

# 集材路での車両走行により締め固められた 土壌物理性の回復年

佐藤弘和

## 車両走行により土は締め固められた後に回復する

ハーベスタやフォワーダといった車両系林業機械は、伐採や集材などの造材作業に欠かせないものとなっています。これらの林業機械を走行させるために、簡易な構造をもつ仮設道路（集材路）が付けられます。林業機械が集材路や林内を走行すると、車輪（ホイール）や履帯（クローラ）が接地する箇所（わだち）では林床植生や表層土壌がはぎ取られるほか、車両重量が土に対して荷重となって締め固めが起きます。土が締め固められると、土の中にある隙間（間隙や孔隙と言います）の体積が小さくなり、浸透能や透水性が低下します。締め固め土壌に雨が降ると土中に水が浸透しないため、表面に水流が生じて土が侵食されることがあります。また、走行跡地では苗木の植栽や木本の天然更新が生じた場合、苗木や更新木の枯死や衰退といった事例が報告されています（佐藤 2020）。

一方で、締め固められた土は、経年変化で柔らかくなることが知られています。これに関して、「なぜ土の締め固めが回復するのか」と質問されます。一般的には、「降雨」「土の乾湿サイクル」「凍結・融解のサイクル」「ひび割れ」「植物根や土壌動物などの生物」などが、締め固めからの回復要因としてあげられています。

国内外では、締め固められた土が締め固めを受けていない状態の硬さまで回復する年数が調べられています。ここでは、その年数を「回復年」と呼ぶことにします。過去の研究を鑑みると、回復年は早くても1年という記録から、長いものでは50年を超える記録まで様々です（図-1）。回復年は、地質の違い、走行する車種と走行回数などによって異なっています。そのため、いろいろな事例を積み重ねることで、土の締め固めと回復年の関係がわかるかもしれません。ここでは、北海道内にある集材路で調べた回復年の結果について紹介します。

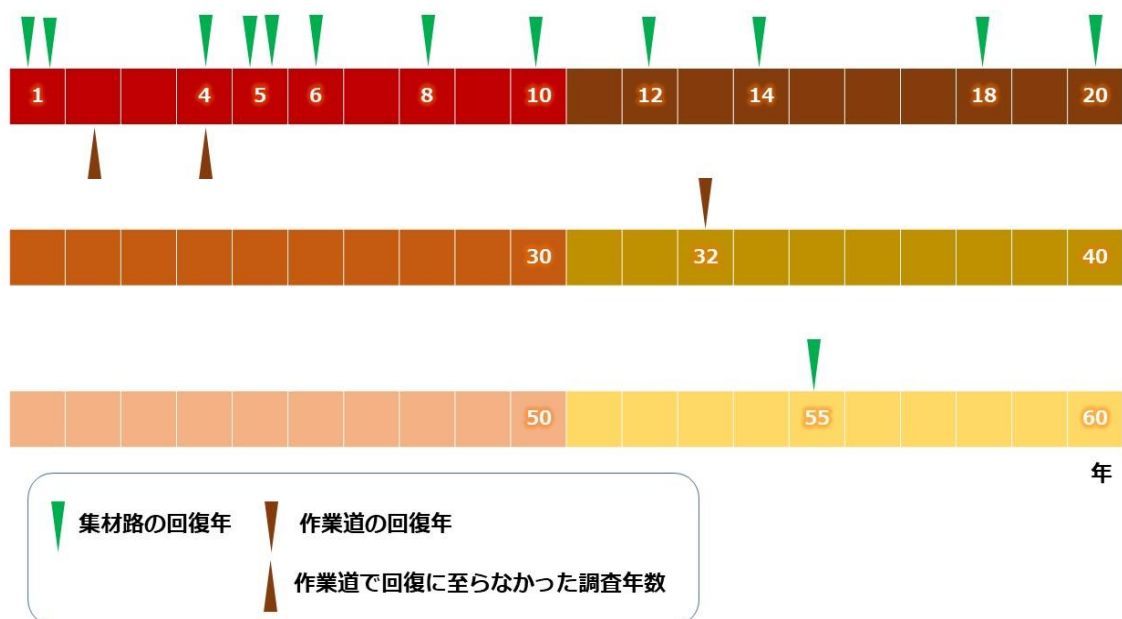


図-1 国内外で報告されている集材路と作業道における回復年

### 締め固めの度合いを表す指標

これまでの研究において、土の締め固めを表す指標には、①硬度（乾燥密度、 $N_c$  値、貫入抵抗など）、②透水性（浸透能、透水係数など）、③三層構造（間隙率など）が用いられています。ここでは、海外の研究でよく使われている乾燥密度について解説します。海外の研究事例では、**bulk density** という用語が使われています。**bulk density** は「仮比重」と訳されていましたが、「乾燥密度」や「容積重」とした方が適訳です。単位は  $g\ cm^{-3}$  が使われますが、最近の論文では  $kg\ m^{-3}$ 、 $Mg\ m^{-3}$  と表記されることがあります。ちなみに  $Mg$  はメガグラムと読み、トンと同じです。

乾燥密度の測定は、以下のように行います。一定容積のステンレス製採土円筒を用意し、ふたがついたカラ状態の重さを量っておきます。現地で採土円筒を取りたい深さまで掘った土壤面に置き、採土器（写真-1、赤い柄が付いたもの）をかぶせてハンマーなどで静かに打ち込みます（力任せに押し込むと、土壤構造が潰れてしまいます）。採土円筒の上面が土壤面に達したら、円筒の周囲の土を掘り取って円筒を取り出します。円筒の上下面は土がむき出しになっているので、ナイフなどを使って平らになるように整形します。その後、上下面にふたをして密封し実験室に持ち帰ります。なお、この状態の重さを量っておけば、次の手順で乾燥させた後の重量差から土壤水分量がわかります。持ち帰った採土円筒の上面のふたを取って乾燥機に入れます。乾燥温度が  $105^{\circ}C$  や  $110^{\circ}C$ 、乾燥時間が 24 時間で乾燥させます（著者は  $105^{\circ}C$  で 48 時間乾燥）。乾燥時間に達したら、熱を冷まして重さを量ります。この重さからカラ状態の円筒の重さを引いて、容積（ここでは 100mL）で割った値が乾燥密度となります。なお、農業分野の普及本では、コーヒー缶で採取し、フライパンで煎ることで乾燥させる方法が紹介されています（安西 2016）。

乾燥密度の主な変化の理由は、以下のようになります。土が締め固められると、間隙体積が小さくなった分、土粒子の体積（重量）が増えます。そのため、乾燥密度は増加します。乾燥密度の測定では土の中の水分を飛ばすため、土の乾湿状態の影響を受けません。ただし、採土の中に有機物が混じり込むと、有機物の重さが土粒子の重さより軽いため、乾燥密度は低い値になります。そのため、林地で土を取る場合は、腐植層や腐植を含む層を除去してから採土します。締め固めの評価は、締め固めによる乾燥密度の増加割合で評価しました（以下、「乾燥密度増分」という）。乾燥密度増分は、 $(\text{【路面での乾燥密度の平均値】} - \text{【対照での乾燥密度の平均値】}) / \text{【対照での乾燥密度の平均値】} \times 100$  で計算され、百分率で表すことにします。対照の乾燥密度と同じになれば、乾燥密度増分は 0% になります。



写真-1 採土の様子

採土円筒に採土器をかぶせてハンマーで打ち込む

### 北海道で調べた集材路と林地での乾燥密度

過去の研究にならい、北海道内の集材路を対象に、路面と対照地（比較のために車両走行がない状態を設定）で土を採取して乾燥密度を調べました。集材路では作設した時期がわからないことが多く、昔に設置されたものほど記録がありませんので、作設年が確認できた集材路に調査区間を設定し調査の対象としました。調査区間が位置する管内と調査区間数は、「空知」が 4 区間、「オホーツク」が 3 区間、「釧路」が 1 区間、「日高」が 1 区間、「渡島」が 4 区間の計 13 区間です。同じ調査区間で数年測定していた場合は、作設からの経過年が最も古い記録を使いました。13 箇所の調査区間内において、採土地点として各集材路のわだち内 7 箇所と、対照として集材路に隣接する林地 7 箇所を設け、それぞれ採土しました。

集材路面と林地における乾燥密度（7 採土地点の平均値）の関係について図-2 に示します。図中にある斜線は、林地における乾燥密度に対する集材路面の乾燥密度が等倍（同じ値になる）、1.5 倍、2 倍になること

を表しています。すべての調査区間において、【林地の平均乾燥密度】 < 【路面の平均乾燥密度】 でした（ほぼ1:1ラインと2:1ラインの間に位置しています）。これより、調査区間における集材路は、対照である林地に比べて締め固めを受けていることがわかります。

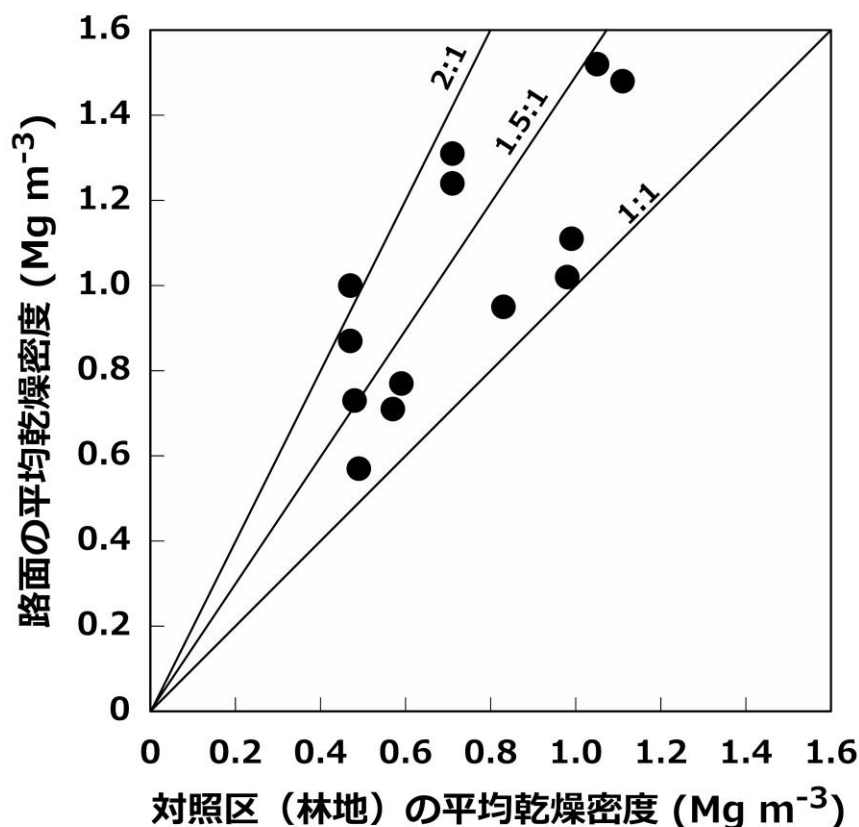


図-2 路面と対象区の平均乾燥密度の関係

#### 集材路の締め固めの度合いをランク化しました

車両が走行する集材路面で締め固めが生じるのは、主に車両の重み（車重）による荷重がかかるためです。特に、車両の履帯や車輪が通ったわだちでは、車両による荷重が集中するため締め固めが顕著になります。また、フォワーダなどを走行させるため、集材路でも切土と盛土を行うことがあります。この場合、作設時に転圧をかけて締め固めることがあるため、車両が走行する際の荷重のほかに転圧が加わります。そのため、車両が走行しただけの状態に転圧が加わると、締め固めが大きくなることが想定されます。こうした締め固めを受けた路面では、植生がなく裸地になっていることがあります。

そこで、締め固めの度合いについて、専用の機器で測定しなくても簡単に判断できる指標として、切土の有無と路面での植生の有無に着目した締め固め度合いランクを考案しました。すなわち、集材路に切土のり面があるかどうかと、路面に植生が繁茂しているかどうか（見た目でも裸地を感じるかどうか）を組み合わせてランクを設定するというやり方です（表-1）。この締め固め度合いランクでは、ランクが上がるほど締め固めの度合いが大きくなるようにしています。

表-1 集材路の切土のり面および路面植生の有無から判別する締固め度合いランク

	路面に植生が繁茂している	路面に植生が繁茂していない
切土のり面がない	ランク 1	ランク 2
切土のり面がある	ランク 3	ランク 4

先述した調査では、集材路の作設経過年数、路面における植生の有無、切土の有無を現地で確認しています。この調査事例を使って、締固め度合いランクと乾燥密度増分の関係を図にしました（図-3）。調査区間によってばらつきはあるものの、ランク1~3までは、ランクがあがるにつれて乾燥密度が増加する傾向にあります。ランク4ではばらつきがみられましたが、ランク1と2、およびランク3と4の区分でみると、乾燥密度増分が40%くらいを境に乾燥密度増分の値が区別されます。このことから、表-1の区分で整理すると、路面に植生が繁茂しているかどうか（ランク1と3、およびランク2と4の組み合わせ）よりも、切土のり面の有無（ランク1と2、およびランク3と4の組み合わせ）が締固め度合いに大きく影響している傾向がみられました。

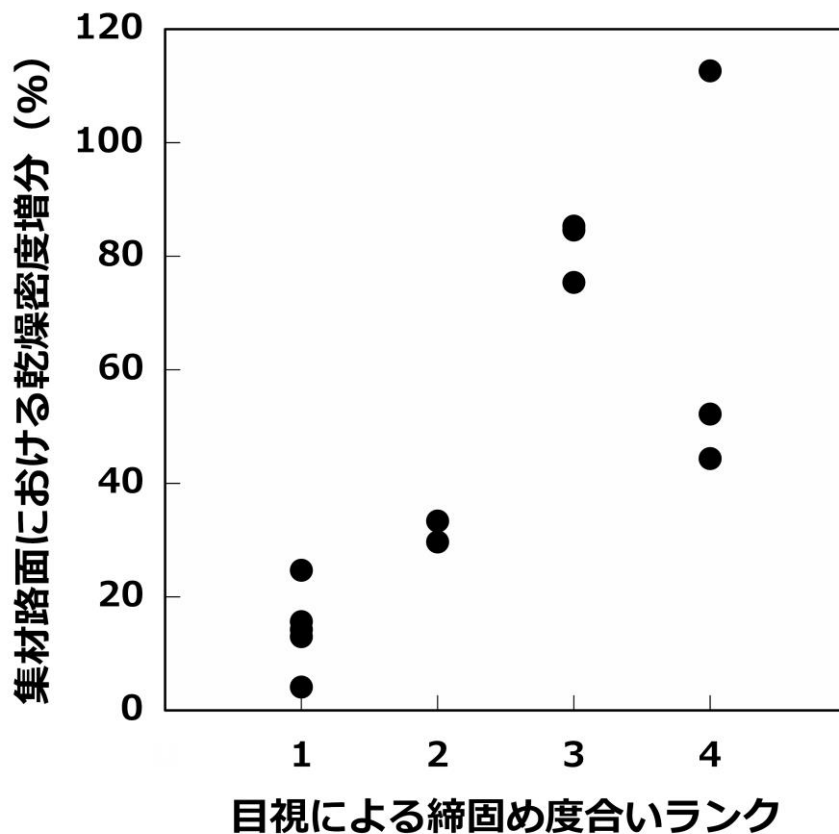


図-3 締固め度合いランクと乾燥密度増分の関係

#### 集材路の作設後経過年数と乾燥密度増分の関係

先行研究では、横軸に作設後経過年数 (year), 縦軸を乾燥密度増分 ( $\Delta \rho_d$ ) にした図を作成すると減少傾向となることが多いです。回帰直線を求めると、傾きの係数 ( $\beta_1$ ) が負となる回帰式  $\Delta \rho_d = \beta_0 - \beta_1 \times \text{year}$  が得られます。ここで  $\beta_0$  は切片です。

本来であれば、同じ路線において対照と同じ数値に回復するまで土壌物理性を経時測定し続けることが理

想的な調査方法ですが、図-1のように数十年間調査を続けることは困難です。そのため、回帰式による回復年の解析としては、①同一場所におけるある調査時期のデータから得られた回帰式を、 $\Delta \rho_d$ が0となるまで延ばして回復年を読み取る（外挿）方法と、②作設からの経過年数が異なる複数の路線で得られたデータから回帰式を作成する方法があります。本稿では、②の方法で解析してみます。

調査事例を使って集材路の作設年数に対する乾燥密度増分の変化を図-4に示しました。この図をみる限り、明瞭な増減関係はありません。ちなみに、直線回帰を求めると正の傾きとなりました。これは、作設年数が経つほど乾燥密度増分が増え、回復しないことを意味します。

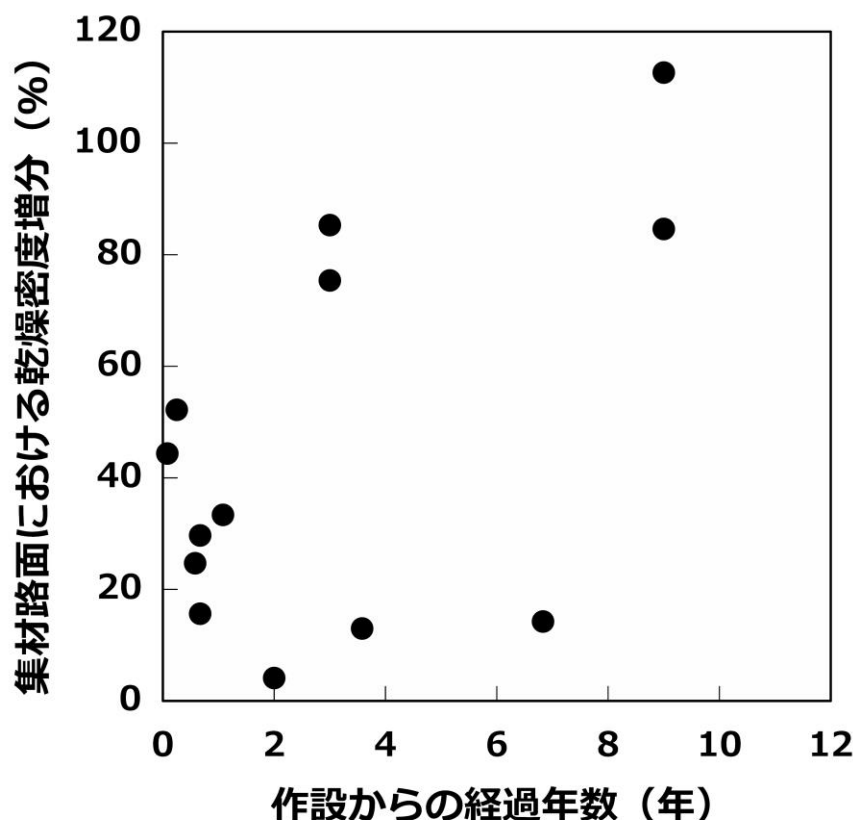


図-4 集材路作設からの経過年数と乾燥密度増分の関係

この図における点のばらつきは、調査路線の地質、気象条件、走行した車両の重量や走行回数の違いなどが反映されています。しかし、図-3でみたように切土のり面の有無によって乾燥密度増分の値の違いに線引きできる傾向がありました。そこで、図-4について、切土のり面あり（法高は1~2m）と切土のり面なしで区分してみました（図-5）。すると、切土のり面なしについては、負の傾きをもつ回帰式が得られました。ちなみに、この式から回復年を計算すると、11.8年となります。

一方で、切土のり面ありの場合は作設後の経過年数が経つごとに乾燥密度増分が増加しています。ここでは直線回帰ではなく、べき乗式  $\Delta \rho_d = \alpha \times (\text{year})^\gamma$  で近似しました。ここで  $\alpha$  と  $\gamma$  は、それぞれ係数です。過去の研究において、作業道では作設からの経過年数が経つほど、路面の強度が増加する報告があります。作業道は、構造的に集材路より強度が担保される必要があります。切土のり面がある集材路では、作業道同様に転圧による締め固めがなされているため、構造的に作業道と似通っているのかもしれませんが。ちなみに、9年経過した調査地点の乾燥密度増分が120%近い路線は皆伐流域に設置されたもので、切土のり面があり、集材路面における植生はほとんどありませんでした。同路線ではかなり強い締め固めがあったことが推測されます。

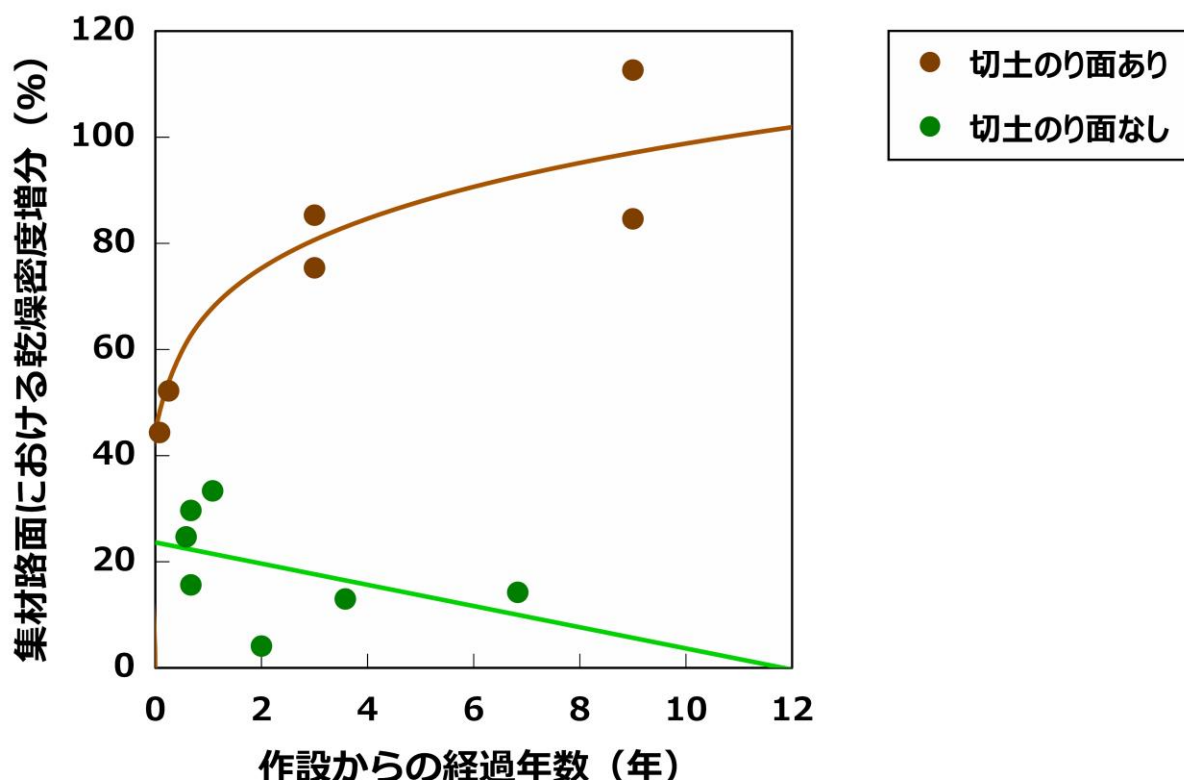


図-5 切土のり面の有無で区分した集材路作設からの経過年数と乾燥密度増分の関係

#### 集材路における土壌物理性の回復年が意味するところ

北海道では、高性能林業機械が普及しています。林地において集材路が作設されるだけでなく、林地内をそのまま車両が走行することがあります。こうして締め固められた土がむき出しになっていたり、硬いままであったりすると土砂流出の発生源になりえるだけでなく、天然更新による植生回復の阻害や、締め固め箇所植栽された苗木の衰退・枯死に繋がる場合があります（佐藤 2020）。筆者が調べた集材路での事例では、回復年が5年の場合や1年（未発表）という結果もみられました。この報告では、回復年が約12年と推測されましたが、あくまで今回調査した結果から導かれた値であり、道内一律での回復年とはなりません。ただし、図-1とあわせて鑑みると、集材路の回復年は10年以内になることが多いようです。

また、ある森林所有者から聞いた話では、フォワーダの走行のために集材路であっても切土のり面を設けるとのことでした。切土のり面を伴う集材路の回復年の情報も、重要な意味を持ちます。

今回の解析で重要な視点は、集材路といえども作設方法の違いによって回復傾向の増減が異なることです。今後、このような事例を増やすことで、集材路の土壌物理性回復に関する知見が深まることが期待されます。

#### 引用文献

安西徹郎（2016）だれにでもできる土の物理性診断と改良．農山漁村文化協会，東京

佐藤弘和（2020）林業機械の走行による集材路での締め固めと土壌物理性の回復．森林科学 90：6-13

※ 図-1の作成に係る引用文献は、数が多く未発表データも含まれるため掲載していません。

（企画調整部企画課）