

## オーストラリアの流域における気候条件と河川の流況の関係\*

福島大学大学院共生システム理工学研究科 小松 和

福島大学大学院共生システム理工学研究科 横尾 善之

## 1. はじめに

流域の気候・地理条件から流況曲線形状を推定する手法に関する研究の歴史は長く、1970年頃から Singh(1971), Mimikou and Kaemaki (1985), Franchini and Suppo (1996), Croker *et al.* (2003), Castellarin *et al.* (2004), 横尾・有働 (2007), 横尾ら (2010)によって研究されている。また、個別の気候・地理条件が流況曲線形状に与える影響として、地頭菌・竹下 (1987), 志水 (1980), Moliere *et al.* (2009), Mazvimavi *et al.* (2005), Farmer *et al.* (2003), Sefton and Hawarth (1998)等は気候の影響, Sefton and Hawarth (1998), Ward and Robinson (1990), Soulsby *et al.* (2006), Kim and Kaluarachchi (2008)等は土壌の影響, 地頭菌・竹下 (1987), 志水 (1980), 虫明ら (1981), Holmes *et al.* (2002), 横尾・沖(2009)等は地質の影響, Moliere *et al.* (2009), Sefton and Hawarth (1998), Fennessey and Vogel (1990), Abebe and Foerch (2006)等は地形の影響, Moliere *et al.* (2009), Sefton and Hawarth (1998), Kim and Kaluarachchi (2008)等は土地利用の影響, Sefton and Hawarth (1998), Burt and Swank (1992), 真板・鈴木 (2008), Komatsu *et al.* (2008)等は森林の影響について明らかにしている。

しかしながら、流域の気候・地理条件と流況曲線形状の関係について、世界のどこでも通用するかたちで整理した研究例はない。流域の気候・地理条件の多様性に対応しながら、流域の気候・地理条件と流況曲線形状の関係について包括的に整理することができれば、流域の気候・地理条件から流況曲線形状を世界のどこの流域でも推定可能になり、あらゆる場所において効率的な水利用を行うための判断材料を提供することができると思われる。これにはまず、流域の気候条件が流況曲線形状に与える影響を多様な気候区を対象として整理する必要がある。なお、流域の気候条件と流況曲線形状の関係について述べた上記の地頭菌・竹下 (1987), 志水 (1980)は日本国内, Mazvimavi *et al.* (2005), Sefton and Hawarth (1998), Moliere *et al.* (2009)はそれぞれジンバブエ, イギリスやウェールズ, オーストラリアの熱帯地域といった限られた範囲内における河川流域を対象としており、互いに条件の類似した流域となってしまう、適用可能範囲は限定されることが考えられる。また, Farmer *et al.* (2003) は本研究と同様の河川流域を対象としているが、条件とモデルの適合性についての議論が主眼であり、気候条件と流況曲線形状の関係について明示的には述べていない。

そこで本研究は、第一段階として Farmer *et al.* (2003)と同様のデータを用いて、オーストラリアの多様な気候条件下にある河川流域を対象とし、流域の気候条件と流況曲線形状を決定する Q25, Q50, Q75, Q95 の関係を整理した。

## 2. 方法

## 2.1 対象流域

本研究は、図-1に示したオーストラリアのBass, Broken, Bullock, Scott, Snobs, Spring, Stonesの合計7の流域を対象とした。これらの流域における1976年から1978年までの日流量, 日降水量データは西オーストラリア

\* Relationship between flow regimes and climatic characteristics in Australian watersheds by Nagomu Komatsu and Yoshiyuki Yokoo

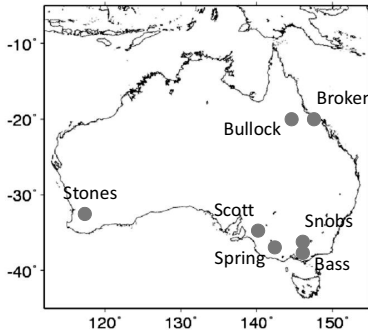


図-1 対象流域の位置

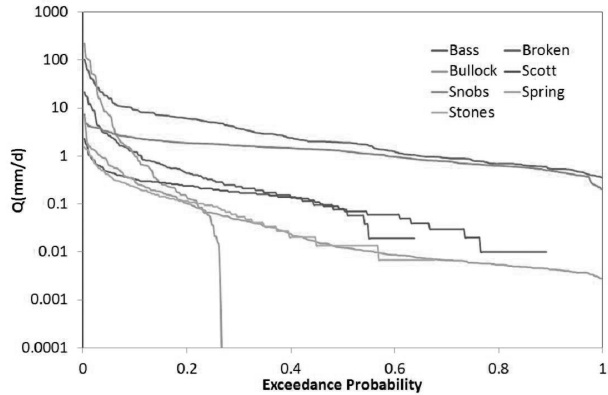


図-2 対象流域の流況曲線

大学提供のデータを用い、気温データはオーストラリアの気象庁の気候データから取得した。なお、図-2は対象流域における1976年の流況曲線である。

2.2 Q25, Q50, Q75, Q95の算出方法

Q25, Q50, Q75, Q95は、流況曲線の累加日数を超過確率で示した際、超過確率がそれぞれ25%, 50%, 75%, 95%にあたる日流量を日流量データから内挿して算出した。

2.3 乾燥指数DI, 季節性指数SIの算出方法

流域の気候条件を説明する特性値として、乾燥指数DIおよび季節性指数SIを各流域で算出した。乾燥指数DIは、Milly(1994)の次式で算出した。

$$DI = APET / AP \tag{1}$$

ここで、APETは年間可能蒸発散量(mm/y)、APは年間降水量(mm/y)である。

季節性指数SIは、次式で算出した。

$$SI = |\Delta P_{mm} - \Delta PET_{mm}| / \overline{P_{mm}} \tag{2}$$

ここで、図-3に示す通り、 $\Delta P_{mm}$ ,  $\Delta PET_{mm}$ ,  $\overline{P_{mm}}$ はそれぞれ月平均降水量の季節変動の振幅(mm/d)、月平均可能蒸発散量の季節変動の振幅(mm/d)、月平均降水量の年間平均値(mm/d)である。

月平均可能蒸発散量は、Thornthwaite(1948)の可能蒸発散モデルに月平均気温を入力して算出した。

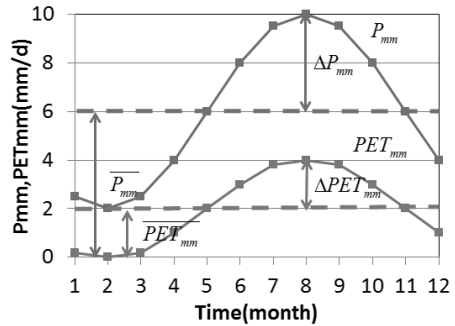


図-3 季節性指数SIの考え方

3. 結果

3.1 乾燥指数DIとQ25, Q50, Q75, Q95の関係

図-4は乾燥指数DIと流量Qの関係を示している。この図から乾燥指数DIの増加とともにQ25, Q50, Q75, Q95はそれぞれ減少することがわかる。この結果は、横尾・沖(2010)と同様の結果である。また、図-5は乾燥指数DIとQ25からの流量減少量の関係、図-6は乾燥指数DIと流量減少率の関係を示している。なお、図-6の流量減少率は、図-5における流量減少量をQ25で基準化したものである。図-5からQ25からQ50, Q75,

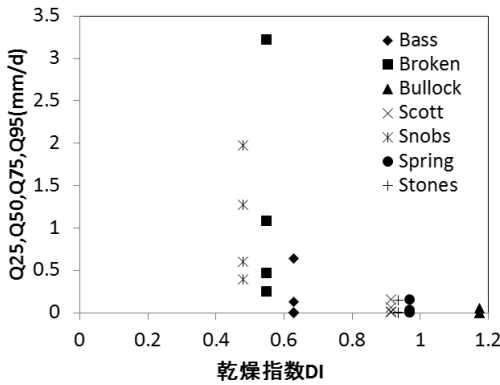


図-4 乾燥指数  $DI$  と流量の関係

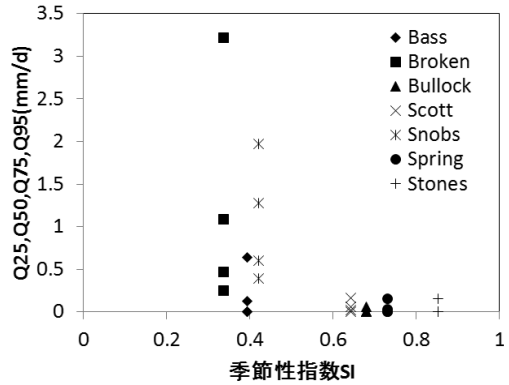


図-7 季節性指数  $SI$  と流量の関係

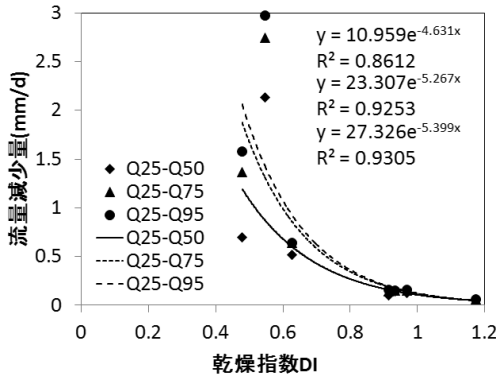


図-5 乾燥指数  $DI$  と流量減少量の関係

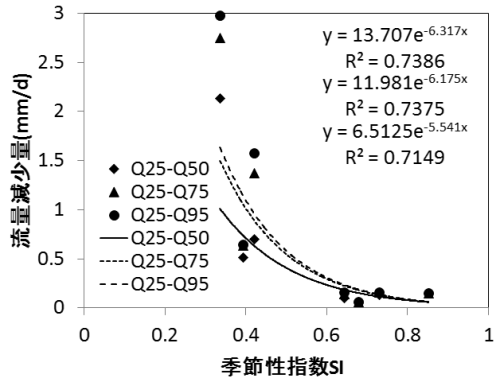


図-8 季節性指数  $SI$  と流量減少量の関係

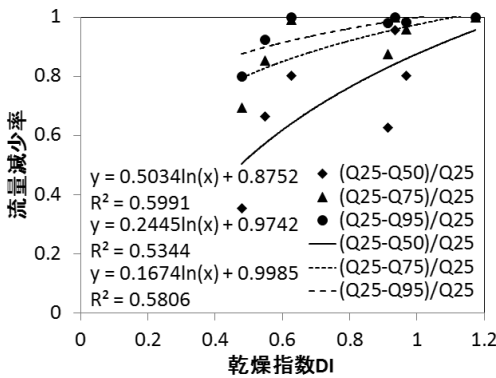


図-6 乾燥指数  $DI$  と流量減少率の関係

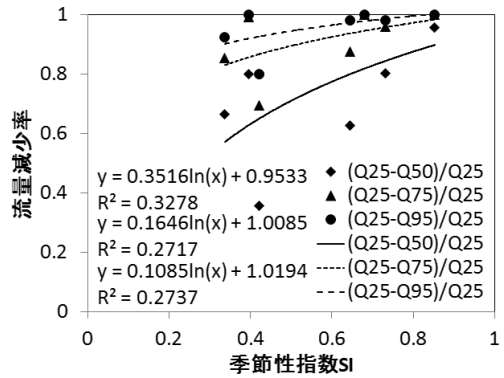


図-9 季節性指数  $SI$  と流量減少率の関係

Q95 までのいずれの流量減少量も乾燥指数  $DI$  の増加とともに減少することがわかり、また図-6 からいずれの流量減少率も乾燥指数  $DI$  の増加とともに増加することがわかる。

### 3. 2 季節性指数 $SI$ と Q25, Q50, Q75, Q95 の関係

図-7 は季節性指数  $SI$  と流量  $Q$  の関係を示している。この図から季節性指数  $SI$  の増加とともに  $Q25$ ,  $Q50$ ,  $Q75$ ,  $Q95$  はそれぞれ減少することがわかる。また、図-8 は季節性指数  $SI$  と  $Q25$  からの流量減少量の関係、図-9 は季節性指数  $SI$  と流量減少率の関係を示している。なお、乾燥指数  $DI$  と同様に、図-9 の流量減少率は、図-8 における流量減少量を  $Q25$  で基準化したものである。図-8 から  $Q25$  から  $Q50$ ,  $Q75$ ,  $Q95$  までのいずれの流量減少量も季節性指数  $SI$  の増加とともに減少することがわかり、また図-9 からいずれの流量減少率も季節性指数  $SI$  の増加とともに増加することがわかる。

### 3. 3 乾燥指数 $DI$ と季節性指数 $SI$ の関係

以上の結果から、乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  には相関があると考えられる。図-10 は本研究の対象流域における乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  の関係を示している。この図から乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  には相関があることがわかる。また、図-4～図-9 の回帰曲線の決定係数値  $R^2$  の大きさから、現状では季節性指数  $SI$  よりも乾燥指数  $DI$  の方が、流況曲線形状の説明変数としてより有効である可能性が高いと言える。

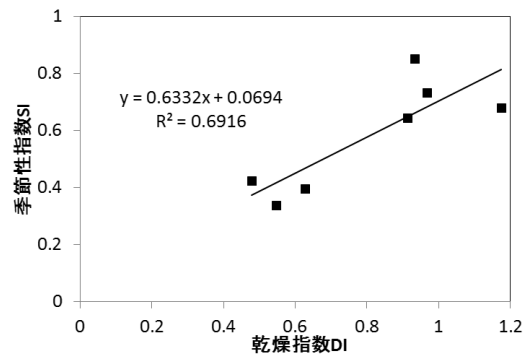


図-10 乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  の関係

## 4. 考察

本研究は、気候・地理条件の多様性に対応しながら、流域の気候・地理条件から流況曲線形状を推定することを最終目的とし、第一段階として流況曲線形状を決定する  $Q25$ ,  $Q50$ ,  $Q75$ ,  $Q95$  と気候条件の関係を多様な気候条件を有するオーストラリアの流域を対象として整理した。その結果、気候条件を代表する乾燥指数  $DI$  および季節性指数  $SI$  の両方が流況曲線形状に影響していることが分かった。このため、乾燥指数  $DI$  や季節性指数  $SI$  を利用して流況曲線形状を推定することができる可能性が示された。

本研究において乾燥指数  $DI$ 、季節性指数  $SI$  と  $Q25$ ,  $Q50$ ,  $Q75$ ,  $Q95$  における流量減少量、流量減少率について整理した結果、回帰曲線の決定係数  $R^2$  の大きさから乾燥指数  $DI$ 、季節性指数  $SI$  と流量減少量の関係については相関が高いと考えられるが、乾燥指数  $DI$ 、季節性指数  $SI$  と流量減少率の関係については増加傾向であることはわかるが、相関は低いと考えられるため、乾燥指数  $DI$ 、季節性指数  $SI$  から流量減少率について直接推定するには有効でないと考えられるため、今後、 $Q25$ ,  $Q50$ ,  $Q75$ ,  $Q95$  の扱い方についても検討する必要があると考えられる。

また、本研究の対象流域においては、乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  には相関があるという特徴的な結果を得た。このことから、乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  はどちらか一方を気候条件の特性値として用いられよ可能性はある。しかしながら、今後対象流域を拡大する上で、乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  の範囲も変化すると考えられるため、現在のところは乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  両方を気候条件の特性値として用いる方が無難であると考えられる。

なお、本研究の、対象流域はオーストラリアの合計7の流域であり、対象流域数としては少ないため、気候条件と流況曲線形状の関係として得られた結果がどこまで有効であるかについては今後検討する必要があると考えられる。また、対象流域の選定条件についても検討する必要があると考えられる。さらに、気候条件について本研究では乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  を対象としたが、気候条件を特徴づける特性値はまだ多くあり、

例えば、年間降水量や年最大降水量等も対象に加えることで、気候条件と流況曲線形状について有効な関係を見出せる可能性がある。

## 5. 結論

本研究は、気候・地理条件の多様性に対応しながら、流域の気候・地理条件から流況曲線形状を推定することを最終目的とし、第一段階として流況曲線形状を決定する Q25, Q50, Q75, Q95 と気候条件を整理した結果、以下の結果を得た。

- ①対象流域においては、乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  は Q25, Q50, Q75, Q95 の大きさに影響していることがわかった。具体的には、乾燥指数  $DI$  と季節性指数  $SI$  の増加とともに Q25, Q50, Q75, Q95 は減少することがわかった。
- ②乾燥指数  $DI$ , 季節性指数  $SI$  の増加とともに Q25 から Q50, Q75, Q95 までの流量減少量は減少傾向を示し、乾燥指数  $DI$ , 季節性指数  $SI$  の増加とともに流量減少量を Q25 で基準化した流量減少率は増加傾向を示すことがわかった。
- ③対象流域においては、乾燥指数  $DI$ , 季節性指数  $SI$  には相関があることがわかった。

今後は、より多くの流域について長い期間のデータを収集し、研究手法と結果を検証するとともに、より多くの気候条件について流況との整理を行うことで、気候条件と流況との有効な関係について見出すこと等が課題である。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究 B, 21760381), 東京大学総括プロジェクト機構「水の知」(サントリー) 総括寄付講座との共同研究, JICA/JST 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築(IMPAC-T)」の成果の一部である。本研究は西オーストラリア大学提供データ, オーストラリアの気象庁の気候データを活用した。ここに謝意を記す。

## 参考文献

- Abebe, A. and Foerch, G. (2006), Catchment characteristics as predictors of base flow index (BFI) in Wabi Shebele river basin, east Africa, *Proceedings of Conference on International Agricultural Research for Development*, pp.1-8.
- Burt, T. P. and Swank, W. T. (1992), Flow frequency responses to hardwood-to-grass conversion and subsequent succession, *Hydrol. Process.*, Vol.6, pp.179-188.
- Castellarin, A., Galeati, G., Brandimarte, L., Montanari, A. and Brath, A. (2004), Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins, *Adv. Water Resour.*, Vol.27, pp.953-965.
- Castellarin, A., Camorani, G. and Brath, A. (2007), Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins, *Adv. Water Resour.*, Vol.30, pp.937-953.
- Crocker, K. M., Young, A. R., Zaidman, M. D. and Rees, G.G. (2003), Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal, *Hydrol. Sci. J.*, Vol.48, pp.427-439.
- Farmer, D., Sivapalan, M. and Jothityangkoon, C. (2003), Climate, soil, and vegetation controls upon the variability of water balance in temperate and semiarid landscapes: Downward approach to water balance analysis, *Water Resour. Res.*, Vol.39, 1035, doi: 10.1029/2001WR000328.

- Fennessey, N. and Vogel R. M. (1990), Regional Flow Duration Curves for Ungaged Sites in Massachusetts, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, ASCE, Vol.116, pp. 530-549.
- Franchini, M. and Suppo, M. (1996), Regional analysis of flow duration curves for a limestone region, *Water Resour. Man.*, Vol.10, pp.199-218.
- Holmes, M. G. R., Young, A. R., Gustard, A. and Grew, R. (2002), A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.6, pp.721-731.
- 地頭蘭隆・竹下敬司 (1987), 山地河川の流況と流域条件の関係 II 流域地質が流況に及ぼす影響, 鹿児島大学農学部演習林報告, Vol.15, pp.15-38.
- Kim, U. and Kaluarachchi, J. J. (2008), Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia, *J. Hydrol.*, Vol.362, pp.39-56.
- Komatsu, H., Maita, E. and Otsuki, K. (2008), A model to estimate annual forest evapotranspiration in Japan from mean annual temperature, *J. Hydrol.*, Vol.348, pp.330-340.
- 真板英一・鈴木雅一 (2008), 森林植生の伐採が山地小流域の流況曲線に与える影響—流況の流域間変動に対する植生要因の大きさの検討—, 日本森林学会誌, 第90巻, pp.36-45.
- Mazvimavi, D., Meijerink, A. M. J., Savenije, H. H. G. and Stein, A. (2005), Prediction of flow characteristics using multiple regression and neural networks: A case study in Zimbabwe, *Phys. Chem. Earth*, Vol.30, pp.639-647.
- Milly, P. C. D., (1994), Climate, interseasonal storage of soil water, and the annual water balance. *Adv. Water Resour.*, 17, 19–24. doi:10.1016/0309-1708(94)90020-5.
- Mimikou, M. and Kaemaki, S. (1985), Regionalization of flow duration characteristics, *J. Hydrol.*, Vol.82, pp.77-91.
- Moliere, D. R., Lowry, J. B. C. and Humphrey, C. L. (2009), Classifying the flow regime of data-limited streams in the wet-dry tropical region of Australia, *J. Hydrol.*, Vol.367, pp.1-13.
- 虫明功臣・高橋裕・安藤義久 (1981), 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, 土木学会論文報告集, Vol.309, pp.51-62.
- Sefton, C. E. M. and Howarth, S. M. (1998), Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales, *J. Hydrol.*, Vol.211, pp.1-16.
- 志水俊夫 (1980), 山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係, 林業試験場研究報告, Vol.301, pp.109-128.
- Singh, K. P. (1971), Model flow duration, *Water Resour. Res.*, Vol.7, pp.1031-1036.
- Soulsby, C., Tetzlaff, D., Rodgers, P., Dunn, S. M., and Waldron, S. (2006), Runoff processes, stream water residence times and controlling landscape characteristics in a mesoscale catchment: an initial evaluation. *J. Hydrol.* Vol.325, pp.197–221.
- Thornthwaite, C. W. (1948), An approach toward a rational classification of climate, *Geogr. Rev.*, Vol.38, pp.55-94.
- Ward, R. C. and Robinson, M. (1990), *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill, pp.264-266.
- 横尾善之・沖大幹 (2009), 山地河川の流況曲線形状を説明するための表層地質の分類法に関する検討, 土木学会水工学論文集, 第53巻, pp.463-468.
- 横尾善之・有働恵子 (2007), 流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響, 土木学会水工学論文集, 第51巻, pp.373-378.
- 横尾善之・沖大幹 (2010), 流域の気候・地形・土壌・地質・土地利用が河川の流況に与える影響, 土木学会水工学論文集, 第54巻, pp. 469-474.