

### 第3章 地化学探査

#### 3.1 概 査

セレンゲ地区、ドゥスディアナ地区及びケレヤ地区で概査を行った。

地化学探査試料の採取は、探試線沿いに歩測によって求めた250m間隔の測点上で行われた。探試線は、車輛通行可能な道路上に設けられた基点から、簡易測量によって南北方向に1km間隔に設定した。基点の位置は、GPS (Global Positioning System) を用いて決定した。

地化学探査試料は、原則として、地表下30-40cm付近の土壌試料を対象とした。試料の採取にはパラミンと呼ばれる鉄棒を使用した。採取した土壌は、マリ地質鉱山局の分析所で約100g (80メッシュ以下) の試料に調整した。探試総個数は11,600個である。

調整された土壌試料11,600個は、マリ地質鉱山局の分析所で、Au・Ag・Cu・Pb・Zn・As・Sbの7成分の分析が行われた。各分析成分の検出限界は、Au 5 ppb, Ag 2 ppm, Cu 2 ppm, Pb 2 ppm, Zn 2 ppm, As 2 ppm, Sb 2 ppmである。

全試料の分析値について、分析値を円の大ききで表した地化学探査結果図 (巻末, 図40~75) を各成分毎に作成した。

分析された各成分について、単一変量解析を行った。統計処理に際して、検出限界以下の値を検出限界値の1/2の値に置き換えた。標準統計量を表14に示す。なお、AgとSbは殆どの試料が検出限界値以下又は2-4ppmの値のため、統計処理を行っていない。

表14 標準統計量 (全地区)

分析成分	単位	最大値	最小値	平均	標準偏差
A u	ppb	4770	<5.0	6.08	57.02
A g	ppm	4	<2.0	—	—
C u	ppm	720	2.0	13.12	7.55
P b	ppm	110	3.0	15.07	7.98
Z n	ppm	6	2.0	11.03	5.25
A s	ppm	21	<2.0	30.90	75.80
S b	ppm	90	<2.0	—	—

#### (1) 地化学異常の設定

検出限界以下の分析値が大半を占めるAgとSbを除く各指示元素について、累積頻度分布図を作成した。

地化学異常の設定にあたっては、複合母集団 (地化学異常+バックグラウンド) の累積頻度分布を複数の単元母集団の累積頻度分布に分解し、これらの合成標準曲線と実測データとを比較・照合することによって、しきい値を決定する大津ほか (1984) の曲線照合法を適用した。この解析結果を累積頻度解析図として示した。

Au 実測データの累積頻度分布は、高含有量側に顕著な過剰を含んでいる。累積頻度解析図に示したように、複合母集団は40ppb、100ppb及び400ppbを境として、大きく4つの単元母集団に分割される。これら4つの単元母集団の累積頻度分布を合成した合成標準曲線は、実測データの累積頻度分布に良く一致する(図19・20)。

40ppb未満のデータは、全体の95%以上を含んでおり、バックグラウンド母集団とみなされ、40ppb以上のデータは地化学異常母集団と判断される。40ppbをしきい値とした地化学異常母集団のうち、400ppb以上を地化学異常A、100ppb以上400ppb未満を地化学異常B、40ppb以上100ppb未満を地化学異常Cとして区分した。

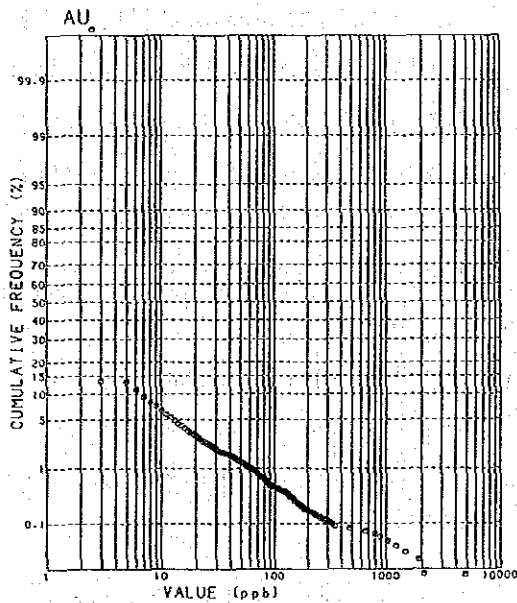


図 19 累積頻度分布図 (Au)

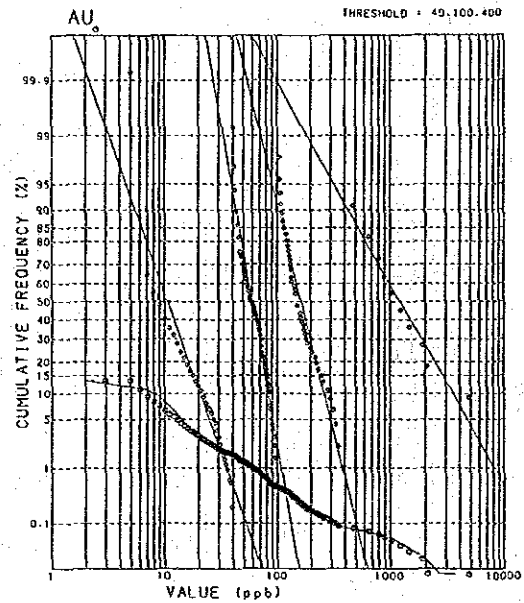


図 20 累積頻度解析図 (Au)

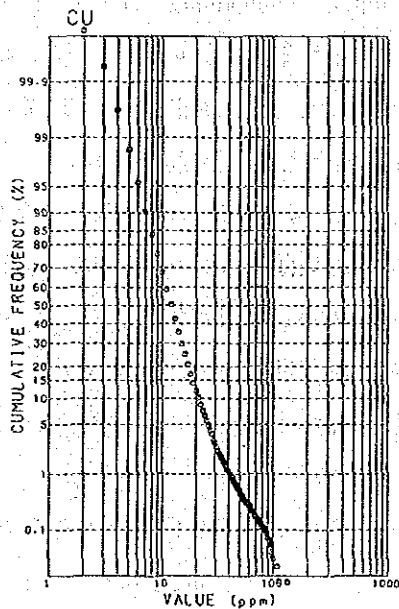


図 21 累積頻度分布図 (Cu)

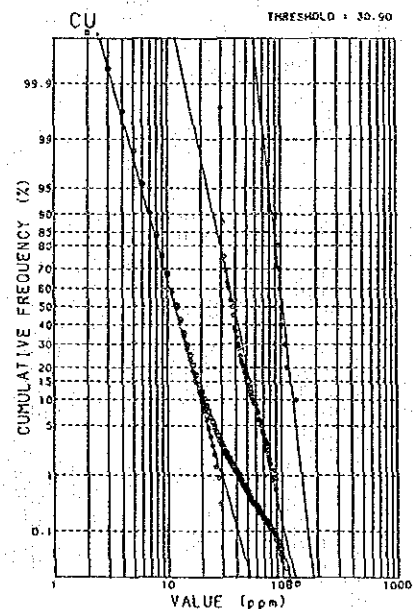


図 22 累積頻度解析図 (Cu)

**Cu** 実測データの累積頻度分布は、高含有量側に弱く波打っており、高含有量側に若干の過剰を含む。累積頻度解析図に示したように、複合母集団は30ppm及び90ppmを境として、大きく3つの単元母集団に分割される。これら3つの単元母集団の累積頻度分布を合成した合成標準曲線は、実測データの累積頻度分布に良く一致する（図21・22）。

30ppm未満のデータは、全体の95%以上を含んでおり、バックグラウンド母集団とみなされ、30ppm以上のデータは地化学異常母集団と判断される。30ppmをしきい値とした地化学異常母集団のうち、90ppm以上を地化学異常A、30ppm以上90ppm未満を地化学異常Bとして区分した。

**Pb** 実測データの累積頻度分布は、高含有量側に顕著な過剰を含んでいる。累積頻度解析図に示したように、複合母集団は50ppm及び100ppmを境として、大きく3つの単元母集団に分割される。これら3つの単元母集団の累積頻度分布を合成した合成標準曲線は、実測データの累積頻度分布に良く一致する（図23・24）。

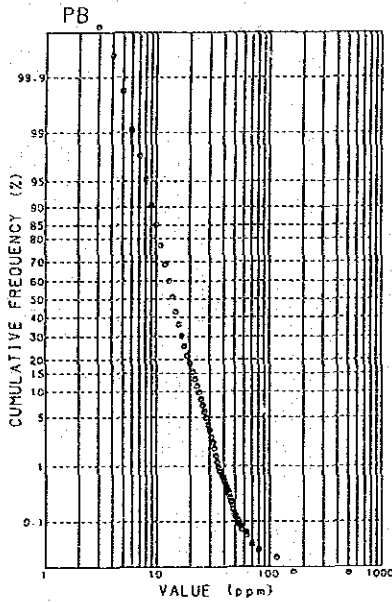


図 23 累積頻度分布図 (Pb)

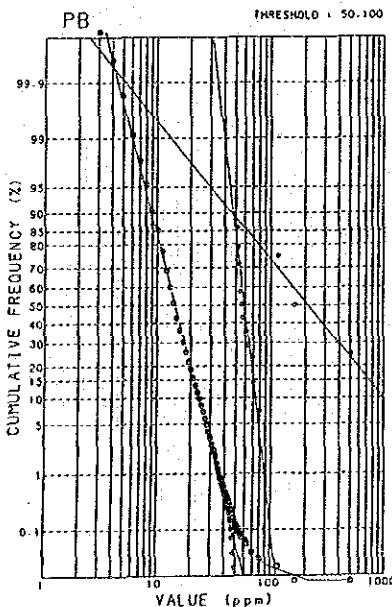


図 24 累積頻度解析図 (Pb)

50ppm未満のデータは、全体の99%以上を含んでおり、バックグラウンド母集団とみなされ、50ppm以上のデータは地化学異常母集団と判断される。50ppmをしきい値とした地化学異常母集団のうち、100ppm以上を地化学異常A、50ppm以上100ppm未満を地化学異常Bとして区分した。

**Zn** 実測データの累積頻度分布は、高含有量側に顕著な過剰を含んでいる。累積頻度解析図に示したように、複合母集団は35ppm及び80ppmを境として、大きく3つの単元母集団に分割される。これら3つの単元母集団の累積頻度分布を合成した合成標準曲線は、実測データの累積頻度分布に良く一致する（図25・26）。

35ppm未満のデータは、全体の99%以上を含んでおり、バックグラウンド母集団とみなされ、35ppm以上のデータは地化学異常母集団と判断される。35ppmをしきい値とした地化学異常母集団のうち、80ppm以上を地化学異常A、35ppm以上80ppm未満を地化学異常Bとして区分した。

**As** 実測データの累積頻度分布は、高含有量側に顕著な過剰を含んでいる。累積頻度解析図に示したように、複合母集団は90ppm、200ppm及び750ppmを境として、大

きく4つの単元母集団に分割される。これら4つの単元母集団の累積頻度分布を合成した合成標準曲線は、実測データの累積頻度分布に概ね一致する(図27・28)。

90ppm未満のデータは、全体の90%以上を含んでおり、バックグラウンド母集団とみなされ、90ppm以上のデータは地化学異常母集団と判断される。90ppmをしきい値とした地化学異常母集団のうち、750ppm以上を地化学異常A、200ppm以上750ppm未満を地化学異常B、90ppm以上200ppm未満を地化学異常Cとして区分した。

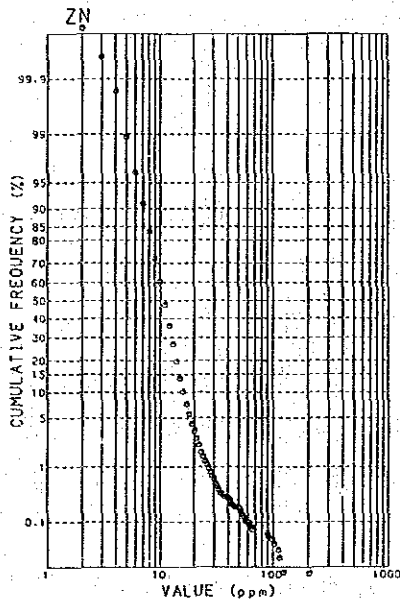


図 25 累積頻度分布図 (Zn)

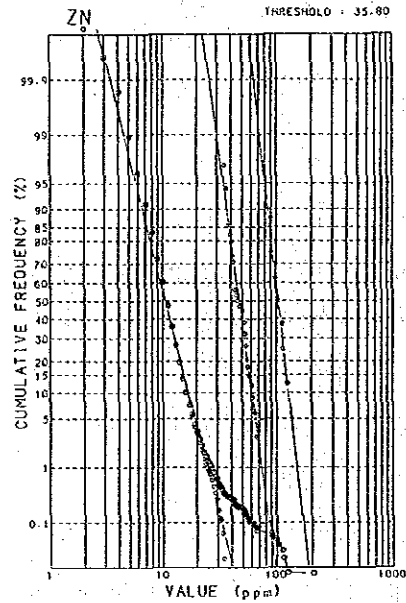


図 26 累積頻度解析図 (Zn)

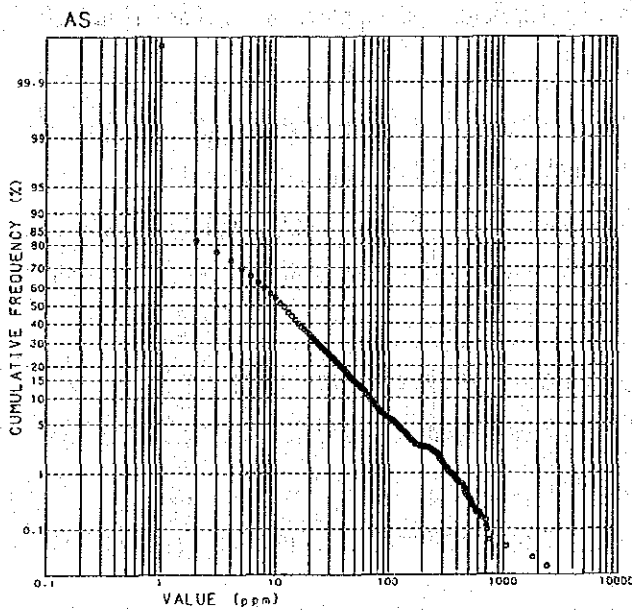


図 27 累積頻度分布図 (As)

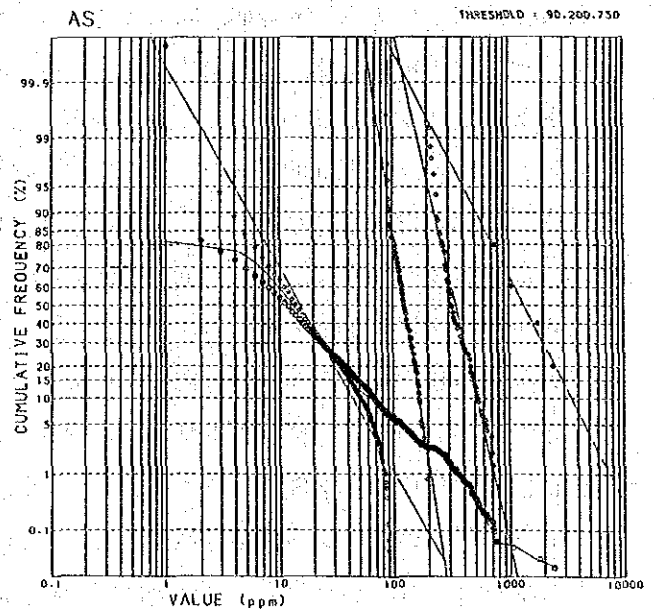


図 28 累積頻度解析図 (As)

以上のように設定された各指示元素のしきい値及び地化学異常のランク分けを表15に示す。

表15 元素別しきい値及び地化学異常のランク分け (全地区)

分析成分	単位	しきい値	地 化 学 異 常 の ラ ン ク		
			A	B	C
Au	ppb	40ppb	Au $\geq$ 400	400 > Au $\geq$ 100	100 > Au $\geq$ 40
Ag	ppm	—	—	—	—
Cu	ppm	30ppm	Cu $\geq$ 90	90 > Cu $\geq$ 30	—
Pb	ppm	50ppm	Pb $\geq$ 100	100 > Pb $\geq$ 50	—
Zn	ppm	35ppm	Zn $\geq$ 80	80 > Zn $\geq$ 35	—
As	ppm	200ppm	As $\geq$ 750	750 > As $\geq$ 200	—
Sb	ppm	—	—	—	—

(b)地化学異常の分布

設定されたしきい値に基づいて、地化学探査解析結果図（巻末、図40～75）を作成した。なお、Ag・Sbについては、地化学異常が認められないので除外した。

各指示元素の地化学異常の分布には、次のような特徴が見られる。

**Au** 地化学異常は調査地区全域に散点的に認められる。まとまった分布を示すのは、セレンゲ地区のDaba南方、Kongolibala周辺、Neneko南方、Sankama西方及び南東方などである。既知鉱化帯を反映していると考えられる地化学異常のうち、Daba南方及びKongolibala周辺の地化学異常が大きく、Neneko南方がこれに続く。

**Ag** 殆どの試料が検出限界値以下又は2-4ppmで、地化学異常は認められない。

**Cu** 地化学異常は、セレンゲ地区全域、ドゥスディアナ地区全域及びケレヤ地区北部に散点的に認められる。まとまった分布を示すのは、セレンゲ地区のNeneko南方、Kongolibala北西方、Daba南方などである。その他、Neneko南東方・Mateleni北西方（セレンゲ地区）、Lamiaina南西方（ケレヤ地区）に孤立した地化学異常が認められる。

**Pb** 地化学異常はまとまった分布を示さない。Sankama南西方・Dalabala北西方（セレンゲ地区）、Kesako北方（ドゥスディアナ地区）などに1点だけの地化学異常が認められる。

**Zn** 地化学異常はまとまった分布を示さない。Neneko南方・Dalabala南方（セレンゲ地区）、Balena北方・Balanfina・Ferenekourouna（ドゥスディアナ地区）、Solo北東方（ケレヤ地区）などで地化学異常が認められる。

**As** 地化学異常の伸びの方向性が、いずれも東西方向（測線方向）に一直線であり、バックグラウンドが高い岩石（クラストなど）の存在、人為的汚染、採試・分析の誤りなどによる直接鉱床に由来しない地化学異常と考えられる。

**Sb** 殆どの試料が検出限界値以下又は2-4ppmで、地化学異常は認められない。検出限界値以上の試料のうちNeneko北東方の試料は90ppmを示す。

それぞれの地化学異常の分布域をまとめて表16に示す。

表16 地化学異常の分布

地化学異常地区	
Au	Daba南方(S), Kongolibala周辺(S), Neneko南方(S), Sankama西方及び南東方(S)
Cu	Neneko南方(S), Kongolibala北西方(S), Daba南方(S)
Pb	Sankama南西方(S), Dalabala北西方(S), Kesako北方(D)
Zn	Neneko南方(S), Dalabala南方(S), Balena北方(D), Balanfina(D) Ferenekourouna(D), Solo北東方(K)

S:セレンゲ地区 D:ドゥスディアナ地区 K:ケレヤ地区

表16から明らかなように、すべての地化学異常が認められるセレンゲ地区が、最も有望な地化学異常地区であると判断される。セレンゲ地区に見られるAランク地化学異常(AuはBランク以上)をまとめて図29に示す。

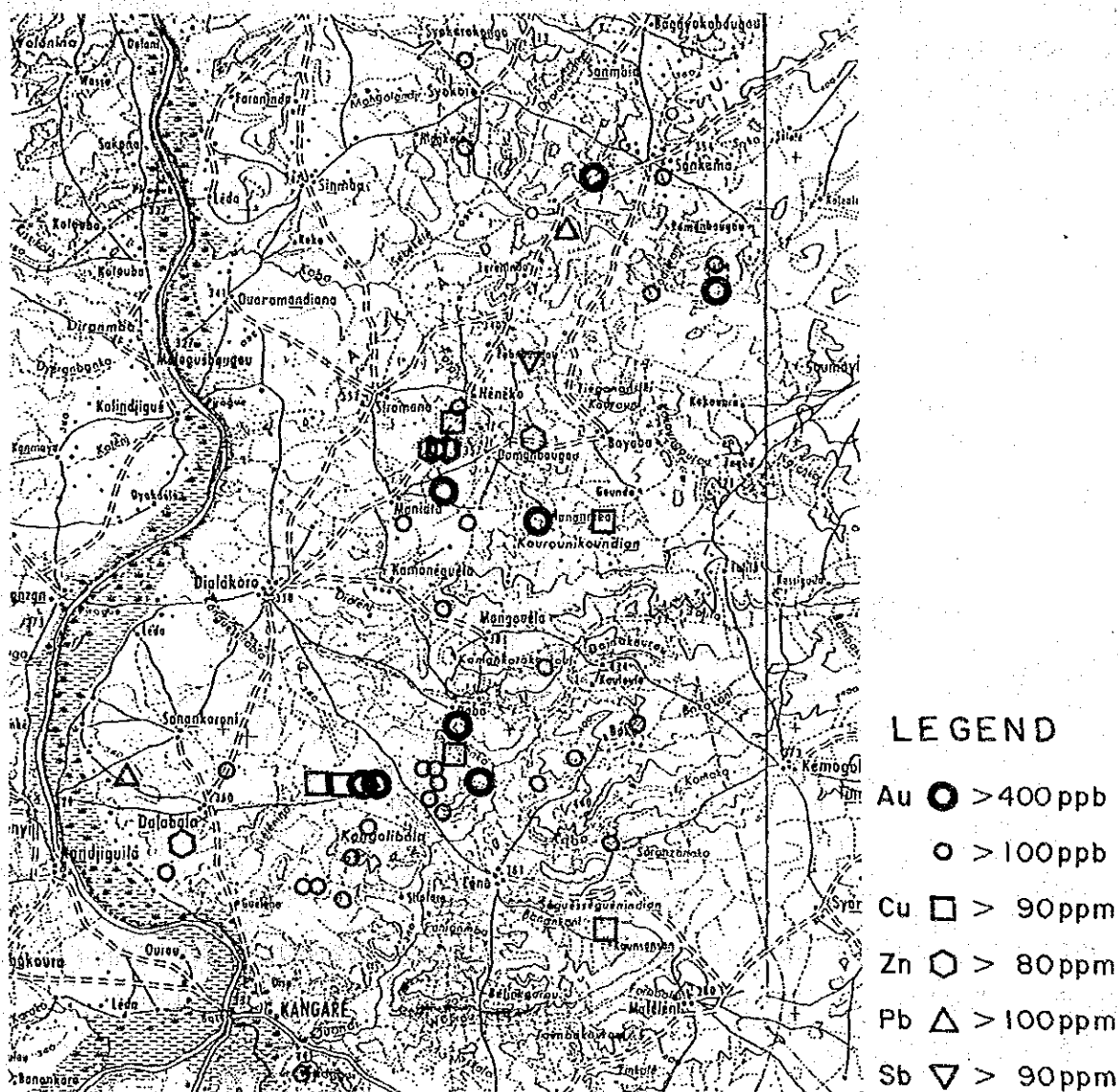


図29 地化学探査解析結果図(セレンゲ地区)

### 3.2 精査

セレンゲ地区内のセレンゲ鉱微地地区で精査を行った。鉱微地地区は、Neneko南方のD-1地区、Daba南方のD-2地区及びDalabala南方のD-3地区からなる（図9）。

地化学探査試料の採取は、探試線沿いに歩測によって求めた100m間隔の測点上で行われた。探試線は、車両通行可能な道路上に設けられた基点から、簡易測量によって南北方向に500m間隔に設定した。基点の位置は、GPS (Global Positioning System) を用いて決定した。地化学探査試料の採取方法・調整・分析などは概査と同様である。探試総個数は1,600個である。

概査の解析結果図（図40～75）から明らかなように、地化学異常はD-1地区及びD-2地区にまとまって分布する。したがって、D-1地区及びD-2地区を解析の対象とした。

これらの地区の標準統計量を表17・18に示す。統計処理に際して、検出限界以下の値を検出限界値の1/2の値に置き換えた。なお、Sb・Agは殆どの試料が検出限界値以下又は2-4ppmの値である。表17・18からは、D-1地区とD-2地区のAuの差が統計的に認められるほかは、2つの母集団に差は認められない。

表17 標準統計量（セレンゲ鉱微地地区D-1）

分析成分	単位	最大値	最小値	平均	標準偏差
Au	ppb	1895	<5.0	10.30	76.84
Ag	ppm	4	<2.0	—	—
Cu	ppm	112	5.0	18.49	10.40
Pb	ppm	70	3.0	15.91	7.59
Zn	ppm	205	4.0	13.55	9.18
As	ppm	139	<2.0	26.33	39.09
Sb	ppm	90	<2.0	—	—

表18 標準統計量（セレンゲ鉱微地地区D-2）

分析成分	単位	最大値	最小値	平均	標準偏差
Au	ppb	4770	<5.0	18.86	173.89
Ag	ppm	4	<2.0	—	—
Cu	ppm	133	3.0	14.73	10.28
Pb	ppm	53	4.0	14.48	6.58
Zn	ppm	66	3.0	11.76	5.40
As	ppm	110	<2.0	20.83	32.83
Sb	ppm	5	<2.0	—	—

D-1・D-2地区における地化学探査結果図を図76～89に、地化学探査解析結果図を図30・31に示す。なお、しきい値としては、概査結果のしきい値を採用した。

#### (1) D-1地区の地化学異常

Au 地化学異常は2～3点の連続で認められるほかは、まとまった分布を示さない。鉱微地S-2及びその南西方ではN-S方向に、また、本地区南部では、NW-SE方向に地化学異常が散点的に配

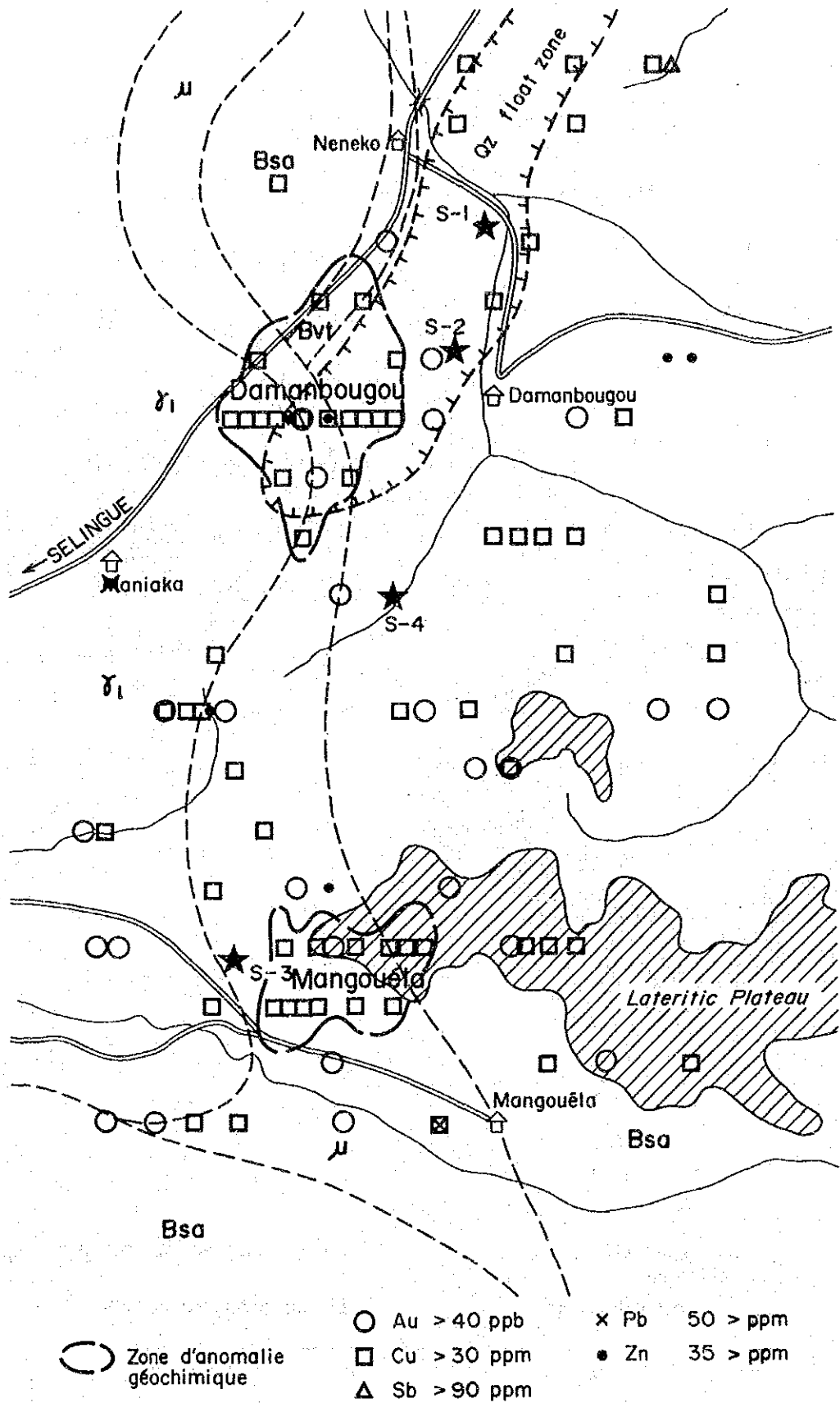


图 30 D-1 地区地化学探查解析结果图



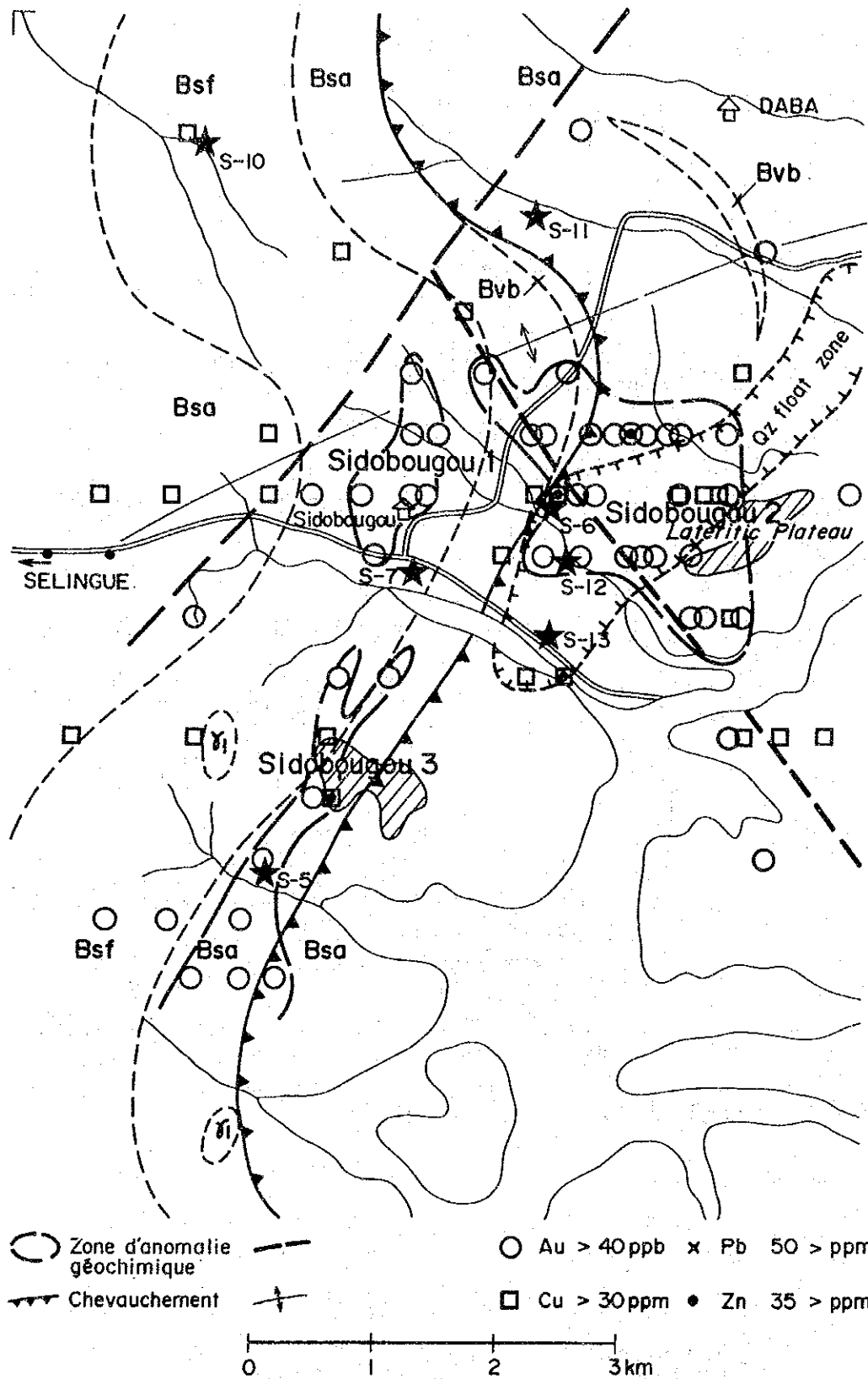


图31 D-2地区地化学探查解析结果图

列する。

**Cu** 地化学異常は本地区全域に散点的に認められる。まとまった分布を示すのは、鉍徴地S-2西方 (Damanbougou), 鉍徴地S-3東方 (Mandouela) などである。鉍徴地S-2西方の地化学異常は石英転石帯に一致する。

**Pb** 地化学異常は孤立した分布を示し、まとまった分布を示さない。Damanbougou西方及びMangouela西方に1点だけの地化学異常が見られる。

**Zn** 地化学異常はまとまった分布を示さない。鉍徴地S-2東方及び西方などで地化学異常が認められる。

**As** 本地区北部及び南部で、E-W方向に地化学異常が直線的に認められる。人為的汚染、採試・分析の誤りなどの直接鉍床に由来しない地化学異常と考えられる。

**Sb** 地化学異常は認められない。本地区北部で最高値90ppmを示す。

各指示元素が重複する区域として、Damanbougou, Mandouelaなどがあげられる (図30)。

## (2) D-2地区の地化学異常

**Au** 地化学異常がまとまって広く分布するのは、鉍徴地S-7北方 (Sidobougou 1) 及び鉍徴地S-6東方 (Sidobougou 2) である。その他、鉍徴地S-7から鉍徴地S-5にかけて (Sidobougou 3), NNE-SSW方向に地化学異常が散点的に配列する。Daba南方の試料が最大値4,770ppmを示す。

**Cu** 地化学異常がまとまって広く分布するのは、Daba南方 (Sidobougou 2), 鉍徴地S-6周辺, Sidobougou西方及び南方 (Sidobougou 3), 鉍徴地S-13南方などである。これらの地化学異常は石英転石帯に概ね一致する。その他、S-7西方に1点だけの地化学異常が見られる。

**Pb** 本地区中央部に1点だけの地化学異常が見られる。

**Zn** 地化学異常は本地区中央部に散点的に認められる。

**As** 本地区中央部にE-W方向に地化学異常が直線的に認められる。人為的汚染、採試・分析の誤りなどの直接鉍床に由来しない地化学異常と考えられる。

**Sb** 地化学異常は認められない。

各指示元素が重複する区域として、Sidobougou 2・3などがあげられる (図31)。

## 3.3 考 察

ラテライト性風化土壌 (ラトソル) を対象とした地化学探査は、各国の熱帯地域で数多く行われてきた。その結果、ラトソルが形成される際の条件の違いによって、元素の拡散や集積の挙動が異なることが明らかになってきた。

本調査地域でも、ラテライト化作用と微量元素の挙動について、第1年次の調査で採取された土壌試料 (1,000個) を用いて検討を行った。

検討に当たっては、ラテライト化作用を表す指標として、ラテライト指数 (L.I.) を設定した。このラテライト指数を用いると、本調査地域の土壌は、シルト質土壌、礫質土壌、ラテライト性

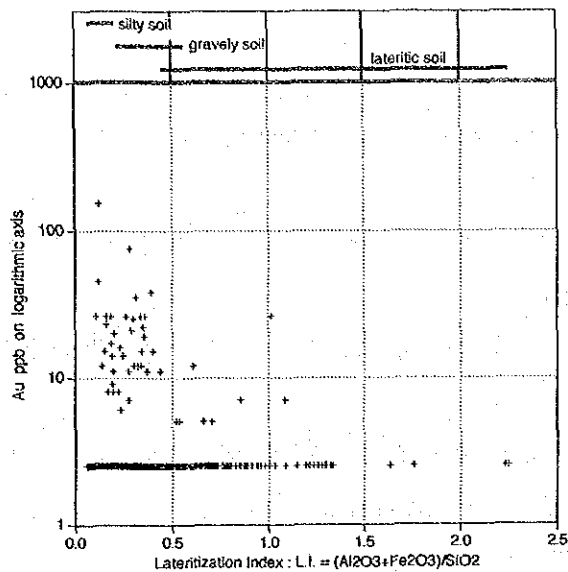


図32 土壌のAu含有量とL.I.との関係

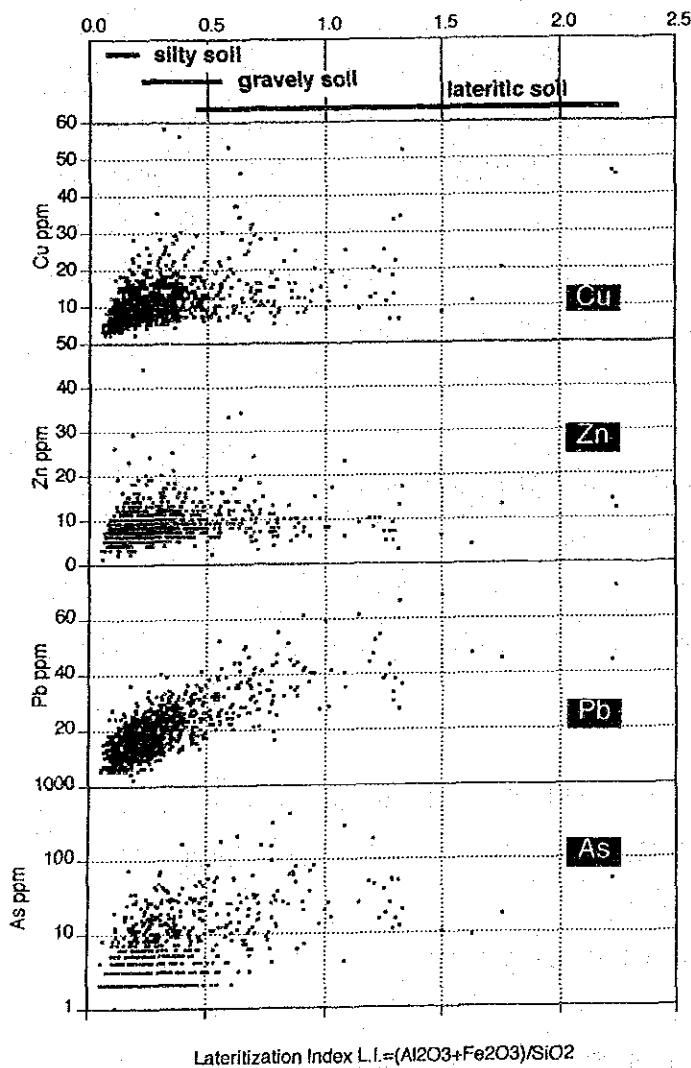


図33 土壌のCu・Pb・Zn・As含有量とL.I.との関係

風化土壌に3分され、L.I.=0.4以上がラテライト性風化土壌に相当する(第4章参照)。

微量元素と区分された土壌との関係は以下のようなになる。

**Au** L.I.と負の相関が認められる。有効試料数は少ないが、シルト質土壌で高い値を示す。ラトソルでは明らかに減少しており、Auの溶解が起こっているものと思われる。

**Cu・Zn** シルト質土壌及び礫質土壌では正の相関が認められるが、ラトソルでは正の相関は認められない。ラトソルでは、独立成分になり、逸散する傾向がある。

**Pb** L.I.と正の相関が認められる。クラストの形成に伴ってラトソル上部に濃集する。

**As** ラトソルで濃集する傾向がある。

以上のことから、本調査地域では、ラテライト化作用が進行するにつれ、Au・Cu・Znは逸散し、Pb・Asが濃集する。

また、Butt and Zeegers(1989)は、熱帯地の風化土壌を分類し、元素の拡散ハローの形状を考察した。それによると、元素の拡散は、残留濃集、機械的運搬、水理的運搬の3要因で支配される。拡散ハローは、サブプロライト中では小さいが、ラトソル上部では、残留濃集により、ハローは分散する。斜面や低地の土壌では、機械的運搬・水理的運搬で低地側に拡大する。

## 第4章 土壌化学組成

### 4.1 目的と方法

ブグニ地域の地表は厚いラテライト性風化土壌（ラトソル）で覆われており、基盤岩の地質を把握するのは困難である。異なる地質基盤上（Birrimien累層群と花崗岩類）に形成された土壌を化学的に判別し、地質調査の補助とする目的で土壌の化学組成を調べた。

分析に供した試料は第1年次に採取したもので、総数は1,009個である。試料は主要な道路に沿って、原則として1km間隔で、地表下40cmまで掘削し、深度30～40cmの間の土壌を採取した。地表が堅いクラストで被覆されている所では掘削が困難なので、クラスト部分から採取した。試料は自然乾燥の後、ふるいにかけて80mesh以下の細粒分を選別し200gに調整した。調整した試料は100gずつに2分し、マリ地質鉱山局（DNGM）の分析所とカナダChemex社に送って、それぞれ下記の分析を行った。

#### 金属元素分析

分析所：マリ地質鉱山局分析所

分析成分（検出限界）：Au(5ppb), Ag(2ppm), Cu(2ppm), Zn(2ppm), Pb(2ppm), As(2ppm)  
Sb(2ppm)

#### 主要酸化物分析

分析所：カナダ Chemex社

分析成分（分析法）：Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ICP-AES), BaO(ICP-AES), CaO(ICP-AES), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ICP-AES)  
K<sub>2</sub>O(ICP-AES), MgO(ICP-AES), MnO(ICP-AES), Na<sub>2</sub>O(ICP-AES)  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(ICP-AES), SiO<sub>2</sub>(ICP-AES), TiO<sub>2</sub>(ICP-AES), L. O. I. (furnace)  
FeO(titration)

### 4.2 土壌の分類

ブグニ地域はサバンナー熱帯雨林混合気候に属し、典型的なラテライト性風化土壌が形成されている。土壌学では、ラテライト性風化土壌を総称してラトソル（Latosol）という。

古い時代に形成されたラトソルは、斜面崩壊や河川侵食などの営力で開析される。開析を受けたラトソルの構成物は低地に堆積し、斜面堆積物（Pediments）や低地堆積物（Flat soil）を形成する。

#### (1) ラトソル

ラトソルの形成機構については、Budal (1977) とButt and Zeegers (1989) が詳しく述べており、以下のように要約される。

ラテライト化作用 熱帯、亜熱帯の機構下で雨量が多く、乾期と雨期が交互にくる条件で進行する。高温の土壌中では微生物の活動はさかんで、有機物の分解が速い。そのため土壌中には有

機酸が大量に含まれる。岩石や鉱物の加水分解と酸化が著しく進行し、激しい溶脱が起こる。一方、地表付近では塩基が急速に遊離する結果、土壌はアルカリ性を呈するようになる。そのため、脱珪酸過程が進行すると同時に酸化鉄の不溶化と集積が促進される。集積した酸化鉄は皮殻状に地表を覆い、これがラテライトとよばれる。

ラトソルには明瞭な垂直的層位がある。図34にケレヤ地区で観察された典型的土壌断面について、X線回折で検出した鉱物組成との対応を示した。露頭下部には弱風化の雲母片岩が露出している。ラトソルの層位は、鉱物組成に対応していることが明らかである。

最下層のサプロライト (Saprolite) はカオリンに富む白色土で、原岩の構造が残存している。セリサイトが豊富に含まれるのは、原岩中の白雲母が残留しているからである。白雲母は風化に対して強い抵抗性を示す鉱物で、白雲母花崗岩分布域ではクラスト中にも大きな結晶が残留していることが多い。

サプロライトより上層は、赤色のプリンサイト (Plinthite) に変化する。上部方向にカオリンが減少するにつれてギブサイトが増加する。さらにヘマタイトとゲーサイトが豆状に集結し、ピソリス (Pisolith) を形成する。この層位では土壌はまだ軟らかい。

最上部ではピソリスの基質がヘマタイトで膠結され、硬いスラッグ状のクラスト (crust) が地表を覆う。クラストの表面はきわめて平坦で、一定の標高をもつ台地 (Platau) を形成する。ラトソルの土壌層位をもつこのような台地地形を、ラテライト台地 (Lateritic Plateau) と呼び、ブグニ地域の地表の約70%を占める。

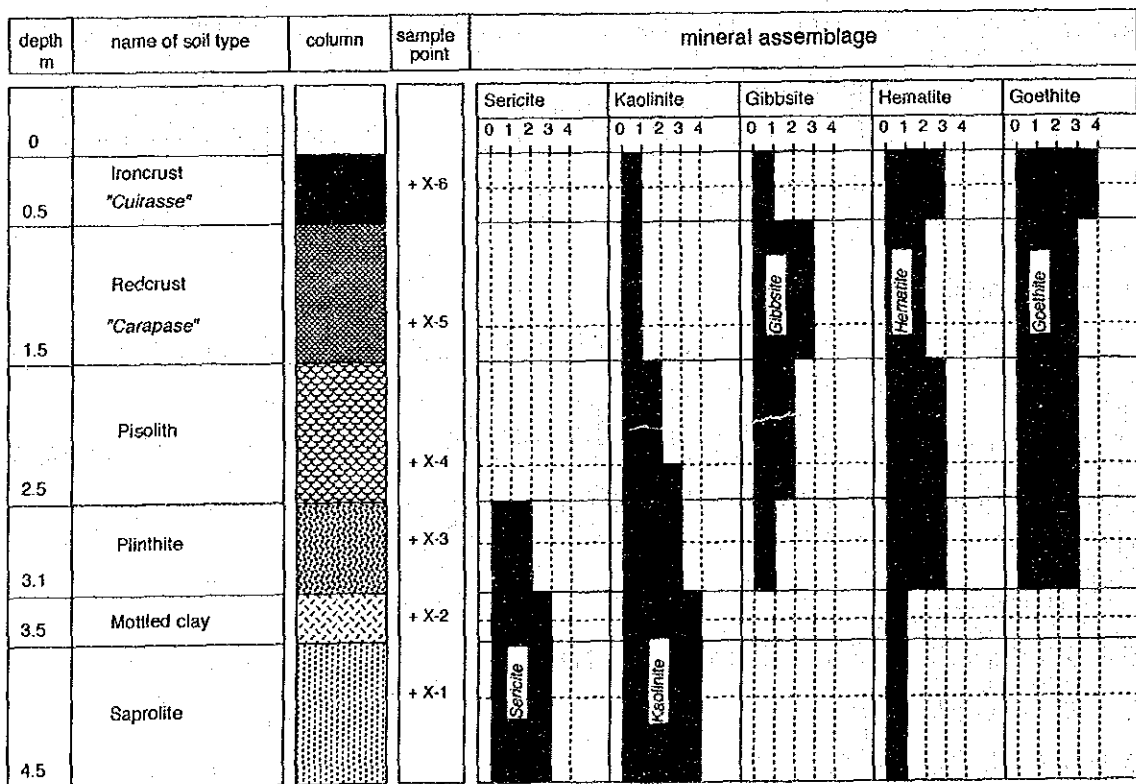
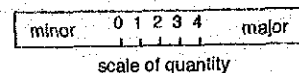


図 34 ラトソルの層位と鉱物組成



## (2) 斜面堆積物と低地土壌

古いラテライト台地は河川侵食と斜面崩壊による開析を受ける。ラトソルの層位は破壊され、低地の堆積物に再構成される。ラテライト台地の末端は小規模な崖になっており、そこから広大な緩斜面が広がっている。斜面の傾斜は頂部で最大7度、末端部では約1度である。このような斜面はペディメント (Pediment) と呼ばれる。ペディメントの末端は、大きな河川の周囲に広がる平原 (Plain) につながっている。

**礫質土壌 (Gravelly soil)** ペディメントの堆積物は、クラストの破片を多く含む礫質土で構成されている。基質の細粒物は灰色又は褐色のシルトで、細粒の石英を多量に含んでいる。礫質土の断面をみると、礫に富む部分とシルトに富む部分が層状に繰り返している。堆積物の表層は細粒分が洗い流されて、礫が多くなっている。ところによって石英脈の破片や基盤岩の岩片に富むことがある。構成物の内容は、ラトソル層位の全体が混合した状態である。

**シルト質土壌 (Silty soil)** ペディメントは河川の周囲では平原に漸移する。平原の堆積物は、細粒石英と灰色のカオリンに富む砂質シルトである。この土壌は乾燥時には比較的しまっているが、降雨時には容易に流れ出し低地に堆積する。構成物はサブロライトとよく似ており、ラトソル層位のサブロライト部分が再堆積したものと思われる。

## 4.3 土壌中の化学組成

化学分析値の大部分には灼熱減量成分 (L. O. I.) が多く含まれる (最大25.7%)。これは土壌中の有機物量を表すと思われる。解析にはL. O. I. を除いて各酸化物の重量比を再計算した値を用いた。

### (1) 主化学組成

図35に各酸化物の土壌中の領域と、花崗岩・泥質岩の平均値との比較を示す。全土壌の平均値が、岩石平均値よりも減少している成分は、土壌形成過程で地下水や河川水に溶けて逸散したものである。一方で、岩石平均値との差が少ない成分は、土壌中に再構成されるけれども地域全体からは逸散しないものである。

$Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$  の3成分合計量は、最大98.68%, 最小93.33%である。これら3種が土壌中の主成分酸化物を構成している。 $Al_2O_3+Fe_2O_3$  と  $SiO_2$  は完全な負相関を示す (図36)。

相関図を土壌タイプで分割すると、サブロライトは分布の中央部に位置する。花崗岩と泥質堆積岩の平均値を比較すると、サブロライトは原岩の組成比よりも  $SiO_2$  が減少した領域に入る。ラトソルは  $Al_2O_3+Fe_2O_3$  に富む領域に入る。礫質土とシルト質土は  $SiO_2$  に富む領域に入る。

ここで、ラテライト指数 (Lateritization Index) を、

$$L. I. = (Al_2O_3 + Fe_2O_3) / SiO_2$$

と設定すると、サブロライトのL. I. 値の平均は0.4なので、ブグニ地域では0.4以上をラトソルとみなすことができる。

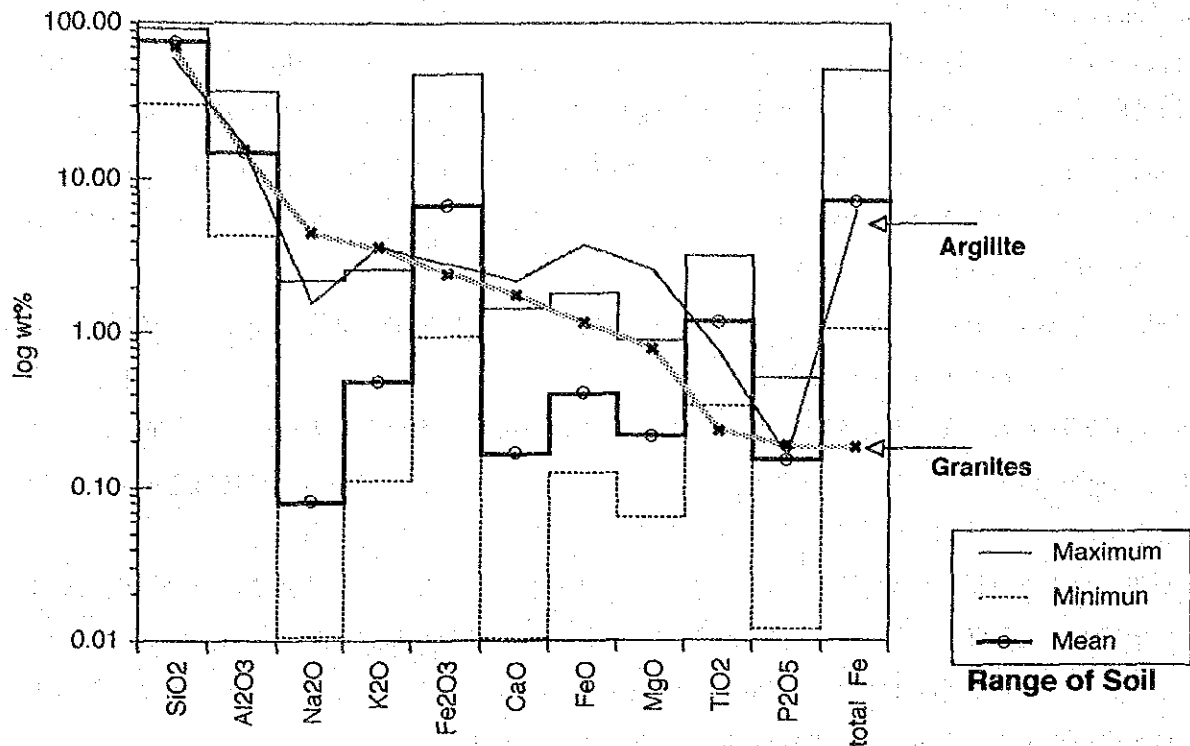


図 35 岩石と土壤の化学組成の比較

ラテライト指数が大きくなる要因としては、①土壤鉱物から珪酸が溶脱し、アルミナの相対的な増加、②ギブサイトの形成、③水酸化鉄の添加・沈澱によるゲーサイト・ヘマタイトの形成があげられる。一方、ラテライト指数が小さくなる要因としては、土壤中の粘土分の分離による石英の濃集。などが考えられる。

## (2) 副化学組成

全土壤を通じて、副成分酸化物の含有量は、花崗岩と泥質岩の平均値よりも著しく低い値を示す(図36)。これらの元素はラテライト風化の初期の段階で、すでに母岩から大部分が散逸しているものと思われる。ラトソル中には、鉱物が溶脱・分解した後に残留した元素が濃集する。地下水に溶解した元素の一部は、地表付近や低地の堆積物中に沈澱するものもあるが、大部分は河川水に運び去られて行く。

各化学組成の挙動は、相関マトリクス(表19)から、以下の3種の動態に分けられる。

### ① ラトソル形成過程で残留する化学組成

①-A 不溶残留元素: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

①-B 非風化鉱物に含まれる化学組成: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>

### ② 地下水に溶解して移動する化学組成

②-A 地表条件で沈澱する化学組成: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO

②-B 大部分拡散する化学組成: SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, BaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, FeO

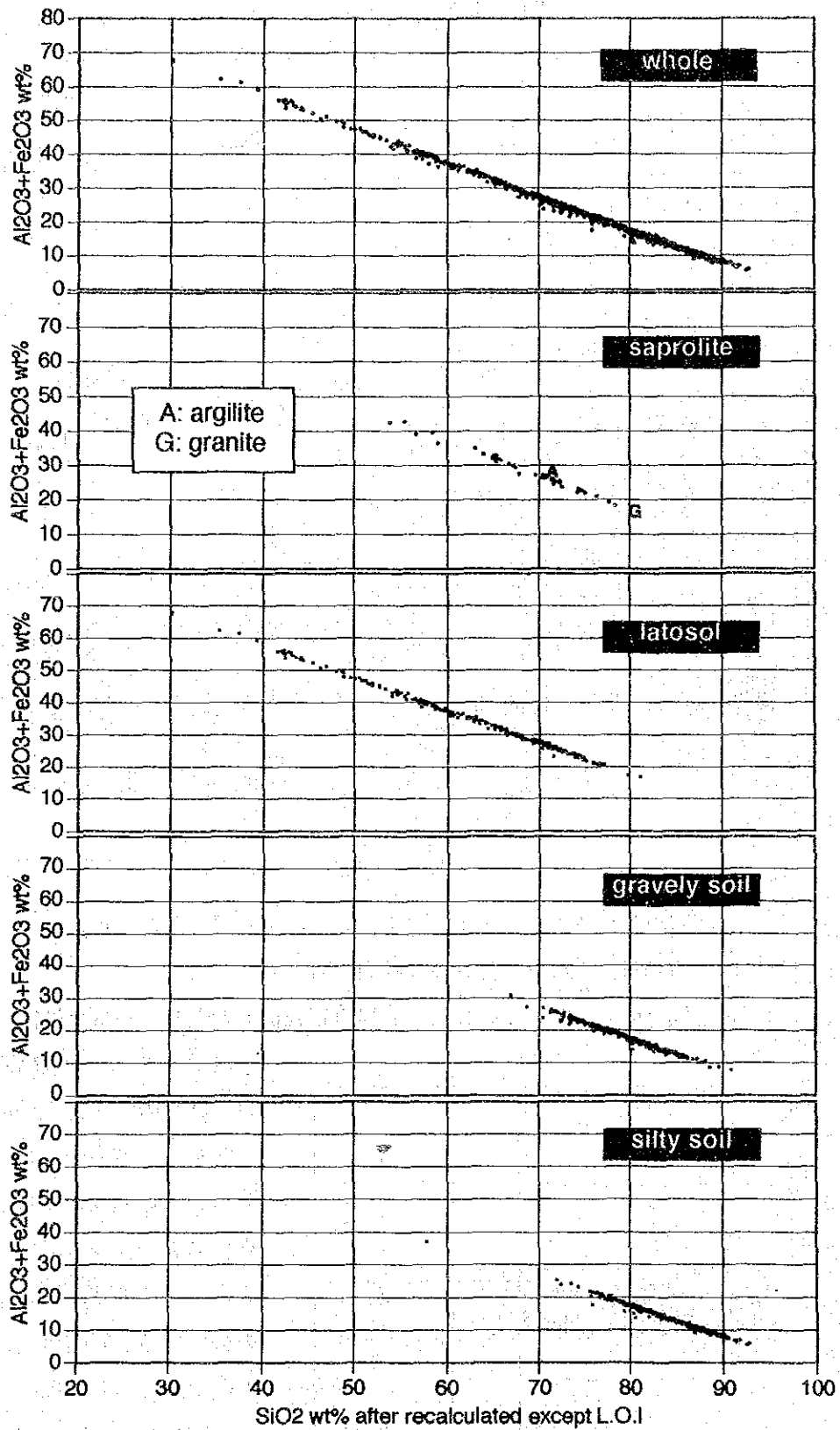


図 36 土壤別  $SiO_2$  と  $(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$  の関係



表19 相関マトリックス

		Cu	Zn	Pb	As	Au	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> Fe <sup>+</sup>	Al <sup>+++</sup>	Li <sup>+++</sup>	
Cu	lateritic soil	1.00																				
	gravelly soil	1.00																				
	silty soil	0.52																				
Zn	lateritic soil	0.48	1.00																			
	gravelly soil	0.68	1.00																			
	silty soil	0.48	1.00																			
Pb	lateritic soil	0.19	-0.01	1.00																		
	gravelly soil	0.19	0.12	1.00																		
	silty soil	0.41	0.28	1.00																		
As	lateritic soil	0.11	-0.02	0.51	1.00																	
	gravelly soil	0.38	0.13	0.43	1.00																	
	silty soil	0.42	0.28	0.34	1.00																	
Au	lateritic soil	-0.05	-0.02	-0.03	0.11	1.00																
	gravelly soil	0.10	-0.05	-0.05	0.03	1.00																
	silty soil	0.00	0.09	-0.02	0.09	1.00																
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	lateritic soil	-0.05	-0.07	0.08	-0.08	0.01	1.00															
	gravelly soil	0.02	0.05	0.14	-0.11	-0.03	1.00															
	silty soil	0.37	0.28	0.45	0.13	-0.03	1.00															
BaO	lateritic soil	0.31	0.22	-0.08	-0.08	0.00	0.15	1.00														
	gravelly soil	0.02	0.08	-0.11	-0.05	0.00	-0.09	1.00														
	silty soil	0.18	0.24	0.00	0.08	-0.01	-0.01	1.00														
CaO	lateritic soil	0.21	0.28	0.03	0.00	-0.04	-0.01	0.06	1.00													
	gravelly soil	0.07	0.30	-0.07	-0.02	0.00	-0.05	0.14	1.00													
	silty soil	0.20	0.38	0.09	0.04	0.01	0.04	0.27	1.00													
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	lateritic soil	0.28	0.04	0.73	0.44	-0.10	0.06	-0.10	-0.01	1.00												
	gravelly soil	0.30	0.17	0.50	0.53	-0.08	0.07	-0.08	-0.06	1.00												
	silty soil	0.52	0.49	0.55	0.52	-0.02	0.05	0.15	1.00													
K <sub>2</sub> O	lateritic soil	0.19	0.06	-0.29	-0.11	0.00	0.16	0.02	0.14	-0.04	1.00											
	gravelly soil	0.20	0.34	0.01	0.00	-0.01	0.11	0.15	0.21	-0.06	1.00											
	silty soil	0.37	0.40	0.11	0.18	-0.01	0.17	0.53	0.35	0.15	1.00											
MgO	lateritic soil	0.23	0.38	-0.21	0.02	0.01	0.08	0.22	0.46	-0.29	0.39	1.00										
	gravelly soil	0.13	0.43	0.10	0.13	-0.07	0.27	0.08	0.51	0.12	0.41	1.00										
	silty soil	0.59	0.58	0.35	0.35	0.00	0.40	0.33	0.50	0.52	0.53	1.00										
MnO	lateritic soil	0.34	0.28	0.43	-0.01	-0.07	-0.03	0.08	0.24	0.42	-0.03	0.01	1.00									
	gravelly soil	0.42	0.38	0.37	0.03	0.02	-0.02	0.06	0.24	0.08	0.04	0.13	1.00									
	silty soil	0.57	0.52	0.33	0.34	0.03	0.07	0.22	0.53	0.47	0.30	0.44	1.00									
Na <sub>2</sub> O	lateritic soil	0.18	0.22	-0.18	-0.15	-0.03	-0.06	0.46	0.31	-0.15	-0.42	-0.43	-0.01	1.00								
	gravelly soil	0.04	0.27	-0.10	-0.05	0.00	-0.05	0.09	0.02	-0.05	0.39	0.56	0.06	1.00								
	silty soil	0.17	0.27	0.05	0.04	-0.03	0.04	0.40	0.68	0.08	0.43	0.43	0.15	1.00								
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	lateritic soil	0.21	0.34	0.08	0.25	-0.01	0.28	0.07	0.55	0.21	-0.08	0.26	0.13	0.28	1.00							
	gravelly soil	0.25	0.23	0.02	0.07	0.05	-0.19	0.03	0.39	0.10	-0.03	-0.05	0.17	0.01	1.00							
	silty soil	0.24	0.31	0.01	0.03	0.02	-0.02	0.01	0.46	0.18	0.02	0.07	0.27	-0.01	1.00							
SiO <sub>2</sub>	lateritic soil	-0.27	-0.02	-0.85	-0.34	0.08	-0.55	-0.01	-0.72	-0.84	-0.12	-0.17	-0.35	-0.14	-0.06	1.00						
	gravelly soil	-0.20	-0.18	-0.41	-0.19	0.05	-0.83	0.08	0.01	-0.58	-0.12	-0.36	-0.13	0.00	0.09	1.00						
	silty soil	-0.53	-0.42	-0.54	-0.25	0.03	-0.88	-0.06	-0.15	-0.75	-0.26	-0.56	-0.25	-0.13	-0.05	1.00						
TiO <sub>2</sub>	lateritic soil	0.15	0.15	-0.28	-0.17	-0.03	-0.10	0.03	0.04	-0.35	0.68	0.31	0.12	-0.02	-0.05	0.31	1.00					
	gravelly soil	0.16	0.00	0.10	0.12	0.02	0.25	-0.07	-0.17	0.19	-0.07	0.18	0.27	-0.23	-0.18	0.36	1.00					
	silty soil	0.25	0.07	0.29	0.12	0.09	0.27	-0.09	-0.13	0.16	0.65	0.22	0.25	-0.16	-0.08	0.31	1.00					
FeO	lateritic soil	0.13	0.25	0.15	0.10	-0.10	-0.27	-0.17	0.10	0.18	-0.13	0.22	0.17	-0.05	0.24	-0.04	0.59	1.00				
	gravelly soil	0.22	0.38	0.24	0.28	-0.01	-0.01	0.03	0.03	0.49	-0.08	0.20	0.44	-0.04	0.00	0.29	0.40	1.00				
	silty soil	0.21	0.26	0.15	0.07	0.04	0.24	0.04	0.20	0.42	0.01	0.30	0.25	-0.01	0.07	0.35	0.16	1.00				
Al <sub>2</sub> Fe <sup>+</sup>	lateritic soil	0.24	0.00	0.70	0.54	-0.08	0.56	-0.01	-0.01	0.87	-0.18	-0.21	0.33	-0.16	0.04	-1.00	-0.34	0.02	1.00			
	gravelly soil	0.17	0.13	0.42	0.18	-0.08	0.87	-0.11	-0.06	0.56	0.04	0.28	0.08	-0.07	-0.11	-0.92	0.30	0.24	1.00			
	silty soil	0.49	0.37	0.53	0.73	-0.03	0.87	0.00	0.07	0.74	0.18	0.48	0.20	0.06	0.03	-0.99	0.27	0.32	1.00			
Al <sup>+++</sup>	lateritic soil	-0.21	-0.07	-0.69	-0.43	0.12	0.33	0.15	0.01	-0.68	0.31	0.28	-0.35	0.12	-0.26	0.57	0.30	-0.31	0.57	1.00		
	gravelly soil	-0.23	-0.10	-0.47	-0.21	0.06	0.44	0.03	0.04	-0.84	0.16	0.02	-0.27	0.03	-0.17	0.08	-0.05	-0.43	-0.05	1.00		
	silty soil	-0.33	-0.28	-0.17	-0.05	-0.01	-0.28	-0.06	-0.14	-0.81	0.01	-0.19	-0.44	-0.03	-0.23	0.00	0.02	-0.32	0.02	1.00		
Li <sup>+++</sup>	lateritic soil	0.28	0.00	0.68	0.33	-0.09	0.49	-0.01	0.00	1.88	-0.16	-0.23	0.36	-0.15	0.05	-0.31	-0.33	-0.01	0.97	1.00		
	gravelly soil	0.17	0.13	0.43	0.18	-0.05	0.88	-0.10	-0.07	0.53	0.08	0.29	0.09	-0.05	-0.10	-0.93	0.31	0.23	1.00	1.00		
	silty soil	0.51	0.40	0.54	0.27	-0.03	0.96	0.02	0.09	0.77	0.19	0.51	0.24	0.09	0.04	-0.92	0.25	0.33	0.99	1.00		

Al<sub>2</sub>Fe<sup>+</sup> = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>    Al<sup>+++</sup> = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>    Li<sup>+++</sup> = (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) / SiO<sub>2</sub>

#### 4.4 考 索

土壤化学組成から原岩の区分をするために、以下のような作業仮説をとった。

- ① 土壤元素のうちで移動量の少ない成分を複数抽出する
- ② 成分間の比率が土壤全体で一定していれば、原岩の組成比を表現している可能性がある。

③ 成分比について群の判別を行い、原岩の区分と関係付ける。

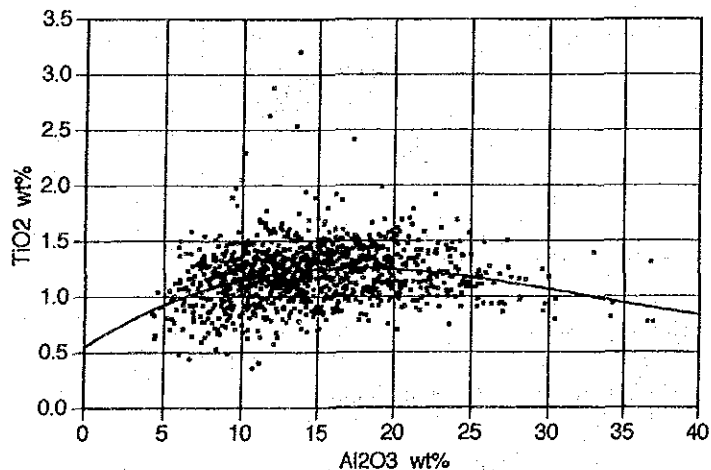


図37 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>図

前記までの解析結果から、土壤を構成する元素のうちラテライト風化による移動の影響が少ないと考えられるのは、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>の2成分である。TiO<sub>2</sub>は主にルチルなどの風化に対して極めて抵抗の強い鉱物に含まれている。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は通常の水条件 (pH4-9) では安定な元素である。図37・38にお

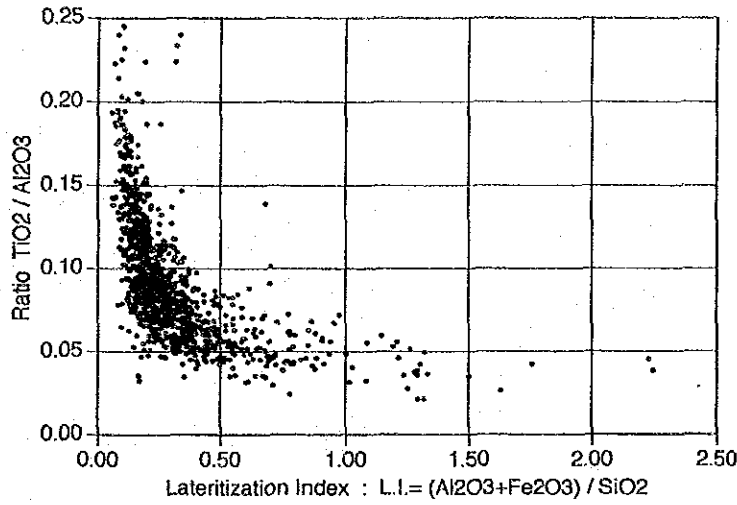


図 38 L. I. - (TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 図

っている。

以上のことから、ラトソルと関係する土壌では、基盤岩の化学組成は完全に再構成されるため、主要な化学成分を用いて原岩の区別をすることは極めて困難である。

いて、TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比とラテライト指数の関係をみると、L. I. 値が大きくなると急激に、TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比が小さくなる。このことは、ラトソルの形成過程でAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>も添加されていることを示している。したがって、TiO<sub>2</sub>及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に関しては上記②の段階でこの作業仮説は適用できない。その他の元素は、風化過程で拡散・濃集が顕著であるため、原岩の特性は消滅してしま



## 第Ⅲ部 総合検討及び提言



## 第III部 総合検討及び結論

### 第1章 総合検討

#### (1) 西アフリカにおける金鉱床のタイプ

本調査地域は、西アフリカクラトンに属し、25-18億年のBirrimien累層群と花崗岩類が分布する。25-18億年は、エブルニア造山期に相当する。

Jean-Pierre Milesiほか(1989)によれば、エブルニア造山期には、短い3回の造山期があり、それらは、第I期の広域的な衝突型テクトニクス、第II期の広域的なN-S系剪断帯の形成、第III期のNE-SW系衝上断層及び広域的なE-W系剪断帯の形成で特徴付けられる。

また、彼らは、西アフリカクラトンに分布する金鉱床を含金電氣石砂岩型、ソレアイト型、含金礫岩、含金硫化型及び含金石英脈の5つのタイプに分類し、エブルニア造山期と関連づけて論じた。それによると、金鉱化作用は、 $2,120 \pm 41$ Maに始まり2,000Maに終了し、Birrimien累層群の堆積構造に平行なものと、Birrimien累層群を切る構造、特に花崗岩の貫入を伴う第II期・第III期の変形時階に生じた剪断帯に伴うものに分けられ、それぞれのタイプに伴われる微量元素にも特徴があるとしている。

金鉱床のタイプ別特徴を表20に示す。これらのなかで、最大の埋蔵能力をもつのは、第II期の含金硫化型である。

表20 西アフリカにおける金鉱床のタイプ

金鉱床のタイプ	鉱化時期	金鉱化を規制する要素	随伴する微量元素
含金石英脈	第III期	NE-SW系断層・E-W系剪断帯	Au・Cu・pb・Zn・Ag・Bi
含金硫化型	第II期	N-S系剪断帯	Au
含金礫岩	第I期	層序(礫岩)	Au
ソレアイト型	第I期	層序(ソレアイト)	Au・Fe・Cu・(Ni・Co)
含金電氣石砂岩型	第I期	層序(含金電氣石砂岩)	Au・B・Fe・Cu・(Ni・Co)

#### (2) 鉱徴と地質・構造との関係

本年度の調査で、鉱徴として、砂金採掘地、石英転石帯、石英脈露頭などが認められ、なかでも、セレンゲ地区で、多数の砂金採掘地が確認された。この砂金は、残留砂鉱及び原地砂鉱であり、砂金源はその直下又は近傍に胚胎しているものと思われる。また、砂金採掘地は、東方又は西方へ流れる各河川沿いにN-S方向に分布し、かつ地表で確認されたN-S系断層の近傍に位置している。

これらのことから、セレンゲ地区の砂金採掘地は、N-S系の構造に規制されて分布しているものと思われ、Jean-Pierre Milesiらによる第Ⅱ期のN-S系剪断帯に伴う含金硫化型の金鉱床を示唆するものと推定され、砂金採掘地の直下又は近傍に金鉱床が胚胎しているものと思われる。

### (3) 地化学異常と地質・構造との関係

地化学探査の結果、Sidobougou 1・2・3, Damanbougou, Mangouelaの5区域が有望地区として抽出された。これらの区域はすべてセレンゲ地区に含まれる。セレンゲ地区における地質・構造と地化学探査結果を図39に示す。図から明らかなように、NNE-SSW系衝上断層沿い又はNNE-SSW系衝上断層、NW-SE系・NE-SW系リニアメント、背斜軸などの構造が集中するところに地化学異常が見られる。これらの構造に規制されて金鉱床が胚胎している可能性は大きい。

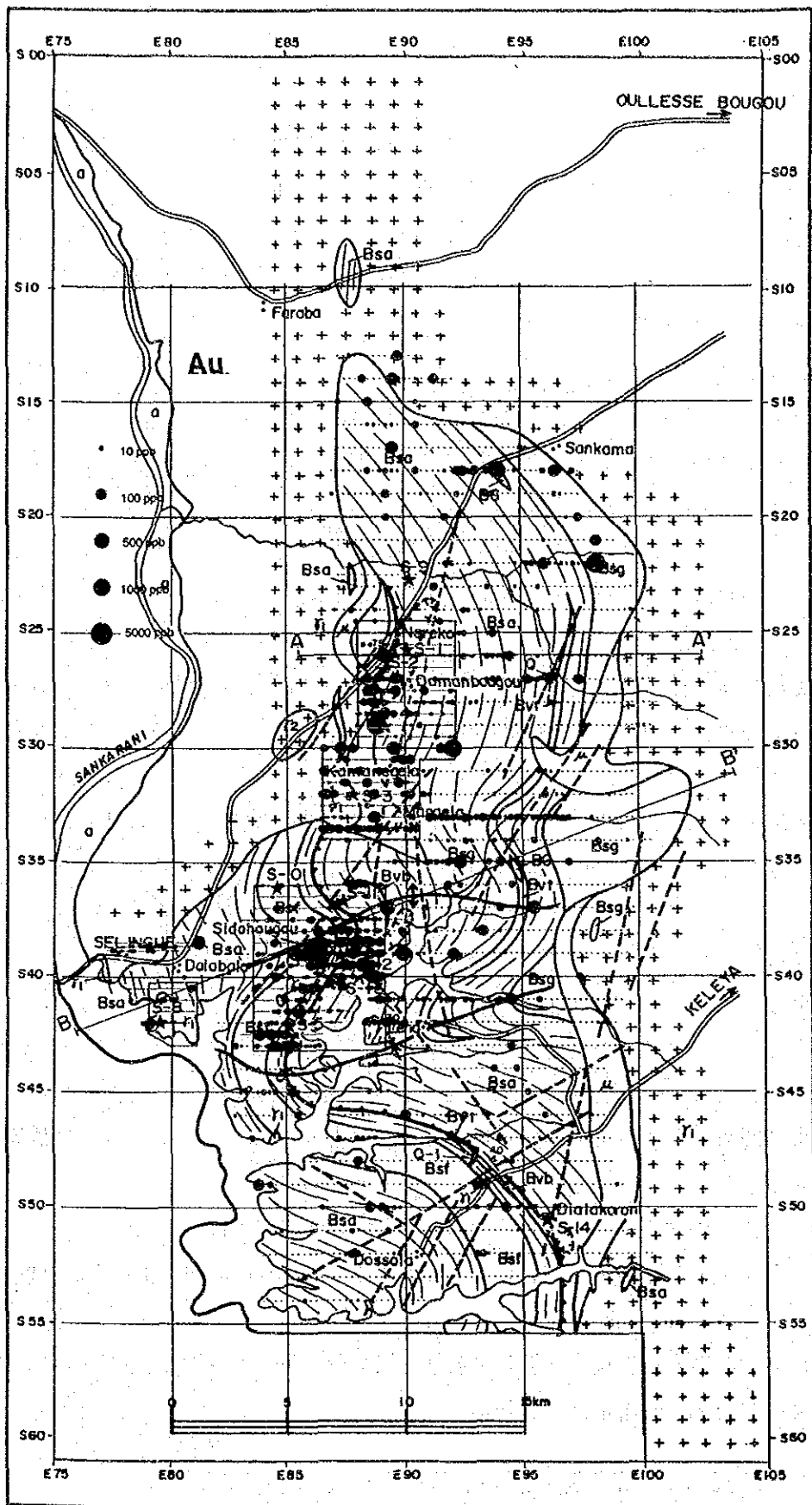


図 39 地化学探査総合解析結果図 (セレンゲ地区)



## 第2章 結 論

本調査は、マリ共和国ブグニ地域における資源開発協力基礎調査（資源開発調査）の第2年次調査として実施されたものである。第2年次の調査として、セレンゲ地区、ドゥスディアナ地区及びケレヤ地区においては地化学探査を、セレンゲ地区内のセレンゲ鉱徴地地区においては精密地化学探査をそれぞれ実施した。これらの調査の目的は、金鉱床胚胎の可能性のある地区の抽出及び砂金鉱徴の源となる金鉱化帯の抽出にある。

本調査地域の地質は、エブルニア造山期のグリーンストーン帯とそれらを買く花崗岩類からなる。グリーンストーン帯は、Birrimien累層群と呼ばれ、砂質片岩と泥質片岩を主体とし、玄武岩や珪長質火山碎屑岩類を挟在する。花崗岩類は黒雲母花崗岩、白雲母花崗岩及び角閃石花崗岩に分けられ、それぞれ異なる時期に貫入したものと推定され、バソリスを形成している。

各調査地区で、砂金採掘地、石英脈露頭、石英転石などを確認した。それらは、セレンゲ地区の14箇所の砂金採掘地（最高品位Au 154ppb）・2箇所の石英脈露頭（最高品位 Au89ppb）・3箇所の石英転石帯（最高品位 Au 3 ppb）、ドゥスディアナ地区の1箇所の砂金採掘地・5箇所の石英脈露頭（最高品位 Au25ppb）及びケレヤ地区の4箇所の石英転石帯（最高品位 Au25ppb）である。

西アフリカでは砂金を端緒として金鉱床が発見された例が多いことから、本調査地区の中では、砂金採掘地が多いセレンゲ地区が有望と考えられる。セレンゲ地区の砂金採掘地は、その分布の方向及び砂金鉱床のタイプから、N-S系の構造に規制され、かつその直下又は近傍に金鉱化帯が存在するものと推定される。地化学探査の結果、セレンゲ地区内のSidobougou1・2・3, Damanbou-gou, Mangouelaの5区域が有望地区として抽出された。これらの区域では、Au地化学異常がまとまって分布するSidobougou1・2が有望である。また、地化学異常の特徴として、Au単味であることが挙げられる。

以上のことを、西アフリカにおける金鉱床のタイプ及びその特徴と照合すると、本地区にはN-S系の構造に規制された含金硫化型の金鉱床が期待できる。この含金硫化型金鉱床は、西アフリカで最大の埋蔵能力を有するもので、マリ共和国でも本調査地区の南東方150kmに位置するSyama鉱床が知られている。

したがって、第3年次の調査としては、本年次に地化学探査が行われなかったBirrimien累層群の分布域に対する地化学探査を実施し、併せて本年度の調査結果から抽出された鉱床賦存有望区域に対して、更に高次の調査を実施することが望ましい。

今後、更に高次の調査を実施すべき区域名を優先順位を付して以下に列記し、各区域で実施することが望まれる調査方法を併せて示した。

優先順位	区 域 名	調 査 方 法
1	Sidobougou 1	ピット調査, ボーリング調査
1	Sidobougou 2	ピット調査, ボーリング調査
3	Sidobougou 3	物理探査, ピット調査

## 文 献

- BASSOT, J. P., MELOUX, J. et TRAORE, H. (1981) : Notice explicative de la carte geologique a 1/1.500.000 de la Republique du MALI. DNGM, 137p.
- BUCHSTEIN, M., Cisse, S. et Sissoko, I. (1973) : Recherches geologiques et minieres dans la region de Bougouni-Sikasso-Yanfolila, Convention 41/c/72/B, Project 88/CD/72/VI/B/1b, BRGM 111p.
- BUDEL, J., (1977) : Klime Geomorphologie, Gebruder Borntraeger. (邦訳 気候地形学, 平川一臣訳 古今書院 1985).
- BUTT, C. R. M., and ZEEGERS, H., (1989) : Classification of geochemical exploration models for tropically weathered terrain. Journal of geochemical exploration, 32, p. 65-74.
- DIALLO, M., ATGER, M. et COULIBALY, B. (1989) : Activites et resultats du projet de prospection de la region aurifere de la Bagoe. MLI/85/007. Ministere de l'industrie de l'hydraulique et de l'energie. UNDP - DNGM.
- FREYSSINET, PH., LECOME, P. and EDIMO, A. (1989) : Dispersion of gold and base metals in the Mborguene lateritic profile, east Cameroun. Journal of Geochemical Exploration, 32, p. 99-116
- HOLLAND, H. D. (1978) : The chemistry of the atmosphere and oceans, John Wiley & Sons Inc. (邦訳 大気・河川・海洋の化学, 山県登訳 産業図書 1979).
- 金属鉱業事業団資料センター (1974) : 昭和48年度調査解析委員会報告書—北・西アフリカ諸国の調査解析—. p. 1-142.
- MAO, S. H. (1991) : Occurrence and distribution of invisible gold in a Carlin-type gold deposit in China. American Mineralogist, Vol 76, p. 1964-1972.
- MARCOUX, E., BONNEMAISON, M., BRAUX C. et JOHAN, Z. (1989) : Distribution de Au, Sb, As et Fe dans l'arsenopyrite aurifere du Chatelet et de Villeranges (Creuse, Massif Central francais). C. R. Acad. Sci. Paris, t. 308, Serie II, p. 293-300.
- 松本重治・米山俊直・伊谷純一郎 (1983) : アフリカハンドブック. 講談社, 628p.
- MINISTERE DU DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET DU TOURISME, DIRECTION NATIONALE DE LA GEOLOGIE ET DES MINES (1987) : Ressources Minerales du MALI. 64p.
- P. G. Fookes and P. R. Vaughan (1986) : A Handbook of ENGINEERING GEOMORPHOLOGY, Chapman and Hall New York
- STEVEN F. OLSON, KASSOUM DIAKITE, LAWRENCE OTT, AMBOGO GUINDO, CHRISTOPHER R. B. FORD, NICHOLAS WINER, ERIC HANSEN, NILDA LAY, ROBIN BRADLEY, and DEMETRIUS POHL (1992) :

Regional Setting, and Descriptive Geology of the Middle Proterozoic Syama Gold Deposit, Mali, West Africa. *Economic Geology*, Vol. 87, p. 310-331.

諏訪兼位・矢入憲二 (1979) : アフリカ. 岩波講座 地球科学16 “世界の地質”, 61-98.

THORNTON, C. P. and TUTTLE, O. F., (1960) : Chemistry of igneous rocks I. Differentiation index. *Amex. Jour. Sci.*, 258, p. 664-684.

# 卷 末 資 料



## 地化学探査結果図及び地化学探査解析結果図



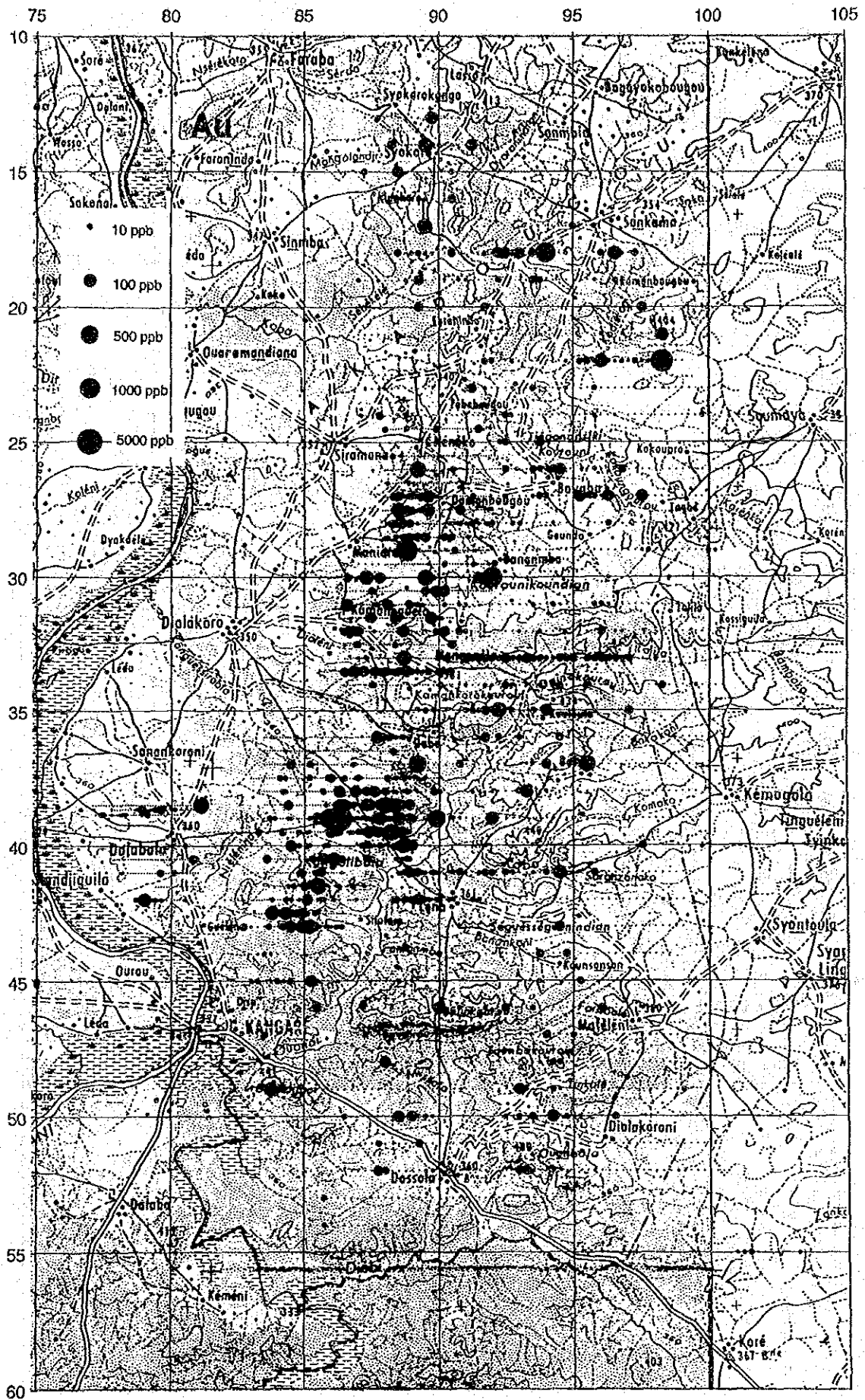


図 40 セレンゲ地区地化学探査結果図 (Au)



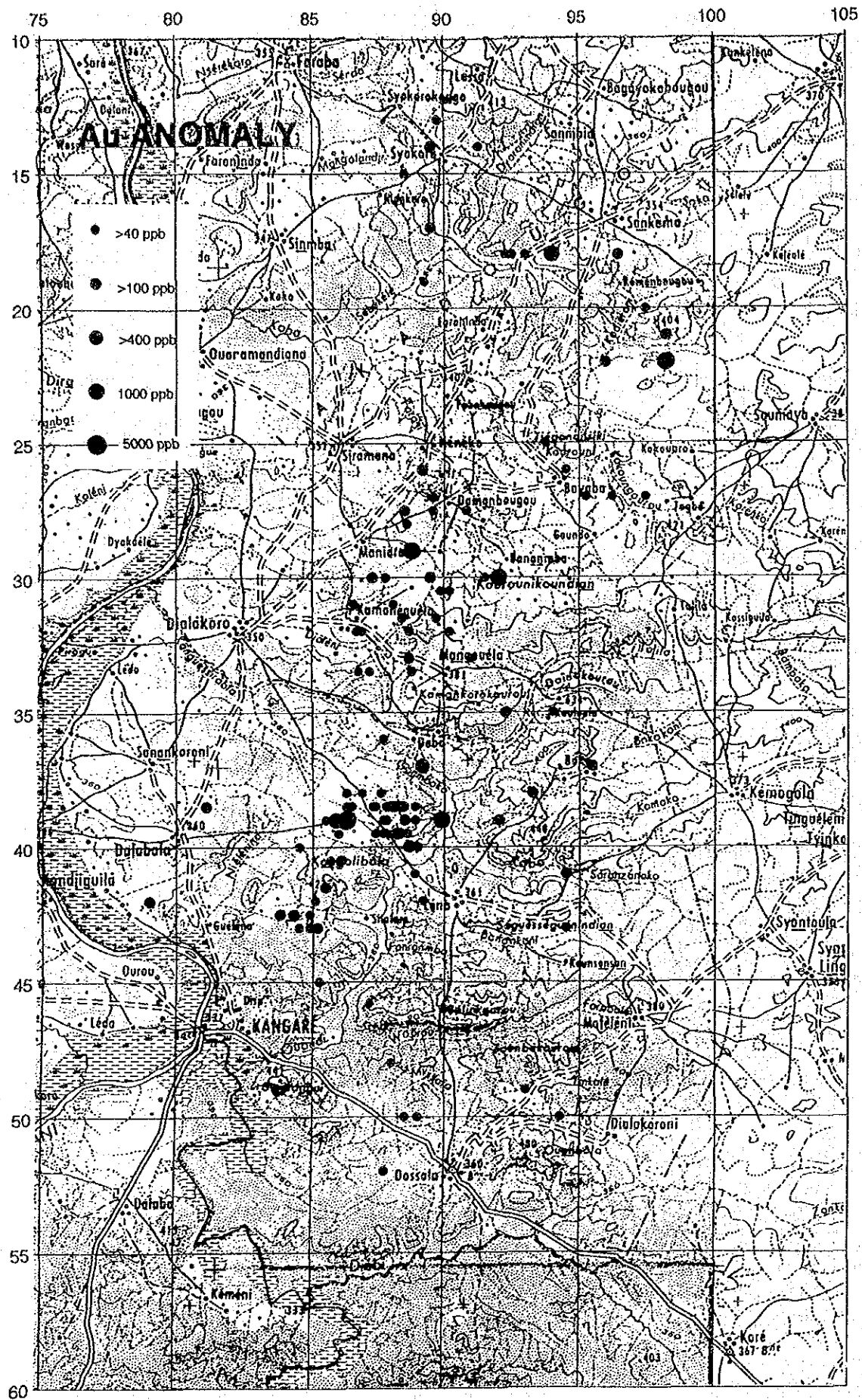


図 41 セレンゲ地区地化学探査解析結果図 (Au)

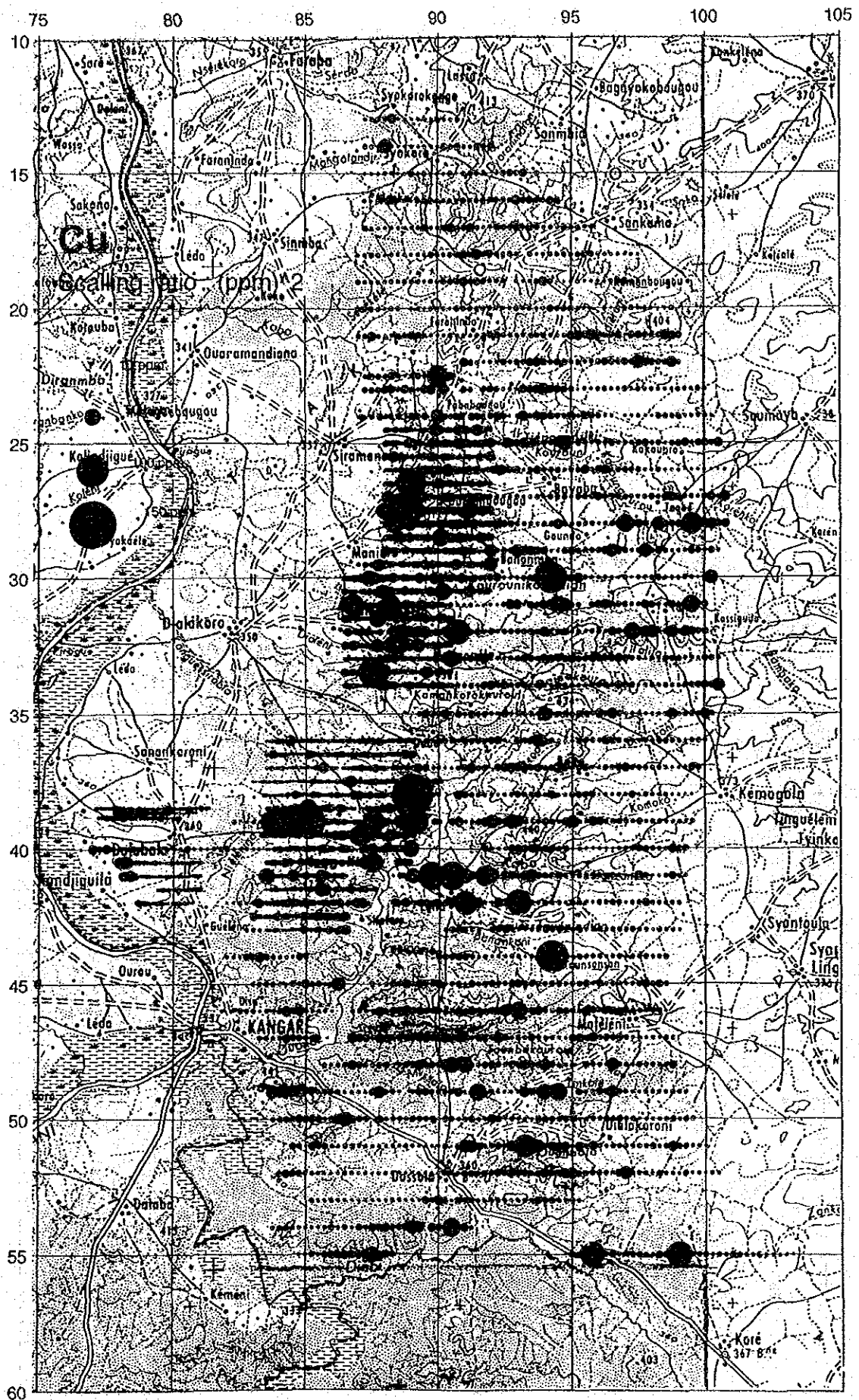


図 42 セレンゲ地区地化学探査結果図 (Cu)

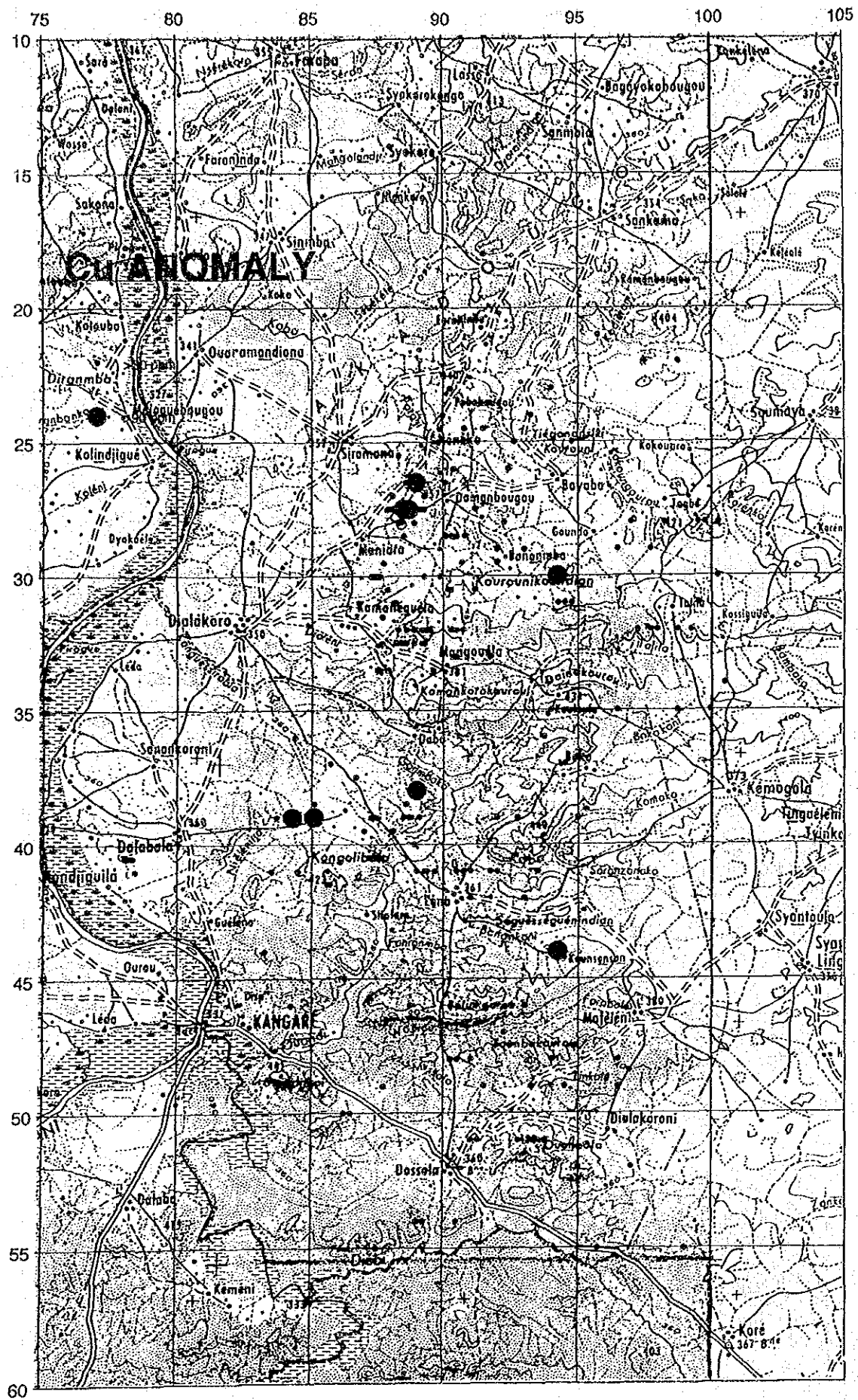


図 43 セレンゲ地区地化学探査解析結果図 (Cu)

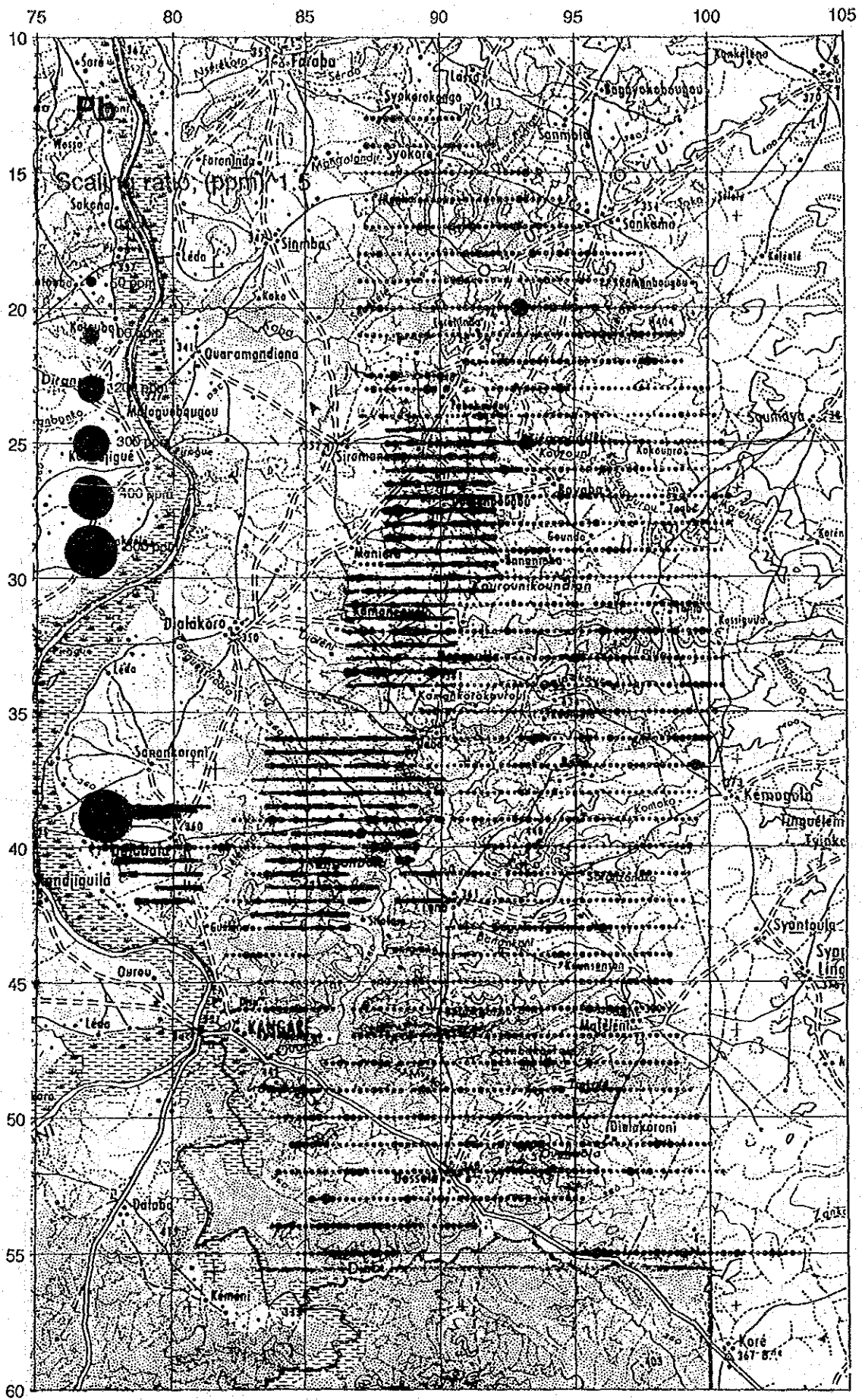


図 44 セレンゲ地区地化学探査結果図 (Pb)

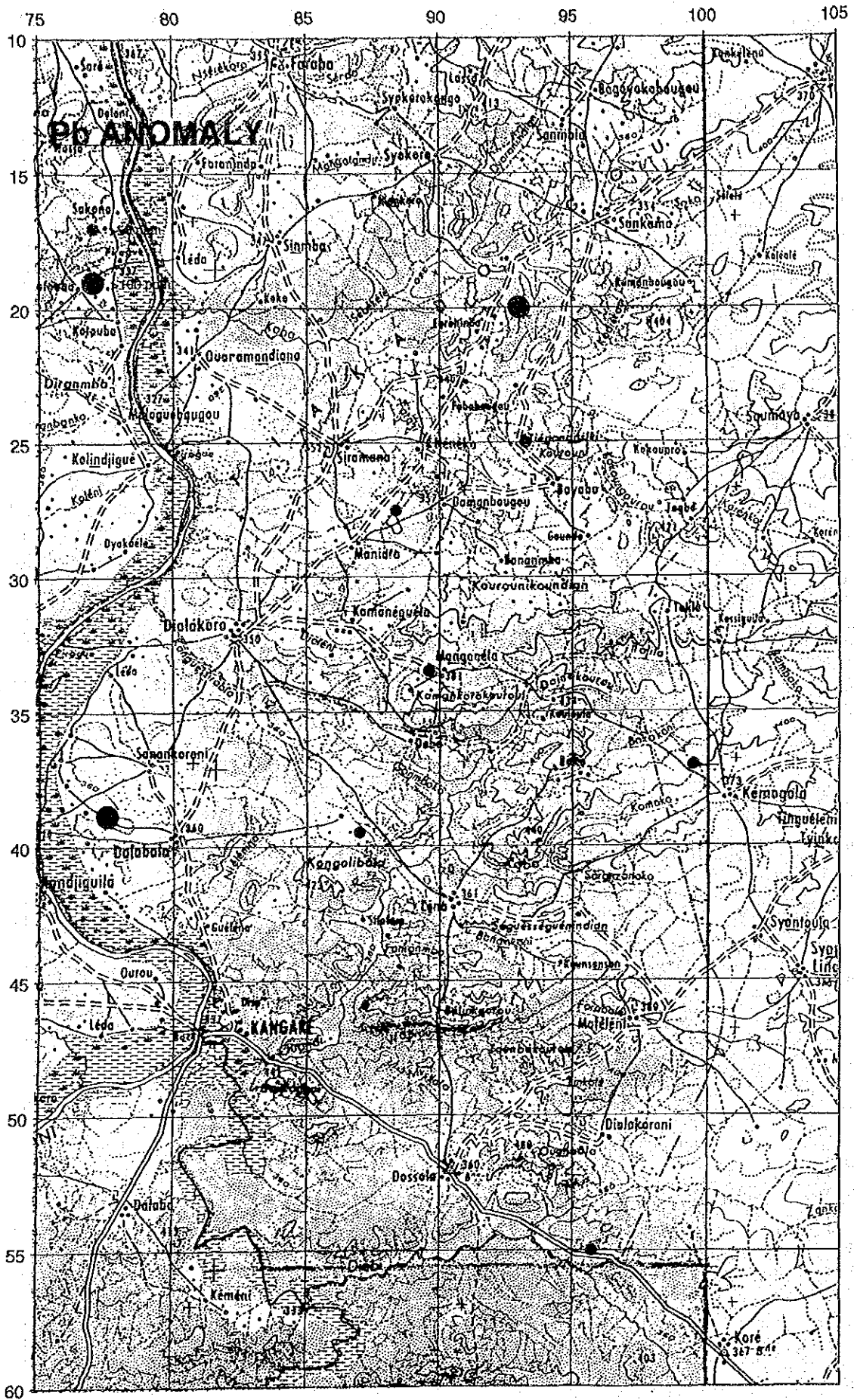


図 45 セレンゲ地区地化学探査解析結果図 (Pb)

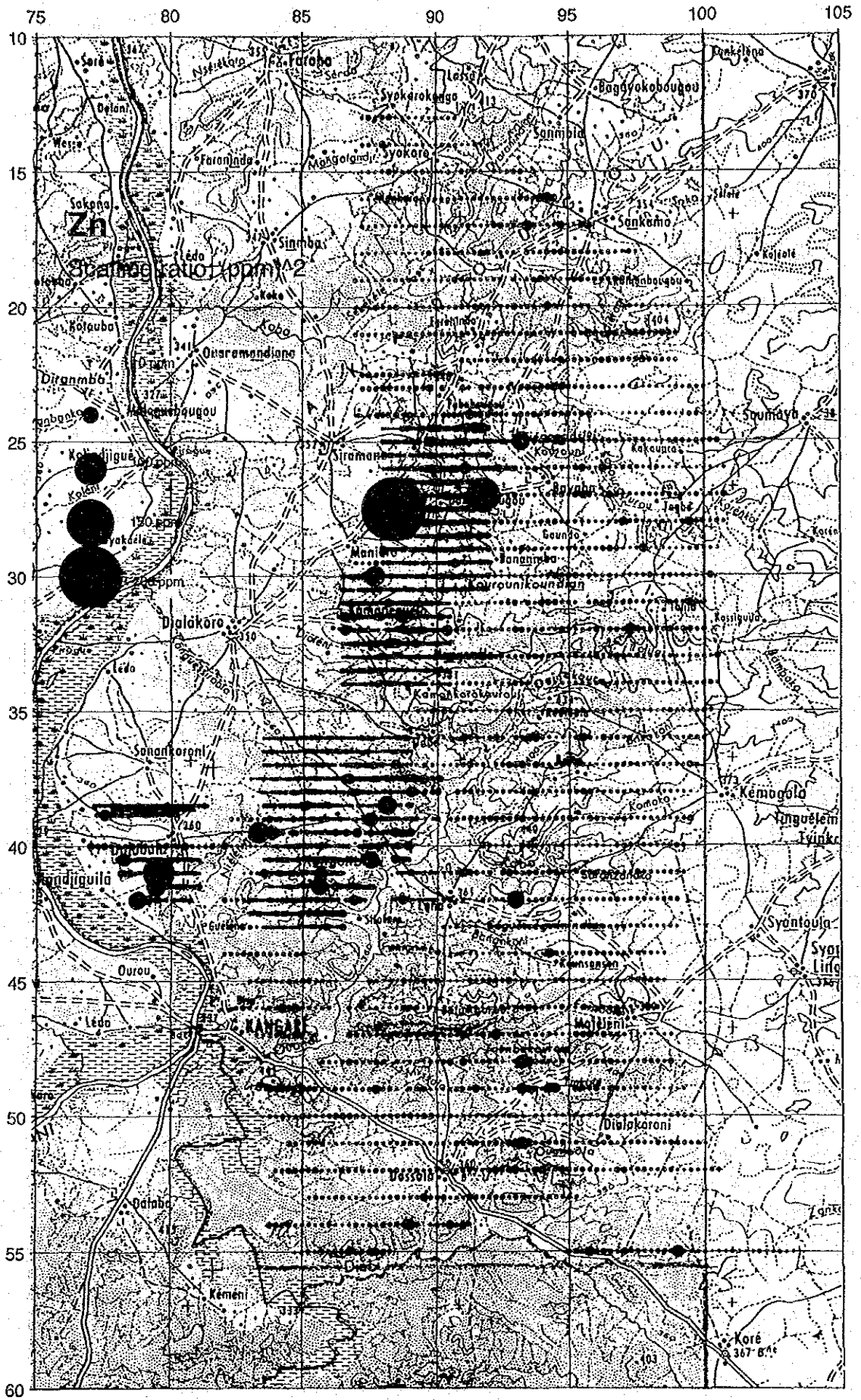


図 46 セレンゲ地区地化学探査結果図 (Zn)

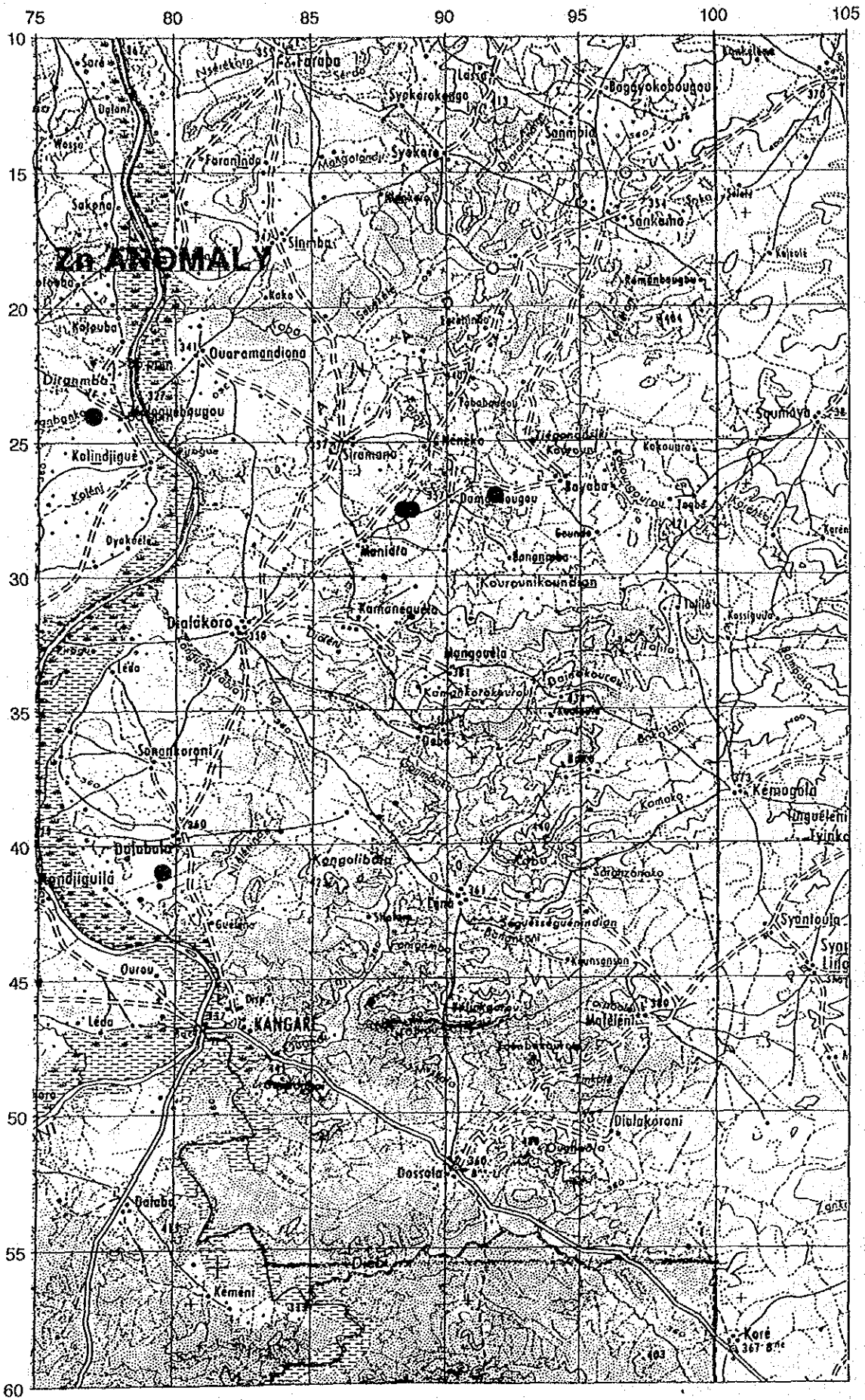


図 47 セレンゲ地区地化学探査解析結果図 (Zn)

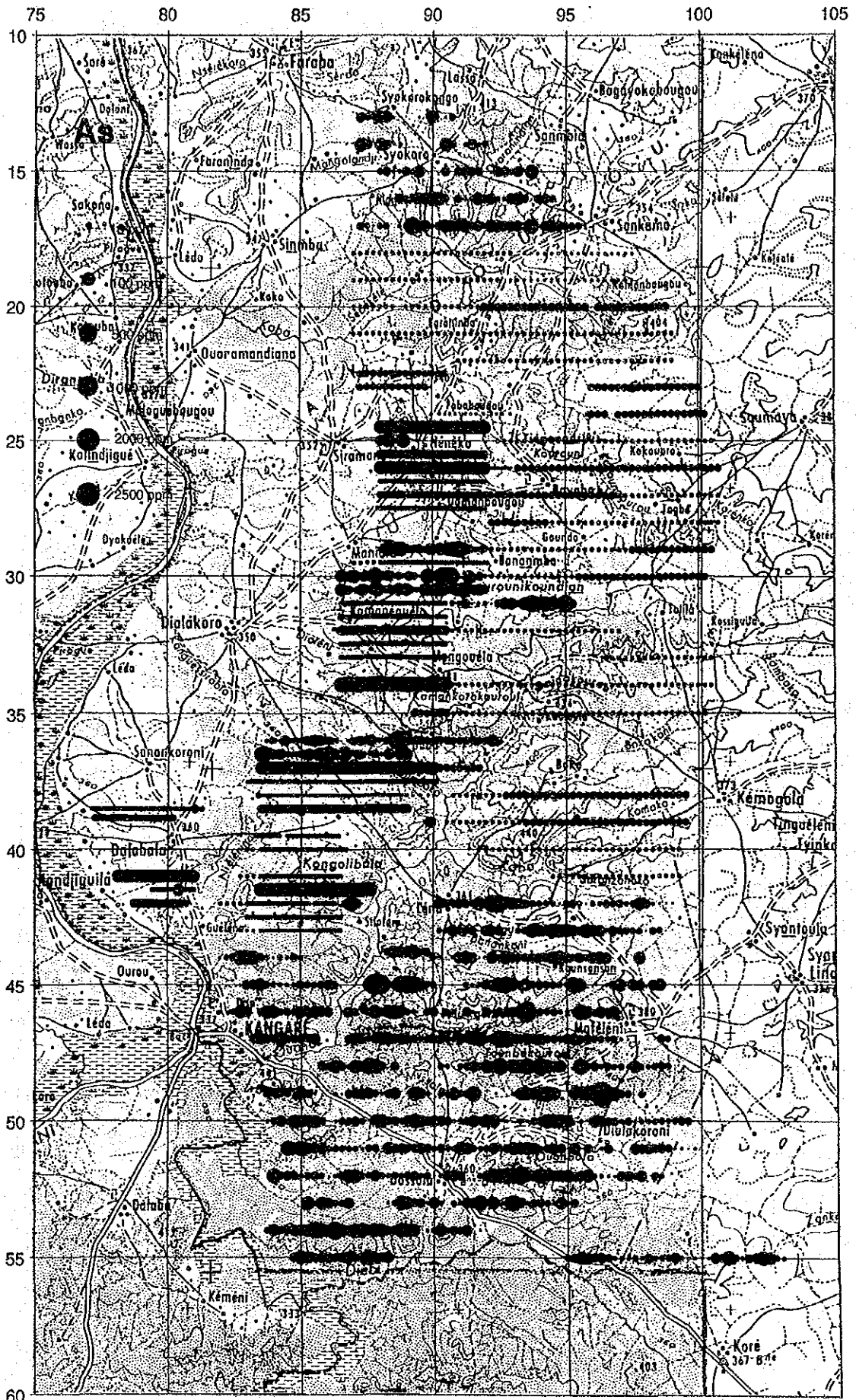


図 48 セレンゲ地区地化学探査結果図 (As)



