

傾斜型ライシメータの開発と融雪時道路管理方法の提案に向けた取り組み

川村 國夫*1 前田 崇志*2 野口 将志*3

1. まえがき

融雪水やその地盤浸透特性を定量的に把握して、これらに基づく融雪期の法面崩壊メカニズムから、法面の安全性評価、道路管理のあり方を提案するため、積雪底面流、地盤浸透水を精緻に計測するための傾斜型ライシメータの開発を進め、地下水位および各種気象の計測も併せて、積雪期～非積雪期を通じた通年気象観測を行っている。

傾斜型ライシメータは、令和元年度から製作を始め、令和2年度から石川県白山市東二口地区の国道157号脇法面で試作機による現地計測を開始して、法面への適用性の検討、および計測値の妥当性を検証し、実機の構造、測定機構等を見直した改良機を特許出願した。

ここでは、今回開発した傾斜型ライシメータを紹介し、過去4年間にわたる気象観測で得られた最新データを提示する。

2. 傾斜型ライシメータの開発と計測

融雪時の法面崩壊メカニズムを解明するためには、融雪水の積雪底面流流量や地盤内への浸透量を定量的に把握し、それらと地下水位変動との関連性を評価する必要がある。このような目的から、融雪水、積雪底面流、地盤浸透水を定量的に計測できる傾斜型ライシメータを開発した。ライシメータ計測の法面は、白山市東二口地区国道157号沿いの南向自然斜面であり、幅100m、奥行120mの集水地形を呈する。現場法面の地層は、図2の表層5mが礫混じり粘土からなる崖錐堆積物(Dt)、その下位には、岩塊混りの礫質粘土と礫質砂状の強風化片麻岩(WGn)、そして、新鮮な片麻岩(Gn)で構成される。地下水位は、GL-3m~4m付近にあり、WGn層を相対的な難透水層として、その上位のDt層中に位置している。上記の水理地質的特徴を踏まえると、融雪期間に想定される法面崩壊は、①気温の上昇や降雨によって融雪が発生、②融雪水が地盤に浸透、③地盤内の地下水位が上昇、④地盤の間隙水圧が上昇し斜面が不安定化、といった進行になる。

上記の法面崩壊想定を説明するためには、開発した傾斜型ライシメータによる融雪水、積雪底面流、地盤浸透水の計測値の精度が重要となる。試作した傾斜型ライシメータ(傾斜面2,500mm長×1,000mm幅)は、図3に示すように、斜面上流部地表からの流入水量「A」、法面への浸透水量「C」および下流部地表への流出水量「D」が計測でき、雨雪量計による降水量「B(降雨量Br+降雪水量Bs)」から構成する。模式図中の赤枠で示した積雪層内の水収支を、 $A+B(Br+B_s)=C+D$ の水収支式で表し、またこれを以て計測精度を評価することを想定した構造を考案した。



図1 調査位置図

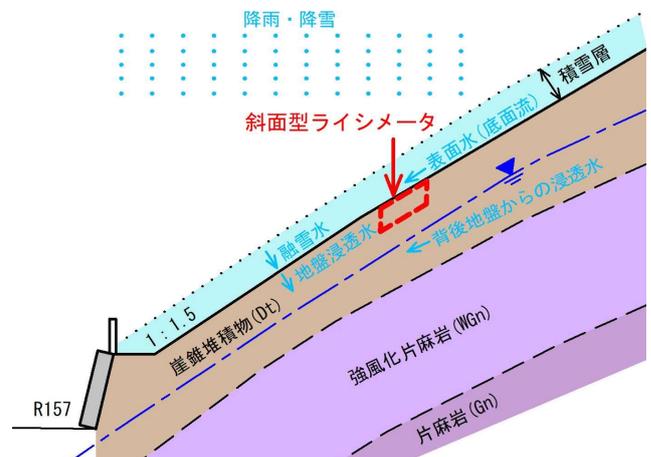


図2 現場法面の地盤図

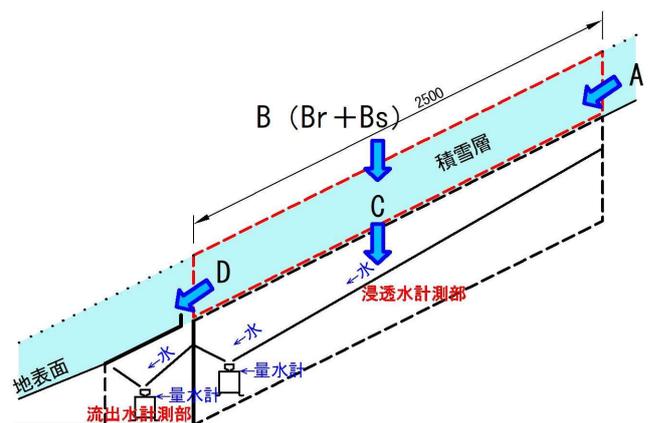


図3 傾斜型ライシメータ模式図

現場法面には、傾斜型ライシメータの他にも、積雪深や気温、降水量などが同時に計測できる各種気象計器を図4に示すような位置に設置した。なお、現場法面は、平成26年4月と平成27年7月のに発生した法面崩壊箇所の隣接地となっている。

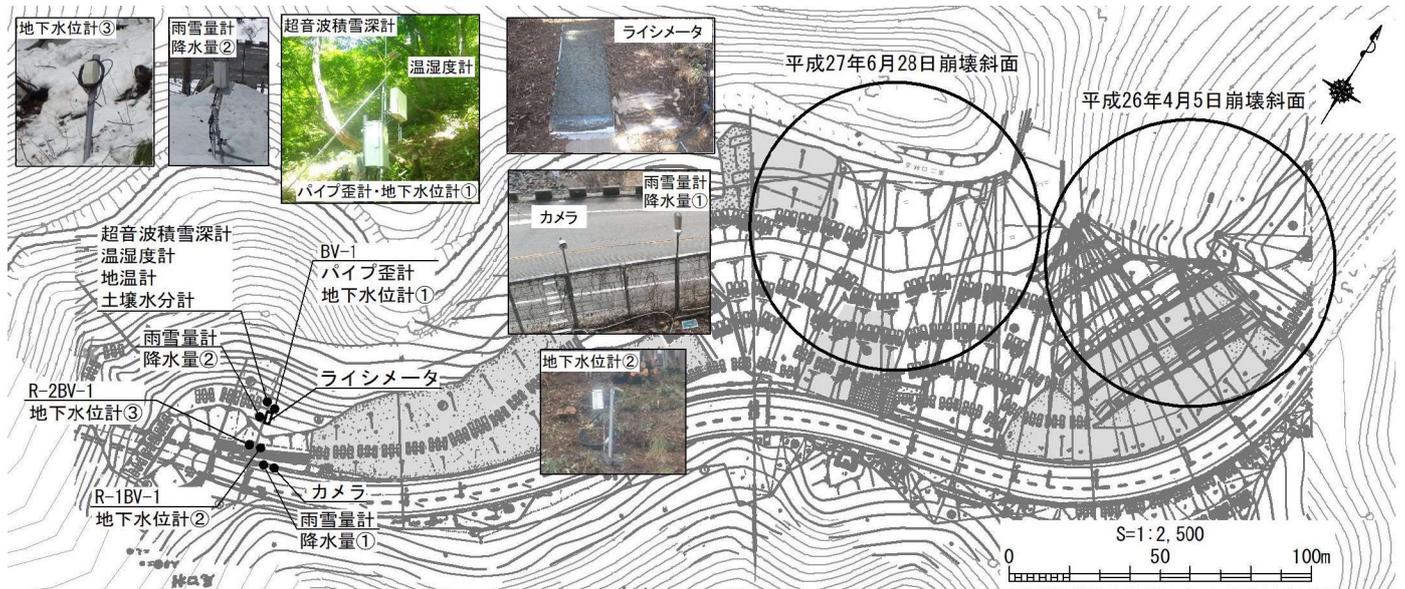


図4 傾斜型ライシメータ、地下水位計および気象観測機器の現場設置

3. 現地計測結果

3.1. 各種の気象計測結果

図5には、令和2年6月1日～令和6年10月1日の観測期間の計測結果（気温、孔内水位、浸透水流量、流出水流量、流入水流量、降水量、積雪量）を示す。観測期間の初期は、ライシメータの調整期間となっており、計測値は令

和2年11月9日以降のデータを採用する。計測値は、非積雪期においては、降雨強度に応じた地下水水位変動が捉えられ、また、積雪期から融雪期においては、気温低下に伴う降雪、積雪や気温上昇に伴う積雪減、融雪水、地下水水位変動などの変動状況は、それぞれの関連性を表示出来ている。

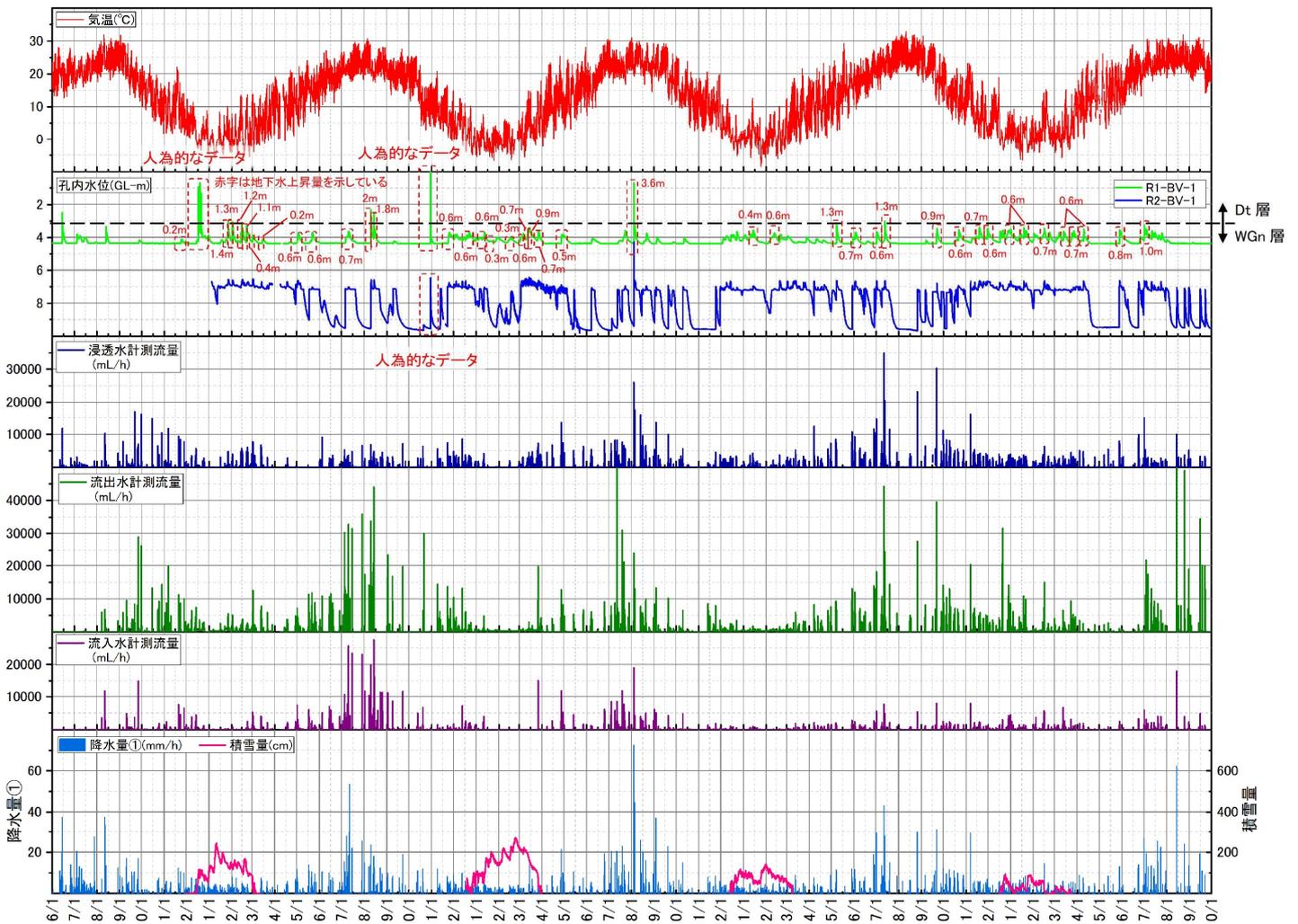


図5 観測期間中の計測結果（気温、孔内水位、浸透水計測流量、流出水計測流量、流入水計測流量、降水量、積雪量）

3.2. 積雪～融雪期間の傾斜型ライシメータ計測結果

図6には、過去4年分（令和2年度～令和5年度）の積雪～融雪期間に計測した降水量、および融雪量の計測結果を示す。図中グラフの濃青色で示した降水量は、雨雪量計の計測値であり、その他の流入水（薄青色）、浸透水（濃緑色）、流出水（薄緑色）計測流量は、傾斜型ライシメータの計測値である。同図には日平均気温と積雪深を併記した。図より、積雪期初期から降雪を表す降水量

が積雪最深日頃まで続き、その後、融雪期に移ると融雪を表す浸透水、流出水、流入水が増加する。

過去4年の計測から、以下の2つの特徴が分かった。

- ①：令和2年度と令和3年度は、積雪期前半に連続した降雪と積雪増加で最大積雪深は約2.5mとなる。積雪減少時期ではどちらも融雪水量のピークは融雪終末期であるが、令和2年度は融雪・降雪を繰り返しながら、令和3年度は連続した融雪によって比較的短期間で

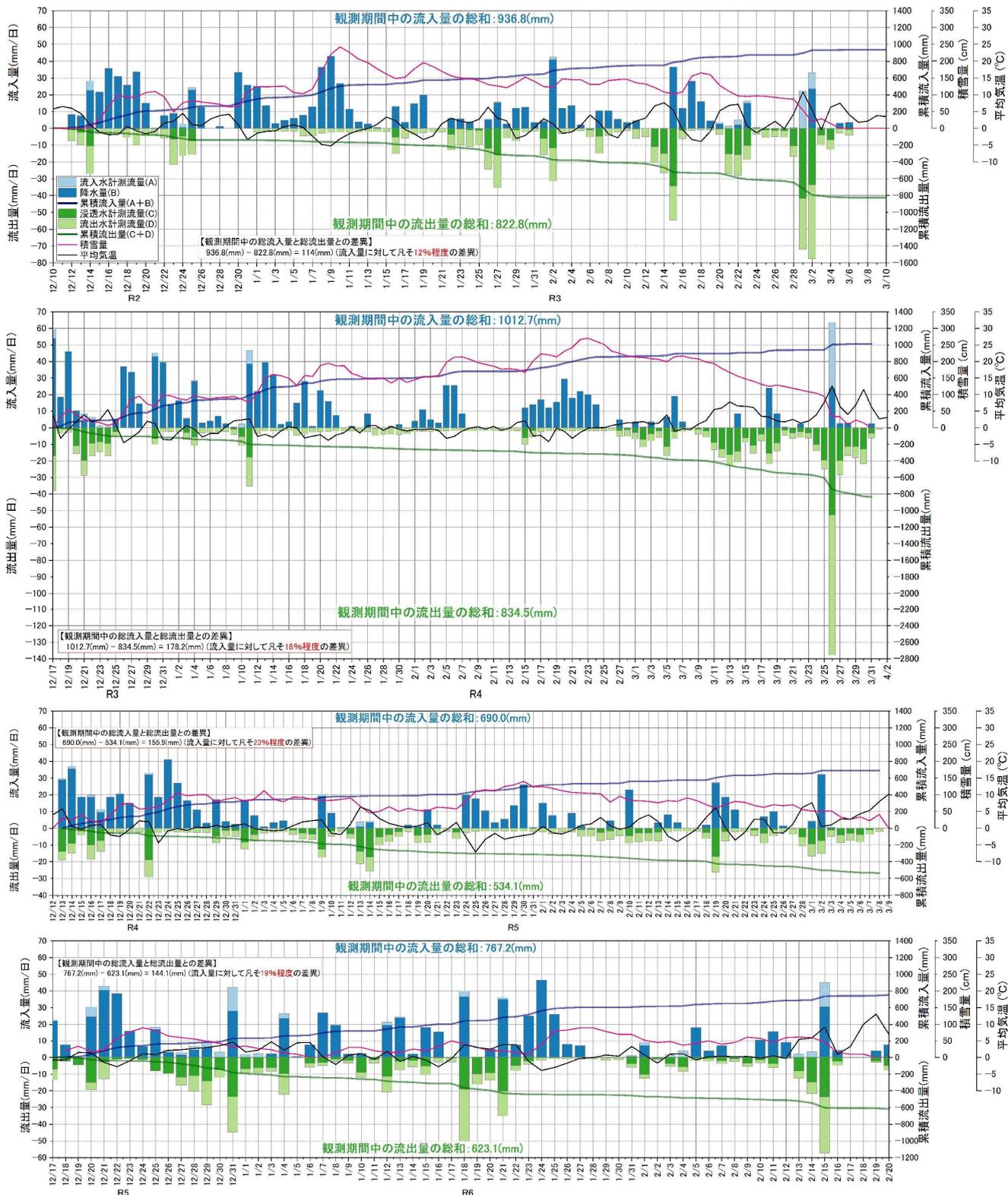


図6 傾斜型ライシメータの水収支（令和2年度～令和5年度）

雪減少が見られた。特に令和3年度の融雪終末期は融雪と降雨が重なりR4年3月26日は約50mm/日の降水に相当する計測値となった。令和4年度と令和5年度は、最大積雪深が1.5m未満で積雪期～融雪期を通じて、積雪と融雪を複数回繰り返すような気象条件となっており、融雪水量のピークも複数回現れる。

②：積雪期間を通じてライシメータ平面内で計測した累積流入量と流出量との水収支差は図示の12%～23%であり、この水収支差の主な要因が積雪層内の流入出であることを令和3年度の計測実験で捉えている。³⁾

3.3. 傾斜型ライシメータ計測に基づく地盤浸透特性

現場法面における降雨量、融雪量と傾斜型ライシメータ計測による地盤浸透量との関係を以下にまとめる。

図7に非積雪期の降雨量とライシメータ計測流量との関係を示す。非積雪期のライシメータ計測結果から、当該地における地盤浸透量C(図の緑色)は地盤浸透量Cと積雪底面流量(流出量D-流入量A)との合計値(図の青色)の概ね50%程度になることが確認された。

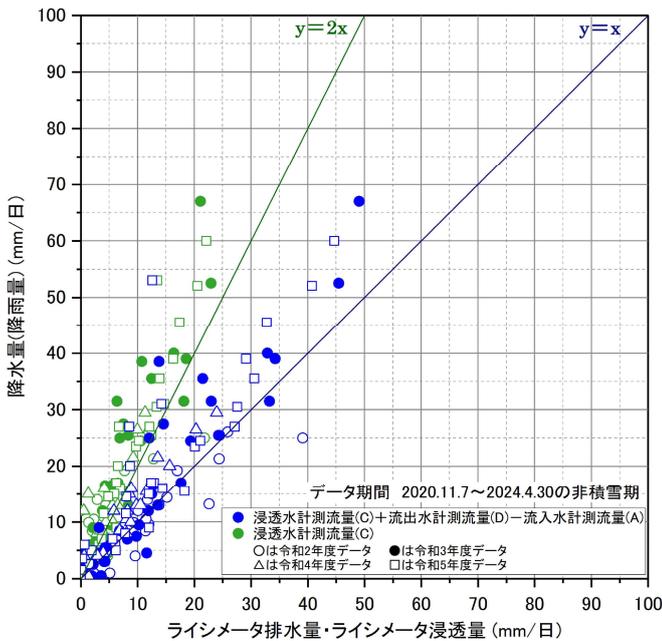


図7 ライシメータ排水量・ライシメータ浸透量

図8および図9には積雪期のライシメータの日融雪量と日浸透量の計測結果を示す。図8は積雪減少期、または融雪時期の後半で積雪全層密度が0.25 (gf/cm³) 以上

(ざらめゆき～こおりゆき相当)となる条件に絞り込んだ日の計測値を示している。なお、積雪全層密度については、3.4節にて後述する。図より浸透量Cと積雪底面流量(流出量D-流入量A)との合計値を日融雪水量と設定したとき、この日融雪水量が気象観測値{(日融雪深×当日の密度+日降雨量)×0.75～0.8}で近似できることを示す。また、日浸透量が日融雪水量の約50%～60%として記録できた。一方で図9は積雪減少期、または融雪時期の前半で積雪全層密度が0.25 (gf/cm³) 未満(あら

ゆき～しまりゆき相当)となる条件に絞り込んだ日の計測値を示している。図より上記の日融雪水量が気象観測値{(日融雪深×0.2+日降雨量)}に対して小さな値を示し、これは融雪水の一部、または殆どが積雪層内へ貯留され、積雪底面流出量が小さくなることを示している。この結果から、法面崩壊メカニズムの検討にあたっては、積雪全層密度に基づく融雪量の算出と融雪水の法面への地盤浸透率の評価が重要になることが分かる。

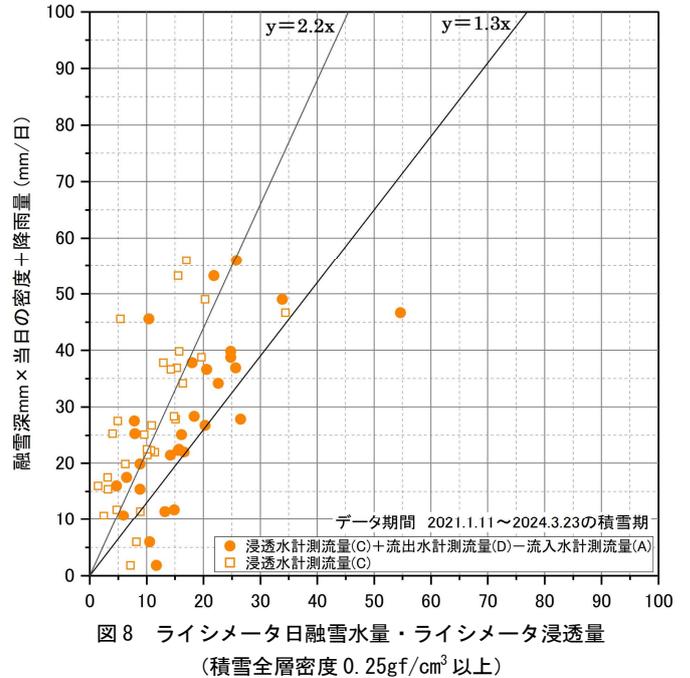


図8 ライシメータ日融雪水量・ライシメータ浸透量 (積雪全層密度 0.25gf/cm³ 以上)

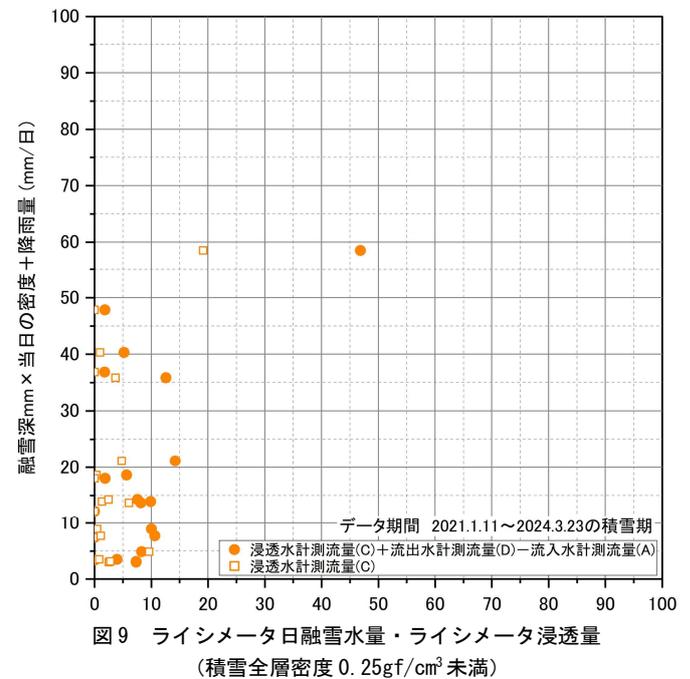


図9 ライシメータ日融雪水量・ライシメータ浸透量 (積雪全層密度 0.25gf/cm³ 未満)

3.4. ライシメータ計測から得られる積雪全層密度

積雪期間を通じて、降水量、ライシメータの計測融雪水量と積雪深計測から、雪密度が算出される。令和2年度～令和5年度の結果を図10～13に示す。図より、積雪初期から積雪深ピーク時までの積雪全層密度は、ほぼ

0.2gf/cm³まで上昇する。その後は、融雪、積雪を繰り返しながら、積雪が漸減し、積雪全層密度が漸増傾向となる。特に、令和3年度は、令和4年3月8日以降に20日間程度連続して融雪が生じており、同期間では融雪末期に向けて0.2gf/cm³から0.4gf/cm³まで増加している。このような結果は、積雪年毎の気象と積雪状況が、その後の融雪量に影響し、特に令和3年度のように多量の積雪から、短期間で融雪が進むような積雪・気象条件が融雪量増加の要因となり、法面の不安定化に大きな影響を与えることとなる。

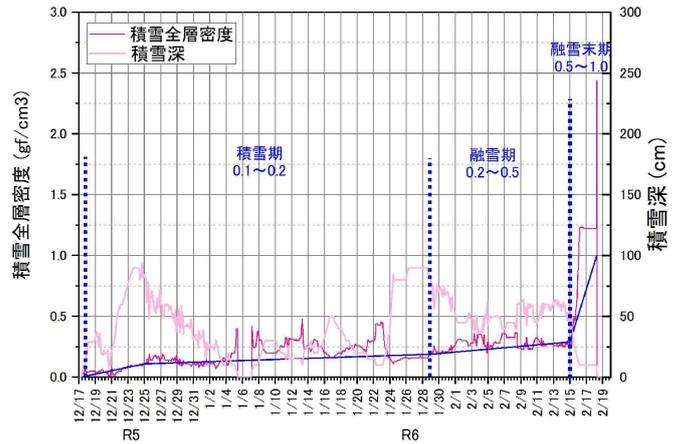


図13 積雪全層密度の推定値 (R5 年度)

3.5. 地盤浸透水量と地下水位上昇との関係

これまでの気象観測結果に基づき、融雪時道路法面の安全性と道路管理法を検討するうえで重要となる「地盤浸透水量」と「地下水位上昇」との関係性を以下に示す。

傾斜型ライシメータによる浸透水計測と地下水位上昇変動の観測結果から、当該法面における降雨（非積雪期）または融雪（積雪期）に伴う R1-BV-1 地点の地下水位上昇は、どちらも浸透水との関係性が認められる。

図14に「日浸透水計測流量」と「地下水位上昇」の関係を示す。非積雪期と積雪期を比較すると、積雪期の方が少ない浸透量に対して地下水位上昇量が大きい傾向がある。また、相関性は非積雪期よりも積雪期の方が小さい。

これらの要因は、非積雪期では法面の一定範囲で一律に注ぐ降雨が地下水位に影響するのに対して、積雪期では法面下方の凹地形付近あるライシメータ計測位置よりも日当たりや風通しが良い法面上方の融雪が相対的に早く進行して、その影響が地下水位上昇に加わったためと考えられる。

なお、「融雪時期の道路管理方法」の検討にあたっては、本節の結果と3.3節で述べた「融雪量と地盤浸透量」を合わせて評価することが必要となる。

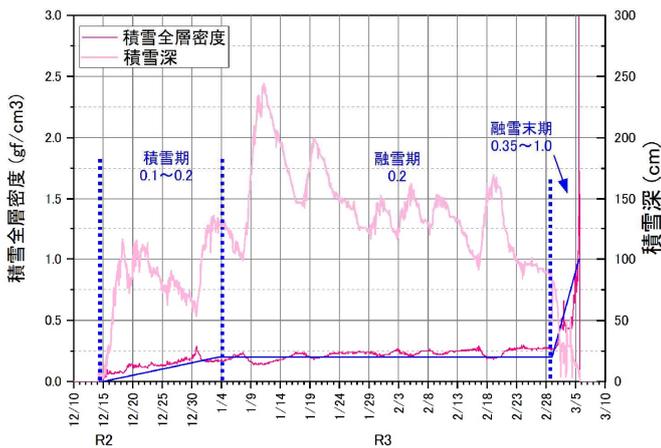


図10 積雪全層密度の推定値 (R2 年度)

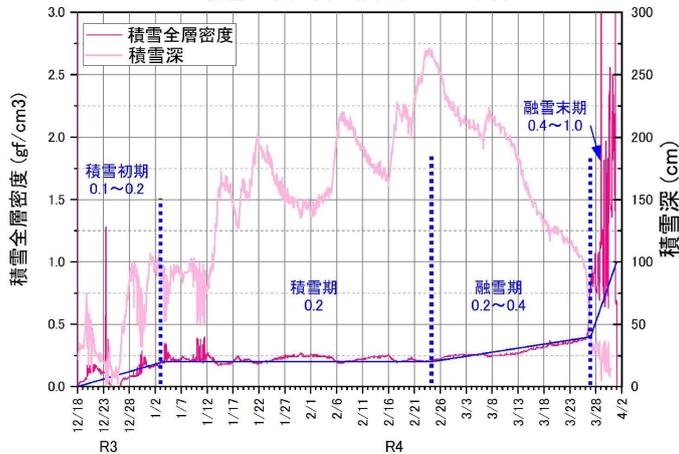


図11 積雪全層密度の推定値 (R3 年度)

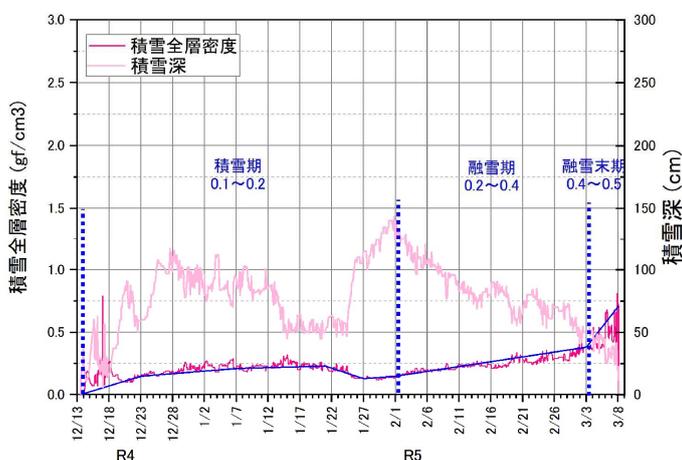


図12 積雪全層密度の推定値 (R4 年度)

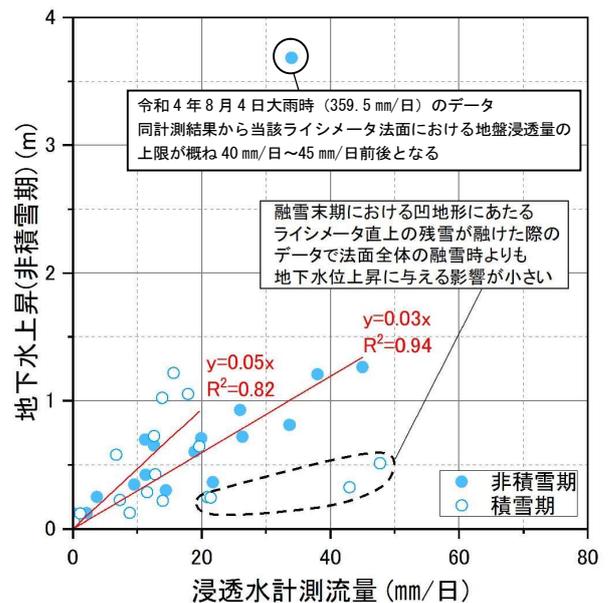


図14 「日浸透水計測流量」と「地下水位上昇」との関係

4. 傾斜型ライシメータの開発について

本節では、開発中の傾斜型ライシメータを紹介する。現在、白山市東二口地区の法面で、試作・運用している傾斜型ライシメータに対して、全体構造のコンパクト化、構造の単純化、統合化などの実機改良検討を行い同改良機を特許出願した。(特願 2024-147385)

現在までの傾斜型ライシメータの改良点を以下に示す。

①機器全体構造のコンパクト化

試作型の傾斜型ライシメータは、図3に示すような箱型で全体構造のうち「高さ」が約1,000mmであり、現地法面への設置の際には、小型バックホウによる床掘りが必要であった。これに対し、当初導水部の直下に配置していた浸透水計測部の流量計について、浸透水を流出水計測位置まで導水して、二つの流量計の配置を集約することで、厚み125mmの薄型化することが出来て、法面への設置の際に床掘りが容易となる。

②計測機器の省メンテナンス化

法面を流下する降雨水や融雪水に運積された土砂や落葉が導水部に流れ込み、そのまま放置すると計測部で詰まってしまうため、ひと月に約1回の頻度でそれらの除去、清掃等のメンテナンス作業が必要となっている。計測機構上、導水部に流れ込む土砂や落葉は不可避だが、流量計に至る導水部の途中に沈殿槽を設けることでメンテナンス作業の頻度を低減し、維持管理にかかる負担を軽減できる構造とした。

③流量計の小規模化

構造規模縮小化を図り、計測部に内蔵する流量計をさらに小さなものに変更した。現在、計測部に内蔵している流量計は、「転倒ます型流量計」であり、計器サイズは、高さ20cm、長さ28cm、幅17cmである。一方、新たに計画する流量計は、「電磁式流量センサー」で計器の大きさは、高さ3cm、長さ12cm、幅5cmである。また、同流量計は、導水管の外周部にクランプ留めする非接触型の計測機となるため、試作機搭載の転倒ます型流量計に比べて省メンテナンスとなる。

以上の改良検討を踏まえた実機構造とライシメータ計測機構を図15、図16に示す。

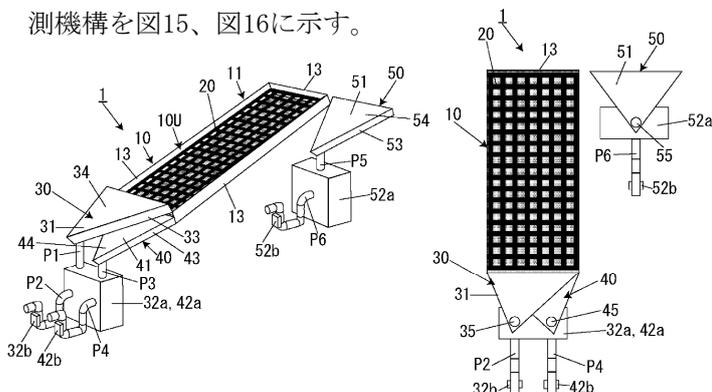


図15 傾斜型ライシメータ実機構造図

符号の説明は図16 参照

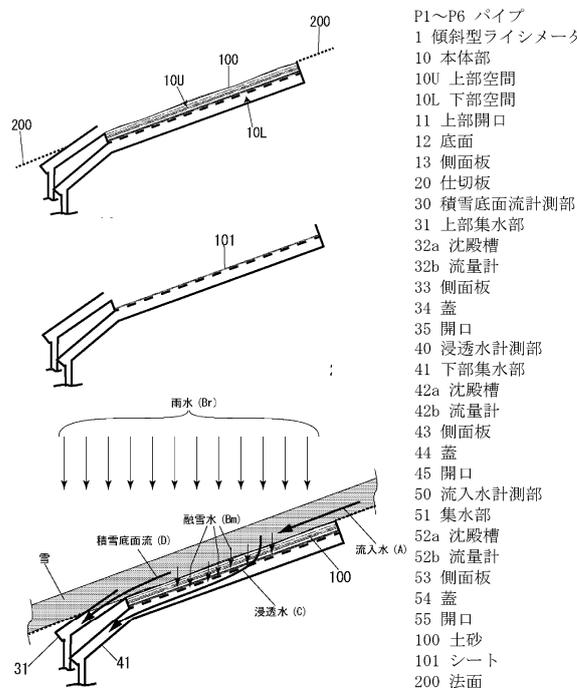


図16 傾斜型ライシメータ計測機構

- P1~P6 パイプ
- 1 傾斜型ライシメータ
- 10 本体部
- 10U 上部空間
- 10L 下部空間
- 11 上部開口
- 12 底面
- 13 側面板
- 20 仕切板
- 30 積雪底面流計測部
- 31 上部集水部
- 32a 沈殿槽
- 32b 流量計
- 33 側面板
- 34 蓋
- 35 開口
- 40 浸透水計測部
- 41 下部集水部
- 42a 沈殿槽
- 42b 流量計
- 43 側面板
- 44 蓋
- 45 開口
- 50 流入水計測部
- 51 集水部
- 52a 沈殿槽
- 52b 流量計
- 53 側面板
- 54 蓋
- 55 開口
- 100 土砂
- 101 シート
- 200 法面

5. あとがき

傾斜型ライシメータの計測結果から以下の結果を得た。

- ①傾斜型ライシメータから、流入、流出量と水収支を説明し、その計測精度を確保出来た。
- ②降雨水、融雪水の地盤浸透率は、これまでの計測値から、いずれも概ね50%になる。
- ③法面における融雪と地盤浸透は、融雪前半期には融雪水が積雪内に貯留されて積雪密度が増加し、融雪後半期には密度増に加えて、雪質もざらめ状となることで融雪に伴う積雪底面流出・浸透量が增大する。
- ④非積雪期、積雪期の地盤浸透水量と地下水位上昇との関係を示し、地下水位上昇の要因を示した。

今後の方針として、道路管理方法の検討に向けて、「融雪量」、「地盤浸透量」、「地下水位上昇」、「法面安定性」の関連性を検討し、さらに対象地域の地形・地質データ、過去の災害履歴等を関連付け、総合的に検討を進めるものとする。

6. 参考文献

- 1) 石川県土木部：一般国道157号災害に強い道路整備工事(調査)業務委託, 令和5年, ホクコク地水
- 2) 宮本義浩, 川村國夫, 野口将志：斜面型ライシメータの開発とそれに基づく道路法面崩壊の融雪特性, 令和4年, 第33回ゆきみらい研究発表会, 2022. 1
- 3) 宮本義浩, 川村國夫, 野口将志：斜面型ライシメータによる融雪水計測結果とその地盤浸透特性, 令和5年, 第34回ゆきみらい研究発表会, 2023. 2
- 3) 山田宗明, 川村國夫, 森影篤史：平成 23 年元旦発生の国道 160 号石川県七尾市庵地区法面崩壊など幾つかの融雪期崩壊現場の特徴と傾向, 第 33 回ゆきみらい研究発表会, 2022. 1
- 4) 諏訪成春, 二木与裕, 川村國夫, 早川森：国道470号道路法面の現地計測に基づく融雪特性と地下水位変動, 第34回ゆきみらい研究発表会, 2023. 2