

# トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部における溶け込み量測定を目的とした超音波探傷技術の開発（その1）

The Development of Ultrasonic Measuring Method for Penetration of Trough Rib Welding

湯田 誠  
Makoto YUDA

川田工業(株)橋梁事業部生産企画部  
溶接研究室係長

藤本 亘  
Wataru FUJIMOTO

川田工業(株)橋梁事業部四国工場  
品質管理課課長

輪荷重の載荷によってデッキプレートが大きく変形することから、トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部には曲げモーメントが作用し、溶接ルート部を起点にした疲労亀裂が発生していることが近年指摘されている。1つの対応策として、ルート部の応力集中を緩和させる目的としてこれまで以上の安定した溶け込み量が求められている。本研究では、この要求品質に対し溶け込み量が十分確保されているかについての確認を可能とする新たな非破壊検査手法（超音波探傷検査）の開発に取り組んだ。

キーワード：合理化鋼床版、トラフリブ、溶け込み量、超音波探傷試験、マスターカーブ

## 1. はじめに

橋梁製作部材のうち鋼床版を構成するトラフリブとデッキプレートとの縦方向溶接部では、ルート部における疲労亀裂発生に対して溶け込み量確保による応力集中の緩和が有効であることからトラフリブ板厚の75%以上の溶け込み深さの要求が道路橋示方書（H14年度版）の改訂で追加された。

溶け込み深さを確認する方法は、1つには超音波探傷試験法（UT法）による方法が考えられるが、既存の技術において必要な溶け込み量を精度良く評価可能とする技術は見あたらない。このため、現状では実際と同様の溶接条件で製作時におけるタブテスト（マクロ試験での確認）がプロジェクトごとに行われてきた。しかしながら、製品溶接部の直接的評価、いわゆる標準化した施工条件に対する溶接品質の再現性の確認、判断ができないという課題が残されていた。

本報告では、上記の課題を解決するために新たな超音波探傷技術の開発を目的とし、トラフリブ外面からの斜角一探触子法による探傷方法に着目し検討した結果、探傷精度が良好な手法を確立したので報告する。

## 2. トラフリブ溶接部の超音波探傷技術について

従来の超音波探傷技術の特徴は、対象物に超音波を入

射させキズ等から反射ピークエコーの情報にもとづいて反射源の位置と大きさを特定する方法である。一般的には、最も高い反射情報（ピークエコー）をもとに大まかなキズの大きさを推定し指示長さはエコーレベルがある一定以上得られる範囲（探触子の移動距離）を1 mm単位で計測している。このことから、今回のように溶け込み残量を精密に評価しなければならない場合、従来技術では不十分となりこれに代わる新たな理論と実証が必要となる。

トラフリブ溶接部の溶け込み残り部（以下、スリット部と記す）の評価は、製作工程上トラフ外面からの斜角探傷（写真1：実施例）によりスリット部からの情報を得る方法が最もふさわしいものと考えられる。また、その情報とはスリット部の大きさに対し0.1 mmオーダーで評価を可能とする探傷技術でなければならない。本検討では、スリット部からの反射エコーを得る方法（エコー高さ法）に着目した方法を採用した。

## 3. きずの定量評価を行うために考慮すべき点

提案のエコー高さ法による定量的評価を行うためには、きずからの反射エコー特性を考慮し、最適な組み合わせを決定していく必要がある。このためには、

- ① 溶接部特有のきずの識別能力にすぐれた探触子の選定

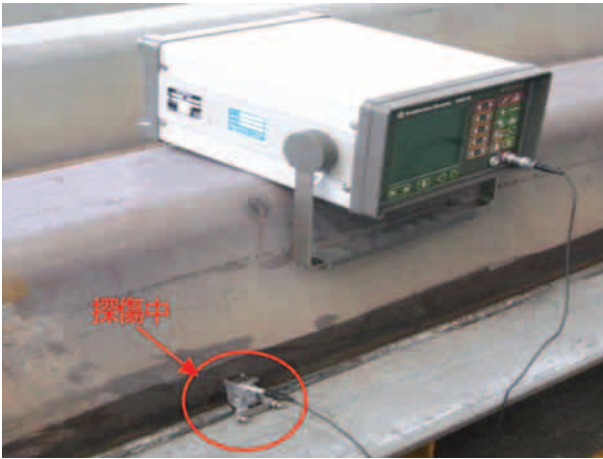


写真1 トラフ外面からの探傷状況例

② エコー高さの安定度を求めるための走査方法ならびに環境条件の決定等に着目し検討を進めるものとした。他の条件も含め、きず評価に関わる影響因子を表1にまとめて示す。

#### 4. 調査対象部位の評価ときずの一元化

トラフリブ溶接部における評価対象部位（ルート部）に発生しやすいきずの種類を表2に示す。きずは、開先面の融合不良や溶け込み不足、ルート部に残留するブローホールや割れなどが考えられる。超音波探傷試験による特性上ブローホールの評価は難しいが、タイプ1～3, 5に見る線状的きずや面状的きずはほぼ似たような傾向をもつか、もしくはこれに準ずる評価が可能であることが考えられる。このことから、目的とする溶け込み不足の評価を行うためにタイプ3の単純なきずに一元化して検討を行うものとした。

#### 5. 実験方法

スリットきずの評価では、超音波ビームの広がりや角度いわゆるスリットに対しどのようなビームが入射、挿入されたかが重要となる。ここでは、表1にも示したよう

表1 きずの定量評価を行う場合に考慮すべき内容<sup>1)</sup>

項目		内容		探傷結果に及ぼす影響
探傷装置	探傷器	送信部	ダンピング抵抗	感度低下、高周波数では周波数特性
			コンデンサー容量(送信エネルギー)	周波数特性
		受信部	受信(増幅)周波数帯域	受信周波数特性
		使用探傷器固有の調度		
	探触子	周波数	周波数特性	エコー高さのばらつき
		振動子形状、寸法	ビーム形状	
		屈折角	きずに対する超音波の入射角(反射率)	
くさび材質		音響インピーダンス(接触媒質と関係)		
探触子ケーブル	ケーブルの種類、長さ、接栓	インピーダンス	減衰特性	
探傷方法	走査方法	接触媒質	音響インピーダンス	エコー高さのばらつき
		接触方法	接触媒質層の厚さ	
	試験片	感度調整用対比試験片		評価のばらつき
被験材	母材	材質	超音波の減衰量	エコー高さのばらつき
		表面状態	表面アラサ	
			表面処理方法(塗装など)	
		溶接施工方法	開先形状	
その他	試験環境	気温	被験材の音速、接触媒質のインピーダンス	エコー高さのばらつき
		湿度	接触媒質のインピーダンス	

表2 トラフリブ溶接部に見るきずの種類

タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5
ルートフェースおよび開先面の溶け込み不足	開先面の融合不良	床版側開先面の融合不良	ブローホール	ルート割れ

に使用する探触子、探傷器のもつ特性をふまえた上で最適な評価を可能とする探傷条件について検討を行った。

**(1) 人工スリットきず試験体の採用**

スリットきずに対する評価を厳密に行うために、大きさや形状の明確なきずを人工的に挿入した試験体を用い、きずに対する検出能について最適な探傷条件を求めるものとした。なお、人工スリットきず試験体にて検討を進める理由は以下の2点である。

- ・スリットの形状、傾き、位置をほぼ特定できるとした特徴を持つこと
- ・溶接部の特徴を精密に再現した加工スリットによる評価が可能となること

検討を進めるにあたり、同時に検討中のトラフ溶接試験体（トラフ板厚：8 mm）を用い、ルート部に特有の溶け込み形状（図1）を破面試験により確認したうえで挿入するスリットきずの形状を以下のように決定した。

- ① 連続的な溶け込み形状を想定した長方形スリット
- ② 不連続な溶け込み形状を想定した円弧形スリット

図2に作成した人工スリットきず試験体を示す。長方形スリットの大きさは要求溶け込み量（トラフ板厚の75%以上； $\leq 2.0$  mm）を含む0.3 mmから5.0 mmまでのスリット高さを0.3~0.5 mmピッチで設け、円弧形スリットきずは高さを0.5 mmピッチとし底面長さはビームの広がりと共にこれに内包される大きさを考慮した。

**(2) 機器ならびにエコー高さの測定要領**

表3に検討に用いた探傷器ならびに探触子を示す。特に探触子は、一般的な斜角探触子や広帯域型探触子を用い検討を行った。また、被検面の荒さによる影響をさけ

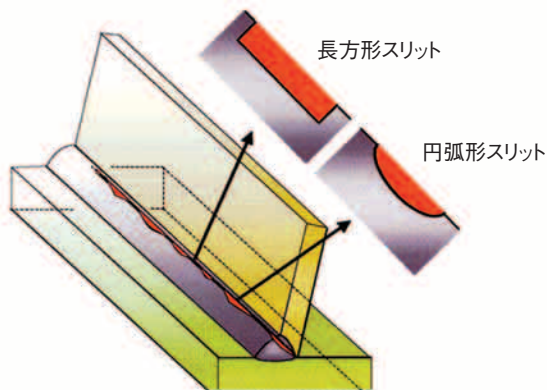


図1 ルート部の溶け込み形状（長方形きず，円弧形きず）

表3 検討に用いた機器および探触子

探傷器	探触子		
	形式	くさび材質	屈折角
USD-15 (クラウトクレーマー)	5C10×10A70	アクリル	69.5
	5Z5×10A70	アクリル	69.8
	5K10×10A70PS	ポリスチレン	70.0

※接触媒質：ソニコートBSLを使用

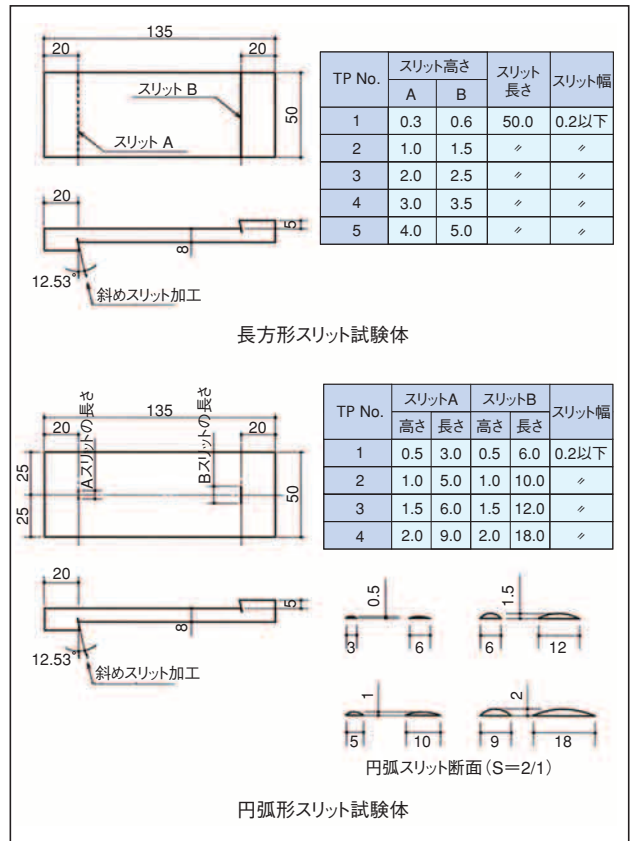


図2 人工スリットきず試験体

エコー高さの安定度を求めるためにギャップ法（G：0.2 mm）を用いた。図3にエコー高さの測定方法とその状況を示す。各スリットきずコーナー部を基準（屈折角に応じた0.5S）とし、2 mmピッチで-8 mm～+10 mmの前後走査により各探傷位置において相対エコー高さが80%となるゲイン値を読みとるものとした。

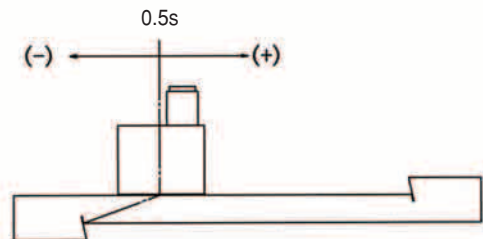


図3 スリットきずの測定状況

## 6. 実験結果

### (1) 長方形スリットきず試験体における結果

前項に述べた要領にもとづき、各きずに対するエコー高さの測定結果を図4～6に示す。グラフに示すように、スリットきずごとの探傷位置とエコー高さの関係は、0.5S～0.5S+2 mmのあたりでピークが得られる傾向を示している。後述するように、いわゆる対象部位に対する近距離音場内のビームの広がり角がコーナー（トラフ側ルート部に残るコーナー部分）部を大きくとらえた結果として表れているものと推察される。なお、このピークエコーの得られた位置ではスリットきずに対し1.5 mm以上のスリットを識別することは不可能であることがわかる。

一方、スリットの大きさを識別可能とする探傷位置を読みとるならば、0.5S点を中心にマイナス側の探傷位置であるほど、きずの大きさごとのエコー高さに有意な差が得られている。最適な探傷位置について実際の溶接ビード高さともなう探触子の接近限界距離を考え合わせた結果、0.5S～4 mmの位置を最適探傷範囲と判断した。また、この傾向を3種類の探触子について比較すると、Aスコープ上での林状エコーの発生する程度を含め、5K10×10A70PSがきず識別能が最も良好であることがわかった。

図7に5K10×10A70PSによる0.5S～4 mm位置での各スリットきずとエコー高さの関係を整理した結果を示す。きず高さが2.0 mmを越えるとエコー高さの差が2.3 db以下となりバラツキを考えると識別は難しくなるが、目標とする2.0 mm以下の評価においてはスリット長0.5 mmごとに5 db以上の差が得られることから十分に識別が可能であることがわかった。

### (2) 円弧形スリットきず試験体における結果

長方形スリット同様、図8～10に測定結果を示す。円弧形スリットきずに対する識別は、いずれの探傷位置、探触子においてもほぼ良好な傾向を示すことが確認された。探触子別による比較においても有意差は見られない。これらの結果から、図1に示したトラフリブ溶接部特有の溶け込み形状を考えるならば、連続した長方形きず+円弧形きずの評価に最適な探触子は5K10×10A70PSが望ましいと考えられる。

長方形スリットきずにおいて良好な識別能を示した0.5S～4 mmの位置におけるスリットきずとエコー高さの関係を図11に示す。円弧状スリットきずの大きさとエコー高さは、ほぼニアな関係を示すことが確認できたことから、凹凸をもつ局所的な溶け込みラインに対しては、長方形スリットに準じた評価が可能であると考えられる。

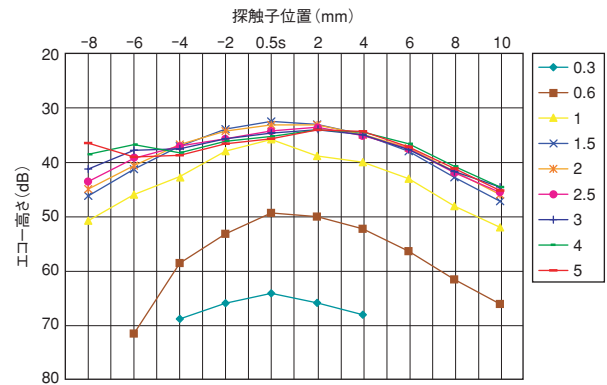


図4 長方形スリットきずの高さと探触子位置 (5C10×10A70 500Ω)

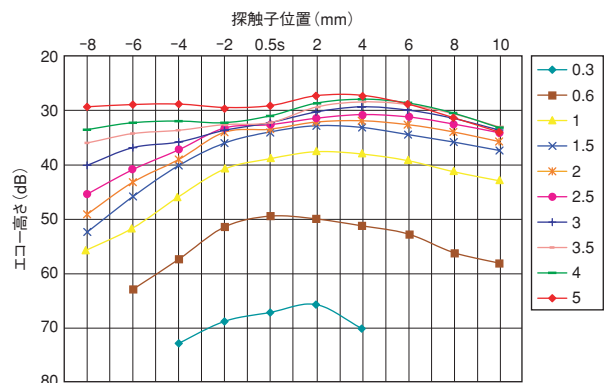


図5 長方形スリットきずの高さと探触子位置 (5Z 5×10A70 500Ω)

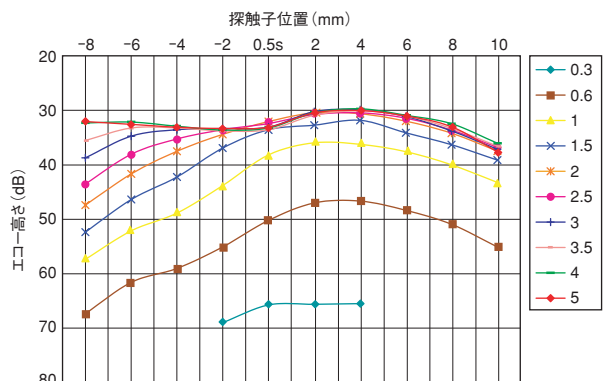


図6 長方形スリットきずの高さと探触子位置 (5K10×10A70PS 50Ω)

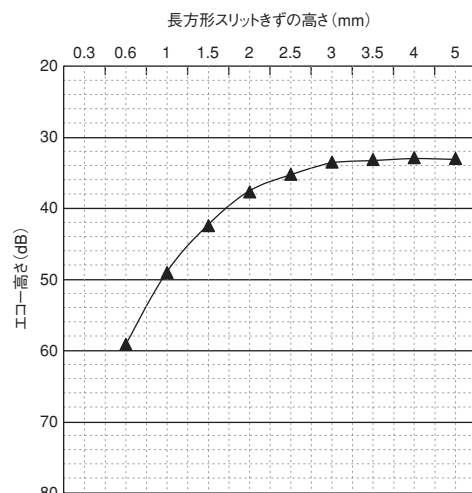


図7 長方形スリットのきず高さとおエコー高さの関係

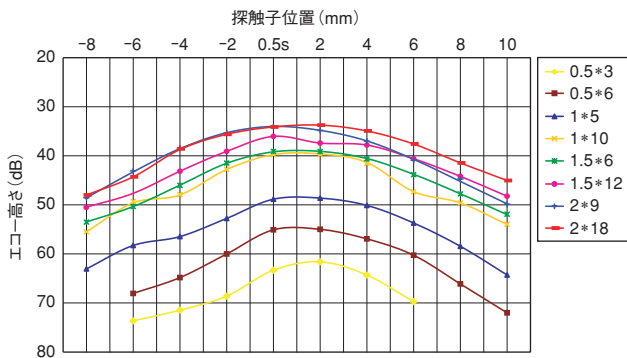


図8 円弧形スリットきずの高さと探触子位置 (5C10×10A70)

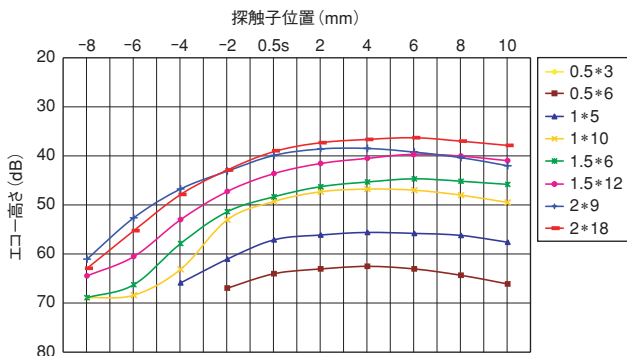


図9 円弧形スリットきずの高さと探触子位置 (5Z5×10A70)

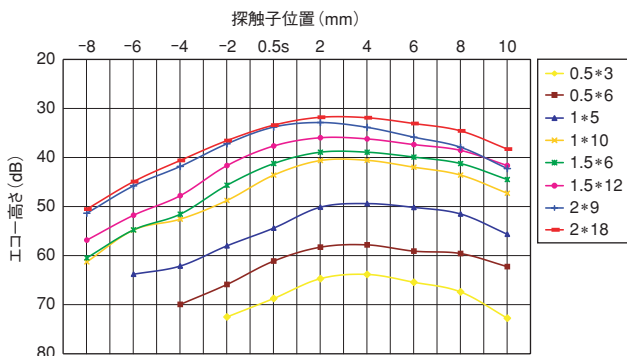


図10 円弧形スリットきずの高さと探触子位置 (5K10×10A70PS)

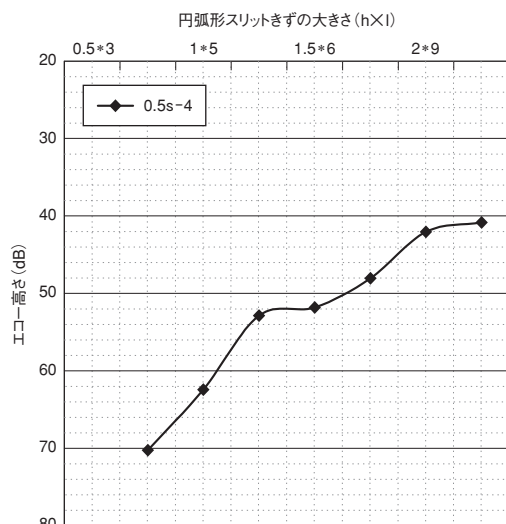


図11 円弧形スリットのきず高さとエコー高さの関係

### (3) 実験結果に対する考察

トラフリブ溶接部ルート溶け込み形状を模擬化した長方形スリットきず、円弧形スリットきずを人工的に挿入した試験体を用い、きずを精度良く識別可能とする探傷条件について検討を行った。これまでの検討結果をまとめると以下ようになる。

- ① きずに対するエコー高さの識別差が大きい探触子位置は0.5S-4~6 mmの範囲が最もよい
- ② 実際の溶接部の探傷を考えるならば、隅肉ビードが干渉するとした接近限界から判断するに-4 mmの位置が望ましい
- ③ これまでの検討結果にもとづけば、最適な探触子は広帯域型探触子(コンポジット型)が好ましい

図12にビームの広がりと溶接部溶け込み不足をとらえた状況を幾何学的に示す。スリット部では、超音波ビームの広がりと角度、いわゆるスリットに対しどのように入射されたかが重要となる。0.5S-4 mmの位置では、コーナーからの反射成分を含まないスリットからの反射エコーをとらえており、きずの識別に良好な探傷位置であることがわかる。

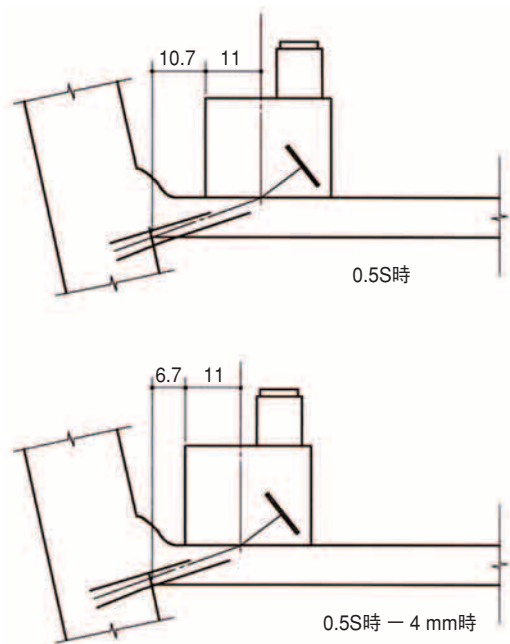


図12 0.5S-4 mm位置でのスリットきずとビームの広がり関係

また、今回採用した広帯域型探触子(5K10×10A70PS)がきずの識別能力が高いとした結果に対しては、今後多くの検討をふまえその特性を明確にしていく必要がある。一般的に、溶接部の探傷においてきずの形状が複雑であるほど広帯域型探触子の利用が好ましい<sup>2)</sup>ことを考えると本溶接部の評価にも効果的であることが予測される。

## 7. スリットきずとエコー高さの関係

### (1) マスターカーブの作成

トラフリブ溶接継手に求められたルート部の溶け込み量の評価方法について、要求される測定精度をほぼ満足する探傷条件（探触子の特性，測定条件）を認識した。これまでの結果をふまえ実際の溶接部におけるルート部の評価を行うためには、スリットの大きさ（高さ）とエコー高さの関係を整理する必要がある。

一般的に平面きずのエコー高さはビームの広がりには包まれるきずの大きさ（反射面積）に比例することがいわれている。このことから図7、11の結果をもとにきずの大きさをビーム幅に対応した反射面積で整理すると図13となる。ここで面積を求めるためのビーム幅は使用した斜角探触子（5K10×10A70PS）のビーム路程約22.0 mm位置での左右の広がり6.6 mm（-6 db範囲）を用いた。本実験でのスリットきずは、きずと板裏面で構成されるコーナー部からの反射成分も含まれる可能性があるため一律に反射面積だけで整理することに問題もあるが、長方形スリットと円弧形スリットにおけるエコー高さとの相関は近似した関係であることが確認された。したがって、本カーブを溶け込み量評価のためのマスターカーブとするものとした。

### (2) 溶接試験体を用いた検証

得られた知見をもとに、実際のトラフリブ溶接試験体を用い溶け込み量の評価を行った。1溶接線に対し連続的に計測を行った結果を図14に示す。計測後、破面試験を行い各測定点における実溶け込み量を実測し相互の値を比較した結果、それらの誤差は±15%以内にとまるとした十分な測定精度を認識した。

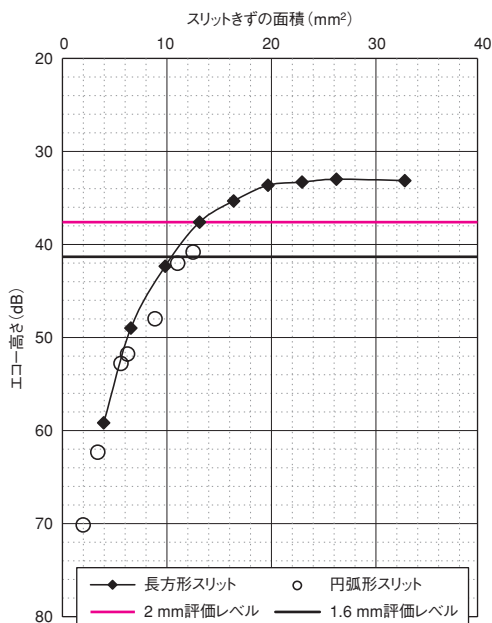


図13 スリットきず反射面積とエコー高さの関係（マスターカーブ）

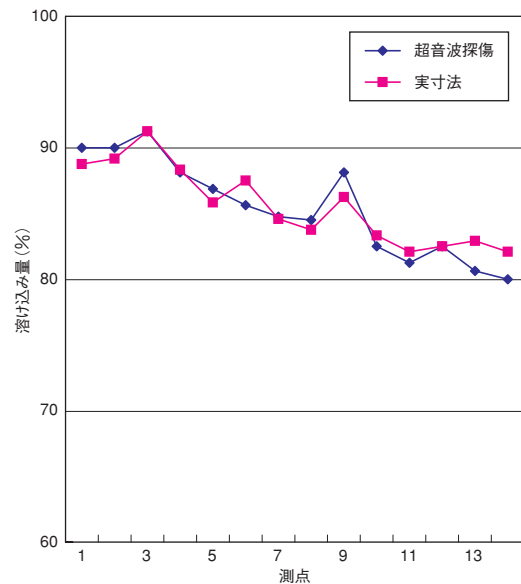


図14 トラフリブ実溶接試験体を用いた検証結果

## 8. まとめ

トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接部に対する新たな溶け込み深さの要求に対し、実際の溶接部の評価を可能とする超音波探傷技術について検討を行った。エコー高さ法に着目し、人工スリットきず試験体を用いた検討結果からきずの定量評価に対する貴重な知見を得ることができた。すでに継続して検討を進めているが現段階における問題点、課題を以下に述べる。

- ① 溶け込み残量に対するエコー高さの評価基準を示すマスターカーブを得たが、要求品質である2.0 mm前後の評価をさらなるエコー高さの差として識別しやすくする必要がある  
また実際の鋼床版製作に関わる点として、
- ② ルート部に得やすい開先面と連続した融合不良（断面形状がくの字形のきず）の評価
- ③ トラフリブ本体の加工精度ならびに組み付け精度（デッキプレートとの構成角の違い）に起因する評価精度への影響

以上のように評価精度の向上に向けたさらなる取り組みが重要である。

本検討において、(有)プレテックエンジニアリングの田中氏には実験計画から実施に至るまで終始多大なご支援ご協力をいただいた。本誌面を借りて感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 例えば：超音波探傷試験Ⅱ、Ⅲ（社）日本非破壊検査協会編 テキスト 2001年度版
- 2) 松山：1-3コンポジット振動子を用いた斜角探触子の特性の紹介、NDI資料21597、1998。