

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）		所 属		役 職	
		（わかい あきひこ） 若 井 明 彦		群馬大学 大学院理工学府		教授	
②研究 テーマ	名称	地震地すべりの安定解析のためのすべり面の繰返し軟化定数の簡易決定法の開発					
	政策 領域	〔分野〕 地域課題分野（砂防）			融合 技術	（リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等）	
		〔公募課題〕					
③研究経費（単位：万円）		平成25年度	平成26年度	平成27年度	総 合 計		
		136	140	217	494		
④研究者氏名							
氏 名		所属・役職（※平成 年3月31日現在）					
（なし）							
⑤研究の目的・目標							
大地震時には山間地で地すべりが発生し、時には地塊が河道を閉塞する。このような長距離移動の直因は繰返し载荷によるすべり面の急速な強度低下（繰返し軟化）である。特にすべり土塊が地震動終息後に小さい有限な変位量で停止するかどうかは防災上の重要事項であり、これを合理的に予測することは適切な対策工の選定にも大きく寄与する。 こうした背景から、近年、地震地すべり斜面の安定性検討に、繰返し軟化を考慮した力学モデルに基づく有限要素解析が活用されることがある。この手法はすべり面となりうる材料が地震動による繰返し载荷によって次第に強度を低下させることを簡易なひずみ軟化モデルで再現するもので、任意の地震動波形の作用条件下での斜面の安定性評価を行うことができる。一方、解析結果の信頼性向上には解析に用いるパラメータの適切な設定が不可欠であるが、一般にすべり面材料を採取した室内力学試験は必ずしも容易でなく、既往の資料等を活用して、解析に用いる軟化特性の材料パラメータ（軟化定数）を推定せざるを得ないこともある。例えば、中越地震の芋川流域の地すべり箇所 の復旧にあたっては、繰返し軟化を考慮した有限要素解析結果が一部の検討において参照されたが、時間と予算の制約上、多くの軟化定数は既往の資料等からの推定によったのが実情である。 こうした状況を踏まえて、本研究では、2004年新潟県中越地震時の芋川流域の地すべり資料等に基づいて、入手容易な広域情報と簡易な現場調査等の資料から、有限要素解析に用いて軟化定数を適切に決定するための簡易な手法を提案することを目的とする。							

⑥研究成果

研究を構成する主な検討項目の概要と相互関係

研究成果の報告に先立って、三年間の研究成果を構成する各項目とその相互関係を図-1に示し、その後、各項目で得られた成果のうちの特に重要な項目の概略を順に述べる。

まず、国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所の資料提供により、中越地震時に芋川流域で発生した大規模地すべり群の地形・地質調査結果の再整理を行った。地震時に観測された変位量の大小と各要因との相関性について詳しく分析した結果、走向傾斜の重要性が確認された。

それに続いて、収集事例と分類を参照しながら、それらを精度良く再現するための解析、すなわち繰返し軟化を考慮した有限要素法に基づく地震シミュレーションに用いる材料構成則（UW軟化モデル）の軟化定数の適切な決定手順を検討した。検討にあたっては、走向傾斜などの重要因子と予測される変位量の大小レベルとの相関性に矛盾がない、合理的な決定手順となることを優先し、多くの試行錯誤計算を伴うパラメトリック・スタディによって、最も適当と思われる手順を求めた。

最後に、上記の定数決定手順の有効性を検証するため、土質試験結果との比較、実際の地震地すべりの有限要素法による再現解析などを実施するとともに、それらの現象の再現性を手掛かりに、より適切な軟化定数を同定するための手法を提案した。

すべり面の軟化（強度低下）と斜面の地震時滑動崩落（長距離移動）との関係

本研究成果の意義を理解する上で不可欠な、地震時のすべり面の軟化とそれに伴って発生する可能性のある土塊の長距離移動との関係について、単純な斜面例題を題材にして簡潔に述べる。

土塊の長距離移動を伴う滑動崩落は「上部土塊の自重による滑動力 $\sum T_s$ 」を「すべり面上のせん断強度の総和 $\sum R_f$ 」が継続的に下回った場合に発生するため、これらの比率 F_d （式(1)）を指標にとった評価手法が考えられる（図-2）。

$$F_d = \frac{\sum R_f}{\sum T_s} \quad (1)$$

ここで、 $\sum T_s$ については地震動による慣性力は含まないことに注意されたい。 $\sum R_f$ は仮想すべり面上にある有限要素の見かけの非排水せん断強度 τ_f の合計値に相当するもので、地震動による繰返し载荷とともに、载荷履歴に応じて各要素でそれぞれ徐々に低下していく。申請者の既往の研究成果に基づいて、本研究では τ_f は式(2)によって表されると仮定した（UW軟化モデル(2007)）。

$$\tau_f = \tau_{f0} + \frac{\tau_{fr} - \tau_{f0}}{A + \gamma^p} \gamma^p \quad (2)$$

ここに、 τ_{f0} および τ_{fr} はそれぞれ初期および残留状態のせん断強度 τ_f 、 γ^p は累積塑性せん断ひずみ、 A は強度低下の速度を規定する軟化定数である。 A は滑動崩落の発生を大きく左右する材料定数であり、本研究の最終目的はこの定数の簡易な決定手法を提案することである。

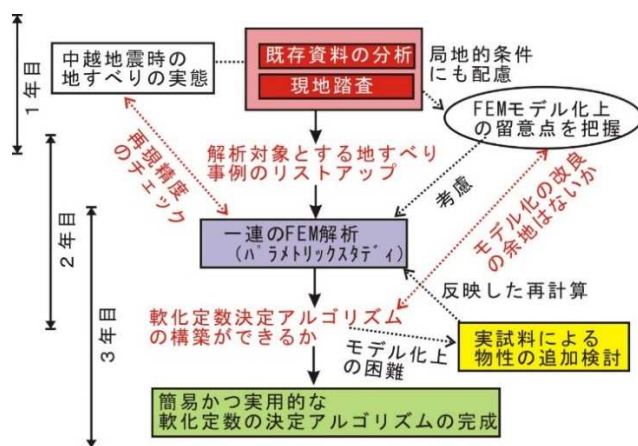


図-1 三年間の本課題研究の全体像。

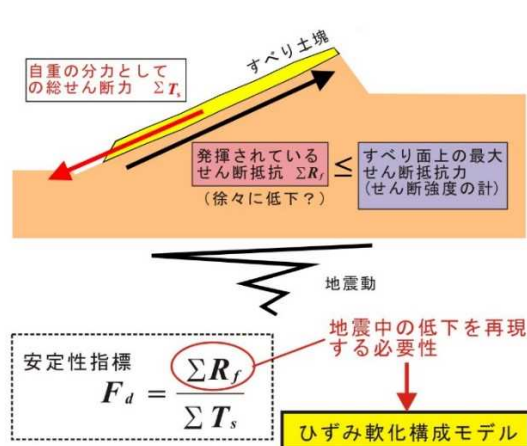


図-2 強度低下と滑動崩落の関係（概念図）。

⑥研究成果（つづき）

地震地すべり事例の収集と現地踏査、事例の整理

国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所から、地震後に実施された調査検討に関わる多様な資料を入手し、2004年新潟県中越地震の際、芋川流域で発生した多数の斜面変状のうち、大規模地すべりの事例を網羅的に収集した。それらのうち、土塊の移動量に大きな影響を与える素因のひとつと考えられる地層の走向傾斜（“流れ盤”についても、柎目盤と逆目盤とに細分類して分析精度を向上）に着目して、それぞれの分類ごとに、特徴的な地すべり箇所いくつかを現地踏査した（写真-1）。

収集した資料と現地踏査の結果に基づき、すべての対象事例について、その地形・地質の特徴および地震被害状況などとの力学的関連性を整理した。整理の際に着目した項目を表-1に、またこの整理方針に基づいて、地すべり箇所ごとに実態を分析した一覧表のごく一部（4箇所のみ）を表-2に示す。約80箇所の対象箇所について同様に既存資料を整理した。



写真-1 芋川流域の現地踏査の状況。

表-1 分析する際に着目した項目。

- ・地すべり土塊の地形的特徴（全長、幅、平均層厚、土量、平均地表面傾斜、地内平均斜度、すべり面傾斜、方向、想定すべり面の数）
- ・震央距離、地震動観測地点からの距離（次年度の分析に使用する地震動を考える際の参考）、地震動が特に増幅される尾根地形の有無
- ・地すべり地形の有無
- ・層理面の走向傾斜（柎目盤、逆目盤、受け盤）
- ・地下水位の高低
- ・地震被害の状況（変位量の大小）
- ・脚部の三次元形状（攻撃斜面の有無、狭窄部など自然停止要因となりうる地形の有無）

表-2 表-1 の項目に基づいて整理された各地すべり箇所の特徴（一部）。

番号	ID Num	地区名	ブロック名	全長 L (m)	幅 W (m)	平均層厚 H (m)	土量 (m ³)	平均地表面傾斜 (°)	地内平均斜度 (°)	すべり面傾斜 (°)	方向	震源までの距離 (km)	周辺観測地震波形との関連	地すべり地形 (%)	変位区分・変位量	
5	7	南平池谷	2	190	180	19.88	680,000	22.9	9	20	南東	6.128	K-NET 小千谷 9.594km	100	大	1～数十mの移動・滑降
20	70	峠塩谷川下流	4	120	140	12.50	210,000	26.1	14	25	南東	1.885	K-NET 小千谷 6.917km	75	大	1m～数十mの移動・滑降
40	24	楳木	1	300	120	15.00	540,000	14.9	16	—	東	4.971	K-NET 小千谷 8.834km	0	小	頭部に数十cmの開口亀裂
80	49	十二平	1	100	50	8.00	40,000	19.5	20	—	北西	3.327	K-NET 小千谷 8.105km	50	大	頭部に比高7～8mの滑降壁、水平方向に20mの滑動

	層理面形状による分類	想定すべり面数	地震動の増幅に効く三次元的な地形の特徴	地下水位	脚部が河川に洗掘された履歴 (攻撃斜面)	移動土塊が自然に側方の地形的効果で停止してしまうような三次元形状
	柎目盤	1	尾根部	90% 砂岩部と泥岩部の製力水への地下水賦存	あり(攻撃斜面)	芋川
	逆目盤	1	尾根部 旧期地すべり滑動による地盤の攪乱・脆弱化	90% 砂岩部への多量の地下水賦存	あり(攻撃斜面)	木沢尻川対岸
	受け盤	1	尾根部	95% 砂岩部に集中的に賦存した地下水	—	—
	逆目盤	1	尾根部	60% 砂岩部に集中的に付随した地下水	—	芋川

以上の事例群の整理を踏まえ、対象地域全体の地すべり被害の概況について全般的な考察を行うとともに、本研究の目的上重要である「地震時に観測された変位量の大小」と各要因との相関性について詳しく分析した。その結果、変位量の大小を大きく左右する要因が、層理面形状すなわち走向傾斜であることが確認され、これらを走向傾斜の分類（柎目盤、逆目盤、受け盤）ごとに整理したところ、特に柎目盤では大変位の観測された箇所が多い一方で、受け盤では小変位しか生じなかった箇所が多かった（これらを図上に示した図面の一部のみを図-3に示す）。なお、上述の分析結果の傾向とやや異なる観測結果（逆目盤であったにも関わらず大変位だった箇所、また、それとは対照的に、柎目盤であったにも関わらず小変位で留まった箇所）については、個別斜面の事情によるところが大きい可能性があるため、例えば、これらを含めてできるだけ多くの条件下の斜面の地震時挙動を現実と整合した形で予測できるような、合理的な軟化定数の決定法を提案することにした。

⑥研究成果（つづき）

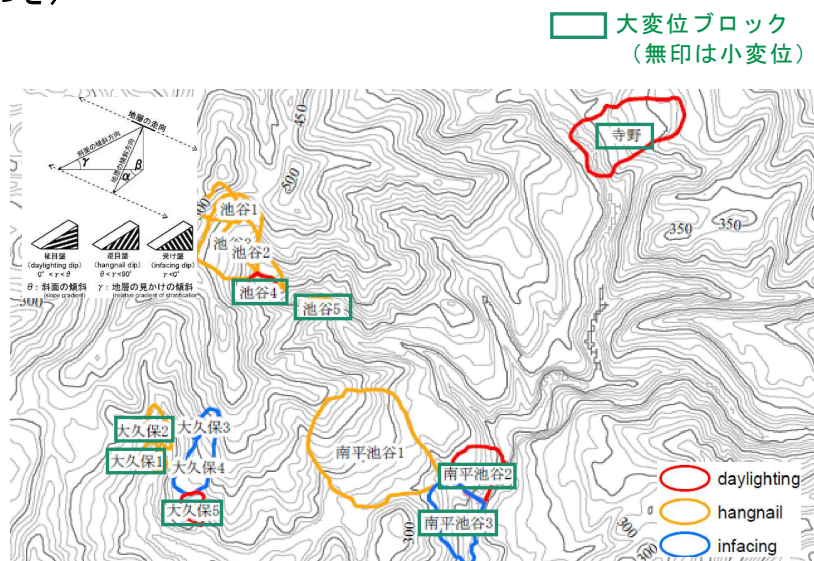
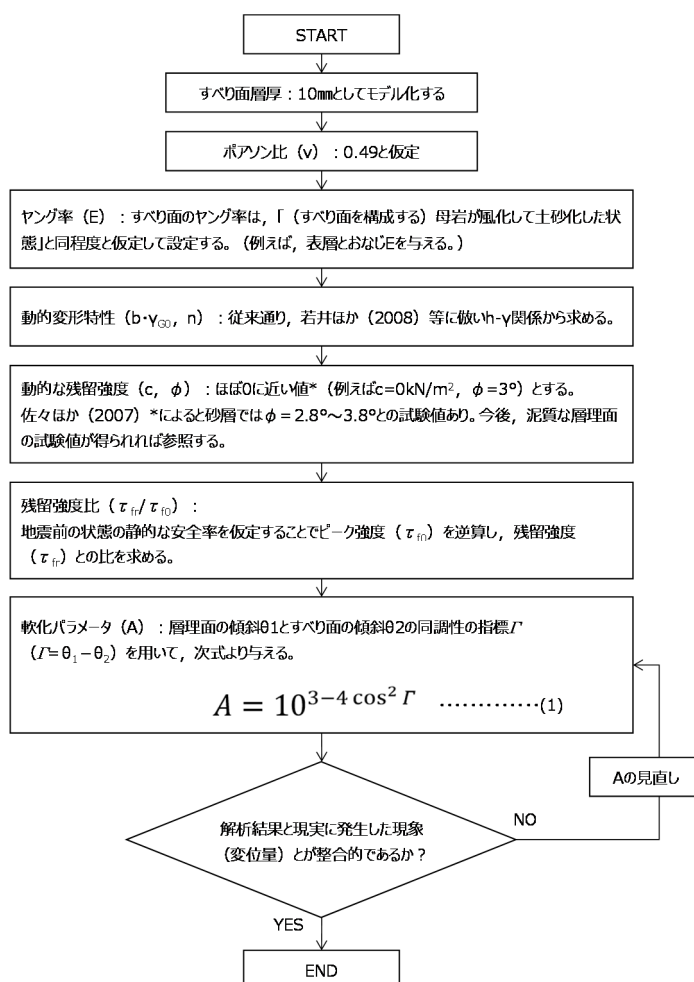


図-3 走向傾斜および観測された変位量の大小に基づく分類（図面の一部）。



* 佐々恭二, 福岡浩, 汪発武, 王功輝 (2007): 平成16年新潟県中越地震により発生した再活動地すべり地における高速地すべり発生・運動機構, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 2 pp.71-78.

図-4 UW軟化モデルにおける各材料定数の簡易な決定手法の提案。

⑥研究成果（つづき）

有限要素解析に用いる各材料定数の簡易な決定法の提案

三年間の研究の二年目以降においては、各材料定数を決定する手法を種々に変更しながら、芋川流域の多数の地震地すべり事例群の変位量予測を行い、より現実の観察結果と変位レベルの整合が取れるような定数セットの決定手法を、力学試験の結果も参照しながら、試行錯誤で模索した。本最終成果報告においては、その具体的な試行錯誤の経緯については割愛して、三年間の研究活動を終える段階において申請者らが最も優れた定数決定手法であると考えられるものを図-4のように提案した。

提案法に基づいて決定した定数による解析結果と実被害事例との比較（提案法の妥当性検証）

提案法の有効性検証、特に、長距離移動の発生有無の予測結果に強く影響する軟化定数 A が適切な値として決定されうるかどうかを検証するため、 A の値を種々に変えた一連の条件下での中越地震の観測地震動を用いた地震応答解析（有限要素解析）を行った。一連の予測結果における土塊の応答変位の時刻歴等を比較すると、ある A の閾値を境にして変位が際限なく継続する（長距離移動）場合と地震後に有限な値に収束する場合とに二分される。この A の閾値が、提案法に基づいて決定した A の値とどの程度の整合性があるかに着目して、提案法の妥当性を検証した。ここでは紙面の都合上、その一例として、中越地震時に大変位が発生した地すべり事例（大久保地蔵地区・第1ブロック）の結果についてのみ紹介する（位置や周辺地形の詳細についても省略する）。図-5はすべり土塊の水平変位の時刻歴（パラメトリック・スタディ）の結果である。

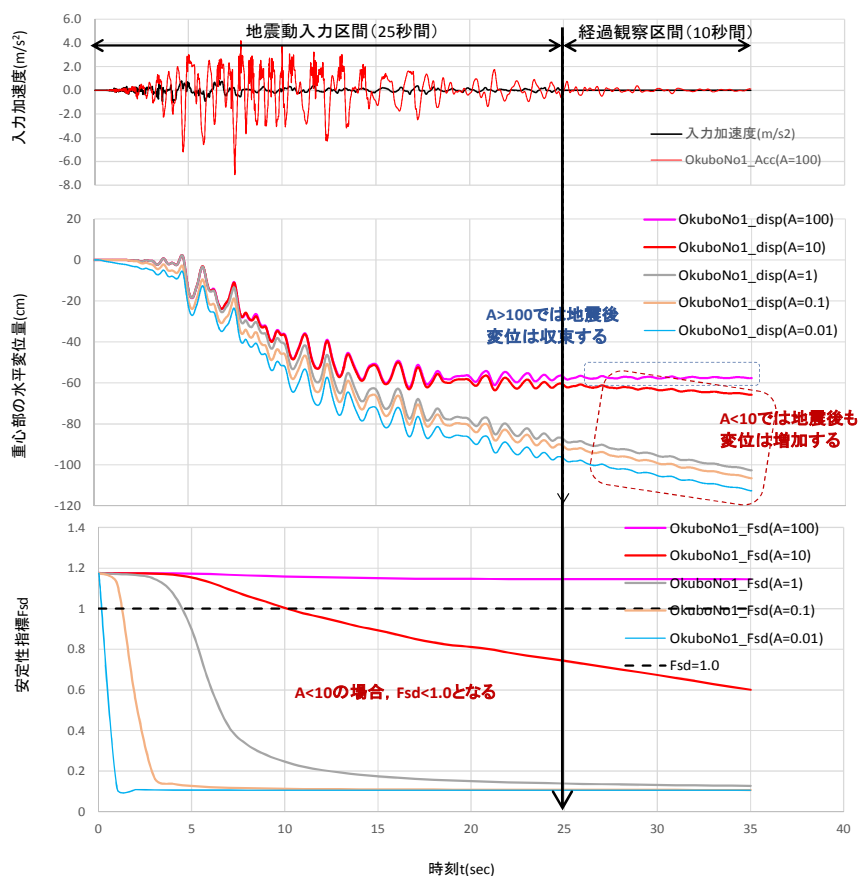


図-5 入力加速度（上），地すべり土塊の水平変位（中），安定性指標 F_d の値（下）の時刻歴。

上記事例の場合、提案法に基づいて得られる軟化定数の推定値 $A=0.18$ となる。これは上記パラメトリック・スタディにおける長距離移動の発生有無の閾値（およそ10程度）より小さい値となっているため、図-5から分かるように、この数値を採用した解析を行うと長距離移動が発生する結果となり、現実と整合する。本例は全体のうちの一例に過ぎないが、ほとんどの斜面事例において予測される変位レベルと現実の結果との間には整合性が認められ、提案法の有効性が確認された。

⑦研究成果の発表状況

[口頭発表]

田中頼博，若井明彦，高堂陶子，林 一成：地震地すべりの安定解析のためのすべり面の繰返し軟化定数の簡易決定法の予備的検討，第54回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.89-90，山形，8月(2015).

若井明彦，田中頼博，林 一成：地震地すべりの安定解析のためのすべり面の繰返し軟化定数の簡易な推定手法，第55回日本地すべり学会研究発表会講演集（発表予定），高知，8月(2016).

[査読付論文集等]

今後、日本地すべり学会誌（査読付）に、論文あるいは研究ノートとして投稿予定である。

⑧研究成果の社会への情報発信

[所内発表会]

2016年3月3日、国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所において、事務所長ほか約20名程度の所員の方々を対象として、三年間の研究成果の発表会をおこなった。発表に際しては、研究協力者である奥山ボーリング株式会社の田中頼博氏、林 一成氏も出席した。

⑨表彰、受領歴

特になし。

⑩研究の今後の課題・展望等

事例数としては少ないものの、地層の走向傾斜とすべり面形状との関係では変位の大小を説明できない事例（地層の傾斜とすべり面の傾斜の同調性が高い[すなわち Γ が小さい]）にもかかわらず、地震時の変位が小変位に留まった事例の解析の実施したところ、推定されるAを用いた場合には大変位を生じる解析結果となったこと）の地すべり機構の考察や、それを踏まえた安定度評価手法を開発することは今後の課題である。さらに解析事例やせん断試験結果との検証事例を増やして推定式の信頼性を高めることや、推定式の力学的意味を考察することなどが課題として挙げられる。

また、今回の対象地域の地質特性と類似した特性を有する堆積岩優勢の地域に対する地震地すべりの予測に際しては、提案法は一定の適用可能性が期待されるものの、異なった地質における同様の可能性については不明であり、今後の研究課題である。例えば、火山岩地域などで発生した地震における地すべり事例群の有限要素法による再現解析などを通じて、本研究において提案した軟化定数の決定手法の妥当性を再検証するとともに、必要に応じて、そういった地質を想定して修正された軟化定数の決定法などを新たに開発することが今後の課題として考えられる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

大地震時の山地部における地すべり災害で最も憂慮すべき事象のひとつが河道閉塞である。このような地塊の長距離移動が発生する直接的な原因は地震動に伴う繰返し載荷がすべり面を構成する材料を破壊して急速な強度低下（繰返し軟化）をもたらすためであるが、こうした事象は従来の降雨や融雪による再活動地すべりでは見られない地震時特有の現象である。防災上の視点から言えば、特に地すべり土塊が地震動終息後に小さい有限な変位量で停止するかどうかは極めて重要であり、これを合理的に予測することは、必要かつ適切な対策工の選定に大きく寄与する。

こうした背景から、近年積極的に地震地すべり斜面の安定性検討に活用されている、繰返し軟化を考慮した力学モデルに基づく有限要素解析については、解析結果の信頼性向上のために、解析に用いるパラメータの適切な設定が不可欠であることが指摘されている。同手法は、すべり面となりうる材料が地震動による繰返し載荷によって次第に強度を低下させることを簡易なひずみ軟化モデルで再現するものであるため、任意の地震動波形の作用条件下での斜面の安定性評価を行うことができる一方で、与える材料定数が不適切であると予測結果に十分な信頼性が得られない可能性がある。

適切な材料定数決定のための最も望ましい方法は、原位置試験あるいは現場採取試料（不攪乱試料）による室内試験に基づいて、材料の力学特性を直接測定した結果に基づくことである。しかし、一般にすべり面材料を採取した室内力学試験は必ずしも容易でなく、工期あるいは限られた予算内で所定の地すべり対策に着手するためには、時にはより安価な方法によって材料定数を決定せざるを得ない場合がある。こうした際に、解析に用いる材料定数、特に予測結果に大きく影響する軟化定数を、入手容易な広域情報と簡易な現場調査等を活用して推定することができれば、極めて有利である。

本課題研究の成果によって、今後の地すべり対策の際、超過地震力を想定した斜面の耐震性照査を有限要素解析に基づいて行うことがより容易になると期待される。引き続きこうした数値解析を援用した地震地すべり検討を推進するとともに、可能な箇所において実施した力学試験の結果とを照合することで、常に簡易な定数決定法の妥当性を担保していく努力が望まれる。