

Ⅲ-A276 情報量規準を援用した cokriging による最適な地下水位分布推定

京都大学大学院農学研究科 ○ 浜口 俊雄
近畿大学農学部 長谷川 高士
京都大学大学院農学研究科 青山 成康

1. はじめに

本研究では、計測データを最大限に有効利用し、かつ、客観的で迅速な処理で再現性の高い最適な推定結果を得るべく、散在する地下水位観測井ごとの一斉計測データから、情報量統計学に基づく4つの情報量規準¹⁾を援用して最適統計モデルを選び、地盤統計学²⁾に基づくkriging^{2),3)}(KG)・cokriging⁴⁾(CK)によって実地盤における地下水位分布の推定を試みた。なお本稿では、地下水位の0-拡張変数 $\tilde{h}$ [式(1)]⁵⁾を利用して、貯留地下水の渚線がなす移動境界を考慮した。

2. CK 推定手法

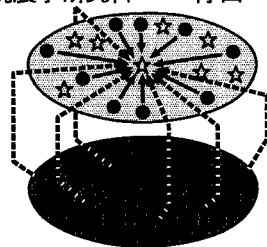
CK 推定の概念図を図1に示す。任意地点での $\tilde{h}$ のCK推定値を $\tilde{h}^*$ とすると、 $\tilde{h}^*$ は式(2)に示す多重線形和で求まる。ここに $\tilde{h}_i$:計測データ、 b_i :ボーリングデータ、重み係数: λ_i, ν_i である。KGとCKは空間分布に対する同じ統計学的推定手法であるが、KGは一変数を対象とするのに対し、CKは相関性のある多変数を対象として連成的に解くのである。CKに関する詳細な内容は、参考文献2),4)を参照されたい。本稿ではUniversal KG/CKを考える。まず基盤高を時間不変量と見なし、CK推定に先立って基盤高分布のKG推定を行う。

3. 基盤高分布のKG 推定

任意地点のKG推定値 b^* は重み係数 ζ_i を用いて式(3)で表される。本稿では、沖縄県宮古島砂川地下水盆の基盤高分布をKG推定するが、これに先立ち、パラメータの最尤推定を行うと同時に、モデルの適合度を測る4規準[式(4)~(7):AIC, BIC, ϕ , d_M]を算出し、最適統計モデルを選び出すというモデル構造同定を行う。本稿では、トレンド関数に7通り[表1中に記載]、共分散関数に5通り[式(8)~(12)]の計35モデルを想定した。その結果を表1に示す。これより4規準が共通に最小となる最適統計モデルがあり、それはトレンド関数が二次元一次型、共分散関数が一次元球状型であった。図2に同モデルに対する基盤高分布をKG推定した結果とボーリング位置(丸印:76箇所)を示す。図2には不自然さがなく、妥当な結果と思われる。

4. 水位分布 CK 推定

本節で想定した統計モデルは前節と同じである。ただし、自己共分散関数 $C_{hh}(x)$ 、 $C_{bb}(x)$ 、相互共分散関数 $C_{hb}(x)$ に共通して含まれる相関関数 $R(x)$ は全て同形とし、式(13)~(15)の様に示した。ここでは1993年10月22日の貯留状況を解析対象とした。以降の推定解析では前節同様、モデル構造同定を行った後CK推定する。基盤高の自己共分散関数が一次元球状型と決定していることから相関関数が定まり、共分散関数の型は選択する必要がない。従ってトレンド関数



● Sampling (or Observed) #1
○ Sampling (or Observed) #2
☆ Estimated

図1: cokriging 概念

$$\tilde{h} = b + (h - b) \cdot u \{ h - b \} \quad (h: \text{地下水位}, b: \text{基盤高}) \quad (1)$$

$$\tilde{h}^* = \lambda_1 \tilde{h}_1 + \dots + \lambda_n \tilde{h}_n + \nu_1 b_1 + \dots + \nu_m b_m \quad (n: \text{水位観測数}, m: \text{ボーリング数}) \quad (2)$$

$$b^* = \zeta_1 b_1 + \dots + \zeta_m b_m \quad (3)$$

$$AIC = -2MLL + 2K \quad (MLL: \text{最大対数尤度}) \quad (4)$$

$$BIC = -2MLL + K \ln(N) \quad (5)$$

$$\phi = -2MLL + cK \ln(\ln(N)) \quad (\text{通常 } c = 2) \quad (6)$$

$$d_M = -2MLL + K \ln(N/2\pi) + \ln|F_M| \quad (7)$$

$$(K: \text{パラメータ数}, N: \text{観測数}, F_M: \text{Fisherの情報行列})$$

$$\text{一次元指数型} : \sigma^2 \exp \left\{ -\frac{d_1}{a_1} \right\} \quad (d_1: \text{二点間距離}) \quad (8)$$

$$\text{一次元ガウス型} : \sigma^2 \exp \left\{ -\left(\frac{d_1}{a_1} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

$$\text{一次元球状型} : \sigma^2 \left\{ 1 - 1.5 \left(\frac{d_1}{a_1} \right) + 0.5 \left(\frac{d_1}{a_1} \right)^3 \right\} \quad (0 \leq d_1 \leq a_1) \quad (10)$$

$$\text{二次元指数型} : \sigma^2 \exp \left\{ -\sqrt{\left(\frac{d_1}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{a_2} \right)^2} \right\} \quad (11)$$

$$\text{二次元ガウス型} : \sigma^2 \exp \left\{ -\left[\left(\frac{d_1}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{a_2} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

$$C_{hh} = \sigma_h^2 R(x) \quad (\sigma_h^2: \text{水位分散値}) \quad (13)$$

$$C_{bb} = \sigma_b^2 R(x) \quad (\sigma_b^2: \text{基盤高分散値}) \quad (14)$$

$$C_{hb} = \rho \sigma_h \sigma_b R(x) \quad (\rho: \text{相互相関係数}) \quad (15)$$

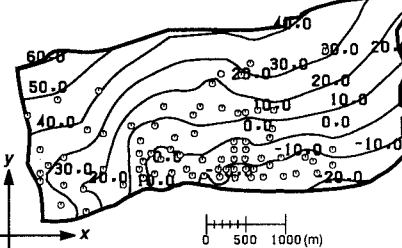


図2: KG 推定による基盤高分布

Key words: 地下水位, 基盤高, 情報量規準, kriging, cokriging

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 TEL: 075-753-6153 FAX: 075-753-6346

〒631-0052 奈良市中町3327-204 TEL: 0742-43-7273 FAX: 0742-43-7273

だけを選択すればよいが、本研究では他のモデルについても同様の評価を行い、上述のランダムモデル決定論の妥当性を検証した。まず図 3 に、両者無相関とした場合の水位分布の CK 推定結果⁶⁾を水位観測井配置(丸印:86箇所)とともに示す。等水位線の描かれた領域($V_{1/2}^*$)が貯留域

表 1: KG 統計モデルの適合順位 (基盤高)

トピック	対数変数	AIC	BIC	順位	順位
無次元	次元数	550.81	607.20	43.83	18
	次元数	618.04	644.34	31.84	34
	次元数	648.19	684.13	21.13	42
	次元数	648.87	684.19	21.13	43
	次元数	691.33	730.06	15.06	49
次元	次元数	648.81	684.13	21.13	42
	次元数	577.22	655.54	29.54	35
	次元数	445.63	545.96	44.96	49
	次元数	445.61	545.92	44.92	50
	次元数	585.85	627.50	39.50	38
次元	次元数	444.72	545.94	44.94	48
	次元数	584.63	627.76	39.76	39
	次元数	442.07	545.39	45.39	46
	次元数	648.81	684.19	21.19	43
	次元数	607.79	651.33	31.33	33
(h)	次元数	632.92	682.68	22.68	40
	次元数	598.95	650.67	28.67	36
	次元数	449.76	559.08	45.08	47
	次元数	648.81	684.19	21.19	43
	次元数	606.32	648.93	31.93	32
(h + h ₂)	次元数	449.67	558.12	45.12	46
	次元数	573.34	650.79	30.79	37
	次元数	632.92	682.68	22.68	40
	次元数	445.12	545.08	45.08	44
	次元数	580.14	627.49	39.49	37
(h + h ₂ + h ₃)	次元数	440.84	545.49	45.49	44
	次元数	598.72	650.38	29.38	34
	次元数	439.16	545.79	45.79	43
	次元数	648.81	684.19	21.19	43
	次元数	603.83	651.82	30.82	31
(h + h ₂ + h ₃ + h ₄)	次元数	438.37	545.02	45.02	42
	次元数	518.14	627.49	39.49	36
	次元数	434.45	544.10	45.10	41
	次元数	439.26	545.34	45.34	43
	次元数	518.14	627.49	39.49	36

表 2: CK 統計モデルの適合順位 (水位)

統計モデル		AIC		BIC		dev		
モデル	変分係数	順位	順位	順位	順位	順位	順位	
簡次元 (b)	一次変数	840.52	16	865.02	13	850.34	15	652.51
	二次変数	1127.80	31	1152.31	20	1137.83	30	1129.34
	三次変数	535.97	10	560.97	9	546.97	8	538.97
	四次変数	844.77	19	872.56	18	855.05	19	849.47
	五次変数	1189.53	35	1196.31	32	1190.30	33	1142.32
	六次変数	575.12	11	590.12	10	575.12	9	567.12
	七次変数	1019.13	25	1037.92	24	1021.31	25	1019.13
	八次変数	812.03	2	839.92	2	825.31	2	806.91
	九次変数	1178.50	33	1197.50	31	1182.75	32	1170.50
	十次変数	1013.95	27	1044.83	26	1029.49	27	1008.57
(a) + b ₂	一次変数	841.30	17	869.06	16	853.56	17	655.15
	二次変数	1178.50	33	1197.50	31	1182.75	32	1170.50
	三次変数	537.51	10	565.16	14	549.73	13	535.10
	四次変数	844.95	20	875.30	20	857.49	20	840.55
	五次変数	1128.77	34	1158.65	24	1141.31	34	1143.81
	六次変数	538.15	11	565.80	15	550.43	14	538.15
	七次変数	1048.14	28	1075.93	28	1060.42	28	1006.45
	八次変数	826.83	10	854.94	8	838.11	9	844.10
	九次変数	1033.31	29	1061.10	29	1045.73	29	1033.31
	十次変数	1059.53	30	1086.41	30	1071.07	30	1074.25
(a) + b ₂ + b ₃	一次変数	826.35	9	854.94	8	838.88	10	844.10
	二次変数	1026.81	26	1054.60	26	1039.24	26	1026.81
	三次変数	512.44	3	547.25	3	531.94	3	522.85
	四次変数	821.85	7	855.92	9	839.64	7	836.94
	五次変数	1012.02	24	1040.00	24	1024.58	24	1012.02
	六次変数	844.08	18	873.96	19	855.62	18	845.19
	七次変数	1127.00	30	1157.91	33	1139.57	32	1141.19
	八次変数	828.39	15	862.10	17	845.76	16	842.77
	九次変数	1041.88	29	1071.67	31	1055.18	31	1041.88
	十次変数	1129.85	35	1163.81	35	1145.64	35	1145.35
(a) + b ₂ + b ₃ + b ₄	一次変数	820.70	6	861.57	5	833.23	6	825.55
	二次変数	991.07	21	1020.86	21	1004.39	21	991.07
	三次変数	606.84	4	637.77	4	619.38	4	606.20
	四次変数	818.30	8	852.29	8	832.06	8	835.34
	五次変数	1017.54	27	1047.54	27	1032.04	27	1017.54
	六次変数	844.08	18	873.96	19	855.62	18	845.19
	七次変数	1127.00	30	1157.91	33	1139.57	32	1141.19
	八次変数	828.39	15	862.10	17	845.76	16	842.77
	九次変数	1041.88	29	1071.67	31	1055.18	31	1041.88
	十次変数	1129.85	35	1163.81	35	1145.64	35	1145.35

であり、その領域を囲む太線部が移動境界となる渚線 (S_t) を表す。続いて相関のある場合のモデル構造同定を行い (表 2)、この場合の最適モデルによる CK 推定を行った。図 4 は、AIC, BIC, ϕ が指す最適トレンドモデルの二次元一次関数を使った結果であり、図 5 は、 d_M が指す最適トレンドモデルの x 次元一次関数を使った結果である。最適な共分散関数モデルは 4 規準とも一次元球状型であり、各々の相互相関係数同定値は順に 0.5040, 0.5031 であった。最適モデルの共分散関数は基盤高と同一のものが選ばれていることから、本稿のような CK のモデル選択はトレンド関数のみでよいと言える。図 4, 5 はいずれも図 3 と比べて観測井の少ない周辺域で分布や S_t 位置に違いが見受けられ、水位計測データの不足分を基盤高との相関性で補うという CK の特徴的效果が見い出せる。この効果は、その周辺域の S_t を図 3 と比べて多少滑らかになっていることから再現性を向上させ得ると言える。

5. 結論

本稿のCKによる水位分布推定は、基盤高との相関性を考慮した結果、特に観測井の少ない周辺領域でCK推定の特徴を見出した。更に相関性のある他変量の計測データも活用したCK推定は、推定結果の再現性を向上させることがわかった。また基盤高分布の最適モデルが決定的であれば、水位分布のモデル構造同定は容易になることがわかった。最後に本研究を進めるにあたり、清水建設㈱和泉研究室の鈴木 誠氏・本多 眞氏に有益な助言をいただいた。また農用地整備公団宮古地下ダム事業所の方々には貴重なデータを提供していただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Carrera, J., and S. P. Neuman: Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, 1. Maximum likelihood method incorporating prior information, *Water Resour. Res.*, 22(2), pp.199-210, 1986. 2) Cressie, N.: *Statistics for spatial data*, A Wiley-Interscience Publication, New York, pp.13-17, 1991. 3) 鈴木 誠・井 清: 土地定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法, 土木学会論文集, No.394/III-9, pp.97-104, 1988. 4) 本多 眞・鈴木 誠・田上 穂・近藤寛明: 地形情報を用いた基礎地盤面のモデル化と推定, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.63-74, 1997. 5) 浜口俊雄・村上 章・長谷川高士: 平面解析で移動解析を考慮した地下水モデルと地盤解析への応用, 土木学会論文集, No.568/III-39, pp.133-145, 1997. 6) 浜口俊雄・長谷川高士・青山成康: 基礎面との相関性を考慮した地盤統計学に基づく地下水位分布推定, 第34回地盤工学研究発表会講演集(投稿中), 1999. 7) Parzen, E., K. Tanabe and G. Kitagawa Editors: *Selected paper of Hirotugu Akaike*. Springer, pp.215-222, 1998.

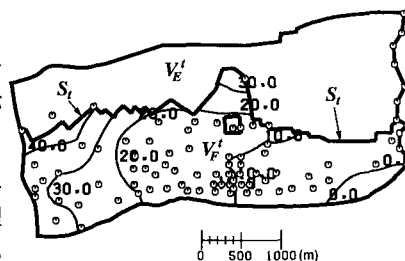


図 3: 水位分布KG推定(無相関)

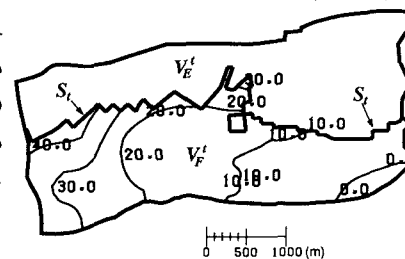


图 4: 水位分布 CK 推定 (AIC, BIC, ϕ 最小)

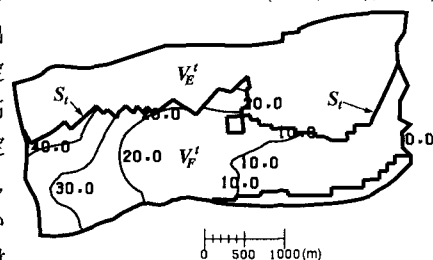


図 5: 水位分布CK推定 (d_M 最小)