

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

山口 恭弘, 合田 政次
塩谷 茂明, 石原 忠
西ノ首 英之, 内山 休男

はじめに

約200年ぶりに火山活動を再開した雲仙普賢岳は、大量の火山噴出物を山麓一帯に放出している。火山噴出物は粒径により0.2mm未満の火山灰、0.2—32mmの火山礫および32mm以上の火山岩塊に大別され、この内火山灰は他と比較して広範囲へ影響を及ぼす可能性があるため、以下本研究では火山起因物質＝火山灰として調査した。また、雲仙普賢岳斜面に堆積した火山灰は、降水により徐々に締固められ、保水性が悪い¹⁾事が知られている。

水無川に発生する火山性土石流（以下は土石流とする）は、比較的少雨でも発生すると同時に、島原半島地域が県内でも比較的多雨な地域である事から、梅雨期を中心として土石流が発生し易い地域であると報告²⁾されている。この土石流中には通常の土石および土砂とともに、大量の火山灰が混入しており、陸上への人的、物的被害と、さらに島原湾へ流入した際火山灰による水産業への影響が懸念される。

水無川河口周辺海域は古くから沿岸漁業が盛んであり、多種多様の漁業が行われている。島原市および深江町の漁業の代表的業態は汀線付近の採貝・採藻、距岸数十メートル以内の藻類養殖、共同漁業権以内の刺し網、小型底曳き網、たこつぼ、いかかご等の漁船漁業等である。操業区域は多くの業態が距岸1マイル以内の沿岸近くである。現在、土砂による漁具被害^{*1}が生じており、漁業への土石流による被害が生じており、さらに本漁場に流入した火山灰による影響が考えられるが、海底に堆積した火山灰の直接的な水産生物への影響は明かでない。

そこで、本調査研究では土石流と同時に漁場へ流入する火山灰の海底堆積状況を潮流との関わりにおいて把握し、水産生物への影響を知るための基礎資料とする事を目的とした。

なお、本稿をまとめるにあたり潮流計の設置・回収および採泥調査にご協力頂いた本学水産学部実習船「鶴水」および長崎県水産試験場「鶴丸」の船長を初め乗組員各位に深謝申し上げます。また、火山灰の化学成分分析は長崎県窯業技術センターの多大なるご協力を頂いた事をここに記し、深く感謝いたします。

1 節 調査・分析の方法

1. 潮流観測の方法

水無川は普賢岳東斜面に横たわる、文字通り平常時において流下水量がない河川である。火山灰は降雨に伴って発生する泥流および土石流に混入して、主として水無川を通じて島原湾へ流入する。また、水無川河口周辺は湾口部の早崎瀬戸に近い為、火山灰の堆積分布に対して強潮流の影響が無視できない。

有明海における流況に関する調査研究は水産業、干拓および船舶航行の側面から潮汐による海水流動について研究された^{3, 4)}のが始まりとされている。以後水理模型による干潟海域の潮流特性並びに干潟形成過程における環流の役割に関する報告^{5, 6)}、あるいは有明海および東京湾の潮汐シミュレーションにより非線形項と境界条件が観測結果と比較する際、重要なファクターである事を示した報告⁷⁾および干拓事業によるノリ養殖漁場の開発保全に関する調査研究等⁸⁾がある。

しかし、何れも有明海の干拓あるいはノリ養殖に関する報告であるため湾奥に着目した研究であり、本調査研究における雲仙普賢岳の火山災害が直接及ぶ島原市および深江町沖合いにおける潮流観測例はほとんど無い。また、島原湾海域における流向は、上げ潮流時では湾奥へまた下げ潮流時では湾口へ向かうことおよび反時計回りの恒流について報告⁹⁾されているが、主として船舶航行用であるため表層流についてのみである。そこで、火山灰の堆積分布に関与すると考えられる、水無川河口周辺における現場の潮流観測を実施した。

潮流観測は1992年6, 8, 11月および1993年4, 6, 10月にそれぞれ3地点

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

ずつ（1992年11月は2点）の計17地点で実施した。観測地点は水無川河口周辺（P11—P23），その北部海域（P31—32），水無川河口沖合い（P41—43），島原市中尾川河口周辺（P51—P53）および湯江川河口周辺（P61—63）であるが，本稿では水無川河口周辺の流況についてのみ限定したため，図1には北側からP21—P23と水無川河口沿岸とほぼ平行に，3地点のみとして示した。

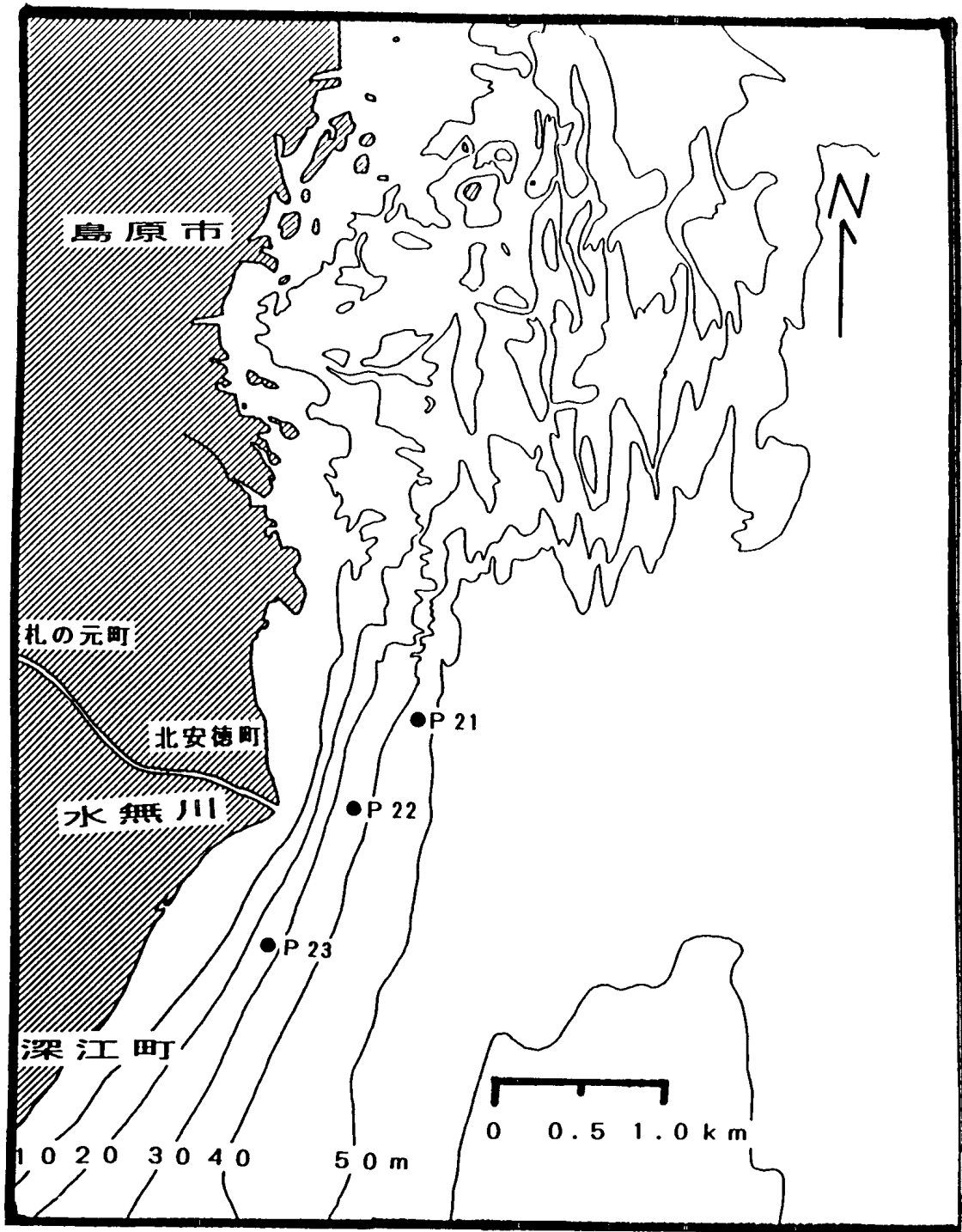


図1 潮流計設置位置

なお、等深線は本研究の一貫として実施した海底地形調査結果の一部を示した。本地点の潮流観測は同年8月6日から9月7日の32日間行った。

観測機器は記録容量および測定項目が異なる2タイプのメモリー電磁流速計（A社製ACM-8M5台およびACM-16M1台）を同時に使用した。メモリー電磁流速計は10分間に30データの観測で、約30日間以上の計測が可能である。

測定仕様は10分毎に30データを0.5秒間隔で測定し、データロガーに連続記録し、約30日後に機器を回収した。流速データの取り込みはデータロガーから専用インターフェイス（A社製IF-32）を介してパーソナルコンピュータ（N社製PC-9801RX）に転送収録し解析に用いた。

設置方法は図2に示した通り2点で係留したブイへの電磁流速計の懸垂により、一定深度を保持する方法を用いた。観測ブイの係留は20kgダンホース型アンカーおよび約30kg土俵を用いてステンレスワイヤー（ $\phi = 6\text{ mm}$ ）により固定し2本のアンカーがほぼ南北になるよう設置した。係留装置は夜間においても視認できるよう、全てのブイおよびアンカー位置にも小型標識灯（ゼニライト）を取り付けた。電磁流速計の設置深度は上層と中下層における流況の違いを想定して、5および20mの2層とした。

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

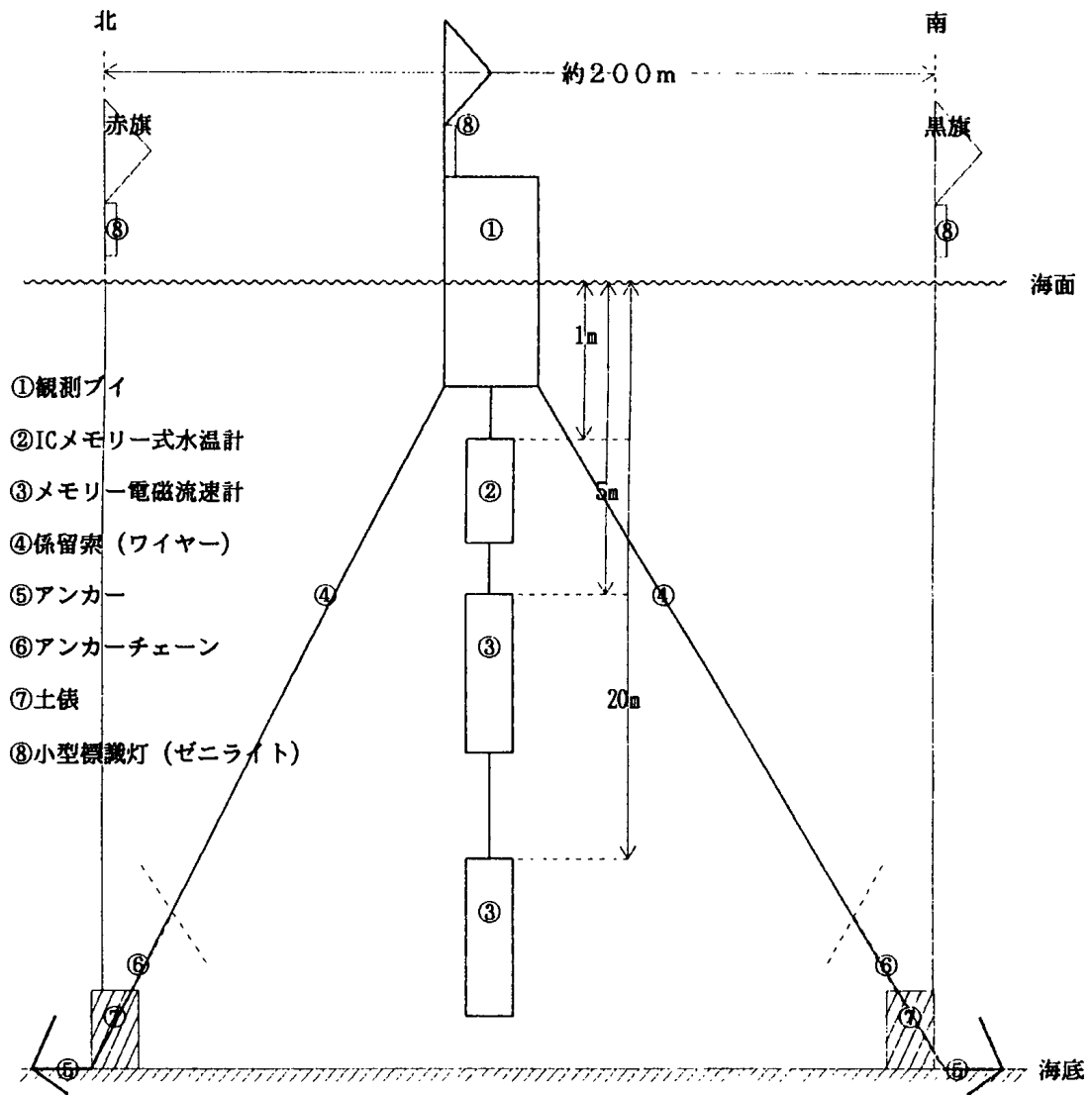


図2 係留ブイ式計測方法概略図

2 節 海底泥の採集方法と火山灰の識別および堆積量測定方法

(1) 海底泥の採集方法および試料採取の方法

水無川河口周辺海域における採泥地点は図3に示した通り緯度、経度それぞれ0.1分毎の格子点上の34点とし、GPS測位により毎回ほぼ同一地点での採泥となるよう留意した。なお、本研究では底質に関わらず海底からの採集を「採泥」と表現し、採集した試料を単に「泥」とし、採泥によって得られた泥と同時に火山灰を採集した。また、漁場海域における火山灰の堆積量を、その厚さで知る事を目的としているため、以下堆積量は各調査地点における鉛直方向の火山灰の深さをcmで表したものと定義する。

したがって、火山灰の堆積量は直接海底に突き刺して火山灰の堆積量が測定できるコアの使用が考えられたが、海底泥上に堆積した火山灰の採集方法は、従来の海底が粗い砂地が多いためグラビティーコア等のコアサンプラーでは固く締まった火山灰層により海底に突き刺さらないか、または突き刺さっても試料が脱落し、使用できなかつた。

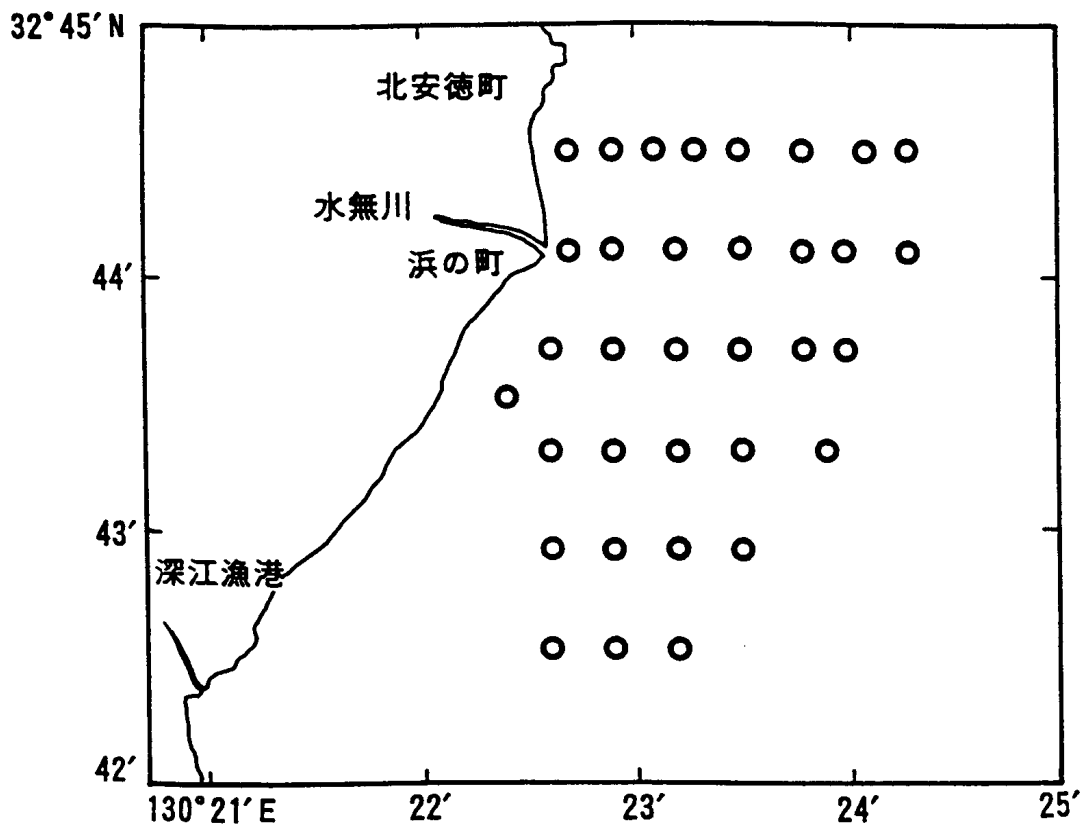


図3 採泥地点

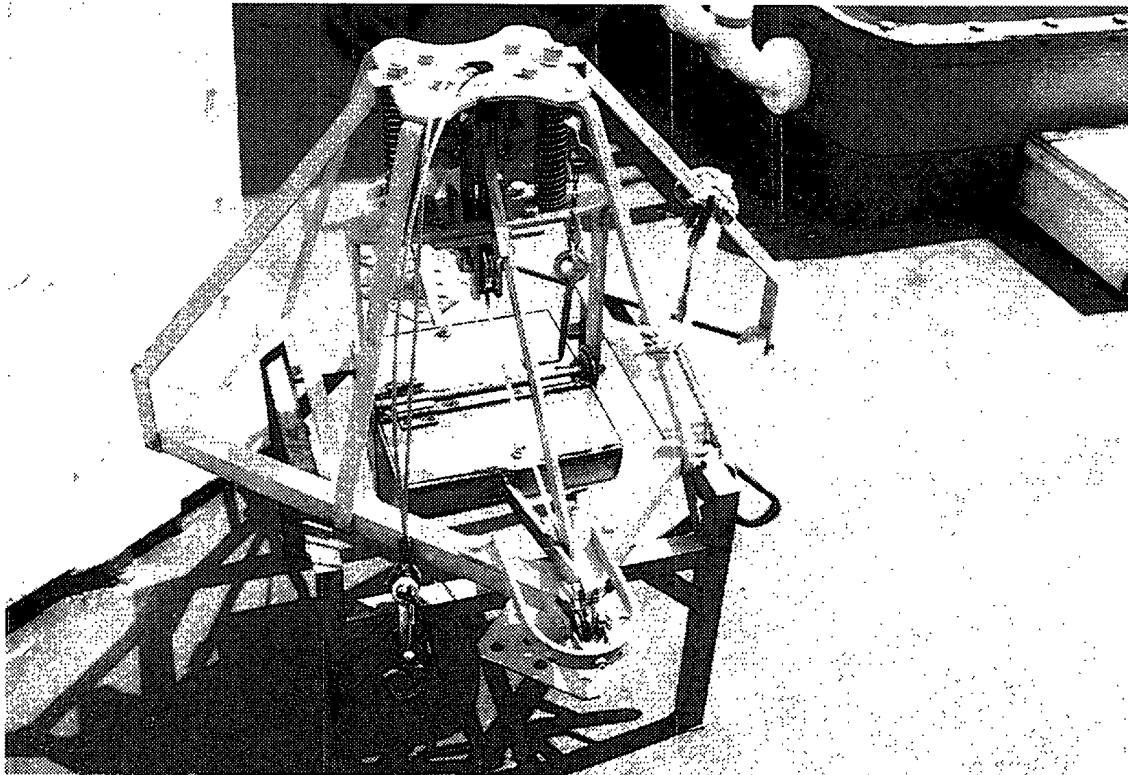


写真 スミス・マッキンタイヤ採泥器

そこで、本研究では一般に底質およびベントス調査に使用される小型スミス・マッキンタイヤ採泥器（採泥面積0.05㎡；写真参照）を用いた採集を行った。スミス・マッキンタイヤ採泥器（以下は採泥器と略記）は岩盤および礫質の様な極めて固い底質の地点以外、潮流が比較的速いとされる本海域においても有効に海底泥を採集できた。

しかし、採泥最大深さ11cm余りであり、それ以上の堆積量は測定できないという欠点を有していた。

表1は1992年の調査日とその前後における土石流の状況を示したものである。土石流発生に関する記録は「広報しまばら」*2に依った。1992年の採泥調査は3

表1 1992年の採泥調査日と土石流発生状況

6/7	梅雨入り	土石流
6/23		土石流
7/13		土石流
7/20—		7月採泥調査日
8/8	台風10号	大規模土石流
8/12	前線活発化	大規模土石流
8/15	前線活発化	大規模土石流
8/24—		8月採泥調査日
9/29		土石流
11/4—		11月採泥調査日

資料：「広報しまばら」*1

度の通常規模の土石流発生1週間後の7月、3度の大規模土石流発生10日後の8月およびほとんど土石流発生がない期間が3ヶ月継続した平穏時として11月に実施した。

(2) 堆積量測定

火山灰堆積量の測定に先立ち、採集した海底泥から火山灰を識別する必要があった。宮原¹⁰⁾は火山灰の水銀含有率が一般底質と比較して少ない事を利用した分析を行い、松岡¹¹⁾も火山灰試料を用いた粒度分析を行ったが、いずれも海底における火山灰の堆積層厚さについてはほとんど言及していない。

そこで、本研究では、火山灰かどうかの識別は目視による方法（以下は目視法と略記）および Loss on Ignition 法（以下は Ig. loss 法と略記）を用いた2方法を併用した。また、Ig. loss 法に先立ち行った火山灰および従来の海底泥それぞれについての化学成分含有率による識別方法は本研究において有効ではなかった。

試料の採取方法は図4に示したとおり、採泥器により採集した泥中に、内径26mm、全長120mmの塩化ビニール製パイプを垂直に突き立て、両端に栓をしたものをサンプルコアとした。サンプルコアは一地点につき2本採取し船上において目視法を実施し、Ig. loss 法試料および粒度分析用試料として-30℃で凍結した。

① 目視法による識別および堆積量測定

海底に堆積した火山灰は調査初期においては特徴的な色と明瞭な層をなしていたため、火山灰の影響を受けていない海底泥とその上に堆積した火山灰との境界層を容易に区別できた。しかし、堆積後時間が経過するにつれて、上下層

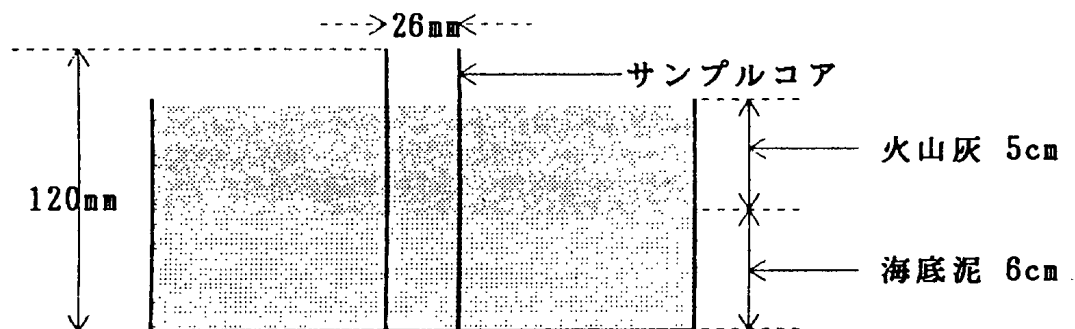


図4 海底に堆積した火山灰の採取例

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

の混合が認められ境界層の識別が困難になるコアサンプルの発生が認められた。また、目視法は個人差による誤差を回避するため、複数人の判定により行った。以上の点を踏まえて、目視法による堆積量測定はコアサンプル中の火山灰と思われる層を注意深く観察しメジャーによって、 10^{-1} cm単位までを読み取った。

② 化学的方法による識別および堆積量測定

火山灰と火山灰の影響を受けていない海底泥について、含有される化学成分の比較を行った結果は表2に示した通りである。珪素，チタン，アルミニウム，鉄，カルシウム，マグネシウム，ナトリウムおよびカリウムの8元素について、それぞれの酸化物としての含有率を比較した結果、酸化カルシウム以外はほとんど差が見られなかった。

酸化カルシウムが火山灰の影響のない海底泥中において含有率が高かった理由は、貝殻中に含まれる炭酸カルシウムに起因するためと考える事ができる。したがって、カルシウム含有率による火山灰の識別は貝殻の有無に大きく左右される事、さらに火山灰の影響のない海底泥自身のカルシウム含量の差も大きい事から、カルシウム含有率を指標とした方法での火山灰堆積量の判定および測定法は不適當であると判断した。

表2 火山灰と火山灰の影響のない海底泥の化学成分比較

試料No.	化 学 成 分								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss
A 1	65.1	0.5	16.9	3.9	5.3	2.3	3.8	2.2	0.3
A 2	64.9	0.6	17.2	3.9	5.6	1.9	3.8	2.1	0.2
A 3	66.5	0.6	16.2	3.6	5.1	1.8	3.7	2.4	0.7
B	64.5	0.6	17.0	4.0	4.7	2.1	3.5	2.3	0.7
C	66.0	0.6	15.5	4.1	2.4	4.9	3.7	2.4	0.2
D	62.5	0.6	16.1	4.1	6.2	1.7	4.0	2.3	2.8
E	59.1	0.6	15.2	4.0	8.9	1.8	3.7	2.0	4.8

A 1 : 未処理火山灰 A 2 : A 1 を蒸留水で洗浄した火山灰

A 2 : A 1 を蒸留水に懸濁させ30分間放置した

上層液を凍結して得た火山灰（極く微細な火山灰が含まれる）

B, C : 未処理火山灰 D : 火山灰の影響のない海底泥の上層

E : 火山灰の影響のない海底泥の下層

一方、表2中の Ig. loss の値を比較すると、火山灰では0.7%以下であったのに対し（純粹に火山灰のみであれば0%であると考えられる）、火山灰の影響のない海底泥ではその4-7倍であった。試料において Ig. loss が0%とならなかった理由は明かではないが、火山灰が採泥地点に至るまでの間に有機物が混入した事を示していると考えられる。しかし、火山灰の影響を全く受けていない海底泥との差は十分有意であった。

Ig. loss とは灼熱減量のことで、600°C前後で長時間燃焼した場合の重量の減少百分率であり、有機物質含有量に相当する値である。本研究では、まずコアサンプルを目視により積層状態を判定しながら、3-5層に分けた後、水分除去の目的で105°Cで熱する。次に、これを葉サジで軽く砕いた後、190 μ のふるいにかけて粗砂および礫等の極端な重量物を除去し、泥質部のみを得た。これを再び105°C中に放置し水分を完全に除去した後、重量を測定しこれを燃焼前重量とする。これをルツボに採取し610°Cで24時間灼熱し完全に燃焼させた。水分の混入を防止するためにデシケータ中にて冷却後、重量を測定しこれを燃焼後重量とする。以上によって秤量した燃焼前重量との差に対する燃焼後重量を百分率で表したものを Ig. loss (%) とし、以下の式で求めた。

$$\text{Ig. loss (\%)} = \frac{(\text{燃焼前重量} - \text{燃焼後重量})}{\text{燃焼前重量}} \times 100$$

Ig. loss 法による判定の実例を図5に示した。例えば、No. 1の試料ではA-C層とD層との間に Ig. loss の大きな差があり、火山灰はC層（6cm）にまで及んでいると判定した。No. 2の試料では、A、B層はほぼ火山灰であり、C層（6cm）には火山灰がかなり混入していたが、D層には火山灰はなかったと判定した。No. 3の試料ではA層（1cm）にのみ火山灰が若干混入していたと判定した。

また、Ig. loss による判定が困難な場合もあり、この場合には目視による判定も考慮した。なお、この場合の目視による判定はコアサンプルの観察、乾燥粉末泥の観察、および190 μ でのふるい操作前後の試料の観察の結果を総合して判断した。

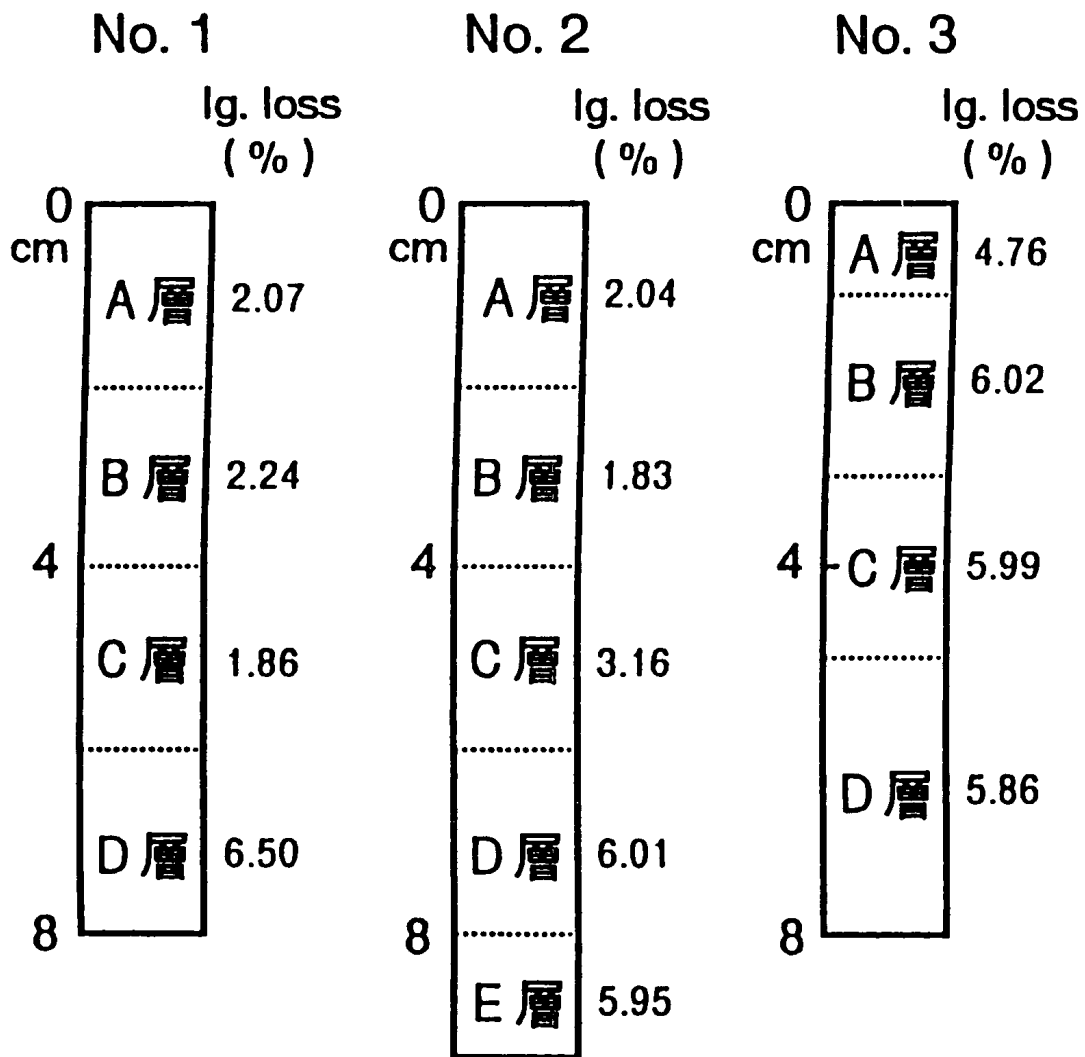


図5 lg.loss 法による堆積量判定例

3節 結果および考察

1. 水無川河口周辺海域の流況

水無川河口周辺を中心とした、北から観測地点P21, P22およびP23の流速頻度分布は5 m層を図6に、20m層を図7に示した。本海域における流向は、上げ潮流時では湾奥（北方）へまた下げ潮流時では湾口（南方）へ向かう傾向と3地点それぞれの観測結果がほぼ一致していた。

5 m層の流向は、上げ潮流時に頻度分布の先端部分即ち約1.2ノット以上の極大流速時前後になると流向は東方向へ偏向しており、また下げ潮流時に流速が速いほど頻度分布が疎となる傾向が認められる。これらの傾向は北側の観測地点ほど大きくなっている。

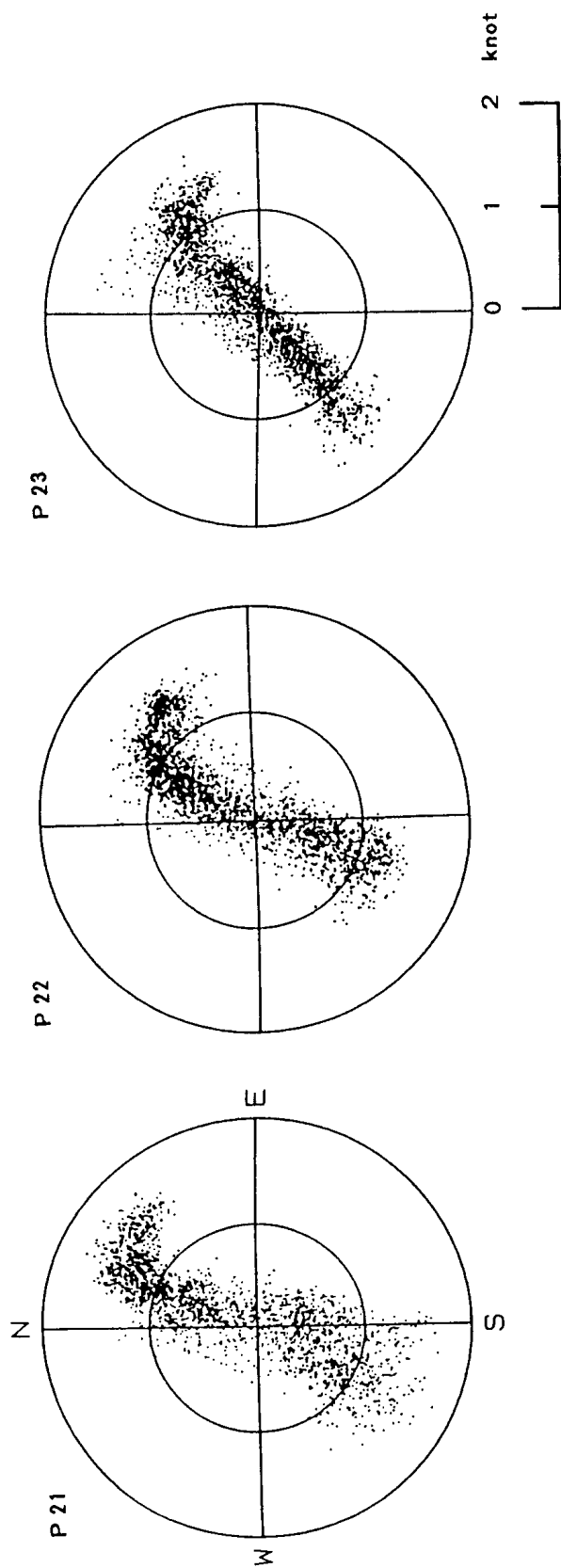


図 6 5 m 層の流速ベクトル頻度分布

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

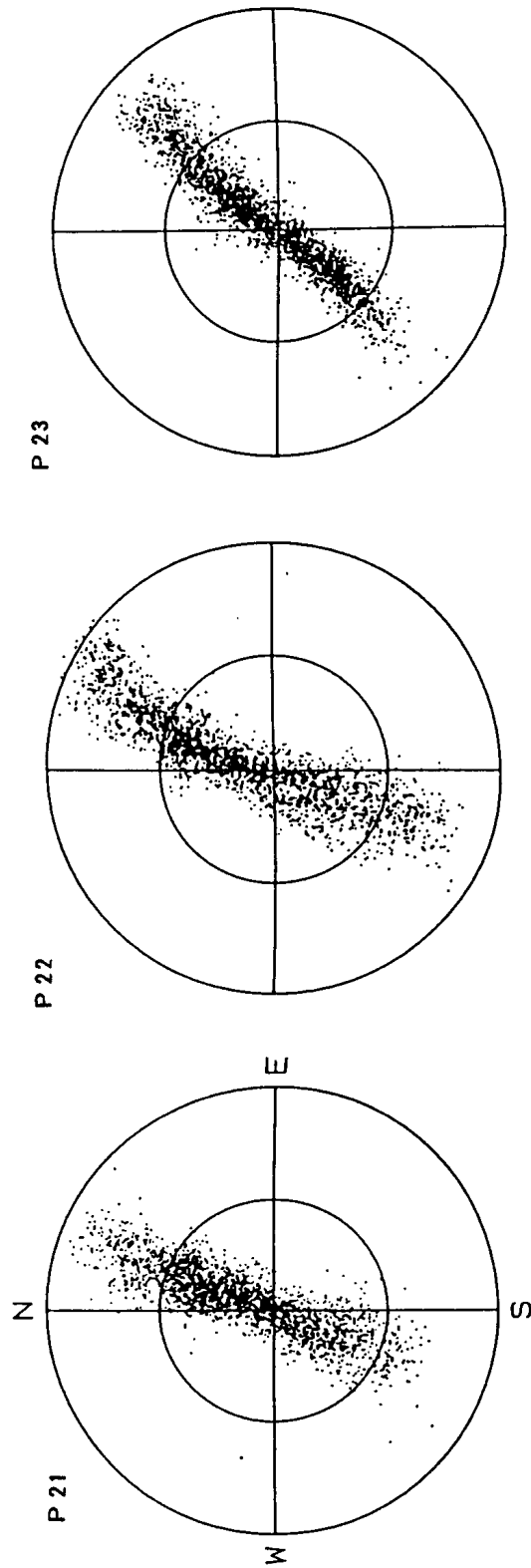


図7 20m層の流速ベクトル頻度分布

これら流向が変動する要因はP 21の北方約0.5km以北に位置する眉山崩壊（1792年）による複雑な海底地形によるものと考えられ、漁業者の言葉による大潮時の潮が沖にはねるという事と一致している。ただし、この現象は20m層には見られず、表層近くのみ現れる現象であると認められる。20m層の流軸は、5 m層とほぼ同様の傾向であるが、流向の変動は小さく明瞭である。

5 m層と20m層とでは頻度分布に若干違いが見られたが、何れの地点においても流軸は上げ潮流時に北北東－北東、下げ潮流時に南南西－南西方向であるといえる。したがって、本海域における流況は憩流時間が短くほぼ半日周期の往復流に近い流れであると考えられる。なお、進行ベクトルは緩やかに北東向きであり、恒流⁹⁾と異なる結果となっていたが、本稿では火山灰の堆積状況の把握を対象としたため検討していない。しかし、火山灰が海底に達するまでの拡散および移流の把握には影響するため、今後検討したい。

2. 火山灰の堆積状況

各月毎の火山灰の堆積状況は、各採泥調査地点における堆積量の等しい点を結んだものを等層厚線として示した。等層厚線は目視法および Ig. loss 法の両方法について図示した場合、極端な相違点が認められなかったが、細部においては堆積状況が若干異なっていた。

(1) 目視法による堆積状況

図8は各月毎の目視法による等層厚線を示したものである。0 cm層の線は火山灰がこの範囲の外側では堆積が認められなかった境界を示しており、2－3 cm層の線はある程度堆積があり、5 cm<は5 cm以上の堆積がある事をそれぞれ示している。なお、図中括弧内の堆積量は等層厚線を結んだ際、周囲とは堆積傾向が異なっていた地点を示している。

7月の堆積状況は2－3および5 cm層が島原市北安徳町沖合いにかけてやや北へ伸びた形状をなし、河口から1マイル以内に集中している。北安徳町沖合いへの堆積は、土石流が国道57号線と水無川が交差する島原市札の元町付近における川の屈曲地点において川から溢れ出たものが、直線的に海岸に達し海に流入したためであると考えられる。

8月の堆積状況は2－3および5 cm層が水無川河口の極近くに集中している点では7月の結果と同様であった。しかし、8月の堆積形状は7月の堆積形状

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

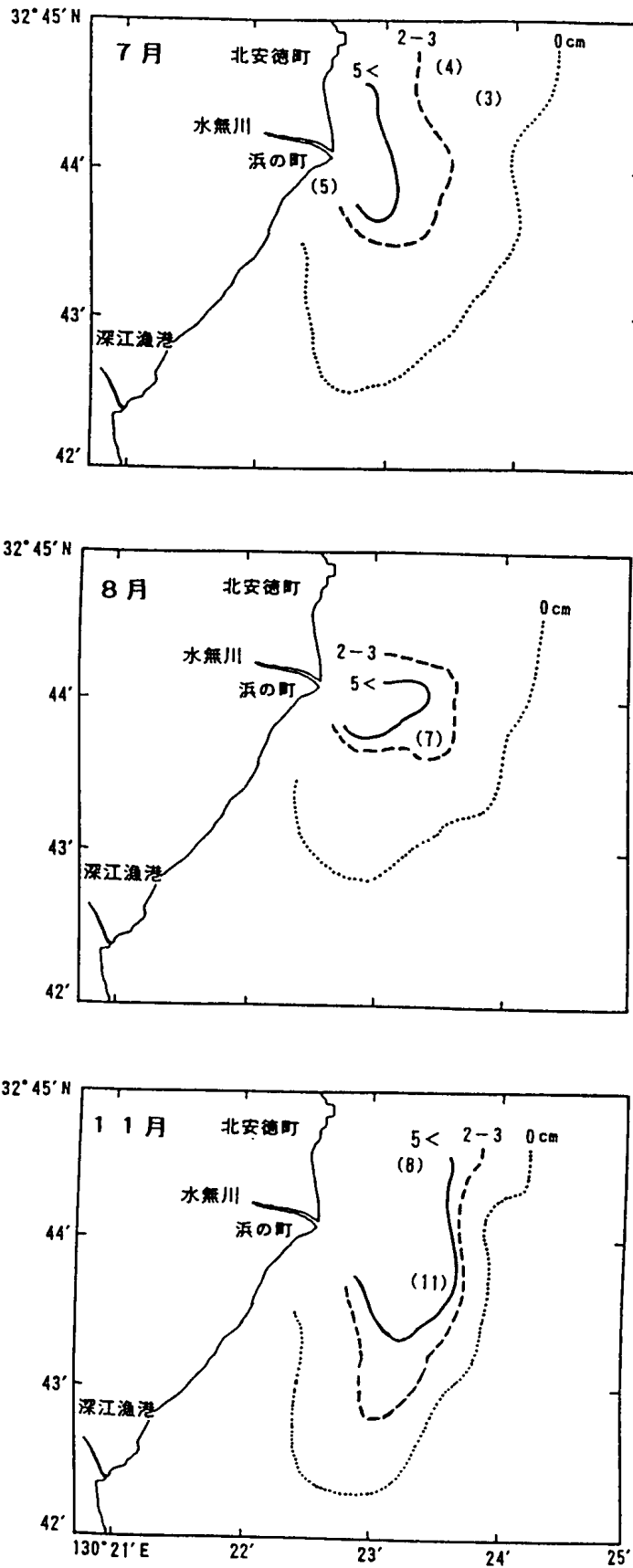


図8 目視法による火山灰堆積状況

が半円状に対し、片仮名のコの字型に近い形状となっていた。この堆積形状の変化は約1ヶ月の間における潮流に起因したものと、また8月8、12、15日に発生した3回の大規模土石流により火山灰が流入堆積したためと推察される。これは一度堆積した火山灰は水無川河口周辺海底に全てが定在するのではなく、一部は時間と共に変化している事を伺わせた。

7および8月の堆積は土石流発生から約7-10日後の状態を示しており、東側への堆積範囲の広がりでは8月の方が、やや大きくなっているものの何れも2-3cmの等層厚線の範囲は水無川河口を中心とした半径1マイル以内に集中する事が明かとなった。

一方、11月の堆積状況は7および8月とは堆積範囲および堆積形状共に大きく異なっていた。0cm層の堆積範囲は東側へはほとんど広がっておらず、南-南西方向へ若干広がっていた。しかし、2-3および5cmの等層厚線は、何れも8月の堆積状況と比較して南-南南西方向へ約1マイル広がっている。8月の結果でみられたコの字型分布が、北東および南-南西方向へ向かって拡大した形状となっていた。この方向は前述した下げ潮流時の流向の主軸方向と一致している事から潮流の影響であると考えられる。また、8月の調査以降ほとんど土石流が発生しなかったにも関わらず、堆積量が8あるいは11cm以上の地点が認められた。この地点は水無川河口沖合いの海底傾斜が緩やかとなる点とほぼ一致しており、この海底地形と潮流とにより火山灰が集積滞留し易い地点である事が示唆された。

(2) Ig. loss による堆積状況

図9は各月のIg. loss法による等層厚線を示したものである。図中の各線の表示方法は目視法と同様である。

7月の等層厚線は水無川河口北方約0.1マイルを中心とした半円状の堆積である。3回の調査では7月の堆積範囲が最も狭かったが、河口より北側に堆積が多くみられた点において類似している。

8月の5cm以上の堆積範囲は7月の傾向と異なり水無川河口の沖合いへ向けて拡大した形状となっていた。これは、土石流の回数が同じであったが、規模が7月より8月の方が海への影響も大きかった事が推察される。2-3cm層も全体的に7月よりやや沖合いに位置している。0cm層は7、8月ではほとんど変化が認められなかった。

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

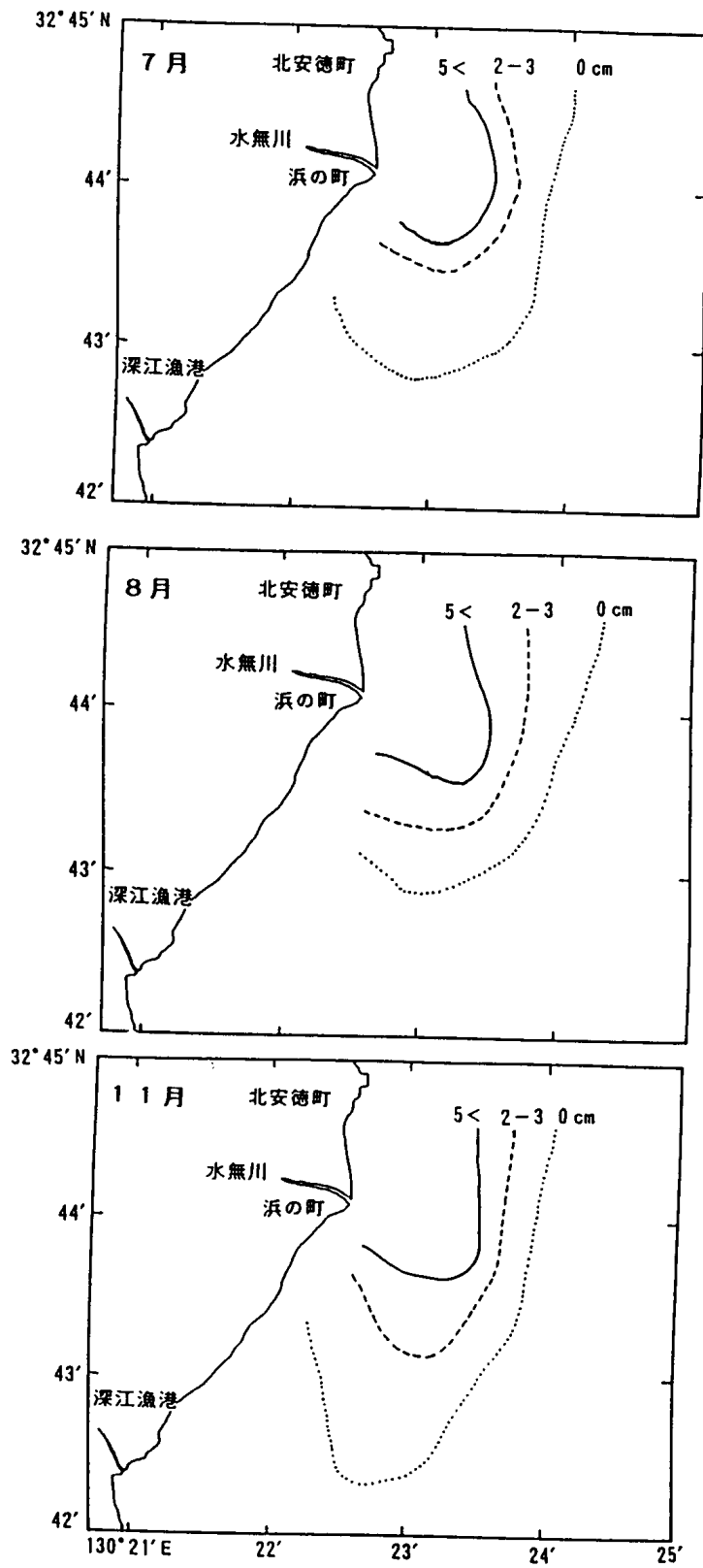


図9 Ig.loss法による火山灰堆積状況

11月の等層厚線は5 cm以上では8月の結果とほぼ変化がないが、2 - 3 cmおよび0 cmでは南および南西方向へ伸びた形状となっていたが、目視法の結果ほど堆積範囲の拡大が顕著ではなかった。

(3) 2方法の比較と潮流との関係

土石流によってもたらされた火山灰は土石流が急斜面を流れ下る際に発生したエネルギーにより、沖合いへ押し出され一次的に堆積すると考えられる。ここでの一次堆積とは前述の7および8月の等層厚線における、水無川河口周辺に限定された状況をいう。土石流は流れというよりも、むしろ段波の進行であり最大速度は20m/sを越える事もあるとされている。この際のエネルギーが東方向（沖合い方向）への堆積範囲の主要因であると考えられる。一次的堆積は7および8月の堆積状況から見て、海底に火山灰が到達するまでの間に、潮流の影響が比較的小さかった事を示すものと思われる。

一方、8月の採泥調査以降、約3ヶ月経過した11月の堆積状況は、東（沖合い方向）への広がりほぼ一次的堆積形状を保持したのに対して、南方へは陸岸とほぼ平行方向に長径を有する楕円状に広がっていた。これを二次的堆積とすると、約3ヶ月間の堆積範囲の拡大方向はほぼ水無川河口周辺における流向と一致していた。二次的堆積に至る過程において、潮流は海底における火山灰の堆積範囲の拡大に密接に関与している事が考えられた。

目視法およびIg. loss法の2方法を用いた火山灰の堆積状況では、0 cm層では両者にほとんど差異がみられなかったが、8月の結果において堆積形状がまた11月の結果において堆積範囲に若干の差異がみられた。8月の堆積形状の差異は目視法による測定の際、明らかに火山灰と思われる層が少なかったために、Ig. lossの堆積範囲が広がった事が考えられる。11月の堆積範囲は目視法の結果がIg. loss法より広がっている。これは潮流による堆積範囲の拡大において、小さい粒径程大きいと考えれば、目視法が主として粒径が細かい火山灰を、Ig. loss法がやや大きい粒径までを把握できる事を示していると推察される。

おわりに

火山礫以上の粒径であれば、堆積範囲は広範に及ぶ事はなく河口直近に土砂と共に堆積すると考えれば、火山礫以下の火山灰の堆積範囲は目視法および

2章 火山起因物質の水無川河口周辺海底への堆積

Ig. loss 法の併用により潮流との関わりにおいて概ね把握できたと考えられる。なお、潮流観測地点P21以北の複雑な海底地形における採泥調査が十分できず本稿では堆積状況が総合的に把握できなかった。しかし、本年3月に実施された潜水調査および一回のみの採泥結果であるが、島原市外港沖合い海底の岩礁の間隙において相当量の火山灰の堆積が確認された。

以上の結果から、島原湾全体からみれば、海底に堆積した火山灰の範囲は現在のところ極く限られた狭い範囲に過ぎないが、現在陸上被害が最も大きい島原市および深江町沿岸部沖合い約1マイル沖合い付近に楕円状に堆積が集中している事が明かとなった。現時点での水産の有用生物資源への火山灰の影響は明かではないが、本書3および4章において火山灰の底生動物および貝類への影響について検討がなされ、特に海底付近を主たる棲息・遊泳層とする漁業対象生物への影響が今後現れる事も十分考えられる。

海洋の汚染は過去の公害の例によっても明らかのように、海洋が有する大きな緩衝作用および自浄作用によって、汚染が明確に現れた時点においてはかなり進行し、末期的状態に達していると考えねばならない場合が多い。雲仙普賢岳の再噴火による火山灰の海洋への流入は自然現象であり人的災害とは異なるが、土石流の発生毎に確実に火山灰は大量に海洋へ流入し、いわば自然による汚染が蓄積されつつある事が考えられる。現在、土石流発生時に島原湾へ流入する流木被害対策としては既に流木防止ネットが水無川河口沖に施設され、一定の効果が認められている。

自然の猛威自体を制御する事は現代の科学技術を駆使しても残念ながら無力な事が多いが、被害を最少限度に止める事は可能である。したがって、土石流と同時に海洋へ流入する火山灰による海洋汚染に対する防止策について、早急に考慮されるべきであると考えられる。

脚 注

* 1 聞き取り調査による

* 2 島原市：「広報しまばら」，昭和堂。

参考文献

- 1) 池永 敏彦, 武政 剛弘: 土壤改良材を用いた雲仙火山灰土での作物栽培試験, 長崎大学教育研究特別経費研究成果「雲仙火山災害の調査研究」, pp. 64-70, 1993. 6.
- 2) 荒生 公雄, 久米 智子, 河田 誠: 1992年に火山性土石流を発生させた島原地方の降雨の特徴, 同上, pp. 4-19, 1993.
- 3) 長崎海洋气象台: 有明海の総合開発に関連した海洋学的研究, 1954.
- 4) 長崎海洋气象台: 同上, 1955.
- 5) 高田 雄之, 戸原 義男: 有明海の水理模型実験について(2), 潮汐伝搬と締切進行にともなう内潮位変動の検討について, 第10回海岸工学講演会論文集, pp. 75-79, 1963.
- 6) 戸原 義男, 加藤 治, 瀬口 昌洋: 有明海の潮流と拡散, 混合に関する研究(1), 第25回海岸工学講演論文集, pp. 556-560, 1978.
- 7) S. Unoki, I. Isozaki and S. Otsuka: Numerical Computation of Storm Surge and Tide in Tokyo Bay, Second Harbor Construction Bureau, Ministry of Transportation, Japan, pp. 125, 1964.
- 8) 加藤 重一, 乃万 俊文, 荻野 静也: ノリ漁場の改良保全に関する調査研究, 有明海および松川浦(福島県)地区について, 農業土木試験場報告, B(水理)第37号, 1976.
- 9) 海上保安庁水路部: 島原湾・八代海潮流図, 第6217号, 1978.
- 10) 宮原 昭二郎: 「火山灰の底質への堆積状況調査」及び「火山灰の海水中における拡散状況調査」, 長崎大学教育研究特別経費研究成果「雲仙・普賢岳火山活動による有明海水産業に及ぼす影響の調査研究」, pp. 23-37, 1992.
- 11) 松岡 數充: 雲仙・普賢岳噴火以降に採取された島原沖の海底表層堆積物について, 同上, pp. 38-45, 1992.
- 12) 本間 仁: 新版河川工学, コロナ社, 東京, 1958, pp. 143.