

住友金属工業株式会社 正会員 岡本 政 信
住友金属工業株式会社 小杉 佐 内

1. はじめに

空気カプセル輸送システムは輸送物を車輪付きカプセル（カプセル車）に積載し管路内を気流で輸送する技術であり¹⁾、カプセル車としては、Fig.1 に示すような車輪軸がカプセル本体に固定された固定輪式カプセル車が構造的に簡単である。しかし、管路断面が円形の場合、走行中に断面内で回転または転倒するおそれがあり対策を要する。そこで、製作時の設計条件により走行姿勢の安定性を確保することにし、その手段として、走行中のカプセル車の姿勢をシミュレートする解析法を考案したので以下に報告する。

2. カプセル車の運動モデル

2.1 作用外力の決定

カプセル車の運動を考えるためにはその作用外力を決定する必要がある。外力は重力や流体力のようにカプセル本体に作用する力と車輪が管路壁面から受ける反力とに分けられる。前者は既知外力でありカプセル本体を剛体とみなし重心 G への等価外力で置き換える。後者についてはFig.2 に示す骨組構造モデルにより求める。ここで、車輪部は車軸中心から管路壁の接地点までを弾性論に従う梁部材でモデル化する。カプセル本体については剛体であるから剛性の大きな梁部材の組合わせでモデル化する。

なお、Fig.3 に示すようにカプセル車は一般に管路断面内で傾転状態にありその角度を安定状態を基準とした回転角 ϕ で表す。また、骨組構造モデルを記述する座標系としてはカプセル車に相対的に固定された座標 $X' Y' Z'$ を考える。さらに、カプセル車が走行するとき、Fig.4 に示すように転がり抵抗 R_1 とキャンパー角 θ_c によるキャンパスラスト R_2 が発生し、これらを作用外力として考慮する必要がある。

2.2 カプセル車の回転運動の定式化

時刻 t で走行カプセル車の回転角 ϕ および作用外力が既知のとき、時間 dt 間での回転角の変化 $d\phi$ を考えてみる。まず、カプセル車が走行するときの車輪の進行方向はFig.5 に示すように取付角 θ とクリープ現象とで決まる。その結果、Fig.6 のように車輪の接地

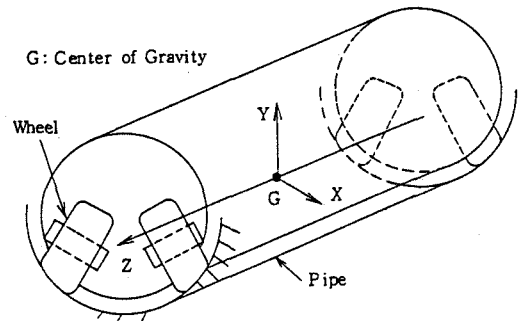


Fig.1 Capsule Vehicle with Fixed Wheels

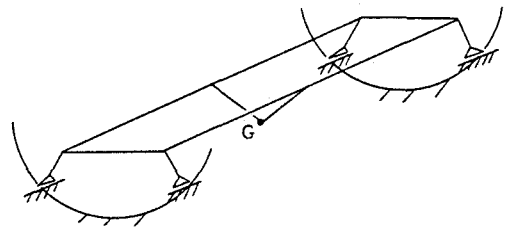


Fig.2 Frame Model of Capsule Vehicle

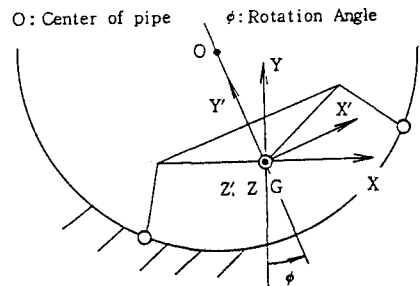


Fig.3 Coordinates System of Model

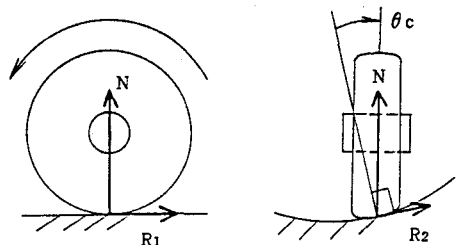


Fig.4 Rotating Resistance and Camber Thrust

点は移動し、節点 i の管路周上の変位を管路中心 O の回りの回転角量 $d\gamma_i$ で表すと次式が成り立つ。

$$d\gamma_i = \left(-\frac{Q_i}{N_i} \cdot \frac{1}{\beta} + \tan(\theta_1) \right) \cdot \frac{w}{r} \cdot dt \quad (1)$$

β はクリープ係数、 w はカプセル車の走行速度、 r は管路半径を表す。各節点の移動により重心 G も移動し、回転角の変化 $d\phi$ が求まる。すなわち、時刻 t で作用外力 f が決まれば ϕ が求まり、次の関係式を得る。

$$\ddot{\phi} = F_0(f_0) \quad (2)$$

なお、Fig.7 に示すように外力としては重心 G に作用する慣性力も存在し、その成分は次のとおりである。

$$[f_x, f_y, m_z] = [M y_0 \ddot{\phi}, M y_0 \dot{\phi}^2, I_z \ddot{\phi}] \quad (3)$$

M はカプセル車の質量、 y_0 は管路中心 O の重心 G からの距離、 I_z は重心回りの慣性モーメントである。

したがって、 f は ϕ 、 $\dot{\phi}$ および $\ddot{\phi}$ の関数となり式(2)より式(4)、さらには式(5)の関係を得る。

$$\ddot{\phi} = F(\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}) \quad (4)$$

$$\ddot{\phi} = G(\phi, \dot{\phi}) \quad (5)$$

この運動は、初期条件 $\phi(0)$ 、 $\dot{\phi}(0)$ が与えられれば一意に決まり、実際には数値計算で求まる。

3. 解析法の妥当性検討

本解析法の妥当性を検証するため、模型実験を実施し結果を比較した。実験方法として、Fig.8 に示すように管径300mmの半割パイプ内で模型カプセル車をロープで引き、走行距離と回転角との関係を測定した。なお、実験では前2車輪に同一の取付角を意図的に与えた。ただし、キャンパー角は与えていない。ここで実験とシミュレーションとの比較結果をFig.9 に示す。設定条件は以下のとおりである。

前輪取付角; $\theta = 0.25^\circ, 0.5^\circ$, クリープ係数; $\beta = 10.0$
 管路半径; $r = 0.15m$, 走行速度; $w = 0.01m/s$
 距離 GO ; $y_0 = 0.28r$, カプセル質量; $M = 81.9kg$

図より両者の結果は良く対応しており、本解析法の妥当性が検証された。

4. おわりに

円形断面の管路内を走行するカプセル車の姿勢安定性を検討する手段として、骨組構造モデルと剛体の運動方程式とを組合わせた姿勢解析法を考案した。さらに、その妥当性も実験との比較により確認した。

参考文献

- 1) 小杉佐内: 日本におけるカプセル輸送の現状, 第5回混相流国際シンポジウム(1992.6), 79

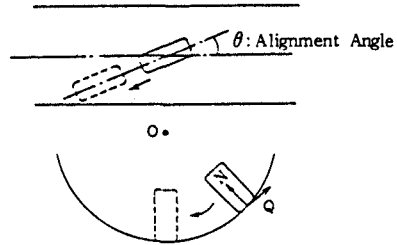


Fig.5 Influence of Alignment and Creep

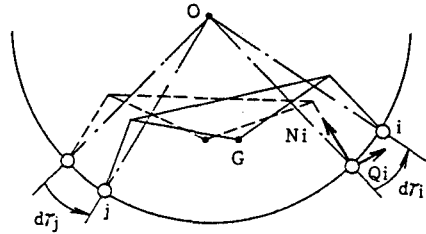


Fig.6 Rotation of Capsule Vehicle

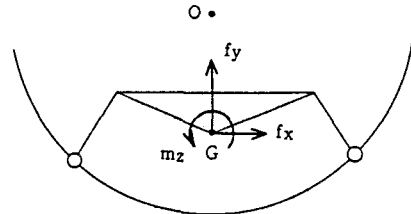


Fig.7 Inertia Forces of Capsule Vehicle

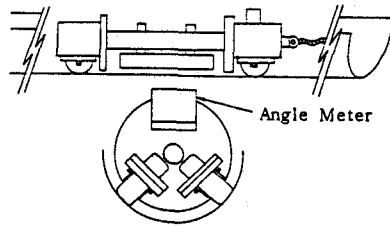


Fig.8 Experimental Apparatus

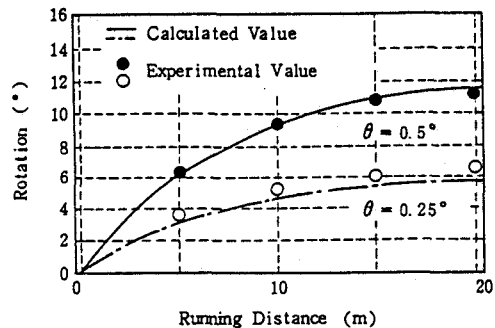


Fig.9 Rotation vs. Running Distance