

令和6年度 機械知能・航空実験II A班

ファイン2 超音波探傷

東北大学 機械知能・航空工学科
ファインメカニクスコース 高・松隈研究室

学籍番号 C2TB1505

千葉 匠

共同実験者 川口朋也，蔦森公亨，吉村悠太

実験日 2024年11月13日

提出日 2024年11月20日

連絡先 chiba.takumi.s4@dc.tohoku.ac.jp

目次

1	目的	2
2	原理	2
2.1	超音波探傷法の原理	2
2.2	AVG 線図を用いた欠陥エコーの評価	2
3	実験方法	4
3.1	実験 I	4
3.2	実験 II	6
3.3	実験 III	7
4	実験結果	7
5	考察	11
5.1	超音波き裂探傷法に内在する問題点	11
5.2	垂直探傷法以外の測定法	11
5.3	超音波の応用例	12
5.4	欠陥の大きさの推定	12

1 目的

品質管理や保守検査において、素材や製品を破壊せずに欠陥の有無・存在位置・大きさなどを調べることができる非破壊試験の重要性は高まっている。本実験では超音波探傷法に関する基礎知識を習得し、パルス反射法によるきず寸法・位置の測定手法を学ぶことを目的とする。

2 原理

2.1 超音波探傷法の原理

超音波とは人間の耳に聞こえない音であり、周波数が 20kHz 以上の音波を指す。超音波の送受信は圧電素子により行われる。送受信の役目を担う素子を振動子と呼び、振動子に吸音材と保護版を貼り付け、ケース格納したものを探触子と呼ぶ。探触子を試験体に押し付けるだけでは、超音波はほとんど入射しないため、接触媒質を介して入射させる必要がある。本実験ではカップリングとして、直接接触法と水浸法の 2 種類を用いた (図 1)。探傷方法はパルス波を用いたパルス反射法である。図 2 のように反射したエコーから欠陥の情報を得ることができる。エコーの往復時間が欠陥の位置に対応し、エコーの高さが欠陥の寸法に対応する。

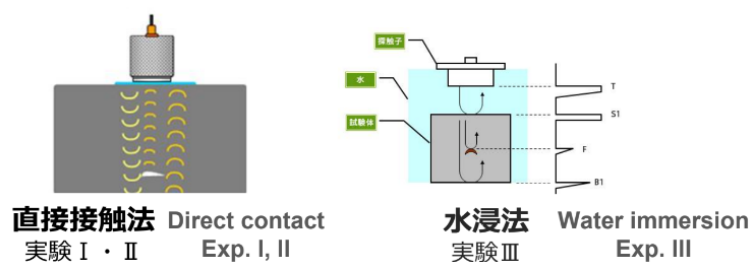


Fig.1: Coupling Methods in Ultrasonic Flow Detection.

2.2 AVG 線図を用いた欠陥エコーの評価

同じ大きさの欠陥でも、探傷面から欠陥までの距離が異なれば、超音波の広がりや減衰によって欠陥エコー高さは異なる。このため、欠陥の大きさを評価するために AVG 線図が用いられる。図 3 は一般化された AVG 線図であり、規準化されたエコー高さ (縦軸) と

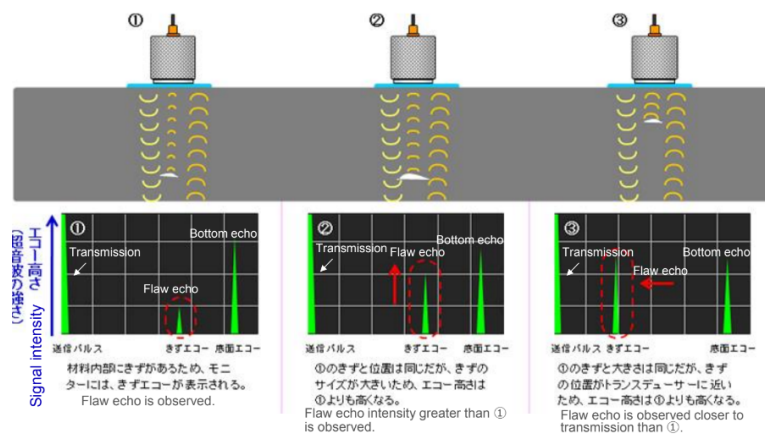


Fig.2: Pulse echo technique.

音波路程 (横軸) との関係を異なる直径の円形平面傷に対して描いたグラフである。欠陥の大きさも振動子の直径によって規準化されている。

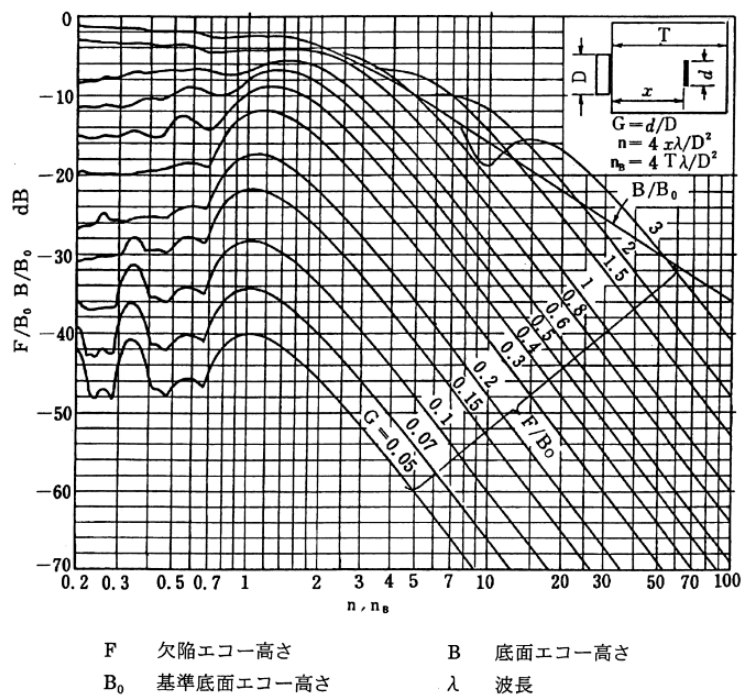


Fig.3: AVG diagram for circular planar wounds.

3 実験方法

本実験では以下の 3 つの実験を行った。

- I. 平面き裂:6 デシベルドロップ法
- II. 欠陥評価：AVG 線図
- III. 最先端超音波探傷の理解

実験 I, II で用いた実験装置を図 4 に示す。パルサーは探触子を振動させ超音波を発信する装置であり、レシーバーは反射した超音波を探触子で電気信号に表示する装置である。探触子は周波数 $f = 5\text{MHz}$ 、直径 $D = 6.3\text{mm}$ のものを使用した。



Fig.4: Experimental apparatus in Experiments I and II.

3.1 実験 I

図 5 に計測した試験体の形状を示す。実験手順を以下に示す。

1. 試験体表面にグリスを塗布した。
2. 探触子を試験体表面に当てて、オシロスコープのエコーを確認した。
3. 第 1 回エコーが送信パルスに対して、大きく変わらない場所で探触子を静止し、オシロスコープの波形を記録した。
4. オシロスコープの波形から図 6 に示すような底面往復時間 $t_B(\mu\text{s})$ と底面エコー高さ $B(\text{V})$ を測定した。
5. 探触子を動かし、第 1 回エコー高さが半減した場所でオシロスコープの波形を記録し、探触子の位置を欠陥先端位置 $L(\text{mm})$ として測定した。

6. オシロスコープの波形から図 7 に示すような欠陥往復時間 $t_F(\mu s)$ と欠陥エコー高さ $F(V)$ を測定した.
7. 式 (1), 式 (2) から試験片厚さ Z_B と欠陥深さ z_F を計算した. ここで C は試験片の縦波音速である.
8. 以上の手順を 4 回繰り返した.

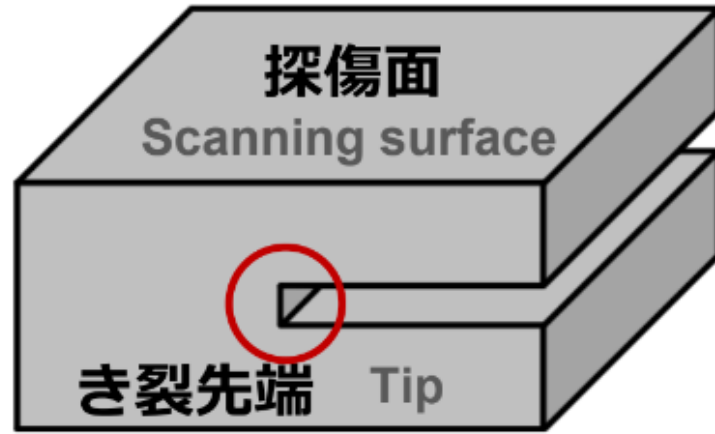


Fig.5: Shape of the specimen in Experiment I.

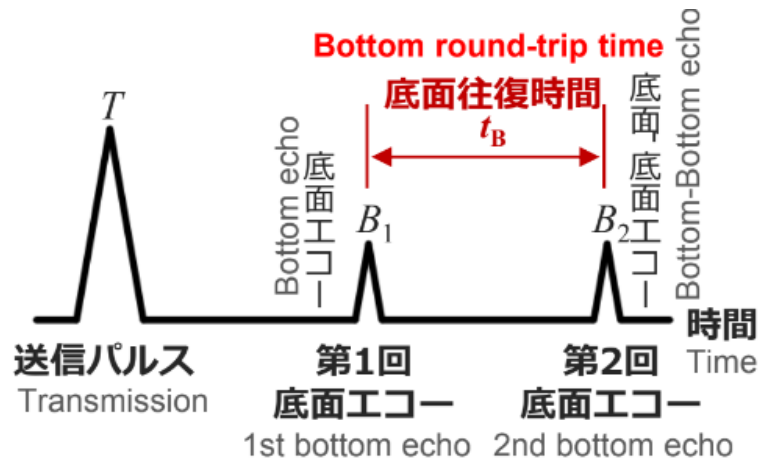


Fig.6: Measurement of specimen thickness.

$$z_B = \frac{1}{2} C t_B \quad (1)$$

$$z_F = \frac{1}{2} C t_F \quad (2)$$

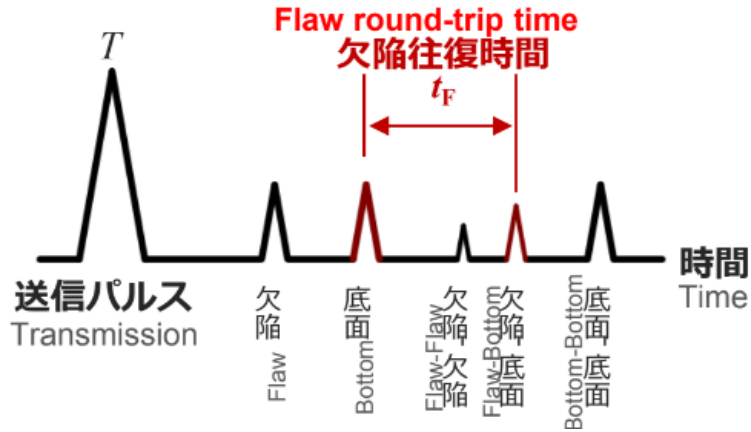


Fig.7: Measurement of defect depth.

3.2 実験 II

実験 II では試験片 Al1, Al2, ステンレスの 3 種類に対して測定を行った．実験手順を以下に示す．

1. 実験 I と同様にしてそれぞれの試験片で，底面エコー高さ $B(V)$ と底面往復時間を測定した．Al1 を 2 回，Al2 とステンレスを 1 回ずつ測定し，それぞれの平均を求めた．
2. 底面往復時間 t_B より試験片の厚さ Z_B を求めた．
3. 求めた z_B より底面までの音波路程 n_B を式 (3) から計算した．ここで波長 λ は $\lambda = C/f$ である．
4. 求めた n_B と図 3 から読み値 $= 20\log_{10} \frac{B}{B_0}$ より，基準化したエコー高さ B_0 を求めた．
5. 次に Al1 のき裂 3 点において，欠陥の位置 x, y ，欠陥エコー高さ $F(V)$ ，欠陥往復時間 t_F を測定した．3 点目の欠陥のみ 2 回測定した．
6. Al2 及びステンレスは 4 つの欠陥において Al1 と同様に測定を行った．
7. 測定結果から欠陥深さ z_F ，欠陥エコー高さ F ，欠陥音波路程 n_F を計算した．さらに F/B_0 を計算し，図 3 から G を過大評価により求め，式 (4) より欠陥直径 d を推定した．

$$n_B = \frac{4z_B\lambda}{D^2} \quad (3)$$

$$d = G \cdot D \quad (4)$$

3.3 実験 III

実験 III では、図 8 に示すような超音波映像装置による最先端の超音波技術により、IC カードの回路構造が表示される様子を観察した。



Fig.8: Ultrasonic imaging device.

4 実験結果

表 1 に実験 I の測定結果，表 2 と表 3 に実験 II の測定結果を示す．縦波音速を A1 は 6320m/s，ステンレスは 5600m/s として計算を行った．表 4 に測定した試験体の寸法，表 5 に欠陥の位置・寸法の正解値を示す．表 5 の d は欠陥の最大直径であり，() 内はドリルで加工による先端の直径を示している．また，欠陥の位置の座標は試験片における x の基準点は正解値と逆になっている．

表 3 と表 5 を比較すると，A11 においてき裂 3F を除いて測定値は位置，欠陥深さともにおおよそ正解値と一致している．欠陥直径においても誤差はおおよそ 25% 程度であった．き裂 3E とき裂 3F で値が大きく変わらないことから，き裂 3F は G の値を読み違った可能性が高い．A12，ステンレスにおいても位置，欠陥深さともにおおよそ一致した．一方，欠陥直径はどれもドリル先端の直径を測定したような値となっており，ばらつきが大きい。

い. また, G を過大評価して求めたため全体的に直径がやや大きく算出されている.

Table1: Measurement results of Experiment I.

測定者			○			平均
実験値	底面往復時間 $t_B(\mu s)$	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	底面エコー高さ $B(V)$	34.7	34.3	32.7	34.5	34.1
	欠陥往復時間 $t_F(\mu s)$	9.1	9.22	9.1	9.14	9.14
	欠陥エコー高さ $F(V)$	34.3	34.9	32.9	34.7	34.2
	欠陥先端位置 $L(mm)$	46	45	46	45	46
計算値	試験片厚さ $z_B(mm)$	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5
	欠陥深さ $z_F(mm)$	28.75	29.13	28.75	28.88	28.9

Table2: Specimen thickness and parameters in Experiment II.

試験片	Al1		Al2	ステンレス
測定者			○	
底面エコー高さ $B(V)$	34.7	34.7	34.7	34.7
底面往復時間 $t_B(\mu s)$	19	18.8	7.7	10.2
平均 $B(V)$	34.7		34.7	34.7
平均 $t_B(\mu s)$	18.9		7.7	10.2
$z_B(mm)$	59.72		24.332	28.56
$n_B(-)$	7.607		3.099	3.223
$B_0(V)$	169.9		70.84	77.68

Table3: Defect evaluation in Experiment II.

		実験値			計算値				
		位置 $x, y(\text{mm})$	欠陥エコー高さ $F(\text{V})$	欠陥往復時間 $t_F(\mu\text{s})$	$z_F(\text{mm})$	n_F	$F/B_0(\text{dB})$	G	$d(\text{mm})$
Al1	き裂 1.A	140,50	30.9	17.3	54.66	6.962	-14.80	0.8	5.04
	き裂 2.C	80,90	27.1	7.78	24.58	3.131	-15.94	0.4	2.52
	○き裂 3.E	38,40	15.5	17.3	54.66	6.962	-20.79	0.6	3.78
	き裂 3.F	38,41	16.1	17.3	54.66	6.962	-20.46	0.8	5.04
Al2	欠陥 1	190,11	12.9	4.94	15.61	1.988	-14.79	0.3	1.89
	欠陥 2	148,15	16.5	4.98	15.73	2.003	-12.65	0.4	2.52
	○欠陥 3	121,13	11.5	4.18	13.20	1.681	-15.79	0.3	1.89
	欠陥 4	29,13	14.1	6.22	19.65	2.503	-14.02	0.4	2.52
ステンレス	欠陥 1	224,12	3.7	6.7	18.76	2.117	-26.44	0.2	1.26
	欠陥 2	184,20	5.5	7.1	19.88	2.243	-22.99	0.3	1.89
	○欠陥 3	147,30	6.7	8.62	24.13	2.723	-21.28	0.3	1.89
	欠陥 4	60,17	3.7	7.54	21.11	2.382	-26.44	0.2	1.26

Table4: Measured specimen size.

	Al1	Al2	ステンレス
横幅 $x(\text{mm})$	200	223	250
縦幅 $y(\text{mm})$	120	25	40
厚さ $z_B(\text{mm})$	60	25	30

Table5: Correct value.

		$x, y(\text{mm})$	$z_F(\text{mm})$	$d(\text{mm})$
Al1	き裂 1	60,50	55	4
	き裂 2	120,90	25	2
	き裂 3	160,40	55	2.5
Al2	欠陥 1	35,8	15	7(1)
	欠陥 2	74,12	17	3(0.5)
	欠陥 3	100,12	17	7(1)
	欠陥 4	129,9	18	5(0.7)
	欠陥 5	168,16	20	8(1.2)
	欠陥 6	194,10	20	5(0.7)
ステンレス	欠陥 1	25,14	19	10(1.4)
	欠陥 2	67,19	21	7(1)
	欠陥 3	100,30	25	5(0.7)
	欠陥 4	139,15	25	7(1)
	欠陥 5	190,22	21	8(1.2)
	欠陥 6	225,13	23	5(0.7)

図 9 に実験 III で撮影した IC カードの回路構造, 図 10 に測定時の波形を示す.

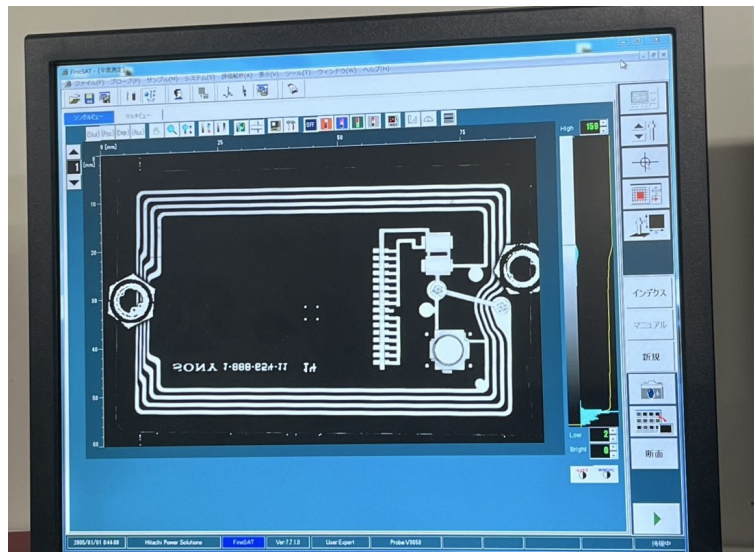


Fig.9: Circuit structure of IC card.



Fig.10: Waveform at measurement.

5 考察

5.1 超音波き裂探傷法に内在する問題点

超音波き裂探傷法の欠点として、振動によるノイズの影響を受けやすいことがあげられる。これを軽減するためには、周囲でものを動かさない、しゃべらない、温度を一定にするといった環境の整備が重要である。また、手作業では手の震えや体温による温度変化、探触子を押さえつけてしまうことによる試験体の形状変化などによってノイズが生じるため、高精度な測定では xyz3 軸のステージを備えた装置を用いることが望ましいと思われる。さらに、自動化によって測定するような場合には、半導体露光装置で用いられているような、カウンターウェイトによる振動キャンセルなどの制御を行うことでより高速で高精度な測定が行えるのではと考える。

5.2 垂直探傷法以外の測定法

パルス反射法には、垂直探傷法のほかに斜格探傷法、表面波探傷法、板波探傷などがある。

斜角探傷法は被検体の探傷面に 45 度、60 度、70 度などの角度をつけて超音波を入射する方法である。溶接部などの垂直探傷法が困難な場所で、内部検査や表面割れ検査に使用される。

表面波探傷法は被検体の表面のみに超音波を伝搬し、表面傷を高感度で検出する方法であり、以下のような特徴を持つ。

- 超音波のエネルギーが表面に集中するため、距離減衰が小さい。
- 表面に水滴が付着しても検出してしまうため、誤差判定対策が必要。
- 表面波のもぐりこみ深さは $1\frac{1}{2}$ 波長で、2MHz 以下の比較的低い周波数を使用することが多い。
- 横波の臨界角近傍で表面波が発生する。

板波とは比較的薄い個体平面層内を平面に沿って伝播する弾性体のことである。板波探傷法は板波を利用したもので、単一の探触子によって全面検査が可能である。この理由により、圧延工程で導入され、品質管理の一方法として利用されている。この探傷法には板厚、欠陥位置、周波数、板波モードなどによって欠陥検出感度が大きく変化する特徴がある。

5.3 超音波の応用例

超音波の応用例として以下のようなものがある．

- 超音波洗浄：超音波の物理的作用 (キャビテーション, 振動加速度, 直進流) と洗浄液による化学的作用及び超音波による化学反応促進作用によって, 洗浄効果を得ている．
- 超音波加工：超音波加工には, 砥粒加工, 切削加工, 接合, 溶着などがある．特に切削加工では, 工具にかかる力が少なくなることによる加工精度の向上や, 発熱による加工対象物の変質などを防ぐなどといったメリットがある．
- 魚群探知機：魚群探査は探傷法と似たような原理で, 海底の反射波と魚群の反射波から, 魚群の位置や大きさを知ることができる．

超音波の利用法として, fff 式の 3D プリンターが考えられる．ノズルに超音波振動させることにより, ノズル詰まりや糸引きの防止などが期待できる．また, ビルドプレート側を振動させることで, 簡単に造形物の取り出しをできるようになり, ビルドプレートの寿命を延ばすことができる可能性もある．さらに, 超音波振動による汚れの除去によって, 造形物の積層強度や品質の向上といったことも期待できる．

5.4 欠陥の大きさの推定

まず STB-G・V15-2 は $\phi 2\text{mm}$ の円形平面傷を持つ標準試験片であり, 探触子の直径は 30mm であるから, 試験片の G は以下のように求められる．

$$G = \frac{2}{20} \approx 0.0667 \quad (5)$$

また, 試験片の音速を 5950m/s とすると $z_F = 150\text{mm}$ より n_F は以下ようになる．

$$n_F = \frac{4 \cdot 150 \cdot 5950 \cdot 10^{-3}}{30^2 \cdot 2} \approx 1.98 \quad (6)$$

よって, AVG 線図から $F/B_0[\text{dB}] = -40$ となる．鍛鋼品は 6dB 高いため $F/B_0[\text{dB}] = -34$ である．鍛鋼品において $z_F = 200$ より, 音速を 5950m/s として n_F は以下のように求められる．

$$n_F = \frac{4 \cdot 200 \cdot 5950 \cdot 10^{-3}}{30^2 \cdot 2} \approx 2.64 \quad (7)$$

以上から AVG 線図より G を過大評価して求めると、 $G = 0.15$. したがって、鍛鋼品における欠陥の大きさは以下のように推定できる.

$$d = 0.15 \cdot 30 = 4.5[\text{mm}] \quad (8)$$

参考文献

- [1] ダイヤ電子応用株式会社. ”超音波探傷試験(UT)/超音波探傷の原理”. (2024/11/19 閲覧)
https://www.dia-elec.com/technique_new/ut/Principle_UT.html
- [2] 廣瀬壮一, 片岡秀起. ”板波探傷法の 2 次元数値シミュレーション”. (2024/11/19 閲覧)
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00549/1995/47-0023.pdf>
- [3] 本多電子株式会社. ”超音波洗浄機の原理”. (2024/11/19 閲覧)
https://www.honda-el.co.jp/product/industry/document/about_washing_machine/cleaner_genri
- [4] meviy-MiSUMI. ”超音波加工って何? 精密加工にも超音波が使われるって本当?”. (2024/11/19 閲覧)
<https://jp.meviy.misumi-ec.com/info/ja/howto/metal-machining/20346/>
- [5] 本多電子株式会社. ”魚群探知機とは?”. (2024/11/19 閲覧)
https://www.honda-el.co.jp/product/marine/document/knowledge_for_fishfinder/about