

# 交流電流通電法による皮膚キャパシタンス測定に適した通電周波数の検討

## Evaluating adequate frequency to measure skin capacitance with alternating current exosomatic method

キーワード: 皮膚電気活動、精神性発汗、皮膚インピーダンス、皮膚キャパシタンス、皮膚コンダクタンス

人間生活工学研究室 13TM1127 田中 美紗

■ Abstract: We evaluated adequate frequency to measure skin capacitance with alternating current (AC) exosomatic method and subject's characteristics appearing to be the cause of skin electrodermal activity (EDA) differences between individuals. EDA measurement is often conducted with direct current (DC) exosomatic method at present, but there are some problems such as large difference in individual measurement value. In the first experiment, imaginary part of skin impedance ( $Z''$ ) was measured with AC exosomatic method, frequency ranged from 50 Hz to 200 kHz. Skin conductance was measured with DC exosomatic method. As a result,  $Z''$  in few frequencies and skin conductance were different significantly between those at rest and during stimuli. There was positive correlation between  $Z''$  and type A behavior score. In the second experiment, skin capacitance was measured with AC exosomatic method, frequency ranged from 50 Hz to 10 kHz. As a result, although there was no significant difference in skin conductance, skin capacitances in some frequencies were different significantly between those at rest and during stimuli. Coefficient of variation of skin capacitance was smaller than that of skin conductance. There was positive correlation between skin capacitance and thickness of hands. In conclusion we suggested 1000 Hz to 126 Hz and 63.1 Hz to 50.1 Hz as adequate frequencies to measure skin capacitance with AC exosomatic method, and type A behavior score and thickness of hands were appeared to be cause of EDA difference between individuals.

### ■背景

精神性発汗は交感神経支配の汗腺活動を反映していると考えられ、精神的ストレスが生じた時に発生すると考えられている。この精神性発汗を電氣的にとらえたものを皮膚電気活動 (Electrodermal activity; EDA) という。

EDAは精神的ストレスの評価指標とされてきた。EDAの測定方法には、通電法と電位法がある。通電法には直流電流 (DC) 通電法と、交流電流 (AC) 通電法がある。DC 通電法の定電圧法は、アメリカ精神生理学会の勧告もあり、現在では一応の標準となっている<sup>1)</sup>一方で、AC 通電法には標準様式がなく、使用している研究者も少ない。AC 通電法の通電電流周波数は 28 Hz<sup>2)</sup>、88 Hz<sup>3)</sup>、1000 Hz<sup>4)</sup>など様々な周波数が使用されている。

皮膚キャパシタンスとは、AC 通電法によって測定される EDA のひとつである。皮膚キャパシタンスは皮膚インピーダンスから得られる。インピーダンスは、交流回路における電圧と電流の比で、直流回路におけるオームの法則の電気抵抗の概念を複素数に拡張し、交流に適用したものである。単位はオーム ( $\Omega$ ) である。複素数であるインピーダンスにおいて、実数部をレジスタンス、虚数部をリアクタンスという。リアクタンスには、インダクタンスとキャパシタンスがある。リアクタンスは周波数依存であり、レジスタンスは周波数に依存しない。生体の電気回路モデル<sup>5)</sup>から、皮膚インピーダンスにはインダクタンスが含まれておらず、レジスタンスとキャパシタンスで構成されていると考えられる。

EDA 測定については様々な試みがなされている。しかしながら、現

在の EDA 測定は、健常者でも EDA の発現パターンに個人差が大きいこと<sup>6)</sup>や、ストレス刺激に対して EDA が出現しない個人の存在<sup>7)</sup>等の問題が指摘されている。

### ■目的

EDA 測定における問題解決を目指し、AC 通電法による皮膚キャパシタンス測定に適した通電周波数と、EDA の個人間の再現性の原因となりうる被験者特性を調べることとした。

### ■第1実験

**方法:** 被験者は 15 名であった (男性 7 名、女性 8 名、 $23 \pm 1$  歳)。EDA として、AC 通電法による皮膚インピーダンス虚部 ( $Z''$ ) と DC 通電法による皮膚コンダクタンスを測定した。皮膚キャパシタンスは  $Z''$  に含まれる成分である。 $Z''$  は通電周波数を 50 Hz - 200 kHz 間の対数間隔 38 ポイントとして測定した。EDA は安静時と刺激時を 1 セットとして測定し、4 セット繰り返した。精神性発汗誘発刺激として、30 秒間の息こらえを行った。被験者特性として、身長、体重、特性不安点数 (State-Trait Anxiety Inventory; STAI)、タイプ A 行動パターン点数 (A 型傾向判別表<sup>8)</sup>)、両手皮厚、両手手厚を測定した。

**結果:** 皮膚コンダクタンスと通電周波数 200 kHz と 158 kHz の時の  $Z''$  に、安静時と刺激時の平均値に有意差があった。通電周波数 63.1 Hz - 251 Hz の時の  $Z''$  とタイプ A 行動パターン点数に  $r \geq 0.7$  で強い正の相関があった。また通電周波数 7940 Hz - 50 Hz で手厚と  $0.7 > r \geq 0.4$  で弱い正の相関があった。

第1実験の結果から、第2実験の通電周波数域、実験環境、タイプ A 行動パターン点数検査法を決定した。

### ■第2実験

**方法:** 被験者は 10 名であった (男性 5 名、女性 5 名、 $24 \pm 1$  歳)。被験者は第1実験の被験者からランダムに抽出した。EDA として、AC 通電法による皮膚キャパシタンスと DC 通電法による皮膚コンダクタンスを測定した。皮膚キャパシタンスは通電周波数を 50 Hz - 10 kHz 間の 25 ポイントとして測定した。精神性発汗誘発刺激として 30 秒間の息こらえを行い、安静時と刺激時を 1 セットとして計 6 セット行った。被験者特性として、身長、体重、特性・状態不安点数 (STAI)、タイプ A 行動パターン点数 (東海大式生活健康調査表) を測定した。両手皮厚、両手手厚は第1実験の測定値を使用した。

**結果:** 皮膚コンダクタンスには安静時と刺激時で有意差はなかった (図 1) が、通電周波数 10k Hz、6310 Hz、126 Hz - 1000 Hz、50.1 Hz - 63.1 Hz の時の皮膚キャパシタンスに有意差があった (図 2)。皮膚キャパシタンスの変動係数は全通電周波数で皮膚コンダクタンスよりも小さかった。通電周波数 1000 Hz - 50 Hz の時の皮膚キャパシタンスと手厚に  $r \geq 0.7$  で強い正の相関があった。また全通電周波数でタイプ A 行動パターン点数と  $0.7 > r \geq 0.4$  で弱い正の相関があった (表 1)。

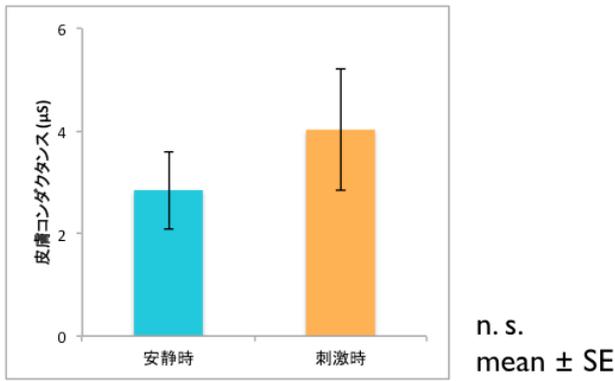


図 1 皮膚コンダクタンスの安静時と刺激時の差。各被験者の平均値について、状態(安静時、刺激時)を要因として、対応のある t 検定を行った

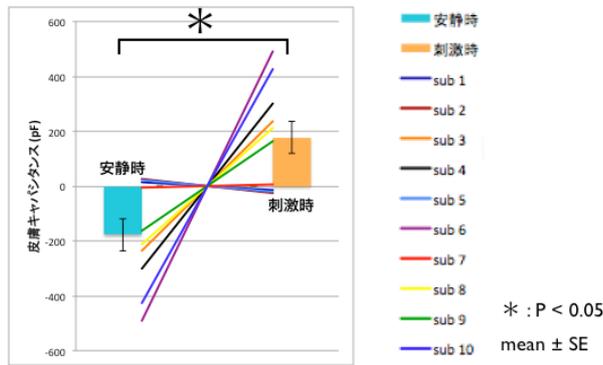


図 2 皮膚キャパシタンスの安静時と刺激時の差。各被験者の平均値について、状態(安静時、刺激時)を要因として、対応のある t 検定を行った。安静時と刺激時を合わせた全計測値の平均値をゼロ点として、線グラフで各被験者の安静時・刺激時の値を、棒グラフで安静時と刺激時の平均値を表した。例として周波数 200 Hz の図をあげた

■考察

- 第1実験では皮膚コンダクタンスの安静時と刺激時で差があったが、第2実験ではなかった。皮膚コンダクタンスの結果の再現性の低さを示唆した。
- 皮膚キャパシタンスが、通電周波数が 1 kHz 以下(ただし 100 Hz、79.4 Hz、50 Hz を除く)では刺激時の平均値のほうが大きくなったことは、先行研究の報告と類似のものとなった。
- 1000 Hz 程度を越える高周波域で安静時と刺激時の値に有意差

がなかったのは、皮膚に流す電流が高周波数になるほど皮膚組織の深部にまで通電電流が及び、組織全体の皮膚キャパシタンスを測定することとなり表皮の測定感度が低下するから<sup>9)</sup>だと考えられた。

- 第1実験、第2実験の結果から、皮膚キャパシタンスと手厚、タイプ A 行動パターン点数の間の相関関係が認められた。皮膚キャパシタンスの被験者間の再現性の低さの原因と考えられる被験者特性として、手厚とタイプ A 行動パターン点数が考えられた。タイプ A 行動パターン点数との相関係数が、皮膚インピーダンス虚部よりも皮膚キャパシタンスで小さくなったのは、実験間でのタイプ A 行動パターン点数の検査方法の違いによるかもしれない。
- タイプ A 行動パターン点数と皮膚キャパシタンスの関連について、「タイプ A 型被験者のストレス耐性」「ノルアドレナリン分泌量」による説明を試みたが、どちらも本研究で得られた相関関係について十分に説明できなかった。今後、異なる視点からの考察が必要とされる。

■結論

- ① 交流電流通電法による皮膚キャパシタンス測定に適した通電周波数は、1000 - 126, 63.1 - 50.1 Hz であると考えられた。決定条件は、(1) より低周波である<sup>9)</sup>、(2) 安静時と刺激時の測定値に有意差がある、(3) 変動係数が皮膚コンダクタンスよりも小さい、とした。
- ② EDA の個人間の再現性の原因と考えられた被験者特性は、手厚とタイプ A 行動パターン点数であった。

■参考文献

1. 『新生理心理学<1 巻>生理心理学の基礎』, 1998
2. Z G Qiao et al., Simultaneous measurement of electrical admittance, blood flow and temperature at the same skin site with a specially designed probe, 1987
3. H Storm, Skin conductance and the stress response from heel stick in preterm infants, 2000
4. S Grimnes, Impedance measurement of individual skin, 1983
5. D T Lykken, SQUARE-WAVE ANALYSIS OF SKIN IMPEDANCE, 1970
6. Y Shimomura et al., Use of Frequency Domain Analysis of Skin Conductance for Evaluation of Mental Workload, 2008
7. 岡田滋子ら, 局所発汗量連続測定装置の臨床応用の検討。I. 正常人を対象として, 1990
8. 前田聡, 虚血性心疾患患者の行動パターン: 簡易質問紙法による検討, 1985
9. 『人間計測ハンドブック』, 2003

表 1 皮膚キャパシタンスと被験者特性との相関係数。相関係数の値により色分けを行った

| 周波数 (Hz) | 10000 | 7940  | 6310  | 5010  | 3980  | 3160  | 2510  | 2000  | 1580  | 1260  | 1000  | 794   | 631   | 501   | 398    | 316    | 251    | 200    | 158    | 126    | 100    | 79.4   | 63.1   | 50.1   | 50     |        |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 身長       | 安静    | 0.09  | 0.17  | 0.22  | 0.25  | 0.27  | 0.30  | 0.32  | 0.33  | 0.36  | 0.38  | 0.40  | 0.41  | 0.44  | 0.4629 | 0.4949 | 0.5112 | 0.5324 | 0.5549 | 0.5791 | 0.6008 | 0.6217 | 0.6232 | 0.6403 | 0.6468 | 0.6561 |
|          | 刺激    | 0.06  | 0.16  | 0.22  | 0.25  | 0.29  | 0.30  | 0.32  | 0.34  | 0.35  | 0.37  | 0.40  | 0.43  | 0.44  | 0.4636 | 0.4864 | 0.5109 | 0.5366 | 0.5642 | 0.581  | 0.598  | 0.6024 | 0.6259 | 0.6385 | 0.6503 | 0.6723 |
| 体重       | 安静    | -0.21 | -0.15 | -0.10 | -0.07 | -0.04 | -0.02 | 0.00  | 0.03  | 0.05  | 0.07  | 0.09  | 0.11  | 0.14  | 0.1765 | 0.2131 | 0.2436 | 0.2779 | 0.3148 | 0.3557 | 0.3871 | 0.4459 | 0.4434 | 0.49   | 0.5038 | 0.5276 |
|          | 刺激    | -0.24 | -0.16 | -0.11 | -0.07 | -0.03 | -0.03 | -0.01 | 0.01  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | 0.12  | 0.14  | 0.1725 | 0.2052 | 0.2407 | 0.2844 | 0.3158 | 0.3541 | 0.3895 | 0.4252 | 0.4488 | 0.481  | 0.52   | 0.5469 |
| BMI      | 安静    | -0.36 | -0.33 | -0.30 | -0.30 | -0.26 | -0.25 | -0.24 | -0.21 | -0.21 | -0.19 | -0.17 | -0.15 | -0.13 | -0.097 | -0.07  | -0.039 | -0.006 | 0.0287 | 0.0694 | 0.0965 | 0.166  | 0.1598 | 0.2141 | 0.2287 | 0.2572 |
|          | 刺激    | -0.37 | -0.34 | -0.31 | -0.29 | -0.26 | -0.26 | -0.25 | -0.24 | -0.21 | -0.20 | -0.18 | -0.15 | -0.13 | -0.077 | -0.045 | -0.004 | 0.0259 | 0.0624 | 0.1011 | 0.1465 | 0.1637 | 0.2018 | 0.2483 | 0.2691 |        |
| 右手皮脂厚    | 安静    | -0.18 | -0.19 | -0.20 | -0.18 | -0.17 | -0.21 | -0.21 | -0.20 | -0.21 | -0.21 | -0.22 | -0.23 | -0.24 | -0.248 | -0.252 | -0.266 | -0.271 | -0.282 | -0.291 | -0.301 | -0.316 | -0.32  | -0.328 | -0.321 | -0.331 |
|          | 刺激    | -0.17 | -0.16 | -0.19 | -0.20 | -0.20 | -0.21 | -0.21 | -0.20 | -0.22 | -0.23 | -0.24 | -0.24 | -0.24 | -0.252 | -0.262 | -0.275 | -0.287 | -0.294 | -0.305 | -0.304 | -0.355 | -0.326 | -0.314 | -0.323 | -0.322 |
| 右手厚      | 安静    | 0.45  | 0.52  | 0.57  | 0.59  | 0.61  | 0.63  | 0.65  | 0.67  | 0.68  | 0.69  | 0.71  | 0.72  | 0.74  | 0.7535 | 0.7746 | 0.7849 | 0.7979 | 0.8093 | 0.8226 | 0.8323 | 0.8417 | 0.8338 | 0.8328 | 0.8359 | 0.8368 |
|          | 刺激    | 0.43  | 0.52  | 0.56  | 0.59  | 0.62  | 0.63  | 0.64  | 0.65  | 0.66  | 0.68  | 0.70  | 0.72  | 0.73  | 0.7446 | 0.7588 | 0.7746 | 0.7905 | 0.8019 | 0.8121 | 0.8194 | 0.7785 | 0.8267 | 0.8342 | 0.8323 | 0.8401 |
| 左手皮脂厚    | 安静    | -0.03 | -0.09 | -0.16 | -0.19 | -0.21 | -0.22 | -0.26 | -0.29 | -0.30 | -0.31 | -0.33 | -0.35 | -0.36 | -0.384 | -0.409 | -0.422 | -0.438 | -0.455 | -0.472 | -0.487 | -0.498 | -0.505 | -0.518 | -0.51  | -0.516 |
|          | 刺激    | -0.02 | -0.09 | -0.15 | -0.20 | -0.23 | -0.25 | -0.26 | -0.28 | -0.29 | -0.32 | -0.34 | -0.36 | -0.37 | -0.394 | -0.411 | -0.431 | -0.448 | -0.467 | -0.483 | -0.492 | -0.498 | -0.509 | -0.522 | -0.537 | -0.541 |
| 左手厚      | 安静    | 0.11  | 0.21  | 0.29  | 0.33  | 0.36  | 0.38  | 0.42  | 0.44  | 0.46  | 0.48  | 0.51  | 0.53  | 0.55  | 0.5772 | 0.6074 | 0.6273 | 0.6514 | 0.675  | 0.6990 | 0.7136 | 0.736  | 0.7418 | 0.7619 | 0.7656 | 0.7763 |
|          | 刺激    | 0.09  | 0.21  | 0.28  | 0.33  | 0.38  | 0.39  | 0.41  | 0.44  | 0.46  | 0.48  | 0.50  | 0.54  | 0.55  | 0.5781 | 0.6013 | 0.6265 | 0.653  | 0.6754 | 0.6975 | 0.7176 | 0.6684 | 0.7407 | 0.7641 | 0.7748 | 0.7915 |
| 特性不安点数   | 安静    | -0.28 | -0.22 | -0.17 | -0.14 | -0.13 | -0.10 | -0.08 | -0.07 | -0.04 | -0.03 | -0.01 | 0.01  | 0.03  | 0.0615 | 0.0949 | 0.1148 | 0.1398 | 0.1683 | 0.199  | 0.2261 | 0.2555 | 0.2644 | 0.296  | 0.3073 | 0.3253 |
|          | 刺激    | -0.30 | -0.23 | -0.18 | -0.15 | -0.12 | -0.11 | -0.09 | -0.07 | -0.06 | -0.04 | -0.02 | 0.02  | 0.03  | 0.0531 | 0.0772 | 0.1049 | 0.1369 | 0.1626 | 0.1924 | 0.2182 | 0.2545 | 0.2631 | 0.2889 | 0.3112 | 0.3425 |
| 状態不安点数   | 安静    | 0.40  | 0.40  | 0.38  | 0.37  | 0.34  | 0.37  | 0.35  | 0.34  | 0.35  | 0.35  | 0.35  | 0.35  | 0.35  | 0.3544 | 0.362  | 0.3686 | 0.3559 | 0.3532 | 0.3552 | 0.3552 | 0.3418 | 0.3246 | 0.3314 | 0.3246 |        |
|          | 刺激    | 0.40  | 0.39  | 0.37  | 0.36  | 0.35  | 0.34  | 0.34  | 0.34  | 0.33  | 0.33  | 0.33  | 0.34  | 0.34  | 0.3373 | 0.3377 | 0.3385 | 0.3418 | 0.3391 | 0.3369 | 0.3344 | 0.3619 | 0.3333 | 0.3196 | 0.3068 | 0.3205 |
| A型傾向点数   | 安静    | 0.51  | 0.56  | 0.57  | 0.59  | 0.58  | 0.60  | 0.60  | 0.59  | 0.61  | 0.61  | 0.61  | 0.61  | 0.61  | 0.617  | 0.6226 | 0.6178 | 0.614  | 0.6068 | 0.5997 | 0.5976 | 0.5738 | 0.5671 | 0.5404 | 0.5428 | 0.525  |
|          | 刺激    | 0.50  | 0.56  | 0.57  | 0.58  | 0.59  | 0.59  | 0.60  | 0.61  | 0.60  | 0.61  | 0.61  | 0.62  | 0.62  | 0.6179 | 0.6173 | 0.6136 | 0.611  | 0.6046 | 0.596  | 0.5887 | 0.5043 | 0.5647 | 0.5491 | 0.5224 | 0.5328 |

$r \geq 0.7$   
 $0.7 > r \geq 0.4$   
 $0.4 \geq r > -0.7$   
 $r \leq -0.7$