

溶接継手の超音波探傷映像化方式実用化研究

その1.部分溶け込みかど継手の超音波探傷

成宮隆雄* 浜野正義***
森下統一** 大久保一樹****

1. まえがき

橋梁・鉄骨製作における溶接部の非破壊検査のうち、超音波探傷は、増々重要な検査方法となってきたが、超音波探傷は、記録性に劣ること、品質の評価が探傷技術者の技術・経験に大きく左右され、および客観的な説得性に劣ることが弱点となっている。

一方超音波探傷は、放射線透過試験と比べると、安全性および検査能率が優れているばかりでなく、多目的な情報を入手することができるため欠陥の手直しにおける効率化を計ることができる。さらに超音波探傷は、放射線透過試験では探傷困難な、十字継手およびかど継手等の検査も容易である。

従来の超音波探傷（JIS・Z3060 鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法）では、欠陥における超音波の反射率（欠陥の最大エコー高さ）とその

範囲（欠陥指示長さ）で欠陥の判定を行っている。これらの手動探傷では、探傷者は、探触子の位置関係およびAスコープ（探傷器のブラウン管）でのエコー高さを読み取り、欠陥の判定を行わなければならない。

一方最近の自動探傷（NDIS2407では、①走査が機械的に行なわれること。②探傷結果の記録がとれること。と定義づけられている。）では、探触子の走査位置とエコー高さをデジタル記録表示する方式が大多数である。これらは、欠陥の寸法を直接的に算定しにくい面がある。理想的には、放射線透過試験におけるフィルム上の欠陥映像のように直接欠陥の形状、寸法および位置が記録されることが望ましい。

そこで、超音波探傷結果の映像化可能なキヤノン製超音波映像装置に注目し、橋梁・鉄骨の溶接部の超音波自動探傷映像化方式の実用化研究を行なった。

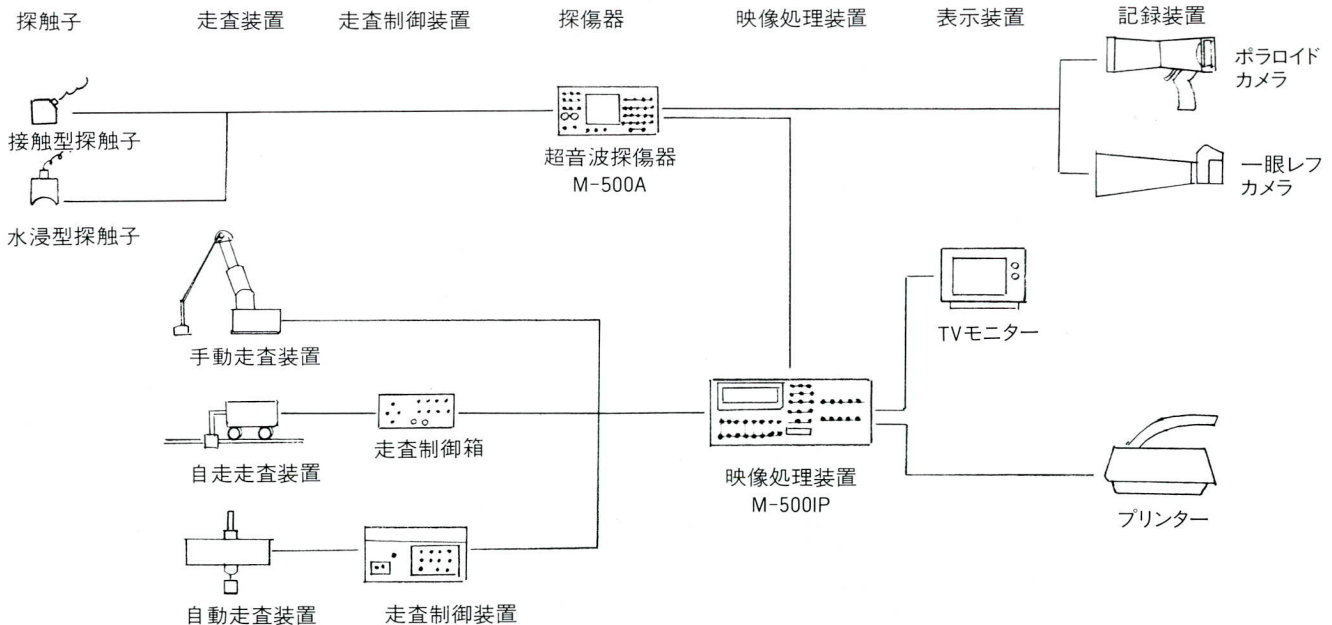


図-1. M-500システム図

* 千葉工場研究室長 *** キヤノン販売(株)
** 千葉工場製造部生産技術課 **** (株)工業技術コンサルタント

本文では、放射線透過試験が困難な箱断面かど継手（主として部分溶け込み継手）の超音波自動探傷映像化システムの実用化に成功したので、報告する。

2. 超音波自動探傷映像化システムの概要

(1) 超音波探傷映像装置M-500システム

M-500システム図を図-1に示す。本装置の特徴は、超音波探傷器（以下Aスコープと呼ぶ）からの欠陥信号と探触子の走査装置からの位置信号を全て超音波映像処理装置M-500-IP（以下M-500IPと呼ぶ）でデジタル処理をして、プリンターにて連続記録し映像化していくことにある。図-1に示したシステムの各装置について、種類および機能を以下に示す。

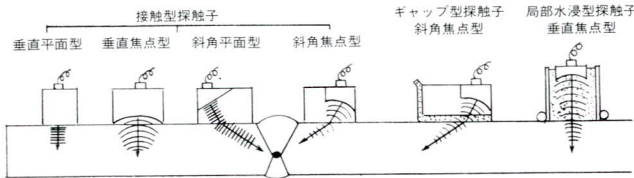


図-2. 探触子の種類

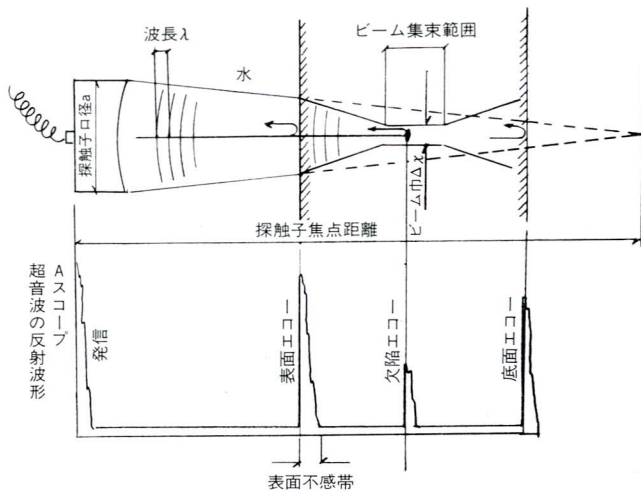


図-3. 水浸型探触子の超音波ビームの光学的形状

(a) 探触子

本システムに用いることができる探触子の種類を図-2に示す。探触子の選択は、探傷の主目的、継手の形状、板厚等を考慮して行う。本報における部分溶け込みかど継手の探傷の場合は、融合線近傍（以下ルート部と呼ぶ）の欠陥を探傷するため、分解能を高くする必要があり、超音波ビームを絞ることができる焦点型探触子を用いることが有利である。図-3に局部水浸垂直焦点型探

触子の超音波ビームの光学的形状とAスコープ波形形状を示す。

焦点型探触子の近接した2つの欠陥を分離できる能力（分解能）は、理論的には、焦点ビーム束(Δx)に相当する。焦点ビーム束(Δx)は、(1)式で示される。

$$\Delta x = 1.22 \frac{\lambda \cdot f}{a} \dots\dots\dots(1)$$

またΔxの理論分解能をもつビーム束長さ（理論焦点深度ΔγL）は(2)式で示される。

$$\Delta \gamma L = 2\lambda \left(\frac{f}{a} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

λ：超音波の波長（水中）mm

f：探触子焦点距離（水中）mm

a：探触子有効口径mm

Δx：理論分解能mm

ΔγL：理論焦点深度mm

(b) 走査装置および走査制御装置

探触子を鋼板平面上で平面的に移動させる装置を走査装置またはスキャナーと称し制御装置と接続し、走査距離、走査速度、走査ステップおよび自走速度等を制御する。

(c) 超音波探傷器（M-500A）

M-500Aは、従来の超音波探傷器としての機能のほかに、映像処理装置M-500IPからの映像を表示するモニターとしての機能を持っている。従って、同じモニターを使ってAスコープ波形と映像を必要に応じて、切替えて観察することができる。

(d) 映像処理装置（M-500IP）

超音波探傷器からの入力信号、走査装置からの位置信号および探傷条件を入力し、映像処理を実行して出力する。本システムの中核機能である。

(e) 表示装置

映像処理装置からの出力信号により、TVモニター及び白黒（またはカラー）プリンターに連続記録し映像化することができる。

(2) かど継手超音波自動探傷映像化システム

M-500システムを用いて、かど継手の部分溶け込みおよびすみ肉継手の超音波自動探傷映像システム（以下M-500CHP-5システムと呼ぶ）を開発した。

図-4に本システムの構成フローチャートを示す。

本システムに用いる各装置について以下に示す。

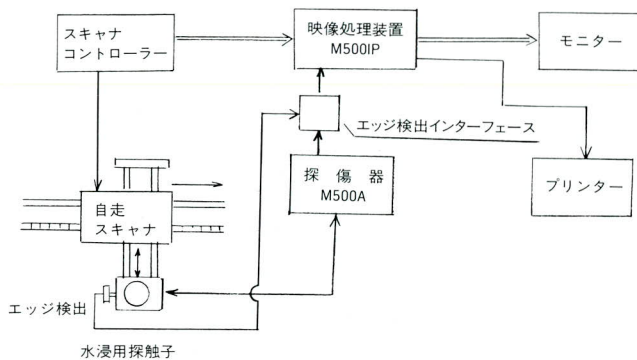


図-4. M-500CHP-5システムフローチャート

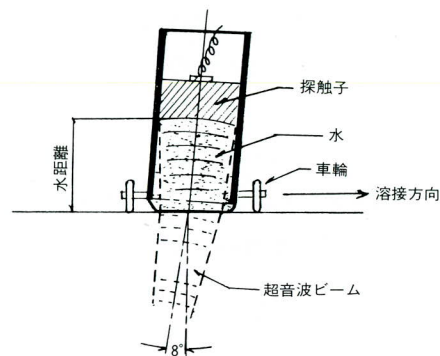


図-5. 局部水浸探触子ホルダー

(a) 探触子

図-2に示した局部水浸垂直点型探触子1個のみを用いて探傷を行う。探触子は、図-5に示す水筒状ホルダーに水浸固定され、探傷面と接する部分は0.2mmのゴム膜で密封されている。ゴム膜（スクラパー）との接触面は水で濡され、接触媒質の役割を果すと共に、走査の円滑化と安定した接触を保つようにしている。なお垂直探触子を用いているが、分解能（ルート部欠陥と融合線下の未溶着部の分離能力）を高めるため、探触子は、溶接方向に対して逆方向に傾け、鋼材内部で超音波ビームが8°傾むくようになっている。

(b) 走査方法

本システムにおける走査方法は、図-6に示した自走スカナーによる方形スキャン方式を採用している。この自走スカナーは、パルスモーターを用いたレール駆動により、スカナコントローラーでスキャンスピード、スキャン幅を操作することができる。

かど継手の操作図とAスコープ像の1例を図-6に示した。本システムの走査条件を下記に示す。

- スキャンピッチ ；粗探傷0.75mm/pitch
- 精密探傷0.5mm/pitch
- スキャン巾 ；38mm

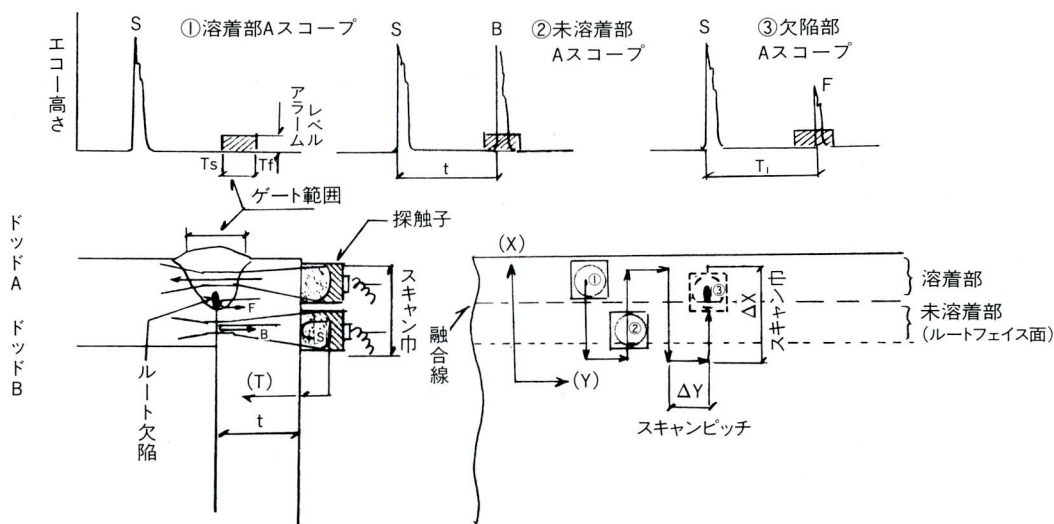


図-6. かど継手の走査図とAスコープ

- スキャンスピード；粗探傷250mm/sec
- 精密探傷150mm/sec
- 探傷速度 ；粗探傷 約8m/h
- 精密探傷約4m/h

(c) 映傷化方式および表示装置

図-6に示した走査において超音波の反射エコーが、

Aスコープのゲート範囲（鋼中のビーム路程 $T_s \sim T_f$ 範囲）においてアラームレベル以上の場合映像化処理装置へOn信号を送り、反射エコーがゲート範囲外およびゲート範囲内でもアラームレベルより低い場合Off信号を送る。同時に走査位置（X方向は0.25mmピッチ、Y方向はスキャンピッチ、ビーム路程T方向は0.25mm

ピッチ)もOn-Off信号に対応してメモリーされる。これらの情報は、逐次プリンターに出力され映像化していく。この状態を図式化したのが図-7である。図-7の映像は、探傷面に対して平面像でありこれをCスコープと称する。このほか探傷面に対して直角断面の映像として、FrontBスコープおよびSideBスコープがある。ただし連続記録方式の場合は、SideBスコープのみがCスコープ(平面像)と同時記録される。各スコープの見方を図-8に示す。なおCスコープには、継手ののど厚または溶け込み量も表示させることができる。

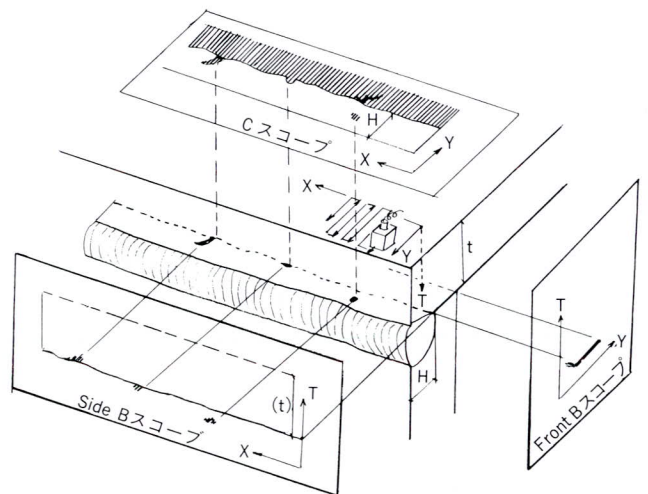


図-8. 各スコープの見方

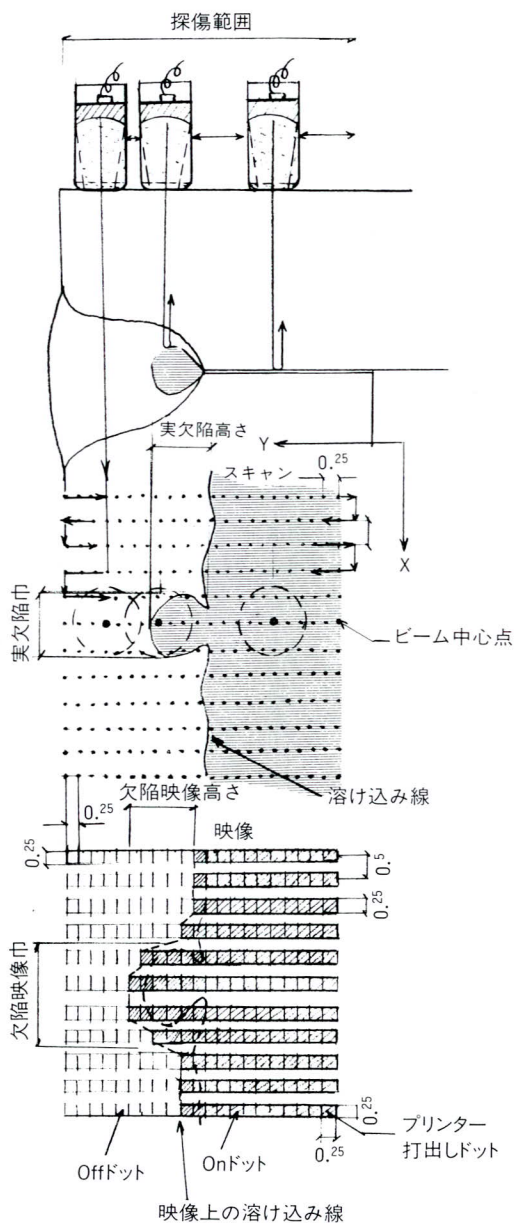


図-7. 走査と映像化の図式

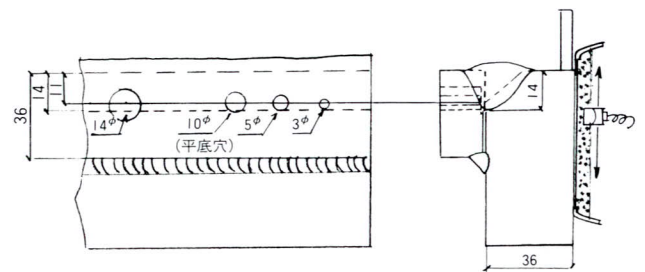


図-9. かど継手平底穴試験片

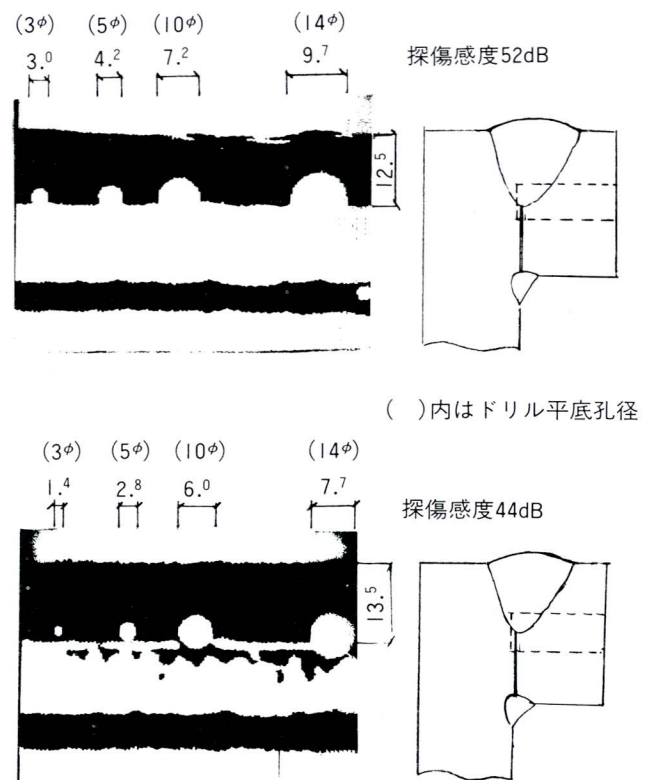


図-10. 平底穴試験片の映像例

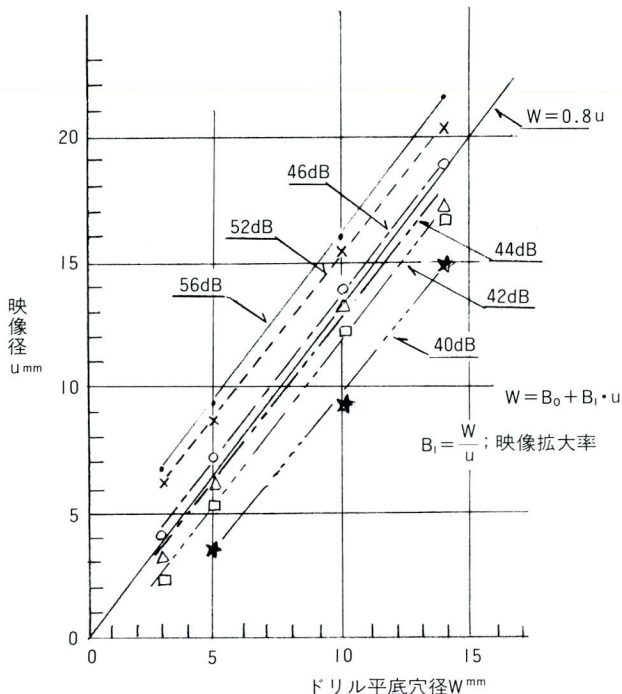


図-11. 平底穴試験片の穴径と映像径

(d) 探傷感度およびアラームレベルと分解能および映像形状・寸法について。

本システムをかど継手の探傷に適用するにあたって、**図-9**に示す試験体を製作し、そのルート近傍に3φ、5φ、10φ、および14φの平底孔を明け、映像寸法と実寸法の関係を調査した。ただし、本実験ではスクラバー局部水浸法を用いず、水タンクに探触子を入れる部分水浸法を用いた。**図-10**に、アラームレベルを一定にし探傷感度を変えた場合の映像の変化の例を示した。また、各探傷感度における実寸法と映像寸法（幅寸法）の関係を**図-11**に示した。

これらの結果から次のことが確認された。

- 1) 探傷感度を高くすると、アラームレベル一定なら映像寸法も大きくなるが、実寸法と映像寸法には、感度に関係なく比例関係が成り立つ。
- 2) 探傷感度を高くすると、映像上の融合線が盛り上り、のど厚が小さくなる。またルート部近傍の欠陥と融合線との分解能が悪くなる。
- 3) 探傷感度を低下させると、ルートフェイス面の圧着効果が現われ、ルートフェイス面と溶着部が映像上区別できなくなる。

3. かど継手（部分溶け込みおよびすみ肉継手）の探傷性能確認試験。

本州四国連絡橋における鉄道・道路併用長大橋では、極厚の調質高張力鋼が多量に用いられており、溶接継手の疲れ強さが設計上の要点となっている。従って製作上溶接継手の品質には十分な考慮がなされているが、トラス弦材等のかど継手（部分溶け込みおよびすみ肉継手）の非破壊検査に十分な信頼性のある方法がなかった。特に部分溶け込みまたはすみ肉溶接継手で形成されるかど継手のルート部の欠陥は疲労上の弱点となることが明らかにされてから、ルート部欠陥の検出が急務とされてきた。これらの技術的要請に基づき筆者らは、ルート部の微小欠陥を融合線と分離・検出し、欠陥の大きさを定量的に算定するため、水浸焦点型探触子を用いた「Cスコープ映像化方式」を提案し基礎的実験を行ない昭和55年11月にJSSC工作基準小委員会にて発表した。

本システムは、1つの探傷子により溶接部を全て走査するため多目的な情報が1回で得られるが、探傷速度には自から制限がある。能率を上げるため走査ピッチを大きくすると、微小欠陥を見逃す恐れがある。即ち、方形走査（仮に走査ピッチ0.5mm、走査範囲38mm、走査速度200mm/secとすると）は、スキニングをしない直線走査に比べて、走査距離は実に76倍になる。従って本システムは、多目的な情報が分り易い映像記録で得られることに特徴があり、そのため或る程度探傷速度は犠牲にせざるを得ない。なお昭和55年当時より現システムM-500CHP-5に至る過程は、信頼性の向上とデータ処理機能および記録方法等の実用機としての改良を行ない、きめ細かいデータの集積に費された。

以下にM-500CHP-5システムによるかど継手の探傷性能確認試験結果を記す。

(1) 人工欠陥試験片を用いた性能確認試験

部分溶け込みおよびすみ肉継手における超音波探傷に要求される性能は下記の通りである。

- 1) 溶け込み線形状が記録され、溶け込みの不整等が分ること。
- 2) のど厚または溶け込み量が算出できること。
- 3) ルート部欠陥（ブローホール、スラグ巻き込み等）を融合線と分離検出し、欠陥の種類を判別してその寸法（幅×高さ）を推定できること。
- 4) ルート部以外の溶接部の欠陥を検出し、その寸法（幅×高さ）を推定できること。

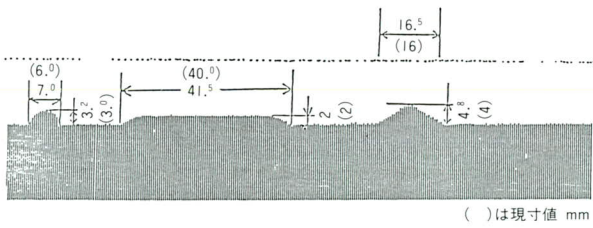


図13-1. ルート変化モデル探傷映像

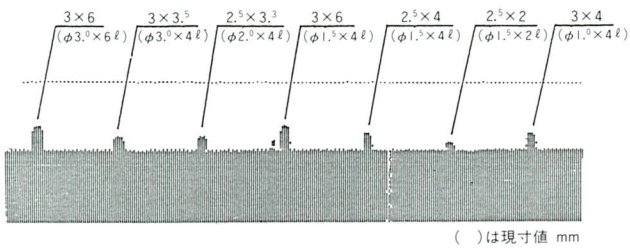
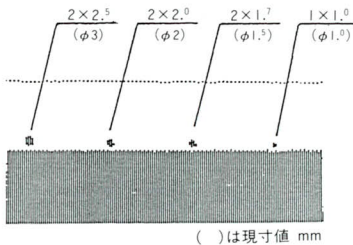


図13-2. 横穴探傷映像



(注) 図-12. に表示した面の裏から探傷するため、探傷映像 (図-13-1~3) は 図-12とは上下が逆になる。

図13-3. 縦穴探傷映像

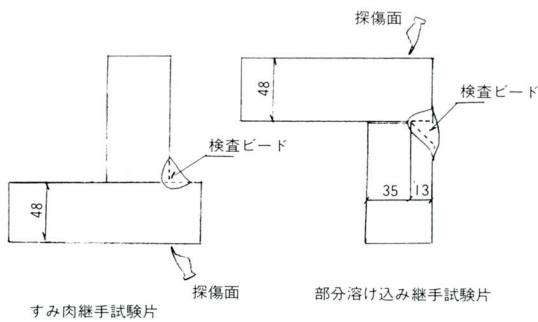


図-14.

とが考えられる。従って波面観察の結果明らかに異常データと思われるものは除外して回帰式を求め、実用的な推定式 (映像寸法より欠陥寸法を推定する式) を下記の通り決定した。

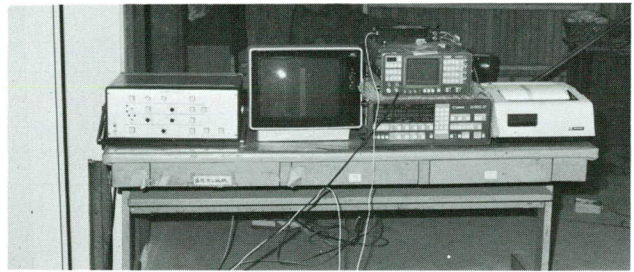


写真-1. M-500CHP-5

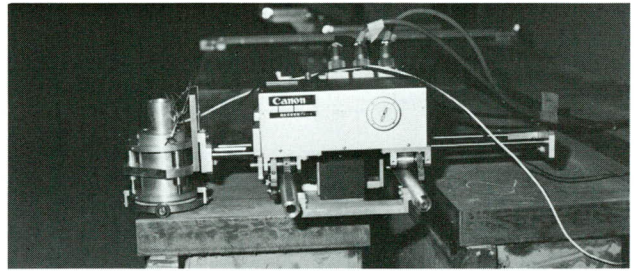


写真-2. スキャナーおよび探触子

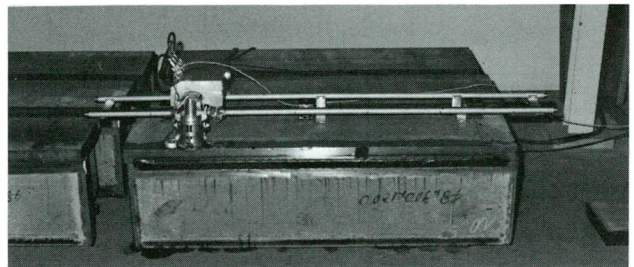


写真-3. 探傷状況

表-2. 自然欠陥試験片 破面欠陥数と探傷検出数及び検出率

欠陥サイズ	0.5ℓW<1.0	1.0ℓW<1.5	1.5ℓW<2.0	2.0ℓW<2.5	2.5ℓW<3.0	3.0ℓW<3.5	3.5ℓW<4.0	4.0ℓW<4.5	4.5ℓW<5.0	5.0ℓW
部分継手 実欠陥個数	45	44	58	70	43	58	23	24	9	24
検出個数	28	26	45	63	43	54	23	24	7	24
検出率	62.2	59.1	77.6	90.0	100	93.1	100	100	77.8	100
すみ肉継手 実欠陥個数	78	35	20	21	6	6	8			
検出個数	23	14	16	20	6	6	8			
検出率	29.5	40.0	80.0	95.2	100	100	100			

$$\begin{aligned} \text{部分溶け込み継手} & ; \hat{W}_G = 0.95u \\ & \hat{H}_G = 1.0+h \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{すみ肉継手} & ; \hat{W}_F = 0.86u \\ & \hat{H}_F = 1.0+1.1h \end{aligned}$$

ここで

\hat{W}_G ; 部分溶け込み継手の欠陥推定幅
 \hat{H}_G ; 部分溶け込み継手の欠陥推定高さ

\hat{W}_F ; すみ肉継手の欠陥推定幅

\hat{H}_F ; すみ肉継手の欠陥推定高さ

u ; 映像から求めた欠陥の幅寸法

h ; 映像から求めた欠陥の高さ寸法

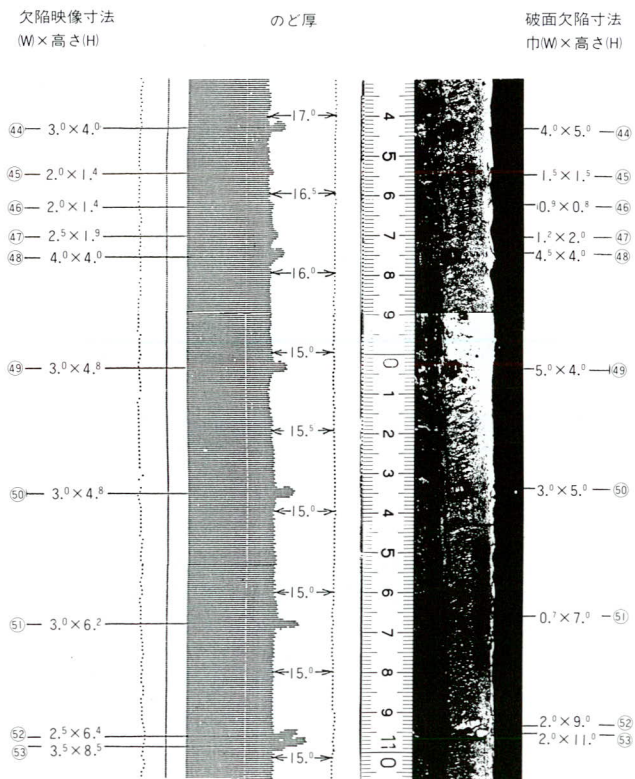


図-15. 破面と映像記録の対比

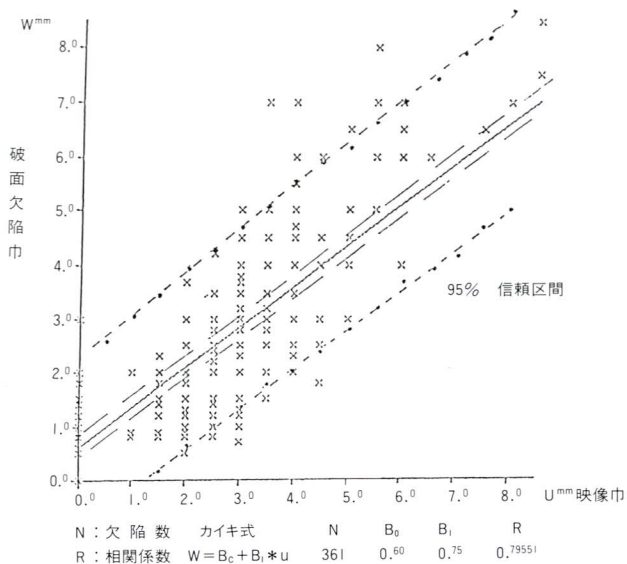


図-16-1. 部分溶け込み継手の欠陥巾と映像巾の相関

(b) 部分溶け込み継手ののど厚

図-16に示した映像記録から求めたのど厚は、波面から求めたのど厚と比べると平均して -0.85mm であった。(n=164個) 従って映像から求めたのど厚を $l\text{mm}$ とすると、推定ののど厚 \hat{l} は、 $\hat{l} = 0.85 + l$ とするのが妥当である。

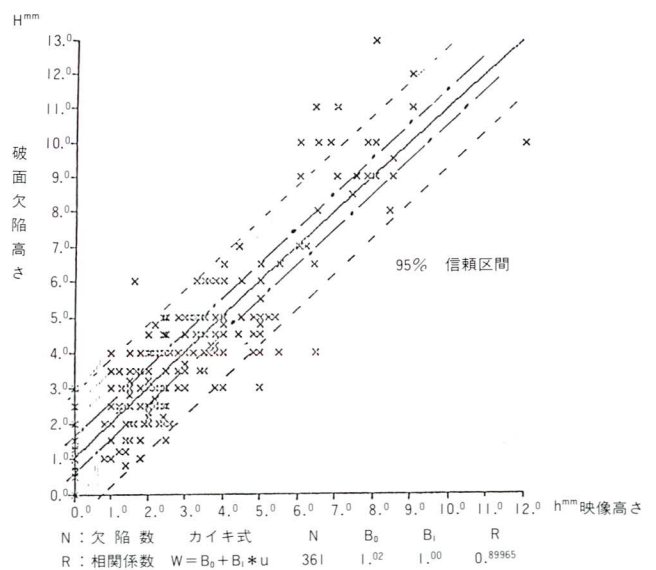


図-16-2. 部分溶け込み継手における欠陥高さとの映像高さの相関

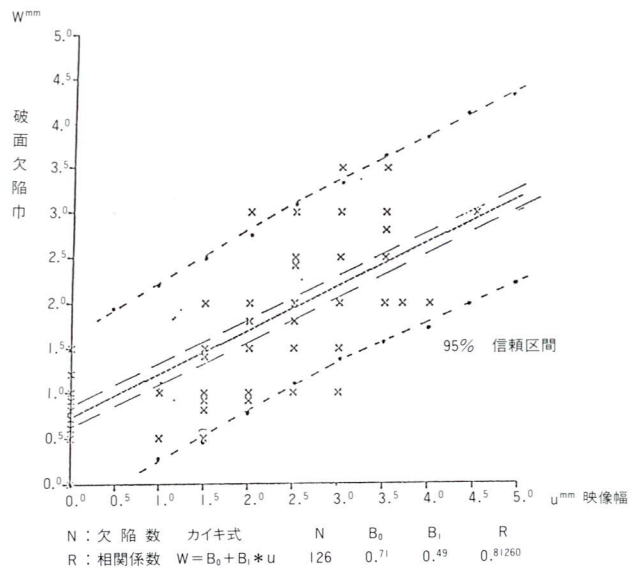


図-16-3. すみ内継手における欠陥巾と映像巾の相関。

(c) 部分溶け込み継手のたれ込み

基準感度 (1.5ϕ 横穴100%+6dB) では、たれ込みは検出できない。一般にたれ込みはウェブ(探傷底面)と完全に密着しているわけではなく基準感度では、ウェブとたれ込みの境界で反射エコーが生じ、これがアラームレベル20%をこえる場合が多い。従って、未溶着部の底面とたれ込みとウェブの圧着効果の差を利用することが必要である。基準感度を 1.5ϕ 横穴100%とし、アラーム

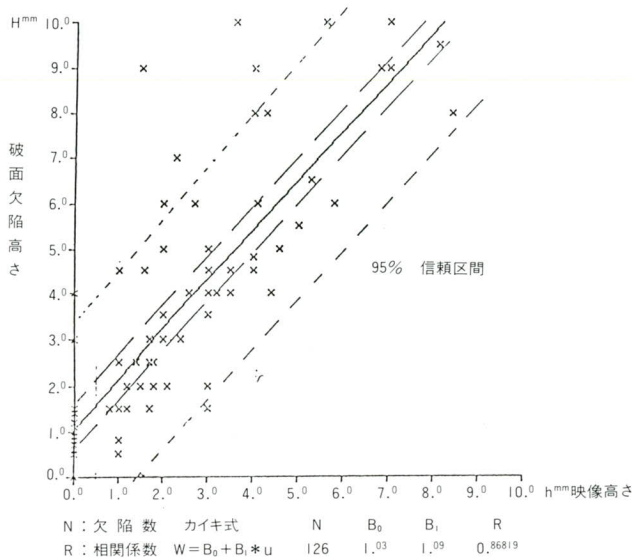


図-16-4. すみ肉継手における欠陥高さ映像高さの相関

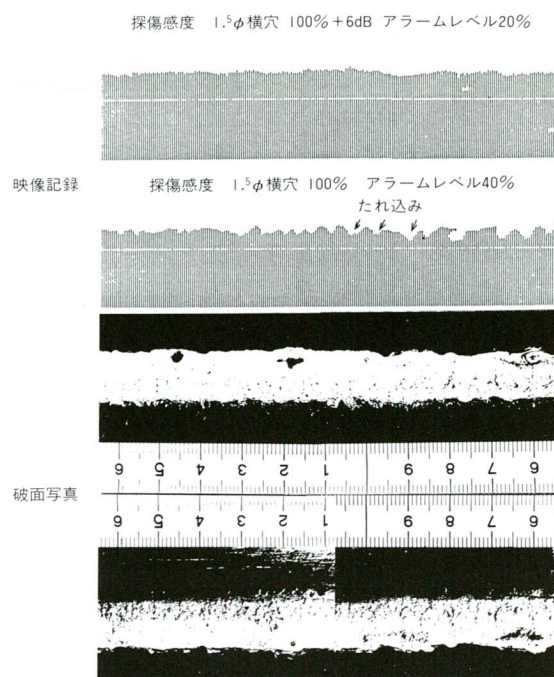


図-17. たれ込みの破面と映像記録

レベルを40%とすれば、たれ込みは検出できる。図-17に、たれ込みを生じた継手の波面写真と映像記録を示す。

4. あとがき

超音波探傷映像化システムM-500について概要を紹介し、M-500CHP-5システムを用いた部分溶け込みおよびすみ肉継手の性能確認試験結果を報告した。

溶接欠陥は、その形状および方向性が複雑であり、一面からの入射超音波で3次元的な溶接欠陥を完全に推定することは不可能であるが、本システムではCスコープ、Bスコープを上手に利用することによって、或る程度3次元的な位置関係を明らかにすることが可能である。本システムでは、一回の探傷により、数多くの情報が得られるが、さらに本システムのオプションとして、Aスコープ波高値の強度分布およびビーム路程のカラー表示等入力データの効果的な出力プログラムも組み込まれている。

本システムにおける探傷精度をさらに向上させるためには、走査時のバックラッシュ（走査の往復における映像のズレ）および超音波の入射角の制御精度の向上等改良すべき点もあるが、かど継手（部分溶け込みおよびすみ肉継手）にも十分適用可能であることが確認された。本研究を遂行するにあたり、長期間にわたり全面的に協力していただいたキヤノン販売株式会社に誌上をかりて深

謝の意を表す。

<参考文献>

- 1) キヤノン・ホロソニックス；カタログ「M-500 SYSTEM」
- 2) 榊宮地鉄工所東京工場；「フォーカスタイプ・Cスコープ超音波探傷映像化方式について」、JSSC工作基準小委員会資料
- 3) キヤノン販売(株)、(株)工業技術コンサルタント；「調質高張力鋼を用いた主構弦材のかど継手に対する超音波探傷システムの適用性能確認試験」報告書、昭和59年5月