

路網開設に伴う二酸化炭素排出量の現状と今後

誌名	森林総合研究所研究報告
ISSN	09164405
著者名	鈴木,秀典 岡,勝 山口,浩和 陣川,雅樹
発行元	森林総合研究所
巻/号	9巻4号
掲載ページ	p. 153-162
発行年月	2010年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



論文 (Original article)

路網開設に伴う二酸化炭素排出量の現状と今後

鈴木秀典^{1)*}, 岡 勝¹⁾, 山口浩和¹⁾, 陣川雅樹¹⁾

Carbon dioxide emission due to the construction of forest roads in Japan: present situation and future prospects

Hidenori SUZUKI^{1)*}, Masaru OKA¹⁾, Hirokazu YAMAGUCHI¹⁾ and Masaki JINKAWA¹⁾

Abstract

Nowadays, mechanization and development of road networks are essential for forestry from commercial and safety reasons. However, energy is required to operate those machines used for logging as well as those used in road constructions; consequently, these machines emit CO₂. Hence, it is important to evaluate the amount of CO₂ emissions from them in order to know carbon sink ability of forest sector more accurately and to plan future mechanization and road network development. In this study, we focused only on the road construction process and determined the amount of CO₂ emissions due to the fuel consumption of construction machines. In the case of forest roads in private forest, the earth volumes and the corresponding fuel consumption were estimated on the basis of the design documents. These parameters were determined in order to estimate the annual amount of CO₂ emissions. In the case of forest roads in national forest, both parameters were estimated from the results of the analysis on private forest. In the case of strip roads, the former parameter was obtained from the existing survey data and the latter was substituted by the parameter of forest roads in private forest. From all these results, it is estimated that the CO₂ emissions for 2007 due to the construction of forest roads in private forest, forest roads in national forest and strip roads in private forest are 48.09, 11.71 and 97.64 kt, respectively. Further, to achieve the desired road density formulated in the Basic Plan for Forest and Forestry (2006), it is predicted that the future road construction process will result in 19.11–20.39 MtCO₂ emission.

Key words : forest road, strip road, earth volume, forestry, energy, global warming

要旨

近年の林業では、経済性や安全性の観点から機械化やそのための路網整備が必要不可欠となっているが、機械作業や路網整備にはエネルギーの使用が不可欠で、これらの機械からは必ず二酸化炭素が排出される。よって、森林による二酸化炭素吸収量を適正に評価するためには、また、今後の機械化作業や路網整備の方向性を議論するためにも、林業活動に伴う排出量を明らかにする必要がある。本研究では日本の森林を対象に路網整備過程に着目して、林道、作業道の開設工事において、建設機械の燃料消費による二酸化炭素排出量を算出した。このために、民有林林道では設計書から土工量および燃料消費量を調べた。国有林林道では民有林林道の値からこれらの値を推定した。作業道では既存の調査による土工量および民有林林道の値から燃料消費量を推定した。これらの値と、各年間開設延長から排出量を算出した結果、2007年度の排出量が、民有林林道から48.09ktCO₂/年、国有林林道から11.71 ktCO₂/年、民有林作業道から97.64ktCO₂/年と算出された。また、森林・林業基本計画(2006)における林道・作業道の整備目標を達成すると、2007年以降、19.11～20.39Mt CO₂の二酸化炭素が排出されるとの予測結果を得た。

キーワード：林道、作業道、土工量、林業、エネルギー、地球温暖化

1. はじめに

温室効果ガスの一つである二酸化炭素の吸収源として、森林に大きな期待がかけられているが、森林がその機能を発揮するためには樹木が健全に成長することが必要である。また、若い木の方が旺盛に成長し、より多くの二酸化炭素を吸収するため、この機能だけを見れば、林分の成長量が劣る高齢林を保

存するよりも、伐採した木材を長期的に利用することを前提に、林分の平均成長量が最大となる伐期で伐採と更新を繰り返す利用システムの方が望ましいといえる。特に日本では森林面積の約40%を人工林が占めることから、人工林でこのシステムを有効に利用していくことが、温暖化の抑制にとって効果的である。

原稿受付：平成22年1月13日 Received 13 January 2010 原稿受理：平成22年10月1日 Accepted 1 October 2010

1) 森林総合研究所林業工学研究領域 Department of Forest Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所林業工学研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Forest Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI) 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687 Japan; e-mail: hidesuzu@ffpri.affrc.go.jp

森林整備や林業活動においては、植栽から保育、間伐、伐木運材の各工程およびそれらに必要な路網整備において様々な機械が使用されており、機械の稼働のためにエネルギーを消費し、二酸化炭素を排出している。このような機械の使用は生産性の向上だけでなく、安全性や労働負担軽減の観点からも必要なものであり、将来的にもその必要性は続くものと思われる。つまり、林業活動などによって森林の高い吸収能を維持するためには、機械の稼働による二酸化炭素の排出が避けられないといえる。よって、森林整備や林業活動においてどの程度の二酸化炭素が排出され、また今後排出される見込みであるかを明らかにすることは、森林における吸収量を適正に評価するだけでなく、将来の林業政策や機械開発、機械化の進展方向などに重要な情報を与えることにつながる。機械の使用による二酸化炭素排出量の算出はこれまでもいくつか行われており、一二三ら (2007) は作業道開設作業における燃料消費量を実際に計測し、また、地拵えから主伐までの林業作業におけるエネルギー投入量と二酸化炭素排出量をアンケート結果から求めている (一二三ら, 2008; 安田ら, 2008)。

これからの林業を高効率かつ低コスト化していくためには、機械化と同時に路網整備が重要となり、林道、作業道などを組み合わせた高密路網の整備が急速に進められるものと思われる。しかし、このような路網の開設においても建設機械などが使用され、二酸化炭素が排出されることとなる。路網整備過程における二酸化炭素の排出量は、これまで調査例が少なく、温暖化緩和の観点からの最適路網密度や適正作業システムはほとんど得られていない。そこで本研究では、国内における林道および作業道の開設工事における二酸化炭素排出量を算出し、また、将来に必要な路網整備のための排出量もあわせて推定することとする。さらに、二酸化炭素排出量という新たな視点を導入したときの、今後の路網整備計画の考え方を示す。

2. 路網開設量の推移と整備目標

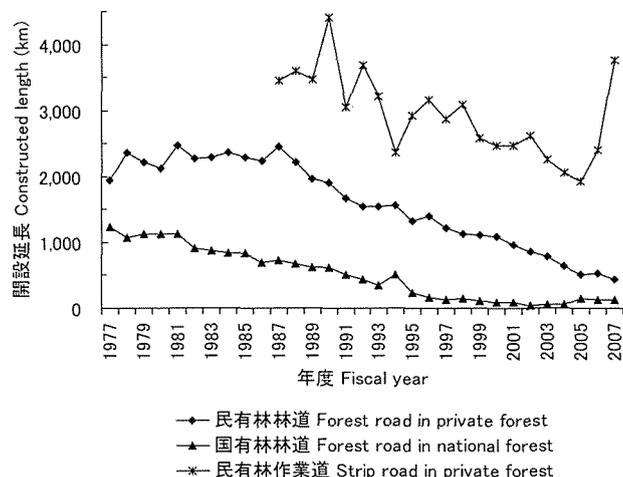
2.1 林道

民有林林道の新規開設量を 1977 年度以降 30 年間の統計 (林野庁, 2009 など) で見てみると (Fig. 1)、1987 年度までは増減を繰り返しながら年間の開設量が 2,000 ~ 2,500km の間で推移しているものの、これ以降はほぼ一貫して減少傾向となっている。2005 年度以降は 500km 程度まで減少し、2007 年度には 436km となった。これは、1977 年度以降におけるピーク時 (1981 年度の 2,466km) の約 18% である。

国有林林道 (林野庁, 2009 など) では 1977 年度以降一貫して減少傾向をたどっている (Fig. 1) が、2003 年度以降はやや増加に転じている。2007 年度の開設量はピーク時 (1977 年度の 1,237km) の約 10% である

123km となっている。

路網の整備目標は、2006 年に策定された森林・林業基本計画の中で定められている。整備の考え方を示す資料 (林野庁, 2006) によると、育成単層林、育成複層林、天然生林の各施業タイプごとに望ましい森林の状態を定めており、必要な路網整備の目安として、育成林では林道と作業道をあわせた路網密度が約 50m/ha、天然生林では既設の林道等から必要に応じて作業道を整備することとしている。路網整備に関してさらに詳しくみると、育成林では公道その他を含む林道等の密度が傾斜に応じて 22 ~ 25m/ha、作業道密度が 22 ~ 25m/ha、合計の路網密度 44 ~ 50m/ha を目標とし、天然生林では林道等密度を 17.5m/ha、作業道を必要に応じて整備することとし、合計路網密度を最低 17.5m/ha としている。この路網密度と森林面積から計算すると、林道の望ましい延長は 26.1 万 km、このうち、民有林が 16.7 万 km、国有林が 9.4 万 km (日本林道協会, 2008) となる。Table 1 に示すとおり、現況路網延長は、目標値に対してそれぞれ約 8 万 km、約 5 万 km 不足している。



出典: 林野庁 (2009) など Reference source: Forestry Agency (2009) and others

Fig. 1. 林道・作業道の開設量
Constructed lengths of forest and strip roads

2.2 作業道

民有林における作業道の新規開設量 (林野庁, 2009 など) を Fig. 1 に示す。統計の得られた 1987 年以降でみると、林道と同様減少傾向を示しているものの、ピーク時 (1990 年度の 4,409km) との比較では、図の期間中最少の 2005 年度でもピーク時の約 43% となっており、林道で見られたほどの落ち込みはない。2006 年度は前年度比約 125%、2007 年度は同約 157% と、近年では開設量が急激に増加してきている。この理由として、コスト低減のために効率的な作業システムに対応した細部路網の整備 (林野庁, 2006) が

Table 1 路網整備の現況と目標
Present and target value of road network development

	面積 Area (1,000ha)	延長 Length(km)			路網密度 Road density(m/ha)		
		現況	目標	不足量	現況	目標	
		Present value	Target value	Deficit value	Present value	Target value	
民有林 Private forest	林道 Forest road	17,411 *	87,931 *	167,000 *	79,069	5.1	9.6
	作業道 Strip road		98,127 *			5.6	
国有林 National forest	林道 Forest road	7,587 *	43,668 *	94,000 *	50,332	5.8	12.4

林道のうち自動車道の値のみを示す。Only the values corresponding to the motorway are considered in the case of forest road.
森林面積は他省庁所管分を除く。Only the forest areas within the jurisdiction of the Forestry Agency have been considered.

* 出典：林野庁 (2009) Reference source: Forestry Agency (2009)

Table 2 作業道の整備目標
Target values of strip road development

	面積 * Area (1,000ha)	目標路網密度 Target density (m/ha)	目標路網延長 Target length (km)	推定現況延長 Estimated present length (km)	不足量 Deficit length (km)
育成林 Managed forest	13,400 **	23.5	314,900		
天然生林 Natural forest	11,700 **	5.6 ***	65,940		
合計 Total	25,100 **	15.2	380,840	141,462	239,378

* 目標値。Desired value.

** 出典：林野庁 (2009) Reference source: Forestry Agency (2009)

*** 現状維持と仮定し、新たな開設を見込んでいない。

It is assumed that the road density maintains the status quo and new roads are not constructed.

進められていることや、近年の路網作設技術の向上 (林野庁, 2006) などが考えられる。

上述したとおり、森林・林業基本計画における作業道の整備目標は、育成林では密度 22 ~ 25m/ha、天然生林では必要に応じた整備となっている。Table 2 に示すとおり、本研究では、育成林の整備目標として中間値である 23.5m/ha、天然生林では新たな開設を行わないと仮定して Table 1 に示した民有林の現況値 5.6m/ha とし、目標作業道延長を約 38 万 km、密度 15.2m/ha とした。国有林作業道に関する統計データが公開されていないために、民・国有林を合わせた現状の作業道延長が得られないが、国有林においても民有林と同程度の作業道密度であると仮定して、合計の推定現況延長を約 14 万 km、目標値に対する不足量を約 24 万 km とした。

3. 二酸化炭素排出量の推定手法

3.1 路網開設における土工量と土質

建設機械の稼働によって、排気ガスの一成分として二酸化炭素がその場で排出されるが、LCA の手法によれば、コンクリート製品などの建造物の製造・輸送・施工・保守・廃棄、あるいは道の維持管理のための走行や補修、伐採・搬出作業などに伴う運用過程などが、

排出要因として考えられる。しかし、構造物などの輸送距離や、保守点検や補修作業の頻度については全国的な値が得られていないことから、本研究では建設機械の燃料消費のみを二酸化炭素排出の対象とする。

開設工事における建設機械の燃料消費量は、土工量その他、土質や作業条件によって決まる。土工量については、斜面傾斜および幅員の増加に従って多くなると考えられるが、(社)全国森林土木建設業協会 (1998) の調査によれば、土工量は傾斜との相関はなく、幅員の増加に従って増加する。調査では、急 (平均傾斜 32 度)・中 (同 25 度)・緩傾斜 (同 17 度) に区分した同一幅員路線の平均土工量、つまり切土量、盛土量、捨土量の合計が、急：中：緩の比率で 1.0 : 1.0 : 1.2 と、緩傾斜面で最も多くなっている。これは、同一のり面勾配であれば、傾斜が急になるとともに切土量や盛土量も増大するが、さらに急になると、擁壁などの構造物を設置することによりこれらの量が減少するためである ((社)全国森林土木建設業協会, 1998)。一方、道の幅員による土工量の違いは、1985 ~ 1987 年度に開設された民有林林道 1 級 (幅員 5.0m)、2 級 (幅員 4.0m)、3 級 (幅員 3.0m) の土工量の比がおおよそ 2.0 : 1.5 : 1.0 (澤口, 1996)、1995 ~ 1997 年度に開設された民有林林道で、同 2.1 : 1.1 : 1.0 (林野庁, 1999)

となっており（これらの比は著者が原著のグラフから値を読み取って得た）、いずれも3mと5m幅員の林道において、土工量におおよそ2倍の差があることが分かる。経年的な変化をみると、いずれの林道規格（幅員）においても土工量の増加がみられるため、その後の林道開設における土工量を改めて調べることにした。

土質について、森林整備保全事業標準歩掛（（社）日本治山治水協会・日本林道協会，2008）では、バックホウによる道路土工（土石）における地山の掘削積込（現場条件：普通）において、最も作業効率のよい砂・砂質土と、最も効率の悪い岩塊・玉石および軟岩（I）Aとの比較では、山積バケット容量0.8m³、旋回角度180°としたときの1時間あたりの土工量がそれぞれ39.4m³/h、27.3 m³/h、比率にしておおよそ1.4：1.0となる。このような土質の違いによる二酸化炭素排出量の増減も重要な要因となる。

土工量の解析にあたっては、2001年度に開設された全国の林道路線から32路線を対象として（Table 3）、各林道事業設計書から必要な値を得た。作業道については林野庁造林保全課（1998）による調査結果を用い

た。この調査では、1996年度に開設された166路線の造林作業路を対象としており、開設単価の平均値が13,178円/m、全幅員の平均値が3.2mの路線である。名称は作業路となっているが、林野庁（2009）の資料などでは、国庫補助事業の作業道として統計が取られている。

3.2 建設機械の燃料消費による二酸化炭素排出量

建設機械の機関出力1kW、運転1時間あたりの燃料消費量は、燃料消費率表（（社）日本治山治水協会・日本林道協会，2008）から求めることができる。しかし、路線の設計書では使用機械の会社名や型式を特定できず、機械の機関出力が得られないことから、林道の開設工事で設計上一般的に使用される建設機械の燃料消費量（Table 4）を使用することとした。また、軽油を燃料として消費したときの二酸化炭素排出量は、環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会（2006）の資料から得た（Table 5）。軽油の発熱量は年によって若干の変動があるが、資料（環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会，2006）中、最も新しい2004年の値を採用して、軽油1Lの燃焼による二酸化炭素排出量を2.594kgCO₂として以降の計算を行った。

Table 3 解析対象林道の概要
Outline of analyzed forest road

林道規格 Forest road standards	路線数 Sample Number	平均幅員 Average formation width (m)	平均事業費 (千円/m) Average cost (10 ³ yen/m)
1級 1st grade	10	5.1	247
2級 2nd grade	10	4.0	209
3級 3rd grade	12	3.0	116

Table 4 各建設機械の燃料消費量と林道規格ごとの各機械による燃料消費割合
Fuel consumption for three construction machines with different sizes and its proportion in each forest road grade

仕様 Specification	燃料消費量 Fuel consumption (L/h)	各機械による燃料消費量の割合 The fuel consumption proportion for each machine 林道規格 Forest road standards				
		1級 1st grade	2級 2nd grade	3級 3rd grade		
バックホウ Excavator	バケット容量 (山積) Bucket capacity (m ³)	0.45	10.5 *	0.00	0.00	0.18
		0.8	18.2 *	0.49	0.43	0.21
ブルドーザ Bulldozer	機械質量 Operating weight (t)	11	13.7 *	0.00	0.00	0.05
		15	17.5 *	0.12	0.09	0.04
ダンプトラック Dump truck	積載量 Load capacity (t)	4	7.3 *	0.00	0.00	0.45
		10	12.3 *	0.36	0.47	0.07

その他の機械による燃料消費割合を含んでいないため、燃料消費割合の合計は1.00にならないことがある。

The fuel consumption proportions for some grades do not add up to 1.00 because the consumptions of other types of machines have not been considered in the total value.

* 出典：各林道事業設計書 Reference source: Forest road project design documents

Table 5 軽油の燃焼による二酸化炭素排出量
CO₂ emission due to diesel oil combustion

軽油の発熱量 Calorific value of diesel oil (MJ/L)	軽油の炭素排出係数 Emission factor of diesel oil (tC/TJ)	二酸化炭素排出量 CO ₂ emission (kgCO ₂ /L)
37.77 *	18.73 *	2.594

* 出典：環境省 (2006) Reference source: Ministry of the Environment (2006)

4. 結果と考察

4.1 単位距離あたりの土工量と二酸化炭素排出量

解析対象路線の設計書から得た林道の単位距離あたり土工量を Table 6、Fig. 2 に示す。幅員 (級) による土工量の比率は、1 級:2 級:3 級が 2.9 : 1.7 : 1.0 となり、較差がさらに大きくなっていることが分かる。級ごとの変化を見てみると、前出の 1995 ~ 1997 年度に開設された林道 (林野庁, 1999) の土工量と比較して、1 級から順に 1.1、1.2、0.8 倍と 1、2 級で若干増加している。また、1985 ~ 1987 年度の林道 (澤口, 1996) の土工量との比較では、順に 1.9、1.3、1.2 倍に増加している。1999 年の報告書 (林野庁, 1999) によると、幹線林道では車両の走行性等を重視した平面・縦断線形がとられるようになってきていることが指摘されている。今回解析した 2001 年度開設林道の土工量が、1985 ~ 1987 年開設のもの比べて高規格になるほど土工量の増加が大きくなっているのは、このためであると考えられる。

さらに、Table 4 の燃料消費量および林道設計書における作業時間から単位距離あたりの燃料消費量を得た (Table 6)。この値と単位距離あたりの土工量から、燃料 1L あたりの土工量を得ることができる。この値を各級の民有林林道で比較すると、林道規格が下がるほど小さくなっている。これは、使用される機械の大きさが小さくなること (Table 4)、取り扱う土工量が少なくなること、作業場所が狭くなることなどによる施工効率の低下によるものと考えられる。また、各設計書では、土質ごとの掘削性を反映した作業時間が記載されているため、Table 6 の民有林林道における燃料消費量は、解析対象地の土質 (Fig. 3) による燃料消費量の違いを反映した値といえる。なお、Fig. 3 において「分類不能」となっている土質は、設計書で「砂、砂質土、粘性土、礫質土」とされているもので、「砂・砂質土」もしくは「粘性土・礫質土」のいずれかに分類されるものである。

国有林における土工量は、民有林林道における幅員と土工量の関係から求めることとする。両者の関係は Fig. 4 のようになり、以下の回帰曲線が得られる。

$$y = 2.21x^2 + 1.22x \quad (R^2 = 0.34) \quad (1)$$

このとき、 y : 土工量 (m³/m)、 x : 幅員 (m) とする。これら両変数の母相関係数 ρ について、 $H_0: \rho = 0$ 、 $H_1: \rho \neq 0$ 、有意水準 1% で検定を行ったところ、以下のとおり H_0 は棄却され、有意な相関があるとの結果を得た。

$$t_0 = |r| \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r^2} = 3.951 > t_{30}(0.005) = 2.750 \quad (2)$$

このとき、 H_0 : 帰無仮説、 H_1 : 対立仮説、 t_0 : 検定統計量、 r : 相関係数 (=0.585)、 n : サンプル数 (=32)、 $t_{30}(0.005)$: 自由度 30 の t 分布両側 1% 点の値とする。国有林では幅員 3.6m の林道が多くなっている (南方・秋谷, 2005) ことから、この幅員に対する土工量を (1) 式から求めると、33.0m³/m となる。幅員が 2 級と 3 級の間値であることから、単位燃料あたりの土工量も同様に中間的な値になると考え、0.90m³/L と仮定し、単位距離あたりの燃料消費量を 36.7L/m と算出した (Table 6)。

作業道の土工量については、林野庁造林保全課 (1998) の調査結果から得ることができる。この調査では、切盛土量として計上されている量を切土量に含めているため、切盛土量 1m³ を、切土量 1m³ と盛土量 1m³ に分割し、切土量が、盛土量と捨土量の合計に等しくなるとの仮定において調査値を改変し、土工量 8.5 m³/m を得た (Fig. 2, Table 6)。土量の内訳を各級林道と比較すると、切土量の占める割合は作業道と林道でほぼ等しいが、盛土量では作業道の方が大きな割合を示し、捨土量では各林道の方が大きくなっている。この理由は、林道では主に切土によって路面をつくっているために、掘削した土砂の一部しか盛土に使用されないのに対し、作業道では切盛均衡を意識して捨土が出ないようにし、切土と盛土の両方によって路面をつくっているためと思われる。この報告書において調査対象となった作業路の平均幅員が林道 3 級程度であることから、作業道における単位燃料あたり土工量を林道 3 級と同じ 0.85m³/L と仮定して、単位距離あたりの燃料消費量を 10.0L/m とした (Table 6)。

燃料消費量と Table 5 で得た二酸化炭素排出量から単位距離あたりの二酸化炭素排出量が得られる (Table 6)。作業道における排出量を 1 としたときの各林道の排出量は、3 級林道で 2.7、国有林林道で 3.7、2 級林

道で4.1、1級林道で7.1となる。土工量 (Table 6) では、作業道との比がそれぞれ2.7、3.9、4.5、7.8となり、排出量の比の方が小さくなっている。これは、単位燃

料あたりの土工量に差があり、規格が高くなるほど土工効率が高くなるためである。

Table 6 土工量・燃料消費量および二酸化炭素排出量
Earth volumes, fuel consumptions and CO₂ emissions

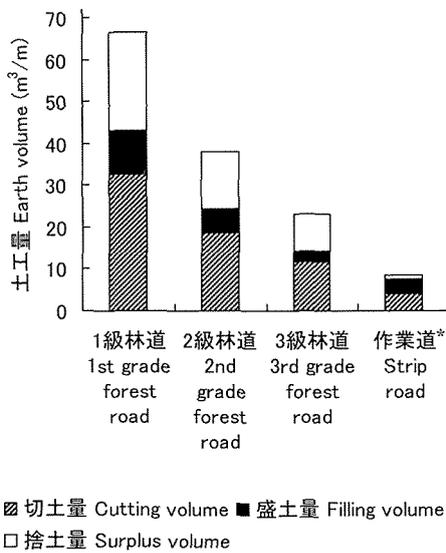
	土工量 Earth volume (m ³ /m)	燃料消費量 Fuel consumption (L/m)	単位燃料あたり土工量 Earth volume per unit fuel (m ³ /L)	二酸化炭素排出量 CO ₂ emission (kgCO ₂ /m)	
1級 1st grade	66.6 (7.8)	70.7	0.94	183.4 (7.1)	
民有林林道 Forest road in private forest	2級 2nd grade	38.0 (4.5)	41.0	0.93	106.4 (4.1)
	3級 3rd grade	23.0 (2.7)	27.1	0.85	70.30 (2.7)
国有林林道 Forest road in national forest	<u>33.0</u> (3.9)	36.7 **	<u>0.90</u>	95.11 (3.7)	
民有林作業道 Strip road in private forest	8.5 * (1.0)	10.0 **	<u>0.85</u>	25.98 (1.0)	

下線は推定値。The underlined values are estimated by the author of this paper.

* 出典：林野庁造林保全課 (1998) を筆者改

Reference source: Forestry Agency Silviculture and Protection Division (1998) modified by the author of this paper

** 土工量、単位燃料あたり土工量から算出。These values are calculated using the earth volume and the earth volume per unit fuel. 括弧は民有林作業道の値に対する比率を表す。The parenthesis values represent the ratios of each item to strip road values.



*出典：林野庁造林保全課 (1998) を筆者改 Reference source: Forestry Agency Silviculture and Protection Division (1998) modified by the author of this paper

Fig. 2. 林道・作業道の土工量
Earth volumes of forest and strip roads

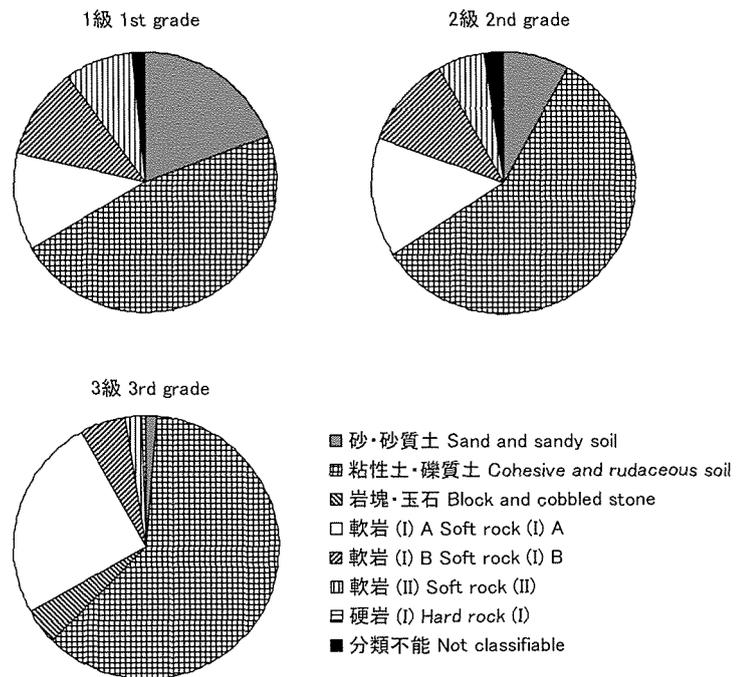


Fig. 3. 民有林林道開設地の土質
Soil properties of forest road site in a private forest

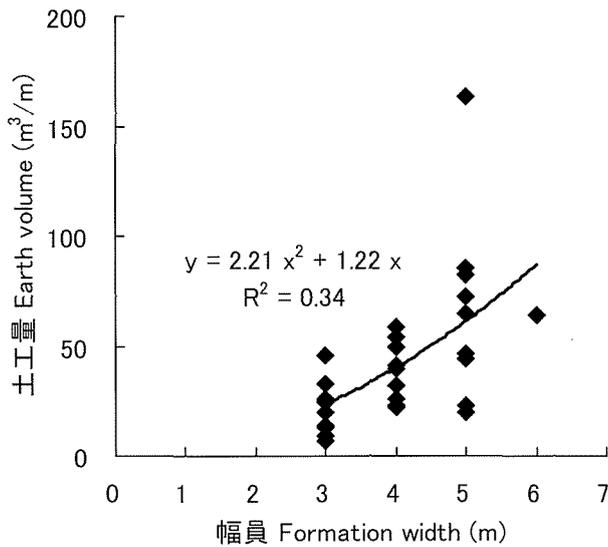
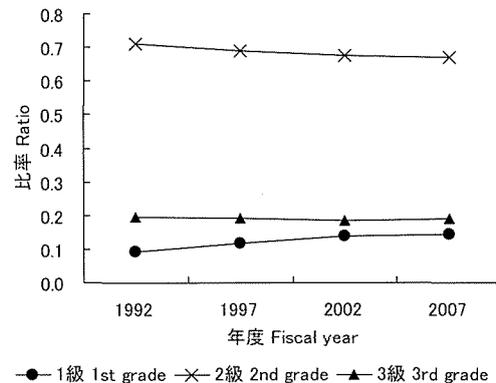


Fig. 4. 民有林林道における幅員と土工量の関係
Relationship between formation width and earth volume of forest road in a private forest

4.2 年間二酸化炭素排出量

民有林林道における各規格の林道延長は、年度末ごとの現況が明らかにされているものの、新規開設量における内訳は明らかになっていない。また、前年度からの延長の変化は、新規開設による増加だけでなく、公道への移管による減少もあることから、前年度との延長の差から新規開設量を求めることもできない。例えば、2007年度末の延長を前年度末の値と比較すると、1、2、3級の順に、87km、193km、100km増加しているが、この合計380kmは、2007年度における新規開設量436kmより小さく、この差の56kmが主に移管された林道延長であると思われる。各年度末における現存林道延長の比率を見てみると、最近15年間では、1級林道がやや増加し、2級林道でやや減少する傾向を示している (Fig. 5)。各比率の変化の程度が緩

やかであることから、2007年度における新規開設林道の比率にも、当年度末における延長の比率、つまり1級0.14、2級0.67、3級0.19を用いることとした。これによって、Table 7に示すとおり2007年度に開設された民有林各級林道の延長を推定することができ、単位距離あたりの二酸化炭素排出量 (Table 6) から、年間の二酸化炭素排出量を推定することができる (Table 7)。その結果、民有林林道で48.09ktCO₂、国有林林道で11.71 ktCO₂、林道からの合計が約60 ktCO₂であるのに対し、民有林作業道では97.64 ktCO₂となり、林道よりも多くの量が作業道の開設によって排出されていることが分かる。この推定値には、国有林作業道の開設量が含まれていないため、実際にはさらに多くの比率を作業道からの排出量が占めることになる。しかし、作業道の単位距離あたり二酸化炭素排出量が林道に比べて非常に小さい (Table 6) ため、開設量に占める比率0.87に比べ、排出量に占める比率は0.62と小さい (Table 7)。



出典: 林野庁 (2009) など Reference source: Forestry Agency (2009) and others

Fig. 5. 民有林林道における各規格の比率の変化
Changes in the ratio of each grade of forest road in private forest

Table 7 路網開設工事における燃料消費量と二酸化炭素排出量
Fuel consumptions and CO₂ emissions due to the construction of forest and strip roads

		開設量 Construction length (km/year)						燃料消費量 Fuel consumption (ML/year)	二酸化炭素 排出量 CO ₂ emission (ktCO ₂ /year)	
		内訳 (推定値) Itemization (Estimated value)								
		1級 1st grade	2級 2nd grade	3級 3rd grade						
林道 Forest road	民有林 Private forest	436	*	(0.10)	61	292	83	18.5	48.09	(0.31)
	国有林 National forest	123	*	(0.03)				4.51	11.71	(0.07)
民有林作業道 Strip road in private forest		3,764	*	(0.87)				37.6	97.64	(0.62)
合計 Total		4,323	*					60.7	157.4	

開設量は2007年度の値。The values of the construction length are for the year 2007.

* 出典: 林野庁 (2009) Reference source: Forestry Agency (2009)

括弧は合計値に対する比率を表す。The parenthesis values represent the proportions of each item to the total value.

4.3 今後の二酸化炭素排出量

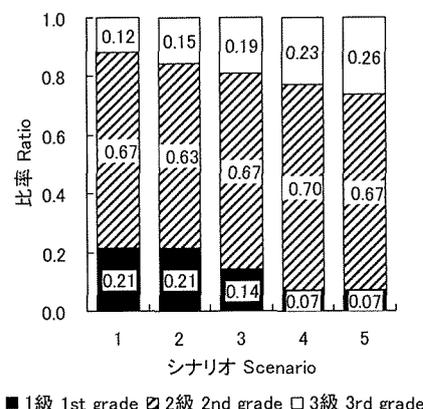
ここでは路網開設量の目標値から将来排出される二酸化炭素量を推定する。なお、林道、作業道とも排出量の推定にあたっては、単位燃料あたりの土工量が将来も変わらず、また、使用される機械の規格も変わらないものとする。実際には、建設機械の燃費の向上が日々進められているものの、その向上程度は未知数であるため、現在の機械を使用した二酸化炭素排出量を推定することとする。

推定のためには、今後の各規格林道の開設量が必要となる。現状では、高規格林道への偏重が開設単価の高騰を招き、林道新設延長が伸びない（澤口, 2007）ため、今後、整備目標を達成するためには、1級林道の開設延長比率を減少していく必要があると思われる。しかし、Fig. 5 で示したとおり、1級林道の比率は増加から横ばいの傾向で推移している。これらのことを勘案して、今後開設される各級林道の比率について、以下に示す5つのシナリオを想定することとした（Fig. 6）。想定では、排出量の負担が最も大きい1級林道の比率を中心に考えることとし、まず、1級林道の比率を現状の1.5倍として、その増分をすべて3級の比率から減少する場合（シナリオ1）、また、増分を2級と3級から均等に減少する場合（シナリオ2）、次に、各級とも現状維持の比率とする場合（シナリオ3）、さらに、1級を現状の半分として、減少分は2級と3級に均等に累加する場合（シナリオ4）、また、減少分をすべて3級比率に累加する場合（シナリオ5）である。事業費は級が下がるごとに小さくなる傾向があるため（Table 3）、各シナリオの遂行によって予想される開設コストも、シナリオ番号の順に低くなるものと思われる。

これらのシナリオを想定することによって、民有林林道の二酸化炭素排出量を Table 8 のとおり推定することができる。国有林林道、作業道については、想定したシナリオにかかわらず、目標達成のための二酸化炭素排出量は一定である。当然シナリオ1のときの排出量が最多、シナリオ5で最小となり、シナリオ3における合計値 19.74MtCO₂ に対して、それぞれ 0.65 MtCO₂ の増、0.63 MtCO₂ の減となった。民・国有林を合わせた林道からの排出量が多くを占めており、民有林林道からの排出量が最も少なくなるシナリオ5の場合でも林道からの排出量の比率が0.68となっている。

森林・林業基本計画では、施業タイプごとに目標とする森林の面積や蓄積を定めており、この誘導にあたっては、おおむね100年後を完了時期の目安としている。そこで、路網整備の目標達成期間を100年間として、この期間の年間排出量を求めることとする。整備目標に対する不足量（Table 1, 2）を100年間で達成するための年間開設量は、民有林・国有林林道がそれ

ぞれ約800km、約500km、作業道が約2,400kmとなり、現在の年間開設量と比べて林道ではいずれも非常に多く、作業道でやや少ない値となる。林道では現在の年間開設量と大きく乖離しているため、変化を緩やかにするために現在の開設量から毎年一定量増加していき、100年間で不足量が開設されるとする。年間開設量は Fig. 7 のように推移し、100年後の年間開設量は民有林林道で1,138km、国有林林道で876kmとなる。Fig. 1 から、これらの値はそれぞれ1998年、1983年と同程度の水準であることが分かる。同様に作業道も毎年一定量減少していくとすると、最終年の年間開設量は1,051kmとなる（Fig. 7）。このような推移によって路網開設を行ったときの年間排出量を Fig. 8 に示す。作業道の開設量は年々減少するものの、林道の開設量が増加するため、合計の年間排出量は増加傾向を示し、100年後の排出量は、シナリオ1で245.8 ktCO₂/年、シナリオ5で227.4 ktCO₂/年となる。2007年度の排出量 157.4 ktCO₂/年（Table 7）には国有林作業道の値が含まれていないために厳密な比較にはならないが、これらの値は、2007年度値の1.56～1.44倍になる。



四捨五入の関係で合計が1にならないことがある。

Some of the total values do not add up to 1.00 because of the rounding error.

Fig. 6. 各シナリオにおける林道開設比率
Ratios in three grades of forest road construction for five scenarios

5. おわりに

林道および作業道の開設工事に伴う二酸化炭素排出量の算出を行った。モータとエンジンを併用するハイブリッド式の建設機械が既に実用段階に入っており、近い将来には機械の稼働に伴う二酸化炭素排出量が劇的に減少することも十分考えられる。しかし、本研究ではこのような技術革新による燃費向上を検討せず、現在の状況で推移したときの値を求めているため、本研究の値は、想定される排出量の上限值として考えることができる。しかし、路網開設目標値を達成するためには、現状のおおよそ1.5倍の年間排出量が想定さ

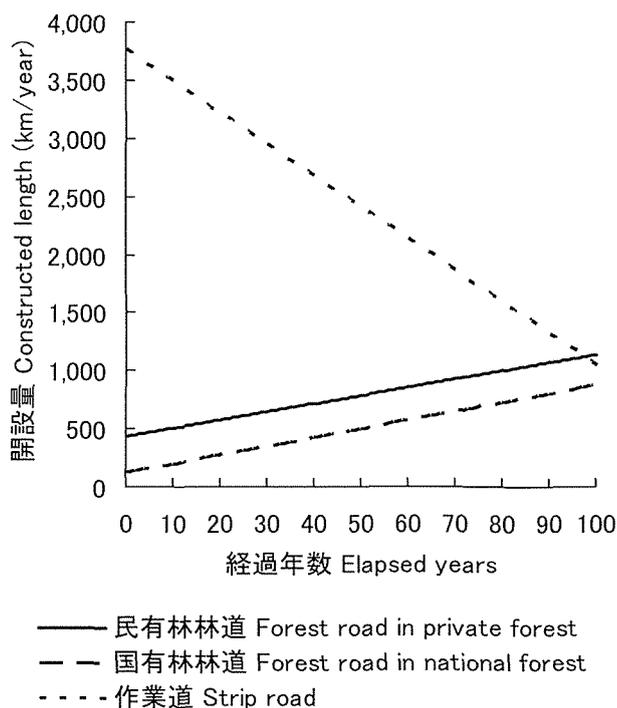


Fig. 7. 目標路網密度達成のための年間開設量
 Requisite road constructed length per year to achieve the target road density

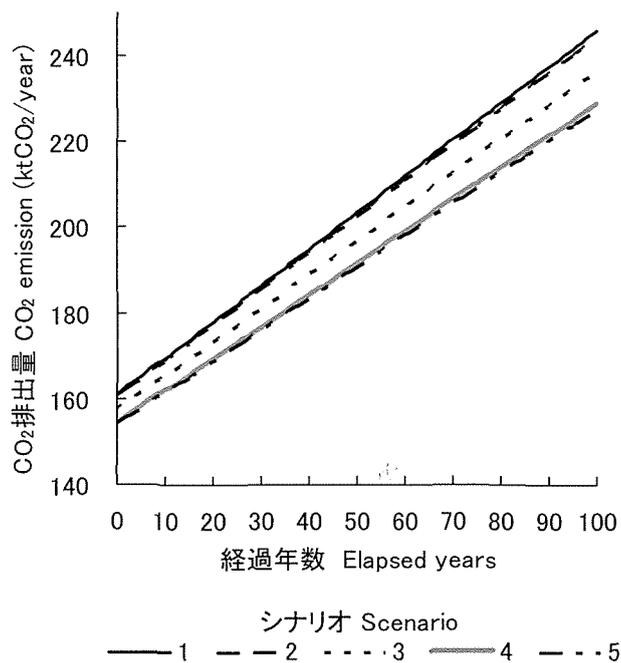


Fig. 8. 目標路網密度を達成するための二酸化炭素推定排出量
 Estimated requisite CO₂ emission for the achievement of the target road density

Table 8 目標達成のための燃料消費量と二酸化炭素排出量
 Requisite fuel consumptions and CO₂ emissions for the achievement of the target road density

		燃料消費量 Fuel consumption (GL)					二酸化炭素排出量 CO ₂ emission (MtCO ₂)				
		シナリオ Scenario					シナリオ Scenario				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
林道 Forest road	民有林 Private forest	3.62	3.58	3.37	3.17	3.13	9.388	9.280	8.739	8.212	8.109
	国有林 National forest			1.85					4.792		
	作業道 Strip road			2.39					6.210		
	合計 Total	7.86	7.82	7.61	7.41	7.37	20.39 (0.70)	20.28 (0.69)	19.74 (0.69)	19.21 (0.68)	19.11 (0.68)

括弧は林道からの排出量の比率を表す。
 The parenthetic values represent the proportions of the forest road value to the total value.

れ、燃費向上のための技術革新や土工量の低減などが今後の重要な検討項目となるだろう。さらに、燃料消費だけでなく、構造物の製造過程や、使用する建設機械の製造過程での二酸化炭素排出量も含めて考えると、さらに多くの量が排出されることとなる。これまでの報告(鈴木, 2001)では、林道では、燃料消費によって排出される二酸化炭素量は全体の2割以下で、8割以上は使用される製品などの製造過程で排出されると見込まれている。よって、路網開設に起因する総合的な二酸化炭素排出量は、本研究で示した値の数倍

程度になると予想され、今後、コンクリート製品などによる構造物の使用を抑えることも二酸化炭素排出量の削減に大きく貢献するといえる。また、LCAの考え方によれば、路網の使用時における排出も想定項目となり、トラック運材や、路網を使用した集材作業の効率をよくすることも重要な要因となる。小林(1997)は、路網の機能を輸送機能と集材機能に分けているが、前者は路網の基幹路線で、後者は末端の路線でより重要性が高くなるといえる。よって、路網の移動効率をよくすることで輸送機能を高め、走行による排出量を

削減することは基幹的な林道ほど重要になり、また、集材距離を短くして集材機能を高め、作業による排出量を削減することは作業道や作業路ほど重要になるといえる。路網は地形条件の厳しい山岳地に開設され、大きなコストもかけられないため、移動効率、集材作業効率ともその向上には限界がある。今後の検討として、林道では、谷筋の路線よりも目的地までの距離が短くなる(大橋・岡橋, 2007)稜線道や、移動効率を向上する循環路網の開設などが考えられる。また作業道では、施業地をとりまとめて対象地の面積や形状を各作業に適したものとし、路網配置効率を高くすることなどが考えられる。いずれの検討においても、各効率の上昇によって使用時の排出量を削減することができる。これらは同時に運材コストや作業コストの低減にもつながるものであり、これまでの低コスト化への検討が、二酸化炭素排出量削減にも効果的であるといえる。

本研究は、農林水産省プロジェクト研究「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発」における研究課題「森林施業に係る炭素収支モデルの開発」の成果を取りまとめたものである。

引用文献

- 一二三雅透・岩岡正博・斎藤寛 (2007) 路網開設作業のエネルギー消費量と影響を及ぼす要因, 日林発表データベース, 118, 314, http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jfsc/118/0/_contents/-char/ja/
- 一二三雅透・岩岡正博・峰松浩彦・内山研史・安田幸治・中澤昌彦 (2008) 林業作業におけるエネルギー投入量と CO₂ 排出量, 関東森林研究, 59, 277-208.
- 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会 (2006) “温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 エネルギー・工業プロセス分科会報告書” <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h1808/11energy.pdf>, (参照 2009-12-25).
- 小林洋司 (1997) 森林基盤整備計画論 林道網計画の実際, 日本林道協会, 205p.
- 南方康・秋谷孝一 (2005) 森林土木ハンドブック, (財) 林業土木コンサルタンツ, 1282p.
- 日本林道協会 (2008) 民有林森林整備施策のあらし林道施策編, 日本林道協会, 303p.
- (社) 日本治山治水協会・日本林道協会 (2008) 治山林道必携 (設計積算編) 平成 20 年版, (社) 日本治山治水協会・日本林道協会, 1970p.
- 大橋慶三郎・岡橋清元 (2007) 写真図解作業道づくり, 全国林業改良普及協会, 106p.
- 林野庁 (1999) 林道の設計手法の改善に関する調査報告書, 林野庁, 165p.
- 林野庁 (2006) “路網整備の考え方について”. <http://www.rinya.maff.go.jp/puresu/h18-6gatu/rinseisin/0627s4.pdf>, (参照 2009-12-25).
- 林野庁 (2009) 民有林森林整備施策のあらし, 林野庁, 281p.
- 林野庁造林保全課 (1998) 低コスト作業路整備指針策定調査報告書, 林野庁造林保全課, 105p.
- 澤口勇雄 (1996) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第 1 報) - 林道路線評価パラメータの特性 -, 森林総研研報, 372, 1-110.
- 澤口勇雄 (2007) 誰が作るのか高密度路網, 機械化林業, 640, 41-46.
- 鈴木秀典 (2001) 持続可能な森林管理のための基盤整備, 日林学術講, 112, 423.
- 安田幸治・岩岡正博・峰松浩彦・一二三雅透 (2008) 地拵えから主伐に至るまでの環境負荷物質インベントリ, 日林発表データベース, 119, 414, http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jfsc/119/0/_contents/-char/ja/
- (社) 全国森林土木建設業協会 (1998) 林道幅員が周辺植生等へ及ぼす影響に関する調査研究報告書, (社) 全国森林土木建設業協会, 110.