コルゲーションの成長・減衰機構の研究*

(第2報, 理論解析)

須田 義大^{*1}, 井口 雅一^{*2}, 今泉 博英^{*2}

The Mechanism of Corrugation Phenomenon on Rolling Surfaces

(2nd Report, Analysis of Vibration and Deformation Mechanism)

Yoshihiro SUDA, Masakazu IGUCHI, and Hirohide IMAIZUMI

To analyze the mechanism of corrugation formation caused by plastic deformation in experiment, vibration and elastic-plastic vibration deformation equations are proposed. The variables used in these equations are displacement of wheel, corrugation profile and deformation per one pass of contact. To measure the deformation per one pass, special experiments are made, and the characteristics of these equations are determined. Then, the property of elastic-plastic deformation and vibration of wheel are examined theoretically in rolling contact to determine the cause of corrugations.

Key Words: Corrugation, Rolling Contact, Plastic Deformation, Contact Vibration, Self-excited Vibration

1. 序 論

本研究は、鉄道車両の車輪・レール系のように大きなヘルツ圧を持ちながら、転がり接触する機構の接触面上に、コルゲーションが生じる原因の解明を目的にしている。従来、コルゲーションの現象に関して発生・成長機構の明解な説明がつけられていないばかりか、現象を記述する方程式についても定説がないようである。第2報は、第1報⁽¹⁾で実験により明らかにしたコルゲーションの成長の現象を、変形を伴う自励振動の問題と考へて、理論解析モデルを提案し、系を記述する方程式を導く。そして、車輪1回転中の挙動、すなわち1回の接触での振動特性、変形特性について考察する。

第1報で述べた実験の概要を簡単に説明する。実験装置は、二つの鋼製車輪を接触面のすべりが無い状態で転がり接触させるものであり、振動系の構成要素は、軸受を固定した車輪に接触剛性を介して車輪がある1自由系である。円筒接触であるため、接触剛性は線形

特性に近い。接触面圧と回転速度を変えて実験を行い、硬度の小さいほうの車輪表面上にコルゲーションを実際に成長させることに成功した。リアルタイムでコルゲーションの形状と車輪の上下振動を測定し、コルゲーション成長の現象に関して、コルゲーションの波長などの振動特性、過渡特性を調べた。

実験から得られた結果を要約すると次のようになる。

すべりがなく、強制加振がなくても繰返し接触によりコルゲーションは自励的に発生・成長し、この過程は一種の自励振動とみなすことができる。変形の要因は主として塑性変形である。コルゲーションの波長は、上下振動の固有振動数によってほぼ定まるが、成長に伴いコルゲーションの波長は増大し、卓越する上下振動の波長より長くなる。また、位相の進みも伴う。コルゲーションの形状は正弦波形ではないため、変形過程は非線形特性を含んでいる。

そこで、これらの実験事実を説明できる理論モデルを提案し、振動特性と変形特性について考察する。

まず、コルゲーションの成長過程を記述する系の構成を検討し、系を記述する物理変数を定めた。そして、振動方程式と変形方程式を導き、実験によりこれらの方程式を同定した。最後に、得られた非線形方程式に

* 昭和62年10月25日 九州・中国四国支部熊本地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月3日。

^{*1} 正員、法政大学工学部(東京大学大学院) (〒184 小金井市鹿野町3-7-2)。

^{*2} 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

ついて、部分的な線形化による理論解析や計算機シミュレーションを行い、車輪1回転中に生じる振動と変形の動的挙動を明らかにした。繰返し接触による表面形状の変形過程、すなわちコルゲーションの成長過程の解析は、引き続き第3報⁽⁴⁾で検討する。

2. コルゲーションの現象を表す系の構成

コルゲーションの成長・減衰機構を表す系、すなわち変形を併う自励振動系の構成は、次の二つに分けて考えることができる(図1)。

ひとつは、方程式の変数に車輪の上下変位 x と1接触当たりの塑性変形量 y 、表面形状 z をとり、系の入力として形状 z を与えたとき、出力として振動 x 、変形量 y が求められる系である[図1(a)]。これは、振動方程式と変形方程式で記述される。もうひとつは、変形量があるために形状が変形していく系である。入力は変形前の形状 z_n と変形量 y 、出力が変形後の形状 z_{n+1} であり[図1(b)]、形状の変化の方程式で表される。これらを組み合わせることによって、繰返し接触により、コルゲーションの成長過程と車輪の上下振動が定まることになる(図1(c))。従来の研究では、1接触当たりの変形量が考慮されていなかったり、車輪の上下振動と表面形状または変形量が混同されていたところに問題があったと考えられる。

3. 方程式

3.1 解析検討方針 解析に当たり、次の前提をおく。

- (1) 振動系については上下方向の自由度のみ考慮する。
- (2) 接触面内のすべりは考えず、すべりによる摩擦も考慮しない。
- (3) 変形の要因は塑性変形のみを考える。
- (4) 車輪は一定方向に一定速度で回転するものとする。
- (5) 弾性表面波、塑性波は考慮しない。

図2 解析モデル

これらは、実験結果から判断して妥当な仮定と考えられる。

3.2 振動モデル 振動モデルは、図2(a)のように考えた。円筒接触のヘルツ理論を適用して、弾性変形時の特性が表される⁽¹⁾。弾性変位と単位接触幅当たりの荷重 P の関係を陽に求めるために、近似的に、

$$P = C_0 \delta^{n_0} \quad (1)$$

と置く。計算の結果、本実験装置の条件($R_1=150$ mm, $R_2=250$ mm)では、次の定数に選べば特性が表されることがわかった。なお、ここでの単位は、単位接触幅当たりの荷重については[kN/mm]、変位については[mm]である。

$$C_0 = 33.4$$

$$n_0 = 1.08 \quad (2)$$

3.3 塑性変形モデルと解析法 本研究のように二つの鋼製車輪が塑性変形を伴いながら転がり接触する場合は、回転塑性加工学⁽²⁾の手法の適用が考えられる。ところが、この現象を厳密に理論解析することは、変形が軸対称でもなく平面ひずみでもなく、三次元に生じること、局部的に圧力を加えるために、材料が盛り上がり表面状態を指定することができず、境界条件が設定できないこと、変形領域が周囲から拘束されていること、加工終了後測定されるひずみ、繰返し加工されたひずみの蓄積であるから、瞬間のひずみ量をとらえることが難しいこと、などから非常に困難である⁽²⁾。そのため、通常、二次元変形を仮定して次のよ

うな塑性解析を行っている。一般に塑性変形の挙動を解析するには、釣合い方程式、ひずみの適合条件、構成式〔降伏条件、応力-ひずみ増分関係式（ながれ則）、体積一定の条件〕、境界条件を連立させて解くことになる。これらの方程式の一部またはすべてを満たす近似解を求める方法として、スラブ法、エネルギー法、すべり線場法や、有限要素法、境界要素法などが提案されている。

塑性加工で最も重要なことは、変形後の形状を定めるときに加工力を推定することである。本研究のように、動的な接触力と動的な変形量の関係を解析的な関数方程式で求める目的に関して、これらの手法は必ずしも最良な方法ではない。実験では、軸方向の変形が認められるし、転がり接触では、ヘルツ理論により降伏応力に最初に到達するのは、せん断応力であり、円周方向への変形を無視するわけにはいかない。そこで、ここでの解析は、図2(b)のように軸流れと円周流れの両方を考慮した三次元変形のモデルで、体積一定という構成式のみを用いて幾何学的特性を求め、荷重と変形の関係は、実験で特性を同定する方針とした。

また、シェイクダウンや加工硬化といった材料特性の問題が存在する。この点に関しては、簡単化のためと、接触回数が比較的小さい（1000～10000回転）こと、塑性加工のような弾性限度を大きく超えた荷重をかけていないことから、考えないことにした。

3.4 塑性変形方程式 車輪・軌条輪の円筒どうしの接触を、等価的に円筒と平面の接触に置き換える。等価軌条輪半径は、

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

で表される。軌条輪は変形しないとする。

変形量は等価軌条輪半径に比べて微小量であるから、円弧を直線近似して、図3のようにモデル化し、記号を図のように定める。塑性変形を伴いながら転がり接触している状態のある瞬間を考える。接触幅 l 、接触長さ B 、変形量 y 、バルジ変形を起こして転がり接触方向前方に押し出される部分について長さ b と高さ h 、横に逃げる体積を表す量として幅の増分 A 、変形する深さ H の間には、体積一定の条件から次式の関係がある。

$$\frac{1}{2} y B l = \frac{1}{2} b h l + \frac{1}{2} B A H \quad (4)$$

これらの変数は荷重 F の関数であり、三次元変形を仮定しているが、近似的に単位幅当たりの荷重、

$$P = F/l \quad (5)$$

で整理されるものとする。

ここで、動的な挙動を考慮して、転がり接触中に荷重が変動して、横に逃げる体積と、バルジ変形する体積の比率が変化したときを考える。距離 ds 進むと、バルジ変形に関して幾何学的に次式が成立する。

$$h = b \frac{dh}{ds} \quad (6)$$

式(4)に代入して、

$$y B = b^2 \frac{dh}{ds} + \frac{B A H}{l} \quad (7)$$

ここで

$$q = y + h \quad (8)$$

と置いて y に関する微分方程式に整理する。

$$\frac{dy}{ds} + \frac{B}{b^2} y - \frac{dq}{ds} - \frac{B A}{b^2} \frac{H}{l} = 0 \quad (9)$$

よって、 B/b^2 、 q 、 AH/l を P の関数で表すことができれば、変形特性を微分方程式で表現できることになる。

3.5 変形を伴う振動系の方程式

座標系を図4のように定めて、表面形状 z 、車輪の上下変化 x 、変形量 y についての方程式をたてる。塑性変形方程式(9)については、時間微分に書き換え、振動方程式では、弾塑性変形時の塑性変形抵抗は、弾性ひずみと塑性ひずみの和をひずみとした弾性力で表されるから、次式のように表される。

(1) 接触、変形なし ($0 < P < P_y$)

図3 塑性変形モデル

図4 座標系

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + lC_0(x_0 + x - z)^{n_0} - mg = 0$$

$$y = 0$$

$$mg = lC_0x_0^{n_0} \dots\dots\dots(10)$$

(2) 接触, 塑性変形 ($P > P_y$)

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + lC_0(x_0 + x - y - z)^{n_0} - mg = 0$$

$$\frac{1}{V}\dot{y} + \beta y - \frac{1}{V}\frac{dq}{dt} - \alpha = 0 \dots\dots\dots(11)$$

(3) 非接触 ($P < 0$)

$$m\ddot{x} + C\dot{x} - mg = 0$$

$$y = 0 \dots\dots\dots(12)$$

ここで,

$$P = \frac{F}{l} = C_0(x_0 + x - y - z)^{n_0}$$

$$\beta(P) = \frac{B}{b^2}, \quad \alpha(P) = \frac{B}{b^2} \frac{AH}{l} \dots\dots\dots(13)$$

とおく。接触力を判定条件にして, 三つの場合に分かれ, 全体で3階の非線形連立微分方程式で表されることになる。

3・6 繰返し接触による形状の変化を表す方程式

繰返し接触による形状の変化を表す方程式は, 円周方向の距離の関数である n 回めの形状 $z_n(s)$, 変形後の $n+1$ 回めの形状 $z_{n+1}(s)$, 1 接触当たりの変形量 $y(s)$ について, 次式で表される。

$$z_{n+1}(s) = z_n(s) + y(s)$$

$$s = 0 \sim 2\pi R_1 \dots\dots\dots(14)$$

厳密には, このような上下方向の変形だけでなく, 軸方向の変形も存在するが, $n+1$ 回めの振動方程式へ与える影響がほとんどないため, 考えないことにする。

これらの方程式は, 本実験条件のように円筒どうしの接触, 円筒と平面の接触いずれについても成立する。両者の違いは, $n+1$ 回めの変形を伴う振動方程式を解くときの初期条件が異なるだけである。前者の場合は, n 回めの最後の点での最終条件が, $n+1$ 回めの初期条件に等しくなる。一方, 後者では, 毎回設定された初期条件を用いることになる。

4. モデルの妥当性

4・1 はじめに ここで提案したモデルでは, 1 接触当たりの変形量を方程式の変数と扱ったところに大きな特徴がある。ところが, 第1報でのコルゲーション成長実験では, 車輪1回転当たりの変形量は微小すぎて測定できない。また, 現実には生じるコルゲーションについては, 測定できないだけでなく, 独立した変数として扱う概念もなかったように思われる。そこで, 本研究では, 車輪に動的な大荷重を加えられるよ

うに実験装置を改造し, 1 回当たりの動的変形量, 車輪変位と変動荷重の関係を実験で求めてみた。

4・2 実験方法 装置の概要を図5に示す。車輪軸受上に取り付けられたおもりの上に荷重計を取付け, その上から, てこを介しておもりで荷重をかける。接触力を周期的に変動させる方法は, このおもりをばねでつるし, おもりの振動を利用している。車輪の回転速度と振動数は, コルゲーションの波長が生成・成長実験時とほぼ等しくなるように設定した。接触力の値は, 直接の測定が困難であったため, 車輪に作用させた荷重の値を荷重計(ロードセル)を用いて測定し, この値に車輪の自重を加えた値とした。車輪に作用する慣性力の影響は, 変動荷重の周波数が1.6 Hz と小さく, 振動の振幅が極めて小さいため無視しても問題はない。

方程式に現れる特性を同定するための静荷重試験, 方程式の動的特性の妥当性確認のための動荷重試験, 加工硬化の影響を調べるための連続荷重試験, 三次元変形を確認するための平面押し付け試験を行った。

4・3 静荷重試験による特性の決定 静荷重を加えて変形後の形状を求めた。測定形状の一例を図6に

図5 塑性変形実験装置の概要

図6 塑性変形実験結果
(静止状態, 転がり状態での静荷重による変形前後の表面形状)

示す。円周方向の変形が確かに存在することがわかる。静止状態と転がり状態では、塑性変形を伴うと接触面積が変化し、同一荷重でも変形量に差がみられる。ここでは、動的挙動を表すと考えられる転がり状態での、単位接触幅当たりの荷重と図7に示した各変形量の関係を、接触幅、荷重、速度を変えて実験で求めた。図8に、測定結果の一部を示す。速度の影響はみられず、方程式に現れる各関数は、次式のように表されることがわかった。

$$q = C_2(P - P_y)^{n_2}$$

$$C_2 = 8 \times 10^{-3}, \quad n_2 = 1.6$$

$$\alpha_n = B \frac{l^2}{b^2} AH = \alpha l^3 = C_3(P - P_y)^{n_3}$$

$$C_3 = 0.04, \quad n_3 = 1.7$$

$$\beta_n = \beta l^2 = B \frac{l^2}{b^2} = C_1 P^{n_1}$$

$$\text{モデル N: } C_1 = 6.25, \quad n_1 = -0.6$$

$$\text{モデル R: } C_1 = 2.8, \quad n_1 = 0.2$$

$$\text{モデル C: } C_1 = 3.4, \quad n_1 = 0.0$$

.....(15)

三次元変形を単位接触当たりの関数で整理したことから、この実験でも測定量が微小であることから、 β_n では実験値には幅があり、とりうる範囲の二つと、 β_n 一定としたモデルの三つが考えられる。弾性限度 P_y の値は、ミーゼスの降伏条件を用いた理論解析結果⁽³⁾より若干小さめであるが、実験での値をもとに、次のように定めた。

$$P_y = 0.6 \text{ kN/mm} \quad \text{.....(16)}$$

4.4 動荷重試験によるモデルの検定 車輪全周のうち一部分のみに1回だけ変動荷重を加え、コルゲーションを生成させた実験結果と、ルンゲ・クッタ法を用いたこの実験の非線形シミュレーション結果を図9に示す。実験とそのシミュレーションに用いた諸定数の値は、接触幅 $l = 2.4 \text{ mm}$ 、振動系の固有振動数 $f_x = 160 \text{ Hz}$ 、振動系の減衰比 $\xi = 0.18$ 、車輪の回転速度 $V = 0.0485 \text{ m/s}$ 、変動荷重の振動数 $f = 1.6 \text{ Hz}$ 、変動荷重の波長 $\lambda = 30 \text{ mm}$ である。図では、モデル N のみの結果を示すが、他のモデルでも、振幅、位相が車輪上下変位、変形量ともによく一致し、モデルの妥当性が確認できた。

4.5 その他の試験結果と考察

平面に円筒を押し付け、変形した部分の断面形状を観察することにより、軸方向変形の存在が確認できた。変動荷

重を連続的に加え、生成したコルゲーションの変化を調べたところ、積算変形量が $80 \mu\text{m}$ 程度ならば、加工硬化の影響は小さいことがわかった。一方、繰返し接触数が多く、塑性変形量が増大すれば、加工硬化により、変形が平衡状態を保ちコルゲーションの成長機構に影響があることもわかった。

5. 変形を伴う自励振動系の特性

5.1 はじめに 確定した方程式を用いて、1 接触中の振動・変形特性について理論検討を行った。方程式の部分的な線形化により、コルゲーションの成長・減衰機構に与える諸要因の影響を大局的に調べた。さらにコンピュータ・シミュレーションによって非線形モデルの詳細な分析を行った。以下に得られた結果を述べる。

5.2 自励振動発生の可能性 繰返し接触に伴い、コルゲーションの自励的成長で表される自励振動のほかに、1 回の接触中にも、変形を伴うことによって自励振動が発生する可能性があることがわかった。弾性変形特性を線形化し、塑性変形方程式に現れる関数を次のように置く。

$$q \propto (P - P_y) = k_p(P - P_y)$$

$$\alpha \propto (P - P_y) = k_a(P - P_y)$$

$$\beta = \text{const.} \quad \text{.....(17)}$$

このような近似により、非線形方程式(11)は次式のよ

図7 塑性変形実験の測定項目

図8 塑性変形特性の同定 (q, B)

図 9 塑性変形実験(動荷重試験)によるモデルの検定

図 10 コルゲーションの振幅と変形量の関係

うな定係数の線形微分方程式となる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega\zeta & 0 \\ -\frac{x}{1+x} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \omega^2 & 0 \\ -\frac{V\alpha_w}{1+x} & \frac{V(\alpha_w+\beta)}{1+x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \omega^2 & 0 \\ -\frac{x}{1+x} & \frac{V\alpha_w}{1+x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\alpha_w}{1+x}x_y \end{bmatrix} \quad (18) \end{aligned}$$

ここでは、次のように定数を置いた。

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{k_c}{m}, \quad \zeta = \frac{C}{2\sqrt{mk_c}}, \quad \alpha_w = \frac{k_a k_c}{l} \\ K_p &= \frac{l}{k_p}, \quad x = \frac{k_c}{K_p} = \frac{k_c k_p}{l}, \quad x_y = \frac{P_y l}{k_c} \quad \dots (19) \end{aligned}$$

フルビッツの安定判別条件より、常に塑性変形が生じるとした時の自励振動の発生条件は、

$$\begin{aligned} 4\zeta^2 + 2\left\{ \frac{V(\alpha_w+\beta)}{(1+x)\omega} + \frac{\omega}{V(\alpha_w+\beta)} \right\} \zeta \\ + \frac{1}{1+x} - \frac{\beta}{\alpha_w+\beta} < 0 \quad \dots (20) \end{aligned}$$

と表される。定性的には、この自動振動の原因は、円周方向前方への塑性変形であり、不安定にする要因は、振動系の減衰比が小さいこと、速度が遅いこと、面圧が等しければ接触幅が大きく円周方向塑性変形を助長することである。しかし、現実的には、この条件が満たされる例は少ないと考えられる。

5.3 振動数 発生する振動数は、塑性変形を伴わないときの減衰固有振動数 f_x よりも小さくなる。バブル変形を考えず、変形量が接触力に比例するとした線形解析によれば、塑性変形を伴う場合の方程式は、

次式で表され、等価的に接触剛性が小さくなる。

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + C\dot{x} + \frac{k_c}{1+x}(x-z) &= \frac{k_c}{1+x}k_p\left(\frac{mg}{l} - P_y\right) \\ x &= k_c/K_p > 0 \quad \dots (21) \end{aligned}$$

ここで、 k_c は弾性接触特性を線形化した時の等価接触剛性、 K_p は塑性変形量が接触力に比例するとした時の塑性変形抵抗である。よって、コルゲーションを生成させる振動と変形量の変動の振動数は、近似的に次式で表される。

$$f_z = \frac{f_x}{\sqrt{1+x}} \quad \dots (22)$$

5.4 変形量の振幅 変形量を増大させる要因は、振動系の固有振動数が大きく減衰比が小さいこと、平均接触圧が高く弾性限度に近いこと、表面の空間的変動振幅が大きいことであり、これらの条件が一定ならば車輪の転動速度には依存しない。5.3節の線形化によって、変形量は近似的に次式で表される。

$$y = \frac{x}{1+x} \quad \dots (23)$$

一方、非線形特性を考慮したシミュレーション結果では、変形量はコルゲーションの振幅 z_0 の約二乗に比例して増大する(図 10)。よって、成長するほど変化が大きくなり、コルゲーションの成長をさらに助長させることになる。

6. 結 論

コルゲーションの成長の現象を表す変形を伴う自励振動系を検討し、塑性変形特性を考慮した振動・変形方程式を導いた。1 接触中の変形量を変数にとった微

分方程式で記述される。

実験により、荷重と変形量、振動の関係を静的、動的に求め、導いた方程式の妥当性を確認した。

理論検討により、塑性変形を伴うと自励振動の発生の可能性があること、振動数が低下すること、すなわち波長が伸びることを指摘し、振動系の特性やコルゲーションの振幅が変形量へ与える影響を調べた。

本研究を行うにあたり、ご協力いただいた方々に感謝する。本研究は文部省科学研究費補助金(昭和61年

度奨励研究(A))の交付を受けて行われたものである。

文 献

- (1) 須田・井口・今泉・谷口, 本論文集 537 ページ, 61.
- (2) 葉山, 「回転塑性加工学」, (昭56), 近代編集社.
- (3) Johnson, K. L., "Contact Mechanics", (1985), Cambridge University Press, 284.
- (4) 須田・井口・今泉, 本論文集 552 ページ.

討 論

〔質問〕 横 瀬 景 司〔新潟大学工学部〕

コルゲーションの発生機構に関し、理論と実験の両面より詳細な検討をされたことに敬意を表す。以下の点についてご教示願いたい。

(1) 3・2 節の振動モデルについては円筒接触のヘルツ理論を適用し、方程式の誘導過程においては変形の要因は塑性変形のみを考えるとあるが、両者のつながりについてご教示いただきたい。また本実験における弾性限度に達する M (図5) はいくらか。

(2) 車輪および軌条論には製作当初の誤差として微小な偏心があるように思う。偏心による強制加振力はコルゲーションの波長にどのような影響を与えるか。また、両車輪の偏心量の実測値、表面粗さ、転走実験におけるスペクトル分析結果があればお教え願いたい。

(3) 図6において、static 状態と rolling 状態における円周方向の差は、接触面の塑性変形であると述べておられるが、測定位置から推定すると車輪偏心、車軸の曲げ振動による測定誤差も入るように思うが、いかがか⁽¹⁾。

〔回答〕 3・1 節で述べた解析の前提における変形の要因とは繰返し接触による表面形状の変化で表される変形の要因のことである。鉄道レールに発生するコルゲーションの問題では、波状摩耗ということばが使われるように、この変形の要因が摩耗であると一般的に受け取られているため、塑性変形を強調する意味で、「塑性変形のみ」と記述した。一方、1回の接触中の生じる振動に伴う変形の要因は、弾性変形と塑性変形である。両者の変形の意味の違いを明確にすべきであったと思う。

弾性限度は、本文に記述したとおり、0.6 kN/mm である。接触幅によっておもりの質量は異なってくる。車輪と軸受体(荷重計を含む)の質量が 88.1 kg、てこ

の質量が 3.7 kg、てこの比が 1.25 であるから、幅 2.2 mm 以下ではおもりの質量がなくても弾性限度を超える。本実験では、塑性変形を生じさせることが目的である。

(2) 車輪の形状成形は、実験装置に取付けてから切削、研削を行っているため、偏心はほとんどないと考えられる。質量の回転バランスまでは取っていないため、1回転1回の加振力の影響は存在すると思うが、回転速度は最大で 300 rpm であり、これは振動数にして 5 Hz となり、コルゲーションの振動数 120~160 Hz と大きく異なる。よって、コルゲーションの波長への著しい影響はないと考えられる。また、データとしては採用していないが、軌条輪にきずがついたため、軌条輪1回転に1回の加振力が加わってしまった実験例があり、このときのコルゲーションの波長には影響がなかった。上記の理由により、偏心量の測定およびスペクトル解析は行っていない。コルゲーション生成実験時のスペクトルでは、車輪の1回転に相当する周波数のピークも認められるが、車輪1周でほとんど同じ形状が繰返すことによるものも含んでいる。

(3) 図6の測定方法を説明すると次のようになる。表面形状のみを測定すればよいのであるから、誤差をなるべく排除するため、実験終了後に、荷重をかけず、車輪軸受を固定した状態で、転がり接触もさせず、車輪のみを低速で回転させて測定している。よって、ご指摘の影響はほとんどないと考えられる。

〔質問〕 大 山 忠 夫

〔(財)鉄道総合技術研究所〕

塑性変形を伴う自励振動によってコルゲーションが成長するという研究成果を興味深く拝見した。二、三ご教示いただければ幸いである。

(1) 図10の横軸 z_0/x_0 の範囲が1までだが、このことはコルゲーションの振幅が弾性圧縮量を超えるこ

とがないことを意味するのか。

(2) 図10で変形量 y/x_0 が z_0/x_0 のほぼ二乗の割合で増加することはコルゲーションが無限に成長することを意味するのか。もし限界があるとしたら、それは何によって定まるのか。

(3) ここで得られた知見から、実際にコルゲーションを防止するためにはどのような対策をとったら良いかお教えいただければ幸いである。

〔回答〕 (1) 図10では、傾向を示すために、便宜上 $z_0/x_0=1$ までの結果のみを表したが、コルゲーションの振幅が大きくなると車輪が飛び跳ねてしまうため、無制限にこの傾向が続くわけではない。条件によって異なるが、図10の計算では、 $z_0/x_0=1$ 付近より車輪が飛び跳ねてしまった。

(2) コルゲーションの発生・成長の現象を考察するには、次の三つの状態を考慮する必要があると考える。なんらかの一定周期の振動が引き起こされ、接触面に塑性変形のような永久変形が生じる発生過程、この変形によって引き起こされる振動が次の変形を定め、表面形状が変化することによりコルゲーションとして成長・減衰していく成長・減衰過程、そして、なんらかの原因で形状の変形が進まなくなり、平衡状態を保つ定常過程である。本報は、このうち発生過程と成長・減衰過程について、実験で生じたコルゲーションを説明する理論解析モデルを求めたものであり、引き

続き第3報で詳細に検討している。

ご指摘のコルゲーションの成長の限界については、上記の定常過程が存在するか、存在するならば何が原因かということに解釈できる。本研究では、第1報の実験では困難であったため、この定常過程の詳細な検討は行っていないが、次のことが考えられる。

まず、上記の車輪の飛跳ねによる一定波長のコルゲーション成長の限界がある。実験においても、車輪の飛跳ねより波長が異なるコルゲーションが生成される現象もみられたが、危険が伴う実験となったため、詳細な解析は行っていない。次に、レールのように半無限遠の場合ではなく、車輪表面に発生するコルゲーションでは、振幅の成長とともに生じる波形の伝ばの影響がでてくる。コルゲーションが車輪全周に伝ばすると、波長の整数倍と円周長の関係が問題になる。実験でも、コルゲーションが全周に伝ばしたことにより、一時的にコルゲーションが減衰する現象もみられた。また、シェイクダウンのような塑性変形特性のため、変形できなくなることによる限界も考えられる。本文に記したように、連続荷重試験では、このような状況が発生した。

(3) コルゲーションの防止法については、第3報で検討しているので、紙面の都合上そちらを参照願いたい。