

第 II 部

第 II 部 各 論

第 1 章 水文調査

1-1 地表水および地下水調査

1-1-1 調査方法

本年度は、雨季（2001年9月～10月）および乾季（2002年1月～2月）の2時期に水文調査を実施した。

調査位置は河川流域および水系の分布を考慮して決定し、現地では河川水および地下水を採取して、水質測定および簡易水質分析を実施した。水文調査地点位置を図 2-1-1、水系図を図 2-1-2 に示す。各採取地点では、採取場所と採取試料の記載、写真撮影および GPS 測量を行った。【巻末の写真 3】

(1) 試料採取

ポリプロピレン製の容器に各地点で 1.5 リットルの水試料を採取した。採取後は冷暗所に保存し、水試料の変質を避けるよう努めた。

本年度の調査では、河川水 12 試料（WR01-01R, WR05-01R～WR13-01R, WR15-02D）、既存井戸水 12 試料（WW07-01R, WW10-01R～WW14-01R, WW15-02D～WW20-02D）およびボーリング水 8 試料（WD01-01R～WD03-01R, WD01-02D～WD03-02D, WD06-01R, WD06-02D）の合計 32 試料を採取した（図 2-1-1、試料番号は巻末資料 2 を参照）。

・河川水

雨季において 10 試料、乾季において 2 試料を採取した。雨季においては全ての採取地点で流水が認められ、流水を採取した。乾季においては大半の河川が干上がっており、Banifing 川のたまり水（WR14-02D）と調査地域内で唯一流水が認められた Baoule 川（WR15-02D）から試料を採取した。

・既存井戸水

雨季において 6 試料、乾季において 6 試料を採取した。村落に既存のボーリング掘削された水井戸から、足踏み式ポンプで汲み上げた水を井戸口から試料を採取した。

・ボーリング水

雨季において 4 試料、乾季において 4 試料を採取した。全 8 試料は、第 1 年次の調査により掘削した MJMB-E1～MJMB-E4 孔から採取した試料である。試料採取に際しては、孔口から採水器を降ろし、地下水面下約 2m の水を採取した。なお、孔底付近の水には濁りが認められた。

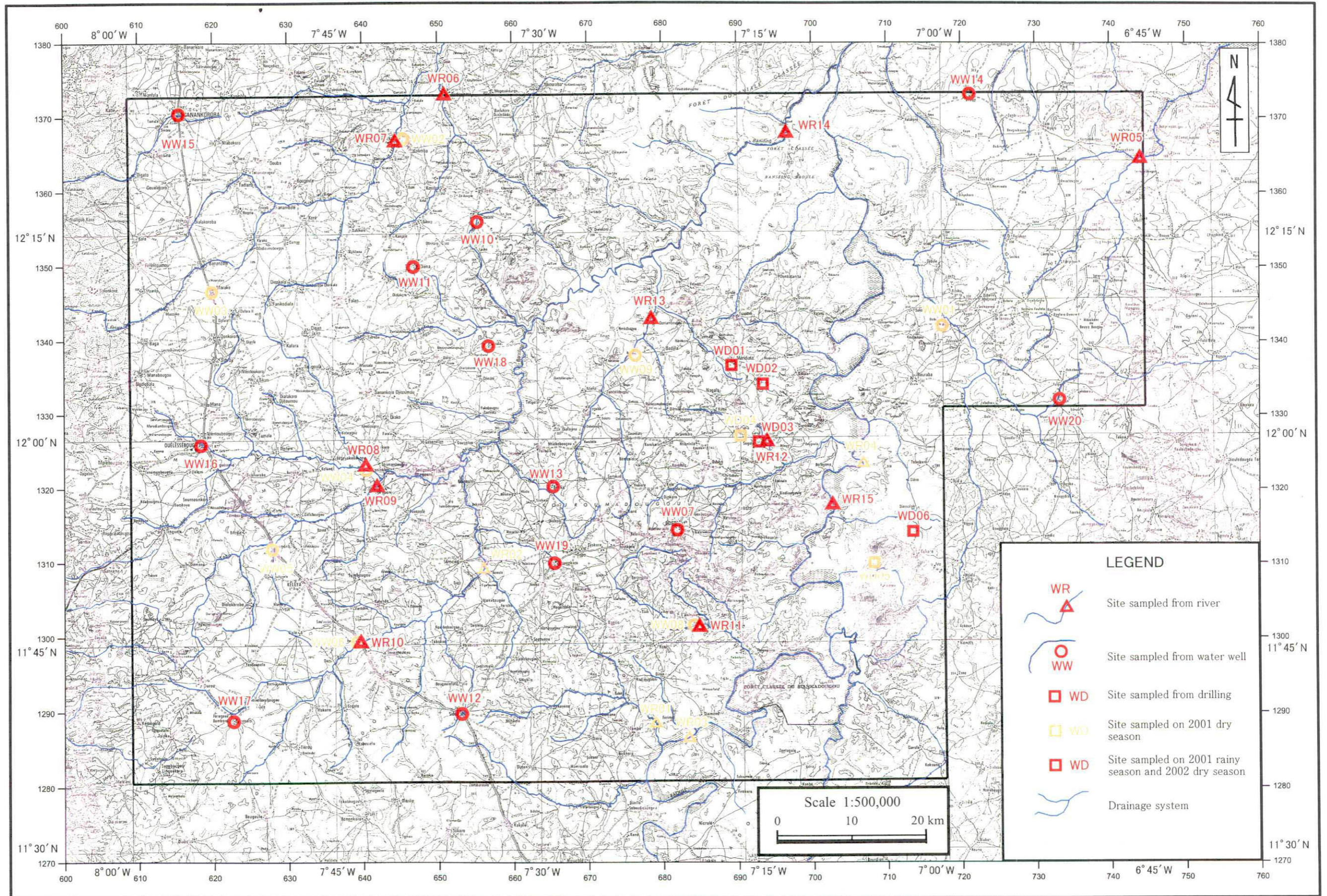


图2-1-1 水文调查位置图

(2) 水質測定, 簡易水質分析および水質分析

水質測定は測定器を現地に持ち込み採取地点において実施し, 簡易水質分析は DNGM の実験室において実施した。また, 乾季に採取した 12 試料をカナダ ALS chemex 社に送付し, ICP 分析法による水質分析を実施した。

簡易水質分析器は分光光度法を利用した分析器で, 専用の試薬はパッケージ化されており, 比較的容易に分析を行うことができる。ただし, 専用の試薬には一部毒物が含まれており, また, 試料の前処理のため濃硫酸やクロロフォルムなどの劇薬を扱う必要があるため, 取り扱いおよび換気には十分注意を払う必要がある。なお, 分析に使用した全ての溶液はポリエチレン製容器に一括保管し, 調査終了後に DNGM の分析所に溶液の処理と廃棄を依頼した。

水質測定および簡易水質分析の測定項目および測定方法を巻末資料 1, 水質測定および簡易水質分析結果を巻末資料 2, ICP 水質分析結果を巻末資料 3 に示す。

1-1-2 調査結果

(1) 肉眼観察

採取試料の肉眼的特徴は次のとおりである。各試料の特徴を巻末資料 3 に示す。

・河川水

河川水は淡黄～淡黄褐～淡黄赤褐色を呈し, 雨季に採取した試料は半透明で混濁しており, 乾季に採取した試料は透明～半透明で, 全ての試料で褐色～赤褐色の沈殿物が見られる。

・既存井戸水

既存井戸水は WW10-01R を除く全ての試料が無色, 透明, 清澄で, 沈殿物はない。WW10 の井戸はポンプに不具合が発生し, 住民生活に必要な量の揚水が不可能となっており放置されている。調査の際, ポンプ操作を何度も繰り返すことで少量の水が採取された。採取水は淡黄色, 半透明で混濁しており, やや金気臭がある。

・ボーリング水

ボーリング水は淡黄～淡黄灰～帯赤灰色を呈し, 半透明, 少量の沈殿物が見られる。

(2) 水質測定結果

第 1 年次および本年度の水質測定結果から各項目について次の傾向が認められる。水質測定値相関図を図 2-1-3 に示す。

- ・ pH: 河川水は 6.4～7.9 の弱酸性からアルカリ性を示す。既存井戸水は 5.3～8.0 と酸性からアルカリ性を示すが, 6.0～7.0 前後の弱酸性の値を示すものが多い。ボーリング水では 6.2～7.3 と弱酸性から中性の値を示す。
- ・ 導電率(Conductivity): 河川水は 14 S/m 以下を示し, 既存井戸水およびボーリング水は 0.24～48 S/m と幅広いレンジの値を示す。一般には既存井戸水およびボーリング水は河川水よりも高い値を示す。

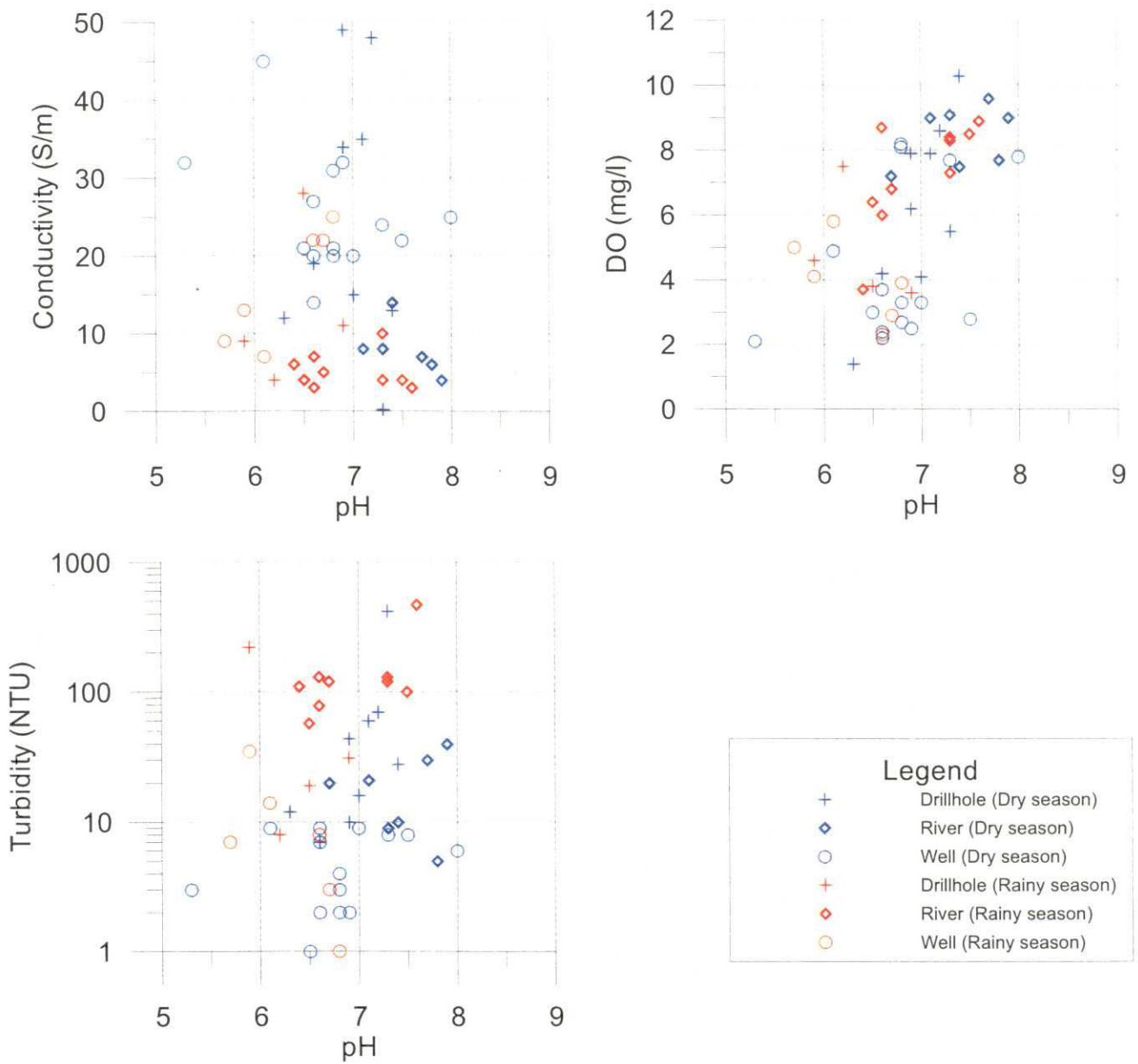


図2-1-3 水質測定値相関図

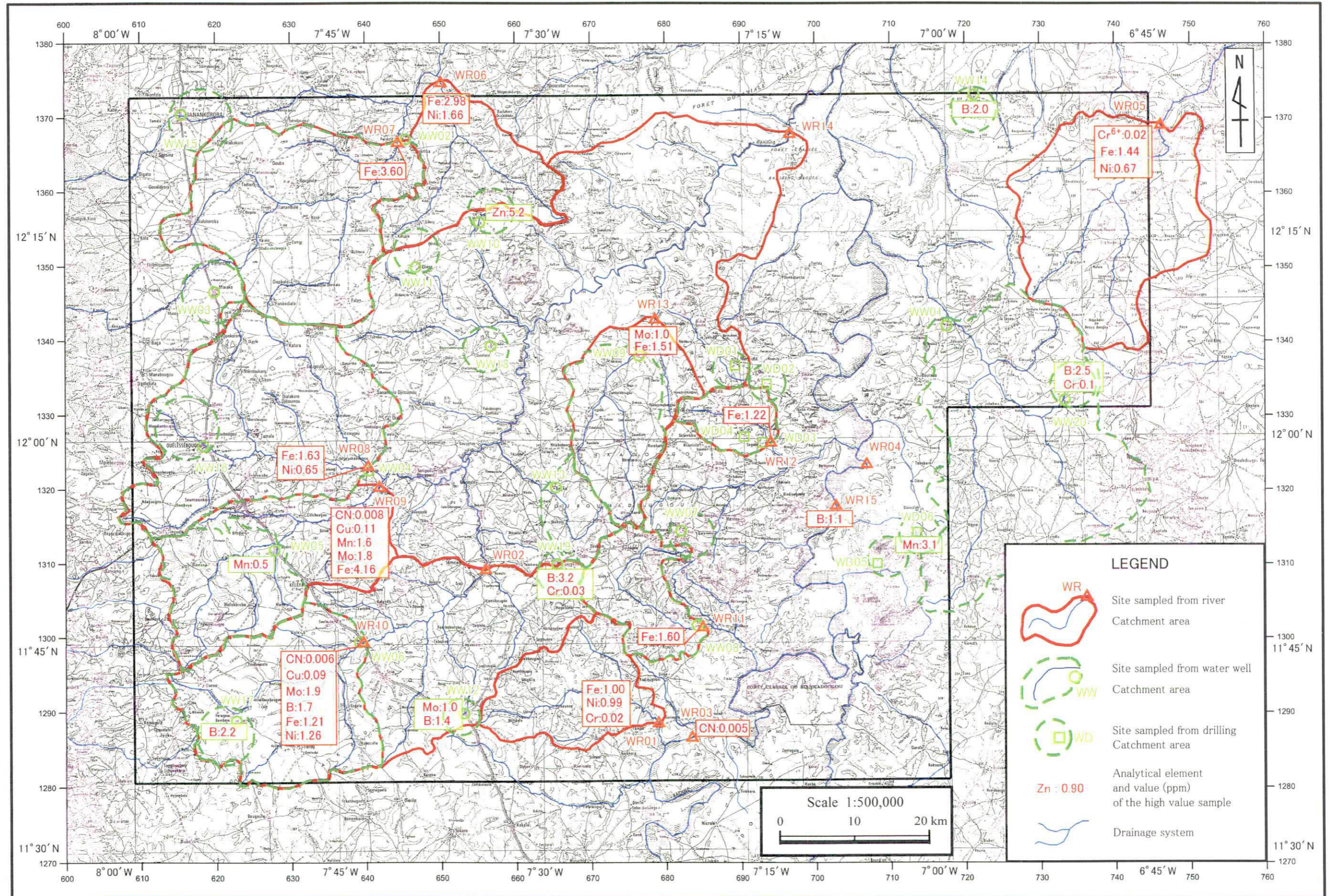
- ・溶存酸素量(DO)：河川水は 3.7~9.6 mg/l, 既存井戸水は 2.1~8.2 mg/l, ボーリング水は 1.4~10.3 mg/l を示す。河川水では 4 mg/l 以上でまとまった値を示すのに対し, 既存井戸水およびボーリング水はばらつきが大きい。
- ・濁度(Turbidity)：河川水は 5~470 NTU, 既存井戸水は 1~35 NTU, ボーリング水では 8~420 NTU を示す。河川水では雨季と乾季で明瞭な違いが認められ, 雨季で値が高く, 乾季で低い。既存井戸水およびボーリング水では, 季節による系統的な値の変化は認められない。また, 既存井戸水は低い値でまとまっているのに対し, ボーリング水ではばらつきが大きい。相対的に値が高い順番に並べると, 河川水(雨季), ボーリング水, 河川水(乾季), 既存井戸水の順である。

(3) 水質分析結果

水質分析結果図を図 2-1-4 に示す。図 2-1-4 には各項目の分析結果で高い値を示す地点とその分析値を示した。Fe-濁度, Ni-濁度, Fe-Ni 相関図を図 2-1-5 に示す。

幾つかの試料および元素の測定値は負の値を示す。この原因は測定方法が分光光度法のため水の濁りが測定に影響を与えているためである。また, F および B の測定では, 妨害物質の存在が推定される。各項目の分析結果は次のとおりである。

- ・CN：ほとんどの試料が 0.005 mg/l 未満の非常に低い値を示す。河川水の WR03-01R, WR09-01R および WR10-01R の 3 試料のみが 0.005 mg/l を超える有意な値を示す。
- ・Cu：ほとんどの試料が 0.05 mg/l 未満の非常に低い値を示す。河川水の WR09-01R, WR10-01R および既存井戸水の WW14-01R の 3 試料のみが 0.05 mg/l を超える有意な値を示す。
- ・Fe：雨季の河川水で高い値を示し, 既存井戸水およびボーリング水では, 1 mg/l 未満の低い値を示す(図 2-1-5)。
- ・Cr⁶⁺：ほとんどの試料が 0.01 mg/l 以下の非常に低い値を示す。河川水の WR05-01R のみが 0.02 mg/l と有意な値を示す。
- ・Mn：ほとんどの試料が 0.05 mg/l 未満の低い値を示す。河川水の WR09-01R, 既存井戸水の WW05-01D, ボーリング水の WD01-02D, WD03-01R および WD06-02D の 5 試料が 0.05 mg/l を超える高い値を示す。
- ・Mo：ほとんどの試料が 1 mg/l 未満の低い値を示す。河川水の WR09-01R, WR10-01R および WR13-01R, 既存井戸水の WW12-01R の 4 試料が 1 mg/l を超える高い値を示す。
- ・B：ほとんどの試料が 1 mg/l 未満の低い値を示す。河川水の WR09-01R, WR15-02D, 既存井戸水の WW12-01R, WW14-01R, WW17-02D, WW19-02D, WW20-02D, ボーリング水の WD01-02D, WD03-01R の 9 試料が 1 mg/l を超える高い値を示す。
- ・F：36 試料が負の値を示し, アルミニウムが妨害物質になっていると推定される。アルミニウムは鉄と同様にラテライト化土壌の主要成分である。このため, 他の 15 試料は 0.03~0.58 mg/l の値を示すが, やや信頼性に欠ける。



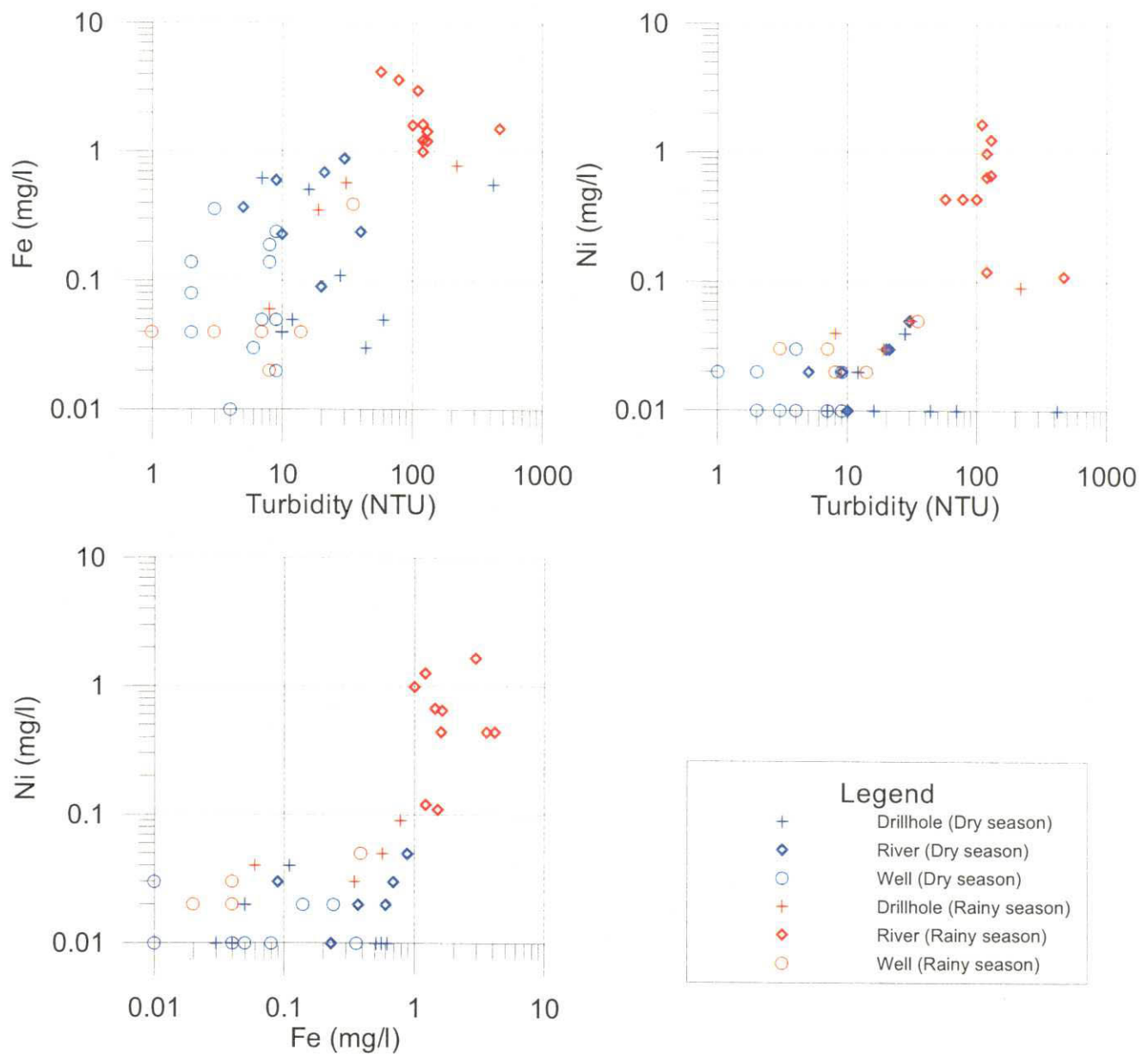


図2-1-5 Fe-濁度, Ni-濁度, Ni-Fe相関図

- ・ Zn : 既存井戸水の WW10-01R のみが、5.2 mg/l と非常に高い値を示すが、他の測定値はばらつきが大きく、0.00~0.90 mg/l である。なお、WW10-01R は故障のため利用されていない井戸である。
- ・ Cr : ほとんどの試料が 0.00 mg/l または 0.01 mg/l の値を示す。河川水の WR01-01R が 0.02 mg/l、既存井戸水の WW19-02D が 0.03 mg/l、WW20-02D が 0.10 mg/l と高い値を示す。
- ・ Ni : Fe と相関関係にあり、雨季の河川水で高い値を示し、既存井戸水およびボーリング水では、0.1 mg/l 未満の低い値を示す (図 2-1-5)。
- ・ As : ほとんどの試料が 0.2 mg/l (検出限界) 以下と低い値を示す。
- ・ COD : 全体にばらつきが大きく 1~8 mg/l の範囲の値を示す。大局的に、河川水が高い値を示し、既存井戸水が低い値を示す傾向があり、ボーリング水はばらつきが大きい。

1-2 河川流量調査

1-2-1 調査方法

河川流量調査は、雨季の調査 (2001 年 9 月) において、WR01, WR05, WR06~WR13 の 10 地点、乾季の調査 (2002 年 1 月) において WR15 の 1 地点で実施した (図 2-1-1)。調査位置は河川流域および水系の分布を考慮して決定した。各調査地点では、採取場所と採取試料の記載、写真撮影および GPS 測量を行った。【巻末の写真 4】

(1) 河川断面の測量

河川流向に直交するように検縄を張り川幅を測定後、川岸から等間隔に水深測定位置を設定し、測量ポールを立てそれぞれの測定点の水深を測量した。水深の測定間隔は川幅の程度により適宜、50cm 間隔、1m 間隔、2m 間隔のいずれかを採用した。

測量結果から、隣り合う 2 つの水深長を平行な上辺と底辺とする台形 (両岸では三角形) の面積を算出し、その和を河川断面積とした。

(2) 流速の測定

流速測定は広井電気式流速計を用いて実施した。この流速計は測定部と検知部に分かれており、測定部には 1.5m のスチール製棒の先端にプロペラが取り付けられており、検知部にはプロペラの回転数を計測する装置が取り付けられている。検知部では測定部のプロペラが 10 回転する毎にブザーが鳴る仕掛けとなっており、ブザー音の間隔をストップウォッチで測定し流速を測定した。測定は水深測定位置と同位置において行い、流速計のプロペラが水面と河底のほぼ中間点になるよう固定した。

(3) 流量の計算

流量の計算は以下の要領で行った。

- ・河川断面を各流速測定位置を中心とした台形（兩岸では三角形）に区切り，その面積を算出する。
- ・区切られた河川断面積に各流速測定値を掛けて，それぞれの断面流量を算出する。
- ・それぞれの断面流量を総和して河川流量を算出する。

1-2-2 調査結果

河川流量調査結果を図 2-1-6 と巻末資料 4 に，河川流量と流域面積の相関を図 2-1-7 に示す。図 2-1-7 の相関図上で，河川流量と流域面積には，ばらつきが大きいものの大局的には正の相関関係があるものと考えられる。

各流量測定点の調査結果は次のとおりである。

- ・ WR01 (Baoule 川支流，流域面積：288km²)
川幅 20m で最大水深 339cm，最大流速 0.056 (m/s) と川の流れは非常に遅い。流量は，1.8 (m³/s) と多い。
- ・ WR05 (Bagoé 川支流，流域面積：419km²)
川幅 7.2m で最大水深 29cm，最大流速 0.566 (m/s) で川の流れはやや遅い。流量は，0.72 (m³/s) と調査地域内では中程度の流量である。
- ・ WR06 (La Faye 川支流，流域面積：244km²)
川幅 5.25m で最大水深 15cm，最大流速 0.177 (m/s) で川の流れは遅い。流量は，0.06 (m³/s) と非常に少ない。
- ・ WR07 (La Faye 川支流，流域面積：651km²)
川幅 4.70m で最大水深 36cm，最大流速 0.634 (m/s) で川の流れはやや遅い。流量は，0.45 (m³/s) と調査地域内では中程度の流量である。
- ・ WR08 (Banifing 川支流，流域面積：697km²)
川幅 8.40m で最大水深 90cm，最大流速 0.492 (m/s) で川の流れは遅い。流量は，1.98 (m³/s) と多い。
- ・ WR09 (Banifing 川支流，流域面積：470km²)
川幅 5.70m で最大水深 40cm，最大流速 0.552 (m/s) で川の流れはやや遅い。流量は，0.69 (m³/s) と調査地域内では中程度の流量である。
- ・ WR10 (Banifing 川支流，流域面積：475km²)
川幅 14.10m で最大水深 125cm，最大流速 0.298 (m/s) で川の流れは遅い。流量は，2.24 (m³/s) と多い。
- ・ WR11 (Baoule 川支流，流域面積：187km²)
川幅 4.15m で最大水深 65cm，最大流速 0.732 (m/s) で川の流れはやや遅い。流量は，0.86 (m³/s) と調査地域内では中程度の流量である。
- ・ WR12 (Baoule 川支流，流域面積：92km²)
川幅 6.70m で最大水深 63cm，最大流速 0.231 (m/s) で川の流れは遅い。流量は，0.41 (m³/s) と調査地域内では中程度の流量である。

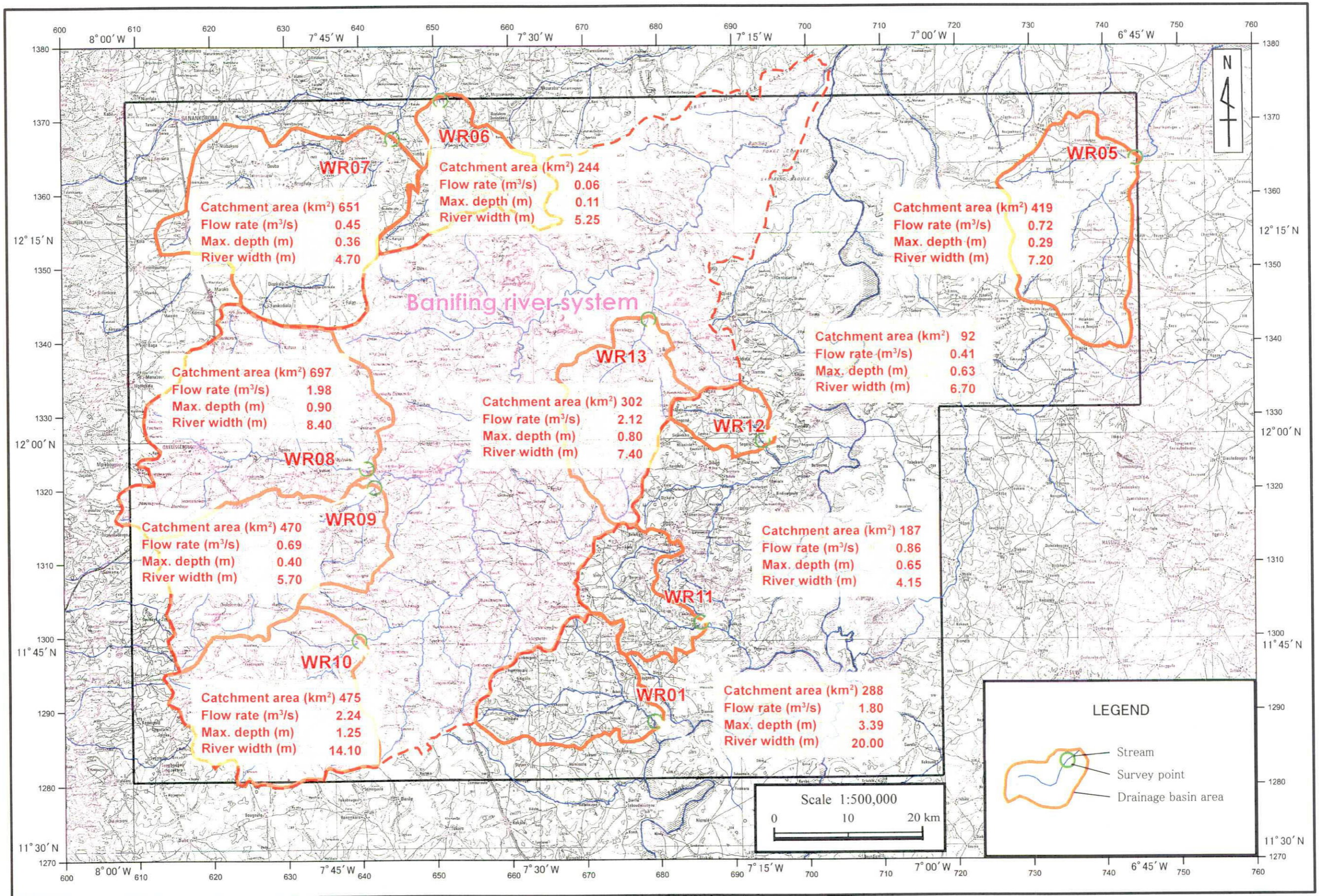


图2-1-6 河川流量调查结果图

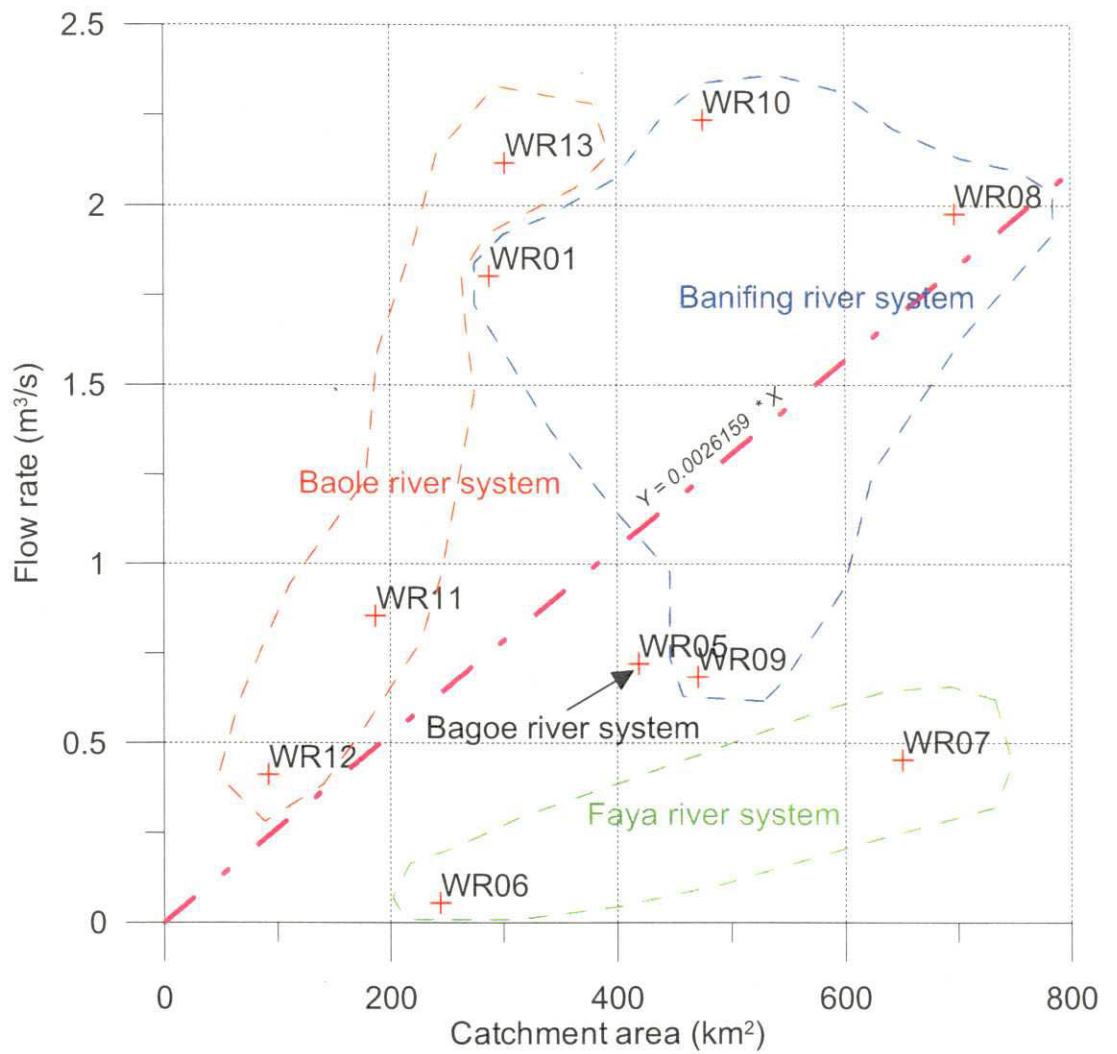


图2-1-7 河川流量と流域面積

- ・ WR13 (Banifing 川支流, 流域面積 : 302 km²)

川幅 7.40m で最大水深 80cm, 最大流速 0.632 (m/s) で川の流れはやや遅い。流量は, 2.12 (m³/s) と多い。

- ・ WR15 (Baoule 川本流)

川幅 56.00m で最大水深 220cm, 最大流速 0.020 (m/s) で川の流れは非常に遅い。流量は, 0.83 (m³/s) であり, 雨季のデータと比べると河川断面積が大きい割に非常に少ない。

1-3 気象調査

1-3-1 調査方法

第 1 年次の調査により, 調査地域中央付近の Dogo 集落に設置された気象観測システムから無人観測された温度, 湿度, 雨量, 風向, 風速, 日射量のデータを回収し, データ解析を実施した。観測は 2001 年 2 月 2 日に開始し, 2002 年 2 月 8 日にデータ回収を行った。データ解析には 2001 年 2 月 4 日 1 時から 2002 年 2 月 3 日 24 時までの 1 年分のデータを使用した。

気象観測システムは, 第 1 年次のキャンプ宿舎の横にある空き地に設置されており, 周囲の建物および樹木から 20m 以上離れている。温度湿度計は地上高 1.5m, 風向風速計および日射計は地上高 2.5m に設置されている。雨量計は地上高 10cm のコンクリート台座の上に設置されている。【巻末の写真 5】

システム構成は, 上記 5 種類のセンサー, 3 個のデータロガー, 2 個の電池ボックスからなる。Dogo では電力の供給が得られないため, 測定に必要な電源としてリチウム電池を使用している。測定は 1 時間毎に行われ, 各センサーで測定された値はデータロガーの内臓メモリに蓄えられる。保存された観測値をカード型フラッシュメモリで読み取り, コンピュータによりデータ解析を行った。

既存資料として, 第 1 年次の調査により得られた Bougouni の 1996~2000 年の気象データに加え, 本年度の調査により Bougouni の 2001 年のデータ, Dioila の 2000 年~2001 年のデータおよび首都 Bamako の 1996~2001 年の気象データを各観測所より入手した。データの種類は, 月別の平均最高気温, 平均最低気温, 平均最高湿度, 平均最低湿度および積算降水量, 1 日の最大降水量, 降水日数, 最頻度の風向 (Bougouni のみ) である。気象観測方法を巻末資料 5, Dogo の気象観測データを巻末資料 6 と 7, 既存気象観測データを巻末資料 8~10 に示す。

1-3-2 調査結果

(1) 気温, 湿度, 雨量の季節変化

Dogo 気象観測システムによる日最高最低気温, 日最高最低湿度および日降水量の年変化を図 2-1-8 に示す。

図 2-1-8 から, 雨季は 5 月上旬から 10 月上旬, 乾季は 10 月中旬から 4 月下旬と判定

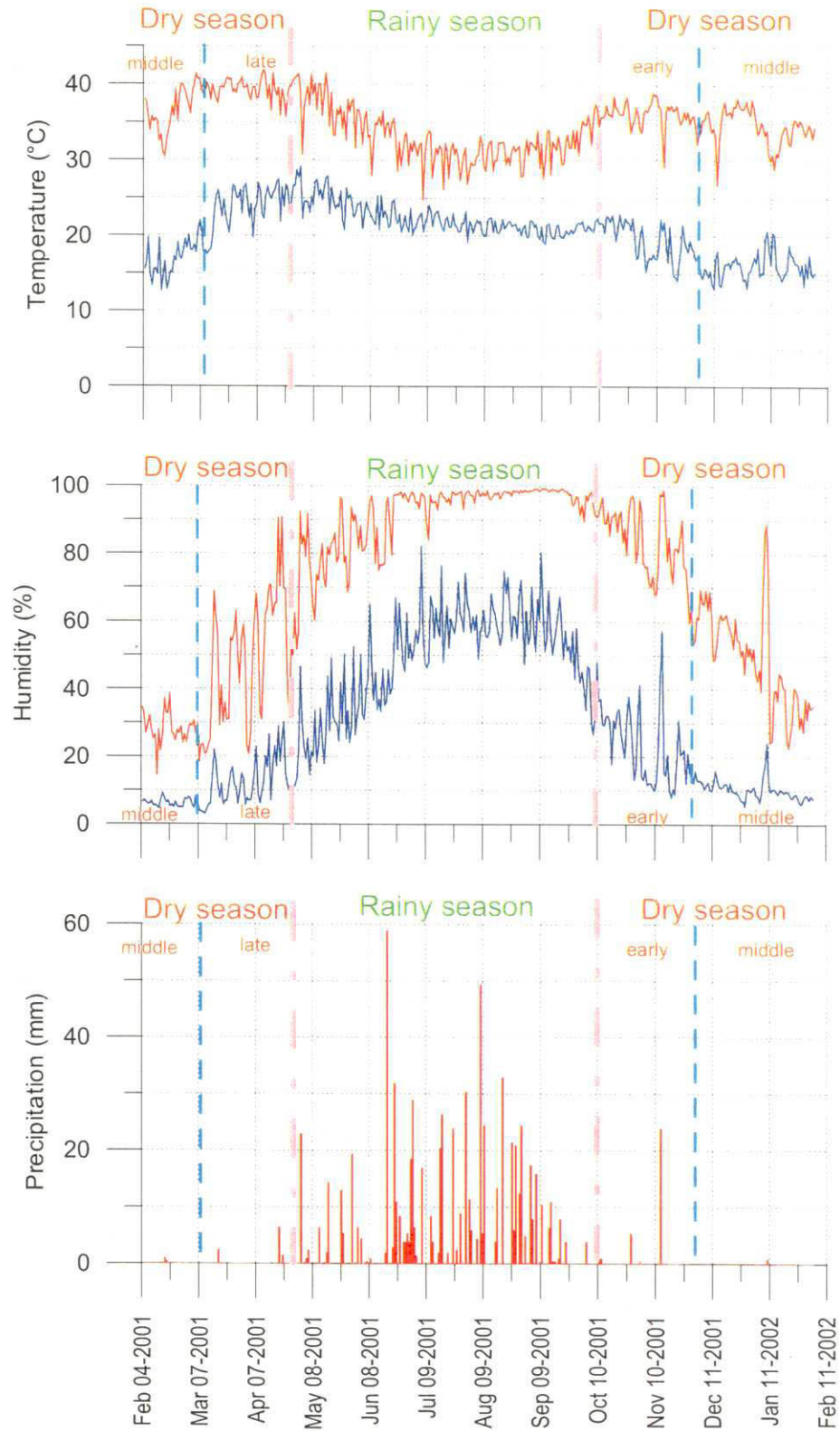


図2-1-8 日最高最低気温，日最高最低湿度および降雨量の年変化図 (Dogo)

される。雨季には気温が下がり、湿度が上がリ、年間の降水量のほとんどが集中する。一方、乾季には湿度が下がり、降水がほとんどなくなる。また、乾季は気温変化の特徴から前期（10月中旬から12月上旬）、中期（12月中旬から2月上旬）および後期（2月中旬から4月下旬）に区分することができる。前期では最高気温と最低気温の差が大きく、湿度は時期を追うごとに下がる傾向が認められる。中期では前期と同じく最高気温と最低気温の差が大きく、湿度は年間で一番低い。また中期は年間で最も平均気温が低い。後期では気温と湿度が徐々に上昇し、4月下旬には年間の最高気温を記録する。

乾季の中期（12月10日）、乾季の後期（4月10日）および雨季（8月19日）の気温と湿度の日変化を図2-1-9に示す。

気温・湿度の日変化は以下のように季節によって顕著に異なる（図2-1-9）。

① 乾季の中期（12月10日）

最高気温は16時に34℃、最低気温は7時に13℃を記録する。最高湿度は7時に61%、最低湿度は12時から16時に5%前後を記録する。気温の日変化は、7時に最低気温を記録し、7時から12時まで上昇する。12時から16時の間は最高気温付近を示し、ほとんど変化しない。16時を過ぎると24時まで徐々に下降する。湿度の日変化は、7時に最高湿度を記録し、7時から12時まで下降する。12時から16時の間は最低湿度付近を示し、ほとんど変化しない。16時を過ぎると24時まで徐々に上昇する。年間では、この時期が最も平均気温が低い。

② 乾季の後期（4月10日）

気温・湿度変化は乾季中期のパターンと同じであるが、乾季中期に比べると気温が全体に高く、湿度が全体に低い。

最高気温は15時に42℃、最低気温は6時に22℃を記録する。最高湿度は6時に15%、最低湿度は15時に5%を記録する。気温の日変化は、6時に最低気温を記録し、7時までほとんど変化しない。7時から15時まで上昇を続け15時に最高気温を記録する。15時から20時まで下降し、20時から21時に再度上昇し、21時を過ぎると24時まで徐々に下降する。湿度の日変化は、6時に最高湿度を記録し、7時までほとんど変化しない。7時から10時まで下降し、10時から18時まで最低湿度付近を示し、この間はほとんど変化しない。18時を過ぎると24時まで徐々に上昇する。年間では、この時期が最も平均気温が高く、平均湿度が低い。

③ 雨季（8月19日）

気温・湿度変化は乾季のパターンと著しく異なる。最高気温と最低気温との差が小さく、気温は乾季に比べると全体に低い。湿度は昼に低くなり、夜高くなる。また、湿度は乾季に比べると全体に非常に高い。

最高気温は14時に32℃、最低気温は18時に21℃を記録する。最高湿度は18時に98%、最低湿度は13時に58%を記録する。気温の日変化は、7時には低く、7時から上昇し、12時から14時に最高気温付近を示す。14時から18時までには下降し、18時

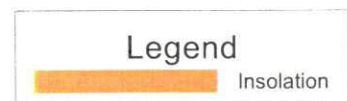
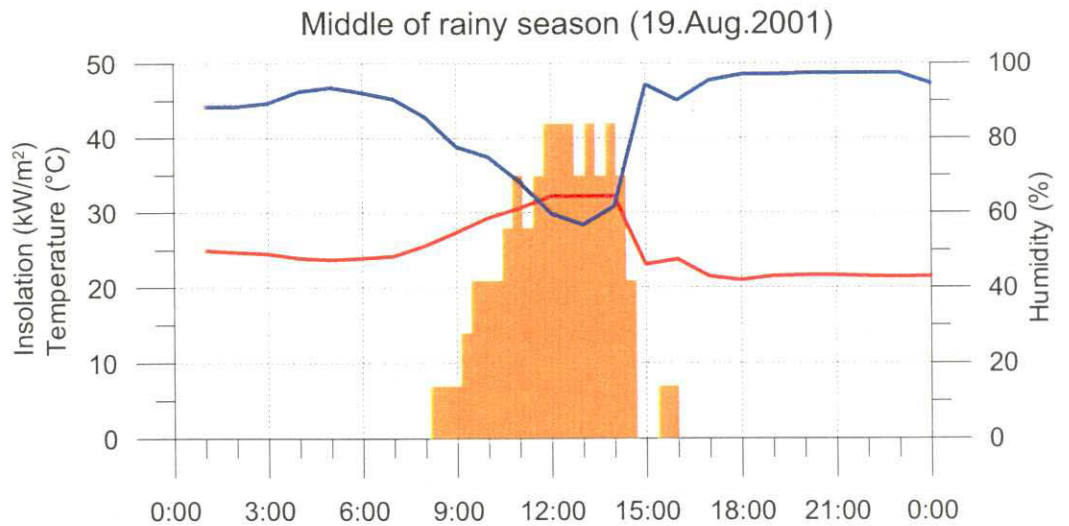
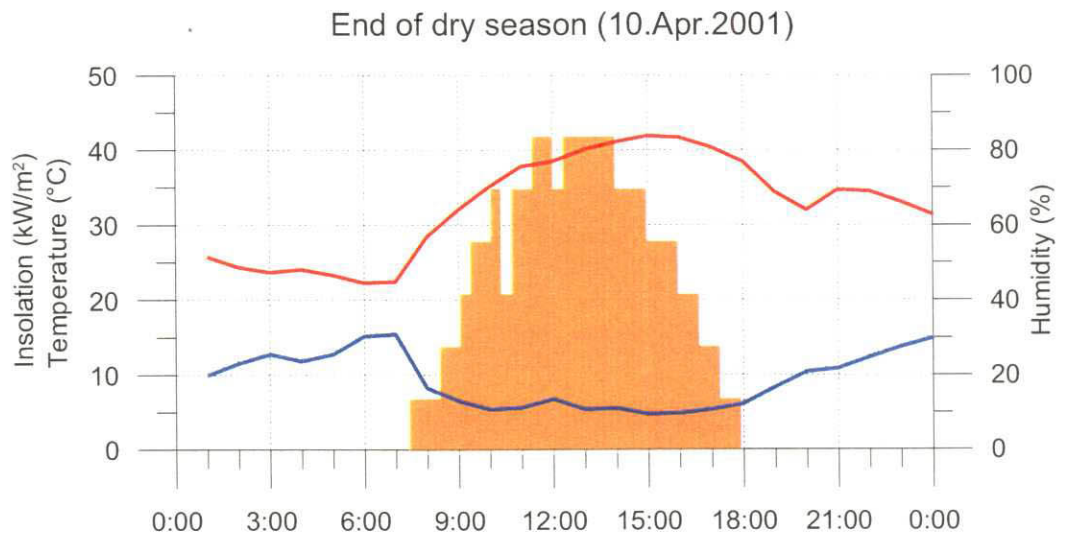
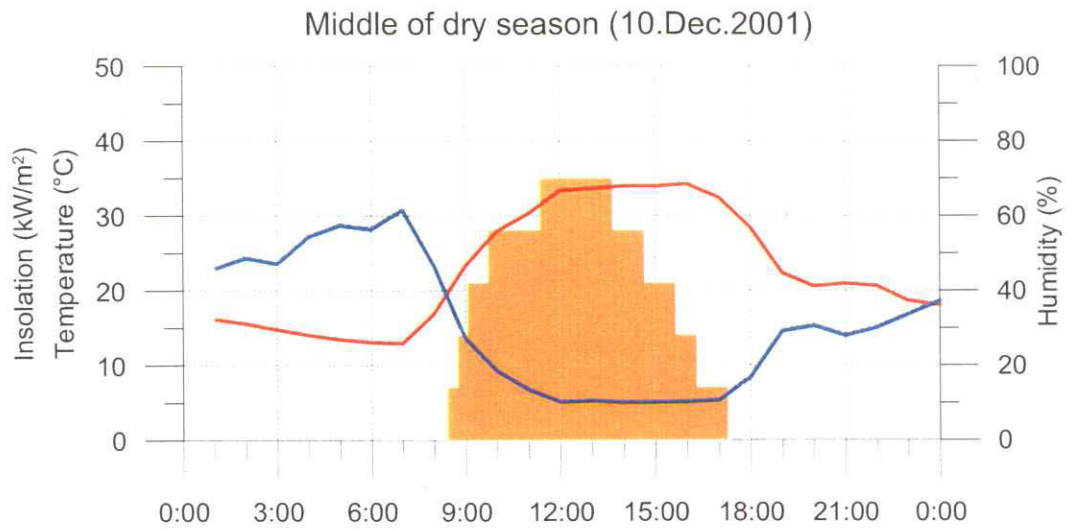


図2-1-9 Dogoの気温・湿度・日射量の日変化図と季節変化

に最低気温を記録する。18 時を過ぎるとほとんど変化しない。湿度の日変化は、7 時には高く、7 時から 13 時まで下降する。13 時に最低湿度を示し、13 時から 18 時まで上昇する。18 時に最高湿度を記録し、18 時を過ぎると湿度はほとんど変化しない。なお、この日は 15 時前後に降水があり、15 時に気温が急激に下降し、湿度が急激に上昇している。年間では、この時期が最も平均湿度が高い。

(2) 風向・風速, 日照量

Dogo 気象観測システムによって得られた風向・風速および日射量データを巻末資料 6 と巻末資料 7, Dogo における日射量の季節変化を図 2-1-9 に示す。なお, Dogo 気象観測システムによって得られる日射量データは連続計測の積算値ではなく, 測定時刻の瞬間値である。したがって, 一般の気象観測所の日射量データと絶対値による比較はできない。

Dogo における風向は, 北～東北東方向が定常的である。風速は乾季に弱く, 雨季に強い傾向が認められる。

日射量の日変化は以下のように季節によって異なる (図 2-1-9)。

① 乾季の中期 (12 月 10 日)

日射量変化は, 8 時過ぎから急激に立ち上がり, 12 時少し前にピークとなる。ピークは 14 時頃まで続き, 14 時を過ぎると徐々に下がり 17 時過ぎにはゼロになる。この時期は 12 時前後のピークにおける日射量が他の時期よりも低く, 1 日の総日射量も低い。

② 乾季の後期 (4 月 10 日)

日射量変化は, 7 時過ぎから徐々に立ち上がり, 12 時少し前にピークとなる。乾季の中期と同様にピークは 14 時頃まで続き, 14 時を過ぎると徐々に下がり 18 時過ぎにはゼロになる。この時期は 12 時前後のピークにおける日射量が他の時期よりも高く, 1 日の総日射量も高い。

③ 雨季 (8 月 19 日)

日射量変化は, 8 時から徐々に立ち上がり, 12 時少し前にピークとなる。乾季の中期と同様にピークは 14 時頃まで続き, 14 時を過ぎると下がる。この日は 15 時頃に降水があり, 15 時頃に日射量がゼロになる。16 時前に日射量が少し回復するが, 16 時を過ぎると日照量はゼロとなる。この時期は降水時に日射量が下がり, 1 日の総日射量も低くなる。

(3) 調査地域と周辺都市の気象観測データの比較

Dogo, Bougouni, Bamako および Dioila の気象データの比較を表 2-1-1, 月平均最高最低気温・湿度の年変化図を図 2-1-10, 月別降水量・降水日数の年変化図を図 2-1-11 に示す。

図 2-1-10 の各地の気温変化では, Dogo, Bougouni および Bamako は, ほぼ同様のパ

表2-1-1 Dogo-Bougouni-Bamako-Dioilaの気象データの比較

Temperature Maximum

Station	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dogo	2001		35.9	39.6	39.4	37.0	33.4	30.6	30.8	31.9	35.9	36.2	35.6
	2002	33.5											
Bougouni	2000	35.3	35.4	38.8	38.8	36.1	32.7	31.1	30.1	31.6	32.9	34.7	34.4
	2001	35.2	36.5	39.5	39.1	37.3	33.6	31.2	31.0				
Bamako	2000	33.4	33.7	37.9	39.7	37.4	33.5	31.2	30.3	32.0	33.4	35.0	33.3
	2001	33.6	35.1	39.5	39.5	38.1	34.1	31.0					
Dioila	2000										37.8	37.0	35.2
	2001	35.5	37.8	40.5	42.0	41.5	39.5	34.0	34.5	37.8	38.5	38.5	37.5

Temperature Minimum

Station	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dogo	2001		16.5	22.2	25.3	24.8	22.7	21.9	21.2	20.8	21.2	18.1	15.5
	2002	16.6											
Bougouni	2000	19.2	17.1	21.4	25.2	24.4	22.5	22.0	21.0	21.6	21.4	17.8	14.7
	2001	15.6	17.3	22.2	24.9	24.8	22.5	22.4	21.9				
Bamako	2000	19.8	18.8	22.7	25.6	25.4	22.7	22.0	21.1	21.4	20.6	17.7	16.1
	2001	16.3	19.0	22.7	24.9	25.5	23.6	22.2					
Dioila	2000										18.7	14.0	12.2
	2001	11.6	13.4	17.2	20.0	19.8	20.5	19.8	20.1	19.9	18.5	15.2	14.8

Humidity Maximum

Station	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dogo	2001		27.9	38.7	55.4	80.4	89.3	96.0	97.8	98.1	91.1	78.5	58.0
	2002	42.0											
Bougouni	2000	62.2	38.6	47.0	77.0	85.2	92.3	94.0	95.5	94.2	93.6	83.4	63.2
	2001	45.6	37.2	52.1	67.3	83.8	90.6	93.7	95.0				
Bamako	2000	50.0	27.0	34.0	62.0	75.0	91.0	96.0	99.0	99.0	96.0	75.0	50.0
	2001	42.0	30.0	37.0	56.0	75.0	88.0	97.0					
Dioila	2000										83.0	62.0	53.0
	2001	44.0	37.0	38.0	47.0	71.0	85.0	94.0	96.0	96.0	79.0	64.0	52.0

Humidity Minimum

Station	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dogo	2001		6.3	9.4	15.1	30.1	45.2	59.4	60.6	57.1	31.6	18.6	11.0
	2002	10.1											
Bougouni	2000	23.5	11.6	13.7	29.6	42.6	53.7	59.3	62.6	58.4	48.4	27.1	16.9
	2001	12.9	11.1	17.4	23.1	37.4	51.4	60.8	63.0				
Bamako	2000	20.0	9.0	11.0	19.0	31.0	47.0	58.0	64.0	59.0	40.0	17.0	12.0
	2001	14.0	11.0	9.0	14.0	29.0	46.0	60.0					
Dioila	2000										39.0	21.0	17.0
	2001	14.0	12.0	18.0	23.0	36.0	59.0	70.0	72.0	66.0	38.0	26.0	20.0

Precipitation (amount)

Station	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dogo	2001		1.5	2.5	8.0	87.5	164.0	183.5	242.5	83.5	11.5	24.5	0.0
	2002	1.0											
Bougouni	2000	0.8	0.0	2.2	41.9	103.9	182.6	235.5	343.4	162.7	137.5	30.3	0.0
	2001	0.0	0.0	0.0	30.4	52.7	217.5	265.7	263.7				
Bamako	2000	1.6	0.0	0.1	22.5	41.6	103.2	246.5	223.8	128.5	43.2	11.2	0.0
	2001	0.0	0.0	0.0	27.2	38.5	139.5	213.3					
Dioila	2000										47.6	4.5	0.0
	2001	0.0	0.0	0.0	2.1	53.4	163.9	289.7	131.8	119.3	0.5	21.2	0.0

Precipitation (day)

Station	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dogo	2001		2	1	2	9	15	14	15	11	4	2	0
	2002	1											
Bougouni	2000	2	0	2	6	10	14	17	21	11	8	2	0
	2001	0	0	0	4	10	15	19	19				
Bamako	2000	1	0	1	4	5	13	19	23	12	9	2	0
	2001	0	0	0	3	11	13	18	17				
Dioila	2000										9	1	0
	2001	0	0	0	1	7	14	19	17	14	1	1	0

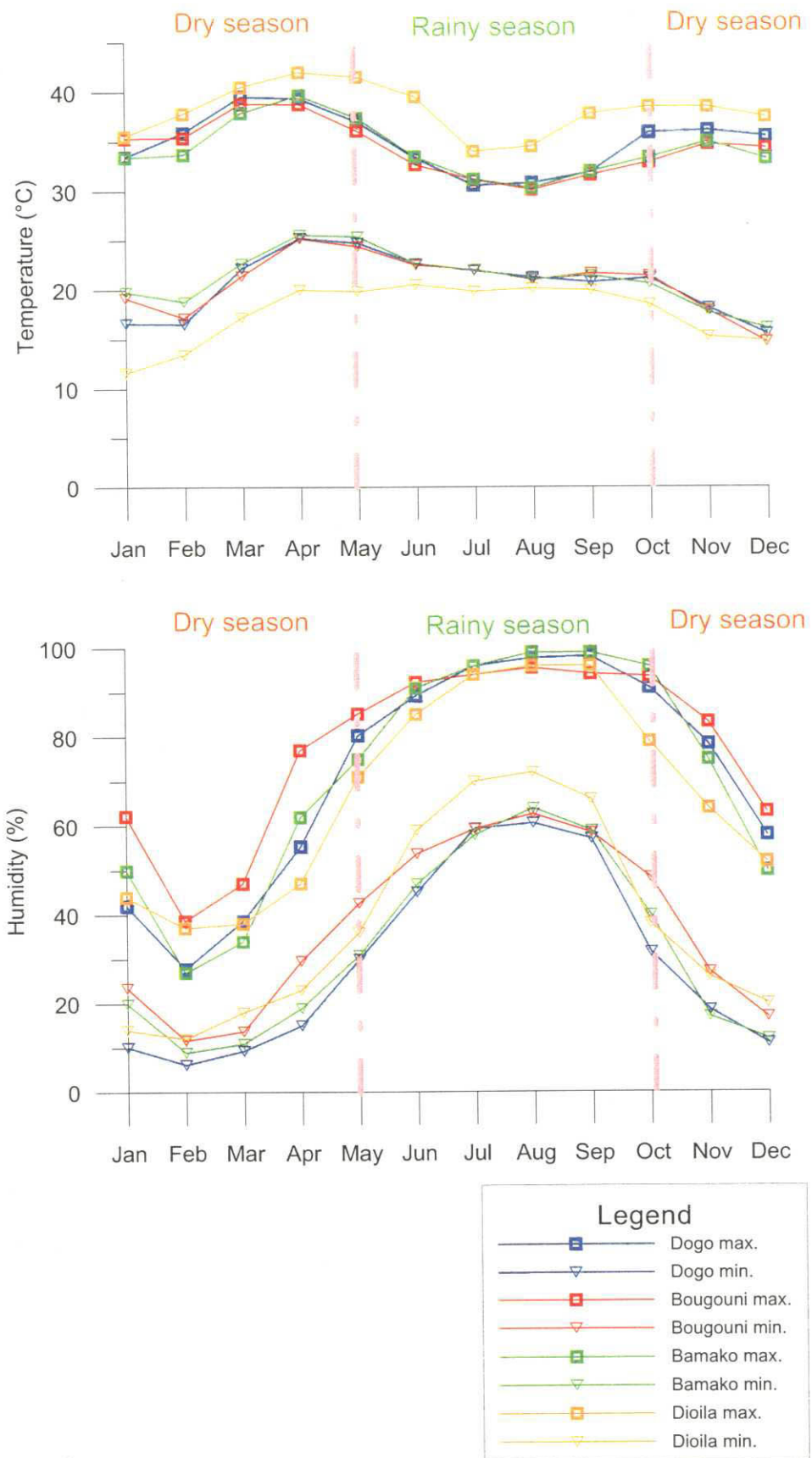


図2-1-10 月平均最高最低気温・湿度の年変化図 (Dogo-Bougouni-Bamako-Dioila)

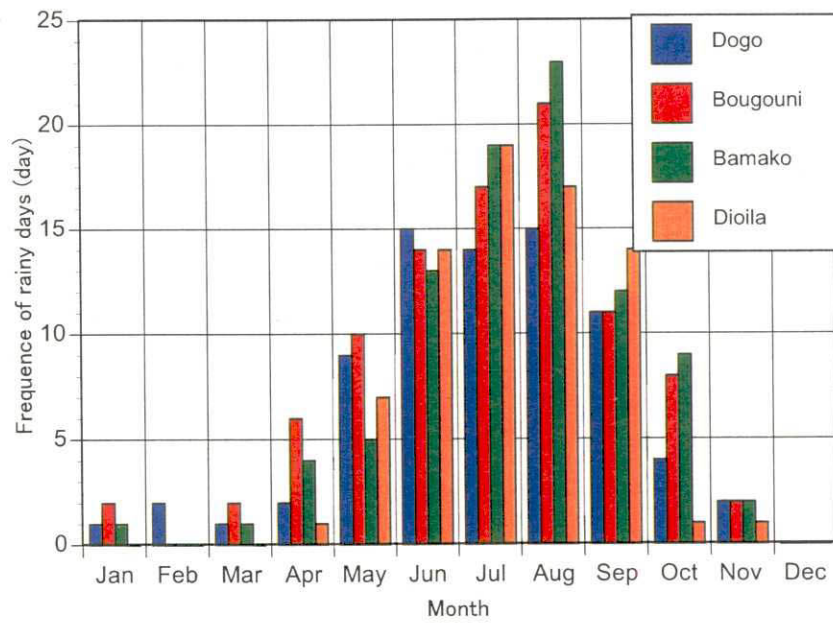
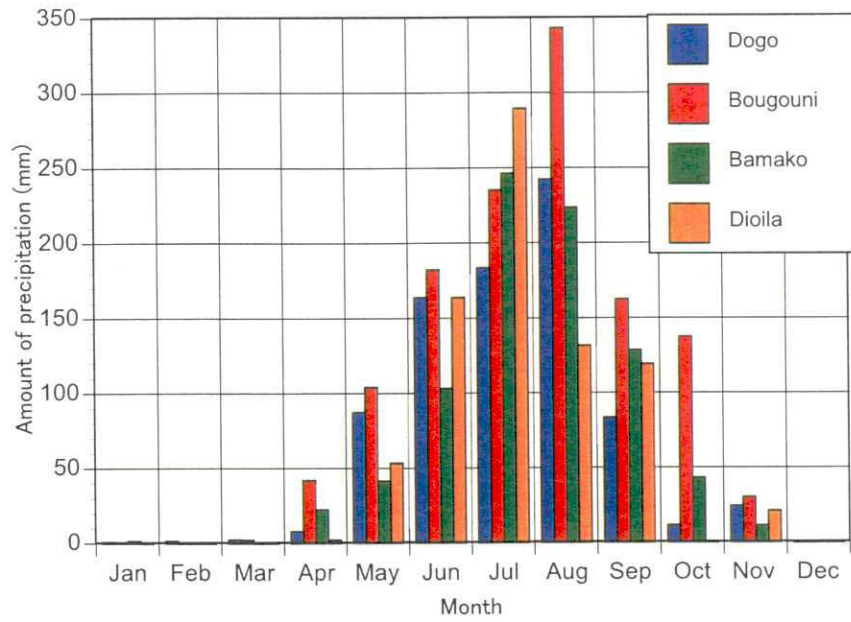


図2-1-11 月別降水量・降水日数の年変化図 (Dogo-Bougouni-Bamako-Dioila)

ターンを示すのに対し、Dioila は全体に最高気温が高く、最低気温が低いパターンを示す。湿度変化では、Dogo および Bamako は、ほぼ同様のパターンを示すのに対し、Bougouni は乾季後半において最高湿度が高く、Dioila は雨季における最低湿度が他の地区よりも高い。

年間総降水量は Bougouni, Bamako, Dogo, Dioila の順に多い。図 2-1-11 の各地の降水量から、Dogo および Bougouni は 8 月にピークがあるのに対し、Bamako および Dioila は 7 月にピークがある。また、降水日数を見ると Dogo, Bougouni および Bamako は 8 月にピークがあるのに対し、Dioila は 7 月にピークがある。

以上のような若干の違いが認められるものの、調査地域内の Dogo と調査範囲の近傍にある各都市の気象データは、ほぼ同様の傾向を示しており、ほぼ同様の季節変化を繰り返しているものと思われる。

1-4 水収支

1-4-1 解析方法

水収支解析に使用する降水量、蒸発散量、流出量および浸透量の計算方法と解析方法は次のとおりである。

・水収支式

一般によく使われている気候学的水収支は次式で表現される。

$$P = E + R \quad \dots \dots \dots \text{(式 1)}$$

ここで、 P : 降水量, E : 蒸発散量, R : 流出量である。

さらに期間を 1 年間に限り、地下水をファクターに加えると次式のようなになる。

$$P = E + R + I_g \quad \dots \dots \dots \text{(式 2)}$$

ここで I_g : 地下水増加量である。

本調査では式 2 を利用し、水収支計算を実施した。

・水収支計算対象範囲

ある程度広い範囲を有し調査地域内で閉じた水系である Banifing 川水系を水収支計算対象範囲とした。この水系の流域面積は 4,631km²である (図 2-1-6 参照)。

・降水量 (P) の計算

降水量は、Dogo 気象観測システムの日別観測データから月別積算値を算出し、この値と Bougouni, Bamako および Dioila の各測候所の月別観測データを算術平均して月別データとして算出した。

・蒸発散量 (E) の計算

蒸発散量の推定には、気候学、水文学の分野で広く適用されているソーンズウェイト法 (Thorntwaite method) を用いた。この方法は気温と可照時間を変数とした経験モデルである。

$$ETp = 16 \left(\frac{10Ti}{I} \right)^a \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{1}{30} \right) \dots \dots \dots (式 3)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{Ti}{5} \right)^{1.514} \dots \dots \dots (式 4)$$

$$a = (492390 + 17920I - 77.1I^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6} \dots \dots (式 5)$$

ここで、 ETp : 蒸発散位 (mm/day), Ti : 月平均気温 (°C), N : 月平均可照時間 (h), I : 熱示数, a : 経験定数である。

・流出量 (R) の計算

本調査において実施した河川流量調査の実測値と各水系の流域面積 (図 2-1-7 参照) から原点を通る回帰直線を引き、得られた式 (式 6) に Banifing 川水系の流域面積を代入し流出量を計算した。なお、WR15 地点の流速測定値は乾季の調査 (2002 年 1 月) で得られたデータであり、系外からの流入量が多い Baoule 川本流のデータであるため、回帰計算の対象から除外した。

$$y = 0.0026159x \dots \dots \dots (式 6)$$

ここで、 x : 流域面積 (km²), y : 流量 (m³/s) である。

ここで計算された流出量は、雨季の調査 (2001 年 9 月) によるデータである。現地調査の経験と気象データから河川に流水があると推定される期間は 5 月~11 月で、12 月~4 月にはほとんど流水がないと推定される。本解析では以下の条件を仮定し、月別の流出量を計算した。

- ① 12 月~4 月: 河川流水は無い。
- ② 7 月~8 月: 9 月の河川流量と等しい。
- ③ 6 月, 10 月: 9 月の河川流量の 10 分の 1。
- ④ 5 月, 11 月: 9 月の河川流量の 100 分の 1。

・地下水増加量 (IG) の計算

式 2 において、降水量 (P), 蒸発散量 (E) および流出量 (R) が上述の方法により算出されたので、下式 (式 7) から地下水増加量 (IG) を計算した。

$$IG = P - (E + R) \dots \dots \dots (式 7)$$

・ 降水時の浸透量

降水時の浸透量は、事実を把握することが非常に困難で、また実測データが無い。山本(1983)では、降水時の浸透量は1 (mm/day) が適当とされている。本解析においても、浸透量を1 (mm/day) と仮定し、月別の降水日数をこの値に掛けて算出した。

・ 蒸発散位 (ET_p) の補正

水収支モデル計算に使用した蒸発散位 (ET_p) は、地表面が湿潤で飽和している状態での蒸発散量である。実際には、計算対象範囲全域でこのような状態は有り得ず、蒸発散位 (ET_p) そのままの値をモデル計算に適用すると、水収支において蒸発散量が過剰となる。このため、計算機上で月別の地下水位変化量の和 (年間地下水位変化量) がゼロに最も近くなる係数を蒸発散位に掛け、蒸発散量 (E) とした (式8)。

$$E = 0.445ET_p \quad \dots \dots \dots \text{(式8)}$$

1-4-2 解析結果

上述の方法で計算された水収支パラメータを使用して水収支フローチャートを作成した。水収支フローチャートを図 2-1-12 に示し、水収支解析結果を巻末資料 11 に示す。

(1) 雨季の水収支

雨季の8月には、月間 $1,090 \times 10^6 \text{t}$ の降水があり、その大部分の $1,002 \times 10^6 \text{t}$ が地表面を表流水として流れ、降水時に浸透する量は $88 \times 10^6 \text{t}$ で、表流水がゆっくりと地面に浸透する量は $788 \times 10^6 \text{t}$ である。河川から水系外に流出する量は $32 \times 10^6 \text{t}$ 、地面および植物から蒸発散される水の量は $270 \times 10^6 \text{t}$ である。このように雨季では河川による流出および蒸発散による水の損失量に対して、降水による水の供給量が上回る。この結果、地下水位は月間 17cm 上昇する。

(2) 乾季の水収支

乾季の4月には、月間 $86 \times 10^6 \text{t}$ の降水がある。降水時の浸透量は $15 \times 10^6 \text{t}$ で、残りの水はすぐに蒸発してしまう。地面からの蒸発量は $518 \times 10^6 \text{t}$ 、これを含めた蒸発散量は $604 \times 10^6 \text{t}$ である。河川には流水がないため水系外への水の流出は無い。このように乾季では降水による水の供給量に対し、蒸発散による水の損失量が上回る。この結果、地下水位は月間 11.2cm 下降する。

(3) 年間水収支モデル

月別水収支計算結果から年間水収支モデルを作成した。ここで、河川水、たまり水、植物に含まれる水分および土壌に含まれる水分など地下水面より上の水を表層水と定義する。

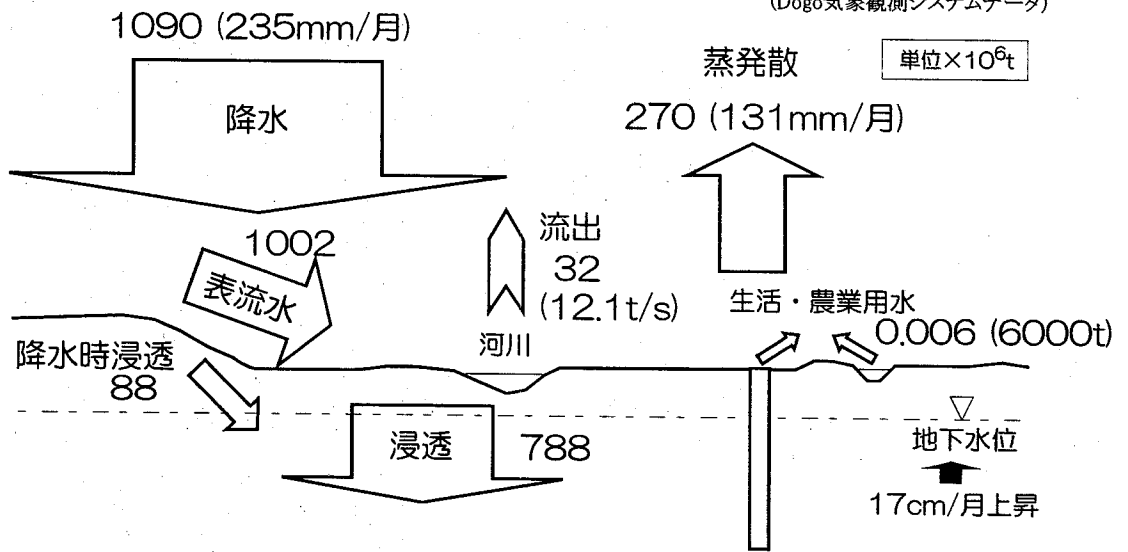
年間 $4,230 \times 10^6 \text{t}$ の降水による水の供給があり、河川による系外流出 $100 \times 10^6 \text{t}$ と地表からの蒸発散 $4,130 \times 10^6 \text{t}$ による水の損失がある。降水から蒸発散に至る経路を月別水収支計算から得られた地下水増加量から推定すると、地表からの浸透による地下水への水の

雨季 (8月)

対象面積
4631km²

最高気温(°C)	最低気温(°C)	最高湿度(%)	最低湿度(%)
30.8	21.2	97.8	60.6

(Dogo気象観測システムデータ)

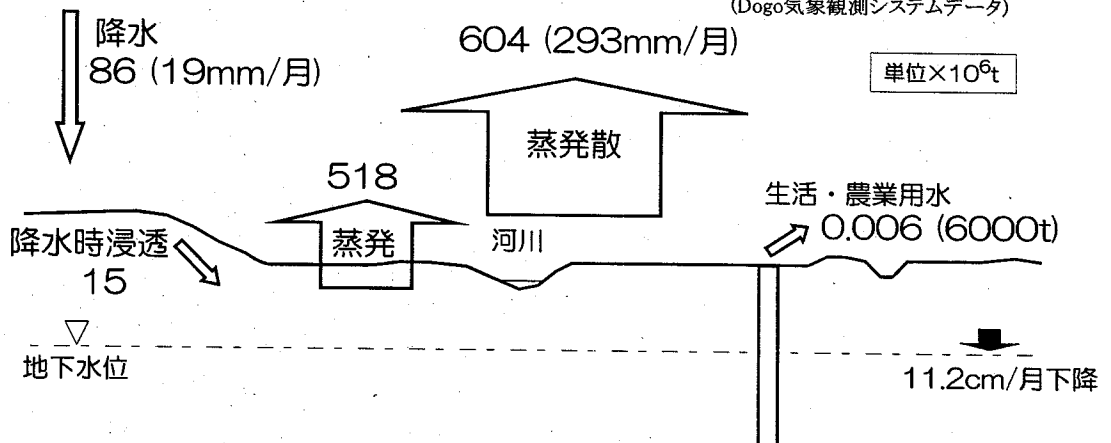


乾季 (4月)

対象面積
4631km²

最高気温(°C)	最低気温(°C)	最高湿度(%)	最低湿度(%)
39.4	25.3	55.4	15.1

(Dogo気象観測システムデータ)



年間モデル

対象面積
4631km²

単位×10⁶t

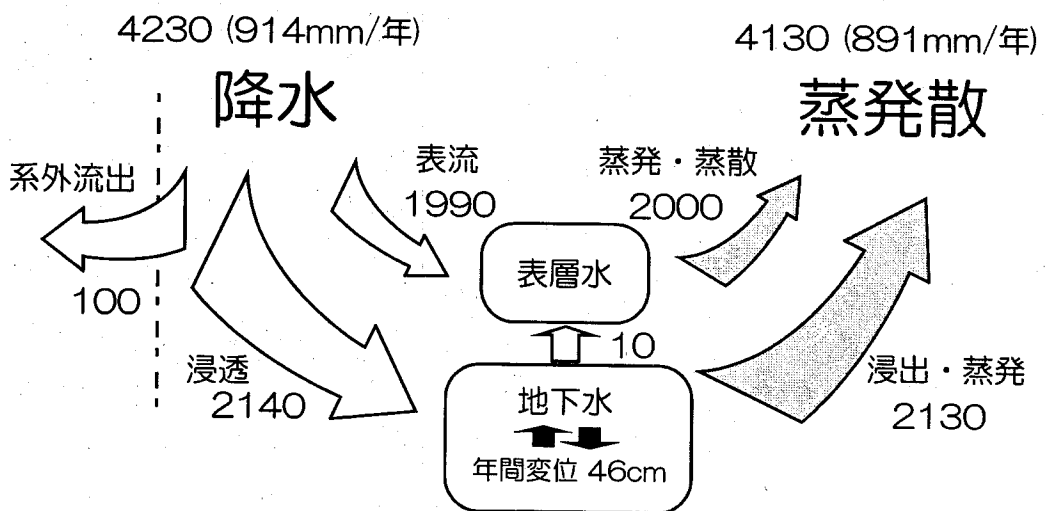


図2-1-12 水収支フローチャート

供給は $2,140 \times 10^6 \text{t}$ 、地下水からの浸出・蒸発による地下水からの水の損失は $2,130 \times 10^6 \text{t}$ 、地下水から表層水への水の移動は $10 \times 10^6 \text{t}$ で、年間の地下水位の変位量は 46cm である。表層水には地表の流水による $1,990 \times 10^6 \text{t}$ と地下水からの浸出による $10 \times 10^6 \text{t}$ の水の供給があり、蒸発・蒸散による $2,000 \times 10^6 \text{t}$ の水の損失がある。ここで年間での地下水から表層水への水の供給は $10 \times 10^6 \text{t}$ と小さい値を示すが、雨季と乾季の水収支で示したとおり、表層水と地下水の間には大量の水のやり取りがある。すなわち、雨季には大量の水が表層水から地下水へ供給され、乾季には逆に地下水から表層水へと供給される。これらが相殺されて、年間での地下水から表層水への水の供給は小さい値を示す。

1-5 考察

(1) 河川水と地下水の水質

調査地域内では、雨季に降水があり河川に流水が認められるが、乾季には降水がほとんどなく乾燥するため、ほとんどの河川に流水が認められない。このため、雨季における河川水と地下水の水質データを比較する目的で水質測定値相関図を作成した(図 2-1-13)。また、比較のため首都バマコに滞在中に採取した雨水の水質測定結果を巻末資料 2 に示す。

河川水は $\text{pH}6.4 \sim 7.6$ を示し、井戸水は $\text{pH}6.9$ 以下を示す。濁度は河川水が高く井戸水が低い。導電率は河川水が低く井戸水が高い。溶存酸素量は河川水が高く井戸水が低い。このように、雨季においては河川水と井戸水の水質に大きな違いが見られる。また、河川水は濁度以外のパラメータで雨水に近い値を示す。これは雨季には雨水がそのまま河川に流入し、地表を流れるためであると考えられる。

第 1 年次および第 2 年次の水質分析結果を総合すると、試料の種類ごとに次の傾向が認められる。

・河川水

雨季に採取された河川水の多くが Fe あるいは Ni に富む傾向がある(図 2-1-5 参照)。これは河川水の混濁物質にラテライト土壌が多く含まれているためと考えられる。

WR03-01D, WR09-01R および WR10-01R は CN が高い値を示す。特に、WR09-01R と WR10-01R は CN のほか Cu, Mn, Mo などの元素が高い値を示す。これらの試料はいずれも上流域内に国道 7 号線が含まれている。国道 7 号線の存在がこれらの元素の高い値に起因している可能性がある。

・既存井戸水およびボーリング水

既存井戸水試料のほとんどが清澄で問題となるような重金属の高い値は少ない。

WW10-01R では、Zn が高い値を示す。これは井戸の劣化が原因であると考えられる。

WW05-01D, WW12-01R, WW14-01R, WW17-02D, WW19-02D および WW20-02D では、B, Mo, Mn が高い値を示す。これらの元素は肥料に用いられることが知

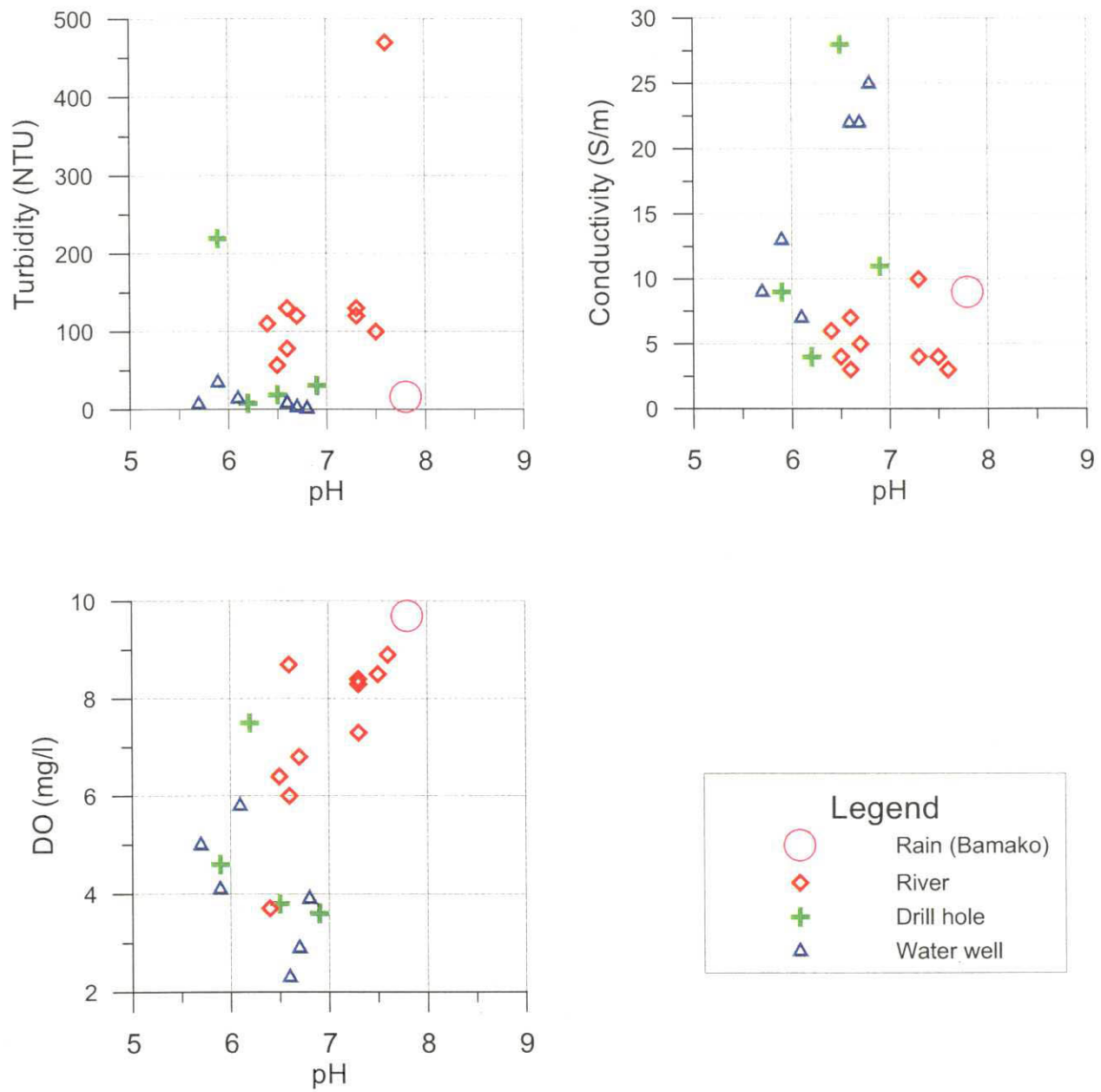


図2-1-13 雨季における水質測定値相関図

られている。調査地域内では全域で農業が盛んに行われており、農業で使用された肥料からこれらの元素が地下水を汚染した可能性がある。

(2) 地下水水質の時系列変化

本調査では地下水水質のモニタリングを目的に、ボーリング孔 MJMB-E1, E2, E3 の3孔において、第1年次乾季(2001年1月)、第2年次雨季(2001年9月)および第2年次乾季(2002年1月)の3時期からの水試料(WD01-01D,-01R,-02D, WD02-01D,-01R,-02D, WD03-01D,-01R,-02D)を採取し、水質測定および簡易水質分析を実施した。

これら3孔の水位は、MJMB-E1とMJMB-E3で浅く(7m以浅)基盤岩より上の土壤中にあり、MJMB-E2で深く(24m前後)基盤岩中にある。水位の季節変化は、MJMB-E1とMJMB-E3で雨季に水位が上がり、乾季に水位が下がる。一方、MJMB-E2では、雨季・乾季とも水位の変化はほとんどない。各井戸の立地は、MJMB-E1がMeridiala南西はずれの平地、MJMB-E2がDiamou南方丘陵地斜面、MJMB-E3がSagala南東はずれの河川近傍である。

ボーリング孔の水質の時系列変化を図2-1-14に示す。

pH、水温、溶存酸素量、Niは3孔で時系列変化が認められる。pHと溶存酸素量は乾季に値が上がり、雨季に値が下がる。一方、水温とNiは雨季に値が上がり、乾季に値が下がる。水温に関しては月の平均気温(1月:24.8℃, 9月:26.3℃)の変化を反映しているものと考えられるが、pH、溶存酸素量およびNiの時系列変化の原因は不明である。この4種以外の水質パラメータでは3孔共通の時系列変化は認められず、3時期一定の値を示すパラメータはない。雨季においては地表からの水の供給があり、乾季においては水の蒸発がある。この地下水の動きがこれらのパラメータの変動に寄与している可能性がある。また、各パラメータの変化に一定性が認められないのは各井戸の個性(立地条件、地盤の透水性、地質、風化、ラテライト化の程度など)によるものと考えられる。

(3) 流量調査の問題点

流量調査の結果、河川流量と流域面積との間にはばらつきは見られるが弱い正の相関関係が認められる(図2-1-7)。また、水系ごとに異なる傾きをもって相関している可能性がある。実際には、調査地域の河川流量は降水に非常に敏感で、前日あるいは当日に降水があった日はすぐに増水し流量が増す。本流量調査は、制限のある条件下で実施されているため、データ精度に問題がある。流量調査の精度を上げるためには、多地点の同時観測、同一地点の連続観測や調査地点の追加などが必要である。

(4) 水収支計算における問題点

本調査では、現地調査により得られた気象データ、河川流量データ、ボーリング孔モニタリングデータなどの実測データと既存データを組み合わせることによって、調査地域内の水収支を計算し、概略的であるが定量的な水収支モデルを作成した。水収支モデルお

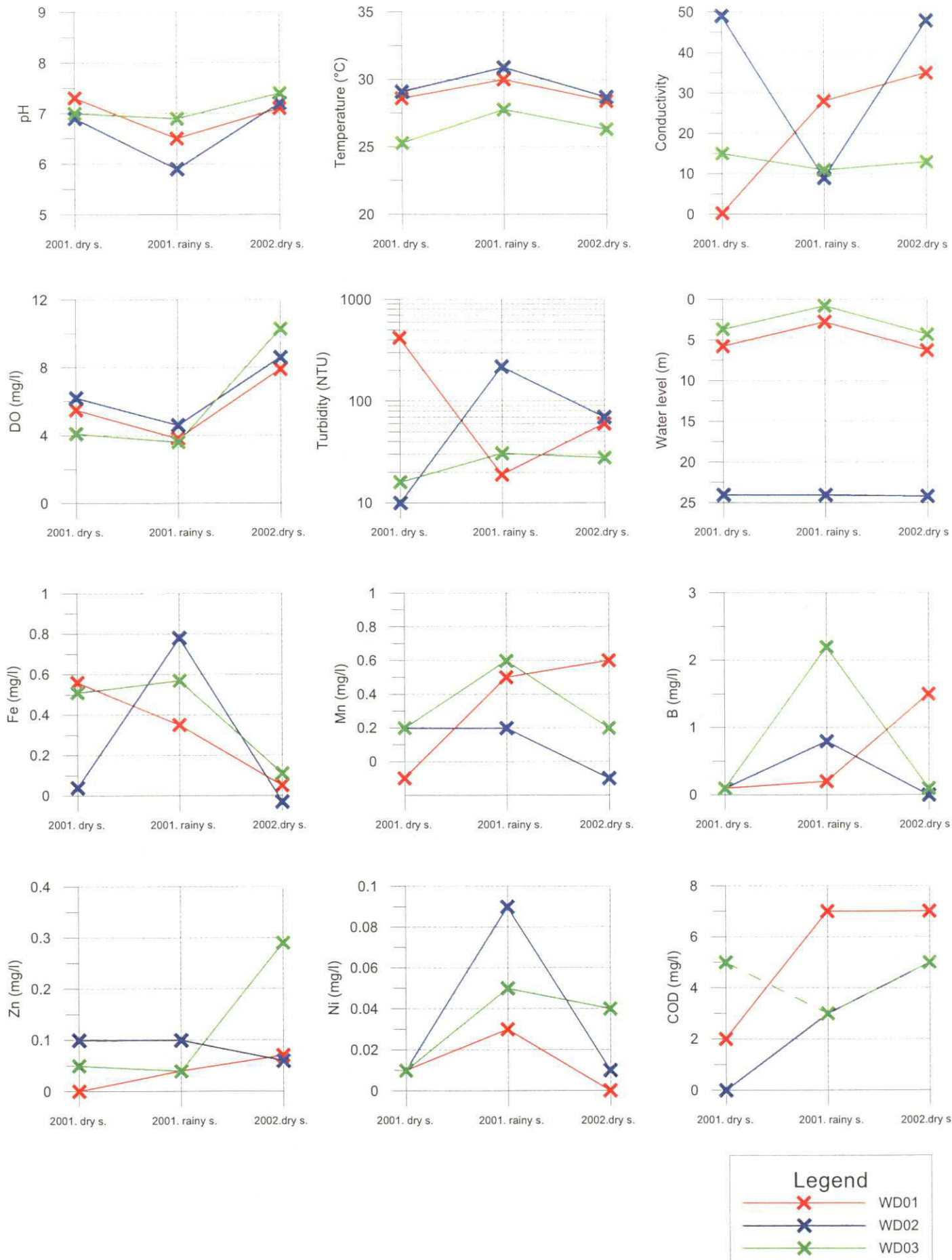


図2-1-14 地下水水質の時系列変化図