

地球一括計上

課題名	温暖化適応策導出のための長期森林動態データを活用した東アジア森林生態系炭素収支観測ネットワークの構築		
担当研究機関	独立行政法人森林総合研究所		
研究期間	平成21－25年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	96,770千円（うち25年度 17,107千円）
研究体制	<p>(1) 東アジアの多様な森林の動態と炭素固定能評価（独立行政法人森林総合研究所）</p> <p>(2) 効果的な適応策導出に向けた長期観測ネットワークデータの活用と共有化の促進（独立行政法人森林総合研究所）</p>		
研究概要	<p>1. 序（研究背景等）</p> <p>地球温暖化に対して緩和策や適応策を適切に講じることは、持続可能な社会を形成・維持する上で今後益々重要となってくる。森林は比較的低コストで効果的な緩和策が実行できる分野として期待されているが、同時に複雑な森林生態系への影響評価の科学的な不確実性をいかに低減できるかが問題となる。近年のアマゾンでの研究事例からも、森林生態系への広域的な気候変動がもたらす影響評価には、複数の試験地による長期間の継続観測が有効であることが示されている。すなわち、単一の試験地のデータだけでは検出困難な変化についても、複数の試験地を比較することで、科学的根拠を持って温暖化影響とそのメカニズムを明示することが可能となる。そして、温暖化影響のより正確な把握があって、はじめて緩和策や適応策を考えることが可能となる。このことから、今後の温暖化対策を考える上で森林を対象とした広域な森林生態系炭素収支観測ネットワークの構築は、科学的にも環境政策的にも極めて重要である。東アジア域の炭素収支に関する観測ネットワークは、フラックス観測サイトのネットワークであるAsiaFluxの例があるが、まだ十分であるとは言えない。多様な森林生態系からなる東アジア域を広域にカバーする観測ネットワークを早急に組織化する必要がある。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本課題では、大きく二つの目的を有する。一つ目の目的は、シベリアの亜寒帯針葉樹林から熱帯降雨林まで、主要な森林生態系の炭素収支への温暖化影響評価の基礎となる炭素動態を正確に把握するために、森林総合研究所が東アジア各地に設定した既存試験地を用いて、森林生態系炭素収支観測ネットワークを構築することである。各試験地のデータを用いた成長量や枯死率の相互比較を行い、「生態学的積み上げ法」によって炭素収支の時系列変化の解析を行う。二つ目の目的は、観測ネットワークのデータの共有化と利用促進である。すなわち、これら蓄積したデータを本ネットワーク専用のインターネットサイトに公開し、国内外の研究者や技術者が利用できる環境を整える。</p> <p>最終年度である平成25年度は、これまでに取得したデータをもとに、以下の取り組みを行った。まず、二酸化炭素について温暖化寄与率の高い温室効果ガスであるメタンおよび一酸化二窒素の亜寒帯林の土壌からの放出量の年々変動を土壌環境との関係を交えて解析を行った。次に各試験地において、地上部現存量と純一次生産量の年々変動を長期間にわたる複数回の毎木データから算出し比較を行った。また、攪乱が森林動態および炭素蓄積に影響を及ぼすことから、攪乱に伴う林冠環境の違いによる現存量の変化を熱帯降雨林の試験地で解析した。また、炭素プールの中で無視することができない枯死木量とその動態について、熱帯季節林および熱帯降雨林の試験地で比較を行い、森林生態系内の5炭素プール量（地上部現存量、地下部現存量、落葉量、枯死木量（粗大有機物量）、土壌）とその構成比の比較を行った。</p> <p>また、東アジア域での森林生態系の炭素動態研究の発展を図り、国内外の研究者間の科学技術の連携を強化するため、これまでに蓄積したデータを本課題専用のホームページに公開し、国内外の研究者や技術者が利用できる環境を整えることを目的とした。</p> <p>3. 研究の内容・成果</p> <p>(1) 東アジアの多様な森林の動態と炭素固定能評価</p> <p>① 亜寒帯落葉針葉樹林生態系からのメタン、一酸化二窒素放出量</p> <p>永久凍土地帯のカラマツ林生態系である Tura 試験地において、林床植生である蘚苔地衣類の種類</p>		

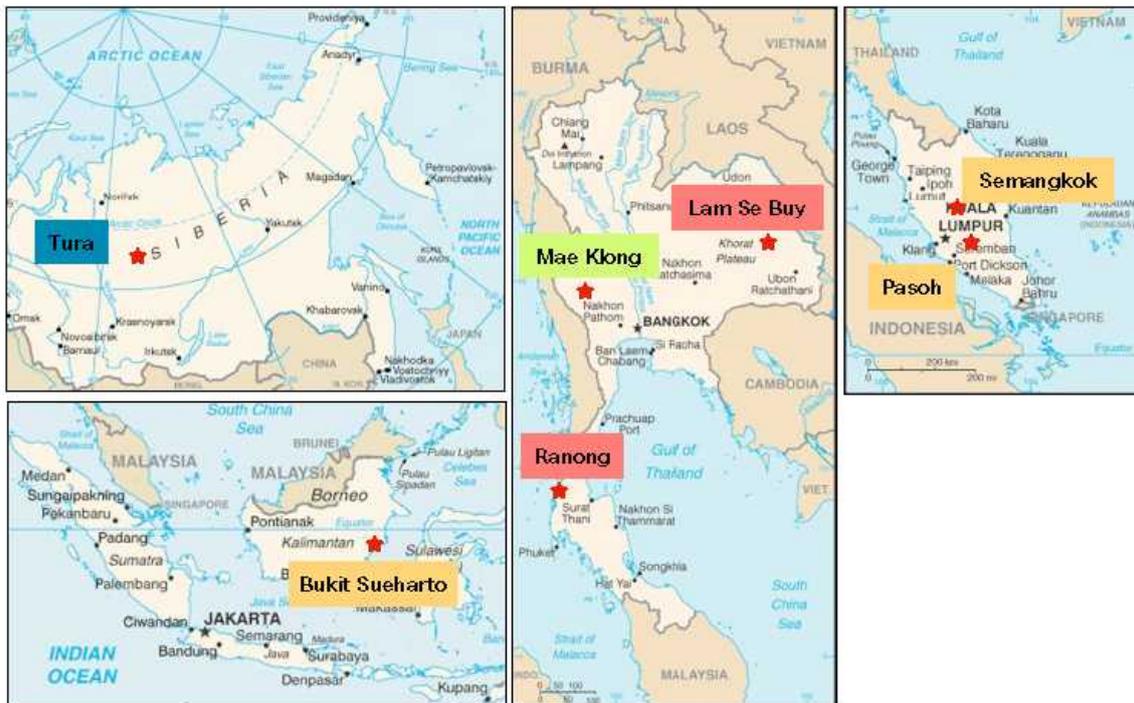


図1 ネットワークを構成する試験地  
地図は University of Texas Libraries による。

の違いに着目して、メタンおよび一酸化二窒素のガスフラックス観測をおこなった。メタンおよび一酸化二窒素フラックスについて、植生毎に違いは不明瞭だったが、メタンフラックスについては観測年による違いが見られた。通常の年の1.5倍以上の降水があった2007年では、メタンは前二年とは逆に土壤から大気へ放出していた。一酸化二窒素フラックスについては、メタンフラックスと同様に、土壤水分率と有意な相関関係があり、土壤水分率が高いほど一酸化二窒素フラックスが低下して、さらに土壤水分率が高い条件下では、土壤が大気から一酸化二窒素を吸収していた。本観測地の森林土壤においては、降水量の増加によって、土壤水分率の上昇が引き起こされると、メタンおよび一酸化二窒素の収支がそれぞれ逆転する可能性が示唆された。

## ②地上部現存量の変化

Semangkok試験地およびPasoh試験地では、過去20年にわたって大量枯死を引き起こす大規模な攪乱は発生しておらず、地上部現存量に大きな変動は認められなかった(図2a)。Semangkok試験地では、尾根を中心に*Shorea cutrisii*の大径木が優占しており、このことが平均500Mg ha<sup>-1</sup>を超える高い地上部現存量(AGB)を示す要因となっている。Mae Klong試験地の地上部現存量は、上述のPasohなどの熱帯降雨林に比べて著しく低く推移していたが、これら森林火災や群生するタケの影響があるものと考えられる。

択伐と火災攪乱の影響を受けたBukit Soeharto試験地では、攪乱強度の違いによって地上部現存量とその年々変動に差が見られた。2012年時点の弱度攪乱区の地上部現存量(293.40 Mg ha<sup>-1</sup>)を基準とした場合、同時期中規模攪乱区および弱度攪乱区の現存量の値は、それぞれ37%と20%に相当した(図2b)。強度の攪乱(択伐と火災)を受けた場合、択伐後15年以上経過しても地上部現存量の観点からは回復が難しいことを今回の結果は示していた。林分構造の調査からは、択伐前の1997年時点の樹木種数よりも2010年時点の種数が増加していた。択伐後に187種が新たに加入したが、一方で同時期に85種消失したしており、攪乱前後で種組成が大きく変化していた。このことは単純に種数の変化だけでは多様性の評価は難しいことを示唆している。単位面積当たり多数の樹種が生育する一方で一樹種当たりの個体数が少ない熱帯雨林では、攪乱により消失を伴う種組成の変化が生じる可能性が高いことに留意する必要がある。

タイ南部のアンダマン海沿岸に成立するマングローブ林であるRanong試験地では、2004年11月のスマトラ沖地震の津波による攪乱を受け、小径木を中心に折損、枯死などの被害が見られた。しかし、地上部現存量の低下は認められず、その後に増加する傾向を示した(図2c)。このことは、マングローブ林の持つ津波攪乱への耐性の高さを示す一例であると言える。

河畔に成立するLam Se Buy試験地の樹種構成および林分構造は、季節的冠水により作られる湿地的な条件に対応して変化していた。すなわち定期的に冠水を受ける地盤高の低い林分(L区およびM区)

では小径木が高い密度で生育し、冠水が希な高地盤（H区およびHH区）では密度は低いが大径の個

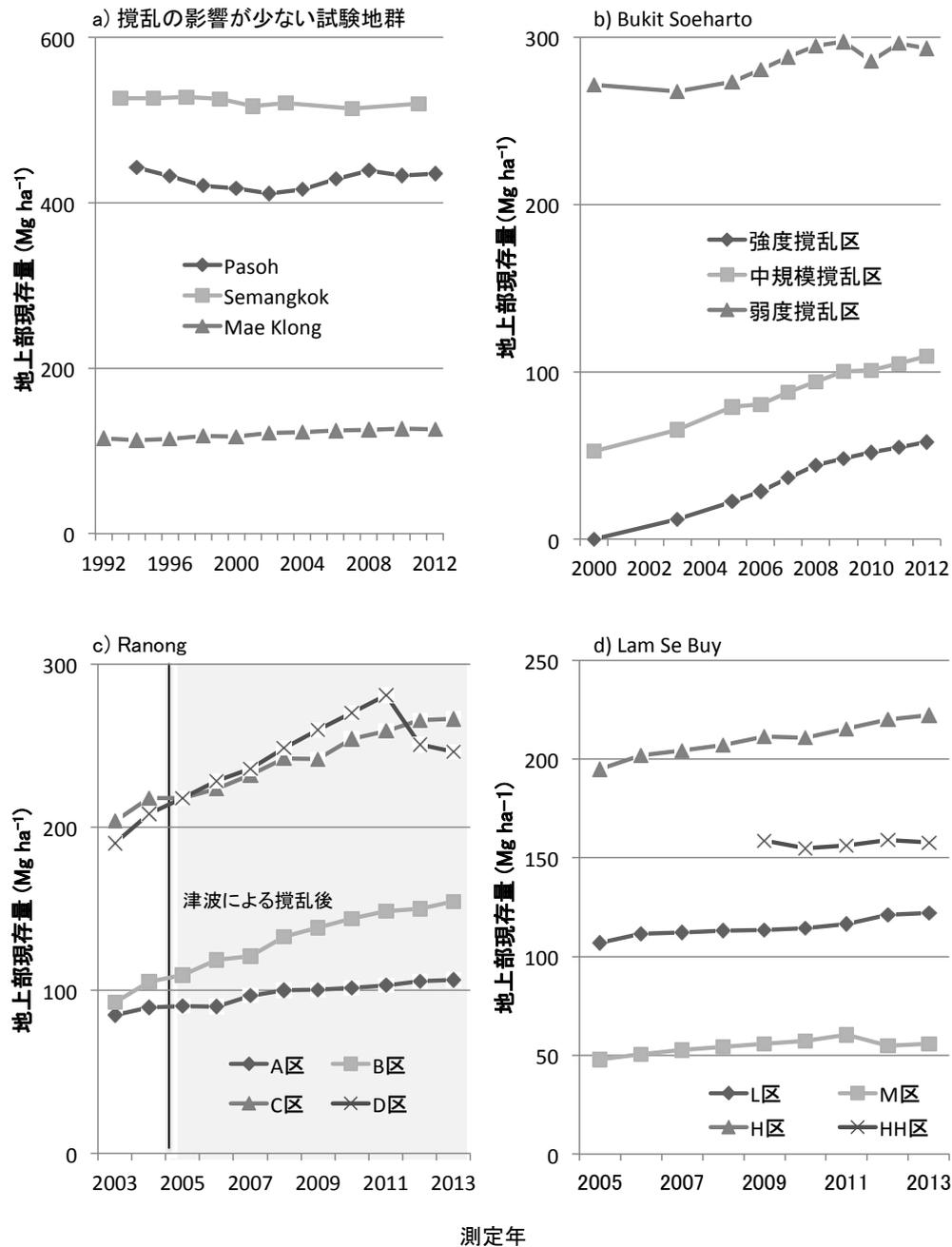


図2 ネットワークを構成する試験地の地上部現存量の年々変動

体が多いことから高現存量を示した（図2 d）。

### ③ 林冠ギャップの変化と地上部現存量の変化

Semangkok試験地およびPasoh試験地の林冠ギャップの空間的な広がり異なる二時点で比較した結果、両試験地ともにギャップの割合に大きな変化は見られなかった。林冠の閉鎖の度合い（開空度）を尺度として閉鎖林冠とギャップに区分した結果、両試験地ともにギャップ下では林冠構成木の枯死による地上部現存量の減少する傾向にあった。Pasoh試験地では大径木（DBH90cm以上）の個体数がSemangkok試験地に比べて相対的に少なく、その結果、地上部現存量が全体的に低くなっている。また、DBH50～90cmクラスの個体数の変化と地上部現存量の増減傾向が一致しており、林冠ギャップでは個体数と地上部現存量の低下（ $-3.10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）、閉鎖林冠下では個体数と地上部現存量の増加（ $4.08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）がそれぞれ認められた。林冠ギャップ下では、枯死した倒木が多く発生することから、現存量の低下と相俟って炭素プールの構成比が大きく変化すると考えられる。今回、17年後の林冠ギャップの分布状況を比較した結果、個々のギャップの広がり若干の変化は見られたものの、全体に占めるギャップの割合に大きな変化は見られなかった。これは期間中に大きな攪乱が発生しなかった

ことが大きな要因と考えられる。一方で小面積の林冠ギャップは閉鎖速度が早いいため、測定間隔が長いと把握できない可能性が高い。したがって、より正確な動態を把握するために今後は短い間隔（たとえば3～5年間隔）で林冠ギャップの調査をする必要がある。

#### ④粗大有機物量とその動態

熱帯季節林の Mae Klong 試験地における CWD 現存量は平均  $9.02 \pm 3.81 \text{ Mg ha}^{-1}$  となり、熱帯降雨林 (Semangkok 試験地および Bukit Soeharto 試験地) に比べて極めて少ない値であった。これは主に粗大有機物量 (CWD) の共有源となる地上部現存量が少ないことによるものと考えられた。試験地内で樹木個体群と混交しているタケの枯死量は約  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  となり、特に *Gigantochloa hasskarliana* が優占するプロットで多い傾向にあった。これら枯死木量の空間的なバラつきから、熱帯季節林では森林火災が CWD やタケのネクロマス量の増減に影響を与えていると考えられた。

Semangkok 試験地の平均 CWD 現存量 (±標準誤差) は、 $81.43 \pm 19.66 \text{ Mg ha}^{-1}$  であり、バラツキが大きかった。各プロット区を大きく4つの微地形 (頂部斜面; 上部斜面; 中部斜面; 下部斜面) に区分し、それぞれの区分の CWD 現存量を求めた結果、中部斜面が最も大きく、上部斜面、頂部斜面、下部斜面の順に減少していた。調査区は頂部斜面から谷頭斜面にかけて *Shorea curtisii* が突出木層を形成しており、これら *Shorea curtisii* が幹折れや根返りなどで CWD として少なからず林床へ供給されている。谷頭斜面にて CWD が多い要因として、斜面上方から *Shorea curtisii* を中心とする倒木が供給されるためと考えられた。

Bukit Soeharto の 9-ha 試験地内の CWD 量は、サンプル区間で大きく異なり、全サンプル区の平均 (±標準誤差) で  $69.92 \pm 9.05 \text{ ha}^{-1}$  であり、Semangkok 試験地 ( $81 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) に比べて少ない値であった。これは主に CWD の共有源となる地上部現存量が択伐や火災の影響を受けて減少していることによるものと考えられた。択伐の強度と CWD 量の関係を見ると、非択伐の対照区では大径木が伐採されずに CWD の供給源となったことから、CWD 量も相対的に多くなったと考えられる。一方で伐採強度の高かったサンプル区では、大径木が択伐ですでに搬出されていることから、CWD の供給が少なかったと考えられる。

#### ⑤ 炭素プールの試験地間比較

熱帯域の4試験地の5炭素プールの構成比は、試験地間で大きく異なっていた。Semangkok 試験地、Pasoh 試験地共に全体の約6割が AGB で占められており、他の炭素プールも似たような構成となっていた。一方、同じ熱帯降雨林である Bukit Soeharto 試験地では、全炭素プール量が  $220 \text{ Mg-C ha}^{-1}$  程度であり、その構成比も大きく異なっていた。AGB の全体に占める割合が少なく、逆に CWD の占める割合が高くなっていた。これは主に Bukit Soeharto 試験地が火災攪乱と択伐の履歴があり、大径木の割合が相対的に少ないことによるものと考えられた。熱帯季節林である Mae Klong 試験地では、AGB が最も大きな割合を示すことは他の試験地と変わらなかったが、土壌の占める割合が極めて高い特徴があった。一方で CWD の占める割合は約3%と少なかったが、これは CWD の供給源となる AGB 自体が少ないことに起因すると考えられた。

#### ⑥ 純一次生産量の比較

モニタリングデータから算出した地上部純一次生産量 (ANPP) の平均値は、地上部現存量同様に試験地間でバラつきが大きかった (図3)。Tura 試験地では、CR1978 プロットを除いた全てのプロットで  $3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  以下の値を示した。また、火災攪乱後に再生過程の ANPP を比較すると、再生後約30年の CR1978 にピークを持ち、その後は減少する傾向を示した。一方、熱帯域の森林では、 $7.15 \sim 25.61 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  の範囲の値を取っていた。熱帯季節林である Mae Klong 試験地では  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  以下の平均値を示していたが、これは地上部現存量が熱帯降雨林のそれに比べて少ないことに起因すると考えられた。

熱帯湿地林の Ranong 試験地の ANPP は他の森林タイプに比べて変動が大きい傾向にあったが、これは2004年12月のスマトラ沖大地震の津波攪乱の影響によるものである。Ranong 試験地では、2004年12月の津波による攪乱で現存量の増加が認められず、それに伴った ANPP の低下が見られた。しかし、その後、ANPP は増加して徐々に回復する傾向にあった。マングローブ林である Ranong 試験地は、他の森林タイプとの比較からも明らかのように相対的に高い生産量を示しており、津波に対する高い耐性を有する種組成と高い生産力が回復につながっていると考えられた。

### (2) 効果的な適応策導出に向けた長期観測ネットワークデータの活用と共有化の促進

#### ① 本課題における情報発信

モニタリングプロットをネットワーク化した CTFS (The Center for Tropical Forest Science)-SIGEO (Smithsonian Institution Global Earth Observatories) や ForestPlots.net などのデータ公開への取り組みを参考に、本課題専用の HP にて各試験地の毎木データを中心に一般公開を開

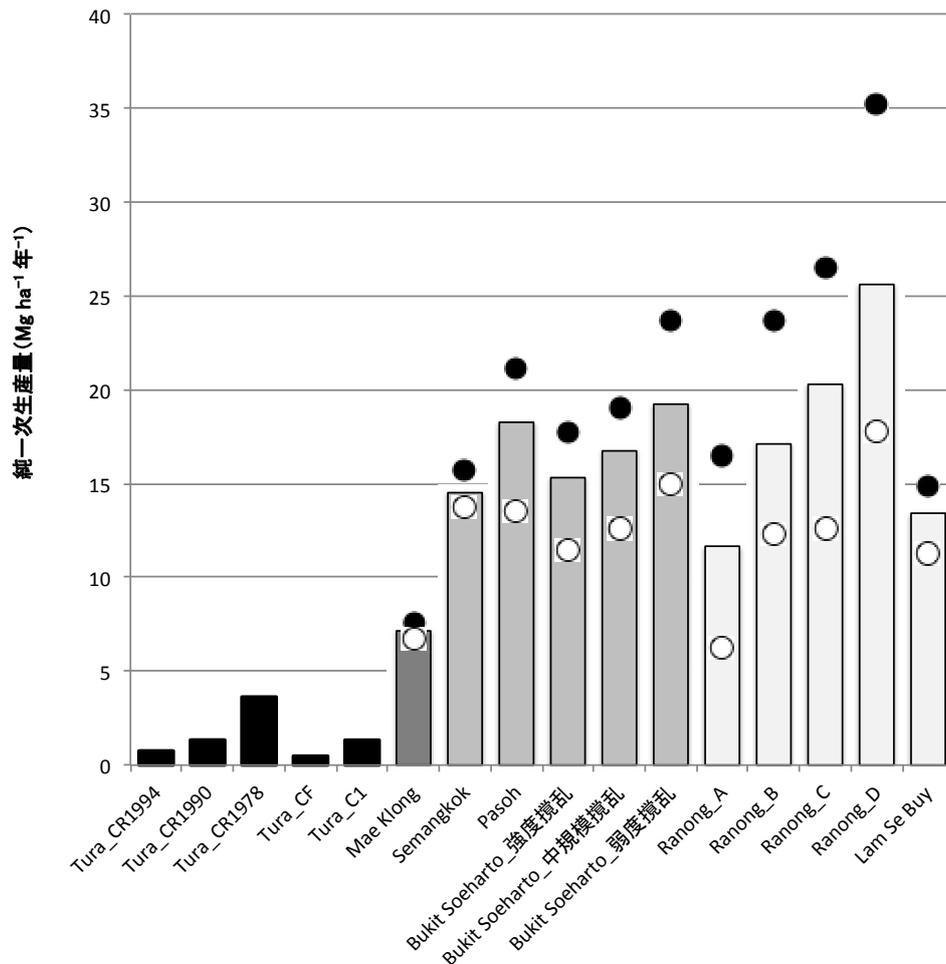


図3 ネットワークを構成する試験地の地上部純一次生産量 (ANPP) の比較  
 黒丸は測定期間中の純一次生産量の最大値、白丸は最小値をそれぞれ表す。攪乱を受けた試験地 (Bukit Soeharto [択伐と火災]、Ranong [津波]) では年々変動の幅は大きくなる。

始した (URL <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/EA-FDPN/datasets/datasets-index.html>)。

データ公開は試験地ごとにまとめられており、利用者のためにデータの構造などの解説を加えている。データフォーマットは、特定のソフトウェアでの使用を想定せず、CSV形式で提供することとした。また、データの使用に関しては、事前申請の形式は取らず、解析などにデータを利用した旨を論文中に明記することを求めることとした。

## ②温暖化交渉など国際的な枠組みへの貢献

REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Degradation in Developing countries) として知られている取り組みは、森林減少および劣化に伴う温室効果ガス排出量の削減努力に対して資金的なインセンティブを与えるというものであり、今後の重要な取り組みのひとつと考えられている。2007年のCOP13以降は「森林保全、持続可能な森林管理、森林炭素貯留量の増加」を加えてREDD+ (レッド・プラス) と呼ばれるようになり、UNFCCC COP14以降の国際交渉の場では+ (プラス) の部分を含めた議論が進められている。これら国際交渉の中でREDD+の重要性は増すばかりであるが、技術的および制度的に克服すべき問題が多い。森林減少が抑制されていることをどのような手法で把握するのも大きな問題である。REDD+を実行するためには、衛星情報と地上調査を組み合わせた手法が中心となるが、森林劣化を衛星では把握することは困難であり解決すべき問題も多い。

炭素蓄積量を把握する一つの手法として固定試験地群による継続観測 (いわゆる Permanent Sampling Plots; PSP) を用いる方法がある。PSPを用いて高い精度で森林の炭素蓄積量を推定するためには、森林タイプの適切な階層化とそれら階層ごとに十分なサンプル数が確保される必要がある。各森林タイプがどの程度の炭素蓄積量が存在し、かつどの程度バラつくのかを把握することで、許容された推定誤差に抑えるためのサンプル数を求めることが可能となる。一方でこのような計算が可能なデータを保有している国や地方は多くないのも実情である。本課題の試験地は、ヘクタール規模の

毎木データを複数回分有しており、森林の炭素蓄積量のバラつきを予備的に把握するための予備的なデータとなり得る。本課題のネットワークは東アジア広域を対象にしており、上記 REDD+の取組に対しても有用なデータを関係者に提供できるものであり、今後もそのために継続観測の環境整備を続けていく予定である。

### ③周極域の森林生態系研究の展開の可能性

本ネットワークの一部を構成する北東アジアの亜寒帯林については、熱帯域に比べて比較研究できる条件が限られており、北欧や北米などの研究と比較を進める必要がある。亜寒帯林研究の国際集會での成果発表を通じ、北東ユーラシアを含めた亜寒帯林の最新の研究動向に関する情報収集を進めた。本研究によって得られた北東ユーラシアのカラマツ林の知見は、北米アラスカ内陸部やカナダ北西準州の永久凍土不連続分布域のトウヒ林と共通する現象が見出された一方で、森林地帯には凍土が分布しない北欧諸国の研究成果との違いも明瞭になった。

## 4. 考察

森林総合研究所では過去 20 年にわたり東アジア広域で森林動態および炭素動態に関する研究を継続してきた。本課題では、気温と乾湿の環境傾度を基準にした森林区分により、東アジアの代表的な森林植生をほぼ網羅した観測ネットワークである EA-FDPN を組織してモニタリングを継続してきた。森林動態に関するこのような広域なネットワーク化は東アジアでは類を見ないものであり、長期観測により得られる科学的意義も大きいものと期待される。また、本課題の成果は、今後の温暖化に係る国際交渉の場 (IPCC SBSTA や REDD 等) で環境省等の政策決定者に有用な情報となることが期待され、環境保全行政の面からも意義深い。本課題による情報発信やデータ共有化の促進は、我が国のみならず東アジア諸国の研究環境の向上に貢献できると考えられる。

亜寒帯林については、北東ユーラシアの永久凍土連続分布域に成立したカラマツ林生態系の研究成果を、国際学会 (シンポジウム) などの場で継続的に発信してきた結果、日露の共同研究成果は高い評価を受けている。今後ともモニタリングを継続することによって、凍土が分布しない北欧諸国を含めた周極域の森林生態系比較にも大きく貢献することが期待される。