国際高等研究所・竹本修三フェロー研究会「京大地球物理学研究の百年」第２回研究会（2009.11.07）

地球電磁気学研究で京大の果した役割

加藤　進

（京都大学名誉教授、京都大学理学部卒 1952 年）

＆１　Sq（静穏日地磁気日変化）の研究

１．研究のはじまり

京大で地球電磁気学研究をはじめたのは、長谷川万吉先生である。これ以前この研究が皆無ではないが、国際的に認められる成果を挙げ、論文として國際誌に載った研究は、彼の仕事が初めてである。１９３６年、彼が京大地球物理学教室の助教授のとき、静穏日地磁気日変化（Sq）に関する研究が英文の論文として、帝国学士院紀要（Proceeding of Imperial　Academy, Tokyo,1936)に載った。これは東京帝国大学名誉教授で貴族院議員である田中舘愛橘先生の推薦によるものであった。

この長谷川先生の研究が Chapman and Bartels 著 Geomagnetism (Oxford, 1940)で詳しく紹介された。この著書は今でも地磁気研究のバイブルと言われている権威のある教科書だ。ここに京大における地球電磁気学の研究の歴史がはじまったと言えるだろう。

２．長谷川先生の Sq 研究とは

Sq の研究は 19 世紀末に始まった。長谷川先生が Sq の研究に興味を持ったころのこの研究の國際的状況は次のように纏められるだろう。

19 世紀末、英国の学者 B. Stewart（1883)、A. Schuster（1889）は Sq 研究ですばらしい業績を挙げた。後者は、すでに行われていたグローバルな地磁気観測データーを集めて、各観測点の太陽時に従って日変化する地磁気成分を取り出し、その原因が地面より高い場所にあることを突き止めた。地上で観測する Sq 場がポテンシアルを持つはずだから、ポテンシアル論により数学的にそれを証明した。その結果、Sq 変動の源は地面より高い領域に流れる電流によるものであり、それは高い空に電気伝導度を持つ領域があるからだと想像した。後、1924 年　E. Appleton により発見された電離層がそれであった。

後者、Stewart はこの電離層に電流を流す起電力は何かと考え、大気潮汐運動ダイナモメカニズムを想像した。つまり、電離層の大気の潮汐運動で、地球磁場の影響で、イオンと電子が違った運動をする結果、電流になり、これが地磁気を変動させ、それが地上に伝わり、Sq となる、こう想像したのだ。

この 2 名の英国学者の研究で、20 世紀初頭には、Sq 電流系の姿が分かっていた。その姿は第 1 図にあるように、赤道を挟んだ南北側に対称に存在する一対の巨大な電流渦である。ただし、この電流系は水平２次元電流系と仮定し得られた電流系なので、飽くまでも等価電流系だ。この Sq 電流系が長谷川先生の出発点であった。

1932 年行われた第２極年の国際共同観測年（2nd Polar Year）に得られた Sq データを解析し、この等価電流系を詳しくしらべたのが長谷川先生の研究である。第 1 図に示されたものは、長期の平均した結果だが、長谷川先生の研究は、この Sq 電流の渦中心が、実は、毎日、南北に変動する有様を明らかにした。図にあるように、中心は平均的には、中緯度 30 度、丁度、九州の阿蘇山の緯度だが、実際は 15 度から、45 度まで日々移動する。

この興味ある Sq 電流渦中心の移動はなぜ起こるか。これに関する説明は長谷川先生の論文では

一切説明されていない。実は、この説明を得るには、半世紀、天気予報に使われる大気大循環モデル（GCM）の時代が到来し、これを使った大型計算機シミュレーションの活躍する時代を待たねばならなかったのだ。だが当時、長谷川先生の仕事は地磁気日変動研究の大きな発展と認められ、1950年、日本学士院賞受賞に輝いた。

３．長谷川先生の Sq 研究は電離層電磁力学研究の源流

長谷川研究室に集まった若い研究者は、長谷川先生の Sq 研究を新しい方向に発展させた。彼らは Sq 等価２次元電流系が電離層を実際流れると仮定して、地上で観測の Sq データーから、電離層の水平電流 I が分かり、さらに電離層電子密度測定結果（当時可能）を使って、電離層電気伝導度∑が分かるので、風速W、 電場 E が分かると考えた。これは、原理は一般オーム法則の適用だ。この研究は電離層電磁力学の研究の源流となり、國際的な注目を引いた。

この研究に参加したのは、広野求和氏、前田坦氏と著者だ。この 3 名の研究は風の取り扱いが違っている。広野氏は div W=0, 前田氏は,curl W=0, 著者は、面倒だが、大気潮汐の運動方程式を用いた。このように、扱いには異同があったが、重要な共通の結果が得られた。それは W の 1 日周期成分が、半日周期成分よりずっと大きいことである。 地上での気圧変動観測は、この結果と違って、大気潮汐の 1 日周期成分は半日周期成分よりずっと小さい。また、これは地上近くで励起され、電離層まで垂直伝播する大気潮汐を説明する理論と矛盾し、ここに新しい重要な問題が現れた。 この Sq による電離層の風の研究結果、特に著者の大気潮汐方程式利用の結果は、J. Dungey 著“Cosmic Electrodynamics （1958)”に載っている。

他の研究成果もある。広野氏は磁気赤道 Electro-jet が異常に大きな見掛けの電気伝導度を持つ理論を提出した。すなわちそれは赤道磁場が水平であるため発生する異常に強い垂直分極電場が原因であるとした理論だ。また前田坦氏は、Sq　から推定した電場を用い、電離層の電子密度の日変化を旨く説明できることを示した。これら研究成果は当時の SGEPSS 学会誌 JGG に載り、この雑誌の國際的評価を高めたと言われた。

長谷川研の研究会には、しばしば東大の永田武先生と京大工学部の前田憲一先生が参加された。この両先生の参加は大きな意義を持つ。永田先生は Sq ではなく、D つまり擾乱磁場変動の研究を専門にしていた。また前田憲一先生は、日本における電離層研究の草分けである。両先生のおかげで、長谷川研の研究会参加により、Sq のみならず、D、電離層一般の世界の研究状況を理解できた。時には、研究会は激論の場となり、若い著者を興奮させた。かくして著者はまことに楽しく恵まれた研究生活を過ごすことができた。

４． Sq 研究の発展と行方は

1957 年、長谷川先生が停年退官し、先生の研究室は消えた。Sq 研究の輝かしい時代は終わった。人は去った。だが、長谷川研究室の消滅は、Sq 研究の消滅ではなかった。別天地で、世界的流れに沿って発展していた。別天地で、世界に先駆けて、新しい学問の源流が生まれていた。

3 節で示したように、Sq より電離層の電気伝導度、電界、風を推定した研究成果は世界の注目を引いた。特に風の推定結果である。つまり、1 日周期の風が半日の風よりずっと大きいことの発見である。やがて、この解決が著者の課題になり、その解決成功は、 1 日大気潮汐波理論の確立となった。成果を述べた論文は JGR(1966)に載った。この理論は、広く、大気潮汐古典論の確立となった。さらに、気象学で重要な役割を演じるプラネタリー波など、大規模大気波動一般の理論的解明に繋がった。この成功は、理論的アイデアが著者の頭に浮かんだからだけではなく、当時、京大に初めて導入された電子計算機 KDCI が身近にあったからであった。当時、著者は京大工学部電子工学教室講師で KDCI のソフト・エンジニアを務めていた。これが幸運をもたらした。工学部が著書の新天地になった。

これに関したエピソードを紹介しておく。米国地球物理学会誌 JGR に投稿したが、この論文は、従来の大気潮汐論から大きく違った理論的発見に思えたので、投稿間もなく、原稿のコピーを、シ

カゴ大の C. O. Hines 氏に送り、意見を求めた。すぐに彼から返事が届いた。それは、同じ内容の論文を、彼と同じ大学の気象学者 Lindzen（実際は、R. Lindzen の名前は匿名）が、同じ内容の論文を、密かに発表しようしているので、至急投稿せよとの勧告だった。彼には、いまでも感謝している。ただ、この理論発見者は、果たして、私か、または Lindzen か、これは今でも國際的謎らしい。1980 年代、この謎解明に関した質問状が Hines から届いたが、真相は不明だ。

もう一つの成果は、大気観測の重要な技術の源流が、Sq 研究で活躍した広野求和氏により創られた。それは、彼による LIDAR の大気観測のアイデアだ。

長谷川研の消滅に際し、広野氏は、長谷川研の助手を辞めて、郵政省電波研究所に移り、量子電子工学を根本から勉強し、レーザーの研究を始めた。当時、彼の研究は電波研究所の貴重な新知識だったらしい。当時、しばらく（1962-1964 年)、著者はオーストラリア政府の CSIRO 所属の上層大気研究所で研究官（Research Officer）として働いていた。広野氏が、自分もそこで働きたいと著者に伝えて来た。所長のスコットランド人の Martyn 博士は著名な電離層物理学者で FRS（Fellow of Royal Society）でもあった。広野氏の優秀さを知っていたのでこの話に乗り気になった。前田憲一先生を経て、電波研所長に伝えて貰ったが、広野氏を手放すことは出来ないとの所長拒絶が知らされた。これは、当時、広野氏が電波研で貴重な存在であったからだろう。

後、九州大学物理学教室教授となった広野氏は、再び地球物理学に戻り、レーザーレーダーの大気観測を思いついた。これが世界に先駆けてのライダーの発明だ。はっきりしない記憶だが、これはある英国人研究者から聞いた話だ。ライダーは MU レーダーと共に中間大気観測の新しい技術になり、今や、ヘリウム・ライダーで電離層の中性大気運動の新しい観測技術も開発されつつあるそうだ。広野氏は九大を新天地として、Sq 研究に重要な源流を創った。

一方、1968 年、地球電磁気講座構担当教授になった前田坦氏は、Sq を離れて、磁気圏研究に衣換えすると宣言した。彼がどんなビジョンをもち、どんな研究成果を挙げたか聞こえてこなかった。知られた活動には、理学部付置国際地磁気資料解析センター設立がある。長谷川先生が、IGY 成果として自慢していた世界地磁気センターC の京大設置は、組織構想がなく、京大図書館に長らく仮住いした。前田坦氏は教授昇任後、彼の苦闘の結果、理学部付置国際地磁気資料解析センターに換えた。今や、教授 1、助教授 1、助手 2 の定員をもっている組織だが、このセンターが変わり行く学界で、如何に成長、発展してきたか。これは中期以後の歴史になるだろう。この紹介には著者は向かないだろう。

THERMOSPHERE

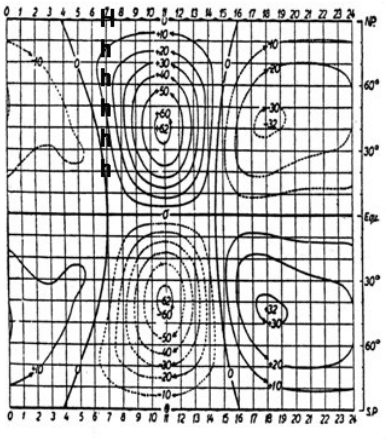

Fig. 5 Ionospheric electric-current system in local time (horizontal axis) versus latitude (vertical axis) for geomagnetic Sq variation in equinoxes in 1902 (Chapman and Bartels, 1940). Between consecutive stream lines, 10,000 amperes flow in the direction of the arrows.

＆２　Space Physics の研究

１．研究の始まり

1958 年、IGY 期間に、米ソの人工衛星が打ち上げられ、スペース時代が到来した。これに備えて、日本でもロケット、次いで人工衛星の開発が始まる。その目的で、1964 年東大宇宙航空研究所ができた。それより一足早く、関連科学研究のために、東北大、東大、名古屋大、京大に研究施設が設立された。これが京大工学部電離層研究施設であり、教授１助教授１、助手２の定員を持ち、教授が大林辰蔵氏、私が助教授に選ばれた。この時、上述の計算機サービス業から解放された。また前田憲一研究室には、木村磐根助教授が誕生した。

新しく命名された Space　Physics は、われわれ若い研究者には、まことに新鮮な響きをもった。この学問の定義ははっきりしないが、天気を支配する対流圏の上の大気を研究対象とする研究と言えるだろう。地球外、惑星、太陽まで広がる宇宙空間スペースそのものだけではなく、スペースに地球大気がどう繋がっているかを研究するのが、この学問の研究の立場だ。この研究は電離層研究の発展として始まった。電離層から上に向かうものと、下に向かう２つの研究の流れができた。京大工学部の前田研究室はこの 2 つの流れに乗った。

２．上向き（磁気圏）の研究

前田憲一先生は、日本の電離層観測の草分けだけでなく、電離層物理学の研究でも國際的に知られていた。先生は 1972 年日本学士院賞の受賞者である。電離層 F 層の電子密度が、地理緯度でなく地磁気緯度に従って分布している、つまり電離層電子密度分布が地磁気コントロールを受けている。この発見は前田先生と同僚の研究論文になり、1942 年日本語論文で発表されたが、後 1944 年、Appleton の同じ発見が英文論文で発表されたので、Appleton　anomaly として知られている。

前田憲一先生は京大に赴任した 1951 年以後、木村磐根氏と共同で、電離層研究特に電離層・磁気圏の電波伝搬の研究をしたほか、日本でのロケット・衛星観測の創始者として活躍した。この観測研究では、大林氏が前田先生、木村氏の密な協力者であった。大林氏は米国での滞在中の知己も多く、米国衛星の磁気圏観測の情報に大変詳しく、その情報をいち早く、日本の若い研究者に知らせ、彼らを魅了させ、space physics 研究の熱意を高めた。この業績は大きいと言える。

木村氏の研究で特筆すべきは、磁気圏電波伝搬、特にホイッスラーと呼ばれる雷放電で作られる超低周波電波が電離層のカット・オフ周波数以下でありながら、地磁気磁力線に沿って、磁気圏深く浸入する特異性を詳細に研究した。米国学者の発見による現象だが、彼の初期の研究とは大きく違い、磁力線から大きくずれる可能性、そのずれの条件が磁気圏電子密度と如何に関わるかなど、木村氏の研究は大きな発見になった。これは Radio Science（1966）に論文として載っている。

３．下向き研究（MU レーダー観測）

1960 年代後半、著者が工学部付属電離層研究施設の教授に就任したころ、理論的研究に行き詰まりを感じてきた。数年悩んだ後、MU レーダー建設を思い立った。このレーダーは、日本の多くの研究機関から参加した大気、電離層の研究者のグループが 15 年に亘る議論と計画の結果、1984 年秋、信楽山中に、世界の研究者の共同利用設備として、完成した。

MU レーダーと名づけたこのレーダーは、直径 100m の円形の人工盆地に、約 500 本の 3 素子八木アンテナを並べ、各アンテナが小型送受信機をもつアクチイブアンテナアレイ・システムだ。1 メガワットの巨大パルスを打ち上げ、高さ数 km から 500km までの大気から、散乱し、戻ってくるドップラーエコーを受信する。このドップラーエコーのスペクトルが散乱大気の運動の情報を持っている。これは星から来る光のスペクトル解析に似ている。MU レーダービームは、計算機制御で、瞬時に向きを変えることが出来るので、変動、移動する大気運動の追尾可能で、世界最高の能

力をもつ MST（中間圏、成層圏、対流圏）レーダーとして、国際的に高い評価を頂き、稼動以来25 周年を迎えた今でも活躍している。昔、長谷川先生が発見した Sq 電流渦中心の日日変動の原因は、地上近くから電離層まで伝播する大気潮汐の変動によると判明した現在だが、この原因の途中の変動する大気運動をしらべることもできる。

思えば、前田憲一先生に雇われ、電離層観測機組み立て要員に始まる 10 年余の工学部生活で得た著者の経験、工学者に囲まれていた環境。これがあったからこそ、MU レーダーは生まれた。でも、長谷川研で、大気波動を研究してきた著者がいなかったならば、工学部にMU レーダー建設の構想など生まれるはずもない。かくして、遂に、理学・工学の融合で、Sq 研究は観測的証明にまでたどり着いたのだ。工学部は私の新天地になった。MU レーダー観測は、大気潮汐波、重力波を含む中間圏大気力学の観測に世界最高の威力を発揮しただけでなく、身近の気象観測にも重要な貢献をしている。これら潮汐理論と MU レーダー開発研究が、2 つの賞の対象になった。一つは 1987 年の Appleton 賞（Royal Soc., London）であり、他の一つが日本学士院賞（1989）だ。

4．将来に向かって

1990 年以後は、工学部出身の松本紘、深尾昌一郎氏等、さらに若かった津田敏隆氏の時代が始まる。松本氏は大林、木村両氏の研究を引継ぎ、新しい道を開拓した。彼が進めたスペースプラズマ計算機シミュレーションはそれ自体研究になるだけでなく、ロケット・衛星実験の計画にも役立つ。また衛星上で行うスペース太陽発電という工学の研究もすすめられた。この計画は米国 NASA で始められたが、実現性に乏しいと棚上げになった。松本氏はこの課題を取り上げ、その実現に必要な基礎を検討し、固めているのが現状らしい。

深尾、津田両氏は著者の参謀として MU レーダー建設から、完成後の観測システム運用にも活躍して来た。彼等の活動はさらに広がってゆく。

赤道大氣運動がグローバルな気候変動の原因になるので、その赤道大氣観測のため、MU レーダー建設に次ぐ赤道レーダー（EAR）建設を計画した。ここでは、深尾氏が計画遂行の中心になった。計画は 1985 年に始まったが、1990 年代の経済バブル消滅の影響もあって、長らく計画推進は止まってしまった。この時、すでに停年を過ぎていた著者は、インドネシア共和国のバンドン工科大学で客員教授としてバンドンに住み、EAR の実現、その活動時代到来に備えて、EAR を使う大氣科学技術者を養成することに努めた。妻と一緒にインドネシア語を本格的に学んだ。これは著者夫婦には楽しい日々であった。この時、欧米から輸入の参考書が高価でインドネシアの学生には向かないので、それまでなかった彼等の言葉で書かれた大氣力学・レーダー観測の教科書をバンドン大学での助手 2 名と共著で、出版する計画を建てた。バンドン工大所属の出版社に出版をお願いした。が、運悪く、丁度政情が悪くなった 1990 年代末なので、出版は絶望だと知らされ失望のどん底に一旦立たされた。だが、幸運にも、出版援助を申し出た現地新聞社のおかげで、出版は成功した。心あるマスコミがインドネシアにも存在する事に感激した。

われわれの努力はどうやら報われる時が来た。これは計画から 16 年後の 2001 年だった。EAR はインドネシア・スマトラ中部にあるブキット・チンギ山頂に建設された。MU レーダーの約 10%の出力だが、赤道にあるユニークなレーダーなので、赤道大気力学、電離層力学の観測研究のために活躍している。この活動を支える津田氏とさらに若い同僚後輩の力を高く評価したい。

あとがき

電離層研究施設は、防災研とともに、教室以外の組織として、歴史を刻んできたと言える。即ち、IGY （地球観測年、1958 年） に行われた人工衛星打ち上げにはじまった Space Age に備え、1961 年、関連した科学研究のために京大工学部付属の 1 部門の電離層研究施設が設置された。これは電離層研究の草分けである電子工学教授前田憲一先生の努力と熱意によるものであった。大林辰蔵、加藤進がそれぞれ教授、助教授に選考され、電子工学教室の前田憲一教授、木村磐根助教授と共同

で、スペース研究に従事した。

1967 年、大林教授が東大宇宙航空研究所に移った後、加藤が教授に昇任した。やがて研究施設は 2 部門に拡張され、小川徹が教授に同志社大学から赴任してきた。超高層物理学、超高層電波工学が部門名で、それぞれ加藤、小川が部門担当教授であった。その後、1984 年の MU レーダー建設完了に備え、1982 年、電離層研究施設は、全国共同利用超高層電波研究センターに改組された。さらにその後の拡張を経て、木質科学研究所と合併し、現在、京大付置生存圏研究所となっている。現在、スペース研究関連部門は 6 部門で、担当教授は橋本弘蔵、津田敏隆、大村善治、塩谷雅人、山川宏、山本衛である。

MU radar
Shigaraki, Japan,34.85 N, 136.10E: 46.5 MHz
Area radius 103m, Maximum power 1MW pulse, 475 crossed Yagi, Active phased array

EAR (Joint Operation by Kyoto Univ. and LAPAN)
Sumatra, Indonesia;0.20°S, 100.32°E; 47 MHz Area radius 110m; 560 Yagi, Maximum power 100kW pulse