

Murakami K, <u>Sasaki S</u> , Takahashi Y, et al.	Misreporting of dietary energy, protein, potassium and sodium in relation to body mass index in young Japanese women	Eur J Clin Nutr		Epub ahead of print	2007
佐々木 敏	健康的な食生活習慣形成を目指した食事摂取基準	学術の動向	11(5)	28-33	2006
Sato S, Iso H, Noda H, Kitamura A, Imano H, Kiyama M, Ohira T, Okada T, Yao M, Tanigawa T, Yamagishi K, Nakamura M, <u>Naito Y</u> , Shimamoto T.	Plasma fibrinogen concentrations and risk of stroke and its subtypes among Japanese men and women	Stroke	37(10)	2488-92	2006
内藤 義彦	実地医家による高血圧の一次予防の実施法 - 実効ある運動指導の進めかた	Medical Practice	24 (2)	345-351	2007

IV. 研究成果の刊行物・別刷

ORIGINAL ARTICLE

Interindividual variability in sleeping metabolic rate in Japanese subjects

AA Ganpule^{1,2}, S Tanaka¹, K Ishikawa-Takata¹ and I Tabata¹

¹Health Promotion and Exercise Program, National Institute of Health and Nutrition, 1-23-1 Toyama, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan and
²Diabetes Unit, KEM Hospital and Research Centre, Pune, Maharashtra, India

Introduction: Basal metabolic rate (BMR) or sleeping metabolic rate (SMR) is the largest component of total energy expenditure (EE). An accurate prediction of BMR or SMR is needed to accurately predict total EE or physical activity EE for each individual. However, large variability in BMR and SMR has been reported.

Objectives: This study was designed to develop prediction equations using body size measurements for the estimation of both SMR and BMR and to compare the prediction errors with those in previous reports.

Methods: We measured body size, height, weight and body composition (fat mass and fat-free mass) from skinfold thickness in adult Japanese men ($n=71$) and women ($n=66$). SMR was determined as the sum of EE during 8 h of sleep (SMR-8h) and minimum EE during 3 consecutive hours of sleep (SMR-3h) measured using two open-circuit indirect human calorimeters. BMR was determined using a human calorimeter or a mask and Douglas bag.

Results: The study population ranged widely in age. The SMR/BMR ratio was 1.01 ± 0.09 (range 0.82–1.42) for SMR-8h and 0.94 ± 0.07 (range 0.77–1.23) for SMR-3h. The prediction equations for SMR accounted for a 3–5% larger variance with 2–3% smaller standard error of estimate (SEE) than the prediction equations for BMR.

Discussion: SMR can be predicted more accurately than previously reported, which indicates that SMR interindividual variability is smaller than expected, at least for Japanese subjects. The prediction equations for SMR are preferable to those for BMR because the former exhibits a smaller prediction error than the latter.

European Journal of Clinical Nutrition advance online publication, 7 February 2007; doi:10.1038/sj.ejcn.1602645

Keywords: sleeping metabolic rate; basal metabolic rate; prediction; variability; body size; Japanese

Introduction

There are three principal components of energy expenditure (EE) in humans: basal metabolic rate (BMR), thermic effect of food and EE of physical activity. The FAO/WHO/UNU expert panel (1985) adopted the principle of expressing the energy requirements of adults in terms of multiples of BMR. Thus, BMR is used to estimate 24-h EE and physical activity level (24-h EE divided by BMR).

Sleeping metabolic rate (SMR), similar to BMR, is approximately 60% of the total EE. Although both are measured in the supine position, SMR is measured during sleep whereas BMR is measured in the postabsorptive state when the

subject is awake. They thus involve slightly different thermogenic processes. EE is lower during sleep than under BMR conditions (Garby *et al.*, 1987; Goldberg *et al.*, 1988; Seale and Conway, 1999; Zhang *et al.*, 2002), probably due to the absence of arousal and maybe to less body movement. Moreover, EE gradually increases after awakening (Kashiwazaki, 1990). Therefore, SMR, not BMR, should be the minimum EE for humans. SMR may be measured more accurately than BMR as it is measured during sleep when there is no arousal. Also, SMR can be measured using equipment (e.g., a human calorimeter) that gives highly reproducible and accurate results (Murgatroyd *et al.*, 1993).

Many equations have been developed to estimate BMR or SMR from body size measurements (Cunningham, 1991; Frankenfield *et al.*, 2005), which can be helpful when actual metabolic measurements are not available. Their accuracy and applicability to specific ethnic groups must be considered. The body size of Japanese differs from that of other ethnicities (Popkin and Doak, 1998; WHO, 1998). Most

Correspondence: Dr S Tanaka, Health Promotion and Exercise Program, National Institute of Health and Nutrition, 1-23-1 Toyama, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8636, Japan.

E-mail: tanakas@nih.go.jp

Received 12 April 2006; revised 28 November 2006; accepted 28 November 2006

equations currently available apply to Caucasians (Frankenfield *et al.*, 2005). Studies have found that they are not applicable to nonwhite groups (Liu *et al.*, 1995; Case *et al.*, 1997; Yamamura and Kashiwazaki, 2002).

We studied the association of SMR and BMR with body size and composition (anthropometry) in adult Japanese men and women who ranged widely in age. The purpose of this study was to develop simple-to-use prediction equations for both SMR and BMR and to compare the variability in prediction errors after adjustment for body size and composition with those found in previous studies.

Methods

Subjects

The data used for the current analysis were collected from different experimental studies that followed a similar methodology. All 137 apparently healthy Japanese subjects (71 male and 66 female subjects; ≥ 20 years) residing in the Tokyo metropolitan area were volunteers approached through personal contact, internet communication or poster advertisement. None had diseases that might affect metabolic rates. The study protocol was explained in advance to the subjects, who were instructed to eat a normal diet and do normal, but not vigorous, physical activity beginning 1 day before monitoring.

All studies were carried out in the National Institute of Health and Nutrition (Tokyo). The study protocol was approved by the Ethics Committee of the National Institute of Health and Nutrition. All of the subjects signed an informed consent form.

Study protocol

The indirect human calorimeter (IHC) data for SMR and BMR were obtained from several studies conducted at the National Institute of Health and Nutrition in Japan. Subjects entered the IHC at 1800–1900 on the study day, had dinner at 1830 or 1900, went to bed at 2300 after sedentary activities and slept until 0700 the following morning. Each subject was provided a standardized dinner to meet EE during the chamber stay using predicted BMR and an assumed physical activity level of 1.5. Energy intake at dinner was set as a third of the total energy. BMR was measured in the supine position and in the postabsorptive state (about 12 h after the last meal).

Measurements

SMR was defined as the average EE of all EEs at 15-min intervals between 2300 and 0700 over an 8 h of sleep (SMR-8h) and the minimum EE during 3 consecutive hours of sleep (SMR-3h) (Schrauwen *et al.*, 1997; Westterp-Plantenga *et al.*, 2002). Two open-circuit IHCs were used to evaluate SMR. Details of the IHC are shown elsewhere (Futami *et al.*,

2003). In brief, the two respiratory chambers were airtight rooms (20000 and 150001, respectively) containing a bed, desk, chair, TV, etc. The temperature and relative humidity in the room were controlled at 25°C and 55%, respectively. The O₂ and CO₂ concentrations of the air supply and exhaust were measured by mass spectrometry. For each experiment, a gas analyser (ARCO SYSTEM Inc., ARCO-1000A-CH, Kashiwa, Japan) was initially calibrated using a certified gas mixture and atmospheric air. The flow rate exhausted from the chamber was measured by a pneumotachograph (ARCO SYSTEM Inc., FLB1, Kashiwa, Japan). The flow meter was calibrated before each measurement, and the flow rate was fixed in both chambers. VO₂ and VCO₂ were determined from the flow rate exhausted from the chamber and the concentrations of the inlet and outlet air of the chamber, respectively (Futami *et al.*, 2003). The values of VO₂ and VCO₂ were expressed under standard temperature, pressure and dry air conditions. EE was estimated from VO₂ and VCO₂ using Weir's equation (Weir, 1949). The accuracy and precision of the IHC for measuring EE, as evaluated by the alcohol combustion test, were $99.2 \pm 0.7\%$ in 6 h and $99.2 \pm 3.0\%$ in 30 min, respectively.

BMR was determined in the postabsorptive state (12 h or more after the last meal) and in a supine position. The measurement was performed using a human calorimeter from 0715 to 0800, or using a mask and Douglas bag for 20 min with a minute of intermission. The detailed protocol is described in Yamamura *et al.* (2003). To examine whether slightly different conditions caused a significant difference in the observed BMR, analysis of covariance with BMR as the dependent variable and gender, age, stature and body weight as covariates was employed. No significant effect of the measurement conditions was observed.

Anthropometric measurements. Body weight was measured to the nearest 0.1 kg and height to the nearest 0.1 cm using a stadiometer. Measurements were performed in light clothing and underwear. The light clothing was weighed and subtracted from the total to obtain body weight with minimal clothing (underwear). Triceps, subscapular and umbilicus skinfold thicknesses were measured by two trained observers using a standardized protocol and a Holtain caliper (Holtain Ltd, Crosswell, Crymch, Dyfed, UK). There were no significant inter-observer differences in any of the measurements. BMI was calculated as weight (kg)/height (m²).

Tahara's equations (2002) for Japanese adults were used to predict body density from the sum of skinfold thickness measurements, and the Brozek equation (1963) was used to estimate body fat percentage (% FAT) from the predicted body density.

Statistics. Results are presented as the mean \pm standard deviation (s.d.). The relationship between SMR, BMR and body size and composition measurements was examined using Pearson's correlation. Age and sex were adjusted for in

partial correlation analysis. Stepwise multiple regression analysis was done to examine the predictors of metabolic rate. Statistical significance was set at $P < 0.05$ for all predictors. Gender was treated as a binomial variable (0 for male subjects, 1 for female subjects). The % difference in prediction error was calculated as the residual divided by the measured value for each subject. Statistical analyses were performed using SPSS for Windows (version 11.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Statistical significance was set at $P < 0.05$.

Results

The study population consisted of adult Japanese men ($n = 71$) and women ($n = 66$) of a wide range of ages (Table 1). The average height and weight of subjects in each age and gender group were similar to national standard heights and weights (The National Nutrition Survey in Japan, 2002). Although the age range was wide, variability in body size and composition was small.

BMR and SMR were highly correlated (Figure 1). The SMR/BMR ratio was 1.01 ± 0.09 (range 0.82–1.42) for SMR-8h and 0.94 ± 0.07 (range 0.77–1.23) for SMR-3h, which was not gender sensitive. On the other hand, the ratios (SMR-8h/BMR and SMR-3h/BMR) were weakly correlated with age ($r = 0.38$ and 0.36 , respectively). SMR-3h was significantly lower than SMR-8h and BMR, whereas SMR-8h was not significantly different from BMR. In most cases, SMR-3h was observed during the latter part of the sleep cycle (2300–0700), around 0300–0600. The phase of the menstrual cycle did not affect BMR and SMR in women (data not shown).

Metabolic rate was strongly correlated with body size and body composition irrespective of age and gender. Metabolic rate was positively correlated with body weight ($r = 0.83$, 0.85 and 0.79 for SMR-8h, SMR-3h and BMR, respectively). The strongest correlation of metabolic rate was with fat-free mass ($r = 0.85$, 0.87 and 0.79 , for SMR-8h, SMR-3h and BMR, respectively) after adjustment for age and gender.

Table 1 Basic characteristics, body size, composition and metabolic rates

	Males (71) Mean \pm s.d.	Females (66) Mean \pm s.d.
Age (years)	36 \pm 16	37 \pm 16
Stature (cm)	170.5 \pm 7.1	159.1 \pm 5.6
Weight (kg)	68.3 \pm 11.5	54.0 \pm 9.2
BMI (kg/m ²)	23.4 \pm 3.1	21.4 \pm 3.3
Fat mass (kg)	12.9 \pm 6.4	14.2 \pm 5.2
Fat-free mass (kg)	55.3 \pm 7.4	39.8 \pm 5.1
SMR-8h (MJ/day)	6.376 \pm 0.749	4.929 \pm 0.607
SMR-3h (MJ/day)	5.954 \pm 0.736	4.552 \pm 0.548
BMR (MJ/day)	6.368 \pm 0.916	4.837 \pm 0.569

Abbreviations: BMI, body mass index; BMR, basal metabolic rate; s.d., standard deviation; SMR, sleeping metabolic rate.

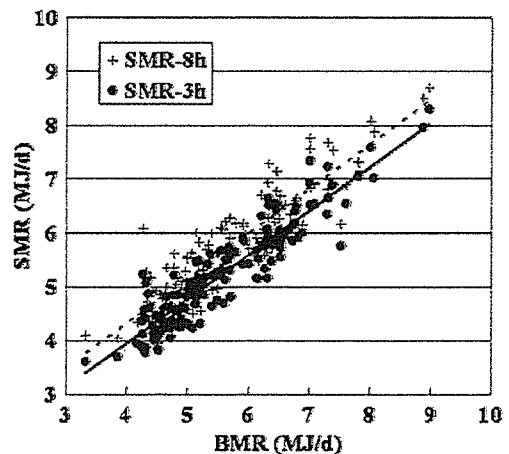


Figure 1 Relationship between SMR and BMR. Regression lines between SMR-8h (dashed line) or SMR-3h (straight line) and BMR.

Table 2 Stepwise regression of BMR, SMR-8h and SMR-3h with body size measurements

Outcome	Predictors	Un std coefficients		Change in % R ²	SEE (MJ/day)
		B	Standard error		
SMR-8h	Constant	1.2142	1.1912		
	Weight	0.0498***	0.0038	75.9	0.494
	Gender	-0.5590***	0.0967	8.2	0.402
	Stature	0.0146*	0.0071	1.1	0.389
	Age	-0.0046*	0.0021	0.4	0.385
	Total			85.6	
SMR-3h	Constant	0.1004	1.0439		0.000
	Weight	0.0469***	0.0033	74.9	0.456
	Gender	-0.4925***	0.0845	9.6	0.368
	Stature	0.0197**	0.0063	2.5	0.343
	Age	-0.0050**	0.0021	0.8	0.339
	Total			87.8	
BMR	(Constant)	0.1238	1.4054		0.000
	Weight	0.0481***	0.0046	65.4	0.619
	Stature	0.0234**	0.0084	11.8	0.510
	Age	-0.0138***	0.0025	2.9	0.485
	Gender	-0.5473***	0.1138	3.3	0.448
	Total			83.4	

Abbreviations: BMR, basal metabolic rate; SMR, sleeping metabolic rate; SEE, standard error of estimate; Un std coefficients, unstandardized coefficients. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

A stepwise multiple regression analysis of predictors of metabolic rate (including height, weight, age and gender) revealed that weight was the strongest predictor of metabolic rate (Table 2). Age, gender and height were additional predictors. These models accounted for 85.6% of the variance in SMR-8h (prediction error 6.7%) and 87.8% of the variance in SMR-3h (prediction error 6.2%). Adjustment for the predictors reduced the variance from 0.996 MJ/day to 0.385 MJ/day (238–92 kcal/day) in SMR-8h and 0.958–0.339 MJ/day (229–81 kcal/day) in SMR-3h. Adjustment for all predictors accounted for 83.4% of the variance in BMR

Table 3 Stepwise regression of BMR, SMR-8h and SMR-3h with body composition measurements

Outcome	Predictors	Un std coefficients		Change in % R ²	SEE (MJ/day)
		B	Standard error		
SMR-8h	Constant	1.8175	0.3678		
	Fat-free mass	0.0812***	0.0054	86.3	0.368
	Fat mass	0.0213***	0.0067	0.9	0.360
	Gender	-0.2125*	0.1063	0.4	0.356
				87.6	
SMR-3h	Constant	0.8878	0.1372		
	Fat-free mass	0.0874***	0.0029	88.3	0.331
	Fat mass	0.0151**	0.0046	0.8	0.318
				89.1	
BMR	Constant	2.3958	0.5602		
	Fat-free mass	0.0787***	0.0079	82.2	0.460
	Age	-0.0109***	0.0029	0.6	0.452
	Fat mass	0.0268**	0.0088	0.5	0.448
	Gender	-0.3314*	0.1477	0.6	0.439
				84.0	

Abbreviations: BMR, basal metabolic rate; SMR, sleeping metabolic rate; SEE, standard error of estimate; Un std coefficients, unstandardized coefficients. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

(prediction error 7.3%) and reduced the variance from 1.084 MJ/day to 0.448 MJ/day (259–107 kcal/day).

Fat-free mass was the strongest predictor of metabolic rate in stepwise multiple regression analysis using metabolic rate as the independent variable and fat mass, fat-free mass, age and gender as the dependent variables (Table 3). Fat-free mass, fat mass and gender accounted for 86.7% of the total variation in SMR-8h (difference for prediction error 6.2%). Adjustment for the predictors reduced variance in SMR-8h from 0.996 MJ/day to 0.356 MJ/day (238–85 kcal/day). For SMR-3h, fat-free mass and fat mass accounted for 89.1% of the variation (difference in prediction error 5.9%) and adjustment for the predictors reduced variance in SMR-3h from 0.958 to 0.318 MJ/day (229–76 kcal/day). Adjustment for fat-free mass, fat mass, age and gender predicted 84.0% of the variance in BMR (difference in prediction error 7.6%) and reduced the variance from 1.084 MJ/day to 0.439 MJ/day (259–105 kcal/day).

The mean difference between predicted BMR using FAO/WHO/UNU equations and observed BMR was $+0.519 \pm 0.494$ MJ/day ($+0.565 \pm 0.556$ MJ/day for male subjects and $+0.469 \pm 0.414$ MJ/day for female subjects).

Discussion

This study was performed to develop predictive equations for SMR-3h and SMR-8h that predict SMR with much lower prediction errors than previously reported (Tataranni and Ravussin, 1995; Weyer *et al.*, 1999; Nielsen *et al.*, 2000; Henry, 2005). The findings indicate that interindividual variability in SMR after adjustment for body size or body composition is much smaller than expected, at least in healthy Japanese adults.

BMR and SMR are measured in a similar manner, but BMR is slightly larger as SMR is measured only in part during sleep (SMR/BMR, 0.88–0.95) (Garby *et al.*, 1987; Goldberg *et al.*, 1988; Seale and Conway, 1999; Zhang *et al.*, 2002; Kumahara *et al.*, 2004). The SMR-3h/BMR ratio in this study was in good agreement with those previous values, whereas SMR-8h was found to be slightly higher than the BMR. In the first hour of sleep, the metabolic rate was higher than BMR by an average of 20%, probably due to sleeping status and diet-induced thermogenesis. In addition, the metabolic rate during periods when body movements were observed using a radar system was excluded from the SMR calculation in some of the previous studies. Thus, evaluation methods appear to affect the slight discrepancy of the ratio between studies. BMR is measured in the morning hours when heat production increases after awakening (Garby *et al.*, 1987) and causes gradual increases in resting EE (Kashiwazaki, 1990). BMR and SMR (although measured in a similar manner) thus might represent different thermogenic processes.

Metabolic rates can be predicted using equations that involve body size and composition measurements. Many prediction equations are available for estimating metabolic rates, but their applicability to other ethnic groups is uncertain (Hayter and Henry 1993; Frankenfield *et al.*, 2005). In the present study, FAO/WHO/UNU equations overestimated BMR by more than 0.45 MJ/day on average, with a prediction error comparable to previously published reports.

We developed two types of equations using stepwise regression to predict metabolic rates in adult Japanese subjects ranging widely in age. The first equation uses weight and height, which are simple body size measurements that can be easily obtained in clinical as well as epidemiological settings. In this equation, body weight accounted for 65–75% of the variation in metabolic rates. Age, gender and height were additional predictors. The second equation uses fat-free mass, which is a more valid predictor than body mass of resting metabolic rate (RMR) because it is associated with a much higher rate of resting EE (Elia, 1992). Sophisticated methods can be used to provide more insight into the metabolically active components of fat-free mass, such as the liver, heart and kidney, in relation to energy metabolism (Muller *et al.*, 2002), but their applicability to epidemiological studies is restricted. Anthropometry, a relatively simpler technique used to predict RMR, has an accuracy rate similar to that of more complicated techniques (Van der Ploeg *et al.*, 2001). In our equations, fat-free mass (measured using skinfold thickness) accounted for 84–89% of the variation in SMR, which is better than previously reported (Ravussin *et al.*, 1990; Toubro *et al.*, 1996; Weyer *et al.*, 1999). In addition, results for the BMR equations are in good agreement with those of others (Cunningham, 1991; Ravussin and Bogardus, 1989; Tataranni and Ravussin, 1995). After fat-free mass, fat mass predicted metabolic rate, but accounted for less than 1% of variation in SMR. The relationship of age and gender with

metabolic rates disappeared after adjustment for fat mass and fat-free mass, except for SMR-8h. Similar results have been reported showing that the effect of age and gender on metabolic rates is mainly due to fat-free mass (Ravussin *et al.*, 1986; Astrup *et al.*, 1990; Cunningham, 1991; Nelson *et al.*, 1992) and fat mass (Dionne *et al.*, 1999).

Relatively smaller variations in body size and composition are observed in Japanese than in Caucasians or African Americans. Although the subjects varied widely in age (20–50 years), the variance (s.d.) in their weights were 11.5 kg (male subjects) and 9.2 kg (female subjects). These variations were much lower than reported in other studies. For example, although Weyer *et al.* (1999) worked with subjects with a smaller age range than in this study, the s.d. values of their weights were 25.9 kg (male subjects) and 26.3 kg (female subjects). A larger percentage of explained variance in metabolic rate calculated from an equation can be due to large variance in the body size of the study subjects. The percentage of explained variance thus does not necessarily indicate better prediction. Therefore, the two measures used to compare prediction errors were standard error of estimate (SEE) and percentage difference in the residuals. The SEE of both equations was lower than that reported by other studies, even those using sophisticated techniques.

The smaller prediction error indicates that variation in minimum metabolic rate (measured as SMR or BMR after adjusting for body size or composition) may be smaller than previously indicated. In general, the reported interindividual CV is about 8–13% (Shetty *et al.*, 1996, Muller *et al.*, 2004). For our SMR equations, the SEE was much lower than the SEE reported by Weyer *et al.* (1999), which was based on fat-free mass measured using sophisticated methods. In Weyer's equation, age, impaired glucose tolerance and waist-to-thigh ratio were additional predictors. In the equation, the SEE was 0.611 MJ/day (146 kcal/day) and fat-free mass accounted for 0.808 MJ/day (193 kcal/day) of the total 1.347 MJ/day (322 kcal/day) variance. Similarly, the new Oxford equations (Henry, 2005) for prediction of BMR in tropical regions have reported an SEE of 0.5–0.7 MJ/day in age group and gender-specific equations, which is higher than our SMR equations. Tataranni and Ravussin (1995) also reported a higher SEE (0.703 MJ/day (168 kcal/day)) in BMR prediction equations, with fat-free mass accounting for 0.268 MJ/day (64 kcal/day) of the total 1.318 MJ/day (315 kcal/day) variance. A similarly high SEE of 0.753 MJ/day (180 kcal/day) in men and 0.628 MJ/day (150 kcal/day) in women was reported by Nielsen *et al.* (2000), who developed equations that used dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) measurements of fat-free mass. Bader *et al.* (2005) reported that s.d. of BMR adjusted for fat-free mass was from 0.81 to 0.92 MJ/day. Thus, most researchers have indicated larger interindividual variability in SMR or BMR compared to the SEE in the present study, particularly for SMR. Although the reasons are unclear, ethnicity may be an explanation. In addition, measurement of SMR using a human calorimeter is very

accurate, particularly prolonged measurements ($99.2 \pm 0.7\%$ in 6 h), and may have contributed to the lower prediction error in our study.

One of the limitations of the present study was that a different method was used for measurement of BMR. This might partially explain why the SEE was greater for the BMR equation than the SMR equation. However, the study by Soares *et al.* (1989) showed that the energy outputs were comparable using different methods (e.g., whole-body indirect calorimetry) to measure metabolic rates. In the present study, the method used for measurement of BMR was also found to have no statistically significant effect on the metabolic rates and s.d. values for the difference between different BMR measurement groups were within 1%. Another limitation was the method of determining body composition using skinfold thicknesses. More sophisticated measures of body composition would have produced better results.

In conclusion, our equations, which use body size and body composition, are useful for estimating metabolic rates in the Japanese population. The prediction error of SMR was smaller than reported for BMR or SMR, which indicates small interindividual variability in SMR after adjustment for body size or body composition. When metabolic rates are needed to estimate 24 h EE or physical activity level, prediction equations of SMR (or, if necessary, the SMR/BMR ratio) should be used rather than BMR because SMR correlates very well with BMR and the SMR/BMR ratio is fairly constant.

Acknowledgements

We thank the study subjects for their cooperation. We thank the members of the National Institute of Health and Nutrition, especially Dr Hiroshi Kashiwazaki, Dr Chiaki Tanaka, Dr Jun Futami, Dr Jun Oka, Ms Taishi Midorikawa, Dr Takashi Kumae, Kayo Uozumi, Yuko Yano and Hiroko Kogure for their help in data acquisition and analyses. This work was performed as part of the Surveys and Research on Energy Metabolism of Healthy Japanese by the National Institute of Health and Nutrition (Project leader: I Tabata).

References

- Astrup A, Astrup A, Thorbek G, Lind J, Isaksson B (1990). Prediction of 24-h energy expenditure and its components from physical characteristics and body composition in normal-weight humans. *Am J Clin Nutr* 52, 777–783.
- Bader N, Boser-Westphal A, Dilba B, Muller MJ (2005). Intra- and interindividual variability of resting energy expenditure in healthy male subjects – biological and methodological variability of resting energy expenditure. *Br J Nutr* 94, 843–849.
- Brozek J, Grande F, Anderson JT, Keys A (1963). Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumptions. *Ann NY Acad Sci* 110, 113–140.
- Case KO, Braehler CJ, Heiss C (1997). Resting energy expenditures in Asian women measured by indirect calorimetry are lower than

- expenditures calculated from prediction equations. *J Am Diet Assoc* 97, 1288–1292.
- Cunningham JJ (1991). Body composition as a determinant of energy expenditure: a synthetic review and a proposed general prediction equation. *Am J Clin Nutr* 54, 963–969.
- Dionne I, Despres JP, Bouchard C, Tremblay A (1999). Gender difference in the effect of body composition on energy metabolism. *Int J Obes Relat Metab Disord* 23, 312–319.
- Elia M (1992). Organ tissue contribution to metabolic rate. In: Kinney JM, Tucker HN (eds.) *Energy Metabolism: Tissue Determinants and Cellular Corollaries*. New York: Raven Press, 61–79.
- FAO/WHO/UNU (1985). Energy and protein requirements. *Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation* WHO Tech Rep Ser 724, 1–206.
- Frankenfield D, Roth-Yousey L, Compher C (2005). Comparison of predictive equations for resting metabolic rate in healthy nonobese and obese adults: a systematic review. *J Am Diet Assoc* 105, 775–789.
- Futami J, Tanaka S, Yamamura C, Oka J, Ishikawa-Takata K, Kashiwazaki H (2003). Measurement of energy expenditure by whole-body indirect human calorimeter – evaluation of validity and error factors – nippon eiyo shokuryo gakkaiishi. *J Jpn Soc Nutr Food Sci* 56, 229–236.
- Garby L, Kurzer MS, Lammert O, Nielsen E (1987). Energy expenditure during sleep in men and women: evaporative and sensible heat losses. *Hum Nutr Clin Nutr* 41, 225–233.
- Goldberg GR, Prentice AM, Davies HL, Murgatroyd PR (1988). Overnight and basal metabolic rates in men and women. *Eur J Clin Nutr* 42, 137–144.
- Hayter JE, Henry CJ (1993). Basal metabolic rate in human subjects migrating between tropical and temperate regions: a longitudinal study and review of previous work. *Eur J Clin Nutr* 47, 724–734.
- Henry CJ (2005). Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr* 8, 1133–1152.
- Kashiwazaki H (1990). Seasonal fluctuation of BMR in populations not exposed to limitations in food availability: reality or illusion? *Eur J Clin Nutr* 44 (Suppl 1), 85–93.
- Kumahara H, Yoshioka M, Yoshitake Y, Shindo M, Schutz Y, Tanaka H (2004). The difference between the basal metabolic rate and the sleeping metabolic rate in Japanese. *J Nutr Sci Vitaminol* 50, 441–445.
- Liu HY, Lu YF, Chen WJ (1995). Predictive equations for basal metabolic rate in Chinese adults: a cross-validation study. *J Am Diet Assoc* 95, 1403–1408.
- Muller MJ, Bosity-Westphal A, Klaus S, Kreymann G, Luhrmann PM, Neuhauser-Berthold M et al. (2004). World Health Organization equations have shortcomings for predicting resting energy expenditure in persons from a modern, affluent population: generation of a new reference standard from a retrospective analysis of a German database of resting energy expenditure. *Am J Clin Nutr* 80, 1379–1390.
- Muller MJ, Bosity-Westphal A, Kutzner D, Heller M (2002). Metabolically active components of fat-free mass and resting energy expenditure in humans: recent lessons from imaging technologies. *Obes Rev* 3, 113–122.
- Murgatroyd PR, Shetty PS, Prentice AM (1993). Techniques for the measurement of human energy expenditure: a practical guide. *Int J Obes Relat Metab Disord* 17, 549–568.
- Nelson KM, Weinsier RL, Long CL, Schutz Y (1992). Prediction of resting energy expenditure from fat free mass and fat mass. *Am J Clin Nutr* 56, 848–856.
- Nielsen S, Hensrud DD, Romanski S, Levine JA, Burguera B, Jensen MD (2000). Body composition and resting energy expenditure in humans: role of fat, fat-free mass and extracellular fluid. *Int J Obes Relat Metab Disord* 24, 1153–1157.
- Popkin BM, Doak CM (1998). The obesity epidemic is a worldwide phenomenon. *Nutr Rev* 56, 106–114.
- Ravussin E, Bogardus C (1989). Relationship between genetics, age, and physical fitness to daily energy expenditure and fuel utilization. *Am J Clin Nutr* 49, 968–975.
- Ravussin E, Lillioja S, Anderson TE, Christin L, Bogardus C (1986). Determinants of 24-hour energy expenditure in man: methods and results using a respiratory chamber. *J Clin Invest* 78, 1568–1578.
- Ravussin E, Zurlo F, Ferraro R, Bogardus C (1990). Energy expenditure in man: determinants and risk factors for body weight gain. In: Omomura Y, Tarui S, Inoue S, Shimazu T (eds.) *Proceedings in Obesity Research 1990: Proceedings of the 6th International Congress on Obesity*. Libbey: London, pp 175–182.
- Schrauwen P, van Marken Lichtenbelt WD, Westerterp KR (1997). Energy balance in a respiration chamber: individual adjustment of energy intake to energy expenditure. *Int J Obes Relat Metab Disord* 21, 769–774.
- Seale JL, Conway JM (1999). Relationship between overnight energy expenditure and BMR measured in a room-sized calorimeter. *Eur J Clin Nutr* 53, 107–111.
- Shetty PS, Henry CJ, Black AE, Prentice AM (1996). Energy requirements of adults: an update on basal metabolic rates (BMRs) and physical activity levels (PALs). *Eur J Clin Nutr* 50, S11–S23.
- Soares MJ, Sheela ML, Kurpad AV, Kulkarni RN, Shetty PS (1989). The influence of different methods on basal metabolic rate measurements in human subjects. *Am J Clin Nutr* 50, 731–736.
- Tahara Y, Moji K, Aoyagi K, Tsunawake N, Muraki S, Mascie-Taylor CG (2002). Age-related pattern of body density and body composition of Japanese men and women 18–59 years of age. *Am J Human Biol* 14, 743–752.
- Tataranni PA, Ravussin E (1995). Variability in metabolic rate: biological sites of regulation. *Int J Obes* 19, S102–S106.
- The National Nutrition Survey in Japan (2002): Ministry of Health, Labor and Welfare, Japan.
- Toubro S, Sørensen TIA, Rønn B, Christensen NJ, Astrup A (1996). Twenty-four-hour energy expenditure: the role of body composition, thyroid status, sympathetic activity, and family membership. *J Clin Endocrinol Metab* 81, 2670–2674.
- Van der Ploeg GE, Gunn SM, Withers RT, Modra AC, Keeves JP, Chatterton BE (2001). Predicting the resting metabolic rate of young Australian males. *Eur J Clin Nutr* 55, 145–152.
- Weir JB (1949). New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109, 1–9.
- Westerterp-Plantenga MS, van Marken Lichtenbelt WD, Strobbe H, Schrauwen P (2002). Energy metabolism in humans at a lowered ambient temperature. *Eur J Clin Nutr* 56, 288–296.
- Weyer C, Snitker S, Rising R, Bogardus C, Ravussin E (1999). Determinants of energy expenditure and fuel utilization in man: effects of body composition, age, sex, ethnicity and glucose tolerance in 916 subjects. *Int J Obesity* 23, 715–722.
- World Health Organization (1998). A World Health Organization consultation on obesity. *Obesity Preventing and Managing the Global Epidemic*. WHO: Geneva.
- Yamamura C, Kashiwazaki H (2002). Factors affecting the post-absorptive resting metabolic rate of Japanese subjects: reanalysis based on published data. *Jpn J Nutr Diet* 60, 75–83.
- Yamamura C, Tanaka S, Futami J, Oka J, Ishikawa-Takata K, Kashiwazaki H (2003). Activity diary method for predicting energy expenditure as evaluated by a whole-body indirect human calorimeter. *J Nutr Sci Vitaminol* 49, 262–269.
- Zhang K, Sun M, Werner P, Kovera AJ, Albu J, Pi-Sunyer FX et al. (2002). Sleeping metabolic rate in relation to body mass index and body composition. *Int J Obes* 26, 376–383.

【教育講座】

間接熱量測定法による1日のエネルギー消費量の評価

田 中 茂 穂

EVALUATION OF TOTAL ENERGY EXPENDITURE USING INDIRECT CALORIMETRY

SHIGEHO TANAKA

現在、エネルギー消費量を推定するのに、いくつかの方法が利用されている。しかし、特に「1日当たりのエネルギー消費量」(total energy expenditure: TEE)については、必ずしもそれらの精確度や特徴を十分に吟味して使用されているわけではないようである。そこで、本稿では、間接法に基づく TEE の測定・推定法について述べる。

I. 直接法と間接法

A. 直接法

消費されたエネルギーは熱となって放散されるため、その熱量を直接測ればよい。代表的な直接法の測定機器である Atwater-Rosa-Benedict human calorimeter の場合、測定室内の被験者が放射する熱を、室内に張りめぐらされた管を流れる水の温度から測定する。また、室内で発生した水蒸気量から呼気等の水蒸気の気化熱を測定するとともに、体温の変化も考慮して、エネルギー消費量を測定する。

このように、装置が大がかりで、活動内容も限定されるため、最近はほとんど使用されていない。

B. 間接法

エネルギーを生み出す際、食物からとりこんだ栄養素が酸素と反応(消費)し、二酸化炭素を産生する。これらの化学式に基づいて、酸素摂取量と二酸化炭素産生量、および尿中窒素量が正確に得られれば、多くの場合1%程度かそれ以下の誤差で、エネルギー消費量が推定できる¹⁾。例えば、最もよく利用される Weir²⁾の式は、以下の通りである。

$$EE(\text{kcal}) = 3.941 \times \text{酸素摂取量} + 1.106 \times \text{二酸化炭素産生量} - 2.17 \times \text{尿中窒素排泄量}$$

また、三大栄養素のうち、摂取エネルギーに占めるたんぱく質の割合は比較的安定している。そこで、たんぱく質の占める割合を12.5%と仮定すると、先の Weir の式は以下ようになる。

$$EE(\text{kcal}) = 3.9 \times \text{酸素摂取量} + 1.1 \times \text{二酸化炭素産生量}$$

たんぱく質の占める割合が20%を大きく越えるような極端に偏った食事であったり、激しい運動中に限定したりしなければ、尿中窒素排泄量を考慮しないことによる誤差の影響は1%未満であり、呼気分析だけでも十分に正確に測定することができる。

間接法は、直接法と比べて簡便に実施できる上に、ズレの小さい仮定に基づいており、直接法による測定と非常によく一致する。しかも、エネルギー基質の評価が可能である。したがって、しっかりとした呼気分析が行われるのであれば、非常に正確かつ有用な方法である。

II. TEE の内訳

TEE の構成要素の標準的な割合やその変動について、表1にまとめた。値は、体重60kg程度の、標準的な日本人の体格をもとに試算したものである。

基礎代謝量(basal metabolic rate: BMR)は、一般に TEE の中で、最も大きな構成成分である。標準

(独)国立健康・栄養研究所 健康増進プログラム
(エネルギー代謝プロジェクトリーダー)
〒162-8636 東京都新宿区戸山1-23-1

National Institute of Health and Nutrition, Health Promotion and
Exercise Program, Project for Energy Metabolism (Project Leader)

表1. 総エネルギー消費量の内訳とバラツキ

成分	割合 (%)	個人差 (kcal/日)	備 考
基礎代謝量	60	±100	割合は大きい、体格でおおよそ決定
食事誘発性体熱産生	10	± 50	割合も変動幅も小さいが、相対的な測定誤差が大きい
運動	0~10	± 50~ 100	日本人で週2日以上運動を実施している者は30%弱
運動以外の身体活動	20~30	±200~ 300	PALの大きな個人差(1.4~2.2)を生じる主な原因

数値は、標準的な体格の日本人(スポーツ選手等は除く)における、おおよその推定値。個人差は、標準偏差あるいは推定の標準誤差からの概算

的な日本人における身体活動レベル(physical activity level: PAL=総エネルギー消費量÷BMR)は1.75程度と考えられている³⁾ので、逆算すると、BMRはTEEの約60%弱(=1÷1.75)となる。しかし、性・年齢や体重などからBMRを推定する場合、国際的に用いられている推定式でも⁴⁾、日本の基礎代謝基準値でも⁵⁾、推定誤差はおおよそ±8~13%程度である。除脂肪量あるいは各臓器重量から推定できる場合は、更に推定誤差が小さくなる⁶⁾。したがって、BMRは、TEEに占める割合や体格による変動幅は大きいものの、体格が決まれば、個人差はそれほど大きいものではないと考えられる。

食事誘発性体熱産生については、これまでの知見によると、TEEの約10%程度と、絶対量が小さい⁷⁾。そのため、個人間の変動係数は約20%程度と大きな値が報告されているものの⁸⁾、TEEの中では、相対的に小さな変動にしかならないと考えられる。

運動については、どこまでを運動ととらえるかによって、値が大きく異なる。国民健康・栄養調査⁹⁾によると、運動の定義が示されていないものの、1回30分以上、週2日以上、1年以上の運動を続けている人の割合が国民の30%に満たない。すなわち、70%以上の方は、運動習慣を有していないことになる。一方、週2日以上運動している人でも、運動していない日が週に数日あるはずである。また、運動している日について考えると、例えば速歩の場合、安静時からの付加エネルギーは、30分間で100kcal弱、1時間で200kcal弱である。したがって、TEEに占める運動の割合は、運動している日でさ

え10%以下、多くの場合は5%以下であると考えられる。

平均60%程度のBMRと約10%の食事誘発性体熱産生、および多くの場合0~10%程度と考えられる運動を除いた残り20~30%は、運動以外の身体活動(nonexercise activity thermogenesis: NEAT)である¹⁰⁾。NEATは、姿勢の保持(座位や立位を含む)や、掃除・洗濯を含む家事、買い物・通勤などにおける歩行、庭仕事などの余暇活動、仕事における荷物の運搬など、低~中強度を中心に様々な活動が含まれる。しかし、運動をしていない人を中心とした一般の集団でも、PALの標準偏差は0.2を越える(~0.3)。この値は、食事誘発性体熱産生や運動の個人間変動、および測定誤差の影響も受けるが、先に述べた点を考えると、主にNEATによるものであると考えられる。標準的な体格(男女平均してBMR≒1400kcal/日)であれば、±200~300kcalに及ぶ。

したがって、TEEを正確に推定するためには、BMRの測定・推定に加え、NEATをいかに評価するかが、非常に大きな問題となる。

Ⅲ. 1日のエネルギー消費量の測定法

短時間の場合、マスクを装着し、ダグラスバッグまたは携帯式の代謝測定装置を使用して測定できる。しかし、食事中を含むいくつかの活動の測定は不可能である。また、不快感や見た目の違和感などから、外出や一部の日常活動が制限される。したがって、長時間連続して測定することは、現実的には

不可能である。

1日あるいはそれ以上の長時間にわたるエネルギー消費量を推定するには、以下のような方法がある。

- 1) エネルギー代謝測定室
- 2) 二重標識水法
- 3) 心拍数法
- 4) 加速度計法
- 5) 生活活動記録に基づく要因加算法

「エネルギー代謝測定室」(ヒューマンカロリメーターあるいはメタボリックチャンバー)とは、人が数時間～数日間生活できる部屋(机やベッド、トイレなど)(図1)と、ガス濃度や流量等の測定機器を備えた設備である¹¹⁾。被験者は、滞在中に酸素を消費し二酸化炭素を排出するが、それによる室内の濃度変化からエネルギー消費量を測定する間接法によるものがほとんどである。測定機器を含む設備全体が十分に管理されれば、既存の設備の中では、数時間に及ぶエネルギー消費量を、最も正確に測定することができる。例えば、国立健康・栄養研究所のエネルギー代謝測定室の場合、6時間のアルコール燃焼試験の結果は、エネルギー消費量の真値に対して $-0.2 \pm 0.5\%$ である。

ただし、生活の場所が室内に限定されるため、個人の生活実態を反映した日常のTEEとは異なる。したがって、実験的に再現したある条件下(活動内容、食事、その他の室内環境など)でのエネルギー消費量を測定したり、他の方法の妥当性の検討に利用される。

二重標識水(doubly labeled water : DLW)法は、 ^2H と ^{18}O を摂取し、1週間～2週間程度の期間にわたる二酸化炭素産生量の推定値と food quotient から、平均のエネルギー消費量を推定する^{11,12)}。したがって、この方法も、いわゆる「間接法」の一種である。

DLW法は、測定機器を携帯する必要がなく、測定期間中の制限がほとんどない。しかし、二重標識水が非常に高価で、しかも入手しにくいこと、安定同位体の濃度を正確に測定するのは容易ではないことから、ごく限られた研究グループがこの方法を用いた研究を実施しているに過ぎない。

また、サンプルの分析誤差に加え、呼吸商や水分代謝について、いくつかの仮定をおいてエネルギー

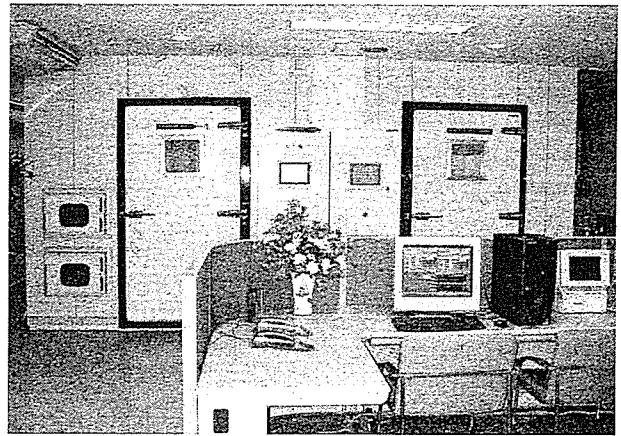


図1. エネルギー代謝測定室の外観と室内

消費量を推定している^{11,12)}。したがって、日常生活におけるTEEを測定する方法として最も信頼のできる値が得られるとされてはいるものの、TEEの推定精度は、エネルギー代謝測定室を基準とした場合、確度・精度ともに $\pm 5\%$ 程度は覚悟する必要がある(表2)。

これら2つの方法は、酸素摂取量と二酸化炭素産生量の両方またはいずれかを測定しているので間接法であるが、3)～5)は、酸素摂取量を“推定”していることから、いわば「間接法の間接法」と言える。

IV. 運動以外の身体活動の重要性

このように、TEEを測定・推定する方法はいくつか存在する。しかし、エネルギー代謝測定室や二重標識水法を妥当基準とすると、簡便な方法は、一般に非常に大きな誤差を有する¹³⁾。日本人を対象とした結果をまとめたのが、表3である。

米国/カナダの食事摂取基準¹⁴⁾においては、二重

表2. DLW法の精確度

	Accuracy	Precision
Schoeller(1984)	+5.9%	6.8%
Speakman(1997)	+2.0%	2.0%
Schoeller(1986)	+5.0%	9.0%
Kuczmarski(1994)	+1.0%	7.0%
Roberts(1986)	-1.4%	4.8%
Jones(1987)	-0.9%	6.2%
Westerterp(1988)	+1.4%	3.9%
Jones(1988)	-1.0%	7.0%
Seale(1989)	-8.7%	12.9%
Hoyt(1991)	-2.5%	6.9%
Pullicino(1993)	+1.8%	4.6%
Speakman(1993)	+7.0%	16.8%
Speakman(1993)	-0.4%	9.3%
Matthews(1995)	-3.1%	7.9%

(4人以上を対象にヒューマンカロリメーターと比較した結果)

標識水法に基づいて TEE の推定式を提示している。そこでは、PAL が1.6~1.9(代表値:1.75)の場合を“Active”としているが、その最も簡単な生活活動例として、

- 着替え・片付けなどの必須行動: 2時間
- 約 107 m/分の歩行: 30分
(普通歩行なら1時間弱に相当)

という、ほぼ最低強度の日常生活(推定PAL≒1.49)に、

- 25分の自転車こぎ
- 40分のテニス

を加えて、PAL が約1.75になるとしている。毎日これだけの運動を含む生活をしている人は少数派だと考えられるが、1.75という PAL は、少なくとも日本人³⁾、恐らく欧米人¹⁵⁾においても、標準的な値である。

ちなみに、エネルギー代謝測定室で運動を含まない生活を送ると、PAL は1.3~1.4程度、1時間程度の歩行に相当する活動を含む生活では約1.5である¹⁶⁾。この値は、先に述べた、米国/カナダの DRI における推定値とほぼ一致する。更に1.75程度の PAL となるようにするには、約 80 m/分程度の普通歩行を約 3 時間程度行う必要がある¹⁷⁾。しかし、1日当たりの歩数は、平均して6,000~9,000歩程度である。10分=1,000歩という単純な計算が当てはまるのであれば、1日に歩いている時間は1~1.5時間程度にしかならないこととなる。したがって、必須活動と歩行以外に、残りの1.5~2時間程

表3. エネルギー消費量測定の精確度—日本人での検討結果—

文献	対象者	PAL	活動記録	HR	ライフコーダ
基準:DLW法					
海老根 (2002)	男子学生	1.63	-92±483 (-3.9%)	+40±542 (+3.0%)	-107±271 (-7.1%)
Rafamantanantsoa (2002)	中年男性	1.85	-335±289 (-12.2%)	+57±603 (+2.0%)	-542±249 (-20.7%)
東野 (2003)	消防士	2.2	-306±301 (+6.3%)		-1478±522 (-36.8%)
彭 (2004)	中年女性 (非運動群)	1.60	63±175 (+0.3%)		-246±196 (-13.0%)
彭 (2004)	中年女性 (テニス群)	2.06	-166±238 (-6.5%)		-649±345 (-25.3%)
引原 (2005)	高校野球	2.66	-686±332 (-13.9±6.5%)	+1539±1168 (+31.6±23.9%)	-1743±275 (-35.3±3.6%)
基準:ヒューマンカロリメーター					
Yamamura(2003)	成人男女	1.51	-54±162		
Kumahara (2004)	成人男女				-168±120 (-8.1±5.4%)
田中(2005)	成人男女	1.43	(+5.8±8.7%)		(+2.8±6.3%)

(表中の数字は各方法—基準とした方法(kcal/日(%)))

度の普通歩行に相当するだけの身体活動があるはずである。現在市販されている歩数計タイプの加速度計を用いた場合、TEEが、それぞれの対象で平均して10~40%近くも過小評価される(表3)のは、こうしたことが主な理由であると考えられる。

最近、こうした日常生活の様々な活動(life-style activity)を評価することの重要性が少しずつ認識されるようになっており、加速度計などによる評価法が検討されつつある¹⁸⁾。

V. エネルギーバランスの評価

人はエネルギーバランスをかなり厳密に調整している。例えば、毎日3%のエネルギーバランスのずれが続くと、1年で体重が約3~4kg変化するはずである。

表3のように、加速度計法や要因加算法は、個人による差はもちろん、平均としても真値から大きくずれることが多い(しばしば10%以上)。ゴールドスタンダードとされるDLW法でさえ、約5%かそれ以上の誤差があり、人のエネルギーバランスの調整能力を下回る精度しか有していない。日常のエネルギー摂取量については、更に真値からのずれが大きい(しばしば20%以上)^{19,20)}。

したがって、エネルギー消費量および摂取量の測定値だけからエネルギーバランスを評価できるような場面は、極端な過食・減食実験を除くと、ほとんどない。現実的には、例えばStubbs et al.²¹⁾のように、食事や運動などを比較的大きく変えた結果として、エネルギー代謝測定室でエネルギー消費量を測るとともに食事を厳密に管理・評価した場合のみ、可能である。

現時点で、エネルギーバランスを評価できるのは、長期間での体重、特に身体組成の測定値からである²²⁾。

文 献

- 1) Livesey, G. & Elia, M. Estimation of energy expenditure, net carbohydrate utilization, and net fat oxidation and synthesis by indirect calorimetry: evaluation of errors with special reference to the detailed composition of fuels. *Am.J.Clin.Nutr.*, (1988), **47**, 608-628.
- 2) Weir, J. B. d. V. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol.*, (1949), **109**, 1-9.
- 3) 第一出版編集部編. 厚生労働省策定 日本人の食事摂取基準(2005年版). 第一出版, 東京, (2005), 28-38.
- 4) Shetty, P. S. Energy requirements of adults. *Public Health Nutr.*, (2005), **8**, 994-1009.
- 5) 厚生省公衆衛生局栄養課監修, 国民栄養振興会編. 昭和50年改定 日本人の栄養所要量と解説. 第一出版, 東京, (1975), 23-48.
- 6) Muller, M. J., Bosy-Westphal, A., Kutzner, D., Heller, M. Metabolically active components of fat-free mass and resting energy expenditure in humans: recent lessons from imaging technologies. *Obes.Rev.*, (2002), **3**, 113-122.
- 7) Van Zant, R. S. Influence of diet and exercise on energy expenditure—a review. *Int. J. Sport Nutr.*, (1992), **2**, 1-19.
- 8) Donahoo, W. T., Levine, J. A., Melanson, E. L. Variability in energy expenditure and its components. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care*, (2004), **7**, 599-605.
- 9) 健康・栄養情報研究会編. 厚生労働省 平成15年国民健康・栄養調査報告. 第一出版, 東京, 2004.
- 10) Levine, J.A. Non-exercise activity thermogenesis (NEAT). *Nutr.Rev.*, (2004), **62**, S82-S97.
- 11) 柏崎 浩. エネルギー代謝測定法—最近の進歩. *臨床スポーツ医学*, (2001), **18**, 409-418.
- 12) Speakman, J. R. The history and theory of the doubly labeled water technique. *Am. J. Clin. Nutr.*, (1998), **68**, 932S-938S.
- 13) Lamonte, M. J., Ainsworth, B. E. Quantifying energy expenditure and physical activity in the context of dose response. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (2001), **33**, S370-S378.
- 14) Institute of Medicine of the National Academies. Dietary Reference Intakes For Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids. The National Academies Press, Washington, DC, (2005), 107-264, 880-935.
- 15) Westerterp, K. R. Impacts of vigorous and non-vigorous activity on daily energy expenditure. *Proc. Nutr. Soc.*, (2003), **62**, 645-650.
- 16) 田中茂穂, 田中千晶, 二見 順, 岡 順, 高田和子, 柏崎 浩. ヒューマンカロリメーターを用いて測定した座位中心の生活における1日あたりのエネルギー消費量. *日本栄養・食糧学会誌*, (2003), **56**, 291-296.
- 17) de Jonge, L., Nguyen, T., Smith, S. R., Zachwieja, J. J., Roy, H. J., Bray, G. A. Prediction of energy expenditure in a whole body indirect calorimeter at both low and high levels of physical activity. *Int. J. Obes.Relat. Metab. Disord.*, (2001), **25**, 929-934.
- 18) Matthew, C. E. Calibration of accelerometer output for adults. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (2005), **37**, S512-S522.
- 19) Livingstone, M. B., Black, A. E. Markers of the validity of reported energy intake. *J. Nutr.*, (2003), **133**, 895S-920S.

- 20) 田中茂穂. エネルギー摂取基準の考え方. 体育の科学, (2005), **55**, 273-277.
- 21) Stubbs, R. J., Hughes, D. A., Johnstone, A. M., Horgan, G. W., King, N., Blundell, J. E. A decrease in physical activity affects appetite, energy, and nutrient balance in lean men feeding ad libitum. *Am. J. Clin. Nutr.*, (2004), **79**, 62-69.
- 22) Elia, M., Stratton, R., Stubbs, J. Techniques for the study of energy balance in man. *Proc. Nutr. Soc.*, (2003), **62**, 529-537.

生活習慣病予防のための 身体活動・運動量

田中 茂穂

1. 「運動所要量」改定の必要性

日本では、「健康づくりのための運動所要量」が1989年に策定された¹⁾。その特徴と問題点を、表1にまとめた。身体活動・運動と生活習慣病や総死亡率に関する科学的研究は、この四半世紀に急速に発展し、冠状動脈疾患ばかりでなく、糖尿病などの生活習慣病罹患に対する身体活動・運動の予防効果が科学的に明らかにされている。そこで、今回の「健康づくりのための運動基準」では、これらの蓄積されたエビデンスを対象に系統的レビューを行ない、それをもとに、生活習慣病予防のために必要な身体活動・運動量を示すこととした。レビューを担当したのは、「厚生労働省運動所要量ワーキンググループ」のメンバーであった国立健康・栄養研究所の田畑泉、宮地元彦、高田和子、筆者の4名である。

2. レビューの目的

生活習慣病の予防に有効な身体活動量の境界値を決定するために、身体活動と生活習慣病の発症に関する観察研究について系統的レビューを行った。

今回は「生活習慣病の予防」を検討の対象としており、すでに生活習慣病を有する人のための

「運動療法」とは異なる。また、日本においても、運動の効果やそのメカニズムに関する生理学的研究が数多く行なわれてきた。しかし、それらの多くが、たとえば血圧や血液生化学検査値といった生活習慣病のリスクファクターの変化を平均としてみており、長期間にわたる観察に基づいて疾病の発症そのものについて効果があるかどうかを検討した研究はきわめて少ない。

そこで、主な生活習慣病の発症、肥満の発現、および死亡をアウトカムとした。また、健常者あるいは一般の住民を対象とした観察研究について検索を行なった。研究の質という点からは、本来はRandomized Controlled Trial (RCT) が望ましいと考えられる。しかし、倫理的な問題から、このような内容の研究についてのRCTはきわめて少ない。そこで、因果関係を検討するためによりふさわしい方法として、同一コホートを追跡した「観察研究」を扱うこととした。

3. 身体活動・運動の定量化の方法

身体活動量は、

$$\Sigma (\text{活動強度} \times \text{時間} \times \text{頻度})$$

と表すことができる。

エネルギー消費量 (kcal) も身体活動量を表す単位である。しかし、エネルギー消費量は体格に

表1 これまでの運動所要量の特徴と問題点

特徴	課題
<ul style="list-style-type: none"> ・ 50% $\dot{V}O_2\max$ 強度の運動と生活習慣病との関連から、有酸素運動の必要性を提唱している。 ・ 体力（最大酸素摂取量）と生活習慣病のリスクファクター（血液性状および血圧、体脂肪率）の異常値との関係から体力の基準値を求めた。 ・ 「生活習慣病のリスクファクターの異常値」→「目標の体力」→「そのために必要な運動量」という一連の流れがある。 ・ 一研究室の一貫した測定結果に基づいて作成された。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「生活習慣病の発症」そのものではなく、「そのリスクファクターの異常値」から基準値を作成している。 ・ さまざまな運動・身体活動に関する知見が得られつつあるが、それに対応していない。 ・ 横断的なデータ解析に基づいて基準値が得られているが、本来は、縦断的な観察が必要である。 ・ 年齢階級による最大酸素摂取量の変化が、その他の報告と比較して小さい。

表2 検索方法

<p>対象としたデータベース：PubMedと医学中央雑誌</p> <p>対象とした期間：2005年4月11日まで</p> <p>検索式：PubMedでは、("physical activity" OR exercise OR "physical training" OR fitness) AND (疾病毎に選択) AND (follow* OR observation* OR prospective OR longitudinal OR retrospective)</p> <p>検索制限：human（人を対象とした研究）</p> <p>対象とした報告：原著論文</p> <p>年齢：学童期（6歳以上）から高齢期</p> <p>対象とした生活習慣病等：肥満、高血圧症、高脂血症、糖尿病、脳血管疾患、循環器病による死亡、骨粗鬆症、ADL、総死亡</p> <p>採択基準：</p> <p>原則として重度の疾病を有していない者（健康、または軽度の症状で運動が可能な者）を長期（原則2年以上）観察し、死亡率や発症率を身体活動・運動量別に分析した研究。</p> <p>定量的方法で評価された身体活動・運動量に関する情報（種類・強度、時間：分/週または分/日、頻度：回/週）を明示した研究。この情報がない場合、「種類・強度と分/週」の情報から計算。</p> <p>身体活動・運動量の群分けや区分けの方法、カットオフラインの設定が論理的な研究。</p> <p>身体活動・運動単独の効果を分析【身体活動・運動以外の要因（性・年齢・喫煙・代謝性危険因子…）を統計的に補正】した研究。</p> <p>対象者の人数が十分かどうかは、分析法や測定精度等から判断。</p>
--



身体活動量の群間差が得られた最低値から、生活習慣病の予防に有効な身体活動量の境界値を決定する。

かなり依存し、たとえばアメリカ人と日本人が同様の活動を行なった場合でも、エネルギー消費量に大きな差が生じる。そこで、体格の違いを考慮することができ、また、今回レビューした文献でも多く用いられていた

$METs \cdot \text{時}/\text{週} = 1$ 週間当たりの $\Sigma METs \times \text{時間}$ でまとめていくこととした。

たとえば、速歩（4METs）を30分/日×3日/週とジョギング（7METs）を30/日×2日/週実施した場合、

$4 \times 30/60 \times 3 + 7 \times 30/60 \times 2 = 13METs \cdot \text{時}/\text{週}$ と計算できる。

4. 検索方法

検索方法の詳細は、表2の通りである。それぞれの文献について、もっとも身体活動・運動量の少ない群に比べて、生活習慣病の発症等が有意に低下する群の下限値を抽出した。たとえば、身体活動量により5群に分け、もっとも身体活動量の

少ない群と比べて、少ない方から3番目の群ではじめて有意差がみられた場合は、その群における身体活動量の下限值を用いて、生活習慣病の予防に有効な身体活動量の境界値を決定することとした。なお、身体活動量の境界値を検討する上で明らかに不適切な群分けをしていると考えられる文献は削除した。

5. 選択された報告における 身体活動・運動の概観

検索式でヒットした件数は、体力と生活習慣病の発症・死亡に関する文献とあわせて8,134本であった。さらに、タイトルと抄録による一次スクリーニングにより794本に絞った。これらの全文を取り寄せ精読したところ、上記の採択基準に該当する文献数は、身体活動・運動に関して36本であった（否定的な結果の得られた文献、および高齢者に関する文献等も含む）。性や年齢、あるいは疾病によって区別するには文献数が少なかつたため、これらをまとめて検討することとした。

6. 「運動」か？「身体活動」か？

身体活動や運動については、1984年に行なわれたアメリカ疾病予防センター（CDC）のワークショップで採用された以下のような定義³⁾が、広く受け入れられている。

・運動 (Exercise)

一つ以上の体力要素を維持あるいは改善するために行なわれる、計画的・組織的・継続的な身体の動作。

・身体活動 (physical activity)

骨格筋の活動により安静時よりも多くのエネルギー消費を伴う身体の状態。

ロンドンの2階建てバスの車掌と運転手を比較したモリスや、ハーバード大学の卒業生を対象として縦断的に観察したパuffenバーガーらの研究に代表されるように、必ずしも運動に限定せず身体活動量をとらえようとした調査は古くから存

在した³⁾。しかし、ジョギングやウォーキング等の有酸素運動の効果やメカニズムが明らかになるとともに、特に1980年代は、身体活動の中でも有酸素運動に焦点が当てられるようになっていた。

しかし、1990年代に入ったあたりから、必ずしも運動ではなく日常的な活動でも、エネルギー消費量を増加させれば生活習慣の予防や改善などに効果があることを重要視するようになった³⁻⁵⁾。それは、パuffenバーガーらを含む疫学的な研究の裏づけがあると同時に、しっかりした有酸素運動を定期的に行なうように訴えても、実現の可能性が低いということがその背景にある。そこで、国際的には運動のみならず、より広く身体活動をとらえる方向に変わってきている。なお、体力増進を目的とした運動のガイドラインも別途存在する⁶⁾。

身体活動には、運動やスポーツの他、労働や家事、余暇活動など（運動以外を「生活活動」と呼ぶこととした）、日常生活におけるすべての活動が含まれる（図1）。しかし、実際には、運動の他、ガーデニングのような余暇活動や、掃除などの家事、力仕事、通勤等による歩行などが調査対象となっている場合が多い。これらの活動は、およそ3~6METsの中強度 (moderate) あるいは6METsを越える高強度のいずれかに相当する⁴⁾。厳密なものではないが、今回のレビューにおいても、多くの場合、およそ3METs以上の身体活動・運動が対象となっていると考えられた。なお、多くの文献で用いられたそれぞれの質問紙は、一回当たりの最低持続時間や頻度について限定していなかったため、今回の基準で規定する根拠はなかった。

今回、レビューの結果をまとめていく上で大きな問題となったのは、調査対象としている身体活動の範囲が研究によって大きく異なることであった。実際のところ、身体活動の分類法は質問紙の数だけあるといってもよいが、大別すると、以下のようになる。

①運動のみ

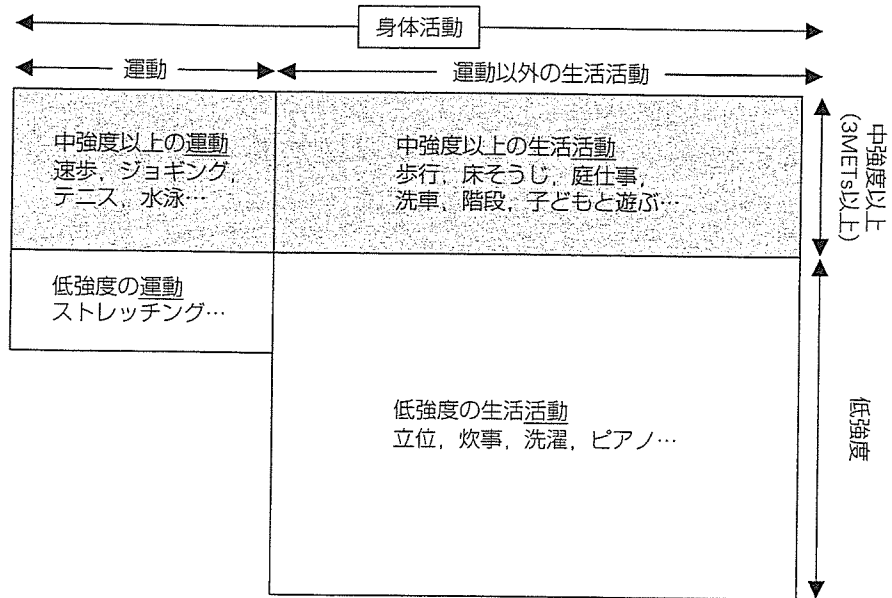


図1 身体活動と運動

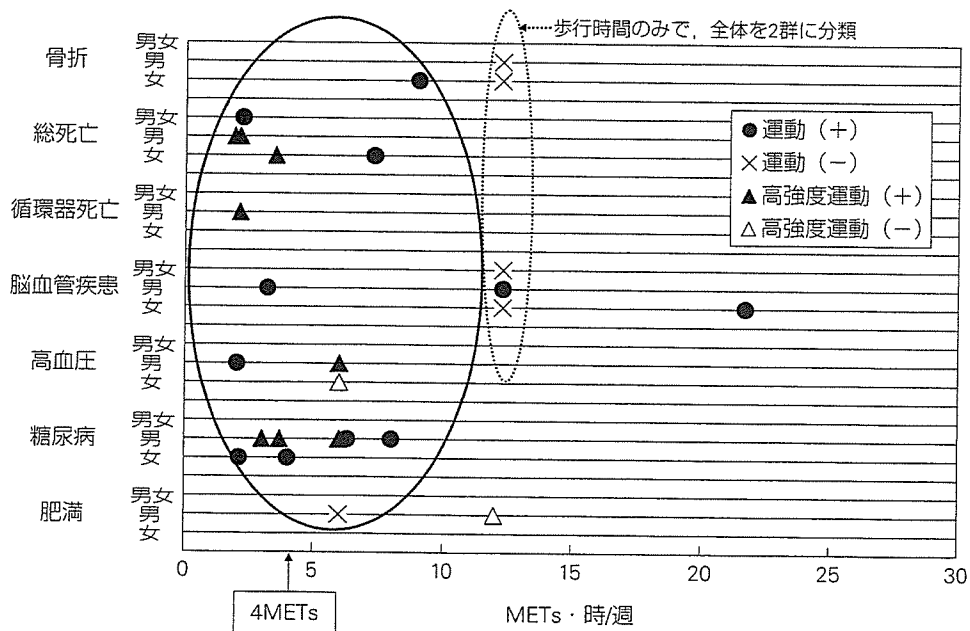


図2 “運動”の境界値 (METs · 時/週)

②運動+一部の余暇活動 (多くの場合, ガーデニングのみ)

③運動+余暇活動 (含; ガーデニング) + 移動 (日常的な歩行や階段)

④あらゆる身体活動 (立位, 炊事, 洗濯なども含む)

このうち, ④については, 1日だけで30METs · 時を越える. しかし, そのような調査に基づく報告は少なかったため, 除外した.

①に該当する値を図2に, ②と③に該当する値を図3に示した. 各研究において, 有意差のみられた身体活動量のもっとも少ない群の下限值

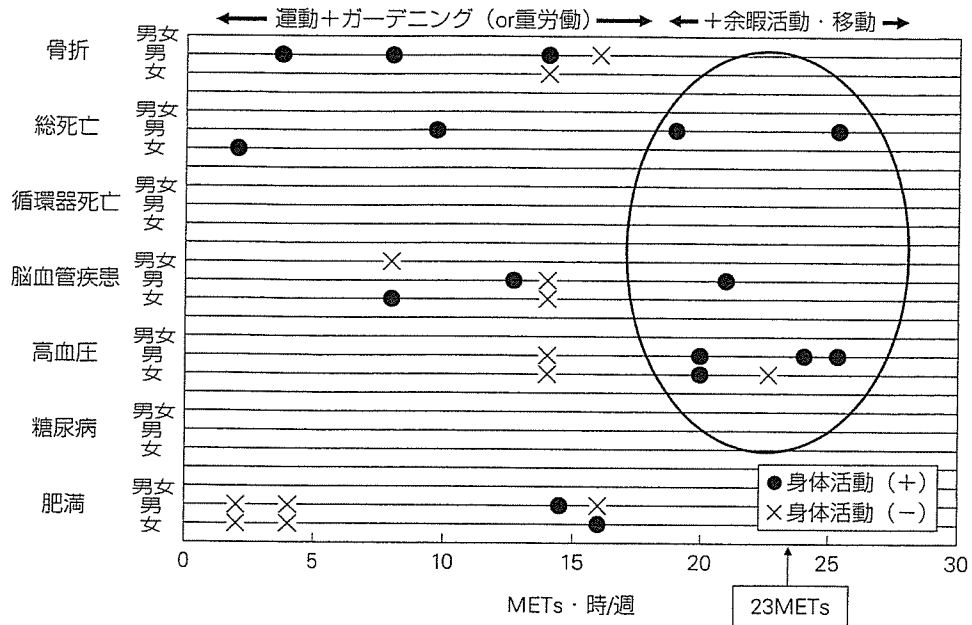


図3 “身体活動”の境界値 (METs・時/週)

を+, みられなかった場合は, 身体活動量のもっとも大きな群の下限値の値を-として表示してある. +が多く, -がほとんど存在しない値の範囲を基準値と設定することとなる. また, 図2では, ジョギング程度かそれ以上の比較的高強度の運動に限定したもの(「高強度運動」と表示)と, 速歩程度の中強度以上の運動をすべてまとめたもの(「運動」と表示)に分類した.

表3 身体活動・運動量の基準値 (対象: 20~69歳)

<p>身体活動</p> <p>23METs・時/週 \approx 3.3METs・時/日</p> <p>毎日約60分程度の中強度活動(ふつう歩行, 床そうじ, 庭仕事等)</p> <p>歩行中心の活動であれば, 1日当たりおよそ8,000~10,000歩に相当</p>	<p>運動</p> <p>4METs・時/週 (範囲: 2~10METs・時/週)</p> <p>例:</p> <ul style="list-style-type: none"> ・速歩: 約60分/週 ・ジョギング: 約35分/週 ・テニス: 約35分/週
--	---

7. 「運動量」の基準値

図2において約12METs・時/週に相当するいくつかのプロットは, 歩行時間で全体を2つの群に分けて(境界値は1日30分), 群間の差を検定した研究から得られたものである. 人数が少ない結果が含まれていることもあり, 有意差の得られていないケースがいくつかみられる. しかし, それらを除くと, ほとんどの報告で有意な境界値が得られた. それらのほとんどは2~10METs・時/週に分布しており, 平均をとると4METs・時/週であった. また, 高強度運動のみの場合と中強度を含む場合とでそれらの値の平均を比較すると, 差は1に満たなかった. そこで, 特に運動の強度

を区別することなく, 約2~10METs・時/週に分布する値から, 基準値を決定することとした. その結果, 基準値とその範囲をそれぞれ4METs・時/週, 2METs・時/週~10METs・時/週とした(表3).

現在の運動量に応じて, 基準値, あるいは基準値の範囲の値を上回ることを目指すようにする. すなわち, 運動習慣がまったくない人は2METs・時/週に, 運動量が基準値以下の人は基準値を目指して, さらに基準値よりも運動量が多い人は10METs・時/週を目指すようにする. その結果, 生活習慣病の発症リスクが低くなることが期待される.

具体的な運動の例としては, 速歩, 体操(動き

のあるもの), ジョギング, ランニング, 水泳, 球技などが, 3METs以上の運動に含まれる。たとえば, 速歩は約4METs (分速90~100m) の強度である。したがって, 4METs・時/週を速歩で換算した場合は, 約60分/週に相当する。同様に, ジョギングやテニス (約7METs) の場合は, 約35分/週に相当する。先に述べた理由により, 頻度や持続時間は問題としない。

8. 「身体活動量」の基準値

「身体活動」においては, 基準値を23METs・時/週とした (表3)。

図3において, 図の左側に存在する点のほとんどは, 先に述べた運動の他, 限定した屋外活動あるいは余暇活動 (多くの場合, ガーデニングのみ) の実施状況もたずねた質問紙から得られた結果である。それらの結果は, 得られた活動量の境界値のバラツキが大きく, 群間の有意差が得られたかどうかともまちまちである。

それに対して右側に位置する点は, スポーツはもちろん, 屋外での歩行 (健康増進のための速歩に限らず, 日常生活における歩行を含む) や階段の利用, その他の中・高強度活動を対象としている。それらの結果は, 約19METs・時/週から約26METs・時/週の間分布しており, ほとんどが有意な結果となっている。そこで, これらの値から, 身体活動量の基準値を決定することとした。ただし, この値に相当する週当たりの身体活動時間は, 3METsの強度 (普通歩行) で1日当たり54~74分の幅がある。しかし, 国民にとって, 3METs以上に該当する活動時間の20分の違いを十分に区別できるものではない。そこで, 身体活動量の基準値は, よりわかりやすいように1つの値, すなわち系統的レビューで抽出された論文の値の平均値を基準とした。

強度が3METs以上の身体活動としては, 日常的な歩行 (買い物, 通勤など), 床そうじ, 庭仕事, 物を運ぶ, 子どもと遊ぶといった活動があげられる。日常的な歩行をはじめとするこれらの活

動の強度は3METs程度であるので, 23METs・時/週 ($\equiv 3.3\text{METs}\cdot\text{時/日}$) は, 3METs以上の強度の身体活動で1日当たり約60分に相当する。ここでの身体活動は, 必ずしも歩行を伴うとは限らないが, 一般に3METs以上の強度の身体活動の多くは歩行を伴っている。そこで, 歩行中心の活動で構成されている場合を考えると, 1日当たり約60分 (10分当たり1,000歩とすると, 約6,000歩に相当) に相当する。日常生活の中では, 屋内での歩行など, 低強度で意識されない歩数が2,000~4,000歩程度みられるので⁷⁾, 1日当たりの歩数の合計としては, およそ8,000~10,000歩に相当すると考えられる。

9. 国際的な身体活動ガイドラインとの比較

国際的な身体活動ガイドラインは, 特に体重増加の予防を目的としたものが多い^{5,8)}。たとえば, 国際肥満学会は, 大規模観察研究における質問紙調査の結果⁹⁾ や, 二重標識水法を用いた減量後女性における体重増加と身体活動レベル (PAL) との関係^{10,11)} などから, 「およそ1.7以上のPALが必要」とし, そこから「毎日45~60分の中強度活動」という結論を導き出している¹²⁾。ただし, 日本人の場合は, 半数以上がこの値をすでに上回っている¹³⁾。欧米と日本で, 生活環境や遺伝的な背景が多少なりとも異なることから, 「必要な身体活動量」には民族差がある可能性も否定できない。今後, 日本人を対象として, できれば客観的な方法に基づいた観察研究が待たれる。

10. 問題点および今後の課題

1) 境界値の決定法

今回は, 有意差の得られた最低の境界値から基準値を決定し, 群間における発症率の差は考慮していない。この方法では, 境界値は, 対象者の人数や分け方等の影響を受ける。ただし, 今回抽出された研究間で, 相対危険度に大きな違いはみられなかった。