

電力気象の研究

宮地 巖・依田正之

Research Project on Electrometeorology

Iwao MIYACHI and Masayuki YODA

The up-to-date electrical energy systems are sensitively concerned with meteorological natural phenomena such as lightning discharges, earthquakes, salt contamination etc. in order to maintain the highest security of power supply. The captured energy of solar radiation, as an alternative source, may well be put to practical use if it is expected to have a combined operation with suitable devices of temporary storage, as is the case with the nuclear power and pumping-up hydraulic plant. Based upon the profound experiences on natural disturbances against power systems and apparatus, and also sustained by the information derived from the meteorological satellite schemes, the authors are intending to establish a new branch of technical development on electrometeorology truly useful in the modern life of next century. This paper deals with the related arguments and estimations for the purpose of promoting the research project concerned.

1. 電力気象の沿革

電力発生の主力を水力に依存していた頃には、毎日の河川流量や降雨流域などが電力技術の主要関心事であった。その後ダム貯水技術が発達して洪水や雪解け水の調節が可能となり、雨量も年間降水量によって議論されるようになった。最近では大容量原子力や火力発電を円滑に運用する必要性から、100万kW級の応急出力を10時間程度連続して放出できる純揚水水力発電所が建設され、エネルギー貯蔵の面でも安定な新方式が確立されてきた。しかしこれらの揚水形態は、上池を山頂付近において落差を大きくするとともに、流域保全の配慮から極力降雨の影響をうけないものになっており、折角の豪雨や洪水に対してはまだ利用の途すら拓けていないのが現状である。

電源と消費地とを結ぶ高電圧基幹送電線は、エネルギー輸送ルートとして工業立国のシンボルでもある。これらは年間を通じての風雪に堪えるよう設計されているが、雷の襲撃に対しては全く無防備の露出状態である。可能な対策として架空地線や保護ギャップを設け、線路末端には適正な避雷器を設置して機器の損傷を防いでいるが、これによって雷撃の発生や頻度を抑制することには少しもなっていない。海岸線に近い送電線や臨海直接昇圧に用いられるがいし・がい管類は、塩分の付着によって沿面絶縁特性が著しく阻害される。特に台風や季節風に伴う塩害事故は、数100kmの広域にわたる同時停電にまで進展する可能性がある。雨洗効果の少ない瀬戸内海

方面では、累積汚損の被害も認められている。

変電所を構成する機器については、遮断器・断路器・変成器・母線など変圧器を除いて一般に重心も高く、強固な耐震性能を付与することが必要である。プロフィールの低い最近のガス絶縁開閉装置においても、地盤の不等沈下などの耐震対策が必要とされている。また変圧器ブッシングは他の機器と異なり、耐震性能上は本体と分離して設計ならびに試験するものとして位置づけをしている。

以上述べた雷撃・塩害・地震などの影響は、局所的な長時間大停電をひきおこす要因ともなり、これら実態の解明は降雨・降雪・台風などの場合とともに、気象学的知見として高度に発達した電力系統を無停電ネットワークとして運用する場合の重要な支援情報となるものである。電力気象といえれば従来は、豪雨・土砂災害・需要予測などの関連に限定されていたが、いまや21世紀に向けて宇宙科学の時代が拓け、ニューメディアとしての気象衛星情報が容易に入手できるようになって、電力系統全般に関与する広義の電力気象の研究が強く要望されるようになってきた。

著者の一人は、変電設備の耐塩設計、変電機器ならびに変圧器ブッシングの耐震設計に関して比較的長期にわたって参画し¹⁾²⁾³⁾、またこれらの成果を将来の100万V級送電設備にも反映させることに専念してきた⁴⁾。表1は全国統一見解によって、塩害地区の汚損区分を想定塩分付着密度を基準として分類したものであり、表2はその基

表1 標準汚損区分

区 分		想定塩分付着密度 (mg / cm ²)	備 考
一 般 地 区		—	塩の影響がほとんどなく、塵埃汚損が主で塩害対策を特に必要としない地区で、等価塩分付着密度0.01mg / cm ² を目安とする。
塩害地区	軽汚損地区	0.03以下	塩の影響があり 塩害対策を必要とする地区
	中汚損地区	0.03超過～0.06以下	
	重汚損地区	0.06超過～0.12以下	
	超重汚損地区	0.12超過～0.35以下	
	特殊地区	0.35超過	

想定塩分付着密度は、長幹がいしに付着した値を基準とする。

表2 長幹がいしと懸垂がいしの塩分付着密度の換算係数

が い し	急速汚損	平常汚損	備 考
懸 垂	1	1	平常汚損については、雨洗効果が期待できる場合の換算係数である。
長 幹	1.2	0.5	

懸垂がいしの塩分付着密度はがいしの下面外とする

礎となるパイロットがいしの同一塩嵐に対する実着密度の相異を換算係数で示したもので、これによって特定地区の耐塩設計ならびに対策が可能となった。一般の変電機器の耐震性能検証のためには、共振正弦3波0.3G突印の試験法を設定したが、1978年6月12日宮城県沖地震で被害のあった変圧器用センタークランプブッシングについては、地震動との共振に注目して図1のような特別のフローシステムを確立した。しかし過去のある時期に提案や実験が行われた人工降雨⁹⁾や人工融雪については、未だに有意な成果をもたらしていない。このように電力気象の分野においては、技術的にはこれまでいろいろな対応があったけれども、学理的には全く解明されていないものも多く、今後の研究成果に期待するところが極めて大きい。

2. 人工雷と自然雷

送電線上を伝播する雷現象を雷サージと呼び、試験場において蓄積電荷を放出させて発生する衝撃電圧を雷インパルスと呼んで区別している。電力機器絶縁については一般に、1/40 μ sの雷インパルスと250/2000 μ sの開閉インパルスとによって短時間特性を検証し、常規電圧の $\sqrt{3}$ ～2倍程度の交流高電圧試験によって長時間耐力を保証するようになってきている⁶⁾⁷⁾。単発的な放電現象であるこれら人工雷インパルスと、実系統に災害をもたらす自

然雷との間には、十分な等価性があるかどうかについてなお検討を要する点が存在する。例えば雷サージは常に1/40 μ sで代表される単発インパルスなのか、継続時間ももっと長くはないか、いわゆる多重雷が予想以上の頻度で発生してはいないかなど数々の疑問が残る。

わが国で大規模な雷観測を始めた時期は遠く1940年代にさかのぼる。気象・電力・無線・航空・電波等の分野にわかれて9年間の成果がとりまとめられた⁹⁾が、その後は専ら機器側からみた雷害対策を指向して、計測手法の統一や図2に示す襲雷頻度マップの完備という形で整備されてきた⁹⁾¹⁰⁾。近年ロケット誘雷技術の発達に伴い、人工的にトリガした雷放雷と同期して精密な放電路の進展を記録し、また電流値やその波形などを計測することができるようになった。ロケットの発射高度や地点などの制約から、この試みはまだ冬季雷にしか成功していない。しかし正負の雷放電をほぼ等しい確率で観測することができ、また10数回から数10回におよぶ多重雷や、割合に多くの全放電時間が1秒近く継続する事実を認識することができた。表3は1977年以降実施してきた石川県河北潟における実験記録のうち、ロケット誘雷に成功した場合のみを集録したものである。表中の異常放電とは、放電路の下部がロケットで打上げられたピアノ線に必ずしも沿わなかった場合をいう。実験では地上電界の強さまたは針端コロナ電流の増加に着目してロケットを発射し

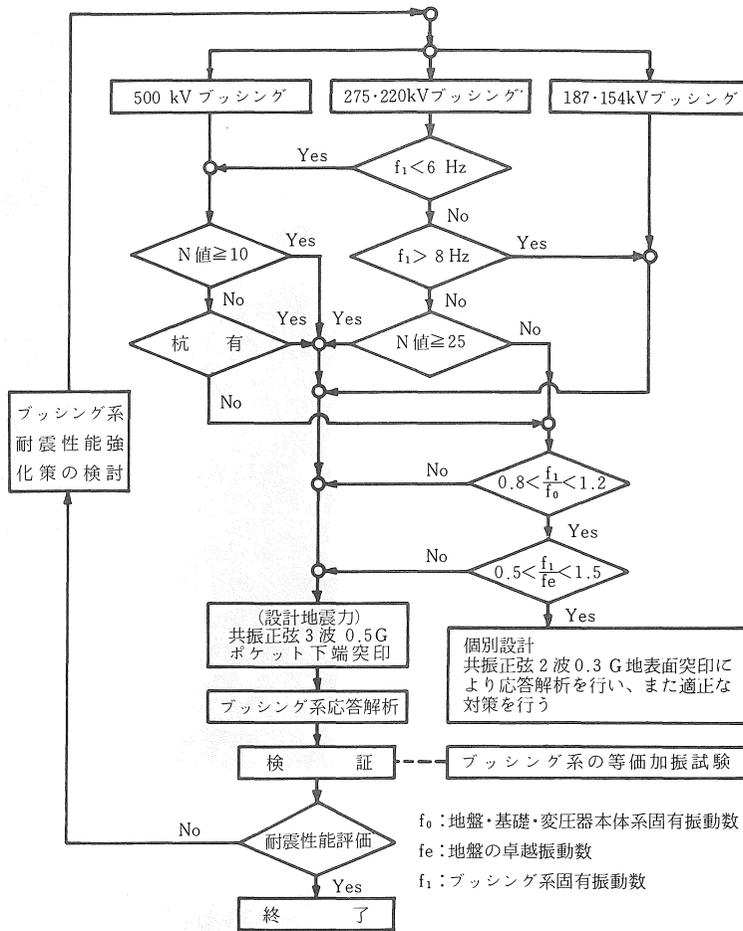


図1 154kV以上変圧器ブッシングの耐震設計

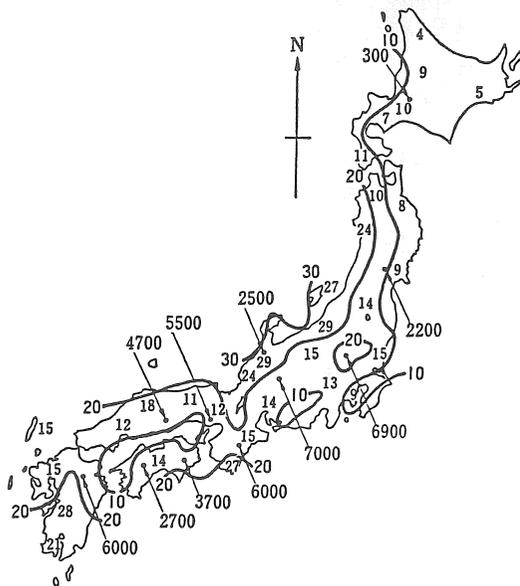


図2 襲雷頻度マップーIKL分布と雷放電カウント数(夏季)

誘雷させたが、これらに関する記録は文献⁽¹⁾⁽²⁾に詳述してある。

図3は初期の誘雷実験で得た代表的な冬季雷の様相である。下方の直線状に光る部分は0.2mmφのピアノ線が溶断したところで、上方は雲底にいたる自由空間内のジグザグ放電路である。電流値は小さいが枝分かれの明瞭な写真がとれたことに大いに自信を得て、爾後の研究発展を円滑に進行させることができた。溶断した線の打上げ高さは300mである。雷放電の先端は通常密雲の内部に侵入しているが、高度2000~4000mに達していると判定されるので、ピアノ線の存在によって誘雷が始動するとはいえ、自然雷全体の放電形態が著しく変歪するとは考えられない。この他、地上高10m程度まで誘雷しそこから自由空間の放電をさせて、地上施設に対するいわゆる長ギャップ放電実験も実施した。このようにして人体模擬や現物の自動車・変圧器などへの自然雷放電を実現させた。最近の実験による多重雷放電の顕著な例を図4に示す。この場合は異常放電でもあかつ至近距離への

表3 誘雷実験記録(冬季)

実験番号	月 日	時:分	地上電界 kV/m	主電流 kA
1977-2	12/22	02:01	9.0	2.2
3	12/27	02:47	-7.5	-1.8
1978-1	12/20	00:07	5.7	5
3	12/23	21:56	4.8	< 1
4	12/29	08:14	8.5	15
6	〃	09:23	5.5	16
7	12/30	05:44	-6.2	(10A)
8	〃	05:58	-9.0	< -1
1979-2	12/01	23:31	9.3	3.6
4	12/05	23:34	-7.1	< -1.2
5	12/10	14:15	-9.4	< -1.2
6	12/15	07:49	-10.6	-24
* 9	12/25	11:49	-9.4	-16
12	12/27	06:35	-7.2	-1.4
14	〃	16:26	-7.4	-12
1980-5	12/08	00:07	7.5	12
10	12/09	18:09	-9.0	-2
11	〃	19:01	7.0	5
15	12/18	23:54	-7.0	-11
17	12/20	14:50	11.5	24
18	〃	15:13	11.0	< 0.5
19	12/23	17:00	9.0	< 0.5
21	12/24	06:31	-8.8	-13
22	〃	06:45	-6.2	-26
24	12/26	08:39	-6.5	< 0.5
1981-6	12/02	00:36	-9.0	-2.8
* 7	〃	01:27	-7.1	-9.0
9	12/11	23:37	7.2	22.3
10	12/12	00:38	6.0	21.1
11	〃	00:46	-7.2	-6.6
13	12/19	18:01	-4.0	< -0.1
16	12/24	01:25	6.0	23.8
1982-2	11/24	18:30	8.0	16.0
4	〃	19:20	7.6	6.0
5	〃	20:41	10.0	2.5
* 9	12/02	06:20	-8.0	
15	12/12	20:20	13.5	15.8
* 16	〃	20:29	-10.0	-30.0
17	〃	21:10	16.0	16.0
* 18	〃	21:25	-14.0	
* 20	12/15	00:06	-9.0	
21	〃	00:54	-9.5	-12.0
* 22	12/18	01:19	-4.0	
23	〃	02:10	-12.0	-1.0
24	〃	04:10	12.0	1.0

* 異常放電

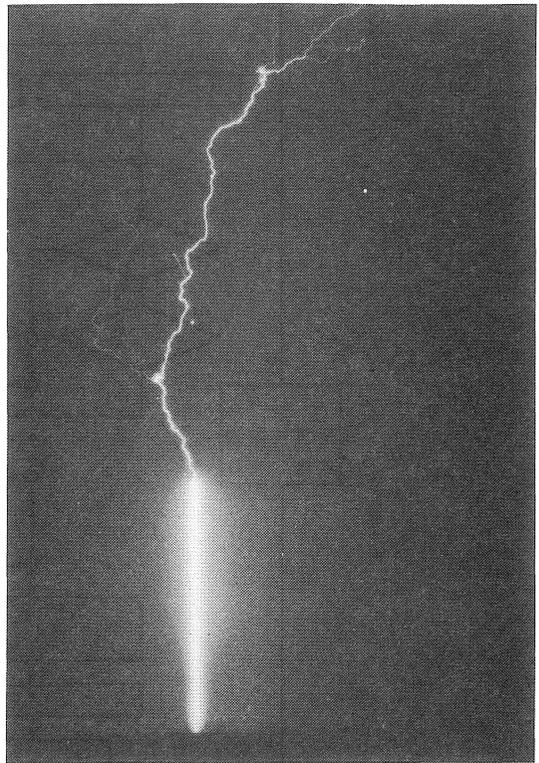


図3 冬季雷の様相(河北瀋, 1978-3)
1978年12月23日21時56分, 2 km前方

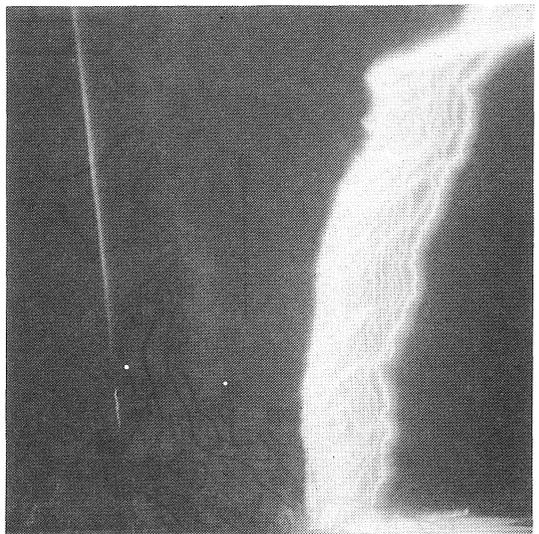


図4 多重雷放電(河北瀋, 1982-16)
1982年12月12日20時29分, 21m前方

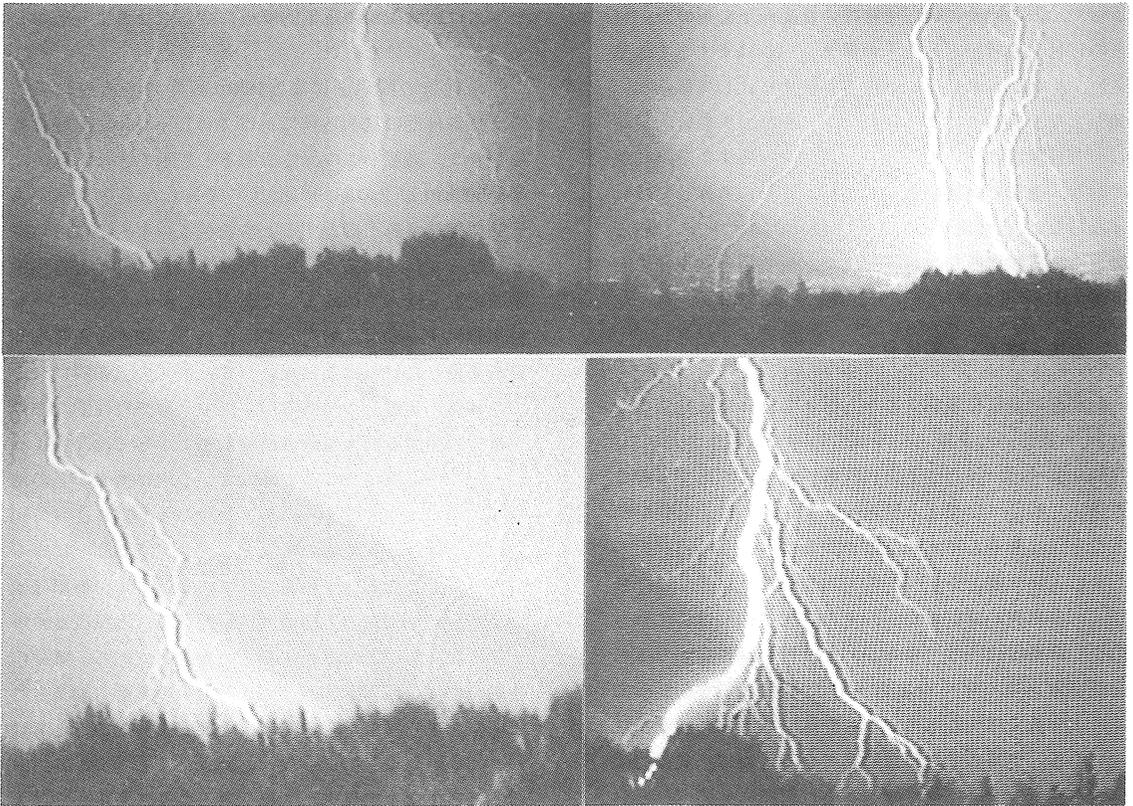


図5 夏季雷の様相 (愛知工大)
一連の放電と単独放電
1983年9月7日16-17時, 600m前方

誘雷であって、風に流された高さ14mの垂直放電路の軌跡と、右方5.5m幅の道路面を放射状に走る水平放電路が明瞭に認められる。この場合は0.4秒間に40回の多重雷となったことが記録より明らかとなったが、一般に全誘雷実験を通じて記録の40%は多重雷であり、また全体の10%は6回以上の多重度を有することも認められた。以上の観点からも電力施設への雷撃の実態と対策については見直すべき時点にきているものと考えられる。

夏季雷の放電様相について、約1時間の間に発生した10回以上の集中落雷を記録したものが図5である。本学の研究室から南方に向かって、ビデオ撮影したものを時系列に分解して写真としたもので、極性や電流値は記録されていない。放電路の移動は一定方向ではなく、狭い地域を数回往復した形跡がある。一連の放電とともに、枝分れの顕著な単独放電の例も示した。全く離れた2地点での単独同時放電もあり、この記録からも雷放電のあり方について今後検討すべき課題が数多く抽出できる。

雷サージや開閉サージに対する電力機器の保護は、わが国独自の開発に端を発した酸化亜鉛形避雷器の出現に

表4 UHV (公称1000kV, 最高1100kV) 系統用酸化亜鉛形避雷器特性

項目	基本仕様	備考	
形式	SF ₆ ガス絶縁, 屋外, 酸化亜鉛形		
定格電圧	826 kV・AC	1100/√3kV×1.3	
連続使用電圧	635 kV・AC	1100/√3kV	
公称放電電流	20 kA	8/20μs	
電圧・電流特性	放電電流	保護レベル	素子4並列使用 500kV系統用 20kA-1350kV
	4 mA	1080kV	
	1 kA	1370	
	10	1550	
	20	1620	
	30	1670	
平坦率	1.5	1620/1080	
課電率	0.83	635√2/1080	
低減率	0.60	1620/1350×2	
エネルギー耐量	250J/cm ²		

よって、国の内外において格段の性能向上を遂げた。将来のUHV系統用としてその保護レベルはますます改善され、表4に示すように500kV系統用と比して低減率は60%となり、これによる経済効果は極めて大きい。しかし一方自然雷についての知見は再検討を要する段階にきており、機器の保護協調についても大いに考究しなければならない。自然雷データの精密観測システムを完備し、複数の誘雷観測所を設置するとか、自然雷の人工発生を実現するとか、いまや関連する研究課題は山積している。

3. 台風・降雨・太陽放射

わが国の発電は現在火力から原子力主体に変換しつつある。石油価格の高騰と入手事情の不安定条件によって、安価な原子力に移行するのは世界的傾向であるが、その取扱いにおいて従来より数桁高い運用信頼度が必要であることはもちろんである。この間新エネルギー源探索のために各種の資源や現象が検討対象となり、多くのプロジェクト研究が発足したが、その評価の結果は必ずしも望ましいものばかりではなかった。特に自然現象のような低密度エネルギーを電力として実用に供するためには、大容量で確実なエネルギー貯蔵システムが必要になってくる。現時点でこれに対応できるものは、実質的には揚水発電を置いて他にないことは冒頭にも述べたとおりである。供給信頼度を確保するための揚水発電の価値は大きい。しかしその経済性を考えるとなるべく運転しないで済むことが望ましい。つまり揚水発電は保険的性格をもつことも事実である。著者らはさき大容量の海水揚水発電について検討を加えてきた¹³⁾が、これも将来のある時期には必ずや具体的研究対象になるものと考えている。このように淡水、海水を問わず、水は当面のエネルギー貯蔵の主媒体であると位置づけることができる。

気象衛星による画像が毎日報道されるようになって、天気予報は格別に身近かなものとなったが、まだ数日先の正確な予報はやはり困難であるという。図6に大型といわれた1983年台風5号の雲軌跡を暦日の順に抜粋配列した。ここに示したものは赤外線画像であるから、深夜でも観測できる代わりに、可視画像に比してコントラストがよくない。大まかなスケッチではあるが、発生から消滅にいたる刻々の活動範囲や移動の過程がよく識別できる。雲画像の濃淡は雲頂温度に対応しているから、この形が目に見える現実の雲の集団を現わしているとは限らない。ひまわり¹⁴⁾やNOAAで代表される気象衛星の他に、各種のミッションをもった人工衛星が打上げられている¹⁵⁾。静止衛星の可視赤外回転走査放射計(VISSR)から得られる情報は予想以上に多く¹⁶⁾、海洋・測地情報¹⁷⁾

とともに広域気象の定量的解析に役立たせるよう活用していかななくてはならない。

熱帯地方の圏界面は高度18km程度であるのに対して、日本付近の夏から秋にかけては14~10km程度であるという。高度がこの程度であると想定できる台風が、半径500km以上の回転円板状に成長しながら日本の大気圏に押込まれて接近するときのエネルギーのはけ口はどうなっているであろうか。代表的な台風モデルの気象学的把握も進んでいるようである。台風のエネルギーを将来利用する場合を考慮して、これらに関する正確な知識を集積しなければならない。また大気の大循環についての知見が定着しつつあるが、集中豪雨や慢性的な多雨地帯を説明する局地気象の理論はまだ十分ではないようである。例えばいまここで降っている雨は世界のどの地点で蒸発した水分であるのか。北陸の冬季雷に伴って起こる大雪は、ごく近海の暖流とシベリア寒気団とによって生じたものであると説明されている。日本の梅雨気象は、ヒマラヤ山系で方向づけられたジェット気流とオホーツク海高気圧とに依存するという説明である。黄砂の移動や世界を何周もするという火山灰の影響も論議されている。さらに雲は空に浮ぶ巨大な貯水池であるともいわれている。揚水によらない制御された降雨により、合理的で自由な水力発電が実現できるよう、宇宙からの大気圏情報も地上からの雲情報もともに大いに役立たせることが望ましい。台風・降雨サイクルにおけるエネルギー収支の微細構造に気象衛星が活躍するのも間近いことと思われる。

新エネルギー源としての太陽光発電が議論される中で、到達エネルギーの分光分析は基礎的意義をもつ。地上の天候如何にかかわらず、大気圏外には絶対量の等しい安定した光エネルギーが到来していることを考えれば、雨天でも夜間でもなるべく多くの太陽放射を利用する手法の開発は課題として望ましい。いわゆる大気の窓領域にある波長10.5~12.5 μm の赤外線がひまわりの観測に利用されているが、0.95 μm 付近の近赤外域には逆に水蒸気の強い選択吸収帯があって、これを大気中の水蒸気情報源とすることができる。最近ではこれらに関する水分子の共鳴振動についての基礎研究が進められている¹⁸⁾¹⁹⁾。電気が発見された当初は通信に利用されたが、今日では主要なエネルギー源となったと同様に、光通信はやがて巨大な光エネルギーとして展開していくのではなからうか。それにしても光はなぜ直進するかという単純な疑問が工学的には理解されていない。それが光の性質だといっても、反射光を含めて世の中にはいかに直進する光が入り乱れて多いことか。反射とは何分子層の光の干渉とみられるか。太陽放射エネルギーの利用という工

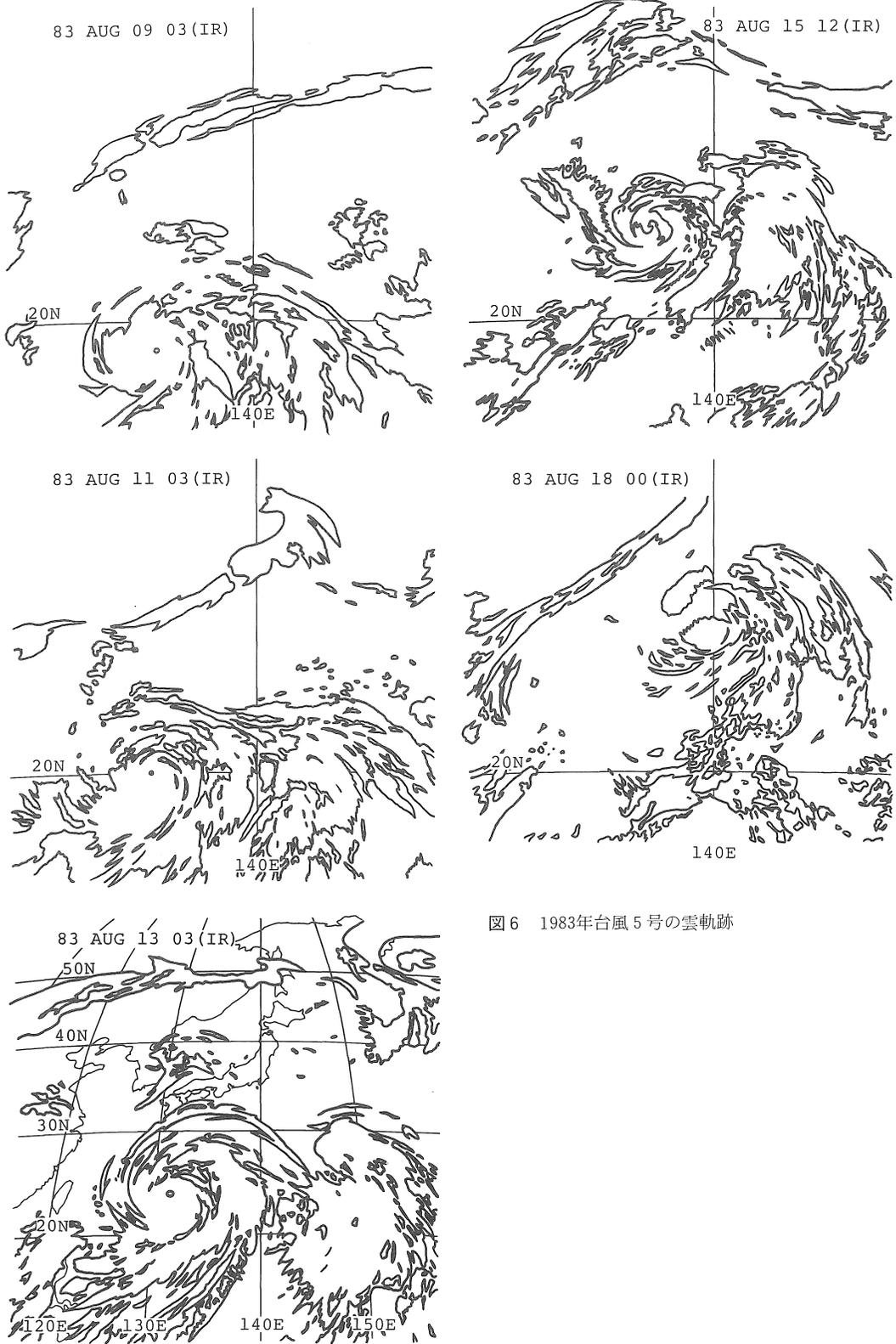


図6 1983年台風5号の雲軌跡

学目的は、従来とは全く観点を異にした幾何光学的量子論的解明を要求しておるように思われる。

4. 電力気象学の構想

電力気象学をどのような体系で展開していくかは現在まだ考究中である。しかし気象衛星のような新しい観測システムによって、研究が数歩前進することは明らかである。これに加えて地上における精度の高い気象レーダや高層天気図、アメダスなどの情報源も漸次整備されてきている。気象学の発達に伴い、現在すでに気象制御や台風制御の問題が提起され、世界の話題になっていると聞いているが、これらについては技術的アセスメントがまず先行すべきであり、またそのための手法としての学問を発達させる必要があるともいわれている。特に工学としての気象学については電力システムとの協調体制を整えた電力気象学を想定して研究開発の指針と目標をたて、これに従って展開する分野を育成することが必要であると痛感する。当面は河川の出水予想や大電源脱落に具えての給電司令体制の確保などが気象情報の対象となっている²⁰⁾が、きめ細かく技術開発対象を抽出して評価することから着手することになろう。著者らはいつの日にか気象災害が新エネルギー源に転ずることを望んでいる。

謝辞

幸にして昭和58年度私立大学研究設備整備計画補助対象として、気象衛星画像受信システムを本学に設置することが認められた。これによって従来の太陽放射エネルギーに関する基礎研究に加えて、全天候型研究を推進することが可能になった。ご協力賜った方々に謝意を表するとともに、写真などの原図を提供して頂いた堀井憲爾教授と中部電力の各位、図表の整備に協力頂いた院生池戸弘泰・加藤敬一の両君、卒研学生加賀一之君とグループの諸君に厚くお礼申しあげる。

参考文献

- 1) 宮地 巖他：変電設備の耐塩設計，電協研35(3)，3-113，1979.
- 2) 宮地 巖他：変電機器の耐震設計，電協研34(3)，4-121，1978.
- 3) 宮地 巖他：変圧器ブッシングの耐震設計，電協研38(2)，4-92，1982.

- 4) 宮地 巖他：UHV交流送電—変電所と機器，電学誌102(1)，1017-1034，1982.
- 5) 柴田二三男・小川春雄：中部の人工降雨について，電気四学協会東海支部連大6・27，44，1953.
- 6) 電気学会標準規格：インパルス電圧電流測定法，JEC-213，1982.
- 7) 電気学会標準規格：交流電圧絶縁試験一般，JEC-170，1978.
- 8) 日本学術振興会：雷の研究，1-140，電気書院，京都，1950.
- 9) 安生晃一郎他：送電線耐雷設計ガイドブック，電研報175031，20-58，1976.
- 10) 今川三郎・宮地 巖・平野忠男：改訂送配電工学，76，コロナ社，東京，1983.
- 11) I. Miyachi and K. Horii：Five Years' Experiences on Artificially Triggered Lightnings in Japan, 7th Int. Conf. on Gas Disch., 468-471, IEE, London, 1982.
- 12) 堀井憲爾他：ロケット誘雷実験の成果と今後の課題，電気学会高電圧研究会，HV-82-11，1-11，1982.
- 13) 宮地 巖・依田正之：新エネルギー源と海水揚水発電所との連系運用，愛工大研報17(B)，1-10，1982.
- 14) 飯田睦治郎・渡辺和夫：気象衛星「ひまわり」の四季，3-112，山と溪谷社，東京，1982.
- 15) 鶴 宏：人工衛星，80-98，工学図書，東京，1983.
- 16) 高橋浩一郎他：衛星でみる日本の気象，8-91；133-150，岩波書店，東京，1982.
- 17) 竹内 均・坂田俊文：宇宙からみた日本列島，80-93，日本放送出版協会，東京，1982.
- 18) L. P. Giver et al.：Water Absorption Lines, 931-961 nm：Selected Intensities, N₂ Collision-Broadening Coefficients, Self-Broadening Coefficients, and Pressure Shifts in Air, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 27(4), 423-436, 1982.
- 19) T. D. Wilkerson et al.：Intensities and N₂ Collision-Broadening Coefficients Measured for Selected H₂O Absorption Lines between 715 and 732 nm, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 22, 315-331, 1979.
- 20) 越川文雄他：最近の系統運用施設，電協研39(4)，45-80，1983.

(受理 昭和59年1月17日)