



六甲山地域の急傾斜地崩壊危険区域の花崗岩斜面の 風化変質鉱物と元素溶脱による風化度

田結庄, 良昭
小田, 哲二

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 7:237-255

(Issue Date)

2003-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/00406488>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00406488>



六甲山地域の急傾斜地崩壊危険区域の花崗岩斜面の 風化変質鉱物と元素溶脱による風化度

Grade of Weathering of the Steep Slopes Due to the Alteration Minerals and Further Leaching of the Granitic Rocks in Mount Rokko Area

田結庄 良昭¹⁾

Yoshiaki Tainosho

小田 哲二²⁾

Satoshi Oda

概要: 六甲山地の急傾斜崩壊危険区域で危険度評価と風化度の関係を見ると, 危険度評価が-30 点以上の斜面の多くで, カオリナイトやバーミキュライトなど風化変質鉱物がみられ, MgO がほとんど溶脱しているなど, 元素溶脱が顕著な特徴を有する。このように六甲山地の急傾斜地崩壊危険区域は, 元素溶脱や風化変質鉱物からみて, 野外観察による風化度判定以上に風化作用が進行していることが明らかとなった。しかも, この現象はより危険度評価が高い斜面で多く見られ, 今後少量の降雨でも崩壊の危険性が高いことが判明した。

キーワード: 急傾斜地崩壊危険区域, 風化度, 風化変質鉱物, 元素溶脱, 危険度評価

1. はじめに

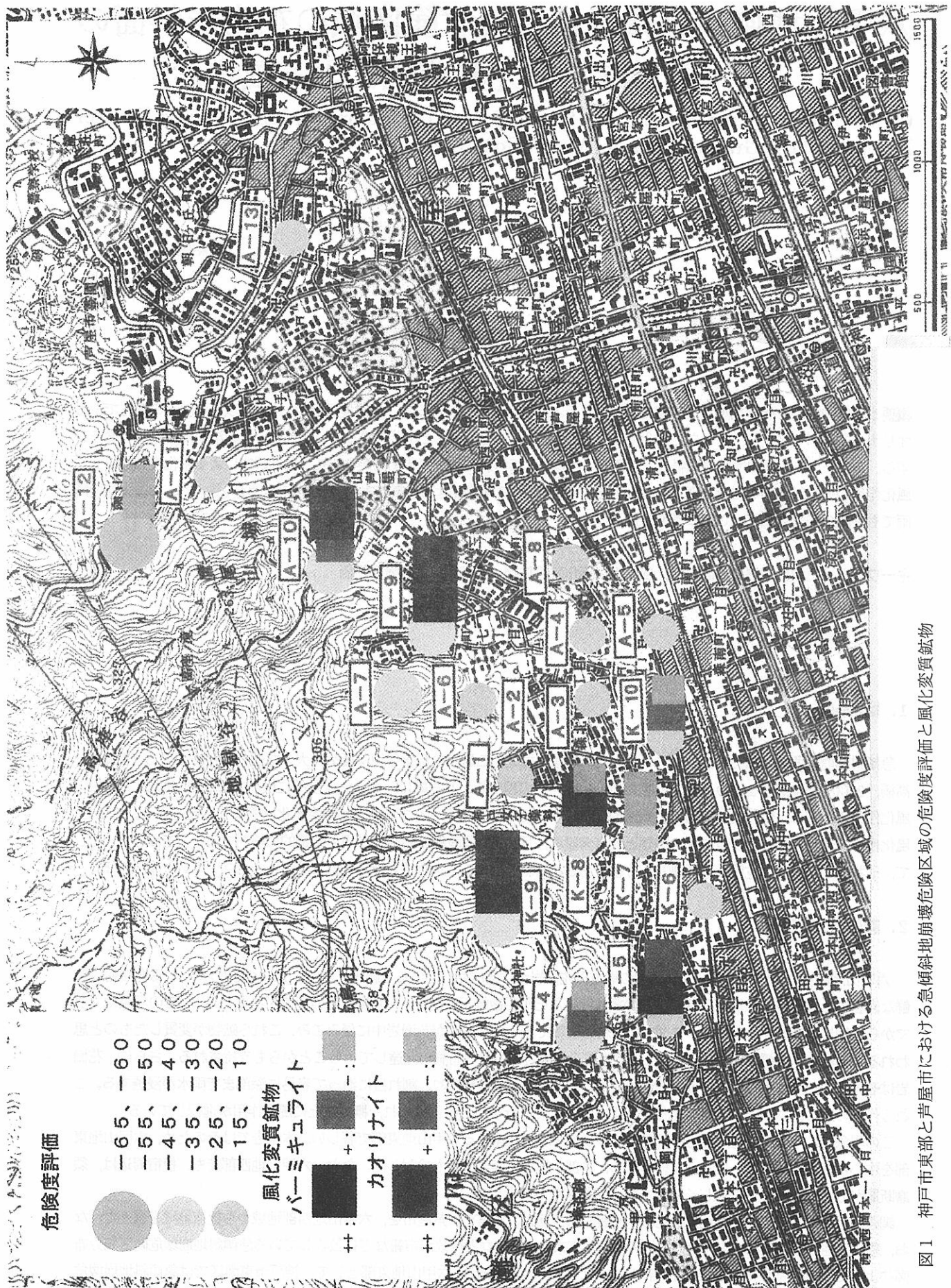
急傾斜地崩壊危険区域の斜面崩壊にあたって, 斜面を構成する岩石の風化作用は極めて大きな影響を持っている(田結庄・高橋, 2000; 田結庄, 2001)。そのためには, 風化作用の程度をより詳細に, しかも定量的に検討する必要がある。しかし, 風化作用の調査は, 野外での肉眼での観察やハンマーの打撃音で測定されているため, 定量化は極めて困難である。そこで, 風化作用の過程で生じる変質鉱物の種類と元素溶脱に注目して, 危険斜面の風化作用を定量的に検討することを試みた。そして, それらから斜面の危険度を予測し, 今後予想される斜面崩壊の危険性を評価する試みを行ったので, ここに報告する。

2. 調査地と地質概要

六甲山地は主に粗粒～中粒, 一部細粒の黒雲母花崗岩から構成されている(藤田・笠間, 1971; 1982)。これら花崗岩は新鮮な岩石でも黒雲母の緑泥石化や斜長石の絹雲母化などが顕微鏡下でみられ, 変質しているのが特徴である。この現象はマグマから花崗岩が固結する過程で, マグマの最終生成物である熱水残液が花崗岩中に侵みこみ, これら鉱物に変質したものである(田結庄・高橋, 2000)。このことは細粒の花崗岩に多数の晶洞が発達していることから支持される。さらに, 花崗岩はその後の断層運動により, 破碎や圧砕作用のため, 細かくひび割れ, 割れ目に沿って容易に深部まで雨水が浸透する。これら作用のため, 六甲山地では風化作用がより深部まで進行したものと思われ, 概観以上に風化作用が進行している。

この現象は, 甲陽, 芦屋, 五助橋断層など多数の断層が発達する六甲山地東部で著しい。本報告ではそのため, 六甲山地東部を中心に調査を行った。また, 比較のため, 一部, 神戸市西部地域も検討した。なお, 六甲山地西部でも, 板宿周辺は, 須磨断層が分布し, 花崗岩は著しく破碎され, 風化作用が進行している。

調査地域としては, 六甲山地東部地域から神戸市東灘区, 西宮市, 芦屋市を, 六甲山地西部地域から板宿地域を選んだ。なお, 急傾斜地崩壊危険区域の選定は, 神戸市や西宮市, 芦屋市など行政が市報などに公表している急傾斜地崩壊危険区域分布図によっている(神戸市, 2002; 西宮市, 2002, 芦屋市, 1997)。六甲山地東部として, 神戸市東灘区では急傾斜地崩壊危



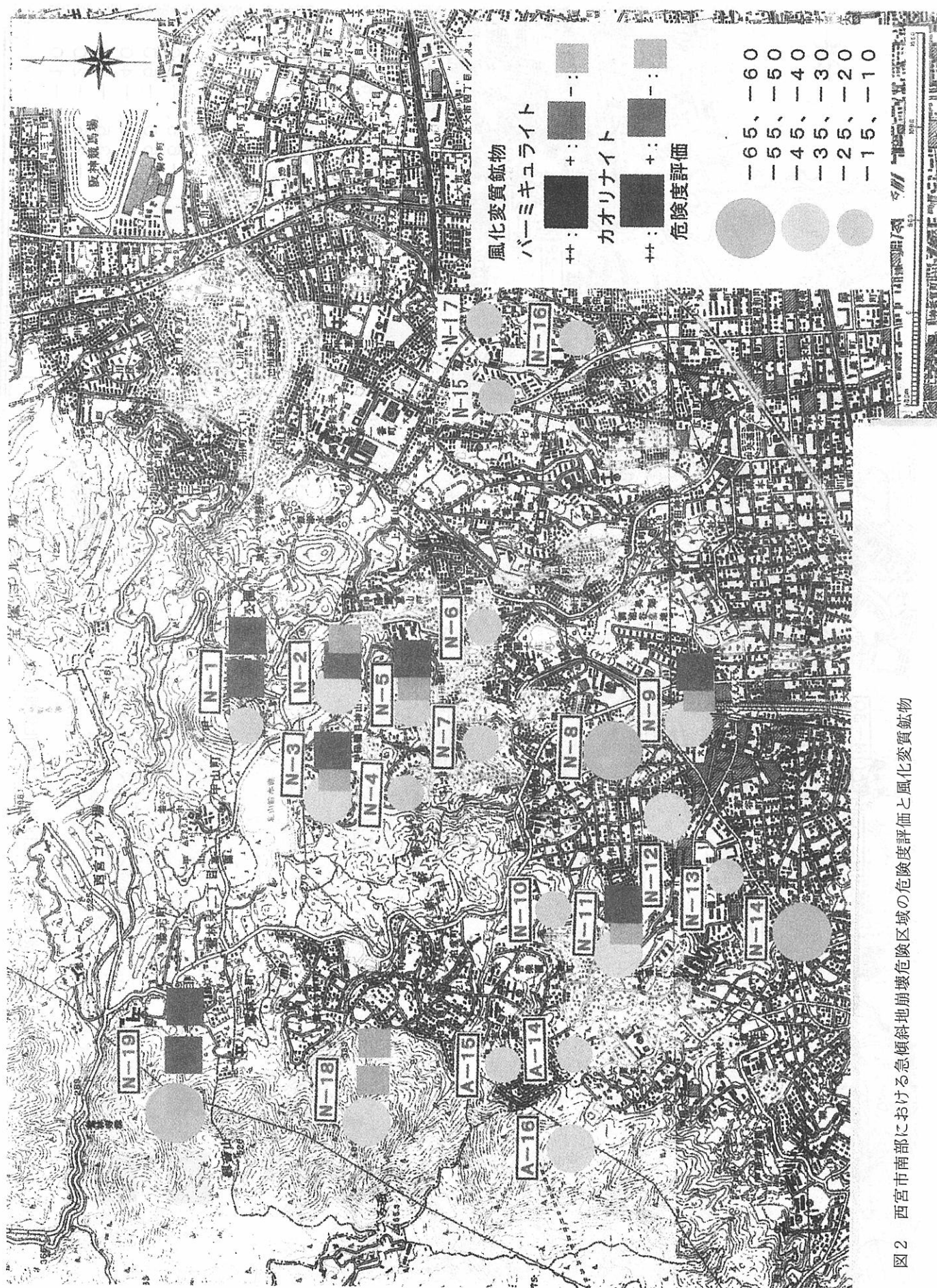


図2 西宮市南部における急傾斜地崩壊危険区域の危険度評価と風化変質鉱物

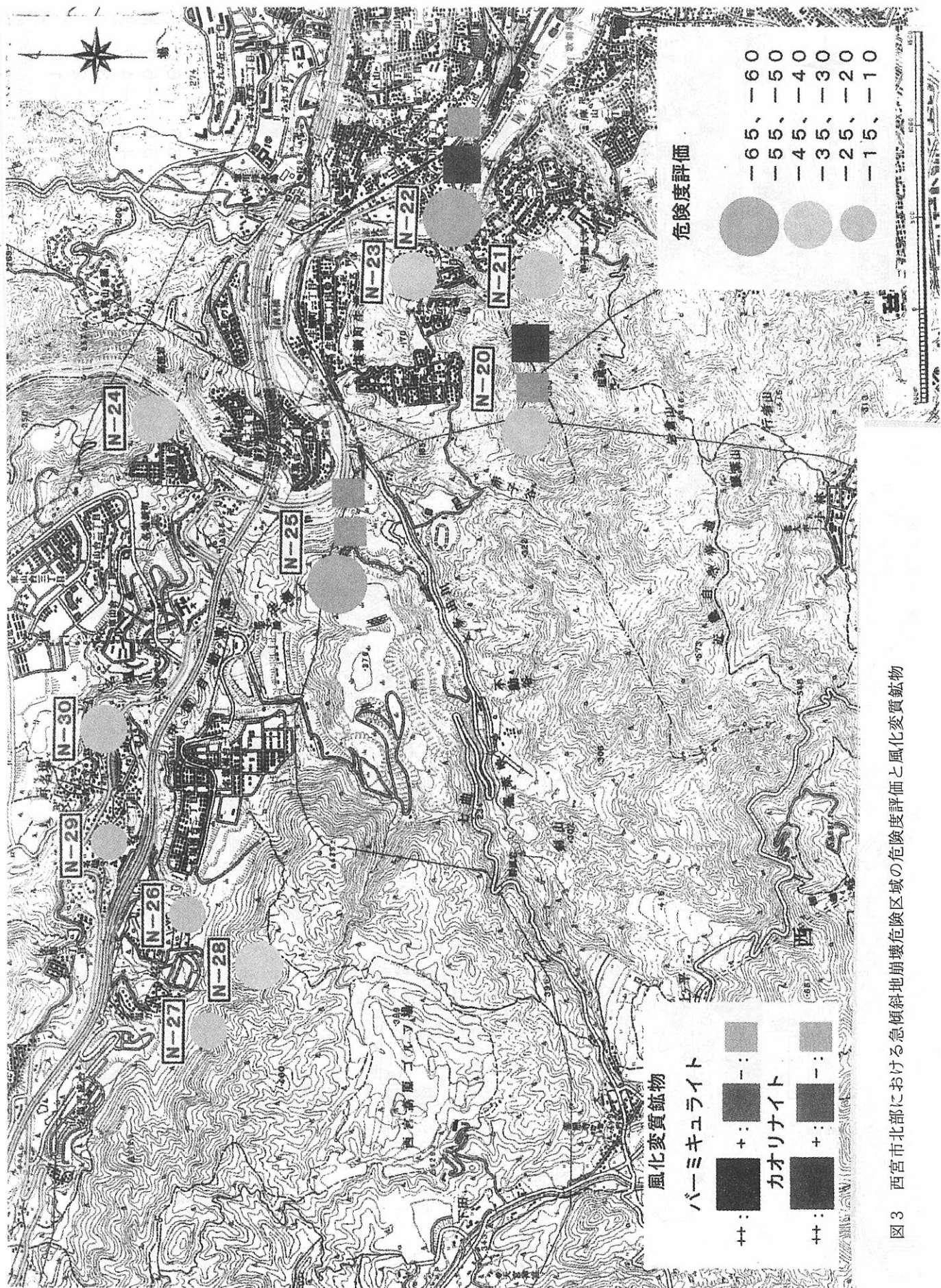
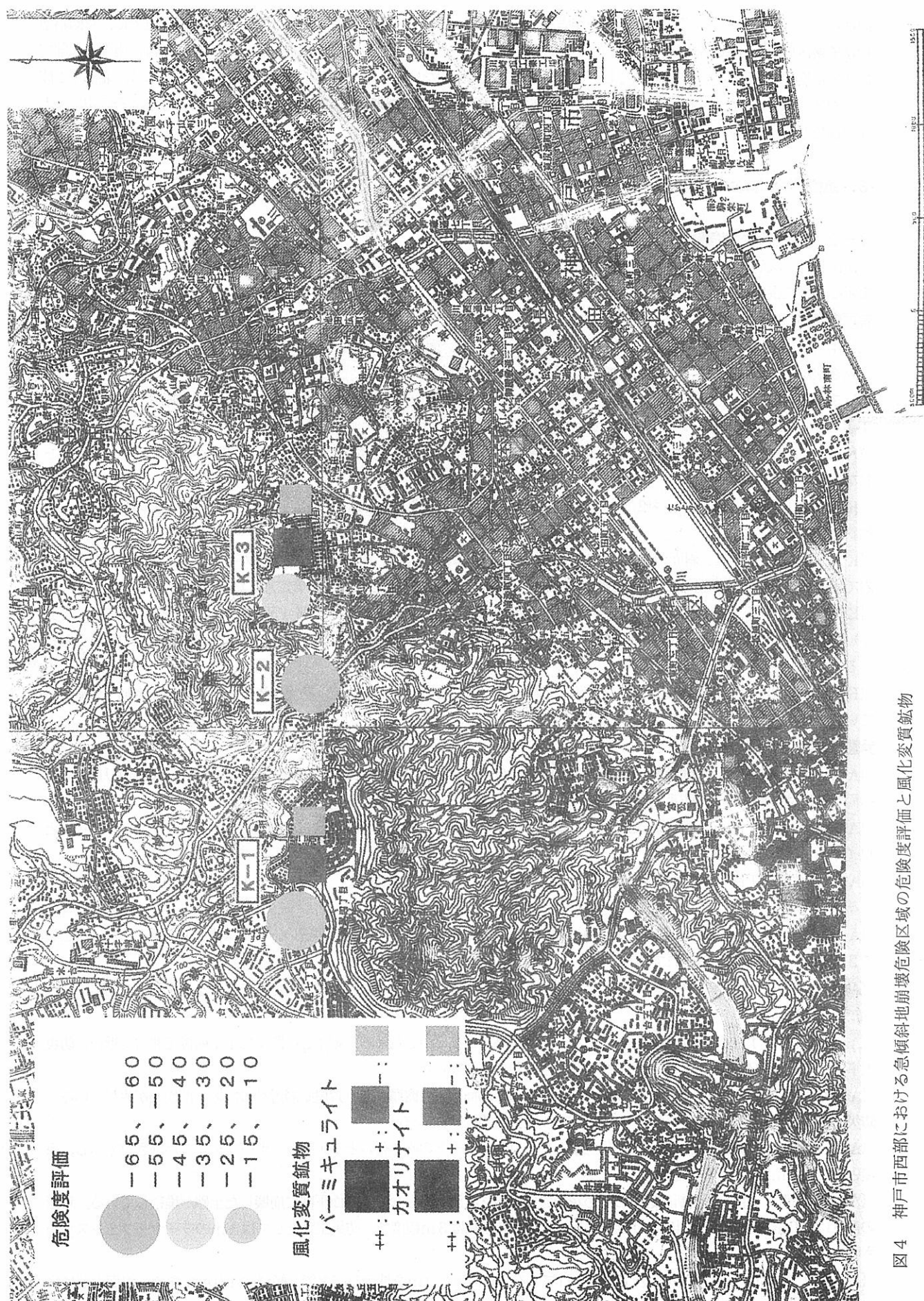


図3 西宮市北部における急傾斜地崩壊危険区域の危険度評価と風化変質鉱物



険区域が25箇所分布し、その中で、岩石が露出し、人工斜面でない6箇所を調査した（図1）。芦屋市付近では、急傾斜地崩壊危険区域は18箇所分布する。その中で、人工斜面でない16箇所を調査した（図1）。西宮市周辺では、南部と北部で急傾斜地崩壊危険区域が77箇所存在し、その中で、人工斜面でない30箇所、すなわち南部19箇所（図2）、北部11箇所（図3）を調査した。六甲山地西部の神戸市西部板宿周辺では、急傾斜地崩壊危険区域が10箇所存在する。その中で、人工斜面でない3箇所の調査を行った（図4）。

3. 急傾斜地崩壊危険区域の産状と特徴

3-1. 急傾斜地崩壊危険区域の産状

急傾斜地崩壊危険区域の斜面の産状を土砂斜面と岩石斜面にわけて記載する。なお、岩石斜面【 】で、土砂斜面を（ ）で示し、調査番号は、図1～4に示す。

神戸市東部、東灘地域（図1）

【K-4】岡本6丁目：斜面は風化した花崗岩で構成されている。節理に沿って崩壊が進んでいる（写真1）。家屋との距離は道路を挟んで2m程度である。防災工事としては1mの石垣擁壁がある。

【K-5】岡本6丁目：土石流危険渓流内にある。斜面の高さは20m前後、植生は豊かである。家屋との距離は5mで、防災工事として1mのワイヤーフェンスが立てられている。

【K-6】本山北町5丁目：斜面の高さは5m、傾斜は40度である。斜面全体が植生で覆われている。過去の崩壊の跡はみられない。

【K-7】本山北町5丁目：斜面は風化した花崗岩からなる。斜面中部に岩盤が露出している（写真1）。斜面の高さは5m、傾斜は40度である。

【K-8】本山北町5丁目：斜面の高さは数mで傾斜は40度である。過去、降雨によって崩壊が生じた。斜面は風化した花崗岩で構成されている。家屋との距離は道路を挟んで4mあり、防災工事として格子枠安定加工が施されている。

【K-9】本山北町5丁目：土石流危険渓流である。斜面は風化花崗岩である。斜面中部（5m）に岩石が露出している（写真1）。斜面の高さは10mであり、角度は60°の急斜面である。過去に崩壊の跡があるが、家屋は斜面から離れたところにある。

【K-10】森北町6丁目：斜面は風化した花崗岩で構成されている。植生が豊かで、防災工事として格子枠安定加工が施されている。

芦屋市地域（図1）

【A-1】森北町6丁目：芦屋断層近くのため花崗岩は破碎されている。流れ盤をなす。古い崩壊地が地震により再び崩壊し、斜面中腹には亀裂が生じ、防災工事としてコンクリートの吹きつけ工事が施されている。

【A-2】森北町6丁目：斜面の高さは20m、傾斜は50度である。植生は豊かである。防災工事として2-3mの石積みとワイヤーフェンスが施されている。

【A-3】森北町6丁目：斜面は風化した花崗岩で構成されている。植生が豊かで、防災工事として格子枠安定加工が施されている。

【A-4】森北町6丁目：斜面の高さは20m、傾斜は50度である。家屋との距離が近い。植生は豊かである。防災工事として2-3mの石垣擁壁が施されている。

【A-5】森北町4丁目：斜面の高さは3mで、防災工事としてコンクリートの吹き付けが施されている。家屋との距離1m以内で非常に近い。

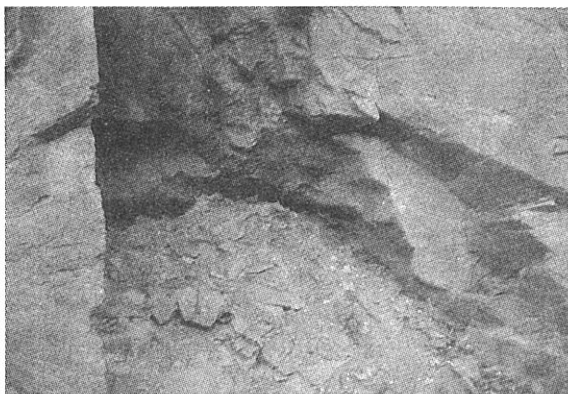
【A-6】森北町7丁目：土石流危険渓流である。斜面の高さは20mを越える。家屋との距離は1m前後で非常に近い。防災工事として2mの石積みと1mのワイヤーフェンスが施されている。

【A-7】森北町7丁目：斜面は20mを越える高さである。斜面頂部に露頭があり芦屋断層近くのため一部崩壊が生じている。防災工事として斜面全面にコンクリートの吹き付け工事が施されている。

【A-8】三条町：斜面の高さは5mで防災工事としてコンクリートの吹き付けと1mのワイヤーフェンスが施されている。家屋との距離1m以内で非常に近い。

【A-9】森北町7丁目：芦屋断層近くのため花崗岩は破碎され流れ盤をなす。斜面下部に崩壊した土砂が堆積している。斜面の高さは20mを越え、傾斜は50度である。家屋との距離は3m程度で、防災工事としては1mのワイヤーフェンスが施されている。

【A-10】山芦屋町：風化した花崗岩で構成されている。斜面は20mを越える高さで、傾斜は40度である。斜面下部に崩



神戸市西部 K-2 禪昌寺1丁目
節理に沿って風化が進んでいる。
斜面下部に崩壊した土砂が堆積している。



神戸市西部 K-3 高取山町1丁目
白色の細脈の斜面に沿って崩壊が生じている。



神戸市東部 K-4 岡本6丁目
節理に沿って風化が進んでいる
斜面は風化した花崗岩で構成されている。



神戸市東部 K-7 本山北町5丁目
斜面は風化した花崗岩で構成されている。
斜面中部に岩盤が露出している。



神戸市東部 K-9 本山北町5丁目
斜面中部に露出している。



芦屋市 A-10 山芦屋町
芦屋断層付近の岩石は破碎され、
斜面下部に崩壊した土砂が堆積している。

写真1 神戸市および芦屋市の急傾斜地崩壊危険区域の産状

壊した土砂が堆積している。植生が豊かである。防災工事として3mの石積みが施されて、現在も工事中である。

【A-11】山手町：斜面は20mを越える斜面で、植生が豊かである。現在造成中である。

【A-12】山手町：土石流危険渓流である。斜面を構成する花崗岩は破碎され、風化している（写真2）。斜面の高さは20m程度で、一部崩壊が起こった跡がある。家屋（学校）との距離は5mで、防災工事として堰堤が1本と1mの石積みが施されている。堰堤は堆積物でほぼ埋まっている。

【A-13】朝日ヶ丘町：斜面は10m前後の斜面で、傾斜は50度である。斜面上部に浮石がみられる。家屋との距離は1m前後で非常に近いが、防災工事としてコンクリートの吹き付け工事と2mの石積みと1mのワイヤーフェンスが施されている。

【A-14】苦楽園：斜面は風化した花崗岩で構成されている。斜面中部に岩石が露出している。家屋との距離は非常に近いにもかかわらず、防災工事は家屋の下部に位置する2mの石積みのみである。

【A-15】苦楽園：斜面は20mを越える非常に高く、傾斜は50度である。植生は豊かで、防災工事はコンクリートの吹き付け工事が施されている。

【A-16】苦楽園：斜面は花崗岩で構成されている（写真2）。斜面の高さは20m前後で、傾斜は40度である。非常に植生が豊かである。崩壊によって樹木が倒壊している。家屋との距離は近いが防災工事がほとんど施されていない。

西宮市南部地域（図2）。

【N-1】甲山町：斜面は非常に新鮮な花崗岩で構成されている。斜面の高さは20m程度で、傾斜は40度である。花崗岩は破碎され風化している。防災工事として1mの石積みが施されている。

【N-2】甲陽園神山町：甲陽断層近くのため花崗岩は破碎され風化している（写真2）。斜面の高さは15m、傾斜は40度である。植生が豊かである。防災工事はほとんど施されていない。

【N-3】甲陽園神山町：斜面は10m程度の高さで、傾斜は50度である。斜面上部の植生が豊かである。細脈に沿って崩壊が生じている（写真2）。斜面下部に崩壊した土砂が堆積している。防災工事として、2mの石積みが施されている。

【N-4】甲陽園神山町：家屋との距離は2～3mと非常に近い。植生は豊かである。斜面中部に岩石が露出している。防災工事は3mの石積みが施されているが、家屋の高さまでである。

【N-5】甲陽園神山町：斜面は風化した花崗岩で構成されていて（写真2）、斜面の高さが4m、傾斜が50度である。斜面下部に一部岩石が露出しているが、植生が豊かで、防災工事はほとんど施されていない。

【N-6】新甲陽町：斜面の高さは10～20mで、傾斜は50度である。このあたり一帯は人工斜面になっている。

【N-7】甲陽園西山町：斜面の高さは10mで、傾斜は50度である。斜面と家屋との距離が1m以内で非常に近い。防災工事として3mの石積みが施されている。

【N-8】神園町：土石流危険渓流である。斜面は風化した花崗岩で構成されている。斜面横に河川がある。植生は豊かである。防災工事として5mの石垣擁壁が施されている。

【N-9】豊楽町：斜面横に河川ある。植生は豊かで斜面全体を覆っている。斜面が20mを斜面である。防災工事はほとんど施されていない。

【N-10】苦楽園1番町：斜面は風化した花崗岩で構成されている。斜面上部（15m）で岩盤が露出している（写真2）。斜面の高さは20mを越え、傾斜が50度である。植生が豊かである。防災工事は1mの石積みに1mのワイヤーフェンスが施されている。

【N-11】美作町：斜面は風化した花崗岩で構成されている。家屋との距離は非常に近いにもかかわらず、防災工事はほとんど施されていない。

【N-12】樋ノ池町：土石流危険渓流である。斜面の高さは20mを越え、傾斜が50度である。植生が豊かで、斜面全体を覆っている。家屋との距離は非常に近いにもかかわらず、防災工事はほとんど施されていない。

【N-13】樋ノ池町：斜面の高さは10m前後である。このあたり一帯は人工斜面になっている。

【N-14】老松町：土石流危険渓流である。斜面は風化花崗岩で構成されている。斜面中部（5m）に岩石が露出している。家屋と斜面との間に幅2mの河川が流れている。防災工事はほとんど施されていない。

【N-15】上ヶ原3番町：斜面は風化した花崗岩で構成されている。斜面の高さは20m前後であり、傾斜が40度である。斜面上部に浮石がみられた。植生が豊かである。防災工事は2mの石積みに1mのワイヤーフェンスが施されている。

【N-16】門戸岡田町：斜面の高さは20mを越え、傾斜は30度である。斜面中部（10m）に岩石が露出している。植生が豊かで、防災工事として1mの石積みが施されている。

【N-17】門戸東町：斜面の高さは20m程度で、防災工事としてコンクリートが吹き付けられている。

【N-18】鷺林寺南町：斜面と家屋との距離が1～2mと近い。花崗岩の崖の傾斜は40度で斜面の高さは20m程度である。斜面全体に岩石が露出している。植生が豊かなため防災工事はあまり施されていない。



芦屋市 A-12 山手町
花崗岩は破碎され風化が進んでいる。
斜面下部に崩壊した土砂が堆積している。



芦屋市 A-16 苦楽園
崩壊によって斜面上部の樹木が
倒壊している。



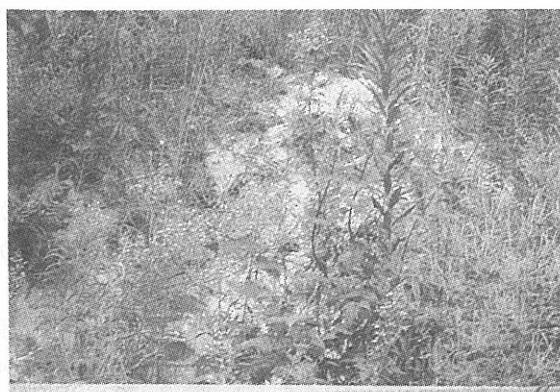
西宮市南部 N-2 甲陽園神山町
甲陽断層付近の岩石は破碎され
崩壊が生じている。



西宮市南部 N-3 甲陽園神山町
細脈に沿って崩壊が生じている。
斜面下部に崩壊した土砂が堆積している。



西宮市南部 N-5 甲陽園神山町
斜面下部に岩石が露出している。



西宮市南部 N-10 苦楽園1番町
風化した花崗岩で構成されている。
斜面上部(15m)で岩盤が露出している。

写真2 西宮市南部および芦屋市の急傾斜地崩壊危険区域の産状

【N-19】鷺林寺1丁目：著しく風化した花崗岩からなる斜面である。斜面の高さは20mを越え、湧水がある。防災工事として斜面全体にネットが張られている。防災工事が現在の進行中である。

西宮市北部地域（図3）

【N-20】生瀬高台：斜面と家との距離は2～3mときわめて近い。花崗岩の崖の傾斜は60度の急斜面で、高さは15m程度である。小断層がみられた。防災工事として、堰堤が3本施されている。

【N-21】宝生ヶ丘1丁目：風化した花崗岩からなる斜面で、斜面の高さは20mを越える。防災工事として格子枠安定化加工、アンカー工が施されている。

【N-22】宝生ヶ丘1丁目：兵庫県南部地震で損傷を受けた。斜面は著しく風化した花崗岩とそれを不整合に覆う崖錐層からなる。斜面の高さは20mを越え、角度は40度である。六甲断層の副断層がみられる。

【N-23】塩瀬町生瀬：斜面の高さは10m程度で、傾斜は30度である。斜面下部に岩石が露出している。植生（竹）が豊かであり、防災工事として1mの石積みが施されている。

【N-24】清瀬台：土石流危険渓流である。防災工事として2本の堰堤と2mのワイヤーフェンスが施されている。

【N-25】名塩新町：斜面は礫層で構成されている。斜面は降雨による細脈に沿って生じた崩壊の跡がみられた。斜面は20m以上で非常に高く、傾斜は40度である。防災工事は施されていない。

【N-26】名塩山荘：斜面と家屋との距離は2～3mときわめて近い。斜面の高さは20m程度であり、植生は豊かである。防災工事は石積みが施されている。

【N-27】名塩山荘：斜面は花崗岩で構成され、谷地形である。斜面中部（10m）に岩石が露出している。斜面の高さは20m程度で、傾斜は50度である。防災工事として、1mの石積みが施されている。

【N-28】名塩山荘：斜面と家屋との距離は2～3mときわめて近い。風化した花崗岩で構成されている。樹木が倒壊している。防災工事として3mの石積みが施されている。

【N-29】名塩1丁目：地すべり危険箇所にも指定されている。斜面の高さは20m、傾斜は40度である。節理に沿って崩壊が進んでいる。斜面の前の道が3mと広い。植生が豊かであり、防災工事は石垣擁壁のみである。

【N-30】名塩1丁目：地すべり危険箇所にも指定されている斜面で、神戸層群からなる礫層で構成されている。岩石は破碎され風化している。防災工事は石垣擁壁と1mのフェンスが立てられている。

神戸市西部、板宿地域（図4）

【K-1】横尾2丁目：古い斜面崩壊で、地震で山腹に亀裂が入り、そこから崩壊が拡大し、降雨のたびに節理に沿い崩壊が進行している。マサ土が日常的に崩れ落ち、ネットも崩壊物のため膨らみ、樹木の倒壊が生じている。1998年には降雨により斜面の西部側が崩壊し、土砂が家屋に押し寄せる被害が生じたため、排水工事を含む防災工事が緊急に行われた。

【K-2】禅昌寺町1丁目：全面吹き付けの防災工事は行われているが、40度を越える急斜面で、その斜面上に家屋が密集している。斜面上には所々風化した花崗岩が露出し、さらに斜面の上流側には風化花崗岩が露出している（写真1）。

【K-3】高取山町1丁目：風化した花崗岩が急傾斜地崩壊危険区域の斜面上に露出し、地震により小規模に崩壊した。斜面直下に家屋が見られる。その後、降雨により崩壊が進行している。この地域の南部の凹地地形斜面では現在山肌をはぎ、防災工事が進行中である。

3-2. 急傾斜地崩壊危険区域の産状の特徴

調査した斜面の中で、断層沿いに位置する斜面で湧水が生じている。湧水は断層粘土により地下水位が上昇し、斜面中から流出したためと思われ、パイピング現象による斜面崩壊が生じやすい。また、急傾斜地崩壊危険区域の中には、花崗岩斜面中に数mmの灰色から緑色で、粘土状の細脈が生じている（田結庄、2000）。これら急傾斜地崩壊危険区域では、K-3（写真1）やN-3（写真2）の斜面のように細脈に沿って滑落し、崩壊している斜面がみられた。

急傾斜地崩壊危険区域の中で、特に危険な斜面が存在する。それは斜面の傾斜が40度を越え、しかも地震で斜面上部に亀裂が存在し、滑落崖が生じている斜面である。なお、このような斜面は、市街地から山地に移り変わる山麓部で多い。また、最近これら地点で開発が多く、今後の防災に多くの問題点を残している。

4. 急傾斜地崩壊危険区域の危険度評価とその特徴

4-1. 急傾斜地崩壊危険区域の調査法

六甲山地の急傾斜地崩壊危険区域は兵庫県南部地震で崩壊や亀裂などの損傷を受けているため（田結庄・藤田、1996）、その後の降雨により斜面崩壊が広がっている。そのため、2次災害が心配され、実際に地震直後から8年を経た2002年に至るま

表1 急傾斜地崩壊危険区域の岩石斜面の危険度判定基準(小標、1971を一部修正)

	切り高	り勾配	風化程度	岩の目	
				間隔・ひん度	方向
配点	20m以上 -10 10~20m -5 5~10m 0 5m以下 +10	6分より急 -5 6分~8分 0 8分より +5 ゆるい	風化して -10 いる 中 -5 新鮮である 0	15cm以下 -10 15~50cm -5 50cm以上 0	流れ盤 -5 受け盤 0 水平 0
備考	最大長をとる	6分=59.04度 8分=51.34度	風化:全体に褐色化 しハンマーでたたけ ば容易にぐずれる。		

	り腐部の状況	滴水関係	り面への 集水範囲	地質の 特殊条件	特異層に対 する配慮
配点	水の集まり -10 やすい地形である その他の -5 地形である	滴水あり -10 り面は -5 常に湿潤 滴水なし 0	大 -10 中(500m2程度)-5 小 0	膨張性の岩 -10 固結度の悪い(三紀)層 -10 その他の 0 一般地質	断層あり -10 浮石あり -10 岩の目 -10 中に粘土層 をはさむ
備考	水田、湿地である とか、水路がある ような谷筋の場合			膨張性岩は泥 岩、凝灰岩、ジャ 紋岩、片岩など	

で、降雨で被害が生じている。これら急傾斜地崩壊危険区域は特に危険なため、防災工事が計画され、一部行われているが、数が多いため充分ではない。

これら急傾斜地崩壊危険区域の調査にあたり、調査項目として、斜面の高さなど地形要素だけでなく風化や岩の目、湧水さらに断層の有無など地質の特殊条件などをより詳細に考慮した小橋(1971)の調査項目を用いた(表1)。なぜなら、建設省(1990)による危険度判定基準では、斜面の高さに重点があり、地質条件などなく、10m以上の高さの斜面ではほとんど危険斜面となるためである(田結庄・高橋, 1999)。なお、風化度は野外観察だけでなく、後述する風化変質鉱物の種類や元素溶脱による化学組成の変化を取り入れ検討を行った。以下に小橋(1971)の調査項目を用い(表1)、各斜面の危険度評価を行ったので以下に示す。

4-2. 急傾斜地崩壊危険区域の危険度評価

六甲山東部地域

神戸市東部、東灘区: 危険度評価が-30 から-45 程度の急傾斜地崩壊危険区域斜面がみられた(図1)。これら危険度が高い斜面では K-9 の様に、カオリナイトが生じているなど風化作用が非常に顕著なのが特徴である。なお、山麓部から離れた斜面では、K-6 や K-10 の様に、危険度評価が-10 程度と、危険度は比較的低い。

芦屋市: A-7, A-9, A-10 地点の様に-30 や-45 程度の急傾斜地崩壊危険区域斜面が多く分布する。これらの中で、A-12 地点で-55 と危険度が高い(図1)。これらの危険斜面は芦屋断層沿いから約10mの所の断層崖に位置し、そのため、危険度が高くなったと思われる。

西宮市南部: N-2 や N-8 の様に、一部甲陽断層沿いに危険斜面がみられた(図2)。これらの斜面の多くは斜面高が20mと高いことと、一部湧水がみられるなど、きわめて危険な状況にある。

西宮市北部: N-22 や N-25 の様に斜面高が20mを越え、高い斜面で(図3)、N-23 の様に斜面途中で湧水がみられた。これらの地域は兵庫県南部地震で斜面の損傷が大きく、多大な被害が生じた地域である。

六甲山西部地域

神戸市西部、板宿: 危険度の点数が-65 ときわめて危険度が高い評価が得られた地点がみられる(K-1 地点)(図4)。それらの特徴として、これらの斜面では、幅数ミリの粘土細脈がみられ、その細脈に沿って斜面崩壊が生じている特徴を有する(写真1)。

神戸市の西部地域は神戸市東部や芦屋市よりも、標高が低く、東部に比べやや緩やかな斜面が多い傾向にある。風化度はカオリナイトなどの顕著な風化変質鉱物がみられ、神戸市東部より風化作用が顕著である。なお、断層による湧水があまりみられない。また、K-2 地域では、斜面と人家が2mと離れておらず、家屋が密集しているなど危険状況にある。

4-3. 危険度評価からの検討

危険度が高い斜面、すなわち-30点以上の危険度評価が得られた斜面について検討を行った。神戸市西部では K-1, K-2, K-3 と、すべての斜面が危険斜面であった。詳細をみると、K-1 のように花崗岩斜面中に粘土細脈がみられ(写真1)、それに沿って斜面崩壊が生じている(田結庄, 2000)。神戸市東部の K-4, K-8, K-9 の斜面では斜面高が20mと高いことが要因である。芦屋市では、A-7, A-9, A-10, A-12, A-16 の斜面の危険度が高い。これら斜面では、芦屋断層により、岩石が破碎され、著しく風化しているのが特徴である。西宮市南部では、N-2, N-3, N-8, N-9, N-11, N-12, N-14, N-18, N-19 が危険な斜面で、特に危険度が高い N-19 は、斜面上部に湧水がみられるなど、きわめて危険な状況にある。西宮市北部では、N-20, N-21, N-23, N-24, N-25, N-28, N-30 で高く、危険な状況にある。

比較的高い危険度評価が得られた斜面に共通した特徴として、斜面の高さが20m以上あり、湧水がみられ、断層崖に位置する地質条件にあることが挙げられる。これら危険な急傾斜地崩壊危険区域の多くは芦屋や西宮など六甲山系の東部に多いが、西部でも見られる。特に、断層近傍ではこの傾向が著しい。これは断層近傍では断層による破碎作用のみならず、断層に沿って湧出する温泉水などにより、変質作用を受けていることも関係している(田結庄, 2001)。

5. 元素溶脱による風化度

風化作用の調査は従来、現地での野外観察やハンマーの打撃音による調査が主体であるが、より定量的に風化度を見るため、斜面の風化岩石の化学分析を行い、新鮮な岩石との比較を行い、風化作用の過程での元素溶脱を定量的に明らかにし、検討を行なった。

表2 急傾斜地崩壊危険区域の岩石の化学組成

Area	六甲	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市
Point	R	K-1	K-3	K-4	K-5	K-7	K-8	K-9
SiO ₂ wt(%)	71.09	73.19	62.98	62.08	61.74	63.16	65.06	70.15
Al ₂ O ₃	13.31	14.14	13.81	16.38	14.99	16.13	16.14	15.66
Fe ₂ O ₃	1.46	1.78	8.37	11.74	12.01	8.44	7.79	4.71
MgO	0.81	0.24	nd	0.18	0.37	1.65	2.51	0.16
CaO	1.94	1.44	4.41	1.53	2.91	5.38	2.95	0.46
Na ₂ O	3.94	3.94	0.77	2.08	2.98	0.89	0.21	0.24
K ₂ O	6.22	5.01	6.31	3.79	3.29	3.16	3.97	7.67

Area Point	六甲 R	芦屋市		芦屋市		芦屋市		芦屋市		芦屋市		芦屋市		芦屋市	
		A-9	A-10	A-12	A-12	A-12	A-12	A-12	A-12	A-12	A-14	A-16	A-16	A-16	A-16
SiO2 wt(%)	71.09	66.65	64.89	73.88	74.55	69.52	75.21	69.91	66.57	74.49	69.93				
Al2O3	13.31	18.96	22.75	15.93	15.56	16.34	16.24	18.23	21.02	14.22	18.43				
Fe2O3	1.46	5.63	5.59	1.22	2.39	4.26	1.26	0.98	3.03	1.41	1.68				
MgO	0.81	0.81	nd	nd	0.21	nd	0.51	nd	0.05	0.02	nd				
CaO	1.94	0.31	0.31	0.49	0.55	0.69	0.47	0.57	0.58	0.39	0.47				
Na2O	3.94	0.62	1.54	1.26	nd	2.22	nd	4.41	3.77	4.09	4.31				
K2O	6.22	4.48	3.98	6.79	6.26	6.57	5.91	5.69	4.26	4.59	4.73				

Area Point	六甲 R	西宮市		西宮市		西宮市		西宮市		西宮市		西宮市		西宮市		西宮市	
		N-1	N-2	N-3	N-5	N-9	N-11	N-18	N-19	N-20	N-22	N-25	N-25	N-25	N-25	N-25	
SiO2 wt(%)	71.09	74.3	70.97	67.78	74.95	72.95	73.27	73.74	75.68	73.86	75.55	73.77				75.27	
Al2O3	13.31	16.4	21.46	24.27	15.27	17.16	15.56	15.65	13.77	15.46	13.74	15.65				19.05	
Fe2O3	1.46	1.36	1.04	0.87	1.01	1.11	0.61	1.78	1.28	0.91	1.88	5.41				1.13	
MgO	0.81	nd	nd	0.03	0.12	0.05	0.03	0.19	nd	0.14	0.01	0.35				nd	
CaO	1.94	0.34	0.22	0.12	0.63	0.43	0.29	0.51	0.28	2.11	0.49	0.11				0.11	
Na2O	3.94	3.37	2.05	1.41	4.26	3.63	5.39	3.89	3.94	3.41	3.83	0.17				nd	
K2O	6.22	4.11	4.09	3.97	3.62	4.51	4.64	4.43	4.73	3.45	4.19	4.22				4.22	

R:新鮮な六甲花崗岩

5-1. 分析方法

エネルギー分散型蛍光 X 線 (エレメントアナライザー-JSX-3220 型, 日本電子製) を用い, 斜面を構成する岩石の化学分析を非破壊で化学分析を行い, 元素の溶脱傾向を調べた。各急傾斜地崩壊危険区域で採取した風化花崗岩の化学組成を表 2 に示す。なお, 溶脱傾向を調べるために, 風化していない新鮮な六甲花崗岩の化学組成も分析した。試料はプレス機を用い約 2400kg/cm^2 の圧力で加圧し, 圧着した。

測定条件を以下に示す; 電圧: 30 kV , 電流約 0.1 mA , 測定時間 120 秒である。元素の中で, 特に溶脱傾向をよく反映している Na, Mg, Ca, K, Si, Fe, Al に焦点をあてた。なお, これらの傾向をより明確にみるために SiO_2 重量パーセントと各酸化物の関係を図 5 に示す。

5-2. 風化作用と元素溶脱

花崗岩中の鉱物は風化作用が進行すると, 水和, 炭酸化, 加水分解や溶解など水と岩石の接触による化学的風化作用のため, マグマから早期に晶出した結晶ほど不安定になりやすく, 後期に晶出したものほど安定な傾向があり, Bowen の反応原理の逆に働く。すなわち, 高温での早期晶出鉱物 (黒雲母や斜長石) ほど風化作用を受けやすく, 低温で後期に結晶した鉱物 (石英やカリ長石) ほど風化変質されにくい。斜長石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ と $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ が固溶体をなす) からはカルシウムやナトリウムが, 黒雲母 ($\text{K}(\text{Fe} \cdot \text{Mg})_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) からは鉄やマグネシウムが風化作用の進行とともに溶脱する。一方, 石英 (SiO_2) やカリ長石 (KAlSi_3O_8) は風化しにくいのでケイ素やアルミニウム, カリウムは逆に溶脱があまり行なわれず, 濃集する傾向にある。以下に危険斜面の岩石の化学組成から, 元素溶脱の傾向を述べる。

急傾斜地崩壊危険区域の岩石のカルシウムとマグネシウムを新鮮な花崗岩と比べると, 神戸市東部の一部 (K-5 の斜面) を除いて明瞭に減少し, 明らかに溶脱されている (図 5)。これは, 斜長石が風化作用の進行により変質し, まず絹雲母が生じ, ついで粘土鉱物に変化するため, カルシウムが溶脱されたこと示している。実際, 顕微鏡下で, 斜長石の核部に細かい絹雲母が生じている。黒雲母は風化作用が進行すると緑泥石化が生じ, さらにパーミキュライトから粘土鉱物に変化する。そのため, 黒雲母中のマグネシウムや鉄が溶脱され, 著しく減少する (図 5)。黒雲母を構成するカリウムはマグネシウムほど顕著ではないが, やはり風化作用の進行につれて減少し, 粘土鉱物への変質過程を通じて溶脱傾向がみられる。なお, 鉄は風化程度が高くなると, 一部 (N-3, N-11, N-20 の斜面) 減少するものもみられるが, 増加するものもみられ, 顕著な溶脱傾向を示さない。このことは鉄が溶脱しやすい傾向にあるといわれていることと必ずしも合致しない。顕微鏡下で黒雲母の劈開に微粒な鉄鉱がみられることから, 黒雲母は風化作用の進行に伴って不安定となり, 劈開中に沿って微量な磁鉄鉱 (Fe_3O_4) が晶出したためと思われる。また, 同じく溶脱しやすい元素であるナトリウムは新鮮な花崗岩とほぼ同じ値を示し, 明瞭な溶脱傾向がみられない。これは斜長石がもともと曹長石成分 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 成分が約 80%) に富み, カルシウムが少なく, 風化, 変質して曹長石化されてもあまり変化しないのであろう。アルミニウムは風化作用の進行につれて斜長石がカオリナイト ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) のような粘土鉱物に変化し, アルミニウムに富むようになるため, 逆に濃集する傾向をもつ。

5-3. 元素の溶脱傾向からの検討

風化作用が著しい急傾斜地崩壊危険区域では, カルシウムやマグネシウムなどの元素の溶脱傾向が明瞭である。特に, 芦屋市や西宮市の斜面の岩石の溶脱傾向をみると元素溶脱は明らかである (図 5)。斜長石中のカルシウムや黒雲母中のマグネシウムなどに注目すれば, 元素の溶脱傾向は風化作用の程度とほぼ合致している。このように元素溶脱による検討は斜面の風化作用の進行を定量的に表すことができる。特に, カルシウムやマグネシウムなど溶脱しやすい指標元素を用いて, 風化度の定量的検討を行うことは, 斜面の危険度を検討する上で有効である。

なお, 野外観察やハンマーの打撃音と元素溶脱による風化度との関係を見ると, きわめて風化作用の弱い六甲花崗岩でも, 元素の溶脱傾向がみられるなど (N-1 など), 六甲山地の花崗岩は, 野外での観察による風化度判定より風化作用が進行している。

このように風化作用が顕著な現象の特徴として, 1) 六甲花崗岩はマグマから固結時に, マグマ残液である熱水により自変質が進行し, もともと鉱物に変質していること, 2) 新鮮な六甲花崗岩でも六甲山地に数多くある断層などにより, 細かい割れ目が入り, 降雨が深部まで浸透すること, などがあげられる。このような作用により, 花崗岩は野外での状況以上に風化作用が進行したものと思われ, これが元素溶脱に反映されたのであろう。

6. 風化変質鉱物による風化度

花崗岩は風化作用の進行とともに鉱物に変質し, ついにはカオリンのような粘土鉱物に変化する。このように, 風化変質鉱

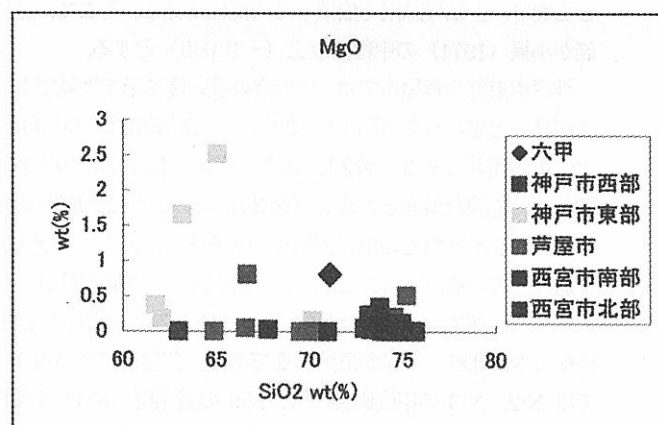
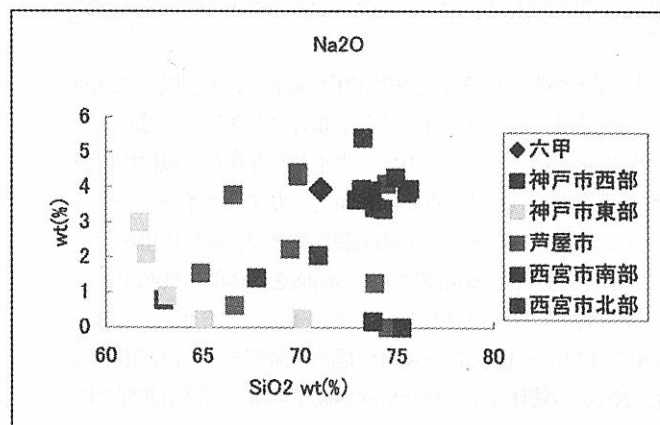
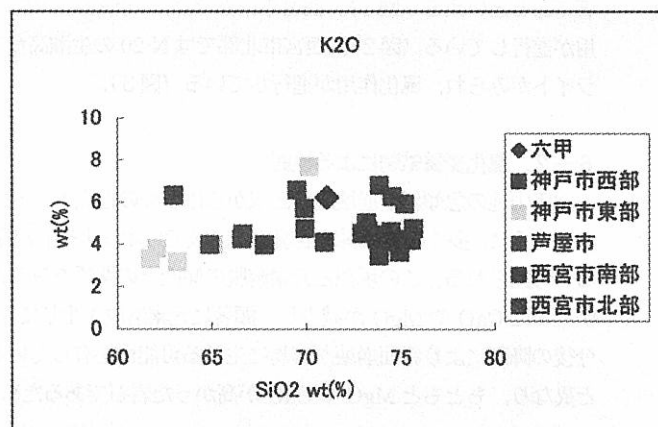
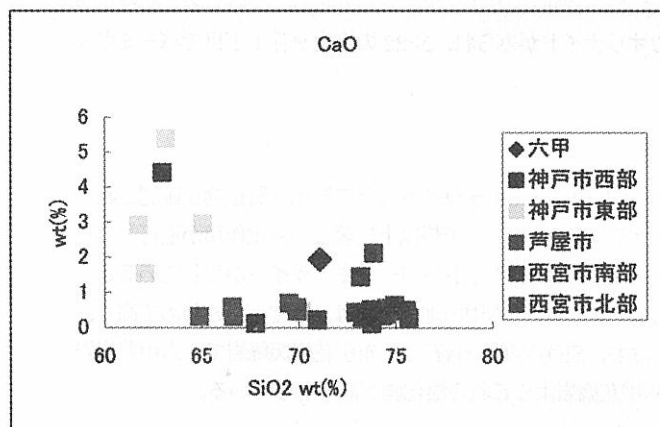
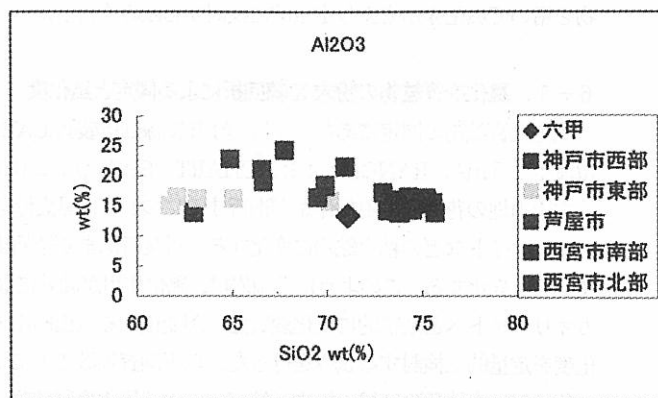
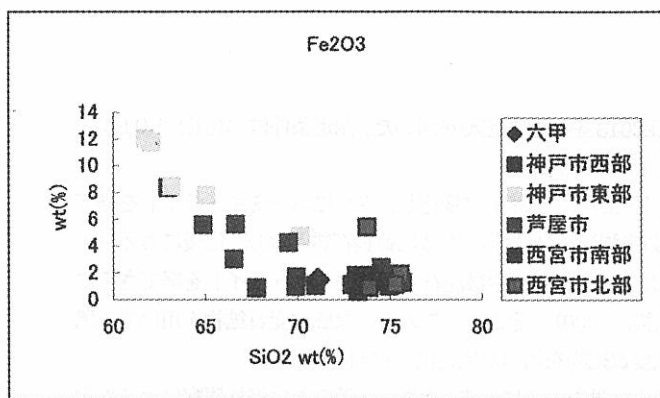


図5 急傾斜地崩壊危険区域の風化作用による元素の溶脱傾向を示す図

物を用いて風化作用をより定量的に検討する試みを行った。

6-1. 風化変質鉱物の粉末X線回折による同定と風化度

風化変質鉱物の同定にあたっては、粉末X線回折装置(CAT.NO.2013 型, 理学電気)を用いた。測定条件は、電圧: 40KV, 電流: 25mA, RANGE: 1k, CHART SPEED: 20mm/min である。

六甲山地の花崗岩は風化作用が進行するにつれて、黒雲母は緑泥石からイライトに変化し、さらにパーミキュライトを経てカオリナイトなどの粘土鉱物に変化する。斜長石はまず結晶核部で絹雲母化が生じ、さらに曹長石質となり、最後にカオリナイトへと変化する。このように花崗岩は、風化作用が顕著になるに従い、絹雲母や緑泥石からパーミキュライトを経てさらにカオリナイトへと系統的に風化変質鉱物に変化する(田結庄・高橋, 2000)。そこで、このような風化変質鉱物を用いて、風化度を定量的に検討する試みを行った。以下調査地域ごとに風化変質鉱物を用いた風化度の検討を行う。

急傾斜地崩壊危険区域の粉末X線回折による風化変質鉱物の同定結果を表3に示す。なお、比較のため野外観察による風化度判定も併せて示した。

神戸市西部(板宿地区)ではK-1の横尾2丁目、K-3の高取山町1丁目ではカオリナイトがみられ、風化作用が顕著であるといえる(図4)。神戸市東部(東灘区)ではK-9の本山北町5丁目ではカオリナイトとパーミキュライトがみられ、やはり風化作用が顕著である(図1)。芦屋市ではA-9の森北町7丁目、A-10の山芦屋町でカオリナイトが多量にみられ、風化作用が顕著であるといえる(図1)。西宮市南部では、一部を除いて、ほぼ全ての斜面にカオリナイトがみられ、やはり著しく風化作用が進行している(図2)。西宮市北部ではN-20の生瀬高台でカオリナイトがみられ、N-22の宝生ヶ丘1丁目ではパーミキュライトがみられ、風化作用が進行している(図3)。

6-2. 風化変質鉱物による検討

六甲山地の急傾斜地崩壊危険区域からは多くの地点で、カオリナイトやパーミキュライトなどの風化変質鉱物が確認された。このように、多くの急傾斜地崩壊危険区域でカオリナイトが存在していることから、予想以上に著しく風化作用が進行していると考えられる。この現象と元素溶脱の傾向との関係を見ると(図6)、カオリナイトやパーミキュライトが生じていると、明らかにCaOやMgOが減少し、顕著に元素溶脱が生じている。このように、六甲山地の斜面は、風化度がきわめて高く、今後の降雨により斜面崩壊が容易に生じる可能性を有している。なお、SiO₂が低い岩石は、布引花崗閃緑岩で、六甲花崗岩と異なり、もともとMgOやCaOが高かった岩石であるため、六甲花崗岩よりこれら酸化物が高くなっている。

7. 風化変質鉱物や元素溶脱による風化度と斜面の危険度評価との関係

急傾斜地崩壊危険区域において、小橋(1971)による危険度評価と風化度の関係を見ると、危険度評価が高い斜面の多くでカオリナイトがみられ、また、元素溶脱の傾向も顕著である。このように、危険度評価が高い斜面で、風化作用は著しく進行しており、少量の降雨で崩壊する可能性がある。そこで、地域別により詳細に見る。なお、危険斜面の条件として、危険度評価が小橋(1971)の中程度以上(−30点)とする。

神戸市東部や芦屋市では、中程度の危険度を示す地域でもカオリナイトが存在するなど風化作用が顕著で、予想以上に危険度が高いと思われる(図1)。さらに、西宮市南部の高い危険度を示す地域でも、カオリナイトが顕著に存在し、やはり、風化作用が顕著である(図2)。また、西宮市北部では中程度の危険度を示すところでも、カオリナイトが存在し、風化作用が顕著で、危険な斜面と言える(図3)。このように、危険度評価が中程度以上(−30点)の斜面で、カオリナイト、一部パーミキュライトなどの風化変質鉱物がみられ、さらにMgOがほとんど溶脱しているなど元素溶脱が顕著で、風化作用が著しく進行している。以下に、これら調査結果から、少量の降雨によって斜面崩壊が生じる可能性がある斜面を具体的に列記する。

神戸市西部ではK-1の横尾2丁目、K-3の高取山町1丁目が危険斜面である。神戸市東部ではK-4の岡本6丁目、K-8、K-9の本山北町5丁目、A-9の森北町7丁目、A-10の山芦屋町が危険斜面である。西宮市南部ではN-2、N-3の甲陽園神山町、N-9の豊楽町、N-11の美作町、N-19の鷲林寺1丁目が危険斜面である。西宮市北部ではN-20の生瀬高台、N-22の宝生ヶ丘1丁目が危険斜面である。

以上述べてきたように、六甲山地の急傾斜地崩壊危険区域では、小橋(1971)の調査項目で危険度点数が高い斜面で、カオリナイトが生じるなど予想以上に風化作用が進行していることが明らかとなり、少量の降雨でも崩壊の危険性が高いことが判明した。しかも、これら危険地域では開発がより進み、危険状況が増加しており、斜面災害が生じる危険性が高い。今後は、これら現状を地域住民に公開するとともに、継続して調査を行い、未然に災害を防ぐ必要がある。

表 3 急傾斜地崩壊危険区域のX線回折による風化度変化と野外の風化度

Area	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市	神戸市
Point	K-1	K-3	K-4	K-5	K-7	K-8	K-9	K-10	K-10
石英	++	++	++	++	++	++	++	++	++
黒雲母	-	-	+	-	+	+	+	+	+
緑泥石	+	-	-	+	-	-	-	-	-
斜長石	+	++	+	+	++	++	+	++	++
バーミキュライト	-	-	+	++	-	++	++	+	+
カオリナイト	+	+	-	+	-	-	++	++	-
風化度判定	-10	-10	-10	-10	-5	0	-5	-10	-10

Area	芦屋市	芦屋市	芦屋市	芦屋市	芦屋市	芦屋市	芦屋市	芦屋市	芦屋市
Point	A-9	A-10	A-12	A-12	A-12	A-12	A-14	A-16	A-16
石英	++	++	++	++	++	++	++	++	++
黒雲母	+	+	+	+	+	+	+	+	-
緑泥石	-	-	-	-	+	+	+	+	-
斜長石	+	+	++	+	+	+	++	++	+
バーミキュライト	++	+	-	-	-	-	+	++	-
カオリナイト	++	++	-	-	-	-	+	+	+
風化度判定	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10

Area	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市	西宮市
Point	N-1	N-2	N-2	N-3	N-3	N-3	N-5	N-9	N-11	N-18	N-19	N-20	N-22
石英	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
黒雲母	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+
緑泥石	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+
斜長石	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
バーミキュライト	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
カオリナイト	+	-	-	++	++	++	+	+	+	-	+	-	-
風化度判定	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	-10	-10	-10	-10	-5	-10

++ : 多量に含まれる + : 十分含まれる - : 含まれない

-10 : 風化している -5 : 中程度風化している 0 : 新鮮である

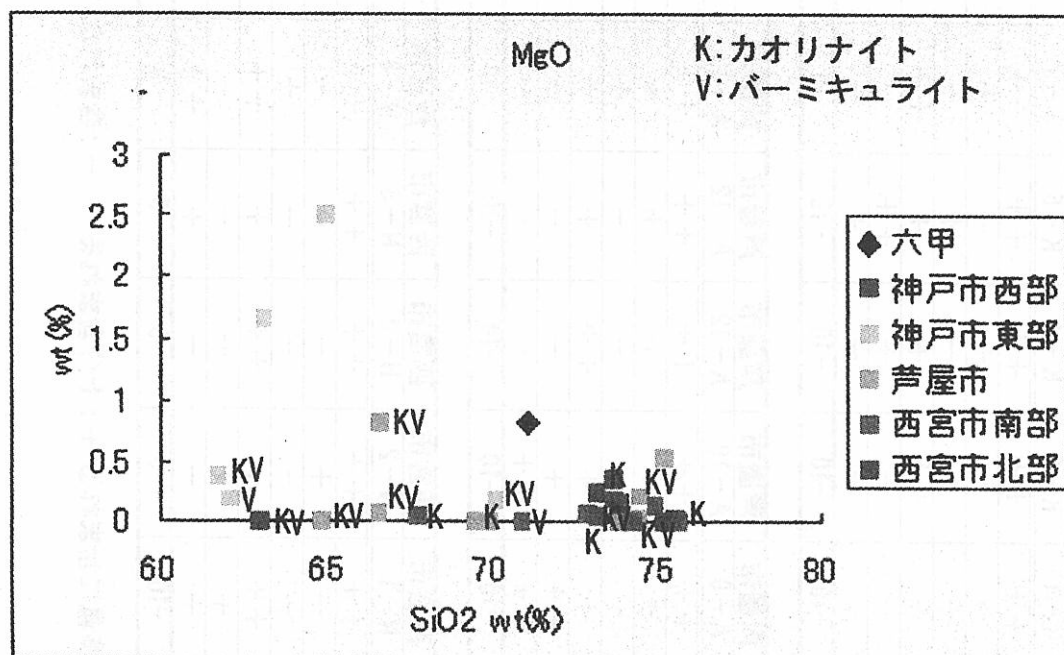
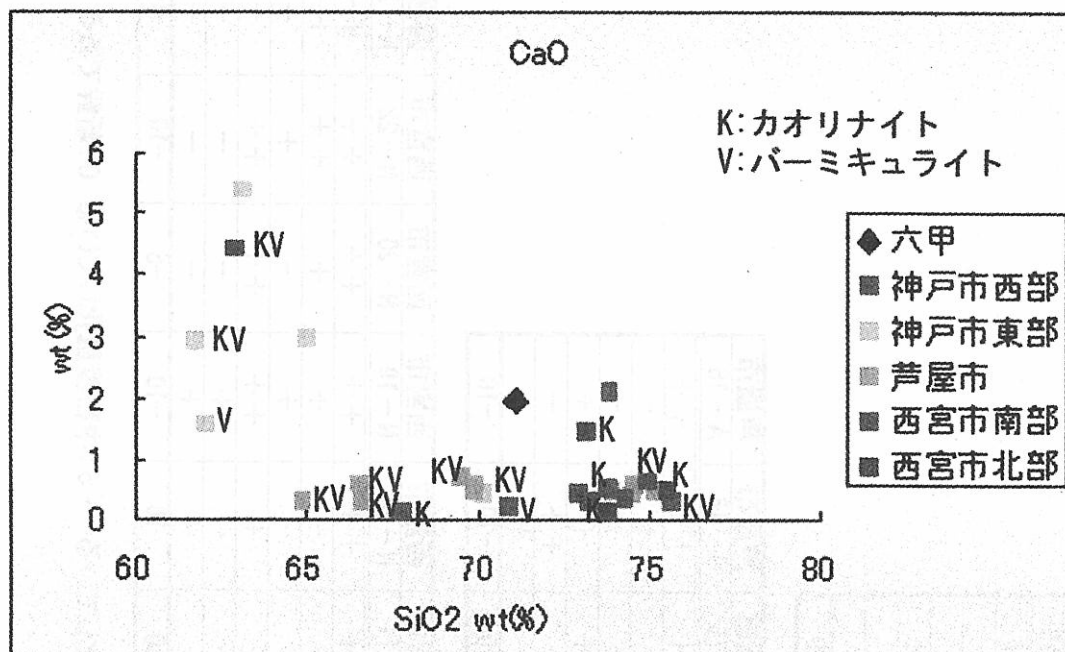


図6 急傾斜地崩壊危険区域の風化作用による元素の溶脱傾向と風化変質鉱物の関係

謝辞： 神戸大学発達科学部の寺門靖高助教授から X 線回折装置の使用について、助言、指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 芦屋市：芦屋市における急傾斜地崩壊危険区域の分布，芦屋市報，1997.
- 藤田和夫，笠間太郎：六甲山地とその周辺の地質，5 万分の 1 神戸市及び隣接地説明書，神戸市企画局，pp.1-58，1971.
- 藤田和夫，笠間太郎：地域地質研究報告，5 万分の 1 地質図幅「大阪西北」，地質調査所，pp.1-112，1982.
- 建設省：急傾斜地崩壊危険区域の判定基準「応用地学ノート」共立出版，pp.86-92，1990.
- 神戸市：急傾斜地崩壊危険区域および土石流危険渓流の分布図，広報こうべ，2002.
- 小橋澄治：斜面崩壊，「地すべり・斜面崩壊の実態と対策」山海堂，pp.395-580.1971.
- 西宮市：西宮市における急傾斜地崩壊危険区域の分布，西宮市報，2002.
- 田結庄良昭，藤田智子：兵庫県南部地震とその降雨による斜面崩壊，応用地質，37，pp.100-110，1996.
- 田結庄良昭，高橋優：兵庫県南部地震により損傷した塚付近の急傾斜地崩壊危険区域の産状と危険度判定の試み，Proceedings of the 9th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics，pp.69-74，1999.
- 田結庄良昭，高橋優：兵庫県南部地震による斜面崩壊地の花崗岩と鉱物の特性，Proceedings of the 10th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics，pp.127-132，2000.
- 田結庄良昭：兵庫県南部地震により崩壊した花崗岩斜面にみられる細脈の重要性，神戸大学都市安全センター研究報告，第 5 号，pp.211-222，2000.
- 田結庄良昭：兵庫県南部地震により崩壊した斜面の化学的特徴と風化作用，神戸大学発達科学部研究紀要，第 8 巻，pp.137-145，2001.

著者：1) 田結庄良昭，発達科学部人間環境科学科，教授，2) 小田哲二，総合人間科学研究科，大学院学生

Grade of Weathering of the Steep Slopes Due to the Alteration Minerals and Further Leaching of the Granitic Rocks in Mount Rokko Area

Yoshiaki Tainosho
Satoshi Oda

Abstract

The steep slopes are widely distributed in Mount Rokko. These steep slopes were composed of deep weathered granitic rocks. The grade of weathering of the granitic rocks is much heavier in western part of Mount Rokko compared with that of the eastern part.

Altered minerals in the steep slopes were identified by X-ray diffraction to estimate of weathering products. Chemical composition of the many rocks in the steep slopes was also analyzed by using EDXRF to check the grade of weathering. In the collapse of steep slopes, readily leachable is clear. The leaching tendency coincides with the grade of the weathering. It is possible that the examination by the chemical composition quantitatively shows the progress of the weathering of the steep slopes.

Many slope failures have heavy weathered minerals such as kaolinite by using X-ray diffraction. As the result of analysis of the EDXRF and weathered minerals, the tendency of weathering progresses is much further than the grade of weathering from field survey. From these results, it seems to be possible to generate a collapse by the heavy rainfall. The quantitative relationship between the possibility of amount of rainfall and collapse should be clarified.