

音波チェレンコフ検出器の作製と観測

森祐二郎

京都大学理学部 2018 年度課題研究 P1

1. 概要

気体中を超音速の物体が通過すると衝撃波が生じる。放射線源から出た α 線のような超音速粒子によって生じる衝撃波を検出する装置を作製し、観測することを目的とする。

2. 原理

ここでは、衝撃波の進む方向とその大きさを見積もることとする。音速を c 、 α 線の速度を v_α とすると衝撃波は図 1 のように発生する。

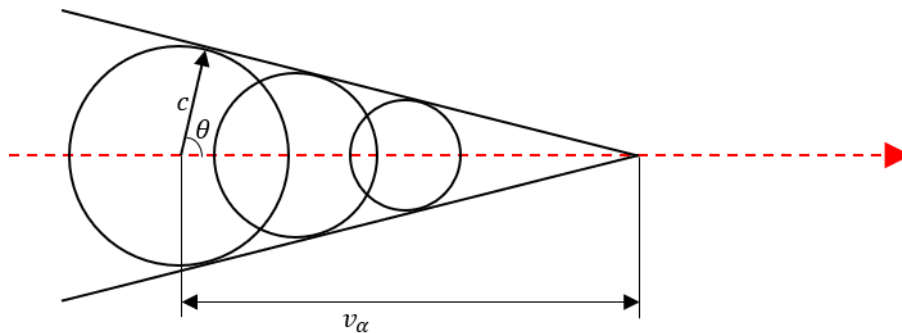


図 1 衝撃波

α 線の進行方向に対し、衝撃波の波面の進行方向との角度を θ とすると、 $\theta = \tan^{-1} \frac{v_\alpha}{c}$ である。
 $v_\alpha \cong 1.5 \times 10^7 \text{ m/s}$ 、 $c \cong 340 \text{ m/s}$ とすると、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_\alpha}{c} \cong 89.99^\circ$$

より、衝撃波は進行方向に対してほぼ垂直に進むことがわかる。
線源から出た α 線の運動エネルギーを K_α とすると

$$K_\alpha \cong 5 \text{ MeV} = 8 \times 10^{-13} \text{ Ws(J)}$$

α 線は線源から5cm程度で止まるので、その間に運動エネルギーが振動のエネルギーに変わると考える。その時間幅を $\frac{5\text{cm}}{1.5 \times 10^7 \text{m/s}} \cong 10\text{ns}$ とすると、単位時間当たり $\frac{8 \times 10^{-13} \text{Ws}}{10\text{ns}} = 8 \times 10^{-4} \text{W}$ のエネルギー、100MHzのパルス波となる。これをマイクロホンで観測するが、今回使用するマイクロホンは100kHz以上の周波数に感度がないため、空気の粘性によって100kHzまで減衰したパルス波を観測する。減衰の仕方は(1)式で近似できる。[1]
 図2は減衰係数 α を表したグラフである。[2]

$$E = E_0 \exp(-2\alpha z) \quad (1)$$

α : 減衰係数 $\alpha \propto f^2$ E_0 : はじめのエネルギー密度 z : 進んだ距離

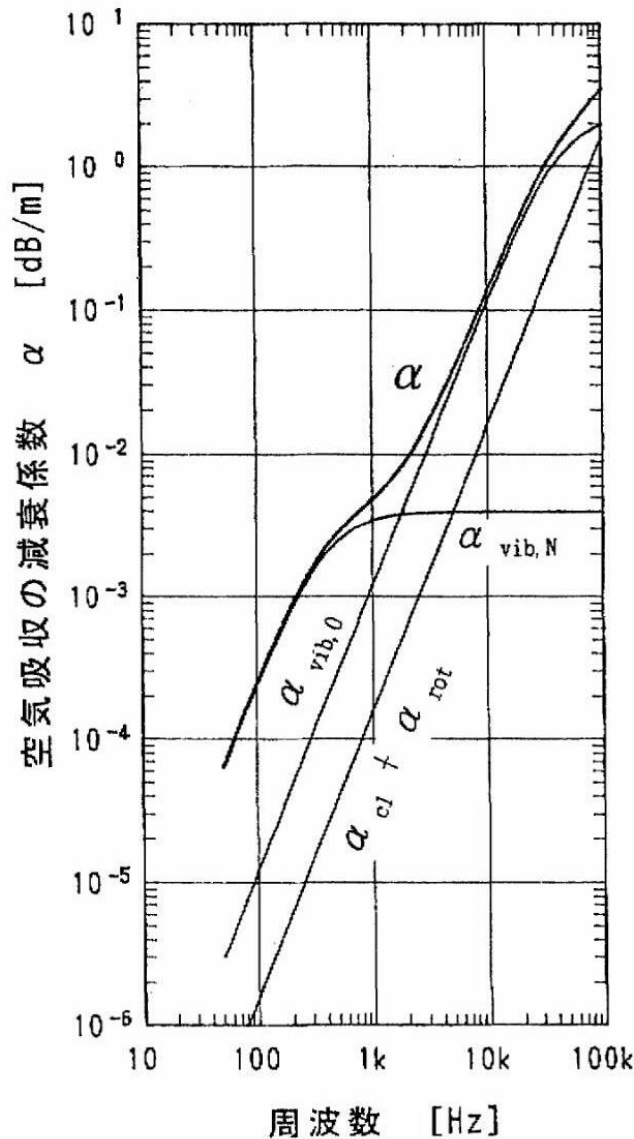


図2 減衰係数の周波数依存性及び各吸収メカニズムの寄与

(1)式によって100MHzの音波は1～数cmで100kHzまで減衰することがわかる。すると、単位時間当たりのエネルギーは

$$\frac{8 \times 10^{-13}Ws}{10\mu s} = 8 \times 10^{-8}W$$

これを単位面積当たりのエネルギーにする。 α 線源から1cm離れた場所にマイクロホンを置く。(図3) マイクロホンの直径は約1cmであり、衝撃波は α 線の進行方向に垂直に進むので、マイクロホンに届く単位時間、単位面積当たりのエネルギーは

$$8 \times 10^{-8}W \times \frac{1cm}{5cm} \times \frac{1}{2\pi cm^2} \times 10^4 \cong 2.5 \times 10^{-5}W/m^2 \cong 75dB \quad (2)$$

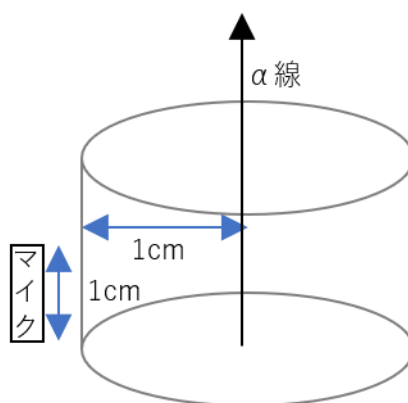


図3 α 線の進行方向とマイクロホンとの位置関係

以上より、大まかに75dB程度の衝撃波がマイクに届くと見積もった。これを観測する。

3. セットアップ

- ・ 今回、 α 線が放射線源から出たタイミングを知るため、気体シンチレーションであるアルゴン中で実験を行う。アルゴン中でも音速($\cong 310 m/s$)と密度($\cong 0.022mPa \cdot s$ at $20^\circ C$ 空気 $\cong 0.019mPa \cdot s$ at $20^\circ C$) [3]はあまり変わらないため、2.原理で行った見積もりをそのまま使う。
- ・ セットアップ略図、写真は図4～6。
- ・ マイクロホンは専用の騒音計が存在するが、持っていないため、延長コードを切断し、プリアンプ電源、バイアス電圧、アンプとそれぞれ接続した。
- ・ シンチレーション光を光電子増倍管で拾える葉長にするため、波長変換材を塗ったアク

リル棒を光電子増倍管の前につけている。

- ・ ノイズカット用の吸音材については真空管の周りに巻き付け、防振ダンパーは下に敷いた。
- ・ バンドパスフィルターについては今回見たい 100kHz 周辺以外の信号をカットするもの作った。回路は図 7、LTspice によるシミュレーションは図 8。

使う機材一覧は次の通り。

○ α 線源

- ・ 241Am

○オシロスコープ

- ・ オシロスコープ

○RION 社製マイクロホンセットアップ

- ・ マイクロホン UC-29
- ・ プリアンプ NH-05A
- ・ 変換アダプタ UA-12
- ・ 延長コード EC-04

○マイクロホン用電源とアンプ

- ・ プリアンプ電源 $\pm 12V$
- ・ バイアス電圧電源 DC200V
- ・ HAMAMATSU 社製アンプ C9663(gain38db) [A]
- ・ アンプ電源 $\pm 5V$

○シンチレーション光観測セットアップ

- ・ 光電子増倍管
- ・ アクリル棒
- ・ 波長変換材(TPB:0.10g パラロイド:1.02g トルエン:20.3g 混合)

○真空引きとアルゴンガス封入

- ・ 真空管
- ・ アルゴンガス
- ・ 真空ポンプ

○ノイズカット

- ・東京防音社製吸音・防音ホワイトキューオン
- ・エクシール社製防振・鑑賞ブロックゲルダンパー
- ・バンドパスフィルター

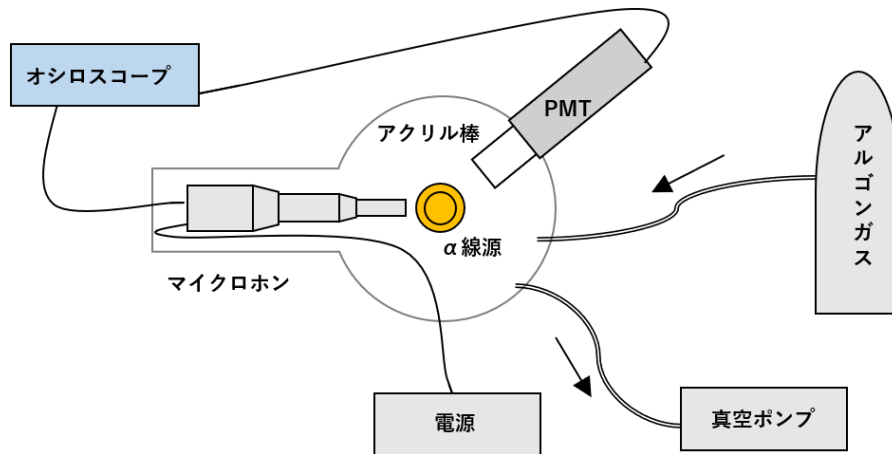


図 4 上から見たセットアップ略図



図 5 セットアップ全体図写真

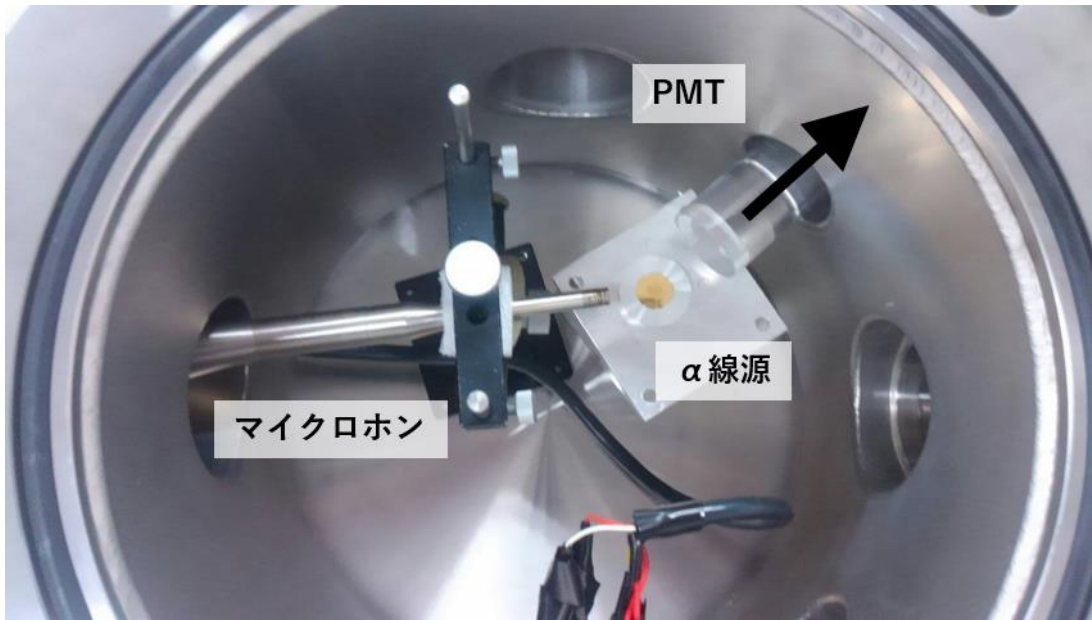


図 6 真空管の中身写真

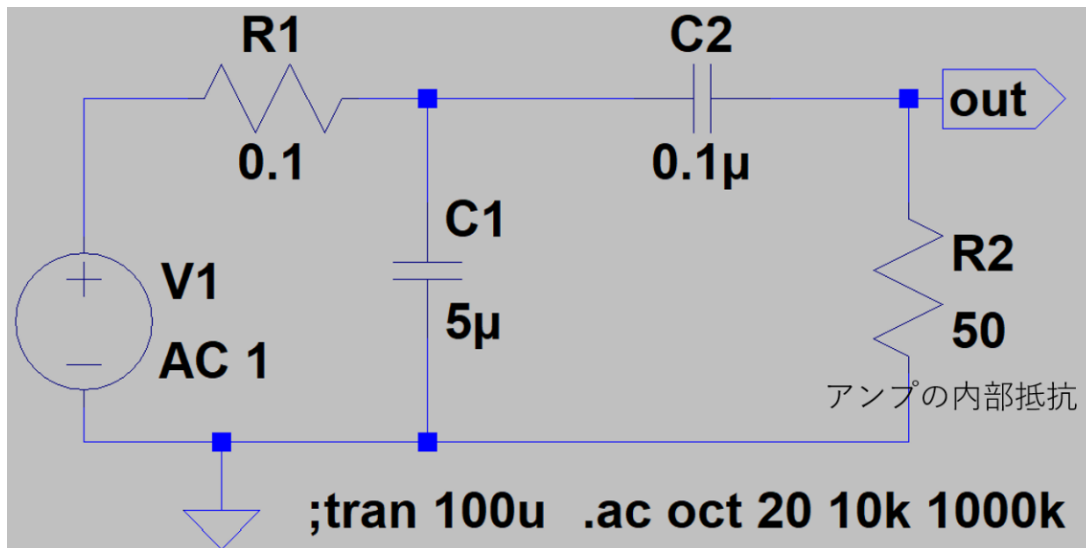


図 7 バンドパスフィルター回路

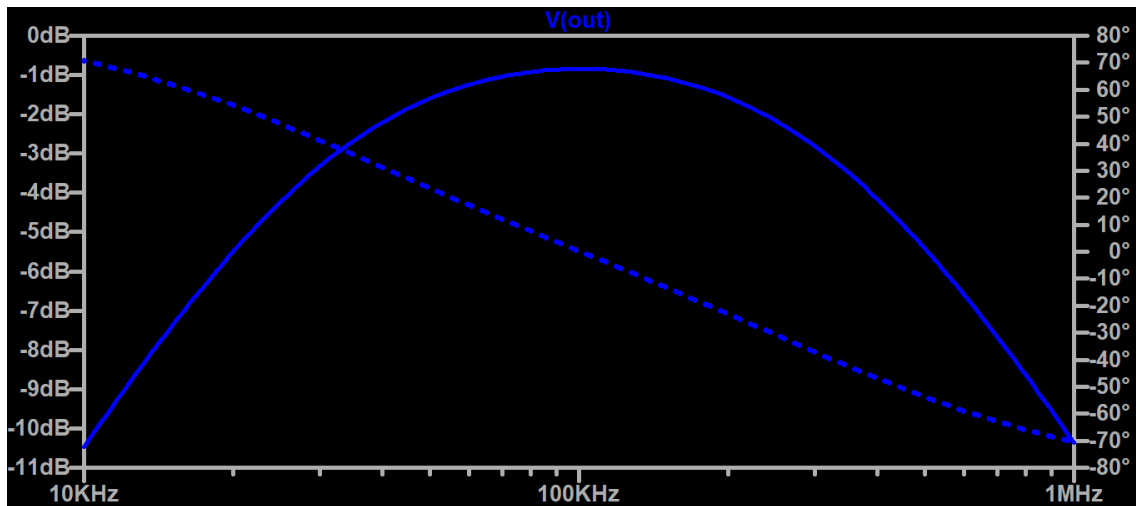


図 8 バンドパスフィルターの LTspice によるシミュレーション

4. 実験手順

- ① 真空管をねじで締めきった。
- ② すべての機械の電源を切ったまま、真空ポンプで真空管の空気をゆっくり抜いた。
- ③ 真空ポンプを止めた後、アルゴンガスを一気圧になるまでゆっくり封入した。
- ④ PMT の電源電圧を 1100V まであげた。
- ⑤ アンプの電源電圧± 5V をかけた。
- ⑥ プリアンプ電源電圧± 12V をかけた。
- ⑦ マイクロホンのバイアス電圧を 200V までゆっくりあげた。
- ⑧ PMT の出力をオシロスコープでみて、 α 線によるシンチレーション光の信号が出ていることを確認し、トリガーをかけた。
- ⑨ トリガーをかけた時のマイクロホンの信号をオシロスコープで確認した。

5. 実験結果

α 線が出たタイミングでトリガーをかけた時のマイクロホンの出力信号が図 9 である。特に衝撃波と思われるような信号は確認できなかった。

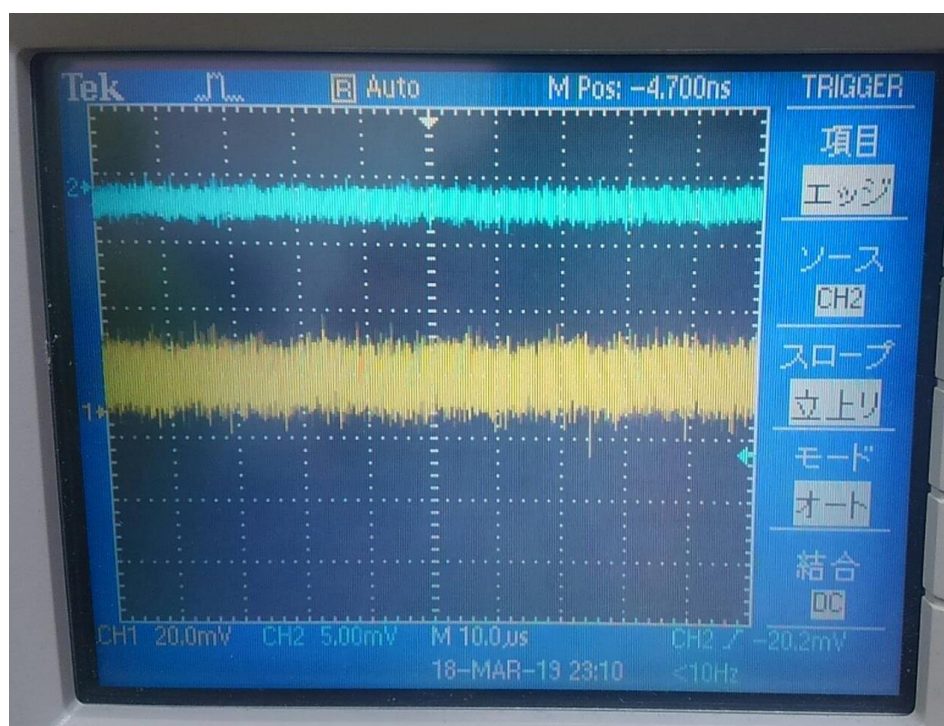


図 9 PMT(上)とマイクロホン(下)の出力

6. 結果の考察

図 9 より、マイクロホンは 10mV 程度のノイズが出ていることがわかる。dB と出力電圧との換算式は次式で表される。[4][A][B]

$$\begin{aligned} \text{dB} &= 20\log(\text{出力電圧}A) + \{\text{音圧レベル} - \text{感度レベル} - \text{アンプゲイン}\} \\ &= 20\log A + 94 - (-47.5) - 38 \end{aligned} \quad (3)$$

すると、10mV のノイズ出力は 60dB の大きさの音に相当する。55dB 程度の信号ならば目視できると考えると、(2)式で見積もった 75dB と比べて二桁落ち、衝撃波のエネルギーは 55dB 以下ということになる。

また、マイクロホンのスペックシートを見ると、自己雑音レベルは 42dB であるので、ノイズを減らし切れていないこともわかる。この原因としては PMT による電磁ノイズの可能性。

そしてマイクロホン専用の騒音計がないため、延長コード EC-04 を切断し、バイアス電圧、プリアンプ電源、出力とそれぞれにコードを繋げたことが考えられる。もともと一つの騒音計から電源を供給されるよりは、電源が安定していない可能性がある。

そして見積もった大きさの信号が得られなかったことから、そもそも α 線のような一粒子で衝撃波が生じるのかという疑問が生じる。

衝撃波は一般に音速を超える飛行機といったマクロな物体の周りに生じる現象で、ミクロな α 粒子とは異なる。

しかし、強度の強い α 線が5cm進むということは、アボガドロ数まではいかないがそれなりの数の原子と相互作用しているはずである。

これはミクロとマクロの中間の現象であり、考察が難しい。シミュレーションで考えられるかもしれない。

7. 結論

放射線源から出た α 線のような超音速粒子によって生じる衝撃波を検出する装置を作製したが、観測することは出来なかった。超音速の α 線が気体を通過すると衝撃波が生じるといった前提に再考の余地が生じた。

謝辞

市川さん、面白いテーマをありがとうございます。楽しかったです。

TAの森さん、小田川さん、ありがとうございました。

引用・参考

[1]空中超音波振動子アニュラアレイによる触覚提示

http://www.hapis.k.tokyo.ac.jp/public/hiroyuki_shinoda/research/pdf/08robomec/08r_iwamoto.pdf

[2]屋外の音の伝搬における空気吸収の計算

https://www.jstage.jst.go.jp/article/souonseigyoy1977/21/3/21_3_130/_pdf

[3]気体の粘度

<https://www.ryutai.co.jp/shiryoku/gas/gas-nendo.htm>

[4]マイクロホンの出力電圧値(V)を音圧レベル値(dB)に換算する方法

<https://www.onosokki.co.jp/HP->

WK/c_support/faq/mi_series/mi8100_sr2200_freq1.htm

[A] アンプスペックシート

Parameter		Description / Value
Frequency Bandwidth (-3 dB)		DC to 150 MHz
Voltage Gain ^A		38 dB (Approx. 80 times)
Current-to-voltage Conversion Factor	Load Resistance: 1 M Ω	8 mV/ μ A
	Load Resistance: 50 Ω	4 mV/ μ A
Rise Time	Typ.	2.3 ns
Input Polarity		Positive / Negative
Amplifying Method		Non-inverting Output
Input Impedance		50 Ω

[B] マイクロホン・プリアンプスペックシート

型 式	UC-29 ^{CE}	型 式	NH-05A
対応プリアンプ	NH-05A (UA-12使用)	対応マイクロホン	UC-29 ^{※1} UC-30/31/33P
口径	1/4"	口径	1/2インチ, 1/4インチ ^{※1}
周波数レスポンス	音場	入力インピーダンス (G Ω)	10
測定周波数範囲 (Hz)	20~100 000 ^{※2}	入力容量 (pF)	0.2
バイアス電圧 (V)	200	測定周波数範囲 (Hz)	10~100 000
感度レベル (dB re 1 V/Pa) ^{※1}	-47	バイアス電圧 (V)	200
静電容量 (pF)	6	増幅度 (dB)	-0.5 (6 pF) (UC-29) (UA-12使用)
最大入力音圧レベル (dB) (直線性誤差 \pm 0.3 dB)	164 ^{※4}	A特性自己雑音レベル (dB)	42 (UC-29)
A特性自己雑音レベル (dB)	42	出力インピーダンス (Ω)	100以下
温度係数 (dB/ $^{\circ}$ C)	-0.01	ケーブル	EC-04シリーズ (7P)
振動膜	チタン	希望小売価格	70,000円
大きさ (mm)	ϕ 7.0 \times 10.0	希望小売価格	130,000円
希望小売価格	130,000円		

※1 : 1 kHz時の代表値 ※2

※1 : UA-12使用