チリ地震津波による侵蝕と堆積について

——とくに、岩手県三陸海岸高田松原附近を中心として——

今野 円蔵・北村 信・小高 民夫・片岡 純*

昭和35年5月23日午前4時10分(日本時間)南米チリ国太平洋沿岸に発生した大地震に伴った津波は太平洋を横断し、翌24日午前日本列島太平洋沿岸の各地に多大の被害をおよぼした。この津波は気象庁によつてチリ地震津波と命名された。私共は同5月25日より31日までの7日間三陸沿岸南部地域の被害状況調査を行った。ここに報告するものは、その中でとくに地形変化の著しかった岩手県高田市高田松原附近の侵蝕と堆積にかんする問題のみをとりまとめたものである。

I. 津波による地形営力と Process について

津波という海水の異常流動は1つの地形営力(Geomorphic Agency)であつて、この営力はさらに、津波の来襲時あるいは引退時の海水の流動状態によつて、1. 布状流(Sheet-flow)、2. 集中流(Linear-flow)、3. 渦流(Eddy)の3つの型に分けることが出来る。これらの Agencies によつて、物質をある位置から他の位置へ移動させたり、溶解させたりして地形を変化させる地形プロセス(Geomorphic Process)は主として物理的あるいは化学的な作用によるもので、その型式は大別して Degradation と Aggradation に分けることが出来る。Degradation とされるものには侵蝕(Erosion)と塊状移動(Mass-wasting)が含まれ、Aggradation とされるものには堆積(Deposition)が含まれるのである(第1表)。

Geomorphic Agencies		Geomorphic Processes	
Tsunami	Sheet flow	Degradation	Erosion
	Linear-flow		Mass-wasting
	Eddy	Aggradation	Deposition

Table 1. Geomorphic Agencies and Processes of Tsunami

II. 侵蝕(Erosion)と運搬(Transporta-

tion)について

津波による海水の3つの異った流動状態下における侵蝕および運搬の基本的な問題についてそれぞれ考察を進める。

1. 布状流(Sheet-flow)の場合：津波が Sheef-flow となつて汀段々丘堆積物・砂洲・自然堤防ないし人造堤防の前面あるいは背面に全面攻撃を与えると、先づ第1に、それらを構成している物質は水を吸収して軟弱化作用(Loosening)をうけて、分離され、次で流水によつて攜みとられる。この攜みとられる Process を Fluviraption という。流水中の懸濁物となつた物質・岩屑は水と共に Corrasion および Abrasion を行ふ力となつて、対象物の破壊・侵蝕を助長する。この総合された働きが Erosion であり、物質・岩屑の運搬(Transportation)も当然同時に行われる筈である。(第1図)

Fig. 1 Sheet-flow attacks whole surface of artificial levee.

2. 集中流(Linear-flow)の場合：津波の

流水がある条件のもとに集中して Linear-flow となる場合は、それまで布状流として一様に働いていたエネルギーが集中され、より強い力を発揮して、部分攻撃を行うことになる。この際も、Erosion の対象となつているものの構成物

質は水の吸収・滲潤によつて軟弱化され、Flu-

viraption を行い、水と共に対象物の Corrasion を行う。第2図は Sheet-flow の津波が堤防の低い部分に Linear-flow となって流れ込み、Side erosion と Deepening が Fluviraption および Corrasion によつて進められて行く状態を示したものである。また、陸域に侵入した海水が引退する際にも Sheet-flow より Linear-flow への変化がみられ、第3図に示した様な Gully-ing が行われて流路が決定され、下刻作用をはじめ。堤防などの両側に沿って流れる Linear-flow による Erosion の例は最も多く、主として堤防の^{のりさき}法先を削っている(第4図)。これら Linear-

Fig. 2 Linear-flow attacks lower portion of artificial levee.

Fig. 3 Sheet-flow margining into Linear-flow.

Fig. 4 Withdrawal of Tsunami actively cutting the inner side of artificial levee.

flow が汀段々丘のきれ目・Sand Bar や Levee の低所、あるいは、川の導水門・川口などに最初に攻撃を与えたであろう事はそれらの部分が他よりも破壊・侵蝕が著しい事でも裏付けされる。Linear-flow の際にも Fluviraption, Corrasion のみで侵蝕・変形されるのではなくて、後述する Mass-wasting も同時に行われてる場合が多い。

3. 渦流 (Eddy) の場合：津波の場合に限らず、流れは障害物につきあたつて、それをのり越えるか、あるいは、迂廻して流れる。障害物をのり越えて滝を作り、落下反転 (tumble over) して横軸の渦流を作つた水は衝撃の力と Fluviraption の働きで滝の下に物質を侵蝕する。さらに、Fluviraption によつて水中にとりこまれた岩屑は Corrasion を助長し、第5図に示した様な侵蝕の跡を残す。障害物を迂廻

Fig. 5 Scouring of Eddy current formed by falling water.

Fig. 6 Eddy current forming Eddy hole.

した水はその背後に縦軸の渦流を作り、第6図に示した様な渦穴 (Eddy hole) を堀る。この際、Eddy hole の中に落込んだ周辺の岩屑は Corrasion を助長し、穴を拡大する。

III. Mass-wasting ついて

Flowage type	Slow flowage	{	Rock creep, Soil creep
	Rapid flowage		Talus creep, Solifluction Rock glacier creep
Sliding type	Slump	{	Earth flow
	Debris slide		Mud flow
	Rock slide		Debris avalanche

Table 2. Two types of Mass-wasting
after Sharpe (1938)

Mass-wasting は最近とくに注目されてきた Process で、岩石・岩屑・土砂あるいは土壌が重力によつて斜面の下方に移動する現象である。Mass-wasting の現象は、Erosion とは明らかに区別されるべき Process で、第2表に示す目に、さらに、Flowage type と Sliding type に大別することが出来る。

今回の調査の結果、津波による Mass-wasting の代表的なものは Rapid flowage の Earth flow と Sliding type の Slumping に2大別することが出来た。後者は何等かの衝撃をうけて後方に廻転を行いながら、Earth mass、あるいは、Rock mass の一部分が下方に移動する現象で、その結果 slump した Mass は反対向きの傾斜を示しているのが特徴である。

Earthflow は、斜面を構成している土砂が、Mass として廻転して slide するのではなく、過剰に水を吸収して流動する結果形成されるもので、その典型的なものは第7図に示した

Fig. 7 Earth flow (1).

堤防の内側などは単に土盛りしたに過ぎないものが多く、今回の調査でもこの部分に最も多く観察された。Earth flow が促進され、第8図の様に、外側の斜面のみが辛うじて残された場合津波の引退時あるいは再度の来襲時には容易に切断され、第9図に示す様な Passage Stream (Linear-flow) によつてさらに変形され、崩壊堆積物の形態まで変化させて仕舞っている例が

Fig. 8 Earth flow (2).

Fig. 9 Modification of Passage stream.

Fig. 10 Widening of Slumping and Earthflow.

しばしば観察された。

Slumping は河流・波浪あるいは人為的な衝撃・斜面基部の掘下げなどによつて生じ易く、明らかに Fluviraption, Corrasion などの Erosional Process と交互に行われる。第10図に示した例は、表土の植物の根の多い粘土質の部分とその下位の軟弱な砂の流動(Earth flow)によつて Slumping を起し、次第に流路の幅を増して行く状態を示したものであり、当然流水による Fluviraption および Corrasion などの Erosion も同時に行われているのである。Mass-wasting の場合も岩屑の Transportation は同時に行われ、切り離して論ずるわけには行かない。

IV. 堆積物 (Sediments) について

津波による堆積物の調査は今回の調査の最大の目的の1つであつたが、海底の砂泥が侵蝕され、津波で運搬されて、陸地内に堆積物として残されたものであるとはつきり云えるものはほとんどなく、大部分は陸地内の侵蝕・崩壊された岩屑その他が位置を変えて堆積したに過ぎないものが多かつた。これは、今回の津波が非常に静かに来襲し、単に海水準の異常な上昇という状態にすぎなかつた為で、海底での侵蝕も少く、また、波の運搬能力も少なかつたということ物語るものといえよう。堆積物について述べるにあつて、侵蝕—運搬—堆積という連続的 Process をよく把握するため、侵蝕された場所との関係の明瞭なものから順次述べる。

1. Mass-wasting で供給された堆積物：

Erosionとは異つて、Mass-wastingのProcessには必ずその崩壊物あるいは堆積物が伴わなければ解釈が出来ないものであり、Earth flowの場合でも Slumping の場合でも崩壊物は必ずその周辺部に残されている。第7・8・9図に示す様に、Earth flowの崩壊土砂は、その後の侵蝕によつて乱されない限り、堆積物として残される。この際の堆積物は全く淘汰作用をうけておらず、混然としたものである。Slumpingによる場合は塊状で、しかも、階段状に配列するものが一般的で、さらに細かく分裂して元々の構造を複雑化している。

Erosion と Mass-wasting は交互に行われることが多く、堤防の前面や背面の崩壊物中にも他から侵蝕運搬されてきた岩屑が混入することも当然考えられ、厳密な意味では Mass-wasting のみによる堆積物と限定することは非常に困難ある。

2. 侵蝕された場所の周辺に堆積したもの：

これは侵蝕された場所との関連性が明瞭なもので、堤防の前面を侵蝕してその場に岩屑を残しているもの、Scouringによる岩屑あるいは道路・鉄道などのバラスをすぐ内側の低所に移動させたものなどで、一般に粒度の粗いものが多い。また、第11図に示した様に、第1回の津波引退時の侵蝕によつて出来た Gully に沿つて、第2・第3回の津波が Linear flowとなつて噴

Fig. 11 Gullies and Spreads formed several oscillations of Tsunami.

流状に來襲し、附近にあつた岩屑などを Gully の先端部に撒きちらしている場合も一応この項のものに属する。

3. 侵蝕された場所から離れた場所に堆積したもの：

津波によつて破壊・侵蝕された岩屑その他が、そこからかなり離れた場所まで運搬されて堆積するのは最も普通に考えられるところで、堆積物そのものから供給源をたづねることは仲々困難である。従つて、何処から運搬されてきたのか不明の堆積物すべてがこの項に該当する。津波による運搬は浮流と掃流によるもので、とくに浮流は乱流の影響によつて相当のエネルギーをもつものと考えられる。運搬のエネルギーが次第に減少するに従い、堆積物の粒度が減少し、水平的な拡がりの上にも、垂直的な分布の上にも、いわゆる Grading の現象があらわれてくるのが特徴である。また、流水の方向を印す漣痕が堆積物の表面に残されていることがしばしばあり、上述の水平的な拡がりをもつ Grading と共に、堆積物を供給した方向を解釈することに大いに役立つている。

4. 海洋底より直接運ばれたもの：可成り広範な地域に亘つて薄い Film 状（厚さ約0.5cm）に分布している沈澱砂泥中に Nonion, Elphidium などの浅海性底息性有孔虫や Coscinodiscus など海棲浮遊性珪藻の死殻が発見され、これらの砂泥が直接海洋底から運搬されてきた可能性も考えられる。しかし、これらの死殻は、すでに海岸の砂浜や汀段々丘堆積物とか堤防建造の土砂中にすでに入つていて、そこから侵蝕・運搬されてきたとも考えられる可能性がある。

したがって、実際には海棲底息性の生きた儘の生物が堆積物中に混じているか否かで決めなければならない。

津波後の高田松原海岸の砂浜でみられた例では、生きた儘の貝類 (*Spisula sachalinensis* (Schrenck), *Haliotis japonica* Reeve, *Fulvia mutica* (Reeve), *Chlamys nipponensis* Kuroda) やナマコ、ウミウシなどが打ちあげられているので、それらの棲息範囲内の沈溺物は津波によって陸地内に運ばれ、多少とも堆積物中に混じているものと推論することが出来る。

V. 広田湾高田松原海岸附近の地形変化 の実例について

広田湾の全奥行は約 10km、湾口北岸の広田崎が南部の御崎岬に比して延びてない為、湾口は東に面し、その幅は約 10km である。湾中央部には西向き、あるいは東向きの多数の小湾が発達し、東向きの大沢・館・只越などの小湾は直接外洋に面した形となつている。これら湾中央部の小湾は両岸共数 10m の海蝕崖によつて取囲まれ、砂浜の発達は少く、多くは砂礫浜で、巾も広く、海に向つて急傾斜を示している。湾頭部は高田松原海岸といわれる湾頭砂洲 (Bay-head Bar) で構成され、その背後には古川沼といわれる潟 (Lagoon) がひかえ、さらに、その背後の海岸平野は気仙川の古い三角洲 (Delta) によつて形成されている。また、高田町北東の氷上山々麓から流れてくる小河川の扇状地堆積物は長砂地区の海岸平野まで押し出してきて、海岸に近接してきている。沼田東方の川には幅の広い河口部があつて、堤防の導水門を通じて海に注ぎ、沼田～松原間には浜田川が直接海に注いでおり、高田松原背後の古川沼は長さ 250m の石垣堤防とその前面の砂浜で、湾と完全に隔られていた。古川沼の水は高田松原の西側の気仙川々口附近の水門で調節されていた。小泉川は川口で古川沼の東側水路に誘導されていて、浜田川々口附近の湿原とは石垣堤防で界されていた。高田松原中央部の堤防前面と砂洲の間にも潟の一部があつて、この部分は高田松原海岸の最も低い部分となつていた。この砂洲は湾頭砂洲のうちで最も新期に形成された部分で、高さ 1.36m、巾約 100m であつた。

第12図は高田松原海岸を津波直後に実測した地形図で、第13図は同じ場所を空中より撮影したものである。今回の津波で侵蝕・破壊された海岸線の一番大きな部分は、古川沼前面の石垣堤防約 150m と砂洲約 250m、浜田川々口の湿地帯と砂浜約 200m、脇之沢～沼田間の導水門周辺の堤防約 50m であつて、これらは全く流失し、かつて脇之沢～高田松原～気仙川々口まで美しい弧を描いていた湾頭砂洲海岸は3つに切断されて仕舞つた。次で侵蝕の対象となつたものは、脇之沢～沼田間の海岸堤防、浜田川々口附近の湿原と水田地帯の間の堤防、および古川沼周辺地帯などである。脇之沢～沼田間では、津波の引退時に破壊された導水門堤防東側延長部の内側が Linear-flow によつて侵蝕され、巾 5m、長さ 60m の溝を作り、さらに Mass-wasting によつて崩壊を行つている。また、導水門西側では汀段々丘の前面が Fluviraption (Erosion) や Earth flow (Mass-wasting) によつて取去られている。浜田川々口では湿原地帯前面の砂浜は全く流出し、湿原地帯にも津波引退時の Ebb Channel が巾広く刻まれ、その内側堤防も Sheet-flow および Linear-flow による Fluviraption, Corrasion と Mass-wasting の Earth flow のため数ヶ所 (最大 30m) 侵蝕・崩壊を行つている。堤防内側水田地帯の侵蝕は第11図に示した通りで、各 Gully の先端部に堆積物を伴っている。浜田川沿いの堤防が東西に彎曲する地点では堤防を越えて over-flow した津波の Eddy による Scouring の痕がみられ、巾 3m、長さ 6m に亘つて草が堀り起されている。その前面には砂礫の堆積物を残しているがさらに北隣の堤防決壊箇所からの第2波・第3波の津波によつて運ばれてきた噴流的堆積物が追加されて、巾 10m、長さ 50m の範囲に平均 5m の厚さ (最厚 20cm) で堆積している。小泉川西側の水田と古川沼の境をなしている堤防の決壊箇所内側に径 4～5m の範囲に孤状の堆積物がみられるが、Mass-wasting と、その後の Passage Stream (Linear-flow) による変形によるもので第7～8～9図の形成過程によつて説明出来る。Passage Stream の流路にあたる部分は内側に凹み、周辺にその厚さを増し、表面

高田松原海岸津波直後の地形実測図

第13図 チリ地震津波直後の高田松原海岸（河北新報社提供）

には漣痕があつて、外側より強い流れによつて形成されたことが明瞭である。古川沼周辺地帯についてみると、その南部は一般に侵蝕地帯となり、北西部は堆積地帯となつている。南部の侵蝕された砂洲の長さは250mで、巾は100m、高さは1.36mであるので、この侵蝕量は膨大なもので、広田湾最大のものと云える。古川沼東側および北側東半部では Sheet-flow による全面攻撃を受け、Fluviraption, Corrasion が行われて侵蝕され、同時に表土の Slumping によつて崩壊を行つている。海岸のコンクリート堤防の内側は Linear-flow による Scouring が盛んに行われて巾広い溝が刻まれている。防潮林の松林の中では松の根の後方に Eddy-hole が多数堀られているのも特徴的であつた。古川沼北側東半部の堤防決壊は6個所で、4個所は完全に切断されて、Gully が水田まで刻まれ、古川沼と連続するにいたつているが、他の2ヶ所は第7図、第8図の様に、まだ mass-wasting の状態のまま残されている。また、完全に決壊した堤防の内側に平行な溝が刻まれ、津波引退時の Linear-flow による Erosion の結果、第4図と第10図の様に作られたものであると解釈される。堤防の内側の堆積物は、おもに、Earth flow と Slumping による Mass-wasting の岩屑で、いまだ原形を保っている。古川沼北側西半部は堤防の侵蝕も少く、内側に若干 Solifluction による崩壊がみられるにすぎない。堆積物は堤防の内側に沿つて約300mに亘つて幅30mの範囲を占めて分布し、中粒ないし細粒の砂からなつている。この表面には、堤防に沿つて水の流れのあつたことを示す漣痕がみられ、堤防の切れ目に向つて厚く（最高15cm）、平均5cmの厚さで堆積している。古川沼北西隅は元来堤防がなく、湿地帯を経て直接水田に続いていたので、侵蝕と堆積が活発に行われ、水田

に Gully が刻まれ、湿地帯の表面には大量の砂が堆積している。この堆積物は南北に配列した、幅25mの3つの大きな波型を作り、さらにさその上に3~5m波長の漣痕が印れている。堆積物の厚さは最高30cm、平均10cm程度の中粒砂である。古川沼西部には屈曲した低い堤防があるのみで、それも南半部までは延びていなかった。したがつて、古川沼前面の砂洲を破壊した津波に対して全く無防備の地帯となり、最大量の堆積物がここにうちあげられる結果となつた。勿論、侵蝕の影響も相当に被り、堤防は数箇所切断されている。この地域の堤防の破壊・侵蝕も、Fluviraption と Corrasion による Erosion と、Earth flow と Slumping による Mass-wasting が同時に行われた結果によるものと考えられる。古川沼と気仙川をつなぐ南の水路の堤防内側に、幅3m、延長約400mの溝が引潮時の Erosion と Mass-wasting によつて刻まれている。この溝は、堤防に近接して次第に厚さを増す傾向をもつた堆積物の堆積後に刻み込んだもので、堆積物の側面に層理があらわれている。堆積物は3つの輪廻に分けられ、最下位のは約30cmの厚さをもち、粗粒~中粒~細粒の Grading を示し、最上位にシルトの薄層を伴っている。中位のは厚さ約15cmで、細粒~中粒~粗粒~中粒~細粒の順序で重なり、粗粒部が中間に挟まつて、上下に Grading をうけている。最上位のものは7cmの厚さをもつもので、淘汰は全くうけず粗粒の砂からシルトまで混然としている。古川沼北部と西部のこれら総ての堆積物は、津波によつて破壊・侵蝕された古川沼前面の砂洲から由来したものが大部分で、北部の堆積物は堤防による遮蔽堆積物的性格を示し、西部のものは大きな Scale の Passage Spread と同じ型式で分布するにいたつたものであると解釈される。

参 考 文 献

1. J. Gilluly, A. C. Waters and A. O. Woodford (1951), Principles of Geology., W. H. Freeman and Company, San Francisco, California.
2. W. D. Thornbury (1954), Principles of Geomorphology, John Wiley & Sons, Inc., New York.
3. B. W. Sparpe (1960), Geomorphology, Longmans, Green and Co. Ltd., London.
4. P. D. Trask (1950), Applied Sedimentation, John Wiley & Sons, Inc., New York.

**Erosion and Deposition due to the Tsunami caused
by the Chile Earthquake on May 24, 1960**

By

Enzo Kon'no, Nobu Kitamura, Tamio Kotaka and Jun Kataoka

The problems related with erosion and deposition due to the Tsunami caused by the Chile Earthquake on May 24, 1960 are briefly summarized in this report. The area where observations were made is the Takada-Matsubara beach and the vicinity in Iwate Prefecture.

Waves caused by the Tsunami like oceanic waves and currents, is an important agency in modifying the geomorphological features of the land adjacent to the sea. This agency is subdivided, from its process, into three types of streams, namely, sheet-flow, linear-flow and eddy. Each of the processes is described on the observed features and are accompanied with illustrations.

Degradation and aggradation due to the Tsunami changes the landform by erosion, mass-wasting and deposition. These different processes, related with the three types of agencies above-mentioned, are discussed and accompanied with illustrations.

The Takada-Matsubara beach and bay-head bar of the Hirota Bay along the Sanriku coast of Iwate prefecture was damaged by and due to the after effects of the Tsunami. The beach extending from Wakinosawa to the Kesen River was cut into three parts, and the lagoon of Furukawa-numa, situated behind the bay-head bar, became united directly with the Hirota Bay.

The erosional processes and the deposits in the vicinity of the Takada-Matsubara beach are elucidated by the accompanying illustrations.