

博士論文

林内道路の路面侵食と適切な横断溝間隔に関する研究

宗岡 寛子

目次

1. 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 路面侵食と横断溝間隔に関する研究例	5
1.2.1. 適切な横断溝間隔の目安の検討	6
1.2.2. 路面侵食に影響を与える要因の解明と路面侵食量の予測	8
1.3. 本研究の目的と構成	13
2. 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実態の比較	17
2.1. はじめに	17
2.2. 調査方法	18
2.2.1. 調査地	18
2.2.2. 横断溝間隔実態調査	19
2.3. 結果と考察	20
2.3.1. 横断溝間隔の実態	20
2.3.2. 横断溝間隔の実態と縦断勾配	26
2.3.3. 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実態の比較	29
2.4. まとめ	32
3. 路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安の導出手法	34
3.1. はじめに	34
3.2. 「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出手法	36
3.3. 母集団の設定とサンプリング	41
3.4. まとめ	43
4. 路面侵食量のモデルと残差分布	45

4.1.	はじめに.....	45
4.2.	調査方法.....	46
4.2.1.	調査地.....	46
4.2.2.	計測方法.....	47
4.3.	結果.....	50
4.3.1.	路面侵食量予測モデルの推定.....	50
4.3.2.	残差分布.....	57
4.3.3.	母集団の設定と残差分布.....	62
4.4.	考察.....	69
4.4.1.	縦断勾配及び横断溝からの距離が路面侵食量に与える影響.....	69
4.4.2.	残差分布の現実的意味.....	70
4.4.3.	残差の空間的分布.....	71
4.5.	まとめ.....	76
5.	要補修率に応じた横断溝間隔の目安導出手法の具体化.....	78
5.1.	はじめに.....	78
5.2.	「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出手法の具体化.....	78
5.3.	まとめ.....	88
6.	開設費と補修費の和を最小化する要補修率の決定方法.....	90
6.1.	はじめに.....	90
6.2.	費用関数の導出.....	91
6.3.	費用関数を用いた最適要補修率の検討例.....	94
6.3.1.	設定条件.....	94
6.3.2.	要補修率の変化に伴う費用関数の変動.....	95
6.3.3.	縦断勾配の平均値 x_m の影響.....	100
6.3.4.	単価の比 B の影響.....	101

6.3.5. 維持管理期間 N_t の影響	102
6.4. まとめ	103
7. 総括	104
謝辞	106
引用文献	107
付録	118

1. 序論

1.1. 研究の背景

森林内の道路網を構成する道には多種多様なものがあるが、その機能の面に着目すれば以下の3種類に大別される。

- ① 山村の地域交通を担う社会資本として長期的に使用される道。
- ② 林業生産活動の基盤として長期的に使用される道。
- ③ 森林施業における集運材、造林等の一工程として作設され、一時的に使用される道。

一方行政的には、以下の3種類に大別される。

- ① 道路法の適用対象であり、道路構造令によってその構造が定められる「公道」
- ② 森林法に基づき全国森林計画及び地域森林計画で計画され、林道規程によってその管理や構造の基本的事項が定められる「林道」（日本林道協会 2008）
- ③ 「作業道」や「作業路」と言われるその他の道

この行政的な区分と上記の機能面からの区分とは必ずしも一対一の対応をしていない。その対応関係は、図 1.1 に示すように時代とともに変遷してきた。

「公道」は、時代に関わらず第一義的には山村の交通を担う社会資本としての役割を担ってきた。ただし、実態として林道を補って林業生産活動の基盤としての役割を果たす場合もあることが指摘されている（松本・北川 2000）。

「林道」は、1960年代頃までは森林鉄道に替わる林業生産活動の基盤としての性格を色濃く有していた（酒井 2011）。しかし高度経済成長期以降、山村の地域交通を担う社会資本的性格の強い林道が多く開設されるようになった（小林 1997, 酒井 2011, 鈴木 1973）。鈴木はこの現象を「林道の公道化」と表現している（鈴木 1973）。社会資本的性格の強い林道については、林業上の必要性や採算とは無関係に、通行の安全性や快適性、迅速性の確保が求められる（鈴木 1973）。そのため、この時代には林道の高規格化、高単価化が進行した（酒井 2011）。しかし、森林資源が充実し利用期を迎えた現在、再び林業生産活動の基盤として

の林道が求められており、平成 22 年度には林業生産活動の基盤としての位置づけを明確にした新たな林道規格として「林業専用道」が定義された（林野庁 2010a）。

一方「作業道」は、小林によれば、もともと「森林施業における集運材、造林等の一工程として臨時に設けられる仮設構造物」と概念され、その規格・構造は最低限のものであった（小林 1997）。しかし林道整備の遅れを補う必要性等から長期的な使用を前提とする「作業道」も開設されるようになり、その規格・構造、利用方法、使用限度などの実態は多様化してきた（小林 1997）。すなわち、「作業道」はかつて機能③を担う道であったが、林道が機能①へとシフトした空白を埋めるように、機能②を担う「作業道」も開設されてきたと言える。2000 年代に入ると「作業道は林業経営を合理的に継続していくための基礎的生産基盤である」（酒井 2004）といった捉え方がむしろ一般的となり、機能③を担う一時的な道は「作業道」ではなく「作業路」と表現される場合が多くなった（中澤 2005, 林野庁 2010b）。平成 22 年度には、林野庁の「路網・作業システム検討委員会最終とりまとめ」の中で「これまで一時的施設と位置づけられていた作業道も、長期にわたって使用していくことを前提に整備していくべきである」とされ、長期的な使用を想定した「森林作業道」規格が定義された（林野庁 2010b）。

以上のように、森林内に開設される道路の機能面からの区分と行政的な区分との対応関係は時代とともに変遷してきた。現在の対応関係は、表 1.1 のように整理することができる。近年の特筆すべき変化として、社会資本的性格を強めていた林道が再び林業生産活動の基盤として整備されようとしていること、また、作業道が林業生産活動の基盤として明確に位置づけられたことが挙げられる。それに伴い、公道的機能を果たす高規格化な林道、あるいは一時的な使用を前提とした最低限の構造の作業道とは異なる、林業生産活動の基盤としてふさわしい林道・作業道の構造について本格的な検討が必要となっている。林業生産活動の基盤として新たに定義された「林業専用道」や「森林作業道」にはそれぞれ作設指針が示されているものの、それらは基本的な事項を定めたものであり、個々の現場で判断が必要な部分も多い。またそれらの作設指針は完成されたものではなく、今後適宜見直しを行っている

くものとされている（林野庁 2010a, 林野庁 2010c）。

林業生産活動の基盤としてふさわしい林道・作業道の構造について検討を行う上で重要になるのは、開設費と将来の維持管理の負担（費用及び労力）を総合的に考慮することである。林道が社会資本的性格を強めていた時代には、その開設費は林業の収益のみでまかなうべきものではないと認識され（南方 1977）、高規格化、高単価化が進んできた。しかし、直接的な受益者が林業関係者に限られる林業生産活動の基盤としての林道・作業道の開設費は、実際には様々な公的補助が受けられるが、本来的には林業経営の中でまかなうべきものととらえられる。一方で、森林という過酷な環境下にある林道・作業道は自然的破壊を受けやすい存在であり、維持管理が行われることで初めて林業基盤としての機能を長期的に発揮することができる（鈴木 1973）。特に、構造が簡素で開設単価の低い道は自然的破壊を受けやすく、維持管理の負担が大きくなることが懸念される（酒井 2008）。その維持管理もやはり林業経営の中で実施する必要があるため、開設費と将来の維持管理の負担との総和が最小となるよう戦略的に道の構造を決定することが、林業経営上非常に重要であると言える。そのためには、ある構造を採用した場合に将来どの程度維持管理作業が必要になるのかという予測が必要になる。林道（酒井の論文中では、行政的区分に関わらず長期的に使用する林業用道路を「林道」としている）の維持管理費は林道網の目標密度決定に関与する費用として長期的には開設費以上に重要であることが酒井によって指摘されている（酒井 1987）が、林道・作業道の構造と維持管理の負担との関係解明は十分に行われていないのが現状である。

林道・作業道は開設後様々な形で劣化・損壊し、維持管理作業が必要となる。その例としては、路面侵食、切取法面からの土砂崩落（北原ら 1985, 1988, 山本 1992, 山本ら 1985）、溪流横断部に設けられる暗渠の閉塞や越流（近藤 1994, Minematsu & Akita 1987, 峰松・秋田 1988, 峰松ら 1988,）等が挙げられる。その中でも路面侵食は発生頻度の高い普遍的な問題であり、1.2.節に述べるようにその対策の提示や進行プロセスの解明を目的とした研究が国内外で多数行われてきた。路面侵食対策の基本は、横断溝を適切な間隔で配置して路面上

を流れる水を路面外に排除することであり，1.2.1項で述べるようにその適切な横断溝間隔に関する研究例は特に多い。しかし，その間隔で横断溝を配置した場合に将来的に必要な路面補修の負担について言及した研究例は見当たらない。そこで本研究では，林業生産活動の基盤として開設される林道・作業道（以後，まとめて「林内道路」と称する。）を対象に，横断溝間隔と将来の路面補修の負担との関係に着目することとした。

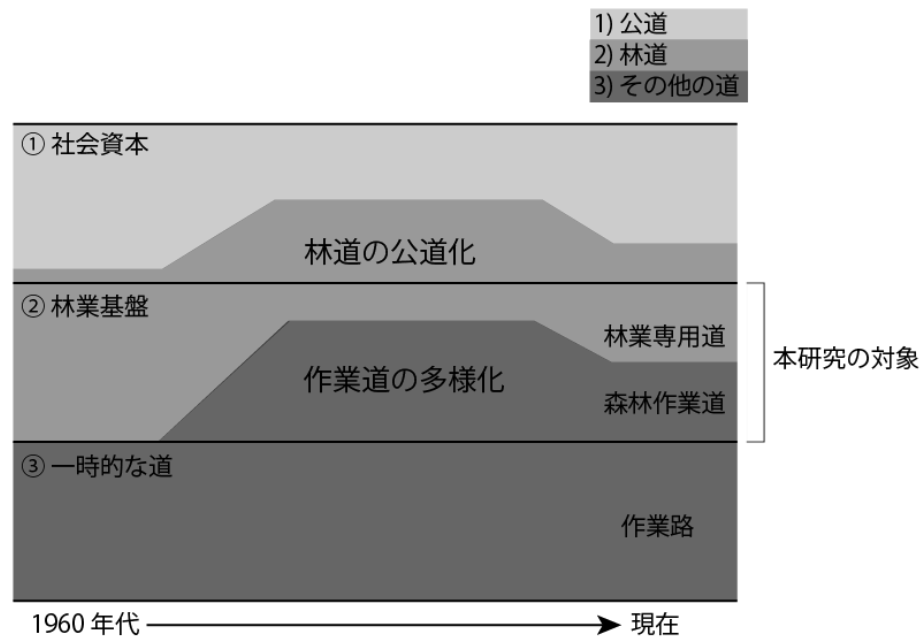


図 1.1 森林内の道路の機能面からの区分と行政的区分との対応関係の変遷

表 1.1 林内道路の種類

種類	位置づけ	使用期間	規格の規程	設計車両 (想定する通行車両)
公道	社会資本・林業基盤	長期的	道路構造令	普通自動車
林道	1級	林業基盤・社会資本	林道規程	普通自動車
	2級	林業基盤・社会資本	林道規程	普通自動車
	林業専用道	林業基盤	林道規程 林業専用道作設指針	普通自動車(10tトラック) 大型林業機械
3級	林業基盤・社会資本	長期的	林道規程	小型自動車
作業道	森林作業道	林業基盤	森林作業道作設指針	小型トラック・林業機械
	その他	林業基盤	なし	4~6tトラック・大型林業機械 小型トラック・林業機械
作業路	森林施業のツール	一時的	なし	林業機械

1.2. 路面侵食と横断溝間隔に関する研究例

侵食によって林内道路の路面状態が悪化すると、通行車両の補修費及び燃料消費量が増加したり走行速度が低下したりする（岩川・高田 1969, 上飯坂ら 1968, 南方ら 1986）。さらに路面侵食が進行すれば林内道路の通行自体が困難となる。また、路面侵食によって流出する土砂は周辺の溪流の水質に影響を及ぼす（Beschta 1978, Brown & Krygier 1971, 福嶋 1982, Lane & Sheridan 2002, 李・峰松 1997, Motha *et al.* 2003, 呉・井上 1998, 吉幸ら 2001）。Ward らは路面侵食がもたらすこれらの影響を、onsite damage（林内道路の機能低下・喪失）と offsite damage（周辺環境への影響）として整理している（Ward & Seiger 1983）。路面侵食に関わる研究は onsite damage の防止と offsite damage の防止という 2 つの問題意識から取り組まれてきた。本研究は林業経営の立場から主に onsite damage の防止を目的として横断溝間隔を検討するものであるが、路面侵食のプロセスの解明に関わる研究は offsite damage 防止の観点から取り組まれたものも多い。そこで、以下ではそれらも含めて既往の研究を振り

返った。

なお、以降で使用する次の用語は、「自然科学の統計学」（東京大学教養学部統計学教室 1992）を参考に以下のように定義する。

要因・・・ある量（例えば「路面侵食量」）に影響を与える条件（例えば「縦断勾配」，「横断溝からの距離」，「土質」など）。

水準・・・個々の要因の状態。例えば「縦断勾配」という要因であれば，5%，6% と言った数値，あるいは「5～10%」，「10～15%」という区分が水準にあたる。

モデル・・・ある量（被説明変数）を，それに影響を与えるいくつかの要因を説明変数とする線形式と，それらの要因で説明できない部分（残差 ϵ ）の和の形で表現したもの。

例えば，要因 x ， y の影響を受ける量 z を表現するモデルは $z = ax + by + c + \epsilon$ といった形で表される。

因子・・・要因のうち，モデルの中で説明変数として取り上げられるもの。

1.2.1. 適切な横断溝間隔の目安の検討

路面侵食に関わる既往研究は，路面侵食対策の提示を直接的な目的とするものと，それを間接的な目的としつつ路面侵食という現象自体の理解に重点を置いたものとの大別される。我が国に先行して林内道路の開設が進んだ米国や欧州ではその維持管理や周辺環境への配慮が喫緊の課題となり（Packer 1967），路面侵食対策の提示を目的とする研究が 1950 年代ころから進められてきた。路面侵食対策の基本は適切な間隔で横断溝を配置し，路面流下水を路面外へ排除することである。その適切な横断溝間隔の目安は縦断勾配を因子とした以下のような形の式で示されている（Kochenderfer 1970, Packer 1967, Trimble & Weitzman 1953）。

$$y = \alpha x^{-\beta} \quad 1.1$$

ただし， x は縦断勾配 $\tan \theta$ （ただし θ は路面の傾斜角）， y は横断溝間隔 [m]， α と β は

経験的に求められる係数である。

日本国内でも、堀らや南方によって林内道路の路面侵食に関する海外文献が翻訳され（堀・市原 1970, 南方 1973）、適切な路面排水の重要性が認識されることとなった。それ以降、適切な横断溝間隔に関する研究が数多く行われてきた。初期には、横断溝が持つ側溝水排除機能を重視し、側溝の限界流量に基づいて適切な横断溝間隔を検討した研究例も見られる（藤原 1979, 豊田 1977）が、その後行われた多くの研究例は、欧米と同様に路面侵食防止の観点から 1.1 式型の横断溝間隔の目安式を検討したものである（出来ら 1988, 伏見 1980, 1982, 市原・福田 1982, 市原ら 1974, 峰松 2002, 峰松・南方 1982, 峰松ら 1983a, 1983b, 中尾 1980, 酒井ら 1982, 1983）。目安式導出のアプローチは研究例によって様々だが、以下のようなものが代表的である。まず実際の林内道路上の複数の地点において「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の 2 因子と「路面侵食量 z （侵食によって路面に形成される溝の深さ [m] や断面積 [m²）」を計測し、それらの関係を表す回帰式を求める。そして許容する最大の路面侵食量 γ （単位は路面侵食量 z に合わせて [m] あるいは [m²]。以後「許容水準 γ 」と称する。）を設定し、その回帰式上で $z = \gamma$ となるときの「横断溝からの距離 y_{limit} [m]」を、「縦断勾配 x 」に応じた横断溝間隔の目安とするものである。このように各研究例では実際のデータに基づく経験的なアプローチにより 1.1 式型の目安式を検討している。そのため、提案された目安式の係数 α 、 β の値は、各研究例の調査地やデータ計測方法の違いを反映して多様である。それに対して、係数 α 、 β の物理的な意味を検討することで、より普遍的な目安式を示す試みも行われている。峰松らは河村の流砂量式（Komura 1976）を基礎として係数 α 、 β の物理的な意味を検討し、 β の理論的な最小値を求めた（峰松ら 1983a）。中尾は Horton の斜面侵食理論をもとに係数 α 、 β の物理的な意味について検討を行っている（中尾 1980）。また、峰松はいくつかの研究例で提案されている目安式の係数 α と β の間には共通の関係があると指摘し、その関係を用いてそれらの研究例が提案する目安式の下限值を表す式（すなわちそれらの研究例が提案する目安の中で最も安全側をとった目安）を提案した（峰松 2002）。これ以降、国内では適切な横断溝間隔に関す

る研究例は見られない。

上記のような横断溝間隔に関する検討のほかには路面侵食対策の提示を目的とした研究例としては、路面からの土砂流出を抑制するための路面被覆材料の検討 (Burroughs & King 1989, 宮前ら 2013, 小倉ら 2011), 路面侵食を抑制する工法の考案やその効果の検証 (堀内 1980, Muneoka *et al.* 2014a, 大河原 1986, 笹ら 1986, 矢部ら 2010, 2014) などが見られる。

また、路面侵食対策の費用対効果に着目した研究も行われている。例えば Madej らは、廃道後の作業道路路面から流出する土砂量を削減するための処理方法について、費用の制約の中で削減効果を最大にする観点から検討を行った (Madej *et al.* 2006)。Thompson らは、流出土砂量削減効果の最大化と費用の最小化という相反する 2 つの目的が与えられた中で路面侵食対策を選択するための意思決定支援手法を検討した (Thompson *et al.* 2010)。しかし、実際に路面侵食対策の費用対効果を検討するためには、対策をとった場合の効果が定量的に把握されていることが前提となるが、対策の効果については未解明の部分も多い。そのため上記の研究例では対策の効果については仮定を置いてシミュレーションを行っている。すなわち、費用対効果の良い対策を具体的に示すというよりは、コストの最小化とベネフィットの最大化という相反する 2 つの目的が与えられた場合の意思決定の方法論を中心とした議論となっている。一方日本国内では、出来らが開設費と補修費の和を最小とする観点から路面侵食対策のあり方を検討しているが (出来ら 1989), それ以外には費用を考慮して対策のあり方を検討した研究例は見られない。

1.2.2. 路面侵食に影響を与える要因の解明と路面侵食量の予測

具体的な路面侵食対策として横断溝間隔の目安の検討が行われる一方、路面侵食という現象自体をより深く理解するための研究も並行して進められてきた。路面侵食は多くの要因の影響を受ける複雑な現象であり (Luce & Wemple 2001), その進行速度は空間的ばらつきが極めて大きいことが報告されている (Luce & Black 1999, Sheridan & Noske 2007, Stafford 2011)。そのため、このばらつきを説明する影響要因の解明を目的とした研究が数多く行わ

れてきた（例えば Ichihara *et al.* 1996a, Luce & Black 1999, Reid & Dunne 1984, Ziegler *et al.* 2001b）。なお、路面侵食の程度を定量的に評価する指標としては、「路面に形成された侵食溝の深さや断面積」と「路面外への流出土砂量」の2つがある。路面侵食がもたらす影響のうち、林内道路の機能低下・喪失（onsite damage）に注目すれば主に前者が問題となるが、周辺環境への影響（offsite damage）に注目すれば後者が問題となる。前項で取り上げた横断溝間隔に関する研究例は前者を指標として用いたものが多いが（例えば出来ら 1988, 伏見 1980, 1982, 市原・福田 1982, 市原ら 1974, 中尾 1980, 酒井ら 1982, 1983）、影響要因の解明を目的とした以下に挙げる研究例の多くは、offsite damage に対する問題意識から流出土砂量を指標として用いている。

既往研究で路面侵食に影響を与える要因として挙げられているものは、図 1.2 に示すように階層的に整理される。路面侵食の進行速度は、最も直接的には、路面流下水が路面に及ぼす「掃流力」と「路面の受食性」によって決まる（Luce & Black 1999）。路面流下水の掃流力は、「路面の縦断勾配」と「水深」の関数である。1.2.1.項で述べたように、多数の既往研究において横断溝間隔の目安が縦断勾配の関数として検討されているのもそのためである。一方「水深」は「路面流下水の流量」と「水路（路面においては主に轍）の形状」によって決まる。この「路面流下水の流量」を路面侵食の進行を決定づける主要な要因ととらえ、「路面流下水の流量」と流出土砂量との関係を検討した研究例も多い（福嶋ら 1984, 古谷ら 1982, 1983a, 1983b, 1984, 1986, Muneoka *et al.* 2014b, Reid & Dunne 1984, 鈴木ら 1991）。路面流下水は「ホートン型地表流（路面上に供給された雨水のうち、路面に浸透しきれない分が地表流として流出したもの）」と「遮断流（一旦林地斜面に浸透し透水層を流下してきた雨水が、林内道路の切取法面で遮断されて路面上へ流出したもの）」の2成分からなる（Negishi *et al.* 2008, Swanson & Dyrness 1975, Wemple & Jones 2003）。前者の「ホートン型地表流」の流量は「降雨強度」、「路面流出率」、「集水域となる路面面積」の関数となる。「路面流出率」とは、路面上に供給される雨水量のうち、浸透しきれずに地表流として路面を流下する水量の割合である。数々の研究例で路面流下水の流量観測が行われこの路面流出率

の値が求められているが、観測地や降雨条件によってばらつきが大きい (Croke *et al.* 1999, 林ら 1982, 1984, 1986, 1987, 市原 1987, Jordan & Martinez-Zavala 2008, Luce & Cundy 1994, 宮崎ら 1981, Muneoka *et al.* 2014b, 長塚ら 2014, 梅田ら 2005, Ziegler & Giambelluca 1997)。

「ホートン型地表流」の流量を決定づける 2 つ目の要因である「集水域となる路面面積」は、林内道路の幅員がほぼ一定であるとすれば、上流側横断溝からの距離に比例する。つまり、路面侵食対策として適切な間隔で横断溝を配置することは、集水域となる路面面積を制限し、ホートン型地表流の流量をコントロールすることを意味する。一方、路面流下水を構成するもう 1 つの成分である「遮断流」の流量は「集水面積」、道の上側斜面の「土質」、「透水層の厚さ」、「斜面傾斜」、「降雨強度」、「先行降雨」、「切取法高」等の影響を受けるとされている (Coe 2006, Negishi *et al.* 2008, Wemple & Jones 2003)。実際に遮断流の流量を観測した研究例は少数であり、結果は各研究例で大きく異なる。アメリカ北西部及びマレーシアにおける観測例では、遮断流が路面流下水の重要な構成成分となっていると報告されている (Negishi *et al.* 2008, Wemple & Jones 2003)。一方、タイ北部における観測では、遮断流の寄与はごく小さく、路面流下水のほとんどはホートン型地表流であると報告されている (Ziegler *et al.* 2001a)。日本国内における研究例では、尾根付近を通る路線に比べ尾根から離れた位置にある路線では路面流下水に占める遮断流の割合が大きくなる傾向があるとの報告がある (Ichihara *et al.* 1996a)。一方、遮断流の発生と集水面積との間に明確な正の相関は見られないとの報告も見られる (長塚ら 2014, 宗岡ら 2015)。遮断流の発生は路面侵食の進行に大きな影響を与えると指摘されているが (Negishi *et al.* 2008, 野口ら 2014)、未だ研究例が少なく未解明の部分が多いと言える。

一方、路面侵食の進行に直接的な影響を与えるもう 1 つの要因である「路面の受食性」にも様々な二次的要因が影響を与えることが明らかとなっている。路面の受食性は、「土質 (工学的土質分類及び母材による分類) (福嶋ら 1984, 市原 1981, Stafford 2011, Sugden & Woods 2007) や路面上に存在する「流送可能土砂の量」 (Ziegler *et al.* 2001b)、路面の「被覆状態」 (Burroughs & King 1989) 等の影響を受ける。「流送可能土砂」とは、他の土粒子との結合

が緩く、路面流下水によって容易に流送される状態にある土粒子である。流送可能土砂は、「雨滴衝撃」(Ziegler *et al.* 2000) や「車両の通行」(Bilby *et al.* 1989, Reid & Dunne 1984, Sheridan *et al.* 2006, Sheridan & Noske 2007, Ziegler *et al.* 2001b), 「路面を均すメンテナンス」(Fahey & Coker 1989, Luce & Black 1999, Stafford 2011, Sugden & Woods 2007, Ziegler *et al.* 2001b) 等によって土粒子同士の結合が緩められることで供給されることが明らかになっている。この流送可能土砂は降雨の初期に一気に流出するため、路面流下水中の土砂濃度は降雨初期に急激に高まり、その後低下することが報告されている(井上ら 1999, Jordan & Martinez-Zavala 2008, Ziegler *et al.* 2001b)。

なお、路面侵食による *offsite damage* (周辺環境への影響) は単に土砂が路面外へ流出するだけでは発生せず、その土砂を含む排水が斜面で浸透しきれずに地表流として溪流へ到達することで初めて発生する。そのため、溪流からある程度の距離をとって林内道路を配置することが *offsite damage* を軽減する対策として挙げられており、その適切な距離(バッファゾーンの幅)について検討が行われている(Megahan & Ketcheson 1996)。路面からの排水が地表流として斜面を流下する距離は、実験的に、あるいは排水先斜面に形成された侵食溝の長さをもとに検討されており、排水の流量や横断溝の種類、排水先斜面の状態(傾斜や植生、流下を妨げる障害物の有無等)の影響を受けることが報告されている(Croke & Mockler 2001, Hairsine *et al.* 2002, Lane *et al.* 2006, Megahan & Ketcheson 1996, Takken *et al.* 2007)。一方日本国内においては、土地所有者の承諾など様々な制約により、溪流から十分なバッファゾーンをとって林内道路を配置することが困難な場合も多い。臼田らはそのような場合の対策として、横断溝の流末に沈砂池を設けて排水に含まれる土砂を沈殿させる方法の有効性を検証した(臼田ら 2014)。

このように、路面侵食による流出土砂量には様々な要因が影響を与えることが報告されているが、米国では多数の要因を因子とした経験的な流出土砂量予測式 USLE (Universal Soil Loss Equation) (USDA 2009) や、物理モデルに基づいて流出土砂量を予測する WEPP (Water Erosion Prediction Project) (USDA 2015) が構築され、改良が重ねられている。この USLE や

WEPP を日本国内における林内道路からの流出土砂量予測に適用する試みも行われている（有賀ら 2006, Ichihara *et al.* 1996b）。しかし、これらによる予測と実際に観測される流出土砂量の間には大きな差があるという報告も見られ（有賀ら 2006, Stafford 2011）、流出土砂量の予測精度は未だ満足なものではないと言える。これは、各因子の影響の大きさが予測式の中で正確に表現されていないことや、予測式の中で因子として取り上げられていない潜在的な影響要因が存在することなど、予測式の不完全さが原因の 1 つと考えられる。また、予測式を用いて流出土砂量を予測するためには、予測を行う対象地における各因子の水準を正確に把握して予測式に代入する必要がある。それが困難であることも、流出土砂量の予測精度が低くなる原因の 1 つと考えられる。

このように流出土砂量予測の困難さが示唆されているが、路面侵食の程度を表現するもう 1 つの指標である「路面に発生する侵食溝の深さや断面積」の予測もまた容易ではないことが示唆されている。1.2.1.項で述べたように、横断溝間隔の目安を導出することを目的として「縦断勾配」及び「横断溝からの距離」の 2 因子と「侵食溝の深さや断面積」との関係を表す回帰式が求められているが、「侵食溝の深さや断面積」はばらつきが大きく、それらの因子との間に明瞭な相関が見られなかったとの報告が見られる（伏見 1989, 酒井ら 1982）。これは、実際の林内道路の路面では、侵食溝が深まる場所がある一方でわずかな勾配変化によって流下してきた土砂が堆積する場所もあることや（藤井ら 1982a, 峰松ら 1983b）、車両の通行による沈下や轍の形成、車両のスリップなども路面の形状に影響を与えること（伏見 1989）などが原因として考えられる。また、開設直後に軽微な侵食溝が形成された場所ではそれが発達する一方で、長期間路面の状態に変化がない場所も多いという報告もある（藤井ら 1982b）。わずかな勾配変化、車両のスリップ、開設直後の軽微な侵食溝形成等は、事前の把握や予測がほとんど不可能な偶然的要因とも言える。それらの影響を受ける侵食溝の深さや断面積を高精度で予測することは非常に困難であると推察される。

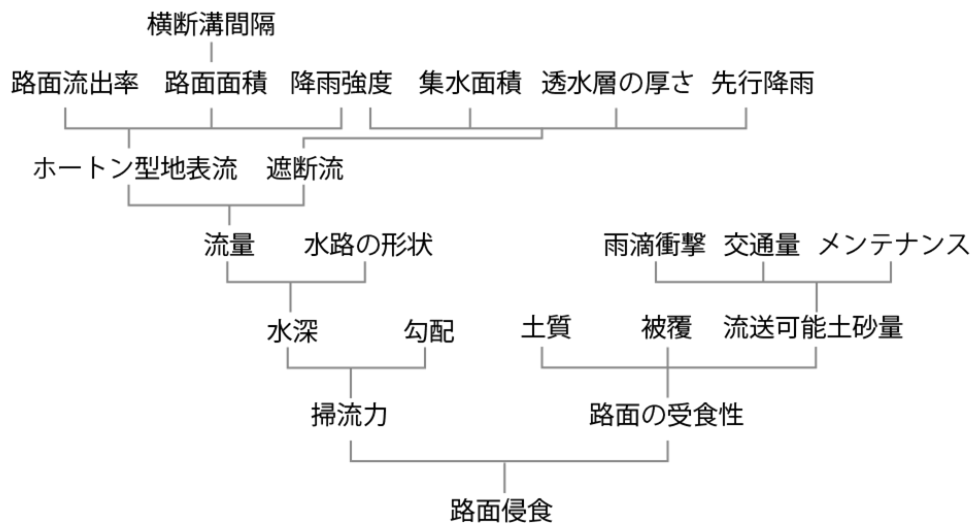


図 1.2 路面侵食に影響を与える要因

1.3. 本研究の目的と構成

1.2.2.項で述べたように、路面侵食は多数の要因の影響を受ける複雑な現象であることが既往研究によって指摘されている。一方、1.2.1.項で述べたように、路面侵食防止のための「適切な横断溝間隔の目安」は、多数の要因の中でも「縦断勾配」及び「横断溝からの距離」の2因子を用いたシンプルな路面侵食量予測式（回帰式）を基に検討されてきた。実際に林内道路を開設する際に多数の要因の水準を正確に把握することは困難な場合が多いため、容易に把握できる少数の因子からなる回帰式を基に横断溝間隔の目安を導くという既往研究の方針は、目安の実用性を考慮すれば一定の合理性があると言える。しかし、多様な要因の影響を受ける路面侵食量について少数の因子からなる回帰式を構築した場合、因子で説明できない残差の分散が非常に大きくなる可能性がある。この残差の分散については Packer (1967) に言及が見られる程度で、定量的に把握されているとは言い難いのが現状である。仮にその分散が無視できないほど大きなものであるとすれば、既往研究における「適切な横断溝間隔の目安」には以下のような問題が指摘できる。

1 点目は目安の基礎となる回帰式の普遍性の問題である。既往研究では、1 路線ないしは

十数路線を調査対象路線として設定し、そこで得た路面侵食量データから「適切な横断溝間隔の目安」の基礎となる回帰式の推定を行っている。しかし、「縦断勾配」及び「横断溝からの距離」の2因子以外にも様々な要因が路面侵食量に大きな影響を与えるとすれば、それらの2因子が同じであっても、データを採る地点によって観察される路面侵食量は大きくばらつくことになる。すなわち、データを収集する際のサンプリングの仕方（調査対象路線の選定、あるいは対象路線内での計測点の設定の仕方）によって推定される回帰式は大きく変わり得る。その回帰式を基に提案されている横断溝間隔の目安が、様々な条件下で開設される林内道路に対して普遍的に適用できるものであるとは考え難い。

2点目は、「適切な横断溝間隔の目安」に従って横断溝を配置した場合の将来の路面補修の負担予測が行われていないという問題である。2因子からなる回帰式に対して実際の路面侵食量が大きくばらつくとすれば、その回帰式を基にした「適切な横断溝間隔の目安」に従って横断溝を配置しても、許容水準を大きく超える侵食が発生する区間が少なからず存在することになる。したがって、回帰式を基にした「適切な横断溝間隔の目安」は「許容水準を超える侵食を確実に防止するもの」ではなく、「その発生確率をある程度以下に抑制するもの」に過ぎず、路面補修が必要になる区間もあることを前提として用いるべきものと位置づけられる。しかし、「適切な横断溝間隔の目安」を検討した既往研究で、それを適用した場合の将来の路面補修の負担について言及したものは見当たらない。1.1. 節で述べたように、林業生産活動の基盤となる林内道路の開設費及び維持管理費は本来的に林業経営の中でまかなうべきものととらえられる。そのことを念頭におけば、林業経営上真に「適切な」横断溝間隔とは、開設時の横断溝設置費用と将来の路面補修の負担の総和を最小化するものと言える。したがって横断溝間隔の目安は、それを適用した場合に将来必要となる路面補修の負担予測とともに示される必要がある。

これらの問題を解決するためには、大量の路面侵食量データが必要となる。様々な林内道路で多点的に路面侵食量データが収集され、それがデータベースとして蓄積されれば、その中から必要なデータ（これから開設する林内道路に類似した条件下にある既存林内道路で

収集された路面侵食量データ)を抽出して回帰式の推定に利用することができる。それによって、個々の林内道路により適した横断溝間隔の目安が得られると考えられ、1点目に挙げた問題点を改善することができる。また、2点目の問題点に対しては、大量のデータを用いて回帰式を推定すれば、実際の路面侵食量データが回帰式に対してどのようにばらつくのか(残差の分布)を把握することができる。それによって、ある間隔で横断溝を配置した場合に許容水準を超える侵食が発生する場所がどの程度出てくるのかを確率的に予測することができ、「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」が得られると考えられる。現状では、路面侵食量のデータ収集には多大な労力を要し、個々の研究者が得られるデータ数は限られている。既往研究で上記の問題点が残されてきた背景には、そのようなデータ数の制約があると推察される。しかし近年、地上及び航空レーザー測量、画像解析等の計測技術の発達はめざましく、森林分野への応用も進められている。(遠藤ら 2012, 斎藤ら 2009, 鈴木ら 2006)。将来的にはこれらの技術の活用により、大量の路面侵食量データが容易に得られるようになる可能性は十分にある。そこで本研究では、そのような将来を見据え、大量のデータを活用して「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を確立することを目的とした。

本研究の構成は以下の通りである。まず第1章では、近年林道・作業道が長期的な利用を前提とした林業生産活動の基盤として整備されるようになり、開設から維持管理までを総合的に考えて適切な構造を検討する必要性が生じているという背景を述べた。そして、路面侵食の問題に注目し、大量のデータを活用して「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を確立することを目的として設定した。第2章では、既往研究で提案されている「適切な横断溝間隔の目安」と、実際の林内道路で観察される横断溝間隔の実態とを比較し、どのような違いがあるかを検討した。それによって、本研究の目的である「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」導出の必要性を確認した。第3章では、確率と期待値の考え方を応用し、大量のデータを活用して「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を提案した。その手法で実際に横断溝間隔の目安を導出す

るためには、少数の因子からなる路面侵食量予測モデルの残差が、何らかの確率分布に従って発生することが前提となる。そこで第4章では、実際の林内道路で計測した路面侵食量のデータを用いて2因子からなる路面侵食量予測モデルを推定し、残差が従う確率分布を明らかにした。第5章では、第4章の結果を用い、第3章で提案した「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」導出手法を具体化した。第6章では、開設時に横断溝の設置にかかる費用と将来路面補修にかかる費用の和を最小にするという観点から、適切な横断溝間隔の目安を選択する方法を提案した。そして第7章で本研究の総括を行った。

なお、本研究では、コンクリート製横断溝、鋼製横断溝のほか、ゴム板や丸太等の安価な資材を利用した路面排水施設や素掘りの横断溝等、路面流下水を路面外に排除する目的で設けられる排水施設全般を「横断溝」と称することとする。

2. 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実態の比較

2.1. はじめに

第1章で述べたように、これまで多数の既往研究で、「縦断勾配」及び「横断溝からの距離」の2因子からなる回帰式を基に1.1式型の「適切な横断溝間隔の目安」が検討されてきた。提案された目安はデータ計測方法や調査対象地の違いを反映して各研究例で異なっている。それに対して峰松は、それらの目安の下限值（すなわち最も侵食が助長される条件下で必要とされる横断溝間隔）を表す式を導出し、横断溝間隔の目安として示した（峰松 2002）。その方法は以下のようなものである。まず、それらの既往研究で提案された第1章1.1式型の横断溝間隔の目安式の係数 α と β に以下のような共通の関係を見出した。

$$\alpha = 2.17\beta^{-2.74} \quad 2.1$$

2.1式を用いて1.1式から α を消去し、それを β で偏微分してゼロとおき、 β について解くことで横断溝間隔 y を最小とする β を求めた。その β を1.1式に代入することで最小横断溝間隔 y_{\min} を表す以下のような式を示し、これを横断溝間隔の目安式とした。

$$y_{\min} = 2.17 \left(\frac{-2.74}{\log x} \right)^{-2.74} x^{2.74/\log x} \quad 2.2$$

ただし、 x は縦断勾配 $\tan \theta$ （ θ は路面の傾斜角）である。この目安は、それまでの既往研究で提案されていた多様な横断溝間隔の目安を、安全側をとるという方針で統合して一般化を図ったものであり、これまでわが国で提案された横断溝間隔の目安の中でも代表的なものと言える。

一方、長年丁寧な維持管理が行われている林内道路においては、開設当初に設けられる

鋼製あるいはコンクリート製横断溝のほかに、開設後に追加されたと考えられる簡易な素掘り横断溝等が観察される場合がある。それらの簡易な横断溝は、維持管理の中で著しい侵食の進行が観察された場所などに必要に応じて追加されたものと考えられる。したがって、そのような林内道路で観察される横断溝配置は、ある程度実際の必要性を反映したものになっていると考えられる。

そこで第2章では、長年維持管理が行われてきた林内道路で観察される横断溝間隔と2.2.1式で表される峰松による横断溝間隔の目安とを比較し、どのような違いがあるかを検討した。そしてその結果から、本研究で目的とする「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔」導出の必要性について考察した。

2.2. 調査方法

2.2.1. 調査地

長年維持管理が行われてきた林道において、横断溝間隔の実態調査を行った。調査地としたのは関東森林管理局管内の国有林林道4路線（東飯田支線林道、仙郷林道、広根場支線林道、新地林道）である。表2.1にこれらの林道の概要を示す。4路線はいずれも30年以上前に開設され、維持管理が行われてきた。路面は碎石敷であり、開設以来の車両の通行により締め固めが進んでいる。一部の区間では素掘りの側溝が設けられていたが、大部分の区間では、側溝は当初から設けられていなかったか、土砂等で埋塞し機能していない状態であった。そのため、切取法面から湧出する遮断流は直接路面へ流入している場合が多いと考えられる。東飯田支線林道、仙郷林道、広根場支線林道は茨城県内にあり、そのうち東飯田支線林道の所在地の地質は花崗岩質の深成岩で、花崗岩が風化したマサ土も広く分布している。仙郷林道、広根場支線林道の所在地の地質は斑レイ岩、花崗岩質の深成岩で、マサ土も広く見られる。新地林道は群馬県内にあり、所在地の地質は玄武岩、安山岩類である。また、一般に関東ロームと呼ばれる火山灰質粘性土が広く分布している。茨城県内の3路線の最寄りの気象庁観測所（柿岡）における最近20年間の平均年間降水量は1377mmであり、新地

林道の最寄り観測所（沼田）では 1140 mm であった。

表 2.1 調査林道の概要

路線	所在地	延長	縦断勾配	開設年	排水区間数
		m	%		(うち侵食発生区間数)
東飯田支線林道	茨城県桜川市	5449	7.2	1972	101 (6)
仙郷林道	茨城県石岡市	2671	6.5	1975	22 (8)
広根場支線林道	茨城県石岡市	2344	5.9	1971	45 (4)
新地林道	群馬県沼田市	2795	4.2	1969	38 (4)

2.2.2. 横断溝間隔実態調査

鋼製及びコンクリート製横断溝，ゴム板を利用した止水板，素掘り横断溝等の位置を GPS (Trimble GPS Pathfinder Pro XR) で記録した。また，縦断勾配の正負が切り替わる点（以後，「縦断勾配変化点」と称する。）も同様に GPS で記録した。隣り合う横断溝または縦断勾配変化点で挟まれる区間内の路面流下水は，その区間の下流側端点となる横断溝または縦断勾配変化点で排水されると考えられる。そこで以後，隣り合う横断溝または縦断勾配変化点で挟まれる区間を「排水区間」と称する。各路線で記録した排水区間数は表 2.1 に示した。「排水区間の長さ（排水区間長）」は「横断溝間隔」とほぼ同義であるが，「横断溝間隔」という言葉には複数の排水区間を総体として見た「横断溝配置」といった意味合いもあるため，個々の排水区間に着目する際は「排水区間の長さ」という言葉を用いることとする。GPS で記録した横断溝及び縦断勾配変化点の位置を，GIS ソフトウェア (ArcMap 10.2) を用いてマッピングし，地図上で各排水区間の長さ（平面距離）を測定した。GPS の測位精度は周囲の環境によって異なるが，本研究においては全測位点の 72% については水平位置の 68% 確率円の半径が 0.5 m 以下，89% については 1.0 m 以内であった。排水区間の長さにして最大数 m の誤差が生じ得るが，以後の階級幅を 10 m とした度数分布で議論する上では十分な精度と考えられる。また，各排水区間の両端点間の直線距離と仰角をレーザー距離計 (Nikon1000AS) で測定し，高低差を算出した（直線距離の精度：±1.25 m，傾斜角の精度：

±0.5 度)。算出した高低差を、地図上で求められた各排水区間の平面距離で除して各排水区間の縦断勾配を求めた。

なお、記録した 206 排水区間のうち 22 排水区間では、深さがおおむね 15 cm 以上の顕著な侵食溝が認められた。本章では、それらの顕著な侵食溝が認められた排水区間を分析対象から除外し、自動車が問題なく走行できる 184 排水区間を対象に分析を行うこととした。各路線で分析対象から除外した排水区間の数は、表 2.1 において括弧内に示した。

2.3. 結果と考察

2.3.1. 横断溝間隔の実態

表 2.2 に各路線で記録した横断溝の数を種類別に示した。また、図 2.1～図 2.4 に各路線の平面線形と排水区間の端点の位置を示した。表 2.2 に示したように、鋼製あるいはコンクリート製横断溝は 4 路線で計 55 箇所確認されたのに対し、ゴム板を利用した止水板、素掘り横断溝等の簡易な横断溝は計 135 箇所確認された。以後、止水板や素掘り横断溝等を「簡易横断溝」と称する。分析対象とした 184 排水区間のうち 90% にあたる 166 排水区間は少なくとも片側の端点が簡易横断溝であった。林道管理者からの聞き取りによれば、それらの簡易横断溝は開設後の維持管理の中で必要に応じて追加されたものが多いとのことである。すなわち、観察された排水区間長はほとんどの場合開設当初の状態ではなく、維持管理の中で簡易横断溝が追加されたことにより短縮されたものであると言える。

図 2.5 は、観察された排水区間長の度数分布を、階級幅 10 m として示したものである。排水区間長の最頻値（度数が最も大きい階級の階級値）は 35 m であったが、数百 m という長い排水区間もあったため、算術平均は 64 m (SD = 54 m) であった。分布は右に裾を引く形状となっており、対数正規分布が想起される。そこで、排水区間長の度数分布が対数正規分布(図 2.5 中の実線)に従うという帰無仮説について、適合度のカイ二乗検定を行った。その結果、カイ二乗適合度統計量 = 16.5 (自由度 38) であり、通常の有意水準で帰無仮説は棄却されなかった。仮に、実際の必要性に関わらず路線全体に一定間隔で簡易横断溝が追

加されたとすれば、排水区間長の度数分布は特定の階級に偏ったものになると考えられる。しかし実態は、20 m 以下から数百 m まで様々な長さの排水区間が見られ、右に裾を引く対数正規分布となっていた。このことから、簡易横断溝の追加は機械的に一定間隔で行われたのではなく、侵食状況の観察等に基づき必要性が認められた区間に対して重点的に行われたと推察される。

表 2.2 種類別 横断溝設置数

路線	横断溝設置数		
	鋼製・コンクリート製 横断溝	止水板	素掘り横断溝等
東飯田支線林道	33	16	51
仙郷林道	9	8	5
広根場支線林道	13	28	0
新地林道	0	14	13

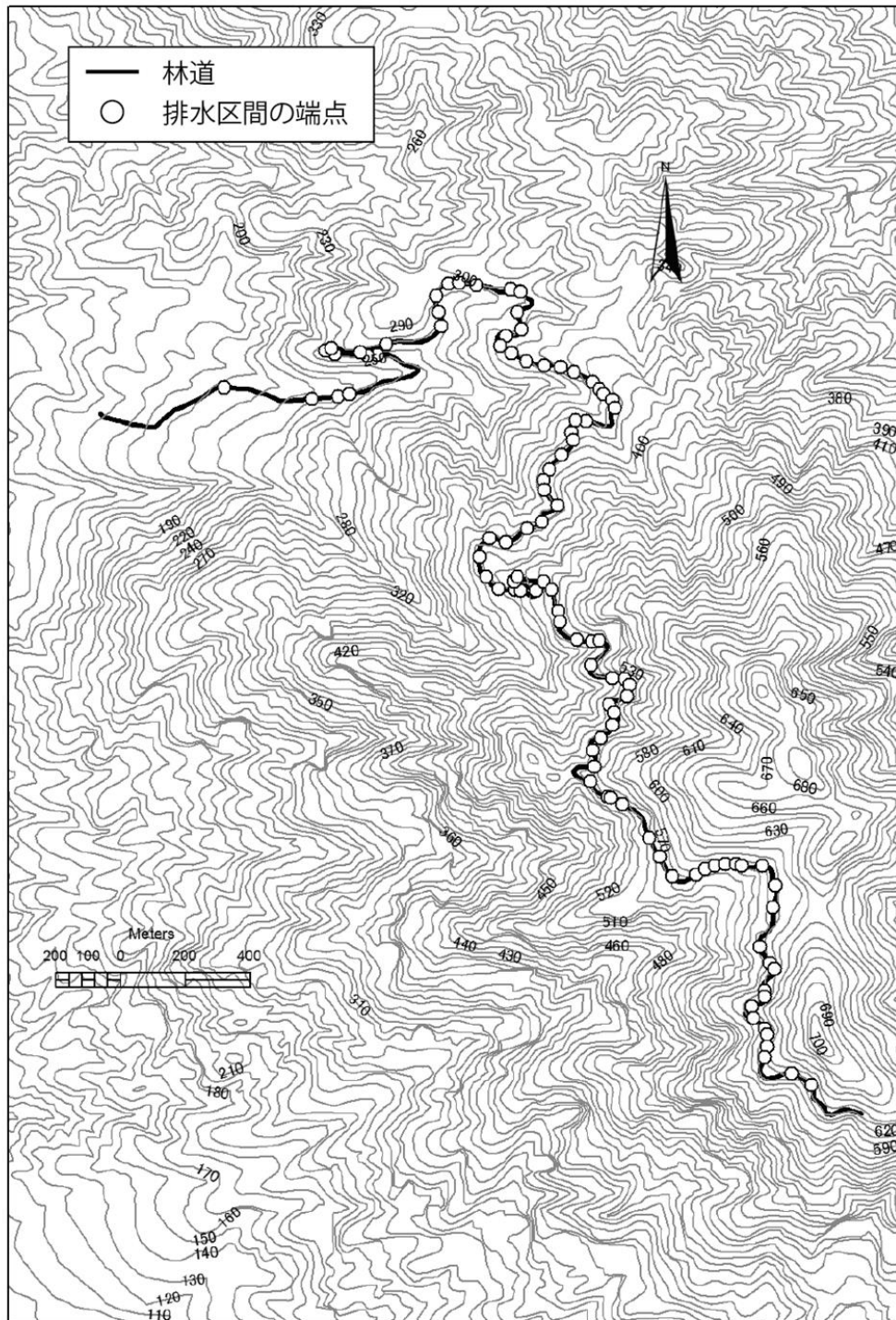


図 2.1 排水区間の端点の位置 (東飯田支線林道)

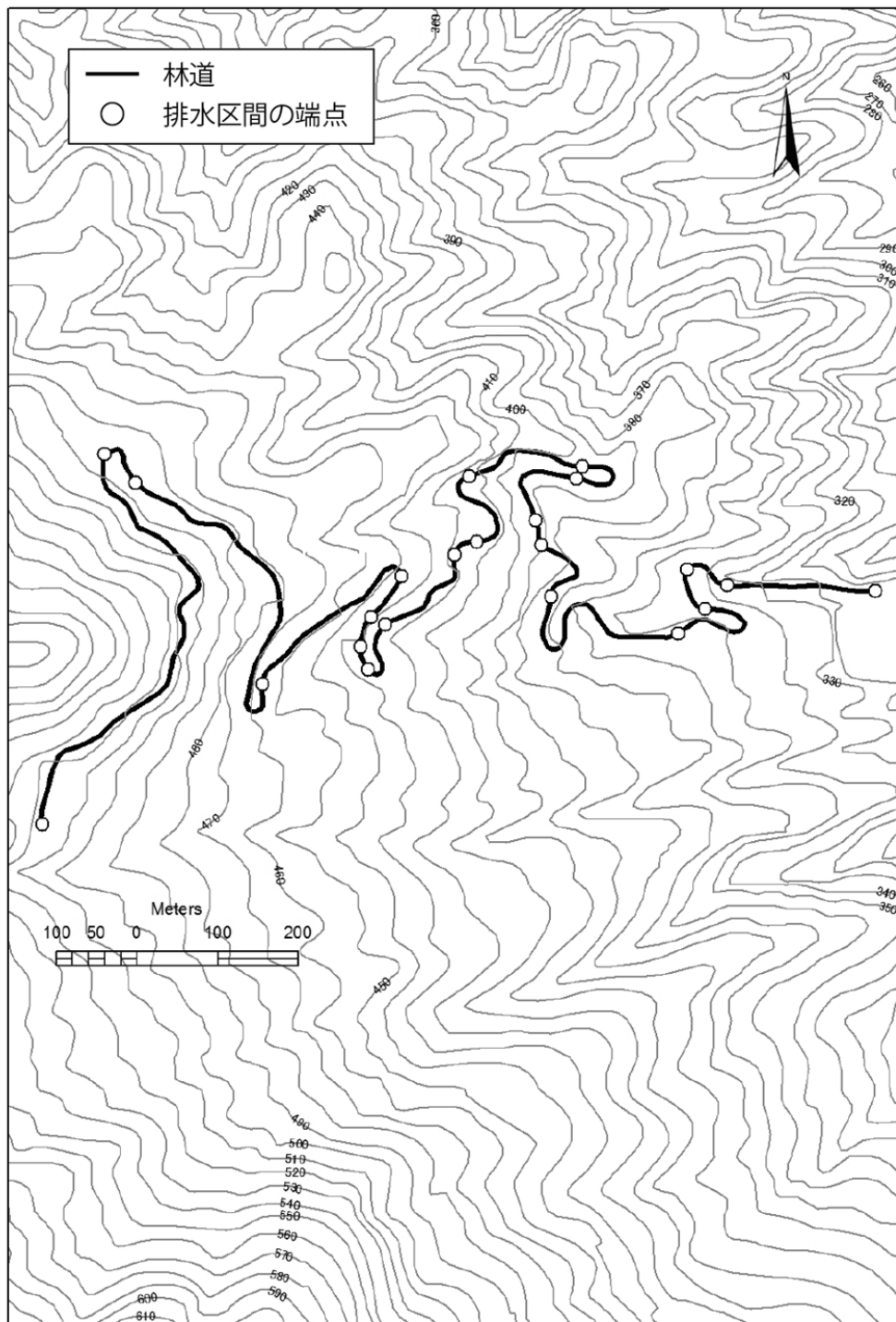


図 2.2 排水区間の端点の位置 (仙郷林道)

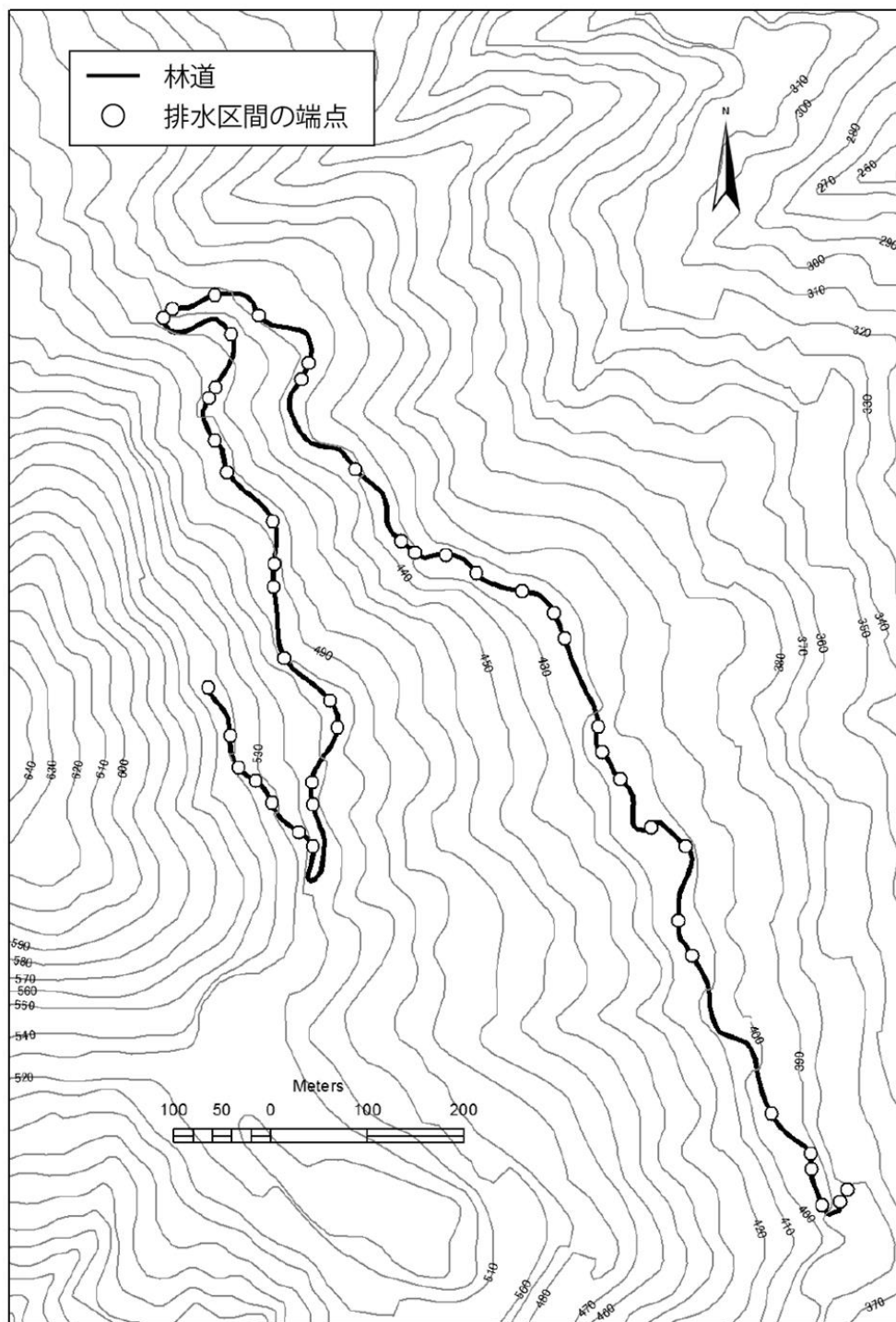


図 2.3 排水区間の端点の位置 (広根場支線林道)

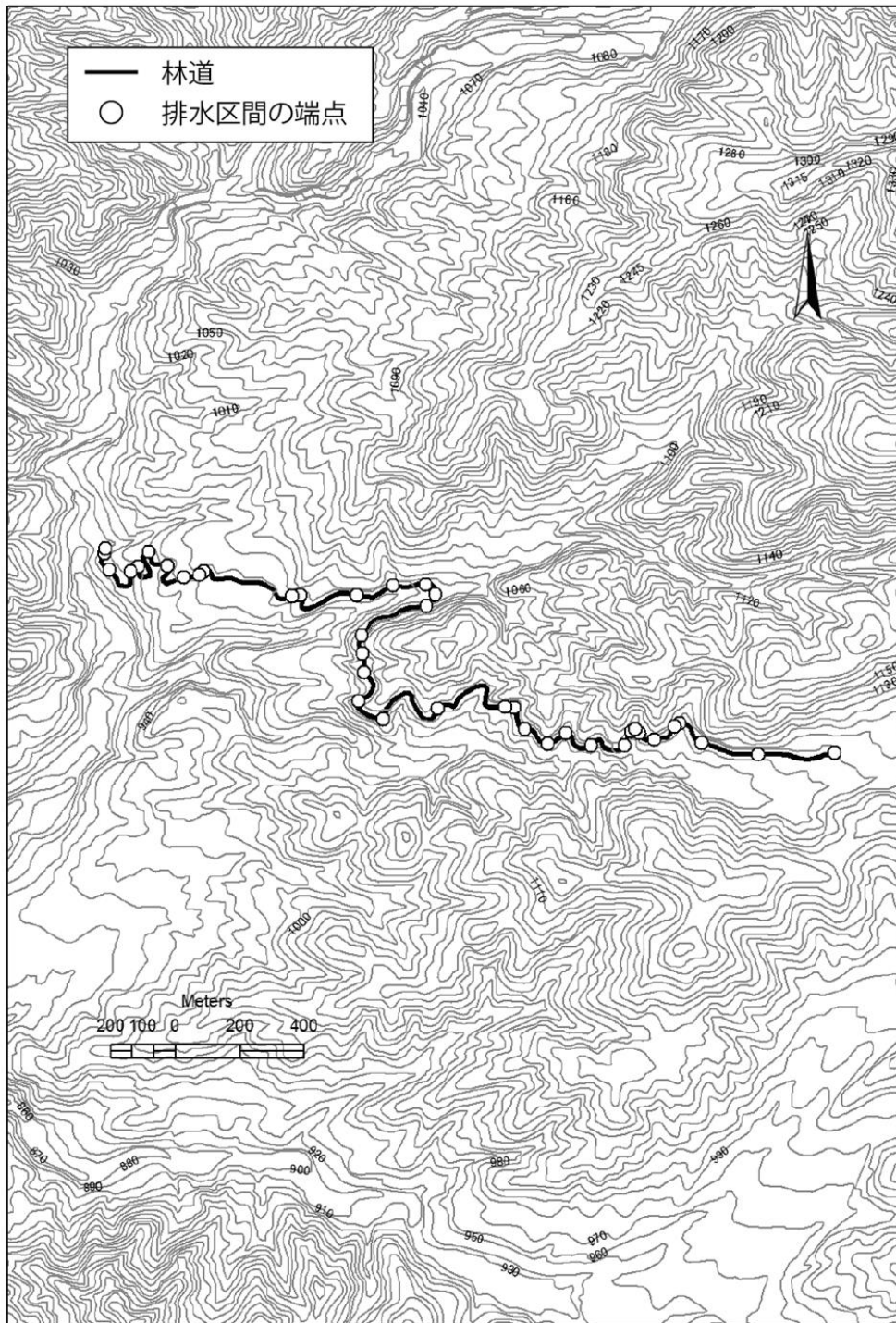


図 2.4 排水区間の端点の位置 (新地林道)

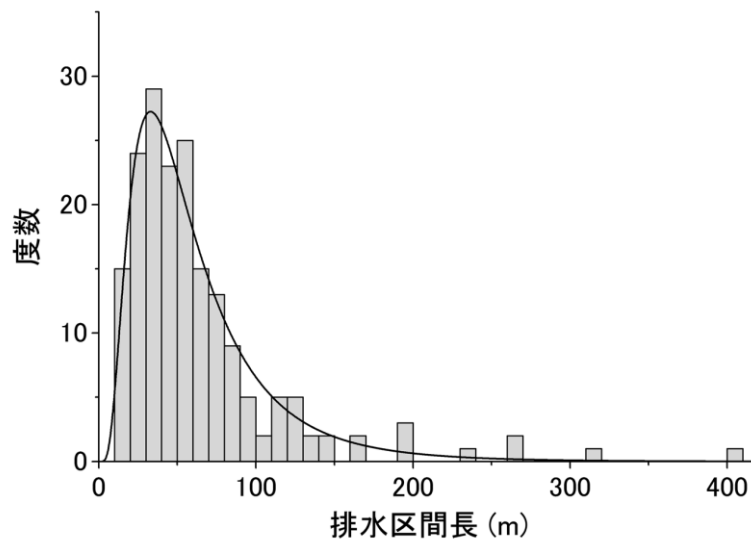


図 2.5 排水区間長の度数分布

2.3.2. 横断溝間隔の実態と縦断勾配

峰松による横断溝間隔の目安をはじめ、既往研究で提案された横断溝間隔の目安は縦断勾配の関数となっている。そこで、2.3.1.項で明らかになった実際の林道における排水区間長のばらつきが、縦断勾配によってどの程度説明できるか検討した。

図 2.6 は実際の林道で観察された排水区間の縦断勾配 x と長さ y [m] をプロットしたものである。白色のシンボルは顕著な侵食溝が認められ分析対象から除外された排水区間であり、ここでは参考として示した。各排水区間の縦断勾配 x と長さ y を無次元化して対数値をとり、 $\log x$ を説明変数、 $\log y$ を目的変数として回帰分析を行うと、以下の回帰式が得られた。

$$\log y = -0.26 \log x + 3.15 \quad 2.3$$

2.3 式の両辺の真数をとって整理すれば、以下のように第 1 章 1.1 式で表される横断溝間

隔の目安式と同型の式を導くことができる。

$$y = 23.3x^{-0.263} \quad 2.4$$

図 2.6 中の実線は 2.4 式を表す。2.3 式の回帰式において $\log x$ は説明変数として有意であり ($p < 0.01$)、その係数は負であったことから、縦断勾配が大きな排水区間ほど長さが短くなるという傾向は認められた。しかし、回帰式の自由度調整済決定係数は 0.07 と小さく、縦断勾配は排水区間長のばらつきのごく一部しか説明していないと言える。また、この回帰式の残差の標準偏差 σ は 0.64 であった。図 2.6 中に点線で $\pm\sigma$ の範囲を示した。実際の林内道路における排水区間の長さは、同程度の縦断勾配の下でも数十 m のオーダーでばらついていると言える。

実際の林道で観察された横断溝間隔が理想的なもの（許容水準を超える侵食を防止するために必要十分な横断溝間隔）であるとは必ずしも言えないが、2.3.1.項の結果を踏まえれば、維持管理の中で必要に応じて横断溝を追加してきた結果形成されたものであり、ある程度実際の必要性に対応したものになっていると考えられる。それが縦断勾配に対して数十 m のオーダーでばらついていたことから、実際に路面侵食防止に必要な横断溝間隔も縦断勾配に対して大きくばらつくことが示唆される。一定縦断勾配の下で必要とされる横断溝間隔がどの程度ばらつくかという検討は既往研究ではほとんど行われていないが、Packer の研究例で言及が見られる (Packer 1967)。この研究例では、排水区間の上流側端点となる横断溝から深さ 1 インチの侵食溝が発生する地点までの距離を多数の排水区間で計測し、その距離と縦断勾配との関係を表す回帰式を求めることで適切な横断溝間隔の目安を検討している。その結果、回帰式の残差の標準偏差 σ は 45 フィート (13.5 m) であり、したがって 95% の確率で侵食を防止するためには、回帰式が示す距離よりも 2σ 分、すなわち 90 フィート (27 m) 短い間隔で横断溝を配置する必要があるとしている。本研究で観察された横断溝間隔のばらつきはそれよりもさらに大きかったが、数十 m のオーダーという点では

同程度と言える。

一定縦断勾配の下でも必要な横断溝間隔がばらつく理由は様々なものが考えられる。本研究の調査林道においては、谷の横断部付近に短い間隔で横断溝が配置されている場合があった。谷の横断部付近は、豪雨時に増水した溪流の水が路面上へ流入する可能性があるほか、切取法面から遮断流が発生する場合も多く（宗岡ら 2015）、一般的な条件よりも路面侵食が進行しやすいと考えられる。また、曲線部の前後に比較的短い間隔で横断溝が配置されている例も見られた。既往研究でも、曲線部は直線部に比べて侵食が進行しやすいという報告が見られる（市原・福田 1982, 中尾 1980）。一方で、短い間隔で横断溝が配置された理由が一見して推察できない所も多かった。そのような場所では、路面の透水性が低い、局所的に受食性の高い土質が分布しているなど、見た目には明らかでないが侵食を助長する何らかの要因が存在する可能性がある。

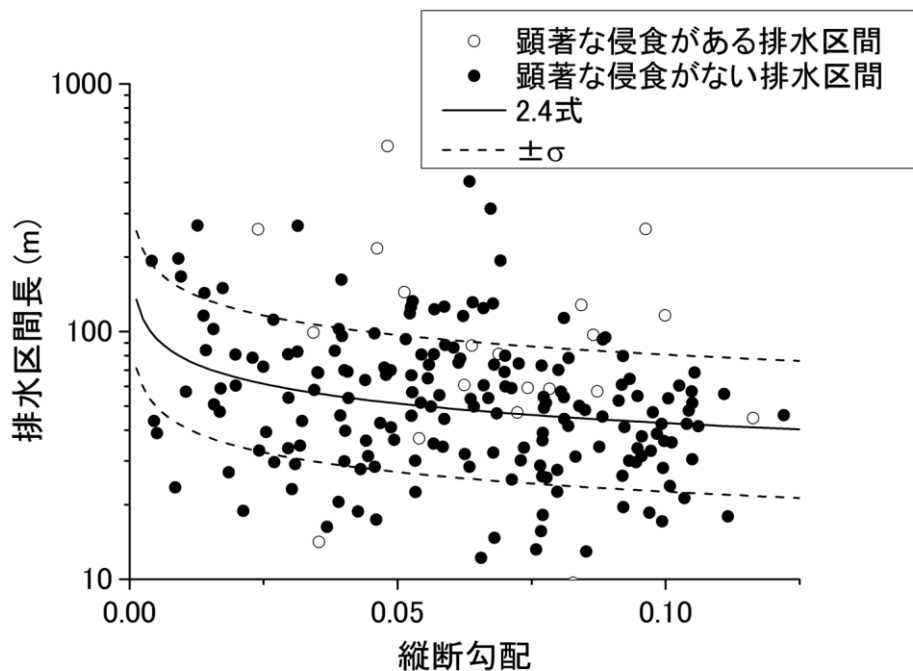


図 2.6 各排水区間の縦断勾配と長さ

2.3.3. 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実態の比較

図 2.7 は実際の林道で観察された排水区間の縦断勾配 x と長さ y をプロットしたものに、峰松による横断溝間隔の目安 (2.2 式) 及び 2.4 式で表される回帰式を重ねて示したものである。また、図 2.8 は各排水区間の長さとの差を求め、その度数分布を示したものである。同じものを、縦断勾配別 (縦断勾配 0.05 未満の排水区間群, 0.05 以上 0.10 未満の排水区間群, 0.10 以上の排水区間群) に分類して示したのが図 2.9～図 2.11 である。

図 2.7, 図 2.8 からわかるように、実際の林道における排水区間は、峰松による横断溝間隔の目安よりも長いものが多かった。実際の排水区間の長さとの差の平均値は +19 m (SD = 57 m), 最頻値は +25 m であり、目安よりも長い排水区間が全排水区間数の 67% を占めた。「安全側をとって短い間隔で横断溝を配置することで確実に侵食を防止する」という方針で示された峰松の目安は、やはり実態よりも密な横断溝配置を求めるものであることが確認された。一方で、目安よりも数十 m 短い排水区間も存在し、目安は実態の下限値に沿うものではなかった。特に、図 2.9 に示すように、縦断勾配 0.05 未満の排水区間群では、目安との差の平均値が -8 m (SD = 57 m), 目安よりも短い排水区間の割合は 63% に上った。それに対して、縦断勾配 0.05 以上 0.10 未満, 及び 0.10 以上の排水区間群については、目安との差の平均値がそれぞれ +32 m (SD = 53 m), +32 m (SD = 45 m) となり、目安よりも短い排水区間の割合はそれぞれ 18%, 5% にとどまった。これは図 2.7 からわかるように、既往研究で提案された横断溝間隔の目安は緩勾配では長く、縦断勾配の増加に敏感に反応して短くなるのに対し、実際の横断溝間隔は同程度の縦断勾配の下でもばらつきが大きく、縦断勾配の増加に対して系統的な変化が鈍いことに起因する。実際の林内道路においては、縦断勾配が緩くとも、前項で挙げたような様々な要因により重点的な横断溝配置が必要な場所が存在すると考えられる。

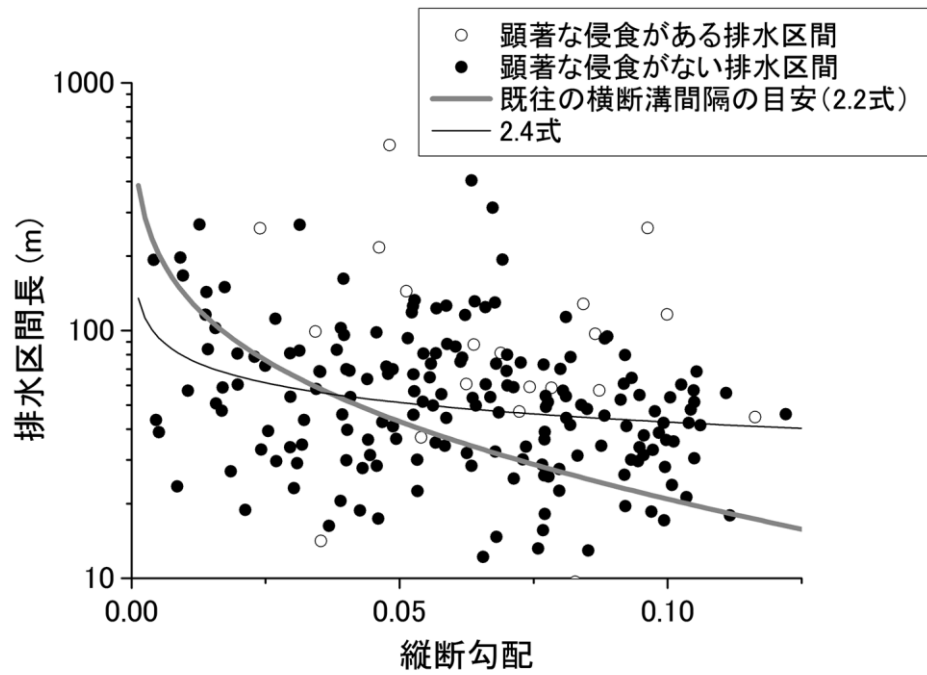


図 2.7 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実際の林道で観察された排水区間の長さとの比較

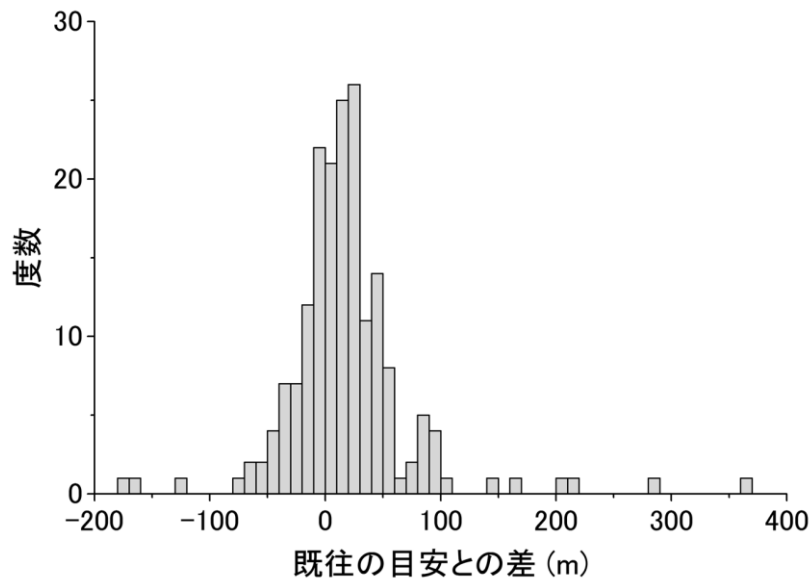


図 2.8 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実際の林道で観察された排水区間長の差の度数分布

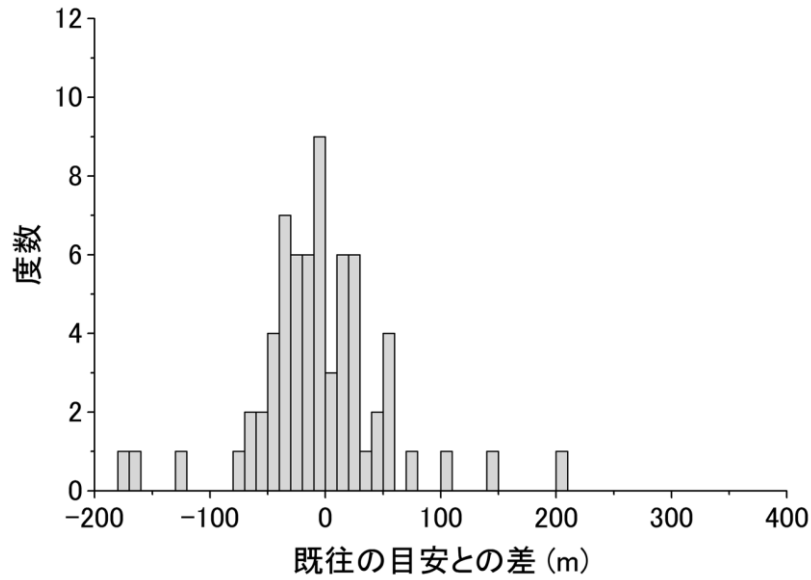


図 2.9 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実際の林道で観察された排水区間長の差の度数分布（縦断勾配 0.05 未満の排水区間群）

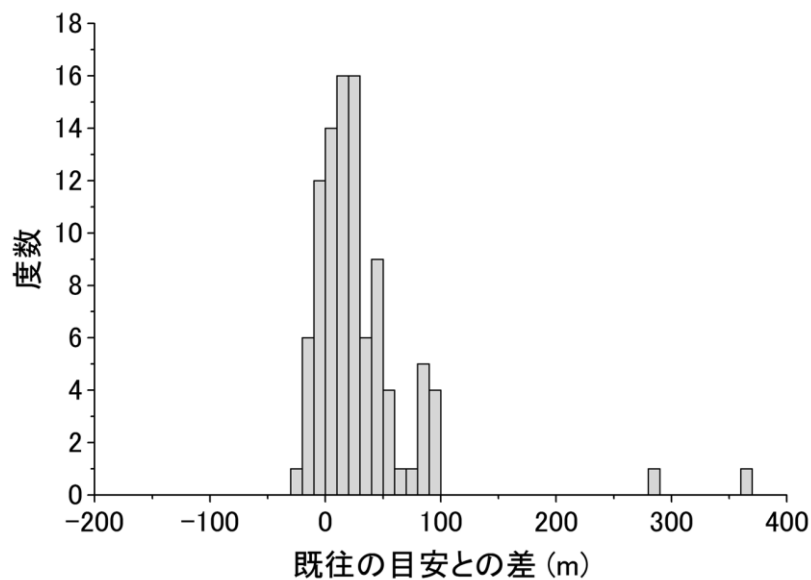


図 2.10 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実際の林道で観察された排水区間長の差の度数分布（縦断勾配 0.05 以上 0.10 未満の排水区間群）

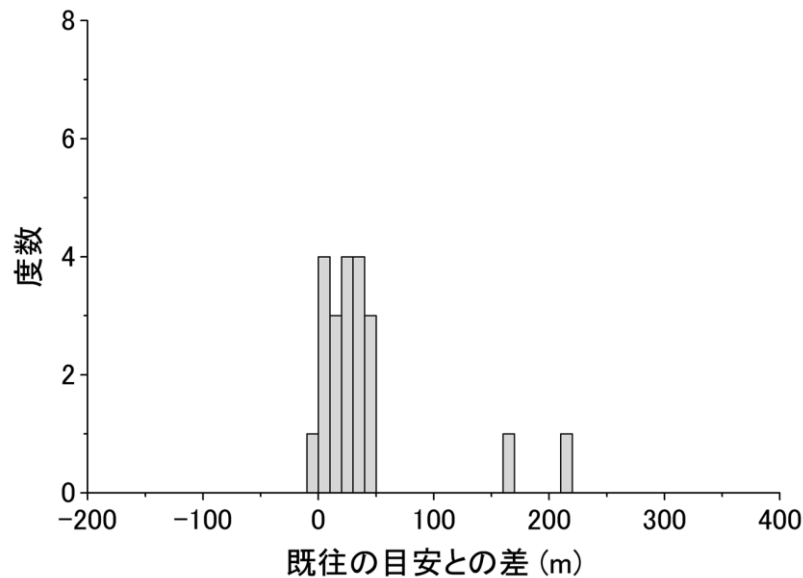


図 2.11 既往研究で提案された横断溝間隔の目安と実際の林道で観察された排水区間長の差の度数分布（縦断勾配 0.10 以上の排水区間群）

2.4. まとめ

実際の林道で観察された横断溝間隔は、同程度の縦断勾配の下でも数十 m のオーダーでばらついていた。観察された横断溝間隔が理想的なもの（許容水準を超える侵食を防止するために必要十分なもの）であるとは必ずしも言えないものの、2.3.1.項の結果を踏まえればある程度実際の必要性を反映したものになっていると考えられる。それが縦断勾配に対して数十 m のオーダーでばらついていたことから、実際に路面侵食防止に必要な横断溝間隔も縦断勾配に対して大きくばらつくことが示唆される。ばらつきをもたらす要因としては、谷の横断部から距離、切取法面からの遮断流の発生量、曲線部・直線部といった線形の違い、路面の透水性、土質等様々なものが考えられる。

そのようなばらつきに対応するための方針の一つとして、安全側をとって最も侵食が助長される条件下で必要とされる横断溝間隔を路線全体に適用するという考え方がある。しかし、そのような方針で峰松が示した横断溝間隔の目安と比較して、実際の林道で観察され

た排水区間長は平均的に 20 m 程度長かった。特に、縦断勾配 0.05 以上の排水区間についてはほとんどがその目安よりも長かった。調査を行った林道は、計 135 か所に簡易横断溝が追加されるなど、比較的丁寧な維持管理が行われてきた路線と考えられるが、安全側をとった目安はさらに高密な横断溝配置を求めるものと言える。このことから、安全側をとった目安は実態に対して要求水準が高いものと位置づけられ、開設費等の制約下で一律に適用することは必ずしも容易ではないと考えられる。したがって、安全側をとって確実に侵食を防止するという方針だけではなく、ある程度路面補修が必要になることを前提に、開設費と将来の路面補修の負担との総和を最小化するという方針で横断溝間隔を検討していく必要性が認められる。そのような検討を可能にするため、次章以降で「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」の導出手法を提案する。

3. 路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安の導出手法

3.1. はじめに

第2章では、同程度の縦断勾配の下でも侵食防止に必要な横断溝間隔は数十 m のオーダーでばらつくことが示唆された。このことから、縦断勾配のみを因子として路面侵食を確実に防止する横断溝間隔の目安を示すことは困難であると考えられる。また、そのようなばらつきに対応するため最も安全側をとるという方針で提案された横断溝間隔の目安は、実態に比べて要求水準の高いものであった。したがって開設費等の制約下でその目安を一律に適用することは必ずしも容易ではないと考えられる。これらのことを踏まえれば、ある程度は路面補修が必要になることを前提に、開設費と将来の路面補修の負担の総和を最小化する横断溝間隔の目安を検討する必要がある。そこで本章では、「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を提案する。

既往研究における「適切な横断溝間隔の目安」導出の代表的なアプローチは以下のようなものであった（出来ら 1988, 市原ら 1974, 中尾 1980, 酒井ら 1982, 1983）。まず、既存の林内道路上で計測点を設定して「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y [m]」の2因子と「路面侵食量 z （侵食溝の深さ [m] あるいは断面積 [m²]）」を計測する。それらを無次元化して対数値をとり、重回帰分析により以下のような回帰式を推定する。

$$\log z = a \log x + b \log y + c \quad 3.1$$

ただし、 a , b は回帰係数、 c は定数項である。そして、路面侵食量の許容水準 γ を設定し、この回帰式上で $\log z = \log \gamma$ となる「横断溝からの距離 y_{limit} [m]」を横断溝間隔の目安とする。すなわち以下のように、3.1 式の左辺に許容水準 γ の対数値を代入し、両辺の真数をとって y について解いたものが、第1章 1.1 式に示した形の横断溝間隔の目安式となる。またそれを図示したのが図 3.1 である。

$$\log \gamma = a \log x + b \log y_{\text{limit}} + c$$

$$\gamma = x^a y_{\text{limit}}^b e^c \quad 3.2$$

$$\begin{aligned} y_{\text{limit}} &= \gamma^{\frac{1}{b}} e^{-\frac{c}{b}} x^{-\frac{a}{b}} \\ &= \alpha x^{-\beta} \end{aligned}$$

ただし、

$$\alpha = \gamma^{\frac{1}{b}} e^{-\frac{c}{b}} \quad 3.3$$

$$\beta = \frac{a}{b} \quad 3.4$$

である。

しかし、第1章で述べたように、林内道路における実際の路面侵食量は「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子以外にも様々な要因の影響を受ける。そのため、実際の路面侵食量と2因子からなる回帰式から予測されるそれとの間にずれ(回帰残差)が生じる(図 3.2)。この回帰残差がプラスになる場所では、既往の「適切な横断溝間隔の目安」に従って横断溝を配置しても許容水準 γ を超える侵食が発生し補修が必要になる。しかし、既往研究でこの回帰残差や路面補修の負担について言及したものはほとんどない。

本章では、ある目安に従って横断溝を配置した全路線延長のうち、開設から時間 N [年] が経過した時点で許容水準 γ を超える侵食が発生している延長の割合の期待値を「要補修率」と定義した。そして、回帰残差に着目し「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出する方法を提案した。

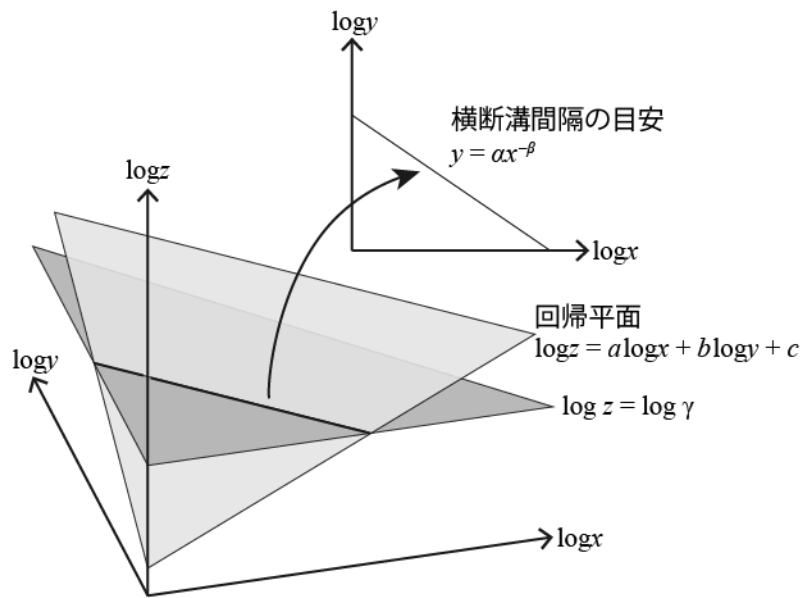


図 3.1 既往研究における「適切な横断溝間隔の目安」導出アプローチ

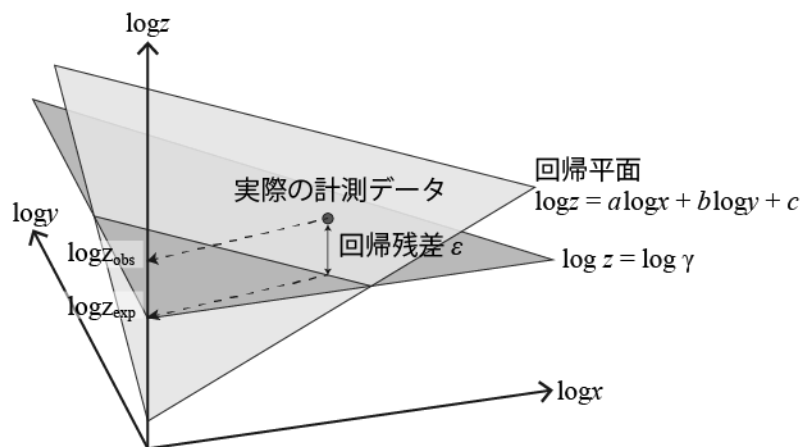


図 3.2 回帰残差

3.2. 「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出手法

本節で提案する「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出手法の概要は以下のようなものである。すなわち，開設から時間 N を経た林内道路上で計測された「縦断勾配 x 」及び

「横断溝からの距離 y 」の2因子と「路面侵食量 z 」のデータを用いて、経験的な路面侵食量予測モデルを推定する。そして、そのモデルの回帰残差の分布を何らかの確率分布で近似することで、ある縦断勾配、横断溝からの距離の地点において許容水準 γ を超える侵食が発生する確率を表現する。それをもとに、ある間隔で横断溝を配置した場合に、開設から時間 N が経過した時点で許容水準 γ を超える侵食が発生し補修が必要となる延長の期待値を求めるというアプローチである。以下にその詳細を示す。

まず、横断溝間隔の目安を適用しようとしている林内道路が属する母集団（例えば「花崗岩質深成岩類の地帯に所在する林道」といったように）を設定する。そしてその母集団に属するとみなせる既存の林内道路上で計測された「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子と「路面侵食量 z 」のデータを用いて以下のような路面侵食量予測モデルを推定する。

$$f_1(z) = f_2(x, y) + \epsilon \quad 3.5$$

ただし、 ϵ は2因子 x, y で説明できない $f_1(z)$ のばらつき（回帰残差）である。左辺も関数の形で表現したのは、モデルの立て方によっては3.1式のように従属変数が z の対数值であったり、2乗値であったりする場合も想定されるためである。なお、「路面侵食量 z 」としては侵食溝の深さや断面積などいくつかの指標が考えられるが、本章で提案する手法はどの指標を用いる場合にも適用できるため、ここでは特定せず一般的に「路面侵食量 z 」としておく。

このモデルにおいて、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」以外の諸要因が「路面侵食量 z 」に及ぼす影響は回帰残差 ϵ として表現される。以後、 x, y の2因子から予測される路面侵食量を z_{exp} 、実際に観察される路面侵食量を z_{obs} と記すこととする。すなわち、

$$f_1(z_{\text{exp}}) = f_2(x, y) \quad 3.6$$

$$f_1(z_{\text{obs}}) = f_2(x, y) + \epsilon \quad 3.7$$

となる。

ここで、回帰残差 ϵ が確率分布 $g_\sigma(\epsilon)$ に従って生じると仮定する。ただし、 σ は回帰残差の標準偏差である。この時、縦断勾配が x で上流側横断溝から y だけ離れたある地点において、路面侵食量 z が許容水準 γ を超える確率 $P_{x,y}(z > \gamma)$ は、以下のように表現できる。なお、図 3.3 にその概念図を示す。

$$P_{x,y}(z > \gamma) = \int_{\gamma}^{\infty} g_\sigma[f_1(z) - f_2(x, y)] dz \quad 3.8$$

3.8 式を y で偏微分すれば、上流側横断溝から y だけ離れた地点における $P_{x,y}(z > \gamma)$ の増加率を表す関数 $p_{x,\gamma}(y)$ が得られる。

$$p_{x,\gamma}(y) = \frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z > \gamma) \quad 3.9$$

ここで、縦断勾配一定のある排水区間（第 2 章に引き続き、本章以降でも横断溝に挟まれる区間を「排水区間」と称する。）において、上流側端点となる横断溝（以後、「上流端横断溝」と称する。）から y だけ離れた地点で路面侵食量が許容水準 γ を超えた場合、以後それより離れた地点（下流側）における路面侵食量が γ 以下になることはないと仮定する。この時、 $p_{x,\gamma}(y) dy$ は上流端横断溝からの距離が y から $y + dy$ までの微小区間において、許容水準 γ を超える路面侵食が新たに開始する確率と同義である。すなわち、 $p_{x,\gamma}(y)$ は排水区間の上流端横断溝から許容水準 γ を超える路面侵食が開始する地点までの距離 y （以後、「侵食開始距離 y 」と称する。）を確率変数とした時の確率密度関数と考えることができる。

長さ d [m] の排水区間において侵食開始距離が y であった場合，路面補修が必要となる延長 w [m]（以後，「要補修延長 w 」と称する。）は

$$w = d - y \quad 3.10$$

である。要補修延長 w を確率変数と考えると，その確率密度関数 $h_{x,\gamma,d}(w)$ は， $p_{x,\gamma}(y)$ を用いて以下のように表現できる。

$$h_{x,\gamma,d}(w) = \begin{cases} \int_d^\infty p_{x,\gamma}(y) dy, & w = 0 \\ p_{x,\gamma}(d - w), & 0 < w \leq d \end{cases} \quad 3.11$$

この確率密度関数を用いて，長さ d の排水区間における要補修延長 w の期待値 $E_{x,\gamma,d}(w)$ が以下のように求められる。

$$E_{x,\gamma,d}(w) = \int_0^d w h_{x,\gamma,d}(w) dw \quad 3.12$$

この $E_{x,\gamma,d}(w)$ を排水区間の長さ d で除したものが，この排水区間の要補修率 R_r となる。

$$R_r = \frac{E_{x,\gamma,d}(w)}{d} \quad 3.13$$

なお，個々の排水区間における要補修延長の期待値と，路線全体における要補修延長の期待値との関係は，期待値の加法性より以下ようになる。

$$E_{\gamma}(w_t) = \sum_{i=1}^n E_{x_i, \gamma, d_i}(w_i) \quad 3.14$$

ただし、 $E_{\gamma}(w_t)$ は路線全体における要補修延長 w_t の期待値 [m]、 n は路線全体における排水区間の数、 x_i は i 番目の排水区間の縦断勾配、 d_i は i 番目の排水区間の長さ [m]、 $E_{x_i, \gamma, d_i}(w_i)$ は i 番目の排水区間における要補修延長 w_i の期待値 [m] である。3.14 式より、個々の排水区間の要補修率を R_r とする横断溝間隔の目安を路線全体に適用した場合、路線全体における要補修率もやはり R_r となることがわかる。すなわち、3.13 式を d について解くことで、「要補修率 R_r に応じた横断溝間隔の目安」を表す式となる。最後に、林内道路の開設主体が将来負担できる路面補修の費用及び労力を考慮して適切と考える要補修率 R_{ropt} を設定してその式の R_r に代入すれば、目的とする要補修率 R_{ropt} に応じた横断溝間隔の目安が得られる。

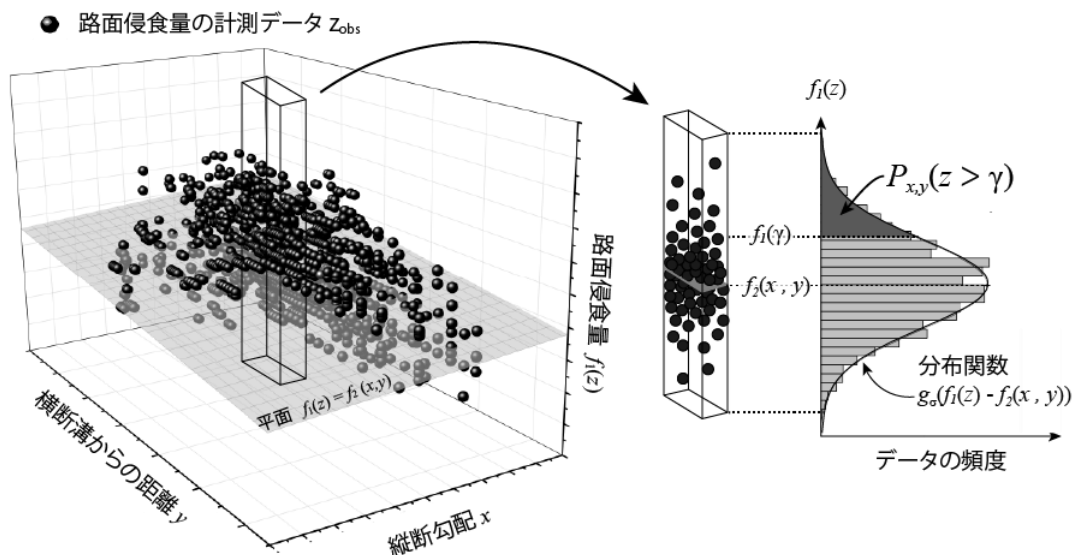


図 3.3 許容水準 γ を超える路面侵食の発生確率 $P_{x,y}(z > \gamma)$ の概念図

3.3. 母集団の設定とサンプリング

3.2節で提案した手法は、既存路線で得られたデータから推定される経験的な路面侵食量予測モデルがベースとなる。第1章で指摘したように、路面侵食量予測モデルの残差 ϵ の分散が非常に大きいとすれば、どのような地点で得たデータを用いるか（サンプリング）によって、推定されるモデルは大きく変わり得る。第1章で述べたように、現状では路面侵食量のデータ収集には多大な労力を要するためデータ数自体が限られているが、将来的には計測技術の発達により大量の路面侵食量データ収集が可能になり、その中から必要なデータを抽出してモデルの推定に利用することが想定される。その際、これから開設する林内道路の路面侵食発生確率をより正確に予測するモデルを得るためには、以下の2点が重要となる。

1点目は、路面侵食量のデータを現地で収集、蓄積していく段階で、路面侵食量の大小でバイアスをかけずにサンプリングを行うことである。横断溝間隔の目安を検討した既往研究の中には、路面侵食量のデータ収集の際に調査対象路線の中でも明確な侵食溝が確認できる区間に限ってその幅や深さを計測した例が見られる（酒井ら 1982, 1983）。しかし、そのような方法では路面侵食量が比較的大きい場所に偏ったサンプリングになる可能性があり、路面侵食発生確率が過大に評価される恐れがある。したがって路面侵食量の大小でバイアスをかけずに、一定間隔あるいはランダムにサンプリングを行うことが重要である。

2点目は、これから開設する林内道路が属する母集団を適切に表現し、その母集団に属するとみなせる既存の林内道路で得られたデータをモデルの推定に利用することである。一般的にサンプルをとって経験的なモデルを構築する目的は、そのサンプルが属する母集団の真の姿を知ることであり、サンプルはその母集団の中から採取することが基本である。したがって、これから開設する林内道路の属性を整理し、どのような母集団についてモデルを構築しようとしているのか明確に記述することで初めてモデルの推定に用いるべきデータが定まる。例えば、「A 県内でこれから開設する林道の、5 年後の路面侵食量を予測する」という目的であれば、「A 県内の、開設から 5 年程度経過した林道全路線」が母集団として設定され、その母集団に属する既存路線で得たデータを用いてモデルを推定すればよいということになる。母集団を記述する属性としては、上記の例のように「地域」や「開設からの経過年数」のほか、「土質」、「年間降雨量」、「交通量」等様々なものが考えられる。中でも、「開設（あるいは前回の路面メンテナンス）からの経過年数」は母集団を記述する属性として必須である。なぜなら、路面侵食は時間的に進行する現象と考えられるため、例えば 1 年後の要補修率を 10% にするための目安と、5 年後の要補修率を 10% にするための目安は異なると考えられるためである。したがって、予定する路面補修の頻度に応じて母集団を設定する必要がある。また、3.2.節で示した手法はモデルの残差 ϵ の分布が何らかの分布関数で近似できることが前提となっているが、母集団の設定が適切でないとそれが満たされない可能性もある。例えば、極端に侵食が進行しやすい土質と進行しにくい土質の地

域の路線が1つの母集団を構成していると、得られるモデルの残差分布が、分布関数での近似が困難な二山型の形状となる可能性がある。そのような問題も考慮して、適切に母集団を設定する必要がある。

3.4. まとめ

第3章では、確率と期待値の考え方を応用して「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を提案した。そのアプローチは、まず、①目安を適用しようとしている路線と共通の母集団に属する既存路線において計測された「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子と「路面侵食量 z 」のデータを用い、路面侵食量予測モデルを推定する。そして、②そのモデルの残差 ϵ の分布を把握することで、許容水準 γ を超える路面侵食の発生確率を表現し、補修が必要になる延長の期待値を求めるというものである。この考え方に沿って実際に横断溝間隔の目安の導出を行うには、モデルの残差 ϵ の分布が、何らかの確率分布で近似できることが前提となる。その分布については、第4章で実際の路面侵食量のデータを用いて検討を行う。

本章で提案した手法は、既存路線で計測された路面侵食量データに基づく経験的な路面侵食量予測モデルがベースとなっている。これから開設する林内道路における侵食の発生確率をより正確に予測するためには、路面侵食量のデータを収集してデータベース化する段階、そしてそのデータベースからモデルの推定に利用するデータを抽出する段階で、以下の2点に留意が必要である。1点目はデータを収集する際に路面侵食量の大小でバイアスをかけずにサンプリングをすること、2点目はこれから開設する林内道路が属する母集団を適切に表現し、その母集団に属する既存路線で得られたデータを用いてモデルを推定することである。特に、路面侵食は時間的に進行する現象であるため、母集団を記述する属性として「開設からの経過時間」は必須である。そのため、本章で提案した手法を用いて「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出するためには、開設あるいは前回の路面メンテナンスからの経過年数が明らかな林内道路で計測した路面侵食量のデータが必要となる。しかし

現状では、林内道路の路面メンテナンスの履歴が記録されることは稀で、そのようなデータを大量に得ることは非常に難しい。今後、路面侵食量のデータの蓄積と併せて、メンテナンスの履歴など林内道路に関する様々な情報を統合してデータベース化することが重要である。

4. 路面侵食量のモデルと残差分布

4.1. はじめに

第3章では、確率と期待値の考え方を応用して「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を提案した。この手法で実際に目安を導出するためには、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子からなる路面侵食量予測モデルの残差 ϵ が、何らかの確率分布に従って発生することが前提となる。既往研究では、「路面侵食量は縦断勾配に対してばらつきが大きい」といった定性的な言及は見られるが（酒井ら 1983）、残差分布についての検討は行われていない。そこで本章では、実際の林内道路において計測した路面侵食量のデータを用いて「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子からなる路面侵食量予測モデルを推定し、その残差 ϵ の分布を検討した。

なお、第3章 3.3節で指摘したように、本来であれば目安を適用しようとする林内道路が属する母集団を表現し、その母集団に属するとみなせる既存路線で得られたデータをデータベースから抽出してモデルの推定に利用することが望ましい。しかし現状では、多数の路線で大量に路面侵食量のデータを収集してデータベースを構築することは技術的に困難である。そこで本章では、林道3路線及び作業道1路線において、横断溝からの距離1 mごとに計測点を設定して路面侵食量をデータ化し、そのデータを用いてモデルの推定と残差分布の検討を行うこととした。同一路線内で得たデータは、開設からの経過年数、地質区分、降雨量といった基本的な属性が統一されているとみなすことができる。そこで、同一路線内で得たデータ群を、経過年数、地質区分、降雨量等の属性で記述された1つの母集団から得たデータ群とみなし、各データ群について、路面侵食量の予測モデルの推定と残差分布の検討を行った。

4.2. 調査方法

4.2.1. 調査地

路面侵食量の計測を行ったのは、表 4.1 に示す林道 3 路線（東飯田支線林道、仙郷林道、広根場支線林道）及び作業道 1 路線（菅谷作業道）である。林道 3 路線はいずれも 30 年以上前に茨城県内に開設された国有林林道である。そのうち東飯田支線林道の所在地の地質は花崗岩質の深成岩で、花崗岩が風化したマサ土も広く分布している。仙郷林道、広根場支線林道の所在地の地質は斑レイ岩質、花崗岩質の深成岩で、マサ土も広く分布している。いずれも路面は碎石敷きであり、開設以来の車両の通行により締め固めが進んでいる。一部の区間では素掘りの側溝が設けられていたが、路線の大部分については、側溝は当初から設けられていなかったか、土砂等で埋塞し機能していない状態であった。そのため、切取法面から湧出する遮断流は直接路面へ流入している場合が多いと考えられる。維持管理作業の履歴は記録されていないが、維持管理の中で追加されたと考えられる素掘り横断溝等が見られたことから、路面の補修作業も行われてきたと推察される。ただし、調査時点では最大で深さ 25 cm 程度の侵食溝が見られた。3 路線の最寄りの気象庁観測所（柿岡）における最近 20 年間の平均年間降水量は 1377 mm であった。

一方、岐阜県内の菅谷作業道は、上記の 3 路線に比べ新しく、平成 25 年度に開設された民有林内の作業道である。行政的な区分は作業道であるが、林業専用道規格を意識して開設されたもので、路面は碎石敷きである。ただし、開設以来この作業道を使用した本格的な施業は行われていないうえ、調査時点では途中で崩壊が発生して車両の通行が困難な箇所があった。そのため、開設後の車両の通行による締め固めは林道 3 路線に比べて進んでいないと考えられる。所在地の地質は付加コンプレックスの基質である。側溝は設けられておらず、所々で遮断流が路面に直接流入している様子が見られた。開設以来路面の補修作業等は行われていない。最寄りの気象庁観測所（美濃）における最近 20 年間の平均年間降水量は 2254 mm であった。

表 4.1 調査路線の概要

路線	所在地	延長 m	平均縦断勾配 %	開設年	工学的土質分類
東飯田支線林道	茨城県桜川市	5449	7.2	1972	細粒分質砂 細粒分礫まじり砂
仙郷林道	茨城県石岡市	2671	6.5	1975	細粒分質砂
広根場支線林道	茨城県石岡市	2344	5.9	1971	粘性土 礫まじり細粒分質砂
菅谷作業道	岐阜県関市	2043	9.0 / 8.6	2013	細粒分質礫質砂 礫まじり細粒分質砂

Note: 菅谷作業道の勾配は、(始点～最高標高点の平均勾配)/(最高標高点～終点の平均勾配)として示した。

4.2.2. 計測方法

4.2.2.1. 本研究における路面侵食量の定義

本研究では、路面侵食量 z [m] を以下のように定義する。すなわち、路面の両端を結ぶ直線を基準線とし、それに対する路面の最高点と最低点との高低差（深度）を路面侵食量 z とする（図 4.1）。ここで基準線を水平ではなく路面の両端を結ぶ直線としたのは、水平を基準とした場合、片勾配がある地点では路面が平滑であっても路面侵食量が大きな値になってしまうためである。調査を行った林内道路では、流水の掃流力のみで形成された侵食溝だけではなく、車両の通行によるわだちの形成とその中を流れる流水の作用が相まって発達したと考えられる路面の変形が多く見られた。本研究の定義による路面侵食量は、そのような車両の通行による変形も含めたものである。

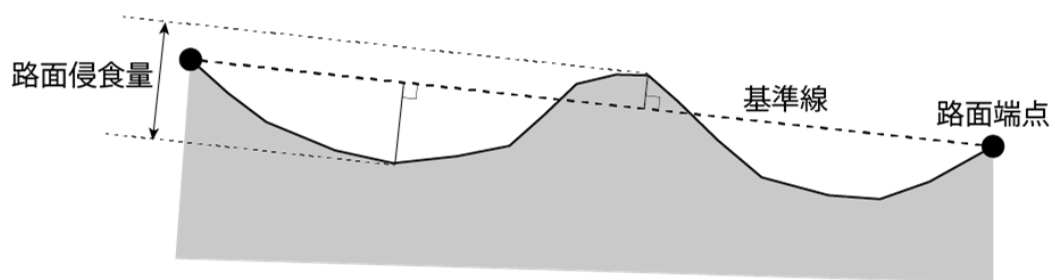


図 4.1 本研究における路面侵食量の定義

4.2.2.2. 計測点の設定

第3章 3.3.節で述べたように、路面侵食量の計測データから許容水準 γ を超える侵食の発生確率を求めるためには、路面侵食量の大小でバイアスをかけずに計測点を設定する必要がある。また、計測点数を十分確保することも重要である。既往研究では調査路線の中でも侵食溝が認められた区間のみを計測対象とした例も見られるが、そのような方法では路面侵食量が比較的大きな場所に偏ったサンプリングとなる可能性がある。そこで本研究では、路面侵食量の大小に関わらず路線全体を調査対象とすることとした。ただし、仙郷林道、広根場支線林道、菅谷作業道の延長が 3000 m 以下であるのに対し、東飯田支線林道の延長は 5000 m 以上であるため、雑草の繁茂が著しく路面形状の判別が困難な区間を対象から外し、約 3000 m を調査対象区間とした。各路線を横断溝で挟まれる区間（排水区間）に分け、すべての排水区間について、上流端横断溝からの距離 1 m ごとに計測点を設定した。すなわち、長さ d m ($D \leq d \leq D + 1$) の排水区間内には D 個の計測点が設定される。それらを、上流端横断溝側から順に計測点 1, 2, ..., D とする。実際にこれらすべての計測点で路面侵食量の計測を行うのは困難であったため、基本的に計測点 $5k$ において計測を行うこととした。計測点 $5k - 4 \sim 5k - 1$ については、目視により計測点 $5k$ に比べて路面侵食量に変化が認められない場合は計測を省略し、計測点 $5k$ における計測結果に等しいとみなした。侵食状況に変化が見られる場合は、計測点 $5k - 4 \sim 5k - 1$ でも計測を行った。このようにして、設定された計測点のうち、写真の不具合（次項に述べるように、本研究では写真を用いて路面侵食量を計測した）や雑草の繁茂等で路面の形状が判別できなかったものを除き、東飯田支線林道では 3023 点、仙郷林道では 2130 点、広根場支線林道では 1967 点、菅谷作業道では 1734 点で路面侵食量のデータが得られた。

4.2.2.3. 写真を用いた路面侵食量計測

既往研究における路面侵食量の計測方法としては、侵食溝が認められる区間でその幅や深さを計測する方法（伏見 1982, 1989, 酒井ら 1982, 1983）や、路面の横断方向に一定間

隔で測点を設定し、各点における深度を計測する方法（藤井ら 1982a, 1982b, 矢部ら 2010）等がある。しかし、前者は侵食溝が未発達で幅や深さが明確に定義できない計測点において実施が困難であり、路面侵食量の大小でバイアスをかけずにサンプリングする必要がある場合には不適である。後者の方法は侵食溝が未発達の計測点でも実施できるが、手間がかかるため十分な計測点数を確保するのが難しい。そこで本研究では、デジタルカメラで撮影した路面の画像から侵食量を求める方法を開発した。これは、路面の横断形状に沿うように置いたマーキングテープを、長さが既知のスケールとともにデジタルカメラで撮影し、その画像内でマーキングテープ及びスケールが写った位置のピクセルインデックスを読み取ることで路面侵食量を計算するものである。路面侵食量の計算に用いた写真の例を図 4.2 に示した。計算方法の詳細については、本論文の末尾に付録として記した。



図 4.2 路面侵食量計測用写真の例

また、縦断勾配については、計測点 5k-2 付近で長さ 2 m のポールを道のセンターライン沿いにて、傾斜計を用いてその傾斜角 θ を 0.5 度単位で計測した。その正接 $\tan \theta$ を計

測点 $5k-4 \sim 5k$ における縦断勾配とみなした。横断溝からの距離は、各排水区間の上流端横断溝を基点として道のセンターライン沿いにテープメジャーを張って計測した。

4.3. 結果

4.3.1. 路面侵食量予測モデルの推定

まず、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子とその地点における「路面侵食量 z 」の関係として、以下の線形モデルを仮定する。これは、第3章3.2節における3.5式に相当する。

$$\log z = a \log x + b \log y + c + \epsilon \quad 4.1$$

ただし、 a 、 b は回帰係数、 c は定数項、 ϵ は回帰残差である。

目的変数、説明変数ともに対数值としたのは、既往研究の線形モデルにならったものである（出来ら 1988, 市原ら 1974, 中尾 1980, 酒井ら 1982, 1983）。 x 、 y の2因子から予測される路面侵食量 z_{exp} と実際に観察される路面侵食量 z_{obs} の関係は、以下のようなになる。

$$\log z_{\text{exp}} = a \log x + b \log y + c \quad 4.2$$

$$\log z_{\text{obs}} = a \log x + b \log y + c + \epsilon \quad 4.3$$

各路線で得たデータ群から、最小二乗法により4.1式の線形モデルの回帰係数 a 、 b 及び定数項 c を推定した結果を表4.2に示す。図4.3、図4.6、図4.9、図4.12は、東飯田支線林道、仙郷林道、広根場支線林道、菅谷作業道の各計測データ群を、 $\log x$ 、 $\log y$ 、 $\log z$ を軸とする3次元空間にプロットしたものである。この3次元空間内に示されている灰色の平面は、4.2式で表される回帰平面である。また、図4.4、図4.7、図4.10、図4.13は横軸を

$\log x$, 縦軸を $\log z$ として計測データをプロットしたもの, 図 4.5, 図 4.8, 図 4.11, 図 4.14 は横軸を $\log y$, 縦軸を $\log z$ としてプロットしたものである。すなわち, これらの図は, 図 4.3, 図 4.6, 図 4.9, 図 4.12 を $\log x$ - $\log z$ 平面及び $\log y$ - $\log z$ 平面に正投影したものとなる。これらの図中の灰色のシンボルは, 各計測データ z_{obs} から残差 ϵ を除いた z_{exp} をプロットしたものである。すなわち, 灰色のシンボルの集合は, 4.2 式で表される回帰平面を正投影したものになる。

図 4.3~図 4.14 より, いずれの路線においても, 実際の路面侵食量 z_{obs} は回帰平面の上下に大きくばらついていることがわかる。表 4.2 に示すように, $\log x$ 及び $\log y$ は, 広根場支線林道のデータ群から推定した線形モデルを除き説明変数として有意であったが ($p < 0.01$), これらの線形モデルの自由度調整済決定係数は 0.2 未満であった。すなわち, 「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の 2 因子は実際の路面侵食量 z_{obs} のばらつきのごく一部しか説明していないと言える。

理論的には「縦断勾配 x 」が大きくなるほど, また「横断溝からの距離 y 」が長くなるほど「路面侵食量 z 」は大きくなるとされるため, 回帰係数 a , b はいずれも正の値となることが期待される。4 路線中 3 路線のデータ群から推定したモデルについてはこれに矛盾しないものとなったが, 広根場支線林道で得たデータ群から推定したモデルは b が負の値となり, 「横断溝からの距離 y 」は因子として有意でないという結果が得られた。また, 第 3 章 3.4 式からわかるように, a と b の値の比は, 既往研究で一般的に示されている $y = ax^{-\beta}$ 型の横断溝間隔の目安式の係数 β を意味する。既往研究では係数 β の値として, 1.5 ~2.2 程度の値が示されているが (出来ら 1988), 本研究で推定したモデルの回帰係数 a と b の比は, 仙郷林道で 1.4 となったものの, 東飯田支線林道で 16, 菅谷作業道で 4.3 と既往研究の β の上限を大きく上回る値となった。すなわち, これらの 2 路線においても, 「縦断勾配 x 」の寄与度に対する相対的な「横断溝からの距離 y 」の寄与度が, 既往研究の報告よりも小さいという結果となった。

表 4.2 路面侵食量予測モデルの推定結果

路線	回帰係数		定数項 <i>c</i>	自由度調整済 決定係数R ²	残差の 標準偏差	データ数
	<i>a</i>	<i>b</i>				
東飯田支線林道	0.391 **	0.0238 **	-1.91 **	0.117	0.423	3023
仙郷林道	0.152 **	0.111 **	-2.78 **	0.0489	0.517	2130
広根場支線林道	0.0358 *	-0.00720	-2.98 **	0.00194	0.430	1967
菅谷作業道	0.207 **	0.0482 **	-2.94 **	0.190	0.437	1734

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$

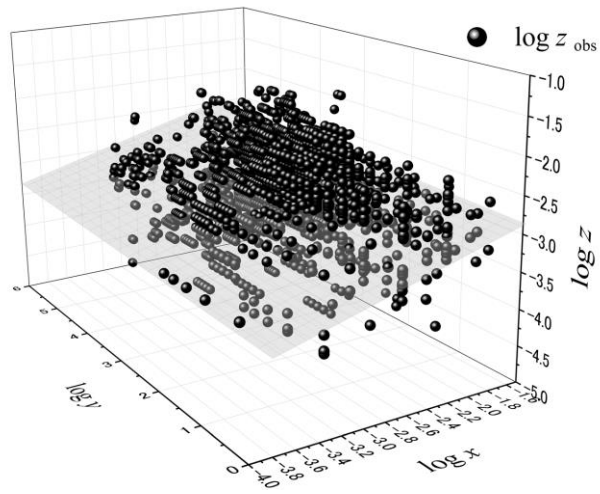


図 4.3 縦断勾配 x 及び横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (東飯田支線林道)

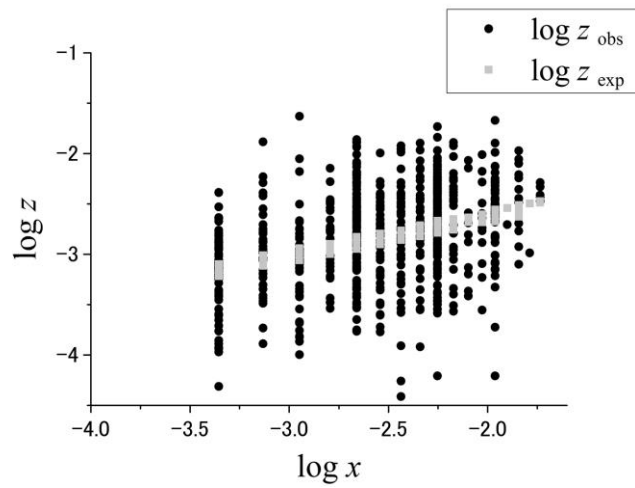


図 4.4 縦断勾配 x と路面侵食量 z との関係 (東飯田支線林道)

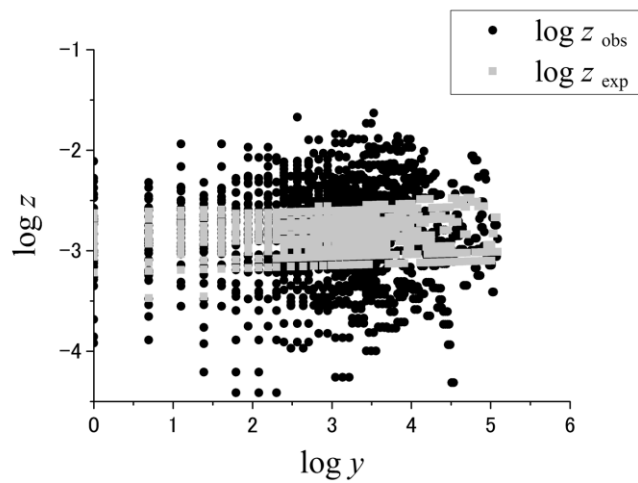


図 4.5 横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (東飯田支線林道)

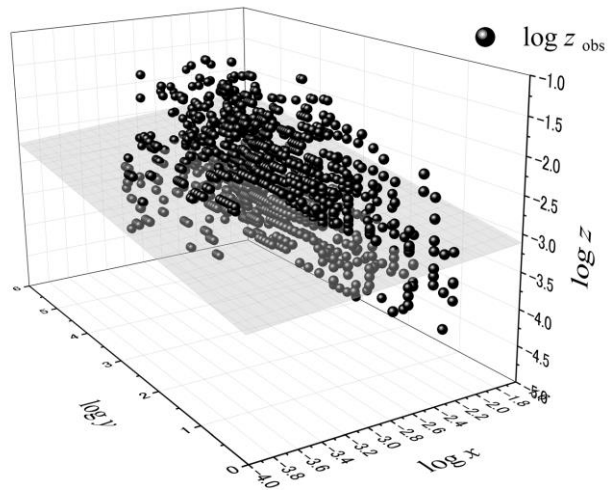


図 4.6 縦断勾配 x 及び横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (仙郷林道)

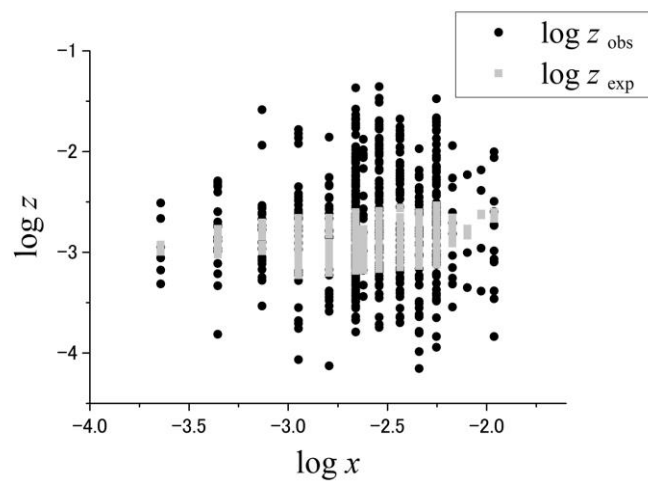


図 4.7 縦断勾配 x と路面侵食量 z との関係 (仙郷林道)

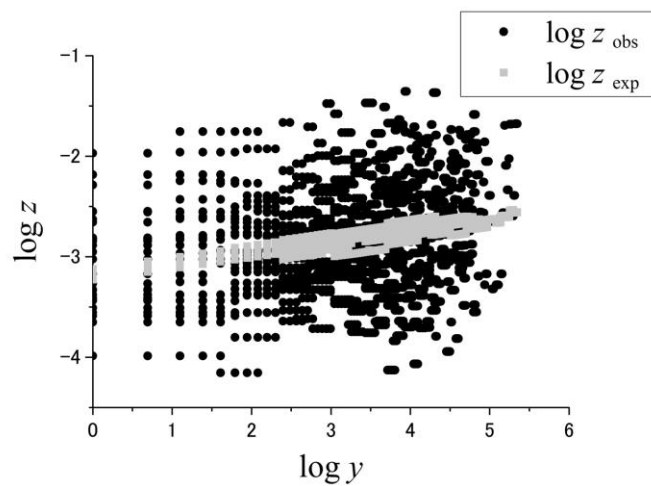


図 4.8 横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (仙郷林道)

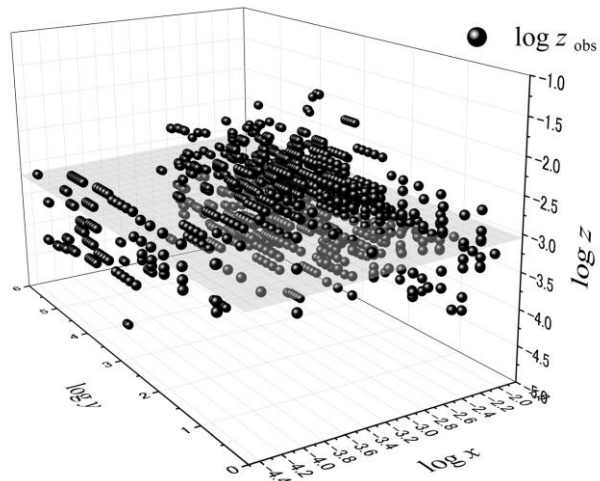


図 4.9 縦断勾配 x 及び横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (広根場支線林道)

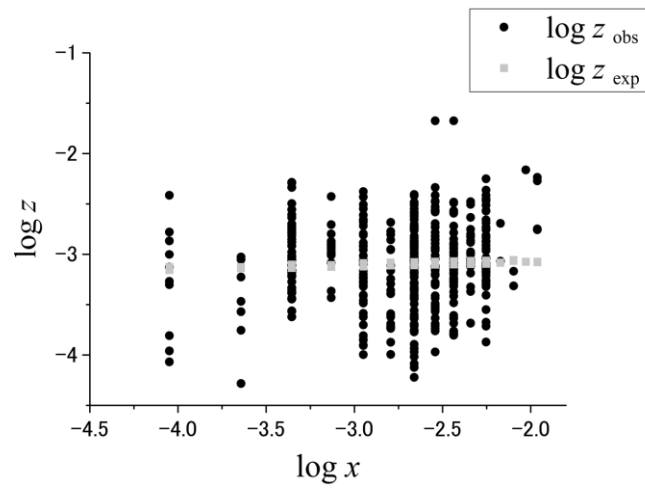


図 4.10 縦断勾配 x と路面侵食量 z との関係 (広根場支線林道)

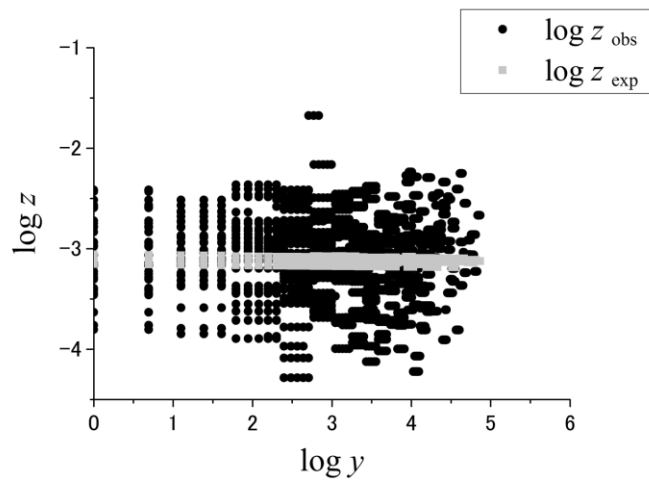


図 4.11 横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (広根場支線林道)

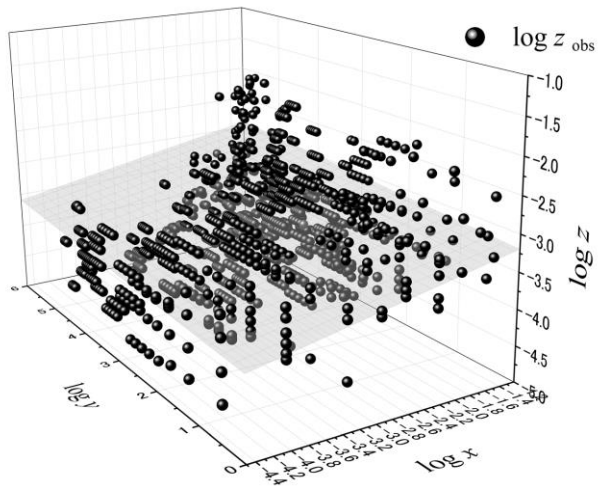


図 4.12 縦断勾配 x 及び横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (菅谷作業道)

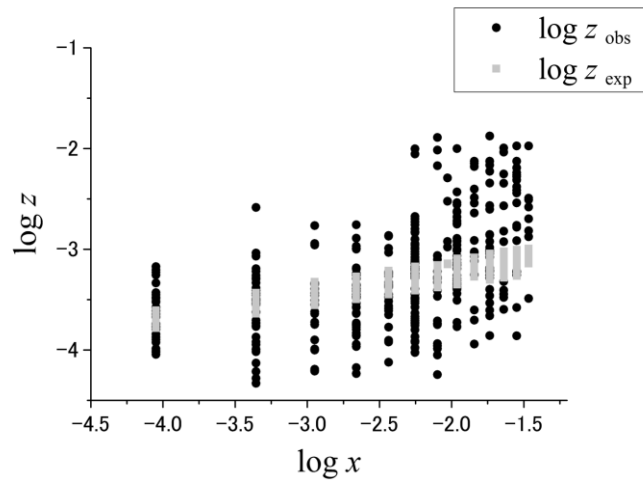


図 4.13 縦断勾配 x と路面侵食量 z との関係 (菅谷作業道)

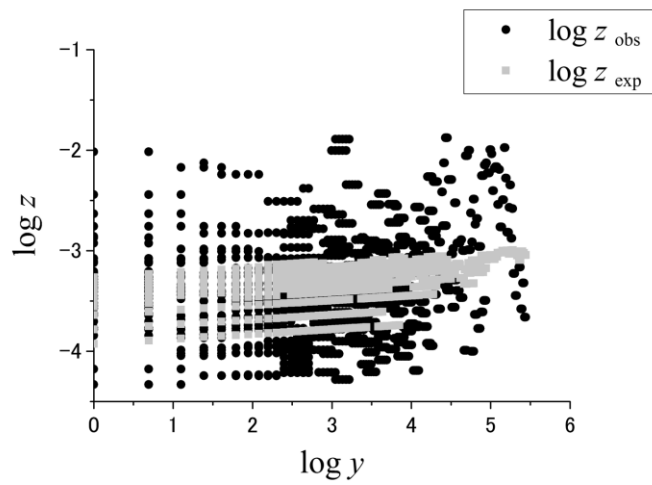


図 4.14 横断溝からの距離 y と路面侵食量 z との関係 (菅谷作業道)

4.3.2. 残差分布

推定されたモデルの残差 ϵ の標準偏差 σ は表 4.2 に示す通りであった。図 4.15, 図 4.18, 図 4.21, 図 4.24 は、残差 ϵ の分布を階級幅 0.1 とするヒストグラムで示したものである。いずれの路線においても、残差 ϵ の分布はほぼ左右対称な釣鐘型で、これを表現し得る関数として正規分布やロジスティック分布の確率密度関数が想起される。図中の実線は、残差分布が正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う場合の理論度数を、点線はロジスティック分布 $F(0, s)$ (ただし $s = \frac{\sqrt{3}\sigma}{\pi}$) に従う場合の理論度数を示している。観測された事象の生起確率がこれらの確率分布に従うか検討する手法として、カイ二乗適合度検定が考えられる。しかし、各群のデータ数は 1500~3000 と多く、帰無仮説の棄却域が広くなるため (保田 2004)、適合度検定には向かない。そこでここでは、残差の累積相対度数と、正規分布及びロジスティック分布の累積分布関数を直接比較することとした。正規分布との比較を図 4.16, 図 4.19, 図 4.22, 図 4.25 に、ロジスティック分布との比較を図 4.17, 図 4.20, 図 4.23, 図 4.26 に示す。正規分布の累積分布関数と残差の累積相対度数とのずれの最大値は、仙郷林道で 2.4 パーセントポイント (以後 pp と記す。), 東飯田支線林道で 3.7 pp, 広根場支線林道で 3.7 pp, 菅谷作業道で 3.4 pp であった。ロジスティック分布と残差の累積相対度数とのずれの最大値は、仙郷林道で 4.6 pp, 東飯田支線林道で 5.7 pp, 広根場支線林道で 4.9 pp, 菅谷作業道で 2.8 pp であった。このように、残差 ϵ の分布は最大数パーセントポイント程度のずれで正規分布やロジスティック分布で近似することが可能であった。正規分布とロジスティック分布とを比較すると、一路線を除き正規分布の方がずれの最大値が小さく、より良い近似になっていた。これらのことから、4.1 式の線形モデルは残差に正規性が仮定できる正規線形モデルであるとみなしてよい。残差分布が正規分布で近似できることから、3.2 節で提案した「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出手法が実行可能であると考えられる。

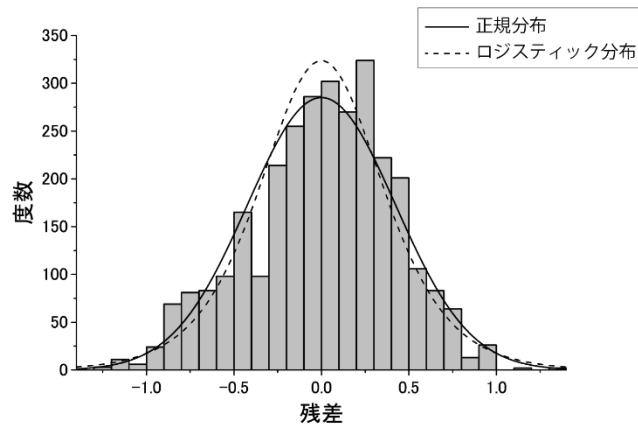


図 4.15 路面侵食量予測モデルの残差の度数分布（東飯田支線林道）

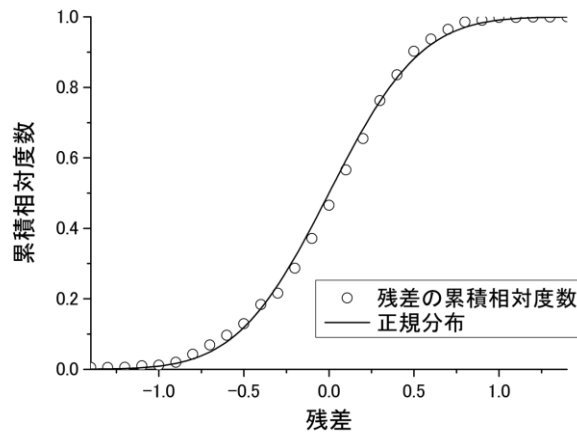


図 4.16 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布（東飯田支線林道）

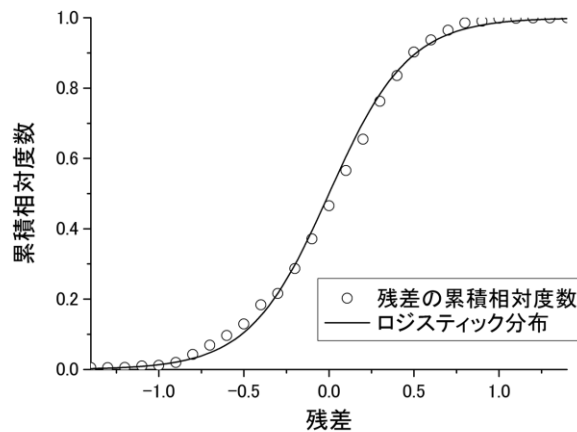


図 4.17 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布とロジスティック分布（東飯田支線林道）

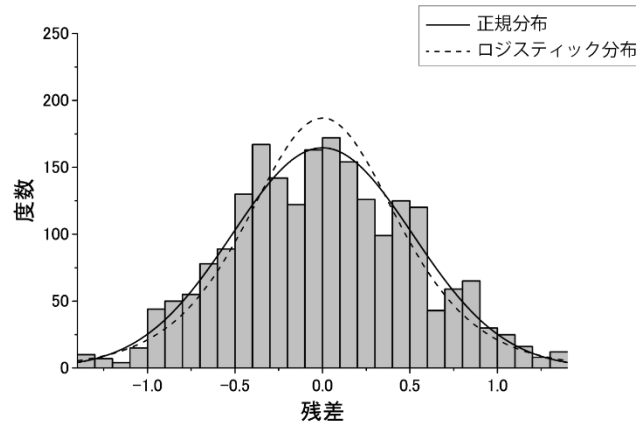


図 4.18 路面侵食量予測モデルの残差の度数分布（仙郷林道）

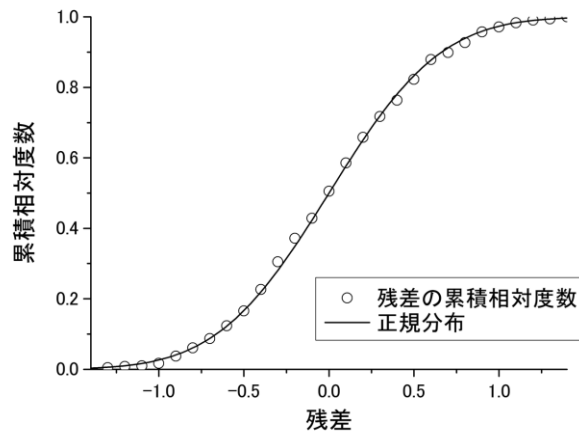


図 4.19 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布（仙郷林道）

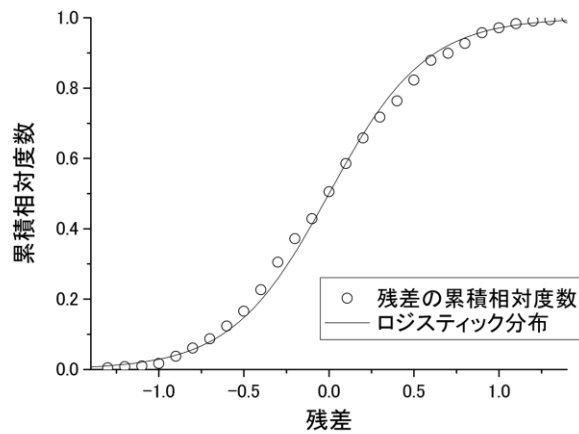


図 4.20 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布とロジスティック分布（仙郷林道）

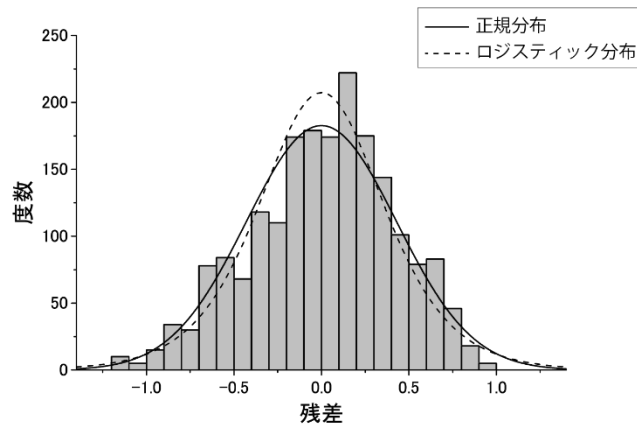


図 4.21 路面侵食量予測モデルの残差の度数分布（広根場支線林道）

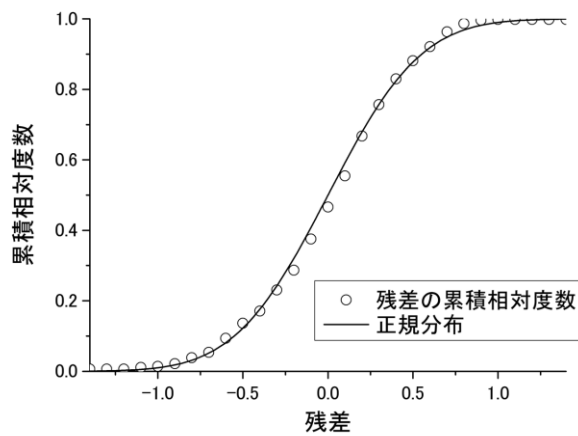


図 4.22 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布（広根場支線林道）

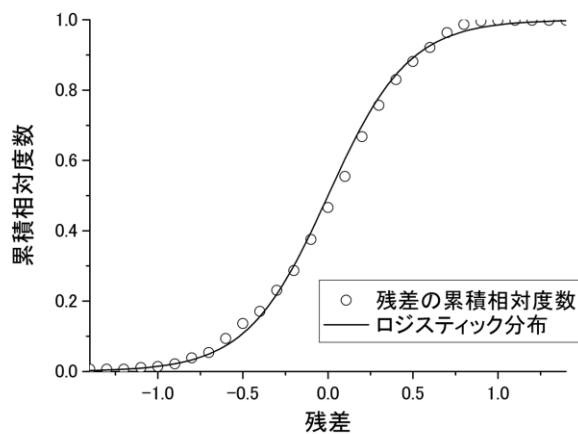


図 4.23 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布とロジスティック分布（広根場支線林道）

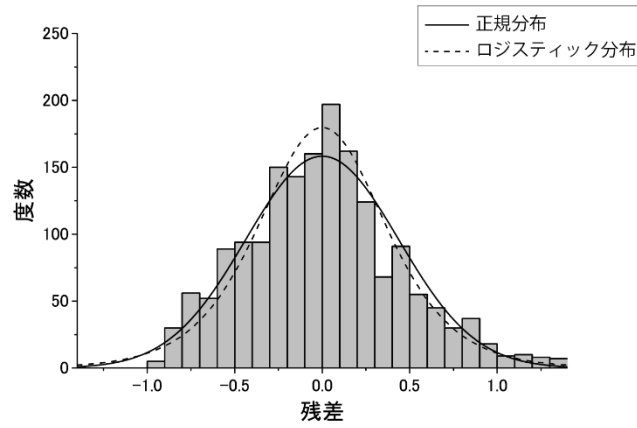


図 4.24 路面侵食量予測モデルの残差の度数分布 (菅谷作業道)

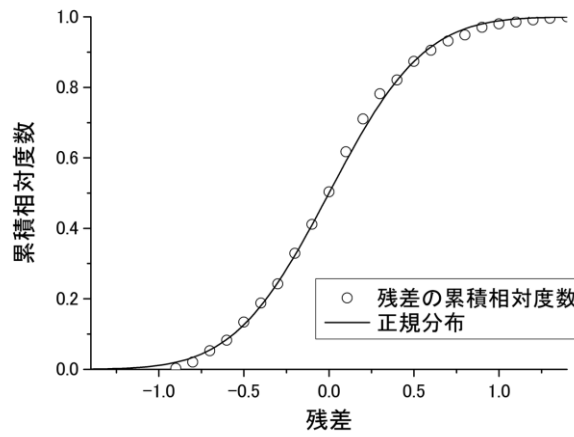


図 4.25 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布 (菅谷作業道)

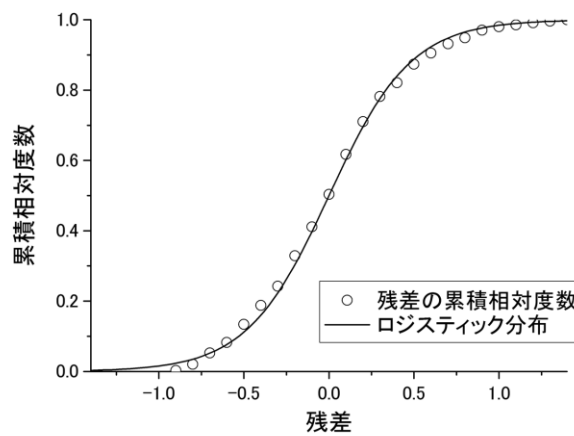


図 4.26 路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布とロジスティック分布 (菅谷作業道)

4.3.3. 母集団の設定と残差分布

4.3.2.項では、同一路線内で得たデータ群から 1 つのモデルを推定した場合、そのモデルの残差分布が正規分布で近似できることが明らかとなった。しかし、例えば母集団を「A 県内のすべての林道」などと設定した場合には、地質等の属性が必ずしも統一されていない複数の路線で得たデータ群で 1 つのモデルを推定することとなる。その場合にモデルの残差分布が正規分布で近似できないとすれば、横断溝間隔の目安導出を同じ手順で進めることができない。そこで、残差分布が正規分布で近似できるという性質が、母集団の設定の仕方にどの程度依存するのかという検証が必要である。

そこで、属性の異なる複数の路線で得たデータから 1 つのモデルを推定することを想定し、4 路線で得た 4 つデータ群から各群 1000 データずつ無作為に抽出し、計 4000 データから最小二乗法により 4.1 式の線形モデルを推定する操作を 5 回試行した。そのモデルの推定結果を表 4.3 に、各線形モデルの残差分布を図 4.27～図 4.36 に示す。残差の標準偏差 σ は 0.504～0.515 となり、路線別のデータから推定したモデルに比べて大きかった。しかし、残差の累積相対度数と正規分布 $N(0, \sigma^2)$ の累積分布関数とのずれは最大で 1.3 pp となり、残差分布はやはり正規分布で近似できると言って良い。これは、同一路線内で得たデータ群の中でも路面侵食量のばらつきは大きいため、相対的に路線間のばらつきは小さくなるためと考えられる。同一路線で得たデータ群から推定したモデルの標準誤差 σ が 0.4～0.5 程度なので、各路線のデータが 95% の確率で分布する範囲、すなわち $\log z_{\text{exp}} \pm 2\sigma$ の範囲を真数で表現すると $z_{\text{exp}} = 0.05 \text{ m}$ に対しては 0.02 m～0.11 m、 $z_{\text{exp}} = 0.07 \text{ m}$ に対しては 0.03 m～0.16 m 程度の幅となる。路面侵食量として通常発生し得る値がおおむね 0～0.3 m 程度と考えられる中で、各路線内でのデータの分布の幅が十数 cm と大きいため、路線間で分布が大きくずれることは考えにくい。したがって、ある程度属性の異なる林内道路が母集団の中にも含まれていても、得られるモデルの残差分布はやはり正規分布で近似できる場合が多いと考えられる。

しかしこの結果は、母集団の設定の仕方によらず常に正規線形モデルが得られることを

保証するものではない。また、属性の異なる林内道路を1つの母集団とすれば、得られるモデルの残差の標準偏差は大きくなり、路面侵食量の推定精度は低下する。したがって適切な母集団を設定することはやはり重要であり、どのような属性で母集団を記述すべきかという問題は、今後に残される課題である。

表 4.3 各路線 1000 データずつ抽出して路面侵食量予測モデルを推定した結果

	回帰係数		定数項 <i>c</i>	自由度調整済 決定係数R ²	残差の 標準偏差	データ数
	<i>a</i>	<i>b</i>				
試行1	0.197 **	0.0595 **	-2.68 **	0.0737	0.504	4000
試行2	0.199 **	0.0630 **	-2.69 **	0.0752	0.510	4000
試行3	0.194 **	0.0545 **	-2.67 **	0.0698	0.505	4000
試行4	0.202 **	0.0496 **	-2.64 **	0.0667	0.515	4000
試行5	0.211 **	0.0515 **	-2.62 **	0.0729	0.509	4000

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$

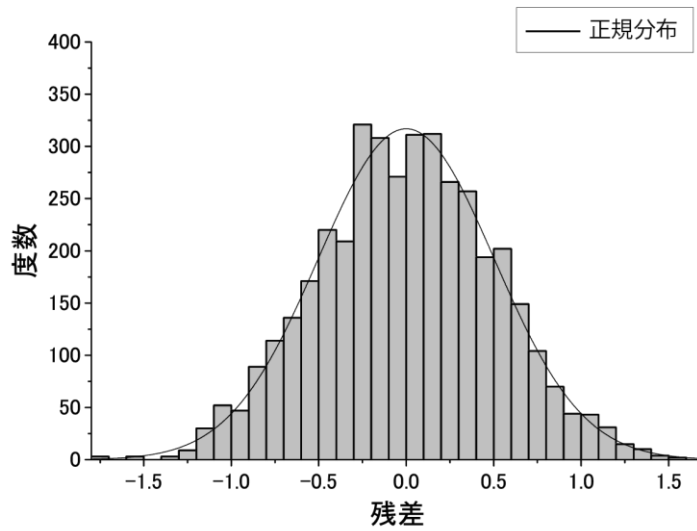


図 4.27 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差分布 (1 回目の試行)

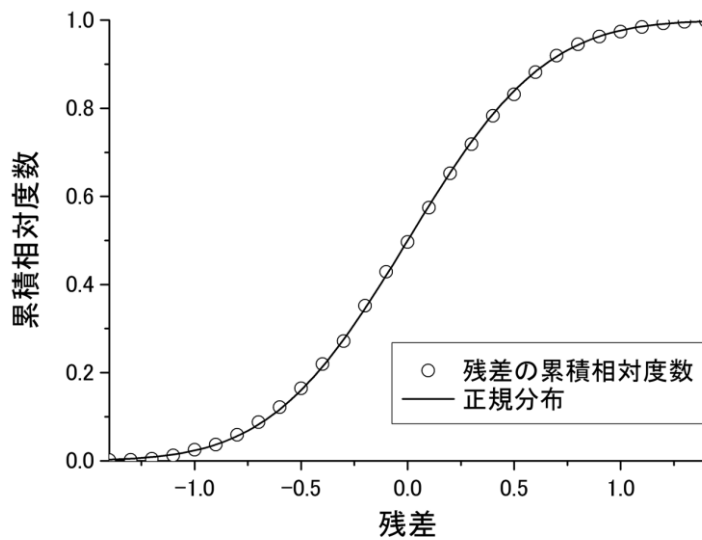


図 4.28 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布 (1 回目の試行)

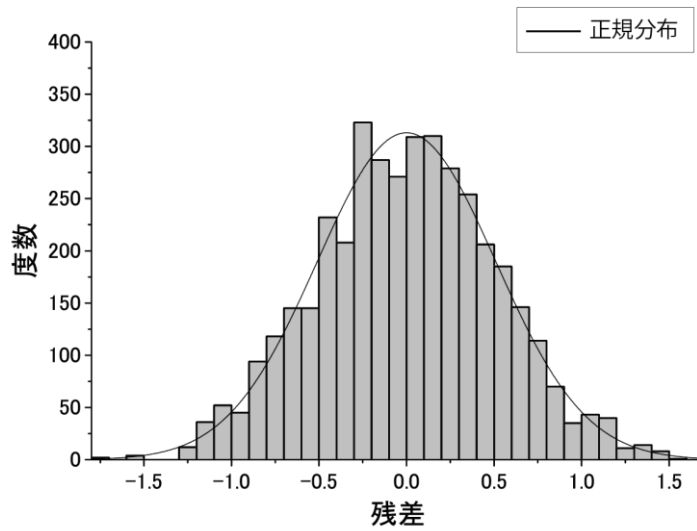


図 4.29 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差分布 (2 回目の試行)

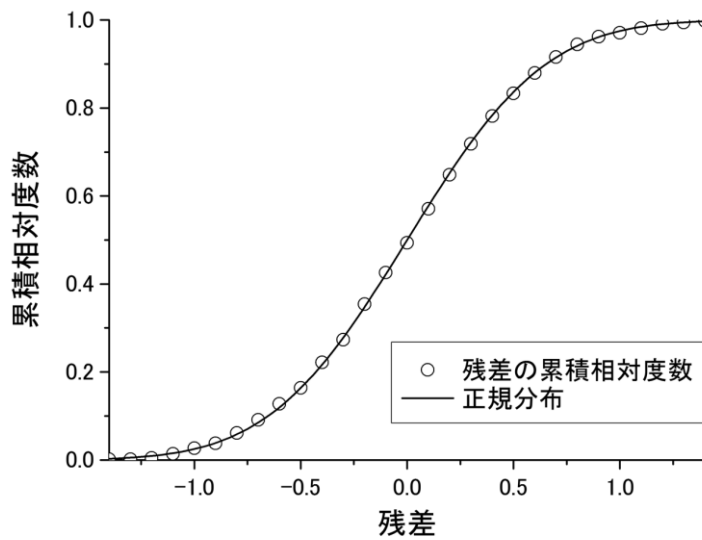


図 4.30 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布 (2 回目の試行)

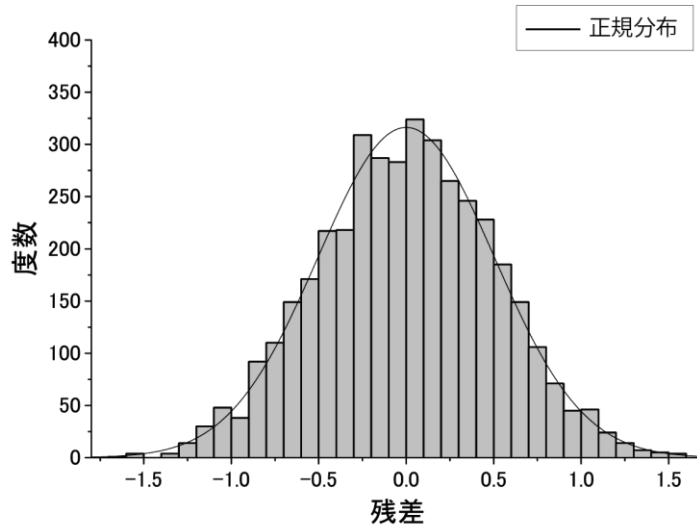


図 4.31 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差分布 (3 回目の試行)

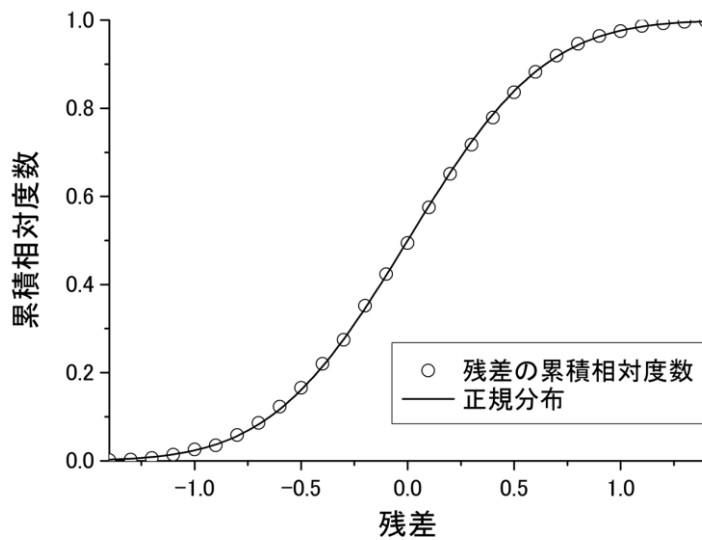


図 4.32 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布 (3 回目の試行)

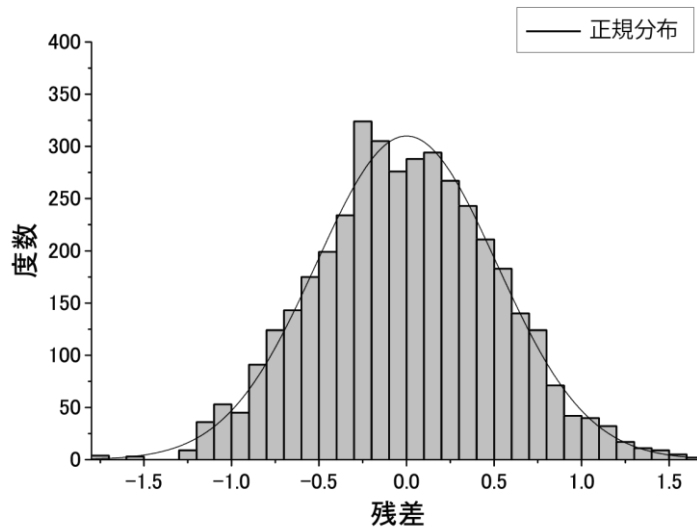


図 4.33 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差分布 (4 回目の試行)

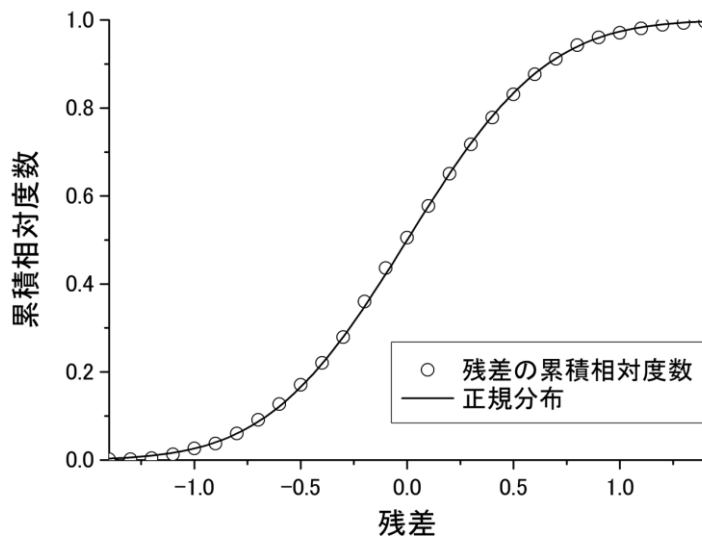


図 4.34 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布 (4 回目の試行)

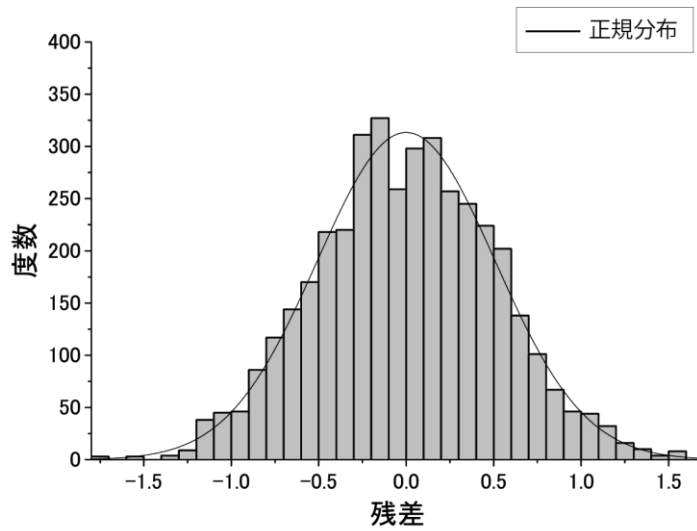


図 4.35 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差分布 (5 回目の試行)

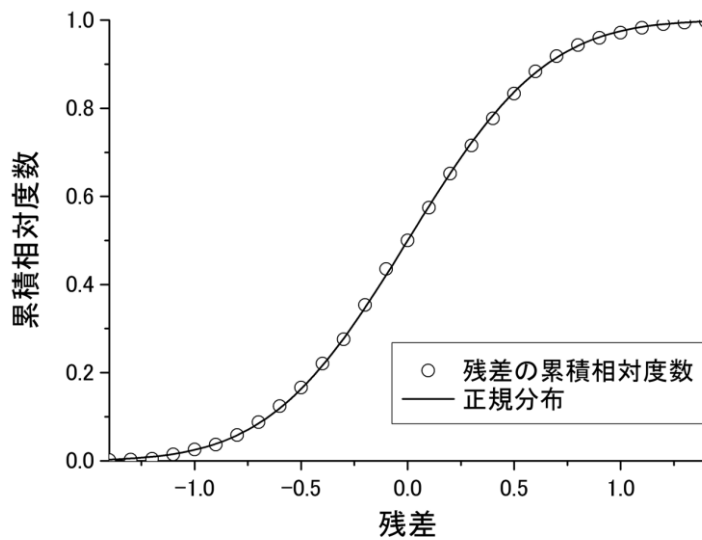


図 4.36 各路線 1000 データずつ抽出して推定した路面侵食量予測モデルの残差の累積相対度数分布と正規分布 (5 回目の試行)

4.4. 考察

4.4.1. 縦断勾配及び横断溝からの距離が路面侵食量に与える影響

「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」は、4 路線中 3 路線で路面侵食量予測モデルの因子として有意であると認められた。しかし 2 因子からなるモデルの決定係数は小さく、2 因子は路面侵食量のばらつきのごく一部しか説明していないことが明らかとなった。特に、「横断溝からの距離 y 」は、1 路線において因子として有意でないという結果が得られたほか、2 路線でも、「縦断勾配 x 」の寄与度に対する相対的な寄与度が既往研究の報告よりも小さいという結果が得られた。これには、以下のような理由が考えられる。まず 1 点目としては、流水の侵食作用だけではなく、車両の通行によるわだちの形成等が路面侵食量に大きな影響を及ぼしていることが挙げられる。既往研究でも、流水の侵食作用だけでなく車両の走行による路面の変形も発生する林内道路においては、横断溝からの距離と路面侵食量との間に明確な関係が見られなかったという報告が見られる（出来ら 1988）。本研究の調査路線も、ある程度交通量があり、わだちの形成と流水による侵食作用が相まって路面の変形が進んでいると考えられるため、「横断溝からの距離 y 」の寄与度が低くなる傾向が見られた可能性がある。

2 点目としては、実際の林内道路における路面流下水の流量は「横断溝からの距離 y 」に必ずしも比例しないということが考えられる。第 1 章 1.3 節に述べたように、路面流下水の構成成分の一つであるホートン型地表流の流量は、理論的には「横断溝からの距離 y 」に比例すると考えられる。しかし実際の林内道路においては、遮断流の発生や上流端横断溝の越流によって、横断溝の直後でも路面流下水の流量が多くなる場合がある。一方で、谷側へのわずかな横断勾配によって自然に路面流下水が排水される場合もあり、必ずしも横断溝からの距離に比例して路面流下水の流量が増加するわけではないと考えられる。既往研究では調査路線の中からある程度恣意的に調査対象区間を選定している場合が多く、これらの現象の痕跡（例えば上流端横断溝の越流の痕跡等）が見られる排水区間を敢えて調査対象区間として選定したかは判然としない。それに対して本研究では、これらの現象も路面侵食

量にばらつきをもたらす要因の1つと考え、調査対象から除外しなかった。結果として、本研究のデータから推定されるモデルでは、「横断溝からの距離 y 」の寄与度が低くなる傾向が見られたと考えられる。

このように、様々な要因が路面侵食量に影響を与える実際の林内道路においては、相対的に「横断溝からの距離 y 」の影響が小さくなると考えられる。横断溝を適切な間隔で配置するという路面侵食対策は、この「横断溝からの距離 y 」をコントロールすることを意味する。しかし上記の考察を踏まえれば、横断溝からの距離に関わらず路面侵食の発生が避けられない場所も存在すると考えられる。この点からも、ある程度路面補修の負担が生じることを前提として横断溝配置を考える必要があることが確認される。

4.4.2. 残差分布の現実的意味

4 路線のデータから推定したモデルの残差の標準偏差は 0.4~0.5 程度であり、残差分布は正規分布で近似できることが明らかとなった。この残差分布の現実的な意味を考察する。例えば、仙郷林道で得たデータ群から推定したモデルによれば、縦断勾配 0.10、横断溝からの距離 50 m の地点における路面侵食量（対数値）の予測値 $\log z_{\text{exp}}$ は -2.80、すなわち真数をとると 0.06 m となる。しかし、残差 ϵ が正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従って生じるため、実際の路面侵食量の対数値 $\log z_{\text{obs}}$ が 95% の確率で取り得る値の範囲は、 $\log z_{\text{exp}} \pm 2\sigma$ の範囲、すなわち真数をとると 0.02 m から 0.17 m までと推定される。0.02 m の路面侵食量とは、見た目にほぼ平滑で良好な路面状態だが、路面侵食量 0.17 m とは車両の通行の支障となるレベルである。つまり、地質区分や降雨量、開設からの経過年数といった基本的な属性が等しい同一路線内にあり、かつ「縦断勾配 x 」、「横断溝からの距離 y 」が同じ場所であっても、その他の諸要因の影響により、ほとんど侵食が発生しない場合もあれば車両の走行に支障をきたすほどの侵食が発生する場合もあるということを意味する。第 2 章の結果に加えこのことから、横断溝間隔の目安は「許容水準 γ を超える路面侵食を完全に防止するもの」ではなく、「その発生確率をある程度に抑えるもの」と捉える必要があることが示され、要

補修率に応じた横断溝間隔の目安導出の必要性が確認される。

4.4.3. 残差の空間的分布

本研究では、実際に林内道路を開設する際に多数の因子の水準を把握することは困難であることを踏まえ、容易に把握できる少数の因子からなる回帰式を構築しその残差分布を把握するという方針をとった。その結果、既に述べたように「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の 2 因子は路面侵食量のばらつきのごく一部しか説明しておらず、残差の分散は極めて大きくなることが明らかとなった。したがって、もう一つの研究の方向性として、土質や地形といった他の要因も因子に加え、より残差の小さい路面侵食量予測モデルを構築することも重要である。本研究ではその方向に深く立ち入ることはしないが、本研究で得られたモデルの残差の空間的分布を表現することで、路面侵食量に影響を与える要因を見出す足掛かりを得ることができる。本研究では、路面侵食量のデータ収集の際に GPS 受信機を用いて各データ計測点の位置情報も記録した。その位置情報を用いれば、図 4.37～図 4.40 に示すように、各計測点におけるデータの残差 ϵ の値を地図上にカラースケールで表現することができる（ただし、図 4.37～図 4.40 では、1 辺が 10 m のセルごとに一つの値（色）を与えている。つまり、そのセル内に位置する約 10 データの残差の平均値をそのセルの値としている）。この図において赤系統の色で着色された地点では、2 因子に基づく予測よりも大きな路面侵食量が観察されたことを意味する。例えば、広根場支線林道ではヘアピンカーブの周辺に、菅谷作業道では谷地形の周辺に赤系統の色が分布していることから、道の平面線形や地形が影響要因になっている可能性が示唆される。このように残差の空間的分布を表現することは、路面侵食に影響を与える要因を見出そうとする際に非常に有効なツールとなると考えられる。

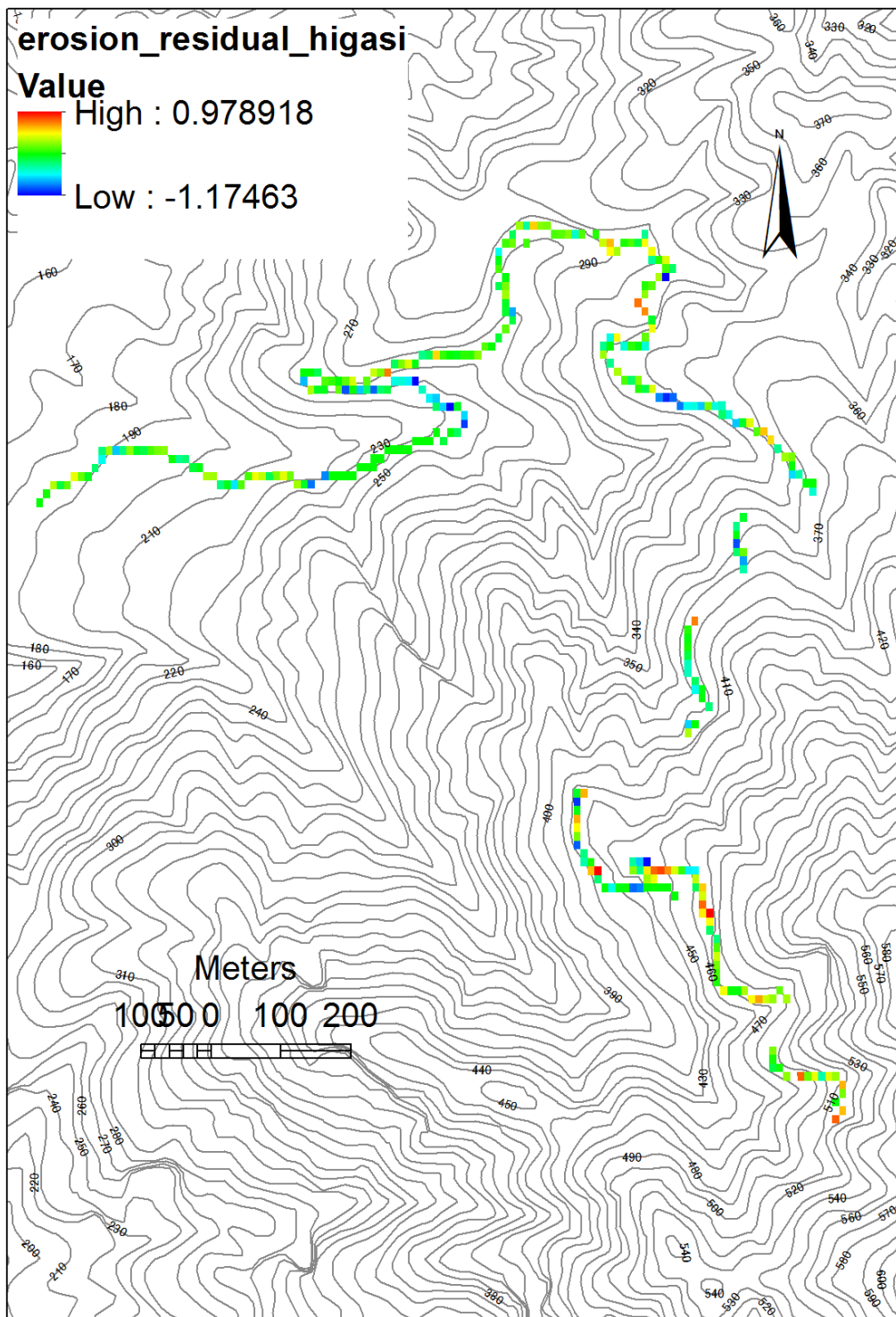


図 4.37 路面侵食量予測モデルの残差の空間的分布（東飯田支線林道）

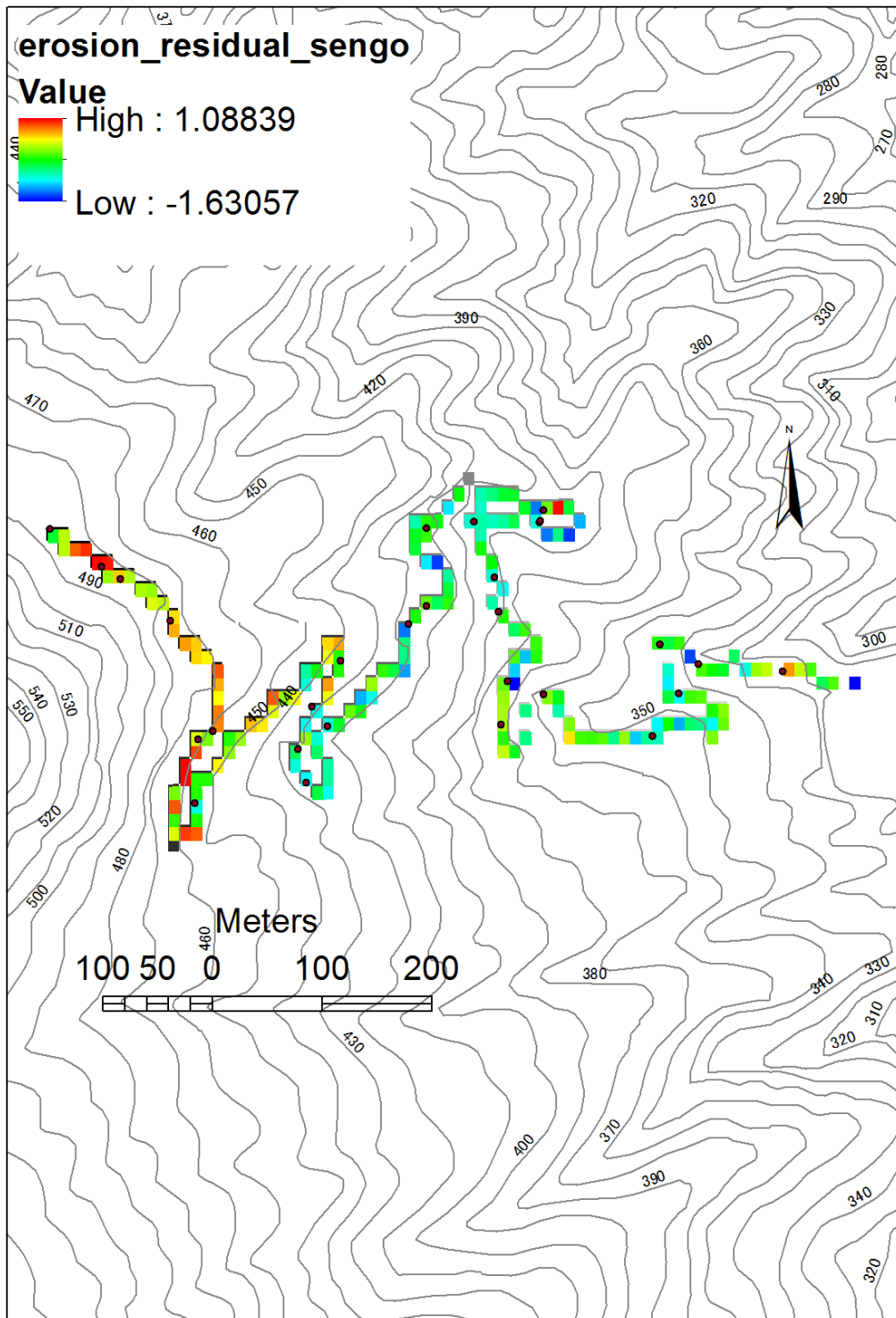


図 4.38 路面侵食量予測モデルの残差の空間的分布 (仙郷林道)

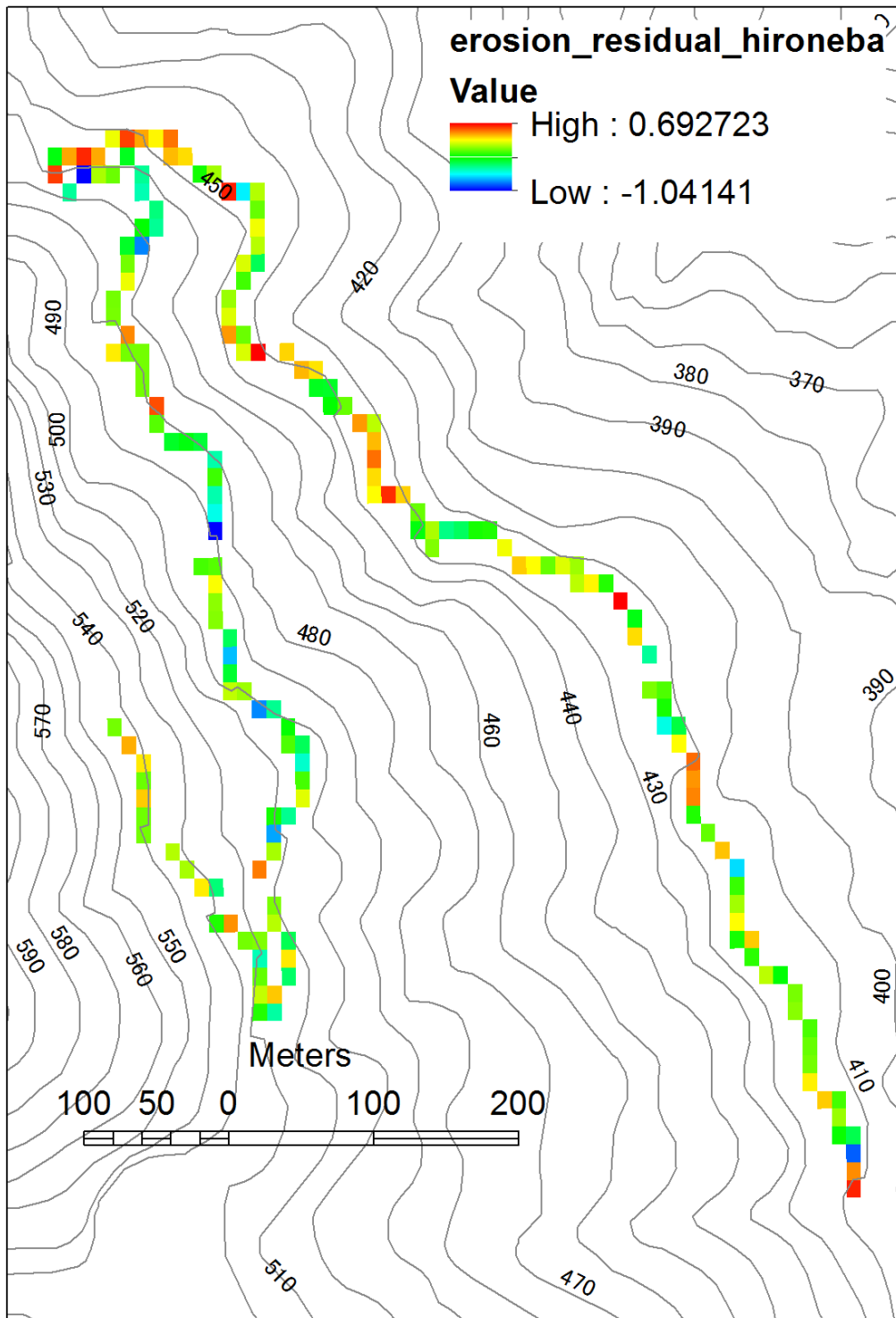


図 4.39 路面侵食量予測モデルの残差の空間的分布（広根場支線林道）

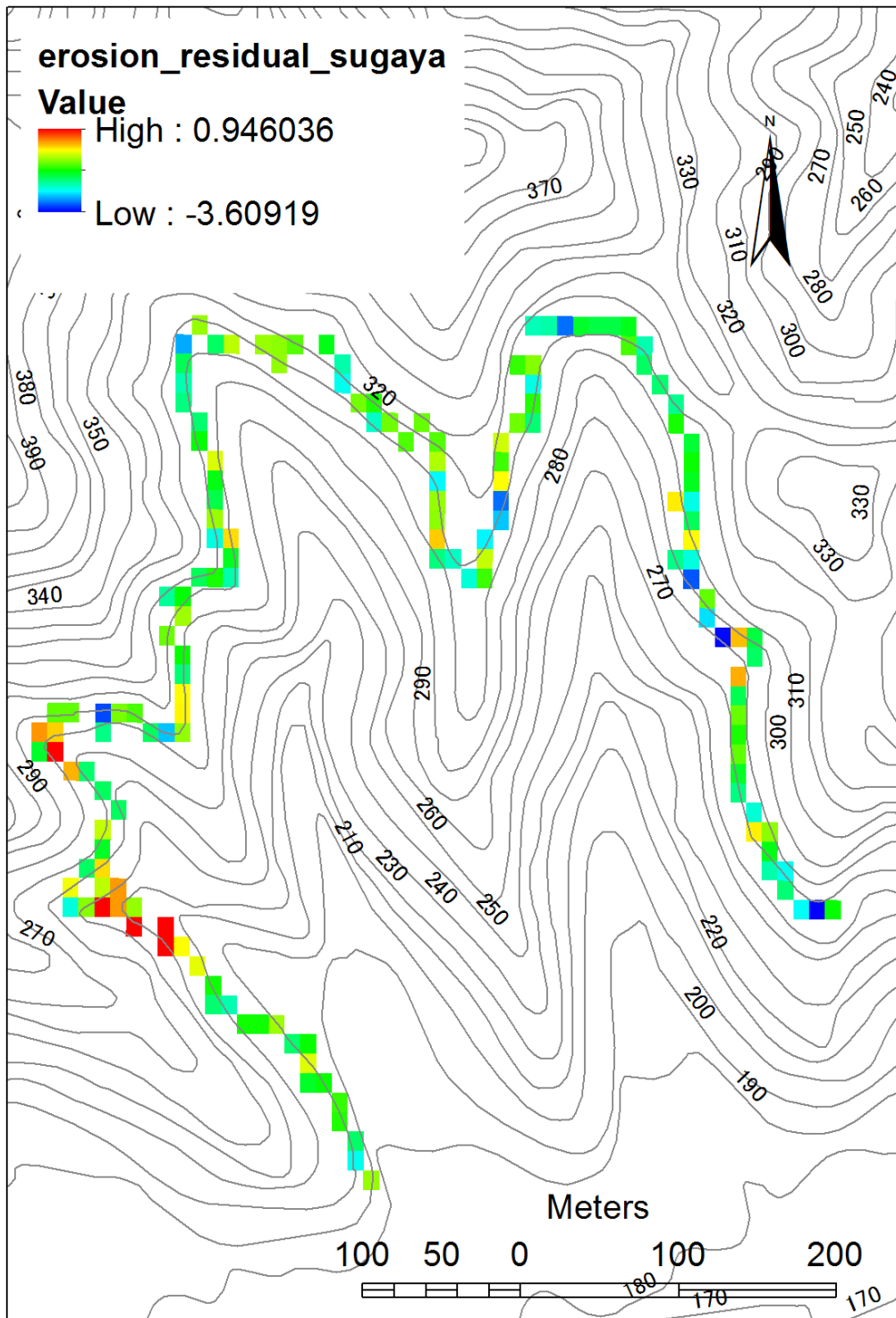


図 4.40 路面侵食量予測モデルの残差の空間的分布（菅谷作業道）

4.5. まとめ

第 3 章で提案した手法で「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出するためには、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の 2 因子からなる路面侵食量予測モデルの残差 ϵ が、何らかの確率分布に従って発生することが前提となる。そこで本章では、実際の林内道路 4 路線で計測した路面侵食量のデータをもとに路面侵食量予測モデルを推定し、その残差 ϵ の分布がどのような確率分布で近似できるか検討した。その結果、モデルの残差 ϵ の分布は正規分布で近似できることが明らかとなった。地質区分や降雨量等の属性が統一されている同一路線内で得たデータ群から推定されたモデルだけでなく、それらが統一されていない複数の路線で得たデータ群から推定されたモデルについても、残差分布は正規分布で近似できる場合が多いと考えられる。これは、同一路線内でも路面侵食量のばらつきは大きく、相対的に路線間のばらつきは小さくなるためである。残差分布が正規分布で近似できるという性質を用いれば、第 3 章で提案した手法で「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出することが可能であると考えられる。第 5 章では、残差分布が正規分布で近似できることを踏まえ、「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」の導出方法を具体化する。

また、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の 2 因子は「路面侵食量 z_{obs} 」のばらつきのごく一部しか説明していないことが明らかになった。2 因子からなるモデルの残差 ϵ の標準偏差 σ の大きさから、2 因子の水準が同程度であっても、ほとんど侵食が発生しない場所もあれば車両の走行に支障をきたすほどの侵食が発生する場所もあると考えられる。特に「横断溝からの距離 y 」の寄与度は既往研究の報告よりも小さくなる傾向が見られた。横断溝を適切な間隔で配置するという路面侵食対策はこの「横断溝からの距離 y 」をコントロールすることを意味するが、それだけでは許容水準を超える侵食の発生が避けられない場所もあると考えられる。このことから、横断溝間隔の目安は許容水準を超える路面侵食を確実に防止するものではなく、一部の区間では補修が必要になることを前提に用いるべきであると考えられる。

路面侵食量にばらつきをもたらす要因としては、切取法面からの遮断流の発生量、谷の横断部からの距離（谷の横断部付近では豪雨時に渓流水が暗渠等を越流して路面に流入することで、路面侵食が助長される場合があるため）、上流端横断溝の機能状況、曲線部・直線部といった線形、路面の透水性、土質等様々なものが考えられる。これらの要因も因子に加えてモデルを構築すれば、2因子のみからなるモデルよりも残差 ϵ の標準偏差 σ は小さくなる可能性がある。因子の数を極端に増やすことは横断溝間隔の目安の実用性の面から望ましくないが、設計時点で容易に把握でき、かつ路面侵食量に大きな影響を与える因子を選定してモデルに加えることは、今後の可能性として検討すべきである。特に、路線の平面線形（直線部、カーブの別）等、路線自体の構造に関わる因子をモデルに加えれば直ちに設計に反映できるため、積極的に検討すべきである。本研究は少数の因子からなるモデルを構築した際の残差分布を把握するという方針をとるものだが、残差を縮小するための因子の特定ももう一つの研究の方向性として並行して進めていくことが重要である。

5. 要補修率に応じた横断溝間隔の目安導出手法の具体化

5.1. はじめに

第3章では、確率と期待値の考え方を応用して「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を提案した。その方法に従って実際に目安の導出を行うには、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子からなる路面侵食量予測モデルの残差 ϵ が、何らかの確率分布に従って発生することが前提となる。第4章で実際の路面侵食量データを用いてその残差分布を検討したところ、正規分布で近似できることが明らかとなった。そこで本章では、残差分布が正規分布に従うことを利用して、第3章で提案した「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」の導出手法を具体化した。そして、例として仙郷林道で得た路面侵食量のデータ群から推定した路面侵食量予測モデルをもとに、実際に目安の導出を行った。

5.2. 「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出手法の具体化

第4章の結果より、適切に設定された母集団に属する林内道路で計測した路面侵食量のデータ群から第4章4.1式型の線形モデルを推定すると、その残差 ϵ の分布は正規分布で近似できる。すなわち残差 ϵ の分布を表現する確率分布 $g_{\sigma}(\epsilon)$ は以下のようなになる。

$$g_{\sigma}(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}\right) \quad 5.1$$

ただし、 σ は推定した線形モデルの残差 ϵ の標準偏差である。

この時、縦断勾配が x 、上流側横断溝からの距離が y である地点において、路面侵食量 z が許容水準 γ を超える確率 $P_{x,y}(z > \gamma)$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
P_{x,y}(z > \gamma) &= \int_{\gamma}^{\infty} g_{\sigma}[\log z - f_2(x, y)] dz \\
&= \int_{\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{[\log z - f_2(x, y)]^2}{2\sigma^2}\right\} dz
\end{aligned}
\tag{5.2}$$

ただし,

$$f_2(x, y) = a \log x + b \log y + c \tag{5.3}$$

である。なお、5.2式は、第3章3.8式に相当する。

例として、仙郷林道で得たデータ群から推定した線形モデルをもとに、「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子と、許容水準 γ を超える侵食発生確率 $P_{x,y}(z > \gamma)$ との関係を求め、図 5.1 に示した。なお、許容水準 γ は任意に設定することができるが、ここでは一例として γ を 0.10 m として計算を行った。また、図 5.2 は、縦断勾配が 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 の時の「横断溝からの距離 y 」と侵食発生確率 $P_{x,y}(z > 0.10)$ との関係を示したものである。なお、本章で以降に示す図も、すべて仙郷林道のデータ群から推定したモデルをもとにして、許容水準 γ を 0.10 m として求めたものである。

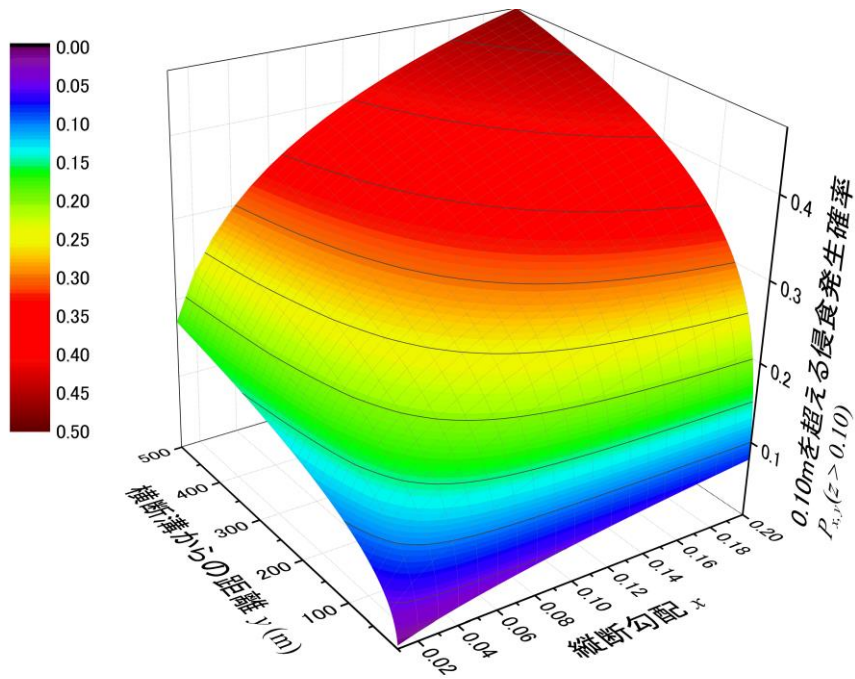


図 5.1 許容水準 γ (0.10 m) を超える路面侵食発生確率 $P_{x,y}(z > 0.10)$ (仙郷林道)

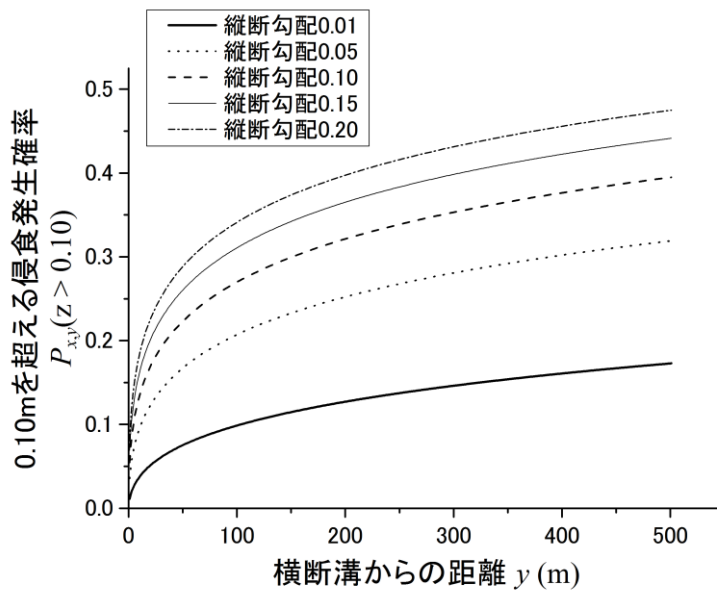


図 5.2 横断溝からの距離 y と許容水準 γ (0.10 m) を超える路面侵食発生確率 $P_{x,y}(z > 0.10)$ (仙郷林道)

第3章 3.9式に示すように、この $P_{x,y}(z > \gamma)$ を y で偏微分すれば、上流端横断溝から許容水準 γ を超える侵食が開始する地点までの距離 y (侵食開始距離 y) の確率密度関数 $p_{x,y}(y)$ が得られる。しかし、正規分布の累積分布関数である 5.2式は解析的に解くことができないため、 y で偏微分することができない。そこで、正規分布の累積分布関数の近似式である Williams の近似式を用いる。5.2式は、以下のように近似される。

$$P_{x,y}(z > \gamma) \cong \begin{cases} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2}{\pi} \left(\frac{\log \gamma - f_2(x,y)}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} \right\}, & \log \gamma - f_2(x,y) \geq 0 \\ \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2}{\pi} \left(\frac{\log \gamma - f_2(x,y)}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} \right\}, & \log \gamma - f_2(x,y) < 0 \end{cases} \quad 5.4$$

この近似により、 $P_{x,y}(z > \gamma)$ を y で偏微分することが可能になる。

$$\frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z > \gamma) = \pm \frac{bA}{\pi y} \left[1 - \exp \left(-\frac{2}{\pi} A^2 \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{2}{\pi} A^2 \right) \quad 5.5$$

ただし

$$A = \frac{\log \gamma - f_2(x,y)}{\sigma} \quad 5.6$$

とおいた。なお、5.5式の右辺の符号が正となるのは $\log \gamma - f_2(x,y) < 0$ の時、負となるのは $\log \gamma - f_2(x,y) > 0$ の時である。

図 5.3 に、侵食開始距離 y と $\frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z > 0.10)$ との関係を示す。 $y = 0$ の付近で $\frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z > 0.10)$ が無限大に発散しているのは、線形モデルに横断溝からの距離 y の対数値を利用していることに起因する必然的な結果である。しかし、実際の林内道路における路面侵食量の計測は、上流端横断溝からの距離が 1 m 以上の計測点で行ったため、それより小

さな y についてこのモデルを拡張することは適切でない。そこで、横断溝からの距離 1 m 以下の地点で γ を超える侵食が開始する累積確率の分は、すべて横断溝からの距離 1 m の地点で開始するものとみなし、以下のように $y \geq 1$ で $p_{x,\gamma}(y)$ を定義することとした。

$$p_{x,\gamma}(y) = \begin{cases} P_{x,1}(z \geq \gamma), & y = 1 \\ \frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z \geq \gamma), & y > 1 \end{cases} \quad 5.7$$

この定義によれば、図 5.4 に示すように $p_{x,\gamma}(y)$ は $y = 1$ において不連続となる（図 5.4 は $y = 1$ 付近を拡大して表示したものである）。

長さ d の排水区間において、侵食開始距離が y であった場合、要補修延長 w は第 3 章 3.10 式より $w = d - y$ となる。長さ d 、縦断勾配 x の排水区間における要補修延長 w を確率変数と考えれば、確率密度関数 $h_{x,\gamma,d}(w)$ は、 $p_{x,\gamma}(y)$ を用いて第 3 章 3.11 式のように表現できる。

図 5.5 に、例として長さ $d = 100$ m、縦断勾配 $x = 0.10$ の排水区間における、要補修延長 w の確率密度関数 $h_{x,\gamma,d}(w)$ を示した。なお、式 5.7 に示したように $y = 1$ m において $p_{x,\gamma}(y)$ は不連続となるため、この確率密度関数は $w = d - 1 = 99$ m において不連続となる。

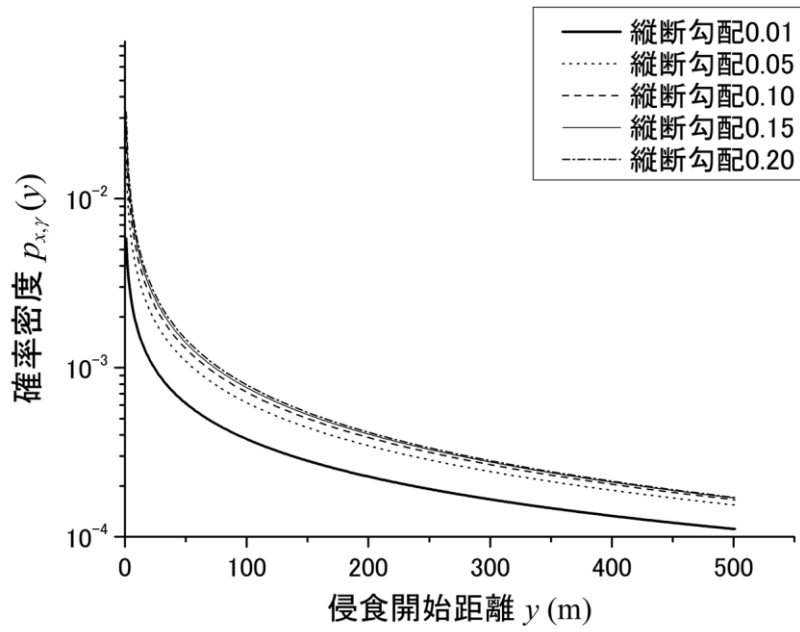


図 5.3 侵食開始距離 y の確率密度関数 $\frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z > 0.10)$

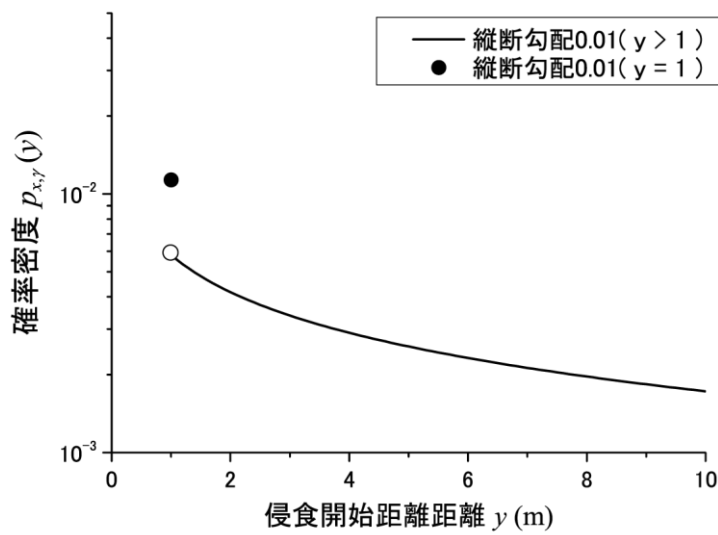


図 5.4 侵食開始距離 y の確率密度関数 $\frac{\partial}{\partial y} P_{x,y}(z > 0.10)$ ($y = 1$ 付近拡大図)

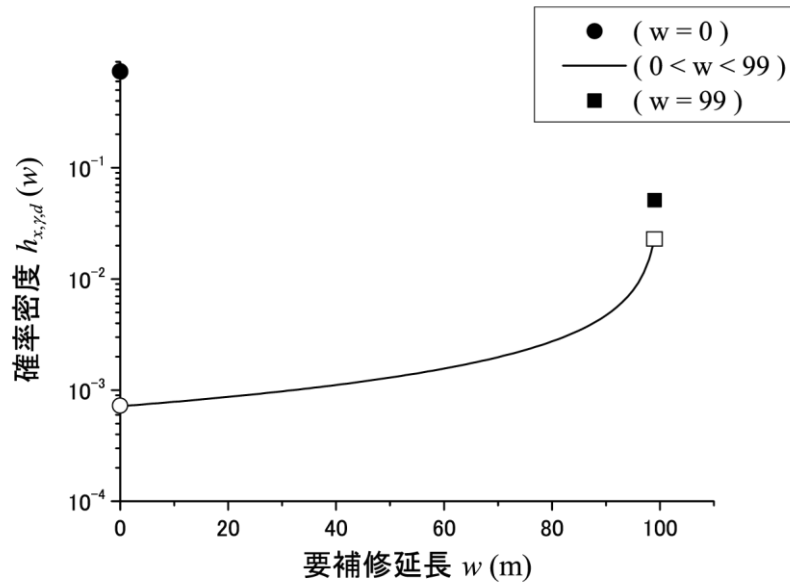


図 5.5 要補修延長 w の確率密度関数 $h_{x,\gamma,d}(w)$

この確率密度関数を用いて、長さ d の排水区間における要補修延長 w の期待値 $E_{x,\gamma,d}(w)$ が以下のように求められる。

$$\begin{aligned}
 E_{x,\gamma,d}(w) &= \int_0^d w h_{x,\gamma,d}(w) dw \\
 &= 0 + \int_0^{d-1} w p_{x,\gamma}(d-w) dw + (d-1) P_{x,1}(z \geq \gamma)
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

この期待値 $E_{x,\gamma,d}(w)$ を排水区間の延長 d で除したものが、要補修率 R_r となる。

$$R_r = \frac{E_{x,\gamma,d}(w)}{d}
 \tag{5.9}$$

本来であれば、5.9 式の R_r に林内道路の開設主体が適切と考える要補修率 R_{ropt} を代入し

て d について解くことで、縦断勾配 x の区間において要補修率を R_{ropt} にするための横断溝間隔の目安 d が得られる。しかし、 $p_{x,\gamma}(y)$ を表す 5.5 式の形が複雑であるため、5.8 式の右辺第 2 項の定積分の計算を解析的に行うことは困難であり、5.9 式を d について解くことができない。そこで、幅 Δw の微小区間内では $p_{x,\gamma}(y)$ が一定であるとみなして、以下のような近似を行うこととした。

$$E_{x,\gamma,d}(w) \cong 0 + \sum_{k=1}^n \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta w p_{x,\gamma} \left[d - \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta w \right] \Delta w + (d-1) P_{x,1}(z \geq \gamma) \quad 5.10$$

ただし、 n は $\frac{d-1}{\Delta w}$ の整数部分である。

この近似を用いれば、具体的な縦断勾配 x 及び横断溝間隔 d に対する $E_{x,\gamma,d}(w)$ をコンピュータによる数値計算で求めることができ、それを d で除して R_r を算出することができる。そして、 R_r が目標とする要補修率 R_{ropt} に最も近くなる時の横断溝間隔 d を、縦断勾配 x に対する横断溝間隔の目安とすればよい。5.10 式による近似を行う上で、微小区間 Δw をどの程度に設定すれば良いか検討するため、仙郷林道のデータを用いて、 $\Delta w = 0.5, 0.1, 0.05$ の 3 パターンでそれぞれ横断溝間隔の目安を求めたところ、 $\Delta w = 0.1$ とした場合と $\Delta w = 0.05$ とした場合で整数部分に違いはなかった。したがって、1メートル単位で横断溝間隔の目安を求める上では、 $\Delta w = 0.1$ 程度とすれば十分であると考えられる。図 5.6 に、 $\Delta w = 0.1$ として求めた要補修率 R_r を示す。この 3 次元曲面と平面 $R_r = R_{\text{ropt}}$ の交線が、要補修率 R_{ropt} に対応する横断溝間隔の目安となる。以上に示した方法により、「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出することができる。

図 5.7 に、例として要補修率 R_r を 0.10, 0.15, 0.20 と設定した場合に対応する横断溝間隔の目安を示した。この図から、要補修率 R_r の設定によって目安となる横断溝間隔は大きく異なることがわかる。要補修率 R_r を 0.15 に設定した場合の横断溝間隔の目安は、縦断勾配 0.05 で 92 m、縦断勾配 0.10 で 36 m などおおむね現実的なものとなったが、要補修率

を 0.10 に抑えるためには、縦断勾配 0.05 で 30 m、縦断勾配 0.10 で 12 m など、かなり高密な横断溝配置が必要ということになる。このような場合には、補修の負担を極力抑えることを志向するよりも、ある程度補修を行うことを前提に横断溝を配置した方が、開設と補修のトータルコストを抑制できる可能性がある。この点については、第 6 章で検討を行う。

林道技術基準の運用によれば、砂利道での横断溝設置間隔は 50～100 m に 1 箇所程度を目安にすることとなっている（日本林道協会 2011）。そのため、路線全体に約 50 m、あるいは約 100 m に 1 箇所といったように一定間隔で横断溝が配置される例もある。そこで、図 5.6 に示した要補修率の変化を、横断溝間隔別にして図 5.8 に示した。50 m 間隔で横断溝を配置した場合の要補修率は、平均縦断勾配が 0.05 程度の路線であれば 0.12 程度、平均縦断勾配が 0.07 程度の路線であれば 0.14 程度、作業道等で平均縦断勾配が 0.10 程度になる場合は 0.17 程度になる。100 m 間隔の場合の要補修率は、平均縦断勾配が 0.05 程度で 0.15 程度、平均縦断勾配が 0.07 程度で 0.18 程度、平均縦断勾配が 0.10 程度になる場合は 0.21 程度になる。すなわち、今回調査を行った仙郷林道と条件が類似している路線では、現行の技術基準を目安に横断溝配置を行った場合、全延長の 1～2 割については路面補修が必要になると考えられる。この結果はあくまで仙郷林道のデータをもとにした一例であり、属性の異なる路線では当然結果も異なってくる。しかし、目安を適用しようとする路線と共通の母集団に属する既存路線で路面侵食量のデータを用いて第 5 章で示した手法で要補修率を求めれば、このように将来の路面補修の負担を量的に予測することが可能になる。

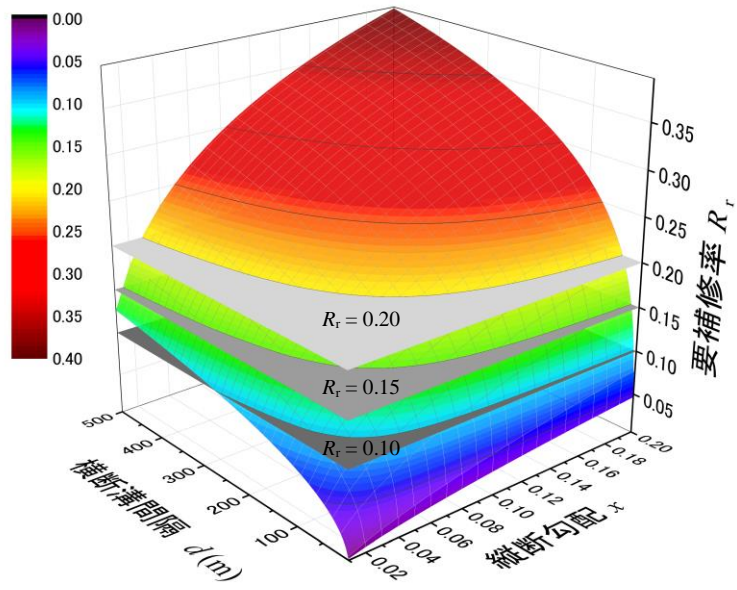


図 5.6 縦断勾配 x , 横断溝間隔 d と要補修率 R_r との関係
($\gamma = 0.10$, $\Delta w = 0.10$ として計算)

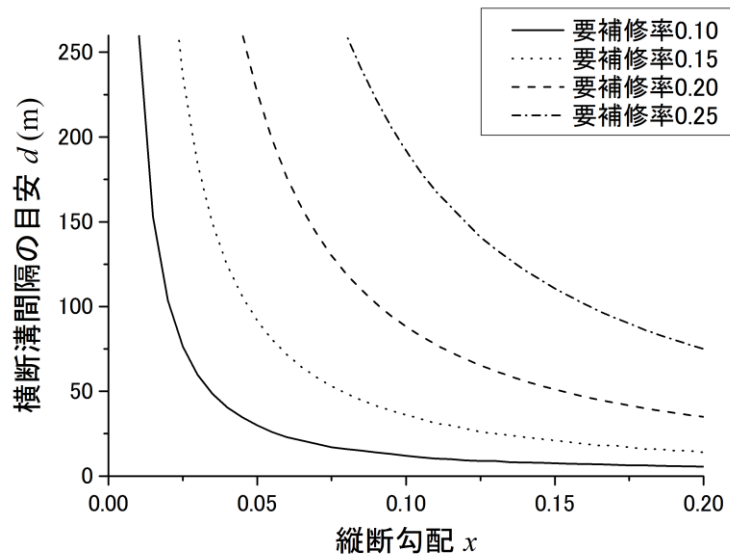


図 5.7 要補修率 R_r に応じた横断溝間隔の目安

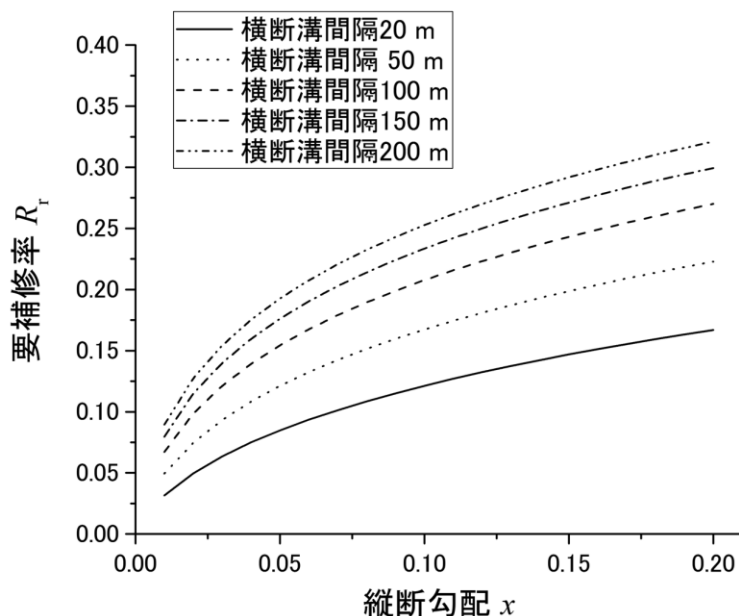


図 5.8 縦断勾配と要補修率

5.3. まとめ

「縦断勾配 x 」及び「横断溝からの距離 y 」の2因子からなる路面侵食量予測モデルの残差 ϵ の分布が正規分布で近似できるという第4章の結果を利用して、本章では、第3章で提案した「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」の導出方法を具体化した。正規分布の累積分布関数が解析的に解けないことに起因して、近似式の利用やコンピュータによる数値計算が必要となる部分があるが、「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」の具体的導出方法が明らかとなった。

例として仙郷林道における計測データを用いてこの手法による横断溝間隔の目安導出を行ったところ、要補修率の設定によって目安となる横断溝間隔は大きく異なっていた。要補修率を極端に低く抑えようとする、現実的でない高密度な横断溝配置が必要となる場合があると推察される。そのような場合には、補修の負担を極力抑えることを志向するよりも、

ある程度補修が必要になることを許容して横断溝を配置する方が，開設と路面補修のトータルコストを低く抑えられる可能性がある。そのような観点から適切な要補修を決定する方法について，第6章で検討を行う。

6. 開設費と補修費の和を最小化する要補修率の決定方法

6.1. はじめに

第5章では、要補修率 R_r に応じた横断溝間隔の目安の導出手法を示した。この手法を用いれば、林内道路の開設主体が適切と考える要補修率に応じて横断溝間隔の目安を得ることができる。ここで次に問題となるのが、適切な要補修率とはどの程度かということである。第5章で例として導出した横断溝間隔の目安からもわかるように、要補修率をどの程度に設定するかによって目安となる横断溝間隔は大きく変化する。要補修率の低い目安を採用すれば将来路面補修にかかる費用や労力は軽減されるが、開設時に横断溝の設置にかかる費用は増加する。安価な止水板や素掘り横断溝等を用いれば開設費への影響は小さくなるが、それらは通過する車両に衝撃をもたらすため、密に配置されていれば林内道路の走行の快適性や走行速度を低下させるというデメリットがある。林内道路の開設主体はそのようなトレードオフの関係を考慮しながら、その路線に適した要補修率を設定しなければならない。それらの考慮すべき事項のうち、将来路面補修にかけられる労力や、林内道路の走行の快適性をどの程度重視するかといった点は開設主体の事情や意向によるため、それらも加味した最適な要補修率を一般化することはできない。しかし、開設時に横断溝の設置にかかる費用と将来の路面補修費用の和を最小化するという観点からは、最適な要補修率が1つに定まる可能性がある。そこで第6章では、林内道路の開設主体が要補修率を設定する際の意味決定を支援するため、開設時の横断溝設置費用と将来の路面補修費用の和を最小化するという観点から最適な要補修率を求める方法を検討した。

なお、最適路網密度の検討等に取り組んだ既往研究の中には、林内道路の補修単価は開設単価に比例するという仮定をおいているものもあり(南方 1965, Minamikata 1967, 酒井 1987, 澤口・大川畑 1993, 澤口ら 1995), 要補修率を低く設定する(すなわち開設単価は増加する)ほど補修費用が減少するという本研究の仮定は、それらとは矛盾する。しかし、それらの既往研究の中でも言及されているように、補修単価が開設単価に比例するという表現は、林内

道路の補修費用に関する全国的な実績資料がない中で、国有林林道の年間災害復旧費、修繕費の実績値（m 当たり）を平均開設単価（年間の林道開設費 / 年間開設延長）に対する割合で表現したものに過ぎず、個々の路線の補修単価が開設単価に比例することが実証されているわけではない。また、澤口らは、補修費用の実績値は管理主体の維持管理に対する姿勢にも影響されると指摘している（澤口・大川畑 1993）。したがって実績値は林内道路を良好な状態に保つために本来必要とされる補修費用と必ずしも一致しないと考えられる。本研究では侵食の実態から必要とされる補修費用を考えるため、開設費が増加するほど補修費用が減少するという本研究の仮定は不合理とは言えず、むしろ自然なものである。

6.2. 費用関数の導出

開設時の横断溝設置費用と将来の路面補修費用の和が、要補修率 R_r の設定によってどのように変動するかを表す「費用関数」を導出する。なお、路面補修の具体的な方法や費用は、現実には極めて多様である上に、履歴が記録されることもほとんどないため、現状では実態を詳細に把握することが難しい。そこで本章では、いくつかの仮定をおき条件を単純化して費用関数の導出を行うこととする。

まず、林内道路の維持管理期間を N_t [年] とし、路面補修を行う間隔を N [年] に 1 度とする。路面補修の方法としては、許容水準 γ を超える侵食が発生している区間に対して碎石を補充することを想定する。なお、横断溝自体の破損を補修する費用や新たな横断溝を追加する費用はここでは考えない。開設から時間 Nk [年] 経過後に行われる k 回目の路面補修にかかる費用の現在価値 C_{rk} [円] は、対象とする路線の中で許容水準 γ を超える路面侵食が発生している延長 w_t [m] の期待値 $E(w_t)$ [m] に比例すると仮定できる。

$$C_{rk} = \frac{c_r E(w_t)}{(1+i)^{Nk}} \quad 6.1$$

ただし、 c_r は許容水準 γ を超える路面侵食発生延長 1 m あたりの路面補修費用 [円/m]、 i

は割引率である。要補修率を R_r とする横断溝間隔の目安を総延長 L の路線全体に適用する場合、許容水準 γ を超える路面侵食発生延長 w_t の期待値 $E(w_t)$ は、

$$E(w_t) = LR_r \quad 6.2$$

となる。6.2 式を 6.1 式に代入すると k 回目の路面補修にかかる費用の現在価値 C_{rk} は以下のようになる。

$$C_{rk} = \frac{c_r LR_r}{(1+i)^{Nk}} \quad 6.3$$

したがって維持管理期間 N_t 中に路面補修にかかる費用の現在価値 C_r は以下のようになる。

$$\begin{aligned} C_r &= \sum_{k=1}^T C_{rk} \\ &= \sum_{k=1}^T \frac{c_r LR_r}{(1+i)^{Nk}} \end{aligned} \quad 6.4$$

ただし、 T は維持管理期間 N_t 中の路面補修回数で、 N_t を N で除した値の整数部分となる。

次に、開設時に横断溝の設置にかかる費用 C_c [円] は、この路線内の横断溝設置箇所数 j [箇所] に比例すると仮定する。すなわち、以下のように表現できる。

$$C_c = c_c j \quad 6.5$$

ただし、 c_c は横断溝 1 箇所あたりの設置費用 [円/箇所] である。

路線内の横断溝設置箇所数 j は、対象とする路線の総延長 L [m] と、第 5 章の方法で導

出された横断溝間隔の目安によって決まる。実際には、一路線の中でも縦断勾配の変化に応じて横断溝間隔を変えることになるが、ここでは単純化して j が以下のように計算できるとする。

$$j = \frac{L}{d_{x_m}(R_r)} \quad 6.6$$

ただし、 x_m は対象とする路線の縦断勾配の平均値、 $d_{x_m}(R_r)$ は要補修率 R_r 及び縦断勾配 x_m に対応した横断溝間隔の目安 [m] である。すなわち、6.5 式は以下のようになる。

$$C_c = c_c \frac{L}{d_{x_m}(R_r)} \quad 6.7$$

なお、路面の補修を行う間隔を N [年] に 1 度と想定しているため、横断溝間隔の目安は開設からの経過年数が N である既存路線のデータから推定した線形モデルをもとに導出することとする。

6.4 式と 6.7 式より、開設時の横断溝設置費用 C_c と将来の路面補修費用 C_r の和 C_t は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} C_t &= C_c + C_r \\ &= c_c \frac{L}{d_{x_m}(R_r)} + \sum_{k=1}^T \frac{c_r L R_r}{(1+i)^{Nk}} \\ &= L \left(\frac{c_c}{d_{x_m}(R_r)} + \sum_{k=1}^T \frac{c_r R_r}{(1+i)^{Nk}} \right) \end{aligned} \quad 6.8$$

ここで、横断溝 1 箇所あたりの設置費用 c_c と、侵食発生延長 1 m 当たりの路面補修費用 c_r の比を B [m/箇所] とすると、 c_c を c_r の関数として表すことができる。

$$c_c = Bc_r \quad 6.9$$

6.9 式を用いれば、6.8 式は以下のように整理できる。

$$\begin{aligned} C_t &= Lc_r \left(\frac{B}{d_{x_m}(R_r)} + \sum_{k=1}^T \frac{R_r}{(1+i)^{Nk}} \right) \\ &= Lc_r C(R_r) \end{aligned} \quad 6.10$$

6.10 式のうち、路線の総延長 L は対象とする路線によって異なる。また、侵食発生延長 1 m 当たりの補修費用 c_r についても現段階では実績の資料がないため、 C_t の具体的な値をここで見積もることは困難である。しかし、要補修率 R_r に応じた C_t の変動を把握するには、 R_r の関数である $C(R_r)$ の部分の変化を見れば良い。この $C(R_r)$ を「費用関数」と称することとする。このように、いくつかの仮定を置いて条件を単純化することで、要補修率 R_r に応じた総費用 C_t の変動を表現する費用関数 $C(R_r)$ を導出することができた。この費用関数 $C(R_r)$ が極小値をとる時の R_r が、開設時の横断溝設置費用と将来の路面補修費用の和を最小とする最適な要補修率 R_r となる。以後、費用関数 $C(R_r)$ が最小値をとる時の R_r を「最適要補修率 $R_{r\text{opt}}$ 」と称する。

6.3. 費用関数を用いた最適要補修率の検討例

6.3.1. 設定条件

本節では例として、仙郷林道における計測データをもとに第 5 章の方法で導出される横断溝間隔の目安について、費用関数 $C(R_r)$ の変動を検討した。費用関数 $C(R_r)$ には、パラ

メータとして「路面侵食量の許容水準 γ 」, 「割引率 i 」, 「維持管理期間 N_t 」, 「路面補修を行う間隔 N 」, 「対象路線の縦断勾配の平均値 x_m 」, 「横断溝 1 箇所あたりの設置費用 c_c と要補修延長 1 m 当たりの路面補修費用 c_r の比 B (以後, 省略して「単価の比 B 」と称する。)」が含まれる。これらのパラメータの値は, 対象となる路線の状況に応じて設定することになるが, 本節では以下のように設定して試算を行うこととした。まず, 路面侵食量の「許容水準 γ 」は第 5 章に合わせて一律 0.10 m, 「割引率 i 」は 0.01 とした。「維持管理期間 N_t 」は 20 年と 50 年の 2 パターン, 「路面補修を行う間隔 N 」は 5 年とした。縦断勾配の平均値 x_m は作業道も想定して 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 の 4 パターンとした。単価の比 B は, 使用する横断溝の種類と補修の方法によって幅広い値をとり得る。横断溝 1 箇所当たりの材料費は, 素掘り横断溝等ではほとんどかからないが, ゴム製の止水板であれば 20,000~30,000 円, 幅 400 mm のコンクリート製 U 字溝と鋼製グレーチングの組み合わせでは 80,000 円以上になる (建設物価調査会 2014)。一方, 要補修延長 1 m 当たりの路面補修費用は, 材料費 (道路用砕石の価格は約 4,000 円/ m^3 (建設物価調査会 2014)) のほか, 砕石の運搬費用や労務費等がかかり, それらは路面補修作業をその他の森林施業に付随して行うか別個に行うかによっても変化する。そこで本節では, 単価の比 B の値として 2, 5, 10, 50 と幅広い値を設定して試算を行うこととした。

なお, 本来であれば費用関数 $C(R_r)$ を R_r で微分してゼロと置き, R_r について解くことで R_{ropt} が求められるが, 第 5 章で述べたように $d_{xm}(R_r)$ を解析的に求めることは困難であったため, $C(R_r)$ は実際には R_r の関数として表現されていない。そこで本節では, 具体的な横断溝間隔 d に対して R_r 及び $C(R_r)$ の値を順次求め, $C(R_r)$ が最小になる時の R_r を R_{ropt} とみなすこととした。

6.3.2. 要補修率の変化に伴う費用関数の変動

図 6.1~図 6.8 に, 要補修率 R_r と費用関数 $C(R_r)$ の関係を, パラメータの設定値ごとに示した。なお, これらの図は $5 \leq d_{xm}(R_r) \leq 400$ となる R_r の範囲で示している。これは, 現

実的にあり得る最小の横断溝間隔は 5 m 程度と考えられること、また第 2 章において実際の林道で観察された横断溝間隔は最長で 400 m 程度であったことを考慮したものである。以後、その範囲を $R_{\min} \leq R_r \leq R_{\max}$ と表現する。また、各パラメータの設定値における最適補修率 R_{ropt} を表 6.1 に示した。

すべての試算条件において、費用関数 $C(R_r)$ の値は要補修率 R_r の増加に伴って一旦減少し、その後増加に転じた。すなわち、 $R_{\min} < R_r < R_{\max}$ の範囲で費用関数 $C(R_r)$ を極小とする R_{ropt} が存在した。費用関数 $C(R_r)$ が $R_{\min} < R_r < R_{\text{ropt}}$ の範囲で減少するということは、要補修率 R_r を極めて低く抑えた目安を適用してメンテナンスフリーに近い道を志向することが、開設費と補修費を総合的に考えた場合に最適な選択とは言えないことを意味する。トータルコストを最小化するためには、ある程度補修が必要になることを許容し、維持管理体制を整えておくことが必要になる。

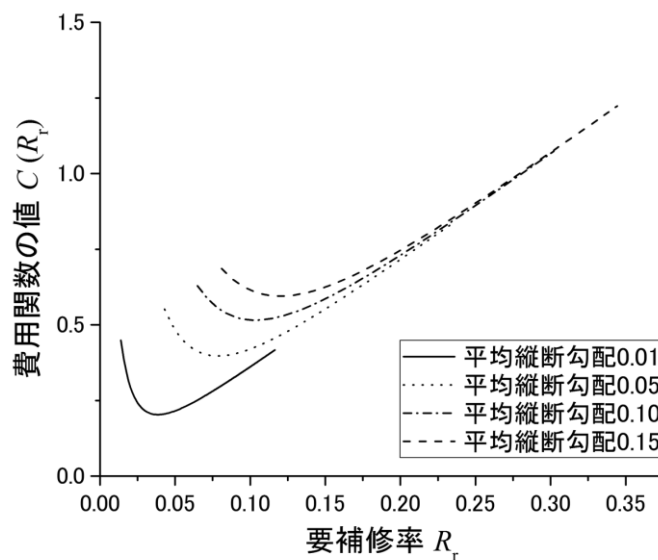


図 6.1 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 2$, 維持管理期間 $N_t : 20$ 年)

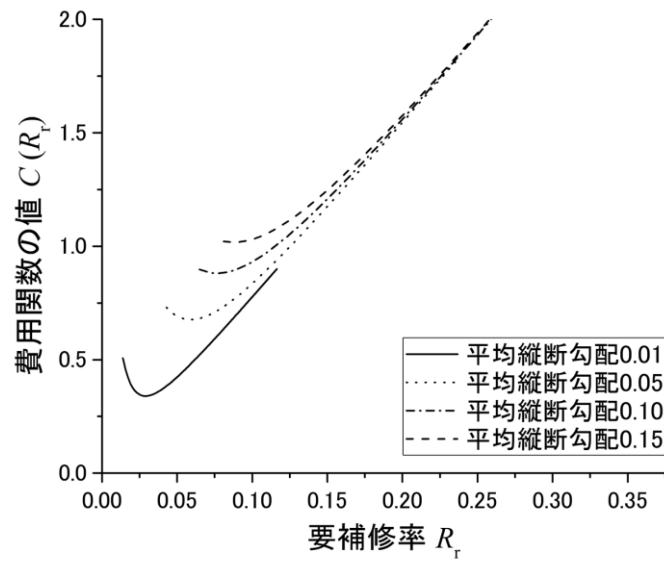


図 6.2 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 2$, 維持管理期間 $N_t : 50$ 年)

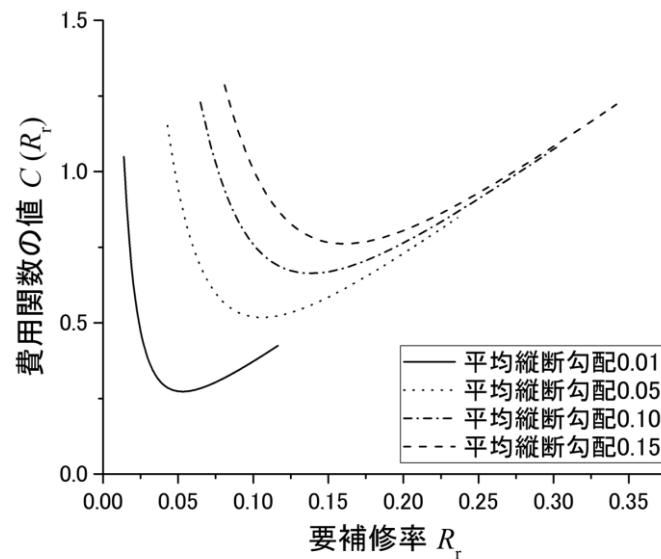


図 6.3 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 5$, 維持管理期間 $N_t : 20$ 年)

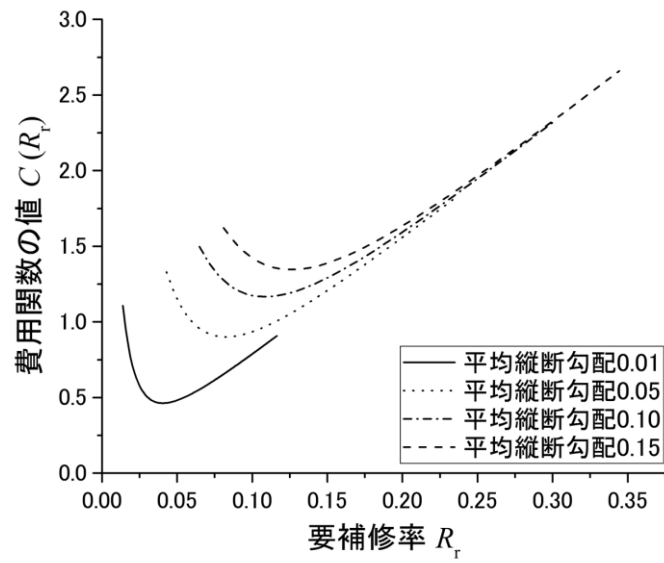


図 6.4 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 5$, 維持管理期間 $N_t : 50$ 年)

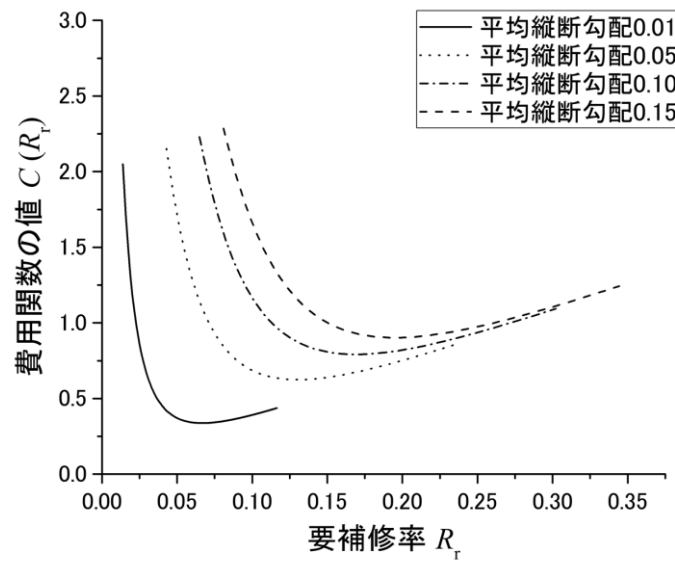


図 6.5 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 10$, 維持管理期間 $N_t : 20$ 年)

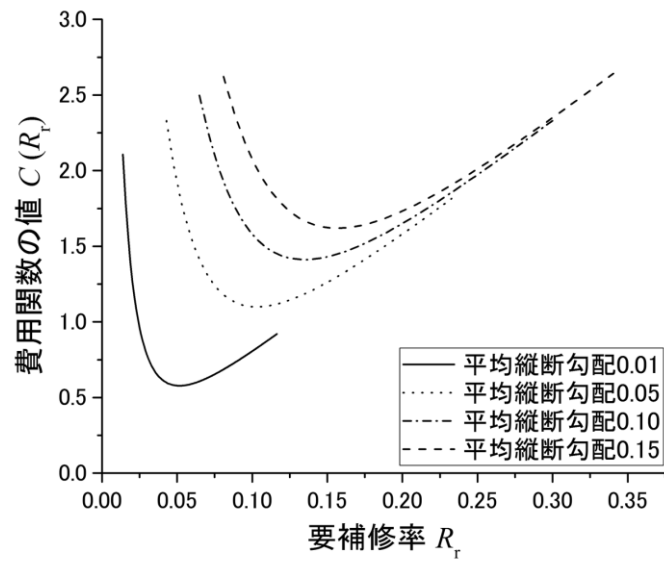


図 6.6 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 10$, 維持管理期間 $N_t : 50$ 年)

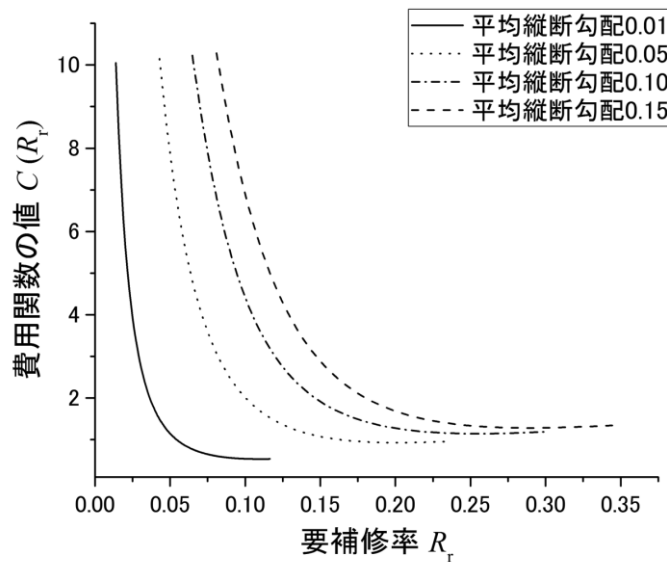


図 6.7 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 50$, 維持管理期間 $N_t : 20$ 年)

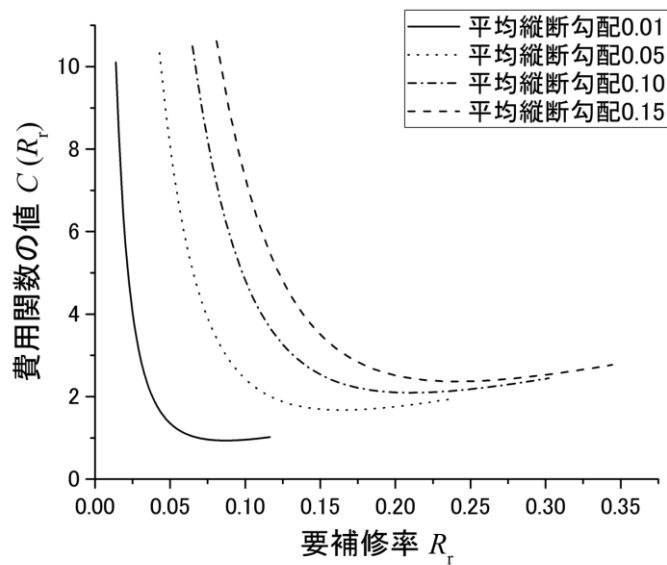


図 6.8 要補修率と費用関数の値 (単価の比 $B : 50$, 維持管理期間 $N_t : 50$ 年)

表 6.1 パラメータの設定値に応じた最適要補修率 R_{ropt}

維持管理期間 N_t [年]	20				50				
	横断溝単価と補修単価の比 B								
	2	5	10	50	2	5	10	50	
縦断勾配 x_m	0.01	0.039	0.053	0.067	0.110	0.029	0.041	0.052	0.087
	0.05	0.079	0.106	0.130	0.202	0.059	0.083	0.104	0.164
	0.10	0.102	0.139	0.168	0.255	0.077	0.108	0.135	0.211
	0.15	0.121	0.161	0.195	0.290	0.089	0.125	0.157	0.241

6.3.3. 縦断勾配の平均値 x_m の影響

維持管理期間 N_t 及び単価の比 B 一定のもと、縦断勾配の平均値 x_m を 0.01 から 0.15 まで増加させると、最適要補修率 R_{ropt} は 0.06~0.18 程度上昇した。すなわち、平均縦断勾配が大きい路線においては、要補修率 R_r を高めに設定した横断溝間隔を採用して補修に力を入れた方が、費用の和 C_t を抑制できると考えられる。これは、縦断勾配が大きい路線で要補

修率 R_r を低く抑えるためには非常に高密度な横断溝配置が必要となり、開設時の横断溝設置費用が跳ね上がるためと考えられる。縦断勾配が大きい路線では特に維持管理体制が重要であると言える。

6.3.4. 単価の比 B の影響

維持管理期間 N_t 、縦断勾配の平均値 x_m を一定として単価の比 B を 2 から 50 まで増加させると、最適要補修率 R_{ropt} は 0.06~0.17 程度上昇した。これは、補修単価に対して相対的に高価な横断溝を用いる場合は、要補修率を高め設定した横断溝間隔の目安を採用して補修に力を入れた方が費用の和 C_t を抑制できることを意味する。特に、 B を 50、維持管理期間 N_t を 20 年間とした場合の最適要補修率は 0.11~0.29 と高くなった。これに対応する横断溝間隔の目安は縦断勾配 0.15 でも 194 m などと極めて長くなる。すなわち、開設当初の横断溝配置は最低限とするのが最適解となる。ただし、これはあくまでも横断溝の設置費用と補修費用の和を最小化することを目的とした最適解であることを断っておく。実際に横断溝間隔を決定する際には、林内道路の機能維持のほかに、溪流への土砂流出防止についても当然考慮する必要がある。また、横断溝間隔が長くなると、路面流下水の溢流による路体災害（峰松ら 1983b）や、排水先斜面でのガリー形成（Croke & Mockler 2001）といった路面侵食以外の問題も生じるため、実際にはこれらの観点も含めて横断溝間隔を検討する必要がある。

このように、単価の比 B も縦断勾配の平均値 x_m と同様に最適要補修率 R_{ropt} に大きな影響を与えるパラメータと言える。そのため、実際に林内道路の開設主体がこの費用関数を用いて最適要補修率 R_{ropt} を検討する際には、対象となる路線の実態に合うように単価の比 B の値を設定することが重要になる。しかし、縦断勾配の平均値 x_m は容易に求まるのに対し、単価の比 B の値を予測することは容易ではない。定性的には、材料費のかからない素掘り横断溝等を用いる場合や、路面補修をその他の森林施業と別個に行わざるを得ず c_r が高くなる場合には B の値が小さくなり、反対にコンクリート製横断溝など高価な横断溝を用い

る場合や、路面補修を他の森林施業に付随して行える場合は B の値が大きくなると考えられる。しかし、現状では維持管理作業に関する記録や研究例は乏しく、具体的な横断溝の種類や路面補修の方法に応じて B の値を予測することは容易ではない。最適要補修率を求めするためには、維持管理作業に関する情報の蓄積が必要である。

6.3.5. 維持管理期間 N_t の影響

縦断勾配の平均値 x_m ，単価の比 B を一定として維持管理期間 N_t を 20 年から 50 年に延長すると、最適要補修率は 0.01~0.05 程度低下した。これは、路線を長期間維持管理する予定がある場合には、要補修率 R_r が小さい横断溝間隔の目安を採用した方が費用の和 C_t を抑制できることを意味する。単価の比 B が小さい場合に維持管理期間 N_t をさらに延長すると費用関数 $C(R_r)$ は単調増加に近づいていき、要補修率 R_r を極力低く抑えることが最適解となる。しかし、現実的に開設段階でどの程度の期間の補修費用をコストとして見込むかという点については、今後の検討が必要である。

また、実際の林内道路の維持管理作業においては、顕著な侵食が発生した場所に対して碎石の補充等の補修を行うだけでなく、第 2 章で見られたように簡易な横断溝の追加を行うという選択肢が考えられる。その場合、初回の補修時に簡易横断溝の追加にかかる費用が発生するが、次回以降は補修が必要な延長が減少すると考えられる。第 4 章で述べたように、開設時点では個々の地点の路面侵食量について確率的な予測しかできないため、ある程度の確率で許容水準を超える侵食が発生することを前提とした横断溝配置にならざるを得ない。しかし、初回の路面補修時には、実際の路面侵食状況を観察することで侵食を助長する要因が存在する場所を特定できる。その場所に合わせて横断溝を追加すれば、次回以降の路面補修の負担を大幅に軽減できる可能性がある。本章の試算ではそのような横断溝の追加等の対応は想定せず、2 回目以降も同じ確率で要補修区間が発生するものとしたが、簡易横断溝の追加を行うことを想定し、追加にかかる費用とその後の補修の負担軽減について評価することも今後の課題である。

6.4. まとめ

第 5 章で示した手法を用いて横断溝間隔の目安を導出する際、林内道路の開設主体は横断溝の設置にかかる費用と将来路面補修にかかる費用及び労力等を考慮して、対象となる路線に最適な要補修率 R_r を設定する必要がある。本章では、開設時の横断溝設置費用と将来の路面補修費用の和 C_t を最小にする最適要補修率 R_{ropt} を求める方法を検討した。いくつかの仮定を置いて条件を単純化することで、要補修率 R_r に応じた C_t の変動を表す費用関数 $C(R_r)$ を導出することができた。この費用関数 $C(R_r)$ を最小とする要補修率を求めることで、費用の和 C_t を最小にする要補修率 R_{ropt} を知ることができる。

最適要補修率 R_{ropt} の値は、費用関数 $C(R_r)$ のパラメータである縦断勾配 x_m 、横断溝一箇所当たりの設置費用 c_c と要補修延長 1 m あたりの補修費用 c_r との比 B 、維持管理期間 N_t の設定によって変化した。すなわち、最適要補修率は R_{ropt} は一律に定められるものではなく、林内道路の開設主体が個々の路線の状況に応じて縦断勾配 x_m や単価の比 B の値、想定する維持管理期間 N_t 及び補修頻度 N といったパラメータの値を設定して検討すべきものである。本章で示した費用関数は、そのためのツールとして有効である。

また、様々にパラメータを設定して試算を行ったが、すべての試算条件において費用関数 $C(R_r)$ の値は $R_{min} \leq R_r < R_{ropt}$ の範囲で一旦減少した。すなわち、要補修率 R_r を極端に低く設定してメンテナンスフリーに近い道を志向することは、開設費と補修費の和を総合的に考えた場合に最適な選択とは言えないと考えられる。これは第 4 章で指摘したように、路面侵食量は横断溝からの距離に対してばらつきが大きく、横断溝の直後でも侵食の発生が避けられない場所が一定程度存在することに起因する。その中で要補修率 R_r をゼロに近づけようとするとう極めて高密な横断溝配置が必要となり、横断溝の設置にかかる費用が跳ね上がる。このように、空間的ばらつきが大きく事前の予測が困難な路面侵食という現象に対して、開設当初から完全な防止対策をとろうとすることは費用対効果が良いとは言えない。維持管理、補修を行うことを前提として対策を考えていく必要があると言える。

7. 総括

本研究では、林道・作業道が林業生産活動の基盤として整備されようとしており、開設から維持管理までを総合的に見て適切な構造を検討する必要があるという背景を踏まえ、「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を提案した。本研究を通じて以下のような問題提起ないしは新たな考え方の提示がなされた。

1点目として、開設費と維持管理の負担を総合的に考慮して設計を最適化するという新たな考え方を提示した。第1章で述べたように、林業生産活動の基盤としての林内道路の開設費及び維持管理費は本来林業経営の中でまかなうべきものととらえられる。したがって林業生産活動の基盤としてふさわしい林内道路の構造とは、開設費と維持管理の負担との総和を最小化するものであると考えられる。そこで本研究では「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」の導出手法を提案し、開設費と維持管理費の和を最小化する横断溝間隔の目安が求められることを示した。この横断溝間隔の問題は林内道路の構造の1つの要素に過ぎないが、今後林業の基盤として適切な林内道路の構造を検討していく上で、開設費と維持管理の負担との総和を最小化するということは非常に重要な視点となる。本研究は、そのような考え方に基づく林内道路の「適切な構造」の検討の端緒を開くものである。

2点目として、少数の因子からなるモデルでは精度の低い予測しかできない路面侵食現象について、確率的な予測を行うことで合理的に対処するという新たな考え方を提示した。路面侵食量は様々な要因の影響を受けるため、縦断勾配等の少数の因子からなるモデルでは低い精度での予測しかできない。それに対して多くの既往研究は、影響要因を解明してより高い精度での予測を可能にするという方針をとってきた。しかし一方で、実際に林内道路を開設する現場では、それらの多数の要因の水準を正確に把握することは困難な場合も多い。林内道路の設計という現実的な面を考えると、少数の因子をもとにした不確実な予測しかできないことを前提として、いかに合理的な設計を行うかという議論も必要である。本研究では、少数の因子に基づく予測に対する実態の「ばらつき」を定量的に把握することで、許

容水準を超える路面侵食の発生を確率的に表現し適切な設計に役立てるという新たな考え方を提示した。路面侵食に限らず、極めて複雑な森林という環境下で発生する林内道路の損壊現象は、少数の因子に基づく予測が困難なものが多いと考えられる。本研究で導入した考え方は、それらの他の損壊現象に対する合理的な対策の検討にも応用できると考えられる。

第3点目として、大量のデータの活用手法の確立という、今後重要性を増すと考えられる新たな研究の方向性を示した。従来、林内道路に関わる研究では、個々の研究者が得た少数のデータをもとにしてモデルの推定や設計の目安の提案が行われてきた。研究の方向性もデータ数の制約を受け、データのばらつきの定量的な把握といった問題に取り組んだ研究例はほとんどなかった。また、少数のデータに基づいて提案された目安を、条件の異なる他の林内道路にどの程度の信頼性をもって適用できるのかという問題も残されてきた。しかし、近年の計測技術の急速な発達を考えれば、今後、データ数の制約はなくなっていくと考えられる。そして、大量のデータをいかに活用するかという、これまでの林内道路に関する研究にはなかった課題が発生する。現段階では路面侵食量を大量かつ容易に計測するという技術は確立されていないが、本研究では近い将来大量のデータが得られるようになることを想定し、それを活用して「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」という有用なアウトプットを得る手法を提案した。本研究は、大量のデータが容易に得られるようになるという近い将来を見据え、それを活用するという新たな研究の方向性を体現したものである。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、懇篤なるご指導と温かい励ましを賜り、校閲の労をとられた東京大学大学院農学生命科学研究科 酒井秀夫教授に心から厚く御礼申し上げます。また、懇篤なご助言と校閲の労をとられた東京大学大学院農学生命科学研究科 仁多見俊夫准教授、浅野友子講師、東京農業大学地球環境科学部 今富裕樹教授、国立研究開発法人森林総合研究所 坪山良夫研究コーディネータに厚く御礼申し上げます。

路面侵食量データの収集にあたり、試験地のご紹介や現地でのデータ収集作業へのご協力、さらには有益なご助言と温かい激励をいただいた岐阜県森林研究所の古川邦明部長、臼田寿生専門研究員、和多田友宏主任研究員はじめ皆様に深く感謝いたします。また貴重なフィールドをご提供いただいた関市役所の長屋隆司課長補佐、林野庁茨城森林管理署、利根沼田森林管理署、沼田林業機械化センター、岐阜森林管理署の皆様に深く感謝いたします。

有益なご助言をいただくとともに大量のデータ収集に終始ご協力いただいた森林総合研究所 林業工学研究領域森林路網研究室の鈴木秀典室長、山口智主任研究員に深く感謝いたします。また、有益なご助言をいただいた同領域の陣川雅樹領域長、梅田修史元領域長、田中良明チーム長ならびに皆様に深く感謝いたします。また今日まで終始温かい激励をいただいた林野庁森林整備部整備課 肥後賢輔 元課長、小原文悟 元政策情報分析官に深く感謝いたします。

最後に、日常のディスカッションを通じ随所での確な助言をくれた夫に感謝します。

引用文献

- 有賀一広・田坂聡明・吉岡拓如・酒井秀夫・渡邊定元 (2006) WEPP を用いた富士山麓作業道作設地における土砂流出予測. 森林学誌 20 (4) : 289~293.
- Beschta R. L. (1978) Long-term patterns of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range. *Water Resour. Res.* 14 (6): 1011-1016.
- Bilby R. E., Sullivan K. and Duncan S. H. (1989) The generation and fate of road-surface sediment in forested watersheds in Southwestern Washington. *Forest Sci.* 35 (2): 453-468.
- Brown G. W. and Krygier J. T. (1971) Clear-cut logging and sediment production in the Oregon Coast Range. *Water Resour. Res.* 7 (5): 1189-1198.
- Burroughs E. R. and King J. G. (1989) Reduction of soil erosion on forest roads. *USDA For. Serv. INT-GTR-264*: 22pp.
- Coe D. B. R. (2006) Sediment production and delivery from forest roads in the Sierra Nevada, California. Master thesis of Colorado State University: 1-110.
- Croke J., Hairsine P. and Fogarty P. (1999) Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *J. Hydrol.* 216: 56-77.
- Croke J. and Mockler S. (2001) Gully initiation and road to stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia. *Earth Surf. Proc. Land.* 26: 205-217.
- 出来俊彦・古谷士郎・鈴木保志・神崎康一 (1988) 急勾配林道における路面侵食の実態について. 京大演報 60 : 198~207.
- 出来俊彦・神崎康一・古谷士郎・田中良明・鈴木保志 (1989) 急勾配林道における路面侵食の実態について (II) : 急勾配幹線道の維持管理計画について. 京大演報 61 : 205~216.
- 遠藤貴宏・中村裕幸・澤田義人・沢田治雄 (2012) 地上 LiDAR による樹幹太さの推定に関する研究. 生産研究 64 (4) : 585~589.

Fahey B. D. and Coker R. J. (1989) Forest road erosion in the granite terrain of southwest Nelson, New Zealand. *J. Hydrol. (N.Z.)* 28 (2): 123-141.

藤井禧雄・古谷士郎・酒井徹朗・佐々木功 (1982a) 林道路面におけるリル侵食の形状および形状変化について. *日林論* 93 : 541~542.

藤井禧雄・古谷士郎・酒井徹朗・佐々木功 (1982b) 林道路面におけるリル侵食の形状変化 (II). *京大演報* 54 : 131~139.

藤原孝光 (1979) 林道の排水施設における一考察. *林道研究発表論文集* 13 : 115~121.

福嶋義宏 (1982) 林道建設による浮遊砂濃度の上昇. 昭和 54~56 年度文部省科学研究費 (総合研究 A) 課題番号 436011 報告書 : 98~103.

福嶋義宏・黒田幸夫・渡正昭 (1984) 林道路面の流出量と侵食土砂量. *京大演報* 56 : 145~154.

古谷士郎・藤井禧雄・酒井徹朗・佐々木功 (1982) 林道の路面侵食について (III) -路面の流出解析-. *日林論* 93 : 545~546.

古谷士郎・酒井徹朗・藤井禧雄・佐々木功 (1983a) 林道の路面侵食について (IV) : 1982 年度の侵食量調査結果. *京大演報* 55 : 230~241.

古谷士郎・酒井徹朗・佐々木功 (1984) 林道の路面侵食について (V) : 1980~1983 年に観測された流出土砂量等に関する総合的検討. *京大演報* 56 : 155~165.

古谷士郎・酒井徹朗・佐々木功 (1986) 林道の路面侵食について (VI) : シミュレーションによる路面侵食量の 2, 3 の検討. *京大演報* 57 : 192~206.

古谷士郎・佐々木功・藤井禧雄・酒井徹朗 (1983b) 芦生固定プロットにおける林道路面の流出解析. 昭和 54~56 年度文部省科学研究費 (総合研究 A) 課題番号 436011 報告書 : 57~64.

伏見知道 (1980) 林道路面の保全と横断排水溝の配置間隔について 瀬戸内マサ土地域の例. *愛媛大演報* 17 : 9~14.

伏見知道 (1982) 瀬戸内花崗岩風化土地域における土質道の侵食と保全. 昭和 54~56 年度

文部省科学研究費（総合研究 A）課題番号 436011 報告書：65～74.

伏見知道（1989）林内作業車道の横断形状と路面変形侵食に関する考察. 愛媛大演報 27 : 9～20.

Hairsine P. B., Croke J. C., Mathews H., Fogarty P. and Mockler S. P. (2002) Modelling plumes of overland flow from logging tracks. Hydrol. Process. 16 (12): 2311-2327.

林博道・堀内照夫・黒谷博美（1986）林道路面水の排水工法に関する実験的研究（VI）模型実験による路面流出量について. 日林中部支講 34 : 201～204.

林博道・唐木義人・清水昭行・中井大雄（1987）林道路面水の排水工法に関する実験的研究（VII）長時間降雨・不透水層の有無による流出率の変化. 日林中部支講 35 : 221～224.

林博道・宮崎敏孝（1984）林道路面水の排水工法に関する実験的研究（V）-新設林道の路面侵食量について-. 日林中部支講 32 : 289～292.

林博道・宮崎敏孝・堀内照夫（1982）林道路面水の排水工法に関する実験的研究（IV）10分間隔の測定例と流出特性について. 日林中部支講 30 : 161～164.

堀高夫・市原恒一（1970）アパラチャ山系における林道の侵食防止方法. 森林利用研究会資料 82 : 15～29.

堀内照夫（1980）林道路面水の排水工法に関する実験的研究（I）. 日林中部支講 28 : 271～276.

市原恒一（1981）林道路面の侵食耐性について（予報）. 日林論 92 : 529～530.

市原恒一（1987）作業道の路面上を流れる雨水量の解析. 日林誌 69 (9) : 329～342.

市原恒一・福田章史（1982）横断排水溝の適正間隔について（II）-土質と侵食の関係-. 日林論 93 : 547～548.

市原恒一・小松正広・堀高夫（1974）横断排水溝の適正間隔に関する研究（予報）. 日林論 84 : 448～450.

Ichihara K., Toyokawa K. and Sawaguchi I. (1996a) Analysis of factor influencing runoff from forest

- roads. *J. Jpn. For. Eng. Soc.* 11 (1): 3-12.
- Ichihara K., Toyokawa K. and Sawaguchi I. (1996b) An estimation of soil loss from tractor logging roads. *J. Jpn. For. Eng. Soc.* 11 (1): 13-20.
- 井上章二・呉在萬・松田健太郎（1999）林道からの土砂（特に浮遊砂）流出に関する室内実験. *雨水資源化システム学会誌* 5 (1) : 1~5.
- 一般財団法人建設物価調査会（2014）建設物価 2014年7月号. 979pp, 一般財団法人建設物価調査会, 東京.
- 岩川治・高田長武（1969）運材車両の補修と林道路面の良否との関係. *日林誌* 51 (11) : 308~313.
- Jordan A. and Martinez-Zavala L. (2008) Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Forest Ecol. Manag.* 255: 913-919.
- 上飯坂実・南方康・伊藤幸也（1968）林道の構造に関する研究. *日林誌* 50 (9) : 274~283.
- 北原曜・真島征夫・清水晃（1985）林道切取法面からの侵食量について（II）シラカンバ種子吹付け法面の結果. *日林北支講* 34 : 203~205.
- 北原曜・真島征夫・清水晃（1988）林道切取法面からの侵食量について（III）過去4年間の比較. *日林北支講* 36 : 176~178.
- 小林洋司（1997）森林基盤計画論-林道網計画の実際-. 203pp, 日本林道協会, 東京.
- Kochenderfer J. N. (1970) Erosion control on logging roads in the Appalachians. *USDA For. Serv.* RP-NE-158: 1-28.
- Komura S. (1976) Hydraulics of slope erosion by overland flow. *J. Hydr. Eng Div-ASCE* 102 (10): 1573-1586.
- 近藤恵市（1994）溪流横断部における林道災害の研究. *静大演報* 18 : 45~75.
- Lane P. N. J. and Sheridan G. J. (2002) Impact of an unsealed forest road stream crossing: Water quality and sediment sources. *Hydrol. Process.* 16 (13): 2599-2612.
- Lane P. N. J., Hairsine P. B., Croke J. C. and Takken I. (2006) Quantifying diffuse pathways for

- overland flow between the roads and streams of the mountain ash forests of central Victoria Australia. *Hydrol. Process.* **20** (9): 1875-1884.
- 李成基・峰松浩彦 (1997) 林道路面から流出する浮遊砂の流出特性に関する実験的研究. *森林学誌* **12** (2) : 111~120.
- Luce C. H. and Black T. A. (1999) Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resour. Res.* **35** (8): 2561-2570.
- Luce C. H. and Cundy T. W. (1994) Parameter identification for a runoff model for forest roads. *Water Resour. Res.* **30** (4): 1057-1069.
- Luce C. H. and Wemple B. C. (2001) Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic effects of forest roads. *Earth Surf. Proc. Land.* **26**: 111-113.
- Madej M. A., Eschenbach E. A., Diaz C., Teasley R. and Baker K. (2006) Optimization strategies for sediment reduction practices on roads in steep forested terrain. *Earth Surf. Proc. Land.* **31** (3): 1643-1656.
- 松本武・北川勝弘 (2000) 山間地域における道路網の配置構造解析と評価指標の検討. *日林誌* **82** (2) : 154~162.
- Megahan W. F. and Ketcheson G. L. (1996) Predicting downslope travel of granitic sediments from forest roads in Idaho. *Water Resour. Bull.* **32** (2): 371-382.
- 南方康 (1965) 素材生産地域における適正林道密度ならびに限界林道密度について. *東大演報* **61** : 1~36.
- Minamikata Y. (1967) Studies on the planning of the forest road network. *J. Jpn. For. Soc.* **49** (2): 53-65.
- 南方康 (1973) 林道より流出する土砂防止のためのガイド. *森林利用研究会資料* **83** : 1~23.
- 南方康 (1977) 林内における基礎路網密度. *日林誌* **59** (8) : 298~300.
- 南方康・仁多見俊夫・酒井秀夫・伊藤幸也 (1986) 林道の路面状態と自動車の燃料消費率. *日林誌* **68** (3) : 95~104.

- 峰松浩彦 (2002) 排水施設. (森林土木学. 小林洋司. 160pp, 朝倉書店, 東京) 75~79.
- Minematsu H. and Akita O. (1987) A New design criterion for a forest-road culvert. *J. Jpn. For. Soc.* **69** (12): 489-491.
- 峰松浩彦・秋田修 (1988) 林道横断排水暗渠に流入する障害物の特性 (II) 一 枝条・倒木および立木の調査一. *日林論* **99** : 701~704.
- 峰松浩彦・秋田修・山本稔之 (1988) 林道横断排水暗渠に流入する障害物の特性 (I) 一 集水域における土砂流出に関する調査一. *日林論* **99** : 697~699.
- 峰松浩彦・南方康 (1982) 横断排水溝の間隔に関する研究. *日林誌* **64** (5) : 193~197.
- 峰松浩彦・南方康・西尾邦彦・伊藤幸也・神田一宏 (1983a) 林道における適正横断排水溝間隔に関与する因子. *日林誌* **65** (7) : 258~261.
- 峰松浩彦・南方康・西尾邦彦・伊藤幸也・神田一宏 (1983b) 林道における適正横断排水溝間隔決定式の適用範囲. *日林誌* **65** (12) : 465~470.
- 宮前崇・小川泰浩・渡邊悦夫 (2013) 枝条被覆による森林作業道からの土砂移動抑制効果. *日林講* **124** : 563.
- 宮崎敏孝・林博道・堀内照夫・日置象一郎 (1981) 林道路面水の排水工法に関する実験的研究 (II) 路面水の計測方法と測定例について. *日林中部支講* **29** : 295~298.
- Motha J. A., Wallbrink P. J., Hairsine P. B. and Grayson R. B. (2003) Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. *Water Resour. Res.* **39** (3): ESG2 (1-14).
- Muneoka H., Shiratori R., Usuda H., Furukawa K., Sakurai R. and Sakai H. (2014a) The effectiveness and features of the rolling-grade drainage method in spur roads. *J. Jpn For. Eng. Soc.* **29** (1): 13-20.
- Muneoka H., Suzuki H., Yamaguchi S, Tanaka Y. and Uemura T. (2014b) The relationship between the velocity of road-surface flow and coarse sediment discharge on forest roads. *J. Jpn For. Eng. Soc.* **29** (3): 165-172.

- 宗岡寛子・鈴木秀典・山口智・田中良明・陣川雅樹 (2015) 林道沿い斜面からの流入水の発生場所. 森利学誌 30 (4) : 印刷中.
- 長塚結花・五味高志・平岡真合乃・宮田秀介・恩田裕一 (2014) 林道路面の浸透能と水流出特性. 日林誌 96 (6) : 315~322.
- 中尾博美 (1980) 林道の構造と路面侵食について. 日林論 91 : 455~456.
- 中澤昌彦 (2005) 森林施業の実態に基づいた森林基盤整備に関する研究. 名古屋大森林科学研究 24 : 85~126.
- Negishi J. N., Sidle R. C., Ziegler A. D., Noguchi S. and Abdul Rahim N. (2008) Contribution of intercepted subsurface flow to road runoff and sediment transport in a logging-disturbed tropical catchment. *Earth Surf. Proc. Land.* 33: 1174-1191.
- 日本林道協会 (2008) 林道規程－運用と解説－. 272pp, 日本林道協会, 東京.
- 日本林道協会 (2011) 林道必携 (技術編). 310pp, 日本林道協会, 東京.
- 野口正二・金子智紀・北田正憲・鈴木秀典 (2014) 開設された作業道における表面流の発生－現地踏査と植生調査の解析－. 日林誌 96 (6) : 342~347.
- 小倉晃・小谷二郎・臼田寿生 (2011) 作業路の土砂流出抑制法－スギの枝条を散布して－. 日林講 122 : 672.
- 大河原昭二 (1986) 山岳林道における岩大式新構造路体の開発. 岩大演報 17 : 53~68.
- 呉在萬・井上章二 (1998) 林道開設地における渓流水の浮遊砂濃度の変化. 森利学誌 13 (3) : 161~168.
- Packer P. E. (1967) Criteria for designing and locating logging roads to control sediment. *Forest Sci.* 13 (1): 2-18.
- Reid L. M. and Dunne T. (1984) Sediment production from forest road surface. *Water Resour. Res.* 20 (11): 1753-1761.
- 林野庁 (2010a) 林業専用道作設指針の制定について. オンライン,
(<http://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/saisei/pdf/rinngyousenyou.pdf>). 2015年9月28

日閲覧.

林野庁 (2010b) 路網・作業システム検討委員会最終とりまとめ. オンライン,
(<http://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/saisei/pdf/romousaisyuu.pdf>). 2015年9月28日
閲覧.

林野庁 (2010c) 森林作業道作設指針の制定について. オンライン,
(<http://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/saisei/pdf/sinrinsagyoudou.pdf>). 2015年9月28
日閲覧.

齋藤仁志・有賀一広・田坂聡明・松英恵吾 (2009) 高解像度 DTM を用いた地形順応型林道
設計自動化手法の検討. 森利学誌 23 (4) : 273~276.

酒井秀夫 (1987) 合理的集運材方式に基づく長期林内路網計画に関する研究. 東大演報 76 :
1~85.

酒井秀夫 (2004) 作業道-理論と環境保全機能-. 281pp, 全国林業改良普及協会, 東京.

酒井秀夫 (2011) 林業専用道・森林作業道の読み方シリーズ①これが林業専用道だ!. 現代
林業 2011年8月号 : 12~29.

酒井徹朗 (2008) 林道の保全時代に向けた自然災害リスクに応じた維持管理技術. 森利学誌
23 (2) : 103~106.

酒井徹朗・佐々木功・藤井禧雄・古谷士郎 (1982) 林道の路面侵食について (I) -横断排水
溝の間隔について-. 日林論 93 : 539~540.

酒井徹朗・佐々木功・藤井禧雄・古谷士郎 (1983) 林道路面の侵食について-侵食溝の実態
調査-. 昭和 54~56 年度文部省科学研究費 (総合研究 A) 課題番号 436011 報告
書 : 35~45.

笹賀一郎・藤原滉一郎・有働裕幸 (1986) 林道路面の排水工法. 北大演報 43 (3) : 685~705.

澤口勇雄・大川畑修 (1993) 路網規格の合理的配置 (I) Hack の法則の類似式適用による幹
線路網規格の決定. 日林誌 75 (1) : 16~23.

澤口勇雄・大川畑修・市原恒一 (1995) 路網規格の合理的配置 (II) 林業的機能評価による

- 林道規格の決定. 日林誌 77 (3) : 187~196.
- Sheridan G. J. and Noske P. J. (2007) A quantitative study of sediment delivery and stream pollution from different forest road types. *Hydrol. Process.* 21 (3): 387-398.
- Sheridan G. J. and Noske P. J., Whipp R. K. and Wijesinghe N. (2006) The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads. *Hydrol. Process.* 20 (8): 1683-1699.
- Stafford A. K. (2011) Sediment production and delivery from hillslopes and forest roads in the southern Sierra Nevada, California. Master thesis of Colorado State University: 1-190.
- Sugden B. D. and Woods S. W. (2007) Sediment production from forest roads in Western Montana. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 43 (1): 193-206.
- 鈴木秀典・梅田修史・山口智 (2006) レーザープロファイラによる路面形状の測量. 日林関東支論 57 : 321~323.
- 鈴木喬 (1973) 林道の機能と林道事業-特に林道の公道的性格と機能について-. 105pp, 日本林業調査会, 東京.
- 鈴木保志・酒井徹朗・古谷士郎 (1991) 林道の路面侵食量の推定 (予報). 日林論 102 : 651~652.
- Swanson F. J. and Dyrness C.T. (1975) Impact of clear-cutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascade Range, Oregon. *Geology* 3 (7): 393-396.
- Takken I, Croke J. and Lane P. N. J. (2007) A methodology to assess the delivery of road runoff in forestry environments. *Hydrol. Process.* 22 (2): 254-264.
- Thompson M., Sessions J., Boston. K, Skaugset A. and Tomberlin D. (2010) Forest road erosion control using multiobjective optimization. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 46 (4): 712-723.
- 東京大学教養学部統計学教室 (1992) 自然科学の統計学. 366pp, 東京大学出版会, 東京.
- 豊田宏 (1977) 林道の排水断面表. 治山林道研究発表論文集 12 : 120~124.
- Trimble G. R. and Weitzman S. (1953) Soil erosion on logging roads. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 17 (2):

152-154.

梅田修史・鈴木秀典・山口智・久保田多余子・清水晃（2005）林道路面流の流出量について.

日林関東支論 56 : 75～76.

United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (2009) USLE Database.

Online, (<http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=10626>). 2015/09/28 access.

United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (2015) WEPP. Online,

(<http://www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=10621>). 2015/09/28 access.

臼田寿生・古川邦明・鈴木秀典・小倉晃（2014）森林作業道における濁水流出防止対策の検

討-沈砂池の効果-. 森利学誌 29 (2) : 97～100.

Ward T. J. and Seiger A. D. (1983) Adoption and application of a surface erosion model for New

Mexico forest roadways. N. M. Water Resour. Res. Inst. Tech. Rep. 188: 1-83.

Wemple B. C. and Jones J. A. (2003) Runoff production on forest roads in a steep mountain catchment.

Water Resour. Res. 39 (8): SWC8 (1-17).

矢部和弘・旗生規・豊川勝生（2010）作業道における片勾配の排水および浸食防止効果. 東

京農大集報 55 (3) : 249～255.

矢部和弘・三平祐樹・福永健司・橘隆一（2014）轍が片勾配路面の分散排水および侵食防止

効果に及ぼす影響. 森利学誌 29 (2) : 91～96.

山本仁志（1992）林道切取りのり面の崩落土砂量の推定. 日林誌 74 (1) : 37～43.

山本仁志・矢部茂明・豊島重造・大河原昭二（1985）林道切取りのり面保護試験地の5年間

の崩土量. 日林論 96 : 655～656.

保田時男（2004）大規模サンプルに対する一般化 χ^2 乗適合度検定-JGSS データへの適用例

- JGSS 研究論文集 16 (3) : 191～202.

吉幸朗・長澤喬・森田紘一・中尾博美（2001）高密度道路網を基板とする機械化間伐作業林

分における土砂流出について. 森利学誌 16 (3) : 191～202.

Ziegler A. D. and Giambelluca T. W. (1997) Importance of rural roads as source areas for runoff in

mountainous areas of northern Thailand. *J. Hydrol.* **196**: 204-229.

Ziegler A. D., Giambelluca T. W., Sutherland R. A., Vana T. T. and Nullet M. A. (2001a) Horton overland flow contribution to runoff on unpaved mountain roads: A case study in northern Thailand. *Hydrol. Process.* **15** (16): 3203-3208.

Ziegler A. D., Sutherland R. A. and Giambelluca T. W. (2000) Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. *Water Resour. Res.* **36** (9): 2787-2791.

Ziegler A. D., Sutherland R. A. and Giambelluca T. W. (2001b) Interstorm surface preparation and sediment detachment by vehicle traffic on unpaved mountain roads. *Earth Surf. Proc. Land.* **26**: 235-250.

付録 写真を用いた路面侵食量計測方法

本研究では、路面侵食量の計測を省力化し多点的な計測を可能にするため、写真を用いた路面侵食量の計測方法を開発した。第4章における路面侵食量予測モデルの推定とその残差分布の検討にはこの方法を用いて求めた路面侵食量のデータを用いた。以下にその方法の詳細を示す。

1. 写真撮影手順

現地での写真撮影手順は以下の通りである。

- ① 排水区間の上流端横断溝を基点として路線のセンターラインに沿ってテープメジャーを伸ばし、1 m 間隔で計測点を設定する。
- ② 計測点において、視認性の良いピンク色のマーキングテープ（幅員と同程度の長さのもの）を路線のセンターラインに直交させて路面に置く（図1）。このマーキングテープは計測対象となる路面の横断面を示す。マーキングテープには0.2 m 間隔でビニルテープが巻かれており、ビニルテープに挟まれた区間に1つずつM10 ナットが取り付けられている。このナットはマーキングテープの浮き上がりを防止する錘の役目を果たす。錘の位置はビニルテープに挟まれた区間内で自由に動かすことができるので、マーキングテープが路面の横断形状に沿うよう錘の位置を調整する。
- ③ マーキングテープ上で路面の両端にあたる位置に測量用明示板を置く。なお、本来2級林道の車道幅員は3 m（全幅員は4 m）であるが、調査を行った林道では植生の繁茂や切取法面からの崩落土砂の堆積等により幅員の辺縁部が平坦でない場合が多かった。そこで本研究では、本来の幅員に関わらず、植生の繁茂や土砂堆積等が見られず現に車両の通行に供されている部分を路面とみなすこととし、両端点を定めた。
- ④ 長さ0.500 m のスケールを左右に二本吊るしたポールをマーキングテープの真上で保持する。このスケールは、錘を吊るした糸の0.000 m 及び0.500 m の位置に、写真画

像内で視認できるカラービニルテープで印をつけて制作した。このスケールは、写真画像内で計測される路面侵食量を、現実空間における長さに換算するために用いる。換算の際、2本のスケールとマーキングテープが鉛直な1つの平面上にあることを仮定する。その状態にするため、2本のスケールがマーキングテープの真上に鉛直に吊り下がるようポールの保持位置を調整し、錘の揺れを止める。このマーキングテープと2本のスケールを含む鉛直な平面を以後「計測対象断面」と称する。

- ⑤ マーキングテープ全体が写る位置にデジタルカメラをセットし、計測対象断面を撮影する。本研究では計測対象断面から3.5 m 離れ、地面から1 m の高さにデジタルカメラをセットした。撮影の際、水平器を用いてカメラの筐体が鉛直になっていることを確認する。

以上の手順により撮影した写真の例を図1に示す。



図1 路面侵食量計測用写真の例

2. 路面侵食量の計算方法

2.1 座標系の設定

次に、撮影した画像から路面侵食量を求める計算を行う。第4章4.2.2項で述べたように、本研究における路面侵食量の定義は以下の通りとする。すなわち、路面の両端を結ぶ直線を基準線とし、それに対する路面の最高点と最低点との高低差（深度）を路面侵食量とする（図4.1）。

写真から路面侵食量を求めることは、画像内で定義される2次元座標系における基準線と路面との高低差を、メートルを単位とする現実の3次元空間座標系における高低差に変換する作業にほかならない。そこで、画像内の位置を表現する2次元座標系として、画像の中心を原点、画像の横方向を u 軸、縦方向を v 軸とし、ピクセルを単位とする座標系を設定する。以後、この座標系を「ピクセル座標系」と称する。また、現実の3次元空間における位置を表現する座標系として、カメラの位置を原点とし、水平かつカメラに正対する方向を U 軸、鉛直方向を V 軸、それらに垂直な奥行方向を W 軸とし、メートルを単位とする座標系を設定する。以後、この座標系を「実空間座標系」と称する。実空間座標系における点 A の座標値を

$$A(U_A, V_A, W_A) \quad 1$$

のように、大文字を使って表現することとする。一方、この点 A が投影された画像内の点は a と小文字で表し、そのピクセル座標系における座標値も

$$a(u_a, v_a) \quad 2$$

のように小文字で表すことで、実空間座標系における座標値と区別することとする。

2.2 透視投影の性質

カメラで撮影された画像は、3次元空間における被写体を2次元の投影面に透視投影したものである。透視投影とは、図2のモデルで示されるように、カメラの位置（投影中心）と被写体とを結ぶ直線と投影面との交点に像を投影するという投影方法である。画像から路面侵食量を求める上で、この投影方法の以下のような性質を用いる。

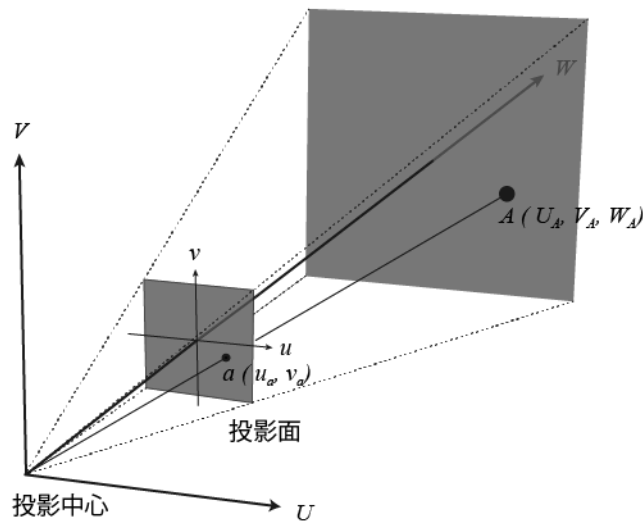


図2 透視投影

まず、このモデルにおいて画像が投影される面（投影面）を平面 $W = E$ とする。これに平行な平面 $W = W_p E$ 上の任意の点 P の U 座標値 U_p と、その投影像 p のピクセル座標系における u 座標値 u_p との比 M は、図3より以下のようなになる。

$$M = \frac{u_p}{U_p} = \frac{1}{W_p q} \quad 3$$

ただし、 q （ピクセル/m）は座標系の単位をメートルからピクセルに変換するための係数である。当然、 V 座標値と v 座標値の間にも同じ関係が成り立つ。以後、この M を「投影倍率」と称する。3式より、投影倍率 M は被写体の W 座標値に依存することがわか

る。実空間座標系においてカメラに正対する平面上では W 座標値が一定となるため、その平面上の被写体は一定の投影倍率で投影される。以後、カメラに正対する平面を「正対面」と称する。投影倍率は正対面ごとに決まるので、以後、正対面 $W = W_1$ 上の被写体の投影倍率を M_{W_1} と表すこととする。

3式より、正対面 $W = W_1$ 上の2点 $S_u(U_{Su}, V_{Su}, W_1)$, $S_l(U_{Sl}, V_{Sl}, W_1)$ 間の距離 $|S_u S_l|$ と、それらの投影像 $s_u(u_{su}, v_{su})$, $s_l(u_{sl}, v_{sl})$ のピクセル座標系における距離 $|s_u s_l|$ との間には、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 |S_u S_l| &= \sqrt{(U_{Su} - U_{Sl})^2 + (V_{Su} - V_{Sl})^2} \\
 &= \sqrt{M^2[(u_{su} - u_{sl})^2 + (v_{su} - v_{sl})^2]} \\
 &= M|s_u s_l|
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\therefore M = \frac{|S_u S_l|}{|s_u s_l|} \tag{5}$$

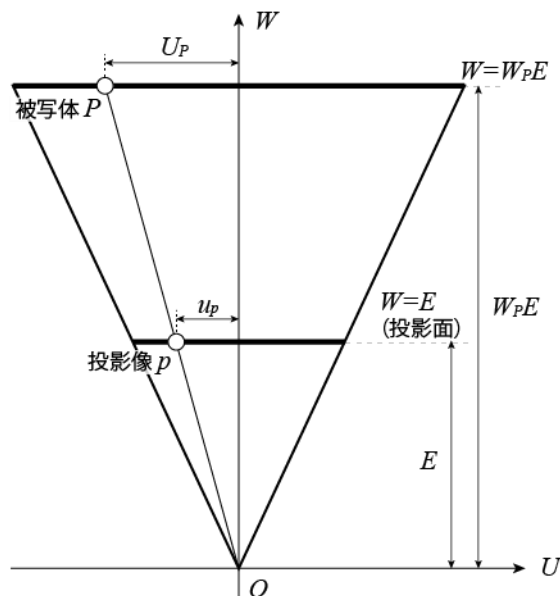


図3 実空間座標系における点 P の U 座標値とその投影像 p の u 座標値

一方、鉛直だがカメラに正対しない平面 $W = aU + b$ (a, b は任意の実数) 上の被写体については、 U 座標値に依存して W 座標値が変化するので、投影倍率も一定ではない。そこでこの平面上の任意の点 P の投影倍率を求める方法を考える。この平面上の鉛直な線分については、両端点で W 座標値が変化しないため、5式の関係が成り立つ。したがって、平面 $W = aU + b$ の任意の点 P の投影倍率 M_P は、同平面上に鉛直な2本のスケール(線分 $S_{1u}S_{1l}$ と線分 $S_{2u}S_{2l}$) を置いて画像に写しこむことで、以下のように求めることができる。

$$M_P = \frac{M_{S1} - M_{S2}}{u'_{s1} - u'_{s2}} (u'_p - u'_{s1}) + M_{S1} \quad 6$$

ただし、 M_{S1} は線分 $S_{1u}S_{1l}$ が存在する正対面における投影倍率、 M_{S2} は線分 $S_{2u}S_{2l}$ が存在する正対面における投影倍率である。 u'_{s1}, u'_{s2} は、平面 $W = aU + b$ 上に、水平な任意の直線 H を仮想的に描き、それをピクセル座標系に投影した直線 h と、直線 $S_{1u}S_{1l}$ 、直線 $S_{2u}S_{2l}$ との交点の u 座標である。 u'_p は点 p を通り線分 $S_{1u}S_{1l}$ に平行な直線と、直線 h との交点の u 座標である。

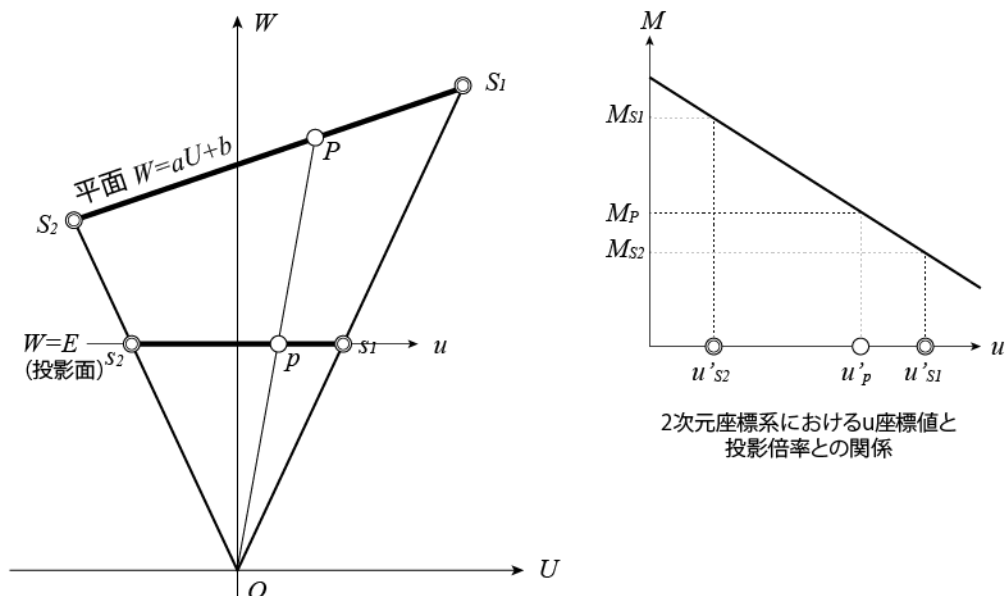


図4 カメラに正対しない平面上の被写体 P の投影倍率

また、平面 $W = W_1$ 上の点 $P_1(U_{P1}, V_{P1}, W_1)$ を、 U, V 座標値は変えずに平面 $W = W_2$ に移した点を $P_2(U_{P1}, V_{P1}, W_2)$ とすると、 P_1, P_2 の投影像 p_1, p_2 のピクセル座標系における u 座標値 u_{p1}, u_{p2} には以下の関係が成り立つ (図 5)。

$$u_{p2} = u_{p1} \frac{W_2}{W_1} = u_{p1} \frac{M_{W2}}{M_{W1}} \quad 7$$

v_{p1} と v_{p2} との間にも同様の関係が成り立つ。

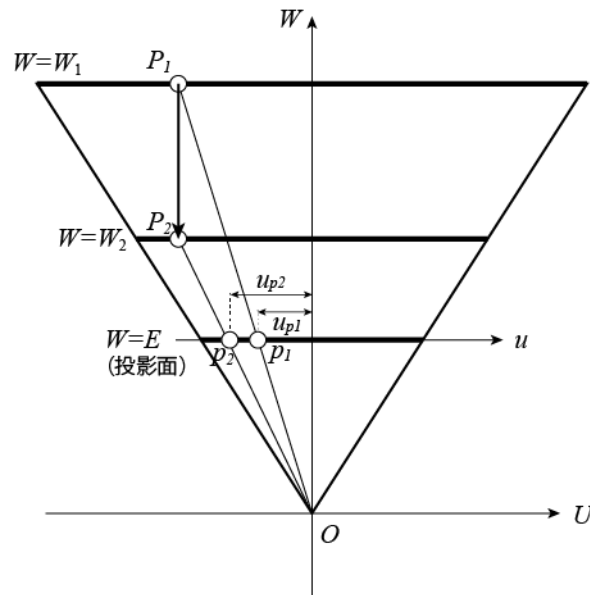


図 5 実空間座標系において平面 $W = W_1$ 上の点 P_1 の投影像 p_1 と、 P_1 を平面 $W = W_2$ 上へ移動させた点 P_2 の投影像 p_2

2.3 路面侵食量の算出

3 式～7 式の関係を用いて、以下の手順により、画像から路面侵食量を求めた。

なお、以下の手順の中では、2 次元のピクセル座標系において、直線の式や 2 直線の交点の座標値を求める操作が頻出する。

2 点 $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ を通る直線の式は

$$v = \frac{v_1 - v_2}{u_1 - u_2}u + \frac{u_1v_2 - u_2v_1}{u_1 - u_2} \quad 8$$

1 点 (u_1, v_1) を通り，傾きが a_1 である直線の式は

$$v = a_1u + v_1 - a_1u_1 \quad 9$$

2 直線 $v = a_1u + b_1$, $v = a_2u + b_2$ の交点の座標値は

$$\left(\frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}, a_1 \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} + b_1 \right) \quad 10$$

と求められることは自明なので，以後これらの記述を省略する。

まず，PC 画面上に表示した画像内で，マーキングテープと路面が接する点 10～15 点を「ピクセル読み取り点」とし，ピクセルインデックスを読み取る。ピクセル読み取り点は，基本的に路面の両端を示す測量用明示板と路面との接点，及びマーキングテープに取り付けられた錘と路面との接点とする。その他に路面の形状が顕著に変化する点がある場合はそれらもピクセル読み取り点に加え，ピクセル読み取り点同士を線分で結んだ時に画像内のマーキングテープとおおむね重なるようにする。ピクセルインデックスの読み取りには，ポインタで指定した位置のピクセルインデックスを表示する機能がある画像表示ソフトを用いる。ピクセル読み取り点数を K 点とし，それらのピクセルインデックスを $p_1(r_{p1}, c_{p1}), p_2(r_{p2}, c_{p2}) \cdots p_K(r_{pK}, c_{pK})$ とする。 p_1 と p_K は路面の両端点となる。デジタルカメラの画像では，左上端のピクセルインデックスが $(1, 1)$ となるが，これを画像中央の座標値が $(0, 0)$ となるよう平行移動し，ピクセル座標系における座標値 $p_i(u_{pi}, v_{pi})$ として扱う。すなわち，以下の変換を行う。

$$u_{pi} = r_{pi} - \frac{r_t}{2} \quad 11$$

$$v_{pi} = c_{pi} - \frac{c_t}{2}$$

12

ただし、 r_t 、 c_t はそれぞれ行インデックス、列インデックスの最大値であり、本研究では 2400×3200 画素の画像を用いたため、 $r_t = 2400$ 、 $c_t = 3200$ となる。また、2本のスケールの上下端のピクセルインデックスも同様に読み取り、ピクセル座標系における座標値に変換する。2本のスケールのうち画像の左側に写ったものをスケール1と呼び、その上下端点のピクセル座標系における座標値をそれぞれ $s_{1u}(u_{s_{1u}}, v_{s_{1u}})$ 、 $s_{1l}(u_{s_{1l}}, v_{s_{1l}})$ とする。同様に右側に写ったものをスケール2とし、スケール2の上下端の座標値を $s_{2u}(u_{s_{2u}}, v_{s_{2u}})$ 、 $s_{2l}(u_{s_{2l}}, v_{s_{2l}})$ とする。

ピクセル座標系において、路面の両端にあたる点 p_1 、 p_k を通る直線の式を求め、これを $v = a_r u + b_r$ とする。本研究で定義する路面侵食量は、この基準線 P_1P_k に対する高低差である。また、ピクセル座標系においてスケール1の上下端を結ぶ直線 $s_{1u}s_{1l}$ の式を求め、これを $v = a_s u + b_s$ とする。なお、 $u_{s_{1l}} = u_{s_{1u}}$ である場合（すなわちスケールがピクセル座標系において v 軸に平行な場合）は、直線の式は $u = u_{s_{1u}}$ となる。同様に、スケール2の上下端結ぶ直線 $s_{2u}s_{2l}$ の式 $v = a_{s2}u + b_{s2}$ または $u = u_{s_{2u}}$ を求める。2本のスケールはいずれも実空間座標系において鉛直に吊り下げられている。従ってピクセル座標系においてこれらに平行な直線は、実空間座標系において鉛直な直線である。なお、2本のスケールは本来平行になるはずだが、写真撮影時のわずかな揺れやピクセルの読み取り誤差等により、 $a_{s1} \neq a_{s2}$ となる場合がある。そこで、これらの傾きの平均 $a_{\bar{s}}$ を、実空間座標系における鉛直方向を示す直線の傾きとみなした。ただし、少なくとも一方のスケールが v 軸に平行である場合は、 v 軸の方向を実空間座標系における鉛直方向とみなすこととした。

次に、ピクセル座標系において、 i 番目（ $2 \leq i \leq K-1$ ）のピクセル読み取り点 p_i を通り傾きが $a_{\bar{s}}$ である（すなわち実空間座標系において鉛直である）直線と、基準線 p_1p_k との

交点 p_i' の座標値 $(u_{p_i'}, v_{p_i'})$ を求める。線分 $p_i p_i'$ の長さは以下のように求められる。

$$|p_i p_i'| = \sqrt{(u_{p_i} - u_{p_i'})^2 + (v_{p_i} - v_{p_i'})^2} \quad 13$$

このピクセル座標系における線分 $p_i p_i'$ の長さを実空間座標系における長さに変換するため、投影倍率 M_{p_i} を求める。計測対象断面がカメラに正対していれば、計測対象断面上の線分 $P_2 P_2' \sim P_{K-1} P_{K-1}'$ および2本のスケールはすべて同じ倍率で投影されることとなり、ピクセル座標系における長さを容易に実空間座標系における長さに変換することができる。しかし、現場で写真を撮影する際にカメラを計測対象断面に完全に正対させることは困難であったため、計測対象断面は鉛直だがカメラに正対しない平面となっている。そこで、6式の関係を用いて、線分 $P_2 P_2' \sim P_{K-1} P_{K-1}'$ および2本のスケールそれぞれの投影倍率を求める。まず、スケール1, 2のピクセル座標系における長さを求める。

$$|s_{1u} s_{11}| = \sqrt{(u_{s_{1u}} - u_{s_{11}})^2 + (v_{s_{1u}} - v_{s_{11}})^2} \quad 14$$

$$|s_{2u} s_{21}| = \sqrt{(u_{s_{2u}} - u_{s_{21}})^2 + (v_{s_{2u}} - v_{s_{21}})^2} \quad 15$$

スケール1, 2の実空間座標系における長さは0.500 mと既知なので、5式より、スケール1, 2が存在する正対面における M_{WS1} , M_{WS2} を求めることができる。

次に、計測対象断面上に水平な直線 H を仮想的に描き、ピクセル座標系におけるその投影像 h の直線の式を求める。直線 H は任意の高さのもので良いが、ここでは、スケール1の下端点 S_{11} を通るものとし、その投影像の直線 h の式を以下のように求める。まず、実空間座標系において、スケール1の下端点 $S_{11}(U_{S_{11}}, V_{S_{11}}, W_{S_{11}})$ を、 X, Y 座標を変えずにスケール2が存在する正対面 $W = W_{S_2}$ に写した点を S_{1S_2} として、そのピクセル座標系における座標値 $s_{1S_2}(u_{s_{1S_2}}, v_{s_{1S_2}})$ を7式の関係を用いて以下のように求める。

$$S_{1S2}(u_{s1s2}, v_{s1s2}) = S_{1s2} \left(u_{s1} \frac{M_{WS2}}{M_{WS1}}, v_{s1} \frac{M_{WS2}}{M_{WS1}} \right) \quad 16$$

ピクセル座標系において、この点 S_{1S2} を通り傾きが $-\frac{1}{a_s}$ （すなわち実空間座標系において水平）である直線と、直線 $S_{2u}S_{2l}$ との交点 $S_{1hor}(u_{s1hor}, v_{s1hor})$ の座標値を求める。実空間座標系においてこの点 S_{1hor} は、スケール2の延長線上にあり、かつ点 S_{1l} と V 座標値が等しい点となる。従って2点 S_{1l} , S_{1hor} を通る直線は、計測対象断面上の水平な直線 H となる。ピクセル座標系における直線 S_1S_{1hor} の式を $v = a_h u + b_h$ とする。この直線と $p_i p_i'$ との交点との u 座標値を u'_{pi} とすれば、6式より、線分 $P_i P_i'$ の投影倍率 M_{P_i} は以下のように求められる。

$$M_{P_i} = \frac{M_{WS1} - M_{WS2}}{u'_{s1} - u'_{s2}} (u'_{pi} - u'_{s1}) + M_{WS1} \quad 17$$

従って、実空間座標系における線分 $P_i P_i'$ 長さは

$$|P_i P_i'| = \frac{|p_i p_i'|}{M_{P_i}} \quad 18$$

図6に、各点の位置関係を示した。

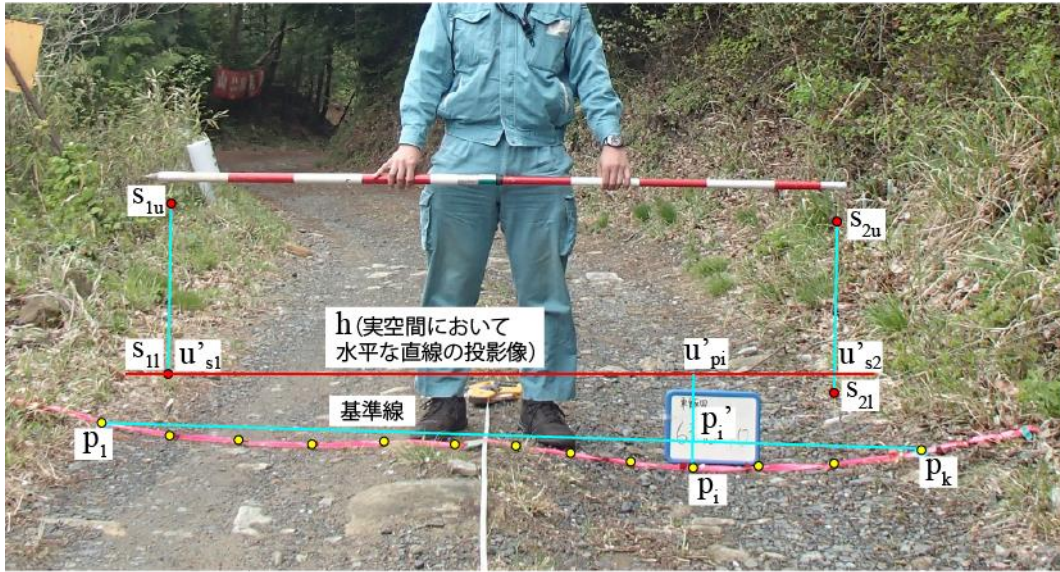


図 6 路面侵食量の計算に用いる点及び直線の位置関係

本研究で定義する路面侵食量は基準線 P_1P_K に対する高低差なので、水平に対する基準線 P_1P_K の傾き θ の余弦を求め、 $|P_iP_i'|$ に乗じる必要がある。基準線の傾きの余弦は以下の手順により求める。実空間座標系において、点 $P_1(U_{P_1}, V_{P_1}, W_{P_1})$ を、 U, V 座標を変えずに P_K が存在する正対面 $W = W_{P_K}$ に写した点を P_{1PK} とすると、そのピクセル座標系における座標値 $p_{1PK}(u_{p1PK}, v_{p1PK})$ は、7式を用いて以下のように求められる。

$$p_{1PK}(u_{p1PK}, v_{p1PK}) = p_{1PK} \left(u_{p1} \frac{M_{PK}}{M_{P_1}}, v_{p1} \frac{M_{PK}}{M_{P_1}} \right) \quad 19$$

ピクセル座標系において、この点 p_{1PK} を通りスケールに垂直な直線と、 p_K を通りスケールに平行な直線との交点 $p_{1hor}(u_{p1hor}, v_{p1hor})$ の座標値を求める。実空間座標系において、直線 P_1P_{1hor} は計測対象断面上にあり、 P_1 を通る水平線である。従って基準線 P_1P_K の水平線に対する傾き θ の正弦は、以下ようになる。

$$\sin \theta = \frac{|P_K P_{1hor}|}{|P_1 P_K|} \quad 20$$

$|P_1 P_K|$ については、ピクセル座標系における直線 $p_1 p_{1hor}$ と直線 $s_{1u} s_{11}$, $s_{2u} s_{21}$ との交点をそれぞれ求め、その u 座標値を u_{ps1} , u_{ps2} とすると、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} |P_1 P_K| &= \int_{u_{p_1}}^{u_{p_K}} \frac{1}{M_u} du \\ &= \int_{u_{p_1}}^{u_{p_K}} (A(u - u_{ps1}) + M_{WS1})^{-1} du \\ &= A \{ \log[A(u_{p_K} - u_{ps1}) + M_{WS1}] - \log[A(u_{p_1} - u_{ps1}) + M_{WS1}] \} \end{aligned} \quad 21$$

ただし

$$A = \frac{M_{WS1} - M_{WS2}}{u_{ps1} - u_{ps2}} \quad 22$$

とおいた。

また、 $|P_K P_{1hor}|$ については以下のように求められる。

$$\begin{aligned} |P_K P_{1hor}| &= \frac{|p_K p_{1hor}|}{M_{p_K}} \\ &= \sqrt{(u_{p_K} - u_{p_{1hor}})^2 + (v_{p_K} - v_{p_{1hor}})^2} (A(u_{p_K} - u_{ps1}) + M_{WS1})^{-1} \end{aligned} \quad 23$$

これらを用いて、水平線に対する基準線の傾き θ の余弦が求められる。

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \\ &= \sqrt{1 - \left(\frac{|P_K P_{1hor}|}{|P_1 P_K|} \right)^2}\end{aligned}\tag{24}$$

路面上のピクセル測定点 P_i と基準線との距離 l_{pi} は、以下のように求められる。

$$l_{pi} = |P_i P_i'| \cos \theta\tag{25}$$

$P_2 \sim P_{K-1}$ を基準線よりも上側にあるものと下側のものに分け、それぞれのグループにおける l_{pi} の最大値を l_{umax} , l_{lmax} とする。ただし、すべての点が基準線の上側にある場合は $l_{lmax} = 0$, すべての点が基準線の下側にある場合は $l_{umax} = 0$ とする。この計測対象断面上の路面侵食量 l_t は、

$$l_t = l_{umax} + l_{lmax}\tag{26}$$

と求められる。