

— 論 文 —

雷 放 電 の 研 究 (第3報)

雷 雲 内 の 局 部 的 な 小 放 電 に つ い て

高 木 増 美 石 川 晴 治 竹 内 利 雄

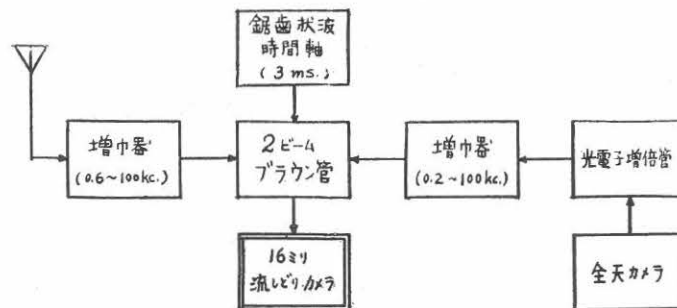
I. ま え が き

雷雲の内部に発生する放電は、雲内主要電荷の中和に有効な働きをしている緩慢な放電と、これに伴ってその1秒近くも続く継続時間内に数十回も繰返される、急激ではあるが局部的な電荷の移動とから構成されることを先に明らかにした。⁽¹⁾⁽²⁾ 緩慢な放電の間続く弱い発光の中で、局部的な小放電のたびごとに強い発光が間歇的に観測されるものである。昨夏の雷観測では、二現象用ブラウン管を使用して、雷放電に伴っておくる電場の急変化と光度急変化を、同時に同一フィルム上に連続写真記録して細かい対応をとることが可能となった。又対地放電について相当数の例が記録され、対地雷撃に附随しておくる雲内の多数の小放電についても、その性質を雲間放電の場合と対比することができた。この報告は、前橋地方に於ける観測期

間中、最大の雷雨のおこった8月18日に得られた記録から、雲内小放電の性質を明らかにしたものである。

観測装置の概略の構成は第1図に示す通りであるが、各部の詳細は従来使用して来た装置と大きな違いはない。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 記録には16ミリ100フィートフィルムを使用し、1巻で連続4分間流しどりをする。記録の一例は第2図に示してある。電場変化と光度変化の増巾器は、急変化分を強調するためそれぞれ300 μ sec、及び1msecの特定数で低周波分を切落してある。両者の感度は独立して適当にえらぶことができる。この日の雷雨は19時半より2時間余り続いたが、約10分ごとに4分間ずつ12巻の記録をとった。雷活動域の移動につれて、適切な記録を得るために、電場変化は40db、光度変化は50dbにわたって感度を変化させる必要があった。

第 1 図 観 測 装 置 構 成 の 概 略



II. 雷雲内の局部的放電の極性

雷雲内の局部的な急放電は、一般に1msec以下の継続時間を持ち、数msecから数十msecの任意の間隔をおいて数十回繰返すものである。⁽¹⁾ この小放電による電場変化の波形は、放電点近傍で観測するとき装置の時常数のために相当に変形されるけれども、一般になだらかな頂をもつ丘状のパルスで、静電的な変化

を示すものである。しかし距離が増すにつれ放射項が顕著になり、30km程度以遠では殆んど静電的变化は認められず、微分型の急峻なパルス⁽⁴⁾ 多数個から成る一集団が一局部放電に対応する様になる。しかし光の変化には電場変化にみられる様な質的な変化はおこらない。

雷雨の近傍でみられる静電的パルスのもつ符号には顕著な傾向がある。⁽¹⁾ 同一放電に含まれる静電パル

スの符号は殆んど大多数が同一か、もしくは途中で正負の混在する過渡期間を経たのち反転するものが、相等数を占めるということである。雲間放電のみでなく、対地放電の場合にも対地雷撃に相当する急峻で大きな正パルス以外の小パルスの符号について、同様の傾向がみられる。第1表は静電パルスの認められる放電と、然らざるものの割合、第2表は更に静電パルスの符号の性質に関して分類した百分率であって、電活動中心域からの距離に対する傾向が示されている。但し対地雷撃そのものについては、30km程度以内では殆んどが正極性の静電的变化が認められるのであって、第1、2表に示した静電パルスとは、これら以外の小パルスのみを対象としている。

第1表

距離 km	対地放電			雲間放電		
	あり	なし	個数	あり	なし	個数
0~5	100	0	65	100	0	229
5~15	66	34	61	76	24	162
15~30	47	53	49	52	48	133

第2表

距離 km	符号						個数
	+	-	+→-	-→+	±混合	%	
対地雷撃							
0~5	8	49	28	3	12	%	65
5~15	40	25	25	5	5		40
15~30	61	17	13	9	0		23
雲間放電							
0~5	62	0	37	0	1		229
5~15	17	42	24	11	6		123
15~30	7	80	6	4	3		70

地上高 h 、観測点までの水平距離 d の位置に存在する点電荷 Q が、地上の観測点に作る静電場は

$$F=2Qh/(h^2+d^2)^{3/2} \quad (1)$$

で与えられる。したがってこの点電荷の局所的な移動によって地上に誘導される静電場変化量は次の様になる。

$$\Delta F=2Q \cdot \Delta s [(d^2-2h^2)\cos\theta+3dh \sin\theta \cos\phi] / (h^2+d^2)^{5/2} \quad (2)$$

但し Δs は点電荷の移動距離、 θ は移動方向の傾角、 ϕ は移動方向の地上射影からみた観測点位置の偏角で

ある。この電荷の小移動による静電場の正味の变化量は、 $Q \Delta s$ をモーメントとする電気双極子の放電による場合を考えても全く等価である。

静電場変化の符号が逆転する位置は $\Delta F=0$ で与えられるが、これは移動方向が水平でない限り一つの円周上にある。その半径は $h(2+\frac{9}{4}\tan^2\theta)^{1/2}$ で与えられ、中心位置も $\phi=\pi$ の方向に $\frac{3}{2}h\tan\theta$ だけずれる。この逆転円内では、電場変化の符号は対象とする放電双極子の極性 * と一致する。雷の活動域は数 km の広がりをもつから、偏角 ϕ は異なる放電ごとに任意の値をとることが予想される。したがって、ある放電に関して観測点が逆転円内にはいる確率は

$$\begin{aligned} p &= 1 & \psi &\leq -1 \\ p &= (\cos^{-1}\psi)/\pi & -1 &< \psi < 1 \\ p &= 0 & \psi &\geq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

である。但し、 $\psi = (d^2-2h^2)/3dh \tan\theta$ で、転移領域である所の $-1 < \psi < 1$ の範囲を第3図に示した。

$d = \sqrt{2}h$ では θ の如何に関らず $p = \frac{1}{2}$ であって $d < \sqrt{2}h$ では双極子の極性と一致する電場変化符号が多くなる。

同一放電中の相続く n 個の静電場小変化がすべて同一符号をもつ確率は、これらの位置及び θ が一定で、 ϕ のみが任意であるとした場合、

$$q = p^n + (1-p)^n \quad (4)$$

で与えられるが、この値は、転移域以外では1であるが、 $-1 < \psi < 1$ で示される転移域内の大部分で $(\frac{1}{2})^{n-1}$ に近い低い値をとる。実際の波形では同一符号が10回以上続

第2図

記録の一例 (距離 4 km)

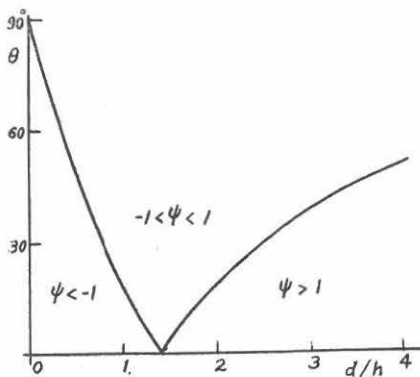
左側：光度変化 (下向きに出る)

右側：電場変化 (上向きが正符号)

* 双極子の極性は正電荷がより上方にある場合を正とし、等価的には正電荷下降又は負電荷上昇の場合を正極性とする。

くことは稀ではなく、放電全期間にわたって正負が混在している例は、逆転域を含む中距離でも数%にすぎないから、一個の放電に対する転移域は一般にあまり広くないと考えなければならない。このことは局部電荷の移動の方向がすべてほぼ垂直であるか、あるいはかなり傾いているとしても、大凡同一の方向をその放電中保たねばならないことを意味する。

第3図 偏角任意の場合の局部的放電の傾角と転移域



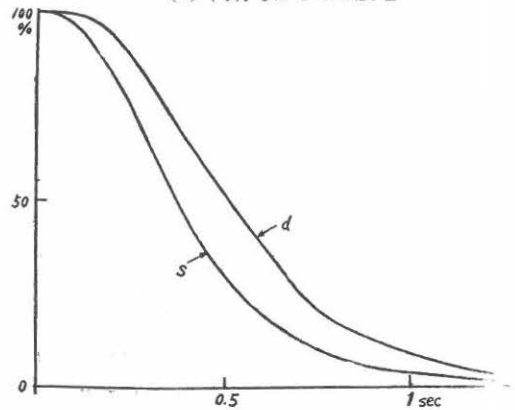
第2表で顕著な事実、距離に対する静電変化の主要な極性が、対地放電と雲間放電とで逆の傾向をもっていることである。(3)式を対照すれば、雲間放電では正極性——これは静電場測定器に緩変化を示す雲内主要放電の大多数の極性と一致する⁽⁵⁾——の局部小放電が多数であるのに対して、対地放電は主に負極性である。又 $+\rightarrow-$ は何れの場合も近距離に多い。

雲内に分布する主要な帯電域が、高い方から、 P 、 N 、 p であらわされるとすると、雲間放電は主に PN 間、又対地放電に属する局部放電は Np 間或は N と大地間の主要な放電に附属していると考えることが妥当である。第2表からも対地放電の場合に逆転域がより放電点に近く、したがって放電のおこる領域がより低い所にある傾向がうかがわれる。 $+\rightarrow-$ の変化については雲内放電の場合、放電の経過に伴い、放電位置の下降をもたらす逆転域の縮小が、逆転域外に観測点を出すこと、逆に対地放電の場合は、放電域が上昇して観測点を逆転域内に入れることを示す。後節で述べる様に、発光の強さの変化からもこの様な放電域移動の傾向が裏がきされる。

第4図に示す様に、 $+$ 、 $-$ の様な単一の符号のみから成る放電より、 $+\rightarrow-$ の如く重複して符号をもつ雲間放電の方が、多少長い継続時間をもつ傾向もあるのだ、比較的数の少い $-\rightarrow+$ の変化や±混合のものは、

逆転域に近い場合の放電期間中の各小放電の位置の変動によると解した方がもっともである。

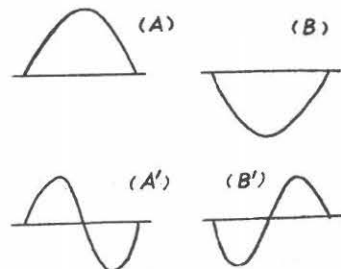
第4図 雲間放電の継続時間
(s) 単一符号からなる放電
(d) 両符号からなる放電



III. 逆転域に於ける静電場変化

逆転域では、正味の静電場変化量は零に近くなるが、これは静電パルス波形が消失して全く観測にかからなくなることを意味するのではない。(1)、(2)式から簡単に見出される様に、電荷が小移動する場合には、逆転域上では電荷の移動の向きとは無関係に、正電荷ならば第5図(A)、負電荷ならば(B)の様な静電場変化を示す。装置の時常数のためにそれぞれの再現された波形は(A')、(B')の様になる。記録では(A')、(B')の様な波形は、実際に $+\rightarrow-$ の転移期間に多く見られる。第3表に示した様に圧倒的に(B')の場合が多く、明らかに小放電が負電荷の移動によっておこっていることを示している。この事実は、雲間放電の場合、小放電は負電荷が局部的に急上昇することによっておこるが、しかしその放電域は逆に次第に低くなることを意味する。これはSmith⁽⁶⁾が緩変化の波形から得た主負電荷の上昇によって雲間放電が完成されることが多いという結果とは、むしろ逆の意味をもっている。

第5図 逆転域の静電場変化



対地放電の場合は局部的な負電荷の下降が小放電を作るが、放電域はJストリーマ⁽⁷⁾の場合と同様に全体として上昇する。即ち対地放電でも雲間放電でも、その進行の向きが逆ではあるが、どちらも正の帯電領域から負帯電域に向って、負電荷を局部的に次第に取込む形で放電が進行している。

第3表

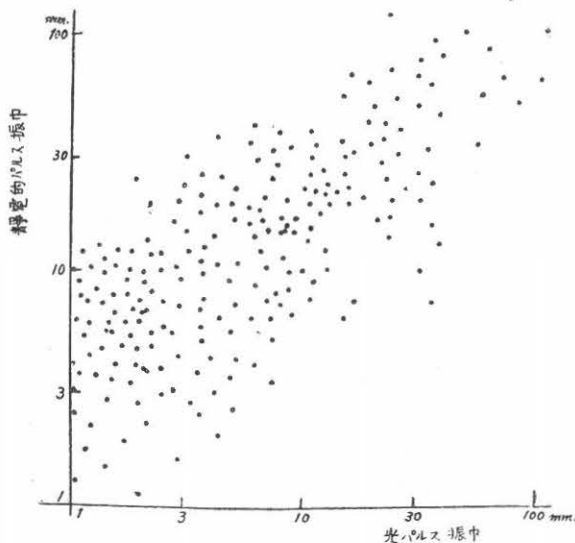
波 形	A'	B'	個 数
対 地 放 電	19	81 [%]	47 ^個
雲 間 放 電	15	85	165

IV. 静電場急変化と光度変化の対応

静電場変化量は放電電荷とその移動量により決まるのに対して、光放射の強さは電光路中のイオン密度と

その温度によるものであること、電場の波形によっても知られる様に一般に放電様式が単純でないこと、或いは又1 msec 近い継続時間をもつ 静電パルス波形が、増巾器の特性による歪のために静電場変化量をそのまま再現せず、立ち上りの遅い様なパルスではかなり小さい値しか示さないであろうこと、更には又局部放電の位置や方向の多少の変動が電場変化量の大きさに影響すること等を考え合せると、記録された静電的パルス及び光パルスの振巾相関が、同一放電中に相続くものをとったときでさえ余り良くないのも、当然かも知れない。しかしながら、平均的には大きい静電場変化は大きな発光を伴うことも事実である。相関の一例として、雷活動域の最も接近した際に得られた4分間の記録から、雲間放電の各々の継続時間中、最初の4分の1の期間に含まれる正静電パルスと相対する光パルスの振巾相関の様子を第6図に示した。

第6図 正の静電パルスと光パルスの振巾相関の一例。
振巾はブラウン管面上の値をとる。



光度変化振巾と静電パルス振巾の相関はそれほどよくはないけれども、平均的な両者の比率（以下これを P/S とかく）には充分な意味がある。これから述べる統計に於いて、 P/S の値は静電パルス波形の多様性から来る資料のかたよりを幾分でも防ぐために、確実に資料数の豊富な静電パルス振巾が2.5~10mm（ブラウン管面上で）のものについて、相当するそれぞれの光度変化振巾に対する比をとって平均した。雲間数kmに達する様な長大ストリーマはこれによって対象から除外できる。実際の観測では、観測の回によ

て両者の利得を独立に変化させているが、相対的な利得差（最高30 db）による平均値の変動は3割を越えていなかったもので、現象の偏差の大きさを考えれば、これを考慮する必要はないと思われる。

第2図の記録例にも見られる様に、一個の放電に属する局部放電の P/S の値は、放電の進展に伴って明らかに系統的な変化を示す場合があるので、各放電の継続時間を前半、後半にわけてそれぞれ平均した P/S 値の分布をしらべてみた。第7図には、静電パルスの中主要な符号に属するもの、即ち対地放電と雲間放電

についてそれぞれ近距離では負と正、遠距離では正と負の P/S 値の分布を示した。

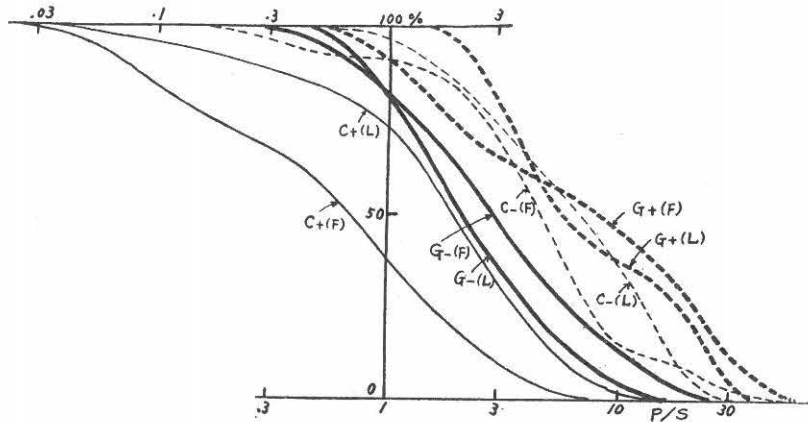
又 P/S の値が同一放電の前半及び後半でどの程度変るかを、後半の P/S 値対前半の P/S 値の比で示し

たのが第8図で、例として第7図と同じ符号のものをとっている。

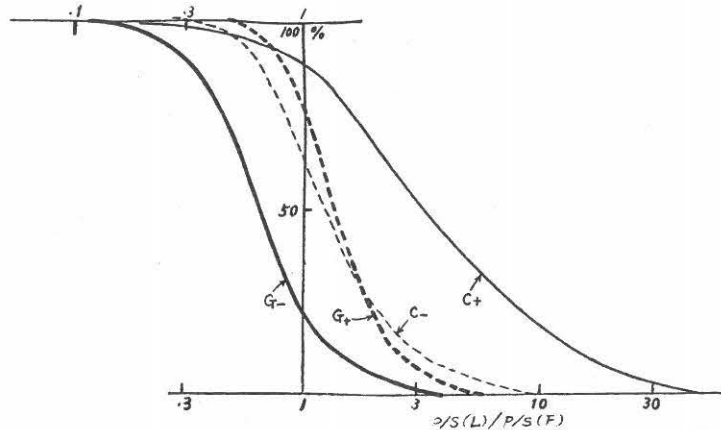
この両図で極めて顕著な傾向は、雲間放電の場合、

第7図 P/S 値の分布

横軸は両者をそれぞれの標準利得に換算して得た値である。 G は対地放電で太線。 C は雲間放電で細線で示す。実線は近距離、破線は遠距離、+、- はそれぞれ静電パルスの極性、又 F 、 L はそれぞれ前半と後半の資料であることを示す。



第8図 同一放電内での P/S 値の後半対前半比の分布 図中の記号は第7図と同じである。



近距離で主役をなす正の静電パルスについては、圧倒的に後半に於いて光が強くなっていることと、逆に対地放電の場合の主役たる近距離の負パルスに対しては、後半に於いて光が弱くなっていることである。確実な資料数の多い近距離で更に細かく継続時間の四半期ごとにとった P/S 値分布の中央値を示した第4表をみれば、前半から後半にかけて次第にこの変化が進行している事実が明らかになる。

第4表

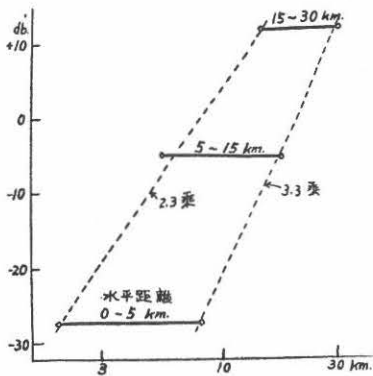
期 間	1/4	2/4	3/4	4/4
対地放電 (負パルス)	2.8	1.6	1.9	1.2
雲間放電 (正パルス)	0.18	0.60	1.1	1.5

電光強度の距離に対する減衰の状態について、現在では雲内の個々の発光源の位置決定が不可能なので確実な資料はない。しかし大凡の雷活動中心までの距離に対する記録の平均感度から推定すると、雷雲域での吸収や散乱のためにかなりの減衰があり、第9図に示

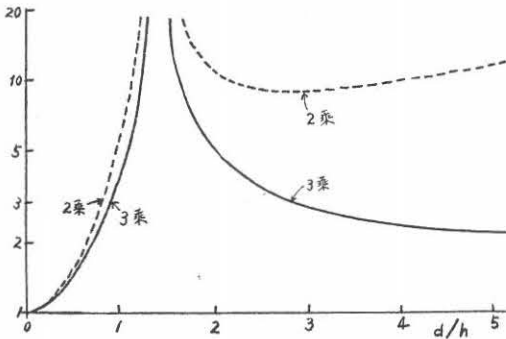
す様に放電の高さを2~8 kmにとればほぼ距離の3乗に近い値が得られる。II節で述べた様に、同一放電に属する局部放電の方向は、概して余り大きな変動をしないと考えてよいので、平均的に静電場変化については垂直双極子の場合をとり、光の減衰には距離の3乗をあててみると、光の強度と静電場変化の絶対値との振巾比は第10図に示す様になる。光の減衰を自由空間での距離2乗にかえてみても近距離での変化の傾向は殆んど変わらない。

逆転距離以内の一放電内に於ける P/S の変化の傾向は、第10図から雲間放電の場合は、 d/h の増加、対地放電では d/h の減少を意味している。即ち放電域の

第 9 図 光記録の平均利得と距離の関係



第 10 図 光度対静電場変化量の距離変化
縦軸は任意単位である



移動は、静電場変化の符号変化から推論されたものと全く同じく、雲間放電では放電域の下降、対地放電では上昇を示すのである。遠距離に於いて前後半で余り P/S 値に変化がないことも、第10図と一致する。近距離に於いて対地放電に属するものは、雲間放電に属するものより前半では数倍明るいのに、後半は大した差がないこと、又遠距離でも差がみられなくなることは、前者と後者の放電域がそれぞれ雲内主要負電荷の

下と上にあって、いずれも負電荷域に近づくことと一致する。

この様に考えるとき、雲間放電に於いて $+$ \rightarrow $-$ の分類に属する正パルスの最後は当然逆転域の比較的高い P/S 値——実際には III 節で述べた様に逆転域でも観測される静電場変化量は零にならないので、第10図に示される程高い観測値を得ることはない筈である——をもつことが予想されるが、第5表に示した正パルスの P/S の平均値は明らかにこのことを裏書きしている。

第 5 表

電場符号	P/S の平均値		個 数
	前半	後半	
$+$	0.34	1.28	58
$+\rightarrow-$	0.78	2.01	55

V. 結 び

(1) 一個の放電に属する静電的パルスの波形及び振巾の多様性と、光との振巾相関の程度があまりよくないこと、更にパルス時間間隔の極めてランダムな特性⁽¹⁾とは、局部小放電の位置と構造が極めて任意であるらしいことを物語るものであるが、その静電的パルスの符号にみられる一貫性からは、各々の局部小放電の方向はその全放電に特有の方向、恐らくその放電を構成する主要な両電荷を結ぶ方向から、余り大きく偏ることが許されない様に考えられる。

(2) 静電場変化符号の一般的な性質と、これと源を同じうする発光の強度との比較の示す傾向から、雲内に附属的に発生する局的小放電についての重要な性質が導かれる。雲間放電は主に雲内の高所にある正の主要電荷とその下方の負主要電荷の間でおこり、その放電域は上方から次第に下降する。しかし静電的パルスの符号逆転域で見られる波形からは、局部小放電が負電荷の局所的上昇によって完成されることを示している。

対地放電の各雷撃間、及び最終雷撃後に比較的高く続く附属的な雲内小放電は、対地雷撃によって地上より上昇せしめられた正電荷と雲内主要負電荷の間でおこる。その放電域は J ストリーマ⁽⁷⁾で説明される所と同じく次第に上昇するが、局的小放電の完成にあずかるものはやはり負電荷の局所的下降である。

以上から導かれる一つの重要な事実、放電が雲間であると対地雷撃に附随するものであるとを問わず、

雲内の緩放電では正帯電領域から負の領域へ向って、局所的には何十回となく急激に負電荷を取込む様な状態で放電が進行してゆくものが多いということである。

参 考 文 献

- (1) 高木, 石川, 竹内: 空電研報告, **8**, 11 (1958)
- (2) 高木, 石川, 竹内: Proc. Res. Inst. Atmosp. **6**, 1 (1959)
- (3) 高木, 石川 : Proc. Res. Inst. Atmosp. **4**, 48 (1956)
- (4) 石川, 高木, 竹内: 空電研報告 **7**, 14 (1957)
- (5) E.J.Workman, R.E.Holzer, G.T.Pelsor : Tech. Notes N.A.C.A. No.850, 864 (1942)
- (6) L.G.Smith : Q.J.R.Met.Soc., **83**, 103 (1957)
- (7) D.J.Malan, B.F.J.Schonland : Proc. Roy. Soc., **206**, 145 (1951)