

## クロアチア・ザグレブ市Kostanjek地すべりの地下水の水質

渡部 直喜

### 1. はじめに

本研究はJST/JICAの地球規模課題対応国際科学技術協力事業「クロアチア土砂・洪水災害軽減基本計画構築」(代表:丸井英明)におけるプロジェクトの1つである。クロアチアの試験研究対象地において、地すべりの危険度評価に基づき、災害を軽減する総合的な基本計画(警戒避難システム、持続可能な土地利用など)の構築を目標としている。地すべりに関しては、総合的な地すべり危険度評価に向けて、地すべり移動体の動態観測、水文・気象観測、地形・地質・地下水調査などの各種観測・調査とこれらの結果に基づく斜面安定解析等を実施している段階である。本報告はその一環として、クロアチア・ザグレブ市西部のKostanjek地すべり地を対象として実施された地下水調査の概要である。

地下水調査では、井戸深度、地下水位、水温・水質の調査を実施した。しかしながら、帯水層位置が不明の井戸が多く、地下水位に基づく地下水流動の解析が困難なため、水質の特徴から地下水系を推定することで大局的な地下水流動を把握することとした。

### 2. 調査地域の概要

Kostanjek地すべりは、ザグレブ市の西方-北方にかけて北東-南西方向に主稜線の連なるMedvednica山地の南西端の山麓に位置し、市の中心部から西へ約10キロの距離にある。地すべりの規模は、最大延長1250m、最大幅950m、面積約100haである。地すべり面の深度は最大90mに達し、移動体の体積は約 $32 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定される。地すべりの基岩地質は中期中新世のマール(泥灰岩)と称される石灰質砂岩、石灰質シルト岩と石灰岩の互層で構成され、マールの基底は同じく中期中新世の石灰岩層からなる。地層の走向はほぼ東西方向、傾斜は地すべりの頭部から中央部で南方向に $10 \sim 15^\circ$ 、地すべりの末端部では北方向に $10 \sim 30^\circ$ 傾斜している。地すべり地形と地質構造の関係から大局的には流れ盤型の地すべりといえる。後背山地であるMedvednica山地は主として塊状のドロマイト(苦灰岩)で構成され、地すべりの基岩である中期中新世マール層・石灰岩層の基盤をなす。後背山地で涵養れた地下水の地すべり地への流入の有無が地すべり発生機構を考える上での鍵となる。

### 3. 試料および分析方法

2011年9月にKostanjek地すべりおよび周辺地域の現地調査を行い、水試料(地下水71試料、湧水2試料、トンネル排水1試料、河川水1試料)を採取した。調査地域は地下水が豊富であり、多くの家庭が飲料用・生活用の井戸を所有している。このため、地元住民の了解のもと、地下水試料のほとんどは家庭用井戸より採水した。水温、pH、電気伝導度は試料採取の際、現地で測定し、主要イオンは採取した試料を持ち帰り、室内で分析した。水温、pH、電気伝導度の測定はそれぞれサーミスタ温度計、pH計(ガラ

ス電極法), 電気伝導度計を用いた。主要イオンのうちNa, NH<sub>4</sub>, K, Mg, Ca, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>の分析はイオンクロマトグラフィーを用い, HCO<sub>3</sub>とCO<sub>3</sub>の分析は0.02N-硫酸による中和滴定で行った。

#### 4. 地下水の水質型

調査地域の地下水は水質化学的特徴より, 次の4つのタイプに分類できた。(1)のCa-HCO<sub>3</sub>型, (2)SO<sub>4</sub>に富むCa-HCO<sub>3</sub>型 ( $0.28 < \text{SO}_4/\text{HCO}_3 \text{比} < 0.40$ ), (3)Mgに富むHCO<sub>3</sub>型 ( $0.19 < \text{Mg}/\text{Ca} \text{比} < 0.55$ ), (4)塩化物(Cl)型 ( $\text{Cl} > 100\text{mg/L}$ )。各水質の分布は次のとおりである。Ca-HCO<sub>3</sub>型の地下水は調査地域全体に分布する。SO<sub>4</sub>に富むCa-HCO<sub>3</sub>型の地下水は調査地域北部および南西部に点在する。Mgに富むHCO<sub>3</sub>型の地下水は地すべり地の東部と南東部, 地すべり地の背後にあたる北部に限定的に分布している。塩化物型の地下水は調査地域の主要道路に沿って点在する。

#### 5. 各水質型の形成機構

一般的にみられるCa-HCO<sub>3</sub>型の地下水は調査地域に広く分布するマール層と密接に関係しており, マール層から溶出されたCaとHCO<sub>3</sub>濃度は方解石に飽和するほど高い。SO<sub>4</sub>に富む地下水の陽イオンはCaが優勢である。よって, SO<sub>4</sub>に富むCa-HCO<sub>3</sub>型地下水のSO<sub>4</sub>の起源は, マール層中に局所的に含まれる石膏または硬石膏の溶解である可能性が高い。塩化物型の地下水は調査地域の主要道路に沿って限定的に分布するため, 高いCl濃度の原因は融雪剤等の人為的影響であると考えられる。

本調査ではMgに富むHCO<sub>3</sub>型地下水の形成に着目した。前述のとおり, Mgに富むHCO<sub>3</sub>型の地下水は地すべり地の東部と南東部, 地すべり地の背後にあたる北部に限定的に分布する。他方, 排水トンネルはドロマイト岩体を貫いており, したがってトンネル排水はMg/Ca比が高くMgに富む。また, 地すべり地の背後を流れるDolje川はMedvednica山地に源を発するため, 流域の湧水・河川水はMg/Ca比が高くMgに富む。これらを踏まえると, Mgに富むHCO<sub>3</sub>型の地下水の形成にはドロマイトが関与していると考えるのが合理的である。つまり, 地すべり地に見られるMgに富むHCO<sub>3</sub>型の地下水はドロマイト岩体から供給された地下水とマール層中の地下水が混合して形成されたと考えられる。Medvednica山地で涵養された地下水はドロマイト岩体中を流動し, Kostanjek地すべり地の地下深所に達し, 被圧地下水を形成している。この被圧地下水が古い断層亀裂等を通路として上昇し, マール層中に注入していると考えられる。地すべりの東部と西部の地下水を比較すると, 全体として東部の方がわずかにMg/Ca比が高い。東部にのみドロマイト岩体中まで達する断層亀裂等が存在する可能性が高い。地すべりの地形的特徴から, すべり面の形状は左右(東西方向)非対称であると推察されるが, このことは地下水調査の結果とも調和的である。