

地震で引き起こされる大気の発光現象

高木俊二¹、池谷元伺¹

地震に伴う空の発光現象は地震発光と呼ばれ、昔から報告されている。1965-67年の松代群発地震において初めて写真に撮影され、その存在が広く知られるようになった。しかし、発光のメカニズムは未だ不明である。地震発光は電場で空気中の自由電子が加速され、それによってイオン化された空気中の分子が光るという放電現象モデルを用いて、電場強度と発光領域の評価を行った。

1. 地震発光現象

自然界の不思議な発光現象は、昔から人々の興味を引きつけてきた。雷やきつね火のように原因が明らかにされた現象もあれば、火の玉[1]や月の異常現象(Lunar Transient Phenomena)[2]の様にも未だ解明中の現象もある。

地震に伴い地表や空が発光する地震発光も未解明の現象と言える。目撃証言は、三代実録(869年)や古代エジプトのピラミッド・テキストなど古くから様々な文献に記載されてきた。しかし、科学的な検証に耐え得る証拠は、1965-67年の松代地震まで待たねばならなかった。群発地震に伴い幾度も地震発光が発生したことから、初めて写真撮影され、その存在が広く知られるようになった[3, 4]。写真に撮られた発光の中で最も明るいものは、フィルムの感度などから1ルックス程度と見積もられた。

これまでに報告されている発光の形態は稲妻、

扇形、ドーム型、帯状等があり、発光の色も青、赤、黄、白など様々である。1995年の兵庫県南部地震でも稲妻のような閃光、青色や赤色の発光などの報告があり[5, 6]、一部は写真撮影された。

1931年の寺田寅彦の論文[7]以降、発光の原理について様々なモデルが提案されているが、未だ明らかではない。一部を例に上げると、山崩れや地滑りによる摩擦発光[7]、天然鉱物中にある自然放射線損傷中の捕獲電子がストレスで解放されて生じる歪み発光[8]、帯電した大気中のちりによる発光として帯電エアロゾル発光[9]、不純物を溶かし込んだ水が地震の揺れで激しく振動することによって発光する水の超音波発光[10]など、モデルは多種多様である。

2. モデルの提案

2.1 放電現象説

地震発光のメカニズムについて、電場で空気中の自由電子が加速され、それによって励起およびイオン化された空気中の分子が光るという大気電気現象(放電)モデルを提案する。地震で電場が発生する仮説はいくつかあり、地殻内の水の運動で起こる毛管電気現象[7, 11]、花崗岩中の石英のピエゾ効果[12]などがある。新たな電場の発生モデルが今後さらに提案されるかもしれないが、ここではイオン化に必要な電場発生を、石英のピエゾ効果であるとする仮定を用いて説明する。

¹大阪大学大学院理学研究科

このモデルで用いる電場強度の範囲では、放電現象のうち暗流の状態である。暗流という現象は実験室の小さな装置では暗く目に見えない。しかし半径数十～数百mの領域にわたって発光が起るとすると、発光現象として肉眼で観測できるほどの強度が得られる。このモデルに基づいて、電場強度および発光領域の評価を行った。

2.2 電場の発生

断層地帯の岩石には長年掛かって歪みが少しずつ蓄積し、圧電効果による電気分極が起こる。その圧電分極する物質として花崗岩中の石英が上げられる。地震を伴わない緩やかな応力変化のときは、図1に示すように導電性の地球では補償電荷が圧電分極に結びついて分極を打ち消すため周囲に影響はない。しかし、地震によってその剪断応力が速やかに解放されると、分極がなくなり解放された補償電荷が一時的に現れる。この電荷によって空中に電場が発生する。

発生する電荷量を圧電効果の式と、地震学で用

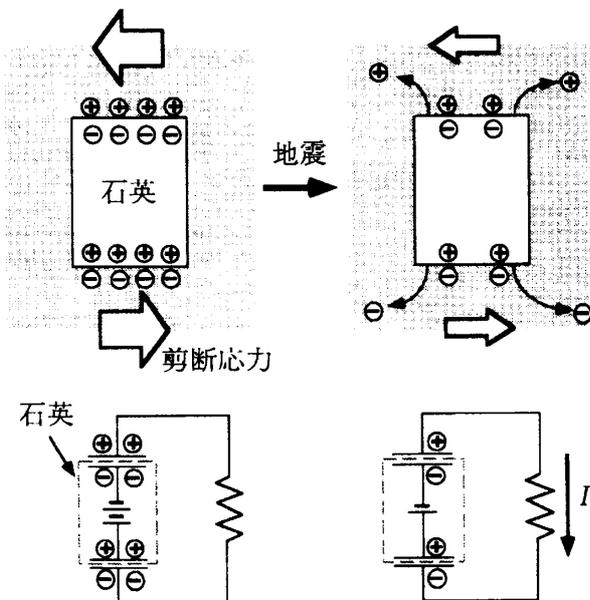


図1. 地震による補償電荷の解放とその等価回路。ピエゾ分極は補償電荷によって分極を打ち消されている(左側)。地震が起こると剪断応力の減少に伴い分極が減り、解放された補償電荷が一時的に現れる(右側)。

いられている断層の数学モデルの式を利用して求めた。応力が解放されるに従って現れる電荷 q は次式で表される。

$$\frac{dq}{dt} = -\alpha \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) - \frac{q}{\epsilon\rho} \quad (1)$$

右辺の第一項は電荷の発生に関する項で、ピエゾ定数 α と応力 σ の時間変化の積で表される。第二項は電荷の減衰に関する項で、地中の誘電率 ϵ と抵抗率 ρ で決まる。

地震でずれる断層の変位量 $D(t)$ は、

$$D(t) = D_0 \{ 1 - \exp(-t/\tau) \} \quad (2)$$

で表される。ここで、 D_0 、 τ はそれぞれ最終変位量、断層の変位時間の時定数である[13]。 σ の時間変化は一般化されたフックの法則を利用して式(2)から求まる。式(1)に代入し、初期条件として最初電荷は存在しないとすると、電荷の時間変化は、

$$q(t) = \alpha \Delta\sigma \frac{\epsilon\rho}{\tau - \epsilon\rho} \left\{ \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\epsilon\rho}\right) \right\} \quad (3)$$

で表される[14]。

式(3)を用いて地表に現れる電荷量から地表の電場強度の時間変化の評価を行った。花崗岩の誘電率と抵抗率はそれぞれ $8\epsilon_0$ と $10^{12}\Omega\text{m}$ である。断層の変位時間の時定数 τ は断層の長さを $2a$ 、地震のS波の速度を β とすると、地震で応力がすべて解放されるとき、 $\tau = a/\beta$ となる。

石英のピエゾ定数は応力の掛かり方によるが、最大の方向で $4.6 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ である。また花崗岩自体のピエゾ定数を測定した結果も報告されていて、石英の15-1000分の1程度のピエゾ定数を持っている[15-17]。松代地震では、石英を多く含む岩石の露頭でしばしば地震発光が観測された。このことからほぼ石英と同じピエゾ定数を持つ岩石が、10mの長さにわたって破碎を生じた場合の電場強度の時間変化を図2に示す。電場強度は $\epsilon\rho$ の時定数で立ち上がり、 τ の時定数で減衰する1つのピークを持つ形となった。地表付近では一時的に $2 \times$

10⁵V/m以上の電界が得られる計算になる。地下に大きな石英脈があるか、圧電補償電荷が分極する物理過程があると発生する電荷量は大きくなる。この点については別稿に譲ることとし、ここでは断層地帯に電荷が現れたものと仮定して計算した。

2.3 電子増倍とイオン化

空気中には宇宙線や地中からの放射線により毎秒1cm³あたり4~10個の自由電子が発生している。これが地表に現れた電荷により加速され、一部の空気分子を励起・電離する。励起された分子が基底状態に戻るとき及び、生成したイオンが再結合するときの発光が、地震発光現象になると考えられる。

発光領域を見積もるため、空気中の分子のイオン化と電場強度の関係を求める。空気中の自由電子はO₂などに付着することにより、速やかに減少する。このためイオン化の計算では、加速された自由電子による直接電離および電子の付着によるイオン化を考慮した。空気中の自由電子数 n の変化は以下の式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = v_{di}n - v_{ai}n + n_{rad} \quad (4)$$

増加項として加速された自由電子による直接電離と放射線による電離を、また減少項として空気に

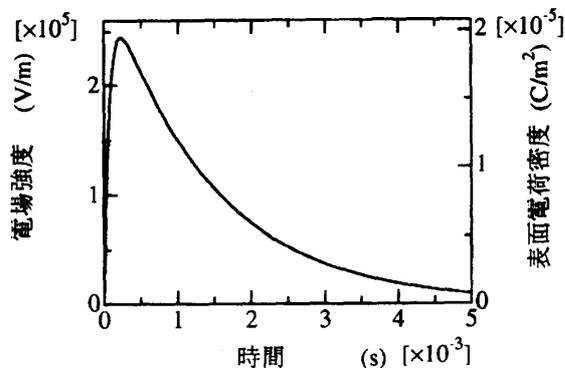


図2. 10mの長さにわたって、10⁶N/m²の応力が解放されたときの、表面近傍での電場強度の時間変化と地表の面電荷密度。電場強度は ep で立ち上がり、 τ の時定数で減衰する。

よる付着を考慮した。ここで、 v_{di} 、 v_{ai} 、 n_{rad} はそれぞれ加速された自由電子による直接電離頻度、自由電子の空気中の分子に対する付着頻度、自然放射線による自由電子の生成量である。

直接電離の頻度は、電子の速度分布関数を $f(v_e)$ 、空気分子密度を N_e とおくと、

$$v_{di} = N_e \int_0^{\infty} \Omega(v_e) v_e f(v_e) dv_e \quad (5)$$

で与えられる。電離は電子のエネルギー分布と電離断面積の積、つまり図3のメッシュで示した部分で起こる。電離断面積は電離エネルギーのところからほぼ直線的に立ち上がるが、電離エネルギー E_i 以上のエネルギーを持つ電子の数は指数関数的に減少している。このため電子温度 T_e が数eVを越えない場合は、断面積を $C(E-E_i)$ という直線の式で近似できる[18]。

電子の速度分布がマックスウェル分布である場合、分布関数を速度 v_e からエネルギー E (eV)に変換し、 $N_e C = a_0 (273/T_e) p$ の関係をを用いると式(5)は、

$$v_{di} = a_0 \left(\frac{273}{T_e} \right) p \left(\frac{8e}{\pi m_e} \right)^{1/2} E_i^{3/2} \left(\frac{kT_e}{eE_i} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{2kT_e}{eE_i} \right) \exp\left(-\frac{eE_i}{kT_e} \right) \quad (6)$$

となる。ここに m_e 、 e 、 k はそれぞれ電子の質量、素電荷、ボルツマン定数である。 a_0 、 E_i は実験的に求

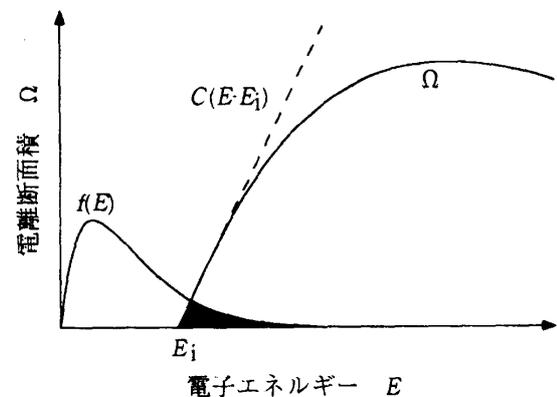


図3. 電離断面積の直線近似。電子のエネルギー分布と電離断面積の積の部分で電離が起こる。電子の平均エネルギーが小さい場合は電離断面積を直線近似しても誤差は少ない。

められていて、それぞれ $a_0=0.26 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ (空気), $E_1=15.5 \text{ eV}$ (N_2), $E_1=12.2 \text{ eV}$ (O_2)である[19]. ただし p は[Torr]で与えられる.

電子の付着確率は1気圧の場合, $4 \times 10^4 \text{ V/m}$ 以下になると急速に大きくなる. それ以上の電圧では, $1-4 \times 10^6$ 程度(つまり, 25万-100万回の衝突に一度の割合で付着する)である[20].

図4は電界強度に対する電離頻度及び付着頻度を示したものである. 放射線による電離だけでは目に見える発光量にならないことから, 地震発光時には電離による電子増倍が起こっていると考えられる. このため, 付着頻度より電離頻度が大きくなる必要がある. N_2 では $6 \times 10^4 \text{ V/m}$ から, O_2 では $5 \times 10^4 \text{ V/m}$ から, 電離頻度の方が大きくなっている.

2.4 発光領域の評価

先程の計算結果に基づいて, 地表に電荷が現れたときの発光領域を計算した. 地表に現れた電荷は図2に示したように速やかに減衰することから, $1.5 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ の電荷が 0.5×10^{-3} 秒間継続した場合を考える. 電子は 10^{-8} sで最終移動速度の94%以上に達するため, 電荷の保持される時間は発光が起こるのに十分な時間である. イオン化されたり励起

された分子は大気中では ~ 1 sの発光時間を持つ. 10 m 四方にわたって $1.5 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ の電荷が現れた場合の発光領域を図5に示す. 斜線で示した範囲が地震発光を起こす領域になり, ドーム型になった. これは松代地震で写真に撮られた地震発光の一つとよく合う結果になった.

3. まとめと展望

地震発光のメカニズムとして, 地震に伴い発生した電場が大気中の自由電子を加速し, 空気分子をイオン化・励起することで地震発光が起こるモデルを提案した. モデルに基づいて計算を行った結果, ドーム型の領域が発光することが求まり, 報告されている地震発光の形態の一つとよく合う計算結果が得られた.

発光量や発光色については, 窒素や酸素分子には様々な励起状態があることから, 多くの過程を考慮する必要がある. それらは実際に放電実験を行った上で, 今後評価を行っていきたい.

連続写真から数十秒程度の長い発光時間を持つ地震発光も報告されている. この場合も提案したモデルで説明が可能である. O_2 のある空間で電場があると, O_3 が容易に発生する. 発生した O_3 は,

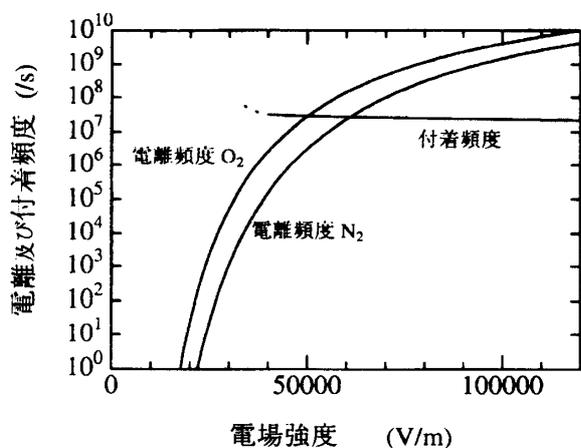


図4. 300K, 1atmでの電場強度に対する電離頻度及び電子の付着頻度. N_2 は 6×10^4 , O_2 では $5 \times 10^4 \text{ V/m}$ 以上で電離頻度の方が付着頻度より大きくなっている.

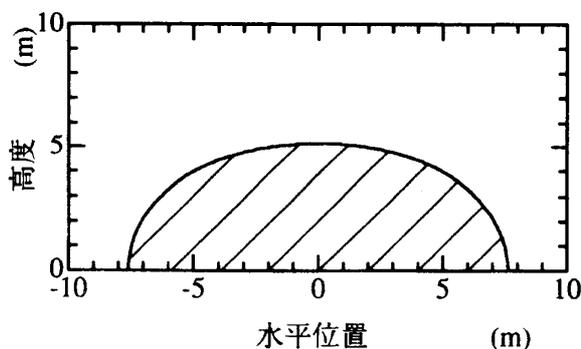


図5. 地表に $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ にわたって $1.5 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ の電荷が現れたときの発光領域の断面図. 斜線で示した範囲で地震発光が起こる.



の反応により励起したNO₂を生成する。このNO₂からの発光波長は520-810nmであり、濃度により反応速度は変化するが、大気圧中で100秒以上継続する[1]。これはプラズマとしての火の玉の発光現象の説明にも用いられており、見方を変えると、オゾンを作ることで化学的にエネルギーを蓄え、長時間にわたり発光のエネルギーを維持していることになる。

様々な形態の地震発光が報告されていることから、複数のメカニズムによって地震発光は引き起こされているのかもしれない。しかし、近年のカメラやビデオカメラの普及により、これまでの証言だけの報告に代わって、写真や動画という客観的な映像資料が得られるようになってきた。地震発光が摩訶不思議な現象とされるのも、あと僅かかもしれない。

参考文献

- [1] スミルノフ, B. M., 大槻義彦・大古殿秀穂, 1994: 『火の玉の科学』, 共立出版.
- [2] Hilbrecht, H. and Küveler, G., 1984: Observations of Lunar Transient Phenomena (LTP) in 1972 and 1973. *Earth Moon and Planets* **30**, 53-61.
- [3] 安井豊, 1968: 地震に伴う発光現象に関する調査報告(第一部). 地磁気観測所要報 **13**, 25-61.
- [4] 安井豊, 1969: 地震に伴う発光現象に関する調査報告(第二部). 地磁気観測所要報 **14**, 67-78.
- [5] 佃為成, 1995: 1995年兵庫県南部地震に伴った発光現象. 月刊地球号外, **13**, 184-189.
- [6] 弘原海清, 1995: 『前兆証言1519』, 東京出版.
- [7] Terada, T., 1931: On Luminous Phenomena Accompanying Earthquakes, *Bull. Earthquake Res. Inst.* **9**, 225-255.
- [8] 池谷元伺, 1982: 地質学との学際領域への旅, 固体物理 **17**, 690-698.
- [9] Tributsch, H., 1982: *When the Snakes Awake*, MIT Press.
- [10] Johnston, A. C., 1991: Light from Seismic Waves, *Nature* **354**, 361.
- [11] Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T. and Ohnishi, S., 1976: Electrokinetic Phenomena Associated with Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.* **3**, 365-368.
- [12] 池谷元伺, 1996: 地震に伴う電磁気現象と動物の異常行動, 科学 **66**, 408-418.
- [13] 金森博雄, 日本物理学会編, 1974: 『現代の地球観』, 丸善, 279-303.
- [14] Ikeya, M. and Takaki, S., 1996: Electromagnetic Fault for Earthquake Lightnig, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 355-357.
- [15] Ghomshei, M. M., Narod, B. B., Templeton, T. L., Arrott, A. S. and Russell, R. D., 1988: Piezoelectric Pole Figure of a Vein Quartz Sample, *Textures and Microstructures* **7**, 303-316.
- [16] Volarovich, M. P. and Sobolev, G. A., 1965: Use of the Piezoelectric Effect of Rocks for the Subsurface Exploration of Piezoelectric Media, *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **162**, 556-558.
- [17] Sasaoka, H., Yamanaka, C. and Ikeya, M., 1997: Measurements of Electric Potential Variation by Piezoelectricity of Granite, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- [18] Raizer, Y. P., 1991: *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, Berlin.
- [19] Von Engel, A., 1955: *Ionized Gases*, Oxford University Press.
- [20] 武田進, 1990: 『気体放電の基礎』, 東京電機大学出版, p. 46.