

I-27 航空LPデータを用いた山岳地帯道路の散水融雪設備計画

Watering Snow Equipment Design of Mountainous Region Road
Applying Airborne Laser Profiler Data牧野衛¹・小林一郎²・山本一浩³・九鬼裕之⁴

Makino Mamoru, Kobayashi Ichiro, Yamamoto Kazuhiro, and Kuki Hiroyuki

抄録：本研究は融雪設備の中で比較的安価で設置できる散水設備について、少量の水による循環型散水設備計画を提案する。路面上の散水を効率よく回収し、循環させるためには水流の動きの把握が不可欠である。これについては、近年、全国的に計測及び取得されている航空レーザ計測標高データ（以下：LPデータ）を使用した。LPデータを使用することにより、路面の勾配を面的に把握することができ、詳細な勾配ベクトルを得ることが可能となった。この勾配ベクトルによって側溝及びアスカーブの設置を適切な位置に計画でき、道路に散水した水を逃がすことなく再利用する循環型散水設備計画を立案できた。

Abstract : We proposed a recycling-based watering equipment plan with the small quantity of water, which can be placed by lower-price. Grasping the movement of water is necessary to collect and circulate water on the road efficiently. In this paper, LP data is utilized for understanding this movement. It enables to understand the inclination of the road in respect and to obtain a detailed gradient vector. As a result, the installation of the street gutter and asphalt curb is planned to an appropriate position which the sprinkled water is recycled as much as possible by recycling-based watering equipment plan.

キーワード：施設設計、散水設備、LPデータ、標高等高線図、勾配ベクトル

Keywords : design of facilities, sprinkler system, LP Data, altitude contour plot, gradient vector

1. 序論

冬季の積雪地帯における道路融雪方法にはいくつかの種類の方法があり、近年においては環境問題も考慮した、無散水融雪が検討、設置されている。無散水融雪には、①電熱方式、②地中熱交換方式、③温水ボイラ方式等の種類があり、既に設置され運用されている¹⁾。しかし、設置費用が高価であることや、新規道路での設置に限定されているなど、設置箇所が限定されている。

以上のような現状を踏まえ、本研究では、山岳地帯道路を対象とし、比較的安価で設置できる散水設備について、少量の水による循環型散水設備計画を提案する。なお、本研究を進める上で重要となる路面における水流の把握については、近年、全国的に計測及び取得されている、航空レーザ計測標高データ（以下：LPデータ）を使用し、路面の勾配を面的に把握する方法を採用した。LPデータを使用することにより、道路面の詳細な勾配ベクトルを得ることが可能となる。そこ

で、適切な位置に側溝やアスカーブ等の配置計画を行うことができ、道路に散水した水を逃がすことのない、循環型散水設備計画が可能であると筆者らは考えた。なお、本研究に用いたLPデータの計測諸元を、表-1に示す。また、取得されたLPデータの単位面積当たり点群数を調べた結果は、3~10Pint/m²であった。

表-1 LPデータ計測諸元

計測諸元	海拔高度	1,300~1,500m	
	パルス頻度	33~70kHz	
	スキャン角	±18~20°	
	スキャン頻度	25~36Hz	
	ビーム径	0.2mrad	
	飛行速度	70m/s	
取得データ 誤差検証値	点検数	144点	
	実測値との差	最小値	-0.051
		最大値	0.011

1：正会員 (株)帝国コンサルタント 大阪支社

(〒531-0076 大阪市北区大淀中 1-4-16, Tel :06-6453-0970, E-mail : m-makino@c-teikoku.co.jp)

2：正会員 工博 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 (〒860-0855 熊本市黒髪 2-39-1)

3：正会員 工博 国土交通省 福井河川国道事務所 (〒918-8015 福井市花堂南 2-14-7)

4：学生員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-0855 熊本市黒髪 2-39-1)

2. LPデータの処理方法

本研究は、3次元CADを使うことを前提としている。既存のCADソフトでLPデータを利用するときの問題点は、以下の2点である。

- ①CADやPCの能力に比べ、測点の数が多すぎる。
- ②ランダムな点群データをFEMや格子点解析へ利用するには、規則的なデータへの変換が必要である。
このため、データ数の削減と同時に、ほぼ等間隔のデータへの変換処理を行う。

(1) メッシュ代表点の算出

点群総数を n とし、全点群 $(x_i, y_i, z_i (i=1,2,\dots,n))$ を、一辺 s の正方形領域(メッシュ)に区分する(図-1)。X, Y方向のメッシュ分割数を mx, my 、全メッシュ数を m とし次式で求める。ただし、 x_u, x_l は x_i の最大値、最小値、 y_u, y_l は y_i の最大値、最小値とする。各メッシュに区分された点群の平均をメッシュ代表点として算出する。

$$mx = \text{Int}\left(\frac{x_u - x_l}{s}\right) + 1$$

$$my = \text{Int}\left(\frac{y_u - y_l}{s}\right) + 1$$

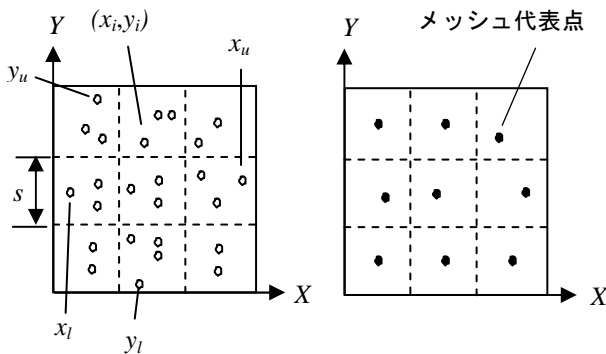


図-1 メッシュ分割と代表点生成

(2) TINサーフェスと勾配ベクトルの生成

図-2に示すように、各メッシュの代表点を結び、面(以下、TINサーフェス)を生成する。TINサーフェスの生成後、全てのTINに対し、以下の手順により、勾配ベクトルを生成する。

- ①TINの3点において最高標高値の点をAとし、その他の2点をB, Cとする。
- ②線分ABをベクトル a 、線分ACをベクトル b とし、 a と b の外積を求め、法線ベクトル u を得る(図-2)。
- ③法線ベクトル u と鉛直線がなす角度 α からABCが

- 作る面の角度を計算し、傾斜角 θ を得る(図-3)。
- ④TINの重心 G を中心とし、法線ベクトル u のx方向成分とy方向成分により方向を求め、さらに、傾斜角の値により長さを決定する。

各メッシュの点群をメッシュ代表点に変換しているため、均等に勾配ベクトルが生成される。これを利用して、道路面の勾配を効率的に把握することができる。

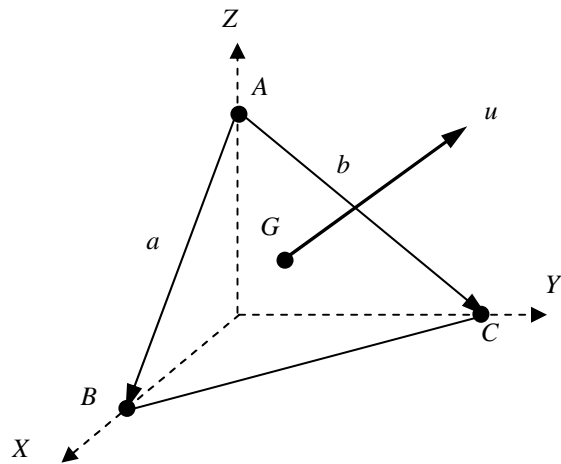


図-2 法線ベクトル u の算出

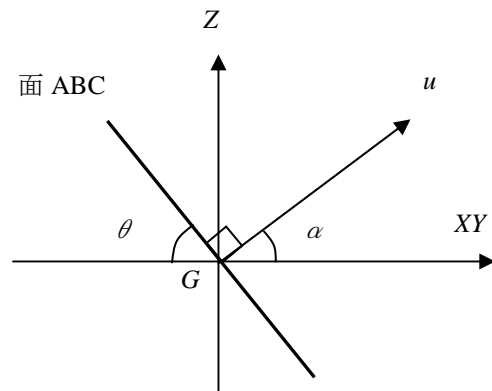


図-3 ABC面の傾斜角の算出

3. 標高等高線図による道路面分割

生成したメッシュ代表点、TINサーフェス、勾配ベクトルを利用して、設計支援のための資料となる、①標高区分図とLPデータから作成された標高等高線図(以下:標高等高線図)、②勾配ベクトルによる道路面分割、③流水軌跡図を求める。

①は、全体の標高分布の把握を目的とするが、視覚と標高等高線情報のみでは解釈に個人差が生じる。よって、②は勾配ベクトルから道路面を分割し、集水エリアの特定を目的に作成する。また、①と②のみでは水の流れを把握できないため、的確な施設配置計画の立案を目的に③を作成する。以下に詳細を述べる。

(1) 標高区分図と標高等高線図

メッシュ代表点を3次元CADに読み込み、10cm間隔で標高を色分けした標高区分図と標高等高線図を作成し、勾配線を入れた(図-4)。通常の地形図では道路面に等高線は作成されないが、等高線間隔を10cmにすることにより、図-4のような等高線が作図される。この標高等高線図から道路面の尾根線と、予測される水の流れ(勾配線)を作図することが可能となり、道路面全体の勾配状況を把握することができる。つまり、流水解析前に勾配状況を把握できることで、解析時の初期条件の設定を容易に行うことができる。

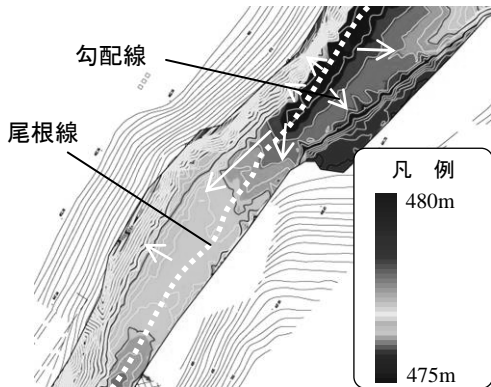


図-4 標高区分図と標高等高線図

(2) 勾配ベクトルによる道路面分割

隣接する2つの三角形の接する線を分割を判断するための照査線とし、その照査線の midpoint をOとする。各三角形にある勾配ベクトルの始点をOに移動する(図-5)。移動した勾配ベクトルの配置状況を、照査線を軸として見た場合、図-6のように3つのパターンに分けられる。

- ①パターン(a): 勾配ベクトルを照査線の midpoint に移動する際に、2つのベクトルが、共に照査線を越えない場合であって、勾配ベクトル移動後に、その配置状況が照査線を中心として左右に配置されている場合をパターン(a)とし、この場合には照査線に尾根線属性を付与する(図-6(a))。
- ②パターン(b): 勾配ベクトルを照査線の midpoint に移動する際に、2つのベクトルが、共に照査線を越えて移動する場合であって、勾配ベクトル移動後に、その配置状況が照査線を中心として左右に配置されている場合をパターン(b)とし、この場合には照査線に谷線属性を付与する(図-6(b))。
- ③パターン(c): 勾配ベクトルを照査線の midpoint に移動する際に、いずれか1つのベクトルが照査線を越えて移動する場合をパターン(c)とし、この場合には照査線には属性は付与しない(図-6(c))。

このパターンにより、全ての照査線に尾根線、谷線の属性を付与していく。この方法で一部の区画で、尾

根線と谷線の属性付与を行った。その結果を図-7に示す。この処理により、尾根線と谷線との関係から、路面を水の流れる方向で分割することが可能となる。なお、図-7において、不定形メッシュとなっているのはLPデータのメッシュポイント変換時にx, y, z全てを平均化し代表ポイントとしているからである。

以上のベクトル移動パターンによる路面分割を行った結果を図-8に示す。この路面分割によりa~fの5つのグループに分割できた。この結果から、水はこの5つの方向へと流れて行くと推測される。また、分割したエリアの面積もCADの機能により得ることができるため、散水量を容易に算出できる。

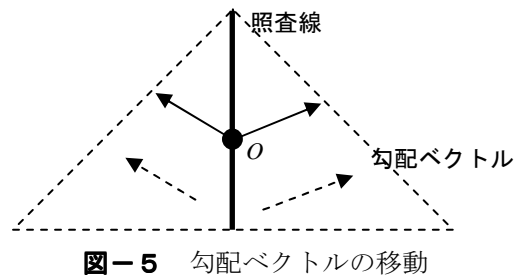


図-5 勾配ベクトルの移動

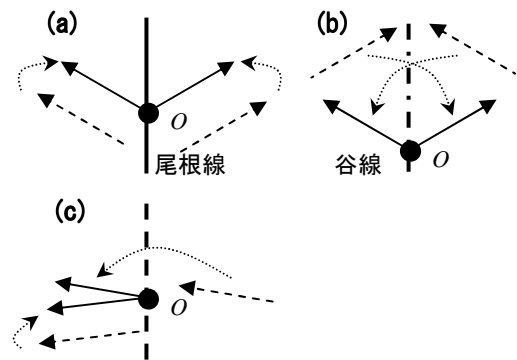


図-6 照査線を軸としたパターン分け

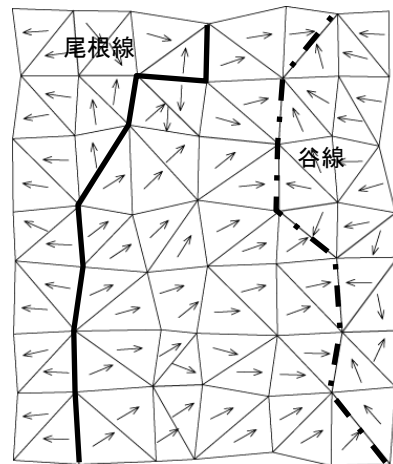


図-7 勾配ベクトルによる路面分割

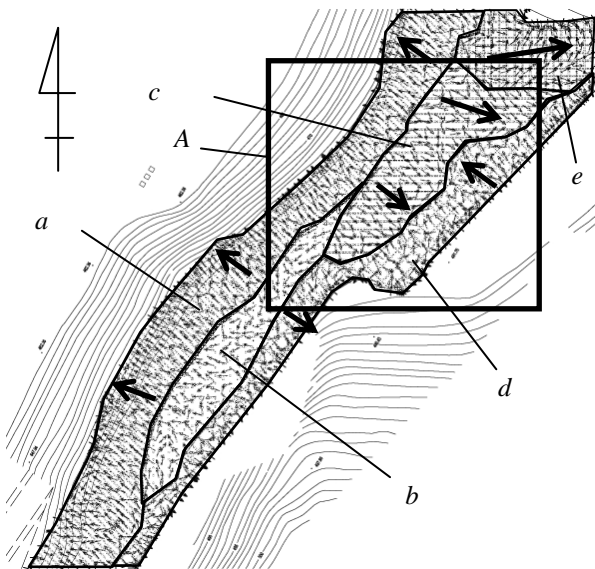


図-8 ベクトル移動パターンによる路面分割

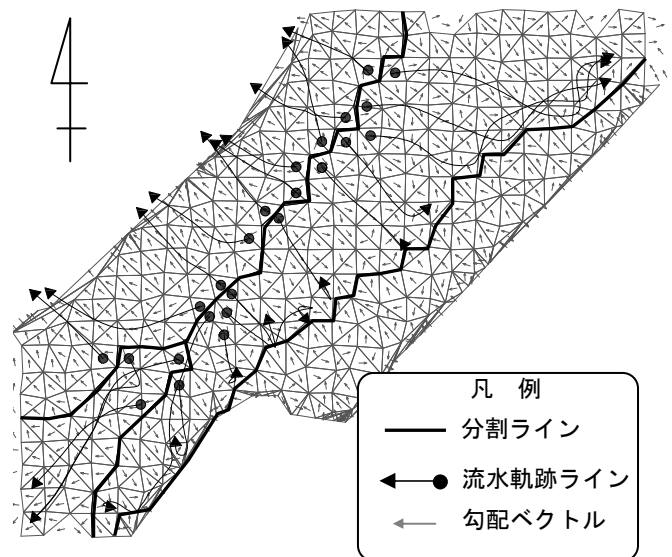


図-9 粒子法による流水軌跡図

(3) 流水解析と軌跡図

本研究では流水解析に粒子法を採用する。粒子法とは連続体を有限個の粒子によって表し、連続体の挙動を粒子の運動によって計算する方法であり、各粒子は速度や圧力といった変数を保持しながら移動する²⁾。粒子法は、差分法や有限要素法で必要となる格子を使用しない方法であることが特徴である。有限要素法等で格子が必要な場合、3次元の複雑な形状に対する格子生成の方が解析よりも相対的に困難である。この格子を必要としない特徴が粒子法採用の理由である。

なお、粒子法も様々な方法が研究されており、その中から本研究では、①TINサーフェスを使用できること、②解析結果をCGソフトで可視化が可能であること、という要件を備えたNext Limit Technologies社製のReal Flowを用いることとした。

前述した粒子法により、図-8のAエリアにおいて解析を実施し、流れの軌跡を図-9に記した。この結果から、標高等高線図及び勾配ベクトルで推測した水の流れる方向と、ほぼ一致していることが確認できた。この流水軌跡図は、水の流れがイメージできるため、住民のニーズ等を考慮した設計が可能である。一度TINサーフェスを作成すれば様々な角度から流水の様子を観察することが可能となり、施工時に発生しがちな設計変更を事前に回避できる。

4. 適用事例

(1) 対象地

国道29号線は、兵庫県姫路市と鳥取県鳥取市とを連絡する唯一の主要幹線道路である。

現在、冬季には降雪による交通障害が本路線の県境

付近で発生し、問題となっている。鳥取県側では散水融雪設備の設置によって既に問題は解決しているが、兵庫県側は、未だに除雪車の稼働によって除雪を行っている。

本研究では、図-10に示すように国道29号線の兵庫県側の散水設備が設置されていない61kp付近の5kmの区間を設計対象地とし、散水融雪設備の計画及び設計を行う。

なお、この区間は河川法の改正³⁾により、河川からの取水に制限がかけられているとともに、水利権等のためダム湖からの取水はできない地区である。このため、河川に負担をかけずに取水し、散水融雪設備へ利用するための対応が迫られている。

その対応として、本研究では、3章で提案したLPデータによる道路面の面的形状把握及び勾配ベクトルによる路面分割を活用し、少量の河川水を有効活用する循環型散水設備計画及び設計を行う。

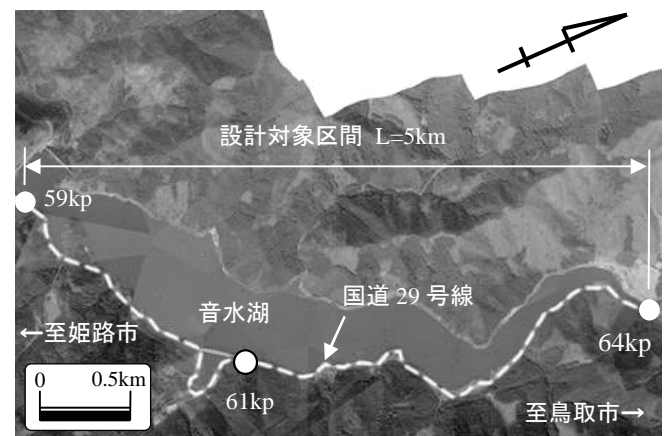


図-10 設計対象区間

(2) 設計の概要

a) 標高等高線図の作成

まず、**図-11**のように、標高等高線図を作成する。この図から、この対象地全域は片勾配及びびりみ勾配の存在する区間であり、ダム湖側の標高の低い場所（X地点）では、アスカープ設置による集水が必要な箇所であると判断できる。

b) 勾配ベクトルによる路面分割

次に勾配ベクトルより路面分割を行うと、**図-12**のようにa~cの3ゾーンに分割される。

- a: ダム湖側に流れて行く道路面。
- b: 山側に流れて行く道路面。
- c: 勾配ベクトルにより集水困難と判断される道路面。

c) 設備設置計画の立案

上記の区分をもとに、循環型散水方式の設備設置計画の方針を立案した（**図-13**）。

- ①ダム湖側（aゾーン）では、アスカープを設置して散水した水を集水樹に集水し、さらに集水槽にて回収する。
- ②山側（bゾーン）では、既設側溝を利用して集水し、集水槽にて回収する。

③cゾーンは、アスカープにて集水は可能ではあるが、道路縦断等を勘案すると、この計画範囲からは除外する必要があると判断できる。

(3) 循環型散水設備計画

循環型散水設備計画において設置する施設の種類と役割及び、散水する水の循環方法の概要を以下に示す。

a) アスカープ新設による集水方法

前節における路面分割により、ダム湖側及び山側に流れる路面を特定した。アスカープは設計対象区間のダム湖側に流れる道路の路肩部分に新設する。このアスカープ計画においては、始点と終点について、粒子法解析による流水状況をシミュレーションし、流水の捕捉状況を検証した上で、適正な施工延長を計画した。その結果を**図-14**に示す。**図-14(a)**は施設なしの状態の流水の状況であり、**図-14(b)**はアスカープの不足により、水がダム湖に流れ込んでいる。それに対し、**図-14(c)**では、解析結果を考慮しアスカープの延長を長くしたことにより、水が捕捉できていることが判る。また、粒子法解析は、アスカープの設置位置だけでなく、散水位置も任意に設定し解析でき

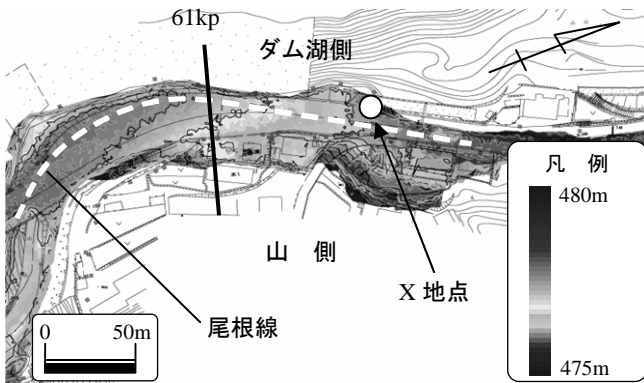


図-11 標高等高線図による路面状況把握

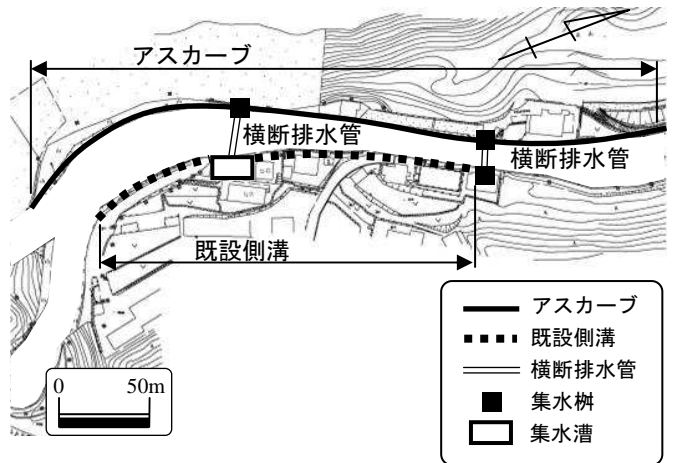


図-13 設備配置計画

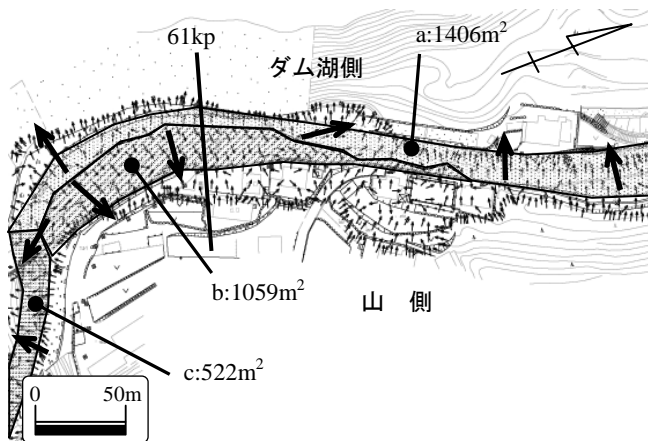


図-12 勾配ベクトルによる路面分割

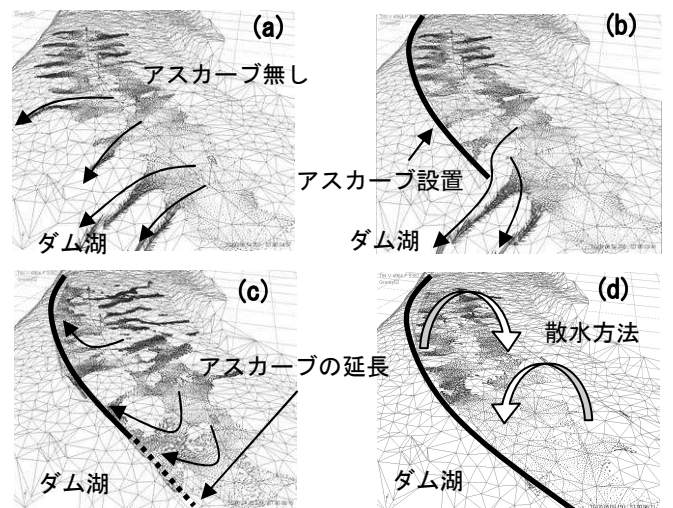


図-14 流水捕捉状況の検証

ることから、散水位置についても検討を行った。その結果、両サイドからの散水方法が、道路面全体に散水できることが確認できた（図-14(d)）。

集水柵、集水槽は標高等高線図と勾配ベクトルにより判断し、標高の低い位置を選定し設置する。散水された水はアスカーブにより、集水柵に集水され、さらに集水槽へと自然流下する（図-15(a)）。

b) 既設側溝利用による集水方法

山側に流れる路面においては、散水された水を既設側溝の利用により集水し、集水槽に回収される（図-15(b)）。

c) 循環型散水設備の全体の流れ

散水された水は、①アスカーブ→集水柵→集水槽、②既設側溝→集水槽の2つの方法により、集水槽に集水される。集水槽に回収された水はポンプアップされ、送水管にて散水区域に送られ再び散水される。

上記で説明した集水方法を図-15(c)に、61kp 付近の設備計画平面図を図-16、61kp 付近横断面図及び送水ポンプ詳細図を図-17(a)、(b)に示す。

(4) 考察

a) 路面分割による循環散水設備計画の効果

61kp 付近での a, b, c の散水面積は $1,406 + 1,059 + 522 = 2,987(\text{m}^2)$ である。

アスカーブと既設側溝により a と b の部分は集水可能であるが c の部分は勾配ベクトル・地形等から集水困難と判断し集水可能面積に加えなかった。

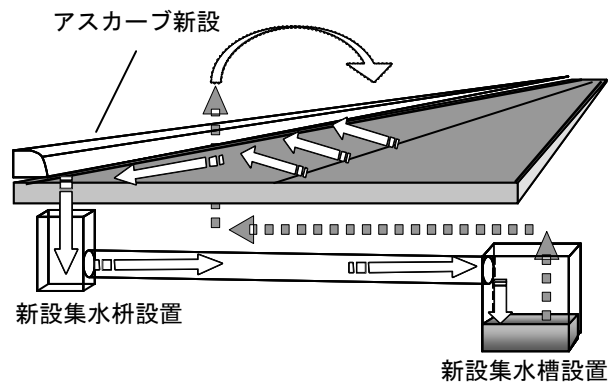
以上の面積情報より、循環のための補給水量を以下の手順で計算する。

- 散水面積： $A = 2,987(\text{m}^2)$
- 集水可能面積： $A1 = A - c = 2,465(\text{m}^2)$
- 集水範囲率： $R1 = A1/A = 0.825$
- 散水量： $V = A \times 0.2(\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2) = 597(\text{L}/\text{min})$
- ここで $0.2(\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2)$ は単位散水量⁴⁾である。
- 散水再利用率： $R2 = R1 \times 0.7 = 0.578$
- ここで 0.7 は道路集水率⁵⁾である。
- 道路内回収量： $Vr = V \times R2 = 345(\text{L}/\text{min})$
- 補給水量： $Vw = (V - Vr)/1000 = 0.25(\text{m}^3/\text{min})$

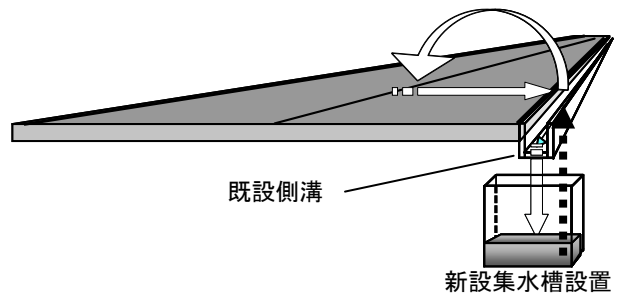
この結果から、対象地において循環散水するために、新たに必要な補給水量は $0.25(\text{m}^3/\text{min})$ となる。

次に、本計画において考案したアスカーブによる集水方法を設けず、aゾーンの面積分の集水できない場合の補給水量を以下に示す。

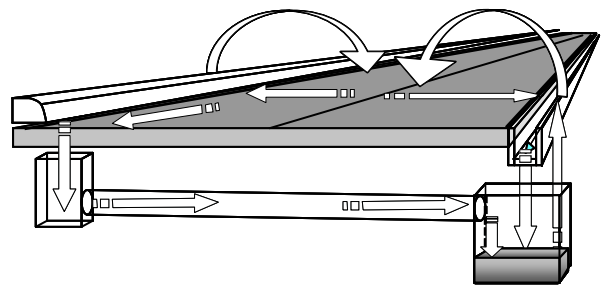
- 散水面積： $A = 2,987(\text{m}^2)$
- 集水可能面積： $A2 = A - c - a = 1,059(\text{m}^2)$
- 集水範囲率： $R2 = A2/A = 0.354$
- 散水量： $V = A \times 0.2(\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2) = 597(\text{L}/\text{min})$
- 散水再利用率： $R3 = R2 \times 0.7 = 0.248$
- 道路内回収量： $Vr2 = V \times R3 = 148(\text{L}/\text{min})$



(a) アスカーブ新設による循環型散水方法



(b) 既設側溝利用による循環型散水方法



(c) 循環型散水融雪設備全体の流れ

図-15 循環型散水融雪設備の模式図

補給水量： $Vw2 = (V - Vr2)/1,000 = 0.45(\text{m}^3/\text{min})$
 したがって、補給水量は $0.45(\text{m}^3/\text{min})$ 必要となり、約倍の水量を補給しなければならず、本計画による効果があったと考える。

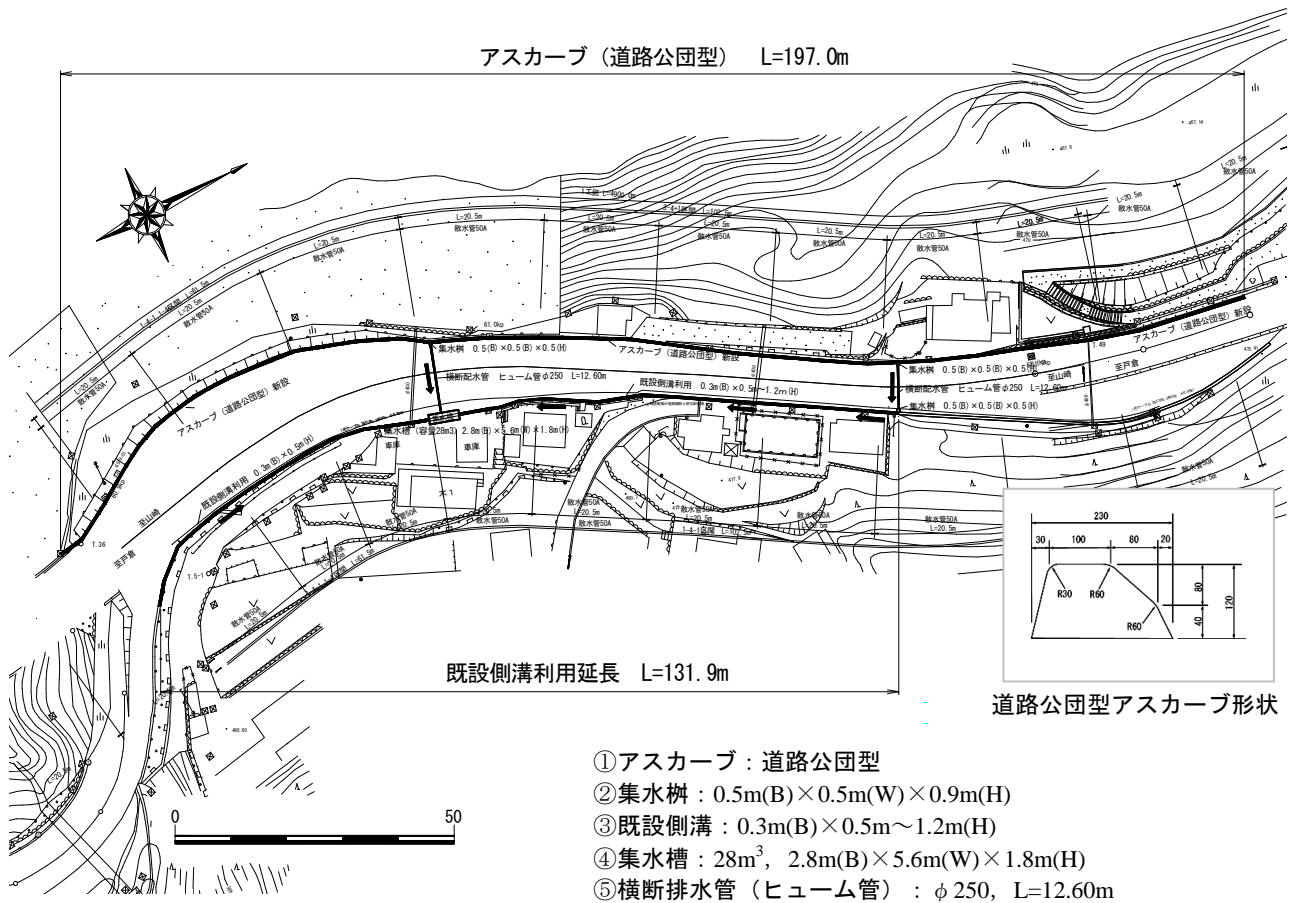


図-16 循環型散水設備設置平面図

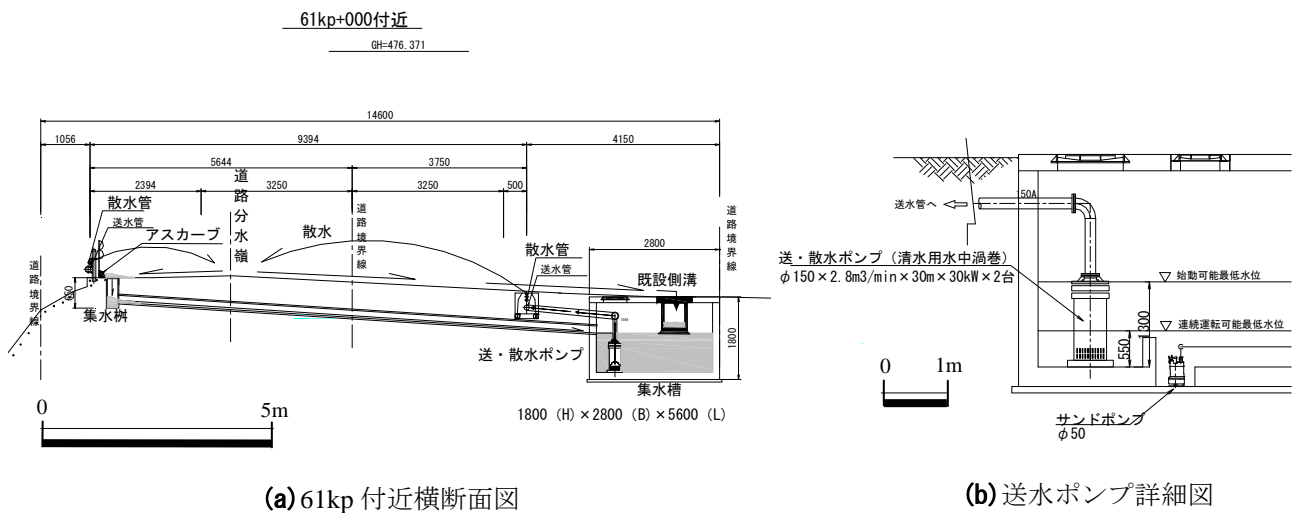


図-17 61kp 付近横断面図及び送水ポンプ詳細図

b) 横断測量データとの比較

LP データには計測誤差があることから、実測による横断データも重要であることは言うまでもない。しかし、本研究で行った道路の面的把握を横断面のみで行う為には、約 20m 間隔の横断面図は必要となると思われる。今回の 5km 区間では 250 本の横断測量が必要となり、費用や時間といった面で負担が増えることとなる。本研究では LP データが既に存在することを前提とし

て行っており、LP データの無い場合には、前述のような横断測量による検討も必要である。

c) 集水量及び集水位置の把握

循環率を高めるためには集水樹、集水槽に集水される、水量並びに集水位置の把握が重要である。水量を把握するためには、集水面積の把握が不可欠であり、本研究の路面分割の提案により、従来の測量と比較すると、精度の高い集水面積の把握が可能となった。集

水樹，集水槽配置計画においても，LP データによる標高データにより，従来の測量と比較して，的確な配置計画が可能であると思われる．また，集水樹形状，集水槽形状，側溝断面形状，ポンプの能力・台数はいずれも集水量に応じて決定されるため，集水量の算出が重要であり，本研究はその目的に寄与できるものと考えられる．

また，集水樹や集水槽の配置が不適切な場合には，アスカーブ設置により路面がプール状態になる可能性があるため，スリップ事故や歩行障害等，様々な弊害が生じる恐れがある．循環率向上はもとより，道路を常に安全な状態に保つという意味でも，計画・設計段階において，適切な集水設備位置の配置計画は重要である．

d) 粒子法解析による施設配置の検証

本研究では，流水解析に粒子法を採用し，路面の流水状況を予測した上で，施設配置の検証を行った（図-18）．今回採用した粒子法は，3章でも述べたように，TIN サーフェスを一度生成するだけで，様々なシミュレーションが可能であり，その結果，効率のよい施設配置ができたものと思われる．

しかし，現時点においては，まだ設計段階での適用に過ぎない．今後，施設完成後のモニタリングで，本設計が本当の意味で最適であるかを検証していく必要がある．

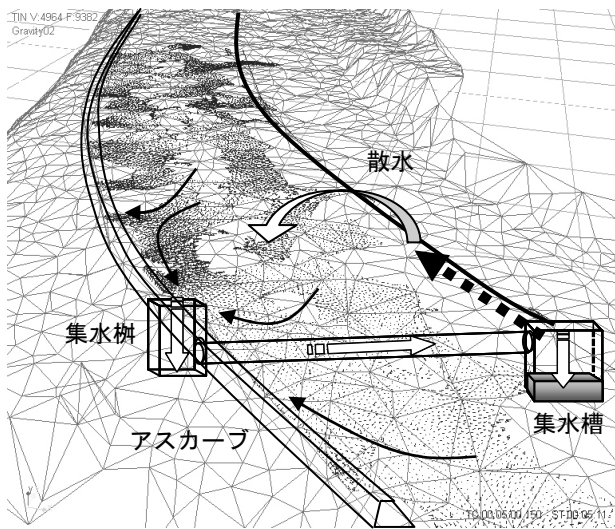


図-18 粒子法解析と施設配置計画

5. 結論

本研究では，散水融雪設備計画への LP データの利用について述べた．既に取り得られている LP データを少し加工し利用するだけで路面の勾配を把握できるため，側溝及びアスカーブを適切な位置に設置でき，道

路に散水した水を逃がすことなく再利用する効果的な循環型散水設備計画を立案することができた．

(1) 2章では，設計支援の資料の基となるメッシュ代表点，TIN サーフェス，勾配ベクトルを大量の LP データから生成する方法を述べた．

(2) 3章では，目的毎の設計支援のための資料となる，標高等高線図，勾配ベクトルによる道路面分割，流水軌跡図の作成方法とそれによって見込まれる効果について述べた．

(3) 4章では，3章で提案した道路面の面的形状把握，勾配ベクトルによる路面分割を活用し，散水融雪設備の計画及び設計を行った．実際の設計検討手順とその結果を示し，本研究で提案した手法について考察を行った．

本設計の全対象区間の循環型散水設備計画による節水量は約 1,500(m³/日)となる．1日8時間，1冬期期間に100日間にて30年使用すると，工業用水代に換算して約1億2千万円の節約となる．さらに，河川環境への影響を鑑みると循環型散水設備計画の今後の役割は決して小さくはないと考える．

今回，道路上にて循環させることにより節水効果は高まったが，循環により散水温度が下がってしまうという課題がある．その解決策としては，集水槽においてヒーター等で，循環水を加熱する方法があるが，コスト面での課題が残る．今後は水温対策のコスト低減の課題を解決する必要がある．

また，本研究の応用としては，道路排水設計への適用が考えられる．道路排水設計を行う際には平坦な地形での側溝計算が必要であり，本研究で提案した LP データを用いた散水計画を応用した道路排水設計が可能となると思われる．

参考文献

- 1) (社)日本建設機械化協会：除雪・防雪ハンドブック（除雪編），pp.285-286，2004年12月．
- 2) 越塚誠一：粒子法シミュレーションと可視化，可視化情報学会，第12回ビジュアルゼーションカンファレンス，2006年10月．
- 3) 河川法研究会：平成20年度版河川六法，p.19，株式会社大成出版社，2007年12月
- 4) (社)近畿建設協会：設計便覧（案）国土交通省 近畿地方整備局 第5編 機械編，p4-14，2004年4月
- 5) (社)近畿建設協会：設計便覧（案）国土交通省 近畿地方整備局 第3編 道路編，p4-4，2004年4月