

## ボアホール TV によるクンガラウラン鉱床の 割れ目分布と予測される地下水流动<sup>†</sup>

宮川公雄<sup>††</sup> 田中靖治<sup>††</sup>

クンガラウラン鉱床における地質・水理構造特性の解明に資するためにボアホール TV による片理方向と割れ目の計測、この結果に基づいた三次元地下水流动解析を実施した。片理の方向からはサイトスケール褶曲構造が明らかとなった。この構造のトレンドは割れ目の卓越方向や割れ目の頻度分布、透水性の大きい方向と一致している。三次元地下水流动解析では片理面の垂直方向の透水性が最小となるように条件を与えた。解析結果による流向は干渉試験による透水性の大きい方向と調和的であり、褶曲構造に支配された水理地質構造モデルが検証された。

To contribute good understanding of geo-hydrogeological structure in and around the Koongarra uranium deposit, the borehole TV logging and the three dimensional groundwater flow analysis were conducted. The results of the borehole TV measurement showed directional trends in the schistosity represented folds which were the most characteristic structure in the site scale. This fold structure was in accord with the directional trends in fracture and fracture frequency, and the axes of the interference test drawdown. The three dimensional groundwater flow analysis was taken into account the hydraulic anisotropy which derived from the assumption that the direction normal to schistosity agree with minimum hydraulic conductivity. The result of analysis showed that directions of ground water flow agreed with drawdown axes, and the conceptual model of hydrogeological structure governed the site scale fold was verified.

### 1.はじめに

オーストラリア・アリゲーター・リバー地域に分布するクンガラウラン鉱床には初生のウラン鉱床とともに、鉱床中のウランが地下水によって長期間移行した結果、二次的に形成された分散帯が認められている。OECD/NEA は、この鉱床に認められる移行現象を処分場からの核種移行のアナロジーとして、長期にわたる放射性核種の溶出、移行、固定機構の解明を目的とした、アリゲーター・リバー・アナログ・プロジェクト(ARAP)を実施した。

ARAP では地球化学的見地からの移行現象の解明を研究の主体として進める一方、この現象が起こった環境を明らかとするため、地質構造、水理地質構造的なサイト特性調査も進められた[1]。筆者らはこの調査においてボアホ-

ル TV 計測によって地下水流动経路となる割れ目の分布特性を明らかとともに、この結果から想定された地下水流动を検証するため地下水流動解析を実施した。その結果、サイトの地質構造特性を反映した地下水流动特性を明らかにすることができたので、これらの結果について報告する。

### 2.調査地域の地質

#### 2.1 クンガラ地域の地質

クンガラ鉱床はノーザンテリトリー、ダーウィン東部 200 km のアリゲーター・リバー地域に位置する(図 1)。地形は標高 50 m の北部から 20 m の南部へ緩やかに傾斜している(図 2)。クンガラ鉱床は地表付近で北東～南西方向に 400 m、20 m の幅で分布し、鉱床南東部には鉱床の分散帯が認められる。地質はクーンガラ逆断層の南西側に Cahill 層の片岩、北東側に Kombolgie 層の砂岩が分布する。

Cahill 層は 22～19 億年前頃、基盤岩であった

<sup>†</sup>Fracture distribution determined by borehole TV in the vicinity of the Koongarra uranium ore field and predictable groundwater flow, by Kimio Miyakawa, Yasuharu Tanaka

<sup>††</sup>電力中央研究所 孫子研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko Research Laboratory

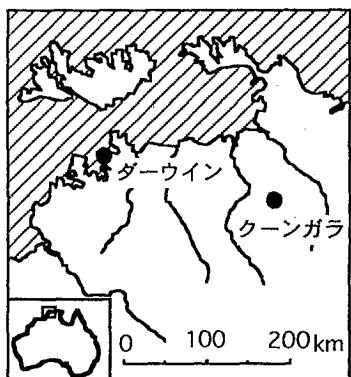


図 1 クンガラウラン鉱床位置図

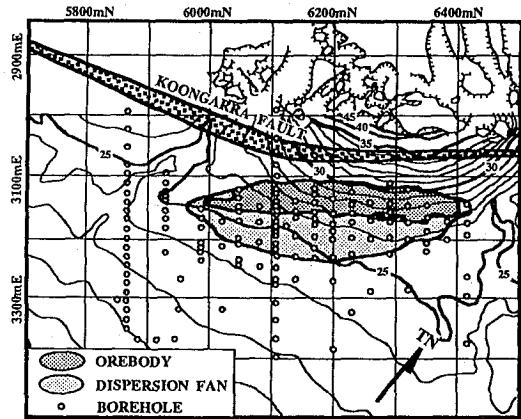
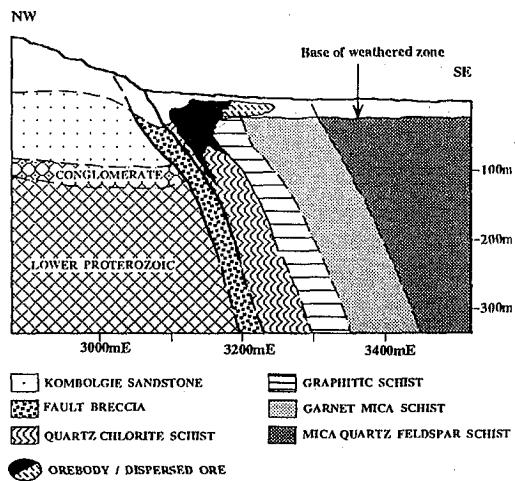


図 2 クンガラウラン鉱床を含む調査サイト地形図

花崗岩に不整合に堆積し、その後角閃石岩相までの変成を受けた。また、2度の花崗岩の貫入に伴う変形作用によって、等斜褶曲が発達した[2]。調査地域に分布する Cahill 層は石英一綠泥石片岩、石墨片岩、ざくろ石一雲母片岩、雲母一石英一長石片岩、苦灰岩からなる。鉱床箇所のボーリングやトレッチでは Cahill 層の片岩相は鉱床とほぼ平行に北東一南西方向の広がりを有し、片理は岩相境界と平行である。鉱床から離れた調査地域西部に関しては探査データも少なく、地質構造はこれまで明らかとなっていない。

Kombolgie 砂岩はおよそ 1.6 億年前に Cahill 層に不整合に堆積し[2]、現在は水平な層となりクンガラ断層北部にメサ状地形として認

図 3 ウラン鉱床の NW-SE 断面図  
(鉱床座標 6200 mN 断面)

められる。調査地域内の Kombolgie 砂岩は中粒から細粒の砂岩である。Kombolgie 砂岩の基底礫は調査地域の東部に露頭しているが、調査地域内では確認されていない。

表層堆積物はクンガラ断層付近から南部に分布し、Cahill 層を被っている。この堆積物は Kombolgie 砂岩の侵食によってもたらされた細礫、砂からなり、クンガラ断層付近から南部のクリークにかけて扇状地帯に分布する。この堆積物の厚さは場所によって異なるが、既存ボーリング調査によれば 1~2 m と考えられる。

クンガラ断層は Kombolgie 砂岩の堆積後まもなく逆断層として形成され、現地形では北部の Kombolgie 砂岩と南部の Cahill 層が境界となっている(図 3)。断層全体の垂直変位量については 50~600 m までの値が推定されており[3]、クンガラ地域では 100~200 m までの値が妥当と考えられている[2]。

## 2.2 クンガラウラン鉱床

鉱床の成因については異なる見解があるが、形成時期については同位体年代から、16~15.5 億年前頃に片岩を主体とした Cahill 層に閃ウラン鉱、ケイ酸ウラン鉱が胚胎したとされている[2]。現在認められる風化層より下部の鉱体

は今もその当時の鉱体の形態を残している。この初成鉱体(一次鉱床)はおよそ300万~100万年前から地表風化作用を受け始め、およそ1.8万年前頃までには現在の風化帯に認められるリン酸ウラン鉱や粘土鉱物、鉄酸化物に吸着した酸化ウラン鉱が二次的な鉱床として形成された。

### 3. 装置と適用方法

孔壁映像を得るボアホール TV にはメカニズムの異なるさまざまな方法がある[4]。本調査では円錐ミラーを使用して展開画像を得る BIPS-300 [5] を適用した。この装置は円錐ミラーによって同心円状の 360° 孔壁映像をテレビカメラに捉え、この映像の円周沿いにデジタルサンプリングして展開映像として出力する仕組みとなっている。計測によって得た映像データは携帯型コンピューターによって MT へ記録され、室内で解析される。

得られた映像にはさまざまな大きさ、形状の割れ目が認められるが、水みちとなる可能性の大小を映像から定性的に評価するために割れ目を分類した。分類では掘削のダメージや掘削後の緩みによって顕在化した場合に認められる平滑な面を持たない不明瞭な割れ目、孔壁で連続性のない割れ目は透水性に乏しい可能性が高いこと、また、幅(壁面における開口幅)の大きい割れ目は小さいものに比べて透水性が高い場合が多いこと[4,8]を考慮した。割れ目の幅については BIPS の分解能(0.15 mm)と孔径の大きさから、幅の計測精度を 0.5 mm とした。これらを分類の基準としてボアホール TV で計測した割れ目を以下の 3 つのタイプに分けて取り扱った。

タイプ 1 : 不明瞭または孔壁面で連続しない割れ目、割れ目の幅は 0.5 mm 以下

タイプ 2 : 明瞭でほぼ孔壁面全体にわたって連続する割れ目、幅は 0.5 mm 以下

タイプ 3 : 明瞭で孔壁面全体にわたって連続する割れ目、幅は 0.5 mm 以上

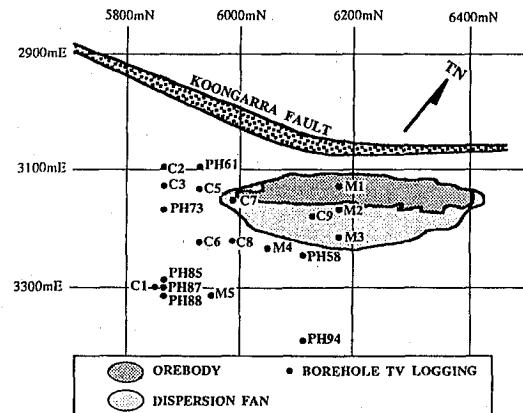


図 4 ボアホール TV 計測の適用孔位置図

### 4. 結果と考察

クンガラサイトにおけるボアホール TV 計測は、鉱床西端部に削孔された 20 本のボーリング孔で実施した(図 4)。結果は岩相、片理の方向、割れ目の頻度、割れ目の間隙幅について取りまとめた。

#### 4.1 岩相分布

ボアホール TV 適用孔に認められる岩相は岩相変化が著しいため、既往調査の中でも岩相を詳しく細分化している Snelling[2]の分類に従い、調査地域の岩相分布をまとめるに際しては詳細な調査が実施されていない鉱床から離れた箇所の岩相分布と整合性をとるために簡略化した(表 1)。

表 2 に各孔の岩相分布を示す。C 1、C 3、PH 85、PH 87、PH 88、PH 94 の 24.5~50.0 m 区間については孔壁が鉄酸化物で被われ岩相の判断が不可能であった。

風化帯、下部風化帯は M 3 孔の上部に認められるのみでその他の計測孔は未風化岩が分布する。M 3 に認められる風化帯は 16.1~23.7 m、風化岩と未風化岩の漸移帯と考えられる下部風化帯は 23.7~25.4 m に分布する。

未風化岩盤に認められる岩相は Cahill 層の石英一緑泥石片岩、石墨一石英一緑泥石片岩、石墨一雲母一石英片岩、ざくろ石一雲母一石英片岩、雲母一石英一長石片岩、角閃岩である。

表 1 ボアホール TV 計測で用いた岩相名と調査地域全体に適用した岩相名

地層名	調査地域全体に用いた岩相名	ボアホール TV 検層で用いた岩相名 (Snellingに基づく[2])
Kombolgie層	砂岩	砂岩 (kS)
Cahill層 (風化岩)	風化帶	風化帶 (WZ) 下部風化帶 (LWZ)
Cahill層 (未風化岩)	石英-綠泥石片岩 石墨片岩 ざくろ石-雲母片岩 雲母-石英-長石片岩 苦灰岩	石英-綠泥石片岩 (QChS) 石墨-石英-綠泥石片岩 (GrQChS) 石墨-雲母-石英片岩 (GrMQS) ざくろ石-雲母-石英片岩 (GMQS) 角閃岩 (Am) 雲母-石英-長石片岩 (MQFS) 苦灰岩 (Do)
(Koongarra断層)	角礫岩	角礫岩 (RFB)

表 2 ボアホール TV 適用孔に分布する岩相

BORE HOLE	WZ (m)	LWZ (m)	RFB (m)	QChS (m)	GrQChS (m)	GrMQS (m)	GMQS (m)	Am (m)	MQFS (m)	KS (m)	Fe
C1											X
C2				19.2-39.8							
C3											X
C5				18.2-27.0							
C6						23.0-27.2 35.6-38.3	27.2-35.6 38.3-39.7				
C7				21.3-27.1							
C8						37.1-38.3	22.4-37.1				
C9						29.2-31.7		26.0-29.2 31.7-39.2			
M1				22.3-49.4							
M2					36.0-43.9						
M3	16.1-23.7	23.7-25.4					27.0-29.2 33.4-34.1 35.4-37.4	25.4-27.0 29.2-33.4 34.1-35.4 37.4-39.2			
M4							31.1-36.3	26.1-31.1 36.3-37.4			
M5								27.0-28.8	28.8-39.6		
PH58							25.1-29.8 35.9-46.8 48.8-50.9 64.3-69.0 73.2-74.8 79.6-83.4	29.8-35.9 46.8-48.8 50.9-64.3 69.0-73.2 74.8-79.6 83.4-89.4			
PH61			81.9-85.9	33.0-81.9					85.9-94.5		
PH73				14.9-84.2							
PK85											X
PK87											X
PK88											X
PH94								53.6-57.5 70.4-75.6	50.0-53.6 57.5-70.4		X 24.5-50.0

WZ : Weathered Zone LWZ : Lower Part of the Weathered Zone RFB : Reverse Fault Breccia QChS : Quartz-Chlorite Schist

GrQChS : Graphic-Quartz-Chlorite Schist GrMQS : Graphite-Mica-Quartz Schist GMQS : Garnet-Mica-Quartz Schist

Am : Amphibolite MQFS : Mica-Quartz-Feldspar Schist KS : Kombolgie Sandstone Fe : Borehole wall covered with iron hydroxide ( X : lithology obscured )

表 3 各孔における割れ目数と頻度

BORE HOLE	LOGGING INTERVAL	LOGGING DISTANCE	NUMBER				FREQUENCY (Nos/m)		
			TYPE 1	2	3	TOTAL	TYPE	TOTAL	
C1	22.8-24.4	1.6	7	3	0	10	4.4	1.9	0.0
C2	19.2-39.8	20.6	19	19	11	49	0.9	0.9	0.5
C3	17.1-20.4	3.3	4	6	0	10	1.2	1.8	0.0
C5	18.2-27.0	8.8	12	2	3	17	1.4	0.2	0.3
C6	23.0-39.7	16.7	9	6	2	17	0.5	0.4	0.1
C7	21.3-27.1	5.8	7	2	2	11	1.2	0.3	0.3
C8	22.4-38.3	15.9	8	16	1	25	0.5	1.0	0.1
C9	26.0-39.2	13.2	11	7	6	24	0.8	0.5	0.5
M1	22.3-49.4	27.1	25	25	2	52	0.9	0.9	0.1
M2	36.0-43.9	7.9	4	1	3	17	0.5	1.3	0.4
M3	16.1-39.2	23.1	19	33	8	60	0.8	1.4	0.3
M4	26.1-37.4	11.3	16	16	2	34	1.4	1.4	0.2
M5	27.0-39.6	12.6	9	5	0	14	0.7	0.4	0.0
PH58	25.1-89.4	64.3	85	48	27	160	1.3	0.7	0.4
PH61	33.0-94.5	61.5	78	67	18	163	1.3	1.1	0.3
PH73	14.9-84.2	69.3	76	48	20	144	1.1	0.7	0.3
PH85	19.6-39.8	20.2	9	13	6	28	0.4	0.6	0.3
PH87	22.2-36.5	14.3	9	22	4	35	0.6	1.5	0.3
PH88	22.7-42.7	20.0	12	11	0	23	0.6	0.6	0.0
PH94	24.6-75.6	51.0	24	9	5	38	0.5	0.2	0.1
TOTAL		468.5	443	368	120	931			
AVERAGE							0.9	0.8	0.3
									2.0

また、Komboligie 砂岩は PH 61 の 85.9~94.5 m に分布する。Cahill 層と Komboligie 砂岩の境界に分布するクンガラ断層の角礫帶は PH 61 の 81.9~85.9 m に認められた。

#### 4.2 割れ目密度

割れ目は 468.5 m の区間で 931 本認められた。全計測長に対する割れ目頻度は 2.0 本/m である。このうち、タイプ 1 の割れ目は 0.9/m、タイプ 2 の割れ目は 0.8/m、タイプ 3 の割れ目は 0.3/m である(表 3)。

割れ目の本数と各岩相における割れ目頻度を表 4 に示した。割れ目頻度に関しては Cahill 層の未風化岩盤では、石墨一雲母一石英片岩が他の岩相より割れ目頻度が 4.0/m と著しく大きい。しかしながら、この岩相は C9 孔のわずか 2.5 m の区間で確認されているだけであり、この岩相の一般的な割れ目頻度を表していない可能性もある。一方、雲母一石英一長石片岩は 0.99/m と他の岩相に比べて著しく割れ目頻度

が小さい。その他の岩相はほぼ 2.0~2.5/m の割れ目頻度を有する。

Cahill 層の風化帯では全体的に粘土化し、割れ目そのものが認められない。下部風化帯やクンガラ断層については未風化層と同程度の割れ目頻度を有するが、未風化層とは異なり、タイプ 3 の割れ目が認められない。Komboligie 砂岩は 1.51/m と多くの未風化 Cahill 層と比較して割れ目頻度が小さい。

#### 4.3 割れ目の間隙

ボアホール TV による間隙幅については、透水試験との比較などから予測される水理的間隙幅より大きくなる傾向が認められている [6]。この理由は、掘削のダメージや充填物を先掘るために孔壁面上で観察される間隙幅は実際の間隙幅より大きくなるためと考えられる。Nelson [7] によれば、これまで報告されている割れ目の幅は、深度数百 m までで、0.01~0.5 mm 間にあるとしており、割れ幅の頻度が指數分布

表 4 岩相ごとの割れ目頻度

LITHOLOGY	LOGGING DISTANCE	NUMBER			FREQUENCY (Nos/m)			TOTAL
		TYPE 1	2	3	TOTAL	TYPE 1	2	
WZ	7.60	2	0	0	2	0.26	0.00	0.26
LWZ	1.70	0	4	0	4	0.00	2.35	0.00
RFB	4.00	3	7	0	10	0.75	1.75	0.00
QChS	165.90	187	147	50	384	1.13	0.89	0.30
GrQChS	22.50	23	13	8	44	1.02	0.58	0.36
GrMQS	2.50	2	6	2	10	0.80	2.40	0.80
GMQS	46.00	48	34	18	100	1.04	0.74	0.39
Am	97.60	100	85	28	213	1.02	0.87	0.29
MQFS	27.30	17	8	2	27	0.62	0.29	0.07
KS	8.60	7	5	1	13	0.81	0.58	0.12
								1.51

表 5 岩相ごとの割れ目の計測幅

LITHOLOGY	LOGGING DISTANCE	APERTURE(mm)			TOTAL APERTURE / METER (mm/m)			TOTAL
		TYPE 2	3	TOTAL	TYPE 2	3	TOTAL	
WZ	7.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LWZ	1.70	2.00	0.00	2.00	1.18	0.00	1.18	
RFB	4.00	3.50	0.00	3.50	0.88	0.00	0.88	
QChS	165.90	73.50	77.50	151.00	0.44	0.47	0.91	
GrQChS	22.50	6.50	17.00	23.50	0.29	0.76	1.04	
GrMQS	2.50	3.00	2.00	5.00	1.20	0.80	2.00	
GMQS	46.00	17.00	36.50	53.50	0.37	0.79	1.16	
Am	97.60	42.50	37.00	79.50	0.44	0.38	0.81	
MQFS	27.30	4.00	9.00	13.00	0.15	0.33	0.48	
KS	8.60	2.50	0.50	3.00	0.29	0.06	0.35	

や対数正規分布するとすれば、ボアホール TV による計測精度では大部分の割れ目の幅の計測は困難であることになる。

しかしながら、割れ目数が著しく多くない場合は、ボアホールテレビによる間隙幅は透水試験結果と相関が得られている報告例も多い [4,8]。

したがって、ここではタイプ1～3の分類に基づき、精度以上で幅を計測したタイプ3の割れ目は計測値、計測精度以下であるものの水みちとなる可能性あるタイプ2の割れ目は計測限界の0.5 mm、水みちとなる可能性が低いタイプ1の割れ目は幅がないものとして扱った。

表5に各岩相ごとの間隙幅を示す。未風化のCahill層のうち、計測長が短い石墨一雲母一石英片岩を除く岩相ではKombolgie砂岩は

0.35 mm/m、雲母一石英一長石片岩は0.48 mm/mであり、他の岩相に比べて小さい傾向がみられる。他の岩相はほぼ0.81～0.16 mm/mの割れ目幅を有している。

#### 4.4 片理の方向

計測では Cahill 層中に片理構造が普遍的に認められ(図5)、約1mに1ヶ所程度の割合で片理面の方向を計測した。

Cahill 層は 18.7～18.0 億年前の造山運動期に4回の褶曲運動(f1～f4)を受けている一方、Cahill 層を不整合に覆う Kombolgie 砂岩には断層と堆積時の構造による緩やかな傾動が認められるのみであり、褶曲は認められていない。

調査地域の Cahill 層中に特徴的に認められる片理構造は f1～f2 の際に、等斜褶曲軸に平

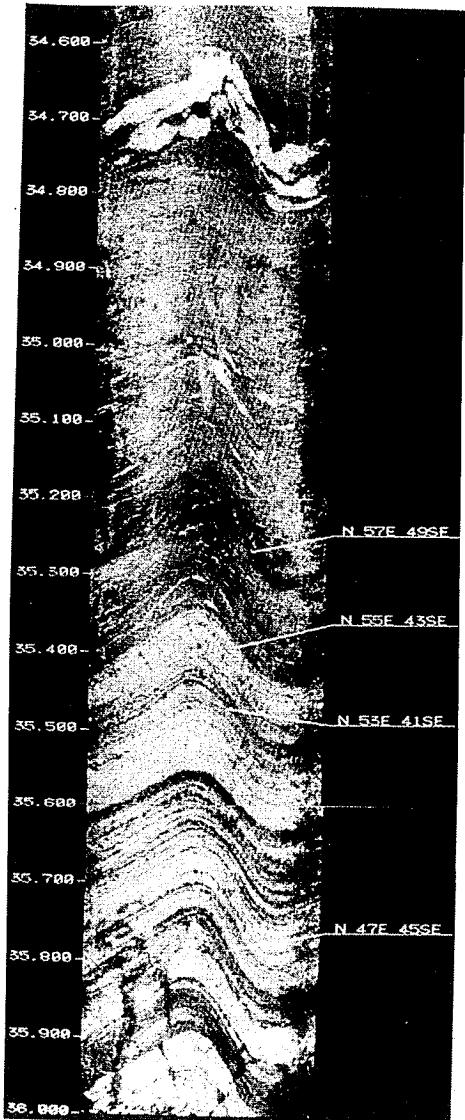


図 5 孔内に認められた Cahill 層の片理；M4 孔、34.6 m～36.0 m 区間。岩相はザクロ石一雲母一石英片岩 (GMQS)。片理は NE 走向 45° SE 傾斜。

行に生じた面構造 (s1, s2) であると考えられている。f3 は閉じた褶曲ではあるが等斜褶曲ではなく、この褶曲運動時に軸に平行な褶曲劈開 (s3) が生じた。そして f4 では、一連の褶曲運動の終焉に伴い弱い脆性的な変形をしたと考えられている [9-11]。

ポアホール TV で認められた片理は岩相境

界に平行であり、当調査地域では 1, 2 回目の変成運動で特徴的な等斜褶曲の影響がより強く現れていると考えられる。

#### 4.4.1 地域スケールの褶曲 (f3 褶曲)

各孔で計測した片理をステレオネットに投影した場合、分布は NE 走向で東へ傾斜した大円に沿う(図 6)。これに対し、各孔毎の片理の方向は著しく卓越しつつも、相互に異なる方向を示すため、調査地域スケールで東にプランジした褶曲が想定できる。ステレオネット上で最適大円を計算した場合、褶曲軸の方向は方位 083.5°、プランジ角 15.3 度となる。各孔 30～40 m 区間の片理の平均方向から想定される褶曲のヒンジラインはほぼ東西に横断する形で東へプランジし、東部ほどプランジ角が小さくなる(図 7)。また、調査地域南部の片理の方向や、南西部で苦灰岩が片岩の下部に確認されていることから、調査地域西端部から南端部に東西に横断する褶曲軸も想定される。

これらの褶曲は閉じた褶曲であり、この地域に普遍的に認められる s2 または s1 を変形していることから f3 褶曲と考えられる。ポアホール TV で認められる岩相境界は片理に平行であり、Cahill 層の各岩相もこの褶曲に沿った分布をしていると考えられる(図 8)。

#### 4.4.2 クンガラ断層による引きずり

クンガラ断層付近の Cahill 層の片理面はクンガラ断層とほぼ同じ傾斜を有する。しかしながら、クンガラ断層と交差する PH 61 では深度が深くなり、断層に接近するほど緩傾斜化する傾向が認められる(図 9)。同様の傾向は M 1、M 2、M 3 を通過する断面にも認められ、M 2、M 3 孔よりクンガラ断層により近い M 1 で傾斜が緩くなっている。

一方、断層の下盤の Kombolgie 砂岩では逆に断層付近で層理面の傾斜が増加していることが明らかとされている [12]。断層を挟んで傾斜に認められるこの傾向はクンガラ断層活動時の引きずりによって、上盤の Cahill 層が引きずられ緩傾斜するとともに、下盤の Kombolgie 砂

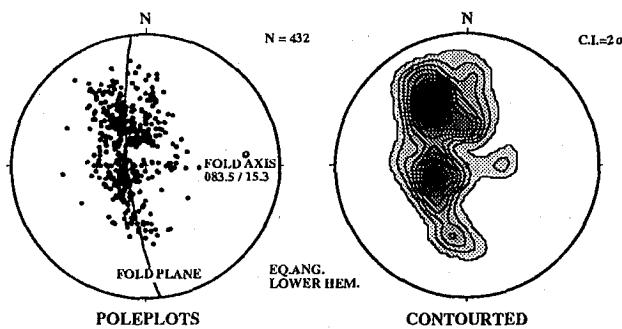


図 6 片理の方向のステレオ投影（全データ）

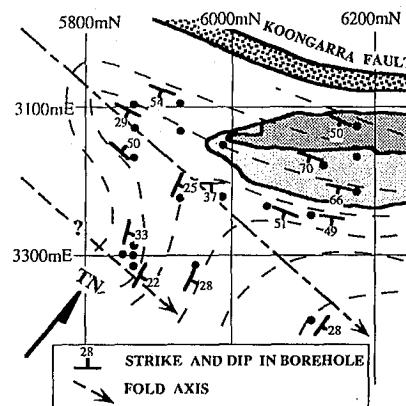


図 7 片理の方向計測から明らかとなった褶曲構造

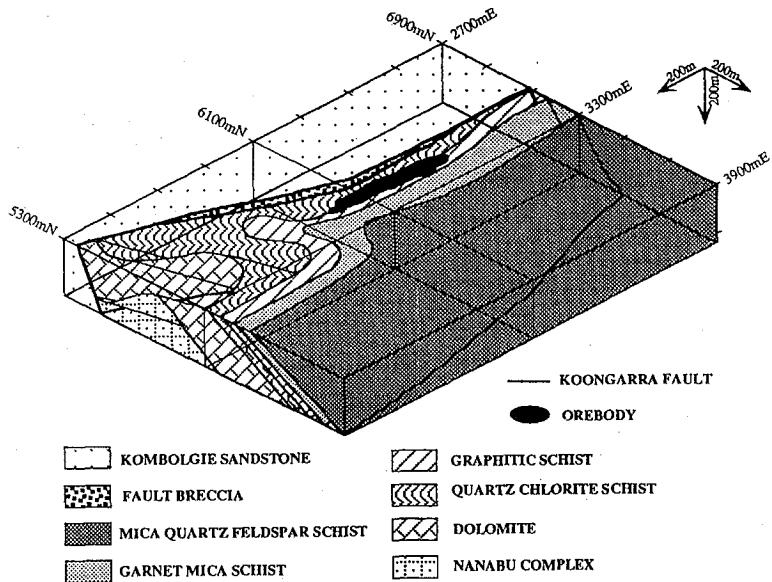


図 8 調査地域周辺の地質構造概念図

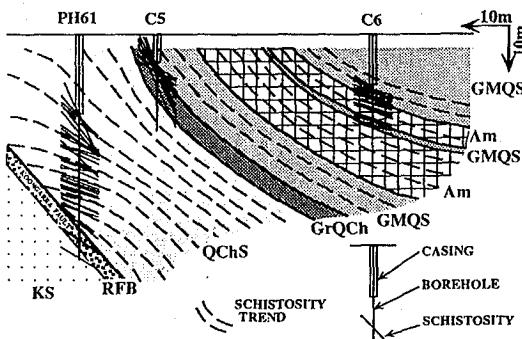


図 9 片理の傾斜変化から認められるクンガラ断層による Cahill 層の引きずり (5930 mN 断面)

層は傾斜を増したものであると推定できる。

#### 4.5 割れ目の方向

ボアホール TV によって Cahill 層に認められる割れ目は、片理に沿って認められる割れ目と、片理構造と斜交する割れ目が認められる(図 10)。もし割れ目が等方・均質に分布する岩盤に鉛直方向のボーリングをした場合、傾斜が緩い割れ目ほど遭遇する機会が多く、傾斜が大きい割れ目はボーリング孔と交差する機会は小さくなることが知られている[13]。これらの割れ目の極をステレオネットに投影した場合、中心点が幾何的な最大頻度となるはずである。

今回計測した全孔の 931 本の割れ目を投影したステレオネットでは、相対的に水平な割れ目は小数であり、岩盤中の割れ目の分布に異方性を持っていることを示している(図 11)。割れ目方向の傾向は NS 走向の大円沿いに分布する割れ目と、NE 象限と SE 象限の境界付近に認められる NS 走向で W 傾斜の小規模な卓越をするものに分けられる。

##### 4.5.1 片理面に平行な割れ目

大円に沿って分布する割れ目は明らかに、この地域全体の褶曲を受けた片理の方向と一致する。また図 12 に示す各孔の割れ目の卓越方向と片理の平均方向の比較でも、各孔の最頻値は片理の方向と一致する。また、一致しない場合でも片理と同方向の多くの割れ目が認められる。

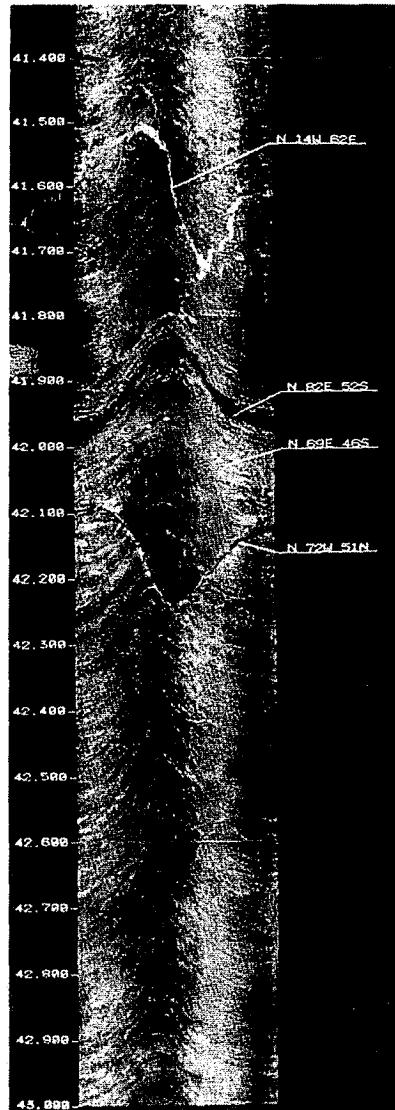


図 10 孔内に認められる Cahill 層の割れ目；M 58 孔、41.3 m～43.3 m 区間。岩相はザクロ石一雲母一石英片岩(GMQS)。41.90 m 附近に認められる割れ目は片理に沿う一方、42.15 m に認められる割れ目は片理を切っている。

これらの割れ目についてはさまざまな時代のものが存在していると考えられるが[1]、断層近傍の Cahill 層の片理面がクンガラ断層と近い方向であることを考えれば、断層形成時に断層近傍で片理構造沿いに小断層や割れ目が発生したことは十分予想される。実際に断層に近い

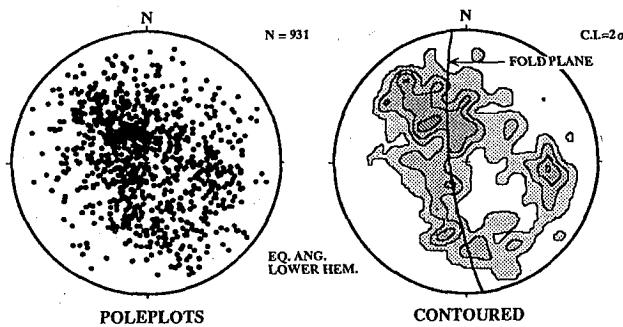


図 11 割れ目の方向のステレオ投影（全データ）

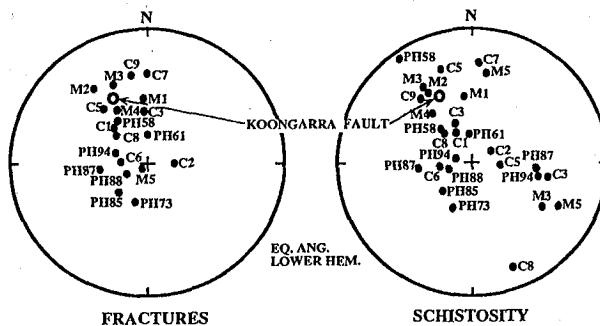


図 12 各孔の片理の平均方向と割れ目の卓越方向；割れ目の最卓越方向が 2 方向存在した場合は、両方を示した。

M 1 孔や PH 61 孔の Cahill 層には片理を緩傾斜化するほどの引きずりが認められるにもかかわらず、ほとんどの割れ目は片理に平行であり、片理沿いに割れ目が生じたことを示唆している。また、今までの侵食による除荷や風化の作用によって、一部の片理面に割れ目が顕在化することもあったと考えられる [1]。

一方、片理生成以後、片理と異なる方向の割れ目も生成していたと考えられる。事実、ボアホール TV では片理自体を切る割れ目や石英脈、炭酸塩鉱物の脈が認められている。しかしながら、これらの片理と斜交する方向の割れ目が生成したにもかかわらず、現在認められる主要な割れ目方向と片理の方向が一致しているという事実は、割れ目が生じるようなさまざまな要因においても、おそらく片理面は割れ目を発生させる弱線として最も有効に作用した結果と考えられる。

#### 4.5.2 その他の割れ目

片理と平行でない割れ目については、広い分布が認められるのみで、明瞭な卓越した方向は認められないがおおむね以下のように分けられる。

SSW：北北東走向、西傾斜(C 2、C 8、M 1、

M 2、M 3、M 4、PH 58、PH 61、PH 85)

P：水平(C 5、C 9、M 1、M 3、PH 58、PH 61、  
PH 73)

WSW：東北東走向、北傾斜(C 3、C 5、M 1、  
M 4、M 5、PH 58、PH 61、PH 73、PH 85、  
PH 87、PH 94)

NE：北東走向、南東傾斜(C 9、PH 58、PH  
61、PH 87、PH 88、PH 94)

これらの 4 方向の割れ目については、ボアホール TV 以外の情報が不足しており、とくに SSW については、同方向の構造は Kombolgie 砂岩層に平行な断層が認められるのみで、その

成因、周辺の構造との関連性は明らかではない。P の一部はこれまでの調査 [2, 3] から想定されているクンガラ断層を切る割れ目や、除荷による顕在化した割れ目であろう。また、WSW は、褶曲軸面に平行であり、おそらく一部は f3 褶曲にともなう劈開 (s3) の顕在化したものと考えることができる。NE 方向はクンガラ断層に近い方向であり、この活動に伴う割れ目である可能性がある。

今のところこれらの割れ目の成因については確証は得られておらず、今後の調査によって検討していく必要があるが、片理と平行な割れ目に比べると卓越性に乏しく分布も離散的であるため、地下水流动へ果たす役割は大きくないと考えられる。

## 5. 地質構造特性と地下水流动

### 5.1 風化層における地下水流动

ボアホール TV 計測では M3 孔でのみ風化帯と下部風化帯が認められる(図 13)。風化帯では岩盤のマトリックスまで風化しており、かつての片理と考えられる帶状の構造が認められるものの割れ目は認められない。また 23.7 m 以深の下部風化帯に認められる割れ目の大部分は粘土鉱物によって充填されている。

このような風化帯では未風化の Cahill 層に比べて低透水性であると考えられる。既往の水理試験 [14, 15] から得られた透水係数でも、未風化の Cahill 層では  $6 \times 10^{-1} \text{m/day}$  であるに対し風化帯で  $5 \times 10^{-4} \text{m/day}$ 、風化帯下部で  $1 \times 10^{-2} \text{m/day}$  と低い透水係数が得られている。

Cahill 層の風化帯中に認められる分散帯が北西から南東に拡散した形状を呈しているのは、風化によって等方均質かつ低透水性になり、地下水が地形面に沿って流动するためと考えられる。

### 5.2 未風化 Cahill 層における地下水流动経路

未風化 Cahill 層の地下水流动は割れ目の存在により風化帯に比べ透水性が高く、そのため

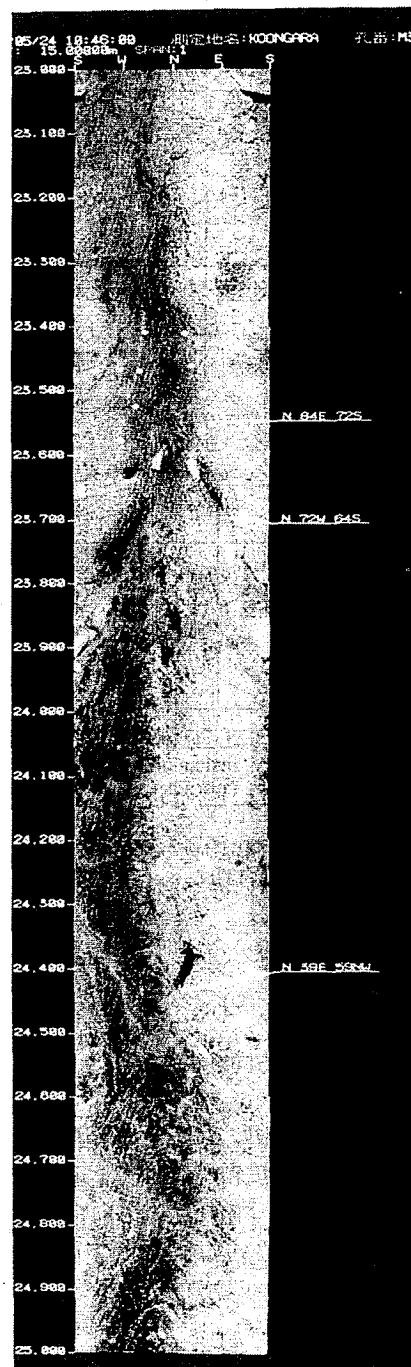


図 13 M3 孔における風化帯と下部風化帯  
(風化一未風化漸移帯)

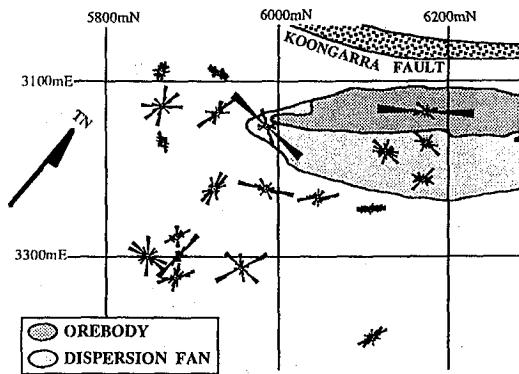


図 14 各孔の割れ目のローズダイアグラム

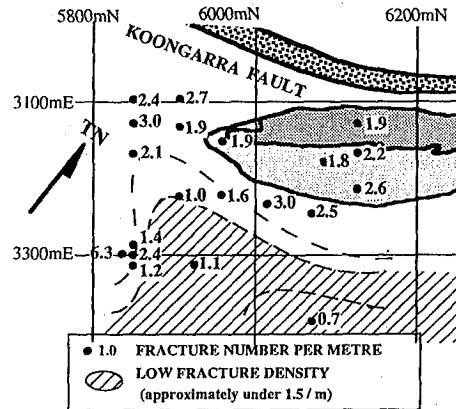


図 16 各孔の割れ目頻度と低頻度領域

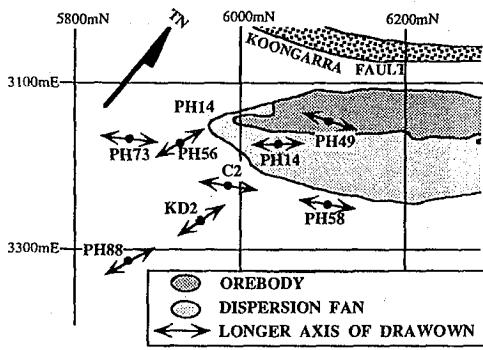


図 15 干渉試験から予測される水位低下の長軸方向 [14]

割れ目の方向と頻度分布は地下水流动に大きな影響を与える。

### 5.2.1 割れ目の方向性

各孔ごとのローズダイアグラムによれば、鉱床西部では北東一南西方向、鉱床南部では南北方向と褶曲構造と調和的な方向を示している(図 14)。このような割れ目の方向特性において、乾期に地下水位が未風化岩盤の近くまで低下した場合、北西から南東方向緩い地形勾配に沿った導水勾配下では、地下水は割れ目の配向方向に沿って流动すると想定される。

サイト内で実施された干渉試験[16]では未風化岩盤までケーシングされた孔から揚水し、周辺孔の水位低下をモニタリングした。この結果、干渉方向の長軸、すなわち地下水の流れやすい方向はローズダイアグラムに認められる方

向性によく一致し、未風化岩盤における地下水流动が割れ目の方向特性に支配されていることを示している(図 15)。

### 5.2.2 割れ目の頻度分布

各孔の平均割れ目頻度によれば調査地域の南西部で褶曲構造に沿った頻度の小さい領域が認められる(図 16)。この領域は雲母一石英一長石片岩の分布にほぼ一致する(図 8)。この岩相は未風化 Cahill 層のうち割れ目頻度、間隙幅とも最も小さい結果が得られており、他の Cahill 層に比べて低透水性と考えることができる(表 4、5)。したがって地下水流动はこの低透水性のゾーンを迂回するよう鉱床西部では北東一南西方向、南部では南北方向の流动が想定され、実際に干渉試験結果はこの想定される地下水流动と調和的な結果を示している(図 16)。

## 6.透水性の異方性を考慮した三次元地下水流动解析

これまで調査地域を対象とした地下水流动解析は、地質調査結果や水理試験結果に基づき風化帯と未風化岩盤を水理的に等方的な岩盤として仮定していた。しかしながら、干渉試験[16]で認められた水位低下の非対称性から、岩盤に水理的な異方性があることが明らかとなった。

本報告ではこのような水理的な異方性は水みちとなる割れ目の方向性や頻度など、岩盤中の

割れ目分布の特性によって引き起こされている可能性を示した。筆者らはこの可能性を検証するため三次元地下水流动解析を実施した [17]。

### 6.1 解析モデルと解析条件

地下水流动に影響を与える割れ目の方向も頻度も基本的に片理の方向の計測から明らかとなつたサイトスケール褶曲構造に調和したものである。このため、解析における地下水流动の概念モデルは褶曲構造を水理的異方性として反映したものとした。解析領域の個々の箇所における水理的異方性は片理面の方向に基づいた透水テソルとして与えた。この際、片理面に垂直な方向の透水係数が最も小さく、片理面と平行な方向については等方とした。垂直方向と平行方向の透水係数比は、実測値としては得られて

いないため、干渉試験から考慮しうる水理的異方性 [14, 15] や、未風化岩盤のコアによる透水性の評価 [1] から 1:100 とした。解析コードは有限要素法解析コード (GMF) [16] を使用した。

解析範囲はクンガラ鉱床全体を含む範囲で実施した(図 17)。解析モデルでは Cahill 層を風化帯、下部風化帯、未風化岩盤に分割し、水理試験結果 [14, 15] に基づいて透水係数を与えた。モデルの底面とクンガラ断層は不透水境界として扱った(図 18)。クンガラ断層を不透水境界と扱った理由は、既往の地下水位観測結果より難透水性と評価することができるためである。またモデルの上面は地形面に沿った一定水頭を与えた。

### 6.2 解析結果

解析は地下水位が地表近くまで上昇し、未風化岩盤のみならず風化帯、下部風化帯が地下水流动に寄与する可能性のある雨期のケースを実施した。

EL. -2.5 m の未風化 Cahill 層の解析平面によれば全体的な地下水流动は標高の高い北部から、低い南部に流下する傾向を示している(図 19)。しかしながら、ローカルな地下水流动は地形勾配よりも、褶曲構造と一致する傾向が認められる。また、流速に関しては石墨片岩のヒンジゾーン付近で、流速が最も遅くなっている。クンガラ断層とほぼ直交する断面では、クンガ

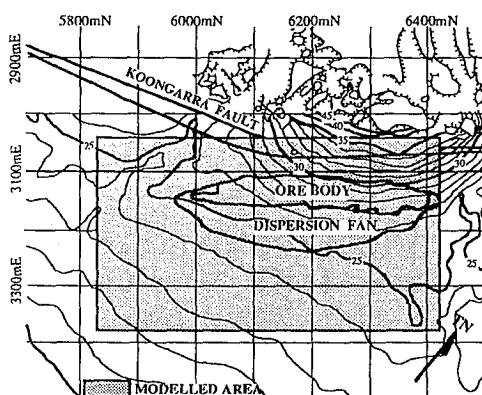


図 17 地下水流動の解析範囲

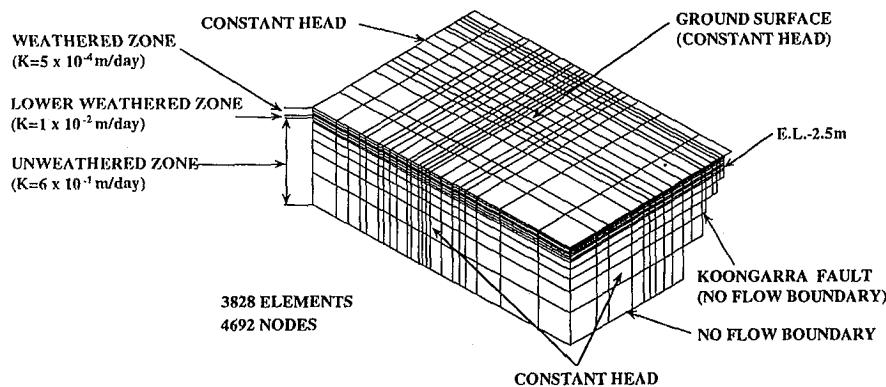


図 18 解析有限要素モデルと解析条件

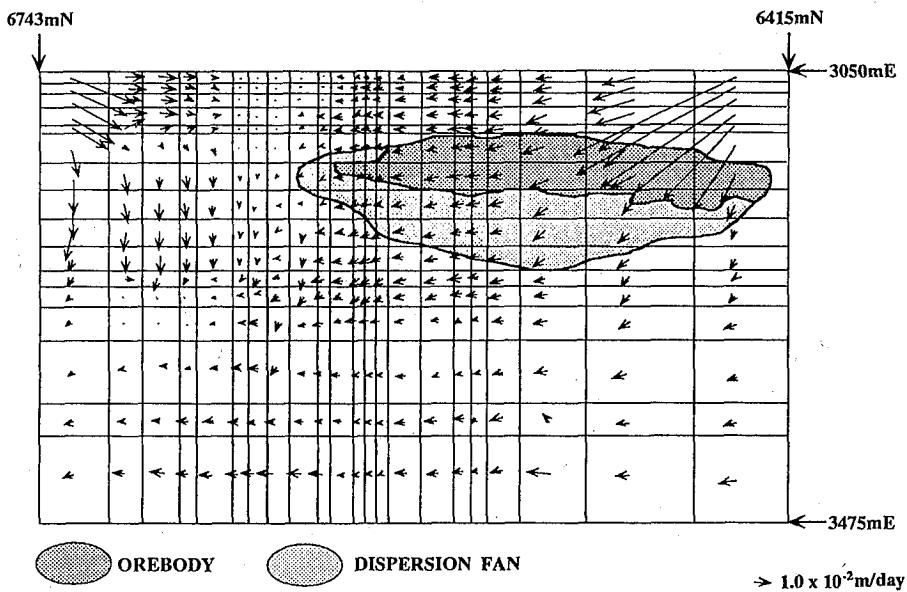


図 19 水平断面図における流速分布図 (E.L.-2.5 m、未風化 Cahill 層)

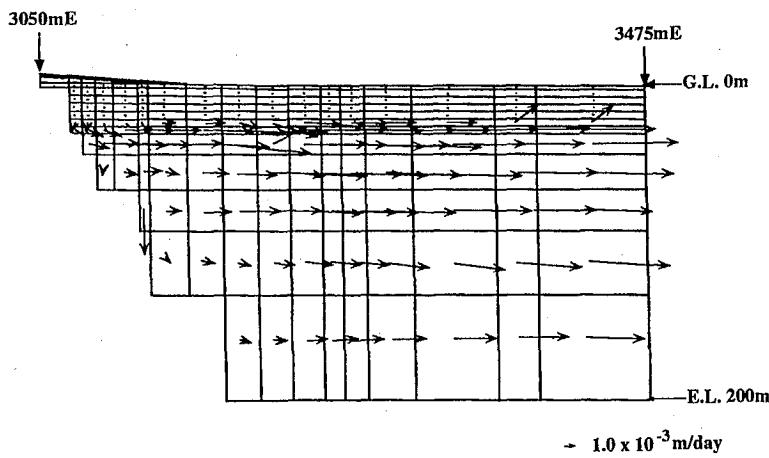


図 20 垂直断面図における流速分布図 (6094 mN 断面)

ラ断層付近で流速が遅く、断層から離れるほど流速が早い傾向が認められる(図 20)。また風化帯や下部風化帯の流速は未風化岩盤に比べて著しく遅く、流向も異なる傾向が認められる。

以上の解析結果のうち、平面的な地下水流动に関しては干渉試験 [16] から求められた地下水低下の長軸とよく一致した結果となっている。これは褶曲構造に沿った地下水流动が実際に起こりえることを検証するとともに、この地

域の割れ目の分布特性に基づく水理地質構造モデルが妥当であったこと示している。

また、風化帯に分布する分散帶付近の流向は現在の地形勾配に調和的である。これは過去から現在までの削剝速度が遅く、サイト全体の地形が著しく変わらなかったと仮定すれば [19]、ウランの分散が始まって以来、分散帶付近の地下水の流向も著しく変遷しなかった可能性を示している。

### 7.まとめ

クンガラサイトでのボアホール TV 計測を実施し、鉱床周辺の未風化岩盤中の地下水流动に影響を与える地質構造を明らかとした。中でも褶曲構造は調査地域の地質構造を特徴づけるものであった。割れ目の卓越方向はこの褶曲構造に平行で、また、調査地域内の割れ目の頻度分布もこの構造と調和的であった。したがって、未風化岩盤における地下水流动は、この褶曲構造を反映したものとなることが予測された。検証のため片理の方向に基づいて透水性に異方性を与え三次元流动解析を実施した。その結果、既往干渉試験結果と一致し、褶曲構造が水理地質構造を支配するモデルが妥当であることを示した。また、ウラン鉱床分散帶では現地形に調和的な地下水流向を呈しており、サイトの地形的傾向に変化がなかったとすれば、また分散帶を形成した地下水流向も著しく変遷しなかった可能性が明らかとなった。

### 8.謝辞

現地でのボアホール TV の計測では㈱レアックスの亀和田俊一氏にお世話になった。また、㈱電力中央研究所の田中和広氏には現地調査の機会を作っていたらしくとともに、本報告をまとめるに際し議論いただいた。河西基氏には地下水流动解析に関して助言をいただいた。これらの方々に厚く感謝いたします。

### 9.参考文献

- [ 1 ] Emarson, D.W. et al. : Alligator Rivers Analogue Project. Final Rep. Vol. 4 (1992).
- [ 2 ] Snelling, A.A. : In: *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea* (Hughes, F.E. eds.), Aust. Inst. Min. and Metal., p 807 (1990).
- [ 3 ] Foy, M.F. and Penderson, C.P. : Economic Geology of Australia and Papua New Guinea, 1, Metals (Knight, C.L. eds.), Aust. Inst. Min. and Metal., p 317 (1975).
- [ 4 ] 田中和広、宮川公雄：応用地質、32、19 (1992).
- [ 5 ] Kamewada, S. et al.: *Rock Joint* (Barton, N and Stephansson, O. eds.), Balkma, p 51 (1990).
- [ 6 ] 本島 勲：原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム、p 71 (1987).
- [ 7 ] Nelson, R.A. : *Geologic analysis of Naturally Fractured Reservoirs*, Gulf Publ. Coy. (1985).
- [ 8 ] 楠本 太他：地下水学会秋季講演会予稿集、p 216 (1991).
- [ 9 ] Needham, R.S. and Stuart-Smith, P. G. : *BMR J. Australian Geol. and Geophy.*, 1, 321 (1976).
- [ 10 ] Johnston, D.J. : PhD Thesis, Monash Univ. (1984).
- [ 11 ] Needham, R.S. : Bureau Mineral resources, 224, 96 Geology and Geophysics, Australian Government Publish service (1988).
- [ 12 ] Mill, K. : Alligator Rivers Analogue Project Progress Rep., Sep. 1, 1990-Nov. 30, 1990, p 93 (1991).
- [ 13 ] Terzuhagi, R.D. : *Geotechnique*, 15, 287 (1969).
- [ 14 ] Norris, J.R. : MS Thesis, Univ. of Arizona (1989).
- [ 15 ] Marley, R.D. : MS Thesis, Univ. of Arizona (1990).
- [ 16 ] Braumiller, S. : Alligator Rivers Analogue Project Rrogress Rep., Sep. 1, 1990-Nov. 30, 1990, p 109 (1991).
- [ 17 ] Tanaka, Y. et al. : 2 nd INTRAVAL Work Shop, Sydney, Australia, Feb. 10-14, 1992 (1992).
- [ 18 ] 河西 基他：電力中央研究所研究報告 U 93054 (1994).
- [ 19 ] Wyrwoll, K-H. : Alligator Rivers Analogue Project. Final Rep., Vol. 2 (1992).