

# 災害調査報告書

## 泥上掘削機の転覆災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

## 1. 災害の概要

災害発生時の作業は、貯水池に堆積している汚泥を泥上掘削機で浚渫（海底・河床などの土砂やヘドロを除去）する作業を模擬するものであった。被災者は機械の運転者に指示を与えるため運転席左側のデッキに乗ったまま、泥上掘削機を貯水池に進入させた。機械が岸から約 10 m 進んだ際に両側のフローターが完全に浮いた状態となった。その後、岸から約 20 m の中央部まで進んだ場所で、上部旋回体を旋回させた後、アームを池の底に伸ばしたところ、泥上掘削機がゆっくり傾斜し始め、その後転覆した。

## 2. 発生状況の調査

### 2. 1 泥上掘削機の概要

図 1 および図 2 に事故のあった泥上掘削機を示す。泥上掘削機の下部走行体には大きなフローターを有し、軟弱地盤や湿地帯で作業可能な掘削機とされている。以下に概要を示す。

型式：水陸両用（泥上仕様）自走式

全装備重量：約 382 kN（約 39 tf）

接地圧：14.7 kPa

フローターの概略寸法：1,900W×1,550H×8,100L（単位：mm）

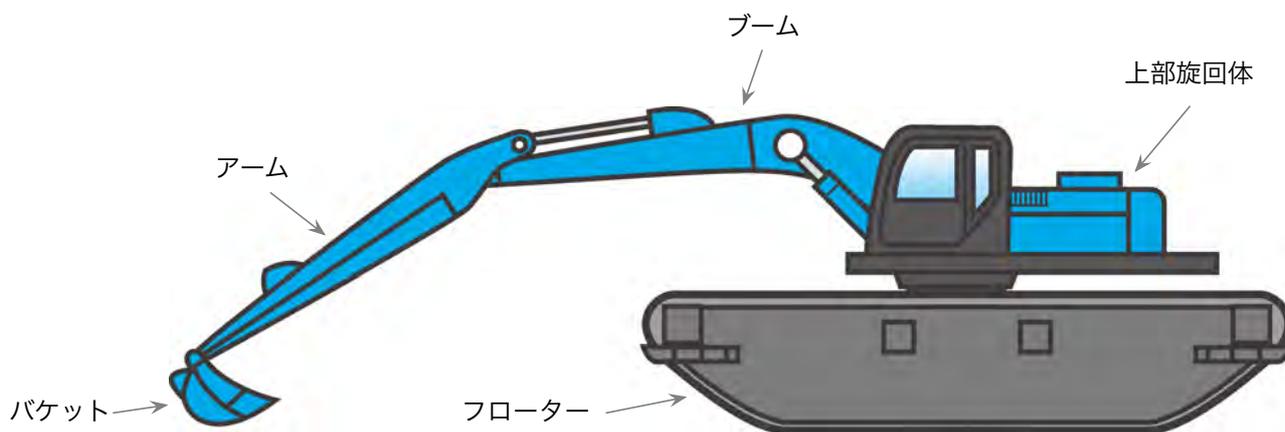


図 1 泥上掘削機のイメージ

## 2. 2 排水量, 浮心, 復原力

船が静水中で浮かび平衡を保つとき, 船が排除する水の重量を排水量という. この排水量は船の重量に等しい. この排水量に等しい力を浮力, 水を排除した容積を排水容積, その体積中心を浮力の中心, あるいは浮心という. 船には浮心から鉛直上向きに浮力が作用する. したがって, 浮力と船の重量とは大きさが等しいが作用方向は反対となる. また船が平衡を保つためには, 船の重心と浮心が同一鉛直線上にある必要がある<sup>1)</sup>. 静水中に浮く船の重心および浮心位置を図2に示す. なお, 静水面に浮いている船体の水面と接する線を喫水線という.

復原性は船舶の性能の中で最も重要なものの一つである. 船舶等が波などの外力が作用して左右どちらに傾斜しても, 重心位置 (G) と浮心位置 (B) の位置関係で船を元に戻そうとする力が働く. これが復原力である.

図3は船体が外力を受けて傾斜した状態を示す. 図のように船体が傾斜した場合, 浮心の位置が移動する. 船は船体が傾斜しても重力と浮力の作用により元の位置に戻ろうとする力が働く, この働きが復原力である.

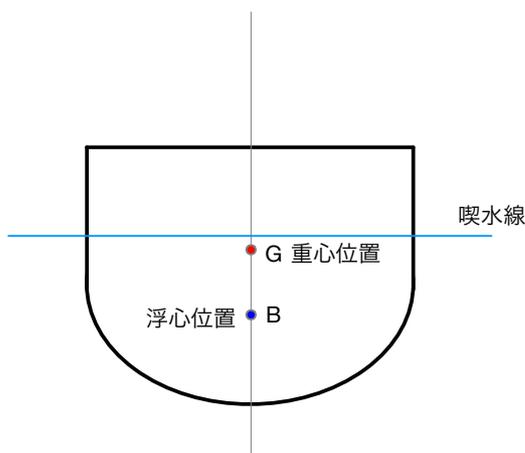


図2 静水中に浮く船の重心および浮心位置 (平衡状態)

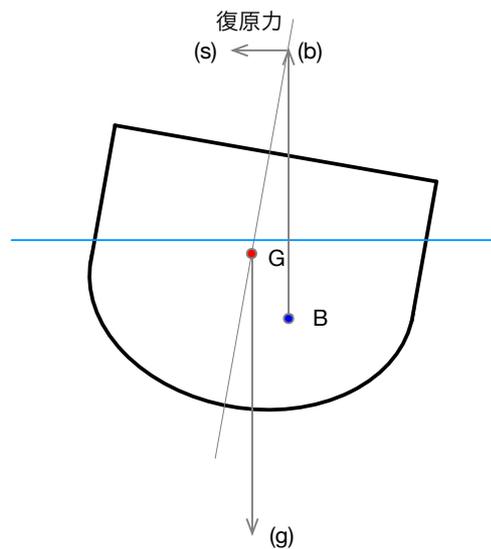


図3 外力を受けて船体が傾斜した状態

### 3. 泥上掘削機の水安定性の検討

#### 3.1 「転覆前」の浮心位置と重心位置の算出

泥上掘削機は貯水池の中央部に移動し旋回した後、アームを伸ばした際に転覆した。本報告書では、アームを伸ばす前の状態を「転覆前」と呼び、アームを伸ばした状態を「転覆時」とそれぞれ呼ぶ。

本検討では当時の記録から転覆前のフローターの喫水線を仮定した。なお、左右のフローターに生じる浮力を正確に算出するためには詳細な寸法を把握する必要があるが、今回はそれが難しかったため形状を簡略化して体積を求めている。

##### (1) 浮心位置の算出

図4に右フローターの喫水線以下の部分の寸法を示す。図心を算出するため①～⑦に分割した。表1に各ブロックの面積および図心までの距離から断面一次モーメントを算出した結果を示す。断面一次モーメント  $S$  は図心を求めるために必要なものであり、面積と距離の積で表される。ここで求めた図心は浮心に相当し、その位置  $G_x$  および  $G_y$  はそれぞれ式(1)および式(2)のとおり算出することができる。ここで、 $G_x$  はフローター左端からの水平距離であり、 $G_y$  はフローター下端からの鉛直距離である。

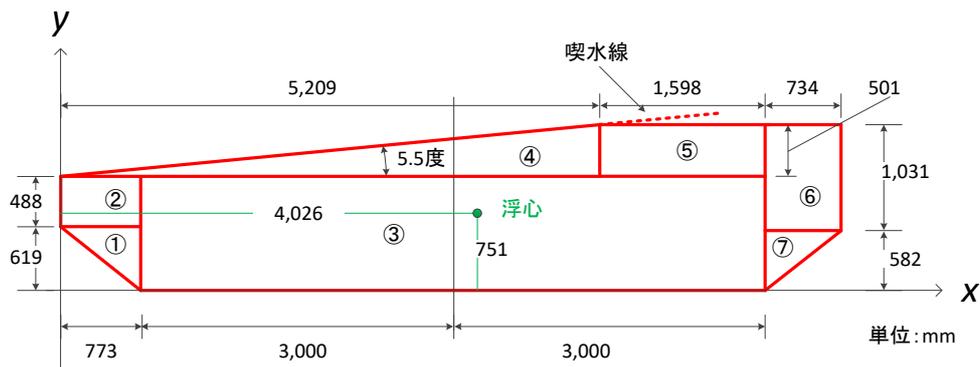


図4 右フローター（転覆前）

表1 面積および断面一次モーメントの算出（右フローター）

	面積 $A$ ( $m^2$ )	水平距離 $x_r$ ( $mm$ )	断面一次モーメント $S_x$	鉛直距離 $y_r$ ( $mm$ )	断面一次モーメント $S_y$
①	0.239	516	123.3	412	98.7
②	0.377	387	145.9	863	325.6
③	6.641	3,773	25,057.3	553	3,674.9
④	1.305	3,472	4,532.2	1,274	1,662.6
⑤	0.801	6,008	4,812.7	1,357	1,087.3
⑥	0.757	7,174	5,429.6	1,097	830.3
⑦	0.214	7,052	1,506.3	388	82.8
計	10.334		41,607.5		7,762.3
浮力 192.4 kN, 浮心 $G_x=4,026$ mm $G_y=751$ mm					

$$G_x = \frac{\Sigma(A \times x_r)}{\Sigma A} = \frac{41,607.5}{10.334} \approx 4,026 \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$G_y = \frac{\Sigma(A \times y_r)}{\Sigma A} = \frac{7,762.3}{10.334} \approx 751 \text{ (mm)} \quad (2)$$

喫水線以下の体積は、面積の和と履帯幅 (1.9 m) の積で求めた。右フローターの喫水線以下の体積は 19.63 m<sup>3</sup> (=10.334 m<sup>2</sup>×1.9 m) であり、浮力は 192.4 kN であった。

図 5 に左フローターにおける喫水線以下の部分の寸法を示す。表 2 に同様にして求めた浮心等の計算結果を示す。浮心  $G_x$  および  $G_y$  はそれぞれ式(3)および式(4)のとおり算出できる。

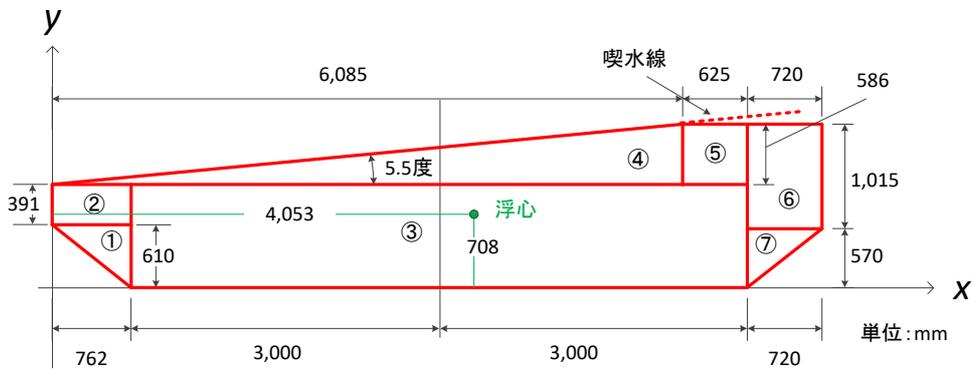


図 5 左フローター (転覆前)

表 2 面積および断面一次モーメントの算出 (左フローター)

	面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	水平距離 $x_1$ (mm)	断面一次モーメント $S_x$	鉛直距離 $y_1$ (mm)	断面一次モーメント $S_y$
①	0.233	508	118.2	407	94.7
②	0.298	381	113.5	806	240.0
③	6.008	3,762	22,601.3	501	3,007.5
④	1.782	4,057	7,227.7	1,196	2,131.6
⑤	0.366	6,398	2,341.8	1,294	473.7
⑥	0.731	7,070	5,169.7	1,078	787.9
⑦	0.205	6,950	1,426.2	380	78.0
計	9.622		38,998.5		6,813.4
浮力 179.1 kN, 浮心 $G_x=4,053\text{mm}$ $G_y=708\text{mm}$					

$$G_x = \frac{\Sigma(A \times x_l)}{\Sigma A} = \frac{38,998.5}{9.622} \approx 4,053 \text{ (mm)} \quad (3)$$

$$G_y = \frac{\Sigma(A \times y_l)}{\Sigma A} = \frac{6,813.4}{9.622} \approx 708 \text{ (mm)} \quad (4)$$

表2より、左フローターの喫水線以下の体積は  $18.28 \text{ m}^3 (=9.622 \text{ m}^2 \times 1.9 \text{ m})$  であり、浮力は  $179.1 \text{ kN}$  であった。したがって、左右のフローターの喫水線以下の部分の体積の和は  $37.91 \text{ m}^3$  であり、全浮力は  $371.52 \text{ kN}$  である。この値は機体の全重量約  $382 \text{ kN}$  にほぼ一致している。

## (2) 重心位置の算出

「転覆前」のブーム、アーム等の位置から、機械の重心を算出した。旋回中心を  $y$  軸の基準  $y_{CL}$  とし、フローター本体低板面を  $x$  軸の基準  $x_u$  とした。図6に「転覆前」のブームおよびアームの状態を示す。機体各部の重量と  $y_{CL}$  軸からの水平距離の積から、モーメント  $M_x$  と  $x_u$  軸からの鉛直距離との積からモーメント  $M_y$  をそれぞれ計算した。表3に重心位置の算出結果を示す。重心位置については式(5)および式(6)から求めた。

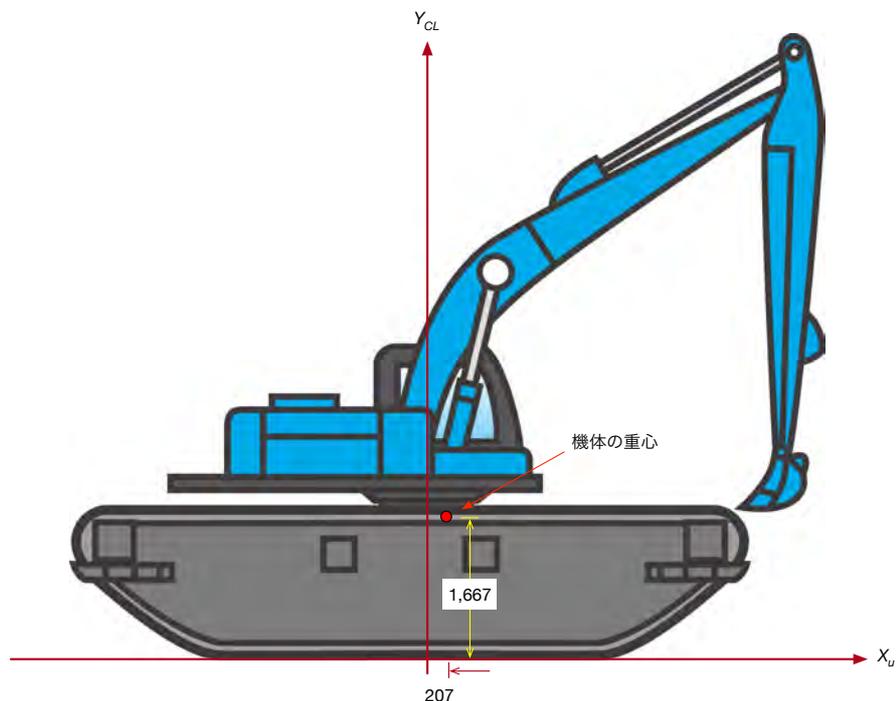


図6 「転覆前」の重心位置

表3 「転覆前」における重心位置の算出

	重量 $W(\text{t})$	水平距離 $x_u(\text{mm})$	モーメント $M_x$	鉛直距離 $y_{CL}(\text{mm})$	モーメント $M_y$
車体上部	8.781	-546	-4,796.9	2,652	23,286.8
フローター	24.8	28	694.4	800	19,840.0
連結棒	2.04	0	0.0	1225	2,499.0
ブーム	1.925	1,867	3,594.6	5,833	11,228.8
アーム	1.184	5,295	6,269.5	6,303	7,462.5
バケット	0.471	5,055	2,380.8	2,256	1,062.5
合計	39.201		8,142.5		65,379.7

$$G_x = \frac{\sum M_x}{\sum W} = \frac{8,142.5}{39.201} \doteq 207 \text{ (mm)} \quad (5)$$

$$G_y = \frac{\sum M_y}{\sum W} = \frac{65,379.7}{39.201} \approx 1,667 \text{ (mm)} \quad (6)$$

### 3. 2 「転覆時」の浮心位置と重心位置の算出

#### (1) 浮心位置の算出

転覆時の右側のフローターの喫水線以下の部分の寸法を図7に示す。図心を算出するため①～⑦に分割した。表4に各部の面積および図心までの距離から断面二次モーメントを算出した結果を示す。浮心位置  $G_x$  および  $G_y$  は式(7)および式(8)のとおり算出することができる。

右フローターの喫水線以下の体積は  $19.62 \text{ m}^3 (=10.328 \text{ m}^2 \times 1.9 \text{ m})$  であり、浮力は  $192.3 \text{ kN}$  であった。

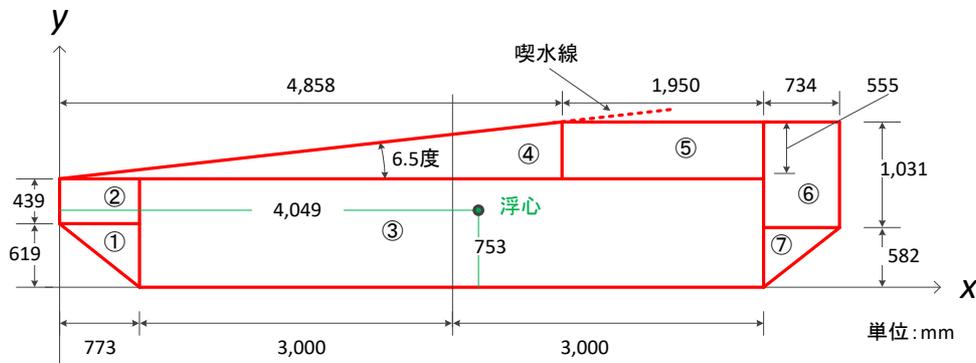


図7 右フローター（転覆時）

表4 面積および断面一次モーメントの算出（右フローター）

	面積 $A$ ( $\text{m}^2$ )	水平距離 $x_r$ (mm)	断面一次モーメント $S_x$	鉛直距離 $y_r$ (mm)	断面一次モーメント $S_y$
①	0.239	516	123.31	412	98.7
②	0.340	387	131.4	838	284.9
③	6.349	3,773	23,955.7	529	3,358.9
④	1.348	3,328	4,365.4	1,243	1,675.8
⑤	1.082	5,833	6,309.3	1,336	1,444.8
⑥	0.757	7,174	5,429.6	1,097	830.3
⑦	0.214	7,052	1,506.3	388	82.8
計	10.328		41,821.1		7,776.2
浮力 192.3 kN, 浮心 $G_x=4,049 \text{ mm}$ $G_y=753 \text{ mm}$					

$$G_x = \frac{\sum(A \times x_r)}{\sum A} = \frac{41,821.1}{10.328} \approx 4,049 \text{ (mm)} \quad (7)$$

$$G_y = \frac{\sum(A \times y_r)}{\sum A} = \frac{7,776.2}{10.328} \approx 753 \text{ (mm)} \quad (8)$$

左フローターにおける喫水線以下の寸法を図8に示す。浮心を求めるため①～⑦に分割して、それぞれの面積および断面一次モーメントを求めた。表5に計算結果を示す。浮心位置  $G_x$  および  $G_y$  は式(9)および式(10)のとおり算出することができる。

左フローターの喫水線以下の体積は  $18.34 \text{ m}^3 (=9.654 \text{ m}^2 \times 1.9 \text{ m})$  であり、浮力は  $179.7 \text{ kN}$  であった。したがって、左右フローターの喫水線以下の部分の体積の和は  $37.96 \text{ m}^3$  であり、全浮力は  $372.01 \text{ kN}$  (=約 38 tf) である。

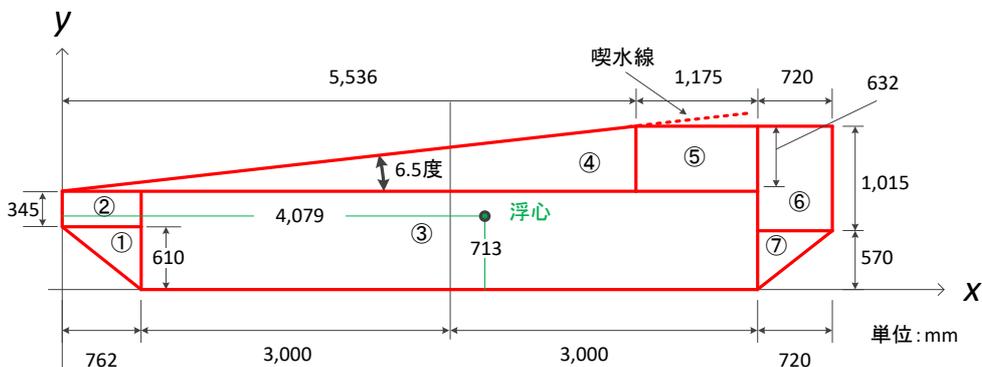


図8 左フローター（転覆時）

表5 面積および断面一次モーメントの算出（左フローター）

	面積 $A$ ( $\text{m}^2$ )	水平距離 $x_i$ (mm)	断面一次モーメント $S_x$	鉛直距離 $y_i$ (mm)	断面一次モーメント $S_y$
①	0.233	508	118.2	407	94.7
②	0.263	381	100.1	783	205.7
③	5.731	3,762	21,560.9	478	2,737.0
④	1.749	3,690	6,453.9	1,166	2,038.8
⑤	0.742	6,123	4,544.9	1,271	943.5
⑥	0.731	7,070	5,169.7	1,078	787.9
⑦	0.205	6,950	1,426.2	380	78.0
計	9.654		39,373.9		6,885.5
浮力 179.7 kN, 浮心 $G_x=4,079 \text{ mm}$ $G_y=713 \text{ mm}$					

$$G_x = \frac{\Sigma(A \times x_i)}{\Sigma A} = \frac{39,373.9}{9.654} \approx 4,079 \text{ (mm)} \quad (9)$$

$$G_y = \frac{\Sigma(A \times y_i)}{\Sigma A} = \frac{6,885.5}{9.654} \approx 713 \text{ (mm)} \quad (10)$$

## (2) 重心位置の算出

「転倒時」における、ブームおよびアームの位置から重心を推定した図9は転倒時の状態であり表6に重心位置の算出結果を示す。重心位置については式(11)および式(12)により求まる。

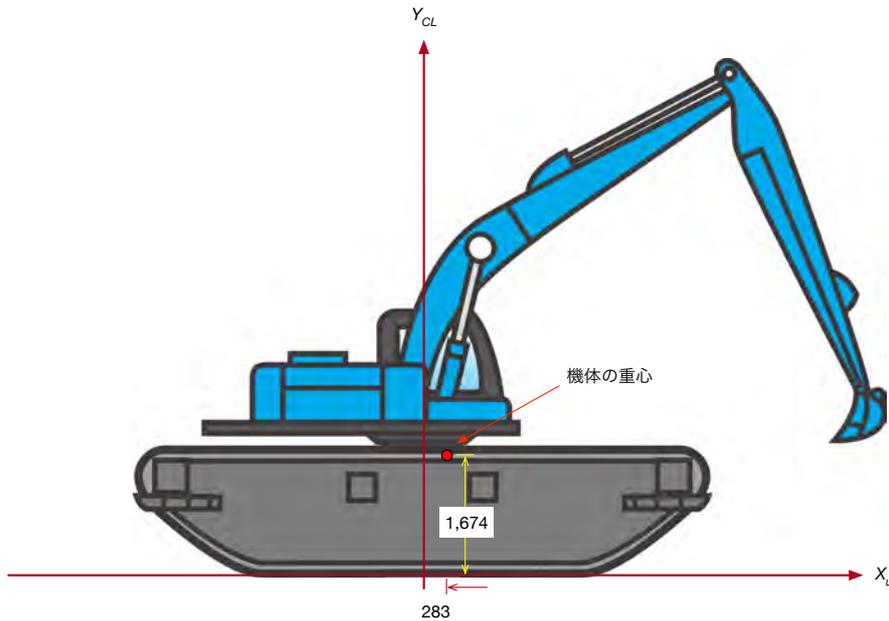


図9 「転覆時」の重心位置

表6 「転覆時」における重心位置の算出

	重量 $W(t)$	水平距離 $x_u$ (mm)	モーメント $M_x$	鉛直距離 $y_{CL}$ (mm)	モーメント $M_y$
車体上部	8.781	-546	-4,796.90	2,652	23,286.8
フローター	24.8	28	694.4	800	19,840.0
連結棒	2.04	0	0.0	1225	2,499.0
ブーム	1.925	1,996	3,842.1	5,760	11,087.8
アーム	1.184	6,316	7,478.2	6,431	7,614.3
バケット	0.471	8,247	3,884.1	2,780	1,309.3
合計	39.201		11,101.9		65,637.2

$$G_x = \frac{\sum M_x}{\sum W} = \frac{11,101.9}{39.201} \doteq 283 \text{ (mm)} \quad (11)$$

$$G_y = \frac{\sum M_y}{\sum W} = \frac{65,637.2}{39.201} \doteq 1,674 \text{ (mm)} \quad (12)$$

### 3. 3 転覆の過程（機体の重心と浮心の変化）

泥上掘削機は転覆前に上部旋回体を 150 度旋回後にアームを伸ばした。転覆はその後に発生し、転覆の方向はアームの向きと同じであった。図 10 に泥上掘削機の浮心の平面位置を示す。転覆時の検討では、図 10 の A-A 断面における機械の重心および浮心位置の関係から機械の安定性を検討した。

ここで、 $M_{BH}$  は旋回中心から機械の浮心までの水平距離、 $F_{LBx}$  は左フローターの中心から左フローターの浮心までの水平距離、 $F_{RBx}$  は右フローターの中心から右フローターの浮心までの水平距離である。

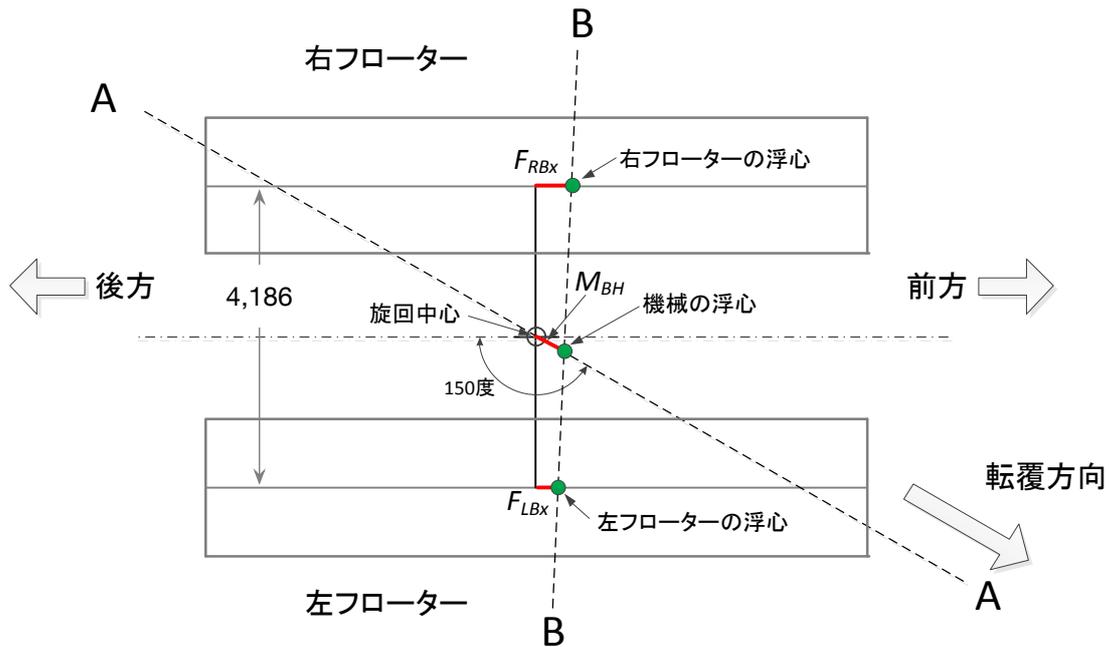


図 10 泥上掘削機の浮心の平面位置

図 11 に  $M_{BH}$  を算出するための概念図を示す。図 11(b) に図 11(a) の破線で示した部分の拡大図を示す。 $\angle B$  は上部旋回体の旋回角とフローターのなす角である。 $M_{BH}$  を算出するためには辺  $a$  の長さとおよび角  $x$  および角  $A$  を求める必要がある。

辺  $a$  については次式で求めることができる。

$$a = \frac{F_{LBx} - F_{RBx}}{2} \quad (13)$$

角度  $x$  については図 11(a) に示す、基準の軸と  $F_{RBx}$  と  $F_{LBx}$  を結ぶ線のなす角  $\theta$  を求める。この  $\theta$  は式 (14) のとおり計算され、 $x$  は式

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_{LBx} - F_{RBx}}{4186}\right) \quad (14)$$

$$x = 90 - \theta \quad (15)$$

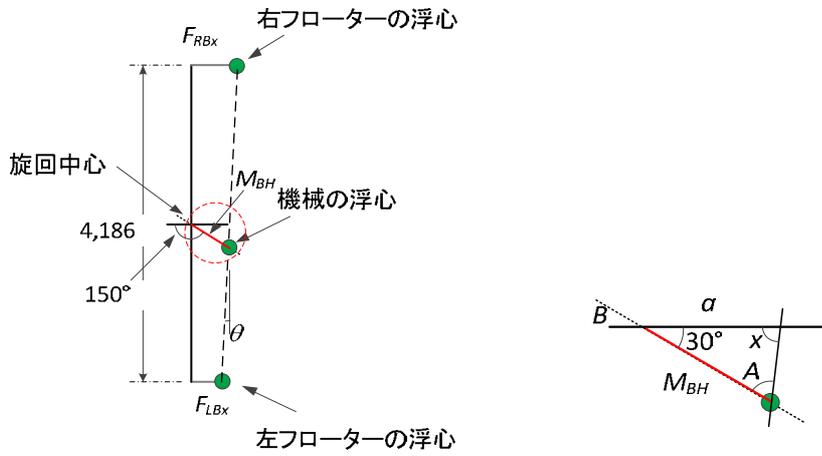
以上の結果から、 $M_{BH}$  は式 (16) のとおり求めることができる。

$$M_{BH} = \frac{a \times \sin x}{\sin A} \quad (16)$$

ここで、角 A は次式で求めることができる。

$$A = 180 - 30 - x \quad (17)$$

表 7 に  $M_{BH}$  の算出結果を示す。



(a) 図 10 の平面図の一部

(b) 破線部分の拡大図

図 11  $M_{BH}$  の算出方法

表 7 機体の浮心位置

	$a$ (mm)	$\theta$ (度)	$x$ (度)	A (度)	$M_{BH}$ (mm)
転覆前	271.9	0.52	89.48	60.52	312.33
転覆時	296.1	0.55	89.45	60.55	340.12

ww 図 11 に左右のフローターの浮心位置をとる B-B 断面における浮心と重心位置を示す。左右のフローターの浮心位置の関係から、機械全体の浮心を求め、その浮心と旋回中心までの距離を求めた。ここで、 $M_{BV}$  はフローター底面から機械の浮心までの距離、 $F_{LBy}$  は底面から左フローターの浮心までの距離、 $F_{RBy}$  は底面から右フローターの浮心までの距離である。

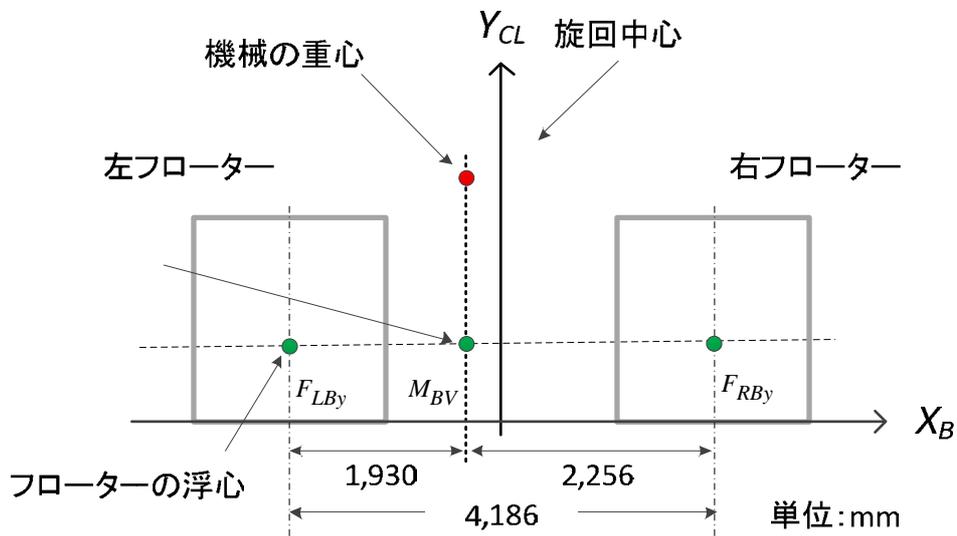


図 11 浮心と重心の立面位置 (B-B 断面)

左右のフローターの浮心の位置と水平距離の関係から、機械の浮心位置  $M_{BV}$  は以下の通り求めることができる。

$$M_{BV} = F_{RBy} + \frac{(F_{LBy} - F_{RBy}) \times 2.256}{4.186} \quad (18)$$

表 8 にフローターおよび機体の浮心位置を示す。左右フローターと旋回中心からの水平距離は  $F_{LBx}$  と  $F_{RBx}$  であり、 $M_{BH}$  は  $F_{LBx}$  と  $F_{RBx}$  から計算した A-A 断面上の浮心と旋回中心の間の距離である。 $M_{BV}$  は  $F_{LBy}$  と  $F_{RBy}$  から算出した A-A 断面上の浮心のフローター本体底板面からの高さである。

表 8 フローターおよび機体の浮心位置

	右フローター		左フローター		機械全体	
	$F_{RBx}$ (mm)	$F_{RBy}$ (mm)	$F_{LBx}$ (mm)	$F_{LBy}$ (mm)	$M_{BH}$ (mm)	$M_{BV}$ (mm)
転覆前	252.96	751.14	290.84	708.10	312.33	731.30
転覆時	276.00	752.93	316.39	713.24	340.12	734.63

3.1 節～3.3 節で求めた機械の重心位置と浮心位置の関係から、各条件での水上での安定性について検討した。図 12 に「転覆前」および「転覆時」の重心および浮心位置を示し、図 13 に重心および浮心のベクトル分布を拡大して示す。図 16 に機械の重量と浮力による回転方向を示す。

転覆前の結果を示した図 13(a)では、重心位置が浮心位置よりも旋回中心側に位置しており、図 14(a)に示すように機体を平衡状態に復帰させようとする復原力が作用するため機体は安定していた。一方、転覆時の結果を示した図 13(b)では、アームを伸ばしたことにより重心位置が外側（右側）に移動し、それに伴い機体が傾斜した。その結果、図 14(b)に示したように重心位置が浮心位置よりも外側に移動し、復原力を失い機体を転覆させようとする力が作用したと考えられる。

以上のことから、当該機械は水上でアームを伸ばすことにより不安定化することから、水上で安全に作業を行うための性能を有していないことがわかった。

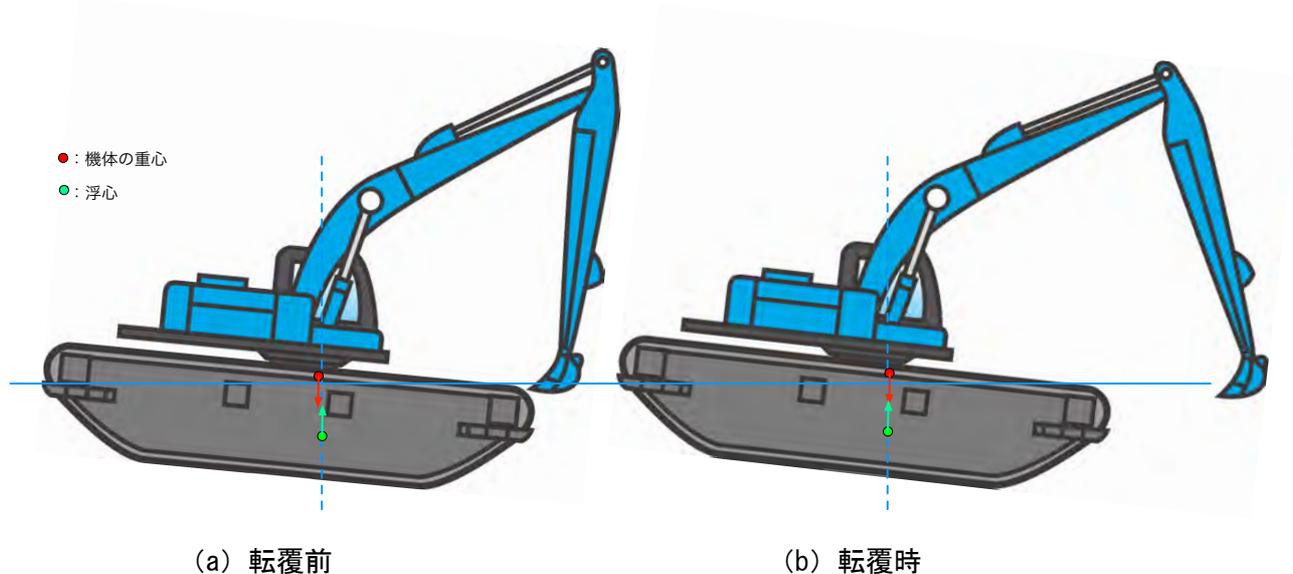
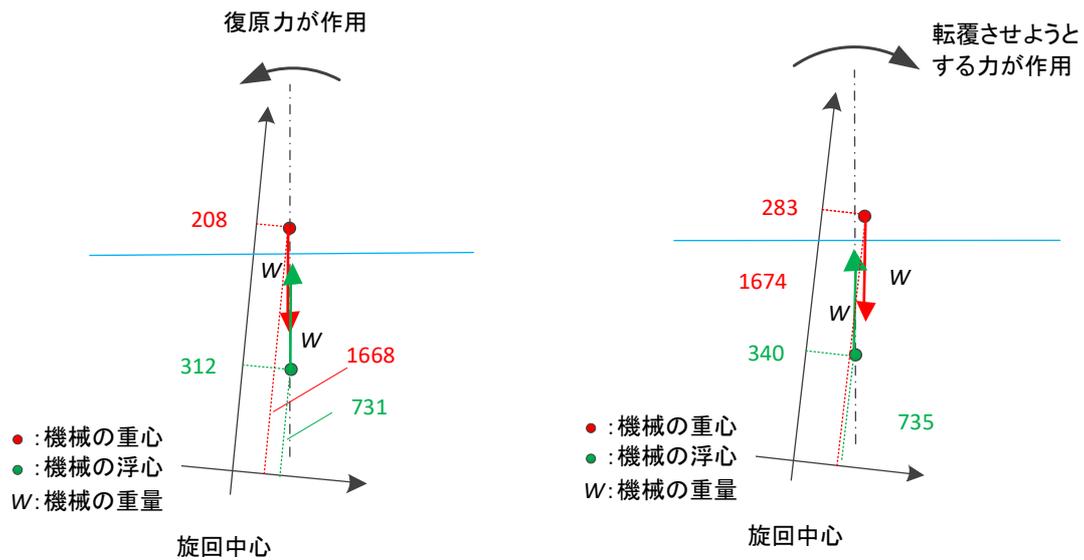
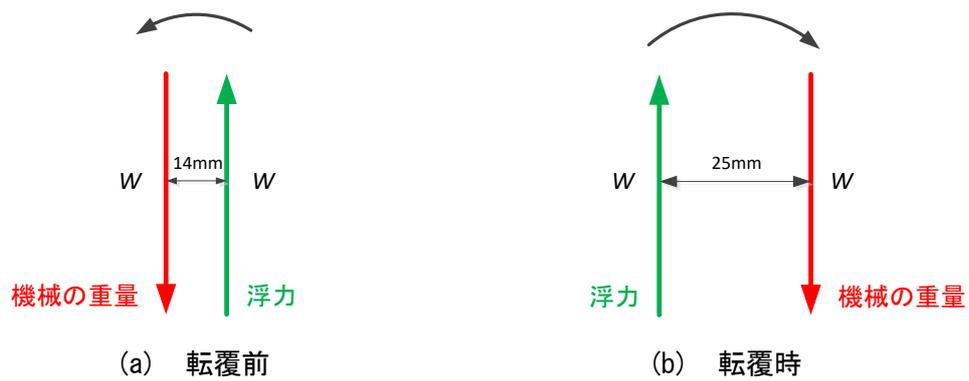


図 12 重心と浮心の関係 (A-A 断面)



(a) 転覆前 (機械の傾斜 5.5 度)                      (b) 転覆時 (機械の傾斜 6.5 度)

図 13 重心および浮心のベクトル分布 (A-A 断面) 拡大図



(a) 転覆前    (b) 転覆時

図 14 機械の重量および浮力の関係

## 4. 発生原因

泥上掘削機の重心と浮心位置を解析して、水上での安定性を検討した。機体の諸元についてはフローター形状の簡略化と一部仮定をした上で、災害原因を以下のとおり推定した。

### (1) 泥上掘削機が転覆した原因

転覆前と転覆後における機械の重心位置及び浮心位置を求め、機体の安定状態について検証した。その結果、泥上掘削機はアームを伸ばした際に、重心が浮心の外側に移動したため復原力を失い転覆したと考えられる。したがって、フローターが完全に浮いた水上では、機体は極めて不安定であることがわかった。

以上のことから、当該機械は水上で安全に作業を行うために必要な性能を有していないため、フローターが完全に浮いた状態で作業を行わないのが原則と考えられる。

### (2) その他の原因

水上で作業を行うにもかかわらず、被災者及びオペレーターはライフジャケット等の救命具を装着していなかった。本災害においては、救命具を着用していれば死亡災害に至らなかったと考えられる。

## 5. 再発防止対策

当該機械による災害を防止するためには、次のような対策が必要と考えられる。

1. 泥上掘削機は水上での作業には適さない構造であり、当該機械を使用して作業を行う場合には、あらかじめ水深や地盤等の状況を調査し、フローターが接地することの確認や、沈下の確認が必要である。
2. 水中地盤の支持力が低く、履帯が沈下するおそれのある場合には、碎石の敷設等の地盤養生を行うことが必要である。
3. フローターが接地した条件で作業を行う場合にも、水中転落による溺れを防止するためにライフジャケット等を着用させ、浮袋その他の救命具を備える必要がある。

## 参考文献等

- 1) 日本造船学会，改訂 船舶工学便覧（第1分冊），1976，p.489.