

西津軽地域における海成段丘崖の勾配と地質との関係

Relationships between Angle of Marine-Terrace Cliffs and Bed Rock Properties:
A Case Study of Nishi-Tsugaru Area, Aomori Prefecture, Japan

佐々木 良宜*・若月 強**・松倉 公憲***

Yoshinori SASAKI *, Tsuyoshi WAKATSUKI ** and Yukinori MATSUKURA ***

はじめに

海成段丘の段丘崖はそれより低位の段丘が波食棚や海食台としての侵食を受けている時の海食崖に相当すると考えられる。従って海食崖はもともと垂直に近い急勾配の斜面であったと推測される。この海食崖は離水後徐々に開析されて斜面勾配が緩くなっていく。同年代の海成段丘面でも段丘面の開析度が著しく異なることは以前から認められていて(太田ほか, 1971), それらは主に岩質に起因する可能性が大きく(吉川ほか, 1973), 開析過程において流水による線的侵食に加えて, ランドスライドの発生による塊状侵食の効果が大きいことが指摘されている(太田, 1969)。そこで本研究では, 西津軽地域に広がるM面相当の段丘崖を対象として, 段丘崖を構成する基盤岩質の違いが段丘崖の勾配に与える影響について考察した。

研究対象地域の概要

研究対象地域は青森県西津軽郡鯨ヶ沢町・深浦町・岩崎村にまたがる全長約 60 km に及ぶ海岸線

沿いの海成段丘崖である。この地域の海成段丘面は高位から順にH面, M面, L面に大別されている。H面は中期更新世に, M面は後期更新世に, L面は完新世(縄文海進時)に形成された段丘面である。M面の分布について第1図に示した。伊倉(1999)および現地観察によると, M面の段丘堆積物の厚さは数m以下であり, 段丘崖の比高に比べて薄いため, M面の前面の段丘崖斜面はほぼ基盤岩石からなるとみなすことができる。調査地域に分布する地質は, 第1図に示すような計12種類の地質が存在し, 北からMs, Amのシルト岩・泥岩地域, Ku, Az, Tsの火山岩および砂岩地域, Tm, Tt, Odの泥岩・凝灰岩地域, Or, Ot₃, Oa₂の火山岩・礫砂岩地域, Jpの凝灰岩地域が分布する。

太田・伊倉(1999)では, この海成段丘のランドスライドに着目し, その分布・形状と地域的差異を明らかにした。そして彼らは, この地域の海成段丘の開析には流水による線的侵食に加えてランドスライドによる塊状侵食の効果が大きく, 塊状侵食には地域的差異があると結論づけている。

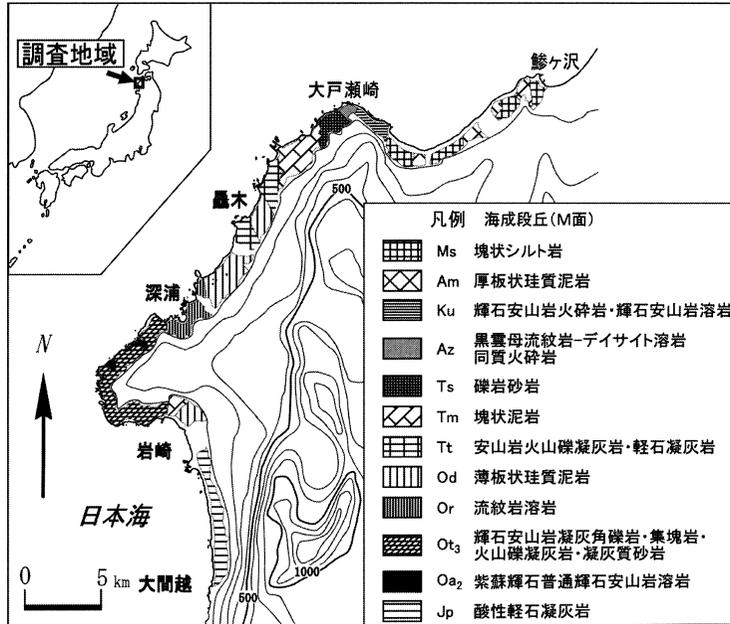
* 筑波大学理工学研究科
** 筑波大学地球科学研究科
*** 筑波大学地球科学系

段丘崖の勾配と地すべりによる段丘崖の開析度

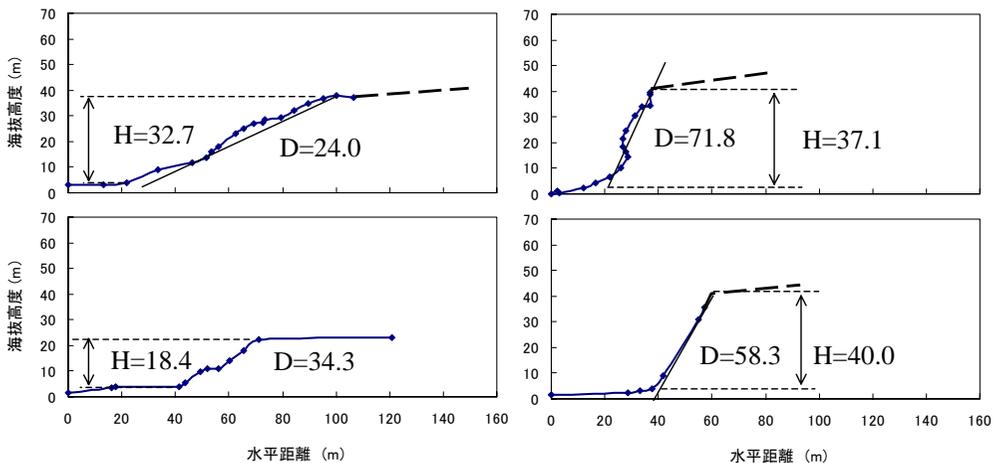
1. 段丘崖の縦断形の計測

調査対象とした M 面の段丘崖の勾配は，レーザー距離計を用いた現地の測量から求めた場合と，地形図（縮尺 1:2000，1:5000）から求めた．現

地測量および地形計測は約 250～750 m 間隔でおこなった．ただし，人工的に段丘崖が削り取られた法面の場合には調査の対象外とした．第 2 図は調査地域の典型的な段丘崖の縦断形の一例である．縦断形中央の急な斜面を段丘崖と認定し，その勾配と比高を計測した．



第 1 図 調査地域の概略と M 面の分布



第 2 図 調査地域の段丘崖の縦断形の例

D: 勾配 (°) H: 比高 (m)

求めた段丘崖の地質ごとの勾配と比高のそれぞれの最大値，最小値，平均を第 1 表に示した。泥岩・シルト岩・凝灰岩質の地域の斜面勾配は，平均値 30 ~ 35° と緩勾配であるが，火山岩質の地域の斜面勾配は平均 39 ~ 60° と急勾配であった。調査地域の比高は Jp で平均 55.8 m と最も大きい値を示し，Or では平均 20.3 m と小さい値を示したが，地質による差ははっきりと見られなかった。

2. 地すべりによる段丘崖の開析

段丘崖の地すべりによる開析を検討するため，それぞれの地質ごとに海成段丘外縁の総延長に対して地すべり地が占める割合を求めた。この地域の地すべりは現在形成されているものではなく，第四紀後期のある時期に形成されたものである（太田・伊倉，1999）。まず，伊倉（1999）を参考にして，地質ごとに地形図（縮尺 1:25000）上で海成段丘外縁の総延長を求めた。地すべり地形の判読は地すべり分布図（清水ほか，1985a,b; 清水・大八木，1987）を参考にするとともに，地形図（縮尺 1:25000）上で行い，地すべりによって開析された段丘崖が占める割合を求めた。

結果を第 1 表に示した。Oa₂ の地質はきわめて分布域が狭いため，Ot₃ とまとめて地すべりによる段丘崖の開析度を求めた。地すべりによる開析度は地質間の差が大きく，Ms，Am，Od，Jp では他地

域に比べ地すべりによる塊状の侵食を著しく受けていた。一方 Az，Ts では地すべりによる塊状の侵食を受けた跡が全くなかった。

岩石物性とスレーキング特性

1. 岩石物性の測定方法

野外においてシュミットロックハンマー反発値を計測し，その値を一軸圧縮強度に換算した。また各地区において段丘崖を構成する岩石を採取し，それらの岩石の密度を計測した。ただし，Od の地質のサンプルは採取できなかったため，測定の対象から除外した。各サンプルの乾燥重量と砂置換法で求めた体積の値から密度を計算した。さらに，段丘崖を形成する岩石中に含まれる鉱物を同定するために X 線粉末回折分析を行った。分析はバルク試料と水ひで集めた粘土試料に対しておこない，粘土鉱物の同定は試料をエチレングリコール処理及び加熱処理（150，350，450，550）をすることによりおこなった。測定には独立行政法人国際農林水産業研究センターの理学電気工業株式会社製の RAD - X を用いた。

測定結果を第 2 表にまとめた。Ts，Ku，Az，Or，Ot₃，Oa₂ の火山岩・砂岩の密度は 1.77 ~ 2.61 g/cm³ と大きく，Ms，Am，Tm，Tt，Od，Jp の泥岩・シルト岩・凝灰岩の密度は 1.12 ~ 1.56 g/cm³ と小さか

第 1 表 段丘崖の勾配と比高の計測値および地すべりによる段丘崖の開析度

地質	計測数	勾配 (m)			比高 (m)			地すべりによる段丘崖の開析度 (%)
		最大値	最小値	平均 (標準偏差)	最大値	最小値	平均 (標準偏差)	
Ms	7	42.7	21.8	34.0 (7.2)	59.3	40.0	46.5 (7.2)	26.9
Am	5	39.0	24.0	33.7 (5.9)	45.9	30.0	37.7 (6.4)	37.3
Ku	4	47.6	33.7	41.4 (6.2)	50.0	20.0	38.8 (13.1)	7.3
Az	5	68.2	36.9	47.6 (12.1)	32.0	20.0	24.8 (5.2)	0.0
Ts	4	50.5	34.4	39.1 (8.6)	50.0	15.0	30.8 (17.0)	0.0
Tm	3	36.2	33.5	34.7 (1.4)	55.0	18.4	31.1 (20.7)	19.1
Tt	3	42.5	16.5	30.4 (13.1)	30.0	23.4	27.1 (3.4)	18.0
Od	3	37.3	31.8	36.4 (4.2)	35.0	15.6	31.9 (14.9)	42.3
Or	4	51.0	30.9	41.9 (8.3)	45.0	13.2	20.3 (7.4)	3.7
Ot ₃	4	71.8	44.1	55.7 (11.7)	40.0	25.0	34.8 (6.7)	3.1
Oa ₂	3	82.3	43.6	60.5 (19.8)	40.0	8.0	27.3 (17.0)	
Jp	13	48.8	20.8	35.6 (6.9)	75.0	40.0	55.8 (10.1)	27.5

第2表 岩石物性値および鉱物同定結果

地質	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	岩石密度 (g/cm ³)	鉱物組成(バルク試料)						鉱物組成(粘土試料)			
			S	A	Pl	Py	Z	C	Sm	V	M	K
Ms	147.5	1.12	○	△	○	-	△	◎	-	◎	-	-
Am	681.0	1.48	◎	-	○	-	○	△	△	○	△	-
Ts	1152.7	2.39	△	-	○	-	○	○	-	○	△	-
Ku	2094.6	2.61	△	-	◎	-	-	△	◎	○	○	-
Az	1003.2	2.07	◎	○	◎	-	-	△	○	○	△	○
Tm	102.0	1.36	△	-	◎	◎	○	◎	◎	△	△	-
Tt	196.5	1.39	◎	◎	○	-	-	○	◎	△	-	○
Od	196.8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Or	1750.6	2.10	◎	○	◎	○	-	△	-	-	-	-
Ot ₃	1181.1	1.77	△	-	◎	△	-	○	◎	△	-	-
Oa ₂	2552.3	1.92	◎	◎	○	-	-	-	◎	△	-	-
Jp	88.1	1.56	○	△	◎	-	○	△	◎	△	○	-

S : シリカ鉱物 A : アルカリ長石 Pl : 斜長石 Py : 輝石 Z : 沸石 C : 粘土鉱物 Sm : スメクタイト
V : パーミキュライト M : 雲母粘土鉱物 K : カオリン鉱物岩石の鉱物組成の相対的評価
: 多量に含有 : 含有 : 少量含有 : 入っていない / : データ無し

った。また一軸圧縮強度は火山岩・砂岩では 1003.2 ~ 2552.3 kgf/cm² と大きい、逆に泥岩、シルト岩、凝灰岩では 88.1 ~ 681.0 kgf/cm² と小さかった。鉱物の含有量に関して測定を行っていないので含有量について厳密なことは議論できないが、X 線の反射強度が強くピークが立って大きいものは相対的に多く含まれていることとした。岩石中の粘土鉱物は Ms, Ts, Tm, Tt, Ot₃ でよく含まれており、そのなかでも Tm, Tt, Ot₃ ではスメクタイトがよく含まれていた。

2. スレーキング特性

調査地域の段丘崖を形成する岩石の乾湿風化(スレーキング)に対する抵抗性を明らかにするために Tanaka *et al.*(1996) の方法に従いスレーキング実験を行った。それぞれの岩石サンプルを 110 で 24 時間炉乾燥した後、重量を計測し、その値を初期状態の重量とした。次にサンプルを (1) 2.83 mm メッシュの篩にのせて 9 時間水に浸し、(2) 水から取り出した試料を 110 で 15 時間乾燥させ、(3) 篩の上に残っている岩石の重量を計測した。(1) ~ (3) の手順を 1 サイクルとして、これを 25 サイクル繰り返した。篩から落ちたものをスレーキングによる欠損分とみなした。

実験結果を第 3 図にまとめた。この図の縦軸は

スレーキングに対する残存率を示している。Tt, Tm の岩石は 1 サイクルで原形を崩し、粉々になった。Am は 4 サイクル目で大きく割れ目が入り、これ以降試料の徐々に玉ねぎ状に剥離していった。その他の試料はわずかながら重量が変化していったが、原形はとどめたままであった。結果から、Tm, Tt はスレーキングしやすいことがわかる。Jp は試料によってスレーキング風化するものとしなないものがあるという報告(猪俣, 2001) がなされており、本実験では Jp がスレーキング風化しなかったことから、猪俣(2001)の結果を引用し Jp(I) とした。

考察

1. 岩石物性やスレーキング特性と地すべりによる段丘崖の開析度との関係

岩石の一軸圧縮強度と密度が小さく、かつ鉱物中にスメクタイトを含んでいる地質(例えば Tm, Tt: 第 2 表)は、地すべりによる段丘崖の開析度が大きい(第 1 表)。理由は以下のように考えられる。スメクタイトの含有はスレーキング風化の原因として最も必要な条件とされている(例えば、Matsukura and Yatsu, 1982)。また、スメクタイトを含む岩石は地すべりを発生させやすいことも知られている(例えば、Yatsu, 1966, pp.23-34)。すなわ

ち上記のような岩石物性の条件をもつことはスレーキング風化に対する抵抗性が弱いことを示し、段丘崖はスレーキング風化によって剪断応力が低下し、地すべりを引き起こしてしまうと考えられる。

2. 一軸圧縮強度が段丘崖の勾配に与える影響
 段丘崖を構成する岩石の一軸圧縮強度と段丘崖の勾配の関係を第4図に示した。プロットされてい

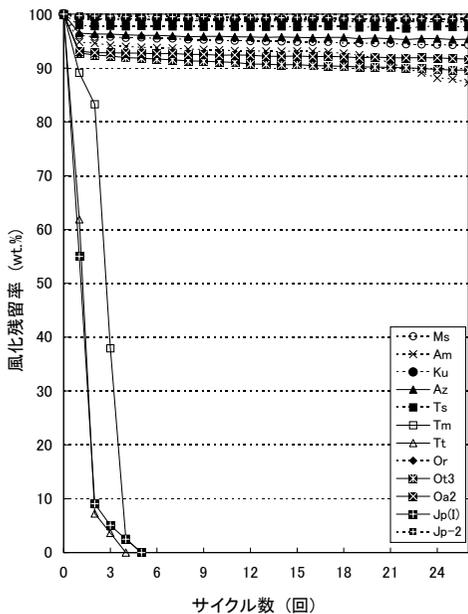
る点は地質ごとの段丘崖の勾配の平均値である。縦のバーは最大値と最小値の範囲をあらわしている。結果からみるとややばらつきがあるが一軸圧縮強度が大きいほど段丘崖の勾配が急になるという傾向が認められる。

3. 段丘崖の地すべりによる開析度が段丘崖の勾配に与える影響

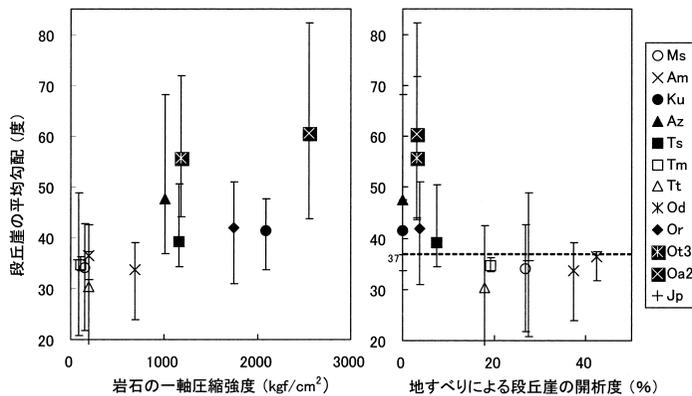
地質ごとの斜面勾配と段丘崖の地すべりによる開析度との関係を第4図に示した。段丘面外縁の地すべり密度を大きく2つに分けると、泥岩、凝灰岩質の地域では地すべり密度が大きく、安山岩、流紋岩の地域では地すべりが少ないことがわかる。これらと段丘崖の平均勾配との関係を見ると、約37°付近を境に地すべりの多いところと少ないところとに分けられている。地すべりの多いところでは緩勾配になっていて、地すべりの少ないところでは急勾配になっていることが示されることから段丘崖の勾配を緩くしている原因として地すべりの発生が考えられる。

4. 岩石物性 - プロセス (地すべり) - 地形 (段丘崖の勾配) の関係

岩石物性の結果、鉱物同定の結果、スレーキング実験の結果と地すべりによる段丘面外縁の開析度と段丘崖の勾配との関係をまとめ、グループ分けして第3表に示した。



第3図 スレーキング実験結果



第4図 岩石の一軸圧縮強度・地すべりによる段丘崖の開析度と勾配の関係

第3表 岩石物性 - 段丘崖の地すべり - 段丘崖の勾配の関係

地質	グループ1				グループ2		グループ3			グループ4		
	Tm 泥岩	Tt 凝灰岩	Od 泥岩	Jp 凝灰岩	Am 泥岩	Ms シルト岩	Az 流紋岩	Ot ₃ 安山岩	Oa ₂ 安山岩	Ku 安山岩	Ts 砂岩礫岩	Or 流紋岩
岩石の一軸圧縮強度(kgf/cm ²)		小 90~200			小 150~650		大 1000~2500			大 1000~2000		
岩石の密度(g/cm ³)		小 1.36~1.56			小 1.12~1.48		大 1.77~2.07			大 2.10~2.61		
岩石中のスメクタイトの量		多			ほとんどない		少			ほとんどない		
岩石のスレーキング風化のしやすさ		大			ほとんどしない		ほとんどしない			ほとんどしない		
地すべりによる段丘崖の開析度(%)		大 18.0~42.3			大 26.9~37.3		小 0~3.1			小 0~7.3		
段丘崖の平均勾配(°)		緩 30.4~36.4			緩 33.7~34		急 46.7~60.5			急 39.1~41.9		

グループ1：泥岩，凝灰岩質である Tm, Tt, Od, Jp は岩石の一軸圧縮強度が小さく，岩石の密度も小さい．また，鉱物同定からみた粘土鉱物の量は多く，その中のスメクタイトの量も多い．そして，スレーキング速度はきわめて速い．そのため段丘面外縁での地すべりの発生頻度が大きく，地すべりにより段丘崖は勾配を緩くすると考えられる．

グループ2：シルト岩，泥岩質である Ms, Am はグループ1と同様に一軸圧縮強度と，岩石密度がともに小さい．しかし，鉱物同定からみた粘土鉱物の量はシルト岩，泥岩にしては比較的少なく，その中のスメクタイトの量も少ない．これらの岩石は Tm, Tt ほどではないがスレーキング風化の影響を受ける．このグループも段丘面外縁の地すべりは発生しやすく，地すべりにより段丘崖の勾配を緩くしていると考えられる．

グループ3：安山岩，流紋岩質である Az, Ot₃, Oa₂ は一軸圧縮強度と岩石の密度がともに大きい．鉱物同定からみた粘土鉱物の量は火成岩にしては比較的多く，その中のスメクタイトの割合も多い．しかし，スレーキング風化に対してはほとんど影響がない．これらの性質では段丘面外縁の地すべりは起きにくく，段丘崖は急勾配を保つと考えられる．

グループ4：安山岩，流紋岩質である Ku, Ts, Or はグループ3と同様に一軸圧縮強度と岩石密度がともに大きい．鉱物同定からみた粘土鉱物の量はきわめて少なく，スレーキング風化をほとんど受けない．これらの性質では段丘崖の地すべりは起きにくく，段丘崖は急勾配を保つと考えられる．

以上よりグループをさらに2つに大別できる．グループ1, 2の凝灰岩，泥岩地域は岩石強度と密度がともに小さい．一部の地質は岩石中にスメクタイトが多く含まれていてスレーキング風化しやすい．そのため段丘崖で地すべりを引き起こし，段丘崖が開析され段丘崖の勾配を緩くしている．一方，グループ3, 4の流紋岩，安山岩地域は岩石強度と密度がともに大きい．岩石中に含まれるスメクタイトは比較的少なく，スレーキング風化しにくい．そのため，段丘崖には地すべりがほとんど発生せず，塊状侵食を受けないため，段丘崖は急勾配のまま保存されている．

結論

西津軽地域の段丘崖は12の地質で形成されており，それらは段丘崖の勾配や段丘崖の地すべり分布密度，段丘崖を構成する岩石物性などより5つ

のグループに分けられる。

グループ1,2の地域を構成する凝灰岩,泥岩は岩石強度が小さく,密度も小さい。岩石中にはスメクタイトが多く含まれていてスレーキング風化しやすい。その性質が段丘面外縁で地すべりを引き起こし,段丘崖が開析され段丘崖の勾配を緩くしている。

一方,グループ3,4地域の流紋岩,安山岩は岩石強度が大きく,密度も大きい。岩石中のスメクタイトは比較的少なくしか含まれておらず,スレーキング風化しにくい。その性質が段丘面外縁の地すべりを少なくし,塊状の開析が行われなため,段丘崖の勾配はより急のまままで保存されている。

謝辞

野外調査においては生命環境科学1年の小暮哲也氏に協力をいただきました。また,独立行政法人国際農林水産業研究センター環境資源部の八田珠郎主任研究官と小口千明博士にはX線回折分析等の機器の使用や,結果の解析に多くの助言・協力をいただきました。さらに,青森県庁農林水産部林政課森林計画班の皆様,鱈ヶ沢町役場,深浦町役場建設課の熊沢氏,岩崎村役場企画課の神林氏には地図などの資料を提供していただきました。測量に使用したレーザー距離計は筑波大学陸域環境研究センターからお借りしました。以上,お世話になった皆様に深く感謝申し上げます。

文献

伊倉久美子(1999):白神山地西縁地域の海成段丘の編年の最終間氷期の古海面高度。東京都立大学理学研究科修士論文。

猪俣 豪(2001):津軽十二湖における地すべり性大規模崩壊について。筑波大学第一学群自然科学類卒業論文。

太田陽子(1969):海成段丘に関する二,三の地形的問題。地理,14(11),20-24。

太田陽子・当間唯弘・須磨重允(1971):台地の構造と開析。日本地理学会予稿集,1,10-11。

太田陽子・伊倉久美子(1999):西津軽地域の海成段丘上に発達する古ランドスライドの分布と意義。地理学評論,72,829-848。

清水文健・大八木規夫・井口 隆(1985a):地すべり地形分布図 深浦。国立防災科学技術センター 防災科学技術資料 No.96。

清水文健・大八木規夫・井口 隆(1985b):地すべり地形分布図 岩館。国立防災科学技術センター 防災科学技術資料 No.96。

清水文健・大八木規夫(1987):地すべり地形分布図 鱈ヶ沢。国立防災科学技術センター防災科学技術資料 No.116。

吉川虎雄・杉村 新・貝塚爽平・太田陽子・阪口豊(1973):『新編日本地形論』東京大学出版会,392p。

Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1982): Wet-dry slaking of Tertiary shale and tuff. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 3, 25-39.

Tanaka, Y., Hachinohe, S. and Matsukura, Y. (1996): The influence of slaking susceptibility of rocks on the formation of Hoodoos in Drumheller Badlands, Alberta, Canada. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 17, 107-121.

Yatsu, E. (1996): *Rock Control in Geomorphology. Sozoshu*, 135p.

(2003年6月3日受付,2003年7月7日受理)