

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15934

研究課題名(和文)積雪寒冷地における気候変動下の農地土壌物理環境予測：津軽地域のリンゴ園を対象に

研究課題名(英文)Predicting Physical Environment of Agricultural Soils under Climate Change in Snowy and Cold Regions: A Case Study of Apple Orchards in the Tsugaru Area

研究代表者

加藤 千尋(Kato, Chihiro)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：60728616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：積雪寒冷地のリンゴ園地を対象に、気候変動が土壌水分、地温、土壌呼吸(土壌微生物による有機物分解と根の呼吸)に起因する土中CO₂動態におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。将来の気温上昇や降水量の増加に伴い、特に初夏(5～6月)および初秋(9～10月)の土中CO₂濃度の増加が示唆された。また、一般に低温の冬季は土中CO₂濃度が低く春季に徐々に増加するが、将来は消雪の早期化が予測され、現在と比較して1か月程度早く土中CO₂濃度の上昇が始まる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地球温暖化緩和策として、農地への有機物施用とともに適切な圃場管理による土壌炭素の維持の重要性も増している。一般に低温の寒冷地は土中の有機物分解速度が低いが、昇温や降水パターンの変化を伴う気候変動は、土壌水分、地温を変化させ、土中有機物分解速度にも影響を及ぼすと考えられる。他方、気候変動下の土壌呼吸に関する研究は、これまで主に森林や草地、水田、畑地などを対象に行われ、果樹園についての検討例は少ない。以上を踏まえ、本研究では積雪寒冷地である津軽地域のリンゴ園地を対象に、気候変動が土壌水分、地温、土中の有機物分解を含む土中CO₂動態予測を行った。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to clarify the effects of climatic change on soil moisture, soil temperature and soil CO₂ dynamics with soil respiration (decomposition of organic matter by soil microorganisms and respiration by roots) in apple orchards in a cold snowy region. The results suggested that future increases in temperature and precipitation will increase soil CO₂ concentrations, especially in early summer (May-June) and early autumn (September-October). In general, CO₂ concentration in the soil is low during the cold winter season and gradually increases in the spring season, but in the future, snowmelt is expected to occur earlier, indicating that CO₂ concentration in the soil may begin to increase about one month earlier than at present.

研究分野：土壌物理学

キーワード：気候変動 積雪寒冷地 土壌水分 地温 土中CO₂ 動態 土壌呼吸

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動が作物生産に及ぼす影響把握と適応策、緩和策の検討は喫緊の課題である。冬季の2~3°Cの気温上昇や降水パターンの変化は、積雪寒冷地においては根雪の期間や融雪の時期を変化させ、冬季~春季の土壤水分・温度状態、土中の生化学反応・物質動態に影響を及ぼす。土壤水分や地温などの土中の物理環境は、作物生産環境として重要である。

土中の生化学反応の一つに、有機物分解が挙げられる。近年、地力の維持増進のため農地への有機物施用が励行され、また、地球温暖化緩和策として土壤の炭素貯留能が注目されている(加藤ら, 2021)。土壤中の有機物分解速度は、土壤水分や地温の影響を受ける。一般に寒冷地においては低温のため有機物分解速度が小さいとされるが、その分、温暖化の影響は大きいと考えられる。したがって、気候変動下において、土中の有機物分解速度がどのように変化するかを把握することが重要である。

気候変動下における有機物分解を含む土壤呼吸の検討は、これまで主に森林や草地などの自然植生や、水田・畑地などを対象に行われ、果樹園についての検討例は少ない。他方、リンゴ園地は積雪寒冷地である津軽地域の主要な土地利用の一つである。リンゴ園地では下草刈り取りや新梢剪定、摘果などの栽培管理によって土壤に炭素が供給される点で、水田や畑地等の他の土地利用とは土中の炭素動態が異なると考えられる。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では、気候変動下において、積雪寒冷地では積雪や融雪の時期、量が変化することによって、農地土中の水移動・熱移動にどのような影響が及ぶか、また、土壤物理環境の変化に伴い、有機物分解速度がどのように変化するか、を明らかにすることを目的とした。そのために、将来の気候予測値を境界条件とした土中水・熱移動および土中CO₂生成・移動計算を行い、気候変動下の土壤環境(土壤水分、地温、およびCO₂濃度)の検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 土壤水分・地温・土中CO₂濃度のモニタリングおよび土壤炭素含量の測定

弘前大学藤崎農場の研究用ビニールハウルのリンゴ樹園地(伊藤ら, 2020; 加藤ら, 2021)において、地表面から深さ15 cmおよび40 cmの土壤水分、地温、土中CO₂濃度の連続モニタリングを行った。土壤水分・地温はMETER社の5TEセンサ、土中CO₂濃度はGMP251センサ(Vaisala社)をシリコンチューブに密封(加藤ら, 2013)した小型土中埋設型ガスモニタリングシステムを用いた。なお、本試験区は非積雪期の4月から11月はビニールの屋根が設置されており、降雨を模した灌漑が定期的に行われた。一方、側面は開放され、気温や大気中ガス環境は外気と同等であった。他方、積雪期(12月から3月)はビニールの屋根が撤去され、ハウス外と同様に積雪があった。

また、2020年10月と2021年5月に地表面から放出されるCO₂フラックスを測定した。リンゴ樹からの距離によって、リンゴ樹根の呼吸速度の寄与が異なると考えられるため、リンゴ樹から距離50 cmおよび150 cmの位置で測定した。2021年5月に深さ0-10 cm、2023年6月に深さ0-10 cmおよび20-30 cmの土壤を採取し、全炭素量、C/N比を測定した。また、土壤を水で抽出、0.22μmフィルターでろ過した溶液中のTOCを測定することで、溶存有機炭素(DOC)を測定した(Wagai and Phillip, 2002)。さらに、その抽出液に少量の土を添加し25°C約1か月間培養し、その間に分解されたDOCを生分解性溶存有機炭素(BDOC)として把握した(BDOC測定は2023年のみ)。なお、2023年4月にリンゴ樹の地上部を伐採した。

(2) 数値計算

HYDRUS-1Dモデル(ver.4.17)を用い、本試験地を対象とした土中水・熱移動計算、および土中CO₂動態の計算を行った。まず土中水熱移動計算について、計算領域を鉛直100 cmと仮定し、深さ20 cmを境界とする2層と仮定した。土中水移動特性関数にvan Genuchten - Mualem式を適用し、現地の表層10 cm程度から採取した不攪乱試料を用い、水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置HYPROP(METER社)によってパラメータを得た。さらに、ここで得られたパラメータを初期値とし、上述の土壤水分モニタリングの実測データ(2020年5月1日から同年7月31日)を用いて逆解析を行い、上層(0~20 cm)、下層(20 cm以深)のパラメータを得た。土中の熱移動特性関数は、Chung and Horton式(Chung and Horton, 1987)を適用し、藤崎農場を対象とした遠藤ら(2014)を参考にパラメータを決定した。ここで得られたパラメータを用いて2020年4月1日から2022年3月31日まで2年分の土中水・熱移動計算を行い、モニタリングによる実測値と比較することによってモデルとパラメータの検証を行った。

このとき、土中水移動計算の境界条件は、上端は降雨(本試験区においては、4月から11月は灌漑量、12月から3月は降水量)と蒸発量・蒸散量、下端は圧力勾配ゼロとした。ここで、蒸発量と蒸散量について、まずwebで公開されているMETEO Crop(農研機構)を用い、対象地に近い弘前市のFAO基準蒸発散位を得た。そして、リンゴと同じバラ科のモモ樹園地における蒸発蒸散比(内藤ら, 1974)を参考に、月ごとに蒸発量と蒸散量を分離した。ただし、冬季(12

月～3月)は落葉するため、蒸散は0と仮定した。土中熱移動計算の境界条件は、上端は温度境界条件として日平均気温、下端は温度勾配ゼロとした。また、対象地は冬季に積雪があるためHYDRUSの積雪オプション(Snow Hydrology)を適用した。積雪に関するパラメータはデフォルト値を用いた。初期条件は、後述の計算開始日(4月1日)の実測値を参考に定めた。また文献値(加藤, 2001)による下草根と、現地のリンゴ樹根の深さ分布(伊藤ら, 未発表)を基に深さによる根の吸水速度分布を決定し、計算に適用した。

続いて土中CO₂の生成・移動計算を行った。計算にはHYDRUS-1DのUNSATCHEMを用いた。当該モデルによるCO₂動態の計算は、土壌呼吸によるCO₂生成と、移流・拡散によるCO₂輸送によって表される。土中CO₂生成速度Pは、土壌微生物呼吸γ_sと植物根呼吸γ_pの和によって表される。

$$P = \gamma_s + \gamma_p \quad (1); \quad \gamma_s = \gamma_{s0} \prod f_{si}, \quad \gamma_p = \gamma_{p0} \prod f_{pi} \quad (2)$$

$$\prod f_{xi} = f_1(z) f_2(T) f_3(c_a) f_4(h) \quad (3)$$

式(1)において、γ_{s0}、γ_{p0}はそれぞれ土壌微生物、植物根由来の最適水分量で20°Cの条件におけるCO₂生成速度である。本研究では藤崎農場内のりんご園地における土壌呼吸速度と地温の関係式(Ito and Ishida, 2016)を用いて算出した20°Cのときの土壌呼吸速度(0.44 cm d⁻¹)を参考に、土中CO₂濃度の測定がリンゴ樹から1m程度と離れていることを考慮してその半分とし、さらに土壌微生物由来γ_{s0}44%、植物根由来γ_{p0}56%の割合(木部・鞠子, 2004)で按分して適用した。また式(3)において、xはs(土壌微生物)またはp(植物根)を表し、f₁(z):深さ(f₁(z)=ae^{-az}), f₂(T):温度、f₃(h):土壌水分量、f₄(c_a):CO₂濃度の関数である。まずf₁~f₄の各パラメータは黒ボク裸地土壌を対象としたKato et al. (2014)と同じ値を用い、深さ関数のパラメータf₁は、計算値と実測値を比較しながらチューニングを行い決定した。

(3) シナリオスタディ

将来予測計算の気候シナリオとして、農研機構のメッシュ農業気象データを利用した。「現在」を2011-2020年、「将来」を2091-2100年として、現在期間は過去データ、将来期間はMIROC5のRCP8.5シナリオによる予測値を得た。用いた気象要素は、最高・最低・平均気温、降水量、相対湿度、全天日射量、日平均風速である。日照時間は現在、将来ともに、MeteoCropで公開されている弘前市2011年から2020年の過去データを適用した。

得られた気候シナリオをもとに土中水・熱移動計算および土中CO₂生成・移動計算を行った。計算のパラメータは現在・将来ともに同一と仮定し、上述の値を使用した。計算領域上端の境界条件は上述のモデル検証と同様に、水移動については日降水量と蒸発・蒸散量、熱移動は日平均気温を与え、先述の気候予測値を用いた。その際、蒸発・蒸散比は現在・将来ともに同一と仮定した。計算領域下端の境界条件はマトリックポテンシャル勾配ゼロ、温度勾配ゼロとした。続いて、土中CO₂生成・移動計算を行った。ここでも、CO₂生成・移動パラメータは、将来にかけて変化しないものと仮定した。

4. 研究成果

(1) 土壌中の溶存有機態炭素分布および地表面におけるCO₂ガスフラックス

図1に深さ0-10cmおよび20-30cmの土壌中DOCおよびBDOCの比較を示す。DOCに占めるBDOCの割合は、深さ0-10cmで80%、深さ20-30cmで54%であった。また、深さ20-30cmの土壌は、DOC、BDOCそれぞれ、深さ0-10cmの0.54倍、0.37倍であった。土壌深さによってDOCは減少し、特に分解されやすいDOCの低下率が大きかった。微生物による呼吸(有機物分解)速度も、深さによって急減する可能性が示唆された。

表1に、対象地の地表面におけるCO₂フラックスの測定結果を示す。2020年10月、翌年5月ともに、リンゴ樹に近いほどCO₂フラックスが大きく、リンゴ樹根の呼吸によると考えられる。また、距離150cm地点に着目すると、地温が0.7°C程度の差であるのに対し、5月は10月の2倍程度のフラックスが観測された。5月は下草が繁茂していたためと考えられる。

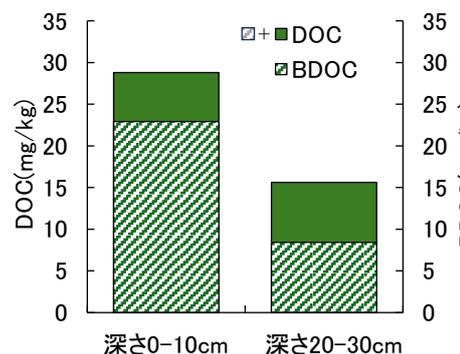


図1 土壌中のDOCおよびBDOC分布

表1 地表面におけるCO₂フラックス

The distance from the apple trees	CO ₂ flux (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Oct., 2020			May., 2021			
		Soil T (°C)	Air T (°C)	VWC (%)	CO ₂ flux (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Soil T (°C)	Air T (°C)	VWC (%)
50 cm	4.31±0.64				5.24±1.06			
150 cm	2.19±0.50	16.0	17.1	47.1	4.86±2.02	16.7	18.7	62.5

(2) 数値モデルの検証

図2に積雪深 (AMeDAS データ) と積雪相当水量 (計算値) の比較を示す。雪の密度の実測データがないため絶対値の比較はできないが、積雪の開始と消雪の時期はモデルによって再現された。図3に、深さ 15 cm の体積含水率、地温の実測値と計算値の比較を示す。非積雪期は、モデルは体積含水率をよく再現していた。他方、積雪期について、実測値は飽和体積含水率に近かったが、計算値は実測値と比較して低い値であった。積雪のタイミングはよく再現できたが、積雪期の体積含水率は小さく見積もられる傾向にあった。地温について、非積雪期はモデルは地温をよく再現した。他方、積雪期は、実際は積雪による断熱効果によって地温が零下となることはなかったが、モデルでは断熱効果が考慮されず、計算値が実測値を下回った。

図4に深さ 15 cm における土中 CO₂ 濃度の実測値と計算値の比較を示す。2020 年は計算値が実測値を上回る傾向にあったが、2021 年はモデルは実測値をよく再現していた。これはリンゴ樹の移植から時間が経つにつれて、根が伸長、高密度化したために土中 CO₂ 濃度が増加したと考えられる。なお、本モデルにおいて積雪層内の CO₂ 移動は考慮していない。

以上のような積雪期における制約を踏まえつつ、シナリオスタディを行った。

(3) 気候変動シナリオ

図5および図6に、気候変動シナリオによる現在 (2011~2020) と将来 (2091~2100) の日平均気温および月降水量の比較を示す。本気候予測値によると、月平均気温は、月によって 3.4°C から 5.2°C の上昇、月降水量は 5 月は 2.3 倍に増加、10 月は 0.8 倍に減少、その他の月は 1.1~1.3 倍の増加と考えられる。図7に、これらの気候予測値を境界条件として計算した積雪相当水量の現在と将来の比較を示す。積雪相当水量は現在、将来のそれぞれ 10 年間の最大値が 1/6 程度に減少、また、現在の初雪および最終降雪日の平均がそれぞれ 11 月 22 日、3 月 24 日であるのに対し、将来は初雪は 1 か月程度早まり、降雪の終了は 1 か月程度遅くなると考えられる。

図8~10に深さ 15cm の土壌水分、地温、土中 CO₂ 濃度の月平均値について現在と将来の比較を示す。将来の土壌水分は月降水量の増加に伴い上昇傾向にあり、特に 5 月、6 月はそれぞれ 11%、22% の上昇が考えられる (図8)。10 月は現在と比較すると将来の月降水量は減少 (図6) しているが、将来の体積含水率の計算値は現在と比較してほとんど変化がなく、下方浸透量や蒸発散量が減少していることが考えられる。将来の地温は月によって 2.4~5.9°C 程度上昇し、特に 9 月から 11 月に 5.5°C 以上上昇する結果となった (図9)。なお先述のように本モデルでは積雪による断熱効果を考慮しておらず、実際は現在の積雪期間 (12 月~3 月) は零下にはならないと考えられる。深さ 15cm における土中 CO₂ 濃度について、土壌水分、地温の上昇に伴い増加傾向であるが、特に、5、6 月および 9、10 月の増加率が 100% 以上、特に 6 月は 300% となった。これらの時期は気温上昇に加え、降水量が一年のなかでも特に増加し、土壌水分が高くなることに起因する。また、現在は 1 月から 3 月まで (冬季) は土中 CO₂ 濃度は低くほぼ一定に保たれているが、将来は気温上昇および消雪の早期化 (図7) に伴い、3 月から CO₂ 濃度の上昇が考えられる (図10)。

ただし、実際には、高温高 CO₂ 濃度条件下において、リンゴ樹や下草などの地上部および地下部の乾物生産量も増加すると考えられ (伊藤ら, 2021; 加藤ら, 2021)、土壌に供給される有機物量や分解性、土壌微生物叢も変化する可能性がある。気候変動下の土中 CO₂ 生成パラメータの検討は今後の課題である。

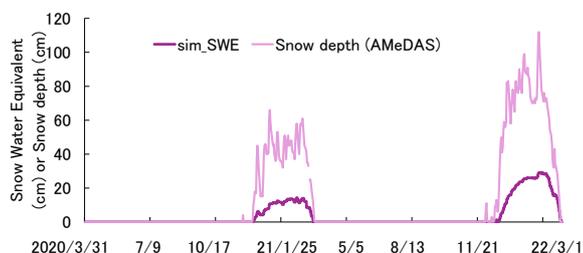


図2 積雪相当水量 (計算値) と積雪深 (AMeDAS)

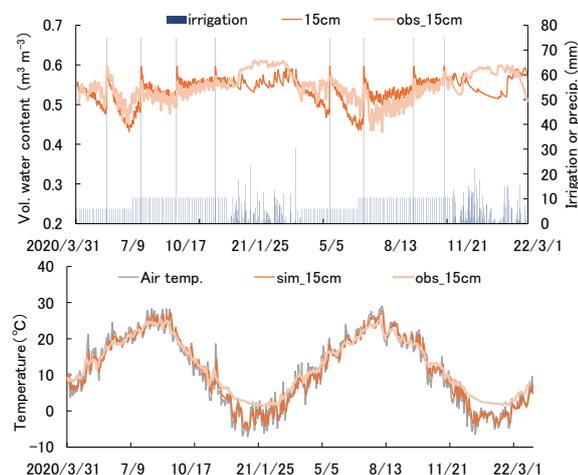


図3 深さ 15 cm の体積含水率 (上) と地温 (下) の実測値と計算値の比較

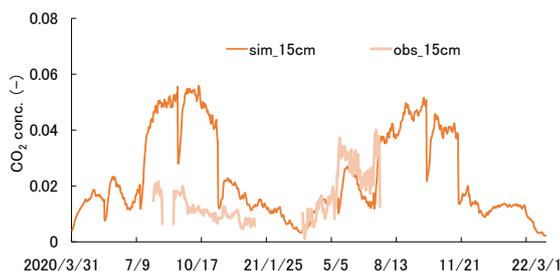


図4 深さ 15 cm の土中 CO₂ 濃度の実測値と計算値の比較

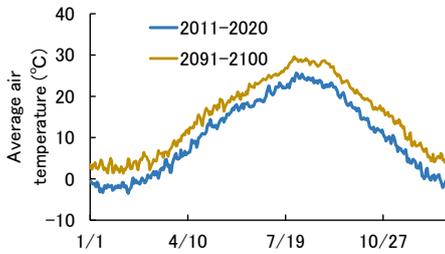


図5 現在と将来の日平均気温の比較

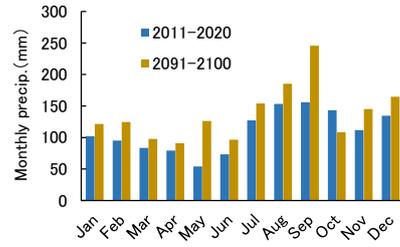


図6 現在と将来の月平均降水量の比較

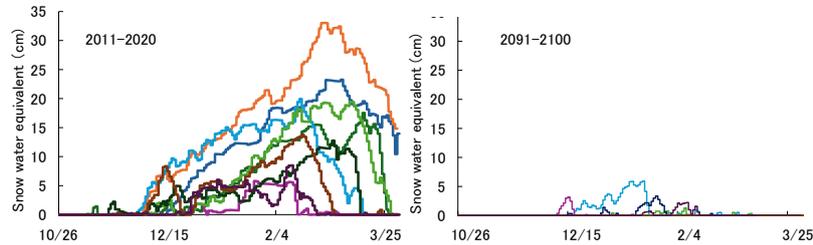


図7 現在(左)と将来(右)10年間の積雪相当水量計算値の比較

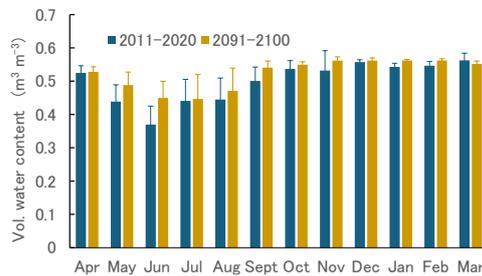


図8 現在と将来の月平均体積含水率の比較

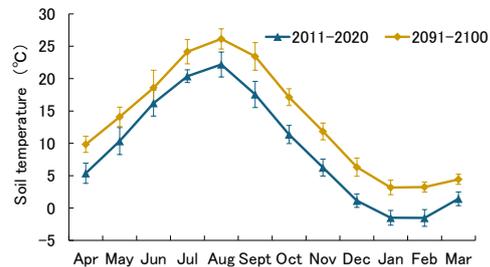


図9 現在と将来の月平均地温の比較

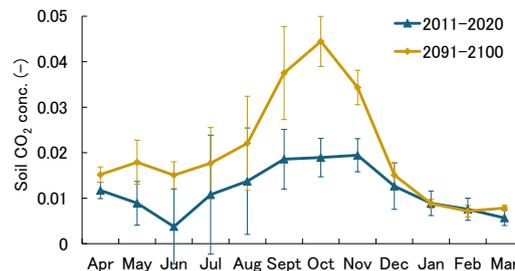


図10 現在と将来の深さ15cmにおける月平均土中CO₂濃度の比較

参考文献

- 伊藤大雄, 石神靖弘, 荒川修, 石田祐宣 (2020): 高温・高CO₂環境がリンゴ生産に及ぼす影響. アグリバイオ, 4, 64-66.
- 加藤千尋, 遠藤明, 伊藤大雄, 石田祐宣 (2021): 気温および大気中二酸化炭素濃度の上昇が津軽地域リンゴ園における土中CO₂動態におよぼす影響. 土壌の物理性, 149, 37-46.
- 加藤千尋, 井本博美, 西村拓, 宮崎毅 (2013): 小型チューブ埋設型土壌ガスモニタリングシステムを用いた農地土壌中CO₂ガス濃度変動の検討. 土壌の物理性, 124: 25-33.
- Chung S.-O., and R. Horton (1987): Soil heat and water flow with a partial surface mulch, Water Resources Research, 23 (12), 2175-2186, 1987
- 遠藤明, 加藤千尋, 佐々木長市, 伊藤大雄 (2014): 施肥・無施肥リンゴ園土壌の無機態窒素の浸透挙動. 農業農村工学会論文集, 294, 75-83
- 内藤文男, 鴨田福也, 坂田公男 (1974): 干ばつ時における限界かん水量に関する研究 II. 果樹園における土面蒸発量とその防止に関する研究. 防災科学技術総合研究報告, 34, 61-73.
- 加藤正 (2001): わい性台リンゴ樹の土壌管理法に関する研究. 青森県りんご試験場報告, 32, 1-94
- Ito, D and S. Ishida (2016): Short- and long- term effects of soil moisture on soil respiration in an apple orchard. Journal of Agricultural Meteorology, 72 (2), 63-71
- Kato, C., Nishimura, T., Imoto H. and Miyazaki, T. (2014): Predicting soil CO₂ dynamics in arable land of Andisol using SOILCO₂ model. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 18, 04014007-1-10
- Wagai, R. and Sollins, P. (2002): Biodegradation and regeneration of water soluble carbon in a forest soil leaching column study. Biology and Fertility of Soils, 35, 18-26

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 加藤千尋・遠藤明・伊藤大雄・石田祐宣	4. 巻 149
2. 論文標題 気温および大気中二酸化炭素濃度の上昇が 津軽地域リンゴ園における土中CO ₂ 動態におよぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 37-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Chihiro Kato
2. 発表標題 Predicting the effects of climate change on soil moisture condition of arable land in Japan
3. 学会等名 The XX CIGR World Congress 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤千尋・遠藤明・佐々木長市・伊藤大雄
2. 発表標題 高温・高CO ₂ 濃度条件がリンゴ園地の土中CO ₂ 濃度に及ぼす影響
3. 学会等名 令和2年度農業農村工学会講演会東北支部青森大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chihiro Kato, Akira Endo, Daiyu Ito, Sachinobu Ishida
2. 発表標題 Effects of elevated air temperature and CO ₂ concentration on soil CO ₂ dynamics in an apple orchard
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chihiro Kato, Akira Endo, Daiyu Ito
2. 発表標題 Soil respiration in an apple orchard in Tsugaru region under high air temperature and high atmospheric CO2 conditions
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------