

現地調査と衛星リモートセンシングによる黄河下流域の断流と洪水に起因する環境変化の解析

Analysis of environment variation based on stream cease and floods
in the lower course of The Yellow River in China by field survey and satellite remote sensing

後藤恵之輔* 陳 運明* 前間英一郎** 藤田 究***
Keinosuke Gotoh* Yunming CHEN* Eiichirou MAEMA** Kyu FUJITA***

ABSTRACT : In this paper the authors describe some analyses and considerations on problems related to environmental variation based on stream cease and floods in the lower course of The Yellow River in China. Few years ago there were some environmental problems in this area including droughts, floods and soil erosion. But stream cease of The River was recorded in 1972 for the first time. At first the authors have reviewed the history of The River through the available books and some records, and particularly considering the present situation in regard with environmental problems encountered. The second step, a field survey was carried out in order to investigate the stream cease and floods by using satellite data. The field survey of the stream and floods of The River was carried out on November 1996 in which a field testing of the soil was carried out. Some interviews took place with the native people and pictures were taken. Furthermore, soil samples were brought from the Delta of The River for some mechanical and physical analysis in the laboratory. Finally, some proposals are suggested in order to find the relationship between the stream cease and floods.

KEYWORDS : Yellow River, Stream cease, Flood, Field survey, Satellite remote sensing

1. はじめに

中国の史書の記述などから統計をとれば、しばしば巨大な竜にたとえられる黄河は、過去二千年余りの間に大小1593回の洪水を起こしている。これは、平均して3年に2回氾濫していることになる¹⁾。たびたび河川災害が起こる黄河の下流域について、著者らは人工衛星データにより環境モニタリングを行い、河口のデルタ地帯の地形の変化に気付いた。1970年代後半から1980年代の半ばにかけて、劇的に現河道の最先端部の地形が変化している。これは、はじめ洪水の影響による土壌流失が原因で起こっているものと考えられたが、経済開放後、自然災害による以前の災害とは違う何らかの変化が起こっているようである。

著者らは、1996年6月25日付けの新聞²⁾で黄河下流域に起こっている断流現象を知り、文献やWWW検索(中国水資源及び水利水電工程建設省)資料から、その現象や記録について調べた。1972年に初めて中国の山東省・利津地点で記録された黄河の断流現象は、近年次第に増えつつあり、文字どおり黄河の流れが止まるというものである。断流は、1996年までその期間と長さは異なるものの、毎年春から夏期の6月ないし7月まで起こっており、河口から数100kmも干上がるという状況となっている。そして、それは川底が露出するほどである。このことは、雨不足に加え、黄河中流域の経済発展や人口増加などにより、水需要が急激に増えたためであると報じられている²⁾。

黄河からの取水に依存している下流域では、断流による農業や飲料水への影響が心配である。このため著者らは、下流域で発生している断流現象の原因究明が必要であると考え、その解決策についていくつかの検討を行った。本論文は、黄河下流域での環境の変化について、1996年11月の第一著者らの現地調査により得られた資料や文献等及び人工衛星データから解析するものである。

2. 黄河の現状

黄河は、青海省を源流とする全長5464kmの中国第2の河川で、年間流量は長江(揚子江)の20分の1だが、土砂量は3倍強の16億tもあり、含砂量は35~38kg/m³と世界最高である³⁾。近年の地形の変化をLANDSAT/MSSデータによるフォールスカラー画像で表わし、1979年10月27日を画像-1(a)に、1995年9月18日を画像-1(b)に示す(原画像はカラー)。下流域は、雨期である7月から10月に約7割の降水量が集中する。下流域は水位が地面より高い天井川となっており、土砂が平均10cm/年の速度で川底に堆積している^{4),5)}。もともと中流域の黄土高原からの土壌の侵食が激しいために含砂量が多く、下流域の新デルタの形成や海洋環境への影響が懸念されていた。また、年間降水量は500mm前後である⁶⁾ので、そのうちの300~400mmが雨期に集中することになり、経済解放前はよく氾濫していた。これまでは氾濫が黄河下流域に豊かな恵みを与えていたが、近年の過剰な灌漑や地下水の汲み上げ、中流域の人口増加や産業発展に伴う水需要の増加によって土地は痩せていき、稲作から小麦や綿花といった、比較的水を必要としない農作物へと変わってきた。特に最近では、小麦が主力のようである。このことは、第一著者らの1996年11月の現地調査により確認された。

一般に、年降水量の500mmの線は、農業にとって生命線であると言われている⁶⁾。年降水量が400mmから500mm

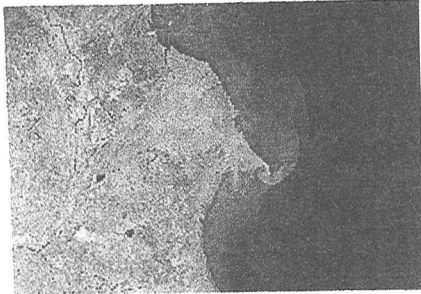
* 長崎大学工学部社会開発工学科 (Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nagasaki University)

** 長崎大学大学院海洋生産科学研究科 (Graduate School of Marine Science & Engineering, Nagasaki University)

*** 長崎県庁土木部 (Division of Civil Engineering, Nagasaki Prefectural Office)

以下である黄河下流域では、人工灌漑等の特別な方法なしで農業を営むことができない。この断流が起こっている期間は、「農業用水を諦める。」「地下水に頼る。」という現地の人々の話(第一著者らの現地調査による)から、断流による農作物の収量減少が大きいと考えられる。このようなことから、植生被覆状況が弱く保水力の低下が原因で、ひとたび洪水が起これば、河川の氾濫やその影響による農作物への被害などが非常に大きいものとなることが予想される。

断流期間とその詳細については、1972年から1991年までは50日間未満で、1992年は83日間、1993年、1994年の両年は50日間以上であった。1995年は3月4日から7月25日までの延べ118日間で、河口から約600kmの河南省・開封市まで干上がり、1996年は2月14日から7月9日までの延べ128日間で、河口から約1000kmの西安市付近まで干上がる(過去最長の断流期間)という状況であった^{2),7)}。水需要の高まりとともに水不足という事態が発生し、特に水の供給が困難である中国北方では、農業用水の確保が困難になりつつあり、近年では周辺都市への水の供給がますます困難になっている。その状況は首都北京が厳しく、その影響を受けて大都市である天津市でも水が不足し、黄河からの長距離分水がしばしば停止されている⁸⁾。



(a) 1979年10月27日



(b) 1995年9月18日

画像-1 LANDSAT/MSS データによる黄河河口付近のフォールスカラー画像

3. 解析の方法

3.1 現地調査

文献調査やWWW検索による資料⁹⁾をもとに、1996年11月に第一著者らが黄河下流域の調査を行った。第二著者の陳の通訳により現地で農作業をしている人々や、黄河の河川管理事務所で働いている人々に断流や洪水に関することをインタビューし、それと同時に現状や施設を写真に収めた。調査を行った場所について、中国の概略図とあわせて図-1に示す。そして、その時の調査報告と現地での実験、採取した黄河の水や土による各種試験から黄河下流域の現状を、文献やWWW検索による資料と照らし合わせて考察する。調査のフローチャートを図-2に示す。

調査地点で、黄河流域の黄土について簡易試験を行った。その内容は、透明度試験、透視度試験及び山中式硬度計による土壌貫入試験の3つである。透明度試験(写真-1参照)は、セッキーマンと呼ばれる直径30cmの白色円板を用いて、これに現場でオモリとロープを取り付け円板を沈める。静かに沈め、白色円板が見えなくなった深さ(m単位)を透明度とする。実際には円板を上げ下げし、円板が見えなくなる位置を再確認することによって透明度とした。透視度試験(写真-1参照)は、メスシリンダーの下に二重の十字線を書いたマークを置き、メスシリンダーに黄河の水を注ぎ、メスシリンダーの上からマークが識別できなくなる水深を調べた¹⁰⁾。土壌貫入試験については、土壌が非常に固くて山中式硬度計を貫入できなかった地点もあったが、貫入できた地点での調査についてその一例を写真-2に示す。

最後に、現地で採取した黄河の水や土を用いた各種試験¹¹⁾を、長崎大学工学部社会開発工学科の土質実験室で行い、黄河下流域の土壌環境を調べた。水については、pH試験や土砂含有量に関する簡易実験を行い、土については、液性限界・塑性限界試験と土粒子の密度試験並びに粒度試験を行った。土砂含有量に関する簡易実験では、採取した黄河の水1000mlを電気マッフル炉で24時間乾燥させた。また、黄河の水と勝利油田付近で採取した白い粉体については、詳しい成分分析を(社)長崎県食品衛生協会の食品環境検査センターに依頼した。



図-1 現地調査地点の位置

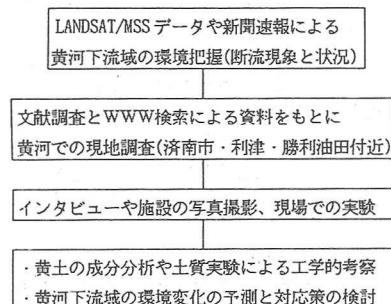


図-2 現地調査のフローチャート



写真-1 透明度試験と透視度試験に用いた道具
(済南にて藤田が撮影、1996.11.24)

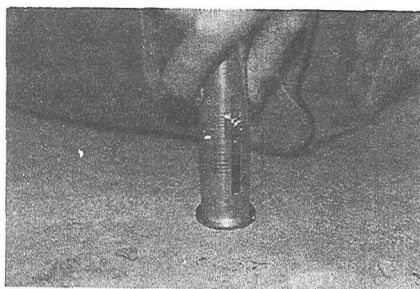


写真-2 土壌貫入試験の様子
(済南にて後藤が撮影、1996.11.24)

3.2 衛星リモートセンシング

使用した人工衛星データは、LANDSAT/MSS データである。そのデータ観測日を表-1に示す。解析システムは、ERDAS/IMAGINE という GIS 及びリモートセンシングデータ解析システムを使用した。

LANDSAT/MSS データによる植生指標 NDVI を求め、植生の変化を捉えることで、黄河下流域の環境変化を検討する。

表-1 使用したデータの観測日

衛星名/センサ名	観測日/パス-ロウ
LANDSAT2 号/MSS	1979 年 10 月 27 日/130-34
LANDSAT4 号/MSS	1984 年 09 月 11 日/121-34
LANDSAT5 号/MSS	1993 年 09 月 28 日/121-34
LANDSAT5 号/MSS	1995 年 09 月 18 日/121-34

4. 解析結果

4.1 現地調査

透明度試験については、黄河の水があまりにも濁っていたため透明度は 0m であった。よって透視度試験を行ったが、同様に測定不能ほどの水の濁りにより 0cm であった。黄河の水の濁り具合を写真-3に示す。また、断流現象で水不足となり、黄河の水を農業用水として期待できない状況で、舗装の施工の悪さや日本との交通事情などの違いもあるが、地下水の過剰汲み上げの結果による地盤沈下が原因と見られる道路の損壊状況を写真-4に示す。

洪水に関しては、以前のように頻繁に起こることはなくなってきているが、一度起こるとその規模は非常に大きなものとなっているという話も現地で聞くことができた。勝利油田付近の堤外地の河川側の木々は、洪水時の水圧のため、堤防側に向かって曲がってしまっている状況であった。これにより洪水の激しさが伺える。1996 年の 8 月に起こった済南市周辺の洪水は非常に規模が大きく、住宅地側の黄河沿岸の堤防の中心高さにまで迫り、もしあと 1m 水位が上昇すれば、反対側の農作地側の堤防を爆破する予定であったという。これは、住宅地側の住民を守る最終手段であるそうである。また洪水対策として浮橋を利用しているとのことである。1996 年の大洪水で水位が上昇し過ぎたため、橋は一度解体されて別の場所に移され、洪水が収まったあとに再び元の場所に戻されたということである。爆破予定であった黄河左岸側堤防の様子を写真-5に、洪水対策としての浮橋を写真-6に示す。中国政府の洪水対策の一つとして、浚渫した黄土を堤防の盛土に利用しているというものがあるが、年々その堤防の盛土の高さは上がる一方である。年々盛土の高さを増築している様子を、その断面図にて図-3に示す。

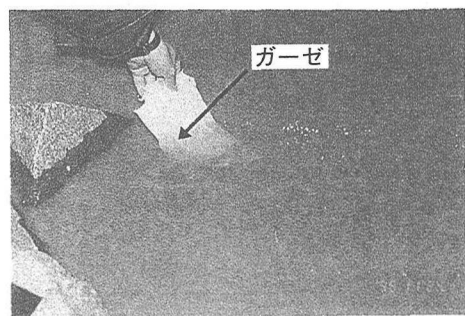


写真-3 黄河の水の濁り具合
(済南にて藤田が撮影 1996.11.24)

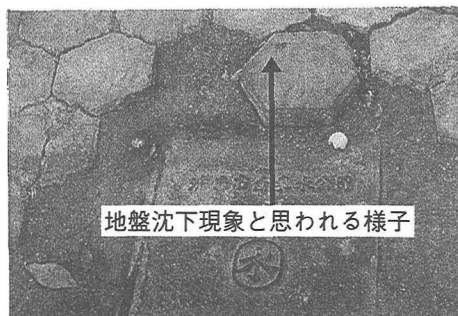


写真-4 地盤沈下が原因と見られる道路の損壊状況
(利津にて後藤が撮影、1996.11.25)

黄河断流時の飲み水は、非常時に備えてダムからの水を使用するが、農業用水は断念せざるを得ない状況である(現地で農作業をする人の談)。しかし地域によっては、地下水をこの時期の農業用水として使用している(黄河森林公園で働く人の談)。このことが地下水の過剰揚水を招き、地盤沈下と見てとれる様子が至るところで見られた(写真-4参照)。また勝利油田付近では、水の代わりに海水を用いて原油を抽出していたので、塩害が起こっている可能性があった。そこで、地表面に噴出していた白い粉体を採取し分析した。その結果、塩素イオンを非常に多く含んでいることが判明した。比較のために、長崎で採取した海底底土と畑地土壌の成分をあわせて表-2に示す。

最後に、土質実験に関する結果について示す。採取した土を用いた土粒子密度試験(JSF T 111)の結果は、 2.69g/cm^3 であった。液性限界・塑性限界試験の結果、黄土は非常に粘性があり、低塑性のシルトであることが分かった。黄土の粒径加積曲線を図-4に示す。簡易含砂量測定試験では、 7kg/m^3 であった。黄河沿岸の堆積層は、平均13~15cm/年という調査結果であった。黄下流域の水質分析結果を表-3に示す。

表-2 白い粉体の成分分析結果

項目	勝利油田の土	海底底土	畑地土壌
塩素イオン	35300mg/l	1060mg/l	2.8mg/l

表-3 黄河下流域で採取した水の水質分析結果

項目	計量結果	計量方法
pH(25℃)	8.1	JIS K0102.12.1
過マンガン酸カリウム消費量	80mg/l	上水試験法
塩素イオン	87.4mg/l	JIS K0102.35.3
亜硝酸性窒素	0.05mg/l 未満	JIS K0102.43.1.2
硝酸性窒素	3.6mg/l	JIS K0102.43.2.5
フッ素イオン	0.54mg/l	上水試験法
カドミウム	0.001mg/l 未満	JIS K0102.55.4
鉛	0.066mg/l	JIS K0102.54.4
全クロム	0.017mg/l	JIS K0102.65.1.4
銅	0.048mg/l	JIS K0102.52.4
亜鉛	0.07mg/l	JIS K0102.53.3
鉄	22mg/l	JIS K0102.57.3
マンガン	2.0mg/l	JIS K0102.56.4
カルシウム	458mg/l	JIS K0102.50.2
マグネシウム	120mg/l	JIS K0102.51.2
全硬度	1640mgCaCO ₃ /l	JIS K0102.15.1.2
大腸菌群	検出する	上水試験法
一般細菌	34000/ml	上水試験法



写真-5 爆破予定のあった堤防
(済南にて後藤が撮影、1996.11.26)

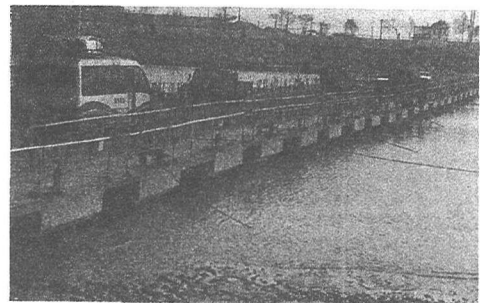


写真-6 洪水対策としての浮橋
(済南にて後藤が撮影、1996.11.26)

黄河大堤历年培修断面示意图(河南台前)

The levee section at Taipian, Henan province, increasing as each round of the heightening finished

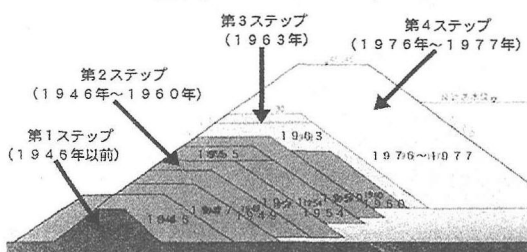


図-3 黄河沿岸の堤防の盛土設計断面図⁹⁾

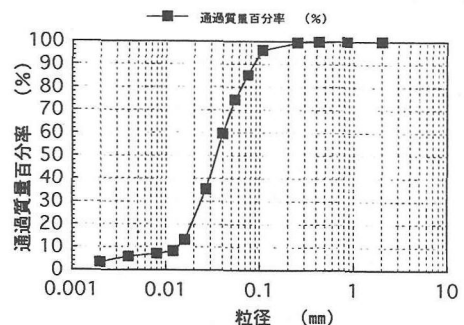


図-4 黄土の粒径加積曲線

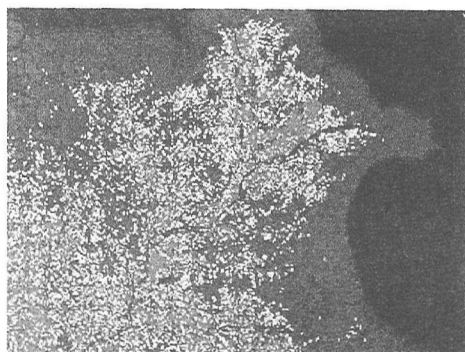
4.2 衛星リモートセンシング

LANDSAT/MSS データを用いた植生指標(NDVI)の解析で、断流期間が近年のように 50 日間以上にも及ぶ前の時期の植生状況を調べる。1984 年 9 月 11 日を画像-2(a)に、1993 年 9 月 28 日を画像-2(b)に示す(原画像はカラー)。

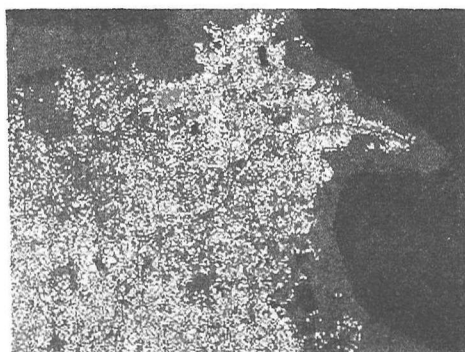
植物のクロロフィルは、 $0.5\sim 0.7\ \mu\text{m}$ の波長帯を約 20%、 $0.7\sim 1.3\ \mu\text{m}$ の波長帯を約 60%の割合で反射する。一般には、クロロフィル含有量が多い葉を持つ植物ほど、可視域の赤色波長帯の反射が低く、葉量が多く成長活力が強い植物ほど、近赤外線波長帯の反射が強くなることが知られている¹²⁾。このような植物が持つ反射特性を利用することで、植物の活性度を人工衛星データを用いて表す。本研究で用いた植生指標である植物活性度(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)の計算式を下記に示す¹³⁾。

$$\text{NDVI} = \frac{\text{CH7} - \text{CH5}}{\text{CH7} + \text{CH5}}$$

CH5: LANDSAT/MSS のバンド 5 の反射率
CH7: LANDSAT/MSS のバンド 7 の反射率



(a) 1984 年 9 月 11 日



(b) 1993 年 9 月 28 日

画像-2 LANDSAT/MSS データによる NDVI 画像(赤色ほど植物活性度が高く、青色ほど低い)

5. 考察

現地での状況と各種の試験から黄土は、図-4 に示しているように粒径が非常に細かいもの($0.02\text{mm}\sim 0.1\text{mm}$)であった。このことは、土粒子の直径が $0.1\sim 0.005\text{mm}$ 以下、約 80%が 0.05mm 以下のもので構成されている黄砂の成分¹⁴⁾と一致する。また、表-3 から明らかなように、鉄、カルシウム、マグネシウムが非常に多く含まれ、全硬度が高かった。このことは、pH が弱アルカリ性(8.1)であったことと一致し、黄河沿岸の土壌がアルカリ土壌化しつつあるのではないかと考えられる。

画像-1 を見れば、数年の間に地形が変わるほどの土壌流失や黄河の含砂量の多さに、非常に驚かされる。また、最も含砂量が多い 8 月(第一著者らの現地の人へのインタビューでは、約 $45\text{kg}/\text{m}^3$ になるそうである。)の 6~7 分の 1 時期であった調査月(11 月)でも、黄河の水が非常に黄濁しているのがわかる。簡易含砂量測定試験の結果から、文献³⁾にある含砂量 $35\sim 38\text{kg}/\text{m}^3$ を大きく上回る。実際には、断流現象の発生による自然の災害耐性の低下や、夏の集中豪雨等による 2 次災害といった新しい災害も起こっている。

画像-2 の LANDSAT/MSS データによる植生指標 NDVI の解析結果から判断すれば、植生状況も段々弱くなっていくと考えられる。断流期間が 50 日間以上であった 1993 年の方が、1984 年より植物活性度が低く、このことは、断流が環境に影響を与え始めていると言える証拠の一つであると、著者らは考える。

6. むすびに代えて

中国黄河下流域については、今後環境モニタリングを続ける必要がある。また、断流現象発生 of 早い段階で何らかの対応策がうてるのではないと思われる。しかし対応策を実行するか否かは、中国政府の対応に委ねられる。

堆積土砂の有効利用の面から、大量に流失している黄土を堤防のための盛土(図-3 参照)や、レンガや瓦のように焼き固めることにより建築材料として利用できる。加えて下流域の堆積層の土砂浚渫を行うことにより、河床を掘り下げ現存する堤防の洪水といった水害耐性に対する高さも増すものと思われる。

洪水対策の検討については、黄河沿岸の植林が大切であると考えられるが、特に中流域の黄土高原への植林が急務である。黄河下流域の土砂は上流から中流に広がる黄土高原から流出されているため、まずこの地域一帯への植林が必要と思われる。植林事業が成功すれば、森林の働きが期待でき、土壌の保水力の向上が雨期の洪水を緩和できる。また、しっかりとした土壌の形成により、土壌の侵食もある程度防げることが期待できる。また、下流域周辺に貯水池を設けることにより、洪水期は黄河の水の保水能力の向上という利点、また断流時期は農業用水として貯水した水を用いるという利点があると考えられる。現地では浮橋や、山東省の黄河河務局や治水管理局などで働いている人々などの施設も見られたが、その数や規模に疑問が残った。そのことを指摘しておきたい。

粒径の小さい黄土が毎年 10cm 以上も堆積するのは、黄河の流れが止まっている期間が長いのか、流れが非常に弱いのかのどちらかであるので、断流による影響が堆積土砂の量を増加させている原因であると、現地調査の結果から著者らは考える。1997 年も 2 月ないし 3 月には断流現象が起こると考えられるので、引き続き衛星データを用いた環境モニタリングを行う必要があり、加えて中国水資源及び水利水電工程建設省の速報資料などに注意して観測を続け、日本政府などが中国黄河の環境改善のための支援や援助を行うときの一資料としていただければと期待する。また、環境モニタリングのシステム作りが大切であると考ええる。

謝辞

解析に使用した LANDSAT/MSS データは、いずれも宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター、(財)リモート・センシング技術センターの研究向け目的利用データ配布によるものであり、貴重な衛星データの提供をしていただいた。ここに記して、深甚の謝意を申し上げる次第である。また、現地調査において、著者らのインタビューに快く応じていただいた現地の農家の方々や、黄河の治水管理事務所働いていた方々に、心から謝意を申し上げます。次第である。

参考文献

- 1) 樋口隆康, NHK取材班: NHK大黄河, 第3巻「黄土高原=文明のゆりかご」, 日本放送出版協会, pp.115~137, 1986.
- 2) 朝日新聞夕刊, 1996.6.25 付.
- 3) 芦田和男: 黄河の治水と開発, 黄河水利委員会治黄研究組編著, 古今書院, pp.1~50, 1964.
- 4) 中国研究所: 中国の環境危機, 新評社, pp.229~241, 1995.
- 5) 前出 3), pp.51~64.
- 6) 倉嶋 厚: 世界気候誌, 第1巻「アジアの気候」, 古今書院, pp.3~8, 1964.
- 7) 中国・人民日報, 1996.7.15 付.
- 8) 丹藤佳紀, 高井潔司: 中国の環境危機, 亜紀書房, pp.49~70, 1996.
- 9) 中国水資源及び水利水電工程建設省資料, 1996.
- 10) 新井 正: 水環境調査, 古今書院, pp.79~81, 1994.
- 11) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, pp.15~36, 1990.
- 12) 後藤恵之輔, 湯藤義文: 1991 年台風 19 号による被害に関する 2, 3 の調査について, 自然災害科学研究西部地区部会報, 第13号, pp.83~93, 1992.
- 13) 後藤恵之輔, 全 炳徳, 長田幸市: 衛星リモートセンシングを用いた眉山の植生回復予測の試み, 雲仙火山災害の調査研究, 第4報, 雲仙火山災害長崎大学調査研究グループ, pp.17~27, 1996.
- 14) 根本順吉: 黄沙とその仲間たち, 気象, Vol.22, No.3, pp.5102~5107, 1978.