

高山帯—亜高山帯境界部における温暖化実験装置の開発

金井 隆治、正木 大祐

筑波大学生命環境科学等技術室（菅平高原実験センター）

〒386-2204 長野県上田市菅平高原 1278-294

概要

山岳の樹林帯最上部で地球温暖化の影響を研究するため、オープントップチャンバー方式の「温暖化実験装置」を開発した。十分に温まること、積雪や強風に耐えられることなどの条件を考慮しながら 5 回の試作を経た改良品を、中央アルプス将基ノ頭付近に設置した。

キーワード：地球温暖化、オープントップチャンバー、野外操作実験、森林限界

1. はじめに

筑波大学菅平高原実験センターの技術職員は当センター所属の教職員はもちろんセンターを訪れる研究者・教員・学生の依頼を受け、各種実験区の設置、実験装置の開発設置、機器の保守管理、調査補助などを行っている。当センターの田中健太助教から「山岳の森林限界（高山帯—亜高山帯境界部）で、温度を数度上昇させられる装置が作れないか？」と相談を受けた。

現在、地球温暖化が進んでいると考えられている中で、野外の生態系を実験的に温暖化させる研究の需要が増えている。野外のある程度の空間を温暖化させる装置としては、赤外線方式、地中電熱線方式、温室方式がある。温暖化に対して非常に感受性が高いと考えられている山岳の森林限界では、電源が不要でメンテナンスも最小限で済む温室方式が適していると考えた。森林限界より上の高山帯では、頂部を解放した温室であるオープントップチャンバー（Open Top Chamber :以下 OTC）を使用した研究が多い。しかし、樹木を含む森林限界部での使用例はほとんどない。依頼された温暖化実験装置は樹木を含められる高さで、温度を上昇させ、積雪や強風に耐えられる強度が必要となる。またアクセスが悪く、斜度も急なことから運搬や施工に関しても工夫が必要である。本稿では、これらの点を考慮しながら行った、開発の過程と、中央アルプス将基ノ頭付近（信州大学西駒演習林）における制作・設置作業での創意工夫や設置の際に苦心した点を織り交ぜながら報告する。

2. 試作 1 号：ビニールハウスタイプ

当初は、農業用ビニールハウスを応用した装置を考えていた。田中助教から設置予定地の状況と設置したい装置の大きさなどを聞き、当センターで試作 1 号を設置した。試作 1 号の大きさは一辺が 120～150

cm の四角形で、高さは装置内の植物の最高部+100 cm 前後（計 250 cm 程度）というものだった。試作 1 号は当センター内のレンゲツツジが等間隔で植えられている場所に設置した。単管（φ 4.86 cm）と自在クランプで枠組みを設置し、ビニールハウス用のビニールで側面と天井を覆った。最初は天井を塞いだまま数日間、温度を測定した。温度の測定は高さ 100 cm と 30 cm に温度ロガーを設置し、これを 1 セットとして装置内に 1 セット、装置外の対照区に 1 セット設置して行った。次に天井のビニールに穴を開けて、測定した。そして最終的に天井のビニールを取り去って測定をした。これは温暖化実験装置を完全閉鎖してしまうと降雨条件や種子・孢子等の移入条件が野外と著しく変わってしまうからで、温暖化の効果があるのなら天井は無い方が好ましかったからである。測定結果から、天井が無くても温暖化することがわかった（図 1）。

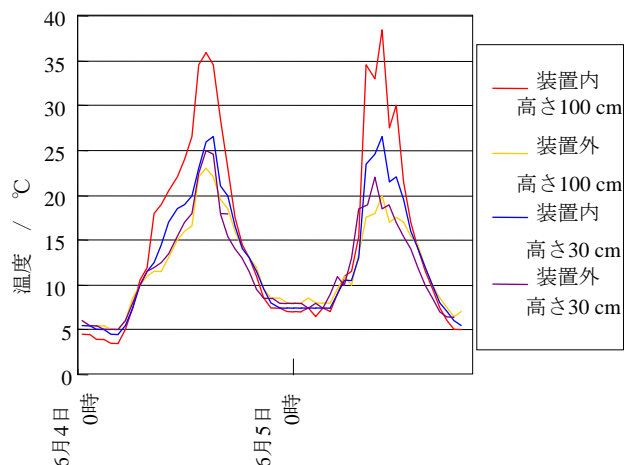


図 1. 試作 1 号の中と外の温度

3. 西駒演習林の下見

設置予定地の状況を検討しながら温暖化装置の大型化を検討した。長さを 10 m くらいにして、数個の装置を設置する予定にした。ビニールハウスは基本的に平地に設置するため、斜面への設置に不安があった。またパイプを地中に差し込むために、地中の状況を確認する必要があった。そのために現場の下見を行った。下見には信州大学小林元准教授と信州大学農学部高橋一太君、田中助教、筆者の 4 人が参加した。

現場は信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学研究センター西駒ステーション演習林（図 2）の将基ノ頭直下の森林限界付近で、標高約 2500 m だった。オオシラビソ帯とハイマツ帯の間で、樹高 4

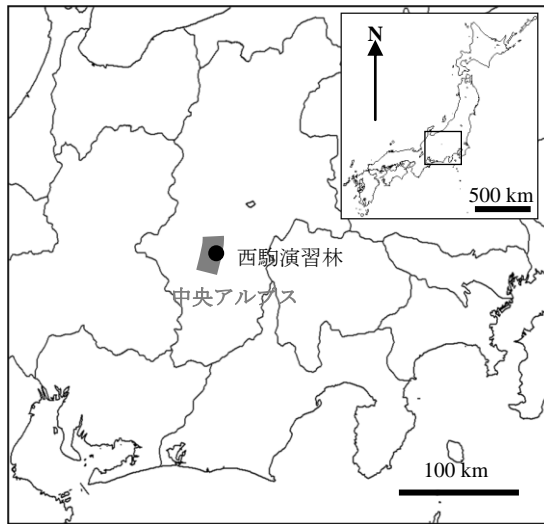


図2.信州大学西駒演習林の位置

m ほどのダケカンバの下には低木等が生えている、平均斜度 35 度前後の急斜面だった (図3)。地中の状況は、表面は土で覆われているものの、地中には木の根や岩石などが隠れていて、パイプを打ち込むことは非常に困難であることがわかった。また脚立の使用は非常に危険性が高いこともわかった。急斜面のため荷物の移動も困難で、積雪 (雪圧) や強風による OTC 倒壊の可能性も考えられた。このような現地の状況からビニールハウスタイプは設置に不向きであることが分かった。

現地で相談した結果、ビニールハウスタイプをやめ、四隅に支柱を建て透明な板で囲う方法に変更した。支柱を差し込むことは困難だが、支柱から張り綱を張れば強度を保てそうだった。大型のものを 1 つ設置するより、小型のものをいくつか設置することになった。



図3.現場の様子 (7月上旬)

4. 波板タイプの試作

菅平高原実験センターに戻ってから田中助教と打ち合わせを行い、現地で考案した OTC は温暖化させることができるのか? 支柱やその他の部品は何を使用すると良いのか? 等を検討するために OTC の試作をすることになった。

4.1 試作 2 号: 温度上昇の再確認

まず支柱を建てて、透明な板で囲う方法で温暖化するかを実験した。

試作 2 号に関しては、温暖化の確認に焦点を置いたため、板以外はセンターにあった材料を用いた。透明な板は強度と価格を検討した結果、ポリカーボネート製の波板 (1800×650×12 mm) を使用することにした。支柱にはイボ竹を利用したが、イボ竹の長さが足りないために鉄パイプを地面に刺して、そのパイプにイボ竹を固定した。波板と支柱は針金入りのビニールテープで固定した。波板の端にはあらかじめ穴を開けておいた。下見を参考に当センター内のススキ草原の斜度ある場所に設置した。現地は積雪が多いため、斜面に



図4.試作 2 号

正対して OTC を設置してしまうと斜面上側の側面への雪圧による負担が増え倒壊の可能性が大きくなる。少しでも雪圧を軽減できるように OTC を 45 度、回転させて設置することにした。斜度があるために波板と地面の間に隙間ができた。試作 2 号の外寸は幅 650 mm、奥行き 650 mm、イボ竹 2000 mm、波板の高さ 1800 mm、そして地面と波板の間に隙間があった (図4)。

OTC 設置後 OTC 内と OTC 外の温度を測定するために温度ロガーを設置した。温度ロガーは地面から 30 cm と 100 cm の 2 か所の高さに設置し、これを 1 セットした。OTC 内に 1 セット、OTC 外に 2 セット、計 3 セットの温度ロガーを設置した。後日解析した結果、温暖化することが判明した (図5)。

試作 2 号の問題点は支柱を鉛直に打ち込む方法、波板への穴の開け方、簡単に製作したので歪みが大きかったことなどがあつた。

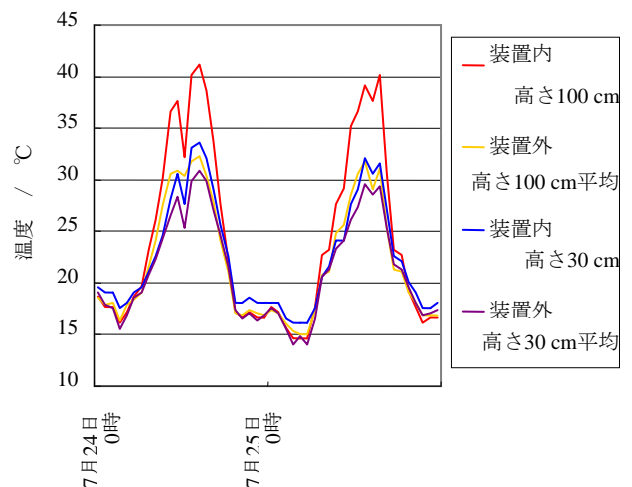


図5.試作 2 号の中と外の温度変化

4.2 試作3号：強度の増加・地際に隙間

試作2号で温暖化することがわかったので、試作3号では現地での使用を考えている強度の高い材料で製作した。支柱は鋼材L型アングル(2400×30×30 mm)、梁は鋼材L型アングル(2100×30×30 mm)を半分の長さに切断して使用した。試作1号より長くした波板(2100×650×12 mm)はフックボルト(1/4×38 mm)を使用して支柱に固定した。また試作2号は波板の幅に合わせて製作したが、試作3号は装置の幅を1050 mmとした。これは前述のように鋼材L型アングル(2100 mm)を半分に切断して梁として使用するためであった。波板は2枚を重ねて、幅を調節し、ビス止めしておいたものを取り付けた。現場を想定した結果、長い支柱を鉛直に打ち込むことは困難なため、支柱を地上部(以下支柱)と地下部(以下アンカー)に分けることにした。まずアンカー(525×30×30 mm)を先に打ち込み、アンカーと支柱(2400×30×30 mm)を固定して作業を行った。アンカーと支柱はボルトとナットで固定した。波板の穴は現場で空けるように変更した。

同時に試作2号を改造した。波板を10 cm高く設置して下の隙間を大きくした。これは夜間、装置内の温度が下がるチムニー効果の軽減と小動物等の往き来を可能にして、より野外の条件に近付けるためだった。

設置後、試作3号と改造した試作2号に温度ロガーを設置した。温度ロガーは試作2号、試作3号の各OTC内に1セットずつ、OTC外に4セット、計6セット設置した。解析結果、試作3号、試作2号ともに温暖化することがわかった(図6)。

試作3号と試作2号の改造の結果からOTCのサイズが決定した。幅1050 mm、奥行き1050 mm、支柱の高さ2400 mm、波板の高さは2100 mm。波板が支柱より短いのは斜度による高低差のためである。

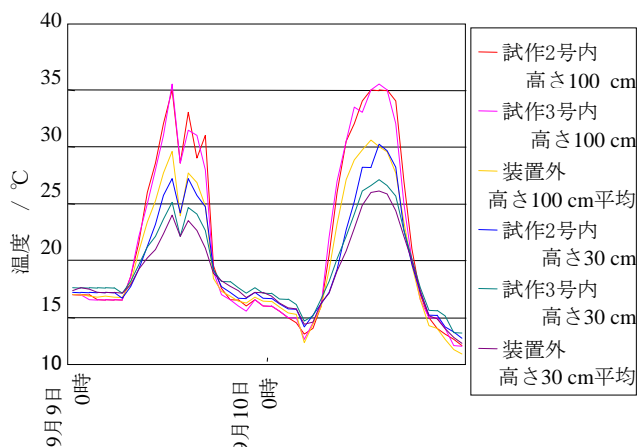


図6.OTC内の温度変化

試作3号の問題点はアンカーと支柱がお互いの厚みのためにしっかり固定できない、波板と支柱が上手に固定できない、アンカーを先に打ち込んでしまうと装置が歪む(地面で距離を測っていても鉛直に打ち込めないために上部でずれてしまう)ということがあった。

4.3 試作4号：工法の改良

試作3号の問題点を解決するため、材料および組み立て手順を再度検討した。そして平坦な場所で外枠のみの試作を行った。

その結果、次のようなことが分かった。

- ① 支柱とアンカーの固定はアンカーの向きを変更することで対応が可能であること。
- ② 波板は支柱でなく梁に固定した方が良いこと。
- ③ 梁を増やすと強度が上がる。雪圧を受けやすい上側の側面の梁の本数を、雪圧を受けにくい下側の側面より多くすること。
- ④ 装置の接続部の直角を維持するためにはコーナープレートが必要ということ。ただしコーナープレートはすべての接続部に必要ではなく、一つの面の四隅に入れるだけでも十分であること。
- ⑤ 支柱と梁、ボルトナットはサイズを統一した方がしっかりと固定できること。
- ⑥ 斜面での設置を考えると、2人では不可能で、3人での作業となること。

4.4 試作5号：斜面での設置・手順の確認

今までの試作の問題点を参考に、最終試作を行った。組み立て手順を確認することが一番の目的だった。場所も試作2号、試作3号を設置した場所より斜度の大きな場所で行った。

最終試作では鉛直、直角は考慮しなかった。また梁の本数も減らした。波板も全面は装着せず、2面だけにした。張り綱も省略した(図7)。



5. OTC 完成型の仕様

以上の試作基を経て OTC 完成型の仕様を以下のように決定した。

5.1 材料

- 支柱、梁、アンカー
品名、鋼材アングル(図8)
サイズ、30×30 mm のL字型
- 波板
品名、ポリカーボネート製波板(図9)
サイズ、2100×650×12 mm

- ボルトセット (図 10)
品名、8 mm ボルト、ナット、ワッシャー
サイズ、8×16 mm (スパナサイズは 13 mm)
- フックボルト (図 11)
サイズ、1/4×38 mm、3/16×50 mm
- コーナープレート (図 12)
サイズ、76×76×0.75 mm
- 張り綱 (図 13)
サイズ、10×1 mm 200 m (1 巻)



図 8.鋼材アングル



図 9.波板



図 10.ボルト・ナット・ワッシャー



図 11.フックボルト



図 12.コーナープレート



図 13.張り綱

5.2 OTC のサイズ

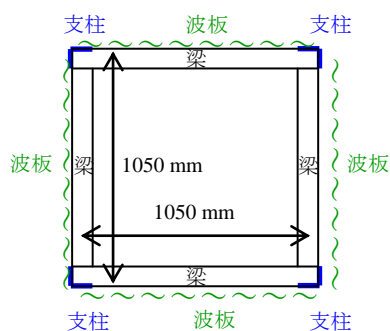


図 14.OTC の見取り図 (真上から)

5.3 OTC を建てる向き

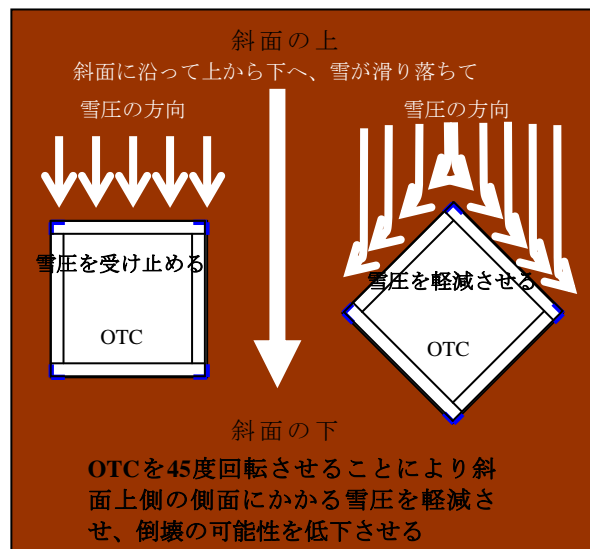


図 15.OTC を設置する向き

OTC を設置する場所は冬季、多くの積雪が予想される。そして平均斜度 35 度という急斜面では積雪が斜面を滑り落ちるように動く。動くスピードは速くはないが、上方の積雪も合わせて動くので、そこには非常に大きな力 (雪圧) が生まれる。図 3 にあるように周辺の樹木の根元付近は直立できずに、斜面下方向に倒れている。

間違いなく OTC にもこの雪圧は影響する。斜面に沿う重力の方向（雪の滑り落ちる方向）と OTC の上側の側面を直角に設置してしまうと（図 15 の左側）上方からの雪圧を受け止めてしまう。どの程度の雪圧がかかるかはわからないが、OTC（波板）が倒壊することも十分考えられる。

斜面上方からの雪圧を少しでも軽減し、OTC の倒壊の可能性を低下させるために、OTC を 45 度前後回転させて設置することにした（図 15 の右側）。

5.4 OTC の下の隙間

OTC は斜面に設置されるが、支柱は鉛直に立てる。取り付けられる波板も鉛直になり、高低差ができる。そのため波板と地面の間には隙間ができる。この隙間があった方がチムニー効果を軽減させ、さらに小動物が侵入しやすくなるためにより野外の条件に近づく。波板の底辺を切れば隙間をなくすこともできるが、作業時間の短縮や隙間がある場合のメリットを考慮して隙間はそのままにした（図 16）。



図 16.現場に設置した OTC の下の隙間

5.5 設置の手順

設置に必要な道具	用途
レベル（水平器）	鉛直をみる
差し金	直角をみる
スパナ	ボルトの固定
カッター	張り綱の切断
電動ドリル（千枚通し）	波板の穴あけ
ペンチ	フックボルトの固定等

スパナは作業人数の 2 倍あると良い。その他のものも多いほうが作業しやすい。

設置手順（図 18 参照）

- ① 現場の状況を勘案して OTC の向きと支柱の位置の目安を決める。
※調査区の位置、斜面の向き、地面の状況に注意する。
- ② 基準となる支柱 A を保持する。
※鉛直に保持し続ける。
- ③ 支柱 A の上部と下部に梁 1 上と梁 1 下を取り付ける。
※支柱と梁の間にコーナプレートを入れる。
※支柱 A と梁 1 が直角になるように固定する。
- ④ 支柱 B を梁 1 上と梁 1 下に取り付ける。

※支柱 A、B が鉛直に、支柱 A、B と梁 1 が直角になるように固定する。

- ⑤ 支柱 A の上部と下部に梁 2 上、梁 2 下を取り付ける。
※支柱 A および梁 1 と梁 2 が直角になるように固定する。
- ⑥ 支柱 C を梁 2 上と梁 2 下に取り付ける。
※支柱 A、B、C と梁 1、2 が鉛直、直角になるように固定する。
- ⑦ 支柱 B の上部と下部に梁 3 上と梁 3 下を取り付ける。
※支柱 B および梁 1 と梁 3 が直角になるように固定する。
- ⑧ 支柱 D を梁 3 上と梁 3 下に取り付ける。
- ⑨ 支柱 C と支柱 D を梁 4 でつなげる。
- ⑩ 支柱 A、B、C、D を鉛直に、そして支柱と梁が互いに直角になるように全体を調節して固定する。
- ⑪ 必要に応じて



図 17.現地での組み立ての様子

梁を追加して固定する（図 17）。

- ⑫ 斜面の上側は下側より本数を多くする。
アンカーを調整しながら地面に打ち込み、支柱を固定する。
※位置、向き、深さに注意しながら打ち込む。
- ⑬ 最後にもう一度全体の鉛直、直角を確認する。
- ⑭ 波板をフックボルトで梁に固定する。（通年タイプ）
※雪の流れる方向に注意して重ねて取り付ける。
※梁 1 本に 6 本程度固定する。
- ⑮ 支柱の上端に張り綱を張り、周辺の適度な樹木に梁綱を固定し、完成。

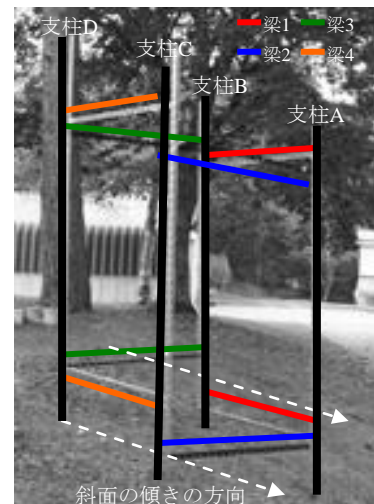


図 18.OTC の組み立てについて

5.6 材料費・設置の労力・必要数

表1に費用をまとめた。人件費、旅費等は除いてある。

表2に労力をまとめた。1人で行うと1日(約7時間)かかる作業の労力を、1人・日としている。

表3にOTC設置に必要な材料数とその重量をまとめた。必要な数も重要だったが、ヘリの荷揚げに重量制限(600kg)があったため、重量超過になることは避けたかった。単純に輸送費(12万円)が2倍になってしまうからである。梁の本数は重量、諸費用等から勘案した。

表1.OTC設置の材料費

	総材料費	輸送費(ヘリ代)
試作合計	41,660円	
設置	389,522円	120,000円

表2.OTC設置の労力

	作業時間	作業参加人数	労力
試作合計	40時間	3名	5.5人・日
設置	75時間	6名	10.5人・日

6. 設置

6.1 設置の準備

試作5号を経て、設置に必要な材料、道具等がなかったのに必要に応じて購入した。フックボルトは必要数準備ができなかったため、サイズの違う2種類のフックボルトで対応することになった。OTCは全部で10基設置予定だった。5基は夏季タイプとして積雪期に波板を取り外すもので、5基は通年タイプとして一年中波板で囲うものだった。梁とアンカーは使用する長さに切断した。設置には2~3日間必要で、現場から30分の場所にある宿泊施設(西駒山荘)に滞在することになった。西駒山荘にある道具もお借りできるようにお願いをした。製作に必要な

表3.材料の必要数と重量

材料	OTC1基に必要な数	現場に上げた数	総重量(kg)
支柱用アングル	4本	40本	105.6
梁用アングル	18本	180本	202.5
アンカー用アングル	3本	40本	22.5
波板	8枚	80枚	112.0
ボルトセット	71組	800組	14.6
フックボルト	108本	1500本	27.0
コーナープレート	16枚	160枚	28.0
張り綱	適当	3巻	6.3
観測機器関係			約30.0
組み立て道具、その他			約10.0

合計558.5kg

材料、道具はヘリで現場周辺に輸送することになった。これは周辺の山小屋への物資の輸送に使用されている方法で、ヘリが荷揚げを行う日に一緒に荷揚げをお願いすることにより経費削減を図った。そのために重量制限(600kg)があった。また荷物は輸送中に落下しないように厳重に梱包した(図19)。精密機械はヘリでは運ぶことができないので、自分たちの荷物と一緒に担ぎ上げた。



図19.ヘリで現場へ上げた荷物(約550kg)

6.2 工程

筑波大学・信州大学の関係者12名が6日間にわたる山中での設置作業・運搬作業に関わった。その間西駒山荘に宿泊した。

9月27日(1日目)天候 曇り

2日目のヘリの荷揚げを西駒山荘付近で待つために2人が入山した。

9月28日(2日目)天候 雨

朝から雨のためヘリが飛ばなかった。しかし筆者を含めた3人(田中、金井、正木)は3日目のヘリの荷揚げを待つために雨が降る中入山した。4時間30分かけて山を登り西駒山荘に到着した。西駒山荘で残る1人と合流した。1人下山。

9月29日(3日目)天候 晴れ

雲の多い天気ではヘリが飛ばず、延期になるかギリギリの空模様だったが、ヘリによる荷揚げは行っていただいた(図20)。ヘリの荷物は予定地から30mほど離れた場所に下ろされた。荷物到着後材料、道具等を確認し、予定地付近へ移動した。その後夏季タイプ5か所、通年タイプ5か所、対照区6か所、計16ヶ所の調査区の場所を確認した。



図20.ヘリの荷揚げ

1基目は4名で手順等を確認しながら設置した。急斜面での作業は想像より困難だった。周辺の低木も作業の妨げになった。3名の手順を4名で行ったため、時間の短縮にはなったが、出来上がりは歪んでしまった。これは手が空いているからと、作業を急いで進めてしまったからだった。正午ごろ信州大学小林元准教授グループ7名が現場に到着した。田中助教は植生調査を開始するために信大グループと合流して作業を開始した。OTC設置作業者は3名になった。1基目の反省を踏まえて2基目の製作に取り掛かった。改善点は
①最初の支柱は鉛直に保持し続ける。
②支柱と梁は1本ずつ取り付ける。
③梁は上下に余裕を持って取り付ける。
という3点だった。2基目からは3人の息も合うようになり、改善点を含めた手順もほぼ問題ないことがわかった。息も合い、手順にも慣れたため2基目から4基目は順調に設置できた。3日目は外枠4基分の設置が完了した(図21)。2名下山。



図21.現場に設置したOTCの外枠

9月30日(4日目)天候 雨

雨対策は十分だったが体調を崩してしまうと大変なため早めの撤収を想定して作業に向かった。雨の中の作業は予想以上に体力と集中力を消耗した。途中から4名での設置作業になったが、集中力の低下

は激しく、8基目を設置して設置作業を終了した。特に7基目の歪みが大きくなった。撤収前に翌日の作業のため波板の取り付けを行った。太さと長さの違い2種類のフックボルトのために作業が難航したが、改善点も判明した。西駒山荘からお借りしてきた充電式電動ドリルが非常に役に立つこともわかった。4日目、OTC計8基分の外枠設置が完了した。また1基分の波板の設置が完了した。3名下山。

10月1日(5日目)天候 晴れ

下山予定日だったが、作業の進捗状況から延泊の可能性が大きかった。午前中に外枠2基の設置が完了し、OTC全10基の外枠の設置が完了した。しかし、波板取り付けと張り綱作業が残っていたので、延泊が決定した。午後は波板の取り付け作業に取り掛かった。終盤、西駒山荘からお借りしてきた充電式電動ドリルのバッテリーが無くなり作業効率が急激に低下したものの、翌日の予定を検討した結果、波板の取り付けを完了させることになった。日も傾き気温も低下し、疲労のため集中力も低下していたが、何とか波板の取り付けを終了できた。植生調査も終了したので、張り綱作業に協力していただいた。5日目外枠は全10基設置完了(図22)。波板も全5基取り付け完了(図23)。張り綱1基分終了。



図22.夏季タイプ



図23.通年タイプ

10月2日(6日目)天候 晴れ

残る作業は、張り綱と現場に残す荷物の固定と片付けだった。張り綱を張る4名と荷物を固定する2人に分かれて作業を始めた。張り綱、荷物固定ともに順調に作業を進めることができ、午前10時には周辺のゴミ片付けも終了し、すべての作業が終了した。間もなく下山を開始し、2時間半ほどで麓に到着した。大きな怪我もなく無事に山を降りることができた。6名下山。

5. 結果

雨のため、1日順延したものの、想定していたよりも順調に作業を進めることができた。雨が降らずに予定通りにヘリが飛んでいたなら1日早く下山できた可能性もあった。

OTCを設置した場所にはあらかじめ調査区が設置されていた関係で、当初の予定通りにOTC45度回

転させて設置することができない場所もあった。その場合は雪圧をより多く受ける面の梁の本数を増やした。集中力が低下していたときに設置したものと最初に設置したものは歪みが大きくなってしまった。地面には石や樹木、木の根などがあり、また急斜面のために設置には厳しい条件だったが、予想以上の完成度の OTC が設置できた。

6. まとめ

今回の信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学研究センター西駒ステーション演習林への OTC 設置のための出張では非常に良い経験ができた。初めての本格的な登山、山小屋での生活、雨の中で立ったまま震えながら食べたおにぎり、将棊ノ頭で全員で食べた焼きうどんなど、忘れることができない。連日に及ぶ朝から日が暮れるまでの作業ではヘッドライトの大切さを痛感した。雄大な景色に

囲まれた中での作業だったが、のんびりと景色を眺めている暇は無かった。雪が解ける頃、再び現場を訪れ、夏季タイプの波板の設置と植生調査を行う予定である。その際は景色を眺められるくらいの余裕を持ちたい。すべての作業を完了したときの達成感、そして作業に最後まで協力していただいた信州大学の 3 人の学生との一体感は素晴らしかった。

7. 謝辞

本報告を行うにあたり、筑波大学菅平高原実験センター田中健太助教に助言をいただき深く感謝いたします。また、信州大学小林元准教授に演習林の案内および便宜を図っていただき深く感謝いたします。高橋一太君をはじめ 5 名の信州大学生に荷物の運搬や設置作業にご協力いただき深く感謝いたします。



図 24.高山－亜高山帯に建つ OTC