

箱根仙石原地域における蒸発散量の推定

板寺一洋*

Estimation of evapotranspiration amount in Hakone Sengokubara district, Kanagawa Prefecture

by

Kazuhiro ITADERA *

1. はじめに

芦ノ湖は箱根温泉の涵養地域にあたる箱根カルデラ内に位置する。湖面の面積は6.9km²で、カルデラ地域の面積の約10分の1を占め、湖面に直接降る年間降水量の約8倍に相当する約1.8億m³の湖水が貯えられている。従来から、この大量の湖水の一部が地下浸透し、箱根地域の地下水や温泉の涵養に寄与していると考えられており、芦ノ湖流域の水収支等に基づいて、湖流域からの地下浸透量が見積もられている(箱根水質調査団、1975; Matsuo *et al.*, 1979)。

水収支計算では、地下水流出量(あるいは流入量)を、河川流出量と蒸発散量の和と降水量との差として見積もることができる。これらの項目のうち降水量と河川流出量は、観測データをもとに対象流域の全体量を見積もることが可能である。結局、水収支によって見積もられる地下水流入量は、蒸発散量をどのように推定するのかによって大きく影響されることになる。

たとえば、箱根水質調査団(1975)は、湖水域に対しては計器蒸発量を、斜面域に対しては年間の降水量の3分の1を、それぞれ蒸発散量として、流域の年間蒸発散量(文献中では蒸発量)を961~1027mmと見積もっている。一方、Matsuo *et al.* (1979)は、斜面域の蒸発散量として、酸素・水素同位体比および塩化物イオンに着目した物質収支から推定した値を用い、流域の年間蒸発散量を1341mmと見積もっている。その結果、芦ノ湖流域からの地下浸透量を見積もった両者の結果には5倍以上の差が生じている。

蒸発散量は、気象や地形、植生などの種々の要素に影響されることから、空間的な変動が大きく、広域を代表するような蒸発および蒸発散量を直接測定することは難しい。広域の蒸発散量の推定法は、主に(1)水収支法、(2)気象データに基づく算定法、(3)蒸発計蒸発量によるものに大別される。芦ノ湖流域における蒸発散量を推定しようとする場合、上述のとおり地下水流出量(あるいは

流入量)が未知数であるので水収支法によることはできない。(2)で用いられるのは気温や湿度、日射、風速などの気象データであるが、一般には、これらの気象要素に関するデータが十分揃うケースも限られている。そこで本稿では、気象データに基づく算定法のうち、必要なデータ項目が少なく実用的な方法であるソーンズウェイト法とマッキング式を用いて、芦ノ湖流域に隣接する箱根仙石原地域(図1)の蒸発散量について検討した。

2. 気象データを用いた蒸発散量の算定法

2.1. ソーンズウェイト法

ソーンズウェイト法は、土壌が十分な水分を含むときの圃場蒸発散量を可能蒸発散量と呼び、気温の関数として求める方法で、その概要は次のとおりである(権根、1980)。

t_i および PE_i を、それぞれ ($i = 1 \sim 12$) 月の平均気温 ()、可能蒸発散量 (cm/月) とすると

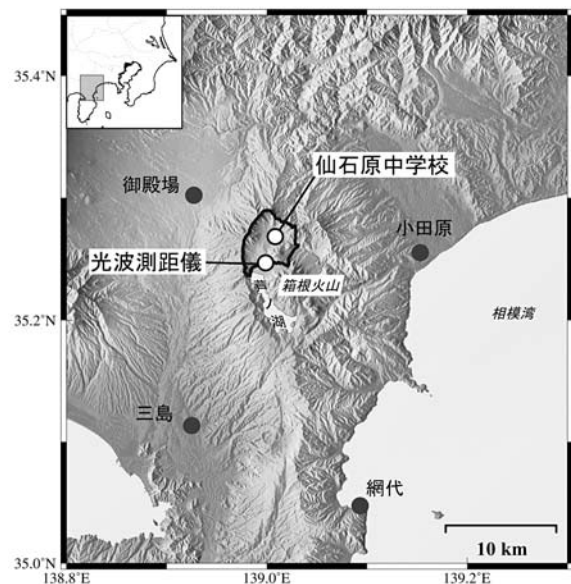


図1 箱根仙石原地域の位置(太線で囲んだ範囲)
○: 箱根町立仙石原中学校および光波測量測距儀の設置箇所
●: 気象データ統計値を使用した地上気象観測所の位置

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田586 報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第37巻, 51-56, 2005.

$$PE_i = 1.6 \left(\frac{10t_i}{I} \right)^a \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1.514} \quad \dots \textcircled{2}$$

$$a = (0.6751^3 - 77.11^2 + 179201 + 492390) \times 10^{-6} \quad \dots$$

こうして求めた PE_i に、緯度による日長補正値を乗じた後、1月から12月まで合計することにより年間の可能蒸発散量を得ることができる。

2. 2. マッキング式

マッキング式はペンマン型簡略式あるいは放射温度法と呼ばれ、気温と日射量に基づき蒸発量を推定する方法である。永井(1993)によれば、その概要は以下のとおりである。

マッキング式による月蒸発量 E_{MAX} (mm/day) は、次式で表すことができる。

$$E_{MAX} = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{L} + b \quad \dots \textcircled{4}$$

ここで、 R_s : 全天日射量 (MJ/m²d) で

$$R_s = R_A (0.18 + 0.55n/N)$$

R_A : 大気圏外日射量 (MJ/m²d 理論値)

n/N : 可照時間 N に対する日照時間 n の比

L : 蒸発潜熱 (MJ/kg) で

$$L = 2.5 - 0.0024T$$

T : 月平均気温 ()

: 乾湿計定数 (hPa/)

: 飽和蒸気圧曲線の勾配 (hPa/)

係数 γ / (+) は無次元となり、次式で近似可能

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} = \frac{1}{1.05 + 1.4 \exp(-0.0604T)} \quad \dots \textcircled{5}$$

、式によって算出される1月から12月までの月蒸発量を合計することにより年蒸発量を求めることが出来る。なお、 a および b は地域係数と呼ばれ、永井(1993)が、全国147地点の気象官署における1960～1965年の6年間の計器蒸発量、日照時間、気温の月集計値をもとに、地域係数の全国分布についてまとめている。

3. 蒸発散量の推定

本稿で計算に用いた大気圏外日射量 R_A 、可照時間 N 、月平均気温、日照時間のデータを表1にまとめた。大気圏外日射量 R_A 、可照時間 N は永井ほか(2003)が示した北緯35度の値を用いた。月平均気温は箱根町立仙石原中学校(図1)の気象観測による1950年から2000年までの50年間の平均値(箱根町立仙石原中学校、2000)を用いた。

日照時間 n については、各気象官署の観測値および統計値が気象庁の電子閲覧室(<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>)で公開されている。そこで、当該地域の周辺に位置する神奈川県の小田原、静岡県の小島、御殿場、網代の4地点(図1)の日照時間年値を月別に平均して計算に用いた。地域係数については、永井(2003)

表1 蒸発(散)量の計算に用いた大気圏外日射量(R_A)および可照時間(N)の理論値と、月別の日照時間と平均気温の値

	$R_A^{※1}$ (MJ/m ² d)	$N^{※2}$ (h)	平均気温 ^{※3} (°C)	日照時間(h)				
				小田原 ^{※4}	御殿場 ^{※4}	三島 ^{※4}	網代 ^{※4}	平均
1月	18.4	308	1.3	161.0	164.3	176.6	145.8	161.9
2月	23.4	301	1.9	160.1	157.5	161.8	141.2	155.2
3月	29.9	366	5.4	144.7	138.4	158.5	147.0	147.2
4月	36.0	387	11.3	159.7	141.0	164.0	160.8	156.4
5月	40.0	429	15.9	151.7	120.0	183.4	186.7	160.5
6月	41.6	429	18.9	102.4	70.0	124.8	128.8	106.5
7月	40.7	437	22.4	125.0	85.6	144.4	154.7	127.4
8月	37.5	413	23.9	178.0	132.6	187.9	193.3	173.0
9月	32.2	369	20.0	122.9	104.4	139.9	129.6	124.2
10月	25.8	347	14.4	129.1	126.5	146.3	128.4	132.6
11月	19.9	307	9.4	144.4	149.9	154.7	129.5	144.6
12月	16.9	301	3.7	164.0	166.7	175.6	147.7	163.5

※1: 永井(2003)の表6.2における北緯35度の値

※2: 永井(2003)の表6.3における北緯35度の値

※3: 箱根町立仙石原中学校観測値による

※4: 気象庁統計値

表2 月別の蒸発(散)量算定結果と計器蒸発量

	ソーンズウェイト法	マッキング式	計器蒸発量
1	3.2	47.1	51.6
2	4.9	52.7	44.8
3	20.6	70.6	70.5
4	53.0	102.6	85.9
5	88.7	117.2	113.9
6	109.1	110.1	87.5
7	136.0	122.8	99.2
8	138.7	139.3	108.8
9	99.4	97.3	75.5
10	56.6	77.6	59.2
11	33.5	58.3	51.8
12	10.8	47.8	47.6
年計	754.5	1043.4	896.3

単位(mm)

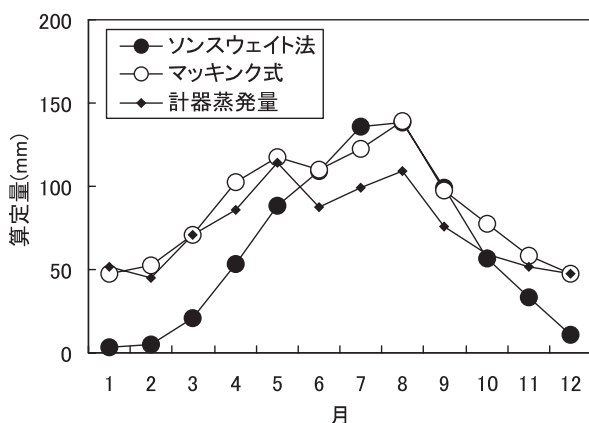


図2 月別の蒸発(散)量算定結果と計器蒸発量の推移

が示した値のうち、当該地域に近い三島の値 ($a=0.963$, $b=0.1$)を用いた。

以上の値を用い、ソーンズウェイト法(式)とマッキング式(式)により月別の蒸発(散)量を算出した(表2)。箱根における蒸発量としては、神奈川県水産試験場が1930(昭和5)年から1940(昭和15)年にかけて測定した計器蒸発量の値が報告されている(箱根町, 1978)。この結果は60~70年以上も前の観測結果であるため、現在の蒸発量とは異なっている可能性はあるが、ソーンズウェイト法やマッキング式などによる算定結果の妥当性を検討するための実測値として十分意味があると考えられる。そこで、表2には、本稿における算定結果とあわせて、この11年間の結果の平均値を計器蒸発量として示した。

月別の算定量の推移(図2)についてみると、ソーンズウェイト法による可能蒸発散量は、気温の推移(表1)と同様の、8月に年1回のピークが現れる推移を示している。計器蒸発量と比較すると、冬から春にかけて過小、夏から秋にかけて過大な値となっており、蒸発散量を月平均気温のみの関数として求めるソーンズウェイト法の特徴を反映している。一方、マッキング式による算定結果の推移は5月と8月の2回ピークを示しており、計器

蒸発量の推移と同様の特徴を示している。蒸発(散)を引き起こす主なエネルギー源は日射である(新井, 2004)ことから、日照時間を介して放射量も考慮しているマッキング式による算定結果の方が、気温のみに基づくソーンズウェイト法による算定結果に比べて、実際に起きている現象を反映していると考えられる。

ソーンズウェイト法による年間可能蒸発散量は755mmであり、計器蒸発量(896mm)の80%強の値となっている。菅原(1972)は、国内の流域の水収支をタンクモデルで解析する場合に、小型蒸発計の値の70~80%を蒸発散量として用いている。また、権根(1980、前出)は、広域面からの年間蒸発散量は小型蒸発計の値の約70%であることや、わが国ではソーンズウェイト法による可能蒸発散量が小型蒸発計の約70%の値を示すことなどを述べている。以上のことから、ソーンズウェイト法によって算定される年間の可能蒸発散量は、ほぼ、対象地域における年間の実蒸発散量に相当するものと考えられる。

一般に、気象データに基づく算定法によって得られる蒸発量は、十分な水分がある被植面からの最大可能蒸発散量に相当し、湿潤地域における計器蒸発量はこれに近い値となると考えられる。対象地域におけるマッキング式による年間蒸発量は1043mmであった。これは計器蒸発量(896mm)の115%強の値であったが、計算に用いた日照時間および地域係数が、対象地域における値でなかったことを考慮すれば、両者は良く一致していると思われる。これらの値は実蒸発散量とは異なるため、地域の状況等に応じた係数(< 1)を乗じた値を実蒸発散量とすることが多い。上述のソーンズウェイト法による算定結果によれば、マッキング式による算定結果から実蒸発散量を推定するための係数の値は0.7~0.8とするのが適当であると考えられる。

4. 温泉地学研究所の気温観測データを用いた蒸発散量の推定

温泉地学研究所では、箱根地域に光波測量観測網を整備し地殻変動の観測を行っている(伊東, 1994)。この光波測量観測のための測距儀は、芦ノ湖に隣接する箱根仙石原地域に設置されており(図1)、周囲に配置した反射鏡との間の距離(測線長)を一時間ごとに測定している。測距儀設置箇所には気温計が設置されており、測線長の測定時に気温も測定・記録されている。気温計のセンサーは合成抵抗式サーミスタで、測定範囲は0~50、分解能は0.1、精度は ± 0.2 である。こうして測定された気温データは、測線長とともに電話回線を経由し

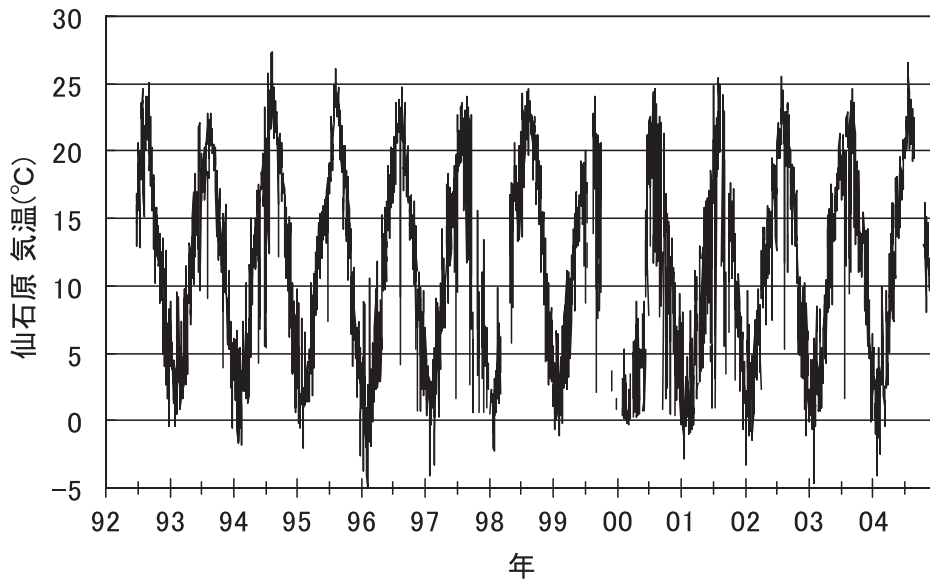


図3 温泉地学研究所の観測による仙石原地域の年平均気温の推移

て回収され、温泉地学研究所総合研究システム(伊東、2005)のデータベースに登録されている。この登録データを用い、以下の作業により観測値の月平均値を求めた。

- (1)同システムのデータ後処理機能により、1992年6月から2004年12月までの一時間毎の気温データを出力させた。
- (2)このデータセットから、欠測やデータエラーを除き、一日の平均気温を求めた(図3)。
- (3)一日の平均気温から月別の平均値を求めた。
- (4)同様の作業を1992年から2004年について実施した(表3)。
- (5)表3に示した結果について、明らかに異常と判断される値と、月別の最大値と最小値を除いて算術平均を行い、月平均値を算出した(表4)。

センサーの設置状況などから、この結果を気温の気候統計値として扱うことは難しいものの、テレメーターで自動収集されているデータを蒸発散量推定のために利用できれば、非常に有用である。そこで、温泉地学研究所観測値の月平均値と、上述した箱根町立仙石原中学校による気温観測値の月平均値を比較すると、両者は良い相関を示した(図4)。

さて、式において

$$E_0 = \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma L}$$

とすると、 $E_{MAX} = aE_0 + b$ となることから、 E_0 を地域係数 a 、 b により補正することで E_{MAX} が得られると読み換

表3 温泉地学研究所の観測による仙石原地域の月別平均気温(1992-2004)
斜線部はデータ無し、灰色部は平均値の計算に用いなかった月

年 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1992						5.2	20.4	21.3	18.7	13.8	9.9	5.7
1993	3.7	3.6	4.4	8.6	13.2	14.1	18.6	18.9	18.6	13.3	10.3	5.3
1994	2.7	2.7	4.2	11.1	12.1	17.5	17.4	23.5	18.5	15.9	10.3	5.7
1995	2.2	2.7	5.0	9.7	13.4	15.3	20.8	23.3	18.6	15.1	8.1	3.4
1996	2.0	1.2	4.9	6.4	13.5	17.2	20.9	19.1	18.6	13.5	7.7	5.2
1997	2.0	2.4	5.5	10.2	13.9	15.1	20.7	19.1	11.8	1.3	2.5	1.4
1998	0.4	3.4	0.4	3.8	14.9	17.5	20.7	22.6	20.3	16.3	9.6	5.8
1999	2.2	2.6	6.3	9.8	14.2	15.6	6.5	7.4	5.8	0.4	0.3	0.1
2000	0.1	1.3	0.7	2.5	2.7	11.8	17.0	18.7	11.6	8.9	8.8	4.5
2001	1.1	2.6	5.0	4.9	9.5	8.2	15.6	15.8	6.3	11.9	8.4	4.0
2002	2.5	2.9	5.8	10.3	13.3	16.7	21.6	19.1	18.4	14.1	6.7	4.1
2003	1.9	2.5	4.5	10.5	14.2	17.9	16.1	17.8	18.7	13.4	11.2	4.7
2004	2.1	3.3	3.7	10.7	13.0	18.3	22.5	17.4		6.2	11.4	6.3
AVG	1.9	2.6	4.9	9.5	13.4	15.9	19.4	19.7	17.1	13.9	9.1	4.9

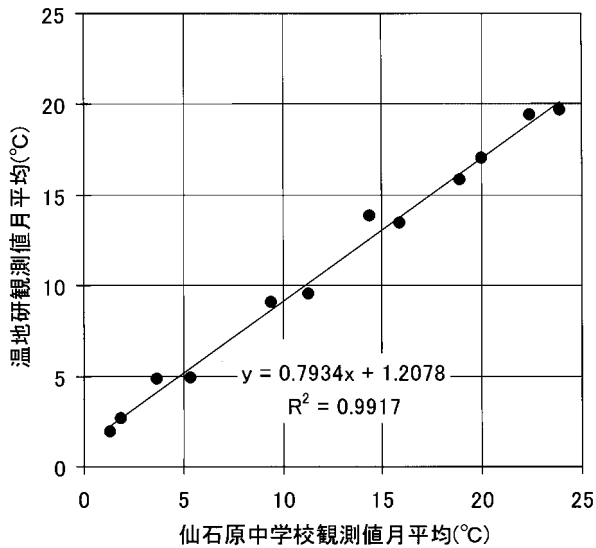


図4 仙石原中学校による気温観測値と温泉地学研究所の気温観測値の比較

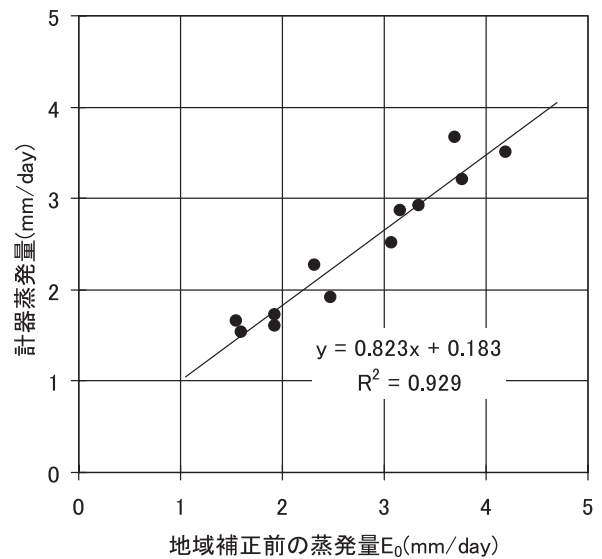


図5 温泉地学研究所の気温観測値による地域補正前の蒸発量(E₀)と計器蒸発量の関係

えることが出来る。そこで、表1に示した数値のうち、気温のみを温泉地学研究所観測値の月平均値に置き換えて算出したE₀と計器蒸発量の関係を調べた(図5)。その結果、日量で表した両者の相関を示す一時式の係数と切片から、地域係数a, bに相当する値として、それぞれ0.823と0.183が得られた。このa, bの値は地点ごとの特徴と、図4に示した相関関係を併せて補正する“みかけの”地域係数に相当すると考えられる。これらを用いたマッキング式の蒸発量E_{MAK}(表4)は、計器蒸発量の推移を良く再現できること(図6)から、実用的には、このa, bの値を地域係数として用いることにより、温泉地学研究所の気温観測値を用いて箱根仙石原地域の蒸発量を推定できると考えられる。

5. まとめ

気象データに基づく蒸発散量の算定法のうち、必要なデータ項目が少なく実用的な方法であるソーンスウェ

表4 温泉地学研究所の気温観測値の月別平均値を用いたマッキング式蒸発量の算定結果

	気温観測値 月別平均(°C)	地域補正前の 月蒸発量E ₀ (mm)	みかけの地域係数 によるE _{MAK} (mm)
1	1.9	48.1	44.4
2	2.6	54.0	48.9
3	4.9	69.6	61.4
4	9.5	98.1	84.0
5	13.4	111.0	96.1
6	15.9	103.7	91.0
7	19.4	116.8	101.3
8	19.7	130.0	112.3
9	17.1	92.1	78.0
10	13.9	76.7	65.0
11	9.1	57.8	51.7
12	4.9	49.4	45.2
計		1007.3	879.3

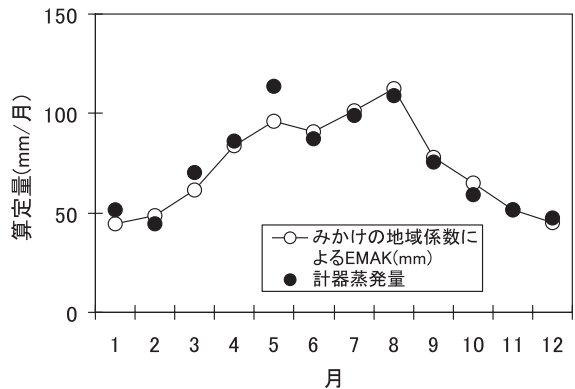


図6 みかけの地域係数による月別蒸発量算定値の推移

イト法とマッキング式を用いて、芦ノ湖流域に隣接する箱根仙石原地域の蒸発散量について検討した。その結果は次のとおりであった。

- (1) 計器蒸発量との比較により、ソーンスウェイト法による年間の可能蒸発散量755mmが実蒸発散量に相当すると考えられる。
- (2) マッキング式による月別および年間の蒸発量は、計器蒸発量の結果と良い一致をみた。(1)との比較により、マッキング式による算定結果から実蒸発散量を推定する場合の係数は0.7~0.8とするのが適当であると見られる。
- (3) マッキング式による地域補正前の算定蒸発量と計器蒸発量の相関から、温泉地学研究所が地殻変動観測の一環で測定している気温データをマッキング式に用いる場合の“みかけの”地域係数a, bとして、それぞれ0.823と0.183が得られた。

参考文献

- 新井 正(2004) 地域分析のための熱・水収支水文学, 古今書院, 309p.
- 箱根地下水調査団(1975) 箱根カルデラ河川流出水の溶存成分に対する温泉の影響について, 神奈川温研報告, 6(2), 87-116.
- 箱根町(1978) 箱根カルデラの水収支調査報告書, 38p.
- 箱根町立仙石原中学校(2000) 観測年報 1999(平・11)年, 54p.
- 伊東 博(1994) 強化された神奈川県西部地域の地震観測施設, 神奈川温地研報告, 25(3), 1-8.
- 伊東 博、宮下雄次、棚田俊收、代田 寧、倉石隆介、加藤正造(2005) 新たな総合研究システムについて, 観測日より, 55, 23-34.
- 榎根 勇(1980) 水文学, 大明堂, 272p.
- Matsuo S., Kusakabe M., Niwano N., Hirano T. and Oki Y (1979) Water Budget in the Hakone Caldera using hydrogen and oxygen isotope ratios, Proceedings of Advisory Group Meeting, 1977, pp131-144, IAEA, 1979.
- 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, 238-243.
- 永井明博、田中丸治哉、角屋 睦(2003) ダム管理の水文学, 森北出版, 146p.
- 菅原正巳(1972) 流出解析法, 共立出版, 227p.