

## 5.5 地下水位観測方法

### 5.5.1 調査方法

本プロジェクトにおいては、次項に記す井戸（自記水位計設置地点は除く）で、以下の村民が毎週1回（月曜日の朝、ポンプ稼働前）、携帯式水位計によって観測を実施した。

- 稼働している深井戸：ポンプオペレータ
- 稼働していない深井戸：ポンプオペレータがいない場合には、村長等によって選定された村民
- 公共の浅井戸：村長等によって選定された村民
- 私的な浅井戸：井戸オーナー

### 5.5.2 調査地点

調査地点の選定は、2008年8月中旬から月末にかけて実施したが、雨期のために観測候補地点までのアクセス状況が悪く、実際に選定できた地点は計画していた23地点中12地点であった。この12地点においては、選定が終わりしだい測定を開始した。また、残りの11地点は乾期の2008年11月中旬から下旬にかけて地点選定を行い、こちらも選定が終わりしだい測定を開始した。

選定した調査井戸の座標と諸元を表5-5-1および表5-5-2に一覧表としてまとめるとともに、調査地点の位置を図5-5-1に示す。

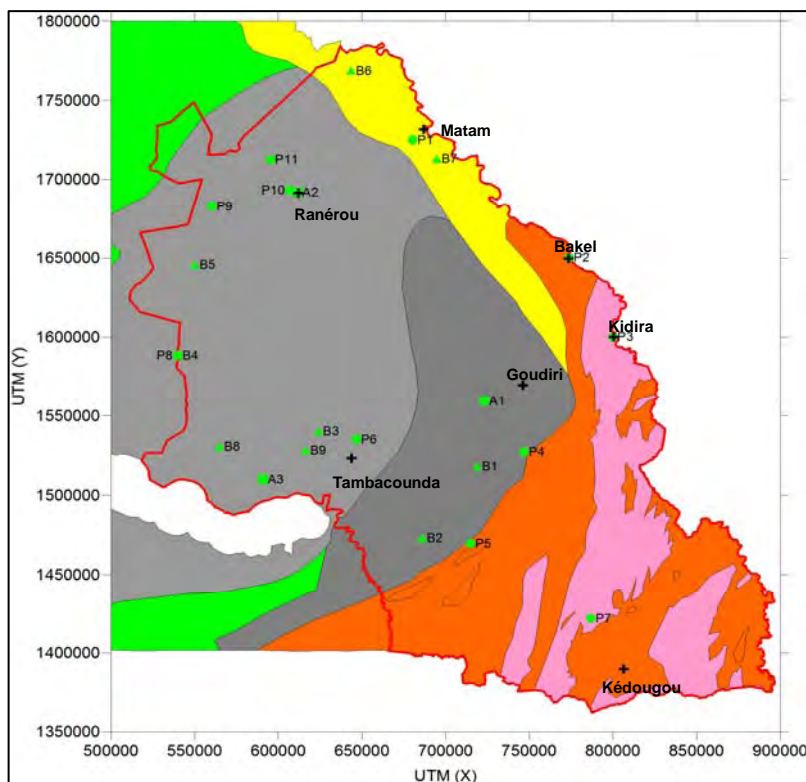


図 5-5-1 地下水位観測地点位置図

表 5-5-1 地下水位観測井座標

No,	村落名	ID_IRH	UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)
手掘り井戸					
P1	OURO SOGUI		680 306	1 725 123	17,950
P2	BAKEL		773 636	1 650 199	24,744
P3	KIDIRA		799 937	1 600 202	31,180
P4	SOUTOUTA		746 897	1 527 139	85,030
P5	MANSADALLA		714 886	1 469 637	30,714
P6	MàYéL DIBI		646 688	1 535 074	23,093
P7	MAKO		786 846	1 422 010	82,298
P8	DAROU MANA		539 832	1 588 413	28,141
P9	NAKAR		560 229	1 682 875	36,250
P10	BELE NDENDI		606 787	1 693 220	28,900
P11	VENDOU KATANE		595 269	1 712 572	48,410
ボアホール					
B1	BANTANANI	20-1X-0001	718 946	1 518 140	93,212
B2	DIALACOTO	19-9X-0001	685 975	1 473 132	41,364
B3	BOUDOR BORDOR		623 971	1 540 170	33,133
B4	DAROU MANA	13-5X-0004	539 832	1 588 413	59,138
B5	BELEL TOUFFLE	13-2X-0002	550 171	1 645 732	19,080
B6	AGNAM CIVOL	08-2X-0004	643 560	1 768 720	7,400
B7	KANEL F4	08-6X-0011	694 685	1 713 056	25,120
B8	DIAGLE SINE	18-2X-0005	564 878	1 530 462	77,229
B9	SINTHIU MALEME	19-1X-0003	616 249	1 528 300	14,910
A1	BOYNGUEL BAMBA	15-7X-0001	723 111	1 559 478	74,892
A2	RANEROU		611 650	1 691 821	29,610
A3	FADIA KOUNDA	18-6X-0007	590 878	1 509 973	37,960

表 5-5-2 観測井（ボアホール・DGPRE 観測井）諸元

No	村落名	ID_IRH	掘削深度 (m)	井戸深度 (m)	スクリーン 深度 (m)	帯水層	静水位 (m)	揚水量 (m <sup>3</sup> /h)	水位 降下 (m)
ボアホール									
B1	BANTANANI	20-1X-0001	239	234,29	211,01~ 230,89	Ma 層			
B2	DIALACOTO	19-9X-0001	161,58	161,41	136,46~ 156,56	Ma 層	21,3	25,5	56,29
B3	BOUDOR BORDOR								
B4	DAROU MANA	13-5X-0004	127,5	121,57	101,57~ 116,57	CO 層	48,7	48,6	12,51
B5	BELEL TOUFFLE	13-2X-0002	330	328	307,86~ 325	Ma 層	16,69	41	8,56
B6	AGNAM CIVOL	08-2X-0004		286,70	241~ 261	Ma 層	9	30	13,53
B7	KANEL F4	08-6X-0011	47	25	23,5~ 24,5	Ma 層	15,39	31	7,98
B8	DIAGLE SINE	18-2X-0005	147	145	137~ 145	CO 層	57,6	13,5	6
B9	SINTHIU MALEME	19-1X-0003	169	156,92	120,47~ 151,11	始新統	17,2	44	4,17
A1	BOYNGUEL BAMBA	15-7X-0001				Ma 層	51,68		
A2	RANEROU								
A3	FADIA KOUNDA	18-6X-0007	88	84	73~ 78	漸-中新統	15,19	40	1,84

### 5.5.3 自動水位記録計による観測結果

自動水位記録計の設置位置とその概要は表 5-5-3 に示すとおりである。

表 5-5-3 設置情報

設置地点名称	Fadia Kounda	Boynguel	Ranerou	MedinaDiakah	Diawara
日付	2008/9/21	2008/9/22	2008/12/16	2009/7/22	2008/7/22
井戸タイプ	DGPRES 観測井	DGPRES 観測井	DGPRES 観測井	本調査試掘井	本調査試掘井
測定感覚	1heure	1heure	1heure	1heure	1heure
設定単位	cm	cm	cm	cm	cm
Levellogger 番号	1034056	1034054	1034070	0041043085	0041042246
Barologer 番号	1034271	1034254	1034269	0011042758	0011042724

表 5-5-4 設置状況写真



各測定地点での測定結果は以下の通りである。

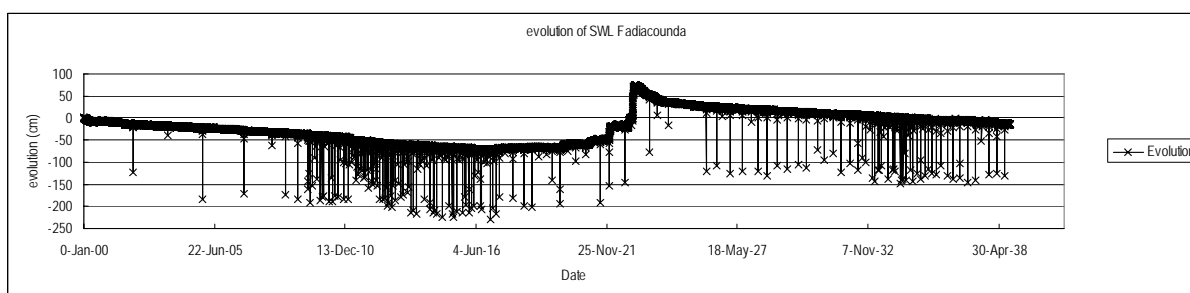


図 5-5-2 水位の変動 (地点 : Fadiacounda)

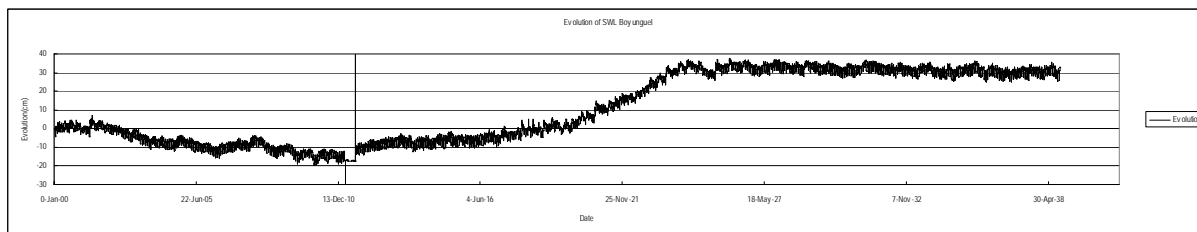


図 5-5-3 水位の変動 (地点 : Boyunguel)

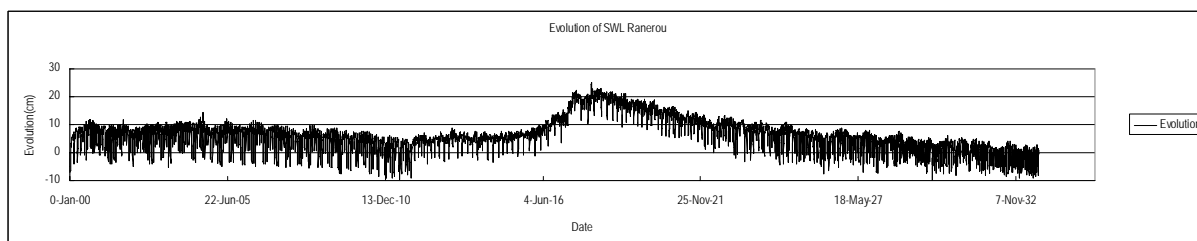


図 5-5-4 水位の変動(地点 : Ranerou)

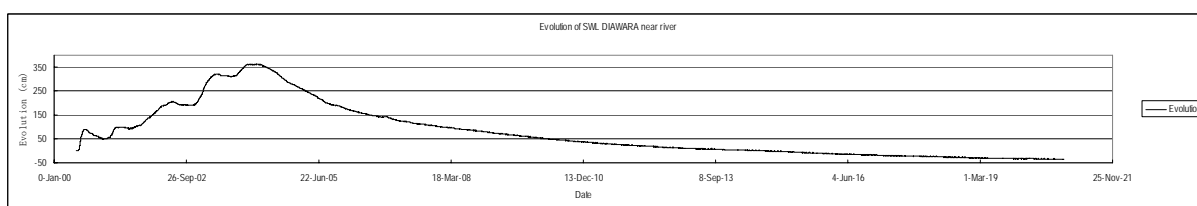


図 5-5-5 水位の変動(地点 : Diawara )

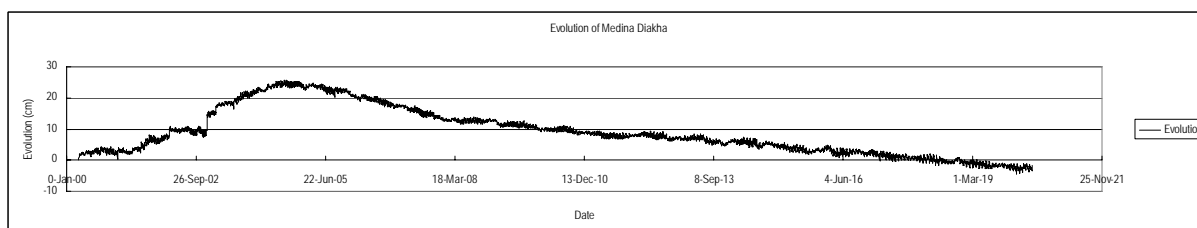


図 5-5-6 水位の変動(地点 : Medina Diakha)

## 5.6 水文（気象・河川流量）調査方法

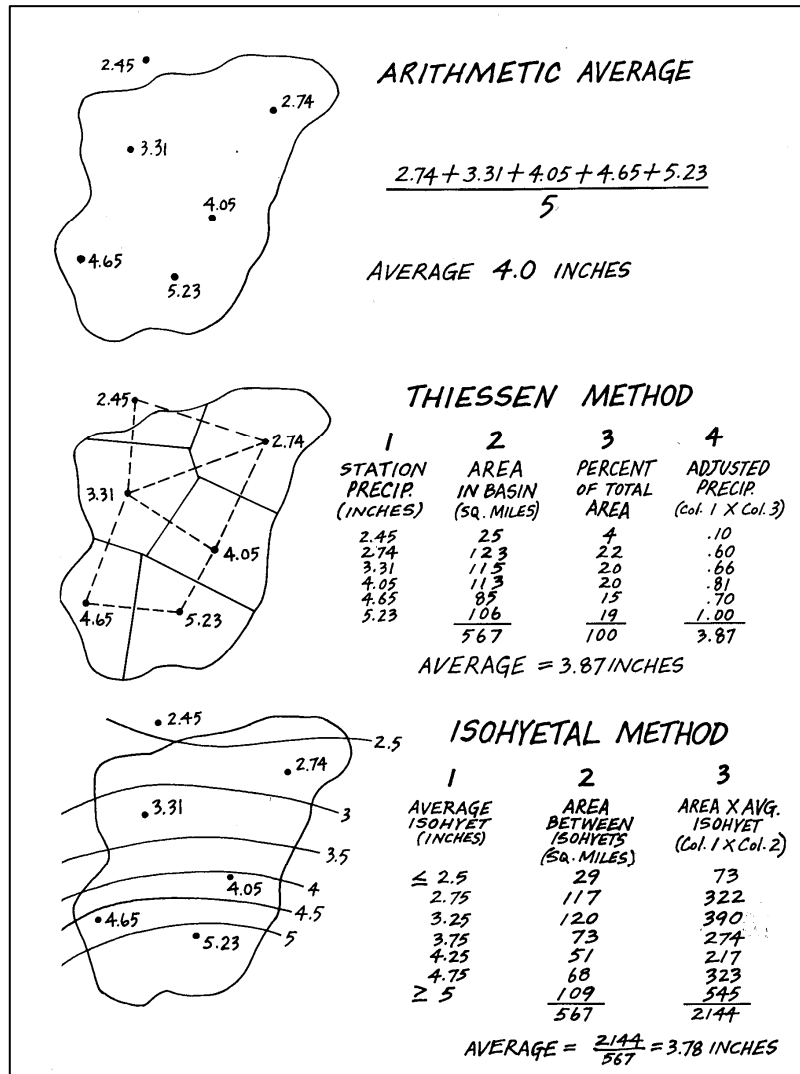
### 5.6.1 気象調査方法

#### (1) 面積雨量の算定方法

##### 1) 調査目的および調査方法

雨量計によって観測される雨量は、観測地点における雨量であり、地点雨量（point rainfall）と呼ばれる。一方、対象地域全体に降る雨量は面積雨量（areal rainfall）と呼ばれる。面積雨量は直

接測定できないため、地点雨量を以下に示す方法などで加重平均することによって算定されることが多い（図 5-6-1 参照）。本プロジェクトにおいては、①いつも同じ結果が得られる、②個人的な誤差が入らない、という利点を有するという理由で広く用いられているティーセン法で面積雨量の推計を行なった。



(出典：Applied principles of hydrology, p70, John C. Manning, 1987)

図 5-6-1 面積雨量の算定方法

● 算術平均法 (Arithmetic average method)

算術平均法は、対象地域の地点雨量を単純に算術平均する方法である。地域内に観測点が数多く適切に配置されている場合には、比較的高い推定精度が期待できる。

$$R_A = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) / n = \sum R_i / n$$

ここに、 $R_A$  は地域の面積雨量、 $R_i$  は地点雨量である。

● ティーセン法 (Thiessen method)

ティーセン法は、隣接する雨量観測点を結ぶ直線の垂直 2 等分線によって作られる多角形の面積を重みとして平均を求める方法である。

$$R_A = (A_1 R_1 + A_2 R_2 + \dots + A_n R_n) / (A_1 + A_2 + \dots + A_n) = \sum A_i R_i / \sum A_i = \sum A_i R_i / A_A$$

ここに、 $A_A$ は対象地域の総面積、 $A_i$ は多角形の面積である。

ティーセン法は算術平均法よりも精度が高いと考えられている。

● 等雨量線法 (Isohyetal method)

等雨量線法は、地点雨量に基づいて等雨量線図を描き、隣り合う等雨量線に挟まれた面積とその当雨量線の雨量平均値から面積雨量を求める方法である。

$$R_A = (A_1\bar{R}_1 + A_2\bar{R}_2 + \dots + A_n\bar{R}_n) / (A_1 + A_2 + \dots + A_n) = \sum A_i\bar{R}_i / \sum A_i = \sum A_i\bar{R}_i / A_A$$

ここに、 $A_i$ は隣り合う等雨量線に挟まれた面積、 $\bar{R}_i$ は隣り合う等雨量線の雨量平均値である。

2) ティーセン分割

ティーセン分割に用いた雨量観測所は、以下の基準で選定した。

- タンバクンダ・マタム州内においては、Météorologie Nationale が主要観測所と位置づけている観測所
- タンバクンダ・マタム州外においては、周辺諸国を含めた観測所の中で、WMO の欠測データが少ない観測所(後記するタンクモデルによる流出解析のために1988年から2007年までのデータに欠測が少ない観測所)

使用した観測所の諸元を表5-6-1に示す。また、ティーセン分割の結果は図5-6-2に示すとおりである。

表 5-6-1 ティーセン分割に使用した気象観測所の諸元

観測所名	国	緯度 (°)	経度 (°)	UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)
Matam	「セ」国	15,650	-13,250	687 583	1 730 994	17
Semme	「セ」国	15,200	-12,950	720 225	1 681 480	40
Ranérou	「セ」国	15,300	-13,966	611 011	1 691 772	33
Bakel	「セ」国	14,900	-12,400	779 733	1 648 898	25
Kidira	「セ」国	14,300	-12,100	812 881	1 582 862	35
Goudiri	「セ」国	14,183	-12,716	746 512	1 569 203	59
Tambacunda	「セ」国	13,767	-13,683	642 377	1 522 347	50
Kédougou	「セ」国	12,567	-12,217	802 415	1 390 852	167
Linguere	「セ」国	15,383	-15,177	487 444	1 700 692	21
Dialakoto	「セ」国	13,317	-13,300	684 138	1 472 821	50
Kenieba	マリ	12,850	-11,233	909 010	1 423 541	132

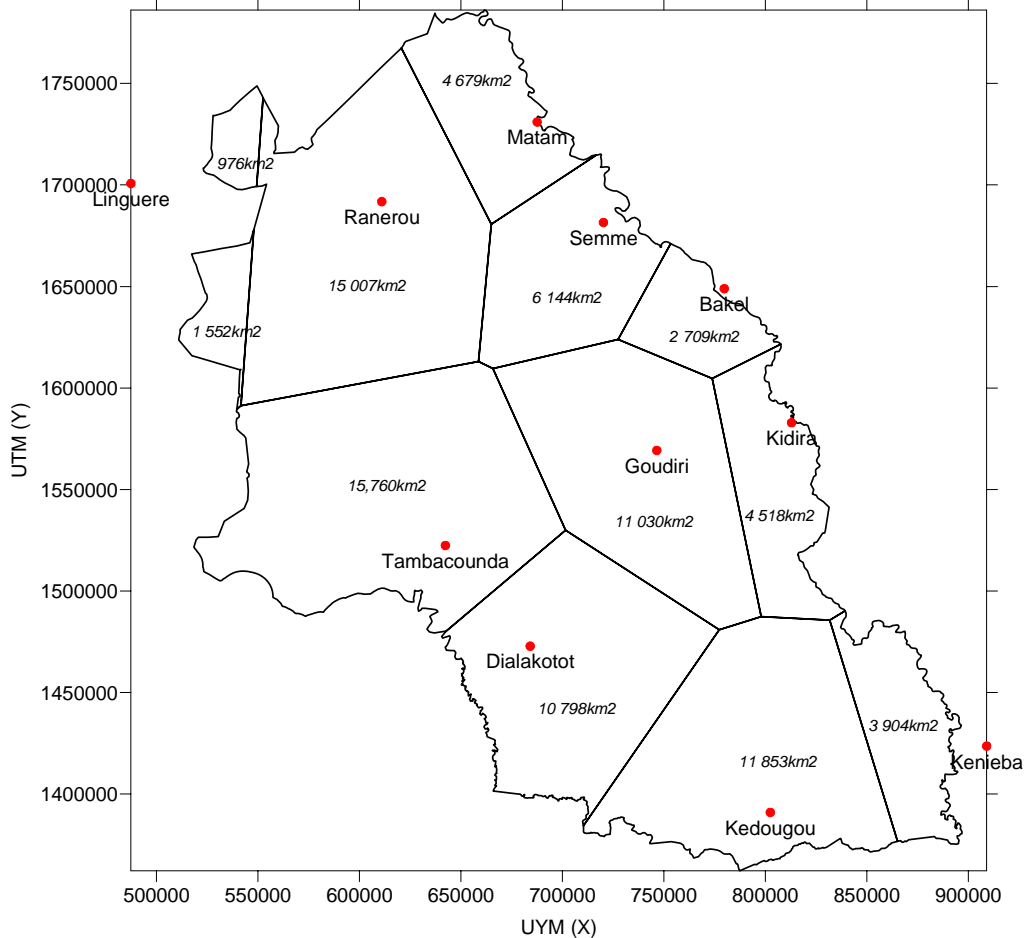


図 5-6-2 ティーセン分割結果

## (2) 確率雨量の算定

### 1) 調査目的

本項調査は、渇水および豊水の状況を確率雨量で把握して、シミュレーションによる予測計算を実施する際に、渇水年や豊水年の発生を含んだシナリオを作成するための基礎資料を得ることを目的とした。

### 2) 確率雨量とは

降雨に起因して起こる水文現象（洪水流量や渇水流量など）は降雨の統計的性質に依存するので、確率的に求められる水文諸量を確率水文量といい、降雨に対しては確率雨量、河川流量に対しては確率流量と呼ばれている。また、用いる確率密度関数（正規分布、対数正規分布、グンベル分布等）やその解放の違い等によって、超過確率および非超過確率を求めるための様々な方法が提唱されている。

確率密度関数  $f(x)$  は、ある事象が  $x$  の値となる確率を表している。しかし、一般には対象とする事象がある値以上または以下になる確率の方が重要である。前者を超過確率、後者を非超過確率という。確率密度関数  $f(x)$  が与えられれば、ある値  $c$  に対する超過確率  $W(c)$  は、 $c$  以上あるいは  $c$  以下の部分の面積を計算することによって求めることができる。

超過確率：
$$W(c) = \int_c^{\infty} f(x)dx$$

非超過確率：
$$S(c) = \int_{-\infty}^c f(x)dx = 1 - W(c)$$

また、超過確率の逆数  $T=1/W(c)$  をある事象値  $c$  に対する再現期間またはリターンピリオドという。逆にある再現期間に対する事象値  $c$  は、 $T$  年確率値と呼ばれる。

本プロジェクトにおいては、岩井法、石原・高瀬法、ガンベル法、トーマス法、ヘイゼン法で確率雨量の計算を行い、比較を行っている。

### 3) 調査結果

表 5-6-2 および図 5-6-3 に示す雨量観測所において、年間雨量の確率計算を実施した。

確率年間雨量の計算結果を表 5-6-3～表 5-6-16 に示す。また、トーマス法を用いた渇水年と豊水年の 10 年確率、30 年確率、50 年確率、100 年確率の年間雨量分布をメインレポートに示している。

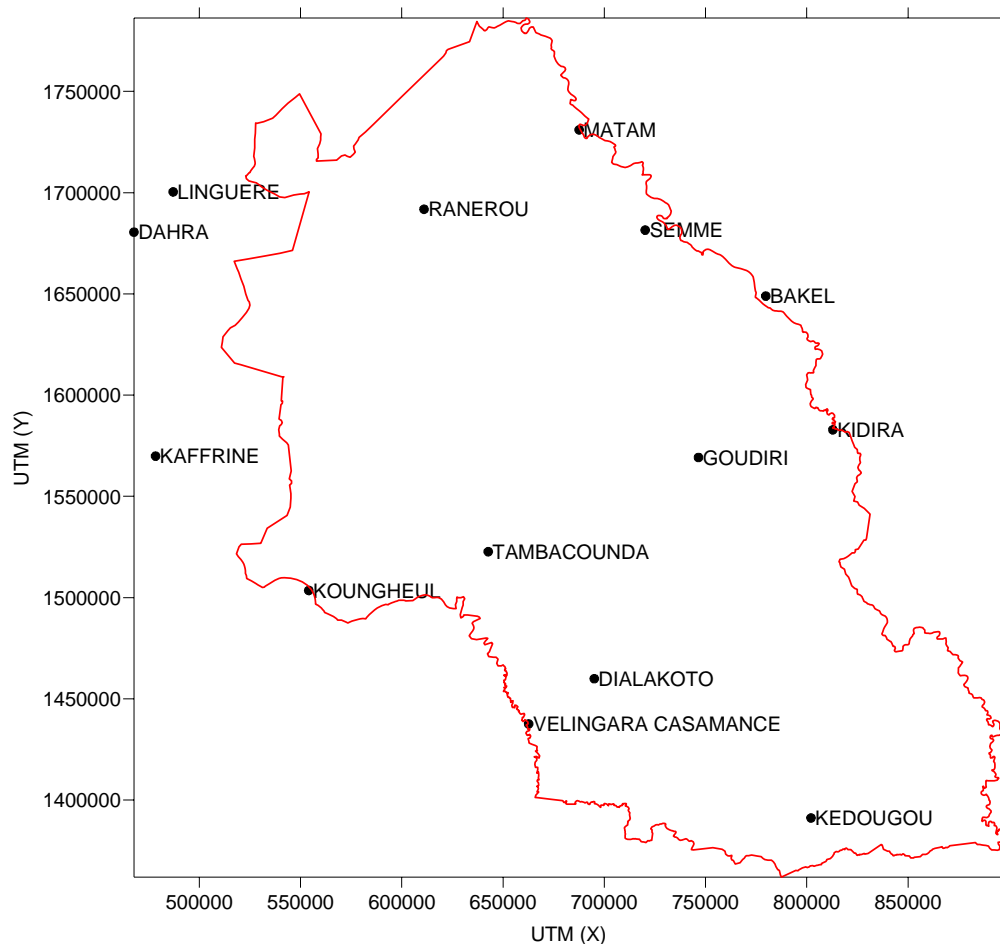


図 5-6-3 確率雨量計算を実施した気象観測所



表 5-6-2 確率雨量計算を実施した気象観測所の諸元

観測所名	国	緯度 (°)	経度 (°)	UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)
Linguere	「セ」国	15,383	-15,177	487 444	1 700 692	21
Dahra	「セ」国	15,200	-15,300	467 778	1 680 469	39
Matam	「セ」国	15,650	-13,250	687 583	1 730 994	17
Bakel	「セ」国	14,900	-12,400	779 733	1 648 898	25
Kaffrine	「セ」国	14,200	-15,200	478 421	1 569 855	11
Tambacounda	「セ」国	13,767	-13,683	642 377	1 522 347	50
Dialakoto	「セ」国	13,317	-13,300	684 138	1 472 821	50
Kidira	「セ」国	14,300	-12,100	812 881	1 582 862	35
Koungheul	「セ」国	13,600	-14,5	554 088	1 503 545	11
Vwlingara Casamance	「セ」国	13,000	-13,500	662 679	1 437 615	38
Kédougou	「セ」国	12,567	-12,217	802 415	1 390 852	167
Goudiri	「セ」国	14,183	-12,716	746 512	1 569 203	59
Ranérou	「セ」国	15,300	-13,966	611 011	1 691 772	33
Semme	「セ」国	15,200	-12,950	720 225	1 681 480	40

表 5-6-3 Linguere 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	—	189,0	197,2	125,5	223,3
	500	—	200,9	208,9	147,1	233,9
	200	—	219,0	226,9	178,5	250,0
	150	—	225,4	233,2	189,1	255,7
	100	—	235,2	242,8	204,8	264,2
	70	—	244,6	252,0	219,4	272,3
	50	—	254,3	261,5	234,0	280,7
	30	—	270,8	277,6	257,9	294,8
	20	—	285,8	292,3	278,7	307,6
	10	—	317,1	322,7	319,4	334,2
	5	—	359,6	363,8	369,9	370,3
2	2	—	457,4	457,4	470,3	455,4
5		—	581,9	575,3	576,0	569,8
10		—	659,9	648,5	633,5	645,5
20		—	732,2	715,9	682,0	718,2
30		—	772,9	753,7	707,7	760,0
50		—	823,0	800,2	738,0	812,3
70		—	855,5	830,3	756,9	846,5
100		—	889,7	861,9	776,1	882,8
150		—	928,3	897,4	797,1	923,9
200		—	955,5	922,4	811,5	953,0
500		—	1 041,8	1 001,6	855,2	1 045,6
1000		—	1 106,9	1 061,1	886,3	1 115,7

表 5-6-4 Dahra 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	162,1	102,2	119,9	204,0	36,7
	500	167,4	111,3	129,2	206,9	51,6
	200	176,0	125,8	143,8	211,7	74,0
	150	179,2	131,1	149,0	213,5	81,8

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	100	184,2	139,2	157,0	216,5	93,7
	70	189,3	147,1	164,7	219,5	105,0
	50	194,6	155,4	172,8	222,8	116,6
	30	204,1	169,8	186,7	228,8	136,2
	20	213,2	183,3	199,6	234,8	154,0
	10	233,5	212,3	226,9	248,8	191,0
	5	264,0	253,6	264,9	271,1	241,3
2	2	346,4	356,4	356,4	338,4	359,6
5		475,4	500,9	479,5	459,0	518,7
10		569,6	598,4	560,0	556,3	624,1
20		666,0	693,1	636,5	662,3	725,1
30		723,9	748,1	680,3	729,0	783,3
50		799,1	817,6	735,1	818,4	856,0
70		850,1	863,7	771,1	880,7	903,6
100		905,4	912,9	809,3	949,9	954,0
150		970,1	969,3	852,7	1 032,7	1 011,2
200		1 017,2	1 009,8	883,7	1 094,2	1 051,7
500		1 174,2	1 141,1	983,1	1 306,0	1 180,6
1000		1 300,3	1 243,2	1 059,4	1 483,3	1 278,0

表 5-6-5 Matam 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	73,9	127,9	135,2	10,7	139,1
	500	92,6	138,6	146,0	38,2	151,8
	200	120,5	155,5	162,8	77,8	171,1
	150	130,2	161,6	168,9	91,2	177,8
	100	144,7	170,9	178,2	110,9	188,0
	70	158,4	180,0	187,2	129,3	197,7
	50	172,3	189,5	196,6	147,5	207,7
	30	195,4	206,0	212,8	177,2	224,5
	20	216,1	221,3	227,9	203,0	239,8
	10	257,7	253,9	259,8	253,2	271,6
	5	311,6	300,0	304,6	314,9	314,8
2	2	426,7	412,7	412,7	436,0	416,4
5		559,5	567,8	559,3	561,2	553,0
10		636,8	670,9	655,6	628,4	643,5
20		705,2	769,9	747,6	684,8	730,3
30		742,5	827,1	800,4	714,4	780,3
50		787,3	899,0	866,5	749,2	842,7
70		815,9	946,4	910,0	770,8	883,6
100		845,4	996,9	956,2	792,8	926,9
150		878,1	1 054,5	1 008,8	816,6	976,0
200		900,9	1 095,7	1 046,3	833,0	1 010,8
500		971,4	1 228,8	1 167,0	882,4	1 121,4
1000		1 023,1	1 331,6	1 259,8	917,3	1 205,1

表 5-6-6 Bakel 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	190,6	215,3	222,2	189,3	246,3
	500	207,0	227,6	234,5	205,9	257,1
	200	231,4	246,5	253,1	230,6	273,5
	150	239,8	253,1	259,7	239,1	279,2
	100	252,4	263,2	269,6	251,8	287,8
	70	264,2	272,9	279,1	263,7	296,0
	50	276,2	282,8	288,9	275,8	304,5
	30	296,2	299,6	305,4	295,9	318,8
	20	313,9	314,9	320,3	313,8	331,8
	10	349,4	346,6	351,2	349,5	358,7
	5	395,2	389,1	392,5	395,4	395,3
2	2	491,7	485,7	485,7	491,9	481,5
5		601,5	606,1	600,9	601,2	597,5
10		664,7	680,6	671,6	664,0	674,3
20		720,2	748,9	736,3	719,0	747,9
30		750,4	787,1	772,4	748,8	790,3
50		786,5	834,0	816,5	784,6	843,3
70		809,4	864,3	845,0	807,2	878,0
100		833,0	896,1	874,9	830,5	914,7
150		859,2	931,8	908,3	856,3	956,4
200		877,4	956,9	931,9	874,3	985,9
500		933-5	1 036,2	1 005,9	929,5	1 079,8
1000		974,3	1 095,7	1 061,4	969,7	1 150,8

表 5-6-7 Kaffrine 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	—	282,1	304,5	231,6	335,2
	500	—	299,0	321,1	258,4	350,0
	200	—	325,0	346,3	297,6	372,3
	150	—	334,1	355,2	310,9	380,2
	100	—	348,1	368,7	330,6	392,0
	70	—	361,4	381,5	349,0	403,3
	50	—	375,2	394,7	367,5	414,8
	30	—	398,5	417,0	397,8	434,4
	20	—	419,8	437,3	424,4	452,2
	10	—	464,0	478,9	476,6	489,0
	5	—	523,7	534,7	541,9	539,2
2	2	—	660,1	660,1	673,6	657,1
5		—	832,0	814,9	814,8	815,8
10		—	939,1	909,8	892,6	920,9
20		—	1 037,8	996,4	959,0	1 021,7
30		—	1 093,2	1 044,7	994,4	1 079,7
50		—	1 161,4	1 103,8	1 036,2	1 152,1
70		—	1 205,5	1 141,9	1 062,4	1 199,7
100		—	1 251,8	1 181,8	1 089,1	1 249,9
150		—	1 304,0	1 226,5	1 118,4	1 306,9
200		—	13-50,8	1 258,0	1 138,6	1 347,3
500		—	1 457,0	1 356,9	1 199,9	1 475,8
1000		—	1 544,5	1 430,9	1 243,8	1 572,9

表 5-6-8 Tambacounda 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	—	360,8	373,6	227,5	430,3
	500	—	381,1	393,8	268,5	447,2
	200	—	412,1	424,3	327,0	472,6
	150	—	423,0	435,1	346,6	481,5
	100	—	439,6	451,3	375,3	494,9
	70	—	455,5	466,9	401,8	507,8
	50	—	471,7	482,8	428,1	520,9
	30	—	499,3	509,8	470,7	543,2
	20	—	524,3	534,2	507,3	563,5
	10	—	576,0	584,4	577,7	605,3
	5	—	645,4	651,6	663,0	662,3
2	2	—	802,4	802,4	826,4	796,5
5		—	997,6	988,1	989,9	977,0
10		—	1 117,8	1 101,7	1 075,5	1 096,5
20		—	1 228,0	1 205,3	1 146,2	1 211,2
30		—	1 289,5	1 263,0	1 183,0	1 277,1
50		—	1 365,0	1 333,5	1 225,8	1 359,5
70		—	1 413,7	1 379,0	1 252,2	1 413,6
100		—	1 464,7	1 426,6	1 278,9	1 470,7
150		—	1 522,0	1 479,9	1 307,8	1 535,6
200		—	1 562,3	1 517,4	1 327,5	1 581,5
500		—	1 689,4	1 635,2	1 386,4	1 727,7
1000		—	1 784,7	1 723,2	1 427,7	1 838,2

表 5-5-9 Dialakoto 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	200,8	323,5	340,0	146,8	380,5
	500	242,4	345,6	362,1	196,1	402,0
	200	303,0	379,9	396,0	266,6	434,5
	150	323,5	392,1	408,1	290,3	445,9
	100	354,0	410,7	426,4	325,1	463,0
	70	382,4	428,7	444,1	357,4	479,5
	50	410,8	447,2	462,3	389,4	496,3
	30	457,4	479,0	493,5	441,4	524,8
	20	498,1	508,2	521,9	486,4	550,6
	10	577,9	569,3	581,2	573,1	604,2
	5	677,5	653,2	662,2	679,0	677,2
2	2	877,2	849,8	849,8	883,8	848,7
5		1 089,6	1 105,6	1 090,6	1 091,7	1 079,6
10		1 206,0	1 268,6	1 242,5	1 201,7	1 232,4
20		1 304,9	1 421,2	1 383,8	1 293,2	1 379,0
30		1 357,5	1 507,7	1 463,6	1 341,0	1 463,3
50		1 419,5	1 614,9	1 562,1	1 396,8	1 568,8
70		1 458,3	1 684,8	1 626,1	1 431,4	1 637,9
100		1 497,9	1 758,6	1 693,6	1 466,4	1 711,0
150		1 541,2	1 842,1	1 769,7	1 504,4	1 793,9
200		1 571,0	1 901,2	1 823,5	1 530,3	1 852,7
500		1 661,4	2 089,7	1 994,5	1 608,2	2 039,6
1000		1 726,0	2 232,9	2 123,9	1 663,1	2 180,9

表 5-6-10 Kidira 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	220,7	263,6	283,5	198,8	306,7
	500	244,0	278,9	298,3	227,4	320,0
	200	278,0	302,3	321,0	268,3	340,1
	150	289,7	310,5	329,0	281,9	347,1
	100	306,9	323,0	341,1	302,0	357,7
	70	323,0	335,0	352,6	320,5	367,8
	50	339,1	347,3	364,4	338,8	378,2
	30	365,8	368,2	384,3	368,5	395,8
	20	389,1	387,2	402,4	394,1	411,7
	10	435,1	426,5	439,5	443,2	444,8
	5	492,9	479,4	488,9	502,7	489,9
2	2	610,3	599,7	599,7	616,7	595,8
5		737,2	750,1	735,5	730,7	738,3
10		807,6	843,2	818,3	790,4	832,6
20		867,9	928,8	893,7	839,7	923,1
30		900,1	976,7	935,7	865,3	975,2
50		938,3	1 035,5	986,9	895,2	1 040,3
70		962,2	1 073,5	1 019,9	913,6	1 083,0
100		986,7	1 113,3	1 054,4	932,2	1 128,1
150		1 013,5	1 158,1	1 093,0	952,3	1 179,3
200		1 032,1	1 189,7	1 120,1	966,1	1 215,6
500		1 088,5	1 289,3	1 205,4	1 007,1	1 331,0
1000		1 129,0	1 364,1	1 269,0	1 036,0	1 418,2

表 5-6-11 Kougheul 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	199,6	298,4	324,7	202,6	342,0
	500	236,7	318,8	344,9	244,4	362,2
	200	290,7	350,3	375,9	304,0	392,6
	150	309,0	361,5	386,8	323,9	403,3
	100	336,2	378,6	403,5	353,2	419,3
	70	361,5	395,2	419,5	380,2	434,7
	50	386,9	412,2	436,0	406,9	450,5
	30	428,5	441,4	464,2	450,2	477,2
	20	464,9	468,2	489,8	487,5	501,4
	10	536,3	524,4	543,1	559,2	551,6
	5	625,4	601,5	615,5	646,0	619,9
2	2	804,2	781,9	781,9	812,1	780,6
5		994,8	1 016,4	993,2	978,3	996,8
10		1 099,3	1 165,8	1 125,6	1 065,2	1 139,9
20		1 188,3	1 305,5	1 248,1	1 137,0	1 277,2
30		1 235,6	1 384,8	1 317,0	1 174,3	1 356,2
50		1 291,4	1 483,0	1 402,0	1 217,8	1 455,0
70		1 326,3	1 547,0	1 457,1	1 244,6	1 519,7
100		1 361,9	1 614,5	1 515,0	1 271,7	1 588,2
150		1 400,9	1 690,9	1 580,3	1 301,0	1 665,8
200		1 427,7	1 745,1	1 626,4	1 321,0	1 720,9
500		1 509,2	1 917,5	1 772,4	1 380,8	1 895,9
1000		1 567,4	2 048,5	1 882,5	1 422,7	2 028,2

表 5-6-12 Vwlingara Casamance 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	507,0	470,6	486,3	511,3	524,7
	500	526,2	493,0	508,3	530,4	542,7
	200	555,6	526,9	541,5	559,4	569,9
	150	565,9	538,7	553,0	569,6	579,4
	100	581,5	556,5	570,5	585,0	593,8
	70	596,5	573,5	587,0	599,9	607,5
	50	611,9	590,9	603,9	615,1	621,6
	30	637,9	620,1	632,3	640,8	645,5
	20	661,5	646,4	657,8	664,2	667,1
	10	710,2	700,1	709,7	712,4	712,0
	5	775,7	771,1	778,1	777,0	773,0
2	2	923,3	927,7	927,7	923,0	916,6
5		1 106,6	1 116,1	1 106,2	1 104,1	1 109,9
10		1 219,4	1 229,3	1 212,7	1 215,5	1 237,8
20		1 322,6	1 331,5	1 308,4	1 317,5	1 360,5
30		1 380,2	1 387,9	1 361,2	1 374,4	1 431,1
50		1 450,8	1 456,6	1 425,2	1 444,1	1 519,4
70		1 496,4	1 500,6	1 466,1	1 489,1	1 577,2
100		1 544,1	1 546,5	1 508,7	1 536,3	1 638,4
150		1 597,7	1 597,7	1 556,3	1 589,2	1 707,8
200		1 635,4	1 633,6	1 589,5	1 626,4	1 757,0
500		1 754,2	1 745,8	1 693,2	1 743,6	1 913,5
1000		1 843,1	1 829,0	1 769,9	1 831,4	2 031,8

表 5-6-13 Kédougou 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	565,0	698,0	714,5	805,4	785,1
	500	611,3	726,1	742,1	822,7	805,3
	200	677,7	768,1	783,3	849,5	835,8
	150	700,0	782,7	797,5	859,1	846,5
	100	732,8	804,6	818,9	873,7	862,6
	70	763,1	825,4	839,2	887,9	878,1
	50	793,3	846,5	859,8	902,6	893,8
	30	842,2	881,8	894,2	927,7	920,6
	20	884,5	913,5	924,9	950,9	944,9
	10	966,2	977,3	986,9	999,5	995,2
	5	1 065,8	1 060,7	1 067,5	1 066,6	1 063,7
2	2	1 258,7	1 240,6	1 240,6	1 225,0	1 224,8
5		1 454,6	1 451,0	1 441,8	1 433,1	1 441,6
10		1 558,2	1 574,9	1 559,6	1 566,8	1 585,2
20		1 644,4	1 685,1	1 664,1	1 692,5	1 722,8
30		1 689,5	1 745,4	1 721,3	1 764,0	1 802,0
50		1 742,1	1 818,3	1 790,2	1 852,8	1 901,0
70		1 774,7	1 864,8	1 834,0	1 910,9	1 965,9
100		1 807,7	1 913,0	1 879,5	1 972,2	2 034,6
150		1 843,5	1 966,5	1 929,9	2 041,7	2 112,5
200		1 868,0	2 003,9	1 965,1	2 091,1	2 167,6
500		1 941,4	2 119,9	2 074,1	2 248,7	2 343,2
1000		1 993,1	2 205,2	2 154,1	2 368,8	2 475,9

表 5-6-14 Goudiri 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	283,3	291,5	317,4	252,5	335,6
	500	301,3	305,6	330,8	275,0	346,6
	200	327,7	326,9	350,9	307,3	363,2
	150	336,7	334,3	357,9	318,2	369,1
	100	350,1	345,6	368,4	334,1	377,9
	70	362,6	356,3	378,4	348,9	386,3
	50	375,1	367,2	388,6	363,5	394,9
	30	395,7	385,7	405,6	387,3	409,5
	20	413,8	402,3	420,9	407,9	422,7
	10	449,6	436,2	451,9	447,6	450,2
	5	494,5	481,1	492,4	496,0	487,5
2	2	585,7	580,4	580,4	589,7	575,4
5		684,5	700,1	684,1	684,8	693,6
10		739,4	772,2	745,4	735,0	771,9
20		786,4	837,4	800,3	776,8	847,0
30		811,5	873,5	830,4	798,7	890,2
50		841,3	917,2	866,8	824,2	944,2
70		860,0	945,4	890,1	840,0	979,6
100		879,1	974,7	914,2	856,0	1 017,0
150		900,1	1 007,5	941,1	873-5	1 059,5
200		914,5	1 030,4	959,8	885,2	1 089,6
500		958,6	1 102,2	1 018,2	920,8	1 185,4
1000		990,3	1 155,6	1 061,3	945,9	1 257,7

表 5-6-15 Ranérou 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	114,6	124,3	138,4	153,0	115,9
	500	127,2	134,0	148,2	161,8	127,9
	200	146,3	149,3	163,3	175,6	145,9
	150	153,0	154,8	168,7	180,5	152,2
	100	163,1	163,2	177,0	188,0	161,8
	70	172,8	171,4	185,0	195,3	170,9
	50	182,7	179,9	193,3	202,9	180,2
	30	199,5	194,6	207,4	215,9	196,0
	20	214,6	208,2	220,5	228,0	210,3
	10	245,7	237,1	247,9	253-5	240,1
	5	287,1	277,4	285,6	288,7	280,6
2	2	379,6	374,7	374,7	373,2	375,8
5		492,7	506,0	491,4	485,8	503,9
10		561,5	592,1	566,3	558,9	588,7
20		624,1	674,1	636,6	628,2	670,0
30		658,8	721,2	676,7	667,8	716,8
50		701,3	780,1	726,3	717,1	775,3
70		728,6	818,8	758,8	749,5	813,7
100		757,1	859,9	793,1	783,8	854,2
150		789,1	906,6	831,9	822,8	900,2
200		811,5	940,0	859,5	850,5	932,8
500		882,0	1 047,1	947,5	939,3	1 036,6
1000		934,5	1 129,5	1 014,5	1 007,3	1 115,0

表 5-6-16 Semme 観測所の確率年間雨量計算 (単位: mm/年)

確率年		岩井法	Thomas 法	Hazen 法	石原・高瀬法	Gumbel 法
超過確率	非超過確率					
	1000	215,3	180,9	200,9	198,1	184,5
	500	225,4	192,9	212,7	210,3	197,2
	200	241,0	211,5	230,8	228,8	216,3
	150	246,6	218,1	237,1	235,3	223,0
	100	255,1	228,1	246,8	245,2	233,1
	70	263,3	237,8	256,1	254,7	242,8
	50	271,9	247,8	265,6	264,4	252,7
	30	286,5	264,9	281,8	280,9	269,4
	20	299,9	280,5	296,6	295,8	284,6
	10	328,1	313,2	327,1	326,7	316,1
	5	367,1	358,0	368,3	368,2	359,1
2	2	459,0	462,1	462,1	462,0	460,0
5		579,7	596,6	579,8	578,7	595,8
10		657,2	681,8	652,8	650,6	685,7
20		730,0	761,3	720,0	716,5	771,9
30		771,4	806,2	757,6	753,3	821,5
50		822,9	861,8	803,9	798,4	883,5
70		856,5	898,0	833,8	827,6	924,2
100		892,0	936,2	865,2	858,1	967,2
150		932,3	979,3	900,5	892,4	1 015,9
200		960,9	1 009,8	925,4	916,5	1 050,5
500		1 052,1	1 106,8	1 004,0	992,5	1 160,5
1000		1 121,6	1 180,4	1 063,0	1 049,5	1 243,6

## (3) 可能蒸発散量の推計

## 1) 蒸発散量とは

水収支項のうちで降水量と流出量については標準的な測定法が確立している。しかし、蒸発散量については測定法、推定法ともに未解決の問題が少なくない。

広域面から大気中へ失われる水蒸気の輸送過程は、一般に蒸発散と呼ばれているが、その中には自由水面からの蒸発、土壌面からの蒸発、植物の葉などに遮断された水の蒸発、植物による蒸散の4過程が含まれている。蒸発散には、水・エネルギー・大気・土壌・植物などの因子が関係しているが、これらの因子が上の4過程に関係する仕方はそれぞれ異なる。従来までは広域面からの蒸発と蒸散をそのメカニズムにまでたちいって区別することができず、水収支調査では両者を一括して扱っていた。そのため、蒸発散の推定は経験的方法にたよる場合が多い。

本プロジェクトにおいては、経験モデルの中で、観測資料が豊富にあり利便性の高い温度法の一つであるゾーンズウェイト法を用いて可能蒸発散量の推計を行なった。推計された可能蒸発散量は、後記するタンクモデルによる流出解析のパラメータの一つと活用した。

## 2) ゾーンズウェイト法 (Thornthwaite method) による推定

ゾーンズウェイト法は、気候学、水文学の分野で広く適用されている方法で、気温と日照時間を変数とした経験式である。Thornthwaite は、丈の低い緑草で、密に覆われた地表面から、水不足の起こらないように給水した場合に失われる蒸発散量を可能蒸発散量と定義し、それを気温だけの関数として次式のように表している。



$$Et = 1,6 (10T/I)^a \quad (\text{式 5-6-1})$$

ここで、Et：可能蒸発散量 (cm/月)、T：月平均気温 (°C)、

$$I = \sum 12 (Ti/5)^{1,514} \quad (\text{式 5-6-2})$$

$$a = (492\,390 + 17\,920 I - 77,1 I^2 + 0,675 I^3) \times 10^{-6} \quad (\text{式 5-6-3})$$

Iは熱示数とよばれ、1月から12月までのTについて総和を求める。(式5-6-1)の関係は気温0～26,5°Cの範囲について有効で、それ以上の温度では表5-6-17の値を採用する。

表 5-6-17 月平均気温 26,5°C以上の月の Et (cm/月)

T (°C)	Et	T (°C)	Et	T (°C)	Et	T (°C)	Et
26,5	13,50	29,5	15,89	32,5	17,53	35,5	18,37
27,0	13,95	30,0	16,21	33,0	17,72	36,0	18,43
27,5	14,37	30,5	16,52	33,5	17,90	36,5	18,47
28,0	14,78	31,0	16,80	34,0	18,05	37,0	18,49
28,5	15,17	31,5	17,07	34,5	18,18	37,5	18,50
29,0	15,54	32,0	17,31	35,0	18,29	38,0	18,50

また、0°C以下の月ではEt = 0と仮定する。(式5-6-1)で求まる値は、昼の長さが12時間の日を30日もつ標準月のEtで、これに表5-6-18の昼の長さに関する補正値を乗じると緯度に応じたEtの月値が得られる。

表 5-6-18 昼の長さの補正値

緯度	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
北緯												
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
15	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94
25	0,93	0,89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70
南緯												
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29
45	1,31	1,09	1,07	0,91	0,82	0,73	0,80	0,90	0,99	1,17	1,24	1,34
50	1,37	1,12	1,08	0,89	0,77	0,67	0,74	0,88	0,99	1,19	1,29	1,41

### 3) 可能蒸発散量の推計結果

本項調査では、前掲のティーセン分割を実施した気象観測所（気温の測定が行われていない Semme、Kidira、Linguere、Dialakoto、Kenieba の5観測所を除く）において、可能蒸発散量の推計を行なった。

タンクモデル計算に使用した可能蒸発散量の値を表 5-6-19～表 5-6-24 に示す。なお、気温が欠測の月は該当する月の平均的な値を用いている。

表 5-6-19 可能蒸発散量の推計 (Matam 観測所、単位：cm/月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	5,84	13,08	17,58	18,62	20,50	19,63	19,39	17,16	16,21	17,48	14,76	7,65
1989	7,32	13,55	16,70	18,43	20,46	19,33	19,12	17,51	17,14	17,24	15,69	13,94
1990	6,04	14,14	18,06	18,77	20,50	19,75	19,39	18,14	17,14	17,90	15,10	9,20
1991	9,33	12,69	16,37	18,43	20,30	19,75	19,39	18,14	17,14	17,24	15,10	10,60
1992	8,83	13,55	16,01	18,23	20,18	19,75	19,39	18,14	17,66	18,08	14,41	13,10
1993	8,15	13,55	17,58	18,91	20,50	19,75	19,63	18,14	16,53	17,71	15,10	8,72
1994	4,87	13,08	17,30	17,18	20,39	19,63	19,12	16,78	16,53	17,24	15,40	9,65
1995	5,63	13,08	17,02	18,43	20,39	19,90	19,85	17,51	16,85	17,48	15,40	8,49
1996	13,94	14,46	17,02	18,43	20,50	19,75	19,39	17,51	17,41	17,71	15,10	8,83
1997	13,53	14,46	15,63	18,00	20,30	19,33	19,12	18,69	16,53	17,48	15,40	7,99
1998	7,70	14,75	17,30	19,10	20,46	19,90	19,39	17,51	16,53	17,48	14,76	9,04
1999	6,45	8,12	17,02	18,62	20,39	19,63	18,16	17,16	16,21	16,97	14,76	9,39
2000	10,64	12,69	17,83	19,02	20,39	19,14	18,16	16,38	16,53	16,05	14,04	9,23
2001	7,70	12,69	17,30	18,23	20,30	19,49	18,50	18,14	16,53	17,24	14,76	13,94
2002	7,41	13,08	16,70	17,75	20,39	19,49	19,39	18,14	17,14	17,48	14,76	13,10
2003	7,26	13,55	17,58	18,77	20,46	19,49	19,39	17,16	15,47	17,24	15,40	8,84
2004	7,36	13,55	16,70	18,77	20,39	19,63	18,82	17,51	16,53	17,48	15,40	13,10
2005	7,36	12,29	17,83	18,91	20,46	19,49	18,50	17,82	16,53	17,24	15,10	14,34
2006	6,82	12,69	17,30	18,91	20,30	19,75	19,85	17,51	16,85	18,08	15,10	7,65
2007	9,39	13,55	17,30	18,62	20,46	19,75	19,39	17,16	16,53	17,48	14,76	13,10

表 5-6-20 可能蒸発散量の推計 (Ranérou 観測所、単位：cm/月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	8,99	13,35	17,12	18,46	20,21	19,19	18,64	17,02	15,94	16,92	14,82	10,44
1989	8,99	13,35	17,12	18,46	20,21	19,19	18,64	17,02	15,94	16,92	14,82	10,44
1990	8,99	13,35	17,12	18,46	20,21	19,19	18,64	17,02	15,94	17,48	14,76	12,89
1991	10,32	12,29	16,37	18,00	19,67	19,14	18,50	17,82	16,53	16,69	14,76	13,53
1992	8,66	13,55	17,30	18,77	20,39	19,33	19,12	17,16	15,85	16,97	14,76	8,48
1993	8,65	13,55	17,30	18,77	20,39	19,33	19,12	17,16	15,85	16,97	14,76	8,65
1994	5,81	13,08	17,30	18,43	20,04	18,93	18,16	15,96	15,85	16,37	15,10	9,49
1995	6,04	13,08	16,37	17,75	20,04	19,49	19,12	16,78	15,47	16,97	14,76	9,90
1996	13,10	14,46	17,02	18,23	20,30	19,14	18,82	16,78	16,21	17,24	14,41	9,64
1997	10,86	14,14	16,01	18,00	20,30	18,93	19,63	18,14	16,21	17,24	15,10	8,28
1998	8,76	15,03	17,58	19,10	20,46	19,63	18,82	16,78	15,85	16,97	14,76	10,20
1999	7,37	9,13	17,02	18,43	20,18	19,33	17,80	16,38	15,47	16,05	14,76	9,36
2000	13,10	13,08	17,83	19,02	20,18	18,93	18,16	15,96	15,85	16,97	14,76	7,59
2001	8,55	13,80	17,30	18,62	20,18	19,14	17,80	17,84	15,85	16,97	14,76	14,34
2002	8,54	16,72	16,70	17,75	20,30	18,69	18,82	17,51	17,14	17,48	15,10	13,53
2003	8,24	13,08	17,83	18,77	20,18	18,69	18,50	16,38	15,47	16,37	14,76	10,73
2004	8,96	13,55	16,70	18,23	20,30	19,33	18,50	17,16	15,85	17,24	14,76	13,53
2005	8,61	12,69	17,83	18,91	20,30	19,33	18,16	17,16	15,85	16,97	15,40	14,71
2006	7,45	12,29	17,30	18,62	20,18	19,49	19,12	17,51	15,85	16,97	14,76	7,29
2007	9,78	13,80	17,30	18,43	20,18	19,33	18,82	16,78	15,85	17,24	14,41	8,29

表 5-6-21 可能蒸発散量の推計 (Bakel 観測所、単位：cm/月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	7,03	13,80	17,58	18,77	20,30	19,14	18,50	15,96	15,08	16,69	14,04	7,96
1989	8,64	13,80	16,70	18,77	20,46	19,14	17,40	16,38	16,53	16,97	15,40	13,10
1990	6,49	14,14	18,06	18,77	20,46	19,63	18,16	16,78	15,85	17,24	15,10	13,10
1991	13,94	12,69	16,70	18,43	20,30	19,63	18,82	17,16	16,21	16,69	14,76	13,53
1992	13,10	13,80	16,37	18,23	20,18	19,49	18,82	17,84	16,85	17,24	14,76	13,53
1993	9,20	13,55	17,58	18,91	20,50	19,49	18,50	16,78	15,08	16,69	14,41	10,21
1994	6,12	13,08	17,02	18,62	20,30	19,14	18,16	15,52	15,47	15,70	15,10	10,79
1995	7,78	13,55	17,30	18,43	20,39	19,84	19,12	16,38	14,66	16,37	14,41	10,61
1996	13,94	14,75	17,30	18,43	18,95	16,78	13,76	12,82	14,23	14,51	10,18	11,13
1997	8,74	14,14	15,63	18,23	20,04	18,69	18,82	15,96	15,08	16,37	14,04	8,91
1998	10,40	13,80	17,30	18,62	20,30	19,63	18,82	15,52	13,77	15,70	14,41	10,40
1999	6,84	7,65	15,22	17,47	19,67	17,84	16,55	11,28	12,12	14,51	13,25	11,16
2000	13,10	13,80	18,44	19,10	20,30	19,14	18,16	15,96	16,21	16,69	14,76	13,53
2001	15,07	14,46	17,58	18,62	20,39	19,33	18,16	17,51	15,85	17,24	14,76	14,34
2002	13,10	14,14	17,58	18,43	20,39	19,49	19,39	18,14	16,53	17,24	15,10	13,94
2003	9,48	15,03	17,83	19,02	20,52	19,63	18,50	16,38	15,47	16,97	15,40	13,53
2004	8,76	14,46	17,30	18,91	20,46	19,49	18,16	17,51	17,41	18,36	16,83	16,30
2005	15,41	15,03	18,06	19,02	20,39	19,63	18,82	17,51	16,21	16,69	15,10	14,71
2006	13,94	13,55	18,06	19,10	20,18	19,63	19,63	16,78	16,21	17,71	15,10	15,41
2007	13,53	14,14	17,58	18,91	20,46	19,84	19,12	16,38	15,85	17,48	15,10	10,07

表 5-6-22 可能蒸発散量の推計 (Goudiri 観測所、単位：cm/月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,13	14,40	12,49
1989	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,13	14,40	12,49
1990	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,37	14,41	12,84
1991	13,53	13,08	17,30	18,43	20,30	19,33	17,40	15,96	15,08	16,05	14,04	13,53
1992	13,53	14,14	17,02	18,62	20,04	18,44	17,40	16,38	15,47	16,69	14,04	13,10
1993	10,72	14,14	17,83	18,91	20,46	19,14	17,80	15,96	15,47	16,69	14,76	13,10
1994	7,63	13,80	17,58	18,62	20,18	18,69	17,80	15,07	15,08	15,70	14,04	11,49
1995	8,97	13,80	17,58	18,62	20,30	19,33	17,80	15,96	15,47	16,05	14,76	9,93
1996	13,53	15,03	17,30	18,77	20,39	19,14	17,80	15,96	15,47	16,05	14,04	13,94
1997	14,34	14,75	17,02	18,77	20,04	18,14	18,16	16,38	15,08	16,37	15,10	10,49
1998	13,53	15,75	18,06	19,21	20,50	19,49	17,80	15,96	14,66	16,37	14,76	13,53
1999	10,59	12,69	18,06	18,91	20,39	18,69	17,40	15,07	14,66	15,32	14,04	9,80
2000	13,94	13,55	17,83	18,91	20,30	18,69	17,40	15,07	15,08	15,32	14,41	9,48
2001	8,57	14,14	17,58	18,77	20,39	18,93	17,80	16,38	16,21	16,69	14,41	14,34
2002	10,40	15,53	17,83	18,62	19,87	18,44	17,40	15,96	15,85	16,05	14,41	16,56
2003	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,13	14,40	12,49
2004	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,13	14,40	12,49
2005	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,13	14,40	12,49
2006	11,76	14,21	17,60	18,75	20,27	18,92	17,70	15,82	15,31	16,13	14,40	12,49
2007	13,53	14,46	17,83	18,62	20,39	19,49	18,16	15,52	15,47	16,37	14,41	13,10

表 5-6-23 可能蒸発散量の推計 (Tambacounda 観測所、単位：cm/月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	9,02	14,14	17,30	18,62	19,87	18,14	16,55	14,58	14,66	15,70	13,65	9,02
1989	10,24	13,80	16,70	18,23	19,67	17,51	15,62	14,58	14,23	14,93	14,04	13,10
1990	8,36	14,14	17,83	18,62	19,87	18,69	16,55	15,52	14,66	15,32	14,41	13,10
1991	13,53	13,55	17,30	18,00	19,87	18,69	16,55	15,52	14,66	14,93	14,04	13,53
1992	13,10	14,14	16,70	18,43	19,46	17,84	16,09	15,52	14,23	15,70	14,04	13,53
1993	13,10	14,14	17,58	18,62	20,18	18,69	16,99	15,52	15,08	16,69	14,76	13,10
1994	8,67	13,80	17,58	18,77	20,04	18,44	16,99	15,07	14,66	14,93	14,04	10,87
1995	9,69	13,55	17,30	18,23	19,87	18,93	17,40	15,07	14,66	15,32	14,04	10,64
1996	13,53	14,75	17,30	18,43	20,04	18,44	17,40	15,07	14,23	15,70	14,04	14,34
1997	14,71	14,75	17,02	18,62	19,87	17,84	18,50	16,38	14,23	15,70	14,76	13,10
1998	12,56	15,53	17,83	19,02	20,30	19,14	17,40	15,52	14,23	15,70	14,41	10,82
1999	9,97	12,29	17,58	18,43	19,67	18,44	16,09	15,07	14,66	14,93	15,40	13,53
2000	15,07	15,03	18,06	18,62	20,04	18,93	18,16	15,96	15,85	15,70	14,76	14,71
2001	15,07	15,03	17,30	17,75	20,39	19,12	17,40	16,78	15,08	17,24	15,69	15,72
2002	13,94	14,75	18,06	18,62	20,30	19,14	18,82	16,38	16,21	16,37	15,10	14,34
2003	13,53	14,75	18,25	18,91	20,30	18,44	16,55	15,52	15,08	16,05	15,10	13,94
2004	13,94	15,03	17,58	18,62	20,04	17,84	16,55	15,52	15,08	16,05	15,10	14,71
2005	13,10	14,46	18,25	18,77	19,67	18,69	16,99	15,52	15,08	15,70	15,10	14,71
2006	10,52	13,55	17,58	18,62	19,67	18,14	18,16	15,96	14,66	16,37	15,10	13,53
2007	14,34	14,75	18,06	18,77	20,18	18,69	17,40	15,52	15,08	16,05	14,41	13,94

表 5-6-24 可能蒸発散量の推計 (Kédougou 観測所、単位：cm/月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1988	9,70	14,01	17,58	18,62	19,87	17,16	13,84	14,58	14,23	14,93	14,04	7,92
1989	9,93	13,55	16,70	18,23	19,67	17,16	15,62	13,39	12,43	14,93	14,76	13,53
1990	10,69	14,14	17,83	18,62	19,67	17,51	15,12	15,07	13,77	15,32	14,76	14,34
1991	14,71	14,46	17,83	18,43	19,87	18,14	13,53	12,50	13,77	13,64	12,83	10,07
1992	11,25	14,14	16,37	18,23	19,21	15,96	13,65	14,58	12,85	14,93	12,83	11,25
1993	11,30	14,14	17,30	18,91	19,67	17,51	13,75	15,07	11,46	14,51	14,41	10,33
1994	8,77	13,55	17,30	18,43	19,21	15,96	15,12	12,81	12,71	15,32	13,25	8,47
1995	8,08	13,55	17,58	18,62	19,87	18,14	15,12	12,60	12,74	16,05	13,25	9,68
1996	13,94	14,75	17,30	18,43	18,95	16,78	13,61	12,67	14,23	14,51	14,76	10,99
1997	13,94	13,80	16,37	18,00	17,99	15,07	13,18	12,30	12,00	14,93	13,25	9,51
1998	10,27	15,03	17,30	18,62	19,67	17,16	16,99	11,64	11,20	14,51	14,04	13,53
1999	10,07	13,55	18,06	18,77	19,87	17,16	15,12	12,69	12,41	14,51	14,04	9,37
2000	14,71	13,80	17,83	18,62	19,87	16,38	15,62	11,45	13,77	14,09	11,38	10,28
2001	11,57	13,55	17,58	18,43	19,67	16,38	15,12	14,58	12,16	14,93	14,04	13,53
2002	13,53	14,14	17,30	18,43	19,87	17,16	16,09	13,07	14,23	14,93	13,25	8,64
2003	8,51	13,80	16,70	18,23	19,21	15,52	11,19	10,28	10,52	12,34	10,11	9,84
2004	9,41	14,14	17,30	18,23	19,21	15,52	13,36	12,46	13,77	14,93	13,65	11,57
2005	10,26	14,46	17,83	18,77	19,21	17,16	16,55	15,52	14,66	15,70	14,04	13,94
2006	11,22	14,14	17,83	18,77	19,46	17,16	16,55	15,52	10,98	15,32	13,65	10,44
2007	13,53	14,14	17,30	18,77	19,87	17,84	15,12	15,52	14,23	15,70	13,65	7,23

## 5.6.2 河川流量調査方法

### (1) 調査目的

河川流量調査の目的は以下のとおりであり、この観点から地点選定を行なった。

- ・ 堆積層地域と基盤岩地域の流量の差異の把握
- ・ タンバクンダ・マタム両州から流出する河川流量の把握
- ・ 一時河川の流出状況の把握

また、調査地点選定に当たっては、前記した DGPRES が実施して河川流量観測結果が上記の目的達成のために利用できる地点を優先した。選定した観測地点においては、毎月 1 回の河川状況の観察と流量観測を行なう。特に、一時河川については、雨期の恒常的な流出の有無を把握し、以下の点に注意を払った。

- ・ 雨期に恒常的な流出がある河川：雨期においては河川から地下水へのかん養がある可能性はないか。また、周辺の浅井戸の地下水位が雨期には高く、乾期には低いという地下水位の変動が激しくないか。
- ・ 雨期においても一時的な流出しかない河川：雨期においても河川からのかん養は期待できないか。また、地下水へのかん養がないため、周辺には浅井戸が存在しないのではないか。

## (2) 観測方法

河川の流量を測る方法として、観測ポイントの断面積と流速を測ってこの積を流量とする方法（流速計測法）を採用し、現地再委託により月 1 回の観測を実施した。雨期においては、毎日の水位高さを観測した。

### 1) 河川横断測量（水深測定）

観測ポイントに定めた断面内の測線上での水深測定を行い、断面積を計算する。以下に測定方法の概要を記す。

- ① 水深測定の測定回数は、原則として往復して同一横断線上を 2 回とする。
- ② 水深測線および第 5 条に記す流速測線は横断線を含む鉛直面上において、横断方向に原則として等間隔になるように選定するものとする。一般に、水面幅と流速測線間隔との割合の標準は、原則とし表 5-6-25 のとおりとする。

表 5-6-25 流速の測定間隔

水面幅 (B) m	水深測線間隔 (M) m	流速測線間隔 (N) m
10 以下	水面幅の 10~15%	N=M
10~20	1	2
20~40	2	4
40~60	3	6
60~80	4	8
80~100	5	10
100~150	6	12
150~200	10	20
200 以上	15	30

- ③ 水深測線は、横断線を含む鉛直面内で流速測線上および相隣る流速測線の中央に設けるものとする。なお、両岸側においては、流速測線の外側にもそれぞれ 1 つの水深測線を設けるものとする（水深測定では、両岸付近においては、死水域との境界に水深測線を設けるものとする）。

## 2) 流速測定

流速計を用いて上項で定めた測線上で流速測定を実施する。以下に測定方法の概要を記す。

- ① 流速測定の測定回数は、原則として横断線上の各測点において続いて2回とする。
- ② 流速測線は、「a. 河川横断測量（水深測定）」に記したように選定する。
- ③ 流速測点は、流速測線上鉛直方向に水深の2割、8割の位置に選定するものとする（2点法）。ただし、水深が浅くこれによれない時は、水面より水深の6割の位置に選定するものとする（1点法）。2点法とするか、1点法にするかの境界は50～75cmの水深であるが、流速測定が難しい場合を除いて、安易に1点法にしない。

## 3) 流速計算

「横断の各区分断面積にその面積を代表する平均流速を乗じて、各区分断面の流量とし、これを全断面について合計して流量とする」方法を用いて観測位置の流量を計算する。以下に流速計算の概要を記す。

- ① 水深は往復2回測定した値を算術平均する。
- ② 平均流速は、同一測点で2回測定した値を算術平均して各測点の流速を求め、これらを用いて各測線ごとに次のいずれかにより求める。
  - ・ 2点法にあってはそれぞれの流速を算術平均した値
  - ・ 1点法にあっては流速測定の値
- ③ 1つの流速測線の受け持つ区分横断面積は、これと相隣る流速測線の中央までとする。相隣る水深測線間の面積は、台形と仮定して求める。
- ④ 流量は、平均流速と、それが代表していると考えられる区分横断面積との積を全測線について合計することによって求める。

## (3) 河川流量観測地点

観測地点の選定は、2008年8月中旬から月末にかけて実施したが、雨期のために観測候補地点までのアクセス状況が悪く、実際に選定できた地点は30地点中15地点であった。残りの15地点は、乾期の11月中旬から下旬にかけて地点選定を行い、12月から観測を開始した。

選定した調査地点および候補地点の位置を下図に示すとともに、表5-6-26に各地点の概略を一覧表にまとめる。なお、図5-6-4の流域界は高水位の場合の流域界を示したものであり、低水位の場合には、タンバクンダ州北西部からマタム州中～西部にかけての平坦部においては、小規模な凹地に河川水が集水し流れの方向が異なることも多い。

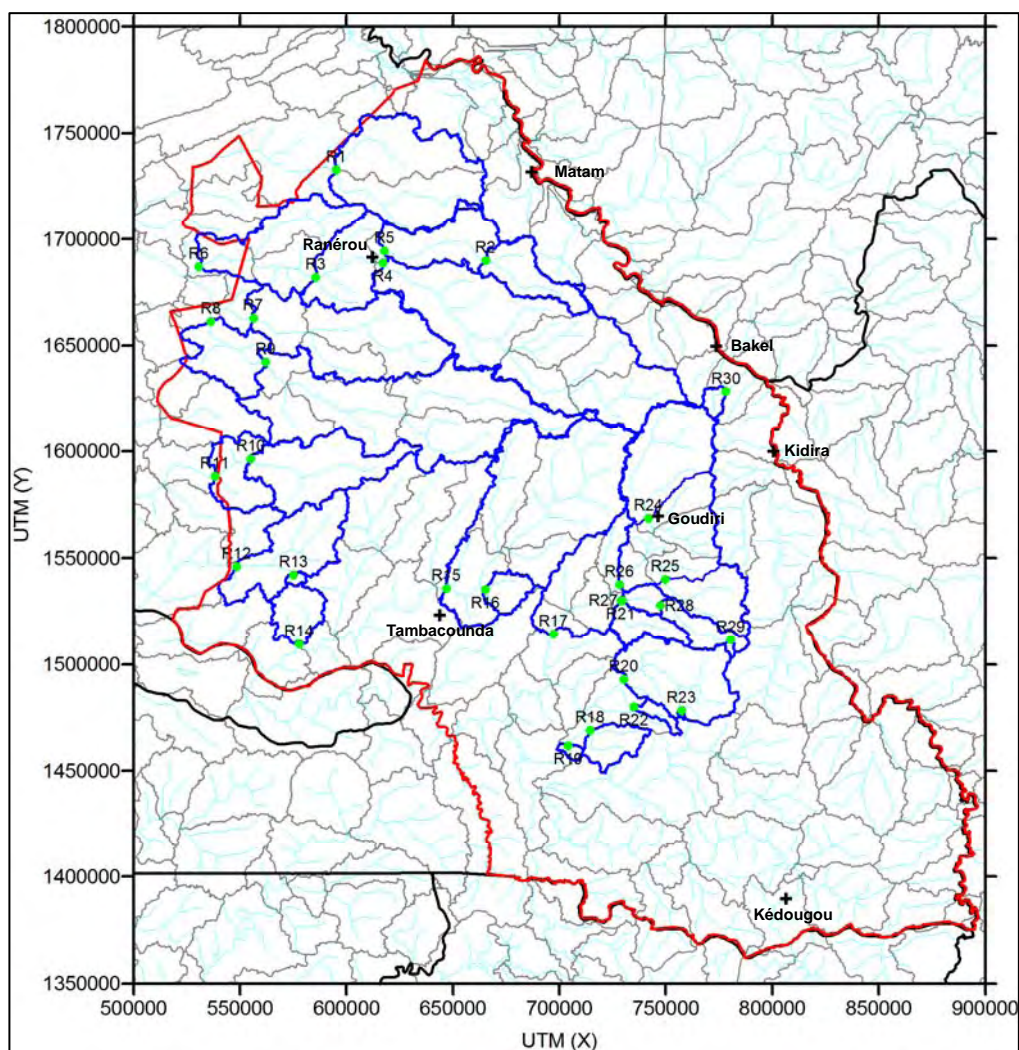


図 5-6-4 河川流量観測地点位置図

表 5-6-26 河川流量観測地点

No	地点名	右岸側			左岸側		
		UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)	UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)
R1	Bélel Tiodo	595 113,263	1 732 891,188	32,500	595 132,535	1 732 769,707	31,750
R2	Gourél Guéda	665 297,766	1 689 927,164	46,630	665 311,834	1 689 956,385	46,940
R3	Nalal Daou	585 407,884	1 682 039,528	15,020	585 480,931	1 682 097,088	14,710
R4	Ranérou-S	617 187,345	1 688 704,047	28,950	617 077,732	1 688 742,007	29,320
R5	Ranérou-E	617 781,014	1 694 513,968	23,170	617 619,542	1 694 485,282	22,720
R6	Lounbel Lana	531 164,462	1 687 782,428	13,150	531 155,569	1 687 825,088	13,280
R7	Tiala	556 223,571	1 662 861,768	12,660	556 222,091	1 662 781,192	11,880
R8	Tiafali	536 309,367	1 661 207,390	16,030	536 295,573	1 661 171,982	16,770
R9	Boudoura	661 932,652	1 642 209,742	16,620	661 996,330	1 642 217,095	18,240
R10	Payar	554 484,345	1 596 446,241	27,322	554 480,154	1 596 404,217	25,579
R11	Mana	538 158,964	1 588 314,946	23,362	538 165,039	1 588 275,995	21,210
R12	Koumpentouri	5483-55,728	1 546 099,283	13,290	548 333,911	1 546 021,418	13,044

No	地点名	右岸側			左岸側		
		UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)	UTM (X)	UTM (Y)	標高 (m)
R13	Malém Niani	575 191,553	1 542 218,800	36,973	575 120,920	1 542 194,031	32,337
R14	Maka	577 527,140	1 509 373,745	21,172	577 484,850	1 509 418,234	21,336
R15	Mâyél Dibi	646 826,847	1 535 753-528	13,285	646 841,118	1 535 808,525	13,869
R16	Kotiari Naoudé	665 128,029	1 535 559,317	20,133	665 172,096	1 535 557,382	20,607
R17	Goumbayél	697 243,847	1 514 366,769	22,622	697 262,335	1 514 372,741	22,208
R18	Mansa Dala	714 438,447	1 468 822,124	28,830	714 439,928	1 468 796,214	28,541
R19	Diénoun Diala	704 093,933	1 461 760,310	47,339	704 127,826	1 461 768,171	47,606
R20	Woloborita	730 233,215	1 492 845,194	36,121	730 224,521	1 492 818,699	35,991
R21	Bani Israel-S	728 808,435	1 530 237,846	67,523	728 791,324	1 530 230,750	68,406
R22	Gamon-E1	734 971,578	1 480 122,543	51,830	734 953,826	1 480 128,876	51,798
R23	Gamon-E2	757 253,237	1 478 287,846	55,660	757 234,983	1 478 273,901	56,019
R24	Sintiou Doubé	741 754,374	1 568 516,417	40,639	741 780,015	1 568 542,817	41,570
R25	Diélan	749 783,396	1 540 124,380	45,016	749 775,198	1 540 133,730	45,342
R26	Dakadoug	728 051,246	1 537 655,042	28,647	728 063,094	1 537 645,389	28,638
R27	Bani Israel-E	728 837,198	1 530 200,976	67,365	728 823,226	1 530 192,214	67,263
R28	Soutouta	747 450,244	1 527 870,772	76,667	747 465,003	1 527 848,564	76,242
R29	Dalafi	780 411,399	1 511 604,605	103,905	780 385,201	1 511 612,726	103,583
R30	Gabou	778 261,059	1 628 343,587	41,376	778 232,892	1 628 389,034	41,848

## (4) 観測結果

各観測地点の観測結果は、データブックに示す。

観測データが少なく、未だ H-Q 曲線を描くまでのデータが収集されていないため、雨期に観測した河川水位データを示すが、DGPRESにより今後データが蓄積されて、この河川水位が流量に換算されることを期待する。

\*\*\*



## 第6章 水資源ポテンシャル評価と地下水モデルによる予測

### 6.1 タンクモデル

本プロジェクトでは、タンクモデルを用いて地下水かん養量の推計を含めた水収支計算を実施した。本節においては、計算に用いたタンクモデルの構造について解説する。

#### (1) 調査目的および解析方法

短・長期流出モデルの一つであり、流出過程の物理機構を考慮した準物理モデルであるタンクモデルを用いて流出解析を実施した。タンクモデルの計算により洪水時の河川流量や基底流量を再現する他、地下水へのかん養量の算出を解析の目的とした。流域が気象観測所を用いて行なったティーセン分割の一つの領域に入り、かつ、流域が基盤岩地域に全て含まれる Mako 流量観測所（雨量観測所：ケドゥグ観測所）と流域が全て堆積岩地域に含まれる Niaoule Tanou 流量観測所（雨量観測所：タンバクンダ観測所）の2地点で流出解析を実施した。

#### (2) 単純線形タンクモデル

##### 1) 考え方とモデルの特徴

菅原（1972）<sup>1</sup>によって提案されたタンクモデル（図 6-1-1 参照）は、幾つかの貯水タンクを鉛直方向に直列に並べた構造になっている。各タンクの側面には河川水への流出を表す流出孔が、底面には地中への浸透を表す浸透孔があり、孔からの流出（浸透）強度は、タンク水深に比例するものとして求められる。タンクモデルは、単純な構造であるが降雨流出過程の物理的な意味を損なっておらず、流出現象の非線形性が表現でき、モデル定数をうまく定めれば河川流量を精度良く推定できる。

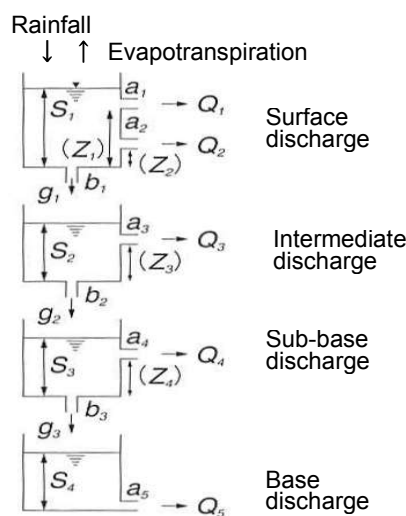


図 6-1-1 日流量解析用タンクモデル

<sup>1</sup> 菅原正巳（1972）：流出解析法，共立出版株式会社

このモデルは、洪水・長期流出解析のいずれにも適用できるが、前者には2～3段タンク、後者には3～4段タンクを用いるのが普通である。モデルの適用に際しては、まず流出孔・浸透孔の係数、流出孔の高さを定める必要があるが、直列4段タンクモデルの場合、決定すべきモデル定数は12個あり、これに計算開始時点のタンク水深（初期水深）4個を加えると未知定数は合計16個にもなる。このようにモデル定数の個数が容易でないことが難点ではある。

## 2) 流出計算

ここでは、直列4段タンクモデル（図6-1-1参照）による日単位計算について述べる。流出孔係数を $a$ 、浸透孔係数を $b$ 、流出孔の高さを $Z$ 、水深を $S$ とする。計算単位時間は1日とし、降水量 $P$ 、流出量 $Q$ 、蒸発散量 $E$ 、浸透量 $g$ の単位はmm/d、孔係数の単位は1/d、孔の高さと水深の単位はmmとする。計算当日を $i$ 日目、前日までの計算で得られている水深残高を $S(i-1)$ とする時、第1段タンクについての計算手順は次のとおりである。

まず、次式で当日の水深を求める。

$$S_1(i) = S_1'(i-1) + P(i) - E(i) \quad (\text{式 6-1-1})$$

次いで、当日の流出量、浸透量を以下のように求める。

$$Q_1(i) = a_1 I[S_1(i) - Z_1] \quad (\text{式 6-1-2})$$

$$Q_2(i) = a_2 I[S_1(i) - Z_2] \quad (\text{式 6-1-3})$$

$$g_1(i) = b_1 S_1(i) \quad (\text{式 6-1-4})$$

ここに、 $I[x]$ は、 $x > 0$ の時 $I[x] = x$ 、 $x \leq 0$ の時は $I[x] = 0$ となる関数である。

この日の水深残高は、次のように計算される。

$$S_1'(i) = S_1(i) - Q_1(i) - Q_2(i) - g_1(i) \quad (\text{式 6-1-5})$$

第2段以下のタンクについては、上段からの浸透量を当該タンクへの入力として同様の計算を行なう。例えば、第2段タンクでは、(1)式を次式に置き換える。

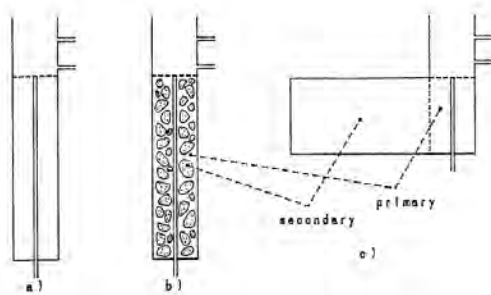
$$S_2(i) = S_2'(i-1) + g_1(i) \quad (\text{式 6-1-6})$$

このようにして、第4段タンクまでの計算を行い、 $Q_1 \sim Q_5$ の合計を当日の流出量とする。以上の計算を $i+1$ 日目以降も同様に繰り返す。

## 3) 土壌水分構造

表層部に土壌水分構造をタンクモデルに付加する必要がある場合もある。日本のような湿潤地域では1年を通じて雨がよく降るので大地の表層はいつも十分に湿っていて、土壌水分の影響を考慮する必要がほとんどなく、1)で示したような簡単なモデルでよい結果が得られる。

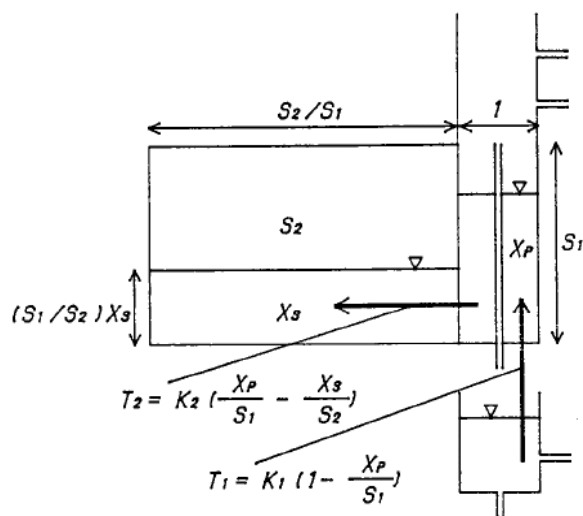
しかしながら、土壌水分（拘束水）を考慮に入れるためには、土壌水分構造をタンクモデルに付加しなければならない（図6-1-2 a）。ただし、土壌水分の影響は、このモデルに示されるような単純なものではない。雨が降って乾燥した土壌に水が供給された時、水は土の粒子間の空気が占めていた空隙を満たしていく。その後、水は土の粒子自身に徐々に移動していく。前者を1次土壌水分、後者を2次土壌水分と称する。これら模式的に表現すれば図6-1-2 bのようになる。しかし、この形では実用には不便であるので、図6-1-2 cに示すように、1次土壌水分の側面に2次土壌水分を置く表現が用いられる。



(出典：Tank Model, Computer Models of Watershed Hydrology, p175, Sugawara, 1995)

図 6-1-2 土壌水分構造モデル

タンクモデルに付加する土壌水分構造の特徴を、以下に記す (図 6-1-3 参照)。



(出典：Tank Model, Computer Models of Watershed Hydrology, p176, Sugawara, 1995)

図 6-1-3 土壌水分に関する水の移動

- 土壌水分貯留高は 1 次土壌水分貯留高  $X_P$  と 2 次水分貯留高  $X_S$  という二つの成分からなる。また、1 次、2 次土壌水分の飽和容量、すなわち最大値を、それぞれ  $S_1$ 、 $S_2$  と表す。
- 第 1 タンクの貯留高  $X_A$  は、1 次土壌水分貯留高と自由水から構成される。  
 $X_A$  が  $S_1$  より小さい時には、自由水  $X_F$  と、1 次土壌水分貯留高  $X_P$  はそれぞれ次式のようになり、雨水は  $X_A$  に加えられ、蒸発は  $X_A$  から引かれる。

$$X_P = X_A, \quad X_F = 0 \quad (\text{式 6-1-7})$$

第 1 タンクの貯留高  $X_A$  が  $S_1$  より大きい時には、1 次土壌水分は飽和しており、1 次土壌水分貯留高  $X_P$  は  $S_1$  に等しく、自由水  $X_F$  は次式のようになる。

$$X_F = X_A - S_1 \quad (\text{式 6-1-8})$$

- 1 次土壌水分が飽和してなく、かつ下のタンクに自由水が存在する時には、2 段目以下のタンクから 1 次土壌水分への補給 ( $T_1$ ) が生じる。

$$T_1 = K_1(1 - X_P/S_1) \quad (\text{式 6-1-9})$$

- もう一つの水の移動は、1 次土壌水分と 2 次土壌水分と間の移動であり、その移動量  $T_2$  は次式で示される。

$$T2=K2(XP/S1-XS/S2)$$

(式 6-1-10)

ここで、 $T2$  が正ならば 1 次土壤水分から 2 次土壤水分への移動、 $T2$  が負なら逆に 2 次土壤水分から 1 次土壤水分への移動を示す。

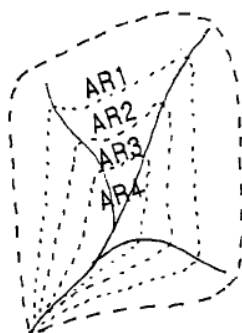
#### 4) 乾燥地帯のタンクモデル

乾燥地帯では山に木が生えていないか、または乾期になると落葉して、山は茶色になり、緑に覆われているのは平地か、または川沿いの地域だけとなる。乾期の間に、水が重力により低地に移動し、高い所は乾いてしまうからである。逆に、雨期に入ると、川沿いの地域から湿っていき、山側の地域は最後に湿った状態となる。

この状況を表すために、流域を幾つかの地帯に分割し（図 6-1-4 参照）、各地帯をタンクモデルで表す（図 6-1-5 参照）。このようにして、 $m \times n$  型のタンクモデルができる（図 6-1-6 参照）。

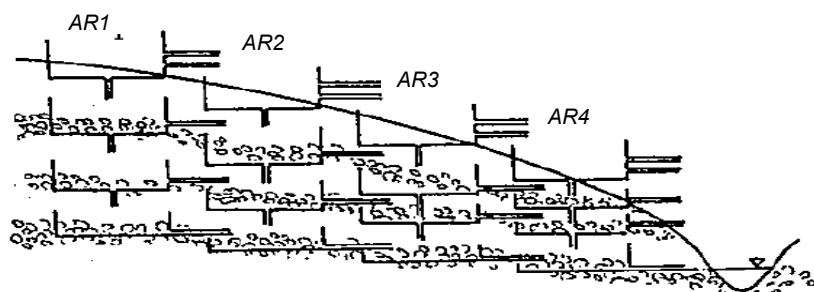
このモデルでは、水は鉛直・水平の 2 方向に移動する。すなわち、あるタンクは上のタンクから水を受け、下のタンクに水を渡す以外に、同じレベルの異なる地帯のタンクへの水の移動がある（山側（図 6-1-5 では左側）のタンクから川側（図 6-1-5 では右側）のタンクに水を渡す）。タンクモデルにおいては、計算の単位は高さ（mm）である。従って、 $m \times n$  型タンクモデルにおける地帯間の水の移動量を計算する時には、若干の注意が必要である。すなわち、図 6-1-7 に示すように、移動後の量を高さで求める時には、地帯面積の比（ $S_{i-1}/S_i$ ）を乗じなければならない。

また、同じ理由により  $m \times n$  型タンクからの流出の合計を求める時には、図 6-1-6 に示すように、 $i$  番目の地帯からの流出には  $AR_i$  を乗じなければならない。



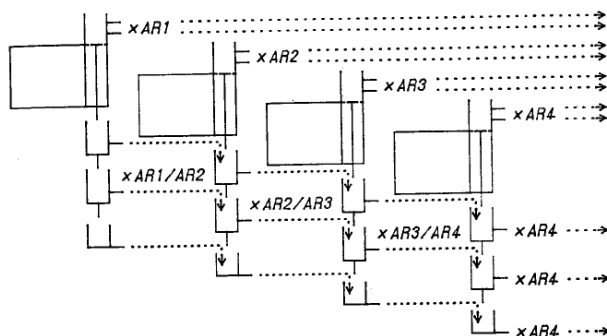
(出典：Tank Model, Computer Models of Watershed Hydrology, p183, Sugawara, 1995)

図 6-1-4 地帯分割



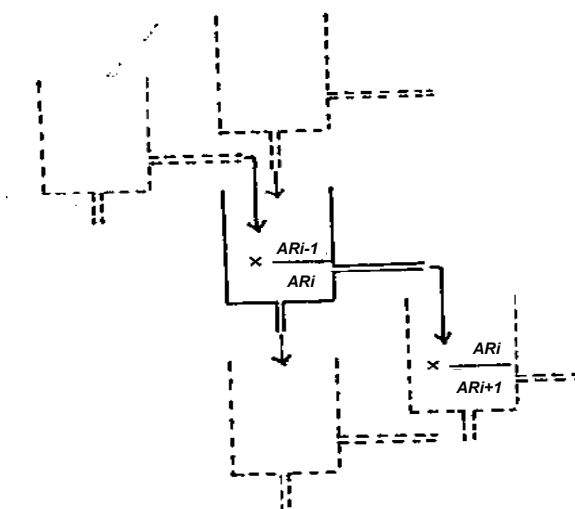
(出典：パーソナル・コンピュータのためのタンク・モデル・プログラムとその使い方, 国立防災科学技術センター研究報告, No.37, p18, 菅原ほか, 1986 を改変)

図 6-1-5 各地帯にタンクモデルを近似したもの



(出典 : Tank Model, Computer Models of Watershed Hydrology, p183, Sugawara, 1995)

図 6-1-6  $m \times n$  (4×4) 型タンクモデル



(出典 : パーソナル・コンピュータのためのタンク・モデル・プログラムとその使い方, 国立防災科学技術センター研究報告, No.37, p19, 菅原ほか, 1986 を改変)

図 6-1-7 地帯間の水の移動量の計算方法

## 6.2 水収支

メインレポートには、気象観測所地点によるティーセン分割の地帯と分布する地質から区分した 15 地帯ごとに、タンクモデル計算による 1988 年から 2007 年までの平均の水収支計算結果を示しているが、本節においては年ごとに集計した単位面積当たりの水収支解析結果を示す (表 6-2-1 ~ 表 6-2-15)。なお、タンクモデルによる計算は日単位で行っている。

表 6-2-1 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Matam 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	489,7	471,9	96,4	0,2	0,0	17,9	3,7	1 873,5	25,2
1989	356,5	346,4	97,2	0,1	0,0	5,9	1,7	1 963,2	17,6
1990	350,4	334,3	95,4	0,2	0,0	16,0	4,6	1 941,2	17,2
1991	218,3	213,2	97,7	0,0	0,0	2,3	1,1	1 945,9	11,0
1992	162,7	160,3	98,5	0,0	0,0	0,3	0,0	1 971,0	8,1
1993	346,9	336,3	96,9	0,1	0,0	8,8	2,5	1 941,7	17,3
1994	1 089,4	942,3	86,5	19,3	1,8	126,9	11,7	1 871,7	50,3
1995	290,4	273,7	94,3	0,1	0,0	8,0	2,8	1 902,2	14,4
1996	312,0	318,3	102,0	0,0	0,0	2,7	0,9	1 998,0	15,9
1997	331,1	327,7	99,0	0,1	0,0	3,6	1,1	1 964,8	16,7
1998	301,0	296,0	98,4	0,0	0,0	3,1	1,0	1 939,3	15,3
1999	455,3	440,2	96,7	0,1	0,0	11,3	2,5	1 828,7	24,1
2000	717,8	686,9	95,7	0,3	0,0	26,6	3,7	1 899,7	36,2
2001	390,4	380,4	97,4	0,1	0,0	10,6	2,7	1 920,8	19,8
2002	338,0	332,4	98,3	0,0	0,0	2,0	0,6	1 878,5	17,7
2003	569,6	476,5	83,7	2,5	0,4	90,2	15,8	1 985,3	24,0
2004	969,9	636,0	65,6	55,0	5,7	278,6	28,7	1 961,6	32,4
2005	533,6	519,8	97,4	0,1	0,0	11,9	2,2	1 958,7	26,5
2006	208,0	205,5	98,8	0,0	0,0	0,4	0,2	1 908,1	10,8
2007	381,4	368,3	96,6	0,1	0,0	12,9	3,4	1 964,8	18,7
平均	440,6	403,3	91,5	3,9	0,9	32,0	7,3	1 930,9	20,9

表 6-2-2 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Semme 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	728,5	650,7	89,3	0,4	0,1	76,8	10,5	1 873,5	34,7
1989	593,7	561,3	94,5	0,2	0,0	30,8	5,2	1 963,2	28,6
1990	428,5	424,5	99,1	0,1	0,0	4,6	1,1	1 941,2	21,9
1991	269,5	268,6	99,7	0,0	0,0	1,5	0,6	1 945,9	13,8
1992	277,3	274,4	99,0	0,0	0,0	2,7	1,0	1 971,0	13,9
1993	558,5	536,0	96,0	0,2	0,0	22,0	3,9	1 941,7	27,6
1994	486,4	473,4	97,3	0,1	0,0	10,0	2,1	1 871,7	25,3
1995	528,4	487,8	92,3	0,3	0,1	40,5	7,7	1 902,2	25,6
1996	410,2	405,3	98,8	0,1	0,0	4,2	1,0	1 998,0	20,3
1997	366,2	361,8	98,8	0,0	0,0	3,5	1,0	1 964,8	18,4
1998	340,4	331,2	97,3	0,1	0,0	9,3	2,7	1 939,3	17,1
1999	556,9	548,7	98,5	0,1	0,0	7,8	1,4	1 828,7	30,0
2000	739,7	702,1	94,9	0,3	0,0	36,4	4,9	1 899,7	37,0
2001	407,9	406,2	99,6	0,0	0,0	3,7	0,9	1 920,8	21,1
2002	349,4	346,9	99,3	0,0	0,0	1,4	0,4	1 878,5	18,5
2003	605,8	479,1	79,1	10,7	1,8	115,6	19,1	1 985,3	24,1
2004	1 018,3	747,7	73,4	16,5	1,6	246,3	24,2	1 961,6	38,1
2005	481,0	474,1	98,6	0,1	0,0	9,7	2,0	1 958,7	24,2
2006	340,5	337,5	99,1	0,0	0,0	2,0	0,6	1 908,1	17,7
2007	474,3	447,0	94,2	0,2	0,0	26,3	5,5	1 964,8	22,7
平均	498,1	463,2	93,0	1,5	0,3	32,8	6,6	1 930,9	24,0

表 6-2-3 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Semme 基盤岩地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	728,5	557,6	76,5	155,2	21,3	13,0	1,8	1 873,5	29,8
1989	593,7	501,3	84,4	89,3	15,0	3,9	0,7	1 963,2	25,5
1990	428,5	397,4	92,7	30,6	7,1	0,5	0,1	1 941,2	20,5
1991	269,5	259,3	96,2	12,3	4,6	0,1	0,0	1 945,9	13,3
1992	277,3	259,8	93,7	17,8	6,4	0,3	0,1	1 971,0	13,2
1993	558,5	482,3	86,4	75,9	13,6	2,6	0,5	1 941,7	24,8
1994	486,4	436,6	89,8	47,6	9,8	1,7	0,3	1 871,7	23,3
1995	528,4	420,2	79,5	100,8	19,1	6,4	1,2	1 902,2	22,1
1996	410,2	384,4	93,7	27,2	6,6	0,4	0,1	1 998,0	19,2
1997	366,2	343,1	93,7	23,2	6,3	0,3	0,1	1 964,8	17,5
1998	340,4	302,3	88,8	38,8	11,4	1,2	0,4	1 939,3	15,6
1999	556,9	503,5	90,4	50,8	9,1	1,7	0,3	1 828,7	27,5
2000	739,7	605,7	81,9	119,2	16,1	9,4	1,3	1 899,7	31,9
2001	407,9	378,5	92,8	31,2	7,7	1,0	0,3	1 920,8	19,7
2002	349,4	330,6	94,6	19,2	5,5	0,3	0,1	1 878,5	17,6
2003	605,8	409,4	67,6	183,7	30,3	12,0	2,0	1 985,3	20,6
2004	1 018,3	656,7	64,5	325,4	32,0	26,4	2,6	1 961,6	33,5
2005	481,0	441,5	91,8	53,2	11,1	1,7	0,4	1 958,7	22,5
2006	340,5	319,7	93,9	25,6	7,5	0,6	0,2	1 908,1	16,8
2007	474,3	398,8	84,1	76,3	16,1	3,6	0,8	1 964,8	20,3
平均	498,1	419,4	84,2	75,2	15,1	4,4	0,9	1 930,9	21,7

表 6-2-4 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Ranérou 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	525,9	493,4	93,8	0,2	0,0	31,9	6,1	1 905,6	25,9
1989	383,8	342,8	89,3	0,2	0,0	38,7	10,1	1 911,1	17,9
1990	163,7	163,7	100,0	0,0	0,0	0,3	0,2	1 940,6	8,4
1991	257,4	256,3	99,6	0,0	0,0	1,3	0,5	1 936,2	13,2
1992	390,5	373,8	95,7	0,1	0,0	14,6	3,7	1 902,3	19,7
1993	349,8	342,6	97,9	0,1	0,0	5,9	1,7	1 904,2	18,0
1994	492,9	480,8	97,6	0,1	0,0	9,4	1,9	1 845,3	26,1
1995	288,8	280,7	97,2	0,0	0,0	0,8	0,3	1 859,3	15,1
1996	366,3	362,9	99,1	0,1	0,0	8,5	2,3	1 951,7	18,6
1997	468,2	435,7	93,1	0,3	0,1	31,1	6,6	1 928,6	22,6
1998	361,5	347,5	96,1	0,1	0,0	10,9	3,0	1 939,5	17,9
1999	495,9	485,7	97,9	0,1	0,0	6,7	1,4	1 813,1	26,8
2000	528,4	521,3	98,7	0,1	0,0	5,8	1,1	1 912,8	27,3
2001	306,0	303,2	99,1	0,0	0,0	1,0	0,3	1 931,9	15,7
2002	272,3	271,1	99,6	0,0	0,0	1,4	0,5	1 914,8	14,2
2003	734,1	609,0	83,0	3,9	0,5	119,9	16,3	1 952,0	31,2
2004	342,4	336,4	98,3	0,0	0,0	1,9	0,5	1 946,1	17,3
2005	461,0	450,0	97,6	0,1	0,0	10,3	2,2	1 959,3	23,0
2006	305,0	295,1	96,7	0,1	0,0	10,7	3,5	1 868,4	15,8
2007	380,9	372,5	97,8	0,1	0,0	7,1	1,9	1 953,8	19,1
平均	393,7	376,2	95,6	0,3	0,1	15,9	4,0	1 913,8	19,7

表 6-2-5 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Bakel 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	654,2	598,1	91,4	0,2	0,0	53,9	8,2	1 843,2	32,4
1989	458,8	450,1	98,1	0,0	0,0	5,6	1,2	1 932,8	23,3
1990	450,1	437,3	97,2	0,1	0,0	10,3	2,3	1 937,7	22,6
1991	454,9	444,1	97,6	0,1	0,0	8,3	1,8	1 988,8	22,3
1992	329,6	324,6	98,5	0,1	0,0	3,0	0,9	2 001,8	16,2
1993	454,6	445,8	98,1	0,1	0,0	8,0	1,8	1 908,0	23,4
1994	561,4	550,4	98,0	0,1	0,0	9,3	1,7	1 850,0	29,7
1995	554,7	527,7	95,1	0,2	0,0	25,6	4,6	1 888,9	27,9
1996	301,8	299,5	99,2	0,0	0,0	1,1	0,4	1 766,2	17,0
1997	478,9	462,8	96,6	0,2	0,0	15,2	3,2	1 846,5	25,1
1998	405,7	388,1	95,7	0,2	0,0	17,6	4,4	1 886,7	20,6
1999	645,2	597,5	92,6	0,3	0,0	46,2	7,2	1 635,0	36,5
2000	624,9	616,1	98,6	0,1	0,0	7,4	1,2	1 990,7	30,9
2001	308,7	304,6	98,7	0,0	0,0	4,8	1,6	2 011,3	15,1
2002	459,1	448,9	97,8	0,1	0,0	6,8	1,5	1 964,9	22,8
2003	713,7	610,8	85,6	0,4	0,1	101,6	14,2	1 996,5	30,6
2004	619,9	576,6	93,0	0,3	0,0	42,4	6,8	2 017,5	28,6
2005	525,7	520,9	99,1	0,0	0,0	3,5	0,7	2 065,8	25,2
2006	454,5	439,4	96,7	0,1	0,0	15,4	3,4	2 052,0	21,4
2007	565,7	505,1	89,3	0,4	0,1	59,1	10,4	1 972,8	25,6
平均	501,1	477,4	95,3	0,1	0,0	22,3	4,4	1 927,8	24,8

表 6-2-6 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Bakel 基盤岩地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	654,2	540,6	82,6	102,8	15,7	7,8	1,2	1 843,2	29,3
1989	458,8	416,3	90,7	38,4	8,4	1,6	0,3	1 932,8	21,5
1990	450,1	404,6	89,9	43,7	9,7	1,0	0,2	1 937,7	20,9
1991	454,9	405,0	89,0	45,8	10,1	1,9	0,4	1 988,8	20,4
1992	329,6	310,1	94,1	18,2	5,5	0,2	0,1	2 001,8	15,5
1993	454,6	409,9	90,2	41,9	9,2	1,4	0,3	1 908,0	21,5
1994	561,4	499,4	89,0	55,5	9,9	2,7	0,5	1 850,0	27,0
1995	554,7	466,3	84,1	79,9	14,4	5,8	1,0	1 888,9	24,7
1996	301,8	284,2	94,2	15,8	5,2	0,4	0,1	1 766,2	16,1
1997	478,9	409,6	85,5	66,2	13,8	3,7	0,8	1 846,5	22,2
1998	405,7	340,1	83,8	65,1	16,0	2,5	0,6	1 886,7	18,0
1999	645,2	509,9	79,0	122,2	18,9	8,5	1,3	1 635,0	31,2
2000	624,9	574,8	92,0	49,9	8,0	2,7	0,4	1 990,7	28,9
2001	308,7	287,0	93,0	22,4	7,3	0,6	0,2	2 011,3	14,3
2002	459,1	411,4	89,6	45,4	9,9	2,0	0,4	1 964,9	20,9
2003	713,7	547,2	76,7	153,6	21,5	13,3	1,9	1 996,5	27,4
2004	619,9	515,6	83,2	100,2	16,2	7,1	1,1	2 017,5	25,6
2005	525,7	491,7	93,5	32,8	6,2	0,8	0,1	2 065,8	23,8
2006	454,5	394,8	86,9	56,4	12,4	3,6	0,8	2 052,0	19,2
2007	565,7	433,7	76,7	125,3	22,1	8,6	1,5	1 972,8	22,0
平均	501,1	432,6	86,3	64,1	12,8	3,8	0,8	1 927,8	22,4



表 6-2-7 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Kidira 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	371,8	364,5	98,0	0,1	0,0	5,2	1,4	1 843,2	19,8
1989	643,4	624,2	97,0	0,2	0,0	18,3	2,8	1 932,8	32,3
1990	318,0	316,2	99,4	0,0	0,0	2,4	0,8	1 937,7	16,3
1991	556,0	532,6	95,8	0,3	0,0	21,8	3,9	1 988,8	26,8
1992	441,2	438,5	99,4	0,0	0,0	2,1	0,5	2 001,8	21,9
1993	478,6	473,3	98,9	0,1	0,0	4,9	1,0	1 908,0	24,8
1994	467,2	457,6	98,0	0,1	0,0	7,5	1,6	1 850,0	24,7
1995	457,4	454,3	99,3	0,0	0,0	3,6	0,8	1 888,9	24,0
1996	321,6	317,9	98,8	0,1	0,0	3,5	1,1	1 766,2	18,0
1997	645,7	531,4	82,3	16,7	2,6	97,7	15,1	1 846,5	28,8
1998	592,0	554,5	93,7	0,3	0,0	35,8	6,1	1 886,7	29,4
1999	828,5	659,0	79,5	8,1	1,0	159,3	19,2	1 635,0	40,3
2000	447,5	447,1	99,9	0,0	0,0	0,6	0,1	1 990,7	22,5
2001	480,1	471,2	98,2	0,1	0,0	5,0	1,0	2 011,3	23,4
2002	336,3	329,2	97,9	0,1	0,0	5,2	1,5	1 964,9	16,8
2003	778,2	682,4	87,7	0,4	0,0	90,3	11,6	1 996,5	34,2
2004	580,9	559,4	96,3	0,2	0,0	22,8	3,9	2 017,5	27,7
2005	742,3	703,5	94,8	0,2	0,0	34,2	4,6	2 065,8	34,1
2006	380,2	376,2	98,9	0,0	0,0	2,7	0,7	2 052,0	18,3
2007	564,8	547,5	96,9	0,1	0,0	14,8	2,6	1 972,8	27,8
平均	521,6	492,0	94,3	1,3	0,3	26,9	5,2	1 927,8	25,5

表 6-2-8 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Kidira 基盤岩地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	371,8	344,3	92,6	22,8	6,1	0,7	0,2	1 843,2	18,7
1989	643,4	560,8	87,2	73,9	11,5	3,9	0,6	1 932,8	29,0
1990	318,0	300,1	94,4	14,1	4,4	0,2	0,1	1 937,7	15,5
1991	556,0	462,8	83,2	87,7	15,8	4,4	0,8	1 988,8	23,3
1992	441,2	420,3	95,3	17,3	3,9	0,3	0,1	2 001,8	21,0
1993	478,6	444,6	92,9	32,9	6,9	1,1	0,2	1 908,0	23,3
1994	467,2	419,8	89,9	41,4	8,9	2,0	0,4	1 850,0	22,7
1995	457,4	428,4	93,7	27,5	6,0	0,9	0,2	1 888,9	22,7
1996	321,6	295,4	91,9	25,9	8,1	0,5	0,2	1 766,2	16,7
1997	645,7	477,0	73,9	157,8	24,4	10,5	1,6	1 846,5	25,8
1998	592,0	481,0	81,3	105,2	17,8	5,1	0,9	1 886,7	25,5
1999	828,5	585,8	70,7	206,9	25,0	20,2	2,4	1 635,0	35,8
2000	447,5	444,7	99,4	15,3	3,4	0,8	0,2	1 990,7	22,3
2001	480,1	449,6	93,6	32,3	6,7	0,8	0,2	2 011,3	22,4
2002	336,3	307,3	91,4	32,4	9,6	1,1	0,3	1 964,9	15,6
2003	778,2	613,5	78,8	152,6	19,6	13,9	1,8	1 996,5	30,7
2004	580,9	500,0	86,1	78,8	13,6	3,6	0,6	2 017,5	24,8
2005	742,3	640,7	86,3	97,2	13,1	5,6	0,8	2 065,8	31,0
2006	380,2	360,6	94,9	21,9	5,8	0,4	0,1	2 052,0	17,6
2007	564,8	491,3	87,0	69,8	12,4	5,4	1,0	1 972,8	24,9
平均	521,6	451,4	86,5	65,7	12,6	4,1	0,8	1 927,8	23,4

表 6-2-9 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Goudiri 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	612,4	568,9	92,9	0,3	0,0	43,1	7,0	1 928,5	29,5
1989	608,4	600,6	98,7	0,1	0,0	6,8	1,1	1 933,8	31,1
1990	398,0	394,7	99,2	0,0	0,0	2,1	0,5	1 939,7	20,3
1991	329,6	320,8	97,3	0,1	0,0	8,9	2,7	1 940,7	16,5
1992	635,2	588,4	92,6	0,2	0,0	44,4	7,0	1 948,0	30,2
1993	477,0	471,3	98,8	0,0	0,0	5,1	1,1	1 949,7	24,2
1994	682,4	648,5	95,0	0,2	0,0	29,7	4,4	1 856,8	34,9
1995	548,1	537,7	98,1	0,0	0,0	3,5	0,6	1 887,6	28,5
1996	622,5	606,4	97,4	0,1	0,0	21,1	3,4	1 972,3	30,7
1997	588,0	574,5	97,7	0,1	0,0	13,4	2,3	1 946,3	29,5
1998	654,7	605,9	92,5	0,4	0,1	47,5	7,2	1 996,2	30,3
1999	797,2	763,9	95,8	0,2	0,0	30,6	3,8	1 857,6	41,1
2000	553,9	549,9	99,3	0,1	0,0	5,7	1,0	1 897,3	29,0
2001	498,8	493,2	98,9	0,1	0,0	5,9	1,2	1 916,8	25,7
2002	423,5	420,3	99,3	0,0	0,0	2,9	0,7	1 913,6	22,0
2003	624,4	613,5	98,3	0,0	0,0	7,5	1,2	1 948,0	31,5
2004	760,0	720,3	94,8	0,2	0,0	32,9	4,3	1 950,0	36,9
2005	380,9	379,5	99,6	0,0	0,0	1,4	0,4	1 933,8	19,6
2006	259,5	257,3	99,2	0,0	0,0	0,5	0,2	1 933,8	13,3
2007	516,8	507,1	98,1	0,0	0,0	5,1	1,0	1 959,3	25,9
平均	548,6	531,1	96,8	0,1	0,0	15,9	2,9	1 930,5	27,5

表 6-2-10 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Goudiri 基盤岩地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	612,4	498,2	81,4	104,1	17,0	7,8	1,3	1 928,5	25,8
1989	608,4	559,2	91,9	44,6	7,3	3,1	0,5	1 933,8	28,9
1990	398,0	383,1	96,2	14,3	3,6	0,2	0,1	1 939,7	19,7
1991	329,6	282,0	85,6	43,9	13,3	1,1	0,3	1 940,7	14,5
1992	635,2	530,6	83,5	98,9	15,6	5,4	0,8	1 948,0	27,2
1993	477,0	432,0	90,6	40,1	8,4	2,8	0,6	1 949,7	22,2
1994	682,4	573,4	84,0	101,2	14,8	7,2	1,1	1 856,8	30,9
1995	548,1	516,8	94,3	28,2	5,1	0,8	0,1	1 887,6	27,4
1996	622,5	549,2	88,2	70,5	11,3	4,1	0,7	1 972,3	27,8
1997	588,0	521,0	88,6	63,0	10,7	2,8	0,5	1 946,3	26,8
1998	654,7	523,2	79,9	125,6	19,2	7,3	1,1	1 996,2	26,2
1999	797,2	682,2	85,6	96,8	12,1	9,0	1,1	1 857,6	36,7
2000	553,9	510,6	92,2	47,9	8,6	1,8	0,3	1 897,3	26,9
2001	498,8	454,2	91,1	44,3	8,9	1,7	0,3	1 916,8	23,7
2002	423,5	395,2	93,3	31,9	7,5	1,0	0,2	1 913,6	20,7
2003	624,4	571,5	91,5	48,3	7,7	3,9	0,6	1 948,0	29,3
2004	760,0	648,8	85,4	104,0	13,7	7,2	0,9	1 950,0	33,3
2005	380,9	368,2	96,7	14,1	3,7	0,2	0,0	1 933,8	19,0
2006	259,5	253,4	97,7	8,3	3,2	0,0	0,0	1 933,8	13,1
2007	516,8	477,0	92,3	37,4	7,2	1,8	0,3	1 959,3	24,3
平均	548,6	486,5	88,7	58,4	10,6	3,5	0,6	1 930,5	25,2

表 6-2-11 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量  
(Tambacounda 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	935,9	765,8	81,8	0,7	0,1	165,2	17,7	1 807,4	42,4
1989	755,7	732,0	96,9	0,1	0,0	21,5	2,9	1 826,5	40,1
1990	701,8	680,4	97,0	0,2	0,0	18,6	2,7	1 870,7	36,4
1991	570,5	543,3	95,2	0,2	0,0	25,4	4,5	1 901,3	28,6
1992	529,9	514,1	97,0	0,1	0,0	16,0	3,0	1 887,2	27,2
1993	433,8	432,3	99,7	0,0	0,0	1,3	0,3	1 944,4	22,2
1994	1034,7	806,5	77,9	0,7	0,1	211,4	20,4	1 838,5	43,9
1995	532,9	527,9	99,1	0,1	0,0	17,2	3,2	1 847,4	28,6
1996	766,6	699,2	91,2	0,3	0,0	64,2	8,4	1 930,9	36,2
1997	732,9	706,5	96,4	0,2	0,0	21,4	2,9	1 954,8	36,1
1998	642,5	589,6	91,8	0,2	0,0	46,3	7,2	1 924,7	30,6
1999	790,3	746,4	94,4	0,2	0,0	39,5	5,0	1 860,5	40,1
2000	729,5	658,2	90,2	1,3	0,2	69,9	9,6	2 008,1	32,8
2001	474,9	468,4	98,6	0,0	0,0	4,6	1,0	2 012,0	23,3
2002	465,1	459,7	98,8	0,0	0,0	3,0	0,7	1 975,8	23,3
2003	831,7	719,8	86,5	0,5	0,1	108,8	13,1	1 949,0	36,9
2004	791,1	747,2	94,4	0,2	0,0	41,7	5,3	1 954,3	38,2
2005	761,0	722,0	94,9	0,2	0,0	36,6	4,8	1 960,3	36,8
2006	557,7	544,5	97,6	0,1	0,0	13,3	2,4	1 917,6	28,4
2007	606,4	593,7	97,9	0,1	0,0	12,1	2,0	1 946,1	30,5
平均	682,2	632,9	92,8	0,3	0,0	46,9	6,9	1 915,9	33,0

表 6-2-12 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Kédougou 基盤岩)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	905,7	697,3	77,0	162,3	17,9	20,9	2,3	1 760,0	39,6
1989	922,0	739,3	80,2	166,1	18,0	21,6	2,3	1 797,1	41,1
1990	696,9	599,2	86,0	97,9	14,0	10,8	1,5	1 868,3	32,1
1991	1 070,7	715,6	66,8	274,7	25,7	38,2	3,6	1 798,6	39,8
1992	791,2	729,7	92,2	101,1	12,8	10,8	1,4	1 750,9	41,7
1993	1 014,5	732,4	72,2	224,5	22,1	24,1	2,4	1 783,6	41,1
1994	1 062,0	795,9	74,9	235,4	22,2	26,8	2,5	1 708,1	46,6
1995	972,9	742,4	76,3	241,3	24,8	32,8	3,4	1 753,6	42,3
1996	960,2	755,2	78,6	200,1	20,8	24,4	2,5	1 807,3	41,8
1997	1 559,3	916,1	58,7	515,4	33,1	72,2	4,6	1 703,4	53,8
1998	1 156,9	774,3	66,9	399,6	34,5	48,6	4,2	1 799,6	43,0
1999	1 298,4	847,6	65,3	399,8	30,8	47,1	3,6	1 757,0	48,2
2000	1 397,5	832,5	59,6	491,1	35,1	65,2	4,7	1 776,3	46,9
2001	1 019,4	838,3	82,2	278,7	27,3	32,9	3,2	1 836,8	45,6
2002	955,4	723,1	75,7	250,6	26,2	24,4	2,6	1 886,5	38,3
2003	1 669,8	789,4	47,3	676,8	40,5	97,6	5,8	1 701,5	46,4
2004	1 250,0	886,4	70,9	452,5	36,2	67,6	5,4	1 761,0	50,3
2005	1 005,5	840,8	83,6	221,0	22,0	21,7	2,2	1 881,0	44,7
2006	900,5	718,6	79,8	195,6	21,7	14,9	1,7	1 810,5	39,7
2007	672,3	643,4	95,7	77,9	11,6	2,8	0,4	1 905,5	33,8
平均	1 064,1	765,9	72,0	283,1	26,6	35,3	3,3	1 792,3	42,7

表 6-2-13 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量  
(Linguere 堆積層地域)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	337,7	330,3	97,8	0,1	0,0	7,4	2,2	1 905,6	17,3
1989	486,1	461,3	94,9	0,1	0,0	22,2	4,6	1 911,1	24,1
1990	294,1	289,5	98,4	0,0	0,0	2,5	0,9	1 940,6	14,9
1991	491,4	436,9	88,9	6,4	1,3	45,0	9,2	1 936,2	22,6
1992	319,1	316,9	99,3	0,0	0,0	1,2	0,4	1 902,3	16,7
1993	352,6	347,9	98,7	0,1	0,0	5,0	1,4	1 904,2	18,3
1994	262,7	258,0	98,2	0,1	0,0	3,3	1,3	1 845,3	14,0
1995	184,9	177,2	95,8	0,0	0,0	0,5	0,3	1 859,3	9,5
1996	332,4	328,3	98,8	0,1	0,0	11,7	3,5	1 951,7	16,8
1997	192,5	185,2	96,2	0,1	0,0	7,4	3,9	1 928,6	9,6
1998	443,1	399,4	90,1	1,3	0,3	40,1	9,1	1 939,5	20,6
1999	148,0	143,7	97,1	0,0	0,0	0,5	0,3	1 813,1	7,9
2000	213,1	213,5	100,2	0,0	0,0	1,7	0,8	1 912,8	11,2
2001	196,6	191,9	97,6	0,0	0,0	3,5	1,8	1 931,9	9,9
2002	210,8	210,0	99,6	0,0	0,0	0,4	0,2	1 914,8	11,0
2003	213,1	210,6	98,8	0,0	0,0	2,6	1,2	1 952,0	10,8
2004	338,5	333,6	98,6	0,0	0,0	3,2	0,9	1 946,1	17,1
2005	376,1	369,3	98,2	0,0	0,0	3,9	1,0	1 959,3	18,8
2006	282,4	279,4	98,9	0,0	0,0	3,2	1,1	1 868,4	15,0
2007	359,8	331,9	92,2	0,2	0,1	25,7	7,1	1 953,8	17,0
平均	301,8	290,7	96,4	0,4	0,1	9,5	3,2	1 913,8	15,2

表 6-2-14 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Dialakoto 堆積層)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	592,8	570,4	96,2	0,2	0,0	21,0	3,5	1 807,4	31,6
1989	706,1	693,6	98,2	0,1	0,0	11,3	1,6	1 826,5	38,0
1990	547,7	543,1	99,2	0,0	0,0	3,5	0,6	1 870,7	29,0
1991	618,6	595,3	96,2	0,2	0,0	22,7	3,7	1 901,3	31,3
1992	660,1	647,1	98,0	0,1	0,0	7,3	1,1	1 887,2	34,3
1993	661,2	634,3	95,9	0,2	0,0	26,6	4,0	1 944,4	32,6
1994	718,1	676,2	94,2	0,2	0,0	38,4	5,4	1 838,5	36,8
1995	729,1	671,7	92,1	0,3	0,0	55,1	7,6	1 847,4	36,4
1996	747,6	617,3	82,6	0,5	0,1	128,6	17,2	1 930,9	32,0
1997	514,6	506,9	98,5	0,1	0,0	8,2	1,6	1 954,8	25,9
1998	450,7	443,6	98,4	0,1	0,0	6,6	1,5	1 924,7	23,0
1999	554,3	548,8	99,0	0,0	0,0	3,2	0,6	1 860,5	29,5
2000	511,7	497,3	97,2	0,2	0,0	14,6	2,9	2 008,1	24,8
2001	333,5	328,2	98,4	0,0	0,0	0,6	0,2	2 012,0	16,3
2002	460,8	449,0	97,4	0,0	0,0	8,7	1,9	1 975,8	22,7
2003	583,6	559,7	95,9	0,1	0,0	20,8	3,6	1 949,0	28,7
2004	554,9	545,7	98,3	0,1	0,0	6,1	1,1	1 954,3	27,9
2005	921,0	834,7	90,6	3,4	0,4	81,6	8,9	1 960,3	42,6
2006	724,7	673,6	92,9	0,2	0,0	50,8	7,0	1 917,6	35,1
2007	704,5	642,5	91,2	0,3	0,0	59,8	8,5	1 946,1	33,0
平均	614,8	584,0	95,0	0,3	0,1	28,8	4,7	1 915,9	30,5

表 6-2-15 タンクモデル解析による単位面積当たりの水収支と可能蒸発散量 (Dialakoto 基盤岩)

年	降水量 (mm)	実蒸発散量		河川流出量		地下水かん養量		可能蒸発散量 (mm)	実蒸発散量/ 可能蒸発散量 (%)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
1988	592,8	517,3	87,3	71,5	12,1	3,7	0,6	1 807,4	28,6
1989	706,1	621,6	88,0	73,2	10,4	6,4	0,9	1 826,5	34,0
1990	547,7	512,0	93,5	30,7	5,6	1,6	0,3	1 870,7	27,4
1991	618,6	529,7	85,6	81,3	13,1	5,3	0,9	1 901,3	27,9
1992	660,1	608,8	92,2	50,9	7,7	1,5	0,2	1 887,2	32,3
1993	661,2	558,0	84,4	93,9	14,2	9,1	1,4	1 944,4	28,7
1994	718,1	594,6	82,8	106,8	14,9	10,7	1,5	1 838,5	32,3
1995	729,1	605,9	83,1	114,9	15,8	10,7	1,5	1 847,4	32,8
1996	747,6	558,5	74,7	170,5	22,8	16,3	2,2	1 930,9	28,9
1997	514,6	478,2	92,9	44,0	8,6	0,7	0,1	1 954,8	24,5
1998	450,7	409,7	90,9	40,5	9,0	1,5	0,3	1 924,7	21,3
1999	554,3	521,2	94,0	29,1	5,3	1,2	0,2	1 860,5	28,0
2000	511,7	448,1	87,6	61,2	12,0	2,6	0,5	2 008,1	22,3
2001	333,5	323,0	96,8	12,4	3,7	0,1	0,0	2 012,0	16,1
2002	460,8	412,7	89,6	45,7	9,9	2,8	0,6	1 975,8	20,9
2003	583,6	509,7	87,3	70,0	12,0	3,6	0,6	1 949,0	26,2
2004	554,9	510,8	92,1	36,6	6,6	1,6	0,3	1 954,3	26,1
2005	921,0	717,8	77,9	187,0	20,3	15,1	1,6	1 960,3	36,6
2006	724,7	606,9	83,7	109,4	15,1	8,6	1,2	1 917,6	31,6
2007	704,5	566,3	80,4	126,6	18,0	10,9	1,6	1 946,1	29,1
平均	614,8	530,5	86,3	77,8	12,7	5,7	0,9	1 915,9	27,7

### 6.3 モデリング

#### 6.3.1 モデル構造

##### (1) 使用する地下水シミュレーション解析と原理

###### 1) 地下水シミュレーションの目的

本プロジェクトにおける地下水シミュレーションの重要な目的の一つは、タンバクンダ・マタム地域における地下水盆の地下水の流動状況や地下水収支の動的な実態を定量的に把握することである。

タンバクンダ・マタム地域の地下水盆は南東部が開鎖された集水域内に位置する盆地であり、盆地内の地下水は主に南東部の山地にもたらされる降水とセネガル川等の河川からのかん養が水源となり、それが盆地内平原部に地表水や地下水として入り込む。したがって、タンバクンダ・マタム地域の地下水盆の有限な水資源を合理的に管理して持続的かつ有効に利用していくためには、地表水と地下水を一体化させた流域全体の水循環の実態を把握することが必要である。

ところが、これまでにタンバクンダ・マタム地域の地下水盆で実施された各種の水文地質や水資源関連調査では、地下水盆の構造や帯水層の連続性などの基本的条件が十分に把握されなかったため、地下水資源量や開発可能量に不明な点が多い。また、地表水と地下水との交流関係や、帯水層別・地域別の水量等についても詳細な検討がなされていない。

本プロジェクトでは、後述するように地下水資源の実態や動態を明らかにするために、地表水

系と地下水系を「かん養」を通じて一体化させたモデルを作成し、モデル解析により流域全体の水循環や地下水流動を動的に把握することを目標としている。また、モデル解析の実施により、これまでバラバラに扱われていた河川や地下水の観測データを統一的に評価するとともに、河川水と地下水の水収支や交流関係を明確にすることも重要な目標である。

地下水モデル解析では、モデルの検証作業を通じて現在までの地下水の挙動をモデル上で再現することができるとともに、これまでに観測された地下水位の変動などを統一的に解釈することができる。さらに、検証された地下水モデルに将来条件を設定することにより、将来の地下水流動や地下水位分布等の動態を予測することができる。このように、地下水シミュレーション解析により諸条件の変化に伴う将来の地下水の挙動をあらかじめ予測し把握することで、貴重な地下水資源を持続的に有効利用し適切に管理するための合理的な計画の策定も行うことができる。

## 2) 地下水モデルの適用方法

本プロジェクトで作成する地下水シミュレーションモデルは、当然のことながらタンバクンダ・マタム地域の地下水盆の構造や帯水層の特徴を可能な限りの確に反映させたモデルでなくてはならない。地下水シミュレーション解析では、現実の複雑な地下水盆システムを合理的にサブシステムに分割してモデル化する必要がある。そのために地下水盆の特徴や水文地質状況を十分に把握した上で、シミュレーション解析の目標を設定して、各種地下水モデルの長所や短所を踏まえて適切な地下水モデルを構築する必要がある。

デジタルコンピュータを使用した地下水シミュレーション技術は、世界的には 1960 年代後半から開発され、1970 年代から 80 年代中期にかけて初期の平面二次元モデルから準三次元単層モデル、断面二次元モデル、準三次元多層モデルへと発展し、1980 年代後半には三次元地下水モデルが実用化された。さらに、1990 年代に入ると地下水流動や地盤沈下だけではなく、地下水中の物質輸送についても三次元モデルが開発され、様々な条件における地下水シミュレーションが行われるようになった。

このように、地下水シミュレーション技術はコンピュータ技術や数値解析技術の進歩に伴い発展してきたが、実際の地下水盆をモデル化するには、地下水盆の構造や水文地質条件に関するデータの質・量や、観測データ等の種類や数量、シミュレーション解析の目的等を総合的に勘案して、最適なモデルを作成する必要がある。

本プロジェクトでは、タンバクンダ・マタム地域の地下水盆の水文地質条件や各種データの利用可能性を検討した上で、シミュレーション解析の目標を次のように設定して、地下水モデルを作成した。

- 広域三次元モデル：タンバクンダ・マタム地域の地下水盆の広域的な三次元地下水流動を解析する。

## 3) MODFLOW コード

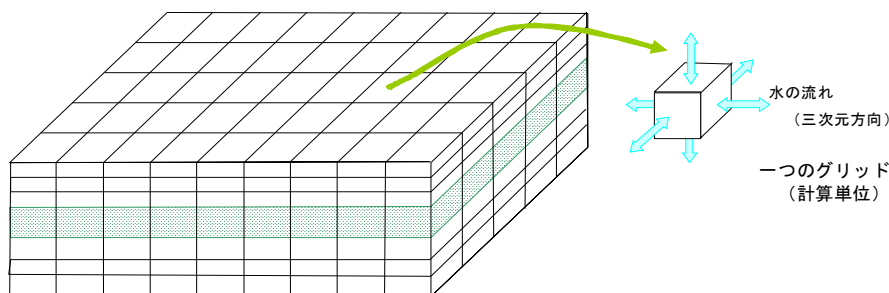
本プロジェクトでは、地下水流動シミュレーション解析には MODFLOW コードを使用した。MODFLOW コードは世界的に広く利用されている解析コードであり、各種入出力用ソフトも開発されている。

MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) は、米国地質調査所で開発された三次元地下水流動解析コードである。MODFLOW は、次の偏微分方程式で表される三次元地下水流動を差分法で解く。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{式 6-3-1})$$

ここに、 $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、および  $K_{zz}$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向の透水係数（次元は  $LT^{-1}$ ）、 $h$  は被圧地下水頭（ $L$ ）、 $W$  は単位体積あたりの水の流入または流出量（ $T^{-1}$ ）、 $S_s$  は比貯留量（ $L^{-1}$ ）、そして  $t$  は時間（ $T$ ）である。

MODFLOW はで、三次元の計算領域を図 6-3-1 に示すような立方体あるいは直方体のグリッド（計算単位、セル、要素あるいは計算単元とも呼ばれる）に分割し、それぞれのグリッドの中心点にグリッド全体の性質を代表させる単元中心グリッドシステムを採用している。



三次元モデルの要素区分  
図 6-3-1 MODFLOW 三次元モデルのグリッド区分

実際の計算は、分割されたグリッドごとに  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の水の流出入量を差分法で解く。なお、MODFLOW コードは二次元平面や二次元断面モデル、準三次元モデルにも適用することができ、二次元の場合の計算グリッドは正方形または長方形となる。

MODFLOW には本体の地下水流動計算コードだけではなく、河川パッケージや水路パッケージ、一般水頭境界パッケージなど様々なサブルーチンコードが付属している。これらのパッケージを使用することにより、各種の外部境界条件下での水の流出入を計算することができる。

本プロジェクトでは、MODFLOW2000 や、物質輸送シミュレーションコードである MT3DMS などを含む統合ソフト「Processing Modflow Pro」（Webtech 社製）を使用した。

## (2) 水文地質パラメータ

### 1) MODFLOW シミュレーションに必要なパラメータ

MODFLOW では、モデルの形状、帯水層の種類、境界条件、初期条件、時間、水文地質特性、および関連パッケージに関する様々なパラメータを設定する必要がある。表 6-3-1 には、本プロジェクトで行う MODFLOW シミュレーションに必要な基本的なパラメータをまとめて示す。

表 6-3-1 MODFLOW シミュレーションに必要な基本パラメータ

種類	名称	内容	備考
モデル形状	モデル構造	行・列数 平面グリッドの大きさ モデル層数	
	水文地質構造	層別上面標高 層別下面標高	グリッド別に指定
帯水層の特徴	帯水層の種別	被圧、不圧、被圧/不圧(透水量係数一定)、 被圧/不圧(透水量係数変化)	層別に指定
	異方性比	水平方向の異方性比	
	水文地質定数の計算方法	透水量係数 漏水係数 貯留係数	
	オプション	Interbed Storage考慮の有無	
境界条件	基本境界条件	計算グリッド 非計算グリッド 固定水頭グリッド	グリッド別に指定 固定水頭グリッドは初期水頭で固定
初期条件	地下水流動初期条件	初期水頭	グリッド別に指定
時間	計算方法	定常、非定常の選択	
	時間単位	時間単位の選択	
	計算ステップ	長さ、分割ステップ数等	非定常計算の場合はステップごとに指定
水文地質特性	透水特性	横方向透水係数(透水量係数) 縦方向透水係数(縦方向漏水係数)	( )はユーザー指定の場合
	貯留特性	比貯留量(貯留係数) <sup>(1)</sup> 有効空隙率 比浸出量 <sup>(2)</sup>	( )はユーザー指定の場合 <sup>(1)</sup> 定常計算では不要 <sup>(2)</sup> 被圧では不要

このうち、水文地質特性に関するパラメータは、透水性を表すものと貯留性を表すものに細分される。透水性を表すパラメータには、①横方向の透水係数と②縦方向の透水係数があり、これを MODFLOW に入力すれば、MODFLOW が自動的に帯水層厚あるいは飽和帯の厚さを掛けて透水量係数や縦方向の漏水係数を計算する。なお、MODFLOW ではユーザーが透水量係数や縦方向の漏水係数を独自に準備して直接モデルに入力することもできる。

一方、貯留性を表すパラメータには①比貯留量(貯留係数)、②有効空隙率、および③比浸出量があるが、比貯留量は層厚を考慮した貯留係数としても入力することができる。なお、比浸出量は帯水層の種類が不圧あるいは被圧/不圧の場合に入力する必要がある。

このほか、MODFLOW には様々な関連パッケージが用意されているが、このうち本プロジェクトのシミュレーションで使用したパッケージは、かん養、井戸、一般水頭境界、および湿潤化能力の4種類である。これらのうち、一般水頭境界のパッケージについては、(4)の境界条件の項でその利用方法を概説する。

また、以下に水文地質特性を示すパラメータの初期値の決定方法について記す。

## 2) 比湧出量

比湧出量は、ある井戸から一定の揚水量で揚水したときに井戸内で発生する水位降下量が分かれば次式により簡単に計算できるパラメータであり、帯水層能力の評価や井戸効率の評価に用いられる。



$$Sc = Q/s \quad (\text{式 6-3-2})$$

ここに、 $Sc$  は比湧出量 $[L^2T^{-1}]$ 、 $Q$  は揚水量 $[L^3T^{-1}]$ 、 $s$  は水位降下量 $[L]$ である。

一般に、通常の生産井を掘削した場合、精密な揚水試験が実施されることは少ないが、少なくとも「生産試験」あるいは「簡易揚水試験」と呼ばれる試験が行われ、その井戸からの揚水量と水位降下量との関係が確認される。比湧出量そのものは地下水シミュレーションの入力データではないが、後述するように比湧出量から透水量係数を推定することができる。また、精密な揚水試験を実施するためには時間やコストがかかるためその試験実施数は一般に限定されるが、比湧出量の場合には井戸掘削記録が残っていれば大半の井戸からその値を得ることができるというメリットがある。

収集・整理した既存井戸資料をもとに、タンバクンダ・マタム地域の地下水盆における比湧出量の分布状況を整理した。

### 3) 透水量係数と透水係数

透水量係数は帯水層の能力を表す最も重要なパラメータであり、被圧帯水層の場合は次式で定義される。

$$T = k \cdot b \quad (\text{式 6-3-3})$$

ここに、 $T$  は透水量係数 $[L^2T^{-1}]$ 、 $k$  は透水係数 $[LT^{-1}]$ 、 $b$  は帯水層の層厚 $[L]$ である。この式からも明らかなように、透水量係数は単に帯水層を構成する地層の透水性だけでなく、その層厚を乗ずることにより、帯水層全体の能力を表している。なお、不圧帯水層の場合の透水量係数は、次式で定義されている。

$$T = h \cdot b \quad (\text{式 6-3-4})$$

ここに、 $h$  は不圧帯水層中の飽和部の厚さ $[L]$ である。したがって、不圧帯水層の場合や、MODFLOW で帯水層の種類を「被圧/不圧（透水量係数変化）」とした場合には、同じ帯水層でも透水量係数は水位により変化することに注意する必要がある。

一般に、透水量係数は揚水試験により求めることができる。本プロジェクトにおいても、試掘井において連続揚水試験および回復試験を実施して、それぞれ透水量係数を求めた。

しかしながら、本格的な揚水試験を細心の注意を払って実施しても得られる透水量係数等の帯水層係数は 1 オーダー程度の誤差を含むことが知られている。また、本プロジェクトで収集・整理した既存井戸資料によると、本格的な連続揚水試験あるいは回復試験により透水量係数を求めた例は少ない。そこで、本プロジェクトでは、既存の簡易揚水試験記録をできる限り活用して、Logan (1964) の経験式を用いて水文地質パラメータの推定を行った。

本項の末にコンチネンタルターミナル層（以下、Co 層）とマーストリヒチアン層（以下、Ma 層）の透水係数分布図を示す（図 6-3-3）。他の帯水層は、次の範囲で透水係数を設定した。

- 第四紀層（以下、Q 層）：37–39m/day
- 始新統（以下、Eo 層）：7,0E-04–5,0E-03 m/day
- 暁新統（以下、Pa 層）：1,0E-04–1,0E-03 m/day

### 4) 貯留係数

貯留係数は帯水層の貯留能力を示すパラメータであるが、その値は被圧帯水層と不圧帯水層の

場合では大きく異なり、前者の値は後者の値よりも極めて小さい。これは、被圧帯水層では水頭が低下しても常に帯水層は地下水で飽和されているのに対し、不圧帯水層では地下水位の低下とともに飽和帯の層厚が減少し、排出される水量が多いためである。したがって、不圧帯水層の場合、貯留係数は有効空隙率にほぼ等しい。

貯留係数の把握には本格的な連続揚水試験が必要であるが、上記したように既存資料には貯留係数を求めた例は少ない。

ただし、以下に記すように、貯留係数の変化が比湧出量に与える影響は小さく、地下水シミュレーションモデルにおいても、貯留係数の計算水位に与える影響は、透水量係数のそれに比べて小さいことから、計算の初期値には一般的な値を用いることとする。

### ● 貯留係数の特徴

Cooper and Jacob (1946) は非定常流被圧完全井から地下水を揚水した場合、その水位降下量は次のように簡略化して表されるとした。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \ln\left(\frac{4Tt}{r^2 S}\right) - 0.5772 \right] \quad (\text{式6-3-5})$$

ここに、 $s$  は水位降下量[L]、 $Q$  は揚水量[L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>]、 $T$  は透水量係数[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]、 $t$  は時間[T]、 $r$  は井戸半径[L]、そして  $S$  は貯留係数[無次元]である。(式 6-3-5) を常用対数に直し、貯留係数の変化が比湧出量に及ぼす影響を検討するために書き換えると、次式のようなになる。

$$Sc = \frac{Q}{s} = \frac{4\pi T}{2.30 \log(2.25Tt/r^2 S)} \quad (\text{式6-3-6})$$

ここに、 $Sc$  は比湧出量[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]である。この式によると、理論的には比湧出量は透水量係数に比例して大きくなるのに対し、 $\log t$  や  $\log(1/r^2)$ 、 $\log(1/S)$  とは反比例の関係にあることがわかる。(式 6-3-6) で表される比湧出量と貯留係数の関係をグラフで表すと、図 6-3-2 のようになる。

この図は時間  $t$  を 1 日、井戸半径  $r$  を 0,1 m、井戸効率を 100% と仮定して作成したものであるが、貯留係数が大きく変化しても、それが比湧出量に与える影響は極めて小さいことがわかる。したがって、地下水シミュレーションモデルにおいても、貯留係数の計算水位に与える影響は、透水量係数のそれに比べて小さいことになる。

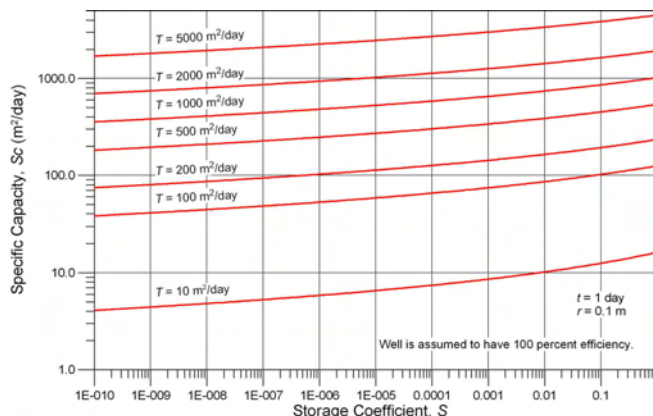


図 6-3-2 非定常状態における比湧出量と貯留係数、透水量係数との関係

● 地下水モデルへの入力値

日本地下水学会 (2010)<sup>2</sup>は、経験的な値として、貯留係数は被圧帯水層で 5,0E-03 から 5,0E-05、不圧帯水層で 4,0E-01 から 5,0E-02 の範囲をとると指摘している。したがって、地下水シミュレーションモデルに初期値として入力する貯留係数は被圧帯水層の代表値である 1,0E-03 とし、モデルの検証過程において実測の地下水変動を再現できるように妥当な範囲で貯留係数を変化させればよいことになる。

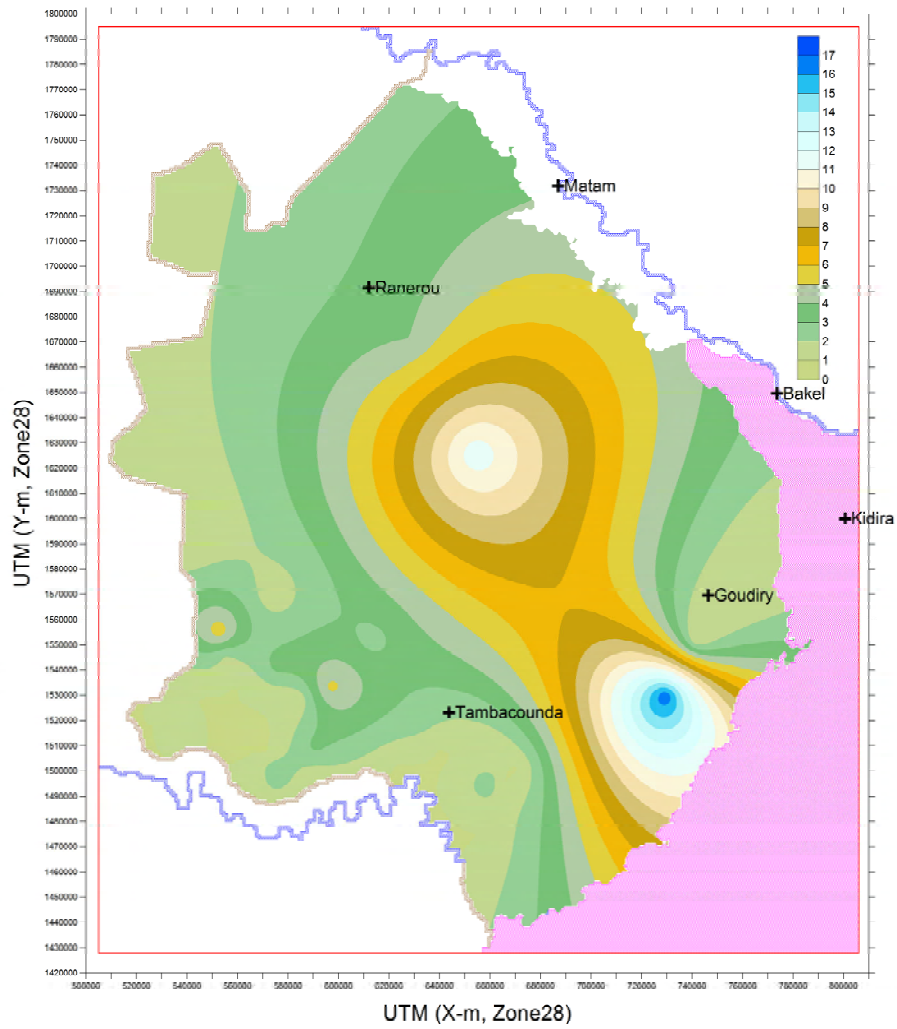
なお、貯留係数も帯水層の層厚を考慮したパラメータであり、単位層厚あたりの貯留係数は比貯留量と呼ばれる。

$$S = S_s \cdot b \quad (\text{式6-3-7})$$

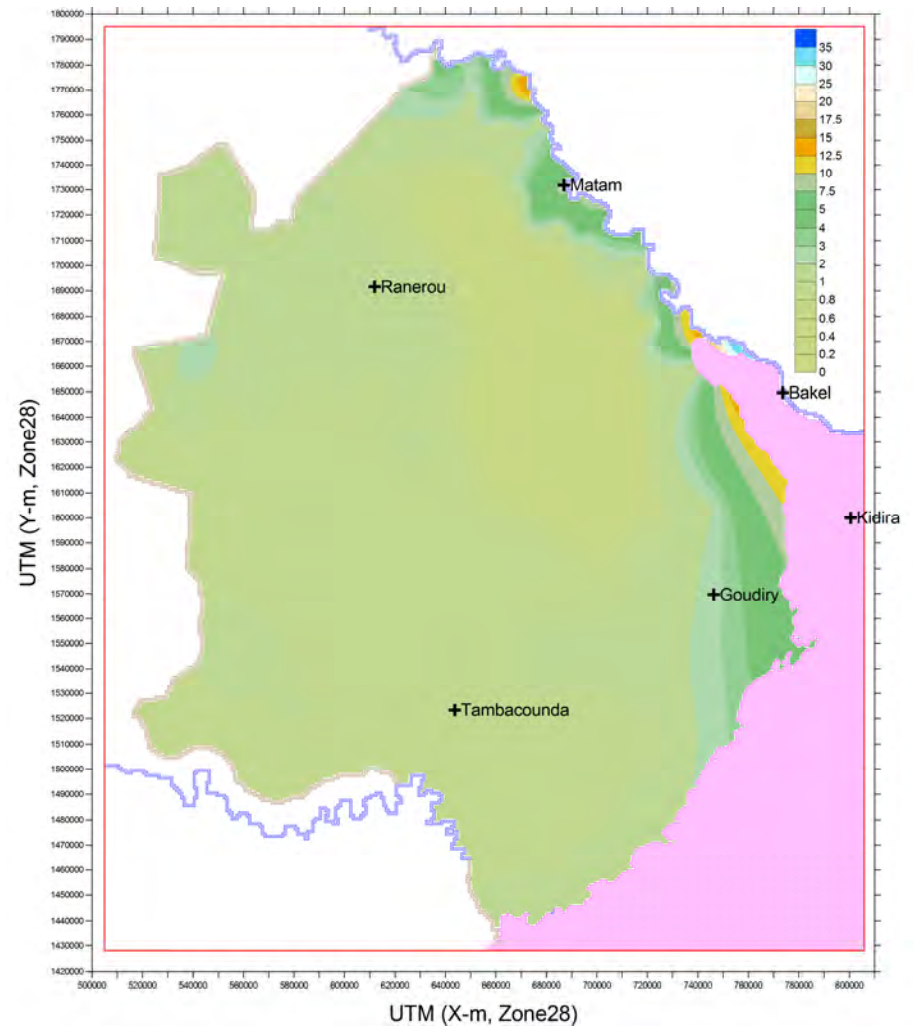
ここに、 $S$  は貯留係数[無次元]、 $S_s$  は比貯留量[L<sup>-1</sup>]、 $b$  は帯水層の層厚[L]である。比貯留量の初期入力値は、上記の 1,0E-03 に既存井戸のスクリーン長を考慮して次のように決定した。

- 第四紀層 (Q 層) : 1,0E-01m<sup>-1</sup>
- コンチネンタルターミナル層 (Co 層) : 5,0E-04m<sup>-1</sup>
- 始新統 (Eo 層) : 1,0E-04m<sup>-1</sup>
- 暁新統 (Pa 層) : 1,0E-041m<sup>-1</sup>
- マーストリヒチアン層 (Ma 層) : 7,5E-04m<sup>-1</sup>

<sup>2</sup> 日本地下水学会 地下水流動解析基礎理論のとりまとめに関する研究グループ編 (2010) : 地下水シミュレーション, 技報堂出版, p232



(Co層の透水係数分布)



(Ma層の透水係数分布)

図 6-3-3 計算初期水頭分布 (単位 : m/day)

## (3) 広域三次元モデルの構造

広域三次元モデルのモデル平面グリッドは、図 6-3-4 に示すように調査地域の堆積層地域全体をカバーするように設定した。モデルグリッドは世界測地系 WGS84 の UTM 座標系第 28 帯を基準として、各グリッドの平面サイズは 1km×1km とした (X 方向 : 301 グリッド、Y 方向 : 367 グリッド)。

広域三次元モデルの断面構造は、深度方向においてもタンバクンダ・マタム両州内の地下水盆全体を立体的にカバーできるような構造とし、地下水盆基底面 (Ma 層下面) までの水文地質条件を反映できるモデルを作成した。帯水層としては以下に記す 5 層の区分が可能であり、この 5 層と基盤岩を含めた 6 層構造のモデル構造とした (図 6-3-5)。

- ・ Q 層 (第四系帯水層)
- ・ Co 層 (コンチネンタルターミナル/漸-中新統帯水層)
- ・ Eo 層 (始新統帯水層)
- ・ Pa 層 (暁新統帯水層)
- ・ Ma 層 (マーストリヒチアン帯水層)
- ・ 基盤岩



図 6-3-4 シミュレーション解析範囲

また、5 つの帯水層の層厚分布および基底面深度分布を図 6-3-6 および図 6-3-7 に示す。

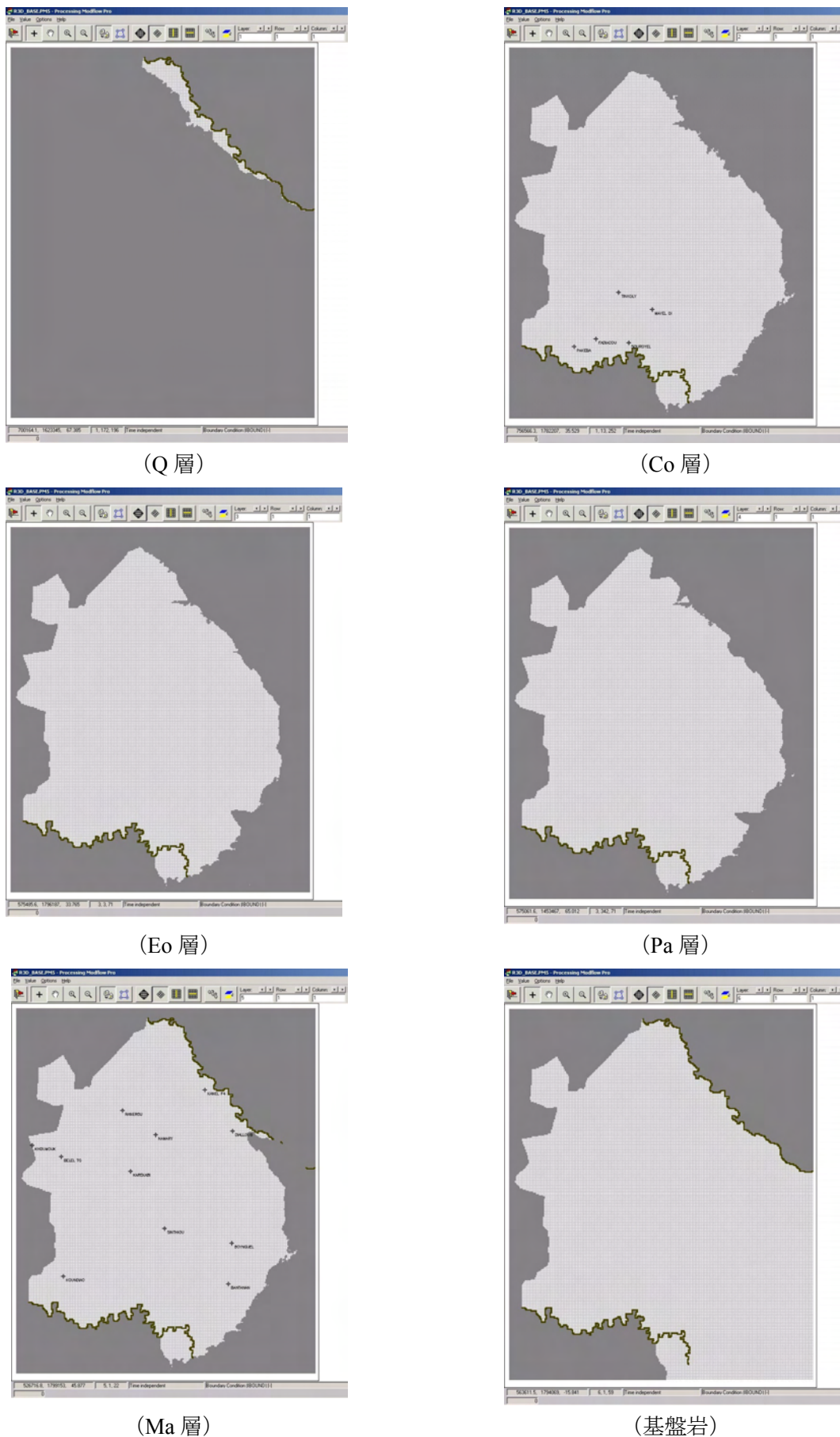
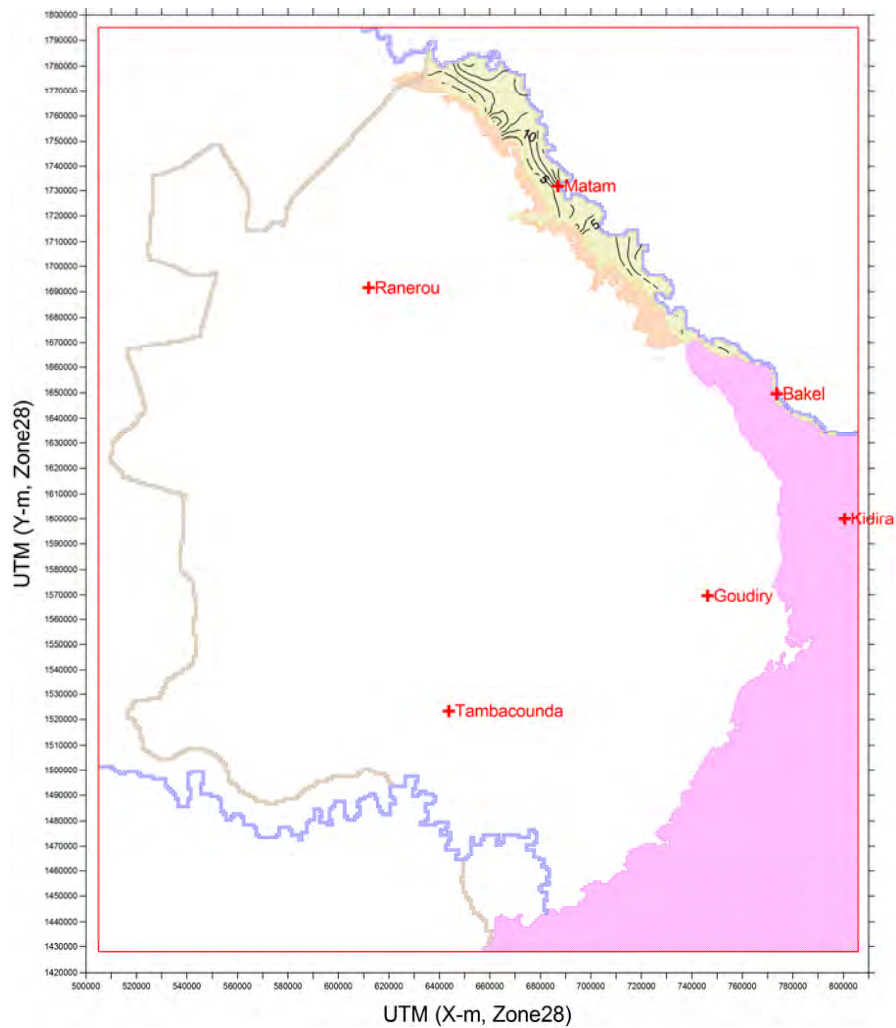
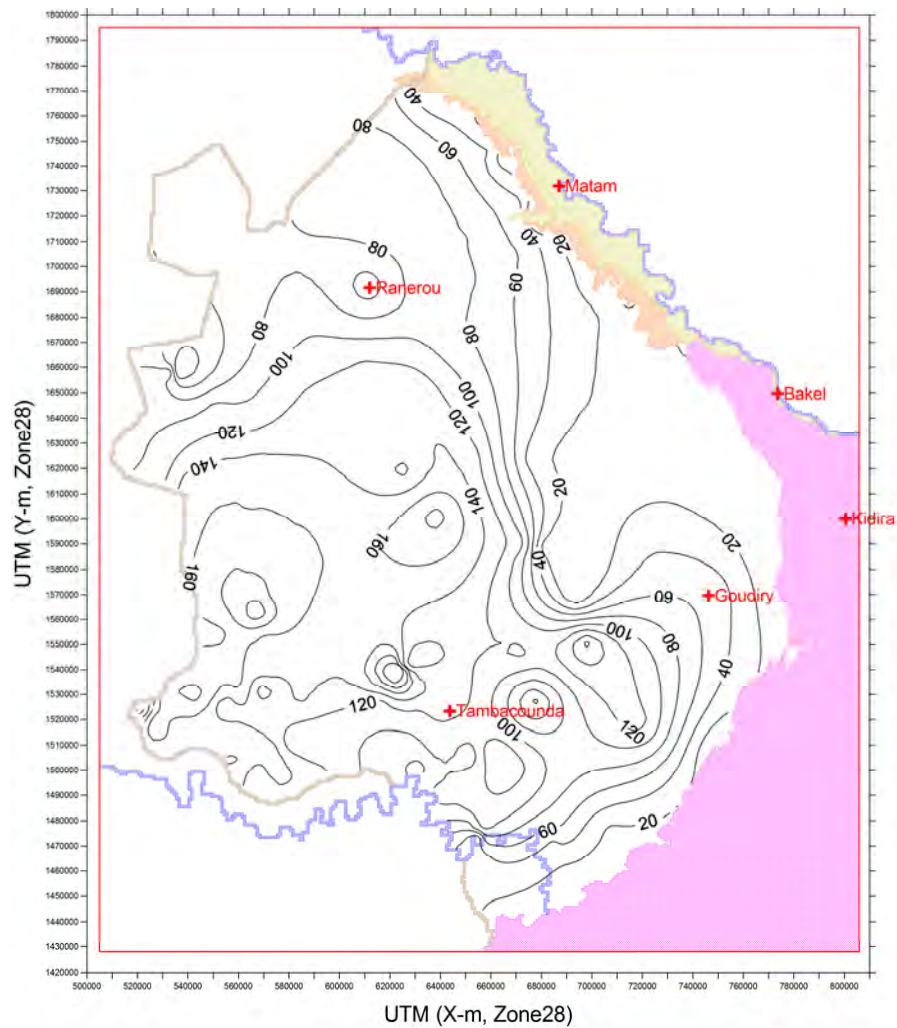


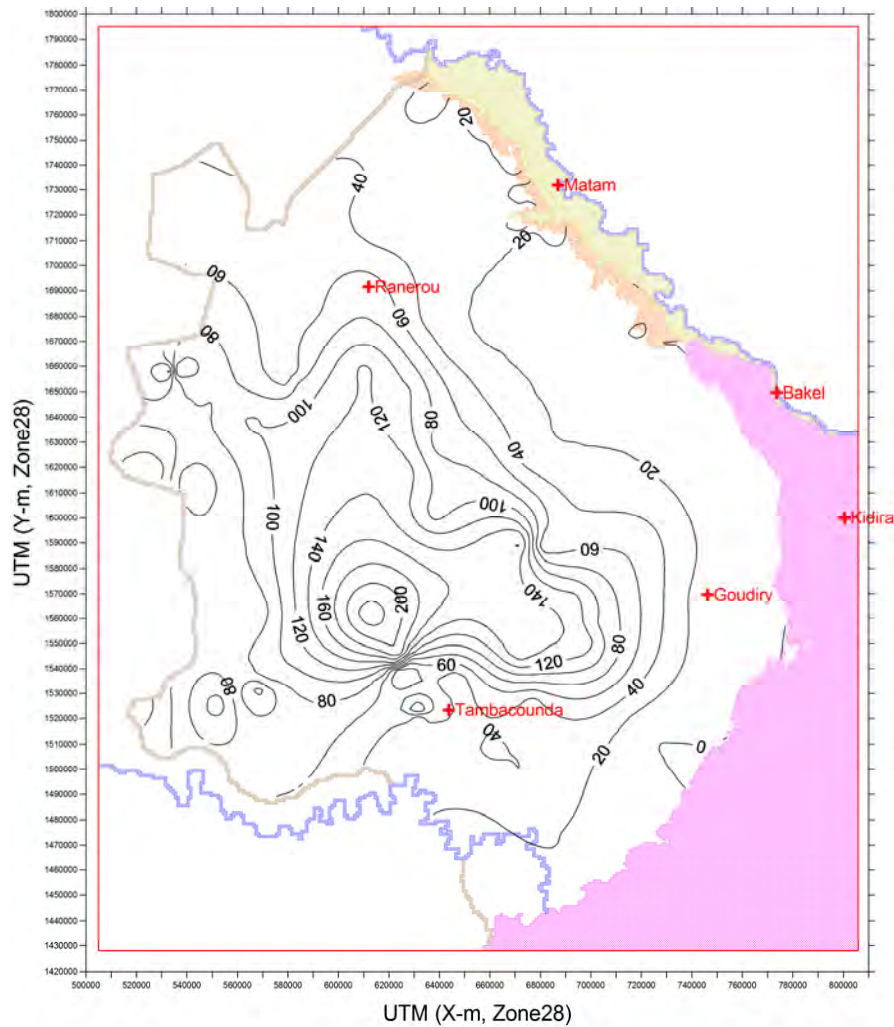
図 6-3-5 シミュレーションモデル層の分布



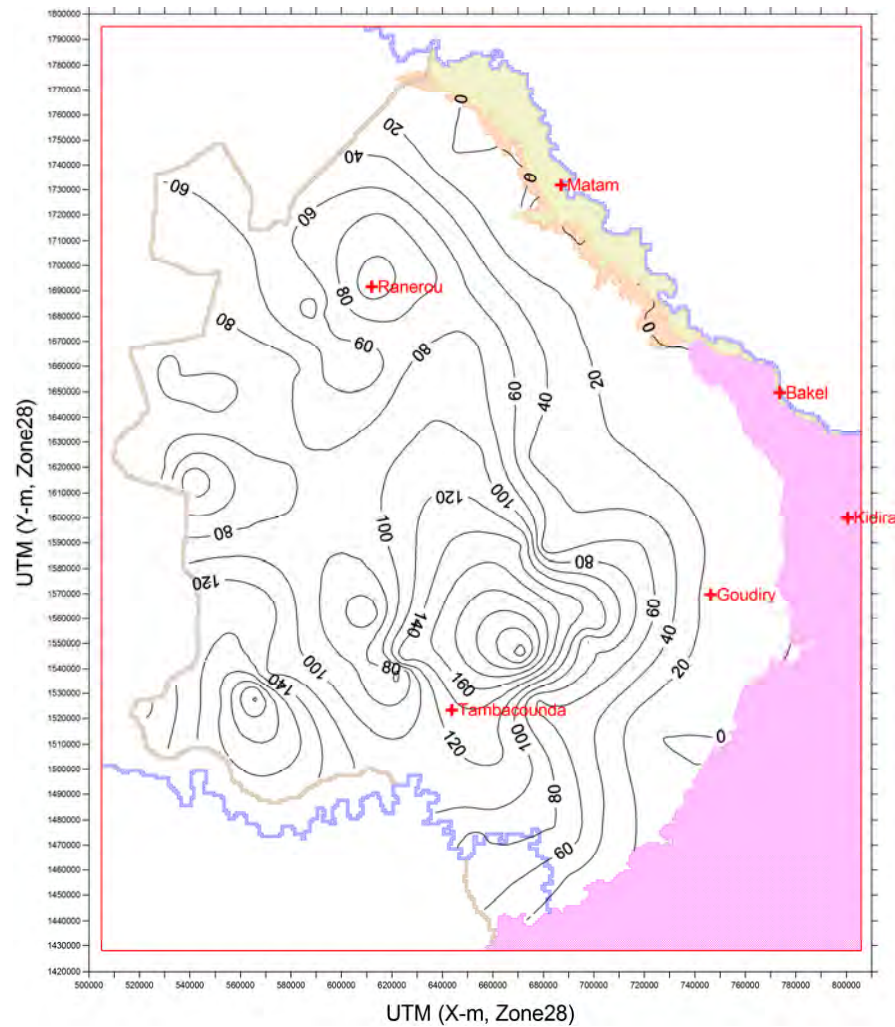
(Q層の層厚分布)



(Co層の層厚分布)

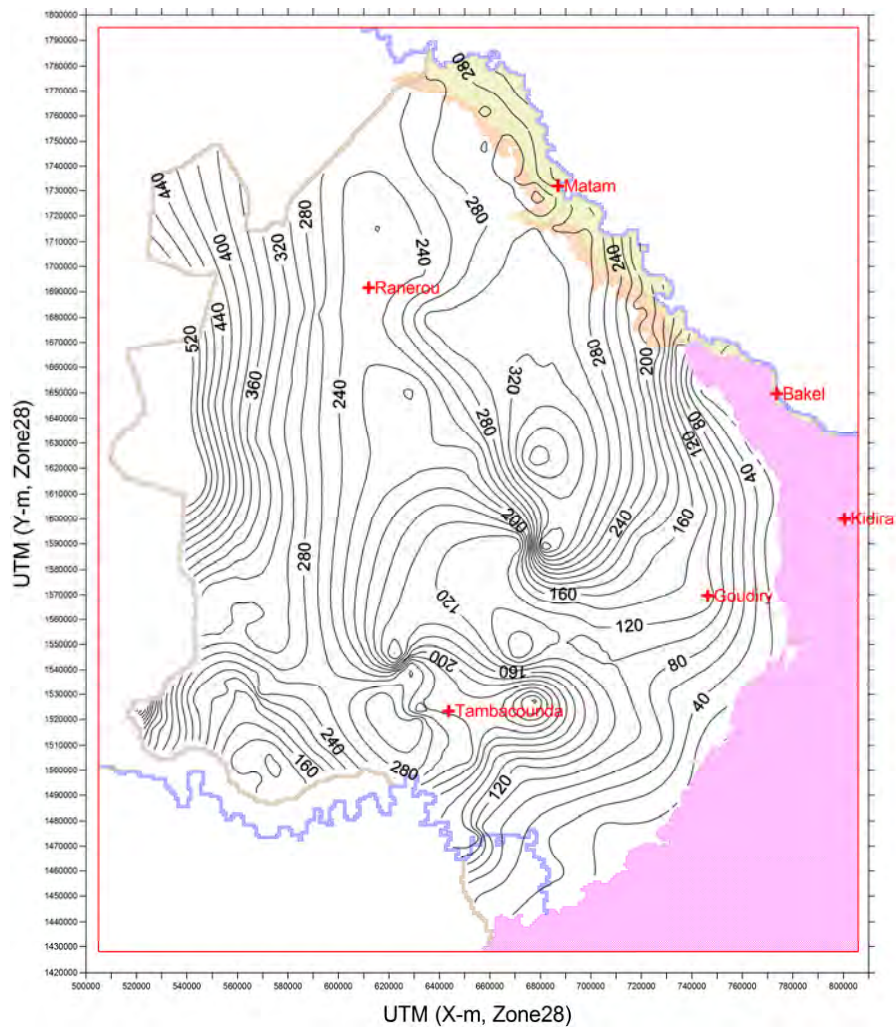


(Eo 層の層厚分布)



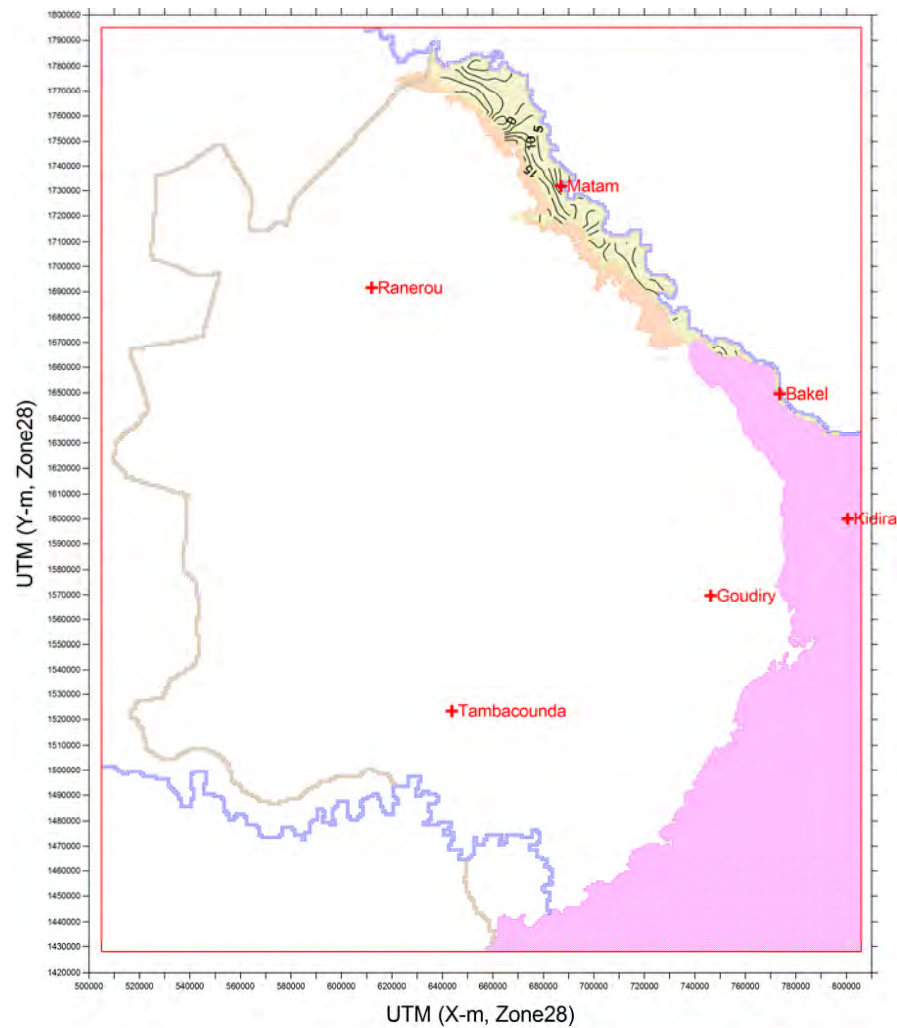
(Pa 層の層厚分布)



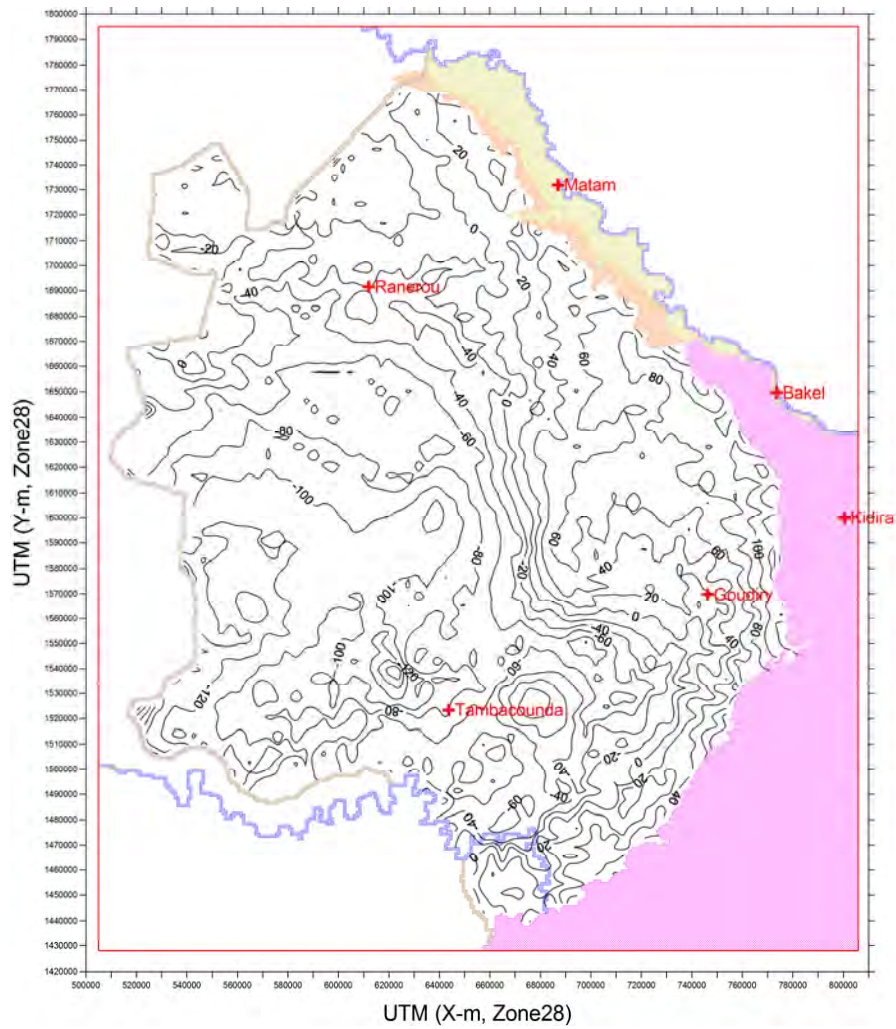


(Ma 層の層厚分布)

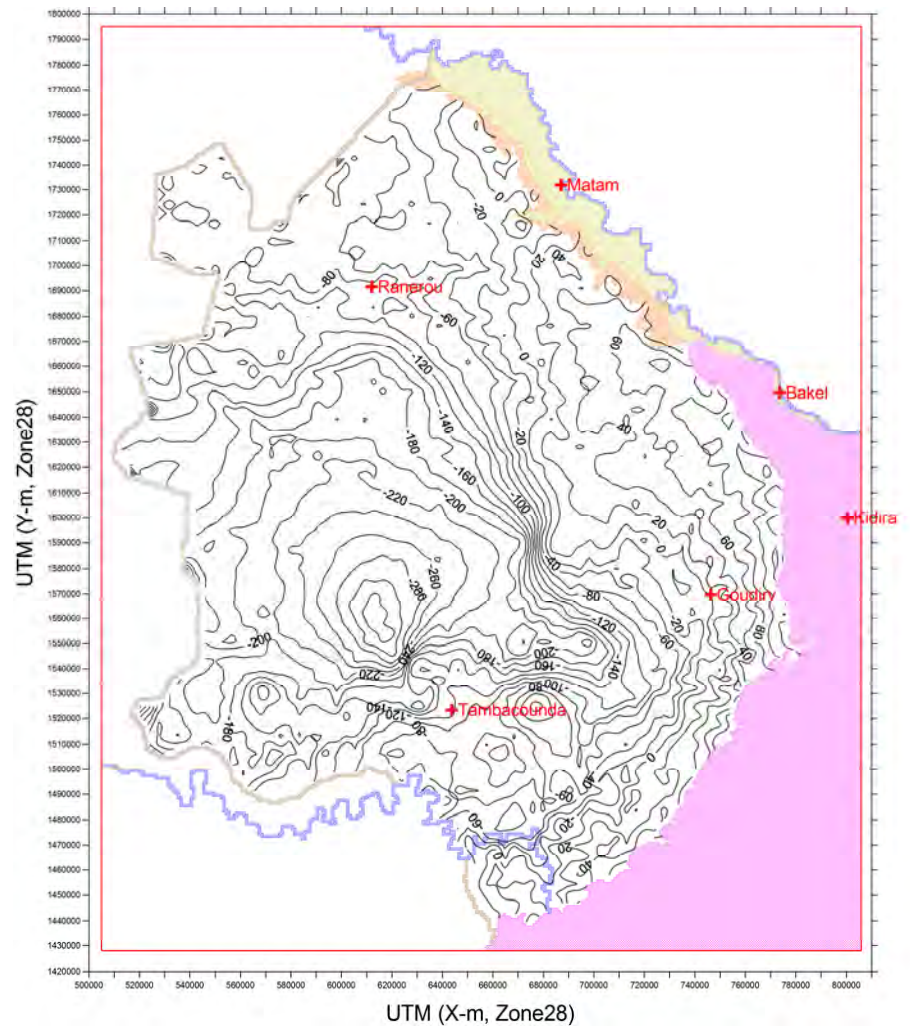
図 6-3-6 層厚分布 (単位 : m)



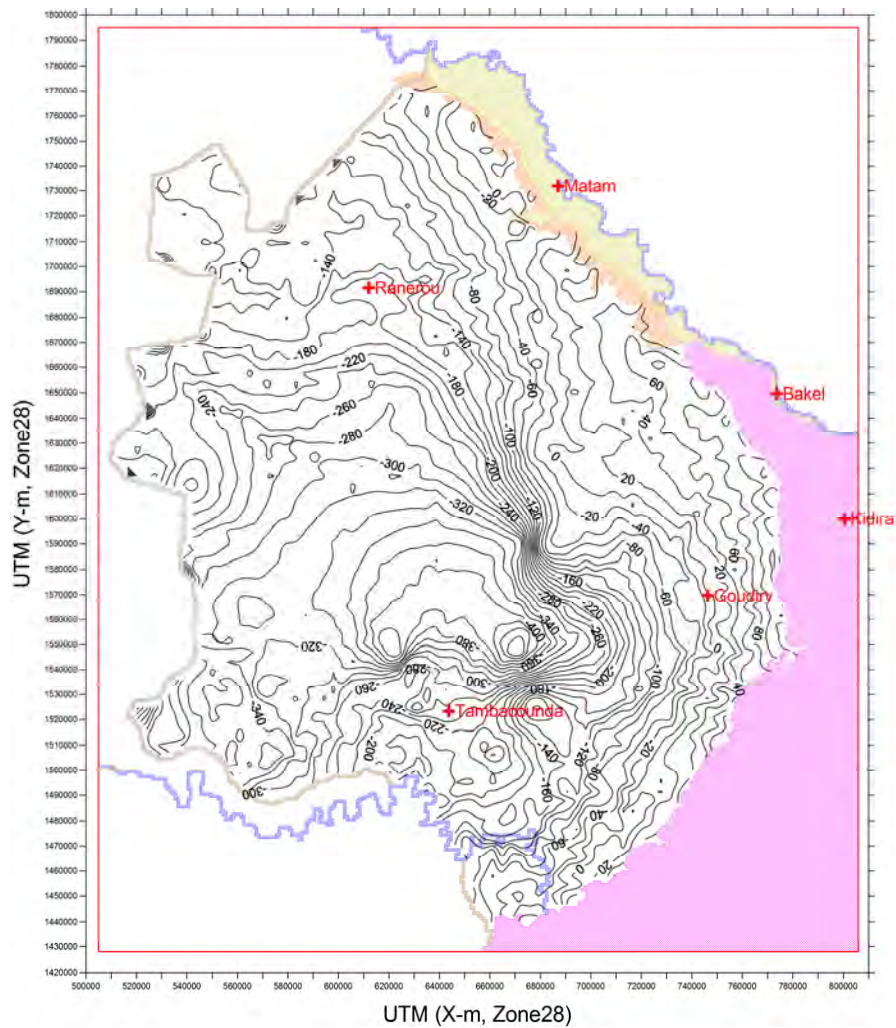
(Q 層の基底面深度分布)



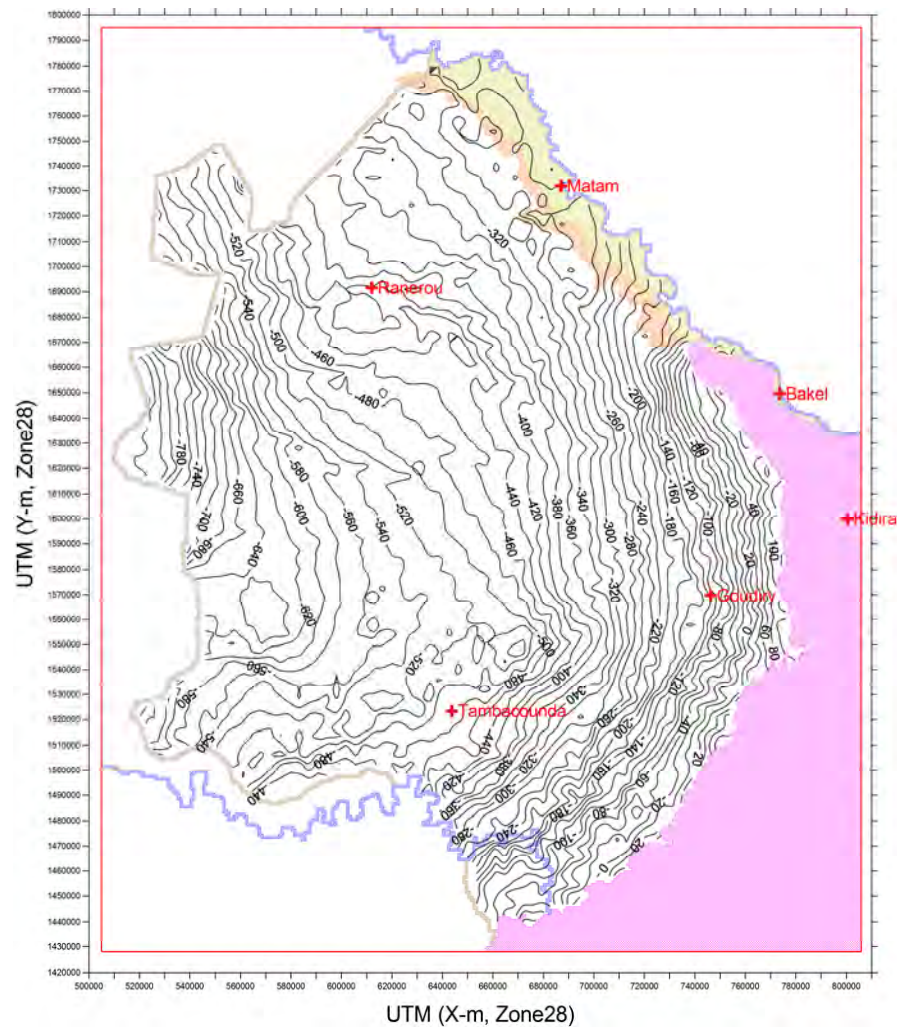
(Co層の基底面深度分布)



(Eo層の基底面深度分布)



(Pa 層の基底面深度分布)



(Ma 層の基底面深度分布)

図 6-3-7 基底面深度分布 (単位: 標高 m)

#### (4) 広域三次元モデルの境界条件

シミュレーションモデルでは、水文地質条件を考慮した境界条件の設定が必要である。本プロジェクトでは、以下の境界条件を設定している。

##### 1) 閉鎖境界

閉鎖境界は、これを境にして内側と外側との間で地下水流動が発生しない境界のことであり、広域三次元モデルではモデルの底面を閉鎖境界とした、また、実際の地層が存在しないグリッドや後述する一般水頭境界を指定していないタンバクンダ・マタム両州境界の外側のグリッドはモデル上では「Inactive Cell」（不透水計算セル）として扱い、計算領域から除外した。

##### 2) 一般水頭境界

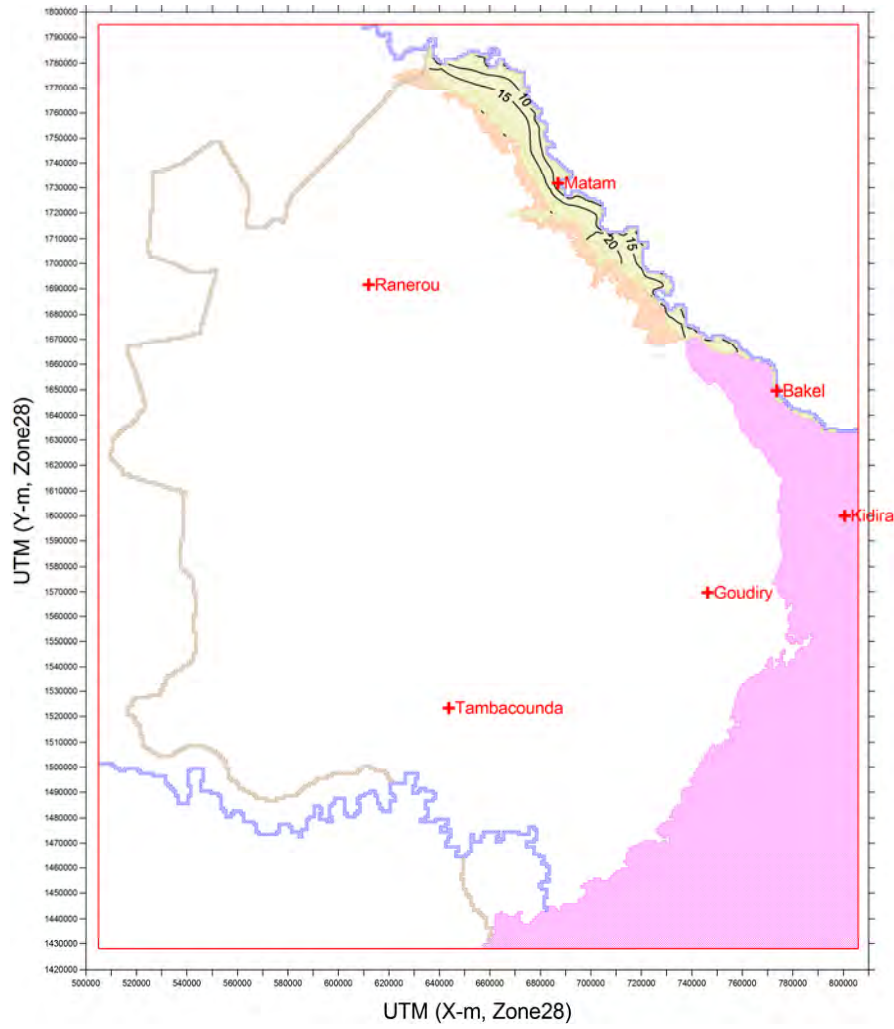
一般水頭境界は、設定したグリッドを既知水頭として、かつシミュレーションの進行にあわせて変化させることが可能な境界条件である。一般水頭境界における計算は、特定のグリッドの外側に固定水頭境界があり、そのグリッドと固定境界との間に一定の水理コンダクタンスを有する物質が存在すると仮定した条件で行われる。本プロジェクトでは、セネガル川とガンビア川が流下するグリッドに一般水頭境界を設定し、DGPRE の河川水位観測記録に基づいて水頭を変化させた（「図 6-3-4 シミュレーション解析範囲」中で GHB（General Head Boundary）としたグリッドが一般水頭境界を設定した箇所である）。

#### (5) 初期水頭

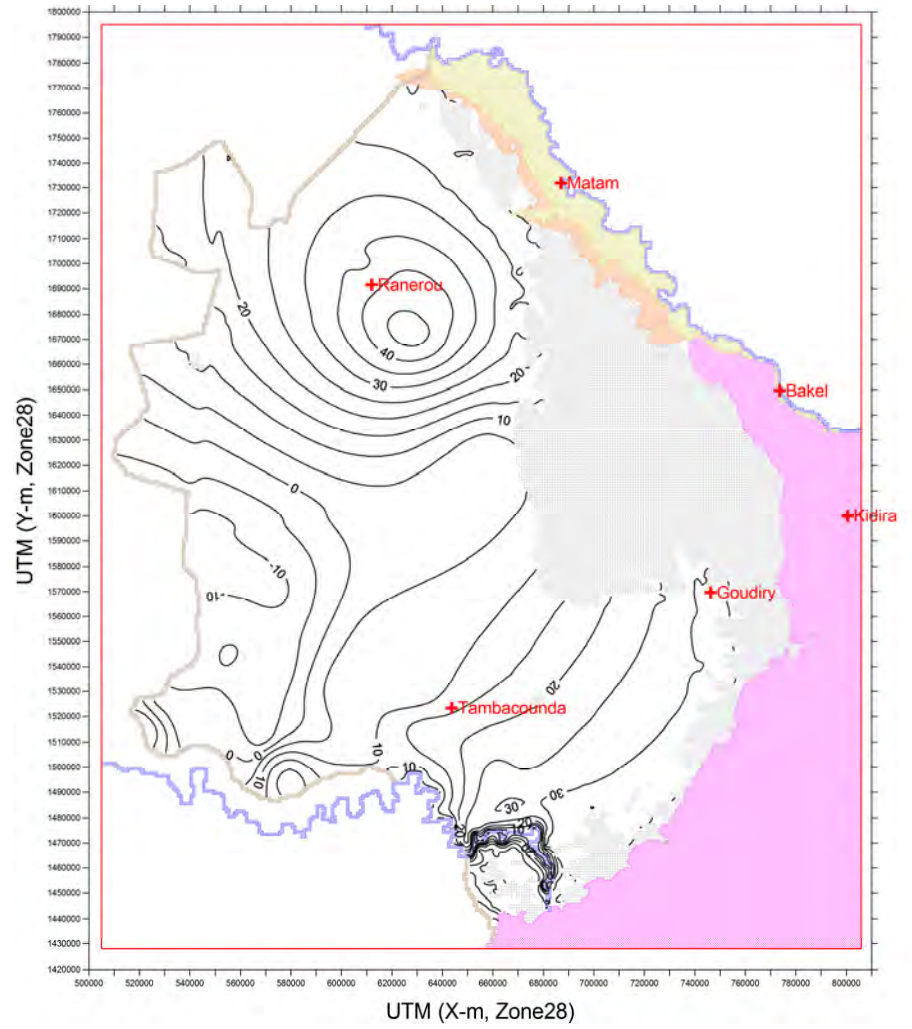
広域三次元モデルの検証は、1988 年 1 月から 2007 年 12 月までの月別時系列データを入力して非定常計算により実施したが、検証期間の非定常計算の前に長期非定常計算（準定常計算）を行い、検証非定常計算開始時の初期水頭とした（図 6-3-8 参照）。

本プロジェクトで実施した長期非定常計算（準定常計算）の方法は、以下のとおりである。

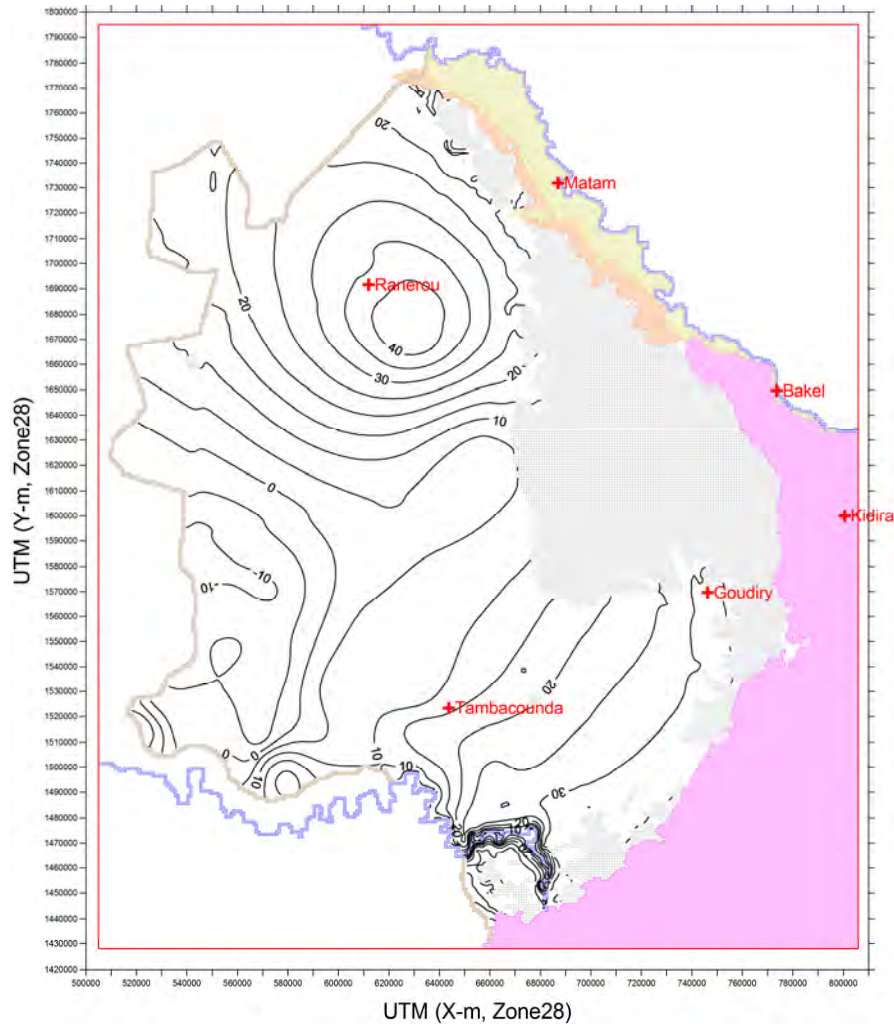
- ① 帯水層ごとに掘削時の静水位をもとに地下水位分布を設定
- ② 1989 年から 1992 年の 5 年間の条件で 10 サイクル（50 年間）の計算を実施
- ③ ②の最終ステップの計算水頭を検証非定常計算の初期水頭として入力



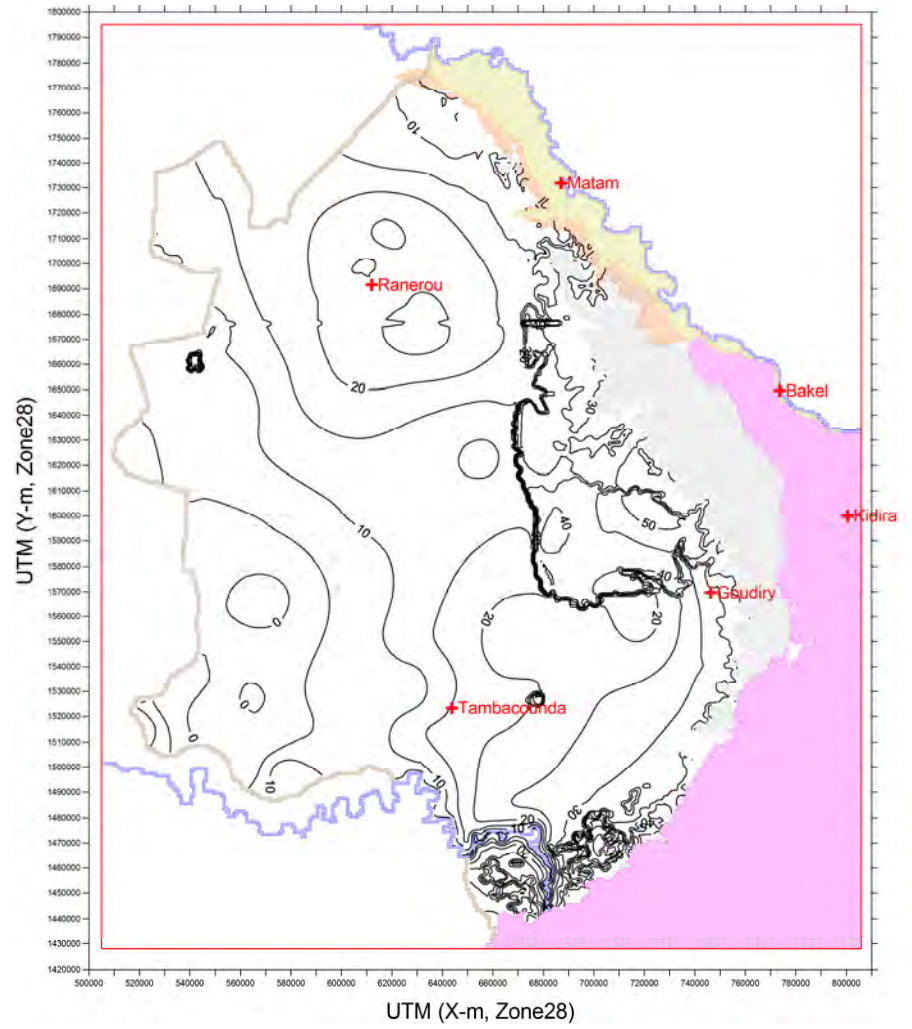
(Q層の計算初期水頭)



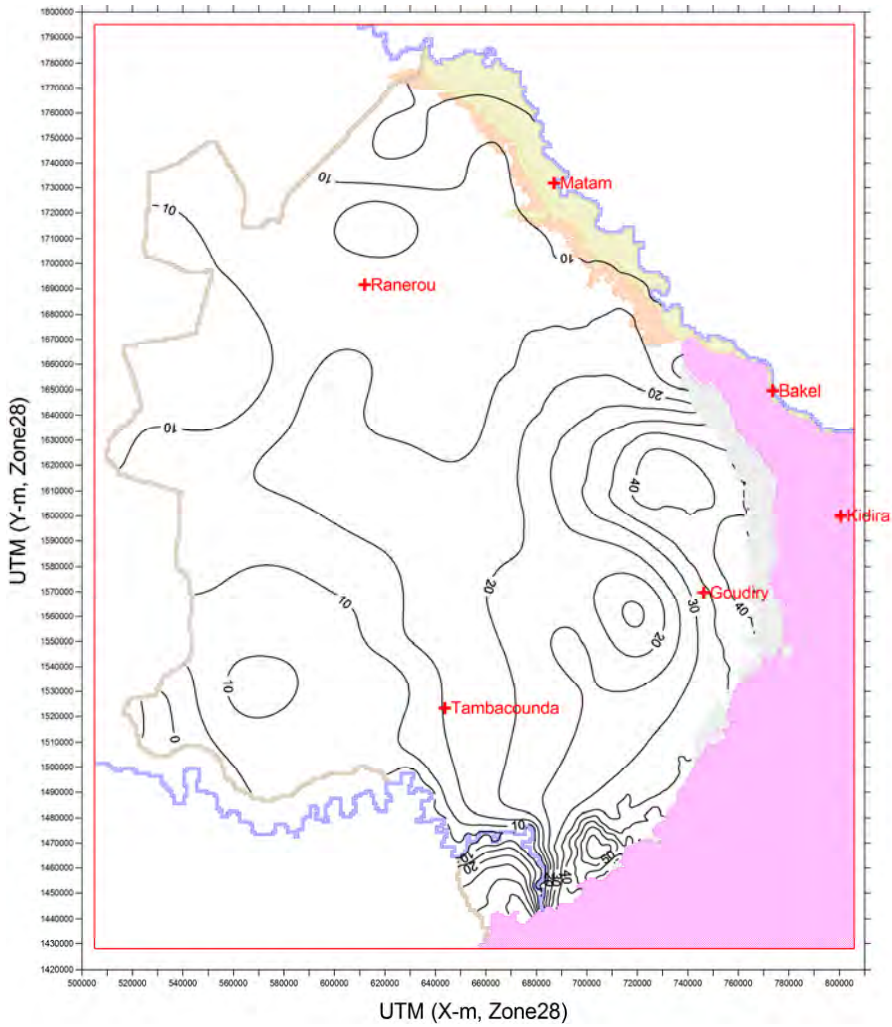
(Co層の計算初期水頭)



(Eo 層の計算初期水頭)



(Pa 層の計算初期水頭)



(Ma 層の計算初期水頭)

図 6-3-8 計算初期水頭分布 (単位: 標高 m)

### 6.3.2 内挿検定結果

#### (1) 検証非定常計算による計算水頭分布

前項で作成した初期水頭を各モデル層に入力し、1988年1月から2007年12月までの240ヶ月について月別に地下水かん養量や揚水量データを入力して検証計算を行った。

図6-3-9に最終ステップである2007年12月の各モデル層の計算水頭分布を例として示す。次頁以降の図中の濃い灰色の部分、揚水が難しく空井戸となる地域である。

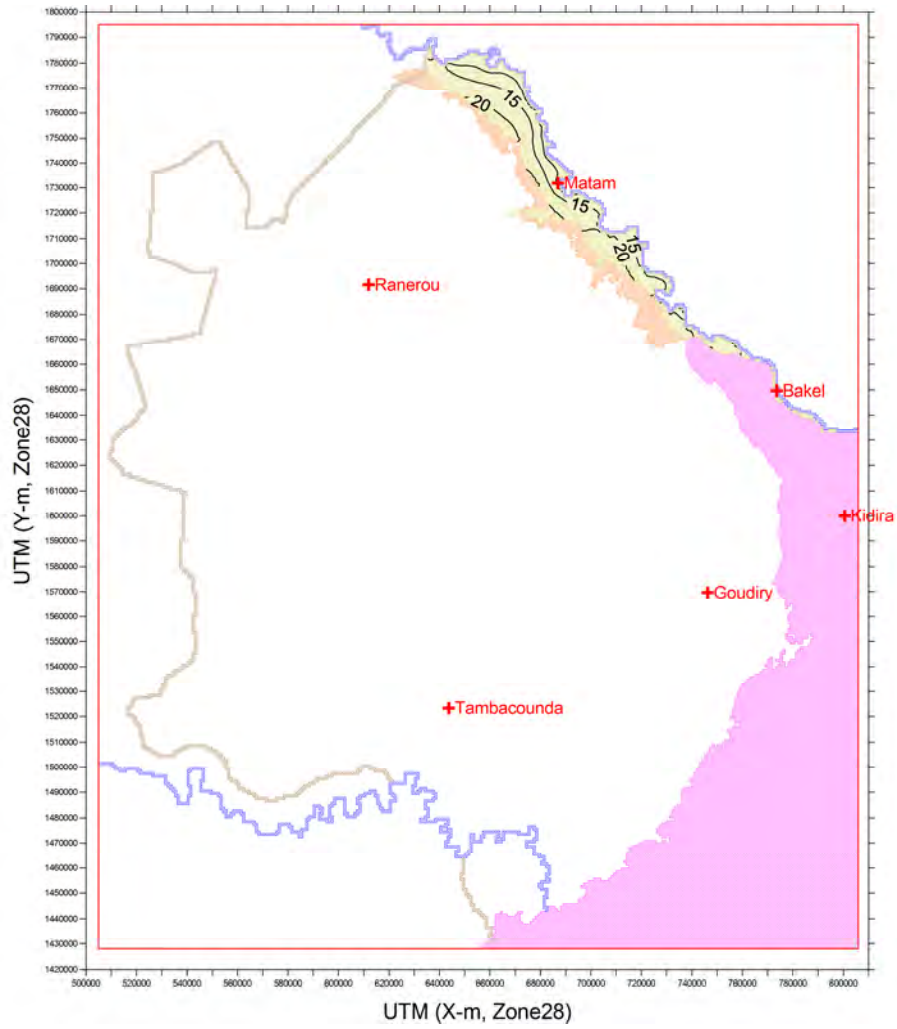
#### (2) 計算水頭変動と実測水頭変動との比較

モデルの精度を検証するために、DGPRES モニタリング井の観測地下水位変動と計算水頭変動を比較した結果を図6-3-10に示す。観測値と計算値に隔たりがある地点は、(i)観測井の近傍に生産井があり観測井の地下水位が低い、(ii)観測井の基準点標高に疑問がある、等の地点である。

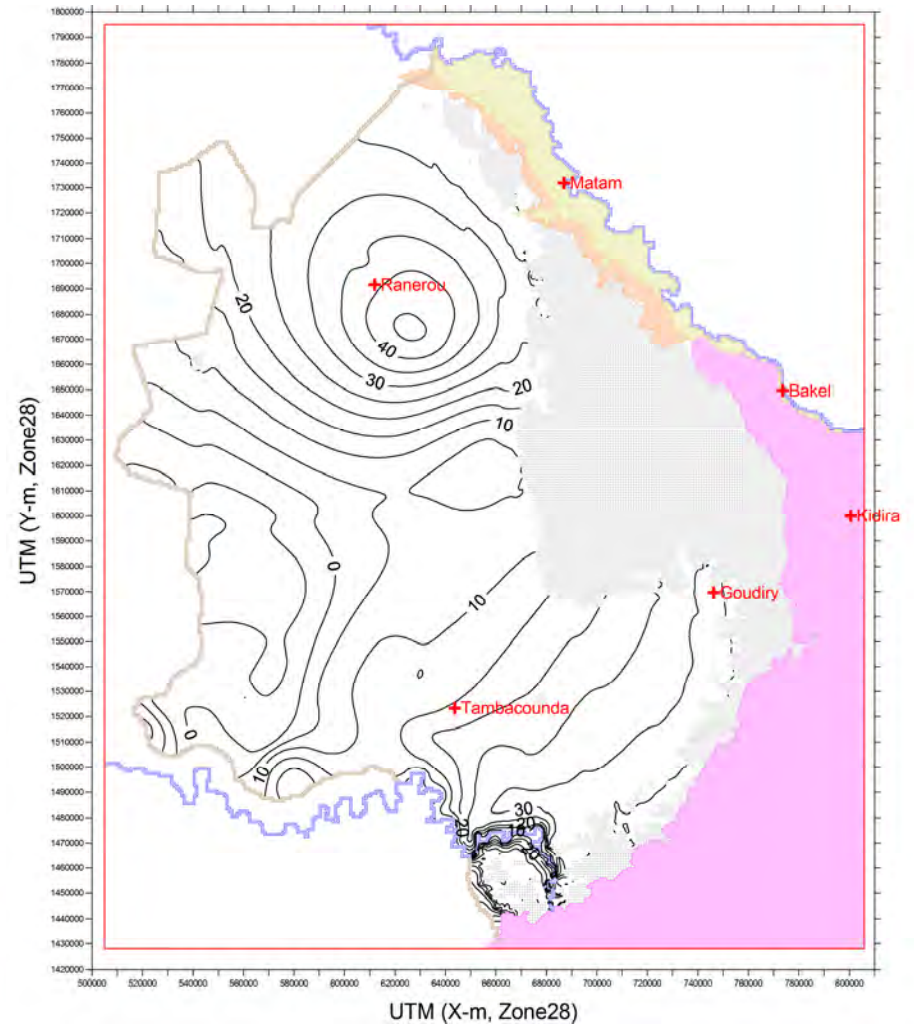
一般に、「内挿検定値は理想的には節点において合致させるべきであるが、実際にはこれはほとんど不可能である。その結果、節点での水頭を推定することによる内挿検定誤差が発生する。この種の誤差は広域モデルでは10ftかそれ以上になることがある (Anderson, M.P. and Woessner, W.W, 1992)<sup>3</sup>」と考えられており、本プロジェクトにおける計算水頭変動は、実際の地下水頭変動をよく再現できていると判断される。

<sup>3</sup> Anderson, M.P. and Woessner, W.W. (1992) : Applied Groundwater Modeling, Academic Press, p381,

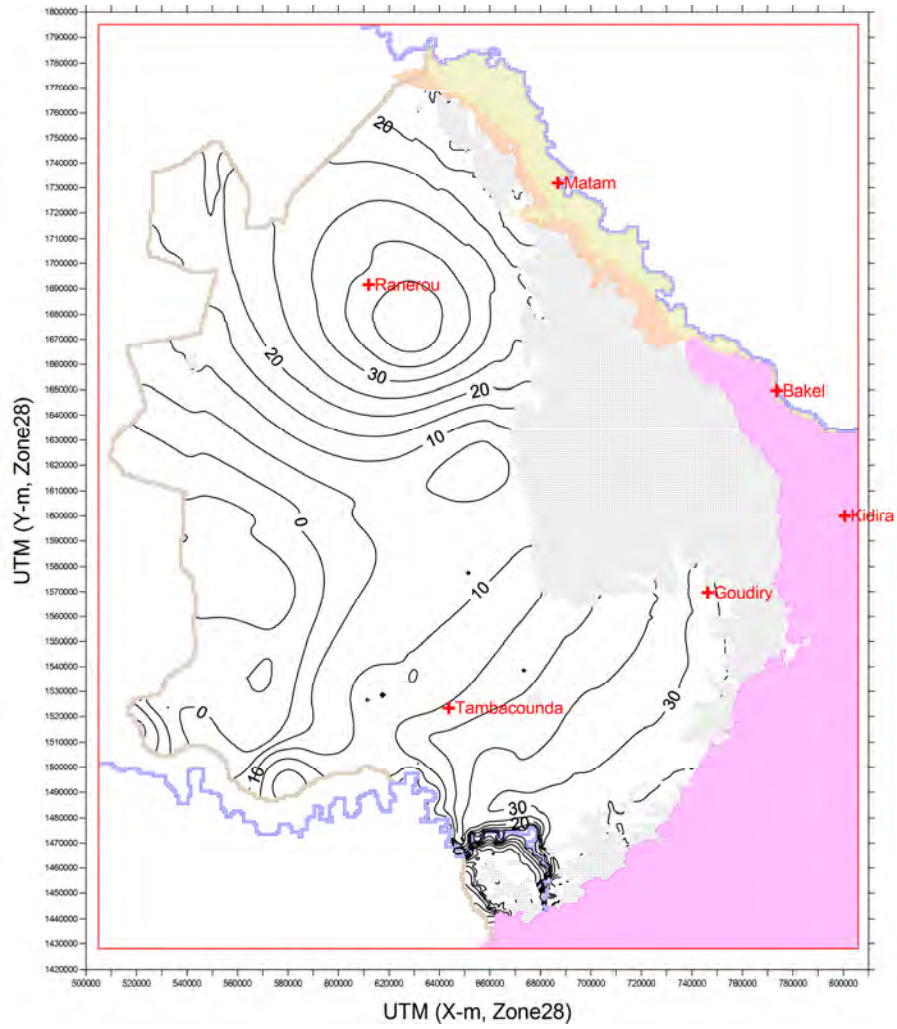




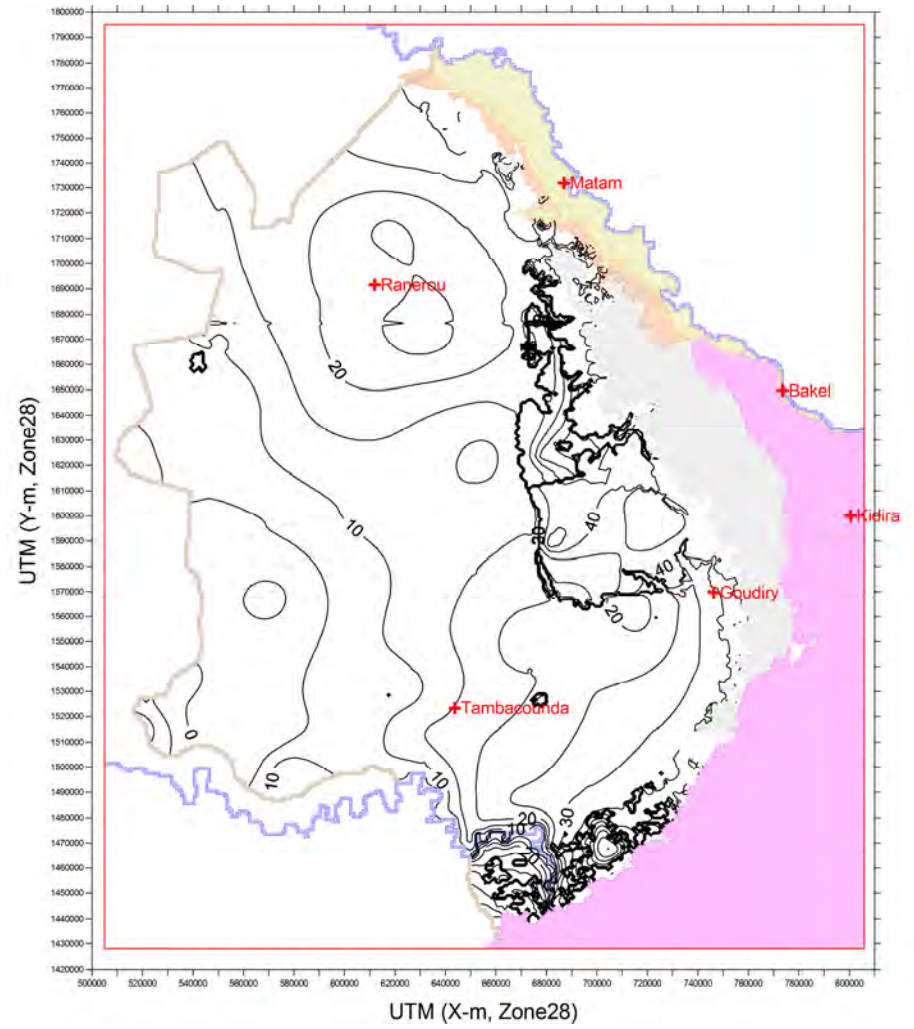
(Q層の2007年12月の計算水頭分布)



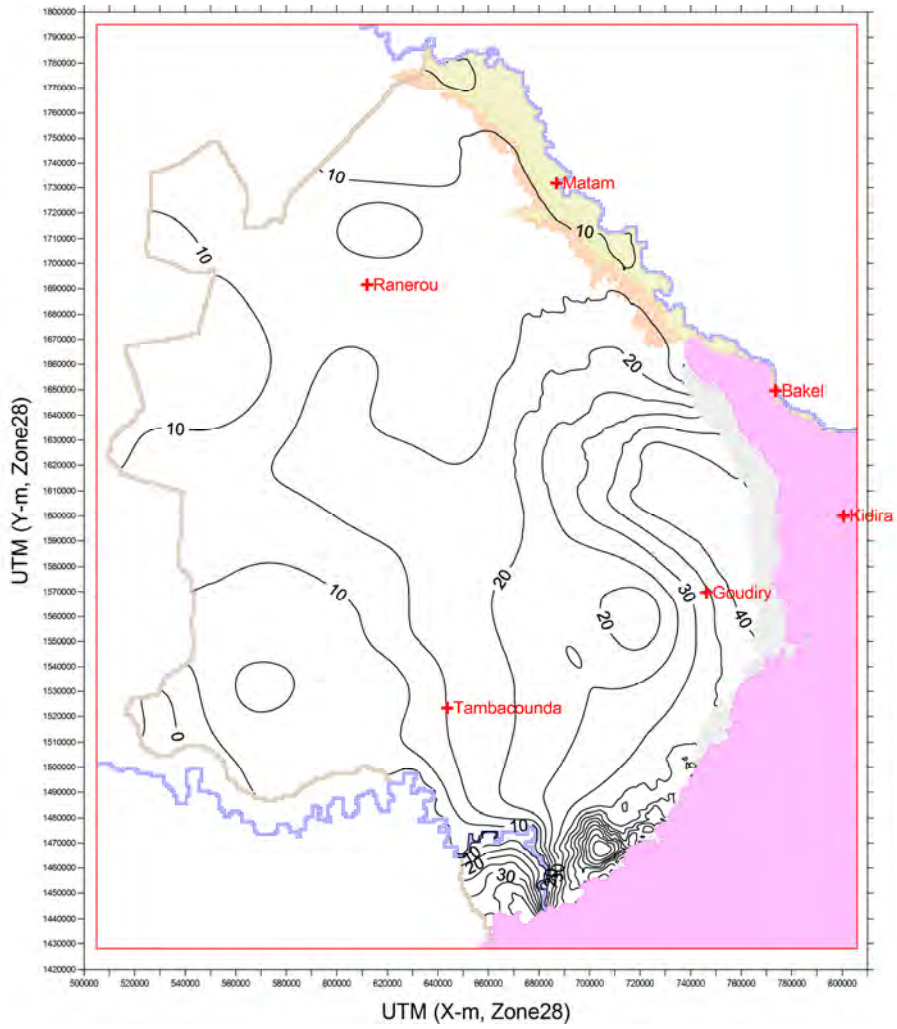
(Co層の2007年12月の計算水頭分布)



(Eo層の2007年12月の計算水頭分布)



(Pa層の2007年12月の計算水頭分布)



(Ma層の2007年12月の計算水頭分布)  
図 6-3-9 計算水頭分布の例 (単位: 標高 m)

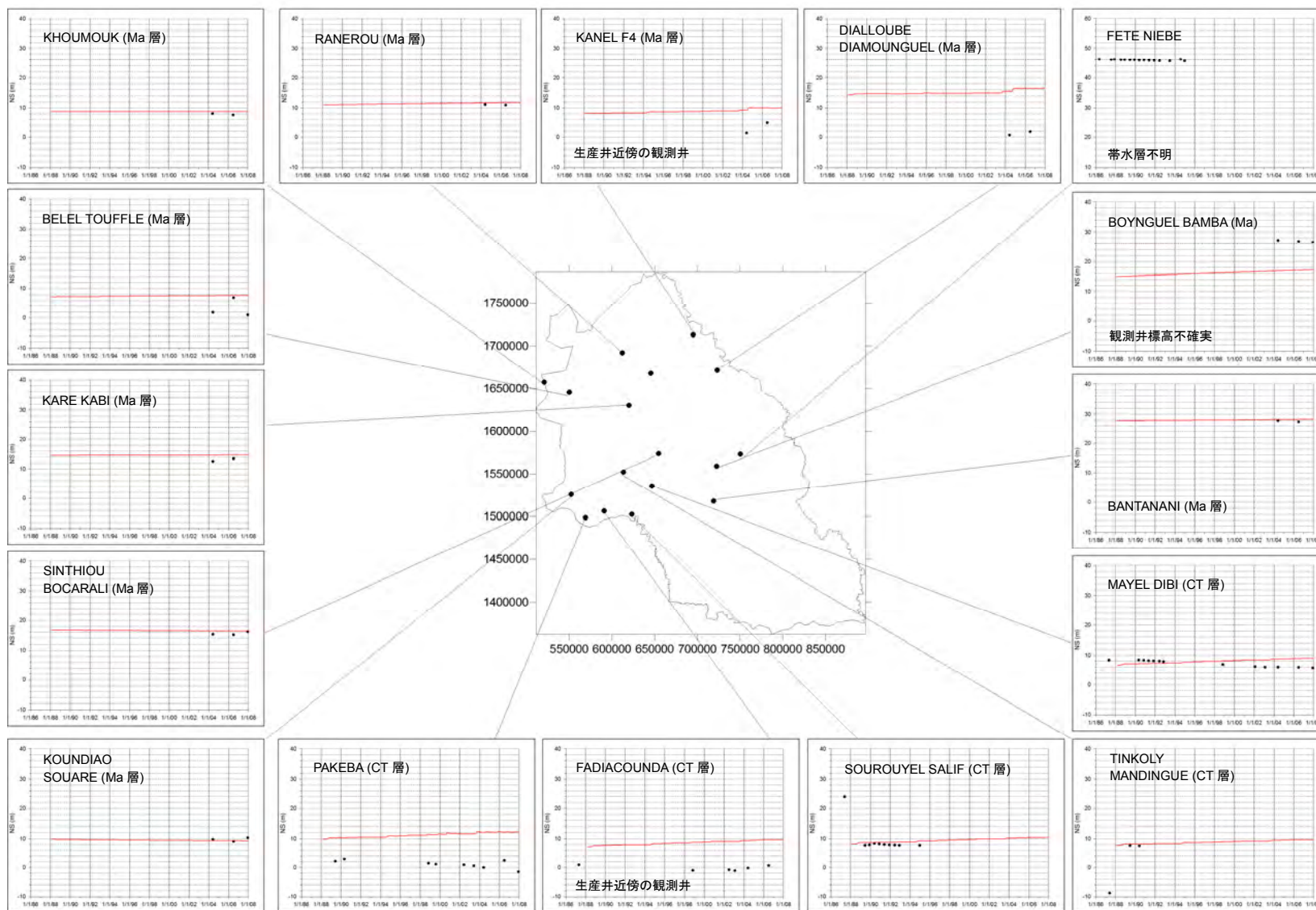
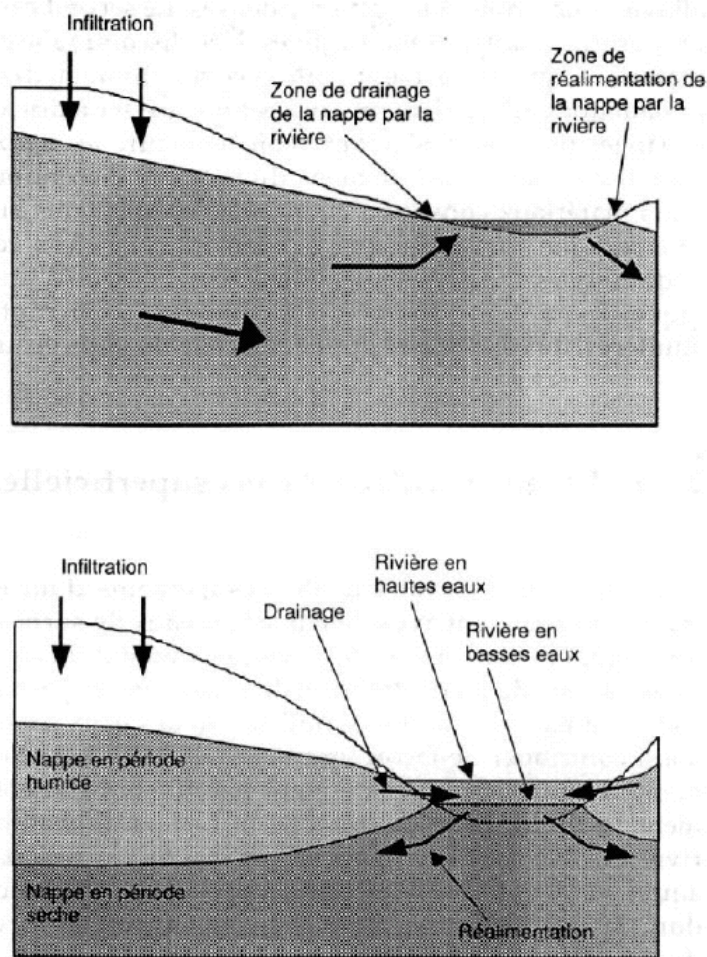


図 6-3-10 DGPRE 観測井の観測地下水位変動（黒丸）と計算地下水頭変動の比較（赤線）

(3) 検証非定常計算における河川水と地下水の交流

河川流域では、河川水位と地下水位の関係により、図 6-3-11 に模式するような河川水と地下水の交流が発生する。



(出典：Master Professionnel Eaux Souterraines Cours d'hydrogéologie, p9, François Renard, 2007)

図6-3-11 河川水と地下水の交流

検証非定常計算における河川水 (セネガル川、ガンビア川) と地下水の交流の計算結果を表 6-3-2 ~表 6-3-3 および図 6-3-12~図 6-3-15 に示す。図 6-3-12~図 6-3-15 においては、赤色が河川から地下水への流入量、青色が河川への地下水の流出量を示す。

表 6-3-2 セネガル川から地下水への流入と地下水のセネガル川への流出

年	Q 層			Ma 層		
	流入 (m3/年)	流出 (m3/年)	収支 (m3/年)	流入 (m3/年)	流出 (m3/年)	収支 (m3/年)
1988	11 454 744	41 831 850	-30 377 105	103 124 186	35 541 135	67 583 051
1989	9 856 479	41 946 185	-32 089 706	88 039 312	68 528 559	19 510 753
1990	3 894 570	42 295 219	-38 400 649	53 733 700	70 049 119	-16 315 419
1991	9 383 949	33 689 192	-24 305 243	78 315 628	46 470 705	31 844 923
1992	4 730 986	27 578 699	-22 847 713	49 483 478	27 437 590	22 045 889
1993	4 663 511	35 041 985	-30 378 473	45 395 888	44 519 182	876 707
1994	21 739 762	28 498 457	-6 758 695	139 322 739	37 657 313	101 665 426

年	Q層			Ma層		
	流入 (m3/年)	流出 (m3/年)	収支 (m3/年)	流入 (m3/年)	流出 (m3/年)	収支 (m3/年)
1995	12 344 812	37 344 337	-24 999 525	86 421 633	80 481 274	5 940 359
1996	3 387 639	43 844 417	-40 456 778	38 081 204	67 735 550	-29 654 346
1997	8 291 796	41 797 610	-33 505 814	68 203 397	79 811 457	-11 608 061
1998	11 610 458	35 311 780	-23 701 322	80 617 925	61 539 015	19 078 910
1999	23 248 885	30 592 946	-7 344 062	127 032 388	55 681 066	71 351 322
2000	7 152 031	36 431 375	-29 279 344	61 541 804	76 638 493	-15 096 689
2001	13 226 564	39 973 133	-26 746 569	87 851 648	79 597 959	8 253 689
2002	7 924 288	36 181 524	-28 257 236	63 383 600	66 699 608	-3 316 008
2003	18 269 598	31 756 201	-13 486 603	110 607 156	63 895 969	46 711 186
2004	605 439	52 746 531	-52 141 093	36 301 099	66 879 282	-30 578 183
2005	5 748 776	51 406 255	-45 657 479	68 647 593	52 524 464	16 123 129
2006	2 101 806	50 563 624	-48 461 818	35 616 530	55 680 496	-20 063 967
2007	6 110 580	50 170 015	-44 059 435	54 037 697	66 960 978	-12 923 281
平均	9 287 334	39 450 067	-30 162 733	73 787 930	60 216 461	13 571 469

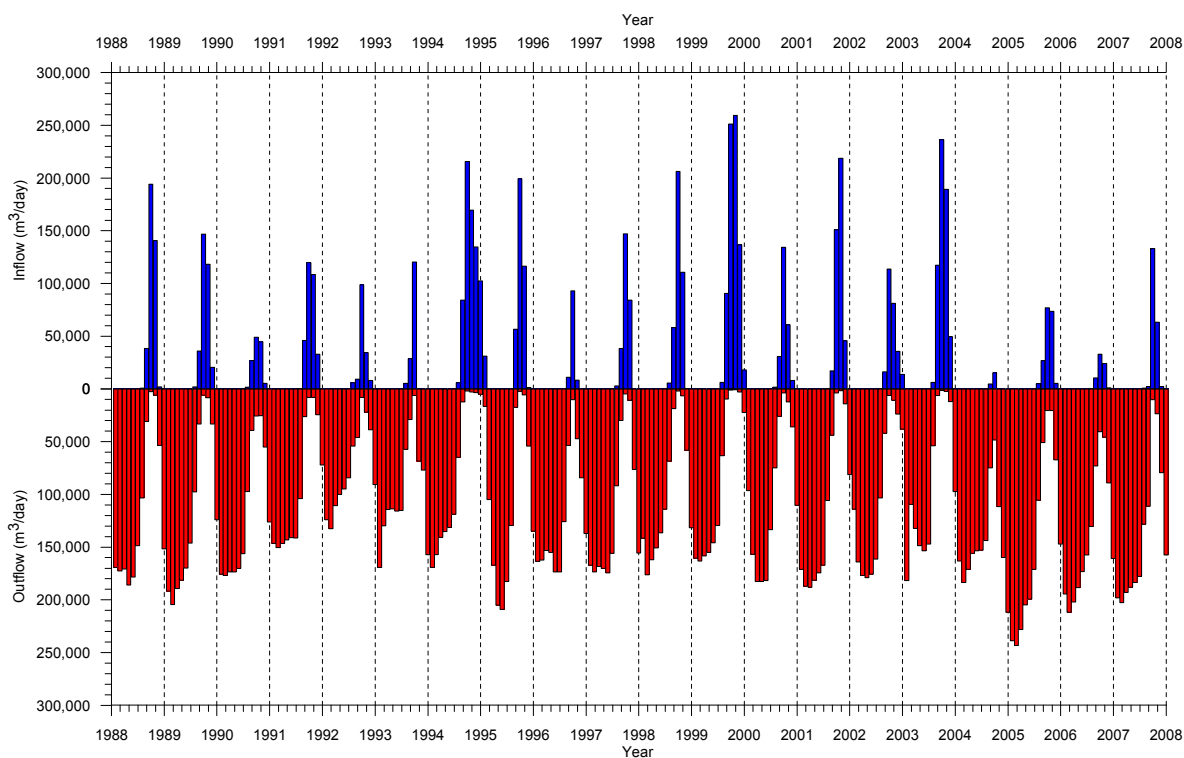


図 6-3-12 セネガル川と地下水の流入出 (Q層)

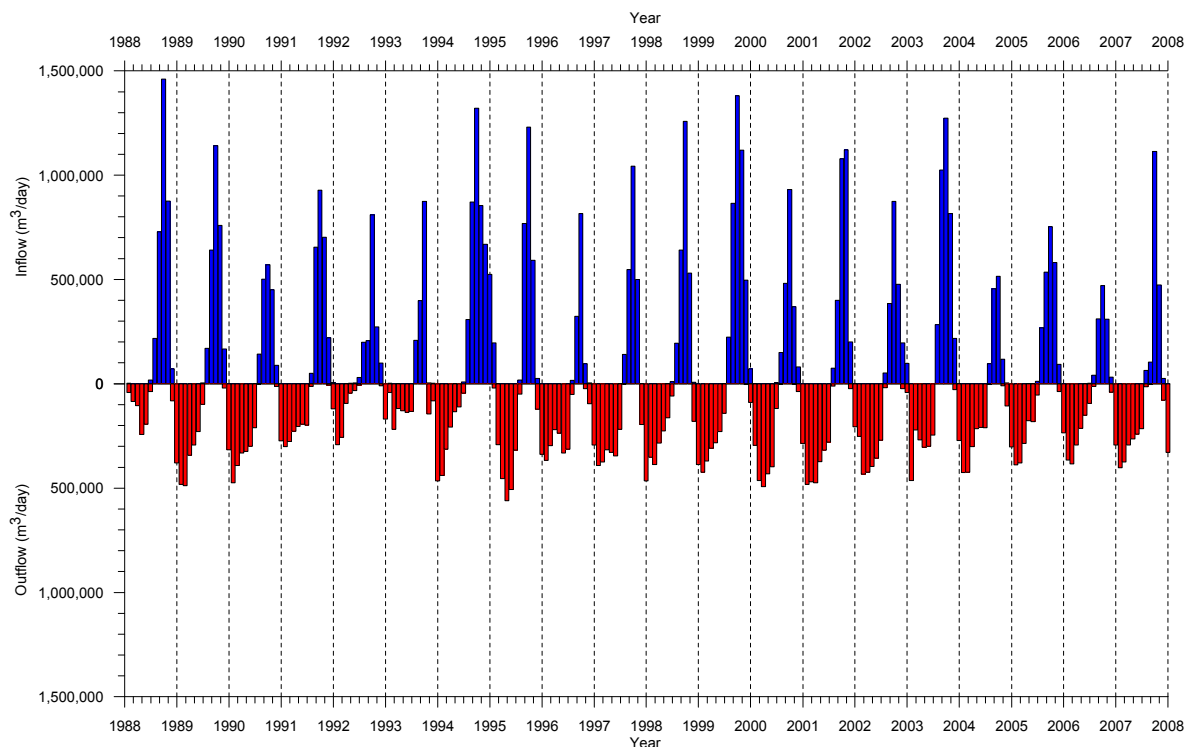


図 6-3-13 セネガル川と地下水の流入出 (Ma 層)

表 6-3-3 ガンビア川から地下水への流入と地下水のガンビア川への流出

年	Co 層 (m3/年)			Eo 層 (m3/年)			Pa 層 (m3/年)			Ma 層 (m3/年)		
	流入	流出	収支	流入	流出	収支	流入	流出	収支	流入	流出	収支
1988	3 834 308	36 027 226	-32 192 918	10 320	60 047	-49 728	7 365	34 137	-26 772	13 994 497	14 402 990	-408 492
1989	3 553 042	36 749 124	-33 196 082	8 749	62 106	-53 357	7 427	33 175	-25 749	12 820 766	17 993 966	-5 173 200
1990	2 278 322	39 653 476	-37 375 154	5 004	68 160	-63 156	3 696	35 744	-32 048	5 636 209	21 374 323	-15 738 114
1991	2 563 387	39 378 891	-36 815 503	5 827	67 254	-61 427	4 769	35 583	-30 813	8 061 023	21 127 265	-13 066 242
1992	2 004 575	40 466 435	-38 461 860	4 704	69 294	-64 590	3 330	36 961	-33 631	5 181 675	21 769 929	-16 588 254
1993	1 896 736	41 097 739	-39 201 003	4 621	69 842	-65 221	3 074	38 196	-35 122	4 386 392	21 351 862	-16 965 470
1994	5 171 713	34 595 648	-29 423 936	13 312	58 632	-45 320	12 135	31 309	-19 175	20 375 182	17 342 492	3 032 690
1995	3 071 598	37 239 339	-34 167 741	7 949	66 516	-58 567	7 828	33 983	-26 155	11 958 588	23 572 939	-11 614 351
1996	2 333 189	41 413 310	-39 080 121	7 938	71 891	-63 953	7 367	37 317	-29 950	11 139 943	26 322 903	-15 182 959
1997	3 255 608	38 154 800	-34 899 193	8 317	64 827	-56 510	8 970	32 130	-23 160	15 302 603	20 125 368	-4 822 765
1998	2 799 819	40 137 245	-37 337 427	7 921	68 840	-60 919	8 171	35 521	-27 349	12 842 789	24 488 075	-11 645 286
1999	4 833 599	37 807 251	-32 973 651	15 100	66 844	-51 744	13 407	34 725	-21 318	20 770 023	24 423 880	-3 653 856
2000	1 977 690	41 193 464	-39 215 775	5 028	71 399	-66 372	5 505	35 787	-30 282	9 242 999	26 742 056	-17 499 057
2001	4 363 936	43 808 013	-39 444 077	14 494	73 744	-59 251	9 548	40 843	-31,295	13 679 990	28 609 097	-14 929 107
2002	1 879 861	44 803 255	-42 923 395	6 428	76 347	-69 919	4 653	41 569	-36 915	6 281 332	27 957 979	-21 676 646
2003	8 715 476	30 003 625	-21 288 149	30 681	57 766	-27 085	21 768	29 335	-7 568	29 958 406	15 370 616	14 587 790
2004	6 140 046	38 949 601	-32 809 554	21 286	71 722	-50 435	15 263	35 833	-20 570	21 757 865	28 860 906	-7 103 041
2005	1 664 563	40 834 640	-39 170 077	5 642	70 683	-65 041	6 491	34 244	-27 753	8 724 469	26 291 452	-17 566 984
2006	868 306	46 249 688	-45 381 382	2 456	80 917	-78 461	2 697	39 375	-36 678	4 451 064	28 651 049	-24 199 985
2007	717 305	48 115 293	-47 397 988	2 102	82 873	-80 771	2 007	42 056	-40 049	3 567 472	27 565 419	-23 997 946
平均	3 196 154	39 833 903	-36 637 749	9 394	68 985	-59 591	7 774	35 891	-28 118	12 006 664	23 217 228	-11 210 564

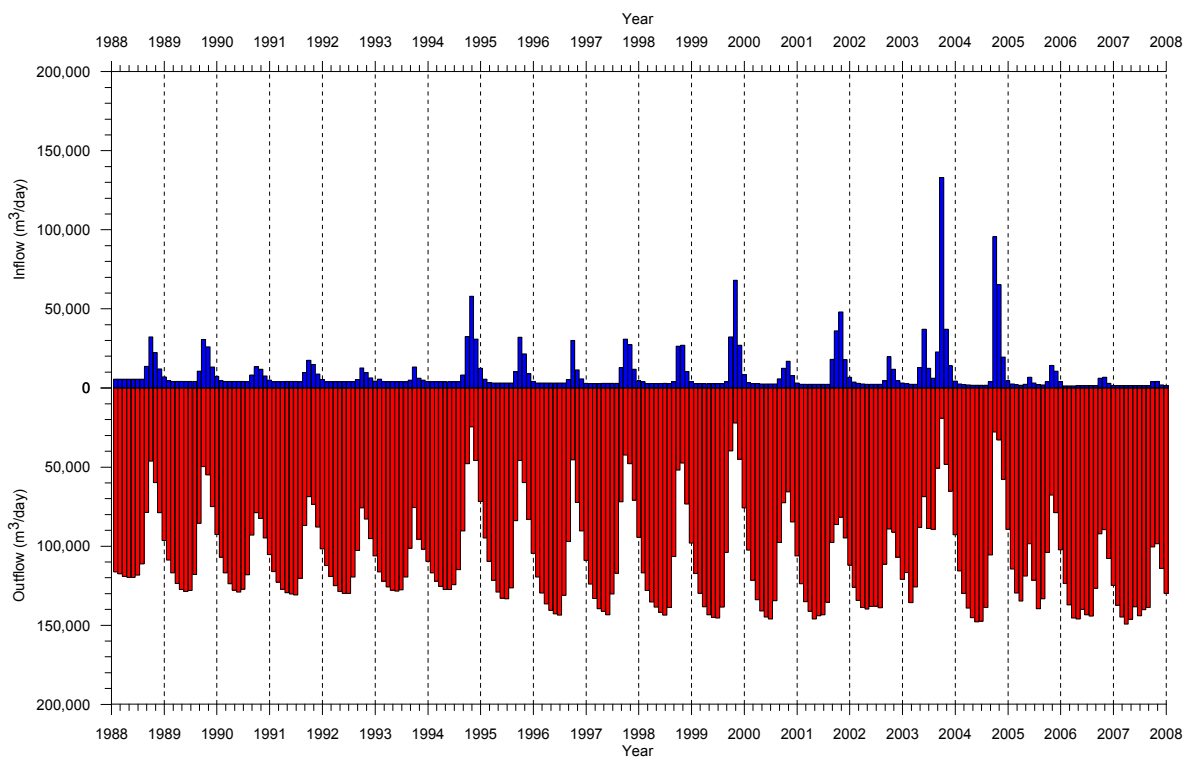


図 6-3-14 ガンビア川と地下水の流入出 (Q層)

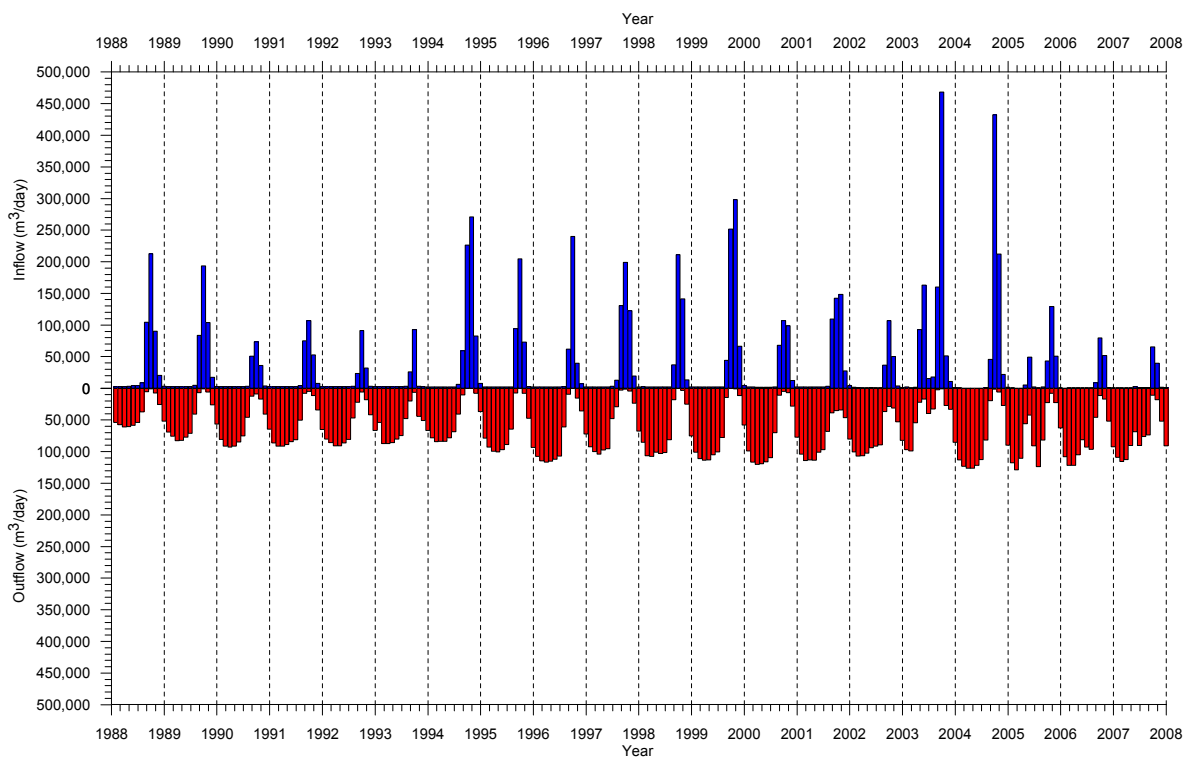


図 6-3-15 ガンビア川と地下水の流入出 (Ma層)



### 6.3.3 脆弱性分布

調査地域の水理地質的脆弱性を評価するために、以下の2つのシナリオを作成して、計算水頭降下量の差異を検討した。

- ① かん養量の変化
- ② 揚水量の変化

また、この結果に基づいて、次節に記すM/Pに基づく予測計算の取水施設ごとに設定する帯水層の検討資料とした。

#### (1) かん養量の変化

調査地域全域の年間降水量が1988年から2007年までの年間平均降水量に近く、かつ全ての観測所で年間平均降水量に近い年は1989年である（調査地域全域の年間降水量を検討した場合、20年間の平均降水量が1989年より近い年もあるが、これらの年は地域間の差が大きく観測所単位の平均降水量とは大きくかけ離れている）。

1989年を基準年として、表6-3-4に示すように1989年のかん養量と河川水位および2007年の揚水量を基本形として、計算開始後2年目と3年目に渇水が発生するシナリオで計算水頭降下量の分布を検討した。渇水発生年には、地下水かん養量を1989年の75%とし、河川水位は年間降水量1989年の年間降水量の75%に近い2006年の河川水位を入力した。ただし、渇水年においても地下水揚水量は2007年の揚水量から変化させない。

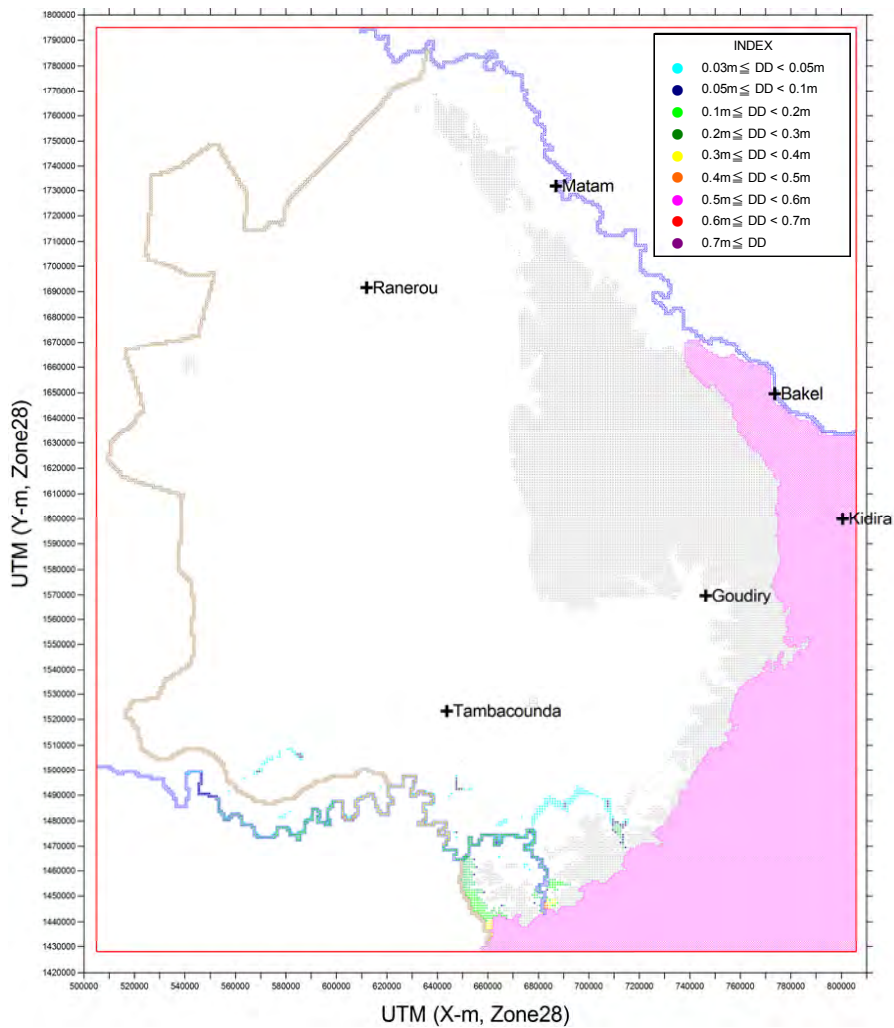
上記のシナリオで基本型と渇水発生型の両方の水頭変化を計算し、両者の差をもとめた。水頭差の分布を図6-3-16および図6-3-17に示す。

表 6-3-4 渇水年発生シナリオ

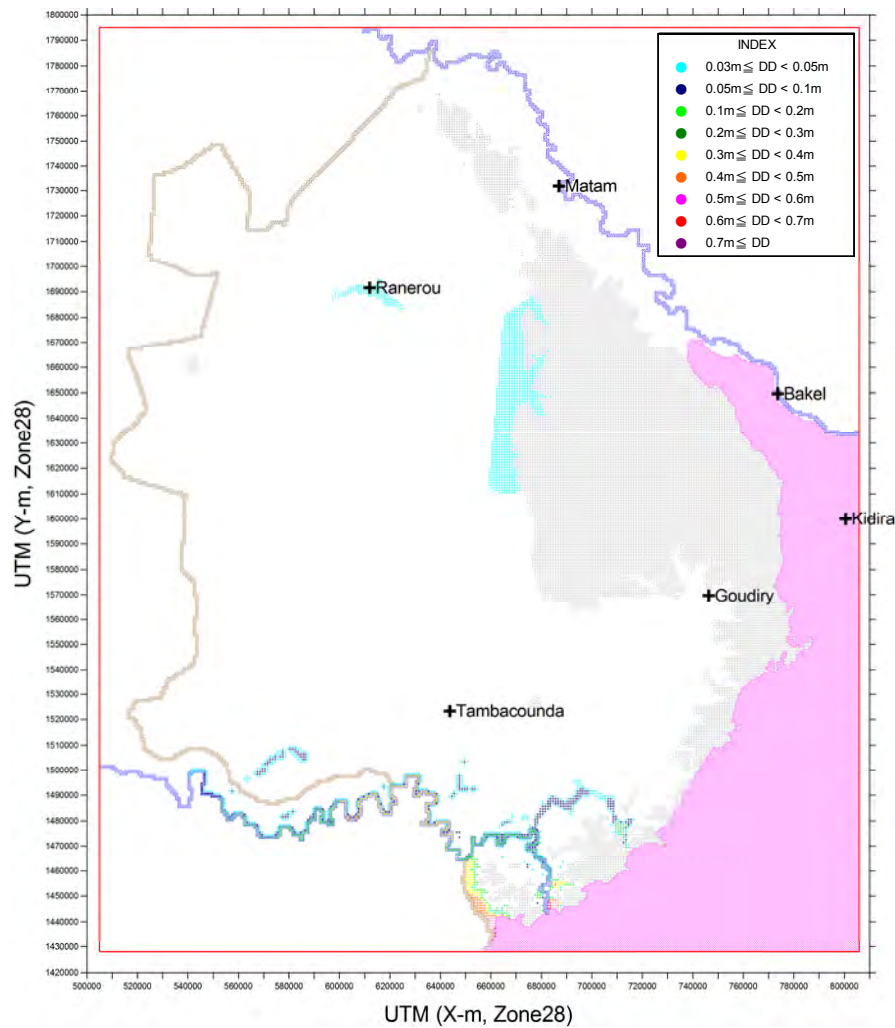
年	基本型			渇水発生型		
	かん養量	揚水量	河川水位	かん養量	揚水量	河川水位
スタート	2007年12月31日					
1年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
2年目	1989年	2007年	1989年	1989年×0,75	2007年	2006年
3年目	1989年	2007年	1989年	1989年×0,75	2007年	2006年
4年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
5年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
6年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
7年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
8年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
9年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年
10年目	1989年	2007年	1989年	1989年	2007年	1989年

Co層においては、灰色で示している地域が層厚が薄く揚水に適さない地域であるが、それに隣接する西側や広範囲に最終ステップでは最大5cm程度の水位の低下が発生する。また、タンバクンダ州南部でも局所的に地下水位の低下が発生するが、このシナリオ程度の渇水では既存の施設のCo層からの取水に影響を及ぼすものではない。ガンビア川沿いで最終ステップでは最大34cm程度の水位の低下が予測されるが、この地域ではCo層を取水層にしていない。

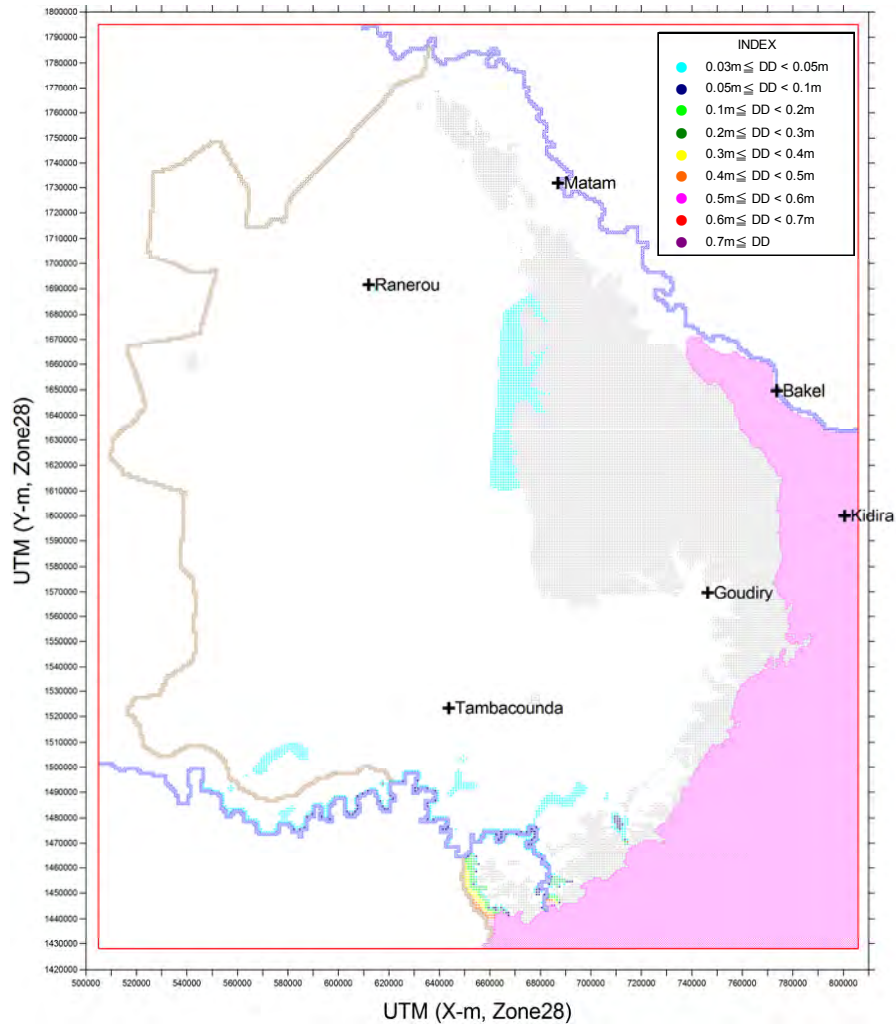
Ma層においては、マタム州南東部とタンバクンダ州南部の基盤岩との境界付近で地下水位の低下が発生する。マタム州南東部の地下水位低下域に既存の施設が存在するが、最終ステップの低下量は最大で10cm程度であり、施設への影響はほとんどない。また、最終ステップでは基盤岩との境界付近で最大52cm程度の水位の低下が予測されるが、この地域には既存施設はなく村落も位置していない。



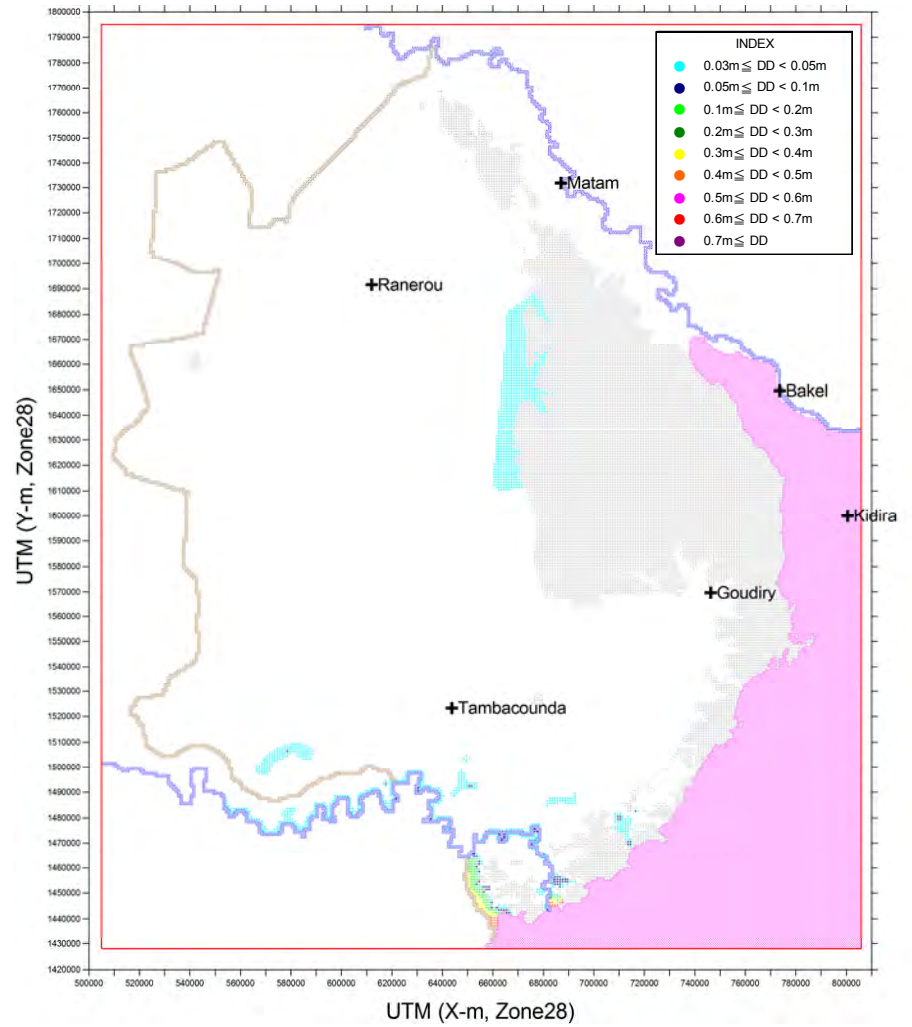
(2年目12月、Co層)



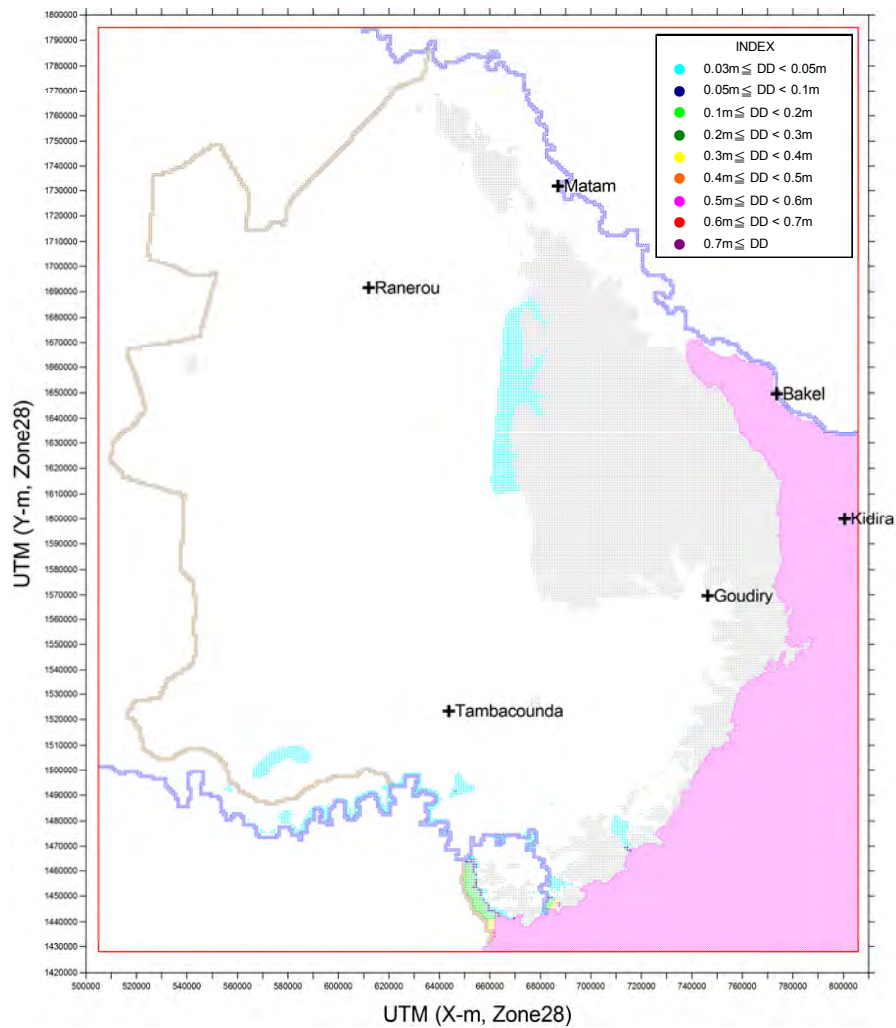
(3年目12月、Co層)



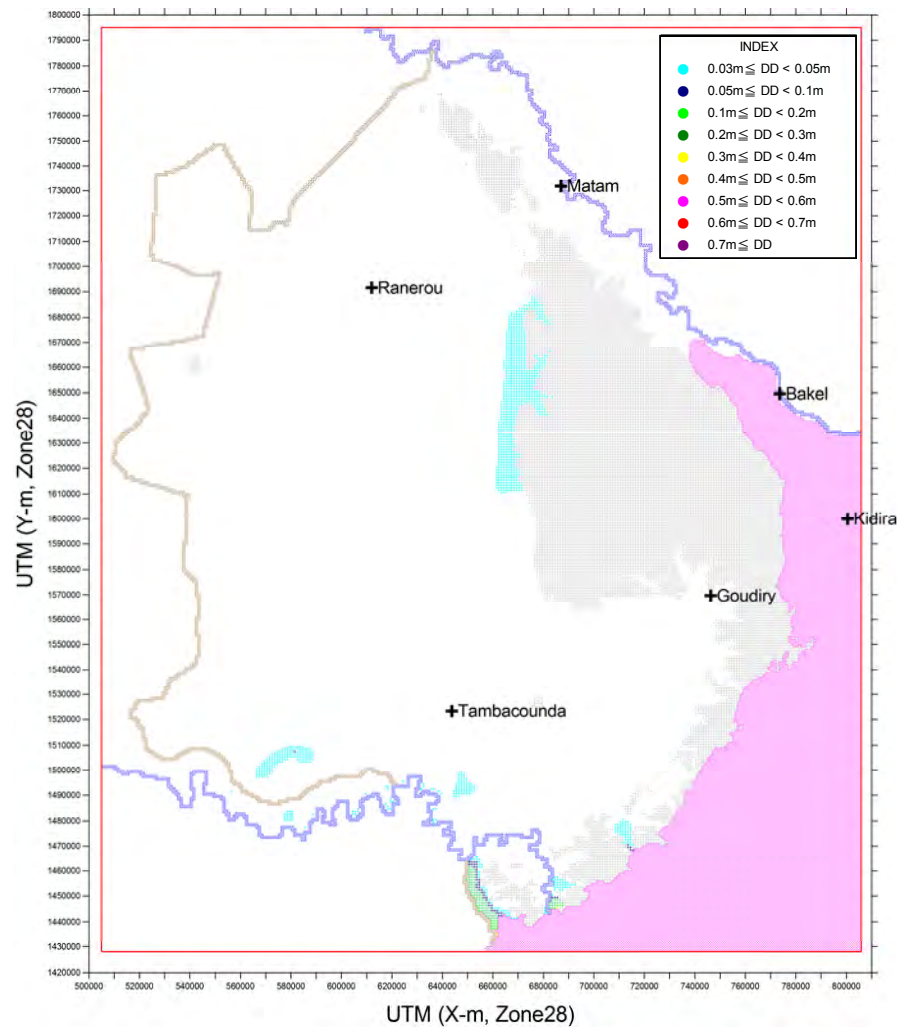
(4年目12月、Co層)



(5年目12月、Co層)

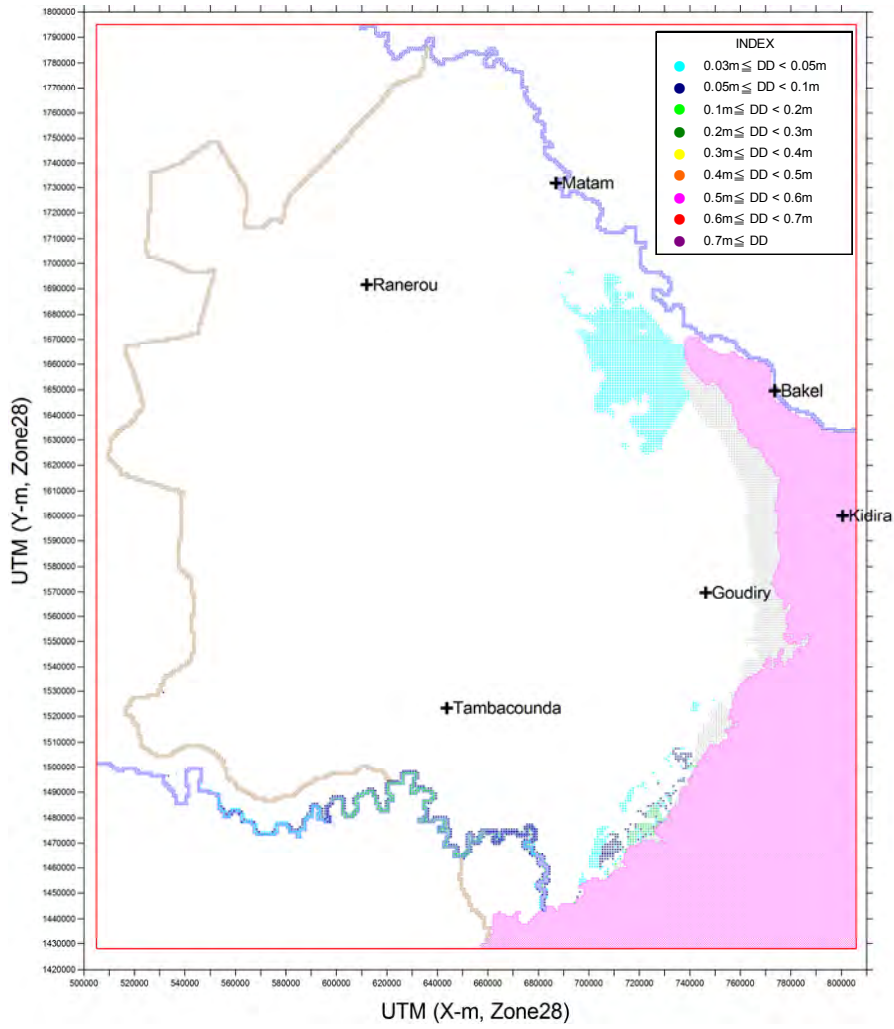


(7年目12月、Co層)

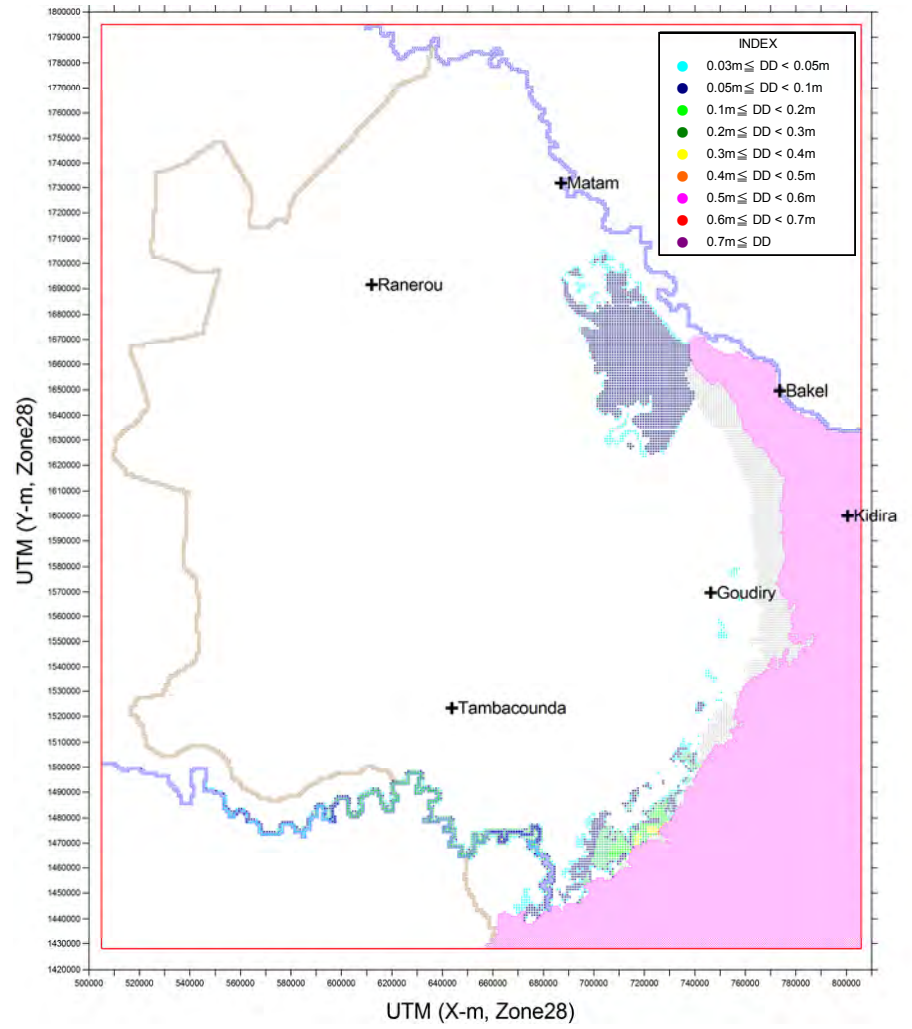


(10年目12月、Co層)

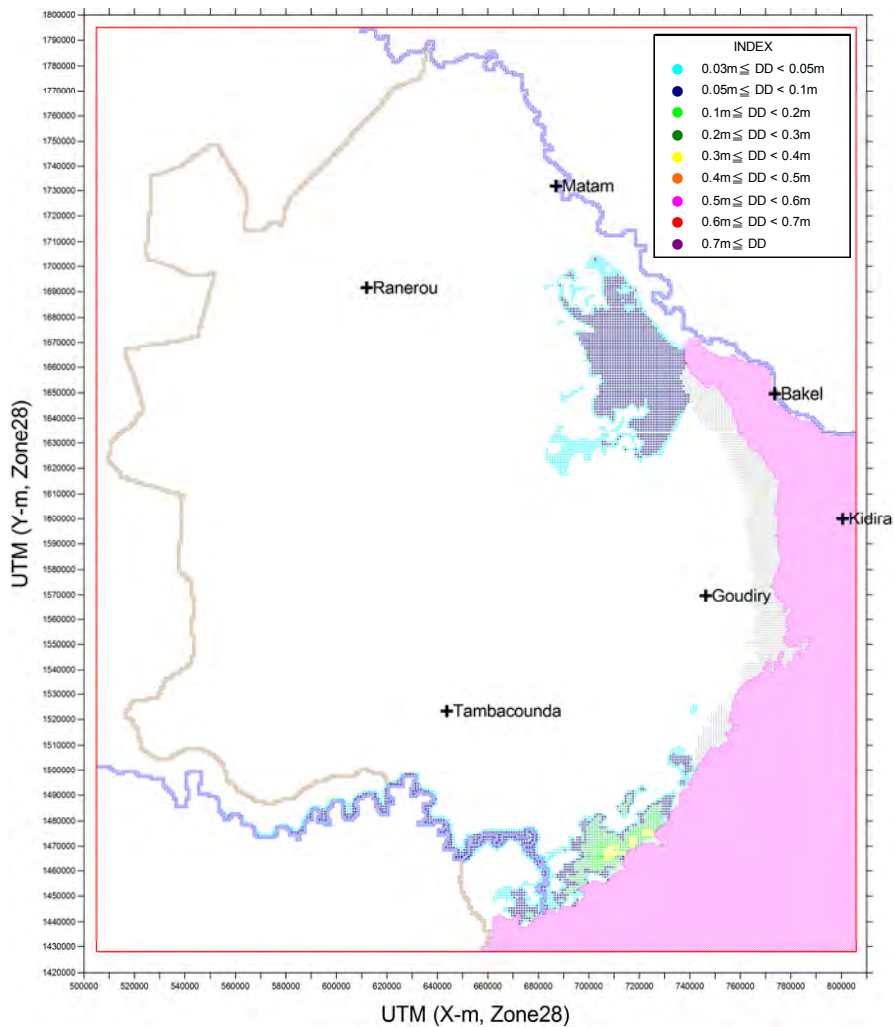
図 6-3-16 かん養量の変化と計算水頭差分布(1)



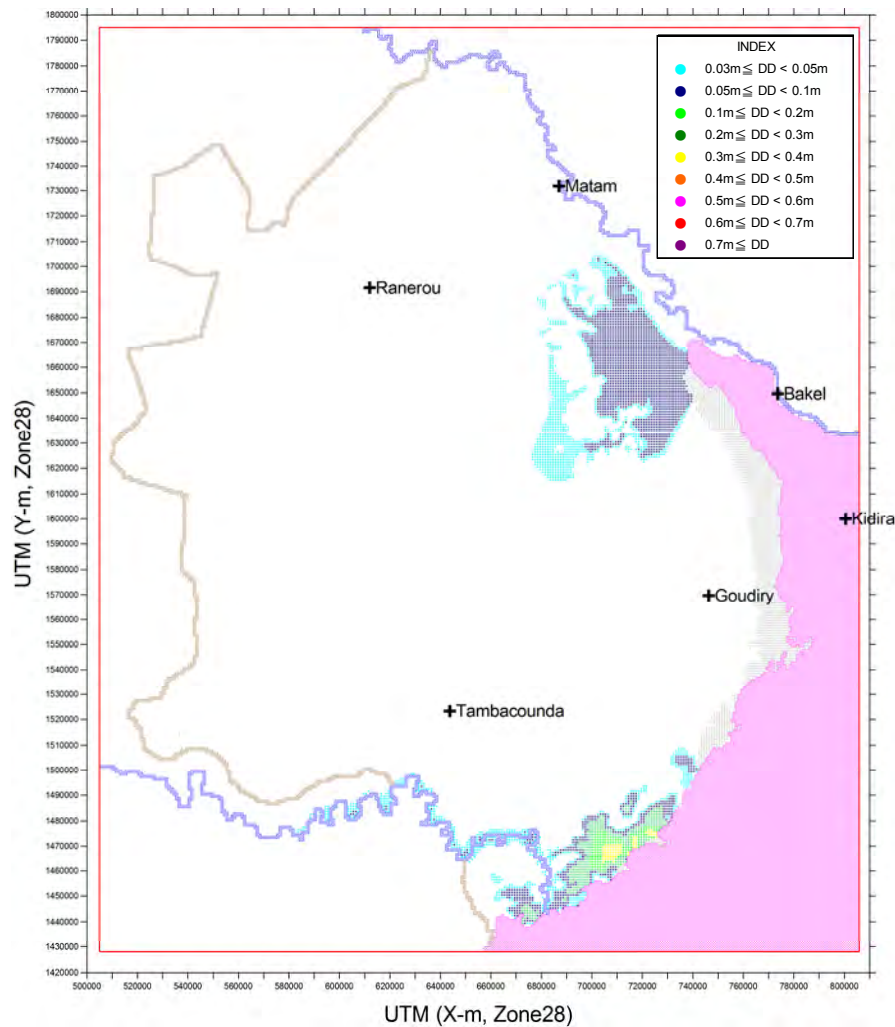
(2年目 12月、Ma層)



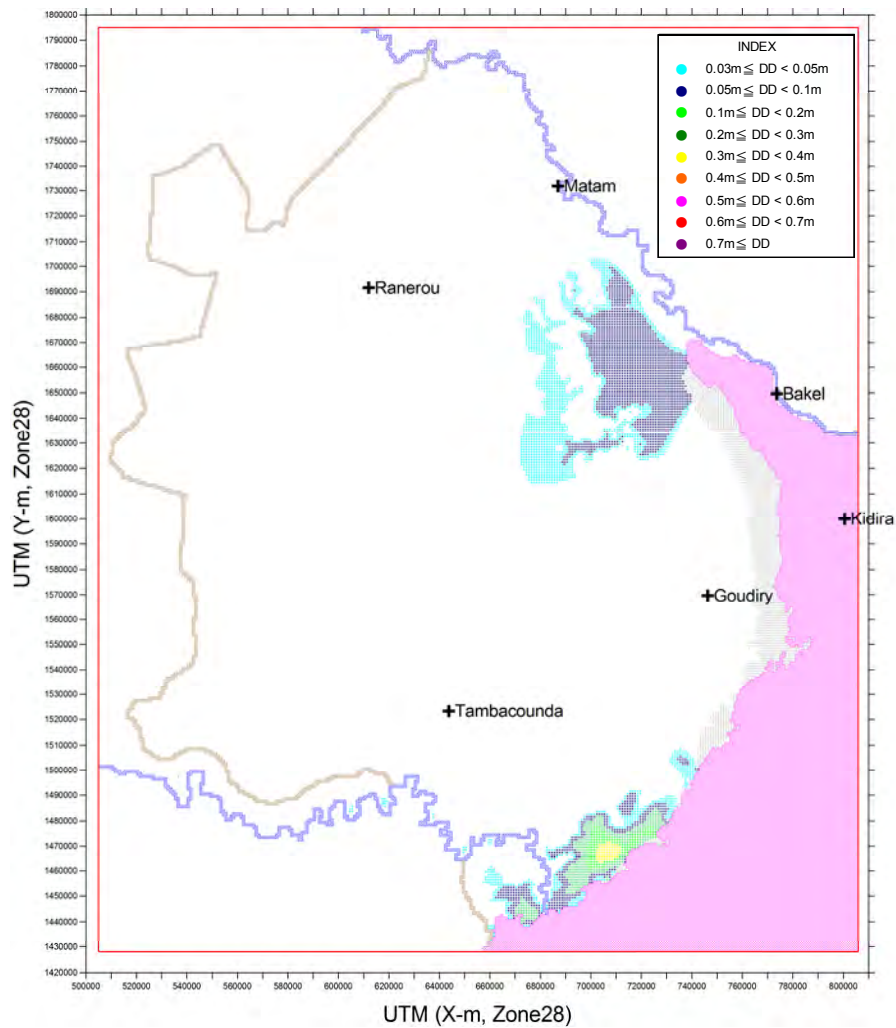
(3年目 12月、Ma層)



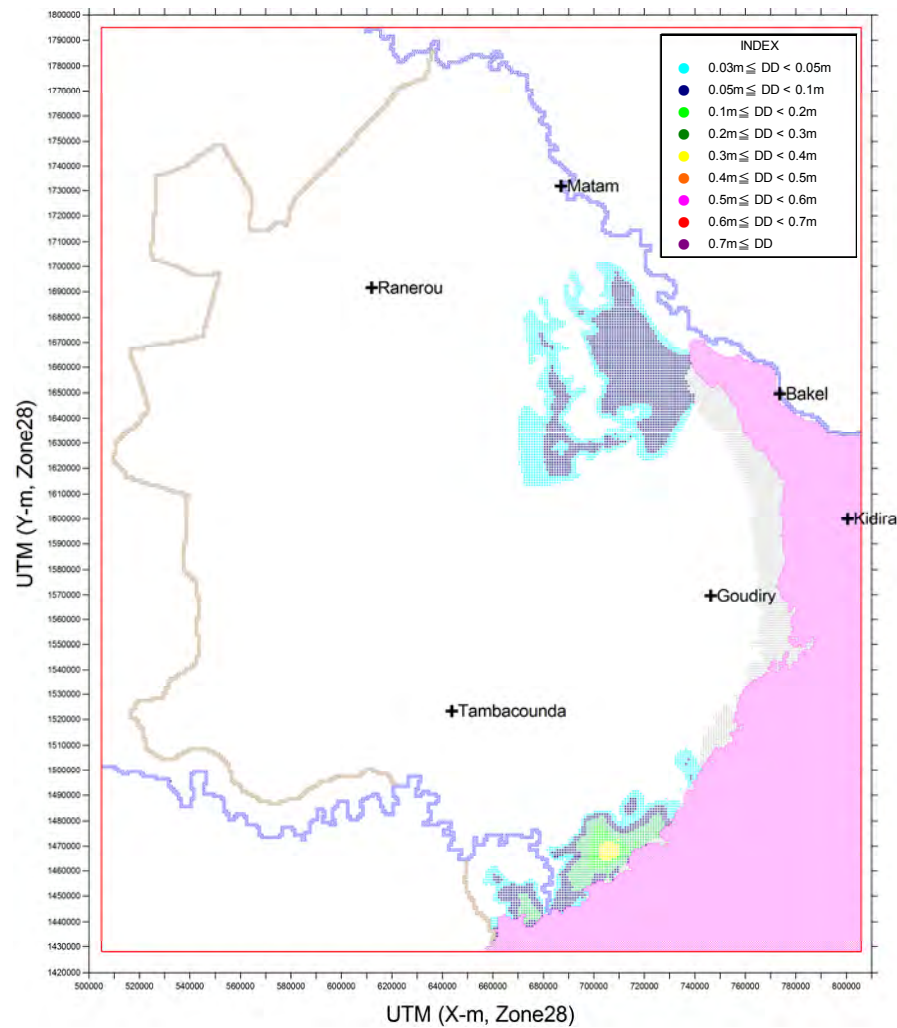
(4年目 12月、Ma層)



(5年目 12月、Ma層)



(7年目 12月、Ma層)



(10年目 12月、Ma層)

図 6-3-17 かん養量の変化と計算水頭差分布(2)