

山地小流域の水循環にともなう大気—森林—溪流系の  
炭素循環の総合把握に関する研究

(課題番号12460068)

平成12年度～平成14年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)(2))  
研究成果報告書



平成15年3月

研究代表者 谷 誠  
(京都大学大学院農学研究科教授)

## はしがき

この報告書は、平成12年度から平成14年度まで科学研究費補助金(基盤研究B(2))によって行われた、「山地小流域の水循環にともなう大気-森林-溪流系の炭素循環の総合把握に関する研究」の研究成果をとりまとめたものである。本研究の研究組織、研究経費、研究発表は以下のとおりである。研究にあたっては、下記に掲げた代表者・分担者以外に、大学院生、学部学生諸君の協力によるところが大きい。記して謝意を表す。また、雑誌投稿中の論文が含まれており、修正の可能性もあるので、掲載後はその雑誌を引用されるようお願いしておきたい。

## 研究組織

研究代表者	谷 誠 (京都大学大学院農学研究科教授)
研究分担者	文字信貴 (大阪府立大学農学部教授)
研究分担者	鱧谷 憲 (大阪府立大学農学部講師)
研究分担者	杉本敦子 (京都大学生態学研究センター助教授)
研究分担者	大手信人 (京都大学大学院農学研究科助教授)
研究分担者	小杉緑子 (京都大学大学院農学研究科助手)
研究分担者	小杉賢一朗 (京都大学大学院農学研究科助手)
研究分担者	武田博清 (京都大学大学院農学研究科教授)
研究分担者	徳地直子 (京都大学大学院農学研究科助教授)
研究分担者	木庭啓介 (京都大学大学院情報科学研究科助手)

## 研究経費

平成12年度	9,500千円
平成13年度	3,900千円
平成14年度	2,100千円
合計	15,500千円

## 研究発表

### (a)学会誌論文等

植山雅仁・鱧谷憲・文字信貴：複雑地形内の森林における風速場の特徴、農業気象、投稿中。

高梨聡・小杉緑子・谷誠・大手信人・矢野雅人・田中広樹・田中克典：ヒノキ林における降雨中および降雨後の蒸発散過程、水文・水資源学会誌 15(3)、2003。

和田卓巳・谷誠・小杉緑子・高梨聡：ヒノキ林における樹体貯熱量の推定、森林研究 74、69-76、2002。

松尾奈緒子、小杉緑子、大手信人、木庭啓介：炭素安定同位体比を用いた暖温帯性常緑広葉樹の水利用効率に関する解析、水文・水資源学会誌 15、229-242、2002。

松尾奈緒子、小杉緑子：暖温帯性広葉樹における個葉のガス交換制御の季節変化について、日本緑化工学会誌 28、14-19、2002。

Kosugi, Y., Shibata, S. and Kobashi, S.: Parameterization of the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O gas exchange of several temperate deciduous broad-leaved trees at the leaf scale considering seasonal changes. *Plant, Cell and Environment* 26, 285-301, 2003.

高梨聡・大手信人・小杉緑子・松尾奈緒子：加圧浸潤法を用いた気孔コンダクタンスの推定手法に関する考察、日本緑化工学会誌 27、324-326、2001。

- 樋口素子・小杉緑子・松尾奈緒子：クロロフィル蛍光を用いた土壌乾燥による光合成低下要因の解析、日本緑化工学会誌 27、339-342、2001。
- 勝山正則・大手信人・内田太郎・浅野友子・木本秋津：降雨流出過程の相違が溪流水質形成機構に与える影響、水文・水資源学会誌、13.227-239、2000。
- Katsuyama, M., Ohte, N. and Kobashi, S.: A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment. *Hydrological Processes* 15. 249-260. 2001.
- Katsuyama, M., Ohte, N.: Determining the sources of stormflow from the fluorescence properties of dissolved organic carbon in forested headwater catchment. *Journal of Hydrology* 268, 192-202, 2002.
- Asano, Y., Uchida, T. and Ohte, N.: Evaluation of water residence times in small headwater catchments, *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, 13: 75-81, 2000.
- 内田太郎、浅野友子、大手信人、水山高久：山地源流域の湧出現象に及ぼす岩盤地下水の影響、日本水文科学会誌 31: 59-72, 2001.
- 川崎雅俊・大手信人・浅野友子・内田太郎：森林小流域の降水浸透過程における溶存有機態炭素の動態、日本生態学会誌 52、119-123、2002。
- 川崎雅俊・大手信人・南部桂・保原達・岡崎亮太・勝山正則・金秀珍：森林流域の水文過程における溶存有機態炭素の動態、陸水学雑誌 63、31-45、2002。
- 尾保手朋子・大手信人・田中広樹・勝山正則・谷誠：ヒノキ林におけるガス態による乾性沈着量の定量化 —ビッグリーフモデルと林内雨法を用いた  $\text{SO}_2\text{-S}$  流入量の推定—、日本林学会誌 84、91-99、2002。
- 浅野友子・大手信人・内田太郎・勝山正則： $\text{H}^+$ 収支を用いた森林植生が酸中和機構に与える影響の評価、日本林学会誌、82、20-27、2000。
- Asano, Y., Uchida, T. and Ohte, N.: Residence times and flow paths of water in steep unchannelled catchments, Tanakami, Japan, *Journal of Hydrology*, 261: 173-192, 2002.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Shibata H., Tsujimura, M., Tanaka, T., and Mitchell, M. J.: Hydrobiogeochemistry of Forest ecosystems in Japan: Major Themes and Research Issues. *Hydrological Processes* 15, 1771-1789, 2001.
- Ohte, N., Mitchell, M. J., Shibata, H., Tokuchi, N., Toda, H., and Iwatsubo, G.: Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and northeastern United States. *Water, Air, and Soil Pollution* 130, 649-654, 2001.
- Hobara, S. Tokuchi, N. Ohye, N. Koba, K., Katsuyama, M. Kim, S.J. and Nakansihi, A.: Mechanism of nitrate loss from a forested catchment following a small-scale, natural disturbance. *Canadian Journal of Forest Research* 31, 1326-1335, 2001.
- 大手信人・徳地直子：森林生態系の物質循環を理解するための流域研究に向けて —流出窒素の動態が示唆すること—、日本生態学会誌 52、131-137、2002。
- 大手信人・柴田英昭・徳地直子・マイロン J ミッチェル・戸田浩人：森林流域からの  $\text{NO}_3$  流出 —流出の季節性から読み取れる情報—、水利科学 268、40-53、2002。
- Ohte, N., Tokuchi, N. Katsuyama, M., Hobara, S. and Asano, Y.: Episodic increases in nitrate concentrations in streamwater due to the partial dieback of a pine forest in Japan: runoff generation processes control seasonality. *Hydrological Processes* 17, 237-249, 2003.
- Asano, Y., Uchida, T. and Ohte, N.: Sources of weathering-derived solutes in two granitic catchments with contrasting forest growth, *Hydrological Processes*, in printing, 2003.

(b)学会口頭・ポスター発表

- Kim, S.J., Ohte, N., Tokuchi, N., Hobara, S., and Katsuyama, M. :Seasonality in concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^-$  in soil profiles of forest catchment with partial dieback by pine-wilt disease, 6th conference on Acid Rain, 2000.

- 金秀珍・大手信人・徳地直子・川崎雅俊・谷誠：森林土壌の可溶性 S の分布に関する研究、第 48 回日本生態学会 2001。
- Katsuyama, M. and Ohte, N.: Effects of the variations of groundwater levels on the hydrochemical processes in a headwater catchment, Japan. International conference "Runoff Generation and Implications for River Basin Modeling", 2000.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Shibata, H., Tsujimura, M., and Tanaka, T.: Hydrobiogeochemical studies of a forest ecosystem in Japan: What is the major conditional uniqueness that reflects on hydrobiogeochemistry? US-Japan Joint Seminar on the Hydrology and Biogeochemistry of Forested Catchments, Honolulu, USA, 2000.
- Ohte, N, Tokuchi, N, Nakanishi, A, Katsuyama, M, Asano, and Y, Koba, K.: Runoff Generation Process as a Controlling Factor of the Seasonality in Nitrate Concentration of Streamwater of the Humid Temperate Forest in Central Japan, Western Pacific Geophysics Meeting, AGU, Tokyo, 2000.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Katsuyama, M., Hobara, S., and Asano, Y.: Episodic rising in nitrate concentration of streamwater by partial dieback of pine forest in Japan, International Workshop on Runoff Generation and Implications for River Basin Modeling, Freiburg, Germany, 2000.
- Ohte, N., Mitchell, M. J., Shibata, H., Tokuchi, N., Toda, H., and Iwatsubo, G.: Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and northeastern United States. Water, 6th International Conference on Acidic Deposition, Tsukuba, 2000.
- Obote, T., Ohte, N., Tanaka, H., Katsuyama, M. and Tokuchi, N. : Estimation of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> dry deposition rate in a Japanese cypress forest, 6th International Conference on Acidic Deposition, 2000.
- 尾保手朋子・大手信人・田中広樹・勝山正則・徳地直子・谷誠：森林流域における SO<sub>2</sub> 乾性沈着量の推定、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 小杉緑子・松尾奈緒子：Jarvis 型および Ball 型気孔コンダクタンスモデルの利点・難点、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 濱規子・小杉緑子・松尾奈緒子・大手信人・田中広樹・谷誠：人工緑地における乱流変動法による顕熱、潜熱、CO<sub>2</sub> フラックス測定、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 片山辰弥・田中広樹・小杉緑子・立花克朗・谷誠：ボーエン比法等複数の手法を用いたヒノキ林のエネルギー交換特性の比較・解析、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 浅野友子・内田太郎・大手信人・谷誠：流出経路を考慮した山地源流域における地中水の平均滞留時間の評価、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 樋口素子・小杉緑子・松尾奈緒子：クロロフィル蛍光を用いた植物の光合成特性の解析、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 小杉賢一朗・村上靖典・小杉緑子・松尾奈緒子：土壌水分条件がヒノキ林の蒸散に及ぼす影響、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 勝山正則・大手信人・壁谷直記：森林流域における地下水帯の変動が地下水・渓流水質に与える影響、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 荒田美美子・大手信人・壁谷直記・小杉緑子：水の安定同位体比を用いた樹体内の水移動、第 112 回日本林学会大会、2001。
- 小杉賢一朗・村上靖典・小杉緑子・谷誠：土壌水分条件を考慮したヒノキ林の蒸散過

- 程のモデル化、水文・水資源学会研究発表会、2001。
- 金秀珍・大手信人・徳地直子・川崎雅俊・谷誠：森林土壌の可溶性 S の分布に関する研究、生態学会第 48 会大会、2001。
- 大手信人・徳地直子：森林の窒素循環と水文プロセス、生態学会第 48 会大会、2001。
- 川崎雅俊・大手信人・浅野友子・内田太郎：森林源流域からの流出 DOC に水文過程が及ぼす影響、生態学会第 48 会大会、2001。
- 松尾奈緒子・小杉緑子・大手信人・木庭啓介：炭素安定同位体比とガス交換速度を用いた温帯性常緑広葉樹の水利用効率の解析、生態学会第 48 会大会、2001。
- 尾保手朋子・大手信人・田中広樹・谷誠：ヒノキ林における粒子状物質の化学組成と濃度の鉛直分布に樹冠が及ぼす影響、第 42 回大気環境学会年会、2001。
- 濱規子・小杉緑子・松尾奈緒子・大手信人・田中広樹・谷誠：瀬戸内気候帯の人工樹林帯における樹冠フラックスの季節変動特性、水文・水資源学会研究発表会、2001。
- Kim, S.J., Ohte, N., Tokuchi, N., and Tani, M. Distribution of inorganic sulfate in forest soil profiles with partial dieback by pine-wilt disease. IGBP Open Science Conference, Amsterdam, The Netherlands, 2001.7.
- 保原達・徳地直子・大手信人・中西麻美・勝山正則・金秀珍・木庭啓介：マツ枯れのある森林集水域からの硝酸流出過程、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 勝山正則・大手信人・小杉賢一朗・安藤宏幸：森林流域における水移動経路の推定、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 和田卓巳・谷誠・矢野雅人・田中広樹・小杉緑子：ヒノキ林の樹体貯熱量の実測と解析、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 田中成斗・谷誠・田中広樹・小杉緑子：芝生及び森林における乱流フラックス特性の比較、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 尾保手朋子・大手信人・田中広樹・矢野雅人・谷誠：ヒノキ林におけるガス・粒子状物質の鉛直プロファイル、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 伊藤雅之・大手信人・勝山正則・川崎雅俊：森林流域におけるメタン動態、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 川崎雅俊・大手信人・小杉賢一朗：森林流域における DOC の生成・消費量の推定、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 高梨聡・小杉緑子・谷誠・田中広樹・矢野雅人・大手信人：ヒノキ林における降雨中および降雨後の蒸発散過程、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 浅野友子・内田太郎・大手信人：森林植生が山地源流域における渓流水の  $\text{HCO}_3^-$  濃度に与える影響、第 113 回日本林学会大会、2002。
- 小杉緑子・濱規子・松尾奈緒子・田中広樹・大手信人・谷誠：多層モデルを用いた瀬戸内気候区人工樹林における顕熱・潜熱・ $\text{CO}_2$  フラックス変動特性の解析、第 113 回日本林学会大会、2002。

- 松尾奈緒子・小杉緑子：暖温帯性広葉樹における個葉のガス交換制御の季節変化について、第 33 回日本緑化工学会研究発表会、2002。
- 尾保手朋子・大手信人・谷誠：ヒノキ林における粒子状物質の鉛直プロファイル、第 19 回エアロゾル科学・技術研究討論会、2002。
- 勝山正則・小杉賢一朗・大手信人：風化花崗岩山地源流域の渓流水  $\text{NO}_3^-$  濃度形成に与える水文過程の影響、水文・水資源学会研究発表会、2002。
- 大手信人・荒田美美子・松尾奈緒子・杉本敦子・王林和・吉川賢：臭柏 (*Sabina vulgaris*) の更新プロセスにおける水分生理の変化とナースプラントとしてのと烏柳 (*Salix cheilophila*) の影響について、生態学会第 49 会大会、2002。
- 松尾奈緒子・小杉緑子・大手信人・木庭啓介：葉の炭素安定同位体比から  $\text{C}_i/\text{C}_a$  を推定する際のタイムスケールの問題、生態学会第 49 会大会、2002。
- Kawasaki, M. and Ohte, N.: The dynamics of DOC in the hydrological process in a forested watershed in Japan. The fall meeting of AGU, 2002.
- Matsuo, N., Kosugi, Y., Ohte, N. and Koba, K.: Calibration of foliar  $\delta^{13}\text{C}$ : an approach to time-integrated  $\text{C}_i/\text{C}_a$  with gas exchange measurements and carbon isotope composition in a temperate forest in Japan, The 3rd Annual International Conference Application of Stable Isotope Techniques to Ecological Studies, 2002.
- Kim, S.J., Nobuhito, N., Tanikawa, T. and Tokuchi, N. Sulfur fractions in a forest soil profiles with partial dieback by pine-wilt disease area. VIII International Congress of Ecology, Seoul, Korea, 2002.
- 松尾奈緒子・小杉緑子：葉と大気の炭素安定同位体比を用いた個葉ガス交換特性の簡易パラメタリゼーション、第 114 回日本林学会大会、2003。
- 和田卓己・谷誠・小杉緑子・高梨聡：ヒノキ林における群落内貯熱量各項の算定、第 114 回日本林学会大会、2003。
- 川崎雅俊・大手信人・内田太郎・浅野友子：花崗岩山地源流域における岩盤湧水 DOC 濃度の経時変化、第 114 回日本林学会大会、2003。
- 三谷智典 小杉緑子 谷誠 高梨聡 片山辰弥：温帯ヒノキ林および熱帯雨林における土壌呼吸量の時間的・空間的変動、第 114 回日本林学会大会、2003。
- 三舛祐美・浅野友子・大手信人・内田太郎・勝山正則・川崎雅俊・谷誠：森林における流域スケールと溪流の流量・水質の関係、第 114 回日本林学会大会、2003。
- 勝山正則・大手信人・小杉賢一朗・谷誠：風化花崗岩流域における空間スケールの拡張に伴う水文化学過程の変化、第 114 回日本林学会大会、2003。
- Matsuo, N., Kosugi, Y., Ohte, N. and Koba, K.: Estimation of time-span indicated by foliar  $\delta^{13}\text{C}$  using simulation based on gas exchange rates、生態学会第 50 会大会、2003。

## 研究の成果

### 目 次

1 総論	7
1-1 概説	7
1-2 成果	7
2 各論	11
2-1 大気-森林系における熱・水・炭素の輸送動態	11
(1) 複雑地形内の森林における風速場の特徴	12
(2) ヒノキ林における降雨中および降雨後の蒸発散過程	22
(3) ヒノキ林における樹体貯熱量の推定	41
2-2 個葉レベルにおけるガス交換過程	49
(1) 炭素安定同位体比を用いた暖温帯性常緑広葉樹の水利用効率に関する解析	50
(2) 暖温帯性広葉樹における個葉のガス交換制御の季節変化について	64
(3) Parameterization of the CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O gas exchange of several temperate deciduous broad-leaved trees at the leaf scale considering seasonal changes	70
(4) 加圧浸潤法を用いた気孔コンダクタンスの推定手法に関する考察	87
(5) クロロフィル蛍光を用いた土壌乾燥による光合成低下要因の解析	90
2-3 森林-溪流系の水循環にともなう炭素の輸送動態	94
(1) 降雨流出過程の相違が渓流水質形成機構に与える影響	95
(2) A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment	108
(3) Determining the sources of stormflow from the fluorescence properties of dissolved organic carbon in a forested headwater catchment	120
(4) Residence times and flow paths of water in steep unchannelled catchments, Tanakami, Japan	131
(5) 森林小流域の降水浸透過程における溶存有機態炭素の動態	151
(6) 森林流域の水文過程における溶存有機態炭素の動態	156
2-4 森林流域における各種物質の循環	171
(1) ヒノキ林におけるガス態による乾性沈着量の定量化	172
(2) H <sup>+</sup> 収支を用いた森林植生が酸中和機構に与える影響の評価	181
(3) Hydrobiogeochemistry of forest ecosystems in Japan	189
(4) Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and northeastern United States	208
(5) Mechanism of nitrate loss from a forested catchment following a small-scale, natural disturbance	214
(6) 森林流域からの NO <sub>3</sub> 流出	224
(7) Episodic increases in nitrate concentrations in streamwater due to the partial dieback of a pine forest in Japan	238
(8) 森林生態系の物質循環を理解するための流域研究に向けて	251

## 1 総論

### 1-1 概説

気候温暖化が最重要の地球環境問題として認識されており、森林-大気間の二酸化炭素輸送交換量の観測が世界的に展開されている。この観測研究はフラックスネットワークを構築することにより標準化や相互比較を目指している。日本においてもこのようなバックグラウンドの中で研究が進められてきている。しかし、大気-森林間二酸化炭素輸送の測定把握が重視されているのに比べ、流域での炭素動態の視点に基づく研究は数が少ない。森林生態系における炭素動態は、光合成・呼吸による生理化学的過程、地中における生物地球化学的過程に基づいており、さらに、雨水の輸送による水文学的過程の影響を受けるから、大気-森林間の輸送と地中の輸送全体を把握し、森林流域での炭素循環全体を推定することが、環境変動に対する生態系の応答を評価して炭素の吸収放出を予測するために不可欠である。

本研究は、タワーによる大気-森林間のフラックス観測設備、地中の水流出機構の測定設備が整い、これまでの観測実績のある森林小流域において、熱や物質の詳細な輸送動態を探りつつ生態系全体の炭素循環を把握しようとしたものである。

本研究で得た成果をまとめると下記ようになる。

- 1) 大気-森林間の熱・水蒸気・CO<sub>2</sub>フラックスを精度よく測定するために、地形の影響を評価した。
- 2) 個葉レベルにおける光合成と蒸散の制御に関する生理化学過程に関して、樹種や環境条件による水利用効率の変化を推定する手法について検討し、適合性の改善を得た。
- 3) 個葉レベルにおけるCO<sub>2</sub>・水蒸気フラックス評価モデルについて検討し、その季節変化を再現できるようなパラメータ化手法について検討を加えた。
- 4) 林内におけるCO<sub>2</sub>の輸送・貯留を再現できる多層モデルを観測によって検証した。
- 5) 降雨中から降雨後にかけての遮断蒸発・蒸散の交替を多層モデルによって推定し、観測によって検証した。
- 6) 森林群落内貯熱のひとつである樹幹貯熱量を推定した。
- 7) 溶存有機態炭素、あるいはナトリウムと硫酸イオンをトレーサーに用いて流出経路を推定した。
- 8) 土壌の雨水浸透過程や斜面方向への流下過程における溶存有機態炭素の動態を明らかにした。
- 9) 水循環にともなう窒素やイオウなどの各種物質の動態について検討し、北米などと比較した日本の森林における特徴を明らかにした。

以上のように、大気-森林-溪流系を通じた炭素の循環、およびそれに関連する各種物質の循環に関して、観測に基づいた知見を得るとともに、これを評価するためのモデル化とその検証を行った。

### 1-2 成果

#### 1) 地形の影響

大気-地表面間のフラックス推定は、平坦地形上の均質植生条件での推定が基本的であり、それ以外の条件での推定には困難が伴う。しかし、森林は山地地形に多く存在し、複雑地形におけるフラックス推定を行う必要性が大きい。われわれが研究を行



っている、滋賀県桐生水文試験地マツ沢のヒノキ林にあるタワーも複雑地形上にあって、地形の影響がどのように現れるのかを検討しておく必要がある。そこで、タワーにおける風速場について検討を行った（各論2-1(1)参照）。その結果、風向によって、中立時の粗度長や地面修正量の値、Monin-Obkhovの相似則の適用性、群落内における鉛直風速分布などが異なる結果となった。すなわち、尾根を越えて吹き降ろす南を中心とする側からの風の場合は、水平一様な条件で成立するとされる相似則や樹冠上と群落内の風速鉛直分布が成り立ちにくい、緩傾斜の沢側から吹き上がってくる北風の場合には、これらの理論的關係がおおむね成り立つことがわかった。複雑山地地形でのフラックスを平坦地と同様に正確に見積もることは今後の課題であるが、比較的昼間に多い北側からの谷風の場合に、フラックス推定の条件が良好であることが確認された。

## 2) 多層モデルによるCO<sub>2</sub>動態の解析

桐生ヒノキ林は複雑地形上に位置しているとはいえ、かなり良い条件での観測が可能であることを背景として、樹冠上の二酸化炭素などを初めとするフラックスの長期観測を行い、CO<sub>2</sub>動態について下記のように解析した。

大気-森林間のCO<sub>2</sub>フラックスは、群落各部位における放射・運動量・温度・湿度環境を基に行われる光合成・呼吸活動を統合した諸過程の結果として生産されるものである。できるだけこのプロセスに沿うように構成されたモデルとして多層モデルがある。そこで、多層モデル（各論2-1-(2)参照）を用いて群落内におけるCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布と樹冠上のフラックスを推定し、実測と比較することにより、モデル検証を行うとともに林内CO<sub>2</sub>動態について検討した。

まず、樹冠上フラックスの日変化、季節変化については、顕熱、蒸発散潜熱、CO<sub>2</sub>フラックスのいずれもおおむね再現された。夜間や降雨前後についてはいずれもみられたが、観測結果にも精度の問題が残されており、降雨中降雨後については、次項で述べる。次に、CO<sub>2</sub>の鉛直プロファイルや林内貯留変化量については、日中はおおむね良く再現されたが、夜間に樹冠下部から土壌面にかけての樹幹空間にかけて急勾配でCO<sub>2</sub>濃度が増加する実測の傾向が再現されなかった。空気塊の混合が実際よりも大きく計算され、土壌面付近に土壌呼吸によって貯留されるCO<sub>2</sub>高濃度の部分を再現できなかったと考えられる。

## 3) 降雨中・降雨後の蒸発散

森林では降雨遮断蒸発のウェートが一般的に大きいことが林外と林内の雨量差から水収支的に指摘されている。しかし、降雨中・降雨後において行われる蒸発フラックスの微気象学的観測の精度には難点があり、エネルギー収支的にみて未解明の問題が残されてきた。また、CO<sub>2</sub>輸送の観点から、このような条件における光合成や呼吸の定量評価がなされるに至っていない。そこで、降雨中・降雨後において、群落フラックスと葉の濡れ具合の観測を同時に行い、群落各部位の濡れ具合やフラックスを再現できる多層モデルを用いて、降雨中・降雨後の蒸発散の評価を試みた（各論2-1-(2)参照）。

降雨によって樹冠上層から短時間に濡れてゆく過程と降雨後、樹冠上層からゆるやかに乾燥してゆく過程は、いずれも、多層モデルによって再現された。また、モデルで計算される、降雨後遮断蒸発から蒸散に変化してゆく過程における両者の合計は、群落レベルにおける渦相関法による観測結果をおおむね再現していた。これらのことから、多層モデルが降雨中から降雨後の蒸発散状況を説明できることがわかった。今

後、降雨中から降雨後にかけての光合成・呼吸の変化についても評価してゆきたい。

#### 4) 樹体貯熱量の推定

多層モデルにおいては、林内における樹幹の貯熱は考慮されていない。そこで、群落内の熱の貯留・輸送をモデルに取り込むため、まず、樹体貯熱量の観測とその特性解析を行った(各論2-1-(3)参照)。その結果、ヒノキ林での樹幹貯熱変化量は、既知の熱物理定数を熱伝導方程式に代入することで評価できることがわかり、樹体温度を測定しなくても周囲の林内気温の測定値から樹体貯熱変化量を推定する手法を提案した。

#### 5) 個葉の水利用効率

個葉における光合成と蒸散の関係は、樹種毎に、また生物季節や気象・土壌水分環境条件によって異なる。群落レベルにおける炭素動態について、植物による制御を考慮してモデル化するためには、このような個葉レベルの特性を反映させる必要がある。すなわち、光合成による生産と蒸散による水消費の関係を表す水利用効率における樹種毎、また、環境条件毎の特性を比較的容易な測定によって把握しておくことが望まれる。これまで、水利用効率推定法としては、瞬間値を推定する方法と、葉の安定同位対比を測定して期間平均的な値を推定する方法が提起されてきた。そこで、両手法を統合して、水利用効率を的確に推定する手法の開発を試みた(各論2-2-(1)(2)参照)。これにより、安定同位対比測定の手法が示している平均化期間についての情報が得られるとともに、この手法の水利用効率推定についての有効性がより明確になる成果を得た。

#### 6) 個葉のガス交換過程のパラメータ化

個葉における $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 交換に関しては、気孔の開閉を表すBallタイプのモデルと光合成の生理化学過程を表すFarquharのモデルが一般的に用いられ、大気モデルの境界条件として植物による交換制御を導入する場合にも応用されている。そこで、これらのモデルで、野外条件下での落葉広葉樹の個葉レベルでのガス交換過程について再現できるかについて検討を行った(2-2-(3)参照)。しかし、開葉期や落葉期を含む長期季節変化を表現することは容易ではなく、そのためには詳細な測定に基づくモデルパラメータの特性の評価が必要であることが示された。

#### 7) 流出経路の推定

山地森林流域における各種物質の溪流への流出特性を評価するには、炭素に限らず、地中の雨水流出経路についての情報が必要である。この経路は、斜面上での鉛直浸透から始まるが、その浸透過程にもバイパス的な速い流れがあり、斜面下方への側方流についてはさらに複雑であって土壌層の流れや岩盤内の流れ、パイプ流などを考慮しなければならない。各種物質はその経路における生物活動にともなう変化、風化にともなう化学変化などを受けるが、その経路そのものが把握されない限り、モデルはブラックボックスにとどまり、物質循環の定量的な評価ができないことになる。

そこで、桐生のマツ沢流域において、ナトリウムと硫酸イオンの濃度をトレーサーにし、林内降雨、恒常的地下水、一時的地下水の水質を測定して、それぞれ、雨水が直接溪流にはいる成分、基底流を生産する地下水成分、土壌内に一時的に発生する側方流成分を代表する水質とみなして、溪流の流出を構成する水の流出経路の時間変化を推定した(2-3-(3)参照)。これによって、総降雨量が少なく地下水位の

低い場合には、雨水の直接流入成分と恒常的地下水成分の混合によって渓流水が説明できるのに対し、地下水位が上昇してくると一時的側方流成分が混合してくることがわかった。以上の結果は、直接流出の生起している場合についての経路推定であるが、そのような時ですら恒常的地下水を涵養している深層を通過した流出成分の役割が大きいことを示している。この結果は、炭素流出においてもこのような岩盤を含む深層の経路も重要とみなす必要があることを示唆している。

#### 8) 溶存有機態炭素の動態

森林生態系における炭素の出入りとしては、大気との交換のほかに、溪流への流出がある。後者には、溶存無機態炭素 (DIC)、粒状有機態炭素 (POC) が区分される。ここでは、溪流生態系に及ぼす影響が大きい DOC について、その流出メカニズムについて検討した。桐生マツ沢流域、及び同じ田上の花崗岩山地にあって岩盤からの流出が明確にみられる不動寺流域において、水流出過程に沿って DOC を測定した (2-3-(5)(6) 参照)。その結果、流下過程にともなう DOC の減少過程が水文過程の特徴を反映して 2 種に区分されることが明らかになった。すなわち、鉛直浸透過程においては、DOC と Al、Fe が有機錯体形成を形成し、共に土壤粒子に保持されることで深層に至るまでに土壤水から急激に除去されること、その過程を経た後に残った DOC は、鉛直浸透に比べて距離が長く流下時間も長い深層における斜面側方への流出過程で微生物分解反応によって緩やかに減少してゆくことが示唆された。

#### 9) 日本の森林流域における物質循環の特性

以上のほか、森林流域における、各種物質の循環に関して次のような結果を得た。降雨によってもたらされる湿性沈着に比べて実測評価が少なかった乾性沈着についての評価を試みた。とくに、大気-植物間のガス交換を評価するビッグリーフモデルをガス態での沈着量推定手法に適用して、イオウの生態系への入力におけるガス態沈着の重要性を明らかにした (2-4-(1) 参照)。

各種物質の生態系内部循環とその境界を越えた外部との流入流出を、それをドライブする流域水文過程を考慮しつつモデル化してゆくことによって、気候、地形、地質、植生などの条件のそれぞれが果たす物質循環における役割が明確にされてくる。このような観点から、酸性雨の渓流水質に及ぼす影響や人為起源の反応性窒素流入が溪流への窒素流出季節変化の及ぼす影響について、北米などと日本においてなぜ異なった結果が得られるのかが検討された (2-4-(3)(4)(6)(8) 参照)。

山地小流域の水循環と炭素を含む各種物質の循環に密接な関係があることは言うまでもない。たとえば、光合成においては水利用効率が重要な種のものであるし、降雨による樹冠の濡れが光合成・呼吸に及ぼす影響も CO<sub>2</sub> 交換の長期連続評価においては問題となる。また、地中においては、水流出経路のそれぞれの特性が DOC 流出に及ぼす影響などが重要になる。これらはいずれをとってもなかなか明らかにすることが容易でない問題を含むが、そのモデル化は、多層モデルを CO<sub>2</sub> 動態把握の手段として用いること、さまざまなトレーシングによって地中における雨水の流出経路を推定することなどに基づいて、確実に進められている。現在問題となっている環境変動にともなう水循環、炭素の循環の応答変化は、このようなステップを踏むことでのみ予測してゆけるものと確信している。

## 2-1 大気-森林系における熱・水・炭素の輸送動態