. M. (1933). Audio-frequency atmospherics. *Proc. I.R.E.*, 21, 1476-1494.
- Cave, C. J. P. (1926). The sound of lightning. *Nature*, 116, 98.
- Corliss, W. R. (1983). Earthquakes, tides, unidentified sounds and related phenomena. *The Sourcebook Project*, Glen Arm, MD 21057, 94-96.
- Cress, G. O., Brady, B. T., & Rowell, G. A. (1987). Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 331-334.
- Dall'Olmo, U. (1980). Latin terminology relating to aurorae, comets, meteors and novae. *J. Hist. Astron.*, 11, 10-27.
- Derham, W. (1727). Observations on the Lumen Boreal, or streaming on Oct. 8 1726. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 34, 245-252.
- Denning, W. F. (1903). On the sounds alleged to precede or accompany the flights of meteors. *Jour. Brit. Astron. Assoc.*, 13, 277-279.
- Denning, W. F. (1907). Audible meteors. *Symons's Meteorological Magazine*, 42, 10-11.
- Denning, W. F. (1915). Sounds accompanying aurorae? *Jour. Roy. Astron. Soc. Canada*, 9, 199-200.
- Gurnett, D. A. (1974). The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.*, 79, 4227-4238.
- Gurnett, D. A. (1978). Electromagnetic plasma wave emissions from the auroral field Lines. *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 257-272.
- Halley, E. (1719). An account of the extraordinary meteor seen all over England, on the 19th of March 1719. With a demonstration of the uncommon height thereof. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 30, 978-990.
- Hawkins, G. S. (1958a). Radio noise from meteors. *Nature*, 181, 1610.
- Hawkins, G. S. (1958b). A search for radio emission from meteors. *Astrophys. J.*, 128, 724-726.
- Hopwood, A. (1989). A new meteor logging technique. *Electronics and Wireless World*, 95, 540-542.
- Ingalls, C. E. (1967). Sensation of hearing in electromagnetic fields. *New York State J. Med.*, 67, 2992-2997.
- Ivanov, V. V. & Medvedev, Yu. A. (1965). Electric effect of large meteoroids. *Geomagnetism and Aeronomy (USA)*, 5, 216-219.

- Johler, J. R. & Morganstern, J. C. (1965). Propagation of the ground wave electromagnetic signal, with particular reference to a pulse of nuclear origin. *Proc. I.E.E.E.*, 53,2043-2053.
- Johnston, M. J. S. (1987). Tectonomagnetism and tectonoelectricity. *Rev. Geophys.*, 25,983-988.
- Keay, C. S. L. (1979). Reports of anomalous sounds from a large fireball. Unpublished scientific paper presented to Commission 22 at the 17th General Assembly of the I. A. U., Montreal.
- Keay, C. S. L. (1980a). The 1978 New South Wales fireball. *Nature*, 285,464-466.
- Keay, C. S. L. (1980b). Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science*, 210, 11-15.
- Keay, C. S. L. (1980c). Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 74,253-260.
- Keay, C. S. L. (1985). In quest of meteor sounds. *Sky and Telescope*, 70,623-625.
- Keay, C. S. L. (1990). C. A. Chant and the mystery of auroral sounds. *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 84,373-382.
- Keay, C. S. L. (1992a). Electrophonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics*, 27,144-148.
- Keay, C. S. L. (1992b). Physics, psychology and respectability. *Scientometrics*, 23,355-359.
- Keay, C. S. L. (1992c). Meteor fireball sounds identified. In *Asteroids, comets, meteors 1991*, A. W. Harris and E. Bowles (eds.), Lunar and Planetary Institute, Houston TX, 297-300.
- Keay, C. S. L. & Ostwald, P. M. (1991). A laboratory test of the production of electrophonic sounds. *J. Acous. Soc. Am.*, 89, 1823-1824.
- Lamar, D. L. & Romig, M. F. (1964). Anomalous sounds and electromagnetic effects associated with fireball entry. *Meteoritics*, 2, 127-136.
- LaPaz, L. (1958). The effects of meteorites upon the earth. *Adv. Geophys.*, 4,217-350.
- McAdie, A. (1928). Phenomena preceding lightning. *Monthly Weather Review*, 56,219-220.
- Milne, D. (1841). Notices of earthquake-shocks felt in Great Britain, and especially in Scotland, with inferences suggested by these notices as to the causes of such shocks. *Edinburgh New Philos. J.*, 31, 92-122.
- Nininger, H. H. (1934). The great meteor of March 24, 1933. *Popular Astronomy*, 42, 291-306.
- Nininger, H. H. (1939). Sound from ether waves? *Popular Astronomy*, 47, 97-99.
- O'Keefe, S. G. & Thiel, D. V. (1991). Electromagnetic emissions during rock blasting. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 889-892.
- Olmsted, D. (1834, 1835). Observations on the meteors of November 13th, 1833. *Am. J. Sci.*, Series 1, 25, 363-411, continued in 26, 132-174.
- Olson, D. E. (1971). The evidence for auroral effects on atmospheric electricity. *Pure and Appl. Geophys.*, 84, 118-138.
- Parrot, M. (1990). Electromagnetic disturbances associated with earthquakes: An analysis of ground-based and satellite data. *J. of Scientific Exploration*, 4,203-211.
- Price, G. H. (1974). The electromagnetic pulse from nuclear explosions. *Rev. Geophys. Space Phys.* 12,389-400.
- Pringle, J. (1759). Several accounts of the fiery meteor, which appeared on Sunday the 26th of November, 1758, between eight and nine at night. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 51, 218-259 and some remarks, *ibid.* 259-274.
- ReVelle, D. O. (1979). A quasi-simple ablation model for large meteorite entry: theory vs. observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 41,453-473.
- Romig, M. F. & Lamar, D. L. (1963). Anomalous sounds and electromagnetic effects associated with fireball entry. *RAND Memo.* RM-3724-ARPA.
- Romig, M. F. & Lamar, D. L. (1964). Strange sounds from the sky. *Sky and Telescope*, 28, 214-215.
- Schonland, B. (1964). *The flight of thunderbolts*. Oxford, Clarendon Press.
- Sexton, S. (1885). The value of the testimony to the aurora sound. *Nature*, 32,625-626.
- Short, T. (1740). An account of several meteors. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 41,625-630.
- Silverman, S. M. & Tuan, T. F. (1973). Auroral audibility. *Adv. Geophys.*, 16, 155-259.
- Sommer, H. C. & von Gierke, H. E. (1964). Hearing sensations in electric fields. *Aerosp. Med.*, 35, 834-839.
- Udden, J. A. (1917a). The Texas meteor of October 1, 1917. *Univ. Texas Bulletin, No. 1772*, 45-47.
- Udden, J. A. (1917b). A Texas meteor. *Science*, 46,616-617.
- Walker, P. M. B. (ed.) (1988). *Chambers Science and Technology Dictionary*. Cambridge, W & R Chambers Ltd and Cambridge University Press.
- Wang, D. Y., Tuan, T. F., & Silverman, S. M. (1984). A note on anomalous sounds from meteor fireballs and aurorae. *J. Roy. Astron. Soc., Canada*, 78, 145-150.

- Watanabe, T., Okada, T., & Suzuki, K. (1988). Meteor and radio wave. *HAM Journal (Japan)*, 54, 109-115 (in Japanese).
- Wylie, C. C. (1929). The meteor of July 25, 1929. *Popular Astronomy*, 37, 514-519.
- Wylie, C. C. (1932). Sounds from meteors. *Popular Astronomy*, 40, 289-294.
- Wylie, C. C. (1939). Psychological errors in meteor work. *Popular Astronomy*, 47, 289-294.

ニコンD500 (APS-C相当カメラ)の感度別4K画像比較

重野好彦

2016年4月28日発売のD500を使用し、超高感度4K動画(3840×2140ピクセル)の画像比較を行ったので紹介する。実写123Mbps=55GB/h=512GB×1/8h。レンズは85mm F1.4 (35mm版200mm相当)。1150×450ピクセル部分をトリミングした。

「図3. ISO:20万」に恒星の等級を記入した。最微等級は11と比較して2等以上明るい。ISO:80万以上の画像はひどく荒れており何に使えるのか。

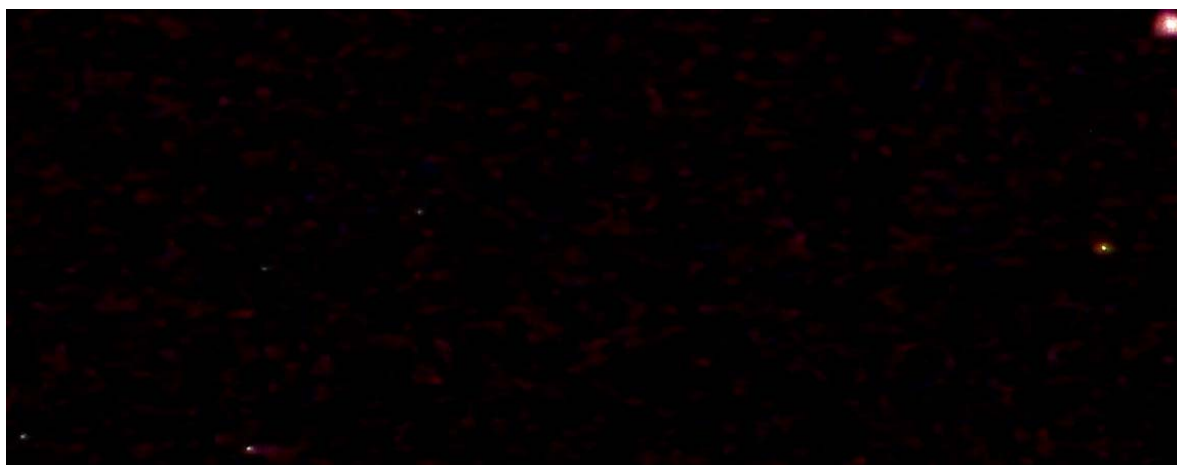


図1. ISO:5万

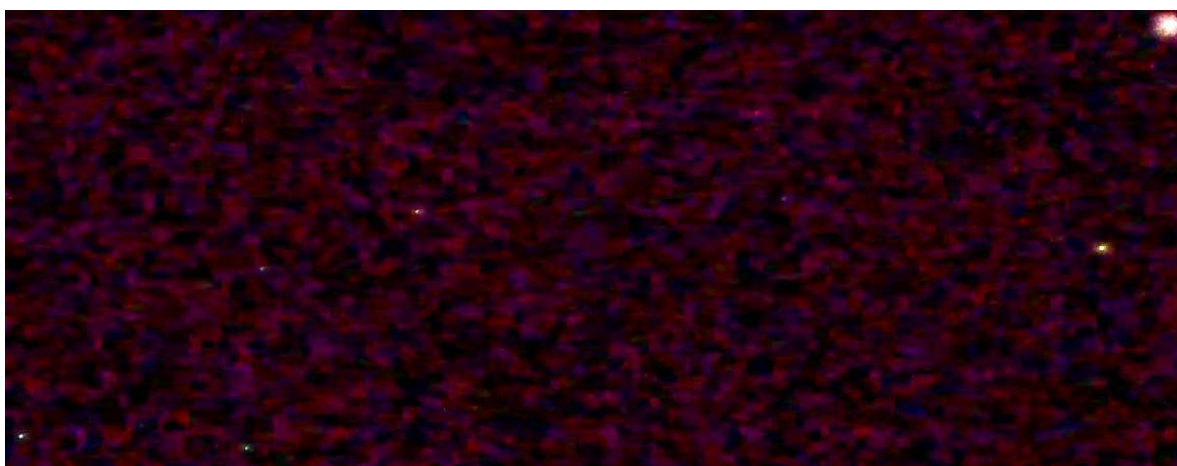


図2. ISO:10万

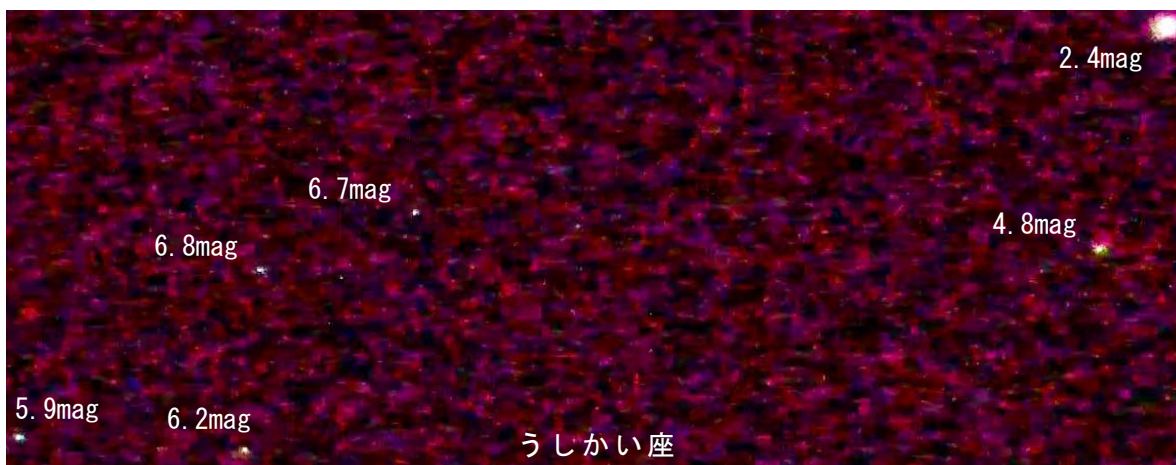


図3. ISO:20万

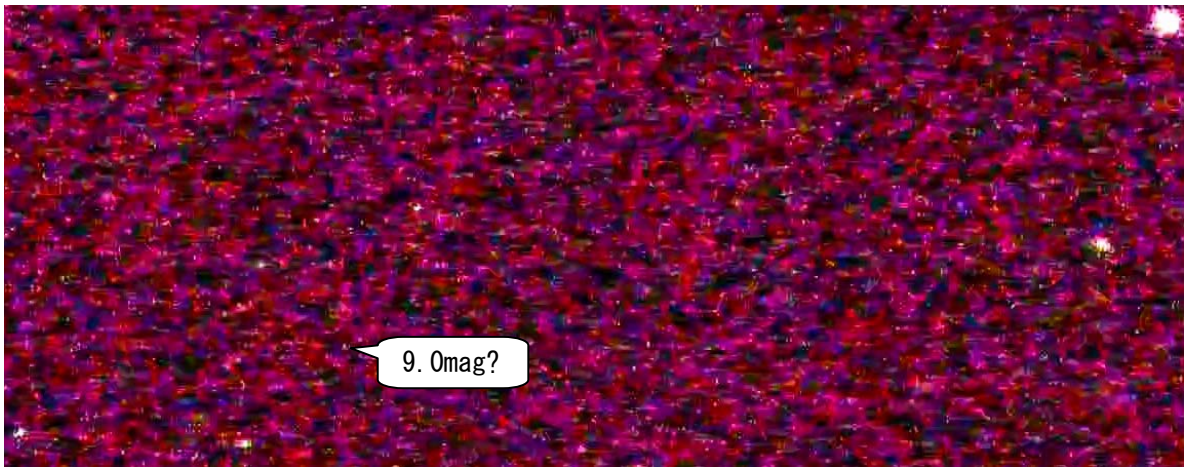


图4. ISO : 40万



图5. ISO : 80万



图6. ISO : 160万

35mmFullサイズカメラとAPS-Cカメラの感度別画像比較

重野好彦

左列は35mmFullサイズカメラ、右列はAPS-Cカメラである。左列と右列がほぼ同じ画質となるようにISO感度別に並べてみた。左列は上からISO:1600, 6400, 25600, 10万、右列は上からISO:400, 1600, 6400, 25600である。つまり35mmFullサイズカメラはAPS-Cカメラに較べて4倍の感度で同画質となっている。この差は非常に大きい。

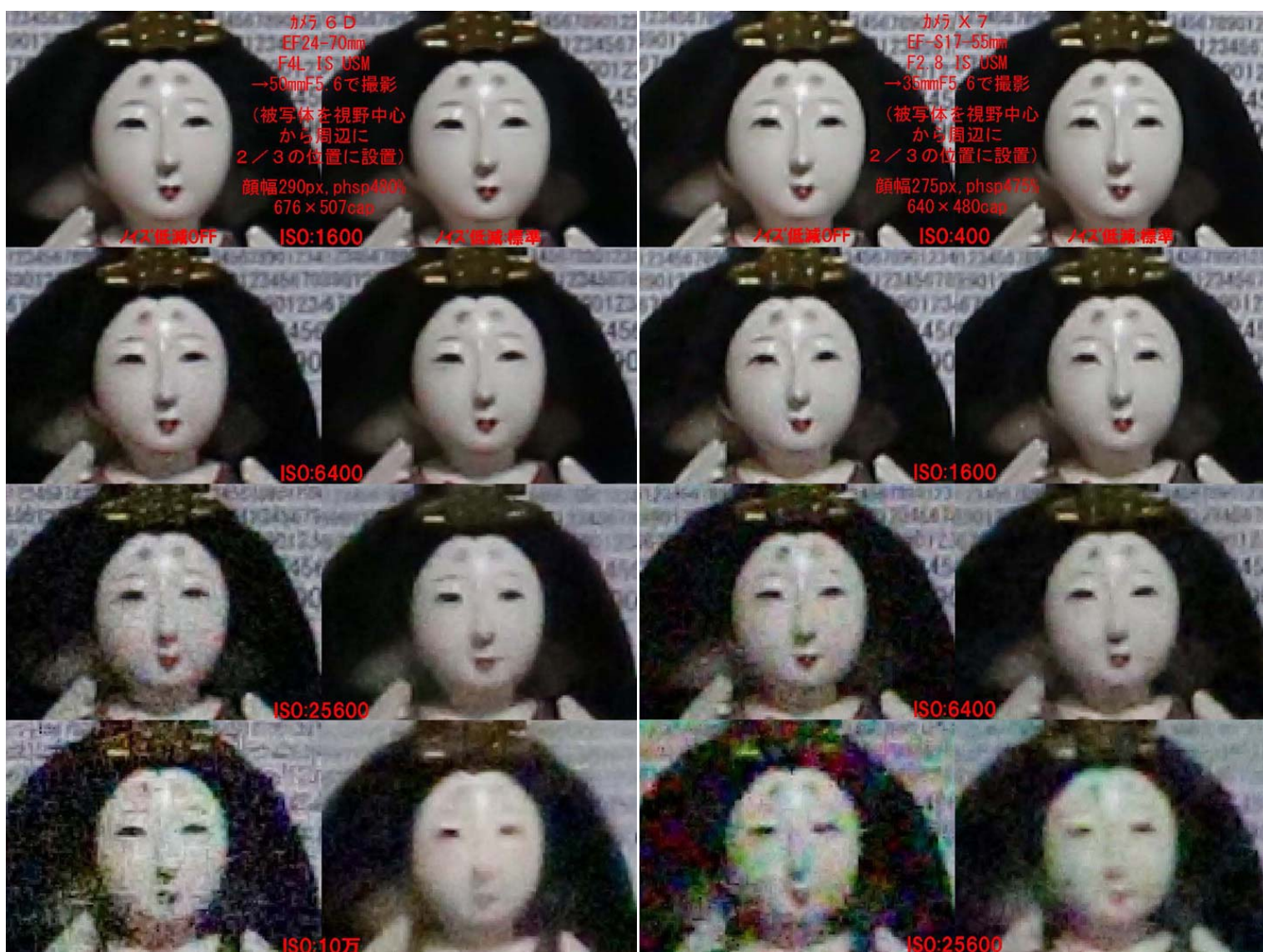


図1. 35mmFullサイズカメラの感度別画像
(キャノン6Dの場合)

- 1) 上からISO:1600, 6400, 25600, 10万。
- 2) 左はノイズ低減:OFF、右はノイズ低減:標準
- 3) きれいに撮るなら1600、ちょっと我慢すれば6400が可能。

図2. APS-Cカメラの感度別画像
(キャノンX7の場合)

- 1) 上からISO:400, 1600, 6400, 25600。
- 2) 左はノイズ低減:OFF、右はノイズ低減:標準
- 3) きれいに撮るなら400、ちょっと我慢すれば1600が可能。

カメラレンズ性能評価法の研究

重野好彦

1. はじめに

フィルムカメラからデジカメになり、画像をPCで自由に拡大表示出来るため、レンズの性能を容易に評価できるようになりました。しかしレンズのユーザーレビューを読んでも「ぬげが良い」「こってりとした色」「その場の空気感まで表現できる」など定性的な評価が多く見られます。また今でもズームレンズは単焦点レンズより性能が落ちると思っている人が少なくありません。そしてレンズメーカーが公表しているMTF特性図を引用している人は全くいません。これはMTF特性図と実際の写り方の関係が分からないことが理由ではないかと思えます。そこでこの問題を理解するためレンズ性能評価の研究を始めました。

MTF特性図に関してキャノンのHPの説明を以下に簡略引用します。『MTFとは、Modulation Transfer Function の略で、コントラスト再現比によるレンズ性能評価方法です。レンズを「光学信号の伝達系」と考えた場合、光学系の周波数特性が測定できれば、光学信号が忠実に伝達されているかどうかを知ることができます。レンズという周波数とは、1mm幅の中に正弦的に濃度の変化するパターンが何本あるかという意味で特に「空間周波数」と呼ばれ、「〇〇本/mm」と示されます。

MTF特性図は、横軸が画面中心を0とした画面中心からの距離（単位：mm）、縦軸がコントラストとなっており、10本/mmと30本/mmのMTF特性が示されています。MTF特性図上の10本/mmのカーブが1に近いほどコントラスト特性がよく、ヌケの良いレンズとなり、30本/mmのカーブが1に近いほど高解像力を備えたシャープなレンズとなります。一般的に10本/mm(コントラスト)のMTF特性が0.8以上あれば優秀なレンズとされています。』（図1参照）

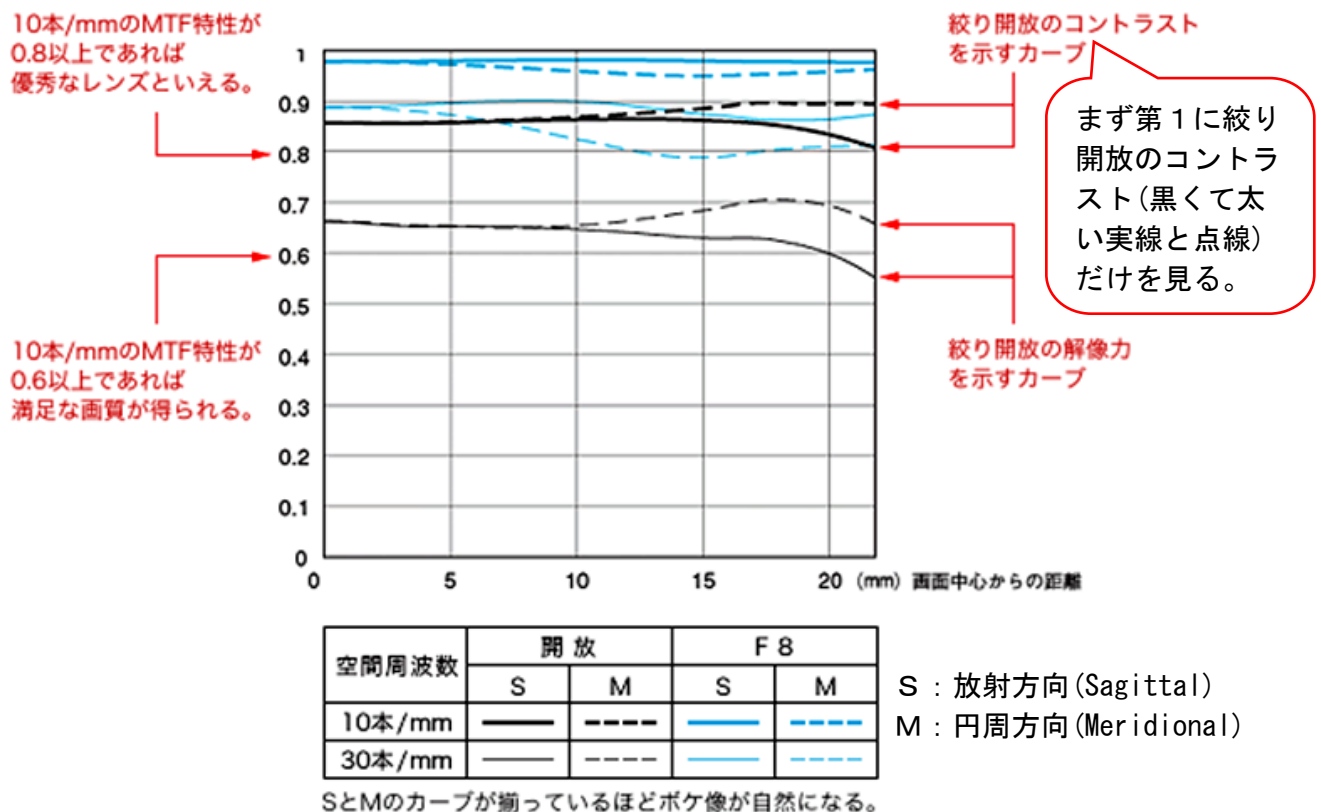


図1. MTF特性図の見方

キャノンのMTF特性図(HPより引用)は、絞り開放(黒線)に加えてF8(青線)があるため、ごちゃごちゃして見にくくなっています。まず第1に絞り開放のコントラスト(黒くて太い実線と点線)だけを見ることにします。これだけでもおおよそレンズの評価が可能です。どのレンズメーカーのMTF特性図にも必ずこの線が含まれています。

2. MTF特性図の実際例

図2～3に2種類の標準ズームのMTF特性図(キャノンのHPより引用)を示します。それぞれ8種類の線が画かれているので赤丸印を付けた絞り開放のコントラストだけに注目してください。図2と3を比較すると図2のレンズの方が多少性能が良さそうです。しかしこのグラフだけでは、図2のレンズが十分満足できるのかどうか分かりません。また図3のレンズがどのくらい劣るのかも分かりません。やはり実際に撮影した画像を見てから評価したくなります。

図2. MTF特性図1

標準ズーム1
EF24-70mm F4L IS USM
φ83.4×93mm 600g
12群15枚

絞り開放のコントラスト
(黒くて太い実線と点線)
に赤丸印を付けました。

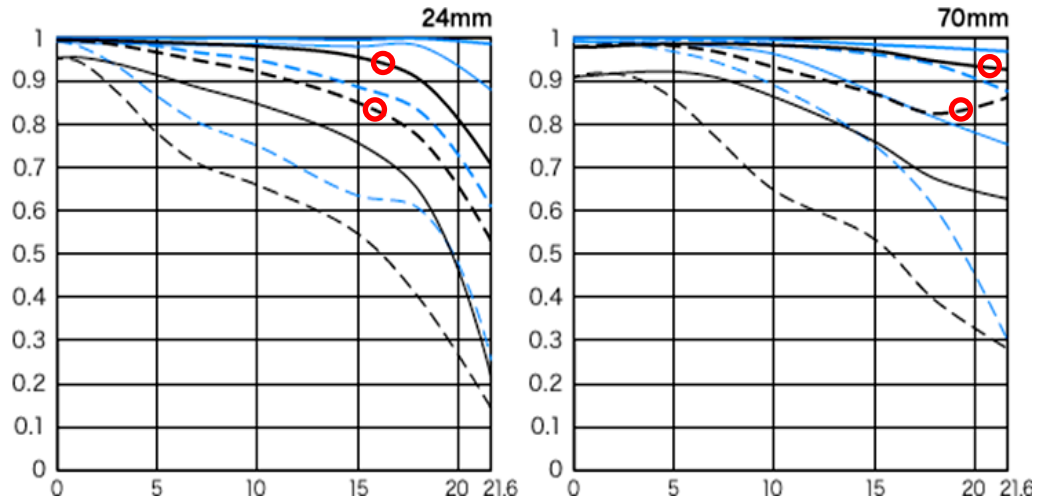
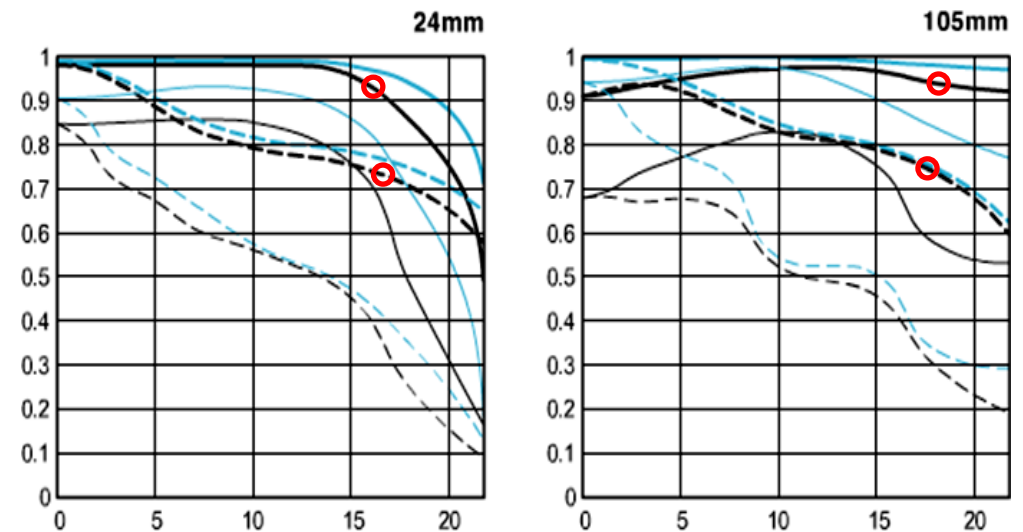


図3. MTF特性図2

標準ズーム2
EF24-105mm F4L IS USM
φ83.5×107mm 670g
13群18枚

絞り開放のコントラスト
(黒くて太い実線と点線)
に赤丸印を付けました。



3. 画像評価方法の実際例

レンズ評価のために実際に画像を撮影してみる方法は意外と簡単ではありません。以下に今まで試した評価方法を述べてみます。

3.1. ISO_12233チャートを使用する

図4にISO_12233チャートを紹介します。
1mmに何本縞模様が分解できるか(分解能)を調べることができます。数値だけでは分かりにくいから実際の画像を見てみたいのに、また新たな数値(分解能)を求めることになってしまいます。

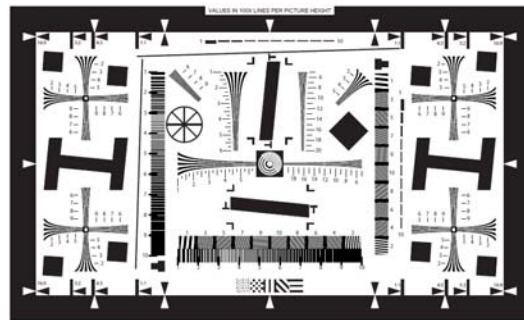


図4. ISO_12233チャート

3.2. 屋外で景色などを撮影する

実際に公園などに出かけてビルや樹木を撮影してみました。しかし広角レンズから望遠レンズまで、それぞれ被写体が異なってしまうため、同じ基準で評価ができません。また屋外は晴れ/曇り、太陽光線のあたり具合、季節などによって被写体の状況が変化します。

天文雑誌には星野写真を撮影してレンズを評価するページがあります。星野写真はいかに恒星が点像に写るかが重要なので、視野四隅の拡大画像が表示されています。ポイントはコマ収差により伸びてしまう恒星像がどこまで絞れば点像に近づくかが示されています。ただ天文雑誌の著者も述べているように、光害の無い場所に、月明かりが無く快晴のときに出かけていく手間がたいへんです。やはり室内で適当な撮影方法を見つけたいとなります。

3.3. 顔の写真

評価チャートには標準顔写真もありますが、印刷した段階で階調が大きく損なわれてしまいます。本物の顔をテストに使うことはできないので、その代わりとして人形を使うことを思いつきました。これが思いの外良かったので、いろいろと試してみてもう今日に至っています。

人形はひな人形が秀逸です。こけしのように目鼻を筆で塗っただけではコントラストが十分生じません。ひな人形は目、鼻、口などを彫刻刀で彫ってあります。顔も曲線で作られています。これらによりくっきりした陰影やグラデーションが生じますので、微妙な写り方の違いによりレンズの評価がしやすくなります。

同じ条件で評価するためにはセンサーサイズ、レンズ焦点距離が変わっても人形を同じサイズで撮影する必要があります。実際には「センサー上での人形の顔幅／センサーの横幅＝1／90」になるように撮影しています。またセンサー上で中心から周辺になるに従って画質はわるくなっていきますので、これらも表現したくなります。本研究では、以下の3カ所を撮影することにしました。これにより各レンズを同じ条件で評価できるようになりました。

- 1) 中心から左端までの2／3の位置……この位置で開放からF 1 1まで撮影し、F値による画質の違いを調べました。(図5の①～④)
- 2) センサー左端……F 5. 6で撮影しました。(図5の⑤)
- 3) センサー左下端……F 5. 6で撮影しました。(図5の⑥)

備考1) テストした全てのレンズにおいてF 1 1以上で回折により画質が低下しました。このため絞りによる画質変化のテストはF 8またはF 1 1までで良いことになります。

備考2) 多くのレンズで最高画質はF 5. 6でした。高品質レンズではF 5. 6とF 8がほとんど同じでした。開放F 5. 6のレンズではF 8が最高画質でした。

図5. 人形の顔写真をまとめて並べて画質の違いを一覧できるようにした「まとめ写真」の模式図です。

①～④は視野中心から左端までの2／3の位置に被写体(人形)を置いて撮影したもので、それぞれF 4～1 1です(F値はレンズによって異なります)。

⑤はセンサー左端、⑥はセンサー左下端に被写体を置いてそれぞれF 5. 6で撮影しました。

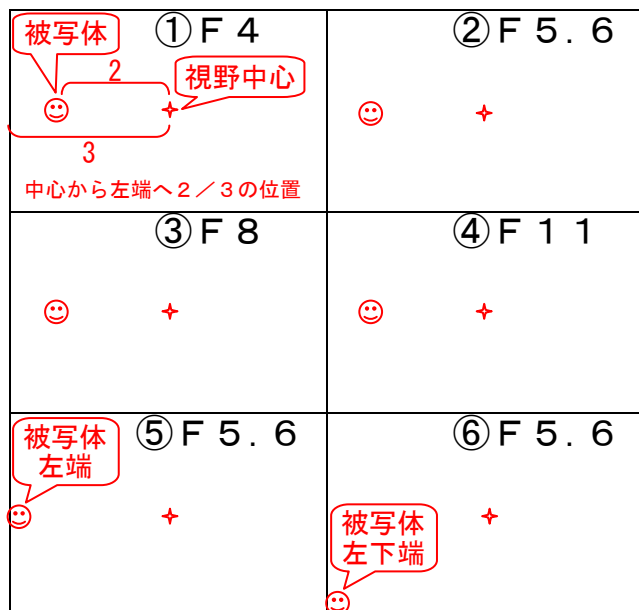


図6～9の人形の顔写真を見ると「EF24-70F4L IS USM」は全域で良像であることが分かります。一方、「EF24-105F4L IS USM」は開放(F 4)及び視野周辺で明らかな画質低下が分かります。このためキャノンは2016. 11. 13に新型を発売しました。長さ107mm→118mm、重さ670g→795g、実売価格98,000円→134,000円になっています。新型レンズはまだテストしていません。



図6. カメラCanon6D(35mmフルサイズ) レンズEF24-70F4L IS USM → 24mm撮影
全ての写真が安定した良像。



図7. カメラCanon6D(35mmフルサイズ) レンズEF24-105F4L IS USM → 24mm撮影
視野左下端は明らかに画質が低下している。



図8. カメラCanon6D(35mmフルサイズ) レンズEF24-70F4L IS USM → 70mm撮影
全ての写真が安定した良像。



図9. カメラCanon6D(35mmフルサイズ) レンズEF24-105F4L IS USM → 70mm撮影
絞り開放(F4)及び視野周辺で明らかに画質が低下している。

4. 課題

カメラレンズの性能を人形の顔を使って評価する方法で一定の成果が得られましたが、実は大きな問題が残っています。人形の顔をセンサー上に同じサイズで撮影するためには、レンズの焦点距離が長くなると人形とカメラの距離を長く取る必要があります。現状では部屋の広さの限界のためレンズの焦点距離100mm程度までしか撮影できません。そこで幾つかの方法を試しましたが、最終解決には至っていません。

4.1. 人形を写真に撮り、縮小プリントして被写体として使う

1/2、1/3、1/4に縮小したプリント作って壁に貼り、撮影テストを行いました。しかしプリントを撮影したのでは、コピーのコピーの様なもので階調が失われて、とても性能評価には使えませんでした。

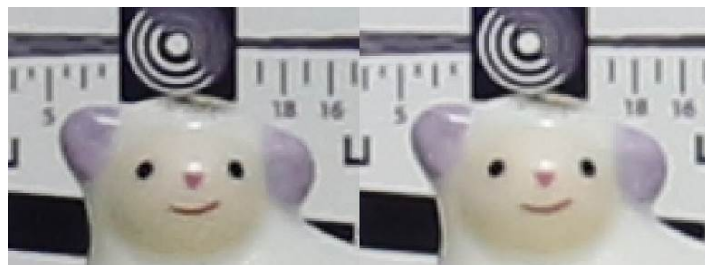
図10.
1/2、1/3、
1/4に縮小した
プリントの様子



4.2. 小さい人形を使う

標準の人形の顔幅は約25mmです。小さな人形を探して顔幅8mmのものを使用してみました。それなりに写るのですが、被写体が違うとレンズ同士の比較はとても行えないことが分かりました。

図11. 小さい人形による
撮影例



4.3. 標準の人形を広い公園に持ち出して人形とカメラの距離を長く取れるようにする

レンズの焦点距離100mmの場合、人形とカメラの距離は約8mになります。もし焦点距離500mmの場合だと約40m離れたところから撮影することになります。広い公園で撮影は行えるのですが、室内と屋外では人形への照明が大きく異なります。室内では天井からスポットライト的に照明するため人形の顔に陰影が生じます。しかし屋外の場合、晴れ/曇り、太陽の位置によって大きく異なりますが、全天から光が降り注ぐことになります。すると陰影のない、のっぺりした顔に写ります。これはレンズの性能評価には適していません。図12、13を参照ください。

とは言え、現状はこれ以上の方法を思いつきませんので焦点距離100mm以下は室内、以上のときは屋外で撮影する方法しかありません。そして室内で撮影した画像は室内同士で比較し、屋外は屋外同士で比較することになります。ただし慣れれば相互の比較もできるようになりそうです。

ご紹介

自分がレンズの性能を知りたくて始めた研究であり、ときどきユーザーレビューに投稿したりしてきましたが、せっかくなのでまとめてHPで公表することにしました。以下で紹介しています。

<http://msswg.net/lens> [レンズ性能研究] で検索できます。



図12. カメラCanon6D レンズEF70-300mm F4-5.6 IS II USM → 70mm撮影
室内にて撮影 (全ての写真が安定した良像)



図13. カメラCanon6D レンズEF70-300mm F4-5.6 IS II USM → 70mm撮影
屋外(公園)にて撮影 (図12と13は同じレンズ、同じ焦点距離)

5. レンズ同士の比較

seeing法により2つのレンズ同士の優劣を点数化してみました。結果を表1に示します。2つのレンズ同士の比較を多くの組み合わせで行うことにより、多くのレンズ同士の比較が可能になります。結果を表2に示します。

表1. 類似レンズの画質比較(seeing法 左レンズが右レンズより '-' :劣る / 0:同じ / '+' :優る)

- 1:わずかに差がある 2:差がはっきり分かるが大きな差では無い
3:やや大きな差がある 4:かなり大きな差がある

今回は全てキヤノン製カメラ・レンズを評価しました。フルサイズ用レンズをフルサイズカメラで撮影した場合は(ful)、APS-Cカメラで撮影した場合は(aps)と表記しました。APS-C用レンズをAPS-Cカメラで撮影した場合も(aps)です。

左レンズ	右レンズ	焦点距離別(左レンズ 右レンズ) : ±評価
10-18F4.5-5.6STM aps	10-22F3.5-4.5 aps	10 11:-3 18 22:-2
10-18F4.5-5.6STM aps	18-55F3.5-5.6STM aps	18 18:-4
16-35F4L	10-18F4.5-5.6STM aps	16 10:+4 24 18:+4 35 18:+4
16-35F4L	10-22F3.5-4.5 aps	16 11:+1 35 22:+4
16-35F4L	24-70F4L	24 24: 0 35 35: 0
16-35F4L	24-70F4L	24 24:-1 35 35:+1
17-55F2.8	10-18F4.5-5.6STM aps	17 18:+3
17-55F2.8	10-22F3.5-4.5 aps	17 22:+2 35 22:+4
17-55F2.8	18-55F3.5-5.6STM aps	17 18:+1 35 35:+2 55 55:+2
17-55F2.8	55-250F4-5.6STM aps	55 70:+1
17-55F2.8	16-35F4L	17 16:-2 35 35: 0
17-55F2.8	24-70F4L	35 35:+2 55 70:+2
17-55F2.8	16-35F4L	17 24:-2 35 35:-1
17-55F2.8	24-70F4L	17 24:-2 35 35:-1 55 70:-1
18-55F3.5-5.6STM aps	16-35F4L	18 16:-1 35 35: 0
18-55F3.5-5.6STM aps	24-70F4L	35 35: 0 55 70: 0
16-35F4L	16-35F4L	24 16:+1 35 24:+1
24-70F4L	24-70F4L	35 24:+1 70 35:+2 70 70:+2
24-70F4L	24-105F4L	24 24: 0 35 35: 0 70 70:+1
55-250F4-5.6STM aps	18-55F3.5-5.6STM aps	70 55:+2
55-250F4-5.6STM aps	70-200F4L	70 70:+1
70-300F4-5.6 II aps	55-250F4-5.6STM aps	70 70:+2 300 250:0
70-300F4-5.6 II ful	100-400F4.5-5.6L II ful	70 100:0 300 400:0
70-300F4-5.6 II ful	24-70F4L	70 70:+1

表2. 全てのレンズの評価

この評価はA3ノビなどに大きく拡大した場合に適用されます。2L以下であればほとんど差は分かりません。(#:撮影法が定まる前の写真のため左下端コーナーが正しく評価されていません)

100-400F4.5-5.6L II ful	:+5	70-300F4-5.6 II ful	:+5		
24-70F4L	ful	:+4	16-35F4L	ful	:+4
16-35F4L	aps	:+3	17-55F2.8	aps	:+2
24-70F4L	aps	: 0	70-200F4L	aps	: 0#
10-22F3.5-4.5	aps	:-2#	10-18F4.5-5.6STM	aps	:-4
			24-105F4L	ful	:+3
			55-250F4-5.6STM	aps	:+1
			18-55F3.5-5.6STM	aps	: 0

ペルセウス群輻射点拡大撮影 ～流星本体と流星痕～

重野好彦

2006年以降、ペルセウス群輻射点の拡大撮影を行ってきた。試行錯誤の結果、ようやくイメージに近い画像を得ることができたので紹介する。

撮影日時 2016年8月11/12日 22:00~04:00(JST) 2流星
12/13日 21:30~04:00(JST) 14流星 (極大22:00)

観測地 新潟八海山

撮影機材 Nikon D500 4K(3840×2160) 30fps動画 1/125secシャッター ISO:10万
レンズ 85mm F1.4 (35mm版200mm相当) 写野 11度×6度
恒星最微等級7.5等 流星最微等級6等
高橋P型+ビクセンモードラ自動ガイド

図1. 従来の合成画像

発光点から消滅点まで全てのコマを合成して1つの流星としている。全て流星本体であり、痕の存在は分からない。

2008.8.

11/12 00:00-03:32 13met

12/13 00:30-04:00 12met

IIによる動画像(720×540)

50mmF1.4(20度×15度)

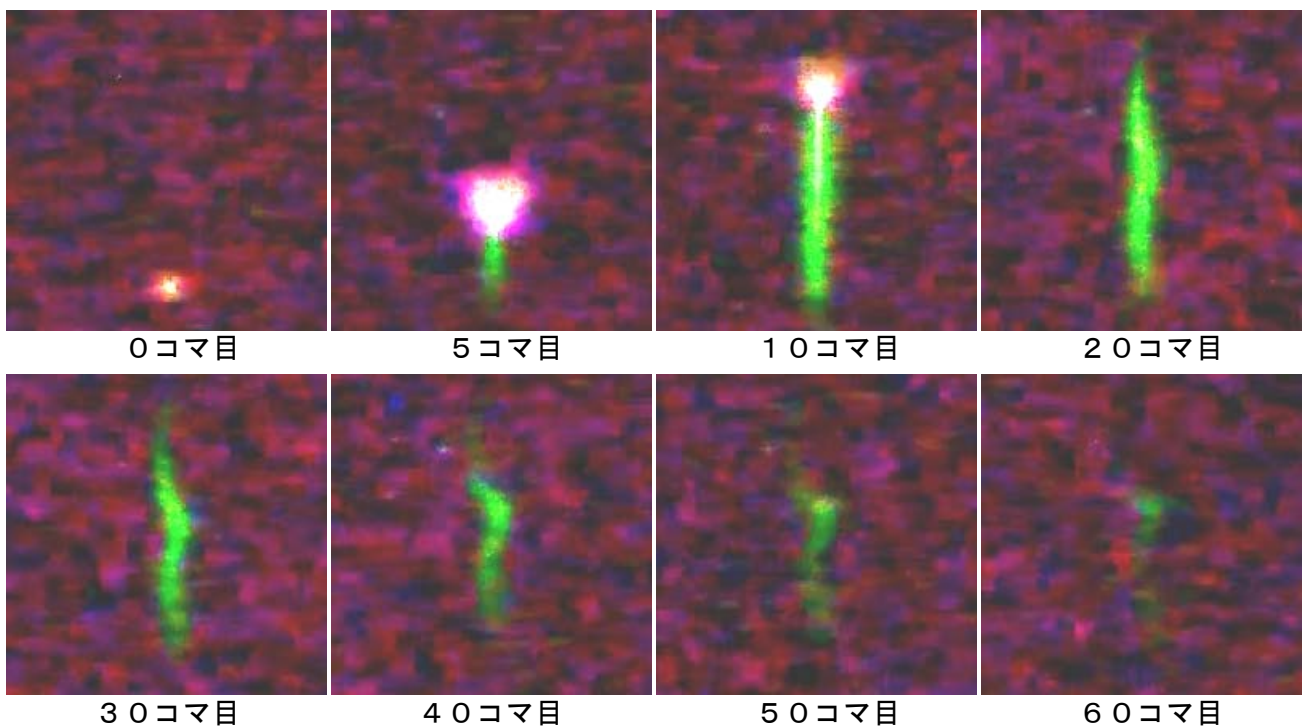


図2. 今回の観測で得られた流星拡大画像。流星本体が消滅点付近に存在する(この流星の場合は10コマ目)を使用して全流星合成画像(図3)を作成した。



図3. 流星本体が消滅点付近に存在するときの1コマをキャプチャーして1つの流星画像とした。16流星全てが経路上に痕を残している。

Letter — Entertaining meteor observations by a student group — 2016 Perseids by Meiji University students

Masahiro Koseki¹, Yoshihiko Shigeno², Tatsuya Hiraizumi³

It seems group observing of meteors is not approved today. Aren't the results of group observing useful? In our opinion the answer is yes, group observing is entertaining and bears fruits well even if their first observation. We show group observing by students can yield comparable results to veteran observer's and, more, students are encouraged to do further studies.

We examined the reports of Meiji University students including their first meteor observations and get reasonable ZHRs and the magnitude ratios. It is suggested even chats during observations could stir up their morale and they learn how to observe meteors in practice. This report is an answer from Japan for 'A perspective on the future of meteor astronomy' discussed in IMO members.

1 Observations

Members of Meiji University Astronomical Club made an expedition for 2016 Perseids and stayed at Aizu Astraea Lodge in Minami-Aizu heights Fukushima during 2016 August 10–16 (Figure 1). The list below shows the participants of observations including those that are not meteor section members. Almost all freshmen experienced their first meteor observations and many others also are not trained in it.



Figure 1 – Meiji University 2016 Perseids campaign participants.

They organized two teams of six for each time span; recorder, time keeper and four observers each. They seated as shown in Figure 2 and two teams depart 10–15 m apart. When a meteor appeared, observers call meteor magnitude and shower membership. Figure 3 shows a recoding sheet for an example.

They could observe Perseids only two nights August 11/12 and 12/13. Their Perseids campaign by the style shown below has started since 2010 but resulted in failure three times 2011, 2014 and 2015, because summer season in Japan is wet. Many Japanese observers were hindered by bad weather and by the existence of the moon in evening sky 2016. They were even lucky in Japanese circumstances last year and enjoyed Perseids display of bright meteors. Table 1 presents the summary results.

¹ 4-3-5 Annaka Annaka-shi, Gunma-ken, 379-0116, Japan. The Nippon Meteor Society (NMS). Email: geh04301@nifty.ne.jp

² 5-6 Kizuki-Sumiyoshi, Kawasaki City, 211-0021, Japan. Meteor Science Seminar (MSS). Email: cyg@msswg.net

³ 4-3-18 Nishinogawa, Komae City, Tokyo, 201-0001, Japan. Meiji University Astronomical Club.

Table 1 – Summary results of Perseids campaign 2016. Lm with an asterisk represents observations under moonlight. Slashes in the duration columns show two groups started/ended observations independently and the duration differs.

Day	Time	Duration (min)	Perseids			Sporadics			Lm
			N	HR	Sum	N	HR	Sum	
11/12	21	40/43	2 ~ 5	2.8 ~ 7.5	24	0 ~ 5	0 ~ 7.5	21	2.89 ~ 4.67*
	22	50	3 ~ 10	3.6 ~ 12.0	48	4 ~ 10	4.8 ~ 12.0	52	2.89 ~ 4.67*
	23	50	7 ~ 17	8.4 ~ 20.4	94	4 ~ 14	4.8 ~ 16.8	66	2.89 ~ 5.08
	00	45/49	5 ~ 18	6.7 ~ 22.0	82	4 ~ 13	4.9 ~ 17.3	74	4.66 ~ 5.80
	01	52	9 ~ 15	10.4 ~ 17.3	50	13 ~ 34	15.0 ~ 39.2	88	5.08 ~ 5.49
	02	45/49	11 ~ 21	13.5 ~ 28.0	127	6 ~ 26	8.0 ~ 31.8	112	2.84 ~ 5.56
	03	54	9 ~ 13	10.0 ~ 14.4	45	6 ~ 11	6.7 ~ 12.2	32	5.49
12/13	21	30/35	1 ~ 6	2.0 ~ 10.3	21	2 ~ 8	4.0 ~ 13.7	36	2.89*
	22	35/50	7 ~ 12	8.4 ~ 18.9	73	4 ~ 17	4.8 ~ 29.1	70	2.89 ~ 5.08*
	23	50/55	8 ~ 20	8.7 ~ 24.0	99	3 ~ 10	3.6 ~ 10.9	48	4.66 ~ 5.08
	01	54	28 ~ 31	31.1 ~ 34.4	120	16 ~ 25	17.8 ~ 27.8	84	5.08 ~ 5.56
	02	50/60	15 ~ 26	16.0 ~ 31.2	174	6 ~ 17	7.0 ~ 18.0	100	5.08 ~ 5.80
Total		3984			957			783	

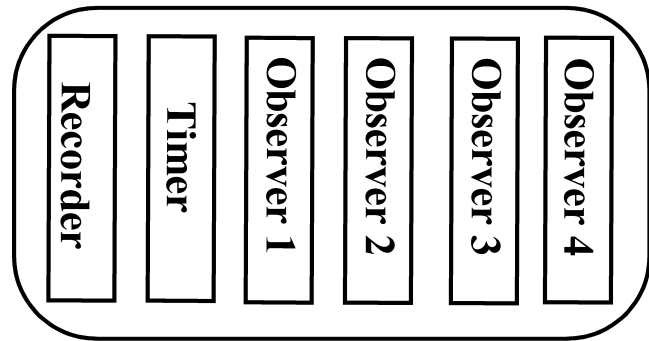
The participants of 2016 Perseids campaign in Aizu were as follows:

Freshman: Kazuki Aigo, Miyuki Aoyama, Tatsuki Ashida, Hikaru Izshima, Miwa Ichikawa, Erika Imai, Kentaro Okuma, Nagisa Okazhima, Sho Osano, Momomi Kimmura, Kosei Kataoka, Ryota Kudo, Akane Kuwakubo, Ikuya Satake, Takumi Sato, Kaina Shibata, Mihoko Suzuki, Kota Tanikawa, Koki Tsuda, Kaho Nagata, Shiyu Nakamura, Atsuya Nimi, Nobutaka Niwa, Rintaro Noda, Wataru Hayasaka, Tichi Hirabayashi, Tomoaki Fujita, Yudai Hojo, Atsuko Matsumoto, Hirohiko Mizuno, Yuki Yamahash, Tichi Yokoe.

Sophomore: Atsushi Owada, Yu Ozawa, Soichiro Kato, Daiki Kimiduka, Tomohiro Kuno, Naoto Koyama, Takaya Saito, Akari Sakanashi, Shoseki, Kazuki Sugi, Yugo Tokino, Ryo Nagasawa, Ozora Nobata, Takumi Haba, Tatsuya Hiraizumi, Ryo Moriya, Shuhei Yamakawa, Daiki Yonemochi.

Junior: Nanako Abe, Saki Izawa, Kazuki Ide, Yu Iwase, Mayu Ueda, Yuka Utsumi, Rika Oki, Azumi Ono, Mami Kawai, Maho Kawakami, Shino Kimura, Reo Kotani, Maho Sasaki, Natsumi Suzuki, Ryota Suzuki, Hiroko Sone, Masono Takshima, Naoyuki Takahashi, Takayuki Teramura, Keita Nawata, Anna Niwa, Seiichiro Hagino, Natsumi Yoshida, Mitsfumi Yoshimura.

Group 1



10~15m apart

Group 2

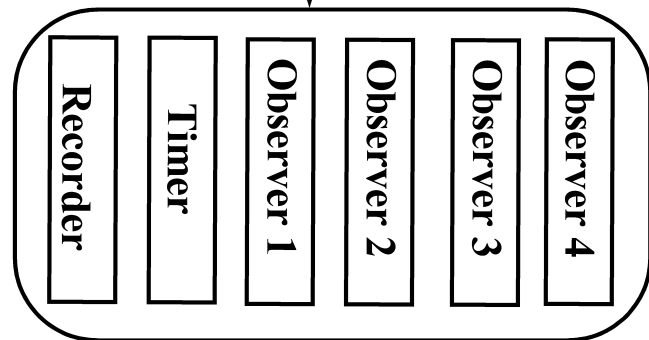


Figure 2 – The disposition of 2016 Perseids campaign.

2 Results from observations

2.1 ZHRs

Observations in evening hours were hindered much by moonlight and the limiting magnitude records are wide spread (Table 1). If we calculate ZHRs strictly by the records, they would reach unreliable values. It is necessary to correct the record by the method described in following section (3.1 Limiting magnitude) and, then, we get proper results as shown in Figure 4.

2.2 Magnitude ratio

If we corrected the observed limiting magnitude by following way (3.1 Limiting magnitude), we could get good estimates of the magnitude ratio of Perseids also. There are two ways to estimate the magnitude ratio; compensating the observed limiting magnitude to the ideal sky by Kresáková’s (1966) perception coefficient or comparing magnitude distribution with sporadic one (see 2.2.2).

[NO.] 流星観測記録用紙 [A・B・C]								
記録者: 1 1 st A	観測地:	海拔:	m	経度:				
開始日: 8 月 13 日	月齢:	緯度:						
開始時間: 2 時 10 分	終了時間: 3 時 00 分	記録対象: ノールセウ流星群						
ZHR:								

出現時刻 時・分・秒	1	備考	2	備考	3	備考	4	備考
	青山	51.6	市川	1.5	中村	1.6	長たね	51.6
2:10:56	3		-		3		-	
2:12:05	2		3		3		2	
12:11	②		3		③		③	
15:56	③		-		③		③	
16:07	②		①		②		②	
16:41	-		-		②		-	
17:39	③		-		③		-	
18:02	③		③		2		③	
19:28	①		1		-		-	
22:01	①		-		-		-	
22:36	②		3		-		②	
22:57	-		-		2		2	
23:28	-		3		-		3	
24:11	①		②		②		②	
25:34	②		-		②	2.2	-	
26:17	-		3		-		2	
26:53	-		1		②		②	
27:22	-		-		-		③	
27:35	③		-		②		-	
27:57	-		-		-		3	
28:09	-		-		②		-	
28:27	③		③		③		②	
28:32	②		②		②		③	
28:34	③		③		②		②	
28:55	③		-		-		③	
32:07	③		-		③		③	
34:36	2		②		2		2	
合計観測数(HR):	39		5.49	5.08	5.99	5.49		

備考: ~~39~~
 0群
 他以外 散在

Figure 3 – An example of the recording sheet of group observing. The first frame; Title, the second; Primary observational records (Day, time, location, and so on.), the third; records for individual meteors (four observers' magnitude estimates are shown in each column with indication for Perseids by a circle.).

2.2.1 Compensating by Kresáková's perception coefficient

We calculate ZHRs by the formula such as $ZHR = HRr^{m-m_0} / \sin h$, where HR is the hourly meteor rates, r is the magnitude ratio, m is the observed limiting magnitude (Lm) and m_0 is set 6.5 usually. Here we accept the hypothesis that we might see meteors in proportion to the power of the difference between m and m_0 . This means we consider the perception coefficient would be shifted by the difference between m and m_0 also.

One of the author, Koseki (2011) modified Kresáková's table to 0.1 magnitude bin interpolating with the third power function. We use the modified table to compensate the meteor number and estimate the magnitude ratios for Perseids and sporadics (see for an example Figure 5). We can estimate the magnitude ratios from the slope of the drawn in the figure for Perseids and sporadics $r_{Per} = 2.11$ and $r_{spo} = 3.15$ respectively.

2.2.2 Comparing meteor numbers of Perseids with sporadics

If we assumed the perception coefficient of Perseids equals to sporadics, we could calculate the ratios of Perseids to sporadics not using any supposed perception coefficient. Figure 6 gives an example from the same observation period of Figure 5. If we use $r_{spo} = 3.5$ based on Kresáková's result, we could estimate $r_{Per} = 2.14$ from the slope of the line.

3 Problems

3.1 Limiting magnitude

As shown in Table 1 the observed limiting magnitudes (Lm) differ very widely because of the disturbance of the moonlight and of inexperience of observers to such recording. IMO instructs to select the area in which star number increases smoothly near Lm in order to record Lm correctly. But, sometimes we need observations of major meteor showers when the moon is bright or when city light hinders much. In such cases, we cannot help using discontent areas and are confronted with a difficult problem to estimate proper Lm.

We have two approaches to reach reasonable Lm; the meteor magnitude distribution and the existence of two independent observing groups in this case.

Firstly, we test observed magnitude distribution and Lm by shifting Kresáková's perception coefficient at where we could get the proper magnitude ratio. Table 2 lists the magnitude distribution of 8 observers (see the second line of Table 1). It is clear they could not recognize magnitude +3 meteors and magnitude ratios both Perseids and sporadics would be reached improbable value if $Lm = 2.89$ is correct. If we shifted supposed Lm to 4.7 on the basis of an observer's report $Lm = 4.67$, we could get $r_{Per} = 3.01$, $r_{spo} = 3.76$. It is suggested we can select the faintest Lm in all reports or the next star in Lm table rather than reported value themselves. This suggestion can be confirmed by following interesting observations.

Secondly, we compare the report of two groups apart 10–15 m, who recorded Lm independently by using different areas in 12/13 night 22 JST period. One used No. 6 and other No. 16. Former group recorded $Lm = 2.89$, because they hindered much by moonlight and could see only corner stars. Another turn opposite to the moon and got $Lm = 4.66$ – 5.08 . Nevertheless, two groups observed similar sky area, that is, up to the zenith. Therefore,

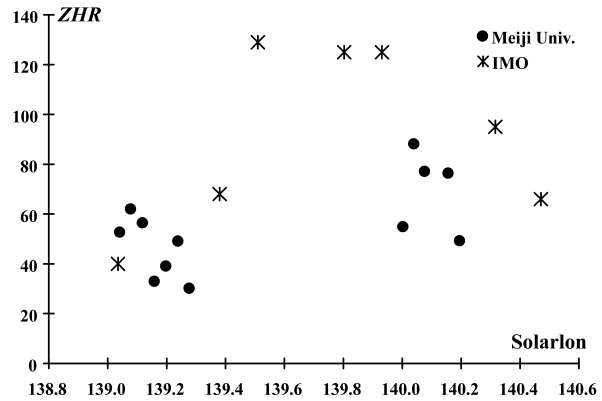


Figure 4 – ZHRs calculated from students' observation (black circle) comparing with IMO VMDB (2016, asterisk).

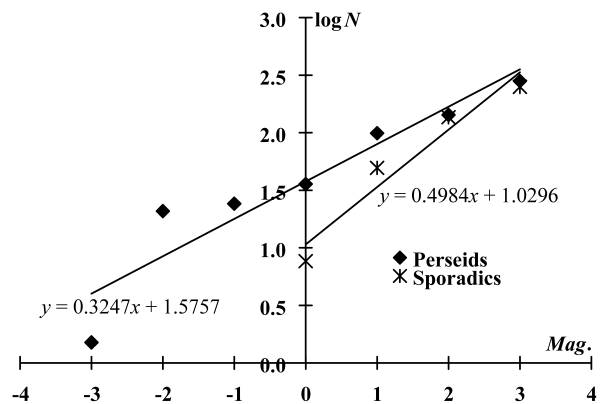


Figure 5 – Magnitude distributions of Perseids and sporadics compensated by Kresakova's perception coefficient (modified). Data used here are combined two groups of 12/13 night 23 JST period.

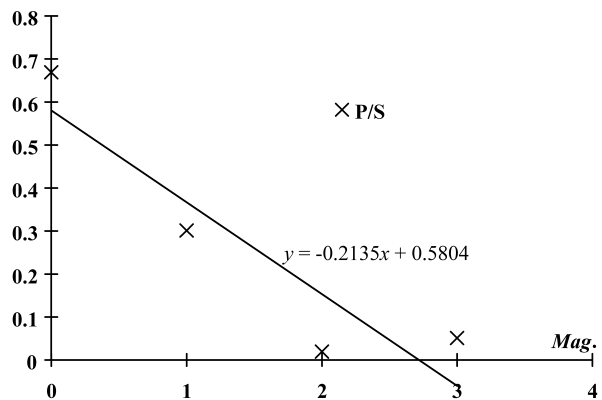


Figure 6 – Perseid meteor ratios to sporadics with magnitudes.

Table 2 – The magnitude distribution in the moonlight.

Date	JST	mag.	0	+1	+2	+3
11/12	21:17(20)–22:00	Perseids	0	10	11	3
		Sporadics	0	2	15	4

we can combine two observations and test above suggestion. Figure 7 shows clearly the estimation of $L_m = 5.08$ is better than $L_m = 2.89$; the estimated magnitude distribution by shifting Kresáková's perception coefficient to $L_m = 5.1$ (Perseids_ $L_m = 5.1$ in Figure 7) seems to be more probable than $L_m = 3.5$. We would be better to use 'next' star in the L_m tables to the reported L_m (star) itself when the sky condition is not good. We get ZHRs in the section 2.1 ZHRs by this manner.

3.2 Membership judgement

Though we can get proper magnitude ratios for Perseids and sporadics in 2.2.1., there are several cases which show unreliable meteor number ratio Perseids to sporadics and give the contrary magnitude ratios. 11/12 night 01 JST period is an example; $N_{\text{Per}}/N_{\text{spo}} = 50/88$, $r_{\text{Per}} = 3.36$ and $r_{\text{spo}} = 2.02$. Koseki (2011) pointed out beginners intend to reject possible Perseids out to sporadics. When a beginner looks up the zenith heading for the south, he/she would see meteors distant from the radiant point and feel difficulty to classify them as Perseids/sporadics. We had better note Perseids magnitude ratios from whole data in this campaign might be higher than the real one and ZHRs lower. But, if we choose carefully observations done properly, we could get very nice results shown in 2.2.1.

3.3 Magnitude estimation

Some groups have a tendency to estimate meteor magnitude narrower extent. It may be suggested they are not familiar with a fireball and to record faint meteors and record them moderate magnitude. But, as Figure 8 shows a good linear expression, they had done good job for estimating meteor magnitude. Shigeno and Toda (2008) concluded that mean magnitude estimates by students equals of video ones.

4 Discussions

Japanese meteor observers have discussed the future meteor observations with several IMO members and it became clear that encouraging young observers is very important. This report is an answer from Japan and following discussions are based on such progress. The outline of this report was presented at the 145th MSS (Meteor Science Seminar) meeting and we exchanged the ideas for enjoying observations and obtaining more useful results.

Determination of the limiting magnitude is difficult for every observer. We feel uncertain the faintest star we look is real one or a vision. It is recommended we accept such star as real or we estimate the limiting magnitude from the next star we confirm.

→ Students are not familiar with any asterisms always and they missed area No.14 which is the most suitable in their observations in this campaign.

The bulk data from student group observing make possible to reach reliable results, though each data might be insufficient, that is, errors of the identification and estimates of magnitude exist somewhere.

+ Student observations must be entertaining and this leads to gather more and more participants.

→ Checks of the data are necessary. It should be corrected the limiting magnitude report by comparing magnitude distributions of observations with estimates from the perception coefficient for an example.

There may be interference between observers when they seat near and call their estimates to a recorder, but such conversations or even chats play important role in group observing especially for students.

+ Chats keep one awake.

+ If one slipped a meteor, he/she would concentrate his/her care to the sky not to overlook the next.

+ If estimates were different, they might talk about it and make efforts to get more proper results.

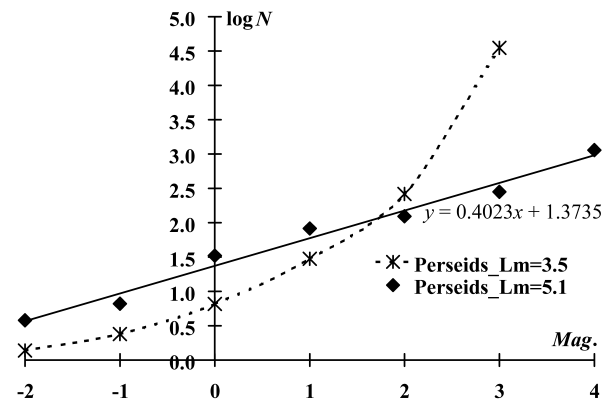


Figure 7 – Comparison with the compensation of the limiting magnitude on the magnitude distribution.

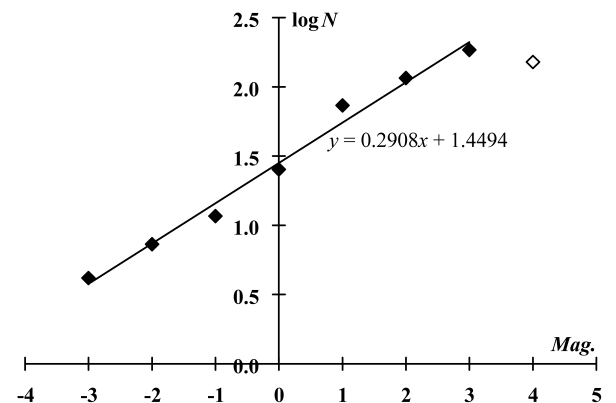


Figure 8 – Magnitude distribution compensated by Kresakova's perception coefficient (modified). Data used here are 12/13 night whole records and the magnitude distributions of each period are weighted by each Perseids number.

Observers in this campaign saw the same area but it seems to be interesting to see different areas. They may count different meteor number.

+ The group observing is said to do so as Levy (2008) wrote.

+ It would be useful to observe 90 degrees different direction each four members.

→ Observers who see the opposite direction to the radiant might feel difficulties to classifying meteors.

+ It would be entertaining and interesting to alter the center of one's view; who could count meteors most?

→ It is necessary to special chair to alter one's view or a "coffin". If not, the change from the zenith could not be larger than 30 degrees.

→ To look the same view and to chat on the event are joyful and give useful experiences for students.

It is very useful to keep looking up the sky and record meteors on a roll paper not looking down the record.

+ A recorder and a time keeper can join observations. Time calling might be left to a talkative clock.

→ Chattering with neighbor observers is useful to activate observers' mind.

We feel happy when we take a meal together and would take a positive attitude (Figure 9).

→ To avoid being sleepy in observations, we had better be careful in overeating or enjoying alcohol drinks.

The observational method might be different with what is the goal of observations.

+ Observers seat side by side and call witness to a recorder when we intend to enjoy and skill up observations.

+ Observers seat radially and write down record by oneself when we try to get better results.

→ This method is good for veteran observers not for students.

+ Experienced and enthusiastic students can challenge video, radio observations simultaneously with visual ones.



Figure 9 – Joy of the expedition: students powered by meals.

Group observing sheets (Figure 3) give more information for future meteor works.

+ We can study why the difference magnitude estimates causes; the existence of the train, the angular speed of a meteor (the distance from the radiant in case of a meteor shower), and etc.

+ The rate of missed meteors with magnitude could give us real perception coefficients.

+ The relation of the rate of different classification to the distance from the radiant might suggest us the ideal direction of the center of the view.

→ IMO instructs us to see the areas distant from the radiant 20–40 degrees. It is a good idea all four observers faces to such area but it is problematic to post one who see the unfavorable direction when they turn to different direction.

[NOTE]: Why Japanese observers often look up the zenith?

Light pollutions became severe in the last quarter of the 20th century in Japan and many observers looked up the zenith in order to avoid poor sky. To observe zenith area is said as the ordinary way in visual observations even if the good sky condition afterward. Many observers now record meteor numbers and magnitude estimates only, not plotting meteor paths on the charts and, so, it is easier to lie on a rug than sit on a chair. Guidance books recommend beginners to look up the zenith and young observers act in obedience to the instruction, though skilled observers view where they like, of course.

References

IMO VMDB (2016). "Perseids 2016 campaign". http://www.imo.net/members/imo_live_shower?shower=PER&year=2016.

Koseki M. (2011). "An analysis of visual group observing by Meiji University students: 2010 Perseids". (presented in 127th MSS meeting (in Japanese)).

Kresáková M. (1966). "The magnitude distribution of meteors in meteor streams". *Contr. astron. obs. Skalnaté Pleso*, pages 75–109.

Levy D. H. (2008). *David Levy's Guide to Observing Meteor Showers*. Cambridge.

Shigeno Y. and Toda M. (2008). "Comparison of TV magnitudes and visual magnitudes of meteors". *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **36:4**, 79–82.

眼視団体観測から得られるもの

——明治大学天文部 2016 ペルセウス群観測

2017/2/5 流星物理セミナー
小関正広、重野好彦、平泉達哉

要約

初心者であっても眼視団体観測が有用なものであることを示し、いくつかの提言を行った。

1. 明治大学天文部の活動

明治大学天文部は1963年に創立し、今年で53年になる。大学天文連盟6大学7サークルの主要メンバーとして活躍してきた。さらに大学間での同時流星観測を推進する関東写真流星ネットワーク(KPM)のメンバーとしても活動してきた。

観測体制としては太陽、惑星、流星、変光星の4つの班で構成されている。一方、創立当時より、部員相互の協調を図るため、上記班活動の他に、部員全員による流星の団体観測を行ってきた。

2. 2016 ペルセウス群の観測

2.1. 合宿計画

福島県南会津郡南会津町の会津アストリアロッジにて、8月10日(水)～8月16日(火)の日程で行った。流星班以外の部員を含め、総勢74人であった。名簿を第1表に、また、集合写真を第1図に示す。

第1表：2016年ペルセウス群観測の参加人数

～1年生～32名

相合一毅(Kazuki Aigo)、青山美幸(Miyuki Aoyama)、芦田樹(Tatsuki Ashida)、飯島輝(Hikaru Izhima)、市川美和(Miwa Ichikawa)、今井映璃果(Erika Imai)、大熊研太郎(Kentaro Okuma)、岡嶋渚(Nagisa Okazhima)、小佐野将(Sho Osano)、木村桃実(Momomi Kimmura)、片岡航星(Kosei Kataoka)、工藤亮太(Ryota Kudo)、桑久保朱音(Akane Kuwakubo)、佐竹郁也(Ikuya Satake)、佐藤匠(Takumi Sato)、柴田海那(Kaina Shibata)、鈴木美穂子(Mihoko Suzuki)谷川航太(Kota Tanikawa)、津田洗希(Koki Tsuda)、永田果穂



第1図：2016年ペルセウス群観測の参加者

(Kaho Nagata)、中村思裕(Shiyu Nakamura)、新美敦也(Atsuya Nimi)、丹羽信崇(Nobutaka Niwa)、野田凜太郎(Rintaro Noda)、早坂渉(Wataru Hayasaka)、平林大知(Tichi Hirabayashi)、藤田知慧(Tomoaki Fujita)、北條雄大(Yudai Hojo)、松本敦子(Atsuko Matsumoto)、水野宏彦(Hirohiko Mizuno)、山橋悠希(Yuki Yamahashi)、横江泰地(Tichi Yokoe)

～2年生～18名

大和田篤(Atsushi Owada)、小澤優(Yu Ozawa)、加藤聡一郎(Soichiro Kato)、君塚大樹(Daiki Kimiduka)、久能友宏(Tomohiro Kuno)、小山直斗(Naoto Koyama)、斎藤堂也(Takaya Saito)、坂梨朱里(Akari Sakanashi)、肖石(Shoseki)、杉一輝(Kazuki Sugi)、時野祐吾(Yugo Tokino)、長澤遼(Ryo Nagasawa)、野畑大空(Ozora Nobata)、羽場拓実(Takumi Haba)、平泉達哉(Tatsuya Hiraizumi)、森谷諒(Ryo Moriya)、山川修平(Shuhei Yamakawa)、米持大樹(Daiki Yonemochi)

～3年生～24名

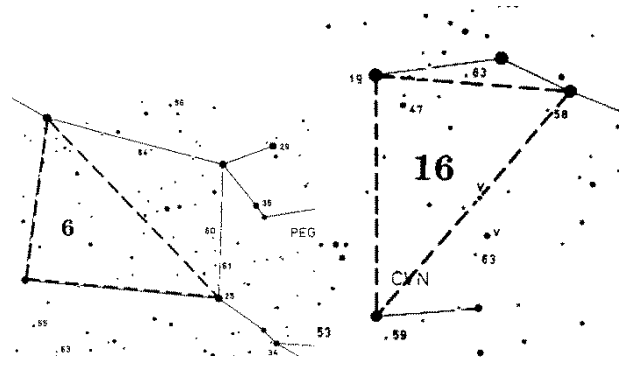
阿部奈々子(Nanako Abe)、伊澤彩貴(Saki Izawa)、井手一樹(Kazuki Ide)、岩瀬優(Yu Iwase)、上田真結(Mayu Ueda)、内海佑香(Yuka Utsumi)、大木梨花(Rika Oki)、大野輝純(Azumi Ono)、河合麻美(Mami Kawai)、川上真帆(Maho Kawakami)、木村詩乃(Shino Kimura)、小谷怜央(Reo Kotani)、佐々木茉歩(Maho Sasaki)、鈴木奈津美(Natsumi Suzuki)、鈴木亮太(Ryota Suzuki)、曾根浩子(Hiroko Sone)、高嶋真園(Masono Takshima)、高橋直之(Naoyuki Takahashi)、寺村崇之(Takayuki Teramura)、縄田景太(Keita Nawata)、丹羽杏奈(Anna Niwa)、萩野誠一郎(Seiichiro Hagino)、吉田奈津美(Natsumi Yoshida)、吉村光史(Mitsfumi Yoshimura)

2. 2. 観測体制

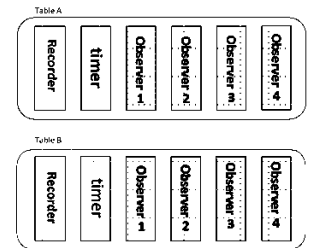
長年にわたり5人1組での団体計数観測を行ってきたが、個人計数観測が主流となってきたため、2000年ごろより団体観測ではあるが、計数はあくまでも個人ごとに行う個人計数観測に移行した。また2010年ごろよりエリア法星図(第2図)を利用して、最微等級を0.1等刻みで目測している。

具体的な観測方法としては、団体計数観測の名残として5人1組で観測を行い、専任の記録係が1~2名いる。この団体観測が1チームとなっているが、最近は部員が多いため、同時に2チームが観測を行うこともある。繰り返になるが、計数はあくまでも個人ごとである。観測者と記録者、計時者の位置関係は第3図に示すとおりである。

第4図に記録用紙を示すが、これは観測者が4名の場合に用いられるもので、1~4の番号の下に光度、備考の欄にペルセウス群か散在かの別を記入する。



第2図：IMOのエリア星図



第3図：観測者配置

2. 3. 観測結果

10/11日、13/14日、14/15日、15/16日は天候不良のため観測できなかった。以下に述べるのは11/12日と12/13日の観測についてであるが、12/13日も0時台と3時台は天候悪化で観測を中断した。

11日の21時~23時の時間帯は東側に山がありペガサスが隠れていたため、IMOのエリアNo.6をすべて使用した。No.6のエリアの方角には月があったため、最微光星光度の決定が十分にできなかった。12日の22時~23時の時間帯はペガサスでいけそうだと判断してNo.16を使用してグループと、No.6を使用したグループとに分かれてしまった。このことにより、月明の影響を受けたグループと受けなかったグループでの最微光星光度推定の違いが判る。エリアNo.14の方が見やすかったことにはあとで気付いた。

全体的に開けている場所で天頂方向を向いていたので、東側の山で視野を遮られた割合は1割に満たなかった。

観測結果の概要を第2表に示す。2つのグループが同一時間帯で観測しているので、観測時間は40/43のように一方が40分、他方が43分であることを示している。流星数とHRは観測者個人別の最多と最少を示し、流星数計の欄には延べ流星数(同一流星も重複して合計したもの)を示している。最微光星光度の欄は観測者の測定値の幅を示し、*は月明下の観測である。また、総計の観測時間は個人の観測時間の総合計で表している。

[NO.] 流星観測記録用紙 [A・B・C]										
観測日	時間	観測者	1	2	3	4	5	6	7	8
11/12	21	40/43	2~5	2.8~7.5	24	0~5	0~7.5	21	2.89~4.67*	
11/12	22	50	3~10	3.6~12.0	48	4~10	4.8~12.0	52	2.89~4.67*	
11/12	23	50	7~17	8.4~20.4	94	4~14	4.8~16.8	66	2.89~5.08	
11/12	00	45/49	5~18	6.7~22.0	82	4~13	4.9~17.3	74	4.66~5.80	
11/12	01	52	9~15	10.4~17.3	50	13~34	15.0~39.2	88	5.08~5.49	
11/12	02	45/49	11~21	13.5~28.0	127	6~26	8.0~31.8	112	2.84~5.56	
11/12	03	54	9~13	10.0~14.4	45	6~11	6.7~12.2	32	5.49	
12/13	21	30/35	1~6	2.0~10.3	21	2~8	4.0~13.7	36	2.89*	
12/13	22	35/50	7~12	8.4~18.9	73	4~17	4.8~29.1	70	2.89~5.08*	
12/13	23	50/55	8~20	8.7~24.0	99	3~10	3.6~10.9	48	4.66~5.08	
12/13	01	54	28~31	31.1~34.4	120	16~25	17.8~27.8	84	5.08~5.56	
12/13	02	50/60	15~26	16.0~31.2	174	6~17	7.0~18.0	100	5.08~5.80	
総計		3984			957			783		

第4図：記録用紙

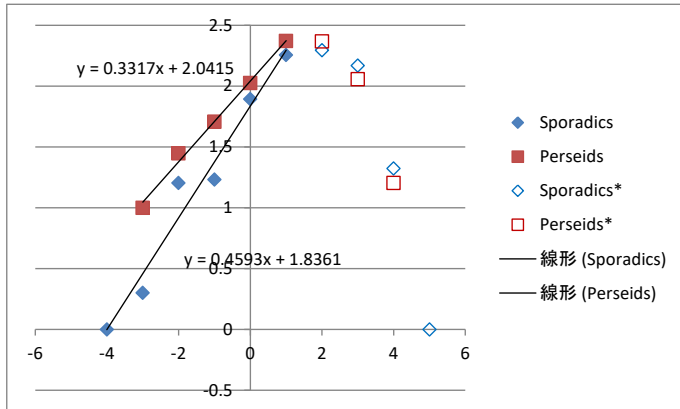
第2表：観測結果の概要。

日	時間帯	観測時間	ペルセウス群			散在流星			最微光星光度
			流星数	HR	流星数計	流星数	HR	流星数計	
11/12	21	40/43分	2~5	2.8~7.5	24	0~5	0~7.5	21	2.89~4.67*
	22	50	3~10	3.6~12.0	48	4~10	4.8~12.0	52	2.89~4.67*
	23	50	7~17	8.4~20.4	94	4~14	4.8~16.8	66	2.89~5.08
	00	45/49	5~18	6.7~22.0	82	4~13	4.9~17.3	74	4.66~5.80
	01	52	9~15	10.4~17.3	50	13~34	15.0~39.2	88	5.08~5.49
	02	45/49	11~21	13.5~28.0	127	6~26	8.0~31.8	112	2.84~5.56
	03	54	9~13	10.0~14.4	45	6~11	6.7~12.2	32	5.49
12/13	21	30/35	1~6	2.0~10.3	21	2~8	4.0~13.7	36	2.89*
	22	35/50	7~12	8.4~18.9	73	4~17	4.8~29.1	70	2.89~5.08*
	23	50/55	8~20	8.7~24.0	99	3~10	3.6~10.9	48	4.66~5.08
	01	54	28~31	31.1~34.4	120	16~25	17.8~27.8	84	5.08~5.56
	02	50/60	15~26	16.0~31.2	174	6~17	7.0~18.0	100	5.08~5.80
総計		3984			957			783	

3. 観測結果の分析

3. 1. 今回の分析結果

3. 1. 1. 仮の光度比



第5図：光度分布と光度比

とし、1人のみ4.67としている。このNo.16のエリアではコーナースターで最も暗いものが2.89等、次が4.67等なのである。本来、IMOでは0.3等級以上の開きがある場合には別のエリアを使うよう指示されている。しかし、月明下ではこのような条件を満たすことは困難である。ここでは、クレサコワによる視認率をスライドして用いることによって、実際の最微光星光度の推定を試みる。

第3表：Kresakovaによる視認率

-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1	0.98	0.95	0.87	0.73	0.57	0.48	0.42	0.343	0.232	0.064	0.008	7E-05

この視認率は最微光星光度が6.5等のものであり、1等級刻みでしか数値が与えられていない。これを内挿して0.1等級刻みの表を作成し、さらにこれを最微光星光度が変化した場合にもスライドして用いることが出来ると仮定する。また植木によると流星数は光度に対して指数関数であらわされるので最尤推定値は次式であらわされる。 m は M 等級までの流星の平均光度である。

$$r = 1 + \frac{1}{M - \bar{m}}$$

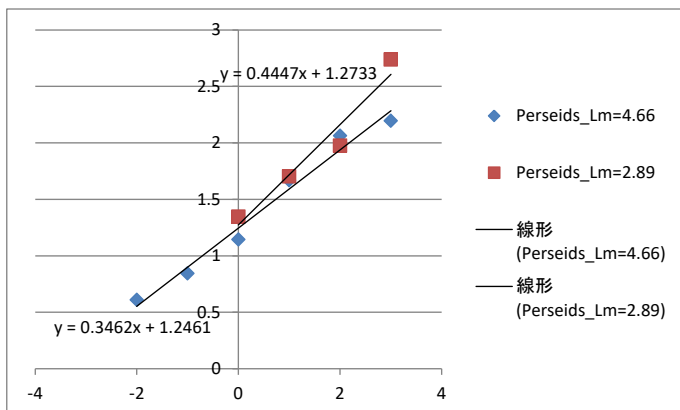
11/12日の21時台の8人の観測者の光度分布を下の表に示す。実際の最微光星光度が2.89であれば3等級の流星を見ることは不可能であるので、クレサコワの視認率を最微光星光度が3.5等にスライドさせると、上式から求められる光度比は $r_{Per}=27.3$ 、 $r_{Spo}=31.5$ となり、ありえない数値を示す。

第4表：11/12日21時台の観測

mag	1	2	3
Per	10	11	3
Spo	2	15	4

最微光星光度を4.7等にスライドさせると、 $r_{Per}=3.01$ 、 $r_{Spo}=3.76$ となり、仮に求めた数値に近づく。No.16のようなエリアを使わざるを得ない状況下では、このような方法によって、最微光星光度を検証する必要がある。また、実際にエリア内で見られた最微星

よりも1つだけ暗いものを最微光星光度として記録することが有効と考えられる。少なくとも確認できた最微星と次の星の光度の中間値を最微光星光度とすることが望ましい。



第6図：12/13日22時台の光度分布(グループ比較)

くなる。

夜半前の観測は月明の影響を受け、一晩の観測中に大きく最微光星光度に変化しているが、それを無視して光度分布を作成すると左図のようになる。ペルセウス群、散在流星ともに1等級未満ではグラフが直線になるので、この傾きから光度比を仮に $r_{Per}=2.15$ 、 $r_{Spo}=2.88$ とする。

3. 1. 2. 最微光星光度の検討

最微光星光度の決定はかなりの経験者にとっても決してやさしいものではなく、初心者にとっては難関である。今回の観測でも11-12日の21時台の観測では月明下、月の方向に近いエリア(IMO-No.16)を選定しているため、最微光星光度を8人中7人が2.89

とし、1人のみ4.67としている。このNo.16のエリアではコーナースターで最も暗いものが2.89等、次が4.67等なのである。本来、IMOでは0.3等級以上の開きがある場合には別のエリアを使うよう指示されている。しかし、月明下ではこのような条件を満たすことは困難である。ここでは、クレサコワによる視認率をスライドして用いることによって、実際の最微光星光度の推定を試みる。

この視認率は最微光星光度が6.5等のものであり、1等級刻みでしか数値が与えられていない。これを内挿して0.1等級刻みの表を作成し、さらにこれを最微光星光度が変化した場合にもスライドして用いることが出来ると仮定する。また植木によると流星数は光度に対して指数関数であらわされるので最尤推定値は次式であらわされる。

$$r = 1 + \frac{1}{M - \bar{m}}$$

11/12日の21時台の8人の観測者の光度分布を下の表に示す。実際の最微光星光度が2.89であれば3等級の流星を見ることは不可能であるので、クレサコワの視認率を最微光星光度が3.5等にスライドさせると、上式から求められる光度比は $r_{Per}=27.3$ 、 $r_{Spo}=31.5$ となり、ありえない数値を示す。

最微光星光度を4.7等にスライドさせると、 $r_{Per}=3.01$ 、 $r_{Spo}=3.76$ となり、仮に求めた数値に近づく。No.16のようなエリアを使わざるを得ない状況下では、このような方法によって、最微光星光度を検証する必要がある。また、実際にエリア内で見られた最微星

よりも1つだけ暗いものを最微光星光度として記録することが有効と考えられる。少なくとも確認できた最微星と次の星の光度の中間値を最微光星光度とすることが望ましい。

今回の観測では、12-13日の22時台に最微光星光度決定用のエリアを半数がNo.6、残りがNo.16を使うということが生じたために、最微光星光度の推定に有益な情報が与えられた。No.16を用いた4名はいずれも最微光星光度を2.89とし、残りの4名はNo.6を用いて1名が5.08、3名が4.66としている。これとともに最微光星光度を4.7等とみなしてペルセウス群の光度分布を補正したものが左図である。わずかに最微光星光度を2.89としたグループの傾きが大きいが、ほぼ一致していることがわかる。エリアNo.6で5.08等の次は5.49等であり、実際には4.7等より暗い星まで見えていた可能性がある。最微光星光度が4.66等よりも暗ければ、両者の差はもう少し小さくなる。

3. 1. 3. 光度比の推定

以上述べてきたように、最微光星光度を補正して用いれば、初心者の方の観測であっても光度比に関して有意義

な情報を得ることが出来る。ここでは2通りの方法で光度比を推定する。

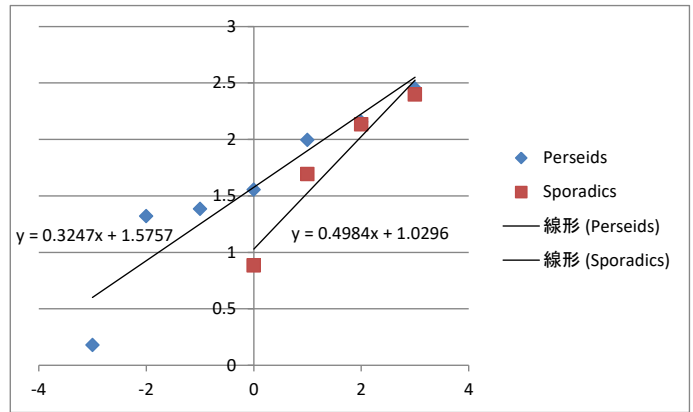
(1)クレサコワの視認率をスライドさせた光度分布

12/13日の23時台を例にとる。最微光星光度については上の考察より、最も暗い推定をしている観測者に合わせて5.1等として補正を行って流星数の分布を示したものが右図である。この傾きからペルセウス群、散在流星の光度比はそれぞれ $r_{Per}=2.11$ 、 $r_{Spo}=3.15$ と算定される。

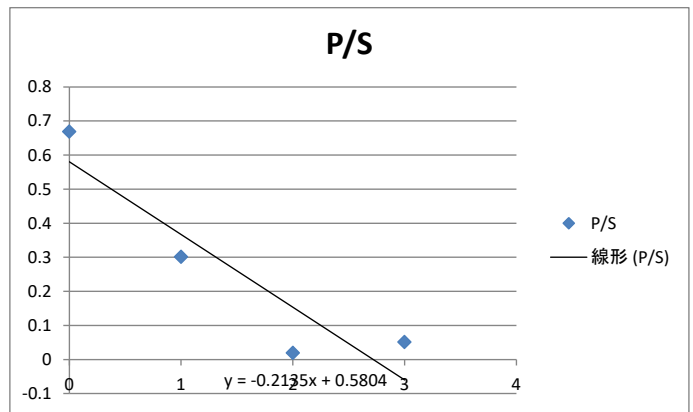
(2)散在流星数との比

(1)と同じデータを用いて、ペルセウス群の散在流星に対する比の光度変化を求める。ペルセウス群と散在流星の視認率が同一であると仮定すれば、視認率について具体的な数値を知らなくても、ペルセウス群と散在流星の流星数の比の光度変化の指数を求めることが出来る。

直線の傾きは、 $a=(r_{Per}/r_{Spo})=10^{-0.2135}$ であることを意味している。ここで仮に $r_{Spo}=3.5$ とすると、 $r_{Per}=2.14$ という値が得られる。この方法は、視認率の具体的な数値がわからなくてもよいので、最微光星光度が変化している今回の観測でも一晩の観測を総合して扱うことが出来る。次項に以前の観測と合わせてこの方法による光度比を示す。



第7図：12/13日23時台の光度分布(視認率スライド)



第8図：12/13日23時台の光度分布(散在比)

3. 2. 今までの結果との比較

3. 1. 3. (2)の方法によって、明治大学天文部によって得られたペルセウス群の光度比の値を現在と同様の観測方法が用いられた2010年以降について示したものが次表である。

第5表：散在比によるペルセウス群の光度比の比較

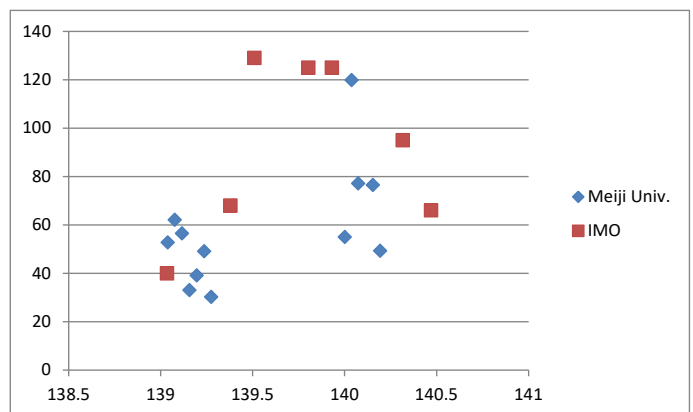
観測	2010Aug.9/10	2012Aug.12/13	2013Aug.12/13	2013Aug.13/14	2013Aug.14/15	2016Aug.11/12	2016Aug.12/13
a	-0.1569	-0.1959	-0.2153	-0.2064	-0.2810	-0.1560	-0.1553
r_{Per}	2.44	2.23	2.13	2.18	1.83	2.44	2.45

4. まとめ

時間帯ごとに全観測者の平均 HR を算出し、仮の $r_{Per}=2.15$ を用いて ZHR を求めたものを IMO のデータと比較したものが次のグラフである。最微光星光度を補正することにより、ほぼ妥当な数値を得られることがわかる。

光度比、ZHR いずれの算定についても、最微光星光度の決定が非常に重要な意味を持つ。これを決定するにあたっては、一般的な注意に加えて、実際に見ることが出来た最微光星よりもエリア内で次に暗い星を最微光星光度とすることが推奨される。特に月明下、都市光害の影響を受ける場合にはこのことにより妥当な光度比、ZHR を得られることが本研究により示された。

初心者の観測であっても、大流星群の活動期でデータ数が多い場合には有意義な結論を導くことが出来る。初心者であっても、改善できる今後の課題としては、相互の影響を排除するために観測者個人が探り書きで記録を取るようにすること、観測方向を天頂に限らず分散させる(天頂であっても頭の方向を四方に分ける)こと、流星数が多い方が信頼性を上げられるので開始・終了を00分にこだわらず、正味で60分(以上)の観測時間を確保すること等があげられる。



第9図：最微光星光度で補正した明治大学天文部の観測とIMOによるものとの比較(縦軸はZHR、横軸は太陽黄経)

2016 ペルセウス群の活動が盛んになる。

SKY and TELESCOPE Aug 2016

2016年のペルセウス群は月例条件が上弦過ぎでありあまり良くないが、極大の8月11-12は午前1時位に月没になるため、夜明けまでの3時間くらい良い条件で観測出来る。通常、極大日にはHR60-90の出現が見られるが、今年は通常年より多くの出現が期待できる。

これまでの経過

ここ数年の活動は全くノーマルである。しかし、過去1970年代から1980年代にかけて、活動が活発だった。特に1980年は活動が盛んで、HR120を超え、HR250を観測した日本人もいた。(訳者注：誰でしょう) ペルセウス群の母彗星は1862年に発見されたスィフト・タートル彗星である。当時、周期は 120 ± 2 年と計算されていた。その結果、1981年位の回帰が期待されていた。したがって1980年頃のペルセウス群の活発化が期待されたわけである。しかし、彗星は発見されず、ペルセウス群の活動も1980年以降、1980年代には通常に戻ってしまった。マースデンは母彗星の回帰が遅れ、1992年頃になる予想を立てた。予想通り1992年秋に母彗星は発見され(訳者注：日本の木内鶴彦氏)この前後の年に大変活発な活動が観測された。この活動の活発化は母彗星の回帰に伴うものであることは明白だが、1980年の活発化の原因は何であったのであろうか。それはおそらく、木星の摂動の影響であろう。LyytinenとFlandernは2004年、母彗星は木星に1.7 auまで接近した。ダストトレイルと母彗星の軌道はそれほど違わないのでダストトレイルが接近したことになる。木星の公転周期11.86 yearごとに、摂動の影響で地球軌道にダストトレイルを0.01 au接近させる作用が起り、地球との交差点で12年おきに、この接近が起こることがある。(1921、1945、1968、2004、2016)今年は1980年ほどではないにせよ、活発な出現が期待できる。

2016年の予報

Mikhail Maslow 氏 (ロシア)

極大 Aug 12 th 12:40 UT (日本: 8月12日21時40分)

ZHR 150-160 (2015はZHR 90)

好条件な地域 東ヨーロッパ、西アジア

(日本でも22時以降は輻射点高度も上がり、十分観測可能)

これは1479、1862年に放出された若いダストトレイルであるので、ピークの時間はあまり長くないだろう。

Vauvbaillon 氏 (フィンランド)

極大 Aug 12 th 4:56 UT (日本8月12日13:56)

これは1079年の古いダストトレイルのため突発的な火球の増加が期待できる。しかし、古いトレイルなので予測の精度は低い。

Perseids to Get a Jupiter Boost?

After the Moon sets, the Perseid meteors could be unusually rich.



The most-observed meteor shower is the annual Perseid display, active for several nights in prime vacation season. This year the Moon will be waxing gibbous on the predicted peak night, August 11–12. But the Moon will set around 1 a.m. for mid-northern observers, leaving the night dark for the three or four prime meteor-watching hours before dawn: this is when your side of the Earth faces most directly into the oncoming meteoroids.

In a normal year, you may see about 60 to 90 Perseids per hour on the peak night between midnight and dawn if you have an excellent dark sky. But the

shower can vary a lot from year to year.

And this year's shower will probably be better than usual. There's even a chance that it could be spectacular.

Four hours, compressed. "I created a composite of all the meteors captured on August 13, 2015, from 12:30 to 4:30 a.m.," writes Brad Goldpaint from northern California. "The large mountain in the distance is Mount Shasta, and the glow from the base of the mountain is the city of Mount Shasta." The evening before, he recorded the starry sky and its reflection in the still lake in a 25-second exposure. The landscape is from a long exposure he shot at a very low ISO during deep twilight. He took dozens of sky exposures during the morning hours, subtracted out the 65 meteors that these recorded, and aligned them to their star backgrounds in the original sky image.



An Enigmatic Enhancement

For the last several years, the Perseids have been quite normal. But in the late 1970s and early 1980s the shower turned unusually active. The 1980 display was one of the best in memory up to then; many observers reported seeing more than 120 per hour and occasionally up to 5 or 6 a minute. A reputable Japanese observer counted nearly 250 in one hour.

The Perseid meteoroids are dusty debris bits shed by the periodic comet 109P/Swift-Tuttle, which was discovered in the summer of 1862. Many experts in the 19th and 20th centuries calculated its orbital period to be 120 ± 2 years, and summer 1981 was considered the “most probable” time for the comet to be recovered. Meteoroids tend to be thicker in the vicinity of their parent comet, so astronomers naturally assumed that the strong Perseid activity in 1980 was due to the impending arrival of Swift-Tuttle.

Yet the comet failed to appear during its anticipated 1979–1983 time frame. Perseid activity through the 1980s returned to normal, and many assumed that Comet Swift-Tuttle — which had evolved into a strikingly beautiful object after its 1862 discovery — had somehow slipped by undetected.

The late Brian G. Marsden, longtime director of the Minor Planet Center (MPC) at the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, put forward an alternative solution: that Comet Swift-Tuttle was perhaps identical with a comet briefly seen in 1737. If so, it might still return. . . around 1992.

Few astronomers believed it. Hadn't the Perseids ramped up around just the right time? The legendary astronomy popularizer Sir Patrick Moore pooh-poohed the idea that Swift-Tuttle would reappear in 1992 and bet a colleague a bottle of whiskey that it wouldn't.

He lost. The comet indeed returned in the fall of 1992, validating Marsden's prediction. And the Perseids in the years around then were even more memorably abundant.

So what caused the high rates in 1980? It was probably a completely unrelated perturbing influence by the most massive planet: Jupiter.

The first to formally propose that Jupiter plays a role in Perseid activity were Esko Lyytinen of Finland and Tom Van Flandern of the U.S. Naval Observatory, in 2004. The comet passes a good 1.7 a.u. above Jupiter's orbit while moving inbound toward the Sun. But because the comet — and the meteoroid stream all along its orbit — have made hundreds of trips around the Sun over tens of thousands of years, slight periodic perturbations can add up.

Every 11.86 years (Jupiter's sidereal period), Jupiter passes under the broad rubble stream. Each time, its gravitational field shifts some of the comet dross about 0.01 a.u. closer to passing Earth's orbit. This segment of dusty debris takes about 16 more months to reach our path, whether Earth happens to be there or not. The long-term result: when Earth reaches the Perseid-intersecting part of its orbit in mid-August, occasionally an extra stream of Perseids will be passing through at the same time.

If this happens about every 12 years in sync with Jupiter's orbital period, we have a nice explanation for not only the strong 1980 display, but also the enhanced showers that were reported in 2004, 1968, 1945, and 1921.

What About 2016?

This would appear to be another of those “prime years.” Russian meteor expert Mikhail Maslov, who has closely studied the evolution of the Perseid stream in space, predicts a “significant increase of Perseid background activity, with a zenithal hourly rate (ZHR) of 150–160.” By comparison, last year's Perseid shower reached a peak ZHR of about 90, judging from the counts submitted to the International Meteor Organization (IMO) by observers worldwide.

The shower's predicted time of maximum is 12:40 UT August 12th. That's

after sunrise for North America, but peak activity usually lasts about 24 hours.

Maslov points out that in addition, fresh debris trails shed by Swift-Tuttle in 1479 and 1862 (“fresh” implies dense and narrow) will likely encounter Earth and might also provide a brief enhancement of activity. Eastern Europe and western Asia are in the best position to watch for this, as it should happen during their early-morning hours when the Perseid radiant is highest.

Moreover, French meteor expert Jérémie Vaubaillon has calculated an older discrete trail of the comet's rubble dating back to 1079. He forecasts Earth passing closest to the middle of this trail at 4:56 UT August 12th, which would favor eastern North America on top of whatever else is happening. This might lead to a sudden outburst of bright meteors, but Vaubaillon cautions, “This 1079 trail [is] quite old, making the forecasting less certain. I certainly would look for it, but just keep in mind the uncertainties.”

As always, the rates you actually see are less than the ZHR unless the radiant (in northern Perseus) is overhead and your sky is dark enough for magnitude-6.5 stars to be visible. Light pollution reduces the numbers, though the brightest ones will shine through. The meteors themselves flash into view anywhere in the sky, not necessarily near the radiant.

To do a meaningful meteor count by standard methods, so that your count can be integrated with others made all over the world for many days running, see imo.net/visual/major. There too you will find the required forms for submitting a report of your count.

Good luck and clear skies to all!

— Joe Rao

FOLLOW THE SHOWER ONLINE:
As meteor observers report their counts to the IMO, you can watch this year's Perseid activity curve develop hour by hour at imo.net.

MSS資料集ホームページ ～2016年度更新～

重野好彦

MSS資料集を2016年度版に更新しましたのでお知らせします。



「第143回流星物理セミナー」のお知らせ

発表するのも話を聞くのも予約不要です。どうぞお気軽にご参加・

日時 2016年7月3日(日) 13時～17時 (確定しました)
 場所 渋谷区 神宮前 隠田(おんでん)区民会館 会議室2号(2階)
 内容 流星輻射点の予報: 5つの方法による比較<紹介>(小関正広)
 翻訳論文配布(詳細は当日)
 MSS資料集更新(重野好彦)
 35mmフルサイズ機とAPS-C機の感度別画像比較(重野好彦)
 ニコンD500(APS-C相当カメラ)の感度別4K画像比較(重野好彦)
 募集中!
 費用 300円
 幹事 重野好彦/寺田充

【渋谷区 神宮前 隠田(おんでん)区民会館 案内図】

至新宿	1) JR原宿駅南口から5分		
	2) 地下鉄明治神宮前駅4番出口1分		
-----		明	
JR		治	【和民(2次会)】
原宿		通	
駅		Laforet	リ 東急プラザ
-----		-----	-----
表参道通り			
	北	地下4番口	ロッテリア
至渋谷	西+東		
	南	【隠田】	-----
		【会館】	-----

			【旧会館】
	(月曜, 第2日曜休館)		

1. 資料集

本資料集は2016年7月版です。

[2015年度資料.pdf](#)

- [MSS00-1-はじめに.txt](#)
- [MSS00-2-ごあいさつ.txt](#)
- [MSS00-3-インデックス.txt](#)
- [MSS00-3-インデックス.xls](#)
- [MSS00-A-50回記念誌上.pdf](#)
- [MSS00-B-50回記念誌下.pdf](#)
- [MSS01-隕石.pdf](#)
- [MSS02-隕石落下シミュレーション.pdf](#)
- [MSS03-遠征観測報告.pdf](#)
- [MSS04-音.pdf](#)
- [MSS05-解析法.pdf](#)
- [MSS06-観測機器.pdf](#)
- [MSS07-観測結果.pdf](#)
- [MSS08-観測理論.pdf](#)
- [MSS09-軌道計算研究発表.pdf](#)
- [MSS10-軌道計算精度.pdf](#)
- [MSS11-軌道計算論文.pdf](#)
- [MSS12-軌道シミュレーション.pdf](#)

[2016年度資料.pdf](#)

- [MSS13-1-議事録.pdf](#)
- [MSS13-2-議事録.txt](#)
- [MSS14-空間密度.pdf](#)
- [MSS15-構造.pdf](#)
- [MSS16-痕.pdf](#)
- [MSS17-シューメーカーレビー9.pdf](#)
- [MSS18-出現予報.pdf](#)
- [MSS19-スペクトル.pdf](#)
- [MSS20-測光.pdf](#)
- [MSS21-その他.pdf](#)
- [MSS22-電波.pdf](#)
- [MSS23-同時観測.pdf](#)
- [MSS24-同時観測MSS-WG.pdf](#)
- [MSS25-同時観測理論.pdf](#)
- [MSS26-発光.pdf](#)
- [MSS27-輻射点.pdf](#)
- [MSS28-豆まき現象.pdf](#)

2. 流星物理セミナー・ワーキンググループ(MSS-WG)の紹介

[観測報告と流星用プログラム](#)

ユニークアクセス数	PC	PC/年換算		PC	PC/年換算
2009.01.18~2009.05.30	59	163			
2009.05.30~2010.07.01	119	109			
2010.07.01~2011.09.30	164	131			
2011.09.30~2012.06.28	88	118			
2012.06.28~2013.03.27	174	234	2013.04.14~2013.06.30	85	403 (サーバ変更)
2013.06.30~2014.04.27	176	214	2014.04.27~2014.07.05	86	455 (ドメイン変更)
2014.07.05~2015.06.28	928	947			
2015.06.28~2016.06.28	480	480			

流星電波観測 解析ソフトの開発について

武田 誠也 MSS-144

電波観測を東京で行っています。(HRO/FMO)

しかし、ソフトがMacで動かない・・・。

東京のノイズの多さ・・・。

いつまでも人さまのソフトにお世話になるより

自分のものは自分で作ろう!の精神

MUST要件

- HROFFTと同等以上の解析精度
- 流星エコーの自動検出
- ノイズの除去

BETTER要件

- 24時間365日運用
- 流星電波観測国際プロジェクトへ
データ自動送信

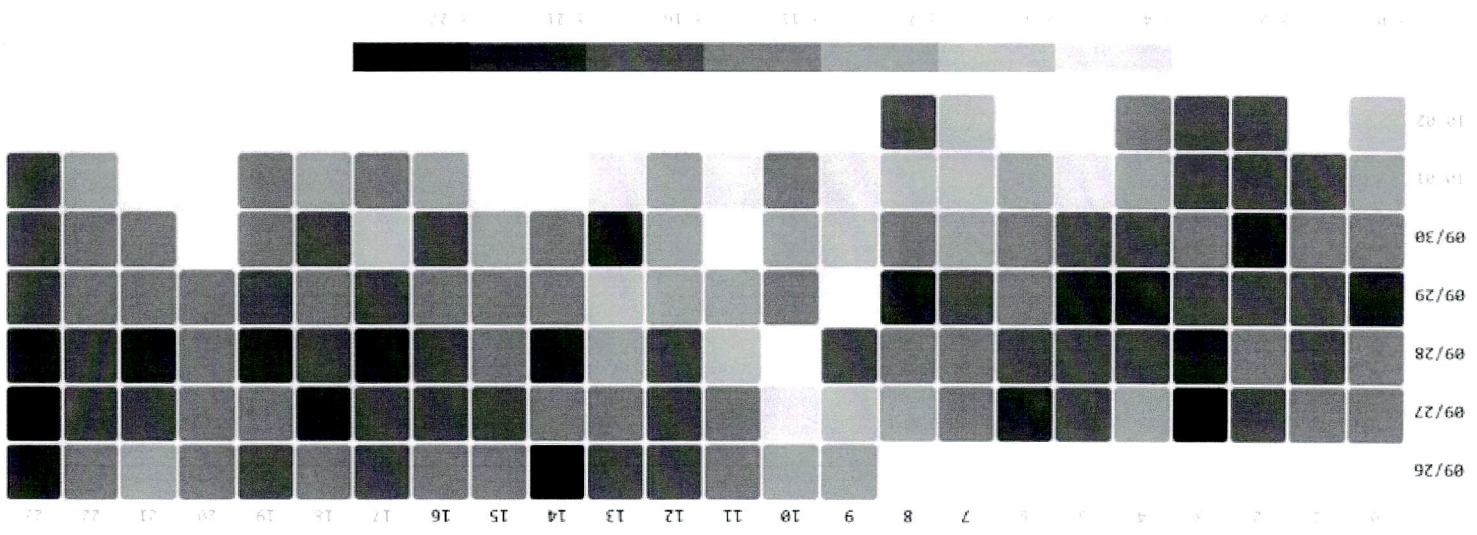
流星検出システム

解析アルゴリズム

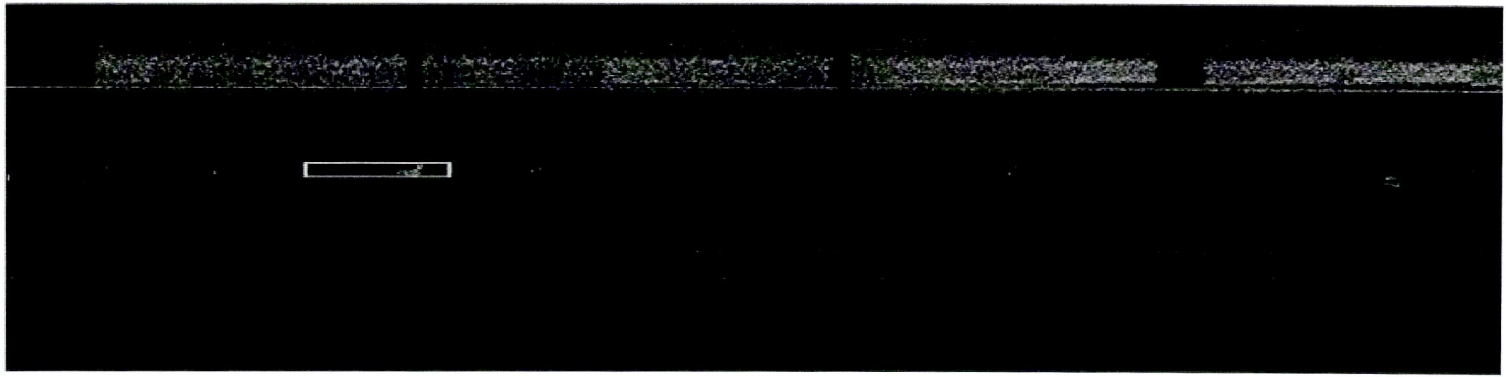
- ・ FFT (ティーキュー窓)
- ・ 周波数フィルター
- ・ 時系列フィルター
- ・ ハフ変換(線状ノイズ除去)

機能

- ・ 流星エコー自動検出
- ・ 検出時のスペクトログラムと録音データの保存
- ・ 時間毎の流星検出ヒートマップ
- ・ 日毎の流星検出カレンダーヒートマップ
- ・ 流星エコーの周波数解析



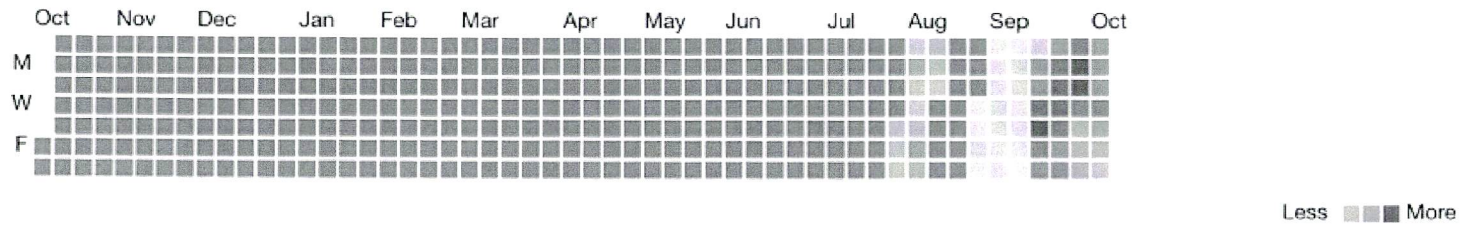
Date Hour Heatmap



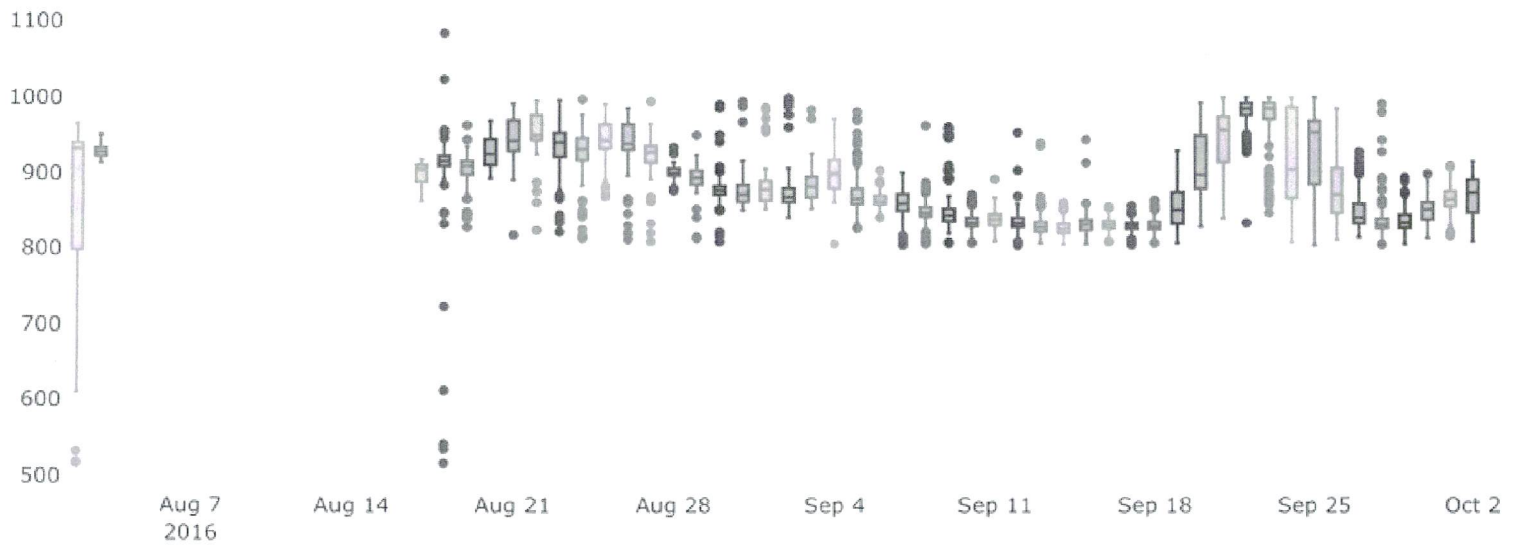
Latest Spectrogram

10 min

Calendar Heatmap

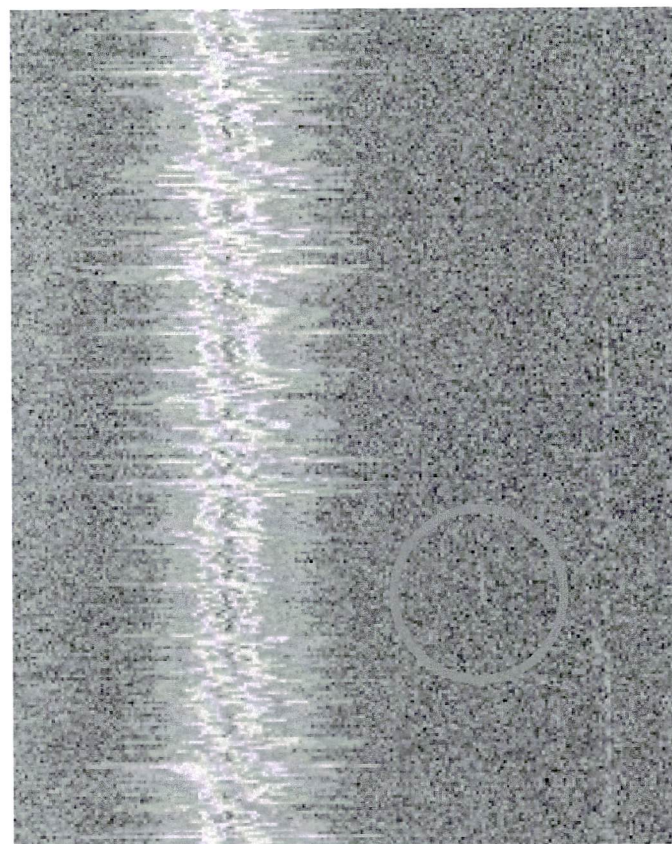


Frequency Boxplot



FMOに挑戦

- FM802 80.2MHz 10kW出力 大阪府
80.0 80.4にtokyofmがはいる、、、
- × FM AICHI 80.7MHz 10kW出力
NHK入る
- × FM OSAKA EASY851 85.1MHz 10kW出力
NHK入る
- × NHK 大阪 88.1MHz 10kW出力
中華系のFMが入る
- × FM仙台 77.1MHz 5kW
- × FM秋田 82.8MHz 3kW出力
- × NHK青森 86.0MHz 3kW出力
- × NHK秋田 86.7MHz 3kW出力



1. 輻射点予報の方法

彗星（あるいは小惑星？）といった天体からの流星活動について輻射点を予想する場合の問題は、それらの母天体の軌道が一般に地球軌道とは交差しないことである。従って、輻射点を予想するには、母天体の軌道に何らかの変更をする必要がある。廣瀬秀雄(1951)は次の3つの方法を紹介している。

- 1) 近日点調整法(ω 法)：軌道の形と軌道面傾斜はそのまま、近日点の方向だけ変えて地球軌道と交差させる。
- 2) 離心率調整法(e法)：軌道の離心率だけ（近日点距離も）を変更して、地球軌道と交差させる。
- 3) 通常法：母天体の日心距離 r が地球の日心距離 R となる点での母天体の速度及び方向を、そのまま推算時刻の地球の位置に於ける流星の速度及び方向と仮定する。

また、長谷川一郎は次の方法を推奨している。

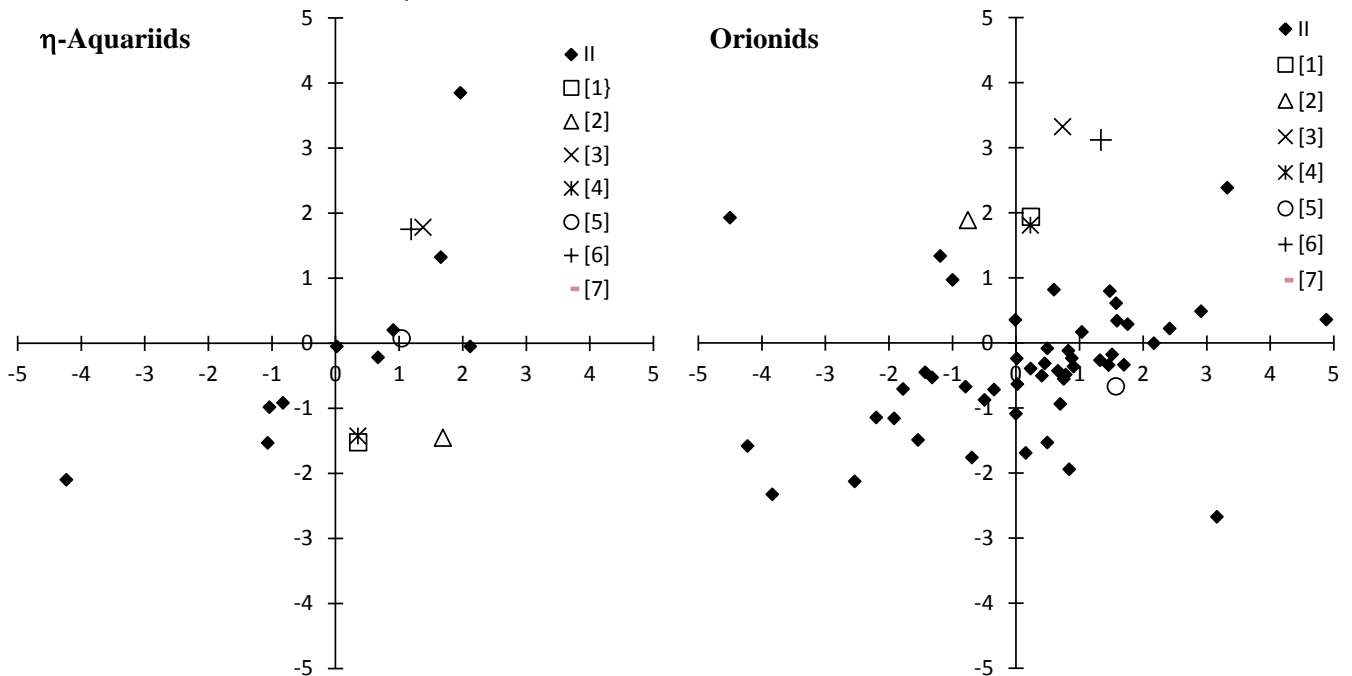
- 4) 流星は母天体と地球の両軌道の最接近点で出現するものと仮定する。以後は、 ω 法によって計算する。
- 5) 近日点の方向と軌道の大きさが一定に保たれている（D判定を最小にする）と仮定する。

本稿ではこの5つの方法について比較検討するが、補足として次の2法を追加する。

- 6) 4)と同様に最接近点での出現を仮定するが、軌道の変更は5)と同じ条件を用いる。
- 7) 素朴に母天体が黄道面を通過する際の速度ベクトルを用いて昇降点（降交点）で出現するとする。

2. 計算結果の比較

1P/Halley による流星群（ η みずがめ群とオリオン群）の重野による I I 観測と5つ（捕捉を合わせれば7つ）の方法による計算結果を比較する。4)~7)は自動的に出現時刻が決定されるが、1)~3)については出現時刻を別に定める必要がある。最接近点で出現すると考えれば、1)と4)は同じものとなる。ここでは、1)~3)についての流星出現時刻を IAUMDC から η みずがめ群、オリオン群についてそれぞれ $\lambda_s=46.9$ 、 $\lambda_s=208.6$ とした。観測輻射点と予想輻射点を $(\lambda-\lambda_s, \beta)$ の座標で示す。

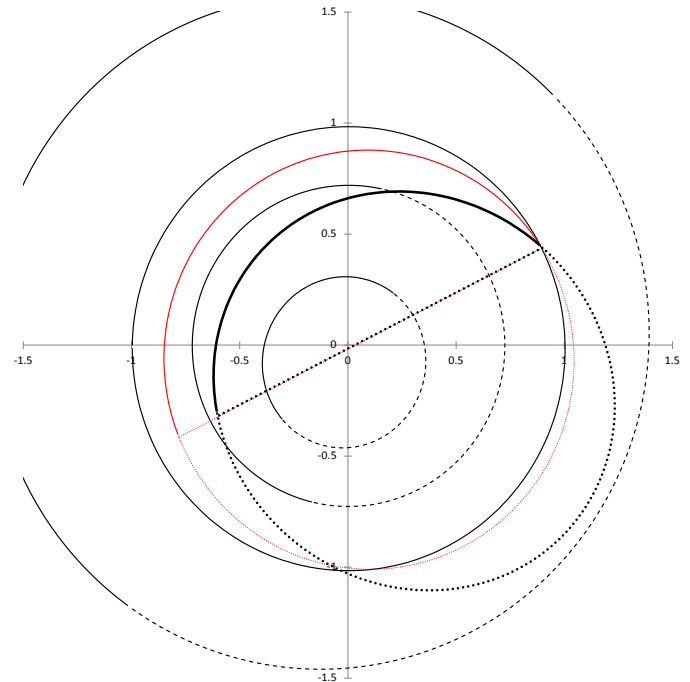
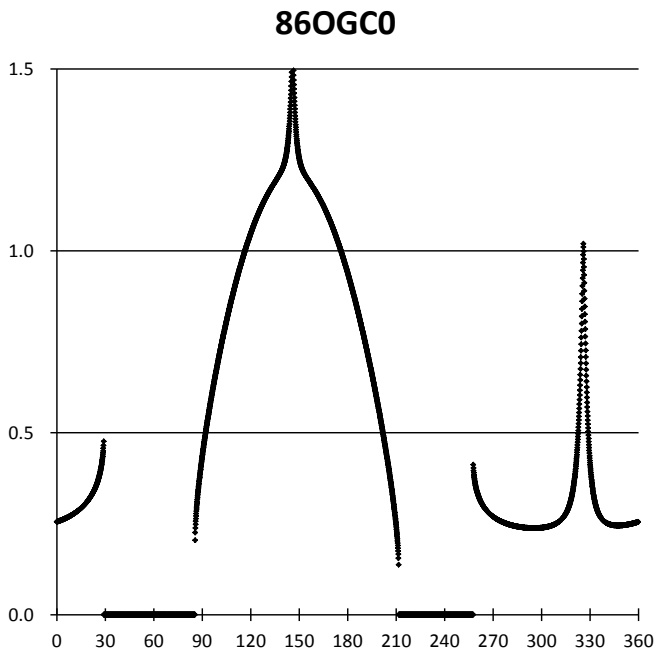


7)はいずれの場合も図の範囲外になる。つまり、母天体の軌道面と地球軌道が交差する場所で、母天体が黄道面を通過する際の速度ベクトルをもった流星が出現するわけではない。5)がいずれについても観測輻射点分布の中心に近く、母天体と流星体の近日点の方向及び軌道の大きさが等しいように変更された軌道上に流星体が分布するという仮定が妥当であることが分かる。また、当然のことだが1)と4)はほぼ同一の結果になる。従って、出現時刻を推定できれば、最接近点を求める手間を省いて、1) (ω 法) が簡便で有効だと考えられる。

3. D法における問題点

D法が一般的には優れていると言えるが、これにも弱点がある。「太陽をかすめる彗星と流星」の発表の際にも母天体と地球軌道の交点から遠く離れた場所では極端な軌道を算出することに気付いてはいたが、IAUMDC の軌道チェックをしていて ω 法の方がよい結果を出す場合があることを確認した。

e	q	i	ω	Ω	λ_s	α	δ	Vg	備考
0.124	0.832	2.7	119.3	26.7	206.4	50.4	-6.9	3.3	86OGC0
			119.28	26.4	206.4	50.3	-6.6	3.3	(1) ω 法
0.3889	0.5805			26.4	206.4	15.1	-3.7	9.3	(2)e法
0.1293	0.8272		118.65	26.4	206.4	49.4	-5.8	3.5	(3)通常法
			119.23	26.76	206.76	50.6	-6.6	3.3	(4)最近点法
0.3893	0.5802	2.7	119.3	26.7	206.7	42.2	9.5	11.3	(5)D法
0.1242	0.8320	2.70	119.25	26.76	206.76	50.6	-6.6	3.3	(6)最近点+自動改変
0.1243	0.8318		119.35	26.7	206.7	50.6	-6.6	3.3	(7)交点法



例として 86OGC を取り上げる。仮定から元の軌道と同じ数値になる箇所は表中で空欄としている。また 1)~3)で昇降点黄経が元の数値と異なるのは IAUMDC で出現時の太陽黄経を昇降点黄経に対応する 206.7 でなく 206.4 としているので、流星出現の予報としてはこちらを優先したためである。備考欄で 86OGC0 としているのは、IAUMDC で付されている流星群内での補助数字の 0 を付け加えたからである。86OGC0 の場合には、D法は交点法より更に悪い。実はD法では D_{SH} が最小となる点での流星出現を考えるのだが、左図に見られるように部分的に D_{SH} が計算不可能となっている（横軸に張りついている）。D法では近日点の方向と軌道長半径を厳密に固定し、なおかつ地球軌道と交差するような軌道が存在しない場合があるからである。ここでは、表におけるD法の数値は 86OGC0 の昇降点黄経での値を示している。右図で円に近い線が 86OGC0 本来の軌道で、離心率が大きくなっている線がD法によって変形された軌道である。

4. 検討

最も簡便な方法は ω 法である。実際に最接近点を求めることは、軌道の形と位置によっては長谷川の示した方法ではかなり手間がかかり、それぞれの2点間の距離を計算しながら逐次計算した方が早い場合もある。トレイルによる軌道では、地球軌道の極めて近傍を通過する流星体の軌道から輻射点を計算することになり、 ω 法で十分な精度が得られるはずである。もちろん、そのようなトレイルが存在せず、予想していなかったトレイルに遭遇する場合もあるので、輻射点の推算位置はあくまで目安である。

D法では厳密に近日点の方向を一定に保とうとするため、母天体の軌道が円に近い場合には適切な解を与えられない場合がある。しかし、円軌道に近い流星群の場合にはわずかな軌道の差異で輻射点が大きく変化するものであり、いずれの方法による予報でも放出間もない新鮮な流星物質に出会う場合を除けば、「点」という概念ではなく輻射領域としてとらえる必要がある。

参考文献

- 廣瀬秀雄, 1951, 彗星の軌道要素よりの流星輻射点の計算法と東京天文台での方法とに就いて, 東京天文台報 10, 11, 288-296.
- 長谷川一郎, 1983, 「天体軌道論」, § 81 流星放射点の予報, 354-364.
- 小関正広, 2014, 太陽をかすめる彗星と流星, 第 137 回流星物理セミナー

1. IAUMDC の使い方のヒント

IAUMDC のリストは「倉庫」としての利用には便利だと説明してきたが、実際に使う場合にはコツを知っておくとよい。その一つが流星群の要素を表示させたときにどのデータを利用するかである。例として7月のペガサス群(JPE)の表示を示す。

00175 JPE		July Pegasids						Single Shower - Status - Established							References	
Activity	S. Lon	RA [deg] J2000	DE	dRA	dDE	VG [km/s]	a [AU]	q [AU]	e	Peri	Node [deg] J2000	Incl	N	OT	References	
annual	107.5	340	15	0.6	0.2	61.3	(44)	0.536		267.2	107.5	131.6		V	1. Jenniskens, 2006	
annual	108	347.2	11.1	0.9	0.2	68.1							0591	T	2. Molau and Rendtel, 2009	
2008/11	110.9	349.6	11.3	0.71	0.17	63.9	14.78	0.564	0.962	264.73	110.9	148.77	0063	T	3. Ueda, 2012	
annual	109	348.8	11.1			64.5		0.598	0.883	260.5	109.1	149.3		T	4. Holman and Jenniskens 2013	
annual	120.8	358.6	14.2			62.6		0.524	0.904	273.8	120.8	150.0	0008	T	5. Rudawski and Jenniskens, 2014	
annual	120.5	357.1	13.3			62.31		0.484	0.922	275.2	120.5	149.4	0012	T	6. Komos et al., 2014	
annual	108.0	347.2	10.0	0.90	0.39	64.0	7.26	0.562	0.960	265.0	112.4	149.2	0104	T	7. Jenniskens et al., 2016, Icarus, 266, 331	
Parent body:		C/1979 Y1 (Bradfield), C/1771 A1														
Notes:																

合計7件のデータが示されているが、一番上のデータをつい使いたくなる。しかし、IAUMDC で表示しているデータは古いものから新しいものへの順になっている。流星群が観測方法、また、年代によって変化しない場合はそれでも良いが、JPEのように新しい流星群の場合（おとめ座η群 EVI もその例である）には、上位に掲載されているデータが<別の>流星群であったり、観測精度（散在との分離）がよくなかったりする。JPEについて D_{SH} を計算したものが次の表である。右側の2列は D_{SH} の平均値を示す。

	175JPE0	175JPE1	175JPE2	175JPE3	175JPE4	175JPE5	175JPE6	July Pegasids	
								mean0~6	mean2~6
175JPE0		0.513	0.315	0.356	0.365	0.352	0.329	0.372	
175JPE1	0.513		0.343	0.366	0.413	0.434	0.333	0.400	
175JPE2	0.315	0.343		0.098	0.115	0.130	0.023	0.171	0.092
175JPE3	0.356	0.366	0.098		0.138	0.175	0.094	0.205	0.136
175JPE4	0.365	0.413	0.115	0.138		0.052	0.104	0.198	0.098
175JPE5	0.352	0.434	0.130	0.175	0.052		0.125	0.211	0.117
175JPE6	0.329	0.333	0.023	0.094	0.104	0.125		0.168	0.108

上位2件のデータは他との差が大きいことがわかる。JPE2は上田昌良さんのデータであり、これがほぼJPEの中心を表しているとみることが出来る。要はIAUMDCのデータは新しいものを選ぶか、よく眺めて他から大きく外れているデータを除くかするとよいだろう。

この新しいデータを選ぶ方が良いというのは、流星群の極大を読み取る場合にも言える。古いデータ（上位のもの）では、流星群の極大における太陽黄経を意味する S.Lon の項目が軌道の太陽黄経から大きく離れている場合があるからである。Jenniskens が例の大著で元データを彼自身の判断によって改変（別のデータとつなぎ合わせる、別の観測による極大に合わせており、IAUMDCはこの大著を発展させたもの）しているためである。新しいデータではそのようなことがないので観測による極大をそのまま表している。

2. IMO との意見交換：続き

A. その後の IMO

(1) Juergen Rendtel から

日本からの文書は”Meteoroids”での招待講演で紹介しました。また、杉本弘文さん、小川宏さんと2016年の四分儀群の活動についての論文を wgn に向けて作成したところです。IMCでは流星経路、スペクトルを高精度で観測するための発表・議論が行われました。

アマチュアの立ち位置については同感です。プロのような束縛なしに新しい企画を始めたり、止めたりできるのです。

ビデオ観測から質量分布指数を求める方法については改善が行われています。しかし、指数は質量の大きさによって、異なることに注意が必要で、電波観測では暗い流星に対する値となります。フラックスや出現数は容易に求められても、質量・光度分布についてはさらなる研究が必要と思われます。

南半球でのビデオ観測者の増加はゆっくりですが、今後は多くのデータが得られると期待しています。

(2) Juergen Rendtel から第二信

輻射点リストは膨張を続けています。何を「流星体束(meteoroid stream)」、「流星群(meteor shower)」と呼ぶのかという問いと切り離して考えることはできないでしょう。これらの用語は天球上または宇宙空間での事象を表すのに用いられていますが、母天体から放出された粒子の軌道変化を考えると、現在の用法はあまり適切ではないと感じています。母天体から放出された粒子が全く異なる軌道上に広く拡散していること

もあるからです。遅かれ早かれ、天球は輻射点で埋め尽くされてしまうでしょう。そのとき、それらを何と呼べばいいのでしょうか。

流星群のモデル研究と観測の連携はもっと強力にする必要があるでしょう。観測者が予測されたトレイルを検出し、観測された時刻、出現数、質量分布指数によってモデルを修正していくことにもっと注意が払われるべきと考えます。

日本での流星会議参加者の皆さんによろしく。

(3) Marc Gyssens (今回の IMC の運営の中心人物) から

IMC は参加者、発表者が多くて、大成功を収めました。課題について話し合う時間はほとんどとれませんでした。しかし、日本からの文書も含めて課題についての進展状況を Juergen と wgn に投稿しようということになりました。8月7-8日には Juergen を訪ねて原稿作成について話し合う予定です。wgn に掲載されたら、更なる議論のスタートになると考えています。

(4) Sirko Molau から

すでにビデオ観測については、IMO と SonotaCo ネットのように部分的な協力体制ができています。観測結果を共有し、共通の問題について解決法をともに探っています。2014年の KCG の突発については、wgn 誌上で日本の観測が紹介され、IMO の観測・解析に活かされています。

相互の連携はもっと活発にすることが出来ると思います。日本から突発、新流星群の活動、モデル計算からの予報等の情報提供があれば、私に直接連絡してください。それにより、私たち自身の観測をチェックしたり、IMO のビデオ観測者たちに直ちに情報を流したりすることが出来ます。現状では、情報に偶然接したか否かに左右されていますが、交流が定常化すればそのようなことはなくなります。

日本に交流拠点ができれば、私たちの知見や疑問を共有したり、他の日本人観測者と情報を共有したりすることもでき、さらにはそれらを深化させることもできるでしょう。

ビデオによるスペクトル観測等の高度な技術については単なる交流の域を越えるので、どのようなことが可能かまだ検討する必要があります。

(5) Cis Verbeek (IMO 会長) から日本側から出された質問(4)と(5)に対する回答

前方散乱干渉計とは、次のような仕組みです。1台の発信機に対して、離れた場所に多数の受信機を設置します。CMOR や BRAMS (Martínez Picar et al. IMC Proceedings 2016, p. 175) のように受信アンテナの配置が適切であれば、反射点の方向を知ることが出来ます。付近の受信機のデータと合わせれば、経路上で数点の反射点を求めることができ、経路が決まります。

多重散乱観測または多点観測は流星体の経路を求めるもう一つの方法です(Lamy et al., IMC Proceedings 2016, p. 143)。複数の受信点で同一の発信機の電波をとらえますが、干渉計は用いません。観測点と流星経路、反射点についての幾何学的な要件をすべて満たすような解を見出すことによって、少し精度は落ちますが経路を決定できます。私の知る範囲では運用レベルにまでは至っていないようです。発信機からのエネルギーは広く放射され、ほんの一部が流星経路から反射されて複数の受信機に到達するので、エネルギー保存則に反することはありません。瞬間、瞬間で流星経路の異なる場所(近くではありますが)から反射されています。(訳注:これは(5)の質問の回答になっていませんが、そのまま掲載します。Lamy の論文も複数の発信機ではなく1台の発信機を用いたシステムに関するものです)。

(5) Detlef Koschny から

Regina Rudawska はすでに IMC と 'meteoroids' の期間中にスペクトル観測に関する議論を始めています。目的は協力体制の強化とデータ共有化のシステム作りです。今後は webex で議論を進めるようです。彼女が休暇から戻ったら、進行状況を聞いてみます。

Gerhard Drolshagen は9月に流星体の流入密度(flux)に関する会合を予定しています。メンバーを限定したもので、Stuttgart、UWO、NASA の流星体関連の人たちで、Sirko もメンバーの一人です。もし、そこに参加するのが適当と思われる人がいたら私に連絡してください。

今後の協力体制には、一人が中心になり、他の人が建設的な方法でその考えを援助することが必要と考えます。

B. 流星会議での意見

(1) より精度の高い観測を目指して: Sony α7 の利用

前田幸治さん、藤原康則さん、柳信一郎さんの例を紹介。柳さんがオーストラリア遠征で使用した f=24mm/F=1.6, ISO=160000 という条件では眼視以上のηみずがめ群が記録されている。SonotaCo ネット等では Sony α7 による 4K 動画の撮影も試行されている。

(2) 学生に対する支援

NMS では、会費、流星会議参加費について学生割引を実施している。さらに、積立金を利用して機器の貸し出し制度を設けてもよいのではないかという提案があった。

(3) 眼視観測

眼視観測は我々にとって基本であり、初心者にとっては新しい観測へのステップとなり、何よりも流星を

見るという楽しいチャンスを与えるものである。学生によるグループ観測は初心者によるものであるが、大量のデータから十分信頼できる光度分布・光度比が得られる。彼らにとって四分儀群、ペルセウス群、ふたご群は最適な流星群である。多数の流星を眺めることは楽しく、また、更なる観測への招待状となる。今夏のペルセウス群は月明の影響も少なく、豊富な出現も予想されるのでお勧めである。小流星群の観測には経路記入という特別な技能が必要になる。

(4)参加者による意見交換

テープからの記録起こしが簡単にできるとよい。CCD 観測で太陽光を避けるためのシャッターが必要だが、簡単にはできない。眼視、ビデオ、電波による同時観測を実施すれば新しい視点が得られる。流星からの輻射（低周波、電磁波音、電波）を観測することは興味深い。流星スペクトルの分析には化学、物理の専門家との協力が必要である。流星のヘッドエコー、前方散乱を複数の観測点で捉えて軌道を求めるという新しい電波観測を進められるとよいが、継続的な電波発信源が必要である。都市周辺の観測者には市街光をカットすることのできるメガネが出来るとよい。学生のグループ観測にはもっと勇気づけを与えるべきだ。輻射点が低い時の長経路流星は美しく、精度よく経路を求めることが出来る。高高度で発光する流星また超長経路の流星は興味深く、どのような物理現象が起きているのか研究の必要がある。光度比（質量分布）は重要であるが、写真、眼視、電波という異なった観測手段による数値をどのようにつなぐとことのできるのかわからない：それらの同時観測が解決手段だろうか？言語の障壁は大きく、アイデアを自由に交換することには困難がある。IMO の眼視観測はどのような状況なのだろうか？

ここで結論を出す必要はない。次回の MSS でも継続的に話題として取り上げていくことになる。

3. 3つのD判定の比較

流星（群）どうしの近縁度を示す値として用いられるものを総称してD判定と呼んでいる。一番よく知られているものが Southworth-Hawkins のものである。

$$|D_{SH}|^2 = (e_2 - e_1)^2 + (q_2 - q_1)^2 + \left(2 \sin \frac{I_{21}}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_2 + e_1}{2}\right)^2 \left(2 \sin \frac{H_{21}}{2}\right)^2$$

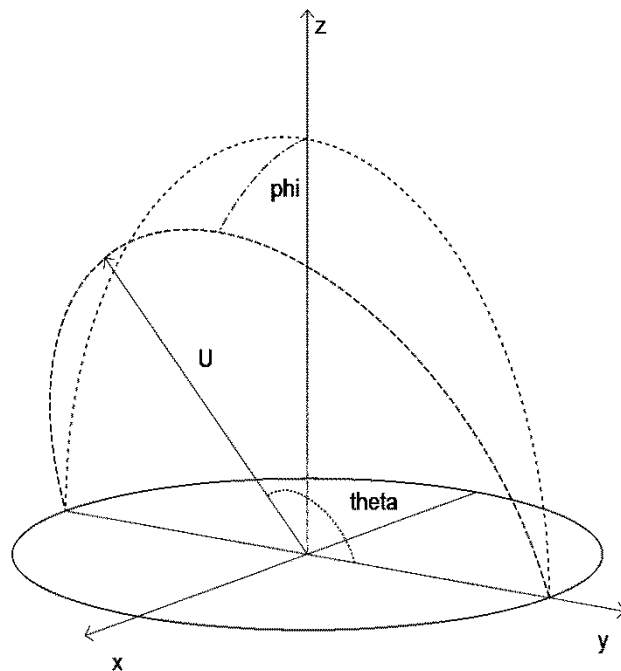
これを改良したものが Drumond によるものであるが、あまり使われていない。

$$|D_D|^2 = \left(\frac{e_2 - e_1}{e_2 + e_1}\right)^2 + \left(\frac{q_2 - q_1}{q_2 + q_1}\right)^2 + \left(\frac{I_{21}}{180^\circ}\right)^2 + \left(\frac{e_2 + e_1}{2}\right)^2 \left(\frac{\theta_{21}}{180^\circ}\right)^2$$

この両者は軌道要素を利用したものだが、観測されたデータ（輻射点、速度、出現時）によるものが Valsecchi, Jopek, Froeschle によって提案されている。

$$D_N^2 = [U_2 - U_1]^2 + w_1 [\cos \theta_2 - \cos \theta_1]^2 + \Delta \xi^2$$

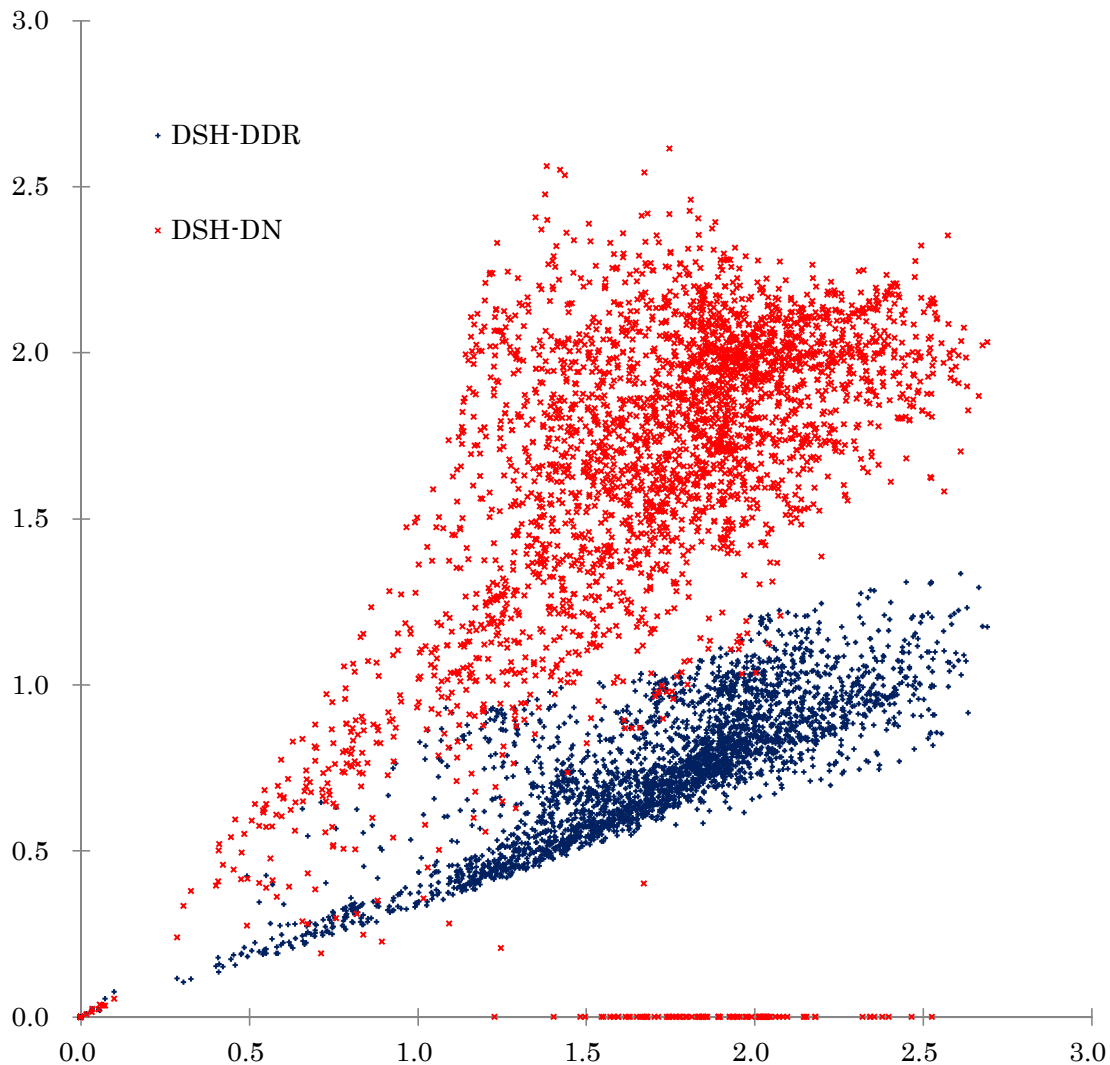
U は地心速度を地球の軌道速度で規格化したもの、 θ と ϕ という角度によって、輻射点の方向を表す（右図参照）。 ξ についての説明は省略するが、この項に ϕ と出現点の太陽黄経が含まれている。 w_1 は彼らの論文では 1 として扱われている。



3つのD判定を四分儀群の例で比較したものが次の表である。

D判定の数値、カタログコード、所属するとされる流星群の名称の順に示した。第1行の10QUA0という軌道データを基準にしたD判定の数値の小さいものから並べたもので、当然、10QUA0のD判定の値は0となっている。値の大きさに違いはあるものの、どの判定を用いても結果に大きな違いがないことがわかる。最後の D_R についての説明は後回しにする。

DMN			DDR			DN			DR		
0.000	10QUA0	Quadrantids	0.000	10QUA0	Quadrantids	0.000	10QUA0	Quadrantids	0.000	10QUA0	Quadrantids
0.017	10QUA1	Quadrantids	0.010	10QUA1	Quadrantids	0.008	10QUA1	Quadrantids	0.004	L1-171	Northern δ Aquarids
0.033	LE-46	Quadrantids	0.016	LE-46	Quadrantids	0.014	LE-46	Quadrantids	0.005	LE-787	Quadrantids
0.035	10QUA5	Quadrantids	0.019	S1-5	Quadrantids	0.022	10QUA4	Quadrantids	0.007	10QUA1	Quadrantids
0.053	10QUA4	Quadrantids	0.022	10QUA4	Quadrantids	0.024	10QUA5	Quadrantids	0.010	26NDA8	Northern delta Aquariids
0.057	S1-5	Quadrantids	0.024	10QUA5	Quadrantids	0.033	10QUA2	Quadrantids	0.010	770LCA0	lambda Caelids
0.066	10QUA2	Quadrantids	0.037	10QUA2	Quadrantids	0.033	L1-216	Quadrantids	0.010	164NZC3	Northern June Aquilids
0.073	L1-216	Quadrantids	0.054	L1-216	Quadrantids	0.036	S1-5	Quadrantids	0.012	26NDA4	Northern delta Aquariids
0.100	10QUA3	Quadrantids	0.075	10QUA3	Quadrantids	0.055	10QUA3	Quadrantids	0.012	342BP10	August Beta Piscids
0.286	S3-8	Quadrantids	0.103	LE-52		0.191	LE-44		0.012	LE-46	Quadrantids
									0.013	LE-239	Arietids



上の散布図は 10QUA0 と登録してある全ての軌道間の 3 つの D 判定の数値の相関を示したもので、横軸が D_{SH} 、縦軸が D_{DR} または D_N の値である。濃青色の+が D_{SH} と D_{DR} 、赤色の×が D_{SH} と D_N との関係を表している（モノクロの図でしかも記号が小さいが、上側に広く分布するのが×、下側が+である）。×が横軸上にかなりの数存在するが、これは、文献に示された計算式によると平方根内が負になるため、恐らく元の文献上で式が不完全な状態にあるためと考えられる。

D 判定の値が $D < 0.2$ （群判定の一般的な閾値）ではほぼ D_{SH} と比例関係にあり、上でみたようにどの判定でも同じ結果になることがわかる。一方、傾きが 1 の直線（つまり D_{SH} と D_{DR} または D_N がほぼ等しい）を想定すると、 D_{DR} はそれより下、 D_N はほぼこの直線に沿うが分散が大きくなっている。このような大きな D 値の領域を問題にすることはないので、物理的意味合いや式の明解さを抜きにして今でも D_{SH} が広く使われているのである。

最後に前ページに示した D_R を紹介しよう。これは D_N の第 3 項を除いたもので、輻射点の流星向点からの離角と速度の大きさだけを問題にした式である。これを流星群の判別に用いることはできないことは表からも明らかである。四分儀群とされている 10 群のうち、 D_N では 4 群しか表に出てこないで、みずがめ北群が二番目に登場している。

しかし、この D_N の面白さは、みずがめ北群だけでなく、最下行には昼間おひつじ群が出てくることである。ピンときた人もいるかもしれないが、四分儀群はみずがめ群や昼間おひつじ群と共通の母天体 96P/Machholz をもつのではないかという説がある。この D_N と D_R を提唱した著者たちはこの点に注目している。群判定に直接は使えなくても、共通の母天体をもつ可能性のある流星群を探索するには役立つ可能性もある。