

## 森林による CO<sub>2</sub>吸収量のタワー観測ネット\*

山本 晋\*\*

### 1. はじめに

地球上の炭素は大気、海洋、陸上植生、地圏という貯蔵庫に蓄積・存在しています。また、炭素はこれらの貯蔵庫の間で気体、無機炭素、有機炭素と形を変えながら、出入りし、循環しています(このようなプロセスを炭素循環過程と呼んでいます)。現在大気中二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の増加による地球温暖化が大きな問題になっていますが、大気中の二酸化炭素が増加しているということは化石燃料消費や熱帯林の破壊などの人間活動による大気へのCO<sub>2</sub>放出(大気貯蔵庫への入)が海洋および陸上植生の貯蔵庫への出を上回って黒字、すなわち炭素の大気貯蔵量が増えていると言いかえることが出来ます。そこで、大気中二酸化炭素濃度の将来推移を予測する上で、各貯蔵庫間の炭素の出入りの定量的説明が大変重要です。

第1図は人間活動に伴い放出されるCO<sub>2</sub>(炭素)量および大気、陸上植生、海洋等の貯蔵庫内の炭素存在量と各貯蔵庫間の炭素の出入りを炭素換算(1GtC=10億トン炭素)で示したものです。ここで正味の交換量(矢印で示される相互の交換量の出入りの差でフラックスといいます)を見ると、人間活動にともなう化石燃料消費とセメント生産で5.5GtC、土地利用の変化で1.1GtCで合計6.6GtCが年々大気へ放出、これに対して陸上植生生態系で1.3GtC、海洋で2.0GtCで合計3.3GtCが年々大気から吸収されて、差引3.3GtC(=6.6-3.3)が年々大気に残留することになっています。これは大気中CO<sub>2</sub>濃度ですると約1.5ppmv/年の上昇率に相当します。なお、現在のCO<sub>2</sub>の大気中の濃度は場所や季節で異なりますが約360ppmv程度

です。ここでの単位ppmvは体積比で10<sup>-6</sup>のことで1m<sup>3</sup>の空气中に1cm<sup>3</sup>のCO<sub>2</sub>が含まれているときに1ppmvということになります。

さて、この図を見ると炭素循環過程はもう解明されているように思われます。しかし、図の数値はIPCC(気候変動に関する政府間パネル)が世界の調査研究成果をまとめて現時点で相互に矛盾の無いように調整したもので、化石燃料消費とセメント生産にともなう放出量、大気中のCO<sub>2</sub>濃度についてはかなり正確ですが、その他の正味の交換量(フラックス)については±50~±100%もの大きな誤差があるものと考えられています。また、フラックスの年々変動も大きい事が明らかになりつつあります。1995年のIPCC第2次報告では、とりわけ森林生態系の炭素吸収・放出における役割が不明とされています。

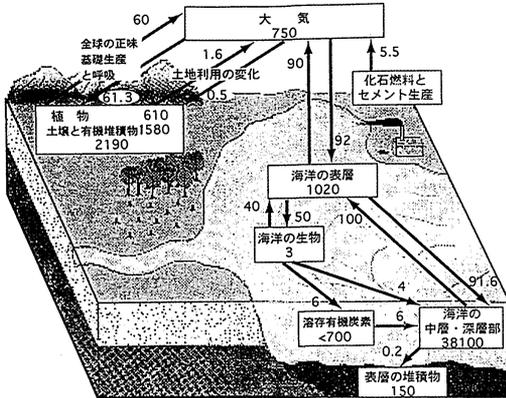
また、二酸化炭素濃度の上昇量を一定程度に押さえ安定化する上で必要となる、人間活動にともなう二酸化炭素放出量を削減、あるいは吸収・固定量を増大させる上でどんな対策技術があり、どの程度有効か等の検討が必要です。このことが1997年12月の京都における気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)以降重要な課題となっていますが、ここでの森林生態系の二酸化炭素吸収・固定量の算定方法は確定していません。このような状況下で、炭素の全球循環・収支とりわけ炭素固定・吸収における森林生態系の定量的評価手法の確立が必要となっています。

森林が光合成作用によって大気中のCO<sub>2</sub>を取り込み、有機物を生産することは良く知られていますが、この生産量の大きな部分は森林自体の呼吸により消費されて、CO<sub>2</sub>を大気に戻します。残りの部分は森林の生物部の増加となります。また、森林の生物部の一部は枯死し、落葉・落枝となって地面に落ちます。一方地面上層部の土壌は多くの有機物を含んでおり、その量

\* CO<sub>2</sub> Flux Network based on Tower Measurements in Forest Ecosystems

\*\* Susumu Yamamoto 資源環境技術総合研究所.

© 1999 日本気象学会



第1図 人間活動の影響を反映した貯蔵庫内の炭素の存在量(単位はGtC)と貯蔵庫間のフラックス(単位はGtC/年)を1980~1989年の期間の年平均値で表した。炭素循環。循環の構成は単純化されているため、かなりの不確実性を有する。さらに、この図は平均値で示しているが年々の変動が非常に大きいことが明らかになりつつある(IPCC第2次報告書(1995年:気象庁訳)より引用)。

は落葉・落枝による有機物の増加と有機物の腐敗によるCO<sub>2</sub>の放出により増減しています。有機物の分解速度は温度や土壤水分量などによります。

このように森林生物部と土壤を含むこの森林生態系での炭素吸収、分解過程には多くの要因が関連し合っているわけですが、現状では森林生態系での炭素循環は十分に解明されておらず、次のような課題が残されています。

第1に森林生態系と大気間のCO<sub>2</sub>交換量と合わせて、生物部への炭素蓄積量(材積量)、土壤中の有機炭素の蓄積量の変動を長期的に解明すること。

第2に大気中CO<sub>2</sub>濃度は年々増大していますが、それに伴う野外環境での森林の光合成速度の増加(CO<sub>2</sub>施肥効果といい、温室栽培などではその効果は確認済みです)を量的に調べること。

第3に大気中の窒素酸化物(硝酸塩やアンモニウム塩など)が沈着・降雨などにより土壤に取り込まれて生ずる土地富栄養化や気候温暖化などによる森林成長促進効果、気温上昇に伴う有機物分解速度などの増大の影響を解明することなどが重要です。

これらは長期的な課題でその解明は容易ではありませんが、現状ではこれらの課題を考える上での基礎的データや知見があまりにも不足しています。

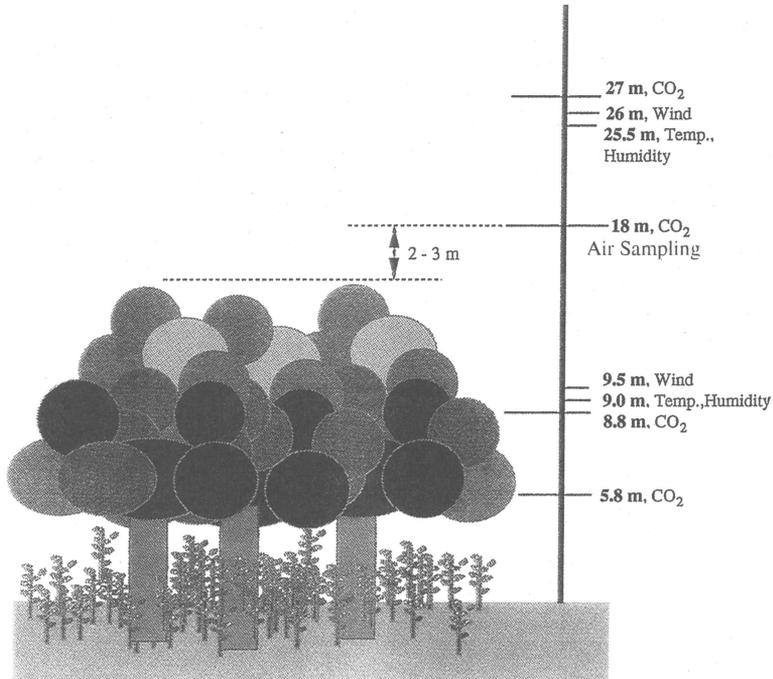
このような視点から、色々な緯度、環境での森林生

態系と大気間のCO<sub>2</sub>交換量(フラックス)の長期観測が重要であり、さらにはフラックス観測と合わせて気象条件調査、植生・光合成活動・土壤分解などの森林生態学的調査が不可欠である事を提起します。さらに、このような調査活動を進める上では学際的な研究者の共同による世界的規模での観測網(フラックスネット)の構築が重要である事を主張します。

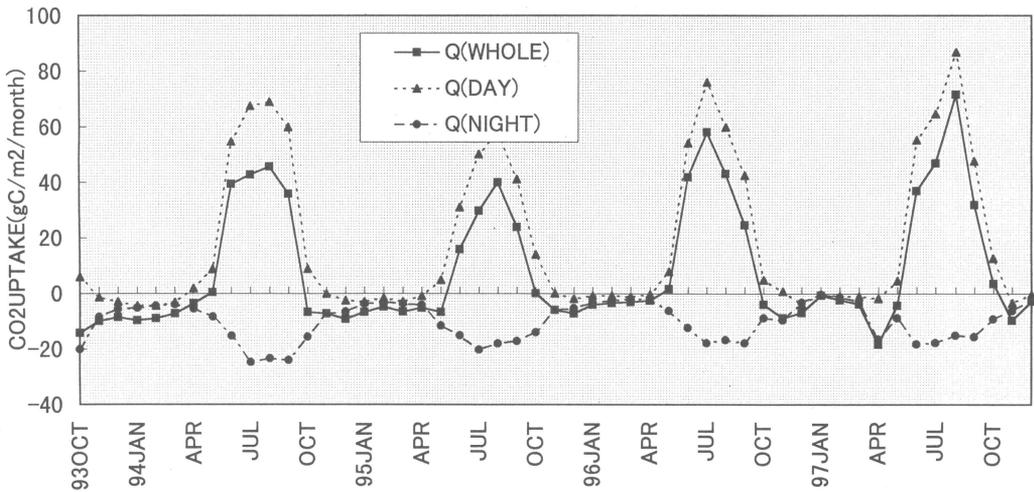
## 2. 大気と森林生態系間のCO<sub>2</sub>交換量(フラックス)のタワー観測

大気と森林生態系(森林生物部と土壤を含む系)間のCO<sub>2</sub>フラックスを野外での観測に基づき調べ、大気と森林生態系間のCO<sub>2</sub>フラックスと気象条件の関係、炭素収支の季節変化、年々変化を解明することは、森林生態系での炭素循環モデルを構築する上で不可欠です。特に、タワー観測は特定地点での森林上層と大気間のCO<sub>2</sub>のフラックスを直接的に知ることが出来、しかも長期的な連続観測に適しています。また、タワー観測地点の周辺で、森林光合成・呼吸、土壤分解、樹木の高さ・直径や成長量などの森林生態学的調査を合わせて行うことも重要です。このようなタワー観測の試みが資源環境技術総合研究所(資源環境研)を含めて世界の諸研究機関で始まっています。第2図は資源環境研が岐阜大学の流域環境研究センターと協力して行っているCO<sub>2</sub>フラックスと気象条件のタワー通年観測の状況を示すものです。タワーの測定項目としては、大気と森林生態系間のCO<sub>2</sub>のフラックス、CO<sub>2</sub>濃度の他に熱や水蒸気のフラックス、気温・風・湿度・日射量等の気象条件があります。また、森林生物量、樹種・樹冠高度、葉面積指数(単位面積の地面上にある植生(樹木)の葉の面積の総和、落葉広葉樹で3から4程度)、土壤水分・温度、土壤呼吸量、落葉や枯れ枝量とそれらの分解速度等も併せて調べられています。高山では1993年10月からこれらの観測を開始し、世界でも数少ない貴重な長期観測データを取得しています。

第3図にこの高山でのCO<sub>2</sub>フラックスの季節・経年変化(日中、夜間、全日別のCO<sub>2</sub>交換量の月別積算値、1993年10月~1997年12月)を示します。測定地点の海拔高度は1420m、平均気温7.3°C、年間降水量2400mm、積雪量1~1.5mで、主要樹種はカンバ類、ミズナラで樹高は15~20mです。森林が活動を開始する5月末から光合成が盛んになり、CO<sub>2</sub>交換量が正の値(森林へのCO<sub>2</sub>吸収)となり7、8月にCO<sub>2</sub>吸収量が最大



第2図 タワー観測の概況と観測項目. 連続測定: CO<sub>2</sub>濃度(4高度), CO<sub>2</sub>・水蒸気・熱フラックス, 風速・風向(2高度), 気温・湿度(2高度), 日射量, 放射収支量, 地表面・葉面温度, アルベド(反射率:入射光に対する反射光の割合), 地温, 土壤水分など. その他: 空気のサンプリング, 葉面積指数, 土壤呼吸, 落枝・落葉量, 樹種(カンバ類, ミズナラ等), 樹高(15-20m), 材積量など.



第3図 岐阜県高山市の冷温帯落葉広葉樹林におけるタワー観測によるCO<sub>2</sub>フラックス(UPTAKE)の季節・経年変化(1993年10月から1997年12月の日中(DAY), 夜間(NIGHT), 全日(WHOLE)別のCO<sub>2</sub>交換量の月別積算値).

第1表 世界の各種森林でのタワー長期観測から求めた森林生態系の炭素吸収・固定量(単位は tC/ha/年). 気象条件等: 気温(°C), 降水量(mm), 海拔高度(m), 葉面積指数(LAI).

測定地点(報告者)	炭素吸収・固定量	気象条件等	
Massachusetts, USA (Wofsy et al., 1993) 落葉樹林 (oak, maple, pine)	3.7 (1991)	7.5°C	--- mm 340 m
Massachusetts, USA (Goulden et al., 1996)	2.1 (1994)	---	---
Oak Ridge, TN, USA (Greco et al., 1996) 落葉樹林 (oak, hickory, maple)	5.3	13.9°C	1350 mm LAI=4.9 365 m
Cantral Italy (Valentini et al., 1996) 落葉樹林 (almost pure beech)	4.7	7.2°C	1100 mm LAI=4.6 1564 m
Rondonia, Brazil (Grace et al., 1996) 熱帯雨林 (palm rich)	1.0	---	---
Manaus, Brazil (Malhi et al., 1997) 熱帯雨林	5.8	---	2200 mm LAI=5-6 ---
Saskatchewan, Canada (Black et al., 1996) 亜寒帯林 (aspen, jack pine, hazelnut)	1.3	---	458 mm LAI=3.3 1564 m
Takayama, Japan (Yamamoto et al., 1998) 落葉樹林 (birch, oak)	1.2 (1994)	7.3°C	2382 mm LAI=3.5 1420 m

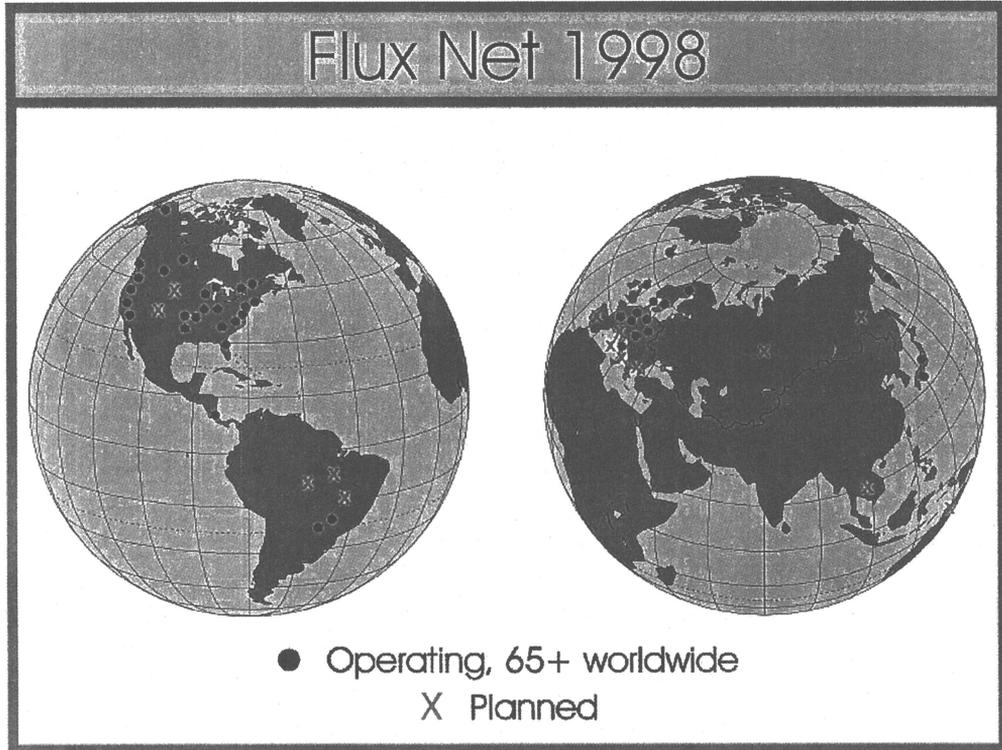
なっています。9月になると森林の生産活動が弱まり CO<sub>2</sub>吸収量は急減します。落葉の時期は10月上旬で、積雪は12月上旬から4月中旬の間見られます。この地点では5月にはまだ樹木の葉は展開していない、また10月には樹木はほぼ活動を停止していると考えられるにもかかわらず、5月および10月において CO<sub>2</sub>の森林生態系への吸収が見られるのは、日射が林内に入るこの時期に林床に生育するクマイザサ群落が光合成活動をしていることによると思われます。積雪の見られる12月から4月の間は日中、夜間共に小さな負の値を示していることから、積雪期間中も少量ながら CO<sub>2</sub>が森林生態系から大気に放出されている事がうかがえます。また、夜間の CO<sub>2</sub>交換量(負の値で CO<sub>2</sub>の放出)は植物体の呼吸量および土壌からの CO<sub>2</sub>放出量が温度に依存している事を反映して7, 8, 9月に大きくなっています。1994年夏季と1995年夏季の日中の CO<sub>2</sub>吸収量を比較しますと、後者は前者の70%程度と小さく、特に6, 7月にその傾向が顕著です。このような年々変動は森林の光合成量、有機物分解量が日射量、気温の変化に依存することによると考えられ、将来の気候変動により CO<sub>2</sub>吸収量が変わることを示唆しています。

世界数か所で行われているこのようなタワー通年観測による CO<sub>2</sub>吸収・固定量の推定結果を第1表にまとめて示します。それによると1-5 tC/ha/年とその幅は大きい、いづれの地点でも森林生態系が CO<sub>2</sub>を吸収

しているという結果になっています。この結果を用いて、世界の保護林(530万 km<sup>2</sup>: 全森林面積の13%)による CO<sub>2</sub>取り込み量を推定すると0.6-2.2 GtC/年となります。この数値は現場での直接的な CO<sub>2</sub>フラックスの測定結果から得られたものですが、IPCCが化石燃料消費と熱帯林破壊などの土地利用変化に伴う大気への放出量から大気への残留量と海洋への吸収量を差し引いた残りとして1995年の第2次報告書で想定した森林再生やその他の植生活動による吸収・固定量推定値(0.5-1.9 GtC/年)に相当する値である事は注目されます。しかし、緯度、樹種、気象条件等の多様性を考慮すると、全地球的な森林の CO<sub>2</sub>収支における役割を解明する上では現状の CO<sub>2</sub>フラックスの長期間測定地点数は絶対的に不足しており、さらに増やす必要があるといえます。地球圏と生物圏で起きる種々の人間活動の影響の解明をめざす地球圏・生物圏国際共同研究計画(IGBP)では大気/植生 CO<sub>2</sub>交換量測定の強化と測定データの相互交換と集約体制の構築を呼びかけています。

### 3. 世界のフラックス測定ネット構築に向けての動き

現在アメリカやヨーロッパではすでにフラックス測定網(AmeriFLUX, EOROFLEX)が構築されており、これら相互の連携を図り、発展させて世界のフラックス測定ネットを構築しようという動きが始まっています。



第4図 世界のフラックス測定ネット (FLUXNET 1998) の測定地点の概況 (計画もふくむ) (オークリッジ国立研究所作成のホームページ <http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/NIGEC/fluxnet> より引用).

す。1998年6月にアメリカのモンタナ州ボルソンで世界のフラックス研究者のワークショップ (FLUXNET 1998) が開かれ、筆者も参加しました。そこでは、フラックス研究の現状と課題、世界のフラックスネット構築 (FLUXNET) について活発に議論されました。その内容をまとめて紹介しましょう。

#### 1) FLUXNET の目的

現地観測に基づき、森林スケールでの炭素、水、熱のフラックスデータの集積、フラックスデータと森林生態学的調査の統合による CO<sub>2</sub>の交換、炭素収支の諸プロセスのモデル化を図る。さらに世界の研究者の協力により、種々の緯度、気候、樹種条件下でのフラックス観測のデータベースを構築し、グローバル/大陸スケールでの炭素、水、熱のフラックスの分布を定量的に解明する。

#### 2) 現在測定しているあるいは計画されている世界の森林種別測定箇所

計画も含めて北アメリカの測定ネット (Ameri-Flux) で35地点、ヨーロッパ (EUROFLUX) 18地点、

南アメリカ、アジア、オセアニアなどで26地点あります。ここ1-2年で測定地点が大幅に増えて、現在60地点以上で観測が開始されています。

第4図に計画も含めて、世界の測定地点の位置を概略示します。樹種別地点数は混交林：3、温帯・広葉林：21、温帯・針葉林：22、亜寒帯広葉林：1、亜寒帯針葉林：7、熱帯林：3、半乾燥林地：16、高山植物地域：6、北極地域：4、草地：7、穀物農地：6、湿地：1となっています。地点数が不足しているアジア、アフリカ、南アメリカ、オセアニア等の測定の増強が必要です。また、測定地点の多くは保全状態の良い森林に設営されていると考えられますが、人為的な伐採、自然災害、森林火災等を受けた履歴の異なる地点での測定も重要となります。

#### 3) 今後の課題

全地球的な炭素収支の解明には個々の地点での解析と共に世界的なスケールでのデータの交換と集積 (データベース化) が重要になります。たとえば、航空機による広域観測や衛星観測などの結果と多数地点で

のタワー観測データを相互に比較したり、全地球スケールでの森林生態系による炭素吸収・固定量の推定に多地点のタワーデータを利用するためにはデータの均質性、測定法や測定結果の解析方法・解析項目などの標準化が不可欠です。

また、現在フラックス測定においては渦相関法という方法が広く使用されていますが、その問題点も指摘されており、フラックス測定誤差の検討も必要です。さらには、フラックスの年々変動の要因を解明する上では10年程度の長期測定データ、生態学的調査のデータの集積も大切です。

#### 4. 日本/アジアの CO<sub>2</sub>フラックス測定ネットの確立

日本の研究者による森林での CO<sub>2</sub>フラックス長期測定地点は国内で3-4か所、東南アジア・シベリアで数か所ありますが、個別に行われているのが現状です。また、シベリアやアジアにおけるフラックス測定網の構築の重要性とそこでの日本の役割などを考えると、残念ながら日本の動きは遅れています。

しかし、日本においては環境問題を軸にして、微気象学、水利・水文学、農業気象学、植物生態学など諸分野において CO<sub>2</sub>/水収支、CO<sub>2</sub>、水蒸気、熱フラックスに関心を持っている研究者が多数おり、日本においてフラックス測定ネットを構築出来る可能性は高いといえます。

このような状況の中で資源環境研と農業環境技術研究所の研究者が日本の IGBP の委員会に呼び掛けて、

1998年8月25日に、東京でフラックス研究会を開きました。ここでは色々の目的で二酸化炭素・水・熱収支などを野外で観測している研究者が一堂に会し、それぞれの研究対象と目的を紹介し、協力可能な内容について話し合い、さらには研究情報の交換、ネットワークのあり方について検討しました。研究会での議論のポイントは以下のようです。

- IGBP のフラックス測定ネット、世界のフラックス測定ネット (AmeriFLUX, EUROFLUX) の現状の紹介に基づき、日本での取り組みの方向を考える。
- 研究会参加の研究グループから観測内容、研究目的の紹介を通して、フラックス観測・研究者の交流と相互理解を図る。
- 陸上植生生態系での炭素循環モデルや気候と陸上植生分布・構造の関係を調べるモデルなどの構築やその検証へのフラックス観測成果の活用方法、フラックス観測と森林生態学的調査との結合の重要性などについて議論する。
- これらの議論を通して可能な研究協力、ネットワークのあり方、研究会の方針を検討する。当面、研究者リストを作成し、研究情報の交換/研究者ネットワークの形成、フラックス研究集会を定期的に開催する。

フラックス研究会ではこのような活動のなかで日本のフラックスネットを構築し、国内のみならずアジア、シベリアでの森林生態系の炭素吸収・固定量の推定に貢献したいと考えています。皆様のご参加とご協力をお願いします。