

噴砂現象の規則性とその成因

—日本海中部地震による秋田県若美町, 秋田港における噴砂災害—

藤 田 至 則*

On the regularity and origin of sand crater caused by the earthquake

—Disaster by sand crater at Wakami-machi and Akita harbour,

Akita prefecture—

by

Yukinori FUJITA

(Abstract)

The author concluded the origin of sand crater caused by the earthquake of the middle part of Japan Sea (May, 26, 1983) as follows:

1. Sand mass of crater erupted from the tension cracks formed the artificial soil parts of paddy fields at Wakami-machi, and from the cracks in the reclaimed soil at Akita Harbour (Fig.8-3 and Fig.9-3),
2. The tension cracks resulted from the sideslip along the sand dune (Fig.8-2 and Fig.9-2)
3. The sideslips were caused by the gravity of the paddy soil on the liquefacted sand mass (Fig.8-1 and Fig.9-1).

Therefore, the occurrence of sand craters essentially attributed the cause to the existence of the inclined water level in sand mass on the inclined basement (Fig.8 and 9).

い ま え が き

筆者は, 日本海中部地震の後, 秋田県下の地震時の地盤災害の実状の調査と見学を行ったが, とくに, 秋田県若美町における水田と秋田港における震害について, 簡単な調査を進め考察を行った。本論はそれらについてのべ, 筆者独自の噴砂成因論を提唱したものである。

ここに報告する若美町における, 震害をうけた水田とは, 現在は埋立てられてしまった八郎潟の西縁の砂丘斜面につくられた人工のそれである。1枚1枚の水田は, 水田下すなわち砂丘表面にビニールシートをしきつめ, その上位に60~100cm程度の植土がのせられているという。地震のとき, ビニールシート下の水分の多い砂丘表面の砂が流動化し, ためにビニールシートに包まれた形の水田土塊が, 砂丘斜面沿いに自重で傾斜方向に動き, それによって生じた引張力でビニールシートが破断し, そこから水田の水が漏水して水稻を枯死させる一方, ビニールシートの裂け目からさきの液状化した砂が水田表面への噴砂現象として現れ, 水稻の一部をおおい, 大きな災害がもたらされたのである**。

今回の日本海中部地震による地盤災害の調査に行を共にして下さった新潟大学理学部の茅原一也教

* 新潟大学積雪地域災害研究センター

** 最近, 各地でビニール敷きの耕地が普及しているが, こうした農法はマルチ農法とよばれているという。本報告の震害は, このいみから, マルチ農法災害の一種とよんで差支えないであろう。

授からは、調査の便宜を戴いた。また、本研究センターの鈴木幸治技官は、同じく調査に参加され、本報告の図や写真を作製して下さい。両氏に厚くお礼申し上げる。

なお、調査に際して、各種の便宜を戴いた秋田大学名誉教授の加納博氏、同大学の柴田豊吉・丸山孝彦の各氏に厚くお礼申し上げる。さらに若美町役場の加藤透氏は災害現場を案内して下さい、同役場の進藤三雄氏ならびに西方文太郎氏は災害後の災害水田の採掘時における水田のビニールシートの破砕状況と噴砂との関係について御教示下さった。併せて両氏に深く感謝する。また、本研究センターの青木 滋教授は新潟地震のときの液状化についての研究について教示下さり、長岡技術科学大学の小川正二教授には、液状化時における地震動に関して御教示を戴いた。ここに厚くお礼申し上げる。

Ⅱ 調 査 結 果

A 若美町の水田における噴砂について

若美町の震害をうけた水田のうち、3枚の水田を対象とし、主として噴砂の形態を中心に調査した。

以下、噴砂の相、噴砂の形態、噴砂列の規則性、水田下の砂丘の傾斜と噴砂列との関係などについてのべる。



写真-1 互に接している噴砂

Photo.1 The twined sand craters.

1. 噴砂の層相

よく分級したサラサラとした細砂からなっていて、一見して、水田の土からきたものでなく、水田下の砂丘砂を起源としたものと推定できたが、じっさいに掘りあげた結果からもこのことが実証されている。

2. 噴砂の形状

噴砂は、一般に、中央にカルデラ孔に似た形の噴砂孔をもち、そのまわりに恰かもカルデラ火山の外輪山様の高まりをもっている(写真-1)。しかし、噴砂後、しばらく滞水していたような場合には、砂は分散して広がってしまい、上記のような火山様の形態を示さない場合がある(写真-2)。1つの噴砂内に新しい噴砂が生じているものもある(写真-3)。2つの噴砂のどちらかが他方を切って発達するものがある。1つの噴砂の肩にそれより小さい噴砂が、恰かも側火山のように発達している場合もある(写真-3)。

また、1つの噴砂孔の中に、いくつかの噴砂が生

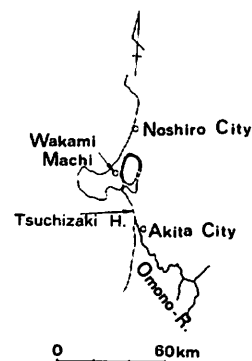


図-1 調査位置図

Fig.1 A map of surveyed area.

• 若美町役場の進藤氏・西方氏談。



写真-2 噴砂列（手前側）と
水に流された噴砂（向こう側）
（図-4を南からみる）

Photo.2 The rows of sand
craters (this side) and
the scattered sand craters
(the other side) (a view
from the southside of Fig.4)



写真-3 巨大な噴砂とその内
部や周辺に生じた二次的噴砂
群（図-3の中にある）

Photo.3 The huge sand crater
and the second sand craters on
the center or the surrounding
part of the former one (Fig.4)

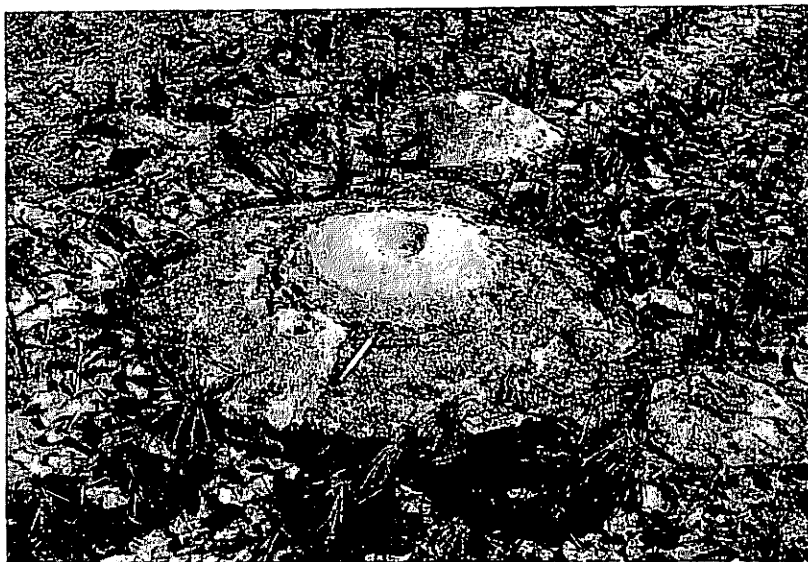


写真-4 二重の噴砂

—大きい噴砂の中央と肩に新しい噴砂が重っている。

Photo.4 The double sand craters.

—The new two sand craters on the center on the margin
of the old sand crater.

じている場合（写真-3），同じく1つの噴砂の中に，側火山様の2重の噴砂が生じている場合（写真-4），さらに，1つの噴砂の中に2つの噴砂が並んで発達する場合などがある。

3. 列をなす噴砂群

個々の噴砂は，1つだけ孤立して発達することは少なく，ほとんどが直線上の列をなして並んで発達している（写真-5・図-2～4）。

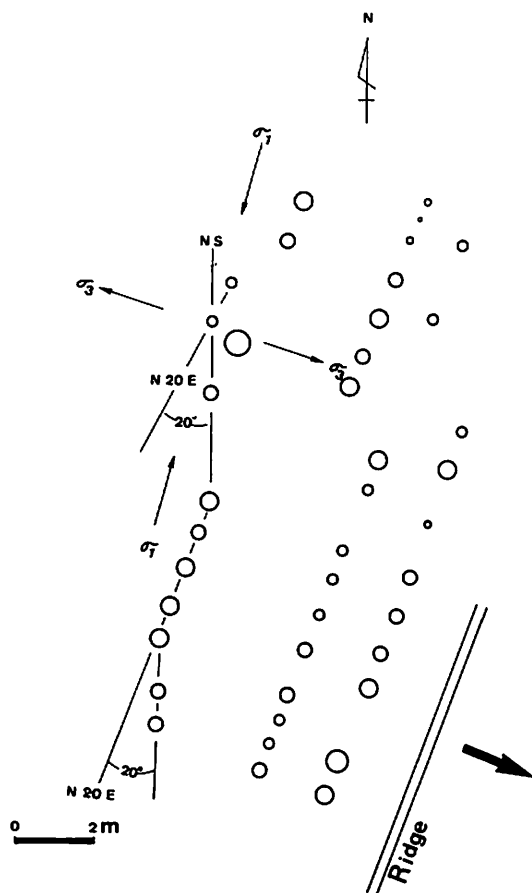


図-2 噴砂の分布略図 (1)

丸印：噴砂（大小は相対的な大きさを示してある）、
太矢印：水田下の砂丘の傾斜方向、小矢印：水田土
塊に裂目が生じたときの圧縮主応力軸の方向（ σ_1
が最大圧縮主応力軸、 σ_3 が最小圧縮主応力軸）

Fig.2 The rough distribution map of
sand craters (1)

circle : sand crater (the size of circles indi-
cates the size of sand craters) , large arrow
mark : the direction of dip of sand dune under
the paddy field, small arrow mark : the direc-
tion of main stress when the paddy soil splitted
by tension (σ_1 ; maximum, σ_3 ; minimum) .

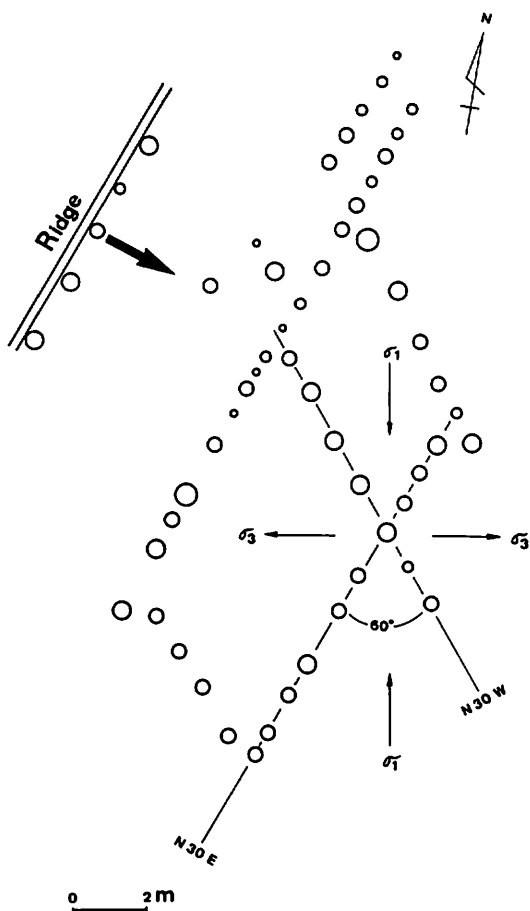


図-3 噴砂の分布略図 (2)

凡例は図-2 と同じ

Fig.3 The rough distribution map of
sand craters (2)

index : same as the exposition of Fig.2.



写真-5 直線状に配列し、かつ、互に斜交する噴砂群

—右手（砂丘の傾斜方向と反対側）に、畝ぞいの噴砂列がみえる—

Photo.5 The straight and crossed rows of sand craters

—Note to the straight rows along the ridge on the right hand (a upside of sand dune slope)

4. 平行配列する噴砂列

上記のように、直線上に列をなして配列する噴砂群は、単一の水田内では、互にほとんど平行して配列するという特徴がある（写真-5・図-2～4）。

5. 互に交叉する噴砂列

単一の水田内に発達する噴砂列は、すべての場合、互に斜交して発達している（写真-5）。この場合、1つの例では互に約 20° で交叉しており（図-2）、もう1つの例では互に約 60° で交叉しており（図-3）、また、もう1つの例では 50° 、 60° ないし 70° で交叉している（図-4）。とくに、図-2と図-3とからわかるように、単一水田内の噴砂列は互に平行しているから、交叉する噴砂列の交角も全く同じである。しかし、図-3の場合のように、同一水田内でも、噴砂列がほんの僅かであるが不平行を示して

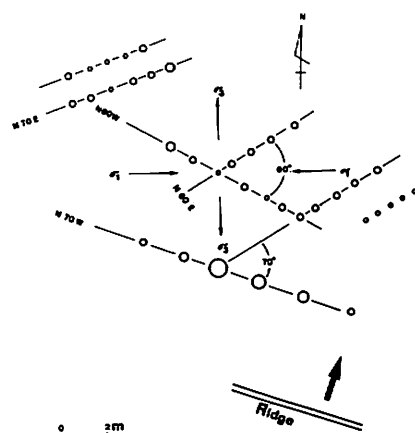


図-4 噴砂の分布略図 (3)

凡例は図-2と同じ

Fig.4 The rough distribution map of sand craters (3)
index : same as the exposition of Fig.2.

いるので、噴砂列の交角が僅かにちがっていることもある。

6. 水田下の砂丘の傾斜方向と噴砂列の方向との相関性

互に交叉する噴砂列の鈍角の2等分線方向は、水田下の砂丘の傾斜方向とほとんど一致している（図-2～4）。

ただし、水田の真の傾斜方向は正しく計測しなかったもので、図-2～4の傾斜方向は実際のものと多少ずれているかもしれないが、大きなちがいはないと思う。

図-5に示したように、3つの水田は、大きい農道をはさんで南北に分かれて分布しているが、南側の2つの水田下の砂丘の傾斜は東へ、北側のそれは北へ傾斜している。しかし、いずれの場合でも、傾斜方向は、同一水田内の交叉する砂丘列の鈍角の2等分線方向とほぼ一致している。

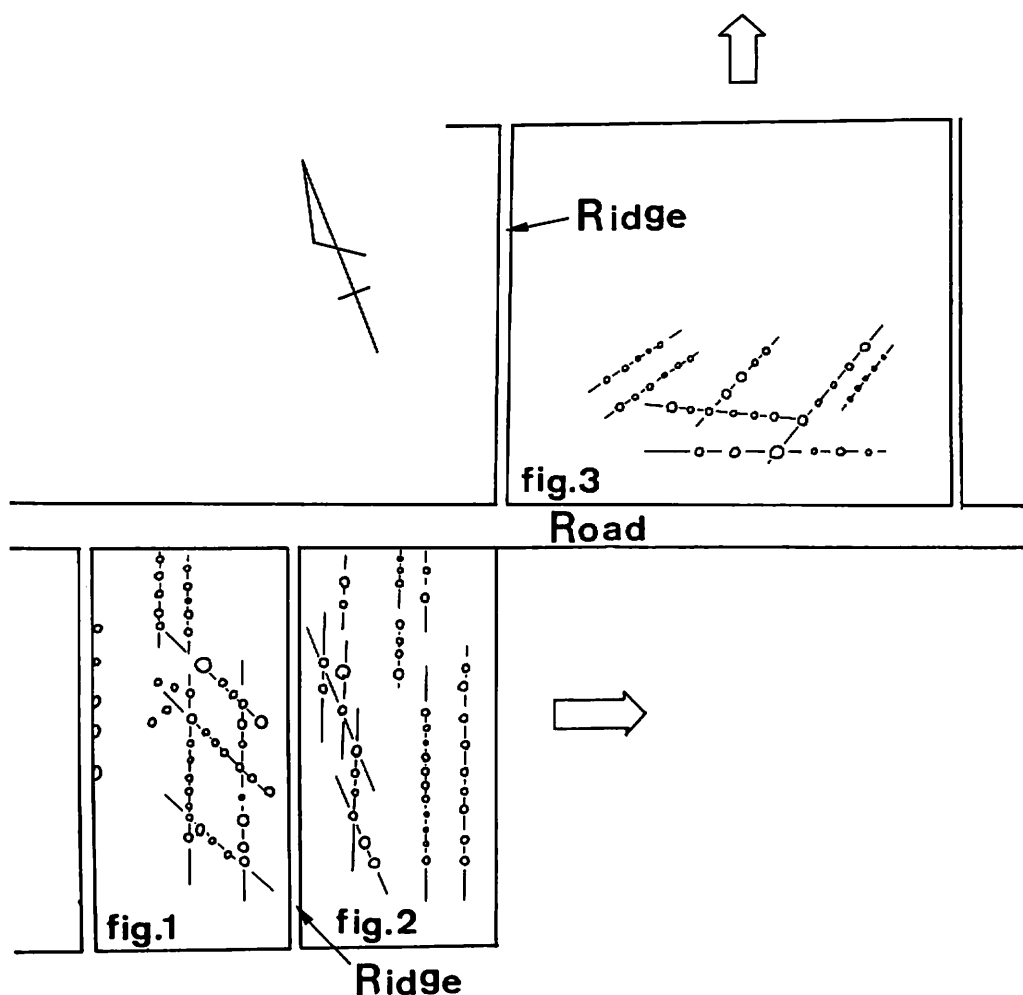


図-5 図-2～4の総合略図

矢印：砂丘面の傾斜方向

Fig.5 A rough synthesis map of Fig.2～4 .

arrow mark : direction of dip of the inclined surface sand dune.

7. 噴砂列とビニールの断裂との関係

噴砂が、水田下方の砂丘の砂を起源としていること、噴砂が線状に配列していること、水田の水がほとんど完全に洩れてしまっていることなどから、噴砂列直下のビニールシートは断裂していると推定していたが、その後、こうした水田の土が掘りおこされた結果、この推定が当たっていたことを知った。すなわち、鋭角で交わる2列の噴砂列の下は、互に鋭角で交わる方向に断裂しているということである。なお、図-3・5にみられるように、砂丘の傾斜と反対側の畝にそって噴砂が直線状に配列している場合もある。

8. 畠地の変形

図-2の水田の東側には、水田に接して、やはりビニールシート上につくられた畠地がある。

この畠には、写真-6のように、隣の水田の畝と平行して、そこに野菜が栽培されている。この写真に現われているように、地震のときに、畝が曲ったといわれている。



写真-6 人口畠地の畝の曲り（左手が砂丘の傾斜方向）

Photo.6 The bending ridges on the kitchen garden (a lefthand side is down one of sand dune slope)

B 秋田港埠頭の噴砂

この地域の噴砂現象について、簡単な調査を行ったので報告する。

埋立て造成地上のコンクリートとアスファルトによって舗装された埠頭広場には、破断亀裂、衝上亀裂、陥没、噴砂などの被害が生じた。それらの見取り図を示しておく（図-6）。ただし、これは正確な測量図ではなく、メモ帳と写真から作製したものであることを予めお断りしておく。

・若美町役場の進藤氏・西方氏談。

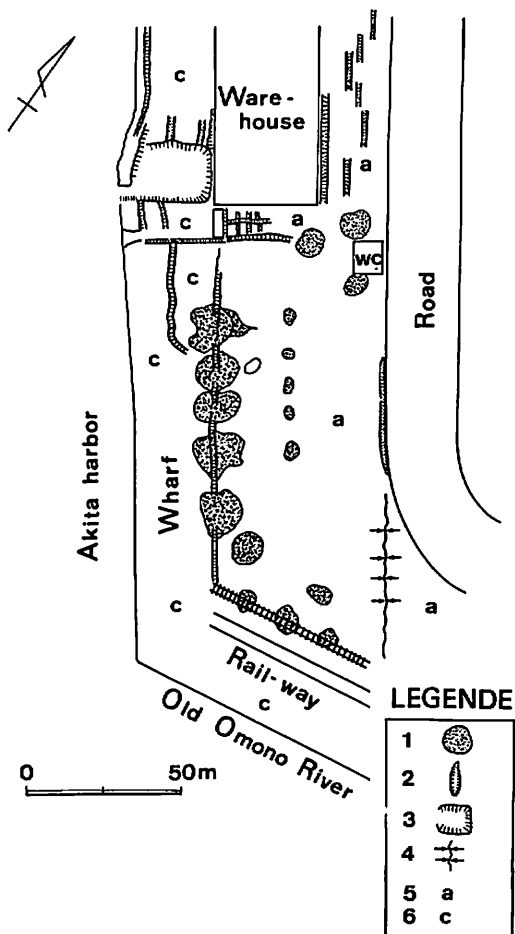


図-6 秋田港駅西方の埠頭における噴砂・亀裂の分布略図

1：噴砂，2：開口亀裂，3：陥没地，4：衝上性亀裂，5：アスファルト面，6：コンクリート面。

Fig.6 The rough sketch of the distribution of sand crater and cracks.

1 : sand crater, 2 : open crack,
3 : subsidence part,
4 : thrust crack,
5 : asphalt pavement,
6 : concrete pavement.

噴砂は、引張亀裂ぞいに多量に分布している場合と、アスファルト上に独立した凹地をなして発達する場合とがある（写真－７・８）。後者の場合は、数ヶの噴砂がほぼ一直線状に配列し、前述の若美町のそれらと同じように噴砂列をなしている。噴砂が地下のどの部分からもたらされたかについては不明であったが、多分、埋立ての土砂起源と推定される。

なお、噴砂せずに、アスファルトが破壊し、同時に凹地をなしている部分がある（写真－７・８）。

この噴砂列の方向と平行して、引張性の破断、すなわち、開裂した亀裂が、コンクリート舗装内、コンクリートとアスファルト舗装の継目（写真－７・８）、建物の土台とその外側の舗装アスファルトとの継目、あるいはアスファルト舗装上面などに発達している。

倉庫の海側の護岸壁は、海岸へと大きく曲り、コンクリートの護岸壁が破壊されている。この壁の内側、つまり、倉庫との間は大規模に陥没していた。

上記の噴砂列と開口亀裂の方向は、すべて埠頭の護岸壁の方向と一致している。

なお、陸側には、これらの方向と一致しているが、アスファルト舗装部が直線状に盛り上がった部分があり、盛り上がった頂部は破壊し、しばしば陸側のアスファルトの部分が、海側のそれの上に低角でのし上げている衝上亀裂がみられる（写真－９）。

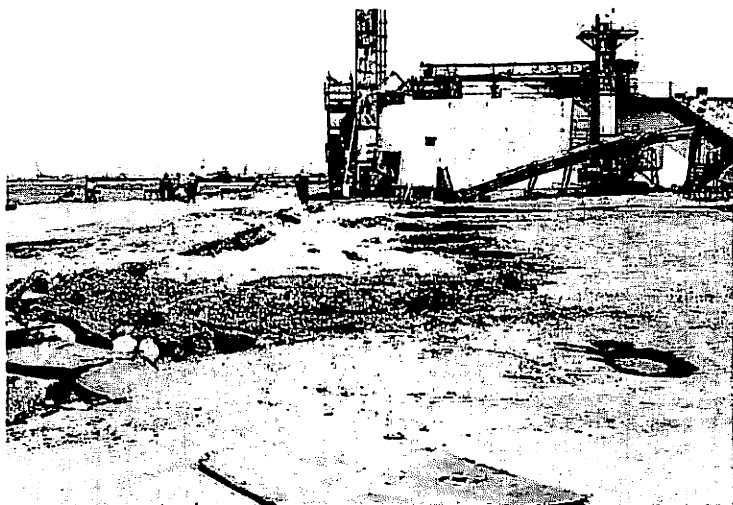


写真－７ 秋田港埠頭の噴砂（北側からの眺め）

－右手に、コンクリートとアスファルトの舗装の継目の開口亀裂からの大量噴砂がみられる。左手にアスファルト上の噴砂列がみられる－

Photo.7 The sand craters on the wharf of Akita harbour (a view from the northern side)

－There are many large sand craters erupting from the open crack between the concrete and asphalt pavement on the right side, and some sand craters on the asphalt pavement on the left side.



写真－8 秋田港埠頭の噴砂群（南からの眺め）

—コンクリートとアスファルトの継目の開口亀裂からの噴砂群と、噴砂していない凹地—

Photo.8 The sand craters on the warf of AKita harbour (a view from the southern side)

—The sand craters from the open crack between the concreate and asphalt pavement and a hollow without sand crater.



写真－9 アスファルトが盛上がった衝上性亀裂

Photo.9 A thrust crack with the upwarping asphalt.

Ⅲ 考 察

はじめに、若美町の人工水田の噴砂の成因について考察し、ついで、この成因論を秋田港の埋立て地における噴砂現象に適用し、併せて噴砂現象一般に関する成因について言及する。

A 若美町の人工水田における噴砂の成因

さきの記載事項に依拠して、人工水田における噴砂ならびに水田土壌の移動の成因について簡条的にのべる。

1. 数回の噴砂現象

すでにのべたように、噴砂の中に新しい噴砂が重って生じていたり、噴砂の一部に別の噴砂が重って発達したりしていることから、少なくとも、噴砂は数回にわたって生じたことが読みとれる。

地震時に、同じ噴砂孔から何回も噴砂したといわれているので、数回の噴砂現象はこのことをいみするのであろう。

2. 噴砂の起源

噴砂が、どこからもたらされたかについては、砂の性質から、感覚的には、水田のビニールシートより下の砂丘砂からと判断できたのであるが、実際は、1983年の秋に行われた被災水田の掘り返し作業の折に、このことが実証された^{*}。すなわち、噴砂は少なくとも水田土壌下のビニールシートよりも下方の砂丘の砂を起源としたものである。ただし、砂丘砂のどの部分からもたらされたかについてはあとでのべることにする。

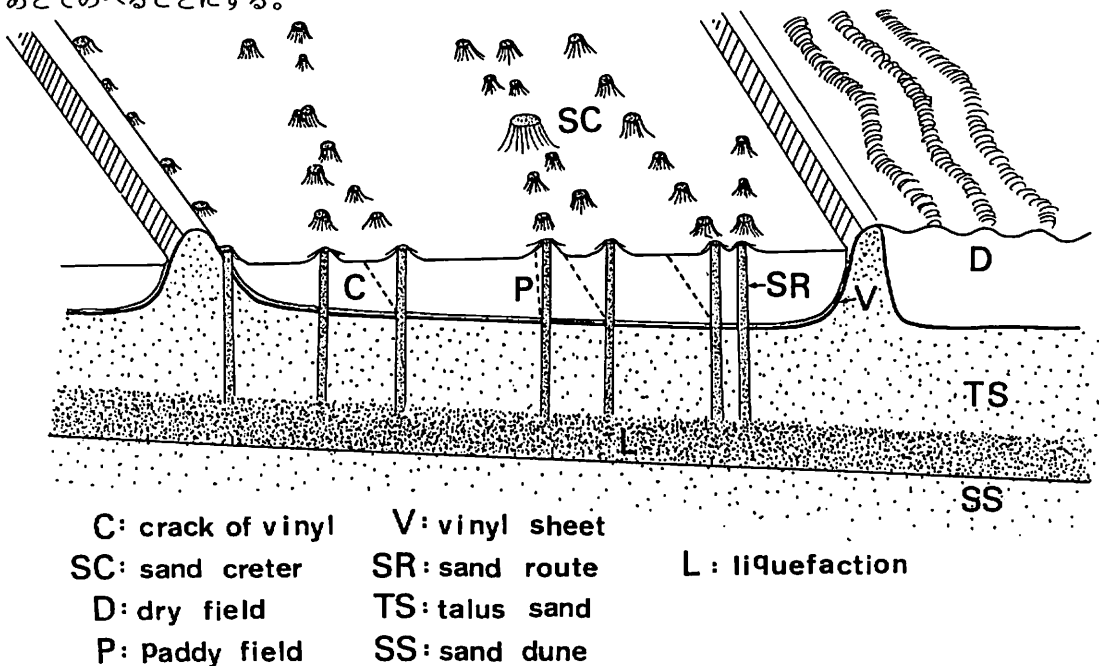


図-7 砂丘斜面上の人工水田における噴砂発生を示す模式断面図

C: ビニールの裂目 (点線は透視による), V: ビニールシート, SC: 噴砂,

SR: 砂のパイプ, D: 畠, TS: 崖すい性砂, P: 水田土, SS: 砂丘, L: 液状化部分

Fig.7 The schematic profile indicating the occurrence of sand craters on the paddy field on the slope of sand dune.

* 若美町役場の進藤氏・西方氏談。

3. 噴砂列が平行ないし交叉している理由

噴砂列の直下のビニールシートが破れていることについてはすでにのべた。このことは、互に平行かつ交叉する噴砂列は、ビニールシートの裂け目が互に平行かつ交叉していることによって規制されたことをいみしている。

では、水田下のビニールシートがなぜ互に平行し、かつ交叉する方向に破れたのであろうか。

このことを考察する上で、次のことが重要と思われる。それは、図-2～4に示したように、噴砂列、すなわちビニールシートの裂け目の方向からすると、1つの水田内にあっては、互に交互するシートの割れ目の方向から、この裂け目の生じたときの応力場が次のように想定されることである。すなわち、同一水田内の互に交叉する噴砂列の鋭角2等分線方向が最大圧縮主応力軸、鈍角2等分線方向が最小圧縮主応力軸、垂直方向が中間主応力軸といった応力場が想定されるということである。では、このような応力場はどんな変動によってもたらされたと考えるべきであらうか。

1つには、交叉する破れ目の鋭角方向から水平の圧縮力が加わった場合、つまり、剪断性の破れ目という見方である。もう1つは、交叉する割れ目方向の鈍角2等分線の方向に水平引張力が働いて生じた、いわゆる破断の破れ目という見方ができる。

筆者は以下にのべる理由から、後者の見方が正しいと考える。

すでにのべたように、互に隣り合う水田内では、それぞれの水田内の交叉する割れ目方向の鈍角2等分線の方向は、つねに、水田下の砂丘の傾斜方向を示している（図-5）。かりに、傾斜方向に、水田土塊の部分が動くとするれば、その水田土塊には、上記の後でのべた見方のように、交互する裂け目方向の鈍角2等分線の方向に水平引張力が働くはずである。

このように、水田土塊が、その下の砂丘の傾斜方向に動いたと考えてよいのであろうか。それは次に述べるように十分可能である。

ビニールシートの下方の滞水した砂層は、傾斜した砂丘表面の形態に応じて、傾斜して発達していたと考えられるので、その砂層がひとたび液状化すると、上位の水田土壌——その下の砂層ともども——は、自からの重量で砂丘の斜面に平行して下方へ動く可能性がある。こうした動きは、水田土塊などに対して水平引張力として作用し、そこでビニールシートを含めて高角な破断面が生じるということである。

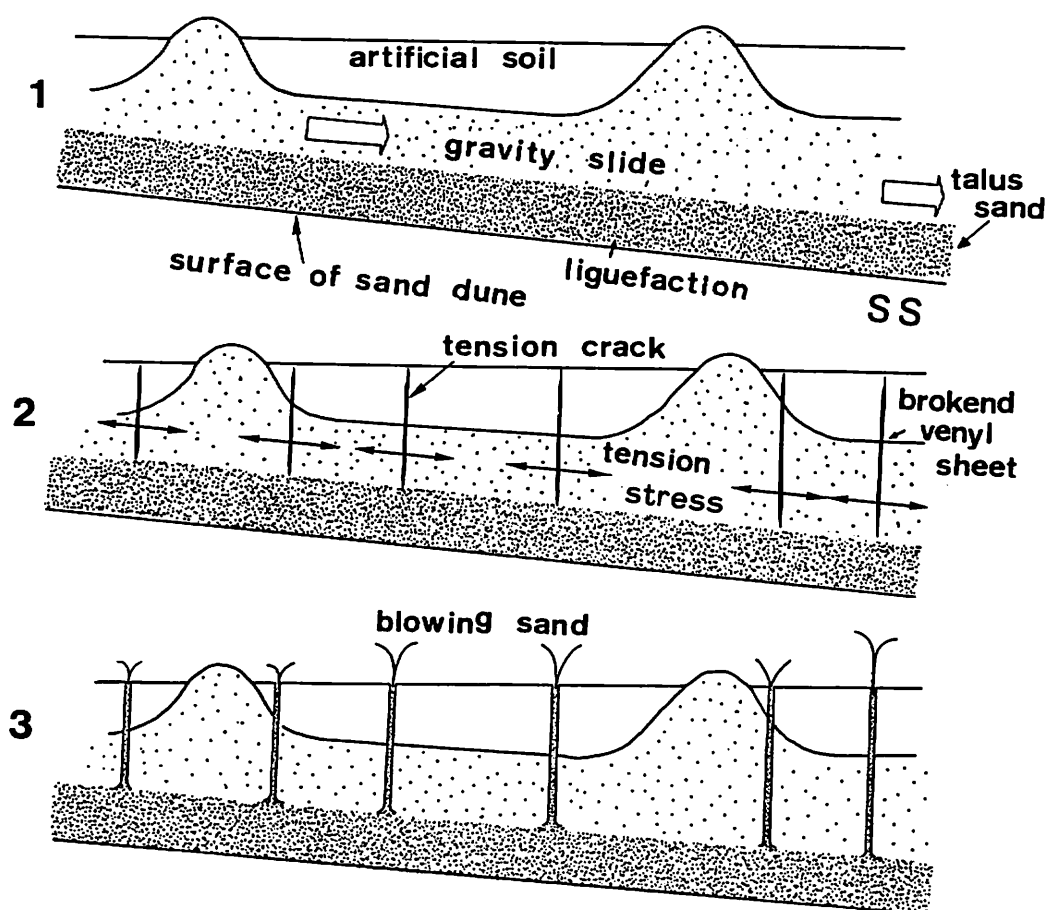
記載でのべたように、乾田の場合（写真-6）には、噴砂が生じないで、畝土そのものが流れて畝の曲がりをもたらしている。このことは、水を含まない軽い畝地の場合には、上記のような破断をもたらす程に応力が集中することなく、重力にしたがって、傾斜方向へ流下しただけだったのであろう。いずれにしても、畝土の流下は、その下方の砂層の液状化によって、表層部が傾斜ぞいに、自からの重力によって流下したことを示している。

すべにのべたように、水田内の噴砂列が、しばしば砂丘の傾斜と反対側の畝のそばのビニールシートの端に並んで発達している。このことは、その水田土塊が傾斜側へずれて、畝と水田土壌の間に開口した亀裂が生じたことをいみし、上記の見方を側面から支持している。

4. 液状化した砂丘砂の部位

さきに、ビニールシートより下方の砂丘砂が液状化したとのべたが、では、砂丘のどの部分の砂が液状化したのであろうか。

ビニールシートによる人工水田は、そもそも、地下水位の低い砂丘地にもうけたのであるから、地



図－8 若美町の人工水田における噴砂の形成過程を示す模式断面図

- 1 : 傾斜した滞水砂の液状化によって、表層土塊が傾斜ぞいに移動する。
- 2 : 表層土塊が水平引張力で開口破断する。
- 3 : 圧の高い液状砂が噴出して噴砂を形成する。

Fig.8 The schematic profile indicating the formative process of sand craters on the paddy field at Wakami-machi.

- 1 : The sidesliding of surface landmass along the slope of sand dune by the liquefaction of the water saturated sand on the sand dune.
- 2 : Making of the open cracks by the tension in the surface landmass.
- 3 : Making of the sand craters by the eruption of the pressure of liquefacted sand.

下水位は、ビニールシート直下にあるとは考えにくい。まして、地震のあった5月というのは、地下水位が下がる時期であるというから、益々地下水は、ビニールシート直下にあったとは考えづらい。なお、水田や水路からの水もれのため、水田直下の砂の含水率が高かったとも考えられなくもない。しかし、砂丘砂の場合はそのような水はすぐ浸透してしまい、水位がそれ程高く上るとは考えにくい。

要するに、砂丘砂の液状化は、少なくとも水田土塊を包むビニールシートの直下よりは下方の砂の部位に生じたと考える。しかし、こうした見方に立つと次のような問題が生じるように思う。すなわ

ち、新潟地震に際して、砂丘砂はほとんど液状化を生じることがなかったといわれているのに、今回の若美町の場合、なぜ砂丘砂が液状化したのかということである。

この問いに対しては、次の2つの答えが可能と思われる。その1つの解答は、液状化した砂丘砂は、本来の砂丘砂ではなくて、砂丘斜面に斜めに堆積した二次的な砂丘砂であり、この部分に地下水が滞水し、それが液状化したのではないかという見方である。いうまでもなく、こうした見方が正しいかどうかについては調査を行って確かめるべき事項である。

もう1つの解答は、本来の砂丘でも液状化するのであるが、人工水田のような重い施設をそこにのせなければ噴砂は生じないという見方ができるかもしれない。このことも改めて調査しなければならない事項である*。

しかし、今の段階では、前者の見方にしがたって、液状化は本来の砂丘砂の斜面をおおっていた2次的砂丘砂の部分に生じたものと考えておく。つまり図-8のように本来の砂丘砂斜面が不透水層となっていて、その上位の2次砂丘砂に地下水が滞水し、震動に伴ってその部分が液状化したとしておく。こうした2次的砂丘砂上に人工水田をもうけると、下位の砂の液状化に伴って上位の人工水田や一部の砂丘砂もろとも傾斜方向に自分の重量で何らかの規模の移動をする。この運動が人工水田や一部の砂丘砂に水平引張力として働き、高角の破断が生じる。このために、ビニールシートが裂けて水田の水が漏水して乾田化したのである。こう考えると、上記の後者の見方の一部、つまり、重量物をのせると噴砂現象が生じるという見方も正しいというべきであろう。

5. 噴砂の出現

液状化した砂は、砂丘斜面上にあるので、当然ながら液状化した砂の内圧は高い。ひとたびこれをおおっている人工水田を含む固相状態の部分に破断面が生じると、その割れ目を通じて、はげしく地表めがけて噴き上げるのである。この場合、地表に火山のような独立した噴砂現象を呈するのは、あくまで破断面を通じて液状砂が噴出するときの力学条件によるのであろう。多くの火山が独立した噴火形態をとるのと同じことなのであろう。

なお、1つ1つの噴砂が、常に中央に陥没孔を伴っているのは、噴砂の最後の段階で生じた落ちこみ、すなわち、多くの砂や水を噴き出したために生じた凹地をいみする。

Ⅳ 傾斜基盤上の土砂の液状化を契機とする表層施設の引張破断による噴砂成因説

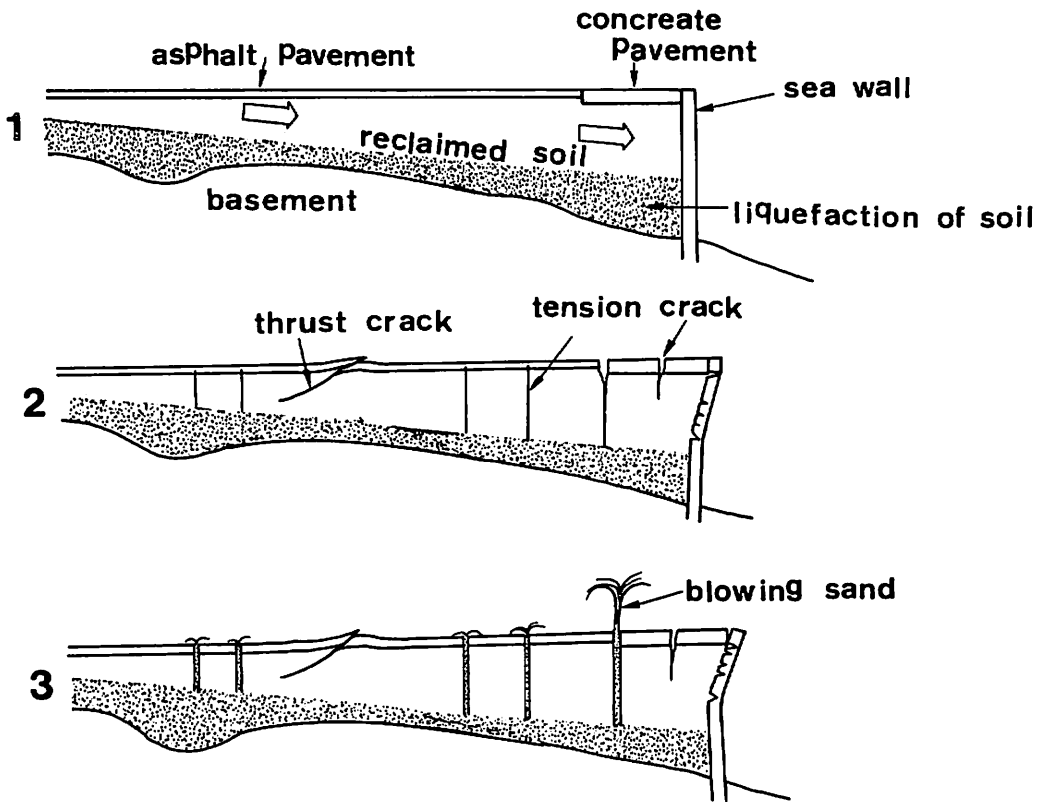
筆者は、日本海中部地震によって、破断、衝上亀裂、陥没を伴って生じた噴砂現象を、秋田港駅の東側の埠頭広場で観察した。この広場は大部分がアスファルト、一部がコンクリートで舗装されているが、ここでは、前章で展開した噴砂形成論によって、秋田港の一部にみられる破断や噴砂の諸現象の形成過程を説明し、併せてここに展開した噴砂成因論が、一般に普遍するものであることを主張する。

A 秋田港駅東方の開口亀裂、衝上亀裂、噴砂の成因

埠頭広場には、コンクリートとアスファルトの舗装部分の継目、建物のコンクリート土台とアスファルト舗装部分との継目、そして、アスファルト内などに、破断した亀裂がみられ、それらはいずれも開口している。広場北西隅にみられるように、岩壁が海側へ折れ曲っていることからわかるように、これらの開口亀裂は、埠頭広場が破断によってブロック化し、かつ、それらが海側へと水平移動した

* 若美町役場の西方氏によると、ビニールシート下にはピートを含む層がある由。これが堅すい物質である可能性がある。

ために生じたことは明らかである。なお、倉庫の南側に、岸壁方向と直交した開口亀裂がみられるが、それは、大きい陥没によって水平方向に引きずられて開口したものであろう。なお、鉄道引きこみ線の付近のアスファルト舗装部に、上記の主要な開口亀裂方向と平行した衝上性の亀裂（写真－9）が発生している。この亀裂は北東側の部分が、南西側の部分へと低角でのし上がる関係を示し、ために、この部分のアスファルトは高まりをなしている。こうした現象は、多分、この亀裂の北東側後背のブロックが、海側へ向って水平に大きくずれたために生じた低角衝上亀裂の地表への現われをいみするのであろう（図－9の2参照）。



図－9 秋田港駅東方の埠頭の噴砂の形成過程を示す模式断面図

- 1 : 傾斜した滞水砂の液化化によって、表層土塊と舗装部が傾斜ぞいに移動（矢印方向）。
- 2 : 表層土塊と舗装部が水平引張力で開口破断する。
- 3 : 圧の高い液状砂が噴出し、噴砂が生じる。

Fig.9 The schematic profile indicating the formative process of sand craters on the pavement of the wharf at the eastern part of Akitako station.
1 ~ 3 : same as the exposition of Fig.8.

さて、噴砂は、上記のアスファルトとコンクリートの舗装の継目に現れている開口亀裂部にみられる。この部分の噴砂の規模が最も大きい。ついで、アスファルト舗装部に、直線状に並んで配列する噴砂群がみられる。この噴砂列の方向は、さきの開口亀裂の方向と平行している。

これらのことからわかることは、1つには、舗装部の水平移動で生じたコンクリートとアスファルトの継目を通して噴砂が生じたということ、もう1つは、アスファルト舗装部では、アスファルト下に生じた開口亀裂を通して、独立した噴砂列を生じたと推定できることである。

こうした見方を、さきの若美町の人工水田の噴砂の成因論から吟味してみよう。まず、はじめのべたコンクリートとアスファルトの継目に生じた開口亀裂から噴砂が生じているということは、若美町の人工水田の場合には直接みることのできなかったような、噴砂を促がした地下の破断部が、地表に現れていることをいみする。こうした開口亀裂は、コンクリートとアスファルトの継目のような力学的に弱い接合部が、水平引張によって破断したことを示している。この場合の亀裂はすべて引張方向と直交しているが、さきの若美町にみられた亀裂の方向が引張方向と斜交しているのに対象的である(図-10)。このことは、表層の物性の差によるものであろう。なお、陥没部のすぐ南東部のコンクリートの部分にはコンクリート自体に生じた開口亀裂がみられるが、そこからは噴砂していない。このことは、その亀裂は地表近いところだけに生じたことをいみするのであろう。

さらに、前述の後段でのべたアスファルト部に生じた直線状に配列している噴砂群は、若美町の人工水田における噴砂列の成因と同次元で考えることができる。すなわち、噴砂部のアスファルト下の部分に破断面が生じ、そこを通路として液状化が上昇し、噴砂したということである。なお、この噴砂には、まれに、砂をほとんど噴き出すことなく丸い凹地を呈していることがあるが(写真-7,8)、これはおそらく、アスファルト直下にはげしい噴砂があったためつき上げられて破壊し、噴砂後、液状化した砂の一部が、地下で海側へ流れ、そこの地表部が落ちこんだためであろう。

この秋田港駅の東方の埠頭広場は埋立地につくられたといわれているが、埋立て状況は全く不明である。しかし、噴砂が埋立て土砂に起源することは疑いないことであり、また、上方の施設が海側へ移動して破断が生じたという上記の論理は、そのまま、前記の若美町にみられた噴砂の背景そのものである。かくて、筆者は、埠頭広場下の埋立土砂は、図-9に示したように、海側へ傾斜した基盤をおおい、地下水位も同じく海側へ傾斜していると推定した。そして、この部分が液状化すると、その上方の土砂ないしコンクリートやアスファルトなどのブロックは傾斜方向、つまり海側へ動き(図-9の1)、この動きが一部の土砂やコンクリートとアスファルトのブロックに水平引張力として働いたために開口亀裂が生じる。なお、陸側ブロックの水平移動量が大きかったため衝上亀裂も生じる(図-9の2)。こうした開口亀裂を生じ、傾いた地下水位のために圧の高まっていた液状砂が地表へあふれ噴砂をもたらしたのであろう(図-9の3)。

B 本成因論の普遍性

今回の日本海中部地震に際して生じた噴砂による災害は、上記の若美町や秋田港だけに生じたわけではない。筆者も、上記の地域のほか、秋田県の脇本町、若美町、能代市などにおいて、噴砂を伴う液状化による住居の破壊状況を観察した。何か所かで、Aでのべたような成因論で説明できる例を知りえた。しかし、ここでは、それをのべることをさけて、今回の地震に際して生じた噴砂現象についての第三者の報告と、1964年の新潟地震の際の噴砂についての報告とを参考にして、筆者の成因論の普遍性についてのべることにする。

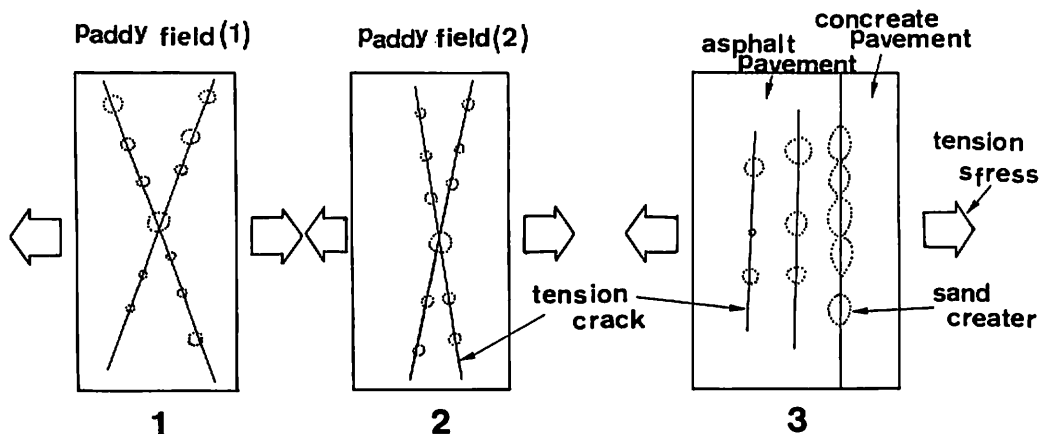


図-10 噴砂時に生じた引張亀裂の地表における方向

- 1・2：若美町の人工水田の亀裂
3：秋田港駅東方の埠頭の亀裂

Fig.10 The direction of the tension cracks forming at earthquake on ground surface.

- 1・2：The cracks on the artificial paddy field at Wakami-machi.
3：The cracks on the pavement of the warf at the eastern part of Akitako station.

さて、栗林ほか3名(1983)は、今回の日本海中部地震によって、秋田から青森の日本海側陸地に現れた噴砂などの災害は、どこでも、平野部の後背地など、地形の変換部における最近60年間に形成した地盤に集中しているとのべている。このことは、筆者の成因説の中樞をなす傾斜基盤とそれをおおう新しい土砂という条件を端的に示しているように思われる。

なお、1964年の新潟地震のときにも、液状化と噴砂による震害がいちじるしかったといわれている。これらの現象を筆者の成因説から吟味してみよう。

この地震の際に生じた噴砂は、家屋密集地域と平地に現れたといわれているが、前者では主として建物の周囲、側溝、道路上の弱線などに生じたとされている。当時の写真から判断すると、こうした弱線からの噴砂は、割れ目全体から噴出したこともあるが、筆者の報告したように、独立した噴砂が連鎖して生じたものもかなりあるようである。平地の場合には独立した噴砂が列をなして現れるという例が多かったが、割れ目噴出の場合もあったと報告されている。この平地の噴砂の場合、多数の地割れ群に列をなして噴砂した例が報告されている。たとえば、それらは塩野橋付近の左岸地域、川岸町の河岸地帯、通船川南岸地帯、新潟駅裏の旧信濃川に沿った地帯などにみられたという(新潟県新潟地震災害復興委員会、1964)。

以上の事実は、まず土地の表層部の施設の割れ易い境界部に開口亀裂が生じ、噴砂がもたらされたことを示している。このことは、さきの秋田港における噴砂機構そのものを示しており、また、噴砂が列をなして発達し、かつ、それが地割れ群にそって分布していることも、筆者が噴砂成因論で展開した規則性そのものを示している。

ところで、筆者の噴砂成因説で指摘した地下の液状化現象によって表層施設が水平方向に動き、それが契機となって表層部の破断、ついで噴砂という機構がうらづけられる次のような報告も知られている。

たとえば、「万代橋ののぼり口と降り口が急角度になったのは、地盤が街ぐるみ家ぐるみ信濃川にはり出したためといわれている」、「自宅と工場がぴったりついていたのが離れて、敷地が三間半ものびた」「八千代橋際の土地が信濃川の方へ伸びて土地が広がった感じがする」「今まで自宅と生垣の間が通れなかったが、地震後、案に通れるようになった」などという報告がそれである。いずれも近くに噴砂現象がみられたという（平田ほか24名, 1964）。

こうしたことが事実であれば、これらのことを、筆者の成因説にてらして解釈すれば、次のようなことになるであろう。すなわち、地下に一方へ傾斜する基盤があれば、その上位には、同じく傾いて滞水する砂層がおおっていることになる。こうした部分が液状化すれば、上位の非液状化の土砂や施設は、自分の重量に応じて液状砂上を水平に移動し、同時にその動きが、上方の土砂や施設に対して、水平引張力をもたらし破断させるであろう。こうして生じた開口亀裂から、圧力の高くなった液状砂が噴砂となって噴きだすのである。

新潟地震の場合の液状化と噴砂は、多分、河川側や低地側に傾いた基盤の傾斜にその本質があったと考えるべきである。また、それはすべての噴砂現象に当てはまると主張したい。

筆者の成因説によると、低地、河川、海へ向って傾く基盤の傾斜部をおおう土砂内には、低地側へ傾く地下水面が生じ、そこが液状化すると表層の土砂と施設が自重で水平移動するためにそこが破断するということであるから、この種の災害を防止するためには、傾斜基盤をおおう新しい土砂上面における施設の基礎杭は液状化しない層まで打ちこむ必要があるし、また、基礎杭無しの小規模施設の場合には、滞水層の除去—水ぬき—が必要である。

筆者の仮説のポイントは、傾いた液状化し易い地層の存在——傾いた基盤をおおう、人工砂層も含む新しい年代の砂層——、それが震動で液状化するが、液状化が直ちに、噴砂や地割れを支配するのではなく、液状化層上に何らかの重量の大きい施設——建物、鉄道、舗装道路、締めた土地など——があると、それが水平にずれ、ずれによって地割れが生じ、そこへ噴砂が生じるというものである。

たしかに、液状化した部分の上位の建物がその下位の砂の液状化によって傾いているという見方は正しいと思うが、この場合にあって、なお、土地の水平的転移がそれに何らかの関与をしていたのではないかという見地で見直す必要があることを主張したい。

参 考 文 献

- 土質工学会編（1980）：日本の特殊土，土質基礎工学ライブラリー10，1－356。
平田義夫ほか23名（1964）：新潟地震を語る，郷土新潟 5，2－9，新潟郷土史研究会。
栗林栄一・角 徹三・中村俊六・青島縮次郎・河邑 真（1964）：1983年5月26日，日本海中部地震における地盤に起因する災害 自然災害科学中部地区シンポジウム講演要旨集，9頁。
新潟県新潟地震災害復興委員会（1964）：新潟地震災害復興計画（案），第1編，序論 1－140。
新潟県（1964）：新潟地震災害復興計画，1－343。
柴田 徹（1982）：地震災害，97～108，ゼロメートル地帯の被災と災害対策の研究（文部省科研費，自然災害特別研究成果，代表者松沢 勲）。
運輸省（1964）：新潟地震港湾被害報告，第1部，1－104。
吉見吉昭（1980）：砂地盤の液状化，技報堂出版，1－156。