

Fig. 2-1-51 (6) Geochemical Anomaly Map in the Camarones Area (Mo)

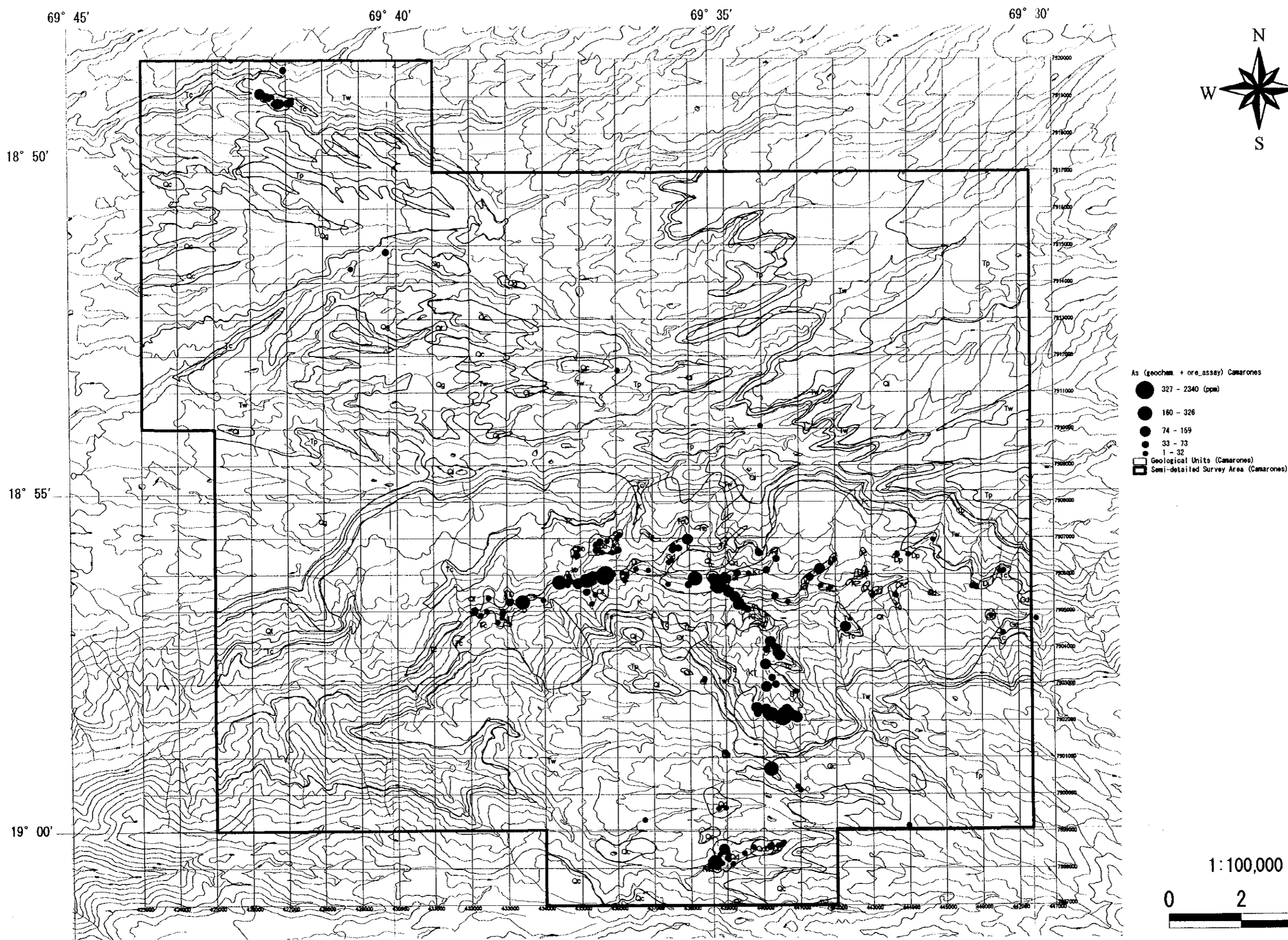


Fig. 2-1-51 (7) Geochemical Anomaly Map in the Camarones Area (As)

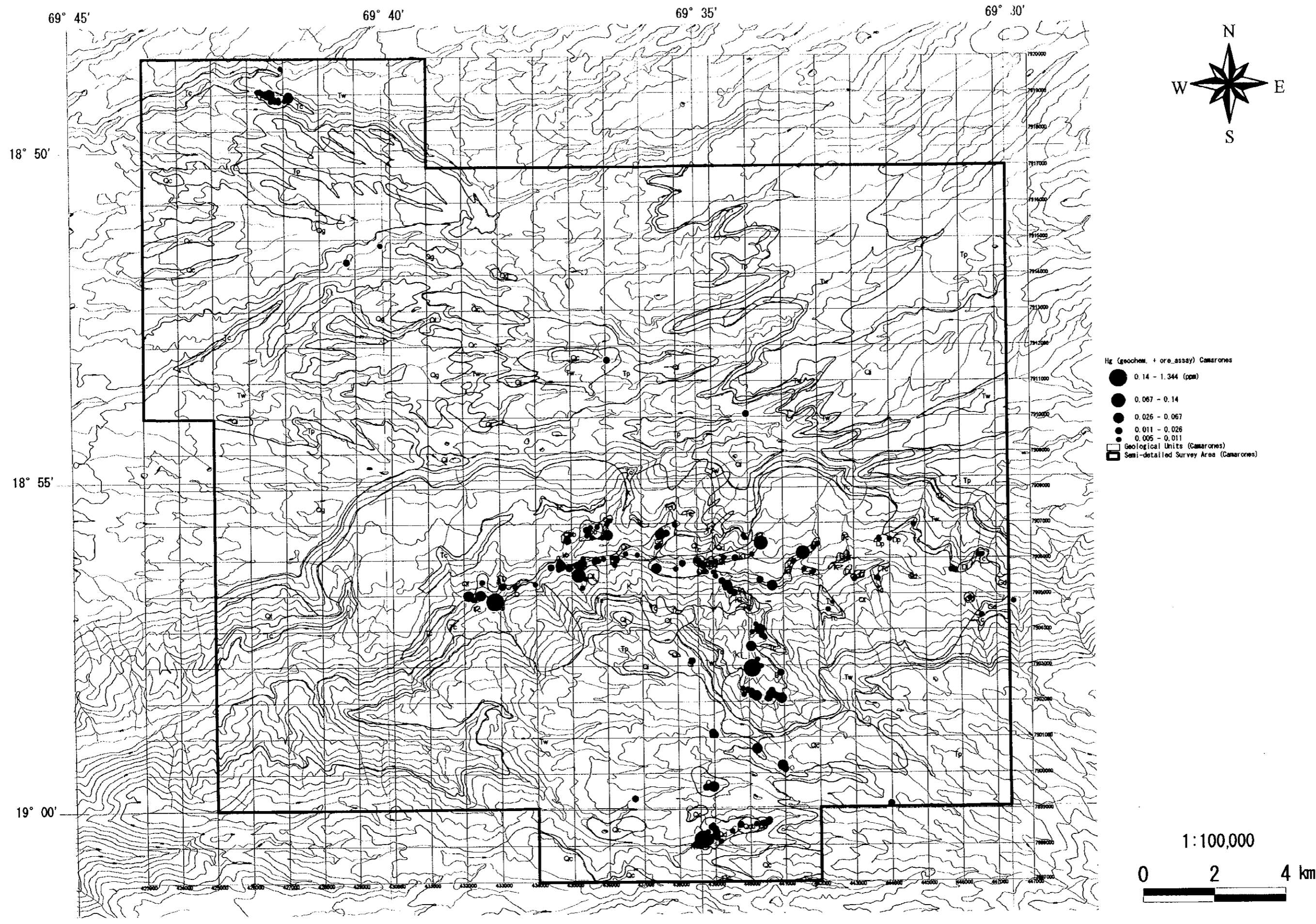


Fig. 2-1-51 (8) Geochemical Anomaly Map in the Camarones Area (Hg)

Table 2-1-2 Basic Static Value of Rock Samples in the Camarones Area

<i>Granodiorite (Gd)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	68	24	81	5	18	10	0.010	3	0.1
Median	82	21	50	5	14	10	0.005	3	0.1
Standard deviation	49	15	120	3	10	0	0.014	0	0.1
Minimum	7	6	1	1	7	10	0.005	3	0.1
Maximum	141	52	433	9	34	10	0.053	3	0.2
Number of sample	11	11	11	11	11	11	11	11	11

<i>Diorite porphyry (Dp)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	117	22	47	5	32	10	0.007	3	0.3
Median	45	23	53	5	11	10	0.005	3	0.4
Standard deviation	166	17	20	2	40	0	0.005	0	0.3
Minimum	18	4	23	3	3	10	0.005	3	0.1
Maximum	471	45	72	8	96	10	0.017	3	0.7
Number of sample	7	7	7	7	6	6	6	7	7

<i>Diorite (Di)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	42	20	72	4	28	10	0.005	6	0.2
Median	46	20	83	3	20	10	0.005	6	0.3
Standard deviation	18	19	39	4	22	0	0.000	3	0.1
Minimum	18	1	16	1	12	10	0.005	3	0.1
Maximum	60	37	106	9	61	10	0.005	9	0.3
Number of sample	4	4	4	4	4	4	4	4	4

<i>Quartz porphyry (Qp)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	683	26	28	4	28	10	0.007	6	0.5
Median	182	27	19	4	13	10	0.005	3	0.3
Standard deviation	1300	12	24	3	36	0	0.004	5	0.6
Minimum	7	5	3	1	3	10	0.005	3	0.1
Maximum	4963	57	108	14	122	10	0.015	20	3.5
Number of sample	36	36	36	36	23	23	23	36	36

<i>Quartz diorite (Qd)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	63	29	57	5	32	10	0.013	5	0.3
Median	52	29	52	4	22	10	0.005	3	0.2
Standard deviation	68	16	43	2	40	0	0.012	6	0.6
Minimum	6	1	7	1	5	10	0.005	3	0.1
Maximum	448	69	242	10	199	10	0.049	32	3.8
Number of sample	52	52	52	52	45	45	45	52	52

<i>F. Lupica (KT)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	24	50	41	7	76	11	0.047	46	3.4
Median	18	31	19	5	66	10	0.005	3	0.1
Standard deviation	19	106	80	5	54	4	0.206	259	21.6
Minimum	6	5	1	1	8	10	0.005	3	0.1
Maximum	92	740	412	20	229	30	1.344	1782	148.0
Number of sample	47	47	47	47	42	42	42	47	47

<i>F. Empexa (K)</i>	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Average	377	120	104	11	111	11	0.013	12	0.4
Median	87	38	79	3	30	10	0.005	4	0.2
Standard deviation	1093	629	97	35	352	3	0.012	26	0.5
Minimum	7	1	18	1	2	10	0.005	3	0.1
Maximum	7129	5145	746	190	2340	28	0.050	170	2.2
Number of sample	66	66	66	66	55	55	55	66	66

Table 2-1-3 Geochemical Correlation Coefficients of Rock Samples in the Camarones Area

	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Au (ppb)	Ag (ppm)
Cu (ppm)	1								
Pb (ppm)	0.015	1							
Zn (ppm)	0.066	0.524	1						
Mo (ppm)	0.239	-0.001	0.043	1					
As (ppm)	-0.017	0.058	-0.015	0.080	1				
Sb (ppm)	-0.012	0.313	0.127	0.016	0.379	1			
Hg (ppm)	0.024	0.004	-0.012	0.221	0.046	0.449	1		
Au (ppb)	-0.006	0.006	0.018	0.058	0.001	0.330	0.081	1	
Ag (ppm)	0.138	0.008	-0.010	0.060	-0.003	0.314	0.059	0.979	1

	Log Cu (ppm)	Log Pb (ppm)	Log Zn (ppm)	Log Mo (ppm)	Log As (ppm)	Log Sb (ppm)	Log Hg (ppm)	Log Au (ppb)	Log Ag (ppm)
Log Cu (ppm)	1								
Log Pb (ppm)	0.274	1							
Log Zn (ppm)	0.391	0.141	1						
Log Mo (ppm)	0.168	0.217	-0.102	1					
Log As (ppm)	-0.004	0.359	-0.083	0.390	1				
Log Sb (ppm)	-0.025	0.171	0.040	0.102	0.239	1			
Log Hg (ppm)	0.011	0.129	-0.005	0.192	0.112	0.272	1		
Log Au (ppb)	0.220	0.172	0.217	0.184	0.094	0.306	0.254	1	
Log Ag (ppm)	0.302	0.197	0.012	0.156	0.041	0.228	0.229	0.369	1

Table 2-1-4 Results of Principal Component Analysis

Eigenvectors

	1	2	3	4	5	6
Log Cu (ppm)	0.3049	-0.5079	-0.2886	0.2515	-0.0141	-0.0492
Log Pb (ppm)	0.3824	0.0138	-0.4229	-0.2149	0.2557	-0.4995
Log Zn (ppm)	0.1582	-0.5871	-0.1026	-0.4568	-0.3315	0.0950
Log Mo (ppm)	0.3294	0.2954	-0.3078	0.6147	-0.3979	0.3961
Log As (ppm)	0.2973	0.4371	-0.4052	-0.2538	0.0638	0.1305
Log Sb (ppm)	0.3392	0.2068	0.3814	-0.4827	0.2509	0.1782
Log Hg (ppm)	0.3139	0.1891	0.4939	0.0306	-0.5949	-0.5633
Log Au (ppb)	0.4182	-0.1570	0.3142	-0.0167	-0.0433	0.6715
Log Ag (ppm)	0.3867	-0.1254	0.2763	0.4596	0.4934	-0.1286

Eigenvalue and its contribution

	1	2	3	4	5	6
Eigenvalue	2.388	1.488	1.197	0.942	0.772	0.719
Contribution (%)	26.532	16.533	13.302	10.469	8.579	7.992
Cumulative contr.(%)	26.532	43.064	56.366	66.835	75.414	83.407

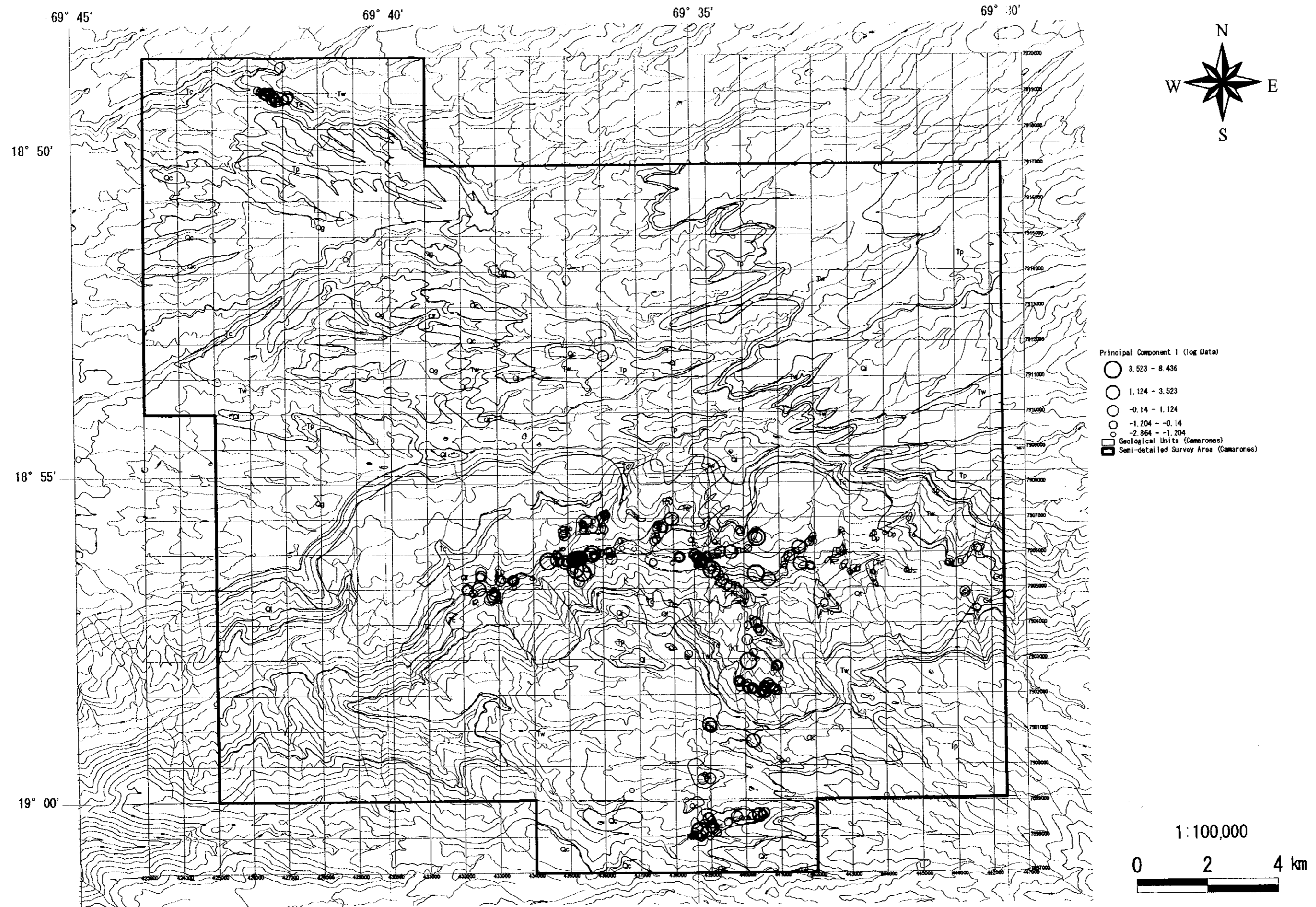


Fig. 2-1-52 (1) Scores of Principal Component Analysis in the Camarones Area (1st Comp.)

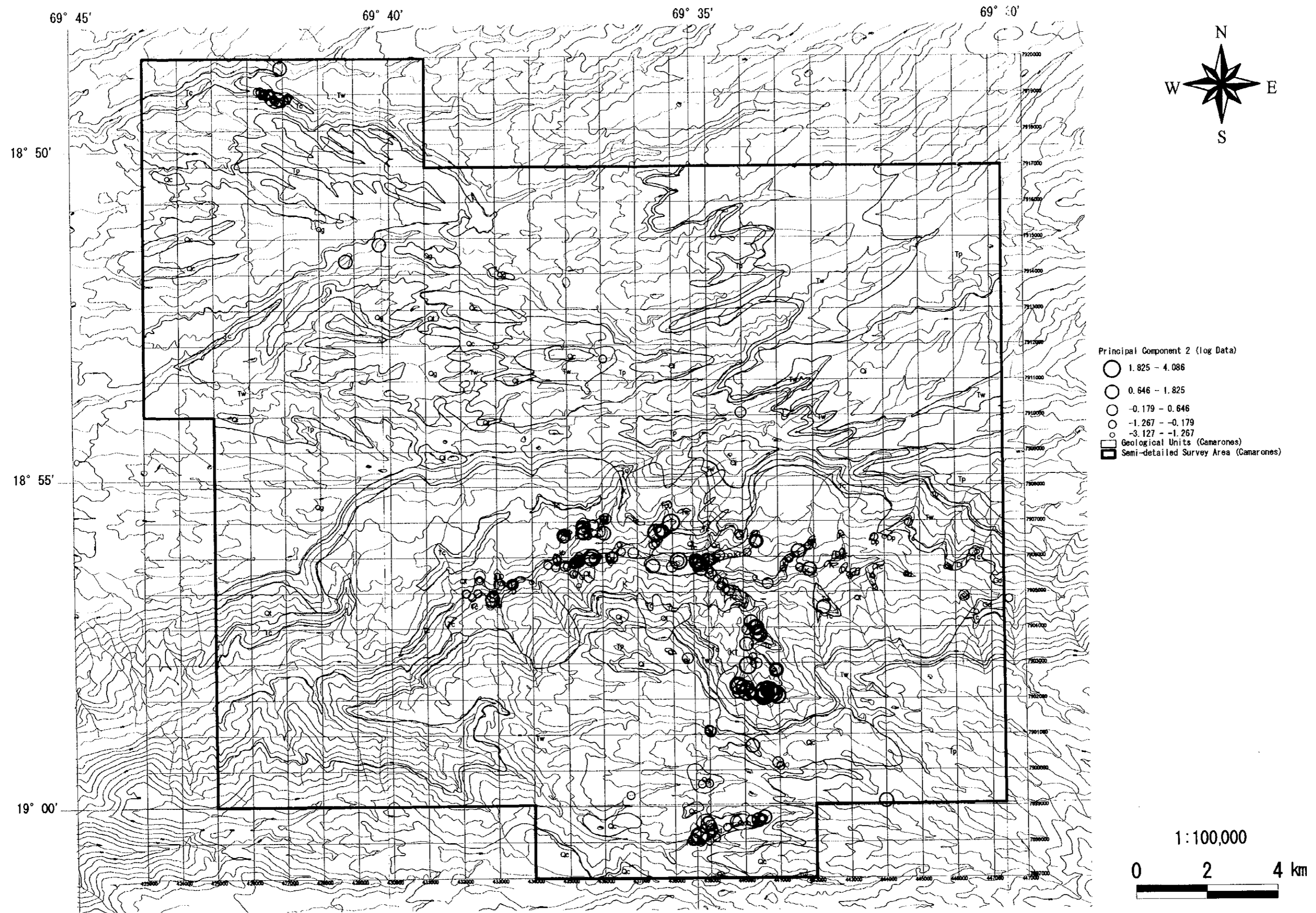


Fig. 2-1-52 (2) Scores of Principal Component Analysis in the Camarones Area (2nd Comp.)

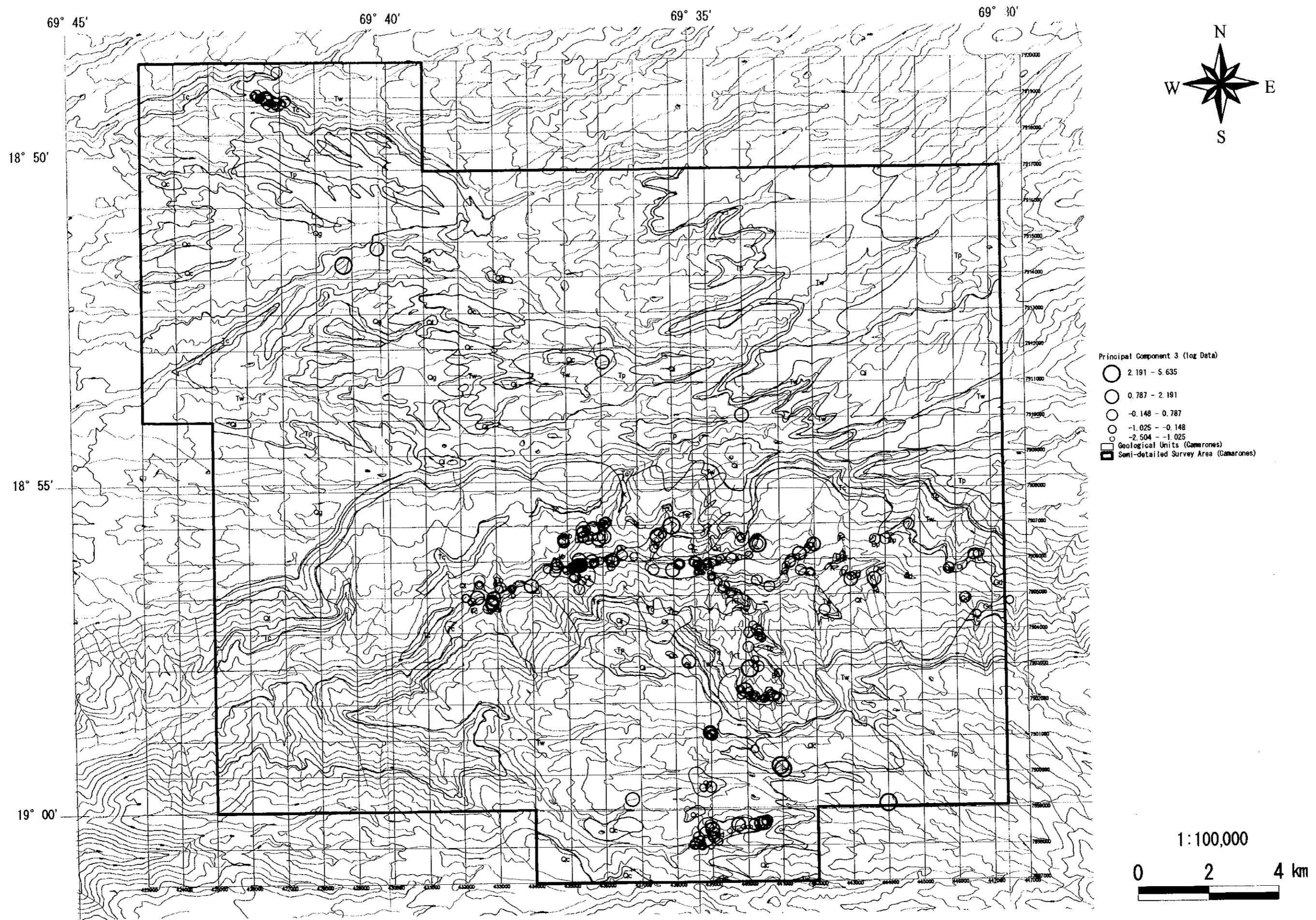


Fig. 2-1-52 (3) Scores of Principal Component Analysis in the Camarones Area (3rd Comp.)

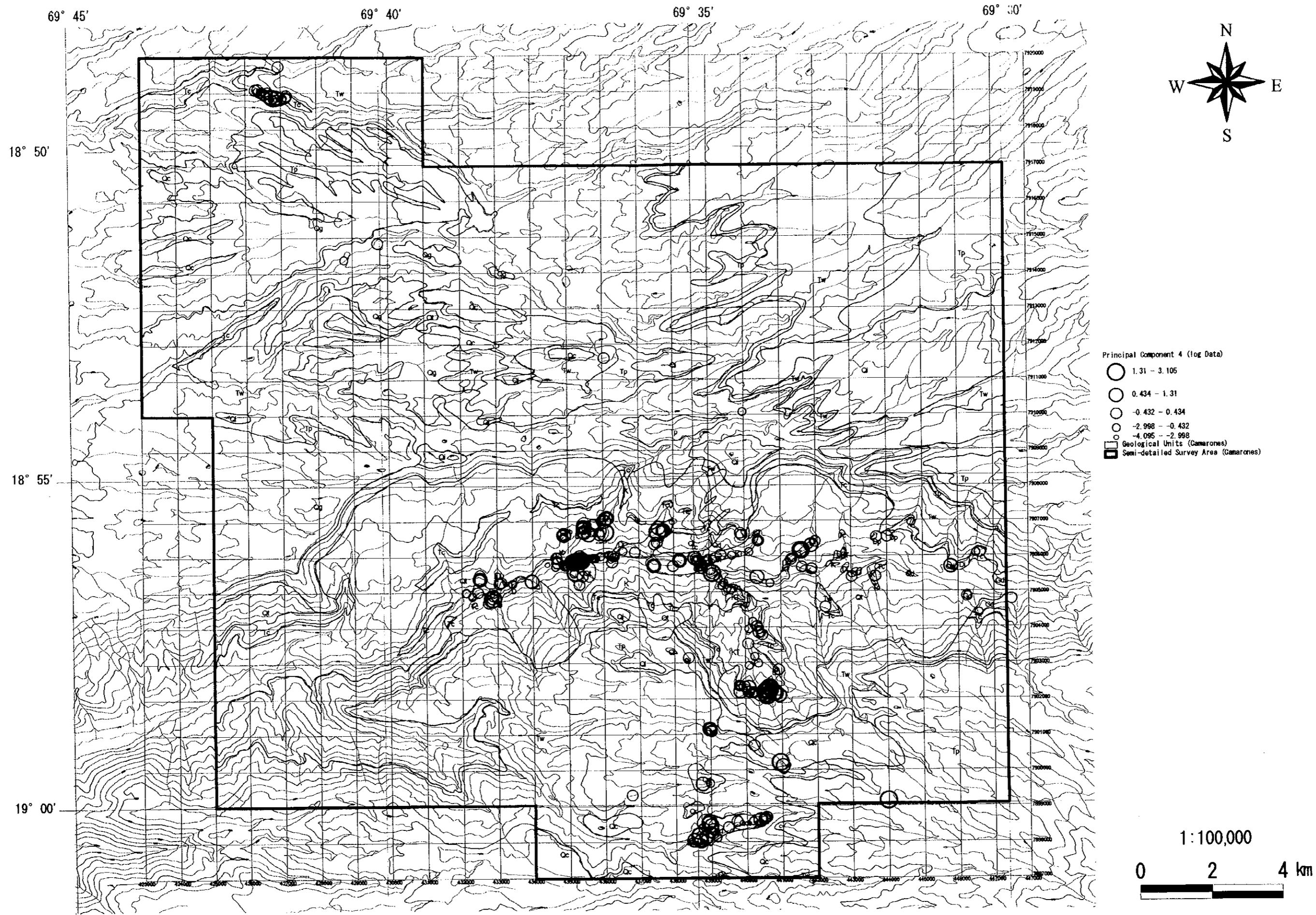


Fig. 2-1-52 (4) Scores of Principal Component Analysis in the Camarones Area (4th Comp.)

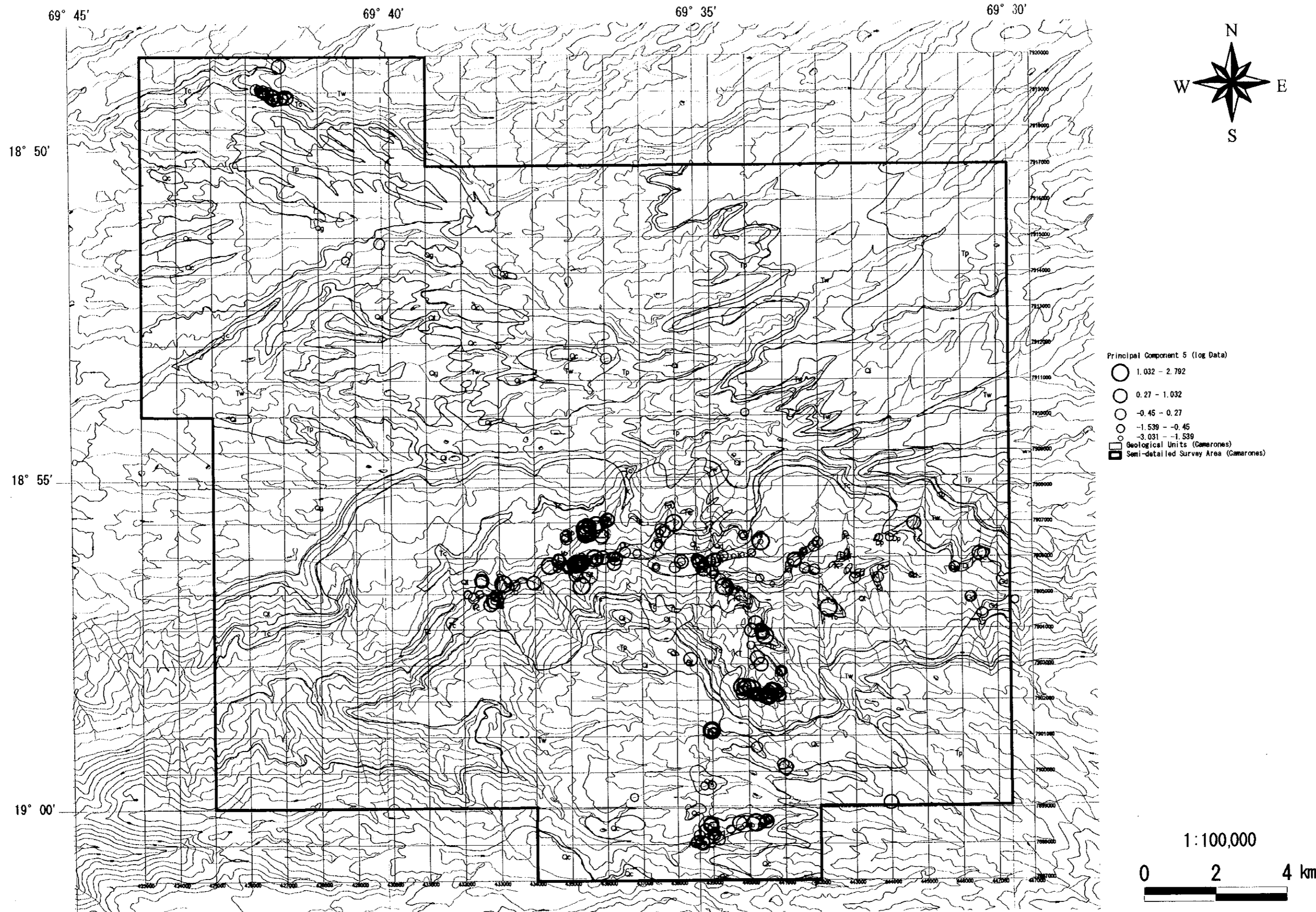


Fig. 2-1-52 (5) Scores of Principal Component Analysis in the Camarones Area (5th Comp.)

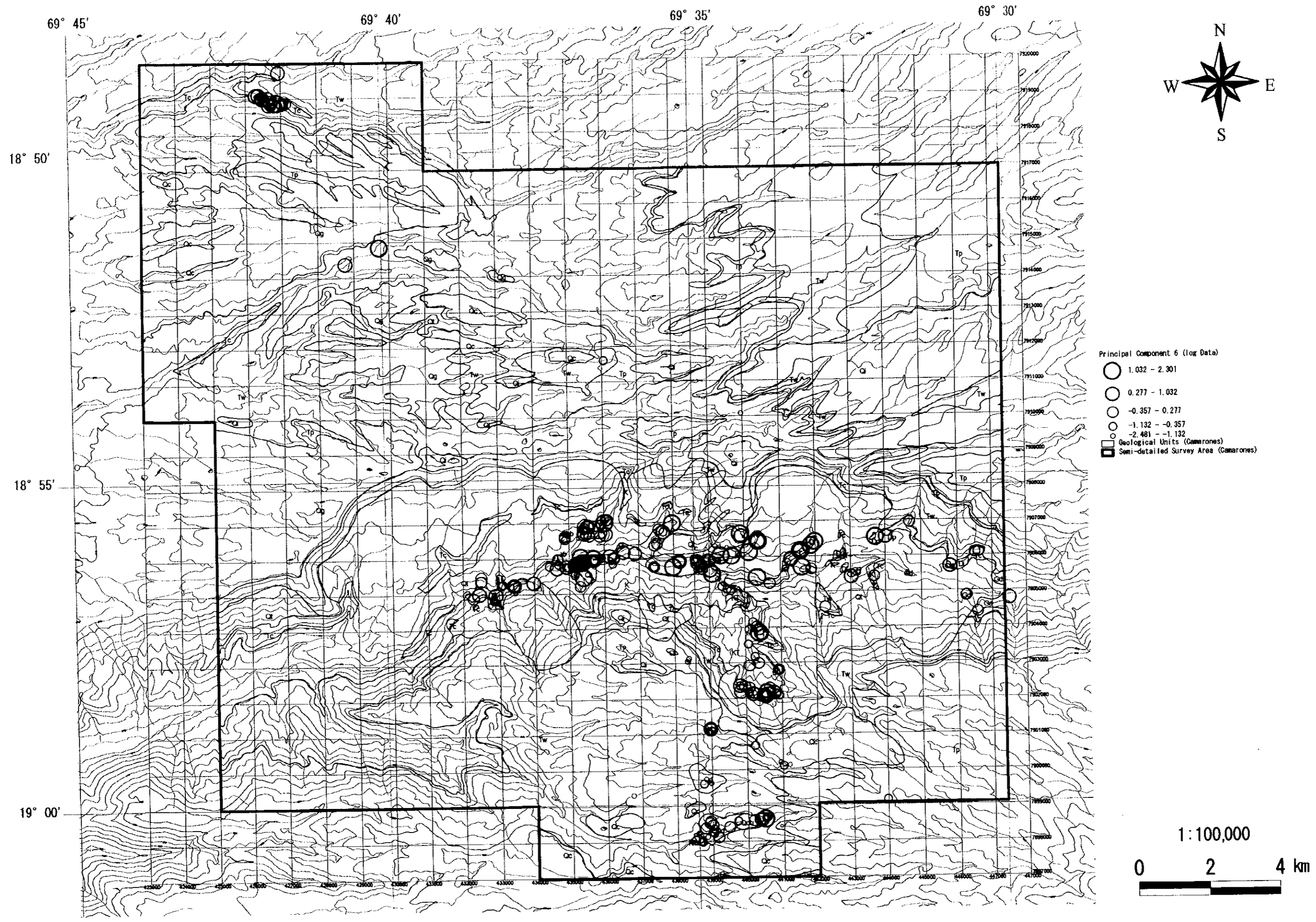


Fig. 2-1-52 (6) Scores of Principal Component Analysis in the Camarones Area (6th Comp.)

カマローネス沢東部鉍化帯：Au·Hg(高異常)
カマローネス沢南方支流鉍化帯：Pb·Mo·As·Hg(高異常)
カマローネス沢東方 Illapata：Cu(弱異常)
カマローネス沢東方 Illapata南部：Zn(高異常)
南端部鉍化帯：Cu·Mo·As·Hg(高異常)

以上から、カマローネス沢の西部鉍化帯及び中部鉍化帯は斑岩銅鉍化型の異常を示し、それらの周辺部は斑岩銅鉍化に引き続いて生じた浅熱水型の異常を示し、南端部鉍化帯では斑岩銅鉍化型と浅熱水型が重複していると考えられる。

Table 2-1-2にカマローネス地域における地化学分析結果の基本統計量を岩体または地層ごとに示した。カマローネス沢西部鉍化帯の斑岩銅鉍化をもたらしたと考えられる石英斑岩以外では、閃緑斑岩の平均Cu含有量の多さとPb/Cu比の低さが注目される。南端部鉍化帯では同岩がCu異常の母岩であることから、同岩は斑岩銅鉍化の関係火成岩となりうる可能性を有していると考えられる。

Table 2-1-3に各元素間の相関係数を示した。正の相関を示す元素組み合わせのうち、斑岩銅鉍化に関係するものとしてはMo·As, Au·Agが、また、浅熱水型鉍化に関係するものとしてはCu·Zn, Pb·As, As·Sb, Sb·Hg, Au·Agが考えられる。

Table 2-1-4に主成分分析結果を示した。また、主成分分析スコア図をFig. 2-1-52に示した。主成分分析の計算には、地化学分析値の対数値から求めた相関行列を用いた。

第1主成分は、Au, Ag, Pbの固有ベクトル値が高く、主成分得点の高得点域は中新統中の鉍徴を除く全ての鉍徴の分布域にほぼ一致することから、斑岩銅鉍化作用とそれに引き続く浅熱水型鉍化作用を表していると考えられる。

第2主成分は、Asの固有ベクトル値が高く、主成分得点の高得点域は中新統中の鉍徴を含む全ての鉍徴の分布域にほぼ一致することから、斑岩銅鉍化とそれに引き続く浅熱水型鉍化作用及び中新世以後に生じた浅熱水型鉍化作用を表していると考えられる。

第3主成分は、Hg, Sbの固有ベクトル値が高く、主成分得点の高得点域はカマローネス沢流域の鉍化帯周縁部～周辺部に広く分布するほか、中新世以後の地層中の鉍徴にも一致することから、斑岩銅鉍化作用との関連性が薄く、斑岩銅鉍化作用のかなり後に生じた浅熱水型鉍化作用を表していると考えられる。

第4主成分は、Ag, Moの固有ベクトル値が高く、主成分得点の高得点域は鉍徴周辺の石英斑岩、石英閃緑岩及び閃緑斑岩の分布と一致するものが多いことから、斑岩銅鉍化作用を表していると考えられる。

第5主成分は、Agの固有ベクトル値が高く、主成分得点の高得点域は石英斑岩及びカマローネス沢流域の石英脈の分布と一致するものが多いことから、斑岩銅鉍化作用とそれに引き続く浅熱水型鉍化作用を表していると考えられる。

第6主成分は、Au, Moの固有ベクトル値が高く、主成分得点の高得点域は花崗岩質岩の分布及びカマローネス沢流域の銅の鉱徴分布と一致するものが多いことから、斑岩銅鉱化作用を表していると考えられる。

第2章 重力探査

2-1 探査方法

重力探査の流れをFig.2-2-1 に示す。

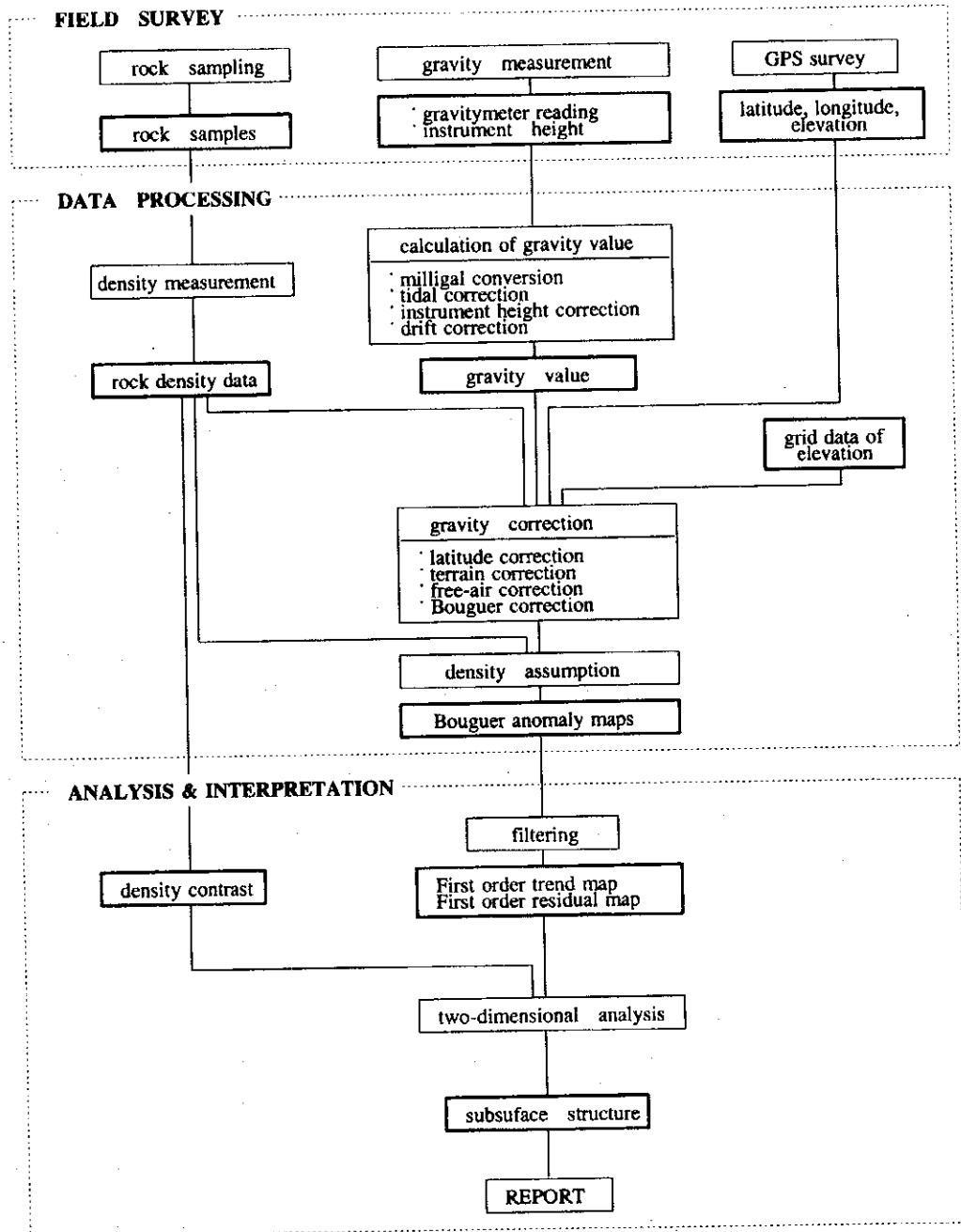


Fig. 2-2-1 Flowchart of Gravity Survey

2-1-1 現地調査

(1) 重力測定

重力探査はカマローネス地域の面積500km²(東西25km×南北20km)の範囲(Fig.1-2)に300点以上の測点を配置することで調査を開始したが、調査の途中で調査地域の北西側に面積38km²、測定点数30点が追加された。

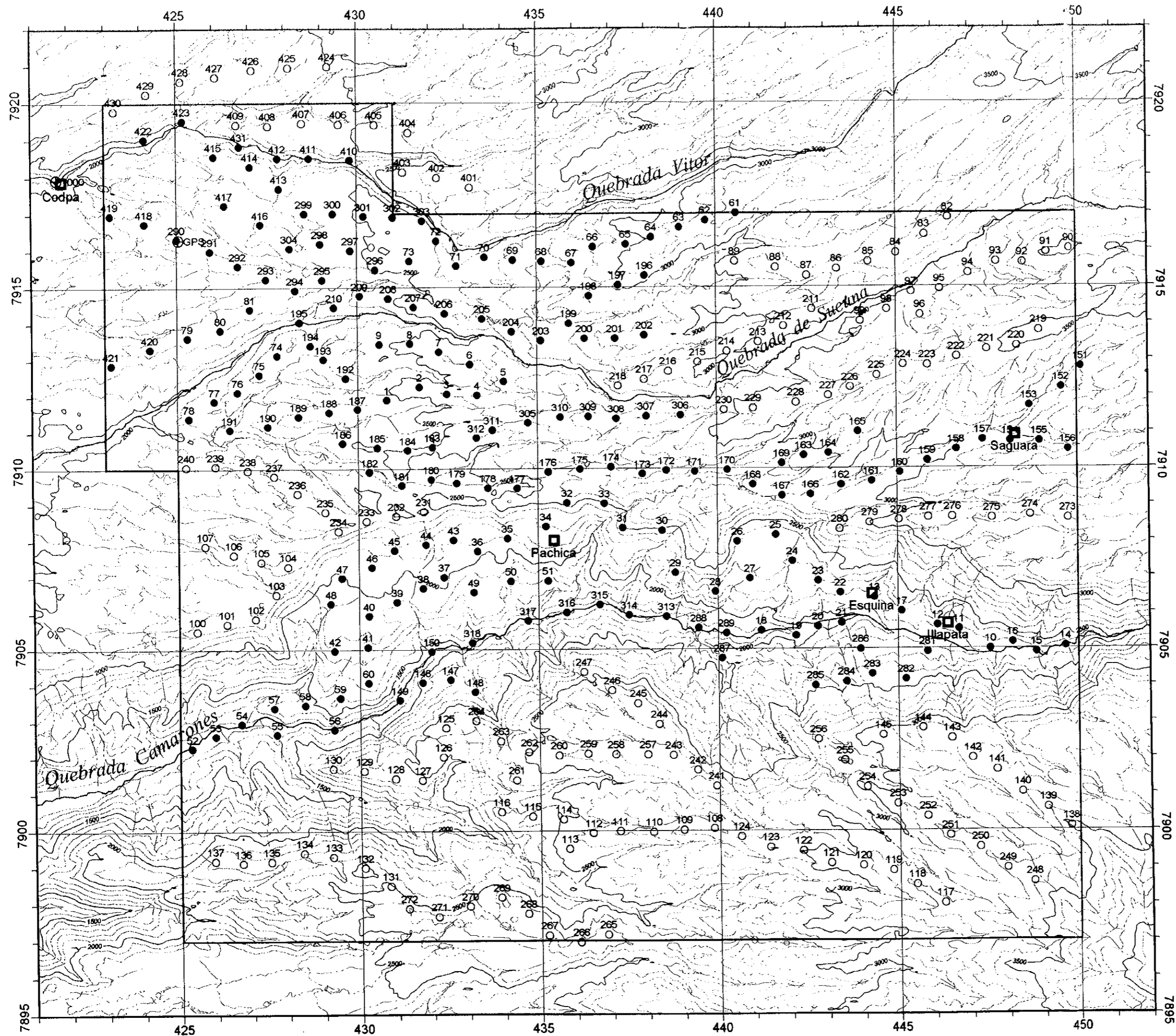
最終的な測定点数は当初の計画範囲に318点、追加範囲に31点の合計349点となった。各測点の位置をFig.2-2-2に示す。調査地域の東部、南部、西部に位置するアクセスに時間のかかる測定ルートの日復にはヘリコプターを使用した。ヘリコプターを使用して測定した測点は150点で、これは全体の43%に相当する。

重力測定には下の表に示す2台のラコステG型重力計を使用した。

重力計番号	G-178	G-365
製作年月	1968年2月	1974年3月
測定範囲	0~7,344.88mgal	0~7,447.81mgal
測定精度	0.02mgal	
本体サイズ	14×15×20 cm	
重量	8.6 kg	
電源	12V バッテリー	
製造元	ラコステ&ロンバーグ社(USA)	

重力測定の基点(No.1000)は調査地域の北西約1kmに位置するCodpaの調査基地敷地内に設置した。基点の重力値(978,044.68mgal)は、調査地域の北西約100kmに位置するアリカ空港内にあるチリ大学の重力点(g=978,480.233mgal)との間の測定により決定した。測定結果を次に示す。

DATE:2000/11/24 LACOSTE G-178										
No.	TIME	READING	INST. HEIGHT	*FACT	INST. COR	ETCOR	+ COR	DRIFT COR	GRVTY DIF.	GRAVITY VALUE
	H M		m	mgal	mgal	mgal	mgal	mgal	mgal	mgal
1000	8 16	1595.978	.27	1670.498	.083	-.034	1670.547	.000	-435.557	978044.676
Arica	11 39	2011.575	.27	2105.858	.083	.159	2106.101	.004	.000	978480.233
1000	17 20	1595.970	.27	1670.490	.083	-.091	1670.537	.010	-435.557	978044.676
DRIFT RATE = -.00109 mgal/hour										



LEGEND
 ○ By Helicopter
 ● By Car

Fig.2-2-2
 Location of Gravity Station

(2) 水準測量

各測点の位置・標高の測量には、人工衛星からの信号を利用して測位を行うGPS(Global Positioning System)静止測量を用いた。GPS静止測量には1台の受信機による単独測位と2台の受信機を用いる相対測位の2種類があるが、本調査ではセンチメートル・オーダーの高い精度が得られる相対測位を採用した。相対測位では、固定点(GPS基点)と移動点(各測点)の2地点で同時に信号を受信して2地点の標高差及び相対位置を測定する。測量機(受信機)には米国トリンプル社の4600LS 3台を使用した。1台が基点用、2台が移動点用である。

GPS測量の基点はCodpaの南東約3.5kmの調査地域北西端部に設置した。この点は重力測点No.290と同一の点である。GPS基点の位置、標高は、調査地域の西北西約17kmに位置する三角点"Garza"との間でGPS測量を行って決定した。

(3) 岩石試料の密度測定

調査地域内で採取した86個の岩石試料について密度測定を行った。試料の採取位置をFig.2-2-3に示す。

岩石試料の密度は、3状態の重量を測定し以下の式により算出した。

$$\text{自然乾燥密度} = W1 / (W2 - W3)$$

$$\text{強制湿潤密度} = W2 / (W2 - W3)$$

W1：試料を室内(常温)で数日間放置した状態(自然乾燥状態)での空中重量。

W2：試料を自然気圧下で約24時間浸水(強制湿潤)したのち、表面の付着水を拭きとった状態での空中重量。

W3：強制湿潤状態での水中重量。

各試料の2種類の密度の一覧表をTable 2-2-1に、地層・岩石別の平均密度をTable 2-2-2に示す。

Table 2-2-2によると、第四紀の集塊岩と第三紀中新世のイグニブライトとが低密度のグループを、第四紀の玄武岩、基盤岩類(上部白亜系、上部白亜系-古第三系)、白亜紀～第三紀貫入岩類が高密度のグループを形成している。低密度のグループは自然乾燥密度と強制湿潤密度との差が $0.06 \sim 0.20 \text{g/cm}^3$ の差があり、岩石の有効空隙率が比較的大きい。一方、高密度のグループは自然乾燥密度と強制湿潤密度にほとんど差がなく、有効空隙率はきわめて小さい。

岩石試料の密度は、地形補正とブーゲー補正に用いる補正密度を決定する時の基本デー

Table 2-2-1 Results of rock density measurements (1/2)

Sample No.	Rock name	Density (g/cm ³)		Coordinates(km)	
		Natural dry	Wet	X	Y
1	Pumice tuff	1.91	2.02	433.648	7912.021
2	Pumice tuff	1.60	1.86	430.485	7913.279
3	Highly welded tuff	2.31	2.37	449.609	7910.606
4	Highly welded tuff	2.41	2.45	445.705	7910.368
5	Highly welded tuff	2.24	2.33	443.376	7909.613
6	Basalt	2.57	2.61	443.879	7910.975
7	Pumice tuff	1.61	1.89	438.479	7909.997
8	Highly welded tuff	2.21	2.32	432.286	7908.038
9	Highly welded tuff	2.19	2.30	431.890	7907.960
10	Agglomerate	1.95	2.13	430.485	7907.536
11	Agglomerate	1.82	1.94	429.413	7906.489
12	Pumice tuff	1.57	1.81	434.138	7908.064
13	Highly welded tuff	2.18	2.29	437.117	7914.998
14	Highly welded tuff	2.35	2.41	435.885	7914.074
15	Highly welded tuff	2.24	2.31	435.184	7913.436
16	Pumice tuff	1.93	2.10	433.676	7914.007
17	Pumice tuff	1.64	1.92	440.556	7913.238
18	Pumice tuff	1.46	1.74	439.525	7912.933
19	Pumice tuff	2.07	2.19	437.831	7912.417
20	Basalt	2.62	2.64	448.537	7913.423
21	Basalt	2.61	2.62	444.316	7912.483
22	Basalt	2.67	2.69	443.574	7912.166
23	Basalt	2.62	2.63	443.322	7912.087
24	Basalt	2.59	2.63	440.544	7911.663
25	Basalt	2.62	2.64	431.689	7908.765
26	Agglomerate	1.88	2.08	430.010	7908.595
27	Pumice tuff	1.55	1.80	427.867	7909.692
28	Basalt	2.55	2.56	426.754	7910.063
29	Pumice tuff	1.88	2.07	426.106	7909.969
30	Pumice tuff	1.70	1.94	439.868	7901.208
31	Pumice tuff	1.61	1.90	438.758	7902.453
32	Pumice tuff	1.84	2.05	436.998	7903.657
33	Highly welded tuff	2.37	2.38	438.783	7902.334
34	Basalt	2.69	2.70	436.467	7904.345
35	Basalt	2.50	2.54	448.524	7898.643
36	Pumice tuff	1.81	2.01	446.563	7899.436
37	Weakly welded tuff	1.94	2.09	446.010	7899.436
38	Weakly welded tuff	2.04	2.18	445.492	7899.753
39	Highly welded tuff	2.27	2.34	443.904	7901.592
40	Weakly welded tuff	2.11	2.22	442.926	7902.321
41	Diorite porphyry	2.66	2.67	443.998	7906.621
42	Diorite porphyry	2.67	2.68	443.998	7906.621
43	Quartz diorite	2.73	2.75	438.677	7898.074

Table 2-2-1 Results of rock density measurements (2/2)

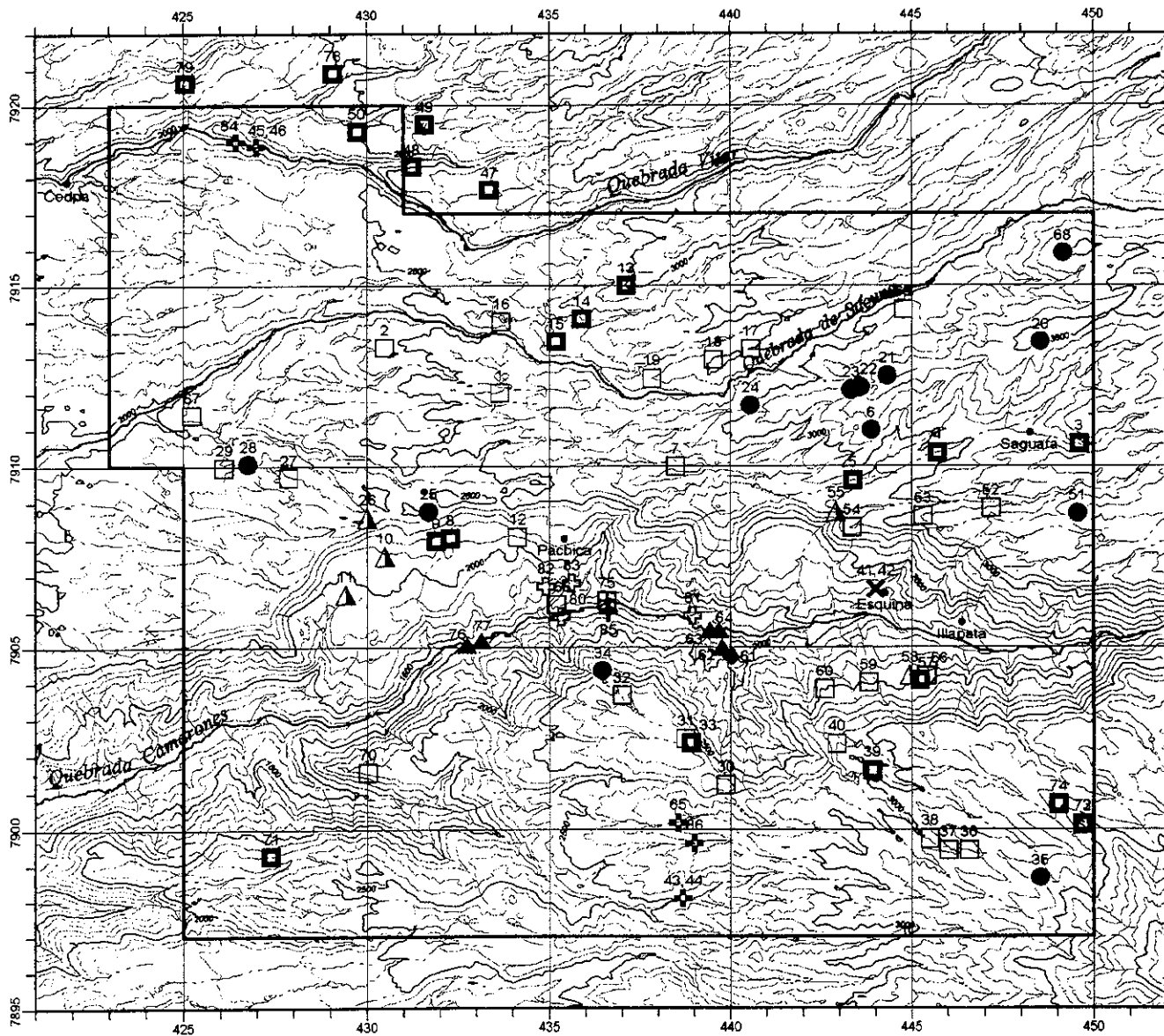
Sample No.	Rock name	Density (g/cm ³)		Coordinates(km)	
		Natural dry	Wet	X	Y
44	Quartz diorite	2.71	2.72	438.677	7898.074
45	Quartz diorite	2.61	2.61	426.980	7918.864
46	Quartz diorite	2.58	2.58	426.980	7918.864
47	Highly welded tuff	2.18	2.25	433.345	7917.657
48	Highly welded tuff	2.35	2.38	431.227	7918.308
49	Highly welded tuff	2.37	2.42	431.585	7919.484
50	Highly welded tuff	2.30	2.37	429.731	7919.301
51	Basalt	2.64	2.64	449.556	7908.699
52	Pumice tuff	1.72	1.96	447.186	7908.846
53	Weakly welded tuff	2.05	2.21	445.309	7908.633
54	Weakly welded tuff	2.12	2.24	443.348	7908.315
55	Agglomerate	2.14	2.20	442.914	7908.765
56	Pumice tuff	1.66	1.92	445.347	7904.094
57	Highly welded tuff	2.24	2.32	445.227	7904.068
58	Agglomerate	2.04	2.18	444.938	7904.201
59	Weakly welded tuff	2.06	2.20	443.800	7904.015
60	Weakly welded tuff	2.04	2.17	442.593	7903.830
61	Rhyolitic volcanics	2.56	2.58	440.015	7904.716
62	Andesitic lava / volcanics	2.68	2.69	439.777	7904.993
63	Andesitic lava / volcanics	2.65	2.66	439.431	7905.496
64	Andesitic lava / volcanics	2.72	2.72	439.683	7905.483
65	Quartz diorite	2.59	2.60	438.545	7900.177
66	Pumice tuff	1.59	1.78	435.184	7906.200
67	Weakly welded tuff	2.04	2.18	425.233	7911.427
68	Basalt	2.62	2.63	449.144	7915.885
69	Weakly welded tuff	2.09	2.21	444.765	7914.338
70	Pumice tuff	1.85	2.05	430.023	7901.554
71	Highly welded tuff	2.37	2.45	427.376	7899.278
72	Highly welded tuff	2.42	2.45	449.688	7900.124
73	Highly welded tuff	2.65	2.66	449.688	7900.124
74	Highly welded tuff	2.67	2.69	449.027	7900.667
75	Diorite	2.80	2.80	436.586	7906.316
76	Andesitic lava / volcanics	2.62	2.63	432.748	7905.074
77	Andesitic lava / volcanics	2.54	2.57	433.132	7905.194
78	Highly welded tuff	2.37	2.39	429.071	7920.914
79	Highly welded tuff	2.22	2.30	425.047	7920.637
80	Quartz porphyry	2.54	2.55	435.319	7905.854
81	Quartz porphyry	2.43	2.44	438.951	7905.889
82	Quartz porphyry	2.50	2.51	434.904	7906.701
83	Quartz porphyry	2.51	2.51	435.614	7906.789
84	Quartz diorite	2.59	2.59	426.420	7918.999
85	Granodiorite	2.51	2.51	436.628	7905.977
86	Quartz diorite	2.72	2.72	439.000	7899.618

Table 2-2-2 Average Densities of Rock Sample

Age	Rock name	Average density (g/cm ³)		Density (g/cm ³)							No. of sample			
		Natural dry	Wet	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80				
Quaternary	Basalt	2.61		2.63							•••••		12	
	Agglomerate	1.97		2.11			•••••						5	
Tertiary (Neogene)	Ignimbrite	Pumice tuff / weakly welded tuff	1.83	2.04	2.03	2.18	•••••	•••••	•••••				27	
		Highly welded tuff	2.33		2.39			•••••	•••••	•••••	•••••		21	
Cretaceous - Early Tertiary	Rhyolitic volcanics/lava, dacitic lava/dome	2.56		2.58						•		1		
	Andesitic lava / volcanics	2.64		2.65						•••••		5		
Cretaceous - Tertiary	Granodiorite	2.51	2.62	2.51	2.62					•		1		
	Diorite porphyry	2.67		2.68							••		2	
	Diorite	2.80		2.80								•		1
	Quartz porphyry	2.50		2.50							•••••		4	
	Quartz diorite	2.65		2.65								•••••		7

LEGEND
 ◊ Natural dry
 ◆ Wet

1. The first part of the document is a list of names and their corresponding dates. The names are: John Doe, Jane Smith, and Bob Johnson. The dates are: 1/1/2020, 2/1/2020, and 3/1/2020.



- LEGEND**
- [Quaternary]
 - Basalt
 - ▲ Agglomerate
 - [Tertiary (Neogene)]
 - Ignimbrite (Pumice tuff/ weakly welded tuff)
 - Ignimbrite (Highly welded tuff)
 - [Cretaceous - Early Tertiary]
 - ◆ Rhyolitic volcanics
 - ▲ Andesitic lava/ volcanics
 - [Cretaceous - Tertiary]
 - + Granodiorite
 - × Diorite porphyry
 - ▣ Diorite
 - ⊕ Quartz porphyry
 - ⊕ Quartz diorite

Fig. 2-2-3
Location of Rock Sample

タとなる。補正密度の決定に際しては表層部に分布する地層の平均密度が重要である。カマローネス地域の表層部にはイグニンプライトが広く分布するが、イグニンプライトは低密度の軽石凝灰岩から比較的密度の高い溶結凝灰岩まで幅広い密度分布を示している。このような場合、単純に平均した密度は実際の密度と大きく異なる可能性があり、それぞれの分布比率を考慮して平均密度を計算する必要がある。「軽石凝灰岩／溶結度の低い凝灰岩」と「溶結度の高い凝灰岩」の分布の比(2 : 8 ~ 1 : 9と推定される)を考慮すると、平均密度は自然乾燥密度で2.23~2.28g/cm³、湿潤密度で2.32~2.35g/cm³となる。カマローネス地域の地下が乾燥状態と湿潤状態のいずれであるかは正確には知られていないが、以上の平均密度を参考にすると、補正密度として2.23~2.35g/cm³の範囲の値を採用すれば大きな誤りは生じないと考えられる。

2-1-2 データ処理方法

(1) 重力値の計算

重力計ダイアルの読取値から重力値を計算するまでの過程では、「ミリガル変換」、「潮汐補正」、「器械高補正」及び「ドリフト補正」の各計算を行った。

a) ミリガル変換

ミリガル変換は重力計のダイアル読取値を重力単位(mgal)に変換する計算である。ラコステG型重力計では、変換係数がスプリングの伸びによってわずかつ変化するので、ダイアル読取値 100毎に指定された定数(K)と変換係数(κ)の2種類の定数を用いてミリガル変換を行っている。

変換の基本式は次のとおりである。

$$V_r = K + (R - R_0) \times \kappa \quad (2-1)$$

V_r : 重力測定値(mgal単位)

R : 重力計のダイアル読取値

R_0 : R の10位以下を切り捨てた数値

b) 潮汐補正

地球上で測定される重力の大きさは次の2つの原因により、 ± 0.2 mgalの範囲内で周期的に変化する。これを補正するのが潮汐補正である。

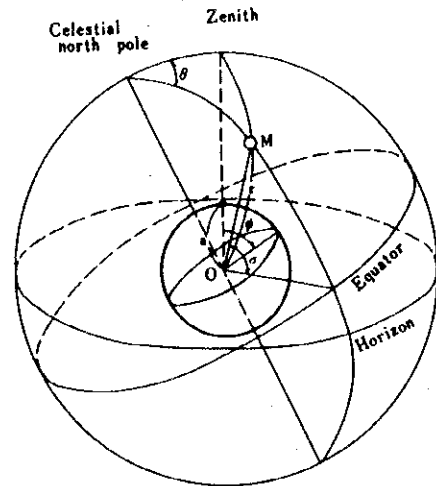
i) 月、太陽などの天体による起潮力の周期的変化

ii) 起潮力に起因する地球のわずかな変形(地球潮汐)

起潮力は(2-2)式によって計算する。

$$U = (3/2)GM(a/r^3)\{3(\sin^2 \delta - (1/3))(\sin^2 \phi - (1/3)) + \sin 2\delta \cdot \sin 2\phi \cdot \cos \theta + \cos^2 \delta \cdot \cos^2 \phi \cdot \cos 2\theta\} \quad (2-2)$$

- U: 天体の起潮力
 G: 万有引力定数
 M: 天体（月，太陽など）の質量
 a: 地球の中心から測点までの距離
 （地球の半径）
 ϕ : 測点の緯度
 r: 天体と地球との距離
 δ : 天体の赤緯（赤道から南北に測った角度）
 θ : 天体の時角（天体と天の北極を通る天球の大円と、測点の子午面との角度）



Tidal correction parameters

天体の起潮力は月と太陽によるものが他の天体に比較して圧倒的に大きいため、重力探査の補正ではこの2つの天体について補正値を計算している。

地球潮汐による重力変化は起潮力による重力変化と同センスであり、その大きさは、調査地域の岩石の弾性的性質によって若干異なるが、起潮力による重力変化の20%程度である。したがって、通常の潮汐補正では月と太陽による起潮力を1.20倍（この値を潮汐定数という）して補正している。

c) 器械高補正

器械高補正は重力計設置地点と測量点との間の高さの差を補正するものである。補正は、回転楕円体表面における正規重力の垂直勾配 0.3086 mgal/m を用いて、(2-3)式で行った。

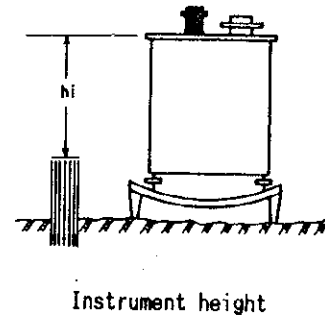
$$V_{hi} = (2\gamma_0/R)h_i = 0.3086 h_i \quad (2-3)$$

V_{hi}: 器械高補正值

γ₀: 正規重力

R : 測点から地球の中心
までの距離

h_i : 測定の測定地点から重力計
上面までの高さ



d)ドリフト補正

ドリフトは重力計のスプリングの伸びに起因するダイヤル読取値の変位で、ほぼ時間に比例する。このダイヤル読取値の変位を補正するのがドリフト補正で、基点における閉塞誤差を各測点に時間比例配分する方法で行う。ただし、ダイヤル読取値の変位には、ドリフトによるもののほかに、運搬時の機械的ショックや気温・気圧の変化による不規則な変位が含まれており、実際にはこれらの変位も補正していることになる。

e)重力値の計算

重力測定値(V_r)に対するすべての補正は(2-4)式で表される。

$$V_c = V_r + V_t + V_{hi} + V_d \quad (2-4)$$

V_c: 補正済重力測定値

V_t: 潮汐補正值

V_d: ドリフト補正值

補正済重力測定値(V_c)は重力の相対的な大きさを示す数値であり、重力値そのものではない。各測点の重力値は、まず基点と測点との間の補正済重力測定値の差を計算し、この重力差に基点の重力値をそれぞれ加えることにより算出される。なお基点の重力値は重力値既知点(重力基準点)との間で別途測定することによって得られる。

(2) 重力補正

重力値からブーゲー異常値を算出する過程を重力補正とよぶ。重力補正では緯度補正、地形補正、大気補正、フリーエア補正及びブーゲー補正の各計算を行う。

a)緯度補正

緯度補正は、重力値から緯度の関数として与えられる地球の標準重力を差し引く計算である。標準重力として、現在では(2-5)式の正規重力γ₀を用いている。

$$\gamma_0 = (a \gamma_E \cos^2 \phi + b \gamma_P \sin^2 \phi) / (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (2-5)$$

a: 回転楕円体の赤道半径(6,378.160km)

b: 回転楕円体の極半径(6,356.775km)

γ_E : 回転楕円体の赤道正規重力(978.031 85 gal)

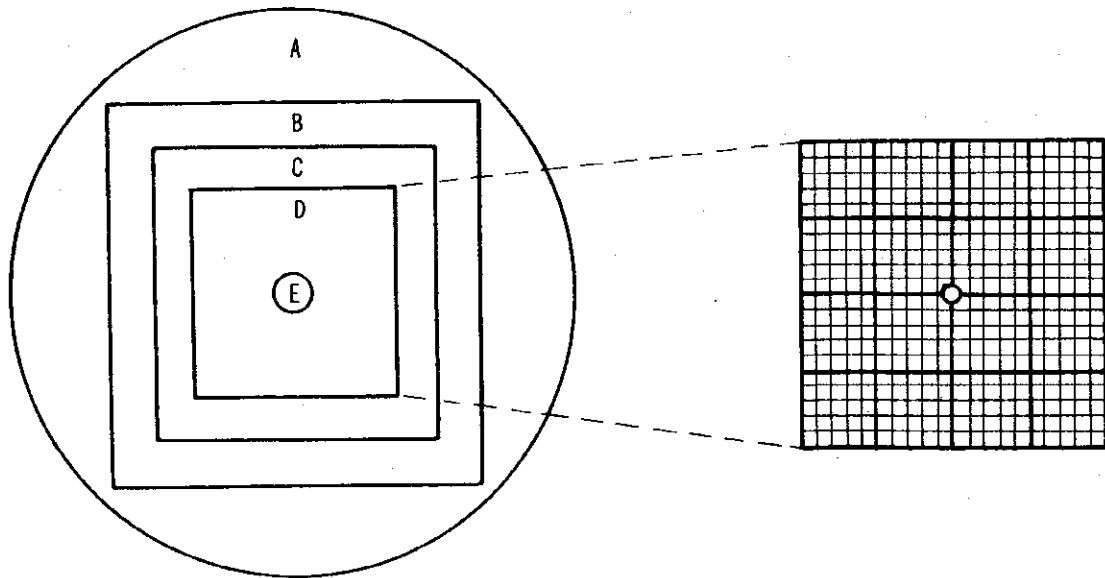
γ_P : 回転楕円体の極正規重力(983.217 73 gal)

重力探査では、一般に(2-5)式のかわりに(2-6)式に示す近似式(正規重力の実用式)を用いて補正を行っている。

$$\gamma_0 = 978031.85(1 + 0.005278895 \sin^2 \phi + 0.000023462 \sin^4 \phi) \text{ (mgal)} \quad (2-6)$$

b) 地形補正

地形補正は測点から半径60kmまでの範囲を、次の図表に示す5つの補正領域に区分して行った。A~Dの4つの補正領域については地形高度のメッシュデータが必要である。各メッシュの地形高度は、A領域については1/500,000航空図から、Bについてはチリ共和国の1/250,000地形図、C,Dの各領域についてはチリ共和国の1/50,000地形図から読みとった。



領域	補正範囲	格子間隔
A	測点より半径60km	2km×2km
B	20km×20km	400m×400m
C	4km×4km	100m×100m
D	1km×1km	50m×50m
E	測点より半径20mまで	スケッチ断面

地形補正区画の概念図及び仕様

c) 大気補正

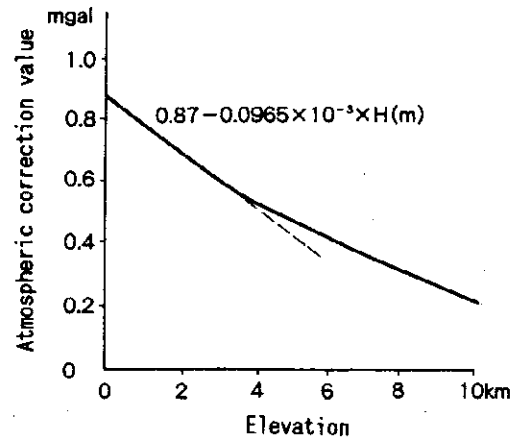
大気補正は重力に対する大気の影響を補正するもので、標準大気模型を仮定した大気の密度分布を使って、測点から高さ50kmまでの範囲について積分して補正値を計算している。

補正値は標高が高くなるに従って指数関数的に減少するが、各測点が位置する標高3.5km以下の範囲については、右の図に示すように、補正値の変化がほぼ1次関数に近似できるため、次に示す式で補正を行った。

$$\delta g_A = 0.870 - 0.00965 \times 10^{-3} H \quad (2-7)$$

δg_A : 大気補正値(mgal)

H : 測点の標高(km)



d) フリーエア補正

地球の表面付近では通常-0.3086mgal/mの大きさの重力鉛直勾配(フリーエア勾配 [Free air gradient:F.A.G] という)があり、標高が高くなると重力値は小さくなる。この影響を補正するのがフリーエア補正である。

$$\delta g_F \doteq (2 \gamma_0 H/R) \doteq 0.3086 H \quad (2-8)$$

δg_F : フリーエア補正値(mgal)

γ_0 : 正規重力

R : 測点から地球の中心までの距離

H : ジオイド面からの高さ(m)

調査地域が位置するアンデス山脈のような高山地帯では密度の軽い地殻物質の厚さが大きいので、フリーエア勾配は-0.3086 mgal/mより小さいことが知られている。

詳しい結果については後述するが、今回の測定データを用いてフリーエア勾配の検討を行い、その結果、調査地域のフリーエア勾配として

$$F.A.G \doteq -0.3000 \text{ mgal/m}$$

の値を得た。したがって、本調査ではこの値を用いてフリーエア補正を実施した。

(2-9)式で定義される量をフリーエア異常という。

$$\Delta g_F = g - \gamma_0 + \sum \delta g_T + F.A.G \times H \quad (2-9)$$

Δg_F : フリーエア異常
 g : 重力値
 $\Sigma \delta g_T$: 地形補正值

e) ブーゲー補正

異なった高さで測定された重力値は、その標高差の間に介在する物質(岩石)の引力に相当する量だけ大きさが異なる。これを補正するのがブーゲー補正で、一定の基準面を設定し、基準面と各測点を通る基準面に平行な面との間の物質の影響を除去する。通常は基準面としてジオイド面を採用している。ジオイド面と測点を通るジオイド面に平行な面との間に均一密度の有限円板を仮定し、(2-10)式を使って補正を行う。なお、有限円板の半径は60kmとし、地形補正の範囲と一致させている。

$$\begin{aligned}
 \delta g_B &= -2\pi G \rho \{A + H - (A^2 + H^2)^{1/2}\} \\
 &\approx -0.0419 \rho \{A + H - (A^2 + H^2)^{1/2}\} \quad (2-10)
 \end{aligned}$$

δg_B : ブーゲー補正值
 G : 万有引力定数
 ρ : 密度
 A : 有限円板半径(60km)
 H : 測点の標高

(2-10)式の ρ をブーゲー密度といい、通常は地表とジオイド面との間の岩石の平均密度をブーゲー密度に採用する。

f) ブーゲー異常値の計算

重力値に対して緯度補正、地形補正、大気補正、フリーエア補正、ブーゲー補正の各補正を施して得られる値がブーゲー異常値で、次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \Delta g_B &= g - \gamma_0 + \Sigma \delta g_T + 0.870 - 0.0965 \times 10^{-3} H + 0.3040 H \\
 &\quad - 0.0419 \rho \{A + H - (A^2 + H^2)^{1/2}\} \quad (2-11)
 \end{aligned}$$

Δg_B : ブーゲー異常値

ブーゲー異常値は地表面で定義された値であり、ブーゲー補正及び地形補正の密度によって異なった値をとる。ブーゲー異常値には、ジオイド面以深の密度構造に関する情報だけでなく、地表面とジオイド面とに挟まれた部分における補正密度と実際の密度との過不足に関する情報も含まれる。

測点の位置(緯度・経度)、標高、重力値、各種補正值、正規重力値及びフリーエア異常値、ブーゲー異常値をまとめた重力成果一覧表、各地形補正領域の補正值の一覧表及び

1.90, 2.00, 2.10, 2.20, 2.25, 2.30, 2.40, 2.50, 2.60, 2.67 g/cm³の10種類の仮定密度によるブーゲー異常値の一覧表を作成し、巻末資料として報告書に添付した。

2-1-3 解析方法

(1) 傾向面解析

傾向面とは地下深部の構造に起因するきわめて波長の長い重力異常で、重力トレンドともいう。傾向面解析は広域的な重力トレンドを低次の曲面(x,yに関する多項式)に近似する作業で、具体的には、次に示す多項式の各係数を、格子点(x,y)のブーゲー異常値 $\Delta g(x,y)$ を用いて最小二乗法で計算する。

・ 1次傾向面

$$\Delta g_1(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (2-12)$$

・ n次傾向面

$$\Delta g_n(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + \dots \dots \dots \\ \dots \dots + a_{m-1}xy^{n-1} + a_my^n \quad (2-13)$$

ここで、 $m=n(n+3)/2$ である。

ブーゲー異常から傾向面(広域的なトレンド)を差し引いたのが傾向面残差重力で、これは比較的地下浅部の構造を反映したものになる。

(2) 2次元解析

2次元解析は、測定で得られた重力異常に最も近似する重力異常を引き起こす2次元の地下構造モデルを求める作業である。本調査では、2次元構造モデルによる重力異常を次のTalwani(1959)の式を用いて計算した。

$$g = 2G \Delta \rho \Sigma Z_i \quad (2-14)$$

g : 重力異常値

G : 万有引力定数

$\Delta \rho$: 密度差($\rho_2 - \rho_1$)

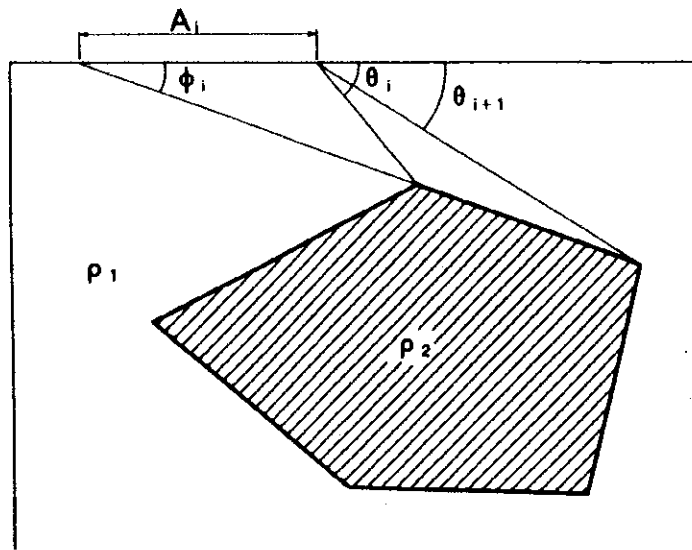
ここで、

$$Z_i = A_i \sin \phi_i - \cos \phi_i \{ \theta_i - \theta_{i+1} + \tan \phi_i \log B \} \quad (2-15)$$

ただし、

$$B = \{ \cos \theta_i (\tan \theta_i - \tan \phi_i) \} / \{ \cos \theta_{i+1} (\tan \theta_{i+1} - \tan \phi_i) \}$$

である。



Talwani の方法による2次元解析模式図

地下の密度構造が単純で2層構造モデルに近似できる場合には、密度差と基準深度を指定し、密度境界面の形状を徐々に変えながら重力異常の計算値を測定値に近似させていく「逐次近似法」による自動解析計算で、実際の構造によく一致する解が一義的に得られる。

多層構造解析は、密度構造をなるべく実際の地質断面に近くなるように細分し、それぞれに岩石試料の密度測定結果に基づく密度を割り当てて、測定された重力異常断面を再現できるような密度構造モデルを求める作業である。

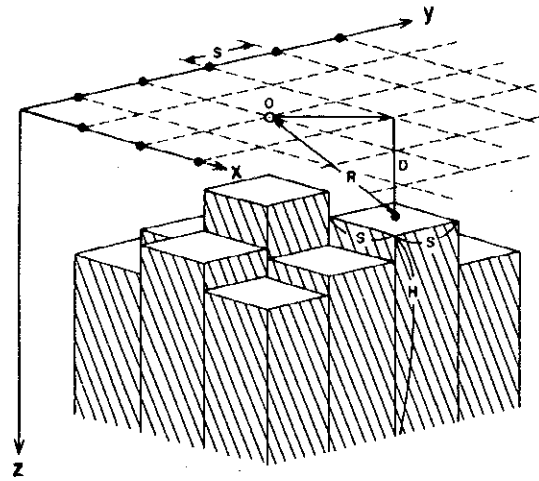
(4) 3次元解析

3次元構造解析は図に示すような角柱モデルの組み合わせを想定し、このようなモデルに基づいて計算した重力異常値と測定ブーゲー異常値とを対比しながら、繰り返し計算によって、測定ブーゲー異常に近似する重力異常をひきおこす角柱モデルの組み合わせを求める方法である。一つの角柱による地表の点Oにおける重力異常の鉛直成分は以下の式で計算した。

$$g = G \Delta \rho [x \ln(y+R) + y \ln(x+R) - z \tan^{-1}(xy/zR)] \quad (2.16)$$

$$\begin{matrix} x = x+S/2 & y = y+S/2 & z = D+H \\ x = x-S/2 & y = y-S/2 & z = D \end{matrix}$$

- S : 角柱の幅
- R : 点Oから角柱の中心
までの水平距離
- D : 地表面から角柱上面
までの深度
- H : 基準面からの角柱の
高さ



3次元2層構造解析模式図

点Oにおける重力異常値はすべての角柱による g の総和で与えられる。