技術論文

UDC 621 . 874 : 625 . 143 . 4

形状記憶合金継目板を用いた, レール, クレーンランウェイガーダー, 天井クレーン長寿命化に向けた取り組み

Lifespan Enhancement of Crane Rails, Runway Girders and Overhead Cranes Using Shape-Memory Alloyed Fish-plates

辻 本 裕 之* Hiroyuki TSUJIMOTO
小 﨑 照 卓 Shohtaku KOZAKI
奥 谷 恭 士 Yasushi OKUTANI
豊 澤 友 裕 Tomohiro TOYOZAWA
安 藤 慶 治 Keiji ANDO
寄 光 伸 治 Shinji YORIMITSU
松 石 長 之 Nagayuki MATSUISHI
石 井 弘 幸 Hiroyuki ISHII

抄 録

一貫製鉄所において，天井クレーンは原料の荷揚げから製品の出荷まで多数稼働しており，それを支持する走行レール，クレーンランウェイガーダー（CRG）も長距離に渡り敷設されている。天井クレーン，CRGは疲労亀裂発生が寿命決定の主要因となっている。一方，走行レールは，継目部の欠損や窪みが寿命決定の主要因となっており，この継目部をクレーンが走行した際の振動や衝撃が，天井クレーン，CRGの亀裂発生につながる。新日鐵住金(株)ではこの問題の解決を目的に形状記憶合金を用いた新軌条継手を開発したので，新軌条継手の特徴とその性能について報告した。

Abstract

In a full-scale steel plant, many overhead cranes are installed for conveyance of objects varying from raw materials to shipping products, and accompanying them are crane rails and crane runway girders (CRG) which cover a long distance. Fatigue crack initiation determines the lifespan of overhead cranes and CRG, while defects and dents on the rail joints are the main determinants for the lifespan of crane rails. The shaking and impact which occurs when the crane passes over a defected joint leads to crack initiation on the overhead crane and CRG. To tackle this problem Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation developed a rail joint using shape memory alloy which enables longer durability for rails. This report explains the characteristics and performance of the newly-developed rail joint.

1. 緒 言

一貫製鉄所において，クレーンは，原料岸壁での原料の荷揚げ・搬送，製銑・製鋼工程での溶銑・溶鋼の搬送，圧延他製造工程での半製品・製品の搬送，製品岸壁からの最終的な出荷まで，他方面に渡って用いられている。また，各工場の製造設備のメンテナンスにも広く用いられている。新日鐵住金(株)では，全所で約5000台のクレーンが稼働しており，一般的な天井クレーンに代表される屋内クレーンが約90%，岸壁クレーン等の屋外クレーンが約10%を占める。これらの中で，屋外クレーンは海浜に近い場合が多く，寿命の律速要因としては腐食と疲労が，屋内クレーンは疲労が中心となっている。

これらのクレーンは本体下端に車輪があり，走行レール（以下レールと略す）上を低速走行できるようになっている。天井クレーンの場合は，レールは建屋の両側の壁に沿って設けられたクレーンランウェイガーダー（Crane Runway Girder：CRG）と呼ばれる桁に支持，固定される（**写真1**）。新日鐵住金では，全所で約520kmのCRG，天井クレーン用レールが敷設されている。このCRGの寿命の律速要因も繰り返し走行する天井クレーンの荷重による疲労である。

一方，レールはクレーンの輪重によって，軽レールから普通レールまでが使用されるが，製鉄所のクレーンのように特に輪重が大きい場合には，頭部肉厚で高さが比較的低く，底部幅の広い特殊形状のクレーンレール（73kgレール，100kgレール：レール1mあたりの重量で，新幹線用レー

* 君津製鉄所 設備部 土建技術室 主査 千葉県君津市君津1番地 〒299-1141

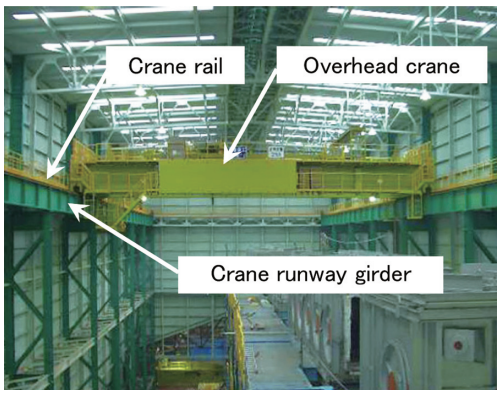


写真１　製鉄所内の天井クレーン，CRG，レール
Overhead crane, crane runway girder and crane rail in a steel plant

ルは60kgレールなのでそれより更に大型）が使用される[1]。天井クレーン用のレールは，輸送および据付工事等の制約から通常10m程度に切断された状態で出荷され，現場で接続作業が行われる。レール構造の中でこの接続箇所（継目部）は最も弱い部分であり，レール端部の欠損や窪みがレール交換の主要因となるとともに，継目部を天井クレーンが走行した際の振動や衝撃が，天井クレーン，CRGの疲労亀裂発生の一因となっている。

本報では，天井クレーンがレール継目部を走行した際の振動・衝撃発生メカニズムを解明し，この振動や衝撃を抑制でき，非熟練工が短時間で施工できる新しい軌条継手の特徴とその性能について報告する。

2.　振動や衝撃抑制による天井クレーン，CRGの延命効果

天井クレーン，CRGの寿命の律速要因となっている疲労亀裂発生の一因として，天井クレーン走行時の振動や衝撃による応力増加が推定されるため，影響度を把握するため工場にて測定を実施した。測定に使用した天井クレーンは定格荷重60t，片側２輪であり（測定時は空載），CRG上を60m/minで走行させた（図１）。レール継目部はCRG（長さ15m）の中央部付近に位置し，段差，隙間をパラメータとして変化させ（写真２），天井クレーン，CRGに発生する応力を測定した。天井クレーンの応力は，車輪を支持するサドル下面（写真３），CRGの応力は下フランジ（写真４）

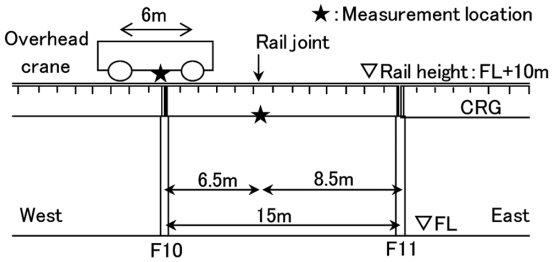


図１　天井クレーン走行範囲と測定位置
Travelling range of overhead crane and measurement locations

にて測定した。

図２，３に段差0，2.9mm（上り段）時の天井クレーン，CRGに発生する応力を示す。測定の結果，段差0mmに対し段差2.9mmの場合，天井クレーンがレール継目部の段差を通過する際に天井クレーンの応力が約12%，CRGの応力が約15%増加した。

同様に段差，隙間を変化させた場合の最大応力を表１に示す。隙間については，10.5mmであっても車輪がこの隙間に落ち込むことはなく応力の増加はほとんどなく，段差による影響が高いことを確認した。なお，レール継目の段差0.5mm，隙間3mmは，天井クレーンの定期自主検査指針・同解説の許容限度であり[2]，この範囲内の段差，隙間であれば，応力増加はほとんど見られなかった。

疲労寿命は応力範囲の３乗に反比例するため，約15%の

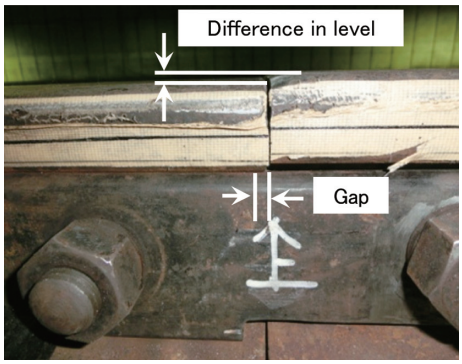


写真２　レール継目部の状態
Condition of rail joint

写真３　天井クレーン応力測定位置
Measurement location of stress for overhead crane

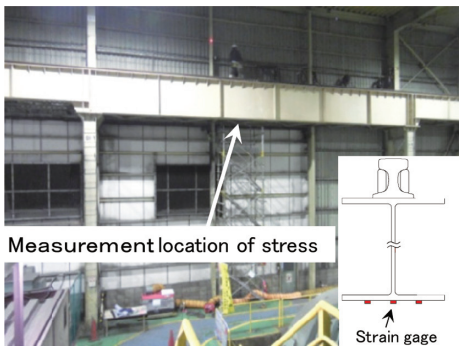


写真４　CRG応力測定位置
Measurement location of stress for crane runway girder

応力増加でも，疲労寿命は66%に短くなるため，段差を発生させない対策が重要である。また，段差は隙間拡大によるレール端部の欠け等から生じることから，隙間の発生を抑制する対策を施すことにより，天井クレーン，CRGの延命につながると言える。

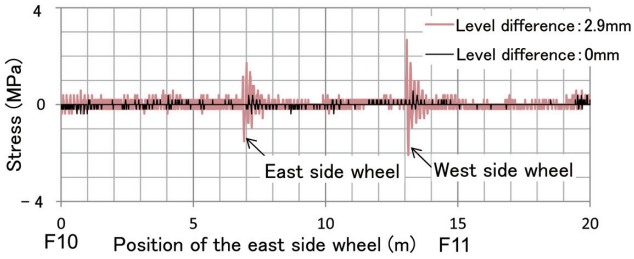


図２　天井クレーン測定結果
Measurement results for overhead crane

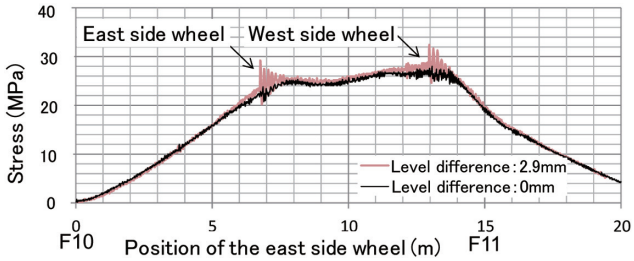


図３　CRG測定結果
Measurement results for crane runway girder

表１　天井クレーン，CRGの測定結果一覧
Maximum stress for all cases measured

	Case					
Difference in level (mm)	0	0.5 Standard limit	2.4	2.9	0	0
Gap (mm)	0	0	0	0	3 Standard limit	10.5
Maximum stress of the saddle (MPa)	1.06σ	1.06σ	1.16σ	1.19σ	1.06σ	1.06σ
Maximum stress of the lower flange (MPa)	1.08σ	1.08σ	1.18σ	1.24σ	1.10σ	1.11σ

σ: Stress at the time of the overhead crane standstill

3.　天井クレーンレール保全上の課題とレールの継手方式

レール構造の中で，レール継目部は最も弱い部分であり，レール損傷もレール端に集中している。レール継目部は，腹部継目穴周辺や上首，下首部に静的にも大きな応力が作用するが，更に天井クレーン通過による衝撃荷重が大きく作用するため，過酷な条件の部分である。

このレール継目部に標準的に使用されているレールの接続方式は，レール端腹部にボルト孔を開けその両側面にボルト孔の開いた２枚の継目板と呼ばれる鋼板をボルトで固定するボルト方式である（**表２**）。本方式は継目板およびレールの加工誤差やボルト径の公差を吸収するために，ボルト孔をボルト径に比べ数mm大きくして遊びを設けており，クレーンの加減速時の力などレールを移動させようとする力が作用すると遊びの量に応じた遊間（隙間）が生じる（**図４**）。

そして，遊間の生じた継目部を天井クレーンの車輪が通過すると車輪がレール端部と衝突し，この時の衝撃荷重が天井クレーン本体の振動や衝撃となる。また，繰り返し車輪が通過していくと次第に欠けや窪みへと成長し（**写真５**），さらに振動や衝撃が助長され，結果として天井クレーン本体構造や機械電気部品の故障の原因となる。

したがって，欠けや窪みが大きくなる前に適切なタイミングでレール交換を行う必要があるが，交換費用や施工時

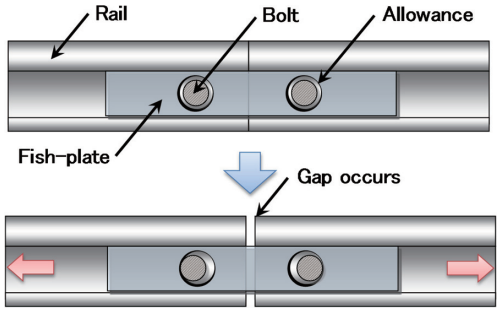
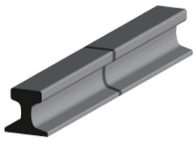


図４　遊間発生メカニズム
Gap-generating mechanism

表２　従来軌条継手の問題点と新軌条継手に求められる性能
Issues of general rail joints and required performance for new rail joints

	Bolt rail joints	Enclosed welding rail joints	New rail joints
Outline			
Gap	× Gap occurs	○ No gap	○ No gap
Lifespan of rail joints	× Defects on the rail joints are determinant	○ Equal to the general part	○ Equal to the general part
Expert skill	○ Unnecessary	× Necessary	○ Unnecessary
Work time	○ Approx. 5 min	× Approx. 6–8 h	○ Approx. 10 min

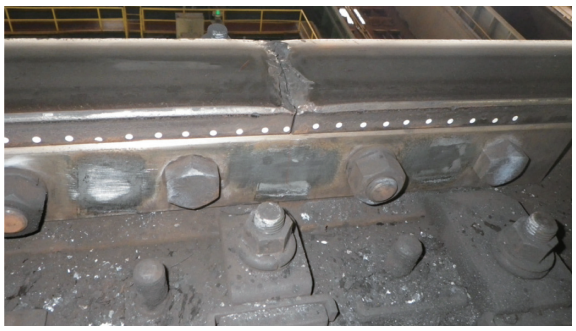


写真５　レール継目部の損傷状況
Damaged rail joint

写真６　カットレール挿入状況
Insertion of a cut rail

間の制約等から，損傷したレールを丸ごと交換するのではなく，両レールの継目板を一旦取り外して損傷部のみをカットし，数 m の短いレールを挿入したり，スライス状にカットしたレールを挿入する等の応急処置を行っている（**写真６**）。

遊間を発生させない方式として，レール相互の隙間に溶着金属を流し込み，余盛を削って仕上げるエンクローズ溶接方式があるが（表２），レールの現場溶接はボルト方式に比べて施工時間が大幅に伸びること，施工に熟練工が必要となること等，24 時間操業で施工時間が制約される製鉄所のクレーンレールへ適用するには課題が多い。またボルト方式でも，遊間の少ないタイプの継目板も存在するが，ボルト孔とボルト径の遊びは必要となり，完全な無遊間とはできない。

したがって，継目板をボルトで固定した後，ボルト孔とボルト径の遊びをなくすために両レールを引き寄せてレール間の遊間をゼロにすることを着想した。当初，L 形にした継目板を，両レールを引き寄せる方向にボルトで緊結することを検討したが，締結力不足や疲労の問題により無遊間の状態を維持するのは困難であることが判明した。そこで，形状記憶合金で継目板を製作し，継目板そのものを収縮させて無遊間を実現する軌条継手の開発に着手した[3,4]。

4.　無遊間軌条継手の概要

4.1　鉄系形状記憶合金の特徴

形状記憶合金（Shape Memory Alloy：SMA）の中で最も広く実用されているのは Ni-Ti 系 SMA であるが，高価で大型部材への実用は現実的ではないことから軌条継手の検討には比較的安価な Fe-Mn-Si 系[5] SMA を使用した（**表３**）。Fe-Mn-Si 系 SMA は，1982 年に単結晶で形状記憶効果が発見されて以来，諸処の材料学的研究開発と製造技術開発がなされ，1990 年代から主として Cr が添加され耐食性を考慮した Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金を用いて実用化検討がなされてきた[6]。これまで，ステンレス鋼配管用継手（**写真７**）や製鉄所の転炉底吹きノズル（セラミック製パイプ）の保護管等の小型部材用途，トンネル工事用曲線鋼管用継手等の大型部材用途といった Fe-Mn-Si 系 SMA の特徴に適合した用途が開拓されてきている（以下，SMA はすべて Fe-Mn-Si 系を指すものとする）。

表３　Fe-Mn-Si 系と Ni-Ti 系 SMA の特徴
Characteristics of Fe-Mn-Si and Ni-Ti series SMA

	Fe-Mn-Si series SMA	Ni-Ti series SMA
Cost	Low cost	High cost
Recovery temperature	250–300 ˚C	0–100 ˚C
Recovery strain	2.5–3.0 %	6–8 %
Properties	One time of shape recovery	Multi-cycle shape recovery

写真７　ステンレス鋼配管用継手
Joints for stainless steel pipes

4.1.1 基本的性質

SMA は一定の温度（950℃以上）に加熱保持するとその形状を記憶させることができ，常温に戻した状態で強制的に変形を加えたとしても約 300℃に加熱することで記憶させた形状に回復し，その後常温に戻しても加熱後の形状を維持するという性質（一方向性の形状記憶効果）を有している。したがって，接合部材としての用途として有利な特性を有している。

4.1.2 力学性能

SMA の形状回復ひずみと温度の関係を**図５**に示す。100℃を超えた付近から形状回復が始まり，最終的な形状回復ひずみは最大 2.5～3.0％程度となる。また，形状回復応力と温度の関係を**図６**に示す。まず加熱に伴って応力が

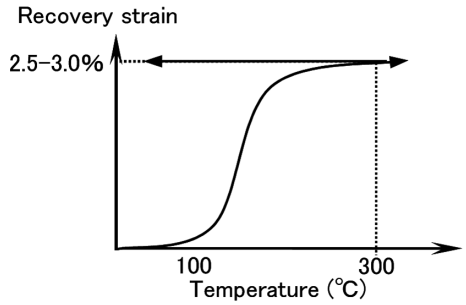


図５　SMA のひずみ - 温度関係
Strain-temperature diagram for SMA

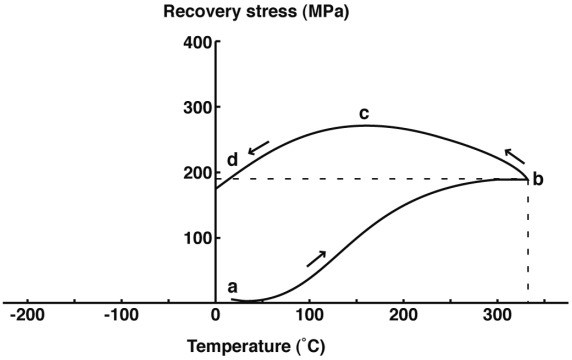


図６　SMA の応力 - 温度関係
Stress-temperature diagram for SMA

表４　物性値の比較
Comparison of physical properties for SMA and steel

	SMA	Steel (S45C)
Tensile strength (MPa)	680–800	570–
Thermal expansion coefficient (˚C^{-1})	16.5×10^{-6}	12×10^{-6}
Thermal conductivity (W/m·K)	8.37	45
Young modulus (GPa)	170	205

発現し，約 300℃で飽和状態に達する。その後，冷却によって一時的に応力が上昇するものの，冷却を続けると再び応力が減少し，常温に戻った時点で約 180 MPa の応力を発現する。

4.1.3 物理的性質

表４に SMA の物性値を示す。一般的な継目板に使用される機械構造用炭素鋼鋼材である S45C 鋼に比べ熱伝導率が 1/5 程度と低い点を除けば，引張強度は 680 MPa 以上と高く，継目板の材料に使用しても機能上・構造上問題はないと言える。

4.2　無遊間化のメカニズム

形状記憶合金を用いた無遊間軌条継手（以下 SMA 軌条継手）は継目板を SMA で製作している点を除けばボルト方式と構成は同じである。SMA 継目板は熱処理による形状記憶と常温での引張変形を与えた後，孔開け等によって継目板の形状に加工されている。本継目板は記憶した形状よりも引張変形を与えられているため，加熱すると形状回復により収縮する性質を持つ（図７）。

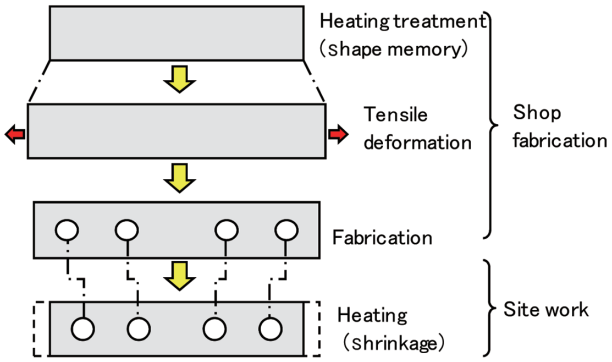


図７　SMA 継目板製作過程
Process of SMA fish-plate production

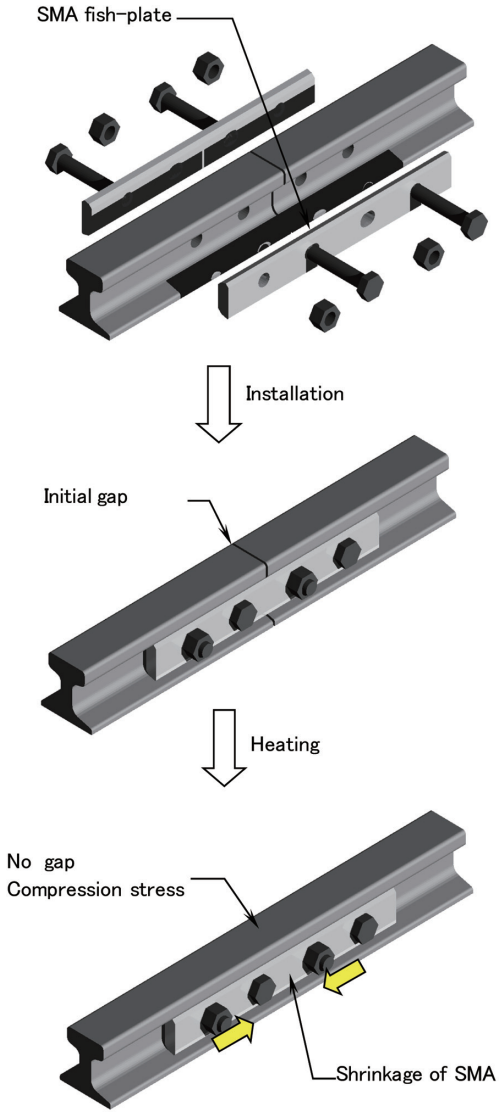


図８　SMA 軌条継手概要
General installation process of SMA fish-plate

SMA 継目板をレールに取り付けてから加熱すると，継目板の収縮によってボルト孔径とボルト径の差による遊び部分を吸収してボルトとボルト孔が接触した状態になり，継目板の収縮がレールへと伝達され，継目部の無遊間を実現する（図８）。遊間が消滅した後も SMA 継目板はさらに収

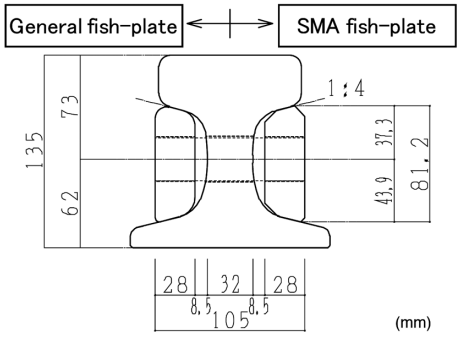


図9　継目板断面形状
Cross section of rail joint

縮しようとする力を発生し続けるため，レールとレールを押しつける締結力が発生する。この締結力をクレーン制動時に生じるレールの引張力よりも大きく設計することにより，引張力を打ち消して遊間の再発生を抑制する。

SMA 継目板の断面は，一般的な継目板断面と同様，レール頭部の変形を抑制するために頭部と脚部に接する形状になっており，製作工程上の理由からコーナー部の面取りのみ円弧からテーパーに変更している（図9）。また，継目板の長手方向の全長は，一般的な継目板と同じであり，継目板のボルト孔位置を変更することにより所要の締結力を発生させる。

5.　性能確認試験

SMA を構造部材に利用した実績は乏しいため，基本性能を確認するための各種試験を実施した。性能確認試験は，溶鋼クレーンやコイル搬送クレーン等に用いられており，無遊間化の需要の高い 73kg レールを対象とした。以下に各試験内容とその結果を記す。

5.1　レール継目部に加わるクレーン荷重の定量的評価

継目部に締結力を作用させ，遊間の発生を防ぐためには，その前提となる天井クレーン走行による発生荷重を明らかにする必要がある。鋼構造設計規準によると，天井クレーン制動力は制動車輪の各車輪荷重の 15%をとり，走行レール上端に作用する[7]とあるが，レール継目部に作用する荷重を確認する試験を行った。

レール継目部に作用する荷重は実際に走行する天井クレーンのレールに生じる応力を測定することで求めた。具体的には，レールの最大応力は急制動時の車輪後方で発生することから，天井クレーンを最高速度で走行させて後輪が応力測定点を通過した直後に急制動をかけてレールに作用する応力を実測した（図10）。測定に使用した天井クレーンは片側４輪，輪重 228kN（空荷，フックは測定したレール側まで寄せた状態）である。

実測結果を図 11 に示す。天井クレーンで急制動をかける直前に４つのピーク値が現れているが，これは天井クレーンの車輪が応力測定点を通過した際に，車輪の鉛直荷重の

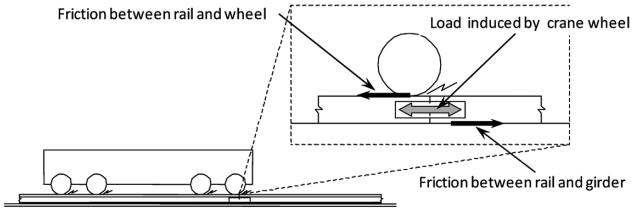


図 10　レール継目部に作用する荷重
Tensile stress at crane rail joint generated by travelling of crane wheel

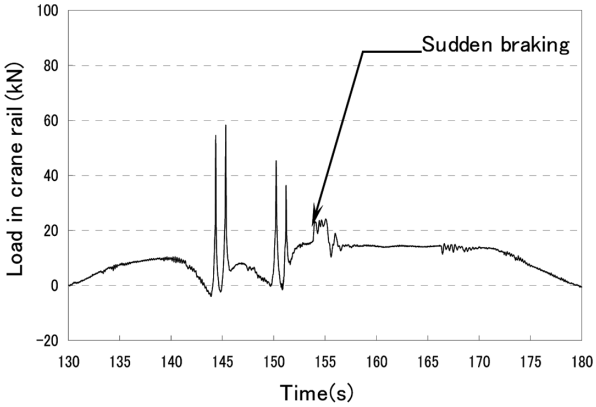


図 11　レール発生荷重
Time history of load in crane rail

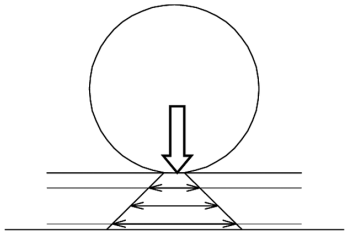


図 12　レールの応力分布
Stress distribution in crane rail

ポアソン比によって生じるレールの伸びをひずみゲージが示したものと考えられる（図 12）。この車輪の鉛直荷重により，レールは延びる方向に変形するため遊間の発生には繋がらないと考えられる。したがって，遊間の発生に繋がるレール継目部に作用する荷重は，急制動直後に発生した 25kN である。これを車輪１輪当たりの輪重で評価すると 11%となる。鋼構造設計規準の指標は輪重の 15%であり，安全サイドになることを考慮して，レール継目部に加わる天井クレーン荷重は車輪１輪当たりの荷重の 15%を指標とする。

5.2　実大構造試験

73kg レールの最大クレーン輪重は 530kN 程度であり，必要締結力については，天井クレーン制動力が輪重の 15%として 80kN で設定した。

応力を算出するためのひずみゲージを貼付した 1m 程度の２片の試験用レールと SMA 継目板をボルトで固定し，SMA 継目板をガスバーナーで加熱する試験を行った（写真

写真８　SMA 継目板加熱試験状況
Heating experiment of SMA fish-plate

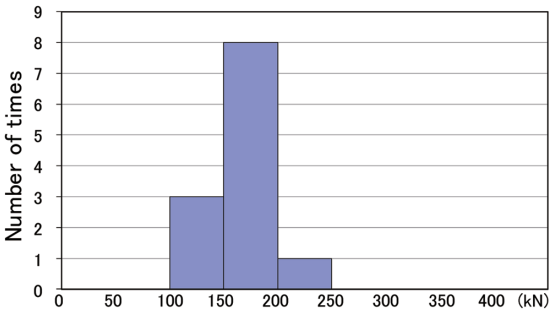


図 13　発生荷重の度数分布
Frequency distribution of generated loads

８)。試験体は製作誤差の影響を勘案しボルト孔位置や孔径をパラメータとした 12 体を準備した。加熱開始から 10 分程度でレール間の隙間が狭くなりはじめ，15 分後には密着し，20 分後には SMA 継目板の温度が 300℃となり加熱作業を終了した。なお，加熱終了時のレールの温度は約 200℃以下でありレールの組成に問題ない程度の熱量であった。

試験体の応力を横軸にとった度数分布図を**図 13** に示す。製作誤差の影響によって発生応力にばらつきが生じているが，実施した 12 体の試験体は全て必要締結力の 80kN を上回っており，SMA 軌条継手が十分な締結力を有していると言える。

5.3　疲労性能確認試験

レール継目部は長期間にわたってクレーン走行による振動や制動力を受けることから，耐疲労性能の確認試験を実施した（**図 14**）。載荷方向はレールの締結力やクレーン制動力等，応力の変動幅が大きいレールの軸方向とし，試験荷重は前述した継目の必要締結力の 80kN を含め３通りとした。繰り返し回数は 2.0×10^6 回および 1.0×10^7 回とし，対象は構造試験において約 120kN の応力が発生した試験体とした。

疲労試験結果を**表５**に示す。30kN から段階的に試験を実施したが，いずれのケースにおいても遊間の再発生は確認されなかった。このことから，SMA 軌条継手は必要締結力 80kN に対し，十分な耐疲労性能を有していると言える。

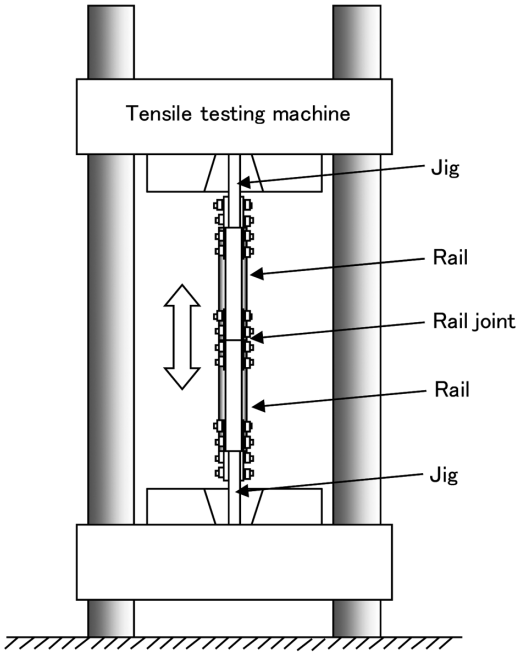


図 14　疲労試験概要図
General outline of fatigue testing

表５　疲労試験結果
Results of fatigue test

	CASE-1	CASE-2	CASE-3
Load (kN)	±30	±50	±80
Number of cycles	2.0×10^6		1.0×10^7
Frequency (Hz)	10		
Result	No space generated		

写真９　レールを接続した鉄系継目板の屋外暴露
Exposure test of a steel fish-plate attached to a crane rail

5.4　暴露試験

SMA 軌条継手では SMA 継目板と鋼製のレールが密着していることから，異種金属の接触による腐食が懸念されるため，試験で使用した継手を海岸に近い屋外（兵庫県淡路島）に 2004 年 11 月より設置して継続的に腐食状況を観察している。

2013 年 11 月時点の状況を**写真９，10** に示す。設置後約 10 年経過しているが，レールと継目板に通常の錆は見られるものの，両者の接触部分での特別な錆の発生は認められず，SMA 軌条継手は異種金属間の腐食は発生しないと言

写真 10　暴露試験体の解体後
Dismantlement of the exposure test specimen

える。また，継目板は部分的に金属光沢も残っている。

6.　適用拡大に向けた取り組み

2004 年 10 月に名古屋製鉄所で初適用以来，名古屋，君津，大分，八幡製鉄所を中心に，1500 箇所，15 km に実機適用済みである（図 15）。開発当初は締結力不足，ボルトの緩みやボルト折損トラブルが発生したが，原因調査と設計の見直しにより，現状は各所とも目立ったトラブルはない（写真 11）。また和歌山製鉄所では，遊間の発生やボルトの損傷が頻発していた製鋼工場にて，SMA 軌条継手適用後は遊間の発生もなく経過良好との報告を受けている。

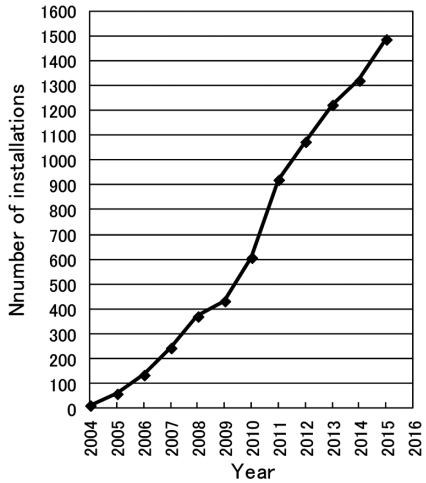


図 15　適用実績
Installation records

写真 11　君津製鉄所製鋼工場適用状況
Installation of SMA fish-plates at the Steel-making Plant in Kimitsu Works

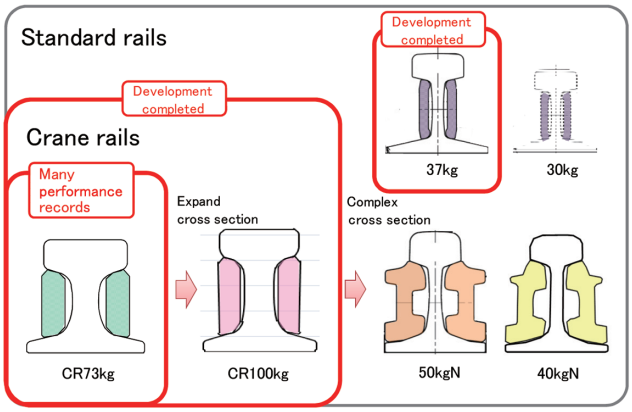


図 16　ラインナップの拡充
Lineup expansion of SMA fish-plates

開発当初は社内で需要が高い 73 kg レールを中心に開発を行ってきたが，現状 100 kg，37 kg レールも開発完了し，さらなる適用拡大を進めている（図 16）。また，安価化に向けた取り組みも行っており，設計の工夫により，継目板の薄肉化，トレーニング処理[6]の省略，合金割合の低減（28% Mn ⇒ 15% Mn）を実現している。

7.　結　　言

SMA 軌条継手は従来のボルト方式の長所である施工容易性を備えたまま，クレーン走行時の振動や衝撃が小さい無遊間状態を長く維持できる技術である。今後も適用先を拡大することによりレール，CRG，天井クレーンの長寿命化，設備の安定稼働に貢献していきたい。

謝　辞

本開発および実用化にあたり，淡路マテリア(株)，国立研究開発法人物質・材料研究機構，(株)フォアーサイトの皆さまには開発初期から各種課題解決に多大なるご助力を頂きましたこと，深くお礼申し上げます。

参照文献

1) (社)日本鉄道施設協会：レール・RAIL．1978
2) (社)日本クレーン協会：天井クレーンの定期自主検査指針・同解説（改訂版）．2007
3) 豊澤友裕，小﨑照卓，安藤慶治：クレーン．45 (4)，1-4 (2007)
4) 丸山忠克，澤口孝宏：金属．82，501-506 (2012)
5) Sato, A., Cgishima, E., Soma, K., Mori, T.: Acta metal. 30, 1177-1183 (1982)
6) 丸山忠克，大塚広明：金属．66，63-72 (1996)
7) (社)日本建築学会：鋼構造設計規準―許容応力度設計法―．2005

辻本裕之　Hiroyuki TSUJIMOTO
君津製鉄所　設備部　土建技術室　主査
千葉県君津市君津１番地　〒299-1141

小﨑照卓　Shohtaku KOZAKI
設備・保全技術センター
土木建築技術部　建築技術室長

奥谷恭士　Yasushi OKUTANI
君津製鉄所　設備部　土建技術室長

豊澤友裕　Tomohiro TOYOZAWA
設備・保全技術センター
土木建築技術部　建築技術室　主査

安藤慶治　Keiji ANDO
ニッポン・スチール・アンド・スミトモ・メタル
インドネシア社
Vice President Director

寄光伸治　Shinji YORIMITSU
設備・保全技術センター
土木建築技術部　建築技術室　主幹

松石長之　Nagayuki MATSUISHI
設備・保全技術センター
土木建築技術部　建築技術室　主幹

石井弘幸　Hiroyuki ISHII
設備・保全技術センター
機械技術部　機械エンジニアリング室　主幹