

## 地下水流動特性の長期的変化の推定に用いる 表層水理に関する情報の整理

Compilation of Near-Surface Hydrological Information  
for Estimation of Long-Term Change on Groundwater Flow Conditions

草野 友宏 安江 健一 竹内 竜史 三枝 博光  
宮原 智哉

Tomohiro KUSANO, Ken-ichi YASUE, Ryuji TAKEUCHI, Hiromitsu SAEGUSA  
and Tomoya MIYAHARA

地層処分研究開発部門  
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

地下水流動特性の長期的変化の推定に用いる表層水理に関する情報の整理

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

草野 友宏<sup>\*</sup>, 安江 健一, 竹内 竜史, 三枝 博光, 宮原 智哉<sup>\*</sup>

(2009年12月18日受理)

国内外の約50編の文献に示された84地区の蒸発散量のデータを収集し、年間の蒸発散量に関する情報を整理した。これらの情報を、算定手法・位置・流域特性・蒸発散量・降水量などを地区ごとに示した一覧表にまとめた。整理の結果、以下のようなデータの傾向が示された。(1) 実蒸発散量の算定において、国内では、熱収支法、補完法、Penman法を用いた事例が多い。(2) 実蒸発散量は、北海道では、おおよそ400~600 mm/y (道東では200 mm/y 台もある)、関東~中部では、おおよそ500~600 mm/y、近畿~九州では、おおよそ800~950 mm/yである。(3) 海外の寒冷地での実蒸発散量は、カナダ南東部やヨーロッパ中部では、おおよそ400~600 mm/yであり、高緯度ほど低下して、北極圏にかかる場所では100 mm/y 台に低下する。(4) 実蒸発散量は緯度や平均気温に調和的な分布を示す。(5) 各地区の涵養量を水収支式(降水量-蒸発散量-河川流出量)により計算すると、涵養量の値は、おおよそ-250~400 mm/yの範囲の値を示し、平均気温、流域面積、土地被覆タイプ(植生)と涵養量との関係にはほとんど相関が見られない。東濃や幌延における観測では、流域の上流から下流にわたって涵養量の違いが見られ、その違いは河川流出量が大きく影響していると考えられ、各地区の涵養量のばらつきも、河川流出量の影響を受けていると推定される。

---

東濃地科学センター (駐在) : 〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

※ 技術開発協力員

\* アジア航測株式会社

Compilation of Near-Surface Hydrological Information  
for Estimation of Long-Term Change on Groundwater Flow Conditions

Tomohiro KUSANO<sup>※</sup>, Ken-ichi YASUE, Ryuji TAKEUCHI, Hiromitsu SAEGUSA  
and Tomoya MIYAHARA \*

Tono Geoscientific Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received December 18, 2009)

Annual evapotranspiration data for 84 sites in Japan and other countries reported in approximately 50 literatures were collected. The data were compiled into tables listing locality, site characteristics, estimation method, value of annual evapotranspiration, precipitation etc. The results are summarized as follows, (1) Major methods for estimating actual evapotranspiration in Japan are the heat budget, the complementary relationship, and Penman methods. (2) Annual actual evapotranspirations are estimated 400–600 mm/y in Hokkaido (200 mm/y in East Hokkaido), and 500–600 mm/y from Kanto to Chubu, and 800–950 mm/y from Kinki to Kyushu. (3) Actual evapotranspirations, 400–600 mm/y in Southeast Canada and central Europe, decrease with latitude to 100–200 mm/y in the Arctic Circle. (4) Actual evapotranspiration is in harmony with latitude and annual mean temperature. (5) Groundwater recharge rate in the sites calculated by the water budget method (Precipitation – Evapotranspiration – Runoff) shows high variability ranging from –250 to 400 mm/y. The relationship between recharge rate and catchment characteristics is not clear. Tono and Horonobe test sites have the advantage of consisting of several catchments situated in recharge and discharge areas to understand distribution of recharge rate. Runoff influences a difference of recharge rate.

Keywords: Long-Term Stability of Geological Environments, Actual Evapotranspiration, Groundwater Recharge Rate, Water Budget Method, Precipitation, Runoff

---

※ Collaborating Engineer

\* Asia Air Survey Co., Ltd.

目次

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1. はじめに               |    |
| 1.1 目的                | 1  |
| 1.2 調査内容の概要           | 1  |
| 2. 情報収集の方法と対象文献       |    |
| 2.1 対象文献の選定方法         | 2  |
| 2.1.1 候補文献の抽出         | 2  |
| 2.1.2 対象文献の選定         | 2  |
| 2.2 対象文献              | 2  |
| 3. 蒸発散量の観測・推定に関する情報   |    |
| 3.1 蒸発散量の算定手法         | 6  |
| 3.1.1 蒸発散量の測定手法       | 6  |
| 3.1.2 蒸発散量の推定方法       | 9  |
| 3.2 文献・地区ごとの蒸発散量の情報   | 12 |
| 3.2.1 国内の蒸発散量の観測・推定事例 | 12 |
| 3.2.2 海外の蒸発散量の観測・推定事例 | 19 |
| 3.2.3 広域の蒸発散量の推定結果    | 27 |
| 3.3 蒸発散量と涵養量          | 28 |
| 3.3.1 蒸発散量の分布         | 28 |
| 3.3.2 涵養量の値と分布        | 44 |
| 3.4 考察                | 48 |
| 4. まとめ                | 51 |
| 参考文献                  | 52 |

## Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction   |    |
| 1.1 Purpose   | 1  |
| 1.2 Overview of research  | 1  |
| 2. Method and object documents of intelligence                                  |    |
| 2.1 Choice method of object documents   | 2  |
| 2.1.1 Extraction of candidate documents   | 2  |
| 2.1.2 Choice of object documents  | 2  |
| 2.2 Object documents  | 2  |
| 3. Information about observation / estimate of quantity of evapotranspiration   |    |
| 3.1 Calculation technique of quantity of evapotranspiration                     | 6  |
| 3.1.1 Measurement technique of evapotranspiration                               | 6  |
| 3.1.2 Presumed method of quantity of evapotranspiration                         | 9  |
| 3.2 Information of quantity of evapotranspiration every documents / district    | 12 |
| 3.2.1 Observation / presumed example of quantity of domestic evapotranspiration | 12 |
| 3.2.2 Observation / presumed example of quantity of overseas evapotranspiration | 19 |
| 3.2.3 Presumed result of quantity of evapotranspiration of wide area            | 27 |
| 3.3 Quantity of evapotranspiration and recharge                                 | 28 |
| 3.3.1 Distribution of quantity of evapotranspiration                            | 28 |
| 3.3.2 Value and distribution of quantity of cultivation                         | 44 |
| 3.4 Consideration   | 48 |
| 4. Conclusion   | 51 |
| References  | 52 |

図リスト

|             |                       |    |
|-------------|-----------------------|----|
| Fig.3.3.1-1 | 国内の蒸発散量の観測地区          | 38 |
| Fig.3.3.1-2 | 海外寒冷地の蒸発散量観測地区（北米）    | 39 |
| Fig.3.3.1-3 | 海外寒冷地の蒸発散量観測地区（ヨーロッパ） | 40 |
| Fig.3.3.1-4 | 海外寒冷地の蒸発散量観測地区（アジア）   | 41 |
| Fig.3.3.1-5 | 緯度と年間実蒸発散量の関係         | 42 |
| Fig.3.3.1-6 | 年平均気温と年間実蒸発散量の関係      | 42 |
| Fig.3.3.1-7 | 土地被覆タイプ別の実蒸発散量のヒストグラム | 43 |
| Fig.3.3.2-1 | 平均気温と涵養量の関係           | 46 |
| Fig.3.3.2-2 | 流域面積と涵養量の関係           | 47 |
| Fig.3.3.2-3 | 土地被覆タイプ別の涵養量のヒストグラム   | 47 |

表リスト

|               |                         |    |
|---------------|-------------------------|----|
| Table 2.2.1   | 対象とした文献と記載地域の概要         | 3  |
| Table 3.3.1-1 | 各地区の水収支，特に蒸発散量に係るデータの整理 | 29 |
| Table 3.3.2-1 | 各地区の涵養量の値               | 45 |

This is a blank page



## 1. はじめに

### 1.1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保に関し、処分場及びその周辺の地質環境への主な影響として、降水量の変化や海水面の昇降により、地下水の流動特性や水質及び侵食速度が変化することなどが考えられる（原子力安全委員会, 2002<sup>1)</sup>）。このことから、気候変動・海水準変動などの天然現象に伴って地下水の流動特性や水質がどの程度変化するのかという情報は重要となる。よって、独立行政法人日本原子力研究開発機構では、天然現象を考慮した地下水流動解析手法の開発を進めている。

地下水流動解析の際、上部境界条件を設定する上で岩盤への涵養量を推定することが必要となる。その算出方法のひとつに水収支法がある。水収支式は、ある地域の一定期間における水の流入・流出の平衡状態を示したものであり、降水量、河川流出量、蒸発散量、涵養量の各パラメータから成り立っている。このうち、降水量、河川流出量、蒸発散量が測定できれば、残りの涵養量は間接的に求められる。しかし、広域を代表するような蒸発散量は、直接測定することが難しいので、気象データに基づく算定法及び蒸発計蒸発量によるものが用いられる。降水量、河川流出量についても広域を対象とする場合、すべての流域において観測することは困難であり、データの代表性という問題が解析精度を左右する可能性がある。

地下水流動特性の長期的変化の推定において広域を対象とする場合、取得するデータとしては、一般的な値の平均だけでなく、値の幅を把握することが重要となる。そこで、本研究では、日本全国の蒸発散量など表層水理に関する情報を整理し、全体の傾向について把握する。

また、過去数十万年間は、温暖化と寒冷化がほぼ 10 万年周期で繰り返している。現在は温暖な時期であるが、この周期性が将来も続くとする、この先、寒冷な時期が訪れることが想定される。そこで、寒冷な時期における日本での涵養条件を考える際、現在の日本に加え、それよりも寒冷な気候条件下にある別の地域の水文・地下水条件を参考にするには、地質環境の長期変化の評価において有効と考えられる。そこで、本研究では、寒冷化の場合を考慮して、日本より高緯度の海外の地域についても蒸発散量など表層水理に関する情報を整理する。

### 1.2 調査内容の概要

日本全国及び日本より高緯度の海外の地域から蒸発散量に関する情報を約 50 編収集し、地点、推定（算出）手法、使用観測データ、観測手法、観測点付近の情報（植生、地形など）、期間などの蒸発散量を推定するのに重要な情報と併せて整理した。対象としたのは、原則として年間（1 年以上）のデータであり、水収支法で計算された蒸発散量の値は使用しなかった。データは日本全国を対象とし、特定地域に集中しないように収集した。蒸発散量のデータを取得した地点近傍の降水量と流出量のデータも整理し、これらの水収支に基づいて涵養量を算出した。得られたデータについては、図表を用いて整理した。

## 2. 情報収集の方法と対象文献

### 2.1 対象文献の選定方法

#### 2.1.1 候補文献の抽出

次の3つの方法により、調査対象の候補となる文献を抽出した。

- ・過去の表層水理関連業務の報告書で参考文献として引用された文献  
「表層地下水流動機構の把握のための観測システムの設計（平成9年）」<sup>2)</sup>、「深地層研究所(仮称)計画における表層水理観測計画の策定（平成13年）」<sup>3)</sup>、「表層水理調査における流域特性を考慮した蒸発散量・降水量の追加測定地点の選定（平成16年）」<sup>4)</sup>での引用文献
- ・国内外の主要な関連学会誌・研究所報告などの掲載論文の検索  
水文・水資源学会誌、水文科学会誌、日本林学会誌、水工学論文集、農業気象、寒地土木研究所報告、北海道大学低温研究所報告、北海道大学演習林研究報告、東京大学農学部演習林報告、京都大学農学部演習林報告、森林総合研究所研究報告、*Journal of Hydrology*, *Hydrological Processes* など
- ・インターネットによる検索  
Googleによるキーワード「蒸発散量〇観測〇年間」「蒸発散量〇観測〇年間〇寒冷地」「*evapotranspiration〇annual〇observation〇(Canada〇Alaska〇Finland〇Sweden〇UK〇Siberia)*」で抽出された文献

また、こうして抽出された文献の引用文献リストにある文献（孫引き文献）のうち、年間の蒸発散量が掲載されている可能性のある文献も収集した。

#### 2.1.2 対象文献の選定

抽出・収集した候補文献より、文献の記載内容を見た上で、以下の基準に従って、対象の文献を選定した。

- ・年間の蒸発散量が算出されている文献を対象とする。（年間蒸発散量が数字で記されていない場合、グラフなどから読み取ることができれば対象とする。）
- ・実蒸発散量が示されておらず、可能蒸発散量だけのものも記載する。
- ・水収支法により蒸発散量が推定されている文献（例えば、蒸発散量を降水量から流出量を差し引いた残分として計算しているもの）は対象外とする。
- ・同じサイトで複数の算定手法が併記・比較されているものは、算定方法・対象データが明確であればそれぞれを記載する。
- ・衛星データ（NDVIなど）を用いた蒸発散量の広域分布推定の手法開発の文献では、検証用に使用した実測値・推定値を対象とし、衛星データを用いて二次的に推定した値は対象外とする。

### 2.2 対象文献

対象とした文献・地区をTable 2.2.1に示す。国内（北海道～沖縄）及び海外の寒冷地（主として、中～北部ヨーロッパ、ロシア、カナダ）の文献を選定した。

Table 2.2.1 対象とした文献と記載地域の概要 (1/3)

| 文 献   | 地 域            |
|---|----------------|
| <p>○サロベツ<br/>羽山・中津川 (2002) <sup>5)</sup>: サロベツ湿原の水循環と地下水への影響.</p> <p>○幌延<br/>瀬尾ほか (2005) <sup>6)</sup>: 幌延深地層研究計画における水収支法による岩盤浸透量の推定—2003年8月～2004年7月—.<br/>核燃料サイクル開発機構 (2005) <sup>7)</sup>: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1 深地層の科学的研究—.</p> <p>○母子里<br/>Ishii et al. (2004a) <sup>8)</sup>: Water balance of a snowy watershed in Hokkaido, Japan.</p> <p>○札幌周辺の流域<br/>加藤ほか (1999) <sup>9)</sup>: 石狩川流域における水収支と蒸発散量の推定.<br/>口澤・中津川 (2002) <sup>10)</sup>: 森林域の水・熱フラックスを考慮した積雪と蒸発散の推定.<br/>石田ほか (2002) <sup>11)</sup>: 研究課題積雪寒冷地の水循環の解明とモデリング.</p> <p>○美々川付近<br/>馬場 (2001) <sup>12)</sup>: 損失を考慮した貯留関数型流出モデルおよび浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルの開発と応用に関する研究.<br/>井形 (1998) <sup>13)</sup>: 湿原及び草地における年間実蒸発散量の観測.</p> <p>○石狩川流域<br/>加藤ほか (1999) <sup>9)</sup>: 石狩川流域における水収支と蒸発散量の推定.<br/>工藤・中津川 (2004) <sup>14)</sup>: 長期熱・水収支モデルによる石狩川流域の水文諸量の推定.</p> <p>○釧路川流域<br/>工藤・中津川 (2005) <sup>15)</sup>: 釧路湿原の水循環と地下水の動向について.</p> | <p>北海道</p>     |
| <p>○十和田<br/>近藤・渡辺 (1991) <sup>16)</sup>: 広域陸面の蒸発—研究の指針—.</p> <p>○奥只見 (衛星データ利用のための検証データ)<br/>多田ほか (1994) <sup>17)</sup>: NDVIを用いた広葉樹林帯の蒸発散分布推定.</p> <p>○つくば (ライシメータによる)<br/>古藤田 (1984) <sup>18)</sup>: 草地の熱収支と蒸発散.<br/>竹内 (1989) <sup>19)</sup>: ライシメータ法による蒸発散量の推定.</p> <p>○箱根<br/>板寺 (2005) <sup>20)</sup>: 仙石原地域における蒸発散量の推定.</p>   | <p>東北～関東</p>   |
| <p>○輪島<br/>中川 (1978) <sup>21)</sup>: 輪島における熱収支・水収支の気候学的推定.</p> <p>○東濃<br/>宮原ほか (2002) <sup>22)</sup>: 広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討.</p> <p>○愛知演習林での水収支観測<br/>寺嶋ほか (1993) <sup>23)</sup>: 花崗岩山地の二小流域における深部地下水浸透量の比較研究.</p>  | <p>中部～九州ほか</p> |

Table 2.2.1 対象とした文献と記載地域の概要 (2/3)

| 文 献   | 地 域              |
|---|------------------|
| <p>○補完法などによる各地の演習林等での蒸発散量推定<br/>           大槻ほか (1984a)<sup>24)</sup> : 計器蒸発量, 蒸発散位と実蒸発散量の関係.<br/>           大槻ほか (1984b)<sup>25)</sup> : 水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較.<br/>           大槻ほか (1984c)<sup>26)</sup> : 気象資料から推定したわが国の蒸発散量.<br/>           谷・阿部 (1987)<sup>27)</sup> : 森林変化の流出に及ぼす影響の流出モデルによる評価.<br/>           Rampisela et al. (1990)<sup>28)</sup> : Application of the PENMAN-MONTEITH Model to the estimation of the evapotranspiration rate of a forested watershed.</p> <p>○CI濃度を利用した蒸発散量推定<br/>           二宮ほか (2007)<sup>29)</sup> : 水とCIの収支から推定される流域蒸発散量.</p> <p>○水収支法による推定 (植物の成長と蒸発散量の関係)<br/>           Hashino et al. (1999)<sup>30)</sup> : Separation of rainfall interception and transpiration from annual evapotranspiration in forested watersheds.</p> | <p>中部～九州ほか</p>   |
| <p>○オンタリオの Mer Bleue 湿地<br/>           Lafleur et al. (2005)<sup>31)</sup> : Annual and seasonal variability in evapotranspiration and water table at a shrub-covered bog in southern Ontario, Canada.</p> <p>○カナダ全域の気候区別広域蒸発散量<br/>           Fernandes et al. (2007)<sup>32)</sup> : Trends in land evapotranspiration over Canada for the period 1960–2000 based on in situ climate observations and a land surface model.</p>   | <p>北米 (カナダ)</p>  |
| <p>○フィンランドの地層処分候補地区の水文調査<br/>           Teollisuuden Voima Oy (1992)<sup>33)</sup> : Final disposal of spent nuclear fuel in the Finnish bedrock: preliminary site investigations.</p> <p>○スウェーデンの地層処分関連地区の水文調査<br/>           Carlsson and Gidlund (1983)<sup>34)</sup> : Evaluation of the hydrogeological conditions at Finnsjön.<br/>           Gustafsson et al. (2006)<sup>35)</sup> : Simulated carbon and water processes of forest ecosystems in Forsmark and Oskarsham during a 100-year period.</p> <p>○リトアニアの広域蒸発散量<br/>           Kilkus et al. (2006)<sup>36)</sup> : Changes in water balance structure of Lithuanian Rivers under different climate change scenarios.</p>   | <p>北ヨーロッパ</p>    |
| <p>○アイルランド各地<br/>           Mills (2000)<sup>37)</sup> : Modelling the water budget of Ireland—evapotranspiration and soil moisture.</p> <p>○スイスのデルタの水収支観測<br/>           Mdaghri-Alaoui and Eugster (2001)<sup>38)</sup> : Field determination of the water balance of the Areuse River delta, Switzerland.</p> <p>○英国での観測<br/>           Wadey et al. (2001)<sup>39)</sup> : Radionuclide transport above a near-surface water table: III. soil migration and crop uptake of three gamma-emitting radionuclides, 1990 to 1993.</p>  | <p>ヨーロッパ～ロシア</p> |

Table 2.2.1 対象とした文献と記載地域の概要 (3/3)

| 文 献   | 地 域  |
|---|--|
| <p>Bradford and Acreman (2003)<sup>40</sup> : Applying MODFLOW to wet grassland in-field habitats: a case study from the Pevensy Levels, UK.</p> <p>Hulme (2006)<sup>41</sup> : Red Moss of Netherley Site of Special Scientific Interest: an ecohydrological study.</p> <p>○ロシア Valdai の観測</p> <p>Gusev and Nasonova (2003)<sup>42</sup> : The simulation of heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP.</p>   | <p>ヨーロッパ～ロシア</p>   |
| <p>○北方寒冷各地の水収支</p> <p>Shutov et al. (2006)<sup>43</sup> : Evaporation from land surface in high latitude areas: a review of methods and study results.</p> <p>以下は、Shutov et al. (2006)<sup>43</sup>に引用されたワークショップ論文集の論文（原文未入手，要旨のみ）</p> <p>Shutov, V. A. (2004)<sup>44</sup> : Extensive studies in boreal wetland watersheds in northwestern Russia.</p> <p>Balonishnikova et al. (2004)<sup>45</sup> : Water balances of experimental watersheds in the Valdai Branch of the State Hydrological Institute (SHI), Russia.</p> <p>Seuna and Linjama (2004)<sup>46</sup> : Water balances of the northern catchments of Finland.</p> <p>Killingtveit, Å. (2006)<sup>47</sup> : Water balance studies in two catchments on Spitsbergen, Svalbard.</p> <p>Vasilenko, N. G. (2004)<sup>48</sup> : Water balance of small Russian catchments in the southern mountainous Taiga Zone: “Mogot” case study.</p> <p>Zhuravin, S. A. (2004)<sup>49</sup> : Features of water balance for small mountainous watersheds in East Siberia: Kolyma Water Balance Station case study.</p> <p>Ishii et al. (2004b)<sup>50</sup> : Summer water balance in an Arctic tundra basin, eastern Siberia.</p> <p>Thorne and Hawkins (2004)<sup>51</sup> : Hydrological processes and water balance for the Dead Creek watershed of southeastern Manitoba, 1982–1995.</p> <p>Janowicz et al. (2004)<sup>52</sup> : Wolf Creek research basin water balance studies.</p> <p>Reid and Faria (2004)<sup>53</sup> : Evaporation studies in small NWT watersheds.</p> <p>Bolton et al. (2004)<sup>54</sup> : Water balance dynamics of three small catchments in a Sub-Arctic boreal forest.</p> <p>Young and Woo (2004)<sup>55</sup> : Queen Elizabeth Islands: water balance investigations.</p> <p>Hasholt and Mernild (2004)<sup>56</sup> : Estimation of water balance in and around the Mittivakkat Glacier basin, Ammassalik Island, southeast Greenland.</p> | <p>高緯度寒冷各地<br/>(レビュー論文)</p> <p>ヨーロッパロシア</p> <p>フィンランド</p> <p>ノルウェー</p> <p>シベリア</p> <p>カナダ</p> <p>アラスカ</p> <p>カナダ，グリーンランド</p> |
| <p>○中国の乾燥地域</p> <p>Wang et al. (2004)<sup>57</sup> : Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area.</p>  | <p>アジア中部</p>   |

3. 蒸発散量の観測・推定に関する情報

3.1 蒸発散量の算定手法

ここでは、次節以降に示す各地区の蒸発散量の算定の際に用いられた方法について、中川（1996）<sup>58)</sup>、鈴木（1992）<sup>59)</sup>、畑（2000）<sup>60)</sup>、口澤・中津川（2002）<sup>10)</sup>などに従って示す。

3.1.1 蒸発散量の測定手法

(1) 熱収支法

基本となるのは、純放射フラックスが水蒸気の気化潜熱と顕熱フラックス・地中熱流量・温度変化の和であることを示した熱収支式である。

$$R_n = H + \lambda E + G$$

$R_n$ : 純放射量 (正味の放射量)       $H$ : 顕熱フラックス  
 $\lambda$ : 気化潜熱       $E$ : 蒸発散量       $G$ : 地中熱流量

地表や植被層 (森林) をどのようにモデル化するかによって、いくつかの方法がある。

1) ボーエン比法

顕熱フラックス  $H$  と潜熱フラックス  $\lambda E$  がそれぞれ鉛直方向の温度勾配と湿度勾配に比例することから、2 高度での温度と湿度 (比湿) を用いて  $H$  と  $E$  は次のように表される。

$$H = C_p \rho \kappa^2 \frac{(u_2 - u_1)(T_1 - T_2)}{[\ln\{(z_2 - d)/(z_1 - d)\}]^2}$$

$$E = \rho \kappa^2 \frac{(u_2 - u_1)(q_1 - q_2)}{[\ln\{(z_2 - d)/(z_1 - d)\}]^2}$$

$$H/E = C_p \frac{(T_2 - T_1)}{(q_2 - q_1)}$$

$C_p$ : 空気の定圧比熱 (1.006)       $\rho$ : 空気の密度 (1.18)       $\kappa$ : カルマン定数 (0.41)  
 $z_1, z_2$ : 高度       $d$ : 基準面の高度       $u_1, u_2$ : 高度  $z_1, z_2$  における風速  
 $T_1, T_2$ : 高度  $z_1, z_2$  における温度       $q_1, q_2$ : 高度  $z_1, z_2$  における比湿

これと上記の熱収支の基本式より、 $E$  は以下のように整理される。

$$R_n - G = H + \lambda E$$

$$R_n - G = EC_p \frac{(T_2 - T_1)}{(q_2 - q_1)} + \lambda E = E \left( \lambda + C_p \frac{(T_2 - T_1)}{(q_2 - q_1)} \right)$$

$$E = (R_n - G) / \left( \lambda + C_p \frac{(T_2 - T_1)}{(q_2 - q_1)} \right)$$

$R_n, G, T_1, T_2, q_1, q_2$  のデータを用いて  $E$  を計算する。顕熱と潜熱のフラックス比 ( $H/\lambda E$ ) をボーエン比と呼ぶ。

2) 2層モデル

地表面と植被層のそれぞれの熱収支に基づく蒸発散量を，下記の基礎式（近藤，1994）<sup>61)</sup>に基づき計算し，それらの和を蒸発散量として表す。

$$\text{地表面； } f_v R \downarrow + (1 - f_v) \sigma T_v^4 - G = \sigma T_g^4 + H_g + \lambda E_g$$

$$\text{植被層； } (1 - f_v)(R \downarrow + \sigma T_g^4) = 2(1 - f_v) \sigma T_v^4 + H_v + \lambda E_v$$

$$H_g = C_p \rho C_{Hg} u (T_g - T)$$

$$\lambda E_g = \lambda \rho \beta_g C_{Hg} u \left\{ e_{sat}(T_g) - e \right\} \frac{0.622}{p}$$

$$H_v = C_p \rho C_{Hv} u (T_v - T)$$

$$\lambda E_v = \lambda \rho \beta_v C_{Hv} u \left\{ e_{sat}(T_v) - e \right\} \frac{0.622}{p}$$

$$f_v = \exp(-F \cdot LAI)$$

$$\sigma T_v^4 \doteq \sigma T^4 + 4\sigma T^3(T_v - T)$$

$$\sigma T_g^4 \doteq \sigma T^4 + 4\sigma T^3(T_g - T)$$

$$E = E_v + E_g$$

$H_g, H_v$ ；各地表面及び植被層からの顕熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$\lambda E_g, \lambda E_v$ ；各地表面及び植被層からの潜熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$E_g, E_v$ ；各地表面及び植被層からの蒸発散量 (mm/s)

$E$ ；全蒸発散量 (mm/s)

$T_g, T_v$ ；各地表面及び植被層の代表温度 (°C)

$R \downarrow$ ；下向き正味放射量 (W/m<sup>2</sup>)

$G$ ；地中伝達熱量 (W/m<sup>2</sup>)

$\sigma$ ；ステファン・ボルツマン係数 (=5.67×10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>)

$\lambda$ ；蒸発潜熱 (=2.50×10<sup>6</sup> J/kg)

$\rho$ ；空気密度 (=1.2 kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$ ；空気の定圧比熱 (=1,004 J/kg/K)

$p$ ；大気圧 (hPa)

$C_{Hg}, C_{Hv}$ ；各地表面～大気間及び植被層～大気間のバルク輸送係数

$\beta_g, \beta_v$ ；各地表面及び植被層の蒸発効率

$u$ ；代表高度での風速 (m/s)

$T$ ；代表高度での気温 (°C)

$e, e_{sat}$ ；各代表高度での水蒸気圧 (hPa) 及び飽和水蒸気圧 (hPa)

$f_v$ ；放射に対する植被層の透過率

$F$ ；各放射に対する葉面の傾きを表すファクター (=0.5；等方的)

$LAI$ ；各葉面積指数

この式は積雪期にも拡張され，積雪があると判定された部分では地表面を積雪面として計算する。樹冠の遮断蒸発量は降雨強度によって算出される（口澤・中津川，2002）<sup>10)</sup>。実際の計算で入力される観測値は，純放射量（下向き正味放射量），代表高度での気温・風速，降水量・降雨時間，積雪深であり，バルク係数や蒸発効率は設定値を用いる。

3) 単層モデル

植被層と地表面を分けず、植物群落として1つの熱収支式(代表的な地表面温度を近似的に使う)を用いて計算する方法である。

(2) 空気力学法(傾度法, バルク法)

比湿の鉛直勾配(湿度, 温度)を用いて蒸発散量を求める。大気が中立平衡にあるとすると、運動量及び水蒸気の乱流拡散係数が等しく、また風速分布は基準面からの高さに応じた対数則に従うと仮定できるので、蒸発散量は次の式で表される。

$$E = \rho \kappa^2 \frac{(u_2 - u_1)(q_1 - q_2)}{[\ln\{(z_2 - d)/(z_1 - d)\}]^2}$$

$E$ : 蒸発散量[ML<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]     $\rho$ : 空気の密度     $\kappa$ : カルマン定数     $d$ : 基準面の高度  
 $q_1, q_2$ : 高度  $z_1, z_2$  における比湿     $u_1, u_2$ : 高度  $z_1, z_2$  における風速

2つの高度での風速・湿度と気温の測定値があれば  $E$  が計算される。傾度法では風速分布が対数分布していることが前提となる。

2高度のうちの1つを地表面に選んだものはバルク法と呼ばれる。

(3) 渦相関法

1つ1つの乱渦が運ぶ輸送量(風速の鉛直成分, 気温, 湿度)の瞬間値を逐次測定して、蒸発散量(すなわち、鉛直方向に輸送される水蒸気量)を直接求める。蒸発散量は、鉛直方向の水蒸気輸送量として次の式で表される。

$$E = \overline{\rho w q}$$

$E$ : 蒸発散量[ML<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]     $\rho$ : 空気の密度     $w$ : 風速の鉛直成分     $q$ : 比湿  
 記号上のバーは時間  $t$  の間の平均を表す

しかし、風速・気温には極めて高い測定精度が必要で、これを長期間継続することは難しく、連続観測には適していない。

(4) 蒸発パンによる計器計測

パンの水位を一定時間ごとに測定する。蒸発パンで得られるのは基準蒸発量としての水面からの蒸発量である(草地など植生のある場所での可能蒸発散量とは異なる)。

我が国では気象庁により小型パン(直径20 cm)での観測が行われてきたが、1965年頃を境に大型蒸発パン(直径120 cm)による全国14か所のみの観測に切り替えられた。大型パンの蒸発量は小型パンでの計測値に0.78をかけて補正する(植原・佐藤, 1983)<sup>62)</sup>。

(5) ライシメータ法

植生を含む土層の重量と水の流入・流出量を計測し、蒸発散量を算出する。2つの方法がある。

1) 水位ライシメータ法:

水槽内(二重槽の外槽に水を満たしたもの)の中に土壌槽が浮いており、水分を含めた土壌槽の重量とバランスした水位が水槽に現れ、蒸発散による消費水分の重量分の水槽水位の変化を測定す



る。土壌槽中の水位を一定に保つ場合、土壌槽底部に給水又は揚水して調節し、これらの水量も測定する。

2) ウェイングライシメータ :

ライシメータ内の土壌槽の重量を、それを載せた秤により測定する。水分は下端で周辺の土壌とつながっており、周辺土壌と平衡した水分状態での重量変化（蒸発散・降雨による変化）を測定する。ただし、側方からの水の移動は阻害されるため、蒸発散量が過小評価される可能性もある。

3.1.2 蒸発散量の推定方法

(1) Thornthwaite 法

Thornthwaite は、植物への水分供給量が増えるにつれて蒸発散量は増加し、最終的に気候条件のみによって決まる値に達すると考え、気温（と緯度から計算される日照時間）のみの関数として可能蒸発散量を推定する下記の式を示した。

$$E_p = 1.6 \left( \frac{10T_i}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = (492390 + 17920I - 77.1I^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6}$$

$E_p$  : 可能蒸発散量      $T_i$  : 月平均気温      $I$  : 熱示数

月平均気温が 26.5°C を超える場合はこの式は使えず、別途参照値を用いる。0°C 以下の月は  $E_p = 0$  とする。得られた値に月日数と昼の長さに応じた補正を加える。

Thornthwaite の式は、米国における流域水収支データと条件をコントロールしたライシメータによる実験データを基に誘導された経験式である。他地域での適用には注意を要し、日本では小型蒸発計蒸発量の季節変動と比較した場合に、冬～春は過小、夏～秋は過大となることが知られている。

(2) Hamon 法

Thornthwaite 法と同様に、気温と日照時間に基づき可能蒸発散量を計算する。使用する気温の関数は、その気温における絶対飽和湿度である。

$$E_p = 1.4 \times D_0^2 \times P(T)$$

$E_p$  : 可能蒸発散量      $D_0$  : 日照時間 (1日当たり 12 h を 1 単位とする)

$P(T)$  : 絶対飽和湿度 [ML<sup>-3</sup>]      $T$  : 日平均気温

(3) Priestly-Taylor 法

可能蒸発散量  $E_p$  を、放射収支の関数として次のように表す。

$$E_p = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left( \frac{R_n - G}{\lambda} \right)$$

$E_p$  : 可能蒸発散量     $\Delta$  : 飽和水蒸気曲線の傾き     $\gamma$  : 乾湿定数  
 $R_n$  : 純放射量     $G$  : 地中熱流量     $\lambda$  : 気化潜熱

これは、下記の Penman 式などに含まれる熱収支項 (=平衡蒸発量: 可能蒸発散量の最低値) に定数 1.26 を乗じたものである。Thorntwaite 法や Hamon 法と同様に、少ない観測量の入力で計算できる(地中熱流量  $G$  が無視できれば純放射量  $R_n$  のみから計算できる)。定数は、種々の広大な湿潤面の蒸発量が平衡蒸発量の 1.26 倍で表されることから経験的に求められたものである。この式は、活力が十分な時期の牧草地の蒸発散量によく適合するとされている。

#### (4) Penman 法

可能蒸発散量を、純放射量(及び地中熱流量)の関数である熱収支項と、気温・湿度・風速の関数である空気力学項の組み合わせで表す。

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left( \frac{R_n - G}{\lambda} \right) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s(T) - e_a)$$

$E$  : 可能蒸発散量     $\Delta$  : 飽和水蒸気曲線の傾き     $\gamma$  : 乾湿定数  
 $R_n$  : 純放射量     $G$  : 地中熱流量     $\lambda$  : 気化潜熱  
 $e_s(T)$  : 気温に対する飽和水蒸気圧     $e_a$  : 水蒸気圧  
 $f(u)$  : 風速の関数で、 $f(u) = 0.26(1.0 + 0.537u_2)$      $u_2$  : 地上 2 m での風速

右辺第1項は放射エネルギー項、第2項は空気力学項(飽和水蒸気圧と大気の水蒸気圧の差による項)である。Penman式は、地表や森林の植物の蒸散における蒸発散特性を右辺第2項で表現し、水蒸気圧の差(飽差)と風速の関数で近似している。

Penmanは、土壤水分が十分に供給された芝生からの蒸発散量が浅い水面からの蒸発量に比例することをライシメータの観測データから見出し、推定式を誘導した。上式で算出されるのは可能蒸発散量であり、実蒸発散量を求めるために南部イングランドでの経験係数として0.6(冬季)~0.8(夏季)を示している。他の地域ではそれぞれに適した係数を用いる必要がある。森林は適用対象とされていない。

#### (5) Makkink式(放射温度法, Penman簡易型法)

気温と日射量から蒸発量を推定する方法である。月蒸発量  $E_M$  を次の式で表現する。

$$E_M = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} + b$$

$E_M$  : 月蒸発散量     $\Delta$  : 飽和水蒸気曲線の傾き     $\gamma$  : 乾湿定数  
 $\lambda$  : 気化潜熱 (=  $2.5 - 0.0024T$ )     $T$  : 月平均気温  
 $R_s$  : 全天日射量 (=  $R_A(0.88 + 0.55n/N)$ )     $R_A$  : 大気圏外日射量  
 $n/N$  : 可照時間  $N$  に対する日照時間  $n$  の割合  
 $a, b$  : 地域係数(永井(1993)<sup>63)</sup>により日本全国の値がまとめられている

使用する観測値は、気温  $T$  と日照時間  $n$  である。こうして求めた月ごとの  $E_M$  を積算して年間の蒸発散量とする。元々この手法はオランダで開発された。

(6) Penman-Montieth 法

Penman 式に植物の蒸散抵抗を考慮し、植生面からの蒸発散量（実蒸発散量）について物理的なプロセス（オームの法則のアナロジー）を表した式である。

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left( \frac{R_n - G}{\lambda} \right) + \frac{\rho C_p (e_s(T_a) - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}$$

$E$ : 蒸発散量     $\Delta$ : 飽和水蒸気曲線の傾き     $\gamma$ : 乾湿定数     $R_n$ : 純放射量  
 $G$ : 地中熱流量     $\lambda$ : 気化潜熱     $\rho$ : 空気の密度     $C_p$ : 空気の定圧比熱  
 $e_s(T)$ : 気温に対する飽和水蒸気圧     $e_a$ : 水蒸気圧  
 $r_a$ : 空気力学的抵抗     $r_c$ : 群落抵抗

右辺第1項の熱力学項はPenman式と同じであるが、第2項が空気力学抵抗項 $r_a$ と群落抵抗 $r_c$ によって表されている。群落抵抗 $r_c$ は、環境に対する植物の主体的な反応（主に気孔の開閉）をパラメータ化したもので、植物の種ごとの水分生理や反応と密接な関係をもつ。群落抵抗 $r_c$ は森林の性質によって異なり、ボーエン比法や傾度法などによって別に求めた $\lambda E$ を用いて取得する必要があるが、代表的な森林での値が示された報告もある。

(7) 補完法

大槻ほか(1984a)<sup>24)</sup>は、Penman 法による可能蒸発散量  $E_p$  と熱収支法による実蒸発散量  $E_a$  の間には補完関係が成り立つこと ( $E_p$  と  $E_a$  の和は一定であること) を、蒸発パンなどの観測データに基づき確認した。これは、地表が乾燥状態になると、実蒸発散量は平衡蒸発量  $E_{eq}$  よりも小さくなるが、Penman 式による  $E_p$  は乾燥化に伴う湿度の低下 ( $e_a$  の減少) と気温上昇に伴う飽和水蒸気圧の増大 ( $e_s(T)$  の上昇) のために逆に大きく計算されるためである。そのため、平衡蒸発量を  $E_{eq}$  とすれば、

$$E_a + E_p = 2 E_{eq}$$

として表される。ここで平衡蒸発量  $E_{eq}$  は、放射量のみによって、

$$E_{eq} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left( \frac{R_n - G}{\lambda} \right)$$

と表され、Penman 式の空気力学を除いた、可能蒸発散量の最低値である。

この関係を利用して、 $E_p$  と  $E_{eq}$  が求められれば、実蒸発散量  $E_a$  が次のように算出される。

$$E_a = 2 E_{eq} - E_p$$

$E_{eq}$  と  $E_p$  に関してどのような物理式を用いるかによって次の方法がある。

1) Morton 式

$$E_{eq} = \varphi (R_m + M)$$

$$E_p = \{ \Delta R_m + c F (e_s(T) - e_a) \} / (\Delta + c)$$

2) Brutsaert-Stricker 式

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_c + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s(T_a) - e_a) \quad \text{Penman式}$$

$$E_p = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_c \quad \text{Priestley-Taylor 式}$$

$E$ : 蒸発散量     $\Delta$ : 飽和水蒸気曲線の傾き     $\gamma$ : 乾湿定数  
 $R_m$ : 純放射量 (Mortonによる式)     $R_c$ : 純放射量 (Changによる式)  
 $c$ : 熱輸送係数     $F$ : 水蒸気輸送係数     $\phi$ : エネルギー加重係数  
 $M$ : 移流項 (=  $0.661L - 0.44 R_m$ )     $L$ : 有効放射  
 $e_s(T_a)$ : 気温に対する飽和水蒸気圧     $e_a$ : 水蒸気圧

大槻ほか (1984a) <sup>24)</sup>は、Penman式の可能蒸発散量が地表面付近の局所的な微気象環境の影響を強く受けるものではないため、補完法による蒸発散量もある広がりを持った地域の平均的な値を表すと述べている。

(8) その他

このほか、Cl 濃度に基づく方法、Primault の経験法、熱 - 水 - 炭素収支などを考慮した総合的なモデル (EALCO モデル, CoupModel) などがあるが、これらについては次節の個別の事例の説明の中で示す。

3.2 文献・地区ごとの蒸発散量の情報

ここでは、対象とした文献に示されている蒸発散量の値と、算定方法、対象地の場の条件などについて整理する。降水量や流出量についても併せて示す。

3.2.1 国内の蒸発散量の観測・推定事例

(1) サロベツ

羽山・中津川 (2002) <sup>5)</sup>では、サロベツ湿原の環境保全の一環として地表水・地下水の循環の把握を目的とした調査解析が実施され、地下水モデルへの入力要素として蒸発散量が計算されている。

蒸発散算定の対象としているのは、アメダスの豊富、沼川、気象官署の稚内のデータ (降水量、風速、日射量、日照時間、相対湿度、気温、積雪深) であり、アメダスの観測項目にない日射量・湿度はエリア外の稚内のデータが用いられている。個々の観測地点の条件の詳細は明記されていないが、牧草地や市街地と考えられる。対象期間は1983年～2000年の18年間である。

蒸発散量の計算は、近藤 (1994) <sup>6)</sup>に示されている 2 層モデルを積雪面に適用した。

計算の結果、流域の年平均の実蒸発散量は 614 mm/y と算出された。また、比較のために豊富において Penman 法による可能蒸発散量も求められ、660 mm/y という値が得られている。両者の差が大きいことは、土壌の水分不足が生じにくい比較的湿潤な条件にあったことを表している。

この実蒸発散量と、流域全体における降水量1,201 mm/y、及び最下流部の浜里における流出高1,102 mm/yを併せて考えると、水収支法による涵養量は-515 mm/yという顕著な負の値となる。この水収支に関しては、降水量の観測のうち降雪量に関し、風の影響で捕捉率が悪く過小評価している可能性や、河川流量が下流の天塩川からの背水の影響を受け流量観測精度が悪いことが原因と

考えられている（羽山・中津川, 2002）<sup>5)</sup>。

## (2) 幌延

瀬尾ほか（2005）<sup>6)</sup>及び核燃料サイクル開発機構（2005）<sup>7)</sup>は、幌延深地層研究所付近の3つの観測流域（P-1, P-2, P-3）において水収支法による岩盤浸透量を推定している。対象期間は、2003年8月～2004年7月の1年間である。

降水量・蒸発散量を取得するための気象観測装置は、牧草地の中（北進気象観測装置）と樹林域（北進蒸発散量観測タワー）の2か所に設置され、本文献において使用されたのは牧草地での観測データである。ここでは、風向・風速・温度・湿度・降水量・日照時間・日射量・積雪深・気圧・地表風速・雪面温度・放射収支量・地中熱流量が観測されている。

観測されている諸量を用いた蒸発散量算定の各手法について信頼度や適用性を検討した結果、牧草地内の北進気象観測所（粗度の小さい場所である）においてデータ取得や機器管理の容易さを考慮してPenman法が適切とされた。ただし、積雪期にはPenman法は適用できないため、バルク法が選定された。

Penman法で得られる可能蒸発散量には、経験的に0.65の係数を乗じて実蒸発散量としている。この結果、当該1年間の蒸発散量の合計は、約420 mm（年降水量の26%）と算定された。

この蒸発散量を基に、3つの各流域における水収支が計算された。全体の岩盤涵養量は104 mm/yとなった。個別の流域のうちP-2流域では-17 mm/yというわずかな負の値となった。

## (3) 母子里

(Ishii et al. (2004a) <sup>8)</sup>の原文が未入手のため、その要旨及びこの論文を引用した Shutov et al. (2006) <sup>43)</sup>の記載に基づいて以下に記す。)

Ishii et al. (2004a) <sup>8)</sup>では、名寄市母子里の対象流域における11年間の観測により、Penman法による蒸発散量は370 mm/y、また、降水量1,670 mm/y、流出量1,375 mm/y、貯留量変化-75 mm/yという値が得られている。年による蒸発散量の変化は大きくなく、貯留量は降水量（特に年間の貯留量を支配する冬季の降水量）により左右される。

この蒸発散量は可能蒸発散量と考えられる。Shutov et al. (2006) <sup>43)</sup>は、同地域における草地での日蒸発散量がライシメータによる計測値とPenman法による推定値に差がないという調査結果（竹内ほか, 1995）<sup>64)</sup>に基づき、日本の当地区のような湿潤環境ではPenman法による値が実蒸発散量をほぼ表しているのではないかと述べている。

（日本各地での観測結果を考えると、この点には注意が必要と考えられる。）

## (4) 札幌周辺の流域

札幌近郊の、定山溪・豊平峡・漁川流域では、いくつかの水収支観測が行われている。

加藤ほか（1999）<sup>9)</sup>は、広域面における季節別実蒸発散量の推定を目的とした流域での実測値取得のために、石狩川流域の南西部に位置する北海道開発局管理の定山溪ダム流域（104 km<sup>2</sup>）・豊平峡ダム流域（134 km<sup>2</sup>）・漁川ダム流域（113 km<sup>2</sup>）の3流域において、水収支の検討を行った。これらはいずれもほとんどが針葉樹からなる流域である。検討に使用されたデータは、ダムの流量データと開発局による雨量データ及びアメダスデータである。

蒸発散量は基本的には水収支法（ $E = P - R$ ）により算定されているが、比較のためにThornthwaite法とHamon法による値も示されている。蒸発散量の計算に用いた気温を空間的にどのように設定したかは明記されていないが、降雪量の算定において流域及び周辺の気象官署・アメダス・ダム管理所の気温の空間補完・標高補正値を1 kmメッシュごとに求めて用いていること

から、この気温データを使用していると考えられる。

これら気温に基づく2つの推定法による蒸発散量（可能蒸発散量）は、定山溪ダム流域と豊平峡ダム流域では水収支法による蒸発散量と同程度の値を示している。このことから、森林域では実蒸発散量が可能蒸発散量に近いオーダーにあることが示唆できると述べられている。漁川ダム流域では、水収支法による蒸発散量よりも数十mm/y小さい値を示している。

口澤・中津川（2002）<sup>10)</sup>は、定山溪ダム流域を対象に、蒸発散量を2層モデルにより計算し、森林植被の影響（樹冠蒸発）を考慮した積雪と蒸発散の再現を試みている。モデルへの入力に用いた観測データは、ダム管理所における降水量・風速・日射量・日照時間・湿度・気温・積雪深である。2層モデルによる蒸発散量は、1996～2000年の5年間の平均で469 mm/yとなった。

こうして得られた蒸発散量の妥当性を支持する事項として、口澤・中津川（2002）<sup>10)</sup>は、水収支法による蒸発散量（497 mm/y）と同程度の値となっていることと、樹冠遮断量が約35%となり近藤（1994）<sup>6)</sup>に示された一般的な結果と同様の傾向を示すことを挙げている。

石田ほか（2002）<sup>11)</sup>は、2層モデルを豊平峡ダム流域にも適用している。1996～2000年の5年間の平均として、豊平峡では、水収支法による蒸発散量516 mm/yに対し、2層モデルが572 mm/yというやや大きい値となっている。

#### (5) 美々川付近

千歳市から苫小牧市にかけての美々川流域では、美々湿原付近での蒸発散量の観測・算定（井形、1998）<sup>13)</sup>と、美々川流域での水収支観測（馬場、2001）<sup>12)</sup>が行われている。

井形（1998）<sup>13)</sup>では、湿原及び牧草地における実蒸発散量を得るために、美々（湿原）及び駒里（牧草地）の2つの試験地において、主に熱収支法による算定を目的とした観測が行われ、1996年5月～1998年4月の2年間はいずれの試験地でも連続データが得られている。

これらのデータに基づき、植生層と湛水層を考慮した下記の熱収支式を基本式として実蒸発散量が算定された。

$$R_n + H + IE + G = \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} z_w + \rho_a C_a \frac{\partial T_v}{\partial t} z_v$$

$R_n$ : 純放射量 [W/m<sup>2</sup>]       $H$ : 顕熱 [W/m<sup>2</sup>]       $IE$ : 潜熱 [W/m<sup>2</sup>]       $G$ : 地中熱流量 [W/m<sup>2</sup>]  
 $\rho$ : 空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]       $C$ : 比熱 [J/kg°C]       $T$ : 温度 [°C]       $z$ : 層厚 [m]  
 添え字  $a, w, v$ : それぞれ空気層, 湛水層, 植生層を表す

顕熱・潜熱を求めるのに、美々では渦相関法と傾度法による計算結果を比較し、湿度の高い状態での結果の信頼性に疑問がある渦相関法を棄却し、傾度法による値を採用した。また、駒里では地表面状態から上式の右辺が0と仮定できるため、ポーエン比法を用いた（傾度法は、これと大きく異なる値を示し、観測している地上5～50 cmの範囲以外での熱量損失が考えられたため、棄却された）。算出された実蒸発散量は、美々湿原で411 mm/y、駒里で456 mm/yである。

また、これらの実蒸発散量を、Penman法（ただし積雪期にはKojimaの式  $E_p = 240 \beta u (e_s(T) - e_a)$  による； $\beta$ は経験定数0.001、 $u$ は風速、 $e_s(T)$ は飽和水蒸気圧、 $e_a$ は水蒸気圧）により別途算出した可能蒸発散量と比較し、蒸発散比（実蒸発散量／可能蒸発散量）の年間変動も整理されている。蒸発散比は、水分供給の十分な湿原において、夏に高く冬に低い季節変動（気温変化に調和的な変動）がより明瞭である。

なお、これらの試験地で観測された対象期間の降水量は、美々1,221 mm/y、駒里1,126 mm/yである。河川流量の観測は行われていない。

一方、美々川では、洪水予測の評価を目的とした研究の一環として、1986～1995の10年間の観

測データに基づき、水収支の各量及び地下水涵養量が推定されている（馬場, 2001）<sup>12)</sup>。蒸発散量は、Thorntwaite法で算出した可能蒸発散量を基に、日平均気温0°C以上で日降水量が1 mm未満の場合に蒸発が生じるとして実蒸発散量を推定し、330～420 mm/y（平均380 mm/y）と推定されている。この研究は洪水の予測評価が目的であったため、この表では観測された河川流量をフィルター分離によって表面・中間流出成分と地下水流出成分に分けて扱っている。また、地下水収支は地下水位の実測値と比較され、両者は年単位でも整合的な結果が得られている。

流出成分の分離を行わず、単純に $G=P-E-R$ と考えた場合、10年間の平均の涵養量は、 $G=1,309.1-375.9-909.8=23.4$  mm/yとなる。

#### (6) 石狩川流域

加藤ほか（1999）<sup>9)</sup>は石狩川流域全体での水収支の検討を行っている。蒸発散量の計算に用いた気温は、標高及び3つの気象官署（札幌、旭川、岩見沢）からの距離と各気象官署における気温を用いた一次回帰式によって1 km メッシュごとに求めた。降水量（降雨量+降雪量）の分布も補完により求め、河川流量は石狩大橋での測定値を用いている。こうして、1976～1997年の22年間を対象とした水収支が得られている。

この結果では、前述の定山溪・豊平峡・漁川ダム流域と異なり、Thorntwaite法やHamon法により推定された可能蒸発散量は水収支法による蒸発散量よりも200 mm/y以上大きな値となっている。

工藤・中津川（2004）<sup>14)</sup>は、石狩川流域の6つの支流の流域ごとに水収支を計算している。ここでは、蒸発量の推定に2層モデルを用いた長期熱・水収支モデルが用いられている。

1998年（1年間）を対象とし、石狩川流域内で観測されている気象データ（風速、気温、日射量、日照時間、降水量、積雪深）の日データを基に、国土数値情報の3次メッシュ（約1 km×1 km）15,303メッシュの値を設定した。このうち、風速、気温、日射量、積雪深については、標高及び地形条件の影響を受けることから、気象データごとに標高に対する増減率を設定して補正した。空間補完はクリギングにより行った。

モデルによる水収支と実測値では50～400 mmの差が見られるが、誤差の要因として流域内の貯留量変化や他流域との地下水のやりとりが考えられるとされている。

#### (7) 釧路川流域

工藤・中津川（2005）<sup>15)</sup>では、釧路湿原の水循環や地下水変化を把握するために、釧路川流域の水収支の検討が行われている。釧路川流域全体を、釧路湿原内に指定されている遊水地区域（面積105 km<sup>2</sup>）を含む5つの流域や区間に区分し、各エリアでの河川流量観測値を基に水収支を求めている。蒸発散量の推定には2層モデルが使用された。

蒸発散量算定のために用いた観測データは、気象官署・アメダス・北海道開発局及び新規設置機器による2000～2003年の気象データ（風速、気温、湿度、日射量、日照時間、降水量、積雪深）である。このうち気温・風速・積雪深は標高による補正を、湿度は気温による補完、日射量は日照時間による補完をそれぞれ行い、エリア内の1 km メッシュでの値を求めて解析に用いた。なお、釧路の年平均気温は5～6°Cである。モデルで設定する経験的パラメータ（バルク輸送係数、蒸発効率、LAIなど）は既往の研究の結果に従い設定している。

各エリアで算出された蒸発散量は下流域ほど大きくなる傾向を示し、遊水池では298 mmとやや大きな値を示す。この蒸発散量と降水量・河川流量による水収支法での実測値との違いをみると、降水量から蒸発散量を引いた値が河川流量よりいずれも大きく、その差は50～170 mmである。また、この差は下流域を含むエリアほど小さくなっていることから、工藤・中津川（2005）<sup>15)</sup>は「上

流域では相対的に降水よりも流出が少なく、他流域への地下水として流出する傾向にあることが考えられる」と述べている。(この“他流域”は、下流側の流域へ向かう地下水涵養も含んだ意味と考えられ、上流部での涵養の大きさを表しているともいえる。)

またこの研究では、気象データに基づき、Thornthwaite 法、Hamon 法、Penman 法による可能蒸発散量と、Penman-Montieth 法、補完法 (Brutsaert-Stricker 法)、単層モデル法の計算がそれぞれ行われ、算出値の違いが比較されている。Penman-Montieth 法と Brutsaert-Stricker 法による推定値 (それぞれ 283 mm/y, 258 mm/y) は 2 層モデルによる実蒸発散量 (278 mm/y) に近い値を示す。また、これと 3 つの方法による可能蒸発散量を比較すると、年平均の蒸発散比は 0.6~0.8 となる。

#### (8) 十和田

近藤・渡辺 (1991)<sup>16)</sup>は、広域蒸発散量把握のための熱収支法による森林域での蒸発散量推定手法について述べ、十和田湖付近の森林を対象に試算を行った。この計算では、十和田湖 (標高 400 m) で 1963~1966 年に観測された気象データ (気温, 湿度, 風速) と秋田・八戸の平均の放射量のデータと、バルク輸送係数や蒸発効率の設定値 (それぞれ 0.005 及び 0.3) が用いられている。年間の蒸発散量は 446 mm/y と算出された。

また、この研究では、気象要素の観測値に生じうる誤差 (気温 1°C, 相対湿度 10%, 風速 1 m/s 放射量 20 W/m<sup>2</sup>など) を考慮した感度解析も行い、これらの誤差による熱収支法の蒸発散量の評価誤差を 30~100 mm/y と見積もっている。

#### (9) 奥只見

多田ほか (1994)<sup>17)</sup>は、衛星データ利用のための検証データとして、Thornthwaite 法により蒸発散量を推定している。この地区は只見川上流の滝ダム流域 (1,991 km<sup>2</sup>) に位置し、ほとんどが広葉樹の森林よりなる (風間ほか, 1992)<sup>65)</sup>。

1989~1991 年の 3 年間の蒸発散量の平均が 595 mm/y であることが示されている。

#### (10) 樹木の成長による蒸発散量の変化

Hashino et al. (1999)<sup>30)</sup>で示されている蒸発散量は、水収支法 ( $E = P - R$ ) により求められた値であるが、これが長安口ダム流域 (徳島; 494 km<sup>2</sup>, 針葉樹) 及び福地ダム流域 (沖縄; 32 km<sup>2</sup>, 常緑広葉樹) では樹木の成長に伴って 10~20 年間で 2~3 倍に増大することが指摘されている。また、熱収支モデルに基づいて蒸発散量を樹幹遮断蒸発量と蒸散量に区分して推算すると、蒸発散量の増大は主として樹冠遮断蒸発量の増大 (葉面積率の上昇) によるが、福地ダム流域では樹幹の増大に伴うとみられる蒸散量の増大も認められた。

#### (11) つくば

古藤田 (1984)<sup>18)</sup>は、ライシメータによる実蒸発散量と、気象要素から求めた平衡蒸発量を示している。

対象サイトは筑波大学の実験圃場で、周囲に樹林や建物がある直径 160 m の草地である。地表下約 2.5 m まではロームが分布し、地下水位は GL-1.5 ± 0.5 m にある。

実蒸発散量は、外径 2 m, 高さ 2 m, 底部がグラスウールのフィルタをもつ秤量感度 500 g のウェイングライシメータを用い、地下水位を GL-1.7 m に保って観測した。観測期間は 1981 年 12 月~1982 年 11 月の 1 年間である。データの解析において、降雨日や下記の各熱収支項の欠測日は、月平均蒸発散量算定の対象から除外した。



算出した年間の蒸発散量では昼間と夜間の蒸発散量が分けて示されている。ライシメータによる年間の実蒸発散量は、617 mm(昼) - 4 mm(夜) = 613 mm/y となる。

なお、平衡蒸発量を、植物吸収・移流・貯熱量変化の影響を考慮した熱収支式、

$$E_e = (1/\lambda) \cdot (\Delta(\Delta + \gamma)) \cdot (R_n - G - \Delta M)$$

$$\Delta M = R_n - H - \lambda E_a - G$$

$E_e$ : 平衡蒸発量     $\lambda$ : 水の蒸発潜熱     $\Delta$ : 飽和水蒸気圧曲線の傾き     $\gamma$ : 乾湿計定数  
 $R_n$ : 純放射量     $G$ : 地中熱流量     $\Delta M$ : 植物の吸収放熱, 移流, 地表層貯熱量の変化  
 $H$ : 顕熱フラックス (渦相関法により求める)  
 $\lambda E_a$ : 潜熱フラックス ( $E_a$ はライシメータによる実蒸発散量を用いる)

によって計算すると、季節による違いはあるものの、ライシメータによる実蒸発散量に比較的近い年間値が得られた。平衡蒸発量は 544 mm/y となった。

竹内 (1989)<sup>19)</sup>は、つくば市の森林総合研究所実験畑において、水位ライシメータによる蒸発散能 (可能蒸発散量) を測定した。対象地は 270 m<sup>2</sup> の圃場で、外径 2 m のライシメータに樹木 (幼齢樹 3 本) を植えた。水位の変動量と、水位を一定に保つように土壌槽の消費水分を補うために給水された水量を測定し、蒸発量に換算した。試験は、スギの幼齢樹を植えた期間 (1981 年 1 月～12 月) とコナラの幼齢樹を植えた期間 (1984 年 1 月～12 月) の 2 回行われ、各時期には裸地のライシメータでも対照区として観測された。また、各試験時期には、周囲の林地も試験樹種と同じ樹種・樹齢の環境に保たれた。

結果として可能蒸発散量は、スギで 566 mm/y、コナラで 618 mm/y となった。これらは裸地蒸発量の 1.3～1.5 倍の値であった。また、季節変化を見ると、5 月～10 月の間に裸地蒸発量との差が大きく、夏季の蒸散の割合が大きいことが示されている。

## (12) 箱根

板寺 (2005)<sup>20)</sup>は、箱根仙石原における長期の気象観測データを用い、Thornthwaite 法及び Makkink 式により可能蒸発散量の推定を行っている。使用されたのは 1950～2000 年の 50 年間で平均した月平均気温のデータである。Makkink 式で用いる日照時間は小田原・三島・御殿場・網代の 4 つの気象官署での平年値の月別平均値を、また、地域係数は最も近い三島の値を使用した。また、これらの手法による推定値の比較対象として、1930 年～1940 年に測定された計器蒸発量 (蒸発パンによる蒸発量) のデータの整理も行われた。

今回算出した 2 つの方法のうち Makkink 式による年間値は計器蒸発量より大きい。これに対し Thornthwaite 法による可能蒸発散量 755 mm/y は蒸発パンでの蒸発量の 80% 程度であることから、こちらが当地域での実蒸発散量に近い値であろうと述べられている。また Makkink 式では蒸発パンの蒸発量の月ごとの推移をよく再現できることから、これに補正係数を乗じることで実蒸発散量が推定できる可能性があるとして述べられている。

(しかし、パン蒸発量との比較のみで年間の実蒸発散量に近似できるかどうかを議論することは難しいと考えられる。)

## (13) 輪島

中川 (1978)<sup>21)</sup>は、気象要素から蒸発散量を推定する目的で、輪島測候所での観測データを用い、Penman 法によって可能蒸発散量を推定している。対象期間は、1951～1976 年の 26 年間である。

蒸発散量は水面可能蒸発散量に 0.7 (積雪時は 0.82) を乗じて求められ、570 mm/y となった。

これは降水量（約 2,400 mm/y）の 24%となる。

(14) 東濃

宮原ほか（2002）<sup>22)</sup>は、東濃地区の 8 つの観測流域（包含関係も含む延べ 8 流域）において、1990 年度以降の観測データに基づき、水収支の検討を行っている。当地区では上流から下流に至る複数の流域を対象とした観測が行われている。蒸発散量は Penman 法を用いて計算し、可能蒸発散量に経験定数 0.7 を乗じて実蒸発散量としている。

東濃鉦山での気象観測結果に基づく実蒸発散量は 477～562 mm/y（1990～2000 年度）、柄石での観測結果による実蒸発散量は 579～618 mm/y（1999～2000 年度）である。

涵養量（降水量－蒸発散量－流出量）は、流域によって対象年度が異なるものの、正馬川上流域・正馬川モデル流域・柄石川上流域といった上流側に位置する小流域では 300 mm/y 程度以上の大きな値を示し、正馬側流域や柄石川流域という流域全体を対象とした場合には 38～55 mm/y という小さな値となる。このような上流・下流の違いによる水収支の違いは、上流側が涵養域で下流側を流出域とするモデルによって説明される。

(15) 各地の演習林などにおける蒸発散量推定

大槻ほか（1984a）<sup>24)</sup>は、蒸発パンによる蒸発量や可能蒸発散量と実蒸発散量の関係を再検討する研究の中で、京都大学構内の水田と演習林の露場における蒸発パンの観測値をまとめている。水田が湛水状態にある春・夏には、半乾燥条件下にある演習林での蒸発量のほうが大きい。この結果から計算される年間の蒸発量は、水田で 850 mm/y、演習林で 940 mm/y である。

大槻ほか（1984b）<sup>25)</sup>、大槻ほか（1984c）<sup>26)</sup>は、補完法に基づき実蒸発散量を推定する手法の開発において、補完法のプロセスの中で計算される Penman 法による可能蒸発散量及び蒸発パンによる蒸発量を示している。また、補完法の妥当性を検証するために、水収支法により求められた実蒸発散量（ $E = P - R$ ）との比較を行っている。これらの検討を行うために、高精度の水収支観測（降水量、流出量観測、気象観測）が長期間実施されている国内の演習林でのデータが用いられた。対象とされたのは、上川、愛知（穴の宮、東山、白坂）、上賀茂、川向・桐生、竜の口（南谷、北谷）、去川（Ⅰ、Ⅱ）の各流域である。5 つの地区については流域の地形図と観測項目も示されている。

補完式（Morton 法）による実蒸発散量  $E_{ac}$  はどの流域でも水収支法による流域蒸発散量  $E_{aw}$  とよく一致している。上賀茂で補完式による蒸発散量が小さいが、これは流域から離れた都市効果の影響を受けた京都気象台のデータを用いているためと考えられている。

（補完式の値が正しいとすれば、水収支法による  $E_{aw}$  のほうが大きく計算されるのは、涵養量が大いことを表している可能性もある。）

大槻らの研究のほかにも、これらの演習林での観測データを基に蒸発散量の算定と水収支の検討を行ったいくつかの研究がある。

寺嶋ほか（1993）<sup>23)</sup>は、白坂流域とその支流域及び東山流域の 1941～1965 年（支流域では短い）における水収支観測データを検討した。蒸発散量には Hamon 式により計算した可能蒸発散量をそのまま用いている。水収支計算の結果、可能蒸発散量は 816～845 mm/y で、それを用いた涵養量は 14～101 mm/y となっている。

また、白坂流域では、流域面積が大きくなると深部地下水浸透量（涵養量）が減少する傾向が示され、小流域（白坂南谷流域）が涵養域として機能している可能性があるとしている。

谷・阿部（1987）<sup>27)</sup>は、竜の口流域の 1975～1984 年の 10 年間の水収支を示し、1980～1984 年の 5 年間では損失量（降水量－流出量）が 732 mm/y であるのに対し、可能蒸発散量は 1,045

mm/yであることを示している。

Rampisela et al.(1990)<sup>28)</sup>は、桐生の森林試験地において、樹高約12mの森林の樹冠部における気温と正味放射量及び高さ16mの風速の観測データに基づき、Penman-Monteith法により年間の実蒸発散量を算定した。また、他の方法による蒸発散量(Thorntwaite法・Hamon法・Penman法による可能蒸発散量、及び水収支法による蒸発散量)も示して比較した。

Penman-Monteith法で算出された実蒸発散量は778mm/yとなり、水収支法による蒸発散量771mm/yに近い値を示した。一方、可能蒸発散量を推定した手法のうち、Thorntwaite法で764mm/y、Hamon法で779mm/yであるのに対し、Penman法では912mm/yとなり、これだけが他より大きな値となった。Penman法は、従来の研究でも述べられているように、植物の作用を考慮していないために森林での適用は難しいと考えられる。

#### (16) Cl濃度を利用した蒸発散量推定

二宮ほか(2007)<sup>29)</sup>は、低地から山地部にわたる小流域において、水とClの収支から流域蒸発散量を推定している。対象地点は、岡山県の瀬戸内海沿岸から中国山地を通り鳥取県の沿岸部に至る16か所の雨水観測地点と12の源流域である。

雨水は、各地点において2003年12月～2004年12月の約1年間の雨水を継続して採水した。源流域の沢水は、数日以上降雨がなく基底流出していると考えられる時期を5回選定して、流量とCl濃度を測定し、その平均を求めた。

沢水のCl濃度は降水よりも高く、雨水中のClが蒸発散により濃縮していると考えられる。また、渇水期の比流量が日本の花崗岩地域の平均より低い流域では、表流水で捉えきれていない地下流出分があると考えられた。これらの点を考慮し、水とClの収支を次の式で表した。

$$P = S + E + D + G$$

$$C_p P = C_p S + C_D (D + G)$$

$P$ : 降水量     $S$ : 表面流出高     $E$ : 蒸発散量

$D$ : 沢水流出高     $G$ : 観測地点での地下流出高

$C_p$ : 雨水中の年平均Cl濃度     $C_D$ : 沢水中の年平均Cl濃度

この2つの式より、流域の年平均蒸発散量は次のように表される。

$$E = (1 - (C_p / C_D)) \cdot (P - S)$$

これらの式に基づき、各源流域での $E$ 、 $S$ 、 $D$ 、 $G$ が計算された。流域蒸発散量は、標高が高くなるほど少なくなる傾向が見られ、山陽側では600mm/y程度、中国山地では300mm/y程度、山陰側ではばらつきは見られるものの600mm/y程度となった。標高が高いと気温が低く蒸発散量が少ないことを表していると考えられる。

なお $G$ は、表流水に含まれないという点で、地下流出と地下への涵養量を含むものと考え、地下流出+涵養量で0～400mm程度を示すことになる。

#### 3.2.2 海外の蒸発散量の観測・推定事例

ここでは、現在の日本の最北部と同等又はそれより寒冷な地域を主な対象として、蒸発散量及び水収支を観測・推定した事例を整理した。

## (1) カナダ・オンタリオ州の湿地

Lafleur et al. (2005)<sup>31)</sup>は、オタワの西方にあるMer Bleue湿地において、蒸発散量の季節変化・経年変化を観測している。ここは約6,000年前に形成され現在は灌木の分布する湿地で、月平均気温は-10.8~20.8°C、降水量が910 mm/y (1961~1990年の平均) の地区である。

可能蒸発散量は、Penman-Monteith式の中の表面抵抗を0として計算した。この算定に用いる気象要素として、高さ2 mでの気温、相対湿度、風速、正味放射量を測定した。降水量は、非積雪期のみサイト内で計測し、積雪期は15 km離れたオタワ空港での観測値を使用した。また、当サイトは流出河川のない閉じた湿地であるため、河川流量は測定されていない。

1998年10月~2002年9月の4年間の平均の降水量は885 mm/y、可能蒸発散量は477 mm/yとなる。月蒸発散量は夏と冬で大きく異なるが、冬季にも100 mm程度が認められる。これらの結果より、涵養量は(少なく見積もっても) 408 mm/yとなる。降水量や蒸発散量は対象期間の後半にはやや少ないが、降水量低下の影響は蒸発散量に1年遅れて生じているようである。

## (2) カナダ各地の気候区別広域蒸発散量

Fernandes et al. (2007)<sup>32)</sup>では、気象変動の将来予測のための研究の1つとして、カナダ全土の気象観測値に基づいて40年間の蒸発散量の変化トレンドが解析されている。エリアはほぼ気候区に基づいて区分され、このうち10エリアでの代表値が算出されている。

蒸発散量の計算はEALCOモデルにより行われた。このモデルでは、気候及び植物生理を土壌・植物・大気間のエネルギー - 水 - 炭素収支に基づき計算する。入力パラメータの気温・降水量・風速・気圧・湿度・純放射量(長波長, 短波長)はカナダの気象観測データシステムCWEEDSの144か所の観測データを用い、土地条件やLAI(葉面積指数)・植物の蒸散・根系深度などに関わるデータ整備には衛星データや土壌マップを用いた。観測点の周囲約50 km四方の範囲の地表条件を用いて地点ごとに、1960~2000年のデータを基に1時間ステップで計算を行った。

年間の蒸発散量は、南東部のGreat Lakes/St. LawrenceやAtlantic Canada, Northeastern Forest地区で400 mm/yを超える大きな値を示し、北西部のMacKenzie DistrictやYucan/North B.C. Mountainsでは200 mm/y台、Arctic Tundraでは約100 mm/yという小さな値となっている。

Fernandes et al. (2007)<sup>32)</sup>によれば、観測点近傍の流域単位での水収支の検討(流量データを用いた検討)が現在実施中とのことである。

## (3) 英国

Wadey et al. (2001)<sup>39)</sup>は、低レベル放射性廃棄物の浅層処分における不飽和帯での核種移行の研究の一環として、英国南部のAscotにおいて<sup>22</sup>Na, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Coの移行試験を行っている。この試験はライシメータを用いて行われ、水の移動の一部として蒸発散量の観測結果が示されている。

試験は1990年春~1994年春の4年間行われた。ライシメータは面積が182×91 cm、深さは40 cmと70 cmの2種類あり、それぞれの下端から5 cmの位置に水位が保たれた(各々をshallow及びdeepライシメータと呼ぶ)。土壌は原位置の砂質ロームで、周囲の環境と同じように毎年秋に小麦が蒔かれた。水位一定の条件におけるライシメータへの水の入出量の測定と降水量の観測を行い、蒸発散量を算出した。

蒸発散量は春~夏に大きく秋~冬に少ない。1990年春~1991年冬の4年間の平均の年間蒸発散量は、shallowライシメータで391 mm/y、deepライシメータで372 mm/yである。年降水量は平均で614 mm/yである。季節ごとの降水量と蒸発散量を比較すると、春~夏は降雨の大部分が蒸発散で消費され、秋~冬には土壌が湿潤となっていることがわかる。

Bradford and Acreman (2003)<sup>40)</sup>は、イングランド南岸のPevensy Levelsの草に覆われた湿地

において、地下水解析コードMODFLOWを用いて200×250 mの範囲での表層部の地下水流れのモデル化を試みている。この解析に使用するための蒸発散量がいくつかの方法で推定されているが、年間の値が示されているのはMORECSによる実蒸発散量のみである。その値は、567 mm/yとなる（1997年1月～12月の1年間）。これと時期は異なるが、1961～1998年の平均の年降水量は763 mm/y、パン蒸発量は774 mm/yである。

なお、MORECS (Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System) は、英国内の気象観測データに基づいて蒸発散量を推定するデータベースシステムであり、英国内全域にわたり40×40 kmのメッシュ単位で蒸発散量が計算されている。実蒸発散量の計算はPenman-Monteith式に基づいて行われている。

Hulme (2006)<sup>41)</sup>では、スコットランド北東部Netherleyのコケの分布する湿地（標高約120 m）の保全のための環境調査において、蒸発散量の推定値が用いられている。この値はMORECSによる可能蒸発散量である（湿地であるためPenman-Monteith式における樹木の抵抗係数を考慮していないと考えられる）。

20年間（1982～2001年）の平均では、降水量915 mm/y、可能蒸発散量528 mm/yである。月ごとに降水量から可能蒸発散量を引いた値はrunoffと記され（流域の河川流出量ではなく、その点での地表からの浸透量を表している）、これが負となったときの値を土壌水分不足 (soil moisture deficit: SMD) としている。

#### (4) アイルランド各地

Mills (2000)<sup>37)</sup>は、アイルランド島全体の蒸発散量と土壌水分不足を示した図を作成している。この分布は、島内の代表地区における蒸発散量の実測値を基に、日射量と気温を変数とした線形回帰式を使って全土に展開したものである。

蒸発散量の実測値は、6つの観測地点 (Cahirciveen, Jhonstown Castle, Glenamoy, Kinsealy, Ballinamore, Oak Park) で得られた水位ライシメータによる観測結果である。測定された値は可能蒸発散量とされている（水位ライシメータでは、一定の水位を保持しながら消費される水の量を測定するため、土壌に水が十分に供給された状態での蒸発散量である）。各地区での1971～1990年の20年間の平均の月蒸発散量が整理され、年間の可能蒸発散量及び夏季・冬季の可能蒸発散量もまとめられている。年間の可能蒸発散量は390～567 mm/yであり、地区による違いが大きい。

なお、これら各地点の場の状況は文献に明記されていないが、「気象観測地点において観測された蒸発散量」と述べられていることから、一般の気象観測地点であれば林地ではなく草地などの比較的平坦な場所と予想される。

#### (5) スイスのデルタ

Mdaghri-Alaoui and Eugstar (2001)<sup>38)</sup>は、スイス西部のAreuse Riverデルタ（標高430 m）において水収支の検討を行っている。ここは表層の0.2～0.3 mに腐植の分布する地区で、その下は砂質ロームである。対象期間は1990年10月～1991年10月の1年間である。

降水量は対象エリアにて観測された値が使用された。また、土壌中の貯留量変化を把握するために、深度0.55～3.65 mにおいてテンシオメータと中性子水分計により土壌水分と地下水位が30分間隔で観測されている。河川流量は水収支の対象項目に入っておらず、河川流出のない範囲を対象エリアとしているものと見られる。

蒸発散量の推定は、Primault の経験式と Penman-Monteith 式の 2 通りの方法で行った。Primault の経験式では、次のように蒸発散量を求める。

$$E = C \cdot [A \cdot (103 - rH) / 100 \cdot (t_s + 2t_p) + B]$$

$E$ : 蒸発散量     $t_p$ : 対象期間の長さ     $rH$ : 相対湿度の平均値     $t_s$ : 積算日照時間  
 $A, B, C$ : 経験定数

水収支検討の結果は、降水量 865 mm/y に対し、蒸発散量は 532 mm/y (Primault の経験式) と 564 mm/y (Penman-Monteith 式) である。貯留量変化は約 20 mm であるので、涵養量は 313 mm/y 及び 281 mm/y となる。これは降水量の約 3 分の 1 である。

(この文献では対象範囲や周囲の地形・河川分布などが示されておらず、ここで算出された涵養量は河川を含まない限られた範囲での表層の浸透速度を表している可能性がある。他事例で見られるような流域単位の水収支に基づく涵養量と比較する際には注意が必要である。)

#### (6) リトアニアの広域蒸発散量

Kilkus et al. (2006) <sup>36)</sup>は、リトアニアの主要な河川流域を対象に、水収支モデル WatBal を用いて将来の気候変化に伴う水収支の変化の予測を行っている。しかし WatBal では、入力データの 'Priestley-Taylor, Thonthwaite 法により計算した' 可能蒸発散量を、水収支項目の総和が 0 となるようなキャリブレーションにより実蒸発散量として出力しているため、本文献に解析結果として示されている実蒸発散量の値は独立に計算・推定されたものではない。

文献の冒頭にある「リトアニアは湿潤帯に位置し、平均降水量は 748 mm/y であり、蒸発散量 512 mm/y よりも大きい」という記述のみが、モデルでキャリブレートされていない値と考えられる。その表現から、この蒸発散量は可能蒸発散量を表しているものとみられる。

なお、現在 (1961~1990 年のデータに基づく) のモデル化された流出量は 300 mm/y と記されている。

#### (7) フィンランドの処分候補サイト

Teollisuuden Voima Oy (1992) <sup>33)</sup>では、フィンランドの地層処分候補サイトの事前調査結果の中で水文調査の概要が紹介されている。

そこで記されているのは、Romvaara, Veitsivaara, Kivetty, Syry, Olkiluoto という 5 つのサイトの調査結果である。個々のサイトでは、降雨・積雪深の観測により降水量が、河川流量の測定により流出量が取得された。河川流量は、年間の連続観測ではなく、代表的な 3 時期のみの計測である。

5 つのサイトでの年降水量はそれぞれ、580 mm, 605 mm, 590 mm, 535 mm, 530 mm であり、同程度の大きさである。蒸発散量については算定手法・具体的な値ともに記されていないが、Kivetty と Syry では降水量の約 60%, Olkiluoto では 70~80% と述べられている。河川流量は、Romvaara, Veitsivaara, Kivetty の各サイトでそれぞれ、2 l/s/km<sup>2</sup> (60 mm/y), 1 l/s/km<sup>2</sup> (30 mm/y), 0.1~2 l/s/km<sup>2</sup> (3~60 mm/y) と示されている。

#### (8) スウェーデン

Carlson and Gidlund (1983) <sup>34)</sup>には、スウェーデンの北部高地 (northern Uppland) に位置する Finnsjon 地区における表層水理調査について示されている。対象エリアは 25 km<sup>2</sup> で、勾配の小さい比較的平坦な地形 (標高差は十数 m) である。主にマツやモミを主とする樹林よりなり、低い部分は湿地化して落葉樹が分布し、高い部分は露岩部もある。

観測期間は明記されていないが、'long-term' と示されている。実蒸発散量の計算は修正 Budykov 法 (具体的な計算法は不明) により行われ、380 mm/y という値が得られている。降水

量は 670 mm/y, 流出量は 240 mm/y である。これらの値から、水収支法により涵養量を求めると、50 mm/y となる。

Gustafsson et al. (2006)<sup>35)</sup>は、放射性廃棄物処分関連サイトである Forsmark と Oskarsham における生物圏（森林）の炭素や水の動態を把握するために、生態系のエネルギー・水・炭素・窒素のプロセスを扱うことのできるモデルである CoupModel を用いて将来 100 年間の予測を行っている。

この中では蒸発散量は、Penman-Monteith 式によって計算されている。その入力データとして、Forsmark では周辺の多数の観測所における 35 年間（1970～2004 年）の気温・風速・相対湿度・全天日射量・晴天率の 1 時間ごとのデータを収集・補正して用いた。Oskarsham では 1 年間のデータを、周辺の観測データとその補正により整備した。

モデルによる計算は、地下水位が浅く土壌が湿潤な条件（Wet）から乾燥した条件（Dry）に変化させて行った。Forsmark での蒸発散量（実蒸発散量）は Dry の条件で 407 mm/y, Wet で 329 mm/y となる。（Penman 法による可能蒸発量は 585 mm/y であり、夏季には大きな値であるが、秋～冬季には実蒸発散量より小さくなる。）Oskarsham での実蒸発散量は 376 mm/y であり、降水量が少ないため E/P の比は大きくなる。

なお、計算結果では土壌水分の Wet～Dry の条件によって蒸発散量が異なることから、この蒸発散量は Penman-Monteith 式の計算値そのものではないか、式中のパラメータを土壌水分状態によって変化させた計算を行っていると考えられる。計算方法の詳細は文献に記されていない。（また、Dry の条件のほうが蒸発散量が大きく計算されることの原因は明らかでない。）

#### (9) ロシア Valdai

Gusev and Nasonova (2003)<sup>42)</sup>は、ロシアの Valdai 地区（モスクワ西方）の観測データを用いて、熱・水交換作用による降水・蒸発・流出を総合的に表すモデル (SWAP) の開発と適用性の確認を行っている。このモデルにおける蒸発散量は、熱収支式に基づき、積雪期・非積雪期を区別して求められている。

当地区は気温の範囲が  $-46.8 \sim +33.3^{\circ}\text{C}$ （年平均  $3.1^{\circ}\text{C}$ ）で、12 月から 5 月初めまで積雪がある。流域は  $0.45 \text{ km}^2$  で、平均樹高 26 m のトウヒ林よりなる。

18 年間（1966～1983 年）のデータを用いた計算による蒸発散量は 569 mm/y となった。降水量は 18 年間の平均で 776 mm/y, 流出量は 173 mm/y である。このモデルでは、降水量と蒸発散量・流出量の差 ( $P - E - R$ ) は土壌水分量の変化とされている。

#### (10) 北方寒冷各地の蒸発散量

Shutov et al. (2006)<sup>43)</sup>は、世界各地の高緯度地域における蒸発散量についての研究結果をレビューし、蒸発散量算定手法及び観測結果を整理している。このレビューは、IAHS（国際水文科学協会）のワークショップの論文集 Publication 290 に示された約 20 地区の研究結果を対象とし、このうち 17 地区での降水量と蒸発散量が一覧表にまとめられている。対象地区は、ヨーロッパロシア、フィンランド、ノルウェー、シベリア、アラスカ、カナダ、グリーンランド、北海道にわたる。

蒸発散量は、ツンドラ地域では 46～179 mm/y と小さく、亜寒帯林 (boreal forest) では 202～497 mm/y と大きい。日本の母子里（北海道）も示されているが、亜寒帯雨林 (boreal rainforest) と記され、370 mm/y という他地区に比べ大きな蒸発散量である。なおこれら各地の値の中には、年間値でないものも含まれているようであり、注意を要する。

Shutov (2006)<sup>43)</sup>は、これらの地区のデータを降水量・蒸発散量比 (E/P) - 放射湿度指数

( $Q_{\text{net}}/LP$  : 純放射量を降水量と蒸発潜熱で除した値) のグラフにプロットし、Budyko の理論曲線や経験式に調和的な傾向にあると述べている。

個別の地区における観測や推定の条件の詳細は、原文の論文集 (IAHS Publication 290) が未入手のために不明であるが、IAHS のホームページに示された各文献の要旨集及び Shutov et al. (2006) <sup>43)</sup>によるレビューの記述を基に概述すると次のようになる。

#### 1) Valdai (ヨーロッパロシア)

前項で示したのと同じ地区と考えられる。Balonishnikova (2004) <sup>45)</sup>は、観測データに基づく降水量と蒸発散量の相関、及び土壌水分・地下水貯留に着目し、各量を互いに独立に計算して水収支の検討を行った。当地区は大陸性湿潤気候区に位置し、平均気温 3.1°C の亜寒帯林及び草地のエリアである。

30 年間の平均で、蒸発散量は 422 mm/y (推定手法は不明)、降水量は 792 mm/y である。

なお、「これらの量が整合しない場合は、いずれかの算出値が適切でないことを表す」と述べられており、夏に蒸発散の影響で貯留量が低下するという季節変化は明らかとなっているが、地下水貯留まで含めた年間水収支は 0 となることが前提とされている (すなわち、深部への涵養は考慮されていない)。

#### 2) Brusovitasa (ヨーロッパロシア)

ロシア北西部、北ドビナ川下流の寒冷湿地において、ウェイングライシメータと蒸発パンにより 2 年間の蒸発散量・蒸発量が観測された (Shutov, 2004) <sup>44)</sup>。蒸発散量は 298 mm/y、降水量は 685 mm/y である。

#### 3) Askanjoki (フィンランド)

フィンランド北部の標高 170~370 m の丘陵部に位置し、亜寒帯林よりなる 16.4 km<sup>2</sup> の流域である (Seuna and Linjama, 2004) <sup>46)</sup>。

25~40 年間の観測データによると (この流域のみの観測期間は不詳)、蒸発散量は 222 mm/y、降水量は 645 mm/y となっている。蒸発散量の算定方法に関する記述は見られない (観測項目の記述に蒸発散に関するものがなく、降水量と流出量が連続観測されていることから、水収支法によって求められた蒸発散量の可能性がある)。

#### 4) Ittovunoma (フィンランド)

フィンランド北部のツンドラ気候区に位置する流域である (Seuna and Linjama, 2004) <sup>46)</sup>。年平均気温 -1°C である。

Askanjoki と比べたとき、降水量は 574 mm/y とやや少ないが、蒸発散量は 230 mm/y で同程度である。(水収支法による蒸発散量の可能性がある。)

#### 5) Bayelva (ノルウェー)

北極圏に位置するスバルバル諸島のサイトであり、エリアの半分以上が氷河に覆われた極地ツンドラ地区である (Killingtveit, 2006) <sup>47)</sup>。蒸発散量は 46 mm/y と極めて小さい。

#### 6) 母子里 (北海道)

3.2.1(3)で述べたように、蒸発散量は平均 370 mm/y であり (Ishii et al., 2004a) <sup>8)</sup>、年による変化は大きくない。可能蒸発散量≒実蒸発散量の可能性もある (Shutov et al., 2006) <sup>43)</sup>。



7) Mogot (シベリア)

シベリア南東部の大陸性気候下のタイガ地帯に位置し、永久凍土も存在する。標高 500~1,200 m の高地である (Vasilenko, 2004) <sup>48)</sup>。

蒸発散量は、熱収支法 (ボーエン比を仮定) とライシメータ法により測定・推定されている。1976~1985 年の蒸発散量は 258~420 mm/y (平均約 290 mm/y) である。蒸発散は夏季に集中する。

8) Kolyma (シベリア)

冬季には極度に低温 (-40°C 以下) となる山岳タイガ地域に位置し、永久凍土地帯である (Zhuravin, 2004) <sup>49)</sup>。

年間の蒸発散量 (水収支法による可能性がある) は 137 mm/y, 降水量 471 mm/y, 流出量 296 mm/y である。蒸発散・流出のほとんどが 5~9 月の夏季に生じている。

9) Tiksi (シベリア)

シベリア北部のレナ川河口域のツンドラ地帯に位置する。表面はコケ, スゲ, レキ堆積面で構成されており, 寒さのため活動層の厚さは 40~100 cm と非常に薄い。

蒸発散量は, 夏季の観測 (Ishii et al., 2004b) <sup>50)</sup> の結果によると 33~75 mm と変化し, 年による違いが大きい。

10) Dead Creek (カナダ)

マニトバ州南部のプレーリー~森林帯に位置し, 放射性廃棄物処分の研究の一環で観測されている。蒸発散量は 327 mm/y (測定法は不明だが, 水収支法の可能性がある), 降水量は 526 mm/y である (Thorne and Hawkins, 2004) <sup>51)</sup>。

地区内の流域でも, 地盤の露出が少なく草で覆われている流域では, 水収支に占める蒸発散量の割合が大きいと述べられている。

11) Wolf Creek (カナダ)

カナダ北西部ユーコン地方にあり, 亜寒帯タイガ・灌木・山岳ツンドラよりなる。蒸発散量は Morton 法 (補完式) によって算定されており, 森林域で 359 mm/y である。降水量は 387 mm/y である。19 mm/y の貯留量を考慮することで閉じた水収支 ( $P = E + R + \Delta S$  の成り立つ収支) となる (Janowicz et al., 2004) <sup>52)</sup>。

なお, 地中熱流量が考慮されていないと, Morton 法では蒸発散量が過大に算出されるおそれがあるが, 当地区はシベリアの Kolyma と比べると気候が厳しくないため, 蒸発散量は大きいのであろう (Shutov et al., 2006) <sup>43)</sup>。

12) Ft. Simpson (カナダ)

対象流域の詳細や水収支の観測・推定法については不明だが, Shutov et al. (2006) <sup>43)</sup> によれば, 年間の蒸発散量は 287 mm/y, 421 mm/y と示されている。

13) Caribou-Poker Creek (アラスカ)

アラスカ内陸部の亜寒帯林の流域である。蒸発散量は Priestley-Taylor 式により, 係数  $\alpha = 1.13$  とし計算し, 220 mm/y が得られている (Bolton et al., 2004) <sup>54)</sup>。

これに対し Shutov et al. (2006) <sup>43)</sup> は,  $\alpha$  を決めた根拠に疑問が残ることと, その基となった日最高気温と蒸発散量の相関が悪いことから, 結果に注意を促している。

14) Imnavait Creek (アラスカ)

Kane et al. (2004) <sup>66)</sup>で求められた蒸発散量は水収支法によるものである。

15) Baffin 島 (カナダ)

対象流域の詳細や水収支の観測・推定 (Young and Woo, 2004) <sup>55)</sup>の方法については不明だが, Shutov et al. (2006) <sup>43)</sup>によれば, ツンドラ地帯であり, 年蒸発散量 154 mm/y, 年降水量 616 mm/y とされている。

16) Devon 島 (カナダ)

緯度約 75°に位置する, 極地砂漠 (降水量が少なく, 寒冷下で乾燥した条件となっていること) の地区である。観測条件 (Young and Woo, 2004) <sup>55)</sup>の詳細は不明だが, 年蒸発散量 117 mm/y, 年降水量 185 mm/y と記されている (Shutov et al., 2006) <sup>43)</sup>。

17) Ellesmere 島 (カナダ)

極地オアシス (極地砂漠より湿潤で植生がある) のサイトである (Young and Woo, 2004) <sup>55)</sup>。年蒸発散量 83 mm/y, 年降水量 141 mm/y である (Shutov et al., 2006) <sup>43)</sup>。

18) Ammassalik (グリーンランド)

グリーンランド南東部に位置し, Makkinck 式を用いて年蒸発散量は約 400 mm/y と計算されている (Hasholt and Mernild, 2004) <sup>56)</sup>。しかし, これは高緯度地方にしては大きすぎる値と考えられ, オランダで開発されたこの式をグリーンランドで適用するには地域固有の係数を設定する方法が明確・適切に示される必要がある (Shutov et al., 2006) <sup>43)</sup>。

(11) 中国の乾燥地域

Wang et al. (2004) <sup>57)</sup>は, ゴビ砂漠南東端の Shapotou の植林エリアにおいて, ライシメータを用いた蒸発散量の観測を行っている。ここはモンゴル高地に位置する年降水量 250 mm 未満の乾燥～半乾燥地域で, 月平均気温は-6.2～24.5°C である。

観測に用いたのは直径 2.3 m, 高さ 3.0 m のウェイングライシメータで, 2 年生の乾燥地生灌木を 3 本植えたものである。比較のために木の無い (裸地の) ライシメータも設置された。重量の測定は 1 日 1 回実施し, 1990～1995 年の 6 年間継続された。また, 近接した場所で降水量も観測された。蒸発散量は次の式で計算される。

$$E = P - (V_R + \Delta V_s) / A$$

$E$ : 蒸発散量[mm]     $P$ : 降水量[mm]     $V_R$ : ライシメータ底からの流出量[mm<sup>3</sup>]  
 $\Delta V_s$ : ライシメータの土壌中の水分量変化[mm<sup>3</sup>]     $A$ : ライシメータの面積[mm<sup>2</sup>]

灌木を植えたライシメータでの蒸発散量は 164 mm/y であり, 観測期間中の平均年降水量の 93.8%であった。一方, 裸地のライシメータでは蒸発散量は 113 mm/y であり, ライシメータ底からの流出水が 48 mm/y (降水量の 27%) であった。これらの結果より Wang et al. (2004) <sup>57)</sup>は, 2 つのライシメータの蒸発散量の差は灌木による蒸散量を表し, 裸地に植林を行う際には地下浸透水 (ライシメータ底からの流出量 48 mm に相当) の蒸散による損失に注意が必要であると述べている。

### 3.2.3 広域の蒸発散量の推定結果

#### (1) 日本全国の蒸発散量分布

いくつかの文献では、気象データに基づき日本全国の蒸発散量分布が推定されている。

服部(1985)<sup>67)</sup>は、既存の年間純放射量分布図を用い、年間純放射量に0.9を乗じた値を水柱高に換算して年蒸発散量の分布を表している。

大槻ほか(1984c)<sup>26)</sup>は、全国の気象官署143地点における1951～1980年の30年間の気象データ(気圧・気温・蒸気圧・湿度・風速・雲量・日照率・日射量の月平均値・緯度・年間降水量)を用い、補完法(Morton式)により全国の可能蒸発散量及び実蒸発散量の分布を示している。

この図によると、Penmanの蒸発散位(可能蒸発散量)は太平洋側のほうが大きく、南高北低の傾向を示し、その値の範囲は700～1,200 mm/yである。これに対し、実蒸発散量の地域差は小さく、全国的にはほぼ600～800 mm/yであるとしている(四国・九州の太平洋側のみ800～1,000 mm/y)。また、北海道では可能蒸発散量と実蒸発散量の差が小さいのに対し、西日本では差が大きく、四国・九州では400 mm/y以上の違いが見られるところもある。

近藤(1994)<sup>61)</sup>は、全国の15の気象官署における気象データに基づき、熱収支法により各地区の森林での蒸発散量を推定している。年蒸発散量は、北海道で500～700 mm/y、四国・九州で800～900 mm/yとなっている。この基となった研究(近藤ほか, 1992)<sup>68)</sup>では、これらの森林蒸発散量は水面蒸発散量の1.1～1.5倍となっていると述べられている。

植原・佐藤(1983)<sup>62)</sup>は、気象庁による1956～1965年の全国30か所の蒸発パンによる計測結果を整理しており、蒸発パンによる蒸発量に定数0.8を乗じて蒸発散量と見なしている。おおむね500 mm/y(北海道)～800 mm/y(四国・九州)だが、三重・和歌山で900 mm/y程度の大きな値も見られる。

#### (2) 世界の蒸発散量と水収支の分布

近藤(1994)<sup>61)</sup>は、Budykoらによる世界水収支分布図(“Atlas of world water balance”, UNESCO Press)に基づき、可能蒸発散量及び実蒸発散量の概略分布を示している。

可能蒸発散量は放射量に比例して低緯度地方で大きいが、高緯度地方で小さくなり、シベリア北部での可能蒸発散量は200 mm/y程度で実蒸発散量と違いがない。ヨーロッパでは蒸発量が300～500 mm/yの地域が多い。

### 3.3 蒸発散量と涵養量

#### 3.3.1 蒸発散量の分布

3.2節で示した各地の蒸発散量推定の対象地、観測サイト条件、蒸発散量及び降水量・河川流出量の値を Table 3.3.1-1 にまとめた。国内ではサロベツ（北海道）～去川（宮崎）の 37 地区に、海外の寒冷地では 47 地区に整理される。また、Fig.3.3.1-1～Fig.3.3.1-4 には、これら各地区の位置と蒸発散量の推定値を地図上に示した。

実蒸発散量は、北海道では、おおよそ 400～600 mm/y（道東では 200 mm/y 台もある）、関東～中部では、おおよそ 500～600 mm/y、近畿～九州では、おおよそ 800～950 mm/y である。

これらの値の分布を、大槻ほか(1984c)<sup>26)</sup>による補完法に基づく実蒸発散量分布図と比較すると（西日本の値は多くが補完法によるものであるので比較の意味は薄い）、東日本の特に北海道東部において 200 mm/y 台という補完法よりも小さな値が見られる。これらの値を含む北海道の実蒸発散量の多くは 2 層モデルにより算出されたものであるが、北海道西部の地区では同じ 2 層モデルにより 500 mm/y を超える値も得られており（石狩川流域の各地区など）、手法の特性が原因で局所的に小さな値になったとは考えにくい。2 層法では積雪面蒸発を考慮した計算過程を含むことの影響が、地区による違いとして現れている可能性もある。

東濃や幌延の実蒸発散量は、周囲の地区の補完法や 2 層モデルによる値よりやや低めである。東濃・幌延では、他の多くの地区と違い、Penman 法の可能蒸発散量に係数を乗じて求めた値を用いていることには注意が必要である。

海外の寒冷地の実蒸発散量は、大局的には緯度によって区分でき、カナダ南東部やヨーロッパ中部（アイルランド、英国、スイス）の多くの地区では 400～600 mm/y であるが、カナダ中～南西部やスウェーデン中・南部では 300～400 mm/y となる。さらに高緯度のアラスカ・北西カナダ・フィンランド・ロシア北西部では 200～300 mm/y となり、カナダ北部～グリーンランドのツンドラ地帯やシベリア北部などの北極圏にかかる地区では 100 mm/y 台かそれ以下となっている。Fig.3.3.1-5 には国内外の地区のデータを基に、緯度と実蒸発散量の関係を示した。両者には  $R^2=0.65$ （相関係数 0.8）という明瞭な関係が見られる。平均気温と実蒸発散量の関係（Fig.3.3.1-6）も、 $R^2$  はやや低いものの、正の相関が明らかである。

緯度に加え、地域的な気候特性を反映して、内陸の湿潤気候の Valdai では 500 mm/y 近い大きな値、Mogot（シベリア南部タイガ地帯）では 290 mm/y、ゴビ砂漠縁辺では 100 mm/y 台といった、蒸発散量の違いも現れている。

このような位置や地理的条件による蒸発散量の分布傾向は、世界水収支分布図にもほぼ表されている（ただし、この図の作成に用いられたデータ元の詳細は未調査である）

Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (1/9)

| 地区番号 | 地区          | 文献   | 算定方法                            | 算定に使用した観測データ          | 観測手法                     | 植生(及び地質)     | 標高・流域面積                             | 気温・気候                         | 年間蒸発散量 E(mm) | 年間降水・降雪量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm) | E算定対象期間                | メモ   |
|------|-------------|--|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------|------------------------|--|
| 1    | サロベツ(北海道)   | 羽山・中津川(2002)                                     | 熱収支法(2層モデル)                     | 純放射量、気温、風速、降水量・時間、降雪量 | 気象庁データ                   | 湿原・牧草地       | 標高 10 m<br>659 km <sup>2</sup>      | -12~23°C<br>平均 5.9°C<br>(夏雷)  | 614          | 1201           | 1102        | -515       | 18年間<br>(1983~2000)    |  |
| 1    | サロベツ(北海道)   | 羽山・中津川(2002)                                     | Penman法                         | 純放射量、気温、湿度、風速         | 気象庁データ                   | 湿原・牧草地       | 標高 10 m<br>659 km <sup>2</sup>      | -12~23°C<br>平均 5.9°C<br>(夏雷)  | Ep 660       | 1201           | 1102        | (-561)     | 18年間<br>(1983~2000)    |  |
| 2    | 峠延 P-1(北海道) | 瀬尾ほか(2005)                                       | Penman法に係数0.65(非積雪期)、ハルルク法(積雪期) | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量   | 草地での観測データ                | 広葉樹・草地・針葉樹   | 4.4 km <sup>2</sup>                 | -14~22°C                      | 419          | 1621           | 965         | 237        | 1年間<br>(2003.8~2004.7) |  |
| 2    | 峠延 P-2(北海道) | 瀬尾ほか(2005)                                       | Penman法に係数0.65(非積雪期)、ハルルク法(積雪期) | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量   | 草地での観測データ                | 広葉樹・草地・針葉樹   | 19.7 km <sup>2</sup>                | -14~22°C                      | 419          | 1621           | 1220        | -18        | 1年間<br>(2003.8~2004.7) |  |
| 2    | 峠延 P-3(北海道) | 瀬尾ほか(2005)                                       | Penman法に係数0.65(非積雪期)、ハルルク法(積雪期) | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量   | 草地での観測データ                | 広葉樹・草地・針葉樹   | 7.6 km <sup>2</sup>                 | -14~22°C                      | 419          | 1621           | 860         | 342        | 1年間<br>(2003.8~2004.7) |  |
| 2    | 峠延全体(北海道)   | 瀬尾ほか(2005)                                       | Penman法に係数0.65(非積雪期)、ハルルク法(積雪期) | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量   | 草地での観測データ                | 広葉樹・草地・針葉樹   | 31.7 km <sup>2</sup>                | -14~22°C                      | 419          | 1621           | 1086        | 104        | 1年間<br>(2003.8~2004.7) |  |
| 3    | 母子里(北海道)    | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Ishii et al., 2004a) | Penman法                         | ? (純放射量、気温、湿度、風速)     |                          | 針葉樹          |                                     | -16~25°C<br>平均 5.3°C<br>(名寄)  | Ep 370       | 1670           | 1375        | (-75)      | ?                      | 蒸発散量が可能蒸発散量かどうかは不明。<br>*Taleuchi(1994)によると雪域では Ep=E <sub>0</sub> と<br>のこと。(Shutov et al., 2006)。 |
| 4    | 定山溪(北海道)    | 加藤ほか(1989)                                       | Thornthwaite法                   | 気温                    | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 393~565 m<br>104 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | Ep 445       | 2046           | 1588        | (13)       | 5年間<br>(1982~1986)     | 降水量も空間補完・標高補正  |
| 4    | 定山溪(北海道)    | 加藤ほか(1989)                                       | Hamon法                          | 気温                    | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 393~565 m<br>104 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | Ep 469       | 2046           | 1588        | (-11)      | 5年間<br>(1982~1986)     | 降水量も空間補完・標高補正  |
| 4    | 定山溪(北海道)    | 口澤・中津川(2002)                                     | 熱収支法(2層モデル)                     | 純放射量、気温、風速、降水量・時間、降雪量 | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 393~565 m<br>104 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | 469          | 2066           | 1589        | 28         | 5年間<br>(1986~2000)     |  |
| 4    | 定山溪(北海道)    | 石田ほか(2002)                                       | 熱収支法(2層モデル)                     | 純放射量、気温、風速、降水量・時間、降雪量 | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 393~565 m<br>104 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | 505          | 2074           | 1589        | 0          | 5年間<br>(1986~2000)     |  |
| 5    | 豊平峡(北海道)    | 加藤ほか(1989)                                       | Thornthwaite法                   | 気温                    | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 485~786 m<br>134 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | Ep 469       | 2074           | 1603        | (-18)      | 11年間<br>(1986~1996)    | 降水量も空間補完・標高補正  |
| 5    | 豊平峡(北海道)    | 加藤ほか(1989)                                       | Hamon法                          | 気温                    | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 485~786 m<br>134 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | Ep 473       | 2074           | 1603        | (-2)       | 11年間<br>(1986~1996)    | 降水量も空間補完・標高補正  |
| 5    | 豊平峡(北海道)    | 石田ほか(2002)                                       | 熱収支法(2層モデル)                     | 純放射量、気温、風速、降水量・時間、降雪量 | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 針葉樹・ササ       | 標高 485~786 m<br>134 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | 572          | 2120           | 1604        | -56        | 5年間<br>(1986~2000)     |  |
| 5    | 豊平川(北海道)    | 工藤・中津川(2004)                                     | 熱収支法(2層モデル)                     | 純放射量、気温、風速、降水量・時間、降雪量 | 流域内外の観測データ<br>の空間補完・標高補正 | 広域<br>(主に森林) | 標高 485~786 m<br>134 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支笏湖群) | 470          | 1625           | 1070        | 85         | 1年間(1988)              | 気象データは、AMEDAS データに基づく<br>1 kmメッシュ値   |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支, 特に蒸発散量に係るデータの整理 (2/9)

| 地区番号 | 地区          | 文献            | 算定方法           | 算定に使用した観測データ              | 観測手法                  | 植生 (及び地質)      | 標高・流域面積                             | 気温・気候                         | 年間蒸発散量 E(mm) | 年間降水量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm) | E算定対象期間                | メモ                             |
|------|-------------|---------------|----------------|---------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------------------|--------------------------------|
| 6    | 湯川 (北海道)    | 加藤ほか (1999)   | Thornthwaite 法 | 気温                        | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 針葉樹林・ササ        | 標高 159~565 m<br>113 km <sup>2</sup> | -8~23°C<br>平均 6.6°C<br>(支効測計) | 226          | 1284        | 982         | 76         | 4 年間(2000~2003)        |                                |
| 6    | 湯川 (北海道)    | 加藤ほか (1999)   | Hamon 法        | 気温                        | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 針葉樹林・ササ        | 標高 158~565 m<br>113 km <sup>2</sup> | -9~25°C<br>平均 6.6°C<br>(支効測計) | 243          | 1264        | 965         | 56         | 4 年間(2000~2003)        |                                |
| 7    | 石狩川 (北海道)   | 加藤ほか (1999)   | Thornthwaite 法 | 気温                        | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 森林・草地・農地・市街地など | 0~2000 m<br>12697 km <sup>2</sup>   | -9~25°C<br>平均 7.5°C<br>(石狩)   | Ep 759       | 1444        | 794         | (-109)     | 4 年間(2000~2003)        |                                |
| 7    | 石狩川 (北海道)   | 加藤ほか (1999)   | Hamon 法        | 気温                        | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 森林・草地・農地・市街地など | 0~2000 m<br>12697 km <sup>2</sup>   | -9~25°C<br>平均 7.5°C<br>(石狩)   | 589          | 1444        | 794         | 61         | 3 年間(1951~1953)        |                                |
| 7    | 石狩川 (北海道)   | 工藤・中津川 (2004) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 0~2000 m<br>12697 km <sup>2</sup>   | -9~25°C<br>平均 7.5°C<br>(石狩)   | 446          | (1504)      |             |            | 4 年間(1963~1966)        |                                |
| 8    | 竜川 (北海道)    | 工藤・中津川 (2004) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 1661 km <sup>2</sup>                | -15~25°C<br>平均 5.3°C<br>(朝内)  | Ep 595       | (2297)      |             |            | 3 年間(1989~1991)        | 衛星データで蒸発散分布を推定するための検証データ       |
| 9    | 窓川 (北海道)    | 工藤・中津川 (2004) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 2531 km <sup>2</sup>                | -12~26°C<br>平均 7.1°C<br>(厚別)  | 613          | (1444)      |             |            | 1 年間 (1981.12~1982.11) |                                |
| 10   | 幾春別川 (北海道)  | 工藤・中津川 (2004) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 332 km <sup>2</sup>                 | -11~26°C<br>平均 7.1°C<br>(美瑛)  | 平均蒸発量 544    | (1444)      |             |            | 1 年間 (1981.12~1982.11) |                                |
| 11   | 夕張川 (北海道)   | 工藤・中津川 (2004) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 1118 km <sup>2</sup>                | -11~24°C<br>平均 6.1°C<br>(夕張)  | Ep 566       | (1217)      |             |            | 1 年間(1981, 1984)       | ラインメータに十分な水が供給された場合の蒸発散量(蒸発散能) |
| 12   | 千歳川 (北海道)   | 工藤・中津川 (2004) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 1142 km <sup>2</sup>                | -12~25°C<br>平均 7.1°C<br>(基沼)  | Ep 618       | (1217)      |             |            | 1 年間(1981, 1984)       | ラインメータに十分な水が供給された場合の蒸発散量(蒸発散能) |
| 13   | 美々川 (北海道)   | 熊場 (2001)     | Thornthwaite 法 | 気温                        | ? 流域近傍の気象庁データの補完値     |                |                                     | -12~25°C<br>(千歳)              | 522          | 1963        |             |            | 33 年間(1960~1992)       |                                |
| 14   | 善々湖原 (北海道)  | 井形 (1998)     | 傾度法            | 気温, 風速, 湿度                |                       | 湖原             |                                     | -15~23°C<br>平均 7.1°C          | Ep 755       | (3448)      |             |            | 50 年間(1950~2000)の平均値   | 降水量は平年値                        |
| 15   | 駒里 (北海道)    | 井形 (1998)     | 熱収支法 (ボ-エン比法)  | 気温, 純放射量(日照時間)            |                       | 牧草地            |                                     | -12~25°C<br>(千歳)              | Ep 1043      | (3448)      |             |            | 50 年間(1950~2000)の平均値   |                                |
| 16   | 御路遊水地 (北海道) | 工藤・中津川 (2005) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 105 km <sup>2</sup>                 | -11~21°C<br>平均 6.0°C<br>(朝陽)  | 蒸発量 896      | (3448)      |             |            | 10 年間(1930~1940)       |                                |
| 17   | 田糸路 (北海道)   | 工藤・中津川 (2005) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 341 km <sup>2</sup>                 | -18~23°C<br>平均 4.4°C<br>(川湯)  | 570          | 2400        |             |            | 28 年間(1951~1976)       |                                |
| 18   | 弟子屈 (北海道)   | 工藤・中津川 (2005) | 熱収支法 (2 層モデル)  | 純放射量, 気温, 風速, 降水量・時間, 降雪量 | 流域内外の観測所データの空間補完・標高補正 | 広域(主に森林)       | 459 km <sup>2</sup>                 | -12~22°C<br>平均 4.8°C<br>(弟子屈) | 517          | 1554        | 981         | 55         | 11 年間(1960~2000)       |                                |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (3/9)

| 地区番号 | 地区         | 文献                   | 算定方法          | 算定に使用した観測データ          | 観測手法                    | 植生(及び地質)                                       | 標高、流域面積                              | 気温、気候                        | 年間蒸発散量 E(mm) | 年間降水量-降雪量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R(mm) | E算定対象期間              | メモ                             |
|------|------------|----------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|--|--------------------------------------|------------------------------|--------------|-----------------|-------------|-----------|----------------------|--------------------------------|
| 19   | 柳井(北海道)    | 工藤・中津川(2005)         | 熱収支法(2層モデル)   | 純放射量、気温、風速、降水量、時間、降雪量 | 流域内での観測所データの空間補完・標高補正   | 広域(主に森林)                                       | 895 km <sup>2</sup>                  | -15~23°C<br>平均15.1°C<br>(標高) | 226          | 1284            | 982         | 76        | 4年間(2000~2003)       |                                |
| 20   | 広里(北海道)    | 工藤・中津川(2005)         | 熱収支法(2層モデル)   | 純放射量、気温、風速、降水量、時間、降雪量 | 流域内での観測所データの空間補完・標高補正   | 広域(主に森林)                                       | 2172 km <sup>2</sup>                 | -11~21°C<br>平均16.0°C<br>(標高) | 243          | 1284            | 965         | 56        | 4年間(2000~2003)       |                                |
| 21   | 上川(北海道)    | 大畑ほか(1984c)          | Penman法       | 純放射量、気温、湿度、風速         | 流域内で観測                  | 主に針葉樹<br>(花崗岩・流紋岩)                             | 標高400~810 m<br>5729 km <sup>2</sup>  | -14~25°C<br>平均5.2°C<br>(上川)  | Ep 759       | 1444            | 794         | (-109)    | 4年間(2000~2003)       |                                |
| 21   | 上川(北海道)    | 大畑ほか(1984c)          | 補完式(Morton法)  | 純放射量、気温、湿度、風速         | 流域内で観測                  | 主に針葉樹<br>(花崗岩・流紋岩)                             | 標高400~810 m<br>5729 km <sup>2</sup>  | -14~25°C<br>平均5.2°C<br>(上川)  | 589          | 1444            | 794         | 61        | 3年間(1951~1953)       |                                |
| 22   | 十和田(秋田・青森) | 近藤・滝辺(1991)          | 熱収支法          | 純放射量、気温、湿度、風速         | 十和田湖での観測値(放射量は秋田と八戸の平均) | 森林   | 標高600 m                              | -7~25°C<br>平均7.7°C<br>(休屋)   | 446          | (1504)          |             |           | 4年間(1983~1986)       |                                |
| 23   | 奥只見(福島)    | 多田ほか(1994)           | Thornthwaite法 | 気温                    | 気温観測                    | 広葉樹  | 標高200~2000 m<br>1991 km <sup>2</sup> | -5~28°C<br>平均19.8°C<br>(只見)  | Ep 595       | (2297)          |             |           | 3年間(1989~1991)       | 衛星データで蒸発散分布を推定するための観測データ       |
| 24   | 筑波大(茨城)    | 古藤田(1984)            | ラインメータ        | 蒸発散高                  | ウェイングラインメータ             | 草地開場   | 標高27 m                               | -4~30°C<br>平均13.5°C<br>(つくば) | 613          | (1444)          |             |           | 1年間(1981.12~1982.11) |                                |
| 24   | 筑波大(茨城)    | 古藤田(1984)            | 熱収支法、ラインメータ   | 純放射量、気温、風速、地中熱流量、気圧   | 開場内で観測                  | 草地開場   | 標高27 m                               | -4~30°C<br>平均13.5°C<br>(つくば) | 平均蒸発量<br>544 | (1444)          |             |           | 1年間(1981.12~1982.11) |                                |
| 25   | 森林総研(茨城)   | 竹内(1989)             | ラインメータ        | 水位(フロートリング)           | 2 m径のラインメータの浮上槽水位を測定    | 5年生のスギ幼樹林。本、周囲の140 m <sup>2</sup> も同じ樹種・樹齢の開場。 | 標高30 m                               | 月平均気温<br>1~24°C              | Ep 566       | (1217)          |             |           | 1年間(1981, 1984)      | ラインメータに十分な水が供給された場合の蒸発散量(蒸発散能) |
| 25   | 森林総研(茨城)   | 竹内(1989)             | ラインメータ        | 水位(フロートリング)           | 2 m径のラインメータの浮上槽水位を測定    | 5年生のスギ幼樹林。本、周囲の140 m <sup>2</sup> も同じ樹種・樹齢の開場。 | 標高30 m                               | 月平均気温<br>2~24°C              | Ep 618       | (1217)          |             |           | 1年間(1981, 1984)      | ラインメータに十分な水が供給された場合の蒸発散量(蒸発散能) |
| x    | 清水畑?(山梨)   | Heshino et al.(1999) | 水収支法          | 降水量、河川流出量             |                         | 針葉樹林   | 平均標高990 m<br>2197 km <sup>2</sup>    | -1~31°C<br>平均14.6°C<br>(標高)  | 522          | 1363            |             |           | 33年間(1960~1992)      |                                |
| 26   | 箱根(神奈川県)   | 板寺(2005)             | Thornthwaite法 | 気温                    | 気温観測                    | 草地・市街地   | 標高645 m                              | 月平均気温<br>0~23°C              | Ep 755       | (3448)          |             |           | 50年間(1950~2000)の平均値  | 降水量は平年値                        |
| 26   | 箱根(神奈川県)   | 板寺(2005)             | Makkink式      | 気温<br>純放射量(日照時間)      | 気温観測<br>日照時間は気象庁        | 草地・市街地   | 標高645 m                              | 月平均気温<br>0~23°C              | Ep 1043      | (3448)          |             |           | 50年間(1950~2000)の平均値  |                                |
| 26   | 箱根(神奈川県)   | 板寺(2005)             | 蒸発皿           | ハム蒸発量                 | ハム蒸発量                   | 草地・市街地   | 標高645 m                              | 月平均気温<br>0~23°C              | 蒸発量<br>896   | (3448)          |             |           | 10年間(1930~1940)      |                                |
| 27   | 輪島(石川)     | 中川(1978)             | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速         | 気象台・県の観測値               | 草地・市街地など?                                      | 標高5 m                                | 0~29°C<br>平均13.2°C<br>(輪島)   | 570          | 2400            |             |           | 26年間(1951~1976)      |                                |
| 28   | 東濃、正馬(岐阜)  | 宮原ほか(2002)           | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量   | 流域内で観測                  | 針広混交林<br>(主に広葉樹)                               | 標高220~330 m<br>0.535 km <sup>2</sup> | -9~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治見) | 517          | 1554            | 981         | 55        | 11年間(1990~2000)      |                                |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (4/9)

| 地区番号 | 地区           | 文献          | 算定方法          | 算定に使用した観測データ        | 観測手法   | 植生(及び地質)       | 標高・流域面積                            | 気温・気候                        | 年間蒸発散量 E(mm) | 年間降水・降雪量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm) | E算定対象期間             | メモ                                 |
|------|--------------|-------------|---------------|---------------------|--------|----------------|------------------------------------|------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------|---------------------|------------------------------------|
| 28   | 東濃-上尾上(岐阜)   | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高280~330m<br>0.153km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 517          | 1546           | 733         | 296        | 11年間(1990~2000)     |                                    |
| 28   | 東濃-正馬下(岐阜)   | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高220~310m<br>0.380km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 517          | 1554           | 1083        | -46        | 11年間(1990~2000)     |                                    |
| 28   | 東濃-坂内川(岐阜)   | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高270~310m<br>0.072km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 507          | 1544           | 946         | 91         | 7年間(1993~1999)      |                                    |
| 28   | 東濃-狐山(岐阜)    | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高280~310m<br>0.092km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 510          | 1506           | 902         | 94         | 5年間(1991,1994~1997) |                                    |
| 28   | 東濃-正馬モリル(岐阜) | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高270~310m<br>0.015km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 490          | 1479           | 659         | 330        | 2年間(1999~2000)      |                                    |
| 28   | 東濃-柳石(岐阜)    | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高290~380m<br>0.233km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 599          | 1583           | 947         | 38         | 2年間(1999~2000)      |                                    |
| 28   | 東濃-柳石小(岐阜)   | 宮原ほか(2002)  | Penman法に係数0.7 | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 針広混交林(主に広葉樹)   | 標高340~370m<br>0.010km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 618          | 1759           | 745         | 396        | 1年間(2000)           |                                    |
| 29   | 穴の宮(愛知)      | 大槻ほか(1984b) | Penman法       | 純放射量、気温、湿度、風速       | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高140~220m<br>0.139km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | Ep 1054      | 1629           | 998         | (-423)     | 18年間(1953~1970)     |                                    |
| 29   | 穴の宮(愛知)      | 大槻ほか(1984b) | 蒸発/心          | 心蒸発量                | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高140~220m<br>0.139km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 蒸発量<br>1144  | 1629           | 998         | (-513)     | 18年間(1953~1970)     |                                    |
| 29   | 穴の宮(愛知)      | 大槻ほか(1984b) | 梅沢式(Meron法)   | 純放射量、気温、湿度、風速       | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高140~220m<br>0.139km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 790          | 1629           | 998         | -159       | 18年間(1953~1970)     |                                    |
| 30   | 東山(愛知)       | 寺嶋ほか(1993)  | Hamon法        | 気温                  | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高350~620m<br>10.05km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | Ep 818       | 1835           | 963         | (53)       | 25年間(1941~1965)     |                                    |
| 30   | 東山(愛知)       | 大槻ほか(1984b) | Penman法       | 純放射量、気温、湿度、風速、地中熱流量 | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高350~620m<br>10.05km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | Ep 928       | 1839           | 975         | (-64)      | 18年間(1953~1970)     |                                    |
| 30   | 東山(愛知)       | 大槻ほか(1984b) | 蒸発/心          | 心蒸発量                | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高350~620m<br>10.05km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 蒸発量<br>628   | 1839           | 975         | (236)      | 18年間(1953~1970)     |                                    |
| 30   | 東山(愛知)       | 大槻ほか(1984b) | 梅沢式(Meron法)   | 純放射量、気温、湿度、風速       | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高350~620m<br>10.05km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 786          | 1839           | 975         | 78         | 18年間(1953~1970)     |                                    |
| 30   | 東山(愛知)       | 石井(1989)    | Hamon法に補正     | 気温                  | 流域内で観測 | 主ご針葉樹<br>花崗岩流域 | 標高350~620m<br>10.05km <sup>2</sup> | -2~33°C<br>平均14.6°C<br>(多治型) | 748          | 1679           | 918         | 13         | 5年間(1964~1968)      | 土壌の水分状態により蒸発散量が季節変化するモデルにより蒸発散量を修正 |



Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (5/9)

| 地区番号 | 地区        | 文献                      | 算定方法             | 算定に使用した観測データ  | 観測手法           | 植生(および地質)                     | 標高・流域面積                                     | 気温・気候                         | 年間蒸発散量 E(mm) | 年間降水量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm) | E算定対象期間                        | 注                                  |
|------|-----------|-------------------------|------------------|---------------|----------------|-------------------------------|---|-------------------------------|--------------|-------------|-------------|------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 31   | 白坂(愛知)    | 大槻ほか(1994b)             | Penman法          | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>花崗岩流域                | 標高 290~630 m<br>0.885 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C<br>(多治型) | Ep 937       | 1806        | 976         | (-107)     | 18年間(1953~1970)                |                                    |
| 31   | 白坂(愛知)    | 大槻ほか(1994b)             | 蒸発ハシ             | ハシ蒸発量         | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>花崗岩流域                | 標高 290~630 m<br>0.885 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C<br>(多治型) | 蒸発量 787      | 1806        | 976         | (43)       | 18年間(1953~1970)                |                                    |
| 31   | 白坂(愛知)    | 大槻ほか(1994b)             | 補完式(Morton法)     | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>花崗岩流域                | 標高 290~630 m<br>0.885 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C<br>(多治型) | 793          | 1806        | 976         | 37         | 18年間(1953~1970)                |                                    |
| 31   | 白坂-北谷(愛知) | 寺嶋ほか(1993)              | Hamon法           | 気温            | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>花崗岩流域                | 0.019 km <sup>2</sup>                       | -2~33°C<br>平均 14.6°C<br>(多治型) | Ep 829       | 2061        | 1260        | (64)       | 25年間(1941~1965)                |                                    |
| 31   | 白坂-青谷(愛知) | 寺嶋ほか(1993)              | Hamon法           | 気温            | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>花崗岩流域                | 0.0142 km <sup>2</sup>                      | -2~33°C<br>平均 14.6°C<br>(多治型) | Ep 817       | 2055        | 1136        | (101)      | 25年間(1941~1965)                |                                    |
| 31   | 白坂-白坂(愛知) | 寺嶋ほか(1993)              | Hamon法           | 気温            | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>花崗岩流域                | 0.885 km <sup>2</sup>                       | -2~33°C<br>平均 14.6°C<br>(多治型) | Ep 845       | 1856        | 897         | (14)       | 25年間(1941~1965)                |                                    |
| 32   | 川向-柳生(滋賀) | 大槻ほか(1994c)             | Penman法          | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 針葉樹<br>花崗岩流域                  | 標高 180~260 m<br>0.087 km <sup>2</sup> (2流域) | 1~31°C<br>平均 14.8°C<br>(大津)   | Ep 1063      | 1661        | 952         | (-344)     | 13年間<br>(1966~1971, 1972~1977) |                                    |
| 32   | 川向-柳生(滋賀) | 大槻ほか(1994c)             | 補完式(Morton法)     | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 針葉樹<br>花崗岩流域                  | 標高 180~260 m<br>0.087 km <sup>2</sup> (2流域) | 1~31°C<br>平均 14.8°C<br>(大津)   | 670          | 1661        | 862         | 39         | 13年間<br>(1966~1971, 1972~1977) |                                    |
| 32   | 柳生(滋賀)    | Rampisela et al. (1990) | Penman-Monteith法 | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 針葉樹<br>花崗岩流域                  | 標高 190~260 m<br>0.027 km <sup>2</sup>       | 1~31°C<br>平均 14.8°C<br>(大津)   | 778          | (1341)      |             | (-7)       | 1年間(1986.9~1987.8)             | P-E-Rの値は、「水収支法によるEが771mm」という記述より算出 |
| 32   | 柳生(滋賀)    | Rampisela et al. (1990) | Thornthwaite法    | 気温            | 流域内で観測         | 針葉樹<br>花崗岩流域                  | 標高 190~260 m<br>0.027 km <sup>2</sup>       | 1~31°C<br>平均 14.8°C<br>(大津)   | Ep 764       | (1341)      |             | (7)        | 1年間(1986.9~1987.8)             | P-E-Rの値は、「水収支法によるEが771mm」という記述より算出 |
| 32   | 柳生(滋賀)    | Rampisela et al. (1990) | Hamon法           | 気温            | 流域内で観測         | 針葉樹<br>花崗岩流域                  | 標高 190~260 m<br>0.027 km <sup>2</sup>       | 1~31°C<br>平均 14.8°C<br>(大津)   | Ep 779       | (1341)      |             | (-6)       | 1年間(1986.9~1987.8)             | P-E-Rの値は、「水収支法によるEが771mm」という記述より算出 |
| 32   | 柳生(滋賀)    | Rampisela et al. (1990) | Penman法          | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 針葉樹<br>花崗岩流域                  | 標高 190~260 m<br>0.027 km <sup>2</sup>       | 1~31°C<br>平均 14.8°C<br>(大津)   | Ep 912       | (1341)      |             | (-141)     | 1年間(1986.9~1987.8)             | P-E-Rの値は、「水収支法によるEが771mm」という記述より算出 |
| 33   | 京大園場(京都)  | 大槻ほか(1994a)             | 蒸発ハシ             | ハシ蒸発量         | 水田園場に<br>置いたハシ | 100m四方の水田。<br>夏は水田。<br>冬は蕎麦栽培 | 標高 30 m                                     | 1~33°C<br>平均 15.6°C<br>(京都)   | 蒸発量 850      | (1545)      |             |            | 13年間(1963~1975)                |                                    |
| 33   | 京大園場(京都)  | 大槻ほか(1994a)             | 蒸発ハシ             | ハシ蒸発量         | 林田園場に<br>置いたハシ | 大学構内の<br>演習林                  | 標高 30 m                                     | 1~33°C<br>平均 15.6°C<br>(京都)   | 蒸発量 940      | (1545)      |             |            | 13年間(1963~1975)                |                                    |
| 34   | 上賀茂(京都)   | 大槻ほか(1994b)             | Penman法          | 純放射量、気温、湿度、風速 | 流域内で観測         | 主に針葉樹<br>堆積岩流域                | 標高 140~220 m<br>0.044 km <sup>2</sup>       | 1~33°C<br>平均 15.6°C<br>(京都)   | Ep 995       | 1725        | 922         | (-192)     | 7年間(1969~1975)                 |                                    |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支, 特に蒸発散量に係るデータの整理 (6/9)

| 地区番号 | 地区             | 文献                   | 算定方法                            | 算定に使用した観測データ     | 観測手法              | 樹生(及び地質)          | 標高・流域面積                               | 気温・気候                        | 年間蒸発散量 E(mm)              | 年間降水量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm)               | E算定対象期間                          | メモ                        |
|------|----------------|----------------------|---------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 34   | 上賀茂(京都)        | 大槻ほか(1984c)          | 蒸発ハシ                            | ハシ蒸発量            | 流域内で観測            | 主に針葉樹<br>堆積岩流域    | 標高 140~220 m<br>0.044 km <sup>2</sup> | 1~33°C<br>平均 15.6°C<br>(京都)  | 蒸発量<br>945                | 1725        | 922         | (-142)                   | 7年間(1969~1975)                   |                           |
| 34   | 上賀茂(京都)        | 大槻ほか(1984b)          | 補完式(Morton法)                    | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 主に針葉樹<br>堆積岩流域    | 標高 140~220 m<br>0.044 km <sup>2</sup> | 1~32°C<br>平均 15.6°C<br>(京都)  | 672                       | 1725        | 922         | 131                      | 7年間(1969~1975)                   |                           |
| 35   | 竜の口-南谷(岡山)     | 谷・河部(1987)           | Pennan 法                        | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 気象庁(岡山地方気象台)のデータ  | 針葉樹<br>堆積岩流域      | 標高 60~260 m<br>0.226 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | Ep 889,1045               | 1209        | 478         | (-258,-314)              | 1975~1979 及び<br>1980~1984 の 2 時期 | 「損失量/Eveman」より係数を求める目的で実施 |
| 35   | 竜の口-南谷(岡山)     | 大槻ほか(1984b)          | 蒸発ハシ                            | ハシ蒸発量            | 流域内で観測            | 針葉樹<br>堆積岩流域      | 標高 60~260 m<br>0.226 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | 蒸発量<br>1110               | 1258        | 403         | (-255)                   | 15年間(1966~1980)                  |                           |
| 35   | 竜の口-南谷(岡山)     | 大槻ほか(1984b)          | Pennan 法                        | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 針葉樹<br>堆積岩流域      | 標高 60~260 m<br>0.226 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | Ep 1012                   | 1258        | 403         | (-157)                   | 15年間(1966~1980)                  |                           |
| 35   | 竜の口-南谷(岡山)     | 大槻ほか(1984b)          | 補完式(Morton法)                    | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 針葉樹<br>堆積岩流域      | 標高 60~260 m<br>0.226 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | 845                       | 1258        | 403         | 10                       | 15年間(1966~1980)                  |                           |
| 35   | 竜の口-北谷(岡山)     | 谷・河部(1987)           | 蒸発ハシ                            | ハシ蒸発量            | 流域内で観測            | 主に針葉樹<br>堆積岩流域    | 標高 50~250 m<br>0.173 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | 蒸発量<br>1110               | 1235        | 439         | (-314)                   | 15年間(1966~1980)                  |                           |
| 35   | 竜の口-北谷(岡山)     | 谷・河部(1987)           | Pennan 法                        | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 主に針葉樹<br>堆積岩流域    | 標高 50~250 m<br>0.173 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | Ep 1012                   | 1235        | 439         | (-216)                   | 15年間(1966~1980)                  |                           |
| 35   | 竜の口-北谷(岡山)     | 谷・河部(1987)           | 補完式(Morton法)                    | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 主に針葉樹<br>堆積岩流域    | 標高 50~250 m<br>0.173 km <sup>2</sup>  | 1~32°C<br>平均 15.8°C<br>(岡山)  | 845                       | 1235        | 439         | -49                      | 15年間(1966~1980)                  |                           |
| 36   | 岡山~鳥取          | 二宮ほか(2007)           | Ci 濃度による方法                      | 雨水と蒸流水の Ci       | 雨水・蒸流水の量と Ci 濃度測定 | 林地の蒸流域<br>(12 箇所) | 標高 0~750 m<br>の 12 箇所                 | -2~31°C<br>平均 13.4°C<br>(津山) | 600(山嶺・山陰側)<br>~300(中風山峠) | 1000~1750   | 200~1500    | 地下流出量<br>+ 湖沼量で<br>0~400 | 1 年間の採取雨水試料                      | 水収支と Ci 収支より計算            |
| x    | 長安口ダム(徳島)      | Hashino et al (1989) | 水収支法                            | 降水量, 河川流出量       |                   | 針葉樹               | 平均標高 785 m<br>494 km <sup>2</sup>     | -2~30°C<br>平均 13.2°C<br>(木道) | 701                       | 3418        |             |                          | 27年間(1967~1993)                  |                           |
| 37   | 去川(宮崎)         | 大槻ほか(1984c)          | Pennan 法                        | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 広葉樹               | 標高 230~370 m<br>0.158 km <sup>2</sup> | 3~31°C<br>平均 17.2°C<br>(宮崎)  | Ep 1208                   | 2988        | 1837        | (-147)                   | 17年間(1959~1975)                  |                           |
| 37   | 去川(宮崎)         | 大槻ほか(1984c)          | 補完式(Morton法)                    | 総放射量, 気温, 湿度, 風速 | 流域内で観測            | 広葉樹               | 標高 230~370 m<br>0.158 km <sup>2</sup> | 3~31°C<br>平均 17.2°C<br>(宮崎)  | 946                       | 2988        | 1837        | 113                      | 17年間(1959~1975)                  |                           |
| x    | 稲地ダム(沖縄)       | Hashino et al (1989) | 水収支法                            | 降水量, 河川流出量       |                   | 常緑広葉樹             | 平均標高 150 m<br>32 km <sup>2</sup>      | 13~32°C<br>平均 22.5°C<br>(名護) | 771                       | 2383        |             |                          | 12年間(1979~1990)                  |                           |
| 38   | Mer Bleue(ワラワ) | Lefleur et al (2005) | Pennan-Monteith 法の抵抗係数を 0 として計算 | 気温, 湿度           |                   | 渚水のある湿地           |                                       | 月平均気温<br>-12~21°C            | Ep 477                    | 885         | 0           | (408)                    | 4年間(1988.10~2002.9)              | 流入出のない閉じた湿地               |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (7/9)

| 地区番号 | 地区                               | 文献                      | 算定方法               | 算定に使用した観測データ            | 観測手法               | 植生(及び地質)    | 標高・流域面積  | 気温・気候   | 年間蒸発散量 E(mm)         | 年間降水量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm) | E算定対象期間         | メモ                          |
|------|----------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------|----------|---------|----------------------|-------------|-------------|------------|-----------------|-----------------------------|
| 39   | Pacific coast (カナダ)              | Fernandes et al (2007)  | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ | 針葉樹         |          |         | 386                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 40   | South B.C. Mountains (カナダ)       | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ | 針葉樹         |          |         | 390                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 41   | Yukon/North B.C. Mountains (カナダ) | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ | 針葉樹         |          |         | 246                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 42   | Prairies (カナダ)                   | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ | 草原          |          |         | 308                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 43   | MacKenzie District (カナダ)         | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ | 針葉樹         |          |         | 227                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 44   | Northwestern Forest (カナダ)        | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ |             |          |         | 331                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 45   | Northeastern Forest (カナダ)        | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ |             |          |         | 414                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 46   | Great Lakes /St. Lawrence (カナダ)  | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ |             |          |         | 473                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 47   | Atlantic Canada (カナダ)            | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ |             |          |         | 441                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 48   | Arctic Tundra (カナダ)              | Fernandes et al. (2007) | 熱・水・炭素収支モデル(EALCO) | 純放射量(長・短波長), 気温, 湿度, 風速 | OWEEDSの予ち対象エリアのデータ | ツンドラなど      |          |         | 105                  |             |             |            | 40年間(1960~2000) |                             |
| 49   | Ascot (英国)                       | Wachy (2001)            | ライシメータ             | 降水量, 入出水量               | 水量の測定              | 小麦 (周囲の畑地も) |          |         | 372(水位深)<br>381(水位浅) | 614         |             |            | 4年間(1990~1994)  | LLW 蒸散収分における不飽和帯での核種移行試験の一部 |
| 50   | Pevensy Levels (英国)              | Braeford (2003)         | Penman-Monteith 法  | 純放射量, 気温, 湿度, 風速        | MORECS データ         | 海岸低地の草地     | 標高 2 m   |         | 567                  |             |             | (386)      | 1年間(1997)       |                             |
| 51   | Netherley (英国)                   | Hulne (2006)            | Penman-Monteith 法  | 純放射量, 気温, 湿度, 風速        | MORECS データ         | コケ(湿地)      | 標高 120 m | 海洋性過湿気候 | Ep 528               | 914         | 0           |            | 20年間(1982~2001) |                             |
| 52   | Chirivven (アイルランド)               | Mills (2000)            | ライシメータ             | 水位(フロートインク)             | ライシメータの浮上槽水位を測定    |             |          |         | Ep 390               |             |             |            | 20年間(1971~1990) |                             |
| 53   | Johnstown Castle (アイルランド)        | Mills (2000)            | ライシメータ             | 水位(フロートインク)             | ライシメータの浮上槽水位を測定    |             |          |         | Ep 543               |             |             |            | 20年間(1971~1990) |                             |
| 54   | Glenroy (アイルランド)                 | Mills (2000)            | ライシメータ             | 水位(フロートインク)             | ライシメータの浮上槽水位を測定    |             |          |         | Ep 428               |             |             |            | 20年間(1971~1990) |                             |
| 55   | Kinealy (アイルランド)                 | Mills (2000)            | ライシメータ             | 水位(フロートインク)             | ライシメータの浮上槽水位を測定    |             |          |         | Ep 567               |             |             |            | 20年間(1971~1990) |                             |
| 56   | Ballinmore (アイルランド)              | Mills (2000)            | ライシメータ             | 水位(フロートインク)             | ライシメータの浮上槽水位を測定    |             |          |         | Ep 421               |             |             |            | 20年間(1971~1990) |                             |
| 57   | Oak Park (アイルランド)                | Mills (2000)            | ライシメータ             | 水位(フロートインク)             | ライシメータの浮上槽水位を測定    |             |          |         | Ep 467               |             |             |            | 20年間(1971~1990) |                             |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (8/9)

| 地区番号 | 地区                       | 文献   | 算定方法                            | 算定に使用した観測データ         | 観測手法 | 植生(及び地質)               | 標高・流域面積                            | 気温・気候              | 年間蒸発散量 E(mm)          | 年間降水-降雪量 P(mm) | 年間流出量 R(mm) | P-E-R (mm) | E算定対象期間                | メモ                         |
|------|--------------------------|--|---------------------------------|----------------------|------|------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|-------------|------------|------------------------|----------------------------|
| 58   | Aarese River delta (スイス) | Mdaghri-Alaoui (2001)                              | Penman-Monteith 法               |                      |      | 表層は森林                  | 標高 430 m                           |                    | 564                   | 865            | 0           | 281        | 1 年間 (1990.10~1991.10) | 土壌中の貯留量変化 20 mm を考慮        |
| 58   | Aarese River delta (スイス) | Mdaghri-Alaoui (2001)                              | Penman-Monteith 法               | 温度、日照時間              |      | 表層は森林                  | 標高 430 m                           |                    | 532                   | 865            | 0           | 313        | 1 年間 (1990.10~1991.10) | 土壌中の貯留量変化 20 mm を考慮        |
| 59   | Lithuania Rivers (リトアニア) | Kilias (2006)                                      | Priestly-Taylor Thornthwaite 法? | 気温?                  |      | (国内の平均?)               |                                    |                    | 512 (おそらく印)           | 748            | (300)       | (-64)      | ?                      | 広域の複数流域の平均値?               |
| 60   | Remvaara (フィンランド)        | Tedilauuden Voima Oy (1992)                        | ?                               |                      |      |                        |                                    |                    |                       | 580            | 60          | 降水量の数値未測   | 不明 (流量測定 3 回のみ)        | 湖水量などは観文記述による。算定の原則レポート未入手 |
| 61   | Veitasaara (フィンランド)      | Tedilauuden Voima Oy (1992)                        | ?                               |                      |      |                        |                                    |                    | 605                   | 降水量の数値未測       | 30          | 降水量の数値未測   | 不明 (流量測定 3 回のみ)        | 湖水量などは観文記述による。算定の原則レポート未入手 |
| 62   | Kivetty (フィンランド)         | Tedilauuden Voima Oy (1992)                        | ?                               |                      |      |                        |                                    |                    | 590                   | 降水量の 60%       | 3~60        | 降水量の数値未測   | 不明 (流量測定 3 回のみ)        | 湖水量などは観文記述による。算定の原則レポート未入手 |
| 63   | Syry (フィンランド)            | Tedilauuden Voima Oy (1992)                        | ?                               |                      |      |                        |                                    |                    | 535                   | 降水量の 60%       |             | 降水量の数値未測   | 不明 (流量測定 3 回のみ)        | 湖水量などは観文記述による。算定の原則レポート未入手 |
| 64   | Olikketo (フィンランド)        | Tedilauuden Voima Oy (1992)                        | ?                               |                      |      |                        |                                    |                    | 530                   | 降水量の 70~80%    |             | 降水量の数値未測   | 不明 (流量測定 3 回のみ)        | 湖水量などは観文記述による。算定の原則レポート未入手 |
| 65   | Finnelehn (フィンランド)       | Carlsson and Gidrud (1983)                         | Budykov 法                       | 純放射量、気温、湿度、風速        |      | (実蒸発散量は植生のある部分で算出)針葉樹? | 標高 22~40 m の平坦地、25 km <sup>2</sup> |                    | 380                   | 670            | 240         | 50         | ? 1 年間(1979)           |                            |
| 66   | Forsmark (フィンランド)        | Gustafsson et al. (2006)                           | Penman-Monteith 法               | 純放射量、気温、湿度、風速        |      | 林地など                   |                                    |                    | 329(wet) ~ 415(fresh) | 645            |             |            | 2 年間(2003~2004)        |                            |
| 67   | Oksaneninn (フィンランド)      | Gustafsson et al. (2006)                           | Penman-Monteith 法               | 純放射量、気温、湿度、風速        |      | 林地など                   |                                    |                    | 376                   | 495            |             |            | ? 1 年間(2003)           |                            |
| 68   | Valdai-Tayozhny (ロシア)    | Quev and Nosonova (2003)                           | 熱収支法                            | 純放射量(昼・短波長)、気温、湿度、風速 |      | 亜寒帯林 (トウヒの成木の林)        | 丘陵 0.45 km <sup>2</sup>            | -47~-33°C 平均 3.1°C | 569                   | 776            | 173         | 34         | 18 年間(1968~1983)       | 土壌水変化・地下水変化量も算出している        |
| 68   | Valdai (ロシア)             | Shutov et al. (2006) (原文は、Balonishnikova, 2004)    | 各パラメータは独立に算出                    |                      |      | 亜寒帯林 (森林)              |                                    | 平均 3.1°C           | 497                   | 794            |             |            | 30 年以上                 | 土壌水変化・地下水変化量も算出している        |
| 68   | Valdai (ロシア)             | Shutov et al. (2006) (原文は、Balonishnikova, 2004)    | 各パラメータは独立に算出                    |                      |      | 亜寒帯林 (草地)              |                                    | 平均 3.1°C           | 422                   | 792            |             |            | 30 年以上                 | 土壌水変化・地下水変化量も算出している        |
| 69   | Brusovista (ロシア)         | Shutov et al. (2006) (原文は、Shutov, 2004)            | ライメーター、蒸発パン                     |                      |      | 亜寒帯湿地                  |                                    |                    | 298                   | 685            |             |            | 2 年間                   |                            |
| 70   | Aelavajoki (フィンランド)      | Shutov et al. (2006) (原文は、Seuna and Liijama, 2004) | (観測項目の記述に E がなく、水収支で算出?)        |                      |      | 亜寒帯林 (主に針葉樹)           | 標高 70~280 m, 16.4 km <sup>2</sup>  | 平均 0°C             | 222                   | 645            | 観測値あり       |            | 25~40 年間               |                            |
| 71   | Iitovuoma (フィンランド)       | Shutov et al. (2006) (原文は、Seuna and Liijama, 2004) | (観測項目の記述に E がなく、水収支で算出?)        |                      |      | ツンドラ (雑性のカシノのみ)        | 標高 400~720 m, 11.6 km <sup>2</sup> | 平均 -1°C            | 230                   | 574            | 観測値あり       |            | 25~40 年間               |                            |
| 72   | Bavolva (ノルウェー)          | Shutov et al. (2006) (原文は、Killingevik, 2004)       | (観測項目の記述に E がなく、水収支で算出?)        |                      |      | ツンドラ、氷河                | 標高 4~742 m, 30.2 km <sup>2</sup>   |                    | 46                    | 385            |             |            |                        | 降水量はツンドラ断りの値               |
| 73   | Mogot (シベリア)             | Shutov et al. (2006) (原文は、Vasilenko, 2004)         |                                 |                      |      | 山岳タイガ                  |                                    |                    | 290                   | 612            |             |            | 10 年間(1976~1985)       |                            |

Table 3.3.1-1 各地区の水収支、特に蒸発散量に係るデータの整理 (9/9)

| 地区番号 | 地区                             | 文献   | 算定方法                            | 算定に使用した観測データ      | 観測手法 | 植生<br>(及び地質)               | 標高・<br>流域面積 | 気温・<br>気候 | 年間蒸発散量E(mm) | 年間降水・降雪<br>量P(mm) | 年間流出量<br>R(mm) | P-E-R<br>(mm) | E算定対象期間            | メモ   |
|------|--------------------------------|--|---------------------------------|-------------------|------|----------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------------|----------------|---------------|--------------------|--|
| 74   | Kolyma<br>(シベリア)               | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Zhuravik, 2004)              |                                 |                   |      | 山岳タイガ、<br>ツンドラ             |             |           | 178         | 471               |                |               |                    |  |
| 75   | Tiksi<br>(シベリア)                | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Ishii et al., 2004b)         |                                 |                   |      | ツンドラ                       |             |           | 131         | 317               |                |               | 1997~1998の夏期       | 夏のみの観測値?   |
| 76   | Dead Creek<br>(カナダ)            | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Thorne and Hawkins, 2004)    | (水収支法?)                         |                   |      | 亜寒帯森林                      |             |           | 327         | 521               |                |               | 14年間               | 放射性廃棄物処分関連研究   |
| 77   | Wolf Creek<br>(カナダ)            | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Jabowicz et al., 2004)       | 補完式<br>(Morton 法)               | 純放射量、気温、湿度、<br>風速 |      | 亜寒帯森林                      |             |           | 359         | 387               | (9?)           | 19            |                    | 19 mm は、「貯留量」の扱い、なお、P、E は森林帯での値。"地中蒸発量を考慮しないとMorton 式では E が過大になる。              |
| 78   | Rt. Simpson<br>(カナダ)           | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Reid and Farris, 2004)?      |                                 |                   |      | 亜寒帯湿草地                     |             |           | 287         | 421               |                |               |                    |  |
| 79   | Caribou-Poker Creeks<br>(アラスカ) | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Bolton et al., 2004)         | Priestly-Taylor 法               |                   |      | 亜寒帯森林                      |             |           | Ep, 202     | 412               |                |               |                    | 係数 $\alpha=1.13$ を求めた相対湿度と適用温度に疑問(Shutov et al., 2006)。永久凍土の層が水収支の各要素に大きく影響する。 |
| x    | Innaik Creek<br>(アラスカ)         | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Kene et al., 2004)           | 水収支法                            |                   |      | ツンドラ                       |             |           | 179         | 353               |                |               |                    |  |
| 80   | Baffin 島<br>(カナダ)              | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、?)                           |                                 |                   |      | ツンドラ                       |             |           | 154         | 616               |                |               |                    |  |
| 81   | Devon 島<br>(カナダ)               | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Young and Woo, 2004)         |                                 |                   |      | 極地砂漠                       |             |           | 117         | 185               |                |               |                    |  |
| 82   | Ellesmere 島<br>(カナダ)           | Shutov et al.(2006)<br>(原文は、Young and Woo, 2004)         |                                 |                   |      | 極地オアシス                     |             |           | 83          | 141               |                |               |                    |  |
| 83   | Ammassalik<br>(グリーンランド)        | Hasholt and Mernild(2004)<br>(Shutov et al., 2006(にも引用)) | Makkink 式と<br>Snow-Train-3D モデル |                   |      |                            |             |           | 379~400     | 1036~1255         | 観測値あり          |               |                    | [E の値が大きすぎ、Makkink 式の係数の再検討が必要] (Shutov et al., 2006)。                         |
| 84   | Shapotou<br>(中国)               | Wang et al.<br>(2004)                                    | ラインメータ                          |                   |      | 灌木の乾燥地域                    |             |           | 164         | 175               |                |               | 6年間<br>(1990~1995) |  |
| 84   | Shapotou<br>(中国)               | Wang et al.<br>(2004)                                    | ラインメータ                          |                   |      | 灌木の乾燥地域                    |             |           | 裸地蒸発量 112   | 175               |                |               | 6年間<br>(1990~1995) |  |
|      | 日本全国                           | 服部<br>(1985)   | 熱収支法                            | 純放射量              |      | (全国対象のコンター図)               |             |           |             |                   |                |               |                    |  |
|      | 日本全国                           | 植原・佐藤<br>(1983)  | 蒸発パン                            | パン蒸発量             |      | (全国 30 地点の値)               |             |           |             |                   |                |               |                    |  |
|      | 日本全国                           | 大畑ほか<br>(1984b)  | Penman 法、<br>補完式(Morton 法)      | 純放射量、気温、湿度、<br>風速 |      | 600~1000<br>(全国対象のコンター図)   |             |           |             |                   |                |               |                    | 水収支法による蒸発散量(降水量-流出量)を<br>真値として比較。  |
|      | 日本全国                           | 近藤<br>(1994)   | 熱収支?                            | 純放射量?             |      | 486~989 mm/y<br>(15 の主要都市) |             |           |             |                   |                |               |                    |  |
|      | アジア大陸                          | 近藤(1994)<br>(原文は、Budyko et al., 1977)                    | 熱収支?                            | 各地の純放射量<br>の推定値   |      |                            |             |           |             |                   |                |               |                    | 推定法の詳細は本記載   |

\* 蒸発散量の欄で、数字のみ表示されているのは蒸発散量を示す。パン蒸発量には蒸発量と記した。  
 \* 降水量の欄の括弧の付いた値は、文献に当該サイトでの降水量データがなく、近隣のアメダス観測点の降水量データを用いたもの。  
 \* P-E-R の括弧の付いた値は、蒸発散量が蒸発散量でないために参考値であることを示す。  
 \* 気温・気候の欄で、末尾に括弧で地名が示されているものは、近隣のアメダス観測点での気温の年平均値(最低、最高、平均)及び地名を表す。地名が覆いていないものは、試験サイト内での値。  
 ※ MORECS: 英国本土の気象データからメソスケールごとに蒸発散量を算定するシステム。  
 ※ CWEECS: カナダ本土の 144 か所における気象データセット

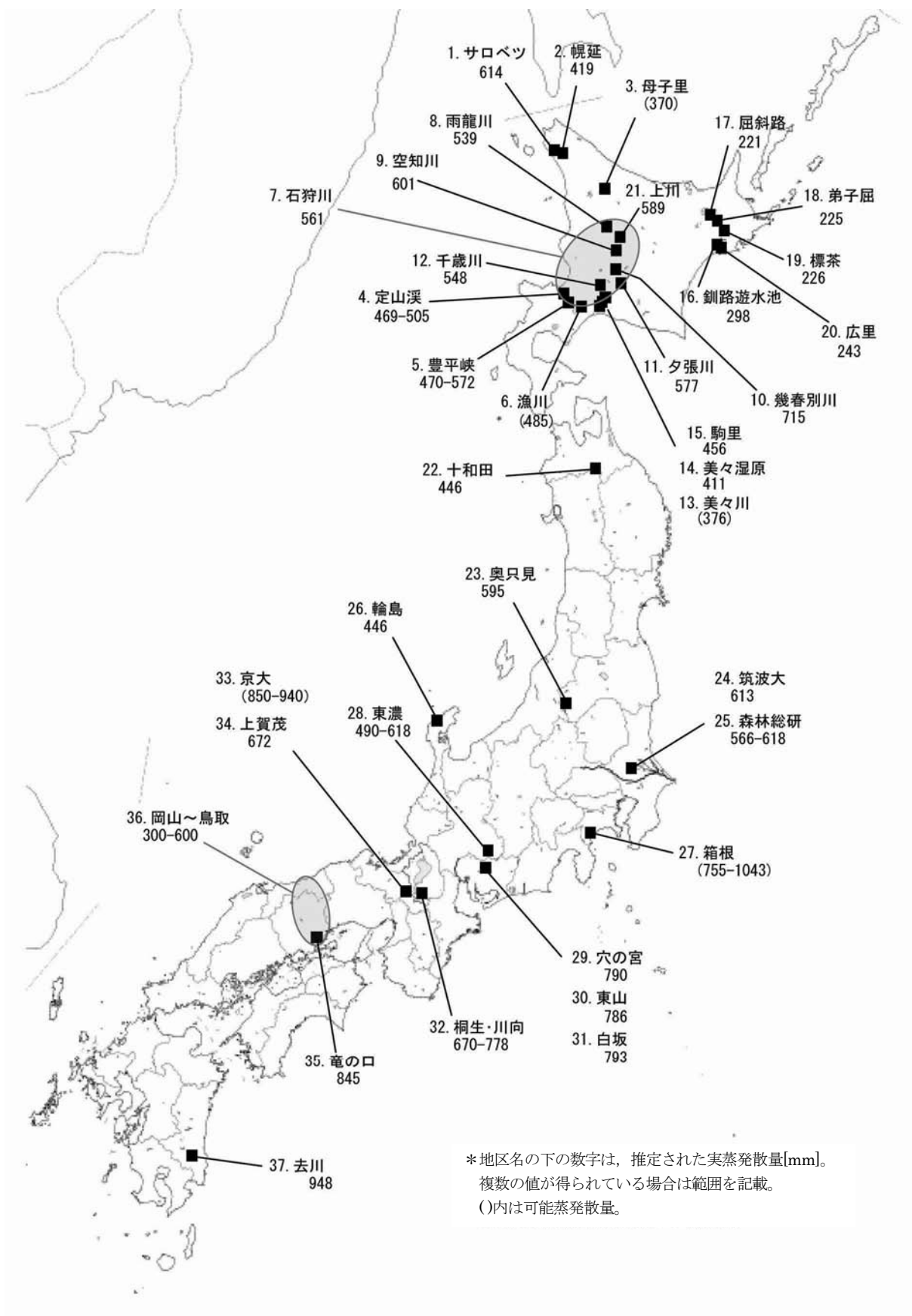


Fig.3.3.1-1 国内の蒸発散量の観測地区

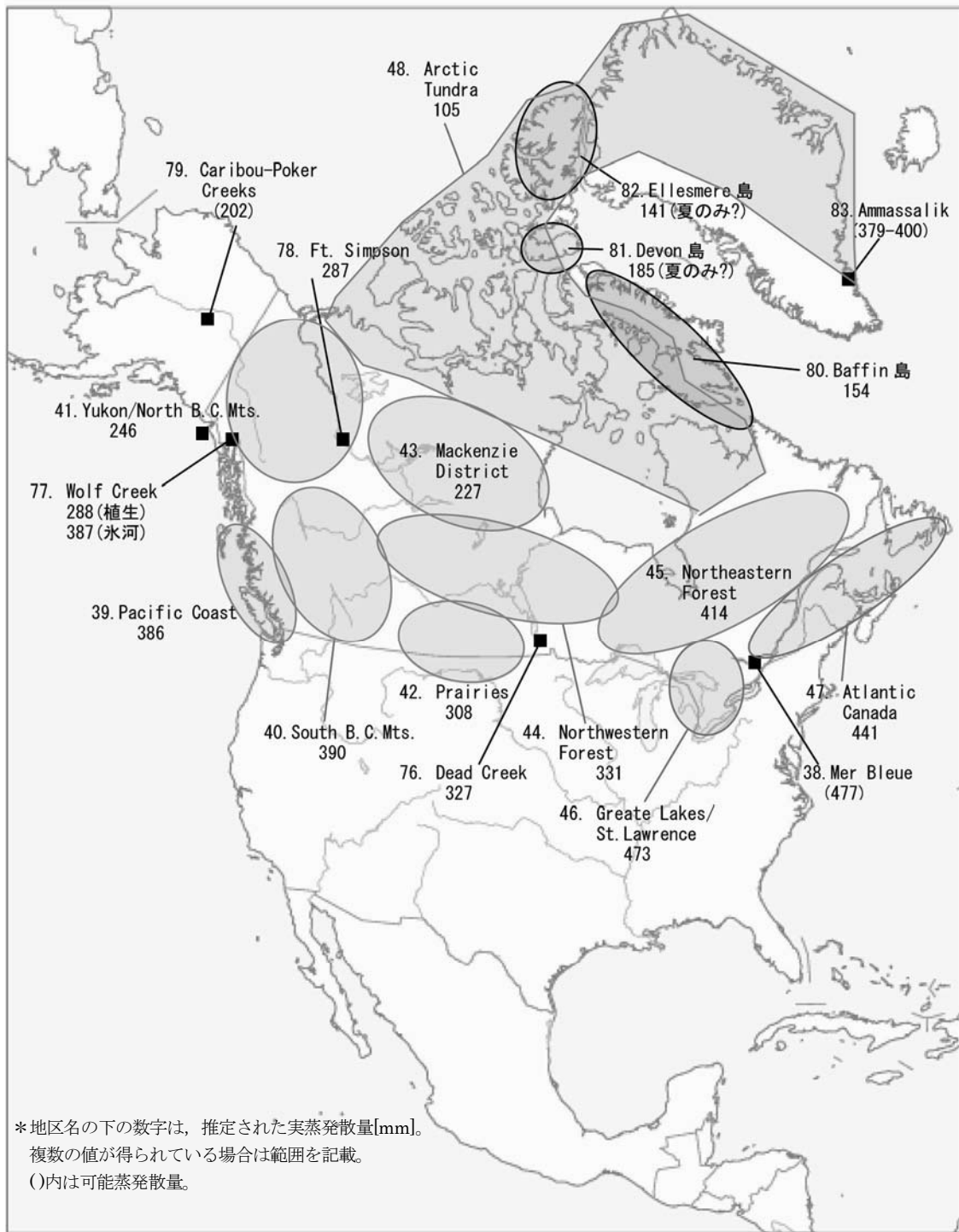


Fig.3.3.1-2 海外寒冷地の蒸発散量観測地区（北米）

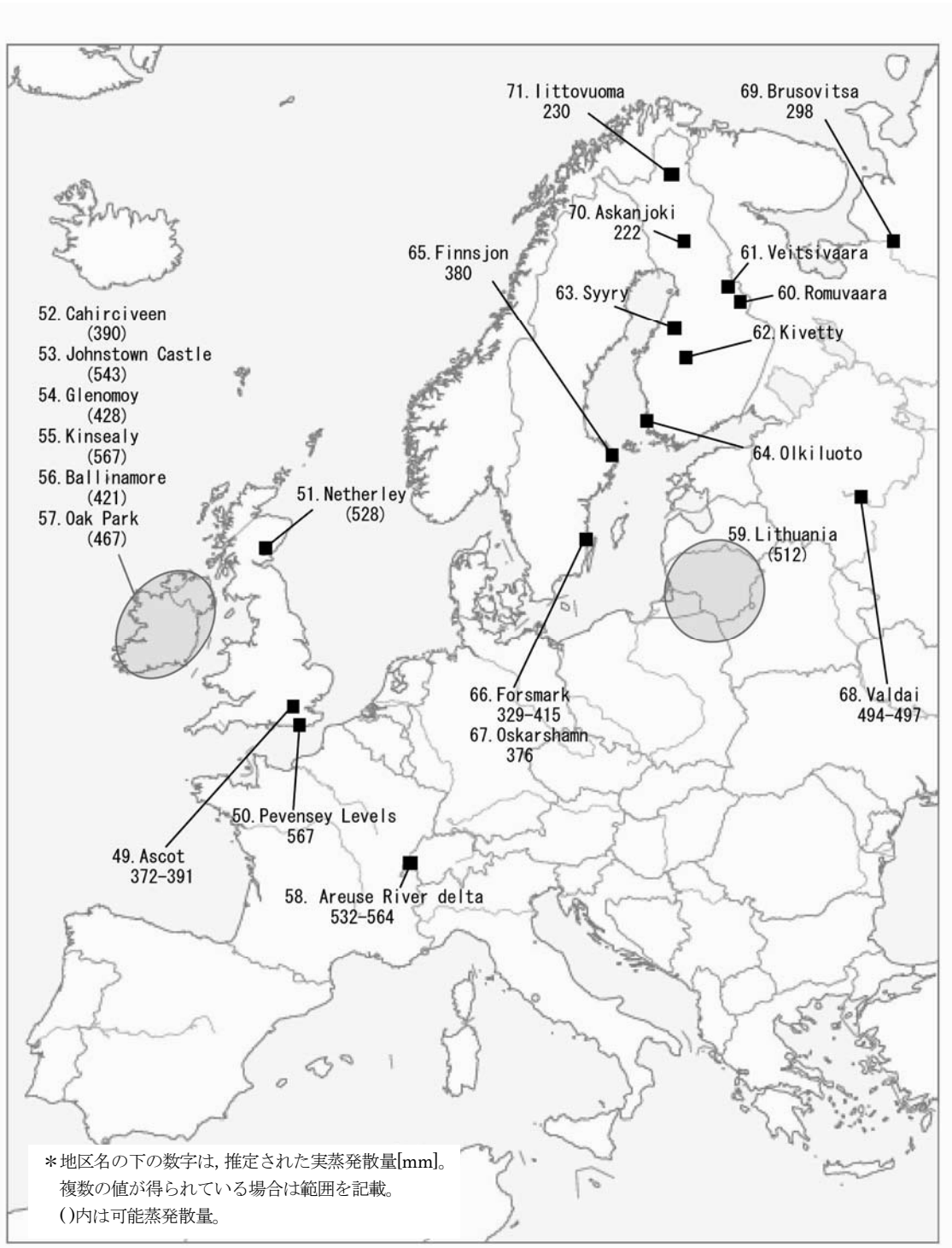


Fig.3.3.1-3 海外寒冷地の蒸発散量観測地区 (ヨーロッパ)



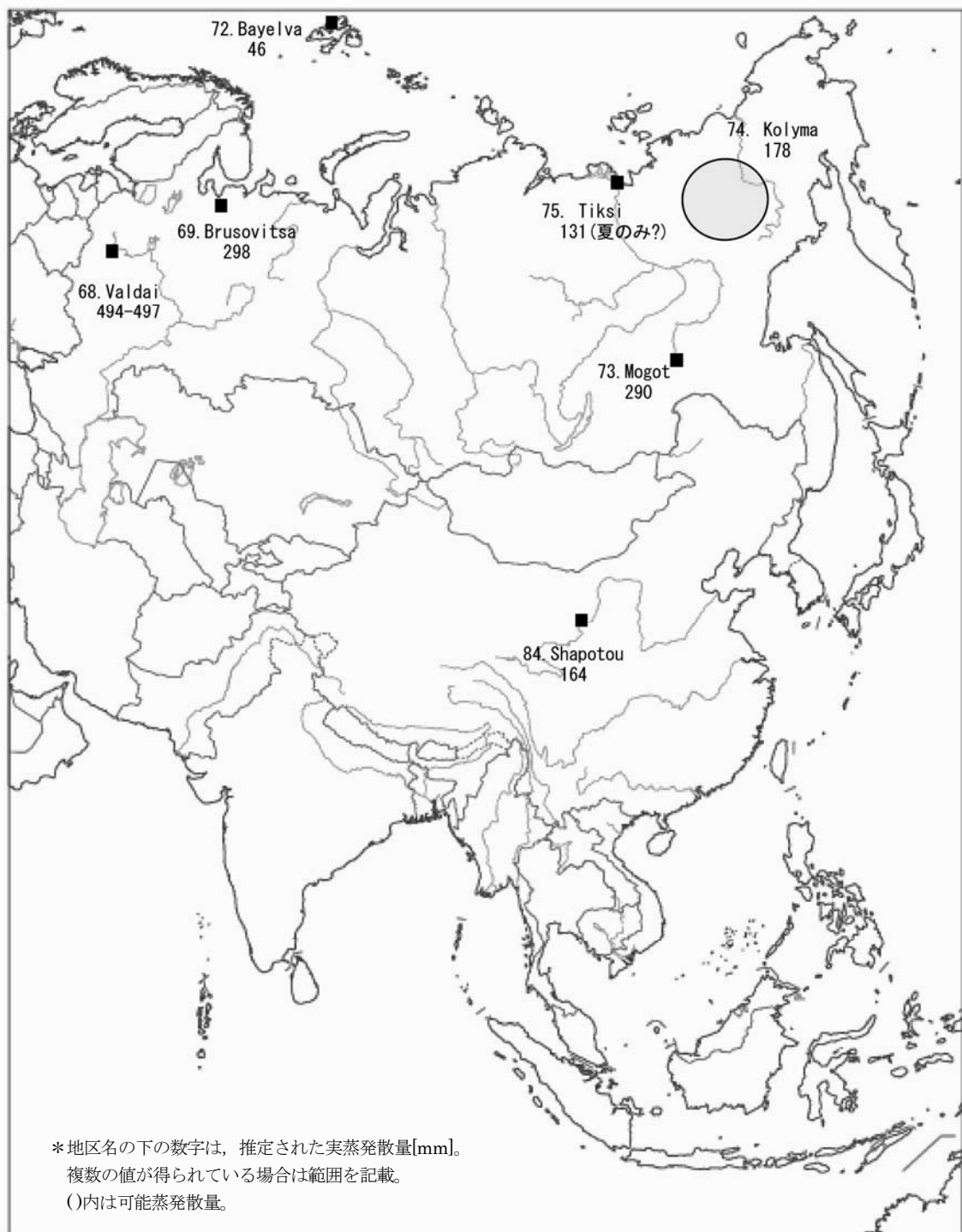


Fig.3.3.1-4 海外寒冷地の蒸発散量観測地区 (アジア)

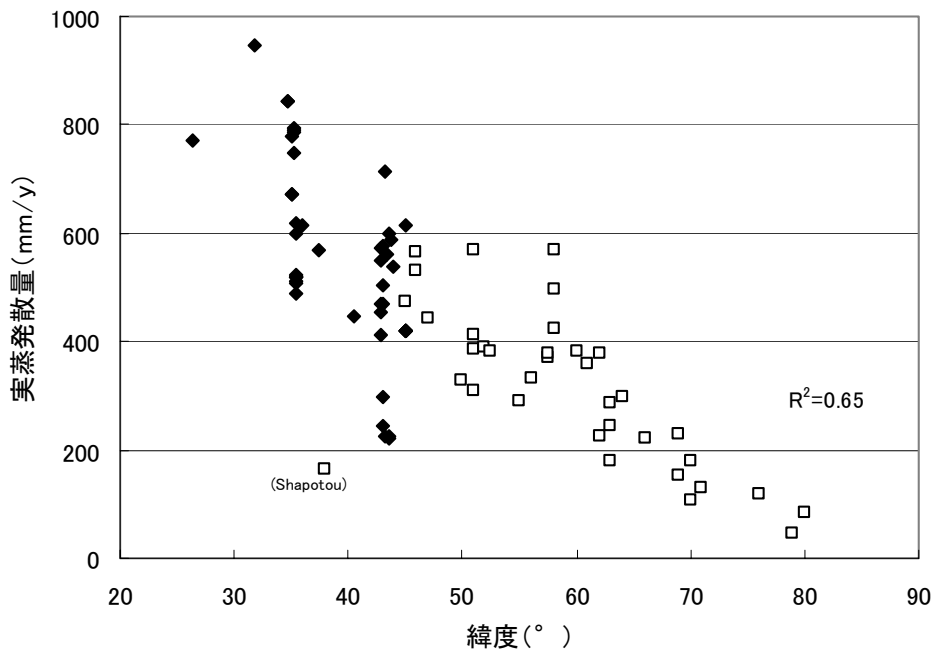


Fig.3.3.1-5 緯度と年間実蒸発散量の関係

黒の四角は国内の地区，白抜きは海外の地区を表す。  
 回帰直線は，乾燥地である Shapotou のデータを除外して求めている。

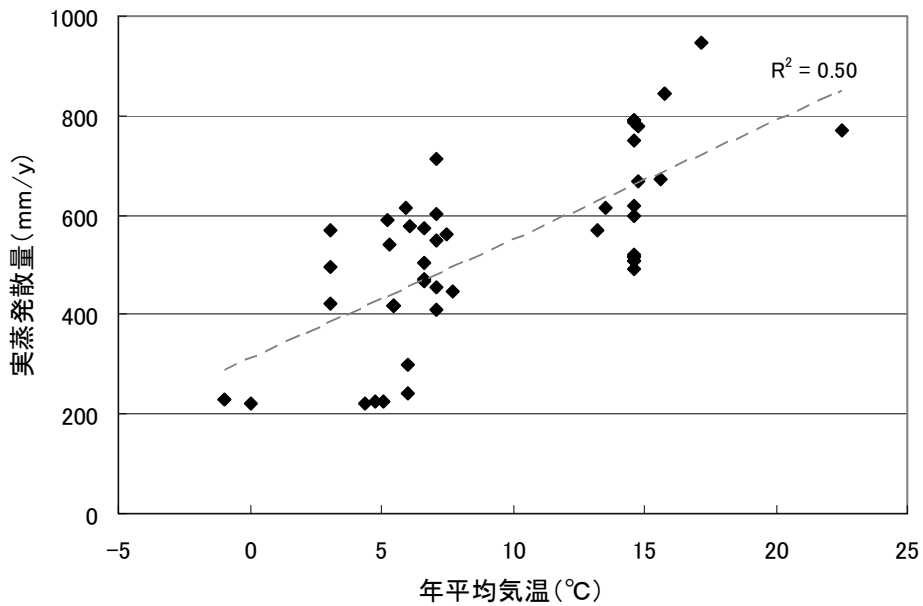


Fig.3.3.1-6 年平均気温と年間実蒸発散量の関係

Fig.3.3.1-7には、対象地区の土地被覆タイプ（植生）ごとに実蒸発散量の分布をヒストグラムに整理した。ツンドラの地区で低い値であることを除けば、植生の違いによるピークの違いは明瞭でない。針葉樹林で分布幅が広いのは、海外の寒冷地の針葉樹林と日本の温暖地域の植生による針葉樹林などのように気候条件の異なるものが混在していることも一因と考えられる。ツンドラで低い値となるのは、植生の背景となる気候（気温）そのものに関連していると考えられる。

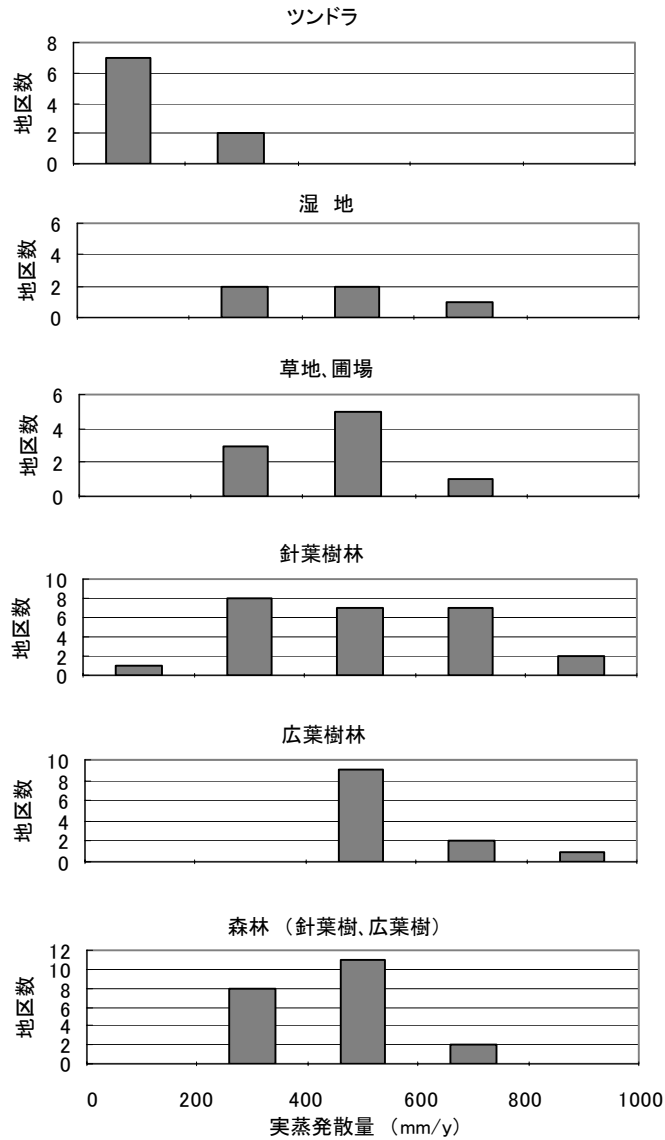


Fig.3.3.1-7 土地被覆タイプ別の実蒸発散量のヒストグラム

主要な植生によって区分している。1つの地区内で複数の流域で実蒸発散量が得られているものは別々にカウントしている。「森林（針葉樹、広葉樹）」とは、針葉樹と広葉樹の両方が分布する森林と、両者が分布すると推定されるもの（詳細は不明）を含む。

### 3.3.2 涵養量の値と分布

Table 3.3.1-1 では、年間の蒸発散量の観測・推定が行われている流域や地区ごとに、降水量及び河川流出量のデータも併せて示した。降水量はほとんどの地区において蒸発散量と共に記載されているが、河川流出量は流域内で観測されていない地区もあった。特に海外の事例では、広域エリア単位で蒸発散量が算出されている事例（カナダなど）もあり、流出量が示されていないものが多数ある。

ここでは、これらの観測量がそろっている流域を対象として、年間の水収支に基づく涵養量を計算する。他の流域との水の出入りを無視すれば、ある流域の水収支は次の式で表される。

$$P = E + R + \Delta S + G$$

$P$ : 降水量     $E$ : 蒸発散量 (実蒸発散量)     $R$ : 河川流出量  
 $\Delta S$ : 貯留量変化     $G$ : 涵養量

貯留量の変化がない期間 ( $\Delta S = 0$ ) を選定すれば、涵養量  $G$  は、降水量・蒸発散量・河川流出量から計算される。

今回対象とした文献での各地区の水収支・岩盤涵養量の取扱いには、大きく次のようなものがある。

- A: 上記の水収支式により、 $G = P - E - R$  として涵養量を算出しているもの。(土壤中の貯留量変化は無視できる時期を対象とするか、実測値に基づき  $\Delta S$  を考慮する。)
- B: 涵養は考えず、水収支の余剰分はすべて貯留量変化 ( $P - E - R = \Delta S$ ) として扱っているもの。 $\Delta S$  が負となる場合は土壤水の不足が生じたとする。
- C: 地下への浸透は考えず (また、 $\Delta S$  も 0 となる条件を仮定し)、 $P - E - R = 0$  となることを前提としたもの。0 とならない場合、いずれかの要素の値が適切でないと考え、値の見直しを行う。
- D:  $P$ ,  $E$ ,  $R$  のいずれかが取得されておらず、水収支の余剰分をどのように考えているかが明らかでないもの。

A のアプローチにより涵養量を考慮した水収支 (実蒸発散量を用いる) が文献中で述べられているのは、東濃・幌延のほかには、東山 (愛知)、Areuse River delta (スイス)、Finnsjön (スウェーデン)、フィンランド 5 地区 (地区 46~50) のみである。このうちフィンランドの 5 地区では算定手法や値が明確でない。

Table 3.3.2-1 には、これらの地区に加え、実蒸発散量及び降水量・流出量のデータが地区内で取得されているものを選び整理した。この表に示したのは、対象とした全 84 地区のうち、国内の 25 地区と海外の 8 地区である。

Table 3.3.2-1 各地区の涵養量の値

| 地区番号 | 地区                          | 蒸発量算定方法                             | 植生<br>(及び地質)               | 標高<br>流域面積                                  | 気温・気候                | 年間蒸発量<br>E(mm) | 年間降水・降<br>雪量 P(mm) | 年間流出量<br>R(mm) | 涵養量<br>P-E-R(mm) | 算定対象期間                         |
|------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---|----------------------|----------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------------------|
| 1    | サロベツ(北海道)                   | 熱収支法(2層モデル)                         | 湿原・牧草地                     | 標高 10 m<br>658 km <sup>2</sup>              | -12~23°C<br>平均 5.9°C | 614            | 1201               | 1102           | -515             | 18年間(1983~2000)                |
| 2    | 幌延 P-1(北海道)                 | Penman 法に係数 0.65(非積雪期)<br>ハルク法(積雪期) | 広葉樹・草地・針葉樹                 | 4.4 km <sup>2</sup>                         | -14~22°C             | 419            | 1621               | 965            | 237              | 1年間<br>(2003.8~2004.7)         |
| 2    | 幌延 P-2(北海道)                 | Penman 法に係数 0.65(非積雪期)<br>ハルク法(積雪期) | 広葉樹・草地・針葉樹                 | 19.7 km <sup>2</sup>                        | -14~22°C             | 419            | 1621               | 1220           | -18              | 1年間<br>(2003.8~2004.7)         |
| 2    | 幌延 P-3(北海道)                 | Penman 法に係数 0.65(非積雪期)<br>ハルク法(積雪期) | 広葉樹・草地・針葉樹                 | 7.6 km <sup>2</sup>                         | -14~22°C             | 419            | 1621               | 860            | 342              | 1年間<br>(2003.8~2004.7)         |
| 2    | 幌延全体(北海道)                   | Penman 法に係数 0.65(非積雪期)<br>ハルク法(積雪期) | 広葉樹・草地・針葉樹                 | 31.7 km <sup>2</sup>                        | -14~22°C             | 419            | 1621               | 1098           | 104              | 1年間<br>(2003.8~2004.7)         |
| 4    | 定山溪(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 針葉樹・ササ                     | 標高 393~565 m<br>104 km <sup>2</sup>         | -8~23°C<br>平均 6.6°C  | 469            | 2066               | 1569           | 28               | 5年間(1996~2000)                 |
| 4    | 定山溪(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 針葉樹・ササ                     | 標高 393~565 m<br>104 km <sup>2</sup>         | -8~23°C<br>平均 6.6°C  | 505            | 2074               | 1569           | 0                | 5年間(1996~2000)                 |
| 5    | 豊平川(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 651 km <sup>2</sup>                         | -8~23°C<br>平均 6.6°C  | 470            | 1625               | 1070           | 85               | 1年間(1998)                      |
| 7    | 石狩川(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 12697 km <sup>2</sup>                       | -9~25°C<br>平均 7.5°C  | 561            | 1504               | 1168           | -225             | 1年間(1998)                      |
| 8    | 雨竜川(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 1661 km <sup>2</sup>                        | -15~25°C<br>平均 5.3°C | 539            | 1634               | 1310           | -215             | 1年間(1998)                      |
| 9    | 空知川(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 2531 km <sup>2</sup>                        | -12~26°C<br>平均 7.1°C | 601            | 1493               | 1085           | -193             | 1年間(1998)                      |
| 10   | 幾春別川(北海道)                   | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 332 km <sup>2</sup>                         | -11~26°C<br>平均 7.1°C | 715            | 1727               | 1118           | -106             | 1年間(1998)                      |
| 11   | 夕張川(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 1116 km <sup>2</sup>                        | -11~24°C<br>平均 6.1°C | 577            | 1586               | 1068           | -59              | 1年間(1998)                      |
| 12   | 千歳川(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 1142 km <sup>2</sup>                        | -12~25°C<br>平均 7.1°C | 548            | 1399               | 1103           | -252             | 1年間(1998)                      |
| 16   | 釧路遊水地<br>(北海道)              | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 105 km <sup>2</sup>                         | -11~21°C<br>平均 6.0°C | 298            | 1159               | 0              | 861              | 3年間(2000~2003)                 |
| 17   | 屈斜路(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 341 km <sup>2</sup>                         | -18~23°C<br>平均 4.4°C | 221            | 1297               | 915            | 161              | 3年間(2000~2003)                 |
| 18   | 弟子屈(北海道)                    | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 459 km <sup>2</sup>                         | -12~22°C<br>平均 4.8°C | 225            | 1285               | 911            | 149              | 3年間(2000~2003)                 |
| 19   | 標茶(北海道)                     | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 895 km <sup>2</sup>                         | -15~23°C<br>平均 5.1°C | 226            | 1284               | 982            | 76               | 3年間(2000~2003)                 |
| 20   | 広里(北海道)                     | 熱収支法(2層モデル)                         | 広域(主に森林)                   | 2172 km <sup>2</sup>                        | -11~21°C<br>平均 6.0°C | 243            | 1264               | 965            | 56               | 3年間(2000~2003)                 |
| 21   | 上川(北海道)                     | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>花崗岩・流紋岩           | 標高 400~810 m<br>5729 km <sup>2</sup>        | -14~25°C<br>平均 5.2°C | 589            | 1444               | 794            | 61               | 3年間(1951~1953)                 |
| 28   | 東濃-正馬<br>(岐阜)               | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 220~330 m<br>0.535 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 517            | 1554               | 981            | 55               | 11年間(1990~2000)                |
| 28   | 東濃-正馬上<br>(岐阜)              | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 260~330 m<br>0.155 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 517            | 1546               | 733            | 296              | 11年間(1990~2000)                |
| 28   | 東濃-正馬下<br>(岐阜)              | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 220~310 m<br>0.380 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 517            | 1554               | 1083           | -46              | 11年間(1990~2000)                |
| 28   | 東濃-板取洞<br>(岐阜)              | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 270~310 m<br>0.012 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 507            | 1544               | 946            | 91               | 7年間(1993~1999)                 |
| 28   | 東濃-館山<br>(岐阜)               | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 260~310 m<br>0.062 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 510            | 1506               | 902            | 94               | 5年間<br>(1991.1994~1997)        |
| 28   | 東濃-正馬モデル<br>(岐阜)            | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 270~310 m<br>0.015 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 490            | 1479               | 659            | 330              | 2年間(1999~2000)                 |
| 28   | 東濃-柄石<br>(岐阜)               | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 290~380 m<br>0.233 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 599            | 1583               | 947            | 38               | 2年間(1999~2000)                 |
| 28   | 東濃-柄石小<br>(岐阜)              | Penman 法に係数 0.7                     | 針広混交林                      | 標高 340~370 m<br>0.010 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 618            | 1759               | 745            | 396              | 1年間(2000)                      |
| 29   | 穴の宮(愛知)                     | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>花崗岩流域             | 標高 140~220 m<br>0.139 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 790            | 1629               | 998            | -159             | 18年間(1953~1970)                |
| 30   | 東山(愛知)                      | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>花崗岩流域             | 標高 350~620 m<br>1.065 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 786            | 1839               | 975            | 78               | 18年間(1953~1970)                |
| 30   | 東山(愛知)                      | Hamon 法に補正                          | 主に針葉樹<br>花崗岩流域             | 標高 350~620 m<br>1.065 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 748            | 1679               | 918            | 13               | 5年間(1964~1968)                 |
| 31   | 白坂(愛知)                      | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>花崗岩流域             | 標高 290~630 m<br>0.885 km <sup>2</sup>       | -2~33°C<br>平均 14.6°C | 793            | 1806               | 976            | 37               | 18年間(1953~1970)                |
| 32   | 川向・桐生<br>(滋賀)               | 補完式(Morton 法)                       | 針葉樹<br>花崗岩流域               | 標高 180~260 m<br>0.087 km <sup>2</sup> (2流域) | 1~31°C<br>平均 14.8°C  | 670            | 1661               | 952            | 39               | 13年間<br>(1966~1971, 1972~1977) |
| 34   | 上賀茂(京都)                     | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>堆積岩流域             | 標高 140~220 m<br>0.044 km <sup>2</sup>       | 1~33°C<br>平均 15.6°C  | 672            | 1725               | 922            | 131              | 7年間(1969~1975)                 |
| 35   | 竜の口-南谷<br>(岡山)              | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>堆積岩流域             | 標高 60~260 m<br>0.026 km <sup>2</sup>        | 1~32°C<br>平均 15.8°C  | 845            | 1258               | 403            | 10               | 15年間(1966~1980)                |
| 35   | 竜の口-北谷<br>(岡山)              | 補完式(Morton 法)                       | 主に針葉樹<br>堆積岩流域             | 標高 50~250 m<br>0.173 km <sup>2</sup>        | 1~32°C<br>平均 15.8°C  | 845            | 1235               | 439            | -49              | 15年間(1966~1980)                |
| 37   | 去川(宮崎)                      | 補完式(Morton 法)                       | 広葉樹                        | 標高 230~370 m<br>0.158 km <sup>2</sup>       | 3~31°C<br>平均 17.2°C  | 948            | 2998               | 1937           | 113              | 17年間(1959~1975)                |
| 58   | Areuse River delta<br>(スイス) | Penman-Monteith 法                   | 表層は腐植                      | 標高 430 m                                    |                      | 564            | 865                | 0              | 281              | 1年間<br>(1990.10~1991.10)       |
| 58   | Areuse River delta<br>(スイス) | Primault の経験法                       | 表層は腐植                      | 標高 430 m                                    |                      | 532            | 865                | 0              | 313              | 1年間<br>(1990.10~1991.10)       |
| 60   | Romvaara<br>(フィンランド)        | ?                                   |                            |   |                      | ?              | 580                | 60             | 降水量の数%<br>未済     | 不明<br>(流量測定 3 回のみ)             |
| 61   | Veitsivaara<br>(フィンランド)     | ?                                   |                            |   |                      | ?              | 605                | 30             | 降水量の数%<br>未済     | 不明<br>(流量測定 3 回のみ)             |
| 62   | Kivetty<br>(フィンランド)         | ?                                   |                            |   |                      | 降水量の 60%       | 590                | 3~60           | 降水量の数%<br>未済     | 不明<br>(流量測定 3 回のみ)             |
| 63   | Syry<br>(フィンランド)            | ?                                   |                            |   |                      | 降水量の 60%       | 535                | ?              | 降水量の数%<br>未済     | 不明<br>(流量測定 3 回のみ)             |
| 64   | Oliluoto<br>(フィンランド)        | ?                                   |                            |   |                      | 降水量の<br>70~80% | 530                | ?              | 降水量の数%<br>未済     | 不明<br>(流量測定 3 回のみ)             |
| 65   | Finnsjön<br>(スウェーデン)        | ?                                   | (実葉蒸散量は樹生のある部分で算出)<br>針葉樹? | 標高 22~40 m<br>の平坦地, 25 km <sup>2</sup>      |                      | 380            | 670                | 240            | 50               | 1年間(1979)?                     |
| 68   | Valdai-Tayozhnyy<br>(ロシア)   | 熱収支法                                | 亜寒帯林<br>(トウヒの成木の林)         | 丘陵<br>0.45 km <sup>2</sup>                  | -47~33°C<br>平均 3.1°C | 569            | 776                | 173            | 34               | 18年間(1966~1983)                |

(Table 3.3.1-1 より抜粋)

Table 3.3.2-1 を見ると、涵養量は-515 mm/y (サロベツ) ~+861 mm/y (釧路遊水池) の範囲にあり、地区により大きな違いがある。最大値と最小値を除いた場合、-252 mm/y (千歳川) ~+396 mm/y (東濃柄石小流域) となる。特に顕著な負の値を示すサロベツ (地区 1) と、流域全体で負の値を示す石狩川流域 (地区 5~12) を除外して見ると、全体にやや正の涵養量となる。

Fig.3.3.2-1~Fig.3.3.2-3 には、各地区の涵養量の大きさと平均気温、流域面積、土地被覆タイプ (植生) の関係を整理した。平均気温と涵養量の間 (Fig.3.3.2-1) にはほとんど相関は見られない。流域面積と涵養量には弱い負の相関が認められ (Fig.3.3.2-2)、流域が大きくなるほど地下水の流出域を含むことを示している可能性がある。しかし、相関は  $R^2=0.22$  と低い。

Fig.3.3.2-3 に示した土地被覆タイプ (植生) ごとの涵養量の分布では、広葉樹林において涵養量が高い傾向が見られる。この理由として、針葉樹林に比べて広葉樹林では流出率が小さい可能性なども考えられるが、国内の既往のフィールド試験では針葉樹と広葉樹の流域で年間流出率の大小関係は様々であり (野口・藤枝, 2007) <sup>69)</sup>、また、今回対象の限られた事例では地形地質条件などに関してばらつきや偏りがあるとみられることから、この結果のみから樹林タイプと涵養量の詳細に議論することは難しいと思われる。

ヨーロッパの地区の中では、Areuse River (スイス) に比べて北方の Finnsjön (スウェーデン) や Valdai (ロシア) の涵養量が小さいが、サンプル数が少ない。むしろ、石狩川流域 5~12 で他地域に比べて涵養量が小さいといった、検討地域や文献による値の偏りがあるようにも見える。

幌延と東濃では、地区内の上~下流にわたる複数の流域での観測結果より、場所による涵養量の違い (上流ほど涵養量が高い傾向) が見られる。同様に、釧路川流域 (釧路遊水池を除いた、地区 17~20) における涵養量も、上流の屈斜路で大きく、下流の広里へ向かい小さくなっている。また、Table 3.3.2-1 には表れていないが、白坂 (地区 31) でも、可能蒸発散量を用いた水収支計算において、地区内、流域内の場所ごとで涵養量が異なる結果が得られている <sup>23)</sup>。

これは、降水量及び蒸発散量が同じにもかかわらず、河川流出量が場所によって大きく異なっているためである (Table 3.3.2-1)。このことは、ある広さをもった地区において、涵養量を推定する際、河川流出量が値を大きく左右する可能性があることを示唆している。

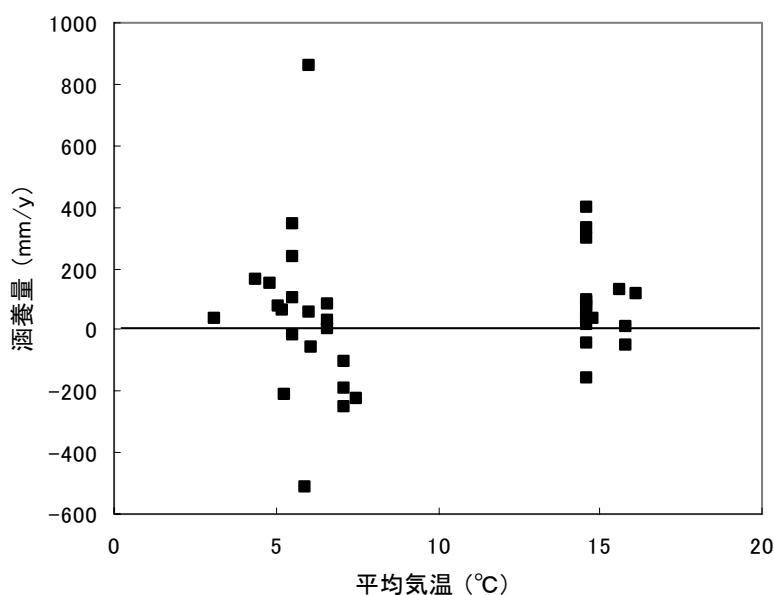


Fig.3.3.2-1 平均気温と涵養量の関係

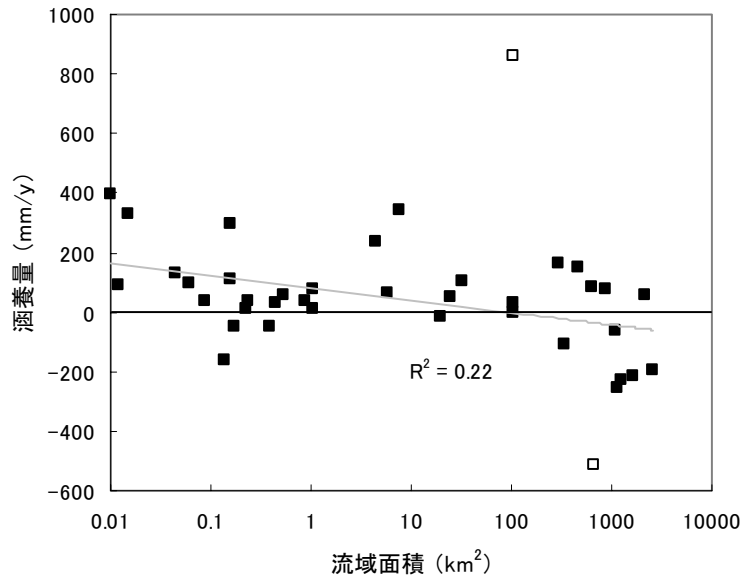


Fig.3.3.2-2 流域面積と涵養量の関係  
 回帰直線は2つの極端な値(白抜きの四角)を除いて求めている。

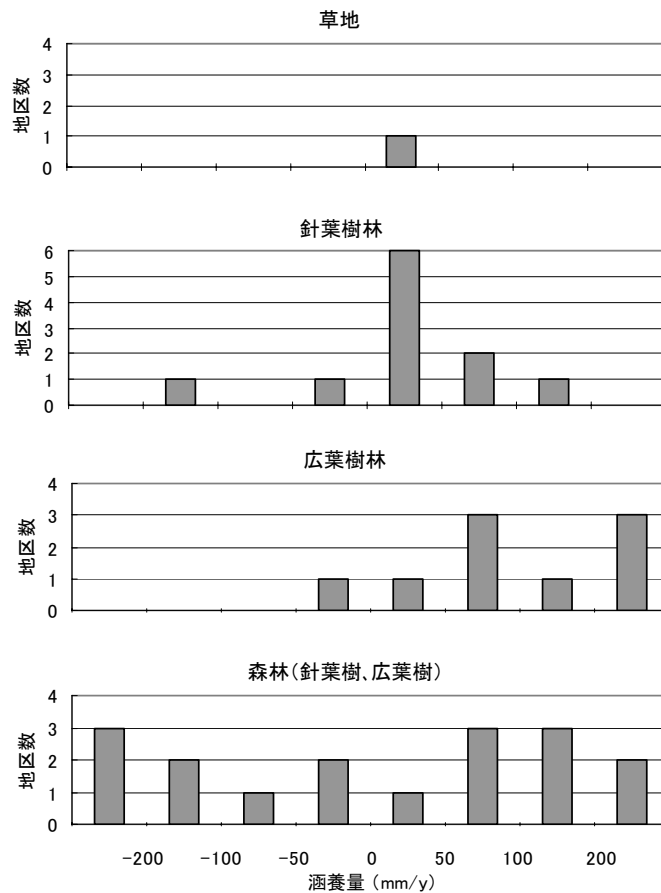


Fig.3.3.2-3 土地被覆タイプ別の涵養量のヒストグラム  
 主要な植生によって区分している。

### 3.4 考察

過去数十万年間は、温暖化と寒冷化がほぼ 10 万年周期で繰り返しており、この周期性が将来も続くとする、この先、現在よりも寒冷な時期が訪れることが想定される。よって、長期地質環境変化の評価における蒸発散量情報の重要な役割は、現在の日本に加え、それよりも寒冷な気候条件下での水文・地下水条件を把握することにある。その中で、今回収集した情報の品質と役割に関し、以下の点が重要と考えられる。

- (1) 収集した蒸発散量の値の妥当性と、蒸発散量の有効な取得方法について検討する。
- (2) 全国の事例より、現在の日本の気候環境での蒸発散量・涵養量の値の範囲を把握する。また、東濃地区や幌延地区の観測結果の位置づけを明確にする。
- (3) 様々に条件の異なる流域の事例より、蒸発・涵養特性に対する流域特性（地形、位置、植生など）の要因の影響についての基礎情報を得る。
- (4) 海外の寒冷地の事例より、寒冷化に伴う日本の蒸発・涵養特性の変化の予測のための情報を得る。

これらの観点で、今回収集した情報について若干の考察を加える。

#### (1) 蒸発散量の妥当性と有効な取得手法

実蒸発散量の値の妥当性を判断する上でいくつかの基準が考えられ、それらの基準に照らして取得された値を考える。

##### 1) 算定手法として開発段階の方法ではないか？

今回の抽出事例のうち、CI 濃度に基づいて蒸発濃縮の量を推定する方法（地区 36）は、他手法との比較や検証がまだ十分に行われておらず、開発段階の手法といえる。

##### 2) 算定手法は検証されたものか？

Thorntwaite 法、Priestley-Taylor 法、Penman 法などは、「適切な係数を乗じることで信頼できる値が得られる」として多数の事例に適用することによって検証されてきた手法といえる。補完法は、大槻ほか(1984b)<sup>25)</sup>において、1 年より長い期間で見れば水収支法で求めた蒸発散量と比較したときに妥当な値であることが確認されている。2 層モデルについても、水収支法による蒸発散量との比較において同様の値が得られたことから検証できたとされている。いずれの方法でも、計算原理そのものよりも、対象とする場の条件において適切なパラメータを用いるかどうかによって左右される。

##### 3) 測定方法やデータに問題がないか？

フィンランドの事例（地区 60～64）では河川流量測定を限られた 3 時期しか実施しておらず、年間の流出量・涵養量の把握は難しい。

##### 4) 適用すべきでない場の条件下で用いられた手法ではないか？

例えば、草地での適用が前提である Penman 法を森林で用いることがこれに当たるが、今回収集した事例は基本的にサイトの条件を考慮した手法を適用しているとみられる。

ただし Ammassalik（地区 83）では、オランダで得られた Makkink 式の経験定数をグリーンランド用に修正する過程が不明確で、再検討が必要である（Shutov et al., 2006）<sup>43)</sup>。

##### 5) 実蒸発散量が推定されているか？

可能蒸発散量のみが示されている地区（母子里、漁川、美々川、奥只見、箱根、京都大学、Mer Bleue、アイルランド各地区、Oland、Lituania river、Caribou-Poker Creeks）では、水収支の検討に値をそのまま利用できない。



Penman 法の可能蒸発散量に蒸発散比を乗じて実蒸発散量とする場合（東濃・幌延の事例など）は、蒸発散比の妥当性のチェックが別に必要であり、このためには類似した条件での蒸発散比の検討例や、下記のように他手法の値との比較が必要となる。また、北海道などで可能蒸発散量＝実蒸発散量という近似（Shutov et al., 2006）<sup>43)</sup>がどの程度成り立つかについては、データや知見の蓄積が必要である。

6) 同じ場所での別手法による算出値との比較

蒸発散量の妥当性評価において、できる限り複数の手法による算出値を比較することが望ましい。例えば、他の手法で求めた可能蒸発散量よりも大きな値を示す実蒸発散量は、信頼性の点から再検討が必要である。定山溪・豊平峡を初めとして、国内の多くの流域では、他手法による値と比較したとき実蒸発散量はおおむね妥当な値を示しているといえる。海外の収集事例では、同じ場の条件に複数の算定手法が適用された地区は少ない。

国内の実蒸発散量の推定において多くの場所で用いられている補完法と 2 層モデルの精度が十分に確認されているわけではないが、複数の推定手法の比較を行い信頼度を向上するためのメニューとしてこれらの手法を加えることは、既往の他の算定法の妥当性を評価する上でも有効と考えられる。

(2) わが国全体の蒸発散量・涵養量の特性と東濃・幌延両地区の観測の位置づけ

前節で述べたように、我が国の実蒸発散量は実蒸発散量は、北海道ではおよそ 400～600 mm/y（道東では 200 mm/y 台もある）、関東～中部では 500～600 mm/y 前後、近畿～九州では多くが 800～950 mm/y の範囲で、地域により変化する。涵養量については、地区ごとで様々な値を示し、地域による傾向を見出すのは難しい。

この中で東濃地区は我が国でほぼ平均的な蒸発散量を、幌延地区は北海道での中程度の実蒸発散量を示す地区といえる。涵養量はいずれの地区も国内ではやや大きいほうである。また、前述のように、これら 2 地区の蒸発散量はいずれも、周辺の手手法による値より小さい傾向があるので、蒸発散比の再確認並びに周辺地区の値の再チェックを行うことが望まれる。

涵養量の算定を目的とした対象流域の配置という点では、東濃・幌延両地区は涵養量の不均質性（涵養域～流出域）を確認できた重要な観測流域といえる。同様の涵養域・流出域の分布は、釧路川流域や白坂流域（花崗岩山地の流域）でも認められている。

しかし、水収支法で涵養量を求めようとする観測は、それ以外の流域ではあまり実施されておらず、この他にはスウェーデン Finnsjön の事例ぐらいである。この理由は、例えば農林業分野では、灌漑計画の情報としての蒸発散量（植物により失われ人為的に補給すべき水の量）の把握を最終目標に研究されることが多いためである。また、気候変動に伴う将来の水資源変化予測の研究分野では、主要な水資源である河川水の流量変化予測に主眼をおき、深部への涵養は通常はモデル上無視される（実蒸発散量は水収支的に降水量や河川流出量から導出されるモデルもある）。加えて、対象が広域のため、単一流域での収支を論ずるには空間的に平均された粗いデータとなっていることもある。さらに、農林業や水資源変化の分野の研究では、水収支法により算出された蒸発散量 ( $E = P - R$ ) を蒸発散量の真値とし、種々の蒸発散量推定法の妥当性を水収支法による蒸発散量との比較によって議論しているものも多い。これらの点を考えると、東濃・幌延両地区における涵養量把握を目的とした長期観測の意義は大きい。

(3) 蒸発散・涵養特性にかかわる気候などの要因の影響についての情報

3.3.1 項で述べたように、緯度や気温と蒸発散量との関係にはある程度の傾向が見られるものの、3.3.2 項で述べたように、平均気温、流域面積、土地被覆タイプ（植生）と涵養量との関係にはほとんど

ど相関が見られなかった。また、同一地区内の上流から下流にわたる複数の場所での観測の結果、流域内の場所ごとで涵養量の違いが見られたことから、降水量及び蒸発散量が同じであることを考慮すると、河川流出量が大きく影響していると考えられる。しかし、今回対象の限られた事例では、これ以上涵養特性の明瞭な傾向を論ずることは難しい。今後は、この河川流出量の推定方法などと併せて、表層水理に関する情報の整備と統計的な検討を行い、流域間の比較などを行っていくことが必要である。

#### (4) 将来の寒冷化に伴う日本の蒸発散・涵養特性変化のモデルへの反映

日本での寒冷化による涵養条件の変化を考える上で重要となる、現在の海外の寒冷地での蒸発散や涵養量に関する知見については、今回収集した個別事例や世界水収支図などによって、精度的には課題が残るものの、緯度や気候区分に従い大まかな蒸発散量が予測できそうであることがわかった。これと並行して、対象地区が寒冷期にどのような気候条件や地理的条件に変化するかの予測のための情報を、この水文・水収支検討とは別に整理し、その結果より特に注目すべき現在の海外寒冷地を絞り込むのがよいと思われる。降水量・蒸発散量・流出量が独立して観測された海外事例は限られているが、個別事例を追加で収集することは重要といえる。

表層水理に関する情報（涵養量）を地下水流動解析モデルへの入力情報として考えたとき、どの段階で用いるかによって求められる役割も変わる。上部境界条件として与える場合には、例えば、涵養／流出域を考慮した分布として与えるかどうかといったオプションがありうる。広範囲を対象とした場合には、降水量や河川流出量についても、全ての流域において観測することは困難であり、データの代表性という問題が解析制度を左右する可能性がある。それに、涵養量及びその基となる蒸発散量を高精度で把握することが容易でないことを考慮すれば、現実的には、入力パラメータの変化幅を設定するための基礎情報とすることや、解析結果の検証段階で幅を持った検証データとして用いることなども考えられる。このとき、現時点での情報の不確実性を明示しておくことは、結果の客観性の点から重要といえる。

また、寒冷化による将来の表層水理条件の変化を予測するためには、

- ・寒冷化に伴う蒸発散メカニズムの要素ごと（蒸散、樹冠遮断など）の変化パターンとその変化幅を予測するために、メカニズムの詳細や定量化に関する情報を整備すること
- ・永久凍土の発達や、凍土の融解時に氷として閉じ込められていた水や凍土の下に滞留していた水の湧出といった、寒冷期に予想されるものの現在の温暖期型地下水流動モデルでは反映されていない現象を、概念モデルに反映すること

といった点もかかわってくる。

#### 4. まとめ

国内外の約 50 編の文献と 84 地区の蒸発散量のデータを収集し、年間の蒸発散量に関する情報を整理した。情報は文献ごと・地区ごとに算定手法や位置・流域特性・蒸発散量・降水量・河川流出量などのデータとして、一覧表にまとめた。

整理の結果、以下のようなデータの傾向が示された。

- (1) 実蒸発散量の算定には、国内では、補完法，2 層モデル（特に北海道），Penman 法が用いられた地区が多い。
- (2) 実蒸発散量は、北海道では、おおよそ 400～600 mm/y（道東では 200 mm/y 台もある），関東～中部では、おおよそ 500～600 mm/y，近畿～九州では、おおよそ 800～950 mm/y である。
- (3) 海外の寒冷地での実蒸発散量は、カナダ南東部やヨーロッパ中部では、おおよそ 400～600 mm/y であり、高緯度ほど低下して、北極圏にかかる場所では 100 mm/y 台に低下する。
- (4) 国内外の地区のデータを基に、緯度と年間実蒸発散量との関係を見ると、両者には  $R^2 = 0.65$ （相関係数 0.8）という明瞭な関係が見られ、緯度が高くなるにつれて実蒸発散量が減少する傾向にあることを示す。また、年平均気温と実蒸発散量の関係も、 $R^2 = 0.50$  とやや低いものの、正の相関が見られ、年平均気温が高くなるに連れて実蒸発散量が増加する傾向にあることを示す。
- (5) 各地区の涵養量を水収支式（降水量－蒸発散量－河川流出量）により計算すると、涵養量の値は、おおよそ -250～400 mm/y の範囲の値を示し、平均気温，流域面積，土地被覆タイプ（植生）と涵養量との関係にはほとんど相関が見られない。東濃や幌延における観測では、流域の上流から下流にわたって涵養量の違いが見られ、その違いは河川流出量が大きく影響していると考えられ、各地区の涵養量のばらつきも、河川流出量の影響を受けていると推定される。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会 (2002) : “高レベル放射性廃棄物の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について”, 21p.
- 2) 山井忠世, 若松尚則, 小林公一, 中島 誠 (1997) : “表層地下水流動機構の把握のための観測システムの設計”, PNC-TJ7361 97-001.
- 3) 今村遼平, 若松尚則, 小田川信哉 (2001) : “深地層研究所 (仮称) 計画における表層水理観測計画の策定”, JNC-TJ1410 2001-001.
- 4) 宮原智哉, 小田川信哉, 村田正敏 (2004) : “表層水理調査における流域特性を考慮した蒸発散量・降水量の追加測定地点の選定”, JNC-TJ5400 2004-001.
- 5) 羽山早織, 中津川 誠 (2002) : “サロベツ湿原の水循環と地下水への影響”, 第46回北海道開発局技術研究発表会概要集河川部門.
- 6) 瀬尾昭治, 竹内竜史, 繰上広志, 原 稔 (2005) : “幌延深地層研究計画における水収支法による岩盤浸透量の推定—2003年8月~2004年7月—”, JNC TN5400 2005-005.
- 7) 核燃料サイクル開発機構 (2005) : “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1 深地層の科学的研究—”, JNC TN1400 2005-014.
- 8) Ishii, Y., Kodama, Y., Nakamura, R. and Ishikawa, N. (2004a) : “Water balance of a snowy watershed in Hokkaido, Japan”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.13–27.
- 9) 加藤晃司, 中津川 誠, 新目竜一 (1999) : “石狩川流域における水収支と蒸発散量の推定”, 開発土木研究所月報, 553, pp.2–13.
- 10) 口澤 寿, 中津川 誠 (2002) : “森林域の水・熱フラックスを考慮した積雪と蒸発散の推定”, 平成13年度土木学会北海道支部論文報告集, 58, pp.358–361.
- 11) 石田享平, 渡邊康玄, 中津川 誠, 石川信敬, 兒玉裕二, 石井吉之 (2002) : “研究課題積雪寒冷地の水循環の解明とモデリング”, 北海道大学低温科学研究所共同研究報告書.
- 12) 馬場仁志 (2001) : “損失を考慮した貯留関数型流出モデルおよび浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルの開発と応用に関する研究”, 北海道大学大学院工学研究科博士論文.
- 13) 井形 淳 (1998) : “湿原及び草地における年間実蒸発散量の観測”, 開発土木研究所月報, 544, pp.9–17.
- 14) 工藤啓介, 中津川 誠 (2004) : “長期熱・水収支モデルによる石狩川流域の水文諸量の推定”, 水文・水資源学会2004年研究発表会.
- 15) 工藤啓介, 中津川 誠 (2005) : “釧路湿原の水循環と地下水の動向について”, 北海道開発土木研究所月報, 626, pp.25–47.
- 16) 近藤純正, 渡辺 力 (1991) : “広域陸面の蒸発—研究の指針—”, 天気, 38(11), pp.699–710.

- 17) 多田 毅, 風間 聡, 沢本正樹 (1994) : “NDVIを用いた広葉樹林帯の蒸発散分布推定”, 水文・水資源学会誌, 7(2), pp.114–119.
- 18) 古藤田一雄 (1984) : “草地の熱収支と蒸発散”, 地理学評論, 57(Ser.A)(9), pp.611–627.
- 19) 竹内信治 (1989) : “ライシメーター法による蒸発散量の推定”, 水利科学, 33(1), pp.70–84.
- 20) 板寺一洋 (2005) : “箱根仙石原地域における蒸発散量の推定”, 神奈川県温泉地学研究所報告, 37, pp.51–56.
- 21) 中川清隆 (1978) : “輪島における熱収支・水収支の気候学的推定”, 金沢大学教育学部紀要, 27, pp.15–25.
- 22) 宮原智哉, 稲葉 薫, 三枝博光, 竹内真司 (2002) : “広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討”, サイクル機構技報, 16, pp.137–148.
- 23) 寺嶋智巳, 森 綾子, 石井治男 (1993) : “花崗岩山地の二小流域における深部地下水浸透量の比較研究”, ハイドロロジー(日本水文科学会誌), 23(2), pp.105–118.
- 24) 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔 (1984a) : “計器蒸発量, 蒸発散位と実蒸発散量の関係—実蒸発散量推定に関する研究(I)—”, 農業土木学会論文集, 111, pp.95–103.
- 25) 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔 (1984b) : “水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較—実蒸発散量推定に関する研究(II)—”, 農業土木学会論文集, 112, pp.17–23.
- 26) 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔 (1984c) : “気象資料から推定したわが国の蒸発散量—実蒸発散量推定に関する研究(III)—”, 農業土木学会論文集, 112, pp.25–32.
- 27) 谷 誠, 阿部敏夫 (1987) : “森林変化の流出に及ぼす影響の流出モデルによる評価”, 林業試験場研究報告, 342, pp.41–60.
- 28) Rampisela, D. A., Suzuki, M. and Fukushima, Y. (1990) : “Application of the PENMAN - MONTEITH model to the estimation of the evapotranspiration rate of a forested watershed”, *Journal of the Japanese Forestry Society* (日本林学会誌), 72(1), pp.1–10.
- 29) 二宮 渉, 小野達志, 北岡豪一 (2007) : “水とCIの収支から推定される流域蒸発散量”, 陸水物理研究会 (第26回) 滋賀大会, 講演36.
- 30) Hashino, M., Yao, H., Hoshida, H. (1999) : “Separation of rainfall interception and transpiration from annual evapotranspiration in forested watersheds”, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 43, pp.73–78.
- 31) Lafleur, P. M., Hember, R. A., Admiral, S. W. and Roulet, N. T. (2005) : “Annual and seasonal variability in evapotranspiration and water table at a shrub-covered bog in southern Ontario, Canada”, *Hydrological Processes*, 19(18), pp.3533–3550.
- 32) Fernandes, R., Korolevych, V. and Wang, S. (2007) : “Trends in land evapotranspiration over Canada for the period 1960-2000 based on in situ climate observations and a land surface model”, *Journal of Hydrometeorology*, 8, pp.1016–1030.
- 33) Teollisuuden Voima Oy (1992) : “Final disposal of spent nuclear fuel in the Finnish bedrock:

preliminary site investigations”, YJT-92-32.

- 34) Carlsson, L. and Gidlund, G. (1983) : “Evaluation of the hydrogeological conditions at Finnsjön”, *SKBF/KBS Technical Reports*, 83-56.
- 35) Gustafsson, D., Jansson, P-E., Gårdenäs, A. and Eckersten, H. (2006) : “Simulated carbon and water processes of forest ecosystems in Forsmark and Oskarsham during a 100-year period”, *SKB Technical Reports*, 06-45.
- 36) Kilkus, K., Štaras, A., Rimkus, E. and Valiuškevičius, G. (2006) : “Changes in water balance structure of Lithuanian Rivers under different climate change scenarios”, *Environmental research, engineering and management*, 2(36), pp.3–10.
- 37) Mills, G. (2000) : “Modelling the water budget of Ireland — evapotranspiration and soil moisture”, *Irish Geography*, 33(2), pp.99–116.
- 38) Mdaghri-Alaoui, A. and Eugster, W. (2001) : “Field determination of the water balance of the Areuse River delta, Switzerland”, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46(5), pp.747–760.
- 39) Wadey, P., Shaw, G. and Bell, J. N. B. (2001) : “Radionuclide transport above a near-surface water table: III. soil migration and crop uptake of three gamma-emitting radionuclides, 1990 to 1993”, *Journal of Environmental Quality*, 30, pp.1341–1353.
- 40) Bradford, R. B. and Acreman, M. C. (2003) : “Applying MODFLOW to wet grassland in-field habitats: a case study from the Pevensy Levels, UK”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(1), pp.43–55.
- 41) Hulme, P. D. (2006) : “Red Moss of Netherley Site of Special Scientific Interest: an ecohydrological study”, *Scottish Natural Heritage Commissioned Report*, No. 163A (ROAME No. F02LF16).
- 42) Gusev, Y. M. and Nasonova, O. N. (2003) : “The simulation of heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP”, *Journal of Hydrology*, 280, pp.162–191.
- 43) Shutov, V., Gieck, R. E., Hinzman, L. D. and Kane, D. L. (2006) : “Evaporation from land surface in high latitude areas: a review of methods and study results”, *Nordic Hydrology*, 37(4-5), pp.393–411.
- 44) Shutov, V. A. (2004) : “Extensive studies in boreal wetland watersheds in northwestern Russia”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.213–223.
- 45) Balonishnikova, J. A., Krestovsky, O. I. and Shutov, V. A. (2004) : “Water balances of experimental watersheds in the Valdai Branch of the State Hydrological Institute (SHI), Russia”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.91–102.
- 46) Seuna, P. and Linjama, J. (2004) : “Water balances of the northern catchments of Finland”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.111–119.

- 47) Killingtonveit, Å. (2006) : “Water balance studies in two catchments on Spitsbergen, Svalbard”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.120–128.
- 48) Vasilenko, N. G. (2004) : “Water balance of small Russian catchments in the southern mountainous Taiga Zone: “Mogot” case study”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.65–77.
- 49) Zhuravin, S. A. (2004) : “Features of water balance for small mountainous watersheds in East Siberia: Kolyma Water Balance Station case study”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.28–40.
- 50) Ishii, Y., Kodama, Y., Sato, N. and Yabuki, H. (2004b) : “Summer water balance in an Arctic tundra basin, eastern Siberia”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.50–64.
- 51) Thorne, G. and Hawkins, J. (2004) : “Hydrological processes and water balance for the Dead Creek watershed of southeastern Manitoba, 1982–1995”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.164–177.
- 52) Janowicz, J. R., Hedstrom, N., Pomeroy, J., Granger, R. and Carey, S. (2004) : “Wolf Creek Research Basin water balance studies”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.195–204.
- 53) Reid, B. and Faria, D. (2004) : “Evaporation studies in small NWT watersheds”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.178–185.
- 54) Bolton, W. R., Hinzman, L. and Yoshikawa, K. (2004) : “Water balance dynamics of three small catchments in a Sub-Arctic boreal forest”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ, 290, pp.213–223.
- 55) Young, K. L. and Woo, M-K. (2004) : “Queen Elizabeth Islands: water balance investigations”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.152–163.
- 56) Hasholt, B. and Mernild, S. H. (2004) : “Estimation of water balance in and around the Mittivakkat Glacier basin, Ammassalik Island, southeast Greenland”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ, 290, pp.129–142.
- 57) Wang, X-P., Berndtsson, R., Li, X-R. and Kang, E-S. (2004) : “Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area”, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 49(2), pp.283–295.
- 58) 中川慎治 (1996) : “「蒸発散」 1. 蒸発散の概念と推定法の適用条件”, *ハイドロロジー (日本水文学会誌)*, 26(1), pp.43–48.
- 59) 鈴木雅一 (1992) : “森林蒸発散の理論”, 塚本良則編「森林水文学」, 文永堂出版, pp.54–78.
- 60) 畑 武志 (2000) : “雨水流出の素過程”, 農業土木ハンドブック基礎編, 農業土木学会, pp.48–55.
- 61) 近藤純正 (1994) : “水環境の気象学”, 朝倉書店, 350p.

- 62) 植原茂次, 佐藤照子(1983):“日本の河川流域の月単位水収支と水文特性(第1報)”, 国立防災科学技術センター研究報告, 30, pp.25-64.
- 63) 永井明博(1993):“Makkink式による計器蒸発量の推定と考察”, 水文・水資源学会誌, 6(3), pp.238-243.
- 64) 竹内由香里, 兒玉裕二, 石川信敬(1995):“草地と水面の蒸発散量の比較”, 北海道の農業気象, 47, pp.18-24.
- 65) 風間 聡, 沢本正樹, Kittipong, J. (1992):“滝ダム流域における融雪期の積雪深モデル”, 水工学論文集, 36, pp.611-616.
- 66) Kane, D. L., Gieck, R. E., Kitover, D. C., Hinzman, L. D., McNamara, J. P. and Yang, D. (2004):“Hydrological cycle on the North Slope of Alaska”, *Northern Research Basins Water Balance*, IAHS Publ. 290, pp.224-236.
- 67) 服部重昭(1985):“エネルギー収支からみた森林蒸発散”, 水利科学, 29(5), pp.1-23.
- 68) 近藤純正, 中園 信, 渡辺 力, 桑形恒男(1992):“日本の水文気象(3)—森林における蒸発散量—”, 水文・水資源学会誌, 5(4), pp.8-18.
- 69) 野口正二, 藤枝基久(2007):“森林流域試験と今後のあり方”, 森林総合研究所研究報告, 6(2), pp.111-125.



# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

| 基本量   | SI基本単位 |     |
|-------|--------|-----|
|       | 名称     | 記号  |
| 長さ    | メートル   | m   |
| 質量    | キログラム  | kg  |
| 時間    | 秒      | s   |
| 電流    | アンペア   | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン   | K   |
| 物質    | モル     | mol |
| 光度    | カンデラ   | cd  |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量                     | SI基本単位       |                    |
|-------------------------|--------------|--------------------|
|                         | 名称           | 記号                 |
| 面積                      | 平方メートル       | m <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の)        | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の)        | 1                  |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量                           | SI組立単位                |                   |                      |  |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|--|
|                               | 名称                    | 記号                | 他のSI単位による表し方         | SI基本単位による表し方   |
| 平面角                           | ラジアン <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m  |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(e)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                | s <sup>-1</sup>      | s <sup>-1</sup>  |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>   |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 電荷, 電気量                       | クーロン                  | C                 |                      | s A  |
| 電位差 (電圧), 起電力                 | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                       | ジーメンズ                 | S                 | A/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス温度                       | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K  |
| 光照度                           | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(e)</sup> | cd   |
| 放射線量                          | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd   |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                | s <sup>-1</sup>      | s <sup>-1</sup>  |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性化                         | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> mol  |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量             | SI組立単位            |                       |  |
|-----------------|-------------------|-----------------------|--|
|                 | 名称                | 記号                    | SI基本単位による表し方   |
| 粘着力のモーメント       | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>   |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>  |
| 角速度             | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>   |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎ジュール         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム        | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 熱伝導率            | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>   |
| 体積エネルギー         | ワット毎メートル毎ジュール     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>   |
| 電界の強さ           | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>1</sup> kg s <sup>-2</sup>  |
| 電荷密度            | ボルト毎メートル          | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>   |
| 表面電荷            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>3</sup> s A   |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>2</sup> s A   |
| 誘電率             | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>2</sup> s A   |
| 透磁率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                        |
| モルエネルギー         | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>   |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| 照射線量 (X線及びγ線)   | ジュール毎モル毎ジュール      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 吸収線量            | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | m <sup>2</sup> s A   |
| 放射強度            | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>   |
| 放射輝度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 酵素活性化濃度         | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
|                 | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol   |

表5. SI接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語  | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨクト  | y  |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称    | 記号   | SI単位による値   |
|-------|------|--|
| 分     | min  | 1 min=60s  |
| 時     | h    | 1h=60 min=3600 s   |
| 日     | d    | 1 d=24 h=86 400 s  |
| 度     | °    | 1°=(π/180) rad   |
| 分     | '    | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad   |
| 秒     | "    | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad  |
| ヘクタール | ha   | 1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                     |
| リットル  | L, l | 1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1t=10 <sup>3</sup> kg  |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称       | 記号 | SI単位で表される数値                                |
|----------|----|--|
| 電子ボルト    | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称        | 記号   | SI単位で表される数値   |
|-----------|------|---|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa  |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa   |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m   |
| 海里        | M    | 1 M=1852m   |
| バイン       | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-15</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600)m/s   |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。  |
| ベベル       | B    |   |
| デジベル      | dB   |   |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称                    | 記号  | SI単位で表される数値   |
|-----------------------|-----|---|
| エルグ                   | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J  |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N  |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s   |
| ストークス                 | St  | 1 St =1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>                         |
| フォトル                  | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx   |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                            |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx = 1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb  |
| ガウス                   | G   | 1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T   |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>   |

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≐ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI単位で表される数値  |
|-----------|------|--|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                     |
| レントゲン     | R    | 1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                 |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                   |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                  |
| ガンマ       | γ    | 1 γ =1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                     |
| フェルミ      | f    | 1 f =1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                    |
| メートル系カラット |      | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg                      |
| トル        | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa  |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm = 101 325 Pa   |
| カロリー      | cal  | 1cal=4.1868J (「15°C」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー) |
| マイクロン     | μ    | 1 μ =1μm=10 <sup>-6</sup> m                                      |

