

ボリビア Tuni 湖集水域での蒸発量の推定

東北大学工学部 白鳥総一郎

東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター 真野明

東北大学大学院工学研究科 朝岡良浩

東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター 有働恵子

1. はじめに

現在、地球温暖化により、アンデス山脈にある熱帯氷河の後退が加速している。¹⁾この融解水を主要な水資源とするボリビアの首都ラパスと隣接都市エルアルトは将来深刻な水不足になることが懸念されている。これらの都市では近年人口の集中やそれに伴う都市域、耕作地の開発により水需要が増加している。そのため、水資源の確保は喫緊の課題である。本論文では、水収支の項目の中で計測が困難な蒸発量を気象データを用いて算出し、現地の気候に適した蒸発量の推定の式を決定することを目的とする。

2. 対象地域と気象データ

ボリビアは南米大陸に位置する内陸国である。Tuni 湖に流入する河川は大きく 3 つあり、それぞれの流域の上流に大きな氷河が存在している (図-1)。この地域は半乾燥地帯であり、雨季と乾季において河川の流出パターンが異なる。なお流域面積は Condoriri が 15km²、Huayna Potosi が 35km²、Tuni Bajo が 10km² である。本研究では、対象流域に適した蒸発量の式を決定するためにデータが豊富に存在する Zongo (南緯 16 度 15 分、西経 68 度 10 分、標高 5050m) の気象データを用いた。Zongo の気象データは GLACIOCLIM²⁾ から取得した。

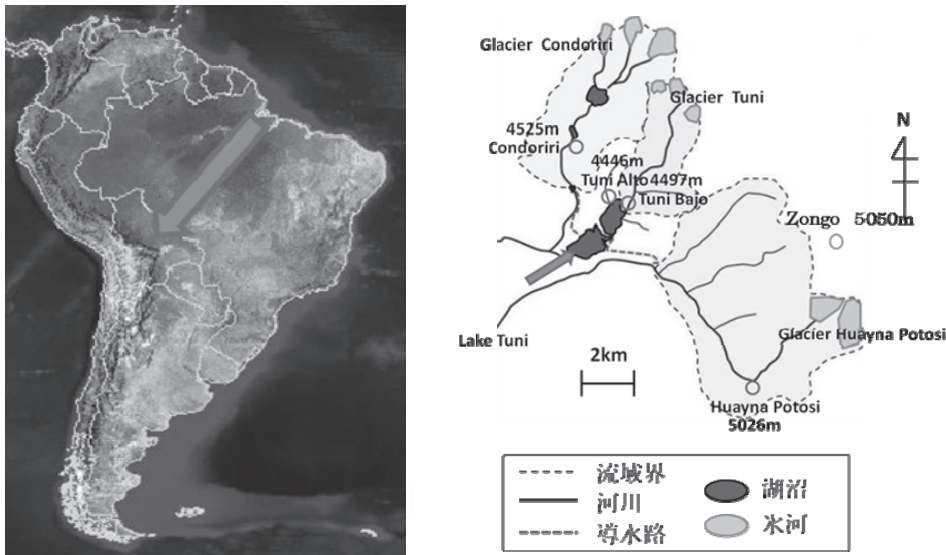


図-1 対象地域

3. 解析方法

対象地域の蒸発量を算出するために、2004年8月から2009年8月までのZongoの観測値のデータを用いた。なお、2007年はデータ数が十分でないため解析期間から除いた。その他の年もデータ数が十分でないため、1日を通してデータが得られる日のみを用い、1月当たり30日とする月平均可能蒸発量を算出した。また、使用した観測項目は、短波放射量、長波放射量、気温、地表面温度、風速、湿度、地中伝導熱量であり、観測高度は地表面から2mである。本研究では、理論的根拠に基づいて可能蒸発量を算出するボーエン比法と、熱収支式に経験則を導入することにより簡易化されたペンマン式を比較した。なお、地表面の湿度が飽和であると仮定して、可能蒸発量が実蒸発量にほぼ等しくなると設定した。

4. ボーエン比法

熱収支式³⁾とバルク式³⁾を用いて可能蒸発量を算出する方法をボーエン比法と呼ぶ。可能蒸発量を算出するための熱収支式は次式で表される。

$$S \uparrow - S \downarrow + L \uparrow - L \downarrow = H + IE + G \quad (1)$$

$$R = S \uparrow - S \downarrow + L \uparrow - L \downarrow \quad (2)$$

ここに、 S : 短波放射量(Wm^{-2})、 L : 長波放射量(Wm^{-2})、 H : 顕熱輸送量(Wm^{-2})、 IE : 潜熱輸送量(Wm^{-2})、 L : 地中伝導熱量(Wm^{-2})、 R : 正味放射量(Wm^{-2})である。

式(1)の顕熱 H および潜熱 IE は、次のバルク式で表される。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (2)$$

$$IE = l \rho C_E U (q_s - q) \quad (3)$$

ここに、 $c_p \rho$: 空気の体積熱容量($JK^{-1}m^{-3}$)、 U : 風速(ms^{-1})、 T_s : 地表面温度(K)、 T : 気温(K)、 l : 水の気化の潜熱(Jkg^{-1})、 q_s : 地表面の飽和比湿($kgkg^{-1}$)、 q : 大気比湿($kgkg^{-1}$)、 C_H 、 C_E : バルク係数である。ここで、 H と IE の比であるボーエン比 B_o を $C_H = C_E$ と仮定して用いる。

$$B_o = \gamma \frac{(T_s - T)}{(e_s - e)} \quad (4)$$

$$E = \frac{R - G}{1(B_o + 1)} \quad (5)$$

5. ペンマン式

本論文では植生を考慮しないと仮定したペンマン式³⁾を用いた。ペンマン式は以下のように示す。

$$IE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} IE_a \quad (6)$$

ここに、 Δ : 飽和比湿の温度に対する変化率 (K^{-1})、 γ : 乾湿計定数 ($hPaK^{-1}$) である。 E_a は放射量によらない大気の乾燥力とし、以下の式で表される。

$$IE_a = f(U) \{e_s(T) - e\} \quad (7)$$

$$f(U) = 0.26 \times (1.0 + 0.54U) \quad (8)$$

ここに、 e_s : 気温 T における飽和水蒸気圧、 e : 気温 T における水蒸気圧である。

以上の(6)(7)(8)式を用いて、可能蒸発量を算出する。

6. 推定手法の比較

ボーエン比法を用いて算出した可能蒸発量、ペンマン式を用いて算出した可能蒸発量を図2、3にそれぞれ示す。

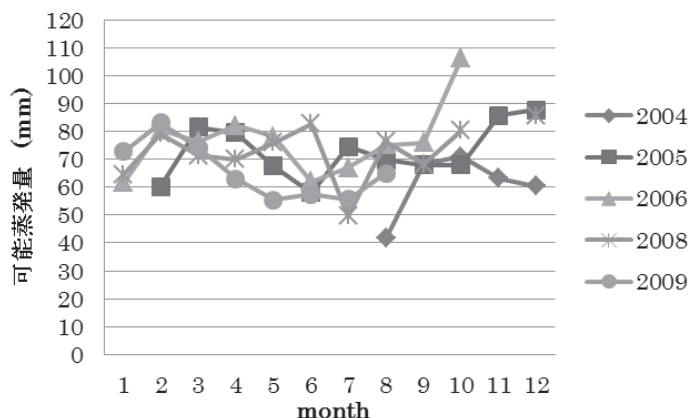


図2 ボーエン比法による可能蒸発量

ボーエン比法は、熱収支と風速、湿度、などの大気の状態を考慮にいれているという点から精度が高い可能蒸発量が算出できると考えられる。さらに、バルク係数を与えないことから粗度や大気安定度を必要としないので、比較的簡易に算出できる。1年間の平均可能蒸発量はおよそ730mm～920mmであり、月単位の平均可能蒸発量はおよそ60mm～80mmと算出された。

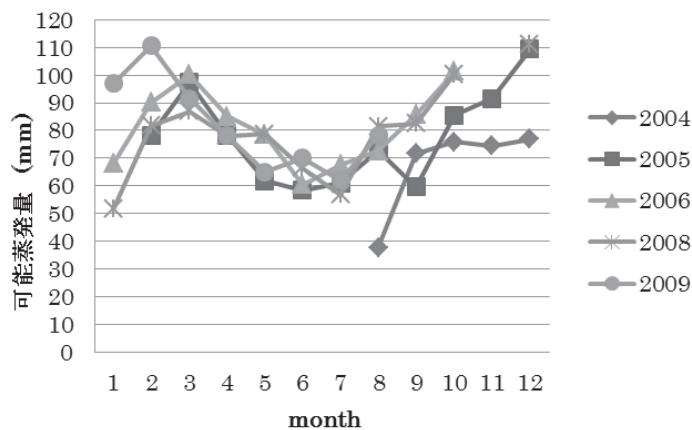


図3 ペンマン式による可能蒸発量

ペンマン式は(8)式の風速関数が今回の対象流域に適するののかという不確実性を含むため、ボーエン比法よ

りも精度は劣ると考えられる。しかし、比較的簡易に可能蒸発量を算出することができる。また、ペンマン式の第1項は正味放射に依存する蒸発成分、第2項は風速に依存する蒸発で成分と考えられる。1年間の平均可能蒸発量はおよそ800mm～980mmであり、1月の平均可能蒸発量はおよそ65mm～80mmと算出された。

7. ペンマン式の検証

ペンマン式は(8)式の風速関数が、今回の対象地域に適用できるのかという不確実性を含む。図4に2通りの手法の相関を示す。

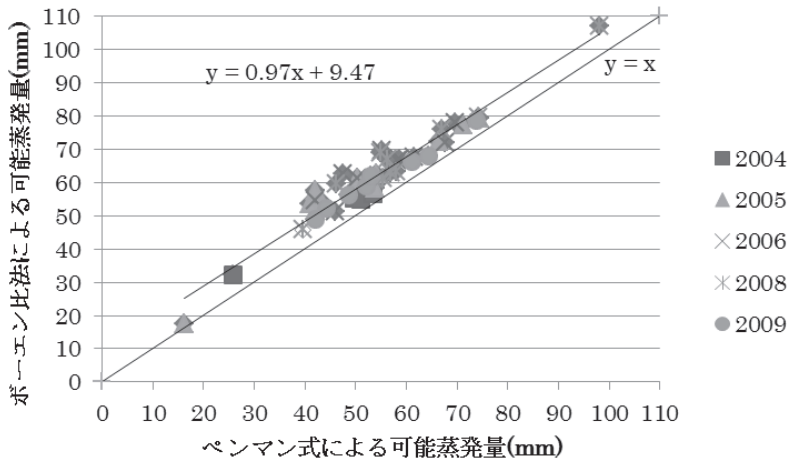


図4 ボーエン比法とペンマン式による可能蒸発量の比較

各年の相関係数は2004年：0.97、2005年：0.97、2006年：0.92、2008年：0.98、2009年：0.99を示し、全体の相関係数は0.97を示した。次に、風速関数は風速 U と気温 T に依存する関数である⁴⁾と考えられるため、それらを用いた補正を行なった。補正については(9)式を用いた。

$$\left(IE - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R - G)\right) \frac{\Delta + \gamma}{\gamma} = \frac{U}{T + 273.15} \quad (9)$$

(9)式の左辺と右辺の相関を図5に示す。

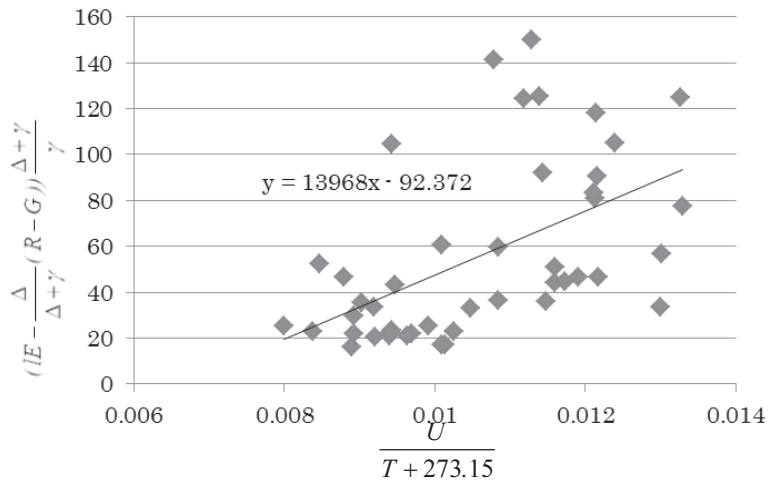
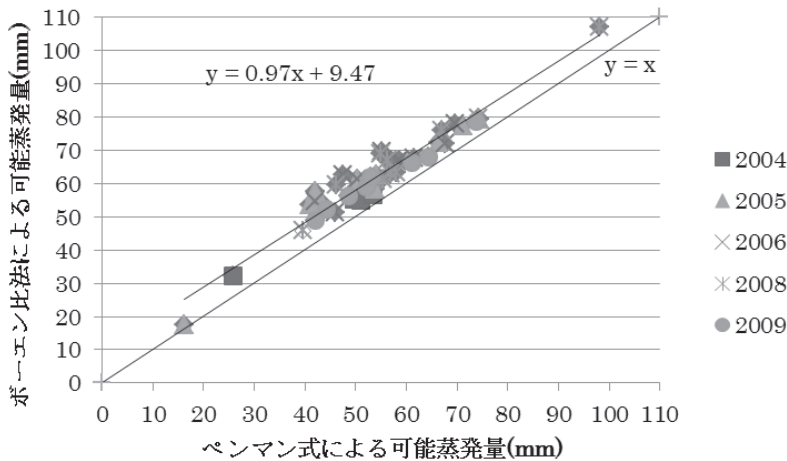


図 5 風速関数の導出

全体として相関係数は0.53を示し、以下の近似式を得た。

$$f(U) = 1.40 \times 10^4 \times \frac{U}{T + 273.15} - 92.37 \quad (10)$$

(9)式を用いた補正後の相関図を図6に示す。

図 6 ボーエン比法と $f(U)$ を補正したペンマン式の比較

各年の相関係数は2004年：0.99、2005年：0.97、2006年：0.92、2008年：0.98、2009年：0.99を示し、全体の相関係数は0.97を示した。これは、補正前の結果とほぼ同じであり、(7)式が今回の対象地域でも適用できる事が確認された。また、対象地域の平均気温は1℃前後であるため、気温による影響が少なかったことも考えられる。ただし、気候変動の状況によっては風速と気温の関数を利用する必要があると考えられる。

8. まとめ

本研究では熱帯アンデス地の Zongo 地域を対象として、ポーエン比法とペンマン式が適用できる事を確認した。今後は、土壌の含水率を考慮にいれた関数を決定し、今回のペンマン式と組み合わせることによって実蒸発量を推定する手法を検討する意向である。

参考文献

- 1) 田中 仁、真野 明 (2010) : ポリビアにおける氷河後退と同国の水資源問題、東北地域災害科学研究、第 46 巻、pp. 161-166.
- 2) GLACIOCLIM : <http://www-lgge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/>
- 3) 池淵周一、椎葉充晴、宝馨、立川康人 : エース 水文学
- 4) Wilfried Brutsaert : 水文学

謝辞 : 本研究は JST/JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発」の成果の一部である。また、気象データは GLACIOCLIM で公開されているデータを利用した。ここに記して関係各位に謝意を表す。