

都市雪害の発生機構とその対策技術
に関する解析的研究

平成9年（1997）9月

杉 森 正 義

目 次

第 1 章	序 論	
1. 1	研究の目的	1
1. 2	都市における雪害対策技術の課題	2
1. 3	本論文の構成	4
1. 4	本論文の特長	5
第 2 章	従来の研究	
2. 1	はじめに	6
2. 2	福井地方の雪の特質に関する研究	6
2. 3	都市雪害およびその対策についての研究	7
第 3 章	福井地方の雪害発生に関する雪の特質	
3. 1	はじめに	9
3. 2	福井地方の積雪深および積雪密度	10
3. 3	沈降圧縮による積雪深および積雪密度の変化	16
3. 4	真冬の期間における融解の効果	26
3. 5	まとめ	31
第 4 章	福井の地域性と雪害発生の特質	
4. 1	はじめに	32
4. 2	福井地方の地理的特性と雪害発生	33
4. 3	都市における雪害発生	38
4. 4	積雪状況と道路除雪費の関係	44
4. 5	まとめ	48
第 5 章	雪の量的広がりと言害発生の評価方法	
5. 1	はじめに	49
5. 2	除雪による道路の有効幅員および排雪需要量	50
5. 3	宅地域からの排雪需要量	53
5. 4	積雪状況と都市構造の変化	57
5. 5	まとめ	59

第6章	都市の排雪システムのネットワーク解析	
6. 1	はじめに	6 0
6. 2	機械力需要量	6 1
6. 3	ネットワークの構成	6 3
6. 4	面的計算方法	6 6
6. 5	作業予測の解析	7 2
6. 6	計算方法のまとめ	7 7
6. 7	福井市におけるケーススタディ	7 9
6. 8	積雪時の都市の安全性の評価方法	8 7
6. 9	実務への適用についての課題	8 8
6. 1 0	まとめ	8 9
第7章	流雪溝システムのネットワーク解析	
7. 1	はじめに	9 0
7. 2	流雪溝の歴史	9 0
7. 3	流雪溝ネットワークの解析方法	9 1
7. 4	作業のスケジュールと水配分計画の作成方法	1 0 0
7. 5	作業スケジュールの計算例	1 0 3
7. 6	作業地域のグループ分けと任意のスケジュールの評価	1 0 8
7. 7	まとめ	1 1 1
第8章	歩道上の雪と歩行者帯確保について	
8. 1	はじめに	1 1 2
8. 2	歩道の雪対策の現況	1 1 2
8. 3	車道除雪の歩行者帯確保に対する影響	1 1 3
8. 4	雪堤の類別と歩行者帯確保への影響	1 1 9
8. 5	雪堤が歩行者帯確保に影響する期間	1 2 4
8. 6	まとめ	1 2 9
第9章	融雪用水確保と融雪計画の量的な需給に関する課題	
9. 1	はじめに	1 3 0
9. 2	地下水の融雪用使用と水位変動	1 3 0
9. 3	融雪用使用と地下水位変動モデル	1 4 0
9. 4	表流水確保と雪対策計画の評価	1 4 4

9. 5	まとめ	1 5 4
第10章	融雪工法と融雪計画の量的な需給に関する評価方法	
1 0. 1	はじめに	1 5 5
1 0. 2	融雪装置の評価モデル	1 5 5
1 0. 3	評価モデルによる過去の雪状況の検証	1 6 2
1 0. 4	まとめ	1 6 7
第11章	結論	1 6 8
	文献	1 7 0
	謝辞	1 7 6

都市雪害の発生機構とその対策技術に関する解析的研究

第1章 序 論

1. 1 研究の目的

わが国の国土は、地理的にはほぼ南北につらなり、山岳地域も多く、さまざまな形での雪氷現象とそれによる災害が発生している。雪はもとより自然現象であり、かつてわれわれは、雪崩のような壊滅的打撃を与えるものは別にして、雪がわれわれに与える影響を災害とは意識しなかったであろう。しかし、社会の進展につれて、特に無雪地との比較において災害と認識され、雪対策の必要性が高まってきた。雪対策の方法を大きく分けると、①社会的な制度に関すること、②地域の空間的基盤の整備およびその計画に関すること、および③雪に対処する技術に関することの3つをあげることができる。①については本論文ではふれない。②に関係した議論では、古川が積雪地の都市の戦災復興のために流雪溝の必要性を指摘したのが最初であろう。しかし、実質的な議論の開始は1960年代前後であると思われる。この頃から、雪対策に関係した法的整備があり、技術面では道路の除雪や地下水を使った融雪が始められた。③については当然多くの研究や技術開発が行われている。本論文の視点は③の立場から②との接点において技術的な検討を行おうとするものである。

北陸地方の雪対策のあり方について、1963年1月の38豪雪と1985年12月末から1981年1月にかけての56豪雪が大きく影響している。38豪雪は、わが国ではじめて年次を冠した豪雪の用語が使われ、地域社会の広い範囲に大きな衝撃を与えた。当時のわが国の社会的背景は、高度成長期に向かう頃であり、無雪地域との格差是正が雪対策の主要なテーマであり、雪害対策の法的な措置がとられたばかりであった。この豪雪は雪対策とそのための研究の必要性をさらに強めた。

1960年代から1970年代にかけて、地域または都市の将来計画に関する計画書または報告書が多く出され、そこでは無雪、防雪、または克雪という言葉が冠せられていたことが特徴的である。これらには、新聞社のキャンペーンや国および地方自治体によるものがある。このうち建設省都市局都市計画課・他(1973)の報告は、雪対策の目標と方法について技術的評価を行い、雪と地域または都市計画の手法を示し、後に続く同種の計画検討に大きな影響を与えた。

56豪雪時の背景は、モータリーゼーションの進展と都市圏の拡大が著しく、生活圏と交流ネットワークの確保が雪対策の主要なテーマとなった。その豪雪の

後、福井県、富山県など、また市町村を含めた多くの自治体で、「雪に強いまちづくり」と冠した計画書類が多く出された。

これまでの雪と都市計画に関する多くの議論において、技術的検討の不足を指摘することができる。このために、計画立案者と雪対策担当者との間にしばしば実現性をめぐる乖離があったことは否定できない。この理由に、都市の空間的な広がりの中における雪害発生機構の解明の不足、および雪処理方法について量的な面からの評価と技術的確立の遅れをあげたい。例をあげると、豪雪に備えた排雪場の確保は計画されても、アクセス等を含めた機能性や利用方法の検討は少なく、一方、寡雪時であっても雪害は発生し、例えば、生活周辺道路における自動車の通行の障害と、緊急時に備えた維持保全機能の低下をあげることができるが、これらについて解析的な議論はされていない。上記の建設省都市局都市計画課・他の報告で示された手法を支援し、さらに発展させるものは少ないといえる。

以上述べたことから、「雪に強いまちづくり」を目標として下記の課題をあげ、都市の空間的広がりにおける雪害発生機構の解明と対策技術の確立について解析的研究を行う。あわせて、雪と都市計画に関する技術的な論点を明らかにすることが本論文の目的である。

- 1) 福井地方の雪害発生に関係する地域性および雪の特質を明らかにする。
- 2) 都市の面的な広がりの中での雪害発生機構の解明をし、積雪時の都市の雪状況の評価方法を確立する。都市雪害の発生の起因は、雪のさまざまな属性のうちの量的な特質、すなわち嵩ばりが都市空間を占有し、都市本来の機能を低減させることに帰するものとみなす。
- 3) 雪処理方法の重要なひとつである除雪および排雪作業について、都市の広がりの中での解析手法を提示し、面的技術の構築をはかる。
- 4) 一方の主要な雪処理方法の融雪について、熱的資源の量と年々の降雪状況の差異との関係でより有効に使用するための評価方法を提示し、都市の雪対策計画における基礎技術の構築をはかる。

本論文では福井地方の事例を多く述べるが、ここでの雪氷現象およびその対策方法の解明は、多様な側面を持つわが国の雪氷現象の普遍的な解明につながると思う。

1. 2 都市における雪対策技術の課題

1. 1で示した本論文の目的をさらに具体的に示すため、都市における雪対策技術の個々の課題および相互の関係について述べる。

(1) 融雪

これは、雪を積もらすことなく処理できるので、もしこれが完ぺきに実施でき

るとしたら他の方法を考える必要はない。まず、融雪が有する設備の運用に関する特質をみるため、他の熱量使用の形態と比較すると、空調の場合は、使用しない部屋において稼働する必要はなく、また、室温等が適度な状態になれば、それ以上の熱の供給は必要でない。しかし融雪では、降雪があっただけの熱量の供給が必要である。一時的に処理を遅らしたとしてもいつかは処理をしなければならぬ。そのため、融雪の対象が空間的に拡大すると、熱量の供給に関する問題が発生し、多くの都市でみられる融雪工（消雪工）の普及と地下水位低下および地盤沈下がその例である。この種の問題の主な対策方法には、センサー技術による効率的な設備の稼働、熱源の確保とその利用方法、および雪対策の対象と実行目標の関係の検討の3つをあげることができる。本論文の視点は主として第3の項目にあり取り上げるもので、雪対策の対象の範囲と雪対策の目標との関係において、各種融雪方法それぞれについて有効性の評価、および融雪以外の方法との組み合わせの検討が必要であり、本論文ではその基礎となる技術的検討を行う。

(2) 機械的除排雪

除雪は、道路の雪処理の主要な方法であり今後ともそれは変わらないであろう。しかし、雪の量が増えるにつれて排雪を必要とし、特に面的な広がりのある都市内では、地区ごとの機械の調達と運搬作業の競合が発生し、また、排雪場に近づくにつれて交通の渋滞が発生する。これらについて、これまで大雪または豪雪時におけるある時点での状況の説明はされているものの、解析的、また時系列的な説明はほとんどされていない。本論文では、都市の排雪作業に関する解析方法を示し、合理的な作業方法の技術的構築を行う。これは、作業計画および排雪場確保等の空間計画の根拠になるとともに、積雪時の都市内の状況を時系列な説明を行い、積雪時の都市の防災等の議論を可能にする。

(3) 流雪溝

北陸地方の山間に近い中小の市または町では流雪溝の面的な整備が進みつつある。流雪溝については、それぞれの場所での維持管理対せういの確立が必要であり、これまでのゲートの管理と水配分に関する面的な取扱いは、経験の蓄積により行われてきたもので、新規のものについては経験が乏しい。経験に代わるもの、あるいは経験を補完する合理的な手法の構築が必要であり、本論文ではこれの根拠を与える。

(4) 歩道の雪対策

歩道の雪対策は近年重要になりつつあるものの、雁木またはアーケードがある場合を除いては決め手に乏しい。車道の除雪や沿道の宅地等からの雪が持ち込まれ、歩道融雪や歩道除雪の障害となる。これらのためには除雪等による固い雪が持ち込まれないことが前提になる。そのため、歩道の雪状況を解析し、対策法を

比較検討することが必要であり、本論文ではこれの根拠となる手法を提示する。

(5) その他の雪対策方法

道路交通に関係しては、路面凍結、標識の着氷雪等多くの課題があるが、本論文では、雪の量的な広がり起因する雪害現象を扱うのでそれらにはふれない。

以上、個々の雪処理方法はそれぞれにおいて運用されるだけでなく、相互に補完して都市全体の雪対策が達成されるべきであり、本論文では全体的なつながりを目的として個々の雪処理方法についての解析と評価の手法を示し、さらに実務的な技術の構築を行うものである。

1. 3 本論文の構成

本論文は全文11章から成り、次のような構成となっている。

第1章は序論であり、雪と都市計画の関係論の経緯を示し、本論文の目的と方針を述べる。

第2章では本論文の内容に関係した従来の研究を概観している。福井地方の雪の特質の研究、豪雪時における都市の積雪状況の調査、および都市の雪害に関する研究の経緯を述べる。

第3章から第10章は、本論文の目的との関係において以下の通り論述する。

目的1) ; 第3章 第4章

目的2) ; 第5章 第8章

目的3) ; 第6章 第7章

目的4) ; 第9章 第10章

第3章は、雪の属性のうちの量的特性の視点から福井の雪の特性を述べる。さらに、ぬれ雪の沈降圧縮のモデルから、積雪深および密度の変化の特質を明らかにする。

第4章は、福井地方における雪害発生特性を、1996年に敦賀で発生した事例その他、および道路除雪費用の経緯をもとに解明し、本研究で雪の量的特性に視点をおくことの根拠を明らかにする。

第5章は、雪害状況の説明に関する項目の定義と雪害の解析モデルを提示する。さらに、大雪時および寡雪時における都市の雪害発生の特徴を示し、モデルを検証する。

第6章は都市の排雪システムについての面的取り扱いに関する解析的手法を提示する。この目的は1.2節の(2)で述べた通りである。

第7章は、前章で提示した面的取り扱いの手法を、流雪溝システムに応用し、流雪溝の面的整備、および維持管理に関する解析的手法を提示し、流雪溝技術の確立をはかる。これについては1.2節の(3)で述べた。

第8章は、近年重要視されている積雪時の歩行者の問題を取り上げ、事例研究および解析的研究を行う。第4章で示した解析モデルをもとに、歩道の雪状況の調査手法を提示し、今後の歩道の雪対策方法の方向性を示す。これについては1.2節の(4)で述べた。

第9章は、地下水使用、およびその他の融雪方法について、融雪の対象範囲が空間的に拡大したときの熱的需給関係についての解析的研究を行う。

第10章は、前章を受けて、都市の面的広がり視点からの融雪技術の評価方法の構築を行い、実際の融雪計画の立案に有用であることを明らかにする。第9章と第10章については1.2節の(1)で述べた。

第11章は、本論文の結論を述べる。

本論文の扱う範囲は、都市の面的な広がりの中での個々の技術または課題についての評価と対策方法に関する技術的研究を行うもので、それらを組み合わせたときの都市計画までの議論は行わない。

1. 4 本論文の特長

本論文の特徴は次にある。

ぬれ雪について積雪深および積雪密度の変化を合理的に説明したのは、本論文で述べた沈降圧縮モデルによるのが最初である。特にこの中で使われている k^* は、ぬれ雪の特質を説明する有用なパラメータとなるであろう。

都市の雪害問題については、これまで多くの研究があるが、対象が面的に拡大した視点での除排雪に関する技術的解析方法は、本論文にある手法が最初である。これは、今後の雪と都市計画および積雪時の都市の防災評価における方法論の一つになる。また、流雪溝システムの手法も同様に評価される。

本論文で示した解析手法の中にある排雪需要量の定義は、本論文の基礎となった論文が最初であり、都市内の積雪状況の説明のための有力な指標である。また、積雪時には都市構造が変化するという考え方は、本論文の基礎となった研究において提示されたのが最初である。

近年重要視されている歩道の問題について、積雪状況と歩道の構造および車道除雪との関係を示したのは本報告にある手法が最初である。

融雪技術の評価手法の提示は、本論文が最初であり、これにより、溪流水等を融雪用資源として有効に使用するための論議に根拠を与えることになる。

第2章 従来の研究

2.1 はじめに

本論文に関係するこれまでの研究概要を述べる。

本論文では、地域または都市における面的な広がりの中において、雪が空間を占有することによる雪害発生 の 解明とその対策の研究を目的とするので、まず、福井地方の雪の特質に関する研究について、次に都市の雪害発生と対策に関する研究の概要を述べる。

2.2 福井地方の雪の特質に関する研究

北陸地方で見られる雪は降雪時あるいは降雪直後から水分を含み、ぬれ雪または暖地積雪と呼ばれる。福井地方の雪の研究は、吉田・他(1963)の38豪雪の調査報告が最初である。このとき、福井地方の雪はぬれ雪であることを明らかにし、他の物理的性質なども東北や北海道で見られるかわき雪とは大きく異なるであろうことを示唆して注目された。その後、北海道、東北、北陸の各地方の積雪の比較観測が行われ、吉田順五編(1969)にまとめられている。北海道や東北地方では、厳冬期では雪の融解(融雪)はきわめて少なく、含水率がほとんど0であることがかわき雪の理由である。かわき雪の雪質の変化は時間的にゆっくりしている。福井地方では、降雪中からでも融解が発生することがあり、融解にあわせて雪質も時間的に早く変化し、降雪をもたらす寒波が襲来しそれが消滅したあとの数日間に、雪質は、ほとんど新雪からザラメ雪までの経過をたどる。福井地方におけるこのような変化の特質については、杉森・各務(1968)、松岡・杉森・伊藤・田中(1970)、その他の報告がある。

雪の量的な特性、すなわち嵩ばりの視点からは積雪深とそれの変化の特性を知ることが重要である。まず中峠・段野(1964, 1966)は、実務者が容易に入手できる情報から積雪深の予測をするために、1日の平均気温から翌日の積雪深の減少分を予測する簡便法を提示した。これは、大まかに現象の説明をするもので、実務上有益であるとしても、積雪深変化の機構にまでは立ち入って説明していない。積雪深の変化の重要な要因に沈降圧縮があり、かわき雪についてはこれまでよく説明されているが、ぬれ雪についての説明はなかった。そもそもぬれ雪は、積雪深および密度変化とともに雪質の変化も同時に発生しているので、沈降圧縮の議論はこれまでほとんどされていなかった。そこで、杉森・伊藤(1993, 1994)はかわき雪とは異なる圧密沈降の説明モデルを提示し、福井と長岡の積雪深変化および密度変化の観測値をうまく説明できることを示した。これにより、降雪をもたらす寒波が繰り返し襲来した場合、降雪量と寒波が断続する日数の間隔の違いによ

る積雪深の違いを示すことができた。杉森・伊藤のモデルでは、沈降圧縮の時間的速さを説明するパラメーター k^* を導入し、この値は、降雪時の期日に関係することが認められた。期日による違いには日射の強度と気温が関係するのであろうが、今後の研究に待つ。

雪の力学的性質については、積雪中の含水の状態では両極端にあるかわき雪または水に浸した雪についてはこれまで研究されているものの、中間状態のぬれ雪については遅れている。少ない研究のうち、先出の松岡・杉森・他の報告は、粘性係数(縦圧縮)の測定を行っている。また、杉森・伊藤の説明モデルにおいても、粘性率を定義し密度との関係を示すことができる。しかし、これらはかわき雪における取扱いと比較してのことであって、水を含み雪質の変化の速いぬれ雪の粘性率をどのように定義するかの議論は不足している。

阿部(1994)は、ぬれ雪の積雪深の変化を粘弾性モデルで説明しているが、粘弾性モデルの要素は、内部構造を問わないブラックボックスでよいとしても、ある時間幅において雪質が大きく変化する場合に、時間幅の前後で同一物質のものとみなして良いかどうかの議論が残る。前田・田坂(1996)はニューラルメソッドにより積雪深変化をうまく説明しているが、やはりこれは現象の表面的説明であって、積雪深変化のメカニズムに立ち入るものではない。ともあれぬれ雪については、密度、含水率、雪粒子の構造等の速い変化があり、物質としての把握が難しい。また、同一条件での再現性のある実験が困難であるという理由で研究が遅れている。しかし、本論文の雪の量的な特性の視点では、ぬれ雪の力学的性質の知見はあまり必要としない。

2.3 地域または都市の雪および雪対策技術についての研究

1.1節で概観した積雪地の地域または都市計画に関する計画書や報告書が出される一方で、都市雪害とその対策についての調査研究が行われてきた。これらについても、顕著な豪雪を契機に多く行われている。北陸地方の38年豪雪については代表者石原籐次郎(1964)の報告があり、56年豪雪については代表者石原安雄(1951)、代表者渡辺善八(1982)、国立防災科学技術センター(1982)、代表者本多義明(1983)、および科学技術庁研究調整局(1983)の報告がある。38豪雪のときは自然現象の解明に主力があったのに対して、56豪雪では扱う内容が都市内の積雪状況や交通機関への影響等にも及んでいるという違いがみられる。杉森(1973)の報告は、雪と地域または都市計画との関係での技術研究の必要性を指摘した。都市内の積雪状況を把握することが必要であり、ここでは、路側の堆雪モデルと排雪需要量の概念と算出方法を提示した。路側の堆雪の研究では、和田・野村・内山・酒井(1974)および土屋・内山・斉藤(1976)

の報告があり、効率的な道路除雪の実施および積雪を考慮した道路幅員計画を目的に路側の雪堤の生成過程を調べている。豪雪時の都市内の堆雪状況の調査については、前記報告書（研究代表者石原安雄）の各論の本多(1981)、前記報告書（研究代表者渡辺善八）の各論の渡辺・阿部・中俣(1982)、前記報告書（科学技術庁国立防災科学技術センター）の各論の東浦・沼野(1982)、前記報告書（科学技術庁研究調整局）の各論の中村勉・中村秀臣・東浦・沼野・阿部(1983)の各報告さらに渡辺・阿部・中俣(1982)の報告がある。

つぎに、個別の問題をみってみる。積雪地域の多くの都市または自治体では、地下水を主とした道路消雪が普及し、雪対策計画の目標を実現している一方で、地下水位低下と地盤沈下の問題が発生している。これの例に六日町がある（谷中・永野・山崎・水谷 1989）。これらは、雪対策が面的に広がった場合の雪対策需要の増大に関するものであり、融雪および機械的除排雪等の雪処理方法について、面的な広がりの中での評価が必要なことを示している。機械的除排雪についての取扱いを杉森(1990, 1991¹⁾, 1992¹⁾)は提示した。さらにここでの手法を使って、流雪溝の面的な管理方法についての技術研究を行った（杉森 1991²⁾, 1992²⁾）。また、杉森・福原(1995)は、消雪工の普及に関係して、地下水位低下と降雪量との間には強い相関が認められ、地下水を使用した消雪工について、大雪または豪雪時を想定したときの地下水位低下と設備の稼働の評価ができることを示した。積雪時における歩行者対策は、通行の確保だけでなく快適性の面からも重要になりつつある。歩行者帯確保に関する積雪状況の把握が必要であり、これについて、杉森(1995¹⁾)は調査手法の提示と対策方法について提言を行った。

都市の雪を量的特性の視点でみると、大雪または豪雪時では地震等との複合災害の問題、また寡雪時であっても、裏通りや生活周辺道路ではかなりの障害となり、いろいろな機能障害を及ぼすことなどがあげられる。これらについては今後の課題として残されている。

第3章 福井地方の雪害発生に関係する雪の特質

3.1 はじめに

本章では雪の量的な特性、すなわち嵩ばりに注目した福井の雪の特質を明らかにする。まず先に、記録の面から積雪深の特質を明らかにする。積雪深は値そのものが注目され、雪対策（克雪）、雪の利用（利雪または親雪）いずれにおいても重要なものとなっている。積雪または降雪の統計的傾向は、雪対策計画における基準値として使われる。事例をあげると、雪崩対策では年最大積雪深の30年再現値、道路計画では10年再現値が使われている。しかしながら、福井では1963年の38豪雪、1981年の56豪雪が現時点でも語られているように、既往最大値またはそれに近い数値は地域に潜在的な圧迫を与えている。他方、福井では積雪状況は年による差異が大きく、そのことは少雪の年もかなりあることを意味し、スキー場等の雪利用の面において不安の要因になっている。積雪深は降雪深だけでは決まらず、降雪の断続の経緯が関係する。このことの顕著な事例として、1981年と1986年をあげることができる。両年の日降雪深年累計値はたまたま同値の622cmであるが、最大積雪深は196cmと127cmで大きな差があり、当然社会的な影響も違った。雪害発生については降雪深累計よりも積雪深に関係があると考えられ、次章で明らかにする。

積雪深の変化は、沈降圧縮と融解の2つが関係する。ぬれ雪の沈降圧縮についてこれまで合理的な説明がなく、杉森・伊藤(1993, 1994)は、雪粒子の充填とみなすモデルを提唱し、積雪深変化および密度変化をよく説明することができた。このモデルは、これまで研究の遅れていたぬれ雪の圧縮粘性係数の説明に有用であるので、やや詳しく説明する。

つぎに、積雪の融解については、積雪表面の熱収支を知る必要があるが、特に実務上において気象要素を詳細に観測することは不都合であり、気温のように観測容易な要素との関係がわかるとよいので、これについても考察しておく。

積雪密度は積雪深ほど注目されるものでないが、雪の重量を問う場合に積雪深との積で関係する。したがって、本章ではぬれ雪の密度とその変化の特質についてもふれておく。

3. 2 福井地方の積雪深および積雪密度

3. 2. 1 年最大積雪深の各地の比較

積雪深の年による多寡の状況から他の積雪地方と比較した福井地方の特質をみる。年最大積雪深の既往最大値と平年値を軸とする平面図に各地の位置を示すと図3-1のようになる。各地の積雪深の記録は気象庁(1991)による。既往最大値と平年値の比をとれば、本州の日本海側のほぼ中央部に位置する福井、金沢、富山では、東北、北海道に比べて大きな値になっていることがわかる。このことは、年による積雪状況の差違が大であることを示している。山陰地方の都市についても比の値は大きい、既往最大値そのものが北陸地方の都市に比べて低い。日降雪深の年累計および積雪日数についてもここで示したものとほぼ同様の傾向が示される。

次のことに注意しておく。気象台のいう平年値は、西暦の下2桁が10年に丸まった30年間の算術平均であらわしている。福井の場合、トーマスプロット法による出現の累計分布の50%値は、観測値の幾何平均値60.3cmにほぼ近い58cmであり、平年値の76cmは、それらよりかなり高い。したがって、図3-1は各地の比較を示すものであって統計的な議論はできない。

しかし図3-1はつぎの点において重要である。雪対策方法の効果的な実地施工のためには、雪状況との関係で雪対策方法の有効性を評価する必要がある、福井では他の地域よりも特にそのことが求められる。また、第10章で明らかにするように、雪害発生状況は、降雪深累計よりも、年最大積雪深により関係することがいえる。

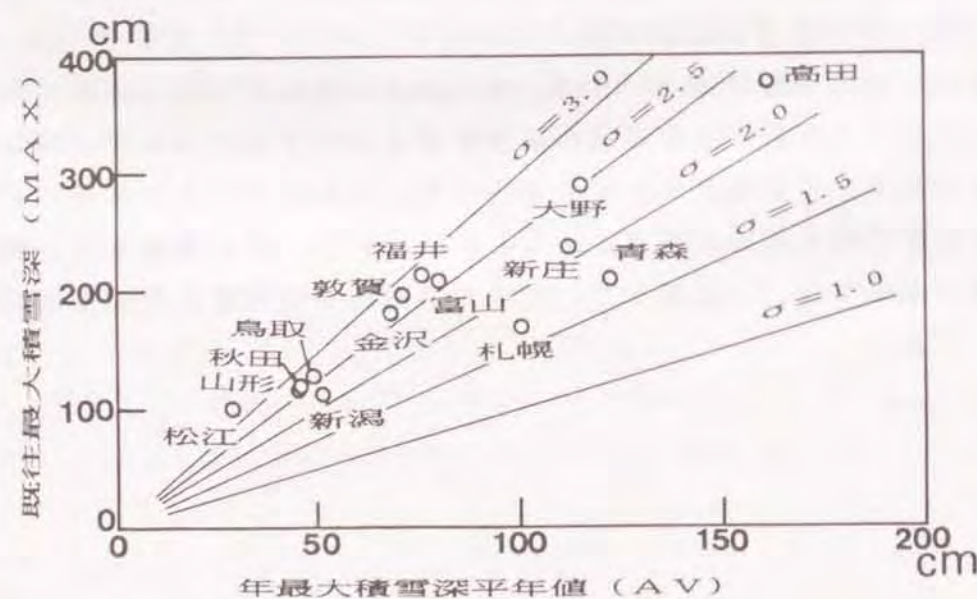


図3-1 年最大積雪深の各地の比較

次に、地域の積雪特性をさらに気温の要素を加えてみる。図3-2において、1月の気温と年最大積雪深を軸とした平面に各地の位置をプロットする。図では各地でみられる特徴的な雪対策方法を併せて示しておく。気温は雪対策の工法の選択に大きく影響していることがわかる。地下水を路面に散布する融雪方法(消雪工)は北陸から東北まで広い範囲で行われている。表流水を散布する方法は、福井などの北陸において、地下水のとれない地区でかなり広く行われている。また、気温が比較的高い地方では、地熱やソーラー等の利用も有利であり、駐車場の融雪や道路凍結抑制について幾つかの方法が実施されつつある(宮本・他1991、宮本1995)。

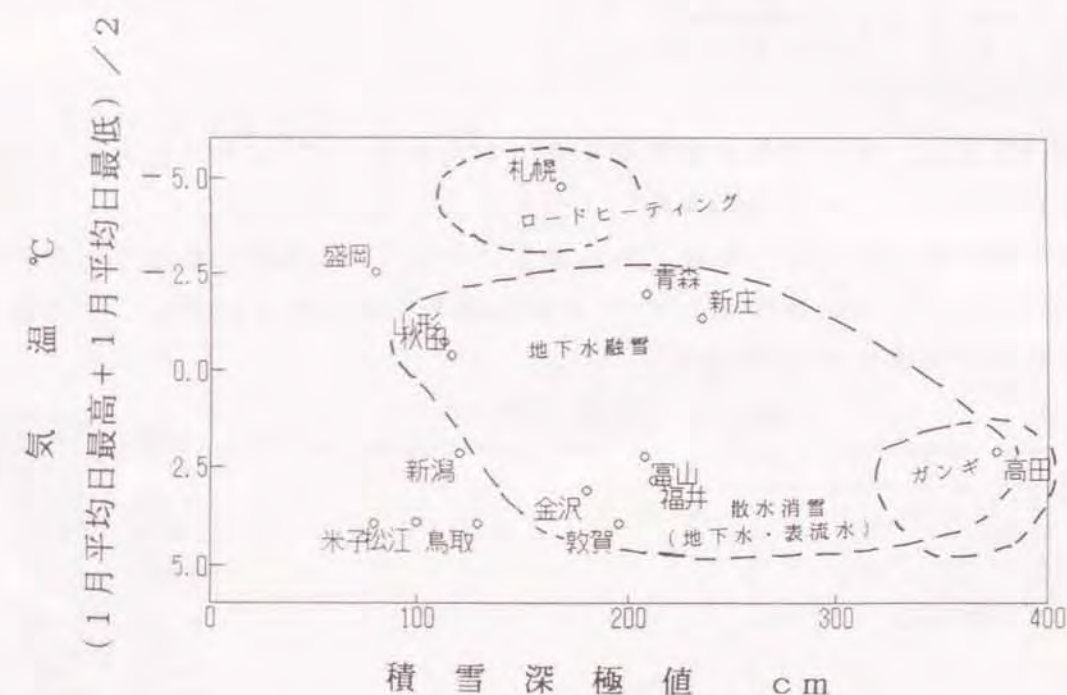


図3-2 各地の気温および積雪状況と特徴的な雪対策の手段

3. 2. 2 年最大積雪深の統計値

河川の洪水や渇水等のような毎年発生する極値についての統計的な取扱いには、極値分布法があるが、水文現象に関する一般的な実務では、取扱いが容易なトーマスプロット法、または対数正規分布による場合が多い。福井地方の年最大積雪深の出現の頻度を図3-3に示す。図の横軸は、積雪深を対数値でとっており、年最大積雪深の出現の頻度は対数正規分布で説明できることがわかる。そこで、福井地方の福井市ほか2地点について、岩井法(テキストは文献参照)による年最大積雪深の期間再現値を示しておく。算出値を表3-1に、算出に係数値を表3-2に示す。岩井法は下限値-bを有する対数正規分布の扱いであり、

基本式は次のように与えられる。変数 x に対する確率分布関数を ϕ 、出現の頻度値を F とおくと、それぞれ次のように表される。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \phi(\xi) d\xi \quad (3-1)$$

$$\phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} \quad (3-2)$$

$$\xi = \frac{1}{a} \log \left(\frac{X + b}{X_0 + b} \right) \quad (3-3)$$

である。ここで、 X は年最大積雪深をあらわす変数、 X_0 は X の観測値 N 個の幾何平均値である。 a と b は係数であり、以下のように求められる。

N 個の観測値に対して、上位より j 番目と下位より j 番目の値をそれぞれ X_j 、 X_i とすると、 X_j の超過確率と X_i の非超過確率が等しいと仮定し、その組み合わせに対する下限値を b_j とすると、

$$b_j = \frac{X_0^2 - X_j \cdot X_i}{2X_0 - (X_j + X_i)} \quad (3-4)$$

であり、これから

$$b = \frac{\sum_{j=1}^m b_j}{m} \quad (3-5)$$

により b を求める。 m は、観測回数のおよそ10分の1の値に近い整数である。

次に、 N 個の観測値 X_i の分散を σ^2 とおき、 $1/a = 1/\sqrt{\sigma^2}$ とおく。そうすれば、

$$\frac{1}{a} = \sqrt{\frac{2N}{N-1} S_x}$$

となり、

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\{\log(X_i + b)\}^2 - \{\log(X_0 + b)\}^2]} \quad (3-6)$$

である。

再現期間値は、期間を T とおくと、

$$T = \frac{1}{F(x)} \quad (3-7)$$

の関係を満たす x の値で算出される。

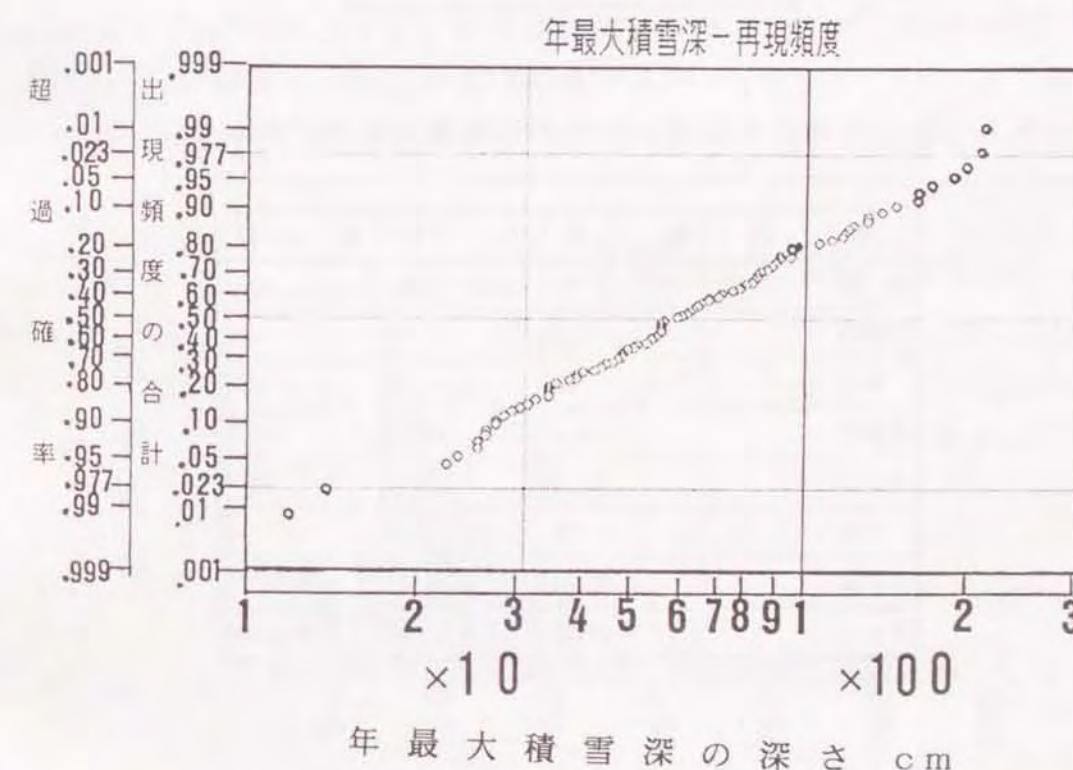


図3-3 福井における年最大積雪深出現の頻度分布

表 3-1 福井地方の年最大積雪深の期間再現値

単位は、再現期間は（年）、積雪深値は（cm）で表している。

年最大積雪深の再現期間				
再現期間	福	井	大	野
2	59	111	53	
5	99	169	86	
10	128	211	111	
15	146	235	125	
20	153	244	131	
30	177	270	151	
40	191	295	161	
50	202	309	170	
60	210	321	177	
70	218	331	183	
80	225	339	188	
90	231	347	193	
100	236	354	197	

表 3-2 年最大積雪深の期間再現値算出に関する係数

項 目	福	井	大	野	敦	賀
期 間	1898~1991	1908~1991	1898~1991			
欠測数	0	3	0			
N	94	80	94			
X (cm)	71.1	125.7	62.8			
X _o (cm)	60.3	111.5	52.7			
-b	-1	-1	-8			
1/a	0.35736	0.30321	0.32177			
S _x	0.25134	0.21306	0.22631			

3. 2. 3 新雪の密度

福井地方の新雪密度は、松岡・杉森・他（1970）、その他によって観測されているが、他地方との比較において福井地方の特質をみるため、日降水量の関係から新雪の密度を算出する。日降水量/日降雪深の値をとり、ディメンジョンを kg/m^3 にして新雪の密度とし、1981年より1990年の10年間の日降雪深が10cm以上の日のデータ127について、新雪の密度値の出現の頻度をみると図3-4に示すものとなる。ここで日界のとり方に注意しなければならない。観測値は気象台の観測によるものであり、降水量の日界は0時から0時であり、降雪深については、9時から翌日9時までのものと、前日21時から当日21時のものと2種類ある。後者の場合は、9時、15時、および21時の1日3回測定との和の値であらわし、本節ではこれを使っている。この場合であっても降水量と降雪深の日界は3時間ずれることになるが無視する。新雪密度の出現頻度のピークは $80\sim 100\text{ kg}/\text{m}^3$ にあり、これにより新雪密度は一般に使われている $100\text{ kg}/\text{m}^3$ が妥当であることが裏付けられた。

次に、福井地方と寒冷地におけるものとの比較を行う。一冬を通してかなりの積雪のあった任意の年を選び、1日10cm以上の日降雪深のあった時の日降水量（mm）/日降雪深（cm）の比をとり図3-5に示す。この比が1であるとき、密度は $100\text{ kg}/\text{m}^3$ に相当する。新雪の密度の表現でいえば、福井では $100\text{ kg}/\text{m}^3 \sim 150\text{ kg}/\text{m}^3$ が多く、新庄および札幌では $50\text{ kg}/\text{m}^3 \sim 100\text{ kg}/\text{m}^3$ であり、 $50\text{ kg}/\text{m}^3$ 以下のときもあることがわかる。

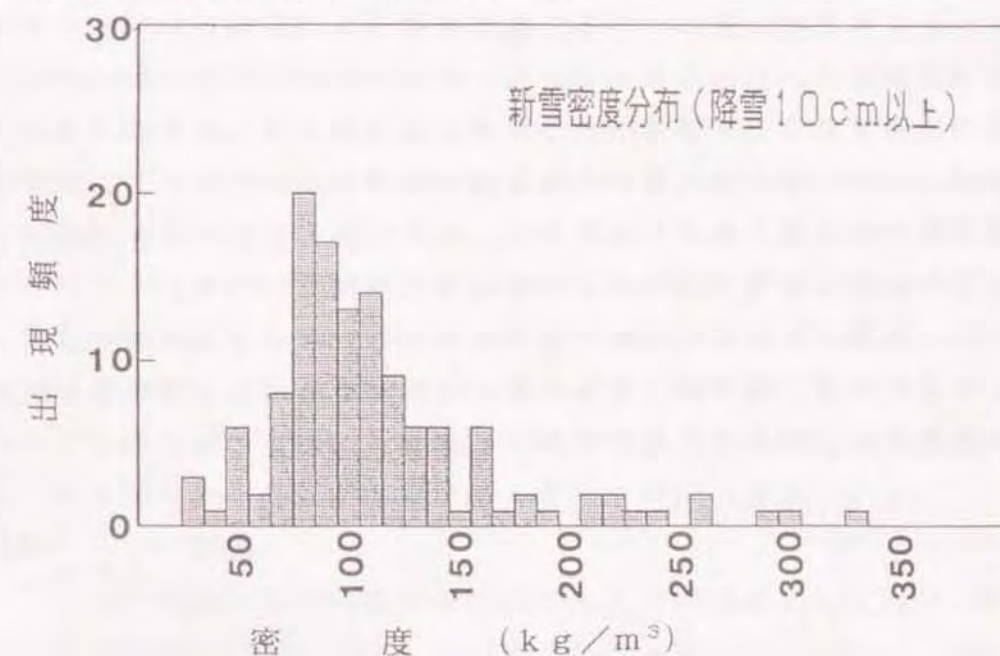


図 3-4 新雪密度値の出現頻度

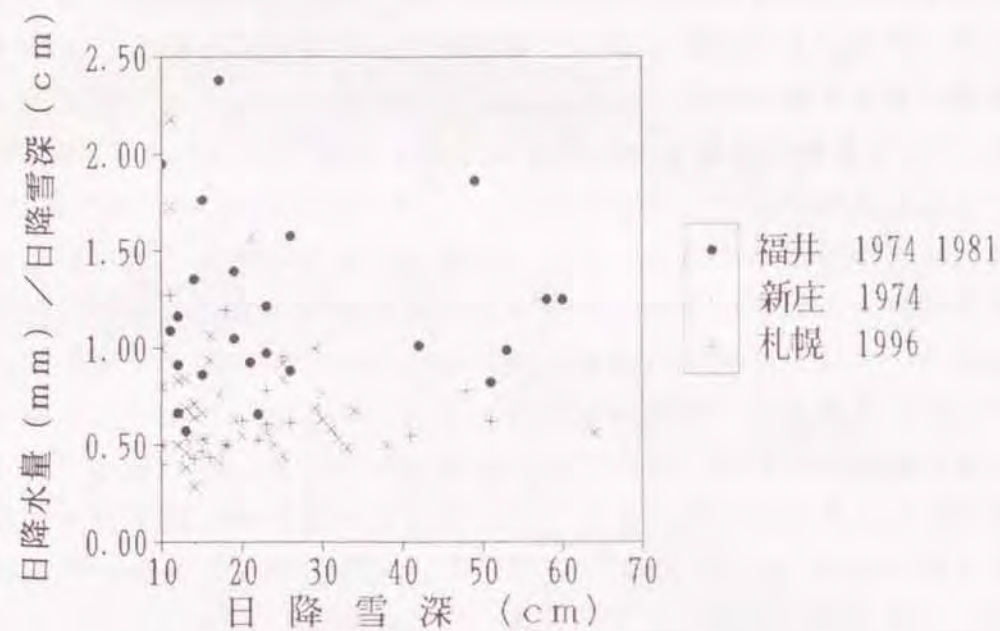


図 3-5 日降水量 / 日降雪深の比の出現の比較 (福井、新庄および札幌)

3. 3 沈降圧縮による積雪深および積雪密度の変化

3. 3. 1 ぬれ雪の沈降圧縮の説明

積雪深の変化について、これまでかわき雪についてはよく説明されていたが、ぬれ雪についての説明は遅れている。粘弾性モデル (阿部, 1994) やニューラルメソッド (前田・他, 1996) による説明が行なわれているものの、それらは見かけの現象の説明であって、積雪内部の機構にまで立ち入ったものでない。杉森・伊藤 (1993, 1994) は、ぬれ雪の沈降圧縮の説明モデルを提示し、福井地方の雪の積雪深変化と密度変化をよく説明した。ここでは、このモデルの概要と、またこれによりぬれ雪の積雪深変化および密度変化の特質を示す。

はじめに、積雪の沈降圧縮理論の概要を述べる。ある厚みの積雪層に、応力 W が加かったとすれば、積雪層の厚みの変化は弾性変形よりも塑性変形が卓越し、それによる密度 ρ の変化は次式で表される。

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{W}{\eta} \quad (3-8)$$

ここで、 η は圧縮縦粘性係数であり、ここでは単に粘性係数と呼ぶ。 t は時間である。また、 W を考えている積雪層にかかる荷重におきかえれば、(3-8) 式を

沈降圧縮による密度変化の説明とみることができる。いま、積雪層の厚みを h とし、融雪を無視できるとすれば、 $h\rho = \text{const.}$ であるので、(3-8) 式の左辺は次のようになり、この式から積雪層の厚みの時間変化を算出できる。

$$-\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (3-9)$$

乾き雪の η と ρ の関係について、小島 (1955, 1956, 1957, 1988, 1967) は、密度がおおよそ $100 \sim 500 \text{ kg/m}^3$ の雪について、次式

$$\eta = C \cdot \exp(\kappa \rho) \quad (3-10)$$

で表されることを示し、積雪深変化をよく説明した。 C および κ は係数である。Shinojima (1967) は、密度が 300 kg/m^3 以下のものについて、小島の式に従い η と温度との関係を調べている。梶川・小野 (1990) は、密度が 50 kg/m^3 以下の軽い雪についても小島と同様の式で説明している。遠藤・他 (1990) は、密度が $40 \sim 300 \text{ kg/m}^3$ の広い範囲にわたって、

$$\eta = C \rho^n$$

という形で表され、階数 n は 4 が適当であるとしている。ここで、 C は係数である。Lange・Nakamura (1983) は、Shinojima の粘性係数を使って積雪内部の各層毎の沈降圧縮量を計算し、実測値によく一致することを示したが、含水率が 4 ~ 5 % 以上になるとずれが無視できなくなるとしている。含水率の高いぬれ雪では、これまで述べた η と ρ の関係式が成立しないことが示唆されたわけである。さて、雪の力学的研究については、かわき雪についてはこれまで多くの報告があり、水に浸した雪については、木下 (1963)、小林 (1985) および Kobayasi et al. (1992) 等の研究がある。かわき雪あるいは水に浸した雪の含水の状態は、福井で見られるようなぬれ雪からは、両極端のものである。含水状態が中間のぬれ雪については、再現性のある実験が困難である理由で研究は遅れている。

(1) 説明モデルの定義

さて、(3-8) 式は物質の内部的構造に立ち入った議論はしていないが、この式が成立する時間的範囲では極端な内部構造等の変化はないとみなされているはずである。ぬれ雪では、密度変化が速いことにあわせて雪質の変化も速いことが確認されていて、杉森・各務 (1968)、松岡・杉森・他 (1970) の報告がある。

雪質の変化と密度変化は概念的には別のものであるが、ぬれ雪については実質的に区別することはできず、両者は同時に発生すると考えられるものである。そうすると(3-8)式の成立に疑問が発生する。そこで杉森・伊藤の方法は、ぬれ雪の沈降圧縮について、かわき雪のように雪粒子間の結合はなく、雪粒子どうしが単独に振る舞うことができる詰め合わせの運動とみなすことにある。

ぬれ雪では、かわき雪についてみられるような網目構造は発達しない。その結果、粒子間の関係について、互いに離れているか付着しているかの判別は難しいが、ぬれ雪の雪粒子を複数の枝を有するボールとみなし、それを図3-6で模式的に示す。圧縮の過程においてこれら粒子は相互に拘束されることなく、次第に押し詰まっていく運動とみなす。粒子どうしは、はじめのうちはまばらな状態で枝を接触させているが、外部からの荷重および自重により枝を変形させながら詰まっていくことになる。ある薄い層の雪ブロックに荷重Wを積載したときの座標を図3-7のようにとると、運動方程式は次式となる。

$$W/g \frac{d^2 x}{dt^2} = F(x) - W \quad (3-11)$$

ここで、 $F(x)$ は雪ブロックに発生する抵抗による力である。(3-11)式は、荷重Wの運動を記述するものであるが、これをブロック頂部の運動とみなすことができる。ただしここでの運動は、錘などを載せた直後の瞬時の雪面の低下は沈降圧縮とは異なるので対象としていない。

$F(x)$ は、互いに接触し、塑性変形をしている枝の間に発生する摩擦力とみなされる。応力の蓄積はないといえるであろう。そこで、 $F(x)$ は、①ブロックの変形の速度に、かつ、②単位体積当たりの粒子の数に比例し、さらに、③粒子1個当たりの変形が許される空間の広さ(有効空隙)に逆比例すると考えることができる。

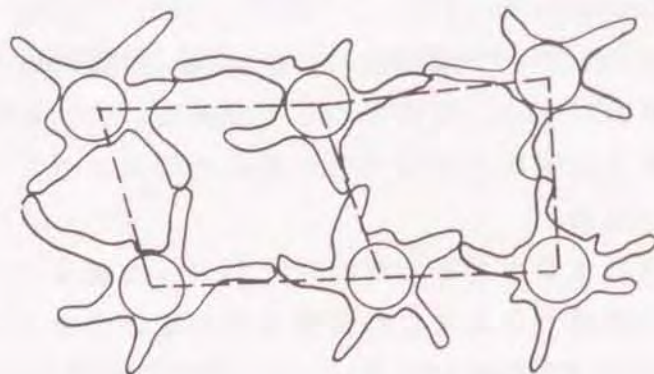


図3-6 ぬれ雪の粒子の模式図

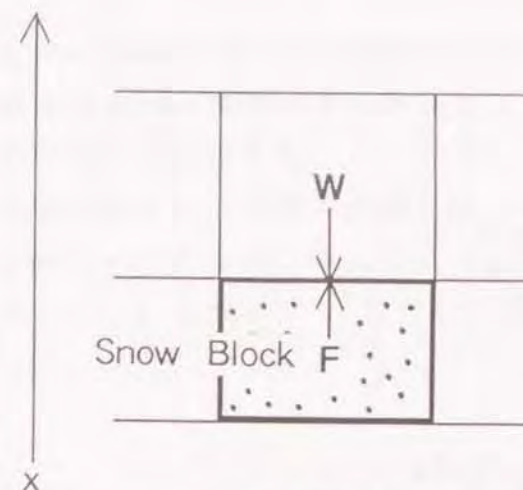


図3-7 沈降圧縮運動の模式図

W: 応力、F: Wの作用点の運動に伴う抵抗

詰め合せ問題であるので、雪ブロックには一つの段階としての最終状態の厚み(x_i)があるはずである。いま対象としているブロックの粒子の数を N_0 とおき、これは圧密によっても変わらないとする。厚み x の状態のときの単位体積あたりの粒子の数は、雪ブロックを単位面積で考えているので、 N_0/x である。粒子1個当たりの有効空隙は $(x - x_i)/N_0$ とあらわせる。したがって

$$F(x) = C \frac{N_0}{x} \cdot \frac{N_0}{(x - x_i)} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3-12)$$

が成立する。Cは係数である

(3-11)式の解を求めるにあたって、沈降圧縮においては、荷重をかけた直後を除いて沈降の速度変化はゆっくりしたものと推定し近似的に解くことにする。沈降は併進運動であるとみなし、 $d^2 x / dt^2 \approx 0$ 、とおく。その結果、

$$C \frac{N_0}{x} \cdot \frac{N_0}{(x - x_i)} \cdot \frac{dx}{dt} = W \quad (3-13)$$

となる。このことについては、(3-11)の数値計算を行うと、ある時間の経過後は、(3-13)でおけばよいことがわかる。つぎに、 $x = R/\rho$ 、 $x_i = R/\rho_i$ とおくと、

$$x - x_i = R(\rho_i - \rho) / (\rho_i \cdot \rho)$$

が得られる。 ρ は密度、 ρ_i は ρ の最終値である。 R はブロックの重量である。
(3-9) 式で h を x 置き換え、この式がぬれ雪についても成立するとみなせば、

$$\frac{d\rho}{dt} = k^* W (\rho_i - \rho) \quad (3-14)$$

が得られる。 k^* は

$$k^* = X_i / C N_o^2 = R / C N_o^2 \rho_i \quad (3-15)$$

とおいている。 N_o 、 ρ_i および R は定数とおけるものであり、(3-12) 式の $F(x)$ に関する定義から C も定数とおけるはずである。したがって、 k^* は定数とおける。(3-14) 式を解くと

$$\rho = \rho_i - (\rho_i - \rho_o) \exp(-k^* W t) \quad (3-16)$$

となる。 ρ_o は ρ の初期値であり、一般にいうところの新雪の密度とする。 ρ_o 、 ρ_i は観測値によるもので、それぞれ 100 kg/m^3 および 400 kg/m^3 とおけばよいであろう。

(3-14) 式をつぎのように書き直すことができる。この式において、

$$r = (\rho_i - \rho) / \rho_i, \quad (0 < r < 1)$$

とおくと、

$$k^* = - (1/W) \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} \quad (3-17)$$

となる。 r は有効間隙比といえるものであり、 k^* を W および r との関係であらわすことができた。 k^* の次元は η の逆の次元となっている。

さて、 k^* は (3-15) 式で定義されているものの、関係する係数等の議論は不足しているので、 k^* についての理論的根拠は弱い。そこで、(3-14) 式の W 、 ρ および ρ_i はいずれも容易に定義または観測が可能なのである、この式における比例係数として k^* を定義することによりぬれ雪の沈降圧縮の現象の説明を行うことにする。本論文ではぬれ雪の沈降圧縮の解明を目的とはしていないので、

このようにおいても差し支えないであろう。

(2) 圧縮粘性係数 η と k^* との関係

k^* を (3-14) 式における比例係数として定義したが、沈降圧縮に関係する物理的係数との関係をみてみたい。杉森・伊藤の説明モデルは (3-8) 式によって説明できないことは明らかであるが、ぬれ雪についてもある時間幅に限ってみれば (3-8) 式は成立するといえるので、(3-14) 式を使って η と k^* および ρ と間の関係を求めると、

$$\eta k^* = \frac{\rho}{\rho_i - \rho} \quad (3-18)$$

となる。 k^* は、 η と ρ の関係式における係数として定義されることになる。つぎに、これに関する若干の観測結果を示すと図 3-8 のようになる。ここで観測値は、松岡・杉森・他 (1970) によるものであり、計算方法は次の式による。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta t} = \frac{W}{\eta}$$

ρ は Δt 時間の間隔で観測した密度の平均値であり、 $\Delta \rho$ は Δt 時間の間の積雪深の増加である。一方、 k^* 値については、各層の密度変化からその最適値 ($0.01 \text{ m}^2 / \text{kgf} \cdot \text{day}$) を求めている。 ηk^* と ρ の関係をプロットすれば、観測事例は少ないものの、説明モデルによる曲線は観測値をおよそ説明していることがわかる。

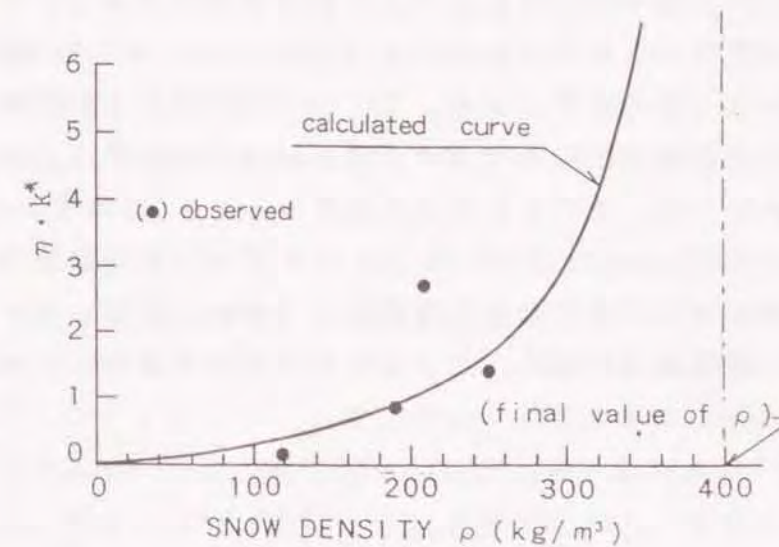


図 3-8 ηk^* と ρ の関係

つぎに、(3-18) 式を書き換えると

$$\eta k^* = \left(\frac{\rho_i}{\rho_i - \rho} - 1 \right)$$

$$= \left(\frac{1}{1 - \rho / \rho_i} - 1 \right)$$

となる。 $\rho / \rho_i < 1$ であるので括弧内の第1項を展開することができ、その結果

$$\eta = (1/k^*) \{ (\rho / \rho_i) + (\rho / \rho_i)^2$$

$$+ (\rho / \rho_i)^3 + \dots \} \quad (3-19)$$

となり、 k^* の定義は η が ρ のべき乗で表されることの議論に結びつけることができる。(3-19)式の第1項のみをとれば、圧縮粘性係数は積雪密度に比例することになる。松岡・杉森・他の報告では、密度がおおよそ $70 \sim 130 \text{ kg/m}^3$ の雪について、ここで示したモデルとは無関係に圧縮粘性係数は積雪密度に比例するとおき、自重による沈降の実験結果をよく説明している。

(3) k^* の値

k^* の値は、積雪深変化の観測値から求められる。積雪深変化は、 $h \rho = \text{const.}$ から算出され、 k^* に適当な値を与え、気象観測署等による日降雪深をもとに積雪深値を求める。これの具体的な計算方法は、積雪層を薄く分割して、それぞれの層の厚みの変化を算出するわけである。 k^* については、ある寒波の襲来時での降雪については同一値としておく。このようにして1961年から1990年までの記録について、計算値と観測値の比較を行うと、50 cm程度の積雪深に達したときはよく一致することがわかる。このときの照合結果から、 k^* は降雪があった期日との間に関係があることがわかり、図3-9にこれを示す。この関係については、気温と日射の強さが原因と考えられる。気温および日射は融雪を生じさせるが、この場合の融雪は、雪の量の実質的な減少よりも、雪質の変化を早めるものと考えられるわけである。

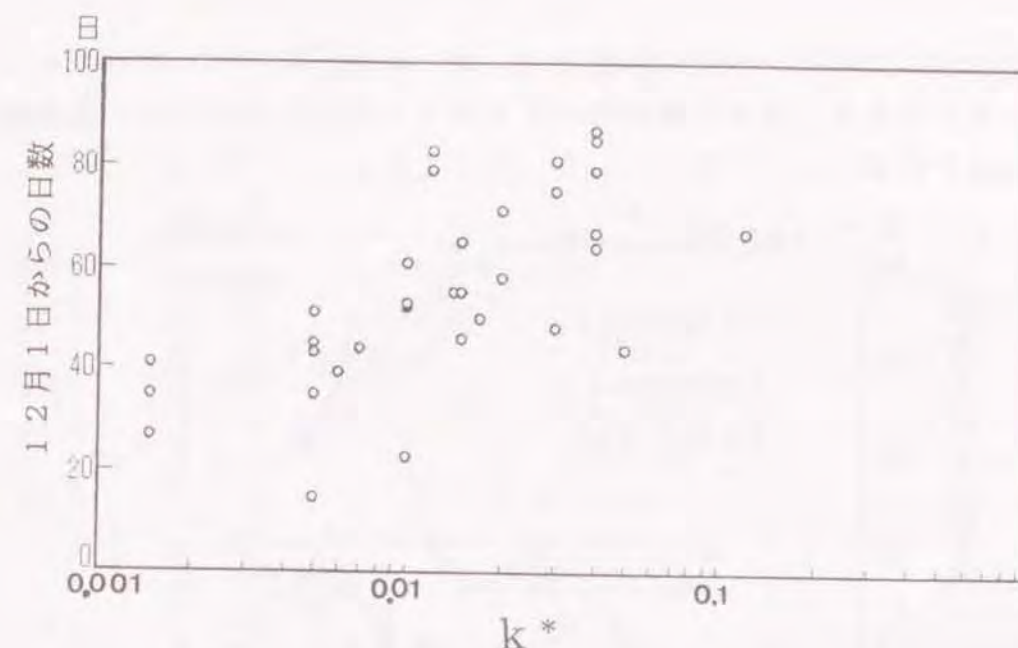


図3-9 k^* と降雪の期日の関係

k^* の単位は $\text{m}^2/\text{kgf} \cdot \text{wt} \cdot \text{day}$

3. 3. 2 積雪深のおよび積雪密度の変化

本節では、先に述べたぬれ雪の沈降圧縮のモデルが積雪深および密度変化をよく説明でき、これにより、日々の降雪深値より日々の積雪深値を計算で求めることができることを示す。まず、図3-10は福井市における38豪雪時のものであり、積雪深の計算値は、寒波が襲来して降雪が続いている期間ごとに k^* 値に適当な値を与えて、日々の降雪深観測値を使って求めた。計算値は積雪深観測値をよく説明していることがわかる。しかし、おおよそ2月5日以降では、計算値と観測値に差が生じ、これは融解が関与していることは明らかである。

長岡市の積雪深変化についてもここで提示したモデルによりよく説明できる。しかし新庄市の積雪深変化については、計算値と観測値に系統的なズレが発生する。このことは、新庄の雪はかわき雪であり、ぬれ雪のモデルにはあわないことが理由であろう。

つぎに、積雪密度の変化は(3-16)式より求めることができる。図3-11は、松岡・杉森・他(1970)の積雪断面観測結果であり、これの代表的な積雪層の密度変化を図3-12および図3-13に示す。適当な k^* を選べば、計算値は観測値をよく説明していることがわかる。図3-12の事例は福井地方では一般的にみられるものであり、雪質の変化および密度の変化は時間的に速く生じている。図3-13は降雪量の多いときにみられるものであり、雪質変化および密度変化は福井地方の雪としてはゆっくりしている。図3-14に長岡市での密度変化事例を示す。密度変化の事例は、一連の積雪断面観測からある一つの層の密度変化

を追跡したものである。実際の観測では、同一の層と見られるものであっても場所による違いがあり、経時的観測値の間ではばらつきがみられるが、観測値の全体的な傾向は計算値によく一致していることがわかる。

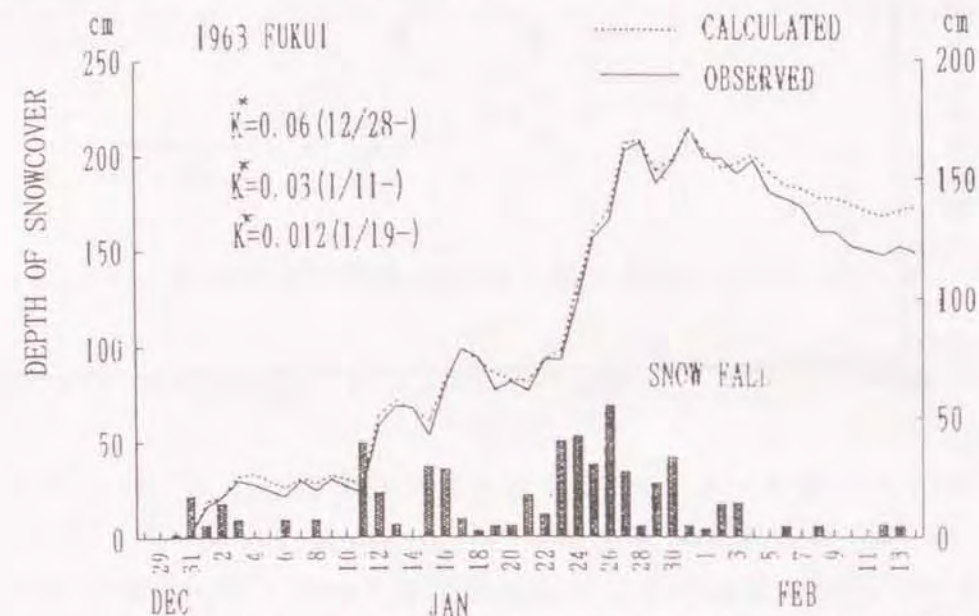


図 3-10 福井における積雪深変化事例 (38 豪雪)

降雪期毎に最適な k^* ($\text{m}^2/\text{kgf}\cdot\text{wt}\cdot\text{day}$) を与えると積雪深変化をよく説明できる。2月上旬以降は融雪が関与し、積雪深変化は沈降圧縮では説明できない。

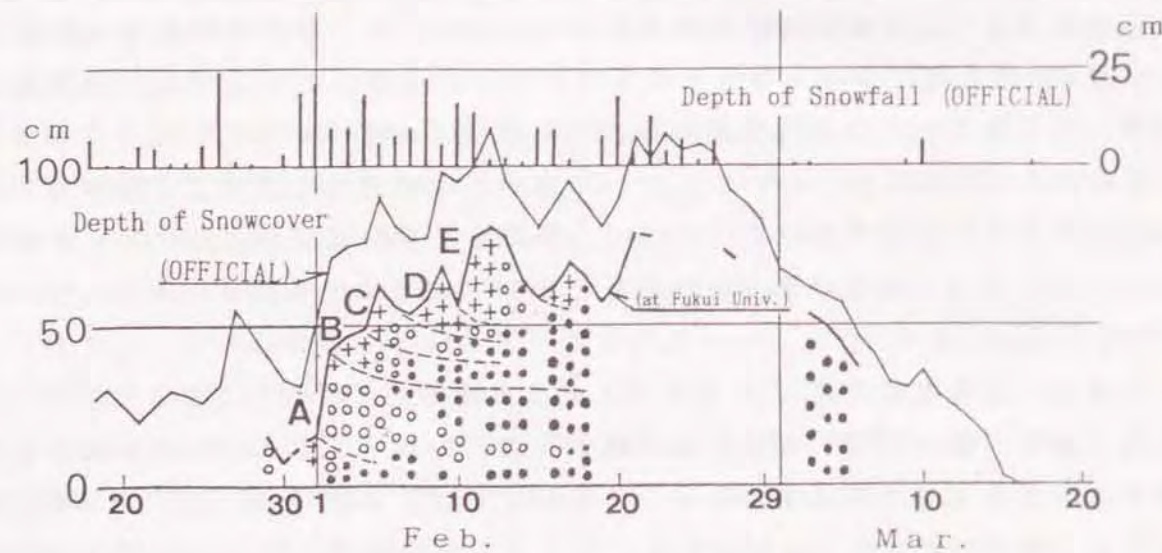


図 3-11 福井の積雪断面観測結果事例 (1968、福井)

積雪深が気象台観測と松岡・杉森・他による違いは、観測位置が違うからである。図中の記号は、+ : 新雪 (new snow)、○ : しまりゆき (compacted snow)、● : ざらめゆき (granular snow)、である。

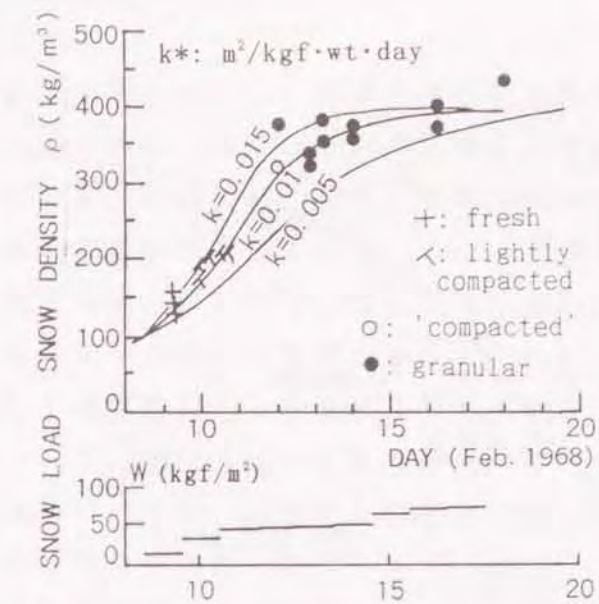


図 3-12 積雪密度変化 (C層)

積雪層の位置は、図 3-11 に示す。図では k^* の値を想定したときの密度の変化曲線を示してある。W は C 層にかかる雪荷重である。

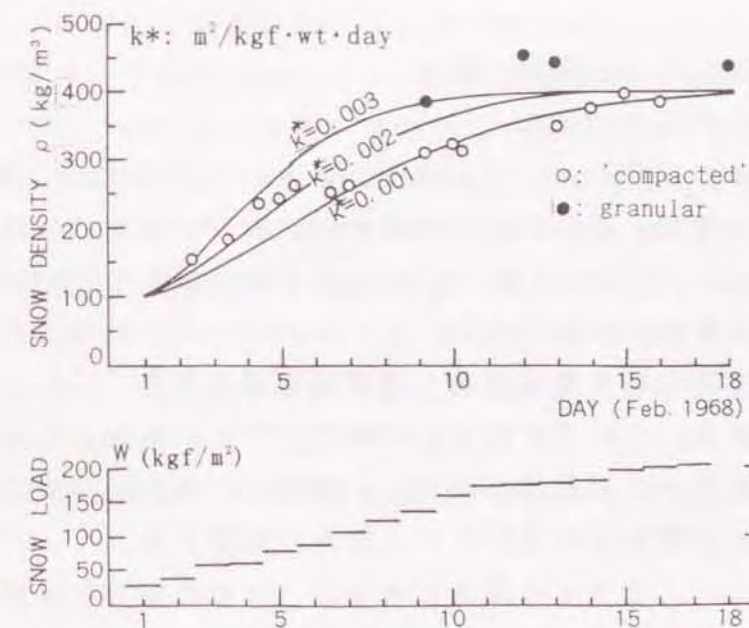


図 3-13 密度変化 (A層)

積雪層の位置は、図 3-11 に示す。 k^* 、密度の変化曲線および W の意味は図 3-12 の通りである。

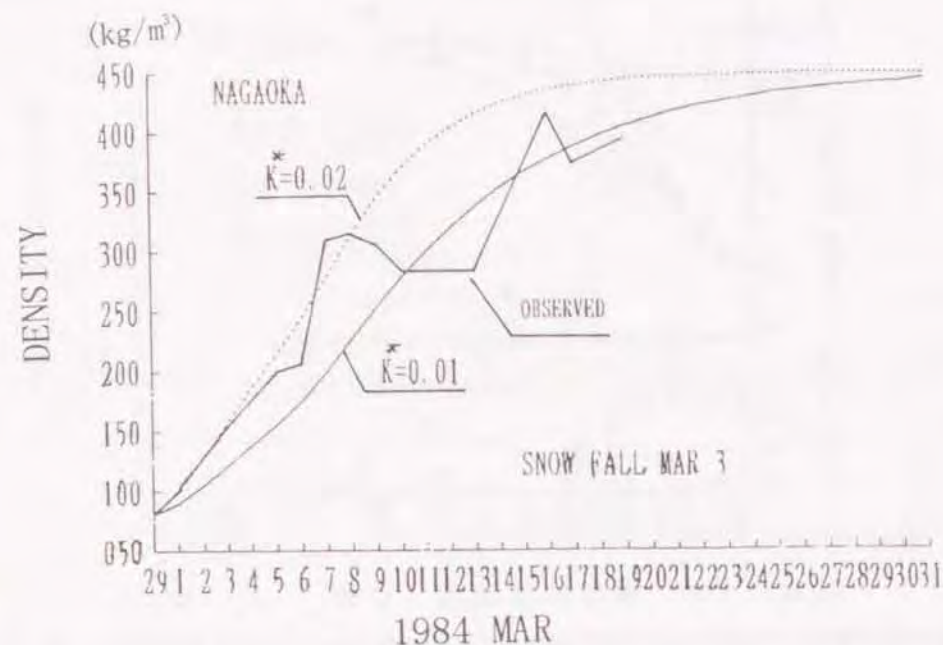


図 3-14 長岡の雪の密度変化事例

密度の観測値は雪害実験研究所 (1984) による。

適当な k^* を与え、密度の変化曲線を示してある。

3. 4 真冬の期間における融解の影響

3. 4. 1 雪面の熱収支の計算

福井地方では真冬の期間であっても寒波が襲来していなければ融解が発生し、前章で述べたような雪質の変化および密度変化が進行するだけでなく、積雪深の実質的な減少が生じる。このことについて、日常的に観測されている気象要素との関連がわかれば実務的に都合がよい。この目的のための気象要素として平均気温を選び、これと雪面の総合熱収支量との関係を推定する。これについては、熱収支に関係する各要素についてそれぞれの研究やテキストを参照する。

①日射：気象台観測の日射量値を使用し、雪面への吸収に関する積雪表面のアルベードの値は、一般的に示されている値から仮定する。

②顕熱：これについては多くの報告があるが、比較的簡易に表現されている成瀬・他 (1970) の報告がある。この場合、気温および風速は雪面上 1 m の値が使われているが、ここでは気象台の観測値そのままを使う。

③潜熱：これまでの研究では顕熱とあわせた関係式が示されているものが多いが、上の顕熱の算出方法にあわせて、蒸発量を単独に表す成瀬・大浦・小島 (19

70) に従う。ここでの風速および水蒸気圧は雪面上 1 m のものであるが、前記同様に気象台の観測値を使う。

(雪面の熱収支量の推定)

④雪面の放射：長波長放射に対して雪は黒体として扱う。

⑤大気の放射：これについては地上付近の気温と水蒸気圧を使った田中・他 (1985) のテキストがある。④項とあわせて、黒体放射式を基本とし、地表付近の水蒸気分圧および雲の状態を考慮している。

⑥雨：雨滴の温度を気温に等しいものとして降水量からの熱量を求める。しかし、雨は熱収支にあまり関与しないことがわかっている。

⑦積雪内の熱移動：積雪表面からの熱収支がマイナスのときは積雪に含まれる水が凍結するものとして、積雪内部への熱の移動はないものとする。

次に、気象の観測データは、福井地方気象台の地上観測日原簿より使用する。

日々の各気象要素は次の時間帯で観測されている。

気温：3時を初回とする3時間毎。

蒸気圧：3時を初回とする6時間毎。

風速：3時を初回とする3時間毎。

降水量：1時間毎、その時間帯に降雪がないときは雨とみなす。

降雪：9時15時、21時の3回。

雲：9時、15時、21時の3回。

全天日射量：1時間毎 (日照が観測される全時間帯)。

上の気象観測項目のうち時間帯によっては観測値があるものとないものがあり、観測値がないものについては、前後の時間帯より按分することにする。昼夜の区分は、6時以降18時までを昼間、18時以降翌日6時までを夜間とする。ただし、降雪量については、9時の観測値を前日の夜間のもの、15時および21時の観測値を当日昼間のものとする。積雪表面の熱収支には日射量が最も関与し、これは雪面のアルベードによってかわる。福井地方の新雪に近い雪面のアルベードの値について、著者らは0.8の事例を得ている。この値は雪質によって当然違うであろうが、系統的な解析までは至っていない。そこで、上記の0.8に近い幾つかの値を設定して雪面の総合的熱収支量を算出するものとする。

3. 4. 2 雪面の総合熱収支量と気温との関係

このようにして算定した雪面の総合熱収支量と日平均気温との関係の事例を図3-15に示す。両者の間にかなりよい関係があることがわかり、図3-16にあるように3冬のそれぞれの回帰式はほぼ一致している。他の年についても同様のことがいえ、雪面の総合熱収支量は日平均気温の1次式であらわすことができる。日平均気温は容易に観測できる気象要素であり、したがって雪面の熱収支量とそれによる融雪量を容易に推定できることになる。

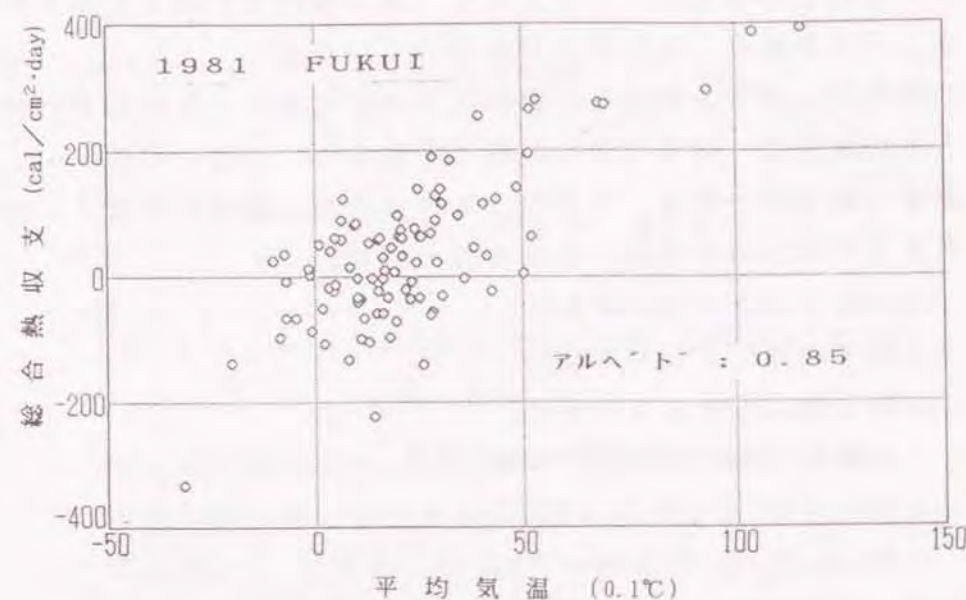


図3-15 雪面の熱収支計算値と平均気温の関係

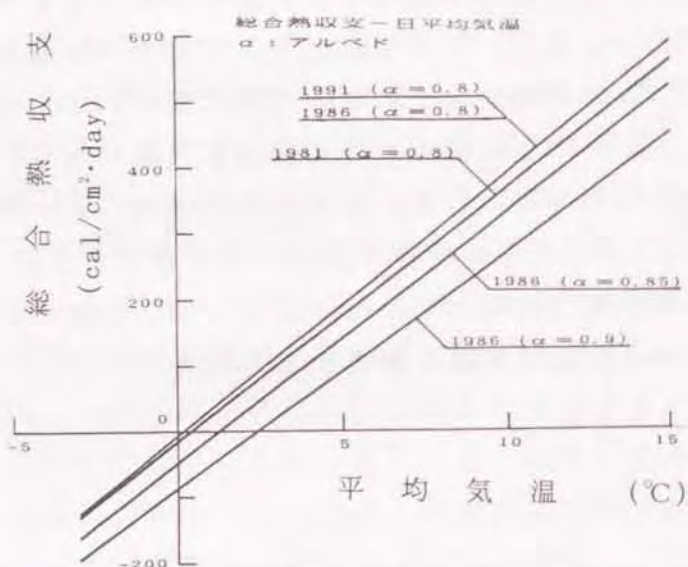


図3-16 雪面の熱収支計算値と平均気温の相関関係

3. 4. 3 総合熱収支推定の検証

ここで示した総合熱収支推定の検証は、積雪の消滅期日の比較により行うことができる。

- ρ : 新雪の密度
- h : 日降雪深
- y : 融解による1日の減少分 (水当量で表す)

とし、

$$X(t) = \sum h - \sum y / \rho \quad (3-20)$$

を求め、 $X(t)$ を有効積雪深とおく。これが0となる期日 t が実際の積雪深が消滅する期日に一致すれば、総合熱収支量の推定が検証できたことになる。1940年より1994年間の55年についてみると、平均気温から推定した消滅時期と実際のものは64%がかなりよく一致していることがわかる。しかし、少雪のときは計算値の積雪が早く消滅し、多雪のときは逆になるようである。図3-17および図3-18に事例を示す。図3-18でみると、12月では、計算値の積雪深の減少は少なく、2月以降になるとよく一致するようである。理由は、12月では日射が弱いことがあげられる。さらに詳細に検討するならば、底面からの融雪 (和泉、1983) も考慮しなければならないであろうが、ここではふれないでもよいであろう。

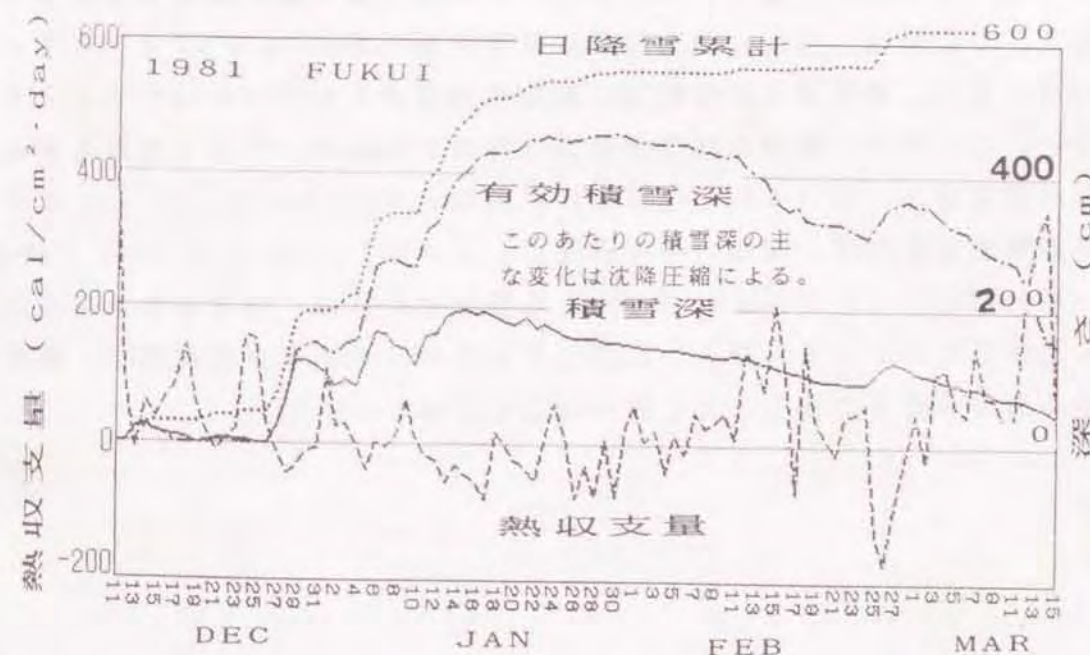


図3-17 積雪深、有効積雪深および積雪表面の熱収支の推移 (1981)

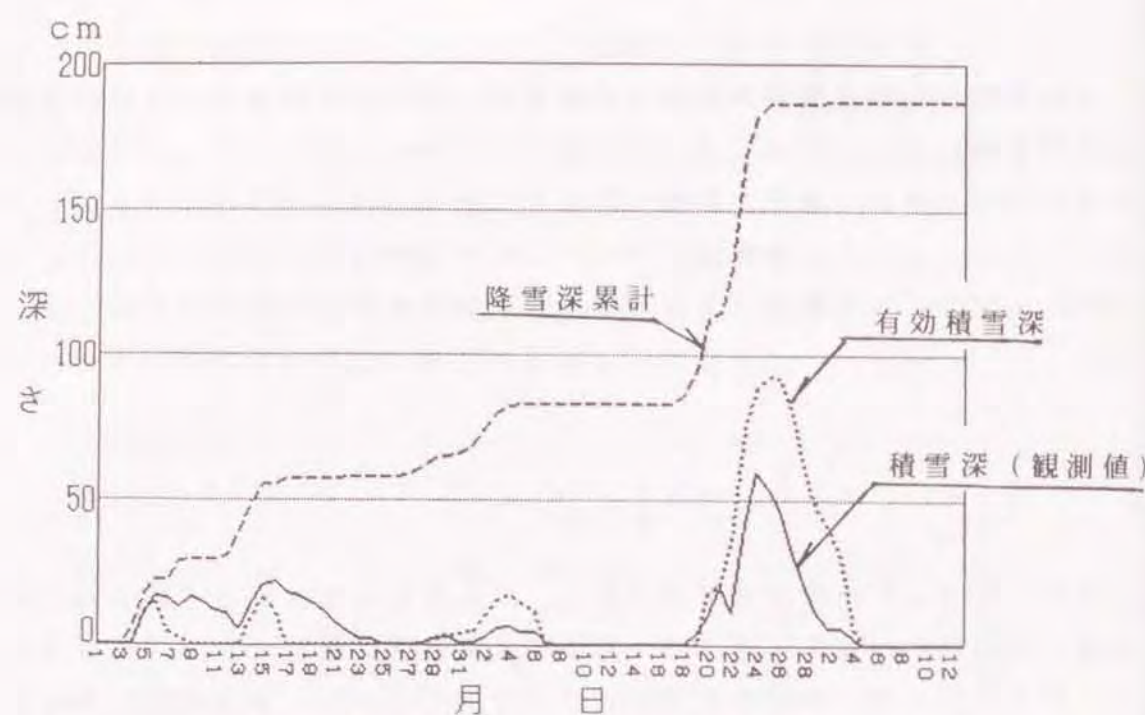


図 3-18 積雪深 (観測値) と有効積雪深の変化 (1991、福井)

3. 4. 4 雪面の総合熱収支と積雪の平均密度との関係

積雪の平均密度は福井地方では一般的に 300 kg/m^3 とされているが、これについては、つぎの2通りの解釈がとれる。①積雪層全体としての平均密度値、②建築設計における雪荷重の算定方法。②については、前田 (1987) において議論されている。1冬期間の最大の積雪荷重は、年最大積雪深の起日より少し遅れて出現し、その値は、年最大積雪深値に積雪密度を 300 kg/m^3 としたものとなっている。さて、積雪層全体の密度の測定事例は多くの労力を要することが理由で少ない。このため、雪面の総合熱収支の算定から積雪の平均密度の推定を行うことが必要になる。 $H(t)$ を積雪深の観測値、 $X^*(t)$ を (3-20) 式による積雪の重量値とすれば、積雪の平均密度は、 $\bar{\rho} = X^*(t) / H(t)$ で求められる。一冬の期間について $\bar{\rho}$ と $H(t)$ との関係をみれば、積雪密度の実務面における適値がわかることになる。ただしここでは、平均密度の解釈は、建築荷重におけるものが妥当であることを述べるにとどめる。

3. 5 まとめ

本章では下記について考察し福井地方の雪害発生に関係する雪の特質を明らかにした。特に、福井地方の雪害発生とその対策については積雪深が深くかかわるので、積雪深変化に関する議論を詳細に行った。

(1) 年最大積雪深が道路施設その他の雪対策計画の基準値になるので、福井地方における年最大積雪深の再現値を算出した。

(2) 福井地方の雪状況は年々による差異が東北や北海道地方に比較して大きく、このことを年最大積雪深を代表事例にして確認した。

(3) 気温と年最大積雪深の2軸の平面で福井他各地を位置づけると、雪対策手法を含めた各地の特質の差がよく理解できる。

(4) これまで研究が遅れていたぬれ雪の積雪深および積雪密度のそれぞれの時間的変化は、積雪層にかかる応力および積雪密度の最終値とある時点での密度との差それぞれに比例するとするモデルでよく説明できることを明らかにした。これにより、日々の降雪深値を使って日々の積雪深値を計算で求めることができる。

(5) 福井地方は比較的温暖であるため、寒波が襲来するあい間では融解があり、積雪深の変化は沈降圧縮だけでは説明できない。そこで、融解に関する雪面の熱収支量を日平均気温との近似式で表現できることを確認した。この場合、雪面のアルベードは0.8とおくのが適当であることがわかった。

(6) 実務上において、積雪層全体の平均の密度値が問われることがあるので、これについて、積雪の雪面の総合熱収支量の推定から算定できることを示した。

第4章 福井の地域性と雪害発生の特質

4.1 はじめに

本章の主な目的は、福井地方における雪害発生の事例を示し、その特質を調べ、本論文において都市雪害の起因を雪の持つ量的特性におくことの根拠を明らかにすることにある。

雪害現象は、気候風土、地理、社会経済、およびその他の条件と雪の持つさまざまな属性とが関連して発生する。福井地方は、気候風土的には比較的温暖であり、凍結よりも積雪による雪害（積雪型）が発生している。ここで関係する雪の属性は、重量または嵩ばりである。つぎに、都市雪害の議論については、近年、都市間あるいは地域間の道路交通を主とした交流が進み、都市内の閉じた範囲だけにとどめることはできない。これにはその地域の地理的条件が関係大きく関係する。福井県の場合は、非積雪地帯に隣接していることと陸上の幹線交通システムの形態をあげることができる。降雪時になると、雪の備えのない自動車が非積雪地域との県境付近で停滞し、大きな幹線交通のマヒをおこすことがしばしば見られる。そのうえ、幹線交通のルート数が少ないため、一地点での停滞がきわめて大きな影響を及ぼすことになる。また、これまでの交通障害は積雪型とみられていたものが、近年は凍結型が多くなった。

また、社会的条件については、近年の自動車交通を主とした交流圏の拡大と高度化があげられ、雪による一時的な停滞が許容され難くなってきている。身近なところでは、雇用状況の変化や高齢化社会の進展により、これまで積雪地域における生活者では当然と見られた屋根雪降ろしが苦痛になりつつある、などがあげられる。しかし、上記をすべて網羅して扱うことは困難であり、記録に残る項目を検索し、順次考察の範囲を広げることが雪害研究の一つの方法であると考え。

1996年1月末から2月初頭にかけて、全国的に寒波が襲い、福井県と滋賀県の県境では平年値を越す積雪深となり、敦賀市周辺において幹線道路の途絶を引き起こした。今回は典型的な積雪型の雪害であった。このときの幹線交通の途絶は、敦賀市周辺だけでなく、福井県の広範囲にわたって不安を与えたことになるが、実態はどうであろうか。この時の交通途絶の記録は容易に入手できる性質のものであるのでこれを研究の入口とすることができ、杉森（1997²⁷）において検討している。

福井において、雪害発生は降雪深累計よりも積雪深の到達値に関係することを、毎年の道路除雪費が年最大積雪深との間の相関の事実から明らかにする。建築被害や造林被害等のような直接的な被害と、道路除雪等に要した対策費用は、雪害現象として客観的に記録されている。しかし、間接被害では、56豪雪にお

いて、福井県全体の商工業被害が760億円と計上されている以外の報告はほとんどない。幹線道路の途絶等の事実が社会的にどの程度の影響を有するかは不明である。このような理由で、道路除雪費は、雪害の最低のレベルを表しているといえる。道路除雪費が積雪深の到達値に関係があることは、本研究において雪の嵩ばりに視点を置く根拠になるわけである。

4.2 福井地方の地理的特性と雪害の発生

4.2.1 地理的特性

石川県、福井県は、図4-1の模式図で示すように、地域の南北方向に北陸自動車道、国道8号およびJRが通過し、県境に峠を有することが共通した陸上交通システムのパターンとなっている。中心都市から東方向に100番台の国道が接続し、海岸沿いにも道路が通っているが、県外との通過交通用にはすぐれたものではない。富山県の場合もおよそこれに近いパターンといえる。特に福井県では、南の境界が降雪時の交通のネックになっている。ここを通過する道路は2本しかないため、1本に障害が発生すると、他方に過重な負担がかかることになり、すぐさま双方とも交通途絶となる。福井県の南方向に接している滋賀県および京都府でも、それぞれ積雪寒冷地をかかえているものの、実質的な交通障害は県境のある峠付近で発生するので、ここでの交通障害を、積雪地域と非積雪地域との接点で発生するものとパターン化して考えることができる。近年における県境でのそもそもの交通障害の発端は、いろいろな理由によるタイヤのスリップ事故によることが多く、いったんこれが発生すると、通過車両の停滞による障害のためレスキュー車の到達が遅れ、混乱がますますひどくなるという経過をたどる。一方、中心都市から東方向に向かう国道は、降積雪の多い山間地域を通過するため、除雪の遅れおよび雪崩危険による交通途絶が頻繁に発生する。そのため、福井県の地域では、陸上幹線交通の全面的な遮断という不安を常に抱えている。

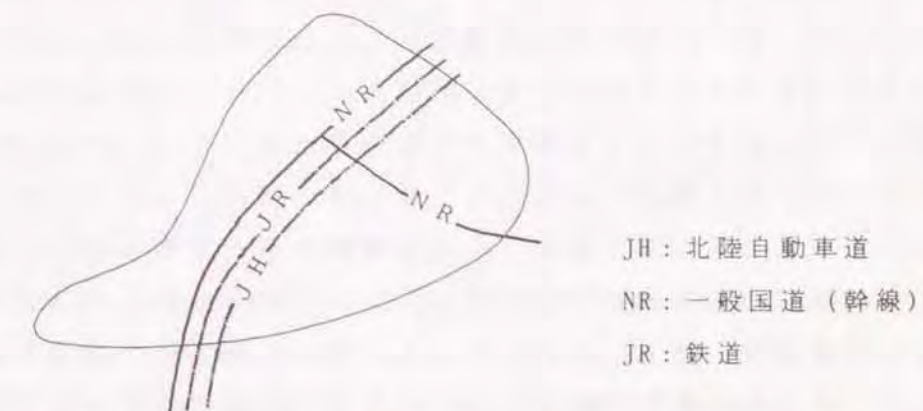


図4-1 福井地域の幹線陸上交通のパターン

4.2.2 1996年冬期敦賀市周辺で発生した雪害状況

(1) 幹線自動車交通の雪による影響

1996年1月末から2月初頭にかけて全国的な大雪があり、1996年豪雪という表現も使われている。北陸地方では特に敦賀市から滋賀県北部にかけて大きな降雪があり、道路交通に大きな混乱が生じた。図4-2に敦賀市の1996年冬期の降積雪状況を示す。敦賀市の積雪深の最大は92cmに達し、平年値71cmの1.3倍である。これに対して、福井市では積雪深の最大は48cmで、平年値76cmの0.63倍にすぎない。敦賀での日降雪深は2月1日に68cmを記録し、これは既往3位の値である。県境付近での大きな交通混乱の理由は、降雪強度が大であったことと自動車の停滞による融雪装置（溪流水使用）の散水能力の低下にあるとみられている。さて、国道8号と北陸自動車道（いずれも下り車線）について、雪による交通量の影響をみてみる。1月と2月の日交通量を図4-3に示すと、明らかに雪による影響が認められる。これをさらに詳細にみるため、時間交通量の変化で見てみる。変動を調べるためには標準交通量を定めることが必要であり、祝日を含まない1月16日から22日の1週間、および27、28日の交通量から求めておく。交通量は、国道8号は全車種交通量、北陸自動車道は大型と小型に分けて測定されているうちの大型車交通量を扱う。前記の期間の時間交通量について、日曜、月曜から金曜、および土曜の3つの特徴的なパターンが認められる。そこで、3種類の標準交通量を定める。国道8号の時間標準交通量を図4-4に示す。次にここで定めた標準交通量の精度を見るため、各曜日の時間毎の値について、標準値からの差の2乗値を図4-5に示す。その結果、昼間での標準交通量値のバラツキはおよそ8%、夜間ではおよそ15%であり、30%のものが少数ある。北陸自動車道における交通量のバラツキは国道8号よりやや大きい。40%以上の場合が数回あったが、その理由は交通事故によるものかどうかの精査はしていない。以上の準備により1月30日から2月5日までの時間交通量について、標準値と比較して図4-6および図4-7示す。交通量の雪による影響について、すでに新聞等で報道された状況を説明していることがわかる。国道8号では1月31日夕刻から雪の影響があらわれ、2月2日はほぼ完全に交通は途絶し、2日夜半から3日朝までの交通量はおおよそ500台であり、これは路上に停留していたものの脱出とみられる。交通量の回復は3日の午後になってからと報じられた（2月4日福井新聞）。北陸自動車道の雪の影響は31日の1時頃に始まり、交通の完全な途絶は3回発生した。2月2日およそ23時から3日12時までの交通量は、路上に停留したものの脱出とみられ、報道（2月4日福井新聞）では、木之本敦賀間が閉鎖されていた下り車線は3日午後1時に34時間ぶりに通行可能となったとある。

ここで示した雪害のパターンについて、特にトリガーとなるものの解明とその対策の研究が今後必要である。

国道158号（図4-1の東方向への路線）は、1日午前1時から3日午後5時まで通行止であった。

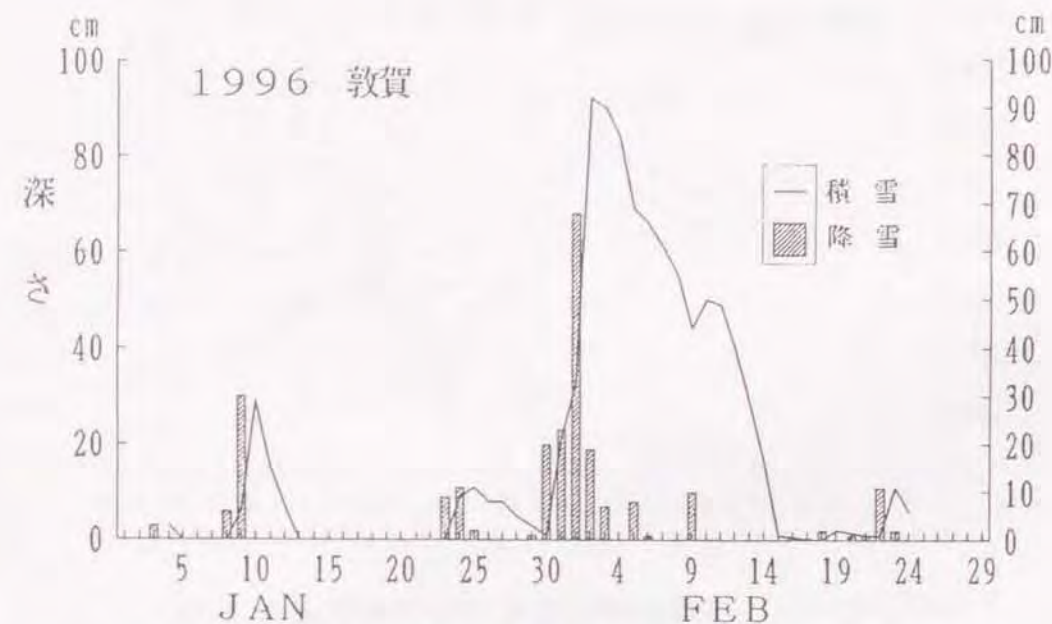
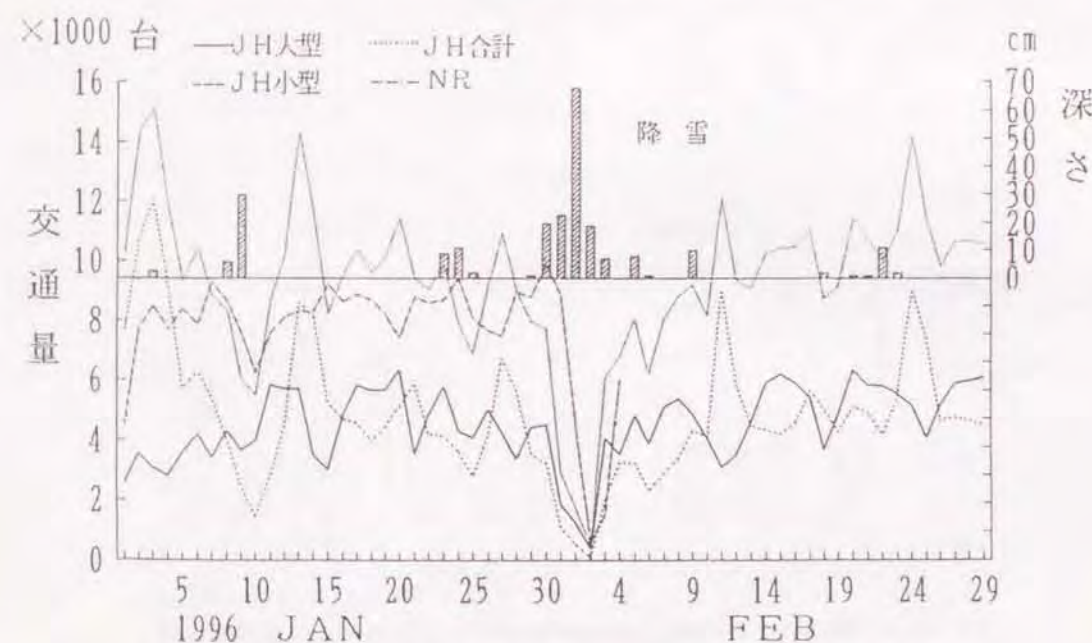


図4-2 1996年敦賀の降積雪状況（敦賀気象台）



JH大型：北陸自動車道日野トンネル（南条）下り線大型車

JH小型：同、普通・小型車

NR：国道8号敦賀市道口。下り線、全車種

図4-3 国道8号、北陸自動車道の日交通量変化

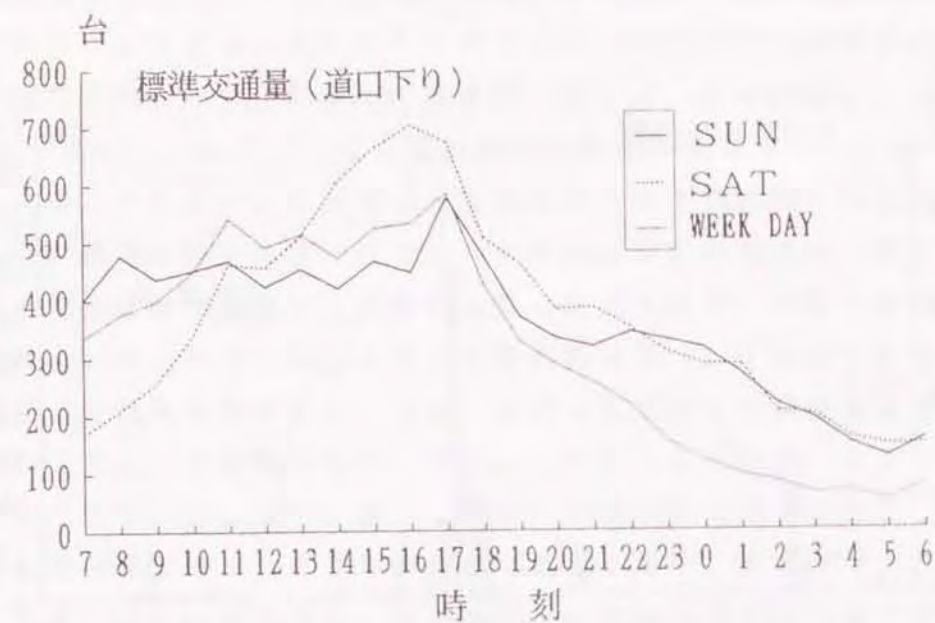


図 4-4 時間標準交通量 (国道 8 号道下り)

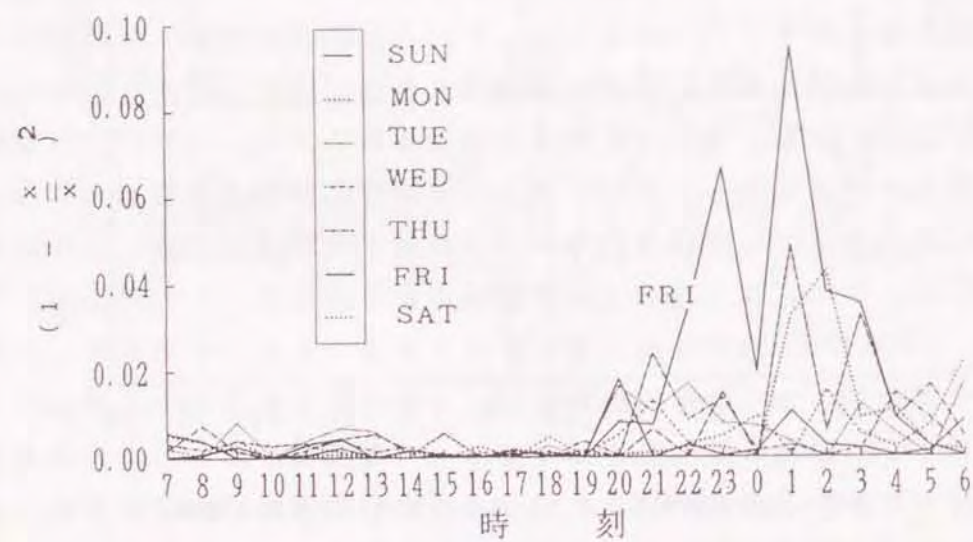


図 4-5 標準交通量との偏差 (1/17~1/23)

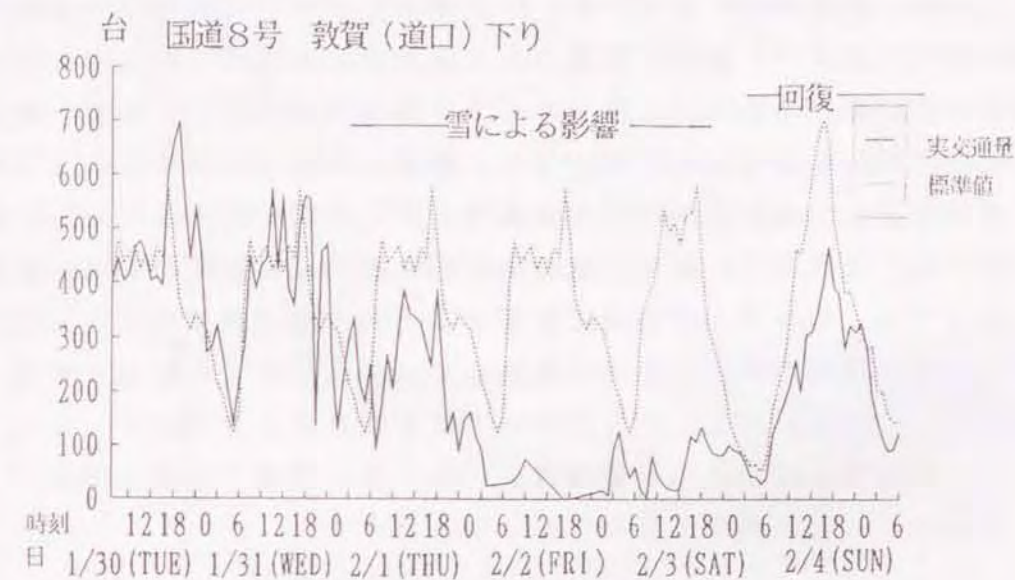


図 4-6 国道 8 号の時間交通量の雪による影響

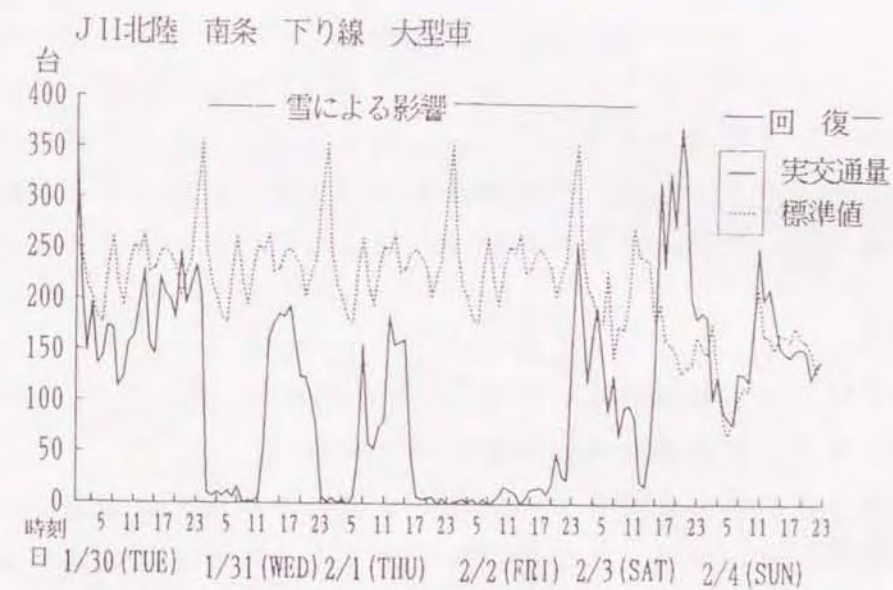


図 4-7 北陸自動車道の時間交通量の雪による影響

(2) 市民生活および産業活動への影響

1996年冬期に、敦賀市周辺を中心に発生した雪害の社会的な影響について概観してみる。前節で示した幹線自動車交通の障害は雪による1次災害であり、1次災害による2次災害について、日常生活への雪による影響として青果の価格を取り上げる。ダイコン、ニンジン、ハクサイ、キャベツの4品目を例にみると、今回の降積雪の期間中、福井、敦賀ともに価格はほとんど変動していない。ただし品薄の不安が報じられた(1996年2月4日福井新聞)。また、近時の産業構造の変化に関係する雪害の一例として、機器の部品の調達がこれまで福井の地域内に倉庫を持つ方式から県外の大規模センター方式にかわったため、かなり不安な場面があったと聞く。交通途絶の期間が今回の程度までは在庫でまかなえたが、これより長くなれば生産活動に影響するという商工業関係者の声があった。また一方では、福井県内から外に出る製品の供給に対する信頼性の問題もあると聞く。ただし、今回の場合これらについては計量されるまでに至っていない。

1996年の雪害についての結論は、このときの期間での交通障害では、記録として残る社会的な影響はあまりなかったといえる。

4.2.3 交通ネットワークに関する課題

積雪時において一時的であるにせよ幹線道路が途絶するという事は、社会の空間的構造が変化するとも言いかえることができる。都市雪害についてはこのような視点に立った研究は遅れている。

福井と他の地域を結ぶ県境において、交通ネットワークの妨げになる雪氷現象として、路面凍結、うす雪すべり(注:わずかの雪の時に数回の自動車の轍の通過でツルツルになる現象の便宜的呼称。)および雪崩がある。降雪期の雪崩については、福井地方でも大規模な煙型表層雪崩が発生することを、杉森・他(1976, 1997)は確認した。今後の道路等の整備計画においては考慮されなければならない。

4.3 都市における雪害発生

4.3.1 1996年降積雪時の敦賀市内の状況

1996年1月末から2月初頭にかけて全国的にかなり的大雪になり、滋賀県と福井県の県境では幹線交通の途絶があったことは4.2節で述べた。このときの敦賀市の最大積雪深は96cmであり、市内の道路の状況はおおよ次のようであった。幅員14m以上の幹線道路ではようやく2車線が確保でき、生活周辺道路では、1車線の確保ができない状態であった。裏通りに面した駐車場では自動車の出入りはほとんど不可能であった。幹線の歩道の積雪断面のうち、自然状態

の範囲がほとんどであり、このことは第5章で示す積み上げモデルの断面に至るまでの除雪が行われなかったことを意味している。市内の重要幹線あるいは商店街ではたまたに運搬排雪が行われていた。幹線道路、生活道路、歩道および駐車場等の状況について、以下幾つかの事例を写真で示す。今回の敦賀市の状況を概括していえば、雪の量的な特性、すなわち雪の嵩ばりを起因に障害が発生していることは明らかである。道路については、もとの道路幅員との関係でどれだけの通行可能な幅員を確保できるかであり、これは、第5章で述べる道路上での雪の積み上げモデルでよく説明できる。歩道についての視点は、歩道上の雪が自然状態のものかそれとも除雪等により積み上げられたものかどうかにある。これらについての議論はやはり第4章の雪の積み上げモデルを基本にして、第8章において詳細に扱う。



図4-8 敦賀市内の地図

○番号は、写真4-1～写真4-6の位置を示す。



写真4-5 住宅街

写真4-6 駐車場

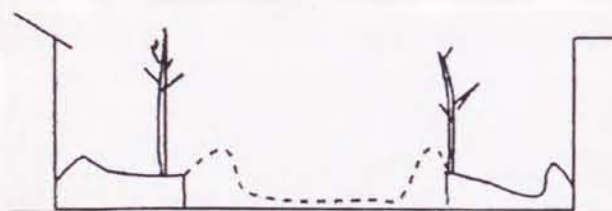


写真4-1 幹線(1)

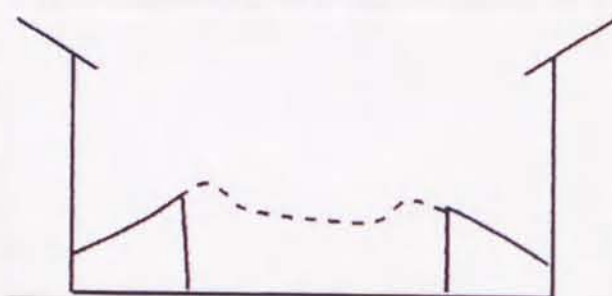


写真4-3 生活周辺道路

4. 3. 2 寡雪時における雪害発生

大雪または豪雪時において雪害が発生することはいうまでもない。近年、特に福井地方では暖冬化傾向で雪が少ない。しかしそうではあっても都市内では雪のかさばりに起因する雪害発生が顕著に見られる。幹線道路の除雪はされていても、生活周辺道路（裏通り）の除雪まではされず、通行障害あるいは不能は普通に見られる。歩行者帯、また駐車場等ではほとんど雪処理がされない場合がある。これはそれら自体が不都合であるだけでなく、事故や災害等が複合して発生した場合の緊急安全性に影響するわけである。詳細な議論は省いて事例のみ示しておく。



写真4-2 幹線(2)



写真4-4 歩道



写真4-7 生活周辺道路（福井市、除雪なし）



写真4-8 生活周辺道路（福井市、除雪あり）

4.3.3 駐車場の機能低下

積雪時における駐車場の機能低下についてみる。駐車場の雪処理は一般的に機械除雪で行われている。地下水による散水消雪はしばしば見られるが、福井市の旧市街部では合流式下水道であり、井戸から揚水した水には下水処理費がかかるため、設備がありながら使用されない場合がある。機械除雪による場合は、堆雪された雪のため有効な面積を減じ、駐車場の機能が低下する。機械除雪による堆雪の断面形状は図5-1に示す通りであり、前面の立ち上がりの勾配の立ち上がりと開き幅の比はおおよそ1:1(45°)である。後方の勾配もフリーな面からの立ち上がりであればおおよそ前面に等しい。除雪前の新雪と雪堤の雪の密度比はおおよそ4である。雪堤の高さは1.5m~2mであり、2.5mまで積み上げられることがある。そこで、全降雪量のうち雪堤に積み上げられる率を仮定すれば、有効面積の低減の割合がわかる。この低減の割合がどの程度駐車場としての機能低下を引き起こすかは、形状や、進入路の位置等によって違うであろう。面積の狭いほど機能低下の影響は大きいと思われる。図4-9に福井県立病院の駐車場の一部に似せた事例を示す。一般的に機械除雪ではA、BまたはCのパターンで積まれる。機能低下を最小に抑えるためにはCのパターンでできるだけ高く積むことが望ましい。これまでの幾度かの観測事例では、作業条件が良好な場合はCのパターンに積まれ、悪い場合は、Aのパターンになるようである。

公共の病院のように夜間においても人の出入りのある施設では次のことが問題になる。やや古いデータであるが、福井県立病院の駐車場は総数279台(平成元年現在)の駐車容量があり、図4-10に示すように、利用率の最大は120%で、夜間の最低でも40%の利用がある。積雪時においても夜間の使用はあるはずであり、このことが機械除雪の大きな障害となることはいうまでもない。なお、同病院の駐車場の雪対策については専用ボイラーによる散水循環式融雪が最良との案が提案されたことがある。この駐車場の現在の状況は、駐車場の進入路等が平成元年時よりは整備され、幾分か機械除雪も容易になったと思われる。

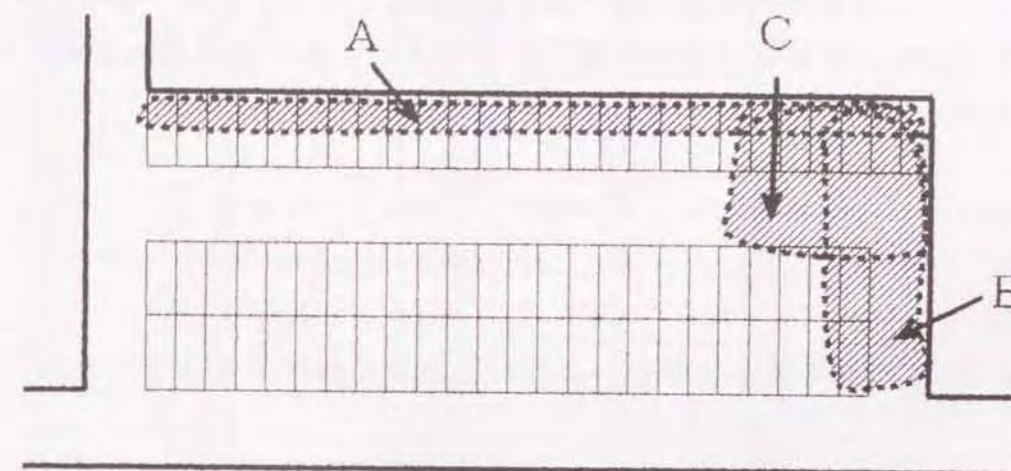


図4-9 福井県立病院駐車場（一部）の除雪状況

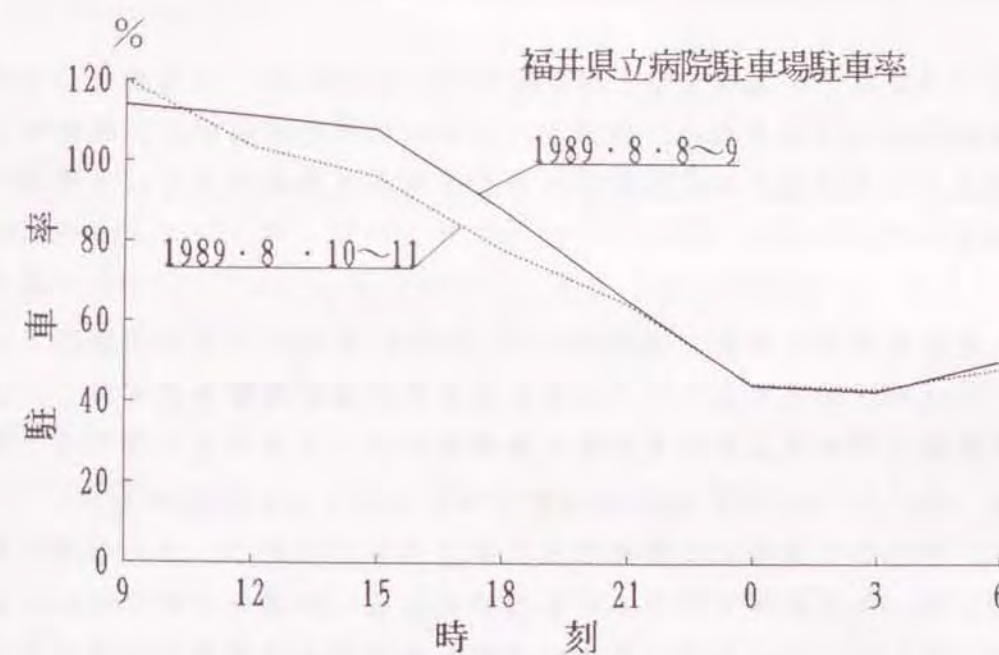


図4-10 福井県立病院の駐車場利用率

4.4 積雪状況と道路除雪費の関係

4.4.1 福井県における道路除雪の現状

福井県（知事管理関係分）における道路除雪の対象路線の延長は、平成8年度で2,030km、昭和60年度で1,930kmであり、年度による変動はあまりない。後に示す年度毎除雪費の比較計算では2,000kmとされている。除雪の区分は、交通量を基準とし、路線の性格を考慮しながら次の4種にわけて除雪サービスの目標を定めている。

第1種	日交通量のおよその基準	1,000台/日以上
第2種	同	500～1,000/日
第3種	同	500台/日以下
春雪除雪	（交通量が少ないか、または通常の除雪が困難な山間地で、春先になって除雪を行う。）	

次に除雪体制の基準は次のようになっている。

除雪準備体制	降雪が予想させる場合
平常体制	（主な基準）降雪深が10cmに達した場合
警戒体制	（主な基準）積雪深が60cm～1.0mに達した場合
緊急体制	（主な基準）積雪深が1.0m以上に達した場合

除雪作業の内容は、初期除雪または1次除雪、拡幅除雪、圧雪除去、運搬排雪および路面凍結防止（薬剤散布）がある。初期除雪の出動基準は、昭和51年度までは、道路上の積雪深が15cm以上であり、それ以降は10cm以上となり現在に至っている。

4.4.2 道路除雪費と年最大積雪深もしくは日降雪深年累計との関係

1973年（寒候期）以来の福井県が実施してきた道路除雪費を表4-1に示す。表4-2に年最大積雪深および日降雪の深年累計値、建設デフレータおよび消費者物価指数（脚注*1）を示す。道路除雪費を年次比較するために建設デフレータで修正する。さらに、除雪の出動基準は毎年変わるものでないが、除雪の内容は住民の要望に従いきめ細かくなっているはずである。除雪サービスの伸びの定量化はこれまで試みられていない。そこで、根拠は薄い消費者物価指数を使うこ

*1（財）建設物価調査会，1996：建設経済季報・62・

表4-1 道路除雪費

（実績）単位は、千円/km

寒候期	除雪費
1973	25.9
1974	35
1975	63.15
1976	73.4
1977	184.4
1978	115.05
1979	71.4
1980	184.4
1981	1027.8
1982	133.5
1983	152.1
1984	521.35
1985	287.35
1986	453.85
1987	131.45
1988	193.35
1989	127.6
1990	182.65
1991	285.15
1992	213
1993	230.7
1994	313.5
1995	316.5
1996	380

表4-2 道路除雪費解析に係る要素

積雪深および降雪深の単位はcmで表す。

寒候期	最大積雪深	累計降雪深	消費者物価指数	デフレータ
1973	35	101	38.6	36.4
1974	55	349	43.1	45.9
1975	63	257	53.2	57.4
1976	65	191	59.4	58.3
1977	138	596	65	62.3
1978	80	250	70.8	66.3
1979	31	111	73.5	71.2
1980	82	303	77.1	78.6
1981	196	622	83	87.7
1982	29	171	86.2	89.5
1983	47	221	88.5	89.1
1984	95	460	90.2	88.4
1985	83	337	92.1	89.9
1986	120	622	93.9	88.7
1987	56	202	93.9	88.4
1988	32	189	94.4	89.8
1989	26	64	95.1	91.7
1990	53	96	97.8	96.4
1991	60	188	100.9	100
1992	20	92	103.7	102.8
1993	20	76	105.4	104.3
1994	66	220	106.7	104.5
1995	54	189	107.1	105
1996	48	188	107	105.5

とにする。このような時点修正を行った除雪費と、雪の属性との関係を調べる。

雪の属性として年最大降雪深および日降雪深年累計をとりあげ、まず、両者の関係を図4-12に示す。相関係数は0.83でありよい相関は認められるが、日降雪深年累計値は622cmの同値でありながら、年最大積雪深は1981年の196cmと1986年の127cmのような事例がある。

つぎに、両者の属性について下記の7通りの組み合わせをとる。⑥と⑦で、日降雪深年累計値を3分の1にしているのは、年最大積雪深との関係で寄与の程度を同等にするためである。これら組み合わせの値と修正した除雪費との関係を示すと図4-11-1～図4-11-3のようになる。これらについての相関係数をみると、④の場合が最も相関が高い。また、年最大積雪深もしくは日降雪深年累計について、1乗よりも乗の組み合わせの方が相関が高いことがわかる。その結果、除雪費は、雪の量の2乗に比例し、雪の量との関係では、降雪深よりも積雪深との相関が高いといえる。

①年最大積雪深

- ②年最大積雪深の2乗
- ③日降雪深年累計
- ④日降雪深年累計の2乗
- ⑤年最大積雪深×日降雪深年累計
- ⑥年最大積雪深+ (1/3) 日降雪深年累計
- ⑦年最大積雪深+ (1/3) 日降雪深年累計の2乗

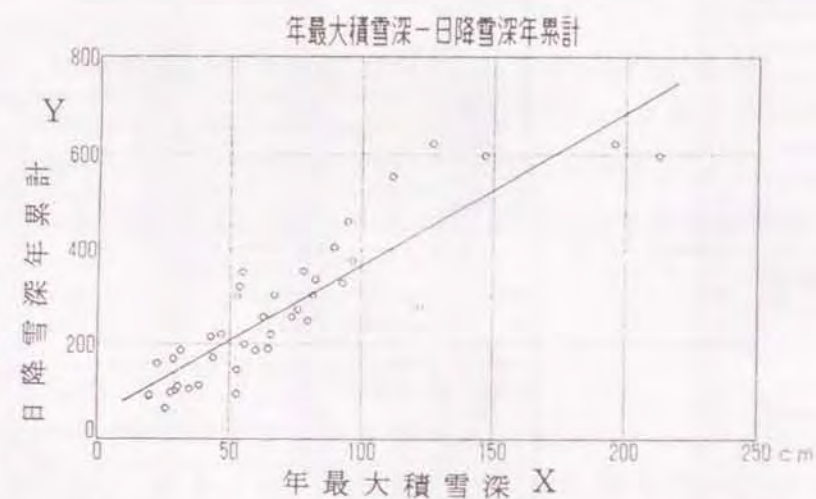


図6 年最大積雪深と日降雪深年累計の相関(福井)

回 帰 式 $Y = 3.18X + 48.9$

相 関 係 数 $R = 0.885$

図4-11 年最大積雪深と日降雪深年累計の相関

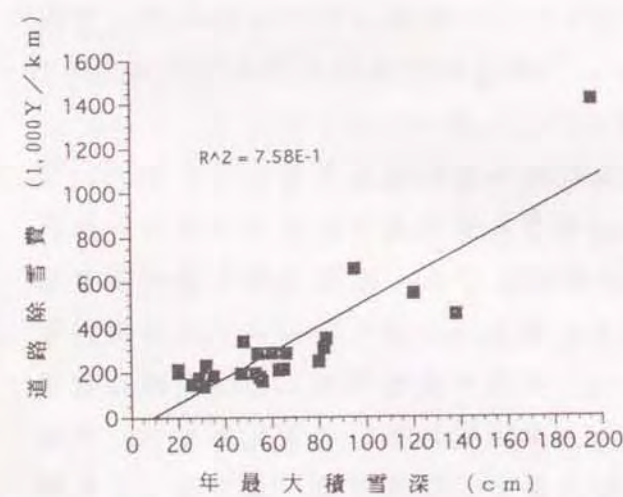


図4-12-1 年最大積雪深との関係

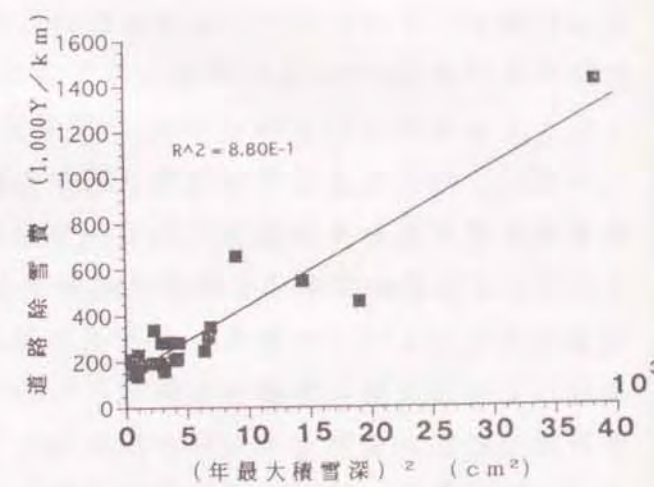


図4-12-2 (年最大積雪深)² との関係

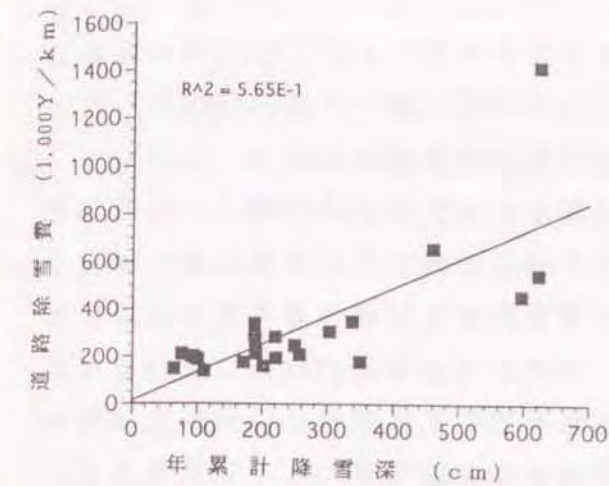


図4-12-3 年累計降雪深との関係

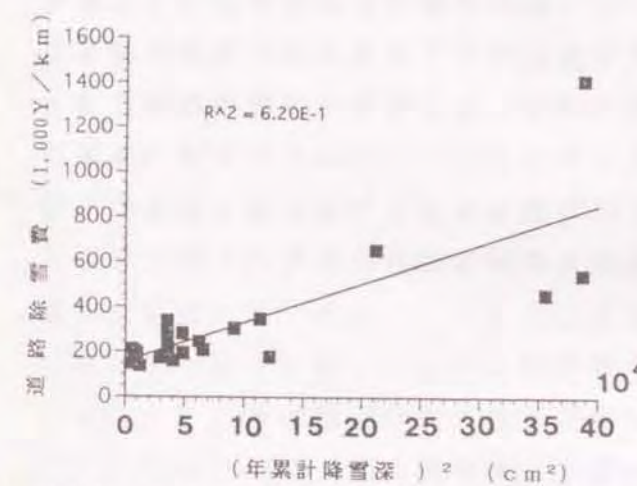


図4-12-4 (年累計降雪深)² との関係

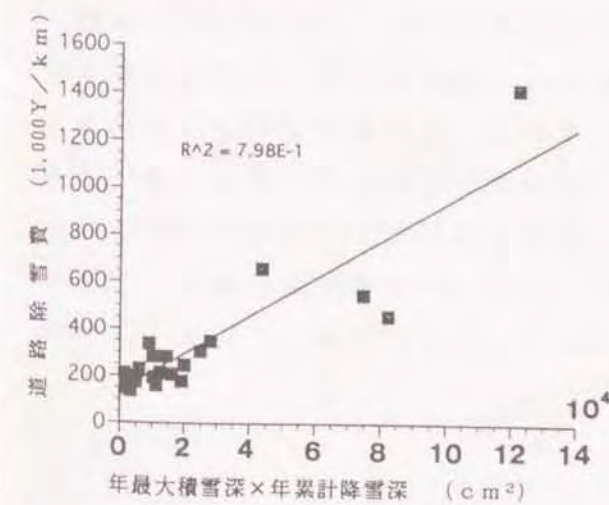


図4-12-5 年最大積雪深×年累計降雪深との関係

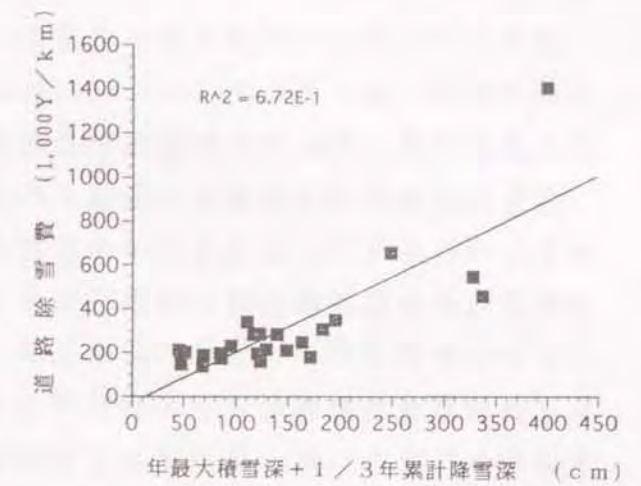


図4-12-6 {年最大積雪深+ (1/3)年累計降雪深} との関係

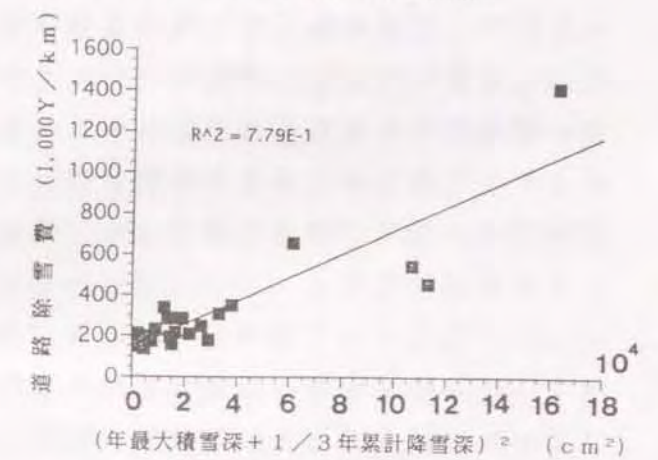


図4-12-7 {年最大積雪深+ (1/3)年累計降雪深}² との関係

4.5 まとめ

福井地方における雪害発生の特徴を、1996年冬期および、福井県の道路除雪費の経緯により明らかにした。これにより、本研究において雪の属性のうちの雪の量的特性（嵩ばり）に注目することの正当性が確認された。

雪の社会経済的な影響は、喧伝されているにもかかわらず、記録として計測されるものは少ない。1996年1月末から2月初頭の降雪により福井県と滋賀県の県境において幹線交通の途絶が発生した。雪害発生の記録の確認を目的に、このときの幹線自動車交通量の記録を調べた。交通途絶は物資の輸送に遅れを与えたことは疑う余地はないが、福井市および敦賀市での生鮮食料品の価格には変動が認められなかった。そのほか交通途絶が雪による2次災害として社会的にどれだけ影響を及ぼしているかは今後の課題である。

道路除雪は毎年基準に従って実施され、常に最大の努力を払う体制がとられているので、雪害状況有力な説明変数になりうる。1973年以来の福井県関係の道路除雪費について、建設デフレーター等で調整した除雪費は、雪の量の2乗とよい相関関係にあることがわかった。また、雪の量については日降雪深の年累計値よりも年最大積雪深との相関が高いことがわかった。このことは、道路の除雪作業では、初期の除雪だけでなく、拡幅等の2次除雪に大きな労力を要していることの説明になる。

これらのことから次のことが結論づけられる。

- (1) 道路除雪作業の作業性にはその時の積雪深が大きく関係する。
- (2) 雪害状況の発生の程度は、積雪深に大きく関係する。

第5章 雪の量的広がりと言害発生の評価方法

5.1 はじめに

本章では、雪の量的特性を起因とする雪害発生の説明モデルを提示する。モデルにおいて定義される説明変数の数は少なく、また数量で表せるものが望ましい。そこで、道路除雪により確保される確保される幅を有効幅員とし、また、運搬排雪作業の対象となる雪の量を排雪需要量とし、この2つを都市雪害発生の説明変数と定める。理由は以下にある。

第1章の序論で述べたように、直接的間接的を含めたさまざまな雪害現象を発生にさかのぼると、交通機能の障害に起因するという構図で考えることができる。いうまでもなく交通機能のうち道路は主要な位置にある。道路に関しては、都市を対象にしたとき、まず通行可能かどうか問われる。つぎに有効幅員幅と交通区分との関係、すなわち、1車線通行、2車線通行があるいはそれ以上であるかにより道路の機能は大きく違ってくる。それゆえ、上記を雪害発生の説明変数としてあげることが正当といえる。また、路側の有効幅員は自動車の走行速度に影響し、交通容量に関係するとされるが、本研究ではそこまでは考えない。

本章では、まず、道路除雪による雪の積み上げモデルを提示し、除雪時の有効幅員を定義する。ただし、ここでは車道の除雪を主に考え、歩行者に関することは第8章で扱う。次に、排雪需要量を定義し、その算出方法を示す。積み上げモデルにより、雪の量的特性を視点とした都市の雪害現象を容易に解釈できる。また、このモデルは、雪の量と道路の幅員の関係から積雪時には都市構造が変わるという概念を導くことができ、これは雪と都市計画の多くの議論につながるものである。

積み上げモデルは、最初杉森(1973)が提示し、これまでに、福井市における雪に強いまちづくり計画等において使われてきた。しかし、積み上げモデルにより算出される排雪需要量は、このままでは、積雪状況の一時的な説明に過ぎない。次章で扱う除雪および排雪の面的取り扱い技術の構築があれば、都市内の面的な広がりにおける時系列的議論を進めることができる。また、近年重要性が高まってきた歩行者対策についても、歩道上の雪状況の説明とそれの対策についての議論を進めることができる。これについては第8章で扱う。

5. 2 除雪による道路の有効幅員および排雪需要量

5. 2. 1 路側への雪の積み上げモデル

道路除雪は雪を空間的に移動させて道路に積み上げる作業であるので、その内容を図5-1で表すことができる。除雪の目的は図に示す除雪幅Jを確保することであり、これを有効幅員に等しいものとおく。

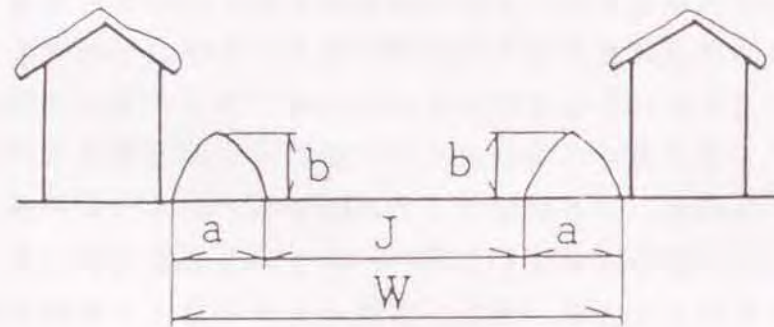


図5-1 除雪による路側への雪の積み上げ

各記号は次のように定義される。

W : 道路幅員 (積雪時に想定し得る総幅員とし、車道、路側、歩道のほか蓋掛けの側溝があればそれも含む。) (m)

J : 除雪確保幅もしくは有効幅員 (m)

He : 有効積雪深とし、新雪に換算した深さであらわす。屋根雪等が加わるか、逆に用水などで処理される分については換算して増減を加える。

(m)

S : 雪堤の断面積 (m²)

a : 雪堤の底辺幅 (m)

b : 雪堤の高さ (m)

α : 雪堤の形状係数

B : 積み上げの限界の高さ (m) (bの最大値)

k : 雪堤の雪の密度と新雪の密度の比

σ : 処理率とし、積雪全体のうち、どれだけ処理の対象とするかを示す。

r : 堆雪率とし、通路や家の玄関先を除いて道路の延長あたりどれだけの範囲に雪を積み上げることができるかを示す。

積雪深は気象観測所等から示される呼びの値で表す方がなじみやすいが、降雪の断続の状況によって積雪の平均の密度は変わってくるので、新雪に換算した有効積雪深Heで表す。必要に応じて呼びの積雪深で表すことがある。駐車場等道路敷以外から雪が持ち込まれた場合はやはり新雪に換算してHeに加算する。歩道は道路幅員の一部分とみなし、ここでは特別な扱いはしない。すぐわかるように、雪の量に関して次の式が成り立つ。

$$\sigma W H e = 2 r k S \quad (5-1)$$

雪堤の形状について、杉森 (1973) は半円として近似したが、これを少し修正し、

$$S = (1/2) a \cdot a \cdot b \quad (5-2)$$

とおく。これは雪堤断面を基本的に三角形とみなしているわけである。図5-2で、雪堤の開き幅をX、立ち上がり高さをYとおくと、およそX : Y = 1 : 1であり、このことは、これまで多くの事例で確認されている。

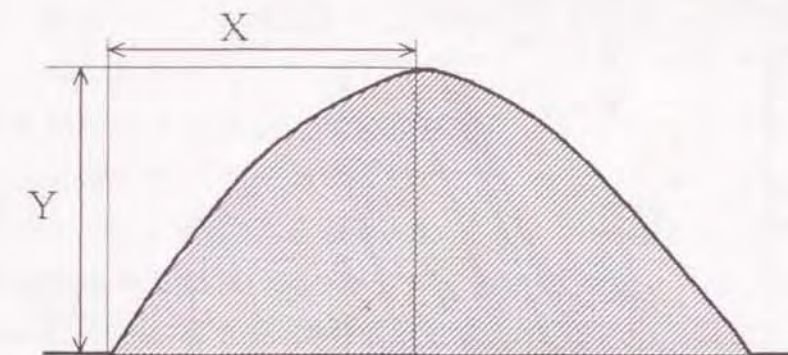


図5-2 雪堤の形状

X : 開き幅、Y : 立ち上がり高さ

図5-1に対比させると、b = Y、a = X / 2 とおける。

5. 2. 2 道路除雪による排雪需要量

路側に雪を積み上げると、その場所は本来有する機能を失するが、ある程度まではやむを得ないとして許容されるであろう。しかし、許容の限界を越えたときは積み上げた雪をさらに別の場所に移動させなければならない。このときの限界を越える量を排雪需要量と定義する。

(1) 道路における排雪需要量

雪堤の積み上げ量の限界は高さの限界Bで表すことにし、これを超えた分量が排雪需要量となる。積み上げの限界量は $(1/2) \alpha \cdot a \cdot B$ であり、また、 $a = (W - J) / 2$ であるので、排雪が開始される積雪深を H_s は、

$$H_s = \frac{r \cdot \alpha \cdot k (W - J) \cdot B}{2 \cdot \sigma \cdot W} \quad (5-3)$$

となる。

次に、道路の単位延長あたりの排雪需要量を V (m^3) とおくと、

$$V = \sigma \frac{H_e \cdot W}{k} - \frac{r \cdot \alpha \cdot (W - J) \cdot B}{2} \quad (5-4)$$

となる。ここで、 V は積み上げた雪（雪堤）の密度で表す量である。各係数値を適当に定め、上の式を図示すると図5-3に示すものとなる。

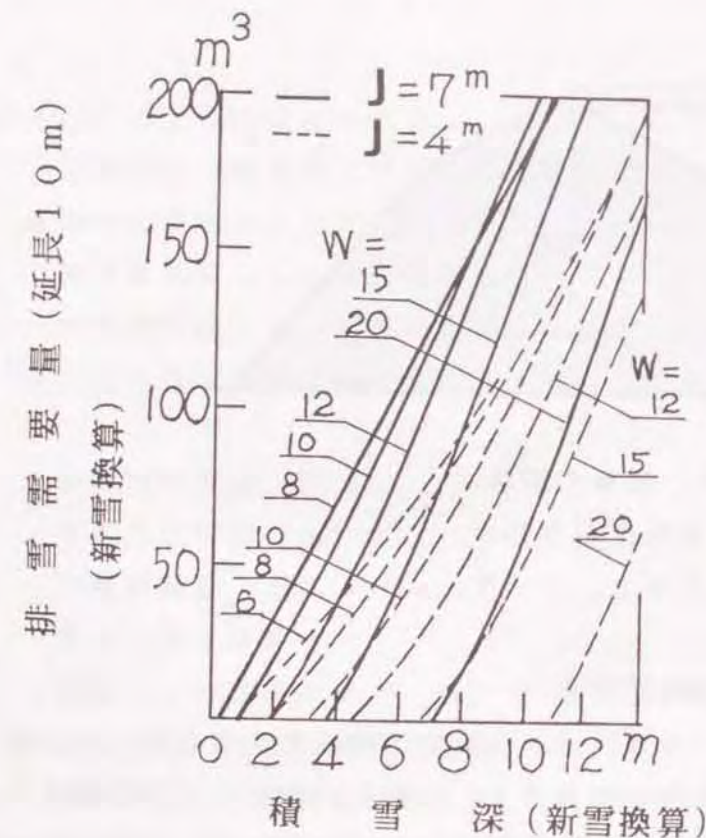


図5-3 排雪需要量

σ	0.8
r	0.8
k	4
α	1.5
B	1.5m

幅員Wの道路において、除雪目標幅Jを確保するときの排雪需要量を示している。

5.3 宅地域からの排雪需要量

道路以外の領域、すなわち、個人の住宅の屋根、玄関先、通路、駐車場等からの排雪需要量について考える。これらの領域をまとめて宅地域と呼ぶことにする。宅地域からの排雪について、図5-4に示すような屋根と空き地の関係におきかえる。

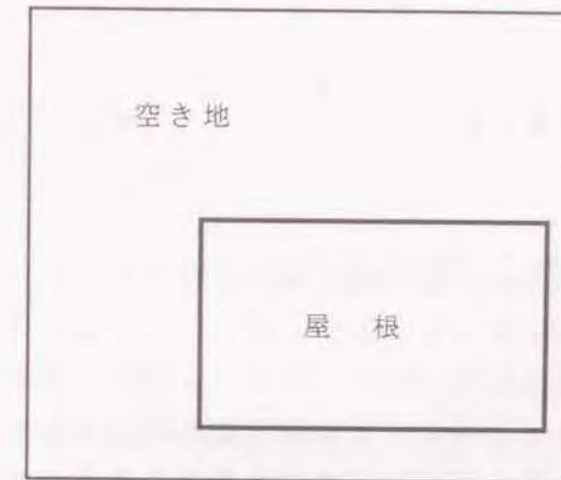


図5-4 宅地域からの排雪需要量発生モデル

屋根上の雪をおろすとき空き地に積み上げることになるが、空き地にも積み上げの限界があるはずで、その限界を超えたものは何らかの方法で他の場所に排出しなければならない。排出を必要とする量を、宅地域からの排雪需要量とする。

雪下必要とする屋根面積 S に対して、雪を積み上げることができる有効な空き地の面積の比をとり、空き地比率 η と定めておく。すなわち、

$$\eta = \frac{\text{空き地の有効面積}}{\text{雪下ろしを必要とする屋根面積}} \quad (5-5)$$

である。

屋根雪下ろしが始まる積雪深 H_F は、人により任意に決めることができるが、一般におよそ定まったものであろう。これも新雪に換算した有効積雪深で表す。また、空き地における積み上げの限界は高さで表すことにし、これを H_c とおく。 H_c も有効積雪深で表す。

ここで、雪下ろしの作業を行うときに、 H_F を超えた分は、それとも、屋根上

にある全ての積雪を処理するかが問われるが、一般の雪下ろし作業の状況では後者になっている。多少は屋根に残されるので p を処理率とする。そうすると排雪需要量は次のように算出される。

面積 s の屋根から空き地に雪を移動させると、空き地の見かけの有効積雪深 h は

$$h = H \left(1 + \frac{p s}{\eta s} \right) = H \left(1 + \frac{p}{\eta} \right) \quad (5-6)$$

であり、このときの排雪需要量 V は

$$V = \left\{ H \left(1 + \frac{p}{\eta} \right) - H_c \right\} \eta s \quad (5-7)$$

である。

ここで図 5-4 について考えてみる。1 戸の住宅についてみでみると、図に示されている関係は住宅 1 戸の単位でなく、雪を処理する領域の単位で考えるべきである。たとえば、家の前面と後面の屋根の雪を相互に移動できない場合は、それぞれの屋根について考える。駐車場については、十分に広くてその駐車場で雪を処理できるとすれば、考察の対象外でよい。しかし、駐車場の面積が狭く、雪を外部へ移動させる場合には図 5-4 の関係で考えるものとする。住宅の通路等についても同様である。

次に、都市内のある地区の範囲でみたとき、個々の屋根面積 s および空き地比 η はいろいろな値をとるであろう。それで、 s である面積の分布関数を $f(s)$ 、空き地比が η であるケースの分布関数を $\phi(\eta)$ とおくと、区域からの排雪需要量の総量 V は

$$V = \int \int \left\{ \left(1 + \frac{p}{\eta} \right) H - H_c \right\} \eta s \cdot f(s) \cdot \phi(\eta) ds d\eta \quad (5-8)$$

であらわせる。

ここで、 p は個々の屋根のユニットごとに違うはずである。しかしこれを深く追求してもあまり意味はないので平均としてある値を取るものとしておく。そうすれば、 $\eta' = \eta / p$ とおき、上の式の η を η' におきなおせばよい。そこで、

η の $'$ を省いて書き直すと、

$$V = \int \int \left\{ \left(1 + \frac{1}{\eta} \right) H - H_c \right\} \eta s \cdot f(s) \cdot \phi(\eta) ds d\eta \quad (5-9)$$

となる。

上の積分は $\{ \}$ 内の正のみにおいて行うので、 η の上限として、

$$\eta_c = H / (H_c - H)$$

とおく。

$f(s)$ と $\phi(\eta)$ の関係については十分な知見は持っていない。しかし、現実の都市の状況を見ると互いに独立であるとみなせそうである。

先に示した処理率 p の関わりについては、空き地率 η が η' に変わるということであり、地区全体としてみれば関数 ϕ の形が変わったと言い換えることができる。そこで、排雪需要量 V の算出において、(5-8) 式でなく (5-9) 式から出発すればよいわけである。

$\phi(\eta)$ については、

$$\int \phi(\eta) d\eta = 1 \quad (5-10)$$

が成立し、さらに、

$$\int f(s) ds = N \quad (\text{家屋または屋根の総数}) \quad (5-11)$$

$$\int s \cdot f(s) ds = N \bar{S} \quad (5-12)$$

であることは明らかである。 \bar{S} は屋根面積の平均である。したがって、

$$V = N \bar{S} [H \int \phi(\eta) d\eta + (H - H_c) \int \eta \phi(\eta) d\eta]$$

となる。

$\phi(\eta)$ は正規分布に従うと仮定すれば、

$$V = NS \left[\{H + (H - H_c) m\} \Phi(-u_c) - (H - H_c) \times \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp(-u_c^2) \right] \quad (5-13)$$

となる。ただし、 $\Phi(-u_c)$ は error function であり、さらに、

$$\int f(s) ds = N \quad (\text{家屋または屋根の総数}) \quad (5-14)$$

$$\int s \cdot f(s) ds = N \bar{S} \quad (5-15)$$

であることは明らかである。 u_c は、

$$u_c = \frac{H - m(H - H_c)}{\sigma(H - H_c)} \quad (5-16)$$

である。

記号の意味はこれまでに示したほか次の通りである。

- m : 空き地比の平均値
- σ^2 : 空き地比分布の分散

少ないデータをもとに m と σ を仮定して排雪需要量を求めると、図 5-5 に示すものとなる。積雪深の少ないうちは排雪需要量は問題にならないであろうが、積雪深の増大に対して指数関数的に増大し、地域全体になると膨大な量になることが予想される。

古い町並みであれば家の裏に空き地や用水があり、このような所へこれまでは雪を処理してきた。雪処理の面から見ると懐が深かったわけである。しかし、近年になって造成された土地では遊び地に乏しく、また、またほとんど類似の規模と形状の造成であるので、積雪深があまり多くないうちから排雪需要量が発生し、なおかつ地区内のいたる所において一斉に発生することになる。

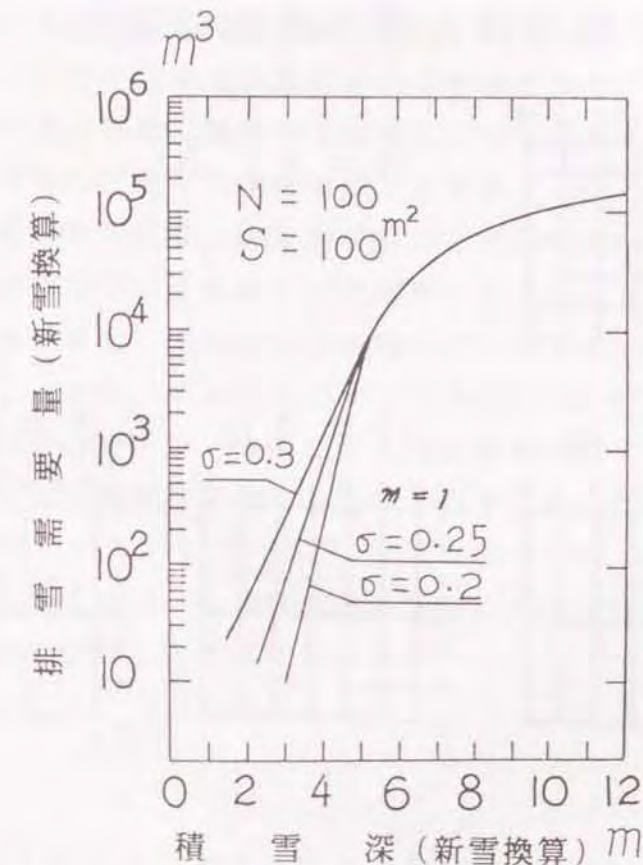


図 5-5 宅地域からの排雪需要量

5. 4 積雪状況と都市構造の変化

道路の積み上げモデルにより積雪深と除雪により確保できる道路幅員との関係がわかった。積雪時の限られた期間であるにせよ、都市の主要な構成要素である道路の有効幅員が狭くなるということは、積雪によって都市構造が変化するという概念を導くことができる。除雪によって確保できる有効幅員を We とし、自動車通行の可否から

	$We < 3.5 \text{ m}$	通行不能
$3.5 \text{ m} \leq We < 5.5 \text{ m}$		1車線通行可
$5.5 \text{ m} \leq We$		2車線通行可

とし、都市のもとの道路網に対して、積雪深との関係で機能が確保できる道路網の関係を模式的にあらわすと図 5-6 に示すものとなる。

積雪深と都市構造の変化

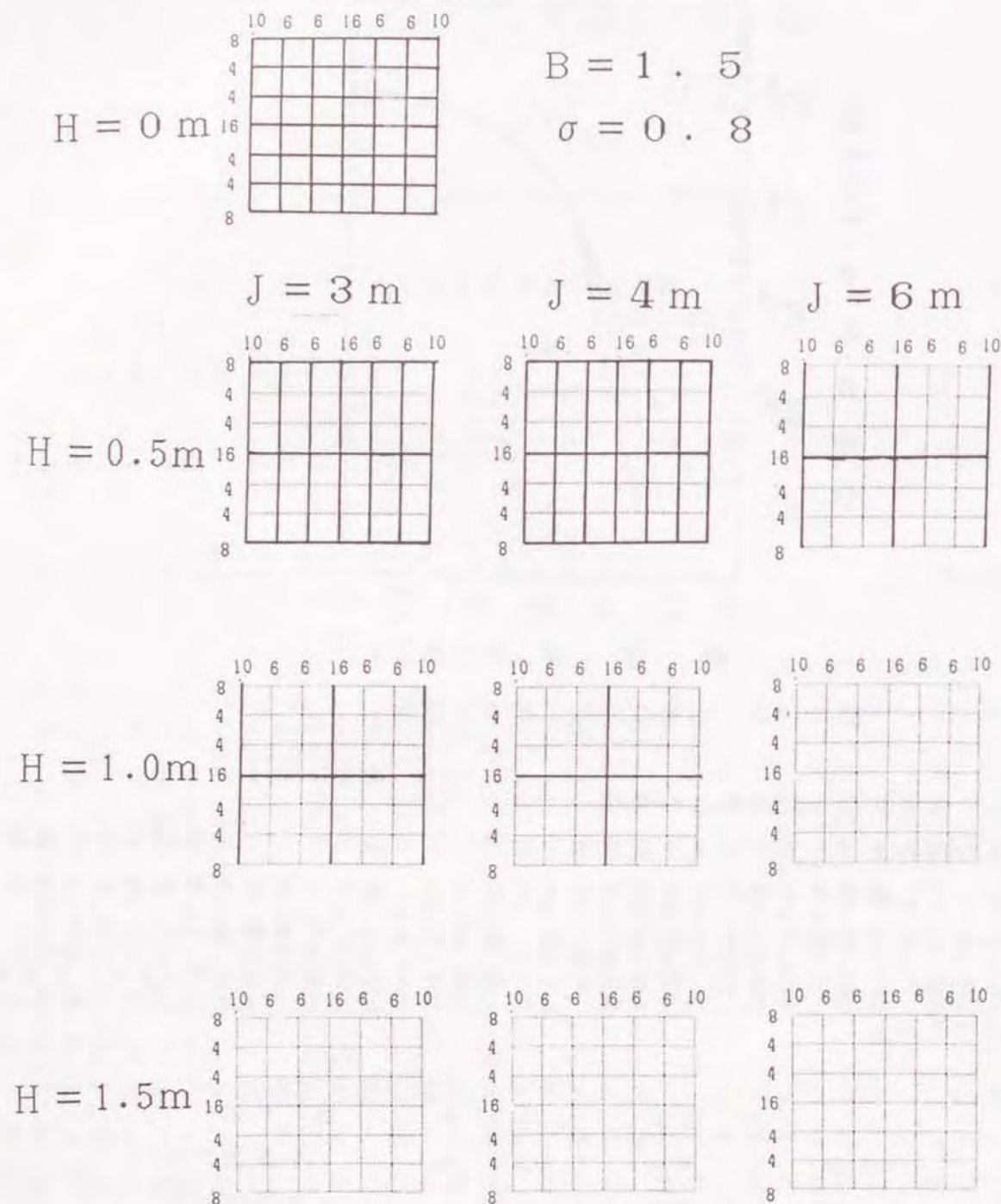


図 5-6 積雪深と都市構造の変化

H : 積雪深 (呼びの深さ) (m)、 B : 雪堤の積み上げ限界深 (m)、 σ : 処理率である。図中の格子にある数字は道路幅員 (m) を表す。
各図で実線が通行可能、破線は通行不可を示す。

5.5 まとめ

本研究では、さまざまな雪害現象の発生の起因をさぐると、雪が道路および都市空間を占有し、それら本来の機能を低下させることにあるという構図をとっている。雪の量的特性に関する雪害発生のモデルを提示した。モデルは道路除雪における路側への積み上げを表現するもので、説明変数として、道路の有効幅員と排雪需要量をあげる。排雪需要量は、次章以降の面的取り扱いにおける目的量として重要であり、道路および宅地域からの発生量の算出方法を示した。この積み上げモデルは、道路除雪の説明だけにとどまらず、都市の多くの雪害状況をよく説明し、また、雪と都市に関する実地計画の技術的根拠とすることができる。積雪状況との関係で、確保できる有効幅員が決まるというこのモデルは、積雪時において都市構造が変化するという概念を提示し、雪と都市計画の議論に結びつく。

ここで示したモデルは、第6章の道路の除排雪の面的な取り扱いおよび第8章の歩道の雪状況の解析に関係づけられる。

第6章 都市の排雪システムのネットワーク解析

6.1 はじめに

前章において排雪需要量の定義と算出方法が示された。これを実際の現場での作業に結びつけるためには排雪需要量に応じた機械力需要量の算出が必要である。つぎに、排雪需要量および機械力需要量は都市内の各地点で発生し、すべて排雪場に向かうので、これに関する取扱いが求められる。運搬経路で発生する条件や排雪場に至る経路でのダンプトラックの集中と交通渋滞は、都市の面的な広がり起因する。したがって、本章の目的は、都市内での除排雪作業に関する解析方法と実務上の技術的確立をはかることにある。それにより、以下の具体的な施策または検討に合理的根拠を与えることができる。

- ・大雪または豪雪を想定した機械の調達、進捗状況の予測等の作業計画の策定

- ・大雪または豪雪を想定した都市の空間的整備計画の策定さらに、大雪または豪雪を想定した排雪作業のシミュレーションができ、今日の行政需要において、実際の対策以上に求められている適切な予測情報の整備が可能になる。また近時、積雪と地震との複合災害等の研究の必要性が高まっていることに対しても議論に必要な情報を用意することができる。

5.6 豪雪時において福井市内では大量の排雪作業が行われ、福井城址濠と足羽川河川敷に大量の雪が積み上げられた経緯がある。もとより融雪を広範囲に実施できれば都市内のおよその問題は解決できるのであるが、融雪は、熱資源の確保可能量およびコストの理由で制限され、機械的除排雪は今後とも雪対策の有力な手法であることにかわりない。先の豪雪直後の時点では、そのときの経緯を踏まえた指摘があったにもかかわらず、その後の排雪場の確保とアクセスは改善されたとはいえない。この理由は、近年暖冬が続いていることも理由になるだろうが、排雪作業について解析検討と計画策定の合理的根拠が用意されていないことが有力な理由であろう。

積雪時における作業状況の解析が遅れているひとつの事例をあげる。排雪作業の実際の現場において、その経費は、作業に要した時間の実績によって支払われているのが一般的であり、このことは、排雪作業に関して計画と予測の方法が存在しないことを意味していることになる。

6.2 機械力需要量

排雪作業において対象となる雪の量の算出がまず必要であり、これは第5章の5.2節で述べてある。ここでは、除排雪作業において使われる機械力について考える。機械力需要量は、雪の単位量进行处理するために必要な時間当たりの機械の台数で表し、土木工事において使われている積算基準に準じて算出する。排雪作業の工程に応じて使用される機械は次のものが一般的である。

- ・積み込み：トラクターショベル

ロータリー除雪車は除雪と同時に積み込みができるが、これの保有台数は限られ、また、ほとんど郊外の道路において使われるのでここでははずす。

- ・運搬：ダンプトラック

- ・敷き均し：ブルドーザー

敷き均し作業は排雪場所に持込まれた後の処理に行われる工程である。全工程のうち、積み込みと敷き均し作業についてはさほど議論の必要はないが、運搬については排雪場所までの経路の道路状況によって大きく違ってくる。土木工事積算の運搬作業の基準では、無雪時の場合であって、積雪時の扱いは何ら考慮されていない。

さて、機械力需要量は都市内の各地点毎で排雪需要量にあわせて発生する。ある作業工程についての機械力需要量は次で定義する。

$$\text{機械力需要量} = \text{排雪需要量} / Q \quad (6-1)$$

ここでQは機械1台あたり時間あたり作業量である。次に、Qは

$$Q = K \cdot 60 / C_m \quad (6-2)$$

で表される。Kは係数であり、1台あたりの積載量、作業効率等が含まれる。

C_mはサイクルタイムといい、機械の1作業行程のサイクル、すなわち運搬作業では排雪場所までの往復に要する時間であり、通常は分で表わす。ダンプトラックによる運搬のC_mについて、土砂運搬の基準では

$$C_m = \beta L + \alpha \quad (6-3)$$

で与えられ、Lは運搬距離(km)、αは積み込み等に要する時間、βは運行についての係数である。トラクターショベルによる積み込みの場合、αの値は18(分)、βの値は、DID(人口稠密)地区の場合において、5.6(分/km)

となっている。先述のようにこれらの値は無雪時の場合であって、積雪時においての基準は示されていない。積雪時において、道路の完全な無雪化は期待できず、特に β については当然違ったものとなるはずである。そこで、積雪時の β について、無雪時の値を β_0 とし、これに倍率を掛けて表わし、

$$\beta = u \cdot \beta_0 \quad (6-4)$$

と仮定する。つぎに、積雪状況に応じた u の値を知る必要があるが、ともあれ積雪の深さに応じてある値をとるものとしておく。さらに、積雪状況は場所によって異なるものであり、従って、 C_m は経路の状況を含めた形で、

$$C_m = (u_1 \cdot L_1 + u_2 \cdot L_2 + \dots + u_n \cdot L_n) \cdot \beta_0 + \alpha \quad (6-5)$$

と表すことにする。これにより、運搬作業の機械力需要量は、積雪の状況によって変わることを記述することができた。

積み込みおよび敷きならし作業の機械のサイクルタイムは、地点によって変わらず一定とみなしてよい。

次に、機械の調達についてみる。まず次の量を決めておく。ある地点でのある作業に要する機械の調達量を M 台とすると、時間あたりの作業量の総量 Q_+ は、

$$Q_+ = M Q \quad (6-6)$$

である。 M の値は、作業命令者の意志によって任意に決めることができるが、積み込み、運搬および敷きならしそれぞれの作業は一連に行われるので、それぞれの工程についての(6-6)式の Q_+ は相互の関連での制限を受ける。さらに運搬作業については運搬経路での通行容量の制限を受ける。相互の制限については、最も低い Q_+ に従うことになり、他の工程については、機械力の調達が過剰になり遊びの時間が発生する。そこで最もウエイトの高い運搬作業についてみる。1地点または1区画(あとでリンクという)あたり M 台のダンプトラックを調達したとすると、その地点から発生する時間あたりの通行台数 U は

$$U = 6.0 M / C_m \quad (6-7)$$

となる。各地点から発生する通行台数はすべて排雪場所に向かうわけであり、排雪場所に近づくにつれて集中し、道路の通行容量を越えると渋滞が発生し、作業の進行に影響する。そこで、地域全体としての取扱いが必要になり、次節以降で明らかにする。なお、ある地点での作業に要する時間 T^* は、その区画の作業量を V とすると、

$$T^* = V / (M \cdot Q) \quad (6-8)$$

となる。

6. 3 ネットワークの構成

6. 3. 1 ネットワークの構成

面的な取り扱いをするためのネットワークを構築する。排雪作業は排雪場に雪を集める行為であるので、排雪システムは、図6-1に示すような排雪場を樹根とする樹木構造とみなすことができる。つぎに、面的な解析を具体的に行うためのネットワークを構築する。図6-2は街路網に似せて作成した構成図である。○印は交差点または区切りの地点を意味し、ノードと呼ぶ。ノードとノードの間の線分をリンクと呼び、リンクに現実の道路の特質を持たせる。リンクにおいて排雪需要量および機械力需要量が発生する。 T_1 、 T_2 、 T_3 は排雪場である。排雪需要量は最終的には排雪場に搬出されることを想定しているので、各リンクはそれぞれ矢印で示すルートをとってどれかの排雪場に結びつくわけである。リンクには雪が運搬される方向に矢印を示してある。一つのノードについてみると、入口は複数でもよいが、出口は一つとする。一つの地点から複数の出口は認めない。

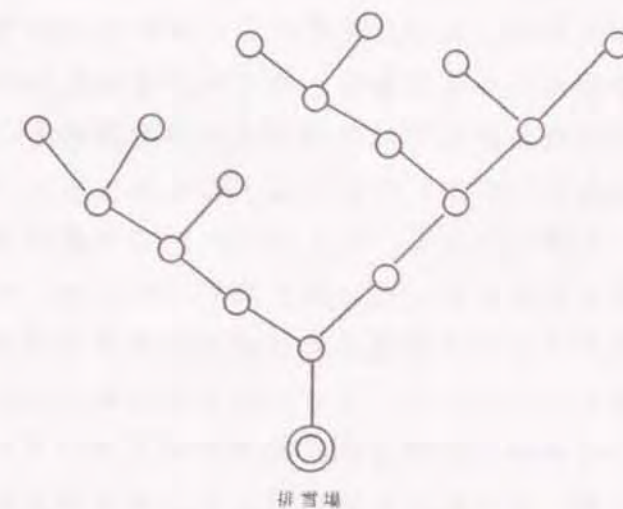


図6-1 排雪システムの樹木構造

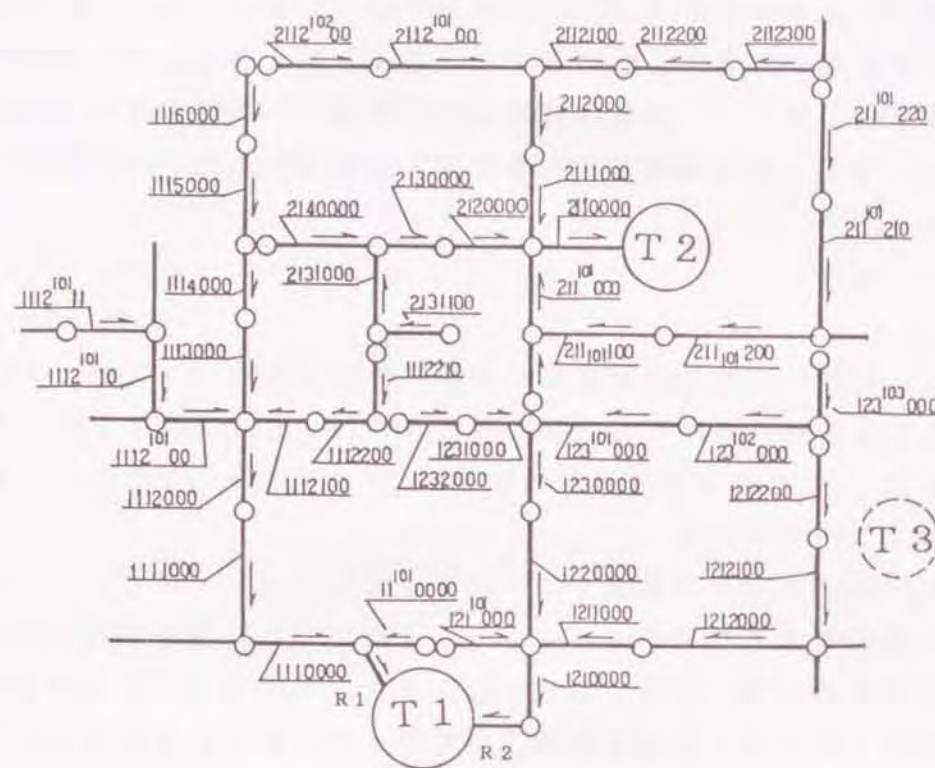


図 6-2 排雪システムのネットワークの構成

6. 3. 2 コードづけ

ネットワークの構成を具体的に示すためのコード（計算コード）づけを行なう。コードの階数は地域の規模にあわせて任意にとってよい。福井市中心部について行った例では7桁とし（T、R、A、B、C、D、E）であらわす。上位から1位のTは排雪場、2位のRは排雪場にアクセスするルート、AからEの3位～7位は道路についてのランクである。図の中にコードの符番の例を示しておく。

コード付けは次のように行なう。まず、Tについては排雪場の番号を与える。Rについては排雪場への入り口の番号をつける。道路については、まず幹と枝を定め、幹の部分には、根元から梢に向かってAの数値を1、2、3……と増していく。幹から分れた最初（2次）の枝には、Aを幹に等しい値のままとし、Bの値を1、2、3……と増していく。さらにこれから分れた3次の枝には、A、Bを2次までの枝の値のままとし、Cの数値を同じように増していく。以下D、Eについても同様に扱う。交差点の両側のように、一つのリンクから枝が2本以上あるときは、3桁の数字で区分する。リンクの中間部からの枝分れは認めず、両端のノードのうちどちらかからの枝分れとみなす。コードの付番と道路のランクは次のように表現する。Aの値が0以外であり、BからEまでのすべてが0のとき、ランクAとする。以下B、C……についても同様とする。

ネットワークにおける道路のランク付けは排雪場との位置関係を示すものであり、排雪場への取り付け道路が必然的に道路の最上位のランクとなり、必ずしも現実の道路状況に合致するものでない。しかし、一応A、B、およびCのランクが幹線またはそれに準ずる道路、DおよびEのランクが生活周辺道路になる。

排雪場またはルートが変わった場合への対応はそれに応じてコードを変更する。コードの変更にあたっては誤りをなくすほかに、簡便さが要求される。このため、ファイルの作成およびその後の管理が容易に行えるように工夫する。あるリンクがそれより上のランクのリンク（親のリンク）に接続する位置がわかれば、そのリンクのランクまでのコードは自動的に付番されるようにする。このようにすれば、排雪場所を変えた比較計算を容易に行うことができる。

6. 3. 3 データファイルの作成

ネットワークの構成に基づきデータファイルを作成する。1リンクを単位に1レコードとし、地域全体を一群としたファイルとする。格納する項目は次のようなものである。

・計算コード

解析計算を行うためのコードであり、上に示したものである。レコードのアドレスとして使うこともある。排雪場所または経路を変えるときは計算コードを変更する。

・リンクを特定する名称

現実の路線および位置と対比させるためのものであり、解析計算には必要ない。

・リンクを特定する番号

リンクに固有の番号を与える。排雪場所または経路が変わっても不変である。

・リンクの接続先番号および階級（ランク）サイン

接続する上位のリンク（排雪場に近い方）の番号（接続リンク番号）と階級（ランク）が変わるかどうかを示すサインを用意する。現地の状況と照合しながら決めるわけであり、これにより、自動的に計算コードを決めることができる。

・道路要件

道路幅員、区間延長を記す。

・沿道条件

消融雪施設の有無、屋根雪の持ち込みの有無等の情報を格納する。

・目的要件

システム解析において、現実の除排雪作業の目的に対比させて定める要件であり、これを除雪確保幅とおく。

・積雪要件

降雪深もしくは積雪深を格納する。

その他の係数およびパラメーター類

現地状況の説明および除排雪作業に関する係数類を必要に応じて格納する。また、ファイルの維持管理、計算および集計等のためのコード、サイン類を必要に応じて格納する。

計算コードの付与と変更はできるだけ簡便に行えるようにしなければならない。そのため、リンク固有の番号とリンクの接続先番号を使って、できるだけ自動的に付番できるようにする。

ここで示したデータファイルを作成しておけば、排雪需要量、機械力需要量について、路線別、地区別の集計などを求めることができ、作業のための有用な情報をある程度得ることができる。しかし、これだけでは状況の説明だけであって、作業の時系列的な把握はできない。そこで次に述べる解析が必要になる。

6. 4 面的計算方法

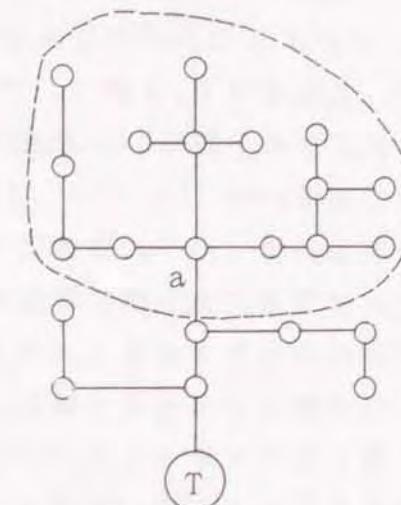
計算の対象となる量は次の3通りに区分される。

- ①他のリンクの影響を受けず、あるリンク単独で計算できる量。排雪需要量、積み込みおよび敷き均し工程の機械力需要量のようなものである。
- ②排雪場に向かう経路において発生する集中状況に関する量。排雪需要量の集計、機械力需要量の集計、経路における運搬車両（ダンプトラック）の集中状況のようなものである。
- ③経路の要素に関する量。各リンクの排雪場からの距離、運搬機械（ダンプトラック）のサイクルタイムおよび運搬需要量、各リンクにおける作業開始時刻および終了時刻のようなものである。

①はここでの面的計算には含まれないものであり、それぞれのリンク単独で計算できるものである。

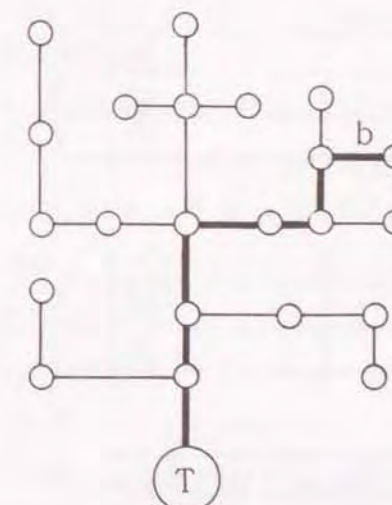
②は集計に関する計算であり、Pタイプの計算と呼ぶ。

③は経路の条件を加算する計算であり、Lタイプの計算と呼ぶ。



Pタイプの計算
任意のリンクaについてそれ以下につながるすべてのリンク（自身を含む）の要素の和を求める。これをすべてのリンクについて行う。

図 6 - 3 Pタイプの計算



Lタイプの計算
任意のリンクbについて排雪場からそこまでの間（自身を含む）の要素の和を求める。これをすべてのリンクについて行う。

図 6 - 4 Lタイプの計算

(1) Pタイプの計算

(6-5) に計算の概要を示す。点線でかこまれたうちのリンク i において、ある要素の発生量を P_i とすると、リンク a においては点線で囲まれた全リンクからの発生量が集中するわけであり、これを PP_a とおく。ただし PP_a には、それ自身のリンクの発生量も含む。Pタイプの計算は、この集中量 PP_a をすべてのリンクについて求めようとするものである。

計算にあたって一群のレコードを計算コードの降順にソートし、アクセスはシーケンシャルに行う。レコードは排雪場に遠い順に並ぶのでその順に従って対象とする要素の累計をとる。枝分かれの合流点のところへきたらいったん累計を仮置きし、別の枝の計算を行う。別の枝の計算を行う時は、前に集計してあったものはクリアする。このような計算を続けてすべてのリンクについて集中量を求めながら最終的には排雪場に到達するわけである。計算式は以下示すものとなる。ここで、計算のためあらかじめ次の準備をしておく。

データファイルに格納してあるデータの構成は図 6-5 のようになっている。i 番目のレコードの計算コードについて、T の枠の値を T_i 、R 以下の枠についても同様に、 R_i 、 A_i 、 B_i 、……とする。i-1 番目のレコードについても同様に T_{i-1} 、 R_{i-1} 、 A_{i-1} 、 B_{i-1} ……とおく。

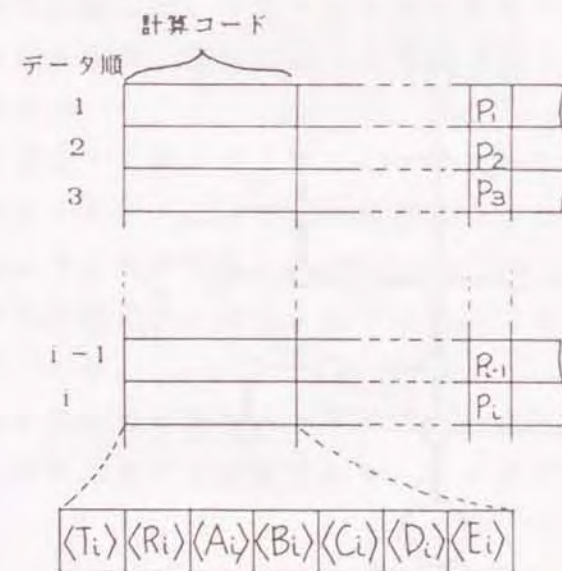


図 6-5 データの構成

次に、関数 δ 、 γ 、 $\overline{\gamma}$ をもうけ、以下のように定義する。

δ について

$$\left. \begin{array}{l} T_i = T_{i-1} \text{ のとき、 } \delta(T_i) = 1 \\ T_i \neq T_{i-1} \text{ のとき、 } \delta(T_i) = 0 \end{array} \right\} \quad (6-9)$$

とし、R 以下についても同様におく。

$\overline{\gamma}$ について

$$\left. \begin{array}{l} T_i \neq 0 \text{ のとき、 } \gamma(T_i) = 1 \\ T_i = 0 \text{ のとき、 } \gamma(T_i) = 0 \end{array} \right\} \quad (6-10)$$

とし、R 以下についても同様におく。

$\overline{\gamma}$ について

$$\overline{\gamma}(T_i) = 1 - \gamma(T_i) \quad (6-11)$$

とし、R 以下についても同様におく。

次に、計算コードのランクに対応した集計ボックスを設けておき、降順にソートされた一群のレコードについて、i 番目までの集計を取り、ランク T のボックスにおける集計値を PT_i とし、ランク R 以下についても同様におく。また、i-1 番目までの集計も同様に PT_{i-1} 、……とおく。要素 P_i についての各ボックスへの集計は次のようになる。

$$\begin{aligned} PT_i &= \delta(T_i) \cdot PT_{i-1} + P_i \\ PR_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot PR_{i-1} + P_i \\ PA_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot PA_{i-1} + P_i \\ PB_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot PB_{i-1} + P_i \\ PC_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_i) \cdot PC_{i-1} + P_i \\ PD_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_i) \cdot \delta(C_i) \cdot PD_{i-1} + P_i \\ PE_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_i) \cdot \delta(C_i) \cdot \delta(D_i) \cdot PE_{i-1} + P_i \end{aligned} \quad (6-12)$$

いま求めようとする集計値 PP_i は、各ボックスの集計値をもとに次のように計算される。

$$\begin{aligned}
 PP_i = & \gamma(T_i) \cdot \overline{\gamma}(R_i) \cdot \overline{\gamma}(A_i) \cdot \overline{\gamma}(B_i) \cdot \overline{\gamma}(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot PT_i \\
 + & \gamma(R_i) \cdot \overline{\gamma}(A_i) \cdot \overline{\gamma}(B_i) \cdot \overline{\gamma}(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot PR_i \\
 + & \gamma(A_i) \cdot \overline{\gamma}(B_i) \cdot \overline{\gamma}(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot PA_i \\
 + & \gamma(B_i) \cdot \overline{\gamma}(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot PB_i \\
 + & \gamma(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot PC_i \\
 + & \gamma(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot PD_i \\
 + & \gamma(E_i) \cdot PE_i
 \end{aligned}
 \tag{6-13}$$

(6-12) 式の意味は、リンク i のランクに応じて、そのランクに等しいランクの集計ボックスの値を選択することを意味する。また、この式の 2 行と 3 行の違いを補足すると、ランク R のボックスは R の値が等しいものについてのみ集計するが、ランク A のボックスは、 A の値が違ってかまわないわけである。ランク B 以下についても同様である。(6-13) 式は、レコードが別の枝のものに移ったとき、加算に先立ち関係するレベルの集計ボックスをクリアするわけである。

リンクの枝分れが 3 つ以上あって、一つの枠のコードが 3 桁の場合は、3 桁目は 1 つ上のレベルで扱う。すなわち、いま B のランクが 3 桁あって、3 桁目の値を B_1 、それ以下の 2 桁の値が B_2 であるとする、 B_1 、 B_2 に対してそれぞれ関数 δ 、 γ および $\overline{\gamma}$ を定義する。(6-12) 式における集計ボックスは先に用意したものでよい。この式の 3 行目と 4 行目についてみると、3 行目はそのままよい。

次に、4 行目は下記のようになる。

$$PB_i = \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_1) \cdot PB_{i-1} + P_i$$

次に、(6-13) 式については、1 行目、2 行目については、 $\gamma(B_i)$ のかわりに、 $\gamma(B_1) \cdot \gamma(B_2)$ とおく。3 行目については、 $\gamma(B_i)$ のかわりに、 $\gamma(B_2)$ とおく。4 行目は $\gamma(B_i)$ のかわりに $\gamma(B_2)$ とおく。3 行目 4 行目についての処置の意味は、 B_1 の桁は、ランク A でかつ A の値が等しいリンクに対して、取付け口の違いを示すためである。以下 C 、 D 、 E の枠に対しても同様の扱いになる。

(2) L タイプの計算

図 6-4 に概要を示す。任意のリンク b における排雪場からの距離または時間は、経路にあたるリンクの値を加算したものとなる。運搬機械のサイクルタイムに関する (6-5) 式は倍率 u を経路について集計したものである。このように経路の要素の和をとる計算をすべてのリンクについて行なうことをここでは扱う。計算の方法は一群のレコードを今度は計算コードの昇順にソートし、シーケンシャルにアクセスする。レコードは排雪場に近い順に並ぶことになり、その順に従って要素の累計をとる。枝分かれがあれば、一つの枝について計算を完了し、別の枝についての計算を行なう。このようにして排雪場に接続するすべてのリンクについての計算を行なう。計算式は以下に示す。

関数 δ 、 γ および $\overline{\gamma}$ は P タイプの計算同様に定義する。 T 、 R については経路の要素は関係しない。そこで、昇順にソートされたレコードについて、 i 番目のレコードのときにおいて、 A から E までの各ランクについての累計ボックスを、 AL_i 、 BL_i 、…… EL_i とおく。要素 L_i に対する各ボックスの累計値は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 AL_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot AL_{i-1} \\
 &\quad + \gamma(A_i) \cdot \overline{\gamma}(B_i) \cdot \overline{\gamma}(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot L_i \\
 BL_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot BL_{i-1} \\
 &\quad + \gamma(B_i) \cdot \overline{\gamma}(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot L_i \\
 CL_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_i) \cdot CL_{i-1} \\
 &\quad + \gamma(C_i) \cdot \overline{\gamma}(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot L_i \\
 DL_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_i) \cdot \delta(C_i) \cdot DL_{i-1} \\
 &\quad + \gamma(D_i) \cdot \overline{\gamma}(E_i) \cdot L_i \\
 EL_i &= \delta(T_i) \cdot \delta(R_i) \cdot \delta(A_i) \cdot \delta(B_i) \cdot \delta(C_i) \cdot \delta(D_i) \\
 &\quad \cdot EL_{i-1} \\
 &\quad + \gamma(E_i) \cdot L_i
 \end{aligned}
 \tag{6-14}$$

全経路の集計値を L_i とすると、

$$L_i = A_i + B_i + C_i + D_i + E_i \quad (6-15)$$

となる。

(6-14) 式の意味は、枝が伸びる時には、その枝のリンクのボックスに経路の要素を加算し、レコードが別の枝のものであるときは、それより下位の集計ボックスをクリアするわけである。(6-15) 式で全経路の和をとることになる。

次に3桁のコードがあるときは、以下のように扱う。集計ボックスははじめに用意したものでよい。いまBの枠を例にとると、コードを前同様B1、B2に分ける。また、関数 δ 、 γ および $\bar{\gamma}$ についても前同様とする。(6-14) 式の1行目について、第2項の $\bar{\gamma}(B_i)$ のかわりに、 $\bar{\gamma}(B_{1i})$ とおく。B1の性質から A_i の集計においてB1が0であることを要しないわけである。2行目について、第1項に $\delta(B_{1i})$ を乗じ、第2項の $\gamma(B_i)$ のかわりに、 $\gamma(B_{2i})$ とおく。第3行以下についてはそれぞれの第1項の $\delta(B_i)$ のかわりに、 $\delta(B_{1i}) \cdot \delta(B_{2i})$ とおく。

他の枠AおよびC以下についても同様の扱いとなる。

6. 5 作業予測の解析

6. 5. 1 作業時間の予測

(1) 排雪作業の開始および終了時刻

作業順序をきめておく。ある時刻 t において作業を行うリンクの選定は次のように行う。

- ① 排雪場に近いリンクから順次行う。
- ② あるリンクの作業が完了したときは隣接するすべてのリンクの作業を行う。
- ③ 機械の調達量の不足または運搬経路で通過許容量を越えるときは、作業を行うリンクを制限しなければならないので、そのための優先順位をあらかじめ決めておく。

③の項目は後の(6-18) 式の判定に制限を加えることになるので、このことについては6. 5. 2 節および6. 5. 3 節で述べる。

①②の条件によれば、あるリンクについての作業の完了時刻は、排雪場までの経路にあたるリンクの作業時間とそれ自身のものと和であらわされるので、リンク i についての作業完了時刻を t_{ei} とすると、

$$t_{ei} = \sum T^*_{ik} \quad (k=1, 2, \dots, i) \quad (6-16)$$

となる。ただし、 T^*_{ik} は経路にあたるリンクの作業に要する時間である。

先に示したLタイプの計算によりすべてのリンクについて上式の結果を求める。上の式を作業終了時刻とするのはLタイプの計算はそれ自身のリンクの値も含むためである。したがって、作業の開始時刻は、

$$t_{si} = t_{ei} - T^*_{ii} \quad (6-17)$$

と表される。

このことから任意の時刻 t において

$$\left. \begin{array}{ll} t < t_{si} & ; \text{ 作業未着手} \\ t_{si} \leq t \leq t_{ei} & ; \text{ 作業中} \\ t_{ei} < t & ; \text{ 作業完了} \end{array} \right\} \quad (6-18)$$

の判別ができ、これをすべてのリンクについて行うことができる。

排雪作業が排雪場への運搬に縛られるかぎり、上の判別式に反した勝手な作業はできないわけである。

(3) 機械力の調達予測

(6-18) 式の判別から、任意の時刻 t において作業中のリンクを特定することができたので、その時刻における機械の稼働状況と作業中のリンクから発生するダンプトラックの運行台数がわかる。その集計をとれば地域全体の稼働台数が求まり、機械力の調達の予測ができることになる。

(4) 運搬経路におけるダンプトラックの集中

任意の時間における作業中のリンクで発生するダンプトラックの運行台数が算出できたので、これにPタイプの計算をすれば、すべてのリンクにおいて運行の集中状況すなわち通過台数が求まる。

(5) 作業の進捗状況の把握

(6-18) 式の判別を言い換えると、すべてのリンクについて作業の進捗状況をあらわしていることにほかならない。

6. 5. 2 運搬経路における渋滞の緩和方法

運搬経路においてはダンプトラックのほか一般の交通が加わるわけであり、通過許容量を超えた場合は渋滞と混乱が発生する。そこで、何らかの緩和方法をとらなければならない。

緩和方法には次がある。

- ① 排雪場を分散する。
- ② 運搬経路を変える。
- ③ 作業時間帯を変更する。

本システム上の対応は次のように行う。

①については、新たな排雪場とそこに至る経路に応じて計算コードを振りなおす。先にも示したように、接続する上位のリンクと階級が変化するかどうかのサインにより自動的に計算コードを振りなおすことができる。

②についても上記同様新たな経路に応じて計算コードをふりなおし、試算を繰り返す。

③については次に示す。

(1) 作業時間帯の調整

道路における通過許容量は一般交通と排雪作業の車両の両方を含んだものであるが、雪を運搬する車両は排雪場に近づくほど集中するので、渋滞は排雪場入り口で最大に発生するとみることができる。そこで作業時間帯の調整は次のように行う。

任意の時刻 t において、作業中のリンクから発生する時間当たり通行台数について P タイプの計算をすると、経路の通過台数がわかるわけであるが、排雪場入り口について注目し、そこにおける単位時間当たり台数を $N(t)$ とする。時間幅を Δt をとると、この間に通過する台数は、 $N(t) \cdot \Delta t$ である。この地点における通過許容台数を N_0 に制限したとき、 $\Delta t'$ の時間がかかるとすれば

$$\Delta t \cdot N(t) = \Delta t' \cdot N_0$$

であり、したがって

$$\begin{aligned} \Delta t' &= \Delta t \cdot N(t) / N_0 \\ &= \Delta t \cdot n(t) \end{aligned} \quad (6-19)$$

となる。(6-19) 式は、作業時間が Δt から $\Delta t'$ に延びたことを意味している。ここで、 $n(t) = N(t) / N_0$ を超過倍率とし、 $1 < n(t)$ である。

次に、作業の時間帯を調整すると機械の調達台数も変わってくる。時間調整の前の調達台数を $M(t)$ 、調整後の台数を $M'(t)$ とすれば

$$M'(t) = M(t) / r(t) \quad (6-20)$$

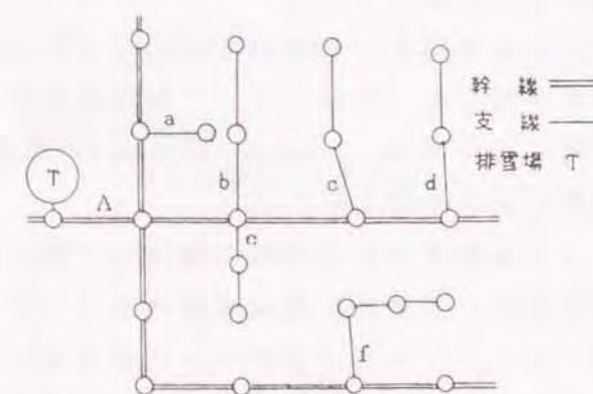
となり、これが実際に調達を必要とする台数である。調達している台数が上で求められる値より過剰であれば排雪場入口または経路での渋滞が発生し、実質上は遊びの機械が生じることになる。逆に調達必要台数に満たないときは作業が停滞して進捗が遅れ、それによる作業時間の調整をしなければならない。

(6-19) 式で算出される $\Delta t'$ を積み上げた時間を t' とすれば、時間 t に対して調整された時間 t' により作業の経過をみなければならない。したがって、(6-20) 式の $M'(t)$ も $M'(t')$ に読み変えられることになる。

(2) 作業命令者の指示の取り扱い方法

これまではすべてのリンクについて、所定の排雪作業が完了するまでは他のリンクからの運搬車両は通過できないものとした。図 6-6 で模式的に説明すると、リンク A からのみ作業を開始するもので、この方式を便宜上「シーケンス」と呼ぶことにする。しかし、実際の道路管理上において、主要な幹線はよほどでない限り交通の途絶は許されず、したがって排雪未完了の状態であっても運搬車両の通過があり得る。すなわち幹線について排雪場に近い方から順に排雪を行なうと同時に、それより後方のどこかにおいても並行して排雪作業が行われるということである。そこで、リンク A から作業が開始されると同時に、各支線のリンク a、b、c……からも順次作業が開始される方式を「D シーケンス」と呼ぶことにする。

現実の作業においては上にあげた方式以外、例えば指定した複数の地点から作業を開始する場合、指定した地点のみ作業を行う場合、あるいは作業開始の時刻を指定する場合が考えられる。これらの方式についても各リンクの作業の開始と終了時刻をそれぞれ決めることにより取扱いが可能である。



作業開始の模式図

シーケンスは A のリンクからのみ作業を開始する。D シーケンスは A のほか a b c……からも作業を開始する。

図 6-6 作業の指示方法

排雪が未完了と完了区間ではの運行時間係数 β の違いを考慮しようとするれば、時間の経過につれて作業が完了するリンク数が増えるためそこを通過する運搬機械のサイクルタイムは時間によって変り、その結果 (6-18) 式の判定を一意的に求めることはできなくなり、時間を区切って逐次計算を繰り返さなければならない。分かりやすく言えば、はじめの予測よりも多少作業の進捗が少しづつ速くなるということである。

6. 5. 3 機械の調達台数不足による作業の調整

これについては通行台数の制限による調整前の時間 t に対する場合と、調整後の時間 t' に対して行なう場合の2通りがあるが、ここでは後者によって行なうことにする。また、機械の不足は現実には特定のリンクにしわ寄せされるであろうが、ここでは均等に及ぶものとする。

調達可能な台数と先の (6-20) 式による調整後の必要調達台数との比を調達率 $p(t')$ とおき、作業の時間幅 $\Delta t'$ をさらに $\Delta t''$ に調整すると、

$$\Delta t'' = \Delta t' / p(t') \quad (6-21)$$

で表される。ただし、 $(0 < p(t') < 1)$ である。

特定のリンクにかたよって調達の台数が不足する場合は、リンクごとの作業の所要時間の算出までさかのぼって計算をやり直す。

6. 5. 4 計算条件および係数類

目的条件の除雪幅 J は、2車線確保を原則とし、 $J = 6\text{ m}$ とおく。積雪条件は呼びの深さまたは新雪換算のいずれでもよいが、新雪換算の方が都合がよい。時間の経過につれて降雪があるときはその都度換算積雪深を変えればよい。また、それによって、係数類の値が変わるときは、リンク毎に変えることができる。例えば運搬車量の通行が困難になる時は、(6-5) 式の u_i の値を任意に与えて標準の作業開始および終了時刻を変えればよい。

係数類の標準の値は、56豪雪またはその後の積雪時の断片的な写真や観測から算出した。特に重要なものに、排雪場に運搬車量が入り出す時間あたり台数であり、実際の調査事例に乏しい。ダンプトラックの排雪場への右折れ左折れ進入の違い、一般車両との混入、近くの信号機の点滅との関係など、検討の余地が多い。

6. 6 計算方法のまとめ

以上述べてきたことから、排雪作業のシミュレーションの方法をまとめると次のようになる。はじめに基本的な計算によって、各リンク毎に標準の作業開始時刻と完了時刻を求め、つぎに、 Δt 時間毎に逐次計算を行って、 $t = \sum \Delta t$ での作業状況を調べ、運搬経路での渋滞緩和の調整があるときは $t' = \sum \Delta t'$ で時間を調整する。調整後の時間 t' で作業状況を評価することになる。フローの中の項目で、Rはリンク単独の計算、PはPタイプの計算、LはLタイプの計算である。

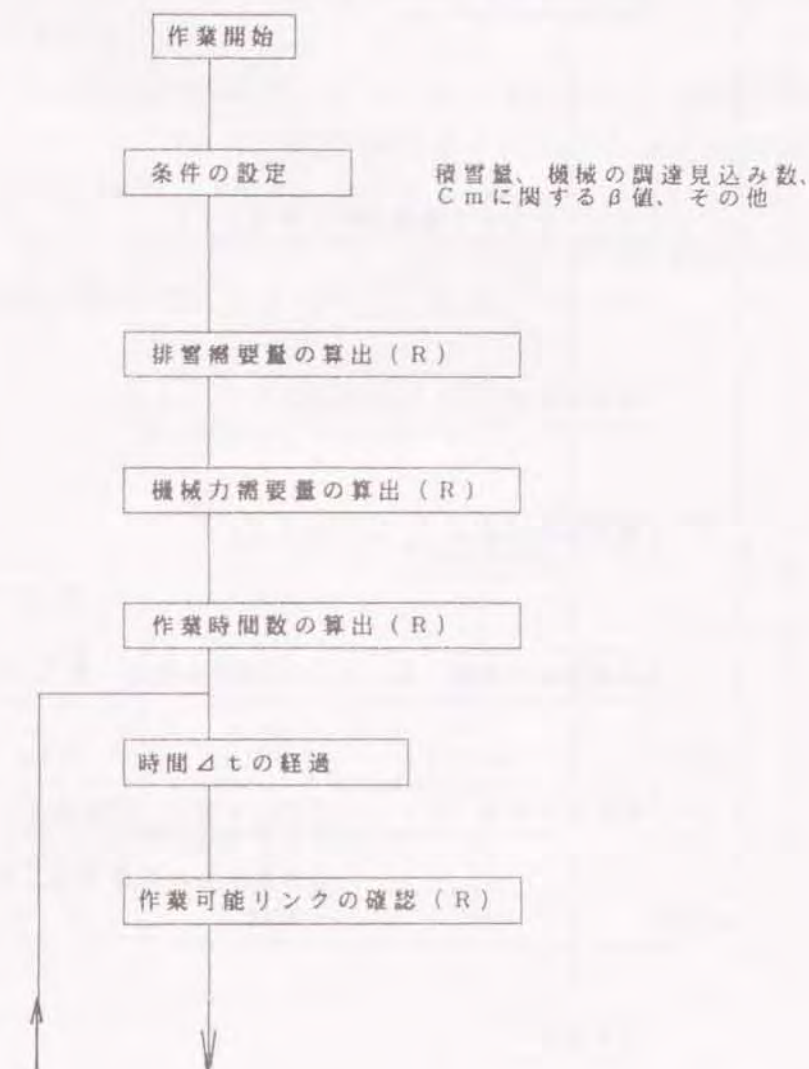


図 6-7 排雪作業のシミュレーション (1)

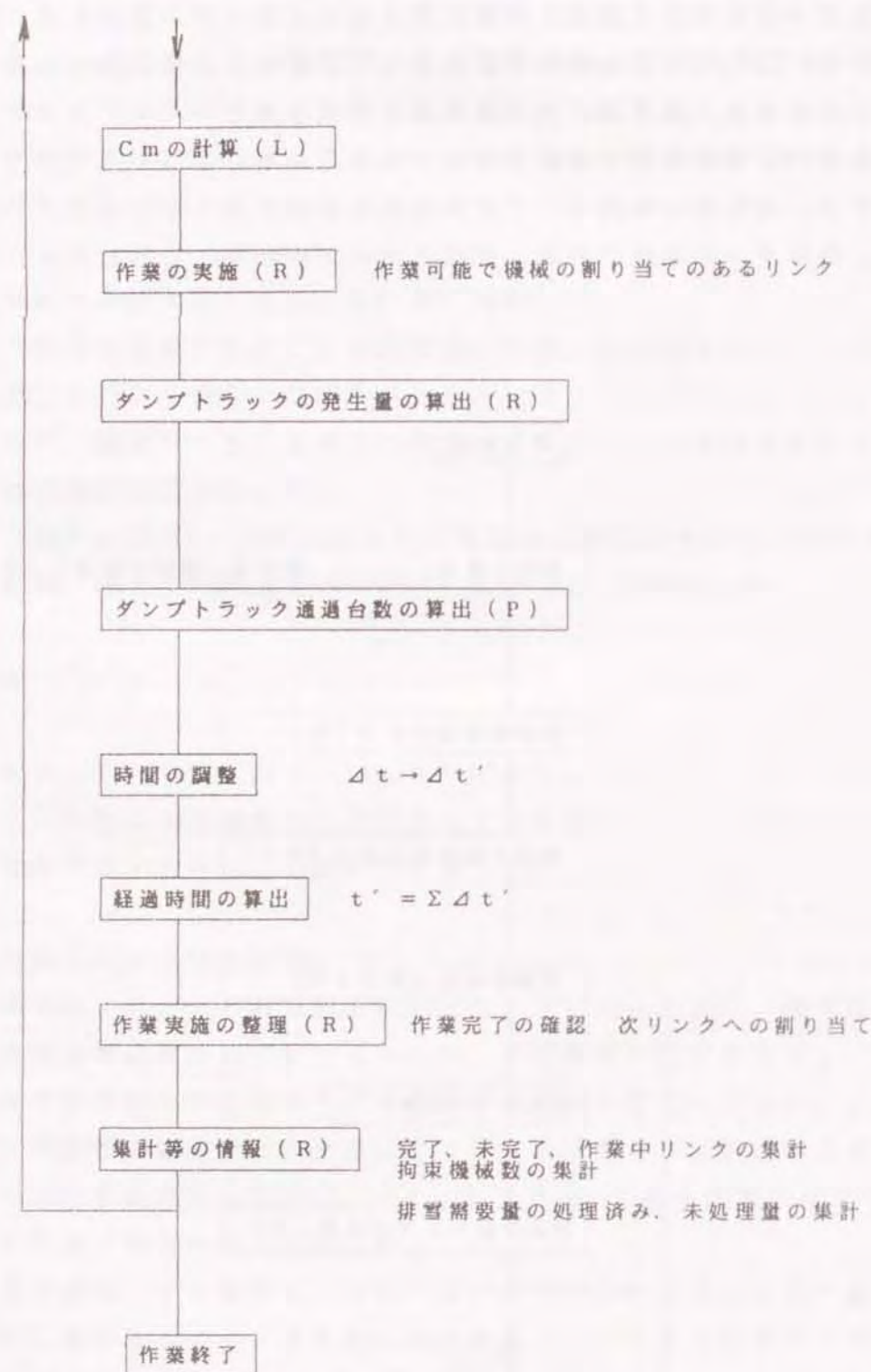


図 6-7-2 排雪作業のシミュレーション (続き)

6.7 福井市におけるケーススタディ

6.7.1 福井市中心部の概況

本節ではこれまでに述べた手法により福井市中心部における計算事例を扱う。

図 6-8 の枠で囲まれた範囲を計算のモデル地域とした。この地域で 56 豪雪時には県庁お濤と足羽川河川敷の 2 カ所が排雪場として使われた。しかし現在は、すでに述べたように足羽川河川敷 1 カ所のみである。区域の諸元は表 6-1 の通りであり、福井県における主要な機能が含まれている。この区域すべての道路を計算の対象とした。道路の区切りすなわちリンクは、幹線道路は主な交差点から交差点までとし、地域道路 (生活周辺道路、支線) は、1 区画分の延長とした。リンクの総数は、排雪場も計算上 1 リンクとし、386 である。排雪場への経路の取り方は、通常において考えられるものとした。

運搬車量の通行は往復同一経路をとるものとする。計算に必要な係数類の値は表 6-2 に示す。これらについてリンク毎に値を変えてより詳細に地域の条件を反映させることができるが、ここでは全リンクについて一様としておく。消雪施設が設置されているリンクについてはサインを立て、排雪需要量などの計算からはずしている。歩道の除排雪はここでは何ら考慮していない。

表 6-1 福井市中心部の諸元

	合 計	県 道	市 道
領 域 面 積	150 ha	—	—
居 住 人 口 (世帯数)	9,414人 (2,885)	—	—
道 路 延 長	32,750m	6,705m	26,045m
道 路 面 積	305,023m ²	133,381m ²	171,642m ²
リ ン ク 数	386	42	344
同上消雪有り	97	3	94
消 雪 延 長	7,220m	455m	6,765m



福井市のモデル地域

①は排雪場(足羽川河川敷)、②～④は結果を示す代表例
原図は「©昭文社発行都市地図福井市」より転載 昭著第900502号

図6-8 モデル計算の範囲(福井市中心部)

表6-2 モデル計算における係数類の値

	記号	数 値	備 考
除雪確保幅	J	3.5m (道路幅W<6m)	1車線
		5.5m (6<W<15)	2車線
		11m (15m<W)	4車線
積雪深	H	1.0m, 1.5m, 2.0m	五六豪雪 213cm
有効積雪深	He	3.0m, 4.5m, 6.0m	$H \times 0.3/0.1$
処理率	σ	0.8	
堆雪率	r	0.8	
密度比	k	4	0.4/0.1
形状係数	α	1.5	
雪堤最大高さ	B	1.5m	
運搬サイクルタイム の β に関する倍率	u	3 (H=1.0m)	
		4 (H=1.5m)	
		5 (H=2.0m)	

6.7.2 計算結果(1)

はじめに全体的な結果を示す。表6-3-1、表6-3-2にデータファイルの構成と計算結果の総括表を示す。表の構成は表6-3-1の横に表6-3-2がつながるものになっている。横一列が1リンクの記録である。計算コードは「T」から「E」までのアイテムであり、排雪場の足羽川河川敷は「1000000」のコードである。各アイテムに便宜的につけた記号のSのものは、レコード単独の値であることを示し、Gをつけたものは、そのリンクから枝となって続くものの合計値を表している。従って、足羽川河川敷のレコードのGのアイテムは、領域全体の集計値となっている。

次に、このような計算結果のまとめを図6-9および図6-10に示す。ここに示した数値と五六豪雪の状況を詳細に比較することはできないが、およそ次のことがいえる。①実際は、モデル計算ほどの排雪は実施しなかった。②裏通りではかなりの期間機能が損なわれたままの道路があった。③日数を経て処理されたり、自然の融雪もあって徐々に都市の機能が回復された。

表 6-3-1 ファイルの構成 (一部) および計算結果 (総括表 1)
H (呼び積雪深) = 2.0 m

S G L																												
排	R	A	B	C	D	E	地区名	番号	進行	KE	CD	ランク	種別	対	サイン	Cダン	Cシヨ	Cブル	橋	延長	幅員	給雪	積雪	要排雪量	排雪量	加算距離	CM	
1	1	0	0	0	0	0	足羽川河川敷			1	1	0	999	1	1	8,000	16,200	17,300			100		2	0.0	19940.3		0.0	18.0
2	1	1	1	0	0	0	幸橋			10	10	1	2	1	1	8,000	16,200	17,300	135	23	10	2	2025.0	19940.3	135.0	21.7		
3	1	1	5	0	0	0	フェニックス	4		50	50	1	2	1	1	8,000	16,200	17,300	205	25	11	2	3567.0	36372.0	892.5	45.7		
4	1	1	2	4	0	0	戸原街連	1		180	180	2	2	1	1	8,000	16,200	17,300	210	20	11	2	3339.0	19642.1	1005.0	46.1		
5	1	1	2	108	1	0	さくら通り	1		220	220	3	2	1	1	8,000	16,200	17,300	212.5	17.5	11	2	3219.3	11461.8	1560.0	61.6		
6	1	1	4	101	0	0	さくら通り	5		200	200	2	3	1	1	8,000	16,200	17,300	197.5	17.5	11	2	2992.1	10258.5	985.0	45.5		
7	1	1	2	111	1	0	松本通り	1		200	200	3	2	1	1	8,000	16,200	17,300	185	17.5	11	2	2802.7	4876.5	1985.0	73.5		
8	1	1	6	102	0	0	松本通り	6		340	340	2	2	1	1	8,000	16,200	17,300	215	17.5	11	2	3257.2	4140.7	1580.0	62.2		
9	1	1	2	104	0	0	萩原北通り	3		380	380	2	2	1	1	8,000	16,200	17,300	150	17.5	11	2	2272.5	38812.1	882.5	42.7		
10	1	1	2	2	101	0	片町通り	2		480	480	3	3	1	1	8,000	16,200	17,300	240	8	5.5	2	0.0	0.0	815.0	46.7		
11	1	1	4	101	2	0	片町通り	4		500	500	3	3	1	1	8,000	16,200	17,300	155	8	5.5	2	1139.2	1139.2	1335.0	44.3		
12	1	1	2	301	0	0	だるまや前通り	1		561	561	2	3	1	1	8,000	16,200	17,300	175	15	5.5	2	1653.7	4470.7	635.0	38.7		
13	1	1	2	2	0	2	県庁市役所前	3		140	590	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	82.5	10	5.5	2	655.8	4597.8	842.5	41.5		
14	1	1	2	2	0	3	県庁東通り	1		140	631	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	120	7.5	5.5	2	864.0	1838.0	1147.5	50.1		
15	1	1	4	2	1	0	西別院通り	1		680	680	3	3	1	1	8,000	16,200	17,300	77.5	10	5.5	2	616.1	10447.8	1270.0	46.0		
16	1	1	6	0	0	2	藤田病院通り	5		60	760	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	125	10	5.5	2	993.7	2295.7	1515.0	60.4		
17	1	1	4	2	1	0	武蔵町通り	3		800	800	3	3	1	1	8,000	16,200	17,300	85	10	5.5	2	0.0	10447.8	1355.0	48.4		
18	1	1	4	2	1	101	0宝永3	6S		680	1830	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	85	6	3.5	2	420.7	420.7	1440.0	50.8		
19	1	1	1	3	0	2	2宝永3	11W		70	1930	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	85	5	3.5	2	441.7	674.2	685.0	37.1		
20	1	1	2	6	2	0	香山2	8W		200	3530	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	115	5	3.5	2	534.7	534.7	1550.0	55.5		
21	1	1	2	7	101	0	香山2	23S		820	3740	0	3	1	1	8,000	16,200	17,300	75	5	3.5	2	348.7	348.7	1895.0	62.8		

S はリンク単独の計算 G は関係するリンク全体の集計
L は排雪場からの経過を表す。

表 6-3-2 計算結果 (総括表 1) H (呼び積雪深) = 2.0 m

排雪システム計算総括表(2) (福井市 H=2.0m)

S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

S はリンク単独の計算 G は関係するリンク全体の集計
L は排雪場からの経過を表す。

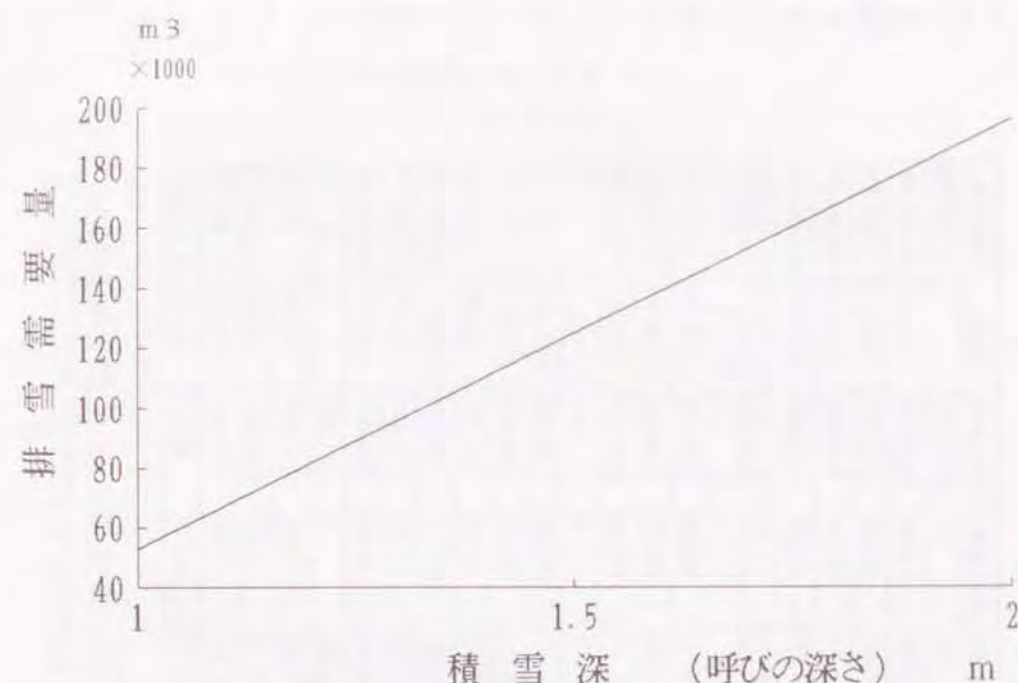


図 6-9 積雪深と排雪需要量の関係

排雪需要量は、モデル地域の全量を表す。

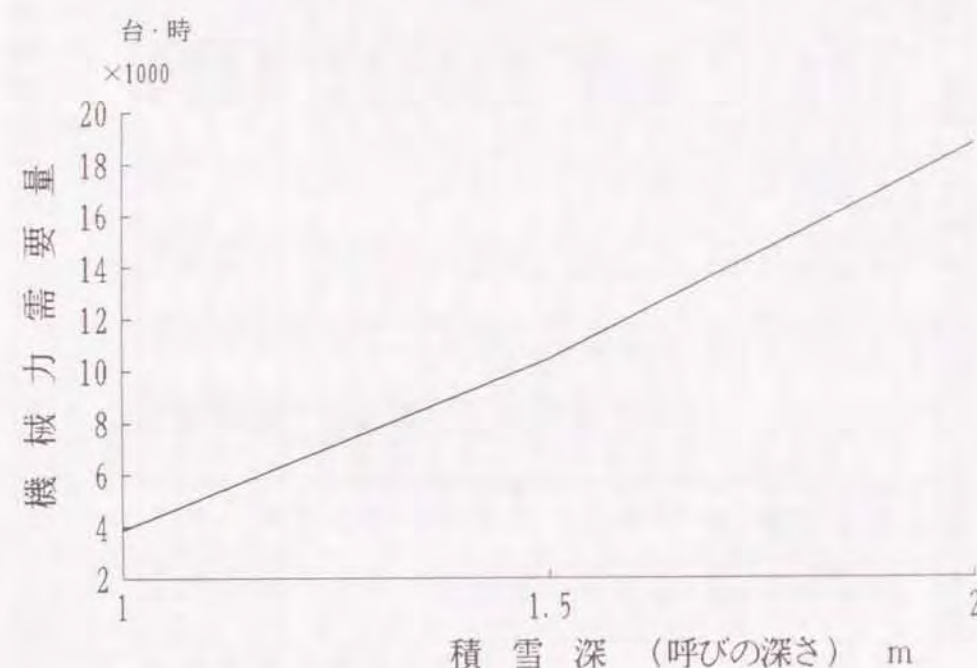


図 6-10 積雪深と機械力需要量（運搬）の関係

機械力需要量はモデル地域の全量を表す。

6. 7. 3 計算結果（2）

本節は時系列的な計算結果を示す。表 6-4 に積雪深を 2 m としたときの排雪場 1 極シーケンスについての作業予測の結果を示す。積み込み機械の調達は、4 車線以上の道路では 1 リンク同時刻 4 組、2 車線までの道路では 2 組用意し、ダンプトラックは必要なだけ調達できるものとした。排雪場へのダンプトラックの進入容量は 180 台/h とした。逐次計算の間隔 Δt は 5 分とする。ダンプトラックの排雪場入り口で許容量を越えたとき時間の調整を行い、 $t' = \sum \Delta t'$ で時間の経過をあらわす。また同時にダンプトラックの調達も調整する。時間とダンプトラックの調整の様子を図 6-11 に示す。このようにして作業方法を変えたときの作業進捗の結果を図 6-12 に示す。作業方法の意味は 6. 5. 2 節に示してある。作業方法の違いによって進捗の状況の違いがわかるであろう。

表 6-4 排雪作業予測の計算結果

記号	項 目	単位	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	91.5
t	時間(修正前)	h	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	91.5
Δt	時間幅(修正前)	h	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	1.5
n	修正値		1	1	1	1	1.6	1.2	1.8	1.7	2.2	1.7	1	1	1
$\Delta t'$	時間幅(修正後)	h	5	5	5	5	8	6	18	17	22	17	10	10	1.5
$\sum \Delta t'$	時間(修正後)	h	5	10	15	20	28	34	52	69	91	108	118	128	129.5
	完了リンク数	個	0	9	13	14	26	38	59	104	138	194	236	252	253
	作業中リンク数	個	1	4	5	5	11	7	11	10	14	11	4	1	0
	未処理リンク数	個	252	240	235	234	216	208	183	139	101	48	13	0	0
	進捗率	%	0	3.5	5.1	5.5	10.2	15	23.3	41.1	54.5	76.6	93.2	99.6	100
M	稼働台数(修正前)	台	18	68	92	93	176	136	256	258	375	333	125	26	0
N	通行台数(修正前)	台/h	41	124	166	166	290	207	332	311	394	311	103	20	0
M'	稼働台数(修正後)	台	15	68	92	93	110	113	142	151	170	195	125	26	0
N'	通行台数(修正後)	台/h	41	124	166	166	180	180	180	180	180	180	103	20	0
	累積処理量	m³	1969	9778	14751	22224	32664	44829	68720	103378	133429	168995	189237	196656	196940
	残処理量	m³	195071	187162	182189	174716	164276	152111	128220	93562	63511	27945	7703	284	0

リンクの数は、消雪工が設置されているものは除いている。

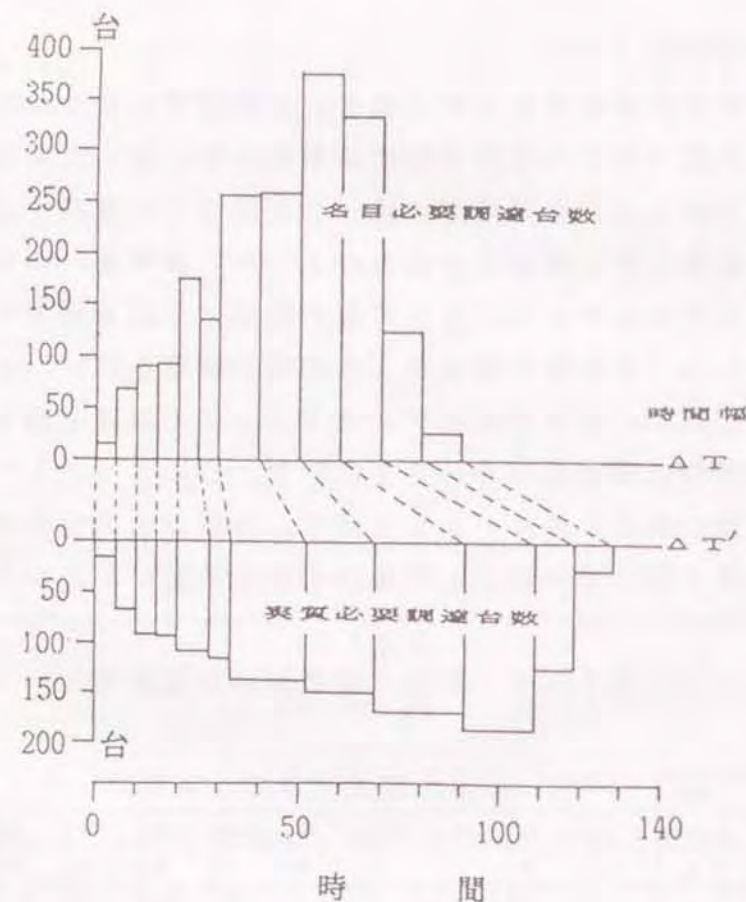


図 6-11 ダンプとトラックの調達予測

名目は、時間調整前の台数、実質は時間調整後の台数
作業条件は、1 極シーケンス

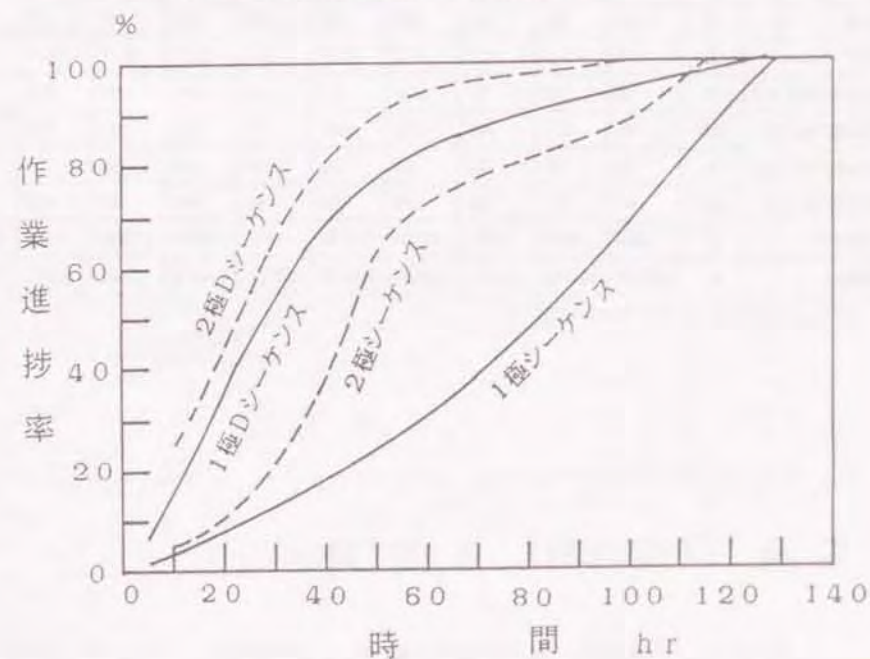


図 6-12 排雪作業の形態と作業の進捗

6. 8 積雪時の都市の安全性の評価方法

本論文の主旨は、雪の嵩ばりが道路機能を阻害し、それが都市機能の低下につながるとしているので、各地点における排雪需要量がなくなる時刻を都市の安全性の 1 つの評価指標と置くことができる。これまで示した結果では、これは排雪作業の完了時刻にあたる。確定した作業の完了時刻を各々のリンクに対して与えることができるので、全体としての状況をプロットすると図 6-13 に示すものとなる。排雪需要量の有無だけでなく緊急車両の到達の可否等を考慮する場合は、ここで示した指標をもとにさらに加工すればよい。

これについて方法のみを示す。いまある病院との関係を見るならば、各レコードにその病院との関係を示すコードを新たにうければよい。新たなコードの昇順にレコードをソートし、L タイプの計算を行うと、各地点についてその病院との時間または距離関係がわかる。これらの計算において、経路の条件は、各レコードが保有する係数として格納され、その値は任意に入れ替えが可能である。このようにして経路の条件を計算に十分に反映させることができる。

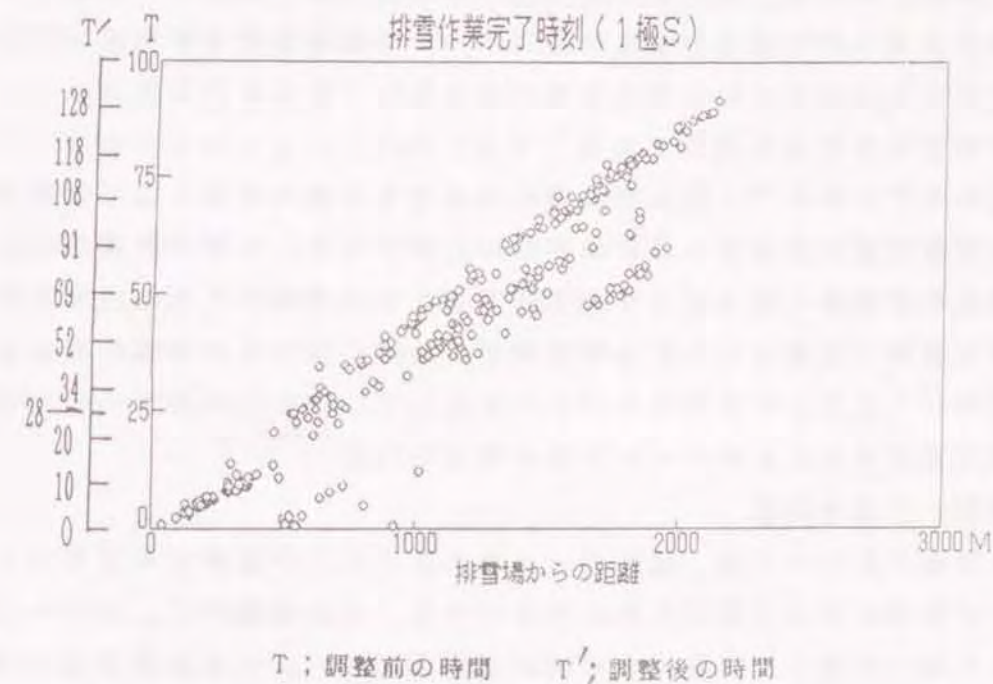


図 6-13 排雪場からの距離と作業完了時刻

排雪作業の完了時刻を安全性の指標とすることができる。

6. 9 実務への適用についての課題

ここで示した排雪ネットワークの手法を実務に適用する場合に以下の課題があり、これについて考察する。

(1) 係数等の値

表6-2にある係数値は、雪が余り多くない状況での観測値に基づくもので、大雪または豪雪時の場合については検討が必要である。特に(6-4)式で定義されている積雪時の運搬に関する u の値と、(6-19)式における運搬経路での通過許容台数については実例の検討を必要とする。これまでの豪雪の記録を、ここで示したネットワーク解析を目的として分析することも今後の課題としてあげられよう。

また、排雪場へのアクセスではダンプトラックの右回りか、左回りか等も関係し、積雪時におけるこれらの計測も必要と思われる。

(2) ネットワークの構成と実際の作業状況との関連

これまで示したネットワークの構成では、運搬車両は往復同一ルートをとることにしている。現実的には、往復別ルートもあり得る。これの取扱いは、一つのリンクについて、もう一つのダミーのリンクをつくり、あらかじめLタイプの計算を行って、往と復を分けた運搬のサイクルタイム C_m を作っておくことにより可能である。

その他の現実の作業に合わせた取扱いについてもあらかじめサインやコード類を用意することにより、かなりの程度までは可能であると見込める。

(3) 市内全域への適用方法

福井市のモデル計算では福井市の中心部の150haを取り上げたにすぎない。これを市街地全域に拡大する場合の検討が必要である。モデル計算にあるように細い道路までを含めて逐一データを作成することは可能であるが、実務的には膨大な作業を必要とする。したがって、モデル地区についての詳細な計算を繰り返し、実務において必要とする情報をパターン化して、いくつかのキーとなる項目により実務に適用することが一つの方法と考えられる。

(4) 実務への適用方法

実務への適用については、既に述べてきたように、作業計画の立案および排雪場のための空間計画の立案のために利用できる。対象範囲が広くなければ、各地点について逐一計算した本論文の事例に従えばよい。対象範囲が広い場合は、上記(3)においての検討が必要である。

さらに、本論文の手法を豪雪のシミュレーターとして利用する方法がある。現場担当者にとって最良の教育は経験であり、模擬的に豪雪を経験することは有用なことである。

6. 10 まとめ

本章は、前章で提示した都市雪害の発生モデルを受けて都市の面的な広がりの中での除排雪作業の取扱い手法の提示と構築を内容とする。この手法により、積雪状況に応じた都市の除排雪作業を含む積雪状況の時系列的解析が可能になり、機械の調達、作業の進捗状況等を予測した作業計画および大雪または豪雪を想定した都市の空間的整備計画に対して技術的根拠を与えることになる。また、ここで提示した手法は、積雪と地震の複合災害等の幅広い議論を可能にする。

面的な取扱い手法は次によって行う。道路網に擬してネットワークを構築し、このネットワークは排雪場を樹根とする樹木構造をとっているため、これを具体的に示すために、道路の区間毎に階層的なコードづけを行う。面的な計算方法は、排雪場に集中する機械力需要量等を扱う集計計算(Pタイプ)と、排雪場からの経路の条件または時間を扱う経路計算(Lタイプ)の2種類があり、この計算方法を提示した。これらの計算により、地域の要件や運搬経路の積雪状況を考慮して、任意の時刻における都市内の各地点毎の作業の進捗状況や、運搬経路でのダンプトラックの集中状況が把握できる。つぎに、道路の集中状況が許容通過量を越えたときは山くずしによる調整を行う。これにより、ダンプトラックの調達と作業の進捗状況を現実的に即して予測することができる。

以上の方法は、比較的小型の計算機を用いて、具体的に都市中心部の排雪システムの解析に適用でき、福井市についての事例を提示した。

ここで示した取扱い手法は、都市内の除排雪作業をより合理的に行うための技術として今後確立をはかるべきものであり、本論文ではその基礎だけでなく、実務に適用できるかなりの部分を扱っている。

この手法の利用方法の一つとして、コンピューターを使った豪雪のシミュレーションが考えられる。擬似的にせよ豪雪を経験することは、雪対策の実務者、および一般市民にとっても有用であり、行政需要として求められている。

第7章 流雪溝システムのネットワーク解析

7.1 はじめに

本章の目的は、流雪溝の面的解析方法を提示し、流雪溝計画または維持管理のための取扱技術の構築をはかり、さらにこのことにより、第6章で示した機械的除排雪のネットワーク解析とあわせて、大雪または豪雪時の都市の災害度に関する議論ができることを示すことにある。ネットワークの構築方法と計算方法は、排雪システムのネットワーク解析で提示した方法を修正したもので行う。

近年流雪溝の面的整備が進められ、流水の配分方法が、設計計画および維持管理の両方において重要になっている。流雪溝の管理は、ほとんど経験の蓄積により行われ、流雪溝の運用が良好かどうかは特定の人の意志によることが大きい。流雪溝の各種マニュアルにおいて流雪溝の面的管理方法が示されているが、これらはこれまでの経験による注意書の程度のもので、解析的取扱いにまでは至っていない。新潟県新井市(1990)の例では、水の配分と作業体制について、作業を行う地区と時間をローテーションで割り振る水配分時間表が作られている。これは経験の蓄積にもとづき作成されたものである。今後とも経験の有用性は変わらないであろうが、面的な拡充が進むにつれて、経験を支援するかまたは経験にかわる取扱方法が求められている。流雪溝の面的な解析方法について杉森(1991²⁾, 1992³⁾)は、はじめて流雪溝の面的流量の計算方法を提示し、流雪溝計画および維持管理の面的取り扱い技術の基礎を与えた。

7.2 流雪溝の歴史

古川巖(1961)によればつぎの記述がある。流雪溝のわが国最初の構想は、大正8年国鉄信越線トンネル口についての設計において出された。しかし、その時は効果についての認識が広まらず、構想だけに終わった。昭和2～3年頃になって雪処理技術としての目的意識を持った研究が始まり、最初の文献は昭和3年に出されている。その頃は流雪溝という呼称はなく、雪を処理する水路という説明語で呼ばれ、土堀であった。昭和7年からコンクリート製の水路が見られるようになり、昭和9年頃になって、排雪溝、流雪水路、除雪溝、融雪溝など、研究者によりそれぞれの名称が使われ、昭和12年になって、鉄道関係の技術語として流雪溝に統一された。また、古川(1946)は戦災にあたって都市部道路に流雪溝を設置することを強く提言している。しかし、実際の流雪溝の普及の足取りは遅かった。断片的な記録を拾うと、同じく前出の古川によれば、市街地における流雪溝の整備について中央からの助成が昭和31年に小千谷市において初めて行われたとある。日本積雪連合(1965)では、意欲的に流雪溝が設置された街として、

小千谷市、新潟県小出町、富山県城端町をあげている。小千谷市については、昭和32～34年度の建設省の下水路助成費による新設延長は2.4km、昭和35～38年度の市単独費による新設延長は1.8km、昭和39年～昭和40年度の雪害助成に関連した事業調整費による新設延長は0.7km、となっている。これらだけでは昭和30年代から40年代にかけて流雪溝がどの程度普及していたかは不明である。

十日町市の経緯をみると次のようになっている。昭和43年度末に流雪溝延長は6.7kmあり、その後の経緯は不明で、昭和56年度から施工実績が延び、平成4年度現在で、国県市道あわせて22kmに達し、全計画延長42kmのうちの62%となっている。普及の状況を見ると、流雪溝の面的整備事業が「積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法」(昭和31年法律第72号、略称「雪寒道路法」)にもとづく「雪寒事業」の中に昭和57年度から含まれるようになったことが大きい。またこの制度の他に、積雪地域の雪を考えたまちづくりを目的としたスノーピア事業や道路の整備改良にあわせて行われたものもある。

7.3 流雪溝ネットワークの解析方法

7.3.1 流雪溝の水量と流雪能力

流雪溝の融雪効果を考えない場合の必要水量について、日本機械化協会「新防雪工学ハンドブック」(1977)および建設省北陸地方建設局監修「流雪設計運営要領」²⁾では次の式があげられている。

①経験式

$$Q = m_1 (1 - \rho) V \quad (7-1)$$

Q : 単位時間当りの流水量 (m^3/s)

V : 単位時間当り投入される雪の体積 (m^3/s)

ρ : 投入雪の比重

m_1 : 水路(流末)の状況による係数

この式は古川(1961)にもとづくものである。また、「流雪溝設計要領」では次の式があがっている。

②実験式

$$Q = m_2 \cdot W \quad (7-2)$$

Q : (上記に同じ)

W : 単位時間当り投入される雪の重量 (t/s)

m₂ : 勾配、雪質による流雪係数

(7-1)式と(7-2)式の違いは、流雪溝の雪の運搬能力は水量に比例するかそれともべき乗になるかどうかであり、べき乗になるとすれば、水路が合流して水量が増した場合にはさらに流雪能力が高まり、このことを意図した使用方法が可能になる。渡辺(1986)、大熊・他(1989)の報告ではそれぞれの算定式が示されているが、水量と投入可能な雪の量については1次の関係になっている。東浦(1981)⁹⁾の観測結果によると、投入可能な雪の量は水量のべき乗になっているように読み取れるが、そのことの明言はされていない。

このあとの流雪溝ネットワークの解析においては、この(7-1)式をQとVが1次の関係にあることを理由に使うことにする。道路関係の設計現場では

(7-2)式が主に使われている。この式によれば、水の量の増大よりも雪の投入可能量の増大の割合が大きく、水路の合流により雪の処理量を増大させることを意識した計画が可能になるが、このようなことは確認されていない。ここではVの関係の詳細な議論をすることが目的でないので、便宜的に(7-1)式によるものである。

水量と投入可能な雪の量の関係について、鉄道関係(新潟鉄道管理局, 1955)では以下のものが使われる。

$$Q = 2V \quad (7-3)$$

渡辺(1986)は

$$Q = (1/2)V \quad (7-4)$$

の式を提示し、管理が良好な場合には

$$Q = V \quad (7-5)$$

になるとしている。

大熊・他(1989)においては、流雪溝の流雪能力の向上を目的に、排水溝の内壁に塗料を塗り、壁面の摩擦抵抗を減少させて雪を含んだ水の流れを良くしている。

7.3.2 計算の対象となる量

計算の対象となる量は、流水、自由流水および投入された雪の流量、およびゲートの開閉である。流量の計算について各水路における流量の詳細な算出方法を示す。

自由流水は流水のうち、雪を投入する余裕のある仮想の水量とし、次のように定義する。ある水路において流水量をQ(雪を除いた正味の水の量とする)、混入している雪の量を投入時の体積になおしたものをV*とおく。(7-1)式によってV*から決まる水量をQ*とし、 $Q_f = Q - Q^*$ とおき、 $Q_f > 0$ ならばさらに投雪の余裕があることになり、 Q_f を便宜的に自由流水と呼ぶことにする。現実の水路については流水Qのうちどれだけ自由流 Q_f であるかを知ることは難しいが、流雪の状況を見て雪を追加投入しても支障がなければ、その水路には自由流水があったと判断されるものである。

7.3.3 ネットワークの構成

実際の流雪溝網を解析するためのネットワークを構築する。解析のためのネットワークを単にネットワークと呼ぶことにする。図7-1に示すように、流雪溝ネットワークは、水源および流末をそれぞれを樹根とする樹木構造が重なったものである。取り扱いにおいてはネットワークは流末を幹とした樹木構造とみなすことにする。実際の流雪溝の水路は、角落としのゲートなどで分岐し、またそれが合流し、部分的には閉回路をつくることがあるので、網状とみなされるであるが、後に示す取扱方法により樹木構造とみなす。樹木構造の類似のネットワークについてはかんがい排水と下水道がある。しかしこれらは弁や水門で流れを制限する性質のものでなく、管路等の設備の設計は、領域ごとに排出される見込量の合計値により行なっているもので、管路または水路について任意の時間における実際の流量を知る必要はない。また、水源を基点とした樹木状のネットワークにはかんがい用水がある。しかし、流路の設計方法は、一度に全領域に配水するのではなく、領域を部分的に区切り、ローテーションによる配水計画をたて、そのうちの最大値をとることにしているもので、やはり任意の時間における実際の流量を知る必要はない。これらはいずれも本報告にあるような水量計算の取扱は必要としない。

ネットワークの取扱は都市における道路の排雪システムについて杉森(1990、1992¹⁾)が提示した方法によって行う。ただし次の違いがある。流雪溝の場合は水路の分岐があるが、都市の排雪システムにおいては考えていない。図7-2に流雪溝ネットワークの構成を示す。

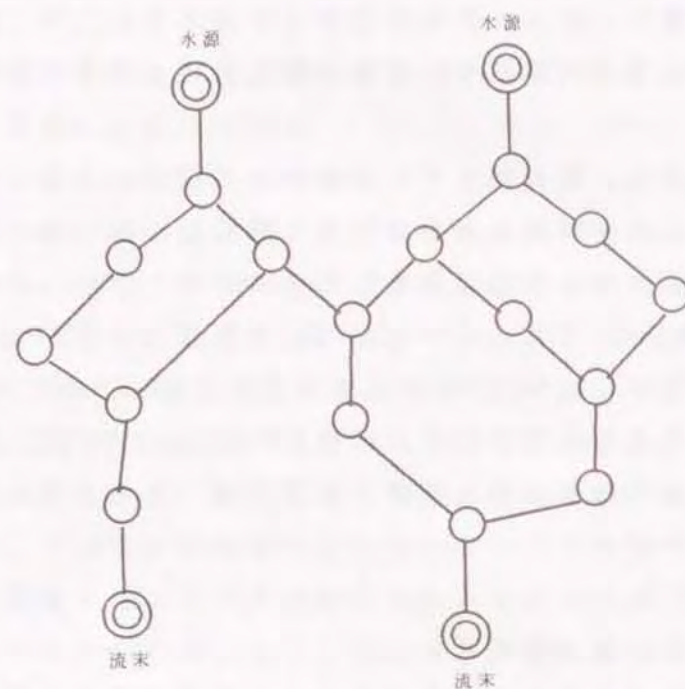


図 7-1 流雪溝ネットワークの樹木構造

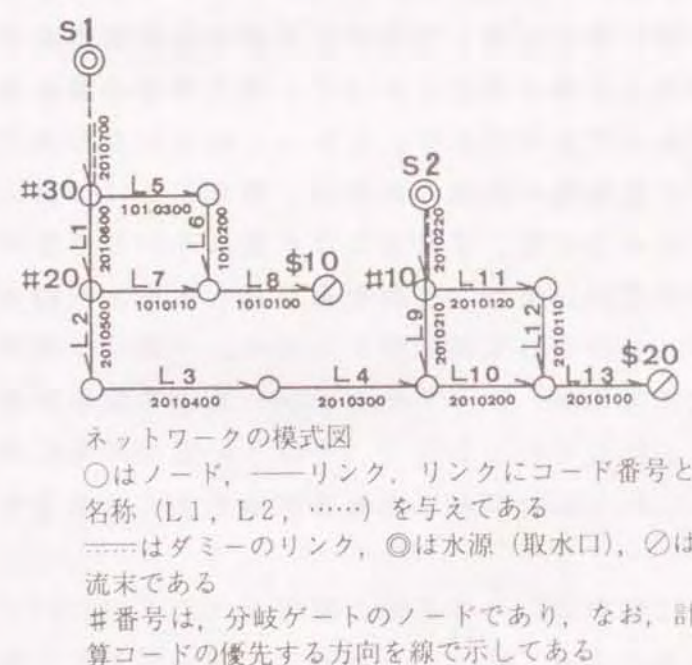


図 7-2 システムの構成図

これは十日町市についての例示 (杉森、1991²⁾) の一部である。丸印類はノードであり、分岐点や区切りの位置を意味する。分岐点となるノードについては、#印の番号をつけ、ゲートと呼ぶことにする。ノードとノードの間の線分をリンクとし、実際の水路の1区間を意味する。流水量の算定や雪の投入の作業はリンクにおいて扱うものとする。リンクにおける水および雪の流れは当然ながら一方向である。1つのノードについて、分岐点ならば出口が複数個あり、合流点ならば入り口が複数個ある。都市の排雪システムの場合は上の説明にあるように、1つのノードからの出口は1個だけである。

ネットワークの構成にあたって、計算の都合上次の制限を加える。

- a 分岐は2までとする。
- b 合流も2までとする。
- c 合流と分岐は別のノードとする。

現実において上記の制限に合わない場合は、図 7-3 に示すようにダミーのリンクをもうけて上の制限を満たすことにする。

地域全体において水源および流末の数に制限はない。

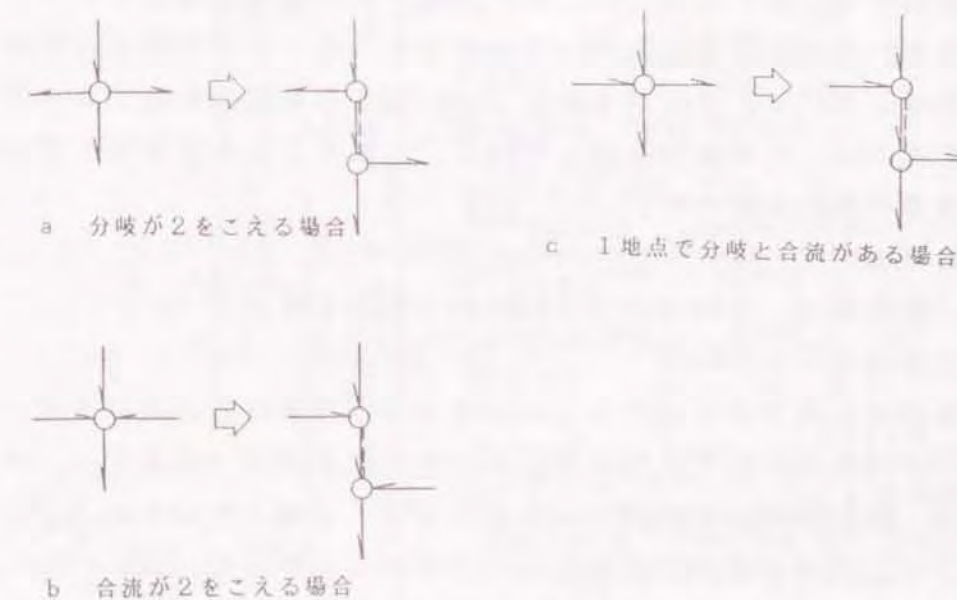


図 7-3 ネットワーク構成の留意事項
 実線と破線の2重線のリンクはダミーのリンクをあらわす。

7.3.4 コードづけ

ネットワークの具体的な構成はコードによってあらわす。先に述べた樹木構造をコードによって示すわけである。コードの階数は任意でよい。十日町市についての例でみると5が適当である。コードは流末を基準につけることにする。上位の方からHは流末、Rは流末への取付け、ABCは水路についてのランクとし、合計階数は5となる。図7-2に示されているコードにおいては、Hのランクは3桁、Aのランクは2桁、他のランクは1桁であらわし、コードは見かけ上は8桁となっている（ただし最初の0は省略している）。

コードづけは次のように行なう。

①ランクH

流末にそれぞれ番号をつける。数値の付与は主要と見られる端末ほど大きい値とする。同一の溪流や水路に流下する場合はまとめて同一流末とする。

②ランクR

一つの流末において取付けが複数の場合は、それぞれに番号をつける。

③ランクA、B、C

流末の位置を樹木の幹とし、番号のつけかたは、杉森(1992¹⁾)に示す通りであり、まず流末に接する最初のリンクについてランクAを01とし、B、Cの値はそれぞれ0とし、0100と置く、流れに逆らう方向で次のリンクはランクAの番号を1つ増して0200とし、以下同様に梢に向って順次Aの番号を増していく。枝分かれ（水路の合流）があればそれをランクBの枝とみなし、Aの番号はそのまま、Bの番号を増していく。ランクBの枝においてさらに枝分かれがあれば、それをランクCの枝とし、Cの番号を増していく。ここでどの水路を幹とするか枝とするかは全体の判断から決める。

④コードの優先順位

コードの優先順は、H R A B Cの順でかつ降順とする。

⑤分岐点におけるコードづけ

水路の分岐点で両方のリンクからのコードづけが重なる場合は上位のコードに従ってコードづけを続ける。例えば図1の#20の分岐点（以後ゲート#20という。）では、2010500と1010110のコードのリンクが接しているの、前者のコードを優先させ、ゲート#20に流れ込むリンクのコードは2010600とする。

⑥コードの値の振り分け

コードの付番は地域全体における相対的位置関係を示すものであり、水路の重要性和必ずしも一致するものでないが、地域を縦横断するような水路には優先度の高いコードをつける。また、流雪溝は言うまでもなく水源があつてはじめて成り立つので、コードの最終の端はどれかの水源につながるものでなければなら

い。このようにして作成した十日町市について試みた流雪溝ネットワークのコード付けを図7-4に示す。

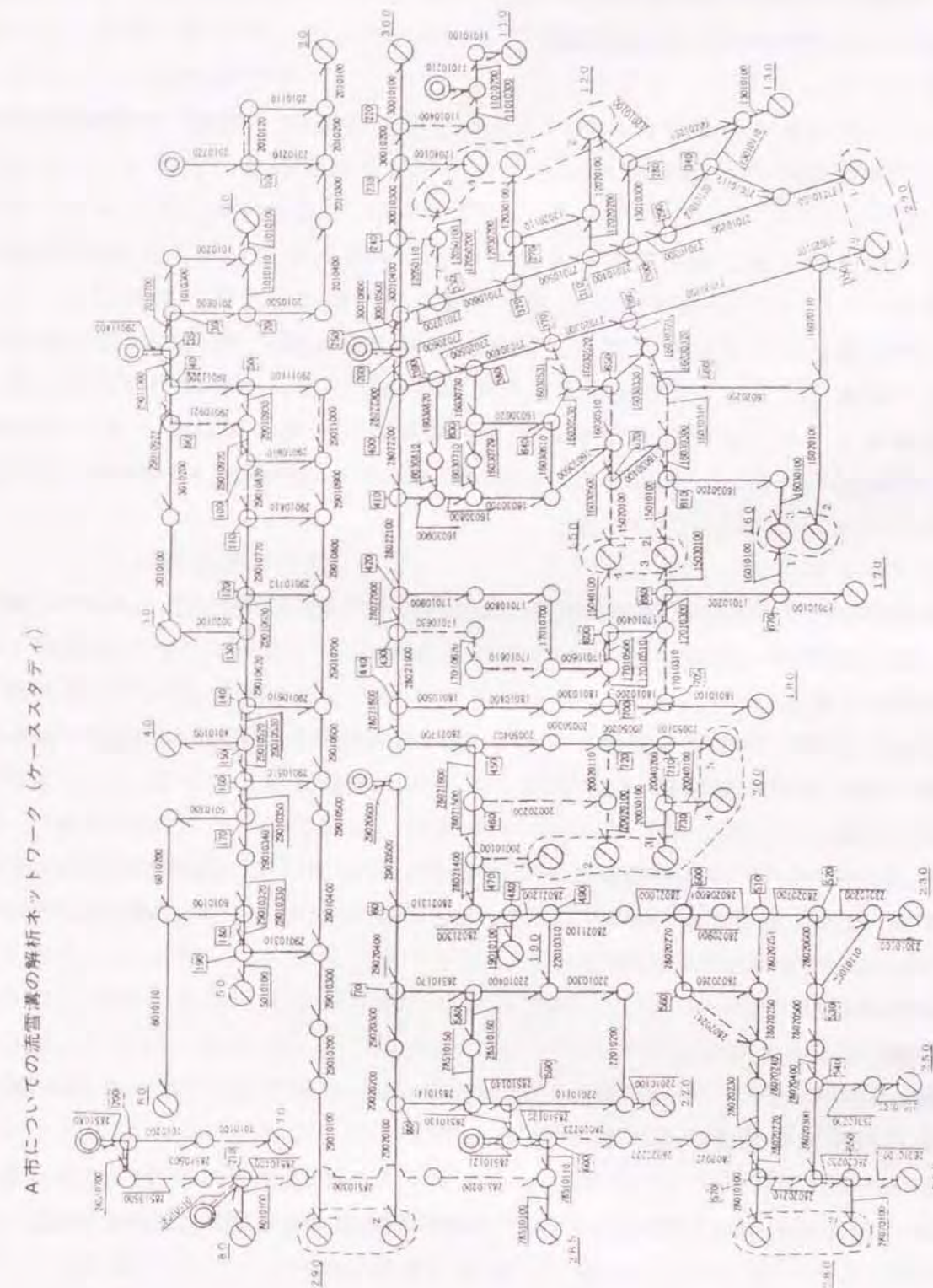


図7-4 流雪溝ネットワークのコード付け事例（十日町市）

7. 3. 5 データファイルの作成

一つのリンクに関する一組のデータを1レコードとしてデータファイルを作成する。格納する項目は次のものである。

①ネットワークの構成に関するもの

・計算コード

先に示したHからCまでの5階のランクで示されるコードで、計算処理に関係するので計算コードとよぶ。

・アドレス

リンクにそれぞれ固有のアドレスをつける。計算コードに一致させればよい。

・名称

リンクを識別する名称をつける。計算上必須ではない。

・ゲート番号

分岐があるとき、位置を特定する番号を与える。分岐の関係にあるリンクに形式上の優劣をつけ姉妹の関係とし、姉にあたるリンクのレコードにその番号を格納する。

・分岐アドレス

姉妹の関係となるリンクについて、姉の方のレコードに妹のアドレスを分岐アドレスとして格納しておく。

・分岐率

分岐点において分岐する割合を示す。姉の方のレコードに親にあたるリンクから妹側へ流れる割合を格納する。

・母アドレス

分岐するレコードに分岐の幹にあたるレコードのアドレスを母アドレスとして格納する。これは、流量の計算において使われることはないが、後で示すグループ分けにおいて必要とする。

②計算目的に関する項目

・発生量

水源における流水、先に定義した自由流水および各リンクで投入される雪のそれぞれの発生量を変数として表わす。

・流下量

流水、自由流水および雪それぞれについてリンクを出る時の流量を変数としてあらわす。

・流量に関するその他の項目

流水、自由流水および雪それぞれについて、分岐する量や合流により流入する量がわかるようにしておく。

③作業のシミュレーションに関する項目

・分岐開始サイン発生アドレス

分岐の変更を指示するサインが必要であり、指定したリンクの作業が完了したときサインが発生するようにしておく。ここで指定するリンクのアドレスは前同様姉のレコードに格納する。

・分岐復帰サイン発生アドレス

分岐がもとの状態に復帰するためのサインを発生させるリンクのアドレスを先同様姉のレコードに格納する。

・排雪需要量

各リンクにおいて排雪を必要とする量を変数として与える。

④流雪溝に関する要件

必要に応じて流雪溝の断面、勾配等のデータを格納する。

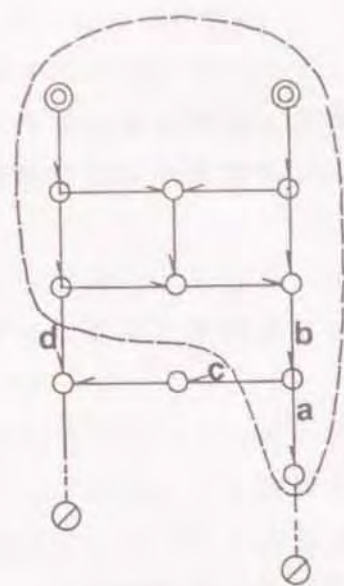
⑤その他

計算処理やデータ整理に必要な係数およびサイン類を必要に応じて用意する。

7. 3. 6 面的流量の計算

計算の内容は、樹木の梢から幹に向かって流れる流量を枝または幹のすべての場所で計算することにある。道路排雪と違う点は、水路の分岐により他の系統の枝に移る場合があることである。計算は道路排雪のネットワーク解析において運搬車両等の経路における集中量を求めたPタイプの計算(杉森、1990)を修正した方法によって行う。これを図7-5により説明する。まず一連のレコードを計算コードの降順にソートしておく。計算はシーケンシャルに行ない、図7-5のリンクaがi番目のレコード、リンクbがi-1番目のレコードとすれば、bの処理のあとaの処理を行なうとき、aに分岐の情報があった場合、分岐アドレスで示されるレコードcにbの流下量のうちから分岐率の分だけ先送りしておく。このため、分岐先のレコードの計算コードは分岐するレコードより下位のものでなければならない。ちなみに、リンクdについてはすでに分岐される量が先送りされている。このような計算を流水、雪および自由流水についてそれぞれ別個に行い、すべてのリンクにおける流下量を求めることができる。

分岐の内容、すなわち分岐開始アドレス、分岐復帰アドレスおよび分岐率は固定したものではなく、ある区域の作業の進捗状況によって変わるものとしてよい。このことは作業のスケジュールの決定に関係し、各ゲートの分岐の内容に関係する情報は、ある区域の作業の進捗により決まるものとし、あらかじめ作業条件として用意しておけばよい。



修正したPタイプの計算方法
リンクaにおいて点線で囲まれ
た範囲のリンクからの発生量が
集中し、この集計計算を全リン
クについて行なう。ただし分岐
があるときはあらかじめ先送り
しておく

図7-5 修正Pタイプの計算

7. 4 作業のスケジュールと水配分計画

7. 4. 1 配水計画の現状

ダンプトラックによる道路排雪の場合は、排雪が完了していない区間をダンプトラックは通過できないという制限を受けるので、作業は排雪場に近いところから順々に始めなければならず、必然的に作業スケジュールが決まるが、流雪溝への配水は区域内の雪処理の進捗に無関係に行うことができるので、作業スケジュールは随意に決めることができる。しかし現実においては、水源から得られる水量には限度があるので、区域毎に時間を区切って配水しなければならず、かつそれが公平に行われることが重要である。新井市の例では各区域への配水の時間を日毎に変えるローテーション方式の水配分時間表が作成されている。

7. 4. 2 排水計画の作成の手順

排水計画の作成の手順は次のとおりである。まず、積雪および水配分に関する条件のもとでの試行により作業スケジュールを求める。これは後で示す方法により各区域の作業の開始時刻と終了時刻の算出からわかることである。次に、水配分の条件をいろいろ変えて試行を繰り返し、より合理的な作業スケジュールを見つけ出す。さらに、そのスケジュールの全時間を幾つかの時間帯に分割し、作業時間が1つの時間帯に含まれる区域を1グループとして、地域全体をグループ分けする。各グループごとに作業の時間帯が割り当てられたことになり、この時間帯に対する時刻をローテーション方式で日毎に変えていくものが求めようとする排水計画である。

7. 4. 3 排水計画における目標

上の合理的なことの要件として、a) 自由流水の流末への流出が少ないこと、b) ゲートの開閉の回数が少ないこと、およびc) 現実的に実行可能なこと、があげられよう。これは多目的計画の課題になるが、解を得ることについては現実的な判断で済ますことにする。

7. 4. 4 作業のシミュレーション

計算のフローは図7-6に示すもので、これを時間間隔 Δt の逐次計算により行う。処理内容を以下示す。

分岐の確認・変更：降順にソートされた全レコードについて、分岐開始サインもしくは復帰サインに関係するレコードを検索し、そのリンクの作業状況の指示により分岐率を与える。次に、図のXからYまでの処理は降順にソートされたレコードごとにシーケンシャルに行うものである。

分岐の処理、流量の計算：これらについては、7. 4. 5節の説明の通りである。

作業の実施：自由流水の流入があれば排雪作業を行う。このとき、先の(7-1)式による分の雪の投入がなされ、かつそれにあわせて排雪需要量が減じ、また自由流水が消費されることになる。

計算における条件は現実に似せて、

- ①分岐点における水配分の割合は現実に準じたものとする。
 - ②作業は流入する自由流水がある基準量 q_{min} 以上のとき行う。
 - ③作業はある一定区域ごとに順次行う。
 - ④作業はある一定区域内では水源に近いところから行う。
 - ⑤作業はある特定の区域を優先して行うことがある。
- と置く。

作業状況の判断 溢水に関する情報、自由流水の端末への流出量（無駄な水の流出）等を整理しておく。ここでは整理しておくだけであって、結果の良否により一連の処理を変更することは意図しない。

このような逐次計算を行うことによりすべてのリンクについて作業の開始と終了時刻がわかり、かつ全時間を通して溢水の判断のための流水および雪の流量、さらに流末への自由流水の流出量を詳細に求めることができる。このようにして、水源からの取水量やゲートの開閉の方法を変えた比較計算を行えばよい。

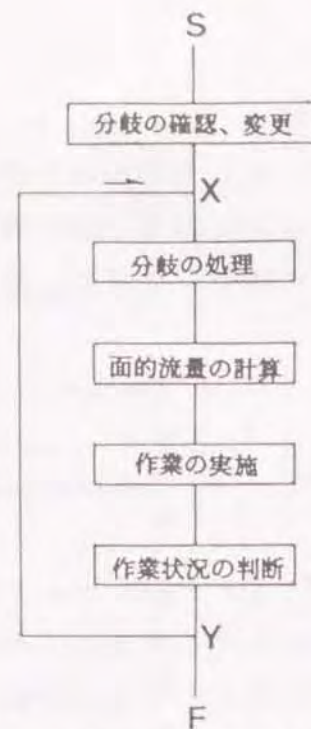


図 7-6 シミュレーションのフロー

7. 4. 5 作業の開始時刻、終了時刻

各リンクについてこれらを次のようにして求める。時刻 t_i において時間幅 Δt の間の作業をみてる。あるリンクに流れ込む自由流水を q とすると、そのリンクの排雪需要量が 0 ならば、当然自由流水はそのまま次のリンクに流出する。いま排雪需要量は 0 でないとし、 $q < q_{min}$ ならば、作業は行われずに自由流水はやはり次のリンクに流出する。つぎに、1 リンクにおける時間当たり最大の雪の投入可能量を V_{max} とおき、 V_{max} に対して (7-1) 式で決まる水量を q_{max} とおき、 $q_{max} \geq q \geq q_{min}$ ならば、(7-1) 式で q に対する投入量を V とすると、 $V \Delta t$ が Δt の間に行われる作業量である。さらに、 $q > q_{max}$ ならば、 Δt 間の作業量は $V_{max} \Delta t$ であり、 $q - q_{max}$ の自由流水が次のリンクに流出する。ここで、当該のリンクについて、 Δt 時間帯で作業が開始された場合は作業開始時刻は当然 t_i とし、作業が完了した場合は $t_i + \Delta t$ を終了時刻とおく。

7. 4. 6 作業時間帯のローテーション

上で得られたスケジュールのままでは、各リンクの作業の時間帯は固定しているため、区域間の公平性に反する。ところで、先にも述べたように、流雪溝の場合は作業を開始する区域の制限はないので、上で得られたスケジュールの時間軸の最終を最初の位置に重ねあわせてループとすれば、どの時間位置から作業を開始してもかまわないことになる。このようにして、作業の開始の位置をずらすことによりローテーションの時間表を作成することができる。

7. 5 作業スケジュールの計算例

7. 5. 1 計算の条件

図 7-2 のネットワークについて計算を試みる。係数等の値は次のようにおく。(7-1) 式に関して、 $m_1 = 1$ とし、雪の密度は $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ (新雪) または $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$ (しまりゆき) とおく。

1 リンク 1 時間当りの最大作業量を最大投入量と解し、 V_{max} とおき、1 リンクあたり 3 箇所の投入口があると仮定し、流雪溝設計運営要領 P42 を参照して 1 律 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ とする。作業を行う最小の自由流水量 q_{min} は、 V_{max} の $1/2$ の作業ができる水量とする。

ゲートの開閉および作業に関する条件は表 1 に示す。例をあげて説明する。図 7-2 からわかるように、アドレス 2010700 のリンクから 2010600 (L1) と 1010300 (L5) の分岐があり、L1 を優位とみているので、L1 にゲート番号 #30 を与え、1010300 を分岐アドレスとしている。次に、#30 の分岐率については、初期の状態では分岐するリンクへの流出は 0 であり、分岐開始アドレス 2010300 のリンク L4 の作業が完了してから 0.5 となり、さらに、分岐復帰アドレス 1010200 のリンク L6 の作業が完了すると再び 0 となるようにしている。現実には、L1 ~ L4 のリンクはこの順番で作業が開始され、L4 からの指示はこれらすべてのリンクの作業が完了してから発せられるようにしている。水源 S1 および S2 からの流入量は、それぞれ $160 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ とする。

各リンクにおける排雪需要量を表にあるように与えておく。これらは、1 リンクあたりの対象面積を $50 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 、積雪深を 0.5 m としたときの 150 m^3 を標準としてランダムに変動させた任意の値である。例題においては、新雪の場合もしまりゆきの場合も同じ値を使うことにする。したがって、新雪の場合は、道路上に積もった 0.5 m の降雪量に相当し、しまりゆきの場合は、屋根面積を道路面積の $1/2$ とした場合の 1 m の深さの屋根雪処理の後始末と解釈されるものである。

溢水の判断をしない場合は、地域に関して求められる要件は排雪需要量のみである。逐次計算の時間間隔 Δt はここでは 5 分とおく。

7. 5. 2 作業スケジュールと自由流水流出の算出結果

2 種類の雪質の場合について計算を行う。この節の目的は、雪質の違いによって必要とする水量が異なるので、計算による作業スケジュールと採用するスケジュールについて検討することにある。

ケース 1 : 新雪、 $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$

ケース 2 : しまりゆき、 $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$

ケース1の場合、1リンクにおける時間当たりの最大作業量は $V_{max}=100$ m^3/h であり、必要水量は(1)式により $90m^3/h$ であり、作業を行う最小の水量は $45m^3/h$ とおける。ケース2の場合は、それぞれ $70m^3/h$ および $35m^3/h$ である。両ケースについて、各リンクについて作業の開始および終了時刻を求めバーチャートであらわし、また、流末への自由流水の流出を算出した結果を図7-7および図7-8に示す。なお、各リンクの並びは、表7-1では計算コード(アドレスに一致)の降順に従っているが、図では図7-2との参照がしやすいように並びかえてある。時刻は作業開始時の一番早いものを0とした時間で表している。

表7-1 ゲートの開閉および作業条件

アドレス	名 称	ゲート 番号	分 岐 アドレス	分岐開始 アドレス	分岐復帰 アドレス	分 岐 率			排雪需要量 m^3	自由流水 発生量 m^3/h	備 考
						初期値	分岐時	回復時			
2010700										160	水源S1
2010600	L1	#30	1010300	2010300	1010200	0	0.5	0	130		
2010500	L2	#20	1010110	2010300	1010100	0	1.0	0	110		
2010400	L3								170		
2010300	L4								120		
2010220										200	水源S2
2010210	L9	#10	2010120	2010100	2010110	0	1.0	0	160		
2010200	L10								190		
2010120	L11								140		
2010110	L12								110		
2010100	L13								170		
2000000											流末S20
1010300	L5								140		
1010200	L6								160		
1010110	L7								170		
1010100	L8								170		
1000000											流末S10

ネットワークは図1による。リンクのコードをそのままアドレスとして使用している。流末についてはリンクの表示を与えていないが、ファイルにおいてはリンクに準じて作成してある

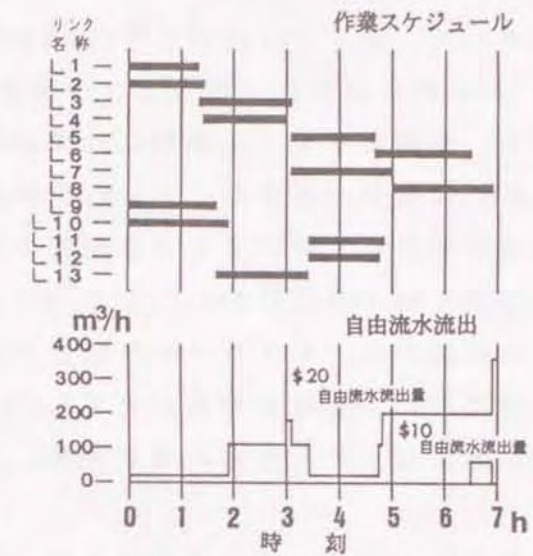


図7-7 計算結果1

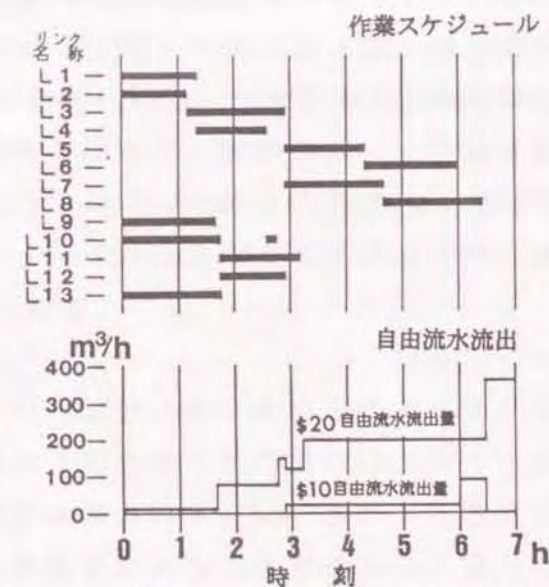


図7-8 計算結果2

雪質によって必要とする水量の違いが、図7-7と図7-8のバーチャートの違いに表れている。L2の作業について、図7-8の場合は時間あたり最大作業量だけ作業ができるのに対して、図7-7ではL1で $90\text{m}^3/\text{h}$ の自由流水を消費するため、L2には $70\text{m}^3/\text{h}$ だけが流れ、従って、作業量は時間あたり最大作業量の $70/90$ (78%) になり、作業終了までに余計に時間がかかっている。また、図7-8において、L10の作業が一時中断している理由は、ゲート#10については、本例題ではL13の作業完了時にすぐさま変更のサインが発せられるようになっているために、時刻1時15分においてL10の作業が未完了のまま#10のゲートはL11方向に開かれ、L10への自由流水が途絶えたためであり、そのあと、時刻2時35分においてL4の作業が完了して、S1からの自由流水の流下量が最小の作業量以上になったときに作業が再開し、時刻2時45分に終了することになる。

それぞれの図を評価してみる。図7-7のケース1について、ゲート#10の分岐開始の条件をL10に従うようにすれば、L11とL12の作業時間帯はL13と入れ替わり、地域全体としての作業の進捗が速いことを良とするならば、これの方が優れている。しかし作業の順序をローテーションにより変える場合は差異はない。また、例題の範囲では作業についての選択の余地は少ないので、ここで算出されたスケジュールは合理的の要件を満たしているとみて差し支えない。ケース2については、流末S20への自由流水の流出が長時間ある。また、作業を行う地域は一方の時間帯に偏っているためローテーションを組むときはバラツキが生じる。そこで、地域全体として平均化されたメンバー数で作業を行うとすれば、S2からの取水量を減らし、他の地域へ送水して有効に利用することが一つの案である。取水量が $155\text{m}^3/\text{h}$ を下回る場合、L11、L12、L13の作業の順序はケース1の場合と同じになることが示される。

7. 5. 3 作業のグループ分け

ケース2において水源S2からの取水量を減らせば、ケース1とケース2は類似のスケジュールとなることがわかったので、ケース1に基づき作業のグループ分けをすれば良いことになる。ローテーションのための時間帯の幅はすべて等しくする必要があり、また、各リンクの作業に必要な時間数はいろいろであっても、すべて定められた時間帯の中で終了しなければならない。そこで、図7-7の結果からみると、スケジュールの全時間帯を4区分に分け、各時間帯の幅はおおよそ100分が適当であるといえる。各々の時間帯へ振分けるリンクのグループを班とし、Pをつけてあらわし、構成メンバーを()でくくると、

I 第1案 L1~L13までをまとめて扱う。

P1: (L1、L2、L9、L10)

P2: (L3、L4、L11、L12)

P3: (L5、L7、L13)

P4: (L6、L8)

II 第2案 L1~L8を大グループ1、L9~L13を大グループ2として別の集団で扱う。

大グループ1 各班の構成は第1案から大グループ2に含まれるものを除く。

大グループ2

P1: (L9、L10)

P2: (L11、L12)

P3: (L13)

となる。

7. 5. 4 作業スケジュール表の作成

上において作業のグループ分けができたので、作業を行う時間帯を日毎にずらしてローテーションを組むと、新井市で使用しているような作業スケジュール表がすぐさま作成される。第2案の場合は、2葉の表が必要である。

時間帯の幅は、事例では100分が適当であるが、全リンクの排雪需要量がある倍率で一様に変わったとすれば、作業スケジュールの時間幅はその倍率だけ変化する。したがって、時間帯の幅は、基準となる降雪または積雪深を考慮しながら決めることができる。

また、次のことに留意する必要がある。配水計画においてあまり細かい取り決めや余裕のないスケジュールは混乱のもとになり、現実にはそぐわない。現実に対応した判断を加えるべきである。

白山町北部流雪溝水配分時間表

(参考)

		各班水配分時間(80分)									
		6:00	7:20	8:40	10:00	11:20	12:40	14:00	15:20	16:40	
1	2	3	4	5	6	7	8	9			
2	1	2	3	4	5	6	7	8			
3	1	2	3	4	5	6	7	8			
4	1	2	3	4	5	6	7	8			
5	1	2	3	4	5	6	7	8			
6	1	2	3	4	5	6	7	8			
7	1	2	3	4	5	6	7	8			
8	1	2	3	4	5	6	7	8			
9	1	2	3	4	5	6	7	8			

図 7-9 (参考図) 新井市の水配分表

7. 6 リンクのグループ分けと任意のスケジュールの評価

前節で述べた手法で作成されたスケジュール表について次の問題が残されている。

- ① 任意の作業スケジュールの可否の判断。
- ② 作業スケジュールとゲートの開閉の指示。
- ③ スケジュール表作成までの試行の回数を減らすこと。

流雪溝ネットワークの場合、排雪ネットワークのような作業順序の制限を受けないので、任意の位置から作業を開始することができる。しかし、面的に広がりがある場合、そのような任意のスケジュールが、他のリンクとの競合関係で許容されるかどうかの判断が必要になる。また実務的には、各地点の作業に関する各ゲートの開閉の情報を知っておきたい。さらに、スケジュール表作成は実際の経験に準じ試行がもとになるが、その回数を減らしたい。そのためには、各リンクについて、主要なゲートの開閉に関するグループ分けをしておくことが必要である。その方法を示す。

まず、あるリンクの作業に関するゲートの検索を行う。いま、リンク m に作業に適した水量が流れているとすると、それは水源からそのリンクまでのいくつかのゲートの開閉状況で決まるわけである。関係するゲートを A_1, A_2, A_3, \dots

...、 A_m とし、それぞれのゲートの開閉状況を $a_{1m}, a_{2m}, a_{3m}, \dots, a_{nm}$ としたときの状態を $G(m)$ とし、下記のように表す。 $G(m)$ は具体的には流量とおいてもよい。

$$G(m) = (a_{1m}, a_{2m}, a_{3m}, \dots, a_{nm}) \quad (7-6)$$

$a_{1m}, a_{2m}, a_{3m}, \dots, a_{nm}$ は具体的には各ゲートの分岐率であり、0 から 1 までの区切りのよい値をとるものとする。左右いずれか一方方向づつ流す場合は、0 または 1 であり、左右同等に流す場合は 0.5 となる。1 つのリンクについて水源までの複数のルートをもつ場合があるので、それらを G_1, G_2, \dots で区別する。このあとの説明で必要以外は添字をはずして扱う。 $G(m)$ に関するゲート $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ は、全ゲートのうち特定のものであり、まずこれの選択をしなければならない。これはすでにファイルの作成において、分岐点での母アドレスの指定およびレコード間のランク付け等の準備をしてあるので、全レコードを計算コードの昇順にソートし、シーケンシャルにアクセスすれば、すべてのリンクについて関連するゲートを検索し、 $G(m)$ を具体的に決めることができる。模式的に図 7-10 でみると、 $G(m)$ は次のようになる。 W, W_1 および W_2 はそれぞれ水源の水量である。

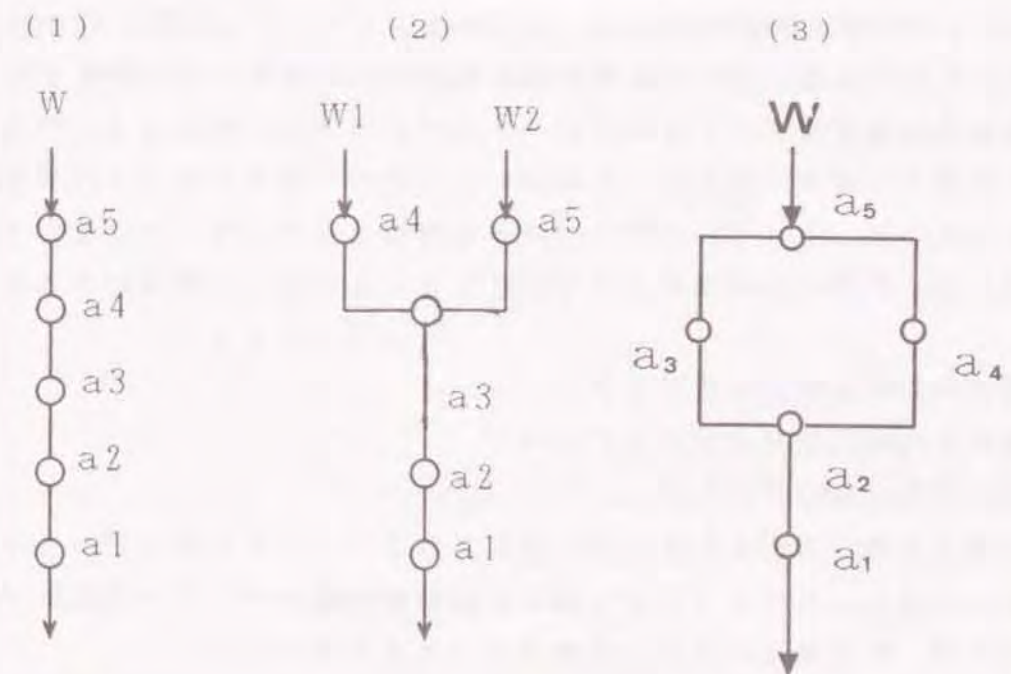


図 7-10 ゲートの組み合わせ関数 $G(m)$

(1) の場合

$$G(m) = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 W$$

(2) の場合

$$\begin{aligned} G(m) &= a_1 a_2 a_3 a_4 W_1 + a_1 a_2 a_3 a_5 W_2 \\ &= G_1(m) + G_2(m) \end{aligned} \quad (7-7)$$

(3) の場合

$$\begin{aligned} G(m) &= a_1 a_2 a_3 \overline{a_5} W_1 + a_1 a_2 a_4 a_5 W_2 \\ &= G_1(m) + G_2(m) \end{aligned}$$

ただし、 $\overline{a_5} = 1 - a_5$

(2) および (3) の場合は、リンク m はそれぞれ $G_1(m)$ と $G_2(m)$ の 2 つの関数を有することになる。

つぎに、 $G_i(m)$ についてのグループ分けを行う。 $G_i(m)$ のグループ分けは各リンクのグループ分けと同一視できる。グループ分けは、ゲートの開閉に起因するものであり、ゲートの数が増えるにつれて組合わせの数も多くなる。そこで実質上は重要なゲートでのグループ分けにとどめておけばよいであろう。各リンクに関係するすべてのゲートについて (7-7) 式で示すような組合わせが分かっているので、それぞれのゲートがとる値にしたがって、すべてのリンクの $G_i(m)$ は、各ゲートの値を 0 もしくは 1 としたとき、つぎのいずれかに類別される。

- ① 値が 0 の時に配分を受けるグループ
- ② 値が 1 の時に配分を受けるグループ
- ③ 値に関係のないグループ

このようにして①もしくは②に分類されるグループの多いゲートほど重要性が高いといえる。このようにして選んだ重要度の高いゲートから順次グループ分けを行えば、階層構造のグループ分けができることになる。

各リンクのグループ分けができれば、はじめに述べた課題の解決に適切な情報を与えることは明らかである。

7. 7 まとめ

本章では、流雪溝の設置が面的に広がった流雪溝ネットワークについて、その運用および今後の流雪溝の面的整備技術の構築を目的とした解析手法を提示した。

ここでの面的取り扱い方法は、前章の排雪ネットワークにおいて提示したものに従う。流雪溝ネットワークを流末を幹とした樹木構造とみなし、それを具体的に示すために、流雪溝のある区間毎に階層的コードづけを行う。面的計算の主な内容は、分岐ゲートの開閉の情報により、水路の各地点を流れる流量と流雪量を詳細に算出することであり、その方法は、前章の排雪システムの解析で提示された P タイプの計算を修正したもので行う。これにより、流雪溝ネットワークの各地点において、流水量および投入した雪の流下量がわかり、流雪溝の溢水危険、雪の投入の可否の判断をすることができる。

次に、ゲートの開閉の指示を現実に行われている流雪溝の管理方法に近い形で与えることにより、作業のシミュレーションを行い、いろいろな条件による比較検討により合理的なスケジュールを求めることができる。そのスケジュールをもとに作業の時間帯と区域の割り振りをを行い、現実においてローテーション方式で実施されている水配分計画表を容易に作成できる。

ここで提示した手法は、流雪溝の運用に関して地域において蓄積された経験を支援するとともに、新規の計画においては経験の不足を補完するものとなり得る。

また、ここでの手法は、いろいろな積雪状況における流雪溝の有効性を評価することになり、都市全体の雪対策の議論の重要な一部を担うことができる。

第8章 歩道上の積雪調査と歩行者帯確保について

8.1 はじめに

本章の目的は、歩行者の通行の障害となる歩道上に積まれた積雪状況の調査および解析の方法を提示し、これを近年の冬期の福井市における事例により検証し、実務的施策に対して合理的な根拠を与えることにある。本章で扱う手法は、第5章で示した雪の積み上げモデルによるものである。

これまで道路の雪対策は、自動車交通に重点がおかれてきたが、目標が経済産業活動を主とした人および物流の交流ラインの確保から、日常的な快適性の維持にまで目標が高まるにつれて、歩行者対策が重要になってきた。しかし、新潟県上越地方で古くから見られるガンギは特別な事例として、一般的に歩行者のための雪対策は遅れている。積雪時の歩道の状況をみると、車道除雪による雪が積み上げられ、さらに住宅の出入り口や屋根の雪までが持込まれることがある。積み上げられた固い雪は、処理が極めて困難である。歩行者対策の方法には、①計画段階において除雪のための堆雪空間を確保すること、②歩道融雪、歩道除雪等の実施、③地域住民の協力、があげられる。まず、歩道の積雪の実態を把握し、特に②③については実施にあたっての障害を克服することが必要である。

そのため本章では、歩道上の雪について、自然状態の雪と堆雪との区別をし、堆雪の起因を調べ、対策方法の解析検討を行うことが主要な課題となる。

8.2 歩道の雪対策の現況

道路の雪対策が道路の幅員構造にさかのぼって扱われるようになったのは比較的新しい。昭和45年改定の道路構造令で、切り土区間において、中央帯および路肩を除雪のために広くとることが初めて示された。昭和58年の改定では適用の範囲を切り土区間以外にも広げ、路肩、歩道等の幅員は除雪を勘案して定めるものとなった。ここでの考え方は、除雪された雪は路肩および歩道等に積み上げるものとし、そうなれば路肩等が本来有する機能の低下が生じるが、それをどこまで許容するかが問われる。しかし、新規の道路であっても除雪による堆雪を計画目的の中に取り入れているケースはまれである。最近では歩道や植樹帯を本来の目的に従い広くとる傾向にあり、このことは結果として除雪をも考慮していることになる。

歩道もしくは歩行者のための雪対策方法では、上越地方の雁木は極めて優れたものであり、なおこれがセットバック方式で設置されていることは驚くべきことである。しかしこれを新しく実施することは容易でない。歩道融雪の事例は近年増えつつある。これには、コストに関するもののほか、歩行車への快適性が求め

られ、地下水による無散水融雪が優れている。事例として、歩道と車道の同時融雪を行い地下水の有効利用をはかる歩道無散水車道散水方式がある。歩道除雪については、近年小型除雪機の使用がやはり増えつつある。これには、10psまでのものと、20ps程度のものがあり、地域住民により簡便に使えるものが望ましい。小型のものは容易に使える反面除雪等による固い雪は処理できない。最初に示したように、歩道上の雪の実態を知り、地域住民の協力を得やすい体制を整備することが必要である。

8.3 車道除雪の歩行者帯確保に対する影響

8.3.1 雪堤の形状

除雪等による歩道上への雪堤の断面形状は、既に第5章で述べたモデルに従い、図8-1に示す。記号の意味を次のようにおく。

W : 車道幅員 (m)

W_e : 歩道幅員 (m)

a : 雪堤の底辺幅 (m)

H_e : 新雪に換算した積雪深 (m)

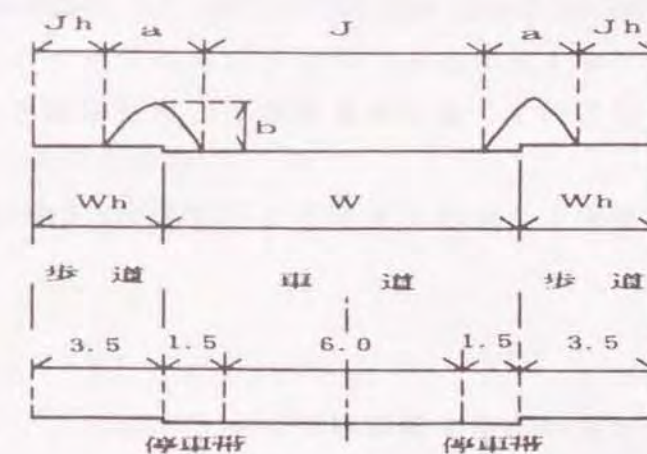
α : 積み上げた雪 (雪堤) の形状係数

k : 雪堤として積上げた体積比の逆数

σ : 処理率とし、路上の雪全体のうち、処理の対象になる比率を示す。

r : 堆雪率とし、通路や家の玄関先を除いて雪の積み上げが可能な範囲の比率を示す。

S : 雪堤の断面 (m²)



除雪による雪堤の積み上げおよび道路幅員
道路幅員は本報告で扱う標準のものである。
単位; m

図8-1 除雪による路側への雪の積み上げ

ここで次のことに注目したい。車道の除雪幅を J 、歩道において車道除雪の影響を受けない範囲を Jh とすると、 Jh は融雪や小型の機械力による雪処理が可能な領域であり、これがどれだけ確保できるかが本章の主要な課題である。

雪堤への雪の積み上げは次の2通りがある。① J の範囲だけの雪を積み上げる。② J と Jh の範囲の雪を積み上げる。降雪時には十分に努力して除雪されるとすれば次の式が成り立つ。

ケース①：

$$\sigma H_e (J + 2a) = 2rkS \quad (8-1)$$

ケース②：

$$\sigma H_e (W + 2Wh) = 2rkS \quad (8-2)$$

ケース①は、歩道融雪が行われる場合、または雪を積もったままにしておける範囲を想定している。ケース②は歩道の除雪を想定している。図8-1の道路幅員構造から

$$J + 2Jh + 2a = W + 2Wh \quad (8-3)$$

である。

雪堤について最も観測しやすい量は高さであるので、 S および底面幅 a を高さ b との関係で表わしたい。既に述べたように、雪堤の断面について開き幅を x 、立ち上がり高さを y とすると、 $x : y$ はおおよそ $1 : 1$ である。そこで、 $b/a = 1/2$ とおけるので、膨らみを考慮した形状係数を α として、

$$S = (1/2) \alpha a b = \alpha \cdot b^2 \quad (8-4)$$

とおける。

雪堤の断面形状は頂点を通る軸に対称であるとしているが、歩道に積もった雪をそのままにして積み上げたときは明らかに違ってくる。この場合は、積み上げた雪の影響は対称と想定した範囲まで及ぶものと考ええる。

各係数のうち、 α 、 k および r の値はおおよそ見当がつく。 k に関する雪堤の密度は 400 kg/m^3 としてよいであろう。しかし、 σ の値を決めるのは難しい。雪堤は、降雪毎の除雪で積み上げられ、その間に、積雪深は日射等の融雪による

減少がある。また、雪堤も融雪の影響を受ける。融雪による影響が両者で違えば、そもそも算出の根拠がない。そこで σ を、ある時点において、道路の単位延長当たりの雪堤としてある雪の重量と、道路上に残っていると見込まれる雪の重量の比として決めることにする。 σ の値は降雪と除雪の状況、および観測の時期によって違い、これまで福井と大野で測定した数例では $0.3 \sim 0.7$ の開きがある。急激な降雪があり、すぐさま除雪が行われた場合は大きくなることが予想される。

積雪深は、有効積雪深 H_e でなく、气象台等で観測される積雪深（呼び値） H で表せば現実に即したものになるので、このあと本文での取扱いは積雪深 H で行う。

8. 3. 2 道路除雪による雪の積み上げ

①、②それぞれのケースについて、積雪深 H に対する積み上げ高さ b を求めることができる。ケース①についての算出結果を図8-2に示す。なお、積雪深は呼び値のもので、密度を 300 kg/m^3 とし、一冬を通した議論ができるものとしている。ケース②の場合の b の値はケース①よりも若干大きくなる。

ここで除雪における雪の積み上げをみってみる。除雪トラックのワンウェイブラウの高さの最大部は 1.3 m 、大きいもので 1.5 m あり、Vブラウの場合が 1.7 m であるので、通常の除雪方法では積み上げの限界高さは 2 m 程度と思われる。雪堤がこの高さを超えると車両を道路の進行方向に向けたままの除雪はできなくなり、作業方法を変えなければならず、除雪に要する時間は格段に増大する。このため郊外部では雪堤の切り崩しとロータリー除雪車による排除作業を頻繁に行っているわけである。都市部においては、排雪作業が必要になる。福井県が行っている除雪体制において、積雪深が概ね 1 m に達すると通常体制から緊急体制をとるのは、理由のあることである。

8. 3. 3 車道除雪による歩道の影響

車道除雪の影響を受けない幅 Jh を積雪深との関係で求めることができる。
(8-3) 式より

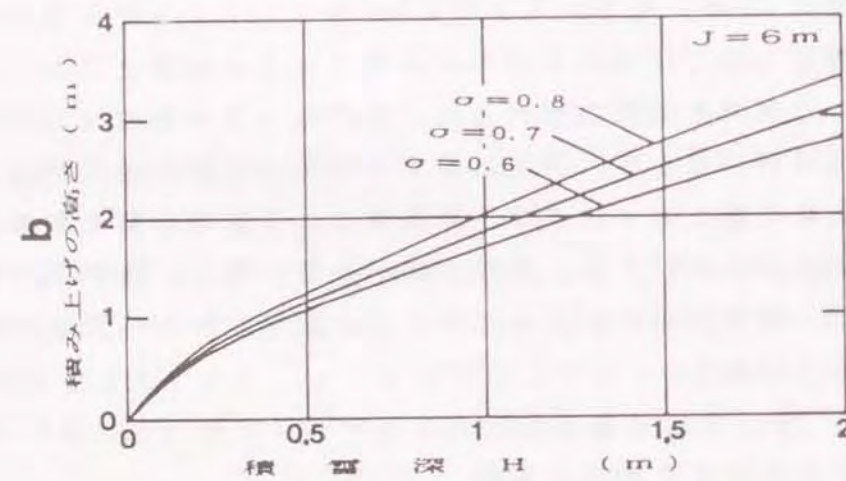
$$Jh = 1/2 (2Wh + W - 2a - J) \quad (8-5)$$

となり、 a の値は b の値により既に算出されているので、①②それぞれのケースについて Jh と H_e の関係がわかる。ケース①について両者の関係の例を図8-3に示す。ケース②の場合 Jh の値は若干小さくなる。図8-4においては、道路幅員が図8-1で示される他に堆雪幅 Wy をさらに加えた場合について示してある。これらの図により、歩行者空間の確保を目的とした道路幅員計画と積雪深の議論

ができる。

道路構造例の運用では、歩行者帯は1.5m確保することが望ましいとあるが、さらに厳しい条件の時を想定し、Jhの値を1m確保するものとし、そのときの限界の積雪深をみてる。処理率 σ を0.7とおくと、堆雪帯を設けない場合の限界積雪深は1.1m、堆雪帯を1m設ける場合は1.5mとなる。堆雪帯が1.5mのときは1.7mであるが、そのときは図8-2によれば雪堤の高さは2.5m以上になり、通常の除雪の範囲を超えている。

福井市の10年再現の積雪深は128cmと推定されるので、道路幅員と積雪深の関係について道路構造令にあるように10年再現値に対する議論ができる。大野市については推定値は211cmであるので、10年再現値に対する議論は無理である。

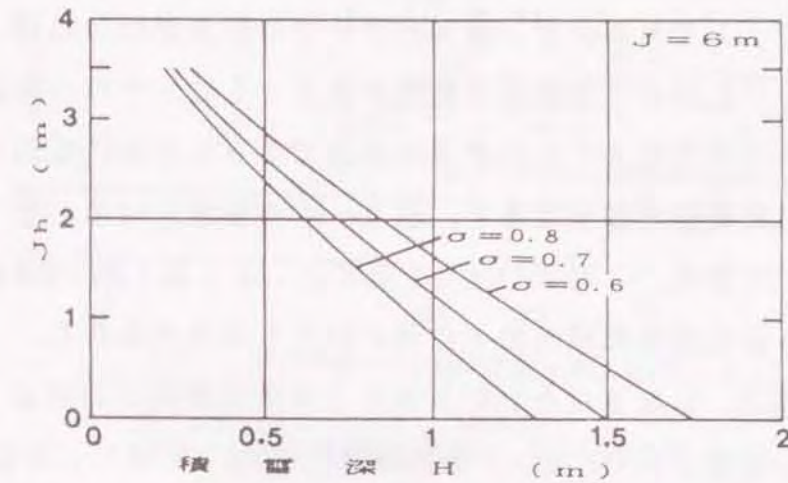


除雪による雪堤の積み上げ高

積雪深は呼び値であらわす。

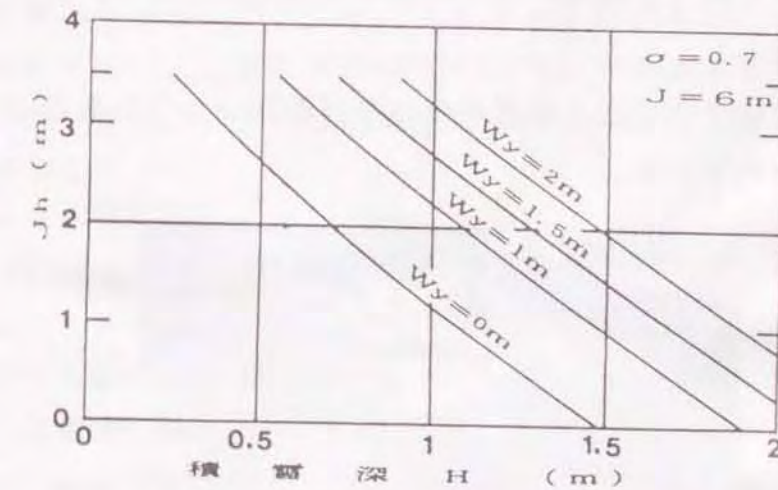
ここで、 $\alpha = 1$, $k = 4/3$, $r = 1$

図8-2 機械除雪におけるHとbの関係



積雪深と雪堤の影響を受けない範囲 (Jh) の関係1

図8-3 Jhの確保と積雪深(H)の間系



積雪深と雪堤の影響を受けない範囲 (Jh) の関係2

図8-4 堆雪帯(Wy)がある場合のJhと積雪深(H)の関係

つぎに、以上述べたことを現地の観測結果から確認し、福井の平年値程度の積雪では、標準の幅員構成の道路における車道除雪の影響は一般に認識されているよりも低いことを明らかにする。既に述べたように雪堤の断面形状の高さと開き幅の関係はおおよそ1:1であるので、高さでピークの位置がわかれば、歩道上を占める範囲がわかる。このような観測事例を写真8-1に、その断面を図8-5に示す。これは後に示す図8-6のP2の位置で1994年に観測したものである。点線に囲まれた範囲が雪堤であり、図8-1の模式図にあわせて、J（ここでは半車線としてある。）、およびJhを示すと、Jhは1.85m確保されている。断面の形状は、右辺は自然積雪の上に積まれたものであるから、左辺と対象でないが、断面の幅は、pを頂点とした2等辺3角形の底辺におおよそ一致している。雪堤の高さは歩道上から0.8m、断面積は0.97m²であり、左辺の車道との段差の部分を検討すると、形状係数は $\alpha = 0.97 / (0.802 + 0.08) = 0.34$ である。断面図の中の数字は積雪密度(kg/m³)を示している。右端は自然積雪とみられるものの値であり、ここでの深さは0.49m、重量は108kg/m²、年最大積雪深に対するみかけの密度は164kg/m³である。雪堤の重量は330kg/単位延長、であり、これには、(J/2 + 雪堤幅)の範囲の雪が積まれているので、処理率は $\sigma = 330 / (108 \times 5.5) = 0.56$ となる。除雪幅Jは、今回の時点では7.8mであった。この時々で除雪に最大の努力が払われるためであり、降雪が継続するとJは次第に狭くなる。

歩道上で車道除雪による雪堤の影響を受けない範囲がかなりあることは、ほかの観測からも確認されている。



写真8-1 車道除雪による歩道の状況

積雪が多くなければ影響範囲は少ない。

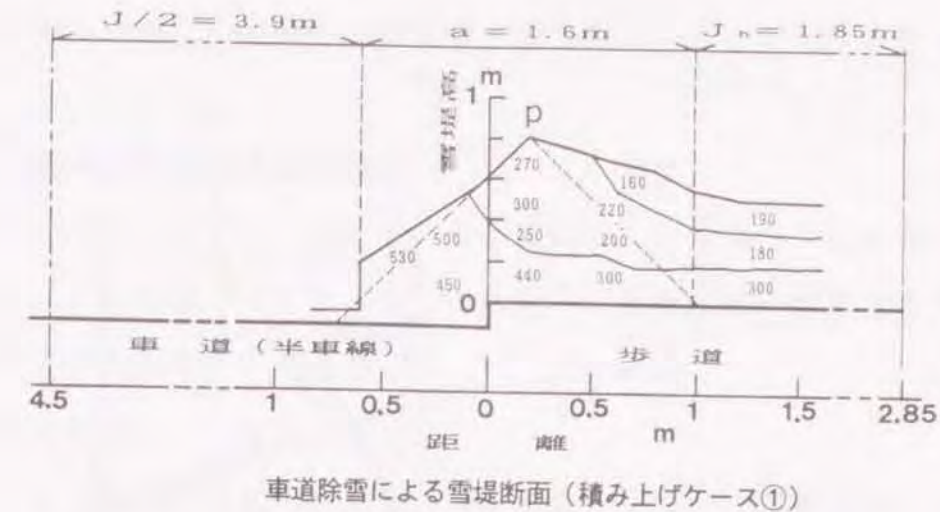


図8-5 車道除雪による歩道の影響

8.4 雪堤の類別と歩行者帯確保へ影響

8.4.1 歩道上の雪堤の類別

先に示した積み上げモデルの検証と、歩道上の積雪の実態の解明を目的に1994年に福井市で行った調査事例を示す（杉森，1995¹³）。類別の基準と目的は次にある。

これまでの雪堤断面の観測結果から、断面の立ち上がりと開き幅の関係は1:1であるので、高さでピークの位置がわかれば、雪堤が歩道上を占める幅がわかる。また、任意の雪堤について、ピークの高さと位置を車道除雪のみによる雪堤のそれらと比較すれば、任意の雪堤の生成について車道除雪以外の起因がわかる。また、そのことを明らかにすれば地域住民の意識の高揚と協力を得るための資料とすることができる。

1988年以来雪が少ない傾向が続いているが、この冬の最大積雪深は1月23日起日の66cmであり、やや平年値の76cmに近いものであった。これまで数年間の断片的な観測によれば、歩道のおおかたにおいて、場所毎に毎年ほぼ同じような雪堤が見られるので、ここで報告する調査結果は特殊事例でないことは明らかである。調査場所は図8-6に示す福井市中心部からやや離れた県道A（福井朝日線）のa1～a2区間および県道B（脇三ヶ福井線）のb1～b2区間である。これらの区間は福井市街地からやや離れた位置にあり、沿線には住宅と小規模の事業所がある。これらの区間で観測された雪堤を雪が積み上げられた経緯で類別する。

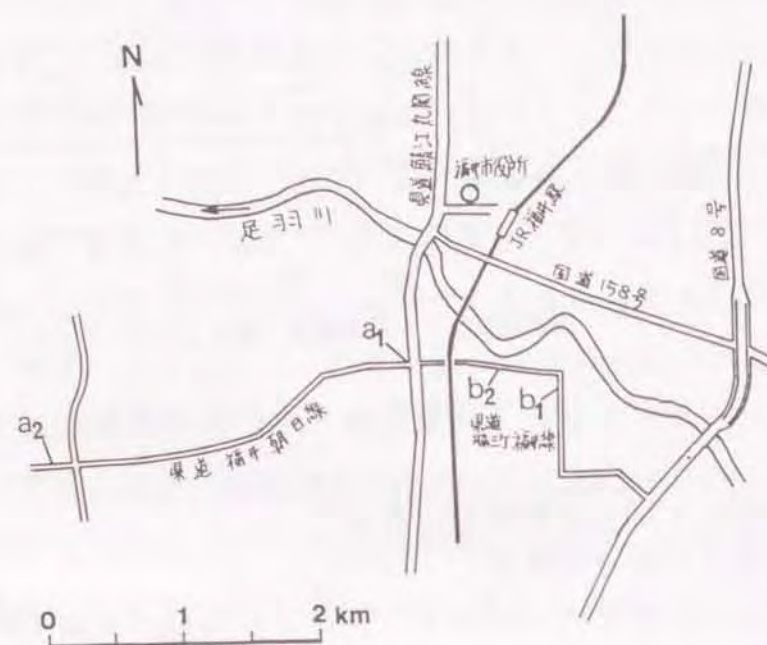


図 8-6 歩行者帯確保状況の調査場所（福井市）

a 車道除雪のみによる雪堤

代表的事例を写真 8-2 (A) の (1) に示す。この雪堤は積み上げモデルのケース①にあたる。今回の積雪の程度では車道除雪の雪の多くは路肩に積まれ、歩道への影響は少ないことがよくわかる。

b 車道と歩道の除雪による雪堤

写真 8-2 (A) の (2) に示す。積み上げモデルのケース②にあたるものである。歩行者帯の確保は地域住民のボランティアにより行われた。

c 個人住宅の出入口から積まれた雪堤

写真 8-2 の (A) の (3) に示す。これらはほとんど人力によって積まれている。後になって処分される場合が多い。

d 個人の駐車場から積み上げられた雪堤

写真 8-2 (A) の (4) に示す。これらはリフト車やショベルカー等の機械力で積み上げられたもので、近年このようなケースが事業所のある地域で多くなっている。処分されずに長期間残るものがある。

e 接続する道路の除雪による雪堤

写真 8-2 (B) の (5) に示す。いわゆる生活道路の除雪においてみられる。このような道路の除雪は機械力を保有する者のボランティアで行われるケースが多い。

f 個人の駐車場の除雪による雪堤

写真 8-2 (B) の (6) に示す。道路に隣接する大規模な駐車場の除雪において低いフェンスを越えて積み上げられたものである。e に類別できるものがあるが、積み上げの経緯を考え別にした。

g 建物屋根から滑落した雪による雪堤

写真 8-2 (B) の (7) に示す。雪が占拠したままでは歩道通行の障害となるばかりでなく、最初の滑落のとき歩行者を直撃する不安がある。このような事例は以前より少なくなったが、きわめて少数箇所で見られる。

この冬の例では、雪が処理されるのは降雪後の 1~2 日の間であり、雪堤の類別はほとんどその時に決まってしまうといえる。



(1) 積み上げタイプ a



(3) 積み上げタイプ c



(2) 積み上げタイプ b



(4) 積み上げタイプ d

写真 8-2 (A) 歩道上の雪堤の状況



(5) 積み上げタイプ a



(7) 積み上げタイプ g



(6) 積み上げタイプ f

写真8-2 (B) 歩道上の雪堤の状況



写真8-3 高さ変化の基準とした雪堤

8.4.2 歩行者帯の確保状況の評価

積雪時の歩行者帯確保の状況について現実的な評価の基準を提示する。歩道上の雪の深さがおよそ10cm以下ならば人の通行は可能であろう。しかし、深さが10cmを超え歩行者の通行ができない場合であっても、自然状態の雪と積み上げられた雪とでは歩行者帯の確保のために必要とする労力等が全く違ってくる。両者が置かれている範囲を識別することは重要であると考え。そこで本報告では、歩道上の歩行者帯確保の状況を、雪堤の構造との関係により次のレベルで表すことにする。

レベル0：雪の深さが10cm以下の場合

レベル1：雪の深さが10cm以下の幅が1m以上ある場合。ただし、歩道全幅ではない。

レベル2：雪の深さが10cm以下の幅が1mに満たないが、自然積雪の範囲を含めると幅が1m以上になる場合。

レベル3：雪の深さが10cm以下の範囲と自然積雪の範囲を加えても幅が1mに満たない場合。

上でいう雪の深さは、自然積雪かまたは積み上げたものかどうかは問わない。上記各レベルを図8-7で表示する。

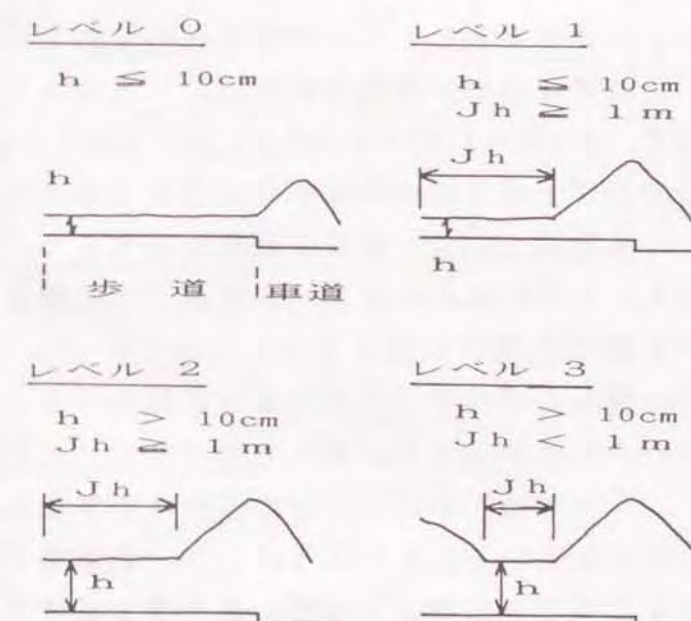


図8-7 歩行者帯確保のレベル

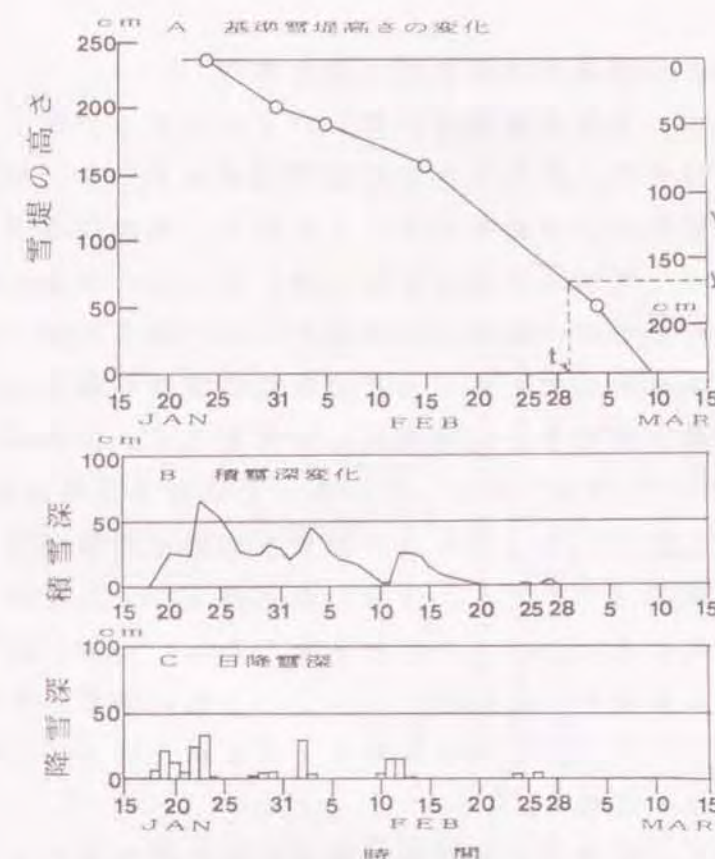
8.5 雪堤が歩行者帯確保に影響する期間

8.5.1 歩行者帯確保に対する雪堤の影響期間

雪堤は、自然状態にある積雪よりも影響する期間が長く、それを次のようにして調べる。雪堤の形状は、融解が進んで規模を縮小してもその形を変えないことがわかっているので、観測の基準となる雪堤を選んでその高さの変化を調べれば、日射等についてはほぼ同じ条件におかれている任意の雪堤の高さの変化の経緯を知ることができる。1994年の観測で、図8-11のP1位置に存在した雪堤を基準にした(写真8-3)。この雪堤は1月24までに積み上げられ、その後の降雪においてはさらに積み上げられることはなかった。基準とするのに都合がよい。ピークの変化の経緯を福井市における降雪積雪の記録とともに図8-8に示す。この雪堤高は1月24日の時点において238cmであり、この値を0cmとおいた逆の座標軸Yをとる。Y軸のある値yから時間軸に平行な線を引き、雪堤の変化曲線との交点を求めると、このときの時間(日)tが高さがyであった雪堤の消滅時刻になる。

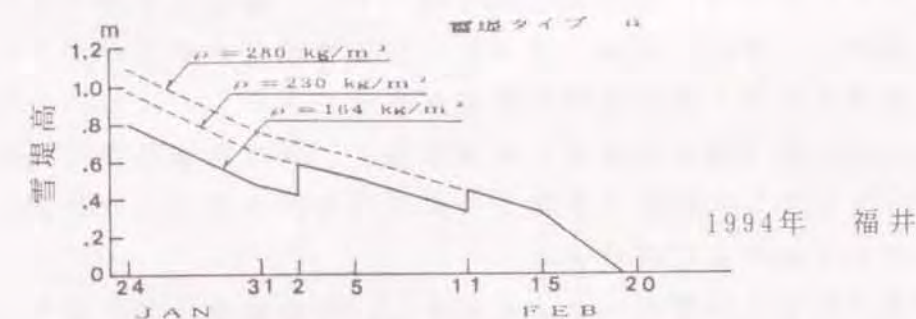
観測日以降の雪堤の経緯は、基準雪堤をもとにわかる。ところが、1月23日の最大積雪深起日の後、2月2日と、2月10～12日の2回かなりの降雪があり、そのたびに除雪が行われたので、時間的経緯を24日の観測結果だけで判断することはできない。そこで、次のような取扱いを行う。2月2日頃の寒波による降雪量の合計は0.44mであり、この時点の雪堤の高さは、この時の降雪が1月23日の時点にあったものと仮定したときの雪堤が経過したものであるとおおむねみなせるであろう。この場合みかけの積雪密度は、1月23日までの降雪量の累計は1.08mであるので、 $164 \times (1.08 + 0.44) / 1.08 = 230 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ となる。積み上げの条件 α 、 σ およびJは、始めの除雪時と同値であったとみなす。2月10～12日にかけての降雪についても同様の取扱いをすると、みかけの積雪密度は 280 kg/m^3 となる。ちなみにこれは、一冬を通しての議論で積雪密度を 300 kg/m^3 としている値に近い。

雪堤の消滅の経緯は、積み上げのケース①の場合は図8-9となる。同様に、積み上げケース②については図8-10に示すものとなる。ただし、ケース②についての α は1とおく。形状が積み上げモデルに従わない雪堤についての最大積雪深起日以降の降雪の扱いについては次のようにした。駐車場等から歩道上に持込まれる場合は場所ごとに作業方法が違うので、最大積雪深時前と後の降雪量の比をとり、後の分について1/2だけ雪堤高を修正した。このようにして、雪堤の自然積雪に比べての残存期間の長さを推定できることが明らかになった。



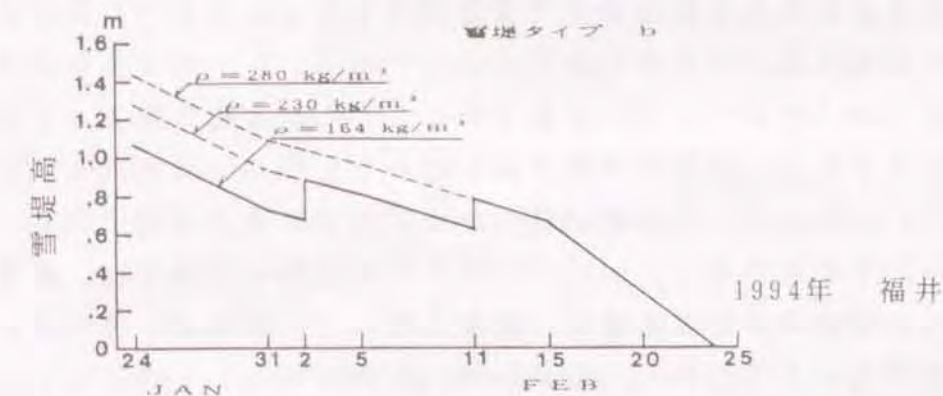
1994年 福井

図8-8 除雪による雪堤高の時間的経緯



1994年 福井

図8-9 除雪による雪堤の時間的変化(1)



1994年 福井

図8-10 除雪による雪堤の時間的変化(2)

8. 5. 2 歩道上の雪堤と歩行者帯確保状況の観測事例

これまで述べた雪堤の分類、歩行者帯確保状況のパターンおよび雪堤の影響期間の調査手法を使って、歩行者帯の確保状況の調査結果事例を示す。観測は、図8-6のb1~b2の区間で行い、詳細を図8-11示す。観測区域の単位区間の延長は、原則として土地の一区画（支道と支道の間）とした。歩道の幅員は図8-1に示す標準のものであるが、実際の幅は場所により若干の違いがある。

表8-1、表8-2に、1994年1月24日における雪堤の観測および、それ以降の歩行者帯確保の経緯の推定値と現地調査の結果を示す。除雪幅Jは、L18地点の観測値によりすべて7.8mとみなしている。日数は冬期最大積雪深起日の1月23日以降でカウントしている。積み上げモデルに従う雪堤の推定値は次のようにして求めた。ケース①（タイプa）では、高さが10cmを超える日数は26日あり、これはレベル1とレベル2の合計日数である。一方、自然積雪が10cmを超える日数は21日あり、これがレベル2の日数になり、レベル1の日数は5日になる。ケース②（タイプb）の雪堤が10cmを超える日数は30日あり、これはすべてレベル1になる。

表8-1のR2および表8-2のL2区間の雪堤は沿道の駐車場から個人の除雪機械により積み上げられたものであるが、形状と所在の位置は積み上げモデルに従うものであったので、それに準じて作図により影響日数を求めた。上記以外の積み上げモデルに従わない雪堤については、10cm以上を超える日数はすべてレベル3とみなし、その消滅の経緯から影響日数を求めた。ボランティアなどにより雪が処理されて、歩行者帯の改善が確認できたものについては、改善された日数を示してある（表2のR4、R6区間）。現地調査結果は実測もしくは写真によった。1月23日から2月15日までの延べ日数は24日あり、推定値と調査結果の照合はおおよそ成立する。

歩道上の雪堤が車道の除雪だけによるものと、他の要件により積み上げられた場合との違いは明白である。また、集計については延長に重みをつけた平均と、さらに1月23日以降の気象台観測の積雪深が10cm以上の日数は23日であるので、これを1とした平均日数比を示してある。レベル2とレベル3は実質的に歩行者帯は確保されていない状態であるが、これらを2次元とした平面に集計値をプロットすれば、地域の特徴がよくわかり、将来への指針を示すことができるであろう。これについては観測例が少ないので今後の課題である。

路線Aについて概観すると、a1~a2のうちの西側の区域では、事業所の駐車場から出された雪堤が歩行者帯確保の障害になっている事例が多く見られた。レベル3の割合が高いわけであり、沿線住民の認識を得ることが必要である。

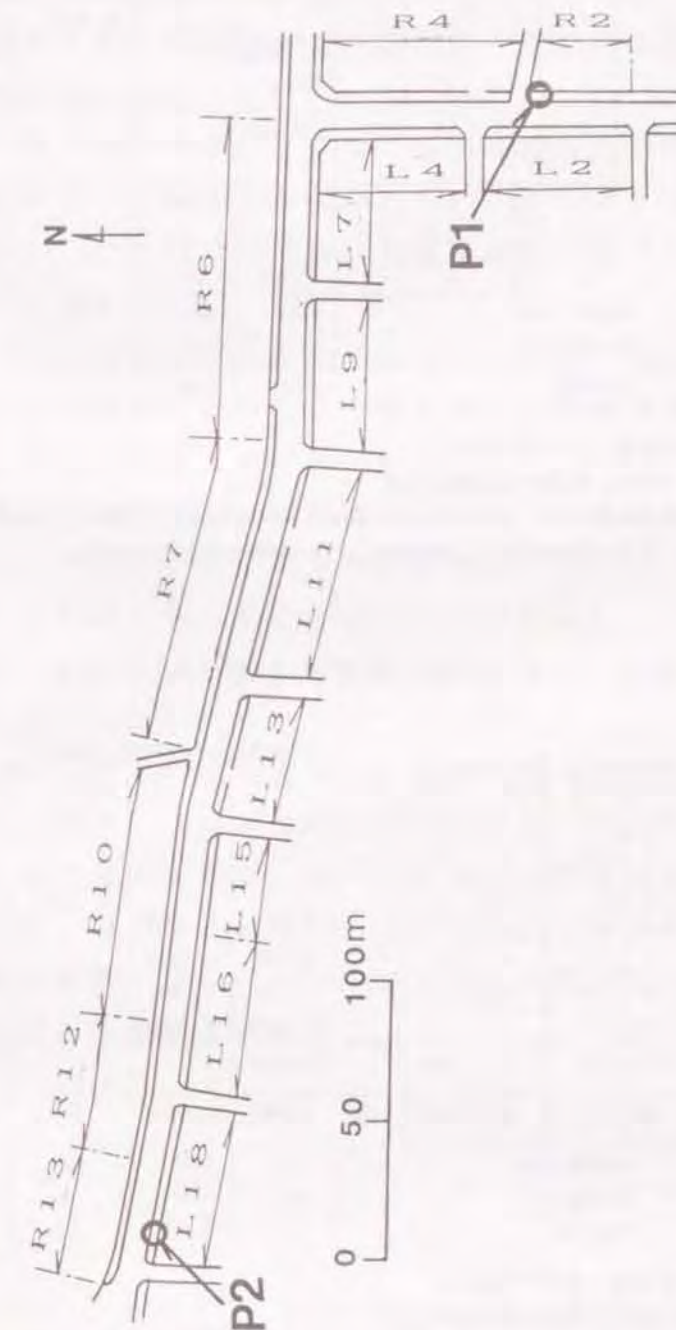


図8-11 雪堤観測地区の平面図（福井市）

表 8-1 雪堤の時間的影響の観測結果 (1)

R 4, R 6 の区間のレベル1の日数(*)は備考の理由により、推定値より短縮されている。

区間	区間延長 (m)	車道幅 (m)	歩道幅 (m)	除雪幅 (m)	雪 掘 タイプ	雪堤高 (m)	J _h (m)	歩行者帯確保状況推定日数（日数延長）			歩行者帯確保状況						備 考
								レベル1	レベル2	レベル3	1/24	1/31	2/5	2/8	2/12	2/15	
R 2	25	6	3.3	7.8	d	2.38	—	25 (625)		19 (475)	3	3	3				事業所
R 4	69	6	3.3	7.8	d	1.5	—			40 (2760)	3	3	3	3		3	事業所
R 6	106	6	3.4	7.8	a	0.9	1.6	* 20 (2120)			1	1	1	0			公的施設 小型機械による除雪
R 7	125	6	2.65	7.8	a	0.8	1.6	* 20 (2500)			1	1	1	0			公的施設 小型機械による除雪
R 10	86	6	2.5	7.8	a	0.75	1.4	5 (430)	21 (1806)		2						住宅
R 12	55	6	2.55	7.8	a	0.75		5 (275)	21 (1155)		2						住宅
R 13	50	6	2.85	7.8	a	0.9	1.9	5 (250)	21 (1050)		2		1			0	緑地
合 計	516	日数延長（日m）						6200	4011	3235							
		平均日数（日）						12	7.8	6.3							
		平均日数比						0.52	0.34	0.27							

備考) 雪堤のタイプは写真-1~7で示す。

除雪幅はL18(表2)地点の観測値を使用

右欄の歩行者帯確保状況は、月/日における確保のレベルを表す。数字は当該のレベルに一致

平均日数比は、年最大積雪深起日以降の10cm以上の積雪日数23日との比

表 8-2 雪帯の時間的影響の観測結果 (2)

区間	区間延長 (m)	車道幅 (m)	歩道幅 (m)	除雪幅 (m)	雪 堤 タイプ	雪堤高 (m)	J _h (m)	歩行者帯確保状況推定日数（日数延長）			歩行者帯確保状況						沿道条件 および 備考
								レベル1	レベル2	レベル3	1/24	1/31	2/5	2/8	2/12	2/15	
L 2	50	9	3.4	7.8	d	2.2	—	25 (1250)		18 (900)	3	3	3				事業所
L 4	54	9	3.4	7.8	a	0.7	2.6	5 (270)	21 (1134)		2	2	2	0		1	住宅
L 7	50	9	2.9	7.8	e	1.3	—			36 (1800)	3	3	3			3	住宅
L 9	51	9	3.0	7.8	a	0.9		5 (255)	21 (1050)		2	2	2	0		1	住宅
L 11	78	9	3.9	7.8	a	0.9	2.8	5 (390)	21 (1638)		2	2	2	2		1	事業所
L 13	46	9	3.9	7.8	a	1	2.5	5 (230)	21 (966)		2	2	2	2		1	事業所
L 15	36	9	3.65	7.8	a	1		5 (180)	21 (756)		2	2	2	2		1	事業所
L 16	54	9	2.45	7.8	b	0.85	1.4	30 (1620)			1	1	1	1	1	1	住宅 人力除雪
L 18	58	9	2.85	7.8	a	0.8	1.85	5 (290)	21 (1218)		2	2	2	1	2	2	事業所 人力除雪
合 計	477	日数延長（日m）						4485	6742	2700							
		平均日数（日）						9.4	14.2	5.7							
		平均日数比						0.41	0.62	0.25							

備考) 雪堤のタイプは写真-1~7で示す。

除雪幅はL18(表2)地点の観測値を使用

右欄の歩行者帯確保状況は、月/日における確保のレベルを表す。数字は当該のレベルに一致

平均日数比は、年最大積雪深起日以降の10cm以上の積雪日数23日との比

8.6 まとめ

本章では、第5章で示した道路除雪による路側への積みあげモデルを使って、歩行者に關係する雪状況の調査と解析方法を提示し、さらに実地の歩行者対策の施策に対して技術的根拠を示すことを目的とする。歩道の雪対策においては、歩道上の雪が自然状態のものか除雪等による固い雪かが重要であり、前者であれば、歩道融雪、歩道除雪等が容易に実施できる。また固い雪の起因を調べ、それを排除する方策の検討が求められる。

(1) 道路除雪による雪の積み上げは、雪堤の断面の立ち上がりと開き幅の比を1:1としたモデルが有用であることがわかった。これにより、積雪時の歩行者帯の確保状況が推定でき、また都市部における道路構造と積雪深との関係の議論ができることが明らかになった。

(2) 歩道上の積雪状況を積み上げられた経緯から分類し、また歩道上の雪の歩行者への影響をパターン分類し、これらが、積雪時の歩行者帯確保の調査および実務面の対策において有効であることがわかった。

(3) 福井市で平年程度の積雪であれば車道除雪による歩道が受ける影響は一般的に認識されているより少ない。もし大きな影響があるとすれば、他に要因があり、その改善を求める根拠を明らかにすることができる。

(4) 福井市近郊における歩行者帯確保の観測事例を示し、本論文で提示した歩道上の雪の解析方法と解析方法が有用であることを明らかにした。

観測事例では車道の除雪だけによる雪堤の区間の延長比がかなり大きく、このことは、歩行者帯確保のためには地域住民の協力が有用でかつ重要であることを示している。しかし、駐車場等から持込まれた雪堤の区間もあり、これは長日数にわたって歩行者の通行に影響するものであり、今後の対策のポイントになる。

(5) ここで示した観測事例は特殊なケースでなく、一般的に見られるものとして、積雪時の歩行者対策の議論の根拠となる。

第9章 地下水および表流水使用融雪についての量的な需給に関する課題

9.1 はじめに

本章の目的は、雪対策用に使用するための地下水および表流水について、福井市を中心とした例示により、都市の面的な広がりの中での量的な需給に関する課題とその解決方法を明らかにすることにある。融雪工法については対象が点から線、線から面に広がるにつれて資源の需給が課題になる。これは量に関することで、第6章または第7章のように、面特有の取扱いを必要とするものでないが、需給関係は現実的には計画立案とその実施に大きく関わる。限られた資源で最大の効果をあげるためには、a) センサー技術の改善等で効率的な資源の利用をはかる、b) 年々の雪状況の差異と、雪対策の目標との関係で、より有効に資源を利用する、の2通りが考えられる。本研究では後者の立場で議論を進める。

まず、道路消雪工と地下水位の関係をみてみる。道路融雪の普及と地下水低下に関係があることは六日町市について報告されている(谷中・他、1989)。福井市においても観測井戸の水位が融雪工の使用によって急激に低下していることが確認され、それが地盤沈下につながる一方、融雪工そのものが大雪または豪雪時において使用できるかどうかの不安が発生している。そこで、消雪工使用と地下水位低下の関係を解明し、水位低下のモデルを構築する。それにより降雪状況の差異を考えた融雪計画、および大雪または豪雪時の地下水位の予測に関する技術的支援を行う。

次に、河川水、農業用水および溪流水について福井における事例をもとに、融雪等使用に伴う普遍的な課題を明らかにする。特に、溪流水使用について、貯留タンク方式はより広範囲の融雪等使用が可能になることを、降雪状況の差異によるシミュレーションによって明らかにする。

ここで述べる手法は、他の融雪装置についても一般化して使うことができる。

9.2 地下水の融雪用使用と水位変動

9.2.1 福井市における地下水の概要

福井市の地勢概要を図9-1に示す。福井平野部の地下水は九頭竜川を水源とし、福井市街地域での層構造を模式的に示すと図9-2のようになっている。地下水は主としてG1層またはG2層から取水されている。G1、G2層はいずれも被圧水層であるが、被圧水層であっても地層の乱れ等により上下の地層の間に水の移動があり、地下水位低下が地盤沈下につながる理由になっている。福井市のG1層では重力水の特徴をかなり有しているといわれる。福井市の足羽川の南部(橋南)地域では新規の井戸の規制があり、道路消雪工は規制前の一つを除いて行われていない。

道路消雪工用にはほとんどG2層が使われている。図9-3に地下水による道路消雪工普及の状況を示す。道路消雪工の揚水量を推定すると、基本の使用量を $0.25 \text{ L} / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$ とし、1日10時間の使用とすれば1日当たり24,000トンになる。しかしこれは、全体平均として基本の使用水量が守られ、漏水がないと仮定した場合である。つぎに、福井市役所の環境保全課に届けられている値によると、平成5年冬期の消雪用に使用した日平均当たり用水量は29,500トンとなっている。

福井市の地下水位観測は図9-1に示す5カ所9個の井戸で行われている。福井市中心部に最も近い春山観測所の水位について、図9-4に経年変化および図9-5に月別変化を示す。さらに地下水位は曜日変化があり、また1日の間にも変化があり、揚水状況を鋭敏に反映していることがわかる。経年的にみると昭和60年代以降は水位は回復傾向にあり、これは、事業所の郊外地への移転と、使用水量の節減が理由と考えられる。月別変化をみると、例年1月と2月の低下が顕著であり、消雪用の使用が理由とみられる。



図9-1 福井市の概況

- : 観測井戸、他の1カ所は地図からはずれている。
- : 融雪工設置箇所

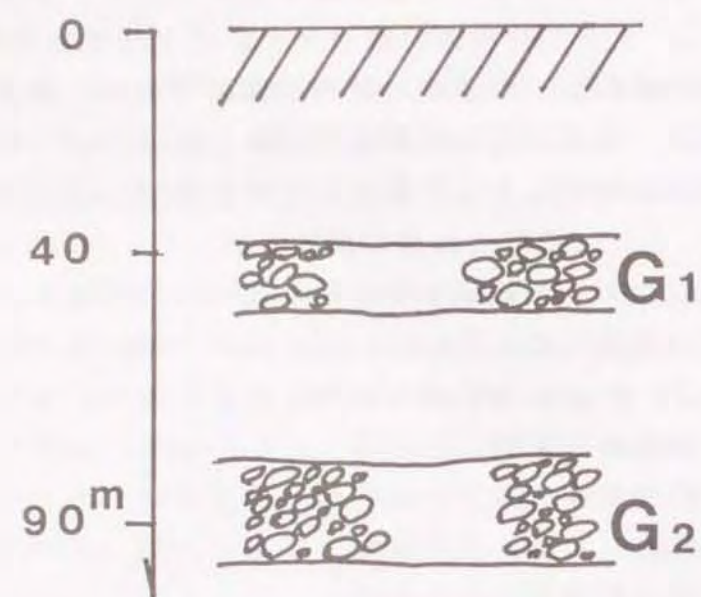


図 9 - 2 福井市の帯水層の概要

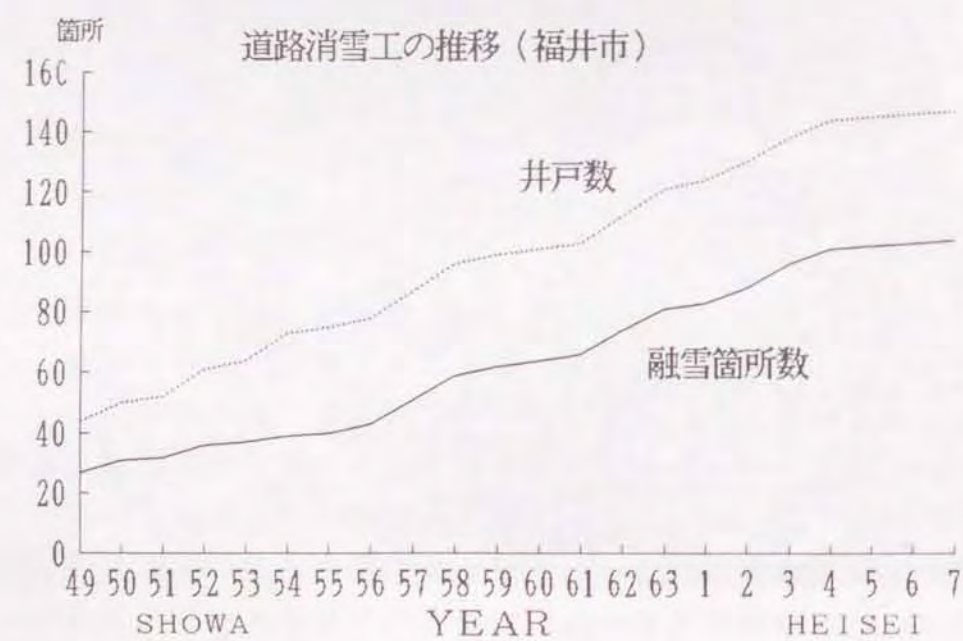


図 9 - 3 地下水による消雪工の普及 (福井市)

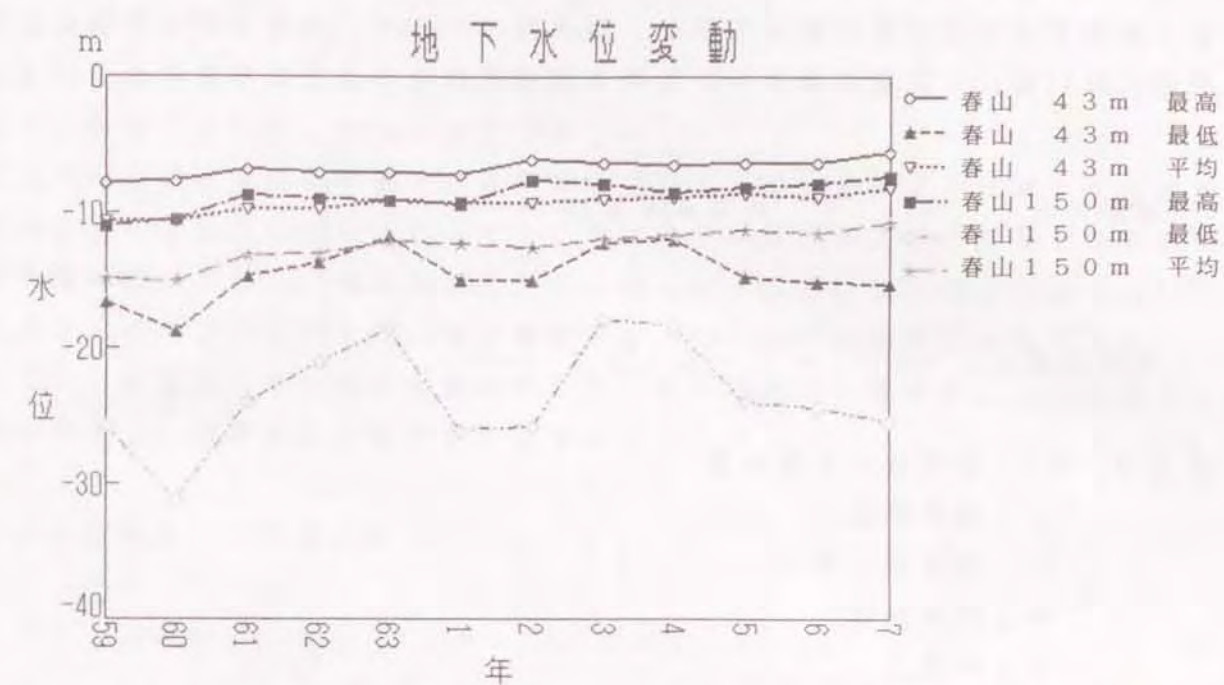


図 9 - 4 地下水位の経年変化 (福井市の環境概要平成 7 年度版)

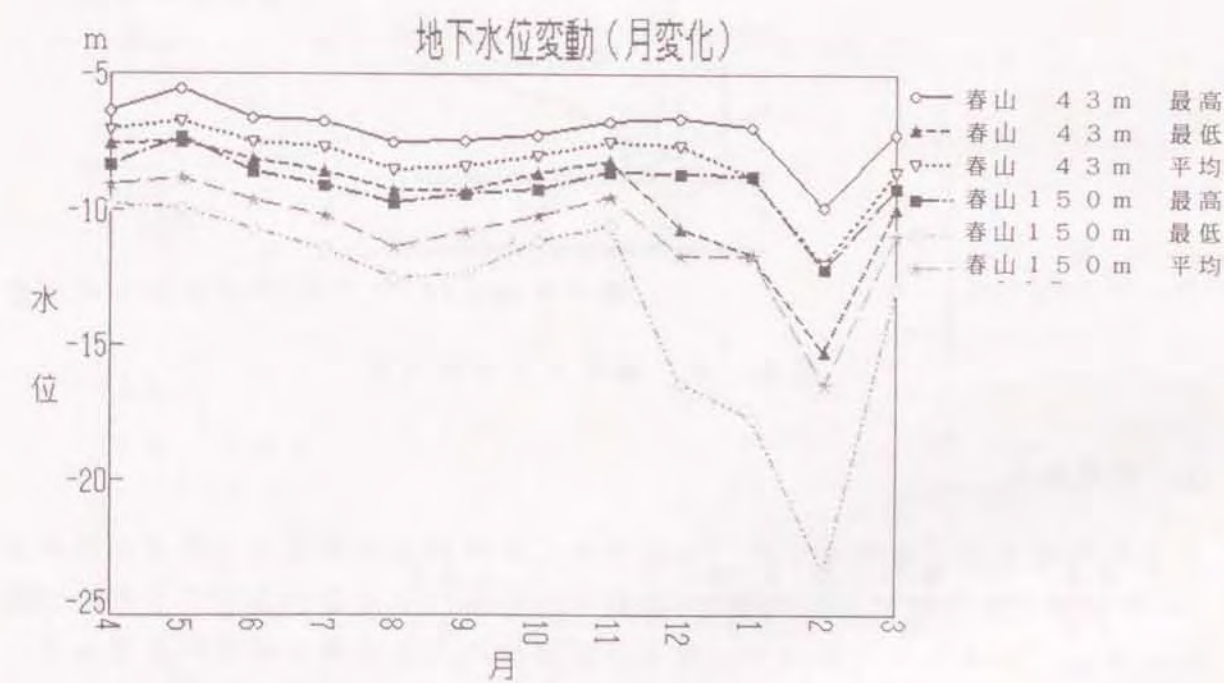


図 9 - 5 地下水位の月変化 (福井市の環境概要平成 7 年度版)

9. 2. 2 連続揚水による地下水位変化

地下水の消雪用使用水位変化のモデルの構築のために、被圧井戸について揚水による地下水の水位変化をみている。透水性が一様で、水平方向に無限に広がる地盤において、一定量の揚水がある時の関係式は次のように与えられている。

$$\left. \begin{aligned} \text{運動の式: } Q_r &= -2\pi r k D \frac{\partial h}{\partial r} \\ \text{連続の式: } \frac{\partial Q_r}{\partial r} &= -2\pi r S \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (9-1)$$

ここで、 Q_r : 時間当たり揚水量

k : 透水係数

D : 帯水層の厚み

S : 貯留係数

t : 時間

r : 井戸中心からの座標

h : 座標 r における水位

である。

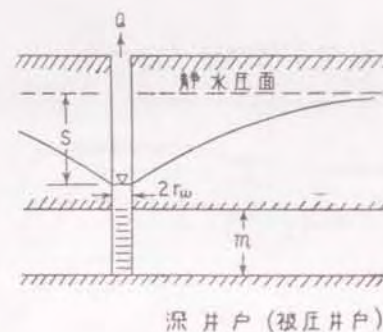


図 9-6 被圧井戸の模式図

上の両式から

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k D}{S} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (9-2)$$

地下水位低下量を $s = H - h$ とおくと、

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{k D}{S} \left(\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} \right)$$

となる。 H は $r = \infty$ の時の水位である。

ここでは上の式を詳細に解くことが目的でなく、揚水量の変化に対して水位変化のふるまいを知ることにあるので、このことを、福井市の地下水盆を想定した数値計算で調べておく。複数の井戸からの揚水による水位変化は、それぞれの井戸による分の和とおけるので、単一の井戸について調べておけば十分である。

そこで、十分に大きい地下水盆に対して、単一の井戸を考える。 r の原点を井戸の中心とし、境界条件は次のように与える

$$\left. \begin{aligned} r \text{ が十分大きい有限値に対して } h &= H \\ r = 0 \text{ において、 } h_0 &\leq h \quad (\text{下限値}) \end{aligned} \right\} \quad (9-3)$$

(9-2) 式で、 $k D / S$ は定数であるので、 $k D / S = K$ とおき、 Q_r / K の値をいろいろ変えて計算する。ここで揚水についての条件を次のようにおく。

一定揚水がある場合

井戸の半径を r_0 としたとき、(9-1) のはじめの式から、

$$\left(\frac{\partial h}{\partial r} \right)_{r=r_0} = \text{const.} \quad (\neq 0) \quad (9-4)$$

揚水停止の場合

$$\left(\frac{\partial h}{\partial r} \right)_{r=r_0} = 0$$

数値計算の結果、一定揚水を継続し、そのあと、揚水を停止したときの水位の時間変化の様子を概念的に示す。図 9-7 は Q_r / K の値と時間的変化の関係を、図 9-8 は揚水の開始と停止場合の時間変化を表している。このあと、図 9-8 の説明に似せた数学モデルを試みる。

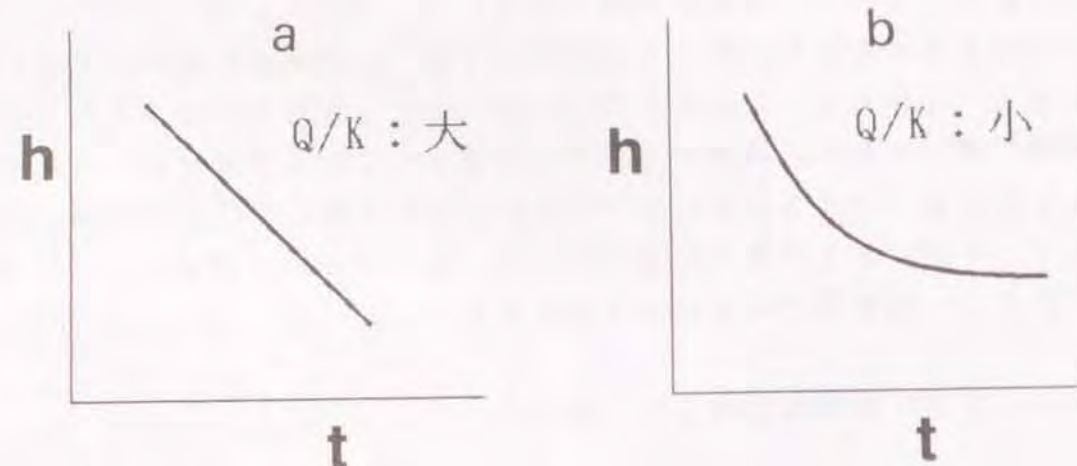


図9-7 水位変化シミュレーション(1)
 Q/K の値の傾向で、地下水位 (h) の時間 (t) に対する変化の傾向をみる。

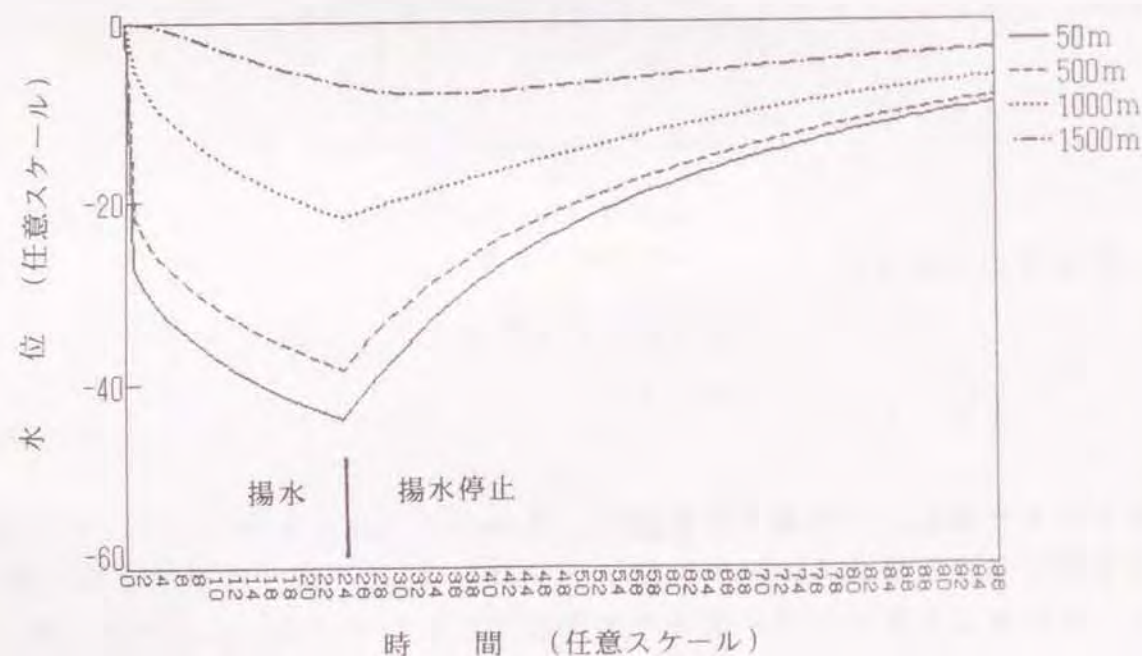


図9-8 水位変化シミュレーション(2)

9.2.3 福井市における融雪用使用と地下水位変化

福井市のすべての観測井戸の1日単位の観測で、井戸の水位変化と日降雪量との間に強い相関が認められ、春山観測井戸について杉森・福原(1995)が報告した。このことは、金沢市および長岡市で知り得た井戸についても同様である。道路消雪の設備は、一般に降雪センサーで稼働し、揚水量は降雪強度に応じて変化させることはせず一定である。したがって、先に述べた地下水の水位変化の知見から、日降雪量と揚水ポンプの稼働時間に相関があり、さらに日降雪量と日揚水量に相関があるといい替えることができる。このためには、日降雪量は降雪量が継続する時間幅に比例すると想定しなければならない。この想定が成立することは、長岡の降雪について田村(1997)によって確認されている。この内容は、10分幅で降雪量を観測し、ある量以上の降雪があったときの時間幅の累計は、降雪量の累計と比例関係があり、これを図9-9に示す。

つぎに、図9-10と図9-11に春山150mおよび43m観測井戸の水位変化と同時に日降雪量を示す。150m井戸のケーシングは90mの位置にあり、G2層の水位を追跡している。一見して、地下水位変動と日降雪深の間に強い関係が予想される。そこで、地下水位の変動の理由について調べる。地下水位 h の時間変化の速度 dh/dt は、周辺耐水層からの流入によって抑制されているから、地下水位の変動について次の式が成立するものとする。

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{dh}{dt} \right)_d + \left(\frac{dh}{dt} \right)_u \quad (9-5)$$

右辺第1項は、周辺帯水層からの流入がないと仮定したときの揚水による地下水位速度、および第2項は周辺帯水層からの流入による上昇速度である。まず観測値のうち、降雪がないときの dh/dt を求めると、それは $(dh/dt)_d$ となる。とおけるので、その時の Δh との関係プロットする。なお、急激な地下水位の変動が発生する前の平均的な水位を標準値とし、標準値との水位差を Δh としている。つぎに、降雪があるときの dh/dt を求め、これから、 Δh との関係で先にわかっている $(dh/dt)_d$ を差し引くと $(dh/dt)_u$ の絶対値が求められ、これを日降雪量 F との関係でプロットする。水位変化の観測値から $(dh/dt)_d$ と Δh の関係、および $(dh/dt)_u$ と F の関係を示すと図9-12および図9-13のようになる。なお、これらの計算において、もとの地下水位の曜日の変動分は調整しておく。図9-12では、水位の回復 $(dh/dt)_u$ は Δh と比例の関係にあることがわかる。図9-13では1990年の場合データ数に乏しいが、日当たりの水位低下は日降雪量に比例しているとみなすことができる。

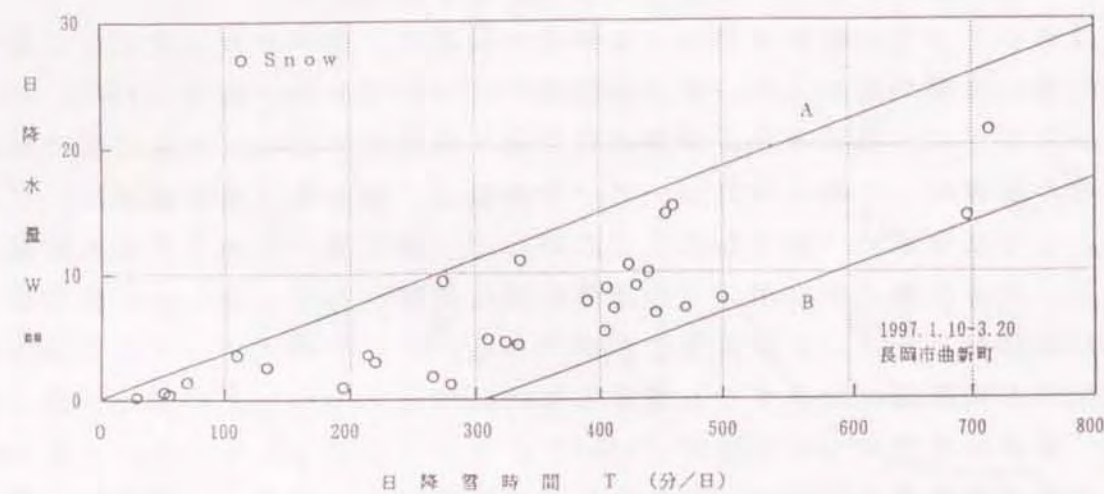


図 9-9 日降雪量と累計降雪時間の関係 (田村)

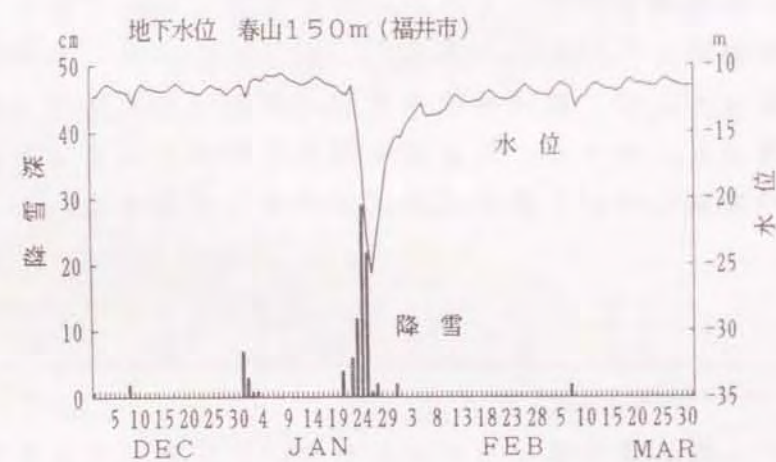


図 9-10 春山観測井 (150m、1990) の降雪深と水位変動

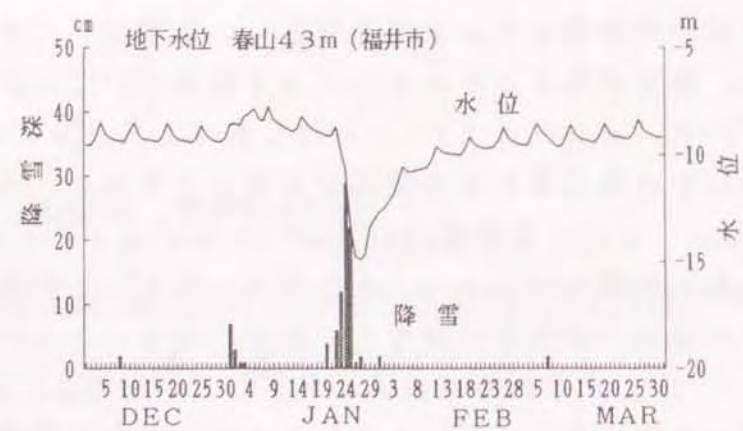


図 9-11 春山観測井 (43m、1990) の降雪深と水位変動

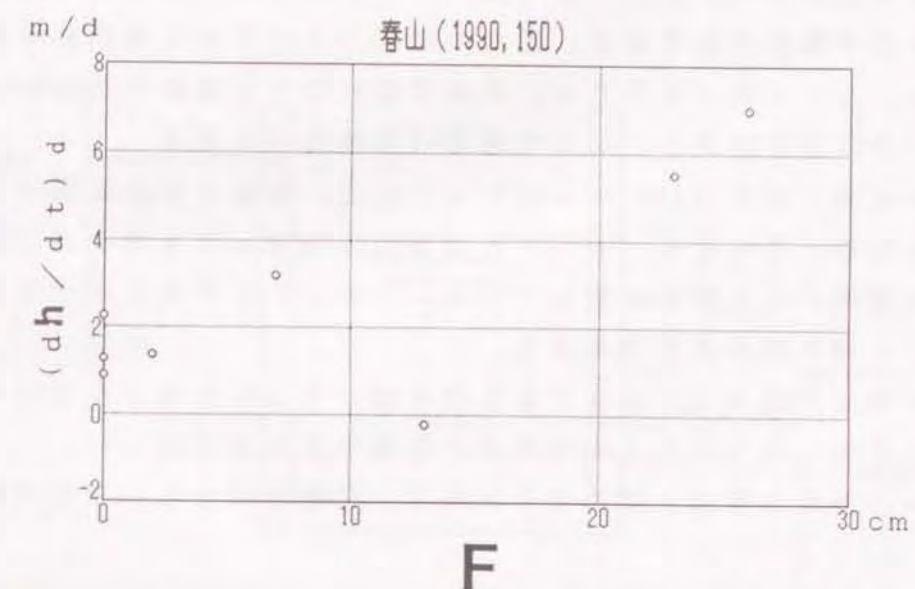


図 9-12 春山観測井 (43m、1990年) の井戸水位の実降下速度 (dh/dt) d と降雪深 (F) との関係

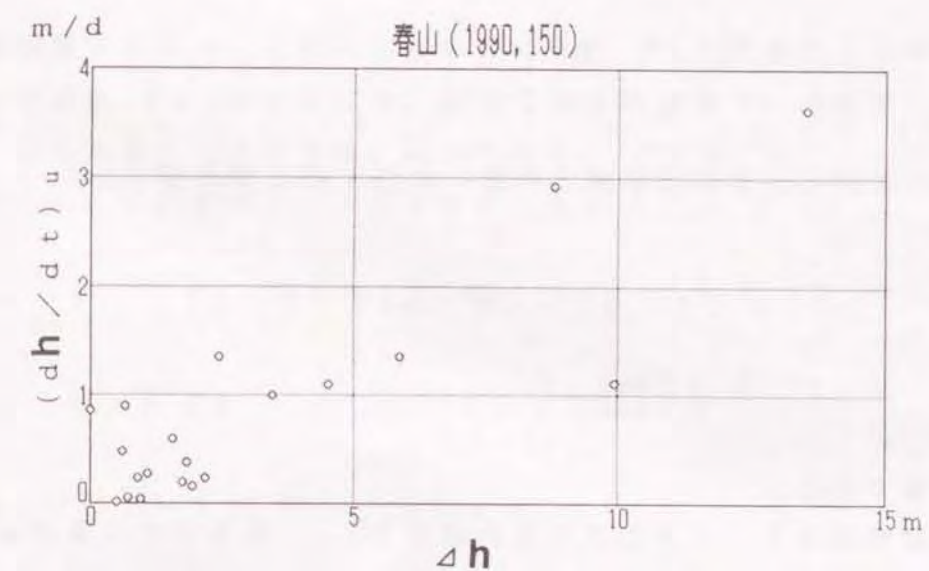


図 9-13 春山観測井 (43m、1990年) の水位回復速度 (dh/dt) u と水位に標準値からの差 Δh との関係

9.3 融雪用使用と地下水位変動モデル

9.3.1 地下水位変動モデル

9.2.2節および9.2.3節で述べたことにより、消雪用水使用と地下水位変化モデルの構築が可能である。揚水の継続と水位変化の関係をみると、図9-7のa、bいずれであろうと、直線で近似できる範囲であれば、地下水盆を一つのタンクに置き換えることができる(1槽モデル図9-14)。これについては杉森・宮本・室田(1997)が報告している。直線とずれる場合には2槽モデルが考えられる。そもそも(9-2)式は無限に連続した水槽とみなすことができるので、2槽モデルも根拠は有している。しかし、この後に示す係数の決定が難しいので、1槽モデルだけで考える。

水位変化の様子が図9-7のbであるならば、そもそも地下水量は十分に存在するということで、現実上はもはや考察の対象とする必要はない。

水槽モデルの基本的構成を次のようにおく。Pを水位とし、下記の係数を定める。

- P_{max} : 水槽内水位の上限値
- P_{min} : 水槽内水位の下限値
- A : 水槽内水位の降下速度
- B : 水槽内水位の回復速度

ここで、水位を温度と置き換えても考え方は同じである。Pについての基本式は次のようになる。

$$\frac{dP}{dt} = -A + B \quad (9-6)$$

Aは降雪量に比例し、Bは上限値との差に比例するとすれば

$$A = a f \quad (9-7)$$

$$B = b (P_{\max} - P)$$

a、bは定数である。

当日の日降雪深をF、前日のPの最終値をP_{i-1}、当日のPの最終値をP_iとすると、(9-6)は次のようになる。Bはbを1日の単位でとった値である。

$$P_i = P_{i-1} - a F + B \{ P_{\max} - (P_{i-1} + P_i) / 2 \} \quad (9-8)$$

とおける。この式の詳細は第10章で示す。

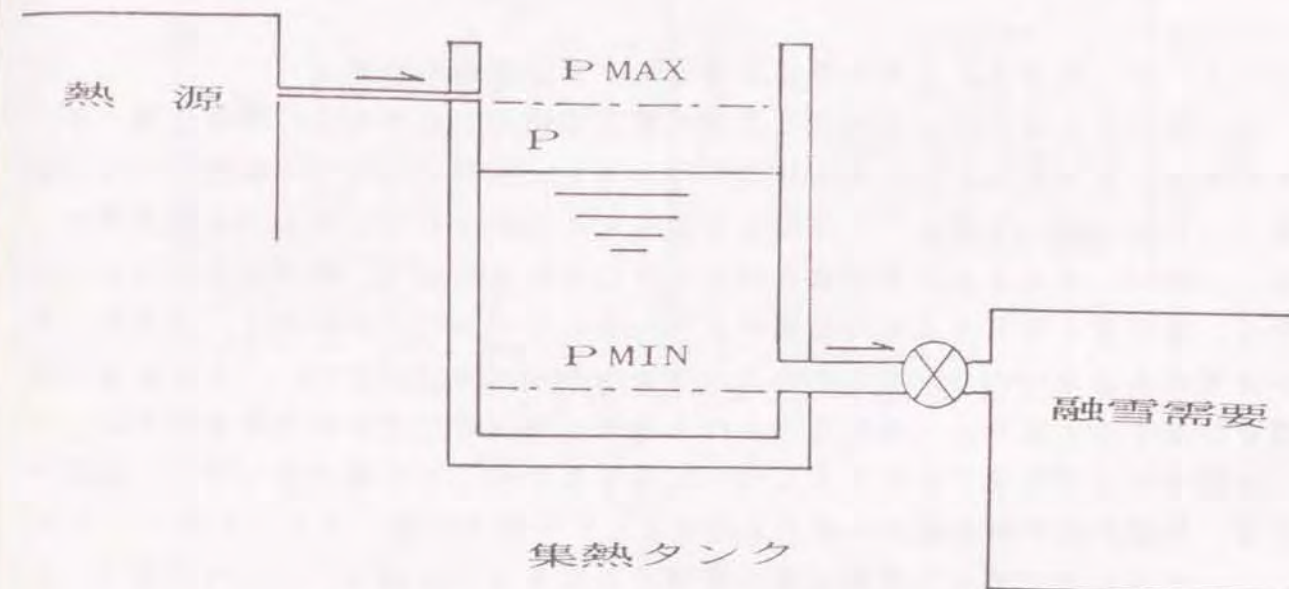


図9-14 1槽モデル

(9-8)式から

$$P_i = \frac{-a F + B P_{\max} + P_{i-1} (1 - B / 2)}{1 + B / 2} \quad (9-9)$$

となり、降雪量Fがあったときの当日の最終水位P_iを知ることができる。

水位には下限値P_{min}があるので、融雪可能な降雪量F_eが決まる。

ここで、係数AとBの決定方法を記しておく。(9-9)式で、1 + B / 2 = Yとおき、さらに、a / Y = A、1 / Y = Bとおくと、

$$\begin{aligned} P_i &= F A + (2 - B) P_{\max} + P_{i-1} (B - 1) \\ &= F A + (P_{i-1} - P_{\max}) B + 2 P_{\max} - P_{i-1} \end{aligned} \quad (9-10)$$

となる。さらに、F = X₁、P_{i-1} - P_{max} = X₂、とおくと、}

$$P_i = A X_1 + (B - 1) X_2 + P_{\max} \quad (9-11)$$

となり、変数 X_1 および X_2 と P_1 の観測値から最適な A 、 B を求める問題に帰着する。これは、重回帰法で使われている手法であり、 F 、 P_1 および P_{1-1} に関する十分な観測値があれば、ひるがえって a および B の値が求まることになる。

9. 3. 2 大雪または豪雪時における地下水位変動の予測

先に述べた1槽モデルを使って道路消雪工の使用と地下水位の関係を調べる。先に図9-11で示した1990年春山150m井戸についての観測値から、係数 A 、 B について、図9-12および図9-13から得られるものを最適値とし、(9-8)式により日降雪量を使って水位変化をみると、図9-15のようになる。観測値とモデルによる理論値がよく一致していることがわかる。そこで、他の降雪時の場合にの井戸の水位がどうなるかをみってみる。例として56豪雪の降雪を想定すると図9-16に示すものとなり、地下水位変動の予測ができる。

金沢市および長岡市の地下水についてもここで示した1槽モデルでよく説明できる。長岡市の事例を図9-17に示す。

ここで示したモデルで係数 A を一定値としてあるのは図9-7または図9-8の水位変化で直線とみなせる範囲を使っているもので、水位が極度に下がるときの揚水量との関係がどうなるかは今後の課題である。また、係数 A 、 B は井戸毎にそれぞれの値になるが、1つの井戸について、1990年から1992年の間は、年による違いがあまりないことが確認されている。しかしさらに長い年数にわたっての結果は未確認である。

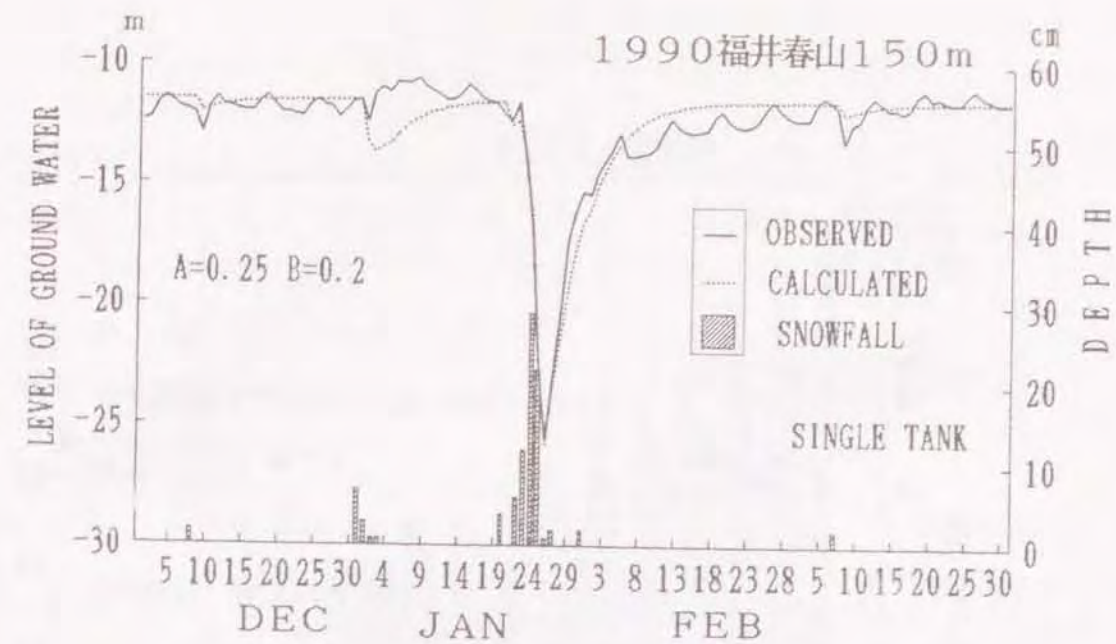


図9-15 春山観測井(150m、1990年)の水位変動

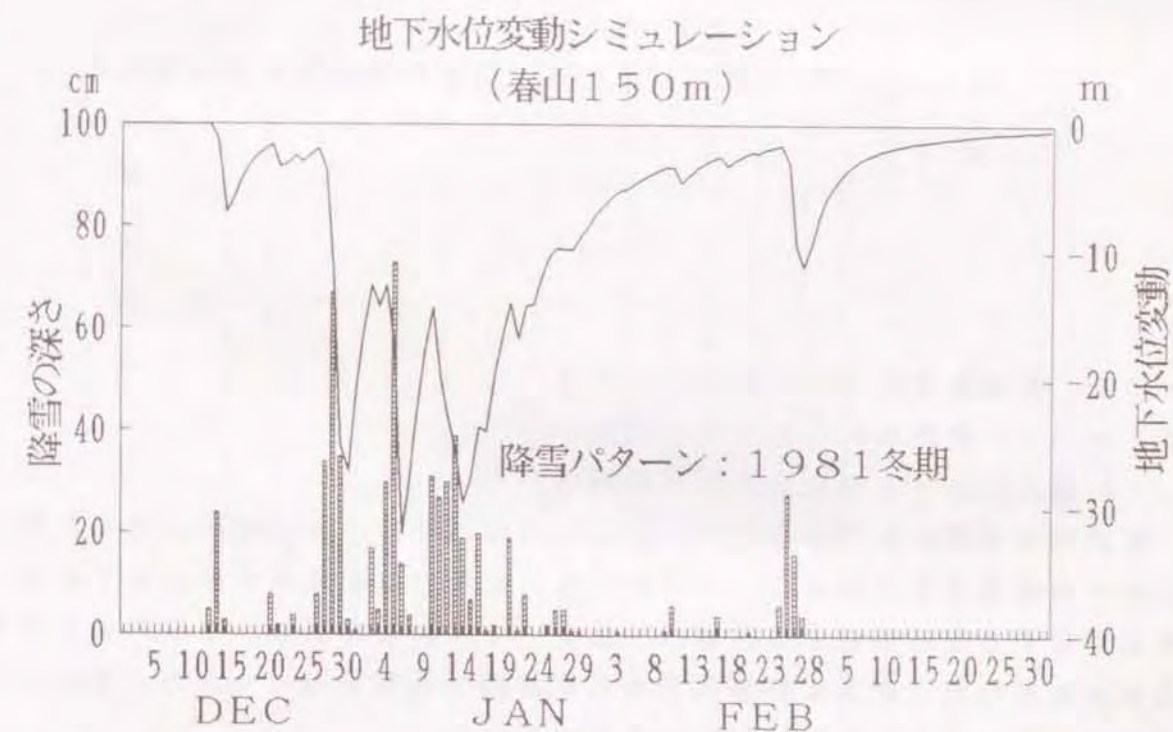


図9-16 春山観測井(150m)の56豪雪時の水位変動の推定

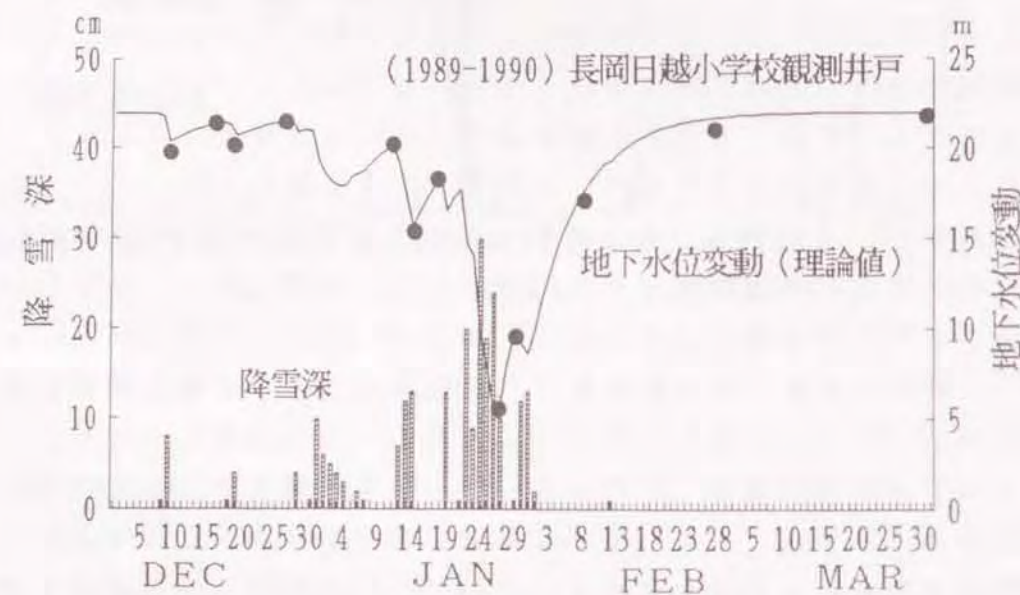


図 9 - 1 7 長岡市の地下水位変動の実測値と計算値比較

9. 4 表流水確保と雪対策計画の評価

9. 4. 1 表流水利用の現状と課題

(1) 福井における表流水利用道路消雪

福井地方で行われている地下水による道路消雪は、九頭竜川水系ほか幾つかの河川の沖積層低地に限られ、山間地に近い箇所では表流水が使われている。福井県が管理する道路消雪工の経緯は、図 9 - 1 8 および図 9 - 1 9 の通りであり、表流水利用は箇所数および延長でそれぞれ約 30 % となっている。表流水利用は今後さらに必要とされることはいうまでもない。



図 9 - 1 8 表流水使用消雪工の普及の経緯 (1)

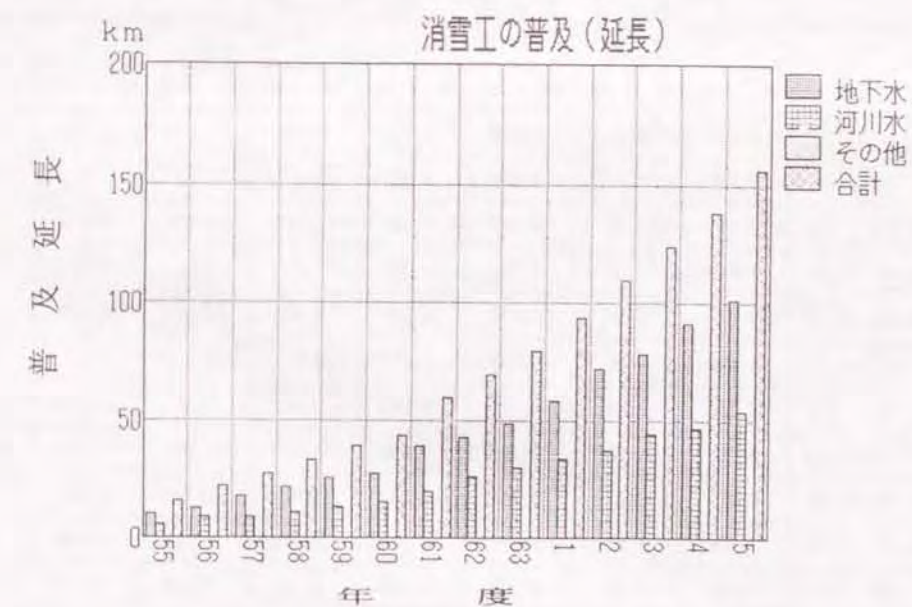


図 9 - 1 9 表流水使用消雪工の普及の経緯 (2)

(2) 福井地方における克雪用表流水調査結果

九頭竜水系の幾つかの河川において、克雪用水利用の可能性について行った調査結果（名津井・和田、1988）を述べる。図9-20に対象とした河川とその位置を示す。昭和61年度から63年度の3か年の冬期間に河川の流量を測定し、克雪用水利用の可能性を検討した。まず、観測結果から基本となる自然流量を把握する必要がある、3か年の期間の最小流量の第1位と、2位を基本自然流量の対象とした。

つぎに、利用可能流量＝基本自然流－正常流量
とし、正常流量は、

正常流量＝維持流量＋水利流量

とおけるものである。維持流量の取り方について2通りを考える。

①標準として使われている $1 \text{ m}^3 / \text{S} \cdot 100 \text{ km}^2$ （流域面積）

②克雪用水は常時の取水でないので、標準維持用水よりも低くできるであろうとの推論で $0.5 \text{ m}^3 / \text{S} \cdot 100 \text{ km}^2$ とおく。

維持流量については、平成4年に克雪用水の取扱い基準の指針で $2 \text{ m}^3 / \text{S} \cdot 100 \text{ km}^2$ の値が示され、この場合は、利用者側においては上よりも厳しい。

表9-1 九頭竜川水系における流量の克雪用利用の可能性

河川名	利 用 可 能 量							
	正 常 流 量		最小第n位流量		利 用 可 能 量			
	第1案	第2案	第1位	第2位	ケースA	ケースB	ケースC	ケースD
浄土寺川	0.17	0.11	0.214	0.319	0.044	0.104	0.139	0.199
清滝川上流	1.54	0.79	0.910	1.003	0.0	0.12	0.0	0.213
清滝川下流	0.39	0.20	0.622	0.734	0.232	0.422	0.344	0.534
赤根川上流	1.85	0.97	0.714	0.787	0.0	0.0	0.0	0.0
赤根川下流	0.51	0.39	1.251	1.349	0.741	0.861	0.839	0.959
木瓜川	1.04	0.18	0.132	0.157	0.0	0.0	0.0	0.0
足羽川	3.68	3.68	9.121	14.252	5.441	5.441	10.572	10.572
荒川	0.20	0.10	0.319	0.409	0.119	0.219	0.209	0.309
浅水川上流	0.35	0.17	1.163	1.282	0.813	0.993	0.932	1.112
浅水川下流	1.65	1.65	8.761	9.624	7.111	7.111	7.974	7.974
河瀬川	0.02	0.01	0.023	0.036	0.003	0.013	0.016	0.026
吉野瀬川	0.44	0.44	1.342	1.624	0.902	0.902	1.184	1.184

注：浄土寺川の場合、昭和62年度の最小値は12月第1、2半旬で雪の少ない時であるため、これを除外して、最小第2、3位を対象とした。

そのほか水利権については、既往の水利権と現地踏査による取水量の実態の確認を行う必要がある。このような検討を行い、利用可能量を算定すると、先の組み合わせから4通りが示される。そのうちの最大と最小を示すと、表9-1のようになる。克雪用水としての余裕はあまりないという結論づけができる。

位置図



図9-20 九頭竜川水系流量調査の位置

(3) 農業用水利用の可能性調査

表流水として魅力あるものに農業用水がある。芝原用水は図9-21に示すように、福井市街地とその周辺を流れる用水であり、農業用使用の他、古くは生活用水にも使われてきた。この用水について、消雪工または流雪溝利用の可能性を調査した(和田・山本、1991)。取水可能量は非灌漑時でも頭首工で3.3トン/Sあり、分水されて市内に入る内輪用水では0.6~1.0トン/Sの流量が見込める。利用にあたってクリアしなければならない主な課題に次があった。

a 導水に関すること

旧市内入り口までは開水路であるため、流雪用に使われる可能性があり、溢水防止等の管理が必要である。現地踏査では水路中への雪捨ての事例を多く見た。

b 流末処理

福井市内の下水は合流式であり流末はすべてそこに流れるため、下水施設の処理能力に関係する問題が発生する。

c 市街地での用水の管理

市街地において、積雪時に流雪用に使用された場合に、溢水の不安が発生する。このため、現在は冬期間の通水は行っていない。

d 施設の保守修繕

施設の保守修繕工事は非灌漑期の冬期に集中して行われる。これとの調整をどうするか。

その他、水利権、用水の管理費用等に関係する問題があり、技術的、制度的を含めて多方面からの検討が必要であり、使用可能性調査により問題点を明らかにしたものの、可能性の結論は否に近いものであった。



図9-21 芝原用水の概要図

9.4.2 溪流水利用方法の解析

道路消雪利用を目的とした溪流水の流出調査の概要と、溪流水の利用方法についての解析結果を述べる。これについては杉森・深川(1994)が報告し、遊水池等を利用した貯水槽を併用すると、そうでない場合の2倍の面積の道路消雪が可能であることを明らかにした。さらに、融雪装置の評価モデルを使って、過去の降雪状況の記録を使ったシミュレーションによれば、貯水槽を併用すると、4倍程度までの面積の道路消雪が可能と見込めることがわかった。

溪流水流出の調査は、福井県松岡町で行い、その位置を図9-22に示す。流域面積は51.65haである。溪流沿いにこの付近の土地開発に関係した有効容積750m³の遊水池が設けられていて、この遊水池を融雪用に利用することを想定した。遊水池に水を貯留することの是非は別の議論としておく。冬期の流出量および流出水温の観測結果事例を図9-23および図9-24に示す。これから設計値として使用できる流出量と温度を安全側に設定して、それぞれ1トン/m³および6℃とする。この温度での道路消雪の基本散水量は、降雪強度の設定を3cm/hとすると、0.41L/min・m²であるので、対象面積は2,800m²になる。しかし貯水槽を有効に使うと対象面積をこれより大きくすることができる。

貯水槽を使った場合の効果を杉森・深川は次式で与えた。

q: 溪流の流出量 (m³/h)

τ: 1日あたりの融雪設備の稼働時間 (h)

V: 貯水槽の有効容積 (m³)

とすると、融雪対象面積の増倍Zは、

$$Z = 1 + (24 - \tau) / \tau \quad (9-12)$$

である。貯水槽の容量Vは

$$(24 - \tau) q \leq V \quad (9-13)$$

でなければならない。説明は次の通りである。τ時間にVのうちのある量を消費し、24-τ時間の間に消費した分を回復すればよい。24-τ時間の間に回復できる分は(24-τ)qであり、貯水槽を使った場合の時間あたり使用可能な溪流水の量は、q(1+(24-τ)/τ)である。貯水槽が無いときの時間あたり使用可能量はqであるので、(9-12)式が導かれる。



観測施設位置図



図 9 - 2 2 溪流水調査の位置 (福井県松岡町)

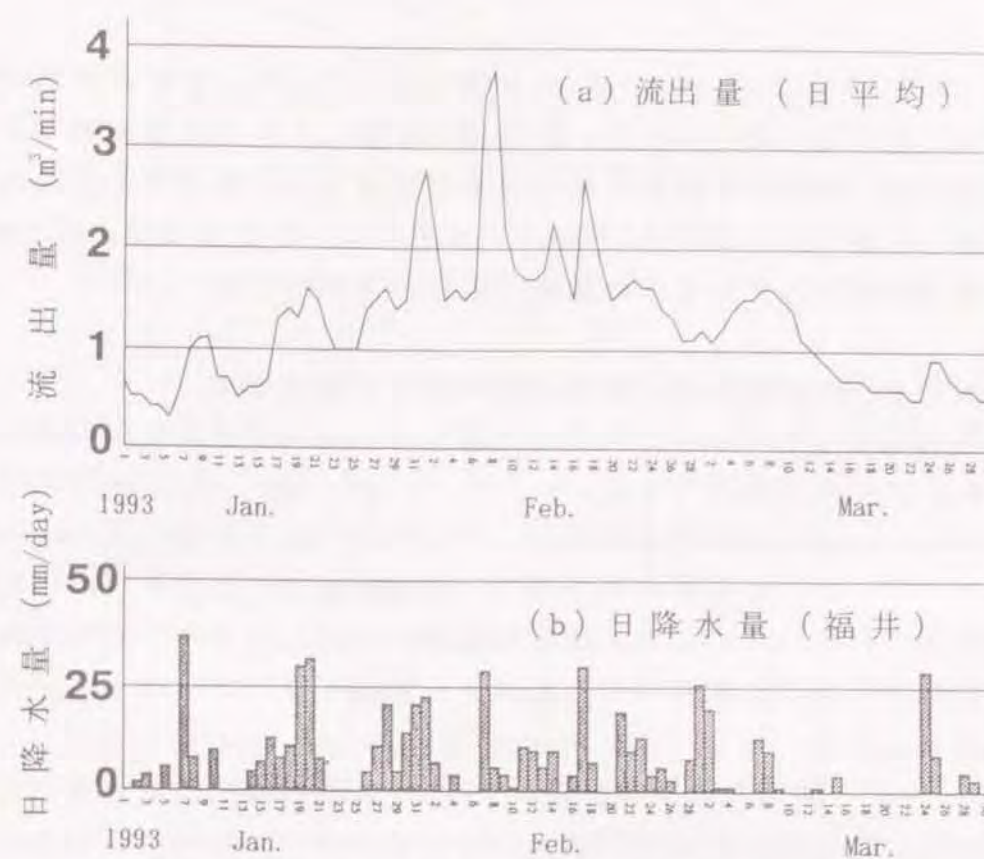


図 9 - 2 3 溪流水の流出量

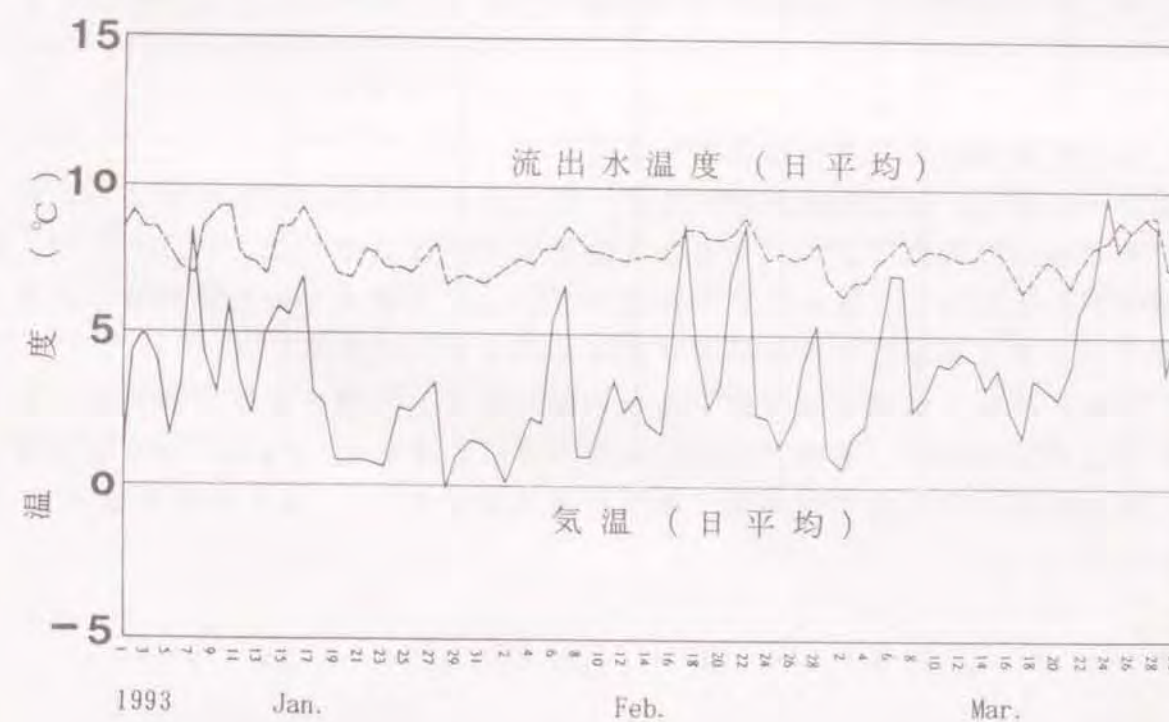


図 9 - 2 4 溪流水の温度変化

さて、式 (9-12) および (9-13) は一通りの方式を与えるだけであって、実地の計画では、流出量 (Q) により、貯水槽の容量 (V) と対象面積 (S) の関係を任意に選んで、降雪条件に応じた議論をすることが可能である。流出量 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ は、日当たりでは $Q = 1440 \text{ m}^3$ になるので、V と S の組み合わせで、表 9-2 の番号であらわす各方法の設備の設計が可能である。

表 9-2 貯水槽方式の融雪装置の諸元と稼働方法

番号	V (m ³)	S (m ²)	Q (m ³)	稼働方法
1	—	2,400	1,440	常時稼働可
2	—	4,800	1,440	不可
3	750	4,800	1,440	12時間ON 12時間OFF
4	1,500	4,800	1,440	24時間ON 24時間OFF
5	1,500	9,600	1,440	12時間ON 24時間OFF

9.4.3 融雪評価モデルによるシミュレーション

表 9-2 の 1、2 は容易にわかるが、3、4 および 5 の稼働方法について、降雪状況の違いに対してどのような効果を有するかは理解しにくい。そこで、融雪評価モデルによるシミュレーションを行う。ここで扱っている貯水槽システムは、次章でとりまとめをしている水槽モデルのタイプ 1 である。

このモデルは、水槽のポテンシャル P について、水槽が融雪に使用されたときの P の変化について、本論文 P140 にあるように、 P_{\max} 、 P_{\min} 、A および B を定め、観測値を 1 日単位ではかり、前日の最終値を P_{i-1} 、当日の最終値を P_i とおくと、

$$P_i = P_{i-1} - aF + B \quad (9-14)$$

となる。ここで、a は比例定数、F を日降雪深とすると、 $B = aF$ であり、P の変化は

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad (9-15)$$

である。P に下限値があるため日当たりの融雪可能量 F_e は

$$F_e = (P_{i-1} - P_{\min} + B) / a \quad (9-16)$$

であり、 $F > F_e$ のときは、 $F - F_e$ が融雪の残量となる。このようにして、日降雪深の状況に対する融雪システムの能力を評価することができる。表 9-2 に関する評価モデルの (9-14) および (9-15) 式の各係数値は表 9-3 の右の欄に示すものになる。番号 1 と 2 の場合は、貯留槽を使わない。

各設計方法の評価の可否の判断は、融雪対象の要件との関係でなされるであろう。重要な物件であれば、常時の融雪が求められて表 9-2 の 1 でなければならず、重要度が下がるにつれて、2、3 および 4 が許容されるであろう。

表 9-3 評価モデルにおける係数値

番号	V (m ³)	S (m ²)	Q (m ³)	P_{\max}	P_{\min}	a	B
1	—	2,400	1,440	—	—	—	—
2	—	4,800	1,440	—	—	—	—
3	750	4,800	1,440	750	75	39	1440
4	1,500	4,800	1,440	1500	150	39	1440
5	1,500	9,600	1,440	1500	150	79	1440

9. 5 まとめ

本章は、都市全体の中での雪処理方法の評価を目的とした融雪についての考察を内容とする。融雪対象範囲が面的に拡大したときの融雪用エネルギーの需給に関する解析と評価方法を提示した。

福井市および他の都市でみられる地下水位低下は、日降雪量との間に強い相関関係があり、これは消雪工使用が理由であることを解析的に説明した。これにより、過去の大雪または豪雪を想定したシミュレーションを行い、全体的計画の中での地下水による融雪の可能性の評価が可能であることを示した。

河川水、農業用水および溪流水について、克雪用利用のための可能性調査の事例とそれぞれの検討結果を示した。表流水の利用を想定するとき、福井市のように合流式下水道の場合は、下水道の処理能力との関係、また、実務的には下水道使用料金が課題になり、都市雪害の議論の範囲を拡大する必要がある。

溪流水の使用を想定した場合、日々の流出量および水温には差異があり、有効に利用するためには貯水槽を設置することが必要であり、これの利用の方法を提示した。次章でとりまとめる評価方法を使えば、さらに有効に使用できることを明らかにした。

第10章 都市の面的広がりにおける融雪工法の評価方法

10. 1 はじめに

第9章において、地下水または表流水を使用した融雪工法について、都市の面的な広がりの中での課題を検討し、年々の雪状況の差異に対する評価の必要性を述べ、地下水と溪流水利用について評価の事例を示した。本章では、融雪装置一般に拡大して評価方法を整理し、融雪に関する面的技術として確立をはかる。これにより、都市の面的な広がりの中での雪対策計画における各種融雪工法の有用性が明確になり、特に福井のような年々の差異が大である地域について、融雪資源の量と雪対策の目標の関係の議論が可能になり、各都市で立案される雪に関する計画の技術的根拠を与えることになる。

10. 2 融雪装置の評価モデル

10. 2. 1 評価モデルのタイプとその特徴

本節では評価モデルのタイプとその特徴を明らかにする。消雪工使用と地下水位の関係は、1槽の水槽モデルについてよく説明できることを、既に9. 3. 1節で示した。融雪の評価モデルを一般化して考える。水槽モデルではつぎの4個の係数が定義される（既出、本論文p140）。

P_{max} : 水槽内水位の上限値

P_{min} : 水槽内水位の下限値

A : 水槽内水位の降下速度

B : 水槽内水位の回復速度

ここで、水位を温度に置き換えてもよい。水位または温度を P としたときの基本式は下記のとおりで先に示してある。

$$\frac{dP}{dt} = -A + B \quad (10-1)$$

ここで、 A 、 B の値の取り方について、表10-1に示す4通りがあり、それぞれの表現方法を示す。 f は降雪強度であり、 a 、 b はそれぞれ定数である。ほとんどの融雪装置の可動状況は降雪強度によって変化しないので、 f の値は、ある時間幅において、一定値もしくは0とおける。

表 10-1 水槽の評価モデルのバリエーション

タイプ	A	B
1	降雪量に比例 $a f$	一定 b
2	降雪量に比例 $a f$	水位差に比例 $b (P_{\max} - P)$
3	降雪量と水位差に比例 $a f (P - P_{\min})$	一定 b
4	降雪量と水位差に比例 $a f (P - P_{\min})$	水位差に比例 $b (P_{\max} - P)$

ここで次のことに注意しなければならない。融雪装置の稼働方式には、降雪の有無を感知する降雪センサーによるものと、路面が白いかどうかを感知する積雪センサーによる2通りがあり、ここでは積雪センサーによる考え方に従う。この方式では、激しい降雪時に処理の積み残しがあっても、時間をかけて処理するものとしている。また、評価システムでは1日あたりの処理量に制限をもうけていないので、Pの初期値が上限に近い時には1日1m以上という現実離れした処理能力を発揮することがあるかも知れない。しかし、実際の融雪設備の処理能力は2.5cm/h~3.0cm/hで設計されていて、1日24時間稼働したとすれば60cm~72cmを処理することになり、過去の降雪のデータにしたがう限り現実と離れることはないであろう。

以下それぞれのタイプについて(10-1)式を調べる。

(1) タイプ1

基本の方程式は次のようになる。

$$\frac{dP}{dt} = -af + b \quad (10-2)$$

となり、これを解くと、

$$P = P_0 - af + B \quad (10-3)$$

ここで P_0 は $t=0$ のときのPの値である。Fは日降雪深であり、

$$\left. \begin{aligned} F &= \int f dt \\ B &= bt \end{aligned} \right\} \quad (10-4)$$

である。観測値は1日単位ではかられるので、前日の最終値を P_{i-1} 、当日の最終値を P_i とおくと、 $P_{i-1} = P_0$ であるので、

$$P_i = P_{i-1} - aF + B \quad (10-5)$$

となる。ここで、

$$P_i \leq P_{\max} \quad (10-6)$$

であり、それ以上の水または熱の流入があるときは、実務上は流入を停止させなければならない。

1日の融雪可能量 F_e は

$$F_e = (P_{i-1} - P_{\min} + B) / a \quad (10-7)$$

である。また、 $P_i \geq P_{\min}$ でなければならず、Fが F_e を越えるときは、 $F - F_e$ が融雪の残量となる。

(2) タイプ2

基本の方程式は次のようになる。

$$\frac{dP}{dt} = -af + b(P_{\max} - P) \quad (10-8)$$

fはtの関数であるので何かの形に仮定しなければならない。そこで、ある時間幅においてfが一定であるとして上の式を解くと、

$$P = (P_{\max} - a f / b) = \{ P_0 - (P_{\max} - a f / b) \} e^{-b t} \quad (10-9)$$

ここで、 P_0 は、ある時間幅における P の初期値である。 b は緩和時間の逆数の意味を有し、 $b t < 1$ とおける t の範囲で考えるとすると、

$$e^{-b t} = 1 - b t$$

とおくことができ、

$$P = P_0 - \{ a f + b (P_{\max} - P_0) \} t \quad (10-10)$$

となる。

つぎに、1日の時間帯を n に分割し、(10-10) 式の計算を順次求めていく。それぞれの時間幅での初期値を $P_1, P_2, P_{n-1}, \dots, P_n$ とおき、(10-10) 式を一般的な形で表すと

$$P_j = P_{j-1} - \{ a f + b (P_{\max} - P_{j-1}) \Delta t \} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10-11)$$

となり、 Δt は分割した時間帯である。上の式は n 個あるので、これの和をとると

$$P_n = P_0 - a F + B \{ P_{\max} - (P_0 + P_n) / 2 \} \quad (10-12)$$

となる。

$$\sum f \Delta t = F \quad (10-13)$$

であり、

$$\sum P_j \Delta t = t (P_0 + P_n) / 2 \quad (10-14)$$

$$B = b t \quad (10-15)$$

とおいている。ここで、 P_0 は前日の最終の P の値に等しいので、 P_{i-1} とおきなおす。 P_i は当日の最終の P の値である。 F は当日の降雪量である。したがって、上の (10-12) 式を

$$P_i = P_{i-1} - a F + B \{ P_{\max} - (P_{i-1} + P_i) / 2 \} \quad (10-16)$$

とおける。地下水は降雪の継続時間に比例して使用され、また、地下水位の変化で (10-14) 式が成立する限り、1日のうちの降雪の断続や強度の変化には関係ないことがいえる。

上の式から

$$P_i = \frac{-a F + B P_{\max} + P_{i-1} (1 - B / 2)}{1 + B / 2}$$

となり、降雪量 F があつたときの当日の最終水位 P_i を知ることができる。水位には下限値 P_{\min} があるので、融雪可能な降雪量 F_e がきまる。

(3) タイプ 3

基本式は次のようになる。

$$\frac{dP}{dt} = -a f (P - P_{\min}) + b \quad (10-17)$$

この場合においても f は短い時間内では一定として扱う。そうすると、

$$P - P_{\min} - b / a f = (P_0 - P_{\min} - b / a f) e^{-a f t}$$

となり、

$$e^{-a f t} = 1 - a f t$$

とおけるものとして、

$$P = P_0 - \{ (P_0 - P_{\min}) a f - b \} \Delta t \quad (10-18)$$

となる。1日をn個に分割したとすると、

$$P_i = P_{i-1} - \{ (P_{i-1} - P_{\min}) a f - b \} \Delta t \quad (10-19)$$

となる。ここで、一日の和をとる場合 $\sum P_{i-1} f \Delta t$ の項が扱いにくい。そこで、この項は、そもそも水位の変動は、そのときの水位に関係しているので、この場合の水位は近似的にはじめから平均値を与えておいてもよいであろう。このようにして、(10-19)式の和をとると、

$$P_i = P_{i-1} - \{ [(P_i + P_{i-1}) / 2] - P_{\min} \} a F + B \quad (10-20)$$

となり、書き直すと、

$$P_i = \frac{P_{i-1} (1 - \frac{a F}{2}) + P_{\min} a F + B}{(1 + \frac{a F}{2})}$$

が得られる。

(4) タイプ4

基本式は次のようになる。

$$\frac{dP}{dt} = -a f (P - P_{\min}) + b (P_{\max} - P) \quad (10-21)$$

ここにおいてもfは短い時間間隔内では一定であるとして扱う。
 $M = a f + b$ 、 $N = a f P_{\min} + b P_{\max}$ とおくと、上の式は

$$P - N/M = (P_0 - N/M) e^{-Mt}$$

となり、 $e^{-Mt} = 1 - Mt$

とおけるものとする、

$$P = P_0 - \{ (a f + b) P_0 - a f P_{\min} - b P_{\max} \} \Delta t \quad (10-22)$$

となる。さらに、n個の分割した時間帯における一般式は、次のようになる。

$$P_i = P_{i-1} - \{ (a f + b) P_{i-1} - a f P_{\min} - b P_{\max} \} \Delta t \quad (10-23)$$

ここで、 $\sum P_{i-1} f \Delta t$ の項は前記同様にし、

$$\sum P_{i-1} \Delta t = t (P_{i-1} + P_i) / 2$$

とおけるので、

$$P_i = P_{i-1} - (a F + B) (P_{i-1} + P_i) / 2 - a F P_{\min} - B P_{\max} \quad (10-24)$$

となる。これから

$$P_i = \frac{P_{i-1} (1 - \frac{a F + B}{2}) - a F P_{\min} - B P_{\max}}{(1 + \frac{a F + B}{2})}$$

が得られる。

10.2.2 未定係数の決定方法

未定係数はいずれのタイプも2個であるので、すでに9.3.1節で述べた方法で容易に決定できる。

10.2.3 融雪装置の種類と評価モデルのタイプ

評価モデルのタイプ別に実際の融雪装置の事例をあげる。

(1) タイプ1

遊水池、地下タンク等を使い水を消費する融雪装置がこれにあたる。杉森・深川(1994)は、遊水池に渓流水を貯留して行う融雪装置について報告した。

(2) タイプ2

地下水を使う消雪工がこれにあたり、既に第9章で述べた。

(3) タイプ3

実際の融雪装置の事例としては不明であるが、廃熱を地下タンク等へ貯留することを想定した装置はこれにあたる。

(4) タイプ4

PIP融雪システムがこれにあたる。PIPは、Pipe in Pileを意味し、ビル等の基礎杭の中空部分に水を貯め、杭の壁面を通して暖め、無散水工法で駐車場または取付道路の融雪を行うものである(宮本・他1991)。設備の面からは、構造物の基礎杭を他用途に利用するために設備費がかからず、また、維持の面では、地下水の消費はなく、ポンプの動力として2kw程度の電力を使うのみである。省資源の視点からはきわめて優れた方式である。この方式は、水位を温度に置き換えたタイプ4の水槽モデルそのものである。係数A、Bの値の大きさは、杭内に貯留した水量と融雪の負荷面積の関係で決まる。

10.3 融雪評価モデルによる過去の雪状況の検証

評価モデルのうち一番簡明なタイプ1を使って、福井の過去の記録を検証する。目的は、他の積雪地域に比して年変動の大きい福井地方において、多様な降雪状況における雪対策の効果と融雪装置の能力との関係を調べ、雪対策技術の運用の高度化をはかることにある。

評価システムのタイプ1の取扱い方法を再録する。Pi-1を前日の水温の最終値、Piを当日の最終値、Fを当日の日降雪深、Bは1日あたりの水温の回復量、aは比例係数とすると、

$$P_i = P_{i-1} - aF + B \quad (10-25)$$

となり、水位には上限と下限があり

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad (10-26)$$

である。水温が下限値に達すると融雪装置の稼働は停止する。そのため、1日の

融雪可能量 Fe は

$$F_e = (P_{i-1} - P_{\min} + B) / a \quad (10-27)$$

であり、FがFeを越えるときは、F - Feが融雪の残量となる。

Pmax = 16℃、Pmin = 6℃とし、aおよびBの値を変えて処理能力をみでみる。図10-1に1984年の福井市の降雪時の想定結果を示す。このようにして、融雪装置の能力によって一冬の間に処理されずに残る日数や残存雪の量を推定することができる。そこで、このことを福井と大野について少し具体的に見てみる。過去およそ30年の間で比較的積雪の多かった年について、融雪能力の違いによる雪処理の推定結果をみでみる。水槽モデルのタイプ1の装置について、aを一定にし、Bを変えたときの両市についての雪処理残の状況を図10-2および図10-3に示す。図で、原点のxは、装置を稼働しないときの値である。38豪雪および56豪雪は、福井地方では現在でも語られるほどのものであるが、それぞれの年最大積雪深値以外の数値でこれら豪雪を説明できることになる。これに関連して、1981年と1986年の結果をみると、雪害の発生状況は降雪深累計よりも積雪深に関係することの根拠を明らかにした。なお、表10-2にシミュレーションの対象とした年の降雪および積雪を示す。平均値は、それぞれの都市の平年値であり、1961年から1990年の30間の算術平均であらわしている。

表10-2 各年における降雪および積雪

寒候期	福 井			大 野		
	年最大積雪	年最大日降雪	日降雪年累計	年最大積雪	年最大日降雪	日降雪年累計
最 大	213 cm	73 cm	622 cm	288 cm	110 cm	1123 cm
最 少	26	16	64	38	18	139
平 均	73	32	285	122	53	559
1963 (S63)	213	56	596	288	70	1048
1981 (S56)	196	73	622	258	110	1074
1984 (S59)	95	26	460	171	44	813
1986 (S61)	127	56	622	155	65	894
1991 (H3)	60	39	188	157	60	419

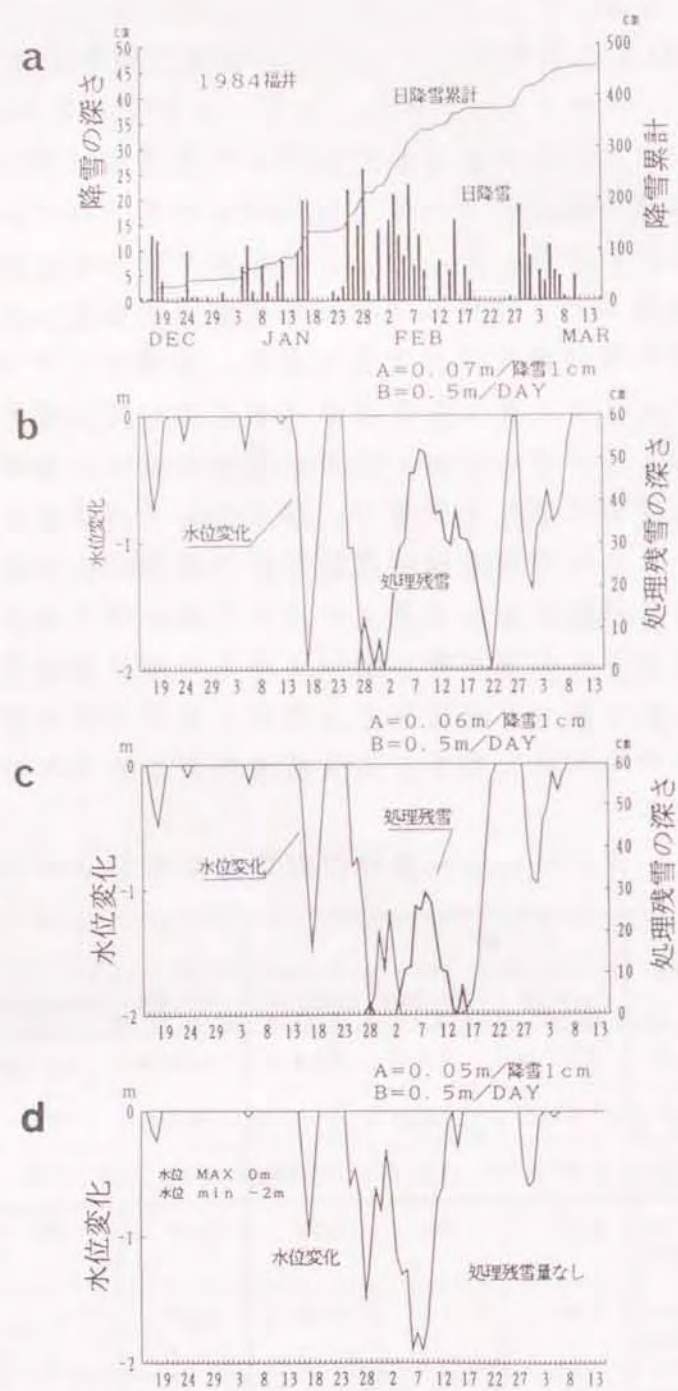


図 10-1 1984 年福井の降雪の評価

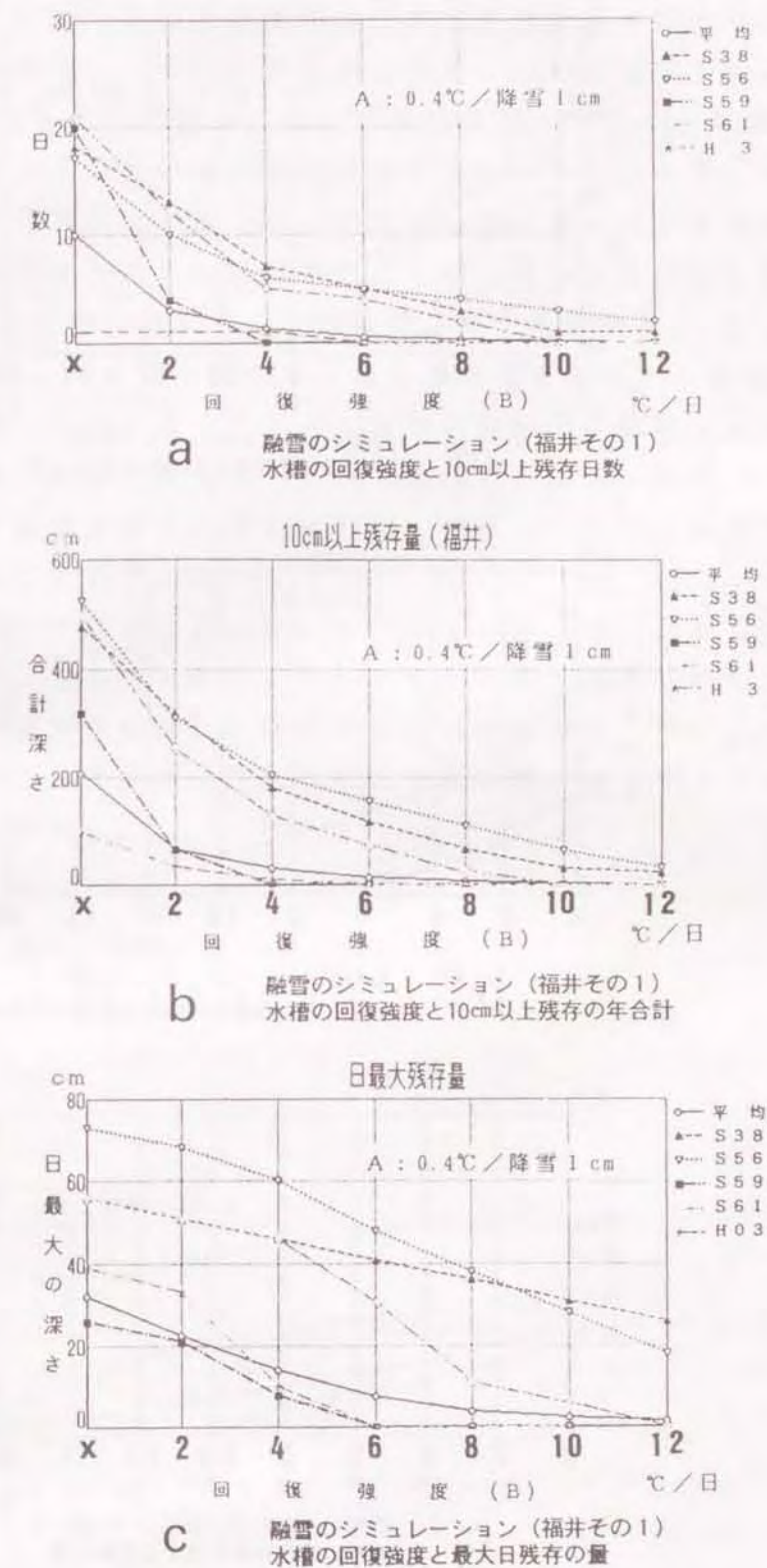
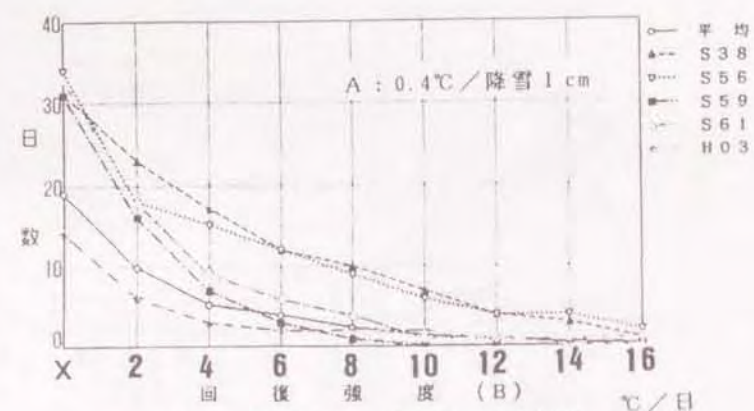
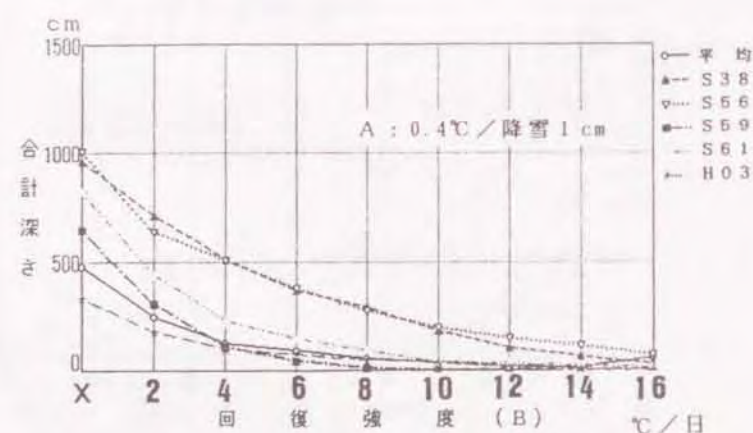


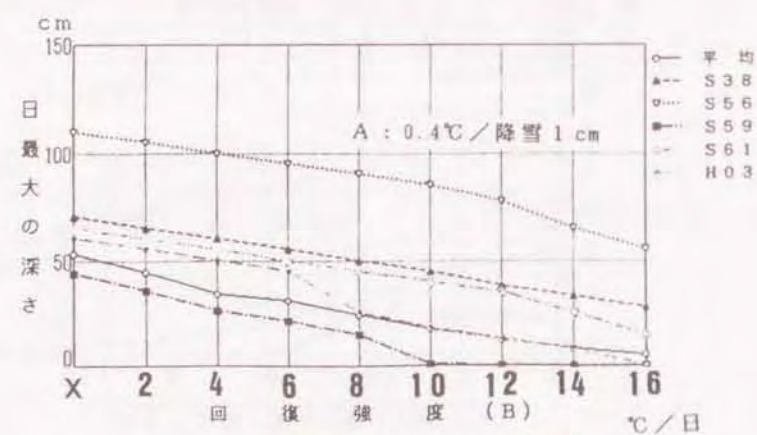
図 10-2 水槽モデルによる装置の回復力 (B) の違いによる雪処理の残量 (福井)



a 融雪のシミュレーション (大野)
水槽の回復強度と10cm以上残存日数



b 融雪のシミュレーション (大野)
水槽の回復強度と10cm以上残存の年合計



c 融雪のシミュレーション (大野)
水槽の回復強度と最大日残存の量

図 10-3 水槽モデルによる装置の回復力 (B) の違いによる
雪処理の残量 (大野)

10.4 まとめ

本章では、実際に使われる融雪装置について、水槽モデルによる評価方法を確立した。水温または水位もしくは水量を P とおき、 P の上限値 P_{\max} 、下限値 P_{\min} 、単位降雪当たりの下降値 A 、および単位時間当たりの上昇値 B の4個の定数を定める。下降値および上昇値が P に依存するかどうかにより、4通りのタイプがあり、実際の融雪装置はそれらのいずれかに類別される。4個の定数値を定めれば、前日の最終の P と当日の降雪量 F により、当日の最終の P 値が算出される。 $P \geq P_{\min}$ であるので、融雪可能量は制限され、それを F_e とすると、 $F - F_e$ が融雪残量となる。このようにして、毎日の降雪量に対する融雪装置の効果を調べることができる。 A は装置の大きさと融雪対象範囲の関係で決まり、 B は熱資源と装置の大きさの関係で決まる。この方法により過去の降雪パターンを使って融雪装置の能力と融雪目標との関係を検証、評価し、融雪の実地計画の策定に技術的根拠を与えることができる。

一方、融雪の評価モデルによるシミュレーションは、年ごとの雪状況の比較評価を行うことになり、1981年と1986年を比較した結果から、雪害発生は、降雪深累計よりも積雪深の極値に関係することを明らかにした。これは、第3章で、道路の除雪費は、日降雪深の年累計値よりも年最大積雪深との相関が大であると述べたことと一致する。

第11章 結論

本論文は、都市雪害とその対策に関する解析的研究を内容とし、都市の面的な広がり起因する技術的課題の解決を目的に、雪の持つ属性のうちの量的特性に着目し、都市雪害の発生機構の解明を行い、つぎに、機械的除排雪および融雪技術等の雪処理方法について、積雪状況に関係した有効性の解析と評価方法を提示し、さらに、主として実務上の運用に関する技術的構築をはかった。これにより都市の雪害対策における総合的な計画検討と実地施策に対して技術的根拠を与えることができた。

本論文の結果を要約すると以下の通りである。

1. 各種の雪対策方法を積雪状況との関係において評価するという視点からは、福井地方において都市雪害に関係する雪の特質は、北海道、東北地方の各地に比べて雪状況の年々による差異が大きいことをあげることができ、それを年最大積雪深に代表させてよいことがわかった。降雪量と積雪深との関係には、積雪の沈降圧縮が関与するが、これまでぬれ雪についての解明は遅れていた。そこで、ぬれ雪の沈降圧縮モデルを提示し、積雪深変化の機構を明らかにした。
2. 道路除雪費の分析から、雪害発生は降雪深の累計値よりも積雪深との間の相関が高いことがわかった。さらに後出の(7.)に関係して、融雪の評価モデルからも同様のことがいえ、これにより、都市雪害について雪の量的な特質に視点をおくことの根拠を明らかにした。
3. 道路除雪時の路側への雪の積み上げの解析をもとに、都市雪害の発生を説明する解析モデルを提示した。モデルにおける説明変数を、積雪時の道路の有効幅員およびそれを確保するための作業量としての排雪需要量に定め、それらの定義と算出方法を示した。このモデルは、道路除雪だけでなく、都市雪害の多くの事項の説明ができることを事例を示して明らかにした。
4. 先の解析モデルでは都市雪害の一過的な説明をするだけであるので、さらに時系列的な解析と対策方法の確立のため、都市内での面的な排雪需要量の移動の取扱い手法の構築を行った。都市の2次元の道路網を、排雪場を幹とした樹木構造であらわし、この構造の中での解析計算のために、道路の区画毎に階層的なコードを与えた。このコードによって都市の面的な広がり計算を行うことができ、その計算方法を提示した。計算内容は、排雪場に集中する集計計算、および、排雪場からの位置または時間的關係を調べる経路計算の2種類がある。これにより、排雪作業に関係する機械の調達、作業の進捗状況等を都市内のすべての地点について知ることができる。この計算方法は、単に排雪作業の説明だけにとどまらず、大雪または豪雪を想定した作業計画または都市の空間的整備計画に対して合理的根拠を与えることができる。さらに、ここで提示した手法は、雪と他の災害等に

関係した幅広い議論をも可能にする。

5. 上記の排雪システムにおける面的取り扱いの手法を応用し、流雪溝ネットワークの解析方法を提示し、流雪溝の維持管理運用または面的整備に関する実務的技術の構築を行った。この方法は、排雪システムと同様の方法でネットワークを構築し、流雪溝のある区間毎に階層的コードを与え、排雪システムにおける集計計算を修正した方法により流水と投入した雪の流れを詳細に計算することである。この取り扱い方法は、流雪溝に関する議論にとどまらず、流雪溝を含めた都市全体の議論を可能にする。

6. 積雪時の歩行者対策のため、先の解析モデルにより歩道に関係する積雪状況の調査および評価方法を提示した。歩行者対策については、歩道上における自然状態の雪と除雪等による雪の範囲を明らかにすることが必要であり、これは、歩道融雪または歩道除雪の実地施工に大きくかかわる。また、福井地方の標準の道路においては、平年程度の雪では車道除雪による歩道への影響は大きくないことを先の解析モデルを使って明らかにした。これらにより、実際の施策の策定に対して技術的根拠を与えることができた。

7. 都市の面的な広がりの中における実地計画の検討のため、融雪方法に関してエネルギー需給の面からの解析方法の提示を行った。地下水を使用した融雪において、地下水位低下と融雪の稼働との関係を明らかにし、地下水盆を1槽の水槽に擬したモデルにより地下水位変化をよく説明できることを明らかにした。これにより、降雪状況の違いに対して水位変動の予測が可能になり、降雪状況に対する融雪装置の有効性を判断することができる。また、表流水および溪流水の使用について事例をもとに技術的課題を明らかにした。さらに、融雪方法一般について、一層モデルによる評価方法を提示し、より効果的な融雪の実地計画が可能になることを明らかにした。

8. 機械的除排雪等、都市の雪対策方法の各種それぞれについて、積雪状況との関係での評価方法が提示されたことは、それぞれの方法に関する議論だけでなく、相互に補完しあった都市全体の雪害対策の議論が可能になる。

9. 都市雪害発生の解析モデルおよび排雪システムの面的取り扱い手法における係数については、これまで事例の不足があり、今後、これらモデルを視点にした調査研究が必要である。一方、これまでの雪と都市計画における議論の遅れは、積雪状況に関係した雪処理方法の有効性の議論の遅れに帰すことができ、本論文で提示した都市雪害の解析と評価手法および技術的取り扱い手法は、雪と都市計画の研究の方法を提示したことになる。

文 献

- 1) 阿部和久, 1994: 個別要素法を用いた積雪変形解析, 1994年度日本雪氷学会全国大会, (金沢), 予稿集, P41.
- 2) 新井市, 1990: ホワイトピアをめざして一新井市の概要と雪対策一, 新潟県新井市建設課総合雪対策係.
- 3) 道路構造令: 道路構造例の解説と運用, 編集発行(社)日本道路協会, 昭和58年2月, 丸善(東京), P140.
- 4) 遠藤八十一・大関義男・庭野昭二, 1990: 低密度の雪の圧縮粘性係数と密度の関係, 雪氷, 52, 267-274.
- 5) 福井県雪対策技術センター, 1992: 年最大積雪深の再現期間値, (1992.2, 技術資料).
- 6) 福井県防災会議・福井地方气象台, 1963: 北陸地方を襲った福井県豪雪調査報告書(昭和38年異常気象報告)(昭和38年2月9日).
- 7) 福井県, 1965: 福井県水理(地下水)地質図説明書, 福井県.
- 8) 福井市: 福井市の環境(各年度版, 福井市).
- 9) 古川巖, 1946: 流雪溝の発祥と将来, 雪氷, 8, 2, 23-26.
(再録) 雪氷10年, 日本雪氷協会編, 昭和23年, P140.
- 10) 古川巖, 1961: 流雪溝効果論, 日本積雪連合資料, NO. 52.
- 11) 東浦将夫, 1981: 流雪溝の運用と問題点. 日本建設機械化協会, 昭和55年度除雪研究会資料, (国立防災科学技術センター新庄支所研究業績集Ⅱ), 1-18.
- 12) 東浦将夫・沼野夏生, 1982: 昭和56年豪雪による福井県・石川県の都市雪害に関する実態調査, 科学技術庁国立防災科学技術センター, 昭和56豪雪による北陸地方の災害現地調査報告, 主要災害調査第17号, 国立防災科学技術センター, 171-335.
- 13) 本多義明, 1981: 昭和55・56年豪雪による道路の横断構成から見た除雪の効果, 研究代表者石原安雄, 昭和55・56年豪雪による雪崩・地すべり災害及び交通傷害の調査研究, (文部省科学研究費(No. 502016)自然災害特別研究突発災害研究成果), 134-139.
- 14) 研究代表者本多義明, 1983: 積雪が街路交通流に及ぼす影響に関する基礎的研究(昭和56・57年度科学研究費補助金(一般研究C)).
- 15) 五十嵐高志・早川典生・金子俊輔, 1992: 長岡市における積雪深データ, 雪氷, 54, 1, 35-39.
- 16) 研究代表者石原藤次郎, 1964: 昭和38年1月豪雪に関する調査報告書, (昭和38年度文部省科学研究費, 特定研究による総合研究班).

- 17) 研究代表者石原安雄, 1981: 昭和55・56年豪雪による雪崩・地すべり災害及び交通傷害の調査研究, (文部省科学研究費(No. 502016)自然災害特別研究突発災害研究成果).
- 18) 石川県地下水対策保全協議会・金沢市・七尾市, 1991: 石川県地下水保全対策調査報告書(平成2年度).
- 19) 伊藤文雄: 屋根から滑落した雪堤の断面形
(未発表)
- 20) 岩井重久・石黒政儀, 1970: 応用水門統計学, 森北出版(東京), 73-83.
- 21) 和泉薫, 1983: 積雪底面の融雪量, 新潟大学積雪地域災害研究センター年報, 5, 123-125.
- 22) 科学技術庁国立防災科学技術センター, 1982: 昭和56豪雪による北陸地方の災害現地調査報告, 主要災害調査第17号, 国立防災科学技術センター.
- 23) 科学技術庁研究調整局, 1983: 昭和56年の豪雪に関する特別研究報告書.
- 24) 梶川正弘・小野昇, 1990: 新積雪の圧縮粘性係数と降雪粒子の結晶形との関係, 雪氷, 52, 3, 283-287.
- 25) 建設省都市局都市計画課・北陸地建企画部・北陸地建企画部・山形県・新潟県, 1973: 防雪都市建設計画報告書.
- 26) 建設省北陸地方建設局監修, 1983: 流雪溝設計運営要領, 北陸建設弘済会(新潟), P35, P56.
- 27) 建設省北陸地方建設局監修, 1990: 路面消・融雪施設等設計要領, 平成2年7月, (社)日本建設機械化協会北陸支部(新潟), 33-52.
- 28) 小林俊市, 1985: 水潤雪のペーンせん断速度(I)ーペーンせん断速度と水潤時間の関係ー雪氷, 42, 1, 55-62.
- 29) Kobayasi S. Izumi K. Ezaki Y. Tan M., 1992: Mechanical properties of high water content snow, CRREL Special Report 92-27, December 1992, 313-321.
- 30) 気象庁, 1991: 日本気候表その1(平成3年3月).
- 31) 木下誠一, 1963: 0°Cの水に浸した雪の圧縮I, 低温科学物理篇, 21, 13-22.
- 32) 小島賢治, 1955: 積雪層の粘性圧縮I, 低温科学物理篇, 14, 77-93.
- 33) 小島賢治, 1956: 積雪層の粘性圧縮II, 低温科学物理篇, 15, 117-135.
- 34) 小島賢治, 1957: 積雪層の粘性圧縮III, 低温科学物理篇, 16, 167-196.
- 35) 小島賢治, 1958: 積雪層の粘性圧縮IV, 低温科学物理篇, 17, 54-63.
- 36) Kojima, K., 1967: Densification of seasonal snow cover. Physics of Snow and Ice, Vol. 1, Part 2, ed. Oura, H., The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 928-952.

- 37) Lange, T. E. and Nakamura, T., 1983, Finite Element Computer Analysis of Snow Settlement, Contribution from The Shinjo Branch No. 2, p139-187.
- 38) 前田博司, 1987: 多雪地方における建築物の雪荷重の評価に関する研究, 昭和62年2月(博士論文).
- 39) 前田博司・田坂郁夫, 1996: ニューラルネットワークによる積雪シミュレーション(その1: パーソナルコンピュータによる試行), 福井工業大学研究紀要, 26, 149-155.
- 40) 松岡春樹・杉森正義・伊藤文雄・田中信清, 1970: 1967/68年冬期における福井地方の積雪の観測結果について, 福井大学積雪研究室報告, 1, 1-85.
- 41) 宮本重信・千田秋広・竹内政紀・木村照夫・橋詰善光・青木由裕・高橋浩三・小林志伸, 1991: 基礎杭利用地熱融雪技術の開発, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 4, 39-48.
- 42) 宮本重信, 1994: 地下水を利用した節水型融雪システムの開発, 土木学会論文集, No. 492/VI-23, 77-86.
- 43) 宮本重信, 1995: 凝固潜熱剤封入による路面凍結緩和の実験的研究, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 8, 39-52.
- 44) 宮本重信, 蓄熱材封入による路面凍結緩和の実験的研究, 土木学会第49回年次学術講演概要集, 第5部, 648-649.
- 45) 長岡市: 長岡市の環境(各年度版, 長岡市).
- 46) 中俣三郎, 1982: 豪雪時における居住区の実体と対策, 市街地の堆雪, 研究代表者渡辺善八, 都市の豪雪による災害とその対策, (文部省科学研究費, 自然災害特別研究研究成果, 自然災害総合研究班), 70-79.
- 47) 中村勉・中村秀臣・東浦将夫・沼野夏生・阿部修, 1983: 都市雪害推定に関する研究, 科学技術庁研究調整局, 昭和56年の豪雪に関する特別研究報告書, 53-118.
- 48) 中峠哲朗・段野勝, 1964: 融雪因の基礎的研究, 農業土木研究, 31, 8, 457-462, <再録> 暖地積雪の研究論文集, 福井大学積雪研究室報告特集号, 昭和46年6月.
- 49) 中峠哲朗・段野勝, 1966: 積雪量変化の予報, 福井大学工学部研究報告, 13, 173-178.
- 50) 中峠哲朗, 1982: 豪雪時における道路の状況と防雪施設, 道路の堆雪状況と水消雪・機械除雪, 研究代表者渡辺善八, 都市の豪雪による災害とその対策, (文部省科学研究費, 自然災害特別研究研究成果, 自然災害総合研究班), 80-83.
- 51) 成瀬廉二・大浦浩文・小島賢治, 1970: 気温融雪の野外研究, 低温科学物理

- 編, 28, 191-202.
- 52) 名津井学・和田秀一, 1988: 河川流量調査中間報告, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 1, 76-91.
- 53) (社) 日本建設機械化協会編, 1977: 新編防雪工学ハンドブック, 改訂版第1刷(1988), 森北出版(東京), 342-343.
- 54) (財) 日本積雪連合, 1965: 新潟を含めた北陸4県における総合除雪方策調査報告書.
- 55) 新潟鉄道管理局, 1955: 流雪溝設計資料, (雪にいとむく雪と鉄道), 昭和47年12月発行, p194).
- 56) 大熊孝, 大川秀雄, 神立秀明, 宮拓男, 水落直人, 中村一郎, 流雪溝と消融雪溝の標準的計画・設計法に関する基礎的考察, 1989: 雪氷, 51, 4, 239-251.
- 57) 雪害実験研究所, 1984: 長岡における積雪観測資料(8)(1983.10~1984.4), 防災科学技術研究資料, 第91号, 国立防災科学技術センター.
- 58) Shinojima, K., 1967: Study on the visco-elastic deformation of deposited snow. Physics of Snow and Ice, ed. H. Oura, The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 875-907.
- 59) 莊田幹夫・須藤伊佐夫, 1961: 平地積雪の断面調査-1952~'60年8冬期間, 於塩沢, 鉄道技術研究報告第258号, 施設編100号, 昭和36年10月.
- 60) 莊田幹夫・須藤伊佐夫, 1973: 平地積雪の断面調査2-1960~'70年10冬期間, 於塩沢, 鉄道技術研究報告第828号, 施設編376号, 1973年1月.
- 61) 杉森正義・各務頼文, 1968: 福井地方の平地積雪の観測結果について, 雪氷, 30, 1, 19-20.
- 62) 杉森正義, 1973: これからの無雪都市計画の観点における融雪および機械的除排雪に関する評価, 雪氷, 35, 1, 5-13.
- 63) 杉森正義, 1990: 都市の排雪ネットワークシステムについて, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 3, 89-104.
- 64) 杉森正義, 1991¹⁾: 都市の排雪ネットワークシステムについて(その2, 作業予測の解析), 福井県建設・雪対策技術センター年報, 4, 97-109.
- 65) 杉森正義, 1991²⁾: 流雪溝の面的流量の計算方法, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 4, 111-120.
- 66) 杉森正義, 1992¹⁾: 都市の排雪システムのネットワーク解析, 雪氷, 54, 1, 1-9.
- 67) 杉森正義, 1992²⁾: 流雪溝の面的配置における流量の計算方法, 雪氷, 4, 4, 347-354.
- 68) 杉森正義・本家秀幸・矢尾良雄, 1992: 中間レベルの雪対策(歩道の雪対策

- についての一考察), 第8回日本雪工学大会論文報告集, 159-164.
- 69) 杉森正義・伊藤文雄, 1993: ぬれ雪の沈降圧縮と粘性係数, 1993年度日本雪氷学会全国大会発表, (新庄), 予稿集 P35.
- 70) 杉森正義・伊藤文雄, 1994: ぬれ雪の沈降圧縮の研究(その2), 1993年度日本雪氷学会全国大会発表, (金沢), 予稿集 P40.
- 71) 杉森正義・深川俊一, 1994: 地下式貯留施設利用融雪システムについて, 雨水技術資料, VOL.13, (社)雨水貯留浸透技術協会, 23-33.
- 72) 杉森正義, 1995: 歩道上の積雪調査と歩行者帯確保についての考察, 日本雪工学誌, 11, 1, 4-14.
- 73) 杉森正義・福原輝幸, 1995: 地下水による道路消雪と地下水位低下について, 平成7年度日本雪氷学会北信越支部研究発表, (福井).
- 74) 杉森正義・梅田正浩・北川博正・伊藤文雄, 1996: 1996年勝山市横倉・小原で発生した表層雪崩について, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」, 9, 35-40.
- 75) 杉森正義・北川博正・伊藤文雄・梅田正浩, 1996: 1996年福井県勝山市横倉・小原で発生した表層雪崩について, 第12回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文報告集, Vol.12-No1, 294-301.
- 76) 杉森正義, 1997²⁾: 都市の機械的除排雪および流雪溝システムの面的取り扱いの研究, 雪氷, 59, 1, 33-40.
- 77) 杉森正義, 1997²⁾: 北陸地方の雪害リスクと地域社会構造との関係, 研究代表者北浦勝, 社会環境の変遷を考慮した都市の雪害軽減支援システム開発, 平成7年度、8年度科学研究費補助金(基礎研究(B)(1))研究成果報告書, 55-64.
- 78) 杉森正義・北川博正・伊藤文雄・梅田正浩・福嶋祐介, 1997: 1996年勝山市横倉・小原で発生した表層雪崩の流動特性, 雪氷, 59, 5, 319-330.
- 79) 杉森正義・梅田正浩・北川博正・伊藤文雄, 1997: 1996年奥越地方で発生した表層雪崩について(表層雪崩報告その2), 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」, 10, 35-38.
- 80) 杉森正義・宮本重信・室田正雄, 1997: 克雪用水目的の水資源の確保と有効利用についての考察, 第5回水資源に関するシンポジウム論文集, 425-430.
- 81) 田村盛彰, 1997: 平成9年度日本雪氷学会北信越支部研究発表, (長野).
- 82) 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土屋喬雄, 1985: 最新環境設計工学, 井上書院(東京), 76-89.
- 83) 谷中隆明・永野多美雄・山崎興樹・水谷宣明, 1989: 新潟県六日町盆地の地下水流動, 地下水学会誌, 31, 3, 143-153.

- 84) 土屋雷蔵・内山宏文・斉藤孝夫, 1976: 積雪地域の道路幅員に関する研究, 第30回建設省技術研究会報告(昭和51年度), 432-439.
- 85) 和田淳・野村俊雄・内山宏文・酒井一成, 1974: 積雪地域における道路の堆雪余裕幅に関する考察, 第28回建設省技術研究会報告(昭和49年度), 354-358.
- 86) 和田秀一・山本重男, 1991: 克雪用表流水確保に関する調査報告, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 4, 33-38.
- 87) 渡辺善八・阿部正二郎・中俣三郎, 1982: 豪雪時における都市の堆雪状況(シンポジウム「都市の雪」), 雪氷, 44, 1, 37-40.
- 88) 渡辺善八, 1986: 流雪溝の配置と排雪に要する水量, 雪氷, 48, 2, 141-147.
- 89) 研究代表者渡辺善八, 1982: 都市の豪雪による災害とその対策, (文部省科学研究費, 自然災害特別研究研究成果, 自然災害総合研究班).
- 90) 渡辺善八・阿部正二郎, 1982: 豪雪時における居住区の実体と対策, 宅地からの排雪, 研究代表者渡辺善八, 都市の豪雪による災害とその対策, (文部省科学研究費, 自然災害特別研究研究成果, 自然災害総合研究班), 66-70.
- 91) 吉田順五・木下誠一・若浜五郎・中村勉・藤岡敏夫・清水弘・秋田谷英次・清水孝一・権平長四郎・佐藤幸三郎・近江満, 1963: 北陸豪雪の雪質調査, 低温科学物理編, 22, 129-154.
- 92) 吉田順五編, 1969: 積雪災害の基礎的研究, 北海道大学低温科学研究所, 昭和44年(1969)4月.

謝 辞

本研究は、(社)日本雪氷学会、日本雪工学会において発表された研究をもとになされたものであり、また、これらの研究は、福井大学積雪研究室、福井県雪害研究室、福井県雪対策技術センターおよび福井県雪対策・建設技術研究所においてなされた研究および業務にもとづくものであります。これまでに多くの方々よりご厚情を得てきました。

福井大学名誉教授塚野善蔵氏(教育学部地学教室・初代福井大学積雪研究室長)、福井大学名誉教授各務頼文氏(工学部応用理学教室)、福井大学名誉教授清水啓氏(教育学部物理教室)、元福井大学教授松岡春樹氏(教育学部物理教室)、福井大学教授本多義明氏(工学部環境設計工学科)、福井工業大学教授前田博司氏(工学部建設工学科・建築)ならびに福井大学教育学部物理教室技官伊藤文雄氏には、福井地方の雪の研究について多大なご指導とご協力をいただきました。

福井県雪害研究室、福井県雪対策技術センターならびに福井県雪対策・建設技術研究所(前記センターの改組)および福井県土木部の関係の各位には、雪対策技術研究業務および土木建設業務において多大なご理解とご支援をいただきました。

長岡技術科学大学教授梅村晃由氏には都市の排雪ネットワークシステムの構築について貴重なご助言をいただきました。

最後に、新潟大学積雪地域災害研究センター教授小林俊一氏、同研究センター助教授青山清道氏、同じく同研究センター助教授和泉薫氏、新潟大学工学部教授大熊孝氏、同工学部教授大川秀雄氏には、本研究を通じて多大なご指導とご助言をいただきました。

以上を記し、各位に対して心より厚く謝意を表します。