レールガス圧接施工プロセスの脱技能化

山本　隆一*　　辰巳　光正*　　柿崎　陽太**

Rail Gas Pressure Welding Process without Using of Expert Skills

Ryu-ichi YAMAMOTO　　Mitsumasa TATSUMI　　Yota KAKIZAKI

Gas pressure welding is commonly adopted for rail welding in Japan. This technique however requires specialist skills for the rail end surface grinding process and rail heating process using a burner. In consideration of prediction of a decrease in skilled welders, a new simplified and standardized gas welding method with minimal requirement of specialist skills has therefore been studied and, as a result, has been developed. This paper describes this newly developed gas pressure welding process, and the performance test results for the gas pressure welds prepared according to this process are also shown.

キーワード：レール，ガス圧接，端面研削，バーナー揺動，脱技能化，継手性能評価試験

1．はじめに

ガス圧接法は，JR グループにおいて主要なレール溶接法として適用されており，図 1 に示すように，約 30%が当工法による施工箇所となっている。一方，当工法はレールセンターで使用されるフラッシュ溶接法と比べると，被接合面であるレール端面の準備作業工程や加熱バーナーによる加熱作業工程において，熟練技能が必要とされている。なお，将来的に熟練作業者の減少が予測されることから，ガス圧接部の品質を確保しつつ，これら技能を要する作業工程の脱技能化を図る必要がある。

このような中，鉄道総研では，レールガス圧接における端面研削工程およびバーナー揺動工程の簡略化・自動化について取り組んできた。本稿では，これらの内容について述べる。

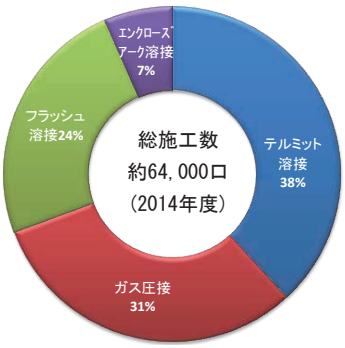


図 1　各レール溶接法の適用状況
（JR グループ）

＊　軌道技術研究部　レール溶接研究室
＊＊　軌道技術研究部　レール溶接研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）

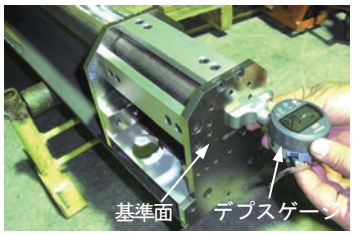
2．新品レールガス圧接時の端面研削工程簡略化に関する検討

現行のレールガス圧接作業では，レール端面研削作業において専用の端面研削機が使用されており，その取扱いに熟練を要する。そのため，未熟練者が研削を行うと，レール端面の平面度が却って低下する等の問題が生じる。一方，レール溶接工事におけるガス圧接の適用は，そのほとんどが仮設基地での一次溶接，および線路脇での二次溶接であり，この場合，新品レールの端面が接合対象となる。なお，レール製造メーカーでは，精密なレール切断がなされているため，そのままの状態でガス圧接に供し得る平面度が確保されている可能性がある。そこで，新品レール同士をガス圧接する場合に，レール端面の専用研削機による作業を省略し得るかを検証するため，新品レールの端面の平面度を調査し，現行作業において専用研削機による端面研削を施したレール（以下，端面研削レールという）端面の平面度と比較することとした。

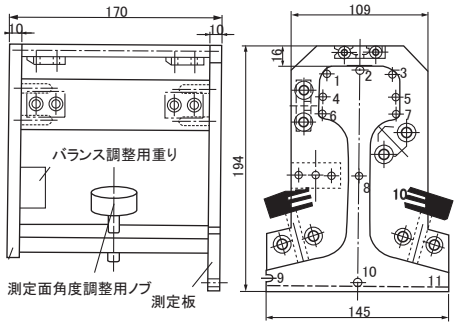
2.1　レール端面平面度測定用治具の製作

現行ガス圧接作業では，端面研削作業後に，直定規（スコヤ）を用いてレール端面の平面度を評価しているが，本研究では，平面度を定量的に把握するため，JIS60kg レール用のレール端面平面度測定用治具を製作した。当治具による測定状況，および当治具の構造を図 2 に示す。

当治具前面の基準面（レール長手方向に垂直）には，図 2（b）に示すように，直径 6mm の穴がレール横断面上の代表箇所（以下，参照点という）に 11 箇所設けてあり，基準面からレール端面上の各参照点までの距離をデプスゲージで測定し，各参照点ごとの測定値の差を指



(a) 平面度測定状況



(b) 構造図

図２　レール端面平面度測定治具

標として平面度を評価した。なお，ここでは，鉛直方向（参照点 2 および 10 の測定値の差），レール頭部の左右方向（参照点 4 および 5 の測定値の差），およびレール底部の左右方向（参照点 9 および 11 の測定値の差）の 3 領域における平面度に注目した。

2.2　新品レールおよび端面研削レールの平面度

図 3 に，新品レールおよび実際のガス圧接作業での端面研削レールを対象とした測定結果を整理して示す。測定数（N）は，新品レール 54 体，端面研削レール 31 体である。なお，図 3 の縦軸は上述した平面度指標であり，例えば，鉛直方向の平面度指標（[参照点 2 の測定値]-[参照点 10 の測定値]）が正の値の場合には，参照点 10 が参照点 2 に比べて前方（測定治具の基準面側）にあることを意味する。

図 3 より，新品レールにおける頭部左右方向および底部左右方向の平面度のばらつき範囲は，端面研削レールのばらつき範囲に収まっていることがわかる。一方，鉛直方向の平面度に注目すると，端面研削レールのばらつき範囲が新品レールのばらつき範囲に比べて負側に偏っている（頭部領域に比べて底部領域がより削れている）。底部クランプ方式の TGP-HA 型ガス圧接機を使用してガス圧接する場合には，圧接機の特性上，レール頭部に比べて底部を多少多目に研削する傾向があるが，図 3 中の端面研削レールのデータには当ガス圧接機を使用した作業時のものが含まれている。このため，端面研削レールのばらつき範囲が負側に偏る結果となっている。なお，平面度指標の絶対値は，新品レールの方が端面研削レールに比べて小さく，平面度がより高いと言える。

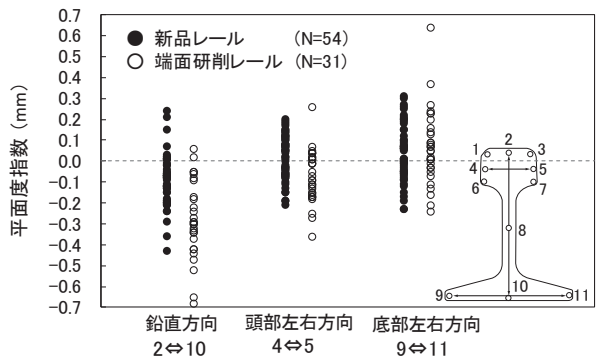


図３　新品レールおよび端面研削レールの平面度

以上より，レールメーカーから出荷された新品レールの端面は，ガス圧接の被接合面として十分な平面度を有しており，端面上の錆を小型グラインダーで研削除去するのみでガス圧接作業に供し得ると判断される。

3．加熱バーナー揺動操作の自動化に関する検討

3.1　現行の加熱作業工程

加熱作業工程では，継手の品質確保上，バーナーにより突合せ部を集中加熱し圧接界面を速やかに昇温しなければならない[1)]。その一方で，局部の集中加熱を継続した場合，レール表面が過剰に溶融し滴下する（以下，溶融滴下という）。したがって，これを防ぐため，加熱作業工程の中盤から終盤にかけて，図 4 に示すようにバーナーを圧接界面を中心としてレール長手方向に往復運動（バーナー揺動操作）させることが不可欠となる。しかしながら，この揺動操作には，標準となるマニュアル等は存在せず，作業者の技量に依存している。

そこで，加熱工程の脱技能化を図る目的から，次の 2 項目を達成目標として検討を実施した。

- バーナー揺動操作の標準化（揺動パターンの提案）
- 提案した揺動パターンを再現可能なバーナー自動揺動装置の開発

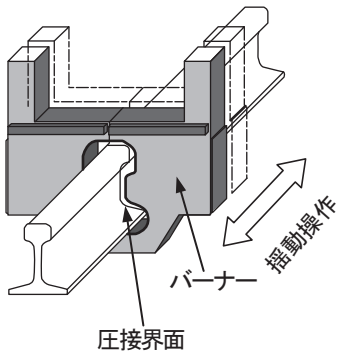


図４　バーナー揺動操作

3.2　バーナー揺動パターンが圧接部品質に及ぼす影響

バーナー揺動パターンが圧接部品質に及ぼす影響を調査するため，一定のガス圧接条件の下，ガス圧接作業

図５　レールガス圧接試験体作製状況

表１　レールガス圧接試験体作製条件

ガス流量（ℓ/min）	酸素	100
	アセチレン	103 ～ 107
加圧力（kN）		170
圧縮量（mm）		24
揺動幅（mm）		20 ～ 40
揺動開始タイミング*（sec）		0 ～ 60
揺動速度（mm/sec）		13 ～ 25

* 圧縮変形開始からの経過時間

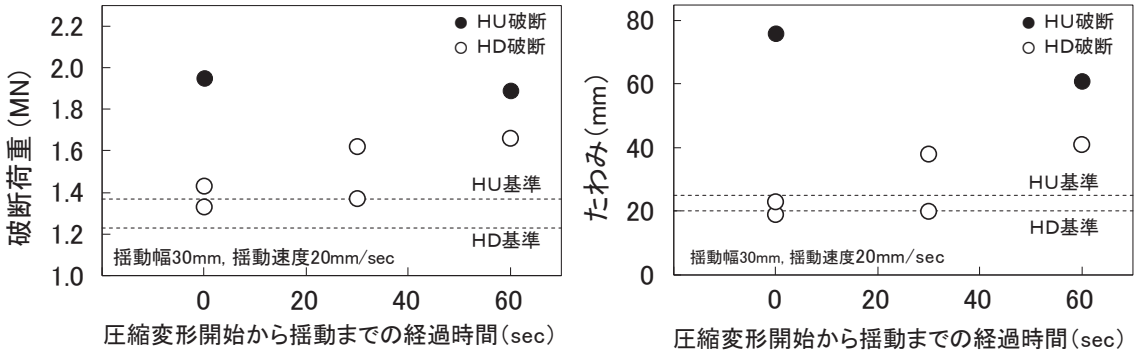
中のバーナー揺動幅，揺動速度，および揺動開始タイミングをパラメータとした揺動パターンを複数設定し，各パターンで作製した継手の静的強度を評価した。図５にレールガス圧接試験体作製状況を，表１に試験体作製条件をそれぞれ示す。なお，揺動開始タイミングは，レールの昇温に伴う圧縮変形開始からの経過時間とした。

図６に，揺動幅を 30mm，揺動速度を 20mm/sec と一定にし，揺動開始タイミングを変化させて作製した JIS60kg 普通レールガス圧接試験継手の静的曲げ試験の結果を示す。なお，従来の知見として，表１のガス圧接条件下でバーナー揺動を行わない場合，圧縮変形開始から 80sec 程度経過した時点で，表面が溶融滴下し始めることがわかっている。よって，本試験では，溶融滴下が生じるまでの余裕を勘案し，揺動開始タイミングの上限値を 60sec に設定した。

図６において，頭部上向（HU）姿勢で破断した継手の曲げ性能と揺動開始タイミングとの間に相関は認められない。一方，頭部下向（HD）姿勢で破断した継手の曲げ性能と揺動開始タイミングとの間には相関があり，揺動開始タイミングが早まるにつれて，曲げ性能が低下する傾向がみられる。なお，揺動幅 30mm，揺動速度 20mm/sec の場合には，揺動開始タイミングを 60sec とすることで，HU 破断，HD 破断ともに十分な曲げ性能を達成できることがわかる。

揺動開始タイミングが早い場合，圧接部周辺へ分散する熱の割合が増加するが，このことにより，圧接界面への入熱量が減少し，継手品質が低下すると考えられる。本試験では，レール頭部に引張応力が作用する HD 姿勢での曲げ性能のみ揺動開始タイミングとの相関が認められた。これは，レール頭部領域は底部領域に比べて体積が大きく，昇温に時間を要することから，揺動開始タイミングを早めることによる継手品質の低下がより顕在化しやすいためであると判断される。また，圧接部周辺への熱の分散をできるだけ抑制する観点から，揺動幅はできるだけ狭いことが望ましい。

以上より，良好な継手品質を達成するには，レール表面の溶融滴下が生じない範囲で，揺動開始タイミングをできるだけ遅く，かつ揺動幅をできるだけ狭くすることが肝要であると判断される。そこで，これらを考慮した上で，表１に示したガス圧接条件の下，揺動開始タイミング，揺動幅，および揺動速度を系統的に変化させたレールガス圧接試験を実施し，レール表面の溶融状況を観察した。表２に，各揺動パターンにおける表面溶融状況の一例を示す。この結果より，揺動開始タイミングを 60sec とした場合，揺動幅 20mm では，圧接終了まで溶融滴下は生じないが，揺動幅 15mm では，圧接終盤過程において，溶融滴下が生じることがわかる。なお，今回の試験範囲内では，揺動速度と溶融状態との間に相関は認められなかった。



(a) 破断荷重　　(b) たわみ

図６　揺動開始タイミングが継手の破断荷重およびたわみに及ぼす影響

表２　各揺動パターンにおけるレール表面の溶融状況（一例）

揺動パターン			レール表面の溶融状況
揺動開始タイミング（sec）	揺動幅（mm）	揺動速度（mm/sec）	
60	30	20	溶融滴下なし
〃	20	〃	溶融滴下なし
〃	15	〃	あご部溶融滴下（揺動開始後 40sec 時点） 底面溶融滴下（加熱工程終了直前）

表３　提案したバーナー揺動パターン
（対象：JIS60kg 普通レール）

揺動開始タイミング*（sec）	60
揺動幅（mm）	20
揺動速度（mm/sec）	20
当パターン適用時の標準ガス圧接条件 ガス流量：酸素 100 ℓ/min, アセチレン 105 ℓ/min 加圧力：170kN, 圧縮量：24mm	

* 圧縮変形開始からの経過時間

3.3　実作業に適用可能な揺動パターンの検討

バーナー揺動操作の標準化を図るため，3.2 で得られた試験結果を基に，十分な継手品質を確保でき，かつレール表面の溶融滴下を回避可能な揺動パターンを選定した。表 3 に，本検討で提案した JIS60kg 普通レールガス圧接時のバーナー揺動パターンを示す。

3.4　バーナー自動揺動装置の開発

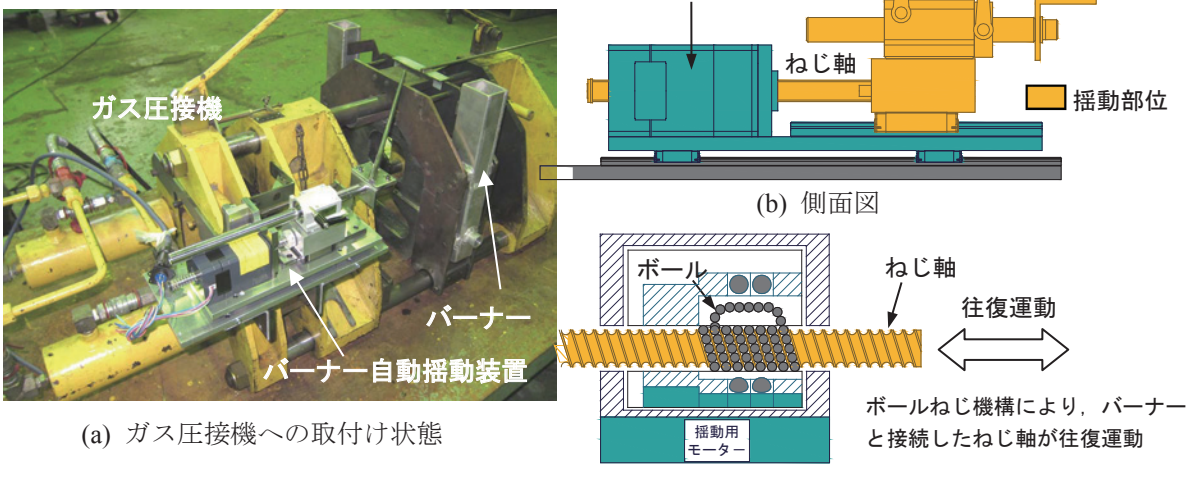
上述したように，バーナー揺動操作の標準化について検討し，実作業に適用可能な揺動パターンを提案した。揺動操作の標準化を図ることで継手品質のばらつきを縮小することは可能であるが，一様な揺動操作であっても，手動操作である限り少なからずばらつきが生じる。そこで，揺動工程の完全な脱技能化を図る目的から，提案した揺動パターンを再現可能な揺動機構について検討し，量産タイプの TGP-V 型レールガス圧接機用のバーナー自動揺動装置を開発した。図 7 に，当装置の外観および構造をそれぞれ示す。

当装置は，バーナーと揺動ブロックを連結棒で接続する構造であり，揺動ブロックをボールネジ機構で往復運動させ，バーナーの揺動を達成する。また，ガス圧接工程では，圧縮変形に伴い圧接界面が移動する（圧接界面の移動距離は，圧縮フレーム移動距離の 1/2）が，当揺動装置は，圧接界面の移動に追随してバーナーの揺動中心を移動させる機構も有する。

4．脱技能化を達成したガス圧接施工プロセス

4.1　提案したガス圧接施工プロセス

上述した成果を統合し，端面研削工程を簡略化し，かつバーナー揺動工程の自動化を達成するガス圧接施工プロセスを提案した。提案した施工プロセスを従来のプロセスと比較して表 4 に示す。提案プロセスでは，端面処理を小型グラインダーによる錆除去のみとし，バーナー操作を自動で行う。



(a) ガス圧接機への取付け状態

(b) 側面図

(c) 揺動機構部の内部構造

図７　バーナー自動揺動装置

表４　提案したガス圧接施工プロセス（接合対象：JIS60kg 普通レール）

		提案プロセス	従来プロセス
端面処理		小型グラインダーによる錆除去のみ	専用研削機による研削作業が必須
ガス流量（ℓ/min）	酸 素	100	同 左
	アセチレン	105	
加圧力（kN）		170	
圧縮量（mm）		24	
バーナー揺 動	揺動方式	自 動	手 動
	揺 動 パターン	揺動開始タイミング＊ ：60 sec 揺動幅 ：20 mm 揺動速度 ：20 mm/sec	作業者の判断

＊圧縮変形開始からの経過時間

図８　バーナー自動揺動装置による継手作製状況

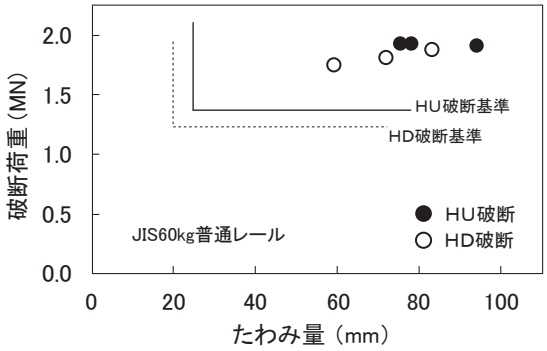
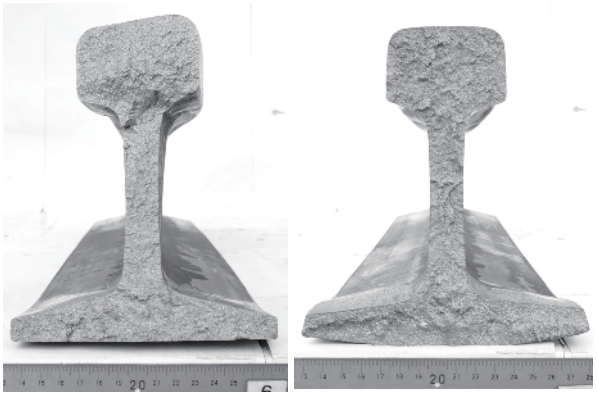


図９　静的曲げ試験結果

4.2　提案プロセスの適用性評価

提案プロセスの適用性を評価するため，当揺動装置を用いたレールガス圧接試験継手作製作業，および作製した継手の性能評価試験を実施した。

供試レールとして，長さ 0.75m の JIS60kg 普通レールを 16 本準備し，バーナー自動揺動装置を用いて長さ 1.5m のガス圧接試験継手を 8 体作製した。なお，レールガス圧接条件およびバーナー揺動条件は，表 3 に示した条件と同一とした。試験継手作製状況を図 8 に示す。当揺動装置を用いた試験継手作製において，作業上の問題は生じなかった。



（a）継手-1（HU破断）　（b）継手-2（HD破断）

図 10　静的曲げ試験での破断面の一例

作製した 8 体の試験継手に対する磁粉探傷試験の結果，いずれも割れ等の磁粉模様は検出されなかった。また，試験継手 6 体を対象に，支点間距離 1m，中央集中荷重による静的曲げ試験を実施した。破断姿勢は，HU 姿勢，HD 姿勢それぞれ 3 本ずつとした。試験結果は図 9 に示すように，いずれの試験継手とも破断荷重とたわみ量は，JIS60kg 普通レールガス圧接部の曲げ破断基準値を十分に上回っている。図 10 に示すとおり，破断面は，いずれも良好な破面性状を呈している。

また，試験継手 1 体に対し，レール底部領域に引張応

図 11　曲げ疲労試験の実施状況

力が作用する HU 姿勢にて，支点間距離 1300mm，中央載荷点距離 150mm の 4 点曲げ疲労試験を実施した。試験では，最小応力を 30N/mm^2 とする片振り条件を採用し，従来の施工プロセスによる継手の疲労強度レベルと同等の 320 N/mm^2（全応力振幅）を負荷した。なお，繰り返し数については 200 万回を限度とした。曲げ疲労試験の実施状況を図 11 に示す。

試験結果は，表 5 に示すように，繰り返し数 200 万回で未破断であった。したがって，当試験継手は，従来の施工プロセスによる継手と同等である 320N/mm^2（全応力振幅）の高い疲労強度を有していると判断される。

表５　試験継手に対する曲げ疲労試験結果

応力（N/mm^2）			繰り返し数	破断の
最小	最大	全応力振幅	（× 10^6）	有無
30	350	320	2.00	未破断

4.3　提案プロセスの適用性

残る 1 体の試験継手を対象に，硬さ試験およびミクロ組織試験観察を実施した。その結果，硬さ分布およびミクロ組織形態いずれも，従来の施工プロセスによる継手と同形態であり，異常は認められなかった。

この結果および上述した静的曲げ試験および曲げ疲労試験結果より，提案プロセスにより作製した継手は，従来の施工プロセスによる継手と同等の性能を有しており，実用に供し得ると判断される。

5．まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に列挙する。

(1) 国内のレール製造メーカーから出荷された新品レールの端面は，ガス圧接の被接合面として十分な平面度を有しており，端面に生成している錆を小型グラインダーで研削除去するのみで，ガス圧接作業に供し得ると判断される。

(2) バーナー揺動操作の標準化を図るため，十分な接合強度を達成でき，かつ加熱工程中におけるレール表面の過剰溶融を回避できるバーナー揺動パターンについて検討し，標準となるバーナー揺動パターンを提案した。

(3) 提案したバーナー揺動パターンを再現可能な TGP-V 型レールガス圧接機用のバーナー自動揺動装置を開発した。当装置を用いて実施したレールガス圧接作業において，作業性等に問題はなく，実作業に適用できると判断される。

(4) 端面研削工程を簡略化し，かつバーナー揺動工程の自動化を達成したレールガス圧接施工プロセスを提案した。当施工プロセスにより作製した JIS60kg 普通レールガス圧接試験継手は，従来の施工プロセスによる継手と同等の性能を有しており，実用に供し得ると判断される。

6．おわりに

現行のレールガス圧接作業において熟練技能が必要となっている加熱作業工程の脱技能化を図る目的から，レール端面研削工程を簡略化し，かつバーナー揺動工程を自動化したレールガス圧接施工プロセスを提案した。なお，現在は，本研究で開発したバーナー自動揺動装置の商品化に向けて取り組んでいる。さらに，本研究では，国内のレール製造メーカーから出荷されたレールの端面は，ガス圧接の被接合面として十分な平面度を有すると判断したが，平面度の低いレールが含まれる可能性を想定し，端面研削レールと同程度の平面度を有する端面を技能を必要とせず達成可能な方法について検討中である。

また，レール端面研削工程およびバーナー揺動工程は，レールガス圧接作業に従事する作業者の育成過程においても，相当の指導時間を要している。したがって，当施工プロセスの適用を前提とした場合には，作業者育成期間の短縮も見込める。

文　献

1）大石橋宏次，上山且芳：ガス圧接部の品質と評価に関する基本的検討 - 鋼ガス圧接部ふくらみの熱間せん断による非破壊検査（第 1 報）-，溶接学会論文集，Vol.14，No.2，pp.305-313，1996