

災害調査報告書

防波堤の東日本大震災 復旧工事中に発生した 水中爆発災害



独立行政法人
JNIO SH 労働安全衛生総合研究所

1. はじめに

漁港内で東日本大震災復旧工事の一部として既設構造物（防波堤鋼管矢板）の撤去工事が行われていたところ、14 時頃、同漁港の海中において爆発が起こり、潜水士 1 名が死亡する労働災害が発生した。災害の原因究明のための調査及び実験、同種災害の再発防止対策の検討を行ったので報告する。

2～3. 略

4. 事故災害の概要

- ①発生時刻：14 時頃
- ②発生場所：漁港内の海中
- ③事故の型：爆発
- ④起因物質：メタン，水素
- ⑤発災装置：鋼管
- ⑥人的被害：死亡者 1 名
- ⑦物的被害：なし
- ⑧発生状況：被災した潜水士（1 名）が酸素アーク溶断によって鋼管矢板に穴を開ける作業中に、鋼管内で爆発が発生し、死亡したもの。
- ⑨気象状況：気象観測所（14 時）：晴れ，風速 3.3 m/s，風向南南東，気温 25.0℃，湿度 60%，気圧 1001.7 hPa（現地気圧）
- ⑩潮位：12 時 103 cm，13 時 101 cm，14 時 101 cm，15 時 105 cm
潮汐表基準面の零点：平均海面下 88 cm

図 4-1 略

5. 作業内容

5.1 水中切断

(1)潜水様式

潜水業務用の潜水様式は器具によって大別され、ヘルメット式，全面マスク式，スクーバ式の 3 種類がある¹⁾（図 5-1）。現場では，全面マスク式とスクーバ式の中間のフーカー式潜水が行われていた。フーカー式ではデマンド式レギュレーター，面マスク，ウェットあるいはドライスーツ，ブーツ，フィン，ベルトとウェイト，緊急ボンベを装着する。空気は船上のエアタンク，コンプレッサーとつながれた送気ホースを介して送られる。



図 5-1 潜水様式の種類²⁾

図 5-2 略

(2) 水中切断機材

酸素アーク溶断器による水中切断では、高電流で切断棒と母材（鋼材）の間にアークを発生し、鋼材を酸化温度以上に加熱し、酸素噴射によって酸化反応熱で局部的に溶融した鋼材が吹き飛ばされる。

酸素アーク溶断器を構成する機材は直流溶接機、トーチ（ホルダー）、溶接棒、酸素容器、酸素ホース、キャブタイヤケーブル（電線）などである。さらに、海上の現場ではエンジン式発電機も必要である。現場では以下の機材が使われていた。写真 5-1 と 5-2 に当該水中切断機と水中溶断棒を示す。

- ・ 防音型エンジン発電機兼用溶接機
- ・ 水中切断機
- ・ 水中溶断棒

図 5-3 に水中溶断棒の構造例を示すが、外側からフィルム、フラックス、鋼管の順に、内部には複数（ここでは 5 本）の助燃線が星形に配置されている。助燃線の隙間は酸素が流れる。ここで数字の 9 は棒の直径を、5 は助燃線の本数を表す。現場で使われていた水中溶断棒は、直径は 8 mm、助燃線が 5 本のものである。使用電流と酸素圧は水深によって異なるが、メーカーによると、代表的な製品である本製品の場合は、標準条件の水深 7 m、軟鋼板 12 mm において、それぞれ 220 A、0.9 MPa である。このときの酸素流量は 95 L/min、切断速度 13 cm/min、切断長さ 208 mm である。

5.2 当時の作業内容

鋼管矢板に溜まったガス抜きのため、穴あけ作業を水中アーク溶断によって行っていた。



写真 5-1 水中切断機と溶断棒



写真 5-2 溶断棒の断面

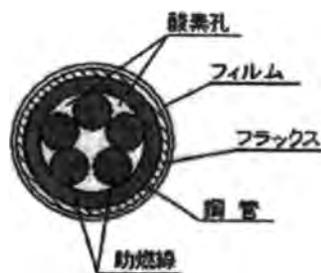


図 5-3 切断棒の構造（例）

5章の参考文献

- 1)中央労働災害防止協会，潜水士テキスト—送気調節業務特別教育用テキスト—，平成 24 (2012) 年
- 2)一般社団法人日本潜水協会 Web サイト，潜水様式
<http://www.sensui.or.jp/pc/contents24.html> (平成 26 年 9 月 19 日アクセス)

6. 被害状況，災害発生の経過など

6.1 被害の様子

(1)被災者の被害状況

- a)被災者（潜水士）の死因は，腸間膜破裂による腹腔内出血であった。
- b)ウェットスーツの腹部は焼けていなかったという。

(2)鋼管 No. 13 とその周囲の状況

- a)図 6-1 に事故発生時の平面図を示す。既に鋼管矢板 12 本について 13 箇所穴を開けた。ただし，鋼管 No.3 の一箇所は上部にコンクリートが充填された箇所貫通していなかった。
- b)略
- c)鋼管 No.13 は 34 度（その後 33 度に修正）で座屈していた。
- d)鋼管 No.13 には 3 箇所穴があった。
- e)現地で行われた鋼管 No.13 の引き上げの様子と穴の状況を写真 6-3~6-8 に示す。また，当時の作業の状況を再現したときのモデルの身長は 173 cm であった。作業者は傾いた鋼管に乗った格好で作業をし，穴と腹部との距離は 50 cm であった。ただし，被災者はこのモデルよりも身長が低かったため，その距離はわずかに短かったものと考えられる。
- f)図 6-3 より，穴の状況からすると，1m の一番上の穴を開けたときにコンクリートに当たり貫通しなかったため(他は貫通していた)，次に 2.3 m 位置で円形の貫通穴を開け，ガスが抜けなかったためもう少し上のほう 1.5 m で穴を開けようとしていたと推測される。この位置で穴を開け始めた時点では，内部からガスは漏れてこなかったが，溶断で酸素が鋼管内に溜まってくるので，いずれガスが漏れてくることになる。

(3)酸素アーク溶断器具

事故後の酸素容器の残圧は 10.6 MPa であった。酸素容器の充填圧力は 35℃換算で 14.7 MPa である。

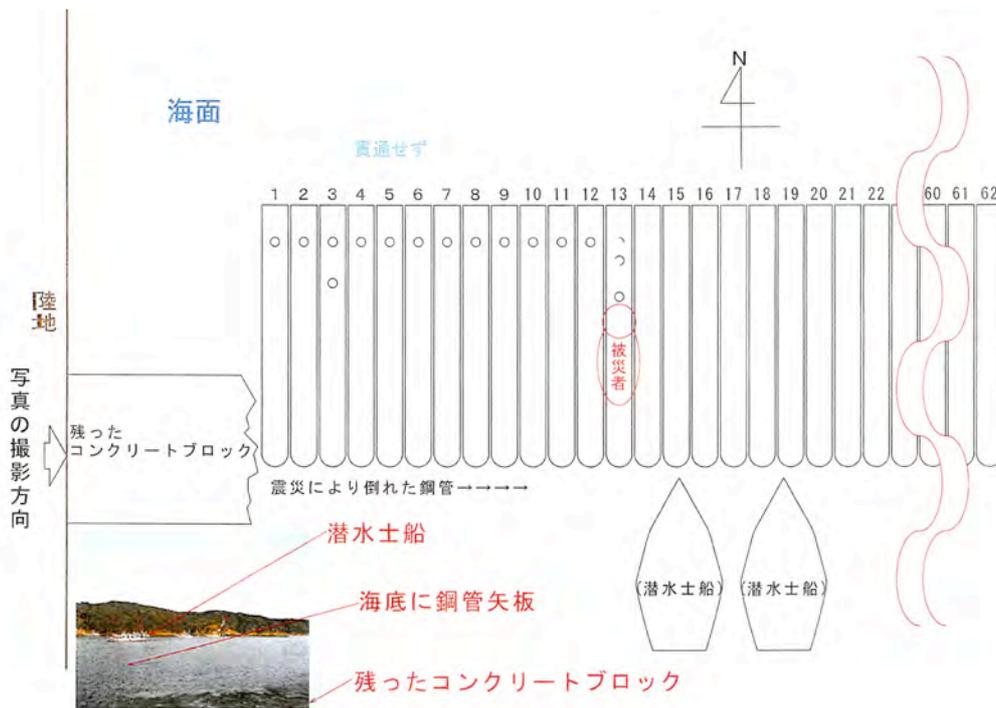


図 6-1 平面図

ただし、鋼管はくっついて一直線に並んでいるわけではない。

図 6-2~3 略

写真 6-1~2 略



鋼管 No. 13 上部平面図

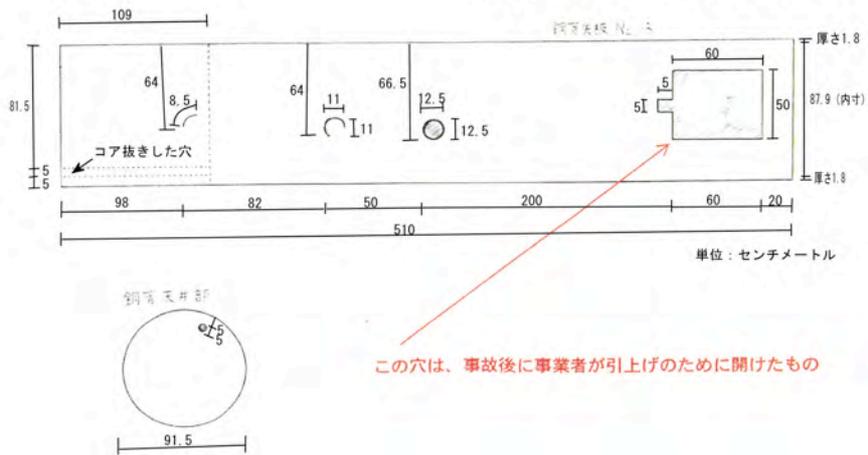


写真 6-3 鋼管 No. 13 引き上げの様子と上部の状況



写真 6-4 事故後に切り出した部分



写真 6-5 円形の貫通穴を上から見たところ



写真 6-6 貫通穴を斜めから見たところ



写真 6-7 鋼管 No. 13 内の様子

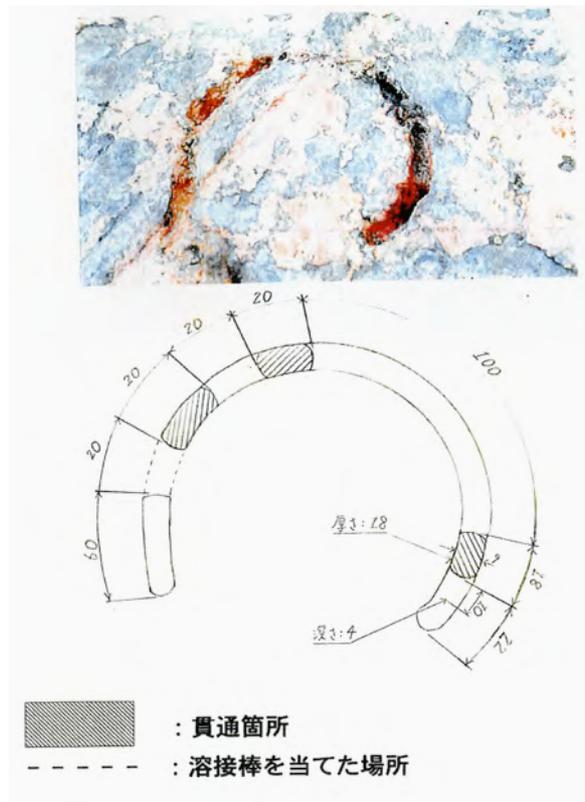


写真 6-8 馬蹄形の穴の様子



図 6-4 事故当時の潜水士の姿勢の模擬

6.2 経過

被災者の潜水歴は約 34 年であるが、溶断の経験は本現場工事が初めてであった。すなわち、事故前の穴あけ作業の経験は 13 箇所である。事故災害発生前後の経過を表 6-2 に示す。

表 6-1 略

表 6-2 事故災害発生前後の経過

時刻	内 容
13 時 30 分頃	潜水開始
約 15 分間	前日落とした溶断に使う杵の探索。鋼管 No13 のケレン作業
13 時 45 分～	杵を使用して溶断作業
14 時頃	鋼管内で爆発発生
14 時 16 分	消防署に通報
14 時 26 分	消防から警察へ通報
	負傷者を病院に搬送

表 6-3 略

6.3 ガス分析

水中で鋼管内の気体を捕集し、成分分析した結果は以下の通りだった。

- a) 鋼管 No.13 の酸素濃度が高いのは、酸素アーク溶断による噴出した酸素が鋼管内に溜まっていたためである。
- b) 当初、鋼管内には施工時の空気を含んでいたかもしれないが、窒素の割合が高いことから水中で水圧を受けて溶存していた窒素が設置後に鋼管内の水圧が減少して、溶存していた窒素と酸素が発生した。
- c) No.15 以降は溶断で酸素が溜まっていないので、相対的にメタンの割合が高い。
- d) 一般的に水素の割合は高くない。
- e) 一般的にメタンを除く炭化水素の割合は高くない。

6.4 ガスの量

鋼管内に滞留するガスの最大量を検討するため、図 6-5 に鋼管の模式図を示す。開口③の穴あけの際にガスが鋼管内から漏れていけば、ガスの溜まったところの液面は開口③付近であり、漏れていなければそれよりも上部（セメントで詰まった側）と推定される。ガスが溜まったところはひずめ形（図 6-6）をしており、幾何学的に次式より体積 V を求めることができる¹⁾。

$$\text{体積 } V = (h/3b) \{ a(3r^2 - a^2) + 3r^2(b-r)\theta \} \quad (1)$$

ただし、高さ $AH=h$ 、半径 $AO=r$ 、 $BD=2a$ 、 $AC=b$ 、 $\angle AOB=\theta$ （ラジアン）。

例えば、 $h=0.7$ m、 $2a=0.9$ m、 $b=0.45$ m、 $\theta=\pi$ の場合の V は 94.6 L となる。

$$V = \{0.7/(3 \times 0.45)\} \{0.45(3 \times 0.45^2 - 0.45^2) + 3 \times 0.45^2(0.45 - 0.45)\pi\}$$

$$=0.0946 \text{ m}^3$$

$$=94.6 \text{ L}$$

おそらく、この量よりも溜まったガスの量は少なかったと推定される。

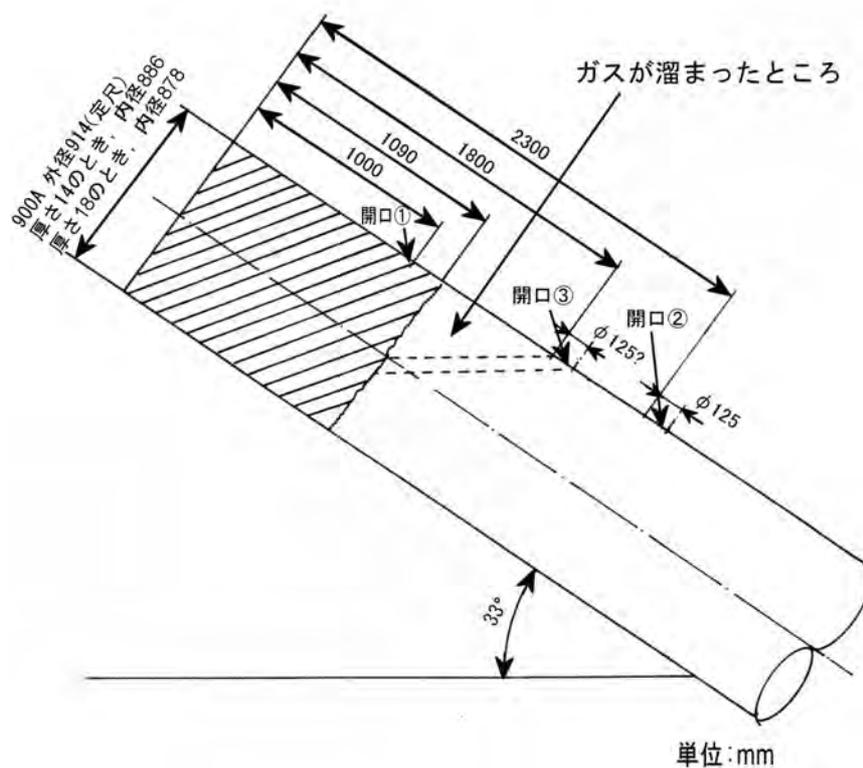


図 6-5 鋼管の寸法

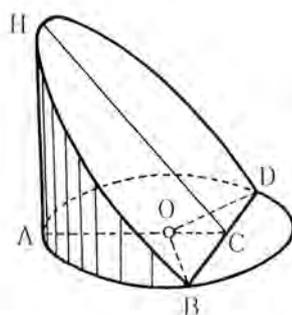


図 6-6 ひずめ形¹⁾

6 章の参考文献

1)機械工学便覧：基礎編 A1 単位および物理定数, A2 数学, p.A2-41, 丸善, 1986

7. 災害原因に関連する事柄

7.1 関連する災害事例

海洋工事に携わる団体が海洋工事災害事例集¹⁾を作成しているが、それによると、平成10(1998)年から最近までの代表的な事例76例を抽出した中に、本件災害ときわめてよく似た事例が挙げられている。図7-1にその事例を示す。同種災害の防止対策として、火気を使用しない作業でのガス抜き穴を開けることが記述されている。他には、潜水士テキスト(図7-2)²⁾において、裏込めが施された鋼矢板壁米や大型鋼材におけるガス爆発の危険性が述べられている。

福岡市内の潜水会社によると、解体工事におけるヒヤリハットの事例としては、酸素アーク溶断中の構造物内部での爆発による爆風あるいは高速水流の噴出での指のけががあるという。また、新潟市内の潜水会社によると、新潟にはガス田があり、港湾工事では天然ガス(主にメタン)の発生、滞留による爆発には注意を払っているという。そのため、潜水士がそばで作業をせずに済む方法が望まれているという。

8 溶接・切断		鋼管を水中切断中、可燃性ガスに引火し爆発				シート番号 B-1		
工種	溶接及び切断	発生日時	—		負傷	左胸部		
作業	溶接・切断	年齢	47	経年数	29年	部位		
起因物	可燃性ガス	職種	潜水士	入場後日数	129日	傷類	外傷性肺挫傷	
災害程度	—	事故の型	爆発		傷類	外傷性肺挫傷		
発生状況	基礎を撤去するため、抵抗保護カバー(鋼管φ500)を水中酸素アーク溶断で切断中、保護カバー内に滞留していた可燃性ガスに引火して爆発し、衝撃波が左胸部を圧迫した。							
発生原因						関係法令		
人的								
物的	・鋼管内部に高濃度のメタンガスが存在していた。							
管理的	・可燃ガスの発生を予測していなかった。 ・作業手順に不備があった。						安衛法20条 安衛法28の2条	
対 策								
人的								
物的	・ガス抜き穴を設けて、可燃性ガスを確実に排除する。 ・火気を使用しない作業方法を採用する。							
管理的	・危険有害要因の特定を確実にし、低減対策を実施する。							

図7-1 潜水作業中の爆発事例¹⁾



図 7-2 水中溶接・切断作業時の危険性：ガス爆発²⁾

表 7-1 略

7.2 地質

国内にはガス田として、勇払油ガス田（北海道）、磐城沖ガス田（福島県）、南関東ガス田（千葉県、茨城県、埼玉県、東京都、神奈川県）、岩船沖油ガス田（新潟県）、東新潟ガス田（新潟県）、南長岡・片貝ガス田（新潟県）、吉井・東柏崎ガス田（新潟県）が知られている^{3,4)}

地質の専門家より、a)当該地域ではメタンが発生して問題になったという事例は聞いたことがないこと、b)当該平野部ではメタンが賦存しているところが多く、以前からボーリングでメタンを確認している事例があること、c)杭施工時に溶存メタンが分離気化し、泡ででてきたところのそばで溶接火花に引火した事例があること（事故にはならず）、などの意見を聞いた。

7.3 調査・実験の方針

本件事故災害の着火源としては、酸素アーク溶断によるアークあるいはスパッタと考えてよいが、鋼管内に滞留したガスの爆発性を明らかにすることを第一目的とし、同種災害の防止のため、この種の水中作業での爆発危険性を実験的に明らかにする。

7章の参考文献

- 1)日建連安全対策本部・海洋安全委員会保安対策部会・建設三団体安全対策協議会編，海洋工事災害事例集（成 24 年 3 月：第 2 版），（社）日本建設業連合会， p.23， 2012
 - 2)中央労働災害防止協会編，潜水士テキスト－送気調節業務特別教育用テキスト-，中央労働災害防止協会， p.101-103， 2012
 - 3)独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構，石油・天然ガス用語辞典
<http://oilgas-info.jogmec.go.jp/dicsearch.pl>（平成 26 年 9 月 19 日アクセス）
 - 4)天然ガス鉱業会，国産天然ガス資源
http://www.tengas.gr.jp/natural-gas_resources.html（平成 26 年 9 月 19 日アクセス）
- 5～6)略

8. 測定・検証実験

8.1 実施項目

実施した測定と検証実験の項目は次の通りである。

- ①現場で引き上げた鋼管 No. 13 の材質の成分分析（元素分析）
- ②現場で捕集した気体の分析
- ③小型の燃焼容器を使った水中爆発実験
- ④実規模の円筒容器を使った水中爆発検証実験
- ⑤水中酸素アーク溶断模擬実験

ただし，④の実験については，実験実施が危険であることが判明したため，中止とした。本報告書ではその準備段階までを述べる。

8.2 鋼管 No. 13 の材質の成分分析

(1) 測定の概要

引き上げた鋼管 No.13 が一般的な構造材料であるのかどうか確認のため，材質の元素分析を行った。

(2) 測定装置及び測定条件

本測定では，エネルギー分散型 X 線分析装置（EDX）を使い，半定性・半定量分析（元素分析）を行った。使用した分析装置は EDX-800HS（島津製作所製）で，6C から 92U まで検出できるものである。測定は真空下で行った。

写真 8-1～8-3 に測定に使用した鋼管の一部を示す。外と内面は赤さびが形成していた。測定したのは写真中 A，B，C，D の 4 箇所である。

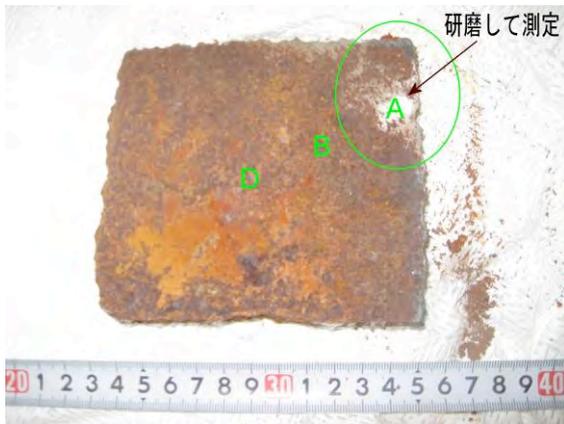


写真 8-1 外面の様子



写真 8-2 内面の様子

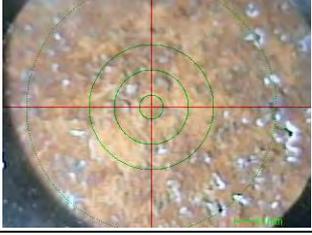


写真 8-3 断面の様子

(3) 測定結果

表 8-1 に分析結果を示す。赤さびを研磨して測定した部位 A の成分からこの鋼管が SS400 (一般構造用圧延鋼材) であることが確認できた。赤さびの部位の主成分酸化鉄であるが、海水の成分 (Na, Cl, Mg, Ca, K) を含んでいることがわかる。

表 8-1 分析結果

部位	成分元素とその割合(wt.%)
部位 A: 測定径 10mm 	Fe : 98.104, Al : 0.802, Mn : 0.527, Si : 0.264
部位 2: 測定径 10mm 	Fe : 85.300, Cl : 9.060, S : 2.652, Na : 1.231, Mn : 0.589, Ca : 0.343, Si : 0.339, Mg : 0.258, Cr : 0.226
部位 C: 測定径 10mm 	O : 37.780, Fe : 27.562, Ca : 19.900, Cl : 7.064, Na : 5.317, Mg : 0.677, S : 0.663, Si : 0.579, Sr : 0.318, Mn : 0.146
部位 D: 測定径 10mm 	Fe : 48.306, O : 36.130, Cl : 11.179, S : 2.011, Na : 1.070, Mn : 0.431, Si : 0.270, Ca : 0.195, Cr : 0.187, Mg : 0.113, K : 0.095

8.3 現場で捕集した気体の分析

(1) 概要

現場で捕集した気体についてガスクロマトグラフを使った成分分析を行った。

(2) 測定装置及び測定条件

分析装置 : GC-14B (島津製作所)

分析法 : ガスクロマトグラフ分析 (検出器 TCD) による面積百分率法による。

測定条件：

カラム：SHINCARBON ST 50/80 2m×3mmφ ステンレス

このカラムでの分析対象ガス：H₂, O₂, N₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄,
C₂H₆

試料注入量：50 μL

キャリアガス：ヘリウム

カラム温度：40℃（3 min 保持）～200℃（4 min 保持），昇温速度 20 °C/min

(3) 測定結果

写真 8-4 に受け入れたサンプル瓶の様子を示す。そして、表 8-2 に分析結果を示す。分析によると、いずれも水素の割合は低く、メタンの割合が高いことがわかった。一酸化炭素と二酸化炭素は溶断棒の被覆材が燃えたときの燃焼生成ガスと考えられる。なお、黄色



写真 1 受け入れ試料（サンプル瓶）の様子

い煙に相当する成分は分析に使用したカラムでは検出されない（できない）。

表 8-2 分析結果

試料名	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	合計 (%)
No.13③	0.00253	64	30.8	0.317	4.91	0	100.0
No.13④	0	64.4	30.5	0.283	4.83	0	100.0
No.15③	0	1.41	61.7	0	36.9	0	100.0
No.15④	0	1.3	61.6	0	37.1	0	100.0
No.17③	0	1.34	57.6	0	41.1	0	100.0
No.17④	0	1.4	57.6	0	41	0	100.0
溶断②	0.0557	91.73	6.28	0.432	0	1.51	100.0

8.4 小型の燃焼容器を使った水中爆発実験

(1) 実験の概要

流れについては一般に相似則が成り立つため、適切な寸法比を採ることで大きな鋼管で生じる物理現象を小さな鋼管で模擬できる。本実験では鋼管内で爆発した際に開口部から噴出する内部流体の威力（爆発圧力）について、縮小モデルの鋼管を使って調べる。また、試みとして、腹部の硬さ程度を実現できる超軟質ウレタン樹脂（以下、「ウレタン樹脂」とする。）を用い、腹部に受ける圧力を測定する。

(2) 実験の方針

① 容器の大きさ、開口寸法について

容器壁面での熱損失が無視できる容器寸法を持つ場合、一般に、最大圧力は容器の寸法に依らない。ここでは、開口を持つ容器内で爆発した場合に、開口での圧力を推算する。

流体力学的に水は連続の式が成り立つので、容積 V_1 の容器中で発生した圧力増加分が、開口からの水の放出となる。従って、最大圧力 P_{\max} 、初圧 P_0 のとき、爆発圧力による体積増加分 $V_1(P_{\max}/P_0 - 1)$ が放出される流量 $v_2 A_2 (= v_1 A_1)$ 等しいと仮定すると、

$$V_1(P_{\max}/P_0 - 1) = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1)$$

ベルヌーイの定理より、

$$p_1/\rho + v_1^2/2 + g z_1 = p_2/\rho + v_2^2/2 + g z_2 \quad (2)$$

ここで、 ρ は水の密度、 p_1 は容器内の圧力、 v_1 は容器内の流速、 z_1 は基準面から液面高さ、 g は重力加速度、 p_2 は開口での圧力、 v_2 は開口での流速、 z_2 は基準面から開口中心までの高さとする。式(2)に式(1)を代入し、 v_1 と v_2 を消去すると、次式が得られる。

$$p_2 = p_1 + (\rho/2) V_1^2 (P_{\max}/P_0 - 1)^2 \{ (A_2/A_1)^2 - 1 \} + g(z_1 - z_2)$$

ここで、右辺第一項 $p_1 = 0$ (ゲージ圧)、第三項の液面高さを無視すると、式(3)が得られる。

$$p_2 = (\rho/2) V_1^2 (P_{\max}/P_0 - 1)^2 \{ (A_2/A_1)^2 - 1 \} \quad (3)$$

式(3)に適当な直径 A_1 、容積 V_1 の容器に対して、圧力比、開口直径 A_2 を任意に選ぶと p_2 が求められ、実験に用いる開口の大きさを決める。

② 人体の皮膚

従来、生体を模擬するため、一般にゼラチン¹⁾ (4%、通称、弾道ゼラチン) が用いられてきたが、最近では、野外での爆風実験のために、脳を模擬した生体モデルにアミドゲル10%²⁾を使った研究も行われている。しかし、ゼラチンは温度依存性が高く、また粘性係数を高くできないなどの問題があり³⁾、生体組織、特に皮膚、内臓などの人体軟組織内を衝撃が体内を伝ばする様子を模擬できる材質としてウレタン樹脂の検討が行われている。本実

験では、人体の腹部程度の硬さを実現できる市販品のウレタンゲルを使って調べることにする。

(3) 実験装置及び実験方法

① 燃焼管

現場の鋼管の馬蹄形状の開口は 3 箇所開口部からなるが、開口部を合計した面積から等価直径を求めると 25.8 mm となる（以下、「上の小さい穴」とする。）。なお、丸い穴の開口部の直径は 125 mm である（以下、「下の大きい穴」とする。）。

実験には 200A と 90A の鋼管にフランジを取り付け、所定の位置に 2 箇所開口を設けたものを燃焼容器として用いる。ただし、現場品 900A（内径 878 mm）に対して、200A（内径 210 mm）は直径比で 1/4.2、90A（内径 102 mm）は同じく 1/8.6 である。図 8-4 と 8-5 に組立図を示す。開口位置は現場の 900A 鋼管と相似になるようにした。ただし、現場の鋼管は長い、水は気体に比べてあまり圧縮しないため、爆発に伴う長手方向の水の圧縮の影響はないものとして、鋼管の長さを短くした。

データ収集に際して、異なる口径を持つプラグを差し替えて使用した。開口の直径の組み合わせは次の通りとした。ただし、下の大きな穴の開口直径を d_1 、上の小さな穴の開口直径を d_2 とする。

- ・ 200A 燃焼容器の場合： $d_1=30$ mm と $d_2=6.5$ mm、 $d_1=16$ mm と $d_2=3.3$ mm
- ・ 90A 燃焼容器の場合： $d_1=16$ mm と $d_2=3.3$ mm

② 測定項目

測定項目は次の通りである。

- ・ 圧力測定：3 点：容器内、開口からの 2 箇所をひずみゲージ式の圧力変換器（圧力センサー）を使い、開口からの距離に対する圧力を測定する。本実験では試みとして腹部を模擬したウレタン樹脂の塊に小型の圧力センサーを埋め込み、腹部で受ける圧力を測定する。
- ・ 噴出状況：高速度ビデオカメラを使った観察

③ 実験装置

写真 8-5～8-17 には装置の様子を示す。燃焼容器は 150 L 水槽（長さ 655 mm×幅 450 mm×高さ 550 mm）に 33° の傾きで沈める。水中での点火を確実にするため、点火玉を着火源に用いた。着火位置は、容器の上の穴の位置よりもやや上部の、混合気が溜まった箇所の端部とした。その位置は工業用ファイバースコープを燃焼容器内に入れて予め確認し、点火玉を差し込む長さを調整した（写真 8-10）。

ウレタン樹脂は、「人肌のゲル」（(株)エクシールコーポレーション製）をメーカー硬度 0（赤ちゃんの肌、腹部程度）になるように主剤と硬化剤を混ぜて作製した。表 8-3 に人肌のゲルの硬度に対する物理特性を示す。

ウェットスーツの試料として、セミドライ用で表がジャージ、裏がゴムで厚さ 3 mm の物入手し、使用した (写真 8-14)。

圧力センサーとして、(株)共和電業製のひずみゲージ式圧力変換器 (PGL-A-1MP-A, 最大 1 MPa) とウレタン樹脂内に埋め込むために点計測用小型変換器 (PS-10KC, 最大 1 MPa) を使用した。圧力センサーは取り付け板に固定した。

④混合気の組成及び充てん量

本実験では、事業場側が外部分析センターに依頼して得られた No.13 の分析結果を参考に、以下の組成の混合気を分圧法で作製した。

H_2 : 0.299, O_2 : 67.8, N_2 : 26.0, CH_4 : 5.89 (%)

混合気は細いチューブを使い、下の穴のほうから燃焼容器に静かに充てんする。充てん量 V_0 は、上の穴から混合気が気泡になって出てくるまでとする。ただし、200A 燃焼容器と 90A 燃焼容器について、実測ではそれぞれ 1.85 L と 0.15 L である。一部の条件については充てん量を半分としてみた。その場合 200A 燃焼容器では実測 0.88 L。

⑤実験方法

実験では、開口直径と開口からの距離に対する圧力を測定する。ただし、90A 燃焼容器においては、上の穴の開口径が小さく、離れた位置での圧力測定が難しいため、下の開口のみの測定とする。

また、爆発に伴う噴出状況を確認するため、圧力センサーを取り外し、高速度ビデオカメラ撮影を行う。

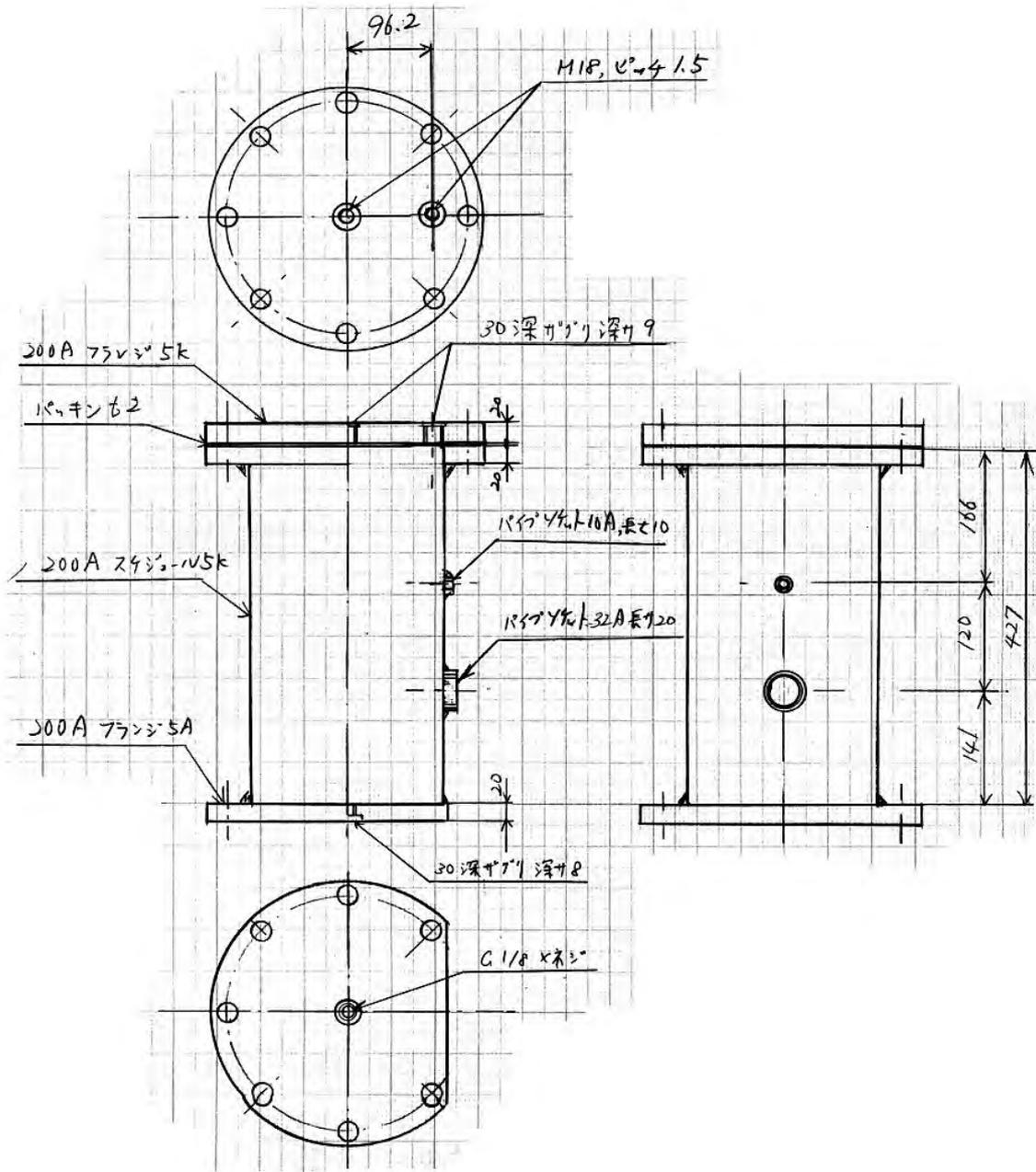


图 8-1 200A 燃烧容器

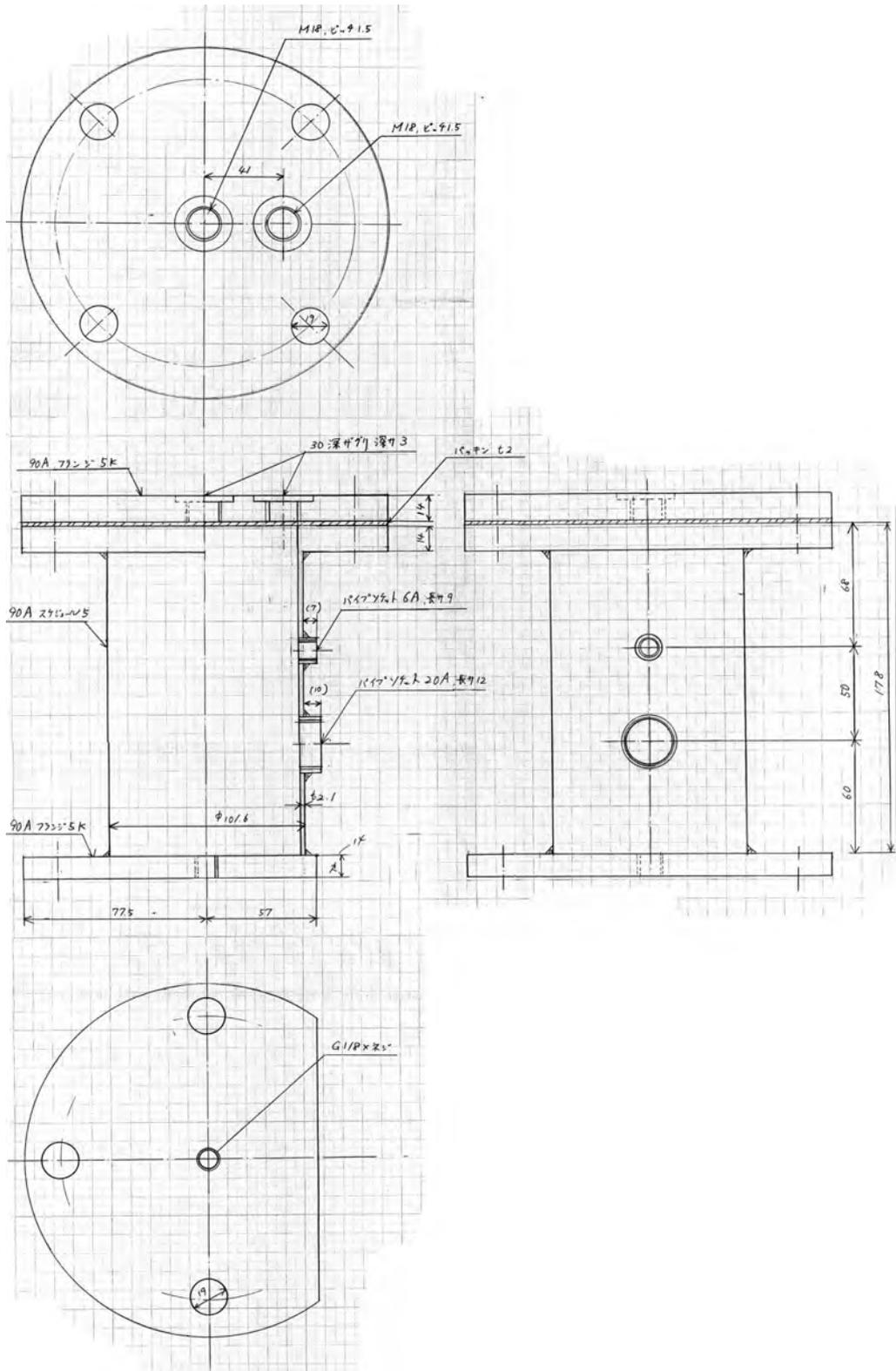


图 8-2 90A 燃烧容器



写真 8-5 200A 燃焼容器と 90A 燃焼容器



写真 8-6 200A 燃焼容器を水槽に入れ傾けたところ



写真 8-7 燃焼容器の傾き 33°

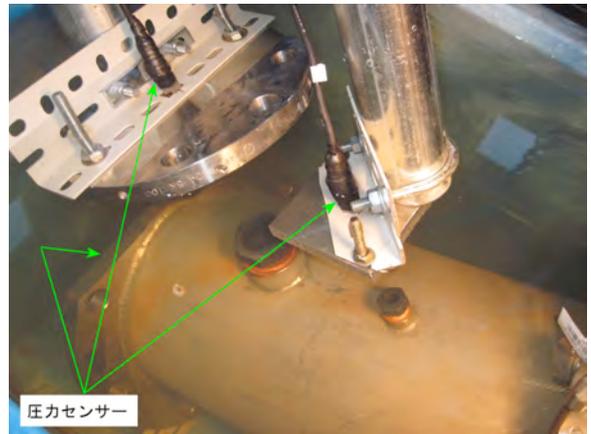


写真 8-8 圧力センサー (PGL-A-1MP-A) の設置状況 : 3 本のセンサーのうち、画面左のものは下側フランジの中央に設置

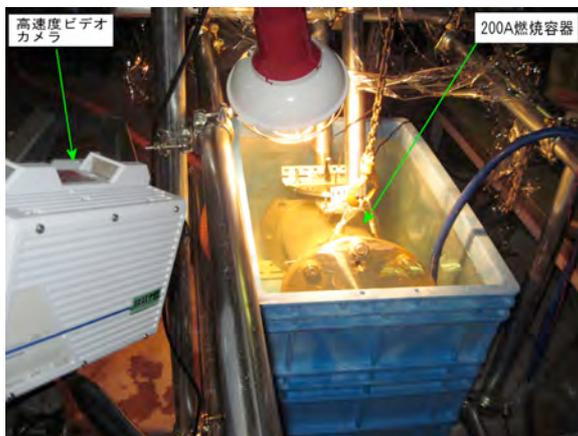


写真 8-9 実験の様子

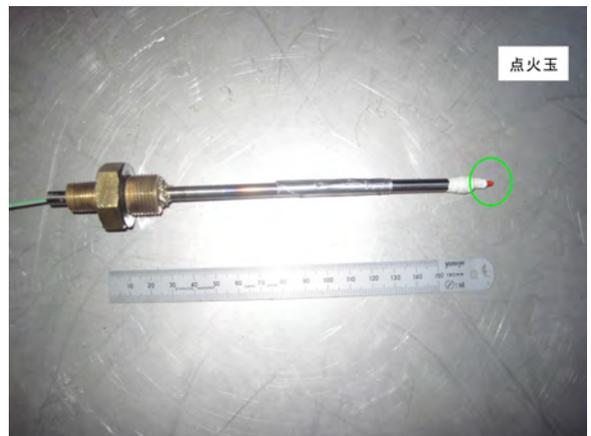


写真 8-10 点火玉の様子



写真 8-11 90A 燃焼容器

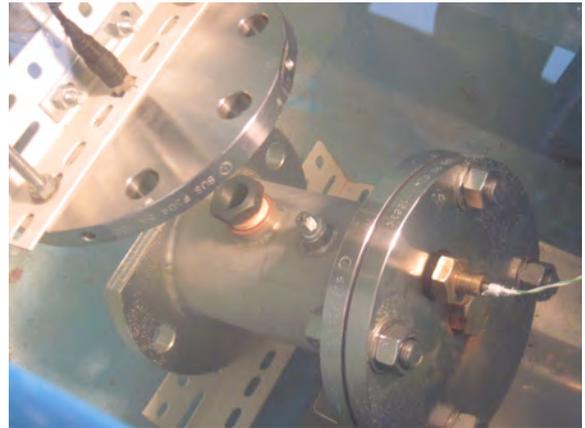


写真 8-12 90A 燃焼容器に圧力センサーを設置したところ



写真 8-13 超軟質ウレタン樹脂(直径 160mm × 厚さ 55mm)



写真 8-14 ウェットスーツ生地

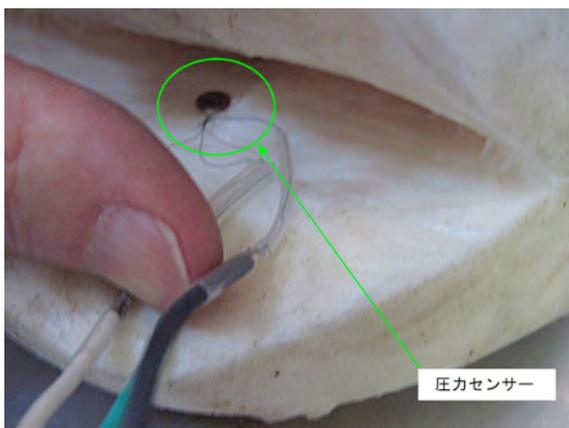


写真 8-15 小型圧力センサーを埋め込む様子

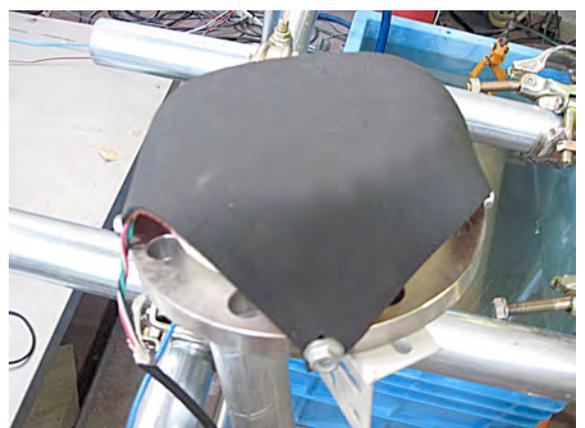


写真 8-16 円板にセットした様子

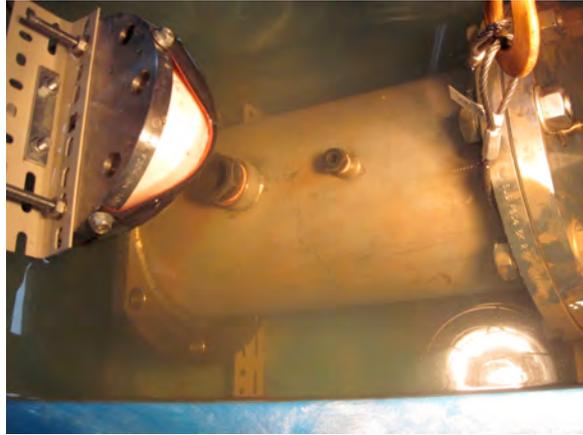


写真 8-17 200A 燃焼容器の開口部上方に設置した様子

表 8-3 人肌のゲルの硬度に対する物理特性（メーカーカタログより）

項目	人肌のゲル		
	0	5	15
比重	1.04	1.04	1.04
硬度	Shore A	0	0
	Shore C	0	5
引張強度	強度 N/mm ²	0.34	0.58
	100%伸び応力 N/mm ²	0.01	0.03
	200%伸び応力 N/mm ²	0.03	0.05
	300%伸び応力 N/mm ²	0.05	0.09
引張伸び	%	758	550
引裂強度	N/mm	0.17	2.70
圧縮強度	10% N/mm ²	0.00	0.02
	20% N/mm ²	0.00	0.05
	30% N/mm ²	0.01	0.12
圧縮弾性率	N/mm ²	0.12	0.23
耐水性		異常なし	異常なし
吸水率 (W/V)	常温 24hrs %	7.2	6.0
	40℃ 24hrs %	4.5	6.8
耐油性	40℃ 24hrs %	-9.04	-8.60
耐酸性	24hrs	異常なし	異常なし
耐アルカリ性	24hrs	異常なし	異常なし
耐環境性	80℃ 80% 24hrs	異常なし	異常なし
耐熱老化	引張強度 N/mm ²	0.30	0.68
	100%伸び応力 N/mm ²	0.01	0.02
	伸び %	660	562
圧縮永久歪み	70℃ 22hrs %	41.8	14.9
	100℃ 70hrs %	17.9	15.9
耐熱温度	℃	-30~60	-30~60
耐寒性	-30℃ 24hrs	脆化せず	脆化せず
粘着性	180°ピール N/25mm	0.15	0.07
	保持力 ^{※1} sec	180	43
	ボールタック NO.	10	6
摩擦係数	静止摩擦係数	-	-
	動摩擦係数	-	-
可視光透過率	%	0.1	0.1
適正荷重	Kgf/cm ²	0.16	0.19

注1) この測定値は参考値であり保証値ではありません。

注2) この内容は性能向上や、仕様変更等により、予告なく変更することがあります。

※1) 保持力については、試料が全て割れなかった場合、時間 (SEC) ではなく長さ (mm) で表示

(4) 実験結果

① 爆発圧力

図 8-3 に 200A 燃焼管と 90A 燃焼管の距離に対する圧力変化（ゲージ圧）を示す。ただし、 $d_2=3.3$ mm の場合のみが 90A 燃焼容器の結果であり、その他は 200A 燃焼容器の結果である。また、密閉時の結果は、開口部に栓をして密閉状態とし下側のフランジ中心で測定したものである。図 8-4 にウレタン樹脂内の圧力変化を示す。

圧力について密閉時の最大圧力で、距離について開口直径で無次元化を行うと、図 8-5 と 8-6 に示すように、距離と圧力の関係が明瞭になることがわかる。

現場の 900A 鋼管において、上の穴のほうは馬蹄形状の 3 箇所開口部からなるが、開口部を合計した面積から等価直径を求めると 25.8 mm である。下の穴の開口部の直径は 125 mm である。鋼管の内径が 886 mm である。125mm の開口部から被災した潜水士の腹部までの距離を 500 mm とすると、無次元距離は 4 となる。同様に小さい穴のほうは 19.4 となる。したがって 実験結果より、無次元圧力はそれぞれ 0.6 と 0.07 と得られる。最大圧力値から換算すると、絶対圧ではそれぞれ 737 kPa と 161 kPa が得られる。ウレタン樹脂内では水中よりも圧力の減衰が大きいですが、無次元距離 5.2 でも無次元圧力が 0.15（絶対圧換算で 188 kPa）もあることがわかる。

② 内容物の噴出状況

写真 8-18 と 8-19 にそれぞれ 200A 燃焼容器と 90A 燃焼容器における爆発の際の噴出の様子を示す。200A 燃焼容器について見ると、先に上の開口から気体が噴出し、続いて、下の開口から渦輪を伴い水が噴出することがわかる。90A 燃焼容器の場合も同様である。すなわち、下の開口からは爆風というよりは水が押し出されて出てくる。

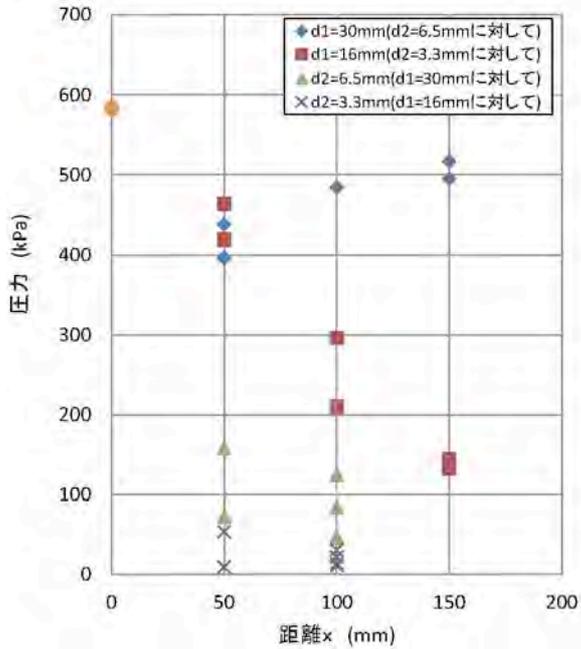


図 8-3 開口からの距離に対する圧力変化

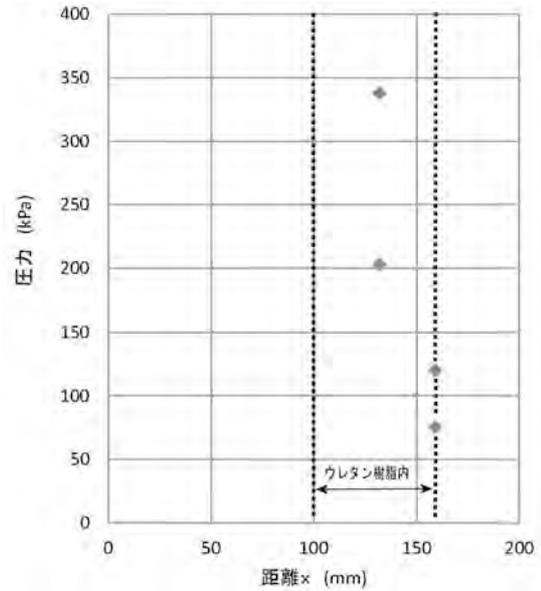


図 8-4 距離に対する圧力変化（ウレタン樹脂，200A 燃焼容器）

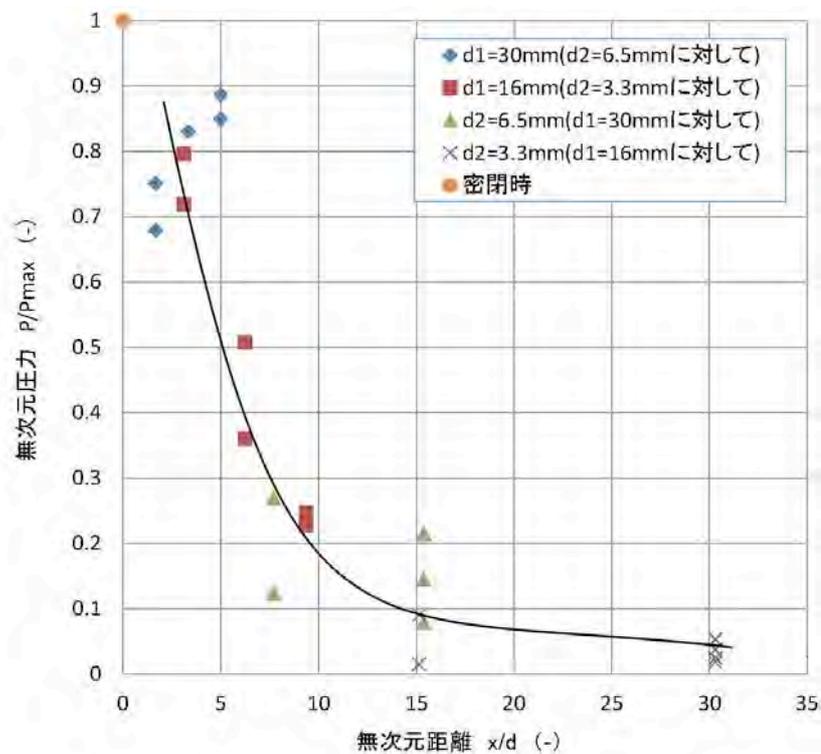


図 8-5 開口からの距離に対する圧力変化（無次元表記）

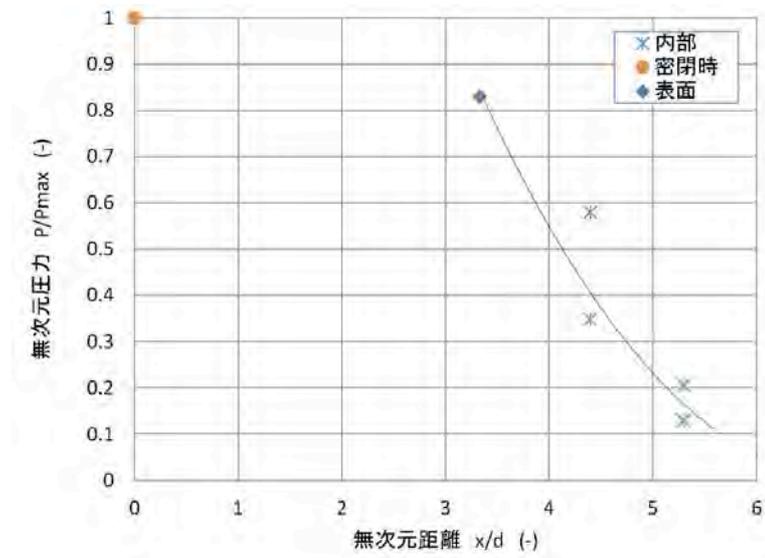


図 8-6 開口からの距離に対する圧力変化（無次元表記，ウレタン樹脂）

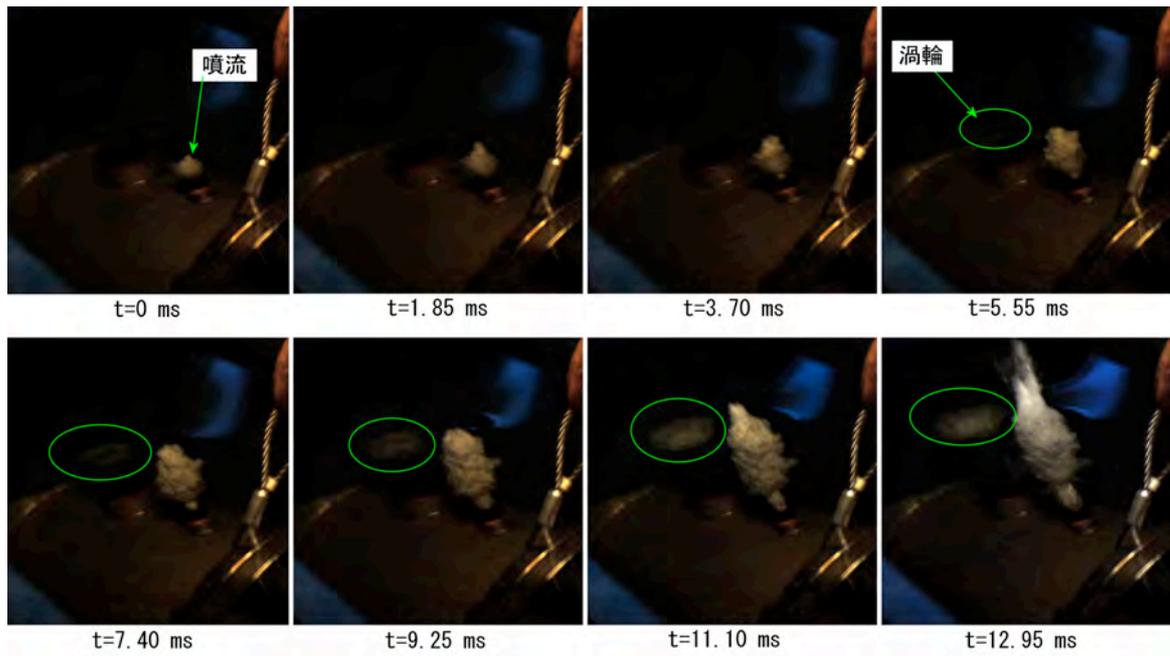


写真 8-18 200A 燃焼容器における開口部からの噴流の様子 ($d_1=30$ mm, $d_2=6.5$ mm)

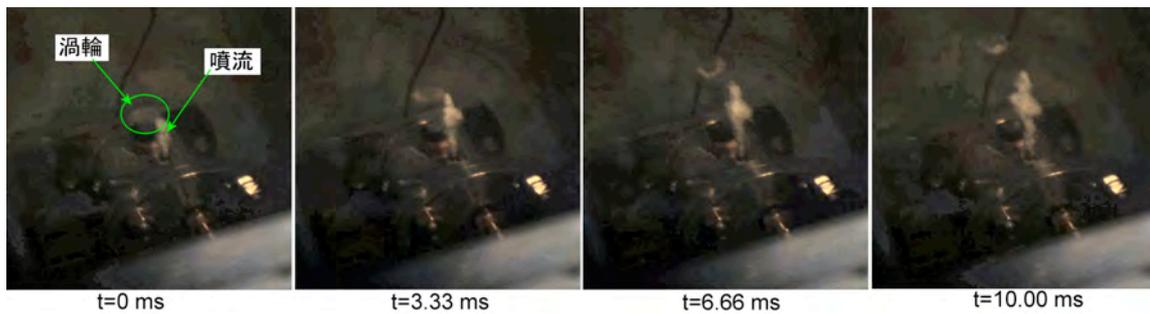


写真 8-19 90A 燃焼容器における開口からの噴流の様子 ($d_1=16$ mm, $d_2=3.3$ mm)

8.5 略

図 8-7 略
写真 8-20~27 略

8.6 水中酸素アーク溶断模擬実験

(1) 実験の概要

本実験では、水中アーク切断作業におけるガス爆発の危険性に関して、ガスの発生と構造物内部に滞留する状況を可視化し、事故災害防止に資するデータを収集することを目的とする。

(2) 実験装置及び実験方法

① 実験装置

図 8-8 と 8-9 に実験に用いた切断箱の寸法を示す。切断板が取り付けられた箱は下面が開放で、側面は切断部を除き透明アクリル製である。切断する板は板厚 14 mm の一般的な SS400 であり、両面に取り付けてある。

図 8-10 に実験の概要を示す。潜水士は海底に足を着けて作業を行い、作業がしやすい高さとする。したがって、水深（深さ）はそのときの潮位に依存する。

装置の寸法，重量等は次の通りである。

- ・切断箱のふたの体積 2.2 L

- ・ホースの体積

内径 12 mm, 断面積 $1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 単位長さあたりの体積 0.113 L ($=1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$), 20 m の体積 2.26 L ($=2.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3$)

- ・切断箱

断面積 0.16 m^2 , 1 cm あたりの体積 1.6 L ($=0.0016 \text{ m}^3$)

ふたを含めた体積：96.0+2.2=98.2 L

- ・ガスの置換

切断箱ふた+ホース(20m)の体積=4.46 L

→切断箱の目盛 3 cm でガスが置換される。

- ・切断箱の自重：約 57 kg+ボルト・ナット
- ・切断箱に溜まったガスによる浮力： $1000 \times 98.2 \times 10^{-3} - 57 = 41.2 \text{ kg}$

②実験条件

実験条件を表 8-4 に示す。

③実験方法

実験では 2 台の水中ビデオカメラを用い、ガスの溜まる状況（発生量）、アークの発生とスパッタの発生状況を調べる。また、ガスサンプリングを行う。

(3)実験結果

実験の様子を写真 8-28~8-31 に示す。また、写真 8-32~8-45 に水中での切断の様子を示す。得られた結果を表 8-5 にまとめる。主な結果は次の通りである。

- ・切断中の切断箱内は非常に明るいこと。
- ・火炎が切断箱内に流入するのは最大でも 13 cm 程度であること。
- ・孤立したスパッタ、火の粉状の物が上方に移動すること。
- ・赤熱したスパッタが落下すること。
- ・実験③によると、溶断棒を傾けて切断した場合は、溶断棒から吹き出す酸素が切断部から内部に入らず、海中に飛散するので溜まる量は少ないこと。
- ・実験④によると、酸素圧を上げると切断速度が大きくなること。
- ・水素が発生することは間違いないが、その量は少なく、CO や CO₂ の割合よりも小さいこと。

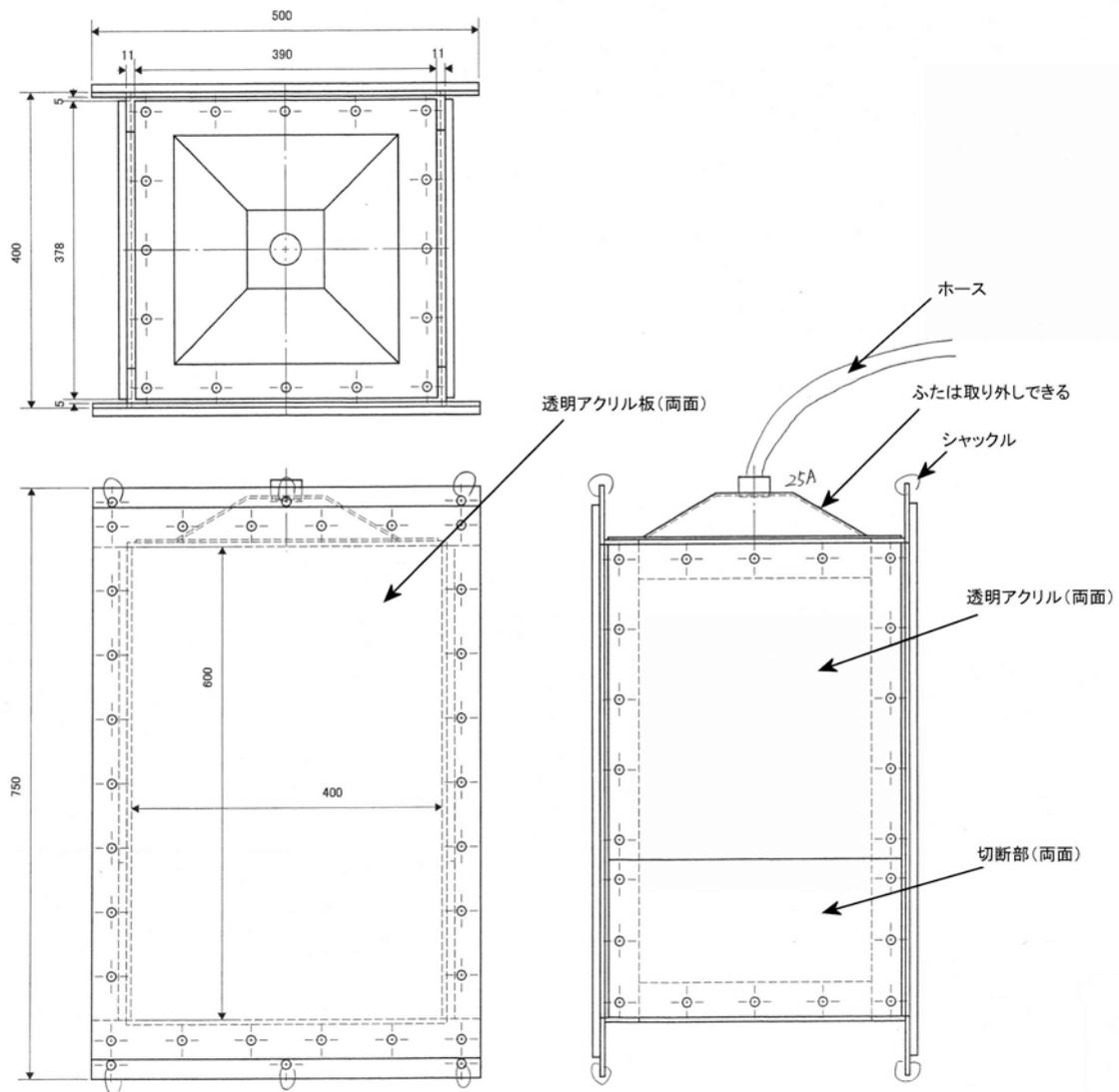


図 8-8 切断箱

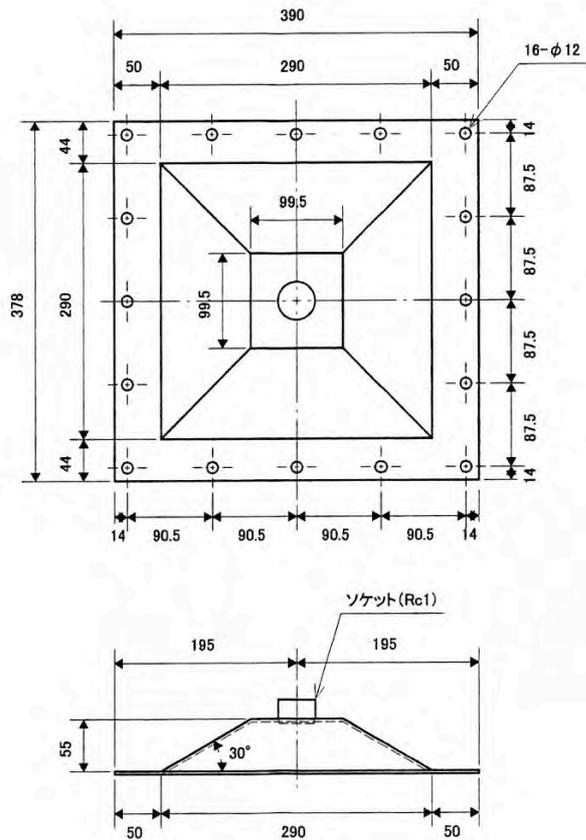
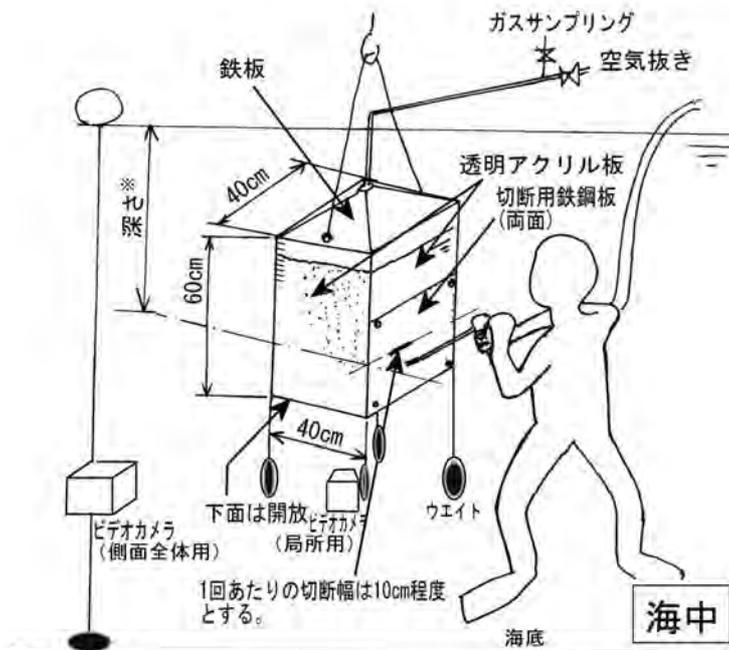


図 8-9 切断箱のふた部



※ 溜まったガスやメタンを事前に充てんして溶断する実験は危険なので実施しない。

※ 深さは別途定める。

作業者は海底に足を着けて作業するが、切断高さは海底から1.5m程度となり、深さはその時の潮位に依存する。

図 8-10 実験の概要



写真 8-28 実験の様子(1)



写真 8-29 実験の様子(2)



写真 8-30 実験の様子(3)



写真 8-31 実験の様子(4) : 切断箱



写真 8-32 切断前の様子（側面：実験①）



写真 8-33 切断の様子（側面：実験①）



写真 8-34 切断の様子（側面：実験①）



写真 8-35 切断の様子（正面：実験①）



写真 8-36 切断の様子（側面：実験②）



写真 8-37 切断の様子（正面：実験②）



写真 8-38 切断の様子（側面：実験③）



写真 8-39 切断の様子（正面：実験③）



写真 8-40 切断の様子（側面：実験④）



写真 8-41 切断の様子（正面：実験④）



写真 8-42 切断の様子（側面：実験⑤）フィルダ装着



写真 8-43 切断の様子（正面：実験⑤）



写真 8-44 切断の様子（側面：実験⑥）



写真 8-45 切断の様子（正面：実験⑥）

表 8-4 実験条件

実験番号	実験条件				
	溶断方法その他	溶断棒	電流 (A)	酸素圧 (MPa)	酸素流量 (L/min)
1	標準的な方法	製品 A	最大 (280)	0.6	130
2	〃	〃	〃	〃	140
3	アークが発生しつつ、切断速度を小さくした状況を模擬する。溶断棒を傾ける (押し切り)。	〃	〃	〃	140
4	酸素圧を上げて行う。	〃	〃	0.8	130
5	標準的な方法。切断箱のふたを取り外して行う。	製品 B	〃	0.6	70
6	〃	〃	〃	0.6	60

表 8-5 実験結果

実験番号 *1)	切断速度 *2) (mm/min)	溜まるガスの量 *3) (L)	単位時間あたりに溜まるガスの量 (L/s)	ガス分析・組成*4)*5) (vol.%)							
				ガス分析番号	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	炭化水素系ガス CxHy	合計 (%)
①	208	34.9	1.03	1-1	0.0167	93.5	5.49	0.113	0.855	0	100.0
				1-2	0.0168	93.1	5.85	0.0989	0.892	0	100.0
②	300	34.9	1.2	2-1	0.0288	93.4	5.45	0.103	1.06	0	100.0
				2-2	0.032	92.7	6.34	0.138	0.829	0	100.0
③	236	22.9	0.763	3-1	0.0464	90.8	7.97	0.166	1.02	0	100.0
				3-2	0.0427	90.2	8.79	0.159	0.841	0	100.0
④	450	22.9	0.964	4-1	0.0384	91.3	6.71	0.18	1.82	0	100.0
				4-2	0.0491	91.3	6.59	0.182	1.83	0	100.0
⑤	104	測定しない	測定しない	測定しない							
⑥	123	測定しない	測定しない	測定しない							

*1)本実験の実施時間：10時39分～11時47分，水深：3.2(m) (10時15分) (ゲージ圧基準)，潮位上昇率： 7×10^{-3} (m/min)

*2)(切断長さ/アークの発生時間) から算出

*3)ホース (6.2 m ; 0.7 L) + 切断箱ふた部 (2.2 L) + 切断箱直方体部に溜まった量

*4)ガス分析について，黄色い煙に相当する成分は分析に使用したカラムでは検出されない(できない)。

*5)ガス分析の装置，分析条件

ガス分析装置：GC-14B (島津製作所)

分析法：ガスクロマトグラフ分析 (検出器 TCD) による面積百分率法による。

分析条件：

カラム：SHINCARBON ST 50/80 2 m×3 mm φ ステンレス

このカラムでの分析対象ガス：H₂, O₂, N₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆

試料注入量：50 μL

キャリアガス：ヘリウム

カラム温度：40 °C (3 min 保持) ~ 200 °C (4 min 保持)，昇温速度 20 °C/min

8章の参考文献

- 1)Institute for Non-Lethal Defense Technologies Report: Ballistic Gelatin, Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University, 2004
- 2)中山良男，生体への爆風影響に関する研究，安全工学シンポジウム 2013 講演予稿集，pp.192-195, 2013
- 3)阿曾沼剛，人体への影響を考慮した個人防護装備の性能評価法について，防衛技術シンポジウム 2012，防衛省技術研究本部，2012

9. 考察

(1) 爆発前に鋼管 No. 13 内に存在していた気体

以下の事柄より、爆発に関与する気体成分について分析会社と研究所の結果に本質的な違いはなく、分析会社に依頼した瓶の成分を採用すると、爆発前の鋼管 No.13 の成分はメタン 5.8%、エタン 0.003%、プロパン 0.0003%、ブタン 0.0001%、水素 0.3%、酸素 67.2%、窒素 26.7%であったと推定される。なお、この組成は、8.4 の小型の爆発容器を使った実験において、爆発性を有することが判明している。

- ① 事故発生後に現場で気体を捕集し、分析会社に依頼してガスクロマトグラフ分析を行った結果によると、鋼管 No.13 の成分はメタン 5.8%、エタン 0.003%、プロパン 0.0003%、ブタン 0.0001%、水素 0.3%、酸素 67.2%、窒素 26.7%であった (6.3)。

同日、別のサンプリング瓶に捕集された No.13 の気体を研究所において同様にガスクロマトグラフ分析した結果では、メタン 4.91%、水素 0.00253%、酸素 64.0%、窒素 30.8%、一酸化炭素 0.317%、二酸化炭素 0%であった (8.3)。ただし、研究所では燃焼の有無を確認するため、一酸化炭素と二酸化炭素の分析項目も追加して行った。検出限界は 0.001%である。爆発に関与する可燃性と支燃性の成分については、分析会社と研究所の分析結果に本質的な違いは見られなかった。

No.14 以降 No.62 までで気体の発生が見られた鋼管の気体成分と比較すると、No.13 の気体については、a)メタンの割合が低いこと、b)水素の割合がやや高いこと、c)酸素の割合が桁違いに高いこと、などがわかった。メタンの割合が低いのは、相対的に酸素の割合が高いためである。酸素の割合がきわめて高いのは、酸素アーク溶断作業で溶断棒から吹き出した酸素が鋼管内に溜まったためである。事業場が外部に依頼した瓶と研究所の瓶の分析結果を比較すると、研究所で分析した瓶のほうが水素の割合が低い。

- ② 水素は水の分解により発生するが、これは電気分解と熱分解によるものと考えられる。
- ③ メタン、エタン、プロパン、ブタン、水素は可燃性気体であるが、水素を除き、これら炭化水素が完全燃焼すると、生成物として二酸化炭素と水を生じる。不完全燃焼すると、一酸化炭素も生じる。溶断棒の被覆材はプラスチック（一般に炭化水素系の成分からなる）であるので、これが燃えると二酸化炭素が発生し、ほかに一酸化炭素も発生することがある。研究所の分析でわずかに検出された一酸化炭素は、爆発（燃焼）した痕跡と考えられる。

- ④ 研究所の分析では二酸化炭素が検出限界以下であったことから、捕集した気体のほとんどは爆発前から存在する燃焼しなかったもので、おそらく鋼管矢板のコンクリートの隙間や鋼管・コンクリートの隙間に溜まっていた気体が主で、これがコアドリルの際に外に漏れ捕集されたものと考えられる。
- ⑤ 鋼管矢板の杭打ち施工時に鋼管内が海水で満たされていれば、海水に溶存する酸素、窒素は水圧や温度の変化で気液分離し、気体となって鋼管内上部に溜まる。メタンは地質由来のもので、鋼管を打ち込んだ土中から湧出してきたメタンと考えられる。被災地域はメタンを賦存する地層があることが知られているが、被災した港ではその存在は指摘されていなかった(7.2)。

(2) 酸素アーク溶断による気体の発生

以下の事柄より、酸素アーク溶断そのもので発生する気体の成分については土中から湧出してきたメタンとは関係ないので、上記(1)の気体の発生量と濃度が採用される。

- ① 災害現場品よりもやや太い溶断棒を使用した水中酸素アーク溶断模擬実験によると、鋼管を模した箱内部に溜まる気体の量は、標準的な溶断方法では1秒あたり1.2リットル、水素0.032%、酸素92.7%、窒素6.34%、一酸化炭素0.138%、二酸化炭素0.829%であった(8.6)。酸素アーク溶断では水の分解による水素の発生が認められるが、その発生量は鋼管内に吹き込まれる酸素に比べて非常に少ない。なお、本模擬実験で対象とする気体の量と割合(濃度)は鋼管内に溜まる分であり、鋼管内に入らずに海中に散逸した分は含んでいない。

実験では切断が可能なアークが発生する状況下で溶断の方法を変えてみたが、水素の発生量は0.05%以下であった。メタンの発生は認められなかった。

- ② 気体の捕集とともに、同日、現場で模擬溶断を行い、生じた気体を事業場が捕集し、分析会社に依頼して分析した結果によると、気体の成分はメタン0.072%、エタン0.0004%、水素1.9%、酸素83.6%、窒素13.6%であった。別のサンプリング瓶に捕集された気体を研究所が分析した結果では、水素0.0557%、酸素91.7%、窒素6.28%、一酸化炭素0.472%、二酸化炭素1.51%、メタン0%であった(6.3)。分析会社は一酸化炭素と二酸化炭素を分析項目に加えていないので、百分率にすると、研究所の結果と数値に違いが見られる。

分析会社による結果ではメタンがわずかに検出されているが、その理由

は不明である。9(1)⑤のことから類推すると、複数回の採取を実施しており、分析試料が同一ではなかったことから分析手法（分析条件）の違いによると見られるが、いずれにしてもメタンの濃度はきわめて低いといえる。

(3) 気体が鋼管内に溜まり、爆発が起こる場合の条件

以下の事柄より、酸素アーク溶断により発生する気体が鋼管内に溜まり、爆発が起こる場合の条件としては、水素のほかに何らかの可燃性の物の存在が必要である。鋼管の材質には特に可燃性気体を発生する成分はなく(8.2)、おそらく、地質由来のメタンが爆発に関与したものと考えられる。

- ① 水素・酸素・窒素の混合気で爆発範囲となる水素の濃度（体積基準の割合）は、常圧で 4.0～75%¹⁾である。すなわち、下限界の水素濃度 4.0%に対する酸素濃度は 20%以上、上限界の水素濃度 75%に対する限界酸素濃度は 5.2%である。圧力の影響については、常圧から 80 kg/cm² (7.85 MPa) (ゲージ圧) までの爆発範囲については常圧時の値を採用してもよいとされる²⁾。したがって、爆発範囲に及ぼす水深の影響は無視できる。
- ② 本件災害で着火源となりえるのは、アーク、切断部（高温面）、溶断棒の被覆材の火の粉（燃焼粒子）、スパッタ（熱粒子）である。水中酸素アーク溶断模擬実験(8.6)では、着火源となりえるような赤熱した粒子が箱内を上方に移動する様子が観察されたことから、着火箇所はアークが発生している切断部付近に限定されない。ただし、切断部付近はアークが常時発生しているため、最も着火しやすい箇所である。
- ③ 酸素アーク溶断で発生する気体は、水素の濃度が下限界未満であるため、鋼管内に溜まっても上記(2)の着火源の存在があったとしても爆発性（可燃性）を有しない。ただし、気体の酸素の濃度が高いため、支燃性を有する。

(4) 爆発の際に鋼管の溶断跡（馬蹄形状）及び丸い開口から外部に発せられる威力

- ① 8.4 の小型の燃焼容器を使った爆発実験の結果を水深 8 m、鋼管表面から 50 cm 位置に換算すると、上の小さい穴のほうは 161 kPa（絶対圧）、下の大きい穴のほうは 737 kPa（絶対圧）になると推定される。なお、水深 8 m での標準大気圧下の水圧は 180 kPa（絶対圧）である。
- ② 爆風圧力と人体被害について調べた文献によると、圧力の大きさと作用する持続時間によって損傷の程度は異なるが、爆薬の爆発のような比較的速い爆発では 100～300 kPa（ゲージ圧）（絶対圧では 200～400 kPa）で 90% の人が肺出血で死亡するという³⁾。また、0.5 kgf/cm² (49 kPa, ゲージ圧)（絶対圧では 149 kPa）では肺に障害を受けるという⁴⁾。本災害では最大

で 700 kPa（絶対圧）を超える圧力を局所的に受け、それは肺出血、内臓が損傷する程度の威力であったことが推定される。

9 章の参考文献

- 1)田村昌三総編集，危険物の事典，朝倉書店，p.434，2004
- 2)柳生昭三，松井英憲，松田東栄，安本弘，水素の爆発危険性についての研究（第一報）－水素の爆発限界に及ぼす圧力の影響－，産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-18-1，1969
- 3)大野友則編著，基礎からの爆発安全工学－構造物の耐爆設計の基礎－，森北出版，p.43，2011
- 4)安全工学協会編，安全工学講座 2：爆発，海文堂，p.231，1983

10. 災害原因の推定

本件災害は，経年で地質由来のメタンが鋼管矢板内に滞留した状況で，水中酸素アーク溶断によるガス抜き用の穴あけ作業を行った結果，鋼管内に吹き込んだ酸素とメタンの爆発性の混合気を形成し，アークあるいはスパッタが着火源となって鋼管内で爆発が発生したと考えられる。そして，開口から生じた高圧の噴流が潜水士の腹部に当たり，負傷，その後死亡したとみられる。当時，鋼管が座屈して斜めになっていたことも原因の一つであり，おそらく潜水士は安定して作業を行うため管にまたがる格好であったため，先に開けた穴の上方に腹部が位置し，爆発の直撃を受けることになった。

11. 同種災害の再発防止対策

本件は，潜水作業における危険性の基本的知識，ガス抜き作業の目的，ガスには可燃性のものを含むこともあることを理解していれば，回避できた災害である。したがって，潜水業務のテキスト¹⁾，安全施工指針・要領^{2~4)}，災害事例^{5),6)}を参考に，同種の事故災害が発生しないための対策を講じる。特に，ガス抜きの際に火気を使うべきではなく，安全の確保のためには以下の項目を参考にすべきである。

- a) 予め地層から天然ガス（主にメタン）などが湧き出す地域であるかどうか文献等で調べる。調査の方法は文献⁷⁾などが参考となる。
- b) ガス抜き（内部に溜まった気体を外部，海中に排気すること）のために鋼管矢板上部から穴あけ作業が可能な場合は，火気にあたらない器具，例えば火花を生じないドリルと動力機器を使い，ガスが抜けたことを確認した後で，酸素アーク溶断などを行う。
- c) ガス抜きのための火花を生じない手法による穴あけ作業やガス抜き後の溶断作業のいずれにおいても，何らかの原因による内容物の噴出，噴流の直撃を受けない位置で作業を行う。
- d) 遠隔操作で行う。

11 章の参考文献

- 1)中央労働災害防止協会編，潜水士テキストー送気調節業務特別教育用テキスト-，中央労働災害防止協会，2012
- 2)国土交通省港湾局監修，潜水作業安全施工指針 改訂版，（一社）日本潜水協会，2013
- 3)国土交通省港湾局監修，港湾工事安全施工指針，（社）日本埋立浚渫協会，2008
- 4)海洋開発工事安全公害対策本部編，海洋工事安全施工要領(改訂版 平成20年3月)，（社）日本土木工業協会・（社）日本埋立浚渫協会，（社）日本海洋開発建設協会・（社）日本鉄道建設業協会，2008
- 5)日建連安全対策本部・海洋安全委員会保安対策部会・建設三団体安全対策協議会編，海洋工事災害事例集（平成24年3月，第2版），社団法人日本建設業連合会，2012
- 6)職場のあんぜんサイト <http://anzeninfo.mhlw.go.jp/>（2014年11月18日アクセス）
- 7)関東地質調査業協会 技術委員会編，現場技術者のための地質調査技術マニュアル，関東地質調査業協会，2005

12. まとめ

研究所における本災害調査は，科学技術的な観点から原因のための現地調査，実験を行い，同種災害の再発防止のための技術的な安全対策の確立に資することを目的として実施した。

調査の結果，本件災害は，経年で地質由来のメタンが鋼管矢板内に滞留した状況で，水中酸素アーク溶断によるガス抜き用の穴あけ作業を行った結果，鋼管内に吹き込んだ酸素とメタンの爆発性の混合気を形成し，アークあるいはスパッタが着火源となって鋼管内で爆発が発生したと考えられる。そして，開口から生じた高圧の噴流が潜水士の腹部に当たり，負傷，その後死亡したものとみられる。当時，鋼管が座屈して斜めになっていたことも原因の一つであり，おそらく潜水士は安定して作業を行うため管にまたがる格好であったため，先に開けた穴の上方に腹部が位置し，爆発の直撃を受けることになった。本件は，潜水作業における危険性の基本的知識，ガス抜き作業の目的，ガスには可燃性のものを含むこともあることを理解していれば，回避できた災害といえる。

水中での構造物の解体作業の効率化，低コスト化のため，酸素アーク溶断による解体作業が一般的に行われている。解体工事における火気となるアーク溶接・溶断，またはガス溶接・切断の使用について注意喚起が必要である。