HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	廣視角廻轉寫眞機による電光の研究
Author(s)	吉田, 順五
Citation	低温科學, 1, 105-132
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17388
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p105-132.pdf

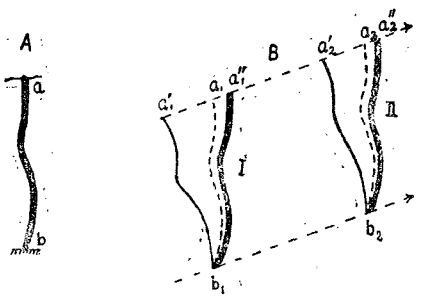
Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

廣視角廻轉寫眞機による電光の研究

吉　田　順　五

§1. 緒言　歷史的概括

靜止した寫眞機で電光の寫眞を撮ると同時に，何等かの方法で像が乾板の上を運動するやうに仕掛けをして，同じ電光の寫眞をとれば，電光の生成する過程を研究することが出來る．像を動かした結果，第1圖 B のやうな寫眞が撮れたとし，靜止寫眞機では A のやうに寫つたとする．但し簡單のために A にも B にも全く同じ二箇のレンズが光軸平行にして用ひられたと考へる．



第 1 圖

B の矢印は像の運動方面を示し，點線で表はした a_1b_1，a_2b_2 は實際には寫らなかつたのであるが，A の ab を形を變へずに平行に移動してそこに書き込んだものとする．これから直ちにわかることは，この電光は I, II の二つの放電から成り，各々の放電は，先づ雲から光の珠が下つて地面に達すると，直ちに再び强い光の珠が雲へ向つて昇ることによつて出來上つたと云ふことである．像の運動速度が I に於て v_1, II に於て v_2 であつたとすれば，光の珠が雲から地面に達するには $\overline{a_1'a}/v_1$, $\overline{a_2'a_2}/v_2$, 地面から雲へ昇るには $\overline{a_1a_1''}/v_1$, $\overline{a_2a_2''}/v_2$ なる時間を要したことも判る．乾板上での像の速度 v が大きければ，$\overline{a_1'a_1}$, $\overline{a_1a_1''}$ 等が長くなり，分解能が高くなるから，成可く v は大きい方がよいわけである．併し v を大きくするために像の鮮明さが損はれてはならない．像の鮮明さに缺ける所があれば，v を大きくしても分解能が大きくなるとは限らないからである．

L. Weber[1] は既に前世紀の終り頃，寫眞機を手で搖りながら電光の寫眞を撮つて，目には一本に見える電光も同じ路を通るいくつかの放電から成立つてゐる場合のあることを示した．寫眞機を搖れば像は乾板上を運動するが，手で搖るのでは運動が不規則で，正確な判斷が得られないことは云ふまでもない．Hamburg の Walter は，感應コイルによる火花の寫眞を高速で走る乾板にとつて火花の生成過程を研究した．そしてこの場合の火花は一度に出來上らず，極から出たいくつかの前放電が次々に路を拓きながら進んで遂に兩極を繋ぎ，その繋がれた路に沿つて主放電が起ることを知つた．電光も恐らく同じやうな過程を經て出來上るのであらうと云ふ豫想の下

北海道帝國大學低溫科學研究所報告第 11 號.

(1) L. Weber: Berichte d. Köngl. Akad. Berlin. 781 (1889).

に，Walter は一つの廻轉寫眞機[1] を作つて電光の組織的な研究を始めた．その寫眞機は焦點距離 12 cm のレンズをつけた中型の寫眞機を時計仕掛けで鉛直軸の周りに廻轉させ，乾板上で像を横に走らせるものであつた．廻轉速度は 35 sec に一廻轉と云ふ遲いものであり，電光の像が乾板の上を運動する速さは乾板の中央で 2.15 cm/sec であつた．これでは分解能が足りないので餘りはつきりした結果は得られなかつたが，それでも Walter 自身が豫想してゐたやうな電光の生成過程をある程度まで確かめ得た．分解能が小さいと云ふことの他にこの廻轉寫眞機には視角が狹いと云ふ缺點がある．電光はどの方向に起るか豫めわからないので，電光の出さうな方向に寫眞機を向けて待つてゐなければならない．そして電光が寫眞機の視角のなかに出れば寫るのである．寫眞機が廻轉して，レンズの方向が見當をつけた方向を通りすぎると，寫眞機を初めの位置に押し戻して再び廻轉させたのであるが，それにしても電光撮影の機會は一箇の靜止した寫眞機よりも著しく少いわけである．電光が遠い場合には，電光の出る範圍の視角が小さいので，一箇の寫眞機の視角のうちにそれを納めることが出來るが，近い場合には寫眞機の視角の外に現はれる機會が多くなる．云ふまでもなく電光の細い構造を見る爲には近い電光を寫すことが望ましい．而も近い電光の見られるのはせいぜい 20 分か 30 分の間である．この短い時間内に大部分の電光を取逃すことは重大な缺陷である．殊に電光には彷徨電光とか瑤電とかいふ珍らしい型のものが知られてゐるに拘らず，それらの廻轉寫眞が未だに得られてゐないことを想へば，視角の大きい寫眞機を作つて澤山の近い電光を撮ることに力を注がなければならない．

Walter が廻轉寫眞機を作つたのと同じ頃，英國の Boys[2] は廻轉する圓板の端にレンズを取付け，圓板と平行に置いた乾板の上に電光の像を結ばせる所謂ボイスカメラを作つた．電光の像は乾板の上を圓形の路に沿つて走るわけである．ボイスカメラではレンズを速かに廻轉させることが出來るので，分解能は著しく高くなるが，一つ具合の惡いことがある．電光としては落雷電光，即ち鉛直方向に長い電光を主な對象とする．この場合レンズが圓板の廻轉軸の上か下かにあるときに電光が寫れば，その像は横に走り，電光と直角の方向に像がずれて具合がよい．併しレンズが廻轉軸の横にあるときに電光が出ると，像はその長さの方向にずれることになつて，電光の各部分が互に重りあつて寫り，像の分解が困難になる．このカメラも亦視角が狹く，Walter の寫眞機とその點では同じ缺點を持つてゐる．併しボイスカメラでは乾板が靜止してゐるので，乾板の取換へが速かに行はれるし，その他の操作も簡便なことが大きな利點である．唯レンズと乾板との間に相對運動があるわけであるから，よほど精密に且つ頑丈に作らないと，レンズと乾板との距離に變動が起つて像を不鮮明にする危險がある．Boys はこの寫眞機で電光を撮らうと努めたが，作つてから二十數年經つた 1926 年に初めて撮影に成功したと云つてゐる．その後 Schonland を主として Malan, Collens 等がボイスカメラを用ひて南アフリカの Johannesburg

(1) B. Walter: Phys. Zeitschr. 3 168 (1920); Ann. d. Phys. 10 393 (1903).

(2) C. V. Boys: Nature. 118, 749 (1926).

に於て澤山の電光を撮影し，五回に亙つて Progressive Lightning[1] なる表題の下にその結果を發表した．それによつて電光の生成過程が非常に明かにされたのである．

上述のボイスカメラは乾板を固定してレンズを運動させたものであるが，逆にレンズを固定して乾板を運動させてもよいわけである．Boys はこの種の寫眞機も作つてゐる．[2] レンズを通つた光をプリズムで直角に曲げ，廻轉圓筒の內面に貼りつけたフイルムの上に像を結ばせる型のものである．米國の Workman, Beams, Snoddy[3] 等も同じやうな型の寫眞機を用ひてゐるが，これで撮つた寫眞を見ると像が餘り鮮明でない．レンズの像は平面內に出來るのに對して，フイルムの面が彎曲してゐることが主な原因であらう．ただボイスカメラのやうに電光の像が長さの方向に重なり合ふ心配はない．

Schonland の使つたボイスカメラでは，像の乾板上の運動速度が最高 1600 cm/sec であり，Workman 等のものではフイルム上の速度が 850 cm/sec である．最近日立製作所で作られた Boys の廻轉フイルム型の寫眞機では，この速度が 7000 cm/secに達してゐる．[4] 又これらの寫眞機より遙かに大きい速度を持つたものが，航空研究所の抜山式廻轉寫眞機である．これはレンズの後に小さい金屬製の鏡を置いて，光を直角に反射するやうにし，この鏡を空氣タービンによつて高速度で廻轉する型である．この寫眞機は頗る分解能が高いが，視角が非常に狹いと云ふ缺點がある．

像の運動速度を大きくして分解能を高めることは，もとより望ましいことではあるが，運動速度を餘り大きくすると，一つ不都合なことが起る．最初にも述べたやうに，電光は間歇的に起るいくつかの放電からなる場合が屢々あつて，これらの全放電が起つてしまふのに要する時間は，長い時には 1 sec 近くにもなる．普通の場合でも 0.1 sec 位である．何れの型の寫眞機を使ふとしても，全放電を逃さないやうにするには，像がフイルム上で循環した路をとるやうにするのが一番よい．併し，その場合像がこの循環した路を一巡りする間電光が續いてゐれば，初めに起つた放電と終りに近く起つた放電とが，乾板又はフイルムの上で入り雜ることになる．すると，どれが最初に出た放電か判らず，間歇放電の順番がつけられないことになる．尤も，多くの場合，第一の放電には特徵があるので，それを利用して見付け出すことが出來るが，その次にある放電が實際に第二の放電かそれとも終りに近い放電かは判らない．この缺點を避ける爲には，像の運動速度を遲くして，一巡りする時間を長くするか，又は出來るだけ路を長くするより他に方法はない．併し事實上路を長くとることは困難であるから，像の速度に制限が加へられる．それにし

(1) B. F. J. Schonland: Proc. Roy. Soc. London (A). 143, 654 (1934); 152, 595 (1935); 162, 175 (1937); 164, 132 (1938); 166 56 (1938).

(2) C. V. Boys: Nature. 124, 54 (1929).

(3) E. J. Workman. J. W. Beams & L. B. Snoddy: Physics 7, 375 (1936).

(4) 日本學術振興會第 9 特別委員會第 2 分科實測報告 (II). 53. (昭和 16).

ても速度としては，Schonland や Workman が用ひた程度のもの，即ち 1000 cm/sec は是非共必要である．Schonland の行つたやうに，二つのボイスカメラを備へ，一方は速かにまはし，他方は遲くまはして，前者で充分な分解能を得，後者で放電の順番を判定すると云ふ方法をとることも出來るが，なるべくならば，一つの機械で間に合はせる方が便利であることは云ふまでもない．

以上，從來用ひられてゐたいろいろな電光分析用の寫眞機の概觀を述べ，各々について特徵，缺點をあげて來たが，總てに共通し而も重大な缺點は，視角が狹いと云ふことである．それで第一にこの共通缺點を除き，而も各々の持つ缺點をも出來るだけ取除いた寫眞機を作ることを試みた．次にその爲に滿すべき條件を列記してみると，

（1） 視角が廣いこと．

（2） 分解能が高いこと．

（3） 像が鮮明であること．

（4） 一つの電光に屬するいくつかの放電の初めの部分と終りの部分とが入り雜らないこと．

（5） 電光の像の運動方向が，電光の長さの方向に直角であること．

望ましい條件はこの他にも澤山あるが，先づこの五つの條件が滿されてゐれば，大した不都合は起らないと思はれる．それによつて考案した廣視角廻轉寫眞機を次節に說明する．

§ 2. 新しい廣視角廻轉寫眞機の設計

澤山の寫眞機を一定の角度だけずらせて，次々に鉛直軸のまはりに取付け，どの方向も必ず何れかの寫眞機の視角內に入るやうにすれば，視角は全體として 360° になる．この鉛直軸を廻轉すれば，Walter の寫眞機と全く同じ法式で電光を分析することが出來，(1) の條件と共に (5) の條件も滿される．寫眞機の視角は普通 40° 位であるから，このやうにするとすれば 10 箇の寫眞機を必要とし，普通ならば尨大な裝置になる．併し近頃は小型の寫眞機で優秀なものがあるから，それを用ひれば，製作の上でも又取扱ひの上でも大した困難は生じない．Walter の寫眞機に於けると同樣，レンズとフイルムとが相對運動をしないから，像は寫眞機を靜止させた儘撮るときと全く同じ程度に鮮明に寫る筈である．乃ち (3) の條件も滿される．

實際に用ひた寫眞機は焦點距離 5 cm のレンズをつけたライカカメラであつて，これは視角が 40° であるから，36° の角度をつけて鉛直軸の周りに取つけると，隣り同志の寫眞機の視角が 4° づゝ重なり合ふ．廻轉速度は 1 sec に五回，即ち 1 回轉 0.2 sec に擇んだから，大抵の電光は 1 回轉する間に完了し，電光の初めの放電と終り近くの放電とが雜り合ふ危險は少くなる．即ち (4) の條件も滿足されてゐる．最後に (2) の分解能についてであるが，像がフイルム上を走る速さを計算すると 5 cm（焦點距離）×2π×15/sec（廻轉速度）＝157 cm/sec となる．これはフイルムの中央部に於ける値で，フイルムの端近くなれば 10% 程値が大きくなる．所がライカカメ

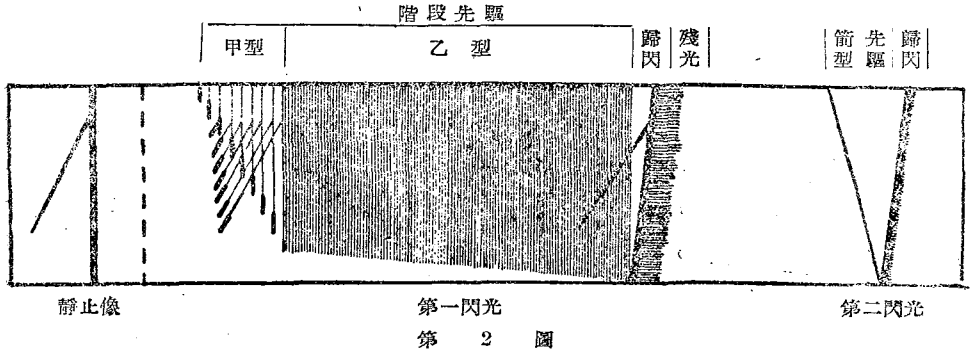
ラの像は非常に鮮明であつて，原圖を 6 倍に引伸ばしても鮮明さに少しも缺ける所がない．それで 6 倍に引伸したものについて考へれば上の速度は

$$157\times6=940\ \mathrm{cm/sec}$$

となり，Schonland, Workman 等の用ひた寫眞機に於ける速度と同程度になつて，分解能としても充分な値が得られるのである．

この寫眞機は日本學術振興會第九特別委員會の雷雨協同觀測の一つの仕事として製作し，昭和 16, 17 年の夏に實際に用ひて可成りの結果を納めることが出來た．

此の廻轉寫眞機で電光を撮ると同時に，同じ電光を他の靜止した寫眞機によつて寫し，兩方の寫眞を比較して，後者に對する前者の變形を求め，それから電光生成の時間的經過を求めることが必要である．ところがこの比較をする場合に一つの困難がある．ボイスカメラではレンズがどの位置にあつても，電光から出た光はレンズの光軸と常に同じ角度を保つてゐるので，乾板上で位置の變化は起つても，形の上の變化は生じない．それ故，全く同一に出來た二つのレンズを用ひ，光軸を互に平行に保ちつつ，一方を廻轉用とし，他を靜止用にすれば，二つのレンズによる像の間に認められる變形は，一方のレンズが運動してゐた爲だけによつて現はれたものである．即ち，丁度第一圖に示した場合に當るのであつて，それを用ひて直ちに電光の生成過程を求めることが出來る．所が，こゝに用ひた廣視角廻轉寫眞機では，電光の方向と，レンズの光軸の方向とのなす角が廻轉寫眞機と靜止寫眞機とに於て一致することは殆どない．即ち一方で例へばフイルムの中央に寫れば，他方では端の方に寫るやうな場合が多い．それで兩方の寫眞の間の變形は一方の寫眞機が運動してゐる爲にのみ生じたものでない．即ち靜止寫眞機ではフイルムの中央に，廻轉寫眞機ではフイルムの端近くに電光が寫つたとすれば，廻轉寫眞機の像は，靜止寫眞機の像よりも幅が廣くなる．この像の歪みによる變形に對しては，光軸と電光の方向との間の角を求めて，計算によつて補正を施す必要がある．しかし澤山の寫眞機を取扱ふ場合，レンズは皆一樣ではなく，焦點距離や收差にも多少の違ひがある．殊に各々の寫眞機は水平方向より少し上の方へ仰がせてあるので，その爲にも像に歪みが出る．それで補正を加へることは不可能ではないが，非常に困難になる．併しこの困難は Schonland によつて明かにされた電光の構造を利用するこ



第　2　圖

とによつて，避けることが出來るのである．

Schonland によれば，第 2 圖左端にあるやうな電光を，乾板上で像を水平に右の方へ走らせながら撮つたとすれば，破線の右側に描いたやうな形が寫る．この圖に對する說明は前揭の Schonland の論文，及び近頃雷について書かれた多くの書物にも詳しく書かれてゐるので，ここには說明を省く．各部の名稱は中谷博士の著書「雷」[1]に據つた．ただ第 2 圖では歸閃を可成り傾けて描いてあるが，これは見易くする爲であつて，實際はもつと鉛直に近いのである．先に電光はいくつかの間歇放電からなると云つたが，その「間歇放電」は本圖の「閃光」に當るわけである．以後は「閃光」を用ひることにする．

珍らしい例外として，歸閃がなく先驅だけを持つ電光もあげられてはゐるが，Schonland は電光は常に第 2 圖の構造を示すと云ふのである．ただ，階段先驅で乙型の部分を缺くものも澤山にあり，むしろその方が多いと云はれてゐる．併し，後に說明するやうに，大體は一致してゐるが或る點でこれと異る電光がある．けれども各閃光が常に先驅と歸閃との二つの部分からなることは間違ひない．歸閃は光が强く，しかも生成速度が非常に速い．Shonland によれば，歸閃が雲に向つて昇る速さは $2.0\times10^{9}\sim1.4\times10^{10}$ cm/sec で 3.5×10^{9} cm/sec なる値が最も頻繁に現はれる．電光の長さを 1 km とすると，3.5×10^{9} cm/sec を用ひて，歸閃が地面から雲に達する時間は 3×10^{-5} sec となり，これは廣視角廻轉寫眞機の寫眞の上で $940\times3\times10^{-5}=0.25$ mm なる長さに當る．即ち歸閃はこの廻轉寫眞機で寫しても像の運動速度の爲には，極めて僅かな變形を示すに過ぎない．實際計算によつて補正を施して，靜止寫眞機による寫眞と比較しても，殆ど變形が認められない．これに反し，先驅の速度は歸閃の速度の $^{1}/_{10}$ から $^{1}/_{100}$ 程度の遲いものである．それ故，先驅の速さ又は時間的經過を求めるに當つては，廻轉寫眞機に於ても歸閃は全く變形してゐないと見なして，それを標準にとることが出來る．換言すれば，第 1 圖の a_1 と a_1''，a_2 と a_2'' とが一致することとなるのである．第三節以下で先驅の時間的經過を示す數字は，總てこのやうにして求めたものである．

ライカカメラは高價なものであるから，澤山のカメラを使ふとすれば，大變な金額になる．それで觀測期間だけ借用して使つた．[2]

§ 3. 廣視角廻轉寫眞機の構造

寫眞 No.67 の左側のものが，新製作の廣視角廻轉寫眞機である．鑄鐵でヨ型の丈夫な枠を作り，それに鋼鐵の棒をボールベアリングを介して縱に取付ける．これが廻轉軸である．棒には背中合せに二箇づつ五箇所都合十箇の切込みを付け，相隣る切込み箇所の間の角度を 72° にしてある．この十箇の切込みにライカカメラを挿め込むと，各々は互に 36° の角度を持つことになる．カ

(1) 中谷宇吉郎： 雷．岩波新書 46. 140 (昭和 14).

(2) 所藏のライカカメラをこの目的の爲に貸與された井上，梅田，加藤，河鰭，坂岸，里，佐藤，園部，戶田，中谷，花島，吉田，吉野 の諸氏の厚意に對し，筆者は厚く感謝する次第である．

メラは二箇づつ背中合せになつてゐるので，カメラの前を金屬板で覆ひ，その覆ひをボルトで結び合はせると，取付けが簡單で且丈夫である．寫眞によく見えるやうに，カメラは皆少し仰がしてあるが，仰ぎの角度は 7° である．

廻轉は小型のコミユテーターモーターによつて行ひ，電源には 50 V の電池を用ひた．電池を用ひたのは，雷雨のときは大抵停電して外から交流電力を得られないことが第一の理由であるが，電池を使つた方が廻轉數に變動がなくて都合がよい．

寫眞器のレンズは Elmar で，焦點距離 5 cm，開口數 $1/3.5$ である．絞りは全開で用ひた．廻轉すると，遠心力の爲レンズが痛まないかと虞れ，成可く輕い Elmar レンズを擇んだのであるが，1 sec 5 回の廻轉數に對しては何の故障も起らなかつた．併し一般に光の弱い先驅を撮る爲には，レンズの開口數はもつと大きい方が望ましいのであつて，出來るならば Summar レンズの開口數 $1/2$ を用ひた方がよい．一度試みに Summar レンズをつけたカメラを取付けて廻轉して見たが，レンズが狂ふやうなことはなかつた．

フイルムは粒子が細かく感光度の高いものを選び，Agfa の Superpan，富士の Superpan，Eastman の Plus X を用ひた．

十箇のカメラのシヤツターの開閉は一度に行ひ得るやうにしてある．寫眞No.67 の上部の，鐵枠と廻轉棒との境に小さい把手が見えるが，これをまはすと聯動式に全部のシヤツターを廻轉中に於ても開閉することが出來る．撮影は夜に限られるが，先づ廻轉を始めてからシヤツターを開き，その儘電光が見えるまで待つ．電光が見えたら直ちにシヤツターを閉ぢて廻轉を止め，フイルムを捲いて，再び廻轉を始め，シヤツターを開くのである．このシヤツターを閉ぢてゐる間は一分間足らずである．フイルムは各カメラに 36 枚分入れてあるから，一つの雷雨の途中で入れ換る必要は殆どない．

撮影は鐵筋コンクリート三階の建物の陸屋根に避雷針を備へた小屋を作り，そのなかで行つた．廻轉數は，前述の如く，常に 1 sec 間に 5 回とした．

§4. 附屬裝置

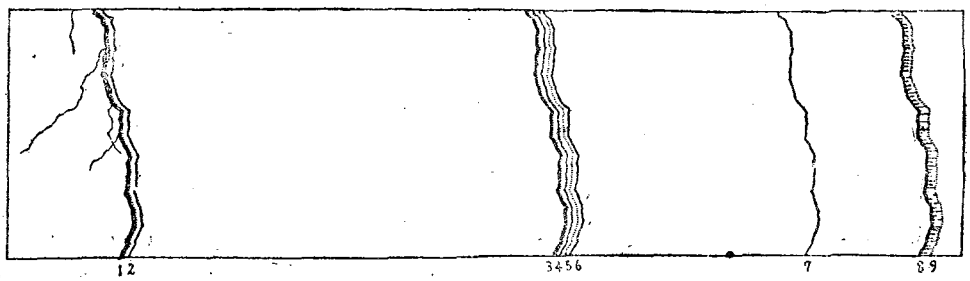
靜止寫眞機．寫眞 No.67 の右側に示してある．鐵棒に 36° づつの角度を持たせて三箇のライカカメラを取付けてあるので，全體としての視角は約 110° である．廻轉寫眞機の視角 360° に對して視角が小さいが，小屋の壁や柱に邪魔されて凡ての方角を全部利用することは出來ないし，二人の觀測者で監視し得る範圍は餘り大きくないので，實際上は 110° の視角があれば大抵充分である．併し靜止寫眞機には寫らずに廻轉寫眞機には入つた電光もいくつかある．觀測者は二人で，一人は廻轉寫眞機の操作にかかり，他の一人は靜止寫眞機と時刻及び電光雷鳴時間の記錄とを受持つた．

寫眞 No.68,69,70,71 は上の寫眞機で得られた距離 1 km 以內の近い電光の寫眞の例として掲げたものである．これを電光 1 とする．寫眞 No.68 は靜止，69, 70, 71 は夫々十箇の廻轉カメラの

うちの第9番目，第4番目，第7番目のカメラにとれた寫眞である．此の電光は 9 箇の閃光から成り，0.2 sec 近くにまで亙つてゐるので，始めの閃光と終りの閃光とが接近してゐて，§1 の (4) の條件が滿たされなくなつてゐるが，このやうに特に放電時間の長いものは稀れなのである．幸に 9 箇の閃光のうち枝を持つ閃光は一つしかない．一般に第一閃光が一番枝を出し易いので，この枝のある閃光を第一閃光と判定し，寫眞の下に示したやうに閃光の順番を知ることが出來た．各閃光の間の時間は下記のやうになる．

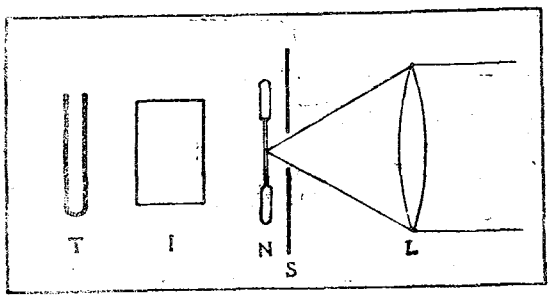
第 1～第 2	2.11 millisec	第 2～第 3	103 millisec
第 3～第 4	2.10 〃	第 4～第 5	0.81 〃
第 5～第 6	1.25 〃	第 6～第 7	58 〃
第 7～第 8	28 〃	第 8～第 9	2.55 〃
	(第 1～第 9	198 millisec)	

第 1 閃光から第 9 閃光までを一列に時間についても正しい比例をとつて表はすと第 3 圖のやうになる．



第 3 圖　電 光 1.

時間標識寫し込み裝置．廻轉寫眞機の廻轉數を正確に記錄しておく爲に，フイルムの上に時間標識を寫し込んだ．第 4 圖の T は振動數 100/sec の電磁音叉である．これから出る間歇的電流によつて感應コイル I を介してネオン管 N を點すと，ネオン管は $^1/_{100}$ sec 毎に光る．口徑 8.5 cm の寫眞用レンズ L の焦點面内にネオン管を置き，L を通過した光を廻轉寫眞機に當てると，カメラは ∞ に焦點を合はせてあるから，フイルムの上にネオン管の點がはつきり結ばれる．寫眞 No.72 は時間標識の一例で，點の間が $^1/_{100}$ sec に相當する．



第 4 圖

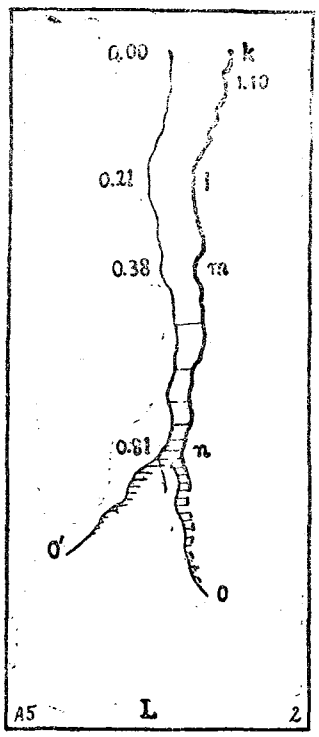
電光の見えた瞬間にシヤツター S を 0.2 sec 開いて時間標識を寫し込むやうにすれば，その

時に於ける廻轉速度を正確に求めることが出來る．併し先にも述べた通り，電池から電力をとつてモーターを廻轉してゐると，廻轉數に殆ど變動が見られない．それで時間標識の寫し込みは，觀測開始のときと，終了のときとの二回だけ行へば十分であつた．

觀測結果

觀測は昭和 15 年から 17 年にかけて三回の夏に行つたのであるが，この廣視角廻轉寫眞機を使ひ始めたのは第 2 年目からである．第 2，第 3 年目の兩夏は雷雨の數が少なかつたにも拘らず，多數の寫眞をとることが出來た．次節以下にそのうちから重要な點を拾ひ出して報告する．何雷は全部熱雷性のものであつた．

廻轉寫眞の歸閃は非常に明るく寫るが，先驅の部分は一般に弱い．それで寫眞版にすると先驅はよく出ないので，寫眞と共にそのスケツチを凸版で示した．寫眞でも凸版でも，電光の像の運動方向はすべて左から右に向ふやうにとつてある．凸版の先驅に沿つて數字が書込んであるが，これは 0.00 と印した點からその點まで先驅が進むのに要した時間を $^1/_{1000}$ sec＝millisec を單位として表はしたものである．例へば，第 6 圖の e 點に 0.56 とあるが，これは先驅が上方 0.00 なる印のある b 點から e 點に迄進むのに 0.56 millisec を要した事を示す．歸閃の上端に 0.81 と書込んであるが，これは先驅が b 點を出てから 0.81 millisec の後に歸閃が現はれたことを示すのであつて，§2 に述べたやうに，歸閃は全體が同時に出來上つたと見做すのである．



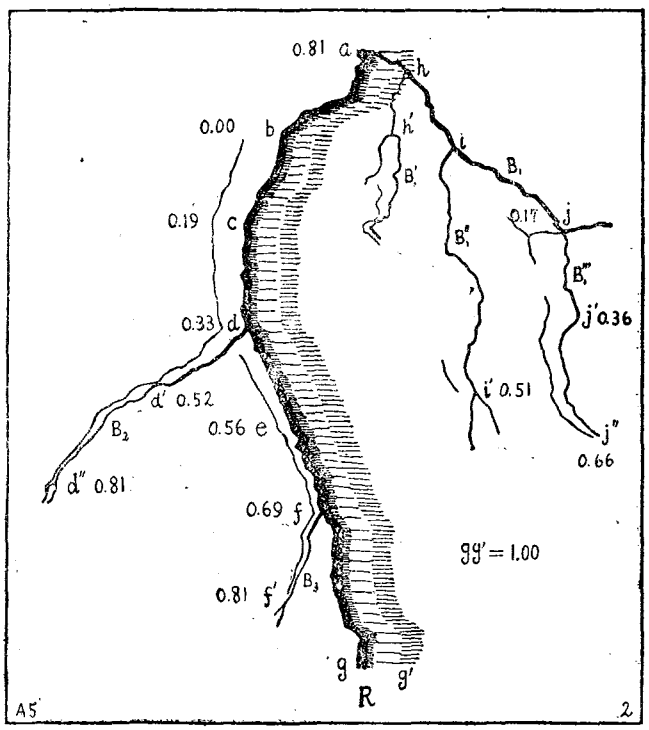
第 5 圖　電光 2，單一閃光

その他 $gg'=1.00$ と云ふやうな書込みがあるが，これも g と g' と間に 1.00 millisec の時間が經過したことを表はすのであつて，凸版中時間に關する數字はすべて millisec を單位とするものである．

§ 5. 第一閃光の先驅（電光 1，2，3,）

第 2 圖に示してある通り，Schonland によれば第一閃光の先驅には甲型と記した階段狀をなす部分がある．一般には乙型と書いた部分がなく，全體が甲型の場合が寧ろ多いが，乙型は甲型の階段が非常に詰つたものである．

第一閃光の先驅は，第二閃光以後の先驅に比べると光が弱く，少し遠方の電光ではよく寫らなかつたが，撮影に成功した 1 km 前後の近距離の電光 3 本に可成り明瞭に認めることが出來た．そのうちの一つが寫眞 No.73 第 5, 6 圖の電光 2 である．第 5 圖の電光 L は第 6 圖の電光 R の左の方に，R より 0.48 millisec 遲れて出たものであつて，恐らく二つは上の方で連絡があるのであらう．それで R と L とは一つの電光と見る．寫眞には電光 L を示さなかつた．

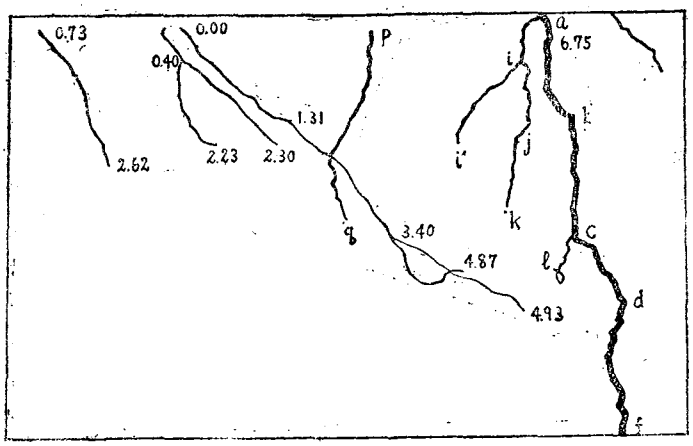


第 6 圖　　電光 2, 單一閃光

この電光と他の二つの電光のうちの一つとは單一電光，即ち第二閃光以下を伴はないものであるが，もう一つの第三の電光は 9 個の閃光から成る寫眞 No. 68, 69, 70, 71 の電光 1 である．前の二つは，それがその儘第一閃光であるが，第三の電光の第一閃光を取出して，これら三つについて先驅を見るのに，何れも第 5，第 6 圖に示された通りの連續した線で階段構造は認められない．

Schonland によると甲型の階段先驅の各階段の間の時間は 0.03～0.09 millisec，一つの階段の長さは 10～200 m である．0.03～0.09 millisec は吾々の寫眞の上の長さとして 0.28～0.85 mm となるし，又電光の距離を 1 km とすると 10～200 m の長さは寫眞の上に 3.0～60 mm となつて現はれる筈であるから，甲型の先驅ならば，必ずその構造が明瞭に認められる筈である．乙型のものであれば階段構造は認められないかも知れないが，Schonland によれば，甲型の先驅が地面近く達してから乙型に變るのである．ここに撮つた寫眞では電光の上端が寫つてゐないが，それでも半分以上は少くとも撮れてゐる筈である．若しこれが乙型の階段先驅であるとすれば，既に雲を出るときに乙型として出發したものと考へなければならない．乙型階段先驅の速度は甲型の速度に比べて著しく小さいのであるが，甲型の進行速度で最も頻繁に現はれる値は 1.5×10^7 cm/sec と云はれてゐる．それに對して第 6 圖の電光 R の先驅の速さは 5×10^7 cm/sec 位で甲型先驅の速度としても速い方の値を示してゐる．尙，乙型先驅であれば，廻轉寫眞に於て，先驅と歸閃の間が相當感光する筈であるが，上記三つの電光では，多少の感光は認められるとしても，非常に弱いものである．この三つの電光の他に少し遠く，4 km の所に出た電光であるが，空氣の條件がよくて非常に明瞭に第一閃光の先驅を示した寫眞がもう一枚得られた．それを寫眞 No.74 と第 7 圖に示す（電光 3）．これでは電光の全長が寫つてゐるが，先驅はやはり連續した細い線で，先驅と歸閃は全く感光してゐない．この先驅の速さは 10^7 cm/sec であつた．

再び寫眞 No.73 に返つて見るに歸閃は幹の部分で強い殘光を示し，殘光は細い縞をなしてゐる．



第 7 圖　電光 3, 單一閃光

このやうな縞の出るのは，先驅が細かい階段構造を持つことを間接に示すものでないかとの疑ひが起る．實際，縞の幅の程度の階段であれば，分解することが不可能である．併し殘光は幹にのみ現はれてゐるのであつて枝には全然認められず，而も枝の歸閃は滑かな連續した細い線で斷續的な構造を全然示さない．Schonland によれば，枝の歸閃は幹に於ける歸閃の殘光のうち初期に屬するものの一部が延長して來たものであるから，若し先驅の階段構造の爲に殘光に縞が現はれるものならば，同じ構造の先驅を持つ枝の歸閃にも縞が現はれるであらう．かくして殘光に現はれる縞は先驅の階段構造とは關係のないものと考へられる．

以上四つの例について，而もこれは第一閃光の先驅を明瞭に寫し得た總ての場合であるが，甲型階段狀構造は認められず，尙乙型と考へるのも無理な條件が多いのである．

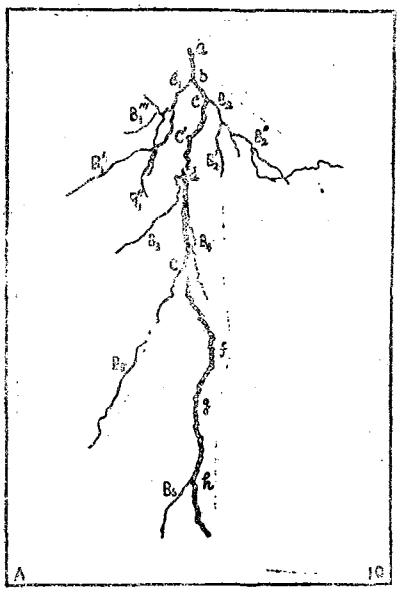
第二閃光以下の先驅はもう少し遠方の電光についても澤山に撮影されたが，それは何れも Schonland の云ふ箭型先驅で速度も速い．そして，上に述べた第一閃光の先驅も，寫眞に現はれた限りでは結局箭型先驅で，唯速度が小さく光が弱いと云ふ點が違ふに過ぎない．併し，後に §11 で說明するやうに，この先驅は性質上箭型先驅とも異るやうである．それで假に連續先驅と呼ぶことにする．或は，遠方の電光で，光が弱い爲に階段先驅があつても寫らなかつたものもあるかも知れないが，少くとも第一閃光に連續先驅を持つものがあることは確かである．尙，第一閃光の生成過程については，次節に述べるやうに，Walter が考へた方式をとるものが明かに存在するのであつて，その意味から云つても，Schonland の如く第一閃光は必ず階段先驅を持つと考へるのは正しくないであらう．

§ 6. 間歇的前放電によつて生成する電光（電光 4, 5）

§1の初めに述べたところの Walrer が豫想し，且ある程度まで觀察し得た電光のはつきりした例が得られた．Walter の寫眞機は分解能が餘りに小さいので，それと示された寫眞を見てもあまりはつきりとはその構造が判らない．併し，こゝに得られたものでは，次に說明するやうに，それが非常に判然としてゐるのである．

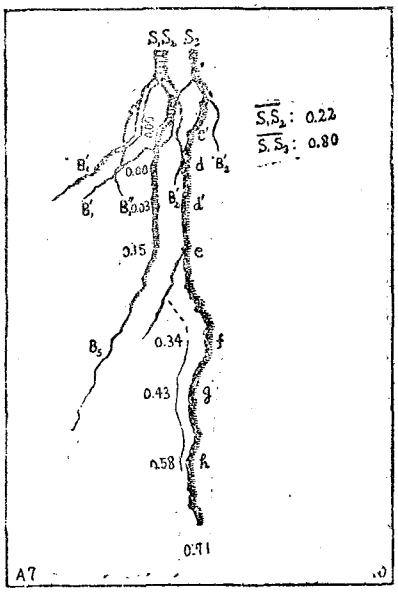
その例を寫眞 No.75 及び寫眞 No.76 に示すが，その內 75 は靜止寫眞，No.76 は第一閃光で第二及び第三閃光もあるが寫眞は略す．この電光を電光 4 とする．第 8 圖，第 9 圖．第 10 圖，

第 11 圖は夫々靜止像，第一閃光，第二閃光，第三閃光の模寫である．第一閃光を見るに，これは三つの放電からなり，S_1 に於て枝 B_1', B_1'', B_2' が出來上り，次に S_2 に於て，像は少しぼやけてゐるが，枝 B_1' と B_5 とが完成してゐる．幹 $ab\cdots h$ について考へれば，S_1 によつて b まで，S_2 によつて e まで伸びたわけである．S_3 に到つて初めて幹は地面に達するが，一番下の枝 B_6 は未だ出來てゐない．S_3 は普通歸閃に見られる通りの強い光を出してゐるが，S_1, S_2 も可成り光が强く，箭型先驅の光以上で，むしろ歸閃の光の弱いものの程度である．S_1S_2 間は 0.22 millisec, S_2S_3 間は 0.58 millisec である．

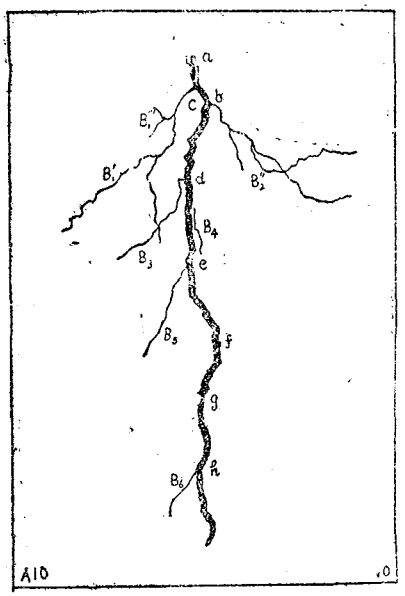


第 8 圖　電光 4, 靜止像

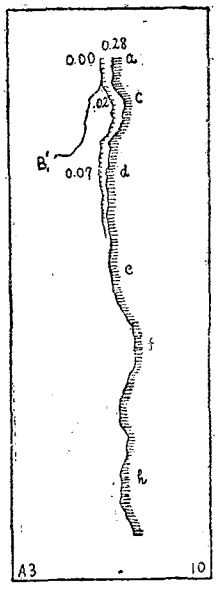
S_1, S_2 の下端は大氣中で終つてゐるが，通常の電光の枝も亦大氣中に終つてゐる．そして電光の枝では，歸閃は先驅を追つて走るのであつて，幹に於けるとは逆に歸閃は下向きに進むのである．ここで電光の枝と同様，S_1, S_2 も先驅と歸閃とからなり，寫眞に寫つたのはその歸閃だけであると考へることも出來る．併し幹の下の方の部分 fh 間に極めて弱くはあるが連續先驅が認められ，それを上の方に延長すると S_2 の e 點に達する．即ち S_2 は e 點に於て主として B_5 の方へ進んだが，一部は分れて連續先驅として地面に達したと見られる．それ故，S_2 は歸閃と見まがふ程光は強いが，先驅的性質のものと見



第 9 圖　電光 4, 第一閃光



第 10 圖　電光 4, 第二閃光



第11圖 電光 4, 第三閃光

るべきであらう．即ち S_2 は，從つて S_1 も亦，それ自身が先驅なのであつて，別に先驅は持たないと考へる方が至當である．尙 S_2 について c' 點と d 點との間には時刻の差がなく，速度が非常に速いことを物語つてゐる．先驅としては餘りに速度が大きいわけであるが，これは，寫眞や圖には表はされてゐないが，S_1 が既にこの邊りにまで達してゐて，ここまではその拓かれた路を辿つた爲であらう．d 點から下では時刻が遲れてをり，de 間は下向きに 10^8 cm/sec の速さで通過してゐる．この邊りは像が錯綜してゐて，この速度の値に正確を期し難いが，10^8 cm/sec は歸閃の速度の十分の一であり，箭型先驅の速度である．この速度の値からしても，S_2 は歸閃とは考へられない．fg 間の連續先驅の速度は 7×10^7 cm/sec である．S_3 は先驅でなく歸閃に相違ない．その全道程を已に一度先驅が走つてゐるし，靜止寫眞と比較しても殆ど變形が見られない程速度が非常に速いからである．

S_1，S_2 の先驅的性質に關しては，雲から出て地面に達しない電光には歸閃を缺く，と云ふ Schonland の記述を裏付けとして引用することが出來る．併し，これには例外があつて，鳳氏の撮影された地面に屆かない電光は明瞭に先驅と歸閃とを示してゐる．(1)

かくして，この電光は Schonland の型式に從つて出來たものでなく，Walter が豫想したやうに，いくつかの前放電が雲から次々に路を推し進めながら間歇的に出て完成されたものである．Schonland の型式にしても，階段先驅の各の階段を一つの前放電と考へれば，Walter 型で前放電の數が著しく多くなつたものと解釋することが出來る．併し前放電の數や光の强さが餘りにも異り，且一本の前放電の構造も異ることを思へば，兩者は別々の型として考へる方がよいであらう．Schonland 型の先驅の一つの階段は，雲から出た非常に光の弱い線で先端に光の强い棒狀のものをつけてゐる．

電光でなく人工的の長い火花については，Walter の古い研究にしても Allibone, Meek(2) のにしても，前放電は先端に叉に分れた刷子放電を持ち，電極と先端とは可成り光の强い細い線で結ばれてゐることを示してゐる．寺田，中谷，山本三氏による系統的研究は，不均整電場の長い火花に關して深い探りを入れたものであるが，その中に火花の飛ぶ路は刷子前放電によつて作られた網目型の路のうち，一番通り易い路筋を擇ぶと云ふことが書かれてゐる．(3) 又，中谷，山崎兩氏はウイルソン霧函によつて前放電を研究され，短い火花ではあるが同じく不均整電場の場合について，刷子狀前放電に更に先立つ放電のイオン分布が，上に述べた前放電と同形で更に複雜な形をしてゐることを示された．(4) ここにあげた電光はこの不均整電場に於ける電氣火花の出來

(1) 鳳　誠三郎：日本學術振興會第九特別委員會に於ける發表（昭昭 17 年 10 月）．

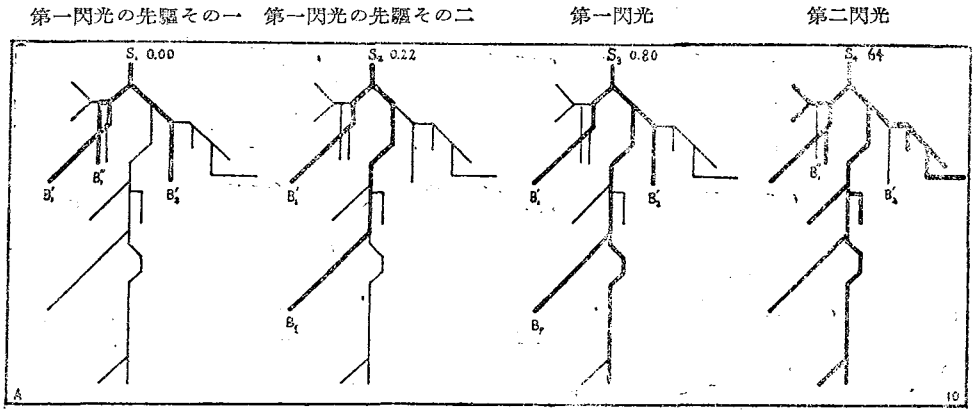
(2) T. E. Allibone & J. M. Meek: Proc. Roy. Soc. London (A). 166, 97 (1938); 169, 246 (1938).

(3) T. Terada, U. Nakaya & R. Yamamoto: Scient. Pap. I. P. C. R. 13, 207 (1930).
T. Terada: Scientific Papers. IV. 203.

(4) U. Nakaya & F. Yamasaki: Proc. Imp. Acad. Japan. 10, 403 (1934); Proc. Roy. Soc. London (A). 148, 446 (1935).

かたとよく一致してゐるのである.

この電光では第一閃光の後 64 millisec を經て第二閃光, 更に 49 millisec を經て第三閃光が出てゐる. 第二閃光には B_1'', B_2' を除いて全部の枝が見える. 下端の枝 B_6 も第二閃光に於て始めて現はれた. 第三閃光は僅かに枝 B_1' を持つだけである. 第一閃光を示す第 9 圖は複雜であるから, 見やすくするために電光を模型的に書き直して第 12 圖に示す. 電光の全體を細い線で書き S_1, S_2, S_3 及び S_4 に於て現はれた部分を夫々太い線で塗つてある.

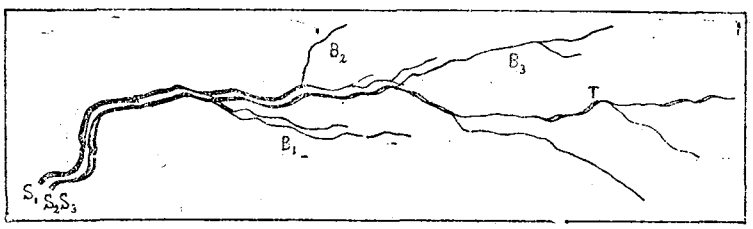


第　12　圖　電　光　4

この第 12 圖で明かに見られるやうに, この電光では先づ大氣中に網目狀の放電路が出來て, そのうちの通り易い路を選んで次ぎ次ぎと電光がのびて行つたものと考へるのが至當である. 即ち寺田及び中谷の不均整電場に於ける電氣火花生成の理論を裏付ける電光が存在することを確めたことになる.

電光が電氣火花と同樣な型式で出來上ると云ふことは自然な豫想であるが, 實際にはかゝる場合が比較的稀である. § 5 で述べた電光はすべて連續先驅を持つてゐたし, 撮影した他の澤山の電光についても間歇的前放電はこの例以外には認められなかつた. 間歇的前放電は光が强いから, 遠い電光でも寫る筈である.

併し花島潔氏が寫眞機を手で搖りながら撮つた雲間電光に, 間歇的前放電のもう一つの例を見ることが出來る. 寫眞 No.77 及び第 13 圖がそれである. 手で搖つたものであるから, 像の運動方向は確實には判らないが, 左上から斜に右へ向ふのであらう. 第一放電 S_1 で, 枝 B_1 及び B_2 と B_3 の中間までとが

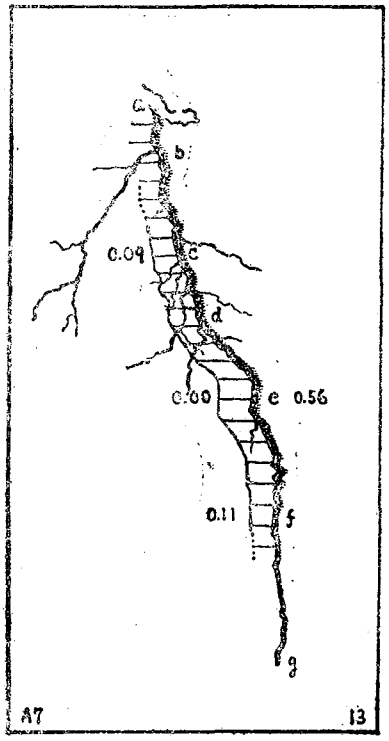


第　13　圖　電　光　5

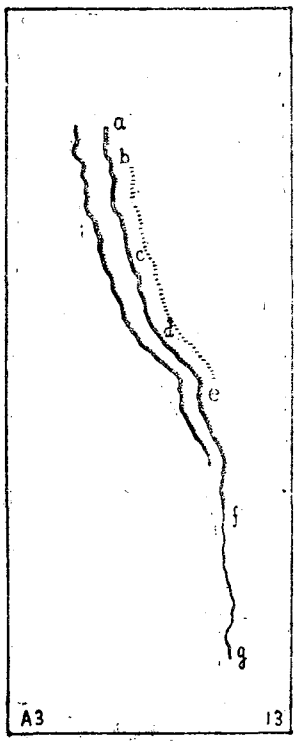
出來上り，第二放電 S_2 は B_1, B_3 を更に進めた上，T 枝に沿つてその途中まで達してゐる．S_2 には B_2 がない．第三放電 S_3 は枝を出さず T を更に進めて終つてゐる．この珍しい寫眞を貸與され，且つ印刷に附することを許可された花島潔氏の好意に感謝する次第である．

§ 7. 電光の中央部から發して上下の方向に進む先驅 帶狀先驅（電光 6）

この型の一例として二つの閃光からなる電光，即ち寫眞 No.78 及び No.79 について說明する．No.78 の模寫なる第 14 圖が第一閃光，寫眞 No.79 の模寫の第 15 圖が第二閃光である．この電光を電光6とする．第一閃光を見ると，中央部の $cdef$ 間に明瞭な先驅が認められ，その上及び下は次第に薄くなつてゐる．この先驅は箭型先驅のやうに一本の線として寫らず，帶の形に歸閃の左側に沿つてゐるが，その左端は非常にハツキリした緣となつてゐる．箭型先驅と歸閃との間が感光してゐる場合はさして珍らしいものではなく，若しこの感光が强ければ丁度この場合のやうに帶狀となる筈である．併し一般にこのやうな場合，そこに歸閃の殘光に似た橫縞が見られ，箭型先驅は一本の强い線としてその左端に區別して見出される．こゝにあげたものにも多少の縞模樣が見られるが，普通の場合に比べると著しい一樣性を示し，帶の左端に光の强い線はないのである．帶の幅は e 點に於て最も廣く，この點に時刻の原點をとると，第 14 圖に示すやうに，上方の c 點，下方の f 點では，先驅の到達した時刻が夫々 0.09, 0.11 millisec となる．歸閃は 0.56 millisec に起つた．



第 14 圖　電光 6, 第一閃光



第 15 圖 電光 6, 第二閃光

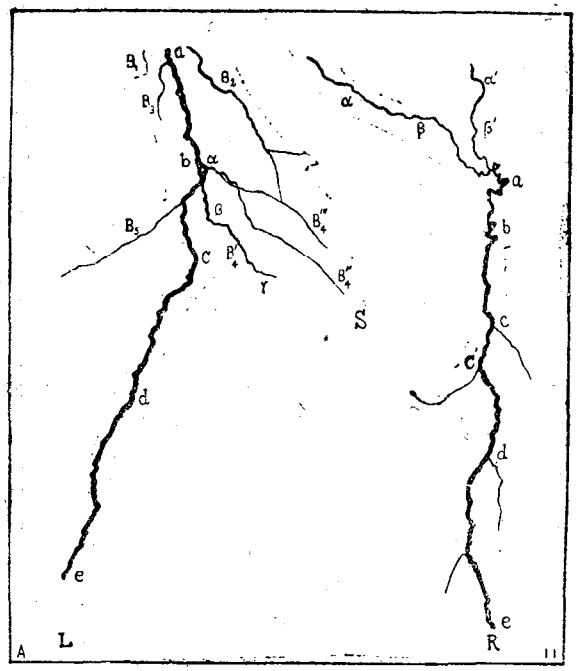
それ故この帶狀先驅は明かに e 點附近から出發して，上下の方向に向つたものである．この電光は，次節に說明する電光 7, 8 の直前に現はれたものであるが，次節に述べるやうに，e 點附近には空間電荷が存在すると考ふべき理由が多いのである．さうとすれば，先驅はこの空間電荷から發して上下二方向に向つて雲と地面を繫ぎ，その繫がれた路を通つて，雲の電氣が放電さ

れたものと考へられる．併し，帶の左端が地面に達した時直ちに歸閃が起つてゐない．その間に 0.3 millisec 程の時間を置いてゐる．上に向つて進んだ先驅が，雲の中に入つても直ぐには電氣のある部分にまで到着せず，暫く路を進めなければならなかつたのであらう．下に向つた先驅が先に地面に屆いた爲に，その時間だけ主放電が遲れたとすれば說明がつく．この帶狀先驅は，一見 Schonland の乙型階段先驅のやうであるが，それならば帶の左端は甲型と乙型との境の線となり，帶の幅はどこも同じ筈である．それ故，これは乙型階段先驅ではなく，新しい型の先驅と思はれる．併し，この帶狀先驅が，雲と地面との中間にある空間電荷から出發する先驅に特有なものであるか否かは不明である．

第二閃光は 115 millisec 後に出，箭型先驅を持つが，歸閃は非常に弱く，明るさが先驅と殆ど變らない．この電光の靜止寫眞は撮れなかつたが，第一閃光の歸閃に比較して變形してゐないから，速度は非常に速いには相違ない．併し歸閃にしては餘りに光が弱いので，先驅ではないかと云ふ疑問も起る．つまり，地面から雲へ向つて進むものではなく，雲から地面へ向ふものではないかと考へられるのである．前節に鳳氏の地面に屆かない電光の寫眞に就いて述べたが，その歸閃は電光の末端から雲の方へ歸るのではなく普通の電光の枝と同樣に先驅と同じ方向に先驅を追つて走るものであらう．さうとすれば，歸閃と云ふ名は當らず，寧ろ前節に述べた電光の間歇的前放電 S_2 の型に近い．若しも上の考へが正しいならば，このやうな電光で大氣中で終らず地面にまで達するものも想像し得る．この第二閃光はその種のものであるかもしれない．

§ 8. 途中の一點を境としてその上下で光の强さが著しく異る電光，並びに第二閃光以下が枝のみから成る電光（電光 7, 8, 9, 10, 11, 12）

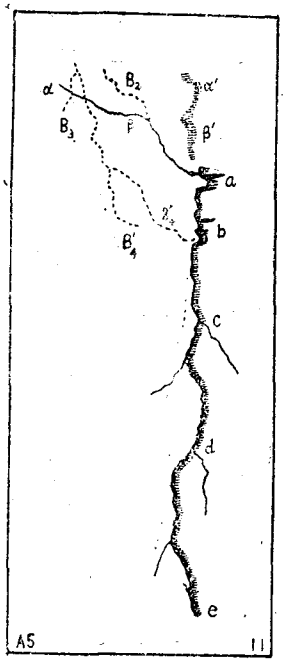
寫眞 No.80 及び第 16 圖は靜止寫眞で，L（電光 7），R（電光 8）なる二つの電光が示されてゐる．その兩方共に，第一閃光に於て途中の一點を境として急激な光の强さの變化が認められるものである．電光 R の方は單一電光なので，この變化が旣に靜止寫眞にも現はれて見える．その廻轉寫眞を寫眞 No.81 に示し，又その模寫は第 17 圖である．先づ R について見るに，雲から二本の弱い電光 $\alpha\beta$, $\alpha'\beta'$ が發して a 點附近で合し，a 點から下は急に光が增し太い幹となつて地面まで屆いてゐる．a 點は或は雲から出た下の點ではなく，雲の底に沿つた遠方の點であつて，$\alpha\beta$, $\alpha'\beta'$ は視線の方向に長いものであるかも知れない．併し寫眞には左側の電光 L の上端から右の方に向つて雲の緣が寫つてをり，$\alpha\beta$, $\alpha'\beta'$ の上の端はこの緣の所に終つてゐる．又後に說明するやうに，電光 L の第一閃光についても，電光 R の a 點と丁度同じ高さにある b 點に於て，光の强さに急激な變化が認められるのである．時間的にも空間的にも相近く起つた二つの電光の寫眞の上で，同じ高さの所に同じ特異性が見出されるのであるから，この一致を偶然と見るよりも實際にその高さの所に橫に擴がつた何等かの特殊狀態を豫想する方が自然である．かくして a 點は實際に雲から下に降りた大氣中の點であると考へる．雲底から a までの距離は略 150 m となる．



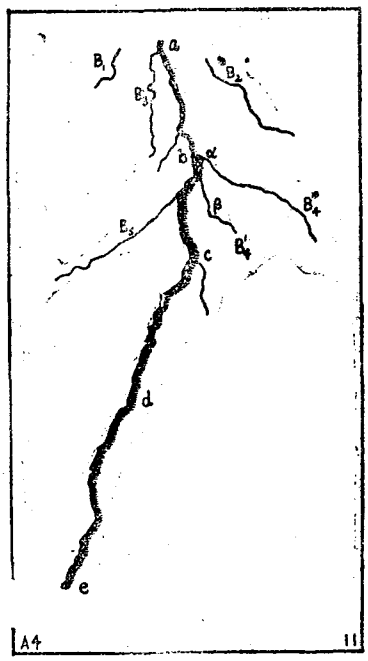
電光 7　　第 16 圖　　電光 8

α 點附近及びそれから下の b 點までは，屈曲が甚だしい．前々節に引用した寺田，中谷，山本三氏の電氣火花の論文に，酸素やその他のガス中で屢屢放電路に激しい屈曲の見られることが指摘されてをり，それを前放電の特殊刷子放電に原因すると考へてゐる．又同様な現象は空氣中の火花でも電場配置の如何によつては得られるのである．この電光の場合の屈曲は，空間電荷の爲に起つたものと思はれる．一樣に分布した空間電荷でなく，密度に激しい變動を持つものであれば，電場が複雜に變化して放電路がはげしく屈曲して差支へない．

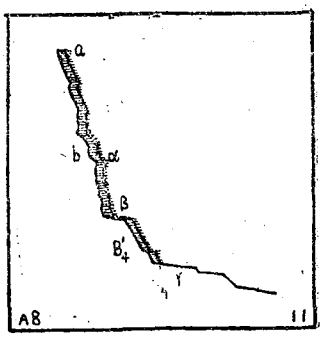
この場合 α 點から上は路が二つに



第 17 圖 電光 8, 第一閃光



第 18 圖 電光 7, 第一閃光

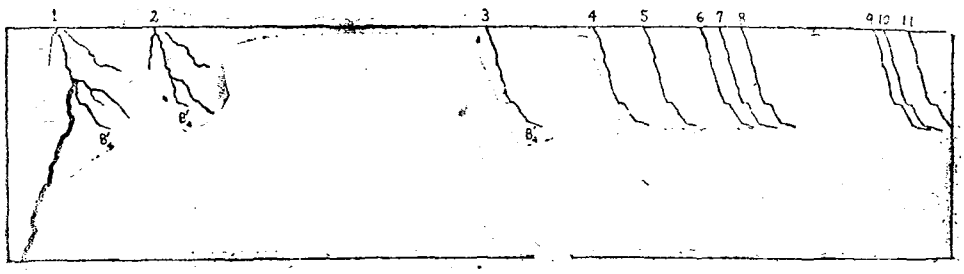


第 19 圖 電光 7, 第三閃光

分れてゐるのであるが，上向きに路が分れるのは珍らしいことであつて，これについては次節で詳しく取扱ふ．實際，αβ，α′β′ は時間的に相隔つた互に關聯のない二本の電光が，偶然寫眞の上で並んで撮れたのではなく，眞正の上向きの枝分れである．廻轉寫眞の寫眞 No.81 第 17

圖を見るとやはり同じ場所に $\alpha\beta$, $\alpha'\beta'$ が寫つてゐる. $\alpha'\beta'$ の方は横に擴がつてぼやけてゐるが, 上部よりも下部の方が少し時間的に遲れてゐる. 卽ち $\alpha'\beta'$ は上から下へ進んだのである. $\alpha\beta$ については進行方向を判定出來ないが, やはり上から下へ向ふものと想像される. a から下の光の强い部分についても先驅は寫らなかつた. 尙第 17 圖に點線で示したものは, 電光 L の第二閃光である.

左側の電光 L については, 靜止寫眞 No.80 では何等の特異性も見當らないが, 廻轉寫眞でとつた第一閃光, 寫眞 No.82, 第 18 圖には, b 點を境として急激な光の强さの變化が認められる, 雲から b までは弱いが, b 點で急に著しく光が强くなつて地面に達してゐる. この電光では b 點附近に激しい屈曲が見られないが, この場合にもやはり强い空間電荷が存在してゐて, それが地面に放電された爲に, ここから下の部分の光が强くなつたものと考へられる. 第二閃光は第 17 圖に點線で書表はしてあるが, 第三閃光以下は總て寫眞 No.83 第 19 圖に示されたやうなものである. 第二閃光以下には幹がない. 第二閃光は靜止圖なる第 16 圖の左の電光に記してある ab $\alpha\beta\gamma$ なる路筋を主としてとり, 枝 B_2, B_3, B_4'' を伴つてゐる. 第三閃光以後のものは $ab\alpha\beta\gamma$ だけであつて第十一閃光までである. 第 20 圖は十一の閃光を全部表はしたもので, 第一閃光と第十一閃光との間は 191 millisec である.

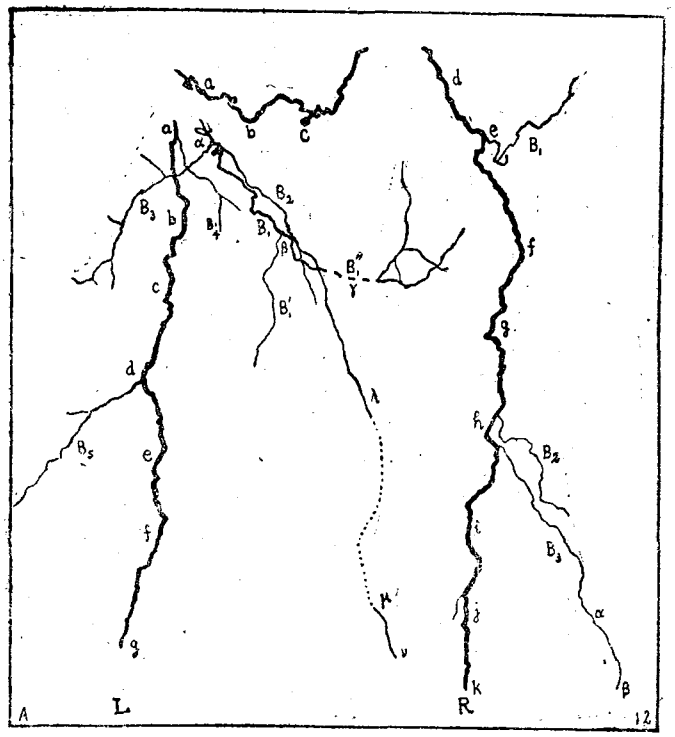


第 20 圖 電 光 7

このやうに大氣中に終る放電が何回も繰返されるのは, その先端に大きな空間電荷の存在を示すわけである. 第 16 圖の電光 L の枝について見るに, 主放電路の右側の方が左側に比べて數に於ても强さに於ても優つてをり, 而も各々の枝が一箇所, 第 16 圖の S の邊りに向つて集まるやうな形に伸びてゐる. そして電光 R の c' から出た左向きの枝もその先端が S の方に曲つてゐる. S の附近が空間電荷の中心であらう.

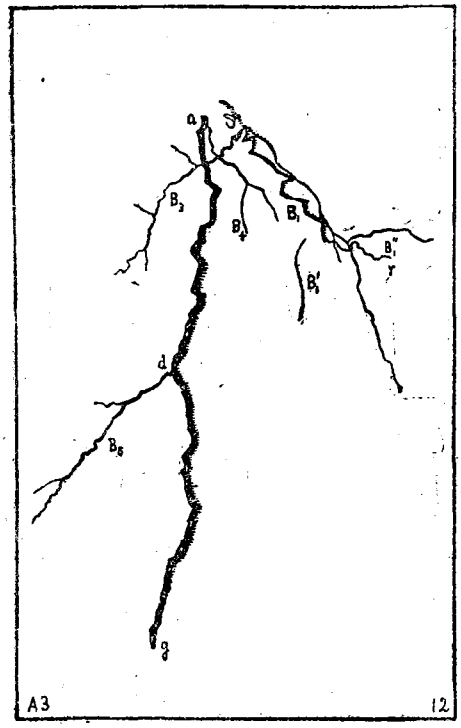
尙, 途中で急激な光の變化を伴ふ電光の例がもう一つ得られ, それを寫眞 No. 84 に示した (電光 9). 境界點は電光の略々中央の邊りにあり, その點で路が著しい角度で右上に向つて折れ曲つてゐる.

寫眞 No.85 第 21 圖に示したものも, 殆ど同時に出た二本の電光を寫してゐるが, これは第 16 圖の電光の後 2～3 分の間に起つたもので位置も全く變つてゐない. 兩方の寫眞に見える森と

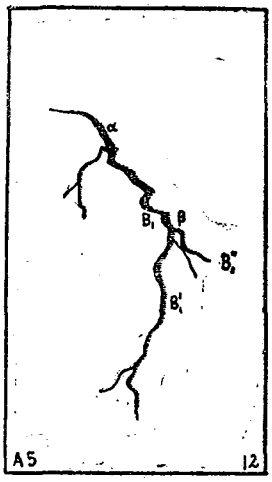


電光 10　　第 21 圖　電光 11

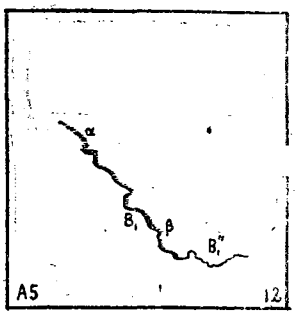
煙突に對する電光の位置を見れば明かである．左側の電光 L（電光 10）は右下へ向けて複雜な形の枝を出してゐるが，この枝は第 16 圖の S に當る附近に向ひ，而も複雜な屈曲及分岐を示してゐる．これも亦空間電荷の存在を裏書きするものである．枝のうち右の方へ向ふ B_1'' は先へ行つて上向きになつてゐるがこの邊りは第 16 圖の電光 R の α 點に近い所である．又他の枝 B_2 は下の方へ向つて伸び，λ 邊から非常に弱くなるが地面近くの μ に於て急に光が



第 22 圖　電光 10, 第一閃光



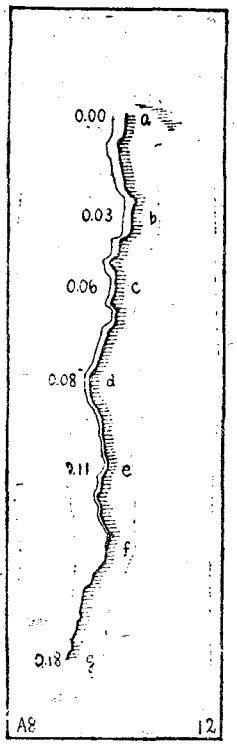
第 23 圖　電光 10, 第三閃光



第 24 圖　電光 10, 第三閃光

強くなり，その儘地面に進んでゐる．

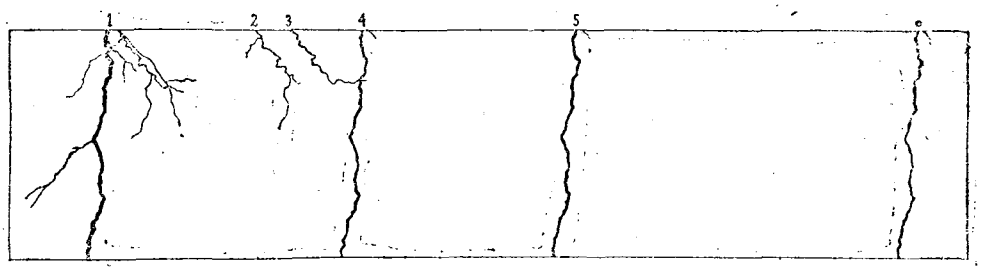
寫眞 No.86 及び第 22 圖は，第 21 圖の電光 L の第一閃光の廻轉寫眞及びその模寫である．又第 23 圖，第 24 圖，第 25 圖は夫々同じ電光の第二，第三，第五閃光である．この電光も實は全部で六閃光から成つてゐるので，その全體の時間的



第 25 圖
電光 10, 第五閃光

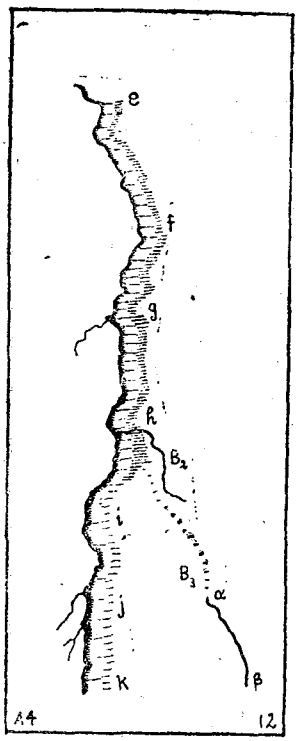
並に空間的配置は第 26 圖に示す如くである. このうち第 23 圖の第二閃光, 第 24 圖の第三閃光は, 第 16 圖の電光 L に於けると同様, 枝のみからなつてゐる. 第四閃光以下は枝のない幹だけのもので, その代表として第五閃光を第 25 圖に示した. 閃光の間の時間は第一～第二, 31 millisec; 第二～第三, 8; 第三～第四, 18; 第四～第五, 49; 第五～第六, 79 である.

第 21 圖の右側の電光 R (電光 11) は, 電光 L の頭上から出發して, 激しい屈曲を示しつつ右に進み, 一度上の方に向つてから急に下向きになつて地面に達してゐる. 上下といふのは勿論寫眞の上でのことで, 實際は大體水平に走つてゐるものであらう. このやうに初め水平に進んで急に折れ曲つて下へ向ふ電光は, 間々見られる所である. この電光は夫々 144, 21 millisec の間隔を置く三つの閃光からなり, 寫眞 No.87 第 27 圖及び寫眞 No.88 第 28 圖は, その第一閃光と第三閃光とである. 第二閃光は第三閃光と同じ様であるが, 殘光が少く先驅の速度が遲い. その寫眞及び模寫圖は略す. 第 21 圖の靜止圖では, 枝 B_3 に何の異狀も認められないが, 第 27 圖の第一閃光を見ると, B_3 の枝は分岐點から α までの 間極めてうすいぼやけた線として寫つてゐる. そして α 點で急に光の强いはつきりした線になつて地面

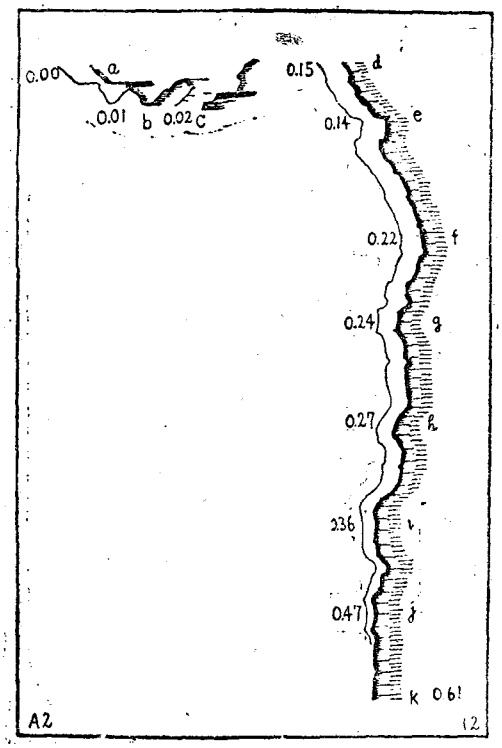


第 26 圖　電　光　10

に達してゐる. 卽ち第 21 圖の電光 L の枝 B_2 と同じ性質のものである. 電光が生成するとき, 先驅が地面近くまで達すると, 地面からも上向きに先驅が出發すると云はれてゐる. この電光 L の枝 B_2 及び R の枝 B_3 に於て下の方にある明るい部分は, 地面から出發した先驅放電と思はれる. 電光について, このやうな地面からの放電の存在が云はれてゐるに拘らず, まだそれを示す寫眞はないやうである. 電氣火花で接地極から出る放電と上の極から來る放電との結合部は, 廻轉寫眞の上でぼやけて寫る場合が多い. 第 27 圖に於て電光 R の第一閃光の枝 B_3 の上半のぼやけた所はそれに相當するものと思はれる.

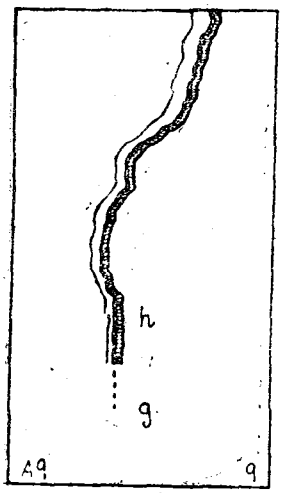


第 27 圖　電光 11, 第一閃光



第 28 圖　電光 11, 第三閃光

別の電光（電光 12）についてもこれと似た例が見られた．卽ちその第三閃光の根元の所が，第 29 圖のやうになつてゐるものがあつた．この場合は箭型先驅が雲から降りて來て，地上 100 m 位の高さの所で終つてゐる．それから 0.04 millisec の後 h から地面に向つて新しく先驅のやうなものが出てゐる．そして更に 0.05 millisec 經つて歸閃が現はれてゐる．箭型先驅であつても，時々その下の方が階段先驅になることがあると云はれてゐるから，この h に於ける不連續はその階段であるかも知れない．併し，h から下の先驅に對して，それの延長と見做されるやうなものが，h の上方に全然見られないので，階段先驅であるとは思はれない．不幸にして電光の最下部は樹に邪魔されて，點線で示した部分が明瞭でないが，h から下の先驅が略歸閃と平行になつてゐる點から見て，これは上から來た先驅を迎へて昇つた先驅であるとも考へられる．



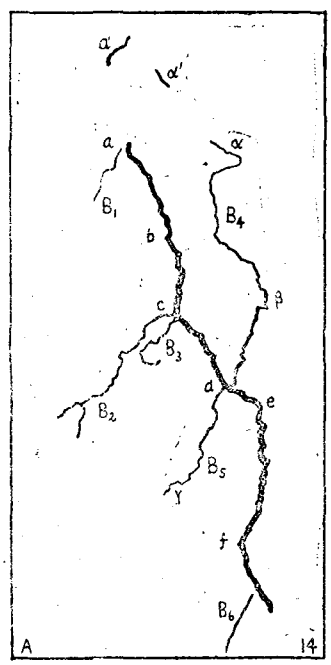
第 29 圖　電光 12

雲と地面との間の大氣中に空間電荷の存在することは，既に多くの人々によつて云はれてゐることである．この節でのべた色々な特異な現象は，空間電荷によつて說明出來る．電光は雲の中の空間電荷から發するのであるが，そこで電光の端がどのやうになつてゐるかは，雲に隱されて見ることが出來ない．併し，雲の中の

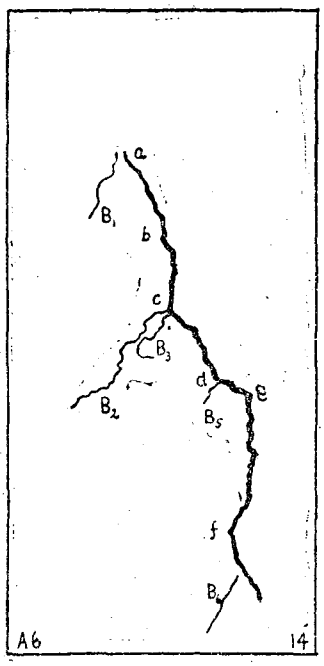
空間電荷も，大氣中の空間電荷も性質的に大きな差異を持たないと思はれるので，雲のなかに於ける電光の末端は，大氣中の空間電荷のなかに終つてゐる第 16 圖左の電光，及び第 21 圖の同じく左の電光から右下の方へ向つて出た枝のやうに，錯綜した形をしてゐるのであらうと想像される．

§ 9. 上向きの枝分れのある電光（電光 13, 14, 15 及び電光 8）

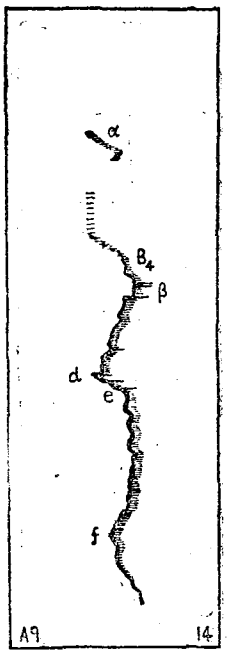
電光の枝は殆ど凡ての場合下向きに分れるのであつて，上向きに分れることは極めて稀である．Simpson は雷放電の機構を理論的に考へて，枝分れは常に正極から負極の方へ向ふ筈であると考へた．それで落雷電光の枝分れの方向から，雲の底の電氣の正負を判定する目的で，澤山の電光の寫眞を集めて調べた．[1] その結果，242 枚の寫眞のうち，確實に上向きの枝分れを示す電光の寫眞はたつた一枚しかなかつたのである．それで一般に雲の底は正電氣を持つと云ふ判斷を下したが，今日では枝分れが必ず正極から負極へ向ふと云ふ考へは容れられず，從つてその判定から雲の底に正電氣のある場合が多いと云ふ決論は出て來ない．實測の結果では負電氣の場合の方が多いのである．併し電光に上向きの枝が稀であることは，その後の多くの觀測によつても間違ひないのである．Jensen の論文[2] には上向きの枝のある電光の寫眞として揭せたものがあるが，それを見ても餘り確かなものとは思はれない．



第 30 圖 電光 13, 靜止



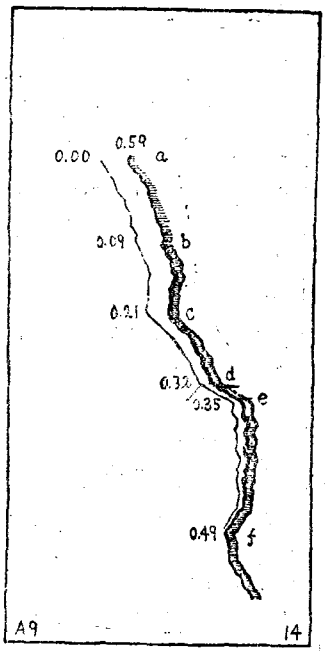
第 31 圖 電光 13, 第一閃光



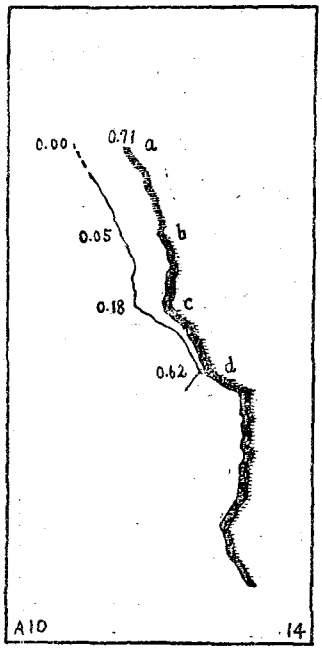
第 32 圖 電光 13, 第二閃光

(1) G. P. Simpson: Proc. Roy. Soc. London (A). 111, 56 (1926).

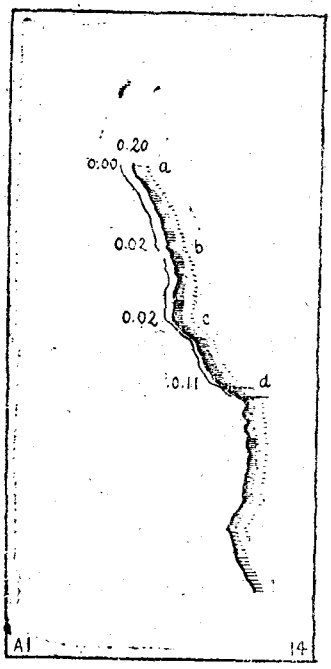
(2) J. C. Jensen: J. Frank. Inst. 216, 707 (1933).



第33圖 電光 13, 第三閃光



第34圖 電光 13, 第四閃光



第35圖 電光 13, 第五閃光

寫眞 No.89 第 30 圖の電光 13 を見ると, d 點から上に向け B_4, 下に向け B_5 なる枝が出てゐる. この二つの枝は d 點で連なつてゐるやうに見えるので, これらは $abd\gamma$ なる獨立した電光で, たゞ寫眞の上で $abcdef$ なる電光と重なつてゐるのかも知れない. 併し廻轉寫眞によると B_4 と B_5 とは全く別のものであつて, 連つた一つのものでないことが判る. 廻轉寫眞の第一閃光は寫眞 No.90 で, 第二閃光と第三閃光とは寫眞 No.91 に見られる. この電光は 5 本の閃光から成つてゐるので, その模寫を第一閃光から第五閃光までの順序に, 第 31～35 圖に示す. 第 31 圖の第一閃光には, 他の枝は全部出てゐるが, 上向きの枝 B_4 だけが缺けてゐる. 所が第 32 圖の第二閃光は, 枝 B_4 と d から下の幹の部分とだけから成つてゐるのである. 第三閃光以下は何れも幹 $ab\cdots f$ のみで枝はなく, 先驅放電が全部にはつきり出てゐる.

以上の圖で判るやうに, B_4 の枝は第一閃光から第五閃光までを一纏めにして考へれば, 上向きの枝と云つてもよいが, 各閃光を獨立した放電と考へれば, 枝ではない. 實際, 一つの電光に屬するいくつかの閃光は, 雲の中で別々な部分から發し, たゞ雲と地面との間だけで同じ路をとる放電と考へられてゐる. 本來枝といふのは, 一つの先驅又は前放電の先端に於て, 路が分れて出來たものについて用ふべき言葉である. それ故, こゝに擧げた B_4 なる枝は, 見かけの上の枝にすぎない. 併し同じ電光に屬する閃光で, 上の方では異る路を採り, 途中で路を合して地面に達したことをこのやうに明かに示した例は未だないやうである. 雲から暫く同じ路を取り, 途中で別々な路をとつて地面に達した閃光の例はよく知られてゐる通りである. こゝに擧げた例は,

その逆の場合である．雲底に近いところで，電光の上部が Y 字形に分れる場合はよく知られてゐるが，その部分を廻轉寫眞に撮れば，こゝにあげた例と同様になつてゐるのであらう．

この電光の閃光間の時間は第一～第二，45 millisec; 第二～第三，9; 第三～第四，15; 第四～第五，30 であるが，第 34 圖の第四閃光に於て，先驅の速度が d 點から下で急に增してゐる．d 點以下では，d より上の部分に比べて，第二閃光により一度だけ多く放電が行はれてゐるためとも考へられるが，それならば第三閃光に於てこそこの變化が著しく現はるべきである．然るに第三閃光では，幾分はその傾向が見られるが，殆ど先驅の速度の變化はない．これには何か他の原因があるものと思はれる．尙 B_4 の枝が d 點で幹に合する所で，急に左に曲つて水平になつてゐることも注意すべきことである．

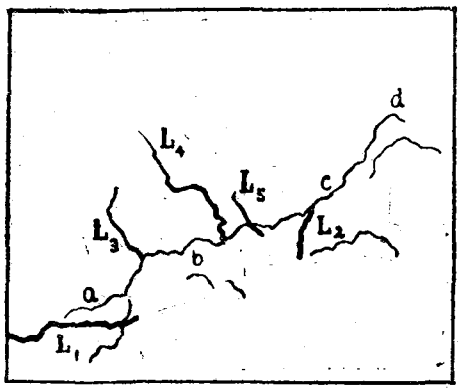
前節第 16 圖の右側の電光 S の a 點に於ける上向きの枝分れは，確かに同一の閃光に於て起つたものである．併し兩方共に a 點に向つて進んで來たものと考へられ，而もその明るさが第 6 節で見た前放電の明るさと同じ程度なので，それ自身が先驅であつて，歸閃は伴はないものと想像される．それで時を同じくして a 點附近の空間電荷に向け，雲の中の異る場所から先驅が出て來て，その先端が合したものとすれば，これも亦眞正の枝分れではないことになる．即ち，下向きの枝分れとは性質の異るものである．

電光の繼續時間，即ち第一閃光と最終の閃光との間の時間は，長いもので 1 sec ぐらゐである．それ故，數秒を隔てゝ起る電光は，同じ場所に現はれたとしても，先づ互に獨立したものと考へてよいであらう．このやうな二つの獨立した電光では，屢々その路の下部が一致して，これらを靜止寫眞として撮ると，見かけ上向きの枝分れが見られることがある．寫眞 No.92,93（電光 14, 15）は共に廻轉寫眞であるが，地物に對する電光の位置から見て判る通り，この二つを重ね合はせると上部と下部とが完全に一致してゐる．それ故，この二つを一枚の靜止寫眞として撮つたとすれば，上部と下部が一致して途中が二つに分れてゐる電光となる．この二つの電光の間の時間は 3～4 sec 程度であつた．

New York の Empier State Building に落ちた電光で，上向きに枝分れしたものが Scientific Monthly[1] に Jensen によつて紹介されてゐる．H. A. Shimer の撮影であるが，二又に分れた光は兩方共に同じ程の太さであるから，これも亦獨立した二つの電光が短い時間を置いて現はれて，同じ乾板の上に重なつて寫つたものと思はれる．

上向きに枝分れのある電光の寫眞を二枚得たのであるが，上に說明した通り，それらは何れも下向きの普通の枝分れとは機構を別にするものであつた．そして，さう云ふことも廻轉寫眞の助けを借りて初めて明かにされたのである．したがつて靜止した寫眞機に上向きの枝分れが寫つたとしても，それから直ちにそれが眞正の枝分れとは斷定し得ない．Simpson が見出した一枚の寫

(1) Scientific Monthly: 560 (1934).



第　36　圖

重な寫眞の電光の上向きの枝分れも，かういふ意味で眞實の枝分れか否かは不明である．

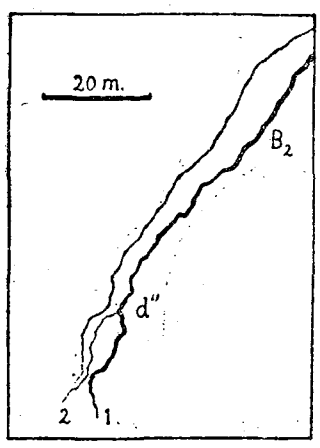
§ 10. 雷雲の緣から星空へ向けて出る電光

雷雲が頭上を過ぎて遠ざかりつゝあるとき，その後によく晴れた星空が現はれて來たことがあつた．雲の表面に沿つて盛に放電が起り，その度毎に雲の輪廓がはつきりと星空に對して區切られて見えたが，屢々その雲の緣から星空へ向けて短い電光の走り出るのを觀察した．寫眞 No.94 と第 36 圖にその一例を示す．圖の *abcd* は雲を區劃る線で，この線の上の方が星空である．L_1, L_2…L_5 は電光で，そのうち L_3, L_4, L_5 が星空のなかへ伸び出てゐる．上の方へ向ふものか，それとも水平に手前へ向つて來てゐるものかはよく判らないが，恐らく水平より少し上向きに出てゐるのであらう．この邊りの仰角は 30° ぐらゐであつた．

抜山氏の理論[1] によると，雷雲の電荷は主として雲の表面に表面電荷として分布されてゐる．そして移動度の大きいイオンは電場の爲に雲の外に押出されて，そこに空間電荷を形作る場合が考へられる．こゝに見た星空へ向ふ電光は，かゝる空間電荷と雲との間の放電であるとすると説明が出來る．

§ 11. 電光の枝の末端（電光 2, 3）

§5の寫眞 No.73 の電光では，枝の先の細かい構造まで可成りよく見ることが出來る．第 37 圖は 6 圖の電光 2 の枝 B_2 の先端を擴大して描いたもので，20m と書入れた長さは，この先端が觀測者から 1km の距離にあつたと假定して計算して出したものである．電光までの距離は，まして枝の先までの距離などは，正確には決定出來るものではないが，上の 1km と云ふ距離の推定にはそれ程大きな間違ひはないと思ふ．電光 2 の枝 B_3 の先端も，枝 B_1'' の i' から分れて左下に向ふ小枝の先も，丁度第 37 圖のやうになつてゐる．先驅の先端と歸閃の先端とは一致してをり，Schonland の云ふやうに，こゝで歸閃が先驅に追付いたのである．この先端は小さな枝分れをしてゐるが，その有樣が電氣火花の前放電の先端の枝分れと可成り似通つてゐる．そして二つの枝のうち，



第 37 圖 電光 2 の枝 B_2 の先端

(1) D. Nukiyama: Jap. J. Astron. & Geophys. 9, 101. (1932).

一方が他方よりも光が強い．第 37 圖では，右側の分枝 1 の方が左側の分枝 2 よりも遙かに強いのである．第 6 圖に於て枝 B_3, B_1'' の先端に於ても同樣である．第 37 圖に於て，先驅について，枝 2 が缺けてゐるのは，それがないわけでなく，歸閃の分枝と重なり合つてよく判らないのにすぎない．

先にも述べた通り，この電光の先驅は連續的な線で階段構造を示さないのである．今，枝の先にこのやうな構造を見ると，先驅は連續的に進み所々で枝分れをするが，一方の枝は非常に弱く少し進んで止つて了ふが，他の枝は尙進行を續けて行くものと思はれる．それならば先驅の途中にも，このやうな短い分枝が寫つてゐてもよい筈であるが，實際には見當らない．併し，第 37 圖に書いた分枝 2 の先驅は非常に弱いものであつて，先端でなく先驅の途中のやうに近くに強い歸閃が寫つてゐる所では，このやうな弱い分枝があつたとしても，カブリの爲に見えなくなつてゐる虞れが充分にある．又歸閃の途中に分枝が見られないのは，歸閃がそこに達した時には已に時間が經つてゐるので，先驅の分枝が古くなつて了つてゐる爲と考へれば說明がつく．

鳳氏は極めて近い一本の電光をボイスカメラで撮影するのに成功されたが，[1] それには連續的な先驅があつて而も所々に刺のやうに分枝が出てゐる．併しこの刺は歸閃にはない．かゝる先驅は今までに撮影された例を聞かず，極めて貴重なものである．電光が非常に近かつた爲と，何等かの原因で特に強く光つた爲に刺がよく寫つたものと考へられるが，これによつて，上に考へたやうな連續的先驅の進み方に對して大きい裏付けが得られた．

枝の進行は，歸閃に追付かれた時に止るか，又は尙少し先に進むかすると云はれてゐる．併し歸閃に追付かれないうちに止る枝もあつて，§5 の第 7 圖の電光 3 では枝 i', l の先驅の先端が歸閃に追付かれるのを待たずに切れてゐる．寫眞にはその先が寫らなかつたのであるとも考へられるが，これらの先驅の先端は右の方へ曲つてゐて速度が非常に小さくなつたことを表はしてゐるから，實際にそこで進行を止めたのである．

§ 12. 電光の根元近くに現はれる枝

今までにあげた電光の靜止寫眞にも，地面から 100～200 m 位の高さで岐れて地面に達する枝が屢々見られる．これは一般にもよく認められてゐることである．同じ雷でも落ちる場所が一つの點から近くの他の點に飛び得ることが屢々あると Fritsch[2] なども云つてゐる．落雷地點が飛ぶと云ふのは，一つの電光に屬する各々の閃光の路が地面近くで變ると云ふ意味になる．併し，電光の根元近くの枝は必ずしもこのやうにして出來たものでなく，一つの閃光にも實際の枝分れが生ずることが多い．電光 8, 13, 14 (寫眞 No.81, 90, 92) では皆第一閃光に枝分れが見える．寫眞 No.75 の電光 4 では，第一閃光では出なかつたが，第二閃光で現はれた．尙，根元近くの枝で

(1) 日本學術振興會第九特別委員會に於ける發表．(昭和 17 年 10 月)．

(2) V. Fritsch: Gerlands Beitr. 54, 245 (1939); 57, 65 (1940).

なく，上の方で分れた枝が同じ閃光に於て幹と同時に地面に達することもある．その例は寫眞 No.85 の二つの電光 10，11 に見られる．

§13. 結　言

以上數節に亙つて說明した落雷電光は皆近距離に於けるもので，1km 前後のものが §5の三本，2～3 km のものが §6，7，8，9 の 11 本，4km のものが §5に一本と都合 15 本である．このうち §9の寫眞 No.92.93 の電光 14，15 はそれらを別々に考へれば普通の電光である．それ故 13 本の電光について多少とも一般に云はれてゐることと異る點が見出されたことになる．2～3km の電光は，この他にも二，三本撮つたが，それらは第一閃光の先驅は見えず，第二閃光以下に箭型先驅を持つもので，取立てて云ふべきことはない．それで撮影した全部で十七，八本に近い電光のうち十三本までに特異な點が見出されたことになる．このことは偶然に特殊な性質を持つた電光に數多く出會つた爲とは考へられず，電光を近くに撮影し得て細かい點まで寫すことが出來たことによるのである．電光が遠いと形が小さくなり，線の明るさは距離に逆比例して減るし，殊に雨や霧の爲に吸收されて光が弱くなるので先驅は殆ど寫らない．實際遠方の電光の寫眞は澤山に撮れたが，稀に箭型先驅がかすかに寫つた程度である．これらの電光の寫眞は閃光の數とか閃光の間の時間とかについて，統計的な數字を求める際に役立つにすぎなかつた．

上のやうに短期間に比較的多數の近距離電光を撮影し得たのは，寫眞機の視角が大きかつた爲である．併し，尙寫眞の分析をするとき，像の運動方向が常に電光に直角であつて，先驅と歸閃とを見分けるのに都合がよい點も非常に重要なことと思はれた．若し先驅と歸閃とが重なり合ふやうなことがあれば，第一閃光の先驅のやうに弱いものは到底見出し得なかつたであらう．

現在廣く認められてゐる Schonland の電光型式と異る點がいくつか見出されたが，第二閃光以下では先驅が皆箭型であること，長い間を置いて出た閃光の箭型先驅の速度は一般に遲いことなど，それに箭型先驅の速度の値，閃光間の時間についても大體 Schonland の云ふ處と一致してゐる．一番大きな差異は第一閃光の先驅に階段先驅が認められず，その代りに連續先驅，間歇的前放電，帶型先驅などが見られたことである．Schonland はアフリカの熱帶地方の雷に就いて調べたのであるから，溫帶の雷についての結果と異る處があつても，さしてをかしくはないであらう．

觀測の結果を取纏めると下のやうになる．

（1） 第一閃光に階段先驅は見られなかつた．多くの場合，第二閃光以下の箭型先驅と同樣連續的な線であつた．併し所々小枝を分ちながら前進するものが多いので生成過程は箭型先驅とは別のものと思はれる．それに對して連續先驅と云ふ名を假に用ひる．速度は 10^7～10^8 cm/sec である．他に，廻轉寫眞の上で帶狀に寫つたものを帶狀先驅と名附けた．それは一例得られた．この先驅は雲から地面へ進むのではなく，電光の途中から上，下二方向に進むものである．間歇的前放電によつて出來上る電光の例も二つ得られたが，不均整電場の電氣火花について知られてゐ

た通りであつた.

（2） 雲の下の大氣中に空間電荷の存在を示すいろいろな現象が認められた. 電光は雲と空間電荷の間で光が弱く, 空間電荷と地面との間で光が強い. Schonland は雲の負電荷の爲, 地物の先端から放電する正電氣によつて正の空間電荷が出來, その結果雲と空間電荷との間の電場が強くなり, 光が上方で強く下方で弱い電光が出來る場合のあることを云つてゐるが, 今の場合はそれと反對であるこの空間電荷は負である. 空間電荷から下で急に電光の光が增すのは電場が大きく, 且空間電荷自身が地面に放電する爲であらう.

（3） 空間電荷があると, 幹から岐れた枝が多くその方向に伸び, 第二閃光以下が地面に達する幹を缺いて, これらの枝のみで終る場合がある.

（4） 地面に達する枝のうち, 地上 100 m 位の點から下で急に光の强くなるものがある. これは上から來る先驅を迎へて地面から昇つた放電を示すものと思はれる.

（5） 上向きの枝分れの例が二つ得られた. 一つは空間電荷へ向つて雲から二條の電光が出て合したものであり, 他は同じ電光に屬する二つの異る閃光の路が, 電光の途中から地面までの間だけ一致して出來たものである. 何れも下向きの枝分れとは別の機構によるものである.

（6） 雷雲の緣から星空へ向ふ短い電光を認めた. 抜山氏の理論にある, 雲から排出されたイオンによる空間電荷を指示するものとして說明される.

（7） 極めて近い電光の枝の先端が, 電氣火花の前放電の先端と似た形に枝分れしてゐることを知つた. (1) に述べた小枝を出しながら前進すると云ふ連續先驅の機構はこの事實から推して考へたものである.

（8） 雷が落ちると, 同時に近くの數箇所が雷擊を受けることがあるので, 落雷地點が飛び移るとよく云はれる. 電光の根元には屢々枝が見られ地面に屆いてゐるが, これらの枝は一つの閃光に於て分れてゐるものである. それ故落雷地點が澤山あつても, それらには皆同時に雷が落ちたのである.

この電光觀測は日本學術振興會雷災防止第九特別委員會の共同觀測の一部として前橋市に於て行はれたものである. この電光觀測を行ふに當つては委員會の方々から多くの援助を受けた. 又この報告の刊行を許諾された同委員會に厚く感謝の意を表はす. 殊に中谷宇吉郎敎授からは直接の指導と鞭撻を得た. 特に感謝の意を表記する次第である. 尙, 前橋郵便局長はじめ局關係の方々, 殊に松浦技手の援助に負ふ所が多かつた. 器械の製作及び觀測に當つては花島政人助敎授, 菅谷重二助手の協力を得た. 又觀測小屋の設置については東寶の村治夫氏の好意による所が多かつた. あはせてここに深甚な謝意を表はす.