

海洋油田プラットフォームの転覆

【1980年3月27日、北海ノルウェー沖 エコフィスク油田】

橋内良雄((社)日本クレーン協会)

小林英男(東京工業大学大学院 理工学研究科)

1980年3月27日、18時30分頃ノルウェー沖に係留されていた石油掘削用海洋構造物のアレキサンダーキーランド号が暴雨風の中で5本のコラムのうちの1本が本体から切断・分離し、約30分後に上下が反転して転覆した。プラットフォームには膨張式の救命袋や救命艇が備え付けられていたが、急に転覆したため212名中の123名が死亡した。原因は、コラムDに接合された水平材の溶接部の溶接欠陥を起点として疲労き裂が発生・進展し、続いてコラムDが破断して本体から切り離されてバランスを失ったためであった。事故後、設計基準であるMODUコードが見直され、構造強度の強化、暴風雨時の十分な浮力と復元性の確保等が規定された。

1. 機器

石油掘削用海洋油田プラットフォーム「アレキサンダーキーランド号」は、半潜水式の5本のコラムの上に103mX99mの広さの甲板が設けられ、甲板上に高さ40mの石油掘削用ドリルと宿泊設備が設置されており、全重量は10,105tonであった(図1参照)。コラム(支柱)の直径は8.5mであって、5本のコラムの間は管直径が2.6mで肉厚が約25mmの水平材と管直径が2.2mの斜材で連結されていた。

2. 事象

1980年3月27日18時30分頃、北緯56度28分、東経3度7分のノルウェー沖エコフィスク油田(図2参照)に係留されていた石油掘削用海洋油田プラットフォーム「アレキサンダーキーランド号」が、風速16~20m/s、気温4~6°C、水温6°C、波高6~10mの暴雨風の中で5本のコラムのうちの1本が本体から切断・分離し、一瞬のうちにプラットフォームが約30°傾き、約30分後に上下が反転して転覆した(図3参照)。

(1) 破断部の特徴

コラムDに溶接されていた水平材D6が最初に破断し、続いてコラムDが破断した。事故のきっかけとなった水平材D6は直径2600mm、板厚25mmのパイプであって、この水平材にはコラムDとの接合部から14m離れた箇所に通水口(ドレン)と、水中音波水深測定器用のハイドロフォンという直径325mm、板厚20mm、高さ228mmのパイプが溶接されていた(図4参照)。き裂はハイドロフォンの溶接部を起点として発生し、その後に水平材D6の円周方向に進展して破断した(図5参照)。破面調査の結果、ハイドロフォンをすみ肉溶接した箇所を起点として時計方向に全周の3/8に、反時計方向に全周の1/8に疲労破壊の特徴が見られ、特に、起点近傍の60~100mmでは両方向とも明確なビーチマークが形成されていた(図6参照)。また、この領域では0.25~1.0μ

mの間隔のストライエーションが観察された。

(2) 溶接部の特徴

起点となったハイドロフォンの溶接部を調べたところ、溶接熱影響部(HAZ)にき裂が認められ、き裂の一部には約70mmにわたってペンキが付着していた。これは水平材D6を塗装した時点で、すでにハイドロフォン溶接部にき裂が存在していたことを示している。

水平材D6は強度部材であるため、設計基準に従い通水口の取り付けはフランジにK開先加工後完全溶け込み溶接され、非破壊検査も実施されていた。しかし、ハイドロフォンについては強度部材に取り付けるにもかかわらず特に基準が示されていなかったため、重要な水平部材であるD6にガス溶断によって穴をあけ、パイプであるハイドロフォンを穴に挿入してその周囲をのど厚6mmですみ肉溶接されていた。ハイドロフォンの寸法を図7に示す。なお、D6にガス溶断で穴あけした際、加工がずさんであったが端面をグラインダで仕上げず、そのままハイドロフォンをすみ肉溶接したため、溶け込み不足、スラグ巻き込み、ルート欠陥等の溶接欠陥が形成されていた。また、ハイドロフォンの材料中にはMnS、Al₂O₃などの介在物によるラメラティアが認められた(図8参照)。このため、ハイドロフォンをすみ肉溶接した直後にHAZにき裂が発生し、塗装した際にペンキが破面に付着したと推察される。

ハイドロフォンすみ肉溶接部の応力集中係数K_tは、正常な溶接では1.6程度であるが、ここでは2.5~3.0になっていた。

(3) 材料の化学成分及び機械的性質

水平材D6及びハイドロフォンに使用した材料の化学成分と機械的性質を表1、表2に示す。化学成分は、D6材及びハイドロフォン材共に設計で要求する規格値を満足していた。

材料試験の結果、D6材の圧延直角方向(表2中のT)の機械的性質は降伏点 $\sigma_y=301\sim 351\text{MPa}$ 、引張り強さ $\sigma_b=501\sim 523\text{MPa}$ 、絞り $\psi=29\sim 33\%$ 、 -40°C におけるシャルピー衝撃エネルギー $C_v=46\text{J}$ であって設計仕様で要求する規格値を満足していた。また、ハイドロフォンの圧延直角方向では $\sigma_y=405\text{MPa}$ 、 $\sigma_b=516\text{MPa}$ 、 $\psi=30\%$ 、 $C_v=17\text{J}$ であって、シャルピー衝撃エネルギーがD6材に比べてかなり低かった。ハイドロフォンについては板厚方向に対する試験も実施され、 $\sigma_b=398\text{MPa}$ 、 $\psi=4.8\%$ であって、圧延直角方向に比べて絞りが著しく減少していたが、これはMnS等の介在物のためである。

水平材D6に作用する応力を当日の気象条件を考慮して求めた結果、 $131\sim 173\text{MPa}$ であった。すみ肉溶接したハイドロフォンの疲労寿命をマイナー則を適用して求めた結果、最も厳しい条件では0.7~5年と推定された。

表1 D6材及びハイドロフォン材の化学成分(mass%)

	C	Si	Mn	S	P	Al	Nb	Ew
規格値	Max 0.18	Max 0.50	1~1.5	Max 0.03	Max 0.03			Max 0.42
D6材	0.17	0.32	1.34 1.37	0.015 0.019	0.026 0.021	0.056 0.044	0.025 0.029	0.41 0.41
ハイドロフォン材	0.16	0.29	1.35	0.020	0.017	0.038	0.023	0.40

表 2 D6材及びハイドロフォン材の機械的性質

	板厚 (mm)	降伏点 (MPa)		引張り強さ (MPa)		絞り (%)		シャルピー衝撃 値 (J)	
		L	T	L	T	L	T	L	T
規格値	< 40	Min 353		490 ~608		Min 22			Min 39.2
D6 材	25	343 ~353	301 ~351	506 ~518	501 ~523	30~34	29~33	40	46
ハイドロフォン材	20		405		516		30	16	17
ハイドロフォン材 Z方向	20			398		4.8			

L: 圧延方向, T: 圧延直角方向, Z方向: 板厚方向, シャルピー試験温度: -40°C

3. 経過

このプラットフォームはフランス CFEM(Compagnie Francase d'Enterprises Metalliques)で設計され、フランスとドイツの子会社でコラムと構造部材の製作が行われた。プラットフォームの組立ては CFEM のダンケルク造船所で行われ、1976 年 7 月に完成してノルウェーに引き渡された。当初、宿泊設備は 80 人用であったが 1978 年 4 月に 348 人用に改造され、1979 年 9 月には年1回の定期検査に合格していた。

4. 原因

- (1)構造部材である D6 水平材にガス溶断して穴をあけ、端面をグラインダ加工せずに、粗雑な材料で作られたハイドロフォンを開先も取らずにはめ込み溶接をしたため、溶接時に D6 水平材に約 70mm のき裂が発生したこと。
- (2)応力集中とき裂の存在のために D6 水平材に応力の再分布が起こって、プラットフォームが稼働した最初からハイドロフォン溶接部を起点として D6 水平材の円周方向に疲労き裂が進展したこと。
- (3)水平材 D6 にハイドロフォンを溶接した際の疲労寿命設計がなされておらず、部材の重要性に対する認識が不足していたこと。
- (4)水平材 D6 に対する定期検査がなされていなかったこと。

5. 対処

この事故調査結果に基づき、ノルウェー船級協会(DNV)及びノルウェー海事局(NMD)はプラットフォームの安定性、強度及び救命設備に対して厳しい規則を制定した。さらに、ノルウェーは 1982 年に国際海事機関(International Maritime Organization, IMO)に、移動式海底資源掘削船構造設備基準(Mobile Offshore Drilling Units, MODU)の見直しを提案し、国際関係機関において MODU コード A-414 について、一般、構造・強度及び材質、復原性、機関設備、電気設備、救命設備、操船要件等が審議され、1988 年に草案がまとまり、1991 年 5 月から MODU コードが発効した。

6. 対策

アレキサンダーキーランド号のような事故を防ぐために、設計基準であるMODUコードが見直された³⁾。改正されたMODUコードでは、構造・強度において、ユニットの構造はいかなる細い水平材が失われても全体的な崩壊に至らないようにすることと、水中にある水平材は水密とし、早期に疲労き裂を検出するための水漏れ検出システムの設置を義務づけた。

復原性では転覆の浸水の判断基準が、米国の ABS 船級協会の研究に基づいて導入された。特に、半潜水式ユニットでは毎秒 25.8m の風荷重に対して十分な浮力と復元性を有するように水密甲板及び隔壁の設置が規定された。また、外部開口部については、機器が傾斜した際に水没する海水流入口には密閉装置を設けることになった。

機関設備では機器が半潜水式ユニットでは 15 度、自己昇降式ユニットでは 10 度傾斜しても正常に稼働することや、主電源が喪失してもハッチの操作が可能なが定められた。

電源設備では非常用電源として主電源を 2 カ所以上に分けて設けること、半潜水式ユニットでは 25 度、自己昇降式ユニットでは 15 度傾斜しても最大定格負荷で非常用発電機及びバッテリーが支障なく機能することが規定された。

以上の他、防火設備、救命設備、救命艇等について基準が改正された。

7. 知識化

機器の完成後に付加物を溶接で取り付けると、溶接部に拘束による二次応力が発生し、さらに機器の本体にも付加的な応力が発生し、破壊事故の原因となることが多い。付加物の溶接による取り付けは、機器の設計のやり直しと認識すべきである。また、取り付けの場合、以後の検査を強化する必要がある。

8. よもやま話

○ はめ込み溶接

この事例のように隙間のある状態で厚板管をはめ込み溶接すれば、溶接部にき裂が発生しやすく、さらにはめ込み溶接では拘束が大きく欠陥が生じやすい。我が国でも溶接船が大量に建造されたときにこのような溶接方法が一部で採用されてきたが、溶接後の外観検査だけでは欠陥の発見が難しい。また、たとえ欠陥がなくとも疲労強度が著しく低く、繰返し荷重を受ける部材にはめ込み溶接を採用すべきでない。

○ ラメラティア (Lamellar tearing)

溶接により密集した介在物を起点として割れが開口し、階段状に連なったもの。板厚方向に大きな応力が発生するような部材では、ラメラティアが存在すると板が裂けて事故が発生する可能性がある。

○ ビーチマーク (Beach mark)

疲労き裂が進展する際に、大きな変動応力を受けると破面に波形の模様が残されるが、この模様はき裂先端の軌跡を表している。浜辺に見られる砂の波形模様と似ていることからこの名が付けられている。

○ ストライエーション (Striation)

疲労き裂が進展する際に、1 回の応力繰返しごとに破面に形成される縞模様のことで、縞の間隔

は疲労き裂が進展する速度と一致する。通常は電子顕微鏡等の高倍率装置を用いないと観察できない。事故調査では、縞の間隔と個数から繰返し応力の大きさと回数の推定に使用されている。

9. 当事者ヒアリング

事故当時の状況について、作業員から以下のような証言がなされたことが、新聞やテレビ等で報道された。

プラットホーム上の映画館で約 60 人の作業員と一緒に映画を見ていたノルウェーの作業員は、2 回の爆発音がしたので何か大変なことが起こったと感じた。床が 40° 傾き、明かりがすべて消えた。人々は出口のある方に飛ばされ、映画館にいた多くの人がけがをした。幸運にもドアが閉じていなかったため、何とか脱出して手すりを使って外に出た。

また、他の作業員は食堂で夕食をとっていたとき、プラットホームが傾き、耳をつんざくような爆発音を聞いた。誰もがデッキに出ようと先を争い、私も必死になって脱出した。デッキにたどり着いたとき、コラムの 1 本が壊れて海に浮いているのを見た。何とか救命着をつけ海に飛び込もうとしたが、プラットホームが大きく傾いたため海に投げ出された。幸い救命ボートに乗ることが出来たが、海水はとても冷たかったと述べている。

10. 主シナリオ

1. 無知
2. 知識不足
3. 経験不足

4. 製作
5. ハード製作
6. 機械・機器の製造
7. 石油掘削用海洋プラットホーム
8. 水平材
9. ハイドロフォン

10. 不良現象
11. 機械現象
12. 溶接不良
13. はめ込み溶接
14. 溶接欠陥

15. 破損
16. 破壊・損傷
17. 疲労き裂

18. 水平材破断

19. 使用
20. 保守・修理
21. 点検

22. 点検不足

23. き裂見逃し

24. 破損

25. 大規模破損

26. プラットホーム転覆

<参考文献>

(1) Norwegian Publication Reports, The “Alexander L. Kielland”-accident, (1981)

(2) A. Almar-Naess, P. J. Haagenen, B. Lian, T. Moan, and T. Simonsen, Trans. ASME, Vol.106, March, 1984. pp.24-31.

(3) 石田成幹、日本造船学会誌、No.734号、1990, pp.475-479.

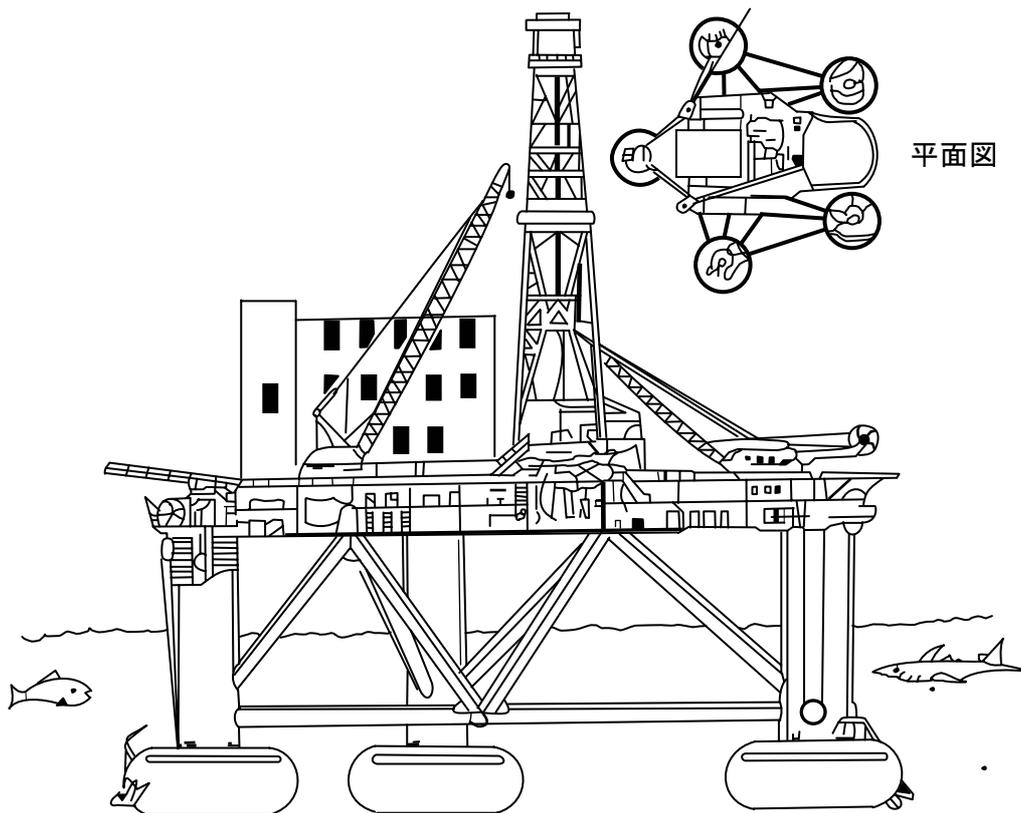


図1 石油掘削用海洋油田プラットフォーム「アレキサンダーキーランド号」

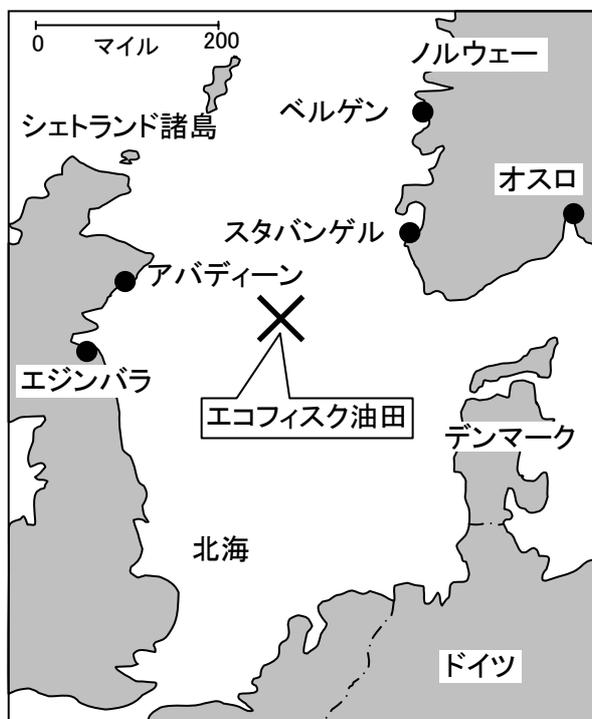


図2 災害発生位置

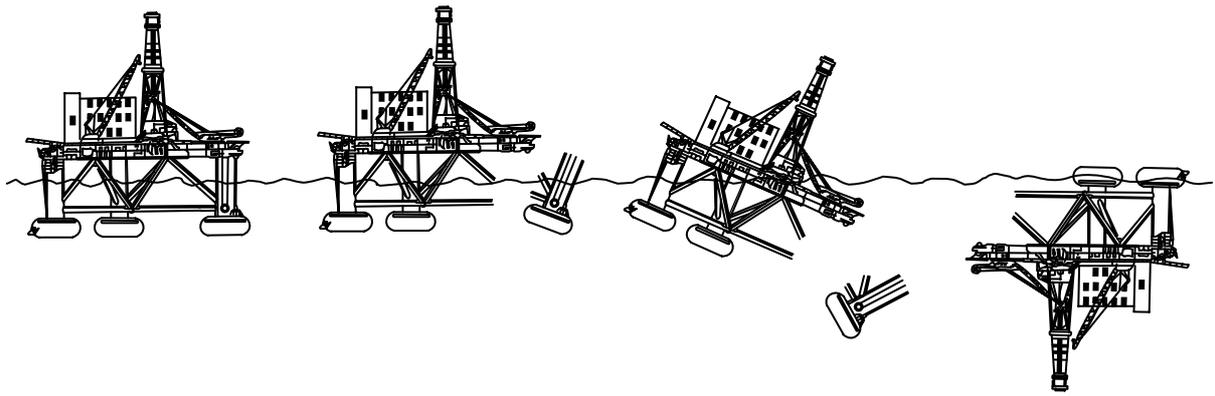


図3 アレキサンダーキランド号の転覆状況

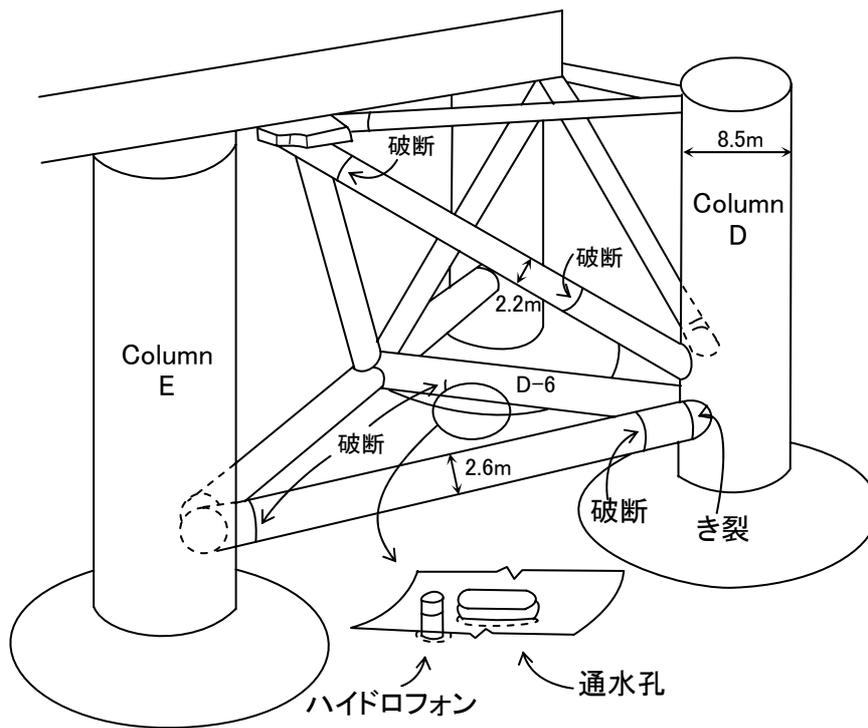


図4 破断した部材 D-6 とハイドロフォンの位置

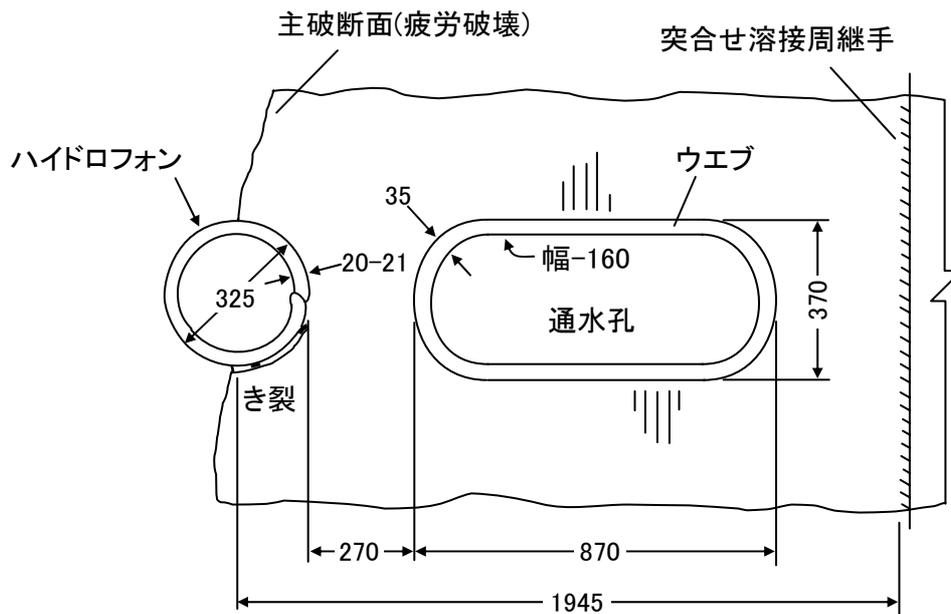


図5 ハイドロフォン近傍のき裂と主破断箇所

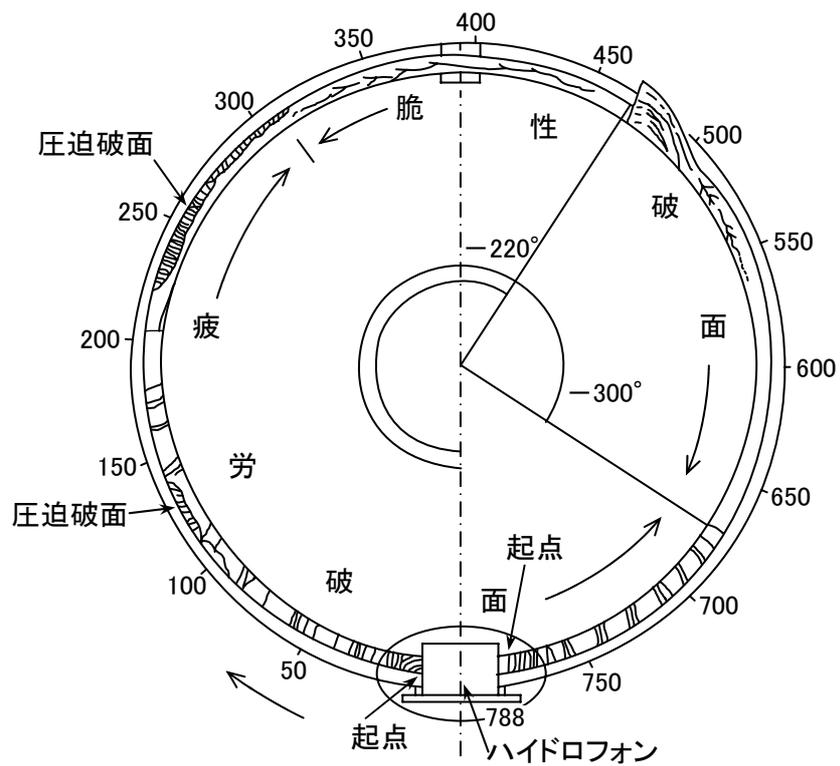


図6 水平材 D-6 の破面の様相

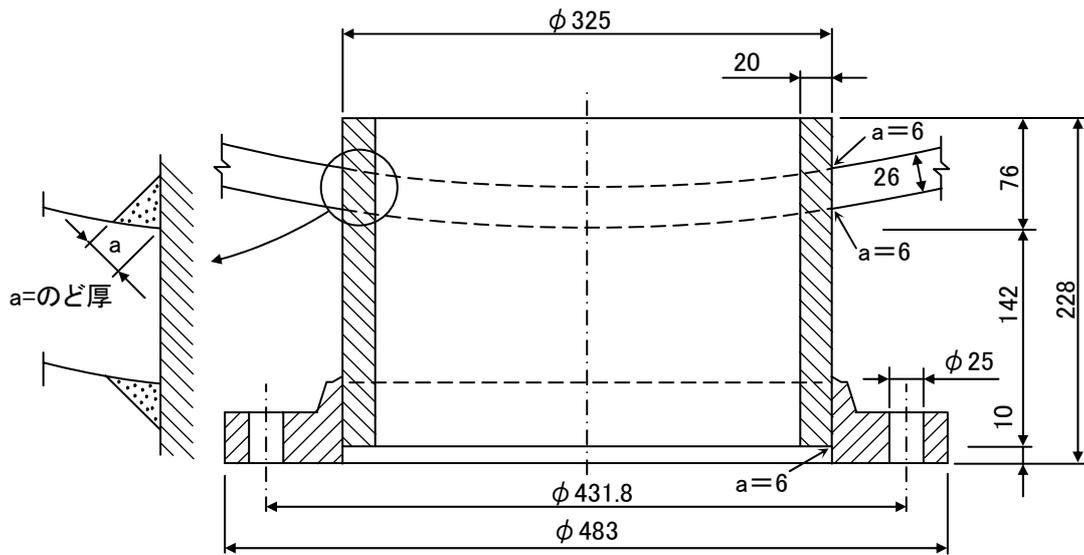


図7 ハイドロフォン(斜線部)の寸法

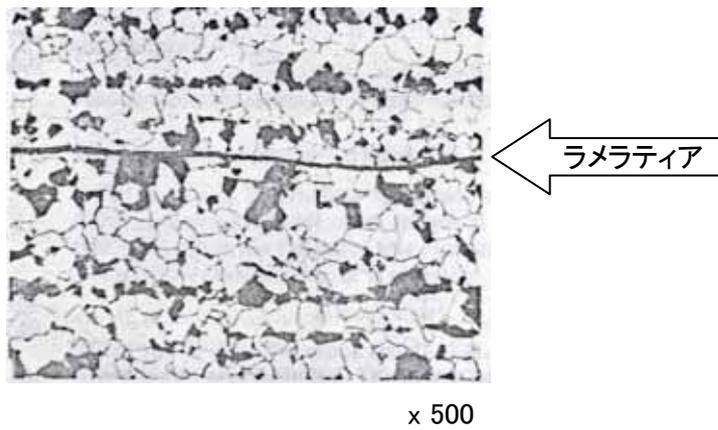


図8 ハイドロフォン材のラメラティア