

## 人の反復跳躍による森林土壌硬度の簡易評価

森林総合研究所北海道支所 橋本徹・相澤州平・伊藤江利子・佐々木尚三

### はじめに

北海道は、緩中傾斜地が多く降雨が比較的少ない。その地域の特徴を活かして、生産性が高く、労働安全性にも優れている林内走行型作業システム(ハーベスタ・フォワーダシステム)の導入が進んでいる。しかし、この作業システムは、大型機械が林内を直接走行して作業を行う仕組みであり、立地環境に与える影響が懸念される(1, 2)。林業機械走行が立地環境に与える影響を明らかにして、十分なリスク管理を行うことが重要である。そのためには、予め、走行予定地の土壌の硬さを評価できることが望ましい。しかし、土壌貫入計や貫入硬度計などは、一般の森林所有者や事業者は所有していないと考えられる。そこで、専用の機器がなくても簡易に土壌硬度を推定する手法として、人が林地で反復跳躍することで土の凹み度合いからその場所の土の硬さを評価する手法を検討した。さらに、林業機械の反復走行に対する脆弱性の指標として、反復跳躍による土の凹みの変化率から土壌硬度の変化も検出できないか調べた。

本研究では、

- ・ 土壌硬度(貫入抵抗)と跳躍回数、土壌含水率、土の凹みの関係を明らかにする
- ・ 人の跳躍による土の凹み度合いから、元の土の硬さを推定する
- ・ 複数回跳躍による土の凹みの変化から土壌硬度の変化を推定する。

ことを目的とする。

### 調査地と調査方法

調査は、森林総合研究所北海道支所の羊ヶ丘実験林で、2014年7月15日(プロットA~E)と8月26日(プロットF~J)に行った(表-1)。

表-1 調査地の状況

Plot	林相	土壌型	傾斜 (°)	土壌含水率 (TDR%)
A	シラカバ二次林	B <sub>D</sub>	3	15.5
B	シラカバ二次林	IB <sub>1D</sub>	4	18.3
C	トドマツ人工林	B <sub>1D</sub>	3	21.0
D	ミズナラ人工林	B <sub>D</sub>	3	26.2
E	トドマツ人工林	B <sub>D</sub>	5	16.7
F	エゾマツ人工林	B <sub>D</sub>	4	28.4
G	シラカバ二次林	B <sub>D</sub>	10	31.3
H	シラカバ二次林	B <sub>D</sub>	9	36.6
I	シラカバ二次林	IB <sub>1D</sub>	6	29.0
J	トドマツ人工林	IB <sub>1D</sub>	3	40.3

斜面方向が短辺となるように約 60×100 cm のプロットを設定し、リターを除去した。高さ 20 cm の所に、プロットの両長辺中央を結ぶように横棒を置き(プロット片方は 60×50 cm になる)、それを両足で飛び越えるようにプロットの左右を交互に跳躍した(図-1)。

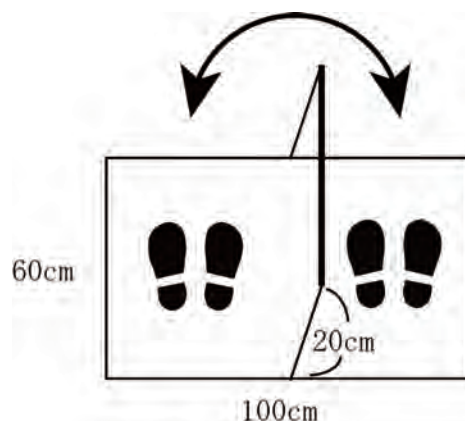


図-1 調査方法概念図

調査者の体重は衣服込みで約 75 kg だった。跳躍回数 0 回目、10 回目、20 回目、30 回目に、土の凹みと 0-30 cm 深の貫入抵抗をプロットの左右で測定した。土の凹みは、最も深いところを折尺で測定した。貫入抵抗測定には、デジタル貫入式土壌硬度計(大起理化工業、DIK-5530)を用いた。同じ場所で測定すると、前回測定した穴に重なる可能性があるため、1 回測定するごとに、測定点を数 cm ずつずらして測定した。また、土壌含水率を土壌水分センサー(Campbell Scientific, Inc., HydroScience2-12)を用いて、プロットの左右で 2 回ずつ測定した。貫入抵抗も土壌含水率も土の凹み度合いもプロット左右の値を平均して、各プロットの値とした。

1-30cm 深の貫入抵抗データをクラスター分析(Ward 法)によって深度別に分類した。

### 結果と考察

クラスター分析によって、貫入抵抗の深さ別変化は、1-9 cm、10-30 cm に分類された。10-30 cm の貫入抵抗値は他の要因との関連が薄かったため、以降は 1-9 cm の貫入抵抗平均について解析した。

まず、人の跳躍回数と土壌の凹み、それぞれの回数の跳躍前の貫入抵抗の関係をみると、土壌の凹みの深いところほど、跳躍前の貫入抵抗が低い傾向が見られた(図-2)。それぞれの跳躍回数での土壌の凹みと跳躍前の貫

Toru HASHIMOTO, Shuhei AIZAWA, Eriko ITO, Shozo SASAKI (Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Sapporo 062-8516)

Simple estimation of forest soil hardness by iterating jump of a man.

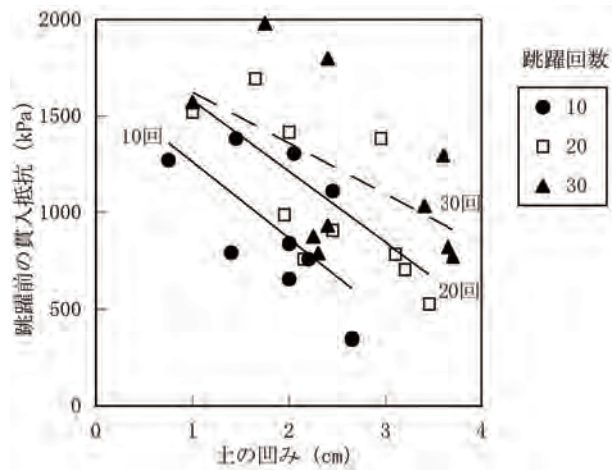


図-2 土の凹みと跳躍前の土壌の貫入抵抗の関係  
図中の線はそれぞれの跳躍回数での回帰直線（実線は有意）を示す

入抵抗の回帰直線の p 値は、跳躍回数 10 回で  $p=0.048$ 、20 回で  $p=0.020$ 、30 回で  $p=0.108$  と、跳躍回数 10 回、20 回で有意であった。凹みの深さと貫入抵抗の直線関係は跳躍 10 回と 20 回ではほぼ同じ傾きのまま平行移動していたが、跳躍 30 回目では点の分散が大きくなり、一定の傾向が見られなくなった（図-2）。跳躍回数と跳躍後の貫入抵抗の関係をプロット毎に見た場合、多くのプロットで跳躍回数が増えるにつれて跳躍後の貫入抵抗が増加していた（図-3）。

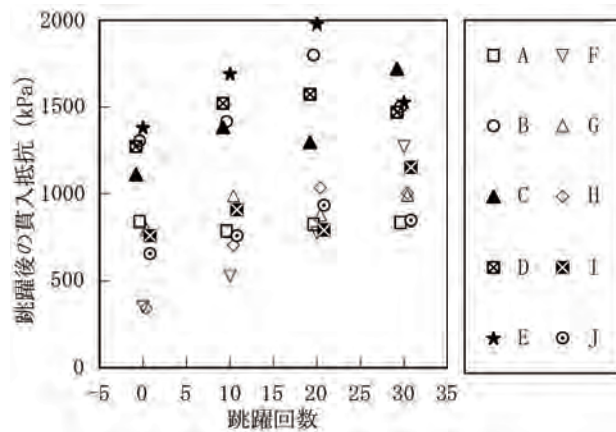


図-3 プロットごとの跳躍回数と跳躍後の貫入抵抗の関係

ただし、プロット A やプロット J など一部のプロットでは、30 回跳躍しても跳躍後の貫入抵抗の増加がほとんど見られず、場所による違いがあった。

	係数	SS	df	F	P
要因					
跳躍回数	25.8	1160897	1	20.65	0.000
含水率	-26.8	1369159	1	24.36	0.000
土の凹み	-304.6	1509366	1	26.85	0.000

表-2 跳躍前の土壌貫入抵抗を説明する線型モデルの独立変数の係数と ANOVA 表

跳躍前の貫入抵抗を決定する変動要因を解明するため、貫入抵抗を従属変数とし、跳躍回数、土壌含水率、土の凹み度合いを独立変数として、線形モデルを当てはめた（表-2）。全ての独立変数が有意だった。跳躍回数が増えると土は硬くなり、土壌含水率の高いところや跳躍で土が深く凹むところは柔らかいということがわかった。

森林土壌の硬度を推定する簡便法として、地上 20cm の高さで 10 回跳躍した時の土壌の凹みのみから元の土壌の貫入抵抗を推定する式は

$$\text{貫入抵抗 (kPa)} = -395.8 \times \text{凹み (cm)} + 1658.1 \quad (1)$$

となった（図-2 の跳躍数 10 回での回帰直線）。 $p=0.048$  であり、土の凹み度合いから土壌硬度を簡易推定できる可能性があると考えた。

機械走行前の土壌硬度評価に加えて、機械による反復走行に対する土壌の脆弱性も評価することが重要である。例えば、プロット A は 0 回目跳躍時の貫入抵抗が約 800 kPa であったが複数回跳躍によってほとんど増加しなかった一方、プロット E は 0 回目跳躍時の貫入抵抗が約 1400 kPa と相対的に高かったにもかかわらず、その後の複数跳躍によってより貫入抵抗が高まっている（図-3）。これは、元の土の硬さからだけでは、機械の反復走行に対する土壌の脆弱性を推測できない可能性のあることを意味している。そこで、土の凹みの変化から、機械の反復走行に対する貫入抵抗の変化率を推測できないか検討した。

まず (1) 式から各プロットの元の土の貫入抵抗を推定した。次に、20 回跳躍した時の土壌の凹みのみから 10 回跳躍と 20 回跳躍の間の貫入抵抗を推定する式

$$\begin{aligned} & \text{10 回跳躍と 20 回跳躍の間の貫入抵抗 (kPa)} \\ & = -367.6 \times \text{20 回跳躍した時の凹み (cm)} + 1948.1 \quad (2) \end{aligned}$$

（図-2 の跳躍回数 20 回での回帰直線式）

で、10 回跳躍と 20 回跳躍の間の貫入抵抗を推定した。(1) (2) 式から推定した貫入抵抗のデータを図-4 に描画し、各プロットで回帰し、その回帰係数から求めた (30 回跳躍時の回帰式はデータのばらつきが大きかったので以下の推定には用いない)。図-4 における各プロットの回帰係数は、元の土の硬さが跳躍 10 回することでどれだけ硬くなったかという変化率ということになる。また、図-3 における各プロットの貫入抵抗実測値の変化率を 0-20 回までのデータでの回帰係数から求めた。こちらは、実測による土の硬さの変化率を意味する。土の凹みから推定した貫入抵抗の変化率と貫入抵抗実測値の変化率の相関係数は、 $-0.23$  だった。つまり、土の凹みの変化のみから土壌硬度の変化を推定することは困難だということがわかった。その原因としては、表-2 で示されているように、土壌含水率の違いが効いている可能性が考えられる。専用の測定機器なしで土壌の水分状態を簡易に調べる方法としては、土塊に圧を加えて、その時の手や指の湿り具合から、土壌の水分状態を区分する方法がある (3)。このような手法と今回検討した手

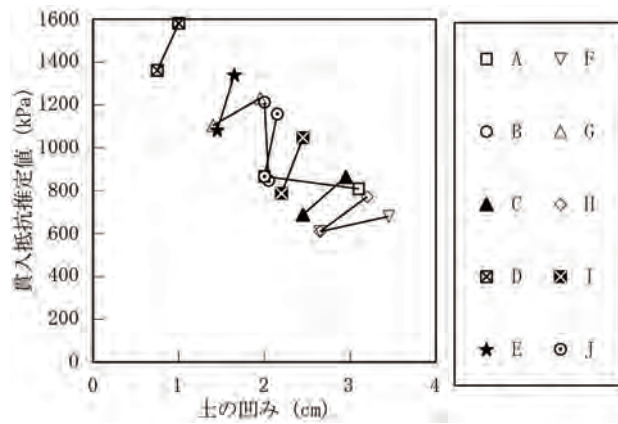


図-4 土の凹みと、土の凹みから推定した貫入抵抗の関係

法の組み合わせで、土壌硬度変化率の推定が改善されるかもしれない。

本研究により、人の跳躍による土の凹みから元の土壌硬度

を推定できる可能性が示唆された。しかし、複数回跳躍による土の凹みの変化率から土壌硬度の変化率を推定することは、今回の調査からはできなかった。この簡易評価手法を実用化するには、解明すべき点が多々残っている。人の跳躍加重と機械の走行加重では、その重さ自体と加重の掛かり方が異なる。今回の方法を評価するためには、同じ場所で機械走行と人の跳躍を行い、そのデータを比較する必要がある。また、この関係式は一調査地のみから導いたものである。本方法の汎用性を検討するためには、より多様な立地条件の場所で追加のデータを取って、その有効性を確認する必要がある。

#### 引用文献

- (1) 猪内正雄 (2001) 森林作業の機械化が森林環境にどんな影響を及ぼすのか. 森林科学 32: 25-33.
- (2) Wästerlund I. (1992) Extent and Causes of Site Damage due to Forestry Traffic. Scand. J. For. Res. 7: 135-142.
- (3) 八木久義 (1993) 野外における土壌および生成環境の調べ方. 森林土壌研究会 (編) 森林土壌の調べ方とその性質 (改訂版) 28-64.