

オーストラリア・パースにおける異なる植生下 での地下水涵養量の比較研究

Comparative Study on Groundwater Recharge
Rates beneath the Various Vegetation Covers
in Perth, Australia

谷口 真人*・M.L. SHARMA**・A.B. CRAIG**

Makoto TANIGUCHI, Munna L. SHARMA and Andrew B. CRAIG

I はじめに

地下水涵養量は、降水量・蒸発量・土壤タイプ・地形学的位置ばかりでなく植物による蒸散量にも依存する。特に降水量の少ない乾燥・半乾燥地域においては、その依存度が相対的に高い。したがって、様々な植生を有する地域全体の地下水涵養量を求めるには、植生の種類や形態の異なる地域それぞれの地下水涵養量を知る必要がある。

筆者は1987年7月から1988年9月までの間、オーストラリア、CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)において、パース地域の地下水涵養量を推定するプロジェクトに参加した。このプロジェクトでは、植生の種類および植林密度、樹齢等の異なる試験地域が選定され、それぞれの植生下での地下水涵養量が比較された。

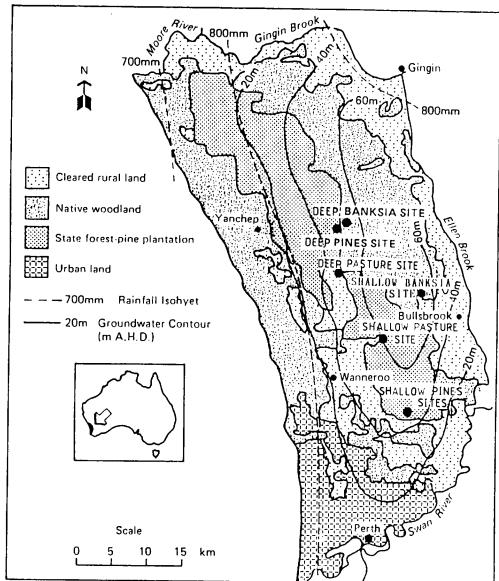
ウェスタンオーストラリアでは、牧草地の開拓のために自然林の伐採が行われたり、逆に木林資源の調達のために植林が行われている。このような植生の変化は、地表面付近での水の分配の割合を変化させ、地下水涵養量を大きく変えることが予想される。様々な植生下での地下水涵養量を明らかにすること

は、水資源確保のための植生マネジメントを行う上で必要不可欠であるばかりでなく、リモートセンシング等により広域の地下水涵養量を推定する際のグランドトゥルースデータとしても重要である。

II 試験地域の概要

ウェスタンオーストラリア州パース地域の通称グナンガラマウンドと呼ばれている地下水帯は、オーストラリア南西部のスワンコースタルプレインに位置し(第1図)、人口約100万人の都市パースの水需要の約60%を供給している(Smith and Cargeeg, 1987)。グナンガラマウンドは約2,200km²の面積を有し、地下水貯留量は約 2×10^{10} m³と推定されている(Allen, 1981)。またこの地下水帯は不透水層であり、マウンドの頂上は海面から約70mの高さにある。この地域は一連の海岸砂丘によって覆われ、土層の飽和透水係数は30m/dayのオーダーである(Sharma and Craig, 1987)。年降水量は700~800mmの範囲で、Class A panによる可能蒸発量は1,800mmである。試験地域は、地下水位の深さを基準に2つの地域群に分けられる。1つは地下水位までの深さが約20mのdeep site、もうひとつは地下水位までの深さが4

*筑波大学水理実験センター **CSIRO, Division of Water Resources, Australia



第1図 調査地域の概要

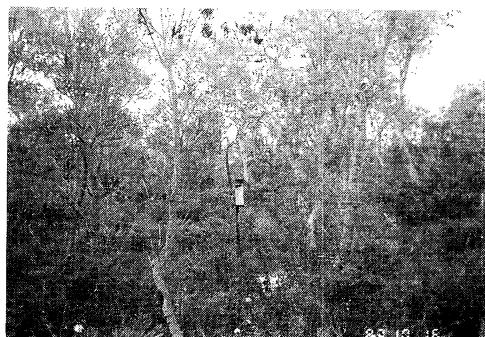


写真1 Banksia siteの様子



写真2 Pasture siteの様子



写真3 Mature pines siteの様子

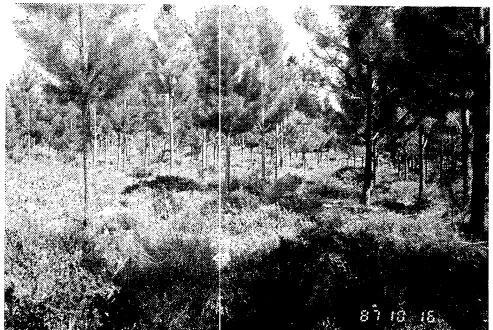


写真4 Young pines siteの様子



写真5 Dense pines siteの様子



写真6 Sparse pines siteの様子

— 6 m の shallow site である。それぞれの site に自然林 (banksia, 写真 1), 牧草 (pasture, 写真 2), 松の植林の 3 つの異なる植生を持つ試験地がもうけられた。さらに松の植林は、deep site では樹齢を規準に mature pines (植林から 30 年, 平均樹高 16m, 写真 3) と young pines (植林から 9 年, 平均樹高 6 m, 写真 4) に、shallow site では植林密度を規準に dense pines (樹幹の面積が 30m²/ha, 平均樹高 15m, 写真 5) と sparse pines (樹幹の面積が 9.5m²/ha, 平均樹高 15m, 写真 6) に区分され、合計 8 つの試験地域において観測が行われた。

III 研究方法

地下水涵養量を推定する方法には様々なものがあるが、この研究プロジェクトにおいては、自然トレーサー法、人工トレーサー法、水収支法、地温測定法などが用いられた。自然トレーサーとしては、測定の容易性等から塩素 (Cl^-) が、また人工トレーサーとしては土壤への吸着がなく、根による吸い上げがない臭素 (Br^-) が用いられた。 Cl^- の解析には定常状態を仮定した物質収支法が、また Br^- の解析にはピーク追跡法が用いられた。水質分析のための土壤水は、土壤のボーリングコアを実験室に持ち帰り、遠心分離機により抽出した。なお両トレーサー法の解析には、根域より下方の水質プロファイルが用いられた。その他の測定項目は、中性子水分計による土壤水分量、地下水位、林外雨量、林内雨量、地温、土壤水の水理水頭、root density などである。

一般に、表面流出が無い地域の不飽和帯での水収支は次の様に表わされる。

$$P = E_v + E_t + R_t + \Delta S \quad (1)$$

ここで P : 降水量, E_v : 蒸発量, E_t : 蒸散量, ΔS : 貯留量変化, R_t : 地下水涵養量である。今、年間の水収支を考えると ΔS は無視でき、塩素は蒸発・蒸散では持ち去られないことから、塩素の物質収支式は次のようになる。

$$P \cdot C_p = R_t \cdot C_c \quad (2)$$

ここで C_p は降水の Cl 濃度, C_c は地下水の Cl 濃度を示

している。(2)式より年間の地下水涵養量を求めることができる。

地下水涵養量を、マトリックスフローによる涵養と、古い根の跡などのマクロポア（ブリファードパスウェイ）を通るブリファレンシャルフローによる涵養に分離するために、ブリファードパスウェイを通る水の濃度を降水の濃度と仮定すると、次の 2 つの物質収支式が得られる (Sharma and Hughes, 1985)。

$$R_t \cdot C_c = R_m \cdot C_m + (R_t - R_m) \cdot C_p \quad (3)$$

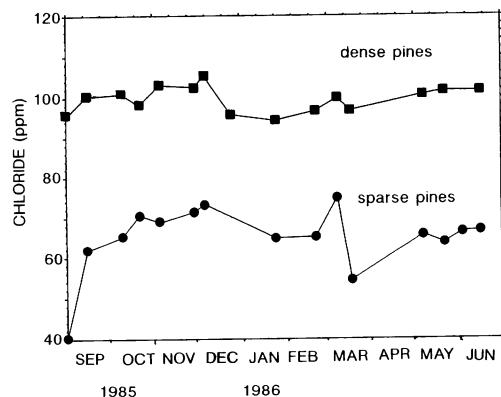
$$R_t \cdot C_c = (R_t - R_p) \cdot C_m + R_p \cdot C_p \quad (4)$$

ここで、 R_p , R_m はそれぞれブリファレンシャルフローによる地下水涵養量、マトリックスフローによる地下水涵養量を表わす。 C_m は根域より下方の不飽和帯における土壤水の Cl 濃度を示す。(3), (4)式から次式が導かれる。

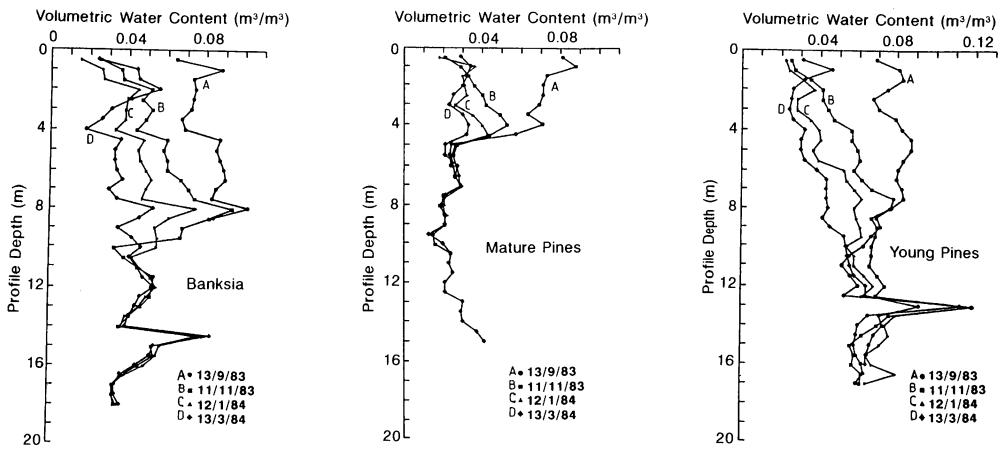
$$R_m = R_t \cdot (C_c - C_p) / (C_m - C_p) \quad (5)$$

$$R_p = R_t \cdot (C_m - C_c) / (C_m - C_p) \quad (6)$$

なお臭素を用いた人工トレーサー法では、1985 年 8 月 2 日に散布した Br のピークを追跡し、土壤水分のデータとともに地下水涵養量を求めた。その他、水収支法等を含めた研究方法の内容は、Sharma *et al.*



第 2 図 shallow site の dense pines site および sparse pines site における地下水の Cl 濃度の季節変化
(after Sharma *et al.*, 1988)



第3図 deep siteのbanksia, mature pines, young pinesの各siteにおける土壌水分量の季節変化 (after Sharma and Craig, 1989)

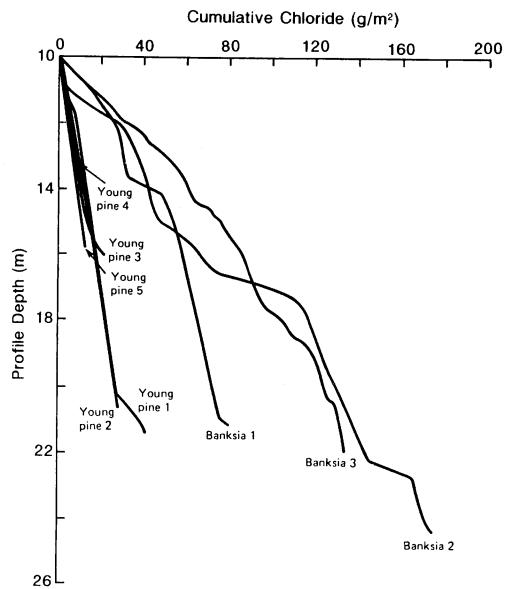
al. (1988) に詳しい。

IV 結果および考察

第2図はshallow siteのdense pines siteとsparse pines siteにおける地下水水面から深度1mまでの地下水の平均Cl濃度の季節変化を示している (Sharma et al., 1988)。sparse pines siteにおける地下水の平均濃度に対するdense pines siteの地下水の平均濃度の比は第1図より1.48である。一方、dense pines siteの林内雨量に対するsparse pines siteの林内雨量の比は1.35であった。したがって(2)式よりdense pines siteに対するsparse pines siteの地下水涵養量の比は2.0となる。

次に、前述した(5), (6)式に従って地下水涵養量をマトリックスフローによる涵養とプリファレンシャルフローによる涵養に分離するために、不飽和帯における土壌水のCl濃度 C_m を以下の様に求めた。

第3図はdeep siteのbanksia, mature pines, young pinesの各siteにおける土壌水分量鉛直プロファイルの季節変化を示している。土壌水分量が季節変化する下限深度は、banksia siteで約10m, mature pines siteで約5mであり、young pines siteでは10m以深でも土壌水分は若干変化するものの、その変化量は小さい。またroot densityの解析結果からは、根の存在する下限深度が10m以浅であること



第4図 deep siteのyoung pine site, banksia siteにおける深さ方向のCl積算値 (after Sharma and Craig, 1989)

が観測された。したがって、根による土壌水の吸い上げは、いずれも深度10m以浅と考えられ、(5), (6)式の C_m を得るには深度10m以深の土壌水のCl濃度の平均値を求めればよいことになる。第4図はdeep siteのyoung pine siteとbanksia siteにおける深度10m以深の塩素の積算値を各ボーリングコアごとに示している。

第1表 deep siteのbanksia site, young pines siteにおける、マトリックスフローによる地下水涵養量とプリファレンシャルフローによる地下水涵養量 (after Sharma and Craig, 1989)

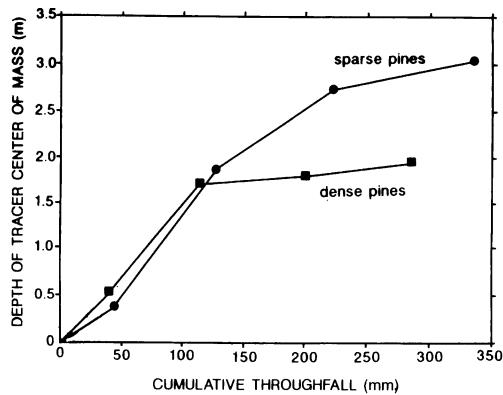
		Annual Recharge (mm)	Recharge as % of Precipitation	R_p as % of R_t
Banksia Woodland	R_m	49	6	
	R_p	70	9	60
	R_t	119	15	
Young Pines	R_m	211	27	
	R_p	35	5	16
	R_t	246	32	

R_m : soil matrix recharge (mm/year)

R_p : preferential recharge (mm/year)

R_t : total recharge (mm/year)

第1表は以上のようにして求めたdeep siteのbanksia siteとyoung pines siteにおける、マトリックスフローによる地下水涵養量とプリファレンシャルフローによる地下水涵養量を表わしている。banksia siteでは、年間の降水量に占める地下水涵養量の割合は15%と小さいが、年間涵養量119mmの内49mmがマトリックスフローによる涵養であり、プリファレンシャルフローによる涵養は全涵養量の60%を占めている。一方、young pines siteにおける年降水量に対する年地下水涵養量の割合は32%とbanksia siteの2倍以上であるが、年涵養量246mmの内211mmがマトリックスフローによる涵養であり、プリファレン



第5図 shallow siteのdense pines site, sparse pines siteにおける、Br濃度のピークの深度と積算林内雨量との関係 (after Sharma *et al.*, 1988)

シャルフローによる涵養は全涵養量の16%にすぎない。

次に、臭素 (Br) を用いた人工トレーサー法の観測結果について述べる。第5図は、shallow siteのsparse pines siteとdense pines siteにおける、積算林内雨量に対するBr濃度ピークの降下深度を示している。両地域の根域の下限深度である1.5mまでは、濃度ピークの降下速度はほぼ等しいが、それ以深ではsparse pines siteでの降下速度の方がdense pines siteでのそれより速い。塩素による物質収支法、臭素によるピーク追跡法、水収支法のそれぞれの方法による地下水涵養量を比較すると、その差は非常に小さいことが明らかになっている (Sharma

第2表 各植生を有する地域の年間地下水涵養量の比較 (after Sharma *et al.*, 1988)

		Depth to Groundwater Table (m)	Max. Depth of Roots (m)	Gross Recharge (% of Precipitation)
Banksia Woodland	Deep site	20	10	15
	Shallow site	7	7	30
Pine Plantation	Mature Pines	20	10	0
	Young Pines	20	10	32
	Dense Pines	6	6	8
	Sparse Pines	5	5	16
Pasture Land	Deep site	8	1.5	50
	Shallow site	4	1.5	60

et al., 1988).

第2表は、それぞれの調査地域の地下水水面の深度、根域の下限深度、降水量に対する地下水涵養量の割合を示している。各植生ごとに地下水涵養量を比較すると、banksia woodland, pasture landとも、地下水水面が低いdeep siteほど地下水涵養量は少ない。これは地下水位が低いほど、土壤水が蒸発散として大気へもどる機会が多いためと考えられる。deep siteでの降水量に対する年間地下水涵養量の割合は pasture, young pines, banksia, mature pinesの順に少なくなり、mature pinesではほぼゼロと推定された。またshallow siteでは、降水量に対する年間地下水涵養量の割合は、pasture, sparse pines, banksia, dense pinesの順に少なくなる。

V おわりに

地下水涵養量は植生の種類、植林密度、樹齢、地下水水面の深さ等によって大きく異なることが明らかになった。地表面の植生が等しい場合、地下水位の高い地域ほど地下水涵養量が多い。また牧草地では、自然林や松のプランテーションに比べて地下水涵養量が多い。このことは、森林伐採により地下水涵養量が増大することを意味する。地下水位が深度5—6mの松のプランテーションの場合、植林密度(樹幹面積)が3倍である地域の地下水涵養量は1/2であった。また地下水位が深度20m、樹齢30年、根域の下限深度10mの松のプランテーションでは年間の地下水涵養量はほぼゼロと推定された。これは降水のすべてが蒸発散として大気へもどることを意味する。地表面の植物の種類・樹林密度・樹齢によって地表面付近の水の分配の割合(蒸発散量と地下水涵養量の比)が大きく異なることは、水資源管理を行う上で、植生マネジメントが非常に重要であることを示している。また流域での水循環を考えた場合、涵養域での植生の変化が流出域での流出量や地下水位の変化をもたらし、secondary salinity(谷口, 1989a)や人間活動による砂漠化(谷口, 1989b)の要因となりうることを示唆している。

謝 辞

本研究は、Western Australia州Water Authorityの依頼によりCSIROが行ったパース地域の地下水涵養量を求めるプロジェクトの一部である。研究を進めるにあたり、CSIROのスタッフの皆様に大変お世話になった。記して感謝いたします。また、筆者を客員研究員として招いてくれたDr. A.J. Peckに感謝の意を表します。

文 献

- 谷口真人 (1989a): オーストラリアの地下水問題と研究動向—オーストラリアにおける地下水研究(2). 地下水学会誌, 31, 133—142.
- 谷口真人 (1989b): オーストラリアにおける砂漠化現象解明のための水文学的アプローチ. 気候影響・利用研究会会報, 6, 55—58.
- Allen, A.D. (1981): Groundwater resources of the Swan Coastal Plain near Perth, Western Australia. Whelan, B.R. ed.: *Groundwater Resources of the Swan Coastal Plain*, CSIRO Division of Land Resources Management, Perth, 29—80.
- Sharma, M.L. and Craig, A.B. (1987): Comparative recharge rates beneath banksia woodland and two pine plantations on the Gnangara Mound, Western Australia. Sharma, M.L. ed.: *Groundwater Recharge*, Balkema, 171—184.
- Sharma, M.L. and Hughes, M.W. (1985): Groundwater recharge estimation using chloride, deuterium and oxygen-18 profiles in the deep coastal sands of Western Australia. *J. Hydrol.*, 81, 93—109.
- Sharma, M.L., Taniguchi, M., Barron, R.J.W., Craig, A.B., Raper, G.P., Fernie, M. and Byrne, J. (1988): Investigations of natural groundwater recharge in the unconfined aquifers of the Coastal Plain. Project Report, CSIRO Division of Water Resources, Wembley, W.A., 104p.
- Smith, G.R. and Cargeeg, G.C. (1987): Management of the unconfined groundwater system underlying Perth, Western Australia. Proc. International Conference on Groundwater System under Stress, Brisbane, 1986, AWRC Conf. Series No. 13, AGPS, Canberra, 619—632.