限定要因の法則からみた蒸発

Estimating Evaporation on the Basis of the Law of Limiting Factors

高見晋一* (近畿大学農学部)

Shinichi TAKAMI *Department of International Resources Management, Kinki University*

Key words : Annual potential evaporation, Annual precipitation, The law of the minimum, Threshold formulation

キーワード : 最少律, 需要供給比較法, 年可能蒸発量, 年降水量

I. はじめに

Budykoは、広域の集水域について、年蒸発量(蒸散を含む)と年降水量及び年可能蒸発量(あるいは正味放射量)との間に簡単な関係が成立することを示した(Brutsaert 1982)。したがって、対象とする地域の年降水量と年可能蒸発量(あるいは正味放射量)がわかれば、このモデルからこの地域の年蒸発量を推定することができる。しかし、このモデルの理論的根拠は必ずしも明らかではない。そこでここでは、限定要因の法則に基づく簡単な理論的考察から、①蒸発量と降水量及び可能蒸発量(あるいは正味放射量)との間の関係を導き、②さらにこの関係と上述のモデルとの間の相互関係を明らかにする。

II. Budykoのモデル

年間を考え、河川流域等の広域の集水域を対象とすれば、次の水収支式が成立する。

$$E = P - f \quad (1)$$

ここで、 E 、 P 、 f はそれぞれ、年間の蒸発量、降水量、流出量である。このうち、降水量は通常、観測値が得られるので、さらに降水量と流出量あるいは蒸発量との関係式があれば、我々は式(1)中の全ての水文量を知ることができる。

そのような関係式の一つとして、1904年、Schreiberは先人の水文データを整理して、次のような経験式を導いた(Brutsaert 1982)。

$$f = P \exp(-a/P) \quad (2)$$

ここで、 a は流域ごとに異なる経験定数である。すると、上記の水収支式から次の関係が得られる。

$$E = P [1 - \exp(-a/P)] \quad (3)$$

その後、Ol'dekopは式(3)中の a が可能蒸発量(E_p)に相当することを示唆するとともに、式(3)の代わりに次式を提案した(Brutsaert 1982)。ただし、ここで可能蒸発とは対象地域の蒸発面が十分湿っている時にその蒸発面が正味吸収する放射量およびこの面に接する大気層の温度、湿度ならびに風速によって決まる蒸発量である。

$$E = E_p \tanh(P/E_p) \quad (4)$$

式(3)と(4)はいずれも、 $E_p/P \rightarrow \infty$ で $E = P$ 、 $E_p/P \rightarrow 0$ で $E = E_p$ に滑らかに漸近する曲線である。

以上のような研究を背景に、Budykoはこの問題を次のように取り扱った。彼はまず、蒸発面が十分に湿っている時の正味放射(R_{nw} 、ただし蒸発の潜熱を考慮して蒸発量、あるいは降水量と同じく水深に換算)と降水量との比 R_{nw}/P によって対象地域の乾燥(湿潤)度を表わした。そして、非常に乾燥しているところすなわち $R_{nw}/P \rightarrow \infty$ では降水は全て土壤に拘束されその後蒸発するので、 $f/P = 0$ すなわち $E/P = 1$ と考えた(Budyko 1959)。一方、十分湿潤な条件下すなわち $R_{nw}/P \rightarrow 0$ では顕熱の蒸発への寄与が無いので、 $E = R_{nw}$ とした。これは、また上述の可能蒸発の定義から、 $E_p = R_{nw}$ であることも意味する。こうして、両極限での関係が規定されたので、彼はその間

*近畿大学農学部国際資源管理学科 〒631 奈良市中町3327-204

Department of International Resources Management, Kinki University, Nakamachi 3327-204, Nara, 631, Japan

では E が滑らかに変化すると仮定し、その変化を表す式として、式(3)、(4)中の E_p を R_{nw} で置き換えたを用いた(Brutsaert 1982)。そして、7つの大河川流域についてその妥当性を調べたところ、データは両式の幾何平均に最も適合した。 E_p の代わりに R_{nw} とした式(3)、(4)、あるいはこれらの幾何平均

$$E = \{P R_{nw} [1 - \exp(-R_{nw}/P)] \times \tanh(P/R_{nw})\}^{1/2} \quad (5)$$

がBudykoのモデルである。

III. 限定要因の法則

限定要因の法則は最少律とも言う。19世紀にJ. Liebigによって植物の土壤養分に対する反応に、ついで今世紀初頭、F.F. Blackmanによって光-光合成関係に適用された(Loomis & Connor 1992)。この法則は簡単でしかも広い適用性を有する。とりわけ、細部のプロセスが明らかなでない複雑な現象の本質を大局的に把握するのに有効である。

1. 数学的表現

限定要因の法則は次のように表現することができる(Thornley 1975)。すなわち、いま、2つの変数 X と U でそれぞれ独立に支配されるあるプロセスを考える。そして、このプロセスが進行する速さ Y は X が U に比べて大きければ U によって、逆に U が十分であれば X によって律速されると仮定する。するとこの関係は次のように表すことができる。

$$0 \leq X \leq bU/a \text{ なら } Y = aX, \\ bU/a \leq X \text{ なら } Y = bU \quad (6)$$

このようなプロセスの最も単純なモデルとしては、ベルトコンベアーによる輸送を考えることができる。輸送速度は、荷物の積み込みがコンベアーの搬送能力以下のときは積み込み速度によって律速されるが、積み込み速度がコンベアーの最大搬送能力を上回ってくると、今度はコンベアーの能力によって律速されるようになる。これは、われわれが日頃、エレベーターやエスカレーターを利用する際に経験するところである。ただし、この関係が成り立つためには X と U が互いに独立であることが必要である。 X にともなって U が変化する場合成立しない。ベルトコンベアーの例で言えば、コンベアーの最大搬送能力に積み込み速度を合わせるか、あるいは逆に、積み込み速度に合わせて、コンベアーの能力を調節するという操作に相当する。いずれにしても、このような場合は式(6)のような簡単な関係は成立しない。

式(6)からは、次の関係を導くことができる。

$$0 \leq U \leq aX/b \text{ なら } Y = bU, \\ aX/b < U \text{ なら } Y = aX \quad (7)$$

すなわち、式(6)と(7)とは数学的に同じであり、要因 X と U とはお互いに入れ替えることができる。

2. 需要-供給関係

限定要因の法則を式(6)のように表わした場合、 X を供給(あるいはソース)、 U を需要(あるいはシンク)そして Y を消費とみなすことができる。ベルトコンベアーの例で言えば、コンベアーによる輸送は、積み込みによって供給される荷物を最大搬送能力という需要で消費するというプロセスとみなせる。一方、式(7)のように表わすと、コンベアーによって供給される輸送力を積み込みという需要で消費するプロセスとみることができる。このように、変数 X と U を限定要因とする任意のプロセスはすべて、 X を供給とし、 U を需要とする側面と、逆に X を需要とし、 U を供給とする二つの側面を有するといえる。

IV. 蒸発現象への適用

1. 歴史的経緯

蒸発現象を限定要因の概念から考察したのは19世紀初頭のSpaldingに遡るといえる(Wetzel & Chang 1987)。しかし、実際に定量的な推定に用いたのはThornthwait(新井 1980, 参照)が初めてではないだろうか。すなわち、彼は月別の蒸発量を可能蒸発量、降水量及び有効土壌水分量(蒸発に利用できる土壌水分貯留量)から次のように推定した。まず、降水量が可能蒸発を上回る月は、蒸発量は可能蒸発に等しいとする。一方、降水量が下回る月は、有効土壌水分が少しでもある限り、それが全て蒸発に使われるとする。したがって、可能蒸発と降水量との差以上に有効土壌水分が残っている限り蒸発量は可能蒸発量に等しいが、それ以下になると蒸発量は可能蒸発より少なくなり、全て使われてしまうと降水量に等しくなる。これは、明言はされていないものの、可能蒸発と供給水量(降水量+残留土壌水分量)とを限定要因とする限定要因の概念の適用に他ならない。

限定要因の法則の適用を明言して蒸発現象をとりあつかったのは、Cowan(1965)にはじまる一連の研究である。すなわち、Cowan(1965)は、植被からの蒸散を土壌-植物-大気系における水の輸送の一環として理論的に解析するにあたって、蒸散速度は可能蒸散と蒸発面への水の供給速度のうちの小さいほう

に等しいと仮定した。ついで、Federer(1982)は、この関係の妥当性を気孔調節を含むシミュレーションモデルによって検討した。さらに、Wetzel & Chang(1987)は蒸散だけでなく蒸発にもこの考え方を適用した。これらの研究は、concept of supply and demand evapotranspiration (Wetzel & Chang 1987)、訳して「需要供給比較法」(近藤1994)とよばれている。限定要因の法則と需要供給概念との間には前述(Ⅲ. 2)のような対応関係があるからである。なお、Mahfouf and Noilhan(1991)は、threshold formulationという呼び方も使っている。

2. 年蒸発量の推定

1) 水の消費としての蒸発

蒸発(E)は蒸発面へ供給された水が「大気蒸発要求」すなわち可能蒸発(E_p)の程度に応じて、消費されるプロセスとみなすことができる。年間を考えると平均的には土壌水分の増減を無視できるので、地面への水分供給速度としては年降水量(P)を考えればよい。すると、限定要因の法則から P が E_p より小さい間即ち降水による水の供給が蒸発要求による需要を下回っている間は蒸発は降水に比例して増加する。しかし、 P が増大して、蒸発要求を上回るようになると蒸発は蒸発要求で頭打ちとなり、 P がいくら増大しても E_p の水準で推移する。すなわち、蒸発は P が E_p に比べて小さい間は P によって、逆に大きくなると E_p によって律速される。式(6)と比べると、 E_p が U に、 P が X に対応していることになる。ここで比例係数は1とみなせる。

実際のデータには式(6)の様な直線関係よりもこれら2直線を漸近線とする1つの曲線がよく適合する。式(3)はそのような曲線として直ちに思いうかぶものの一つである。

2) エネルギーの消費としての蒸発

蒸発は、また、大気から蒸発面へ供給された可能蒸発という量が蒸発面の水の量に応じて消費されるプロセスとみなすことができる。あるいは、正味放射が全て蒸発に使われたときの蒸発を可能蒸発と定義すれば、蒸発面の水を蒸発させるのに必要なエネルギーが正味どれだけ供給・消費されるかという観点から見る事ができる。この場合は(1)とは逆に、 E_p が X に、 P が U に対応する。すなわち、直接的には式(7)に対応する。したがって、上と同様2つの直線関係の代わりに滑らかに変化する曲線、例えば双曲線正接関数、を用いるとそれが式(4)に他ならない。

V. むすび

蒸発は、可能蒸発と降水を限定要因とする限定要因の法則によって、最も単純にかつ理論的根拠をもってモデル化することができる(限定要因モデル)。Budykoのモデルはこうして得られた折れ線関係を指数関数あるいは双曲線正接関数で近似したものともみなすことができる。

蒸発現象に対する限定要因の考え方の適用はすでにThornthwaitにみられる。そして後に、需要供給比較法としてあらためて一連の研究を生むこととなる。本稿では、限定要因の法則をその基本にたちかえって考察し、以上のような相互関係を明らかにした。

引用文献

- 新井 正(1980): 日本の水, pp. 61-64, 三省堂, 東京.
 Brutsaert, W. (1982): *Evaporation into the Atmosphere*, pp. 241-242, Kluwer Academic Press Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
 Budyko, M.I. [内嶋善兵衛 訳] (1959): 地表面の熱収支, pp. 100-102, 河川水温調査会, 東京.
 Cowan, I.R. (1965): Transport of water in the soil-plant-atmosphere system, *J. Appl. Ecol.*, 2, pp. 221-239.
 Federer, C.A. (1982): Transpirational supply and demand; plant, soil, and atmosphere effects evaluated by simulation, *Water Resour. Res.*, pp. 355-362.
 近藤純生(1994): 水環境の気象学, p. 194, 朝倉書店, 東京.
 Loomis, R. S. and D.J. Connor (1992): *Crop Ecology*, pp. 54-56, Cambridge University Press, Cambridge.
 Mahfouf, J. F. and J. Noilhan (1991): Comparative study of various formulation of evaporation from bare soil using in situ data, *J. Appl. Meteor.*, 30, pp. 1354-1365.
 Thornley, J.H.M. (1976): *Mathematical Models in Plant Physiology*, pp. 93-95, Academic Press, London.
 Wetzel, P.J. and J.T. Chang (1987): Concerning the relationship between evapotranspiration and soil moisture, *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, pp. 18-27.

(受付: 1997年8月8日, 受理: 1997年9月18日)