

Technology Reports

ウェアラブル皮膚アセトン測定装置の開発と健康管理への応用

ドコモは採取が容易な生体サンプルを生化学的に分析することで、高度な健康管理や健康診断を可能とする「バイオチップ携帯」の実現に向けた取組みを進めている。健康管理を行ううえで注意を払うべき点はいくつかあるが、中でも肥満は万病の元といわれており、能動的な動作を行うことなく体脂肪の燃焼状態を自動的に測定できる技術が求められていた。そこで、身に着けるだけで日常生活における体脂肪燃焼状態を「見える化」できるウェアラブル皮膚アセトン測定装置を開発した。これにより、肥満の予防や改善に向けて、1日の中でも時々刻々と変化する体脂肪の燃焼状況に応じた個人別の健康アドバイスの提供が可能となる。

先進技術研究所
 やまだ ゆうき ひやま さとし
 山田 祐樹 檜山 聡
 とよおか つぐよし
 豊岡 継泰

1. まえがき

国民医療費は増加の一途を辿っており、その中でも後期高齢者医療費^{*1}の伸びは著しい。後期高齢者医療費は、2012年に39.2兆円であったが、2025年には52.3兆円まで増加する見通しであり[1] [2]、その抑制が急務となっている。その抑制のためには、介護を必要としたり、病気で寝たきりになったりせずに健康で自立した生活を営むことができる期間（健康寿命）をできるかぎり延ばすことが重要である。その鍵となるのが、生活習慣の改善と、疾病の発生や進行を未然に防ぐ予防医療^{*2}である。

予防医療を成功に導くためには、能動的な動作を行うことなく簡単・

手軽に自身の健康状態を理想的には毎日詳細に検査、確認できる測定装置と、各人の健康状態に応じたアドバイスを提供することが重要である。その点、携帯電話やスマートフォンの人口普及率は94.5%に達しており[2]、国民に広く普及している。そのため、これらの機器への測定装置の搭載ないしは、接続が可能なウェアラブル機器に測定装置を組み込むことができれば、予防医療サービスを展開するうえで有力なツールとなることが期待される。

ドコモは、呼気や皮膚ガス^{*3}などの自身で容易に採取可能な生体サンプル^{*4}を、携帯端末に接続可能なバイオチップ^{*5}で生化学的に分析することで、個人差を考慮した高度な健康管理や健康診断などの予防医療

サービスを行う「バイオチップ携帯」のコンセプトを世界に先駆けて掲げ、その実現に向けた研究開発を進めている[3]~[5]。

その一環として、皮膚ガス中に含まれる「アセトン^{*6}（皮膚アセトン）」という体脂肪の燃焼マーカーとなる化学物質の量を測ることができ、身に着けられるほど小型・軽量な世界初の測定装置を開発し、CEATEC JAPAN^{*7} 2014に参考出展した[6]。本稿では、開発した測定装置の概要と健康管理への応用例を紹介する(図1)。

2. 皮膚アセトン測定の意義と課題

皮膚ガス中にはさまざまな成分が含まれており、体の状態との関連が

©2015 NTT DOCOMO, INC.
 本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

*1 後期高齢者医療費：75歳以上、および65歳以上の一定の障がいをもった方に要する医療費。
 *2 予防医療：病気になることを未然に防ぐ医療行為や医療サービスなど。
 *3 皮膚ガス：皮膚表面から放出されるガス。

*4 生体サンプル：生体由来の検査対象となる試料。
 *5 バイオチップ：生体サンプルの検出や分析を行う機構が搭載されたチップ。
 *6 アセトン：揮発性が高い有機化合物。化学式C₃H₆O。

知られている (表1)[7]~[9]. 皮膚アセトン^{*}は、運動や空腹に伴い体脂肪が分解されることによって血中に代謝産物として産生されるアセトンが、皮膚表面から放出されたものである。そのため、脂肪代謝の動態を知るのに役立つと期待されている。肥満は万病の元といわれており、生活習慣病になるリスクを高めることから、皮膚アセトンの放出量を測り、脂肪燃焼状況をモニタしながら日常の健康管理へ応用することは非常に有意

義である。皮膚アセトンは常時、無意識に放出されていることから、ウォッチ型やインナーウェア型などのウェアラブル機器で皮膚アセトンを測定することができれば、身に着けるだけで予防医療サービスを受けることが可能となる。しかし、皮膚アセトンの放出量は極微量 (通常 $10\sim 200\text{pg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ^{*8}) であるため、これまでは大型の測定装置 (例えばガスクロマトグラフィ装置) を使用することが通例であった。つま

り、身に着けられるほど小型・軽量の皮膚アセトン測定装置は実用化されていなかった。

そこでドコモは、皮膚アセトンを濃縮して測定する新たなガス測定機構を提案し (図2)、身に着けられるほど小型・軽量な世界初の測定装置を開発した。

3. 開発装置の概要

ウェアラブル機器に実装するガスセンサとしては、「小型」「高感度」「安価」「長寿命」「メンテナンスフリー」といったすぐれた特徴を有している半導体式ガスセンサ^{*9}が望ましい。しかし、世界最高レベルの測定感度を有する半導体式ガスセンサ [5]でも、センサ単体では皮膚アセトンの測定は難しい。例えば、皮膚アセトンを濃縮して濃度を高めた状態で測定するなどの工夫が必要となる。

そこで今回の開発装置では、半導体式ガスセンサと、アセトン分子径よりもやや大きい細孔を有する機能性材料^{*10}を備える構成とした。つまり、皮膚表面から自然放出されるアセトン分子を一定時間捕集することで、機能性材料に皮膚アセトンを吸着させる。そして、機能性材料を瞬間的に加熱することで、吸着させた皮膚アセトンを機能性材料から一斉に放出し、皮膚アセトンの濃度を一時的に高めた状態で半導体式ガスセンサにより測定する (図2)。なお、半導体式ガスセンサには、アセトンに対して特に高い感度を有する酸化タンゲステンを主な材料とするセンサを選定した。



図1 CEATEC JAPAN 2014参考出展品

表1 皮膚ガス中の成分例と体の状態

皮膚ガス中の成分例	体の状態
アセトン	体脂肪の燃焼状況
エタノール	酔いの程度
アセトアルデヒド	二日酔いの程度
メタン	腸内環境の変化・便秘
ノネナール	老化・加齢の進行
ホルムアルデヒド	癌の発症・進行

*7 CEATEC JAPAN : アジア最大規模の映像・情報・通信の国際展示会。

*8 $\text{pg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$: 1分間に皮膚 1cm^2 あたりから放出されるアセトンの量を示す。1pgは1兆分の1g。

*9 半導体式ガスセンサ : 酸化金属などの半導体をセンサ素子とし、大気中のガス成分との酸化還元反応に伴うセンサ素子の電気抵抗の変化によって大気中のガス成分の濃度を測定するセンサ。

*10 機能性材料 : 外部からの制御が可能な機能を有する材料。ここでは、分子を選択的に吸着する機能と、加熱などの外部刺激によって吸着した分子を放出する機能を有する材料を指す。

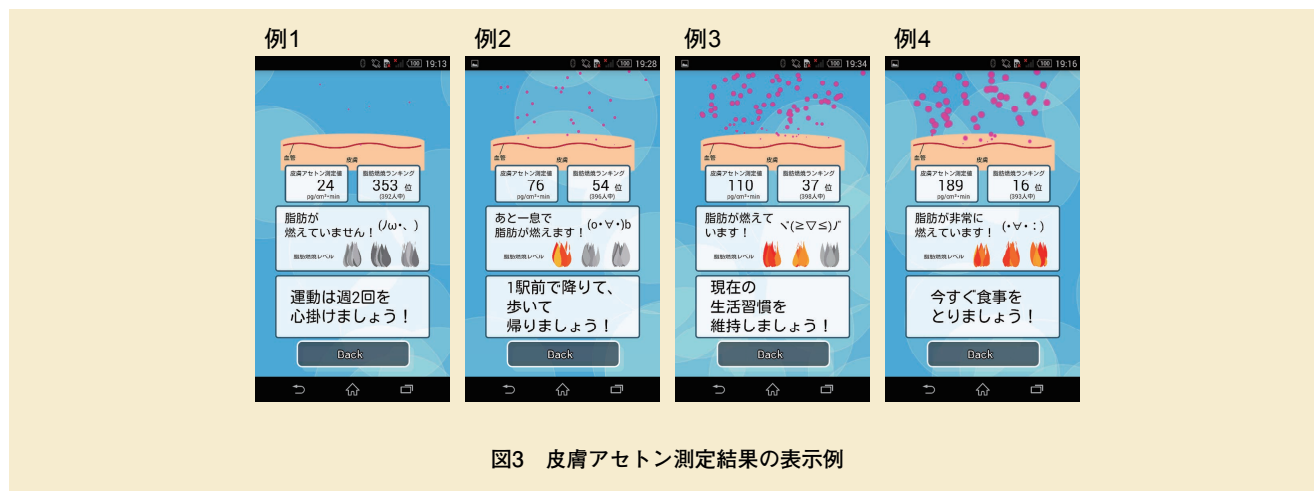
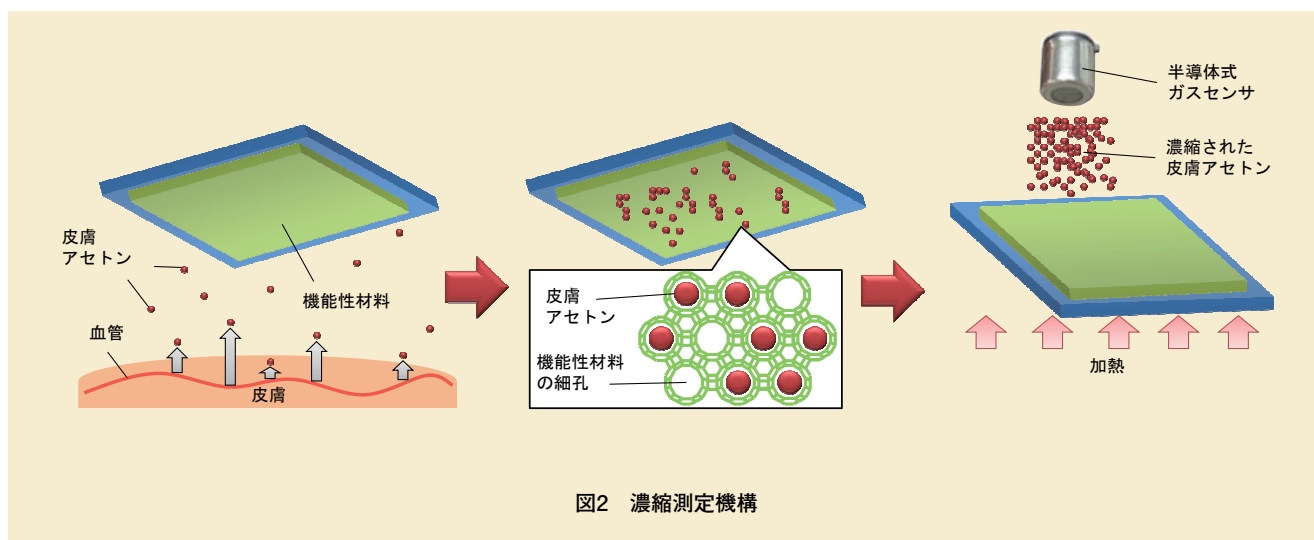
開発装置は重さが54g、大きさは40×78mmとクレジットカードより一回り小さく、厚さは13mmと胸ポケットにも収まるサイズである。従来の大型測定装置と比べて、重さで約1/120、体積で約1/380もの小型・軽量化に成功した。皮膚アセトンの測定結果はBluetooth®*11による無線伝送で対向するスマートフォンやタブレットに送信が可能である。対向するスマートフォンやタブレットには、開発装置からの送信データを受信し、皮膚アセトンの測定結果

に応じて、現在の脂肪燃焼状況と健康的なダイエットに向けたアドバイスをGUI*12で視覚的に表現するアプリケーションを開発・実装した(図3)。

4. 性能評価実験

考案したガス測定機構の原理実証を行うため、開発装置の性能評価実験を実施した。皮膚アセトンは血管由来の生体ガス成分であるため、腕だけでなくさまざまな部位からの測定が可能であるが、比較的放出量が

多いとされる掌の皮膚アセトンを複数名の被験者から測定し、本開発装置と従来の大型の測定装置(ガスクロマトグラフィ装置)とで比較評価を行った。その結果、本開発装置による測定結果は、従来の大型装置による測定結果と正の高い相関が認められた(相関係数*13 $R=0.96$) (図4)。これは、ユーザ自身が脂肪燃焼状況の傾向や目安を簡易的に把握する用途を想定すると、実用に耐えうるレベルである。本開発装置は、従来の大型装置に近い性能でありながら、



*11 Bluetooth®: 免許申請や使用登録の不要な2.4GHz帯の電波を使った近距離無線通信規格の1つ (IEEE 802.15.1)。米国Bluetooth SIG Inc. の登録商標。

*12 GUI: 操作や表示の対象が絵で表現され、直感的な操作や視認性に優れたインタフェース。

*13 相関係数: 2つの変数の間の類似性の度合いを示す統計学的指標。1に近いほど類似性が高く、0に近いほど類似性が低い。

小型・軽量化に成功したと言える。

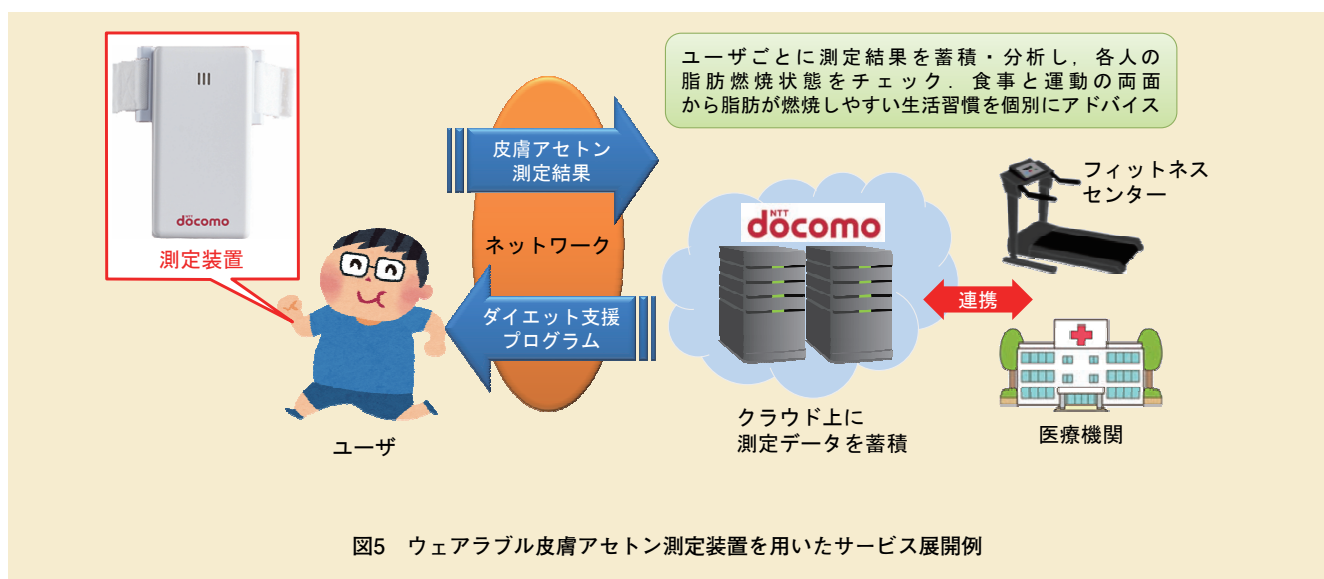
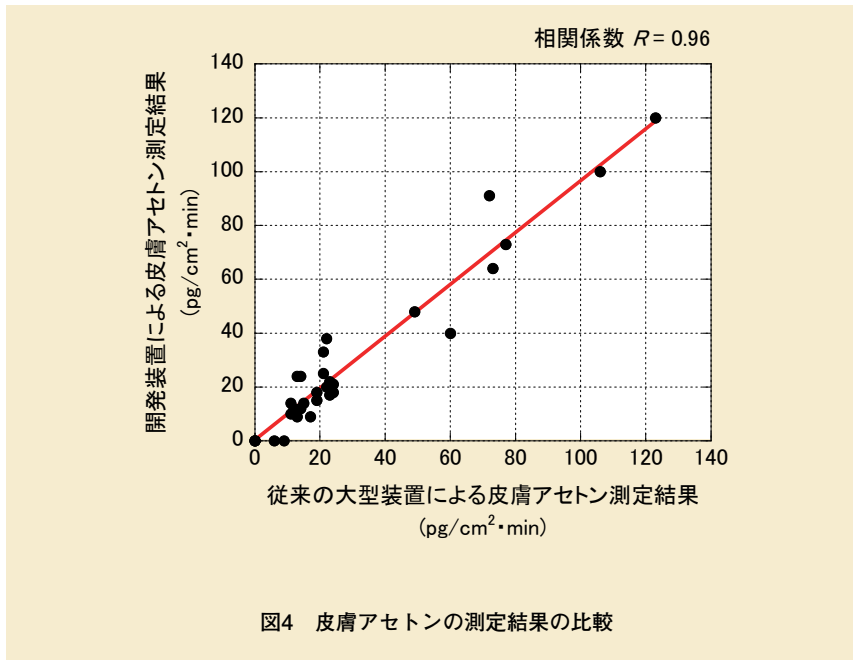
5. サービス展開例

(1) ダイエット支援

ダイエットへの関心が高いユーザーやメタボリック症候群が気になるユーザーが、自宅や職場などで日常的に利用する例が考えられる。具体的

には、各人の代謝特性を踏まえ、食事や運動に適したタイミング、お薦めの食事メニューや食事量、適正な運動量や運動負荷といった情報をダイエット支援プログラムとして提供できる可能性がある(図5)。開発装置を1日身に着けて生活した場合の測定結果例を図6に示す。図6よ

り、皮膚アセトンの放出量は1日の中でも変動していることが分かる。例えば、昼食前の皮膚アセトン放出量が少ない時は、体脂肪があまり燃焼しておらず、体内には糖分が豊富に残存しているものと推定される。そのような場合に多めの食事を摂ると太ってしまうため、軽食を勧めたり、炭水化物の摂取量を控え目にしたりするようアドバイスを行う。逆に、皮膚アセトンの放出量が極めて多い場合は、無理な食事制限を行っている可能性があり、過度なダイエットに注意を促すアドバイスを行う。別の使用例としては、運動の前後で皮膚アセトンの放出量を確認・比較し、実施した運動が体脂肪の燃焼に効果があったか否かを判定する。図6は運動の成功例を示しているが、運動前後の皮膚アセトン放出量に顕著な変化が見られない場合は、実施した運動の負荷が低い、運動の時間が短いことが原因であると推定され、各人に合った運動負荷や運動時



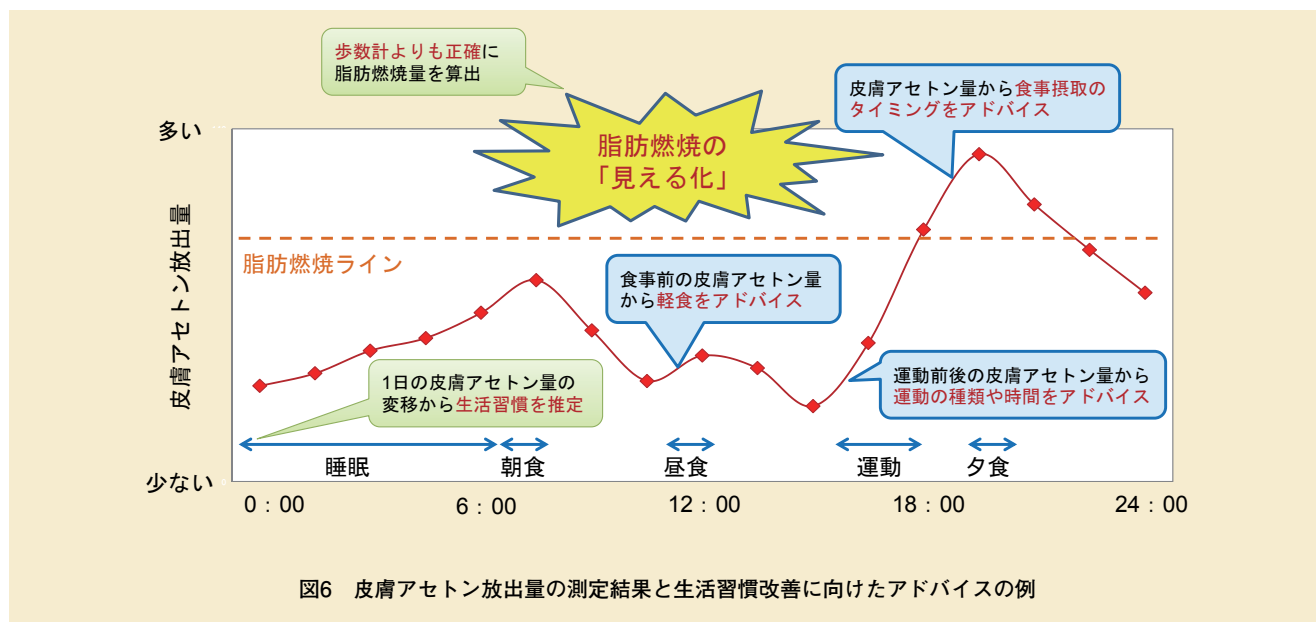


図6 皮膚アセトン放出量の測定結果と生活習慣改善に向けたアドバイスの例

間になるまで段階的に調整することを勧めるアドバイスを行う。

(2)高齢者の見守り支援

高齢者の介護や食事管理などでの利用が考えられる。高齢になると、極端に食事摂取量が低下したり、食事の摂取そのものを忘れてしまったりして、知らず知らずのうちに栄養失調に陥ることがある。このような場合には、皮膚アセトンの放出量は極めて高くなる。日常的に皮膚アセトン放出量を測定することで、食事がしっかり摂れているかを客観的に判断することができる。また、そのデータを家族や介護者と共有するといった、安心・安全分野での利用も期待される。

(3)糖尿病患者・予備軍への支援

糖尿病を患っているユーザーとその予備軍による利用が考えられる。糖尿病と診断されると、まず食事による治療が試みられ、症状に改善がみられない場合などには、経口薬や

インスリン注射による治療が行われるが、治療によるコントロールが有効に働いていない場合などでは、皮膚アセトンの放出量が高くなる傾向があり、糖尿病の診断や経過観察を行う上で1つの指標となる可能性がある。特に、外来患者の在宅での測定や、入院患者のベッドサイドでの測定など、これまで測定が困難であった場面での利用が期待される。

6. あとがき

本稿では「バイオチップ携帯」の実現に向けた開発例として、身に着けるだけで体脂肪燃焼状況を「見える化」できるウェアラブル皮膚アセトン測定装置を紹介した。開発装置は、独自の濃縮測定機構を実装しており、従来の大型装置に近い性能でありながら、大幅な小型・軽量化を実現した世界初の測定装置である。

開発装置の測定機構をウォッチ型やインナーウェア型など、さまざま

な形態のウェアラブル機器に組み込めば、ユーザーの代謝特性に合わせたダイエット支援プログラムなどをより自然な形で提供することが可能となる。

今後も引き続き「バイオチップ携帯」の研究開発をすすめ、アセトン以外のガス成分などを総合的に分析可能な測定装置の開発を行っていく。そして、予防医療サービスの実現や、国民医療費の高騰といった社会問題の解決に取り組むなど、医療・健康分野での新たな価値創造に貢献していく。

文献

- [1] 厚生労働省：“平成24年度 国民医療費の概況。”
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-iryohi/12/>
- [2] 総務省：“情報通信白書平成25年度版。”
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/pdf/index.html>

- [3] 檜山, ほか: “分子通信の実現に向けた分子伝送技術,” 本誌, Vol.16, No.3, pp.47-50, Sep. 2008.
- [4] 山田, ほか: “「バイオチップ携帯」の実現に向けた呼気アセトン計測装置の開発,” 本誌, Vol.20, No.1, pp.49-54, Apr. 2012.
- [5] T. Toyooka, S. Hiyama and Y. Yamada: “A Prototype Portable Breath Acetone Analyzer for Monitoring Fat Loss,” J. Breath Res., Vol.7, No.3, 036005, 2013.
- [6] NTTドコモ報道発表資料: “CEATEC JAPAN 2014への出展について,” Sep. 2014.
http://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2014/09/18_00.html
- [7] T. Tsuda, T. Ohkuwa and H. Itoh: “Findings of Skin Gases and Their Possibilities in Healthcare Monitoring,” Gas Biology Research in Clinical Practice. Basel, Karger, pp.125-132, 2011.
- [8] Y. Sekine, S. Toyooka and S. Watts: “Determination of Acetaldehyde and Acetone Emanating from Human Skin Using a Passive Flux Sampler — HPLC System,” J. Chromatography B, Vol.859, No.2, pp.201-207, 2007.
- [9] C. Turner, B. Parekh, C. Walton, P. Spanel, D. Smith and M. Evans: “An Exploratory Comparative Study of Volatile Compounds in Exhaled Breath and Emitted by Skin Using Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry,” Rapid Commun. Mass Spectrom., Vol.22, No.4, pp.526-532, 2008.