

## 以二重標識水法測定每日消耗熱量及其相關 應用研究

彭雪英\*<sup>1</sup> 吉武裕<sup>2</sup> 齊藤慎一<sup>3</sup> 陳全壽<sup>4</sup>

### Determination of Daily Energy Expenditure by Doubly Labeled Water Method and Its Application

Hsuen-Ying Peng, Yutaka Yoshitake, Shinichi Saito, and Chuan-Show Chen

<sup>1</sup> Doctoral Program of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574 JAPAN

<sup>2</sup> Department for Interdisciplinary studies of Lifelong Sport and Physical Activity, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya, 1 Shiramizumati, Kannoya, Kagoshima, 891-2393 JAPAN

<sup>3</sup> Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574 JAPAN

<sup>4</sup> National Council on Physical Fitness and Sports (NCPFS), Executive Yuan  
11F, No. 20, Chu-Lun ST, Taipei, Taiwan, ROC

(Received: April 28, 2005. Accepted: August 10, 2005.)

**ABSTRACT** The two main causes of the growing number of lifestyle-related diseases are decreased energy expenditure due to physical inactivity, and nutrition imbalance caused by overeating. Nowadays, participation in exercise and providing balanced nutrition should be encouraged. They play important roles in the policy development for maintaining health and preventing lifestyle-related diseases. Hence, areas regarding the evaluation of daily energy expenditure (DEE) and physical activity level (PAL) have recently received greater levels of public interest. The doubly labeled water (DLW) method provides a novel approach to obtain accurate and non-intrusive measurements of DEE in free-living society. In this review, we introduce the determination of DEE using the DLW method and discuss its application.

**Key words:** doubly labeled water method, daily energy expenditure, physical activity level, estimated energy requirement, activity record method

## 前 言

健康有活力的生活需要靠均衡的營養與適當的運動來維持。然而，現今富裕的生活導致從小孩至老人都面臨著活動量不足造成的消耗熱量減少與過食造成的攝取熱量過剩的問題，且此種由於攝取熱

量與消耗熱量的失調所造成的肥胖問題（過剩的脂肪於體內堆積）<sup>(1)</sup>與其相應產生的現代成人病（如糖尿病、高血壓、心臟病等）的增加亦趨顯著。因此，在現代成人病的預防上，除了藉由增加身體的活動量（如養成運動習慣）以提高每日消耗熱量外，營養（攝取與消耗熱量的均衡）的改善亦不容忽視，故如何正確評估每日消耗熱量（daily energy

\* To whom correspondence should be addressed.

expenditure, DEE) 並提供一個適切的每日所需熱量 (estimated energy requirement, EER) 攝取基準在肥胖的預防及今後的健康指導對策上已被世界各國的科學家視為重要的課題。

一般而言, DEE 的測定法中以呼氣氣體測定室 (indirect human calorimeter; respiratory chamber) 法的精準度較高, 可說是國際公認的標準測定法。然而, 此法除了需要昂貴的實驗設備以外, 受試者必須被限制於實驗室 (空間: 20~30 m<sup>3</sup>) 內, 對於要正確測定一般人在日常生活中的 DEE 或是某些運動選手的 DEE 可說是不可能。因此, 其他實驗室外的簡易消耗熱量測定法, 例如具有小型、攜帶方便、能夠評估身體活動的強度等優點的加速度計 (accelerator, AC) 法, 或是具有低成本、能夠評估身體活動的內容、可同時進行多人數調查的生活時間調查 (activity record, AR) 法等經常被應用在消耗熱量方面的研究。

自 1980 年代後期, 新的 DEE 測定法: 二重標識水 (doubly labeled water, DLW) 法逐漸受到國際學者的矚目。它具有在實驗室內及室外均可測定的優點, 且與標準測定法的呼氣氣體測定室法比較, 具有相當高的精確度<sup>(2,3)</sup>。研究學者只需讓受試者飲用 DLW 並藉由數次尿液的收集, 即可在不需限制受試者的日常身體活動下測得 DEE, 因此在身體活動量的相關研究上漸受應用。本綜論主要的內容除了簡介 DLW 法的測定原理及方法外, 亦將介紹其在 DEE 測定上的相關應用研究。

## 二重標識水法的原理

### 一、什麼是二重標識水 (DLW)

二重標識水是由自然界存在的安定同位素: 重氫 (<sup>2</sup>H, Deuterium) 及 18-氧 (<sup>18</sup>O) 所標識製成的特殊水 (<sup>2</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>O), 它完全無放射性的危險, 且外觀

和口感與一般的水 (<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>16</sup>O) 並無差異。

由於同位素大多是以混合體存在於自然界 (表一), 故要測定 <sup>2</sup>H 及 <sup>18</sup>O 等安定同位素的存在比 (abundance) 時需要考慮到其他同位素的變動, 因此需使用國際標準物質 (例如 Vienna-Standard Mean Ocean Water, V-SMOW 等) 來校正。同位素的含量是以相對於標準物質的飽和濃度 (enrichment), 即如下所示之 δ‰ (per mil) 來表示。

$$\delta\% (\text{以 } ^2\text{H 爲例}) = [ (^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ 樣品} / (^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ V-SMOW} - 1] \times 1000$$

### 二、每日消耗熱量 (DEE) 的測定原理

簡而言之, 以 DLW 法測定 DEE 的原理是分析 <sup>2</sup>H 及 <sup>18</sup>O 在一段期間內於體內的排出率差值後, 求出二氧化碳的排出量, 進而計算出 DEE。首先, 讓受試者飲用已知 <sup>2</sup>H 及 <sup>18</sup>O 存在比的 DLW (一般於飲用後約 4~8 小時內, DLW 會與體水分達成平衡狀態)。而後, DLW 內所標識的 <sup>18</sup>O 會以水 (H<sub>2</sub><sup>18</sup>O) 的型態於尿液、汗、呼氣中的水蒸氣、或是以呼氣中的二氧化碳 (C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>) 排出體外。另一方面, DLW 內所標識的 <sup>2</sup>H 則僅以水 (<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O) 的型態排出體外。如此, 即可由此二同位素的排出率差值, 計算出二氧化碳的排出量。而後代入下列的公式, 以間接熱量測定法的原理求出氧氣攝取量後計算出 DEE。

實際上, 隨著時間經過, 此二同位素於總體水份量 (total body water, TBW) 中的存在比會逐漸低下, 因此可求出其各自的排出率 (以對數式來表示, 如圖一所示)。即在飲用 DLW 後 (t1) 收集樣品求出濃度 (E1), 經過一段時間後, 於第二時間 (t2) 收集第二次的樣品 (E2), 各自減去體內原有 (baseline) 的濃度 (Eb), 即可求出各自的排出率。在此, k 為排出率 (/day)。

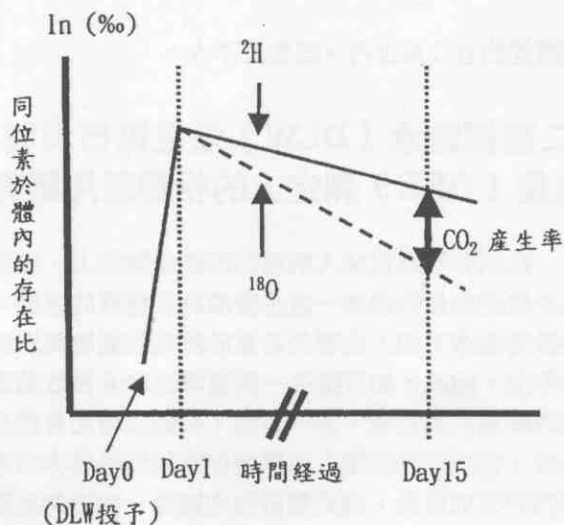
$$k = [\ln (E2 - Eb) - \ln (E1 - Eb)] / t, \quad t = t2 - t1 \quad (1)$$

利用上式可求得 <sup>2</sup>H 的排出率 (Kh) 及 <sup>18</sup>O 的排

表一 氫元素與氧元素的同位素

Table 1. The characteristics of the isotopes of Hydrogen and Oxygen.

氫元素的三種同位素	天然存在比(atom%)	放射性	氧元素的三種同位素	天然存在比(atom%)	放射性
H <sup>1</sup>	99.985	無	O <sup>16</sup>	99.759	無
H <sup>2</sup>	0.0149	無	O <sup>17</sup>	0.037	無
H <sup>3</sup>	1x 10 <sup>-5</sup>	有	O <sup>18</sup>	0.204	無



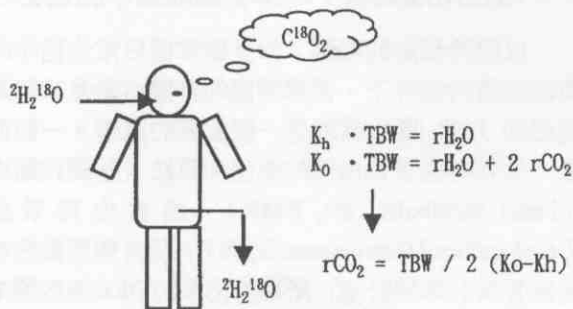
圖一 二重標識水法中的同位素排出理論  
Fig. 1 The model of the isotopes' elimination theory in doubly labeled water method.

出率 (Ko) 後，再以公式 (2) 求出二氧化碳的排出量 (rCO<sub>2</sub>)。

$$rCO_2 = TBW / 2 \times (Ko - Kh) \quad (2)$$

在此，2 為定數，即 1 莫耳 (mol) 的二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 為 2 莫耳的氧於體內排出，1 莫耳的水 (H<sub>2</sub>O) 僅 1 莫耳的氧於體內排出 (圖二)。

此外，同位素也有可能往水以外的體組織移動。實際上，<sup>18</sup>O 的稀釋容積約為 TBW 的 1%，<sup>2</sup>H 的稀釋容積約為 TBW 的 4%<sup>(3)</sup>。因此，在以稀釋容積求得 TBW 時，必須將 1.01 及 1.04 的係數列入計算。另外，相較於水蒸氣，<sup>18</sup>O 與 <sup>2</sup>H 在液體中的存在比較大，且相較於水，<sup>18</sup>O 易存在於二氧化碳中，考慮以上條件後，Schoeller 等人<sup>(4)</sup> 提出了以下



圖二 二氧化碳排出量的計算  
Fig. 2 The calculation of carbon dioxide production rate.

的計算公式：

$$rCO_2 = TBW / 2.078 \times (1.01 Ko - 1.04 Kh) - 0.0246 \times 1.05 \times TBW (Ko - Kh) \quad (3)$$

然而，TBW = (No / 1.01 + Nh / 1.04) / 2，No 及 Nh 分別為 <sup>18</sup>O 及 <sup>2</sup>H 的稀釋容積 (mol)，經由整理後，以下公式被廣泛應用。

$$rCO_2 \text{ (mol/day)} = 0.4554 \times TBW (1.01 Ko - 1.04 Kh) \quad (4)$$

在求取 k 值時有二種方法。一種如上所述，即僅在實驗最初與最後的兩個時點收集樣品的二點採樣法 (two-point method)，另一種為在實驗期間，每日進行樣品收集的多重採樣法 (multipoint method)。現在，以二點採樣法較常被應用<sup>(2)</sup>。

## 二重標識水 (DLW) 的測定方法

### 一、投予量及測定期間

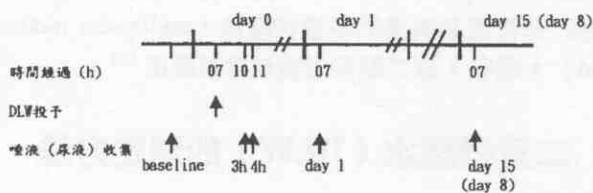
隨著時間的增加，安定同位素的存在比會逐漸下降，因此投予量及測定期間必須考慮到安定同位素於體內下降的速度，即相較於 baseline 時的存在比，在實驗終了時的存在比必須要在儀器能夠檢測的範圍內。一般來說，成人的測定期間為 2 週，小孩約 6~7 天。關於投予量，<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O 約為 0.12 g / kg TBW，H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 約為 0.25 g / kg TBW。新生兒的投予量需稍微偏高，<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O 約為 0.16 g / kg TBW，H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 約為 0.4 g / kg TBW。由於測定期間必須約為安定同位素半衰期的 1~3 倍，因此，代謝較為活潑狀態的受試者如新生兒、燒燙傷患者、或是運動選手等的測定期間通常較短 (約 3~7 天)，相反地，代謝較為緩慢的高齡者的測定期間則較長 (可長達 21 天)。

### 二、投予方法與樣品收集

同位素的分析樣品可為唾液、尿液或血液。在投予前一天，讓受試者以空腹狀態到研究室，先收集作為 baseline 的唾液或是尿液，並記錄體重。而後以體重的 60% 來推算 TBW，並以市售的 <sup>2</sup>H (99.8 atom%) (例如成人以 0.12 g / kg TBW 計算) 與 <sup>18</sup>O (10.0 atom%) (例如成人以 2.5 g / kg TBW 計算) 來調製 DLW 後，計算投予量<sup>(2)</sup>。

在投予日當天，讓空腹狀態的受試者飲用 DLW。為了避免 DLW 於瓶內殘留，以約 100 mL 的

飲用水分 2 次沖洗飲用瓶，並讓受試者以漱口方式（避免 DLW 於口腔內殘留）喝下。而後，在 DLW 於體內達成平衡所需之 4 小時內禁止劇烈運動及飲食。在投予 3 小時及 4 小時後收集唾液（約 2 mL）或尿液樣品，並在投予 24 小時後及第 15 天（或第 8 天）的同一時刻收集尿液樣品（圖三）。在 DLW 的測定期間，受試者可完全不受任何拘束，如同平常生活一樣地自由活動。



圖三 二重標識水 (DLW) 法的測定流程

Fig. 3 The schematic schedule of the doubly labeled water (DLW) method.

### 三、樣品的分析

樣品中的  $^2\text{H}$  及  $^{18}\text{O}$  存在比的分析均是以安定同位素比質量分析計 (isotope ratio mass spectrometry, IRMS) 來進行，且需以國際原子力機關所提供的標準物質 (V-SMOW) 等來做為參考物質<sup>(2)</sup>。現今，在日本有關於應用 DLW 法的相關研究多為 (獨立行政法人) 國立健康營養研究所主導，進行各種同位素比的分析。而大學等研究機關則以委外分析的方式 (例如委託英國的分析公司: ISO-Analytical Limited) 較多。

### 四、每日消耗熱量 (DEE) 的計算

先以測得的  $^2\text{H}$  及  $^{18}\text{O}$  存在比來求得稀釋容積並計算出 TBW，而後從  $^2\text{H}$  或  $^{18}\text{O}$  的排出率求出二氧化碳的排出量 (公式 4)，再以 Weir<sup>(5)</sup> 的公式，利用間接熱量測定法來計算出 DEE (公式 5)。

$$\text{DEE (kcal/day)} = 22.4 \times 3.941 (\text{rCO}_2/\text{RQ}) + 1.106 (\text{rCO}_2) \quad (5)$$

在此，RQ 為呼吸商 (respiratory quotient)，通常是在在測定期間中的飲食記錄法所求得的食物商 (food quotient) 來代入計算。在無法測定食物商或是飲食記錄不正確的情況下則以假定值 0.85 來計算。研究<sup>(6)</sup>指出，代入此假定值所產生的 DEE 計

算誤差約在 3% 以內，誤差並不大。

## 二重標識水 (DLW) 法在每日消耗熱量 (DEE) 測定上的相關應用研究

在肥胖及現代成人病預防的健康對策上，營養與身體活動量的改善一直是醫療專家推薦的重點。在營養改善方面，主要是著重於熱量的攝取與消耗的平衡，因此，如何提供一個適切的 EER 攝取基準受到專家們的重視。另一方面，有關於增加身體活動量 (養成運動習慣) 與健康促進的關係等亦為專家們的研究重點。而此類研究均需要一個能夠正確評估 DEE 的方法。DLW 法可在不限制受試者活動的情況下，經由 1~3 週的時間測定 DEE，且具有相當高的正確度 (accuracy) (表二)，在人體消耗熱量的研究上，逐漸受到重視。雖然安定同位素的投予量、測定期間的長短、樣品的採取頻度等因素會多少影響其正確度，但在實驗室外的 DEE 測定方法中，DLW 法可說是一個標準測定法，對於一些無法以呼氣氣體測定室法測定 DEE 的受試者如消防隊員<sup>(7)</sup> 或是某些競技選手 (如水中芭蕾舞選手<sup>(8)</sup>) 而言，DLW 法可說是此類現場研究的唯一選擇。然而，在投予時所需的安定同位素 (特別是  $^{18}\text{O}$ ) 目前仍屬高價階段，故限制了其在熱量代謝學研究上的應用性。目前 DLW 法多被應用在評估 EER 攝取基準及簡易消耗熱量測定法的適切性等相關研究。另外，以少人數為受試者所進行的 DEE 與肥胖及健康的關係等研究亦在持續進行。故本論文亦針對以 DLW 法來評估 (1) EER 攝取基準、(2) 簡易消耗熱量測定法的適切性等相關研究來做一個探討。

### 一、每日所需熱量 (EER) 攝取基準的適切性

以肥胖預防的觀點，於正確掌握日常生活中的消耗熱量的條件下，因應個體的身體活動量來設定適切的 EER 攝取基準是一個重要的課題。一般而言，世界各國多以所謂的要因加算法 [基礎代謝率 (basal metabolic rate, BMR)、攝食生熱效應 (diet-induced thermogenesis, DIT) 及各個活動的消耗熱量累計等總計值] 所推算出來的 DEE 為根據來設定 EER 攝取基準。然而以要因加算法所推算的 DEE 存在著相當大的測定誤差<sup>(9)</sup>。另外，以 BMR 的倍數來計算 EER 的概念在二十幾年前亦被提出。

表二 以二重標識水法測定每日消耗熱量的優缺點

Table 2. The advantages and disadvantages of the doubly labeled water method for estimating daily energy expenditure.

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 具有高正確度(1~3%)與精密度(4~7%)。在適當的條件下能正確測定出日常生活狀態下的消耗熱量</li> <li>• 受試者不分年齡,均可測試</li> <li>• 測定較長期間(1~3週)內的消耗熱量,故較為準確</li> <li>• 測量的同時亦可測得身體組成</li> <li>• 安全、無痛且不影響受試者的任何身體活動。比起其他方法,較不會因為測定而不自主改變日常活動,進而影響測定值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 同位素(<math>O^{18}</math>)的成本仍相當高,故目前僅限於少數受試者的研究</li> <li>• 樣品的分析成本仍昂貴,且精密的同位素分析儀器需要專業人士來操作。一些專家亦正在進行分析步驟的改良或簡化的研究,樣品的分析亦可郵送至分析中心</li> <li>• 在現場研究領域,由於二氧化碳的產生及非氧氣的利用亦會被測定,在呼吸商的測定上易有誤差產生</li> <li>• 所測得的每日消耗熱量為4~21天的平均值,無法獲得某天或某個活動的消耗熱量值</li> </ul>

世界衛生組織(1985年)<sup>(12)</sup>指出,將男性的日常勞動程度分為「輕度」、「中度」及「重度」時,其EER攝取基準分別是以1.55、1.78、2.10等指數乘BMR所求出的值。而女性的EER攝取基準則為以1.56、1.64、1.82乘BMR來求得。

由於DLW法在DEE測定上具有高精確度,且應用此法完全不會拘束受試者的日常身體活動,各國專家便開始應用DLW法來進行EER攝取基準的適切性評估<sup>(10,11,13)</sup>。另外,隨著在90年代後期應用DLW法的相關研究陸續被發表後,以DLW法測得的DEE除以BMR所計算出來的身體活動指數(physical activity level, PAL)亦漸被應用,並成為身體活動量的代名詞。利用此指數,可不論體型或身體組成的差異,以BMR的倍數(PAL)來簡便顯示人體的消耗熱量<sup>(2)</sup>。因此PAL在EER攝取基準的適切性評估研究中亦廣受探討,期望未來能定義出一個較為正確的PAL參考值,作為評估EER攝取基準的計算指標。

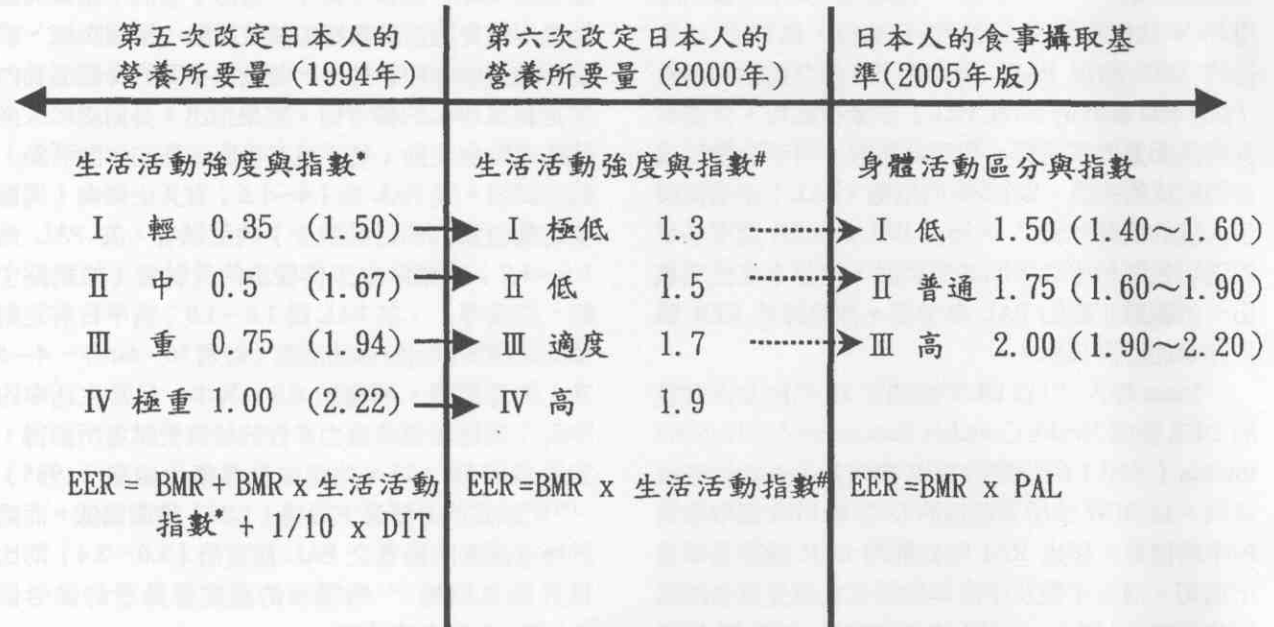
Jones等人<sup>(10)</sup>以DLW法測定29名加拿大女性的DEE後與Health Canada's Recommended Nutrient Intakes(RNI)所設定的EER攝取基準進行比較後發現,以DLW法所實測得的DEE較EER攝取基準的平均值高,指出RNI所公佈的EER攝取基準並不適切。而以年輕及中高年歐美男女為受試者所進行的研究<sup>(11)</sup>顯示,DLW法所測得的DEE與EER攝取基準(National Research Council, 1989)的平均值之間具顯著差異,著者並指出,在日常生活中的一些無意識的身體活動(如姿勢的變換或是處於不安的狀態下等)的熱量消耗於個體間的差異很大,此為在EER攝取基準的設定上未被列入考量的要素。另外,Yao等人<sup>(13)</sup>以職業廣泛的73名中國男

女(35~49歲)為受試者所進行的DLW研究指出,日常的身體活動程度屬於「輕度」的女性受試者所實測得的PAL(1.66)明顯高於世界衛生組織(1985年)<sup>(12)</sup>所揭示的指數(1.56)。由上述研究可發現,與以DLW法所實測得的DEE比較,現今各國所揭示的EER攝取基準有偏低的傾向。另外,有關於PAL的上限與下限值的研究,Black等人<sup>(14)</sup>收集了至1994年為止的574名以歐美人為受試者的DLW數據(其中,排除了發展中國家與極端激烈的身體活動數據如競技運動、軍隊訓練、或是極地探險等的數據),並依據不同的身體活動內容定義出PAL的參考值。結果指出,長期處於久坐狀態而鮮少走動(幾乎沒有參與激烈的休閒活動)的受試者,其PAL為1.4~1.5;有久坐傾向(偶爾會走動但激烈的活動很少)的受試者,其PAL為1.6~1.7;處於站立工作較多的受試者(如家庭主婦、店員等),其PAL為1.8~1.9;若平日有定期參與運動或激烈的休閒活動(每週30~60分、4~5次)的受試者,則再加0.3。其中,日常生活中的PAL下限值由無法自力步行的輪椅受試者所測得,其平均值為1.21,此值較世界衛生組織(1985)<sup>(12)</sup>所設定的必要最下限值(1.27)稍微偏低。而處於極度活動狀態者之PAL測定值(2.0~2.4)則比世界衛生組織<sup>(12)</sup>所揭示的重度勞動者的參考值(1.78~1.82)來的高。

值得參考的是與我國有類似生活水準的日本在EER攝取基準設定上的概況。日本厚生省於2000年所公佈的「第六次改定日本人的營養所要量」<sup>(15)</sup>中,改採以與PAL同義的生活活動強度指數來作為計算EER攝取基準的指標,並將EER攝取基準向下調整一個等級(圖四)。日本民衆可根據年齡及

體重推算出 BMR 後，再乘以各自的生活活動指數 [男女共通，分四等級，「極低」：1.3；「低」：1.5；「適度」：1.7；「高」：1.9] 來求得 EER 攝取基準的參考值。有關於以 DLW 法來評估 EER 攝取基準的適切性研究指出，以 40 名日本中高年男性 (30~69 歲) 為受試者所實測得的 PAL 平均值為 1.85 (範圍 1.35~2.53)<sup>(16)</sup>；以 10 名沒有特殊運動習慣的日本中年女性 (39~58 歲) 為受試者所實測得的 PAL 平均值為 1.60 (範圍 1.41~1.75)，略高於分類為「低」等級的對應指數 1.5；而以 14 名有運動 (打網球) 習慣的中年女性 (39~58 歲) 為受試者所實測得的 PAL 平均值為 2.06 (範圍 1.75~2.32)<sup>(17)</sup>，高於分類為「高」等級的對應指數 1.9，顯示出「第六次改定日本人的營養所要量」<sup>(15)</sup> 所揭示的生活活動指數 (PAL) 與 DLW 法的實測值與有一些差距<sup>(17)</sup>，即其在 EER 攝取基準的設定上與歐美的研究結果相似，具有偏低的偏向。然而，在 2005 年 4 月所最新公佈的「日本人的營養所

要量 (2005 年版)」<sup>(18)</sup> 中，正式採用了 PAL 這個名詞來作為 EER 攝取基準的計算指標。且不同於以往以要因加算法的推算方式，「日本人的營養所要量 (2005 年版)」<sup>(18)</sup> 中所揭示的 PAL 是根據以 DLW 法所實測得的 PAL 來設定參考值及範圍 [男女共通，排除了有極度訓練的選手或是重度勞動的受試者後分三個等級，「低」：平均值 1.50 (範圍 1.40~1.60)、「普通」：平均值 1.75 (範圍 1.60~1.90)、「高」：平均值 2.00 (範圍 1.90~2.20)]，並將 EER 攝取基準向上調整一個等級 (圖四)。若將日本中年女性的 PAL 實測值 (無運動習慣者：1.60、有運動習慣者：2.06) 與「日本人的營養所要量 (2005 年版)」<sup>(18)</sup> 中所揭示的身體活動分類等級「低」(1.50) 及「高」(2.00) 做比較可發現，此新揭示的 PAL 及由其所計算得之 EER 攝取基準較「第六次改定日本人的營養所要量」<sup>(15)</sup> 所揭示的參考值更為接近日常生活活動下的 DEE 實測值。



BMR:基礎代謝率；DIT：攝食生熱效應。

\*：相對於BMR的活動代謝比值。( )內的數值是為了能與第六次改定日本人的營養所要量做比較所計算出來的BMR的倍數。

#：BMR的倍數與身體活動指數 (physical activity level, PAL) 同義。

圖四 每日所需熱量攝取基準的變遷 (日本)

Fig. 4 Alternation of estimated energy requirement (EER) recommend allowance in Japan.

值得一提的是，我國於2002年所新修訂之「國人膳食營養素參考攝取量」<sup>(19)</sup>中將工作勞動量的區分由原來的「輕」、「中」、「重」、「極重」修訂為「低」、「稍低」、「適度」、「高」，並將EER攝取基準略為向下修正，而在EER攝取基準的設定仍是以要因加算法所推算的消耗熱量為參考依據。隨著肥胖及其所導致的健康問題的日益惡化，提供國內民衆一個更正確、可簡單計算的EER攝取基準可說是在營養及行動（增加身體活動量）改善面上的一個重要課題。應用PAL來作為EER攝取基準的計算指標是一個值得參考的方式，在概念及計算上不僅簡便易懂，也預估會成為在熱量代謝研究上的一個重要指標。然而，目前國內尚未有學者發表有關DLW法的相關應用研究。未來，專家學者除應著手進行DLW研究數據的累積外，如何參考國內外的研究成果以提供國內民衆一個更加正確的EER攝取基準實為當務之急。

## 二、簡易消耗熱量測定法的適切性

消耗熱量測定法的妥當性、適用性、簡便性及所需的經費與時間等因素會因調查方法不同而有差異。在身體活動量與肥胖及健康的相關研究中，以多人數為受試者的疫學研究因為考量簡便性及經費等因素，多採用AR法及AC法來進行研究。然而，以簡易測定法來評估消耗熱量時容易有測定誤差的產生<sup>(9)</sup>，故近年來，世界各國的專家亦開始應用DLW法來評估簡易測定法的適切性等相關研究，期許能提供簡易消耗熱量測定法在調查方法的改良、誤差的校正或是測定儀器上的開發所需要之參考數據。

有關於以簡易熱量測定法來測定身體活動量的疫學研究中，以AR法的研究數據最多，但由於執行手法（實際的行動紀錄或回想方式）、分析的方法（身體活動的分類或是記錄時間的間隔）、或是消耗熱量的換算方法等的不同會導致在評估DEE時產生誤差。海老根等人<sup>(20)</sup>分析了歐美以DLW法來進行AR法的適切性評估等相關研究指出，與DLW法的測定值比較，由AR法所測得的DEE誤差約為-12~0%。另外，Conway等人<sup>(21)</sup>以DLW法來進行AR法（簡易的行動紀錄）的適切性評估指出，AR法的測定誤差約為 $7.9 \pm 3.2\%$ ，指出AR法在多人數的消耗熱量研究上是一個有用的測定法。而以回想方式所測得的DEE誤差值高達 $30.6 \pm 9.9\%$ 。另

一方面，以DLW法進行AC法的適切性評估研究<sup>(20,22)</sup>指出，AC法的DEE測定誤差為-4%~-59%，在消耗熱量的測定上具有過小評估的傾向。此可能是由於AC法是以加速度感應計來偵測因身體的移動所伴隨產生的加速度來計算出各個身體活動的消耗熱量，故身體活動種類的差異、儀器感應力的低下、或是因從事水中運動而無法配戴等問題易使AC法在測定DEE時產生誤差<sup>(17)</sup>。有關於在日本的研究結果（表三），與DLW法所測得的DEE比較，AR法（1分單位的行動紀錄方式）的測定誤差為-0.3%~-12.3%；AC（uniaxial）法的測定誤差為-7.3%~-36.9%，顯示研究中採用的AR法在消耗熱量的研究上的測定誤差並不大。此可能是由於以1分單位的行動紀錄方式會比一般的簡易行動紀錄法（5~15分單位）更為精確，亦能減少因記憶錯誤（回想方式）等所導致的誤差。另外，有關於以DLW法來評估AC法在DEE測定上的適切性等研究結果與歐美類似，測定誤差的範圍相當大。然而，從表三亦可發現，對於有類似生活活動內容的受試者（如學生、沒有運動習慣的中年女性等）而言，AC法與AR法的測定誤差及由Bland and Altman<sup>(23)</sup>統計手法所計算出來的信賴區間（limit of agreement）的差異並不是很大，因此若經由適當的校正，AC法亦是一個值得參考的消耗熱量測定法<sup>(17)</sup>。

整體而言，AR法（1分單位的行動紀錄方式）的消耗熱量測定誤差低於AC法，故除可應用在身體活動量的測定外，亦可活用其優點，進行有關於身體活動的質（如活動的內容）與健康的關係等研究。另外，許多研究指出，身體活動的強度不僅與身體活動量的增加有關<sup>(24)</sup>，增加中強度的身體活動量對於降低疾病的罹患率亦有幫助<sup>(25,26)</sup>，故能夠測知身體活動強度的AC法在身體活動量與健康的相關研究上亦是不可或缺，期許未來能夠藉由適當的誤差校正、或是儀器的改良來提高AC法在身體活動量相關研究上的精確度。

## 結 論

本論文除了介紹DLW法的測定原理及方法外，亦探討其在消耗熱量測定上的相關應用研究，如以DLW法來評估EER攝取基準及簡易消耗熱量測定法（AR法、AC法）的適切性。今後，國內學者有

表三 以二重標識水法測定每日消耗熱量來評估生活時間調查法及加速度計法的適切性研究 (日本)

Table 3. Previous studies in Japan comparing daily energy expenditure (DEE) assessed by doubly labeled water (DLW) and activity record (AR), accelerator (AC) methods.

受試者	二重標識水法	生活時間調查法 (1分單位的行動紀錄方式)			加速度計法 (uniaxial)		
	平均值±SD	平均值±SD	測定誤差% <sup>#</sup>	信賴區間 <sup>§</sup>	平均值±SD	測定誤差%	信賴區間
n=10, 男性學生, 24.2±1.8 歲 <sup>(20)</sup>	2910±524	2727±154	-6.3%	-1150~783	2697±541	-7.3%	-756~328
n=24, 中高年男性, 48±10 歲 <sup>(16)</sup>	2724±396	2389±430	-12.3%	-913~243	2182±249	-19.9%	-1039~-44
n=10, 男性消防隊 員, 30.0±2.8 歲 <sup>(7)</sup>	4009±611	3704±476	-7.6%	-907~296	2531±186	-36.9%	-2522~-434
n=10, 無運動習慣 的 中 年 女 性, 49.3±5.9 歲 <sup>(17)</sup>	1889±182	1953±184	-0.3%	-286~412	1643±130	-13.0%	-638~146

<sup>#</sup> (AR ( or AC ) -DLW) / DLW x 100, 負值代表 DEE 的過小評估。

<sup>§</sup> 平均值的差 ± 2SD (Bland and Altman 統計手法)。

必要參考 DLW 法，進行熱量代謝的相關研究，並結合各種簡易消耗熱量測定法，來進行身體活動的質（如內容及強度等）與健康的關係等相關研究，以期能提供國人在肥胖及現代成人病預防的健康指導對策上所需之科學根據。

### 參考文獻

- Hill JO and Melanson EL (1999) Overview of the determinants of overweight and obesity: current evidence and research issues. *Med Sci Sports Exerc* 31:S515-S521.
- Saitoh S, Ebine N, Shimada M, Yoshitake Y and Tanaka H (1999) Energy expenditure measured by doubly labeled water method and it's application to evaluated physical activity in healthy individual and in elite athletes. *栄養学雑誌* 57 :317-332.
- Montoye HJ, Kemper HCG, Saris WHM and Washburn RA (1996) Measuring physical activity and energy expenditure. In: *Doubly Labeled Water*. Pp. 17-25. Human Kinetics, Champaign, IL, USA.
- Schoeller DA, Ravussin E, Schutz Y, Acheson KJ, Baertschi P and Jequier E (1986) Energy expenditure by doubly labeled water :validation in humans and proposed calculation. *Am J Physiol* 250: R823-R830.
- Weir JB (1949) New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109:1-9.
- Black AE, Prentice AM and Coward WA (1986) Use of food quotients to predict respiratory quotients for the doubly labelled water method of measuring energy expenditure. *Hum Nutr Clin Nutr* 40C:381-391.
- Touno M, Rafamantanantsoa HH, Ebine N, Peng HY, Yoshitake Y, Tanaka H and Saitoh S (2003) Measurement of total energy expenditure in Japanese firefighters under normal working condition using the doubly labeled water method. *Jpn J Phys Fitness Sports Med* 52:265-274.
- Ebine N, Feng J-Y, Homma M, Saitoh S and Jones PJH (2000) Total energy expenditure of elite synchronized swimmers measured by the doubly labeled water method. *Eur J Appl Physiol* 83:1-6.
- 柏崎浩 (2001) エネルギー代謝測定方法-最近の進歩。臨床スポーツ医学 18:409-418.
- Jones PJH, Martin LJ, Su W and Boyd NF (1997) Canadian recommended nutrient intakes underestimate true energy requirements in middle-aged women. *Canadian J Public Health* 88:314-319.
- Roberts SB and Dallal G.E (1998) Effects of age on energy balance. *Am J Clin Nutr* 68:975S-979S.
- World Health Organization. *Energy and Protein Requirements (1985)* /井上五郎訳:エネルギー・蛋白質の必要量。1989, 医歯薬出版, 東京。
- Yao M, McCrory MA, Ma G, Li Y, Dolnikowski, GG and Roberts SB (2002) Energy requirements of urban Chinese adults with manual or sedentary occupations, determined using the doubly labeled water method. *Eur J Clin Nur*

- 56: 575-584.
14. Black AE, Coward WA Cole TJ and Prentice AM (1996) Human energy expenditure in affluent societies: an analysis of 574 doubly-labelled water measurements. *Eur J Clin Nutr* 50: 72-92.
  15. 健康・栄養情報研究会 (1999) 第六次改定日本人の栄養所要量—食事摂取基準—. 第一出版, 東京。
  16. Rafamantanantsoa HH, Eblne N, Yoshioka M, Higuchi H, Yoshitake Y, Tanaka H, Saitoh S and Jones PJH (2002) Validation of three alternative methods to measure total energy expenditure against the doubly labeled water method for older Japanese men. *J Nutr Sci Vitaminol* 48:517-523.
  17. 彭雪英、吉武裕、齊藤慎一 (2004) 中年女性における簡易エネルギー消費量推定法の検討—二重標識水法との比較。肥満研究 10:49-58。
  18. 厚生労働省策定 (2005) 日本人の食事摂取基準 (2005 年版)。第一出版, 東京。
  19. 行政院衛生署 (2003) 國人膳食營養素參考攝取量及其說明。修訂第六版, p20-21, 台北市。
  20. 海老根直之、島田美恵子、田中宏暁、西牟田守、吉武裕、齋藤慎一、Peter PTH (2002) 二重標識水法を用いた簡易エネルギー消費量推定法の評価—生活時間調査法、心拍数法、加速度計法について— 体力科学 51:151-164.
  21. Conway JM, Seale JL, Jacobs JrDR, Irwin ML and Ainsworth BE (2002) Comparison of energy expenditure estimates from doubly labeled water, a physical activity questionnaire, and physical activity records. *Am J Clin Nutr* 75 : 519-525.
  22. Leenders NYJM, Sherman WM, Nagaraja HN and Kien CL (2001) Evaluation of methods to assess physical activity in free-living conditions. *Med Sci Sports Exerc* 33 : 1233-1240.
  23. Bland JM and Altman DG (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1:307-310.
  24. Westererp KR (2001) Pattern and intensity of physical activity. *Nature* 410:539.
  25. Oguma Y, Sesso HD, Paffenbarger JrRS and Lee I-M (2002) Physical activity and all cause mortality in women: a review of the evidence. *Br J Sports Med* 36: 162-172.
  26. Lee I-M and Paffenbarger RS Jr (1998) Physical activity and stroke incidence. The Harvard alumnihealth study. *Stroke* 29:2049-2054.

## 以二重標識水法測定消耗熱量及其應用研究

### Determination of Daily Energy Expenditure by Doubly Labeled Water Method and Its Application

彭雪英\*<sup>1</sup> 吉武裕<sup>2</sup> 齊藤慎一<sup>3</sup> 陳全壽<sup>4</sup>

<sup>(1)</sup> 筑波大学人間総合科学研究科博士課程

〒305-8574 日本國 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>(2)</sup> 鹿屋体育大学体育学部生涯スポーツ学講座

〒891-2393 日本國 鹿児島県鹿屋市白水町 1 番地

<sup>(3)</sup> 筑波大学体育科学系

〒305-8574 日本國 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>(4)</sup> 行政院體育委員會主任委員

台北市朱崙街 20 號 11 樓

(收稿日期：94 年 4 月 28 日。接受日期：94 年 8 月 10 日)

**摘要** 身體活動量不足所造成的消耗熱量偏低及過食所造成的營養失調，可說是肥胖及現代成人病日漸增加的主因。故在健康維持及成人病預防的對策上，除鼓勵增加身體活動量（運動）以提高消耗熱量外，營養方面（攝取熱量的均衡）的改善也是一項重要的課題。因此，正確評估日常生活狀態下之每日消耗熱量（daily energy expenditure, DEE）與身體活動指數（physical activity level, PAL）方面的研究漸受到重視。二重標識水（doubly labeled water, DLW）法是一個能夠測定日常生活狀態下之 DEE 的新測定法，具有高精確度及無需限制受試者行動等的優點。本文章介紹以 DLW 法來測定 DEE 及其相關應用研究。

**關鍵詞：**二重標識水法、每日消耗熱量、身體活動指數、每日所需熱量、生活時間調查法