

鉄道軌道における環境対策

古川 敦

鉄道車両の発生に伴って騒音・振動は速度とともに大きくなるため、列車の高速化にしたがって各種対策が必要となる。鉄道構造物のうちでも軌道は車両とじかに接する部位であり、ハードおよびソフトの面から、騒音や振動の対策が実施されている。本稿では、防振タイプの軌道構造やレール表面の凹凸管理による転動音（車輪／レールの接触によって発生する騒音）抑制などの、軌道における環境対策について紹介する。

キーワード：軌道，振動，騒音，レール削正，バラスト軌道，直結軌道

1. はじめに

鉄道における環境問題は、そのほとんどが車両の走行に伴う騒音，振動である。このうち騒音は、主として①車両の走行に伴う空気力学的な現象（車体やパンタグラフから発生する風切り音など），②車両そのものから発生する音（電動機のファンやディーゼルエンジンの駆動音），③車輪・レールの接触に起因する音，④③の振動の伝播により，構造物が振動して発生する音，の4種類に大別される。また振動は，車両の走行に伴う構造物の変形が振動として周辺に伝播し，人や物に悪影響を及ぼすものである。

鉄道の線路構造物のうち，軌道は車両と直接接することから，騒音・振動を小さくするためには，軌道側の対策が求められる。また，振動を低減すると軌道部材に発生する応力そのものも小さくなり，軌道保守量の削減にも効果がある。したがって，特に新幹線の騒音が社会問題となった1970年代以降，軌道における騒音・振動への対策法の開発が盛んに進められている。本稿ではこれらを取りまとめ，鉄道の環境問題への軌道側の対策を紹介する。

なお，騒音・振動は振動する媒体が異なるだけであり，対策として採られる方法において本質的な差は無いため，以下では，「騒音対策」「振動対策」を区別せずに，車両の走行に伴って発生する振動現象を小さくするという観点で，具体的な方法を紹介する。

2. 振動対策の概要

軌道における騒音・振動対策を目的毎に分類すると以下のようになる。

①発生源対策

- ・レール継目部の除去
- ・レール表面凹凸の除去
- ・レールの潤滑

②振動の吸収，減衰

- ・軌道の低弾性化
- ・重軌条化等の軌道強化
- ・吸音

以下，具体的な方法について解説する。

3. 発生源対策

(1) レール継目部の除去

車両の走行に伴って発生する音のうち，最も知られているのはレール継目部通過時に発生する「がたんごとん」という音である。これは良くも悪くも鉄道の代名詞と言ってもよい。

この音を無くすにはレールを溶接するしかない。日本では主として運搬の都合上，レールは1本あたり25mで製造される。これを溶接し，1本あたりの長さを200m以上としたものをロングレールという。

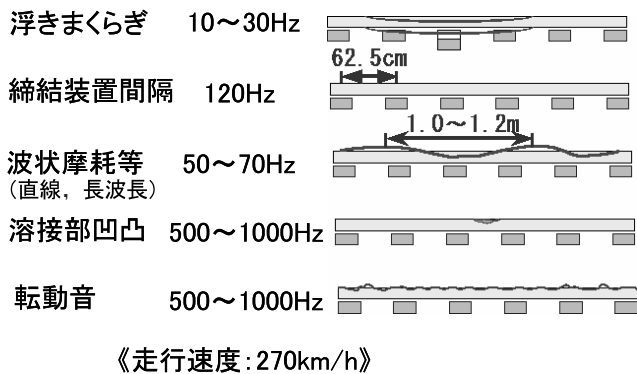
溶接さえすればレールはいくらでも長くできるように感じるが，屋外に敷設されているレールの温度は，夏場は直射日光を受けて60度に達する一方で冬場には氷点下まで下がるため，温度応力による軸力の変動

が避けられない。圧縮軸力が大きくなり過ぎると軌きょう（レールとまくらぎによるはしご状の構造体）が座屈することがあり（これを鉄道では「張り出し」と呼んでいる。）、逆に引張軸力が大きくなり過ぎるとレールが破断する。したがってロングレール区間では、レール軸力管理や各種座屈対策が慎重に行われている。なお、上記のような問題から、ロングレールはトンネル内等で温度変化が小さい区間を除き、直線および概ね半径 400 m 以上の曲線において敷設される。なお、この最小曲線半径は事業者により異なる。特に軌間の違いは本質的である。

橋梁上に敷設されているレールの場合、桁そのものの温度伸縮の影響も受ける。また分岐器が介在するロングレールではレール軸力分布が複雑となる。最近ではこれらの軸力解析技術が進歩したため、ロングレール敷設区間は徐々に広がっている。現在日本で最も長いロングレールは、東北新幹線いわて沼宮内～八戸間に敷設されている 60.4 km のものである。

(2) レール凹凸の除去

車両の走行にともなってレール表面は徐々に摩耗する。摩耗にともなって、表面の凹凸が徐々に大きくなる場合がある。凹凸のあるレールの上を車輪が走行すると、これを起点としてレール・車輪が振動し、車輪レールの接触力（輪重という）が変化して、騒音や振動の原因となる。新幹線におけるレール凹凸の種類を図—1 に示す。



図—1 レール摩耗の種類と振動周波数（新幹線の例）

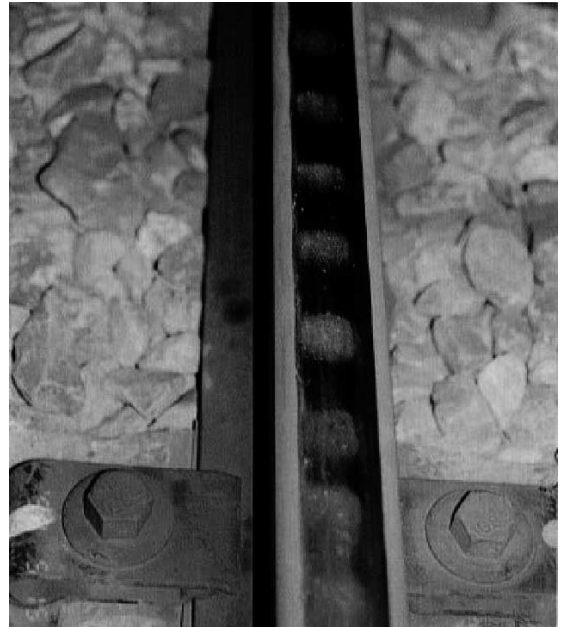
図—1 のうち、レール表面が周期的に摩耗する波状摩耗は、線形や走行条件によって様々なタイプに分類される。波状摩耗の主な種類と発生要因を表—1 に、在来線の波状摩耗の例を写真—1 に示す。

波状摩耗は、騒音や振動の大きな要因の一つであるため、これが大きな区間では、レール削正車と呼ばれる専用の車両（写真—2）でレール表面凹凸の除去が

表—1 波状摩耗の種類と発生メカニズムの例

発生部位	波長 (m)	発生メカニズム
曲線内軌	0.05 ~ 0.2	レール左右振動
曲線外軌	0.1 ~ 0.5	ばね下振動, 軌道剛性
直線・長波長	0.02 ~ 0.7	ばね下振動, 軌道剛性
新幹線急勾配	1.2 ~ 1.5	軌道剛性, レール振動

※上のメカニズムはあくまでも例であり、異説もある。



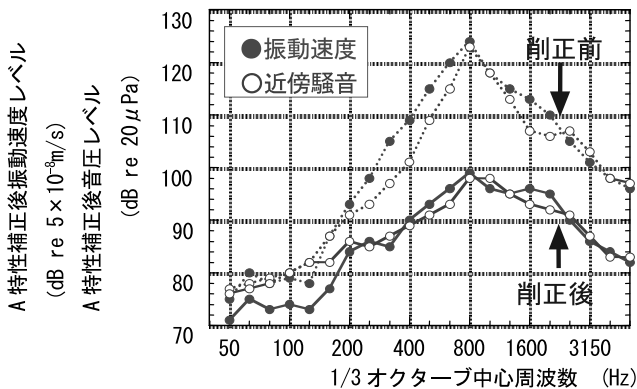
写真—1 波状摩耗の例

行われる。レール削正車には、機種にもよるが1編成あたり 8 ~ 48 個の砥石が設けられており、この砥石によって時速約 5 km/h でレール表面を削正していく。また砥石の角度の制御によって波状摩耗の除去のみならず、目的に応じた様々なレール断面形状の形成ができる。なお、レール削正は騒音低減のみならず、レール表面の凹凸や表面接触疲労層の除去によるレール延命も目的とされている。



写真—2 レール削正車

図—2は、波状摩耗区間における軸箱振動速度(車両の軸箱で測定した加速度を1階積分したもの)レール削正前後の騒音レベルの変化の例である。波状摩耗の波長に対応する周波数を中心に、各帯域で騒音が大きく減少しているのがわかる¹⁾。



図—2 レール削正前後の軸箱振動速度とレール近傍騒音との関係の例

(3) レール潤滑

ほとんどの鉄道車両は操舵機構を持たないため、急曲線を車両が走行する場合、車輪の進行方向とレールの接線方向が一致せず、車輪とレールとの間にすべりが発生し、すべり面からきしり音が発生する。このきしり音を防ぐため、主として急曲線内側のレール表面を対象に塗油が行われる。また、外側レールのゲージコーナー(レールの角部)にも、騒音および摩耗防止のために塗油が行われる。塗油は車両または地上から行う。いずれの場合も一定時間あるいは一定列車本数毎に、車輪レール接触面付近に潤滑油を塗布する。写真—3に地上塗油器の例を示す。



写真—3 レール塗油器(手前の蓋は油タンク)

塗油を行うと、きしり音と共にレール、車輪の摩耗も減少するが、一方で摩耗が減少するとレール表面に

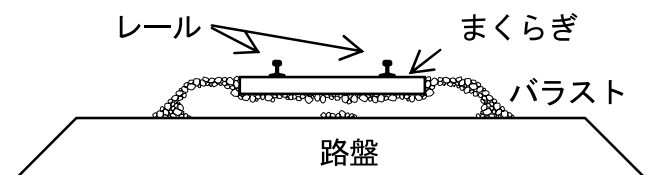
接触疲労層が蓄積し、きしみ割れやゲージコーナーの亀裂が発生することがある。このように、潤滑と摩耗を適度にバランスさせるのは現在でも困難であり、各事業者において試行錯誤されているのが実情である。

また過度の塗油は、車両の加速・減速や信号システムに悪影響を及ぼす(一般に、鉄道の信号はレールと車軸から構成される電気回路によって制御される)。したがって、油とは異なる成分による摩擦調整材や摩擦緩和材の開発が進められている²⁾。

4. 振動の減衰・吸収

(1) バラスト軌道

バラスト軌道は、道床バラスト、まくらぎ、レールから構成される単純な構造物であるが、騒音・振動の減衰・吸収機能に優れた構造物である(図—3)。近年建設される軌道のほとんどは、保守の省力化の観点から後述する直結系軌道が採用されているが、騒音・振動が問題となる区間では、現在でもバラスト軌道が採用されることがある。また直結系軌道であっても、消音を目的としてバラスト散布が行われることがある。



図—3 バラスト軌道

バラスト軌道は、新設されることこそ少なくなったものの、既設線の大半を占める軌道構造であることから、各種振動対策が考案されている。その一つは、重軌条化である。これはレールの剛性を高め、車輪から作用する荷重をより広い範囲に分散し、まくらぎ1本あたりに作用する力を小さくすることによって振動を減少するものである。また、レールの重量が大きくなることによって、レール自身の振動によって吸収するエネルギーを大きくするという効果もある。ただし、レールの断面積を大きくすると、温度変化によるレール軸力変動が大きくなるという問題もある。現在JISに規定されている最も太いレールは、1mあたりの質量が60kgである。

もう一つの方法はまくらぎの大型化である。これは、重軌条化と同じくまくらぎ自体の振動によってエネルギーを吸収することと、まくらぎから道床バラストに作用する単位面積あたりの力を減少し、振動を小さく

するものである。さらに低弾性化が求められる場合は、まくらぎの底面に弾性材を貼った弾性まくらぎが用いられる。図-4に弾性まくらぎの模式図を示す。これ以外にも軌道パッドの低ばね化などの対策が採られることがあるが、これは次項に譲る。

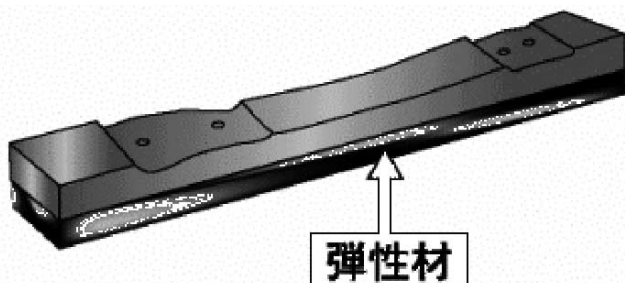


図-4 弾性まくらぎ

(2) 軌道パッドの低ばね定数化

PCまくらぎおよび後述する軌道スラブ等では、レールとコンクリート部材との間に弾性を付与するため、ばねと軌道パッドを組み合わせたレール締結装置が用いられる。図-5に、狭軌曲線用PCまくらぎに用いられる9形改レール締結装置を示す。

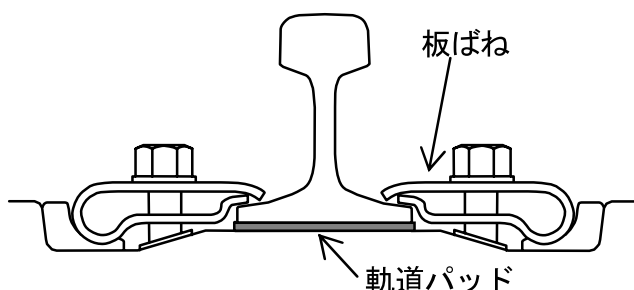


図-5 9形改レール締結装置

軌道パッドは、ばね定数が60～110 MN/mのものが一般的に用いられるが、防振を目的としてこれより柔らかいものが用いられることがある。

軌道パッドの低ばね定数化は、他の条件にもよるが、締結装置間隔（60 cm 前後）に起因する周波数の振動に対し、1～2 dB 程度の低減効果がある。特に、バラスト軌道に比して全体の剛性が高いスラブ軌道では、相対的に効果が高い。

このように軌道パッドの低ばね定数化は、既設線では比較的簡便に行うことができる振動低減法であるが、一方で板ばね等の応力振幅が大きくなり、使用寿命が短くなるといった問題がある。したがって柔らかいものは耐久性の照査が必要である。現在日本で用いられている軌道パッドのうち、最もばね定数が小さいものは20 MN/mである。

(3) 直結系軌道における振動対策

(a) スラブ軌道

前述したとおり、バラスト軌道は防振性に優れたものであるが、列車の走行に伴って道床バラストが漸進的に崩れ、軌道面に数ミリ程度の不等沈下を生ずるため、定期的にこれを測定し、保守を行わなければならないという宿命がある。これに対し道床バラストを廃し、弾性体を介してコンクリート路盤とレールを直接締結した直結軌道が古くから開発され、路盤の沈下量が小さいトンネル内などで用いられてきた。

一般区間におけるバラスト軌道代替用軌道構造として本格採用されたのはスラブ軌道が最初である。スラブ軌道は山陽新幹線岡山開業時に試験的に敷設され、岡山以西で本格的に導入された。スラブ軌道では図-6のように、路盤コンクリートと軌道スラブとの間のセメントアスファルトモルタル、およびレールと軌道スラブとの間のレール締結装置で弾性を確保している。

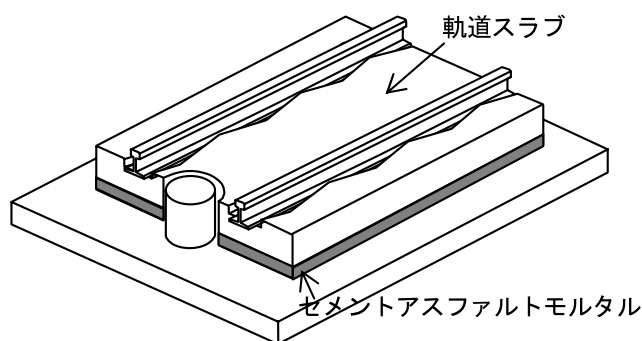


図-6 スラブ軌道

スラブ軌道は、バラスト軌道と比較して建設費は高いが保守量が大幅に減少されることから、昭和50年代以降の新設線では標準的な軌道構造となった。一方で、軌道スラブ表面からの反射音などによって、バラスト軌道よりも騒音が大きいことが指摘されている。例えば山陽新幹線の初期の試験では、バラスト軌道に比べ5 dB (A) 大きいことが明らかにされている。

これに対し、防振性を高めた防振スラブ軌道が開発された。これは、軌道スラブとセメントアスファルトモルタルとの間にゴムマットを挟み込んで振動を遮断するもので、山陽新幹線での試験では普通スラブと比較して3 dB (A) の騒音低減効果が確認された。

(b) 弾性まくらぎ直結軌道

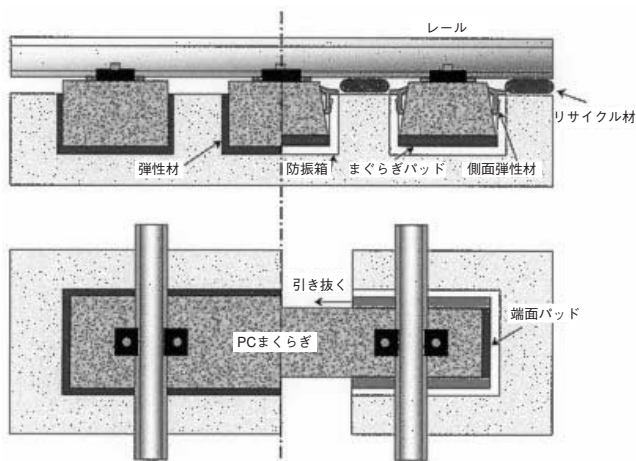
上述の防振スラブによって一定の騒音低減効果は見られたが、一方、軌道スラブの軌道有効支持面積が増加し、実質のばね係数は下がっていないことが指摘された。これに対し、スラブ軌道と同様に直結系軌道で

はあるが、レールと路盤コンクリートの間を、線路方向に剛性をもたないまくらぎで連結し、これを弾性支持する弾性まくらぎが提案された。

弾性まくらぎをバラスト軌道に適用する場合は、保守の作業性の観点から図—4のように現行まくらぎを弾性被覆したものが用いられたが、直結軌道とする場合にはこのような制約はないので、動特性上有利と考えられる条件を満足するものが選択された。具体的には、以下の条件を考慮して軌道構造を検討した。

- ①上下・左右の位置調節が十分行えるレール締結装置を用いられるようにする。
- ②まくらぎの振動を低減するために大版のまくらぎを用いる。
- ③弾性被覆の形成が容易な形状とする。
- ④車輪、レール間に生ずる走行騒音を吸音し、反射による騒音を若干でも低減できるようまくらぎの周辺に碎石を充てんする。

これらを満足する軌道構造として、図—7の左側に示すB型弾性まくらぎ軌道が開発され、大都市内における新幹線軌道などで敷設された。



(1) B型 (2) D型

図—7 B型およびD型弾性まくらぎ直結軌道

一方、このB型弾性まくらぎ直結軌道は、騒音低減効果は優れているものの、路盤コンクリートの構造が複雑であることと、弾性材の交換が困難であること等が課題とされていた。そこで、新たに図—7右側に示すD型弾性まくらぎ直結軌道が開発された。

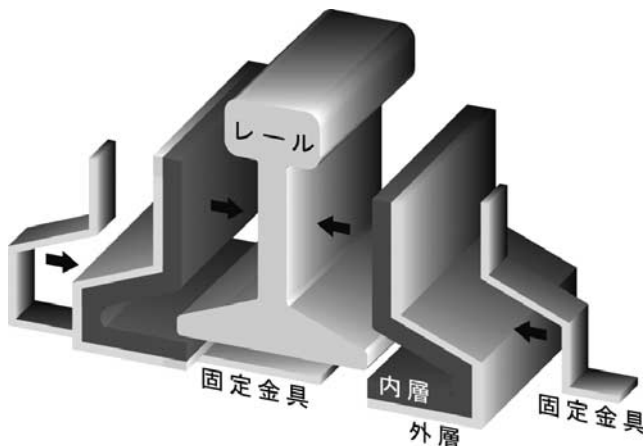
D型弾性まくらぎ直結軌道の特徴は、まくらぎとして一般のバラスト軌道と共通のPCまくらぎを用いるとともに、コンクリート路盤とまくらぎとの間の弾性材が着脱可能な構造となっていることである。これにより、建設費を抑制するとともに、供用後の保守が

容易となっている。

(4) レール吸音材

レール／車輪の接触に伴う騒音への対策として、前述したレール削正のほか、防音壁の設置や軌道面への吸音材の敷設などが実施・検討されている。しかしこれらの方法は、構造物全体の死荷重が増加する、あるいは施工に手間がかかるといった問題がある。そこで、施工性に優れた新たな騒音対策として、レールに直接取り付けられる防音材が開発されている⁶⁾。

レール防音材は、図—8に示すように、レールを両側から高分子弾性層（エチレンプロピレンゴムの発泡体：EPDN）と鋼板（制振鋼板）からなる積層構造となっており、まくらぎ間隔ごとに2体1組でレール頭頂部を除くウェブおよびフランジを全面的に被覆し、その外側を固定金具でボルト固定する。



図—8 レール吸音材の構造

この防音材は、内層の高分子粘弾性層によって振動減衰効果および吸音効果を期待したもので、沿線に防音壁を設置したり、軌道面に吸音材を敷設したりするよりも簡便に施工ができる。また、着脱可能な構造であるので、取付後もレールの検査・保守が可能となっている。バラスト軌道への敷設状況を写真—4に示す。



写真—4 レール吸音材の敷設状況

最近行われたバラスト軌道上における防音材敷設試験によると、レール防音材の敷設時には500 Hz以上の騒音に対し低減効果があり、最も低減量の大きい1 kHz付近では約5 dBの低減が認められ、またA.P.値に関しても約2 dBの低減が認められている。

5. おわりに

軌道は、車両を直接支持するため、走行安全性や環境対策の面から、レール長手方向の形状を高い精度で管理・維持する必要がある、またレールや締結装置は日々の列車走行によって摩耗・損傷するため、日常的な検査・補修が不可欠な建造物である。このようなメンテナンスコストを下げるためには軌道全体を剛にすれば良いのだが、これは騒音・振動の増加につながる。本稿で紹介した技術は、メンテナンス削減と沿線環境改善の両立を目指して行われた数多くの試行錯誤の中から生み出されたものである。

軌道は鉄道固有の技術であり、建設業全体に占める契約額の割合も小さいことから、多くのゼネコンやコ

ンサルタントの方々にはなじみが薄いと思われる。本稿を通じ、環境対策のみならず、軌道の様々な分野に興味を持っていただければ幸いである。 JICMA

《参考文献》

- 1) 須永陽一・成毛将利：在来線における転動音低減のためのレール凹凸管理手法, **16** [4] (2002.4)
- 2) 石田誠・伴巧・名村明：車輪/レール摩擦緩和システムの開発鉄道総研報告, **21** [8] (2007.8)
- 3) 堀池高広・高尾賢一・須永陽一・安藤勝敏・福井義弘・内田一男：着脱式弾性まくらぎ直結軌道(D型弾直軌道)の開発, 鉄道総研報告, **12** [6] (1998.6)
- 4) 佐藤吉彦・大石不二夫・小林悟：防振G型スラブ軌道の開発, 鉄道線路, **30** [3] (1982.3)
- 5) 宇佐美民雄・佐藤吉彦・平田五十・生田重美：弾性マクラギ直結軌道の開発(上), 鉄道線路, **26** [5] (1978.5)
- 6) 間々田祥吾・半坂征則・佐藤潔・鈴木実：遮音機能を有するレール防音材の開発, 鉄道総研報告, **21** [2] (2007.2)

【筆者紹介】

古川 敦(ふるかわ あつし)
 (財)鉄道総合技術研究所
 軌道技術研究部(軌道管理)



平成 19 年度版 建設機械等損料表

■内 容

- 国土交通省制定「建設機械等損料算定表」に準拠
- 各機種の燃料消費量を掲載
- わかりやすい損料積算例と損料表の構成を解説
- 機械経費・機械損料に関係する通達類を掲載
- 各種建設機械の構造・特徴を図・写真で掲載

■ B5版 約600ページ

■一般価格

7,700円(本体7,334円)

■会員価格(官公庁・学校関係含)

6,600円(本体6,286円)

■送料 沖縄県以外 600円

沖縄県 450円(但し県内に限る)

(複数お申込みの場合の送料は別途考慮)

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>