

## 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 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22710002

 研究課題名（和文）陸上植物活動における酸素、二酸化炭素交換比の精密観測と呼吸、  
光合成量の分離評価

 研究課題名（英文）Precise observation of  $O_2:CO_2$  exchange ratios for terrestrial  
biospheric activities and its application to the estimation of  
Gross Primary Production and Ecosystem Respiration.

研究代表者

石戸谷 重之（ISHIDOYA SHIGEYUKI）

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・研究員

研究者番号：70374907

研究成果の概要（和文）：陸上植物活動に伴う酸素・二酸化炭素交換比（ER）を森林生態系の呼吸・光合成量の分離評価に応用することを目標とし、飛騨高山落葉広葉樹林サイトにおいて土壌チャンバーおよび葉チャンバーにより土壌呼吸および光合成+葉呼吸による ER を観測した。併せて大気中酸素濃度の高精度連続観測装置を開発し、森林内大気中濃度変動における ER を観測した。得られた ER と森林内酸素/二酸化炭素収支の 1 box model とを用いた解析により大気-森林間フラックスにおける ER を推定し、森林内大気中濃度変動における ER との関係性を明らかにした。今後は、森林生態系の呼吸・光合成量の分離評価のため、大気-森林間フラックスにおける ER の直接観測による導出が課題となる。

研究成果の概要（英文）：A detailed observation of  $O_2:CO_2$  exchange ratios was conducted in a cool temperate deciduous forest located in the central part of Japan. The exchange ratios of soil respiration and net assimilation were found to be  $1.11\pm 0.01$  and  $1.02\pm 0.03$  from soil chamber and branch bag measurements, respectively. Continuous measurements of the atmospheric  $O_2/N_2$  ratio and the  $CO_2$  concentration, made inside the canopy during a summer season, indicated that the average exchange ratio was lower in the daytime than in the nighttime, with a daily mean value of  $0.94\pm 0.01$ . The observed average daytime and nighttime exchange ratios agree with the corresponding values obtained from a 1-box canopy  $O_2/CO_2$  budget model simulation of net turbulent  $O_2$  and  $CO_2$  fluxes between the atmosphere and the forest ecosystem.

交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2011 年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 2012 年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

研究分野：物質循環学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

 キーワード：気候変動、物質循環、大気中酸素濃度高精度観測、森林生態系炭素収支、酸素・  
二酸化炭素交換比、呼吸・光合成

## 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) は人為起源温室効果気体の中で地球温暖化への寄与が最も大きく、今後の大気中濃度を正確に予測し、濃度増加の抑制対策を実施することが不可欠である。しかしながら現状では、大気に放出された CO<sub>2</sub> がリザーバーである海洋と陸上植物圏にどれだけ吸収されているかが十分な精度で見積もられていない。また温暖化に伴う陸上植物圏の CO<sub>2</sub> 吸収量の変化を予測するには、植物圏の呼吸、光合成量を分離して定量化し、それぞれが気温や降水量の変化等に対してどのように応答するかを明らかにする必要があり、呼吸、光合成量の分離評価法の確立が急務となっている。

CO<sub>2</sub> のリザーバー間収支の推定には、大気中の酸素 (O<sub>2</sub>) 濃度の高精度測定を利用した方法が注目されている。大気中の O<sub>2</sub> 濃度は有機物の燃焼と陸上植物活動において CO<sub>2</sub> 濃度と逆方向に変化し、海洋への取り込み時には CO<sub>2</sub> 濃度と独立に変化することから、両者の経年変化の解析により CO<sub>2</sub> 収支の見積もりが可能となる (e. g. Manning and Keeling, 2006)。しかしながらこの方法の適用の上で、陸上植物活動による O<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> 交換比の仮定値に不確実性が残されており、各種森林内での観測による値の検証が強く求められている。また植物の呼吸、光合成量の分離評価には、渦相関法による大気-森林間の CO<sub>2</sub> フラックス観測と気温・生態系呼吸量関係の経験式とを用いた手法が用いられているが、経験式の不確実性が大きく、異なる手法での検証が不可欠な状況にある。

申請者は現在まで、質量分析計を応用し、フラスコサンプルを用いて O<sub>2</sub> 濃度を ±1.1 ppm の精度で測定する手法を既に開発して大気観測への応用を行っており、さらに近年は O<sub>2</sub> 濃度の高精度連続観測装置の開発も進めている。

## 2. 研究の目的

本研究では、陸上植物活動に伴う -O<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> 交換比 (ER) を、樹冠 (キャノピー) 内大気全体と、土壤呼吸、光合成各過程に対して高精度で明らかにする。そのため、燃料電池センサーを用いた O<sub>2</sub> 濃度連続観測装置を開発し、質量分析計を用いた O<sub>2</sub> 濃度測定法も改良する。呼吸と光合成における ER は呼吸基質や二次代謝の種類等で異なる値をとり得ることから、その高精度観測により森林生態系の光合成量と呼吸量の分離評価の上で有効な情報が得られることが期待される。

## 3. 研究の方法

O<sub>2</sub> 濃度の高精度連続観測装置を製作し、岐阜県高山森林サイトのキャノピー内外大気

観測を開始する。この観測により、森林内大気の O<sub>2</sub> 濃度の詳細な変動を明らかにし、CO<sub>2</sub> の連続観測結果と併せて解析することで、キャノピー内外大気の日内および日々の濃度変動における ER を導出する。また季節を変えた集中観測を行いチャンバー法でフラスコに大気を採取し、質量分析計を用いた O<sub>2</sub> 濃度測定装置によって分析することで、光合成+葉呼吸、および土壤呼吸における ER を明らかにする。化石燃料消費による ER が陸上植物活動による値と大きく異なる性質を利用することで、観測されたキャノピー内大気と O<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度の変動が植物の呼吸、光合成量の変動のみで引き起こされている場合を抽出し、連続観測で得られた濃度変動と、チャンバー観測で得られた呼吸、光合成各過程の ER、および渦相関法で得られた鉛直 CO<sub>2</sub> フラックスとを用いて、森林キャノピー内大気と上空大気間の O<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> フラックスを考慮したキャノピー内大気 1 box model を用いた解析を行う。

## 4. 研究成果

図 1 に土壤および葉チャンバー実験で得られた O<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> 濃度の関係を示す。なお O<sub>2</sub> 濃度は標準試料の O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 比に対する測定試料の O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 比の偏差を表す  $\delta(O_2/N_2)$  で表記され、 $\delta(O_2/N_2)$  の 4.8 per meg の変化が O<sub>2</sub> 濃度の 1 ppm に変化に相当する。

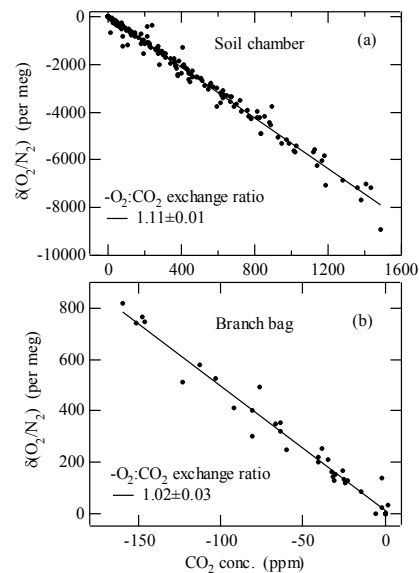


図 1 : 土壤および葉チャンバー実験 ((a)および(b)) で得られた  $\delta(O_2/N_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度の関係。データに対する回帰直線も併せて示す。

土壤チャンバー実験では土壤呼吸に伴う O<sub>2</sub>

濃度の減少、CO<sub>2</sub>濃度の増加が観測され、葉チャンパー実験では光合成による O<sub>2</sub> 濃度の増加、CO<sub>2</sub>濃度の減少が観測された。回帰直線から求めた土壌呼吸と光合成+葉呼吸による ER はそれぞれ  $1.11 \pm 0.01$  および  $1.02 \pm 0.03$  であり、両者に有意な差が見られた。また、高山サイトでは土壌呼吸が生態系呼吸量 (RE) の 90 % を占めると考えられることから (Saigusa et al., 2005)、本研究では RE における ER (ER<sub>R</sub>) を土壌呼吸の ER と等しい 1.11 と仮定した。一方、光合成から予測される ER (ER<sub>A</sub>) は 1.00 と考えられるが ( $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{O}_2$ )、葉チャンパー実験から得られた ER は ER<sub>A</sub> と整合的な値であった。

図 2 に高山サイト森林キャノピー内 (8.8 m) およびキャノピー外 (27 m) における大気中  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度の連続観測結果を示

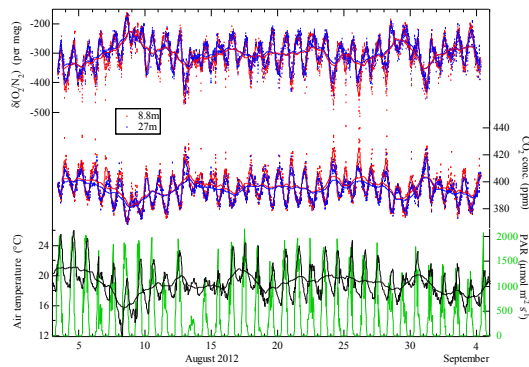


図 2：高山サイト森林キャノピー内 (8.8 m) およびキャノピー外 (27 m) において 2012 年 8 月 4 日～9 月 4 日の期間に観測された大気中  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度。データに対する Smoothing spline 関数による回帰曲線とその 24 時間移動平均値、および高度 25 m における気温と高度 19 m における光合成有効放射量 (PAR) を併せて示す。

す。キャノピー内外の大気中  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度は、日内変動および日々変動において明瞭な負相関関係を示した。日内変動における  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  (CO<sub>2</sub> 濃度) の極大値と極小値 (極小値と極大値) は日中と夜間に現れており、PAR が特に小さい期間は  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度の日内変動の振幅が小さくなっていた。このことから、観測期間の日中の光合成による総一次生産 (GPP) が RE より大きく、その変動が日内変動の大きさを決めていていると考えられる。また CO<sub>2</sub> 濃度の日々変動は気温の日々変動に 1 日遅れでほぼ追従しており、図 3 に示した  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度の日平均値の関係から計算される ER ( $1.10 \pm 0.05$ ) は土壌呼吸における ER と整合的であった。高山サイトでは RE が気温の関数で近似できることが知られており (Saigusa et al., 2005)、また上述のように ER<sub>R</sub> が土壌呼吸における ER とほぼ等し

いと考えられることから、高山サイトにおける夏期の  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度の日々変動は RE の日々変動によって引き起こされていることが強く示唆される。

チャンパー実験の結果に基づき ER<sub>R</sub> を 1.11、ER<sub>A</sub> を 1.00 と仮定し、観測された大気中の  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度変動から計算される ER を ER<sub>atm</sub> とした場合の、森林内 O<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> の収支を図 4 のベクトル図に表した。図 4 において、Fc は渦相関法で測定した大気-森林間の CO<sub>2</sub> フラックス、ER<sub>F</sub> は同フラックスに伴う ER、NEP は生態系純生産量を示す。図 4 から、もし渦相関法により大気-森林間の O<sub>2</sub> フラックスを測定することで ER<sub>F</sub> を直接観測できれば、RE と GPP の分離評価が可能になることが分かる。しかしながら現状では ER<sub>F</sub> の直接観測は

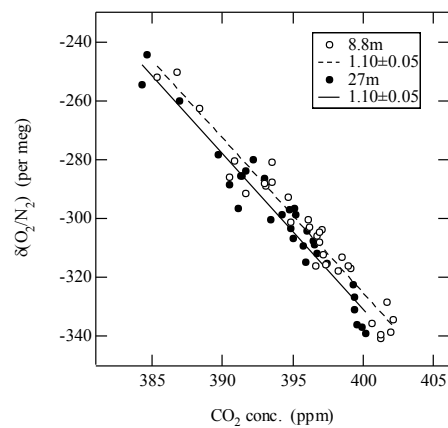


図 3：森林キャノピー内 (8.8 m) およびキャノピー外 (27 m) で観測された  $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$  と CO<sub>2</sub> 濃度の日平均値の関係。

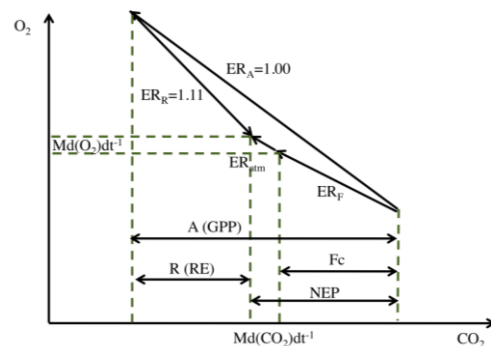


図 4：森林生態系における O<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> の収支。

行えていないことから、その前段階として、渦相関法による Fc と経験的な呼吸-温度関数を用いることで推定した GPP および RE の値 (Saigusa et al., 2005) を与えて ER<sub>F</sub> を推定し、観測された ER<sub>atm</sub> と ER<sub>F</sub> との関係について以下で議論する。

図5に、観測期間における $\delta(O_2/N_2)$ と $CO_2$ 濃度の日内変動を重ね合わせて図示し、その平均的な日内変動を抽出した結果を示す。図5から、 $ER_{atm}$ は時間帯によって変化し、

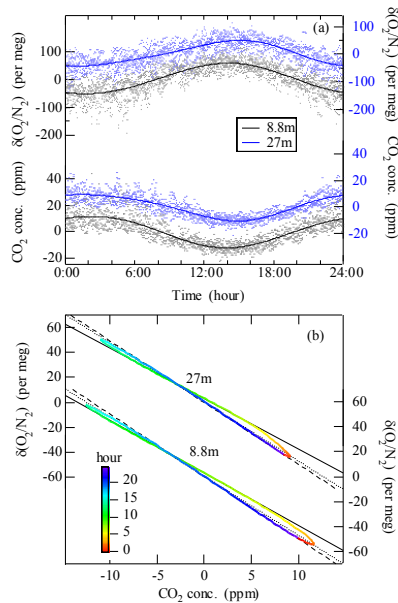


図5：(a)観測期間における $\delta(O_2/N_2)$ と $CO_2$ 濃度の平均的な日内変動。実線は24時間および12時間周期のtwo-harmonics回帰曲線を示す。(b)(a)における $\delta(O_2/N_2)$ と $CO_2$ 濃度の回帰曲線の関係。Color scaleは1日の時間帯を示し、黒実線、破線、および点線は6:00-13:00における関係、18:00-24:00における関係、および $ER_A$  (1.00)の場合の関係を示す。

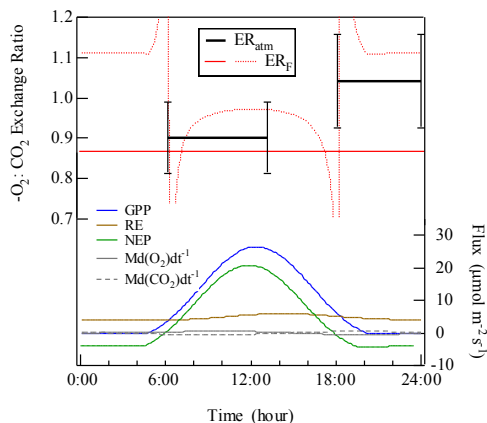


図6：図4のベクトル図に基づく森林内 $O_2$ 、 $CO_2$ 収支から推定された観測期間平均の $ER_F$ の日内変動(赤点線)と日平均値(赤実線)。図5で得られた6:00-13:00および18:00-24:00の時間帯における $ER_{atm}$ を併せて示す。図には収支解析に用いたGPP、REおよびNEPの値も併せて示した。

6:00-13:00の日中において $ER_A$ より小さい値を、18:00-24:00の夜間において $ER_A$ より大きい値を取ることが明らかになった。図6に、図4のベクトル図に基づいて推定した、観測期間における平均的な $ER_F$ の日内変動と、図5で観測された $ER_{atm}$ との比較結果を示す。

図6から、推定された日中および夜間の $ER_F$ は、6:00-13:00および18:00-24:00の時間帯における $ER_{atm}$ と誤差内で一致することが明らかになった。これらの時間帯は図4のベクトル図においてNEPの絶対値がFcの絶対値より大きく、かつ $\delta(O_2/N_2)$ と $CO_2$ 濃度が単調な増加および減少を示す時間帯に相当する。また、6:00-13:00の $ER_{atm}$ は $ER_F$ の日平均値とも誤差内で一致していた。先行研究としてSeibt et al. (2004)が森林内 $O_2$ 、 $CO_2$ 収支から推定した $ER_F$ と $ER_{atm}$ とをイギリスのGriffin forestにおいて比較しているが、彼等の報告による日中の $ER_F$ は1.26-1.38であり $ER_A$ より大きく、また $ER_{atm}$ は約1.0で $ER_F$ と整合しない値となっており、本研究とは大きく異なる結果である。

本研究の結果から、大気-森林間の日平均 $ER_F$ は $ER_R$ の値とNEPの正負に強く依存し、森林によって異なることが示唆される。このことは、 $O_2$ 濃度観測に基づく全球 $CO_2$ 収支解析に用いられている陸上生物活動平均 $ER$  (1.1) (Severinghaus et al., 1995)の値に関して、より詳細な検証が必要であることを示唆している。なお、本研究の内容は国際紙Tellus Bに投稿中である。

## 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3件)

① Ishidoya, S., S. Morimoto, S. Aoki, S. Taguchi, D. Goto, S. Murayama and T. Nakazawa, Oceanic and terrestrial biospheric  $CO_2$  uptake estimated from atmospheric potential oxygen observed at Ny-Ålesund, Svalbard, and Syowa, Antarctica, Tellus B 2012, 64, 18924, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.18924>, 査読有。

② Ishidoya, S., S. Aoki, D. Goto, T. Nakazawa, S. Taguchi and P. K. Patra, Time and space variations of the  $O_2/N_2$  ratio in the troposphere over Japan and estimation of the global  $CO_2$  budget for the period 2000-2010, Tellus B 2012, 64, 18964, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v>

64i0.18964., 査読有.

- ③ Murayama, S., H. Kondo, T. Maeda, N. Saigusa, S. Ishidoya, S. Yamamoto, Long-term measurements of carbon budget in forest ecosystems at AIST stations in Japan and Thailand, Proceedings of GEO-Carbon Conference: Carbon in a changing world, pp.78-79, 2011/10, 査読無.

〔学会発表〕(16件)

- ① 石戸谷重之、村山昌平、質量分析計を用いた大気中酸素/窒素比、アルゴン/窒素比、CO<sub>2</sub>濃度、および窒素・酸素・アルゴン安定同位体比の高精度同時連続観測、第18回大気化学討論会、2012年11月08日、ホテルパーレンス小野屋(福岡県)
- ② 村山昌平、渡辺力、高村近子、三枝信子、森本真司、石戸谷重之、近藤裕昭、中澤高清、青木周司、宇佐美 哲之、フラックス観測、酸素安定同位体観測及び群落微気候モデルにより推定された飛騨高山サイトにおける各呼吸要素の季節的変動、2012年度日本気象学会秋季大会、2012年10月05日、北海道大学(北海道)
- ③ 石戸谷重之、村山昌平、高村近子、近藤裕昭、三枝信子、後藤大輔、森本真司、青木周司、中澤高清、宇佐美哲之、大気中酸素濃度観測に基づく森林生態系の純一次生産と生態系呼吸の分離評価、日本気象学会2012年度春季大会、2012年05月29日、つくば国際会議場(茨城県)
- ④ 石戸谷重之、森本真司、青木周司、田口彰一、後藤大輔、中澤高清、スバルパール諸島ニーオルスンおよび南極昭和基地における大気中酸素濃度から推定された陸上生物圏と海洋のCO<sub>2</sub>吸収の年々変動、日本地球惑星科学連合2012年度連合大会、2012年05月22日、幕張メッセ(千葉県)
- ⑤ 村山昌平、近藤裕昭、石戸谷重之、複雑地形の森林における大会中CO<sub>2</sub>とラドン濃度の変動、複雑地形における気象・フラックス観測及びそのモデル化に関する研究会、2012年1月27日、岐阜大学(岐阜県)
- ⑥ 石戸谷重之、村山昌平、高村近子、青木周司、中澤高清、近藤裕昭、三枝信子、Application of atmospheric O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> ratio to the estimation of Gross Primary Production (GPP) and Ecosystem Respiration (RE) at Takayama site、高山・日中韓フォーサイト事業合同セミナー、2011年1月27日、岐阜大学(岐阜県)
- ⑦ 村山昌平、近藤裕昭、石戸谷重之、山本晋、三枝信子、飛騨高山サイトにおける森林内CO<sub>2</sub>濃度の日内振幅の長期変動、日本気象学会2011年秋季大会、2011年11月18日、名古屋大学(愛知県)
- ⑧ Murayama, S., H. Kondo, T. Maeda, N. Saigusa, S. Ishidoya, S. Yamamoto, Long-term measurements of carbon budget in forest ecosystems at AIST stations in Japan and Thailand, GEO-Carbon Conference: Carbon in a changing world, pp.78-79, 2011年10月24日、ローマ(イタリア)
- ⑨ 石戸谷重之、青木周司、後藤大輔、中澤高清、田口 彰一、Prabir K. Patra、日本上空における大気中酸素濃度の変動と過去10年間の全球二酸化炭素収支の見積り、第17回大気化学討論会、2011年10月18日、京都大学宇治キャンパス(京都府)
- ⑩ 室町篤、青木周司、梅澤拓、後藤大輔、中澤高清、石戸谷重之、石島健太郎、八代尚、菅原敏、森本真司、東アジア域におけるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO濃度の変動、第17回大気化学討論会、2011年10月18日、京都大学宇治キャンパス(京都府)
- ⑪ 村山昌平、石戸谷重之、近藤裕昭、宇佐美哲之、高村近子、近藤美由紀、中澤高清、青木周司、飛騨高山森林観測サイトにおける土壌空気中CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比の季節変動、第17回大気化学討論会、2011年10月18日、京都大学宇治キャンパス(京都府)
- ⑫ 石戸谷重之、菅原敏、森本真司、青木周司、中澤高清、本田秀之、豊田栄、井筒直樹、飯嶋一征、山内恭、吉田哲也、大気成分の重力分離を利用した成層圏物質循環の研究、大気球シンポジウム、2011年10月7日、宇宙科学研究所(神奈川県)
- ⑬ 村山昌平、石戸谷重之、近藤裕昭、宇佐美哲之、石島健太郎、松枝秀和、澤庸介、坪井一寛、冷温帯落葉広葉樹林における温室効果気体の濃度変動、第16回大気化学討論会、2010年11月18日、首都大学東京南大沢キャンパス国際交流会館(東京都)

- ⑭ 石戸谷重之、森本真司、田口彰一、青木周司、中澤高清、スバルパール諸島ニールスンおよび南極昭和基地において観測された大気中酸素濃度の変動と全球二酸化炭素収支の見積り、第16回大気化学討論会、2010年11月18日、首都大学東京南大沢キャンパス国際交流会館（東京都）
- ⑮ 石戸谷重之、村山昌平、青木周司、中澤高清、日本上空における過去10年間の酸素濃度の変動と見積もられた全球二酸化炭素収支、第8回環境研究シンポジウム、2010年11月17日、一橋記念講堂（東京都）
- ⑯ 近藤裕昭、村山昌平、前田高尚、石戸谷重之、蒲生稔、三枝信子、石島健太郎、地球温暖化観測連携拠点へ：高山スーパーサイト(TKY)、第8回環境研究シンポジウム、2010年11月17日、一橋記念講堂（東京都）

〔その他〕

ホームページ等

<http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/24ae-sg/Atmos/AtmosTop/Atmos.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石戸谷 重之 (Ishidoya Shigeyuki)

産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・研究員

研究者番号：70374907