電磁超音波探触子を用いたレール軸力の音弾性測定*

荻 博次^{*1}, 平尾雅彦^{*2}, 福岡秀和^{*2}Acoustoelastic Stress Measurement on Railroad Rails
Using Electromagnetic Acoustic Transducer

Hirotsugu OGI, Masahiko HIRAO and Hidekazu FUKUOKA

Birefringent acoustoelastic stress measurement has been performed on JIS-60 rail samples on the basis of the combination of noncontacting electromagnetic acoustic transducer (EMAT) and the superheterodyne phase-sensitive detector. Slight change of ultrasonic velocities with stresses can be detected using the resonance method for thin samples or using the phase-detection method in case of long propagation paths. Relative accuracy on the order of 10^{-6} is easily available with both approaches. Applied compressive stress up to 76 MPa (about 60 tons), which well exceeds the buckling load of long rails, is measured using the shear waves propagating normal to the stress axis at three portions of the rail (top-to-bottom, head, and web). The evaluated stress coincides with the stress calculated from the load and the cross-sectional area within a few MPa. Discussions on the effects of liftoff and residual stresses are provided.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Nondestructive Inspection, Ultrasonics, Rail, Superheterodyne Phase Detector, Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT), Phase, Resonance Frequency, Liftoff

1. 結 言

鉄道レールは、つねに外気や日射にさらされており、夏や冬の急激な温度変化の影響を直接受ける。レールは枕木に固定されているため、熱膨張・収縮が拘束され熱応力が発生する。その結果レールには、冬は引張応力による破損が、夏は圧縮応力による座屈が生じ、これらは重大事故を引き起こす大きな原因となる可能性がある。現在、このレールの破損・座屈による脱線事故防止のためにその軸力管理には多大な労力と費用が費やされており、実用的なレールの軸力測定方法が要求されている⁽¹⁾。レールの軸力測定に重要なことは、測定精度が測定条件(レール表面のさびや温度など)によらず安定していること、測定が簡単であり、特別な技術を要せず、だれが測定しても同じ測定精度が実現できること、測定時間が短いこと、などである。

本研究ではこれらの条件を満足するセンサと考えられる電磁超音波探触子(EMAT)⁽²⁾を用いてレールの軸力評価実験を行った。EMATは電磁力によって非接触に超音波を送信・受信することができるため、材

料の表面状態の影響を受けにくい。軸力の評価は超音波の音速が応力に反応して線形的に変化する効果(音弾性効果)を利用して行い、2種類の音速測定法(電磁超音波共鳴法と位相法)を試みた。測定は新生の新幹線レールを用い、レールの頭頂部、側頭部、腹部で別々に軸力評価を行った。

いずれの測定も数トン以内のばらつきで軸力を評価できたが、腹部では測定位置による初期値のばらつきが大きく、正確に同一場所での測定が要求された。また、頭頂部と側頭部では初期値のばらつきは小さかったが、車輪が直接接触する場所であり、その影響が未解決のまま残されている。

2. 複屈折音弾性法則

レールの軸力評価は、複屈折音弾性法則に基づいて行った。レールに単軸応力が作用している場合、その横方向に伝わり、軸力方向に偏向した横波の音速 V_1 と、軸力に垂直な方向に偏向した横波の音速 V_2 との差は、次式のようにレールの軸応力 σ と線形関係にある⁽³⁾。

$$B = \frac{V_1 - V_2}{\frac{1}{2}(V_1 + V_2)} = B_0 + C_A \sigma \dots\dots\dots (1)$$

* 原稿受付 平成5年8月24日。

^{*1} 准員, 大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-1)。^{*2} 正員, 大阪大学基礎工学部。

ただし、 B は音速差を無次元化した量(音響異方性)であり、 B_0 は無応力時の音響異方性で、試料の集合組織に依存する。 C_A は横波の音弾性定数であり、通常単軸負荷実験によって較正する。したがって、 B_0 と C_A をあらかじめ測定しておけば、二つの直交偏向した横波の音速差から軸応力を評価することができる。

3. 電磁超音波探触子による音響異方性の測定

音響異方性の測定には図1に示す横波用の電磁超音波探触子(EMAT)を用いた⁽⁴⁾。EMAT はローレンツ力によって非接触で超音波を送信・受信できるため、試料表面のさびや汚れの影響を受けにくく実用性が高い。測定に先立って研磨などの前準備は不要である。しかし、変換効率が低いという欠点があり、従来の伝ば時間に基づく音速測定方法(シングア라운드法やエコーオーバーラップ法)では音弾性測定に必要な高精度の音速測定(相対精度 10^{-5} ~ 10^{-6})が困難である。

本研究では、図2に示すスーパーヘテロダイン原理[この原理と操作方法については文献(5)、(6)が詳しい]によって受信信号の位相を抽出し、この位相を利用した2種類の音速測定法を用いた。一つは電磁超音波共鳴法⁽⁵⁾⁽⁷⁾であり、もう一つは、位相そのものを用いた位相法⁽⁶⁾である。

3・1 電磁超音波共鳴法 電磁超音波共鳴法とは、EMAT を通じて長いバースト波によって、試料内に超音波を発生させ、その定在波の共鳴周波数から材料を評価する方法である。励起終了後に多重反射エコーからなる残響信号の位相差を利用して互いに干渉させることで、相対精度 10^{-6} の共鳴周波数測定が可能である⁽⁵⁾⁽⁸⁾。共鳴法は、多数の反射信号が重なり合う共鳴状態を捕えるため試料の板厚が薄いほど有効であるが、30~40 mm 程度の板厚の金属板に対しても、十分に長いバースト波で共鳴状態を発生させることができる。

図1 横波用 EMAT

n 次の共鳴周波数は試料の板厚 d と音速 V を用いて、

$$f_n = \frac{Vn}{2d} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表されるので、式(1)の音響異方性 B は次式のよ
うに2方向に偏向した二つの横波共鳴周波数を用いて表すことができる。

$$B = \frac{2(f_n^{(1)} - f_n^{(2)})}{f_n^{(1)} + f_n^{(2)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $f_n^{(1)}$ 、 $f_n^{(2)}$ はそれぞれ軸力方向とそれに垂直な方向に偏向した横波の n 次共鳴周波数である。式(3)を用いると、共鳴周波数を測定することで直接軸応力を評価することができる。共鳴法では1回の音響異方性の測定に10~20秒要する。

3・2 位相法 超音波が試料内を伝ばしたことによる位相遅れ ϕ_s は、

$$\phi_s^{(1),(2)} = 2\pi \frac{Lf}{V^{(1),(2)}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。ただし L は超音波が試料を伝ばした距離、 f 、 V は超音波の周波数と音速であり、添字(1)、(2)は各偏向方向を表す。 V が周波数に依存しなければ ϕ_s は周波数と線形関係にあり、その傾きは伝ば時間を与える。したがって、ある区間内で周波数を掃引して ϕ_s を求めていき、結果を直線に最小二乗近似すればその傾きから音速測定を行うことができる。音響異方性
の場合は周波数を掃引しなくても式(1)、(4)から、

$$B = \frac{2(\phi_s^{(2)} - \phi_s^{(1)})}{\phi_s^{(2)} + \phi_s^{(1)}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、位相から直接軸応力を評価することが可能である。これを位相法と呼ぶことにする。位相遅れ ϕ_m は、図2の二つの INTEGRATOR の出力をそれぞれ I_1 、 I_2 とすると、 $\phi_m = \tan^{-1}(I_1/I_2)$ である⁽⁶⁾。ところが、このように測定した位相には、EMAT ならびに測定

図2 スーパーヘテロダイン原理による位相検出

装置内を電気信号が伝わる際に生じる位相遅れ ϕ_i 、超音波の拡散による位相遅れ ϕ_d 、EMAT が信号を送受信する際の電気-機械変換による位相遅れ ϕ_e 、および、位相の変域を $0 < \phi_m < 2\pi$ とするための $2\pi N$ (N は整数) の任意性も含まれており、

$$\phi_m = \phi_e + \phi_i + \phi_d + \phi_e - 2\pi N \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。したがって、 ϕ_e を求めるには $\phi_e + \phi_i + \phi_d - 2\pi N$ ($= \phi_0$ とする) の値が必要である。 ϕ_0 が周波数に依存しない場合は、式(6)の ϕ_m は式(4)から周波数と線形関係になるため、その切片として ϕ_0 が求まる。したがって、この場合は実際の測定に使用する周波数を中心として等間隔に周波数を掃引し、 ϕ_m を測定していき、中心周波数での ϕ_m を基準にして $-\infty < \phi_m < \infty$ の変域に拡張し(ϕ_m の変域は $0 < \phi_m < 2\pi$ であるから周波数を掃引すると単調増加し、 2π を越えると再び零から単調増加するといった周期をもつ)、結果を直線に最小二乗近似するとその周波数零の切片から ϕ_0 が求まる。

実際は ϕ_e 、 ϕ_i 、 ϕ_d の値は周波数に依存するため、厳密に ϕ_e を求めるには測定周波数における ϕ_0 の値が必要である。これは次のようにして求めることができる。まず ϕ_e 、 ϕ_i の値を位相速度が既知で分散性を示さない参照試料を用いてあらかじめ較正しておく⁽⁶⁾、次に測定に使用する周波数を中心として等間隔に周波数を掃引し、 ϕ_m を測定していく。各周波数の ϕ_m に対し参照試料から得た ϕ_e 、 ϕ_i の補正と拡散による補正 ϕ_d を行う⁽⁹⁾。そして補正後の位相を $-\infty < \phi_m < \infty$ の変域に拡張し、結果を直線に最小二乗近似するとその周波数零の切片から ϕ_0 が求まる。しかし、実際には ϕ_e 、 ϕ_i 、 ϕ_d の値は数 rad であり、後述するように、十分に伝ば距離が長い場合はこれらを無視し

ても軸応力測定に及ぼす影響は数 MPa 以内である。

このように、あらかじめ無応力状態で一度周波数を掃引して ϕ_0 を求めておけば ϕ_e は

$$\begin{cases} \phi_e^{(1)} = \phi_m^{(1)} - \phi_0 = 2\pi \frac{L f}{V_1} + \Delta\phi \\ \phi_e^{(2)} = \phi_m^{(2)} - \phi_0 = 2\pi \frac{L f}{V_2} + \Delta\phi \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで $\Delta\phi$ ($0 < \Delta\phi < 2\pi$) は、 ϕ_e や ϕ_i が測定時の気温や測定試料の表面状態に影響されるため完全に取り除くことはできないことによる位相シフト量である。 $\Delta\phi$ は除去できないが式(7)右辺の第1項が $\Delta\phi$ に比べて十分に大きいとき式(5)右辺は、

$$\frac{2(\phi_e^{(2)} - \phi_e^{(1)})}{\phi_e^{(2)} + \phi_e^{(1)}} \approx B \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi \frac{L f}{V}} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり [ただし、 $V = (V_1 + V_2)/2$]、例えば $\Delta\phi = 2\pi$ 、 $f = 3 \text{ MHz}$ 、 $V = 3240 \text{ m/s}$ 、 $B = 0.2\%$ 、 $C_A = -8.0 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ のとき、 $L > 270 \text{ mm}$ を満足していれば式(8)左辺の値を音響異方性としても応力の測定誤差は 1 MPa 以内である。同様に、 $\phi_e + \phi_i + \phi_d = 10 \text{ rad}$ と仮定しても、 $L > 430 \text{ mm}$ であれば ϕ_e 、 ϕ_i 、 ϕ_d の周波数依存性を無視しても応力の測定誤差は 1 MPa 以内である。したがって、伝ば距離を長くすることで式(7)の ϕ_e から直接軸応力を評価できると考えられる。

このように位相法は測定時間も短く (0.01~0.1 秒)、伝ば距離が長くできる場合に有効な測定法であり、共鳴法とは相補的である。

4. レールの単軸負荷応力実験

図3に示す断面を有する新幹線レール [JIS-60, DHH 340, 長さ 500 mm: 新日本製鐵(株)] に圧縮荷重を加え、電磁超音波共鳴法と位相法とで軸力評価を行った。レール表面は研磨せず、赤さび・黒さびが付着した状態のまま測定を行った。荷重は 5 トン間隔で 60 トンまで負荷および除荷した。この荷重は長尺レールに対する座屈荷重 (20~30 トン) を十分越えている。共鳴法では板厚の薄いレールの腹部を測定した。位相法では長い伝ば距離を得るため、頭頂面から底面間を 1 往復する超音波横波を、また側頭部では水平方向に多重反射した超音波横波を利用して測定を行った (図4)。

4.1 電磁超音波共鳴法による測定 図4に示す位置に EMAT を取付け (EMAT は永久磁石の磁力によって強くレール表面に吸着する)、軸方向と軸に垂直な方向に偏向した横波共鳴周波数を別々に測定し

図3 新幹線レールの断面図

た。測定には、振幅 298 Volts, 長さ $42.3 \mu\text{s}$ のパースト波を用いた。パースト波を $3.79 \text{ MHz} \sim 3.88 \text{ MHz}$ まで 600 Hz 間隔で EMAT に送り、レール腹部のほぼ平行な部分に超音波振動を生じさせる。個々の周波数での多重残響信号を同じ EMAT が受信し、振幅スペクトルを求め、得られたスペクトル曲線をガウス分布に近似してその対称軸から共鳴周波数を決定した⁽⁵⁾。得られた共鳴周波数を用いて式(3)から音響異方性を求めた。使用した共鳴周波数は次数が 40 次(約 3.83 MHz)である。図 5 は軸力方向に偏向した横波の周波数スペクトルの軸力による変化である。軸力の増加とともに共鳴周波数が増加しており、音速が増加していることを示している。図 6 に測定結果を示す。横軸は荷重を図 3 の断面積(7770 mm^2)で除した応力である。この結果から音弾性定数 $C_A = -7.85 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ と初期値 $B_0 = 0.189\%$ を得た。軸応力の測定は 3 MPa 以内のばらつきで評価できた。

4.2 位相法による測定 位相法では応力による微小な伝ば時間変化を精度よく検出するために、長い伝ば距離が必要である。このため図 4 に示すようにレールの頭頂部と側頭部とで測定を行った。

まず、音速が既知の参照試料を用いて ϕ_0 と ϕ_i の

図 4 測定位置

図 5 周波数スペクトルの軸力による変化

値を校正しておき、無応力状態のレールで周波数を掃引して ϕ_0 を決定した。参照試料にはアルミニウム合金 (Al 5083, 板厚 20 mm) を用いた。図 7 に ϕ_0 を求める際の周波数-位相関係の例を示す。これはレール頭頂部で周波数を掃引し(中心周波数 3 MHz , 周波数間隔 1 kHz)、各周波数の位相 ϕ_m を測定した結果である。同図の実線は参照試料を用いて ϕ_0 に対する厳密な補正を行った場合であり、破線がこれらを見捨てる、位相の変域拡張のみを行った場合である。いずれも結果を直線に最小二乗近似し、その周波数零の切片から ϕ_0 を得た。この場合、参照試料を用いた補正を行わなくても測定誤差は応力に換算して 0.2 MPa であった。同様にして側頭部でも ϕ_0 を求めた。側頭部では参照試料による補正を行わなくても 0.1 MPa の誤差であった。

次にレール軸方向に圧縮荷重を加え、手動で EMAT を回転させ、軸力方向と軸力に垂直な方向の位相 ϕ_m を別々に測定した。先に得られた ϕ_0 を用いて式(5), (7)から音響異方性を求め、軸応力の評価を行った。レールの頭頂部は第一反射波を、側頭部では第三反射波をそれぞれ使用し、図 8 に示すように、受信波形よりも広い積分ゲートで反射横波の信号を取り込んだ。表 1 に測定条件を示す。表中の位相補正量 $-\phi_0$ の () 内の値は参照試料を用いた補正を行わ

図 6 軸応力と音響異方性の関係(腹部)

図 7 周波数と測定位相の関係(頭部)

い場合の値である。軸応力の測定結果を図9と図10に示す。いずれの結果も3 MPa以内のばらつきで軸応力評価が可能であった。

以上の結果を表2にまとめる。表2から初期値 B_0 の値は腹部が他の部分よりかなり大きく、製造工程での圧延による大きな塑性変形と急激な冷却を受けるためと考えられる。また、この腹部では上下方向に初期値が大きく変化していることが予測されるため、EMATの位置がわずかにずれただけで初期値が大き

く変化し、大きな測定誤差の原因になる。この問題を回避するためには、適切なジグによってEMATを固定させることが必要になる。

5. 初期値のばらつきとリフトオフ

5.1 初期値のばらつき 複屈折音弾性法は、板厚の薄い圧延材料に対しては集合組織による異方性 B_0 (初期値)の値が応力による異方性よりも大きくなる場合が多く、測定位置での初期値の値をあらかじめ測定しておかなくてはならないという欠点がある。鉄道レールの場合、初期値が軸方向に一定であれば、レール端部の無応力部分での測定値を初期値とすることができるが、複雑な残留応力⁽¹⁰⁾の影響などのため、実際には初期値は軸力方向に変動すると考えられる。これを調べるために、共鳴法、位相法両方で、レールの軸方向に25 mm間隔で B_0 を測定した。測定には単軸負荷実験に用いたレールとは異なり、標準の熱処理を施したレール(JIS-60、長さ500 mm、断面寸法は図3

表1 測定条件(位相法)

	Frequency (MHz)	Burst Wave Amplitude (Volts)	Burst Wave Width (μ s)	Gate Width (μ s)	Pass Length (mm)	$-\Phi_0$ (rad)
Head	3.0	120	6.67	11	350	2036.36 (2039.90)
Side	2.5	250	8.00	10	390	1891.18 (1899.44)

図8 受信波形と積分ゲート

図9 軸応力と音響異方性の関係(頭頂部)

図10 軸応力と音響異方性の関係(側頭部)

表2 音弾性定数と初期値の測定結果

	Resonance	Phase (head)	Phase (side)
$C_A \times 10^{-6} / \text{MPa}$	-7.85	-8.14	-8.53
$B_0 (\%)$	0.189	-0.00506	0.0508

(a) 腹部のばらつき(電磁超音波共鳴法)

(b) 頭頂部と側頭部のばらつき(位相法)

図11 軸方向の初期値 B_0 のばらつきの応力換算値

と同じ)を使用した。単軸負荷実験に用いたレールはひずみゲージを多数接着しているため、初期値のばらつきの測定には不適當であった。

測定結果を図 11 に示す。図の縦軸は、レール中心部での B_0 値を基準としたときの初期値のばらつきを応力に換算した値であり、中心部の B_0 値に対して引張応力方向に変化する場合を正とした。レール腹部では初期値のばらつきがかなり大きく、ほぼレール中心部に関して対称な変化を示している。頭頂部と側頭部では腹部より変動は小さく、中心付近(両端 15 cm を除いた範囲)では側頭部で約 5 MPa、頭頂部で約 15 MPa のばらつきであった。これらの原因として、レール内部の残留応力が端部付近では解放されたことやレールを試験体に切断した際の発熱の影響が考えられる。このような場合、 B_0 値は集合組織のみに起因するのではなく残留応力や発熱による金属組織の変化をも反映している。したがって、本法では、製造時の残留応力に付加された応力を測定することになる。これらの影響は、実際のロングレールではより小さく、初期値の軸方向の変動も減少すると考えられる。したがって本実験の範囲内では、腹部を利用して軸力管理を行う場合はあらかじめ各測定位置での初期値 B_0 を測定しておき、敷設後、正確に同じ位置で測定することが必要である。また、頭頂部と側頭部を利用する場合はレール端部から約 15 cm 内側であれば同一の初期値を用いても頭頂部で約 15 MPa、側頭部で約 5 MPa 以内のばらつきで軸応力が評価できると予測される。しかし、頭頂面は車輪が直接接触するため、磨耗や塑性変形を起こし、安定した軸力管理を行うことができない可能性がある。側頭部も車輪の接する場所に近いため同様の影響が予測されるほか、上下方向の曲げモーメントが加わる可能性も考えられる。これらが軸力評価に及ぼす影響は、現在のところ未知である。

図 12 リフトオフによる初期値 B_0 の変化の応力換算値

このほかに、初期値 B_0 に影響を及ぼす要因として測定時の温度変化が考えられる。温度が上昇すると、 B_0 を決定するパラメータである単結晶の弾性定数が減少し、その結果 B_0 の絶対値が減少する⁽¹¹⁾。この変化量は、 B_0 の絶対値が大きいほど著しく、次式の理論式で表される⁽¹¹⁾。

$$\frac{\left(\frac{dB_0}{dT}\right)}{B_0} = 2.11 \times 10^{-4} \quad ^\circ\text{C}^{-1} \dots\dots\dots (9)$$

これに従うと 50°C の温度変化が初期値に及ぼす影響は 2% 以内であり、これは応力に換算すると 1 MPa 以内の誤差であるため、温度変化による影響は小さいことになる。

5.2 リフトオフによる影響 完全な非接触測定のためには EMAT とレール間にかんげき(リフトオフ)を設ける必要性が生じる。レール表面上の汚れやさびもリフトオフに同等であり、この影響を次に調べる。リフトオフは、EMAT の等価回路を考えたときそのインダクタンスと抵抗を変化させるため⁽¹²⁾、式(6)の Φ_0 が変化し、位相のずれを引き起こす原因となる。この結果、位相の測定値だけでなく共鳴周波数もシフトする⁽¹³⁾。音響異方性は二つの偏向方向の共鳴周波数および位相の差に大きく依存するため、リフトオフの影響は相殺されて実際の測定には大きな影響はないと考えられるが、リフトオフによる受信信号の微弱化もあり、測定に及ぼす影響を調べる必要がある。

本研究では、EMAT とレールの間に 0.1 mm 厚の高分子フィルムをはさんでリフトオフを模擬した。測定には標準の JIS-60 レールを用いた。測定結果を図 12 に示す。同図はリフトオフが零のときを基準とした測定値変化の絶対値を応力に換算した結果であり、荷重は負荷していない。リフトオフは 1.4 mm まで測定できた。これ以上のリフトオフは受信信号が微弱となり測定不可能であった。結果は、1 mm のリフトオフまでが約 10 MPa 以内、1.4 mm までが約 20 MPa 以内の誤差であり、リフトオフが増すにつれて誤差が増加した。また腹部での誤差がやや大きいのは、これは腹部では測定位置による初期値のばらつきが大きいため、リフトオフだけでなく、EMAT を手動で回転させたときに生じる測定位置の誤差の影響も含まれているためである。この影響を調べるために同じ測定位置で音響異方性を繰返し測定した結果、腹部で約 8 MPa、頭頂部と側頭部で約 3 MPa の誤差であった。したがって、リフトオフによる応力への誤差は 1 mm までが約 5 MPa 以内であり、1.4 mm までが約 12 MPa 以内と考えられる。信号微弱化の問題は、より有効断

面積の大きい EMAT を使用することや、EMAT の永久磁石の代わりに電磁石を用いてより強い静磁場を作ることによって改善できる。

6. 結 論

電磁超音波探触子によるレールの軸力測定に関する結論を(1)～(5)に示す。

(1) スーパーヘテロダイン法による位相抽出原理によって変換効率の低い EMAT でも音弾性応力測定に必要な相対精度 10^{-6} の音速測定が実現した。

(2) 位相法では長い伝ば距離を用いることで、測定装置や超音波の拡散による位相シフトを無視することができる。

(3) 腹部で電磁超音波共鳴法を利用して軸力管理を行う場合はあらかじめ各測定位置での初期値を測定しておき、敷設後に同一点で測定することで数 MPa (軸力で約 2 トン) のばらつきで軸応力評価が行える。

(4) 頭頂部と側頭部で位相法を利用する場合はレール端部から約 20 cm 内側であれば端部付近の初期値を用いても頭頂部で約 15 MPa (軸力で 12 トン)、側頭部で約 5 MPa (軸力で 4 トン) 以内のばらつきで軸応力が評価できると予測される。

(5) リフトオフは 1.4 mm まで測定可能であり、その影響は 1.0 mm で約 5 MPa (軸力で 4 トン) であった。

また、実用上以下の問題が未解決のまま残されている。

(a) EMAT を手動で回転する際に、測定位置の誤差が生じる。これは測定位置による初期値変化の大きい腹部での軸力管理に大きな影響(約 8 MPa)を与える。

(b) 頭頂部や側頭部における車輪の接触による磨耗や塑性変形による影響、またレールの曲げによる影

響が未知である。

問題点のうち(a)については、レール腹部を型どりの固定装置を使用することや EMAT を改良することで回避できる。例えば、二つの偏向方向のコイルと二つの電磁石からなる EMAT を用い、回転せずに二つの偏向方向の横波を送受信できる EMAT にする。(b)については実際に使用中のレールで測定を行い、その影響を調べる必要がある。

最後に、本研究で使ったレール試験体は、杉野和男博士 [新日本製鐵(株)] より提供していただいたものである。また、負荷試験には大阪大学溶接工学研究所・上田幸雄教授のご好意により、同研究所の試験機を使用させていただいた。さらに、大阪大学・八重川克利技官と大阪大学大学院生・本田崇氏には単軸負荷実験を手伝っていただいた。これらの方々に謝意を表する。

文 献

- (1) 柏谷・ほか 4 名, 鉄道技術研究所速報, A-85-93, (1985).
- (2) Thompson, R. B., *Phys. Acoust.*, **19**(1988), 157, Academic Press, New York.
- (3) 福岡, 機論, **49**-440, A(1983), 403.
- (4) 荻・ほか 2 名, 機論, **60**-569, A(1994), 258.
- (5) 荻・ほか 2 名, 機論, **60**-569, A(1994), 250.
- (6) Fortunko, C. M., ほか 4 名, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(1992), 3477.
- (7) Fukuoka, H., ほか 5 名, *Rev. of Prog. in QNDE*, **12**(1993), 2129.
- (8) Petersen, G. L., ほか 3 名, *Rev. Sci. Instrum.*, (1993), in press.
- (9) Seki, H., ほか 2 名, *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**(1956), 230.
- (10) Zarembski, A. M., *Railway Track & Structures*, (1992), 9.
- (11) 平尾, 日本非破壊検査協会 音弾性研究会資料, **2**(1989), 7.
- (12) Clark, A. V. and Berlinsky, Y., *Res. Nondestr. Eval.*, **4**(1992), 79.
- (13) Hirao, M., ほか 3 名, *Proc. of 6th Intern Symp. on Nondestr. Charact. Mater.*, Hawaii, in press, (1993).