

新しい木材害虫から住宅を護る

吉村 剛^{1*}

Protection of houses from invasive wood-attacking insects

Tsuyoshi Yoshimura^{1*}

概要

木材・木質材料の国際的な移動にともなう海外からの新しい木材害虫のリスクが高まっている。特に乾燥済みの木材製品については、熱帯、亜熱帯地域からの直接的な輸入だけでなく、第三国を経由した加工品の輸入も増加し、さらにはインターネットの普及による個人的な輸入も一般化しつつある。これらの製品を食害する乾材害虫類、ヒラタキクイムシ類、ナガシクイ類およびシバンムシ類、ならびにカンザイシロアリ類については、水際の阻止は実質的に不可能である。我々の財産である高機能かつ高耐久な木造住宅やお気に入りの木製家具やグッズ、そして日本の文化を支えてきた木質文化財、これらを海外からの新たな木材害虫による被害から護るためには、我々自身が正しい知識を持ち、そのリスクを十分に理解し、そして適切な対処を行うことが求められる。

1. はじめに

今、海外から我が国に新たに侵入してきた木材害虫が問題になりつつある。もちろん、彼ら（彼女ら）は自分の力で海を渡って来るわけではない。木材貿易とともに、あるいは我々が海外で購入した木製品などとともに日本にやって来るのである。それらの多くは1 cmにも満たない小さな甲虫類（beetle）だが、読者になじみの深い最も重要な木材害虫であるシロアリ類もしばしば水際で発見される。

日本は「紙と木の文化の国」。こういった新しい害虫は、資源としての木材・木質材料に被害を与えるだけでなく、木質文化財の後世への継承という点にも重大な影響を与える可能性がある。本稿では、今問題になりつつある新しい木材害虫とその対策について紹介する。

2. 木材を加害する昆虫

2.1 昆虫の多様性と木材

昆虫はこれまでに地球上で記載されている全生物種の半数以上を占め、最も多様性に富んだ生物群である。木材を食害する昆虫類を総称して、食材性昆虫（Xylophagous insects : Xylo が木材、phagous が食べるという意味）と呼ぶが、木材は伐採されたすぐ後の生丸太から、製材・乾燥した後室内で使用される木材・木質材料まで、あらゆる段階で昆虫の食害を受ける。表1に、木材の状態と主な食材性昆虫類をまとめた。なお、名前を挙げた昆虫グループはそれぞれ分類学的には目あるいは科に相当する。

表1では、「生丸太」、「接地湿潤材」、「非接地乾燥材」という3つのカテゴリーに分けて食材性昆虫を示したが、住宅や木質文化財の害虫、すなわち人間の身近に存在する木質製品の害虫という点か

2016年6月19日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所居住圏環境共生分野。

*E-mail: tsuyoshi@rish.kyoto-u.ac.jp

表1：木材の状態と食材性昆虫グループ

	木材の状態	加害する昆虫グループ
生丸太	伐採した後のまだ皮が付いたままの丸太。含水率が高く、液体状の水（自由水）が多く存在	<ul style="list-style-type: none"> ・甲虫類（ナガキクイムシ、クイムシ、カミキリムシ、タマムシ、ゾウムシ、オサゾウムシ） ・ハチ類（キバチ類） ・シロアリ類
接地湿潤材	乾燥後木材製品となった後に屋外で土壌と接触した状態で使用され、高含水率となったもの	<ul style="list-style-type: none"> ・甲虫類（オサゾウムシ、チビナガヒラタムシ） ・シロアリ類
非接地乾燥材	乾燥した木材製品で屋内使用されるもの	<ul style="list-style-type: none"> ・甲虫類（ヒラタキクイムシ、ナガシンクイ、シバンムシ、カミキリムシ、ゾウムシ、オサゾウムシ） ・シロアリ類

ら見た場合、最も重要なものと言うまでもなく「非接地乾燥材」を食害する昆虫類ということになる。この仲間のうち甲虫類であるヒラタキクイムシ、ナガシンクイ、シバンムシ、カミキリムシ、ゾウムシ、オサゾウムシを広い意味では乾材害虫と呼ぶが、カミキリムシ、ゾウムシ、オサゾウムシには、その産卵に樹皮を必要としない種類は少ないことが知られている。つまり、乾材害虫という場合は、狭義の、ヒラタキクイムシ、ナガシンクイ、シバンムシの3つのグループを指す。ちなみに、後述の乾燥材を食害するシロアリ類も熱帯・亜熱帯域を中心に数多く生息しているが、乾材害虫とは別に考えることが一般的である。

なお、表には記載されていないが、クマバチ（藤の花によく飛来する大型でおしりの黄色い丸形のハチ）やオオハキリバチなどのハチの仲間が建造物に使用される木材に大きな孔を開けて穿孔し、巣穴を造ることが知られている。場合によっては、文化財建築物などに激しい被害を与えることが報告されているが、本稿では取り扱わない。

2.2 食材性昆虫の栄養源と消化共生

上述の食材性昆虫が木材の何を栄養源としているか考えることとする。栄養源を考察する重要性は、木材中の何を栄養源としているかによって、被害を与える木材の種類や部位が決まるからである。上述した巣穴のためだけに木材に穿孔するハチ類を除き、食材性昆虫類は利用する栄養源によって大きく2つに分かれる。なお、材の部位によるタンパク質や可溶性糖分の量、すなわち利用の容易な栄養成分の量は、形成層>内樹皮>辺材>心材>髄>外樹皮、の順となる¹⁾。

まず、木材細胞壁の主成分であるセルロースやヘミセルロースを消化・吸収できるものとしては、シロアリ、シバンムシ、カミキリムシが知られており、消化管内に共生微生物を保有している。一方、細胞内の微量成分であるデンプン、アミノ酸、単糖類などのみを栄養源としていることが明らかなグループとしては、ヒラタキクイムシとナガシンクイが挙げられる。それ以外のグループについては、その消化機構について十分な検討が行われているとは言えない。

また、生丸太の害虫であるクイムシとナガキクイムシの一部の種（近年、京都地域を含む西日本で猛威をふるっているカシノナガキクイムシなど）では、アンブロシア菌と呼ばれる菌類を木材中に掘った孔道中で栽培して幼虫の餌としていることが知られており²⁾、さらに、キバチ類は孔道中で栽培した垣子菌類を幼虫の餌として用いている³⁾。したがって、これらの昆虫類の加害を受けた材では、直接的な穿孔被害だけでなく、菌類による変色の二次的な被害を受けることになる。

セルロースやヘミセルロースを消化・吸収できるグループは、どのような種類の木材であっても細

胞壁が存在すれば食害することができる。一方、微量成分を栄養源としているグループでは、形成層～辺材部分、特に広葉樹の辺材部分のみを食害することになる。表2には、住宅や木質文化財を構成する非接地乾燥材において加害を受ける材の種類・住宅部材と昆虫グループをまとめた。また、写真1と写真2には、これら2グループの典型的な被害の様子を示す。

表2：木材害虫と住宅部材

昆虫グループ	栄養源	加害を受ける材料	加害を受ける住宅部材
シバンムシ シロアリ	木材細胞壁中のセルロース&ヘミセルロース	すべての木材製品&植物細胞壁製品	すべての構造材、内装材、タタミ、紙製品
ヒラタキクイムシ ナガシクイ	木材細胞中の微量成分であるデンプン、アミノ酸、糖類	広葉樹の形成層～辺材部のみ	広葉樹系床材・家具材・合板



写真1：シロアリ類による針葉樹材（ロシア産カラマツ材）（左）と本の被害（右）。前者ではシロアリによる典型的な同心円状の被害が明瞭である。



写真2：シバンムシ類による建築部材の被害（左）とヒラタキクイムシ類とナガシクイ類によるパレット材の複合被害（右）。後者では辺材のみが被害を受けているのがよくわかる。

3. 新しい木材害虫とその対策

3.1 木材輸入の歴史と害虫の侵入

歴史的には奈良時代以前から貴重な工芸品としてのいわゆる唐木製品が日本に渡来していたが、日本における木材輸入が本格的に始まったのは大正時代とされている。東京駅前にあった旧丸ビル(1923年(大正12年)竣工)の解体工事の際、基礎杭として5,000本以上のベイマツ(Douglas-fir)が打ち込まれていたことが明らかとなった⁴⁾。これは第一次世界大戦後に急激に増加した米国からの木材輸入の一つの象徴とも言えるだろう。その後、国内林業への圧迫を勘案して1929年に木材関税が強化されたことから輸入は減少した。

第二次世界大戦期における木材輸入は基本的に途絶えていた。その後戦後になって、大戦時の乱伐と住宅不足によって木材の供給量は圧倒的な不足状態となったことから、徐々に木材が輸入されるようになった。あわせて、いわゆる戦後の拡大造林として、大量のスギ、ヒノキ、カラマツなどが日本中に植林された。この植林木が今伐採の適齢期を迎えていることはご承知の通りである。その後木材輸入は徐々に拡大していったものの、ちょうど筆者の生まれた1960年には、木材自給率はまだ86.7%という高い水準を保っていた⁵⁾。木材輸入の転機となったのが1964年(昭和39年)の木材輸入の完全自由化である。これによって北米からは建築用の針葉樹丸太が、東南アジア諸国からは合板用の広葉樹丸太と一部製品が大量に輸入されるようになり、木材の自給率はまたたくまに低下した。近年では、産出国、特に東南アジア諸国における木材産業の育成という目的から、丸太ではなく製品による輸入が増加し、現在では木材輸入の90%近くが製品によるものとなっている。ちなみに、2012年(平成24年)の日本の木材自給率は27.9%となった⁵⁾。

最近では、上で述べた構造材や合板以外に、内装材やデッキ材として、現地で高い耐久性を持つことが知られているイペ、ウリン、ジャラなどの広葉樹材が南米やオーストラリア、アフリカなどから輸入されるようになってきている。さらに、海外旅行の一般化やインターネットの普及によって、家具や工芸品などの土産物としての持ち込みや個人輸入も多くなってきた。

木材輸入の歴史と害虫の侵入とはどのような関係があるのだろうか。筆者なりに整理してみたのが表3である。現在侵入木材害虫として最もリスクが高いのは、乾材害虫であるヒラタキクイムシとナガシクイの仲間であること一見してわかる。さらに、北米からの乾材シロアリの侵入も可能性がある。以下、これらのグループによる侵入の歴史と現状、そして対策について紹介する。

3.2 ヒラタキクイムシとナガシクイにおける侵入種による被害の歴史とその対策

ヒラタキクイムシ類とナガシクイ類は、成虫が脱出する際に木粉を排出し、それが円錐状に堆積することから、英語では“Powder-Post Beetle”と呼ばれる。幼虫の栄養源には木材中に含まれるデンプンが必要とすることから、基本的にデンプン含有量が高い(1%以上)広葉樹の辺材部のみを食害する。最適な木材含水率は16%前後と言われている⁶⁾。これは、普通に室内で使われている木質系材料の含水率と同じである。日本においては基本的に1年1世代で、通常5月~7月に羽化・脱出した成虫が交尾・産卵し、木材中で孵化した幼虫が材中に孔道を掘りながら食害する。デンプン含有量の多いラワン系の合板、ナラ材の床材、あるいはゴムノキといった熱帯産広葉樹材製の家具など、広範囲な製品が被害を受ける。

ヒラタキクイムシ類による被害が社会的に注目されるようになったのは、東南アジアからの木材の輸入が急増した1950年代後半から被害が拡大したことによる。その後1970年代初頭に公団住宅におけるナラ材のフローリングやラワン材の造作材や下駄箱で大量に被害が発生し、大きな問題となった。当時、学校の体育館のナラ材の床がヒラタキクイムシ類の食害によって破損した例も知られている。その当時最も重要視されたのは、もともと熱帯・亜熱帯性で百数十年前から日本で記録されているヒラタキクイムシという種類である⁶⁾。すなわち、江戸~明治にかけて日本に侵入した外来害虫である

と考えられている。

ところが今、ヒラタキクイムシは新顔のアフリカヒラタキクイムシへと置き換われつつある。全国のヒラタキクイムシ類被害に関する調査結果から、特に名古屋以西の西日本ではその被害の大半が新たな侵入種であるアフリカヒラタキクイムシによるものであることが明らかとなった⁷⁾。写真3にアフリカヒラタキクイムシの成虫を、図1にヒラタキクイムシ類の被害調査結果を示す。アフリカヒラタキクイムシは低温に弱いものの繁殖力は強いことが知られており、高機密・高断熱住宅の一般化と暖房の普及によってその勢力範囲が拡がりつつあると考えられる。筆者の研究室ではアフリカヒラタキクイムシの食害生態を解明すべくいろいろな角度から研究を行ってきているが、最近、雄の成虫から仲間を呼び集める効果のある物質（集合フェロモン）を初めて見つけた⁸⁾。農業害虫、食品害虫、林業害虫などでは、こういったフェロモンを用いたモニタリング装置が以前から開発され、その発生予測に使用されている。現在、現場への応用を目指して研究を進めているところである。実現すれば、世界で初めての乾材害虫用モニタリングシステムとなる。

表3：日本における木材輸入の歴史と侵入害虫

時代	主な輸入材の種類・形態	想定される侵入木材害虫
大正～1960年代前半	・北米産の針葉樹丸太	・丸太害虫：キクイムシ、ナガキクイムシ
1960年代後半～1980年代	・北米産・ロシア産の針葉樹丸太	・丸太害虫：キクイムシ、ナガキクイムシ
	・東南アジア産の広葉樹丸太	・丸太害虫：キクイムシ、ナガキクイムシ
1990年代～現在まで	・東南アジア産の広葉樹合板	・乾材害虫：ヒラタキクイムシ、ナガシクイ
	・北米産・ロシア産の針葉樹製品	・乾材シロアリ
	・東南アジア産の広葉樹合板	・乾材害虫：ヒラタキクイムシ、ナガシクイ
	・中国産の広葉樹合板	・乾材害虫：ヒラタキクイムシ、ナガシクイ
	・南米、オーストラリア、アフリカ産の広葉樹製品	・乾材害虫：ヒラタキクイムシ、ナガシクイ
	・家具や工芸品の土産物としての持ち込みや個人輸入	・乾材害虫：ヒラタキクイムシ、ナガシクイ、シバシムシ、カミキリムシ



写真3：アフリカヒラタキクイムシ。体長は4mm程度

ナガシクイムシ類は熱帯に数多くの種類が生息しており、丸太の検疫時に多く発見されるグループである。日本では1世代1年以上必要とするようであるが、その生態には不明な部分も多く残されている。タケ材、特に伝統的な土壁に用いる木舞竹の害虫として有名なチビタケナガシクイが熱帯・亜熱帯から日本全土に分布し、最も有名な種類であった。しかし、土壁+木舞竹を使った新築住宅はまず見られなくなり、その被害は希なものになりつつある。一方、近年輸入材においてその被害例が増加しつつあるのが、オオナガシクイ、ホソナガシクイなどの大型のナガシクイ類である。写真4（左）にゴム材から脱出してきたオオナガシクイを示す。2~4 mm程度の大きさのチビタケナガシクイとは異なり、体長は約1 cmある。

また、かつては非常に希な虫であると言われていたホソナガシクイ（オオナガシクイと酷似）が中国から輸入されたキリ材やピアノに使用されたラワン材から脱出した例が最近多く報告されるようになってきている⁹⁾。この理由として、アフリカヒラタキクイムシの場合と同様、高機密・高断熱住宅の普及による冬期の住宅内温度の上昇というものが挙げられると思う。乾材害虫は日本にフリーパスで入ってくる。写真4（右）はインドネシア・スカルノハッタ空港で購入した木製紅茶入れからケプトヒラタキクイムシが大量に発生した例である。なお、筆者は被害を知らずに日本に持ち帰ったわけではなく、脱出孔が存在していることを承知で購入し、持ち帰った上で、研究室の昆虫飼育室で脱出防止策を講じた上で保管した。

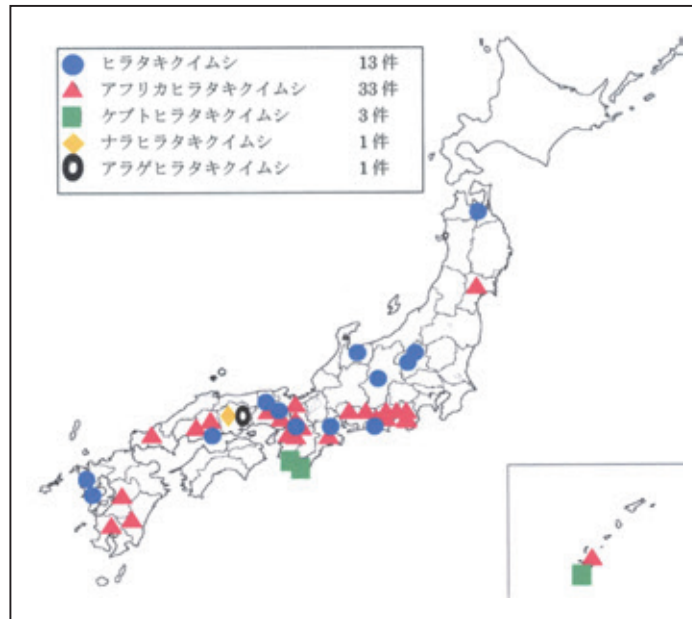


図1：日本におけるヒラタキクイムシ類の被害分布⁷⁾

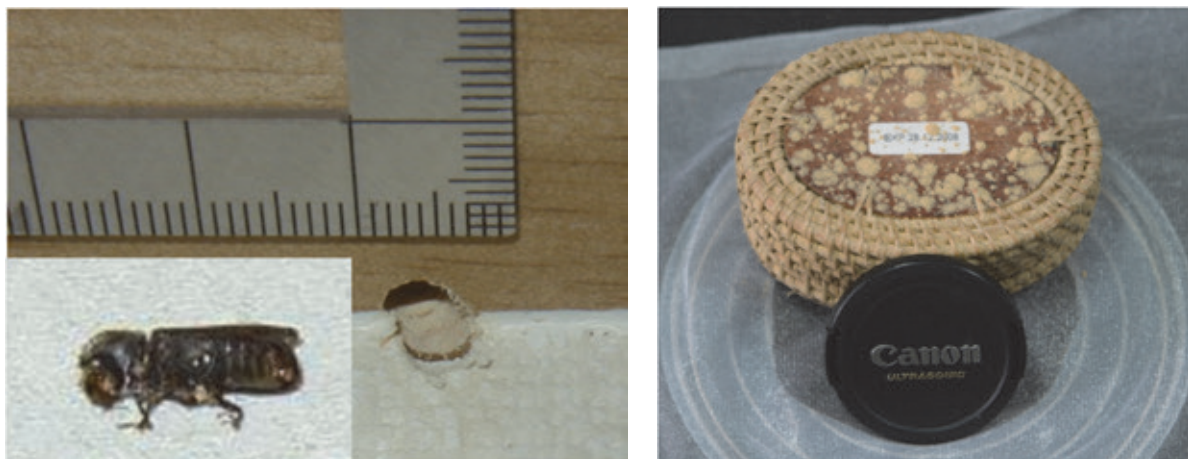


写真4：海外からの乾材害虫の例。オオナガシクイの脱出孔と成虫（写真提供：田原利夫氏）
（左）とスカルノハッタ空港で購入した木製紅茶ケースより大発生したケプトヒラタキクイムシ（右）

日本におけるこういった新しい乾材害虫の被害拡大をどのようにして食い止めるのか。それは、海外からの安易な持ち込みの防止および被害の早期発見と根絶に尽きるであろう。具体的な方法は、

- ・ 我々自身が、被害を受けた製品、つまり孔（ピンホール）の開いた木材製品を日本にもちこまないこと。お土産で木材製品を購入する時はよく確認すること
- ・ 海外通販でそのような商品が届いた場合は必ず返品すること
- ・ もし海外の木材製品から虫が脱出した場合は、虫を採集してすみやかに保健所や研究機関に連絡すること

である。

3.3 アメリカカンザイシロアリ被害の現状とその対策¹⁰⁾

最近あまり取り上げられることがなくなったが、一時期マスコミ等で騒がれた侵入シロアリとしてアメリカカンザイシロアリがあげられる。原産地は北米大陸太平洋岸のワシントン州からメキシコにかけてであり、その分布域から米国では *western dry-wood termite* と呼ばれる。米国における木材害虫市場の最大 20%を占めるといわれる代表的な害虫シロアリである。

このシロアリは第二次世界大戦後に家具などの木材製品とともに日本に持ち込まれたと考えられているがその詳細は不明である。正式な被害の記録は東京都江戸川区における 1976 年のものである¹¹⁾。その後、被害例が日本全国で発見されるようになり、現在では図 2 の点で示した通り、26 都府県でその被害が報告されている。特に、首都圏と近畿圏の海岸沿いおよび瀬戸内海地域で被害例が多いように見受けられる。この理由は不明であるが、その生存に液体状の水を必要としないと考えられている“乾材シロアリ”の仲間であるとは言え、やはり生物が生活して行くためには水が必要である。また、このシロアリは基本的に地中海性気候に適応した種であるとも言われている。おそらく、ある程度の湿度と気温条件というものが必要なのであろう。写真 5 に被害材の断面の様子と材から取り出したコロニーを、写真 6 に被害住宅における典型的な屋根裏の様子を示す。

筆者は、いろいろな調査データから日本におけるアメリカカンザイシロアリの現在の被害件数は最大 10 万軒と見ている。では、今後はどうなると予想されるであろうか。残念ながら、現状ではその被害は今後益々拡大すると言わざるを得ない。その理由は簡単である。有効な予防・駆除対策がとられていないためである。被害拡大をストップするためには、その生態、つまり敵を知ることが必要である。



図 2: 日本におけるアメリカカンザイシロアリの被害分布 ((公社) 日本しろあり対策協会 2014 年資料)



写真 5 : アメリカカンザンシロアリ被害材断面 (左) と材より取り出したコロニー (右)



写真 6 : アメリカカンザイシロアリ被害家屋の屋根裏の様子。6 個の窪みがある特徴的な形のフンが被害材より落下・堆積している。フンの大きさは長径で約 1 mm。

図 3 に、アメリカカンザイシロアリの生態に基づいた被害拡大のステップをまとめておく。

- ・被害を受けている家具などが外部から持ち込まれ、そのコロニーが新しい環境に定着する (①と②)。
- ・コロニーが成熟し、羽アリの生産や枝分かれすることによって、その住宅の中で複数のコロニーが誕生する (③)。
- ・複数のコロニーから多くの羽アリが生産されるようになり、住宅の外へ飛び出すようになる (④)。
- ・その結果、周囲の住宅へ被害が拡大する (⑤)。
- ・地域へ被害が拡大することによって、別の地域への被害材の持ち出しの可能性が高まる (⑥)。

例えば、横浜市鶴見区の例では、300 m 四方の区画における被害軒数が 9 年間で 43 軒から 263 軒へと 6 倍以上に拡大した (富岡、未発表)。しかしながら、ここで注意しておかなければならないのは、その区画から外部への拡大はほとんどなかったという事実である。すなわち、アメリカカンザイシロアリの被害というものは、ある範囲内でその被害密度をどんどん上昇させるものの、広い範囲への拡大は容易ではないということである。また、X 線 CT 装置を使った筆者らの研究によれば、羽アリのペアが木材に穿孔してコロニーの生長がスタートしたとしても、2 年間では 10 頭に満たない個体数と最大 50 cm の孔道が観察されたのみである。したがって、その被害を早期に発見することができれば、駆除は決して困難なものではないと考えられる。

効果的なシロアリ対策には予防-探知-駆除という 3 つの要素がうまくかみ合う必要がある。アメ

リカカンザイシロアリの予防は、住宅の木質系部材に対する効率的な薬剤処理や物理的なバリアーによって達成されるが、被害住宅から羽アリを外へ分散させないこと、そして被害材を外部へ持ち出さないことも重要なポイントとなる。探知については、現在マイクロ波探知器など種々の装置が開発されつつあり、飛躍的にその信頼性が高まりつつある。居住者の方によるフン（写真 6）の発見も早期探知にとって非常に重要である。駆除については、天幕燻蒸処理や熱処理など住宅全体を対象とした処理が原産地の米国で多く行われているが、日本の住宅密集地での応用は困難である。被害部材に対する薬剤を用いたスポット処理の精度を、基礎的な研究成果などをもとに高めて行くことが必要であろう。さらに、最近他の害虫の駆除に開発されつつあるスポット的な物理的処理、例えばマイクロ波や高周波を用いた熱処理やドライアイスを用いた低温処理などの応用を早急に検討する必要があると考えられる。

最後に重要な点として挙げておきたいのが、シロアリ駆除業者にとってきちんと商売になるビジネスモデルの構築である。いくら技術があったとしても、ビジネスにならないければ駆除対策が進まないのは自明である。さらに、現在の被害、特に被害密度の高い地域における駆除対策には、外来害虫対策としての公的資金の導入を切に望みたい。

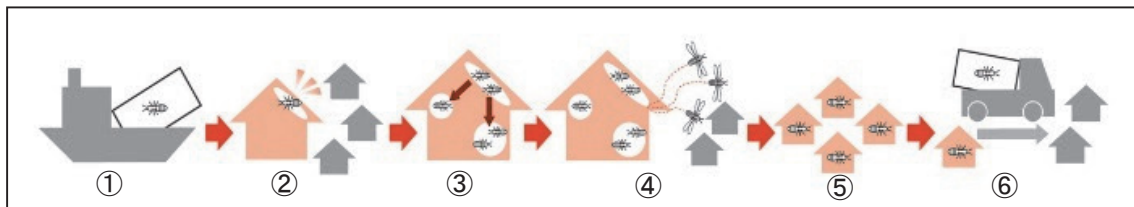


図3: 侵入害虫としてのアメリカカンザイシロアリ被害拡大の模式図（原図：アサンテ（株））。

①被害材の持ち込み、②コロニーの定着、③住宅内での被害の拡大、④外部への羽アリの分散、⑤被害住宅の拡大、⑥外部への被害材の持ち出し。

4. おわりに

以上、新しい木材害虫とその対策について紹介した。家具や木材製品を食害する乾材害虫は、今後もしろいろな形で日本に侵入してくると考えられる。我々自身も知らない間に持ち込む可能性がある。我々の財産である木の香り溢れる住宅やお気に入りの木製家具やグッズ、そして日本の文化を支えてきた木質文化財、これらを海外からの新たな木材害虫による被害から護るためには、まず正確な知識を持ち、そして今よりも、より多くの注意を払うことが求められるだろう。

参考文献

- 1) 岩田隆太郎, 木材保存学入門第3版, 日本木材保存協会編, 2012, pp. 59-61.
- 2) 中島敏夫, 図説養菌性キクイムシ類の生態を探る—ブナ林の中のこの小さな住民たち, 学会出版センター, 1999.
- 3) 杉本博之, 田戸裕之, 福原伸好, 人工林におけるキバチ類の生理・生態の解明と被害回避法に関する調査—ニホンキバチの被害回避法に関する調査—, 山口林指セ試験報告, 16, 17pp, 2003.
- 4) 今村祐嗣, 土木事業への国産材の利活用, 森林技術, No.794, 36-37, 2008.
- 5) 林野庁, 平成26年度 森林・林業白書, 223pp, 2015.
- 6) 野淵輝, 鈴木憲太郎, 乾材害虫と屋内で発見される昆虫—同定、生態、被害、防除—, 林業科学技術振興所, 96pp, 1993.

- 7) 古川法子, 吉村剛, 今村祐嗣, ヒラタキクイムシ類による家屋被害調査, *木材保存*, **35**, 260-264, 2009.
- 8) Titik Kartika, Nobuhiro Shimizu and Tsuyoshi Yohsimura, Identification of esters as novel aggregation pheromone components produced by the male powder-post beetle, *Lyctus africanus* Lesne (Coleoptera: Lyctinae), *PLOS ONE*, **10**, e0141799.
- 9) Lee-Jin Bong, The cases of Bostrichidae infestation in Japan, *Sustainable Humansphere*, **11**, 8-12, 2015.
- 10) 吉村剛, 外来木材害虫アメリカカンザイシロアリの総合的防除に向けた取り組み, *木材学会誌*, **57**, 329-339, 2011.
- 11) 森八郎, アメリカ乾材シロアリ東京都内に定着, *しろあり*, **27**, 45-47, 1976.

著者プロフィール



吉村 剛 (Tsuyoshi Yoshimura)

＜略歴＞ 1983 年京都大学農学部林産工学科卒業／1985 年京都大学大学院農学研究科修士課程修了／民間企業勤務を経て 1990 年京都大学木材研究所助手／1995 年京都大学博士（農学）／2000 年同大学木質科学研究所助教授／2010 年同大学生存圏研究所教授／現在に至る。＜研究テーマ抱負＞木材と生物の関わり合い。特に木材食害性昆虫類の生理・生態とその環境調和型防除。＜趣味＞バイクトーリングと下手の横好きの楽器を少々。

木に学ぶ、きのこに学ぶサイエンス

西村 裕志^{1*}

Biomass science inspired by trees and fungi

Hiroshi Nishimura^{1*}

概要

陸上の炭素循環にとって重要な樹木と、これらを分解する「きのこ」を研究することは、バイオマスの理解と利活用へ向けた重要な知見となる。木材細胞壁中で最も分解しにくい芳香族高分子であるリグニンの分子構造とその生分解機構を明らかにする研究、特に木質バイオマスを包括的に解析する方法として最新の核磁気共鳴法 (NMR 法) を用いる研究により多くの知見が得られている。分子構造に基づいた理解を進めることで、木質バイオマスの特性を活かした利活用へつなげていきたい。

1. はじめに

私たちの周りは生き物であふれている。外に目を向けると、木々や草花をはじめとする植物や昆虫、鳥、動物たちがいる。多くの生物にとって調和がとれた環境は多様な生物の宝庫である。その中で目立たないものの、菌類も重要な役割を担っている。

地球上の炭素循環をみると、陸上では主に樹木をはじめとする植物が太陽エネルギーから二酸化炭素(CO₂)を光合成によって蓄える。したがって、植物は生態系においてはCO₂を有機物へ変換する「生産者」といえる。それに対して、私たち人間を含めた動物は植物を直接あるいは間接的に食べる「消費者」として、菌類は動植物を分解して戻す「分解者」として考えられている。植物が蓄えた有機物を植物バイオマスといい、特に存在量の多い樹木を木質バイオマスという。

近年の急速な化石資源の消費は地下に蓄積された炭素を短期間に大気中に放出することであり、環境のバランス変化が生じている。こうして私たちが直面している環境変動や環境汚染、資源枯渇といった問題に対して、化石資源ではなく地球表層にあるバイオマスを再生産しながら活かすシステムの構築が持続可能な生存圏の未来に必要なだと考えている。

2. 生態系における「きのこ」

化石資源の多くは過去の植物や微生物群が長い時間をかけて還元されて炭素濃縮されたものと考えられている。現在の樹木は木材腐朽菌と呼ばれる「きのこ」によって分解されるが、今からおよそ3億年前の大森林時代(石炭紀)には、まだ現代の「きのこ」が存在せず、多くが石炭化した¹⁻²⁾。

現代の森を形成する樹木は単独ではなく、菌根菌をはじめとする微生物と共生関係にある。たとえばマツタケはアカマツの木と共生し、アカマツから養分をもらいながら、窒素やリンなどの必要な栄養素をアカマツに供給する。そして、枯れた木は木材腐朽菌によって速やかに分解される。これが森の新陳代謝となっている。

2016年7月19日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野.

*E-mail: hiroshi_nishimura@rishi.kyoto-u.ac.jp

ここで「きのこ」について説明する。「きのこ」と聞いて思い浮かべるシイタケ、シメジ、マツタケなどは、分類学的には担子菌や子囊菌に属している。私たちが食べる部分は子実体と呼ばれる胞子を飛ばす器官で、植物における花のようなものといえる。実際の「きのこ」の本体は菌糸体で地中や木の中にある。菌糸は普段目にするには少ないが、たとえばナラタケの仲間は山一面を覆うこともあり、一例では、菌糸体をまとめると推定重量 100 トン、菌糸が 15 ヘクタールにわたって広がっていたという報告がある。一個体として見れば、とても巨大な生物といえる³⁾。このように菌類は目立たないものの、生態系において重要な役割を担っている。菌類全体では、少なくとも 150 万種が存在すると推定される。現在知られている菌類は 8 万種程度であり、まだまだ未知の菌類がたくさんいる¹⁻²⁾。



図 1:大杵社の大杉(大分県) 推定樹齢 1000 年以上とされている。

3. 木質バイオマス

樹木は、よく知られているように大きく長寿命である。図 1 の写真は湯布院の近くにある杉の木であるが、樹高 30 メートル、推定樹齢 1000 年と言われている。このような大きさを維持し支えるためには強固な木質細胞が不可欠である。樹木の生きている細胞は樹皮の下形成層と辺材の一部までで、大部分の木質細胞は細胞内が抜け落ちて細胞壁だけとなり、樹木を支えている。細胞壁はセルロース、ヘミセルロースなどの高分子多糖とリグニンという芳香族高分子で構成されている。これらをまとめてリグノセルロースと呼ぶ(図 2)⁴⁾。セルロースは紙の原料になるパルプの主要成分である。リグニンは茶色く、難分解性であるので、脱リグニン処理が木材利用の課題になってきた。現在は化学薬品処理や物理粉碎処理によってパルプ化が行われているが、環境に穏和な方法で、植物が作り出した天然の分子構造を活かした利用法の開発が求められている。

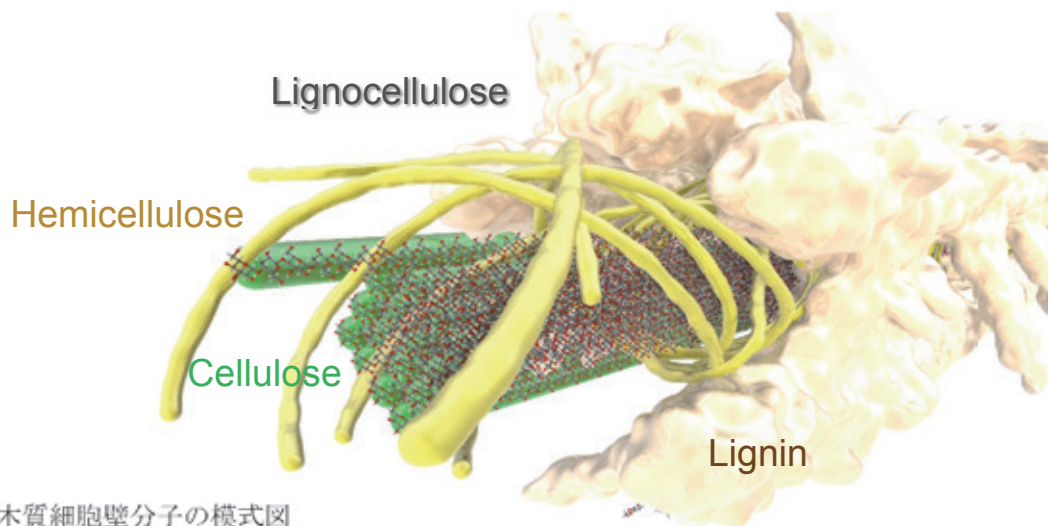


図 2 : 木質細胞壁分子の模式図

セルロースの周りをヘミセルロースとリグニンが覆っている。併せてリグノセルロースと呼ぶ。

4. 木を分解する「きのこ」、木材腐朽菌

木を分解する「きのこ」を木材腐朽菌という。主に木材の白枯れを引き起こす白色腐朽菌と褐変させる褐色腐朽菌とに分けられる。白色腐朽菌はリグニンを分解する能力をもち、自然界における木質バイオマスの分解者として重要である。代表的な例はシイタケやナメコ、エノキタケなどがある。白色腐朽菌はリグニンとともにセルロースを分解するが、一部の選択的白色腐朽菌と呼ばれる種類はセルロースの分解率が低く、リグニンを高選択的に分解する。褐色腐朽菌はリグニンを分解する能力を持たず、もっぱらセルロース、ヘミセルロース多糖を分解、資化する。代表的な例はサルノコシカケやキチリメンタケなどである。最近の研究では、褐色腐朽菌が腐朽過程でリグニンの構造を部分的に分解することが報告されている⁵⁾。

図3は木材細胞の内腔へ選択的白色腐朽菌の菌糸が進入し、リグニンの分解が生じている際の紫外線顕微鏡写真とその模式図である⁶⁾。菌糸は周りにスライム状のグルカン多糖(主に β -1,3グルカンから成る)が覆い、分解酵素や代謝物を分泌し、酵素反応やラジカル反応を駆使して難分解性のリグニンを分解していく。

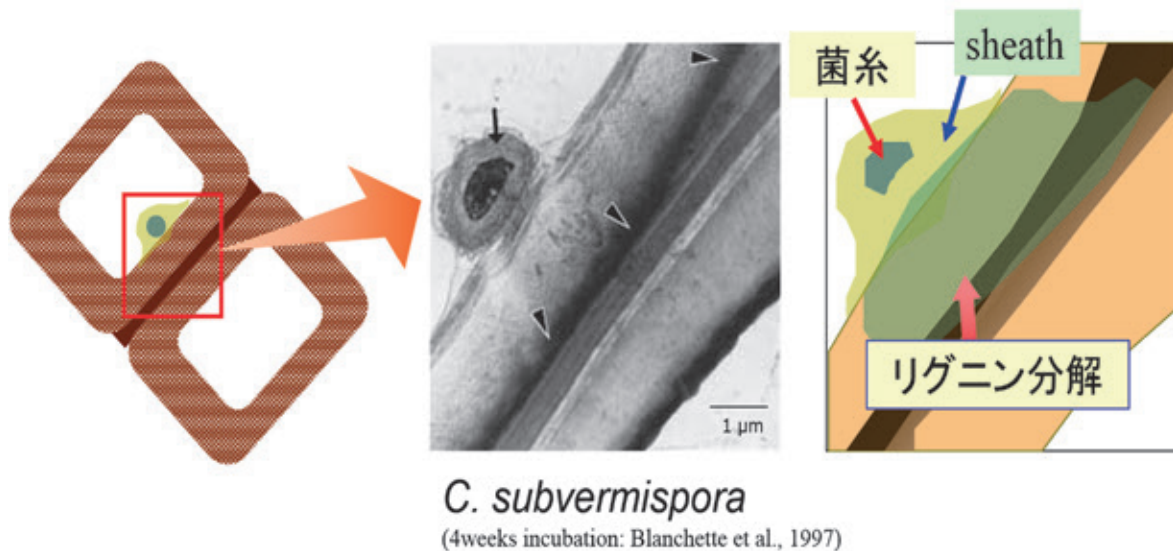


図3：選択的白色腐朽菌の菌糸と木材細胞壁の分解

紫外線顕微鏡写真と模式図。菌糸を覆うグルカン層(sheath)との接触面からリグニンの分解がみられる。

図4は典型的な選択的白色腐朽菌と通常の白色腐朽菌による分解後の木材細胞の模式図および電子顕微鏡写真である。選択的白色腐朽菌においては、細胞壁内と、特に細胞間層のリグニンが強力に分解されているのに対して、通常の白色腐朽ではリグニンとともに多糖であるセルロースが分解され、細胞壁の薄壁化が観察される。このような腐朽形態の違いは、木材細胞内腔に侵入した菌糸から分泌されるリグニンやセルロースの分解酵素が直接、木材細胞壁内に浸透するかどうかによって考えられている。通常、菌体外に分泌される分解酵素の分子サイズは木材細胞壁の細孔より大きいため、木材細胞壁内へは侵入できない。このため、多くの白色腐朽菌は、活性酸素種であるヒドロキシルラジカル($\cdot\text{OH}$)をフェントン反応(遷移金属のレドックス反応)サイクルを介して発生させることにより木材細胞壁中の多糖をぼろぼろにし、分解酵素を侵入させていく。これに対し、*Ceriporiopsis subvermispora*に代表される選択的白色腐朽菌は、木材腐朽がかなり進行した段階になっても、分泌した分解酵素を木材細胞壁内に侵入させることなく、酵素から遠く離れた細胞間層や細胞壁深層のリグニンを高選択

的に分解する。このユニークな腐朽メカニズムは、細胞壁の侵食なしに広範囲のリグニンを分解する、いわば遠隔攻撃であり、その主役は菌糸から分泌される低分子量の代謝物であると考えられている。これまでの研究で、特徴的な二次代謝物であるセリポリック酸を分泌し、これが選択的リグニン分解反応において重要な役割を担っていることがわかっている。セリポリック酸は遊離脂肪酸を部分構造に含むジカルボン酸で、類似した構造の天然物には地衣類が産生するケトメリック酸などの地衣酸がある⁷⁻¹⁰。

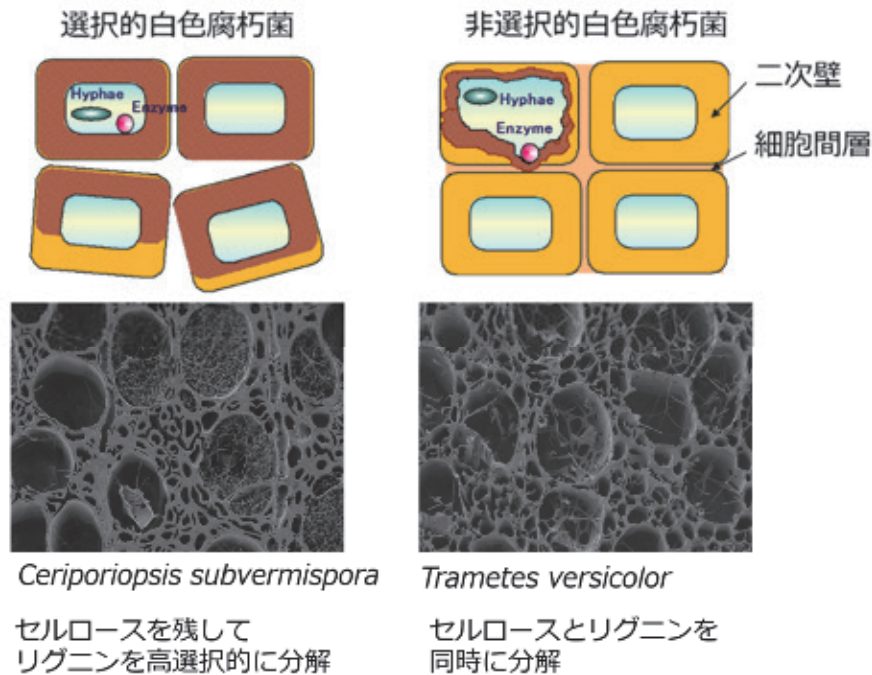


図4: 選択的白腐と非選択的白腐後の木材細胞の模式図および電子顕微鏡写真

5. 木質細胞壁の分子構造を見る方法

リグノセルロースは互いに多様な結合で三次元の網目状高分子を形成している。この高分子ネットワークの結合構造を正確に把握することは木質バイオマスの戦略的な変換、利用につなげる上で大変重要である。特に、リグニンの分岐構造やリグニンと糖の結合構造は、その存在量は少ないもののバイオマスの高分子ネットワークを“ほどく”ための鍵となる構造である。

リグノセルロースの分子構造を解析する有力な方法に核磁気共鳴法（NMR法）がある。NMR法は非破壊測定法で、試料中の有機物を包括的に観測することができ、医療機関にあるMRIと同様の原理を利用している。MRIでは主に水分子のプロトン(^1H)密度と状態の違いを画像化する。例えばプロトンのT1、T2緩和をそれぞれ強調することで体内組織を観察することができる。NMR法では、有機分子のプロトン(^1H)とカーボン(^{13}C)の核スピン情報から、1次元または2次元スペクトルデータとして分子構造情報を得る。これを基に、化学分解や成分分離、微生物分解など、さまざまなバイオマスの変換反応過程における構成成分の変化を観測することができ、バイオマスの利活用を進める基盤となる。私たちは溶液NMR法を用いて、リグノセルロースの構造解析や木材腐朽菌による生分解過程の分析を行っている。単一の有機分子の分析と異なり、木質バイオマスは分子量分布をもった高分子の混合物であり、多様な結合構造が存在するため、分析と構造解析が難しいという問題があり、分析技

術の開発を行っている。

図5に木質バイオマスのNMR分析の流れを示す。木材は固体であるので、溶液NMR測定のためには、できるだけ試料調製段階での構造変化の影響を防ぎつつ溶解する必要がある。そこで、できる限り温和な条件として、窒素雰囲気下、乾式遊星型ボールミル粉碎を行い、数ミクロンの微粉末木粉を調製する。これを有機溶媒に溶解させてNMR測定を行うと、図6に示すような ^1H - ^{13}C 相関二次元HSQC NMRスペクトルを取得することができる。二次元HSQC NMR法はプロトン(^1H)とカーボン(^{13}C)の直接結合を観測する方法で、一次元のNMRスペクトルではオーバーラップするシグナルを分離することができるため、バイオマス分子の構造、特に多様な結合ユニットの状態を判別することができる。また、ロングレンジ相関NMR法であるHMBC法(2結合~3結合離れた位置の炭素と水素の相関を観測する手法)を用いて、さらに詳細な構造情報を得ることができる。

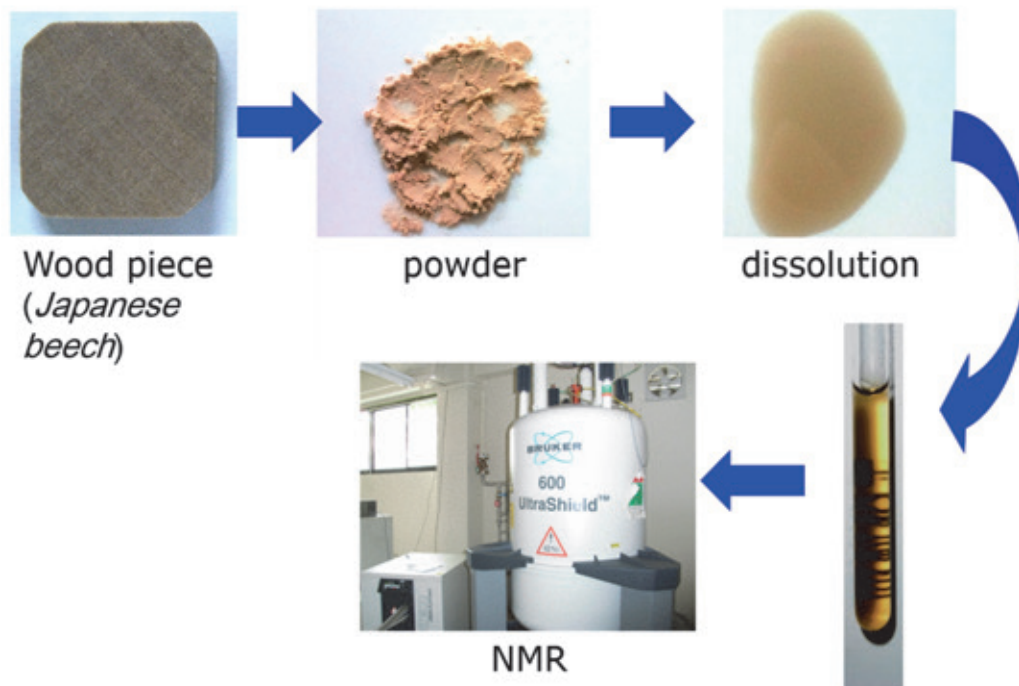


図5：木質バイオマスのNMR分析の流れ

固体の木材を微粉末化し、溶解後、サンプル管へ入れ溶液NMR測定を行う。

木質バイオマスの特徴として、高分子であり比較的粘性が高いという点がある。これはNMRスペクトル上において、ブロードで分解能が低いシグナルを与える原因となる。そこで私たちは、主に蛋白質などの生体高分子に適用されていたTROSY法をバイオマス分子に初めて応用し、より高分解能のスペクトルを得ることに成功している。また、2次元NMRスペクトルから直接、バイオマスの構成成分の定量を行う方法を開発している¹¹⁾。このようにして、これまでなかなか難しかったバイオマスの分子情報を直接観測できるようになってきた。

NMR法は木材腐朽菌(きのこ)による木質生分解過程の解析にも有効である。図7に、木材腐朽菌の種類による腐朽パターンの違いを解析した結果を示す。異なる種類の木材腐朽菌によって30日間分解した木粉のスペクトルから、分解前のスペクトルを差し引いた差スペクトルを得ることにより、木質構成成分の構造変化の特徴を効果的に解析することができる。

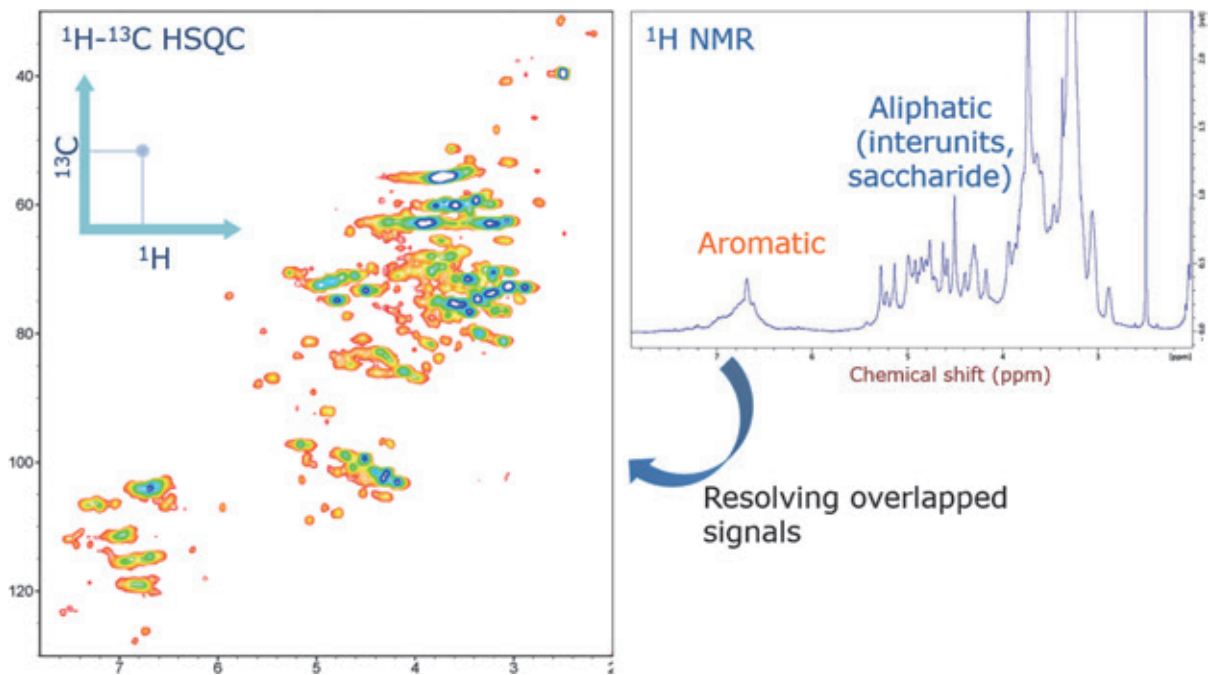


図6：木質バイオマスの ^1H NMR スペクトル(右)と2次元 ^1H - ^{13}C HSQC NMR スペクトル(左)。2次元上に有機分子の構造を反映するシグナルを呈示することで、詳細な分子構造情報を得ることができる。

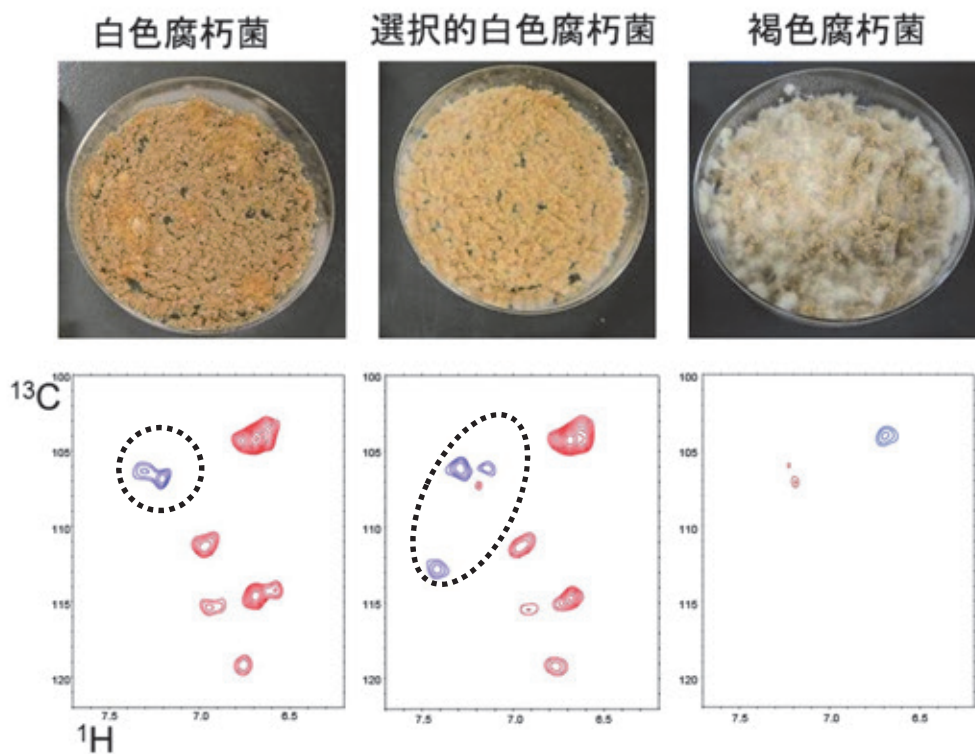


図7：木材腐朽菌によるブナ木粉の腐朽試験写真および腐朽前後の ^1H - ^{13}C HSQC 差スペクトル。横軸、縦軸はそれぞれ ^1H 、 ^{13}C の化学シフトを示し、シグナルの断面が等高線で表示されている。シグナルの正負と大きさ、位置からリグニン構造の変化と増減がわかる。図中の点線で囲ったシグナルはきのこのこのリグニン分解反応により増加した酸化型リグニン構造を反映している。

6. 生存圏の未来へ向けて

自然が豊かな環境と聞いてどのような風景を思い浮かべるだろうか。さまざまな木々で緑にあふれた山々とそこに流れる清流、あるいは澄んだ海の情景は心を落ち着かせてくれる。そうした環境は地球上で当たり前の光景ではなく、荒涼とした地域も多くある。また、一旦自然が猛威をふるえば大きな災害となって風景は一変する。樹木は根をはり、水をため、風を防ぎ、大気循環へ作用することで気候を調節し災害を緩和する役割を担っている。そのため森は人々の畏敬と信仰の対象にもなってきた。人類は産業革命以前、木材に代表されるバイオマスエネルギーとして利用してきた。その後、現代社会は化石資源をエネルギー源として利用することで発展してきたが、化石資源は何億年もの時間をかけてエネルギーが利用しやすい形に集約・蓄積されたバイオマスともいえ、このエネルギーを短時間に解放することによる不均衡がさまざまな問題を引き起こしている。

持続的な生存圏を実現するためには自然の調節力を生かしながら、自然に調和しながら発展を続ける必要がある、そのためには人類の消費活動を現在の生態系に即した形にしていく必要がある。バイオマスを再生産しながら、エネルギーと有機資源として利用していくシステムを作ることが益々重要になっている。バイオマスはエネルギー生産量として、化石資源の代替となるポテンシャルは十分にあるが、化石資源のように地球の地下で長年の炭素濃縮を受けて集約していない“生の”資源であるため、構成成分を利用可能な形に分離する必要がある。この戦略を立てる上で、分子レベルでバイオマスの構成成分を把握し、バイオマスのポテンシャルを生かして利用する方法を開発する視点が重要だと考えている。また、バイオマスは持続可能な分散型の資源であるため、将来の地産地消型の循環社会の実現へ向けて、その利活用法の開発が期待される。NMR法を用いてバイオマス成分の全体像を把握し、NMRスペクトルから直接、構成分子の精密情報を取得し、定量的に評価することが可能になってきた¹¹⁾。今後、木質バイオマスの樹種や部位の相違による特性評価や、化学変換・微生物変換過程の解析への応用が期待される。特に自然界における木質バイオマスの分解者である「きのこ」に学び、その反応のエッセンスを活かすことは重要なアプローチだと考えている。さまざまなバイオマスを巧みに使いこなすには、人類の英知を結集しなければならず、バイオマスの成り立ちから構造利用までを分子レベルで捉える研究は、その基盤として今後ますます重要になってくると考えている。

参考文献

- 1) 発酵研究所監修, “IFO微生物学概論”, 培風館, 2010, pp.41-53, 409-413.
- 2) 国立科学博物館編, “菌類のふしぎ—形とはたらきの驚異の多様性”, 東海大学出版, 2008, pp.3-19, 164-173.
- 3) Smith, M., Bruhn, J., Anderson, J., The fungus *Armillaria bulbosa* is among the largest and oldest living organisms. *Nature*, **356**, 428-431, 1992.
- 4) Heitner, C., Dimmel, D., Schmid, J.A., *Lignin and Lignans: Advances in Chemistry*, CRC Press, 2010, pp.1-10, 137-151.
- 5) Yelle, D.J., Ralph, J., Lu, F., Hammel, K.E., Evidence for cleavage of lignin by a brown rot basidiomycete. *Environ. Microbiol.*, **10**, 1844-1849, 2008.
- 6) Blanchette, R.A., Krueger, E.W., Haight, J.E., Akhtar, M., Akin, D.E., Cell wall alterations in loblolly pine wood decayed by the white-rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*, *J. Biotechnol.*, **53**, 203-213, 1997.
- 7) Enoki, M., Honda, Y., Kuwahara, M., Watanabe, T., Chemical synthesis, iron redox interactions and charge transfer complex formation of alkylitaconic acids from *Ceriporiopsis subvermispora*. *Chem. Phys. Lipids*, **120**, 9-20, 2002.
- 8) Nishimura, H., Setogawa, Y., Watanabe, T., Honda, Y., Watanabe, T., Epoxy ceriporic acid produced by selective lignin-degrading fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Chem. Phys. Lipids*, **164**, 707-712, 2011.
- 9) Nishimura, H., Sasaki, M., Seike, H., Nakamura, M., Watanabe, T., Alkadienyl and alkenyl itaconic acids (ceriporic acids G and H) from the selective white-rot fungus *Ceriporiopsis subvermispora*: a new class of metabolites initiating ligninolytic lipid peroxidation, *Org. Biomol. Chem.* **10**, 6432-6342, 2012.

- 10) Nishimura, H., Murayama, K., Watanabe, T., Honda, Y., Watanabe, T., Diverse rare lipid-related metabolites including ω -7 and ω -9 alkenylitaconic acids (ceriporic acids) secreted by a selective white rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispota*, *Chem. Phys. Lipids*, **165**, 97-104, 2012.
- 11) Okamura, H., Nishimura, H., Nagata, T., Kigawa, T., Watanabe, T., Katahira, M., Accurate and molecular-size-tolerant NMR quantitation of diverse components in solution, *Sci. Rep.*, **6**, 21742, 2016.

著者プロフィール



西村 裕志 (Hiroshi Nishimura)

<略歴>2003 年京都大学工学部工業化学科卒業／2009 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了、博士（農学）／京都大学生存圏研究所博士研究員、ミッション専攻研究員、京都大学エネルギー理工学研究所日本学術振興会特別研究員を経て 2012 年京都大学生存圏研究所助教、現在に至る。<研究テーマと抱負>木質バイオマス、リグノセルロースの精密構造解析と、木材腐朽菌（きのこ）による炭素分解システムを通じて環境調和型バイオマス変換法を探っています。<趣味>旅行、子どもと公園めぐり

木造建築千年の技術

北守 顕久^{1*}

Technology in Traditional Japanese Timber Structures

Akihisa Kitamori^{1*}

概要

本項は我が国の伝統木造建築物に見られる特徴を技術的観点から論じたものである。まず、「伝統構法」の架構技術に依存した発達と形態の変遷についてその特徴を明らかとし、続いて嵌合接合部の技術に関して、めり込みに依存した粘り強い性質を持つ接合の原理について論じる。続いて、「バランスを取る、受け流す」をキーワードに、伝統構法建築物に見られる地震力に対する柔軟な考え方を例示する。さらに伝統構法から現代の在来工法へ、住宅がどの様に変化してきたかを論じ、最後に今後伝統構法建築物を建てる際に必要な、設計手法に関する研究を紹介する。

1. はじめに

私たちは身近で豊富な木材資源を利用して木造建築物を作ってきた永い歴史を持つ。いま残る様々なかたちの伝統建築物は、多様な風土や災害に適応し変遷・発展してきたもので、木組みや架構には強く長持ちさせるための仕組みを見出すことができる。持続的生存圏のため、建築物のさらなる木造化が提唱されるなか、本稿では先人の知恵を学び、「木を活かす」技術について考えてみたい。すなわち、伝統的な木造建築に見られる技術的な発展の歴史や力学的な意味を概説し、さらに近代における工学が木造建築に与えた影響を振り返り、伝統を含むこれからの木造建築のあり方について論ずる。

2. 伝統木造建築の特徴と技術

2.1 「伝統構法」の発達と変遷

建築物の必要な機能はシェルターとして屋根や床を支持し、また外力（風圧、地震力）に耐える安全な空間を供することである。また快適な室内空間も求められる。我が国では身近で豊富な森林資源を利用した木造建築構法が発達した。木材はその形態を活かし、柱・梁といった軸部材として用いるのがもっとも効率的である。我が国の構造は基本的には軸組構造に分類される。

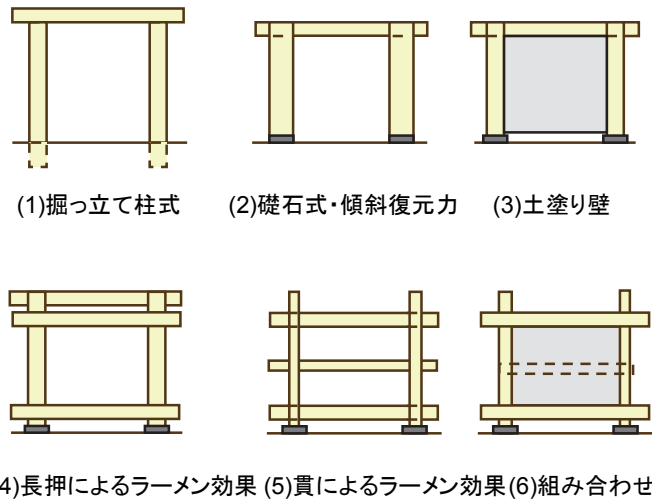
古代の建築はまずは掘立造から出発した。木材を精緻に加工する技術が無かったので、架構を構成するためには部材同士を引っ掛け、縄で縛り留めつける。それだけだと構造が安定しないため、柱の根元を土中に埋め込み、土圧によって安定させる構造とした。現代でも伊勢神宮の構造などで目にすることができる。掘立構造の部材には耐久性の高いクリ、またはヒノキの心材などが用いられた。しかし長期間の使用には耐えることができず、伊勢神宮でも20年定期の式年遷宮によって更新されている様子が見られる。

2016年7月19日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生活圏構造機能分野。

* E-mail: kitamori@rish.kyoto-u.ac.jp

そこで地盤上に設置した礎石上に柱を立てる構法が出現した(礎石造)。しかし礎石上では柱の安定が困難であるため、大きな断面の柱を鉛直力で押さえ込む形式(傾斜復元力)による構造が現れた。後述するが、単に柱単体では無く、頭貫や組み物といった要素と組み合わせることによってさらに安定した性能を得ることができている。また、日本の夏の日差しや多雨、台風に晒される風土に対応するべく深い軒を出し、かつ重い瓦や土葺きの屋根材で押さえ込む重厚な屋根構造は、巨大な鉛直力を生むが、大径の柱と用いることで傾斜復元力を有効に働かせる組み合わせとと言えるだろう。



(1)掘っ立て柱式 (2)礎石式・傾斜復元力 (3)土塗り壁
(4)長押によるラーメン効果 (5)貫によるラーメン効果 (6)組み合わせ
図1：鉛直構面架構の分類

柱間には土塗り壁によって壁面を構成する方法が発達した。日本における土壁はいわゆる“Wattle and daub”方式で、木舞を組み、その上に塗り土を数度に分けて施工する。土壁には他に日干し煉瓦式、版築式などがあるが、木舞の靱性で剥がれにくい、何らかの変形を受けた際に粘り強い性質をもち、かつ補修が容易な特徴をもつ塗り土壁形式が我が国では定着した。当時はまだ板材を加工するのが技術的に困難であったため、板は木繊維に沿って打ち割り、表面を槍鉋でならして仕上げた。通直大径の材が取れる、ヒノキやスギ材が豊富にあったことが加工を比較的容易なものとした。

傾斜復元力、土塗り壁、板壁といった要素で足りない水平耐力は長押部材の発達で補われた。長押は現在では化粧材だが、当時は有効な構造材であった。すなわち、柱に側面から溝を設け、通しの横架材を嵌め込む。後述する貫仕口に比べ表面から加工できるため精度良い加工が容易なことから、頭貫等と組み合わせて用いられた。

ところが長押による構造では立体的な架構形式や絶対的な耐力性能に限界がある。そこで平安時代末期に中国から貫構法が伝来し、様々な形で普及した。貫構造は当初大仏様として、東大寺再建のために僧重源上人が留学・輸入したことに始まる。貫とは、柱に穴を穿ち、そこに横架材を突き刺して構成する骨組みであり、鑿、鉋といった大工道具の発展により、正確な穴を空ける技術がこの時代になって可能となっていた事が構法の普及に繋がったと言える。大仏様は本来、大きな軒先の荷重を支え(差肘木)、開放的な室内空間を構成するフレーム構造を実現するための技術である。しかし後述するように地震力に対して非常に有効な機能を持つことから、我が国では様々な形で、例えば壁中や小屋組を構成する要素として取り入れられることになった。貫構造の登場によって我が国の架構技術は地震に対して安定となり、以降より精緻な木組みの技術の発展につながっている。



図2：深い軒(唐招提寺)、長押構造(秋篠寺)、上部土塗りと下部版築の例(Bhutan)¹⁾

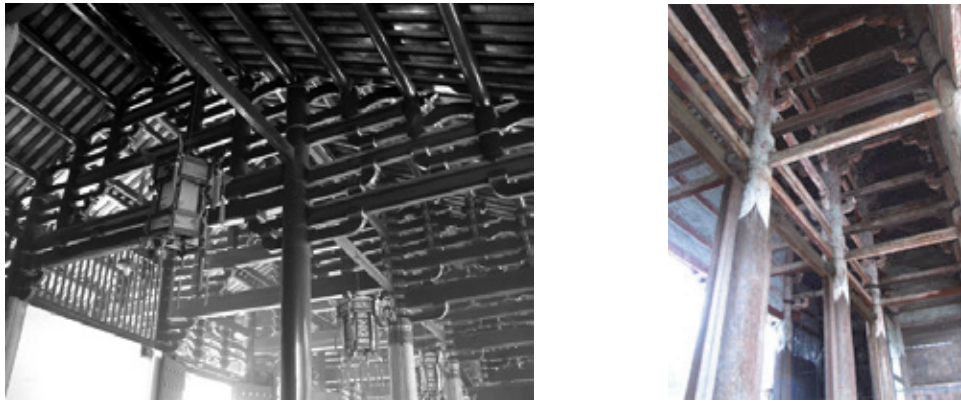


図3：大仏様の起源（左：中国潮州开元寺天王殿檐）と重源による東大寺南大門

2.2 嵌合接合部の技術

伝統構法では「木組み」による技術が発展した。すなわち、木材を精緻に欠き込み加工を施して互いに嵌め合わせる嵌合接合部の技術である。先に述べたように、嵌合接合の代表例が貫接合部である。貫とは柱に穴を穿ち、柱より幅の小さい横架材を差し込むことで構成される。地震力などを受けると柱木口が貫材に接触することで回転抵抗力を発揮する。我が国ではヒノキやスギといった針葉樹材を多用するが、針葉樹材は特に仮導管構造を持ち、細胞壁がパイプを束ねたような構造を持つ。柱木口が接触すると、パイプが押しつぶれ、極めて粘り強く変形することが可能であり（めり込み）²⁾、変形と同時にエネルギー吸収が生じる。すなわち、貫接合部が多数並列して用いられる構造物は地震に対して倒壊しにくい建物となることができる。

一方でめり込みは比較的柔らかく、また木材が乾燥収縮したり、初期の施工誤差があると接合部に隙間が生じてしまい、構造を固めることができない。そこで貫接合部では楔を打ち込み締め固める。楔は中国などではあまり見られず、我が国で特に発展的に用いられる要素で、やはり地震に対する配慮が背景にあると考えられる。さらに楔の使用は、接合部内で部材を落とし込み、噛み合わせることを可能とする。重源上人が考案した東大寺の接合技術は、複雑な形状をもつ4方向仕口だが、形状を規格化し、並列的な大工加工を可能とすることで非常に短期間で建物を完成することができたといわれている。

さらに堅く接合部を締め固めるための技術に「木殺し」と呼ばれる技術がある。これは接合部を組み立てる際に、構成する材料の表面を玄翁でたたいて、表面付近の細胞を潰してから組み立てる技法である。横方向の変形に対して木材の細胞はたとえ一端潰れたとしても、弾性を失ったわけではなく、長期的に膨らみ、寸法を回復しようと働く。この作用で接合部の嵌合度や接触応力を持続させることができる³⁾。

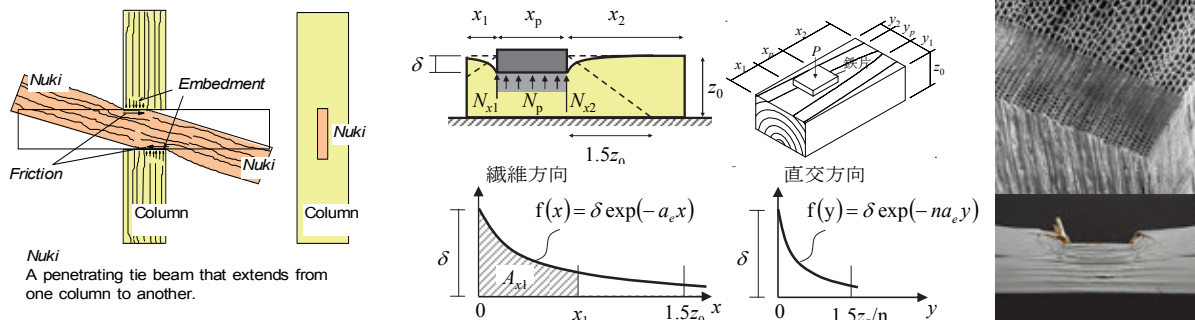


図4：貫接合部とめり込みの力学モデル²⁾

柱の曲げによって外力に抵抗する、モーメント抵抗フレーム構造を構成するために差鴨居接合部が用いられる。図5に示す竿車知接合部は、差鴨居用の技術のひとつで、車知と呼ばれる傾斜した栓を打ち込んで部材同士を留めつける。これにより車知は柱と梁の部材同士を引き寄せ、密着させる機能を持つ。車知は我が国固有の接合具である。我が国の大工は特に締める、固める、といった機能を大切にしてきたことがわかるだろう。車知を有する差鴨居接合部がモーメントを受けると、車知接合部には大きな引張力が作用する。このとき、車知は仕口内で回転するように動き、車知道を横に押し広げる。これを止めているのが梁先端に加工された目違いで、目違いは車知を打ち込む際に柱の中に差し込まれている。この車知、車知道、竿、目違いの寸法と強度のバランスが取れたときに、接合部は粘り強い変形挙動を示す事ができる。また、雇い竿が梁の全断面で無く上部だけで、竿車知道は下部でつながっていることもまた車知の回転による横割裂を抑止するために重要な形状である。実際に様々な寸法パラメータを設けて実験を行うと、伝統的に用いられてきた寸法バランスは粘り強さを発揮するために非常に理に合ったものであることが証明された⁴⁾。

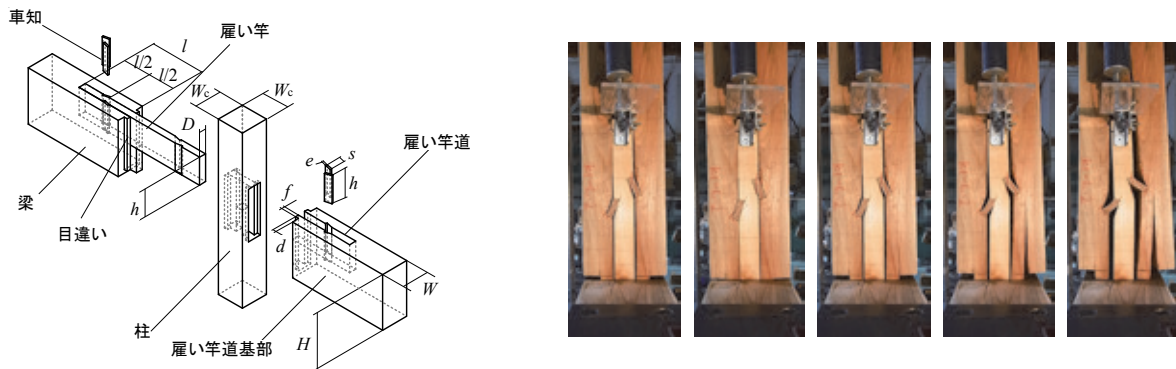


図5：雇い竿車知接合部と変形の様子

2.3 バランスを取る、受け流す

伝統建築は先述した礎石建て構法の流れを受け、柱を直接礎石上に設置するいわゆる石場建て構法によって立てられる事例が多くみられる。石場建ての利点は床下の通気を良くすることで、部材の耐久性を高めることにあると考えられる。それ以外に、地震時に地震動を受け流す、いわゆる免震的な効果があるのではないかと指摘がなされている。実際に地震被害調査に行くと、図6左に見られるように、礎石からずれ落ちてはいるが、健全な状態の建物を目にする事ができる。反対に、同様の建物でも倒壊してしまうものや(中)、束立ての石場建てのため、礎石上で滑ることができずに反対に束の接合が完全に破壊してしまう事例(右)も見られる。実際に実大建物の振動実験を行うと、後者の様な挙動になってしまうことが多い。全体が一律に滑ることができれば効果的な免震機構となるが、実際には滑る部分と滑りにくい部分が混在し、結果として滑らない場所に力が集中して破壊してしまう事につながってしまう⁵⁾。伝統構法の免震的機構の解明にはさらなる技術的な検証が必要だろう。



図6：地震被害の例

社寺建築の軒下に取り付く組み物は外観を決定づける重要な要素である。大斗や肘木を組み合わせ、2段3段に徐々に広げながら重ねて構成される組み物は、屋根の鉛直荷重を柱に伝達する際、隅木や軒垂木の支持点を柱よりも外に持ち送ることで深い軒を支えるために必要な要素である。多段の組み物が一段一段回転変形と摩擦滑り変形することで、地震時エネルギーを吸収するのではないかとされている⁶⁾。その他にも組み物と同時に使用される丸桁や頭貫といった横架材が、柱傾斜復元力と共に水平抵抗力に重要な働きを持つことがわかってきた。図7には傾斜復元力の試験結果を示す。頭貫が存在すると、大きな水平抵抗力を持つことがわかる。組み物や頭貫は、常に自重による鉛直力を受け続けるので緩むことが無く、高い嵌合剛性を常に発揮することができる。重い屋根荷重を耐力性能に活かすため、組み物機構は効果的であると言えよう。

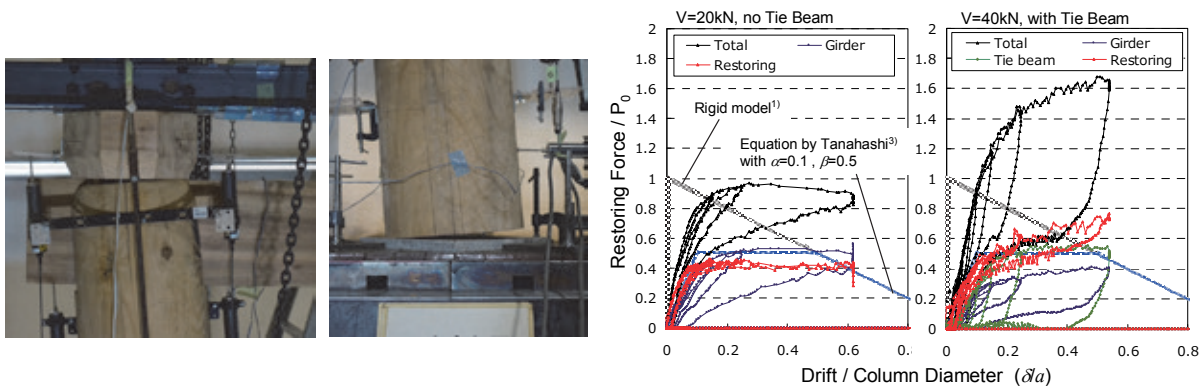


図7：柱復元力の実験例⁹⁾

軒に作用する大きな鉛直力を支える要素として桔木と呼ばれる部材がある。桔木は我が国固有の部材で、軒垂木の上に並べて配置する丸太部材である。天秤構造をしており、中央側で支えることで軒先を跳ね上げる機能を持つ。重い軒先を支持するのに尾垂木に負担を強いていた従来手法に比べ、格段に強度を増すことになった。興味深いことに仮に軒先が垂れた際に桔木を調整できるように桔木の根元はしっかりと固定せず、簡単に動かせるようになっている。

三重塔五重塔といった塔建築は通し柱では無く管柱で構成されている。このため各層がそれぞれ比較的柔らかく動くことができ地震時に高次の変形モードを示し、地震力を受け流す機構となる。中央には相輪の荷重を支える心柱が配置されているが、中にはこの心柱が中にぶら下がっている構造をしているものがある。間に横架材を挟みつつ多層に積み上げる五重塔は、長期的に自重によって沈下する。このとき心柱が地面に接すると、突っ張りとなり相輪と屋根との間に隙間が生じてしまうが、これを防止するために、沈下と同時に下方に変形するように心柱を施工し、やじろべーのようなバランス架構とするのである。このような柔軟性を持たせる工夫は伝統構法の随所に見ることができる。



図8：桔木(左)と三重塔の心柱(右)；心柱は地盤に接せず浮いている。それぞれ簡易に固定される。

2.4 伝統構法→在来工法への変化

ここまで特に社寺等大型の伝統建築に用いられる技術を中心に解説してきた。では住宅はどうだろうか。昔も現在も多くが木造で建てられている。住宅は社寺等の大型建築と比べ予算規模が小さく、十分な部材断面や耐力要素を必ずしも確保できるとは限らないため、度重なる地震によって少なからず被害を受けてきた。そこで、技術的に明治期以降の西洋の考え方が導入され、在来工法として大きく変化した。在来工法は伝統的な町家住宅（書院造形式）を基本形とするが、西欧技術から見た視点と、濃尾地震(1891)、関東大地震(1923)の被災建築物調査による問題点が整理され、以下の様に定義された。

- ① 土台・足固めの設置：柱脚の礎石からの踏み外しを防止
- ② 筋交い耐力壁：壁の耐力性能の向上
- ③ 屋根の軽量化：瓦→鋼板等
- ④ 伝統仕口の否定・金物補強：柱の断面欠損を最小に
- ⑤ 火打ち部材の導入：水平構面を固める
- ⑥ 通し柱：最も大きな引き抜き軸力のかかる隅柱の引張性能向上
- ⑦ 基礎とアンカーの設置：不同沈下、底面一体性、曲げ戻しによる応力分散（基礎）、壁体の浮き上がりの防止

すぐに一般に広まることは無かったが、学会主導で研究成果が蓄積され、木構造設計規準の刊行(1949)、建築基準法の制定(1950)、住宅金融公庫共通仕様書(1950)の策定に及んで、標準仕様として一気に普及することになった。初期の在来工法では、仕様規定が一人歩きし、筋交い端部が簡易に留めつけられ地震時には引き抜きに対して無力で踏み外す、通し柱が層の変形の差に追随できずに折れるなど必ずしも耐震性能が高くない場合もあった。また床下や壁内の密閉度が上がったため、耐久性が低下したという指摘もあった。近年は面材大壁耐力壁、プレカット仕口、JAS規格材、根太レス合板、集成材梁、外壁、断熱材+透湿防水シートといったさらなる品質管理の徹底と合理化により伝統構法的な要素はますます姿を消してきている。大きな傾向の変化を以下に列記すると、

- ・伝統的デザインと大きく異なる屋根と外壁の仕様変化、不燃外壁、軽量鉄板屋根
- ・内装は見せる構造から隠す構造へ（大壁・クロス貼）、気密性の向上の要求
- ・複雑な木組み架構から単純・合理化な構成、個々の接合部には大きな力が作用

耐震性能についても基本的に耐力壁と呼ばれる壁に負担させることとし、またその性能は壁倍率という指標で評価される。板壁の様な伝統構法で用いられる耐力壁は初期の剛性はあまり高く無いが、最終的に木材同士の接触で大きな荷重を負担できる特徴があった。これは建物の倒壊を防ぐ観点からは非常に優れた点と言える。ところが現行の耐力壁の指標では後者の利点は活かされず、最小初期剛性によって指標が定まるため、低い強度の壁として見なされてしまう。伝統構法の利点を活かすには評価基準の見直しが必要となるだろう。

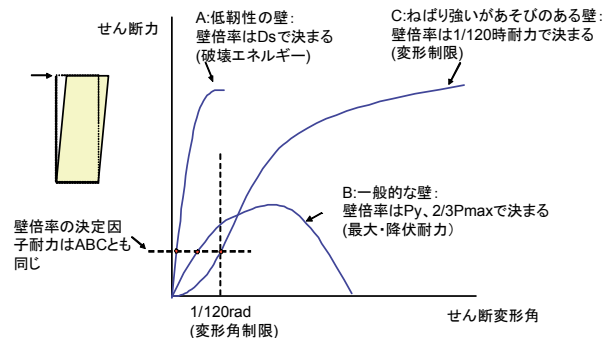


図9：伝統木造住宅の地震被害と壁倍率の概念

2.5 伝統構法の設計とこれから

現在純粋に近い伝統構法住宅の新築シェアは 1%を切っている。構造面での法規制が新築を極めて困難にしている為とされている。そこで伝統構法を再定義し、耐震安全性は確保しつつより容易に伝統構法住宅を設計する道筋を作る検討が行われている。

具体的には、設計法に関しては限界耐力計算と呼ばれる耐力要素の終局変形を考慮した設計法の適用が検討されている。土塗り壁や板壁と言った壁要素に限らず、差鴨居や貫フレームなどの接合部も積極的に耐震要素として考慮に入れることで、より正確な評価を行うことができる。ところがこれらの伝統耐力要素の性能は未だ不明点が多く、実験や力学モデルに基づく評価式の制定が試みられている。また、設計者が自由に参照できるようなデータベースの整備も検討されている。さらに、材料面では例えば限界耐力計算を行う際に用いられる構造部材は、その品質性能が明確である必要があるため、基本的には伝統構法で用いられてきた天然乾燥の製材は使用することができない。一方でその色味や香り、加工のしやすさなど利点やエネルギー面の利点を活かすべく、品質に関する規制の緩和を図る試みがされており、基礎的な研究が続けられている。

3. おわりに

伝統構法は木造建築の中でも特に複雑な挙動を示す、難しい構法といえる。しかし我が国で生まれ、幾多の災害を乗り越えて技術的に発展してきたものであり、また重要な文化的価値をもつことも疑いない事実である。将来に向けて伝統構法建築物を継承していくためには、伝統構法の機能や利点不利点を正當に評価する必要があり、研究者や技術者のますますの協働が求められている。

参考文献

- 1) 稲山正弘“木材のめり込み理論とその応用”，東京大学学位論文，1991.
- 2) 池 浩三，鈴木樹，片岡 靖夫，東大寺南大門の構成部材-軸部の肘木と貫，*日本建築学会計画系論文報告集*，**453**，127-136，1993.
- 3) 鄭 基浩，北守顕久，小松幸平，スギ圧縮込み栓の回復特性による金輪継ぎ手接合部の抗クリープ性能向上，*木材学会誌*，**53**，306-312，2007.
- 4) 北守顕久，野村昌史，稲山正弘，後藤正美，雇い竿車知栓留め柱-梁接合部の引張性能評価式の提案，*日本建築学会構造系論文集*，**79**，93-102，2014.
- 5) 伝統的構法の設計法作製および性能検証実験 平成24年度事業報告書 http://green-arch.or.jp/dentoh/report_2011.html
- 6) 藤田香織，木村正彦，大橋好光，坂本功，静的水平加力試験に基づく伝統的木造建築の組物の履歴モデルと剛性評価，*日本建築学会構造系論文集*，**543**，121，2001.
- 7) Kawai, N., Column Rocking Resistance in Japanese Traditional Timber Buildings. *Proceedings of the International Engineering Conference*, **1**, 186-190, 1996.
- 8) Tanahashi, H., Suzuki, Y., Analytical Simulations of Full-Scale Static and Dynamic Tests of Traditional Wooden Frames, *Proceedings of Urban Cultural Heritage Disaster Mitigation*, **4**, 181-188, 2010.
- 9) Kitamori, A., Yeo, S.-Y., Aoyama, T., Chung, Y.-L., Mori, T., Hsu, M.-F., Komatsu, K., Isoda, H., Experimental Study on Restoring Force of Japanese Traditional Column Combined With Tie Beam And Bearing Block, *Proceedings of WCTE2016*, CD-ROM, 2016.

著者プロフィール



北守 顕久 (Akihisa Kitamori)

＜略歴＞ 2000年北海道大学農学部森林科学科卒業／2008年京都大学大学院農学研究科博士後期課程単位取得退学／博士（農学）／2009年京大生存圏研究所助教、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞木質構造学、木材工学。木造建築物について、材料から接合、構法、歴史に至るまで、構造・強度的観点から幅広く研究しています。美しい木造建築物がより普及することに貢献する研究を心掛けています。＜趣味＞読書。歴史物。最近は運動不足ですが、昔はサッカーと登山をやっていました。

木づかいの匠、日本

田鶴 寿弥子^{1*}

Japan, the specialist in wood usage

Suyako Tazuru^{1*}

概要

古くから適所適材の観念が発達していた日本では、樹種の選択に日本独自の知恵が盛り込まれてきた。今に伝わる木質文化財に使用されている樹種やそれらが選ばれた意味を再考することは、日本文化の根底に流れる日本人の豊かな知恵を知ることにつながる。日本古来の知恵を未来へ正しく伝えること、それが今を生きる我々の使命ではないだろうか。

1. はじめに

毎日の生活の中で、木の恩恵に与らない日はあるだろうか。従来、住居、家具、食器、玩具をはじめとして、木は私たちの生活や文化形成に必須であった。私たちが住む日本は、その国土面積からは想像できないくらい豊かな植生に恵まれており、国土の70%程度を森林に覆われ、有用樹木種だけでも約300と言われている¹⁾。木造建造物、木彫像、木工芸品などを見てもわかるように、古来日本人は木を選び、その特性を有効活用することで独自の文化を成立させてきた。そのことは日本書記に記された有名な一節「ヒノキは宮殿に、スギとクスノキは船に、コウヤマキは棺に」からもみてとれる。このような樹種選択には、樹種特有の物性などが反映されており、当時すでに用材選択における豊かな知識が日本人には備わっていたことが想像できる。木質文化財に利用されている樹種や選択された意味を調べていくことで、日本文化を構築してきた「適所適材」の木づかいの知識を知ることにつながるのではないかと考えられる。



図1：石川県にある曹洞宗大本山総持寺祖院における保存修理工事の様子（左）と再利用のために保管されている古材（中央）。建造物の文化財保存修理工事では、解体した古材それぞれについて再利用の可否を決定し保管する。このような古材の中でも再利用不可な部材では、樹種識別調査に加えて年代測定もおこなわれることがある（右）。

2016年5月24日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野。

* E-mail: tazurusuyako@rishi.kyoto-u.ac.jp

2. 文化財保存修理工事と樹種調査

現在日本の国宝・重要文化財に指定されている歴史的建造物のうち、現存する世界最古の木造建築物である法隆寺の木造建築物をはじめ、約9割が木造によるものである(平成17年文化庁公表)。古の工匠が創り上げた数々の建造物の古材からは、威厳、美しさ、技術の高さを見るのみならず、過去の様々な情報、すなわち樹種、加工痕、技法、年代、古気候といった情報を得ることができる。図1左、ならびに中央の写真は、修理工事中の石川県曹洞宗大本山総持寺祖院であるが、建造物における樹種情報は、建造物を維持する上で必要不可欠となる修理工事後補材選択に重要なだけでなく、部材の樹種選択の地域性や当初・修理における部材選択の変遷の把握にも重要である。当時の木材流通の解明にもつながる他、古い植生の解明にも有益であることが判明してきている。また図1右のような部材片や大径材から年代調査も行われ、建造物の歴史的背景の解明にも活用されてきている。

これまでにも、多くの建造物の文化財保存修理工事において、解体された部材の見た目や匂いなどから目視観察によって樹種が推定されてきた。このような修理時、調査に用いられる古材は、長年にわたる劣化などで見た目が変化しているものも多く、大工らの経験則に基づいた樹種推定では特定が困難な場合も多くある。そこで、先人たちにより光学顕微鏡観察による樹種識別法が確立され^{2),3)}、木材標本データベース、解剖学的特徴に基づいた樹種データベースなどが構築、公開され(図2)、活用されてきている。これにより、様々な文化財における樹種調査が行われてきており、木材科学のみならず建築、美術、環境、考古学をはじめとした様々な領域に新たな知見がもたらされてきた。

一方、修復工事においては修理現場担当者の采配や予算問題もあり、上記の光学顕微鏡をはじめとした自然科学的手法を用いた調査が適用されることが難しい場合もまだまだ多く、現在も目視による調査が多くを占めているのが実状ある。本稿では、これまで光学顕微鏡をはじめとした科学的手法による樹種調査が殆ど行われてこなかった地域の建造物群に注目し、文化財保存修理工事に際して行った樹種調査から新たにわかりつつあることを紹介する。



図2：北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、森林総合研究所の木材標本ネットワーク(左)と京大大学生存圏研究所の木材標本関連のデータベース(右)。木材の標本ネットワークの構築が進められてきており、木材や樹種識別に必要な情報などを下記のサイトなどからある程度入手することもできる。

http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/bmi/Xylarium_net/cai_jiandetabesu.html (左)

<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/bmi/jp/namazu.cgi> (右)

3. 樹種を知りたい

「何の木かな?」、街中や森でそう思った場合は、まず木をよく観察することからはじまる。樹形、葉、花、実、樹皮、大きさなどの特徴を観察し樹種を判断する。しかしながら図 3a のように一旦「木材」となったものや、長い年月を経た古材などを判断する場合は、表面の色が変わっていたり樹皮がはがれていたり、長年の経験がある大工でさえ目視での判別が困難な場合があり、木材組織を観察し形態的な特徴を見つけて判断することが必要になってくる。そのために木口面、柁目面、板目面についてそれぞれ剃刀(図 3b)を使って薄い切片を作成し、光学顕微鏡(図 3c)などで3断面(図 3d-3f)を観察することが必要となる。この光学顕微鏡観察では、木材を科・属・種のうち、おおよそ属レベルまで識別することが可能である。

さらに最近では木材中の化学成分に注目した DNA 分析による識別が研究されている他⁴⁾、近赤外分光分析を利用し、例えばニヨウマツ類の中でもアカマツとクロマツといった木材組織が似通った樹木の化学成分を測ることによって識別する方法も開発されている⁵⁾。また文化財修理などで得られる非常に小さな木片の樹種調査等にはマイクロ X 線トモグラフィ法による樹種識別も活用され、木彫像や古面をはじめとした様々な木質文化財の樹種調査に役立てられている⁶⁾。



図 3 : アスナロ属(特に能登半島の建築関係者はそのうちのいくつかをアテ、クサアテ、マアテ、スズアテなどと分けて呼ぶことがある)の部材(a)を、剃刀(b)を用いて切片を作り、光学顕微鏡(c)で観察する。d~f(d: 木口面、e: 板目面、f: 柁目面)の顕微鏡写真からそれぞれ解剖学的特徴を見出し同定する。アスナロ属は樹脂細胞があり、分野壁孔はスギとヒノキ型の間で、一分野に三~四個乱雑に存在している点で、似通っているヒノキの組織学的特徴とは異なる。なお、樹脂が多く、組織が見えにくいという特徴がある。

4. 北陸地域の建造物の樹種調査からわかること

様々な文化財保存修理工事において発行される報告書には、建築関係の膨大な情報とともに部材の樹種情報が記載されている場合がある。しかしながら多くの報告書では大工や現場担当者の目視による樹種調査結果が多いというのが実状であった。

なかでも福井県や石川県をはじめとした北陸は、価値ある古い歴史的建造物が多く残存しているにもかかわらず、光学顕微鏡を用いた樹種調査数が少ない地域であった。そこで2008年より継続して福井県の丸岡城天守、明通寺本堂、明通寺三重塔、瑞源寺書院、須波阿須疑神社本殿、本荘春日神社、石川県の民家や総持寺祖院などについて、樹種調査、年代調査（一部）を行い、報告書や文献調査に記された部材情報との比較を行った。

その結果、例えば福井県の丸岡城では報告書にヒノキとケヤキが使用されていると書かれているのに対し、我々の樹種調査ではヒノキと考えられていた部材にアスナロ属が使用されていたことが明らかになるなど、既存の修理報告書に記された目視による調査結果とは多少の相違があることが判明した⁷⁾。また、修復現場で古材をみた大工がヒノキやスギと推定した部材が、すべてアスナロ属であったという例も見られた。13世紀に建造され福井県内で最も古い明通寺本堂にもアスナロ属が使用されており、アスナロ属は鎌倉時代にはすでに福井県内でヒノキの代理のような形で有用な建築材として認識されていたことが伺えた⁸⁾。

また福井県内の一部の建造物については、アテヒノキ（アスナロ属のことを北陸の方言でアテと呼ぶ）、クサマキ（草槇）や麻木（マキ）が使用されていることが報告書に記載されている例もあるが、これらが一体なんの樹種を意味しているのかは現段階では不明であり、今後の継続した調査が必要である。さらに石川県能登半島に位置する総持寺では、アスナロ属の使用が、光学顕微鏡により多く認められたが、現地の大工はねじれや年輪の入り具合、加工のしやすさなどといった木材の特性により、アスナロ属の部材をアテ、クサアテ、マアテ、ズアテなどと分けて呼んでいる。それぞれ、ヒノキアスナロの変種ではないかと考えられているが、過去の植生を考えるなどして科学的分類の可否を検討していく必要がある。

5. おわりに

近年、木彫像に使用された樹種を科学的に明らかにしたことで、古代の日本人の用材観に新しい知見がもたらされた⁹⁾ように、木材の樹種識別調査は補助的な調査から、建築史、考古学、美術史学、環境学といった様々な研究分野に新しい情報をもたらすことから、より重要度の高い調査となっている。建造物の樹種識別調査を行い、報告書に書かれた目視による樹種情報と照らし合わせる作業は、ややもすると間違い探しをして喜んでいるように思われがちである。しかしながら我々は、木の匠が心血注いでつくりあげた建造物に使用された樹種を科学的に正しく知り伝えることで、日本人が古か



図4：材鑑調査室

http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/bmi/data/xyliarium/Virtual_Field/zhan_shi_shao_jie.html 参照

ら伝えてきた知恵を正しく理解し、その建造物に適した樹種すなわち同じ物性を示す同樹種を用いることで、将来に正しく伝えたいと思っている。日本人の知恵を将来の日本人へ伝えること、それが今を生きる我々の使命だと考えている。修理現場にヘルメットをかぶって入っていくとき、古材が古の工匠の真剣な思いを我々に教えてくれようとしているように感じる。

このような樹種調査で用いた古材の標本やプレパラートは、京都大学生存圏研究所の材鑑調査室（図4）にて保管管理されている。材鑑調査室は1978年に国際木材標本室総覧に機関略号 KYOW として正式登録されたことを機に、1980年に建立・設置された。木材標本やさく葉標本の収集はもちろんのこと、国内外の大学、研究所、諸機関との材鑑交換・分散管理を行うことにより、火災や自然災害などによる資料の欠損を防いでいる。『過去は未来を予測する鏡である』という言葉があるが、古材という鏡によって未来を予測することが求められている。すなわち、年輪情報による未来の気候予測、木彫像に用いられた樹種からの史実の抽出、材料の経年劣化調査による未来の材料検討といった、未来を見据えた様々な研究が、現在多くの研究者によって進められてきている。

近年、特に我々の研究室では木材のCT画像の濃度分布情報に基づいた、画像による樹種の自動認識^{10,11)}や、近隣のアジア諸国との文化財調査を通じて、樹種から文化交流の歴史を再考する¹²⁾など、文理融合研究に取り組んできている。たかが木の種類、されど木の種類。木から過去を見つめ、そして未来を夢見る、そんな研究を今後も続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 貴島恒夫, 林昭三, 岡本省吾, 「原色木材大図鑑」, 保育社, 1962, pp. 204.
- 2) 伊東隆夫, 藤井智之, 佐野雄三, 安倍久, 内海泰久, IAWA による光学顕微鏡の特徴リスト, 「針葉樹材の識別」, 海青社, 2004, pp. 70.
- 3) 伊東隆夫, 藤井智之, 佐伯浩, IAWA による光学顕微鏡の特徴リスト, 「広葉樹材の識別」, 海青社, 1998, pp. 142.
- 4) Tsumura Y, Kado T, Yoshida K, Abe H, Ohtani M, Taguchi Y, Fukue Y, Tani N, Ueno S, Yoshimura K, Kamiya K, Harada K, Takeuchi Y, Diway B, Finkeldey R, Na'iem M, Indrioko S, Kit K, Muhammad N, Lee S., Molecular database for classifying Shorea species (*Dipterocarpaceae*) and techniques for checking the legitimacy of timber and wood products, *J. Plant Res.*, **124**, 35-48, 2011.
- 5) Horikawa Y, Mizuno-Tazuru S, Sugiyama J., Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese diploxylons, *J. Wood Sci.*, **61**, 251-261, 2015.
- 6) Mizuno S, Torizu R, Sugiyama J, Wood identification of wooden mask using a synchrotron X-ray micro-tomography, *J. Archaeol. Sci.*, **37**, 2842-2845, 2010.
- 7) 水野(田鶴)寿弥子, 杉山淳司, 重要文化財丸岡城天守の古材に関する樹種識別調査, *建築史学*, **55**, 63-71, 2010.
- 8) 水野(田鶴)寿弥子, 杉山淳司, 国宝明通寺三重塔古材の樹種識別調査, *建築史学*, **57**, 109-117, 2011.
- 9) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之, 日本古代における木彫像の樹種と用材観 -七・八世紀を中心に-, *MUSEUM 東京国立博物館研究誌*, **555**, 3-54, 1998.
- 10) 杉山淳司, 歴史や文化にかかわる木材の科学的調査, *海洋化学研究*, **28**, 24-29, 2015.
- 11) Kobayashi K, Akada M, Torigoe T, Imazu S, Sugiyama J, Automated recognition of wood used in traditional Japanese sculptures by texture analysis of their low-resolution computed tomography data, *J. Wood Sci.*, **61**, 630-640, 2015.
- 12) 杉山淳司, 韓国の祭祀と面 -古面の材質から-, *繊維と工業*, **71**, 291-295, 2015.

著者プロフィール



田鶴(水野) 寿弥子 (Suyako Tazuru-Mizuno)

＜略歴＞ 2011年京都大学大学院農学研究科森林科学専攻博士課程農学博士取得／同年京都大学生存圏研究所博士研究員／同年同研究所生存圏学際萌芽研究センターミッション専攻研究員／同年同研究所助教、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞ケモメトリクスによる樹種特性解析や木質文化財の樹種データベース構築、年輪研究。抱負は「学育両道」に励む。＜趣味＞子供服作り

木材の流動成形における高度制御型化学処理手法の開発

田中 聡^{1*}

Development of techniques for highly controlled chemical treatment in wood flow forming

Soichi Tanaka^{1*}

概要

木材の流動成形は、塊状の木材を流動させて自由に形状を付与できる新しい成形技術であるが、安定した成形体を得るためには、成形前の木材に化学処理物質を導入する必要がある。それは、木材の細胞壁の中にある不安定構造が吸放湿することや分解の起点になることを抑制して、成形体の変形、劣化、および分解を防ぐためである。しかしながら現状では、化学処理された細胞とされていない細胞が存在し(巨視的処理ムラ)、さらに細胞壁中にも処理されて安定化された箇所と処理されていない不安定な箇所が存在する(微視的処理ムラ)。そのため成形体には、環境次第で変色・表面荒れが生じる、寸法が不安定であるといった問題が生じている。著者はこれまでに、巨視的および微視的な処理ムラを解消するために、それぞれ「細胞1つ1つを物質溶液で充填する手法の開発」および「細胞壁中の不安定領域を物質で充填する手法の開発」に取り組んできた。本稿では、これらの取組みの概要を説明するとともに、特に後者のための新しい手法として、処理物質溶液含浸木材の養生工程(溶媒を蒸発させる工程)における細胞壁への物質拡散の制御技術について紹介する。

1. 木材の流動成形について

木質資源は人間がわずかなエネルギーを投じるだけで材料として利用できるが、それが十分に進んでいるとは言い難い。これは木質系材料が、大量の材料が使用される産業界の要求に応えられていないためである。産業界では高い安定性、精度や正確さをもつ材料が求められる。そのために材料開発では、一般的に素材の構成要素を小さくしてそれを再構築する。一方で、構成要素を小さくするほど加工に大きなエネルギーが必要なので、小さい構成要素にすることは環境負荷という観点からは好ましくない。木質系材料の要素となる構造は、主に塊状の木材(丸太)、組織構造、細胞構造、微細構造に分類できる。特に、利用促進と低環境負荷を両立させるためには細胞構造を生かした材料開発が必要である(図1)。それは細胞構造が、それ以上細かくするエネルギーを導入せずとも、緻密で強靱な階層構造を持ち、優れた機械特性(例えば細胞1つの引張強度 0.4-1.4 GPa¹⁾)や物性を有するためである。

近年、細胞構造を効果的に利用した加工技術である「流動成形技術²⁾」が注目を集めている。塊状の木材を流動させて自由に形状付与をすることができる成形技術である(図2a)。この成形の過程では、温度・圧力を制御して細胞と細胞の間を軟化させ、外力によって細胞を移動させ、最初隣にいた細胞とは別の細胞と再結合させる(図2b)。従って流動成形技術では、1つ1つの木材細胞の破壊を抑えつつも自由度の高い木材の加工ができる。また、細胞構造を使った他材料(ファイバーボードや紙など)

2016年7月11日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。

* E-mail: soichi_tanaka@rishi.kyoto-u.ac.jp

では磨砕工程により細胞構造が部分的に破壊されているため^{3,4)}、流動成形で得られた成形体はそれらよりも細胞構造を「生かした」材料であるといえる。さらに、流動成形体は、高強度(曲げ強度が180 MPa以上でポリカーボネイトを凌駕)や高寸法安定性(プラスチックより一桁低い線膨張率)を示すことが知られており⁵⁾、産業界で工業材料として通用する高いポテンシャルを秘めている。

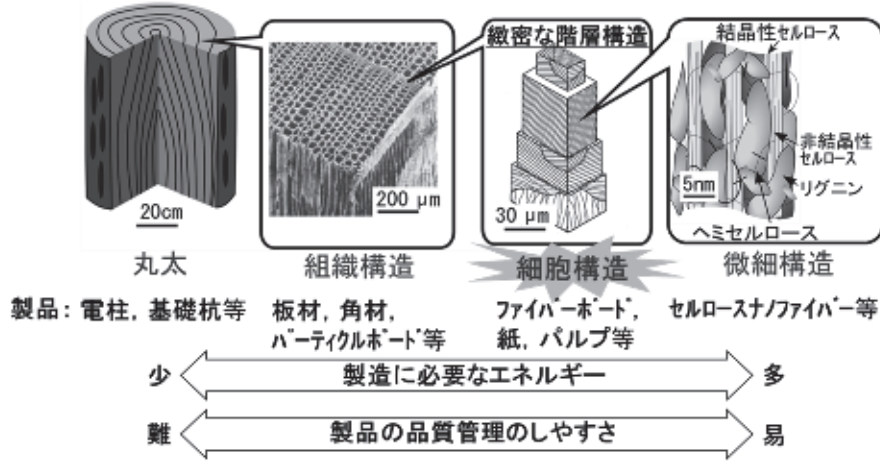


図1：木材の階層構造、それを利用した製品、および加工・管理の問題点

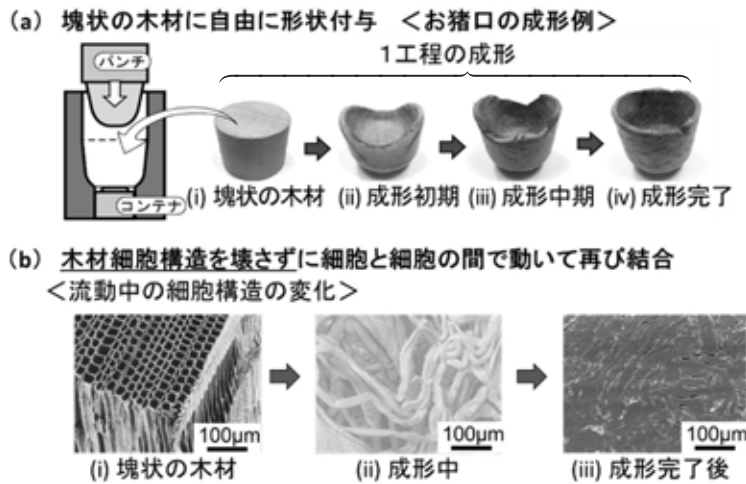


図2：木材の流動成形技術とその特徴

2. 流動成形技術の問題点、課題、および取組み

無垢の木材を成形したカップを沸騰水中に1時間浸漬すると分解する(図3)。これは、水分が細胞壁中の不安定な非結晶構造に浸入して細胞を膨潤させ、成形時に再結合した箇所が分離するためであると考えられる。また、この不安定な領域は、生分解や熱分解の起点にもなりうる。従って、流動成形で安定した成形体を得るためには、成形前の素材に化学処理を施す必要がある。

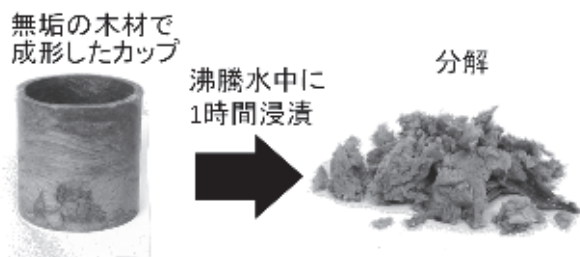


図3：無垢の木材の流動成形体の煮沸処理による分解

化学処理は、主に木材細胞壁中に存在する不安定な非結晶構造に化学物質を導入・反応させることで、木質系材料の構造安定化や構造間接着を図る手法である。これまでの検討によると、成形前の木材に化学処理をすると成形体の形状は固定されたが、成形体にはなお変色や表面荒れが生じた(図4)。これは、そもそも化学処理物質が木材全体の細胞壁に十分に行き渡っていないことに起因する。

化学処理した木材
で成形したカップ

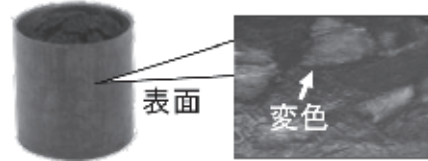


図4：化学処理木材の流動成形体の表面の変色

従って、問題解決には処理物質を木材全体に均一かつ十分に行き渡らせるという視点からの研究が必要不可欠である。

これは、流動成形以外の木質系材料全般においても未解決な課題であり、この課題を解決することは、産業界の要求に応えられる材料開発のためには極めて重要である。

化学処理には処理物質を液相で木材に作用させる方法と気相で作用させる方法などがあり、より一般的なのは前者である。液相法には、木材に処理溶液を注入する含浸工程(図5(i))とその後に大気下で溶媒(水の場合が多い)を蒸発させる養生工程(図5(ii))があるが、各工程について解決すべき課題が数多く残されている。

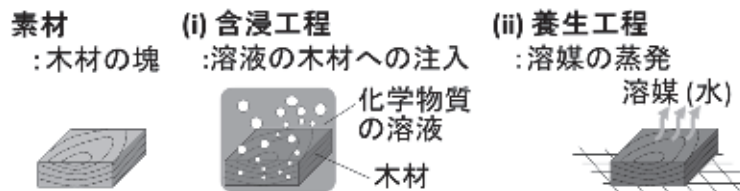


図5：木材の化学処理工程(液相法)

2.1 含浸工程における課題

含浸工程では、木材細胞の1つ1つまで十分に処理溶液を行き渡らせ、巨視的な処理ムラを防ぐ必要がある。そのためには、主に4通りの方法が考えられ、それぞれに課題がある。

2.1.1 処理溶液注入条件の操作

処理溶液の注入方法は、木材を処理溶液に浸漬し、液を減圧して木材中を真空にした後、液を加圧して生じる木材内外の液圧差を駆動力とし、液体を木材中に流動させるといったものである⁶⁾。処理液の注入量は主に圧力スケジュールに依存するが⁷⁾、木材細胞をムラなく処理するという目的を果たすための最適な圧力スケジュールについて一般解は未だ得られていない。

2.1.2 含浸前素材の小型化

素材寸法を小型化すれば、処理溶液のアクセシビリティは向上するため素材の含浸性は向上するが、小型化には木材を切削、破碎、磨砕する必要があるため³⁾、木材細胞が損傷または切断され、元の細胞構造を十分に生かすことができない。細胞壁を壊すことなく素材を小型化する手法が求められる。

2.1.3 含浸前素材の圧密処理

木材の圧密によって処理液の通導阻害組織である閉鎖壁孔を破壊しつつ、変形回復に伴うスポイト効果で木材に処理液を注入する方法であるが⁸⁾、力学的作用では全ての壁孔をムラなく破壊できないことが課題である。

2.1.4 含浸前素材のインサイジング処理

刃物、針、レーザーなどによって木材に刺傷を施す処理であるが⁹⁾、この手法では木材の表層のみしか処理できないため、木材全体を満遍なく刺傷する方法が求められる。

2.2 養生工程における課題および取組み

含浸工程で処理物質の溶液が1つ1つの細胞に行き渡りさえすれば、養生工程はさほど重要ではないと思われがちである。しかしながら、仮に含浸工程で溶液が全ての細胞内腔と細胞壁に行き渡ったとしても、細胞壁中にある不安定な非結晶構造周辺にはまだ多くの溶媒(水)が存在するため(図6(i))、そこは不安定なままとなる。従って、養生工程で不安定領域を残さないように水を除去し、微視的な処理ムラを防ぐことが極めて重要である。そのための足掛りとして、含浸後の養生工程において、処理物質が細胞壁に拡散して非結晶構造周辺の水を置換するという仮説¹⁰⁾に着目した(図6(ii))。この拡散が円滑に起こるように養生工程の周辺雰囲気[相対湿度(RH)や温度]をうまく制御すれば、水の多くを処理物質に置換できる可能性がある。しかしながら、養生工程のRHや温度が細胞壁への物質処理の拡散に及ぼす影響に関する知見はなかった(図6)。

著者はこれまでに、木材に処理溶液を含浸して養生したときの相対湿度(RH)が養生後の細胞壁中の処理物質に及ぼす影響について調べた。なお、処理物質にはポリエチレングリコール(PEG1540)を用いた。同物質を用いたのは、試料寸法から細胞壁中の物質量が算出できるためである¹¹⁾。その結果、次の4つの知見が得られた。

- (1) 化学処理において、処理物質の大部分は含浸工程よりも養生工程で細胞壁に入る¹²⁾。
- (2) 養生後の細胞壁中の物質量は、含浸する溶液の濃度が高すぎても低すぎても少なくなる¹²⁾。
- (3) 養生中の細胞壁への処理物質の拡散量はRHに依存する^{13,14)}。
- (4) 拡散量が最大となるRH条件で強制対流させて養生すると、拡散量を下げることなく短時間で処理できる¹⁵⁾。

以上の知見から、これまで注目されてこなかった養生工程の重要性が確かめられ、養生RHの制御によって細胞壁中の非結晶領域を短時間で従来よりも安定化させ、材料をより均質化・安定化させられることがわかった。今後は、養生温度が物質拡散に及ぼす影響、および他の化学処理物質を用いた場合についても検討する必要がある。本稿では、特に上記の知見(1)~(3)を裏付ける結果について紹介する。

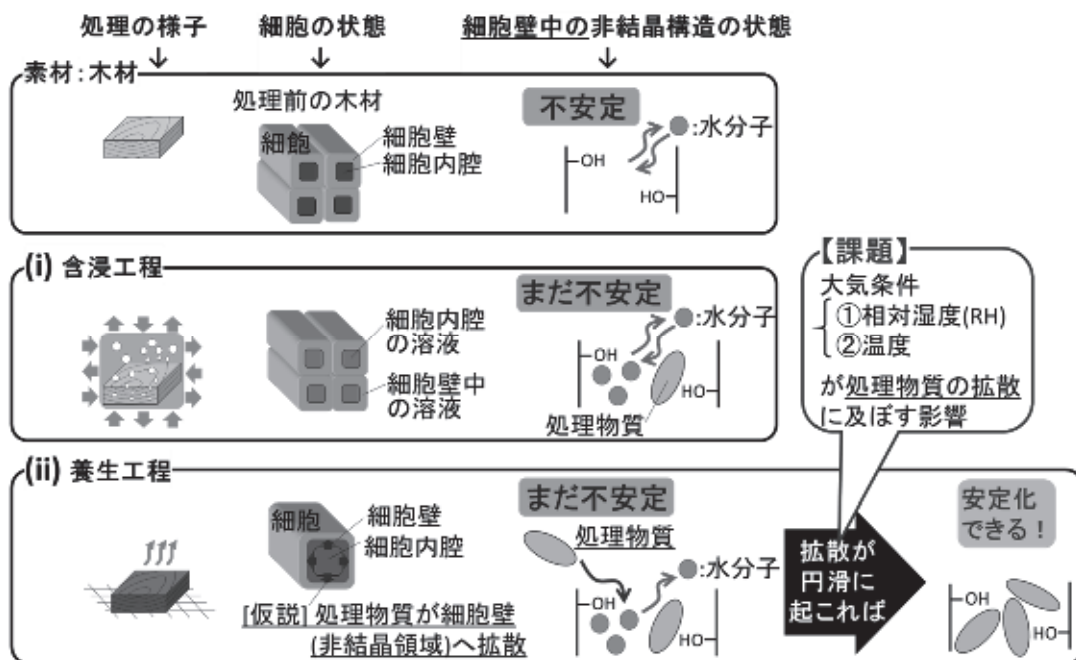


図6：化学処理における非結晶構造の不安定状態および養生工程における課題

2.2.1 含浸工程と養生工程における細胞壁への物質移動量の比較と含浸溶液濃度の影響¹²⁾

ヒノキの木口試験片(繊維方向 5 mm×接線方向 25 mm×放射方向 25 mm)に濃度が 10, 20, 30, 40 または 50 mass%の PEG1540 水溶液を含浸し、続けて RH = 83%で 2161 h 養生したあと RH=11%で 84 h 養生し(温度は 35 °Cで一定)、五酸化ニリン上で減圧乾燥した(35 °C)。養生直前の細胞壁中の PEG の質量および全過程後の試験片の膨潤量を求め、それらを養生直前および養生後の細胞壁の PEG 充填率として正規化した。正規化には極めて複雑な計算を要するため、具体的な計算方法は原著論文¹²⁾を参照されたい。

養生後と養生直前の充填率の差は、養生直前の充填率より大きく、溶液濃度の増加に伴い 20 mass%まで増加したのち減少した(図 7)。これらより、細胞壁中の PEG の大部分は養生中に増加すること、および細胞壁へ拡散する PEG 量は含浸溶液濃度が 20 mass%のときに最大になることが示唆された。

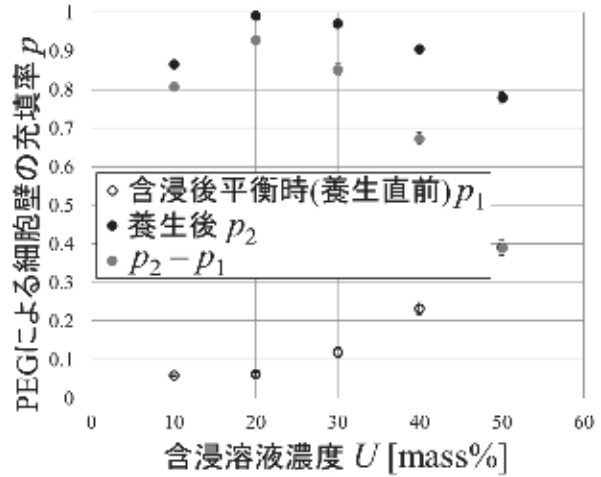


図 7：含浸後と養生後における細胞壁の PEG 充填率と含浸溶液濃度の関係

2.2.2 養生工程の RH が細胞壁への物質拡散に及ぼす影響¹⁴⁾

前節と同様の試験片に 30 mass%の PEG1540 水溶液を含浸したあと、11, 33, 55, 82%の 4 通りの RH(35 °C)で約 900 h 養生した後、五酸化ニリン上で減圧乾燥(35 °C)した。

注入前における減圧乾燥後の試験片の比膨潤率と養生中の RH の関係を図 8 に示す。RH の増加に伴い比膨潤率は増加した。比膨潤率は細胞壁中の PEG の量に比例することから、RH の増加に伴い細胞壁への PEG 拡散量が増加することが示唆された。

RH 増加に伴う比膨潤率の増加率は、RH が高くなるほど低くなる(図 8)。このことから、RH が高くなるほど細胞壁へ拡散を促す因子と、細胞壁への拡散を妨げる因子の両方が存在するといえる。既往の仮説¹⁰⁾によると

「養生中に細胞壁に処理物質が拡散するのは、細胞壁と比べて細胞内腔の溶媒(水)の蒸発が早く進み、その結果、細胞内腔の物質濃度が細胞壁と比べて高くなり、この濃度差が駆動力となるため」である。従って、次の 2 つの因子が、細胞壁への物質拡散を決定すると考えられる。

- ① 細胞壁への処理物質の拡散のしやすさ(拡散係数)
- ② 細胞壁と細胞内腔における処理物質濃度差

これらの因子に基づくと、養生の RH が高くなるほど、処理物質の周辺の水分子量が増えるので拡散性が上がり、その結果、拡散量は増加する傾向になるが、RH が高すぎると水の蒸発量が少なくなり、拡散の駆動力となる細胞壁と細胞内腔の濃度差が生じにくくなるため、物質は拡散しにくくなる解釈できる。この推察は、他の結果^{13, 15)}とも矛盾せず、現状では確からしい考え方であるといえる。

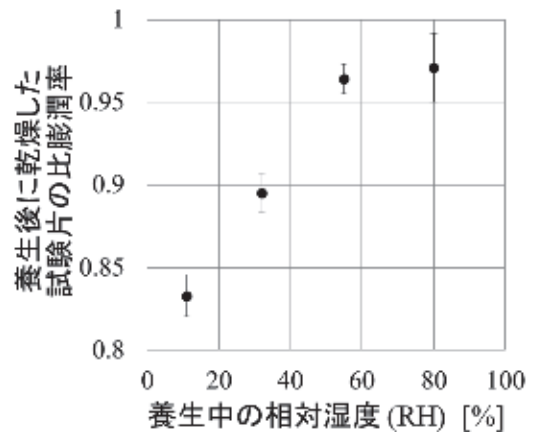


図 8：養生後に乾燥した試験片の比膨潤率と養生中の相対湿度(RH)の関係

3. おわりに

本稿では、木材の流動成形技術について紹介し、同技術における化学処理(含浸・養生工程)の重要性と課題について述べた。また、一見するとさほど重要とは思われない養生工程を制御することの意義について述べ、そのための戦略と結果の一例を紹介した。化学処理工程の制御は、流動成形技術に限らず本質的にはすべての木質系材料の製造技術にとっても重要であり、その達成によって木質系材料全般の信頼性を向上させることができ、木質資源の利用拡大にも繋がるものと考えている。

参考文献

- 1) Groom, L., Mott, L., Shaler, S., Mechanical properties of individual Southern Pine fibers. Part I. Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility, *Wood Fiber Sci.*, **34**, 14-27, 2002
- 2) 三木恒久, 木質系材料の新規塑性加工技術(細胞界面のすべり現象による大変形を利用した賦形技術), *木材工業*, **67**, 553-556, 2012.
- 3) Suchsland, O., Woodson, G.E., Fiberboard manufacturing practices in the United States, In: *Agriculture Handbook*, USDA Forest Service, No. 640, 1986.
- 4) 門屋卓, 角祐一郎, 吉野勇, 5. パルプ製造法の曲りかど(無公害パルプ・高収率パルプ), “紙の科学”, 中外産業調査会編, 1977, pp. 85-115.
- 5) 金山公三, 木材の微細構造制御と高機能化, *日本材料学会木質材料部門委員会第288回定例研究会講演要旨集*, 1-7, 2015.
- 6) 大越誠, B.9.1 浸透 流動, “新編木材工学”, 中戸莞二編, 養賢堂, 1985, pp. 89-99.
- 7) 西本孝一, 3-5-3 防腐処理法, “木材工学”, 梶田茂編, 養賢堂, 1961, pp. 546-561.
- 8) 飯田育穂, 圧縮法による木材の浸透性, 乾燥性の改善[II], *木材工業*, **53**, 446-449, 1998.
- 9) 今村祐嗣, 2. 含浸技術, 木材の科学と利用技術 II 2. 木材の化学処理, *日本木材学会研究分科会報告書*, pp. 21-38, 1991.
- 10) Stamm, A.J., Dimensional stabilization of wood with carbonwaxes, *Forest Prod. J.*, **6**, 201-204, 1956.
- 11) 石丸優, PEGと木材のはなし, *木材保存*, **19**, 204-218, 1993.
- 12) Tanaka, S., Seki, M., Miki, T., Shigematsu, I., Kanayama, K., Solute diffusion into cell walls in solution-impregnated wood under conditioning process II: effect of solution concentration on solute diffusion, *J. Wood Sci.*, **62**, 146-155, 2016.
- 13) 田中聡一, 三木恒久, 関雅子, 重松一典, 金山公三, 溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への溶質拡散機構の検証:相対湿度がポリエチレングリコール水溶液含浸木材の膨潤・収縮挙動に及ぼす影響, *材料*, **64**, 369-374, 2015.
- 14) Tanaka, S., Seki, M., Miki, T., Shigematsu, I., Kanayama, K., Solute diffusion into cell walls in solution-impregnated wood under conditioning process I: effect of relative humidity on solute diffusivity, *J. Wood Sci.*, **61**, 543-551, 2015.
- 15) 田中聡一, 関雅子, 三木恒久, 重松一典, 梅村研二, 金山公三, 溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への溶質拡散に及ぼす溶媒蒸発速度の影響, *材料*, **65**, 359-364, 2016.

著者プロフィール



田中 聡一 (Soichi Tanaka)

<略歴> 2007年京都大学工学部工業化学科卒業/2013年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(博士(農学))/同年産業技術総合研究所特別研究員/2015年京都大学生存圏研究所特定研究員/2016年同研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。<研究テーマと抱負>木質系材料の工業的利用のために基礎研究で貢献したい。<趣味>体軸の回転を伴う運動(陸上競技投擲、野球、卓球等)、音楽鑑賞および楽器演奏(バロック音楽～昭和歌謡まで)。

森林生態系におけるメタンフラックス観測の発展

坂部 綾香^{1*}

Progress of the methane flux measurements in forest ecosystems

Ayaka Sakabe^{1*}

概要

メタンは二酸化炭素に次ぐ温室効果ガスであるが、陸域生態系におけるその放出源、吸収源についての理解が進んでいない。その一因に、現場でのメタン放出・吸収速度（フラックス）観測の難しさゆえに、観測データの蓄積が不足しているという点が挙げられる。とりわけ森林におけるメタン収支は、観測データが非常に限られている。森林生態系は、一般にはメタンの吸収源と認識されているが、林内では局所的にメタン放出も起こっていることが明らかになっている。林内の空間不均一なメタン動態を加味した森林におけるメタン収支の定量評価や、林内のメタン放出源、吸収源のプロセス理解が必要である。メタンフラックスの観測は、メタン濃度分析計の技術革新に依存するところが大きく、近年の半導体レーザー分光法を用いた高応答性かつ、高精度なメタン濃度分析計の普及に伴ってメタンフラックス観測例が増加している。本総説では、森林生態系におけるメタンフラックス観測の発展の経緯と現状について解説する。

1. はじめに

温室効果ガス濃度の上昇が地球温暖化の主要因とされており、気温上昇への寄与率は、二酸化炭素が56%、次いでメタンが32%となっている¹⁾。二酸化炭素の大気中濃度が400 ppm程度であるのに比べて、メタンは、1.8 ppm程度と微量であるが、メタンは二酸化炭素の約30倍という高い温室効果を持つため、気温上昇への寄与率が高くなっている。

大気中メタン濃度は、産業革命以降（1750年頃）、2.5倍以上に上昇した。1990年代には濃度上昇が停滞し、1999年から2006年は濃度が安定化し、2007年以降再び濃度が上昇している。20世紀の終わりにメタン濃度が安定化した理由について、水田における施肥の増加と水利用の減少に伴って、水田からのメタン放出量が減少したことが主要因であるとする研究や²⁾、化石燃料の生産によるメタン放出の減少が原因であるとする研究もあり³⁾、統一的な結論は得られていない。また、濃度上昇の再開についても、異常に高い温度や降水量の増加に起因した北方や熱帯の湿地からの放出の増加と、熱帯でのバイオマス燃焼の増加が原因であるとする研究や⁴⁾、OHラジカルとの大気化学反応が主要因であるとする研究⁵⁾など諸説ある。メタンは二酸化炭素に次ぐ温室効果ガスであるにも関わらず、大気中メタン濃度に影響を与える明確な原因は明らかになっていない。今後の気候変動に対して、大気中メタン濃度がどのような応答を示すのか予測するために、さらに、科学的根拠に基づいてメタン削減計画を設定するためには、まずメタン放出源、吸収源を正確に把握することが重要である。

メタンの生成源については、大気中のメタンは主に生物起源である。湛水した土壌のような嫌氣的

2016年8月8日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター.

* E-mail: sakabe.ayaka.6n@kyoto-u.ac.jp

な環境下で、有機物の嫌氣的な分解の間にメタン生成菌によって生成される。一方でメタンの吸収源については、ほとんどのメタンが対流圏での化学反応によって消失する。また、水分不飽和な好氣的な土壌では、メタン資化性菌によってメタンは二酸化炭素へと酸化される。土壌はメタン生成にもメタン酸化にも重要な役割を果たしており、両者のバランスによって、メタン放出源となるかメタン吸収源となるかが決まる。

全球のメタン収支の推定には、大きく分けてトップダウン法とボトムアップ法というアプローチがある。トップダウン法では、陸上の観測ステーション、海上を航行する船舶、航空機、人工衛星などを使って観測された大気中メタン濃度と、地球上の空気の流れを数値計算で再現できる大気輸送モデルを用いて、観測された大気中メタン濃度の時間・空間分布を再現するには地表面のどこでどれだけのメタンが放出・吸収されていたか逆推定する計算を行う。ボトムアップ法は、ローカルレベルで世界各地の主要な生態系におけるメタン収支を直接測定し、得られたプロセスの経験的知識を使ってパラメータ化し、全球の気象データセットや、衛星観測で得られたデータを併用して、ローカルレベルから大陸、全球スケールへと拡大してメタン収支を推定する。トップダウン法、ボトムアップ法によって推定された各メタン放出源、吸収源の推定値を表1に示す。各項目の推定幅が大きく、ボトムアップ法から得られた推定値は、概してトップダウン法から得られた推定値よりも大きいという問題がある⁶⁾。トップダウン法とボトムアップ法それぞれの不確実性を減らす努力と、比較検証を続けることによって、全球のメタン動態を正確に捉えることができるようになると思われる。

表1：トップダウン法およびボトムダウン法によって推定された2000年代におけるメタン放出量と吸収量⁶⁾。括弧内の数値は推定幅を表す。

	メタン収支 (Tg CH ₄ year ⁻¹)	
	トップダウン法	ボトムアップ法
放出源	548 (526-569)	678 (542-852)
自然起源	218 (179-273)	347 (238-484)
湿地	175 (142-208)	217 (177-284)
その他	43 (37-65)	130 (61-200)
人為起源	335 (273-409)	331 (304-368)
農業と廃棄物	209 (180-241)	200 (187-224)
バイオマス燃焼	30 (24-45)	35 (32-39)
化石燃料	96 (77-123)	96 (85-105)
吸収源	540 (514-560)	632 (592-785)
土壌	32 (26-42)	28 (9-47)
大気化学反応による損失	518 (510-538)	604 (483-738)

ボトムアップ法についていえば、地上観測データの更なる蓄積によって、精度を向上させる必要がある。現在は、全球をカバーするには非常に限られた観測データに基づいて推定が行われている。中でも、森林生態系におけるメタン動態は、観測に基づいた理解が進んでいない。森林の大部分は、好氣的土壌から成り、他の生態系に比べて効率的にメタンを吸収することから、森林は一般にメタンの吸収源と認識されている⁷⁾。しかし近年、微地形に起因して林内に局所的に存在する湛水した土壌、湿地、渓流域からのメタン放出量を無視できない可能性が指摘されている⁹⁻¹¹⁾。森林はメタン吸収源として期待されている一方で、森林現場での観測が困難なことから、林内の空間不均一なメタン動態を加味した森林メタン収支の定量評価や、林内のメタン放出源、吸収源のプロセス理解が進んでいない。森林は陸域に占める面積が大きいこと、正確なメタン収支の定量化が重要となる。メタンフラックス観測の発展は、メタン濃度分析計の技術革新によるところが大きい。以前は、水素炎イオン化検

出器 (Flame Ionization Detector, FID) 付きのガスクロマトグラフによる実験室でのメタン濃度測定が主流であった。近年は、半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計の登場により、現場での高精度なメタン濃度の連続測定が可能となった。こうした新しいメタン濃度分析計を活用したメタンフラックス観測によって、森林のメタン動態について多くの新たな事実が明らかとなってきている。

2. ガスクロマトグラフを用いたチャンバー法による土壌メタンフラックス観測

メタンフラックスを測定する手法は、大別すると二つに分けられる。一つはチャンバー法、もう一つは微気象学的手法である。チャンバー法は、地表面にチャンバーを被せて密閉空間をつくり、そのチャンバー内で起こる濃度変化速度を測定し、フラックスを算出する手法である。微気象学的手法は、大気乱流理論に基づいて、地表面の熱エネルギー、物質の生態系スケールのフラックスを直接測定する手法である。本章では、これまでメタンフラックス観測に最も長く用いられてきた静的閉鎖型チャンバー法とガスクロマトグラフによるメタン濃度分析を組み合わせた手法について概説する。

閉鎖型チャンバー法では、地表面にチャンバーを被せ、チャンバー内の空気を外界から隔離する。シリンジと真空バイアル瓶等を用いて、ある時間間隔でチャンバー内のヘッドスペースから空気を採取する。他にも開放型チャンバー法というものがあり、開放型ではチャンバー内の空気が外気と通じている。開放型チャンバー法では、チャンバー内に一定流量で外気を導入し、その入口と出口の濃度差を計測する。採取したサンプルガスを実験室に持ち帰り、メタン濃度の分析を行う。ガスクロマトグラフのサンプル注入部にサンプルガスを注入すると、ガスの流れに乗せられてカラムと呼ばれる分離管に運ばれる。カラムの中ではサンプル中の各気体成分が分離され、検出器でその量が測定される。そして、濃度の増加、減少速度からフラックスが求まる。

この手法を用いて、世界中の森林で土壌メタンフラックスの観測が行われている。蓄積された観測データを統合して、全球的な温帯林 ($14.9 \text{ Tg C year}^{-1}$)、熱帯林 ($7.7 \text{ Tg C year}^{-1}$)、北方林 ($3.8 \text{ Tg C year}^{-1}$) といった森林タイプごとのメタン吸収量が推定されている¹¹⁾。全球的な陸域生態系における光合成による炭素吸収量は $123 \text{ Pg C year}^{-1}$ であることから¹¹⁾、メタンフラックスのオーダーが小さいことが分かる。また、メタンフラックスと環境要因の関係が明らかになっており、土壌含水率が増加するにつれてメタン吸収が減少すると報告されている¹²⁾。土壌が浸水して好氣的なエリアが減少するにつれて、メタン資化性菌の活動できるエリアが減少する一方で、メタン生成菌の活動が促進されるためと考えられる。また、温度について、温度が上昇するにつれてメタン吸収が増加するという報告や¹³⁾、温度との関係は見られないという報告がある¹⁴⁾。メタン生成菌もメタン資化性菌の活動も、 $20\text{--}30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で最も活発になることが土壌の培養実験から報告されているので¹⁵⁾、土壌の水分状態による両者のバランスによって温度との関係が決まると考えられる。こうした森林土壌におけるメタン吸収量、環境応答性についての知見は、大部分が北アメリカやヨーロッパで得られた観測結果に基づいており、乾燥した夏を迎えるサイトでは、夏にメタン吸収が最大となる季節変化が報告されている^{16,17)}。

対照的に、アジアモンスーン気候のような夏から秋にかけて、梅雨と台風によって多量の降雨がある地域では異なるメタンフラックスの季節変化が観測されている。森下らによって、日本中の広葉樹林、針葉樹林を含めた 26 サイトで、月に 1 回、2 年間にわたって森林土壌におけるメタンフラックスが観測された結果、すべてのサイトで常にメタン吸収が観測された¹⁸⁾。そして、ほとんどのサイトでメタン吸収の季節変化は見られなかった。夏の温度上昇によってメタン吸収が促進される一方で、アジアモンスーン気候下で夏に降雨量が多く、メタン吸収が抑制されるために、メタンフラックスの明確な季節変化は見られなかったと考えられる。また、観測された植生、土壌タイプごとのメタン吸収量と、日本の森林の植生、土壌のエリアの統計値を用いて、日本の森林におけるメタン吸収量が推定された。その結果、日本の森林におけるメタン吸収量は、アメリカやヨーロッパの森林に比べて大きいことが明らかになっている。様々な気候帯下でメタンフラックスの観測例が増加することによって、森林タイプごとのメタン吸収量、環境応答性、季節変化の様子が明らかになってきている。

これまで森林の好氣的土壤におけるメタン吸収能に重点を置いて、メタンフラックスが観測されてきたが、伊藤らは林内でのメタン放出源に着目した観測を行った⁸⁾。滋賀県南部に位置する温帯ヒノキ林(桐生水文試験地)において、土壤メタンフラックスの時空間変動性を把握するために、森林土壤の斜面上部から下部、林内の湿地も含めて土壤メタンフラックスが観測された結果、斜面下部の溪畔域に近いところでは、降雨の多い夏にメタン放出が観測された。土壤表面が水分不飽和であっても、地中の嫌氣的なマイクロサイトでメタン生成が生じているためと考えられる。また、湿地ではほぼ年間を通じてメタンが放出されており、林床での吸収に比べて3オーダーほど大きなメタン放出があることが明らかになった。林内のメタン放出源を考慮すると、森林流域全体としてメタン放出源として機能する可能性が示された。

チャンバー法の利点は、地点ごとの詳細なメタンフラックスの変動プロセスを理解するのに役立つという点である。チャンバー法によって、土壤メタンフラックスの地点ごとの環境応答性、林内のこういった場所でメタン吸収・放出が生じているのか明らかとなった。一方でチャンバー法の欠点は、空間代表性に欠けるという点である。特に森林におけるメタンフラックスは空間不均一性が高いため、森林におけるメタン収支をチャンバー法のみで評価するには、空間代表性の問題がより重要になる。他には、採取や分析の際の人為ミスが懸念されるほか、採取と分析に掛かる手間のせいで、測定データ数が限られてしまうという欠点がある。また、チャンバーが存在することによって、その場の風速や気温といった環境が攪乱されてしまうという問題もある¹⁹⁾。

3. レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を活用したメタンフラックス観測

近年、半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計の開発が進み、メタン濃度の現場でのリアルタイム計測が可能となった。複数の会社から、測定方式の異なるレーザー分光法を用いたメタン濃度分析計が販売されている。例えば、Los Gatos Research社から販売されている off-axis Integrated Cavity Output Spectroscopy 法を用いたメタン濃度分析計は、メタンに強く吸収される狭い波長帯(1.65 μm)に調整されたレーザーが、サンプルガスの入った測定セル内に照射される。測定セル内では、レーザーが非常に反射性の高い2つの凹面鏡を何度も反射し、その透過光が検出される。メタンによる透過光強度の変化を用いて吸光度が決定され、吸収スペクトルを積分することでメタン濃度が求まる²⁰⁾。こうしたメタン濃度分析計では、微量なメタンを検出するために、測定セル内での実効光路長を伸ばす工夫がされている。微気象学的手法によってメタンフラックスを評価する場合は、多量の空気を連続的に分析する必要があるため、ガスクロマトグラフの使用は適さない。この半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計の登場によって、微気象学的手法によるメタンフラックスの観測が可能となった。本章では、半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を活用したメタンフラックス観測について概説する。

3.1 微気象学的手法

微気象学的手法は、土壤表面の微環境にかく乱を与えることなく、測定点から風上の地形を代表した生態系スケールのフラックスが得られるという利点がある。中でも、渦相関法は用いる仮定が少なく、最も直接的な手法であると考えられている。渦相関法では、鉛直風速と気体濃度の0.1秒ごとの共分散を30分間程で平均する。フラックス(F)は次のように表される。

$$F = \overline{w'c'}$$

ここで w は風速の鉛直成分を、 c は対象とする気体の空気中での密度を示す。上付きのバー($\overline{\quad}$) は時間平均を、プライム($'$) は平均からの偏差を示す。この方法では、フラックスに寄与するすべての周期の変動を捉える必要があるため、センサーには0.1秒ごとの変動をとらえる応答性が必要とされる。風速の鉛直成分の測定にはこの条件を満たす超音波風速計が一般に使われる。

二酸化炭素フラックス観測については、1990年代後半から650サイトを越える世界中の様々な生態系で観測が展開されている。ヨーロッパの国々を中心としたFLUXNETや、アジアの国々を中心としたAsiaFluxという国際研究ネットワークが存在し、データ共有を目的としたデータベース整備が進んでいる²¹⁾。渦相関法によるメタンフラックス観測については、大気中濃度が微量なメタンに対して、渦相関法を適用できる応答速度、精度を持つメタン濃度分析計が得られなかったために、観測は困難であった。しかし、半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計の登場により、現場での高速かつ、高精度なメタン濃度測定が可能となった。1992年に北方の泥炭地において、試作型の半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を用いて、初めて渦相関法によるメタンフラックスの観測が行われた²²⁾。当時、メタン濃度分析計をフィールドで用いることは、高価で大掛かりなセットアップを必要とし、頻繁な較正、温度制御のためかなりの労力を必要とした。そのため、実質的には無人連続観測を行うには限界があった。2008年頃から、フィールドでの操作性に優れた、安定性の高いメタン濃度分析計が得られるようになった²³⁾。Los Gatos Research社や、Piccaro社によって販売されている測定部が閉鎖系になっているクロズドパス型や、Li-Cor社によって販売されている測定部が大気に開放されているオープンパス型のメタン濃度分析計がある。これらのメタン濃度分析計を活用して、湿地²³⁾や水田²⁴⁾といった大きなメタン放出源で、渦相関法によるメタンフラックス観測が行われている。湿地や水田では、オープンパス型とクロズドパス型のメタン濃度分析計によるメタンフラックスの比較観測が行われており、両者が一致したことから、ある程度のメタン放出があるサイトでは、信頼できるメタンフラックスの観測が可能になったといえる^{25,26)}。しかし森林生態系では、メタン放出と吸収が混在し、メタン濃度の変動が微量であるため、渦相関法を適用するにはメタン濃度分析計の精度が不足する場合がある。そのため、森林で渦相関法によってメタンフラックスが観測された例は数件しかない^{27,28)}。

森林における微量なメタンフラックスを観測するために、簡易渦集積 (REA) 法に半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を組み合わせた手法が用いられている²⁹⁾。REA法は、測定原理は渦相関法に準じているが、応答性の速い分析計が得られない場合に利用できる³⁰⁾。REA法では、超音波風速計の風速データに基づいて、鉛直風速が上向きの時と下向きの時の空気が、それぞれ分けてリザーバーにサンプルされる。30分程サンプルされた後、各リザーバー内のガス濃度が分析され、リザーバー間の濃度差からフラックスが求まる。フラックス (F) は次のように表される。

$$F = b\sigma_w(C^+ - C^-)$$

ここで σ_w は鉛直風速の30分程の標準偏差、 C^+ 、 C^- は鉛直風速が上向きの時と下向きの時の平均濃度、 b は実験によって求まる係数である。例えば、鉛直風速が上向きの時にメタン濃度が高く、下向きの時にメタン濃度が低いと、リザーバー間の濃度差は正の値となりメタン放出となる。鉛直風速の測定には超音波風速計など高速の測器が必要であるが、ガス濃度については平均値が得られればよいので、濃度の分析に時間をかけることができる。メタン濃度分析計の精度は応答速度とトレードオフの関係にあるので、最適なシグナル積算時間を選択することで、ランダムノイズが低減され、精度良くメタン濃度の分析を行うことができる³¹⁾。

桐生水文試験地において、REA法による生態系スケールのメタンフラックス観測を行った。本試験地は、アジアモンスーン気候下の影響で、夏に多量の降雨があり、流域の溪畔域に湿地が散在する。観測の結果、温帯ヒノキ林は生態系スケールで、季節的にメタン放出源、吸収源として切り替わる様子が明らかになった。また、夏から秋にかけて、降雨後にメタン放出源となる傾向があった (図1)。夏に湿地や嫌氣的土壌からのメタン放出が増加した結果、生態系スケールでメタン放出源となったと考えられた。

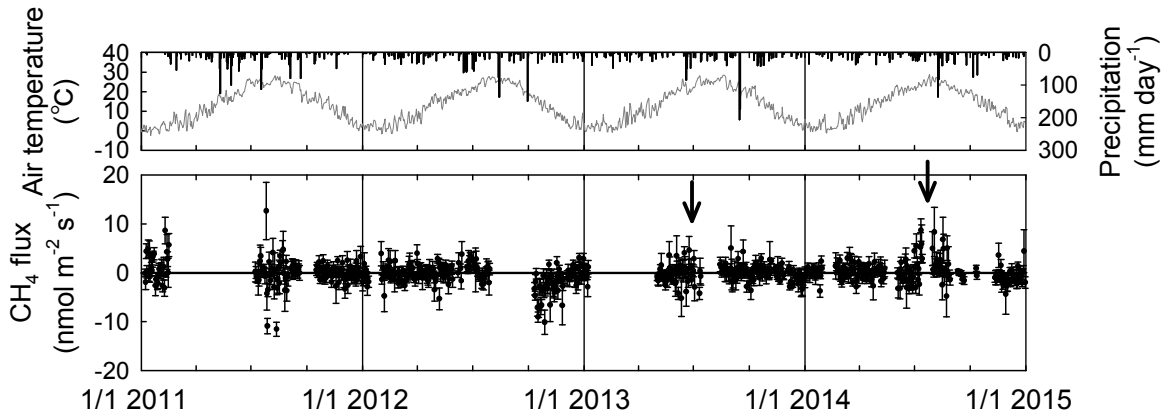


図 1: 桐生水文試験地における REA 法による生態系スケールメタンフラックスの観測結果。観測期間は 2011 年 1 月から 2014 年の 12 月まで。矢印で示した夏にメタン放出源となる傾向がみられた。

3.2 チャンバー法

半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計によって、現場でのリアルタイムのメタン濃度測定が可能となったことから、自動開閉する閉鎖型循環式チャンバー法と組み合わせることで、土壌メタンフラックスの連続観測が行えるようになった³²⁻³⁴⁾。アジアモンスーン気候下では、メタンフラックスの変動は降雨の影響を強く受ける。そのような場所でメタンフラックスを連続観測することにより、リアルタイムでの降雨応答性を捉えることは重要である。自動連続観測によって、詳細な季節変化の様子、降雨応答性が明らかになり、より正確なメタン年収支を推定できるようになった。

桐生水文試験地において観測を行った結果、好氣的土壌でのメタン吸収は、春先に気温が上昇し始めるにつれて増加するが、梅雨によって著しく吸収は減少し、降雨後土壌が乾燥するにつれて即座に吸収が回復する様子が明らかになった。梅雨後の夏から秋にかけても、降雨によって吸収が減少し、降雨後に回復するという降雨に応じた変化を示した。冬季には気温が低下するにつれて吸収量が減少した。降雨応答性を考慮しない場合では、年間のメタン吸収量は最大で 20% 過大評価される可能性があることが分かった³⁴⁾。

また、連続的に得られるメタンフラックスデータから、降雨中にメタン吸収速度が著しく減少する様子が捉えられた(図 2)。雨滴によって土壌表面の空隙がふさがれるためにメタン吸収速度が低下すると考えられた。降雨後は、メタン吸収が回復するのに時間がかかっていた。そのため、雨滴によるガス拡散性の影響だけでなく、土壌含水率の増加に伴って形成された嫌氣的な土壌環境により、メタン生成菌の活動が促進される一方でメタン資化性菌の活動が抑制された結果、メタン生成が増加し酸化が減少することで、このような降雨応答性が観測されたと考えられた。

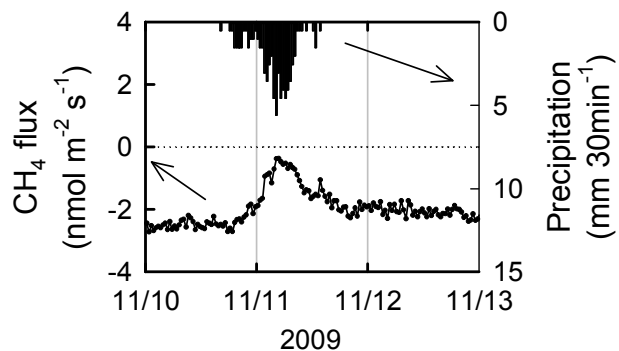


図 2: 桐生水文試験地におけるチャンバー法による土壌メタンフラックスの降雨応答性。観測期間は 2009 年 11 月 10 日から 2009 年 11 月 13 日まで。降雨時にメタンフラックスの増加すなわちメタン吸収が減少している。

4. まとめ

メタン濃度分析計の技術革新に伴い、陸域生態系におけるメタンフラックスの観測データは着実に増加している。森林における微量なメタンフラックスを観測する手法も確立されてきたので、今後も森林を含む様々な生態系でメタンフラックス観測データを蓄積していく必要がある。そして二酸化炭素フラックスのように、データベースを強化することで、モデル研究者らと協力する基盤が整備され、ボトムアップ推定の精度向上につながり、全球のメタン収支の把握に役立つことが期待される。一方で、微気象学的手法によるフラックス観測は、空間を代表したフラックスが得られるが、場所ごとの詳細なメタンフラックスと環境要因の関係を決定するのが難しいという欠点がある。そのため、微気象学的手法とチャンバー法をうまく組み合わせ、広域の収支評価と同時にプロセス理解を進めることが有効であると考えられる。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., and New York.
- 2) Kai, F.M., Tyler, S.C., Randerson, J.T., Blake, D.R., Reduced methane growth rate explained by decreased Northern Hemisphere microbial sources, *Nature*, **476**, 194-197, 2011.
- 3) Aydin, M., Verhulst, K.R., Saltzman, E.S., Battle, M.O., Montzka, S.A., Blake, D.R., Tang, Q., Prather, M.J., Recent decreases in fossil-fuel emissions of ethane and methane derived from firm air, *Nature*, **476**, 198-201, 2011.
- 4) Dlugokencky, E.J., Nisbet, E.G., Fisher, R., Lowry, D., Global atmospheric methane: budget, changes and dangers, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 2058-2072, 2011.
- 5) Rigby, M., Prinn, R.G., Fraser, P.J., Simmonds, P.G., Langenfelds, R.L., Huang, J., Cunnold, D.M., Steele, L.P., Krummel, P.B., Weiss, R.F., O'Doherty, S., Salameh, P.K., Wang, H.J., Harth, C.M., Mühle, J., Porter, L.W., Renewed growth of atmospheric methane, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22805, 2008.
- 6) Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunois, M., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D.R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E.L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P.J., Krummel, P.B., Lamarque, J., Langenfelds, R.L., Quéré, C.L., Naik, V., O'Doherty, S., Palmer, P.I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R.G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D.T., Simpson, I.J., Spahni, R., Steele, L.P., Strode, S.A., Sudo, K., Szopa, S., van der Werf, G.R., Voulgarakis, A., van Weele, M., Weiss, R.F., Williams, J.E., Zeng, G., Three decades of global methane sources and sinks, *Nat. Geosci.*, **6**, 813-823, 2013.
- 7) Le Mer, J., Roger, P., Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review, *Eur. J. Soil Biol.*, **37**, 25-50, 2011.
- 8) Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Methane flux characteristics in forest soils under an East Asian monsoon climate, *Soil Biol. Biochem.*, **41**, 388-395, 2009.
- 9) Dinsmore, K.J., Skiba, U.M., Billett, M.F., Rees, R.M., Drewer, J., Spatial and temporal variability in CH₄ and N₂O fluxes from a Scottish ombrotrophic peatland: Implications for modeling and up-scaling, *Soil Biol. Biochem.* **41**, 1315-1323, 2009.
- 10) Sakabe, A., Kosugi, Y., Okumi, C., Itoh, M., Takahashi, K., Impacts of riparian wetlands on the seasonal variations of watershed-scale methane budget in a temperate monsoonal forest, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, published online, 2016.
- 11) Dutaur, L., Verchot, L.V., A global inventory of the soil CH₄ sink, *Global Biogeochem. Cycles*, **21**, GB4013, 2007.
- 12) Steudler, P.A., Bowden, R.D., Melillo, J.M., Aber, J.D., Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils, *Nature*, **341**, 314-316, 1989.
- 13) Whalen, S.C., Reeburgh, W.S., Sandbeck, K.A., Rapid methane oxidation in a landfill cover soil, *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 3405-3411, 1991.

- 14) Castro, M.S., Steudler, P.A., Melillo, J.M., Aber, J.D., Millham, S., Exchange of N₂O and CH₄ between the atmosphere and soils in spruce-fir forests in the northeastern United States, *Biogeochemistry*, **18**, 119-135, 1993.
- 15) Dunfield, P.F., Topp, E., Archambault, C., Knowles, R., Effect of nitrogen fertilizers and moisture content on CH₄ and N₂O fluxes in a humisol: Measurements in the field and intact soil cores, *Biogeochemistry*, **29**, 199-222, 1993.
- 16) Whalen, S.C., Reeburgh, S.C., Interannual variations in tundra methane emission: A 4-year time series at fixed sites, *Global Biogeochem. Cycle*, **6**, 139-159, 1992.
- 17) Dobbie, K.E., Smith, K.A., Comparison of CH₄ oxidation rates in woodland, arable and set aside soils, *Soil Biol. Biochem.*, **28**, 1357-1365, 1996.
- 18) Morishita, T., Sakata, T., Takahashi, M., Ishizuka, S., Mizoguchi, T., Inagaki, Y., Terazawa, K., Sawata, S., Igarashi, M., Yasuda, H., Koyama, Y., Suzuki, Y., Toyota, N., Muro, M., Kinjo, M., Yamamoto, H., Ashiya, D., Kanazawa, Y., Hashimoto, T., Umata, H., Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 678-691, 2007.
- 19) Denmead, O.T., Measuring fluxes of CH₄ and N₂O between agricultural systems and the atmosphere. In: Peng, S., K.T. Ingram, H-U, Neue, L.H. Ziska (eds), Climate change and rice. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 1994, pp. 209-234.
- 20) 高橋けんし, レーザーで森林のメタンをはかる, “森林科学”, 森林科学編集委員会編, 日本森林学会出版, 2012, pp. 47-48.
- 21) Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U., K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 2415-2434, 2001.
- 22) Shashi, B., Ullman, F.G., Billesbach, D., Clement, R.J., Kim, J., Eddy correlation measurements of methane flux in a northern peatland ecosystem, *Boundary-Layer Meteorol.*, **58**, 289-304, 1992.
- 23) Hendriks, D.M.D., Dolman, A.J., van der Molen, M.K., van Huissteden, J., A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 431-443, 2008.
- 24) Knox, S.H., Matthes, J.H., Sturtevant, C., Oikawa, P.Y., Verfaillie, J., Baldocchi, D., Biophysical controls on interannual variability in ecosystem-scale CO₂ and CH₄ exchange in a California rice paddy, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **121**, 978-1001, 2016.
- 25) Detto, M., Verfaillie, J., Anderson, F., Xu, L.D., Baldocchi, D., Comparing laser-based open- and closed-path gas analyzers to measure methane fluxes using the eddy covariance method, *Agric. For. Meteorol.*, **151**, 1312-1324, 2011.
- 26) Iwata, H., Kosugi, Y., Ono, K., Mano, M., Sakabe, A., Miyata, A., Takahashi, K., Cross-validation of open-path and closed-path eddy-covariance techniques for observing methane fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, **151**, 95-118, 2014.
- 27) Smeets, C.J.P.P., Holzinger, R., Vigano, I., Goldstein, A.H., Röckmann, T., Eddy covariance methane measurements at a Ponderosa pine plantation in California, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8365-8375, 2009.
- 28) Shoemaker, J.K., Keenan, T.F., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Forest ecosystem changes from annual methane source to sink depending on late summer water balance, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 673-679, 2014.
- 29) Sakabe, A., Hamotani, K., Kosugi, Y., Ueyama, M., Takahashi, K., Kanazawa, A., Itoh, M., Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tunable diode laser spectroscopy detection, *Theor. Appl. Climatol.*, **109**, 39-49, 2012.
- 30) Businger, J.A., and Oncley, S.P., Flux measurement with conditional sampling, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 349-352, 1990.
- 31) Ueyama, M., Hamotani, K., Nishimura, W., A technique for high-accuracy flux measurement using a relaxed eddy accumulation system with an appropriate averaging strategy, *J. Agric. Meteorol.*, **65**, 315-325, 2009.
- 32) Savage, K., Moore, T.R., Crill P.M., Methane and carbon dioxide exchanges between the atmosphere and northern boreal forest soils, *J. Geophys. Res.*, **102**, 29279-29288, 1997.

- 33) Lai, D.Y.F., Moore, T.R., Roulet, N.T., Spatial and temporal variations of methane flux measured by autochambers in a temperate ombrotrophic peatland, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **119**, 864-880, 2014.
- 34) Sakabe, A., Kosugi, Y., Takahshi, K., Itoh, M., Kanazawa, A., Makita, N., Ataka, M., One year of continuous measurements of soil CH₄ and CO₂ fluxes in a Japanese cypress forest: Temporal and spatial variations associated with Asian monsoon rainfall, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **120**, 585-599, 2015.

著者プロフィール



坂部 綾香 (Ayaka Sakabe)

<略歴>2010年京都大学農学部生森林科学科卒業／2015年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(農学博士)／同年同大学大学院農学研究科ポストク／2016年京大生存圏研究所学際萌芽研究センターミッション専攻研究員、現在に至る。<研究テーマと抱負>森林生態系がガス交換を介して気候に与える影響とそのフィードバックの解明。<趣味>バレーボール観戦。

MU レーダー IEEE マイルストーン認定

橋口 浩之^{1*}

The MU radar IEEE milestone dedicated

Hiroyuki Hashiguchi^{1*}

概要

MU レーダー (Middle and Upper atmosphere radar: 中層超高層大気観測用大型レーダー) は、1984 年に滋賀県甲賀市信楽町に設置されたアジア域最大級の大気観測用大型レーダーであり、対流圏から超高層大気に至る大気の運動、大気循環を観測している。MU レーダーは、アクティブフェーズドアレーシステムを用いた世界初の大規模大気レーダーとして、大気科学やレーダー技術の発展に貢献したことが評価され、2015 年に IEEE マイルストーン (IEEE Milestone in Electrical Engineering and Computing) に認定された (図 1)。本稿は、MU レーダー建設の経緯からその後の発展、また IEEE マイルストーンについて概説する。

1. MU レーダー建設の経緯

地球大気は、気温の高度変化によって、対流圏(地表～高度 10km)、中層大気(高度 10～100km)、超高層大気(高度 100km 以上)に分けられる。MU レーダーは当初の主な観測対象が中層大気(Middle atmosphere)と超高層大気(Upper atmosphere)であることから、その頭文字を取ってそう呼ばれることになった。

MU レーダー建設の計画はすでに 1960 年代に始まっていた。当時、超音速機の排出するガスが中層大気中のオゾン層を破壊し、地上に達する紫外線が増え、人の健康を害する恐れがあると研究者が指摘したことから、中層大気研究への関心が急速に高まった。しかし、中層大気の観測手段は、時間分解能の劣るロケットや気球による直接測定以外になく、大気状態が未解明であったため「未知圏」と呼ばれていた。ちょうどその頃、超高層観測を主目

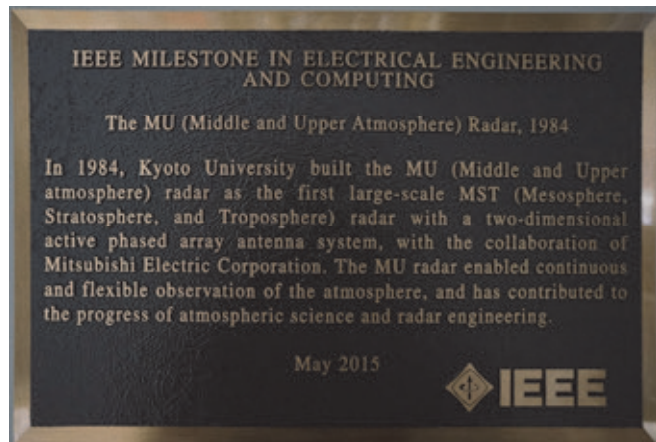


図 1: IEEE マイルストーン銘板

(和訳)

電気電子情報通信分野における IEEE マイルストーン「MU レーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー), 1984」1984 年に建設された京都大学の MU レーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー)は、二次元アクティブフェーズドアレーアンテナシステムを用いた世界初の大規模大気レーダー(MST/IS レーダー(中間圏・成層圏・対流圏観測/非干渉散乱レーダー))で、三菱電機(株)との共同で開発されました。MU レーダーにより、連続的で柔軟な大気観測が可能となり、大気科学、レーダー技術の発展に大きく貢献しました。

2015 年 5 月

2016 年 6 月 28 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野。

* E-mail: hasiguti@rish.kyoto-u.ac.jp.

的としたペルーのヒカマルカレーダーによって、中間圏(高度 50~80km)からの電波散乱が発見され、風速の観測に成功したことが報告された¹⁾。ヒカマルカレーダーは 300m×300m の巨大アンテナを用いた 50MHz 帯レーダーである。その後、中層大気 of 散乱機構の理論的検証がなされ、大気乱流による密度変動などが引き起こす電波屈折率の揺らぎによるブラッグ散乱であることが分かった。この「揺らぎ」がその場の大気の流れと共に移流するので、これをレーダー電波のドップラー偏移として捉えることで、大気の運動をリモートセンシングできることが 1975 年頃から次第に明らかになってきた。その後、成層圏(高度 10~50km)・対流圏でも乱流散乱を利用すれば天候にかかわらず風速三成分を測定できることが分かった。特に大気重力波が中層大気運動の理解に不可欠とされ、この目的に最適な観測装置として大型大気レーダーの開発建設が計画された。

日本の気象、電離層、電波研究者は 1960 年中頃から、中層大気研究の重要性に強い関心を持ち、加藤進京大教授(当時)を中心とする大きな WG を組織した。MU レーダー建設の計画は、この WG メンバーの強い協力で行われた。1970 年代後半には具体的な大型レーダー建設計画が立案され、変動の激しい中層大気観測に対してヒカマルカレーダーのパッシブアレー方式の限界を見出し、アクティブフェーズドアレーアンテナを備えた最新型レーダー「MU レーダー」が提案・設計された²⁾。1981 年に予算化され、滋賀県信楽町の山中で大規模な土木工事が開始された。

2. 世界初のアクティブフェーズドアレー大型大気レーダー「MU レーダー」

MU レーダー建設計画は、気象だけでなく超高層大気 of 研究者からも熱烈な支持を受け、中層大気と超高層大気の両方を観測できることが求められた。そのためには 50MHz 帯周波数で、送信尖頭電力 1MW、アンテナ開口径 100m という大規模なシステムが必要であった。激しく変動する大気 of 運動を 3 次元的に捉えるためには、観測方向(アンテナ方向)を高速に切替えることが必須である。しかし、ヒカマルカレーダーのような既存 of 大型レーダーシステムでは巨大な送信機 of 出力を一本一本 of アンテナに分配するためアンテナ入力端で 1kW 程度 of 電力となり、位相を高速に変えることは困難であった。

MU レーダーでは高速ビーム走査可能なシステム of 実現が設計 of 大目標におかれた。しかし、そのような大気レーダーは当時世界中 of どこにも存在しなかった。メーカー of 議論の中で、「分散型送受信(アクティブフェーズドアレー)方式」という案が浮上した。それは従来 of 巨大な送信機を用いる方式ではなく、(八木)アンテナ素子 of 一本一本に小型送信機を接続し、それら of 位相を制御しようというものであった。それは原理的に高速ビーム走査を可能とするが、500 台近く of 送受信機(送受信モジュール)すべて of 位相を揃えて動作させる必要があることから、電子工学 of 専門家からも実現性を否定する声が上がった。

この新方式について京都大学とメーカー of 関係者は 2 年以上に渡って検討を重ね、斬新な機能を持つ大気レーダーが実現するに至った。図 2~4 に、MU レーダー of 全景(空撮)、八木アンテナ、送受信モジュール of 写真を示す^{3,4)}。MU レーダーはコンピュータ制御による自動観測を可能にし、パルス送信毎すなわち 1 秒間に 2500 回ビーム方向を変更でき、多様な観測目的に柔軟に対応できる高機能をもたらした。

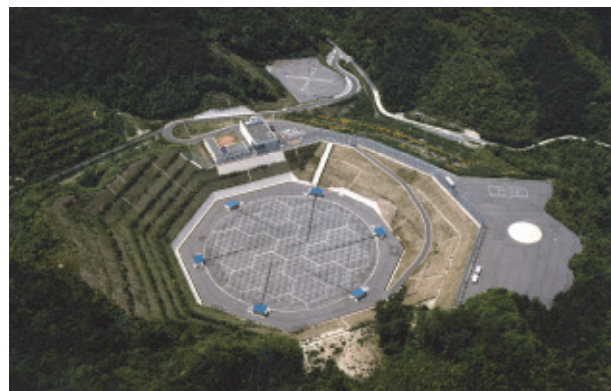


図 2: MU レーダー of 全景。中央 of 直径 103m of 円形がアンテナアレー



図 3: MU レーダーの直交三素子八木アンテナ



図 4: MU レーダーの送受信モジュール

3. MU レーダーによる観測

MU レーダーによる標準的な観測では、天頂および天頂角 10° で東西南北の計 5 方向にレーダービームを向けて視線方向速度を測定し、レーダービームが走査する空間・時間内で速度場が一様であると仮定して風ベクトルを求める。大気レーダーは、鉛直流を含む風ベクトルを時間的に連続に観測できるという優れた利点を持っている。従来のセンサーを付けた気球を放球して測定する方法では、データ間隔は数時間以上で間欠的である。MU レーダーでは、1 分に 1 回気球を放球するのと同様な非常に高時間分解能で連続データを得ることができる。MU レーダーで観測される物理量は基本的にレーダー直上の高さ方向の一次元量であるが、近似的に気象システムの空間構造が観測時間内で大きく変わらないとすれば、一般に同システムが西から東に移動することを利用して、時間変化を水平変化と解釈し、その高度・東西距離断面構造を推定することができる。同種の現象の観測を積み重ね、異なる南北位置における断面図を合成することで、現象の立体構造を解明できる⁵⁾。

一般に、中層大気の振る舞いは様々な時空間スケールを持つ大気波動が重なったものとして理解することができるので、このような高度・時間の連続データは波動を解析する上で好都合である。特に大気重力波はスケールが小さく、従来は適当な観測手段がなかったことから、その実態解明に大気レーダーが大きな役割を果たした⁶⁾。MU レーダー観測は、中層大気中に大気重力波が普遍的に存在することを明らかにしただけでなく、波のパラメータを定量的に明らかにした。さらに、対流圏下層で発生した大気重力波がジェット気流に捉えられ、またジェット気流で励起された波が上方に伝搬する途上で臨界層によって次々に捉えられる様子なども MU レーダーで初めて直接観測された⁷⁾。さらに大気波動が励起源となり、中緯度電離圏に特有の擾乱が引き起こされていることも、MU レーダー観測により発見された⁸⁾。

大気レーダーの観測分解能はレーダーシステムで規定され、 $1\mu\text{s}$ の送信パルスの場合高度分解能は 150m となる。これは層厚が数 m~100m とされる薄層乱流などの観測には不十分である。このため、帯域内で複数の周波数を用いて、レーダー映像法(radar imaging)により、パルス幅よりも細かい高度分解能を得る技術開発が進んでいる⁹⁾。2004 年に「MU レーダー観測強化システム」が導入された際に、この機能も追加され、ケルビン・ヘルムホルツ(シアア)不安定の S 字型波形(ピロー)などが明瞭に観測できるようになり、物質や熱の輸送を考える上で重要な知見が得られている¹⁰⁾。

4. MU レーダー観測を基礎とした大気レーダーの発展

MU レーダーを中核設備とする信楽 MU 観測所は、共同利用者によって関連する装置が持ち込まれ

て、複合計測施設としての大気実験場として発展している。我々も信楽 MU 観測所において、MU レーダーを基礎として小型可搬型レーダー(ウィンドプロファイラー)の開発を行ってきた。まず 1990 年頃に 1357.5MHz を用いたアンテナ径 2m、送信出力 1kW の境界層レーダーを開発し¹¹⁾、その後、1999 年に新しいアンテナ素子を用いた一辺 4m の矩形アレーを開発し、送信出力を 2kW としたレーダーを試作した。これは常時、高度 5km 程度までの下部対流圏の風ベクトルが観測可能なことから「下部対流圏レーダー(Lower Troposphere Radar: LTR)」と名付けられた¹²⁾。気象庁は LTR を全国に展開し、ウィンドプロファイラー・ネットワーク「局地的気象監視システム(WInd profiler Network and Data Acquisition System: WINDAS)」を完成させ、2001 年から現業利用を開始した¹³⁾。観測データは中央監視局で品質チェックされた後、数値予報モデルの初期値として利用されており、局地的集中豪雨などの予報精度向上に貢献している。

MU レーダーの建設中に早くも赤道域に大型大気レーダーを建設する「赤道レーダー」構想が立案され、現地調査が開始された。地球規模の大気循環の駆動源とされる赤道域では、強い太陽放射加熱によって大規模な積雲対流が発生・組織化する。また赤道域ではコリオリ因子がゼロに近づくため、鉛直伝搬可能な大気波動の帯域が広がる。これが上方伝搬し背景風と相互作用することによって赤道域特有の顕著な振動を引き起こしており、さらに超高層大気の振る舞いとも強く関わっている。気球や小型レーダーを用いた観測を経て、2001 年に「赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar: EAR)」がインドネシア共和国西スマトラの赤道直下に設置された¹⁴⁾。EAR のアンテナ開口径は 110m で、MU レーダーより若干大きい、送信電力はその十分の一の 100kW で、感度は著しく劣っている。しかし、EAR は MU レーダーと同じアクティブフェーズドアレー方式を採用し、柔軟な運用が可能である。これにより地表付近から下部成層圏までの全高度域と、高度 100km 以上の電離大気擾乱など様々な物理量が高分解能・高精度で時間的に連続に観測できる。EAR は我が国の大学が海外で運用する初めての大型設備であり、現地 LAPAN(インドネシア航空宇宙庁)との共同運用により、約 15 年に渡って安定して運用されてきた。

EAR により多くの成果が得られているが、送信出力が MU レーダーの十分の一であるため、中間圏の乱流や電離圏の IS 観測はできない。我々は、MU レーダーで培ってきた技術を集大成した「赤道 MU レーダー(EMU)」を赤道直下に建設し、赤道大気の大気観測機能を飛躍的に向上させることを計画している。EMU を主要設備の一つとする「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」を国立極地研究所他と共同で提唱しており、それは日本学術会議のマスタープラン 2014 と文部科学省のロードマップ 2014 に採択されている。

5. IEEE マイルストーン

MU レーダーは完成以来全国共同利用に供され、気象学・大気物理学、超高層物理学、天文学・宇宙物理学、電気・電子工学、宇宙工学など広範な分野にわたって多くの成果を上げ、その後の大気レーダー開発に大きな影響を与えた。MU レーダーは IEEE マイルストーンに認定され、その記念式典が 2015 年 5 月 13 日に京都大学において開催された。記念式典では、約 120 名の方々の列席のもと行われた贈呈式において、Howard E. Michel IEEE 本部長から山極壽一京都大学総長と柵山正樹三菱電機(株)執行役社長に銘板(図 1)が贈呈された。

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)は、1884 年創立の AIEE (American Institute of Electrical Engineers)と 1912 年創立の IRE (Institute of Radio Engineers) が 1963 年に合併した電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である。会員数は世界 190 カ国以上に 40 万人を超える。米国の学会であるが、半数以上を米国外が占め、日本の会員数は 9 支部合計で約 14,000 人である。

IEEE マイルストーンは、IEEE の分野において達成された画期的なイノベーションの中で、開発から 25 年以上経過し、地域社会や産業の発展に多大な貢献をしたと認定される歴史的業績を表彰する制度であり、IEEE 創立 100 周年を翌年に控えた 1983 年に創設された。その狙いは、優れた技術成果

に光を当てると共に、それを生み出した技術者に対する社会一般の理解と評価を高めることにある。マイルストーンに認定されると、その業績を記した銘板(Plaque)が贈呈され、ゆかりの地に展示される。

2016年5月までに認定、贈呈式を終えた総件数は165件で、Regionごとの分布は次表の通りである(2件が2つのRegionにまたがる)。(http://ethw.org/Milestones:List_of_IEEE_Milestones)

Region	1-6 (米国)	7 (カナダ)	8 (欧州・アフリカ)	9 (中南米)	10 (アジア・太平洋)
認定数	82	15	36	4	30

国際的にはENIACコンピュータ、トランジスタ製造、ボルタ電池などが認定されている。国内では、表1に示すように、八木・宇田アンテナ、富士山レーダー、東海道新幹線など28件が認定されており、MUレーダーが25件目の認定である。

表1: 日本のIEEEマイルストーン

	テーマ	記念すべき年	贈呈式の年月日
1	指向性短波(八木・宇田)アンテナ	1924	1995.6.17
2	富士山頂レーダー	1964	2000.3.6
3	東海道新幹線	1964	2000.7.13
4	電子式水晶腕時計	1969	2004.11.25
5	電卓の先駆的開発	1964-1973	2005.12.1
6	家庭用ビデオ VHS	1976	2006.10.11
7	鉄道自動改札	1965-1971	2007.11.27
8	日本語ワープロ	1971-1978	2008.11.4
9	依佐美送信所	1929	2009.5.19
10	フェライト開発・応用	1930-1945	2009.10.13
11	電子式TVの開発	1924-1941	2009.11.12
12	太平洋横断TV衛星中継	1963	2009.11.23
13	黒部川第四発電所	1956-1963	2010.4.9
14	太陽電池の産業化	1959-1983	2010.4.9
15	直接衛星放送サービス	1984	2011.11.18
16	電界放出形電子顕微鏡	1972-1984	2012.1.31
17	G3 FAX 国際標準化	1980	2012.4.5
18	ラップトップ PC T1100	1985	2013.10.29
19	日本の一次・二次電池産業の誕生と成長	1893-1971	2014.4.12
20	高効率音声符号化(LSP)	1975	2014.5.22
21	シャープ 14 インチ TV 用 TFT-LCD	1988	2014.6.10
22	電力用酸化亜鉛形ギャップレス避雷器(MOSA)	1975	2014.8.18
23	20 インチ光電子増倍管	1979-1987	2014.11.5
24	太平洋海底ケーブル TPC-1	1964	2014.11.12
25	MU レーダー	1984	2015.5.13
26	高品質光ファイバの量産製造技術「VAD 法」	1977-1983	2015.5.21
27	緊急警報放送	1985	2016.5.11
28	ハイビジョン	1964-1989	2016.5.11

6. まとめ

MU レーダーは、アクティブフェーズドアレー方式の技術的先駆性により、大気科学、超高層物理学、電子工学、電波科学等の広い分野で共同利用研究に活用され、多くの研究成果を生み出した。高機能のレーダーシステムを活用して、新しい観測技術が開発され、一部は気象予報等にも実用されている。MU レーダーは大型大気レーダーの源流となり、その技術は国内外で開発された多くの大気レーダーに引き継がれている。国際的大型大気レーダーネットワークの中核として、今後も活躍が期待されている。

謝辞

MU レーダーは、加藤進京都大学名誉教授のリーダーシップにより、三菱電機(株)・京都大学の産学連携により開発されました。MU レーダー、LTR、EAR の開発・研究の中心におられた深尾昌一郎京都大学名誉教授は、IEEE マイルストーン認定の約 1 年前に逝去されました。心よりご冥福をお祈りします。

参考文献

- 1) Woodman, R.F., Guillen, A., Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 493-505, 1974.
- 2) Fukao, S., Kato, S., Aso, T., Sasada, M., Makihira, T., Middle and upper atmosphere radar (MUR) under design in Japan, *Radio Sci.*, **15**, 225-231, 1980.
- 3) Fukao, S., Sato, T., Tsuda, T., Kato, S., Wakasugi, K., Makihira, T., The MU radar with an active phased array system, 1. Antenna and power amplifier, *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168, 1985.
- 4) Fukao, S., Tsuda, T., Sato, T., Kato, S., Wakasugi, K., Makihira, T., The MU radar with an active phased array system, 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20**, 6, 1169-1176, 1985.
- 5) Shibagaki, Y., Yamanaka, M.D., Hashiguchi, H., Watanabe, A., Uyeda, H., Maekawa, Y., Fukao, S., Hierarchical structures of vertical velocity variations and precipitating clouds near the baiu frontal cyclone center observed by the MU and meteorological radars, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 569-596, 1997.
- 6) Tsuda, T., Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Jpn. Acad.*, **90**, 12-27, 2014.
- 7) Yamanaka, M.D., Fukao, S., Matsumoto, H., Sato, T., Tsuda, T., Kato, S., Internal Gravity Wave Selection In The Upper Troposphere And Lower Stratosphere Observed by the MU Radar: Preliminary Results, *Pure Appl. Geophys.*, **130**, 481-495, 1989.
- 8) Yamamoto, M., Fukao, S., Woodman, R.F., Ogawa, T., Tsuda, T., Kato, S., Mid-Latitude E-Region Field-Aligned Irregularities Observed with the MU Radar, *J. Geophys. Res.*, **96**, 15943-15949, 1991.
- 9) Luce, H., Mega, T., Yamamoto, M.K., Yamamoto, M., Hashiguchi, H., Fukao, S., Nishi, N., Tajiri, T., Nakazato, M., Observations of Kelvin-Helmholtz instability at a cloud base with the middle and upper atmosphere (MU) and weather radars, *J. Geophys. Res.*, **115**, D19116, 2010.
- 10) Fukao, S., Luce, H., Mega, T., Yamamoto, M.K., Extensive studies of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows in the lower atmosphere with the VHF Middle and Upper atmosphere radar (MUR), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 1019-1041, 2011.
- 11) Hashiguchi, H., Fukao, S., Tsuda, T., Yamanaka, M.D., Tobing, D.L., Sribimawati, T., Harijono, S.W.B., Wiryosumarto, H., Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results, *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054, 1995.
- 12) Hashiguchi, H., Fukao, S., Moritani, Y., Wakayama, T., Watanabe, S., A Lower Troposphere Radar: 1.3-GHz Active

Phased-Array Type Wind Profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915-931, 2004.

- 13) Ishihara, M., Kato, Y., Abo, T., Kobayashi, K., Izumikawa, Y., Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1085-1096, 2006.
- 14) Fukao, S., Hashiguchi, H., Yamamoto, M., Tsuda, T., Nakamura, T., Yamamoto, M.K., Sato, T., Hagio, M., Yabugaki, Y., Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, 2003.

著者プロフィール



橋口 浩之 (Hiroyuki Hashiguchi)

<略歴> 1992 年京都大学工学研究科修士課程電子工学専攻修了／同年日本学術振興会 特別研究員 DC1／1995 年京都大学工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了（工学博士）／同年日本学術振興会 特別研究員 PD／1997 年京都大学超高層電波研究センター 助手／2000 年京都大学宙空電波科学研究センター 助手／2001 年同助教授／2004 年京都大学生存圏研究所 助(准)教授、現在に至る。<受賞歴> 2006 年科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(深尾昌一郎・渡邊伸一郎と共同受賞)／2008 年日本気象学会堀内賞。<研究テーマ> 大気観測用レーダーの開発及びそれを用いた気象観測への応用研究。

京都府与謝野町における神像ならびに 獅子・狛犬の樹種識別調査の事例紹介

田鶴 寿弥子^{1*}, 杉山 淳司¹

Wood identification of wooden Shinto sculptures and Shishi-Komainu in Yosano city, Kyoto Prefecture.

Suyako Tazuru^{1*} and Junji Sugiyama¹

概要

古くより日本人は適所適材の木材利用を行ってきた。その中でも日本人の精神世界を支えてきた宗教や神の概念を象徴する木彫像の製作には、より意味をもたせた木材選択がなされたことが想定できる。本研究では京都府与謝野町に伝わる神像および獅子・狛犬の樹種調査結果について、事例を紹介する。

1. はじめに

日本では多種多様な文化財に木材が使用されており、多くの樹種識別調査によって日本人は適所適材の木材利用を行ってきたことが明らかにされてきている¹⁾。文化財に使用された樹種を知ることは当時の木材観、木材流通、文化などを知るうえで非常に重要である。全世界共通に、人類の生存には、物質的な充足とともに精神世界の充実が不可欠であり、日本では主に神道と仏教の観念が混在する宗教観を支えたものが木であったと考えられる。拝む対象として日本人の精神を支えてきた木彫像すなわち仏像や神像をはじめとした対象には、特に意味をもつ樹種選択がなされたことが推察される。

平成 28 年 6 月現在、国宝および重要文化財に指定されている美術工芸品の中で、彫刻は国宝 130 件、重要文化財 2,692 件にも及ぶ（文化庁 HP より）。その中でも仏像関連品は非常に多く、日本の彫刻品は主に仏像を中心として調査・研究されてきたとも言えるだろう。

近年、仏像の樹種については、東京国立博物館などの調査によって、平安時代に造像された一木造りの仏像がおおよそカヤで造られていることが明らかとなり、学界で長年課題とされてきた栢木の概念をはじめとして様々な文化的背景が再考されてきている²⁻⁴⁾。

一方、木彫像の中でも神道美術の神像や獅子・狛犬を始めとした関連品に目を向けると、それらの研究は仏像と比べて遅れているのが現状である。神像やそれらを守護する役割をもつ獅子・狛犬は、基本的には仏教芸術により発生し発達したものとされている⁵⁾。しかしながら、例えば神像においては、儀軌がない、男女が区別されている、神人同格の表現に則っており人間を写実している⁶⁾、その多くが貴族などの官人や俗体を表現している、気候的に寒い地域の文化圏の生活を思わせるような服装の偶像にしあげられている⁷⁾というように、仏像とは対照的な様相を見せることが多く、複雑を極

2016 年 7 月 11 日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野。

* E-mail: tazurusuyako@rish.kyoto-u.ac.jp

める。さらに、神仏分離や廃仏毀釈といった様々な歴史的背景により、神像や獅子・狛犬の研究そのものが困難であったという問題点も挙げられる。また、公開を前提としていないことから、長年神殿などの閉ざされた空間に安置される例も多く、経年劣化が進んでいることも多い。これまでその歴史的背景や造作といった美術史的観点からの考察が多くなされてきた神像や獅子・狛犬の材質についての調査・研究は昨今ようやく進みだした段階である。特に神像彫刻では神が木に憑いて顕現したという伝えも多いことから、木の信仰が特に示唆され、その樹種選択は注目されている。

神像彫刻は、奈良・京都を中心に広く輪を広げて分布したとされるが⁸⁾、帰化人との関連などとの兼ね合いも考慮すべき問題とされる。山陰、北陸地域をはじめとして日本海に面する地域は、直接に三韓からの氏族が住んだ地域であると推察される。そこに神社がつくられ神像が製作されるにあたり、どのような木が選択され、どのような像が制作されたのか、非常に興味深い点である。神像彫刻における樹種選択の調査・研究はまだ発展途中である。本稿では、京都府の中でも北部に位置し、日本海に面する与謝野町に伝わる神像ならびに獅子・狛犬の樹種調査を行った事例を報告する。

2. 方法

本研究では、京都府与謝野町の須代神社、天満神社、(四辻)八幡神社の神像および獅子・狛犬の樹種調査を行った。本調査は、所蔵者の理解と許諾を得て書面でのやりとりの他、地元の教育委員会に諮った上行ったものである。樹種識別データの公表についても書面にて承諾をいただいている。試料の詳細については、表1にまとめた通りである。これらの像は、長年にわたる劣化によって、像底部や干割れ部分に剥落や遊離片が認められた。像本体を傷つけることなく、それぞれの像由来の非常に小さな遊離片(1 mm × 1 mm × 2 mm 程度)を筆者が担当者とともに確認して採取し、樹種調査に用いた。木片は、極めて劣化が激しいものが多くを占めていた。須代神社および天満神社の木彫像については光学顕微鏡観察のための切片の作成が可能であったことから徒手で切片を作成し、スライドガラスにのせてグリセリン:エタノール=1:1と共にホットプレートで加熱して薄片内の気泡を除去し、光学顕微鏡での観察に供した。光学顕微鏡で観察される解剖学的特徴により、木材の属レベル(時には種まで)の識別が可能で、そのためのリストが公表されている。一方、(四辻)八幡神社の獅子・狛犬の一体については試料が非常に脆弱であったことから、兵庫県播磨の大型放射光施設(SPring-8)の医用ビームライン BL20XU を用い、シンクロトロン放射光 X 線トモグラフィー⁹⁾(課題番号: 2007B1544, 2008B1563, 2009B1093, 2009B1981, 2010A1932, 2011B1239)での樹種調査に供した。一般的に木材の樹種識別には、マイクロメーターオーダーの分解能が必要であるが、市販の CT 装置ではそれに足る分解能をもっていない。SPring-8 のトモグラフィーのセッティング BL20XU では極めて平行に近い X 線ビームが利用可能で、高分解能が得られる。得られた透過像から断層像を作成し、3次元データを得たのち、Slice、ImageJ、VGStudio といったソフトを用いて解剖学的特徴の観察のための任意の断面観察などを行った。

3. 結果

光学顕微鏡とシンクロトロン放射光 X 線トモグラフィーによる樹種調査を行った結果、須代神社の神像3体と獅子・狛犬1体および天満神社の獅子・狛犬2体にはヒノキが、八幡神社の獅子・狛犬にはカヤが使用されていたことが判明した。例として図1に須代神社の左大臣像の光学顕微鏡写真を、図2に(四辻)八幡神社獅子・狛犬像についてシンクロトロン放射光 X 線トモグラフィーを用いて撮影した縦断面像から構築した3D像トモグラフィー画像を示した。図1a-cではヒノキの解剖学的特徴が観察でき、また図2右では仮道管内壁に2本ずつのらせん肥厚が明確に観察でき、カヤであることが判明した。

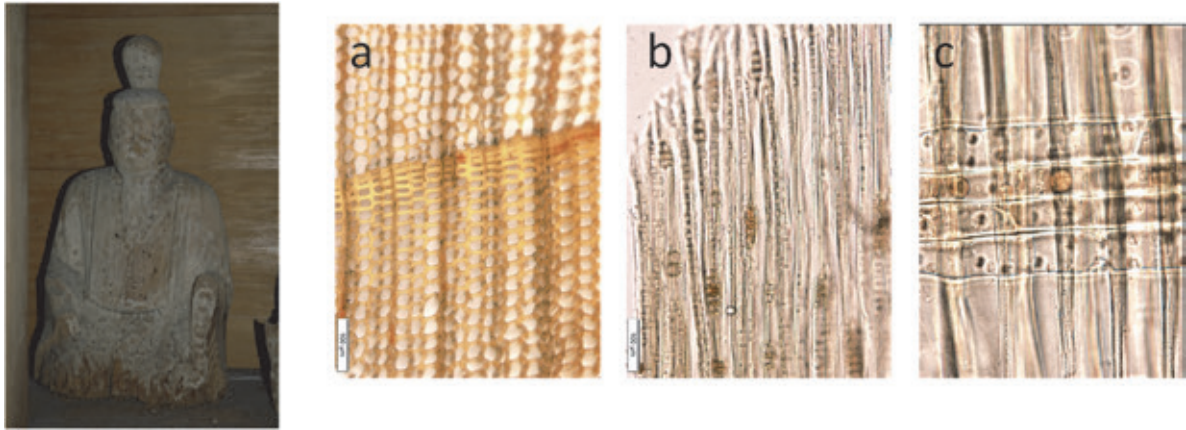


図1：須代神社左大臣像（左）と、木口面（a）、板目面（b）、柁目面（c）の光学顕微鏡写真

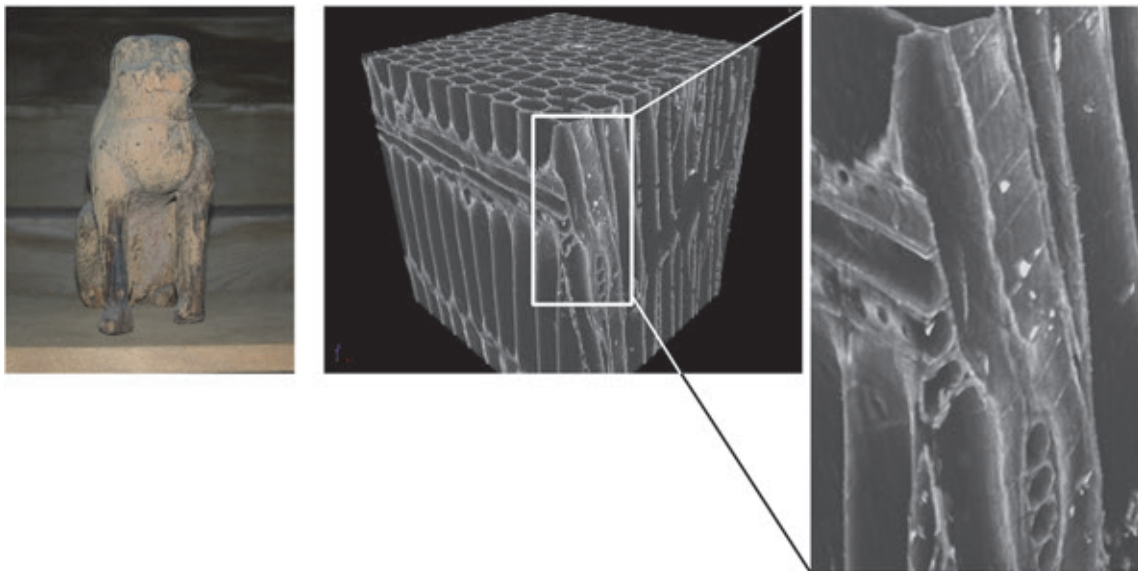


図2：（四辻）八幡神社獅子・狛犬像（左）とシンクロトロン放射光 X 線トモグラフィを用いて撮影した縦断面像から構築した 3D 像トモグラフィ画像（中央）とその拡大図（右）

同定された樹種についての識別根拠は以下のとおりである。

ヒノキ：*Chamaecyparis obtusa*

針葉樹。仮道管と放射柔細胞、および樹脂細胞からなる。水平・垂直樹脂道とも存在しない。早材から晩材への移行は緩やかであり晩材部は少ない。分野壁孔はヒノキ型で一分野におよそ2個ずつ存在する。

カヤ：*Torreya nucifera*

針葉樹。垂直・水平樹脂道および樹脂細胞を持たない。早材から晩材への移行は緩やかであり、晩材部は少ない。仮道管の内壁には2本ずつペアで走るらせん肥厚が確認できる。分野壁孔はトウヒ型で小さく、一分野に2-4個ずつ存在する。

4. 考察と展望

本調査で用いた資料の詳細は表1に示した通りである。以下、各神社について列挙し、若干の考察を行う。

4.1 須代神社

須代神社は、詳細が不明な点もあるが、平安時代中頃（10世紀頃）に成立した延喜式神名帳に社名が記載されている歴史の古い神社である。須代神社には、神像4軀、獅子・狛犬1軀が伝わっており、本調査では、遊離片が認められず調査が不可能であった女神像を除き、男神像、随神である左大臣と右大臣、獅子・狛犬1軀の計4軀について樹種識別を行った。男神像は虫害が著しく、面相も定かではないが、手に笏をもつ姿に彫られている。また左大臣・右大臣は衣冠束帯姿であり、これらの像は同時期に製作されたものと推定される。獅子・狛犬の一体は、像中心部が劣化で空洞化しているほか、顔も劣化により面相をつかみづらい。これらについて樹種識別を行った結果、すべてヒノキであることが判明した。

これらのうち神像の年代を考える上で男神像の笏に注目した。劣化が激しいために明確ではないが、男神像は別材ではなく本体と同材から彫り出した笏を持っている。一般的に鎌倉時代には神像の手指の造作が巧であり、南北朝時代頃から持物をとるのみに変化するとされている。上記のような男神像の笏の特徴をふまえると、南北朝時代（室町時代）以降の作の可能性が考えられよう。また当神社の看板には、これらの神像の年代について鎌倉時代との記載がある。本品は、昭和40年代の調査所見の年代観に基づき、昭和57年に旧加悦町指定文化財とされたものである。しかし、近年の研究では、殊に獅子・狛犬については室町時代の制作が妥当であろうと想定されている。

4.2 天満神社

天満神社には1733年に再建された本殿が残っており、豊富な絵様や彫刻の飾り付けで建物を豪壮にみせるという当時の丹後地域における神社建築の特徴をよく残している。天満神社に伝わる獅子・狛犬2体は、高さ18cm強と比較的小さく、造形もシンプルである。これらは両者ともヒノキであることが判明した。阿吽ともに劣化が激しく面相ははっきりせず頭部の角の有無も不明瞭である。たてがみも比較的控え目である。これらの特徴から室町時代頃の作と推定される。

4.3 (四辻)八幡神社

(四辻)八幡神社には、比較的小型の男神像、観音像、獅子・狛犬一対の計4軀の神像群が伝わっている。「与謝郡誌」¹⁰⁾によると、「市場村字四辻小字上谷鎮座、指定村社、祭神誉田別命創立年代由緒詳ならず古老の伝によれば神像は嵯峨帝の御作にて応神帝、神功皇后、武内宿禰の三体なりしを何時しか其一を失して寛文八年八月京都佛師黒羽正邦再嘗せしといふ」と記されている。また、四辻郷土史¹¹⁾によると、神社に現存している木彫像について、

1. 嵯峨天皇（8-9世紀頃か）御自作と称せらる旧御身体木像（座像7寸7分高サ）
2. 外に立像にて膝下朽ち且つ焼失の痕跡あるもの（高サ約1尺2寸位）元神功皇后御像といふ、仏像形の如し
3. 同時代作と思はれる狛犬木彫のもの一対

との記載があり、形状や大きさなどから、上記の小型の男神像が上記の1に、観音像が2に相当するものと考えられる。

本調査では遊離片が採取可能である像が限られていたため、獅子・狛犬のうち一軀についてのみ樹種調査を適用することができた。その結果カヤであることが判明した。樹種調査は適用していないが、同八幡神社の小型の男神像は、近年滋賀県塩津港遺跡から出土した神像群などにある程度類似した形態を示すなど、平安時代後期（末期）ともとれる特徴もみられる。男神像の特徴や獅子・狛犬にカヤが使用されている点などを考えると、他の2つの神社に比べて比較的古い時代に神像群が製作された

ことも考えられるが、今回の調査は限定的であり推測の域をでない。

表1：各神社の木彫像における特徴と樹種識別結果のまとめ

	男神像	左大臣(随神)	右大臣(随神)	獅子・狛犬(吽像)
				
神社名	須代神社	須代神社	須代神社	須代神社
高さ(cm)	58.0	52.3	47.4	43.1
樹種識別法	光学顕微鏡観察	光学顕微鏡観察	光学顕微鏡観察	光学顕微鏡観察
樹種	ヒノキ	ヒノキ	ヒノキ	ヒノキ
時代	室町時代か(神社看板には鎌倉との記載あり)	室町時代か(神社看板には鎌倉との記載あり)	室町時代か(神社看板には鎌倉との記載あり)	室町時代か(神社看板には鎌倉との記載あり)
構造	一木造	一木造	一木造	一木造
姿勢	立像	坐像	坐像	蹲踞(お座り)
身	本体と共に彫り出した筋をもつ。ただし劣化のために左右の手で持つか否かは不明。鎌倉時代は手指の造作が巧みで南北朝頃から持物をとるのみに変化する。そのため本像は南北朝以降と考えられるが劣化により特徴の詳細は不明瞭である。	拱手せず。ただし、劣化により詳細な造作は不明。衣冠束帯姿。	拱手せず。ただし、劣化により詳細な造作は不明。衣冠束帯姿。	像中心部が虫害で空洞化している
頭	大きい冠をつける	巾子冠が認められる	巾子冠が認められる	劣化により、頭部の角の有無は不明
顔	劣化により詳細は不明	劣化により詳細は不明。髪が認められ、もう一方の随神に髷が大きいことからこちらが格上の左大臣と考えられる	劣化により詳細は不明	劣化により詳細は不明

	獅子・狛犬(阿像)	獅子・狛犬(吽像)	獅子・狛犬(吽像)
			
神社名	大廣神社	大廣神社	八幡神社
高さ(cm)	102	18.4	測定なし
樹種識別法	光学顕微鏡観察	光学顕微鏡観察	SPRING-8のμCT法
樹種	ヒノキ	ヒノキ	カヤ
時代	室町時代か	室町時代か	不明
構造	一木造	一木造	一木造
姿勢	蹲踞(お座り)	蹲踞(お座り)	蹲踞(お座り)
身	比較的小柄な狛犬である。たてがみは比較的控え目である。	比較的小柄な狛犬である。たてがみは比較的控え目である。	たてがみは比較的控え目である。
頭	劣化により、頭部の角の有無は不明	劣化により、頭部の角の有無は不明	耳の名称が認められる
顔	劣化により詳細は不明	劣化により詳細は不明	両目のくぼみが認められる

ここで与謝野町に位置する他の神社に伝わる主な神像についていくつかまとめてみたい。与謝郡岩滝町の板列八幡神社には2軀（かつては、さらに男神像1軀があったと伝えられている）の女神像がある。目鼻だちを顔いっぱい広げて置いている様相から藤原時代の造像の仏像と類似しており、造立の時代が暗示されている。この板列社は、延喜式の丹波国与謝郡二十座の中に板列神社の名前がみえ、古くからこの地にあった神社であることがうかがえる。これらの女神像は平安時代後期（保元3年）を中心とした時代の造立が考えられている¹²⁾。この女神像に関しては、由緒も国府八幡宮に繋がる可能性も想定され、地方国府の造像水準の指標となると示唆されている¹³⁾。

中郡周枳村の大宮売神社では女神像2体が伝わっており、これらの2体のうち、大きいものは唐装のものであり、小さいものは和装である。造作的にも相違がみられ、年代については造形形式によって考えるしかない¹⁴⁾。

与謝郡養老村の日吉神社の神像4軀については、これらは造形形式によって時代が異なることが指摘されている¹⁵⁾。そのうち男神像2軀については、鎌倉時代の末葉から南北朝時代、室町時代にかけての造立が推察されている。残りの男神像2軀については、神像の神性を表す造形的な手法などが閑却されてしまって人形的な表現に終わっていることから、神像彫刻における末期的な現象の一つと考えられている。これら4軀の造像時期については、その神社の背景や氏族の関係を考慮したうえで、鎌倉時代かと考えられている¹⁵⁾（これについては不明点が多い）。

上記のように、限定的な知見ではあるものの、与謝野町一帯において現在に伝わる神像群からは、平安時代から室町時代にかけて様々な形態の神像が造られたことがわかる。ただしその材質については不明なままである。今回の樹種調査により、一例ではあるものの（四辻）八幡神社の獅子・狛犬1軀がカヤで造像されていたことが判明したことは、当該地域における神像造像にカヤが少なからず何らかの意味を持っていたということであり、重要な知見であることは間違いないだろう。

近年、神道彫刻における調査が進むにつれてその材質への関心はますます高まってきている。本研究は、与謝野町という一地域に伝わる神像や獅子・狛犬の樹種識別調査に過ぎないが、今後科学的手法に基づいた樹種識別手法による樹種情報のデータを蓄積することにより、仏教と神道における木彫像制作に関連する知見の獲得のみならず、樹種選択の地域性や時代的差異へのアプローチも期待される。近年、樹種識別においては非破壊手法の開拓が進んでいる¹⁶⁻¹⁸⁾。年代測定なども組み合わせることにより、これまで見えてこなかった神道彫刻の歴史解明に役立てたい。

5. 謝辞

本研究は（財）高輝度光科学研究センターの課題研究課題番号 2007B1544, 2008B1563, 2009B1093, 2009B1981, 2010A1932, 2011B1239 により、ビームライン BL20XU において得られた成果の一部をまとめたものである。放射光実験においては八木直人博士、鈴木芳生博士、竹内晃久博士、上杉健太郎博士に多大な協力をいただいた。また、本研究は京都大学生存圏研究所全国共同利用研究（生存圏データベース（材鑑調査室））によるものである。ここに明記し、感謝の意を表す。調査ならびに樹種識別結果と画像データの公表にご理解とご承諾を下された須代神社、八幡神社、天満神社の関係者の皆様に心よりお礼を申し上げます。末筆ながら、本研究に協力くださった京都府与謝野町教育委員会にこの場をお借りして心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 伊東隆夫, 木質文化財に関する最近の研究の動向, *木材学会誌*, **51**, 67-69, 2005.
- 2) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之, 日本古代における木彫像の樹種と用材観—七・八世紀を中心に—, *MUSEUM 東京国立博物館研究誌*, **555**, 3-54, 1998.
- 3) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之, 日本古代における木彫像の樹種と用材観II—八・九世紀を中心に—

- , *MUSEUM 東京国立博物館研究誌*, **583**, 5-44, 2003.
- 4) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之: 日本古代における木彫像の樹種と用材観Ⅲ-八・九世紀を中心に(補遺)-, *MUSEUM 東京国立博物館研究誌*, **625**, 61-78, 2010.
 - 5) 岡直己, 神像彫刻の研究, 角川書店, 1966, p.419.
 - 6) 岡直己, 神像彫刻の研究, 角川書店, 1966, p.423.
 - 7) 山折哲雄, 神と仏 日本人の宗教観, 講談社現代新書, 2006, p.48-49.
 - 8) 岡直己, 神像彫刻の研究, 角川書店, 1966, p.435.
 - 9) Mizuno, S., Torizu, R., Sugiyama, J.: Wood identification of wooden mask using a synchrotron X-ray microtomography, *J. Archaeol. Sci.*, **37**, 2842-2845, 2010.
 - 10) 京都府與謝郡誌上巻, 京都府與謝郡役所, 1923, p.144 -145.
 - 11) 山添輝一, 四辻郷土史, 八幡神社々務所, p.262.
 - 12) 岡直己, 神像彫刻の研究, 角川書店, 1966, p.156.
 - 13) 長坂一郎, 神仏習合像の研究—成立と伝播の背景—, 中央公論美術出版, 2004, p.194.
 - 14) 岡直己, 神像彫刻の研究, 角川書店, 1966, p.356-360.
 - 15) 岡直己, 神像彫刻の研究, 角川書店, 1966, p.373.
 - 16) Watanabe, K., Abe, H., Kataoka, Y., Nodhito, S., Species separation of aging and degraded solid wood using near infrared spectroscopy. *Jpn. J. Historical Bot.*, **19**, 117-12, 2011.
 - 17) Horikawa, Y., Mizuno-Tazuru, S., Sugiyama, J., Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese diploxylons, *J. Wood Sci.*, **61**, 251-261, 2015.
 - 18) Kobayashi, K., Akada, M., Torigoe, T., Imazu, S., Sugiyama, J., Automated recognition of wood used in traditional Japanese sculptures by texture analysis of their low-resolution computed tomography data, *J. Wood Sci.*, **61**, 630-640, 2015.

著者プロフィール



田鶴(水野) 寿弥子 (Suyako Tazuru-Mizuno)

<略歴> 2011年京都大学大学院農学研究科森林科学専攻博士課程農学博士取得/同年京大生存圏研究所博士研究員/同年同研究所生存圏学際萌芽研究センターミッション専攻研究員/同年同研究所助教、現在に至る。<研究テーマと抱負>ケモメトリクスによる樹種特性解析や木質文化財の樹種データベース構築、年輪研究。抱負は「学育両道」に励む。<趣味>子供服作り



杉山 淳司 (Junji Sugiyama)

<略歴> 1987年京都大学大学院農学研究科森林科学専攻博士課程中退/同年東京大学助手/1993年京都大学木質科学研究所助教授/2006年生存圏研究所教授、現在に至る。<研究テーマと抱負>非破壊診断と機械学習による樹種特性解析, 多糖の構造・形成・分解, 抱負は「苦手の克服」<趣味> サイクリング

なぜオーロラ爆発が起こるのか

海老原 祐輔^{1*}, 田中 高史²

Why do auroral breakups occur?

Yusuke Ebihara^{1*} and Takashi Tanaka²

概要

明るいオーロラが急に現れ、短時間のうちに極方向及び西方向に広がるオーロラ爆発(auroral breakup)と呼ばれる現象がある。オーロラが最も明るくそして激しく舞う瞬間である。オーロラ爆発は磁気圏物理学最大の謎の一つであったが、大規模な数値シミュレーションによってそのメカニズムが明らかになりつつある。本稿では、最新のシミュレーションで得られたオーロラ爆発の基本メカニズムについて解説する。

1. はじめに

オーロラは常に地球のどこかで現れている。普段のオーロラは微弱で動きが緩慢であるため鑑賞するには退屈である。ところが、オーロラがある狭い処から急に明るく光りはじめ、明るく華麗なオーロラが極方向そして西方向に広がっていくことがある。これをオーロラ爆発(auroral breakup)と呼ぶ。図1にオーロラ爆発直後に現れるオーロラの一例を示す。このとき、オーロラを流れる強力な電流によって地磁気が大きく乱れ、地球近くの宇宙空間(磁気圏)も大きく変動する。オーロラ爆発に伴う一連の擾乱をサブストームと呼ぶ。地球規模で見ればサブストームは珍しい現象ではない。多いときには一日に5~6回起こることもある。しかし、オーロラ爆発は真夜中より少し前の時間帯で起こりやすく、オーロラが現れる緯度は常に変わるので、地上にいる人がオーロラ爆発に巡りあう機会はそう多くはない。

赤祖父俊一博士らはオーロラ爆発の発達過程を整理し、オーロラ・サブストームの概念を提唱したり。それから半世紀近く経つが、オーロラ・サブストームの原因については統一的な見解が得られておらず、磁気圏物理学の最大の謎の一つとなっている。また、オーロラを流れる電流が送電網などの導電体に誘導電流を流し、変電所の変圧器を損傷させるリスクが指摘されている。生存圏の安心・安全を担保し、豊かな社会を維持・発展させるためにもオーロラ爆発の原因を理解することは重要と言えよう。

明るいオーロラの直接的な原因は宇宙空間から降り注



図1：オーロラ爆発直後に見られる渦巻型のオーロラ(スウェーデン・キルナ郊外にて海老原撮影)。

2016年8月8日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存科学計算機実験分野。

* E-mail: ebihara@rish.kyoto-u.ac.jp

²〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター。

ぐ電子である。シャワーのように降り注ぐ電子が超高層大気を構成する原子や分子にエネルギーを与え、原子や分子が放つ光がオーロラの実体である。降り注ぐ電子の量が多いほど発光が増すので、オーロラ爆発のときにはバケツをひっくり返したように電子が大量に降っていることになる。電子の進む向きと電流の向きは逆であるから、電子が降り注ぐということは電流が上向きに流れていることを意味する。よって、「なぜオーロラが急に光り出すのか」という問題は「なぜ電流が上向きに急に流れ始めるのか」という問題に置き換えることができる。

電流は必ず閉じなければならない。明るいオーロラに伴って上向きに流れる電流は高さ約 100 km にある電離圏を經由し、下向きに流れる電流とどこかで接続していると考えられている。とくに明るいオーロラ中の電離圏を水平方向に流れる電流はジェット電流と呼ばれ、地磁気を大きく乱す²⁾。地磁気の急激な乱れもオーロラ爆発の特徴である。オーロラ爆発の肝は宇宙と出入りする電流であるが、この電流はどこから来るのだろうか。宇宙空間を流れる電流線を計測することはそもそも難しい。右ねじの法則で知られるアンペールの法則によって人工衛星が観測した磁場から近傍の電流を求めることができるが、広大な宇宙空間を3次元的に流れる電流線を観測によって把握することは殆ど不可能である。1970年代、オーロラ爆発が発生したときの観測データを詳細に解析することで、マックフェロンたちは楔（くさび）型電流系を提案した³⁾。図2左はその模式図である。常に磁気圏尾部を流れている電流が何らかの理由で寸断されると、余った電流が磁力線に沿って地球に流れ込むというものである。朝側で下向き、夕側で上向きの電流が流れ、上向きに流れている電流の根元で明るいオーロラが光ると考えられている。構造がシンプルで観測を説明しやすいため楔型電流系は広く支持されており、現在では「何が電流を寸断するのか」という問題に焦点が当てられている。微視的な不安定性が電流を寸断するという説⁴⁾や磁気圏の尾部からプラズマの泡が到来して電流を等価的に寸断するという説⁵⁾などがあり、激しい議論が今なお続いている。

2. オーロラ爆発の基本的なしくみ

私達のアプローチは、大規模な数値シミュレーションによってオーロラ爆発を詳細に再現し、全体を俯瞰することでオーロラ爆発の全容を明らかにしようというものである。私たちが用いている電磁流体シミュレーションはオーロラ爆発に伴って現れる特徴的な時空間変動を良く再現することができることが確かめられている⁶⁾。シミュレーションで再現したオーロラ爆発の例を図3に示す。磁極を取り囲むようにオーロラがリング状に現れている（図3左）。これをオーロラ・オー

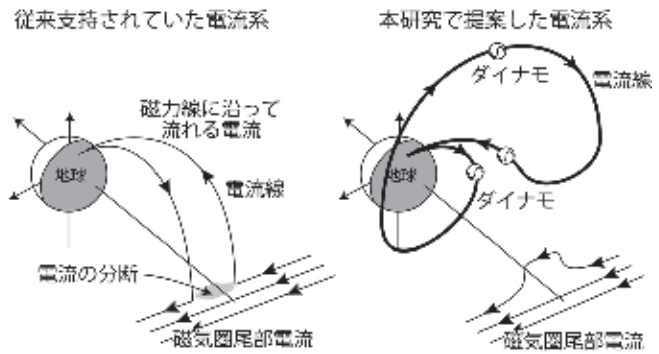


図 2：オーロラ爆発の原因となる電流系の模式図。
（左）従来から支持されている楔型電流系。（右）シミュレーションの結果に基づき提案した電流系。

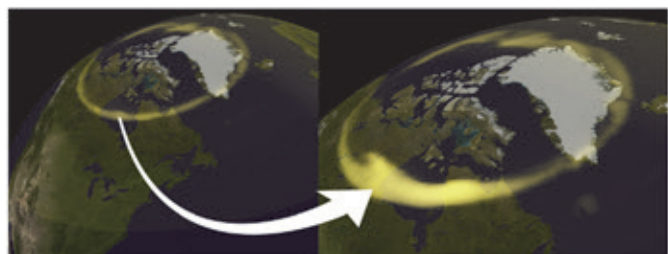


図 3：オーロラ爆発のシミュレーション結果。オーロラ・オーバルの一部が急に明るくなり、極方向と西方向に明るいオーロラが広がっていくというオーロラ爆発の特徴が再現できている。

バルと呼び、シミュレーションでも再現することができる。やがて真夜中付近のオーロラ・オーバルの一部が急に明るくなり、明るいオーロラが極方向そして西方向に広がるというオーロラ爆発の特徴もよく再現されている(図3右)。シミュレーションの結果を詳しく解析することで分かったオーロラ爆発を含むオーロラ・サブストームの基本的なメカニズムを以下に紹介する。

2.1 静穏期

太陽に起源を持つ磁場を惑星間空間磁場と呼ぶ。惑星間空間磁場の南北成分が殆どゼロか北を向いているときは目立ったオーロラ活動や地磁気活動は見られない。よって磁気圏は静穏だと考えられている。ところが磁気圏と電離圏が電磁氣的に結合しているため、レイリー・テイラー型の流体的な不安定性によって磁気圏プラズマの構造がゆっくりと微細化してゆくことがシミュレーションでわかった。水にインクを垂らすとインクがキノコ状に落下していくように、比重の異なる液体に重力が働くときにその特徴を見ることができる。宇宙空間のプラズマには重力の代わりに電磁的な力が作用することで、レイリー・テイラー型の不安定性が成長すると考えられる。このようにして微細化したプラズマ圧力構造は細かい上向き電流を作り、地上では南北方向あるいは太陽方向に伸びた細長いオーロラ・アークとなって現れると考えている⁷⁾。静穏時の磁気圏では基本的に何も起こらないと考えがちであるが、磁気圏ではプラズマ圧力の微細化が「静かに」進行しているようである。

2.2 成長相

成長相のオーロラは、高緯度からオーロラ・オーバルに向かってゆっくり移動する南北アークあるいは東西アークが特徴である。成長相のきっかけは惑星間空間磁場が南を向くことにある。南向きの惑星間空間磁場と北向きの地球磁場が磁気圏前面で互いに向き合うことで磁力線が繋ぎ換わり、大規模なプラズマの対流が促進されるからである。静穏期に微細化したプラズマ圧力構造は活性化した対流によってゆっくりと赤道面方向に運ばれてゆく。地上では低緯度に向かって移動する南北アークや東西アークとなって現れると考えている⁷⁾。シミュレーションで再現したオーロラの形や動きは実際に成長相で観測されるオーロラとよく似ている。こうした高緯度域でおこるプラズマ圧力構造の運動とは独立に、磁気圏尾部ではプラズマの圧力が高まってゆく。すると地球の磁力線が夜側に向かって大きく引き延ばされ、ついには地球の南半球から出た磁力線と北半球に向かう磁力線が再結合するようになる(図4①)。

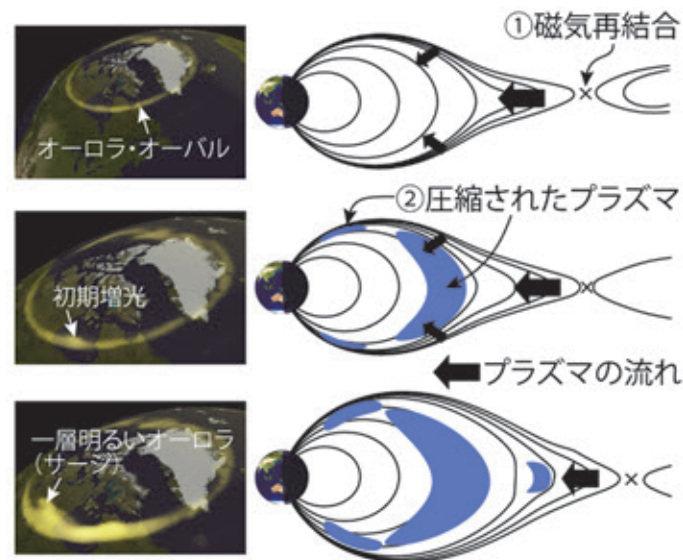


図4：(左) シミュレーションで再現したオーロラと(右) 磁気圏構造の模式図(線は磁力線を示す)。

2.3 初期増光

オーロラ・オーバルの一部が急に明るく光り出すことを初期増光と呼ぶ。ここでは初期増光をオーロラ爆発の始まりとみなす。初期増光のきっかけは、夜側磁気圏尾部での磁場の再結合にある。

夜側の磁気圏尾部で磁気再結合が起こると、磁力線には自ら縮もうとする性質があるために磁力線は元の双極子型に戻ろうとする。磁気圏の構造が3次元的に変わり、ローブと呼ばれる高緯度域から内部磁気圏に向かってプラズマが一気に流れ込む。内部磁気圏のプラズマも強く圧縮される(図4②)。プラズマ圧力の高い領域ではプラズマの流れが変わり、上向きの電流と下向きの電流が作られる。これらの電流が電離圏に接続した瞬間、初期増光が始まると考えている⁸⁾。シミュレーションでは電流の3次元分布も得られるので、電流線を辿ることができる。初期増光につながる電流線を辿ってみると、磁気赤道面を経由せずに高緯度にあるダイナモ領域に接続しているようである(図2右)。シミュレーションで得られた電流系は従来支持されていた楔型電流系(図2左)と大きく異なるが、それは以下の理由による。楔型電流系は電離圏と磁気赤道面の間を磁力線に沿って電流線が繋がっていると仮定している。ところが、直前に起こった磁場の再結合によって内部磁気圏ではプラズマの圧力が既に高い。高いプラズマ圧力は磁力線に垂直方向に流れる電流が強いことを意味している。すなわち、磁力線に垂直方向に流れる電流が強いため、電流線は磁力線に沿って流ることができない。その結果、電流線は磁力線から離れてゆく。観測的にもこの段階では内部磁気圏のプラズマ圧力が高まっていることが知られており、電離圏と磁気赤道面の間を磁力線に沿って電流線が繋がるような楔型電流系が存在するのは難しいようである。楔型電流系はサブストーム時における内部磁気圏の磁場変化を説明するためにも用いられているが、図2右の電流系でも合理的に説明できることを確認している。

2.4 拡大相

拡大相のオーロラの最大の特徴は、明るいオーロラが極方向・西向きに拡大してゆくことにある。拡大するオーロラの先端部分は特に明るく、オーロラ・サージと呼ばれている。シミュレーションによると、このとき内部磁気圏ではプラズマ圧力は一層高まり、高圧領域は真夜中から夕側と朝側に向かって広がっている。電離圏を出入りする上向きの電流と下向きの電流は一層強まり、明るいオーロラ中をジェット電流が流れるようになる。ジェット電流が流れるのは、宇宙空間から供給される電流が増え、且つ宇宙空間から降り込む電子が超高層大気を電離して電気が通りやすくなっているため(電気抵抗が下がっているため)である。電流の流れやすさがオーロラの明るさによって異なるということは、明るいオーロラの周囲では電気の過不足が生じることを意味する。シミュレーションによると、明るいオーロラの極側あるいは西側では電気が余り上向きの電流が強まる。すなわち、明るいオーロラが更に極側あるいは西側で光るようになる。一方、その反対側では電気が不足し下向きの電流が強まる(上向きの電流が弱まる)。すなわち、明るいオーロラの東側あるいは赤道側ではオーロラが弱まる。これを繰り返すことで極方向・西向きに動く明るいオーロラ・サージになると考えている⁹⁾。つまり、ひとたびオーロラが明るく光り始めると明るいオーロラが自発的に現れ、サージとして移動してゆくのである。逆説的に言えば、すでに電気抵抗がほぼ一様に下がっていて、オーロラによって電流の流れやすさに違いが現れない場合にはサージは発達しにくいと考えられる。白夜が続く夏の極域電離圏や磁気嵐の時のように継続して粒子が降り込んでいるときがこれに該当すると思われる。実際、磁気嵐のときにはオーロラ・サージが現れにくいという報告があり¹⁰⁾、本結果と調和的である。

3. おわりに

振り返れば、地上観測から上空の構造を予測することから磁気圏研究が始まった。磁気圏を直接観測すればその予測が確かめられると思われていたように思われる。しかし実際に直接観測を行うと、部分から全体を予測するのもまた困難であることが認識されるようになった。本研究で示したように、解像度の高いグローバル・シミュレーションを行うと現実に近いサブストームが再現されるという結

論は、世界に流通している磁気圏物理学と逆のようである。磁気圏物理学は原理の科学ではなく、複合系の科学である。原理が複合化されて、観測される自然現象が発生する。磁気圏物理学において複合化を生み出すのは磁気圏のトポロジーである。このことは全ての地球科学で共通と言えるが、気象、海洋、地球内部などの分野では、複合化による原理からの飛躍はそれほどドラスティックでないかもしれない。磁気圏物理学を含む宇宙プラズマ科学では、より激しい複合性が示されるのが特徴のようである。この典型がサブストームといえる。

複合系の科学に立脚し、全体構造の変遷を俯瞰することで、静穏時から成長相そして拡大相に至るオーロラ・サブストームの変遷を初めて合理的に説明することができたと考えている。電磁流体力学という単一の枠組みでオーロラ爆発を含むオーロラ・サブストームの特徴を良く再現できるということは、オーロラ・サブストームの本質は巨視的な磁気圏構造の変更過程（状態遷移）であり¹¹⁾、オーロラ爆発はその必然であろうと考えられる。微視的な不安定性や正体が良くわからないプラズマの泡を持ち込まなくても、磁気圏構造の変更過程でオーロラ爆発が必然的に現れる。必要以上に多くを仮定すべきでないというオッカムの剃刀と呼ばれる指針があるが、現実的なシミュレーションを行うことで何が説明に必要十分であるかが明確になったかもしれない。複雑で理解することが難しい現象に対して数値シミュレーションが極めて有効な手段であり、部分だけではなく全体を俯瞰することが重要であることを示す一例となろう。

参考文献

- 1) Akasofu S.-I., The development of the auroral substorm, *Planet Space Sci*, **12**, 273-282, 1964.
- 2) Kamide Y, Akasofu S.-I., The auroral electrojet and global auroral features, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3585-3602, 1975.
- 3) McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P., Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms, *J. Geophys. Res.*, **78**, 3131-3149, 1973.
- 4) Lui A.T.Y., A synthesis of magnetospheric substorm models, *J. Geophys. Res.*, **96**, 1849-1856, 1991.
- 5) Chen C.X., Wolf R.A., Interpretation of High-Speed Flows in the Plasma Sheet, *J. Geophys. Res.*, **98**, 21409-21419, 1993.
- 6) Tanaka T., Substorm Auroral Dynamics Reproduced by Advanced Global Magnetosphere-Ionosphere (M-I) Coupling Simulation, In *Auroral Dynamics and Space Weather*. Hoboken, N.J., John Wiley & Sons, Inc, 2015, pp. 177-190.
- 7) Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding auroral breakup, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **121**, 1201-1218, 2016.
- 8) Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**, 7270-7288, 2015.
- 9) Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Formation of westward traveling surge, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**, 10466-10484, 2015.
- 10) Hoffman R.A., Gjerloev J.W., Frank L.A., Sigwarth J.W., Are there optical differences between storm-time substorms and isolated substorms? *Ann. Geophys.*, **28**, 1183-1198, 2010.
- 11) Tanaka T., The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **105**, 21081-21096, 2010.

多様な地上・衛星観測データを用いた太陽活動に伴う宇宙圏、 および大気圏環境の長期・短期変動に関する研究

新堀 淳樹^{1*}

A study of long-term and short-term variations in space and Earth's
atmosphere environments associated with solar activity using
different kinds of ground-based and satellite observation data

Atsuki Shinbori^{1*}

概要

地球を取り巻く大気圏(対流圏・成層圏・中間圏・熱圏)、およびその周辺の宇宙圏(電離圏・プラズマ圏・磁気圏・惑星間空間)の基本構造と環境は、太陽から放射されるエネルギー(太陽放射、太陽風)を入力とした平衡状態によって規定される。しかしながら、太陽放射エネルギーは常に一定ではなく、太陽活動に応じて変動するため、大気圏・宇宙圏で観測される長期的な環境変動が太陽活動によるものか、人為起源によるものかを見極めるには、長期にわたる様々な地上・衛星観測データを統合解析することによって、太陽活動に対するこれらの領域の応答過程を解明し、定量的に一つのシステムとして捉える必要がある。このような研究を促進させるためには、様々な地上・衛星観測データを一元的に取り扱うデータ解析システムが必要不可欠となるが、2009年5月から開始された大学間連携プロジェクト「Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET」において、様々な地上観測データを相互参照し、可視化・相関解析を行う研究インフラを開発してきた。現在では、多くの地上観測データが公開され、このデータ解析システムを駆使して大気圏・宇宙圏の短期・長期変動に関する研究を行える環境にある。本解説では、IUGONET プロジェクトの概要について述べ、これまで行ってきた大気圏・宇宙圏の太陽活動に対する応答とそのメカニズムに関する研究を紹介する。

1. はじめに

我々の生存環境である大気圏は、特徴的な温度構造を持ち、その温度の高度分布に従って地表面から順に対流圏(~10 km)、成層圏(10~50 km)、中間圏(50~90 km)、及び熱圏(90~1000 km)と名付けられている。成層圏と中間圏を合わせた領域はまた、中層大気(10~100 km)と呼ばれる。一方、太陽紫外線などによって中間圏・熱圏の一部の大気が電子とイオンに電離し、電離圏を形成している。電離圏もまた、電子密度の高度分布に従って下から順に D 領域(70~90 km)、E 領域(90~130 km)、F1 領域(130~250 km)、および F2 領域(250~1000 km)として区分される。とりわけ、高度 100km 以上の大気圏は超高層大気と呼ばれている。高度 1000 km 以上の領域になると、中性大気はほぼ完全に電子とイオンに分か

2016年8月18日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。

* E-mail: shinbori@rish.kyoto-u.ac.jp

れ、無衝突プラズマの状態にある。これらの荷電粒子は、背景と個々の粒子が作り出す電場や磁場の影響を受けながら運動する。地球磁場が支配する磁気圏、電離圏起源のプラズマで満たされている地球近傍のプラズマ圏、高エネルギー粒子からなる放射線帯、および惑星間空間におけるエネルギーのやりとりは、直接粒子間の衝突ではなく、電磁場と荷電粒子の相互作用を介して行われる。これが宇宙圏の特徴であり、大気圏と大きく異なる点である。

図1に太陽地球結合システムの概念図を示す。この図が示すように、太陽は絶えず周辺の惑星間空間へ2つのカテゴリーに属するエネルギーを放射している。第一のカテゴリーは電磁波の性質を持つ電磁放射であり、第二のカテゴリーは物質の性質をもつ太陽光および太陽高エネルギー粒子である。太陽放射は、電磁波であるため、地球磁場の影響を受けずに地球磁気圏・大気圏に直接侵入することができる。大気圏、地球表面が受け取る太陽放射エネルギーは、赤道域で最大となる。図2に示

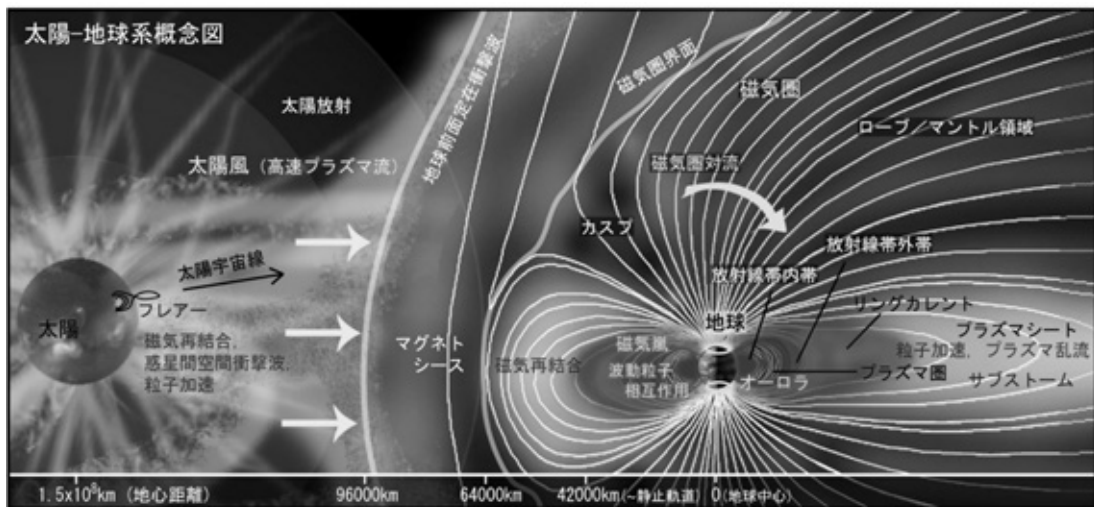


図1: 太陽地球結合システムの概念図¹⁾。

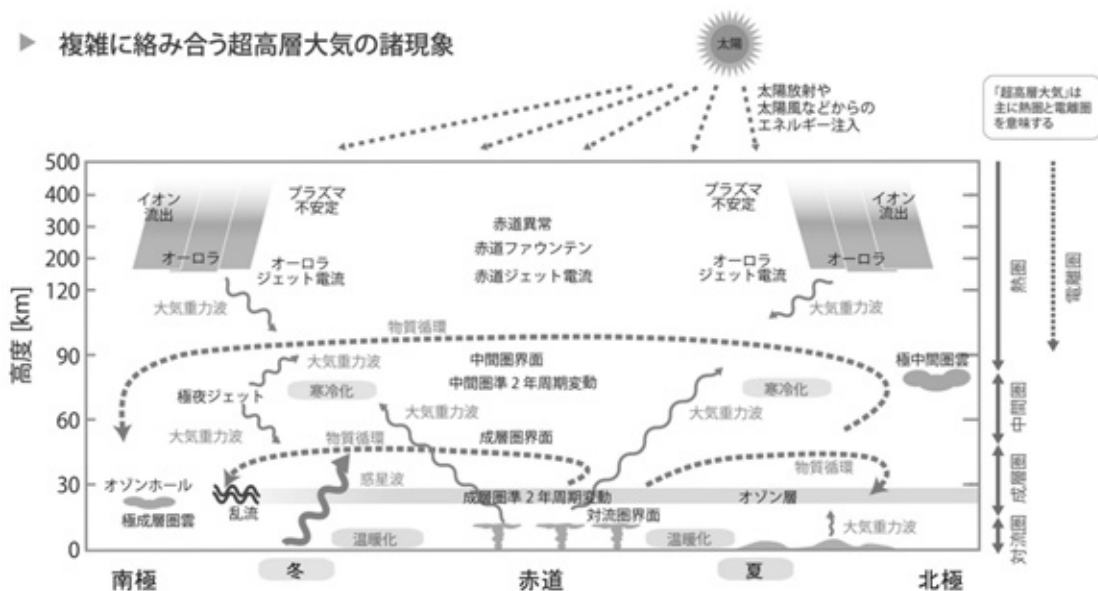


図2: 高度 500 km までの地球大気中で観測される諸現象と各大気層の位置関係²⁾。横軸は緯度、縦軸は高度を示す。右軸に対流圏、成層圏、中間圏、熱圏、および電離圏の大まかな高度範囲を表す。

すように赤道域における対流圏では、強烈な太陽放射エネルギーによって地表面、および地表付近の大気が加熱され、活発な対流現象が引き起こされる。活発な対流現象に伴う大気擾乱を種として大気波動が励起され、大気波動が上方の大気層へ伝搬し、運動量とエネルギーを輸送する。また、高度 70 km の大気層では、短波長の太陽放射が吸収され、熱圏の加熱源と中性大気の電離源となっている。熱圏では 1000 度以上の高温となり、熱圏領域と重なるようにして電離圏が形成されている。一方、荷電粒子からなる太陽風、太陽高エネルギー粒子は地球磁場の影響を受け、磁気圏や大気圏に直接侵入することができない。太陽風-磁気圏相互作用を通じて発生した電磁エネルギーが磁気圏内を伝搬し、磁気圏内におけるプラズマ対流、環電流の発生、および放射線帯粒子の生成を引き起こす。

このように大気圏・宇宙圏における基本構造と基礎状態は、太陽放射エネルギーを入力としたエネルギー収支バランスの上で成り立っている。太陽は、一定エネルギーを絶えず放射しているわけではない。太陽活動によって太陽風、およびX線から紫外領域における太陽放射が大きく変動することに伴い、大気圏・宇宙圏におけるプラズマ、大気環境は太陽活動に呼応して変化する。プラズマ、大気環境が状態遷移する際に様々な擾乱現象が発生する。状態遷移による擾乱現象の発生過程や背景場の長期変動メカニズムを解明するためには、太陽活動による大気圏・宇宙圏の応答を捉え、太陽と地球を一つのシステムとして理解を深める必要がある。地球観測年(International Geophysical Year: IGY, 1957-58年)以降、整備されてきた広域観測網から取得された太陽・地球大気圏に関する多種多様の観測データ、衛星観測、および数値モデリングを組み合わせることで、グローバルなエネルギーの流れとエネルギー変換過程を明らかにすることが必須である。既に、2009年5月から開始された大学間連携プロジェクト「Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET」によって国内外の大学・研究機関が実施してきた太陽・地球大気の地上観測データに関するメタデータ交換システムの構築と観測データを可視化、解析するソフトウェアの開発が実施された。観測データを相互に有効活用し、分野横断的な地球大気環境変動に関する学際的な研究を実施できる研究基盤が整っている。

本解説では、筆者が主体的に取り組んできた IUGONET データ解析システムの概要と利用法、ならびに長期にわたる地上・衛星観測データを用いた太陽活動に伴う地球大気、宇宙圏の長期、短期変動とメカニズムに関する研究についてわかりやすく述べる。

2. IUGONET データ解析システムの概要と利用法

前章で述べたように、宇宙圏、および大気圏に入射する太陽放射エネルギーは、地球をとりまく空間の中を太陽エネルギーの形態を変えながら伝搬し、多様な物理現象の要因となる。地球大気圏・宇宙圏は異なる領域間でお互いにグローバルに強く結合しているため、地球大気圏・宇宙圏で観測される変動現象のメカニズムを定量的に理解するためには、各領域間における物質輸送や運動量輸送などの相互作用の実体を調査する必要がある。全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データ（電離・中性大気、大気組成、オーロラ、地磁気、太陽風、太陽紫外線等）を組み合わせた分野間にまたがる総合解析を行うことが必要不可欠となる。本章ではまず、IUGONET 発足以前の観測データベースの在り方と問題点を述べた上で、IUGONET プロジェクトの概要とデータ解析システムについて解説する。

2.1 観測データベースの問題点と IUGONET プロジェクトのねらい

IUGONET 発足以前の太陽・超高層大気観測データベースは、観測を実施した各大学・研究機関の責任者の判断で独自に管理され分散していただけでなく、観測データベースのホームページに観測データの意味、利用法、注意点などの記述が不十分であった。そのため、研究者が専門分野外の観測データを検索、取得、解析し、科学的成果を得るのに多大な労力を必要としていた。観測データの多くは特定の機関や分野での利用が中心となり、一部は利用可能なデータベースとして整理されず、未公

開のまま有効に活用されてこなかった。上述の理由によって、多様な観測データを用いた学際的研究を実施するのが困難となり、研究遂行上の障壁となっていた。観測データベースのあり方に関する問題を解決するために、2009年5月から開始された IUGONET プロジェクトは、図3に示すように観測データからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを開発し、各機関が国際地球観測年（1957-1958年）以来蓄積してきた種々の地上観測データを相互参照する研究環境の構築を

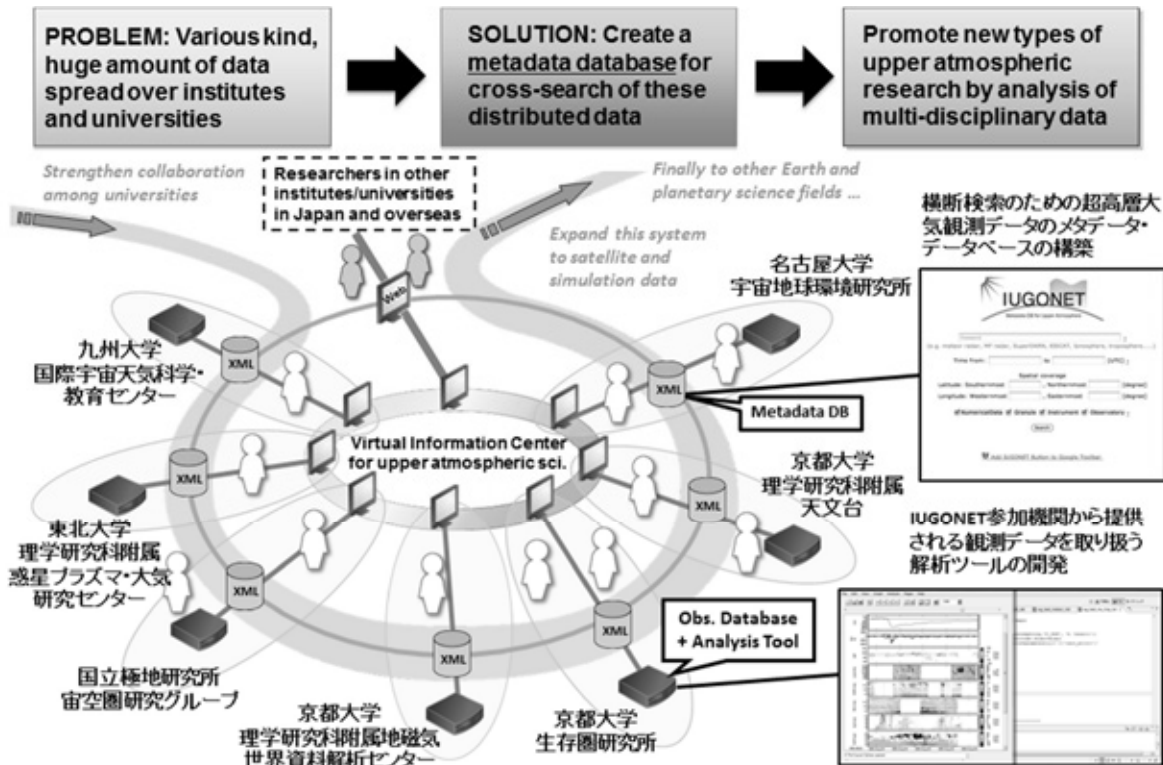


図3：IUGONETプロジェクトの概念図⁴⁾。IUGONETでは、横断検索のための超高層大気観測データのメタデータ・データベースを構築し、それをインターネット上に共有することで各観測データの相互参照を可能にしている。

図る。異種の地上観測データを一つのプラットフォームで可視化、統計解析を行う解析ソフトウェアを開発し、観測データの総合解析を促進させる。全球規模で起こる地球大気圏・宇宙圏の諸現象の解明に貢献する研究基盤の構築とともに、分野横断的な研究促進を目指す^{3,4)}。

2.2 横断検索のためのメタデータ・データベース

前述のように IUGONET では観測データからメタデータを抽出してデータベース化し、インターネット上で共有するシステム（=IUGONET メタデータ・データベース）を構築している。IUGONET メタデータは観測データそのもの（実データ）ではなく、実データに付帯した情報を記述した、いわばデータのカatalogに相当する。つまり、太陽・地球大気分野の観測データに対するメタデータに含まれる項目としては、観測データの概要、謝辞、観測日時、観測領域、観測地点、データの保存形式、観測データの所在、装置の種類、問い合わせ先などが挙げられる。各機関が所有する個々の観測データからメタデータを抽出し、データベース化するためには、共通のフォーマットを策定する必要があ

る。IUGONET では、欧米の太陽地球系物理学の研究者らによる国際コンソーシアムである SPASE (Space Physics Archive Search and Extract)⁵⁾によって作成されたデータモデルを基本メタデータフォーマットとして採用した。SPASE モデルは衛星観測データ用に記述されていたため、IUGONET では独自に太陽や地球大気に関係する地上観測データの特徴に沿うように修正を加えて、共通メタデータフォーマットを策定した。修正事項として、地上観測器が見ている観測領域(緯度、経度、高度、座標など)を記述できるように、SPASE モデルの基礎部分に改良を加えた⁶⁾。既存の有力なフォーマットを基礎とすることによって、将来的に世界中の様々な太陽地球科学分野におけるコミュニティ間で、メタデータ交換や共有が進められることが期待される。IUGONET 共通メタデータフォーマットは1つのデータセットを記述するメタデータの他に、観測装置、観測サイト、人的リソース、実データのデータベースなどの情報のカテゴリー毎に独立している。カテゴリーに分けられたメタデータは個別の XML ファイルとして記述され、相互参照できる構造を持っている。個々のデータファイルに付随したメタデータ (Granule) も定義されており、データファイル毎のメタデータをアーカイブすることで、データファイル単位の検索も可能となっている。したがって、Granule に記述されているデータファイル単位の URL を通じて、直接、データを web 上で取得することができる。



図 4: IUGONET メタデータのカテゴリー²⁾

2.3 IUGONET メタデータ・データベースの活用方法

IUGONET メタデータを介して各大学・研究機関が所有している観測データにたどり着くためにはまず、IUGONET メタデータ検索ページ(<http://search.iugonet.org>)にアクセスする。アクセスに成功すれば、図 5 のような検索ページがブラウザーの画面に現れる。メタデータ検索ページへのアクセスにあたっては、ユーザー登録が不要で誰でも自由にアクセスすることができる。検索したいメタデータに合わせて、キーワード、日時、地球や太陽面上の緯度・経度、データタイプなどの条件を入力し、検索(Search)ボタンをクリックする。入力した条件を満たすメタデータのリストが現れるので、該当する



図 5: IUGONET メタデータ検索ページのトップ画面²⁾。検索に必要な入力事項や活用方法などの説明が吹き出しの中に記述されている。

メタデータに記載された実データの所在地（URL など）から観測データに容易にアクセスすることができる。IUGONET メタデータ検索システムを利用する利点として、IUGONET 参加機関と協力機関が所有する観測データに関するメタデータを1回の問い合わせで横断的に検索できる点である。

キーワードの指定では、表1に示すように AND/OR 検索、固定文字列検索や特定ワードの除外などを条件に加えてメタデータの検索を絞り込むことができる。登録 ID でのメタデータの検索も可能で、一意検索、階層検索、ならびに両者を組み合わせたメタデータ検索にも対応している。一方、IUGONET メタデータ検索ページの左の欄には、検索ページの簡単な使い方を動画で紹介するページのリンクや IUGONET 各機関のメタデータ登録の進捗状況が機関ごとに一覧表へのリンクがある。メタデータ登録の進捗状況に関する一覧表からも該当する観測データのメタデータにたどり着くことができるようになっている。

表1: 検索ワードの指定例²⁾

検索方式	フォームへの入力例	説明
AND検索	magnetogram kyoto または magnetogram AND kyoto	単語の間に半角スペースを入れる または 単語の間に半角大文字で AND を入れる
OR検索	magnetogram OR kyoto	単語の間に半角大文字で OR を入れる
ANDとORの組み合わせ	EISCAT (NIPR OR STEL) または EISCAT AND (NIPR OR STEL) など	半角カッコを付けて入れ子にする
固定文字列検索	"magnetogram kyoto"	固定文字列を半角ダブルクォート(")で囲む
特定ワードの除外	STEL-EISCAT	除外する単語の前に半角マイナス(-)を付ける

検索方式	フォームへの入力例/説明
一意検索	ResourceID:space¥//IUGONET/Granule/STEL/Induction/ATH/induction/64hz_ergsc_cdf/stel_induction_ath_2010032623_cdf
(説明)	ResourceID: に続けてResourceIDの文字列を入力する。 ※このとき、space¥//の部分は¥マークを入れて space¥//のようにする。
階層検索	ResourceID:space¥//IUGONET/Granule/STEL/Induction/ATH/induction
(説明)	この階層下にあるメタデータをすべて表示する。
階層と検索ワードの組み合わせ	ERG ResourceID:space¥//IUGONET/NumericalData/STEL ERG magnetometer ResourceID:space¥//IUGONET/NumericalData/STEL など
(説明)	この階層下にあり、かつ、指定した単語を含むメタデータを検索する。

2.4 データ解析ソフトウェア - IUGONET data analysis software (UDAS)

IUGONET プロジェクトでは 2.3 節で述べたメタデータ・データベースを通じて取得した様々な観測データを解析、可視化する解析ソフトウェア、IUGONET Data Analysis Software (UDAS)^{7,8)}を開発してきた。IUGONET データ解析ツールは太陽地球物理コミュニティにおいて幅広く使用されている Interactive Data Language (IDL)言語で書かれており、宇宙空間物理環境のためのデータ解析ソフトウェア (Space Physics Environment Data Analysis Software : SPEDAS)のプラグインソフトウェアである。UDAS は IUGONET 参加機関が提供する様々な地上観測データ(太陽、地磁気、大気光、風速、温度など)のロード関数、および高度なスペクトル解析ツールや統計検証パッケージから構成されている。UDAS を使用することにより、IUGONET 地上観測データの表示や解析を行うことが容易にできる。また、UDAS は ERG 衛星プロジェクト⁹⁾と共同で開発された解析ツールでもある。SPEDAS は、元々オーロラサブストーム現象を解明するために打ち上げられた THEMIS 衛星の観測データを一元的に取り扱う解析ツール(THEMIS Data Analysis Software: TDAS)の拡張版ツールである。TDAS にはコマンドライン(Command User Interface: CUI)だけでなく、初心者向けの Graphical User Interface (GUI)ツールも実装されているため、実際の解析では CUI、GUI とともに利用することができ、未経験者にとっても

直感的に操作しやすい仕様になっている。図 5 に示されている以下の手順に従って IUGONET のホームページ(<http://www.iugonet.org/software.html>)から UDAS をダウンロードし、UDAS を各個人の PC へ導入することができる。現在、SPEDAS VM バージョンが SPEDAS のホームページ(<http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtml>)から入手可能となっており、IDL VM (Virtual Machine)をインストールしなくても動作する仕様となっている。

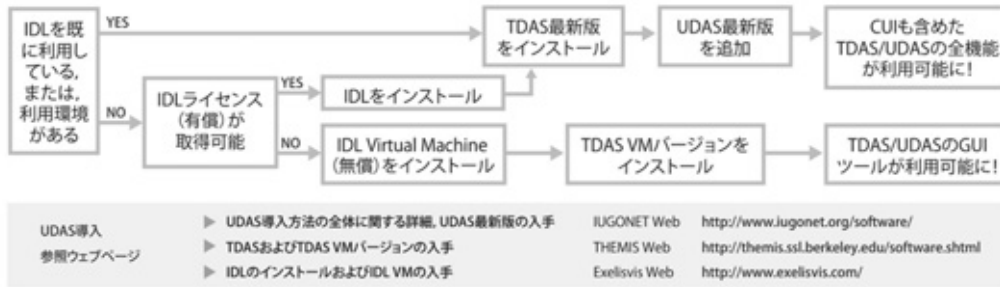


図 5. UDAS 導入までの流れ²⁾

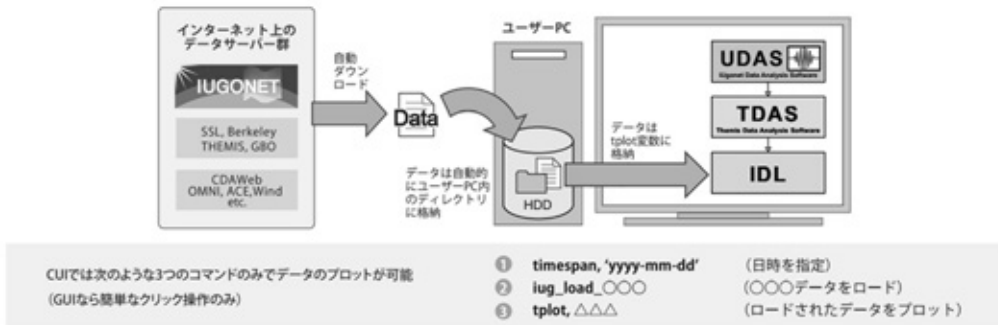


図 6: UDAS を用いた観測データのロードのイメージ²⁾

UDAS の最大の特徴はユーザーがデータの所在地やデータファイルのフォーマットを気にすることなくデータを自動的にダウンロード、表示や解析することができる点である。図 6 には UDAS を用いた観測データのロードのイメージ図を示している。図 6 が示すようにユーザーはたった 3 つのコマンドを打つことにより、データをダウンロードし、時系列プロットに表示することができる。SPEDAS でロードできる衛星データも含めた異種データの並列プロットを容易に作成でき、各データ間の相関を一目でみることができる。現在、IUGONET のホームページから公開されている UDAS s1.00.1 (SPEDAS v1.00 対応版) で提供している UDAS ロード関数は 29 種目である。表 2 に UDAS s1.00.1 で利用可能な UDAS ロード関数の一覧を示す。表 2 からわかるように太陽、超高層大気から一部の気象観測データまでを UDAS で取り扱うことができる。

UDAS には表 2 に示した 29 種のロード関数以外に SPEDAS では実装されていない IUGONET メタデータ・データベースとの連携ツールや様々なスペクトルと統計解析ツールが含まれている。表 3 には UDAS に実装されている統計解析のコマンド(IDL 関数)を示す。UDAS に含まれる統計解析ツールを利用することにより、異なるデータの相関解析から得られた結果の有意性を客観的に見ることができる。長期の観測データの中に見られる長期トレンドの有意性についても調べることができ、地球温暖化に代表されるような太陽地球環境の長期的な変動がデータの上で有意かどうかを判定できる。通常の短時間フーリエ変換では追うことができない非正常な変動現象(地震波、地磁気不規則変動など)に対しても、Stockwell 変換を施すことによって周波数と振幅の時間変化を詳細に調べることができる。

表 2. UDAS ロード関数の一覧²⁾

UDAS ロード関数	観測データ	提供機関
iug_load_smart	太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) データ	京大天文台
iug_load_iprt	太陽 VHF/UHF 電波スペクトルデータ	東北大
iug_load_hf_tohokuu	HF 帯太陽・木星電波広帯域スペクトルデータ	東北大
iug_load_aws_rish	自動気象観測装置データ	京大 RISH
iug_load_blr_rish	境界層レーダーデータ	京大 RISH
iug_load_ltr_rish	Lバンド下部対流圏レーダーデータ	京大 RISH
iug_load_ear	赤道大気レーダーデータ	京大 RISH
iug_load_mu	MU レーダーデータ	京大 RISH
iug_load_meteor_rish	流星レーダーデータ	京大 RISH
iug_load_mf_rish	MF レーダーデータ	京大 RISH
iug_load_wpr_rish	ウィンドプロファイラーレーダーデータ	京大 RISH
iug_load_ionosonde_rish	イオノゾンデデータ	京大 RISH
iug_load_radiosonde_rish	ラジオゾンデデータ	京大 RISH
iug_load_sdfit	SuperDARN レーダーデータ	名大 ISEE、極地研、その他 SuperDARN 関連機関
iug_load_eiscat	EISCAT レーダーデータ	名大 ISEE、極地研
iug_load_eiscat_vief	EISCAT レーダーデータ (イオン速度/電場ベクトル)	名大 ISEE、極地研
iug_load_irio_nipr	イメージングリオメータデータ	極地研
iug_load_lfrto	LF 帯標準電波観測データ	東北大
iug_load_avon_vlfb	アジア VLF 観測ネットワーク (AVON/VLF-B) データ	東北大
iug_load_camera_omti_asi	超高層大気イメージングシステム (OMTI) データ	名大 ISEE
iug_load_asi_nipr	全天イメージャデータ	極地研
iug_load_ask_nipr	全天イメージャケオグラムデータ	極地研
iug_load_gmag_wdc	AE, Dst, ASY/SYM 指数、観測所地磁気データ 1 時間値・1 分値	京大 WDC
iug_load_gmag_nipr	昭和基地・アイスランド磁力計、南極無人磁力計観測網データ	極地研
iug_load_gmag_mm210	210° 地磁気観測網データ	名大 ISEE、九大 ICSWSE
iug_load_gmag_magdas_1sec	MAGDAS 地磁気観測網データ	九大 ICSWSE
iug_load_gmag_stel_induction	STEL 誘導磁力計観測網データ	名大 ISEE
iug_load_gmag_nipr_induction	昭和基地、アイスランド誘導磁力計データ	極地研
iug_load_kyushugcm	九大 GCM シミュレーションデータ	極地研、九大

表 3. UDAS に実装されているスペクトル、統計解析ツール²⁾

IDL 関数名	入力データ数	用途
udata_interpolation	2	2 種類のデータの時間間隔と欠測値の有無を比較し、欠測値の部分と時間間隔を短いデータに合わせよう線形補間を行う。
ucross_cor	2	2 種類のデータの相互相関を求め、最大と最小の相関値とそれを与えるラグを求める。そして、求めた相関係数の有意性を t 検定によって判定する。
udifference_test	2	2 種類のデータを比較し、有意な差が認められるかを判定する。
utrend_test	1	1 種類のデータに対して有意なトレンドがあるかどうかを t 検定によって判定する。
uspec_coh	2	2 種類のデータのパワースペクトルを計算し、コヒーレンスと位相を算出する。
ustrans_pwrspc	1	1 種類のデータに対して Stockwell 変換を行い、周波数スペクトルを求める。
uchange_point_checker	1	1 種類のデータについてトレンドの変曲点、つまり上昇から下降に転じる時刻を求める。

IUGONET データ解析ソフトウェアは分野の異なる観測データを可視化するだけでなく、お互いの相関について詳しく調べる解析ツールである。IUGONET データ解析ツールを駆使することによって、各分野を専門とする研究者が分野横断的な研究を容易に実施することができると考えられる。図 6 で示した基本プロットコマンドを繰り返すだけで、異なる観測データの時系列プロットを縦に並べて描くことができる。図 7 に、UDAS を用いた太陽 F10.7 指数、MU レーダーで取得された長期にわたる

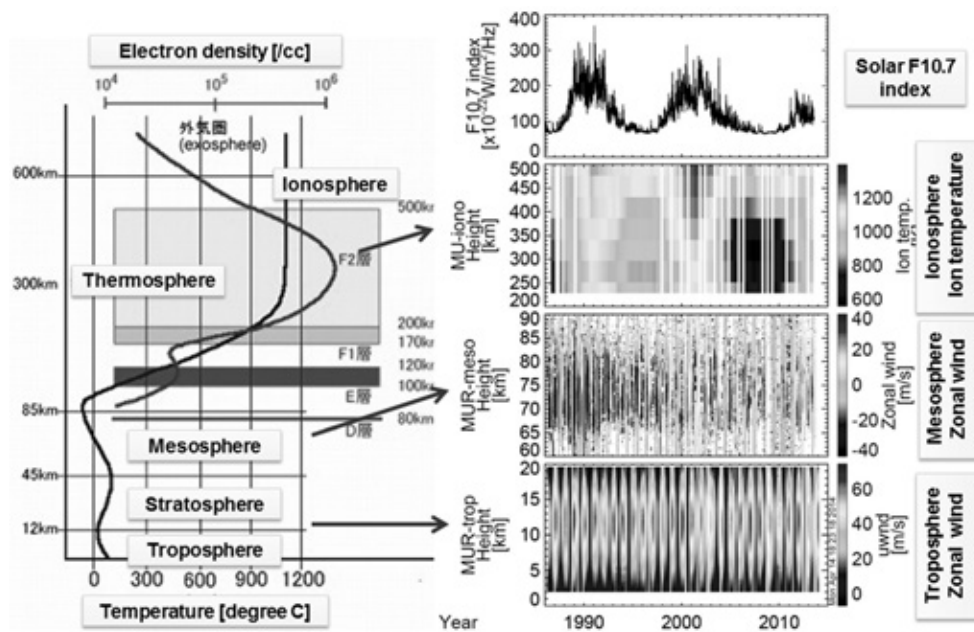


図 7: UDAS を用いた太陽 F10.7 指数、信楽 MU レーダーで取得された長期にわたる電離圏から対流圏までの観測データの並列プロット。

電離圏-対流圏データの並列プロット例を示す。横軸は年を表し、期間は 1986 年から 2015 年までである。各パネルのデータがどの大気層を示しているのかをわかりやすくするために、左のパネルに中性大気温度と電子密度高度プロファイルのポンチ絵を示している。図 7 の第 1 パネルに示される太陽 F10.7 フラックスは 1986 年から 2015 年までに 3 度、約 11-13 年の間隔をもって極大となっている。太陽 F10.7 フラックスの変動は 11 年の太陽活動周期を示すものであり、太陽活動が極大の時期に太陽 F10.7 フラックスが増加する。第 2 のパネルに示される電離圏イオン温度の高度分布は、太陽活動 11 年周期に同期して変動し、太陽活動が極大となる時期にイオン温度が上昇していることが分かる。太陽活動 23/24 周期の極小期(2007-2009)において高度 400 km 以下の電離圏イオン温度が極端に低下していることも見て取れる。中間圏、および下部成層圏・対流圏における東西風には顕著な季節変動が見受けられるが太陽活動に同期した変動は現れていない。図 7 から一目で太陽活動の影響がどの大気層まで及んでいるかを判定することができる。IUGONET データ解析システムを利用した研究例として筆者が行ってきた太陽地球環境の短期/長期変動に関する研究例を第 3、4 章で解説する。

2.5 まとめ

IUGONET 参加期間は長年にわたって多種多様の観測測器を両極域から赤道域までの広範な領域に設置し、太陽から気象観測データを取得し、データベース化を行ってきた。しかしながら、太陽地球観測データベースは各機関が独立に運営・管理していたため、太陽地球観測データベースが分散していた。太陽地球観測データを利用したい研究者はデータベースの場所、観測データの収集に多くの時間を要し、短時間で新しい研究成果を出すのが困難であった。このような問題点を解決するために 2009 年から開始された IUGONET プロジェクトは、個々の観測データからメタデータを抽出し、それをデータベース化し、インターネット上で共有できるようなシステムを構築してきた。IUGONET メタデータ・データベースを利用することによって、データ利用者は容易に各データベースにたどり着くことができ、メタデータから観測データに関する重要な情報(観測点の位置、観測測器、観測者、データフォーマット、観測期間と領域、データベースの場所など)を知ることができる。メタデータを介して収集した観測データを一元的に取り扱う IUGONET 解析ソフトウェア(UDAS)も開発してきた。UDAS を駆使することによって異分野の観測データを一つのプラットフォームで解析でき、時系列プロットを縦に並べて描くことができる。UDAS によって容易に異分野のデータ間の相関やスペクトル解析を行うことができる。IUGONET メタデータ・データベースと UDAS は既に公開されており、誰でも利用することができる。

現在では IUGONET メタデータ検索システムの弱点を補うために、新しい IUGONET データ解析システムの開発が行われている。現在公開されている IUGONET データ解析システムではメタデータ検索とデータの可視化が別々のツールに分かれていたが、新システムではメタデータ検索とデータ解析が一体化され、検索メタデータに関連したデータの Quick Look プロットを見ることができる。メタデータ作成に用いられるスキーマファイルにも改良を施し、デジタルオブジェクト識別子 (Digital Object Identifier : DOI) を組み込んだメタデータ作成が今後可能となる。

3. 地磁気日変化の振幅に見られる超高層大気の長期変動特性について

本章では地磁気変動が比較的静かな日に現れる地磁気日変化に着目し、地磁気日変化の振幅変動から推測される高度 80-150 km の熱圏・電離圏の長期変動特性(季節変動、太陽活動、長期トレンド)について触れる。

3.1 はじめに

人類の活動によって地球大気圏に放出された温室効果気体(二酸化炭素、メタン)は、対流圏などの下層大気においては温室効果として働くが、成層圏・中間圏・熱圏などの中層・超高層大気では冷却

源として作用する。中層・超高層大気における大気密度や温度などの長期トレンドは、地球温暖化によって減少傾向を示すことが予想される。地球温暖化の影響が下層大気に比べて中層・超高層大気において大きく現れるため、上層の大気圏における観測パラメタ(気温、風速)の長期解析から、地球温暖化の影響をはっきりと捉えられると期待される。

1990年以降、太陽地球大気環境に関する長期の観測データの解析研究やモデル・シミュレーション研究によって、超高層大気の長期変動の実態が明らかになりつつある¹⁰⁻¹⁵⁾。例えば、電離圏に目を向けると、電子密度構造を示すパラメタ(最大電子密度、それを与える高度)の長期トレンドは、以下の3つの要因が関係していると考えられている。

1. 地球温暖化ガスの増加^{16, 17)}
2. 地磁気活動の長期変化^{18, 19)}
3. 地球磁場の永年変化²⁰⁻²²⁾

本研究では、1と3の効果に着目して電離圏や熱圏の長期変動を表すプロキシの1つである地磁気静穏日変化の振幅についての長期変動特性について焦点を絞り、地磁気静穏日変化振幅の長期変動から推測される電離圏・熱圏における長期変動特性とメカニズムについて考察する。

地上で観測される地磁気変動の中には、太陽フレアなどの太陽表面現象に伴う突発的な擾乱現象である磁気嵐以外に、比較的太陽活動の静穏なときに観測される規則正しい変動がある。後者の地磁気変動は地磁気静穏日変化(Sq: Solar quiet daily variation)と呼ばれており、電離圏E、下部F1領域に相当する高度領域(85-125 km)を流れる電離圏電流の作る磁場擾乱である。Sq変動を引き起こす電離圏電流は中間圏・下部熱圏における中性大気風と電離圏プラズマとの相互作用によって駆動される。Sq電流は電離圏電気伝導度、電離圏電場および中性風による起電力の大きさや方向によって変化する。グローバルに分布する多数の地磁気観測点で観測されるSq場の磁場振幅を長期に解析することで、下部熱圏・中間圏、および電離圏環境(中性大気・プラズマ密度、風速場、温度分布)の太陽活動や人類活動によって引き起こされる地球温暖化による長期変動を調べることができる。静穏時における地磁気の変化には、太陽時と太陰時に依存する2つの成分があることが古くから知られている。ただし、太陰時に依存する成分は太陽時に依存する成分に比べて非常に小さいので、正確な変化分を検出するためには膨大な資料を用いた複雑な統計解析を必要とする。

図8に柿岡、Guam、及びHuncayoの3地磁気観測点で得られた地磁気活動が静穏な期間の地磁気水平成分の変化を示す。柿岡は中緯度域に、残りの2観測点は赤道域に属する。この図からわかるように、GuamとHuncayoのような赤道域に位置する観測点では、Sq場の水平南北方向の磁場変動は正の変動を示し、赤道域よりも高緯度側では負の変動を示す。Sq場に伴う地磁気変動と電磁気学における

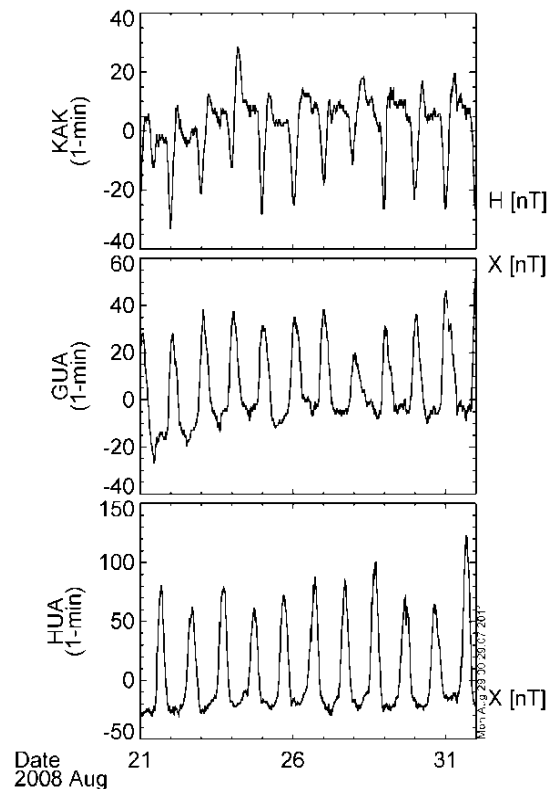


図8: 柿岡、Guam、及びHuncayoの3地磁気観測点で得られた地磁気水平成分の変化。プロットの期間は、磁氣的に静穏な2008年8月21-31日である。

基礎法則(アンペールの法則)を考慮すると、赤道域では東向きの電流が流れ、中緯度では西向きの電流が電離圏高度に流れていることが推測される。各日における Sq 場の振幅は常に同じではなく、日に応じて異なる。これは、各地磁気観測点の上空を流れる電離圏電流強度が日々変動をしていることを意味する。Sq 場に伴う地磁気変動を用いて作成された電流系は昼間側の中低緯度領域で支配的な反時計回りの電流系となっている。Sq 電流系の起源は電離圏高度における電離大気と中性大気との相互作用を介して発生するダイナモ電場である。ダイナモ電場によって電離圏 E 領域を構成しているイオンと電子が異なる方向に移動するので、電離圏 E 領域に電流が発生する。高緯度に目を向けると、磁気緯度 75 度付近に中心をもつ 2 セル型の電流系が形成されている。2 セル型の高緯度電流系は太陽風-磁気圏相互作用によって生じた電流や電場によって駆動されたものである。高緯度電流系による磁場変動はしばしば Sqp と呼ばれており、Sqp 変動を見ることによって過去の太陽風の状況を推定することができる。

さて、Sq を作る電離圏電流は、以下のオームの法則に従う。

$$\mathbf{J} = \Sigma \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B})$$

上式において、 Σ 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{U} 及び \mathbf{B} はそれぞれ、高度積分された伝導度テンソル、電場 \mathbf{E} 、中性風 \mathbf{U} と背景磁場 \mathbf{B} である。オームの式からわかるように、電離圏電流の大きさは電気伝導度 Σ 、電場 \mathbf{E} 、およびダイナモ電場に相当する中性風と背景磁場の掛け算に依存する。 Σ は電離圏の電子密度、中性大気と電離圏プラズマとの衝突周波数、および背景磁場強度に関する。電離圏・熱圏におけるプラズマ、大気環境の影響を受けて変動する Sq 場の磁場振幅における長期変動特性を調べることで、電離圏・熱圏下部・中間圏における超高層大気の長期的な変遷を明らかにすることができる。

これまでの Sq 場の振幅についての長期変動に関する研究は数多く行われており、約 30 年に及ぶ長い歴史を持っている。代表的な研究例として Schlapp らと Elias らによるものが挙げられる^{24, 25)}。Schlapp らは 1911 年から 1986 年までの約 75 年間に及ぶ、ヨーロッパ地域にある地磁気観測点 Niemegek (NGK) から得られた Sq 場の磁場振幅と太陽黒点数の月平均値の変動との相関解析を行った。Schlapp らの結果を図 10 に示す。図 10 において上の曲線が Sq 場の磁場振幅を、下の曲線が太陽黒点数を表す。図 10 で最も特徴的な変化は Sq 場の磁場振幅が太陽黒点数に非常によい相関をもって変動

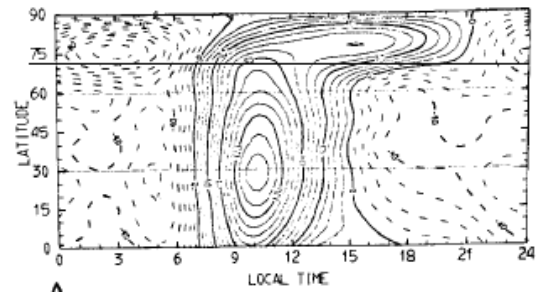


図 9: 地磁気日変化変動から導き出された電離圏高度でのグローバルな等価電流系²³⁾。

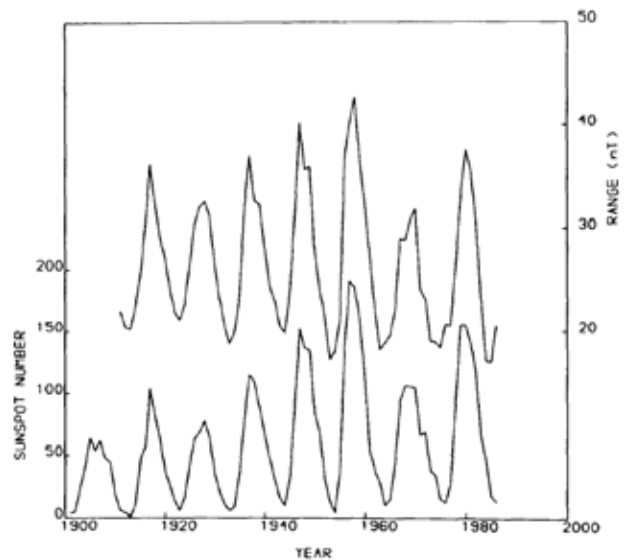


図 10: 1911-1986 年における国際地磁気静穏日について、ヨーロッパの地磁気観測点 NGK での Sq 場の磁場振幅と太陽黒点数の時系列プロット²⁴⁾。両者とも年平均データとなっている。また、左縦軸には、太陽黒点数、右縦軸には、測点 NGK での Sq 場の磁場振幅を nT で表している。

し、太陽活動極大期に Sq 場の磁場振幅が増大する傾向にある。太陽活動に同期した Sq 場の磁場変動は地球の超高層大気を電離させる太陽極端紫外線が太陽活動 11 年周期で変動するため、太陽活動に応じて電離圏の電子密度や電気伝導度が変化し、電離圏を流れる電流量が変化することを意味している。

太陽黒点数と Sq 場の磁場振幅の最大値のエンベロップの変化の仕方が似ていることから、太陽活動 11 年周期以外の太陽活動によっても Sq 場の磁場振幅が変化していくことが結論づけられる。特に、太陽活動が低調であった 1930 年代、1970 年代の Sq 場の磁場振幅の最大値が小さくなっている。

Schlapp らは 3 つの太陽活動周期に対して、太陽黒点数と Sq 場の磁場振幅の相関について解析を行った。図 11 から明らかなことは太陽黒点数に比例して地磁気日変化の振幅が増加することである。各太陽活動周期に対して、Sq 場の磁場振幅の傾きはほぼ一定であるが、1979 年に太陽黒点数が最大となる太陽活動周期では、y 切片が小さくなっていることが見て取れる。y 切片の値の変化は Sq 場の磁場振幅の長期変動に与える太陽活動以外の寄与、つまり、地磁気の永年変化成分や地球大気の長期変化が関与していることを示唆する。

一方、後者の Elias らは地磁気の永年変化成分や地球大気の長期変化が Sq 場の磁場振幅に与える影

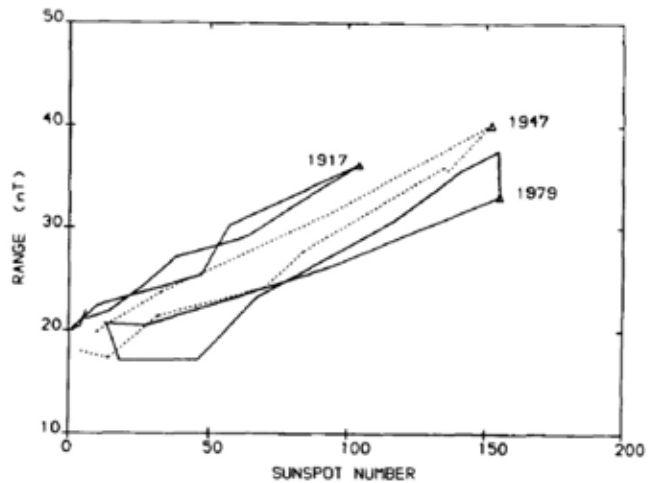


図 11: 3 つの太陽活動周期に対して、太陽黒点数と地磁気日変化の振幅の相関図²⁴⁾。各プロットの三角印は、各太陽活動周期の中で太陽黒点数の最大値を示す。

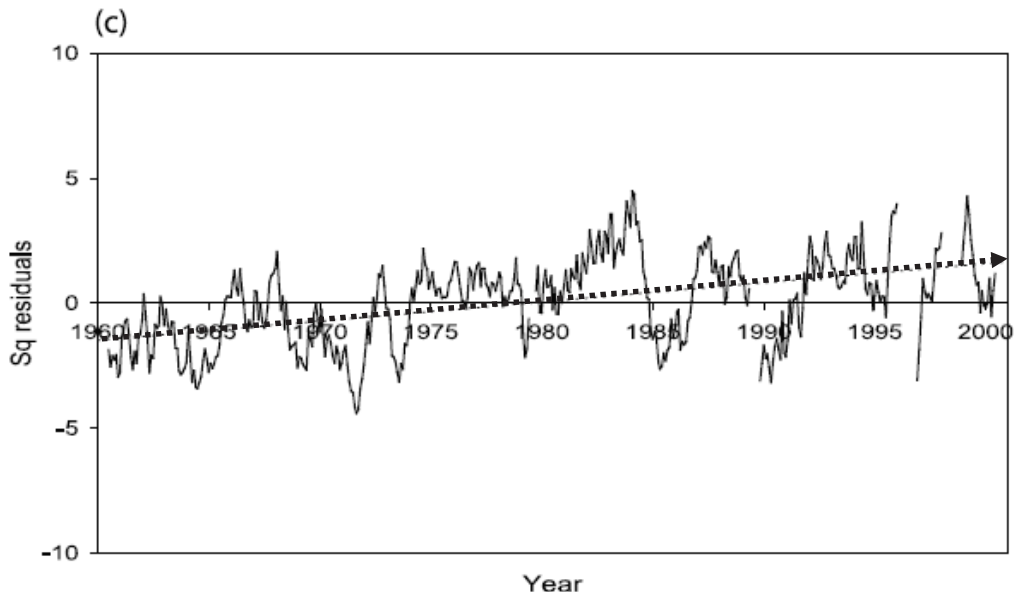


図 12: 1960–2001 年までの太陽活動成分を差し引いた南アフリカの地磁気観測点(ヘルマナス)における Sq 場の磁場振幅の長期トレンド²⁵⁾。

響について解析を行い、図 12 に示すように Sq 場の磁場振幅には右上がりの長期的なトレンドが存在することを示した²⁵⁾。Elias らは電気伝導度モデル値との比較を基に Sq 場の磁場振幅が示す右上がりの長期トレンドは、背景磁場の永年変化だけでなく、超高層大気の長期変動による電離圏電子密度増加による影響であると解釈した。超高層大気の長期変動の候補として地球温暖化ガス(CO₂)の増加による電離圏・熱圏・中間圏の寒冷化が引き起こす電離圏電子密度の増加が挙げられることをモデル計算から示唆している。しかしながら、Elias らの研究は、使用した地磁気観測点が 3 点のみであること、解析期間が 1960–2001 年までの 41 年間に限っていることから、長期的に見たときに果たして Sq 場の磁場振幅における増加トレンドが全球的に見られるのかという疑問が残る。また、Sq 場の磁場変動を駆動している下部熱圏・中間圏の中性大気風のデータを解析していないため、その下部熱圏・中間圏における風速変動の寄与がどの程度効いているか不明である。Elias らの解析では、中性風の寄与は電離圏電気伝導度に比べて相対的に小さいと仮定している。このような背景にあって、2009 年度から開始された IUGONET プロジェクトの保有する長期的な全球的な地磁気データ、および熱圏・中間圏における中性大気風データを用いて、全球的な Sq 場の磁場振幅の長期変動特性とメカニズムを明らかにすることを目的とする。本研究では、IUGONET で開発された観測データのメタデータ検索システムやデータ解析ソフト(UDAS)といった恵まれた解析環境を駆使することによって多種多様でかつ多量のデータ解析の効率化を図った。

3.2 観測データと解析方法

3.2.1 観測データ

本解析では京大地磁気センター(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>)から提供された 1 時間値の地磁気水平成分データを用いた。京大地磁気センターのサイトでは 274 の地磁気観測点で得られた地磁気観測データが利用可能となっている。Sq 場の地磁気変動を作り出す電離圏電流は、中・低緯度の中間圏・下部熱圏領域における太陽潮汐波による中性風によって駆動されるため、本研究では磁気緯度 60 度未満の領域に分布する地磁気観測点のデータを選んだ。太陽活動度指数(F10.7 フラックス)データが利用可能な期間(1947 年–現在)に該当するデータを選定すると、213 の地磁気観測点のデータが上記の条件に当てはまった。さらに、利用可能な観測データ期間が太陽活動 3 周期分以上であるという条件を付加した結果、69 の観測点が残った。以後の Sq 場の地磁気変動の統計解析(太陽活動との比較、長期トレンドなど)では 69 点の地磁気観測点で得られたデータを用いた。

地磁気静穏日を同定するため、GeoForschungsZentrum (GFZ, Potsdam, Germany) から提供された 3 時間値である地磁気 Kp 指数を用いた。Kp 指数は 1932 年 1 月から利用可能となっている。太陽活動の良い指標としてよく用いられる太陽 F10.7 電波フラックスの 1 ヶ月平均値を用いた。F10.7 データは Space Physics Interactive Data Resource (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>)から提供されたものである。太陽黒点数の代わりに太陽 F10.7 電波フラックスを用いた主な理由は、太陽活動極小期ではしばしば連続した無黒点日数が現れるため、太陽黒点数がゼロになってしまうためである。長期間にわたってゼロ値が継続すると、Sq 場の磁場振幅と太陽活動度の相関解析を正確に行えなくなってしまう。一方、太陽 F10.7 電波フラックスは超高層大気の電離と加熱を引き起こす太陽極端紫外線(EUV)放射との物理的関連性を持つ。

3.2.2 解析手法

これまでの Sq 場の長期変動に関する過去の研究では、各月の中で最も静穏な 5 日間の地磁気静穏日リストを用いている²⁵⁾が、地磁気静穏日リストを使用した場合、必ずしも静穏ではない日が含まれるという欠点を含む。本解析では、地磁気静穏日として各 1 日を通じて Kp 指数の最大値が 4 未満である日として定義し、Kp 指数の最大値が 4 未満という条件を満たす日の地磁気水平成分の最大と最小値の差を Sq 場の磁場振幅とした。太陽活動に依存しない Sq 場の長期的な変動成分を調べるため、太陽活動依存性を除去することが必要となる。Kp 指数の閾値から同定された地磁気静穏日における

太陽 F10.7 フラックスの 1 日平均値と Sq 場の磁場振幅との相関関係から 2 次回帰曲線を求めることができる。2 次回帰曲線からのずれ(残差)を時系列としてプロットし、2 次回帰曲線からの残差にどのようなトレンドがあるのかと調べた。

3.3 解析結果

3.3.1 Sq 場の磁場振幅の太陽活動依存性

太陽活動度の指標である太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅との間にどのような関係があるのかを調べるため、両者のデータの相関解析を行った。図 13 には 1945–2015 年までの 1 ヶ月平均値の太陽 F10.7 電波フラックスと各観測点における Sq 場の磁場振幅の長期変動の時系列プロットが示されている。図 13 の左のパネルは主に赤道域に位置している観測点のもので、右のパネルは低緯度の観測点のものとなっている。両方のパネルから見て取れるように、太陽 F10.7 電波フラックスが示す 11 年太陽活動周期をもって Sq 場の磁場振幅が変動していることが分かる。すなわち、太陽 F10.7 電波フラックスの値が増加するにつれて Sq 場の磁場振幅も増加している。Sq 場の磁場振幅の大きさは各太陽活動周期の活動度に比例している。例えば、1970 年を極大とする太陽活動 20 サイクルは他の活動サイクルに比べて低調で、太陽 F10.7 電波フラックスの最大値も 150–160 程度と低くなっている。各観測点で得られた Sq 場の磁場振幅においても同様の傾向がみられる。1913 年以來約 100 年ぶりの超極小期であった 2008–2009 年付近の Sq 場の磁場振幅が極端に小さくなっていることが注目される。一方、Sq 場の磁場振幅には太陽 F10.7 電波フラックスに見られない比較的短周期の変動が重畳している。短周期の変動は、主として半年と 1 年周期の 2 つの成分からなっている。短周期の変動は

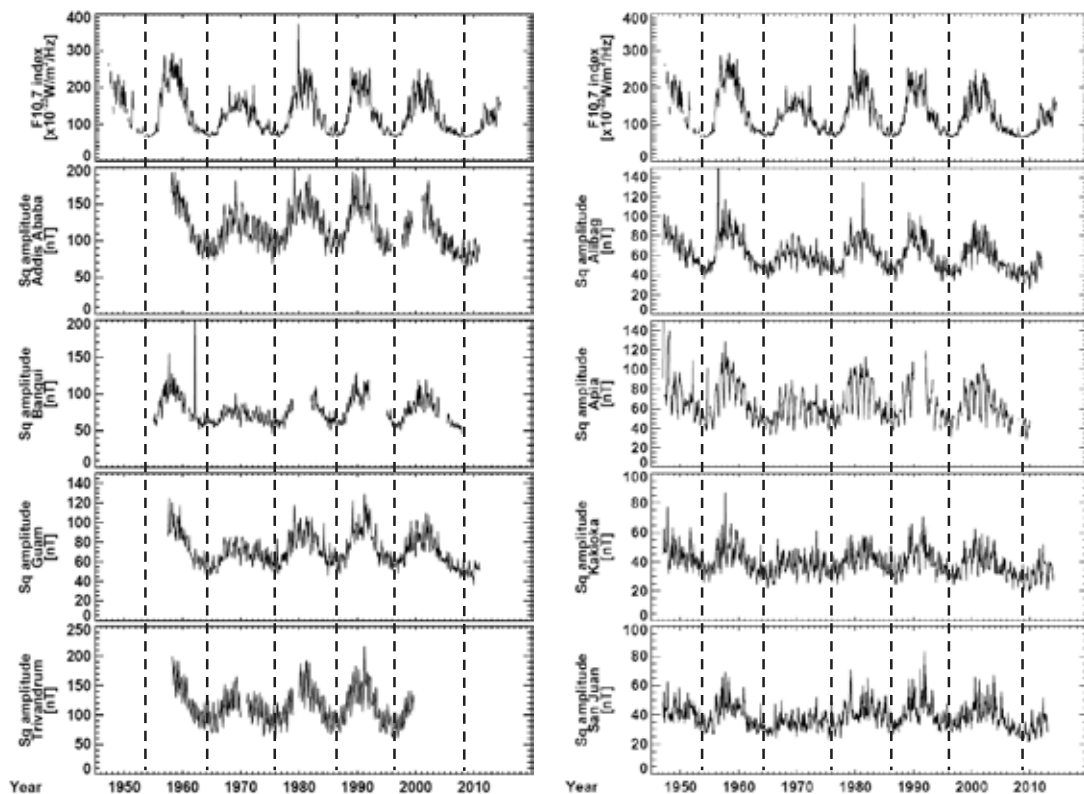


図 13: 左右のパネルは、1945–2015 年までの 1 ヶ月平均された太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅²⁶⁾。左のパネルは、赤道域に分布する 4 観測点における Sq 場の磁場振幅を表し、右のパネルは、中緯度に分布する 4 観測点のデータを示す。縦の点線は、太陽 F10.7 電波フラックスの値が極小となる時期、つまり、太陽活動極小点を示す。

地球の自転軸の傾きに起因した地球大気から見た太陽天長角の変動に伴う電離圏の電子密度や熱圏における太陽潮汐風などの季節変動に関係している。

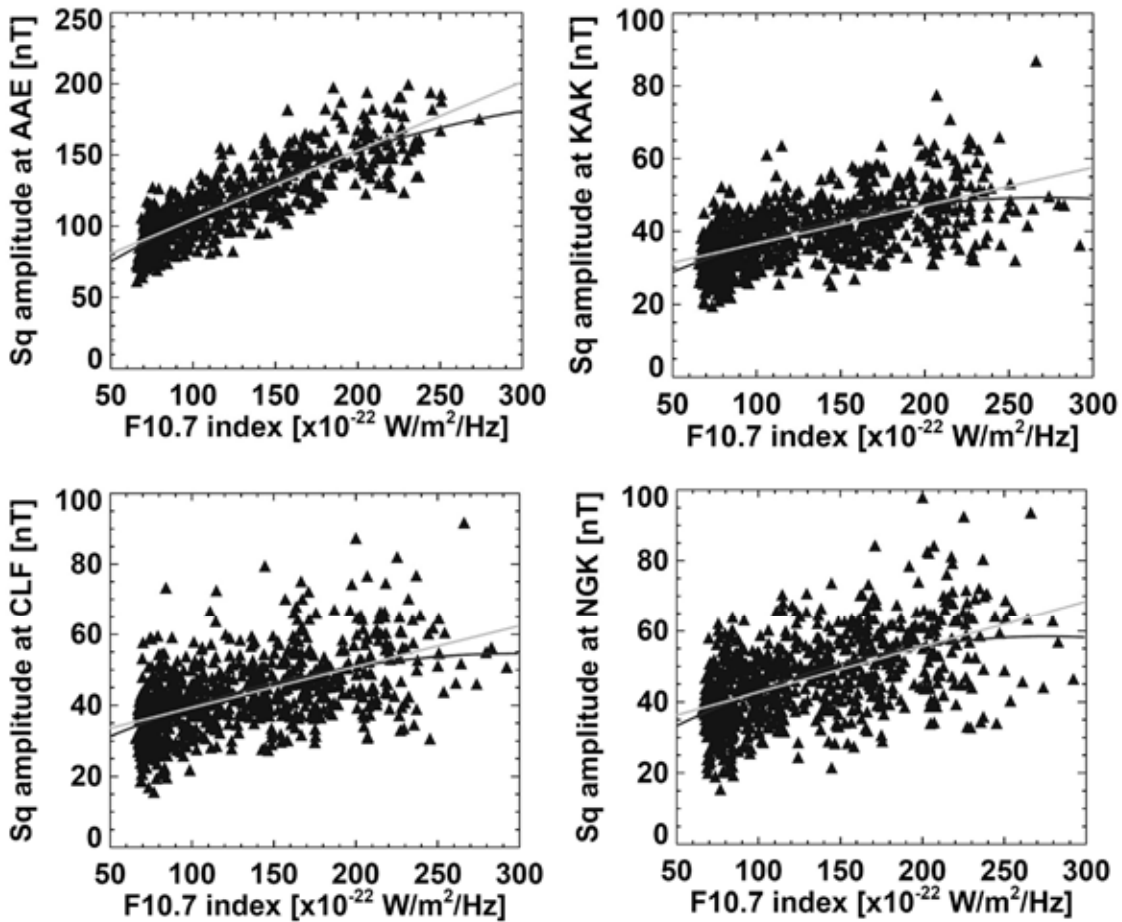


図 14: 1945–2015 年までの 1 ヶ月平均値の太陽 F10.7 電波フラックスと各観測点における Sq 場の磁場振幅との相関関係²⁶⁾。左上、右上、左下、右下図は、それぞれ AAE(赤道域)、KAK(低緯度)、CLF(中緯度)、及び NGK(中緯度)で観測された Sq 場の磁場振幅との関係を表す。また、各パネルに示されている 2 つの曲線は、相関解析から求めた 1 次と 2 次の回帰曲線である。

次に、太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅の相関関係を調べるため、図 14 の各 4 枚のパネルに示されるように、横軸に F10.7 指数、縦軸に各観測点で得られた Sq 場の磁場振幅とする散布図を作成した。図中には 1 次と 2 次の回帰曲線が描かれている。散布図を見てわかるように、全ての観測点での Sq 場の磁場振幅は太陽 F10.7 電波フラックスの増加とともに増加する。Sq 場の磁場振幅の増加率は太陽 F10.7 電波フラックスの増加とともに減少する。この傾向は磁気緯度が高くなるにつれて強くなっており、太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅との間の関係が線形でないことを示唆している。したがって、高い太陽 F10.7 電波フラックス領域では電離圏 E 領域の形成に必要な太陽紫外線 EUV フラックスとの間に線形関係にないことが推察される。一方、回帰曲線からの残差は太陽活動 11 年周期成分以外の変動要因を示しており、回帰曲線からの残差を解析することによって、図 13 で述べた季節変動やほかの要因(太陽風、地磁気永年変化、地球温暖化)について調べることができる。図 15 に、太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅の関係から求めた 2 次回帰曲線からの残差を時系列にプロットした結果を示す。ここで、曲線からの残差値を Residual Sq (Res-Sq)場と定義する。図 15 からわかるように、図 12 で顕著に見られていた約 11 年の太陽活動周期成分が消えている

ことがわかる。図 15 から読み取れる顕著な Res-Sq 場の磁場振幅は 1 年周期以下の短周期の変動である。短周期の振幅は各観測点によっても異なるが、おおよそ 15–25 nT の範囲である。Res-Sq の磁場振幅の短周期変動は図 13 で述べたように電離圏の電子密度や熱圏における太陽潮汐風などの季節変動に相当すると考えられる。Res-Sq 場の磁場振幅についての季節変化の周期が赤道域から中緯度に行くにしたがって長くなっている。図 15 に示す 6 つの観測点における Res-Sq 場の磁場振幅についての回帰直線に着目してみると、赤道域の Addis Ababa、中緯度の Chambon-La-Foret と Neimegk における Res-Sq 場の磁場振幅は、顕著な減少トレンドを示している。特に、中緯度の Chambon-La-Foret の傾きが最も大きくなっており、各観測点によって長期トレンドの大きさが異なっている。各観測点における Res-Sq 場の磁場振幅における長期トレンドの有無を統計的に調べるため、IUGONET データ解析ツールに実装されている傾向性検定^{27,28)}を行った。その結果、低緯度の San Juan を除いて 5 つの観測点

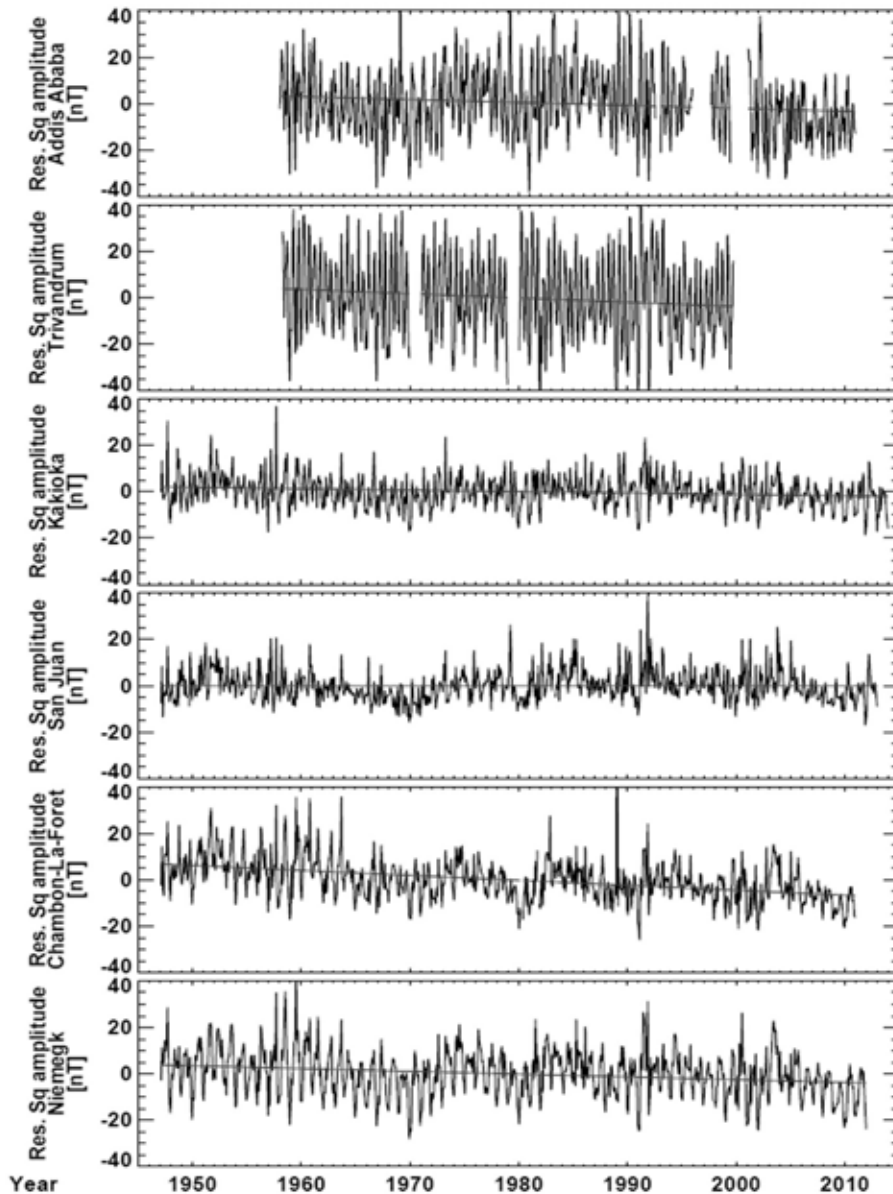


図 15: 1945–2015 年までの太陽活動成分を差し引いた 6 つの地磁気観測点における Residual Sq (Res-Sq)場の磁場振幅の時系列プロット²⁶⁾。各パネルの直線は、Res-Sq 場の線形回帰直線を示す。

で Res-Sq 場には統計的に有意な減少トレンドが存在することが分かった。統計的に有意である回帰直線の傾きは、観測点にも依るが、 -0.12 – -0.21 nT/yr の範囲であった。負の長期トレンドを見出した時点で先行研究²⁵⁾によって示された Res-Sq 場の磁場振幅には顕著な増加トレンドが存在することが全ての観測点で成立しないことが判明した。

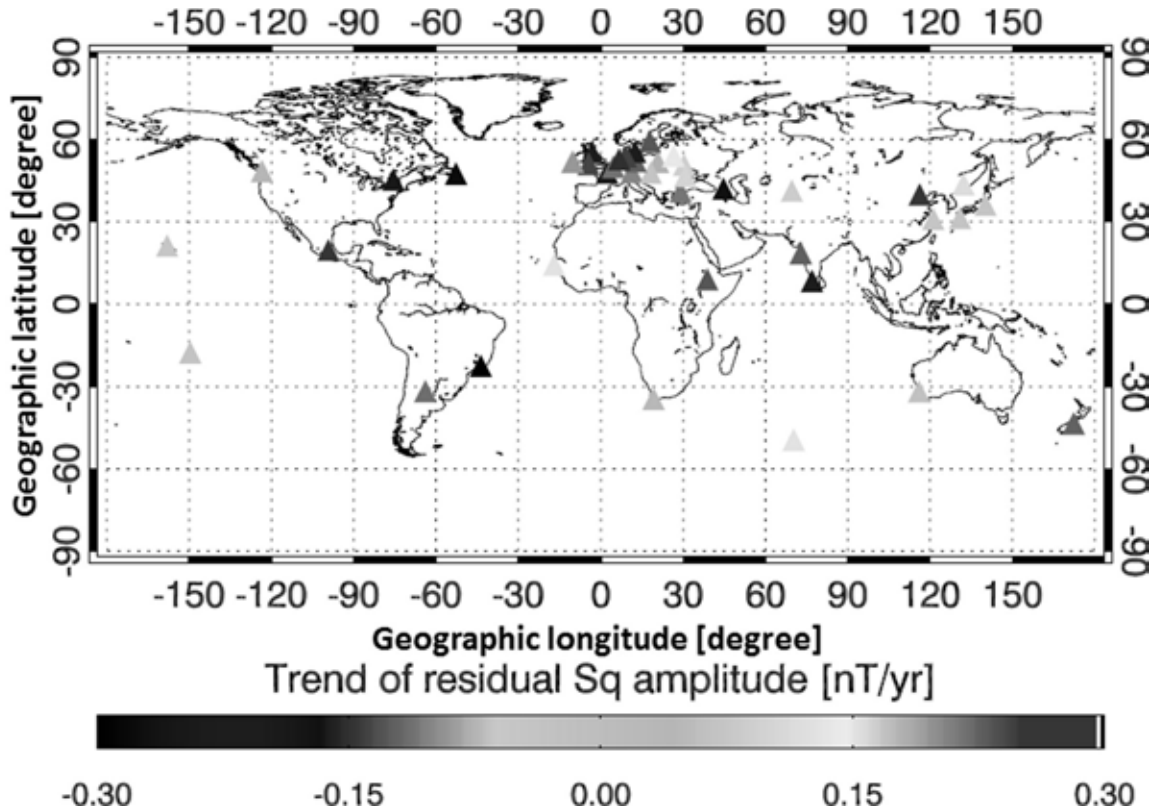


図 16: Res-Sq 場の磁場振幅についての長期トレンドの全球分布²⁶⁾。図のカラーバーは回帰直線の傾きの値を表す。ここでは、傾向性検定を通過した 40 観測点のデータのみをプロットしている。

次に、Res-Sq 場の磁場振幅の長期トレンドにはどのような緯度、経度の依存性があるのかを調べるために、69 の赤道域から中緯度に分布する地磁気観測点のデータを解析した。その結果を図 16 に示す。図のカラーバーは回帰直線の傾きの値を ± 0.3 nT/yr の範囲で示している。図 16 には、各観測点のデータに対して傾向性検定を行った結果、有意なトレンドを持つと判定された 40 観測点のデータをプロットしている。結果、40 点中 29 点の Res-Sq 場の磁場振幅は負のトレンドを示し、負のトレンド値の平均値は、 -0.15 nT/yr であった。Res-Sq 場の磁場振幅における負のトレンドの全球分布は緯度と経度の依存性を持たず、全ての領域にわたって分布している。ただし、Res-Sq 場の磁場振幅のトレンド値は地域によって偏りを持ち、中でもヨーロッパ、インド、およびオセアニア域でトレンドの値が大きくなっている。図 16 の結果からも先行研究²⁵⁾によって示された Res-Sq 場の磁場振幅には顕著な増加トレンドが存在するという指摘は全球的にみると成り立たないことが結論づけられる。

3.4 考察

3.4.1 太陽活動 23/24 サイクルの超極小期における Sq 場の磁場振幅の低下要因

Sellek²⁹⁾は、赤道域から低緯度に分布する 3 つの観測点で観測された 1 年平均した Sq 場の磁場振幅には強い太陽活動依存性が存在することを示し、太陽黒点数が太陽活動の良い指標であると考えた。Sellek は、Sq 場の磁場振幅が年平均した太陽黒点数にほぼ線形的に比例することを見出すとともに、

地磁気の永年変化によって Sq 場の磁場振幅が変化することも発見した。本研究では、1 ヶ月平均した Sq 場の磁場振幅の長周期変動は図 13 で示したように太陽 F10.7 電波フラックスに見られる 10-12 年の太陽活動に 1 対 1 対応の関係をもち、太陽活動極大期には Sq 場の磁場振幅が増大することを示した。本研究の結果はこれまでの過去の研究^{24,29)}によって得られた結果と一致する。太陽活動極大期に Sq 場の磁場振幅が増加する主な理由として、(1)電離圏の電子密度の増加に伴って高度方向に積分された電気電導度が増加する、(2)電離圏高度における太陽潮汐波の活動度の増加に伴って電離圏ダイナモ電場が増加することが考えられる。

2 番目の理由について考察する。最近、Takeda³⁰⁾は低緯度の観測点で得られた長期の地磁気データと電離圏電気電導度モデル値を用いて、Sq 場の磁場変動から見積もった中性風には明瞭な太陽活動の影響が見られない、むしろ太陽活動と反相関であることを報告している。彼の研究の結論は Sq 場の磁場振幅に見られる太陽活動成分について電離圏高度における中性風ではなく、高度方向に積分した電離圏電気電導度の太陽活動成分が主に寄与していることである。興味深いことに、Liu ら³¹⁾は、山川とトムスクの長期のイオノゾンデデータを解析することにより、1 日と半日周期の潮汐波動の振幅が太陽活動の増加に伴って減少する傾向を示した。両者の関係は線形ではなく非線形であることも報告している。Liu らの研究結果は太陽活動極大期に太陽潮汐波動の活動度が低下するため、電離圏ダイナモ電場の大きさが小さくなることを意味する。太陽活動極大期に Sq 場の磁場振幅の増加は太陽潮汐波動による中性風変動ではなく、主に電離圏電気電導度の変動を反映していると結論できる。

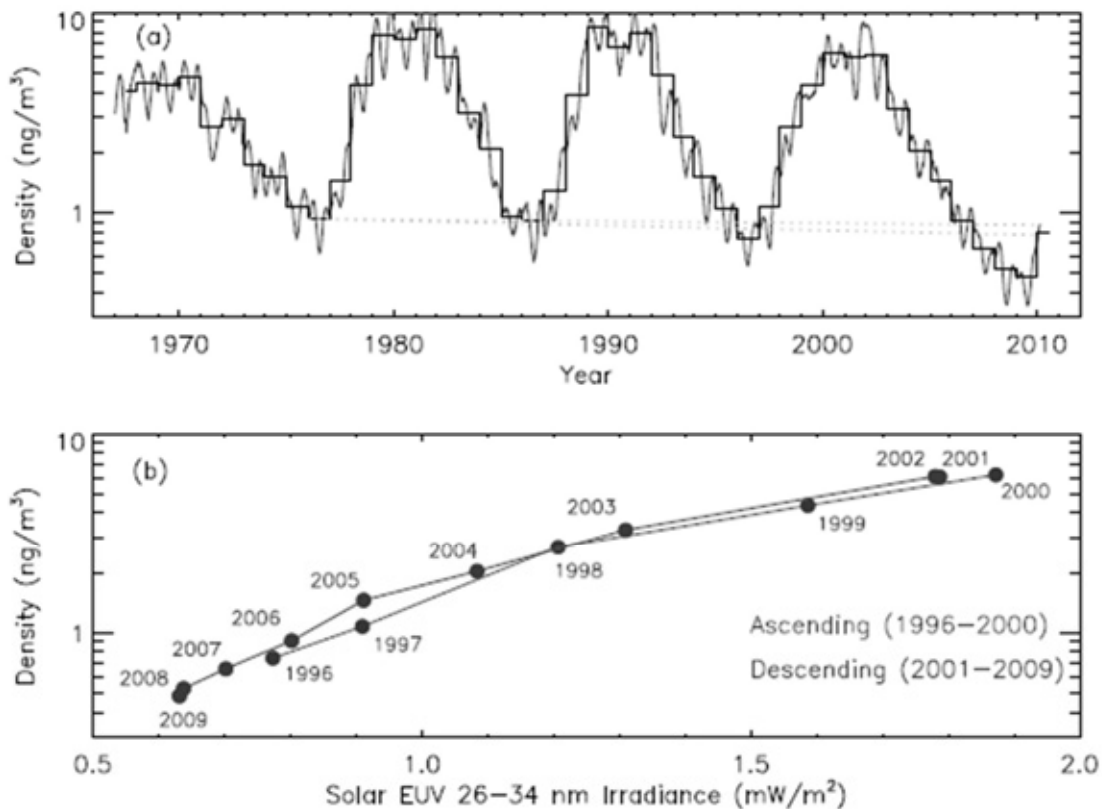


図 17: 衛星観測から得られた高度 400 km 付近の熱圏大気密度の変動(上段)と 1996 年以降の太陽極端紫外線(EUV: 26-34 nm)と熱圏大気密度との相関³²⁾。上段の線は、1 月平均値の密度を表し、黒線は 1 年平均値を表す。また、2 本の薄灰色の点線は、1976 年を基準にした二酸化炭素の量を 5%および 20%増加させたときの熱圏大気密度の変化を表す。下段の 2 本の曲線はそれぞれ、太陽活動 23 サイクルの上昇期と下降期のものに対応する。

図 13 で示したように、赤道域から低緯度における Sq 場の磁場振幅が太陽活動 23/24 サイクルの極小期(2008/10)で前サイクルの極小期のものと比べて 10-15%の減少が認められた。太陽活動 23/24 サイクルの極小期における減少要因について上の考察を基にして考えると、Sq 場の磁場振幅の極端な低下は太陽活動 23/24 サイクルの極小期において電離圏の形成に関係する極端紫外線(EUV)の強度がかなり低下したことを意味する。Solomon ら³²⁾は太陽観測衛星 SOHO に搭載された EUV モニター測器から得られた長期の EUV フラックスデータを解析し、図 17 の下段が示すように前太陽活動極小期(1996 年)に比べて太陽活動 23/24 サイクルの極小期(2008 年)における EUV フラックスの値が 10-15%の低下を報告している。図 13 で既に示した赤道域にある観測点(グアム)における Sq 場の磁場振幅について実際に前太陽活動極小期と太陽活動 23/24 サイクルの極小期のものを比較すると、約 10 nT の減少が認められ、比で表すと約 17%の減少量であった。前太陽活動極小期に比べて太陽活動 23/24 サイクルの極小期における Sq 場の磁場振幅が小さいという傾向は、赤道域の観測点(グアム)以外の場所でも見られた。太陽活動 23/24 サイクルの極小期における Sq 場の磁場振幅の極端な減少は、電離圏の形成に関係する太陽極端紫外線(EUV)の強度がかなり低下したことによるものと結論できる。

3.4.2 太陽 F10.7 電波フラックスに対する Sq 場の磁場振幅の非線形応答

Sq 場の磁場振幅は太陽黒点数や太陽 F10.7 電波フラックスといった太陽活動度指数とよい相関を持つことがよく知られている^{24, 26, 29, 30)}。Sellek²⁹⁾は低緯度観測点(San Juan)で得られた 1929 年から 1965 年までの地磁気と太陽黒点数データを用いて、1 年平均した Sq 場の磁場振幅と太陽黒点数の間には正の相関が存在し、お互いに線形関係であることを示した。Schlapp らもまた太陽黒点数と Sq 場の磁場振幅の間に線形関係が存在することを報告しているが、両者の関係から求めた回帰直線の傾きは各太陽活動サイクルによって異なることを指摘した。彼らの解析結果は Sq 場の磁場振幅の最大値が 100 以上の太陽黒点数に対してあまり大きくならない傾向を示している。本研究で得られた結果では、太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅の関係はほぼ線形関係にあるが、69 点中 37 の観測点における Sq 場の磁場振幅と太陽 F10.7 電波フラックスの関係はむしろ非線形であった。図 14 で示したように太陽 F10.7 電波フラックスの値が 200 を超えると、Sq 場の磁場振幅があまり増加しない傾向であった。過去の研究では太陽活動度指数と Sq 場の磁場振幅の間の線形関係から太陽活動による変動成分を除去して Residual Sq 場の磁場振幅の長期トレンドの解析を行っていた。しかしながら、本研究では太陽活動が高くなると Sq 場の磁場振幅があまり増加しないという非線形効果を加味せずに行った場合、太陽活動極大期における Residual Sq 場の値に非線形効果による誤差が含まれることになる。非線形効果による誤差を小さくするためには線形回帰ではなく、2 次回帰曲線からのズレを解析したほうがよいと考えられる。

太陽 F10.7 電波フラックスに対する Sq 場の磁場振幅の非線形応答に関連した研究結果として、電離圏電子密度を高度方向に積分した全電子数(Total Electron Content: TEC)は、太陽活動極大期における極端紫外線フラックスや太陽 F10.7 電波フラックス値に対して非線形的な応答を示すことが報告されている³³⁻³⁶⁾。Balan ら³³⁾は、1981-1985 年における地磁気静穏日($A_p < 10$)に該当する電離圏 TEC 値と太陽 F10.7 電波フラックスの関係を調べた。結果、TEC 値は太陽 F10.7 電波フラックスの値に対して線形的に比例するが 200 を超えたところで非線形的な関係であった。太陽 F10.7 電波フラックスの値が 200-300 の間では、Sq 場の磁場振幅がほぼ一定になっていた。彼らは太陽 F10.7 フラックスとの非線形関係が現れる要因として電離圏の電子密度の飽和を提案している³⁴⁾。一方、Liu らは太陽 F10.7 電波フラックスと太陽極端紫外線放射の間の関係を調べ、両者がお互いに非線形であることを示した³⁵⁾が、電離圏の電子密度に関する太陽活動依存性を調べる際に、太陽 F10.7 電波フラックスとの非線形効果だけでなく、大気と電離圏における力学効果を加味する必要があることを指摘している。この議論を基に太陽 F10.7 電波フラックスに対する Sq 場の磁場振幅の非線形応答であった理由を考察すると、太陽 F10.7 電波フラックスと EUV の間の非線形な関係と太陽活動期における電離圏電子密度の飽和状態が考えられる。今後は SOHO 衛星などの観測データを加味した統合解析からこの要因を

明らかにしていく予定である。

3.4.3 Residual Sq 場の磁場振幅における長期変動の全球分布

これまでの研究から、いくつかの地磁気観測所で得られた Residual Sq 場の磁場振幅には正のトレンドが存在することが示されてきた^{24, 25, 29}。Elias ら²⁵)は低緯度域に分布する3観測点で得られた Residual Sq 場の磁場振幅の長期変動において明瞭な正のトレンドがあることを報告している。しかしながら、彼らの研究では1960–2001年の期間、かつ低緯度の3観測点のみの地磁気データを書き記しているに過ぎないので、Residual Sq 場の磁場振幅における長期トレンドの全球分布は未解明のまま残されていた。本研究では、赤道から中緯度に分布する多数の地磁気観測点から得られた長期(1947–2015)の地磁気データを用いて長期トレンドの全球分布を見出した。結果、図16に示すように半数以上の地磁気観測点における Residual Sq 場の磁場振幅は明瞭な負の長期トレンドを示した。長期トレンドを示す地磁気観測点の分布は地理緯度と経度の依存性はなかった。特に、ヨーロッパ、インド、カナダ東部、ニュージーランドにおいて負の傾向が強かった。 -0.20 nT/yr 以下の傾きをもつ地磁気観測点はヨーロッパ地域に集中していた。逆に、ユーラシア大陸、南北アメリカ大陸のいくつかの観測点では、Residual Sq 場の磁場振幅が正のトレンドを示した。上記の結果から Elias ら²⁵)によって提案された地球温暖化に伴う超高層大気のコヒーレント冷却効果による Sq 場の磁場振幅の増加というシナリオは本研究によって棄却されたことになる。仮に Sq 場の磁場変動を作る電離圏電流が流れる高度領域における電子密度の増加が地球温暖化に伴う中間圏・熱圏大気のコヒーレント冷却によって引き起こされるとすれば、地球温暖化の影響を打ち消す、あるいは妨げる他の要因が存在することが考えられる。最近、Cnossen と Richmond は、地球大気のグローバルモデル計算を基に、電離圏、熱圏、及び Sq 場の磁場振幅における長期変動の要因を調べた。結果、Sq 場の磁場振幅の大きな変動が南米大陸付近に見られ、彼らは Sq 場の磁場振幅の変動が

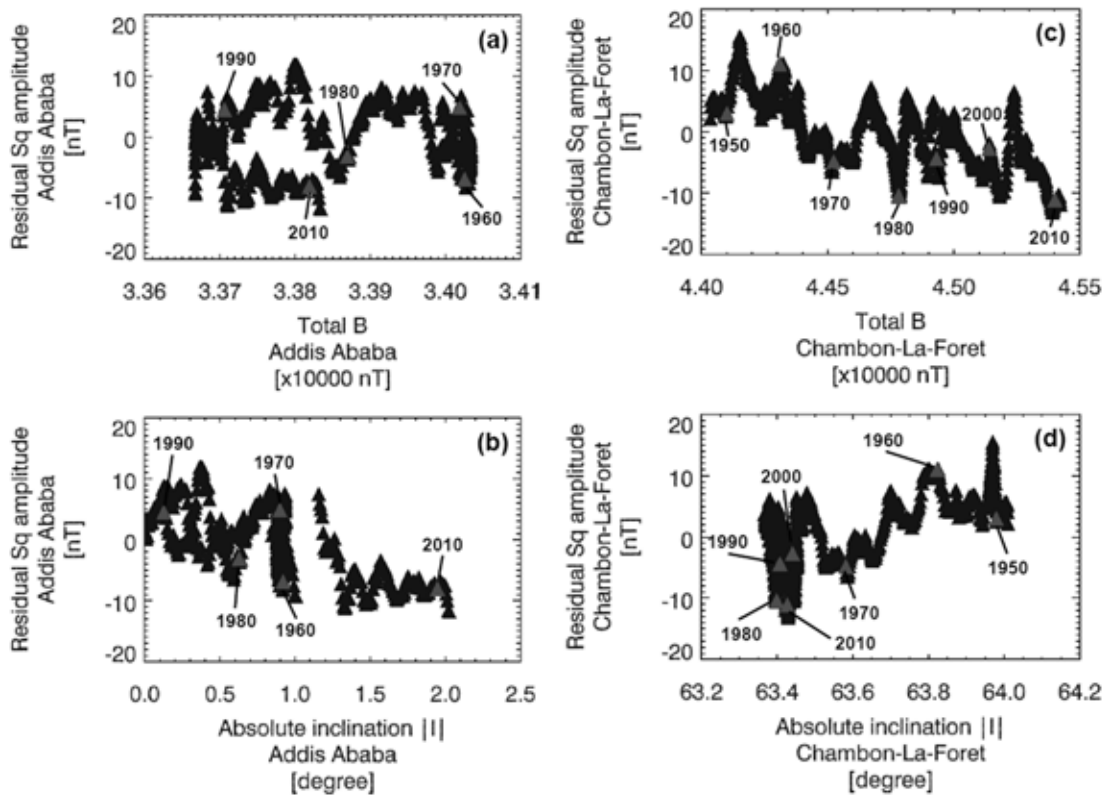


図 18: 赤道域(Addis Ababa)と中緯度(Chambon-La-Foret)における Residual Sq 場の磁場振幅と背景磁場のパラメータの相関関係²⁶⁾。図中の数字は年を表す。

地磁気の永年変化によってもたらされていると解釈した。彼らの研究に習って本研究でも Residual Sq 場の磁場振幅と地球磁場モデルから計算される全磁力の関係性を調べた。その結果を図 18 に示す。図 18 を見ると、赤道域(Addis Ababa)の Residual Sq 場の磁場振幅は電離圏 E 領域高度(100 km)における全磁力との相関はないが、伏角に対しては明瞭な依存性があり、伏角の増加とともに減少する。一方、中緯度(Chambon-La-Foret) の Residual Sq 場の磁場振幅は赤道域と異なり、全磁力に対してよい相関を持ち、全磁力の増加とともに Residual Sq 場の磁場振幅が減少する。図 18 の結果から赤道域の Residual Sq 場の磁場振幅の伏角依存性は、地磁気の永年変化によって赤道ジェット電流の流れる中心位置の移動を示している。図 18 の結果は地磁気観測点(Addis Ababa)からその電流の中心位置が年と共に離れていくことを表している。一方、中緯度(Chambon-La-Foret)における Residual Sq 場の磁場振幅の減少は地磁気的全磁力との相関がよいことから、地磁気の永年変化に伴う電離圏電気電導度の減少によるものと考えられる。Takeda³⁷⁾は実際にモデル計算によって電離圏電気電導度が磁場の増加に伴って減少することを示した。以上の考察から、Residual Sq 場の磁場振幅の長期変動は主に地磁気の永年変化によってもたらされていると言える。今後は実際の電離圏電導度との比較により、電離圏ダイナモ電場や中間圏・下部熱圏風の長期変動の特性と変動メカニズムを解明していく予定である。

3.5 まとめ

1947-2015 年までの 69 の地磁気観測点で得られた地磁気 1 時間値を用いて Sq 場の磁場振幅における長期変動特性を調べた。69 の地磁気観測点で測定された Sq 場の磁場振幅は明瞭な 10-12 年の太陽活動依存性を示し、各太陽活動極大期に増加する傾向にあった。例えば、1970 年付近に極大となる太陽活動 20 サイクル時に相当する期間の Sq 場の磁場振幅は、他の太陽活動サイクルに比べて小さくなっていった。2008-2009 年に出現した太陽活動超極小期における Sq 場の磁場振幅は前太陽活動サイクルの極小期に比べて 15-20%低下していた。Sq 場の磁場振幅の減少は電離圏の形成に関与する太陽極端紫外線の強度が小さくなり、電離圏の電子密度が低下したために電離圏電流の大きさが小さくなったと考えられる。

太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅の相関解析から、必ずしも太陽 F10.7 電波フラックスの値の増加に対して線型的に Sq 場の磁場振幅が増加するのではなく、高い太陽 F10.7 電波フラックスの値になると Sq 場の磁場振幅の増加率が減少するという傾向を発見した。これまでの電離圏観測との結果を考慮すると、高い太陽 F10.7 電波フラックスに対しては電離圏電子密度があまり増加しなくなり、太陽 F10.7 電波フラックスに見合った電離圏電流強度にならないことを示唆している。太陽 F10.7 電波フラックスと Sq 場の磁場振幅の相関解析から求めた 2 次回帰曲線からの残差を計算し、残差を Residual Sq 場の振幅と定義し、Residual Sq 場の長期変動特性を調べた。結果、半数以上の地磁気観測点における Residual Sq 場の磁場振幅は明瞭な負の長期トレンドを示した。負のトレンドを示す観測点の分布は地理緯度と経度の依存性はなかった。特に、ヨーロッパ、インド、カナダ東部、ニュージーランドにおいて負の傾向が強かった。また、 -0.20 nT/yr 以下の傾きをもつ地磁気観測点は、ヨーロッパ地域に集中していた。逆に、ユーラシア大陸、南北アメリカ大陸のいくつかの観測点では、Residual Sq 場の磁場振幅が正のトレンドを示した。上記の結果から Elias ら²⁵⁾によって提案された地球温暖化に伴う超高層大気の冷却効果による Sq 場の磁場振幅の増加というシナリオは本研究によって棄却されたことになる。Residual Sq 場の振幅の長期トレンドのメカニズムを明らかにするため、電離圏 E 領域高度における背景磁場パラメータ(全磁力と伏角)と Residual Sq 場の磁場振幅の相関を調べた。結果、磁気赤道付近に位置する観測点の Residual Sq 場の磁場振幅は地磁気の伏角と相関し、伏角の増加とともに Residual Sq 場の磁場振幅が減少する傾向を示した。一方、中・低緯度の観測点は地磁気的全磁力と相関し、全磁力の増加とともに Residual Sq 場の磁場振幅が減少する傾向であった。前者の考えられる機構として、地磁気の永年変化に伴って赤道ジェット電流が流れる中心位置が変化し、地上の観測点から赤道ジェット電流が離れた結果であると考えられる。後者の機構は地磁気的全磁力の増加とともに電離圏電気電導度が減少し、電離圏電流が流れにくくなったためと考えられる。今後は、実際の

電離圏電気電導度との比較を通じて Sq 場の磁場振幅から電離圏電場と中性風の速度を推定し、それらの長期変動特性を解明する予定である。

4. 磁気嵐時の地磁気変動に見られる電離圏電流の全球分布

本章では、太陽フレアなどによって発生した太陽風擾乱が引き起こす磁気嵐時のグローバルな地磁気変動特性とその変動から推定される電離圏電流と電場の時間・空間分布について研究を行った結果について解説する。

4.1 はじめに

惑星間磁場と地球磁場との磁気再結合過程を通じて磁気圏内に生成された大規模な対流電場は、高緯度と磁気赤道域に Disturbance of Polar Field (DP) 2 型の地磁気変動の要因となる電離圏電流をもたらすことが 1960 年代の研究によって知られている^{38, 39)}。図 19 に DP 2 型の地磁気変動から推定される等価電流系の空間分布と 1963 年 12 月 3 日に観測された Huancayo の地磁気水平成分の変動と IMP-1 衛星による惑星間磁場の角度変化との相関を示す。当時、使用可能な地磁気観測点がまばらであったため、DP 2 型電離圏電流は高緯度から中緯度に分布する 2 セル型の電流と赤道域を東向きに流れる環状電流の 2 種類があると考えられていた。図 19 の右図に示すように、惑星間磁場が南向きになるにつれて DP 2 型地磁気変動が強められることが分かっていたが、太陽風のエネルギーがどのように磁気赤道域にまで伝わってくるのかはよくわからなかった。その後、高時間分解能で地磁気を観測できる磁力計が全球的に設置されるようになり、グローバルな地磁気変動特性やその緯度間結合過程を調べることができるようになった。Kikuchi ら⁴⁰⁾は図 20 に示すように高時間分解能を持つ地磁気データを用いて、高緯度と磁気赤道の DP 2 型地磁気変動が 25 秒以内の時間スケールで同時に起こっていることを示し、DP 2 型地磁気変動をもたらす電離圏電場が高緯度から磁気赤道域へ短い時間スケールで伝搬していると解釈した。DP 2 型磁場変動の瞬時応答は地球-電離圏の空間内を 0 次の導波管(TM0)モードの高速伝搬によって説明されている^{41, 42)}。Kikuchi ら⁴⁰⁾は EISCAT レーダーで測定された電離圏電場と磁力計ネットワークから得られた地磁気データ解析に基づいてオーロラ帯の DP 2 型地磁気変動が電離圏ホール電流によって引き起こされていることを実証し、昼間側赤道域の DP 2 型地磁気変動が Cowling 効果^{43, 44)}によって増強された電離圏ペダーセン電流によるものと解釈した。同様の DP 2 型電離圏電流は磁気急始現象⁴⁵⁻⁴⁷⁾、Pc 5 地磁気脈動⁴⁸⁾、サブストームの成長層⁴⁹⁻⁵¹⁾や磁気嵐⁵²⁻⁵⁴⁾な

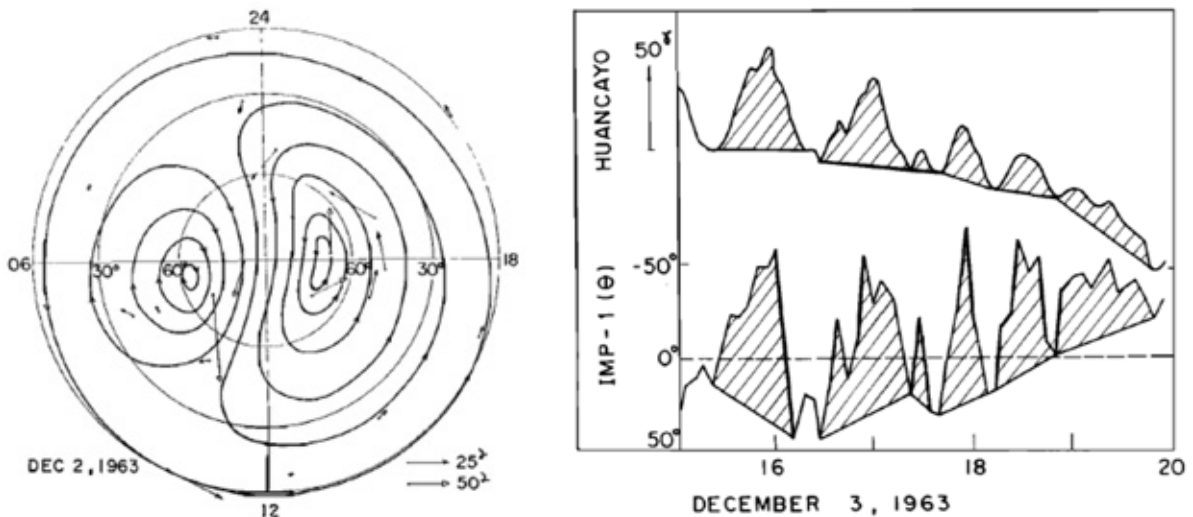


図 19: DP 2 型地磁気変動から推定される電離圏等価電流系(左図)と 1963 年 12 月 3 日に観測された Huancayo における地磁気水平成分の変動と IMP-1 衛星による惑星間磁場の角度(右図)³⁹⁾。なお、惑星間磁場の角度は北向きを正にとる。

どのグローバルな地磁気変動の解釈に適用されてきた。

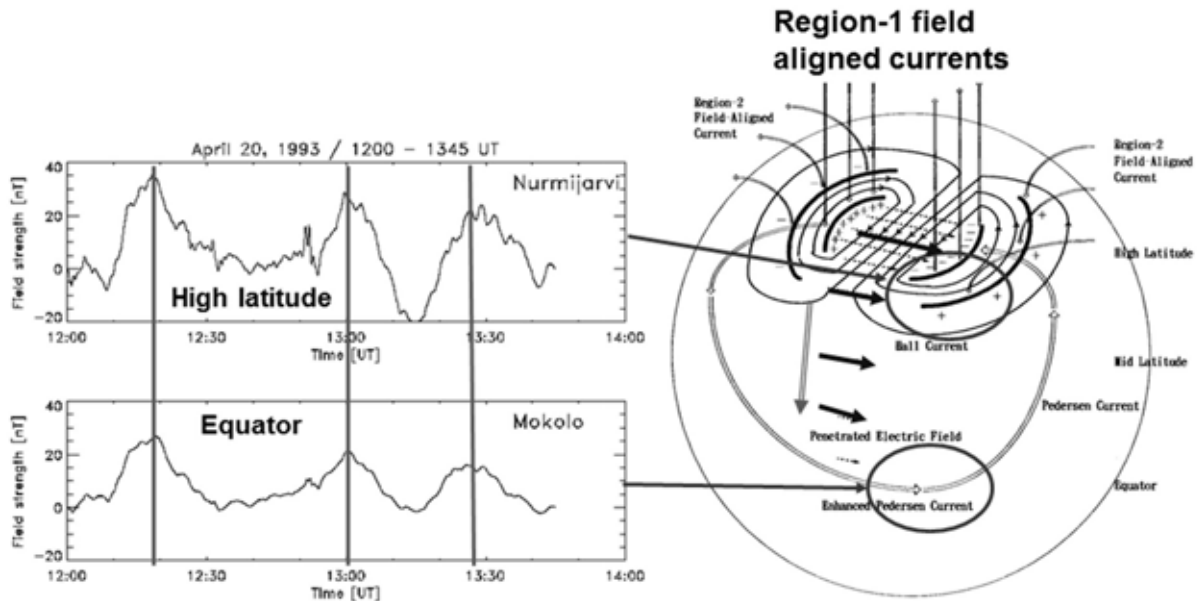


図 20: 高緯度と磁気赤道の地磁気観測点で観測された DP 2 型地磁気変動(左図)とその変動から推察される DP 2 型電流システムの概観(右図)³⁹⁾。

磁気嵐中に増大した対流電場は地球近傍の磁気圏尾部から内部磁気圏へプラズマシートの熱いプラズマを運び、地球磁場の勾配や曲率などの磁場の空間構造の影響を受けてイオンが西向き、電子が東向きにドリフトし、内部磁気圏内に部分環電流を形成する。部分環電流は午後側と午前側の電離圏から入り、出ていく領域 2 型の沿磁力線電流に接続している。領域 2 型の沿磁力線電流の発達に伴って中低緯度の電離圏に対流電場を打ち消す遮蔽電場が形成される⁵⁴⁻⁵⁹⁾。惑星間空間磁場が南向きの間は対流電場が発達しており、中低緯度と赤道域の電離圏に形成される遮蔽電場の強度を上回っている。遮蔽電場は対流電場の増大後に発達するため、地上の地磁気データから推察されるように約 15-20 分後に有効になってくる^{54, 60)}。数値シミュレーション結果では、遮蔽電場は対流電場の増大後に 20-30 分経過してから有効になる^{59, 61)}。惑星間磁場の北転に伴って惑星間磁場が南を向いていた時期に発達していた対流電場が急激に弱まると、増大した遮蔽電場が中・低緯度の電離圏電場の逆転をもたらす⁶²⁻⁶⁵⁾。逆転した電場はしばしば遮蔽電場として同定され⁶³⁻⁶⁵⁾、遮蔽電場は昼間側磁気赤道において西向きの赤道ジェット電流を駆動

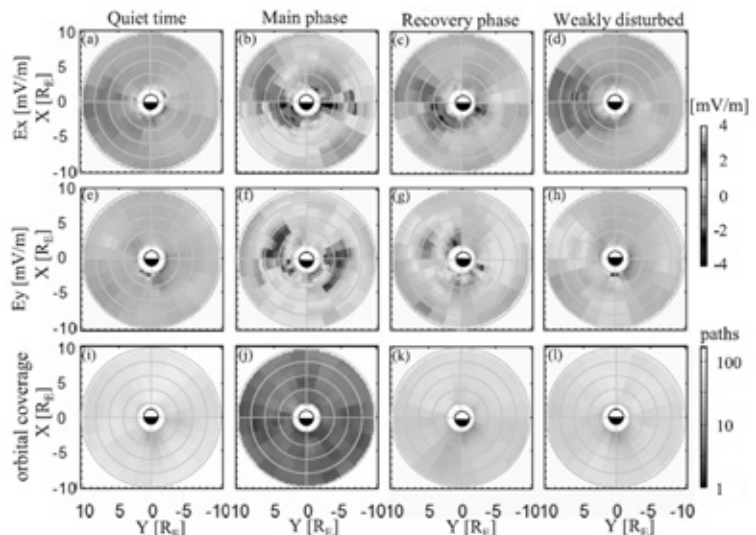


図 21: あけぼの衛星に搭載された電場計測器(EFD)によって得られた磁気嵐時における磁気圏電場の空間分布⁷¹⁾。電場の大きさをカラースケールで表している。上、中、下段のパネルは、それぞれ電場の太陽方向(E_x)、夕方方向(E_y)、各 bin について統計した際に用いた衛星の軌道数を示す。

する。西向きの赤道ジェット電流は地上で負の南北成分の磁場変動を作り出すため、逆向き赤道ジェット電流(equatorial counter electrojet: CEJ)と呼ばれている^{51, 54, 62, 66-68}。モデル計算結果によれば、遮蔽電場は数10分継続することが分かっている^{60, 69}。

Wilson ら⁵²)は磁気嵐の初相と主相時における高緯度と中緯度における DP 2 型電離圏電流の変動特性を調べた。磁気嵐中に CRRES 衛星が内部磁気圏における電磁場とプラズマを測定しており、環電流の内側に強い電場の出現を捉えていた。彼らは DP 2 型電離圏電流に関係する電離圏電場が内部磁気圏で発達した環電流の発達に寄与することを指摘している。Wilson らの研究結果は内部磁気圏で観測される対流電場と中緯度の電離圏電場が磁力線を介して結合していることを示唆する。1989年に打ち上げられたオーロラ観測衛星、あけぼの衛星の電場データを用いて、Shinbori ら⁷⁰)は1989年3月13-14日に発生した超巨大磁気嵐の主相時に内部磁気圏に非常に強い対流電場が形成されていることを見出した。強い対流電場が出現する領域が磁気嵐の発達とともに地球側へ近づいていく傾向にあった。Nishimura ら⁷¹)は、複数の磁気嵐時におけるあけぼの衛星の電場データの統計解析を行うことによって、磁気嵐時に形成される内部磁気圏電場の時間変動と空間分布を明らかにした。図21のEy成分に着目すると、地磁気静穏時における電場分布は、空間的に一様で電場強度も1 mV/m以下と弱かったが、磁気嵐主相時にはその様相が一変し、空間的に不均質な強い電場が朝と夕方側の地球近傍の内部磁気圏に出現し、電場強度は2-4 mV/mに達していた。電場の強度と空間分布には、朝-夕の非対称性が見られた。磁気嵐回復相になると午後側と真夜中すぎの地球近傍の内部磁気圏に逆向きの電場が形成されることが分かった。一方、Kikuchi ら⁵³)は複数の磁力計ネットワークから得られた地磁気と太陽風データを比較することにより、2001年11月6日に発生した大きな磁気嵐時における地磁気変動特性を調べた。結果、磁気嵐の開始とともに午前側の中緯度(磁気緯度55-60度)に強いオーロラジェット電流が形成し、赤道ジェット電流の急増が起こっていた。磁気嵐の回復相に入ると中緯度にあったオーロラジェット電流が強度を弱めながら極方向へ移動し、赤道域では西向きの赤道ジェット電流が卓越していた。磁場変動の逆転は磁気嵐の主相と回復相で DP 2 型の磁場変動を引き起こす電離圏電流、電場分布が異なることを意味しており、電場の空間分布が環電流の発達と衰退に関係していることを示唆する。

磁気嵐時におけるサブオーロラ帯や中緯度の電離圏電場の直接観測は、これまで衛星、非干渉散乱レーダーや SuperDARN レーダーを用いて行われてきた⁷²⁻⁷⁵。しかしながら、衛星やレーダー観測の空間的な制約によって磁気嵐時の中緯度における電場の空間分布についてはあまりよく調べることができなかった。本研究では、2002年5月23-24日に発生した磁気嵐イベントについて地上の磁場変動の緯度と地方時分布を調べ、磁気嵐の各相についての全球的な電離圏電流の時間と空間変動特性を明らかにする。

4.2 観測データと解析手法

本研究では、高緯度から磁気赤道まで分布する観測点から得られた地磁気1分値データを使用した。図22には使用した170の地磁気観測点の位置を表す。170の地磁気データは複数の地磁気観測ネットワーク(International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects: IMAGE, Geophysical Institute Magnetometer Array: GIMA, Canadian Array for Realtime Investigators of Magnetic Activity: CARISMA, and NICT Space Weather Monitoring: NSWM⁵³)と京都大学地磁気世界資料センターから提供され

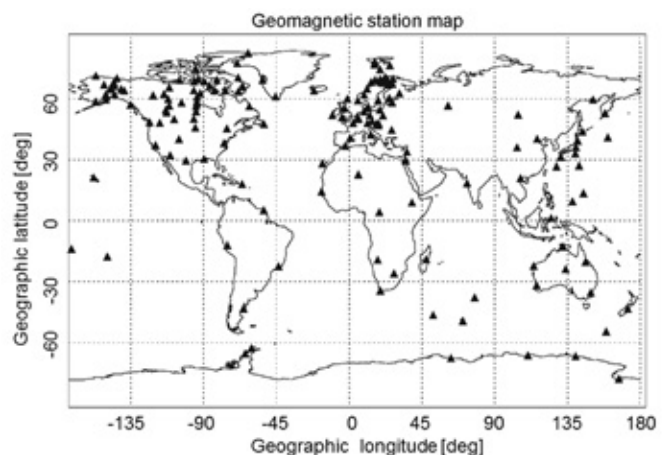


図22: 本解析に用いた地磁気観測点⁷⁶

たものである。ACE 衛星から得られた太陽風と惑星間磁場のデータは NASA/NSSDC Coordinate Data Analysis (CDA) website から公開されているものを使用した。本データ解析には、地磁気と太陽風データを一元的に取り扱う IUGONET データ解析ツール^{7,8)}を駆使した。

磁気嵐中に地上で観測される地磁気変動は電離圏電流、沿磁力線電流、環電流、磁気圏界面電流などによって形成されるので、磁気嵐の発達と衰退に伴う電離圏電場の空間分布の変動をとらえるためには、電離圏電流の作る磁場成分を取り出す必要がある。電離圏電流の作る磁場変動を抽出するために、1ヶ月の中で10日地磁気静穏日に該当する地磁気データから平均的な日変化のパターンを求め、元の観測データからその日変化成分を差し引き、地磁気3成分のデータを地理座標系から地磁気座標系に変換した。最後に、環電流と磁気圏界面電流の効果を極力小さくするため、低緯度に分布する観測点のデータを各観測点のデータから差し引いた。最後の解析では4つのセクターに分割し、各セクターに含む代表的な低緯度観測点を選び、各観測点の磁気緯度に応じて磁気緯度の補正を施したものをを用いた。10日静穏日を同定するために地磁気 Kp 指数から作成された地磁気静穏日リストを用いた。地磁気静穏日リストは GeoForschungsZentrum (GFZ, Potsdam, Germany) から提供されたものである。

4.3 解析結果

4.3.1 2002年5月23-24日に発生した磁気嵐の外観

図23のパネル(a)-(f)は、ACE衛星で測定された太陽風密度、太陽風速度、惑星間磁場3成分(B_x, B_y, B_z)と地磁気 SYM-H 指数を示す。各パラメータの時間分解能は1分である。惑星間磁場の座標系は、Geocentric Solar Magnetospheric (GSM)座標系であり、ACE衛星は地球と太陽の間にあるラグランジュ地点付近を航行していた。時間幅は、2002年5月23日09:00-21:00(UT)となっている。太陽風と惑星間磁場は、地球とACE衛星間を移動する太陽風速度から計算される時間だけ右へシフトしている。図23のパネル(a)と(b)が示すように、太陽風衝撃波の通過に伴う2度の急峻な太陽風密度と速度

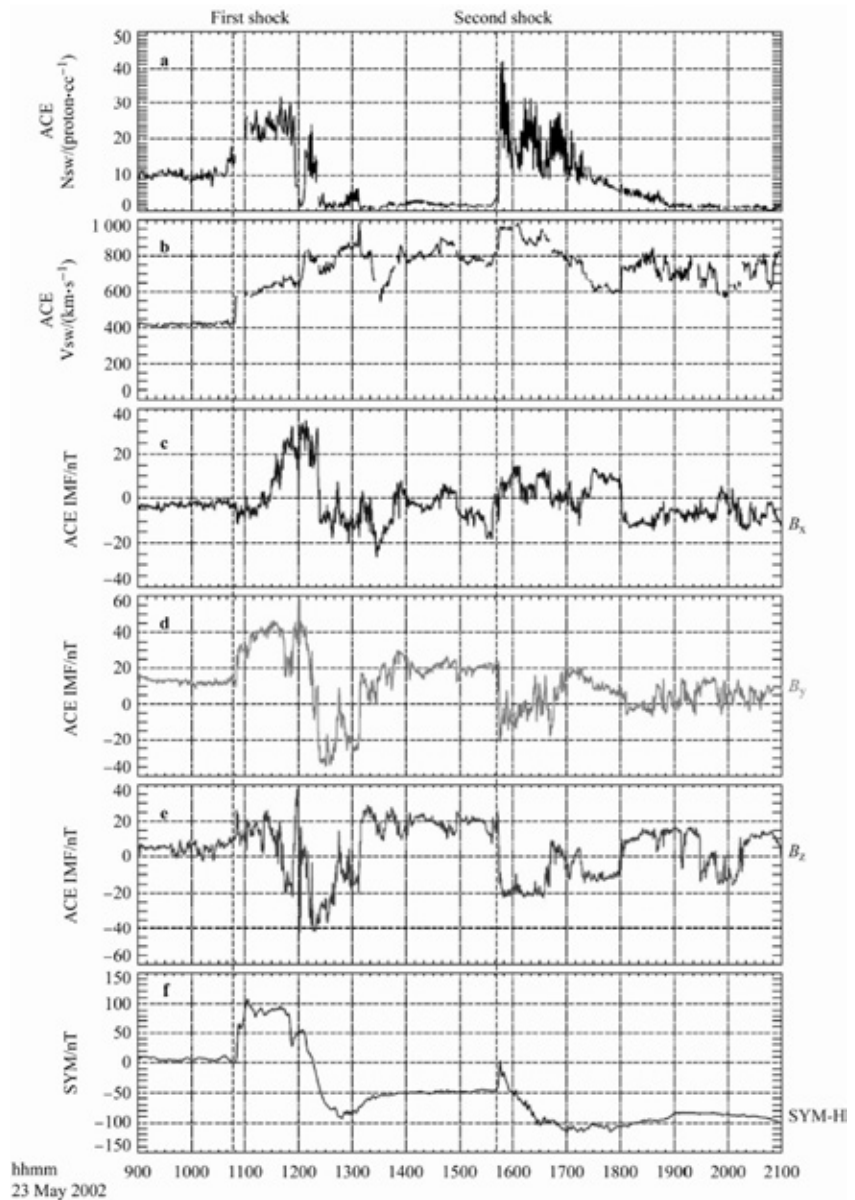


図23: 2002年5月23-24日に発生した磁気嵐イベントの概観⁷⁶⁾。パネル(a)-(f)は、それぞれ太陽風密度、速度、惑星間磁場3成分(B_x, B_y, B_z)と地磁気 SYM-H 指数である。

の増加が見られ、太陽風密度と速度の増加による磁気圏の急激な圧縮を示唆する SYM-H 指数の急増が観測されている。このときの時刻はそれぞれ、10:49 (UT)と 15:42 (UT)であった。太陽風衝撃波が通過した後に惑星間磁場 Bz 成分が南を向いたため、SYM-H 指数の急激な減少を表しているように 2 回の磁気嵐が発生している。2 回目の磁気嵐によって SYM-H 指数の値が約 110 nT まで降下した。1 回目の衝撃波が地球磁気圏に到来後、しばらく惑星間磁場 Bz 成分が北を向いたままであったため、すぐには磁気嵐の発達は見られず、SYM-H 指数の値が正のままになっていた。一方、惑星間磁場 Bz 成分が北向きに変化する、またはその南向き成分が弱まると同時に磁気嵐の発達は止まり、2 つとも SYM-H 指数の上昇を示す磁気嵐回復相に移行している。1 回目の磁気嵐の回復相において惑星間磁場 Bz 成分が北を向いているにも関わらず、14 時以降の SYM-H 指数がほぼ一定の値を示していることが興味深い。

4.3.2 高緯度から磁気赤道に至る地磁気南北と東西成分の変動特性

磁気嵐時における電離圏電流の時間と空間変動を明らかにするため、4.2 の解析手法によって得られた高緯度から磁気赤道までに点在する地磁気観測点における地磁気南北と東西成分の変動についての解析を行った。図 24 に 1 つ目の磁気嵐時に相当するアメリカとヨーロッパ地域で観測された地磁気南北成分(灰色)と東西成分(薄灰色)の変動特性を示す。1 つ目の磁気嵐の期間中、アメリカ(左図)とヨーロッパ地域(右図)はそれぞれ午前側と午後側に位置していた。2 つ目の縦の点線以降、SYM-H 指数の減少を示す磁気嵐主相の期間となるが、アメリカ地域では磁気赤道の HUA を除く全地磁気観測点で磁気嵐の発達とともに地磁気南北成分の減少を示し、地磁気南北成分の変動量は磁気緯度 60 度付近の領域で最大となる。逆に、ヨーロッパ地域では磁気赤道を除く磁気緯度 61 度以下の領域で地磁気南北成分の増加を示し、回復相に移行する少し前に最大となる。また、61 度よりも高緯度になると、

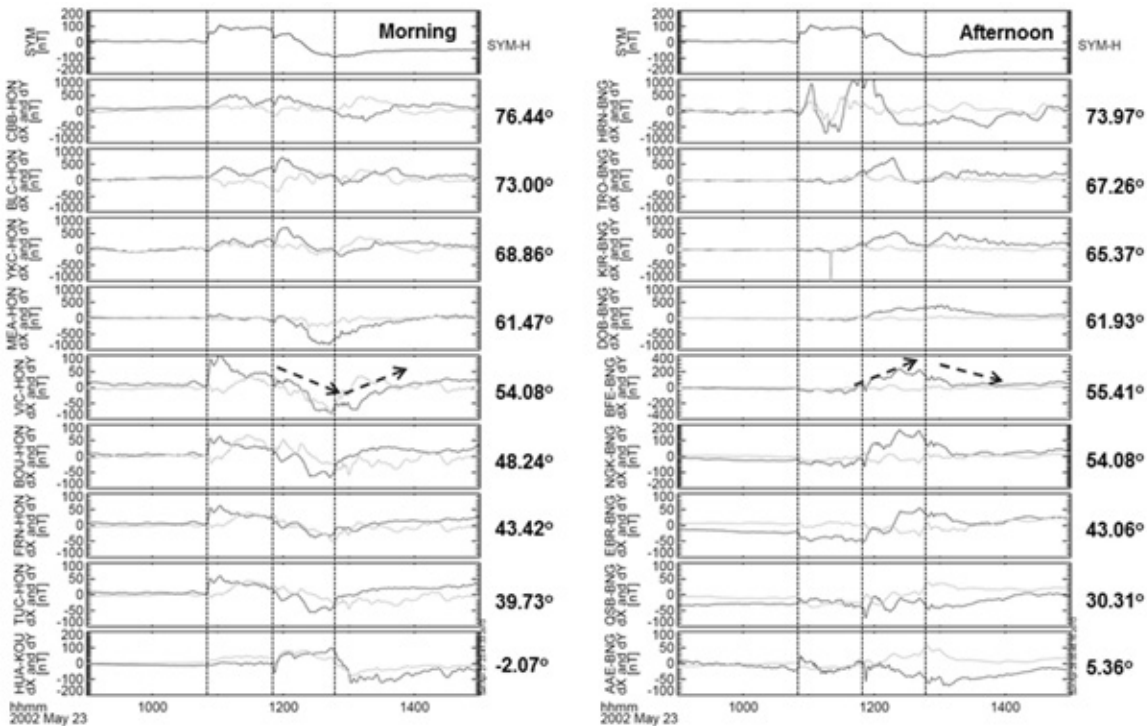


図 24: 1 回目の磁気嵐の期間に相当するアメリカ(左図)とヨーロッパ地域(右図)で観測された地磁気南北成分(灰色)と東西成分(薄灰色)の変動特性。このときアメリカとヨーロッパ地域の地磁気観測点はそれぞれ午前側と午後側に位置していた。上段のパネルは、SYM-H 指数を表し、それ以降のパネルの横に記されている数字は、観測点の磁気緯度を表す。縦の点線はそれぞれ磁気急始時、主相と回復相の開始点を表す。

地磁気南北成分の変動量は小さくなり、磁気嵐主相の途中から増加から減少に転じていた。地磁気南北成分の増加から減少の変化は地磁気変動を作り出す電離圏電流の流れる方向が変わったことを意味している。オーロラジェット電流の位置よりも北側の領域では電離圏電流の流れる方向が反転しているため、地磁気変動から推察すると、磁気嵐の発達とともにオーロラ帯ジェット電流の位置が移動したためと考えられる。図 24 で一番のポイントは午前側と午後側の地磁気南北変動が逆転していることである。図 24 に示す地磁気変動から午前側では西向き、午後側では東向きの電離圏電流が流れていたことがわかる。磁気嵐回復相に入ると、アメリカとヨーロッパ地域ともに磁気嵐主相で見られた変動とは逆の変動を示している。例えば、アメリカ側の観測点のデータを見てみると、磁気赤道以外増加に転じている。アメリカ側の磁気赤道では、磁気嵐主相時では地磁気南北成分が正の値をとっていたが、惑星間磁場が北を向き、磁気嵐回復相になると、負の値になっていた。惑星間磁場の北転に伴う磁気赤道の磁場変化は、磁気嵐の主相と回復相とは赤道ジェット電流の流れる方向が逆転していることを表している。上述のように観測点の磁気緯度と地方時によって磁気嵐時における地磁気変動のパターンが異なる。図24に示された地磁気変動をわかりやすく模式図で示すと図25のようになる。

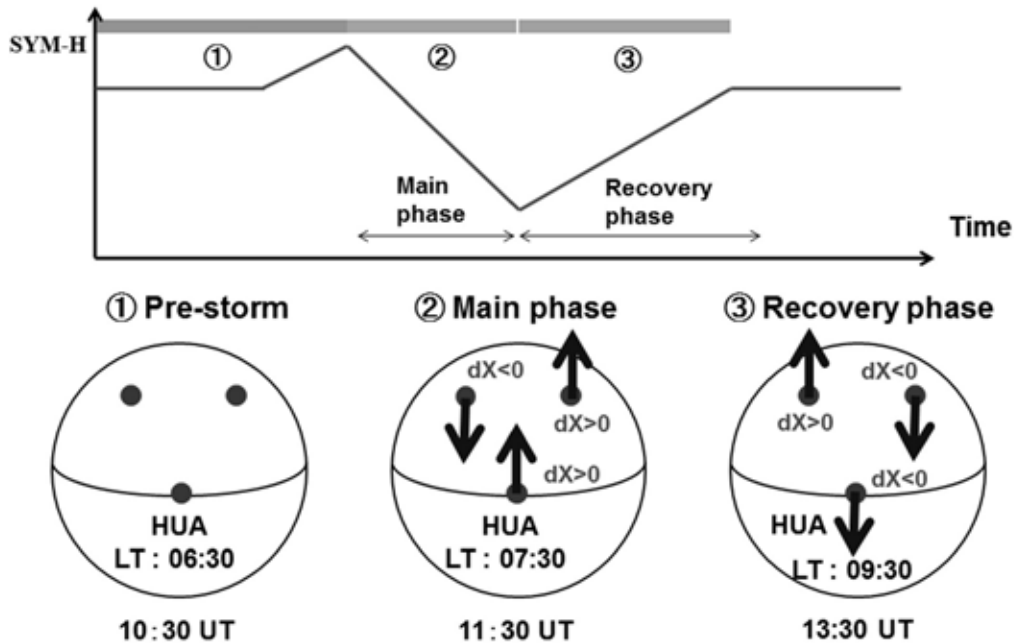


図 25: 磁気嵐主相と回復相で観測される地磁気南北成分の変動の模式図。上段に模式的に描いた SYM-H 指数の変動を表している。図面は磁気赤道の観測点 HUA の地方時を基準に描かれている。

4.3.3 磁気嵐時における電離圏等価電流の空間分布

ここでは、磁気嵐時のグローバルな電離圏電流の時間と空間発展を調べるため、各観測点で得られた地磁気南北と東西成分の変動量から電離圏等価電流のグローバルな分布を導出した。以下にその結果を示す。図 26 の左のパネルが示すように、磁気嵐主相時ではアメリカ大陸上空で時計回りの大規模な電離圏電流が流れ、ヨーロッパ地域では逆に反時計回りの電流が流れている。アメリカ大陸上空の電離圏電流分布は過去の研究³⁸⁾によって示されている DP 2 型の電流パターンに一致している。DP 2 型電流の渦中心の磁気緯度はそれぞれ、70 度と 65 度であった。若干、午後側の電流渦の中心が低緯

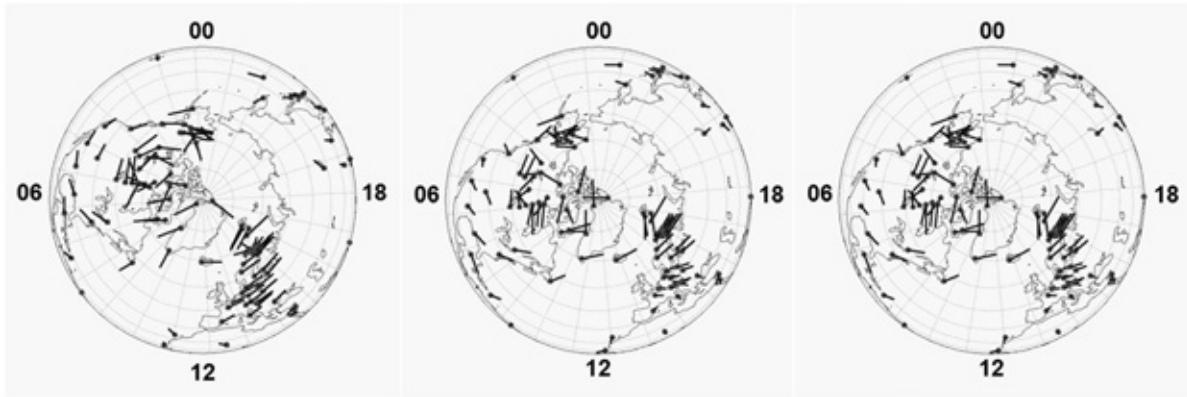


図 26: 北極側から見た磁気嵐時の電離圏等価電流分布。図面の外側の数字は、磁気地方時を表す。左から順に1つ目の磁気嵐主相時(11:30 UT)、回復相時(13:30 UT)、および2つ目の磁気嵐主相時(16:30 UT)である。

度側に寄っている。DP 2 型電離圏電流が支配的な領域は磁気緯度 30 度付近にまで広がっていた。逆に、惑星間磁場が南から北へ転向し、磁気嵐回復相に入ると電離圏電流分布が一変する。図 26 の中央のパネルが示すようにまず、アメリカ、ヨーロッパ地域の中緯度から低緯度の観測点上空の電離圏電流の向きが主相時と比べると逆になっていることが見て取れる。電離圏電流の向きが変わっている領域の北限はアメリカ側で 55 度、ヨーロッパ側で 50 度であった。アメリカ側の高緯度に目を向けてみると、主相時に現れていた時計回りの渦電流の支配領域が縮小し、磁気緯度 55-75 度の領域に限られていた。昼間側の高緯度(磁気緯度 80 度以上)の領域に別の小さな電流渦の出現が見られる。昼間側高緯度の電流渦の方向は、反時計周りで通常の対流電場によって駆動される 2 セル型の電流渦とは異なっている。2 度目の衝撃波の到来後に再び惑星間磁場が北から南へ転向し、磁気嵐の主相へと入っていくが、2 度目の磁気嵐主相時の電離圏等価電流分布は、1 度目の磁気嵐主相時と同様に 2 セル型の電流分布になっている。2 セル型電離圏電流が卓越していることから、磁気嵐主相時には大規模な電離圏電流が卓越し、回復相になると DP 2 型電離圏電流が支配的になる領域が縮小し、極冠域と中緯度から低緯度にかけて 2 セルとは逆向きの電離圏電流が出現していると推定される。一方、夜側中緯度(日本列島、カムチャッカ半島、カムチャッカ半島から南東方向の海上)に分布する観測点では、ほとんど等価電流の方向が変化していない。

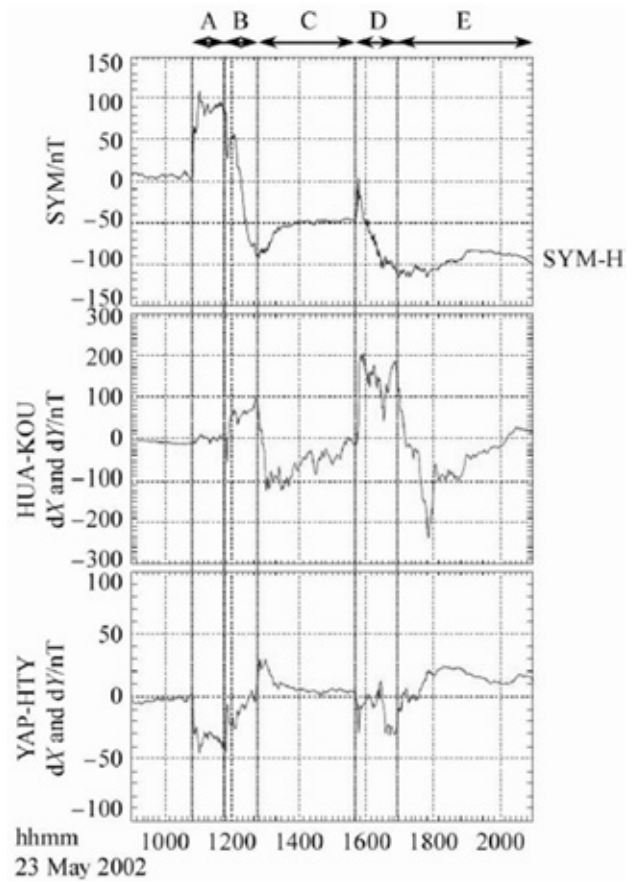


図 27: 2 つの磁気嵐における SYM-H 指数と昼と夜側に位置していた時期赤道上の観測点の地磁気南北成分の地場変動⁷⁶⁾。期間 A-E はそれぞれ磁気嵐初相、主相、回復相、主相、および回復相の期間を示す。

等価電流に変動が見られないことは夜側中緯度領域では日照がなく、電離圏電気伝導度が昼間側に比べて1-2桁も小さいため、ほとんど中緯度領域では電離圏電流が流れないことを意味している。その代わりに、高緯度電離圏と結合している沿磁力線電流が作る磁場変動が卓越する⁵⁴⁾。夜側中緯度の磁場変動は沿磁力線電流の位置に依存して変動するため、電離圏電流が作る磁場変動とは異なっている。

4.3.4 磁気嵐時における昼間側と夜側の時期赤道上の磁場変動の比較

図27は、昼間側と夜側に位置していた磁気赤道域の2つの観測点(HUAとYAP)で得られた磁気嵐時の地磁気南北成分の変動を示す。図27の上段は地磁気SYM-H指数である。期間A-Eは図24で説明した期間と同じである。最初の磁気急始部においてSYM-H指数の値が急激に増加し、SYM-H指数の増加と同時に昼間側のHUAでは増加、夜側のYAPでは減少を示した。その傾向が磁気嵐初相と主相時まで継続し、初相から主相へ移行するときに、昼間側のHUAでは顕著な増加、夜側のYAPでは負の変動量がやや小さくなった。回復相になると、昼間側のHUAでは南北成分の変動量が正から負へ変化し、逆に夜側のYAPでは負から正の値へ変化した。南北成分の磁場変動大きさは時間の経過とともに弱まっていき、ゼロ付近へと漸近していく傾向にあった。1つ目の磁気嵐時における昼間側の変動量は夜側のもものと比べて約3-4倍大きかった。夜側の磁場変動が小さいことは夜側の電離圏電気伝導度が小さいことにあると考えられる。同様の傾向が2つ目の磁気嵐においても見受けられた。磁気赤道域における地磁気南北成分の磁場変動から、磁気嵐主相時には昼間側の領域では東向きの電流が卓越し、夜側では西向きの電流が卓越していると考えられる。電場の立場から見れば、昼間側の領域では東向きであり、夜側では西向きである。昼夜の磁気赤道の磁場変動の特徴から、極域電離圏に持ち込まれた朝-夕方向の対流電場が昼夜の電離圏へ伝搬していると考えられる。

4.4 考察

4.4.1 磁気嵐中の電離圏電場の磁気赤道域への侵入過程

大規模な対流電場は強い南向きの惑星間磁場が地球磁気圏へ到来することによって、昼間側の磁気圏界面で起こる惑星間磁場と地球磁場との再結合を通じて強められる。磁力線の再結合過程によって増大した対流電場は内部磁気圏に環電流を作り出し、環電流の作る磁場によって地上の磁場強度が全球的に弱められる。これまでの研究から増大した対流電場は高緯度から磁気赤道へ侵入し、磁気嵐主相時に中緯度電離圏にDP2型電流を引き起こすことがよく知られている^{53, 54, 77, 78)}。Tsujiらは、磁気嵐時における磁場変動の解析からDP2型電離圏電流が磁気嵐主相時に磁気緯度30度付近にまで広がっていることを示した⁵⁴⁾。本研究では多数の地磁気観測点のデータを解析することにより、2セル構造したDP2型電離圏電流が午前側、午後側ともに磁気緯度30度付近にまで拡大することに加えて、図27に示す通り昼夜の磁気赤道の磁場変動が逆転していることを示した。前半の結果はNishida³⁹⁾、Kikuchi⁷⁵⁾らの研究結果と整合するものである一方、夜側磁気赤道の磁場変動を捉えることにより、昼夜の磁気赤道領域に電場が侵入していることをグローバルな磁場観測から初めて明らかにした。昼間側と逆向きの夜側磁気赤道電流の検出に成功したことで、約40年前の研究³⁹⁾で提案された磁気赤道を東向きに一周する電離圏環状電流系は存在しないことを示した。本研究で解析した磁気嵐イベントでは、DP2型電離圏電流渦の中心が午前側で70度、午後側で65度に位置し、太陽風-磁気圏相互作用で作られた沿磁力線電流が電離圏に流れ込む、あるいは流れ出している位置がその磁気緯度にあることがわかった。DMSP衛星による観測から、HeelisとMohapatraは、Dst指数が-300 nT以下になるような超巨大磁気嵐時には、大規模な対流電場が磁気緯度20度付近の低緯度領域にまで拡大することを報告している。磁気嵐主相時に対流電場の低緯度方向への拡大は、図26に示すようにDP2型電離圏電流の中緯度域への拡大とオーロラジェット電流の赤道方向への移動と一致している。DP2型電離圏電流を駆動する電場は、非干渉散乱レーダー^{77, 78)}や衛星⁷⁹⁾によっても観測されている。電離圏電場の赤道方向への拡大はいくつかの衛星^{80, 81)}によって観測されているように深内部磁気圏領域へ対流電場を侵入させ、内部磁気圏のプラズマ環境を変貌させる。

惑星間磁場の北転または南向き強度の減少に伴って磁気嵐回復相が始まり、大規模な対流電場が急速に弱まる。惑星間磁場の北転または南向き強度の減少時には、図 26、27 に示したように昼間側の中緯度(30–50 度)と磁気赤道において電離圏電流の向きが逆転する。夜側の磁気赤道においても昼間側の逆転現象に呼応して電流の向きが西向きから東向きへと変わる(図 26)。中緯度–赤道域における電離圏電流の逆転現象は、領域 2 型の沿磁力線電流系が中緯度以下の領域では領域 1 型の沿磁力線電流系よりも卓越することを表している。中緯度における電離圏電流の逆転現象は過遮蔽と呼ばれている⁵³⁾。図 26 の中央のパネルに見られるように、朝側の東向き電流が磁気嵐回復相において磁気緯度 50–60 度付近で西向きへと逆転している。この結果から、領域 2 型の沿磁力線電流の足元が磁気緯度 50–60 度緯度付近に位置すると考えられる。磁気緯度 50–60 度緯度付近の緯度帯は地球半径 3–4 倍の磁気赤道面を横切る磁力線が走る内部磁気圏領域に相当する。したがって、領域 2 型の沿磁力線電流の起源となる部分環電流がちょうどその領域に存在することがわかる。中緯度–赤道域における過遮蔽現象は、Kikuchi らの研究^{53,75)}により既に報告されているが、本研究ではグローバルな等価電流系マップを作成し、磁気嵐主相と回復相の状態を比較することで、領域 2 型の沿磁力線電流に伴う渦構造を同定できた。先行研究では、ある特定の磁気経度に分布する少数の地磁気観測点のデータしか解析を行っていなかったため、領域 2 型の沿磁力線電流に伴う渦構造の同定には至っていなかった。領域 2 型の沿磁力線電流に伴う渦構造を見出した点が本研究で得られたもう一つの新しい事項である。一方、いくつかの過去の研究によって対流電場の急激な減少に伴って赤道ジェット電流が逆転することが報告されている^{53,54)}。しかしながら、本研究ではアメリカとヨーロッパ域に属する磁気赤道においてその応答が異なることを示した。アメリカ域に属する磁気赤道の観測点では、惑星間空間磁場や太陽風の変動に対して明瞭な磁場変化が現れ、磁場の変動量もかなり大きい。しかし、ヨーロッパ域の磁気赤道域では、太陽風や惑星間空間磁場変動による地磁気の応答が見られないこともある。地磁気変動の経度依存性については今後の研究によって明らかにすべき事項として挙げられる。

4.4.2 夜側赤道ジェット電流

本研究では、磁気嵐主相と回復相時にそれぞれ西向きと東向きの電離圏電流が夜側磁気赤道域に流れていることを地磁気変動の解析から突き止めた。夜側磁気赤道域の地磁気変動は昼間側の赤道ジェット電流の変化に対応していた。昼間側の地磁気変動との対応関係は対流電場や遮蔽電場が夜側の磁気赤道域にも侵入し、夜側磁気赤道域での Cowling 効果によって他の夜側の緯度帯に比べて電離圏電流が増幅されることを示している。Tsuji らもまた、夜側の西向きジェット電流が磁気嵐の主相時に強められることを報告している⁵⁴⁾。彼らの結果では、磁気赤道域における磁場変動の最大値は昼間側で 270 nT、夜側で 35 nT であった。Abdu らは、磁気嵐時における昼と夜側の赤道域の磁場変動をもとに夜側の電離圏 E 領域の電導度が昼間の 0.2 倍であることを見積もっている⁸²⁾。Shinbori らは、Tsunomura 電離圏電場ポテンシャル解法⁸³⁾を用いて赤道域の磁場水平成分の変動量を計算し、夜と昼の磁場変動比が 0.14 と見積もっている⁴⁶⁾。本研究では、図 26 において 16:55 (UT) 付近の YAP と HUA の磁場変動の比は 0.22 となり、過去の研究例⁸²⁾に一致する。上記の議論から侵入電場は夜側の電離圏の状況下でも磁気赤道域では十分な大きさ磁場変動を引き起こすと言える。

4.5 まとめ

本研究では、磁気嵐時における高緯度から磁気赤道域に至る広範な領域の磁場変動分布の時間発展を調べるため、高緯度から磁気赤道域までの領域をカバーする多点の地上観測点から得られた磁場データの包括的な解析を行った。磁気嵐主相時における昼間側の等価電流分布は領域 1 型の沿磁力線電流によって駆動される 2 セルの電流渦の構造をしており、2 セルの電流渦が磁気嵐の発達とともに低緯度側へ拡大していく様相が見られた。磁気嵐の発達期の頂点では、2 セルの電流渦の下限域は磁気

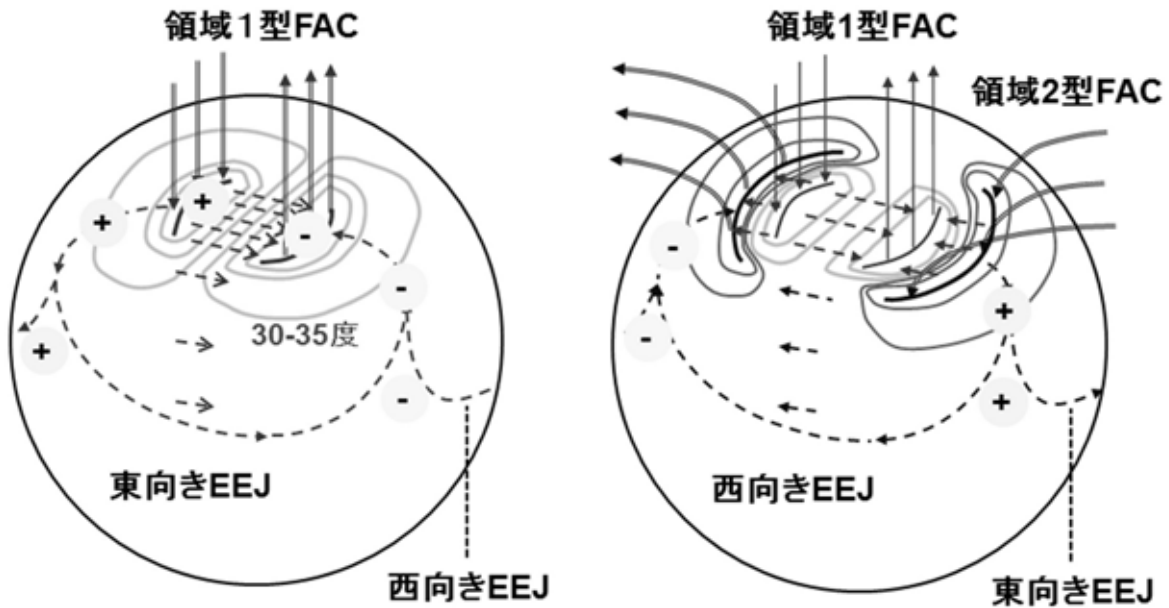


図 28: 磁気嵐の主相(左のパネル)と回復相(右のパネル)時における沿磁力線電流と電離圏電流分布の描像。2組矢印はそれぞれ、領域1型の沿磁力線電流(Field-Aligned Current: FAC)系と領域2型の沿磁力線電流系を表す。

緯度 30 度以下の低緯度域にまで達していた。2 セルの電流渦の中心は午前側では磁気緯度 70 度付近に、午後側磁気緯度 65 度付近に位置しており、午後側の中心位置がやや低緯度側に寄っていた。領域1型の沿磁力線電流系の強まりに呼応して、昼と夜側の磁気赤道域ではそれぞれ、東向きと西向きの赤道ジェット電流が強められていた。昼夜の磁気赤道域における地磁気変動は増大した対流電場が昼夜の磁気赤道域にまで侵入し、昼間側では東向き、夜側では西向きの電場が赤道電離圏へ印加したことを意味している。惑星間磁場の南向き成分が弱まる、あるいは北転することによって磁気嵐回復相が始まると、領域1型の沿磁力線電流が駆動する2セルの電流渦は弱まりながら縮小し、極冠域と中緯度域に新たな電流渦が出現した。中緯度域に形成された電流渦は内部磁気圏を流れる環電流と接続する領域2型の沿磁力線電流を起源とするものである。領域1型の沿磁力線電流と領域2型の沿磁力線電流の発達と衰退時間が異なるため、前者が急速に弱まるときに一時的に後者の電流系が強くなった状態が形成される。領域2型の沿磁力線電流の寄与が強まるとき、磁気赤道域では磁気嵐主相時とは逆向きの電流が昼と夜側に流れていた。極冠域に出現した電流渦は強い北向きの惑星間磁場とローブ域の地球磁場との再結合によって生み出されたNBZ型の沿磁力線電流が起源となる。以上の観測事実から磁気嵐の主相と回復相時における沿磁力線電流と電離圏電流分布の描像は Kikuchi⁷⁵⁾らの研究で提唱された電流系に夜側赤道電流系を追記した図28のようになる。

5. おわりに

本解説では、著者が京大生存研研究所で進めてきた主な3つの研究例について既に論文等に発表している内容に加えて新たな考察や解説を加えた。序論でも述べたように地球の超高層大気は太陽活動と上方へ伝搬してくる下層大気起源の大気波動の影響を受けているため、超高層大気で観測される変動現象の発生メカニズムを解明するためには、太陽から地球大気に至る地上と衛星観測を組み合わせた統合解析が必要である。したがって、多種多様な観測データを1元的に取り扱うデータ解析システムの開発が必要であり、筆者はIUGONETプロジェクトメンバーの一員として主体的に多種多様な観測データを取り扱うデータ解析システムの開発に取り組んだ。第2章でデータ解析システムにつ

いて詳しく述べたので、この解説を読んで IUGONET データ解析ツールの使い方を学んでいただけたら幸いである。IUGONET データ解析ツールの威力を皆さんに知っていただくため、第3と4章に2つの超高層大気に関する研究事例(1. 地磁気日変化の振幅に見られる超高層大気の長期変動特性について、2. 磁気嵐時の地磁気変動に見られる電離圏電流の全球分布)についての成果概要をまとめた。

参考文献

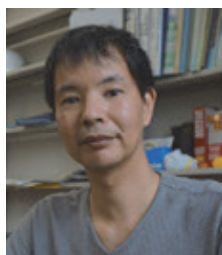
- 1) 名古屋大学宇宙地球環境研究所ニューズレター, 44, 2006 (<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/pub/ste-nl/Newsletter44clr.pdf>).
- 2) 大学間連携プロジェクト「IUGONET」パンフレット (http://www.iugonet.org/doc/iugonet2015j_A4.pdf)
- 3) 林寛生, 小山幸伸, 堀智昭, 田中良昌, 新堀淳樹, 鍵谷将人, 阿部修司, 河野貴久, 吉田大紀, 上野悟, 金田直樹, 米田瑞生, 田所裕康, 元場哲郎, 大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」, *宇宙科学情報解析論文誌*, **1**, JAXA-RR-11-007, 113-120, 2012.
- 4) Hayashi, H., Koyama, Y., Hori, T., Tanaka, Y., Abe, S., Shinbori, A., Kagitani, M., Kouno, T., Yoshida, D., UeNo, S., Kaneda, N., Yoneda, M., Umemura, N., Tadokoro, H., Motoba, T., IUGONET project team, INTER-UNIVERSITY UPPER ATMOSPHERE GLOBAL OBSERVATION NETWORK (IUGONET), *Data Sci. J.*, **12**, WDS179-WDS184, 2013.
- 5) Thieman, J. R., Roberts, D. A., King, T. A., Harvey, C. C., Perry C. H., Richards, P. J., SPASE and the Heliophysics Virtual Observatories, *Data Sci. J.*, **9**, IGY85-IGY93, 2010.
- 6) 堀智昭, 鍵谷将人, 田中良昌, 林寛生, 上野悟, 吉田大紀, 阿部修司, 小山幸伸, 河野貴久, 金田直樹, 新堀淳樹, 田所裕康, 米田瑞生, IUGONET共通メタデータフォーマットの策定とメタデータ登録管理システムの開発, *宇宙科学情報解析論文誌*, **1**, JAXA-RR-11-007, 105-111, 2012.
- 7) 田中良昌, 新堀淳樹, 鍵谷将人, 堀智昭, 阿部修司, 小山幸伸, 林寛生, 吉田大紀, 河野貴久, 上野悟, 金田直樹, 米田瑞生, 田所裕康, 元場哲郎, 三好由純, 関華奈子, 宮下幸長, 瀬川朋紀, 小川泰信, IUGONET解析ソフトウェアの開発, *宇宙科学情報解析論文誌*, **1**, JAXA-RR-11-007, 91-98, 2012.
- 8) Tanaka, Y.-M., Shinbori, A., Hori, T., Koyama, Y., Abe, S., Umemura, N., Sato, Y., Yagi, M., Ueno, S., Yatagai, A., Ogawa, Y., Miyoshi, Y., Analysis software for upper atmospheric data developed by the IUGONET project and its application to polar science, *Adv. Polar Sci.*, **24**, 231-240, 2013.
- 9) Shiokawa, K., Seki, K., Miyoshi, Y., Ieda, A., Ono, T., Iizima, M., Nagatsuma, T., Obara, T., Takashima, T., Asamura, K., Kasaba, Y., Matsuoka, A., Saito, Y., Saito, H., Hirahara, M., Tonegawa, Y., Toyama, F., Tanaka, M., Nose, M., Kasahara, Y., Yumoto, K., Kawano, H., Yoshikawa, A., Ebihara, Y., Yukimatsu, A., Sato, N., Watanabe, S., and the Inner Magnetosphere Subgroup in the Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences, ERG - A small-satellite mission to investigate the dynamics of the inner magnetosphere, *Adv. Space Res.*, **38**, 1861-1869, 2006.
- 10) Aikin, A. C., Chanin, M. L., Nash, J., Kendig, D. J., Temperature trends in the lower mesosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 416-419, 1991.
- 11) Roble, R. G., Major greenhouse cooling (yes, cooling): The upper atmosphere response to increased CO₂, *Rev. Geophys.*, **33**, 539-546, 1995.
- 12) Ulich, T., Turunen, E., Evidence for long - term cooling of the upper atmosphere in ionosonde data, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1103-1106, 1997.
- 13) Jarvis, M. J., Jenkins, B., Rodgers, G. A., Southern hemisphere observations of a long - term decrease in F region altitude and thermospheric wind providing possible evidence for global thermospheric cooling, *J. Geophys. Res.*, **103**, 775-20,778, 1998.
- 14) Lastovicka, J., On the role of solar and geomagnetic activity in long - term trends in the atmosphere-ionosphere system, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **67**, 83-92, 2005.
- 15) Lastovicka, J., Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **71**, 1514-1528, 2009.
- 16) Roble, R. G., Dickinson, R. E., How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?, *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 1441-1444, 1989.
- 17) Rishbeth, H., A greenhouse effect in the ionosphere?, *Planet. Space Sci.*, **38**, 945-948, 1990.
- 18) Danilov, A. D., Mikhailov, A. V., Long - term trends in the parameters of the F2 - region: A new approach, *Geomagn.*

- Aeron.*, **39**, 473–479, 1999.
- 19) Mikhailov, A. V., Marin, D., Geomagnetic control of the foF2 long - term trends, *Ann. Geophys.*, **18**, 653–665, 2000.
 - 20) Foppiano, A. J., Cid, L., Jara, V., Ionospheric long - term trends for South American mid - latitudes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **61**, 717–723, 1999.
 - 21) Elias, A. G., Ortiz de Adler, N., Earth magnetic field and geomagnetic activity effects on long - term trends in the F2 layer at mid - high latitudes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **68**, 1871–1878, 2006.
 - 22) Yue, X., Liu, L., Wan, W., Wei, Y., Ren, Z., Modeling the effects of secular variation of geomagnetic field orientation on the ionospheric long term trend over the past century, *J. Geophys. Res.*, **113**, A10301, 2008.
 - 23) Matsushita, S., IMF polarity effects on the Sq current focus location, *J. Geophys. Res.*, **80**, 4751–4754, 1975.
 - 24) Schlapp, D. M., Sellek, R., Butcher, E. C., Studies of worldwide secular trends in the solar daily geomagnetic variation, *Geophys. J. Int.*, **100**, 469–475, 1990.
 - 25) Elias, A. G., Artigas, M. Z., Barbas, B. F. H., Trends in the solar quiet geomagnetic field variation linked to the Earth's magnetic field secular variation and increasing concentrations of greenhouse gases, *J. Geophys. Res.*, **115**, A08316, 2010.
 - 26) Shinbori, A., Koyama, Y., Nose, M., Hori, T., Otsuka, Y., Yatagai, A., Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation, *Earth Planets Space*, **66:155**, 1-20, 2014.
 - 27) Terpstra, T. J., The asymptotic normality and consistency of Kendall's test against trend, when ties are present in one ranking, *Indagationes Mathematicae*, **14**, 327–333, 1952.
 - 28) Jonckheere, A. R., A distribution-free k-sample test against ordered alternatives, *Biometrika*, **41**, 133–145, 1954.
 - 29) Sellek, R., Secular trends in daily geomagnetic variations, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **42**, 689–695, 1980.
 - 30) Takeda, M., Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field, *J. Geophys. Res.*, **118**, 4516–4522, 2013.
 - 31) Liu, L., Luan, X., Wan, W., Lei, J., Ning, B., Solar activity variations of equivalent winds derived from global ionosonde data, *J. Geophys. Res.*, **109**, A12305, 2004.
 - 32) Solomon, S. C., Woods, T. N., Didkovsky, L. V., Emmert, J. T., Qian, L., Anomalously low solar extreme - ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L16103, 2010.
 - 33) Balan, N., Bailey, G. J., Jayachandran, B., Ionospheric evidence for a nonlinear relationship between the solar e.u.v. and 107 cm fluxes during an intense solar cycle, *Planet. Space Sci.*, **41**, 141–145, 1993.
 - 34) Balan, N., Bailey, G. J., Jenkins, B., Rao, P. B., Moffett, R. J., Variations of ionospheric ionization and related solar fluxes during an intense solar cycle, *J. Geophys. Res.*, **99**, 2243–2253, 1994.
 - 35) Liu, J. Y., Chen, Y. I., Lin, J. S., Statistical investigation of the saturation effect in the ionospheric foF2 versus sunspot, solar radio noise, and solar EUV radiation, *J. Geophys. Res.*, **108**, 1067, 2003.
 - 36) Liu, L., Wan, W., Ning, B., Pirog, O. M., Kurkin, V. I., Solar activity variations of the ionospheric peak electron density, *J. Geophys. Res.*, **111**, A08304, 2006.
 - 37) Takeda, M., Effects of the strength of the geomagnetic main field on the dynamo action in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **101**, 7875–7880, 1996.
 - 38) Nishida, A., Iwasaki, N., Nagata, T., The origin of fluctuations in the equatorial electrojet: A new type of geomagnetic variation, *Ann. Geophys.*, **22**, 478-484, 1966.
 - 39) Nishida, A., Coherence of geomagnetic DP2 magnetic fluctuations with interplanetary magnetic variations, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5549-5559, 1968.
 - 40) Kikuchi, T., Lühr, H., Kitamura, T. et al., Direct penetration of the polar electric field to the equator during a DP2 event as detected by the auroral and equatorial magnetometer chains and the EISCAT radar, *J. Geophys. Res.*, **101**, 17161-17173, 1996.
 - 41) Kikuchi, T., Araki, T., Maeda, H. et al., Transmission of polar electric fields to the equator, *Nature*, **273**, 650-651, 1978.
 - 42) Kikuchi, T., Araki, T., Horizontal transmission of the polar electric field to the equator, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **41**, 927-936, 1979.
 - 43) Hirono, M., A theory of diurnal magnetic variations in equatorial regions and conductivity of the ionosphere E region, *J. Geomag. Geoelectr.*, **4**, 7-21, 1952.
 - 44) Baker, W. G., Martyn, D. F., Electric currents in the ionosphere, I The conductivity, *Phil. Trans. R. Soc. London A*, **246**,

- 281-294, 1953.
- 45) Araki, T., A physical model of the geomagnetic sudden commencement, *Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves*, Washington, D. C. AGU, 183-200, 1994.
 - 46) Shinbori, A., Tsuji, Y., Kikuchi, T. et al., Magnetic latitude and local time dependence of the amplitude of geomagnetic sudden commencements, *J. Geophys. Res.*, **114**, A04217, 2009.
 - 47) Shinbori, A., Tsuji, Y., Kikuchi, T. et al., Magnetic local time and latitude dependence of amplitude of the main impulse (MI) of geomagnetic sudden commencements and its seasonal variation, *J. Geophys. Res.*, **117**, A08322, 2012.
 - 48) Motoba, T., Kikuchi, T. Lühr, H. et al., Global Pc5 caused by a DP 2-type ionospheric current system, *J. Geophys. Res.*, **107**, SMP 8-1-SMP 8-12, 2002.
 - 49) Nishida, A., Kamide, Y., Magnetospheric processes preceding the onset of an isolated substorm: A case study of the March 31, 1978, substorm, *J. Geophys. Res.*, **88**, 7005-7014, 1983.
 - 50) Kikuchi, T., Pinnock, M., Rodger, A. et al., Global evolution of a substorm-associated DP2 current system observed by SuperDARN and magnetometers, *Adv. Space. Res.*, **26**, 121-124, 2000.
 - 51) Kikuchi, T., Lühr, H., Schlegel, K. et al., Penetration of auroral electric fields to the equator during a substorm, *J. Geophys. Res.*, **105**, 23251-23261, 2000.
 - 52) Wilson, G. R., Burke, W. J., Maynard, N. C. et al., Global electrodynamics observed during the initial and main phases of the July 1991 magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **106**, 24517-24539, 2001.
 - 53) Kikuchi, T., Hashimoto, K. K., Nozaki, K., Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **113**, A06214, 2008.
 - 54) Tsuji, Y., Shinbori, A., Kikuchi, T. et al., Magnetic latitude and local time distributions of ionospheric currents during a geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **117**, A07318, 2012.
 - 55) Vasyliunas, V. M., Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere, *Particles and Fields in the Magnetosphere*, Hingham, MA, D. Reidel. Pub. Co., 60-71, 1970.
 - 56) Vasyliunas, V. M., The interrelationship of magnetospheric processes, *Earth's Magnetospheric Processes*. Norwell, MA, D. Reidel. Pub. Co., 29-38, 1972.
 - 57) Jaggi, R. K., Wolf, R. A., Self-consistent calculation of the motion of a sheet of ions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2852-2866, 1973.
 - 58) Southwood, D. J., The role of hot plasma in magnetospheric convection, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5512-5520, 1977.
 - 59) Senior, C., Blanc, M., On the control of magnetospheric convection by the spatial distribution of ionospheric conductivities, *J. Geophys. Res.*, **89**, 261-284, 1984.
 - 60) Somayajulu. V. V., Reddy, C. A., Viswanathan, K. S., Penetration of magnetospheric convective electric field to the equatorial ionosphere during the substorm of March 22, 1979, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 876-879, 1987.
 - 61) Peymirat, C., Richmond, A. D., Koba, A. T., Electrodynamic coupling of high and low latitudes: Simulations of shielding/overshielding effects, *J. Geophys. Res.*, **105**, 22991-23003, 2000.
 - 62) Rastogi, R. G., Patel, V. L., Effect of interplanetary magnetic field on ionosphere over the magnetic equator, *Proc. Indiana Acad. Sci.*, **82**, 121-141, 1975.
 - 63) Kelley, M. C., Fejer, B. G., Gonzales, C. A., An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, **6**, 301-304, 1979.
 - 64) Fejer, B. G., Gonzales, C. A., Farley, D. T. et al., Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 1. The effect of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **84**, 5797-5802, 1979.
 - 65) Gonzales, C. A., Kelley, M. C., Fejer, B. G. et al., Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 2. Implications of simultaneous auroral and equatorial measurements, *J. Geophys. Res.*, **84**, 5803-5812, 1979.
 - 66) Rastogi, R. G., Geomagnetic storms and electric fields in the equatorial ionosphere, *Nature*, **268**, 422-424, 1977.
 - 67) Rastogi, R. G., Midday reversal of equatorial ionospheric electric field, *Ann. Geophys.*, **15**, 1309-1315, 1997.
 - 68) Kikuchi, T., Hashimoto, K. K., Kitamura, T. I. et al., Equatorial counterelectrojets during substorms, *J. Geophys. Res.*, **108**, 1406, 2003.
 - 69) De Zeeuw, D. L., Sazykin, S., Wolf, R. A. et al., Coupling of a global MHD code and an inner magnetospheric model:

- Initial results, *J. Geophys. Res.*, **109**, A12219, 2004.
- 70) Shinbori, A., Nishimura, Y., Ono, T. et al., Electrodynamics in the duskside inner magnetosphere and plasmasphere during a super magnetic storm on March 13-15, 1989, *Earth Planets Space*, **57**, 643-659, 2005.
- 71) Nishimura, Y., Shinbori, A., Ono, T. et al., Storm-time electric field distribution in the inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L22102, 2006.
- 72) Yeh, H-C., Foster, J. C., Rich, F. J. et al., Storm time electric field penetration observed at mid-latitude, *J. Geophys. Res.*, **96**, 5707-5721, 1991.
- 73) Foster, J. C., Rich, F. J., Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **103**, 26367-26372, 1998.
- 74) Baker, J. B. H., R. A. Greenwald, J. M. Ruohoniemi, et al., Observations of ionospheric convection from the Wallops SuperDARN radar at middle latitudes, *J. Geophys. Res.*, **112**, A01303, 2007.
- 75) Kikuchi, T., Y. Ebihara, K. K Hashimoto, et al., Penetration of the convection and overshielding electric fields to the equatorial ionosphere during a quasiperiodic DP 2 geomagnetic fluctuation event, *J. Geophys. Res.*, **115**, A05209, 2010.
- 76) Shinbori, A., Hori, T., Tanaka, Y., Koyama, Y., Kikuchi, T., Nagatsuma, T., Global distribution of storm-time ionospheric currents as seen in geomagnetic field variations, *Adv. Polar Sci.*, **24**, 296-314, 2013.
- 77) Huang, C-S., Foster, J. C., Kelley, M. C., Long-duration penetration of the interplanetary electric field to the low-latitude ionosphere during the main phase of magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **110**, A11309, 2005.
- 78) Fejer, B. G., Jensen, J. W., Kikuchi, T. et al., Equatorial ionospheric electric fields during the November 2004 magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **112**, A10304, 2007.
- 79) Heelis, R. A., Mohapatra, S., Storm time signatures of the ionospheric zonal ion drift at middle latitudes, *J. Geophys. Res.*, **114**, A02305, 2009.
- 80) Huang, C. S., Continuous penetration of the interplanetary electric field to the equatorial ionosphere over eight hours during intense geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **113**, A11305, 2008.
- 81) Burke, W. J., Maynard, N. C., Hagan, M. P. et al., Electrodynamics of the inner magnetosphere observed in the dusk sector by CRRES and DMSP during the magnetic storm of June 4-6, 1991, *J. Geophys. Res.*, **103**, 29399-29418, 1998.
- 82) Abdu, M. A., Maruyama T., Batista, I. S. et al., Ionospheric responses to the October 2003 superstorm: Longitude/local time effects over equatorial low and middle latitudes, *J. Geophys. Res.*, **112**, A10306, 2007.
- 83) Tsunomura, S., Numerical analysis of global ionospheric current system including the effect of equatorial enhancement, *Ann. Geophys.*, **17**, 692-706, 1999.

著者プロフィール



新堀 淳樹 (Atsuki Shinbori)

＜略歴＞ 2001年東北大学理学部宇宙地球物理学科卒業／2006年東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了（理学博士）／同年 JSPS 特別研究員 PD／2009年名古屋大学宇宙地球環境研究所研究員／2010年京大大学生存圏研究所特定研究員／2015年京大大学生存圏研究所研究員、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞多様な観測データベースを用いた地球大気環境変動に関する研究。IUGONET データ解析システムの国際的な利活用を進めつつ、地球大気環境の長期変動特性を明らかにしたい。＜趣味＞旅行、映画鑑賞、鉄道など。休日は、研究活動のリフレッシュのために近場を小旅行。特に、青春 18 切符が使用できる期間は少し遠出します。