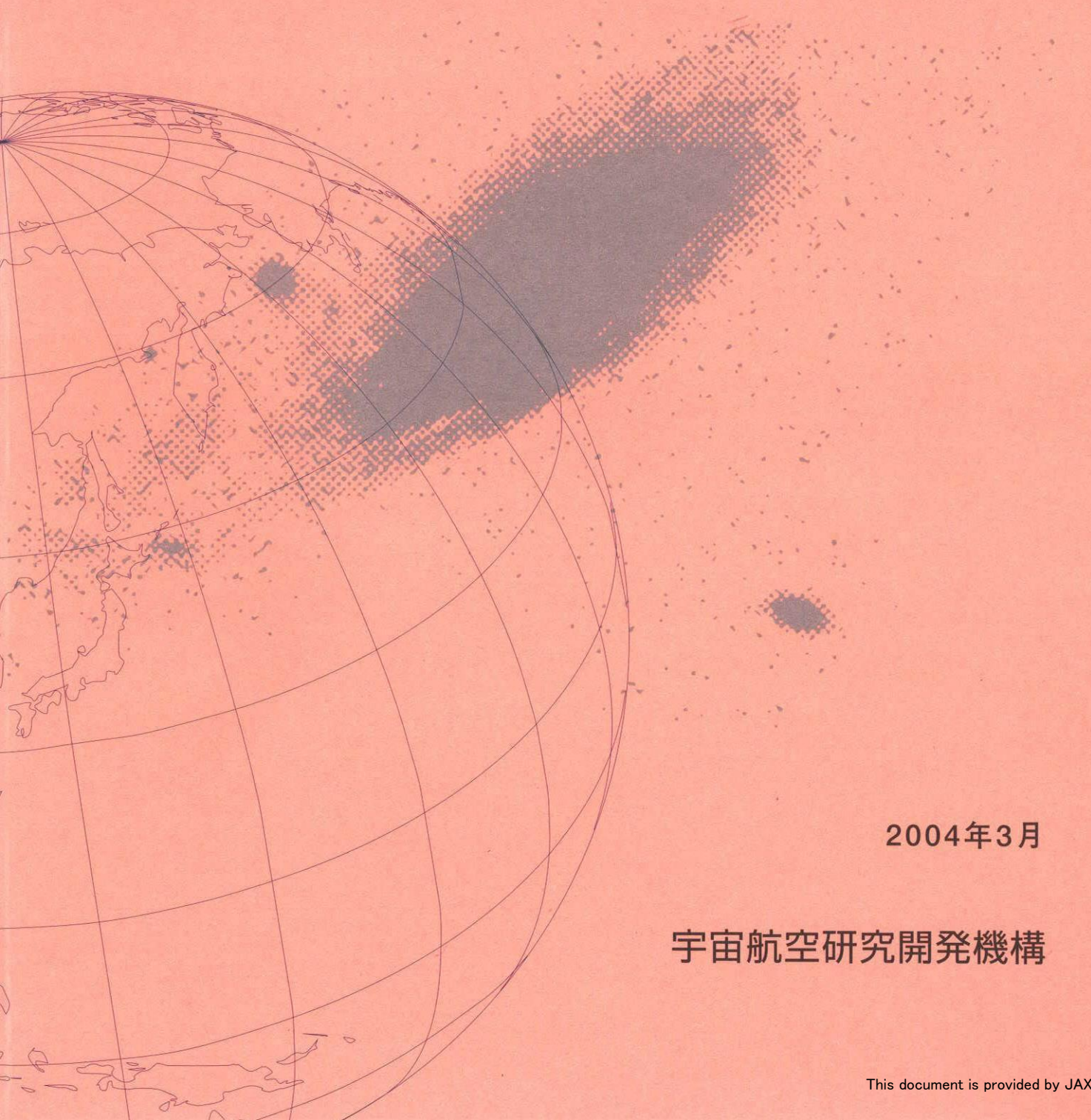


宇宙航空研究開発機構研究開発資料

AEを用いた極低温用FRPタンクの音源位置標定法の開発



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

AEを用いた極低温用FRPタンクの音源位置標定法の開発

Development of the Acoustic Emission Source Location
Method for the Cryogenic FRP Tank

水谷 義弘

Yoshihiro MIZUTANI

総合技術研究本部 システム評価技術グループ
Space Systems Evaluation Engineering Group
Institute of Space Technology and Aeronautics

2004年3月

March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

和文抄録	<p>構造グループでは CFRP 製タンクの材料レベルでの研究を行っているが、どのような環境下でマイクロラックが発生し、成長するのかを明らかにすることは最重要課題である。このマイクロラックの発生をモニタリングする手段として AE 法の適用を考えているが、従来の AE 法では以下の理由から極低温タンクの音源（損傷）位置標定を行うことはできない。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) タンクが薄板構造物であることから、発生する AE がラム波（板波）として伝播し、分散性波動としてセンサーへ到達する。 2) CFRP は顕著な速度異方性があるため、伝播方向によって AE の速度が変化する。 3) タンクの種類によっては水中を伝播する AE と側壁を伝播する AE が同一時間帯にセンサーに到達する。 4) AE センサーが低温環境にさらされることによって検出感度が低下する。 5) タンクが冷却されることによってタンクの材質が変化し、AE の伝播特性が変化する。 <p>本研究では基礎研究として 1) と 2) を考慮にいたした AE モニタリングアルゴリズムの構築を試みた。はじめに CFRP タンクの速度異方性を測定するとともに、水中を伝播する AE の影響を調べた。次に、4つのセンサーに囲まれたモニタリングゾーンの外で発生した AE をゾーン内で発生した AE から分別する方法を考案した。ゾーン内で発生したものについては特定周波数の到達時間差から音源位置を標定する方法を構築した。最後にタンク全体の様々な位置で人口的に AE を励起して AE モニタリングを行った。構築した手法を用いて音源位置標定を行い、手法の有効性を検討した。</p> <p>※本資料の内容は日本実験力学学会の年次講演会で発表する。</p>
和文キーワード	<p>Acoustic Emission FRP tank Wavelet Transform</p>

目 次

1. 緒論.....	1
2. 実験装置およびA Eの速度異方性の測定.....	1
3. 水中伝播A Eの影響調査.....	5
4. 音源位置標定法の構築及び人工音源を用いた有効性の検証.....	6
5. まとめ.....	11
6. 今後の課題.....	11

1. 結 論

宇宙輸送コストの低減を可能にする単段式の再使用型宇宙輸送機を実現するためには、総重量の約 1/3 を占める燃料タンクを軽量化する必要がある。そこで当事業団では CFRP 製タンクの研究を行っているが、最も問題となるのは極低温下で発生したマイクロクラックが成長してリークパスとなり、燃料が漏洩することである。従って、どのような環境下でマイクロクラックが発生し、成長するのかを明らかにすることは最重要課題であり、このマイクロクラックの発生をモニタリングする手段として AE 法の適用を考えている。しかし、従来の AE 法では以下の理由から極低温タンクの音源（損傷）位置標定を行うことはできない。

- 1) タンクが薄板構造物であることから、発生する AE がラム波（板波）として伝播し、分散性波動としてセンサーへ到達する。
- 2) CFRP は顕著な速度異方性があるため、伝播方向によって AE の速度が変化する。
- 3) タンクの種類によっては水中を伝播する AE と側壁を伝播する AE が同一時間帯にセンサーに到達する。
- 4) AE センサーが低温環境にさらされることによって検出感度が低下する。
- 5) タンクが冷却されることによってタンクの材質が変化し、AE の伝播特性が変化する。

本研究では基礎研究として 1) と 2) を考慮にいたした AE モニタリングアルゴリズムの構築を試みた。はじめに CFRP タンクの速度異方性を測定するとともに、水中を伝播する AE の影響を調べた。次に、4 つのセンサーに囲まれたモニタリングゾーンの外で発生した AE をゾーン内で発生した AE から分別する方法を考案した。ゾーン内で発生したものについては特定周波数の到達時間差から音源位置を標定する方法を構築した。最後にタンク全体の様々な位置で人工的に AE を励起して AE モニタリングを行った。構築した手法を用いて音源位置標定を行い、手法の有効性を検討した。

2. 実験装置および AE の速度異方性の測定

2.1 実験装置及び座標系

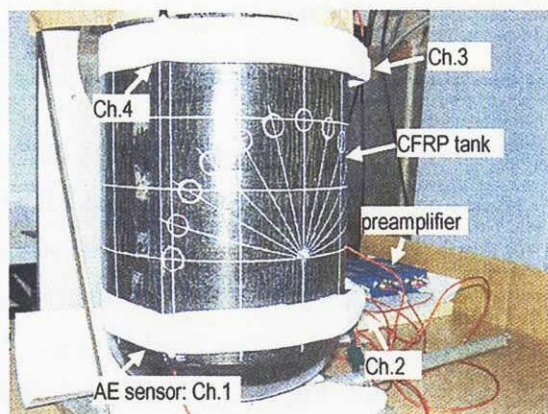


Fig.1 The CFRP tank and AE monitoring system. The outside diameter of the tank is 210mm. 4-channels of 150 kHz-resonance type AE sensors were used.

試験片は外径 210mm の CFRP タンクで、フィラメントワインディング法で製作されたものである。タンクの上下部はドーム状になっており、下部は金属製の栓で止められている。タンクの内側は金属箔板を介してポリマー樹脂が塗布されている。試験片表面には多数の微小亀裂が存在している。タンク及び実験装置の外観を Fig.1 に示す。タンク表面に放射状に描かれている線は AE の速度異方性を測定する際に使用したものである。タンクの上部と下部にある白いバンドは AE センサーを固定するために用いた。4つの AE センサーで検出した信号は Fig.1 右下のプリアンプで 40dB 増幅後に A/D コンバータに取り込んだ。サンプリング条件はインターバル 250[ns], サンプリングサイズ 4096[points]とした。

タンクの概略図と座標系を Fig.2 に示す。一辺 200mm の正方形の頂点位置に Ch.1~Ch.4 の AE センサー (φ19mm、PAC 社 : Type R15) を配置し、このセンサーに囲まれた範囲を音源位置標定の対象範囲とした (以後モニタリングゾーンと呼ぶ)。座標系は Ch.1 センサーの位置を原点(x,y)=(0,0)とする右手座標系とした。

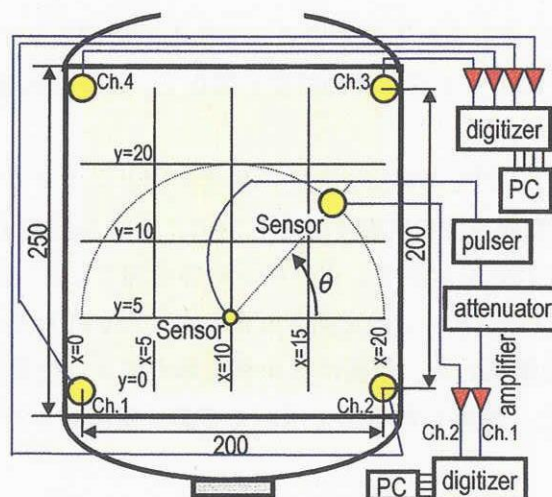


Fig.2 Schematic illustration of experimental setup and coordinate system. Detected AE were digitized by A/D converter and fed to the computer. Attenuated high-voltage pulse was used as trigger when the AE velocities were measured.

2.2 速度異方性の測定

音源位置標定を行う為の基礎データとして AE の速度異方性を測定した。Fig.2 に示すように (x,y)=(10,5)の位置に小型 AE センサー (φ5mm、PAC 社 : Type PICO) を取り付け、300V のパルス電圧を負荷して、人工的に AE を励起した。励起した AE を $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ まで 15° おきに測定した。伝播距離は 100mm とした。検出した AE はプリアンプで 40dB 増幅後にデジタイザーで取り込んだ。また、トリガー信号として Ch.1 にパルサーから分岐した信号をアテニューエータで減衰させて入力した。検出した AE の一例を Fig.3 に示す。なお、時間軸の 0[s]は AE の発生時刻 (トリガー入力時刻) となっている。検出した AE はタンクが薄板であることを反映してラム波 (板波) となった。ラム波には大きく分けて Fig.4 に示すような対称モード (S-mode) と非対称

モード (A-mode) の二つの伝播モードがあるが、はじめに速度の速い S-mode が到達し、その後に A-mode が到達している。同一モードであってもラム波は周波数によって伝播速度が異なるために、分散性の波動となった。また、CFRP タンクの異方性の影響を受けて AE は伝播角度 (θ) によって大きく変化している。従って CFRP タンクでモニタリングした AE を解析する際には 1) AE がラム波として伝播していることと 2) 異方性の影響を受けていることを考慮に入れる必要がある。

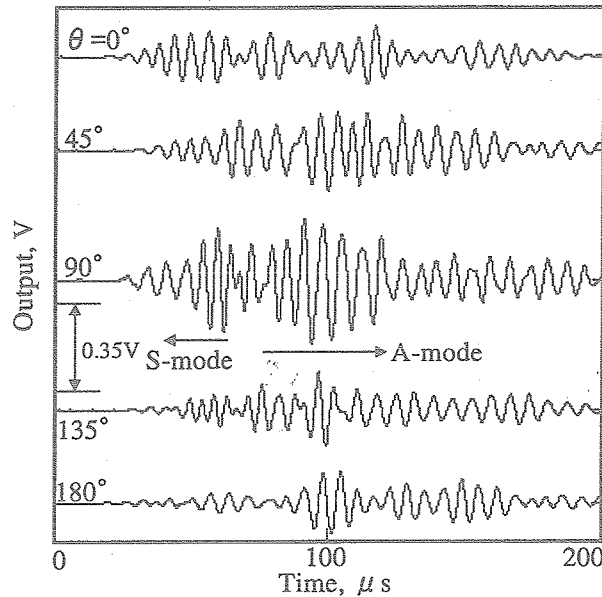


Fig.3 Detected AE waves at variable propagation angle. AEs were induced by artificial source. Propagation length was 100mm.

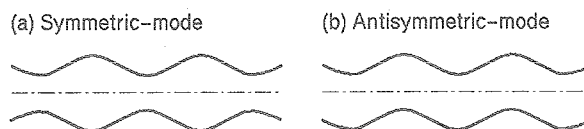


Fig.4 Schematic illustration of 0-th order lamb wave propagation

ラム波 AE の伝播速度は周波数依存性があることから、連続ウェーブレット変換 (マザーウェーブレットにはガボール関数を用いた) で特定周波数成分 (90kHz と 150kHz) の情報を抽出した。Fig.3 の AE をウェーブレット変換した結果を Fig.5 に示す。それぞれの最大ピーク到達時間と伝播距離から伝播速度を求めた。先に述べた 2 つの周波数以外にも様々な周波数の情報を取り出して速度の決定を試みたが、共振周波数に近いところでは同じ出力レベルのピークが多数存在し、信頼性のある速度を求めることができなかつた。(たとえば 150kHz の 0° のようにピークが多数存在する。) ウェーブレット変換を用いて求めた速度と比較するために、初動到達時間と最大ピーク到達時間 (図中の \circ の位置) から伝播速度を求めた。測定した伝播速度を Fig.6 に示す。初動波到達時間から求めた速度 (\bullet) は繊維方向の影響を反映して周期的に変化している。この

速度分布を関数近似して音源位置標定に利用することもできるが、実際の試験で検出される AE には初動波が読み取りにくいものが多数存在するため、あまり実用的ではない。一方、最大ピークの到達時間 (■) および 150kHz のウェーブレット変換のピーク到達時間から求めた速度 (□) はばらつきが多いため、位置標定には使えない。90kHz のピーク到達時間から求めた速度 (○) はほぼ一定の速度 (平均速度は 1124m/s) となっており、90kHz 成分の速度を使用すれば CFRP の異方性を気にせず音源位置標定ができることが分かった。Fig.7 に測定した 90kHz 成分の速度と平均値 (1124m/s) を極座標表示して示す。測定値と平均値の平均誤差は 33m/s で最大誤差は 15° と 150° の時の 66m/s であった。多少大きな差ではあるが、タンク内で繊維方向にばらつきがあることや、実用的には損傷が発生したおおよその位置が分かれば十分であることから、1124m/s 一定として以後の解析を行った。

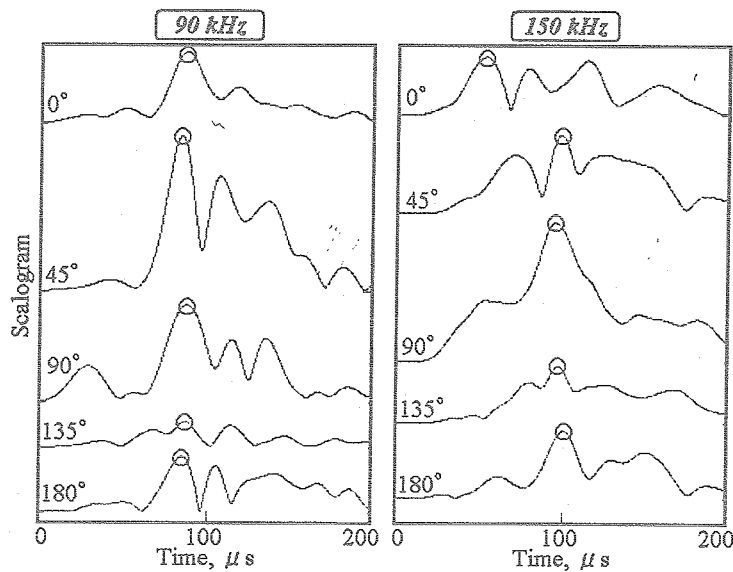


Fig. 5 Extracted 90kHz- and 150kHz-wavelet coefficients. Open circles indicate arrival times of the maximum peaks. We used 90kHz wavelet coefficients for source location.

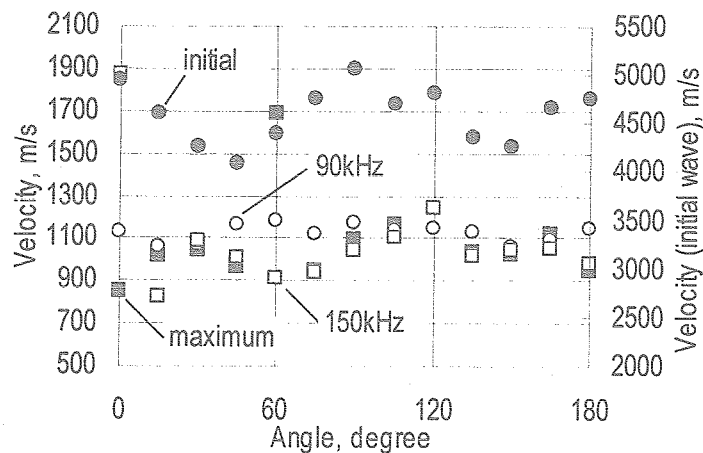


Fig. 6 Measured AE velocities at variable angle. (Used arrival time of ●: initial wave, ○: wavelet coefficients of 90kHz, □: wavelet coefficients of 150kHz, ■: maximum peak)

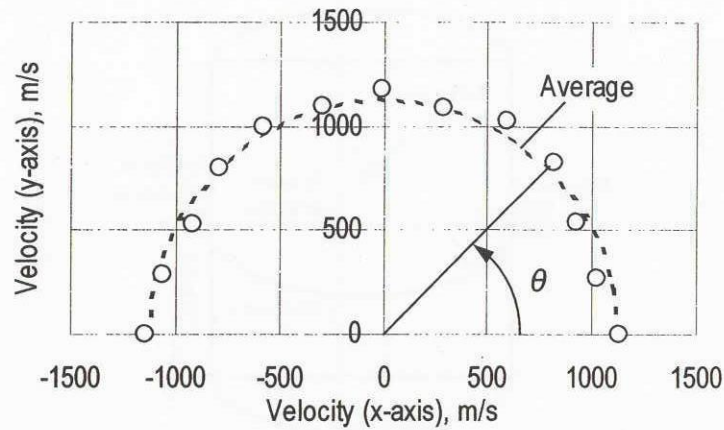


Fig.7 Orientation dependence of 90kHz Lamb velocities in CFRP tank. Dotted line indicate average velocity (=1124 m/s) of measured data.

3. 水中伝播 AE の影響調査

タンクの形状や種類によってはモニタリングゾーンの反対側で AE が発生した時に、水中を伝播してくる AE と側壁を伝播してくる AE が同一時間帯にセンサーに到達するため、これを考慮にいれた解析をする必要がある。例えば、Fig.8 は直径 84mm のスチール製円筒タンクに水を入れた状態と空の状態人工的に AE を励起して、タンクの反対側で検出した例であるが、側壁を伝播してきたラム波の S-mode と A-mode の間の時間帯に水中伝播 AE が到達している。

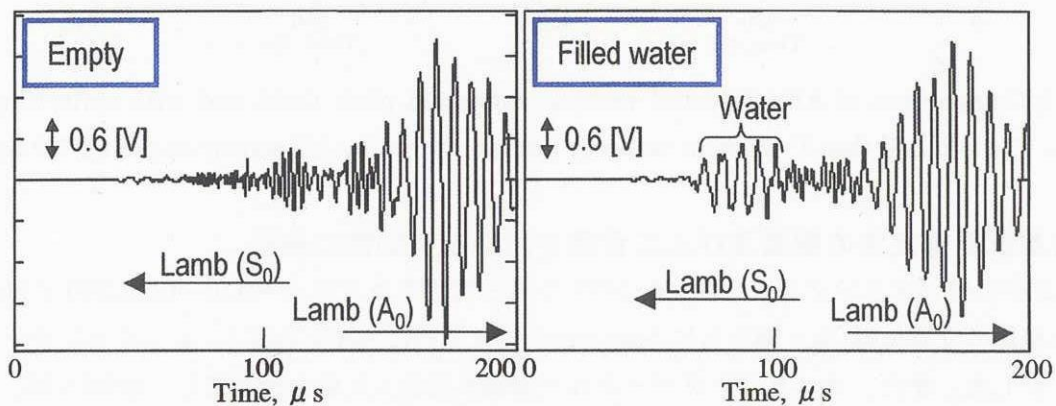


Fig.8 Comparison of the AEs detected on the ϕ 84mm steel tank. (left: empty tank, right: tank with water)

本研究で用いた CFRP タンクが水中伝播 AE によって受ける影響を調査するために Fig.9 に示すような実験を行った。タンクに水を満たした状態でタンクの片側から AE を人工的に励起し、反対側で検出した。次にタンク内に反射板を設置して水中伝播 AE が検出側センサーに到達しないようにして、同じ条件で AE を検出した。検出波形を Fig.10 に示す。2つの波形が完全な同一波形となったことから、本研究で用いた CFRP タンクでは水中伝播 AE の影響を考慮しなくてもよいことが分かった。

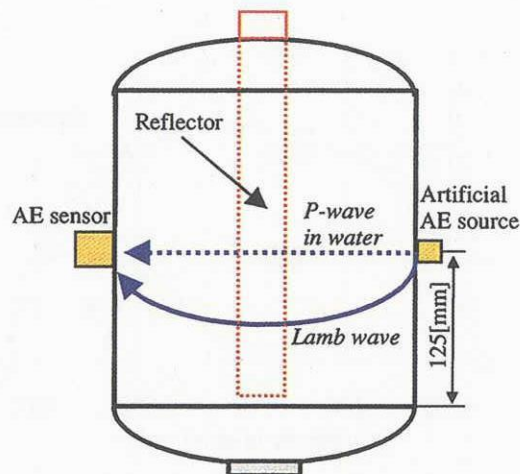


Fig. 9 Experimental setup for investigating effect of P-wave AE in water to the AE monitoring.

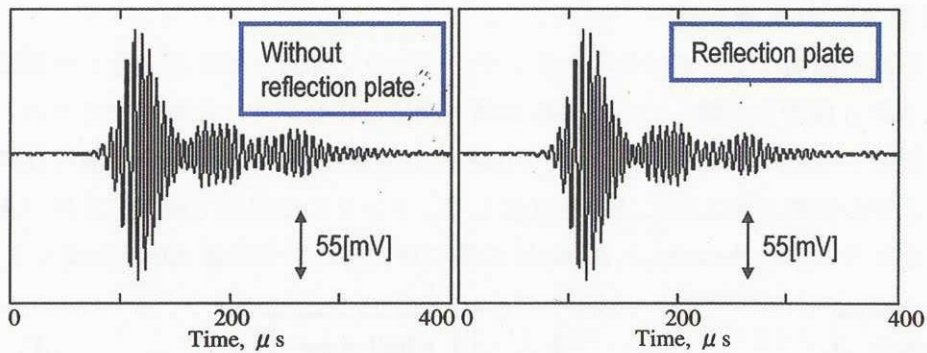


Fig. 10 Comparison of AEs detected without reflection plate (left) and with reflection plate (right). It is noted that P-wave in water is not monitored by AE sensor in the CFRP tank.

4. 音源位置標定法の構築及び人工音源を用いた有効性の検証

Fig.2 中のモニタリングゾーン内 (4つのセンサーで囲まれた $(x,y)=(0,0)\sim(200,200)$ の範囲) における座標の交点位置 (x,y 軸ともに 5cm step) で人工的に AE を励起し、4つのセンサーでモニタリングした。また、モニタリングゾーン外で損傷が発生した場合を想定し、 $x=25\sim65$ 、 $y=5\sim15$ mm の範囲についても 5cm step で人工的に AE を発生させてモニタリングを行った。

4.1 モニタリングゾーン外から到達する AE の分別

モニタリングゾーン外で発生した AE は、ゾーン内で発生した AE とは区別し、間違った位置標定結果をださないようにする必要がある。位置標定では、AE の各センサーへの到達時間差を情報として用いるが、モニタリングゾーン外で AE が発生した場合にも、ゾーン内で発生した場合と同じ時間差になることがある。例えばモニタリングゾーンの中心部である $(x,y) = (10,10)$ のちょうど反対側で AE が発生した場合には、各センサーへの AE の到達時間差は 0[s] となり、モニタリングゾーンの $(10,10)$ で発生した場合と区別することはできない。そこで、ラム波が分散性の

波動であり、伝播距離が長くなればなるほど分散の度合いが大きくなることを利用してゾーン外で発生した AE を分別する方法を考案した。分散の度合いを表す指標として AE の出力が最大値の 10%を超えた時間から 10%以下になるまでの時間を用いた。(以後この時間を AE の持続時間と呼ぶ) はじめに、検出した 4 つの AE 信号の中から最も出力の大きいチャンネルを決定し、その信号の持続時間を求めた。一例として、(x,y)=(15,15)と(30,15)の位置で人工的に AE を励起した時の結果を Fig.11 に示す。(15,15), (30,15)ともに ch.3 の信号が最大となった。モニタリングゾーン外の AE の持続時間 (Fig.11 の下) がゾーン内 (上) のものと比較して長くなっていることが分かる。

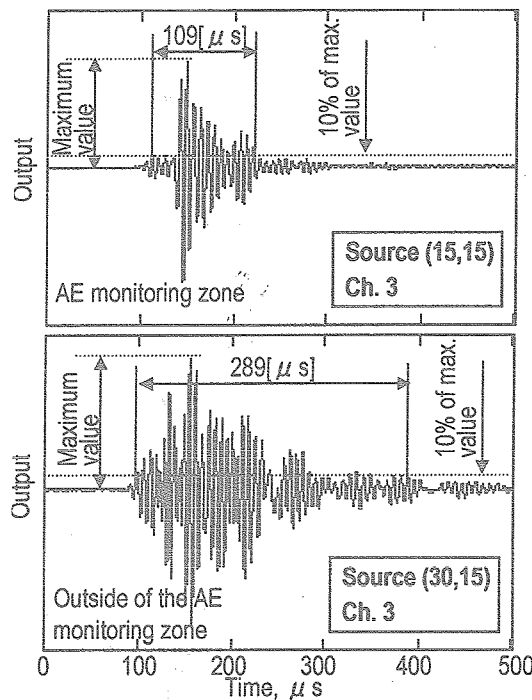


Fig.11 Procedure for determining AE duration time. The duration time was used for separating AEs from outside of the AE monitoring zone.

Table 1 Duration times of the AEs in monitoring zone
Unit: μs

y \ x	0	5	10	15	20
20		123	135	115.25	
15	111	156.75	171	109	121.5
10	173	212.5	159.25	111.25	149
5	166	163.25	141	162	131.25
0		98.75	218	70.5	

モニタリングゾーン内で AE が発生した場合の持続時間を測定した。その結果を表 1 に示す。(x,y)=(5,10)、(10,0)の値のみ例外的に 212.5、218[μs]と大きくなったが、それ以外は最大でも 173[μs]となった。次にモニタリングゾーン外でも持続時間を測定し、173[μs]と 218[μs]をしきい値として、これよりも短い持続時間のものをそれぞれ“○”、“■”とし、それ以外のもの(持

続時間が長いもの)を“●”としてモニタリングゾーン外で発生した AE の分別を試みた。結果を Fig.12 に示す。X=25[cm]軸上ではモニタリングゾーンに近いためにモニタリングゾーン内と判定されたが、”■“もゾーン外とすれば、それ以外の箇所ではこの方法でほぼ分別ができた。モニタリングゾーン内で持続時間が長い箇所が 2 ヶ所あったが、材料表面の亀裂による影響だと考えられる。本研究では詳細な位置標定を行う前に、音源がゾーン内にあるかどうかの判定(ゾーン標定)を行った。

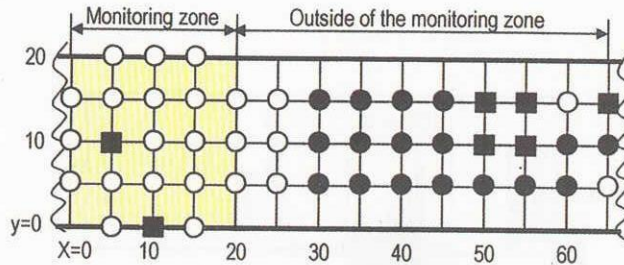


Fig. 12 Overlapping of the development of the tank with result of zone location. ○: monitoring zone. ■: outside of the monitoring zone (1), ●: outside of the monitoring zone (2)

4.2 音源位置標定法および標定結果

提案した手法で AE がモニタリングゾーン内にあると判定されたものについては、音源位置標定を試みた。本研究で構築した音源位置標定法を(x,y)=(15,15)で AE を励起した時に検出した信号(Fig.13)を用いて説明する。また、AE が検出されてから位置標定されるまでの一連の流れを Fig.14 に示す。

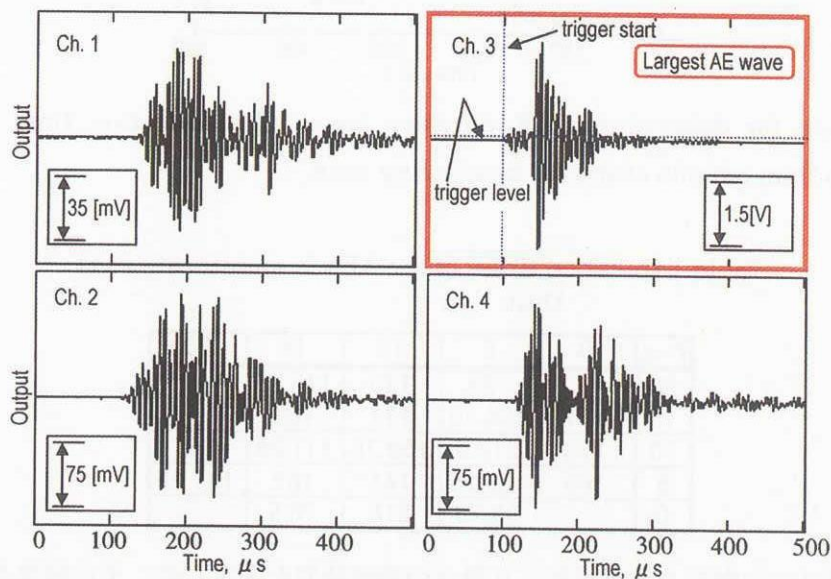


Fig. 13 Detected AE waves due to artificial source at (x,y)=(15,15). AE signal of Ch.3 was used for determining zone location. Detail procedure for determining zone location is shown in Fig. 11.

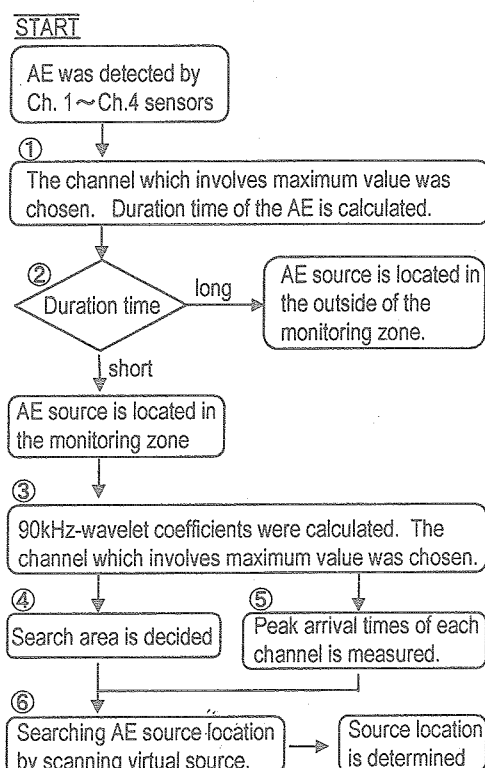


Fig.14 Flowchart for estimating the source location.

はじめに、検出した 4 つの AE 信号の中から一番大きな振幅をもつ信号を選択する。(Fig.14 の手順①) Fig.13 の場合には Ch.3 となる。選択した信号の持続時間を Fig.11 の方法で決定し、前節で提案した手法によって音源がモニタリングゾーン内にあるのか、ゾーン外にあるのかを判定する(手順②)。Fig.13 の Ch.3 の場合には持続時間が短いためにゾーン内とにあると判定される。ゾーン内にあると判定されたものについては 90kHz 成分のウェーブレット強度を計算する。(手順③) Fig.13 の信号について計算したウェーブレット強度を Fig.15 に示す。今回構築した音源位置標定法では Fig.16 に示すように 4 つに分割したモニタリングエリア (AREA1~4) のうち音源がどのエリアにあるのかをはじめにウェーブレット強度を用いて判定する。4 つの信号の中から最大のウェーブレット強度を含むチャンネルを選択し、そのセンサーを含む範囲を標定エリアとする。(手順④) Fig.15 の場合には Ch.3 が最大ピークを含んでおり、Fig.16 中の AREA3 が標定エリアに選択される。次に各センサーについて、ウェーブレット強度のピーク到達時間を求める。(手順⑤) Fig.15 のピーク到達時間は図中に示したが、これを音源位置標定を行う際の情報として用いた。ピーク到達時間 ($t_1 \sim t_4$) を式(1)~(3)に代入して Ch.1 との到達時間差を求めた。Fig.16 に示したように、決定した AREA の $\pm 20\text{mm}$ の範囲を走査範囲として、仮想音源 (図中の virtual source) を 0.1mm ステップで x,y 方向に走査させながら、各地点でのセンサーへの到達時間 ($t'_1 \sim t'_4$) を先に求めた平均速度 (1124m/s) を用いて理論的に計算する。次に式(4)~(6)に代入して Ch.1 との到達時間差を求めた。実験で得られた到達時間差と仮想音源を走査した時の到達時間差を式(7)で比較し、差が最小となる座標を決定した。(手順⑥) Fig.15 の場合には (x, y)=(15.24, 15.24)に位置標定された。この時、式(7)の誤差は $29[\mu\text{s}]$ で、標定誤差は 3.4mm であ

った。他の箇所についての音源位置標定結果を Fig.17 に示す。図中の “●” が音源を与えた位置で、“○” が標定された位置である。(x,y)=(5,5), (20,10), (5,15), (10,15)の標定誤差は 50mm 以上となり大きくなった。これは Fig.15 に示すような最大ピークの前に到達する S-mode のピークが、A-mode のピークよりも大きくなり、到達時間の測定に失敗したためである。その他の地点での平均誤差は 17.8mm となり、実用的には問題がないことが確認できた。

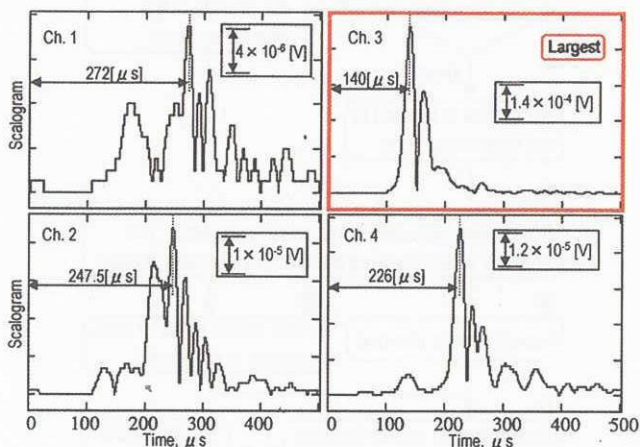


Fig. 15 Time transient of 65 kHz wavelet coefficients calculated for AEs (Fig.13) due to artificial source at (15,15). Gabor function is used for mother wavelet.

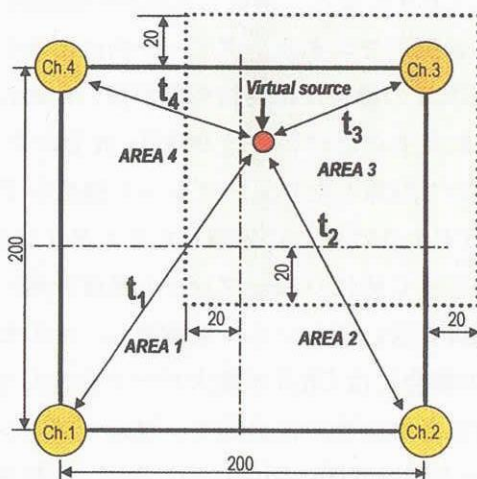


Fig.16 Algorithm for source location. Virtual source is scanning in 0.1mm step. Arrival time is theoretically calculated by using measured average velocity of 1124 m/s.

$$\Delta t_{21} = (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$\Delta t_{31} = (t_3 - t_1) \quad (2)$$

$$\Delta t_{41} = (t_4 - t_1) \quad (3)$$

$$\Delta t'_{21} = (t'_2 - t'_1) \quad (4)$$

$$\Delta t'_{31} = (t'_3 - t'_1) \quad (5)$$

$$\Delta t'_{41} = (t'_4 - t'_1) \quad (6)$$

$$Error = |\Delta t_{21} - \Delta t'_{21}| + |\Delta t_{31} - \Delta t'_{31}| + |\Delta t_{41} - \Delta t'_{41}| \quad (7)$$

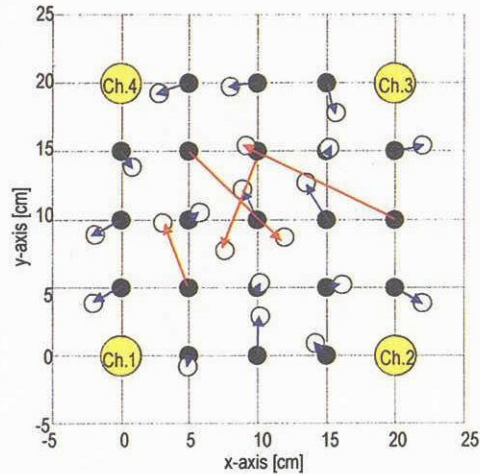


Fig.17 Comparison of given source (●) and estimated location(○). Average error except four points is 1.8 [cm].

5. まとめ

極低温用 CFRP タンクに発生するマイクロクラックをモニタリングする手法を開発することを目的とし、AE モニタリングによる位置標定法を構築した。以下に得られた結果を述べる。

- 1) AE の持続時間を用いてモニタリングゾーン外で発生した AE をゾーン内で発生した AE から分別する方法を考案した。80%以上の確率で分別できることを確認できた。
- 2) 本研究で用いたタンクでは 90kHz のウェーブレット強度のピーク到達時間を用いれば、速度異方性を無視できることが分かった。
- 3) 本研究で用いたタンクでは水中伝播 AE を無視できることを確認した。
- 4) 各センサーへの AE の到達時間差から音源位置を標定した結果、大きな誤差が生じた 4 点を除けば十分実用レベルであることが確認できた。

6. 今後の課題

ラム波解析を詳細に行うためにはワイドバンドセンサーで AE を検出する必要がある。従って、マイクロクラックが発生したかどうかを判定するための共振型 AE センサーと位置標定をするためのワイドバンドセンサーが併用できれば、高精度の解析が可能になると考えられる。

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-008

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

