

# 超音波フェーズドアレイ法による 一方向凝固材検査技術の開発

## Development of Ultrasonic Phased Array Testing Method for Unidirectional Solidification Materials

(株)日立製作所	溝田 裕久	Hirohisa MIZOTA	Non-member
(株)日立製作所	永島 良昭	Yoshiaki NAGASHIMA	Non-member
愛媛大学	中畑 和之	Kazuyuki NAKAHATA	Member

An ultrasonic measurement method has been developed to determine the crystal growth angle of a unidirectional solidification material by using an ultrasonic array probe. The crystal growth direction of a unidirectional solidified nickel based superalloy are derived within an error of  $\pm 5$  degrees by evaluating wave height levels of echoes measured with focal laws of each assumed crystal growth angle. Moreover, high precision ultrasonic testing is realized based on the focal laws considering the acoustic anisotropy.

**Keywords:** Phased array, Ultrasonic Testing, Unidirectional Solidification Materials, Anisotropy

### 1. 緒言

超音波フェーズドアレイ法は、圧電素子に与える電氣的なタイミングを遅延制御することで、超音波ビームを被検査対象の内部で走査し、内部を可視化することができる有用な非破壊検査手法の一つである[1]。

ステンレス鋼や炭素鋼などの超音波検査では、測定対象物中を伝搬する超音波の音速は伝搬方向に依存しない物質固有の一定な値をとるため、材質が既知であれば、物質固有の音速を用いてアレイセンサに与える遅延条件を求めることで、高精度の測定が実施できる。しかし、特定の方向に金属結晶が成長した一方向凝固材のような結晶性材料では、音速が超音波の伝わる方向に依存する音響異方性を有する。このため、超音波フェーズドアレイ法で検査する場合、仮に音速を一定として求めた遅延条件を設定しても、超音波を集束させたい位置に正確に送信できなくなるため、位置精度や信号強度が低下することが知られている。従って、音響異方性を考慮した遅延条件を用いて検査することが重要となる。従来、結晶成長方向が正確には分からない一方向凝固材を超音波フェーズドアレイ法で検査する場合、あらかじめ、結晶成長方向を断面観察やX線計測で求めておく必要があった。

そこで我々は、発電プラントなどで用いられる、耐熱性に優れたニッケル基合金の一方向凝固材を対象とし、結晶成長方向が正確には分からない場合であっても、超音波フェーズドアレイ法により結晶成長方向を推定する方法を考案し、音響異方性を考慮した検査条件を設定して、精度の良い超音波検査を実施することを可能にした。

本報告では、ニッケル基合金の一方向凝固材にスリットを付与した試験片を製作し、この試験片の結晶成長方向の計測結果と、結晶成長方向の計測結果を元に設定したセクタスキャンの遅延条件を用いて付与したスリットを画像化した結果について紹介する。

### 2. ニッケル基合金の一方向凝固材

#### 2.1 製作方法と結晶学的特性

ニッケル基合金が一方向に凝固したサンプルを、Fig. 1に示すように、ステンレス製の基盤上にニッケル基合金製(インコネル®82)の溶接棒を用いて肉盛りして製作した。ニッケル基合金が熔融したのち凝固すると、主に熱流方向に沿って柱状晶が成長する。このように製作したサンプルの一方向凝固材部分は、Fig. 2に示すように、柱状晶の一つ一つは立方晶系に属し、結晶学的な $\langle 001 \rangle$ 方向と結晶成長方向は一致する。このため、ほぼZ軸方向に成長した柱状晶の集合組織を成す。一方、その他の結晶学的な $\langle 100 \rangle$ と $\langle 010 \rangle$ 方向はランダムに配列する。このため、マクロ的に均質化すると、横等方性材料(六方晶系モデル)とみなすことが出来る。

連絡先: 溝田 裕久、〒319-1221 茨城県日立市大みか町7丁目2番1号、(株)日立製作所 研究開発グループ  
E-mail: [hirohisa.mizota.gr@hitachi.com](mailto:hirohisa.mizota.gr@hitachi.com)

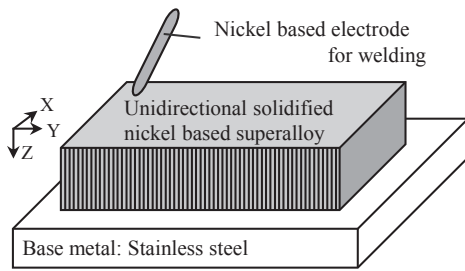


Fig.1 Unidirectional solidification

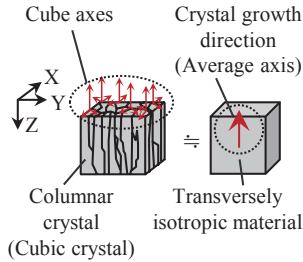


Fig.2 Columnar crystal organization

## 2.2 群速度分布

本サンプルの一方方向凝固材部分における、結晶成長方向と超音波の伝搬方向の成す角 ( $\theta$ ) に依存して変化する群速度分布を、電磁超音波共鳴法 [2] により算出した Table 1 に示すインコネル®82 の弾性スティフネスを参照し、理論解として求めた。群速度分布を Fig.3 に示す。今回の計測で用いる縦波の群速度分布は、厳密には  $180^\circ$  周期であるが、ほぼ  $90^\circ$  周期となっていることがわかる。

Table 1 Material properties

Material parameter		Value
Density		8310[kg/m <sup>3</sup> ]
Elastic constants	C11	280[GPa]
	C12	117[GPa]
	C13	143[GPa]
	C33	257[GPa]
	C44	107[GPa]

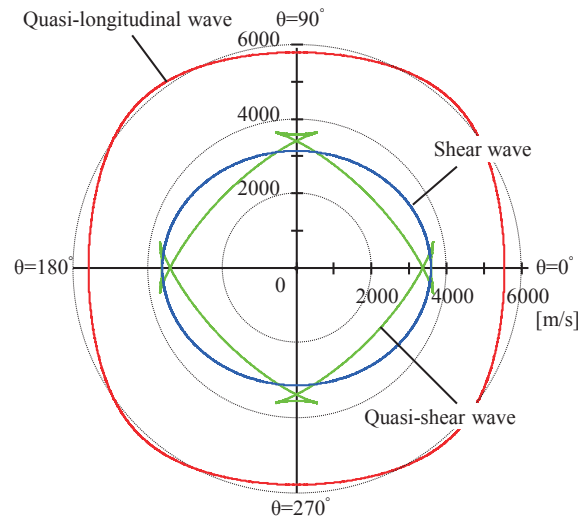


Fig.3 Group velocities diagram

## 3. 超音波による結晶成長方向の計測方法

Fig.4 に示すように、結晶成長方向が未知の一方方向凝固材の試験片があり、遅延条件に基づいて超音波を送受信可能なアレイセンサが試験片上に設置されているとする。もし、異方性を考慮した正しい遅延条件を設定できれば、底面やコーナーなど、試験片の形状に起因する反射源上に強い集束ビームを形成し、強い反射信号が得られことになる。例えば、Z 軸を基準に、結晶成長角度を  $-90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$  の範囲で多数仮定し、仮定した結晶成長角度に対応する遅延条件を全て算出する。算出した遅延条件を用いて反射源から得た反射波形 (A-スコープ) を、Fig.5 に示すように、仮定した結晶成長方向順に並べ、反射源からのエコー強度 (I) を抽出して評価する。仮定した結晶成長角度のうち最も反射信号が強くなる角度を探ることにより、試験片の結晶成長角度 ( $\theta_c$ ) すなわち結晶成長方向を推定することができる。

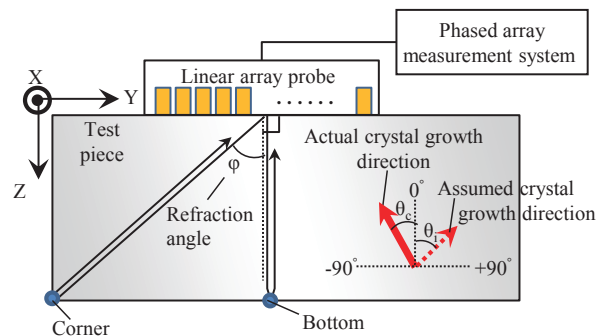


Fig.4 Apparatus setup

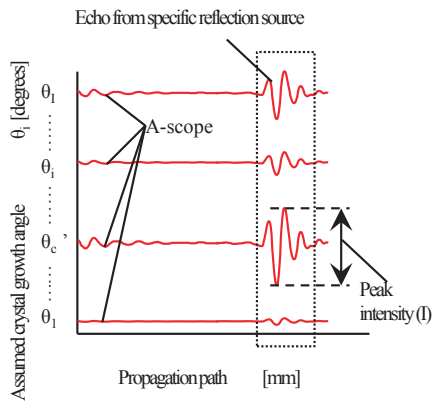


Fig.5 Procedure for evaluating crystal growth angle

## 4. 結晶成長方向の計測実験

### 4.1 実験体系と実験条件

結晶成長方向を計測するための実験体系を Fig. 6 に示す。アレイセンサは、アレイセンサの中心から屈折角  $50^\circ$  方向にコーナーが位置するように配置した。アレイセンサの仕様を Table 2 に示す。フェーズドアレイ探傷器には、株式会社 日立パワーソリューションズ製 ES3500W を用いた。試験片は、Fig. 1 に示した方法で製作したサンプルの一方向凝固材部分から、幅 160mm、高さ 30mm、奥行き 20mm のサイズで直方体形状に切り出し、さらに高さ 10mm の貫通スリットを付与して製作した。

結晶成長方向を計測するための実験条件を Table 3 に示す。 $-90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$  の範囲において、 $1^\circ$  ピッチで結晶成長方向を仮定し、試験片コーナーに屈折角  $50^\circ$  で超音波が集束できる遅延条件を 181 通り作成した。

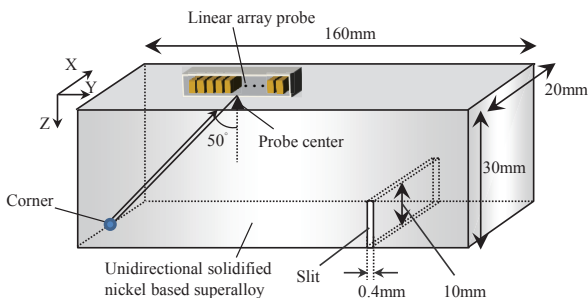


Fig.6 Apparatus setup for measuring crystal growth angle

Table 2 Specifications of the linear array probe

Frequency	2 MHz
Elements	64
Pitch	0.5 mm

Table 3 Experimental conditions for measuring crystal growth direction

Transmitter	Max voltage	160 V
Receiver	Band-pass filter	1 – 5 MHz
Focal law	Refraction angle	50 degrees
	Focal depth	30 mm
	Assumed crystal growth angle	From -90 to 90 degrees
	Increment	1 degree

### 4.2 計測結果

作成した遅延パターンを用いて試験片の結晶成長方向を計測した。Fig. 5 で示した方法で、試験片コーナーからのエコー強度を評価した結果を示す。エコー強度のピークは、仮定した結晶成長方向  $\theta_i$  のうち、 $1^\circ$  と  $84^\circ$  に観測され、若干  $1^\circ$  の方が高い値となった。このことから、試験片の結晶成長角度 ( $\theta_c$ ) は  $1^\circ$  であり、凝固時の熱流方向となる Z 軸に沿って結晶成長したことが推定できた。なお、 $84^\circ$  にも強いピークが観測された理由は、先述のとおり、群速度分布がほぼ 90 度周期に近く、与える遅延時間がほぼ同じとなるためである。

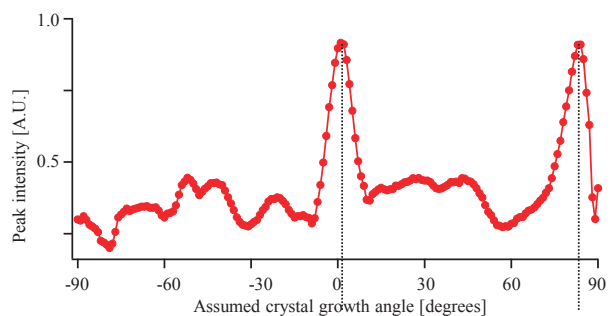


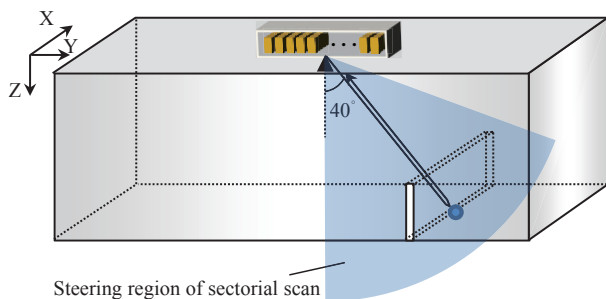
Fig.6 Measurement result of crystal growth angle

## 5. スリットの画像化実験

### 5.1 実験体系と実験条件

超音波フェーズドアレイ法による一方向凝固材の検査において、要求される結晶成長角度の計測精度を求めるため、試験片に付与したスリットを画像化して検証した。

実験体系を Fig. 7 に示す。アレイセンサの中心から屈折角  $40^\circ$  方向にスリットのコーナーが位置するようにアレイセンサを配置した。超音波フェーズドアレイ法によるセクタスキャンの実験条件を Table 4 に示す。なお、用いた器具一式は、結晶成長方向の計測実験と同一である。



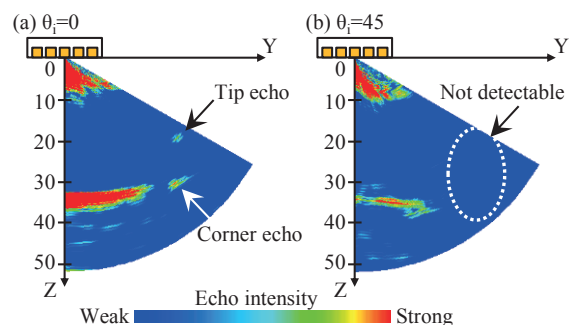
**Fig.7 Apparatus setup for ultrasonic phased array technique verification**

**Table 4 Experimental conditions for ultrasonic phased array testing**

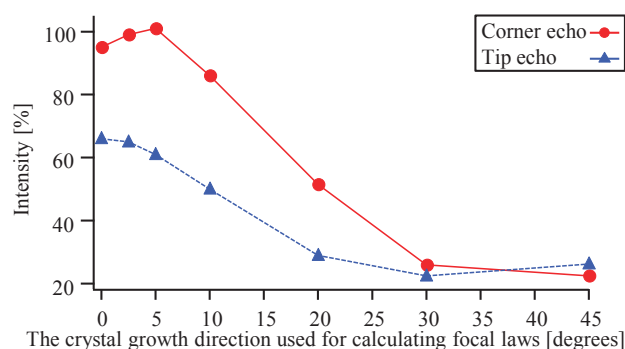
Transmitter	Max voltage	160 V
Receiver	Band-pass filter	1 – 5 MHz
	Total gain	72 dB
Focal law	Steering angle	From 0 to 60 degrees
	Crystal growth angle	0, 2.5, 5, 10, 20, 30, 45 degrees

## 5.2 画像化結果

超音波フェーズドアレイ法で、試験片に付与したスリットの画像化を実施した。推定した試験片の結晶成長角度とほぼ一致する (a)  $\theta_i=0^\circ$  とした場合のセクタスキャン画像と、一致しない (b)  $\theta_i=45^\circ$  とした場合のセクタスキャン画像を、Fig. 8 に例示する。正しい結晶成長角度の場合は、スリットのコーナーと端部からのエコーが鮮明に検出できているが、誤った結晶成長角度の場合は、どちらのエコーも検出できていないことがわかる。スリットからのエコー強度の結晶成長角度依存性を Fig. 9 に示す。結晶成長角度を  $5^\circ$  と仮定した場合でも、依然として強いエコー強度が得られるが、結晶成長角度を  $10^\circ$  以上として仮定した場合においては、強度が弱くなる傾向が得られた。すなわち、インコネル®82 の一方向凝固材検査において、結晶成長方向計測の要求精度は  $\pm 5^\circ$  程度であると推定できた。



**Fig.8 Sectorial scan results: (a) sectorial scan with the correct inspection condition (b) sectorial scan with the mismatched inspection condition**



**Fig.9 Dependence of echo intensity on crystal growth angle**

## 6. 結論

超音波フェーズドアレイ法による一方向凝固材検査の高精度化を目的とし、集束超音波を用いた結晶成長方向の推定手法を考案した。結晶成長角度の異なる遅延条件を設定して形状エコーを取得し、エコー強度を評価することで、インコネル®82 の一方向凝固材においては、 $\pm 5^\circ$  の精度で結晶成長方向を推定できる見通しを得た。推定した結晶成長を元に、精度よくスリットを画像化できることを示し、本手法の有効性を実証した。

## 参考文献

- [1] L. Azar, Y. Shi and S. C. Wooh, “Beam focusing behavior of linear phased arrays”, NDT&E International 33, pp.189–198 (2000)
- [2] H. Ogi, G. Shimoike, K. Takashima and M. Hirao, “Measurement of elastic-stiffness tensor of an anisotropic thin film by electromagnetic acoustic resonance”, Ultrasonics, Vol.40, pp. 333-336 (2002)

(平成 29 年 5 月 17 日)