

除雪シミュレーションによる除雪体制と費用に関する研究

都市交通研究室 永井 新悟

指導教員 松本 昌二

佐野 可寸志

土屋 哲

1. はじめに

現在の道路除雪は除雪水準が高く、平常時の降雪量であれば都市交通機能が滞らない程度の除雪体制が整えられている。しかし近年、自治体は厳しい財政状況になっているため、除雪費用の削減が求められている。また、平成18年度の少雪時では、県管理道路の除雪を請け負っている業者の多くが除雪機械の整備・点検、維持等の費用により採算性がとれず、随意契約から競争契約に体制が移行した際には、除雪業者の撤退による除雪体制の崩壊が懸念された。そこで本研究では、実際の除雪作業を可能な限り、再現した除雪シミュレーション・モデルを開発し、対象地区における降雪量と除雪費用との関係を数量的に明らかにすることで、実質的に必要となる除雪費用の推計・分析を行い、除雪費用積算方法の問題点を明らかにすることを目的とする。

なお、除雪費用には一般除雪、拡幅除雪の稼働により支払われる主要除雪費用及び、雪道巡回、待機、情報連絡等の補助的除雪工に対して支払われる補助的除雪費用とがある。本研究では国道・県道の順に除雪シミュレーション・モデルを構築し、両モデルを用いて主要除雪費用を推計する。その後、推計した主要除雪費用に降雪量に応じた係数を乗じることにより、総除雪費用(主要除雪費用+補助的除雪費用)を推計し、分析していく(図1)。

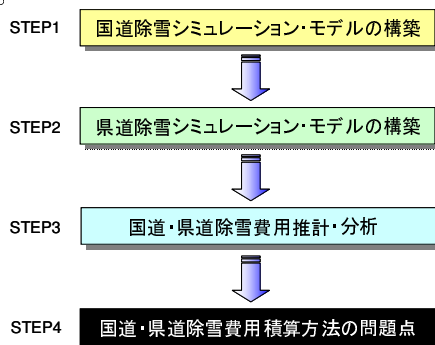


図1. 研究フロー

2. 除雪シミュレーション・モデル

本研究では実際の除雪作業を可能な限り、再現する除雪シミュレーション・モデルを開発し、対象地区における仮想的な除雪稼働時間(一般除雪、拡幅除雪)を算出することで実質的に必要となる除雪費用を推計する。以降、一般除雪を一次除雪、拡幅除雪を二次除雪と称する。その際、一次除雪作業後にみられる雪の断面変化計算、また、日射熱量を考慮した融雪計算を行うことにより、実際の除雪作業を再現することを試みる。除雪シミュレーションのフローチャートを図2に示す。

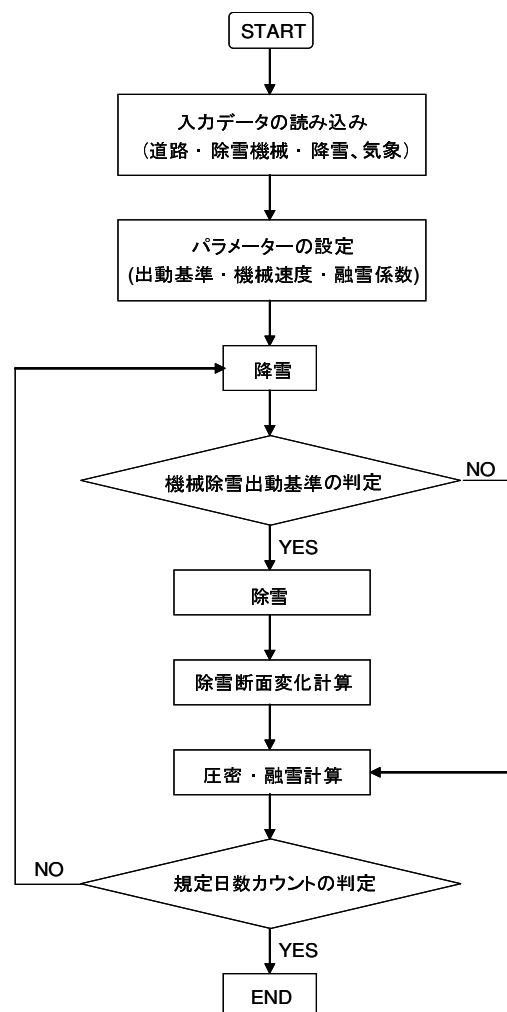


図2. 除雪シミュレーションフロー

2-1. 入力データ

(1) 道路データ

- ・ 区間長・道路幅員(片側)・道路条件

区間毎に入力し、各区間の除雪機械速度を判定する。また、区間長以外は一次除雪後に形成される堆雪形状計算に入力し、区間毎の堆雪高を算出する。

(2) 除雪機械データ

- ・ 除雪機械車種・形態・台数
- ・ 除雪機械出動経路

除雪機械データは除雪単価が異なる車種・形態毎に入力する。また、機械毎に出動経路を入力し、降雪パターンに応じた経路選択を行う。

(3) 降雪・気象データ

降雪データは1時間毎に読み取りを行い、出動基準の判定を行う。また、気象データに関しては融雪計算を行う際の日射熱量を入力する。

2-2. パラメーターの設定

(1) 除雪機械出動基準

一次除雪は路面堆雪高、二次除雪は一次堆雪高を使用して各機械除雪出動の判定を行う。

(2) 除雪機械速度

道路条件により分割する区間毎に各除雪機械速度を入力し、各除雪稼働時間の算出計算を行う。

(3) 融雪係数

日毎の日射熱量に融雪係数を乗じて、融雪計算を行う。

2-3. 一次堆雪形状の仮定

路面堆雪は、一般除雪によって除去され、路肩に一次堆雪帯が形成される。この堆雪量が増加するとロータリによる拡幅除雪が行われる。本シミュレーションではこの一次堆雪形状の発達の計算を簡易的に行うため、堆雪形状を仮定し、近似的に形状変化のモデル化を行う。

一次堆雪帯の発達状況より、安定勾配の限界である40°を仰角として斜面が平行に発達していくと仮定した(図3)。これより、一次堆雪堆体積VAが与えられれば、一次堆雪高HAは式(3)で計算可能となる。

以上の堆雪断面発達モデルを用いて一次堆雪高を算出する。

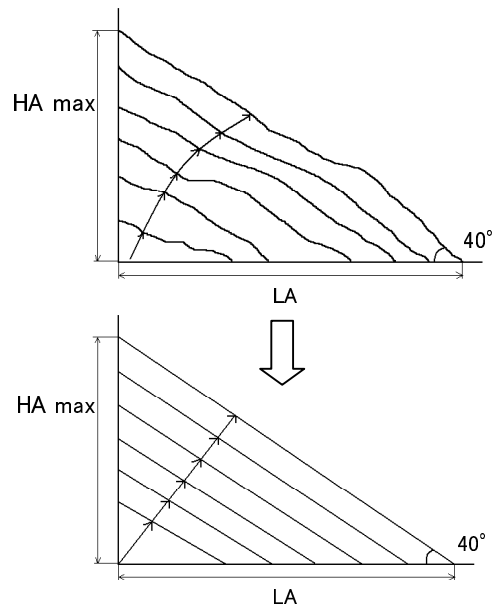


図3. 一次堆雪断面発達モデル

$$\tan 40^\circ = \frac{HA}{LA} \quad \dots (1)$$

$$V = \frac{HA \cdot LA}{2} \quad \dots (2)$$

(1)、(2)より

$$HA = \sqrt{2V \cdot \tan 40^\circ}$$

$$= \sqrt{1.687 \cdot V} \quad \dots (3)$$

2-4. 圧密・融雪計算

本シミュレーションでは気象による融雪を考慮し、1時間毎に路面堆雪、一次堆雪帯に対して式(4)の融雪計算を行う。また、日照りが無い夜間を17時から7時までとし、この時間帯は日射熱量Io=0として計算する。なお、Me、Md、Mvの値は融雪量Wmに及ぼす影響がわずかであるため、割愛している。

$$W_m = \frac{S}{80} (M_a + M_e + M_d + M_v) \times P_{am} \quad \dots (4)$$

Wm: t日間で生じる全融雪量 (g)

S: 堆雪の表面積 (cm²)

Ma: t日間の総日射熱量 (cal/cm²)

$$M_a = I_o (1 - r)$$

Io: 日射熱量 (cal/cm²)

Io = 天候別平均日射熱量 × 各天候の継続時間
(晴れ=24.5、曇り=15.6、雨=10.4、雪=9.8)

r: 雪面反射能 (親雪0.75、しまり雪0.6、投雪層0.4)

Pam: 融雪係数

3. 国道除雪シミュレーション

除雪シミュレーション・モデルを構築する上で、入力に関する詳細な情報が必要となる。そのため、基礎データが十分に整備されている国道を対象として、H19の除雪シミュレーション・モデルの開発をまず、試みた。その上で、パラメーターを試行錯誤的に変化させ、各除雪機械の稼働回数・稼働時間を、可能な限りの再現することを試みた。また、降雪量データは平年並みの降雪量であったH19を対象とした。

3-1. 対象工区

対象工区は、長岡国道事務所管轄である国道17号線に位置する小出工区を選定した。適度に降雪があり、地形条件に偏りがなく、適度に散在している点から、小出工区を対象とした。また、実際の除雪作業を再現するにあたり、道路条件によって除雪機械速度が影響を受けることから、工区を細かく分割する必要がある。よって、表1のように道路条件を考慮した区間分割を行い、区間毎に各除雪機械速度を設定した。

表1. 道路条件(小出工区)

区間	道路条件			
	消雪パイプ	堆雪帯	投雪帯	橋
A	○	—	—	—
B	x	○	○	—
C	x	○	x	—
D	x	x	x	○

3-2. シミュレーション結果

図4, 5は一次除雪の実稼働時間と推定稼働時間の相関図を表している。1日毎の稼働時間にかんがりの誤差がみられるが、移動平均5日間によって比較すれば、比較的適合度の高いモデルを構築することが出来た。一次除雪は、出動基準が明確に定められていることから、シミュレーションでの再現性は高いといえる。

図6, 7は二次除雪の実稼働時間と推定稼働時間の相関図を表している。一次除雪によって形成される一次堆雪高に基づいて出動判定を行っているため、一次除雪に比べて誤差が大きくなっている。しかし、移動平均5日間を比較すると、高い相関が得られることが判明した。

以上の結果より、国道において一次・二次除雪共に適合度の高いモデルが構築できたといえる。

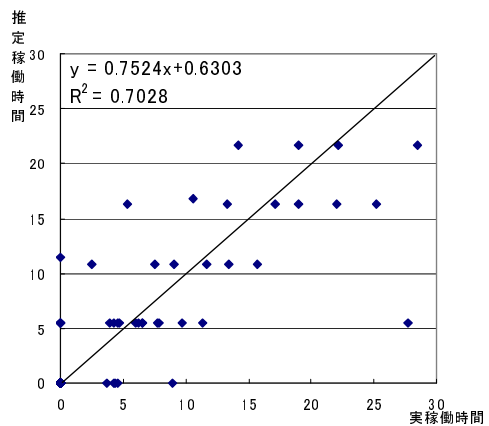


図4. 一次稼働時間/日の相関図

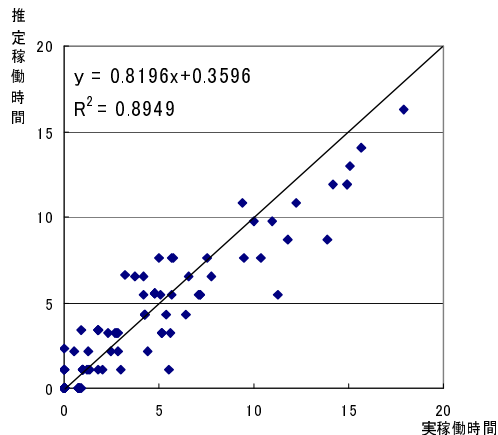


図5. 一次稼働時間(移動平均5日間)の相関図

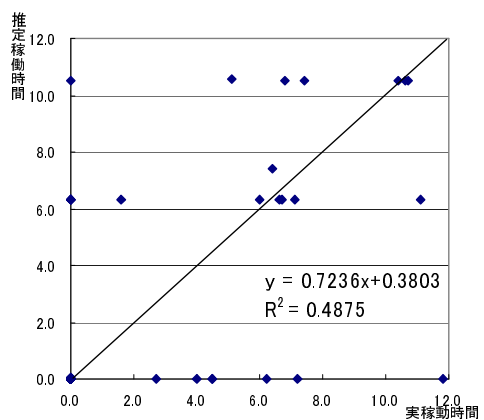


図6. 二次稼働時間/日の相関図

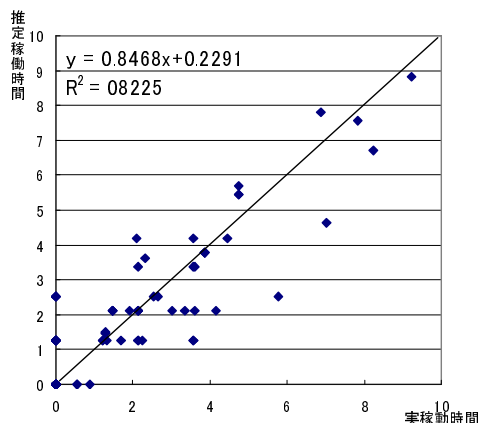


図7. 二次稼働時間(移動平均5日間)の相関図

3-3. 主要除雪費用の推計

除雪シミュレーションにおいて推計した各稼働時間を用いて、稼働に対して実質的に必要となる除雪費用を推計する。国道・県道共に、除雪機械の稼働1時間当たりの単価が定められており、累計稼働時間に単価を乗じて求めることが出来る。今後、稼働に対して支払われる除雪費用を「主要除雪費用」と称する。主要除雪費用の推計結果を表2に示す。国道除雪シミュレーションにより推計した主要除雪費用は、実績の費用と誤差が少ないことが確認された。

表2. 国道主要除雪費用の推計結果(H19)

	一次除雪費用		
	実際除雪費用	推計除雪費用	割合(%)
12月	808,331	712,091	88.1
1月	3,844,503	3,454,741	89.9
2月	3,859,837	3,560,459	92.2
3月	192,773	369,013	52.2
合計	8,705,444	8,096,304	93.0
	二次除雪費用		
	実際除雪費用	推計除雪費用	割合(%)
12月	-	-	-
1月	1,274,929	1,381,919	92.3
2月	1,943,062	2,005,626	96.9
3月	59,146	-	-
合計	3,277,138	3,387,544	96.7

4. 県道除雪シミュレーション

国道において、ある程度高い相関が得られたため、国道のモデルをベースとして、県道での除雪シミュレーション・モデルを構築した。入力する降雪量データは国道同様、H19を対象とした。

4-1. 対象路線

対象路線は幅員が他の県道に比べ、比較的広く、降雪量も小出工区同様に多いことから旧栃尾市に位置し、新潟県管轄路線である国道290号線を対象とした。また、小出工区同様、国道290号線においても区間分割を行った。国道290号線は、消雪パイプが全区間敷設されていないため、表3の道路条件を考慮した区間分割を行った。また、急カーブ区間に関しては、対向車に恐怖感を与えない様、速度が制限されることを考慮し、他の道路条件に比べ、除雪機械速度を低く設定した。

表3. 道路条件(国道290号線)

区間	道路条件		
	堆雪帯	投雪帯	急カーブ
A	○	○	—
B	○	×	—
C	—	—	○

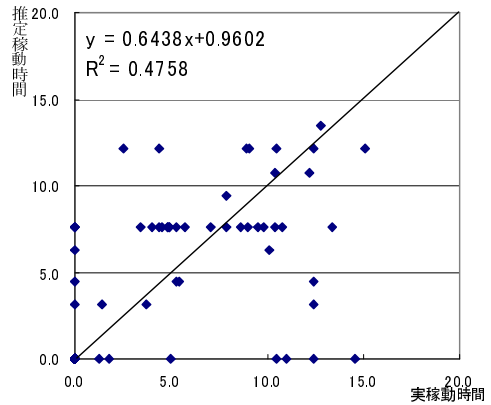


図8. 一次稼働時間/日の相関図

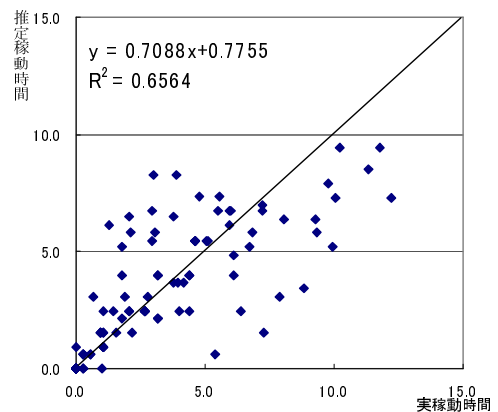


図9. 一次稼働時間(移動平均5日間)の相関図

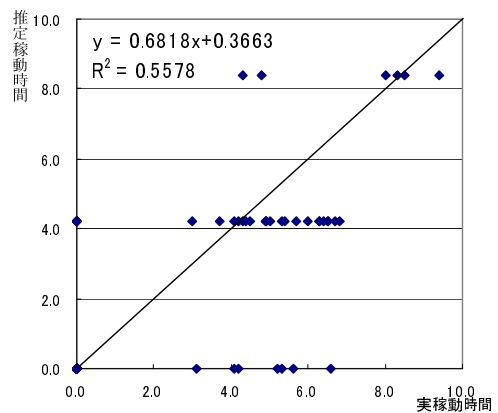


図10. 二次稼働時間/日の相関図

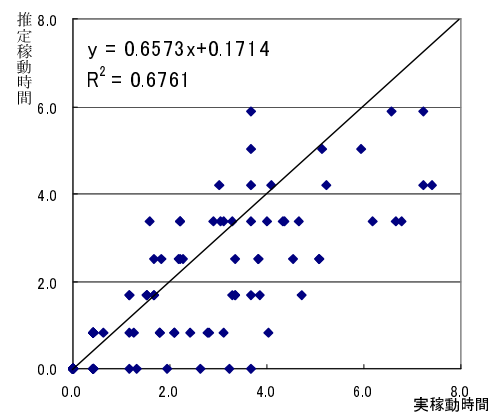


図11. 一次稼働時間(移動平均5日間)の相関図

4-2. シミュレーション結果

図 8, 9 は一次除雪の実稼働時間と推定稼働時間の相関図を表している。国道に比べ、1 回当たりの稼働時間にばらつきがあり、再現性を高めるのは困難だといえる。また、二次除雪出動と同時に一次除雪も出動となるため、二次除雪出動判定に大きく影響を受ける。

図 10, 11 は二次除雪の実稼働時間と推定稼働時間の相関図を表している。二次除雪の出動基準は一次除雪と異なり、一次堆雪高についての出動判定のみである。そのため、一次除雪に比べて、相関は多少高い結果となった。

県道は、モデルを構築する上で必要となる基礎データの整備が十分ではないため、再現性は国道に比べると低くなった。また、使用する機械台数が国道に比べて少なく、1 台当たりにかかる負担がかなり大きいことから、路面状況に応じた多種多様な除雪作業を行うことが余儀なくされていることも再現性を低くした要因だと考える。

4-3. 主要除雪費用の推計

表 4 より、県道除雪シミュレーションによって推計した主要除雪費用は、実績の費用と誤差が少ないことが確認された。これより、国・県道除雪体制の問題点を数量的に明らかにする。

表 4. 県道主要除雪費用の推計結果(H19)

	一次除雪費用		
	実除雪費用	推計除雪費用	割合(%)
12月	791,700	662,082	83.6
1月	2,651,740	2,753,907	96.3
2月	2,817,360	2,721,364	96.6
3月	49,140	57,157	86.0
合計	6,309,940	6,194,510	98.2
	二次除雪費用		
	実除雪費用	推計除雪費用	割合(%)
12月	397,150	394,834	99.4
1月	2,091,500	1,678,045	80.2
2月	2,051,550	2,072,878	99.0
3月	-	-	-
合計	4,540,200	4,145,757	91.3

5. 総除雪費用分析

前章では、H19 国道(小出工区)、県道(国道 290 号線)それぞれの降雪条件で除雪シミュレーションを行ったので、両者の除雪費用を比較することが出来ない。そこで、国道・県道除雪シミュレーション・モデルに同一の降雪量データを入力し、除雪費用を推計することによって、同条件での比較を行う。その際、シミュレーションにより推計される主要除雪費用に、補助的除雪費用(雪道巡回工・待機保障・情報連絡等)を加えた総除雪費用について比較を行う。

5-1. 総除雪費用の推計方法

総除雪費用を推計するためには、補助的除雪費用を推計する必要がある。しかし、国道では降雪量の有無に関わらず、補助的除雪費用が支払われていることから、補助的除雪費用をシミュレーションによって推計するのは困難である(図 12)。また、一次除雪の稼働の有無に関わらず、待機保障費が支払われていることから、同様のことがいえる。そこで、実績の主要除雪費用と補助的除雪費用の割合に着目し、シミュレーションによって推計した主要除雪費用に係数を乗じることにより、補助的除雪費用を含めた総除雪費用を簡易的に推計することとした。

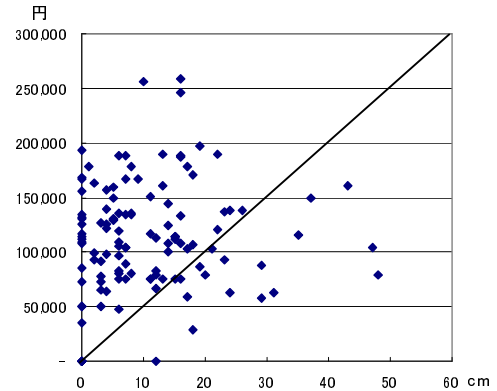


図 12. 実績補助的除雪費用と降雪量の相関図 (小出工区 : H19)

表 5. 除雪費用の出来高実績

対象区間	年度	年間降雪量 (cm)	内容	主要除雪費用			補助的除雪費用				合計費用	
				一般除雪	拡幅除雪	小計	雪道巡回工	待機	情報連絡	小計		
小出工区 国道17号線	H18	676	除雪費用(円)	3,526,019	262,147	3,788,166	3,455,738	3,104,276	767,910	3,127,686	10,455,610	14,243,775
			割合(%)	24.8	1.8	26.6	24.3	21.8	5.4	22.0	73.4	
	H19	1272	除雪費用(円)	8,705,444	3,277,138	11,982,582	4,129,581	4,645,908	1,037,735	3,723,646	13,536,870	
			割合(%)	34.1	12.8	47.0	16.2	18.2	4.1	14.6	53.0	
栃尾 国道290号線	H19	1111	除雪費用(円)	6,309,940	4,540,200	10,850,140	-	73,600	-	-	73,600	10,923,740
			割合(%)	57.8	41.6	99.3	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	

表5にH18, 19の各除雪費用出来高実績を示す。表5より、県道(栃尾：国道290号線H19)では、主要除雪費用が全除雪費用の99.3%を占めており、補助的除雪費用は極わずかである。それに対して国道は、平常並みの降雪量(H19)では、主要除雪費用が47.0%、補助的除雪費用が53.0%となっており、全除雪費用の5割程度は降雪量の有無に関わらず、保障されていることが分かる。また、平常時(H19)に比べて5割程度の降雪量であった少雪時(H18)では、主要除雪費用が26.6%、補助的除雪費用が73.4%となっており、主要除雪費用に対して2倍以上の保障が確保されていることが分かる。

以上の出来高実績から、補助的除雪費用を含めた実質的に必要となる総除雪費用を推計する方法を表6のように定めた。国道(小出工区)の場合、除雪シミュレーションによって推計された主要除雪費用に年間降雪量に応じた係数を乗じることににより、補助的除雪費用を含めた総除雪費用を推計する。また、県道(国道290号線)の場合、補助的除雪費用の割合が全体の1%にも満たないことから、補助的除雪費用をゼロとみなして推計を行う。

表6. 総除雪費用推計方法

国道除雪 (小出工区)	①平常時: 総除雪費用 = 推計主要除雪費用 × 2
	②少雪時: 総除雪費用 = 推計主要除雪費用 × 3.5
県道除雪 (国道290号線)	総除雪費用 = 推計主要除雪費用 × 1

以上の推計方法を用い、旧栃尾市栗山沢で観測されたH17, 18, 19の同一降雪データを両モデルに入力し、同条件での総除雪費用の比較を行うことにより、国道・県道総除雪費用の積算方法の問題点を明らかにする。また、上記の降雪データを選定した理由は、平常時(H17, 19)と少雪時(H18)を比較することで、降雪量の変動が総除雪費用に及ぼす影響を数量的に比較・分析するためである。

5-2. 総除雪費用の推計結果

総除雪費用の推計結果を表7に示す。国道は県道に比べて平常時で2倍程度、少雪時では4倍以上の除雪費用が支払われることがわかる。また、県道では平常時に比べて少雪時には7割程度もの除雪費用の減少がみられる。次に、対象区間道路の面積1㎡当たりの除雪費用を比較すると、国道では、平常時で300円/㎡程度、少雪時で200円/㎡弱であるのに対して、県道では平常時で200円/㎡程度、少雪時で65円/㎡程度になると推計された。これより、国道では県道に比べて平常時で1.5倍程度、少雪時では3倍程度の除雪費用が支払われると推定される。

6. まとめ

国道・県道除雪シミュレーション・モデルを構築したことにより、同一の降雪条件において、降雪量の変動が総除雪費用に及ぼす影響を数量的に把握し、比較することが出来た。これより、現段階では県道の除雪費用積算方法に補助的費用が含まれないことが最も深刻な問題として挙げられる。しかし、国道の除雪費用は県道に比べて、必要以上に支払われていることも問題点の一つに考える。そのため、国道・県道除雪費用積算方法の妥当性について、さらに検討することが必要と考える。

謝辞：データ提供並びに、ヒアリング調査に協力していただいた長岡国道事務所、長岡地域振興局各位に、この場を借りて深く感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 長岡技術科学大学大学院 増川直実
国道除雪作業シミュレーションの開発に関する研究：(1987)
- 2) 国土交通省長岡国道工事事務所 除雪作業日報：(2007, 2008)
- 3) 新潟県長岡地域振興局 県道除雪作業計画書：(2007, 2008)

表7. 総除雪費用推計結果

	年度	年間降雪量 (cm)	主要除雪費用(円)			係数	合計費用 (円)	面積 (1㎡)	平常時	少雪時
			一般除雪	拡幅除雪	合計				1㎡当たりの 除雪費用(円)	1㎡・cm当たりの 除雪費用(円)
									1㎡当たりの 除雪費用(円)	1㎡・cm当たりの 除雪費用(円)
国道除雪 (小出工区)	H17	1282	7,333,173	4,386,310	11,719,483	2	23,438,966	78000	300.50	0.23
	H18	617	3,214,715	1,050,369	4,265,084	3.5	14,927,794		191.38	0.31
	H19	1111	7,366,994	3,800,448	11,167,442	2	22,334,884		286.34	0.26
県道除雪 (国道290号線)	H17	1282	7,361,387	4,231,959	11,593,346	1	11,593,346	52000	222.95	0.17
	H18	617	2,277,267	1,066,940	3,344,207	1	3,344,207		64.31	0.10
	H19	1111	6,194,510	4,145,757	10,340,267	1	10,340,267		198.85	0.18