

# 異なる斜面方位に成立する冷温帯落葉樹林における 受動型オープントップチャンバーによる土壌温暖化 実験の有効性

菱, 拓雄  
九州大学農学研究院環境農学部門森林環境科学講座

山内, 康平  
九州大学農学部附属演習林

井上, 幸子  
九州大学農学部附属演習林

田代, 直明  
九州大学農学研究院環境農学部門森林環境科学講座

<https://doi.org/10.15017/4377825>

---

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 102, pp.1-8, 2021-03-22. The Kyushu University Forests  
バージョン：  
権利関係：

# 異なる斜面方位に成立する冷温帯落葉樹林における受動型オープントップチャンバーによる土壤温暖化実験の有効性

菱 拓雄<sup>\*1</sup>, 山内康平<sup>2</sup>, 井上幸子<sup>2</sup>, 田代直明<sup>1</sup>

地球温暖化に対する森林土壌の機能変化を予測することは、森林の生態系サービスを評価する上で重要な課題である。しかし温帯森林での受動型オープントップチャンバー (OTC) の使用例は少ない。本研究では、北海道演習林の林内に自作の OTC を設置し、土壌の温度、凍結融解頻度、含水率への効果を主に季節性、斜面方位、OTC の有無から明らかにした。年間で OTC 内は外より地温が高かったが、状況によりその効果は様々だった。地温の日平均値、日最高値、最低値および日較差において、季節性、斜面方位、OTC 処理の間に相互作用があり、これは日最高、日平均、日較差において、OTC 内外の差が北斜面と比較して南斜面で大きいことによっていた。冬期は北斜面、南斜面とも土壌凍結融解頻度が OTC 内で有意に増加した。OTC 内では含水率の低下も見られた。以上より、受動型 OTC は、冷温帯落葉樹林内でも、十分に土壌への環境ストレスを増加させる効果があることが明らかとなった。

キーワード：温暖化実験、受動型オープントップチャンバー、斜面方位、凍結融解頻度

Predicting changes in functions of forest soil against to global warming is an important issue to assess forest ecosystem services. However, there are few examples of the use of non-powered passive open top chambers (OTC) in temperate forests. In this study, we set up the OTC in the forest of the Hokkaido Experimental Forest, and clarified the effects on soil temperature, freeze-thaw frequency, and water content mainly from seasonality, slope orientation and warming treatment effect using OTC. The soil temperature inside the OTC was higher than outside during the year, but the effect varied depending on the situation. There were interactions between seasonality, slope aspect, and OTC treatment in daily maximum, minimum, mean soil temperature, and daily range. The interaction was because the difference between the inside and outside of the OTC is larger on the south slope than on the north slope in terms of daily maximum, average soil temperature, and daily range. In winter, the frequency of soil freezing and thawing increased significantly in OTC on both the north and south slopes. There was also a decrease in water content within the OTC. From the above, it was clarified that passive OTC has the effect of sufficiently increasing environmental stress on soil even in cold temperate deciduous forests, although the stress effects are different depending on the situations.

Key words: freeze-thaw cycle, passive open top chamber (OTC), slope aspects, warming experiment

## 1. はじめに

地球温暖化の進行により、生態系機能の低下が懸念されている。森林において温暖化による植生や土壌の生物活動の変化を予測することは、森林の生態系サービスを正確に評価する上でも重要な課題である。温暖化が土壌や植物に与える影響を野外で調べるために、上部が開放された温室 (オープントップチャンバー, OTC) を用いて野外の温度、地温を上昇させる研究が行われてきた (Marion *et al.* 1997; 田中ら 2013)。電熱線やボイラー、赤外線ヒーターを備えた能動型 OTC 法 (active OTC) を用いれば、森林林床の上昇気温をコントロールし、温暖化を再現することが可能である (Pelini *et al.* 2011; Sun *et al.* 2014)。ただし、能動的方法では、電源供給や、ヒーターのメンテナンスが必要であ

り、設置、維持費用も高額である (田中ら 2013)。一方で、無電源の受動型 OTC (passive OTC) は、日射エネルギーを捕捉することで地温や気温を上昇させる (Marion *et al.* 1997) 方法で、設置および維持コストが低く、メンテナンスの手間も比較的かからないため、長期影響の観測に向いており、またアクセスが困難な山岳地や、車の乗り入れが困難な野外での使用が容易である。

無電源の受動型 OTC は、外部からの日射を受けとることで地温を上昇させるため、設置場所の光条件や湿度条件が重要となる (Marion *et al.* 1997)。ツンドラや草原に比べて、森林では高い樹冠に遮光されるため、一般に日射量は低く、温室としての効果が得られにくいことから、森林林床での受動型 OTC によって地温が増加した報告例は少なく (例えば Xu *et al.* 2010: トウヒを中心とした針葉樹林、針

Hishi T\*, Yamauchi K., Inoue S, Tashiro N.: Validity of passive open-top chamber for soil warming experiment in cool-temperate deciduous forest stands on contrasting slope directions

\* 責任著者 (Corresponding author) Email. hishi.takuo.498@m.kyushu-u.ac.jp 〒 811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町津波黒 394

1 九州大学農学研究院環境農学部門森林環境科学講座

Affiliations: 1 Division of Forest Environmental Science, Department of Agro-environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University

2 九州大学農学部附属演習林

University Forest, School of Agriculture, Kyushu University

広混交林, Sharkhuu *et al.* 2013: 北方シベリアカラマツ林ほか), 受動型 OTC ではうまく温暖化しなかった例もみられる (Sun *et al.* 2014: モミ林)。したがって森林では日射や気候の条件などにより温暖化の可否が変わる可能性がある。地形では, 斜面の方位は南向き斜面でより日射量が大きく, 気温や地温が高く, 凍結融解の頻度が異なることがわかっている (Hishi *et al.* 2014)。したがって, 地形条件も受動型 OTC の温度変化に影響すると考えられる。また, 天気や季節による日射量や日射入射角, 上層木の遮光条件などが異なるため, 温暖化の効果は条件によって様々である。

本研究では, 冷温帯の落葉樹林において, 安価な素材を用いた受動型 OTC を用いた土壤温暖化実験が可能であるかどうかを検討するため, 様々な条件下で受動型 OTC が地温に与える効果について検討した。農業用トンネル資材を組み合わせた簡易なテント型の OTC を, 日射条件の異なる北向き, 南向きの冷温帯落葉広葉樹林内に設置し, 季節や斜面方位と OTC 処理が, 地温および凍結融解や土壌水分にどのように影響するのかを調査した。

## 2. 材料と方法

### 2.1. 形状と素材の検討

OTC 内の気温や地温にとって, OTC の形状は重要な役割を果たしている。加工が容易なため, 直立壁による柱状構造のもの (金井&正木 2011) があるが, 多くは  $n$  角錐の側面を持ち, 上部を除いた先すぼみの形状をしており, 壁面を透明の素材で覆い, 上部が開放されている。底面の地面の面積と上部開放面積の差が大きいほど温暖化効果が得やすい (Marion *et al.* 1997) が, 柱型のほうが可塑性が低くても丈夫な壁材を使用して作成できる利点がある。

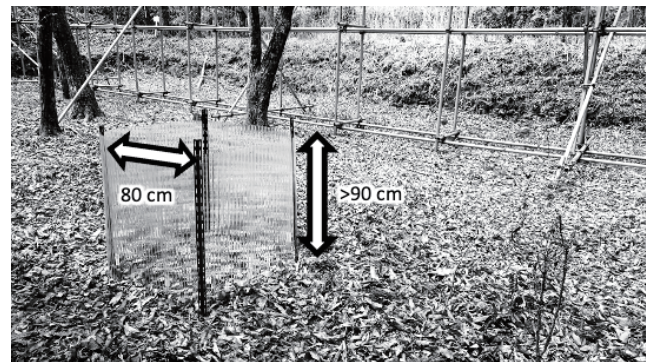
実際の林地での温暖化実験を始める前に, 九州大学農学部附属宮崎演習林 (以下宮崎演習林) の椎葉樹木園内で OTC の素材と形状について検討した。まずはじめに, 2019 年 4 月 25 日にポリカーボネート波板で壁面を高さ 90cm, 1 辺 80cm の四角柱型に覆い, 天井を開放した OTC を設置した (図 1a)。OTC の内部中央と, OTC から 1m ほど離れた地面の二箇所で地温を測定した。地温は筐体にセンサーが内蔵されたデータロガー (おんどとり Jr. TR-51, T&D Co., Tokyo, Japan) を用いた。筐体の上面が鉍質土 0cm に揃うように埋設し, O 層, 腐植層を完全にかぶせた。30 分間隔で 2019 年の 4/26 の午前 0 時から 5/6 の 23:30 までの 11 日間 (うち雨天 3 日間) 測定した。

直立型は材料の加工性が低くても作成は容易だが, 形状としては, テント型の OTC の方が温暖化の研究において一般的であるため, 加工性に優れ安価な農業用ポリエチレンを用いて, テント型 OTC を作成した (図 1b)。直径 16mm 高さ 180cm のアーチ型菜園ポール (セキスイ菜園アーチ支柱  $\Phi$  16H-1.8#70) 2 本の上部を十字に組み, 菜園クロスバンドで留めたあと, 支柱下部を開き, 予めかたてで開けた 4 つの穴におよそ 60 度の角度で支柱の足のそれぞれを刺した。支柱のあいだそれぞれにポリエチレンを貼り, パッカーで留めた。大きさについては, 過去の OTC

の設計図 (Marion *et al.*, 1997) をもとにして, 類似の効果を得られるよう, OTC 上部の開口部は 1 辺 50cm 四方, 底面 1 辺の長さはおよそ 120cm, ビニールの高さがおよそ 90cm になるように設計した。農業用ポリエチレンには厚さの違いがあり, 透光性や保温性に違いがあるため, 厚さ 0.10mm, 0.03mm のポリエチレンで OTC を作成し, 2019 年 7 月 27 日から 30 日までの 4 日間, 前述同様に地温の測定を行った。

宮崎演習林での実験と並行し, 異なる気候帯の北海道でもテント型 OTC による温暖化効果を得られることを確認するため, 農業用ポリエチレン 0.1mm 厚のテント型 OTC を宮崎演習林で作成したものと同様の手順で作成し, 北海道足寄町の九州大学農学部附属演習林北海道演習林 (以下, 北海道演習林) 構内の落葉樹高木の木陰で検討を行った。なお, この OTC 一基は, セキスイ菜園アーチ支柱  $\Phi$  16H-1.8#70 を 2 本, 菜園クロスバンド 1 ピース, 菜園かんたんパッカー 16mm 用 16 ピース, 農業用ポリエチレン 0.1mm 厚  $\times$  1.5  $\times$  10m ほどの合計 3000 円未満の資材で作成できた。

a)



b)

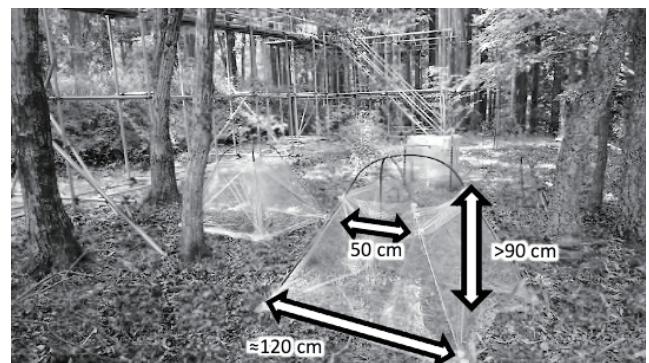


図1. 様々な試作OTC。高さ90cm, 縦横80cm四方ポリカーボネート波板の四角柱型OTC (a)。開口部までの高さ90cm, 上端開口部1辺50cm, 底辺部1辺120cm四方のポリエチレン製テント型OTC (b)。

Fig. 1. Two types of examined open-top chambers (OTC) in this study. Quadrangular prism shaped open-top chamber (OTC) made with clearcolored corrugated poly-carbonate with 90 cm in height and 80 cm in sidelength (a). Four-sided tent shaped OTC made with poly-ethylene (b), whose height from ground to open-top, open-top side lengths, and bottom side lengths are 90, 50, and 120 cm, respectively.

## 2.2. 落葉性広葉樹天然林へのOTC設置

OTCに対する地形や長期的な季節の影響をみるため、季節性が顕著で、斜面方位による日射量が異なる (Hishi *et al.* 2014, 智和・中村 2020) 北海道演習林の天然性落葉広葉樹林において、年間の OTC の地温変化を調べた。北海道演習林の天然林のうち、北向き斜面、南向き斜面プロットを3つずつ選んだ (図2)。南向きの3斜面はいずれもミズナラ (*Quercus crispula*), 北向きの3斜面はオオバボダイジュ (*Tilia maximowicziana*), エゾイタヤ (*Acer pictum* subsp. *mono*) を中心とした湿性の樹種が優占していた。6つの斜面は互いに独立した尾根を持ち、水平距離で0.38 km から8.40 km, 平均して  $4.38 \pm 2.42$  km 離れている。それぞれの斜面上に互いに9m以上離れた位置に、3つずつ OTC を設置した。斜面に設置するため、OTC の高さが斜面上部と下部で多少異なるが、上部側が90cmの高さになるように調整した。OTC のサイズは上記事前実験と同様、上部開口部は1辺50cm 四方、底面は斜距離で1辺およそ120cmである。

それぞれの OTC 内部の中央付近に温度センサーロガーを設置した。機材および設置方法は予備試験と同様の方法で、リター直下、鉾質土層0cmに筐体の上面が揃うように



図2. 北海道演習林内の温暖化実験実施斜面。黒色の点は南向き、灰色の点は北向き斜面を示す。

Fig. 2. Experimental slopes in Ashoro Research Forest (ARF). Black and grey circles indicate south- and north-facing slope.

埋設し、腐植とリターをかぶせた。それぞれの斜面に、3つの OTC のうち、中央に位置するものから1-2 m離れた場所の一つずつ、温度センサーを埋設した。すなわち、2方位の3斜面 (6斜面) それぞれの対象区に1つずつ、3基の OTC それぞれに1つずつ、計24個の温度センサーを埋設した。測定期間は2019年9月11日から、2020年9月10日である。一年間のそれぞれの日にちについて日最高、最低、平均地温を算出した。また、日最高と最低地温の差を地温日較差とした。凍結融解頻度 (FTC) は、地温が正負の値をまたいだ日数で定義した。温度計の回収は2019年11月、2020年6月、8月、11月に行い、その際、ADR (Amplitude Domain Reflectometry) または TDR (Time Domain Reflectometry) センサーで土壌体積含水率を測定した。用いたセンサーは季節ごとに異なり、2019年11月はシートプローブ ML3 (Delta-T devices London, UK), 2020年6月には土壌水分測定器 DM-18 (竹村電機製作所, 東京), 2020年8月と11月には Field Scout TDR 150 (Spectrum Technologies Inc., IL, USA) を用いた。したがって、季節間の違いは本研究では議論しない。

## 2.3. 保守

OTC はよく動物に攻撃され、冬の時期には、ビニールが破損したり、支柱ごと倒れたりした。可能な限り見回りを行い、破損や倒壊があったときには修繕を行った。気温変化などを見て、破損箇所の温度が破損発見からさかのぼって、ある時点から急に変化しているところなど、明らかに OTC が機能していないと判断した場合や、地温計が露出していたと判断できる期間については、解析から外した。冬期に動物の被害が多く見られたため、狼の尿を染み込ませたスポンジで鹿などの動物を排除する wolf pee ハンギングタイプ (原産: 米国, 販売元: リソー販売株式会社, 神奈川) を各 OTC に設置した。また、各プロットに眩しい光と大きな警告音を出して草食獣を警戒させるソーラー式害獣撃退器 (通せんぼ君, 株式会社富士倉, 大阪市) を設置し、動物よけに用いた。警告音を出す機械は、林内では太陽電池の充電速度が十分でなく、受光時にしか作動しないため、夜間の鹿よけとしては効果が期待できなかった。

## 2.4. 統計解析

地温の日最高、最低、平均と日較差に対し、斜面方位、季節と OTC の有無の3つに交互作用を加えた独立変数を固定効果とし、日にちと斜面プロットを変量効果とした三元配置の混合線形モデルを用いて解析した。また、凍結融解頻度については、同様の固定効果に、斜面プロットを変量効果とした三元配置の混合線形モデルを用いて解析した。土壌体積含水率については、斜面方位と OTC の有無とその交互作用を加えた固定効果と、斜面プロットと含水率測定器の機器の違い (つまり測定機会) を変量効果とする二元配置混合線形モデルを用いて解析した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 形状・資材の検討

宮崎演習林で試作したポリカーボネート性四角柱 OTC では、装置の内部、外部における地温の平均±標準偏差はそれぞれ  $13.7 \pm 3.2^\circ\text{C}$  および  $13.8 \pm 3.1^\circ\text{C}$  であり、値にほとんど違いがなかった (図3)。ポリカーボネートの強度は魅力だが、林内において柱状 OTC では十分に地温を上昇させる効果はみられなかった。

0.10mm, 0.03mm 厚のポリエチレン OTC 内および外の地温の平均、標準偏差はそれぞれ  $22.9 \pm 1.3^\circ\text{C}$ ,  $23.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$ ,  $22.5 \pm 1.4^\circ\text{C}$  と、OTC 内部は平均して  $0.37, 0.48^\circ\text{C}$  増加した (図4)。壁材の厚さによる地温の違いは  $0.10^\circ\text{C}$  と僅かだった。したがって、より強度が高いと考えられる 0.10mm のポリエチレン製の資材を OTC 資材として用いるのが良いと考えられた。

北海道の構内の木陰で設置した 0.1mm 厚ポリエチレン OTC 内部の地温は  $18.0 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 、外部の地温は  $17.4 \pm 1.0^\circ\text{C}$  で、OTC 内部の地温が平均で  $0.60^\circ\text{C}$ 、最高地温は晴れた日は  $1.5^\circ\text{C}$ 、曇りや雨で日射量が少ないときにも  $0.5^\circ\text{C}$  程度増加していた (図5)。夜間は差が小さくなるものの、ほぼすべての時間で OTC 内は OTC 外よりも地温が高かった。以上より、本研究で作成、使用した農業用ポリエチレンを用いたテント型 OTC は、落葉樹林内で十分土壌を温暖化する効果があると考えられた。

#### 3.2. 季節、斜面方位が OTC の地温上昇効果に与える影響

図6に全地点の毎日の日最高、最低、平均地温と、日較

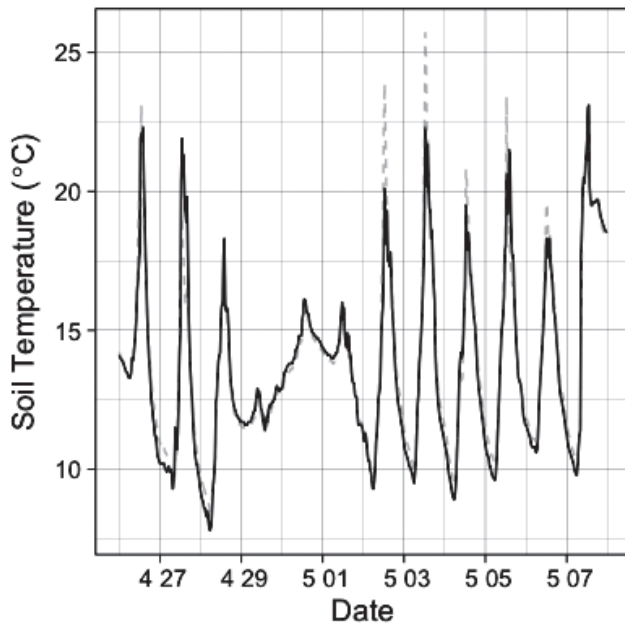


図3. 宮崎演習林椎葉樹木園のミズナラ樹冠下に設置したポリカーボネート波板の四角柱型 OTC の内部 (灰色の線) および外部の地温 (黒い線)。  
Fig. 3. Soil temperatures in (grey line) and out (black line) of quadrangular prism shaped OTC made with clear-colored corrugated poly-carbonate.

差を示した。地温は8月中旬をピークに、11月頃から急激に低下し、4月頃までは土壌凍結が生じていることがわかる。OTC の外部と内部の地温は、北斜面のほうが春先から開葉の終了する夏前までに大きな違いがあるのに対し

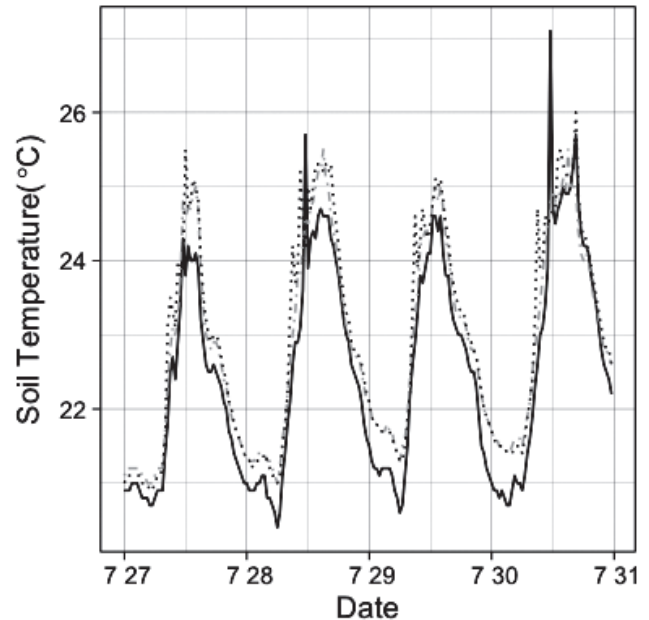


図4. 宮崎演習林椎葉樹木園内のテント型 OTC の内部と外部の地温の違い。灰色の破線は OTC 内部、黒の実線は OTC 外部の地温を表す。  
Fig. 4. Soil temperature inside and outside of tent-shaped OTC in Shiiba Research Forest. Solid black and broken grey lines indicate soil temperature outside and inside of OTC, respectively.

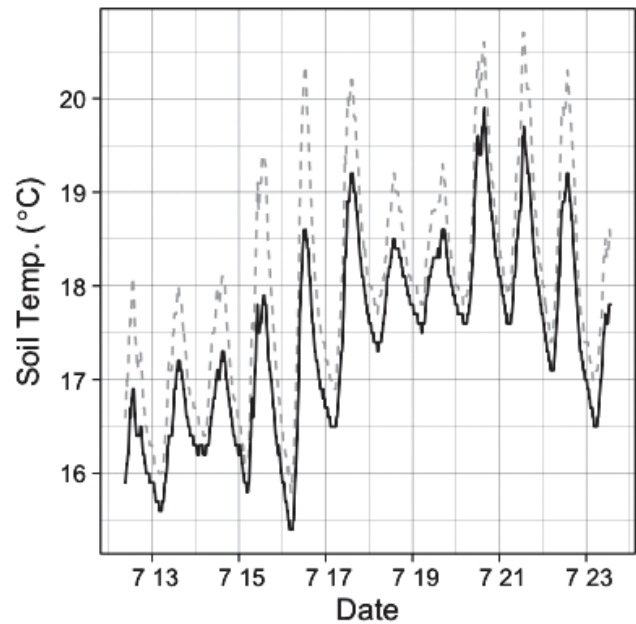


図5. 北海道演習林構内のテント型 OTC の内部と外の地温の違い。灰色の破線は OTC 内部、黒の実線は OTC 外部の地温を表す。  
Fig. 5. Soil temperature inside and outside of tent-shaped OTC in Ashoro Research Forest. Solid black and broken grey lines indicate soil temperature outside and inside of OTC, respectively.

表 1. 各斜面方位上の OTC の外部と内部の地温 (日最高, 最低, 平均, 較差), 凍結融解頻度 (FTC), 体積含水率 (VWC) の年平均値 ± 1S.D.

Table 1. Annual mean ± 1S.D. of soil temperature (daily maximum, minimum, mean and range), frequency of freeze-thaw cycles (FTC), and volumetric soil water content (VWC).

|   | Soil Temperature (°C) |            |            |            | FTC*<br>(days) | VWC<br>(%) |
|---|-----------------------|------------|------------|------------|----------------|------------|
|   | maximum               | minimum    | mean       | range      |                |            |
| Annual (2019.9.21-2020.9.20)            |                       |            |            |            |                |            |
| North OUT                               | 7.0 ± 8.2             | 4.9 ± 7.3  | 5.9 ± 7.7  | 2.1 ± 1.8  | 25 ± 8         | ——         |
| North IN                                | 8.4 ± 8.4             | 5.0 ± 7.7  | 6.5 ± 8.0  | 3.4 ± 2.9  | 45 ± 18        | ——         |
| South OUT                               | 9.2 ± 8.6             | 5.6 ± 7.8  | 7.1 ± 8.0  | 3.6 ± 2.9  | 49 ± 15        | ——         |
| South IN                                | 12.5 ± 8.5            | 5.8 ± 8.0  | 8.2 ± 7.9  | 6.8 ± 4.9  | 105 ± 36       | ——         |
| Autumn (2019.9.21-11.30, 2020.9.1-9.20) |                       |            |            |            |                |            |
| North OUT                               | 9.1 ± 6.3             | 6.9 ± 6.0  | 8.0 ± 6.1  | 2.3 ± 1.2  | 5 ± 1          | 19 ± 9     |
| North IN                                | 10.3 ± 6.5            | 7.3 ± 6.3  | 8.8 ± 6.4  | 2.9 ± 1.7  | 9 ± 3          | 14 ± 8     |
| South OUT                               | 11.7 ± 6.5            | 7.9 ± 6.4  | 9.6 ± 6.4  | 3.8 ± 2.0  | 8 ± 2          | 17 ± 4     |
| South IN                                | 15.0 ± 6.1            | 7.9 ± 6.6  | 10.5 ± 6.1 | 7.1 ± 4.6  | 12 ± 5         | 15 ± 3     |
| Winter (2019.12.1-2020.2.29)            |                       |            |            |            |                |            |
| North OUT                               | -1.6 ± 0.9            | -2.5 ± 1.2 | -2.0 ± 1.1 | 0.9 ± 0.6  | 0 ± 1          | ——         |
| North IN                                | -1.6 ± 1.1            | -3.4 ± 1.7 | -2.5 ± 1.4 | 1.8 ± 1.1  | 3 ± 5          | ——         |
| South OUT                               | -0.8 ± 0.9            | -2.5 ± 1.4 | -1.7 ± 1.1 | 1.7 ± 1.1  | 7 ± 6          | ——         |
| South IN                                | 1.8 ± 2.3             | -3.0 ± 1.7 | -1.2 ± 1.2 | 4.8 ± 2.9  | 61 ± 28        | ——         |
| Spring (2020.3.1-5.31)                  |                       |            |            |            |                |            |
| North OUT                               | 2.9 ± 4.4             | 0.5 ± 2.1  | 1.6 ± 3.0  | 2.5 ± 2.9  | 19 ± 8         | 46 ± 2     |
| North IN                                | 6.6 ± 6.4             | 1.1 ± 3.1  | 3.3 ± 4.1  | 5.5 ± 4.4  | 34 ± 11        | 45 ± 1     |
| South OUT                               | 7.0 ± 6.5             | 1.5 ± 3.5  | 3.6 ± 4.5  | 5.6 ± 4.4  | 35 ± 8         | 42 ± 2     |
| South IN                                | 13.0 ± 7.8            | 2.2 ± 4.1  | 5.8 ± 4.9  | 10.9 ± 5.9 | 31 ± 10        | 41 ± 2     |
| Summer (2020.6.1-8.31)                  |                       |            |            |            |                |            |
| North OUT                               | 16.8 ± 2.9            | 14.1 ± 2.6 | 15.4 ± 2.7 | 2.7 ± 1.3  | 0              | 19 ± 3     |
| North IN                                | 17.5 ± 2.7            | 14.4 ± 2.4 | 15.8 ± 2.4 | 3.1 ± 1.5  | 0              | 12 ± 4     |
| South OUT                               | 18.3 ± 3.0            | 15.0 ± 2.4 | 16.4 ± 2.6 | 3.4 ± 1.6  | 0              | 7 ± 2      |
| South IN                                | 19.6 ± 3.3            | 15.2 ± 2.4 | 17.0 ± 2.6 | 4.4 ± 2.3  | 0              | 6 ± 2      |

\*FTC: 日最高地温 × 日最低地温 &lt; 0 となる日数. すなわち一日のうちにプラスとマイナスの地温を両方観測した日数

表 2. OTC, 季節及び斜面方位が地温 (日最高, 最低, 平均, 較差), 凍結融解頻度, 含水率に及ぼす影響における線形混合回帰分析の結果. Table 2. Results of mixed linear regression models in effects of OTC treatment (T), season (S) and slope direction (D) on soil temperature (daily maximum, minimum, mean and range), frequency of freeze-thaw cycles (FTC), and volumetric soil water content (WC).

| Soil Temp. | T    | S    | D    | T×S  | S×D  | D×T  | T×S×D |
|------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Maximum    | **** | **** | **   | **** | **** | **** | ****  |
| Minimum    | **   | **** | n.s. | **** | **** | **** | ****  |
| Mean       | **** | **** | *    | **** | **** | **** | ****  |
| Range      | **** | **** | **   | **** | **** | **** | ****  |
| FTC        | ***  | **** | *    | **   | **   | †    | ***   |
| WC         | ***  | ——   | *    | ——   | ——   | †    | ——    |

\*\*\*\*: P &lt; 0.0001, \*\*\*: P &lt; 0.001, \*\*: P &lt; 0.01, \*: P &lt; 0.05, †: P &lt; 0.10

て、南斜面では落葉前から冬にかけて長い期間に渡って大きく違っている。受動型 OTC は日射エネルギーの捕捉により温度が上がる (Marion *et al.* 1997)。北海道演習林は、北向き斜面に比べて、南斜面で地表面が受け取る日射量が高い (Hishi *et al.* 2014) うえ、日射量の違いは特に日射の入射角が浅い休眠期に大きくなる条件が重なったため、南向き斜面では秋、冬期の OTC の温度上昇効果が得られやすいのだと考えられた。温暖化の効果が最も大きく反映されると考えられる日最高地温の年間平均は、南斜面の OTC 内部で最も高く  $11.9 \pm 8.5$  °C、OTC 外部の  $8.4 \pm 8.3$  °C との差は  $3.5$  °C であった (表 1)。また、北斜面の OTC 内部では  $7.5 \pm 8.2$  °C、外部では  $6.3 \pm 7.8$  °C で、その差は  $1.2$  °C であった。最低地温は年間を平均するといずれの斜面方位でも OTC 内外の差は  $0.1$ - $0.2$  °C 程度の違いにとどまるため、平均地温の年間平均は、南斜面の OTC 内部で  $7.3 \pm 7.6$  °C、外部では  $6.2 \pm 7.3$  °C で OTC 内外の差は  $1.1$  °C、北斜面の OTC 内部で  $5.6 \pm 7.6$  °C、外部で  $5.2 \pm 7.4$  °C で OTC 内外の差は  $0.4$  °C と、最高地温と比較して OTC の効果は小さくなった。平均よりも最高地温が受動型 OTC による効果に

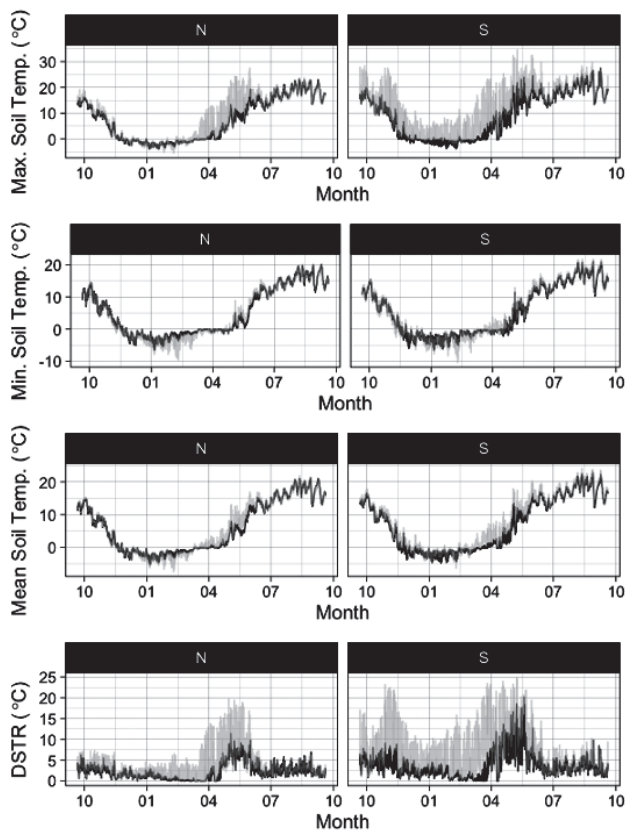


図6. 北海道演習林の天然生林内の斜面方位ごとに設置されたOTCの内部および外部の日最高、最低、平均地温と日較差 (DSTR)の年間の変動。左は北斜面、右に南斜面の値を示す。黒線はOTC外部、灰色の線はOTC内部の地温。

Fig. 6. Daily maximum, minimum, mean of soil temperature, and daily soil temperature range (DSTR) outside and inside of OTC on different slope directions in Ashoro Research Forest. Figures on left and right sides indicate north- and south-facing slopes. Black and grey lines indicate outside and inside of OTC, respectively.

対して感度が高いことは過去の研究と一致している (Xu *et al.* 2010)。

混合線形モデルの結果から、季節、斜面方位、OTC 設置効果のいずれの間でも日最高地温、日最低地温、日平均地温、日較差は異なっており、これらの全てにおいて季節と斜面方位、OTC 効果の交互作用は有意だった (表 2)。つまり OTC による地温への影響は、季節と斜面方位によって異なっていた。まず南向き斜面のほうが北向き斜面と比べて日射量が大きいため、受動 OTC の受けるエネルギーは南向き斜面で大きく、年間及びすべての季節の日最高地温は南向きが北向きよりも大きかった。また、季節による OTC の地温への作用の違いは、夏や秋にはそれほど変わらず、春には OTC で高くなる最低地温が、冬期には両斜面方位において OTC 内部で外部より低下したことである (表 1)。最低地温の低下により、冬期は OTC による最高地温の上昇が小さい北向き斜面において、より平均地温が低下するため、年間の OTC による地温上昇効果が北向きで南向き斜面よりさらに低くなる。北斜面の最低地温が OTC によって低下する原因としては、積雪深が浅く、雪の断熱効果を得られない南斜面に比べ、十分な積雪深で断熱効果を得ている北斜面 (図 7) のほうが、OTC による積雪深の減少の影響を受けて地温が低下しやすかったためだと考えられる。

地温の日較差については、南向き斜面において北向き斜面よりも大きいことが知られている (Hishi *et al.* 2014)。本研究の OTC 外部の地温日較差を比較すると、南向き斜面で北向き斜面よりも大きかった (図 6, 表 1)。OTC 内部では OTC 外部よりも地温日較差が有意に大きく、いずれの季節でも北斜面の OTC 内部の地温日較差は南向き斜面の OTC 外の地温日較差と同程度に大きくなり、南向き斜面の OTC 内の日較差は常に最も大きかった。日較差の年間平均は、南斜面の OTC 内部で  $7.0 \pm 4.9$  °C、OTC 外部で  $3.7 \pm 3.0$  °C で、OTC 内外の日較差の違いは  $3.3$  °C、北斜面の OTC 内部で  $3.5 \pm 2.9$  °C、外部で  $2.1 \pm 1.9$  °C で、OTC 内外



図7. 冬期の北斜面に設置されたOTC。周囲の積雪深と比較して、OTC内の積雪は少なく、斜面下方に偏っている。

Fig. 7. OTC on the north-facing slope in winter season. Snow depth in OTC was thinner than that around OTC, and was biased to lower-side.

の日較差の違いは1.4°Cである。OTCによる地温較差の増加は、北斜面の土壌環境を南斜面程度の地温環境下に置き、南斜面の土壌はかなり厳しい地温環境に模して置くことが可能な実験法であるといえる。

夏期の日較差のOTC処理の違いが主にOTC内部における最高地温の増加によるものであったのに対して、冬期の日較差は、OTCによる日最高地温の増加に加え、日最低地温の低下によるところが大きかったが、これによって冬期の凍結融解は増加する(表1)。年間で見ると、北斜面の凍結融解頻度はOTC外が最も低く、北斜面のOTC内(46 ± 19日/年)と南斜面のOTC外(49 ± 15日/年)が同程度、南斜面のOTC内は倍以上の頻度で、105 ± 36日/年の凍結融解が生じた(表1, 図8)。土壌凍結は季節、斜面方位、OTCの有無の間の交互作用が有意であった(表2)。

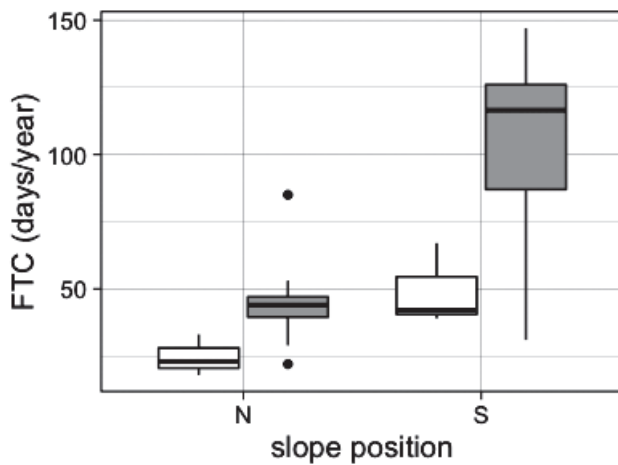


図8. 斜面方位ごとのOTC内部、外部における凍結融解頻度 (frequency of freeze-thaw cycle: FTC)。  
Fig. 8. Frequency of freeze-thaw cycles (FTC) on each slope direction at inside and outside of OTC.

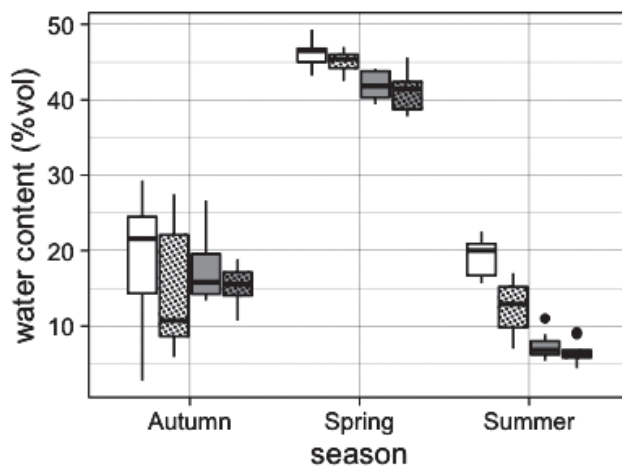


図9. 斜面方位ごとのOTC内部、外部における土壌体積含水率 (VWC)。白い箱ひげは北斜面、灰色の箱ひげは南斜面、無地はOTC外部、ドット柄は内部を表す。  
Fig. 9. Volumetric water content on each slope direction at inside and outside of OTC. White and grey boxplot indicate north- and south-facing slope, respectively. Plain and dotted pattern indicate outside and inside of OTC, respectively.

地温の日較差を反映し、いずれの季節においてもOTC内同士、外同士においては南斜面の方が北斜面よりも凍結融解頻度は高かった。この凍結融解の頻度は、亜極域や、北方針葉樹林の凍結融解頻度(0-19回/年, Bokhorst *et al.* 2012, 2013, 2018, Konestabo *et al.* 2007)よりも遥かに高かった。季節ごとにみると、秋と冬の期間でOTC内の凍結融解頻度が外のそれよりも高くなり、特に冬のOTC内では外の10倍の頻度となった。冬期の積雪の減少は、凍結融解頻度と深く関係し、分解者群集に対する重要なストレス要因として働く。このため分解者による土壌養分の生成には冬期の凍結融解が重要な役割を担っており(Shibata 2016, Urakawa *et al.* 2014, Hishi *et al.* 2014)、凍結融解を介した土壌機能変化に対する野外実験操作としてもOTCは有効な実験方法だといえる。

OTCは地温の上昇だけでなく、土壌の乾燥をもたらすことも知られている(Makkonen *et al.* 2011)。土壌の乾燥は、開口部面積が狭いことによる降雨遮断の影響と、温暖化による蒸発の影響が考えられる(Marion *et al.* 1997)。本研究では、いずれの斜面方位でも、夏にのみOTC内部の土壌体積含水率が外部よりも低下する効果が認められた(表1, 図9, 表2)。

#### 4. 結論

受動型のOTCは、植生が発達し、光環境の比較的悪い森林では適用例が少ない。本研究では、冷温帯落葉広葉樹林においても、OTCは年間の地温を増加させ、土壌水分を低下させる効果があることが確認された。ただし設置環境や季節によっては、OTCによって地温上昇の効果が得にくい場合や地温が低下する場合があります、注意を要する。一方で、一貫していずれの季節でもOTCによる地温の日較差が増加することが確認された。また、これと類似した冬期イベントとして、OTCによる凍結融解頻度の増加が見られた。本調査地は、亜極域や北方林よりも高い頻度で土壌が凍結融解しており、OTCはさらに高い頻度で凍結融解を発生させることが可能であった。地温較差、乾燥、凍結融解の増加は、いずれも土壌生物に対するストレス要因として認識されており、受動型OTCは今後土壌生物への温暖化影響を見るためにも有用な方法と考えられた。

#### 謝辞

本研究はJSPS科研費JP19K06126の助成を受けたものです。OTCの設計段階で相談に乗っていただいた岡山大学准教授の兵藤不二夫博士、OTC作成、設置、維持と環境計測に助力いただいた北海道演習林准教授の智和正明博士、技術班の鍛冶清弘技術専門職員、藤山美薫技術職員、新妻組・山田勝二郎氏、森文雄氏、新妻喜代志氏、山田勝美氏、宮崎演習林技術班の扇大輔技術専門職員、村田秀介技術職員、山内耕司朗技術職員に感謝します。



## 引用文献

- Bokhorst S, Metcalfe DB, Wardle DA (2013) Reduction in snow depth negatively affects decomposers but impact on decomposition rates is substrate dependent. *Soil Biol Biochem* 62:157-164
- Bokhorst S, Phoenix GK, Bjerke JW, Callaghan TV, Huyer F, Berg MP (2012) Extreme winter warming events more negatively impact small rather than large soil fauna: shift in community composition explained by traits not taxa. *Global Change Biology* 18: 1152-1162
- Bokhorst S, Veen GF, Sundqvist M, De Long JR, Kardol P, Wardle DA (2018) Contrasting responses of springtails and mites to elevation and vegetation type in the sub-Arctic. *Pedobiologia* 67:57-64
- 智和正明, 中村琢磨 (2020) 九州大学北海道演習林の異なる斜面方位における気温, 積雪深, 地温の経時変化. *九大演報* 101 : 7-11
- Hishi T, Urakawa R, Tashiro N, Maeda Y, Shibata H (2014) Seasonality of factors controlling N mineralization rates among slope positions and aspects in cool-temperate deciduous natural forests and larch plantations. *Biol Fertil Soils* 50: 343-356
- 金井隆治, 正木大祐 (2011) 高山帯—亜高山帯境界部における温暖化実験装置の開発. *筑波大学技術報告*. 31 : 43-50
- Makkonen M, Berg MP, van Hal JR, Callaghan TV, Press MC, Aerts R (2011) Traits explain the responses of a sub-arctic Collembola community to climate manipulation. *Soil Biol Biochem* 43: 377-384.
- Marion GM, Henry GHR, Freckman DW, Johnstone J, Jones G, Jones MH, Levesque E, Molau U, Molgaard P, Parsons AN, Svoboda J, Virginia RA(1997)Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Glob Chang Biol* 3: 20-32.
- Pelini, SL, Bowles F, Ellison AM, Gotelli NJ, Sanders NJ, Dunn RR (2011) Heating up the forest: open-top chamber warming manipulation of arthropod communities at Harvard and Duke Forests. *Methods in Ecology and Evolution* 2: 534-540
- 田中健太, 平尾章, 鈴木亮, 飯島慈裕, 濱田崇, 尾関雅章, 廣田充 (2013) 地球温暖化が山岳域と極域の生態系に与える影響 — 人工温暖化実験によって何がわかってきたか? *地学雑誌* 122: 628-637
- Sharkhuu A, Plante AF, Enkhmandal O, Casper BB, Helliker BR, Boldgiv B, Petraitis PS (2013) Effects of open-top passive warming chambers on soil respiration in the semi-arid steppe to taiga forest transition zone in Northern Mongolia. *Biogeochem* 115: 333-348
- Shibata H. 2016. Impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: A synthesis from Japanese case studies. *Ecol Indic* 65: 4-9
- Sun S-Q, Peng L., Wang G-X, Wu Y-H, Zhou J, Bing H-J, Yu D, Luo J (2014) An improved open-top chamber warming system for global change research. *Silva Fennica* 47: 960
- Urakawa R, Shibata H, Kuroiwa M, Inagaki Y, Tateno R, Hishi T, Fukuzawa K, Hirai K, Toda H, Oyanagi N, Nakata M, Nakanishi A, Fukushima K, Enoki T, Suwa Y (2014) Effects of freeze-thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in ten temperate forest ecosystems throughout the Japanese archipelago. *Soil Biol Biochem* 74: 82-94
- Xu Z, Wan C, Xiong P, Tang Z, Hu R, Cao G, Liu Q (2010) Initial responses of soil CO<sub>2</sub> efflux and C, N pools to experimental warming in two contrasting forest ecosystems, Eastern Tibetan Plateau, China. *Plant Soil* 336: 183-195