

呼気中炭化水素, アルコール類, 低級脂肪酸,  
アセトンと運動に関する研究

信州大学 二木安之

**Studies on Relationship between Hydrocarbons,  
Alcohols, Lower Fatty Acids and Acetone in  
Expired air and History of Physical Exercise**

by

Yasuyuki Futatsugi

*Shinshu University School of Medicine*

**ABSTRACT**

The detected concentrations of the changes in endtidal expired air hydrocarbons, alcohols, lower fatty acids and acetone show that the contents remain in as follows : carbon dioxide, 2.9 ~ 7.0% ; methane, 1.0 ~ 12.6 ppm ; n-hexane, 0.0028 ~ 0.085 ; methanol, 0.036 ~ 0.229 ; acetaldehyde, 0.023 ~ 1.20 ; ethanol, 0.0068 ~ 3.78 ; acetone, 0.021 ~ 0.99 ; acetic acid, 0.024 ~ 0.049 ; propionic acid, 0.0014 ~ 0.020 ; iso-butyric acid, 0.00010 ~ 0.00042 ; n-butyric acid, 0.00022 ~ 0.0044 ; iso-valeric acid, less than 0.00010 ~ 0.00068 ; n-valeric acid, less than 0.00010 ~ 0.00098 (in ppm), respectively.

The relationship between carbon dioxide and methane, and alcohols, lower fatty acids and acetone in end tidal expired air of volunteer normal students in preloading was reasonable finely.

However, metabolic pathway of alcohols, aldehydes and lower fatty acids of a male in many physical exercise training was not clear.

## 要 約

本研究では、健常な医学生6名(男4, 女2)を被検者とした。同一人の呼気中炭化水素, アルコール類, 低級脂肪酸, アセトンの物質群を詳しく分析した。その結果, 呼気中二酸化炭素は2.9~7.0%にわたり, メタンは, 1.0~12.6 ppmで, 2.5 ppmをこえる者は1例であった。呼気中アルコール類およびアセトンは, やややせ型(肥満度-9.9%)で運動量の最も多い者であり, 低級脂肪酸も濃度は高かった。しかし, この者の酢酸は通常の濃度レベルであった。脂質代謝の指標とされる呼気中アセトンは, 0.21~0.99 ppmで, 比較的個人差が少ないことがわかった。呼気成分を物質群ごとに詳しく分析することは, 単に個人差, 運動量(運動負荷)との関係を明らかにするのみならず, 代謝系, 生理機能面から重要であると考えられる。

## 緒 言

呼気中には, 酸素, 二酸化炭素などの呼吸ガスのほかに, 微量ではあるが重要な揮発性代謝物質が含まれており, これらは血中濃度と対応して, しかも物質の拡散能に応じて肺泡毛細血管を流れ去る, 混合静脈血のガス分圧の情報が得られる。このため, 人の健康状態, 栄養バランス, 摂取された各種薬物などの動態をも反映する, 非観血的検査に供される非侵襲性で, 人に与える負担もきわめて小さく, 採取方法が簡単, 迅速で, 反復して, 経過が追える点で有利であるとされ, 古くより注目されてきている。

最近, 呼気分析診断術とも言えるほどの潜在的可能性<sup>1)</sup>が, 総説としてまとめられている。この中では, 医学的存在意義が十分に明確になっていないものをも含め, 約200成分が呼気中に存在すること。呼気中代謝産物とその起源についての解析が可能なこと, 異常呼気臭とその予想される疾病

—とくに先天性代謝異常症など, 呼気中アセトン測定 of 臨床的意義などが注目されている。

ところで運動時にエネルギー源として脂質, とくに脂肪酸を適切に活用できる体質が, 十分に備わっているか否かを明らかにすることは, 運動障害の予防のためにも, また, 健康面からもきわめて重要である。とくに, 空腹時あるいは体重減少時に, 血中に増加してくる遊離脂肪酸は, 心筋活動のエネルギー源となる反面, 異常増加は心筋毒や各種不整脈を発生したり, ショック死をおこさせる物質群であり, また, 糖質不足も血中遊離脂肪酸濃度を増大させることから, その挙動はきわめて重要であるとされている<sup>2-6)</sup>。

一方, 呼気中アセトンは血中のケトン体と対応し, 糖尿病ケトアシドーシス, 運動負荷, 絶食などにより変化するが, 測定上の最大の意義は, 他の末梢組織を通過する以前に, 最初に肝で産生したアセトンを肺胞気で, 気相分析によるチェックが行える点にある。

呼気中アセトン濃度が運動によって増強することは, 運動後ケトージス(Post-exercise ketosis)<sup>7)</sup>として知られているものであるが, われわれは, 運動負荷後にさらに摂取する飲料等によって変化すること, 血清グルコースとの対応などをすでに報告<sup>8)</sup>した。また, 大桑ら<sup>9)</sup>は, 運動中の呼気中アセトン濃度は運動強度(酸素摂取量/最大酸素摂取量)と密接に関係していることを明らかにした。

本研究は, 人の健康状態, 栄養バランスなどをも反映している, 非観血的検査に供される呼気を対象試料とし, 健常者の安静時と運動経歴についての, 炭化水素, アルコール, 低級脂肪酸, アセトンの挙動を明らかにするために, 同一人に対する検索と意義を明らかにするためのもので, さらに, 運動時の危険因子を迅速に, 連続的に非侵襲的に事前評価する可能性を研究することを目的とした。

## 1. 実験

### 1.1 被検者

いずれも医学部に所属する健康な男女6名で、22～33歳の身体特性と運動歴を表1に示した。いわゆる肥満度でみた場合、-17.4～18.1%の範囲にあった。

運動歴については、ほとんど運動をしない者からサッカーを2時間/毎日、バドミントンを2.5時間/3日/週、テニスを2時間に加え、水泳を2～3回/週の範囲の運動量を有する者にわたっている。

### 1.2 呼気中炭化水素、アルコール類、低級脂肪酸、アセトンの測定

#### 1.2.1 呼気の採取

前報<sup>9)</sup>と同様に、一回呼吸法-20秒間息こらえ法によった。すなわち、①はじめに口をすすぐ②ゆっくりと数回の呼吸をやや深目に行う③吸気後、呼吸を停止する(20秒間)④20秒後、約200ml(大部分が空気と混合している)の呼気をゆっくり呼出する⑤その後、純窒素で清浄にした10lテドラーバッグ内に、努力して終末呼気をも呼出

させた。鼻からの外気の混入のないように注意して、呼気採取を行わせた。

ここから2ml～2.8lの試料ガスを、5mlのガスタイトシリンジで直接か、または、呼気中各成分ごとの分析条件にしたがって濃縮し、ガスクロマトグラフ分析を行った。

#### 1.2.2 呼気成分のガスクロマトグラフ分析

##### 1) 炭化水素

メタンは、Porapak Q (80/100メッシュ) 充てんカラム、長さ1.7m、内径3mmガラス、30℃、窒素キャリアーガス35ml/minのガスクロマトグラフ分析条件で、試料量2mlを直接導入し分析した。ヘキサンほかの炭化水素は、5% SP-1200 + 1.75% Bentone 34担体 Chromosorb W (AW, DMCS) (80/100メッシュ) 充てんカラム、長さ3m、内径3mmガラス、60℃、窒素キャリアーガス35ml/minのガスクロマトグラフ分析条件<sup>10)</sup>で、試料量0.5lを液体酸素低温濃縮して分析した。

##### 2) アルコール類およびアセトン

Porapak Q (80/100メッシュ) 充てんカラム、長さ1.7m、内径3mmガラス、175℃、窒素キャ

表1 Characterization of volunteer normal students

Student	Age (y)	Sex	Height (cm)	Weight (kg)	o.f.*	Physical Exercise
A	22	F	163	54	-4.8	Walking 20min per day
B	22	M	168	55	-10.1	Batonminton 2.5h 3times per week
C	25	M	164	68	18.1	Walking 5min, Sucker 2h per every day
D	27	M	174	60	-9.9	Walking 10min, Tennis 2h, Swimming 2~3 times per week
E	22	F	160	46	-17.4	Walking 10min
F	33	M	176	59	-13.7	Walking 10min

$$* \frac{\{W - (H - 100) \times 0.9\}}{(H - 100) \times 0.9} \times 10^2$$

リヤーガス 35 ml/min のガスクロマトグラフ分析条件<sup>11)</sup>で、試料量 0.25 l を液体酸素低温濃縮して分析した。

### 3) 低級脂肪酸

0.3% FFAP + 0.3% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 担体 Carboxpack B (60/80 メッシュ) 充てんカラム, 長さ 1.5 m, 内径 3 mm ガラス, 210°C, 窒素キャリアーガス 45 ml/min のガスクロマトグラフ分析条件下で、試料量 1 ~ 3 l をアルカリビーズ法<sup>12)</sup>で濃縮して分析<sup>12)</sup>した。

ガスクロマトグラフ島津 GC 3 BF, 島津 4 CMFFp の検出器には、いずれも水素炎イオン化型検出器 (Flame Ionization Detector, FID) を使用した。

呼気中二酸化炭素は、試料ガス 10 ml を 100 ml のガラス注射器に採取し、実験室空気では 10 倍に希釈後、理研計器ポータブル赤外線炭酸ガス測定器 RI-411 A 型を使用した。

また、呼気中アンモニアは、ガステック 3 L 検知管を使用した。

## 2. 結果および考察

### 2.1 呼気中二酸化炭素

表 2 には、安静時の呼気中二酸化炭素濃度を示した。

通常 3.5% が正常であるとされ、5% 以上では、気腫 (emphysema) などの異常が疑われる<sup>13)</sup> うえ、A のように変動の著しいものに対する運動負荷検査に当たっては、事前に十分慎重なチェックが必要なものと考えられる。

### 2.2 呼気中メタン

図 1 には、安静時の呼気中メタンのガスクロマトグラムを示した。

実験室空気中メタンは、約 1.5 ppm である。A の場合は、著しい (B から F の約 10 倍) 濃度であった。A は表 2 のように呼気中二酸化炭素濃度変動の著しい例である。各試料とも 2 回ずつ測定

表 2 Carbon dioxide in endtidal expired air of volunteer normal students in preloading

Student	Date	Carbon dioxide in endtidal expired air (%)
A	August/28	2.9
A	September/11	7.0
B	August/28	no test
B	September/11	5.1
C	August/28	4.5
C	September/11	5.9
D	August/28	4.2
D	September/11	3.8
E	July/3	4.7
F	July/3	3.4

表 3 Methane in endtidal expired air of volunteer normal students in preloading

Student	Date	Methane in endtidal expired air (ppm)
A	September/3	12.6
B	September/3	2.4
C	September/3	1.3
D	September/3	1.7
E	July/9	1.0
F	July/9	1.5

を行い、平均した値を表 3 に示した。

健常者の呼気中メタンは、1 ~ 99 ppm の範囲<sup>14~16)</sup>にわたることが知られている。

### 2.3 ヘキサンおよびその他炭化水素

図 2 には、安静時の呼気中 n-ヘキサンおよびその他の炭化水素のガスクロマトグラムを示した。n-ヘキサンの定量結果を表 4 に示した。

呼気ガス中、炭化水素として、先のメタンのほかにエタン、ブタン、ペンタンなど<sup>9,17,18)</sup>が、血中不飽和脂肪酸との対応から研究されているが、n-ヘキサンその他の炭化水素の報告は比較的少ない。図 2 から明らかのように、A から F にわたって全体のクロマトグラムのパターンが異なる



The Peak 1 Represents  
n-hexane

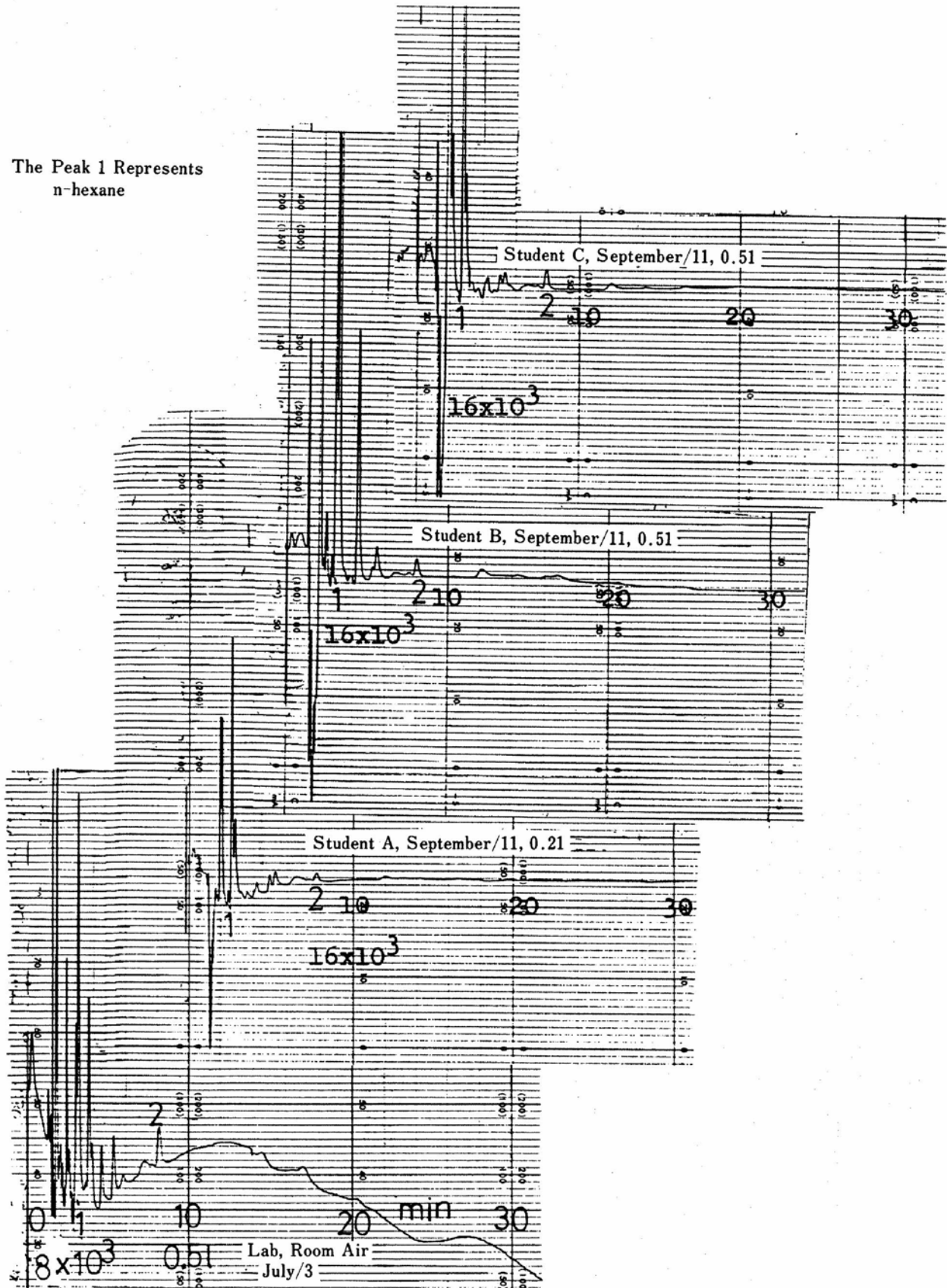


図2-a Typical gas chromatograms of n-hexane and other hydrocarbons in  
endtidal expired air of normal students in preloading

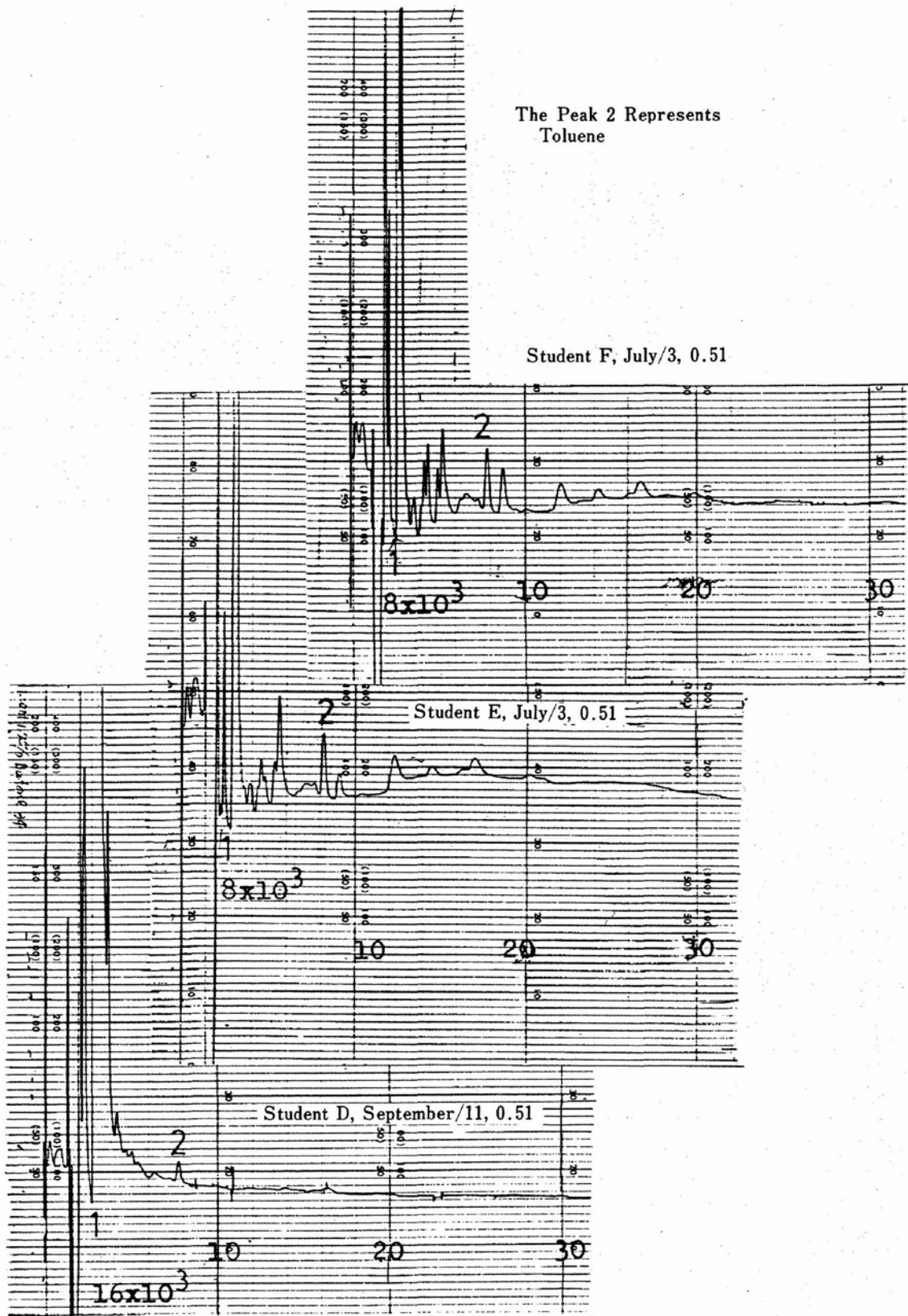


図2-b

表4 n-Hexane and other hydrocarbons in endtidal expired air of volunteer normal students in preloading

Student	Date	n-hexane in endtidal expired air (ppm)
A	September/11	0.085
B	September/11	0.0028
C	September/11	0.026
D	September/11	0.042
E	July/3	0.021
F	July/3	0.020

点は興味深い、トルエンは、空气中常在成分であるが、変化は比較的少ないことがわかった。

定量結果を表4に示した。ここでもAの例の濃度が高いことがわかった。

#### 2.4 呼気中アルコール類およびアセトン

図3には、安静時の呼気中アルコール類およびアセトンのガスクロマトグラムを示した。

また、定量結果を表5に示した。

図3、表5から明らかなように、このグループは、D例が最も高い濃度を示した。とくに、エタノール、アセトアルデヒドは、異常に高いものと考えられた。

前報<sup>8)</sup>では、アセトン濃度を $\mu\text{g}/\text{l}$ で表示したが、 $1\mu\text{g}/\text{l}$ はおおよそ0.42 ppmに相当する。

D例は、やややせ型で、運動量の最も多い者であったが、これをのぞくと呼気中アセトンは0.21~0.31 ppmと個人差の少ないことが明らかになった。

#### 2.5 呼気中低級脂肪酸

図4には、安静時の呼気中低級脂肪酸のガスクロマトグラムを示した。

表5 Alcohols and acetone in endtidal expired air of volunteer normal students in preloading

Student	Methanol (ppm)	Acetaldehyde (ppm)	Ethanol (ppm)	Acetone (ppm)	Date
A	0.036	0.023	0.0083	0.26	Sep./11
B	0.068	0.035	0.052	0.29	Sep./11
C	0.106	0.023	0.0068	0.31	Sep./11
D	0.229	1.20	3.78	0.99	Sep./11
E	0.038	0.023	0.023	0.21	July/3
F	0.053	0.023	0.020	0.27	July/3

表6 Lower fatty acids in endtidal expired air of volunteer normal students in preloading

Student	Acetic acid (ppm)	Propionic acid (ppm)	Butyric		Valeric	
			iso- (ppm)	n- (ppm)	iso- (ppm)	n- (ppm)
A	0.049	0.0024	0.00028	0.00037	N.D.	N.D.
B	0.037	0.0047	0.00028	0.00075	N.D.	N.D.
C	0.024	0.0029	0.00028	0.00078	0.00068	0.00098
D	0.026	0.020	0.00042	0.0044	0.00017	0.00049
E	0.035	0.0057	0.00020	0.00022	N.D.	N.D.
F	0.029	0.0014	0.00010	0.0031	0.00012	0.00035

Date, A-D ; August/28 N.D. represents less than 0.00010ppm. E,E ; July/3



The Peak 1 Represents  
 Methanol; 2, Acetaldehyde;  
 3 Ethanol; 4, Acetone; 5,  
 Isoprene + 1-Propanol

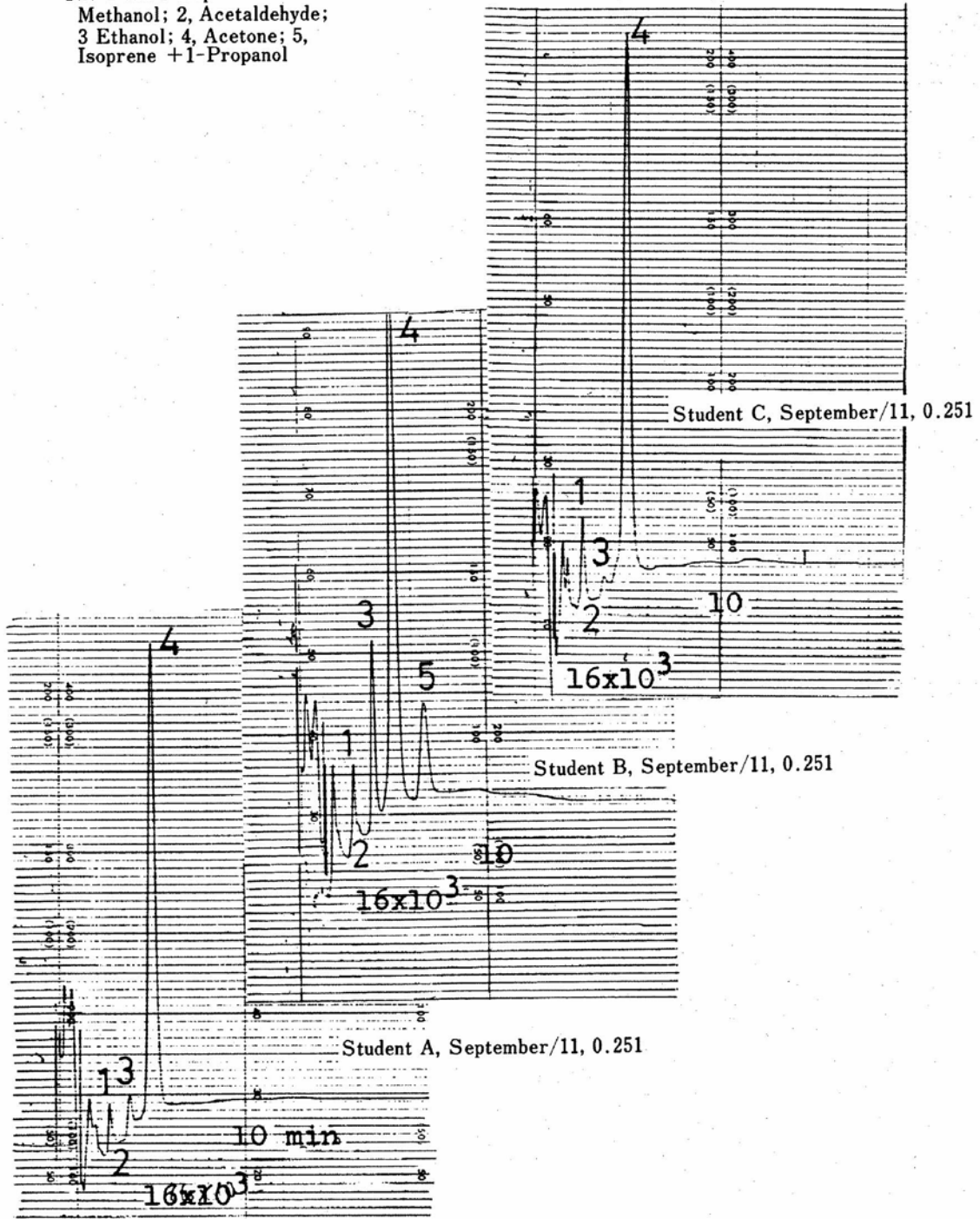


図3-a Typical gas chromatograms of alcohols and acetone in endtidal expired air of normal students in preloading

また、定量結果を表6に示した。

図4、表6から明らかなように、このグループは、2、4項アルコール類およびアセトンと同様に、D例が最も高い濃度を示した。とくに、プロピオン酸、n-酪酸は他の例よりもおおよそ10倍

高濃度であった。しかし、アルコール（エタノール）、アセトアルデヒド、酢酸と代謝されるアルコールの径路<sup>19)</sup>から酢酸が高濃度になると予想されたが、結果的には、ほかの例と濃度が変わらないことが明らかになった。

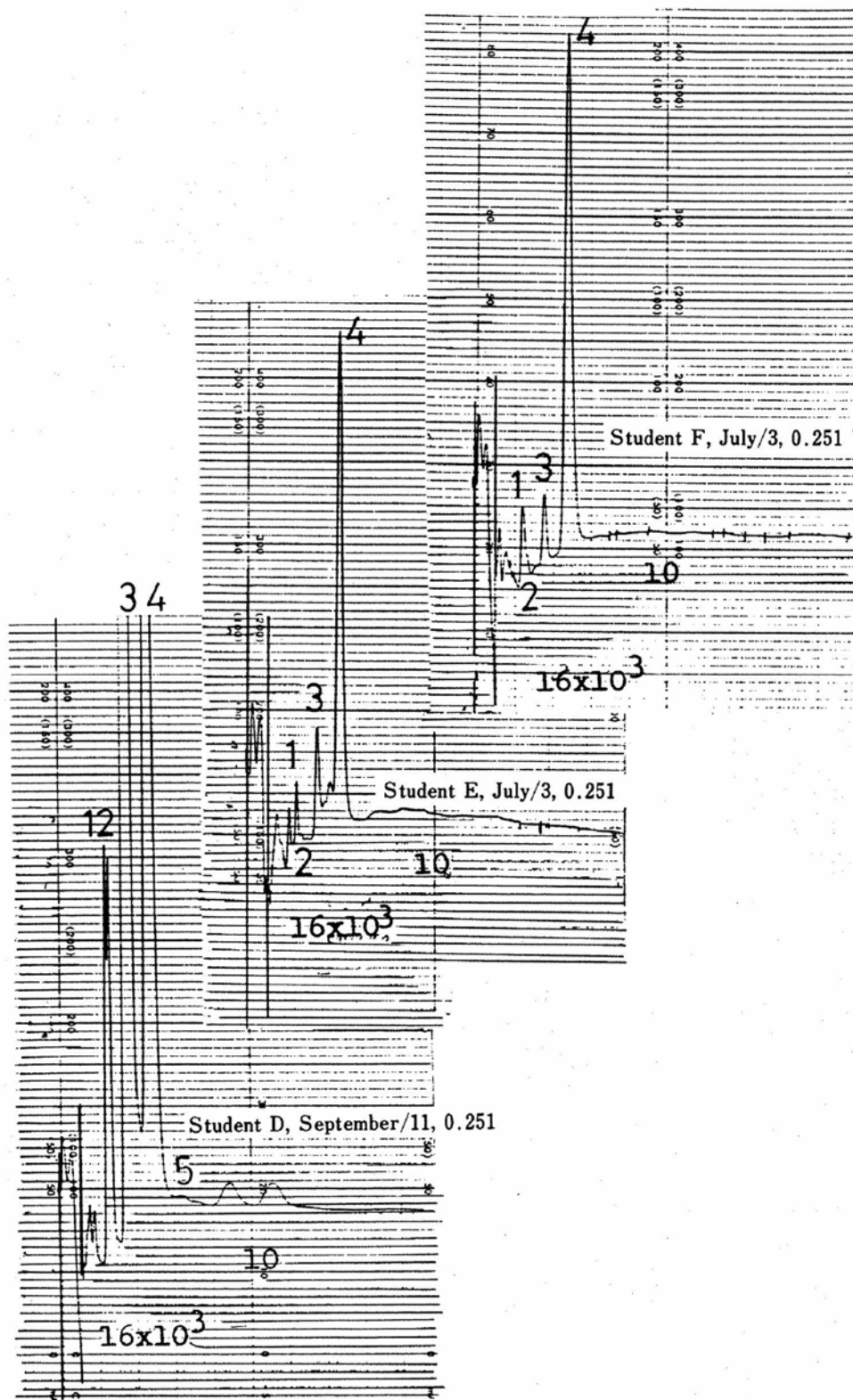


図3-b

### 3. まとめ

呼気中炭化水素, アルコール類, 低級脂肪酸, アセトンと運動についての関係を研究した結果,

つぎのことが明らかになった.

- 1) 被検者は, 健康な男女6名, 22~33歳, 肥満度は, -17.4~18.1%であった.
- 2) 呼気中二酸化炭素は, 2.9~7.0%にわた

The Peak 1 Represents Acetic Acid;  
 2, Propionic Acid; 3, Iso-butyrac Acid;  
 4, n-butyrac Acid; 5, Iso-valeric Acid;  
 6, n-valeric Acid

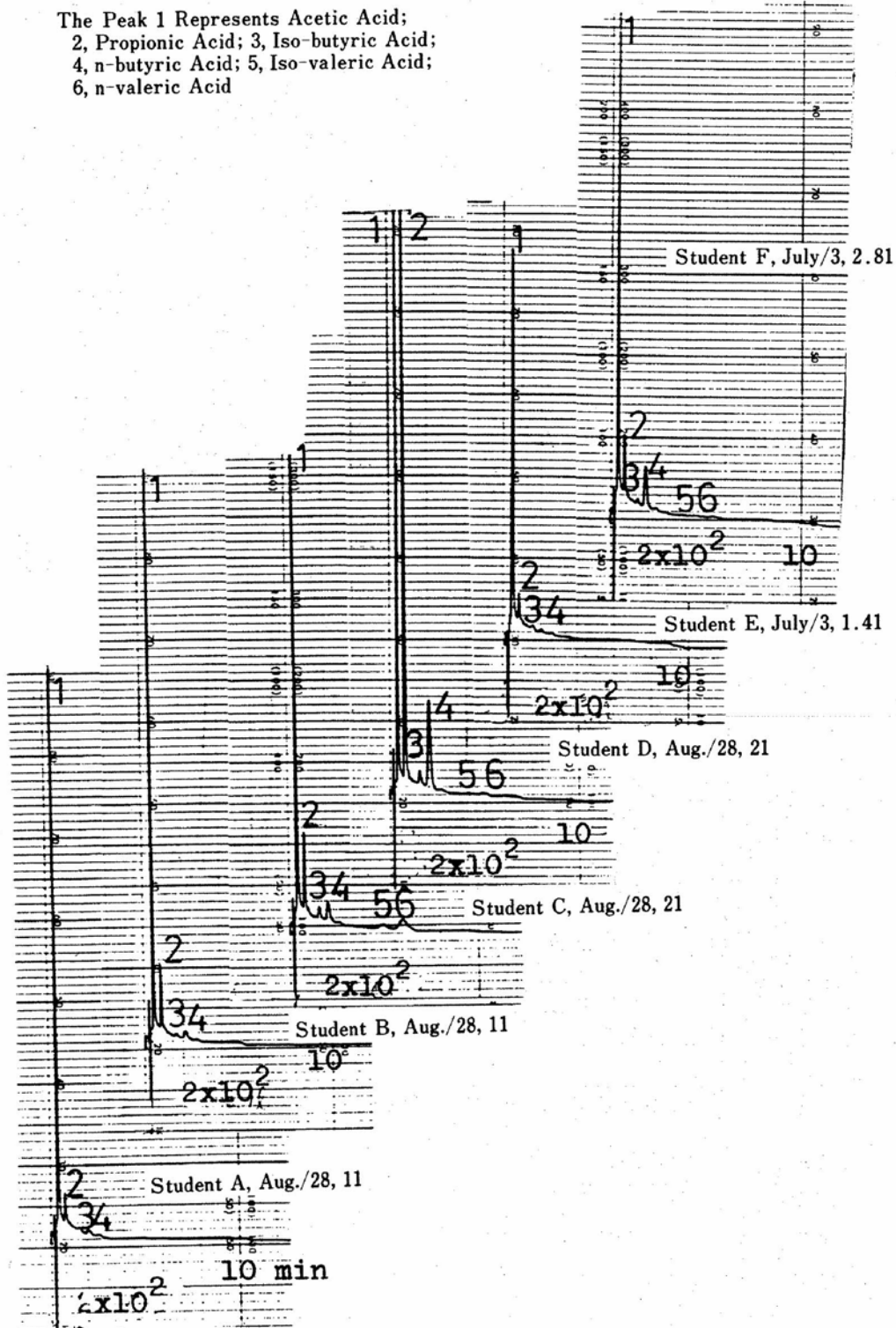


図4 Typical gas chromatograms of lower fatty acids in endtidal expired air of normal students in preloading

り、最低値と最高値を示したものは、同一の女性であった。2週間で、このように大きな変化がある者の運動負荷検査を行うに当たっては、注意が必要である。

- 3) 呼気中メタンの高濃度が、二酸化炭素濃度の変動の著しい例から認められた。
- 4) 呼気中アルコール類およびアセトン高濃度は、やややせ型(肥満度-9.9%)で運動量

の最も多い者であった。

5) 呼気中低級脂肪酸は、アルコール類およびアセトンの高濃度の者が高かった。

6) 呼気中アンモニアは、いずれも 0.5 ppm 以下であった。

以上のように、同一人の呼気中成分を化学物質群ごとに詳しく分析することは、個人の体調の変化、運動量の適正化、運動負荷前のチェックに必要であり、今後運動強度、健康度の対応を解明するための簡便で精度よい手法の開発が望まれる。

終わりに、血中遊離脂肪酸と健康に関する貴重な資料と論文をご教示いただきました、前東京慈恵会医科大学客員教授 小野三嗣先生と本研究にご協力いただいた関係各位に深謝いたします。

#### 文 献

- 1) Manolis, A.; The diagnostic potential of breath analysis, *Clin. Chem.*, **29**, 5-15 (1983)
- 2) 小野三嗣, 渡辺雅之, 春日規克, 小川芳徳, 小室史恵; パルミトオレイン酸の不整脈誘発作用, *体力科学*, **27**, 31-36 (1978)
- 3) 小野三嗣, 宮崎義憲, 柴田義晴, 渡辺雅之, 谷嶋二三男; 高年者の身体活動時の血中脂肪酸の消長, *体力医学*, **27**, 1-10 (1978)
- 4) 小野三嗣, 渡辺雅之, 長尾憲樹, 池田道明, 山本隆宣, 小野寺昇, 田中弘之, 原 英喜, 湊久美子, 大橋道雄; タウリンの運動時代謝に及ぼす影響 (1) 健康成年男子の低糖高蛋白高脂食の場合, *体力科学*, **29**, 191-204 (1990)
- 5) 小野三嗣, 宮崎義憲, 渡辺雅之, 池田道明, 長尾憲樹, 山本隆宣, 清水 悟, 原 英喜, 小野寺昇, 田中弘之, 湊久美子, 原田邦彦, 小川芳徳, 春日規克; 長距離歩行の至適処方確立のための基礎的研究 (その1), *体力科学*, **30**, 193-205 (1981)
- 6) 小野三嗣, 食事とスポーツ障害, *公衆衛生*, **51**, 621-625 (1987)
- 7) 河合 忠, 玄番昭夫, 屋形 稔編; 異常値のでるメカニズム, *医学書院*, pp. 18-19 (1984)
- 8) 二木安之; 呼気中アセトン等を指標とした運動負荷による体重減少効果に関する研究, *デサントスポーツ科学*, **9**, 180-188 (1988)
- 9) 大桑哲男, 伊藤 宏, 下田次雄, 石田直章; 有酸素的運動が鍛練者および非鍛練者の呼気中炭水素濃度に及ぼす影響, *デサントスポーツ科学*, **13**, 253-261 (1992)
- 10) 星加安之; Tenax-GC 濃縮管を用いたガスクロマトグラフィーによる大気中の極微量スチレンの定性, *分析化学*, **28**, 629-632 (1979)
- 11) 星加安之, 三井泰裕, 高田芳矩, 村山忍三; 呼気中極微量化学物質 (特に臭気成分) のキャラクターゼーションと疾病の診断・予後判定基準の確立に関する基礎的研究, 第2回診断クロマトグラフィーシンポジウム論文集, 45-50 (1984)
- 12) Hoshika, Y.; Gas chromatographic determination of lower fatty acids in air at part-per-trillion levels, *Anal. Chem.*, **54**, 2433-2437 (1982)
- 13) Gudzinowicz, B., J., Gudzinowicz, M., J.; Analysis of Drugs and Metabolites by Gas Chromatography-Mass Spectrometry, Volume 1 Respiratory Gases, Volatile Anesthetics, Ethyl Alcohol, and Related Toxicological Materials, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel pp. 12-16 (1977)
- 14) Levey, S., Balchum, O. J.; Studies of metabolic products in expired air. I. Methane, *J. Lab. & Clin. Med.*, **62**, 247-254 (1963)
- 15) Calloway, D. H.; Respiratory hydrogen and methane as affected by consumption of gas-forming foods, *Gastroenterology*, **51**, 383-389
- 16) Calloway, D. H., Murphy, E. L.; The use of expired air to measure intestinal gas formation, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **150**, 82-95 (1968)
- 17) 嵯峨井勝; 生体内過酸化脂質の測定 C 呼気分析の過酸化脂質実験法, 金田, 植田編, 医歯薬出版, pp. 98-108 (1983)
- 18) 内田義之, 本間敏明, 藤岡 浩, 市瀬孝道, 嵯峨井勝, 長谷川鎮雄; 呼気ガス炭化水素測定 of 臨床応用, *日本臨床生理学会雑誌*, **13**, 108-112 (1983)
- 19) 山村雄一編; 新内科学 第1巻 (南山堂), アルコール中毒, *生化学, 代謝*, pp. 678, 679 (1977)