(38) 国道の事前通行規制基準の設定における One Class Support Vector Machine の適用性

宮﨑　祐輔[1]・青木　宏史[2]・小山　倫史[3]・藤原　照幸[4]・岸田　潔[5]

[1]正会員　京都大学大学院　工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-213）
E-mail: miyazaki.yusuke.6w@kyoto-u.ac.jp

[2]非会員　アビームコンサルティング株式会社　エンタープライズトランスフォーメーション ビジネスユニット（〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-4-1 丸の内永楽ビルディング）
E-mail: koaoki@abeam.com

[3]正会員　関西大学　社会安全学部（〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1，高槻ミューズキャンパス）
E-mail: t-koyama@kansai-u.ac.jp

[4]正会員　地域地盤環境研究所　地盤工学ラボ（〒658-0064 兵庫県神戸市東灘区鴨子ヶ原 1-2-22）
E-mail: teruyuki@geor.or.jp

[5]正会員　京都大学大学院　工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3-335）
E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

事前通行規制基準は，時間雨量の積算値により通行止めを実施し，2 mm/h が 3 時間以上継続することで解除する制度である．この制度は，降雨強度の大きな大雨や，先行降雨の影響を考慮されない場合があるなど判断指標に課題があるほか，規制基準の設定根拠が明確でなく道路利用者への説明責任が果たせていないという問題について指摘されている．しかしながら，土砂災害の発生頻度はまれであり，その発生形態が多様であることから，災害の発生データと非発生データは不均衡となることが多い．この土砂災害の発生・非発生データの性質に対して，きめ細かな通行規制基準を定めることが本研究の目標である． 本研究ではこの不均衡データに対して，異常検知の一手法である One Class SVM を用いて，設定根拠が明確な通行規制基準を定めることが可能か検証した．

Key Words: *advanced traffic closure, under extreme weather, one class support vector machine*

1. はじめに

一般道路においては，台風や大雨などの異常気象時に予め定めた基準の雨量により通行を規制する区間が存在し，平成26年度の時点で区間延長980km，区間数175に上る [1]．この制度は事前通行規制制度とよばれ，時間雨量の累積値が所定の基準に達した場合に，通行止めを行い，2mm/h以上が3時間以上継続することで，累積をリセットして，区間の安全を確認してから通行止めを解除する，連続雨量法が採用される．この基準について，山田ら[2]は以下の3つの問題を指摘した．1. 降雨特性の変化に伴う多様な土砂災害に対応できていない可能性が高い，2. 設定根拠が不明瞭で，道路利用者への通行規制の説明責任が果たせない．3. 規制を解除する明確な基準がない．

これらの問題は，国土交通省道路局 [1]，大段ら [3]，加藤ら [4]も指摘しており，新しい事前通行規制基準の取り組みが広く研究されている．共通する見解は，連続雨量だけではなく，降雨浸透の時間遅れの影響を考慮可能な長期雨量指標を用いるべき，また，規制基準に説明性を持たせるべきという考え方である．

そこで，本研究では，短期雨量指標と長期雨量指標を組み合わせ，説明性のある規制基準を検討する．事前通行規制区間においてはテレメータ雨量計により降雨量が収集されている．なお，災害の発生・非発生データは区間外の自然斜面と同様に不均衡である．この降雨データを用いて，リアルタイム性を有する規制基準を統一的に構築可能なよう規制基準を定める．本論文では機械学習における異常検知の一手法である One Class Support Vector Machine（以降，OCSVM とよぶ）の適用結果を述べる．

2. 機械学習手法

機械学習を用いた事前通行規制基準を検討する場合，学習モデルが理解しやすいか，多様な発生パターンの土砂災害に適応できるか，災害・非災害の不均衡な発生データを適切に対処できるか[5]，といった観点が重要と考えられる．One Class SVM は，その名が示す通り一クラス（異常検知の場合「正常」）のラベルを有するデータを学習して，その分布を包含する境界を定めることで，異常を検出する．この境界はカーネル関数の選択により，線形・非線形に設定可能である．そのため，土砂災害のような，複雑な現象に対しても，決定境界を柔軟に定めることで，異常検知可能と考えられる．また，数学的に明快で理解しやすく説明性に優れる．これらの特徴により，異常検知の手法の中でも，One Class SVM は事前通行規制基準の設定に適用可能と考えられる．以下にモデルの概要，データの前処理，学習手順を述べる．

(1) One Class SVMの概要

One Class SVM は Schölkopf ら[6]により提案された一クラス分類の機械学習手法である．以降では，Wang ら[7]，平内ら[8]による定式化に基づいて，本手法を説明する．本手法で対象とするデータを $\mathbf{X}_{\text{target}} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \cdots, \mathbf{x}_N\}$ と定義し，陰関数 $\phi(\cdot)$ は元の特徴空間から新しい特徴空間 H に写像するものとする．OCSVM は H における超平面Πを求める．このとき，Πは，$\Pi : \mathbf{w}^T \cdot \phi(\mathbf{x}) - \rho = 0$ を満足し（$\mathbf{w}$ はΠの法線方向ベクトルである），原点から最も遠い距離にあり，同時に $\phi(\mathbf{x}_i)$ は超平面を挟んで原点とは反対側に存在する．このとき解くべき最適化問題は以下の通り．

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{w},\xi,\rho} \frac{1}{2}\|\mathbf{w}\|^2 + \frac{1}{\nu N}\sum_{i=1}^{N}\xi_i - \rho \\ &\text{s.t.} \quad \mathbf{w}\cdot\phi(\mathbf{x}_i) - \rho + \xi_i \geq 0, \xi_i \geq 0, \forall i \end{aligned} \tag{1}$$

異常値の上限の割合を与える ν，ξ はスラック変数である．$\phi(\cdot)$ は陰関数であるため，通常，次の双対問題を解く．

$$\begin{aligned} &\max_{\alpha} -\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{N}\alpha_i\alpha_j K(\mathbf{x}_i,\mathbf{x}_j) \\ &\text{s.t.} \sum_{i=1}^{N}\alpha_i = 1, 0 \leq \alpha_i \leq \frac{1}{\nu N}, \forall i \end{aligned} \tag{2}$$

ここで，$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ は写像されたデータの内積であり，α_i は双対変数である．実際には，この内積を直接求めるのではなく，カーネルトリックとよばれる手法により，特定のカーネル関数を定義することで，計算する．一般にガウシアンカーネル $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp(-\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2/\sigma^2)$ が用いられる．このとき，$\gamma = 0.5/\sigma^2$ がガウシアンカーネルの幅に関連するハイパーパラメータとなる．カーネル関数とそれに応じたハイパーパラメータを選択することで，上記の最適化問題は二次計画問題として解くことが出来る．双対最適化問題を解くことで α_i が求まり，ρ は $0 < \alpha_i < \frac{1}{\nu N}$ を満たす α_i に対応する任意の $\mathbf{x}_i$ を選択することで得られ，$\rho = \sum_{j=1}^{N}\alpha_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ を解くことが出来る．一方で，$\alpha_i > 0$ に対応する任意の $\mathbf{x}_i$ はサポートベクターとよばれ，OCSVM の決定境界となる．未知のデータ $\mathbf{x}_t$ が外れ値と分類される場合，以下の条件を満たす．

$$f(\mathbf{x}_t) = \sum_{\alpha_i > 0}\alpha_i K(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_i) - \rho < 0 \tag{3}$$

(2) 分析データ

本研究では，異常気象時通行規制区間の一つである京都府内のA地点を分析対象とした．同区間では，それぞれの区間にテレメータ雨量計が設置されており，この観測データを分析対象とした．テレメータ雨量計は，転倒ます型雨量計により雨量を計測する．受水口を通じて，1 mm の降水が溜まるたびに転倒し，排水するますの転倒回数を電気信号に変換し，記録して雨量を計測する．本検討では，土砂災害が発生した 2013 年の降雨データを学習データとして用いた．この期間に計測された正時の時間雨量と 10 分間雨量を分析に用いた．

(3) 学習手順

訓練データの選定基準として，情報の受け手が通行規制基準を視覚的に理解でき，直感的に危険度を理解できることを前提に，土砂災害警戒と同じ短期降雨指標と長期降雨指標の 2 種類の説明変数を用いることとした．気象庁が発表する土砂災害警戒情報[9]においては，短期降雨指数に 60 分間積算雨量，長期降雨指標 に土壌雨量指数が採用されている．これらの値をテレメータ雨量計により計算し，標準化した．データ分割はランダムとした．One Class SVM を適用する場合，2 つのハイパーパラメータ ν と γ の設定方法が課題となる．いずれのパラメータも，目的とする判断基準に合わせて最適な値を探索する必要がある．今回の検討においては，γ と ν が決定境界にどのような影響を与え，通行規制基準として採用する場合にどのような課題があるかを調べた．γ はガウシアンカーネルの幅を制御するため，σ = 10, 1, 0.1, 0.01 と段階的に変化させて，決定境界に与える影響を調べた．

ν については，客観的に決定可能なように，斜面崩壊の発生事例に基づき計算した．具体的には，A 地点において判明している斜面崩壊事例について，崩壊の発生日を学習期間の日数で除した値を異常割合と定義し，ν の値として用いた．なお，訓練データの割合に応じて適切

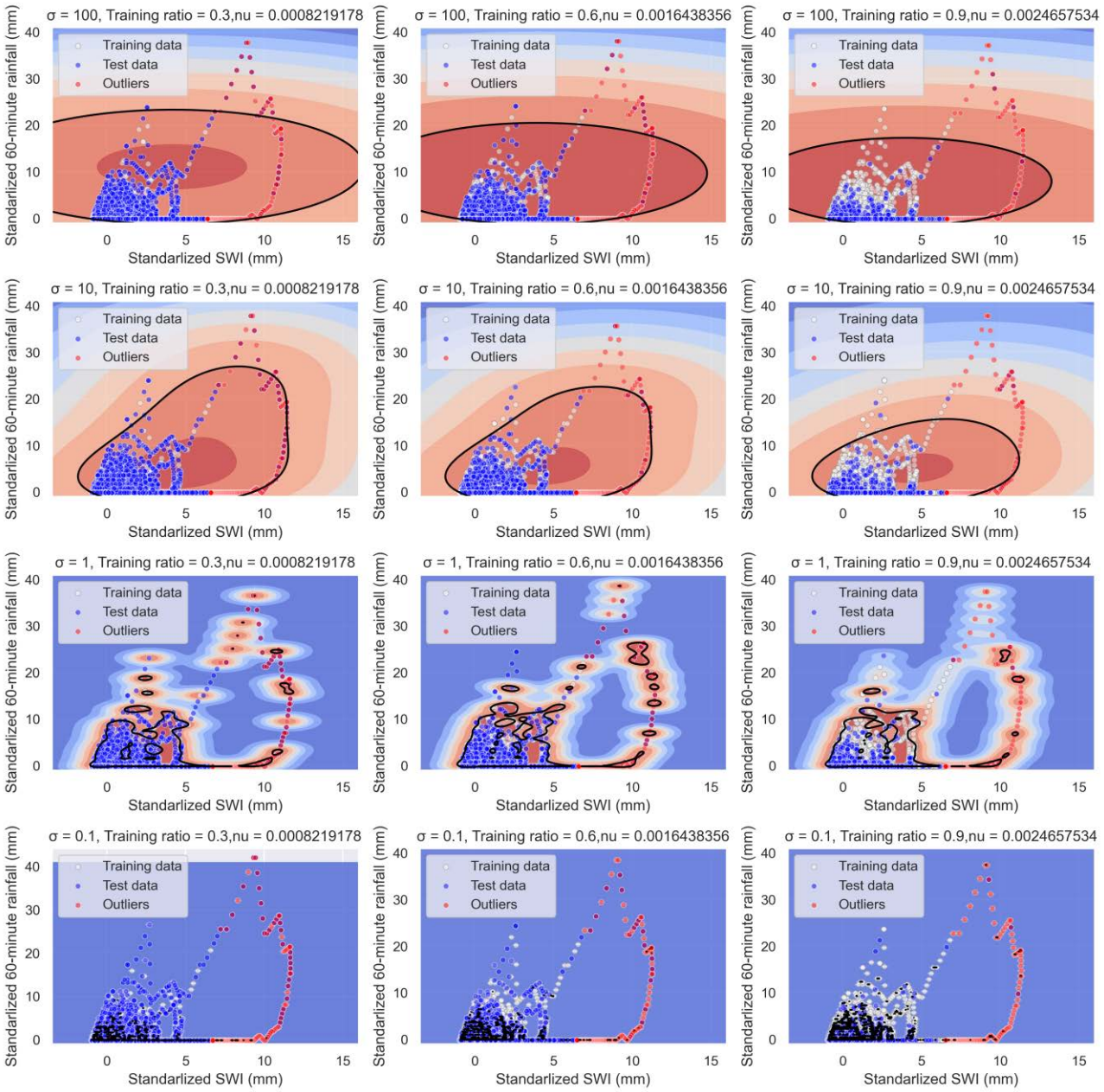


図-1　σおよび学習データ量と決定境界の関係（図中の黒線が決定境界である．決定境界の外側が異常とみなされる．）

な異常割合を設定するため，2013年における土砂災害の発生日を年間の異常割合と定義し，全体の学習用データにおける訓練データの割合を乗じて，計算に用いた．

3.　適用結果

図-1に学習結果を示す．同図には訓練データとテストデータ，外れ値を散布図でプロットし，決定境界を黒の実線，決定境界からの距離をヒートマップで示している．なお外れ値は土砂災害が生じた日の降雨データである．決定境界より内側のデータはすべて正常と判断され，それより外側のデータはすべて異常と判断される．領域が青色に近いほど，決定境界からの距離が遠い．

図より，σと訓練データの割合の影響を述べる．σが大きいとガウシアンカーネルの幅が広がり，汎化性能が高まり，決定境界が広がる．$\sigma = 1$の条件では，訓練データに過剰に適合する傾向が読み取れる．一方で，訓練データの割合が決定境界に与える影響は，境界が拡大・縮小する傾向として現れ，複雑である．これは，異常割合の上限値であるνが訓練データの割合により変化するために，決定境界の変化がまた複雑となるためである．

表-1，**表-2**にそれぞれの学習モデルに対するF1値，MCC（Matthews Correlation Coefficient）を示す．F1値は真陽性の評価指標であるが，異常検知においてはデータの不均衡により異常を全て包含するモデルとなる可能性が高い．この問題を回避するため，真陽性と真陰性を正しく予測できたかを定量的に評価する必要があり，MCC

表−1　F1 score と σ および学習データ量の関係

F1 Score		*Training ratio*		
		0.3	0.6	0.9
σ	100	0.998005	0.996961	0.990845
	10	0.997909	0.996889	0.992059
	1.0	0.985171	0.989060	0.984178
	0.1	0.984178	0.813101	0.714974

表−2　MCC と σ および学習データ量の関係

MCC		*Training ratio*		
		0.3	0.6	0.9
σ	100	0.252674	0.418031	0.569640
	10	0.569640	0.424595	0.644698
	1.0	0.121070	0.203327	0.308045
	0.1	0.052676	0.040524	-0.001422

が併せて用いられる[7]．MCC は-1~1 の間を取り，1 に近いほど，真陽性と真陰性を正しく分離できたモデルといえる．そのため，MCC がより重要な評価指標である．

表より，F1 値が十分に高く，MCC が最も 1 に近いモデルは $\sigma = 10$ かつ訓練データの割合が 0.9 のケースである．**図-1** より，このケースでは，決定境界により外れ値を最も多く回避しつつ，正常なデータを可能な限り多く正常と認識していることからも，この評価結果が妥当であることがわかる．この決定境界を事前通行規制基準としてそのまま適用可能か考察する．

上述の通り，事前通行規制基準の設定に OCSVM の決定境界を用いる場合，ハイパーパラメータの選定により，外れ値を回避して適切に設定可能といえる．しかし，単に F1 値，MCC が良い高いスコアを示したとしても，決定境界の内外を連続的に行き来することで，通行止めの判断が乱発しないか，通行止め判断に必要な時間を確保可能か，という懸念が存在する．これらの評価指標を構築し，併せて学習モデルを評価する必要がある．また，上記の結果は，1 年分の学習期間によるものであり，学習期間の長さが決定境界にどのような影響を与えるか十分調べていない．

宮﨑ら[10]は，単一の $\sigma = 0.5$ に対して，学習期間が決定境界に与える影響について調べた．しかし，決定境界が正常なデータ分布に過適合する傾向が強く，決定境界をそのまま事前通行規制基準として用いると，頻繁に通行止めを実施してしまう．そのため，決定境界の距離を正常なデータ分布からの異常度の高さと解釈することで，決定境界の距離の最小値の 95%を事前通行規制基準とする方法を提案した．しかし，この閾値の根拠は客観性に乏しいため，決定境界により基準を一意に定めることが望ましい．

4. まとめ

本研究では，短期雨量指標と長期雨量指標を組み合わせ，One Class SVM による新しい規制基準の設定方法を検討した．1 年間のテレメータ雨量データから算出した 60 分間積算雨量と土壌雨量指数を学習した結果，σ と ν を適切に設定することで，F1 値，MCC がそれぞれ優れた決定境界を定めることができた．しかし，この決定境界を事前通行規制基準として用いる場合，決定境界の内外を連続的に移動する時刻が存在し，通行止めとその解除が繰り返される恐れがあり，合理的でない．今後，この問題に対する評価指標を定め，事前通行規制基準として決定境界を用いることができるか検討を重ねる．

謝辞：本研究で用いたデータは国土交通省近畿地方整備局から提供を受けた．ここに記して謝意を示す．

参考文献

1) 国土交通省 道路局 国道・防災課 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行~災害捕捉率の向上と通行止め時間の適正化~，道路行政セミナー，Vol. 8, No. 83, pp.1-9, 2015.
2) 山田敦浩，竹本大昭，小林央宣，倉本和正，荒川雅生，中山弘隆，古川浩平：豪雨時の道路事前通行規制基準雨量の設定に関する研究，砂防学会誌，Vol. 57, No. 6, pp. 28-39, 2005.
3) 大段恵司，小田和広，伊藤真一，小泉圭吾，鳥居宜之：土壌雨量指数を用いた国道における通行規制・解除基準の提案，土木学会第 73 回年次学術講演会，III-318, pp. 635-636, 2018.
4) 加藤俊二・東拓生・佐々木哲也：土壌雨量指数を活用した道路の事前通行規制手法に関する検討，土木技術資料，Vol.65, No. 2, pp. 20-25, 2023.
5) 宮本崇，浅川匡，久保久彦，野村泰稔，宮森保紀：防災応用の観点からの機械学習の研究動向，AI・データサイエンス論文集，Vol. 1, J1, pp. 242-251, 2020.
6) Schölkopf, B., Platt, J. C., Shawe-Taylor, J., Smola, A. J., and Williamson, R. C.: Estimating the support of a high-dimensional distribution. Neural Computation, Vol. 13, pp.1443-1471, 2001.
7) Wang, S., Liu, Q., Zhu, E., Porikli, F., Yin, J.: Hyperparameter selection of one-class support vector machine by self-adaptive data shifting, Pattern Recognition, Vol. 74, pp.198-211, 2018.
8) 平内和樹，倉元昭季，瀬尾明彦：One-Class Support Vector Machine を用いた異常検知手法による作業性の評価，人間工学，Vol. 55, No. 2, pp. 50-58, 2019.
9) Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima S., and Noro T.: Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network, Landslides, 7, pp.325-338, 2010.
10) 宮﨑祐輔，青木 宏史，小山 倫史，藤原 照幸，岸田潔：One Class Support Vector Machine を用いた事前通行規制基準の設定例とその課題，第 58 回地盤工学研究発表会，13-7-1-05，2023.