

AE 計測による宇宙用高圧ガスタンクの損傷位置標定

Locating Damage Source in High Pressure Gas Tank Space Rocket using AE Measurement

福本 伸太郎	株式会社 IHI 検査計測	研究開発センター
西土 隆幸	株式会社 IHI 検査計測	研究開発センター センター長 工学博士
荒川 敬弘	株式会社 IHI 検査計測	フェロー 工学博士
大森 真実	株式会社 IHI 検査計測	検査事業部技術部
大森 征一	株式会社 IHI 検査計測	検査事業部技術部

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) で製造された宇宙用高圧ガスタンクを用いて、水耐圧試験を実施した。あらかじめタンク上部に損傷を付与しておき、損傷の進展や新たに発生した損傷箇所を、アコースティック・エミッション (AE) 法により特定した。損傷位置の標定には、タンク内部の水中を伝播する波を用いた。計測した AE (水中伝播波) による三次元位置標定を実施した結果、損傷箇所や破壊起点の位置標定ができていることを確認した。

We have been studying damage evaluation methods during the hydraulic test of the thin-walled CFRP pressure vessel using three-dimensional source location (3D source location). In this study, we conducted 3D source location using water propagation waves when the CFRP pressure vessel was damaged. Also, we evaluated the separation tendency of surface propagation waves and water propagation waves, thereby confirming the Kaiser effect. In order to improve the precision of 3D source location using water propagating waves, we demonstrated a new method, "Area locating." The results thereof confirmed that 3D source location using "Area locating" was consistent with fracture phenomenon. In addition, the new method was able to identify the origin of the fracture.

1. 緒 言

宇宙製品への炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 材の適用は、多くの例がある。宇宙製品のなかには、気蓄器と呼ばれる、衛星推進系の燃料タンクから燃料を排出するためにガスを蓄えておく高圧のタンクがある。

この製造および輸送過程において、タンクに損傷を与える可能性がある。または、それを補修する場合がある。その際、損傷部や補修後の健全性を確認する方法として AE (Acoustic Emission) 計測が有力である。特に、CFRP 製のタンクでは、製造後の耐圧試験、およびその後の非破壊検査によってタンクの健全性を確認している。耐圧試験における AE 計測は、試験中のどの段階でどこに損傷が生じたかを特定できる。このため、耐圧試験時において AE 計測が適用できる技術を確立しておく必要がある。

2. AE 法によるタンクの位置標定

AE 試験は圧力容器の健全性評価手法として普及しており、ASME (American Society of Mechanical Engineers) などの規格も制定されている^{(1)~(3)}。AE 試験では、AE パラメータ解析によって AE の発生位置を知ることが可

能であり、位置標定と呼ばれる。このときの AE パラメータとは、試験対象物に取り付けた複数の AE センサで検知した AE の発生数 (ヒット) から、同一事象ごとに分類し、各センサが検知した AE 波の到達時間差を示す。一般的に AE による位置標定には、対象物の表面を伝わる波 (表面伝播波) を用いて求められる^{(4)~(6)}。しかしながら、CFRP 材は音響異方性を有しており、一般的な位置標定方法の適用が難しい。

過去、CFRP 製薄肉タンクの水耐圧試験において、人工的に発信した AE を用いて、AE が水中を良く伝播することを確認した。その水中を伝播した波 (水中伝播波) を複数の AE センサで検知することによって、三次元位置標定の新たな知見を示した⁽⁷⁾。

本稿においては、この構造に類似した炭素繊維巻き厚が 6 mm の CFRP 材のタンクを作製し、水耐圧試験を実施した。なお、人工的に発信した AE ではなく、昇圧によって損傷が進展する際に発生する AE を用いた。位置標定は、水中伝播波による三次元とし、タンクに人工きずを付与した後の耐圧試験結果を用いた。また、位置標定の精度向上を目指した。

3. 試験概要

3.1 CFRP 製タンクの仕様

第1図に薄肉CFRP製タンクを示す。外観を第1図-(a)に、拡大表面を-(b)に示す。また、このタンクの仕様を以下に示す。なお、保証圧とはメーカーが容器の健全性を保証する圧力であり、容器が破断する圧力ではない。

炭素繊維巻き厚	6 mm
寸法	
外径	260 mm
内径	218 ± 2 mm
全長	1 150 mm
ライナ樹脂材料	ポリエチレン樹脂
口金材質	アルミニウム 6061-T6 (JISH0001)
保証圧	7 ~ 8 MPa
製造条件	T700 相当炭素繊維をフィラメントワインダ (FW) 加工によってヘリカルフープ巻き仕上げ→樹脂ライナにフルラップ巻き付け加工→熱硬化処理→製造後、保証圧まで加圧

なお、T700 とは A 社の炭素繊維の商品名であり、繊維や糸の太さを表す織度は 800 g/1 000 m である。

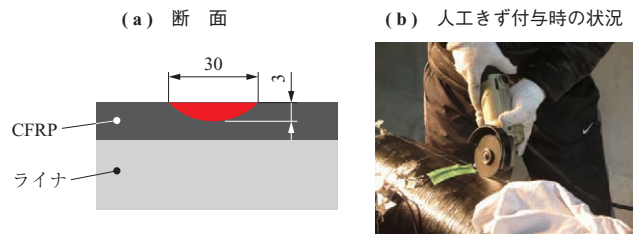
3.2 試験装置

試験装置および使用センサの仕様を以下に示す。

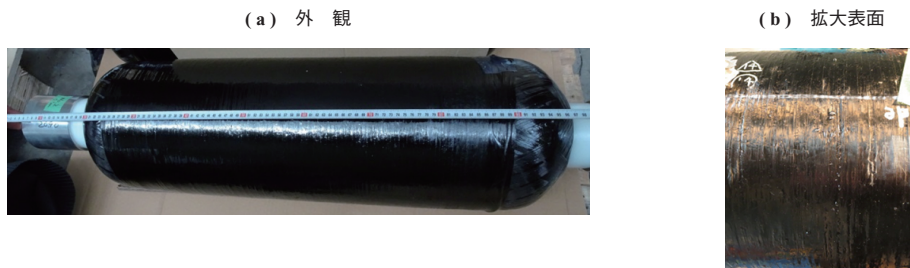
AE 装置	AMSY-6 MB19 (Vallen 社:ドイツ)
AE 発信源	VS150-RIC (Vallen 社:ドイツ)
AE センサ	周波数帯域 100 ~ 500 kHz AE144A (Vallen 社:ドイツ)
プリアンプ	34 dB AEP5 (Vallen 社:ドイツ)

3.3 センサ配置および人工きず

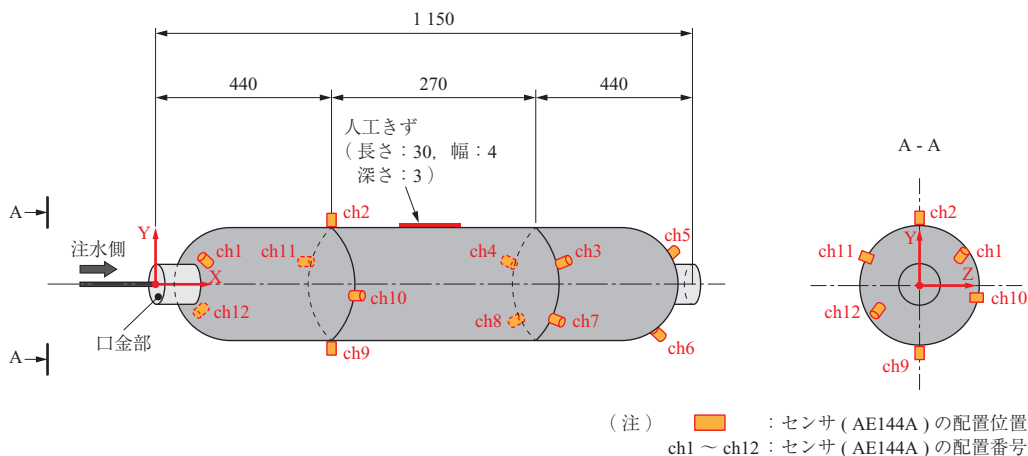
第2図にタンクに取り付けたセンサ配置および人工きずを付与した箇所を示す。本試験では、12 個のセンサを使用した。また、第3図にグラインダによる人工きずを示す。



第3図 人工きず (単位: mm)
Fig. 3 Damage point (unit: mm)



第1図 薄肉CFRP製タンク
Fig. 1 Thin-walled CFRP pressure vessel



第2図 センサ配置および人工きず (単位: mm)
Fig. 2 Sensor location and damage point (unit: mm)

示し、人工きず付与時の状況を第3図-(b)に示す。

3.4 水耐圧試験

第4図に水耐圧試験の工程を示す。水耐圧試験 No. 1 では、13 MPa までの昇圧を2回実施した。その後、タンクへ人工きずを付与した。水耐圧試験 No. 2, および水耐圧試験 No. 3 では、13 MPa までの昇圧を1回ずつ実施した。最終的に水耐圧試験 No. 4 では、タンクが破断するまで昇圧させた。

4. 試験におけるタンクの損傷

4.1 カイザー効果の確認

カイザー効果とは、先行荷重を除荷し、再度負荷を掛けるときに試験対象物が健全であれば先行荷重に至るまでは、AE がほとんど検出されない現象をいう。これは、破壊の進行中のような構造的に不安定な段階では存在しないので、構造安定性の指標として試験に利用できる⁽⁸⁾。

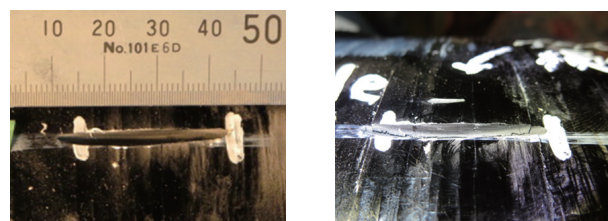
第5図に水耐圧試験 No. 1 および No. 2 における、1秒当たりの AE ヒット数を示す。なお、緑線は水圧を示す。横軸に試験時間、縦左軸にヒット数を、縦右軸に水圧を示す。第5図から、水耐圧試験 No. 1 では13 MPa の昇圧を2回繰り返しており、2回目の昇圧過程において、

13 MPa までにヒットがなく、カイザー効果が成立しているのを確認した。なお、2回目の13 MPa 付近(360 s 辺り)で AE ヒットが見られるが、圧力が不安定で、13 MPa より大きくなったためである。人工きず付与後の水耐圧試験 No. 2 では8 MPa 以降でヒットが計測されており、カイザー効果が不成立であることが確認できた。これは、13 MPa までの昇圧過程において、新たなき裂が発生し、タンクの損傷が進展したためであると考えられる。

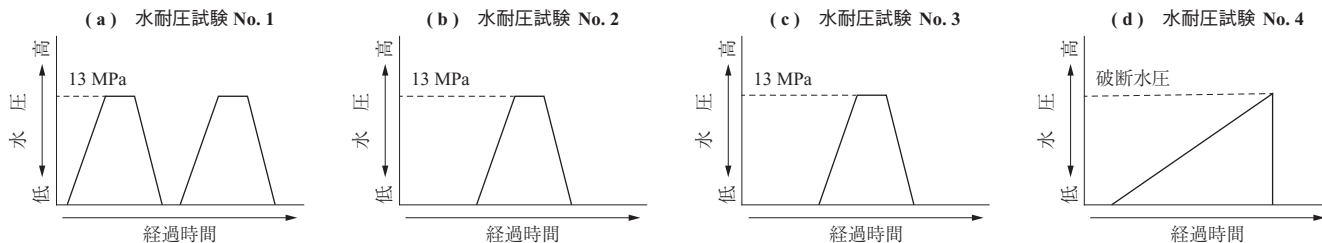
4.2 損傷箇所の変化

第6図に人工きず付与後(- (a)), および水耐圧試験 No. 2 後(- (b)) の損傷箇所の変化を示す。第6図から、水耐圧試験 No. 2 後、人工きず箇所の底面にき裂が発生していたことが確認できた。さらに、人工きず箇所端

(a) 人工きず付与後 (b) 水耐圧試験 No. 2 後

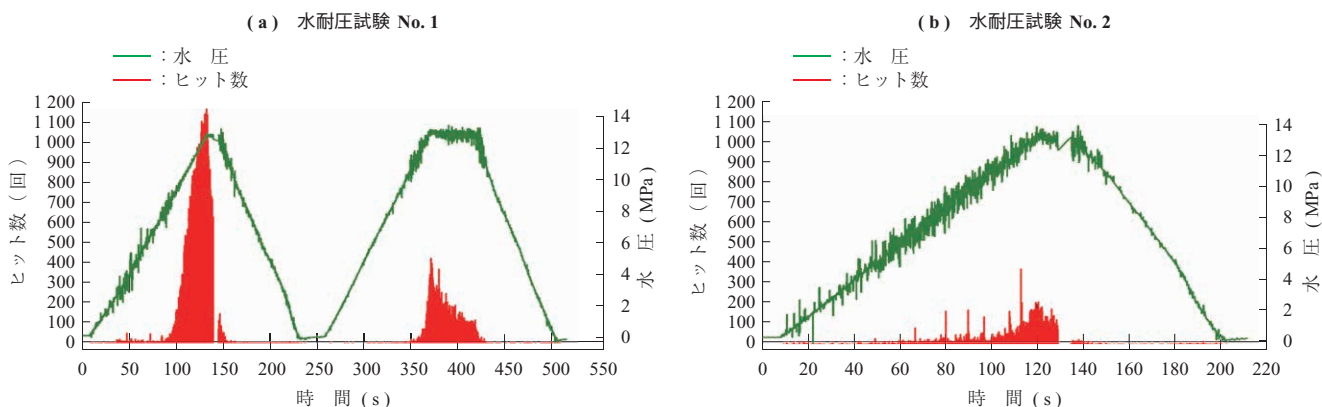


第6図 損傷箇所の変化
Fig. 6 Change of damaged point



(注) (b), (c), (d): タンクの人工きず付与後を示す。

第4図 水耐圧試験の工程
Fig. 4 Water propagation test



第5図 1秒当たりの AE ヒット数
Fig. 5 AE Hits per second

部から、タンクの周方向に進展していたことが確認できた。

5. 水中伝播波による三次元位置標定

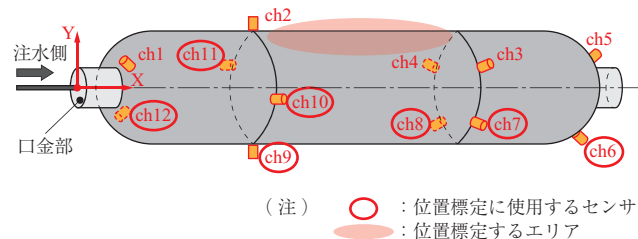
5.1 表面伝播波と水中伝播波の分離

本稿における三次元位置標定は、水中を伝播した AE データのみを用いる必要がある。しかしながら、本試験で計測した AE データは表面伝播波と水中伝播波が混在していた。計測条件の設定によって、水中伝播波のみを計測することは困難であり、計測対象が変わるごとに設定変更が必要となる。このため計測後の位置標定解析において、両者を分離した。第 7 図にエリア標定を示す。

音源と受信センサとの角度を考慮し、ある領域に対して、解析に用いる受信センサを決めることで分離を試みた。

5.2 水中伝播波の指向性

解析に用いる受信センサを決めるためには、水中伝播波の指向性を考慮する必要がある。発信源を VS150-RIC (振動子直径 $\phi 20$ mm)、受信センサを AE144A (振動子直径 $\phi 10$ mm) として、発信源と受信センサの角度と相対エコー高さの関係を理論値として算出した。なお、 $\phi 20$ mm の VS150-RIC を発信源としたのは、 $\phi 10$ mm の

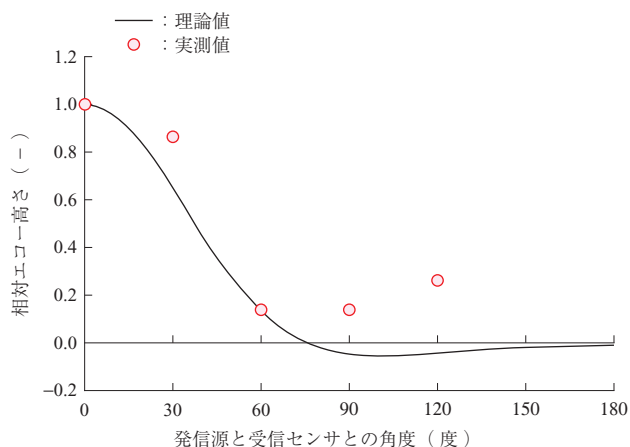


第 7 図 エリア標定
Fig. 7 Area location

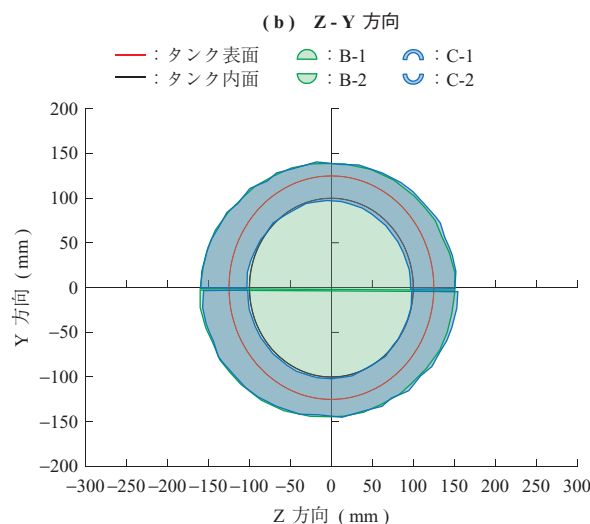
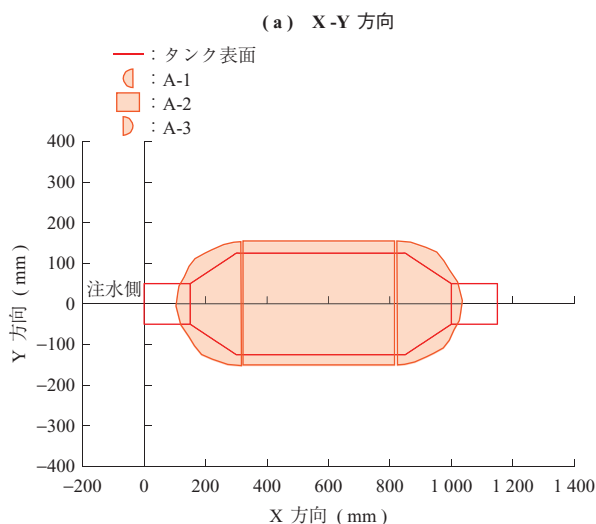
AE144A と比べ振動子径が大きく、指向性が鋭いため、水中伝播波の指向性を得やすいからである。第 8 図に発信源と受信センサの角度と相対エコー高さの理論値と実測値を示す。第 8 図から、実測値と理論値では 90° まで近似した値となっており、特に 60° までは非常に近い値である。この結果から、本タンクにおいては、AE の発信源と受信センサとの角度が $0 \sim 60^\circ$ において水中伝播波を得られると考えた。

5.3 エリア標定

VisualAE ソフトウェア (Vallen 社: ドイツ) を用いて、位置標定をする領域を決めた。第 9 図にポリゴンプロセッサを示す。第 9 図 - (a) は、容器を正面方向から見たときは 3 分割に、- (b) は、容器を注水側から見たときには 2 分割にした。これらの分割した領域をそれぞれ組み合わせ、計六つの領域 (① A-1 と B-1, ② A-2 と C-1, ③ A-3



第 8 図 発信源と受信センサの角度と相対エコー高さ
Fig. 8 Angle of source/receiving sensor and echo height

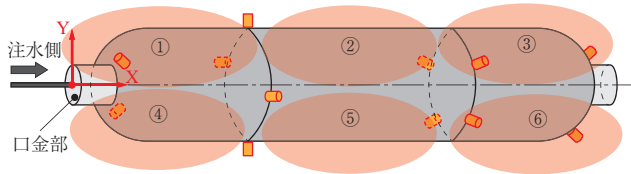


第 9 図 ポリゴンプロセッサ
Fig. 9 Polygon processor

と B-1, ④ A-1 と B-2, ⑤ A-2 と C-2, および⑥ A-3 と B-2)とした。第 10 図に分割した六つの領域を示す。この位置標定法をエリア標定と呼ぶことにした。

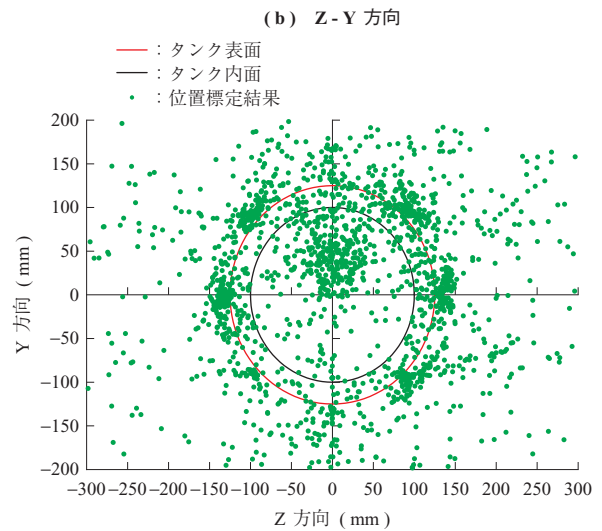
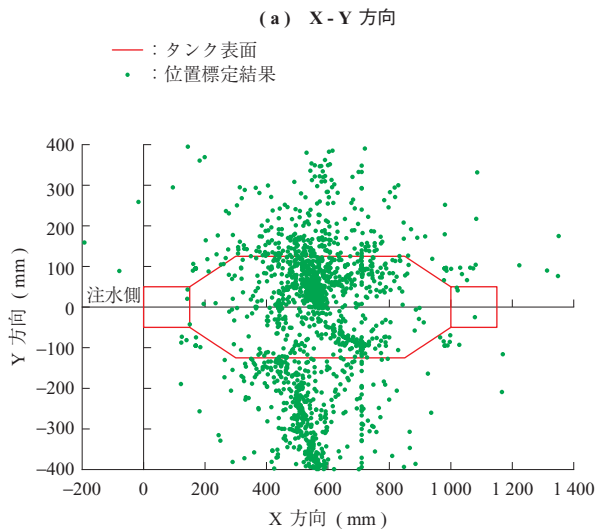
5.4 水中伝播波による三次元位置標定結果

前項で示した六つの領域は、それぞれ指定したセンサによって、位置標定された。たとえば、第 7 図における、

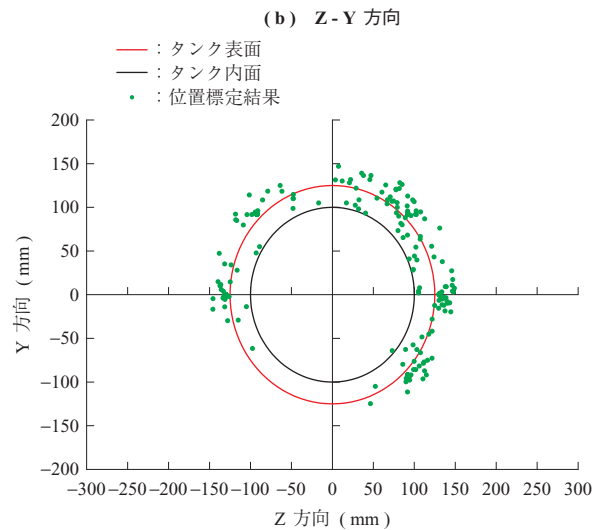
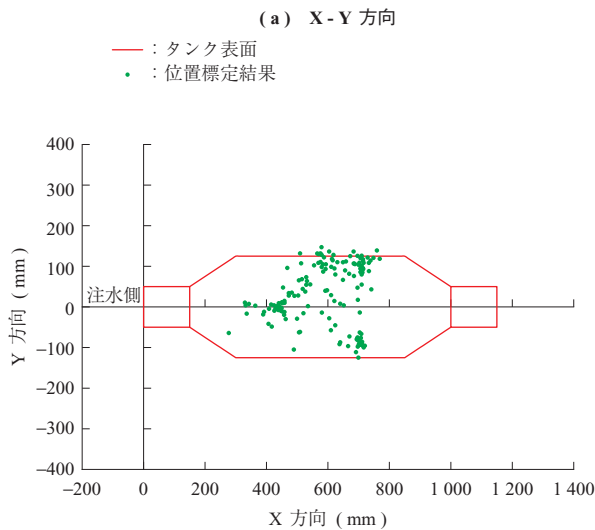


(注) ①~⑥: 位置標定とする各領域

第 10 図 分割した六つの領域
Fig. 10 Six divisions



第 11 図 すべてのデータによる三次元位置標定
Fig. 11 3D source location using all AE data



第 12 図 エリア標定による三次元位置標定
Fig. 12 3D source location using "Area locating"

タンク上部の赤い領域ならば領域 ③に該当し、ch6 ~ 12 のセンサによって位置標定されている。

第 11 図に、すべてのデータによる三次元位置標定、第 12 図にエリア標定による三次元位置標定の結果を示す。第 11 図は、すべての計測データを用い、領域分割も行っていない結果であり、第 12 図は、エリア標定による結果である。第 11 図 - (a) および第 12 図 - (a) は、横軸に X 方向、縦軸に Y 方向として注水側を左側とした平面図である。第 11 図 - (b) および第 12 図 - (b) は横軸に Z 方向、縦軸に Y 方向として注水側から見た平面図である。図中の緑点が位置標定された結果であり、これらの位置が AE の発信源を示している。

第 11 図から、標定結果がタンク上部に集中しているこ

とが分かる。しかしながら、本来 AE が発生することのないタンク外や水中においても多数の結果がある。一方、**第 12 図**では、タンク内外の標定結果がなくなり、タンク上部に集中していることが分かる。

以上の結果から、水中伝播波による三次元位置標定において、以下の知見を得た。

- (1) 水耐圧試験中において、水中を伝播する AE 信号を用いて三次元位置標定が可能である。
- (2) エリア標定によって、表面伝播波と水中伝播波を良く分離でき、標定結果が損傷箇所近傍のタンク上部に集中した。

6. 結 言

炭素繊維巻き厚が 6 mm の CFRP 製タンクの水耐圧試験において、昇圧によって損傷が進展する際に発生し、水中を伝播した AE による三次元位置標定を実施した。この結果、水中を伝播する AE 信号のみを使用する三次元位置標定（エリア標定）を行うと、標定結果が損傷箇所近傍のタンク上部に集中した。本稿は定性的な評価にとどまっているが、今後 CFRP 材の破壊機構を把握し、位置標定が適用できる損傷の大きさを検討していきたい。

参 考 文 献

- (1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V Article 12 : Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels during Pressure testing American Society for Mechanical Engineers Latest edition

- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V Article 11 : Acoustic Emission Examination of Fiber Reinforced Plastic Vessels American Society for Mechanical Engineers Latest edition
- (3) 一般社団法人日本高圧力技術協会編：HPIS G 110 TR 2005, AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する技術指針 社団法人日本高圧力技術協会 2005 年
- (4) 金子敦史, 竹本幹男：液体貯蔵円筒タンクの AE 伝播挙動 非破壊検査 第 51 号 第 11 号 2002 年 11 月 pp. 718 - 725
- (5) S. Murakami, K. Homma, T. Koike and M. Yamada : AE Source Location Using Neural Network on AE Evaluation of Floor Conditions in Above-Ground Tank Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering Vol. 1 No. 7 (2007. 3) pp. 919 - 930
- (6) 中村英之, 荒川敬弘, 関根和喜, 笠井尚哉, 前田守彦, 鈴木裕晶：タンク AE 計測における液滴ノイズの識別及び除去方法の検討 圧力技術 第 46 巻 第 1 号 2008 年 pp. 26 - 31
- (7) 中島富男, 川崎 拓, 佐藤明良：薄肉 CFRP 圧力容器耐圧試験における AE 音源位置標定に関する実験的考察 日本機械学会論文集 A 編 79 巻 797 号 2013 年 1 月 pp. 115 - 118
- (8) 一般社団法人日本非破壊検査協会編：アコースティック・エミッション試験Ⅱ 2008 年 12 月 p. 8