

歩道橋の水平振動問題への適用を考えた神経振動子の基本特性

近畿大学理工学部 フェロー ○米田 昌弘
近畿大学理工学部 深江 美妃

1. はじめに 近年、歩行者による歩道橋の水平振動が問題になっている。そこで、本研究では歩行者によって歩道橋に水平振動が生じる原因を解明するため、ロボット工学の分野で知られている神経振動子に着目し、固有振動数をはじめとする基本特性について検討した。

2. 神経振動子の概要 人間における神経振動子の存在は間接的にしか確認されていないが、そのモデルは松岡¹⁾をはじめとする研究者によって解明されている。この神経振動子モデルは、神経素子(ニューロン)の対を相互抑制的に結合することによって形成されており、以下のような2変数微分方程式で表すことができる。

$$\tau_1 \dot{x}_1 = -x_1 - \beta v_1 - \gamma [x_2]^+ + c - [u_f]^+ \quad (1)$$

$$\tau_2 \dot{v}_1 = -v_1 + [x_1]^+ \quad (2)$$

$$\tau_1 \dot{x}_2 = -x_2 - \beta v_2 - \gamma [x_1]^+ + c - (-1.0) \times [u_f]^+ \quad (3)$$

$$\tau_2 \dot{v}_2 = -v_2 + [x_2]^+ \quad (4)$$

ここに、 x_1 と x_2 は神経素子(ニューロン)の膜電位、 v_1 と v_2 は内部状態を表す変数、 τ_1 と τ_2 は時定数、 β は疲労係数とも呼ばれる順応の強度を表す係数、 γ は二つの順応素子の結合係数、 u_f は外部からの持続入力である。また、 c は tonic な入力(tonic は元気づけるという意味)で $c=0$ だと振動は生じない。さらに、 $[x]^+$ は閾値関数で

$$[x]^+ = \max(x, 0) \quad (5)$$

と表される非線形関数である。ちなみに、 x_1 と x_2 の正の部分各神経素子の出力に対応することから、神経振動子の出力 y_{out} は

$$y_{out} = y_1 - y_2 = \max(x_1, 0) - \max(x_2, 0) \quad (6)$$

で求められる。

3. 神経振動子の固有周波数 M. Williamson²⁾は、パ

ラメーターを $\beta=2.5$ 、 $\gamma=2.5$ 、 $c=1.5$ (以下、この解析条件をCASE-252515と記す)とした場合について、時定数を $\tau_1=0.25$ 、 $\tau_2=0.5$ に設定して松岡の神経振動子モデルを解析している。そこで本研究でも、まず、文献2)と同じ条件のもとで、神経振動子モデルを解析することとした。本研究の解析結果を図-1に示す。この図から、神経振動子の固有周波数を読み取ったところ、本研究の解析では0.449Hzとなったが、この値はM. Williamsonの解析結果である0.445Hzと非常によく一致した。また、3番目のピーク値を比較したところ、本研究の解析では0.721、M. Williamsonの解析では0.714となり、同様に両者の結果は非常によく一致した。次に、CASE-252515($\beta=2.5$ 、 $\gamma=2.5$ 、 $c=1.5$)について初期値を $x_1=1.5$ 、 $x_2=-0.3$ に設定し、 τ_1 と τ_2 の値を変化させて神経振動子モデルの固

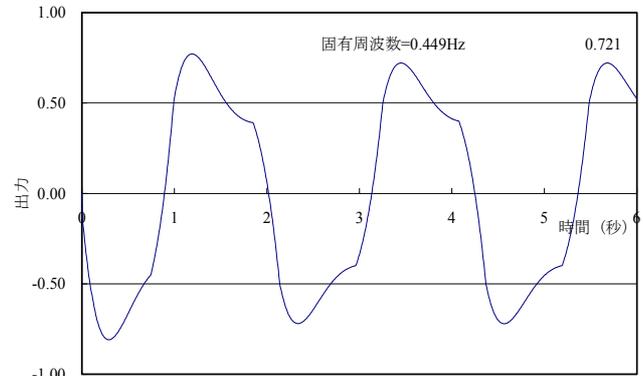


図-1 本研究での解析結果 ($\tau_1=0.25$ 、 $\tau_2=0.50$ 、 $\beta=2.5$ 、 $\gamma=2.5$ 、 $c=1.5$)

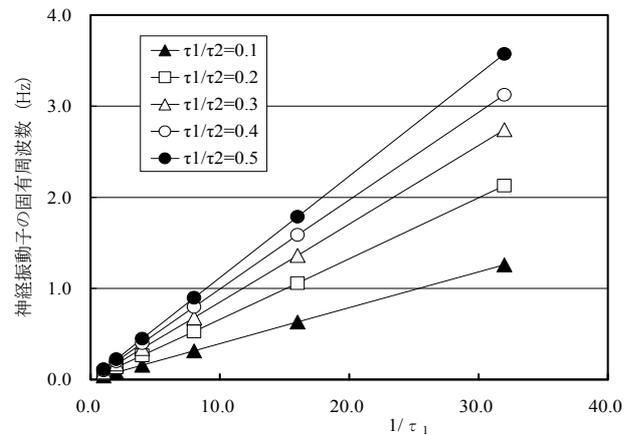


図-2 神経振動子の固有周波数 ($\beta=2.5$ 、 $\gamma=2.5$ 、 $c=1.5$)

キーワード：歩道橋、歩行者、水平振動、神経振動子、引き込み現象

連絡先：〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1 TEL 06-6721-2332 FAX 06-6730-1320

有周波数を算定した。その結果を図-2に示す。この図より、時定数の比 τ_1/τ_2 が同じ場合、神経振動子の固有周波数は $1/\tau_1$ に比例することがわかる。

4. 神経振動子の引き込み現象 まず、時定数比を $\tau_1/\tau_2 = 0.1$ ($\tau_1 = 0.0454$, $\tau_2 = 0.454$) とした CASE-151515 ($\beta = 1.5$, $\gamma = 1.5$, $c = 1.5$) の神経振動子モデル (固有振動数は 1.000Hz) を対象として、外部入力振幅を 0.01~0.2 (無次元だが次元を m と考えても良い)、周波数を 0.5Hz~1.5Hz の範囲で変化させて引き込み現象の特性を検討した。その結果を図-3に示す。この図において、正の直線勾配を示している区間が引き込み現象を生じている領域であり、入力振幅がたとえ 0.01m=1.0cm (図中の□記号) であっても、0.975Hz~1.025Hz の周波数領域 (神経振動子の固有周波数に対して $\pm 2.5\%$ の周波数領域) で明確な引き込み現象が生じていることがわかる。次に、 $\tau_1/\tau_2 = 0.5$ とした CASE-151515 ($\beta = 1.5$, $\gamma = 1.5$, $c = 1.5$) の場合について、神経振動子の固有周波数を以下のように変化させて解析を実施することとした。すなわち、 $\tau_1/\tau_2 = 0.5$ の関係を保ったままで τ_1 の値を変化させれば、神経振動子の固有周波数は変化する。そこで、神経振動子の固有周波数を 0.50Hz~1.0Hz ($\tau_1 = 0.2242 \sim 0.1121$) の範囲で変化させて、外部入力振幅と神経振動子の引き込み現象が生じる周波数の範囲を比較した。その結果を図-4に示す。

ただし、図-4において縦軸は、 $|1 - \text{引き込み周波数} / \text{固有周波数}| \times 100$ を表し、一つの周波数に対して正負の値が存在することから、ここでは負の値に対しては絶対値をとり、正の値との平均値を記すこととした。図-4より、引き込み現象が生じる周波数範囲に対して、概ね次式の関係が成立することがわかる。

$$D = 95 \times \text{振幅 (m)} \times \text{神経振動子の固有周波数 (Hz)} \quad (\text{ただし, } 0.03\text{m} \leq \text{振幅} \leq 0.20\text{m}) \quad (7)$$

5. まとめ 本研究で得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 時定数の比 τ_1/τ_2 が同じ場合、神経振動子の固有周波数は $1/\tau_1$ に比例する。
- (2) 神経振動子モデルに定常的な振動が入力された場合の応答 (出力) 波形から、入力振幅がたとえ 0.01m=1.0cm であっても、明確な引き込み現象が生じる。
- (3) $\tau_1/\tau_2 = 0.5$ の CASE-252515 ($\beta = 2.5$, $\gamma = 2.5$, $c = 1.5$) の場合に着目し、引き込み現象が生じる周波数範囲を予測するための設計式を提示した。

参考文献 1) K.Matsuoka : Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptations, Biological Cybernetics, Vol.52, pp.367~376, 1985. 2) M.Williamson : Neural Control of Rhythmic Arm Movements, Neural Networks, Vol.11, pp.1379~1394, 1998.

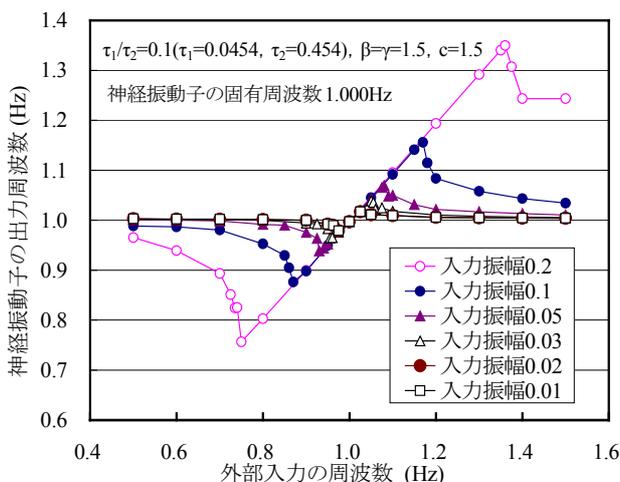


図-3 外部入力の周波数と神経振動子の出力周波数の関係 ($\tau_1/\tau_2 = 0.1$)

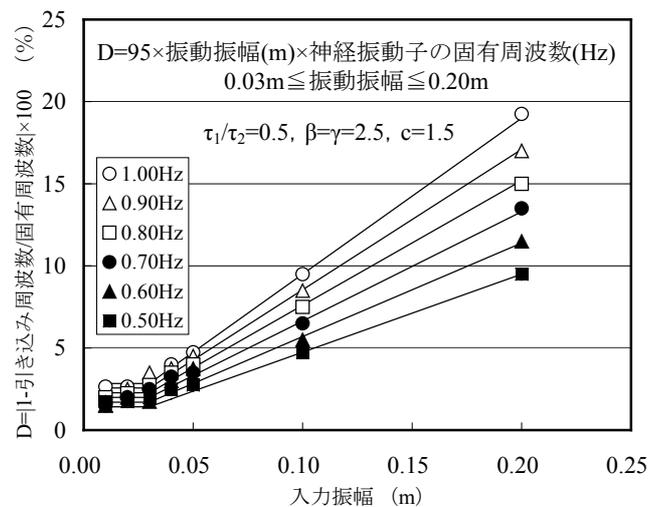


図-4 入力振幅と引き込み現象が生じる領域の対比 ($\tau_1/\tau_2 = 0.5$ に固定)