

機関番号：82105

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19380095

研究課題名（和文） 台風攪乱を受けた落葉広葉樹林の攪乱前後のタワーフラックスの変化と CO₂ 収支の解明

研究課題名（英文） Typhoon disturbance effects on carbon dioxide budget and fluxes in broad-leaved forest.

研究代表者

宇都木 玄（UTSUGI HAJIME）

独立行政法人森林総合研究所・北海道支所・チーム長

研究者番号：40353601

研究成果の概要（和文）：地球温暖化に伴い台風の大型化が予想され、森林の CO₂ 収支を評価する上で、台風被害の影響を無視できない。そこで森林が台風攪乱を受けた場合、攪乱前と同じ CO₂ 吸収機能を発揮できるか研究した。台風被害を受ける前後の森林生態系の CO₂ 収支を計算したところ、風害前は光合成による吸収量が土壌や枯死木による放出量を上回っていた。風害後は両者が逆転し、森林生態系として CO₂ の放出に変化することが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：The enlargement of the typhoon is expected along with global warming, and the influence of the typhoon disturbance cannot be disregarded in evaluating the forest CO₂ budget. Then, the forest function for CO₂ absorption after typhoon disturbance was researched. Before the wind damage, the absorbed amount of CO₂ by photosynthesis in the forest canopy had exceeded the CO₂ emission by respiration in soil and coarse wood debris. After the wind damage, both photosynthesis and respiration reversing, CO₂ was emitted from forest ecosystems into atmosphere.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 7,800,000 | 2,340,000 | 10,140,000 |
| 2008年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2009年度 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |
| 2010年度 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,700,000 | 4,410,000 | 19,110,000 |

研究分野：森林生産生態学

科研費の分科・細目：林学／林学・森林工学

キーワード：台風攪乱、炭素収支、落葉広葉樹林、タワーフラックス観測、プロセス、NPP、NEP、GPP

1. 研究開始当初の背景

現在、約 300 カ所におよぶ世界各地の森林で大気-森林間の CO₂ フラックス（タワーフラックス）や炭素循環プロセスが観測されているが、多くは単一樹種・同齢個体で構成された安定した森林を対象としており、また自然攪乱の前後でタワーフラックスと炭素循

環プロセスを比較観測した例はない。一方、森林生態系の安定性における自然攪乱の重要性が 80 年代より世界各地で認識されてきており、アジアモンスーン下にある日本では台風による自然攪乱がもっとも普遍的であると考えられる。さらに、地球温暖化にともない、相対的に強い熱帯低気圧が増える事が

予想されており、森林生態系の CO₂ 収支を評価するうえで台風攪乱の影響は無視できないものとなっている。これまで、森林生態系の CO₂ 収支に及ぼす攪乱の影響は、人為攪乱については、森林と皆伐地のタワーフラックスの比較、皆伐更新地における生態系フラックスの観測などが着手されているが、伐採木を持ち出すなど自然攪乱と条件が全く異なっている。一方、自然攪乱については、攪乱後の遷移段階の異なる林分の CO₂ 収支の比較がなされている程度で、攪乱直後から森林の回復に至る過程で、個別の炭素循環プロセスやその総和としてのタワーフラックスが実際にどのように変化するかは未解明のままである。札幌市羊ヶ丘の落葉広葉樹林では、2001 年よりタワーフラックスと樹木-土壌系の炭素循環プロセスを明らかにしてきた。しかし、2004 年 9 月の 18 号台風で、森林とタワーは大きな風倒被害を受け、観測は一時中断した。2005 年春にタワーを再建し、同年 7 月から攪乱後のフラックスおよび炭素循環プロセスの測定と観測を始めた。このように、同一サイトで台風攪乱前後の観測を継続している研究は国際的にも例がないものである。

2. 研究の目的

本研究は、冷温帯落葉広葉樹林における台風攪乱にともなう二酸化炭素(CO₂)収支の変化を、同一サイトにおける攪乱前後の①タワーフラックス、②ソースエリアの林分構造、③生理生態プロセス(植物生産、生態系呼吸)の観測から初めて明らかにし、台風攪乱後の植物と土壌の機能を組み込んだ森林炭素循環プロセスモデルを開発し、台風攪乱の森林生態系純生産量(NEP)への影響をあきらかにする。

3. 研究の方法

(1)2004 年 9 月の 18 号台風の被害を受けた、森林総合研究所北海道支所羊ヶ丘実験林を調査地とした(写真-1)。実験林はシラカンバとミズナラを主要構成木とし、1900 年初頭に



写真-1 台風被害を受けた実験林

生じた山火事後の山火再生林である。2003 年 9 月 2 日及び 11 月 8 日に LIDAR データを取得し、地表高と林冠高の分布を得た。LIDAR とは航空機からレーザーを地表に照射し、反射速度から地表物の三次元座標を推定する手法である。台風後の 2004 年 10 月 1 日に LIDAR データを再取得し、林冠高の分布を得た。台風以前に取得したレーザーの反射点の高さが、台風以降 70%以上低くなった場合を攪乱点と評価した。攪乱点の判断は 1m 平方メッシュ内毎に一点でおこない、20m 平方メッシュ(400 ポイント)に占める攪乱点の百分率を、20m 平方メッシュ内の攪乱強度(%), また[100-攪乱強度]を攪乱後残存率(%)とした。

(2) 実験林内に LIDAR で調査した区画と同一座標となるように、65 個の毎木調査プロット(各 20m 平方、合計 2.6ha)を設置した。調査は 2005 年の秋から開始し、プロット内にある立木(DBH3cm 以上)、台風で倒壊した樹木、及び台風以前に自然枯死していた樹木の胸高直径と樹高を測定した。樹木バイオマスの推定は、2003 年に作成したアロメトリー関係式を用いた。またその結果から、根量は幹重量の 31.7%とした。

台風攪乱後のササ群落の成長量を明らかにするため、攪乱強度の異なる 17 個のプロット(2m×2m)を設定し、2006 年、2007 年、2009 年の夏に刈り取り調査、光環境調査をおこない、プロット直上の相対照度と現存量の関係を求めた。また 1999 年におこなった調査から、桿の回転率を 7.36 年、葉の回転率を 2.62 年とした。ササの純生産量(NPP)は、現存量が定常状態であるとし、枯死脱落量と等しいと仮定した。

(3) 毎木調査プロットの外周 1km にラインを設置し、ラインに跨がるすべてのシラカンバとミズナラの倒木(CWD)の容積密度を測定した。容積密度はピロディンによる貫入量と水中法で求めた容積密度の相関関係を元に、ピロディン貫入量を全調査木に適用して求めた。ピロディンの貫入量で最大値を超えてしまう(柔らかい)場合、もしくはシラカンバ及びミズナラ以外の樹種の場合、円盤状のサンプルを採集し、実験室で水中法による容積密度を測定した。

(4) 林冠光合成総生産量(GPP)は、気温・湿度・CO₂ 濃度・直達光量・散乱光量・葉量・葉角度分布及び個葉の光合成パラメータを取得し、Farquhar および Ball-Berry モデルを混合した群落光合成生産量モデルを作成し推定した。地上部非同化部の呼吸量は、2002 年に作成したモデルと調査結果から計算した。樹木の純生産量(NPP)は、期間内の現存量増加量と枯死脱落量を合計した値とした。

(5) 土壌表面から炭素放出量(土壌呼吸; R_{Soil})を測定するため、林内 4 地点に設置し

た自動開閉チャンバーによる土壌呼吸時系列測定(ダイナミックチャンバー法)、100 点に設置したチャンバーによる土壌呼吸広域測定(スタティックチャンバー法)をおこなった。ダイナミックチャンバー法で土壌呼吸速度の温度依存性に関する式を作成し、スタティックチャンバー法から一定温度での土壌呼吸速度を推定した。

土壌呼吸のプロセスを分離するために、細根を採取して室内培養(インキュベート法)で呼吸速度を測定した。粗大根については、地上部幹量と粗大根量の重量比を地上部幹呼吸量に乗じて推定した(R_{Root})。微生物呼吸(R_{Aos})は A0 層および 0-10、10-20、20-30、30-40cm 層別の土壌を採取し、インキュベート法により推定した。

(6) タワーを用いた CO_2 フラックスの微気象学的連続観測(タワーフラックス)を 2005 年夏より再開した。熱収支・微気象モデルの入力となる日射量・光合成有効放射量・気温・風速などについて、短期欠損についてはスプライン関数による補間、長期の欠測については関連する気象要素、または隣接する気象観測露場におけるデータを用いて補間し、連続したデータを整備した。夜間及び積雪期の生態系 CO_2 純交換量(NEE; 実際は生態系呼吸量 RE)の欠損は、地温(5cm)と RE の関係を指数関数で近似し、その数式および地温データから補間値を計算した。無積雪期日中の NEE の欠損は、光合成有効放射量と GPP の関係を直角双曲線によって一ヶ月毎に関数化し、地温の指数関数である RE を差し引いて補間値を計算した。NEE の品質は、3 次元風速各成分、 CO_2 濃度、気圧などの乱流変動をグラフから目視点検によってチェックし、さらに FPRI FluxNet の標準品質プログラムを用いて各種チェックをおこなった。ここで NEE は後述する NEP と絶対値が同じで、符号が逆である。

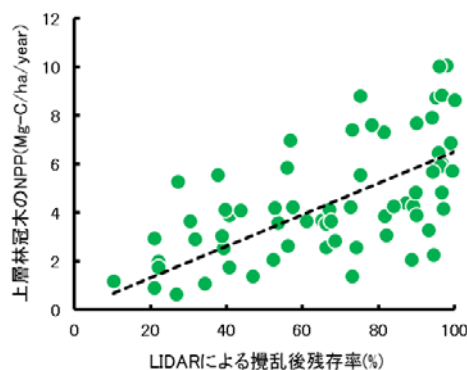


図-1 攪乱後残存率と 2005-2007 年の平均 NPP の関係。切片は有意でなく ($p > 0.02$), 攪乱後残存率と攪乱後の NPP に比例関係が認められた。

4. 研究成果

(1) LIDAR による攪乱強度と残存木の NPP

実験林全体において、台風後の攪乱強度は $7.4 \pm 0.2\%$ であった。一方 2.6ha の毎木調査プロット内の平均攪乱強度は $32.5 \pm 3.2\%$ と強度であり、最激害区画は 90% とほぼ全壊に近かった。

アロメトリー関係を用いてプロット内の現存量を推定した結果、台風以前に $233.5 \pm 10.7 \text{Mg ha}^{-1}$ 存在した[幹+枝+根: 上層林冠木]の現存量は、台風後に $168.5 \pm 11.5 \text{Mg}$ に減少し、 $65 \pm 8 \text{Mg ha}^{-1}$ の枯損が生じていた。同プロットに近接した森林内において、攪乱以前の上層林冠木の NPP は約 6.3Mg-C/ha/year であった。攪乱後 2005-2007 年のプロット内平均 NPP は $4.5 \pm 0.3 \text{Mg-C/ha/year}$ となり、現存量の減少率と同様な傾向であった。

攪乱後残存率(X)と攪乱後 2005 年の上層林冠木現存量(Y)の間に強い正の比例関係が認められ ($Y=2.55X$, $r^2=0.6$)、LIDAR データから攪乱後に残存する樹木の現存量を推定可能であると考えられた。また上層林冠木の NPP(Y)と攪乱後残存率(X)の比例関係も認められ ($Y=0.065X$, $r^2=0.36$ 図-1)、有意な相関関係であった。

攪乱強度は林床(ササ群落直上)散乱光レベルでの相対光強度(9:00-15:00 の平均値; RPPFD)、及び快晴日における日積算光合成有効放射束密度(6:00-18:00)と強い正の相関関係を示した ($r^2 > 0.95$)。同様に気温と湿度も攪乱強度と相関関係を示した。一方地中 15cm の地温及び土壌含水率と攪乱強度に有意な相関関係は無く、これは地中 40cm での地温と土壌含水率においても同様であった。このことは攪乱後に急速にササ群落によって地表面が覆われ、地表面下部の環境条件を攪乱強度から推定できないことをあらわす。

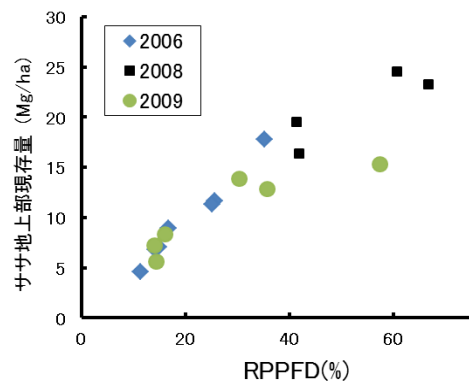


図-2 ササ群落直上の相対光強度(RPPFD)と、ササ地上部現存量の関係

(2) ササ群落および森林全体の NPP

2006年から2009年におこなったササの刈り取り調査から、ササ群落直上の光強度(RPPFD)とササ現存量(地上部)の関係を見ると(図-2)、各年の両者の関係はほとんど変化しなかった。これは攪乱後の2年間で、ササ群落が、それぞれの光環境に適応した最大の現存量まで成長したことを示す。攪乱以前の暗い環境(相対照度約1.4%)では、地上部現存量が4~5Mg/ha、NPPが0.45Mg-C/ha/yearであったが、攪乱後の開放地では現存量が25Mg/ha、NPPは光環境に対応して最大5Mg-C/ha/yearとなった(図-3)。これはこれまで報告された完全な開放地での最大NPP(7.5Mg-C/ha/year)に近い値である。

LIDARによる攪乱強度とRPPFDの関係、RPPFDとササ群落NPPの関係、攪乱後残存率と上層林冠木NPPの関係から、各毎木調査プロット内のNPPを計算した。フラックス観測タワーから半径100m、200m、300m内のフェッチ(図-4)について計算すると、それぞれ 6.8 ± 0.2 、 6.6 ± 0.1 、 6.4 ± 0.1 Mg-C/ha/yearとなり、攪乱以前のササ群落も含んだ森林のNPPとほぼ同等となった。

(3) 光合成総生産量(GPP)の推定

林冠光合成総生産量(GPP)の推定は均一の林冠構造を仮定しているため、計算は攪乱以前の条件でおこなう事ができ、その結果上層林冠木のGPPは14.3Mg-C/ha/yearであった。ここで攪乱以前のササのNPPが約0.5Mg-C/ha/yearであり、GPPに占めるササ呼吸量(Ra)の割合が50%と仮定すると、ササのGPPは1.0Mg-C/ha/yearとなり、森林全体のGPPは15.3Mg-C/ha/yearと計算できた。GPPはNPP+生物体呼吸量(Ra)で表される。前項(1)で求めたNPPおよび2002年に求めたRaからGPPを推定すると15.5Mg-C/ha/yearとなり、台風攪乱以前のGPPは約15Mg-C/ha/year超と

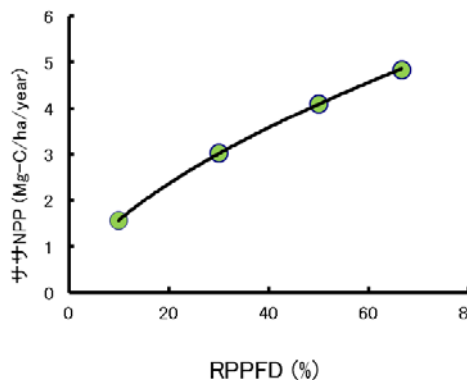


図-3 ササ群落直上の相対光強度(RPPFD)と、ササNPPの関係

推定できた。

攪乱後倒壊樹木のNPPをササ群落が補償し、GPPに占めるNPPとRaの割合が攪乱前後で大きく変化しないと仮定すると、攪乱前後で森林群落のGPPは大きく変動しないと考えられた。

(4) 枯死木の分解および土壌呼吸

ピロデインの貫入量(X)と容積密度(Y)は、スギ材において良好な関係が得られており、本研究においても

$$\text{シラカンバ } Y = -3.9517X + 558.13 \quad (r^2 = 0.48 \quad n = 54)$$

$$\text{ミズナラ } Y = -16.398X + 863.72 \quad (r^2 = 0.85 \quad n = 13)$$

の結果が得られた。

各プロット内の分解率は被害木の量と相関関係を示さず($r^2 = 0.001$, $p > 0.05$)、5年間の分解率のプロット間平均値は $18.95 \pm 2.5\%$ 、分解定数(k)は 0.0445 ± 0.007 であった。この値は世界の気候帯を通じた平均温度とkの関係解析をした報告と矛盾しなかった。本実験林が風倒被害を受ける以前、幹・枝の合計呼吸速度は 2.24 ± 0.05 Mg-C/ha/yearであった。この幹・枝が全て風倒にあった場合を想定すると、風倒後の年間平均被害木分解量は3.57Mg-C/ha/yearと試算され、幹・枝の呼吸量よりも59%大きくなると推定された。このように台風で風害を受けて枯死した樹木は、その後5年間、生残した場合よりも多くの炭素を分解呼吸により放出することがわかった。フラックス観測タワーから半径100m(P100)、200m(P200)、300m(P300)内のフェッチについて、被害木量からの炭素放出速度を計算した。P100では1.0Mg-C/ha/year、P200では0.8Mg-C/ha/year、P300では0.6Mg-C/ha/yearであった。被害木率に風倒以前の幹・枝呼吸速度(2.24Mg-C/ha/year)を乗じた値を、攪乱による呼吸量減少分とした。また被害木から発生した炭

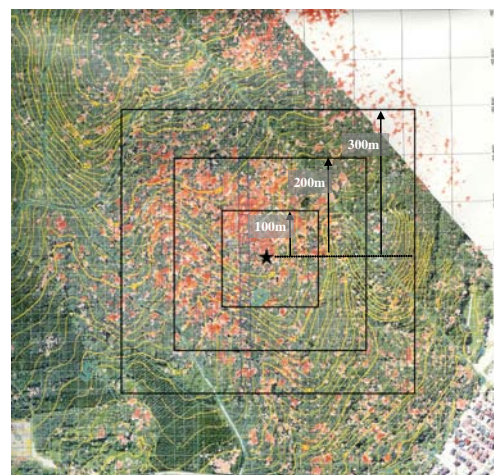


図-4 フラックスタワー(★)を中心とした片側100mの方形区(P100)、200m(P200)の方形区、300m(P300)の方形区
赤くまだらに見える部分が風倒被害地である

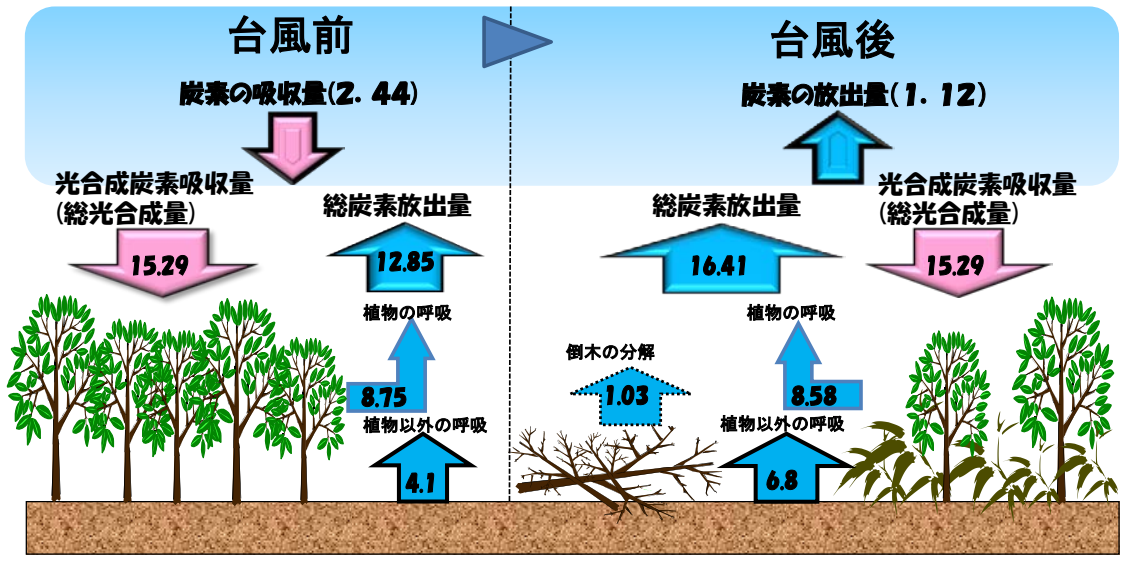


図-5 台風攪乱前後の森林生態系内の炭素の動き (単位=Mg-C/ha/year)

素放出速度を勘案すると、P100 では風倒以前の幹・枝呼吸による炭素放出量に対して風倒後は16.3%増加し、同様にP200, P300ではそれぞれ13.3%、9.6%増加すると試算された。

風倒以前の土壌呼吸速度は7.3 Mg-C/ha/yearであり、細根2.6Mg-C/ha/year、粗大根0.6Mg-C/ha/year、A0層1.0 Mg-C/ha/year、鉾質土層3.1Mg-C/ha/yearであった。樹木の呼吸速度を含めて、森林からの炭素放出速度は12.85 Mg-C/ha/yearとなり、森林は2.44 Mg-C/ha/yearの炭素吸収源であった。

台風攪乱後は、ササ根によって被害細根量は補償され、粗大根は被害木量に比例して減少したと考えた(0.44 Mg-C/ha/year)。Ao層はリター蓄積量が台風前後で同一であった。

め、変化しないと考えた。鉾質土壌の呼吸速度が増加し、5.8Mg-C/ha/yearとなった。風倒木の分解速度も加え、最終的に森林からの炭素放出速度は16.41Mg-C/ha/yearとなり、森林は-1.12Mg-C/ha/yearの炭素放出源に変化した(図-5)。

(5) フラックス観測とプロセスモデルの比較

将来に渡る森林のCO₂の吸収量を予測するためには、タワーを用いたCO₂フラックスの微気象学的連続観測(微気象学的方法; EC法)と、光合成や呼吸といった個々の炭素循環プロセスを積み上げながらCO₂の移動量を推定する方法(生物観測法; Bio法)との相互検証が重要となる。Bio法は(1)~(4)までおこなった個別プロセスをモデルで統合し、森林生態系(森林と土壌を含む)におけるCO₂の収支(森林生態系純生産量; NEP)を推定する。一方EC法はNEP(又はNEE)を直接観測するが、夜間における森林生態系から大気へのCO₂放出量(夜間のRE)を過小評価するといわれる。”光合成総生産量(GPP)=NEP+RE”であるから、EC法ではGPPが過小評価される可能性が高い。

台風攪乱前後でのCO₂収支を見ると、攪乱前は生態系呼吸量(RE)が小さく、森林全体でCO₂を吸収していた(NEPがプラス)(図-6)。ここでEC法によるREはBio法に比べて小さく、GPPで2 Mg-C/ha/yearの差が検出された。一方攪乱後は両手法でREが増加し、森林全体でCO₂が放出された(NEPがマイナス)。また攪乱前後でEC法によるGPPの大きな変化は認められなかった。両手法で台風攪乱前後におけるGPPの安定性、及びREの劇的な変化が検出され、台風攪乱は呼吸量(森林の基礎代謝量)の増大をもたらし、その結果炭素収支

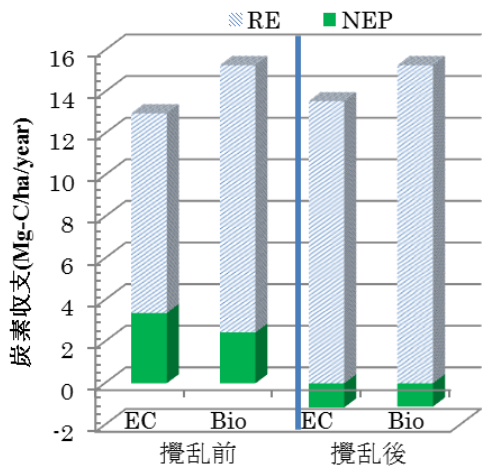


図-6 EC法とBio法の台風攪乱前後における、森林生態系炭素収支の比較

が CO₂ 放出(マイナスの NEP)に転じたことが明らかとなった。しかし Bio 法と EC 法の間で、RE に数 Mg-C/ha/year の差が存在し、両手法のさらなる検証と相互の弱点の克服が求められる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Tobita H., Utsugi, H., Kitao M., Kayama M., Uemura A., Kitaoka S., Maruyama Y. Variation in photoinhibition among *Sasa senanensis*, *Quercus mongolica*, and *Acer mono* in the understory of a deciduous broad-leaved forest exposed to canopy gaps caused by typhoons. *Trees*, 査読有、24:307-319、2010.
- ② 宇都木玄、阪田匡司、北岡哲、飛田博順、上村章、札幌市郊外落葉広葉樹林における倒木分解量の推定 - 2004 年台風 18 号による風倒後、4 年間について -、日本森林学会北海道支部論文集、査読有、58、2010、83-86.
- ③ 宇都木玄、高橋正義、飛田博順、上村章、北岡哲、阪田匡司、鷹尾元、渡辺力、LIDAR データを用いた林冠攪乱強度と森林構造の関係、日本森林学会北海道支部論文集、査読有、57、2009、69-71.
- ④ 宇都木玄、飛田博順、北尾光俊、上村章、北岡哲、阪田匡司、飯田滋生、渡辺力、札幌市郊外の落葉広葉樹林における地上部非同化部呼吸量の推定、日本森林学会北海道支部論文集、査読有、56、2008、47-49.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 宇都木玄 他、台風攪乱による森林生態系炭素循環への影響、日本農業気象学会 2011 年全国大会、2011.03、鹿児島大学 (鹿児島市)
- ② Utsugi H. et al., Long-term forest biomass sequestration in deciduous broad-leaved forest. XXIII IUFRO WORLD CONGRESS. 2010.08. COEX (Soul Korea)
- ③ 宇都木玄 他、台風攪乱後のササ群落が森林生態系炭素循環に果たす役割、第 57 回日本生態学会、2010.03、東京大学 (文京区)
- ④ 宇都木玄 他、台風攪乱を受けた落葉広葉樹林における 3 年後の純生産量の変化、第 119 回日本森林学会、2008.03、東京農工大学 (府中市)

[図書] (計 5 件)

- ① 宇都木玄 他、森林総合研究所、森林総合研究所 H22 年度研究成果選集、2011.03、pp4-5.

[その他]

ホームページ等

http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seika_senshu/2010/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇都木 玄 (UTSUGI HAJIME)

独立行政法人森林総合研究所・北海道支所・チーム長

研究者番号：40353601

(2) 研究分担者

山野井 克己 (YAMANOI KATSUMI)

独立行政法人森林総合研究所・北海道支所・グループ長

研究者番号：20353906

北村 兼三 (KITAMURA KENZO)

独立行政法人森林総合研究所・気象環境研究領域・主任研究員

研究者番号：90353664

阪田 匡司 (SAKATA TADASHI)

独立行政法人森林総合研究所・北海道支所・主任研究員

研究者番号：50353701

渡辺 力 (WATANABE TSUTOMU)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：60353918

(3) 連携研究者

飛田 博順 (TOBITA HIROYUKI)

独立行政法人森林総合研究所・植物生態研究領域・主任研究員

研究者番号：10353781