高速道路のり面土壌の二酸化炭素固定量調査

外崎公知^{*1)}・鳥山貴司²⁾

1) 財団法人都市緑化機構

2) 株式会社クレアテラ

摘要: 本稿は、京都議定書の枠組みに位置づけられている植生回復に関する報告対象のうち、土壌に焦点を当て二酸化炭素固定量の把握に向けた土壌調査を行なった。まず、調査の背景を述べた上で、人的攪乱の少ない高速道路のり面を対象に土壌有機炭素固定量を把握するための研究の枠組みを示し、高速道路のり面の土壌が二酸化炭素の吸収源であることを確認するとともに、整備後概ね 20 年間の炭素含有量は、0-10cm と 10-30cm の上下差分量の方が 0-30 cm の平均値よりも経過年数と高い相関を示した。

キーワード: 植生回復, 土壌, 二酸化炭素, 吸収源, 上下差分法

1. はじめに

わが国は、地球温暖化対策の一環として京都議定書第3条4項に位置づけられている活動である植生回復 (revegetation) を第一約束期間 (2008年~2012年) に選択し、「気候変動に関する国際連合枠組条約」事務局に毎年報告している。植生回復とは「1990年以降に行われる開発地における公園緑地や公共緑地、又は行政により担保可能な民有緑地を新規に整備する活動」である。

炭素固定量については、IPCC (2003) ²⁾ の「土地利用、土地利用変化及び林業に関するグッド・プラクティス・ガイドダンス」(以下、「LULUCF-GPG」という。)に定められた方法に基づいて算定し報告することとされている。植生回復に関する報告対象としては、①5つの炭素プール(地上バイオマス、地下バイオマス、土壌、リター(落葉落枝)、枯死木に加えて、②石灰の施与による炭素排出、③バイオマスの燃焼による炭素排出が必要とされている。また、生体バイオマスの吸収係数(デフォルト値)を使用する際の条件は、「平均樹齢20齢以下」とし、「平均樹齢20齢超」の樹木に関しては、炭素の固定と排出が見かけ上、バランスしている(排出・吸収量=0)ものとして扱うこととなっている。

しかし、LULUCF-GPGには、①の炭素プールのうち生体バイオマスに関するデフォルト値はあるものの、土壌、リターのデフォルト値等は示されていない。このため、これらの算定に必要な係数等は選択した国が独自の知見として科学技

術的な根拠に基づき作成する必要がある。LULUCF-GPGにおいて、土壌とは「地下部の炭素のうち、リター及びバイオマス・枯死木の地下部を除いたもの」と定義されており、一年経過後のリターも含まれるということである。ここで炭素とは植物により生産された有機炭素を意味し、算定対象となる土壌の深さは土壌の表層から30 cmまでとされている。

土壌の炭素固定に関しては、松井ら (2005) ⁵⁾ はエコロジ一緑地帯の土壌炭素集積速度が 0.44-1.33 MgC/ha year と、高橋 (2007) ⁸⁾ は都市公園の土壌の炭素蓄積量は公園樹木による炭素蓄積量 55 MgC/ha と同等か超えており、雑木林のような落葉を堆積していく緑地形態では年月が経過していく程に多くの炭素が貯蔵されると報告している。そこで本研究では、設計要領や整備履歴が比較的明らかで人的攪乱の少ない高速道路の盛土のり面における土壌中の有機炭素現存量を測定し、植生回復の土壌が二酸化炭素の吸収源としてどの程度の蓄積速度(整備後概ね 20 年間)を有しているかを算定するための基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 調査方法

2.1 調査地

四手井・堤 (1962) ⁷⁾ によると土壌中の炭素蓄積量は、地質や気候条件の影響を受け変化する。緑地形態によっては利用や管理も大きく影響する。緑地形態の影響と経年的変化を明確化するために地質や気候条件の変化を小さくする必要がある。そこで本研究では調査範囲を関東周辺の高速道路の盛土のり面に限定した。

炭素現存量を把握のための調査地点を東日本高速道路株式会社が管理する高速道路の 14 区間の盛土のり面内に設けた(表-1)。のり面内の緑地形態を、草地・高木植栽地(広葉樹に限定)・無植生地に分け、植生や地表の状態が平均的な部分を調査地点とした。

日本道路公団及び東日本高速道路株式会社等は、道路整備に関する設計要領を定めている。のり面保護工の設計にあたっては、盛土材料が植生に適さない場合に土羽土(厚さ 20~30 cm 程度)を設けるなど植生の積極的な遷移が期待できる

* 連絡先著者 : E-mail : tonosaki@urbangreen.or.jp 〒101-0021 東京都千代田区外神田 2-15-2

表-1 調査地点の概要

No.	路 線 名	区 間 名	開通年度	調査年度
1	関越自動車道	東松山～前橋	1980	2007
2	"	前橋～赤城	1985	2007
3	"	赤城～沼田	1985	2007
4	上信越自動車道	藤岡～佐久	1992	2007
5	北関東自動車道	高崎～伊勢崎	2000	2007
6	"	伊勢崎～東村*	工事中	2007
7	"	東村～	(2004)	2007
8	"	友部 IC 付近	2000	2010
9	"	茨城西 IC 付近	2000	2010
10	"	水戸南 IC 付近	2000	2010
11	東関東自動車道	大栄 IC 付近	1985	2010
12	常磐自動車道	いわき勿来 IC 付近	1990	2010
13	"	いわき湯元 IC 付近	1990	2010
14	"	いわき湯元～いわき勿来	1990	2010

*No.6 伊勢崎～東村の調査地点は 2004 年度に植栽工事が竣工した。

表-2 土壌採取地点数と主な調査項目

No.	採 取 地 点 数			有機炭素 含有率	土粒子 密度	石礫率
	草地	高木植栽地	無植生地			
2007	6	6	2	○	○*	—
2010	7	7	0	○	○	○

*No.7 の土粒子密度は未調査である。

植生工を優先的に適用するとともに、昭和 45 年頃からは大規模なり面への高木植栽も実施されるようになった。

2.2 調査方法

現地調査は 2007 年度と 2010 年度の 2 回実施した。検土杖で簡易調査を実施後に土壌採取地を決定し、草地、高木植栽地、無植生地の形態毎に土壌採取地点を設けた(表-2)。

図-1 に示すようにまず 2～3 m 四方の調査区を設定し、当該年に落下したと思われるリターを除去し、地形・植生などを考慮し土壌採取地点を 4 ヶ所選定した。ステンレス 100 ml の採土円筒と採土補助器(DIK-6130:大起理化学工業株式会社)を用いて土壌深 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm の鉋質土壌を定体積用(1 ヶ所×3 サンプル)、有機炭素測定用(3 ヶ所のサンプルを 1 つにまとめたもの×3 サンプル)を採取した。

採取した土壌は実験室に持ち帰り、風乾(30～40℃)にて乾燥させた後 2 mm の篩にかけ石礫や根などを取り除き、細土及び石礫の重量を測定した。その後、塩酸処理により無機炭素を脱し、細土の有機炭素含有率を乾式燃焼法元素分析装置(Elementar Analysensysteme GmbH 社製 vario MAX CN)を用いて測定した。粒度組成は JISA1204 の分析手法により、また石礫率は風乾土(重量)当たりの 2 mm 以上の石礫(重量)の割合とした。細土の有機炭素含有率・土粒子密度及び石礫率から計算により 100 ml の採土円筒中の炭素量を

図-1 土壌採取の方法

表-3 緑地形態別の土壌有機炭素含有率

緑 地 形 態	土 壌 深 (cm)	有機炭素含有率 (%) *
草地	0-10	2.39±0.91
	10-20	1.03±0.46
	20-30	0.77±0.42
高木植栽地	0-10	2.96±1.79
	10-20	1.47±0.86
	20-30	1.20±0.70
無植生地	0-10	0.09±0.00
	10-20	0.09±0.00
	20-30	0.10±0.02

*平均 ± 標準偏差

深さ毎に求め、それらをもとに 1 ha×30 cm(深)あたりの炭素現存量(MgC/ha)を求めた。

3. 結果と考察

3.1 有機炭素含有率

表-3 に緑地形態別・土壌深毎の有機炭素含有率を示す。草地と高木植栽地ともに土壌深が浅くなるほど有機炭素含有率は高くなり、0-10 cm の含有率は 10-20 cm, 20-30 cm の 2 倍以上あった。全ての土壌深で高木植栽地の方が草地よりも含有率が高い値を示した。これは高木植栽地の土壌中では植物からの炭素供給が比較的大きいためと考えられる。草地と高木植栽地の含有率は無植生地と比較しても高かったことから、植物根等が土壌への炭素供給源となっていることが示された。

次に、植生地の土壌深により有機炭素含有率に有意な差があるか否かを確認するため、分散分析を行ったところ、土壌深による有意な差があることが分かった($p<0.01$)。そこで、「土壌深別の有機炭素含有率の平均値は等しい」との帰無仮説を立て、t 検定(分散が等しくないと仮定)を行ったところ、0-10 cm の含有率は、10-20 cm と 20-30 cm との間に有意な差があり、10-20 cm と 20-30 cm との間には有意な差は見られなかった。

表-4 緑地形態別の土粒子密度と石礫率

緑地形態	土壌深	土粒子密度*	石礫率
	cm	g/cm ³	%
草地	0-10	0.77±0.17	5±2
	10-20	0.87±0.25	9±4
	20-30	0.91±0.34	5±2
高木植栽地	0-10	0.71±0.15	6±2
	10-20	0.71±0.27	13±5
	20-30	0.78±0.30	13±9
無植生地	0-10	1.73	—
	10-20	1.39	—
	20-30	1.43	—
植生地平均	0-30	0.79±0.22	9±9

*平均 ± 標準偏差

3.2 土粒子密度と石礫率

表-4 に緑地形態別・土壌深毎の土粒子密度と石礫率を示す。草地と高木植栽地の土粒子密度は、のり面造成段階である無植生地の土粒子密度よりも低く、また土壌深が深くなるほど高くなっている。これは落葉が多く堆積し土壌の緊密性が妨げられ、土粒子密度が低くなったと考えられる。

次に、植生地の土壌深により土粒子密度及び石礫率に有意な差があるか否かを確認するため、分散分析を行ったところ、いずれも土壌深度による有意な差はなかった ($p>0.1$)。

3.3 炭素現存量

有機炭素含有率、土粒子密度、石礫率から計算した 1 ha×30 cm (深) あたりの調査地点の炭素現存量を表-5 に示す。なお、調査地点 No.1~No.7 の石礫率と No.7 の土粒子密度が未調査だったため、全植生地の平均石礫率 9% と No.7 (東村〜) の近傍である No.6 (伊勢崎〜東村) の土粒子密度を用いて計算した。

道路のり面の造成初期段階であった無植生地の炭素現存量は 3.8 MgC/ha であった。草地の炭素現存量は、最小が No.6 (伊勢崎〜東村：工事中) の 13.2 MgC/ha、最大が No.3 (赤城〜沼田：1985 年度開通) の 52.2 MgC/ha、平均で 30.8 MgC/ha であり、概ね経年的に増加していた。高木植栽地の炭素現存量は、最小が No.13 (いわき湯元 IC 付近：1990 年度開通) の 12.0 MgC/ha、最大が No.1 (東松山〜前橋：1980 年度開通) の 103.5 MgC/ha、平均で 35.6 MgC/ha であった。標準偏差は高木植栽地が 25.6 MgC/ha と草地の 2 倍近くあった。これは立木密度、樹種、のり面方位等が影響しているものと考えられる。

3.4 経過年数と有機炭素含有量

道路のり面の植栽密度については設計要領に定められているが、日本道路公団 (1976) ⁶⁾ と東日本高速道路株式会社 (2006) ¹⁾ では数字が若干異なっていると同時に、成木・未成木植栽方式と苗木植栽方式では標準植栽密度が異なる。ま

た、増田ら (2002) ⁴⁾ によると、高速道路の植栽林の 20 年後では、侵入種の二酸化炭素固定量も多くなること、のり面方位では南側の固定量が多いことが報告されている。このため、経過年数別に各土壌深の平均有機炭素含有量を算出した (表-6)。草地、高木植栽地ともに、経過年数が増えるに従い含有量は増加するが、その傾向は土壌深 0-10 cm で顕著である。

図-2 は土壌深 0-30 cm の有機炭素含有量の経年変化であるが、草地と高木植栽地では増加傾向に差異が見られ、草地は経過年数 15 年頃までは増加し続けるが徐々に頭打ちになる傾向があり、高木植栽地では当初 10 年間は草地と同様に増加するがその後足踏み状態となり、経過年数 20 年頃からふたたび増加する傾向がある。これは、有機炭素含有量に影響

表-5 調査地点の炭素現存量 (MgC/ha)

No.	草地	高木植栽地	無植生地
1	32.1	103.5	—
2	32.7	23.1	—
3	52.2	36.9	—
4	38.1	18.3	—
5	20.4	25.5	—
6	13.2	13.2	4.0*
7	—	—	3.6*
8	43.5	22.8	—
9	30.0	47.1	—
10	24.0	44.7	—
11	42.6	60.0	—
12	22.8	31.5	—
13	28.5	12.0	—
14	20.7	24.3	—

全調査地点** 30.8±11.0 35.6±25.6 3.8±0.3

*No.6 の無植生地は種散布工直後ののり面、No.7 の無植生地は植生工前ののり面である。

** 平均 ± 標準偏差

表-6 経過年数別・土壌深別の土壌有機炭素含有量 (MgC/ha)

経過年数	草地			高木植栽地		
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
0	1.4	1.1	1.2	1.4	1.1	1.2
3	5.4	4.1	3.6	6.1	4.0	3.2
7	11.0	5.1	4.1	14.7	5.7	5.2
10	14.2	9.4	8.9	18.5	10.1	9.6
15	23.4	8.0	6.8	9.6	4.7	3.8
20	13.8	5.8	4.4	15.4	3.8	3.3
22	25.3	11.0	6.1	18.0	11.0	7.8
25	24.6	9.5	8.4	29.6	15.6	14.7
27	18.1	6.9	7.0	51.5	24.5	27.5

図-2 土壌有機炭素含有量の経年変化

表-7 経過年数と土壌有機炭素含有量の相関係数

草地			高木植栽地		
0-10	0-30	上下差分量	0-10	0-30	上下差分量
0.835	0.808	0.827	0.792	0.765	0.819

 $p < 0.05$

を与える植物根やリターの供給量及び分解速度、土壌からの二酸化炭素の排出等が関係しているのではないかと考えられる。なお、調査地点の草地も高木植栽地ともに落葉落枝の人為的な除去は行なわれていなかった。

草地、高木植栽地について、土壌深別の有機炭素含有量を分散分析した結果、有意な差 ($p < 0.05$) が認められたので、土壌深間で t 検定を行なった。その結果、3.1 の有機炭素含有率と同様に、0-10 cm の含有量は、10-20 cm と 20-30 cm との間に有意な差があり、10-20 cm と 20-30 cm との間には有意な差は見られなかった。

次に、有機炭素含有量と経過年数との相関分析を行った。有機炭素含有量は、土壌深①0-10 cm、②0-30 cm、③有意な差があった 0-10 cm と有意な差なかった 10-20 cm・20-30 cm の平均とよる上下差分量を用いた。表-7 より経過年数と有機炭素含有量はいずれの場合も高い相関を示すことから、高速道路のり面の土壌は二酸化炭素の吸収源であることが確認できた。また草地及び高木植栽地ともに上下差分量の方が 0-30 cm の含有量よりも高い相関を示すことから、基盤土壌に残留炭素量等の影響がある場合は、上下差分量を指標として用いる手法（上下差分法）の有効性が示唆された。

次に整備後概ね 20 年間の炭素蓄積速度を検討するため、0-30 cm の有機炭素含有量と経過年数（0～22 年）との回帰分析を試みた。なお、分散分析の結果、草地と高木植栽地との有機炭素含有量に有意な差がなかったため、経過年数 0～22 年の草地と高木植栽地の計 14 地点のデータを植生地として用いた。

植生地 $Y=1.15 X+11.05$ （決定係数 0.53, $F<0.01$ ）

Y：有機炭素含有量（MgC/ha）

X：経過年数（年）

堤（1989）⁹⁾、前迫ら（2003）³⁾ は土壌形成過程の初期段階の方が炭素蓄積速度は大きくなること、松井ら（2005）⁵⁾ はエコロジー緑地帯の土壌炭素集積速度が 0.44～1.33 MgC/ha であることを報告している。これらのことから、高速道路のり面整備後 1～20 年の炭素蓄積速度としては概ね妥当な範囲ではないかと考える。

4. おわりに

本研究では高速道路の盛土土壌中の炭素現存量は草地・高木植栽地ともに、年月の経過とともに有機炭素含有量が増大しており二酸化炭素の吸収源であることが明らかとなった。また整備後概ね 20 年間は、経過年数と有機炭素含有量は、0-10cm と 10-30cm の上下差分量の方が 0-30 cm の含有量よりも高い相関を示すことから、基盤土壌に残留炭素量等の影響がある場合は、上下差分量を指標として用いる手法の有効性が示唆された。しかし高木植栽地における植栽密度や樹種特性まで加味していなかったこと、のり面整備後 20 年超の炭素蓄積速度の検討が不十分であること等、更に検討を深めたいと考えている。

引用文献

- 1) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社（2006）設計要領第 1 集 造園編，NEXCO 中央研究所，56 pp.
- 2) IPCC (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>
- 3) 前迫俊一・酒井正治・下川悦郎（2003）崩壊発生周期を用いた土壌炭素蓄積速度の推定（Ⅰ），九州森林研究，56:239-241.
- 4) 増田俊二・倉井達夫，上村恵也（2002）道路植栽林の生育実態（二酸化炭素固定量）調査，日緑工誌，28(1):310-312.
- 5) 松井直弘・小野由紀子・植野誠二（2005）エコロジー緑地帯造成後の土壌有機物集積，日緑工誌，31(1):143-146.
- 6) 日本道路公団（1976）設計要領 第一集 第四編 造園，22 pp
- 7) 四手井綱英・堤利夫（1962）林地の有機物集積量とその年分解率と気候との関係，日本林学会誌，44(11):297-303.
- 8) 高橋輝昌（2007）都市緑地土壌の炭素固定機能に関する研究，公園緑地研究所報告 2007:117-121.
- 9) 堤利夫編（1989）森林生態学，朝倉書店，98 pp.

（2012.7.6 受理）