

滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故

原因調査報告書

令和5年9月1日

滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故に係る

第三者委員会

目次

はじめに（第三者委員会）	2
第1部 水槽破損事故の原因推定	3
1. 調査の対象	3
(1) 事故発生水槽の位置	
(2) 事故が発生した水槽の性状	
2. 水槽破損事故の発生状況と対応	4
2-1. ビワコオオナマズ水槽	4
(1) 事故発生状況	
(2) 破損事故に伴う被害	
(3) 破損事故後の対応	
(4) 水槽破損状況	
2-2. ふれあい水槽	7
(1) 事故発生状況	
(2) 破損事故に伴う被害	
(3) 破損事故後の対応	
(4) 水槽破損状況	
3. 水槽破損事故の原因推定	9
3-1. ビワコオオナマズ水槽	9
3-1-1. 破損原因推定のための調査と検討の経過	9
3-1-2. 破損原因推定のための現地状況の確認	10
(1) 水槽の状況	
(2) 建物の歪み（水槽周辺の建物床面調査）	
3-1-3. 水槽の破損原因推定	17
3-1-4. より根本的な破損原因の推定	21
3-2. ふれあい水槽	23
3-2-1. 破損原因推定のための調査と検討の経過	23
3-2-2. 破損の状況	23
3-2-3. 水槽の破損原因推定	24
第2部 水槽の点検と安全の確立	26
1. 従来 の点検体制	26
(1) 事故前の点検の実施状況	
(2) 従来 の体制の課題	
2. 新たな安全管理体制の構築	27
(1) 全水槽の点検と安全性基準作成の経過	
(2) 水槽の安全度判定	
(3) 安全度判定結果に基づく対応	
(4) 新たな管理体制	
第3部 総括：水槽破損事故の再発防止に向けて	31
1. 壊れない水槽を造る	31
2. 壊れる前に対処する	32

はじめに

滋賀県立琵琶湖博物館では、令和5年2月10日午前8時ごろに琵琶湖の主（ぬし）水槽（通称「ビワコオオナマズ水槽」）（直径 5.1m 高さ 3.8m、水量 78 トン）が破損した。その際に発生した水流と破片によって水族展示室内の通路壁が損傷し、当該水槽の周囲が広範囲に浸水するなどの大きな被害が発生した。幸い開館前であり、破損当時、周辺に来館者はもちろん職員もいなかったため人的被害は生じなかったが、もし開館時間中に起こったのであれば深刻な事態になったであろう。また同年3月2日には別の水槽（ふれあい水槽）で大きな亀裂が見つかり、早期発見であったため漏水に至るまでに対処ができたものの、当該水槽は使用不能となった。大量の水を蓄えた、多様な形状により意匠をこらした水族館の水槽は魅力的な展示で人気があるが、ひとつ間違えば凶器と化す可能性があることから、その安全管理は最も優先されなければならない。琵琶湖博物館は1996年の開館から27年が経過し、水槽や施設の劣化も進んでいると考えられる。そうした状況で、今後も来観者に安全で安心な観覧環境を提供するためには、まず第一に水槽が破損した原因を推定し、迅速かつ適切な対処を行っていく必要がある。

このような背景のもと、水族館の水槽に関する専門家をメンバーとして「滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故にかかる第三者委員会」が設立されることとなった。本委員会の目的は、ビワコオオナマズ水槽が破損した原因を推定し、事故の再発防止につなげる見識を提示することである。なお、本委員会では原因の推定は行うが、その責任の所在の追及には関与しない。

また、水槽破損の原因推定と並行して、琵琶湖博物館は既存の水槽の安全管理に関する体制の見直し案についても本委員会に諮問した。今後の安全な水族展示の運営に不可欠な問題であることから、本委員会ではこの件についても検討し、琵琶湖博物館に対して必要な提言を行うこととした。

滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故に係る第三者委員会

滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故に係る第三者委員会名簿（敬称略、委員は五十音順）

	氏名	所属／役職
委員長	岡田尚憲	一般社団法人 野生生物生息域外保全センター 特別顧問 公益社団法人 日本動物園水族館協会 前事務局長
副委員長	柴山 勇	株式会社 アクアート アクアリウムシステム部 取締役部長
委員	井口博人	株式会社 VAN aqua teal 代表取締役社長
委員	岡村信也	一般財団法人 日本建築総合試験所 技術アドバイザー
委員	中村英博	エポキシ工業株式会社 代表取締役
委員	峰島靖典	有限会社 富士アクリル工業 代表者

第1部 水槽破損事故の原因推定

1. 調査の対象

(1) 事故発生水槽の位置

破損事故が発生したのは琵琶湖博物館水族棟 1 階の水族展示室で、琵琶湖の主（びわこのぬし）水槽（通称：ビワコオオナマズ水槽。以下、通称で表記する）は展示室のほぼ中央に位置する。ふれあい水槽は順路後半のふれあい体験室の奥側の壁面に、博物館の建築工事後に設置された水槽である。

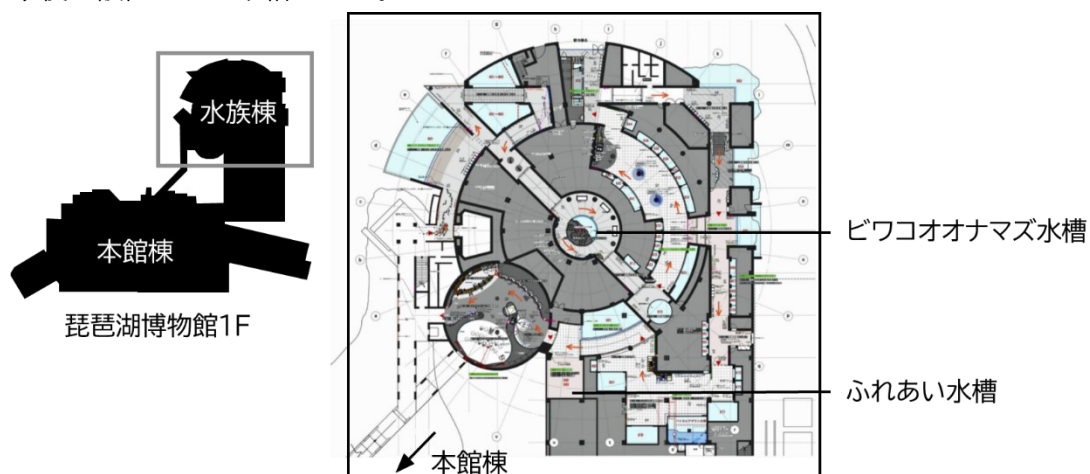


図1 破損事故が発生した水槽の位置

(2) 事故が発生した水槽の性状

ビワコオオナマズ水槽

形状 円柱状水槽

直径 5.1m、高さ 3.8m

材質 アクリル（底はコンクリート製）

アクリルの厚さ 40mm

展示水量 約 78 トン

ろ過槽水量 約 24 トン

設置年：開館時（1995～1996年）

（博物館の建築工事後に設置）

- 2004年4月に水槽下部のケミカルクラック（薬品などによって生じた小さいヒビ）削る修理を実施した。
- 当水槽は2016年のリニューアル時には改修していない。

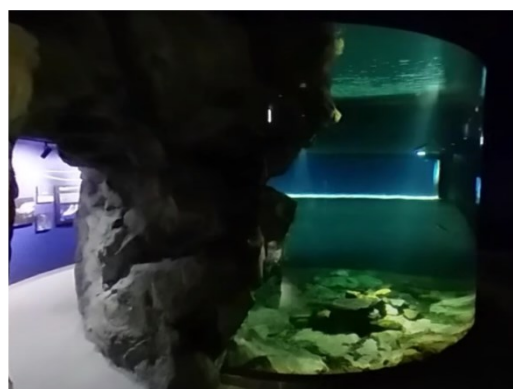


図2 ビワコオオナマズ水槽

ふれあい水槽

形状 直方体水槽

幅 300cm、奥行 100cm、高さ 180cm

材質 天面、底面も含めてアクリル製

アクリルの厚さ 約 30mm

展示水量 約 4.7 トン

設置年：開館時（1995～1996年）

（博物館の建築工事後に設置）

- 水槽内部を減圧することで、展示室側の水槽下部3か所の穴から手を入れることができる構造になっている。
- 当水槽は2016年のリニューアル時には改修していない。



図3 ふれあい水槽

2. 水槽破損事故の発生状況と対応

2-1. ビワコオオナマズ水槽

(1) 事故発生状況

事故発生日時 2023年2月10日（金）8:00頃

事故発生前後の経過

- 前日 水族飼育員が毎日行う水槽の目視点検では亀裂などの異常はなかった
- 6:00頃 警備員が巡回。水槽などに異常なし
- 7:59 防災監視センターにおいて漏電警報を受信
- 8:19 防災監視センターがビワコオオナマズ水槽のろ過槽の水位低下警報を受信
- 8:20 水族飼育員が現場に急行したところ、ろ過槽の水位低下を確認
同時にビワコオオナマズ水槽が破損し周囲が浸水していることを確認
- 8:20頃 清掃職員が水族展示トイレの清掃のために当該地に移動したところ、
ビワコオオナマズ水槽付近に水があふれていたため、総務課に報告
- 8:30～ 博物館職員が排水作業や被害状況の確認を開始
- 14:10頃 ビワコオオナマズ 1個体（全長85cm）を救出
- 15:00頃 排水完了

(2) 破損事故に伴う被害

- 破損破片や水流等による展示室内通路の壁の破損が発生したほか、周囲一帯が浸水した（図5）。
事故発生直後は、水槽前面では膝の高さまで浸水した。
- 開館前で来館者がおらず、発生時に現場には職員がいなかったことから、人的な被害はなかった。

(3) 破損事故後の対応

- 水族展示室の閉鎖
ただちに水族展示室を閉鎖し、関係者以外立ち入らないようにした。
- 関係各所への連絡
- 全ての水槽の目視点検
ビワコオオナマズ水槽破損直後、全ての水槽を目視で点検した。破損水槽と同形状のコアユ水槽については、潜水による点検でもひび割れ等は確認できなかった

が、安全面に配慮し、3月10日に水を抜いた。

- 建物調査

水槽の破損およびその後の浸水に伴う建物床面への影響を滋賀県土木交通部建築課（以下、県建築課と略）立会いの下で2月13日に調査した。亀裂、ひび割れは無く、建物の床の損傷等は確認されなかった。また、床の水平レベルに問題はなかった。

- トンネル水槽の水抜き

第1回第三者委員会で危険性が指摘されたトンネル水槽について、3月19・20日に水抜きを行った。

- 博物館の開館

水族展示を除き通常通り開館した。水槽の安全点検後、破損の恐れのある水槽を落水した状態で、5月9日から部分再開した。

（4）水槽の破損状況

ビワコオオナマズ水槽の破損は令和5年2月10日の午前8時ごろに発生した。博物館の防災監視センターが当該水槽のろ過水槽部分の水位低下を検知し、職員が確認に行ったところで破損を確認した。また、当該エリアを含め博物館には録画機能を備えた防犯カメラがないため破損の瞬間は目撃されていない。

水槽のアクリルは一部、天井まで割れており、大量の水が流出したために水槽の周囲は最大約70cmの深さで浸水していた（図4、5）。水槽破損時の水流で水槽内部の擬岩も破損したようである。周囲の通路壁には水流、アクリルの破片、擬岩の破片等によると思われる損傷が発生していた（図5）。擬岩の破片は水流によって散乱していたが、他の水槽やその周辺の通路の壁などを壊すことはなかった（図6）。浸水は広範囲にわたり（図7）、バックヤードも一部浸水した（図8）が、バックヤードの機械類への被害は出なかった。

図9は排水完了後の水槽の状況である。観覧者側からみて正面よりやや左寄りに幅約2mでアクリルパネルが破損、消失しており、内部の擬岩も上半分が完全に崩壊していた。アクリルは大小20個の破片（細かいものは除く）に割れていた（図10）。



図4 ビワコオオナマズ水槽の状況(破損直後)



図5 破損した周辺の壁



図6 他の水槽前まで散乱した擬岩の破片

2月10日ビワコオオナマズ水槽
破損による水族展示浸水箇所

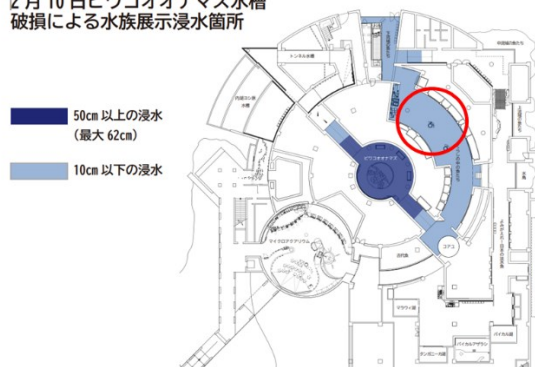


図7 水槽破損に伴う浸水範囲とその一例





図8 バックヤードの浸水



図9 ビワコオオナマズ水槽の状況(排水後)



図10 水槽アクリルの破片の例

2-2. ふれあい水槽

(1) 事故発生状況

事故発生日時 2023年3月2日(木) 17:00頃

事故発生前後の経過

前日 水族飼育員が毎日行う水槽の目視点検では亀裂などの異常はなかった

17:00頃 水族飼育員が水槽等の点検中に水槽の左端部において亀裂を発見
水漏れはなし

17:20 危険防止のため、水槽の水抜きを開始

17:40 水抜き完了。飼育員が中に入り、亀裂の状態を確認

(2) 破損事故に伴う被害

- ひび割れが確認された時点では漏水はなく、浸水被害は発生しなかった
- 水族展示を閉鎖していたため人的被害は生じなかった。また、新型コロナウイルス感染症対策のために当該水槽は閉鎖されていたことから、水槽内には魚はいなかった。

(3) 破損事故後の対応

- 危険防止のために水を抜いた。
- 関係各所への連絡。
- もともと水族展示室を閉鎖していたため、開館への影響はなかった。

(4) 水槽の破損状況

展示室側から見て左側の角部のアクリル接合面付近より亀裂が上下に伸びていた（図 11 実線部および図 12A, B）。水槽右側（図 11 点線部）には当初亀裂等はなかったが、排水作業に伴って発生した（図 12C）。

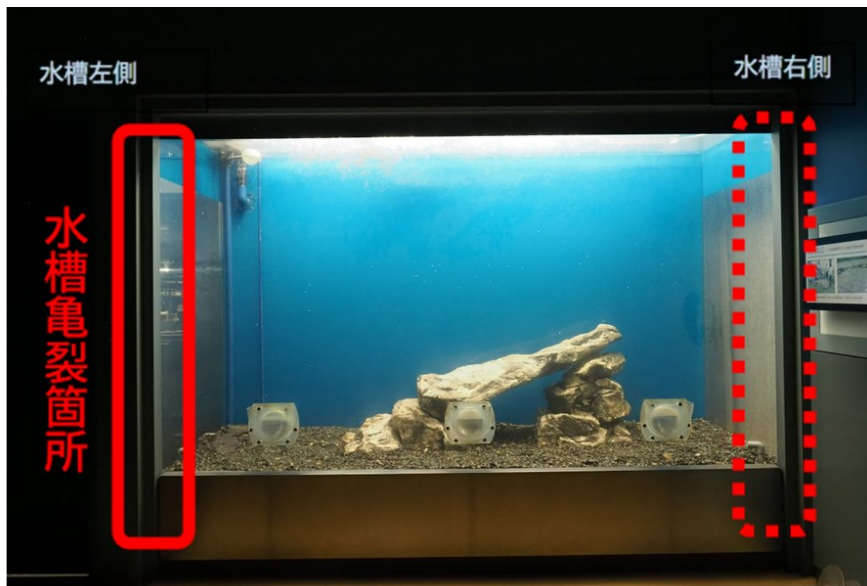
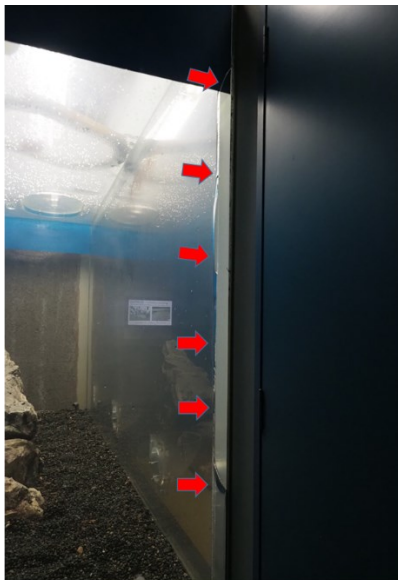


図11 ふれあい水槽の破損箇所



A 横から見た水槽左側の亀裂(矢印の範囲)



B 内部から見た水槽左側の亀裂(実線枠の部分)



C 内部から見た水槽右側の亀裂(点線枠の部分)

図12 ふれあい水槽の亀裂

3. 水槽破損事故の原因推定

3-1. ビワコオオナマズ水槽

3-1-1. 破損原因推定のための調査と検討の経過

- 2月10日 破損事故発生
- 2月10日 アクリル納入・水槽設置業者である三菱ケミカルインフラテック(株)(以下、三菱ケと略)による破損状況調査
- 2月11日 三菱ケ(2月10日とは別の社員)とその協力会社による破損状況調査
- 2月13日 県建築課立会いによる水槽周辺の建物床面の調査
- 2月15日 三菱ケによる破損についての報告書(速報)提出
- 3月7日 三菱ケによる破損に関する調査報告書提出
- 3月11日 滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故にかかる第三者委員会(以下、第三者委員会と略)開催。同委員会による現場検証と原因推定のための討議を行った。(図13)。今後、事故原因推定のために内部擬岩の撤去や水槽周辺床のはつり工事を行い、水槽の設置状況について調査することを確認
- 3月14日 三菱ケ以外の業者(一財)化学物質評価研究機構(以下、CERIと略)による事故現場の調査を実施(機器分析・化学分析などの専門的解析を行う前の現場での観察調査)
- 3月29日 第2回第三者委員会開催(オンライン)。琵琶湖博物館による事故原因推定のための工事や調査の進捗報告、水槽の安全管理体制についての意見聴取
- 3月31日 CERIによる「試験報告書」(セカンドオピニオン)提出
- 5月15日 水槽背面の外側にある擬岩の撤去工事
- 5月23-25日 アクリル・水槽内部擬岩の撤去工事
- 5月29日 水槽周辺床の撤去工事(県建築課立会)
- 6月7日 第3回第三者委員会開催。アクリル・擬岩・床面を撤去した状態で水槽内部側の詳細な状況の確認、水槽設置基部の構造の確認等を行い、想定される原因についての討議を行った(図14)



図13 第1回第三者委員会の現場検証



図14 第3回第三者委員会の現場検証

3-1-2. 破損原因推定のための現地状況の確認

(1) 水槽の状況

三菱ケと CERI の報告書及び第三者委員会による現場検証の結果をもとに破断した水槽の状況を記述する。各業者の報告書に基づいて記述する場合にはカッコ内に引用元を示した。

アクリル破断面の特徴と破断の進行順序

図 15 は破損直後の水槽の状態である。縦方向に水槽の全長（高さ約 4m）、横方法に幅 2m 程度の開口部が生じている。破断面の名称は三菱ケの報告書に準拠した（図 15）。

大きな断面の拡大図を図 16 に示す。破断面 A と C は比較的平滑で光沢があり、破断面 B と D は破断面がうろこ状になっている（三菱ケ、CERI）。前者は比較的早い速度で割れが

進行し、後者は遅い速度で割れが進行した時に生じる断面である（三菱ケ）。破断面どうし
の関係を見ると、DはCで止まっていることから、割れの進行はC→Dの順番で起こり、
その後Dが延伸してBおよびAに至ったと考えられる（三菱ケ、CERI）（図17）。

破断面の起点

最初に破断したと推定される破断面Cの起点となった箇所を検討するため、接着面なら
びに2004年に行ったクラック（ひび）修繕（アクリルを削った）箇所と破断面の位置関係
を比較した（図18）。いずれも破断面Cからは離れた位置にあることが確認され、少なく
とも接着面ならびに修繕箇所が最初の破断の起点になった可能性はないと考えられた。

破断面Cより背面の擬岩側には小規模な縦クラックが複数見出された（図19）。クラ
ックの形状から見て、これらは薬品によるもの（ケミカルクラック）であると推定される。
C上には2種類の異なる断面が存在しており（CERI）、その内の1種類は、上述のケミカル
クラックと推定された（図20A）。つまり内側から見て左端のものは破断面C上に存在して
いたと考えられる（図20B）。そのため、破断面C上のケミカルクラックが急激に拡大し、
大きな破断の起点となった可能性がある。このことについては、焦点深度が深い走査型電
子顕微鏡を用いた詳細な観察が必要であるが（CERI）、アクリルの切り出し方法などにおい
て障害が伴うことから、電子顕微鏡観察は見送ることとする。

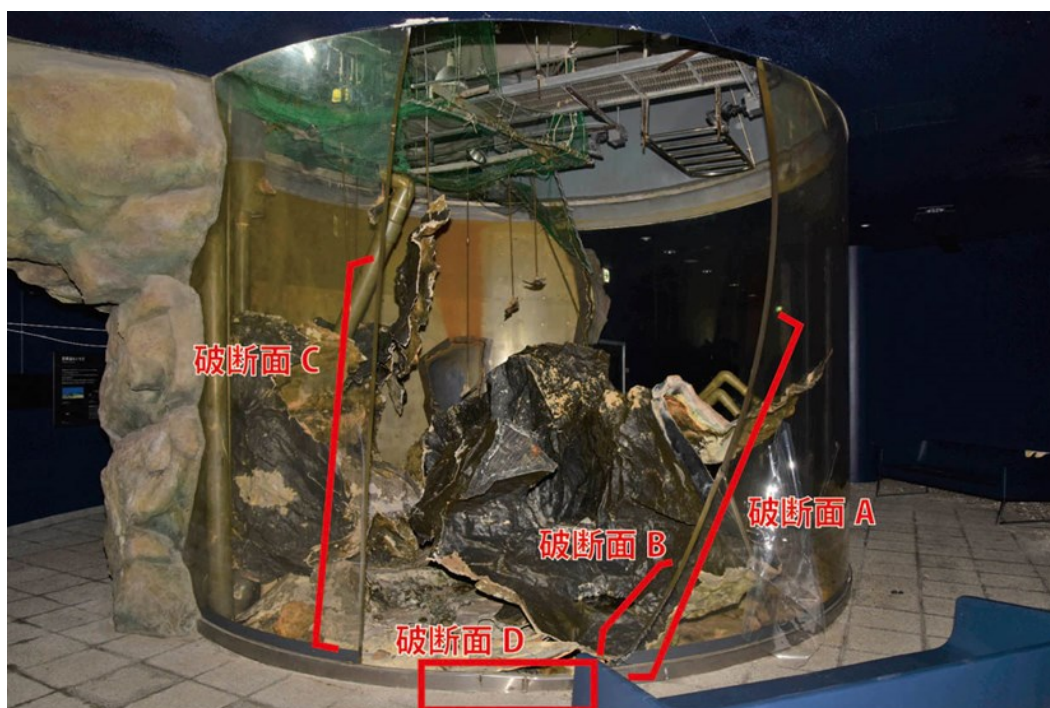


図15 ビワコオオナマズ水槽破損状況(全体)

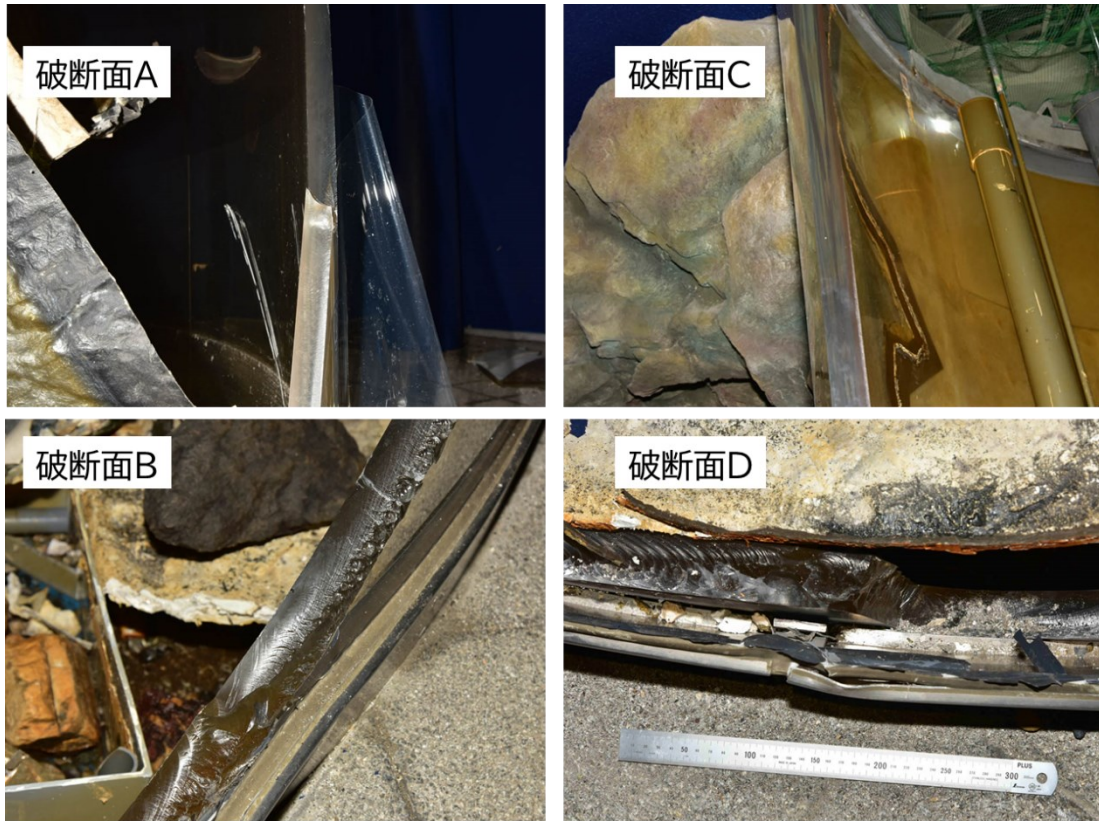


図16 各破断面

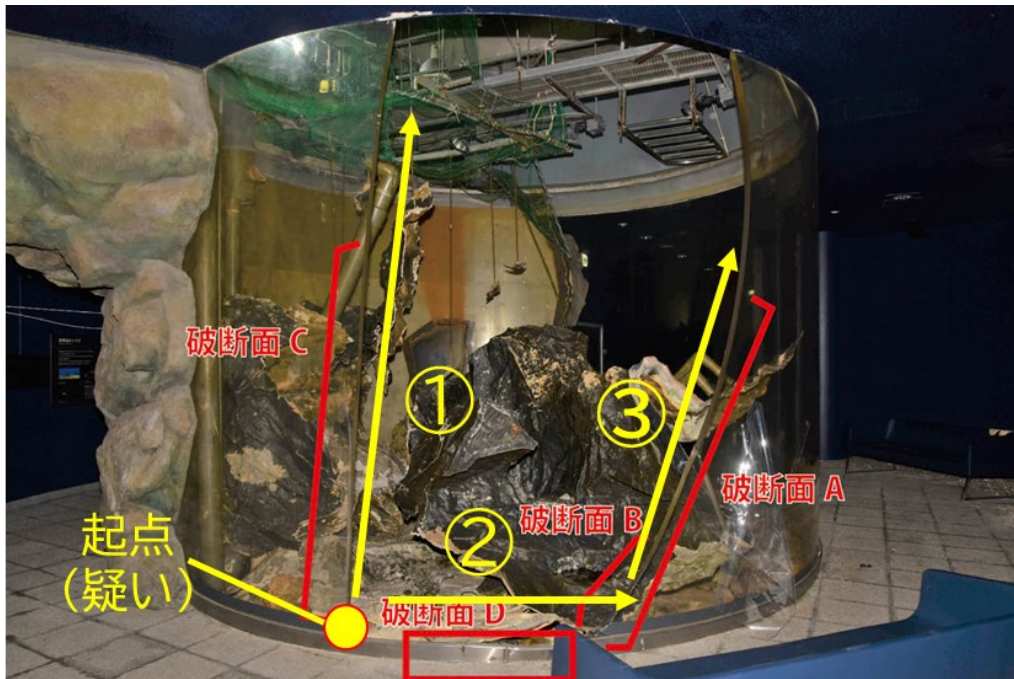


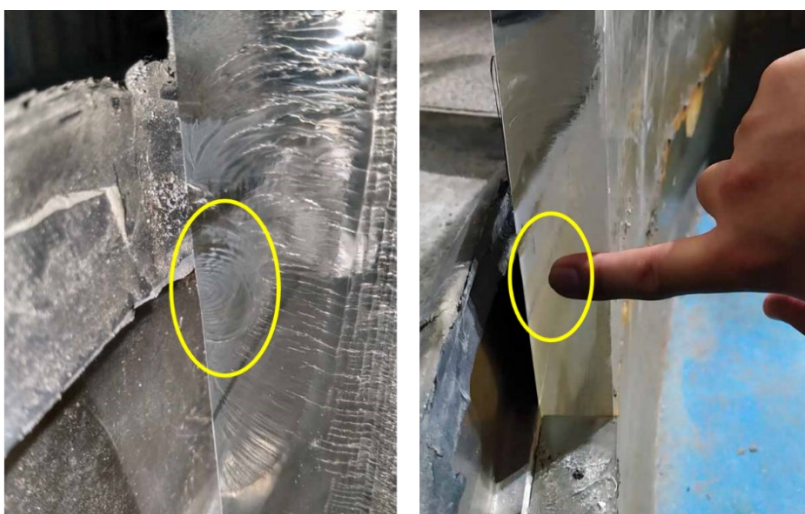
図17 ビワコオオナマズ水槽の破損の進行(推定)



図18 A: 修繕箇所と破断面の位置関係(左)。赤丸が修繕位置。黄丸が破断面Cの下端でステンレス中木がアクリルに食い込んでいた位置。B: 2004年の削り取り跡



図19 ケミカルクラック



A クラック周辺の破断面の形状
図20 破断面Cとクラック

B 破断面Cにあったクラックの痕跡

水槽のアクリルの拘束

アクリル水槽は中の水の圧力と吸水により外側に膨張する。このため水槽を設計する際には膨張分を考慮して、アクリルの外側に硬質の部材と接触しないようなクリアランス（隙間）を設ける必要がある。

<水槽下部の構造とアクリルへの拘束>

当初設計は、アクリル板の外側と H 字型のステンレス巾木の間には 10mm のクリアランスが設定され、ステンレス巾木の上端とアクリルの間には軟質のシリコンによるシーリングが設置されたものとなっていた。また、ステンレス巾木の下には硬質のグラウト材が充填されていたが、グラウト材とアクリルの間には軟質のバックアップ材が設置され、それら以外の部分（ステンレス巾木の上端以外とアクリルの間）は空隙となっているはずだった（図 21A）。

しかし、2004 年にビワコオオナマズ水槽下部のアクリルクラックを修繕した際の工事完了報告書では、ステンレス巾木が L 字型となっていたこと、巾木の高さが当初設計よりも小さいこと、巾木が嵩モルタルの上であり、その嵩モルタルがアクリルに直接接触していたことが報告されている（図 21B）。嵩モルタルへのアクリルへの直接の接触を懸念したためか、2004 年の修繕後の復旧で、嵩モルタルとアクリルの間には厚さ 20mm の緩衝材（発泡スチロール板）が設置された。

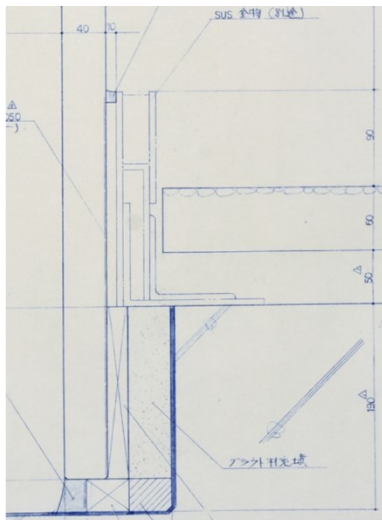
事故直後の目視観察では、破損巾木上部のシーリングは数 mm まで圧縮され、クリアランスは非常に狭くなっていた。そのため、ステンレス巾木そのもの及び L 字型支持金具とアクリルが非常に近接している箇所もあった（図 22）。また、ステンレス巾木の下部がアクリルに食い込んでいる部分もあった（図 23）。なお、破断直後は、破断面 C 上に、この食い込みが見られたことから、ここが起点ではないかと考えられたが（三菱ケの速報）、ここが起点となった場合には食い込み方向（横方向）に亀裂が入る可能性が高いため、起点は C 上の違う点である可能性が高いと考え直された（CERI）。

床のタイルを除去した後の 6 月 7 日の現場検証では、嵩モルタルのアクリルへの直接の接触は上述の通り発泡スチロールによって防がれていた（図 24）。しかしながら、本来は少し動くような設計だったと思われる巾木を支えるステンレス製金具が、実際には錆びやモルタルの付着により動かなくなっていた。また、その金具とアクリルとの間にモルタルが入り込んでいたり（図 25）、最下部にあるバックアップ材の上にはみ出たと思われるグラウト材が付着していたりするなど、硬質な物体とアクリルの直接的な接触が一部で見られた。以上のことから、これらの水槽下部の各種状況は、アクリルへの拘束となっていた可能性があると考えられる。また、巾木の L 字金具は約 2m 間隔であるため、上述の拘束が起きていた場合には、とびとびに複数個所で点拘束となっていたことになる。

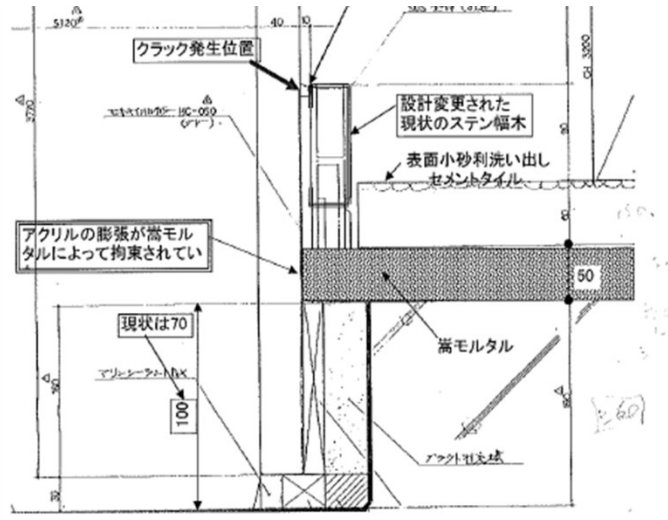
<水槽背面の意匠とアクリルへの拘束>

アクリル撤去と共に行った水槽背面の外側の擬岩の剥ぎ取りによって可能となった観察の結果から、水槽背面外側のアクリル表面には金網が巻かれ、厚さ 10mm のモルタルが塗布されていたことが明らかになった（図 26）。モルタルには各所にひび割れがみられた（図

26A・B)。モルタルの外側には鉄骨が取り付けられ、場所によっては水が抜けた現在の状態であっても、鉄骨とモルタルとの間に隙間はほとんど見られなかった(図26C)。厚さ20mmのガラス繊維強化セメント(GRC)製の擬岩は鉄骨に取り付けられていた。端部にみられるシリコンはアクリルと擬岩の境界を隠すためのもので、アクリルと擬岩もしくはモルタルの間の緩衝材ではなかった(図26D)。モルタルで覆われていた部分は、全周のおよそ半分に及んだ。



A ビワコオオナマズ水槽設計図



B クラック修理工事完了報告書

図21 水槽下部の拘束状況を示す工事図面



起点から離れた場所のクリアランス



破断起点付近のクリアランス



同左ステンレス製巾木下部に着目

図22 クリアランスの状況



図23 アクリルへのステンレス製
巾木の食い込み



図24 嵩モルタルと緩衝材の設置
状態



図25 L字金具の接触
状態

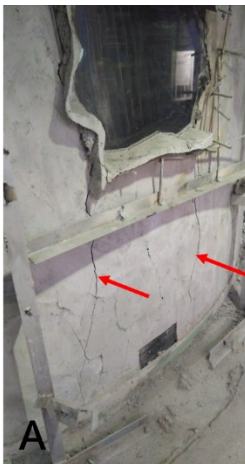


図26 水槽背面の状況 A・B:アクリルに塗布されたモルタル。あちこちにひび割れが生じている。C:擬岩を設置する鉄骨。鉄骨の一部はモルタルに接している。D:擬岩とアクリルの端を隠すために施されたシリコン。擬岩とアクリルの間の緩衝材にはなっていない。

(2) 建物の歪み（水槽周辺の建物床面調査）

2月13日に建築業者によって行われた床面調査では、基準点に対して最大-15mmの差が見られた（図27）。これは一般的な施工誤差のレベルであり、先の嵩モルタルやタイルなどのズレを示していると考えられ、建物の変形を示すものではないと想定される。また、水槽周辺の床面に亀裂・ひび割れは見られなかった。

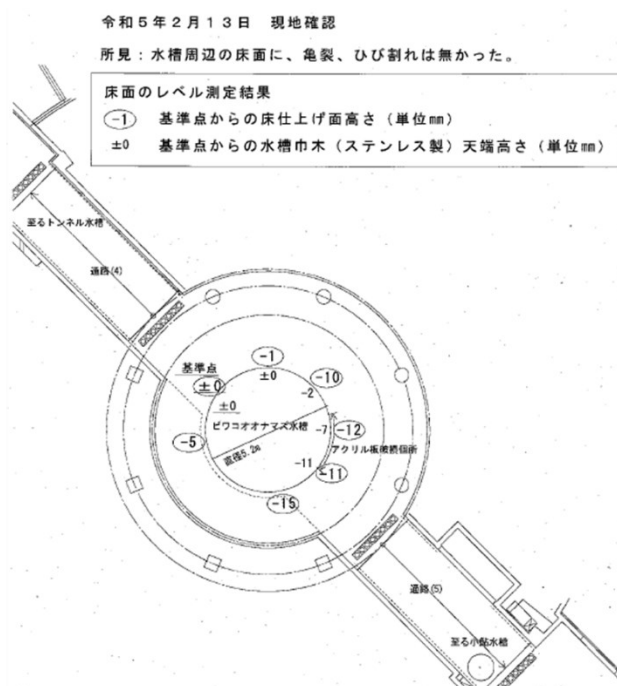


図27 床面高さ測定結果

3-1-3. 水槽の破損原因推定

現場検証の結果と第三者委員会における討議の結果から、破損原因として検討すべき項目を次のように整理した。

- ① アクリル板の厚さの不足
- ② アクリル板の経年劣化
- ③ 急激な温度変化
- ④ アクリル板の拘束
- ⑤ 薬品によって発生したクラック
- ⑥ 過去の修理（アクリル切除）

これ以外に当初想定されていたものとしてはアクリル面の外傷や建物の歪みがあったが、外傷については日常の目視観察で確認されていないこと、建物の歪みは現場の調査で否定的な結果が得られたことから検討対象外とした。

水槽設置後27年が経過しており、その間の外部環境（例えば気温）変化など不明な点も多い。また、破損原因として① - ⑥の要素は複合的に働いている可能性がある。そうしたことを勘案しつつ、無理に一つの原因にまとめるのではなく、考えられる様々な可能性を多角的に検討していくことにする。

① アクリル板の厚さ

ビワコオオナマズ水槽に使用されたアクリル板の厚さは40mmである。この厚さの妥当性についてはアクリルパネルの納品、設置を行った三菱ケによる強度計算の考え方の資料に基づき検討した。

● 三菱ケミカルインフラテックの水槽用アクリル板厚みの設計基準

応力基準（長期）

アクリル母材部分の許容応力	6.9 MPa 以下
突き合わせ重合接着部分の許容応力（接着線に直角な方向）	4.9 MPa 以下
吸水応力	2.9MPa
円筒形パネルの許容周応力	2.0MPa 以下

＝重合接着部分の許与応力 - 吸水応力（4.9 MPa - 2.9MPa）

材質であるアクリルの引張強度は 76MPa、パネル接着部の強度は 56MPa であるから安全率はそれぞれ約 11 倍に設定されている。このうち、弱い方の強度である接着部の応力から吸水によって生じる応力分を差し引いた 2.0MPa が設計上の許容応力の基準となっている

- 板厚 40mm でシミュレーションを行うと最大応力は 2.0Mpa となり、上記基準を満たした（図 28）。すなわち、板厚 40mm は安全率 11 倍での設計基準を満たしていたと考えられる。

以上のような説明から、第三者委員会としては、拘束などの外部要因が関与しない真円の円筒水槽単体として存在する場合には、設計値である 40mm の厚さはアクリルの強度としては問題ないとする。しかしながら、破損状況など現場の検証結果からは板厚が薄かったのではないかという感も否めない。もし、より厚い板厚であれば、大きな破断に至る前の亀裂の段階で気づくことができた可能性もあったかもしれない。

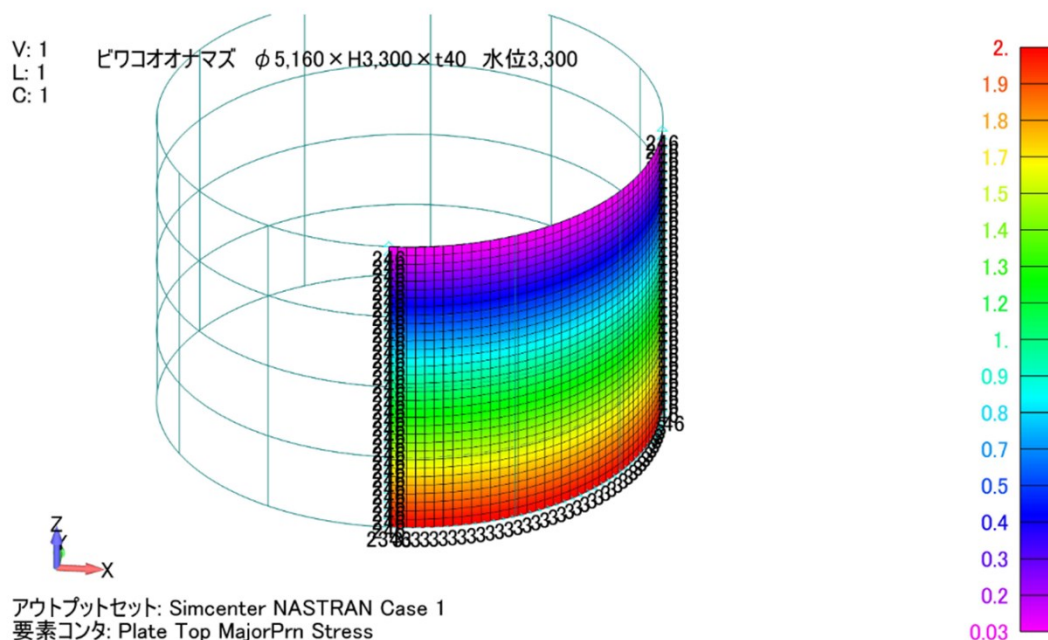


図28 ビワコオナマズ水槽の応力分布シミュレーション図（三菱ケ作成）

②アクリルの経年劣化

三菱ケが提示した資料によれば、商品のアクリル（商品名：アクリライト）の耐候暴露による 20 年後の引張強度は 93%維持となっている。また、設計基準はこの変化を考慮した

応力基準を採用しており、理論上は劣化による問題は生じないと考えられる。ただし、長期間にわたって高水圧がかかり続けてきたことや温度変化に伴う膨張・収縮の繰り返し、など複合的な要因が作用した場合の劣化については予想ができない。設置から26年が経過している事を考えると、程度は不明だが何らかの劣化は進んでいたものと予想される。

また、アクリルは、年数が経てばその幅はわずかではあるが、吸水し続けるため、わずかではあるが膨張を続けていると考えられる。そのため、シーリング材のプライマーによるケミカルクラックには常に力がかかり、ごくわずかではあるがクラックは広がっていく恐れがある。これも経年劣化の一つと捉えられる。

CERIによる報告書には、経年劣化を考える際には、①破損したものの、②破損したものと同時期・同ロットで作成され、使用されずに保管されていたものの、③破損したものと同規格の新品を比較することが提案されていたが、②と③が存在しないことから経年劣化に関する調査は不可能であると判断せざるを得ない。

③ 急激な温度変化

事故が起こったのは厳寒期の2月であることから、空調停止後の急激な温度低下などが存在していたかを検討する必要がある。琵琶湖博物館の担当者の報告によると、ビワコオオナマズ水槽の水温のデータはないが、オオナマズ水槽と同じく温度調節を行っていない水槽（チョウザメ水槽）の水温は15.1℃ということだった。また、ビワコオオナマズは発見時、背中に小さい外傷があったものの、元気であったことから水槽の水の急激な温度変化はないと考えられた。館内の他の場所における事故発生日前後の気温は16.5 - 20.2℃の範囲にあり、急激な温度低下は記録されていない。これらの結果から、少なくとも水槽を破損させるような急激な温度変化はなかったと考えられた。当該水槽は温度調整を行っていない水槽であるため、外気温と大きな差はないが、年間を通じての緩やかな温度変化は経験している（夏期で水温28℃程度、室温25℃程度。冬季は上述の通り、水温15℃程度、室温18℃程度）。そのため、②で述べた長年の使用におけるアクリルの経年劣化においては、多少の影響を与えていた可能性はあるかもしれない。

④ アクリル板の拘束

第三者委員会、三菱ケ、CERIによる現場検証では、水槽基部でアクリルに対して部材が一部接触していたことが明らかになった。また、水槽背面の外部は、擬岩を装着するためにクリアランスなしでモルタルがアクリルに塗布されており、ここでもアクリルの拘束が生じていた。アクリル製の水槽は水圧と吸水により膨張するため、その変化を見越してクリアランスを設けておいたり、シリコンなどの軟質の緩衝剤で膨張を受け止めておいたりする必要がある。拘束を受けると水槽の変形がいびつになるため、水槽単体で行ったシミュレーションとは異なる応力分布が生じる。特にビワコオオナマズ水槽の場合は、背面のほぼ全てがモルタルで固定されており、前面（観覧者側）に応力が集中する可能性がある。このような場合、局所的に許容応力を超え、破断に至る可能性がある。

この可能性を分かりやすく説明するための参考資料として、三菱ケによる①アクリルへの拘束のない状態、②背面を拘束した状態、③背面と前面の脚部(金具位置のみ)を拘束した

状態という 3 つのパターンでの変形図を掲載する(図 29)。②および③では、拘束によって不均一な変形を生じるため、①と比較して局所的な応力の上昇が推測できる。このシミュレーション図は、実際のオオナマズ水槽の膨張を正確に再現していないため、破断を定量的に評価する精度を持たないが、当初設計で想定された無拘束の円筒形水槽と比較して、一部に拘束があった場合にはアクリルに対してかかる負荷が不均一となる性状を示している。以上より、アクリル板の膨張に対する拘束は、水槽破断を引き起こす重要な要因となる可能性がある。

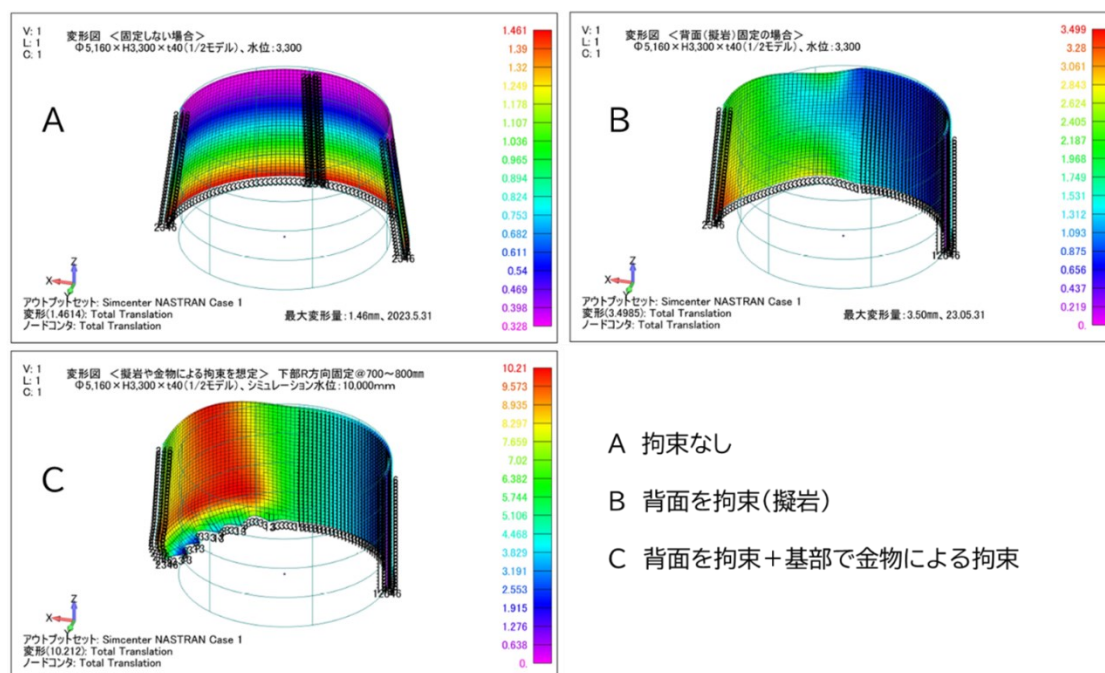


図29 拘束の有無による変形状態の変化のシミュレーション(三菱ケ作成)

⑤薬品によって発生したクラック

現場検証では、破断面 C より背面側に小規模なケミカルクラックが多数発生しており、その一部が破断面 C に含まれていた。前項のシミュレーションで明らかになった応力の不均一な分布を背景に、このクラックが広がり、起点となって破断が生じた可能性は十分に考えられる。

⑥過去の修理 (アクリル切除)

現場検証で明らかになったように、3か所ある修理箇所(アクリルの接合面)のひとつは水槽の割れた領域に含まれていた。しかし、破断の起点となったと推定される破断面 C とは離れており、今回の破損が生じた直接の原因には関わっていないものと推察される。ただし、2番目に破断した破断面 B には含まれていることから、この部分の破断に関わった可能性は完全には否定できない。

3-1-4. より根本的な破損原因の推定

前項では水槽破損の原因として、アクリルの拘束による異常変形が関与している可能性が示された。また、破断の起点としてケミカルクラックが関与した可能性もあった。これらは水槽を破損させた直接的な原因ということになるが、より根本的な問題点は、そのような条件をもつ水槽が造られた過程にあるのではないかと考えられる。水槽が造られたのは約30年前のことであり、かつ長期保存される工事記録にも残らないような細部の事象の積み重ねでもあるので、現時点において事実関係を完全に確認することは困難であるが、得られた検討結果から推定できる問題点を整理する。

<水槽の構造や設置に関する問題>

既に示したように、水槽の設置工事においては、基部の構造が設計段階と施工段階で異なっていた。そのため、本来クリアランスがとられている部分で嵩モルタルの接触があった(図21)。この変更に関する記録(設計変更書や竣工図面)が残されていないため、瑕疵によるものなのか、現場での作業判断によるものなのか、設計による承認を得て行われたことなのか不明瞭な点が残されているが、いずれにしてもクリアランスの確保がアクリル製の水槽の設置において重要な要素であることが、設計から施工までの一貫した共通理解となっていなかったことは明らかである。次に基部前面の点拘束をもたらしただけの中木を支える金具やL字型に変更されていたステンレス中木下部との接触であるが、これは予想以上に水槽が前面にせり出したことによって生じたものと推定される。この原因となったのがモルタルと鉄骨による水槽背面の拘束である。3-1-3.水槽の破損原因の推定で示されたように、水槽の厚さなどを決める設計は、こうした拘束が存在しない前提で行われている。このため、当初設計のクリアランスが守られていたとしても、水槽の変形によって最終的にはクリアランスが不足し、拘束が生じる可能性は極めて高くなる。ただ、当初設計のH字型中木だった場合、万一アクリルとの接触が生じていても面であったため、L字型中木の下部が接する状況に比べれば、拘束による圧力は多少低かったかもしれない。

また、クリアランス(シーリング材の厚さ)は、10mmで設計されていたが、他の水族館と比してのみならず、これは琵琶湖博物館内の他の水槽(最も薄いもので15mm)と比しても、薄いものとなっている。シーリング材が厚すぎると施工が難しくなることがあるが、10mmは経験則から考えても薄い印象が拭えない。

ここで問題となるのは、拘束部分を生み出してアクリルの歪な変形を助長してしまった背面に擬岩を配するという展示意匠が、水槽の設計より前にあったのか後にあったのかということになるが、この点については不明である。前者であれば、アクリル板を厚くしたり、シーリング材を厚くしたりするなど、背面の拘束がある状態を加味した水槽設計を行うように情報共有する必要があった。また後者であれば、モルタルや擬岩の間に分厚いシーリング材を入れるなど、膨張を考慮に入れた展示造作、すなわち拘束を起ささないような工事が必要だった。このあたりの時系列情報、事実関係は不明であるが、いずれにしても、水を入れたら膨張・変形するというアクリル水槽の特性に関する理解が共有されていなかった点で、前出の嵩モルタルの件と共通する。

以上のように、ピワコオオナマズ水槽は設計から設置、展示の施工の各段階で水槽の安

全性を損なう可能性を生じるような齟齬が積み重なっており、それが今回の破損につながっていったと考えられる。

<ケミカルクラックの問題>

現場検証により、破断面 C と擬岩の間の領域には細かいケミカルクラックが発見され(図 19)、その一部は破断と関係している可能性が示された(図 20)。ビワコオオナマズ水槽および同じ形状のコアユ水槽(当時はビワマス水槽)はシーリング材またはシーリング材をアクリルに密着させるためのプライマーに含まれる溶剤が原因とみられるケミカルクラックが生じ、2004 年にその修繕(削り取り)工事が行われた。工事報告書によればその際に、建設時に使用されたシーリング材とプライマーをアクリルに塗布する実験が行われ、プライマーによる影響があったことが確認されている。このため、修復工事ではプライマーの代わりにテープを使う工法をとった。このような経過から、破損時に見つかったクラックは、建築当時のプライマーの影響で生じたものと考えられる。おそらく 2004 年の段階では見つからないほど小さかったが、その後のアクリルの変形や劣化に伴って成長したのだろう。シーリング材やプライマーに含まれる溶剤はアクリルに影響を与える可能性があるため、水槽の設置の際には、修繕工事を行った時のように慎重に用品を選ぶ必要がある。しかし、建設時にはそうした配慮がなく一般的な建築用の用品が使われたものと思われる。なお、施工から 20 年以上経っていて、成分が揮発している可能性が高いことや、プライマーの層は薄く、ごく微量であることから、プライマーやシーリング材に含まれている成分の特定は困難を極め、事実上不可能であると分析業者から提示された。

<関係者間の共通理解と意思疎通>

水槽の構造や設置に関する問題とケミカルクラックの問題が示唆するのは、アクリル水槽の特性に関する関係者間の共通理解と意思疎通の不足である。水族展示室の大型水槽という特殊な建築工事においては、博物館と関係する複数の異業種の業者(展示設計業者、建設業者、アクリル納品・設置業者、展示室側の建築業者、水槽の防水工事業者など)の間で問題意識を共有し、十分な協議の機会を経て設計および施工を進めていかなければならない。琵琶湖博物館の場合、工程の各部分では協議が行われていたようだが、全工程を通じた情報共有ができる体制がなかったのではないかとと思われる。それが水槽破損の根源的な原因といえるのではないだろうか。

3-2. ふれあい水槽

3-2-1. 破損原因推定のための調査と検討の経過

- 3月2日、飼育員により亀裂の発生を発見。学芸員の判断により危険防止のため落水。
- 3月7日に当該システムの販売、設置を行った荏原製作所（滋賀営業所）が来館。滋賀営業所から当時の設置部署（現在の水ing社）に連絡
- 3月8日に水ing来館。アクリル水槽はどこかから購入した可能性が高いため、アクリル業者に見解を聞くのが良いとの助言が博物館側にされた
- 第1回第三者委員会で、アクリル業者（三菱ケ）も含めて現場を確認した（3月11日）（図30）
- 3月14日にCERIによる現地調査が行われ、結果が3月31日に報告書として提出された（機器分析、化学分析などの専門的解析を行う前の現場での観察調査）
- 5月23日に別のアクリル業者（日本サカス）による現場確認がされた
- 第3回第三者委員会でCERIの報告書を参考に再び現地調査を行い、破損の原因について議論が行われた



図30 第三者委員会による現場検証(3月11日)

3-2-2. 破損の状況

図11、12に示したように、観覧者側から見て左側面と正面の接着面に割れが生じていた。水槽右側の割れは落水の際に生じたものであるため、破損原因の推定では水槽左側にのめ着目して状況を整理する。水槽左側の亀裂は前面アクリルパネルと側面アクリルパネルの接合部にほぼ沿う形で上下方向に走っている（図31）。上端と下端で亀裂は前面パネル側に湾曲し、接着面を横断する形状となっている。三菱ケ、日本サカスは、破断面のほとんどが接着面に沿っているとの見解を示している。第三者委員会の現場検証では委員からも破

断面が接着面に沿っている、と同様の見解が示された。

また、CERI の報告書では、破断面の上から約 1/3 の付近に破断面の進行方向の切り替わりが見られることから、この付近が破綻の基点になった可能性があるとされていた。三菱ケによる見解では、この水槽は陰圧水槽であるため、圧力のかかり方が通常とは異なっており、手を入れられるところを基準に、そこより下は陽圧（通常の圧力のかかり方。下に行くほど高い圧力）、そこより上は陰圧（通常とは逆に、上に行くほど圧力が高くなる）になっており、水面から 1/3 の箇所に最大の応力が作用するとされていた。起点の位置については、CERI および三菱ケの見解はほぼ一致している。

このほか、CERI の報告書ではアクリル断面に 1mm 未満の点が多くみられることから、異物またはボイド（微小な空洞）の存在にも言及している、これらが破断に直接的に影響した可能性は低いと考えられる。



図31 ふれあい水槽の亀裂の位置(左)と破断面の切り替わり(右・矢印部分)

3-2-3. 水槽の破損原因推定

ふれあい水槽は内部を減圧にすることによって下の開口部から水が漏れず、そこから手を入れられるという特殊な構造になっている。このため、圧力のかかり方が特殊であり、清掃時の落水による圧力変化などがアクリル板やその接着面に与える負担は通常の水槽より大きいと想定される。類似の構造を持つ水槽で亀裂が発生した事例は、これまでにいくつか存在しており、強度の予測が難しい水槽である。以下、検討の結果を記す。

①アクリル板の厚さ

ふれあい水槽のアクリル板の厚さは 30mm であるが、前述のように圧力変化が生じたり、通常の水槽と異なり、常に陰圧の力がかかっていたりするため、現在の安全設計の基準や

状況を考えると、このような特殊な水槽としては、強度に不安を覚えるところがある。

なお、他館では陰圧ポンプやその配管が破損することで生じた急激な圧力変化が破損の原因となっている例があるが、そのような場合には、開口部からの漏水を伴う。今回、開口部および亀裂からの漏水がなかったことから、陰圧ポンプは正常に稼働しており、今回の破断原因は圧力変化によるものではないと考えられる。

②接着の問題

現場検証の結果から第三者委員会では接着面に沿った破損（剥離）が起こっていると判断した。また日本サカスによると、通常はアクリル水槽が破損するときには、接着面よりもアクリル本体に亀裂が走ることが多い。しかし今回の破損はアクリル面ではなく、接着面で生じていたことから、第三者委員会としては接着面に何らかの問題があると考えた。

今回の破損は、設置から 26 年経過していることによる経年劣化が相まって生じた接着不良によるものである可能性が高い。この水槽の接着方法は重合接着であり、一般的には最も強度がある方法だが、使用するモノマーが市販のものである場合、強度が不足することがある。今回の接着不良の原因を解明するには使用した接着剤の種類や工程を確認する必要があるが、ふれあい水槽のシステムを作成・販売した業者がすでに廃業しているので、接着剤の種類や工程はおろか、水槽の製作元を確認することはほぼ不可能である。また、なお、当該水槽における保証期間は不明だが、当館の他のアクリル水槽の保証期間は設置から 10 年となっていることを考えると、耐用年数は既に経過していると思われる。

第2部 水槽の点検と安全の確立

ビワコオオナマズ水槽の破損事故は来館者や職員が現場に居合わせなかったために、人的被害を出さずに済んだが、一つ間違えば人命に関わる惨事につながる恐れがあった。このように大量の水を貯蔵する水族展示は大きなリスクを抱えており、破損事故が生じないよう、管理に万全を期す必要がある。

そこで、この事故を機に、琵琶湖博物館から、水族展示室再開のための全水槽の点検および管理体制の見直しによる再構築を行うための助言を、当委員会に求められた。当委員会では、それらに対しての評価および修正の指示を行った。その結果、アクリル破損の可能性のある水槽については使用が停止され、それらのアクリルパネルの更新計画が立てられた。また従来の管理体制の問題点を踏まえて、今後の新たな管理体制が作られた。以上のことから、総じて、安全管理体制の構築がなされたと考えられる。

1. 従来の点検体制

アクリル製の水槽は経年劣化等によりひび割れが発生することがしばしばある。また、観覧者側のアクリル面は日常的な接触によって常に傷が生じる。このため、琵琶湖博物館でも従来から飼育員による水槽の目視確認と補修が日常的に行われてきた。

(1) 事故前の点検の実施状況

以下は、琵琶湖博物館から提出された事故発生前の日常点検、異常への対応状況である。

<日常点検>

- 水族展示室内（観覧側）におけるアクリル面は、開館前および閉館時、また開館時間中にも水族飼育員および水族担当学芸員が適時展示室の巡回を行い、複数人の目視による点検を行ってきた。
- 点検の内容は、アクリル面の傷やひび割れの有無、接合面からの水漏れの有無などである。
- 閉館後（17時～17時30分）には毎日水族飼育員がアクリル面の指紋のふき取り作業などを行ってきた。休日などで来館者が多く汚れが酷い場合は、状況に応じて翌日（8時30～9時30分）にも作業を行ってきた。また休日など来館者が多いときには、細かな傷が発生するケースが多く、その日のうちに修復している（週一回程度）。修復できない傷は学芸員へ報告して、対応を検討していた。
- 潜水作業を伴う詳細な調査などは実施していなかった。
- 閉館時の点検については、ポンプ等の設備点検チェックシートがあるが、水槽アクリル面のチェックシートはなく、クラックなどを発見した場合のみ学芸員に報告されていた。
- アクリル面に異常があった場合は、学芸員と相談の上、対応を行ってきた。

<日常点検における異常への対応について>

- 日常点検で発見されるアクリル面の異常は、主としてひっかき傷である。大きな傷な

ど目立つものは、傷のついたその日のうちに発見される。傷の浅いものは水族飼育員が研磨剤（ピカール）でアクリル面を磨き、修復をしている。傷が深いものに関しては完全に修復できず、目立たないよう傷を丸める程度に研磨し、深く削らないよう対応してきた。

- 水槽内部についた大きな傷や多数の傷については、水族館のアクリル水槽を研磨する専門業者に研磨を依頼することがあった。なお、破損したオオナマズ水槽については、2004年のクラック補修工事以外で研磨を依頼したことはない。

（2）従来の体制の課題

従来から実施してきた点検と修復は小規模な傷を想定しており、大きな修理を要する傷への対応などはその都度判断していた。また、クラックの発生した水槽については交換するといった管理基準が設定されていないなど、更新も見据えた長期的なリスク管理という視点においては不十分な点があったことは否めない。

2. 新たな安全管理体制の構築

（1）全水槽の点検と安全性基準作成の経過

- 破損したビワコオオナマズ水槽と同形状のコアユ水槽について、琵琶湖博物館は3月10日に落水した。3月11日の委員会では同水槽を引き続き使用しない方が良いと提言した
- 破損したビワコオオナマズ水槽とふれあい水槽以外の水槽のクラックの状況やアクリルの状態を第1回第三者委員会で現場確認した（図32）。
- 常設された48基の水槽のうち、破損した2基以外のすべての水槽について、3月11日にアクリル業者（三菱ケ）2名によるクラック等の目視点検が実施された。
- これらの点検・現場確認の中で、トンネル水槽ドーム窓に存在するクラックによるトンネル水槽の大破の危険性を指摘した。そのため、琵琶湖博物館は3月19日にトンネル水槽の落水作業を行った。
- 琵琶湖博物館は、三菱ケによる点検結果を基にして、水槽の大きさとクラックの規模から算出された各水槽の安全度評価の表を作成した。この表が3月29日の第2回第三者委員会にて提示され、算出基準等について討議を行った。
- 前述の討議の結果を反映して、琵琶湖博物館が全水槽についての安全度リストの修正版を作成し、4月4日に全委員に提出した。
- リストにて安全性が低い（破損の可能性が高い）ランクCとDに該当する水槽について、琵琶湖博物館は水族展示の再開前に水槽の水を抜いて使用を停止した。



図32 第三者委員会による破損した水槽以外の水槽の確認

(2) 水槽の安全度判定

琵琶湖博物館から提出された水槽の点検結果とそれに基づく安全度の判定結果を示す(表1、ただし報告書用に一部の項目を省略)。表1に示された各水槽の※1～※4の評価項目のランクは次のように決定される。

※1 専門業者による点検結果

a : 安全 (◎) b : 普通 (○) c : 危険 (△) d : 最も危険 (×)

クラックの有無・深さに基づく指標。複数のアクリルがあったり、評価に幅がある場合には最悪の評価・アクリルの結果を記載。

※2 水量のランク

1 : 10 トン未満 2 : 10～49 トン 3 : 50～99 トン 4 : 100 トン以上

※3 水深のランク

1 : 1m 以下 2 : 2m 以下 3 : 3m 以下 4 : 3m 超

※4 被害リスクの評価 (規模: 水量ランク×水深ランク)

a : 低 (1～4) b : 中 (5～8) c : 高 (9～12) d : 危険 (13～)

数値が小さいほど安全、大きいほど危険 (最大 16)。

安全度 (※5) の求め方

アクリルの状態、水槽の規模により判断。値の悪い方を採用する。

安全度 A : 現時点でクラックの発生はない。クラックが発生した場合には、B に上がる可能性がある。

安全度 B : 小さなクラックがある場合には、それらが増加、成長すると将来的に C になる可能性がある。

安全度 C : クラックがある場合、破損の危険性が高いため、水槽の使用停止を検討し、アクリルパネルを更新する。

安全度 D : 破損、もしくは破損の危険性が著しく高く、水槽規模が大きいため、水槽の使用を停止し、アクリルパネルを更新する。

ただし、トンネル水槽については、規模から常に緊急性が D となるため、日常点検をしっかりと行う。状態 c もしくは d をもつパネルが見つかった場合には、使用を中止する。

表1 琵琶湖博物館水族展示安全度リスト(部分・2023年4月4日現在)

	コーナータイトル	水槽名称	水槽容量 (t)	クラックの有無	状態 ※1	水量 ※2	水深 ※3	規模 ※4	安全度 ※5
1. 琵琶湖の生き物とその環境									
1	琵琶湖の生き物とその環境	内湖・ヨシ原にすむ魚たち	110		a	4	2	b	B
2-1		岩場から沖合にすむ魚たち トンネル水槽	460		b	4	4	d	D
2-2				a					
2-3				a					
2-4				a					
2-5				○					
					不明				
3		琵琶湖の主 ビワコオオナマズ	78.4	○ (残存部にクラック有)	破損	3	4	c	D
4		湖底の生き物たち	3		a	1	1	a	A
5		琵琶湖のコアユ	31.3	○	d	3	4	c	D
2. 琵琶湖の生き物と人の暮らし									
6	暮らしのなかの魚たち	ジオラマ水槽(温水系)	2		a	1	1	a	A
7		ジオラマ水槽(冷水系)	1		a	1	1	a	A
8		ウツセミカジカ	1.4		a	1	1	a	A
9		アブラビガイ	1.4	○	b	1	1	a	B
10		ビワヒガイ	1.4	○	b	1	1	a	B
11		スゴモロコ	1.4		a	1	1	a	A
12		イフトコナマズ	1.4	○	b	1	1	a	B
13		タナゴの仲間	7.6		a	1	1	a	A
14		ホンモロコ	3.1		a	1	1	a	A
15		ビワヨシノボリ	1.6	○	d	1	1	a	D
16		ニゴロブナ	7		a	1	1	a	A
17		ギギ	2.2		a	1	1	a	A
18		ワタカ	7		a	1	1	a	A
19		外来種	8.3	○	d	1	1	a	D
20		国内外来種1	5		a	1	1	a	A
21		国内外来種2	1.3		a	1	1	a	A
22	ナマズ	4.8		a	1	1	a	A	
3. 川の生き物とその環境									
23	下流域の魚と漁	下流部	6.1		a	1	1	a	A
24-1	中流域の生き物たち	中流	59.4		a	3	1	a	B
24-2				b					
25	上流域の生き物たち	溪流にすむ魚	47		a	2	2	a	A
26		川の上流にすむ生き物1	0.05		a	1	1	a	A
27		川の上流にすむ生き物2	0.05		a	1	1	a	A
28		川の上流にすむ生き物3	0.05		a	1	1	a	A
4. 水辺の鳥たち									
29	水辺の鳥たち	カイツブリ	30	○	b	2	2	a	B
5. よみがえれ!!日本の淡水魚									
30	よみがえれ!!日本の淡水魚	ミヤコタナゴ	0.75		a	1	1	a	A
31		ネコギギ・ハリヨ	0.75		a	1	1	a	A
32		ニッポンバラタナゴ	1.5	○	c	1	1	a	C
33		アユモドキ	1.5	○	d	1	1	a	D
34		ナガレモンイワナ	3.1		a	1	1	a	A
35		夏:アオバラヨシノボリ 冬:オヤニラミ	0.75	○	c	1	1	a	C
36		ウシモツゴ	2.25	○	c	1	1	a	C
37		ヒナモロコ	2.25	○	c	1	1	a	C
38		ゼニタナゴ	2.25	○	c	1	1	a	C
6. 古代湖の世界									
39	最古の湖 バイカル湖	バイカル湖の魚たち	27		a	2	2	a	A
40		バイカル湖の魚たち2	3		a	1	1	a	A
41		バイカル湖の魚たち3	3		a	1	1	a	A
42		バイカルアザラン	32.6		a	2	2	a	A
43	アフリカ大地溝帯の湖	タンガニーカ湖	29		a	2	2	a	A
44-1		マラウィ湖	23		a	2	2	a	A
44-2				a					
45	ヴィクトリア湖	4.5	○	c	1	2	a	C	
7. 古代魚と魚の進化									
46	古代魚と魚の進化	古代魚	91		a	3	2	b	B
8. ふれあい体験室(現在閉鎖中)									
47	タッチングプール	タッチングプール	2			1	1		
48	ふれあい水槽	ふれあい水槽	4.2	◎(亀裂あり)	破損		—		D

(3) 安全度の判定結果に基づく対応

表 1 に示した安全度判定の結果に基づいて琵琶湖博物館が決定した問題のある水槽に対する対応を表 2 に示した。破損したビワコオオナマズ水槽、ふれあい水槽に加え、安全度判定で C または D となった水槽の使用を停止した。なお、実際には現場確認などからコアユ水槽、トンネル水槽について 3 月時点で先んじて使用を停止した。安全度判定 A または B の水槽については使用を継続しながら観察を続け、B については中長期的な、C および D については早急なアクリルパネルの更新を進めることとしている。

表2 安全度判定結果に基づく対応(問題のない水槽を除く)

	コーナータイトル	水槽名称	安全度	今後の対応
16	暮らしのなかの魚たち	ニゴロブナ	A	化粧シールの膨れ(はみだし)がある。シールのやり直し必要か？
18	暮らしのなかの魚たち	ワタカ	A	化粧シールの膨れ(はみだし)がある。シールのやり直し必要か？
9	暮らしのなかの魚たち	アブラビガイ	B	小さなクラックがあるため、将来的にCに上がる可能性がある
10	暮らしのなかの魚たち	ビワヒガイ	B	小さなクラックがあるため、将来的にCに上がる可能性がある
12	暮らしのなかの魚たち	イワトコナマズ	B	小さなクラックがあるため、将来的にCに上がる可能性がある
24-1	中流域の生き物たち	中流	B	上部シールの一部が脱落している。アクリルパネルへの負担を考慮し、シールの修繕が必要か。
29	水辺の鳥たち	カイツブリ	B	小さなクラックがあるため、将来的にCに上がる可能性がある
32	よみがえれ!!日本の淡水魚	ニッポンバラタナゴ	C	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
35	よみがえれ!!日本の淡水魚	夏:アオバラヨシノボリ 冬:オヤニラミ	C	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
36	よみがえれ!!日本の淡水魚	ウシモツゴ	C	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
37	よみがえれ!!日本の淡水魚	ヒナモロコ	C	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
38	よみがえれ!!日本の淡水魚	ゼニタナゴ	C	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
45	アフリカ大地溝帯の湖	ヴィクトリア湖	C	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
2-1	琵琶湖の生き物とその環境	岩場から沖合にすむ魚たち トンネル水槽	D	現在、水を抜き安全確保。→3/20排水済 ドーム型パネルにクラック有のため更新が必要。更新の際は円盤にする予定
3	琵琶湖の生き物とその環境	琵琶湖の主 ビワコオオナマズ	D	破損のため、更新が必要
5	琵琶湖の生き物とその環境	琵琶湖のコアユ	D	水を抜き、安全を確保(3/10排水)。更新が必要
15	暮らしのなかの魚たち	ビワヨシノボリ	D	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
19	暮らしのなかの魚たち	外来種	D	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
33	よみがえれ!!日本の淡水魚	アユモドキ	D	使用を停止し、早急にアクリルパネル更新が必要
48	ふれあい水槽	ふれあい水槽	D	破損のため、排水(3/2)。更新が必要

(4) 新たな管理体制

琵琶湖博物館からは、今後の水槽の安全度管理の方針として、次の 3 項目を実施することが提示された。

- 日常点検（朝夕の水槽の目視確認）を継続する。
- クラックのある水槽について、定期的にクラックの観察や記録を行い、クラックの進行状況を把握する
- 年 1 回程度の頻度で専門業者による点検を実施（状態を評価）し、その都度、緊急度リストを更新する。その際に、他園館のアクリル厚さなど最新の安全基準に関する情報も収集し、それらの結果に合わせて水槽のアクリルの更新計画を作成し、必要なものから順次交換を進める。

第3部 総括：水槽破損事故の再発防止に向けて

冒頭にも記したように、大量の水を蓄えた水槽は魅力的な展示であると同時に、破損の際には甚大な被害をもたらす可能性がある。今回のピワコオオナマズ水槽のような壊滅的な破損は水族展示を行う施設においてもっとも起こってはならない事案であることを肝に銘じなければならない。ここでは破損原因の推定と、水槽の安全確認から得られた教訓をもとに、今後の運営に対する提言を行う。

(1) 壊れない水槽を造る

今回破損した水槽、安全度点検の結果使用を停止した水槽については、今後新たな設計のもとに再建が行われるものと考えられる。その際には今回の教訓を十分に反映しなければならない。

第一の教訓は、水槽の安全性を高めるように水槽の形状とアクリル板の厚さの選択を行うことである。今回破損したピワコオオナマズ水槽、ふれあい水槽ともにアクリル板の厚さは破損の主要な原因ではないと推定されたが、現在の水族館業界の設計基準からすると30年近く前に作られた当館の当該水槽は、周囲に擬岩による意匠などが施されたことなどを考えると、結果的に薄かったのではと思慮される。まだ事故には至っていないが、トンネル水槽にあるドーム状の窓部分の板厚は25mmであり、トンネル本体（厚さ160mm）やトンネル水槽の他の平板で作られた窓（35mm、40mm、75mm）と比べると薄い部材で作られていた。水圧や形状により安全基準となる板厚は異なるが、現在の水族館業界の設計基準で作るなら、もう少し厚みがある部材で作った方がよいかもしれないという意見もみられた（なお、当該のドーム窓にはクラックが見られたため、板厚の考慮以前に交換されることが決定していると聞いている）。水槽の再建や修理、更新にあたっては、他館の状況を十分調査し、最新の安全基準を鑑み、十分な安全率を用いて設計された基準にあわせていくことが望まれる。

第二の教訓は、設計から施工、展示工事まで一貫して安全を実現するための管理・情報共有体制を確立することである。ピワコオオナマズ水槽の例で明らかのように、各段階での齟齬の積み重ねは複合して水槽を破損させることにつながる。全ての工程において関係者がアクリル水槽の特性を理解し、各工程において施される処置の意味を理解するようしなければならない。これは単に博物館の意識の問題で解決するものではなく、工事の入札書や発注書に明記するなどして、事業者の選定段階から全体の意識を高めていかなければならない。また、博物館の担当職員だけで全体を統括するのが難しいと考えられる場合は、全体のコーディネートを担う人員を確保できる発注を行うことも視野に入れるべきである。なお、この安全性に関する意識の共有は、水槽の再建や更新の際だけでなく、後付けで行われる小規模な展示更新（例えば水槽周辺の壁の塗り替えなど）まで継続しなければならない。破損原因の推定ではシーリング材やプライマーの溶剤によるケミカルクラックの発生を取り上げたが、水槽周辺の塗装に含まれる溶剤も影響を与える可能性があるからである。

第三の教訓は、しっかりとした専門業者の選定と適切な予算額を設定することである。水槽の設計や設置工事、水族館建設は特殊な業務であるため、水槽の特性を理解した専門業者を選定した上で、適切な対価を支払った上で作業に当たってもらう必要がある。官公庁の水槽に関する仕事の発注において、入札による業者選定は避けては通れない。その際に、仕様書に詳細を全て書くことは難しい。仮に全てをきっちりと書いていたとしても、それを理解できる業者のみを入札に参加させることも難しい。また、官公庁では地域を優先させる傾向にあるが、水槽は特殊な業務であり、地域に専門業者がいることは稀である。設計は安全な水槽を造る上で、最初の工程にして、最も重要な作業であると言える。水槽工事において、発注者は予算や納期を可能な限り削ろうとするが、その分のしわ寄せは最終的にできた水槽のクオリティに集まってしまい、結果として数年で壊れたり、大きな事故を起こしてしまったりする恐れがある。官公庁には、今回の事故を契機に、今後の水槽設計や工事の発注の在り方を検討してもらい、理解している専門業者でいかに造っていくか、ということの重要性を考えてもらうことが望まれる。

(2) 壊れる前に対処する

十分に注意を払って作った水槽でも、経年劣化によりアクリルには傷やヒビが生じ、いつかは壊れる。琵琶湖博物館のように開館から30年近くが経過した施設では、劣化に対処し、壊れる前に適切に水槽を更新していく必要がある。その基礎となるのが、水槽の状況の把握である。今回の事故を受け、琵琶湖博物館は水槽の安全度リストを作成するとともに、安全度の判断基準や、経過観察の方法などを取りまとめた方針を策定した(第2部参照)。第三者委員会も作成の過程で様々な助言を行うことができた。このような管理体制が作られたことは、大きな前進であると評価している。課題は新たに作った管理体制が永続的に維持できること、管理基準に基づいて水槽の適切な更新計画が作成され、かつ、それが実行できることである。この課題の実現には博物館の努力だけでなく、設置者である滋賀県の理解が欠かせない。来館者の安全確保は設置者にとっても重要な責務であることを、第三者委員会としては指摘しておきたい。

<本報告書に関する問い合わせ先>

第三者委員会事務局(滋賀県立琵琶湖博物館)

〒525-0001 滋賀県草津市下物町1091

電話番号:077-568-4811

別添資料

- 滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故に係る第三者委員会設置要綱
- 三菱ケミカルインフラテック株式会社
調査報告書 琵琶湖博物館：オオナマズ円筒水槽破損について
令和5年3月9日
- 一般財団法人化学物質評価研究機構
試験報告書：令和4年度琵琶湖博物館水槽破損事故原因分析業務
令和5年3月31日

滋賀県立琵琶湖博物館水槽破損事故に係る第三者委員会設置要綱

(趣旨)

第1条 この要綱は、滋賀県立琵琶湖博物館水族展示室において発生した水槽破損事故(以下「事故」という。)に関し、その事故の原因等の究明および今後の安全管理の在り方を検討するために設置する水槽破損事故に係る第三者委員会(以下「委員会」という。)の組織および運営に関し必要な事項を定めるものとする。

(所掌事項)

第2条 委員会所掌事項は、次のとおりとする。

- (1) 事故の原因、発生状況等に係る調査結果の評価
- (2) 事故の原因、発生状況等に係る追加調査の検討および県に対する提言
- (3) 事故の原因に関する調査結果のとりまとめ
- (4) 今後の点検等安全管理の在り方検討
- (5) 事故があった水槽以外の水槽の安全点検結果の評価
- (6) その他事故原因等の究明および今後の安全管理に必要と認められる事項

(組織)

第3条 委員会は次の委員をもって10人以内で組織する。

- (1) 水槽の構造・材質等に関する有識者
- (2) 水族館の設計・建設等に関する有識者
- (3) その他調査等に必要事項に関する有識者

(委員長および副委員長)

第4条 委員会に委員長および副委員長を置き、委員の互選によりこれを定める。

- 2 委員長は、委員会を代表し、会務を総理する。
- 3 副委員長は、委員長を補佐し、委員長に事故あるときは、その職務を代理する。

(任期)

第5条 委員の任期は、第2条の所掌事項終了までの期間とする。

(会議)

第6条 委員会の会議は、委員長が招集し、その議長となる。

- 2 会議は、委員の半数以上が出席しなければ開くことができない。ただし、オンラインにより会議に参加する委員は出席と見なす。
- 3 委員会は、必要があると認めるときは、委員以外の者に資料の提出または会議への出席を求めることができる。
- 4 委員会は、公開とする。ただし、委員長が必要と認めるときは、非公開とする。

(守秘義務)

第7条 委員は、その職務に関して知り得た秘密を他に漏らしてはならない。その職を退いた後も同様とする。

(庶務)

第8条 委員会の庶務は、滋賀県立琵琶湖博物館において処理する。

(その他)

第9条 この要綱に定めるもののほか、委員会の運営に関し必要な事項は、委員長が別に定める。

附則

(施行期日)

- 1 この要綱は、令和5年3月1日から施行する。

調査報告書

琵琶湖博物館：オオナマズ円筒水槽 破損について

2023/3/9

三菱ケミカルインフラテック株式会社

機能成形材ビジネスユニット

建築材料部 アクリテックグループ

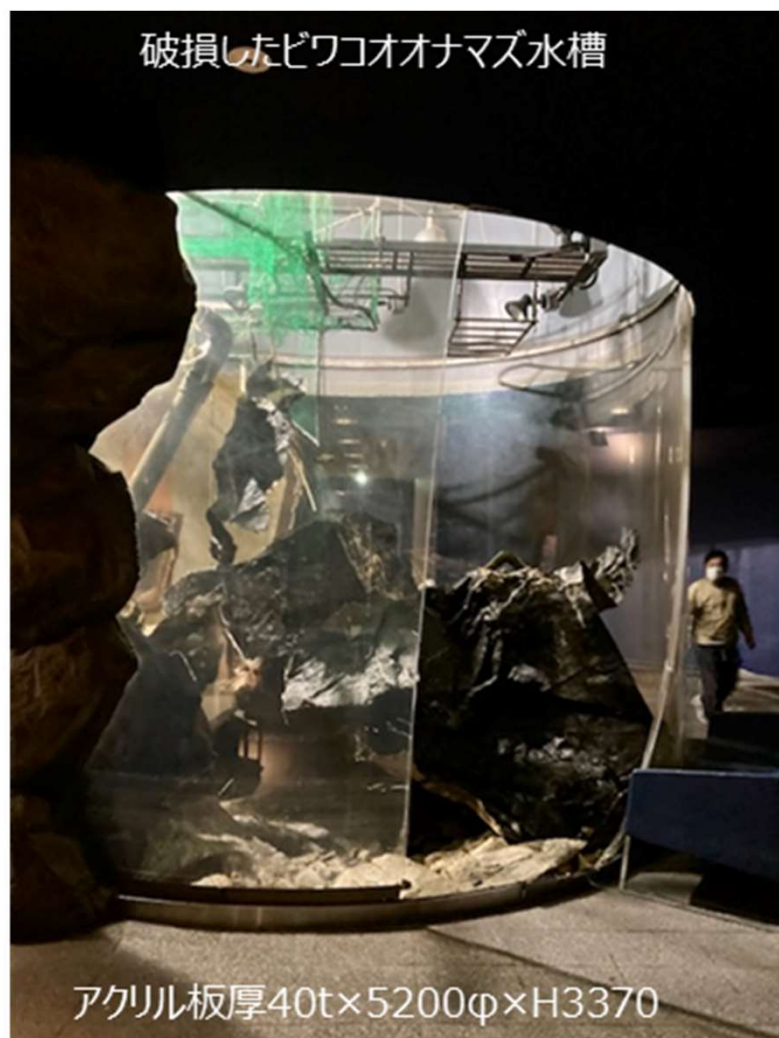
1. 経緯

破損後の主な対応>

- 2月10日、博物館より破損の連絡を受け、16時、弊社現地確認。
- 2月12日、弊社と加工会社同行し、破損調査。
- 2月15日、破損について（速報）のご連絡。
- 2月18日、弊社と取付（撤去計画）会社同行し、撤去方法打合せ。

施工～現在>

- ・1995年 施工（三菱レイヨン⇒菱晃へ事業移管）
- ・1996年 オープン(保証期間：1996年4月1日～10年間)
- ・2003年 ビワマス円筒水槽 クラック補修
- ・2004年 ビワコオオナマズ円筒水槽クラック補修
 - * 建築化粧シールプライマーによるクラック除去（アクリル切除）
- ・2016年 リニューアル（ビワマス水槽他の研磨 * オオナマズは施工なし）
- ・2023年2月10日 am8:00 ビワコオオナマズ円筒水槽破損



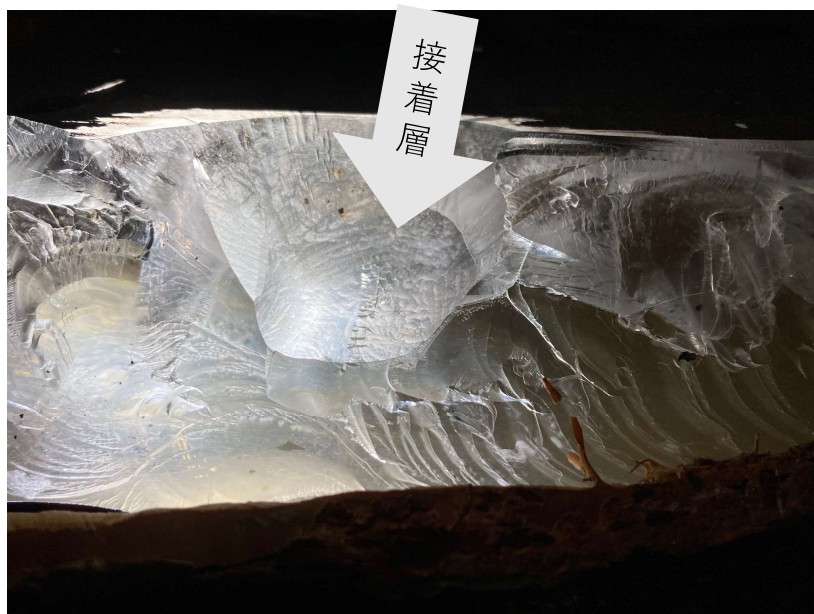
2. 割れの状況(1)

- ・向かって左下側に、クラック発生が多数観察できた。
- ・左縦割れ部の断面は、光沢があり（＝割れ速度が速い）
- ・下部横割れ部の断面は、ウロコ状である（＝割れ速度遅い）



2. 割れの状況(2)

- ・観覧側最下部の端部に、SUS部材が食い込んでいるように見える。
- ・クラック除去箇所（2004年施工）の内、3か所を視認できた。
割れの起点となった形跡はない。
- ・アクリル板接合部（線接着）を確認したが、割れの起点となった形跡はない。



3. アクリルパネル下部の固定状況

◎アクリルパネル下部とモルタル・表面タイルが直接接触している。

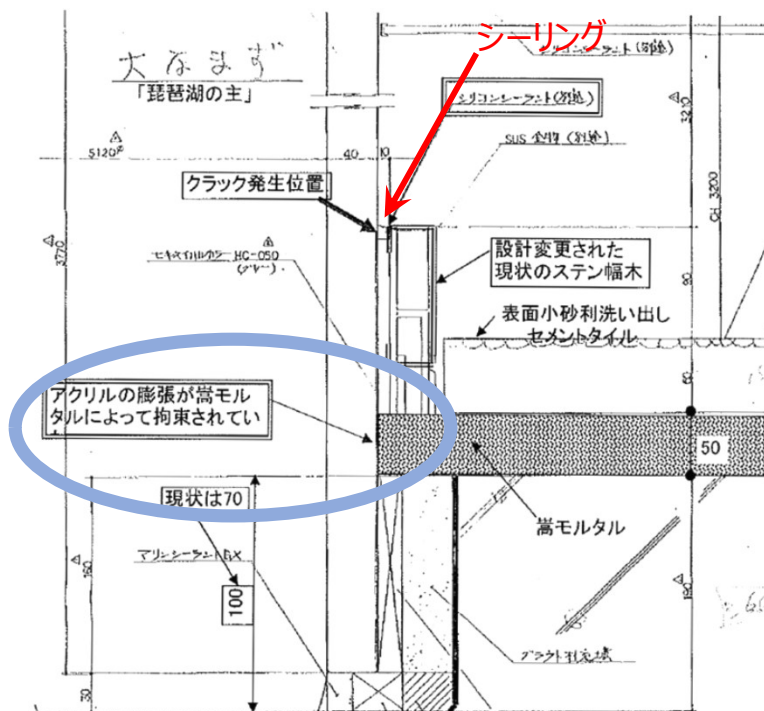
※アクリルパネルの伸びが拘束されている

◎下部シーリング厚みは設計上10mmであるが、数mm程度に圧縮されている。

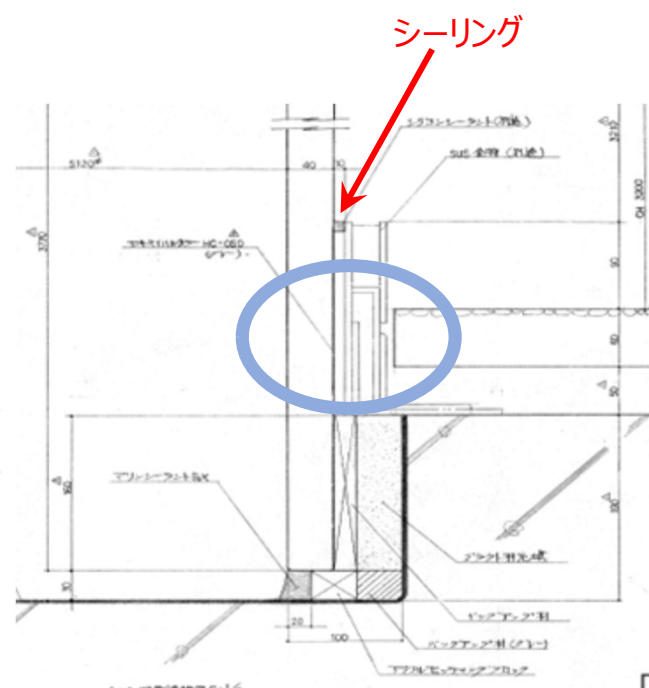
埋め殺し状態(左側)



(2004年工事報告書)より抜粋



(2004年工事報告書)より抜粋

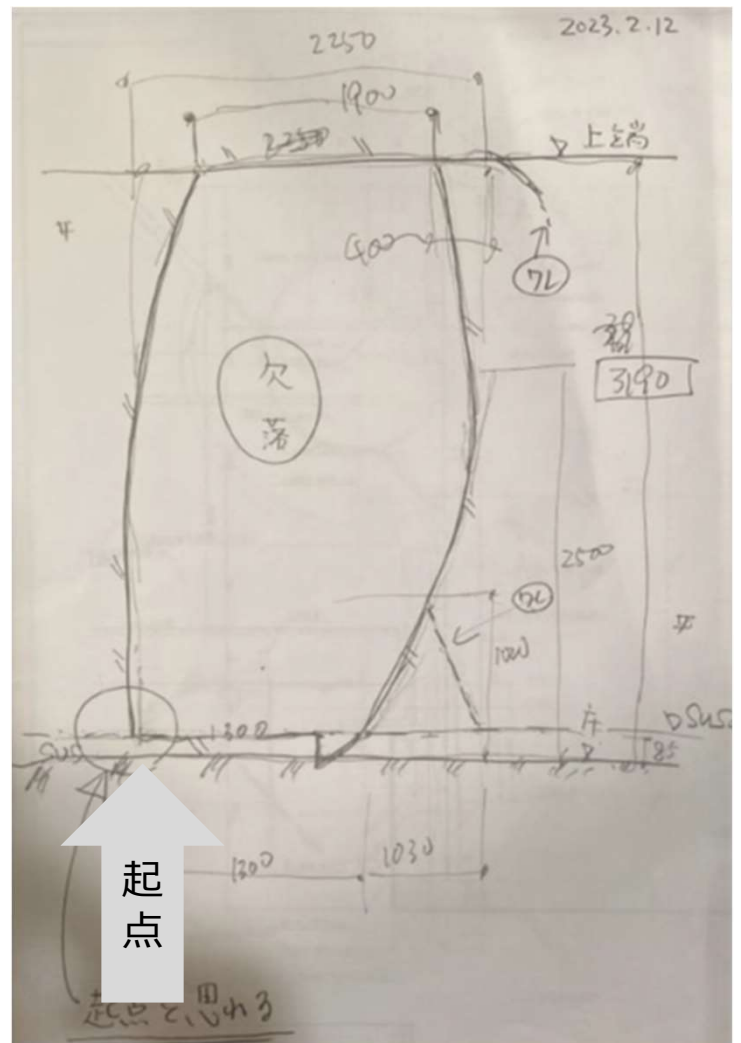


(弊社当初施工図)より抜粋

4. 割れ発生 推定状況

- ・吸水による形状変化（飽和吸水時7.5mm大きくなる）＝観覧側への引張り応力
- ・縦状のクラック発生（タイル・モルタルによる拘束と、なんらかの薬品により発生した可能性あり）
- ・モルタル部とアクリルパネルの間に隙間がほぼない状態
- ・SUS金具エッジのアクリルパネルへの食い込み（起点となった可能性あり）

- ①左側下部の起点より、上部に向けて一気に割れが発生。
- ②円筒としてのバランスが崩れ、全体が大きく変形。
- ③下辺が引きちぎられるように破断。
- ④右辺が一気に破断。



琵琶湖博物館様ご提供写真

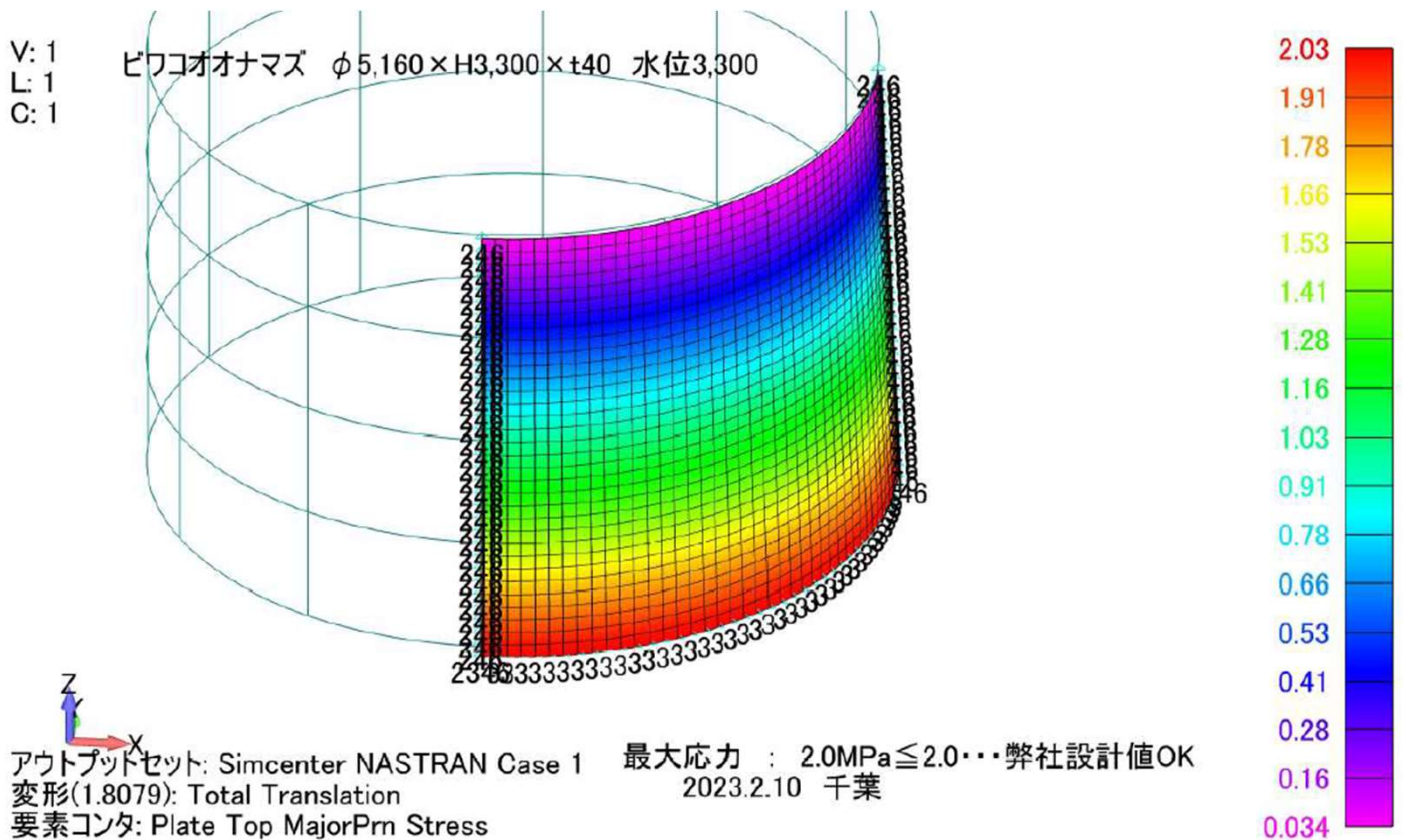
* スケッチと合わせる為、元写真を
左右逆転させております。

観覧側からの図

5. 水槽パネル：強度計算

◎強度計算

- ・アクリルパネル引張強度 76MPa （パネル接着部 56MPa）
- ・円筒水槽における許容応力2.0MPa以下（弊社基準 別紙）を満足する。



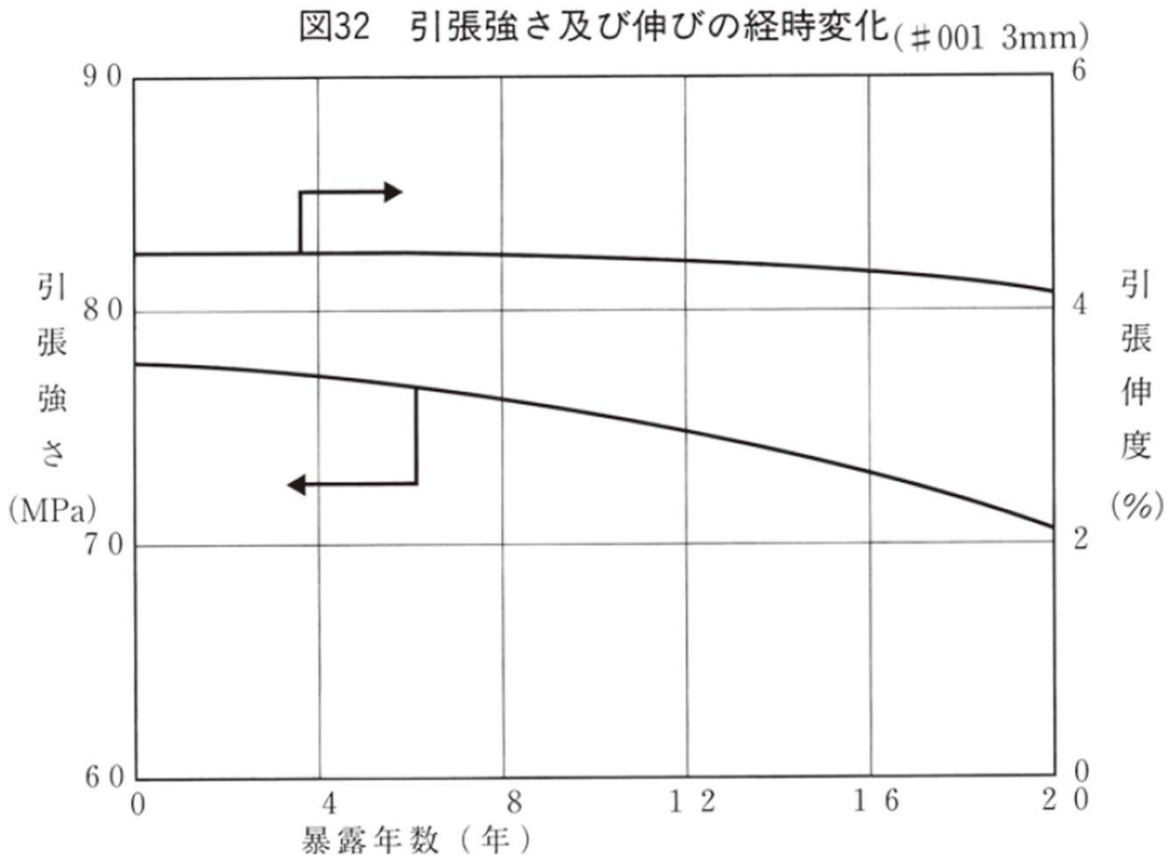
5. 水槽パネル：強度の経年劣化

◎アクリル樹脂の耐候暴露による強度変化（～20年）

引張強度 76 ⇒ 71 MPa 保持率：約93%

*アクリル樹脂は、一般的な樹脂と比べると例外的に劣化が進みにくい部類
となっております。

例) 自動車テールランプ（ヘッドランプはポリカーボネート樹脂）



アクリライト（三菱ケミカル）物性編より抜粋

5. 水槽パネル：吸水と伸び

◎アクリル樹脂の飽和吸水率 2%（水側：飽和状態）

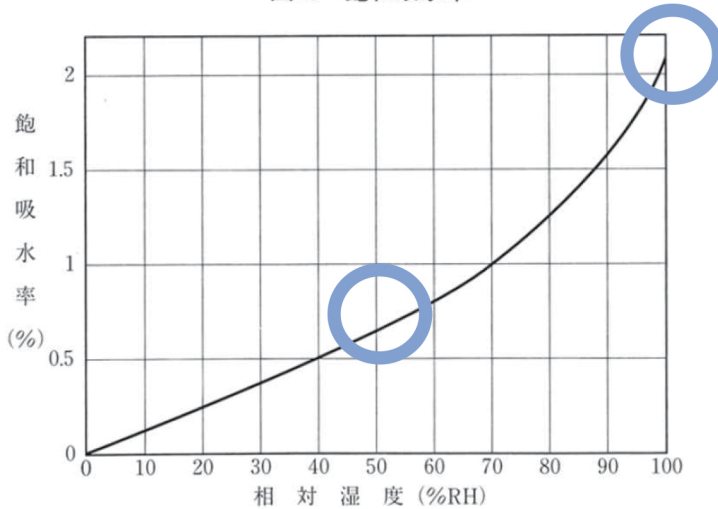
0.6%（室内側：湿度50%想定）

アクリル樹脂が吸水することで、その分 寸法的に「伸びる」こととなります。

吸水による伸び 0.4%（水側）、0.1%（室内側）

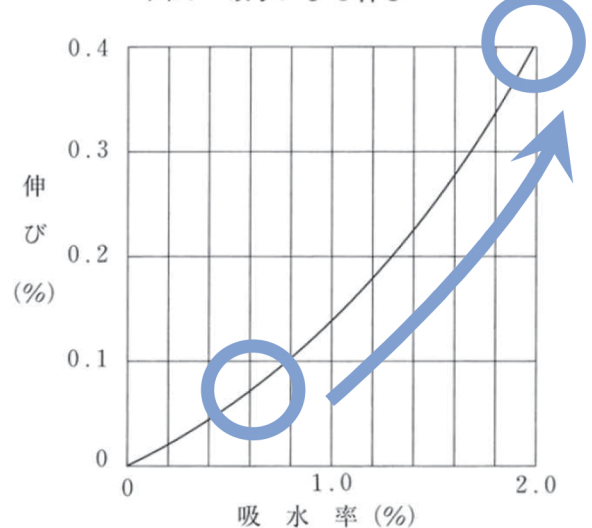
* 直径5mの当該水槽の場合、水側・室内側の伸び率の違いを考慮すると、
水槽全体として 約7.5mm 大きくなります。

図28 飽和吸水率



アクリライト（三菱ケミカル）物性編より抜粋

図29 吸水による伸び



◎弊社社内規定

技術資料

水槽用アクリル板厚みの設計基準

2. 応力基準

円筒形パネルの許容周応力	
長期	2.0MPa 以下

※ 三菱ケミカルインフラテック㈱
設計基準による



令和5年3月31日

No.242-22-A-0438

一般財団法人 化学物質評価研究機構
東京事業所
埼玉県北葛飾郡杉戸町下高野 1600 番地
TEL 0480-37-2601 FAX 0480-37-2521



1. 依頼者 滋賀県知事三日月大造 殿
2. 受付日 令和5年3月13日
3. 件名 令和4年度琵琶湖博物館水槽破損事故原因分析業務
4. 試料 調査対象水槽
①ビワコオオナマズ水槽
②ふれあい水槽 計2点

5. 経緯及び目的

5.1 ビワコオオナマズ水槽の破損

令和5年2月10日、アクリル樹脂製の円柱型ビワコオオナマズ水槽が破損し、水が漏出する事象が発生した。アクリル水槽は直径5.1m、高さ3.8m、厚さ4cmで、破損は高さ方向には全長、円周方向には1~2mにわたって生じ、開口した状態に至っており、破損・脱離したアクリル樹脂は展示室に破片化して散乱していた。

アクリル水槽は6枚のアクリル樹脂板が現地にて重合接着により組立設置されている。1996年の開館以降、アクリル樹脂は交換されていないが、2004年に接着箇所クラックが発生したため補修工事が行われた。当時、クラック発生は化粧目地工事用プライマーによるものと推定されているが、今回の事故における破損起点は接着面ではないと推定されている。水温は14℃(冬)~28℃(夏)で調整されておらず、濾過槽のあるバックヤードと展示室の室温に左右される。

5.2 ふれあい水槽の破損

令和5年3月2日、全面アクリル樹脂製の直方体型ふれあい水槽において、水漏れはないものの左端部に亀裂が確認された。本亀裂は前日には確認されていない。亀裂確認後通常(2時間)よりも短時間(20分)で排水したところ、さらに右端部にも亀裂が発生した。アクリル水槽は幅3m、奥行き1m、高さ1.8m、厚さ3cmで、亀裂は前面と側面のアクリル樹脂の接着部付近に縦方向に生じている。

アクリル樹脂平板が重合接着され直方体型に組み立てられており、観覧側から水槽内に手を入れることができる穴を設けた特殊構造の水槽で、穴から水が出ないように水槽全体が減圧されている。1996年の開館以降、アクリル樹脂は交換されておらず、水温は温調機器で調整されていたが、2021年8月の故障以降は調整されていない。別のアクリル樹脂製水槽の日常の清掃は市販の中性洗剤を使用しており、指紋除去に用いる青色の市販洗剤も10倍程度に希釈して使用しているが、ふれあい水槽は2022年1月からコロナウイルス感染症対策の影響を受けて閉鎖しているため直近では清掃されていない。

次頁に続く

本報告書では、ピワコオオナマズ水槽とふれあい水槽の破損事故原因を調査するための調査方針（分析方法、試料採取など）を検討するために、2023年3月14日に破損状況、使用環境、水槽設置状況などに関する現地調査を行った内容を報告する。なお、調査方針の検討は3月17日に提供いただいた第1回第三者委員会資料（3月11日）の内容も加味して行った。

6. 調査結果

6.1 破損原因調査方針の検討の概要¹⁾

6.1.1 破損原因調査の一般的流れ

破損などの原因調査の一般的な流れを図1に示す。はじめに破損が生じた使用環境、使用年数、ロット性、原材料や成形加工法、組立方法の変更の有無など、不具合発生に至る経緯や情報を詳細に把握する必要がある。その情報を手がかりとして適切な分析対象試料及び分析法を選択し、得られた結果を考察する。さらに、その結果を基に原因を追究する分析を実施し、分析試料の再収集、情報再収集も必要に応じて行い、原因の検証を行い、原因を突き止めていく。調査過程で実施する各種分析においては破損品と同時に新品や良品などの比較試料の分析も行い、破損品特有の事象を見出すことが基本となり比較試料の選択も重要である。

破損には使用環境や材料、製造条件などの多数の因子が複雑に関与するため破損原因調査方法に常法はない。経緯や情報の把握が原因調査の入口として重要で、のちに続く分析作業と考察の質を高めるために欠かせないプロセスになることから、水槽の設置状況や使用環境を含めた現地での破損状況の確認を行い、今後の破損原因の分析調査方針を検討した。



図1 破損などの原因調査の一般的流れ

6.1.2 破壊の種類と強度にかかわる因子を考慮した調査方針検討

プラスチックの代表的な破壊モードには脆性破壊、延性破壊、クリーブ破壊、疲労破壊、環境応力亀裂及び溶剤亀裂などが挙げられ、発生する応力の大きさや速度、環境などによって破壊モードが変わる。破断面は破壊モードと破壊の起点に関する情報を与える。破壊の起点を判別できれば分析試料の採取箇所を選定の参考になるため、現地では顕微鏡を用いた精緻な破断面観察はできないが目視で観察によって採取箇所を検討する。

次頁に続く

破損原因を調べる上で前述の破壊モードを特定することは重要であるが、製品の原因調査の場合は破壊モードの特定だけは往々にして不十分である。それは破壊モードを特定しても「なぜその破壊モードで破壊したのか」は分からないためである。例えば、破断面観察で脆性的な破壊であることがわかったとして、単純に想定以上の外力が付与されたのか、材料組成に問題があったのか、劣化が生じて強度が低下したのかなどの真因までは分からない。また、環境応力亀裂による破壊が破断面観察で示唆されたとしても、その原因物質の解析などを別の化学分析などを行わなければ、環境応力亀裂をもたらした物質が分からないため真因には達しない。真因にたどり着くためには表1に示した製品強度に関わる因子が強度低下をもたらしていないかを破断面観察以外の方法も駆使して調べる必要があり、今後の破損原因の分析調査方針を決める際に考慮する。

表1 製品強度に関わる因子（一般論で調査対象の亚克力水槽に絞ったものではない）

因子	具体的事象の例
劣化	使用とともに劣化により強度低下 熱劣化、光劣化、金属害、加水分解など
薬品類	環境応力亀裂（溶剤亀裂）
形状	応力集中を招く形状 曲率半径、厚さ、傷
材料	ポリマーの強靱さ、分子量及び分子量分布 フィラーの選択、量、分散 可塑剤の選択、量 延伸、結晶化度、残留ひずみ
異物	フィラーの分散不良 外部からの混入（成形機滞留物、異樹脂）
ボイド	成形時の水分 成形時の分解物（ガス）の発生 成形時の空気の巻き込み
ウェルドライン	ゲートの位置や成形品の形状に応じて、流動樹脂衝突位置に発生

参考文献

- 1) 仲山和海 高分子 2021, 70(5), 232.

次頁に続く

6.2 ビワコオオナマズ水槽の現地調査

(1) 水槽に関する情報

設置年：1996年

アクリル樹脂：三菱レイヨン製

施工業者：アクリル樹脂設置(株) 菱晃(現・三菱ケミカルインフラテック(株))

寸法：円柱型水槽 直径5.1m 高さ3.8m

水槽板厚：4cm

周辺部材：躯体部分にシーリング材が使用されている

展示水量：約78.4トン

濾過槽水量：約24トン

室温：空調設定温度は、冬24℃、夏未確認(涼しいと感じる程度)

水温：14℃(冬)～28℃(夏) 温調なし

水の交換頻度：換水は2ヶ月に1回。10～20トン程度。

逆洗作業による水の入れ替えは2019年3月までは月1、2回。2019年4月以降は2ヶ月毎。8トン程度。

清掃担当：水族飼育員

清掃方法：水中側 年1回程度。スポンジ使用。

展示室側 2022年8月までは指紋が付着している際に、クロスによる水拭きもしくは弱アルカリ性洗剤(KAOプロフェッショナル ガラスマジックリン 業務用)を10倍以上に希釈したものをクロスに吹きかけて拭き取り。2022年8月以降、洗剤は中性洗剤に変更

備考：2004年に接着部のクラック補修工事実施

(2) 図2にビワコオオナマズ水槽の破損状況を示す。

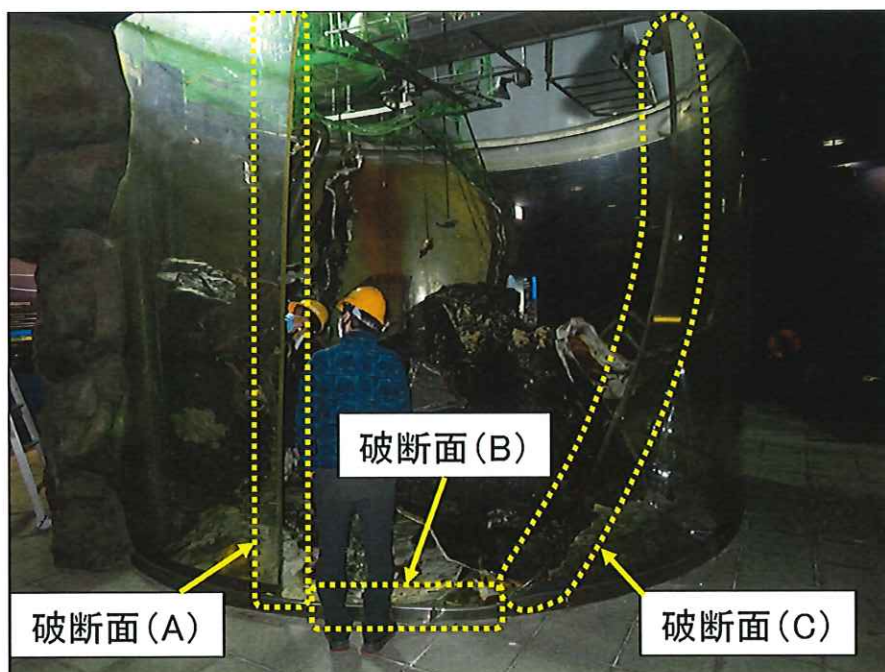


図2 ビワコオオナマズ水槽の破損状況

(3) ビワコオオナマズ水槽は高さ方向に全長、周方向に1～2mが破損し、開口した状況であった。

(4) 図3にアクリル水槽破片と本体破断面の対応を示す。

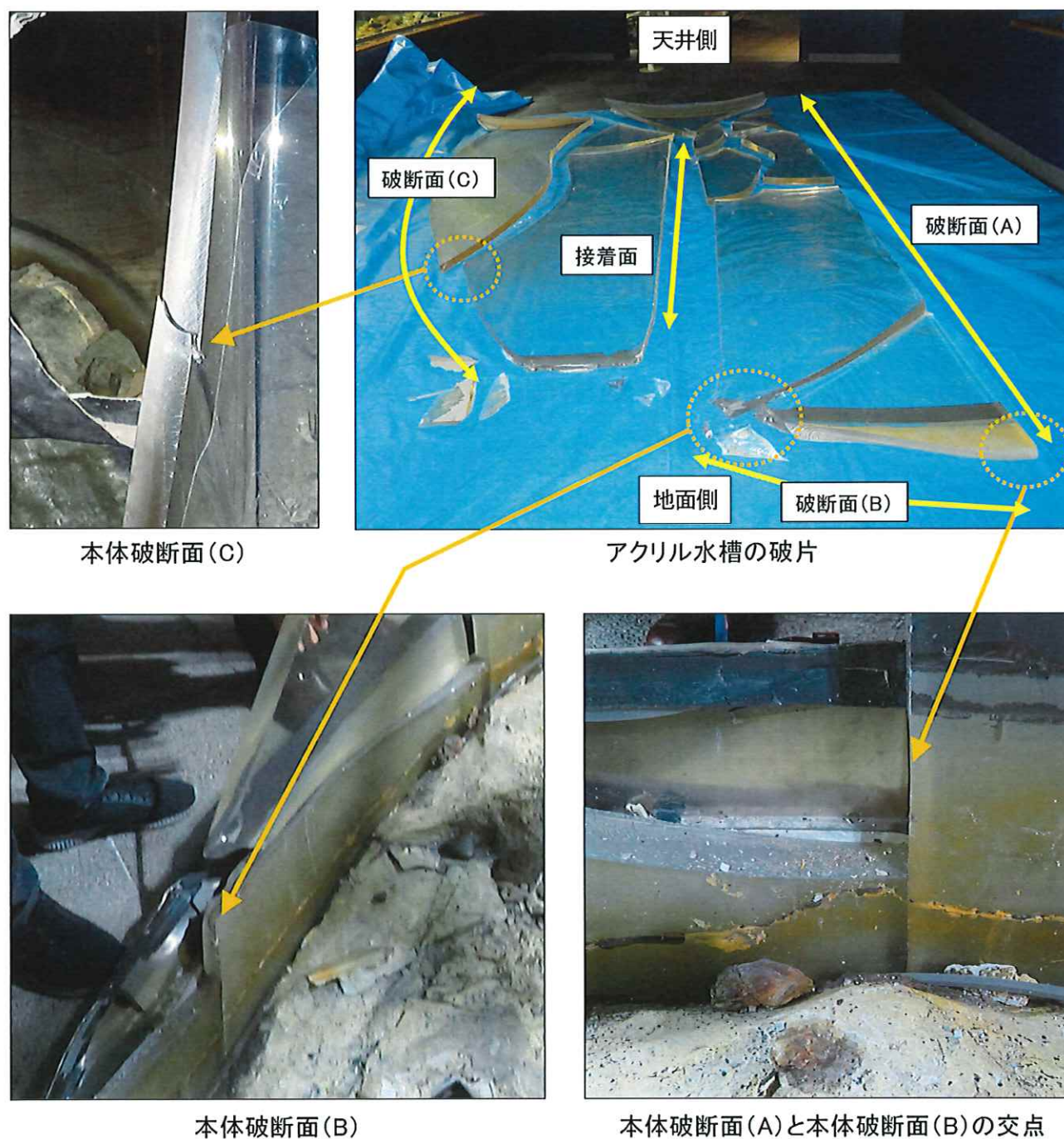


図3 アクリル水槽破片と本体側破断面の対応

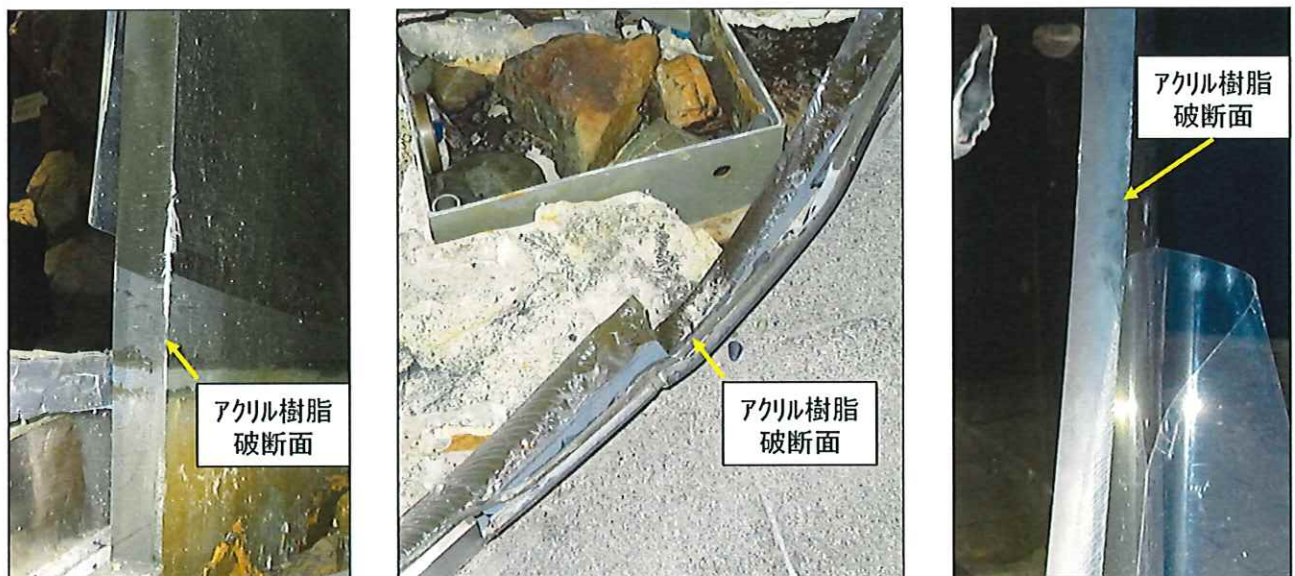
- (5) アクリル水槽破損により水槽の外に散乱した破片が回収され、形状を復元するように静置されていた。
- (6) 破断面 (B) は破断面 (A) で止まっているので破断面 (B) は破断面 (A) の後に破断が進行したと考えられる。さらに、破断面 (B) の中央付近で鉛直方向に破断が生じている。鉛直方向の破断はアクリル板の接着面付近に生じているが接着部の痕跡を示す図4のくぼみ位置からややずれていた。破断面 (B) と接着面の破断面の交点でアクリル板が細かく砕けていることが認められる。破断面 (B) はさらに進展して破断面 (C) に至ったと考えられる。

次頁に続く



図4 アクリル水槽本体側破断面 (B) のアクリル板接着の痕跡

(7) 図5 にアクリル水槽本体側の各破断面の写真を示す。



破断面 (A)

破断面 (B)

破断面 (C)

図5 本体側アクリル水槽本体側の各破断面の様子

(8) 破断面 (A) と破断面 (C) は比較的滑らかな破断面であるのに対して、破断面 (B) では波紋状である。各破断面において特徴的な部位を採取して、顕微鏡観察を行い、破壊モード及び破損の進展方向について考察することで、アクリル水槽破損の起点を推定し、破損原因解析を進める必要がある。

次頁に続く

(9) 図6に本体側アクリル水槽破断面 (A) の拡大写真を示す。

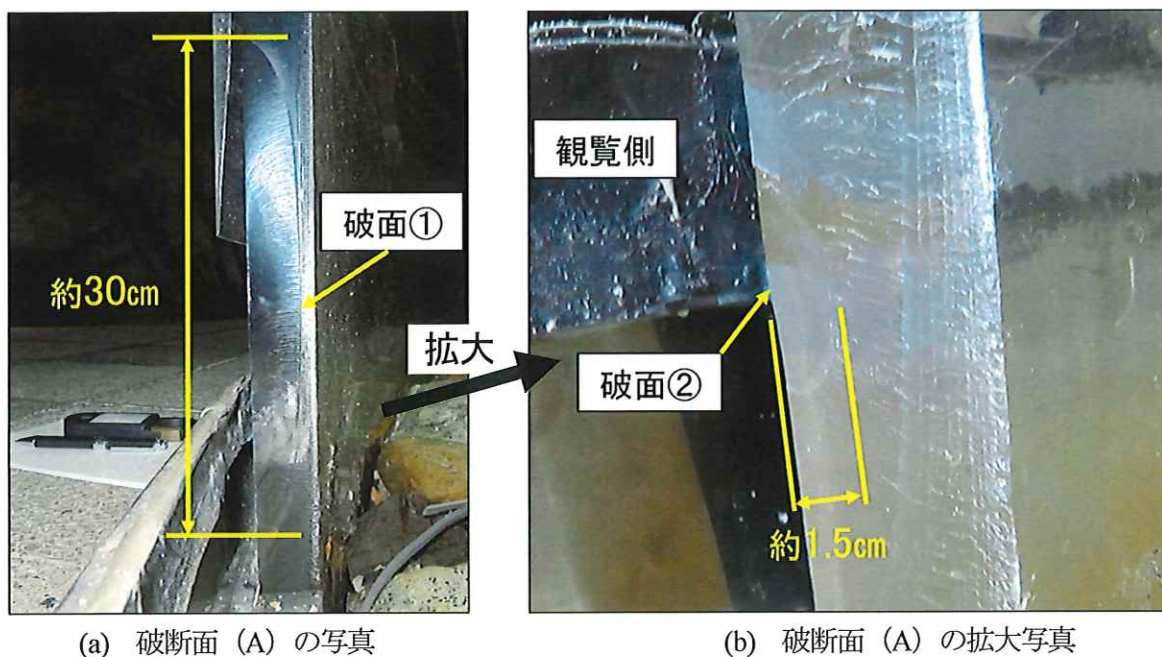


図6 本体側アクリル水槽破断面 (A) の拡大写真

(10) 図6(a)より、破断面 (A) には長さ約30cmの放射状模様 (破断面①) が認められ、その中に水槽の観覧側から深さ方向に約1.5cmの比較的平滑な破断面 (破断面②) が認められる (図6(b))。この観察領域においては、破断面②が初期クラックとして発生し、さらに破断面①の大きさまで進展したと考えられるが焦点深度が深い走査型電子顕微鏡を用いて詳細に観察する必要がある。他の破断面 (B) や破断面 (C) でも同様の破断面の有無について調査を行い、破面解析に基づいて水槽破損の起点の特定を試みる必要がある。

(11) 図7に本体側アクリル水槽破断面 (A) に対応する破片とその破断面を示す。

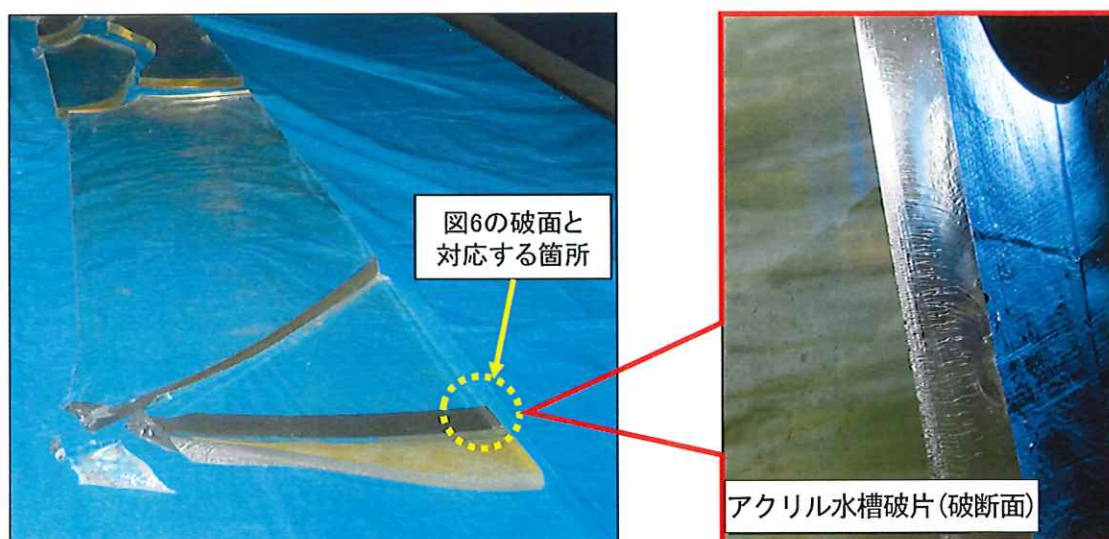


図7 破断面 (A) に対応する破片とその破断面

(12) 破線枠で囲んだ部分は、図6で拡大表示した破断面に対応する箇所であり、図6(a)の破断面①と対応する放射状模様が破断面に認められる (図7右)。

(13) 図7の破片を本体側アクリル水槽破断面(A)に合わせた様子を図8に示す。



(a) 破片を合わせた様子

(b) 破片合わせ面のズレ

図8 アクリル水槽の破断面(A)周辺破片を合わせた様子

(14) 図8(b)の矢印で示す部分で、破片合わせ面のズレが認められる。これは水槽の内部ひずみによる現象と考えられる。非破損部分や理論上ひずみの少ない部分との内部ひずみの比較測定を行い、水槽破損進展との関係について調査する。

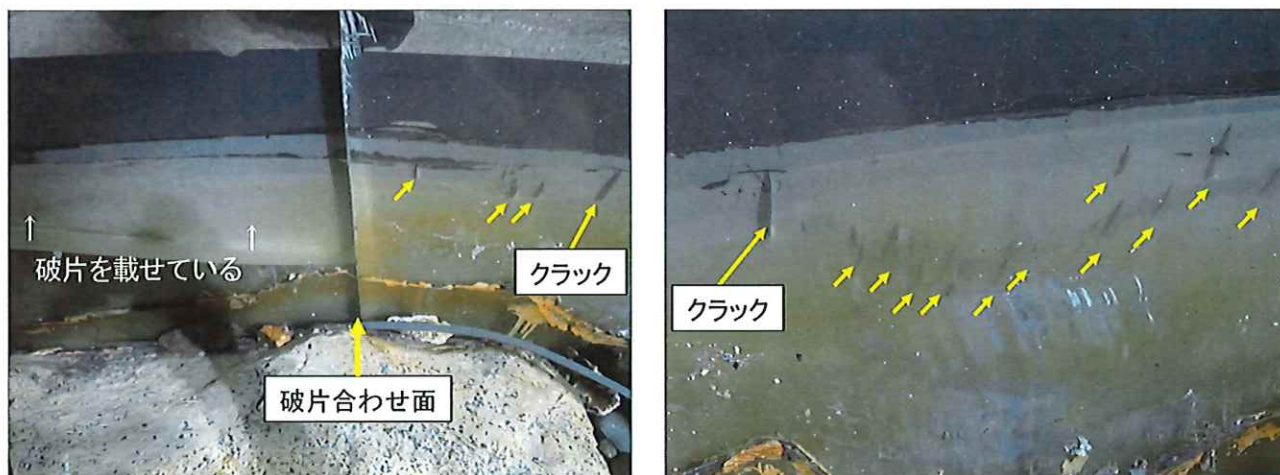
(15) 図9に水槽内側から見た躯体部分の様子を示す。



図9 水槽内側から見た躯体部分のアクリル水槽の様子

次頁に続く

(16) 図 10 に破断面 (A) 周辺の躯体部分の様子を示す。



(a) 破断面 (A) 周辺の破片を合わせた様子

(b) 破断面 (A) 右側クラック頻発箇所の様子

図 10 水槽内側から見た破断面 (A) 周辺の躯体部分の様子

(17) 水槽内側から見て、破片合わせ面より右側には、水槽の高さ方向に沿って数 cm 程度のクラックが頻発している。しかし、破片合わせ面より左側にクラックは認められない。

(18) 図 11 に破断面 (B) 及び破断面 (C) 周辺の躯体部分の様子を示す。



(a) 破断面 (B) 周辺の様子

(b) 破断面 (C) 周辺の様子

図 11 水槽内側から見た破断面 (B) 及び破断面 (C) 周辺の躯体部分のアクリルの様子

(19) 図 10 で確認されたクラックは、破断面 (B) 及び破断面 (C) の躯体部分には認められない。

次頁に続く

(20) 図 12 にクラック頻発箇所の様子を示す。



図 12 クラック頻発箇所の様子

(21) 灰色の帯状模様がクラック頻発箇所とほぼ重なって認められ、クラック発生と灰色の帯状模様の形成に因果関係があると考えられることから、アクリル水槽観覧側の様子を解体して確認し、灰色帯状模様が生じている原因を明らかにする必要がある。

(22) 図 13 にアクリル樹脂の周辺部材の写真を示す。

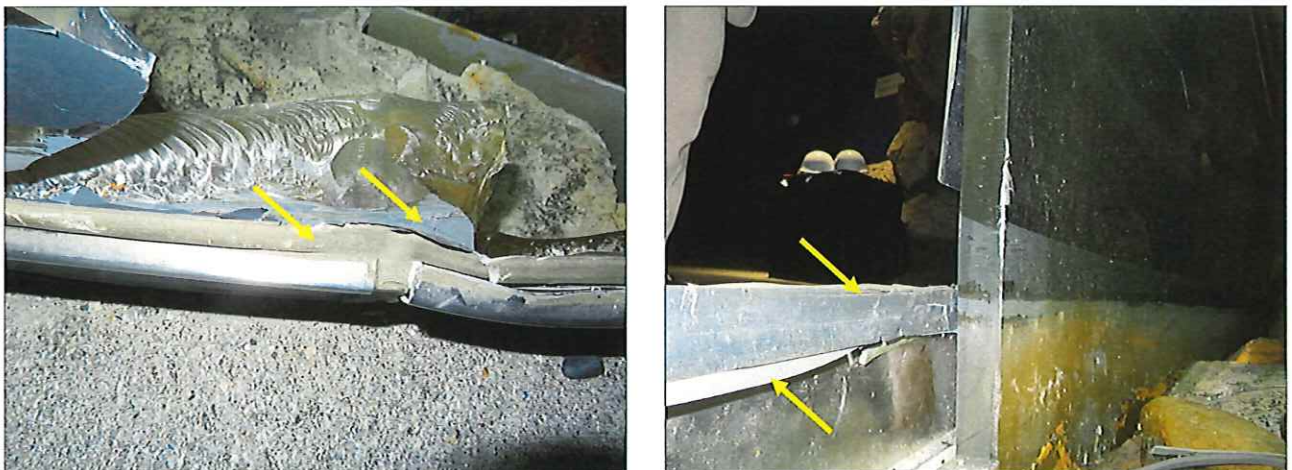


図 13 アクリル樹脂の周辺部材 (矢印部が周辺部材)

(23) 目視では、矢印で示すように少なくとも 4 種類の部材がアクリル樹脂と接している可能性がある。これらを含め、図 12 のクラック頻発箇所のサンプル採取は必要なので、解体工事の立ち合い、もしくは解体工事業者との事前打ち合わせにて、分析評価に必要な部位の検討を行う。

次頁に続く

(24) 図14及び図15に1996年の設置当初の施工図と、2004年の補修工事時に確認されている設計変更後の施工図を示す。

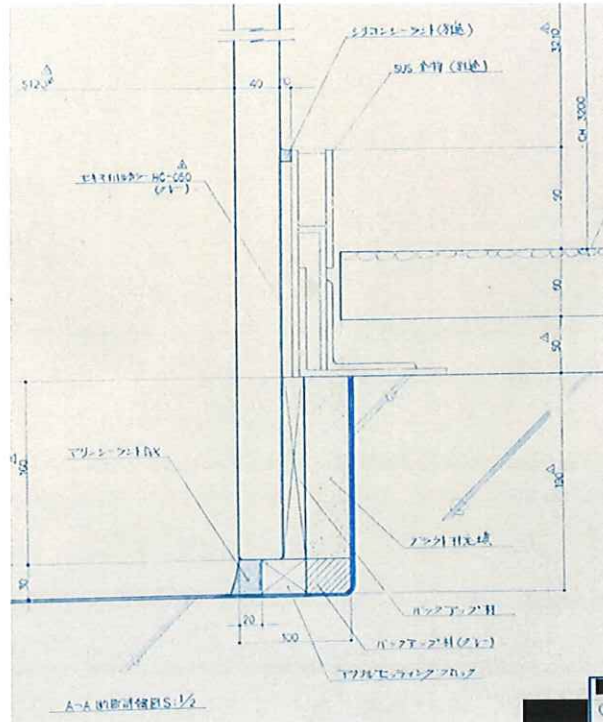


図14 水槽の当初施工図 (3/11 第三者委員会資料2より)

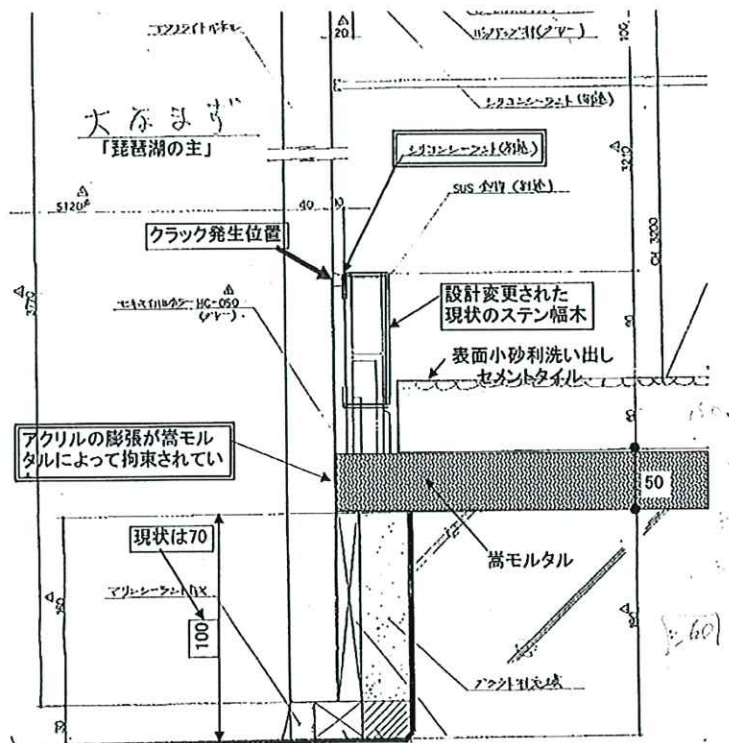


図15 水槽の設計変更後施工図 (3/11 第三者委員会資料3-3 p.16 掲載図より)

- (25) 図 13 にて確認される使用部材と、水槽の施工図に記載されている部材の対応は明確にできないので、解体工事の立ち合いと部材回収・成分分析が必要である。
- (26) 図 16 に破断面 (A) 躯体部分の拡大写真を示す。



図 16 破断面 (A) 躯体部分の拡大写真

- (27) 図 15 の施工図によると、図 16 で示した箇所でアクリル板に接している部材はモルタルのみであるが、実際には SUS 巾木も接触しており、図 15 の施工図と図 16 の状態は対応が取れない。剛直な SUS 巾木とアクリル板の接触が今回の破損要因の一つなのか、今後、調査内容を検討する。

6.3 ふれあい水槽

(1) 水槽に関する情報

設置年：1996年

アクリル樹脂：不明（現在調査中）

施工業者：不明（現在調査中）

寸法：全面アクリル製直方体型水槽 幅3m、奥行き1m、高さ1.8m

アクリル板板厚：約3cm

展示水量：4.7トン

濾過槽水量：約0.3トン（急速濾過機）

室温：空調設定温度は冬24℃、夏未確認。

水温：2022年以前 18℃（冬）～29℃（夏）、2022年以降 16℃（冬）～32℃（夏）

水の交換頻度：2ヶ月毎。圧力の急激な変化を避けるため、2時間かけて水を抜く。

清掃担当：水族飼育員

清掃方法：水中側 月1回程度。落水してスポンジを使用。最終落水は2021年11月。

展示室側 2022年1月までは、指紋除去はクロスによる水拭きもしくは弱アルカリ性洗剤（KAOプロフェッショナル ガラスマジックリン 業務用）を10倍以上に希釈したものをクロスに吹きかけて拭き取り。
2022年1月以降、ふれあい体験室閉鎖に伴い展示室側からの清掃はほとんど行っていない。

類似事故の事例：今後確認（同仕様の水槽は国内に3件程しかない。）

備考 ①：2022年に水温を調節する温調機器が故障

備考 ②: 観覧側のアクリル面から手を入れることができる特殊構造の水槽。手を入れる箇所から水が出ないように、上部を密閉し真空ポンプで水槽内の空気を常時抜いている。魚が生活できるようエアレーションは行っている。

(2) 図 17 にふれあい水槽の外観を示す。



図 17 ふれあい水槽

- (3) 観覧側から見て左手の亀裂 (A) について現地で詳細に観察した。右側の亀裂 (B) は水槽の構造上、近づいて観察できない場所であった。
- (4) 図 18 にふれあい水槽を観覧側に対して側面から撮影した写真を示す。

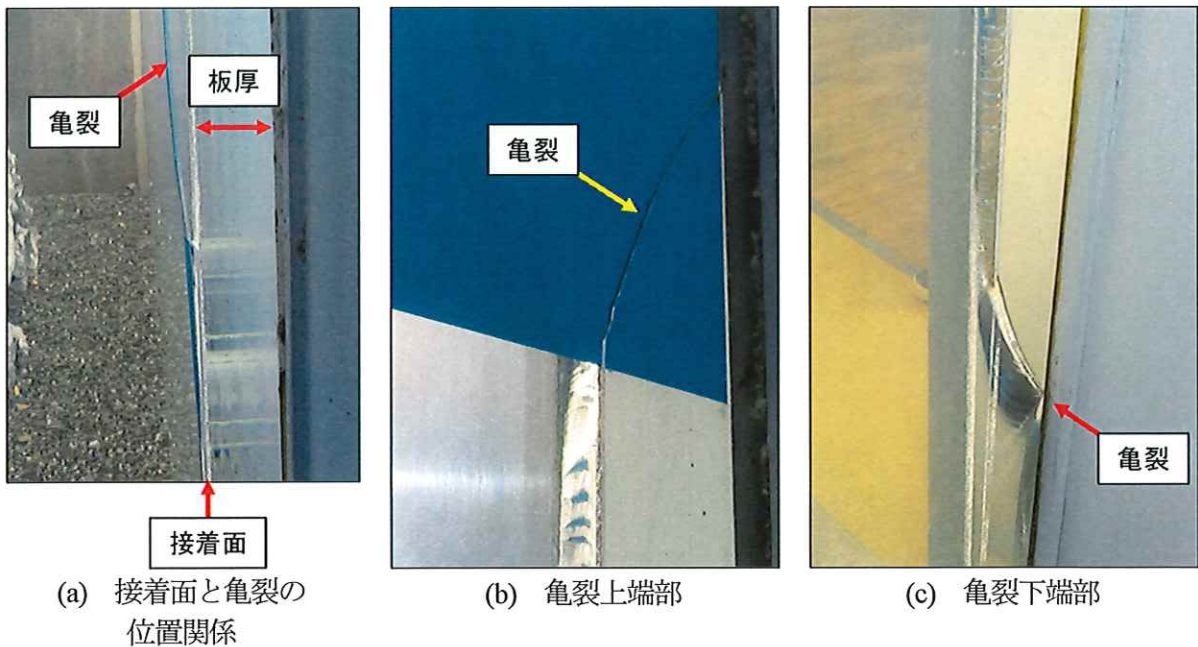


図 18 ふれあい水槽の亀裂とアクリル接着面の位置関係

- (5) 図 18(a)に示すように接着箇所付近に縦方向に亀裂が認められる。亀裂は接着面に沿っている領域もあるが外れた領域が大部分を占めること、また図 18(b)と図 18(c)に示すように、亀裂は板厚方向を横断していることから、接着不良による亀裂発生の可能性は低いと考えられる。

(6) 図 19 にふれあい水槽の破断面の様子を示す。

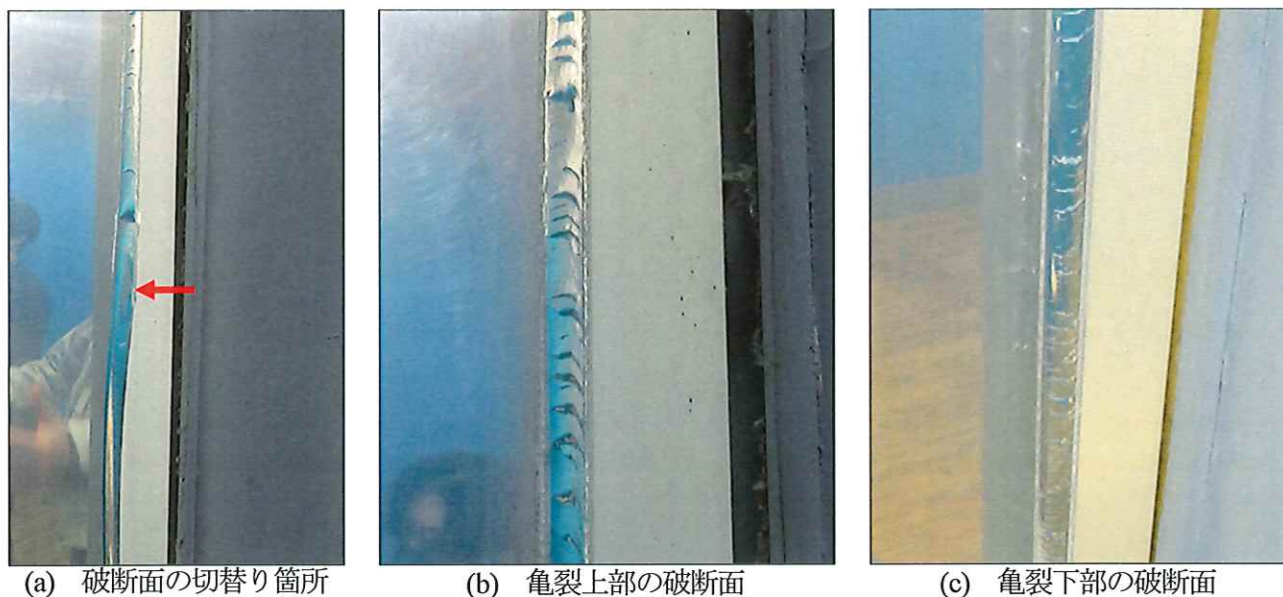


図 19 ふれあい水槽の破断面の様子

- (7) 図 19(a)の矢印で示した部分から上部と下部で、図 19(b)と図 19(c)に示すように、破断面の進展方向が異なる。恐らく図 19(a)の矢印部分を起点として、亀裂が上下に進展していると考えられる。より詳細な破面解析によって破壊起点を特定する。
- (8) 図 20 にアクリル樹脂内部のボイドもしくは異物の様子を示す。



図 20 アクリル樹脂内部のボイドもしくは異物の様子

- (9) 図 20 に破線で囲んだ部分、アクリル樹脂内部に 1mm 未満の点が多数認められる。これらがボイドなのか異物なのかは目視判断できない。亀裂発生箇所と少し位置が異なることから、亀裂発生の直接的な原因ではないと考えられるが、亀裂発生との関係性についても不明のため、詳細な分析の必要性については、今後の調査の進捗にて判断する。

次頁に続く

7. まとめと今後の調査方針

7.1 ビワコオオナマズ水槽

7.1.1 2023年3月14日実施現地調査まとめ

- (1) 破断面の交点から、破断面（A）が初期に発生・進展したと考えられる。
- (2) 破断面（B）とアクリル板接着部付近で接着面への破断が進展したと考えられる。
- (3) 破断面（B）と接着面が交差した後、破断面（C）が進展したと考えられる。
- (4) 破断面（A）と破断面（C）は滑らかな破断面で、破断面（B）は波紋状である。
- (5) 破断面（A）床側の躯体部分において、長さ約30 cmの放射状模様の破断面①が認められ、その中に観覧側から深さ方向に比較的滑らかな約1.5 cm破断面②が認められる。
- (6) 破片を本体側破断面に合わせると破断面にずれが認められ、内部ひずみの影響が考えられる。
- (7) 床側の躯体部材とアクリル水槽の接触部分において、水槽高さ方向のクラック頻発箇所が認められる。
- (8) クラック頻発箇所と重なるように灰色の帯状模様が認められる。クラックとの因果関係については今後調査が必要である。
- (9) シーリング材などの周辺部材について、破損現場の実物と設計変更後施工図で対応が明確にできないため、解体工事に立ち会って周辺部材の設置状況確認と回収が必要である。
- (10) 設計変更後施工図にはない形状のSUS巾木が存在しており、アクリル水槽と接触している。

7.1.2 今後の調査方針

- (1) 水槽破損状況の観察（2023年3月14日現地調査で実施済み）
- (2) 解体工事立ち合い、試料採取
 - アクリル水槽
 - ①破損品
 - 水槽本体側、破片側、各破断面から特徴的な部位を3箇所ずつ
 - 躯体部分アクリル樹脂クラック頻発箇所
 - 躯体部分アクリル樹脂クラック未発生箇所
 - ②新品（または保管品などの比較材料）
 - 周辺部材
 - ①現地品
 - ②新品（または保管品などの比較材料）
- サンプルサイズは要相談
- (3) 水槽破断面観察による破壊モードと破損起点の絞り込み、推定
- (4) 破損品の各種分析、機械的物性測定
 - 物理的、化学的観点で下記項目を実施
 - 水槽のポリマー定性
 - 水槽の化学的劣化分析
 - 水槽の機械的強度測定
 - 水槽の内部ひずみの比較測定
 - 水槽の耐薬品性調査
 - 周辺部材の成分分析
 - その他必要に応じて分析内容を検討
- (5) 比較材料（新品、保管品）の各種分析、機械的物性測定
- (6) (4)と(5)の比較にて破損品特有の事象を抽出
- (7) 抽出された事象から破損の推定要因を考察

7.2 ふれあい水槽

7.2.1 2023年3月14日現地調査まとめ

- (1) ふれあい水槽観覧側から見て左手角部の亀裂は、一部アクリル板接着面に沿っているが、大部分は一致せず、板厚方向を横断するように亀裂の進展も認められた。
- (2) 亀裂進展時に生じる模様形状が上下で異なり、その中央付近亀裂発生の起点が存在すると考えられが、詳細な破面解析が必要である。
- (3) アクリル板接着部付近で、1 mm 未満程度の点が多く視認できるが、それらがボイドか異物かの判別はできない。亀裂発生との関係性については不明ではあるが、必要に応じて分析を行う。

7.2.2 今後の調査方針

- (1) 水槽破損状況の観察 (2023年3月14日現地調査で実施済み)
- (2) 試料入手 (場合によっては立会解体実施)
アクリル水槽
 - ①破損品
左手側面の亀裂(A)付近、側面正常部、正面正常部
 - ②新品 (または保管品などの比較材料)
サンプルサイズは要相談
- (3) 水槽破断面観察による破壊モードと破損起点の絞り込み、推定
- (4) 破損品の各種分析、機械的物性測定
物理的、化学的観点で下記項目を実施
 - 水槽のポリマー定性
 - 水槽の化学的劣化分析
 - 水槽の機械的強度測定
 - 水槽の内部ひずみの比較測定
 - 付着物の確認分析
- (5) 比較材料 (新品、保管品) の各種分析、機械的物性測定
- (6) (4)と(5)の比較にて破損品特有の事象を抽出
- (7) 抽出された事象から破損の推定要因を考察

以上

(受付 No.242-22-1-0432)