

## P15-2 運動イメージ中の脊髄前核細胞興奮性の個体差を考慮した数理モデル ～階層ベイズモデルとマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて～

○山本 昌樹(やまもと まさき), 永禮 敏江  
姫路獨協大学 医療保健学部 理学療法学科

Key word : 運動イメージ, F波興奮性の個体差, 階層ベイズモデル

**【目的】** 運動イメージの電気生理学的研究では、イメージ能力の個体差(系統誤差)が測定に影響するため標本の平均値と分散値のパラメータだけでは複雑な統計予測は困難である。階層ベイズモデルは個体差が大きい時系列データの回帰においても個体ごとのパラメータをベイズ推定出来る。ここで個体パラメータは特定の確率分布に従いその分布はハイパーパラメータにより階層的に制約を受ける構造をとることで系統誤差を考慮した推定が可能となる。今回運動イメージ中の脊髄前核細胞のF波興奮性の変化を、階層モデルにより個体パラメータを推定しモデルの有用性を検討した。

**【方法】** 対象は健常大学生15名(女性8名男性7名、平均年齢20.6歳)であった。対象者には実験内容を書面にて説明し同意を得た。運動とイメージ課題は非利き手の拇指と示指との対立運動とその運動イメージとした。F波は手部尺骨神経刺激で第一背側骨間筋より記録(日本光電社製MEB-9404)した。実験手順は10分間の安静後に安静時F波を測定した。次にPCディスプレイで1Hzのペースでの対立運動の動画を提示しペースに合わせた5分間の対立運動を行った後、再度F波を測定した。その後も動画を提示し同様な対立運動の運動イメージを20分間実施した。イメージ開始から終了まで5分間ごとに4回測定し計6時点でのF波を記録した。イメージ中のF波は動画の対立運動に合わせM波最大振幅の120%刺激強度にて30回導出した。実験条件は拇指-示指の対立運動イメージ(拇指イメージ)と足の底背屈運動の動画に合わせた底背屈イメージ(足イメージ)とし、コントロールは無関係な動画を提示しイメージは行わなかった(各5名)。時系列モデルのデータはF波出現頻度(%)を用いた。出現頻度値 $\gamma[n, t]$ のモデル式は時系列グラフで当初増加しその後減少するカーブ形状であり、 $\gamma[n, t] \sim \text{Normal}(c[n] \{ \exp(-a[n] \text{Time}[t]) - \exp(-b[n] \text{Time}[t]) \}, \sigma\gamma) n=1, \dots, N t=1, \dots, T(1)$   
( $a[n] \sim \text{Normal}(a0, \sigma a)$ ) (2)  
( $b[n] \sim \text{Normal}(b0, \sigma b)$ ) (3)  
( $c[n] \sim \text{Normal}(c0, \sigma c)$ ) (4)  
 $\gamma[t] \sim \text{Normal}(c0 \{ \exp(-a0 \text{Time}[t]) - \exp(-b0 \text{Time}[t]) \}, \sigma\gamma) t=1, \dots, T(5)$   
の階層構造(2)~(4)を持つ非線形モデル(1)とした。(5)式は階層を持たないパラメータ固定モデルである。ここでNは対象者の人数、Tは測定した時点の数、nとtは対象者と時点のインデックス、 $\sigma\gamma$ は $\gamma[n, t]$ の観測誤差を表す。

Time[t]は経過時間である。 $a[n]$ 、 $b[n]$ 、 $c[n]$ は平均が条件平均 $a0$ 、 $b0$ 、 $c0$ で標準偏差 $\sigma a$ 、 $\sigma b$ 、 $\sigma c$ の正規分布に従う個体のパラメータである。 $\sigma a$ 、 $\sigma b$ 、 $\sigma c$ は無情報事前分布(ハイパーパラメータ)で一様分布となる。パラメータ $a0$ 、 $b0$ 、 $c0$ 、 $\sigma\gamma$ 、 $a[n]$ 、 $b[n]$ 、 $c[n]$ をマルコフ連鎖モンテカルロ法による4,000回のサンプリングにてベイズ推定した。モデル計算の実装と実行環境はWindows10(64bit)、R 3.4.3<sup>1)</sup>、Stan 2.17.3<sup>2)</sup>であった。

**【結果】** 平均パラメータと95%予測区間は、拇指イメージで $a0$ は0.04(0.02~0.06)、 $b0$ は0.36(0.19~0.64)、 $c0$ は45.5(27.6~73.8)、 $\sigma\gamma$ は5.39(3.88~5.86)であった。足イメージで $a0$ は0.06(0.04~0.07)、 $b0$ は0.59(0.33~0.87)、 $c0$ は35.7(24.8~45.7)、 $\sigma\gamma$ は6.08(4.59~8.19)であった。コントロールで $a0$ は0.05(0.03~0.07)、 $b0$ は0.59(0.33~0.89)、 $c0$ は36.2(24.2~48.9)、 $\sigma\gamma$ は5.80(4.34~7.78)であった。拇指イメージ条件5名の $a[n]$ 、 $b[n]$ 、 $c[n]$ を個体パラメータとした階層モデルの予測値と測定値は、安静~運動後~イメージ終了までの6時点(測定値/予測値%)でPerson1: 8/11.9, 24/28.8, 27/29.1, 23/24.9, 27/20.6, 12/16.9, Person2: 8/10.8, 31/25.3, 13/23.5, 18/18.9, 13/14.8, 8/11.5, Person3: 13/15.2, 37/35.7, 38/34.1, 22/28.5, 27/23.5, 19/19.2, Person4: 7/10.6, 26/26.0, 24/24.8, 23/20.1, 9/15.8, 14/12.3, Person5: 11/11.3, 22/29.2, 28/29.5, 33/25.3, 14/20.9, 19/17.1で測定値は95%予測区間内であった。固定モデルによる予測値は同順で12.0, 29.8, 29.3, 24.8, 20.4, 16.7であった。

**【考察】** モデル式(1)の $a[n]$ と $b[n]$ は個体 $\gamma[n, t]$ の時間カーブの形態を、 $c[n]$ は大きさを決めるパラメータである。95%信用区間より $b0$ と $c0$ の区間幅は広くパラメータに差があることから、初期の増加以降の減少時点と大きさの変化には個体差が大きい。パラメータ固定モデルの予測値は3時点後から測定値との差が大きく十分に予測できていない。階層モデルのそれは95%信用区間内であり、少ないデータでも個体差を反映した予測ができた。

**【理学療法研究の意義】** 階層ベイズモデルでは個体パラメータは特定の確率分布に従うと仮定するため個体ごとのばらつきを標準化して比較、また個体ごとの予測回帰が行える。

1) <https://www.r-project.org/>

2) <https://cran.r-project.org/web/packages/rstan/index.html>