

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21241009

研究課題名（和文）複雑地形地におけるフラックス観測の代表性と広域化に関する研究

研究課題名（英文） A study on representativeness and aggregation of a tower flux measurement in complex terrain

研究代表者

近藤 裕昭（HIROAKI KONDO）

独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・副研究部門長

研究者番号：60357051

研究成果の概要（和文）：水平一様な領域での観測が前提であるフラックス観測について、対象とする領域が草地から森林に急激に変化する場合、および2次元的地形上でのフラックスについて風洞実験と数値実験で解析を行った。前者では遷移点から30H（Hは森林キャノピー高）までの間の場が単純ではないこと、後者では移流の影響が大きいことが明らかとなった。実際の複雑地形地である岐阜県高山市郊外の観測点における複雑地形の影響と代表性の分析を行った。

研究成果の概要（英文）：

Flux measurement with eddy-covariance method employs the assumption of horizontally homogeneity of the fields. The effects of sudden transition from grass land to forest and of two-dimensional simple topography were investigated with wind tunnel experiment. The experiment demonstrated that the field of flow and turbulence at $x < 30H$ (H: forest canopy height) was complicated, and that advection flux was much larger than turbulent flux in the wind tunnel experiment. The effects of complex terrain on the flux measurement were examined at two flux tower sites of TKY and TKC in Gifu prefecture.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	21,300,000	6,390,000	27,690,000
2010年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2011年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学

キーワード：物質循環、二酸化炭素フラックス、風洞実験、渦相関法、複雑地形

1. 研究開始当初の背景

産総研と岐阜大が共同で森林生態系の炭素吸収能に関する調査・研究を行っている岐阜県高山市における2つのサイト(AsiaFlux登録コード:TKY,TKC)は複雑地形中にある。複雑地形地においては夜間に地表面から放出されたCO₂が斜面下流により流出し、渦相関法を用いたタワー観測では測定されない問題が指摘されており、摩擦速度 u_* がある

程度大きいときの測定データで評価する補正法がよく用いられる。生態学的手法に基づく二酸化炭素吸収量と比較するとTKYでは補正後ややフラックス観測の吸収量が多いのに対し、TKCでは放出量が大きく、両地点で逆のセンスとなり、昼間のフラックス観測にも何らかの問題が潜んでいる可能性が示唆された。

2. 研究の目的

渦相関法に基づくフラックス観測では、水平一様の下に基本的データ解析がなされる。複雑地形地ではこの仮定は成り立たない。またより基本的な問題として、草地から森林に急激に遷移するような場所では、その境界から一定距離は水平一様とみなせない。しかし水平一様性を満たさない場合に関する基本的な情報も少なく、本研究では遷移点付近に起きる現象と複雑地形の基本的な影響を風洞実験により考察した。また、実際の TKY, TKC での観測値に現れる複雑地形の影響の抽出を試み、またデータの代表性・広域化について検討した。

3. 研究の方法

水平一様でない場でのフラックスの基本的な変化を調べるため、2種類の風洞実験を産総研温度成層風洞を用いて行った。はじめに、金網を用いて森林キャノピーを模し、キャノピー内外の平均流や乱流変動量が風下方向にどのように変化するかを調べた。次に面源の発生源を準備し、これを水平または山形に組むことにより渦相関法で測定されるフラックスの変化を調べた。前者については LES による解析も試みた。斜面上に観測タワーがある TKC においては想定される誤差の大きさに関する検討を観測データを用いて実施した。山頂と谷に観測タワーがある TKY については夜間の斜面下降流の影響について考察した。

4. 研究成果

(1)風洞実験結果

①森林端付近に生じる流れ場の解析

渦相関法によるフラックス測定は、水平方向の一様性を前提としているが、実際の測定地点には厳密にこの前提を満たす地点はそう多くない。水平方向に植生が草地から森林に変わる場合は水平一様性に反する最も単純なケースであるので、このような場合について産総研の温度成層風洞を用いた実験を行った。ただし今回の研究では成層は考慮していない。

先行研究では LES(Large-Eddy Simulation)により計算した例があり、LAI が大きくなるとキャノピー内に反流が起きることを示している。風洞実験では金網を用いてその配置を変え、LAI の差を表した実験を実施した。金網は針金の径が 0.7mm、メッシュ間隔が 1/4 インチのものを用いた。RUN1 では高さ(=H)を 10cm とし、これを 10cm 間隔で風洞内の測定部分(長さ 20m, 幅 3m, 高さ 2m)の床面の 2m×5m の範囲に並べ、RUN2 では同じ範囲に H=20cm、間隔 5cm とした金網を並べた。

金網キャノピーの LAI はその抵抗係数から計算することができる。このためキャノピ

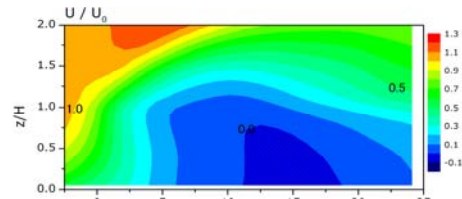


図 1 流れ方向の平均風速(RUN2)

一の中心線に沿って流れ方向に 50cm 間隔で金網と床面が受ける抗力の測定を行った。RUN1 では抗力はすべて風下方向に向いていたが、RUN2 では $x=15H$ 付近で抗力が風上側 (x はキャノピー端からの距離)を向いた。風速を変えた実験からそれぞれの金網キャノピーの抵抗係数を出し、それから LAI を計算するとそれぞれ RUN1 では 2.9, RUN2 では 6.7 となった。実際に流速を測定すると RUN1 では反流は生じなかったが、RUN2 では反流が生じた (図 1)。

②2次元地形上でのフラックス測定

次に風洞内にトレーサを発生させ、その乱流フラックスを実際に渦相関法を用いて計測することを試みた。トレーサは空気とほぼ密度が同じであるエタン(C_2H_6)とした。この実験においてはトレーサを面状にかつできる限り均一に発生させる必要がある。このため、焼結多孔体を使用して発生源とした。この際、場所による発生量の際はおおむね 15% 以下にすることができた。

風洞実験において渦相関法により乱流フラックスを測定するためには、細かい乱れに対応して変動するトレーサ濃度を高速でサンプリングできる装置が必要である。この装置としてテクニカ製高速全炭化水素測定器(H-THC)を使用した。この装置と熱線風速計を図2のように組み合わせて測定を実施したが、炭化水素測定器のプロブが 20cm ほどあり、分析に時間遅れが生じる。この時間遅れを調べると約 20ms であることからデータ解析の際にはこの遅れを考慮した。

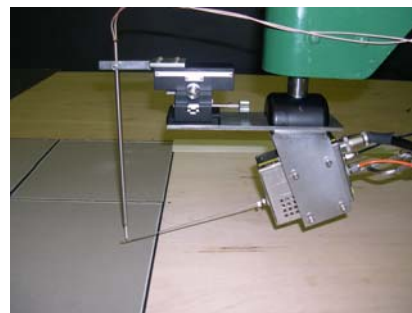


図 2 風洞実験における熱線風速計(左)と高速全炭化水素測定器(右)の配置。

これらの装置を用いてはじめに焼結多孔体(20cm×20cm)を幅 60cm,長さ 120cm に敷き詰めてトレーサを発生させた測定を実施した。風洞風速は 2m/s とし、上流側には乱流生成格子を置いて床面から約 50cm の範囲で風速が 1/7 乗則を満たすようにした。平均濃度

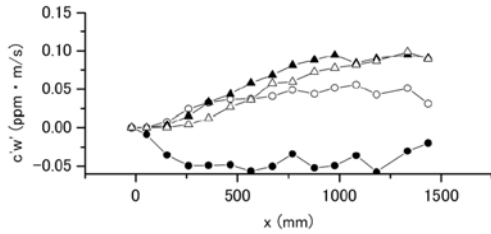


図 3 渦相関法によるフラックスの測定結果

を求める別の炭化水素分析計により床面付近の平均濃度を測定すると、発生源の上流端から約 60cm 以降ではほぼ一定の濃度となった。y 方向も両端の 10cm を除いてほぼ一定の濃度となった。渦相関法を用いた測定を図 3 に示す。図 3 では z=5mm と 10mm の測定値が他の高度と異なっている。この理由として、床面付近では焼結多孔体を通してトレーサが出てくる穴の影響が無視できず、濃度変動が風洞内における風の乱れのみ依存していないことが示唆された。このようにして求めた z=20mm でのフラックスを使用して質量保存式の各項の大きさを求めると次のようになった。

$$\int_0^h \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\overline{UC}) dz + [\overline{WC}]_h = - \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'}) dz - [\overline{w'c'}]_h - \int_0^h [\overline{v'c'}]_y dz + \int_0^h \overline{S_c} dz$$

0.0 0.11 0.40 0.00 -0.08 -0.02 0.69

ここで最後の 0.69 が発生量で右辺第 2.3 項が渦相関法により求めた値である。この値は予想外に小さく、風洞内の輸送には移流が大きく効いていることがわかった。

次に焼結多孔体を 2 次元の山形に組み、同様の計測を行った。焼結多孔体を 4 つ流れ方向に並べて(長さ 80cm)片方の斜面とし、上部(山頂)にも 1 枚の多孔体を置いた。山の高さは床面から 20cm とした。幅は 3 枚分(60cm)で平面の実験と同じとした。風洞風速は平面の場合と同様にした。まず後流側について、タンポポ風向計を用いて逆流域(剥離域)が生じていないことを確認した。図 4 にトレーサ濃度の鉛直分布を示す。風は左側から流入する。上流側の高濃度領域の厚さは薄いのに対し、後流側では厚くなった。渦相関法を用いてフラックス測定を行い、トレーサの質量保存式の各項を図 4 の 1 と 2 の点についてまとめると、

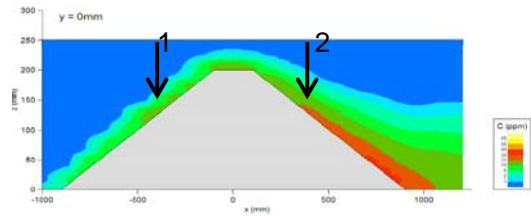


図 4 山形に配置した面源による濃度分布

$$\int_0^h \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\overline{UC}) dz + [\overline{WC}]_h = - \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'}) dz - [\overline{w'c'}]_h - \int_0^h [\overline{v'c'}]_y dz + \int_0^h \overline{S_c} dz$$

1.0 0.36 -0.02 0.02 -0.05 --- 0.46
2.0 -0.25 0.54 0.0 -0.11 --- 0.46

という結果となった。質量がバランスしていない分は測定していない y 方向に輸送されたものと考えられる。ここで(u,w)成分は斜面に直交する座標系でとった量である(斜面に沿って x 軸をとる)ここでも右辺第 2 項で示される渦相関フラックスはそう大きくはないことが示された。

(2) 数値計算結果

① LES による計算

自作コードの LES モデルを開発し、端の異なる非一様な植生キャノピー乱流解析を行った。植生キャノピー乱流については、RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) モデルにしても LES モデルにしても、これまでに多くの解析事例が見られるが、その多くは水平一様な植生キャノピーを対象としたものである。本解析対象の場合、標準 k-ε モデルの結果も LES モデルの結果も植生内部で循環流(反流)が生じた。しかし、その大きさは大きく異なり、標準 k-ε モデルで予測された植生内部の循環流の大きさは LES モデルの結果に比べてかなり小さいものとなった。循環流域内の乱流エネルギーの分布を比較すると、標準 k-ε モデルは LES モデルよりもその値を遥かに大きかった。標準 k-ε モデルはモデルの構造上、減速域付近で乱流エネルギーを過大評価することが知られている。本解析対象の場合、植生の端に流入してくる風が植生内部を通過していくにつれて減速するため、上記の状況に相当し、標準 k-ε モデルにおいて乱流エネルギーの過大評価が生じたものと考えられる。乱流エネルギーが過大評価されると、乱流混合が過剰に促進されるため、循環流は小さくなる。一方、本研究で開発した LES モデルでは、循環流域内の乱流エネルギーの過大評価は生じず、乱流混合の過剰な促進は起こらないため、標準 k-ε モデルに比べて循環流の大きさが大きくなったと考えられる。

② オープンスペースを持つ非一様な植生キャノピー乱流解析

本研究で開発した LES モデルを用いて、オープンスペースを持つ非一様な植生キャノ

ピー乱流解析を行い、オープンスペースの間隔と植生キャノピー乱流の発達過程について検討した。「調整域」(本研究では、鉛直方向平均風速が 0.01 以上(基準風速で無次元化した値)の領域、と定義)や「突風域」(本研究では、主流方向平均風速の歪度が 1.2 以上の領域、と定義)とオープンスペースの間隔の関係を整理し、①オープンスペースの間隔が広がるにつれて調整域や突風域が拡大する、②オープンスペースの間隔が同じ場合、調整域と突風域の出現領域が良く対応する、③オープンスペースの間隔が広がるにつれて突風域の風上側端の位置(始点)が風上側に移動する、ことが分かった。

③メソ気象モデルを用いた複雑地形上でのフラックス分布の検討

非静力学メソ気象モデル CReSS を用いて、複雑地形上にある高山常緑針葉樹林サイト(TKC)周辺での気流場と顕熱フラックスの関係を調べた。対象日は 2007 年 8 月 17 日で前日夕方からのシミュレーションである。初期条件境界条件は気象庁の MANAL を用い、水平格子数 69x69 で水平解像度 3km, 1km, 300m の単方向のネスティングを用いた。ここで使用したモデルは地表面を簡単にバルク法で扱うもので、顕熱フラックスは、領域内で 2 倍程度の変動を示し、主に地表面と大気の間で対応しているという結果が得られた。

(3)観測結果

①急斜面での乱流特性の検討

TKC での乱流統計量(高度 30m)と樹冠(高度 20m)より上の風速分布等のプロファイルとの関係を 2010 年 11 月について調査した。ある程度の風速のある場合、風は谷の壁面の斜面(斜度約 20°)に沿って吹上(下)げるが、乱流変動量は水平面上での実験式とおおよそ同等な振舞いを見せた。しかし、プロファイルから計算される中立時の displacement height や粗度長は、平均風の仰角に依存し、吹上(下)時には、非常に大きな粗度長と非常に小さな displacement height が見られた。プロファイルから求められ摩擦速度 u^* は乱流観測から求められるものよりも日中の吹上の多い西風時にはキャノピー直上の粗度境界層の振舞いを見せたが、東風時には示さないなど、周辺地形等との影響を受けた複雑な様相を呈した。

②複雑地形上での日射フラックス分布の検討

TKC 周辺での 1 年間の日射量を、近隣の高山試験地庁舎での全天日射観測値と標高データを用いて解析した。全天日射は直達光と散乱光に分け、地形の影響等を考慮した。単位水平面にある斜面についてさまざまな解像度での計算を行った結果、年平均日射量の

空間変動は、解像度があがるとともに増大し、50m 解像度の際に増分は 20%にも達した。

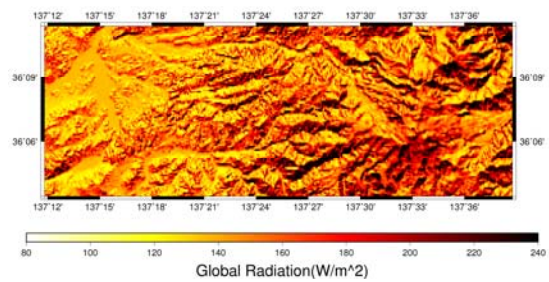


図 5. 50m 解像度での単位水平面にある斜面が受ける年平均全天日射量の推定値(2010 年)

③TKC での観測

急斜面上に位置する高山常緑針葉樹林サイト(TKC サイト)においてタワーフラックス観測の精度検証とデータ精査を行った。熱収支研究では地表面傾斜が約 20 度と急傾斜地であることを考慮して、日射、吹き上げ角、融雪量などの様々な補正を行うことで地表面が水平なサイトと同程度の観測結果が得られ、急傾斜地におけるフラックス観測が可能であることを示した。

また、複雑地形における炭素循環の環境応答研究方法として、一般的な摩擦速度閾値法と夜間最大値法を併用する手法を提案し、TKC サイトにおける純生態系生産量(NEP)、生態系総生産量(GPP)、生態系呼吸量(RE)の環境応答について検討した(図 6)。その結果、本研究サイトのスギ・ヒノキが優先する森林は土壌水分ストレスや強光阻害がほとんどなく成長に適した環境条件で、高い光合成活動による CO₂ の吸収と呼吸による CO₂ の放出を活発に行う生態系であることを示した。乾燥年、湿潤年の比較結果からは、乾燥年で高い GPP, RE を示し、おもに春先と夏季の両年の差が影響していた。とくに乾燥年の GPP は春先で湿潤年に比べて 20%以上高かった。これは、乾燥年における冬季の高温と早い融雪タイミングに伴う春先の高い最大光合成速度、さらに春の高い光合成放射量に依存していた。

TKC サイトを対象とした渦相関法による CO₂ フラックスデータを用いて、CO₂ 貯留変化量の有無が炭素収支の推定にどの程度誤差を生じさせるかを評価した。その結果、本研究サイトでは CO₂ 濃度プロファイル計測なしであっても、サイト間比較研究に耐える精度(生態系呼吸量、総一次生産量の誤差は年積算値で 2.0%以下、NEE の誤差は 6.4%以下)で炭素収支量の推定を行える可能性が示唆された。

水フラックスに関しては、上記検討を行い精査したデータと風速プロファイルデータ

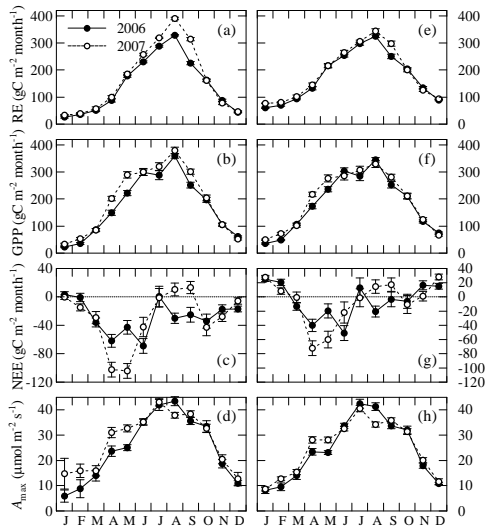


図 6 TKC サイトにおける摩擦速度閾値法 (a-d) と夜間最大値法(e-h)の両手法を用いた炭素収支の検討 (Saitoh et al. 2010, JPR)。

を用いて、夏季における蒸散量の経年変動について検討し、降水量、日射、大気飽差などの経年変動と比較して蒸散量の経年変動が小さいことを明らかにした。また、炭素収支についても積み上げ法によって得られた結果と併用することで生態系モデルの検証データとして利用可能であることを示した。

④TKY での観測

渦相関法による CO_2 フラックス測定に関して、複雑地形地の稜線にある観測塔(TKY)では、夜間に呼吸に伴い周辺に発生した CO_2 が斜面下降流により下流に流出して測定できない問題点が指摘されており、その結果、呼吸量を過小評価 (吸収量を過大評価) してしまう可能性がある。本研究では、飛騨高山冷温帯落葉広葉樹林観測サイトにおける、稜線部と谷筋の塔における大気中ラドンと CO_2 濃度の観測結果を基に収支式から森林キャノピー内の下層における斜面下降流による CO_2 流出量を見積もった。得られたラドン濃度データ、風速データおよび高山サイトにおける土壌から大気へ放出されるラドンフラックスと土壌水分との経験式を用いて、以下の収支式によりラドン収支の各項を推定し、斜面下降流による影響を評価した。

$$h \frac{d[Rn]}{dt} = F_{soil}^{Rn} + K \frac{d[Rn]}{dz} - u \cdot h \frac{d[Rn]}{dx} \quad (1)$$

h: キャノピー内の斜面下降流の厚さ、 $[Rn]$: ^{222}Rn 濃度、オーバーバー: 地表から高さ h までの平均、 F_{soil}^{Rn} : 経験式で見積もられた地表からの ^{222}Rn フラックス、K: 渦拡散係数、u: 斜面下降風速、x: 斜

面方向の距離、z: 鉛直方向の距離

ここで、左辺は地表～高度 h までの ^{222}Rn の貯留、右辺第 2 項は、鉛直方向の輸送、右辺第 3 項は斜面風による水平方向の輸送の項を表す。観測値と経験式で求まる地表における ^{222}Rn を代入すると、K が求まる。 CO_2 についても同様な収支式が成り立ち、 CO_2 濃度データと上記で求めた K を代入すると、 F^{CO_2} : 地表～高さ h までの層の正味の CO_2 収支 (夜間の場合は生態系呼吸) が求まる。

2008 年 8~10 月で有効なデータが得られた夜のうち、夜間、斜面下降流が起きていた 17 の夜について平均すると、地表から放出されたラドンのうち約 4 割が、また生態系呼吸として大気中に放出された CO_2 の約 7 割が、斜面下降流により流出していると推定された。

$$h \frac{d[\text{CO}_2]}{dt} = F^{\text{CO}_2} + K \frac{d[\text{CO}_2]}{dz} - u \cdot h \frac{d[\text{CO}_2]}{dx} \quad (2)$$

斜面下降流による CO_2 の流出量の季節変動を見積もるために、稜線部と谷筋の塔間の平均的な CO_2 の濃度差の日内変動を月毎に調べた。その結果、一般に斜面下降流が起こりやすい、夜間に谷筋で濃度が高くなり、斜面上昇流が起こりやすい、日中に僅かに稜線部で高くなる傾向が年間を通してみられたが、夜間の濃度差は初夏と秋に増大する傾向が見られ、式(2)より、この時期に夜間の斜面下降流による流出が顕著になる可能性が示唆された。また、流出量を精度良く評価するためには、稜線部と谷筋の濃度差を高精度に測定する必要があることが分かった。

(4)まとめ

水平に一樣でない森林キャノピー上でのフラックス観測に影響を及ぼす要素について風洞実験、数値実験、観測により分析を行った。複雑な場でのフラックス測定に必ず問題となるフェッチについて、風洞実験からは $x > 30H$ にとると一樣性が担保できるという結果が得られた。また $x < 30H$ では LAI が大きい場合にキャノピー内に反流が生じることが風洞実験と数値実験で確認された。風洞実験による乱流フラックスが予想外に小さかったことは、風洞内での乱れのスケールが野外での乱れのスケールに比べてかなり小さいことが示唆され、風洞実験の相似性に基本的な疑問が生じた。TKC (斜面上のサイト) における現地観測からは、種々の補正を施すことにより平坦地と遜色の無いデータが得られることがわかった。TKY (稜線上) の観測からは、夜間の斜面下降流による CO_2 呼吸量の過小評価についてラドンを用いた解析を行った。この結果従来の補正をした渦相関法による測定では夜間の生態系呼吸量の約 2/3

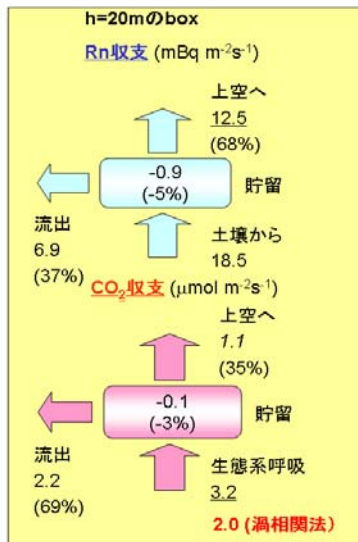


図 7. 斜面下降流が起こっていた 17 夜の平均的なラドンおよび CO₂ の収支の試算結果。

しかとらえられていないことが示唆された。メソスケールモデルを用いて複雑地形を高分解能で表現した結果、顕熱量は数 km の範囲で場所により最大 2 倍程度異なることがわかった。

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 8 件)

① Saitoh T.M., Tamagawa, I., Muraoka H., and Koizumi H. (2011) Energy balance closure over a cool temperate forest in steeply sloping topography during snowfall and snow-free periods, *J. of Agricultural Meteorol.*, 67, 107-116, doi: 10.2480/agrmet.67.3.4. (査読あり)

② 和田晃、村山 昌平、近藤 裕昭、松枝秀和、澤庸介、坪井一寛、(2010) Development of a compact and sensitive electrostatic Radon-222 measuring system for use in atmospheric observation, *J. Meteorol. Soc. of Japan*, 88, 123-134、(査読あり)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/88/2/88_2_123/article

他 6 件 (査読あり)

[学会発表] (計 24 件)

① Saitoh T.M., Tamagawa I., Muraoka H., and Kondo H. (2011) Summer evapotranspiration based on multi-year observations including extreme climatic conditions over a cool-temperate evergreen coniferous forest, Takayama, Japan. *AsiaFlux Workshop 2011*, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia, 2011.11. 10.

② 近藤裕昭、堀 晃浩、武藤勝彦 (2011), Wind tunnel experiment for scalar flux measurement on inclined surface, 第 5 回日中韓共催気象学会, 釜山, 2011.10.25 (招待講演)

③ 村山昌平、近藤裕昭、前田高尚、三枝信子、石戸谷 重之、山本 晋 (2011) Long-term measurements of carbon budget in forest ecosystems at AIST stations in Japan and Thailand, GEO-Carbon Conference: Carbon in a changing world, ローマ, FAO. 2011.10.24

④ 近藤裕昭、堀 晃浩、酒井遼子、飯塚悟、武藤勝彦 (2010) Flow and turbulence near the edge of a forest canopy: Wind tunnel and numerical experiment, 29th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, Keystone, 2010.8.6.

他 20 件

[図書] (計 2 件)

① 斎藤琢 (2009) 「微気象学的な測定 (渦相関法による測定)」, 北海道大学低温科学研究所・日本光合成研究会共編, 『光合成研究法』, 北海道大学低温科学研究所, 低温科学 67, 129-136.

② 近藤裕昭 (2009), 地球温暖化抑制技術, 新・地球温暖化対策教科書, オーム社、125-134.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 裕昭 (HIROAKI KONDO)

独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・副研究部門長

研究者番号：60357051

(2) 研究分担者

村山 昌平 (SHOHEI MURAYAMA)

独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・研究グループ長

研究者番号：30222433

玉川 一郎 (ICHIRO TAMAGAWA)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授

研究者番号：40273198

斎藤 琢 (TAKU SAITO)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・特定研究補佐員

研究者番号：50420352

飯塚 悟 (SATORU IIZUKA)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：40356407

(3) 連携研究者

三枝 信子 (NOBUKO SAIGUSA)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・陸域モニタリング推進室長

研究者番号：00251017