

# 地質調査

'11 第2号  
(通巻128号)

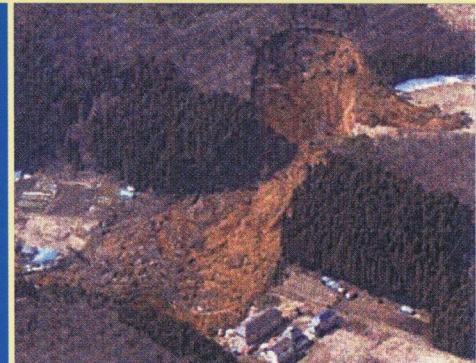
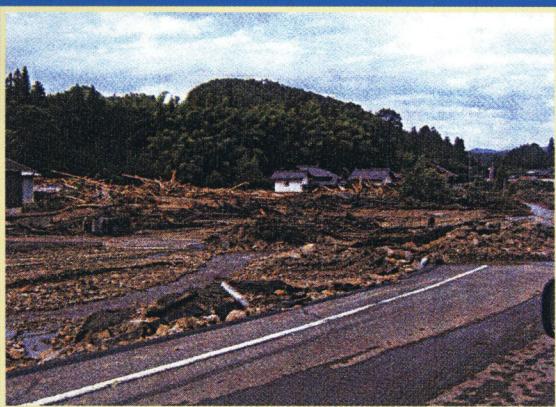
編集／社団法人全国地質調査業協会連合会

卷頭言 賢い選択と粘り強い適応に基づく持続可能な社会

中央大学 都市環境学科 教授 山田 正

総 論 地球温暖化と気候変化

東京大学名誉教授 木村龍治



## 小特集「地球温暖化と斜面・水災害」

斜面崩壊 千木良雅弘

近年の地すべり災害の傾向と今後の課題 丸山清輝

近年の斜面災害の傾向と対応策 …土石流を中心に 石塚忠範

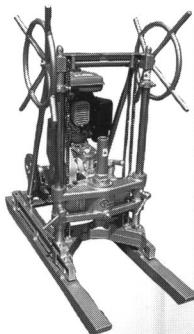
気候変動等気象の変化に対応する河川管理のあり方 山本 聰

海岸(港湾)への影響 島田広昭

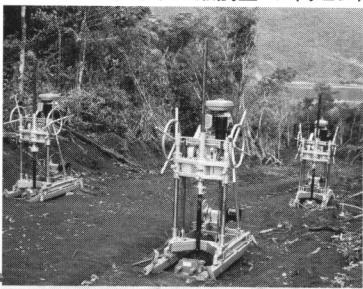
教養読本 (1) 気候温暖化に関わるもう一つのシナリオ—地球環境を操る宇宙線— 桜井邦朋

(2) 第四紀気候変動と地球表層システム 横山祐典

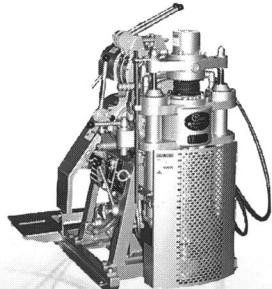
YHP-1



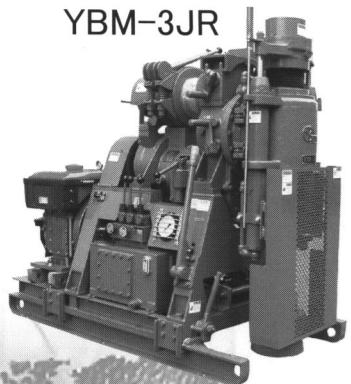
(ニッケル鉱調査 フィリピン)



YBM-05DA-2



YBM-3JR

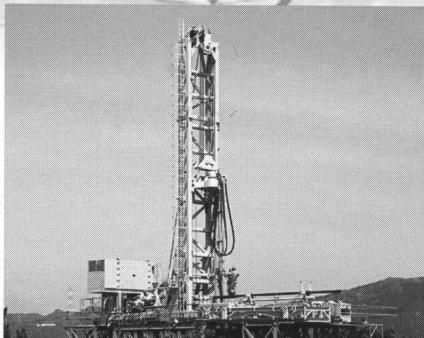


## 資源探査、環境調査、土木建設の基礎調査 世界で活躍するYBMのボーリングマシンとツールス

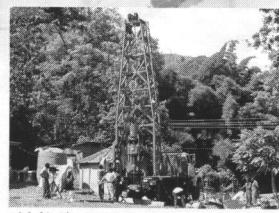
大口径ボーリングマシンから、超軽量ボーリングマシンまで、  
幅広いニーズを満たす製品を取り揃えております。



ワイヤーライン工法用削孔機  
TYW-50

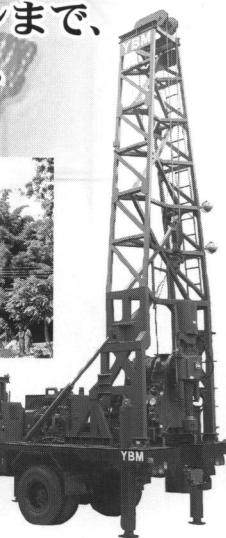


地熱開発用コンパクトリグ  
HC-2000R



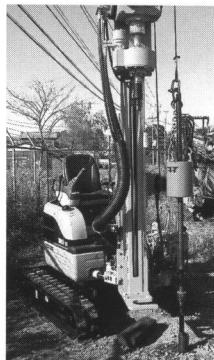
(鉱物資源調査  
マラウイ)

トラックマウントドリリングリグ  
YSD-500BV



ワイヤーライン  
工法調査機  
YWL-200

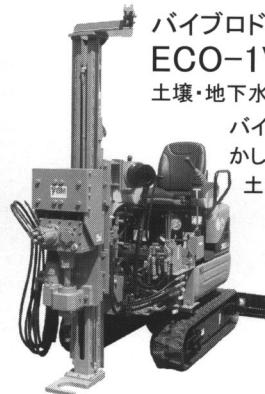
スピンドル回転数  
2速切換の為、  
低速回転での口元  
ケーシング掘削も  
可能。



標準貫入試験作業風景

バイブロドリル  
ECO-1VII

土壤・地下水汚染調査など  
バイブロ機能を活  
かして回転せずに  
土中に貫入可能。



ハンディECO  
表層土壤汚染調査など

**ybm** 株式会社 ワイビーエム

本 社／〒847-0031 佐賀県唐津市原1534 TEL (0955) 77-1121

東京支社 〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町16-5 新日本橋長岡ビル4F TEL (03) 5643-7593  
東京支店 〒342-0005 埼玉県吉川市川藤3062 TEL (048) 982-7558  
大阪支店 〒578-0964 大阪府東大阪市新庄西5-4 TEL (06) 4309-2921

名古屋営業所 〒468-0043 愛知県名古屋市天白区菅田1丁目1208 TEL (052) 804-4841  
広島営業所 〒732-0802 広島県広島市南区大州1丁目1-25第一ふじビル1F TEL (082) 285-3824  
ハノイ駐在員事務所 Room No. 23.5 Vimeco Bldg, Block E9, Pham Hung Trung Hoa, Cau Giay, Hanoi, Vietnam TEL (+84) 4-3782-0132

<http://www.ybm.jp/>

**卷頭言 賢い選択と粘り強い適応に基づく持続可能な社会**

中央大学 都市環境学科 教授 山田 正 1

**総 論 地球温暖化と気候変化** 東京大学 名誉教授 木村龍治 3**小特集 地球温暖化と斜面・水災害**

斜面崩壊	千木良雅弘	9
近年の地すべり災害の傾向と今後の課題	丸山清輝	15
近年の斜面災害の傾向と対応策…土石流を中心に	石塚忠範	20
気候変動等気象の変化に対応する河川管理のあり方		

山本 聰 24

島田広昭 30

**教養読本 (1) 気候温暖化に関わるもう一つのシナリオ  
—地球環境を操る宇宙線—** 桜井邦朋 34**教養読本 (2) 第四紀気候変動と地球表層システム** 横山祐典 39**私の経験した現場 沖縄における琉球石灰岩空洞調査** 高久和彦 45**大地の恵み 岐阜県各務原市の地下水源復活** 長繩直樹 47**各地の残すべき地形・地質 室戸半島 土佐湾岸を通り室戸岬方面へ  
国道55号線（羽根岬～室戸岬～佐喜浜）** 奥田之宏 49**各地の博物館めぐり 北海道三笠市「三笠市立博物館」  
—三笠1億年の歴史を今に—** 松本和正 51**基礎技術講座 室内土質試験第4回 地盤材料における  
せん断試験とその適用について** 坪田邦治 53**会 告 全地連「平成22年度第48回通常総会」の開催について** 59

平成22年度地質調査事業量は667億円 61

地質調査技士資格検定試験 受験申込者数 1,075名 63

全地連「技術フォーラム2011」京都 64

平成23年度「土壤汚染調査技術管理者試験」対応

事前講習会開催のご案内

**小特集テーマ 「地質リスクマネジメント」**

- ・地質リスクマネジメントの現状について
- ・地質調査業界と地質リスクについて
- ・地質リスクマネジメントにおける取組み
- ・地質リスク事例（国内）
- ・海外における事例

**教養読本** 建築紛争、戸建住宅における基礎と地盤のリスク

**やさしい知識** 労働災害と地盤リスク

各地の博物館巡り

大地の恵み

各地の残すべき地形・地質

私の経験した現場

# 賢い選択と粘り強い適応に基づく持続可能な社会

中央大学 都市環境学科 教授 山田 正

土木学会では、地球温暖化対策に取り組むために、地球温暖化特別委員会を設立し、この委員会の下に影響小委員会、緩和策小委員会そして適応策小委員会の三つの委員会を設立している。私は適応策小委員会の委員長をしているが、同時に同学会の常置委員会である地球環境委員会の委員長もしている。以下の文章はこれらの委員会において地球温暖化を迎えた時代における土木技術者への提言を出すということになり、そのときにおこなわれたいいくつかの議論から要点を取りまとめたものである。詳しくは土木学会のこの提言書を参照していただきたい。それにしても本年3月11日の東北地方太平洋沖地震とともに大災害は、我が国が置かれている自然環境の厳しさを改めて気づかされた。その提言書において「たとえ200年確率の災害でも明日に起きるかどうかわからない」ということを述べている。確率論では当たり前のことだがもう一度土木技術者のみならず、国民、政治家、マスコミも正しく認識しなければならないであろう。以下はその提言の抜粋である。

## 1. 水の安全保障という観点の重要性

地球温暖化と気候変動に対する適応策に関する基本的哲学として「水の安全保障」の考え方がある。この場合「水の安全保障」の考え方は字義通りの狭義の意味での(1)水災害・水需給・水質・環境・生態系の安全保障と広義の(2)人命、資産と平和に関する安全保障の二つがある。持続可能な社会は以下に示す三つの安全保障の確保のもとに達成され、そのもとに平和で活力のある社会が構築される。(1)水の安全保障(2)食糧・食料の安全保障(3)エネルギーの安全保障

## 2. 地球温暖化と気候変動に関する既往の提言

現在までに地球温暖化と気候変動に対応した適応策に関して、

- ・ 国土交通省河川局 気候変動に適応した治水対策検討小委員会……水災害適応型社会
- ・ 環境省 地球温暖化影響・適応検討委員会 気候変動への賢い適応—地球温暖化影響・適応検討委員会報告……賢い適応
- ・ 農林水産省水産庁 地球温暖化に対応した漁場・漁港漁村対策調査事業報告書
- ・ 日本学術会議 地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同 国土・社会と自然災害分科会 地球環境の変化に伴う水災害への適応……環境変化や災害に対して適応能力が高い強靭な社会を築く

日本学術会議では環境変化や災害に対して適応能力が高い強靭な社会を築く(Establishment of adaptive capacity, high-resilience society)ことが謳われており、環境省では適応策全般に対して「賢い適応」のもとにさまざまな提言がなされている。国土交通省は、「水災害適応型社会」の名の下に、水災害に特化した適応策を社会資本整備審議会から答申を受けている。

## 3. 地球温暖化と気候変動に関する不確実性と賢い選択

地球温暖化と気候変動は時間的・空間的にも、またその質的・量的にも多くの不確実性が存在する。この中では施策の賢い選択が必要である。そして選択した事項の実現に向けては既存の政策や計画に適応策を組み込んでいくこと、すなわち適応の主流化が最も効果的でありかつ現実的である。

#### 4. 粘り強い適応

想定を超える外力や構造物の耐力を超えた外力に対しては、カタストロフィーに導く壊滅的な被害を回避する壞れにくくかつ壊れても迅速な復元が可能な粘り強い機能を必要とする。可能な限りの耐力を有する防災能力の強化と、耐力を超える場合にはその外力の分散を図ることによる被害の最小化を目指した地域の災害耐力に応じた統合化された社会システムの構築と外力がもたらす被害からの避難や退避に基づく減災能力を必要とする。その中には被災想定箇所や地域からの住居や生産・産業拠点の退避も含まれる。

#### 5. 治水の整備水準が低い中での気候変化の襲来

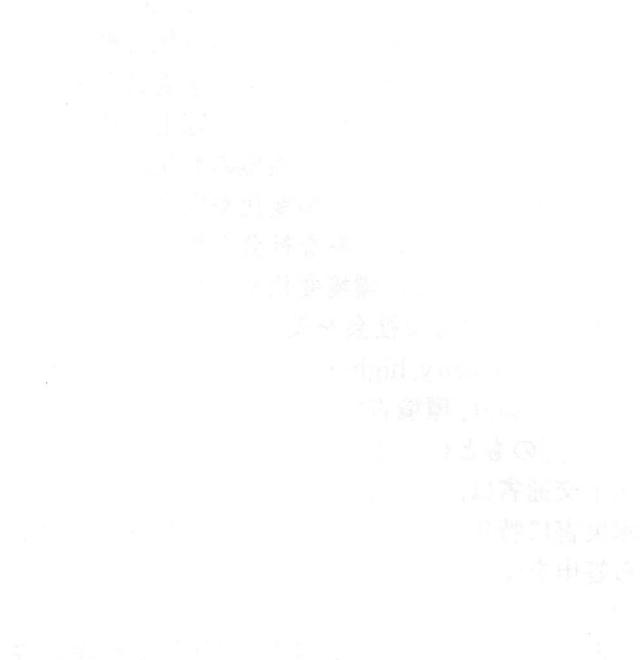
現在の治水目標に対してさえ整備には長期間を要すると見込まれる上に、温暖化が進んだ場合、今世紀末には現行での200年に1度の規模の洪水が100年に1度程度と頻発化し、同時に巨大化することが予測されている。このためダムや堤防の整備は着実に進める必要がある一方で、それただけに頼るのは非現実的であり、水が溢れることも

念頭において現実的な治水策を温暖化適応策の一部として導入していく必要があるだろう。100年後の海面は60cm程度高くなる予想であるが、今回の地震被害で東北地方のある地域は70cm程度地盤沈下し、海拔0m地帯となっている。将来の海面上昇が東北において今起きている。この対策こそ適応策の今やれる施策である。

以下提言書の章立てを列挙すると、

- 既存の枠組みに囚われない既存ストックの活用
- 画期的な災害リスク評価手法の開発と公開
- 政策の転換
- 諸外国の適応策への支援
- 水問題に関する教育の革新
- 地球温暖化適応策実施のための法的・経済的・社会的システムの整備
- 余裕ある社会へ向けて生活・制度の見直し

等となっている。2年前に出したこの提言書は今回の3.11地震と津波被害に対する復旧復興への提言書とみてもよく、今一度私自身も読み返しているところである。



# 地球温暖化と気候変化

## 【Key Word】

地球温暖化、気候変化、気温、降水、海水位

木村 龍治\*

## 1. はじめに

1988年以来、気候変化が大きな社会問題になった。きっかけは1988年の異常気象である。この年は、例年になく世界各地で異常気象が多発した。日本では、7月が記録的な冷夏になり、8月は日本近海で台風が次々に発生する変な夏になった。一方、北米大陸では、初夏に1カ月間も雨が降らず、農作物に大きな被害が出た。米国政府は、議会に気象の専門家を呼んで、干ばつの原因を質問した。呼ばれた気象学者は、それ以前から人為的な気候の変化を研究していたので、ここぞとばかりに自説を述べた。曰く、産業革命以降、化石燃料の燃焼により、大気中の二酸化炭素濃度が増加した。それに伴う温室効果の増加で、グローバルな気候が変化した。それが原因で干ばつが発生した、という仮説である。

このニュースを聞いたとき、私は、「ずいぶん、いい加減なことをいう研究者がいるものだ」と思った。長年、気象の研究をしていれば、おのずと頭の中に気象の常識が形成される。その常識に従えば、気候の変化、それもグローバルな気候の変化と1988年のアメリカの異常気象を因果律で結びつけるなど、狂気の沙汰としか思えなかった。もしも、気象学を学ぶ学生がこのようなことをいえば、「気象と気候の区別もつかないのか」と教授に叱責されるであろう。ところが、何と、現在では、この仮説が社会的常識になってしまった。

私は、1960年代の、いわば、「前温暖化時代」から、グローバルな気候のメカニズムに興味をもってきた。個別の気象現象に比べて、グローバルな気候は非常に多くの要素が組み合わされたきわめて複雑なシステムである。容易にアタックできない、というのが実感であった。ところが、1988年

以降、一般市民の方々が気楽に（？）気候変化を語るのを見て、かなり違和感をもった。「前温暖化時代」に形成された私の常識は、社会で通用しなくなった。逆に、私には非常識に思えることが社会の常識になった。本稿では、その違和感について述べてみたい。

## 2. 気温の「常識」

「気候」と「気象」は異なる概念である。気象は個別的な大気現象を指す。気候はその地域で発現する気象の特徴を指す。地域によって、さまざまな気候がある。もっとも大雑把な気候区分は、熱帯、温帯、寒帯の区別であろう。地球が球体であることを反映して、緯度によって気候は大きく変化している。気候を支配する主な要因は気温と降水量である。植生はこの2つの要素に敏感であるから、気候の異なる地域には、異なる植生が存在する。ケッペンは、これらの特徴を基に気候の世界区分を作製した（ケッペンの気候区分図）。

気象と気候の違いは、音楽における旋律と和音の違いに似ている。五線譜には、沢山の音符が描かれている。音符は小節で区切られ、それぞれの小節の中の音符は和音を形成する。小節にある音を同時に鳴らすと、小節の調性が分かる。その音楽の平均的な音の特徴が分かるわけである。小節毎に同時に音符を鳴らせば、その音楽の調性の変化が分かる。しかし、音楽の面白さは、ひとつひとつの音符の時系列的な変化にある。音を同時に鳴らすのは、いわば、音楽を平均化してしまうようなことである。ひとつの楽曲の音符全体を同時に鳴らすのは、音楽全体を平均化してしまうようなもので、あまり意味がない。

1988年以前の気候学者の主な興味は、主に、地域的な気候の変化であった。それは、音楽でいえば、旋律に関心をもつということである。もちろ

\* 東京大学名誉教授

ん、気候の変化の中には氷期と間氷期の交代というような規模の大きな現象があるが、それさえ地域的な色彩が大きい。地球全体の気温がどうなるか、というような問題は、(ひとつの曲の全体の音符を同時に鳴らすことに似て) 気候学としてはあまり意味をもたない。グローバルに気温を平均すると、地上気温は驚くほど一定である(常に約15°Cに保たれている。年による変動の大きさは±0.5以内)。大きなゆらぎのプラス・マイナスが打ち消し合って、ほぼ一定の気温に保たれているのである。気候学の面白さは、このような一定の気温ではなく、地域的な気温のゆらぎにあった。このような「前時代の常識」は、1988年以降に逆転した。グローバルな気温の変化が地域的な気象をコントロールしている、という「新しい常識」が生まれた。その結果、1988年以前には(英國イーストアングリア大学など)一部の大学でしか研究されていなかったグローバルな気温の経年変化が、しばしばマスコミで報道されるようになった。

### 3. 大気汚染の「常識」

もしも、地球温暖化が純粋な自然現象であれば、これほど大きな社会問題にはならないだろう。自然現象を人為的にコントロールできないからである。しかし、変化の原因が人為的なものであれば、人間社会の対応が問題になる。地球温暖化問題の特徴は、大気中の二酸化炭素の増加が人為的な点である。すなわち、地球温暖化は大気汚染の一種である。ところが、大気汚染の常識とは、大きく異なることがある。

1960年代の高度成長期には、日本で、さまざまな公害問題が発生した。その中には、四日市喘息のような大気汚染も含まれている。大気汚染の特徴は、被害の発生する地域が限定されていることである。四日市喘息が新型インフルエンザのように感染拡大し、世界中に広まるということはない。その理由は、その原因となる大気汚染物質(喘息の場合は硫黄酸化物と窒素酸化物)の濃度と被害が関連しているからである。ある程度拡散してしまえば、濃度が低くなつて、被害は出ない(高い煙突から排出するのはこのためである)。

地球温暖化の原因は工場や車から排出される二酸化炭素であるが、その濃度は、当然、排出源(工場、都市)の近くが高い。従つて、温暖化が(濃度と被害が関連している)通常の大気汚染であれば、工場地帯や都市の温暖化が顕著であつてしまふべきであろう。二酸化炭素が世界中に拡散してしまえば、濃度の変化は非常に小さくなつてしま

う(グローバルには、毎年1.5 ppm程度の増加)。それでは、被害が出ないというのが、「前温暖化時代」の大気汚染の常識である。

1988年以降、この常識が逆転した。二酸化炭素が拡散しなければ問題ないが、グローバルに拡散するから、グローバルに影響が出るという新常識が生まれた。

### 4. 降水の「常識」

雨、雪、雹など、空から水が降っている現象を総称して降水といふ。私たちの生活に身近なので、誰も降水現象を不思議と思わない。しかし、気象の中では扱いにくい現象である。現在の天気予報は、コンピューターシミュレーションによって未来の大気の状態を決定論的に予測する。3日先までの短期予報はよく当たるが、降水の予報に限ると、予報精度が悪い。そこで、気象庁は、降水の予報に関しては、過去の降水データも加味して、降水の確率を予測している(降水確率予報)。

降水は、1回に降る降水の量も、降水の間隔も、変動が大きい。その結果、季節によって、地域によって、降水量に大きな変動が生じる。どの程度の降水が降るか、河川管理、ダムの管理などに関連して、1988年以前から関心が持たれてきた。

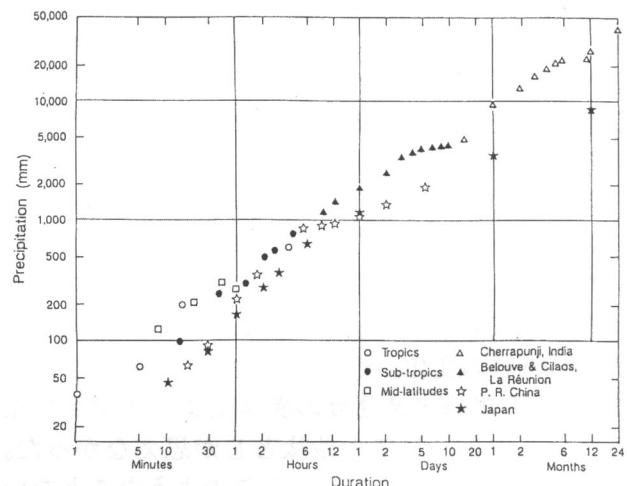


図1 これまでに観測された降水量の最大値と積算時間との関係<sup>1)</sup>

降水量には最大値が存在する。最大値は、雨量を測定する積算時間によって変化する。図1は、降水量の最大値と積算時間の関係を示したものである。この図によれば、1時間雨量の最大値は200 mm、1日の雨量の最大値は1000 mm(因みに、2010年10月に大きな被害が出た奄美大島の豪雨の日雨量は600 mm)、1カ月雨量の最大値は1万mm、1年間の雨量の最大値は3万mm程度である。積算期間が長くなれば、当然、雨量は多くな

るが、比例関係はない。それぞれの雨量を一時間単位の雨量に換算すれば、1時間雨量の最大値は200 mm、1日雨量の1時間平均値は42 mm、1カ月雨量の1時間平均値は14 mm、年間雨量の1時間平均値は3.4 mmである。日本列島上の降水(グラフの★印)を見ると、短時間降水量は、ほとんど最大であることが分かる。日本列島には、短時間には、地球上最大の降水が発生している、ということである。

日本列島の存在する緯度帯(中緯度帯)は、グローバルに見ると、比較的降水量の少ない地域である。ところが、日本列島には、降水量を大きくする要因が重なっている。北太平洋高気圧の西の縁に位置しているために、夏季には南から暖湿な空気が運ばれて、梅雨や台風に伴う降水が生じる。冬季には、北西季節風が日本海から水蒸気を日本列島に運んで、日本海側に豪雪を降らせる。さらに、1年を通して、温帶低気圧が発達しながら日本列島上を通過するため、前線に伴う降雨が生じる。その結果、毎年、豪雨や豪雪による気象災害が発生する。

1988年以降、地球温暖化によって、降雨強度の大きな雨の発生頻度が大きくなつたといわれる。IPCCレポート(2007)<sup>2)</sup>によれば、数十年~100年スケールの強い降水の増加は、世界の多くの地域に認められるそうである。といっても、降水のようにゆらぎが激しい現象の長期トレンドを議論す

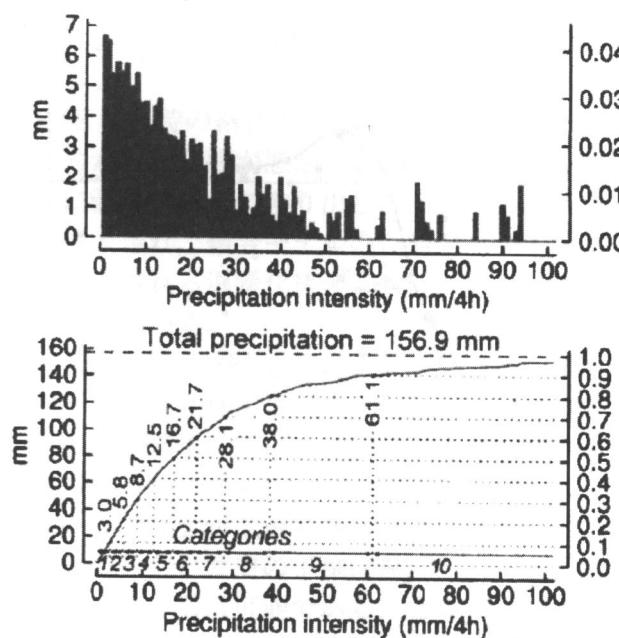


図2 上図：降雨強度(横軸。4時間雨量を1mm間隔で区切したもの)と、それぞれの区分の降水量(東京、8月)。1898年～2003年の平均。下図：上の図の降水量を積算したもの<sup>3)</sup>。

る際には、統計解析に耐えるほど長い期間の観測データが必要なので、100年間以上の降水量のデータがある地域は限られている。

気象庁・気象研究所の藤部文昭氏のグループは、日本で観測された降水量の可能な限りのデータを集めて、過去約100年間の降水量の変化を調べた<sup>3)</sup>。

図2は、東京の8月の降水について、4時間で積算した降水量を1mm/4時間、2mm/4時間、…100mm/4時間に区分し、それぞれの降水強度ごとの1カ月間の降水量を示したものである。1898年～2003年の観測データを使用した。降水強度が大きくなるにつれて、降水量が減る傾向が分かる。すなわち、1回に降る降水量は大きくなるが、降る回数が減るので、全体としては、弱い降水による寄与が大きくなる。下図は、その積算値である。寄与が等分になるように10種類の降水強度に分類した。それがグラフの下にあるカテゴリーである。カテゴリー1は弱い降水、カテゴリー10は強い降水ということである。

図3は、カテゴリー1とカテゴリー10の降水強度を日本全国で積算したものと過去100年間にわたって比較したものである。参考のために、年降水量の経年変化も示した。

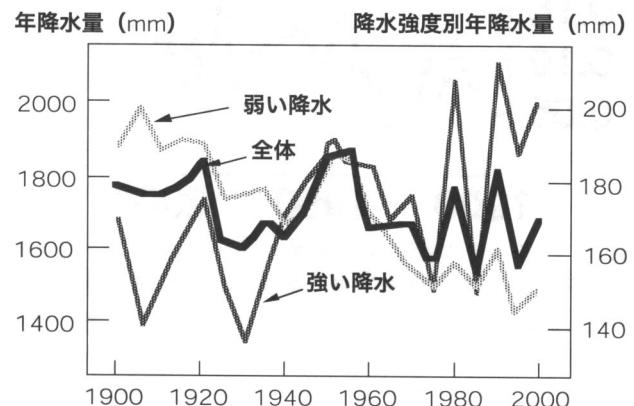


図3 日本列島の年降水量の過去約100年間の変化(太い黒い実線。縦軸は左側の目盛りに対応)。弱い降水(カテゴリー1)と強い降水(カテゴリー10)による寄与。縦軸は右側の目盛りに対応)。カテゴリーの定義は図2の下図を参照。

このグラフはかなり興味深い。日本列島の年降水量は、毎年、1600 mm～1800 mmの間で変動しているが、長期的には弱い減少傾向が見られる。弱い降水も強い降水も、全降水量の変化と同じように変化している。全降水量が増加するときは、弱い降水も、強い降水も増加している。ところが、弱い降水と強い降水を比較すると、逆の長期トレンドが見られる。弱い降水の寄与は減少し、強い

降水の寄与は増加しているのである。このような傾向は、別の統計解析からも得られている<sup>4)</sup>。

図4は、日降水量について、強い順に並べ、最大から10番目、100番目、1000番目までの降水量の100年間にわたる変化を示したものである。全体で、38000日あるので、いずれにしても強い雨である。この結果を見ると、1000番目までの降水量には増加傾向が見えないが、100番目、10番目までの降水量には増加傾向が見える。しかし、ゆらぎの振幅は10番目のほうが大きい。非常に強い降水は、まれに起こるからである。

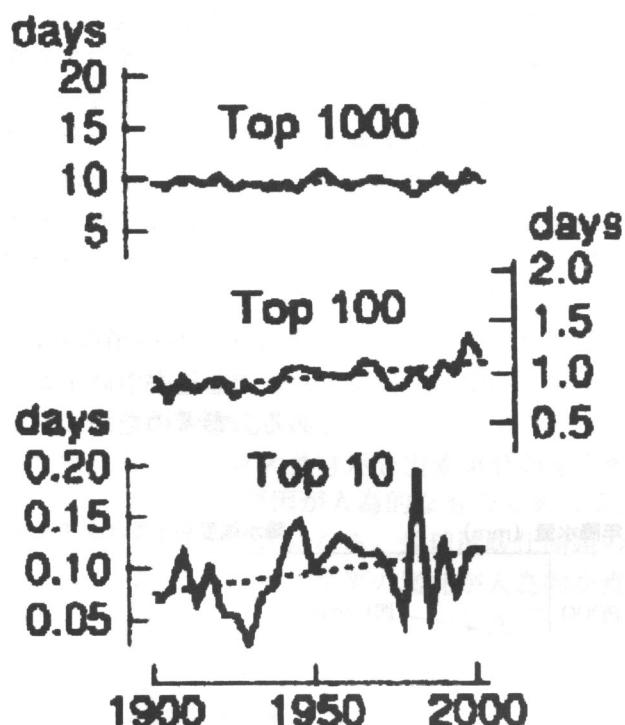


図4 日降水量の強さを降水量の多い順に並べ、最大から10番目の降水日数、最大から100番目までの降水日数、最大から1000番目までの降水日数を比較したもの<sup>4)</sup>。

新聞には、しばしば、「観測史上最大の豪雨が降った」という表現が見られる。藤部氏は、観測史上最大といわれるような豪雨が、どの程度の再現期間で発生するのか、統計的に調べた<sup>5)</sup>。その結果を表1に示す。

表1 記録的豪雨の再現期間（雨量は2日間の総雨量）<sup>5)</sup>

1位	高知	1976年9月12日	901.5mm	再現期間905年
2位	高知	1998年9月25日	874.0mm	再現期間690年
3位	名古屋	2000年9月12日	566.5mm	再現期間2937年
4位	浜松	1910年8月10日	542.0mm	再現期間681年
5位	水戸	1938年6月30日	440.9mm	再現期間770年

この表を見ると、豪雨の再現期間が非常に長い

ことが分かる。もちろん1988年以前にも、記録的な豪雨が降っている。とはいえ、最近は、ゆらぎの幅が大きくなっていることは統計的にもその傾向が出ている。防災面ではこの点に注意が必要であろう

## 5. 海水位の「常識」

ツバルという国名が、地球温暖化問題に関連して、しばしば登場する。海水位が上がると国全体が水没してしまう、ということで注目されている。もともと、陸地がサンゴ礁でできているので、海拔高度がほとんどゼロなのは、成因から当然である。人口は1万人に満たない。地球温暖化を待つまでもなく、大きな津波が来たら、国全体が水没するだろう（1994年のインド洋津波では、20万人以上が犠牲になった）。ところが、ウィキペディアによれば、このような危険な陸地に、紀元前から人類が住み着いていたそうである。何と、2千年間も、海拔ゼロメートルの国が水没しないで、存在していたのである。私には、この事実のほうが驚きである。脆弱と思える海水位が実に安定していたことを示している。

図2は、干潮帯に住む貝を指標にして、横浜港付近の過去の海水位を復元した結果である<sup>6)</sup>。9千年前は現在の海底40mの深さに海岸線があったが、その後、現在の海水位まで上昇した。主に、陸地にあった氷床が解けて、海水の量が増えたためである。6千年前から5千年前にかけて、現在

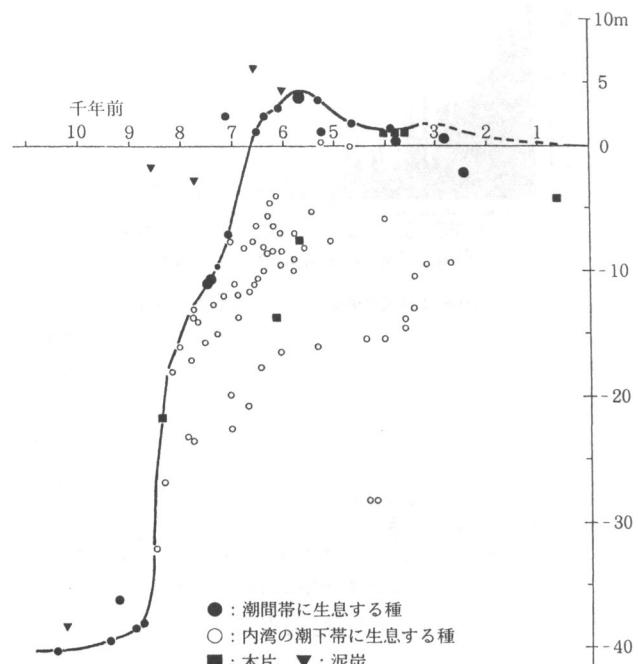


図5 横浜港周辺の海水位の変化の歴史<sup>6)</sup>。現在の海水位からの相対的な変化を示している。

よりも海水がかなり高い時代があった。縄文海進という。その後、ゆっくり海退が起こり、少なくとも、最近の千年間は、海水位はかなり安定に保たれてきた。

その常識は、1988年以降、通用しなくなった。気温が温暖化すると、海水が熱膨張で膨らみ、水位が高くなるという常識が生まれたのである。しかし、考えてみると、季節によって気温が変化する。日本列島の場合、夏と冬で、気温は20°Cほど変化する。それに対応して、海水の熱膨張が変化し、海水位が変化する。その大きさは潮位計（検潮儀）で測定できる。潮位の測定に詳しい宮田元靖氏に尋ねたところ、熱膨張による水位の変化は、太陽年周潮と区別がつかないので、すべて、太陽年周潮（天文潮）として扱われているが、実際は、大部分は熱膨張である、との解答を得た。東京湾で、20cmほどである。20°Cの季節変化で、20cmの水位の変化を生む。ということは、1°Cの温度変化で1cm海水位が変化する、と考えてよいであろう。一方、半日潮は1mほどもあるから、誰も、海水位の季節変化に気づかない。一方で、1年よりはるかに長い気候の変化による海水位の変化（100年で3cm程度の変化）が大きな社会問題になっている。

## 6. 気候の予測に関する「常識」

IPCCレポートは、大気海洋結合モデルの結果に基づいて将来の気候を予測している。コンピューターシミュレーションによって地球環境を再現し、100年後の地球環境を予測しようという発想である。

1988年当時の結合モデルは、コンピュータ資源の制約から分解能が悪かった。先進国政府が積極的に温暖化対策に乗り出してから、巨額な研究費が投入され、結合モデルの性能が上がった。新聞で報道される温暖化後の気候は、その計算結果に基づいている。

大気海洋結合モデルとは、大気循環と海洋循環をお互いに相互作用させながら、地球環境の変化を現在から未来に向けて再現しようとする計算機のプログラムである。誰も、このような方法で、未来の人間社会が予測できるとは思わないであろう。人間社会の歴史の予測は無理だが、地球環境システムの予測は可能である、と考える根拠はあるのだろうか。確かに、天体の運動のような単純なシステムは物理法則によって、見事に未来が予測できる。それと同じように、地球環境システムは、物理法則の適用で未来の状態が予測できるほ

ど単純なのであろうか。私には、そのように思えない。

大気中の二酸化炭素の増加をモデルに入れると、様々な気候因子に影響を与え、巡り巡って、日本列島の将来の気温がどうなるか、降水量がどうなるか、というような結果が出てくる。二酸化炭素の増加から降水量の変化に至る因果関係は、あまりに複雑で、よく分からぬ（単純な因果関係が見えないからこそ、地球全体の気候変化をまるごと再現するという発想が生まれる）。モデルの信頼性の評価として、観測された過去のグローバル平均気温の変化と、コンピューターが再現した過去のグローバル平均気温の変化の仕方がよく似ているということがいわれるが、グローバルな平均気温の推移が似ていることは、地域的な気候を正しく再現している保証にはならない。極端な例で恐縮であるが、グローバルな平均値と地域的な気象の関係は、熱力学における温度と分子の熱運動の関係に似ている。膨大な分子のランダムな熱運動の結果、一定の温度が決まる。温度が決まることと、その温度をもたらしている分子運動の具体的な様子とは関係はあるが、別問題である。おそらく、温度が決まても、それをもたらす無数の異なる分子運動のパターンが存在するだろう。同じように、コンピューターシミュレーションが運良くグローバルな平均気温の変化を正しく予測したとしても、地域的な気候の変化のバリエーションはいろいろあるだろう。スケールが小さい現象ほど、シミュレーションは難しくなるので、この特集のテーマと関係する降水量の地域的な予測は至難の業であろう。

「前温暖化時代」には、このような発想で未来の気候を予測しようという研究はほとんど学問的な関心を呼ばなかった。コンピュータが作り出す疑似気候変化は、あくまでコンピュータの作り出した気候であって、それが現実の未来予測になるなど、誰も考えていなかつたのである。それ故、気候学者の興味は、未来の気候よりは、過去の気候に向いていた。ところが、1988年以降、その常識が逆転した。多くの人が、過去の気候より未来の気候に関心をもつようになった。シミュレーションの結果が、あたかも、現実世界の未来予測のように新聞で報道されるようになった。

## 7. 結語：温暖化論争の構図

前述したように、グローバルな気候は、沢山の因子の集合で形成されているので、気候変化に関わる原因と結果の因果性は明確でない。因果性が

明確でない現象は、いいかげんな予測であっても、それに反論することは非常に難しい。例えば、「2012年に富士山が噴火する」という予測に対して「2012年に絶対に噴火しない」といえない。しかし、2012年が過ぎると予測の真偽は明らかになる。一方、100年後の予測に対しては、真偽の判定に100年かかる。気候変化が政治のテーマになり得た原因是、一見、客観的な自然科学の問題のように見えて、実は「真偽が見えにくい」という側面があるからではないだろうか。真偽が見えにくい問題は、権威が威力を振るう余地が生まれる。IPCCの予測は、(予測を検証できないという点で)古代ギリシャの政策決定に大きな役割を果たしたといわれるデルフォイの神託と似ている。

1988年以降の地球温暖化の社会現象を見て、ある傾向に気がついた。第1に、1988年以前から気候の研究を行っていた専門家は、この問題で沈黙している人が多い。第2に、積極的に地球温暖化の危機を主張する研究者は、社会情勢の変化に対応して、1988年以降に研究テーマをシフトした人が多い。IPCCレポートには多くの気候学・気象学の研究者が参加しているが、1988年以降にグローバルな気候の研究を始めた人がほとんどである。第3に、地球温暖化問題に積極的に反論している人は、ほとんど気象学とは別の分野の研究者である。しかし、何より驚くのは、日本を含めた先進国の政府がこぞってグローバルな気候変化に

関心を示し、100年後の地球環境の保全を環境政策の最重要項目に掲げたことである。一気象学者の議会発言をきっかけに、政府主導の新常識ができるという構図には、大きな違和感を感じる。政府が、自然科学の間違った仮説を政策に利用して、社会に大きなダメージを与えた例として、マイケル・クライ顿は、優生学、ルイセンコ説を挙げている<sup>7)</sup>。温暖化問題が第3の例にならないことを望む。

## 文献

- 1) 武田喬男 雨の科学 気象ブックス 015 成山堂書店 2005
- 2) IPCC レポート 2007, Cambridge University Press, 2007 (気象庁のHPに評価報告書の日本語訳がある).
- 3) F. Fujibe, N. Yamazaki, M. Katsuyama and K. Kobayashi, SOLA, 2005 Vol. 1, 041-044 (日本気象学会の電子版学術誌。日本気象学会のHPで閲読可).
- 4) F. Fujibe, N. Yamazaki Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 84, 1033-1046, 2006 (日本気象学会のHPで閲読可).
- 5) 藤部文昭, 天気, Vol. 57, No. 7, 449~462 (日本気象学会のHPで閲読可)
- 6) 松島義章 貝が語る縄文海進 有隣新書 64 有隣堂 2006
- 7) マイケル・クライ顿「恐怖の存在」早川書房, 2005

# 斜面崩壊

ちぎら まさひろ  
千木良 雅弘\*

## 【Key Word】

地震、降雨、降雪、深層崩壊

### 1. はじめに

良く知られている通り、我が国は地殻変動や火山活動が活発なだけでなく、モンスーン気候による多雨地帯である。さらに、あまり知られていないが、日本海側は世界でも有数の豪雪地帯である。言い換れば、我が国は世界で最も自然災害を受けやすい国の代表であるとも言える。我が国は、明治30年の砂防法と森林法を初めとして、昭和33年の地すべり等防止法、昭和44年の急傾斜地法、そして、平成12年の土砂災害防止法と、斜面災害に対する法的枠組みを整えながら、災害と戦ってきた。それでも、近年、地球的な気候変化に伴って降雨や降雪のパターンが変化することが指摘されてきており、土砂災害の発生頻度や様式も変わることが懸念されている。また、近年では、従来の法的枠組みの対象に入らない、いわゆる「足の長い」崩壊が、2009年台湾の小林村の深層崩壊発生後、問題になってきている。加えて、2011年東北地方太平洋沖地震を契機に、日本中のいたるところで地震活動が活発な状態になっている。4月11日に福島県で発生したM7の地震は顕著な地表地震断層も出現させた。

崩壊を発生させる最も一般的な誘因は、地震と降雨であるが、我が国のように両方が頻繁に繰り返されるような国では、これらは斜面崩壊の誘因として独立とは言えない。つまり、大きな地震が発生した時に、直接的に引き起こされる崩壊もあるが、その後の降雨によって発生する崩壊もある。また、地震によっては、事前に大雨を経験している場合もあるし、経験していない場合もある。これらの繰り返しパターンがかなり重要であるらしいことも経験的にわかつてきた。

上記のようなことを背景として、本稿では、地

震、降雨、降雪の繰り返しと斜面崩壊との関係について整理し、さらに、深層崩壊について述べる。

### 2. 地震と降雨・降雪の繰り返しと崩壊

2011年東日本大震災以来、強い降雨が予想されると、「地震によって地盤が緩んでいるので少しの降雨でも土砂災害が発生する危険性があります」といった注意喚起がなされている。確かにその通りであるが、今までの経験から、同様の地震に関する斜面崩壊発生状況を比較すると、実際には、大量の降雨があった後に地震が発生する方がかえって危険度が高いことがわかる。

地震と降雨・降雪・融雪の繰り返しには、次のように幾つかのパターンがある。

- 降雨→地震
- 地震→降雨
- 降雪→地震→融雪
- 地震→降雪→融雪

以降、これらの繰り返しの斜面崩壊に対する影響について、表1に示すような実際の事例を取り上げながら考えてみる。

表1 本論で触れた地震の一覧。網目は斜面崩壊を多発した地震。

地震名	発生現地日時	M	断層タイプなど	地震断層の出現	地質	地質時代
1949年今市地震	12月26日8時17分 8時25分	6.4 6.7	不明	なし	中古成層、深成岩、火砕物	古生代—更新世
1968年十勝沖地震	5月16日	7.9	海溝型	—	火砕物	更新世
1978年伊豆大島近海地震	1月14日	7.0	右横ずれ	有	火山噴出物	中新世—更新世
2000年神津島沖	7月1日	6.4	—(海域)	なし	火山噴出物	第四紀
2004年新潟県中越	10月23日	6.8	逆	有(不明瞭)	堆積岩	新第三紀以降
2007年能登半島地震	3月25日	6.9	逆断層	なし	堆積岩、火山噴出物	新第三紀以降
2007年中越沖地震	7月16日	6.8	逆断層	なし	堆積岩	新第三紀以降
2008年岩手宮城内陸地震	6月14日	7.2	逆断層	有(不明瞭)	火山噴出物	新第三紀以降
2008年汶川地震	5月12日	7.9	逆断層	有	堆積岩、花崗岩	プレカンブリアンから新第三紀
2011年東北地方太平洋沖地震	3月11日	9	海溝型地震	—	様々	様々

\* 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 教授

## 2.1 降雨→地震

降雨が斜面の安定性を低下させることは、良く知られていることである。その原因是、いくつかあげられるが、地盤の湿潤によるサクションの消失、雨水による地盤の自重増加、そして、間隙水圧の上昇による有効応力の減少などが主なものである。

ここでは、地震前の降雨状況が異なり、おそらくそれを反映して崩壊の発生状況が大きく異なっていた事例を2つ挙げる。

### (1) 2004年中越地震, 2007年中越沖地震, 2007年能登半島地震

これらの地震は、いずれも日本海側の新第三系地帯で発生したもので、マグニチュード6.8または6.9であった。地質、地形的には類似していたにも関わらず、崩壊発生頻度は圧倒的に中越地震時に高かった(千木良, 2007)<sup>1)</sup>。図1にこれらの地震に先行する10日間の降雨状況を示す。

これらの3つの地震は、新第三系から第四系の堆積岩と火山噴出物の分布する地域で発生した。それらに先行する降雨は、中越地震の時には、約170mmの降雨が10日間にあり、また、3日前には約100mmの降雨があった。能登半島地震の場合、10日間でもわずか50mmにみたない降雨があったのみであり、積雪はなかった。中越沖地震の場合には、10日間で約50mmの先行降雨であった。

中越地震の時には、斜面の崩壊が発生しただけでなく、緩傾斜の谷に堆積していた土砂が流動化するような現象も多数発生した。これらは、堆積物が飽和した状態にあり、地震によって間隙水圧が上昇して液状化に近い状態が起こったと推定されている(千木良, 2007)<sup>1)</sup>。この原因は3日前の約100mmの降雨に求められる。

### (2) 1969年十勝沖地震, 2008年岩手・宮城内陸地震, 2011年東北地方太平洋沖地震など

これらの地震は、マグニチュードも異なり、また、岩手・宮城内陸地震は内陸型で、その他の2つは海溝型地震である。東北地方太平洋沖地震が圧倒的に強く、広域に震度6強の地震動を引き起こした。しかしながら、この地震の引き起こした斜面崩壊は限定的で、比較的大規模なものは、福島県白河市の数か所か所、栃木県北部で発生した数か所ものに限られるようである。このように崩壊発生箇所が非常に少なかった主な理由の一つは、地震前の先行降雨が非常に少なかったことに

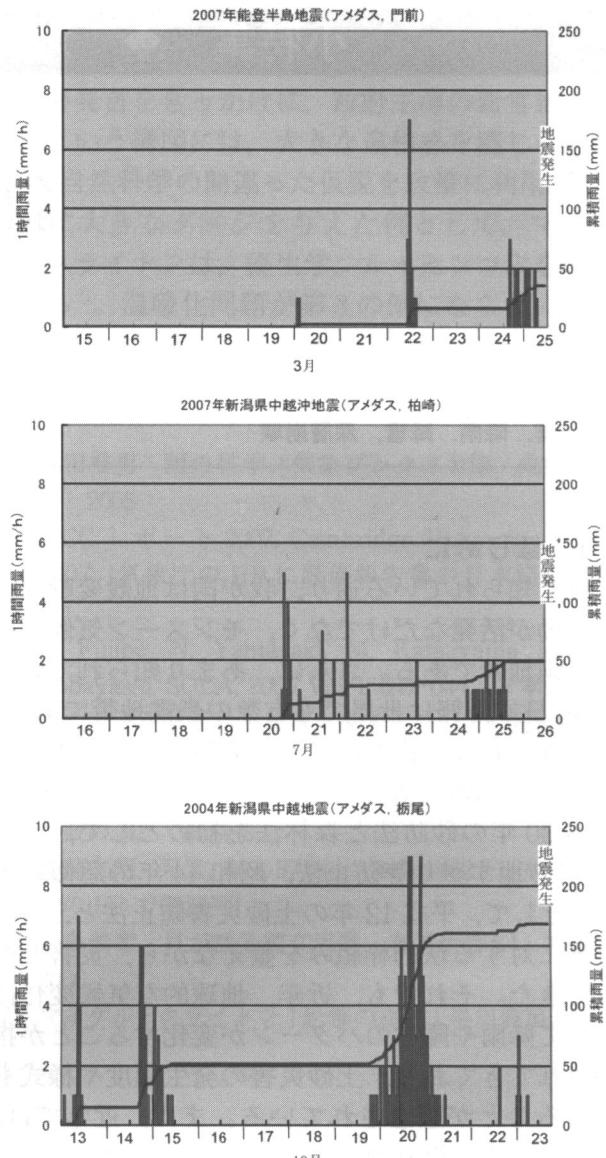


図1 日本海側で発生した3つの地震に先行した降雨状況。2004年中越地震の時には3日前に約100mmの降雨があったが、他の2つの地震の時には降雨が極めて少なかった。

求められる。白河市では10日間で12.5mm, 1カ月間で80mm、また、震度5強以上を経験した地域を広域的にみても、地震前1カ月間の降雨は非常に少なかった。

一方、この地震で白河市や栃木県那賀川町で発生した崩壊は、1949年今市地震(Morimoto, 1951)<sup>2)</sup>や1968年十勝沖地震(東北大学理学部地質学古生物学教室災害調査グループ, 1969)<sup>3)</sup>、1978年伊豆大島近海地震(千木良, 1995)<sup>4)</sup>の時に発生した風化降下火碎物の崩壊に極めて良く似た崩壊特性と地質条件を持っていて(千木良・中筋他, 2011)<sup>5)</sup>。いずれも、深さ数mの古土壤あるいは風化軽石層、風化火山灰層中にすべり面が形成され、上の層が高速で斜面下方に流れ広がったも

のである(図2)。これらの崩壊は、大抵の場合流動性が高く、2011年東北地方太平洋沖地震の際に発生した崩壊の見かけの摩擦角は、 $10^{\circ}$ から $16^{\circ}$ であった。上記の地震時に発生した崩壊の頻度を比べると、2011年東北地方太平洋沖地震時の崩壊発生頻度が極めて低かった。これらの地震に先行した降雨状況を、10日間、30日間、60日間について図3にまとめて比較した。どのくらいの期間の先行降雨を考慮すべきかは、降雨量、降雨強度、そして、地盤の透水性と保水性との兼ね合いによると考えられるが、風化火碎物の場合、保水性が高いので、他の一般的な堆積岩類などよりは長期を考える必要がある。この図を見て明らかなように、東北地方太平洋沖地震のみが、いずれの期間をとってもかけ離れて少ない降水量であったことがわかる。おそらく今回の地震よりも先行降雨が多ければ、もっと多数の崩壊が発生していたものと考えられる。ただし、これらの降下火碎物の地震による崩壊は、地質構造的要因に加えて、形態的にみて下部切断された斜面に発生する場合が多く確認されているため、個々の発生場所予測にあたっては、このことを考慮する必要がある。



図2 福島県白河市葉ノ木平の崩壊(国土交通省、東北地方太平洋沖地震 ヘリ調査報告より)。

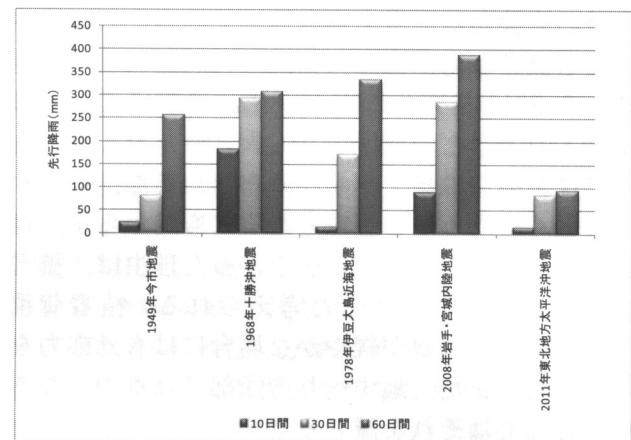


図3 地震による降下火碎物の崩壊に先行した降雨。それぞれの地震について、左から、10日間、30日間、60日間の先行降雨量。いずれも気象庁ホームページの過去の気象データによる。今市地震—宇都宮、十勝沖地震—八戸、伊豆大島近海地震—稻取、岩手・宮城内陸地震—駒の湯、東北地方太平洋沖地震—白河。

つまり中越、中越沖、能登半島地震などと似た規模であった。また、震央域の地質は、これらの地震の地域と同様の新第三紀から第四紀にかけての堆積岩と火山噴出物からなり、数多くの地すべりが地形的に認められる。この地震の場合が他の3つの地震と大きく違ったのは、地震発生当時、積雪が2mから3mあったことである。

この地震によって発生した地すべり・崩壊は、断層の上盤側で震央距離11km以内に、極めて限定期に発生した。段丘崖の急斜面の表層崩壊を除くと、比較的規模の大きなものは5カ所で発生したのみであった。それらの内3カ所は地すべり、2カ所は崩壊で、その崩壊土砂は雪とともに渓谷を長距離移動した。地すべりはいずれも堆積岩の流れ盤斜面に発生したもので、2カ所は、下部を侵食によって切断された初生的なもの、1カ所は古い地すべりの脚部を侵食によって切断されたものであった。つまり、地震時に発生する地すべりの典型的なものであった。崩壊は、1カ所のものは、受け盤の急斜面に発生したもの、もう1カ所(2斜面)は、地層の走向方向の斜面に発生したもので、非常に大規模な地すべりの末端の崩壊であった。これらは、いずれも谷底に堆積していた雪の上に落下し、雪を巻き込みながら谷沿いを流下した(図4)。そのうち1つは、天然ダムとなって川をせき止めて、池を形成した。ダム堤体自体に雪が含まれているため、融雪時にダムが決壊することは十分考えられることから、それが強く懸念されている。これらの内長距離移動した崩壊の見

## 2.2 降雪→地震→融雪

### 2011年長野県北部地震

厚い積雪がある地域で強い地震が起こった事例は、近年では2011年長野県北部地震である(土砂管理研究グループ「雪崩・地すべり研究センター」, 2011<sup>6)</sup>; 千木良・松浦他, 2011<sup>7)</sup>)。この地震は東北地方太平洋沖地震が3月11日に発生した翌日の3月12日に発生したもので、マグニチュード6.7,

かけの摩擦角は、雪を巻き込んでいるために小さいと予測されたが実際には、 $16^{\circ}$ と $19^{\circ}$ であり、前述した2011年東北地方太平洋沖地震による葉ノ木平( $10^{\circ}$ )などの崩壊よりも大きかった。震央近くには数多くの地すべりが分布し、また、地下水位も低くなかったと想定されるにも関わらず、地すべりや崩壊の発生数が少なかった理由は、積雪に帰することができると考えられる。積雪荷重は、すべり面傾斜が緩やかな場合には有効応力を増大させ、また、地すべりの頭部では推力となるが、脚部ではそれを減じる効果を發揮する。これらの効果の合計として、積雪が強い地震動に対して地すべりを守ったと考えられる。ただし、地盤の中には地震動によるひずみが発生しているはずであり、積雪の被覆が失われ、かつ、融雪水が地盤に浸透すると、安定性が失われることが懸念される。



図4 2011年長野県北部地震による辰口の崩壊（撮影、アジア航測株式会社）。崩壊土砂が雪を巻き込みながら長距離移動した。

### 2.3 地震→降雪→融雪

#### 2004年中越地震

2004年10月23日の中越地震は膨大な数の崩壊を誘発し、さらに、山地に数多くの亀裂を生じ、不安定斜面を作りだした。また、震央域は、わが国有数の豪雪地帯であり、2004年から翌年にかけての冬は、1985年から1986年にかけての豪雪以来の積雪があり、それは3mを越えた（川邊・権田他, 2005<sup>8)</sup>）。そのため、融雪に伴う崩壊や地すべりの多発が強く懸念された。ところが、翌年の調査によると（川邊・権田他, 2005<sup>8)</sup>；千木良・中筋他, 2005<sup>9)</sup>），融雪に伴って河川を流下した土砂は増加していたが、意外にも崩壊が著しく増加したこととはなかった。このことの原因は明らかでないが、貴重な経験的データを提供している。つまり、この場合には、新第三紀から第四紀にかけて

の堆積岩地域で強い地震が発生し、斜面に数多くの亀裂が形成し、その後豪雪が降って融雪が起こっても、必ずしもそれらが大きく拡大するわけではないことを示している（図5）。

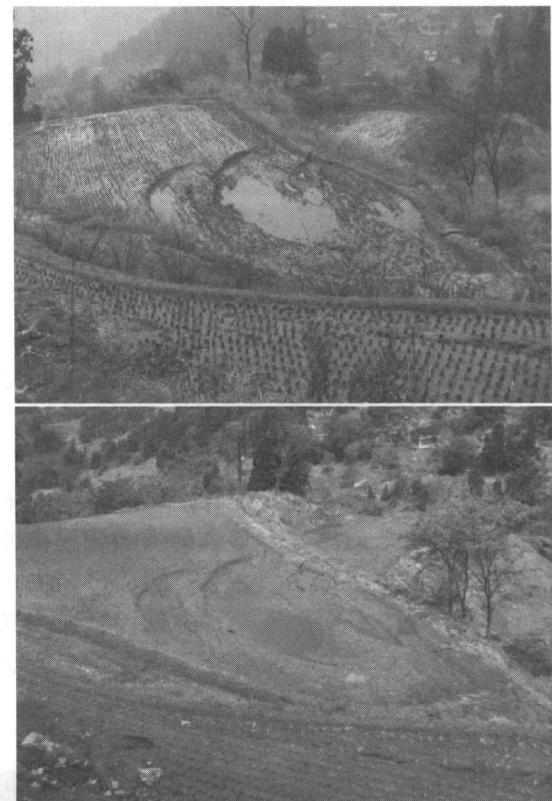


図5 2004年新潟県中越地震によって形成された亀裂（2004年12月）と、融雪後の亀裂の状況（2005年5月）。両者にほとんど差がなく、融雪が亀裂を拡大しなかったことがわかる。山越村役場東方。

### 2.4 地震→降雨

#### (1) 2000年新島・神津島近海地震

地震に引き続いて強い降雨があるような事例で、経時的に崩壊の発生状況が調べて報告された事例は少ない。2000年新島・神津島近海地震の際には、9日間に地震→降雨→地震と繰り返され、流紋岩質の火山である神津島で崩壊発生に対するこれらの影響が分析された（宮崎他, 2005）<sup>10)</sup>。経緯は次のようにある。

7月1日 震度6弱の地震

—618個の崩壊発生。他に128か所の既存の崩壊の拡大。

7月7日-8日 24時間に291mmの降雨（最大時間雨量52mm）

—123個の崩壊発生。他に162か所の既存の崩壊の拡大。

7月9日 震度6弱から5強の地震

—102 個の崩壊発生。他に 209 か所の既存の崩壊の拡大。

神津島は、主に流紋岩質溶岩と軽石や火山灰の火碎物からなる。地震時には、降雨時の崩壊に比べてより急傾斜の斜面に崩壊が発生した。また、地震時には崩壊発生に対して地質の選択性はなかったが、7月7日～8日にかけての降雨では、透水性の高い亀裂質の溶岩や細粒分に乏しい火碎物には崩壊が少なく、細粒分に富み透水性の低い火碎物近傍で崩壊が多く発生した。このように、地震動の影響を受けた後の降雨に対しては、透水性の高い物質のみからなる場合よりも、降雨の浸透を妨げる難透水層近傍で間隙水圧が高まって崩壊が発生する場合が多いようである。

## (2) 汶川地震

2008 年 5 月 12 日に四川省で発生した汶川地震は、それ自体膨大な数の崩壊を発生したが (Chigira et al., 2010)<sup>11)</sup>、その後、次の事例を初めとする土石流が多発した (Tangchuang, 談話)。9 月 24 日には北川で豪雨によって土石流が発生し、42 名が死亡し、地震の被災者の移転先も襲われた。地震時に清平で発生した崩壊地一本地震による崩壊で 2 番目に大きなもの一下流では、2010 年 8 月 13 日の土石流によって 12 名が死亡し、また、500 棟が埋没した。これらの大規模な土石流は、降雨によって新たに崩壊が発生したというよりも、地震時の崩壊の堆積物が谷に堆積しており、それが土石流として再移動したものである。

## 3. 深層崩壊

2008 年 8 月 9 日の台湾小林村の大規模な崩壊発生以来、深層崩壊が注目されている。この対極には表層崩壊があり、両者の間に明確な定義上の境界があるわけではないが、一般的には、表層崩壊は、斜面表層の風化物や崩積土の崩壊であり、深層崩壊は風化や堆積などの表層プロセスに起因する崩壊ではなくもっと深部の地質構造に起因した崩壊である。

深層崩壊は、地すべりのように緩慢な土砂移動ではなく、急速な移動を伴い、多くの場合、移動距離が長い。そのため、広い範囲に大きな災害を引き起こす。

深層崩壊は、地震によっても引き起こされるが、以下は降雨によるものを想定する。降雨による最近の土砂災害を表 2 にまとめた。この図をみてわかるとおり、豪雨による表層崩壊が群発すること

はかなり一般的であるが、深層崩壊の発生は数少ない。このことの一因は、表層崩壊を引き起こす降雨状況と深層崩壊を引き起こす降雨パターンとが異なることによるようである。定性的に言えば、表層崩壊は短時間の強雨、深層崩壊は大量の降雨によって引き起こされる。

我が国では、最近では 2004 年の三重県宮川村の災害、2004 年の愛媛県西条の災害、2005 年の宮崎県耳川の災害などがあげられる。発生後の地質・地形調査によれば、これらの大規模な崩壊は、事前に重力によって変形していた岩盤が崩壊したものである (千木良, 2007)<sup>12)</sup>。

表 2 近年の豪雨災害。○は多数発生、△は少数であるが発生したことを示す。

発生時	誘因	場所	地質	大規模崩壊	小規模群発
1999/6/29	雨(梅雨前線)	広島市	花崗岩	—	○
1999/7/28-29	雨(前線)	北海道留萌	堆積軟岩	—	○
2000/7/1-9	地震と雨	神津島	流紋岩質火碎物	—	○
2000/9/11-12	雨(前線+T14)	東海地方	花崗岩	—	○
2003/7/20	雨(前線)	水俣、菱刈	安山岩溶岩	△	○
2003/8/9-10	雨(T10)	北海道日高	第三紀堆積岩剥離砂岩と礫岩	—	○
同上		同上	メランジュ	—	○
2004/7/13	雨(梅雨前線)	新潟県長岡西方	泥岩	—	○
同上		福井足羽川	火山岩地帯?	—	○
2004/9/28-29	雨(T21)	三重県宮川村	硬質の堆積岩	○	△
2004/8/1	雨(T10)	徳島県木沢村	硬質の堆積岩と緑色岩	△	△
2004/9/29	雨(T21)	愛媛県西条～香川県	硬質の砂岩	—	○
2004/9/29	雨(T21)	愛媛県西条	片岩	○	○
2005/9/6	雨(台風14号)	宮崎県耳川流域	硬質の堆積岩	○	△
2006/7/19	雨(梅雨前線)	長野県岡谷	火山灰	—	○
2009/7/21	雨(梅雨前線)	山口県防府	花崗岩	—	○
2009/8/9	台風モラコット	台湾	堆積岩	○	○
2010/7/16	雨(前線)	広島県庄原	風化土、黒土	—	○

大まかにみると、これらの重力による変形は、体積 10 万 m<sup>3</sup> 以上の崩壊の場合には、発生前に空中写真で認められるようである (羽田野, 1968<sup>13)</sup>; 千木良, 2007<sup>14)</sup>)。

重力による岩盤の変形(岩盤クリープ)には様々なタイプのものがあるが、面構造の発達した岩盤の場合には、図 6 のようなタイプのものがある。これらの中、重力的にみて最も不安定なのは、座屈である。つまり、斜面下方で地層の座屈がおこり、その変形が進んでいくと、変形した岩盤は下部の逆転翼部によって支えられた形になるが、この支えが破壊されると、斜面上方の地層に働く力の均衡が急激に大きく崩れ、一挙に不安定となるためである。

2009 年に発生した小林村の崩壊は、発生前にこのタイプの座屈変形をしていた地層が崩壊したものである (Tsou et al., 2010)<sup>15)</sup>。

また、筆者らの台湾北部大漢川流域での調査によれば、多くの深層崩壊がこのタイプであることが明らかになりつつある。

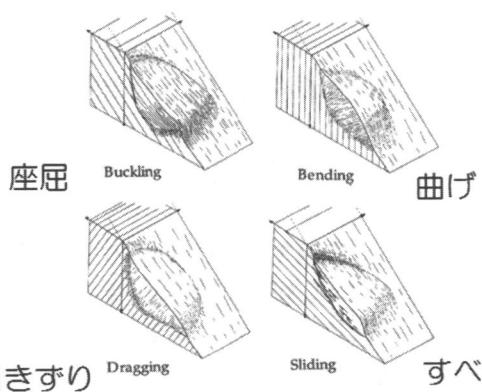


図 6 面構造と岩盤の重力による変形との関係を示す模式図。



図 7 台湾小林村の崩壊源に見られた座屈タイプの岩盤クリープ。この変形は崩壊前の地形にも明瞭に認められた。

#### 引用文献

- 1) 千木良雅弘 (2007) : 崩壊の場所一大規模崩壊発生場所予測. 近未来社, 256 p.
- 2) Morimoto, R. (1951): Geology of Imaichi District with special reference to the earthquakes of Dec. 26th, 1949. (II). Bulletin of the Earthquake Research Institute, 29: 349-358.
- 3) 東北大学理学部地質学古生物学教室災害調査グル  
ープ (1969) : 地震に伴う自然現象と災害—青森県東北部における“1968年十勝沖地震”の実例について—, 東北大学地質学古生物学研究報告邦文 67, 1-98.
- 4) 千木良雅弘 (1995) : 風化と崩壊. 近未来社, 名古屋, 204 p.
- 5) 千木良雅弘, 中筋章人他 (2011) : 2011年東北太平洋沖地震による崩壊・地すべり (福島, 栃木) および地震断層 (福島) 調査結果. <http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/mountain/reports/110424fukushima-tochigi2011esq.pdf>
- 6) 土木研究所土砂管理研究グループ 雪崩・地すべり研究センター (2011) : 長野県北部等地震調査報告 (速報). [http://www.pwri.go.jp/team/niigata/sokuho\\_03\\_jishin\\_nagano.pdf](http://www.pwri.go.jp/team/niigata/sokuho_03_jishin_nagano.pdf)
- 7) 千木良雅弘, 松浦純生他 (2011) : 2011年長野県北部地震による斜面災害の調査報告 (速報). [http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web\\_j/saigai/20110406\\_ji-ban.pdf](http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/20110406_ji-ban.pdf)
- 8) 河邊洋, 権田豊他 (2005) : 新潟県中越地震による土砂災害と融雪後の土砂移動状況の変化. 砂防学会誌, 58-3, 44-50.
- 9) 千木良雅弘, 中筋章人他 (新潟県中越地震による土砂災害研究小委員会) (2005) : 2004年新潟県中越地震による斜面災害の融雪後の状況について. 応用地質, 46, 293-302.
- 10) 宮崎裕子・千木良雅弘・黒川潮 (2005) : 2000年新島・神津島近海地震とその後の降雨による崩壊発生の地質・地形的要因について: 流紋岩質溶岩と火碎物からなる斜面の崩壊の例. 地形, 26, 205-224.
- 11) Chigira, M., Wu, X., Inokuchi, T., and Wang, G. (2010): Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Geomorphology, 118, 225-238.
- 12) 羽田野誠一 (1968) : 地すべり性大規模崩壊と地形条件—和歌山県有田川上流の事例—: 第5回災害科学総合シンポジウム講演論文集, 209-210.
- 13) Tsou, C. -Y., Feng, Z. -Y., and Chigira, M. (2011): Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, ShiaoLin, Taiwan. Geomorphology, 127, 166-178.

# 近年の地すべり災害の傾向と今後の課題

## 【Key Word】

気候変動、地すべり災害、斜面災害、土砂災害

まる やま きよ てる  
丸 山 清 輝\*

## 1. まえがき

自然災害による犠牲者の中で、土砂災害によるものが大きな割合を占めている。しかしながら、依然として土砂災害防止施設の整備が追いつかず、土砂災害に対する安全確保が十分とは言えないのが現状である。その上、今後の気候変動に伴う大雨頻度の増加や台風強度の増大などが予測されており、土砂災害のリスクの増大が懸念されている。このため、土砂災害による被害の防止軽減対策を如何に効果的・効率的に行うかが、益々重要な課題となっている。

本文では、今後効果的・効率的な地すべり対策を進めるために、近年の地すべり災害の傾向と今後の課題について検討を行ったので紹介する。

## 2. 今後の気候変動予測と斜面災害の想定

気候変動に関する政府間パネル IPCC 第4次評価報告書による今後の気候変動予測では、以下のことことが示されている。

- (1) アジアにおいては21世紀後半には20世紀後半と比べて降水量が9%増加し、気温は3.3℃上昇する。
- (2) 日本では地域的な梅雨明けの遅れや、時間雨量30mm/h以上の豪雨の頻度が増加する。

また、今後の気候変動による斜面災害に関する想定としては、以下のことが懸念される。

- (1) 降水量の増加により、危険箇所における斜面災害が多発する。
- (2) 現在の危険箇所以外でも、斜面災害が発生する。

- (3) 雨の降り始めから斜面災害発生までの時間が短縮化し、避難が困難になる。
- (4) 斜面災害の発生頻度の増加、発生規模の増大、発生タイミングの変化により被害が激甚化する。

## 3. 気候変動による斜面災害の実態

### 3.1 日降水量の経年変化<sup>1)</sup>

図1には、1975～2006年の観測地1箇所当たりの日降水量100mm以上の年間出現日数の経年変化を、全国51観測地点の平均値で示した。日降水量100mm以上の年間出現日数は、最小値の

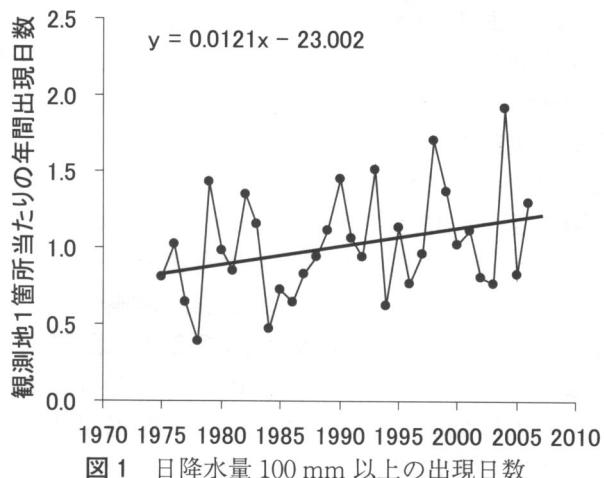


図1 日降水量100mm以上の出現日数

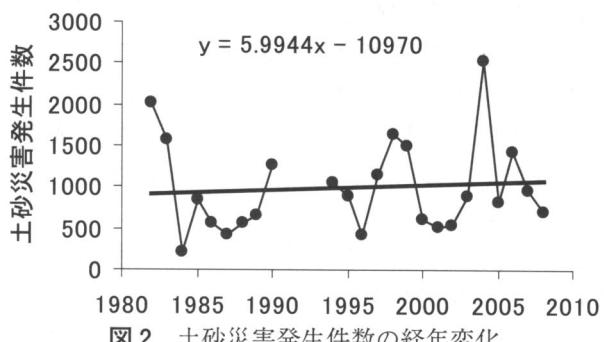


図2 土砂災害発生件数の経年変化

\* (独)土木研究所 土砂管理研究グループ

雪崩・地すべり研究センター 総括主任研究員  
博士(学術) 技術士(建設部門)

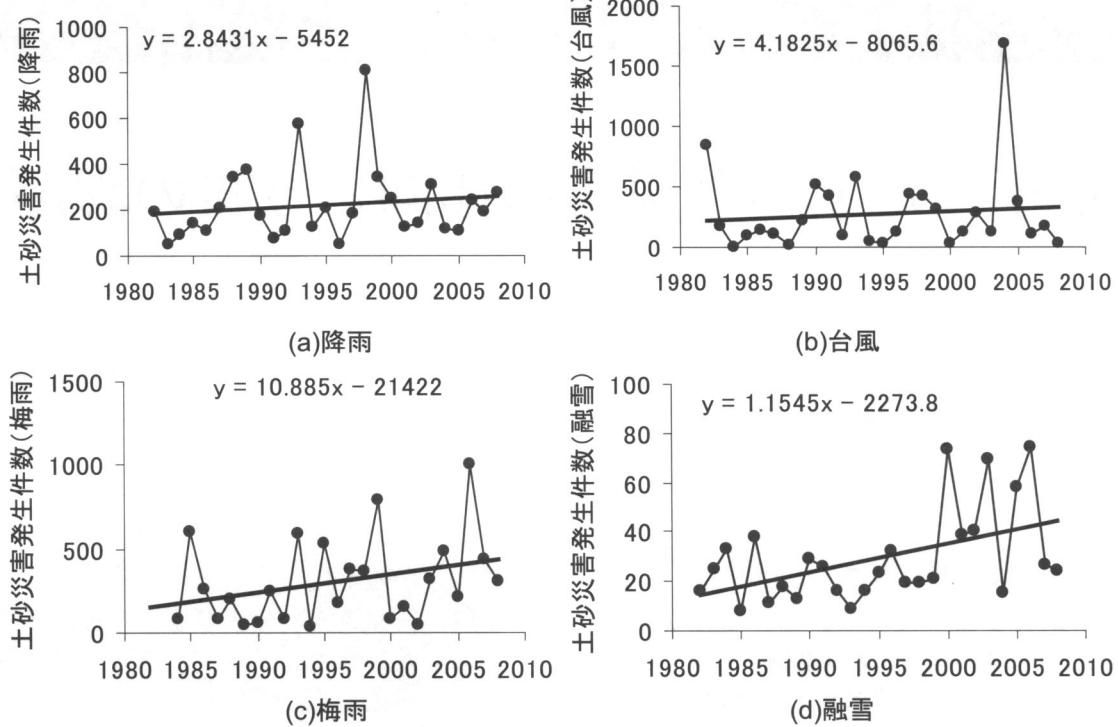


図3 誘因別土砂災害発生件数の経年変化

1978年の0.4日から最大値の2004年の1.9日まで変動するが、全体の傾向としては経過年数とともに増加傾向にあることが分かる。

### 3.2 土砂災害発生件数の経年変化<sup>2)</sup>

図2は、1982～2008年までの土砂災害発生件数(地すべり、がけ崩れ、土石流)の経年変化を示したものである(1991～1993年の雲仙普賢岳土砂災害発生年は除く)。土砂災害発生件数は、最小値の1984年の221件から最大値の2004年の2537件まで変動幅が大きいが、全体の傾向としては経過年数とともに増加傾向にある。

図3(a)～(d)は、1982～2008年までの誘因別(降雨、台風、梅雨、融雪)土砂災害発生件数の経年変化を示したものである。なお、梅雨については1982年の長崎豪雨災害と1983年の山陰豪雨災害は除いている。いずれの誘因についても、土砂災害発生件数は、全体の傾向として経過年数とともに増加傾向にある。

図4には、1975～2008年までの地すべり災害発生件数の経年変化を示した。なお、2004年の突出した値は中越地震が発生した年のものである。地すべり災害発生件数は、最小値の1977年の20件から最大値の2004年の461件までの間で変動しているが、全体の傾向として経過年数とともに増加傾向にある。

図5は、1975～2008年までのがけ崩れ災害発生件数の経年変化を示したものである。がけ崩れ災害発生件数は、最小値の1984年の103件から最

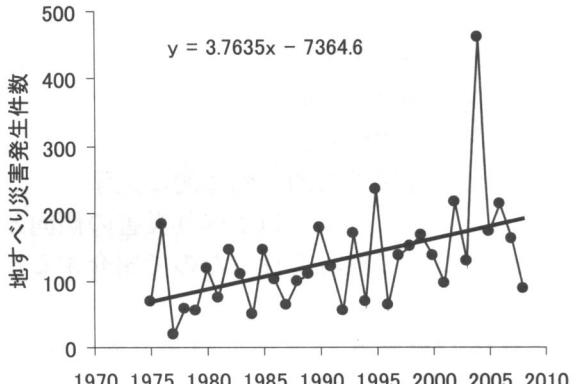


図4 地すべり災害発生件数の経年変化

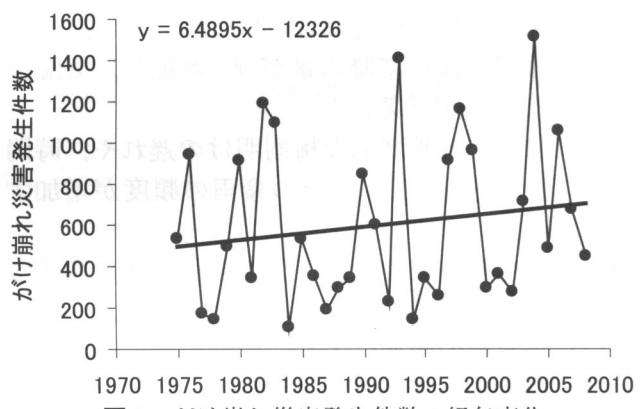
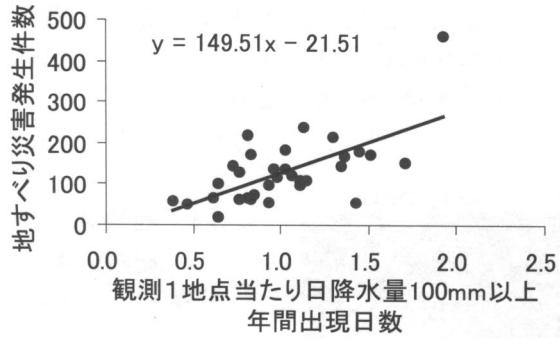


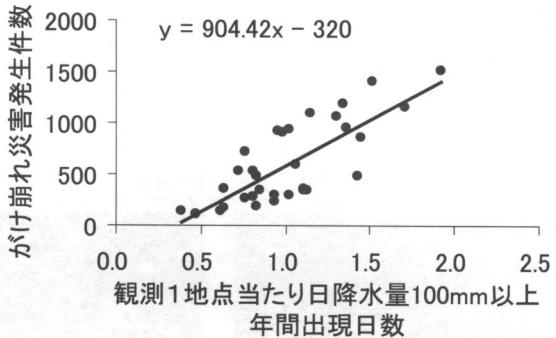
図5 がけ崩れ災害発生件数の経年変化

大値の2004年の1511件まで大きく変動しているが、全体の傾向として経過年数とともに増加傾向にある。

図6(a), (b)には、観測地1箇所当たりの日降



(a)



(b)

図6 降水量と地すべり及びがけ崩れ災害発生件数との関係

水量 100 mm 以上の年間出現日数と地すべり及びがけ崩れの災害発生件数との関係をそれぞれ示した。地すべり及びがけ崩れの災害発生件数は、豪雨発生日数の増加とともに増加する傾向がある。

これらのことから、地すべり、がけ崩れ災害発生件数は、今後の気候変動による豪雨発生日数の増加傾向に伴い、増加することが懸念される。

#### 4. 山間地の耕作放棄と地すべりの発生

山間地では耕作放棄地が増加しており、耕作放棄地で地すべりが発生している。

##### 4.1 新潟県妙高市平丸地区の事例

表1は、新潟県妙高市における農家総数の変遷を示したものである。農家総数は、平成7年から平成17年の間で約20%減少している。また、農家総数の減少に伴う過疎化により、現地では耕作放棄地の増加が認められる。

表1 農家総数の変遷（新潟県妙高市）

年次	農家総数	専業農家		兼業農家		農家 人	農業就業人口				
		第1種兼業		第2種兼業			総数 人	男 人	女 人		
		戸数	割合 %	戸数	割合 %						
平成7年	3,640	339	9.3	289	7.9	3,012	82.7	15,260	4,390	1,564	2,826
平成12年	3,201	273	11.3	136	5.6	2,017	83.1	13,431	3,407	1,357	2,050
平成17年	2,832	264	13.8	149	7.8	1,495	78.4	11,166	2,716	1,168	1,548

資料:農林業センサス

図7には、妙高市平丸花立地区における地すべり発生状況を示した。平成18~21年の間に7件の地すべりが発生している。

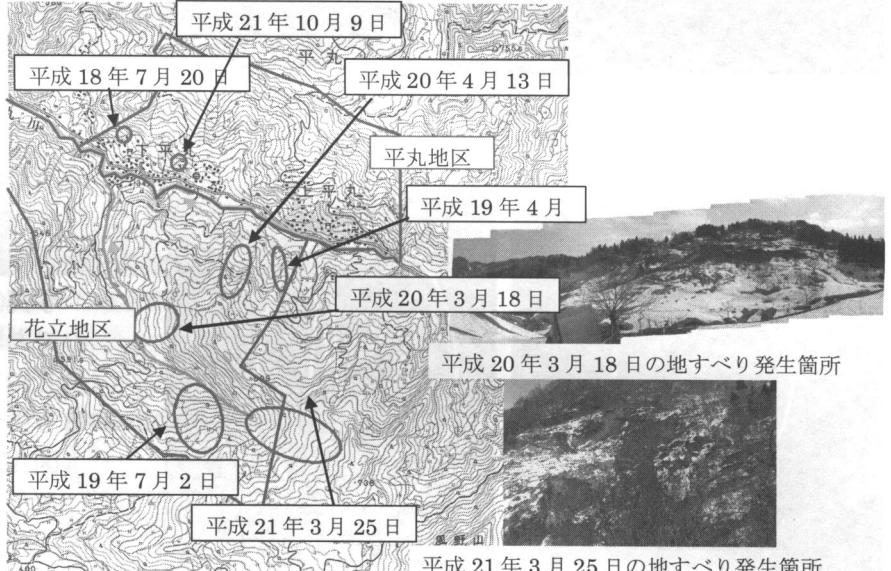


図7 地すべり発生状況

写真1は、地すべり発生斜面の土地利用の変化を、昭和46年と平成12年に撮影された空中写真で示したものである。3箇所の地すべり発生斜面では、耕作地の荒廃が認められる。

写真2~4には、平成19年7月2日、平成20年3月18日、平成21年3月25日に、それぞれ地すべりが発生した斜面（矢印の部分で地すべりが発生）の土地利用の変化を示した。平成19年7月2日に地すべりが発生した斜面においては、平成12年撮影の写真では棚田が耕作放棄地になっているのが認められる。また、平成20年3月18日及び平成21年3月25日に地すべりが発生した斜面では、平成12年撮影の写真に地すべり発生斜面の上部が棚田の耕作放棄地になっているのが認められる。

これらのことから、耕作放棄は斜面の安定性に悪影響を及ぼしていることが考えられ、今後は耕作放棄と地すべり発生との関連性について明らかにする必要がある。また、今後懸念される気候変

動による豪雨発生日数の増加も考慮した、山間地における耕作放棄地の管理が大きな課題である。

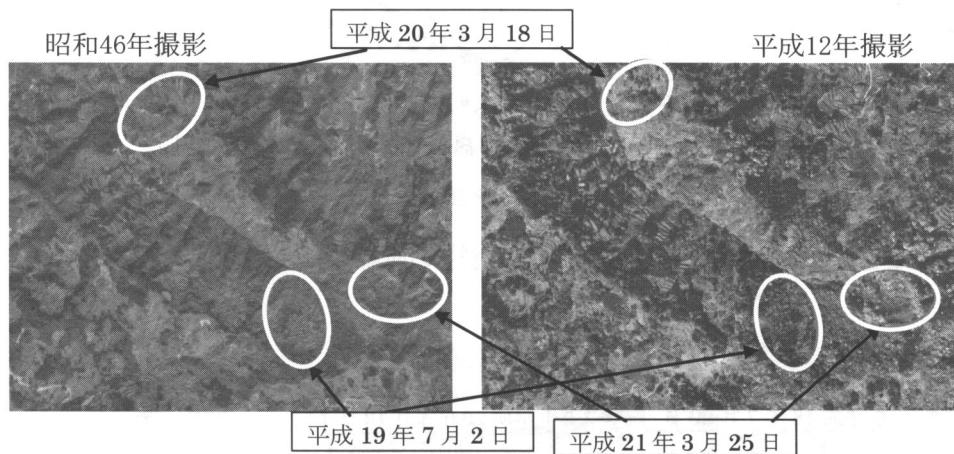


写真1 地すべり発生斜面の土地利用の変化

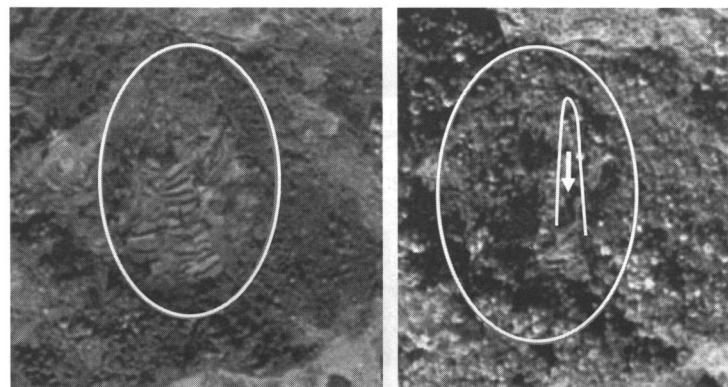


写真2 平成19年7月2日の地すべり発生斜面

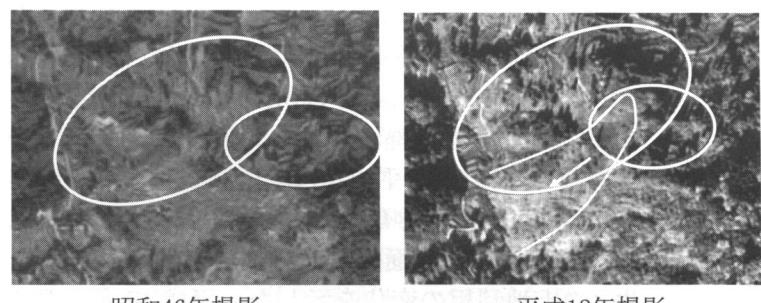


写真3 平成20年3月18日の地すべり発生斜面

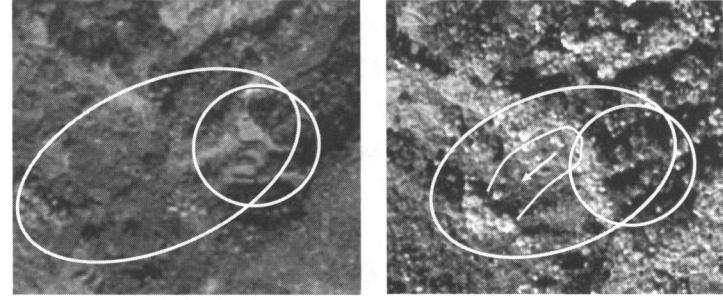


写真4 平成21年3月25日の地すべり発生斜面

## 5. 地表水・地下水排除施設の管理の現状

地すべりを防止するために、数多くの地表水・地下水排除施設が設置されているが、それらの管理が課題になっている。

### 5.1 地表水・地下水排除施設の現状

写真5(a), (b)は、横ボーリングについて示したものである。横ボーリングが雑草で覆われてしまったものや、集水管がスライムで閉塞したものなどがあり、機能低下を生じているものがある。

写真6(a), (b)には、集水井について示した。排水管が

破損し集水井内に水がたまつたもの、集水管がスライムで閉塞したものなどがあり、機能低下を生じたものがある。

写真7(a), (b)は、水路について示したものである。目地の開いたもの、鋼製水路が腐食したものなどがあり、機能低下を生じているものがある。

図13には、全国の地表水・地下水排除施設の機能低下状況を示した。調査した施設数に対する機能低下が生じている施設数の割合は、横ボーリング32%, 集水井38%, 排水トンネル27%, 水路34%であり、全国的に地表水・地下水排除施設の機能低下が生じていることが分かる。

今後は、豪雨発生日数の増加が想定されることから、地すべり斜面の安定を維持して行くために地表水・地下水排除施設の管理が非常に重要になる。このため、地表水・地下水排除施設の管理を、効率的・効果的に実施してゆくことが大きな課題である。

## 6.まとめ

近年の地すべり災害の傾向と課題について、気象データと土砂災害発生件数をもとに検討した。以下に、その結果を示す。

- (1) 1975~2006年の観測地1箇所当たりの日降水量100mm以上の年間出現日数の経年変化は、全体の傾向としては経過年数とともに増加傾向にある。
- (2) 1982~2008年までの土砂災害発生件数(地すべり、がけ崩れ、土石流)の経年変化は、全体の傾向としては経過年数



(a) 雜草で覆われた横ボーリング



写真5 横ボーリングの現状



(a) 滞水した集水井

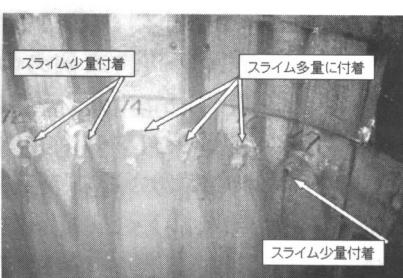


写真6 集水井の現状



(a) 目地の開いた水路

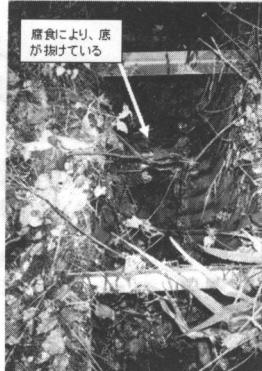


写真7 水路の現状

とともに増加傾向にある。

(3) 気候変動に関する政府間パネルIPCC第4次評価報告書による今後の気候変動予測では豪雨発生日数の増加が予測されており、それに伴い地すべり、がけ崩れ災害発生件数の増加が懸念される。

(4) 山間地では耕作放棄地が増加し、耕作放棄が斜面の安定性に悪影響を及ぼしていることが考えられ、今後は耕作放棄と地すべり発生との関連性について明らかにする必要がある。また、今後懸念される気候変動による豪雨発生日数の増加も考慮した、山間地における耕作放棄地の管理が大きな課題である。

(5) 全国の地表水・地下水排除施設の機能低下状況を調査した結果、調査した施設数の約30%で機能低下が生じていることが分かった。

(6) 今後は、豪雨発生日数の増加が想定されることから、地すべり斜面の安定を維持して行くために地表水・地下水排除施設の管理を、効率的・効果的に実施してゆくことが大きな課題である。

#### 参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート 2008, pp. 29~30, 平成21年3月
- 2) 砂防・地すべり技術センター：土砂災害の実態, 1982~2008

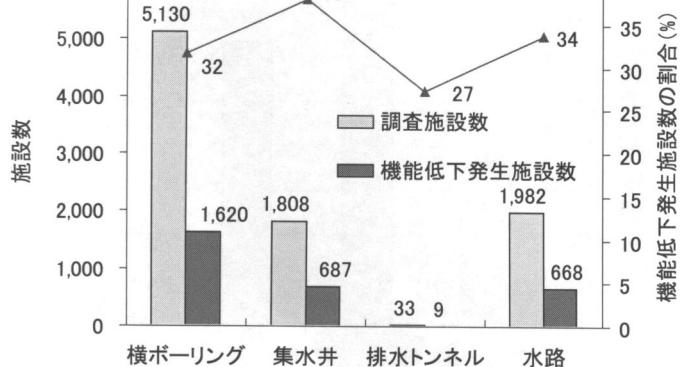


図13 全国の地表水・地下水排除施設の機能低下状況

# 近年の斜面災害の傾向と対応策…土石流を中心に

## 【Key Word】

記録的短時間豪雨、鉄砲水、河床上昇、表層崩壊、降雨予測

いし づか ただ のり  
石 塚 忠 範\*

## 1. はじめに

近年、時間雨量 100 mm を超えるような記録的な短時間豪雨がしばしば発生し、これに伴う土砂災害も増加傾向にあると考えられる。過去 3カ年に発生した総雨量 300 mm 未満で時間雨量が 50 mm 以上の記録的短時間豪雨による土砂災害の代表的な事例を表 1 に示す。降雨強度は、土砂災害を発生させる重要な条件といえるが、降雨の継続時間によっても災害形態は異なる。一般に降雨強度も大きくその継続時間も長い場合は、土砂災害が広域的に発生し、下流河川でも氾濫被害が生じることが多いものと考えられる。一方、降雨強度は大きくとも、継続時間が短い場合には、継続時間の長い豪雨に比べて、相対的に土砂災害は発生し難いと考えられるが、降雨強度が記録的である場合には、やはり土砂災害が発生している。

本稿では、局所的な短時間豪雨によって発生し

た土砂災害事例の中から、2010 年 7 月に広島県庄原市で発生した災害について紹介し、近年しばしば発生する記録的短時間豪雨によりもたらされる土砂災害の特徴について考察する。

## 2. 記録的短時間豪雨による土砂災害の事例

### 2.1 2010 年 7 月広島県庄原市災害の概要

2010 年 7 月 16 日に広島県庄原市を襲った集中

2010/7/16 17:00 (16:00~17:00 の 1 時間雨量)

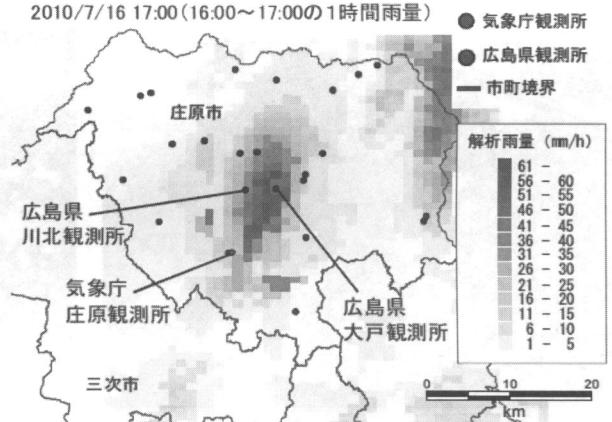


図 1 気象庁の解析雨量の分布（庄原市域、16 日 17 時）

### 崩壊・土石流の起り始め(17時ごろ)

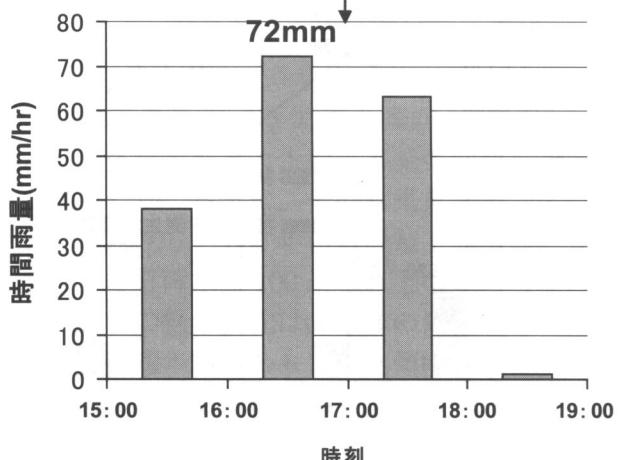


図 2 災害当日の広島県大戸観測所の雨量データ

\* (独)土木研究所土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム

豪雨により、同時多発的に土砂災害が発生し、庄原市川北町を中心に全壊 13 戸、死者 1 名の被害が生じた（2010 年 8 月 3 日広島県砂防課発表）。

## 2.2 災害当日の気象状況

気象庁の庄原観測所の観測によると、梅雨入りの 6 月 13 日から災害発生前日の 7 月 15 日までの雨量は 547 mm、特に災害発生前の 5 日間（7 月 11 日～15 日）の雨量は 271 mm と梅雨入り後の総雨量のおよそ半分が集中していた。

一方、災害発生の 16 日は、被害が集中した地域では、16 時までは降雨は無く、16 時～19 時までの 3 時間に降雨が集中し、その後直ちに止んだ。被害の集中した地域の西端にあたる広島県の川北観測所で 16 時～19 時の 3 時間に 125 mm（時間最大 54 mm）、東端にあたる大戸観測所で 173 mm（時間最大 75 mm）の降雨が観測されており、この両観測所に挟まれた地域ではより多くの降雨があった可能性がある。図 1 の気象庁の解析雨量の分布に見られるように、強度が 50 mm/hr 以上の雨域が、東西 2～3 km しかない極めて局所的な豪雨である。

## 2.3 調査結果

7 月 18 日、19 日に撮影された空中写真を見ると、土砂移動の痕跡は、西側は大津恵川、東側は大戸川に挟まれた狭い範囲内に集中して認められる（図 3、写真 1）。この範囲は、図 1 に示された降雨強度の大きい範囲と概ね対応している。

### (1) 大戸川流域

大戸川は、流域面積  $4.48 \text{ km}^2$  を有し、南流して、江の川水系西城川に合流する山地小河川である。



図 3 土砂移動現象の発生範囲



写真 1 集中的に発生した崩壊



写真 2 大戸川 先大戸地区



写真 3 土砂、流木流出堆積状況（先大戸地区）



写真 4 表層崩壊（斜面上部のみが崩壊、中腹からは流送部（草が倒伏））



写真5 篠堂川の河床上昇と流水による家屋被害

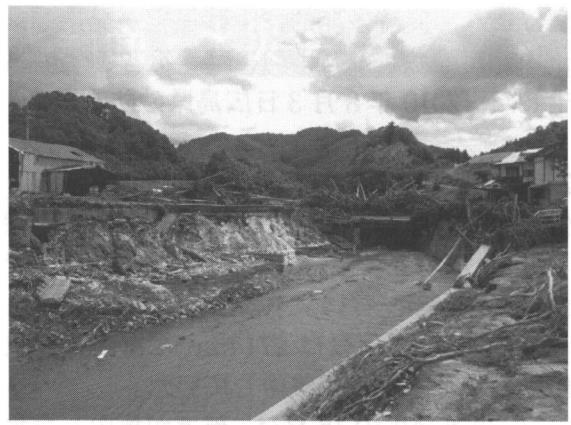


写真6 大津恵川との合流点下流における橋梁の流木による閉塞

主な地質は、土木地質図によると、安山岩質・流紋岩質凝灰岩、花崗岩であり、基岩の上には、過去のテフラ（黒ボク）等の黒色土層が見られる。

ヘリコプターによる観察では、同河川の中流域から上流はほぼ全域で崩壊・土石流が発生している状況が確認された。中流部に位置する幅の広い谷底平野（先大戸地区）では、西から1本、北から2本の合計3支溪が合流しており、その全てから土砂と流木が流出していた（写真2）。流出土砂には巨礫はあまり含まれておらず、大部分がそれ以下の粒径の礫、砂で占められていた（写真3）。

一方、その下流域でも土石流が発生・氾濫し、ダム関連工事の現場で13人が取り残された他、家屋被害が生じているが、これは主に下流部で右岸側から合流する支川で発生した土石流による土砂が氾濫して、被害を及ぼしたものと考えられる。

## （2）篠堂川流域

篠堂川は、大津恵川合流点から上流の流域面積約 $4.24\text{ km}^2$ を有し、西流して、川北川、西城川に合流する山地小河川である。主な地質は、大戸川とほぼ同様である。

ヘリコプターからの観察では、同河川は、大津恵川合流点から上流のほぼ全域にわたって、無数の崩壊、土石流が発生している。写真4に現地で見られる典型的な斜面崩壊の状況を示した。崩壊深は概ね1m以下で、典型的な平行斜面で発生している。斜面上部で崩壊した土砂は、下部斜面上を流走したが、顕著に侵食することは無く、斜面脚部ですぐに停止していた。

篠堂地区の家屋は多くが被災をしているが、被災形態は大きく二つに分かれる。一つは、支川から発生した土石流、流木による被災であり、もう一つは、本川の洪水流による被災である。河床が最大で5m程度と大きく上昇しており、家屋が流

失被害に遭うとともに、残った家屋も宅地地盤と河床との比高差がほとんどないような箇所も見受けられた（写真5）。

実際に本災害で被災した篠堂地区の住民の方の証言では、夕方5時頃に住宅が土石流によって破壊されたこと、さらにそれより少し前の時点で、篠堂本川沿いの家屋では、鉄砲水によって家屋浸水が発生していたこと、の二点が得られている。雨の降り始めから1時間程度で、本川の流量が急増するとともに、支川から土石流が発生し始めたことが伺われる。

篠堂川の河床上昇・氾濫は、大津恵川との合流点のやや下流まで続いている。大津恵川からは、水と流木が流出した痕跡は認められるが、顕著な土砂流出の痕跡は見当たらなかった。合流点下流では流木によって閉塞された橋梁（写真6）があ



写真7 篠堂川下流の土砂堆積範囲末端

り、その下流では顕著に氾濫している様子は見られなかった（写真7）。

## 2.4 被害状況のまとめと考察

梅雨末期の局地的集中豪雨によって広島県庄原市で発生した土砂災害の特徴を総括すると、以下のとおりとなる。

### （1）崩壊・土石流の局地的多発

図3から分かる通り、極めて狭い範囲に高密度に崩壊、土石流の発生が集中している点が今回の災害の最大の特徴である。狭い範囲に集中した理由としては、報道等で「雨のカーテン」と言われたような極端とも言える局地的豪雨であったことが大きなものとして考えられる。

ほぼ1年前に山口県防府市で発生した土砂災害においても、限られた範囲に集中的に降った雨によって土砂災害が高密度に発生した。しかし、今回の土砂災害で崩壊・土石流の発生が見られた範囲はさらに狭く、集中の度合いでは2009年の山口災害を上回っている。このように極端に高密度に崩壊・土石流の発生をもたらすような局地的集中豪雨への対応については、今後、気象現象としての観点と合わせて、土砂災害の発生時期・形態を予測する観点からも重要な課題の一つと言える。

### （2）降り始めからの災害発生時間

次に、降り始めから土砂災害発生までの時間が非常に短いことも大きな特徴である。今回の災害の直接の引き金となったのは、3時間という短時間に集中した豪雨である。篠堂地区の住民の方の証言では、雨が降り始めてから1時間程度の17時頃には、土石流の発生が始まっていたものと考えられる。

一連降雨として考えた場合、先行降雨がほとんど無い状況で土石流が発生したとも言えるが、災害発生の前日までを考えると、大量の降雨があったことが分かっている。このように豪雨の時間的地理的偏在性が極端な現象を対象として、土砂災害の発生予測を考える場合は、ある程度の期間に

わたって影響する土壌水分も考慮に入れる必要が示唆される。

## 4. おわりに

山地小流域で記録的短時間豪雨が発生すると、それにより、局所的に薄い表層崩壊が集中的に発生する他、雨水が短時間で集中することで渓流流量が急激に増加するといった現象が発生する。その結果、土砂や流木が大量に流出し、急勾配の渓流出口で氾濫・堆積するのみでなく、土石流危険渓流が合流した下流の山地小河川においても、緩勾配区間での河床上昇や、狭窄部での閉塞を引き越し、氾濫被害を生じると考えられる。

今後とも気候変動の影響等により、記録的な短時間豪雨が頻発するようになれば、同様の形態の土砂災害が、これまでよりも頻繁に発生するようになることが考えられる。雨域が小さく、豪雨の継続時間も短いことから、その影響範囲は限定的であるが、その範囲内においては、広島県庄原市の事例が示す通り被害は激甚なものとなる。

この形態の土砂災害は、地形、地質条件との関連が相対的に低いと考えられるため、短時間豪雨が発生すれば、どこでも発生し得るものと考えおかねばならない。このため、その対応に当たっては降雨予測が極めて重要となるが、局所的短時間豪雨を精度よく予測することは難しいと言わざるを得ないのが現状である<sup>2)</sup>。今後、XバンドMPレーダー等を活用した、より高精度な短時間降雨予測技術の開発が期待されるとともに、土砂災害の発生予測の観点からも、局地的短時間豪雨の影響に関する知見を蓄積し、その精度向上につなげていくことが重要である。

## 参考文献

- 1) (独)土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：近年発生した鉄砲水災害事例、土木研究所資料、No. 4126
- 2) 山越ほか：10分間更新短時間降雨予測の土砂災害警戒避難への適用、土木技術資料、Vol. 43, No. 11, pp. 26-31

# 気候変動等気象の変化に対応する河川管理のあり方

## 【Key Word】

気候変動、治水安全度、水割リスク、気候変動適応策、豪雨、レーダ雨量

やま もと  
山 本 聰\*

## 1. はじめに

気候変動に伴う影響は、「気候変動に関する政府間パネル」(以下 IPCC とする)の第4次報告書に記載されているように、地球温暖化の影響は、生態系、水資源、防災、食糧、産業、健康など多岐にわたることが報告されている。特に河川管理する上で関連性の高いものとしては海平面の上昇と降雨量の増加や異常な台風の発生等による水害の頻度の増加と規模の拡大があげられる。

我が国は、国土の7割を山地・丘陵地が占め、約10%にすぎない沖積平野に全人口の約1/2、総資産の約3/4が集中している。我が国の社会経済の中核である三大都市圏の存在する三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）にはゼロメートル地帯が発達し、その面積は約600km<sup>2</sup>、居住人口は約400万人にのぼっている。また、山岳が急峻であることから、短く急勾配の河川が多く、断層や地すべり地帯がいたる所に分布するなど、災害の危険性が高い地形・地質条件である。さらに、我が国は世界でも有数の多雨地帯であるモンスーンアジアの東端に位置し、年平均降雨量は世界平均の約2倍にあたる約1,700mmであることに加え、数多くの台風の接近や上陸の脅威にさらされ、時間100mmを超える降雨が頻発するなど一度に激しい雨が降るといった極めて厳しい気象条件にある。このように我が国は、水害や土砂災害、高潮災害等が頻発する脆弱な国土であるため、他の先進諸国に比較すると水害に対して著しく脆弱な国土になっており、今まで治水整備に多額の投資を行い近年は一昔前に比べ膨大な死傷者が発生する事態は幸いにして避けられている。しかし、流域住民の生命・財産の安全安心を確保することを目

標とする計画対象とする大規模な降雨に対してはいまだ目的を確保できていない状況にある。

このような状況の中、地球温暖化に伴う気候変動に伴い発生することが予想されている洪水流出量の増加や、海平面の上昇という新たな外力増加に対応しなければならない厳しい状況に直面している。

ここでは気候変動による河川の治水安全度の低下に関しての予測の現状とそれに対応する適応策等の対処法の考え方について述べる。また、現在進行中の豪雨対策（ゲリラ豪雨）を早期に探知するXバンドMPレーダの進捗状況について併せて紹介する。

## 2. 気候変動による降雨量の変化

気候変動に伴う降雨量の増加とそれに伴う河川の流出増を予測することは、IPCCの検討からは直接には出来ない。このため治水の安全度がどう変化するか予測することは、IPCCの報告書の基となっている地球全体の全球モデルからダウンスケーリングをするなど日本周辺の現象をより詳細に表現できるモデルによる検討が必要である。

この種の検討についてはIPCCの気温上昇の各種シナリオやシナリオ毎に有している予測の幅やダウンスケーリングの際の手法等により幾つかの検討結果が公表されており、計算機の能力や気象現象の解明状況などから、検討には不確実性が伴うものの、降雨量等の変化量の推定が試みられている。国土交通省ではこの解析に、気象庁気象研究所で開発された、水平解像度20kmの高解像度全球気候モデル（GCM20）と地域気候モデル（RCM20）を使用し、年最大日降雨量を現在と100年後とで比較している。具体的には変化率（21世紀末の20年の平均値/20世紀末の20年の平均値）を算定している。変化率はIPCCの温暖

\* 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部長  
(前・河川研究部長)

化の各種シナリオについて異なるとともに各シナリオで幅を持っているが、中位のシナリオで算定している。図1は社会資本整備審議会河川分科会で使用した検討結果<sup>1)</sup>であるが、GCM20を使用してA1Bシナリオ（高成長型社会シナリオ）で算定した変化率を記載した。また全国を12ブロックに分けて算定しているが、高緯度である北海道、東北などは1.3倍になっている。

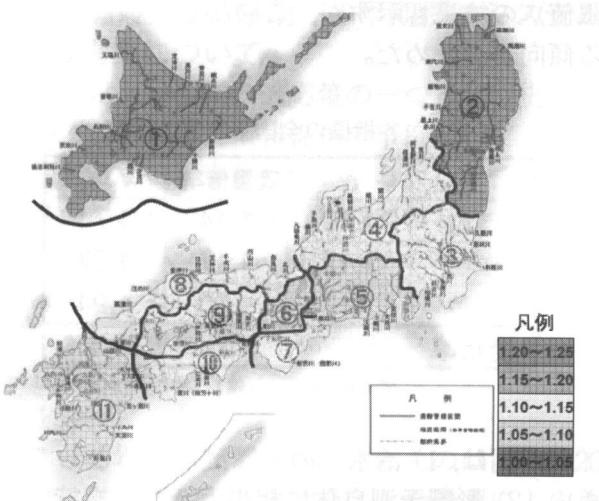


図1 各地域における平均年最大降雨量の変化比

現在、年々進歩する気候変動シミュレーションによって、地球温暖化がもたらす降雨変化予測結果の情報が質・量ともに上がってきている。あるモデルの計算では日本の河川・流域の降雨現象を対象にするために、気象変動予測計算のメッシュサイズを20kmから5kmに更に細分化したモデルで分析する等、世界的に見ても非常に小さくし、豪雨といったスケールの気象現象まで再現することがモデル上では可能になってきている。しかし、その反面計算の繰り返しや、異なるモデルの比較結果によって予測の信頼性を吟味するという通常行われる手順を踏むことが現段階では難しい状況にある。温暖化ガスの排出シナリオ自体に関しても想定の幅が存在することから、算定した数値の信頼性を考えると将来の予測には予測の幅を考慮すべきである。

### 3. 気候変動による水害リスクの増加とそれに対応する河川整備事業

気候変動に伴う治水安全度の変化を算定するためには降雨量の増加に伴う流量の増加を予測することが必要である。直轄管理河川を対象として実

際の河川計画に使用されている流出解析モデルを適用して予測される最大流量を求めた。この結果を各ブロック毎の年最大降雨量の変化率（21世紀末の20年の平均値/20世紀末の20年の平均値；以下 $\alpha$ とする）とそれに伴って変化する流量の倍率について図示している（図2参照）。この検討についてはGCM20を使用して算定しているが、年最大降雨量変化率に比べ流量倍率は大きな数値を示しており、増大する割合が増幅している傾向が読み取れる。

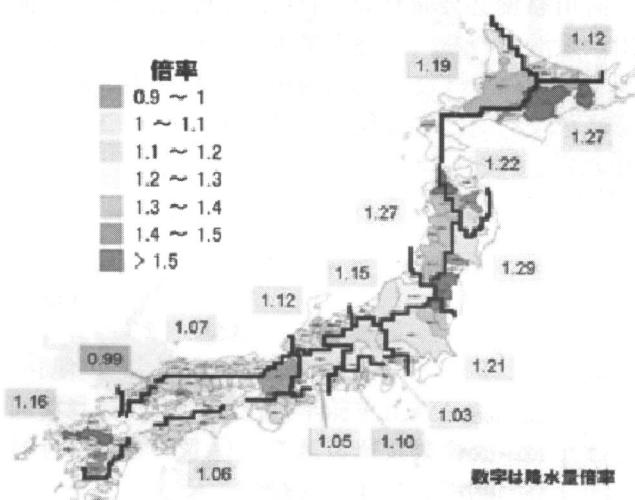


図2 流量倍率の全国分布

次にこれらの流量の増加、即ち洪水氾濫リスクの増加に対処するために必要な河川整備事業量の増加について試算した。気候変動により将来の年最大降雨量が増加していく状況下において、当初（現状の方針の規模）と同一の目標水準（確率規模）の治水安全度を維持するためには、整備規模を拡充し、気候変動の影響による降雨増加分を埋め合わせる必要がある。対象としたのは一級水系の国管理基本本川区間（大河川）で、新たに設けた共通指標「河川整備必要量比」を用いて試算した結果を示すものである。

河川整備基本方針に示されている目標水準に相当する洪水を現況の整備途上の河道に流下させると、図3に示すように最高水位 $H_p$ が計画高水位 $H_{HWL}$ を上回る区間が生じる。そこで整備規模の大きさを表す指標として図3の青色部分の水量 $V$ を用いることとし、以降 $V$ を河川整備必要量と呼ぶこととする。

現在気候下および将来気候下における河川整備必要量 $V_p$ 、 $V_F$ は、当初の整備規模とそれに気候変動の影響を吸収する拡充分を加えた整備規模に

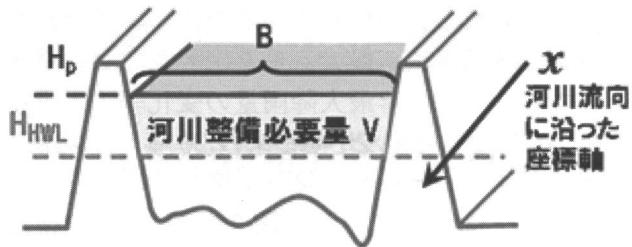


図3 河川整備必要量の定義

対応すると考え、これらの比  $V_F/V_P$  を「河川整備必要量比」と設定した。

河川整備必要量比は、「気候変動適応を全て河水系沿いのハード整備によって行う」ことを意図したものではなく、治水施策に及ぼす気候変動影響を包括的に定量化する表現方法の一つとなるもので、適応策検討の土台になりうることに着目して採用したものである。

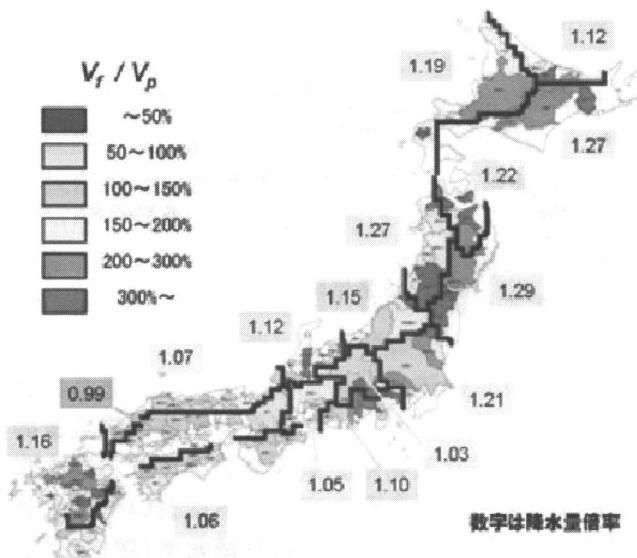


図4 河川整備必要量比の全国分布

年最大降雨量の変化率  $\alpha$  の中央値を与えて河川整備必要量比  $V_F/V_P$  を計算した結果を図4に示す。同程度の  $\alpha$  を与えた水系間において  $V_F/V_P$  の差違が大きくなっているブロックもあるが、この原因是、 $V_F$  は雨量倍率に応じて単調に増加するものの、 $V_P$  では  $H_p-H_{HWL}$  の大きさが整備進捗状況（目標水準に対する整備達成の度合い）に応じて水系ごとに異なるためである。

地域のブロックによって整備量が3倍を超すような河川も存在するが、これは、前述のように気候変動による影響と現在の整備率（残事業のボリューム）によって個別の水系では大きな数値となつた河川である。

以上の  $V_F/V_P$  計算結果について総括的に全国

平均でまとめたものが表1である。個別河川では大きな数値になるものもあるが、全国平均では気候変動による降雨量の増大は数 % から 2割程度であり、あまり大きな変化でないと認識される傾向にあるかもしれない。しかし、現在の計画と同じ安全度を確保するための事業量の変化と比較すると、少しの降水量の変化が与える影響は大きく増幅される傾向が把握できた。また表にあるように降雨量の変化倍率  $\alpha$  とその検討結果の幅の低位と高位（計算結果の95% 信頼区間の上限と下限値）の結果も示すが、この幅も同様に増大される傾向がつかめた。

表1 各指標の全国平均値の比較

	$\alpha$	流量倍率	$V_F/V_P$
低位	1.10	1.14	1.74
中位	1.12	1.17	1.82
高位	1.13	1.20	1.94
変化率	3.2%	5.5%	11.1%

変化率:(高位-低位)/(中位)×100(%)

わが国は、1) 治水への影響度が全体としては大きい、2) 影響予測自体に相当大きな幅を持つ、の両方を考慮しなければならないという難しくて不透明な状況に直面している。

#### 4. 気候変動の適応策の考え方

社会資本整備審議会の中間答申の中でも適応策の基本的方向については、増大する外力に対して河川施設の更なる整備だけでなく政策の転換を含めた方針を提言している。

主な内容は以下のようである。気候変動による外力の増加による計画規模を上回る洪水を「超過洪水」と位置づける必要があり、それへの対応としては「流域における対策で安全を確保する治水政策」へと転換する。そして、災害を完全に防御することは難しいため、「犠牲者ゼロ」に向けた検討を進める。

具体的には

- ・土地利用の規制・見直しなど地域づくり
- ・氾濫しても被害の少ない地域づくり
- ・危機管理対応を中心とした適応策
- ・大規模災害への対応体制の整備
- ・危機管理対応の充実・強化

等の政策転換を含めた提言を行っている。

適応策の規模については、現在と同レベルの安全度を確保するためには数 % オーダーでなく数割オーダーの事業増大の投資や効率化が求められ

るが、この規模の投資増や、成熟してきたとみられる河川整備の技術体系から、このレベルのイノベーションを達成することは容易ではない。したがって、河川整備にとどまらず流域での施策を開拓すること、例えば今まで一部流域で実践され効果を發揮してきた総合治水対策を、規模や実質的な効果量について大幅に進化させることが求められる。いずれにしろ「後悔しない戦略」の具体化が求められているのである。

## 5. 豪雨（ゲリラ豪雨）の早期探知システムの構築について

ここでは気候変動の適応策の一つとして提言されている危機管理、情報提供の事例として、都市域で頻発している豪雨（いわゆるゲリラ豪雨）の被害減少のために国土交通省で整備を進め、現在試験運用中のXバンドMPレーダの整備内容について紹介する。なお言うまでもなく、最近頻発しているいわゆるゲリラ豪雨は気候変動が原因で頻発しているという学問的解析はなされていないことを最初に申し述べておく。

いわゆるゲリラ豪雨が注目されたのは、平成20年7月に神戸市の都賀川で発生した豪雨による急激な増水により児童3名を含む5名が流され死亡した事件であろう。このほか東京都豊島区駒司ヶ谷の下水管内で作業員5名が急な増水により流れ死亡するほか、豪雨（ゲリラ豪雨）により、石川県金沢市街地を流れる浅野川等や愛知県岡崎市街地を流れる伊賀川等が氾濫し、人的被害や床上浸水等の甚大な被害が発生する等毎年のように各地で被害が頻発してきた。これらの被害は、少しでも早く豪雨の情報を一般市民、河川管理者等の関係機関へ知らせることが、豪雨対策として重要なことを再認識させた出来事であった。しかし、気象庁のアメダスや国土交通省で現在観測しているレーダ雨量計（現行のレーダ雨量計）等も含めた現在の観測システムの中では、これらの豪雨をタイムリーに探知する機器は存在しない。

### （1）豪雨（ゲリラ豪雨）の増加

近年豪雨の発生の頻度が高まっている。特に気象予報の精度が高まるにつれ、従来豪雨の中で一番警戒していた台風による降雨については予測精度が高まっているが、急に発生する集中豪雨の被害が目立ってくるようになった。そして従来の気象台による観測網では予測困難な集中豪雨に対し、ゲリラ豪雨の名称が用いられるようになった（ゲリラの意味は、突然発生する、予測困難、

局地的等のニュアンスがあるようである。）これらの豪雨によって気象庁の報告<sup>2)</sup>によると短時間強雨や大雨の発生回数はここ30年間余りで増加傾向にあることが指摘されている。

1時間降雨量50mm以上の短時間強雨の発生回数は最近10年と30年前を比較して約1.5倍に増加している（図5）。

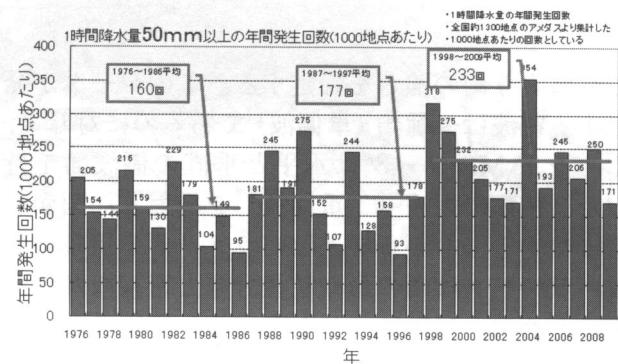


図5 1時間降雨量50mm以上の降雨の発生回数

同様に1時間80mm以上の短時間強雨の発生回数は最近10年と30年前を比較して約2倍に増加している（図6）。これらが気候変動に伴う影響かどうかについては気象学的には明確になっていないが、グラフからわかるように豪雨の頻度が増加している明確な傾向は見られる。

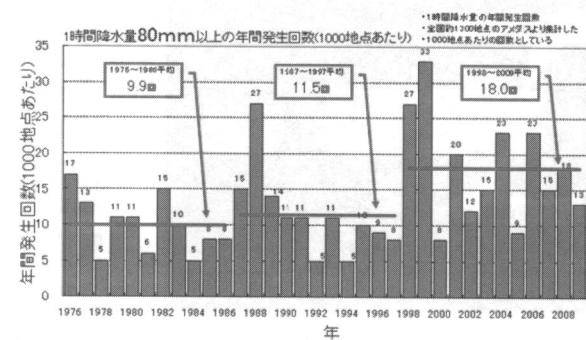


図6 1時間降雨量80mm以上の降雨の発生回数

また、上述の気候変動等により将来の豪雨の発生頻度についての予測は、東京大学など合同研究チームの報告<sup>3)</sup>によると、日降雨量100mm以上の発生回数については今後増加するという研究結果も出されている。

### （2）レーダの観測の原理について

国土交通省が現在使用している降雨情報を提供しているCバンドレーダは、雨に当たって戻ってくる電波の振幅情報（反射因子）だけを測定し、

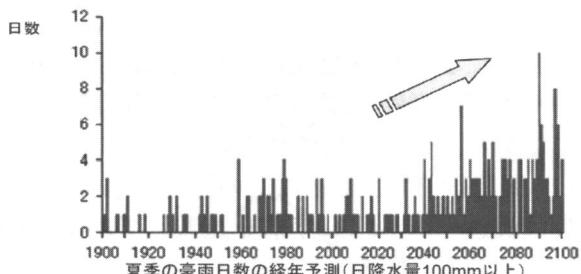


図 7 日降雨量 100 mm 以上の発生回数

これにより雨の強さを判定する。このレーダが発射する電波は一種類（単偏波）であるのに対して、X バンド MP レーダは水平と垂直の偏波面を持った 2 種類の電波（二重偏波）を発射し、雨から帰ってくる信号から様々なパラメータを得る。偏波パラメータは雨の形や粒径分布と密接な関係があるために、MP レーダを用いると精度の良い降雨量を推定することができる。具体的には、雨滴は大きくなると形が球形から扁平な形になるが（図 8），このような雨滴の降雨中を水平と垂直の偏波が伝わると、両者の位相情報を間に差が生じ、この位相差情報から雨量推定ができる。現在、MP レーダによる雨量推定精度は、十分に定量性のある雨量を推定可能なだけでなく、そのほかに風や雨滴の粒子の情報についても観測できるものになっている。

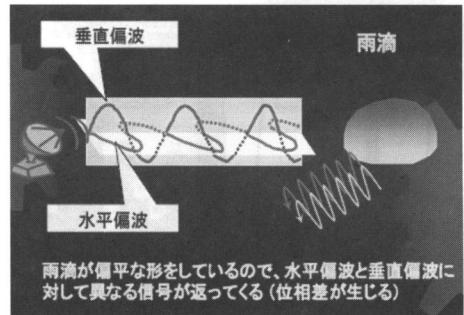


図 8 偏波レーダによる雨量観測

今回、導入された X バンド MP レーダの仕様は、現行レーダと比較して上述の偏波の違いのほかレーダ波の波長が異なっているが、このことによって下記の点で豪雨の詳細な観測が可能になる。

- 1) 高分解能化 現行レーダの観測分解能 1 km メッシュに対して X バンドの MP レーダは 250 m メッシュの観測分解能が可能となる。このため従来の 16 倍の密度での雨量情報が取得可能になる。
- 2) 高頻度化（即時性の向上）現行レーダ雨量計は、水平偏波の反射強度のみから雨量を推定するた

め、地上観測雨量とキャリブレーションを行ってレーダパラメータを随時修正することによって雨量換算の精度を確保している。この地上観測雨量の観測間隔が 5~10 分であるため、現行レーダの雨量情報の配信も 5~10 分間隔となる。一方 MP レーダでは、地上観測とのキャリブレーションが不要のため、1~2 分間隔の雨量情報の配信が実現され、即時に雨量状況を把握することが可能となった。

ここまで長所ばかり述べてきたが、X バンド帯の波長を使用することにより、観測可能なエリアが狭くなるほか、降雨による電波強度の減衰（降雨減衰）が著しいため、特に豪雨時には観測精度が低下するという欠点がある。しかし、MP レーダでは降雨減衰の影響を受けにくい位相情報を用いて雨量推定を行い、さらに複数台のレーダで異なる方向から降雨域を観測することにより、降雨減衰の影響を克服している。また、観測範囲が狭いことについても、複数台の MP レーダをネットワーク化することで克服するようにしている。

### (3) X バンド MP レーダの試験観測結果

平成 22 年の 7 月から整備の完了した 4 地区について試験運用を開始し、国土交通省の HP を通じ試験配信中である。

(<http://www.river.go.jp/xbandradar/>)

昨夏も各地で豪雨が発生しているが、試験運用直後に大きな被害を出した 7 月 5 日に東京都板橋区で発生した豪雨の配信画面を紹介する（図 9 参照）。東京都板橋区では 7 月 5 日に夕方から豪雨が発生し、板橋区では 1 時間に 107 ミリの降水が観測されたのを始め、練馬区や青梅市、埼玉県所沢市でも 1 時間に 50 ミリを超す激しい雨が降り、多数の家屋浸水や道路冠水が生じる等多大な被害が発生した。この時の配信画面を従来レーダ画面と比較してみると、高密度で高頻度の情報が提供できることが確認できる。

観測の精度についてであるが、この豪雨の時の地上雨量計と現行の C バンドレーダと X バンド MP レーダの比較したものを図 10 に示す。

地上雨量計を真値とするこの降雨の時の X バンド MP レーダの観測地はかなり精度の高い観測結果と評価できる。降雨量が時間的、面的にこの精度で把握できるようになればこのデータを応

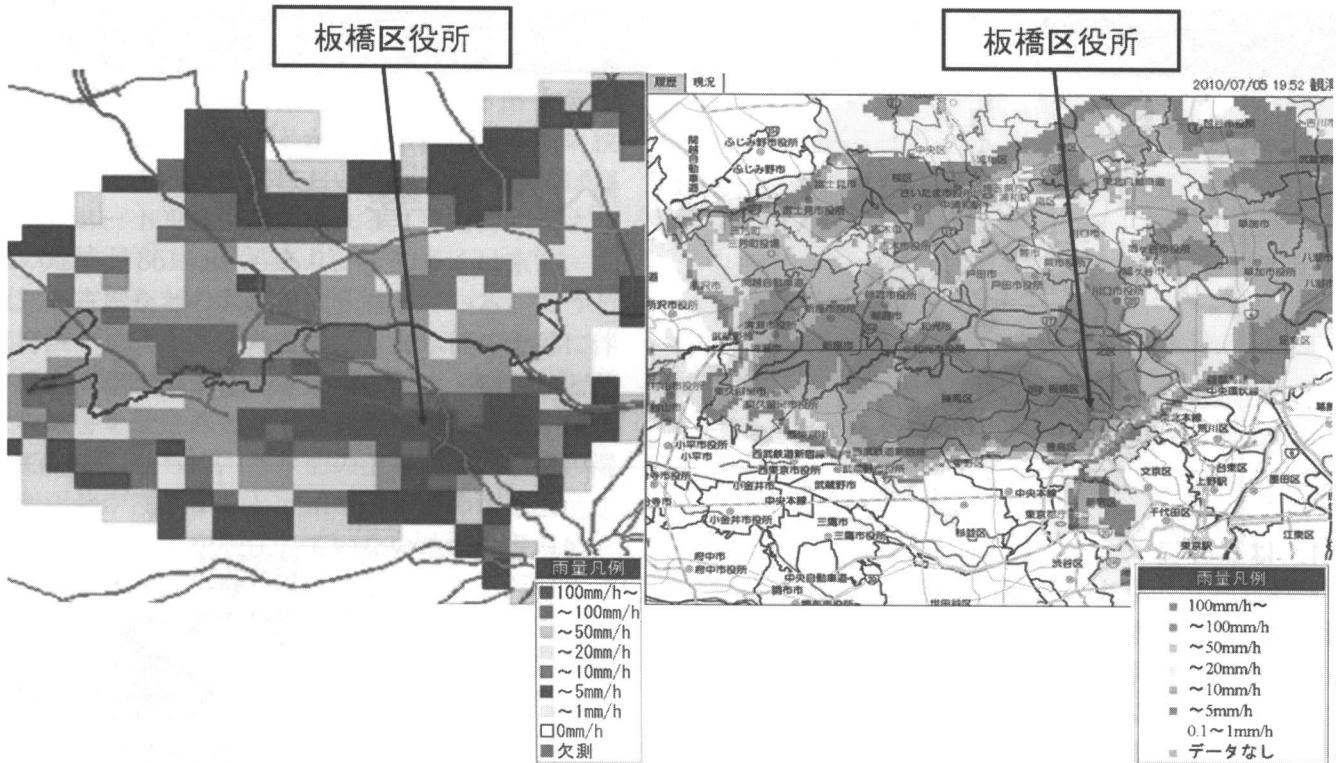


図9 配信画面（板橋区）の比較〔左：原稿レーダ（Cバンドレーダ）右：XバンドMPレーダ〕

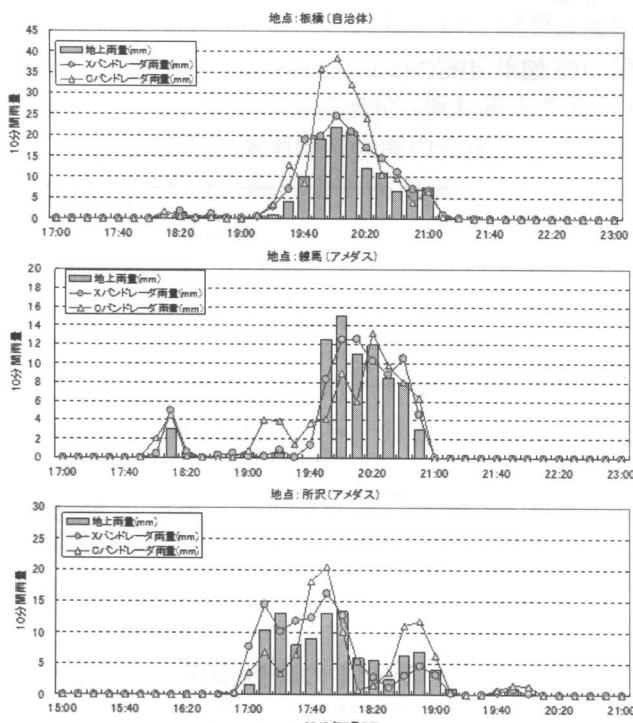


図10 7月5日豪雨の各観測所での各観測値の比較

用した流出解析やその他の利用面においても飛躍的な進歩が期待できる。

## 6. おわりに

河川に関する気候変動に伴う将来予測についての解析状況と、それに伴う適応策の事業規模の予測について紹介した。地球環境悪化について緩和策の実効性について議論が進まない中、また特にわが国にとっては国民の安全・安心についての関心が高まる中、気候変動についての適応策について真剣に議論する時期にきていると思われる。更なる「予測」についての精度向上を図り、具体的な適応策の検討が必要である。また適応策については、河川管理者だけでなく広く流域の住民も関係する課題であることを強く情報発信することが必要である。

## 参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会「水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への適応策のあり方について」(平成20年1月)
- 2) 気象庁：気候変動監視レポート2007
- 3) 東京大学など合同研究チーム：2004年9月16日報道発表

# 海岸（港湾）への影響

しま 島 だ ひろ あき\*

## 【Key Word】

海面上昇、台風の巨大化、高潮の発生、越波流量の増大

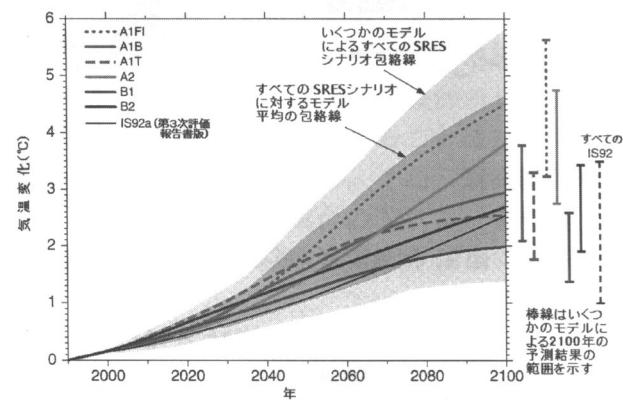
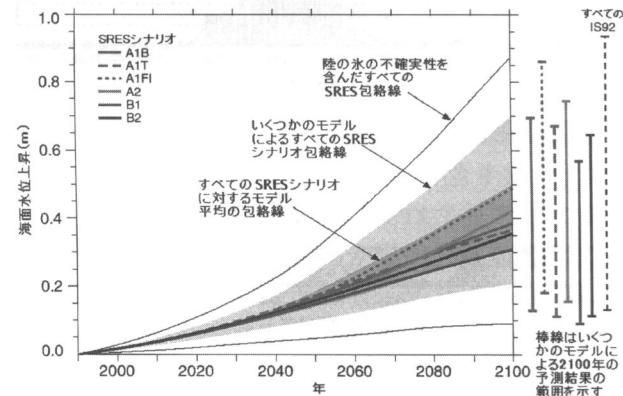
## 1. はじめに

地球温暖化が都市に及ぼす影響は少なくない。例えば、都市水害の頻発と水不足、台風の巨大化と海面上昇、異常高温による熱中症患者の増加、食物の生育障害などが考えられる。流域や沿岸域など水圏に及ぼす影響についてもう少し詳しくみてみると、大気温度が上昇すると大気中の水分量は急激に増加する。そのため、集中豪雨の頻発、台風の巨大化および発生数の増加、またそれらに伴う洪水や高潮の発生などがある。IPCC の気候モデル<sup>1)</sup>によると、2070 年までに東アジア全体で降水量が 1 割程度増加すると予測されている。こうした降水量の増加は、年間を通じて均等ではなく極端な形で現れるため、都市水害を引き起こすとともに、一方では水不足の地域も増えてくる。また、大型で非常に強い勢力の台風などが頻繁に発生すると、その通過に伴う高潮や高波などが沿岸域に多大な被害をもたらすことになる。それに加えて、IPCC によると世界の平均海水面は少なくとも年間 2 mm ずつ、さらに満潮時の平均潮位はこれを上回るペースで上昇するといわれている。こうした海水面の上昇により、高潮や高波浪による被害はよりいっそう助長されると考えられる。最近の研究によると、南極やグリーンランドの氷が予想以上に速いペースで減っていることがわかっており、平均海水面の上昇に拍車がかかっていることも指摘されている。

そこで、ここでは地球温暖化による海面上昇と台風の巨大化が沿岸域に及ぼす影響について、考えてみよう。

## 2. 海面上昇が沿岸域に及ぼす影響

わが国の海岸線は、総延長約 3 万 5000 km であ

図 1 IPCC による気候変動の将来予測<sup>2)</sup>図 2 IPCC による海面上昇の将来予測<sup>2)</sup>

り、その約 60% が全くの自然海岸である。残りの約 40% は人工的な構造物によって何らかの防護対策が施されている。また、わが国は狭小な国土面積の割に急峻な山地が多いことから、海に面した市町村に、人口の約 45%、工業出荷額の約 50%、商業販売額の約 75% が集中している。したがって、わが国の沿岸域は社会・経済活動にとって重要な地域である。

図 1 および 2 は、IPCC による気候変動と海面上昇の将来予測<sup>2)</sup>を示したものである。これらの

\* 関西大学環境都市工学部准教授

図によると、1990年に比べて2100年には気温が最大で5.8℃上昇することや、氷河や氷山の融解と海水の膨張によって最大で海面は0.8m上昇すると試算されていることがわかる。山地が多い狭小な島国であるわが国においても、沿岸部には海拔ゼロメートル地帯とよばれる、平均海面より低い地域が861km<sup>2</sup>もあり、その多くは東京、大阪、名古屋などの大都市に分布している。こうした海拔ゼロメートル地帯では、海面の上昇に伴う巨大高波や高潮により家屋の浸水・倒壊など甚大な被害を受けると考えられ、早急な対策が望まれている。さらに、海面の上昇により沿岸の湿地や沼地が浸水すると、川や帶水層の塩分濃度が上昇し、特に人が居住していない地域の環境破壊にもつながってくる。このように、地球温暖化が沿岸域に及ぼす影響は少なくない。

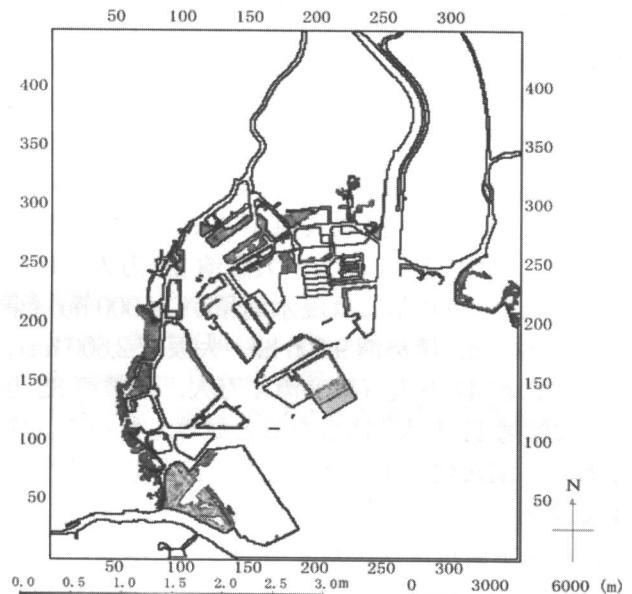
### 3. 地球温暖化が沿岸域に及ぼす影響

#### 3.1 高潮

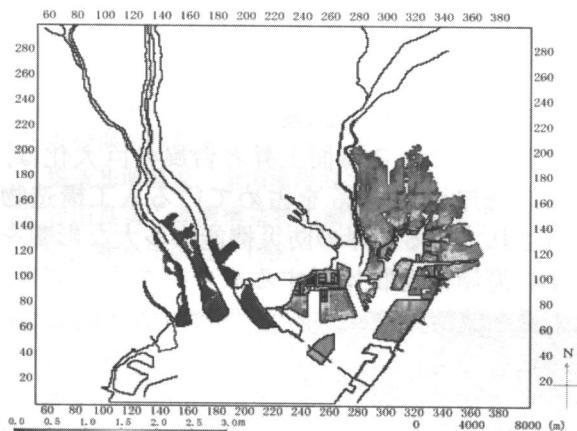
海面上昇により沿岸域に及ぼされる影響として、まず考えられることは護岸背後の浸水であろう。この現象は、高潮による越流や高波浪による越波によって引き起こされる。わが国では海岸整備に際して、護岸や防潮堤など海岸構造物の設計潮位として、①既往最高潮位（概ね過去半世紀）または②朔望平均満潮位（大潮の満潮位）に伊勢湾台風クラスの台風による高潮偏差を加えた潮位、のいずれかを用いている。しかしながら、前述したようにわが国沿岸の平均海面は上昇しつつあること。さらに、海面温度の上昇によってこれまで経験したことのない強い勢力の台風が出現すると、現行の設計潮位を用いて機能設計された海岸構造物では天端高さが不十分となり防護できなくなる。

さらに、高潮災害を助長する台風の巨大化については、橋本ら<sup>3)</sup>が地球温暖化によって台風の発生個数、気圧、移動速度、半径の平均場が変化するという仮定の下で検討しており、地球温暖化によってその平均場が北へ緯度で2°移動した場合、東京湾、伊勢湾、大阪湾に来襲する台風の中心気圧は7~10hPa低くなることを明らかにしている。このことは、気圧低下による海面の吸い上げだけでも約10cm上昇することを意味している。

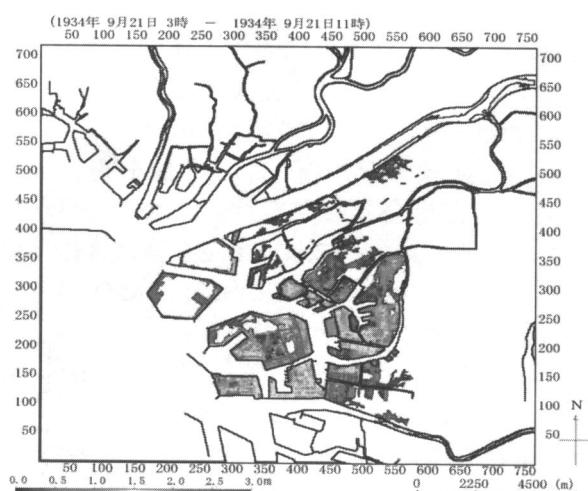
図3は、三大湾奥部（東京湾、伊勢湾、大阪湾）における高潮浸水領域の将来予測を示した。この図は、鈴木<sup>4)</sup>が三大湾奥部（東京湾、伊勢湾、大阪湾）における地表面の高低と堤防等防護施設の情



(a) 東京湾



(b) 伊勢湾



(c) 大阪湾

図3 三大湾奥部における高潮浸水予想図<sup>3)</sup>

報を元に、海面上昇と高潮による陸域の浸水面積とそこに居住する人口を推算している。その結果、2000年には三大湾奥部で高潮によって浸水す

る危険のある面積が 4,900 ha (東京湾 740 ha, 伊勢湾 3,400 ha, 大阪湾 710 ha), その範囲に居住する人口が 3.1 万人 (東京湾 0.4 万人, 伊勢湾 2.0 万人, 大阪湾 0.7 万人) であるが, 2030 年には浸水面積が 7,200 ha (東京湾 970 ha, 伊勢湾 5,000 ha, 大阪湾 1,200 ha), 浸水人口が 12.5 万人 (東京湾 0.5 万人, 伊勢湾 9.1 万人, 大阪湾 2.9 万人) になり, さらに 2100 年には浸水面積が 14,000 ha (東京湾 1,700 ha, 伊勢湾 9,600 ha, 大阪湾 2,600 ha), 浸水人口が 47 万人 (東京湾 4 万人, 伊勢湾 32 万人, 大阪湾 11 万人) にもなると試算している。すなわち, 温暖化による海面上昇と台風の巨大化による高潮偏差の増大で, 2000 年から 2100 年にかけて, 浸水面積は 9,100 ha 増加し, 浸水人口は 44 万人増加すること, また高潮に脆弱な地域は東京南部沿岸, 名古屋港内, 大阪中南部沿岸に多く, 比較的古くから開発してきた大都市域の埋立地とその周辺であることを明らかにしている。

### 3.2 波の打ち上げと越波

地球温暖化による海面上昇と台風の巨大化は, わが国の海岸の約 40% を占めている人工構造物で防護されている海岸の防災機能に多大な影響を及ぼす。海岸構造物に対する波の打ち上げ高は, 海面上昇と波浪条件によって変化する。海面上昇による波の打ち上げ高の増大量は, 宇田<sup>5)</sup>らによつて試算されている。

図 4 は, 波の打ち上げ高の算定図表の一例であり, 海底勾配 1/30 の海岸に, 法面勾配 1/0.5 の構造物が設置されている場合のものである<sup>6)</sup>。今, 現状での静穏時の満潮位における堤脚水深を 1 m にした場合, 高潮発生時の堤脚水深を 2.68 m, 波浪条件は周期 6.6 s および波高 4.2 m として, この図を用いて推算すると, 海面上昇量を 65 cm と 130 cm とした場合の最高打ち上げ水位と現状の打ち上げ高との差は, それぞれ 2.5 倍と 3 倍に増幅されることがわかる。このような条件の下では, 海岸構造物に対する海面上昇の影響は非常に大きくなる。

海面上昇が起これば, 波に伴って海岸構造物を越える水塊, すなわち越波流量も増大する。図 5 は, 越波流量の算定図表の一例であり, 海底勾配が 1/30 の海岸に直立護岸が設置されている場合に冲波波形勾配 0.036 の不規則波が来襲したときの越波流量算定図表である。波の打ち上げ高の場合と同様に, 静穏時の満

潮位における堤脚水深を 1 m, 高潮偏差を 1.68 m とした時, 打ち上げ高は 6.85 m であるから, これに余裕高 0.47 m を加えて護岸天端高を堤脚部から 10.0 m としたとする。この条件で高潮発生時の越波流量をこの図から算定すると, 現状と海面上昇量を 65 cm および 130 cm とした場合の越波流量との比は, それぞれ 7 倍と 30 倍にもなる。このように海面が上昇すると, 堤脚水深は増大し, 護岸天端高は減少する。堤脚水深が増大するということは, 波は海底の影響を受けにくくなるため浅水変形や碎波などによるエネルギー低減をしないまま構造物に来襲することになる。また, 護岸天端高が減少するということは, 波高の小さ

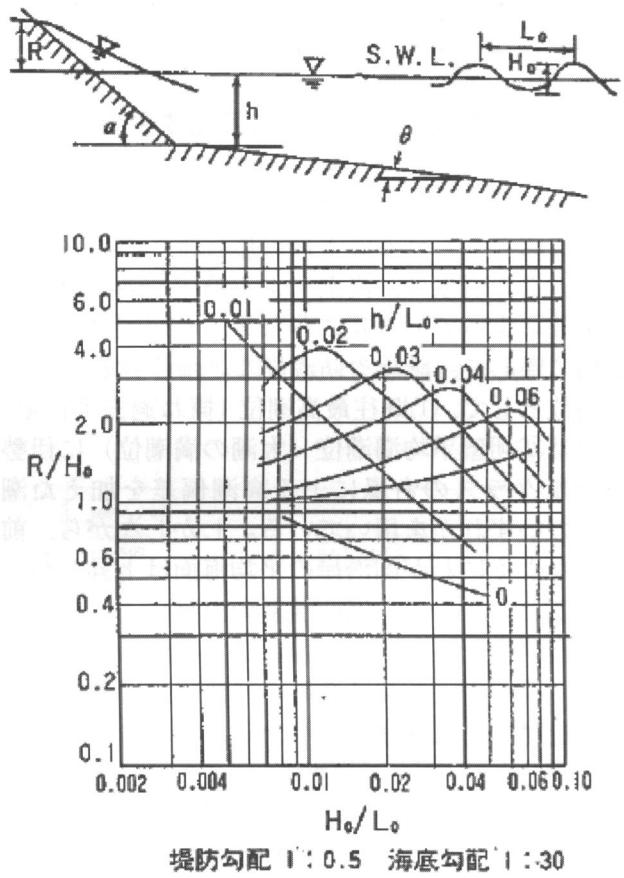


図 4 波の打ち上げ高の算定図表<sup>6)</sup>

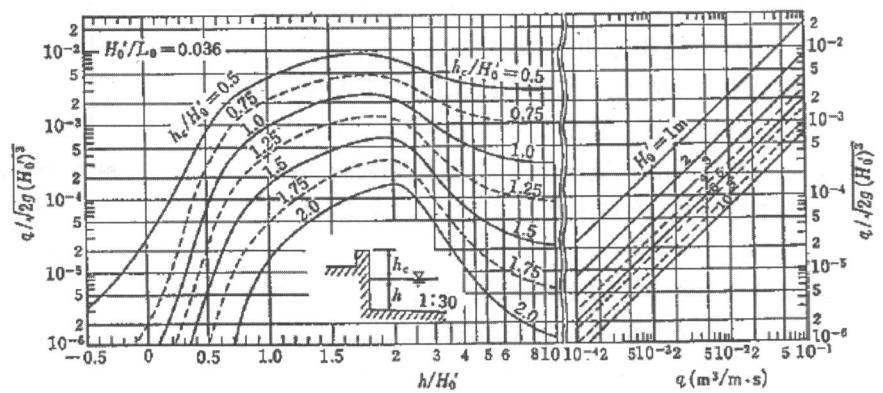


図 5 越波流量算定図表<sup>7)</sup>

な波でも水塊が護岸を越えることになる。したがって、現状の海岸構造物に海面上昇が起これば、この二つの効果が相乗するため、越波流量は急激に増加することになる。

#### 4. まとめ

以上、地球温暖化がわが国沿岸に及ぼす影響について、これまで海岸（港湾）部門で検討されてきたことの一端を解説してきた。ここで取り上げた高潮や波による越波現象だけでなく様々な現象に対して、多くの研究者によって検討されていることを付記しておきたい。また、わが国の海岸線には、地震に伴う津波対策として既に多くの防波堤が設置されており、それらが海水面上昇などからも沿岸地域を守る役割を担っている。わが国の大都市や人口集中地域、さらには発電所や石油備蓄基地などの周辺は、高い防潮堤や海岸堤防で防護されている。しかし、これらの防護対策も完璧でないことは、2011年3月11日に発生した「東日本大震災」により来襲した津波が天端高10m以上の防波堤や防潮堤を越えて、多くの犠牲者を出したことからも立証されている。したがって、防波堤や防潮堤などの海岸構造物だけで住民や財

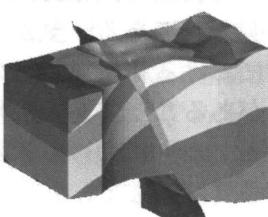
産を守るハード対策だけでは不可能であることから、予警報システム、ハザードマップ、避難訓練などのソフト対策と併用することが、地球温暖化に伴う海水面上昇や台風の巨大化の対策として重要であり、かつ津波対策としても効果を發揮するものと思われる。

#### 参考文献

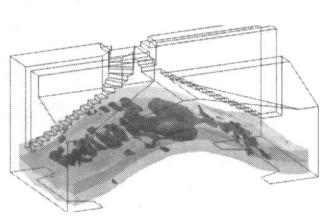
- 1) IPCC, 2007: Climate Change 2007, IPCC Fourth Assessment Report, 2007.
- 2) 気象庁訳：IPCC 第3次報告書第一作業部会報告, 2001.
- 3) 橋本典明・川口浩二・河合弘康・松浦邦明・市川雅史：港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検討、海岸工学論文集, 第50卷, 土木学会, pp. 176-180, 2003.
- 4) 鈴木武：三大湾奥部における温暖化による高潮浸水領域の変化の予測、地球環境シンポジウム講演論文集, Vol. 15, pp. 167-170, 2007.
- 5) 宇多高明・小俣篤：海岸保全に及ぼす海面上昇の影響、土木研究所, 5, 1989.
- 6) 海岸保全施設建築基準連絡協議会編：海岸保全施設建築基準解説、全国海岸協会, 1987.
- 7) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、波浪工学への序説、鹿島出版会, 1990.

## 3次元+時間 可視化技術

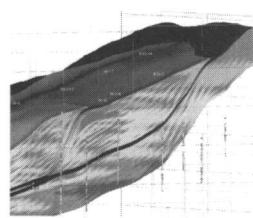
MVS(Mining Visualization System)  
EVS(Environmental Visualization System)



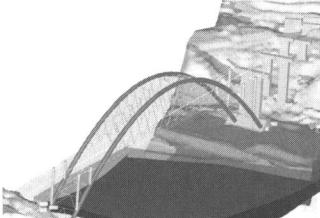
層状データ



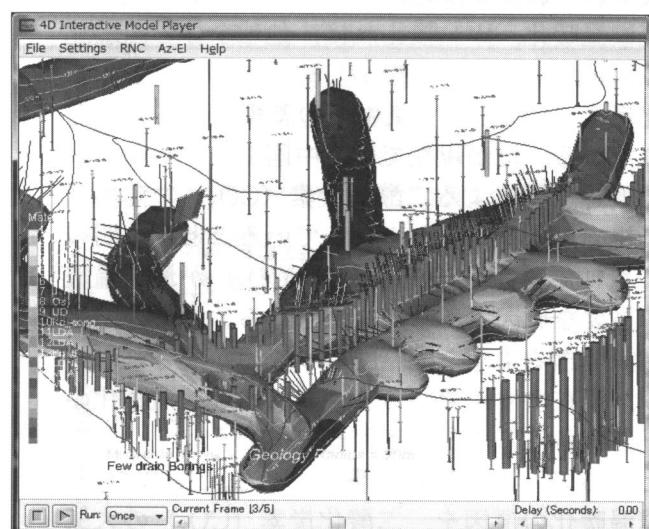
連続値データ



離散値データ



構造物データ



4D Interactive Model Playerで自由に配布



ohtageoresearch

検索

有限会社 太田ジオリサーチ

<http://www.ohta-geo.co.jp/>

無料3次元可視化モデル自動作成配信サービスは太田ジオWEBから

TEL 078-907-3120(担当:林)

# 気候温暖化に関わるもう一つのシナリオ —地球環境を操る宇宙線—

## 【Key Word】

気候温暖化、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ )、太陽活動、太陽の自転、宇宙線

さくら い くに とも\*

## はじめに—気候変動をめぐる最近の国際事情について

1997年に京都で開催されたCOP3で採択された気候温暖化に対処するための国際的合意に基づく報告書が、「京都議定書（Kyoto Protocol）」と題して出版されている。昨年、メキシコのカンクンで開かれたCOP16では、この議定書に記載されている国際合意の延長をめぐって紛糾し、将来に向けての新しい方針は確立できなかった。アメリカはすでに「京都議定書」の取り決めから脱退してしまっていたし、中国とインドに代表される発展途上国は、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の排出量では無視しえない状況なのに、「京都議定書」の適用の延長を要求、温暖化防止へ向けての発展では、何の進展もみられなかった。

気候温暖化、いい換えれば、地球全体の温暖化の原因は、先進諸国が排出し続けてきた大量の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の大気中への蓄積にあるのだとしている。だが現在では、中国やインドのような発展途上国による二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の排出量も無視しえないほどになっていることが、明らかにされている。二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) が地球温暖化の主要な原因であるのだとしたら、全ての国々が協調できるような国際的取り決めがなされない限り、現在すすんでいるといわれる地球温暖化の進行を押さえることは不可能であろう。

ところで、ここ数年、現在でもまだ少数だが、地球温暖化の原因を、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の大気中への蓄積以外に求める人たちが、現れてきている。この動きにも私たちは注意して、どのようなことが主張されているのかについて、耳を傾ける必要があるのではないだろうか。

過去半世紀以上にわたって、太陽活動の長期変動とそれに因果的に関わる地球環境の変動について研究してきた一人として、この面から、地球温暖化に関わる問題が、どのようにみえるかを、これから語って行きたい。

## 1. 最近の過去 150 年における太陽活動の変動

太陽活動の指標（index）として現在用いられている相対黒点数（Relative Sunspot Number）について、その年平均値を年代順にグラフ化してみると、この数が約 11 年の周期で増減をくり返していることが判る。黒点観測が系統的になされたようになった 18 世紀半ば頃から以後ついてみると、図 1 に示すように、先に述べた周期で、相対黒点数が変動していることが、明らかである。気がつくことは、それぞれの周期における相対黒点数の極大値に、かなりばらつきがあることである。現在では、太陽活動周期（サイクル）における太陽活動の活発さを測るために、必要に応じて、各周期

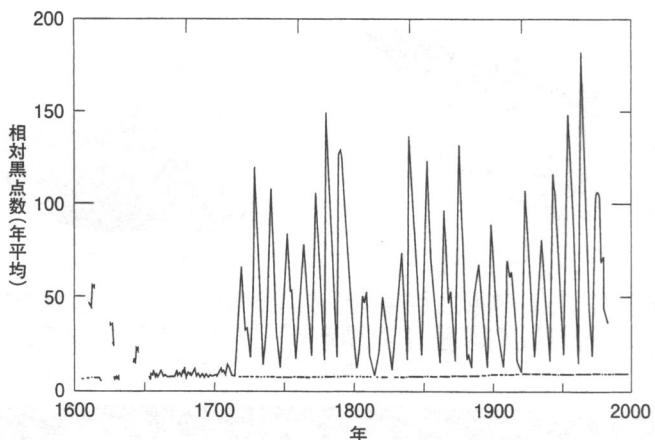


図 1 1600 年以後の相対黒点数（年平均値）にみられる変動性。17 世紀半ばから 1715 年頃が無黒点の時代であった。

\* 早稲田大学 理工学術院 総合研究所 客員顧問研究员

(サイクル)に対する相対黒点数の総和で、太陽活動にみられる各周期の特性を表す指標としたりしている。

1882年に始まる太陽活動周期(サイクル)12以後の各周期における相対黒点数の総和について、周期(サイクル)22までとりあげ、ひとつの図に表してみると、図2に示すような結果が得られる。

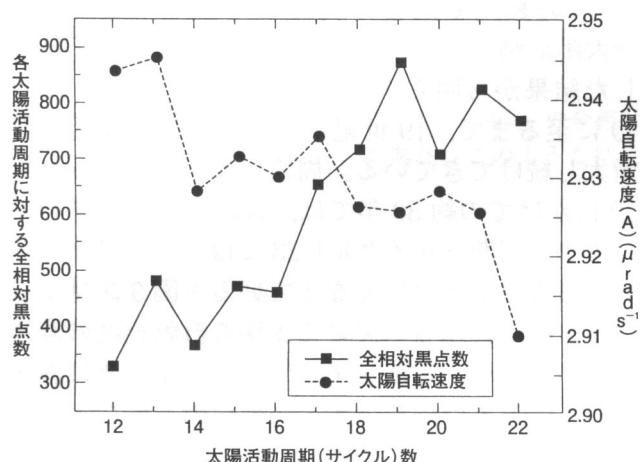


図2 1882年(サイクル12開始)以後、2005年頃までの太陽赤道における自転速度(A)と各太陽活動周期(サイクル)に対する全相対黒点数の両長期変動のパターン[Sakurai他(2009)による]

この図には更に、各周期(サイクル)における太陽の自転の平均的な速さについて、太陽赤道における大きさが示してある。この図から推測されることは、太陽の自転の速さが小さくなつて行くにつれて、太陽活動が活発化する傾向があるようみえることである。各活動周期(サイクル)に対する相対黒点数の総和と、この赤道における自転速度との関係を、図2の結果を用いて描いてみ

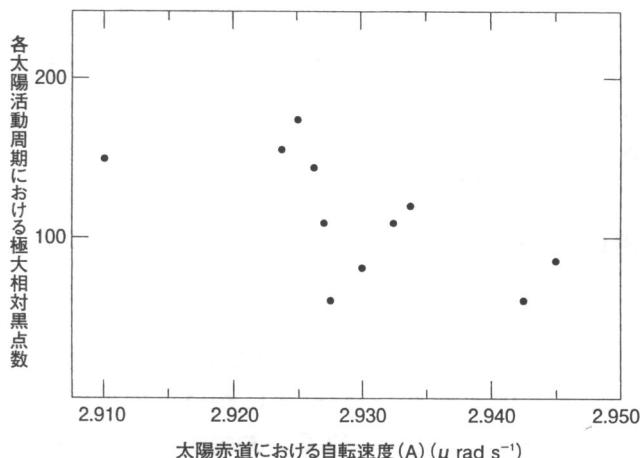


図3 太陽赤道における自転速度(A)と各太陽活動周期(サイクル)における極大相対黒点数との関係[Sakurai他(2009)による]

ると、図3に示すような結果が得られる。図2に示した結果から、太陽活動は周期(サイクル)19で最も活発化した後、停滞状態に入ったように見えるのだが、太陽の自転については、減速傾向が続いていることが判る。

だが、図には示されていないが、周期(サイクル)23に入ると、太陽の自転は減速から加速に転じ、活動周期(サイクル)19, 20の値にまで戻っている。図には示していないが、活動周期(サイクル)23では、太陽活動はあまり活発でないだけでなく、2010年になってもまだその周期(サイクル)が継続したままのように見える。

この太陽の自転速度にみられる加速への移行は、図3に示した結果からみて、太陽活動が弱まって行くことを示唆しているのである。実際に現在(2010年末)でも太陽活動は停滞したままで、各年に対する相対黒点数の年平均値は、10以下と小さいままである。(図9を見よ)。この事実は、今後の太陽活動が極めて不活発に推移するのではないかと予想させる。図1に17世紀半ば以後18世紀初めまで、太陽活動が極めて不活発な無黒点期とでもい言いたいような状況下にあったことが示されているが、もしかしたら、この時代と同様の事態が、今後の太陽活動に生じるのではないかとの予想をさせるのである。

## 2. 太陽圏内の磁場と宇宙線との相互作用

太陽活動の指標である黒点群の発生とその後の成長には、強力な磁場の変動が伴っている。この磁場の一部は、太陽の外層大気であるコロナ中から、太陽から常時溢れだしているコロナ・ガスの

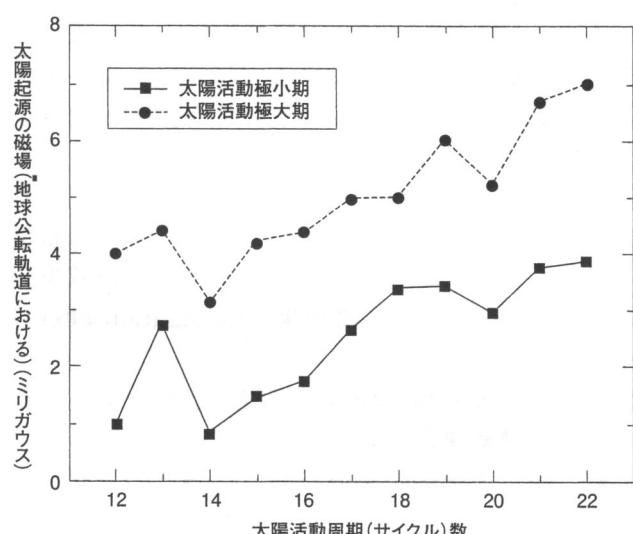


図4 太陽コロナ外延部から太陽圏に広がる磁場の経年変化(地球公転軌道における強さを示す)[Sakurai他(2009)による]

流れである太陽風により、宇宙空間へとひきのばされて行く。この磁場の特性は、太陽活動の活発さに応じ、当然のことだが、変化して行く。

太陽圏内に広がる磁場の地球の公転軌道付近における強さは、Pulkkinen たちにより推定値が求められており、周期（サイクル）12 以後について、この磁場の強さを示すと、図 4 にみるようになっている。この図では、各太陽活動周期（サイクル）における太陽活動の極大期と極小期に対する磁場の強さが示されており、ひとつの活動周期（サイクル）において 2 倍程度の変動を示すことが判る。この極大、極小両期に対応した銀河宇宙線の地球環境への侵入フラックスの変動は、図 5 に示すようになっている。

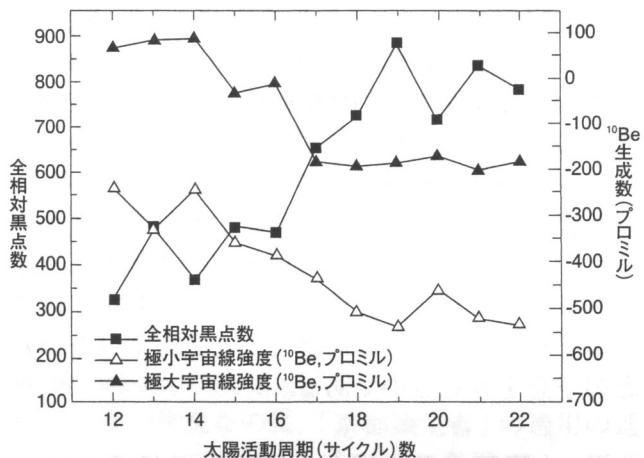


図 5 1882 年（サイクル 12 開始）以後における宇宙線の地球大気への侵入フラックスの長期変動。宇宙線が大気中で生成したベリリウムの同位体 (<sup>10</sup>Be) 数を示す。[Sakurai 他 (2009) による]

これら図 4 と図 5 に示した二つの結果は、過去 150 年ほどにわたって、太陽圏内に広がる磁場の強さが増加し続けていているのに対応して、宇宙線の地球環境への侵入フラックスが減少し続けてきたことを示している。宇宙線粒子は磁場との相互作用を通じて変調を受けるのだが、過去 150 年ほどにわたる太陽圏内の磁場の強さにみられる増加は、宇宙線の地球への侵入フラックスの減少をひき起こすという変調効果 (modulation effect) を示しているのである。

この宇宙線の地球環境への侵入フラックスにみられる変調効果が、地球大気内ですむある種の変動、特に大気中に形成される低層雲の生成量の変動を生みだす。この変動の影響が地球温暖化に因果的に関わっているのではないかとの指摘が、デンマークの Svensmark ほかによりなされている (1990)。ごく最近になって、気候変動の原因と

して、宇宙線による大気低層部のイオン化効率の変動が取り沙汰されるようになっている。この人とその協力者たちの提唱した宇宙線が地球温暖化に果たす役割については、長い間、無視され続けてきたのであった。現在でも、反対を唱える人たちの多いのが実状である。

### 3. 気候変動の原因は一体何なのか – 宇宙線の長期変動との関わり

太陽活動の長期変動についてみると、図 2 に示した結果から明らかなように、周期（サイクル）19 に至るまで、19 世紀末からずっとこの活動は増大し続けてきている。周期（サイクル）20 から 22 にかけての約 30 年では、太陽活動は停滞しているが、周期（サイクル）23 では、それ以前に比べて、太陽活動は弱くなっている（図 9 を見よ）。また、図 2 に示されている太陽の自転速度の減速傾向も終わり、周期（サイクル）23 では既に加速に転じており、周期（サイクル）19, 20 にみられた速さにまで戻っている。

周期（サイクル）23 における太陽活動の低下は、宇宙線の地球環境への侵入フラックスの増加をもたらしているから、Svensmark たちの提唱した仮説が正しかったとしたら、地球温暖化は 2000 年頃から以後では、止まってしまっているはずだということになる。最近公表された世界の平均気温の動向は、図 6 に示すようになっており、2000 年頃から以後、実際に温暖化は止まってしまっていることが判る。

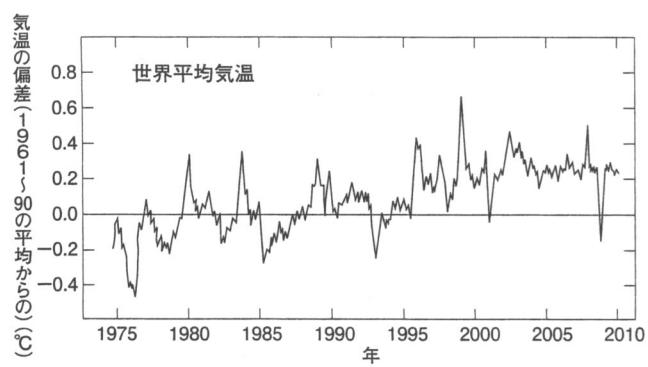


図 6 1975 年以後、現在に至るまでの世界の平均気温の変動 [R.A. Kerr (2009) による]

ここで、太陽活動と世界の平均気温の両動向について、1960 年から 2000 年にかけての世界の平均気温からの偏差を求めて、太陽活動との関係を図示してみると、図 7 に示すような結果がえられる。この結果は、相対黒点数により表わされる太陽活動の活発さが、地球温暖化をひき起こしてい

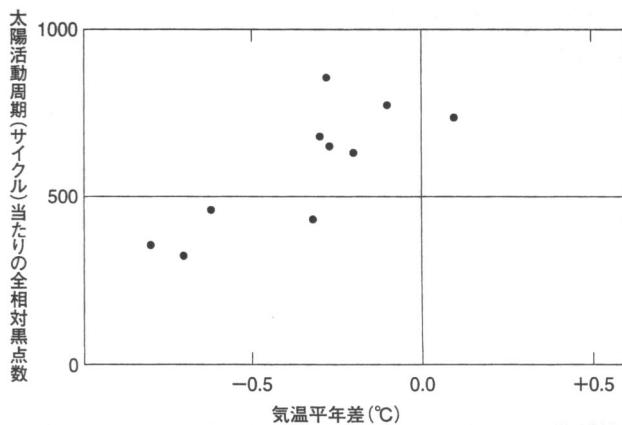


図7 太陽活動の活発さ〔各周期（サイクル）〕の全相対黒点数と気温年平偏率との関係。このような結果はみかけなのか。

るのではないかと推測させるが、太陽活動は太陽の光球面上の現象だし、過去150年の期間に太陽の総電磁放射フラックスは僅かに0.2パーセントの増加にすぎないから、この活動が原因だとは考えられない。

次に、宇宙線の地球大気中への侵入フラックスと先の気温偏率との関係を求めるべく、図8に示すような結果が得られる。宇宙線のフラックスの減少に伴い、平均気温が増加していく傾向がみられる。この結果は、Svensmarkほかにより提唱された仮説を支持することが明らかである。この結果から、過去150年ほどにわたって地球温暖化を引き起こしてきた真の原因是、地球大気中への宇宙線の侵入フラックスにみられる長期変動によるものだとする推論が正しいのではないかと、言えることになる。

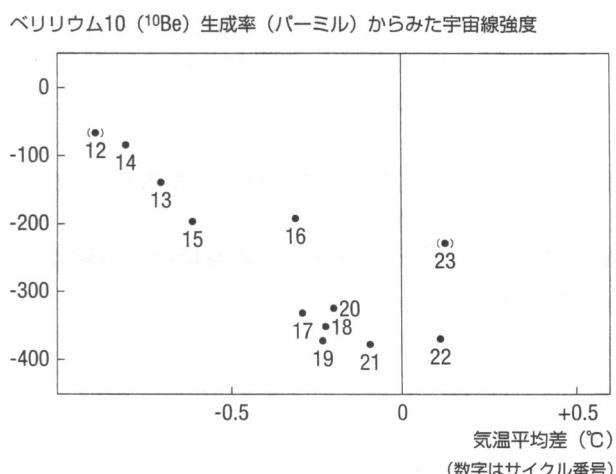


図8 宇宙線の大気中への侵入フラックスと気温年平偏率との関係〔数字は各周期（サイクル）の数を示す〕

げたのだが、宇宙線の太陽圏内における挙動が、究極の原因なのだということを強く示唆しているのである。宇宙線の挙動は、地球の大気圏内でみられる現象だからである。

#### 4. 太陽活動の衰退は何を物語るか—今後の見通し

ここ二、三年のことだが、図6に示した世界の年平均気温の変動にみられる“予期せざる”結果を、何が引き起こしているかをめぐって、地球環境内で果たす宇宙線の役割が、新聞や週刊誌の記事にしばしばみられるようになっている。2000年から以後も、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の大気中への蓄積量は単調に増加する傾向を維持しているのに、図6に示した結果は、この蓄積量の増加とは無関係であることを示唆している。

現在では、太陽活動周期（サイクル）23が終息し、24へと移行しているはずなのだが、2000年頃から後の太陽活動は衰退を続けており、無黒点の時代が到来したかのように見える。

このような無黒点の時代は、歴史上、何回か起こっているが、よく知られているのは、17世紀半ばから18世紀初めにかけての約70年にわたる時代である。この時代はマウンダー極小期(Maunder Minimum)と現在呼ばれているが、地球が著しく寒冷化した時代で、小氷河期(Little Ice Age)の最盛期に当たっている。

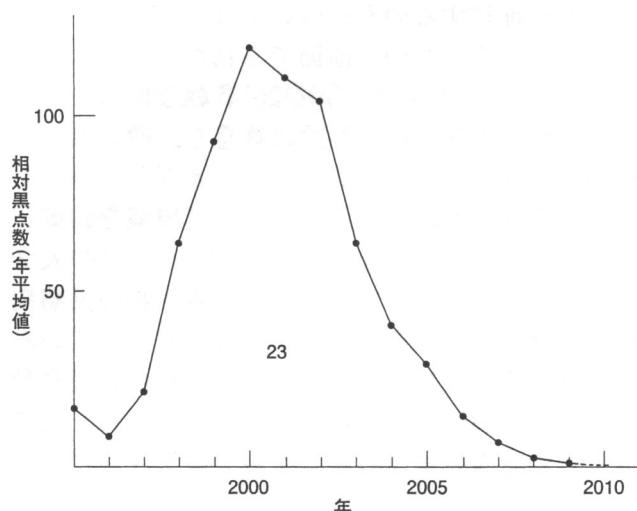


図9 1995年以後（サイクル23）における年平均相対黒点数の経年変化。2005年以後も太陽活動は低下し続けている。

2000年頃から以後の太陽活動は極端に不活発で、周期（サイクル）23は図9に示すように、太陽活動の減少が長く尾を引いており、2010

年になっても次の周期（サイクル）24へ移行しているようにみえないのである。太陽活動周期（サイクル）の長さの平均は、ほぼ11年なのだが、この長さが更に長くなった時代は、その周期（サイクル）の太陽活動は不活発であることが知られている。図1に示した結果から、このような時代は、1800年前後、1900年以降の約20年では太陽活動が不活発で、地球環境が寒冷化した時代だったことが示されている。

現在の太陽活動にみられる衰退化傾向から、今後の地球環境の変動を占うと、この傾向が今後20年から30年と長期にわたって続くような事態が生じると、1800年前後にみられたのと同程度かそれ以上の気候的にみて厳しい時代が、今後訪れる可能性がある。1800年前後の時代は、ドールトン極小期（Dalton Minimum）と現在呼ばれている。

1250年頃から以後、地球環境は徐々に寒冷化に向かい、この傾向は1850年頃まで続いた。この期間は小氷河期と呼ばれており、その最盛期がマウンダー極小期に当たっている。

こうした気候の長期変動と太陽活動のそれとの間には密接な関係があり、太陽活動が間接的ながら、地球環境に大きな影響を及ぼしている。図7に示した結果をみれば、こうした“みかけ”の因果関係が成り立つことが納得できるであろう。

### 結論にかえて—ひとつの推測

太陽活動は現在衰退してしまっており。今後どのように推移するのかについては、予断を許さない状態にある。だが、前節で述べたように、太陽活動の極端な衰退が、今後20年かそれ以上も続ければ、地球温暖化は必然的に終息し、逆に寒冷化に向かう可能性がある。

このよう事態に立ち至れば、地球環境を制御しているのは、人為的な二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の大気中への蓄積によるのではなく、太陽活動の長期変動により地球の気候は、間接的に制御されているのだということになる。この太陽活動の長期変動が、地球環境への宇宙線の侵入フラックスを変動させ、地球大気中における下層雲の生成量に対応

した変化をもたらし、地球の寒冷化を生じるのだということになる。

図7、図8に示した結果と、図4に示した結果の三つを眺めることから、推論しうるのは、太陽から太陽圏に広がる磁場の長期変動は、太陽活動のそれと因果的に関わっており、この磁場の増加傾向が2000年頃にまでわたって続いたことから、地球大気への宇宙線の侵入フラックスが減少し、これが気候の温暖化をもたらす原因となったのだ、ということとなる。

国連に設置された「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）が、地球温暖化の原因是、太陽活動や太陽からの電磁放射エネルギー総量の長期変動にあるのではなく、人間活動による二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の大気中への蓄積が原因なのだとしたのは、過去150年ほどで、先の放射エネルギー総量はフラックスで、僅か0.2パーセントしか増加していないからである。また、太陽活動は太陽面の現象で測るのであるから、地球環境に直接の影響を及ぼすと想定することはできないからであった。

本稿では、太陽活動の長期変動によって変調を受ける地球環境への宇宙線の侵入フラックスの変動が、地球環境の温暖化や寒冷化の究極の原因であることを示した。このことに対しては、現在でも異論があるであろうが、図6に示した結果を、大気中への二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の蓄積量の変動から説明することは不可能なのである。

太陽活動の現在の状況は、地球寒冷化を今後もたらす可能性を示唆している。太陽の動静をしっかりと見極めることが、地球環境の今後の動向を予見する重大なカギなのである。

太陽活動と地球環境との関わりについて、著者の手になる二つの書物が出版されていることを記しておく。

- 1) 「眠りにつく太陽—地球は寒冷化する」（祥伝社新書）、祥伝社（2010年10月）
- 2) 「移り気な太陽—太陽活動と地球環境との関わり」、恒星社厚生閣（2010年11月）

# 第四紀気候変動と地球表層システム

## 【Key Word】

第四紀, 氷期-間氷期, アイスコア, 温暖化, 地球表層システム, 古気候学

よこ やま ゆう すけ\*

## 1. はじめに

現在進行中の地球温暖化。将来の予測は大規模計算機を用いた気候変動モデルによるところが大きい (IPCC 2007)。しかし、非線形に応答する気候システムの理解はまだ不明な点が多い。過去の気候データの高精度復元と、モデルのアウトプットの比較を行うことにより、モデルの動作特性を把握することができ、気候システムの理解を深め、予測モデルの精度向上に貢献できると考えられる。ところが人工衛星や水温計など、過去の直接の気候データは、たかだか 100 年ほどしか遡ることができない。現在の地球温暖化が人間活動にともなう大気の温室効果ガス放出に伴うものだという報告がなされて久しいが、すなわち直接データに関しては、産業革命以降の地球温暖化の進行が開始以降の情報に限られてしまうことになる。つまり現れている気候現象が、果たして地球の気候システム固有のものなのか、人為起源の温室効果ガスによるものなのか、その分離が難しい。したがって、より長期的な高精度データを復元することが重要である。

もともと地球の気候変動には氷期-間氷期変動などを含む、環境変化が繰り返していることが分かっている。現在の地球表層には常に大規模氷床が存在しており、氷室期（アイスハウス）とよばれる時期である。過去約 200 万年間の第四紀と呼ばれる地球の気候の大きな特徴のひとつは、その氷床量が増減を繰り返す、氷期-間氷期の存在である。約 2 万年前に起こった直近の氷期の最盛期 (Last Glacial Maximum : LGM) には、現在のカナダのほぼ全て、南はニューヨーク近辺まで厚さ 3 km の氷が覆っており、同様の光景が北欧にも広がっていた。またそれに伴いグローバルな海水準

も 120 m 以上現在よりも低く、熱帯の海域でさえも年平均表層海水温 (Sea Surface Temperature : SST) が 2–6°C も下がっていたことが分かってきた。これらの大規模な環境変化の際に、大気-海洋-雪氷圈がどのように同期/非同期して変動していたかを定量的に復元することが重要である。

過去 200 万年間という長時間スケールでの大気海洋システムの変遷は、海洋堆積物試料や陸上のサンプルを使った比較研究を行うことにより復元される。筆者らは宇宙線照射生成核種を用いた<sup>1)</sup>長期浸食速度の定量や、河川堆積物の移動量復元と気候変動との関係等についても研究を行っているが<sup>2,3)</sup>、それらの紹介は別の機会にゆずるとして、本小論では、特に過去 80 万年間の気候変動復元研究の実際について、最近の知見を交えながら概観する。

## 2. 気候変動のリズム

地球に到達する太陽からの熱エネルギーの総量は、氷期と間氷期で変化はないが、地球の公転軌道要素の変化にともない、熱の分配に変化が生じる。プレートテクトニクスの影響による海流の流路変化等の考慮が不要な第四紀の気候変動のトリガーとなっているのは、この熱分配の変化である。地球の公転軌道要素変化には主に 3 つの種類が存在する（図 1）。

地球の自転軸の角度の変化がそのひとつで、22°～25° まで約 41,000 年の周期を持って変化する。これは季節性の強弱を決定する重要な要因で、地軸の傾きがなければ、季節が存在せず、また逆に 90° 傾いていたとすると、ある地点はずっと夏、一方ではずっと冬という地点が存在することになる。

二つ目は地球の公転軌道の離心率で、ほぼ円形から 0.06 まで変化し、100,000 年と 400,000 の周

\* 東京大学 大気海洋研究所 准教授

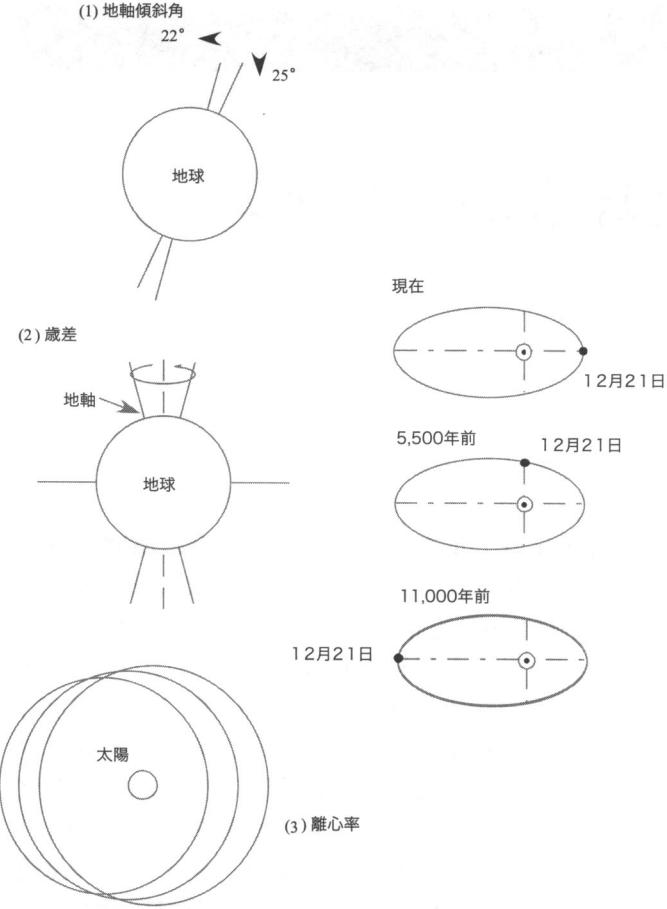


図1 地球の公転軌道要素の変化

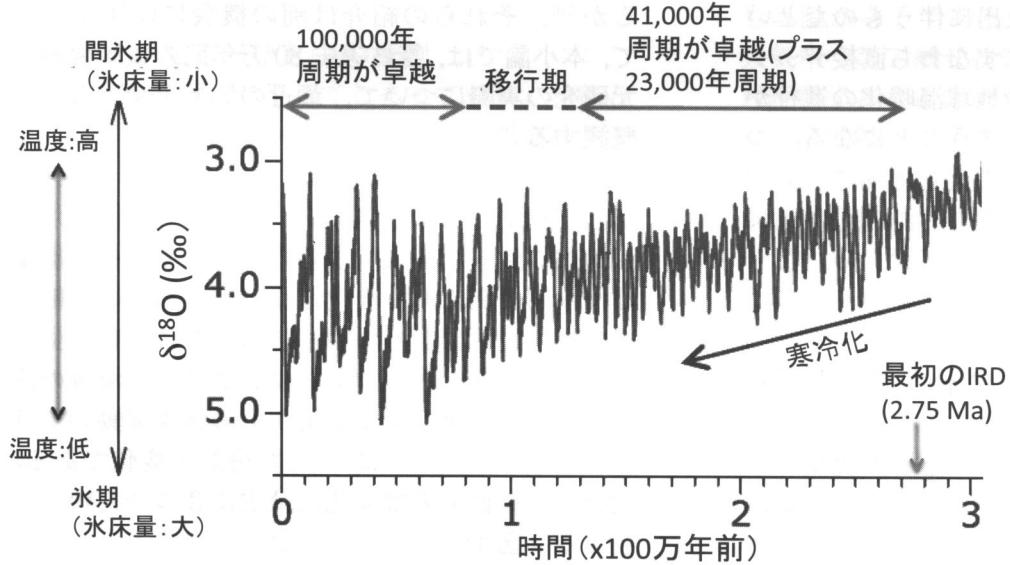


図2 深海堆積物に含まれる海底近くに棲むプランクトンの殻の化石（有孔虫）の酸素同位体比から求められた過去300万年間の環境変動。氷期と間氷期の繰り返しに伴う海水の同位体組成のはか、徐々に水温が低下してきている傾向が読み取れる。

期を持つ。最後に地球がコマのように回転しているために起る歳差で、これには26,000年の周期が存在する。地球の公転軌道周期と地球に到達する日射量（インソレーション）と季節性の関連を唱えたのは、ユーゴスラビアの天文学者であったミ

ランコビッチ<sup>4)</sup>、このことから氷期-間氷期の気候変動周期はミランコビッチサイクルとよばれる。しかし、このミランコビッチサイクルが、実際のデータによって裏付けられたのは、深海堆積物の中に含まれている有孔虫と呼ばれる生物の殻の酸素同位体比の変動のスペクトル解析結果が行われた1970年代に入ってからであった。過去の気候変動を復元し、現在の気候状態を理解するには、プロキシ（代替指標）と呼ばれる化学的指標を活用する<sup>5,6)</sup>。

地球上の水蒸気輸送は、全球規模でみると蒸発の卓越する低緯度から高緯度へと行われている。海水から水蒸気となる際には、水分子中のより軽い酸素同位体（<sup>16</sup>O）が選択的に海水から取り除かれる一方で、水蒸気から降水がもたらされる際には、より重い酸素同位体（<sup>18</sup>O）が選択的に水蒸気から取り除かれる。そのため、高緯度での降水（降雪）の酸素同位体比は低緯度のそれより3-4%近く軽くなっている。したがって、大陸氷床には、より軽い酸素同位体比を持つ氷が存在する。これは同時に輸送される水素の同位体比についても同じことがいえる。つまり、これが間氷期に融解して、海洋へ融氷水がもたらされると、海洋全体の水の同位体比を軽い方向にシフトさせるため、海水の同位体比を保存している有孔虫の炭酸塩中の

酸素同位体比も軽くなる。つまり海水の酸素同位体比を復元することにより、過去のグローバルな氷床量を復元すること、つまり氷期-間氷期変動を明らかにすることができるわけである（図2）。また、氷床の酸素同位体比（または水素同位体比）の存在比を比較することにより、同様に熱力学的な分子の挙動から、温度計を作ることが可能となる（現地の温度がより寒いと重い同位体を持つ雪が降雪する）。このほかに、有孔虫やサンゴなどの殻の炭酸カルシウム形成時にカルシウムを置換して骨格に取り込む同じく2価のイオンであるマグネシウムやストロンチウムの分配係数が、温度依存性をもつことを利用した温度計なども存在する<sup>7,8)</sup>。

このほかに、有孔虫やサンゴなどの殻の炭酸カルシウム形成時にカルシウムを置換して骨格に取り込む同じく2価のイオンであるマグネシウムやストロンチウムの分配係数が、温度依存性をもつことを利用した温度計なども存在する<sup>7,8)</sup>。

さて先ほどの酸素同位体比であるが、変動記録を周期解析すると、確かに公転軌道要素の変動周期と同調した周期のパワースペクトルが認められた<sup>9)</sup>。ところが最も顕著なものは、氷期-間氷期変動の鍵を握っていると思われる、太陽の日射量の季節性をコントロールする地軸の傾きの周期ではなく、100,000年周期であった。地球の公転軌道要素の変動のうち、100,000年周期を持つものは、離心率であるが、この変化は地球が受ける太陽からの年間の熱量の0.2%ほどの変化をもたらす程度であり、この要因のみによりグローバルな気候変動がもたらされるとは考えにくい。また、地球の公転軌道要素変動に基づく、太陽からの熱フラックスの緯度変化や季節性の変化のみで氷期-間氷期変動がもたらされるのであれば、その移行期はインソレーションの変動と同調してゆるやかにおこるはずであるが、最近の研究では氷期-間氷期の移行のタイミングは急激なものであり、全ての事象がインソレーションカープと同位相で引き起こされているわけではないことが明らかになってきている。

実際ミランコビッチが予想した周期性は、氷期-間氷期変動に現れているが、もし公転軌道要素の周期性だけが氷期-間氷期の周期をコントロールしていると考えると、南北半球での氷期-間氷期の同期性を説明できない。北半球高緯度の夏の日射量が最大の時には、南半球のそれは必ずしも最大ではないからである。つまり、地球気候システム内部のフィードバック機構など、重要なサブシステムの存在が示唆されるのである<sup>10)</sup>。海洋循環による熱の低緯度から高緯度への分配や温室効果ガスの存在がその一つである。

### 3. 過去の気候変動復元

かつて海洋堆積物がメインであった過去の気候変動の研究であるが、1980年代から1990年代にかけて、高緯度氷床の氷のサンプルの柱状試料（アイスコア）を採取する研究計画が開始した。高度な技術と厳しい掘削環境での試料採取は困難を極めたが、グリーンランド氷床において、アメリカとヨーロッパのそれぞれがサンプル採取に成功した<sup>11, 12)</sup>。アイスコアは、降雪によりもたらされたH<sub>2</sub>Oにより、酸素や水素の同位体比をもちいた“温度計”を保持しているだけでなく、雪が自重により氷になる段階でトラップされた、当時の大気組成も記録している。これによって大気組成と現場の気温の変化との関係を議論することが可能となる。さらにエアロゾルの増減や水蒸気の起源海

域の水温変化なども復元することができる優れた環境記録媒体である。

グリーンランドの氷床コアの掘削はその後も続き、最新のボーリング調査（NEEM: North Greenland Eemian Ice Drilling）では、過去のプロジェクトで、コアリングによる擾乱を受けていたとされる最終間氷期相当層の回収も行われ、解析が進んでいる。

グリーンランドのアイスコアからもたらされた過去の気候変動の描像は、これまで考えられていたものとは大きく異なっていた。それは、現在の間氷期が“特別に”安定した時期であること、過去のグリーンランドの気温の変化が、大規模かつ急激に何度も引き起こされていたことである。グリーンランドの気温の変動は時に10年以内に15°C以上にも及んだ。これだけの短い時間スケールの大規模な気候変動を引き起こすには、ミランコビッチサイクルに伴う地球の公転軌道要素の変動に原因を求めるのは難しい。

海洋学的観測および海洋堆積物の解析結果から、それらは、熱塩大循環とよばれる、いわば地球のサーモスタッフが弱化したことが原因であったことが明らかになった。これは北大西洋のアイスランド沖などを起点とする、一周が1000-1500年というゆっくりとした循環で、低緯度の余剰な熱を高緯度に運搬することにより地球の気候を安定させている。この流れは基本的に塩分の差によって引き起こされている。高緯度の冷たく塩分の高い海水は、アマゾン川の流量の約100倍もの規模で沈み込んでいる<sup>13)</sup>。過去の急激な気候変動は、氷床の部分的な崩壊によってもたらされた淡水により、深層水形成を妨げたため弱められたことが海洋循環弱化の主な原因だという事が分かってきた<sup>14, 15, 16)</sup>。

グリーンランドのアイスコアは、比較的速い降雪速度のため、高時間分解能の過去の気候記録を保存しているが、最終間氷期より遡った過去、つまり氷期-間氷期変動を1サイクル以上遡ることはできない。氷は固体だが極めてゆっくりと流動しているためであり、氷床のサイズは降雪量と氷河などを通して流出する量とで“動的平衡”により決定されている。よく“温暖化により氷がとけている”と表現されているのは、流出量が増大して、サイズが小さくなっていることを指していることが多い。

したがって、それより遡って気候と温室効果ガスとの関係を調べるには、南極氷床コアを用いる。1998年に採取された東南極氷床のボストーク基

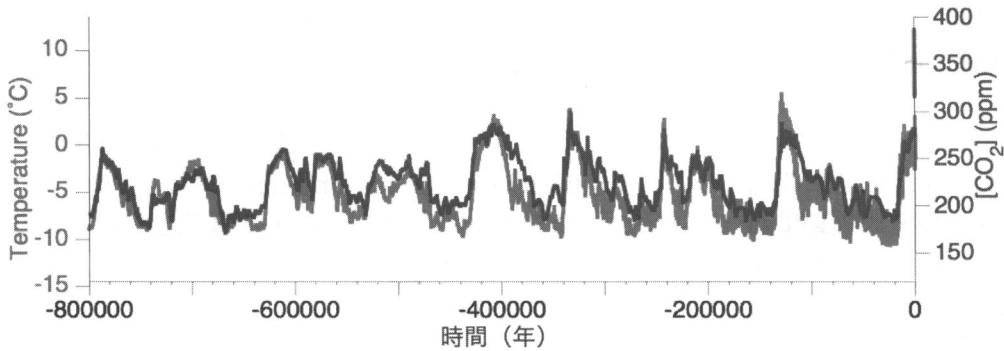


図3 南極の氷床コアに保存された気温と二酸化炭素の変化。(黒線がCO<sub>2</sub>分圧、灰色線が気温。極めて高い相関をもつ。)

地から採取された長さ3600 mのアイスコアには、大気中の二酸化炭素と気温の変化が同調して変動していることが発見された。近年では、ヨーロッパチームのドームCコアにより過去90万年間にわたり、この関係が維持されてきたことが明らかになった(図3)。過去8回の間氷期における二酸化炭素分圧は280 ppm、氷期には180 ppmであり、氷期と間氷期の大気二酸化炭素分圧の差は、いつも100 ppmであり、気温変化と同調して変化してきた<sup>17)</sup>。気温変化との高い相関関係は、大気中メタンの濃度変化についても同様のことがいえる。間氷期には大気中に存在する温室効果ガスは、氷期には海洋に隔離されていると考えられている。しかし詳細については未だに解明されていない。

#### 4. 氷期-間氷期移行期の時系列変化から読み取る表層環境変動

直近の氷期の最も寒かった時期(最終氷期最盛期: Last Glacial Maximum以降LGMとする)は、30,000年前から19,000年前であったことが、最近のわれわれの研究で分かってきた<sup>18, 19, 20, 21)</sup>。そのLGM終了期から現在にかけて、地球表層の気温は数度上昇し、北アメリカと北部ヨーロッパを覆っていた、最大時の厚さが3000 mにもおよんだ氷床も姿を消し、汎世界的な海水準は120-130 mも

上昇した。前述のように、大気中の温室効果ガスも気温も上昇した。これらの移行期の地球表層サブシステムの時系列変化の復元は、気候システムの理解に有用である。ではその移行期であるが、近年の研究から分かってきたことを要約すると以下のようになる。まず22,000年前に北緯65°

の夏の日射量が増加したことにより、北半球高緯度の気温が上昇し氷床融解の引き金となる(図4の曲線1)。グリーンランド氷床コアには、気温の上昇傾向が記録されており<sup>22)</sup>、LGMの終焉期に起こった海水準急上昇期(19 ka-Mwp)も北半球氷床起源であることが報告されている<sup>18, 23)</sup>(図4の2と3)。氷床の部分崩壊によりもたらされた淡水が、北大西洋の深層水形成を弱め、北半球高緯度に寒冷化をもたらす一方、熱分配の両極シーソー現象<sup>24)</sup>によって南大洋の水温が上昇する。南極氷床コアの気温の上昇記録は19,000年前に開始している(図4の4)。

南大洋の水温上昇は、海氷の広がりをおさえるため、それまで深海に隔離されていた二酸化炭素が大気中に放出されるが、このことは南極氷床アイスコア中の二酸化炭素分圧変化として記録されている(図4の5)。放出された二酸化炭素は温室

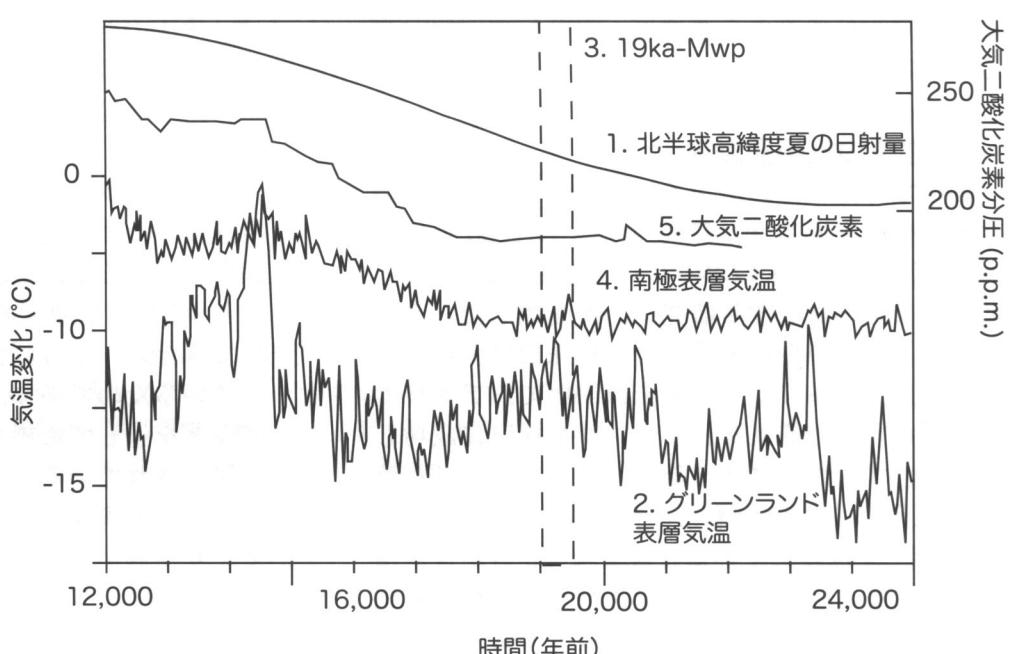


図4 様々なプロキシによる直近の氷期-間氷期の気候変動復元。地球表層サブシステムの時系列変化の関連性がわかる。

効果ガスとして地球温暖化を加速する正のフィードバックとしてはたらき、北半球氷床を融解させ<sup>25)</sup>、現在の間氷期である完新世に至っている。つまり直近の氷期-間氷期の移行期の研究では、北緯65°Nの夏の日射量変化が、気候変動の起点となっていることが明らかになってきた（図4）。また、この一連のプロセスの中では、大気二酸化炭素は極めて重要な役割を果たしており、仮に大気中の二酸化炭素分圧が氷期レベルに留まっていたならば、気候は現在の間氷期のレベルにまでは到達しなかった可能性がモデルの結果から示唆されている<sup>26)</sup>。

## 5.まとめ

過去の長期の気候変動を研究する分野を古気候学と呼ぶが、将来の気候変動予測を正しく理解するためにも、気候モデルと古気候データによる細かな比較検討が重要である<sup>27)</sup>。アイスコアの研究から温室効果ガスと地球表層気温との密接な関係性が明らかになったが、より細かなスケールでの変動については、太陽活動や大気エアロゾルとの関係的重要性が議論されている<sup>28)</sup>。筆者らも行っている研究においては、例えば10年スケールの気候変動には、太陽活動の影響が無視できない規模で存在することが明らかになってきた<sup>29,30)</sup>。

気候変化すなわち気温変化として捉えられがちであるが、それらは、特に降水量変動に関係が深いことも分かってきている。防災という観点からもこれらの研究を進めていく必要があるが、本小論では、紙面の関係から、それらの研究の紹介について割愛させていただいた。

近年、クライメートゲート事件や温暖化懐疑説など問題の一面だけを取り上げて、センセーショナルな議論が行われている。しかし、地球の気候変動の歴史を紐解くと、過去には大きな気候変動を何度も経験しており、それらは、気候システムを構成する、太陽や温室効果ガスのどれもが重要なコンポーネントとなって現象を引き起こしてきていることが明らかである。いずれにしても引き続き、検証可能で定量的な科学的データに基づいた気候変動研究を遂行していくことは、科学的にも社会的にも極めて重要であると考えられる。

**謝辞：**本小論で紹介した研究の一部は最先端・次世代研究開発支援プログラム、GCOEプログラム、JSPS科研費などの支援を受けて行われました。

## 参考文献

- 横山祐典・阿瀬貴博・村澤晃・松崎浩之（2005）宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究。地質学雑誌 vol 111, 693–700.
- Shiroya, K., Y. Yokoyama and H. Matsuzaki (2010) Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  depth profile, *Geochemical Journal*, 44 (6), e23–e27.
- Yamane, M., Y. Yokoyama, H. Miura, H. Maemoku, S. Iwasaki and H. Matsuzaki (2011) The last deglacial history of Lutzow-Holm Bay, East Antarctica, *Journal of Quaternary Science*, 26 (1) 3–6.
- 横山祐典 (2004), 氷期-間氷期スケールおよびMillennialスケールの気候変動の研究：同位体地球化学的・地球物理学的手法によるアプローチ, 地球化学, 38, 127–150.
- 横山祐典 (2003), 放射性炭素同位体とウラン系列核種を用いた古海洋学研究, 地質ニュース, 585 (5), 21–29.
- Yokoyama, Y., T. Naruse, N.O. Ogawa, R. Tada, H. Kitazato, and N. Ohkouchi (2006), Dust influx reconstruction during the last 26,000 years inferred from a sedimentary leaf wax record from the Japan Sea. *Global and Planetary Change*, 54, 239–250.
- Yokoyama, Y., A. Suzuki, F. Siringan, Y. Maeda, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, H. Kawahata and H. Matsuzaki (2011) Mid-Holocene palaeoceanography of the northern South China Sea using coupled fossil-modern coral and Atmosphere–Ocean GCM model, *Geophysical Research Letters*, 38, L00F03, doi: 10.1029/2010GL044231.
- Inoue, M., Y. Yokoyama, M. Harada, A. Suzuki, H. Kawahata, H. Matsuzaki and Y. Iryu (2010), Trace element variations in fossil corals from Tahiti collected by IODP Expedition 310: Reconstruction of marine environments during the last deglaciation (15 to 9 ka), *Marine Geology*, 271, 303–306.
- Hays, J.D., Imbrie, J., and Shackleton, N.J. (1976) Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194, 1121–1132.
- 横山祐典 (2004) アイスエイジの気候変動—氷期と間氷期の繰り返し。“進化する地球惑星システム”東大地球惑星システム科学講座編 第9章 (2004.5発行)
- Dansgaard, W., S.J. Johnsen, H.B. Clausen, et al. (1993) Evidence for general instability of climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218–220.
- Greenland Ice-core Project (GRIP) members. (1993). Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature* 364, 203–207.
- 横山祐典 (2005), 海洋循環が鍵を握る急激な気候変

動～海面下のサンゴサンプルがもたらす重要な古気候情報, *Ship & Ocean News Letter*, 106, 6-7.

- 14) Yokoyama, Y., T.M. Esat and K. Lambeck (2001), Coupled climate and sea-level changes deduced from Huon Peninsula coral terraces of the last ice age, *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 579–587.
- 15) Yokoyama, Y. and T.M. Esat (2004), Long term variations of uranium isotopes and radiocarbon in surface seawater as recorded in corals, *Global environmental change in the ocean and on land*, 1, 279–309.
- 16) Yokoyama, Y., and T.M. Esat (2011), Global Climate and Sea Level-Enduring variability and rapid fluctuations over the past 150,000 years-. *OCEANOGRAPHY*, in press.
- 17) EPICA Community Members (2006), One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica, *Nature*, 444, 195–98.
- 18) Yokoyama, Y., K. Lambeck, P. De Deckker, P. Johnston and L.K. Fifield (2000), Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima, *Nature*, 406, 713–716.
- 19) Lambeck, K., Y. Yokoyama and A. Purcel (2002), Into and out of the Last Glacial Maximum: sea-level change during oxygen isotope stages 3 and 2c, *Quaternary Science Reviews*, 21, 343–360.
- 20) Yokoyama, Y., P. De Deckker, K. Lambeck, P. Johnston and L.K. Fifield (2001), Sea-level at the last glacial maximum : evidence from northwestern Australia to constrain ice volumes for oxygen isotope stage2, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 165, 281–297.
- 21) Yokoyama, Y., Y. Kido, R. Tada, I. Minami, R.C. Finkel and H. Matsuzaki (2007), Japan Sea oxygen isotope stratigraphy and global sea-level changes for the last 50,000 years recorded in sediment cores from the Oki Ridge, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 247, 5–17.
- 22) Alley, R.B., Brook, E.J., and Anandakrishnan, S. (2002). A northern lead in the orbital band : North-south phasing of ice-age events. *Quaternary Science Reviews*, 21, 431–441.
- 23) Clark, P.U., McCabe, A.M., Mix, A.C., and Weaver, A.J. (2004) Rapid rise of sea level 19,000 years ago and its global implications. *Science*, 304, 1141–1144.
- 24) Stocker, T.F., Wright, D.G., and Broecker, W.S. (1992), The influence of high-latitude surface forcing on the global thermohaline circulation. *Paleoceanography*, 7, 529–541.
- 25) Severinghaus, J.P. (2009) Climate change : Southern see-saw seen. *Nature*, 457, 1093–1094.
- 26) 横山祐典 (2010) ターミネーションの気候変動. 第四紀研究, 49, 337–356.
- 27) IPCC (2007) Climate Change 2007-The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report on the IPCC, 996p. Cambridge University Press.
- 28) Yamaguchi, Y.T., Y. Yokoyama, H. Miyahara, K. Sho and T. Nakatsuka (2010) Synchronized Northern Hemisphere Climate Change and Solar Magnetic Cycles during the Maunder Minimum, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 107(48) 20697–20702.
- 29) Hong, P.K., H. Miyahara, Y. Yokoyama, Y. Takahashi and M. Sato (2011) Implications for the low latitude cloud formations from solar activity and the Quasi-Biennial Oscillation, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73 (5–6), 587–591.

# 沖縄における琉球石灰岩空洞調査

高 久 和 彦\*

## 1. はじめに

調査地は沖縄本島中部に位置し、周囲を民間地域で囲まれた米軍提供施設であり、標高約60mの平坦な丘陵地で住宅地として利用されている。調査地東側の隣接する民間地域には鍾乳洞があり、既存資料では西側へ約180m延伸している。

地質は既存調査結果より基盤層の不透水層である新第三紀鮮新世の島尻層泥岩が南東→北西へ傾斜し、その上部に透水性が高く鍾乳洞が存在する可能性のある第四紀更新世の琉球石灰岩が層厚10~30m堆積している。

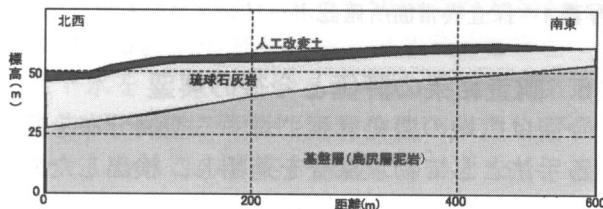


図1 調査地の模式断面図

米軍提供施設内の再開発計画に伴い、文化財である鍾乳洞およびその延長付近について空洞の状態を把握し、再開発計画の基礎資料とする目的で調査を行った。

## 2. 調査手法の選定

当初は比抵抗法電気探査のみで計画をしたが、空洞の発達する琉球石灰岩地域での鍾乳洞調査事例では以下の傾向、条件があった。

- ・岩質が不均質で鍾乳洞には方位、標高、規模等に規則性がない
- ・経験的に電気探査など1種類の物理探査だけでは空洞の状況を把握できない場合が多い
- ・既存鍾乳洞は文化財であり、直接ボーリング掘削して確認することはできない

・米軍提供施設内の調査地は住宅や道路等既設構造物があり、調査手法や測線長に制限がある。これら諸条件を考慮して以下の調査計画を立案した。

- 1) 既存鍾乳洞測量にて現況測量調査を行い、規模、位置、高さを特定する
- 2) 数種の物理探査による異常箇所の抽出による複合探査による異常箇所の抽出（基本は比抵抗法電気探査、一部S波浅層反射法地震探査、補足調査～地中レーダ、微重力探査、熱赤外線映像法等）
- 3) 各種探査結果による異常箇所におけるチェックボーリング以上の計画を立て、発注者と打ち合わせ協議のうえ実施した。

## 3. 既存資料の把握と鍾乳洞現況測量

既存調査結果により現場には5箇所のボーリング柱状図および推定地質断面図等があった。また、その他の調査結果より河川水や地下水の流下方向（基盤の傾斜方向）は南東→北西に緩やかに傾斜していることが判明していた。

鍾乳洞は既存資料で人員が入れる規模で測量可能であったが、地形図での平面的位置、標高は不明であった。そこで、簡易測量で鍾乳洞全体を把握し、末端位置までの形状を座標で捉えた。更に、末端に近接する部分で地表までの土被り最も薄い部分に電磁場を与える機材を持ち込み、磁場を与えてその位置を地表からの磁気探査により確認し、鍾乳洞の平面的位置、断面位置を確定した。その結果、既存資料とほぼ類似の形状・延長であることが判明した。

## 4. 測線配置

現況測量の結果、既存鍾乳洞は不透水層である基盤構造の傾斜とやや違ってほぼ西方向へ延伸し

\* 大和探査技術株式会社 沖縄営業所

ていることが判明し、現況図面にその位置を表示できた。よって、これらとほぼ直行する南北方向の道路沿い(埋設管などがない部分)や住宅間の庭先等にほぼ同一間隔で測線を設定した。また、再開発計画構造物位置や範囲も考慮し配置した。

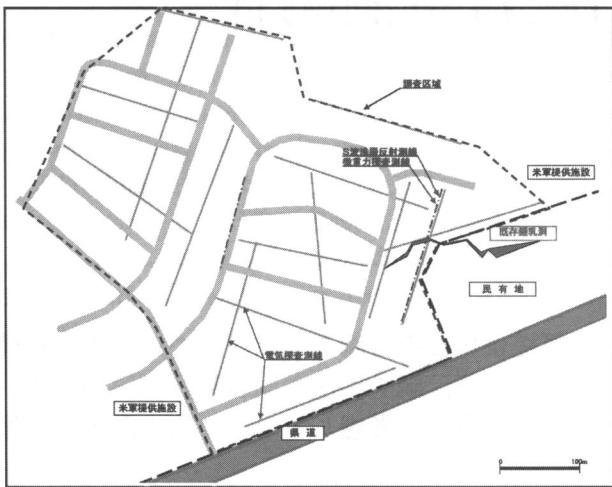


図2 調査位置模式平面図

## 5. 調査、探査結果

### ○比抵抗2次元探査

基本的な調査手法である比抵抗2次元探査は施設内での電極設置条件を考慮してウエンナー法とエルトラン法を組み合わせて測定した。調査地内の琉球石灰岩層は地下水位がほとんど無く、鍾乳洞内は空洞となっていると考えられる。既存鍾乳洞上で行った空洞検出パターンは下図に示すように実際の空洞の数倍の規模で同心円状の高比抵抗帯が得られた。よって同様なパターン箇所を異常箇所として抽出した。

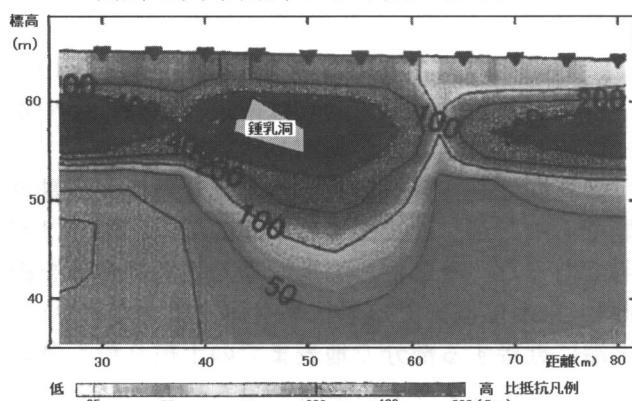


図3 比抵抗断面図(空洞検出パターン例)

### ○S波浅層反射法地震探査

既設空洞上では再結晶した空洞頂部の硬質な石灰岩を捉えて凸状の強反射・弱反射パターンが見られたため同様の傾向箇所を抽出した

### ○地中レーダ

通常用いる400MHzのアンテナと可探深度が深い100MHzのアンテナで探査を行った。道

路上など浅部について空洞検出パターンである凸状の強反射部分を探した。

### ○微重力探査

既存空洞上での測線で異常パターンを得て類似箇所を抽出した。

### ○熱赤外線映像法

地表近くにあると思われる空洞を赤外線の温度差のパターンから検出した。

### ○チェックボーリング

各種探査で得られた異常箇所のうち、重複して認められる異常箇所、顕著な傾向を示す箇所を選び、機械ボーリングを8箇所にて実施して異常の把握を行った。その結果、35cm以下の小規模な空洞を2箇所で発見したが、鍾乳洞などの規模の大きなものは発見されなかった。



写真1 探査異常箇所確認ボーリングコア写真(部分)

## 6. 調査結果の評価と今後の展望

今回は広域の開発計画に対する空洞分布を調査する手法として物理探査を適用し、検出した異常箇所においてチェックボーリングによる確認を行う手法での調査である。その結果、規模の大きな鍾乳洞などは発見されなかった。また、その後、再開発計画は順調に進んでいる。

今後は実施した数種の物理探査のうち、どの手法の組み合わせが良かったかを検証していく必要がある。また、必要最小限の調査手法の選定、精度の向上、コスト縮減、調査日数の短縮が望まれる。

## 7. その他

観光施設の鍾乳洞は照明や通路が整備されているが、今回調査した鍾乳洞は未整備で一般人は立ち入れない。戦前までは鍾乳洞の途中の横穴から子供が出入りし遊び場となっていた。測量時は照明機器の搬入、緊急時連絡用の有線通信機器の持ち込みなどが必要であった。また、直径約50cm未満で長さ約3mの横穴部分や区間長約10mで匍匐前進する箇所もあり、測量作業員はウエスト90cm未満のやせ形を選任した。

## 岐阜県各務原市の地下水源復活

### 1. はじめに

水と空気、人類が生存していく上で最も重要な二つの物質のうち、特に水については大地とのかかわりの大きいものと言えよう。地球上の水資源のうち、海水が97.5%、淡水が2.5%を占めるが、このうち利用できる淡水は0.01%にすぎない。利用可能な淡水のほとんどは降水によってもたらされている。日本では平均年間降水量1800mmのうち、約20%が地下水水流になるといわれている。地下水は土壤によって微生物や不純物のろ過・吸着が行われて浄化され、飲用に適するようになる。しかし、これが人為によって汚染された場合には話は異なる。

地下水を上水道としている岐阜県各務原市では、約35年前に硝酸性窒素の地下水汚染が発覚した。しかしこの事実を隠蔽することなく、産官学が協同してこれを克服し、その成果は環境賞を受賞するに至った。ここでは、この事例を紹介する。

### 2. 汚染の発覚と原因究明

各務原市は、広大な濃尾平野の北端、犬山扇状地の木曽川対岸に位置しており、東に国宝犬山城を臨む一方、市域中心部には広大な航空自衛隊岐阜基地を擁している。市は昭和20年頃より、上水道水源を地下水に求めた。後に明らかになるのだが、その地下構造は図1に示すように、深度100m付近までは透水性の良い礫層が分布しており、豊富な地下水盆を形成していた。

水源井は市の西部に偏在しており、人口増加に対応すべく市

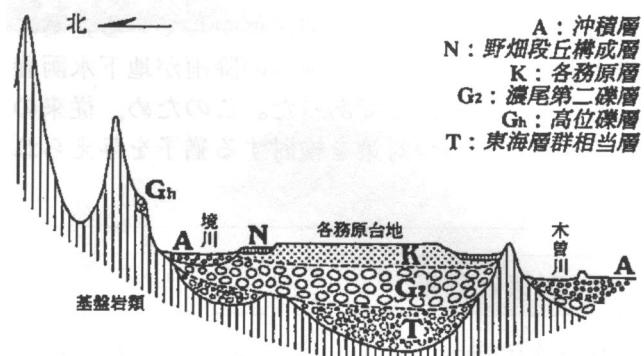


図1 各務原市地下水盆模式断面図（南北方向）

の東部にも水源井を増設する準備を進める段階で、硝酸性窒素の地下水汚染が発覚した。硝酸性窒素は特に乳幼児において、体内に取り込まれると酸素欠乏症を引き起こす原因となることが知られている。当初は、地形的に地下水の涵養源は木曽川の伏流水と考えられており、汚染は畜産農家の家畜糞尿に起因するものと疑われた。しかし種々の水質調査、土地利用状況の分析より、農用肥料に着目された。伊勢湾台風以降、人参の作付転換が進み、このころには夏冬二回栽培が行われ、化学肥料による多肥多産傾向が顕著となっていた。

汚染源が人参に対する施肥と特定することは、市の基幹農業を加害者扱いすることになり、農業団体からの強い抵抗が懸念された。このために

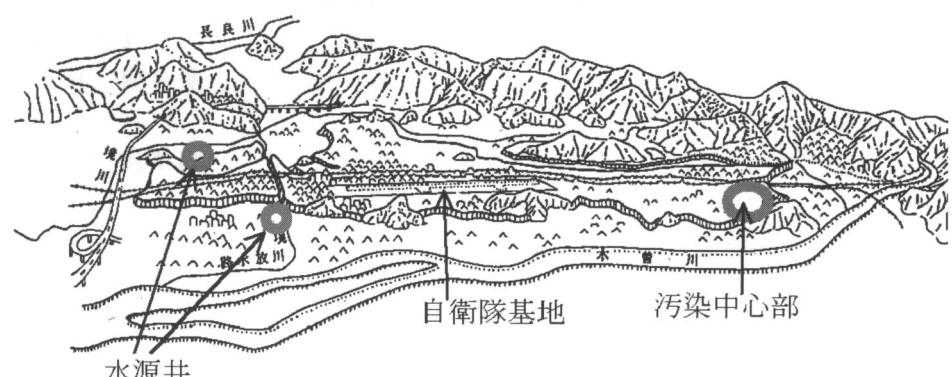


図2 各務原市の鳥瞰図

は、地下構造や地下水挙動の把握、水収支の分析などさまざまなデータを集積して周到に説得材料を準備する必要があり、地質調査業関係者も数多くこれに関与した。

その結果、地下水涵養源はほとんど降水や水田等からの浸透水であること、台地中央部には西へ向かう大きな地下谷があること、地下水盆の大きさは $2\text{ km}^3$ で地下水水量は $0.4\text{ km}^3$ 程度であることが明らかとなった。

ここで、特筆すべきことは、汚染の濃度分布が西へ流下しないで市域東部に停滞していたことがある。これは、市の中心部に集中している企業の揚水と、広大な自衛隊基地への降雨が地下水涵養に寄与しているからであった。このため、従来の水源を利用しつつ対策を検討する猶予を与えられた。

### 3. 対策と効果

地下水流动シミュレーションにより30%程度の減肥によって汚染は低減できると予測された。しかし、減肥しても特産品である人参の生産量を維持できることの理解を得る必要があり、現地で圃場実験を行うことが不可欠とされた。

重窒素肥料を用いた実験より、収穫された人参に含まれる全窒素は、土壤元来の地力と追肥由来が97%であるのに対して、基肥由来が2%に過ぎないことが判明した。(種をまく前に施す肥料を基肥、生育段階で追加する肥料を追肥という)つまり、基肥の98%は土壤からの地下浸透や窒素ガスとして拡散していたことになる。

さらに種々の場合わけ実験を行って、化学肥料は追肥段階で従来の1/3を根部周辺に局部施肥すれば生産に影響ないことを明らかとした。これらの実験データによって農協は次第に減肥することへの理解を示し、関係者に実施の協力を普及して

いった。その結果、汚染発覚から20年後において、水源井の硝酸性窒素の含有量は上水道基準値の1/2に止まっており、地下水を守るに至った。

ここで、各務原市は全国でも珍しい人参の二期作産地となっており、農協はその品質と生産量に絶大な信頼を持っていた。人参は特に人気のある野菜とは言いがたいが、 $\beta$ カロチンが豊富に含まれている特徴がある。この $\beta$ カロチンには抗酸化作用があり、活性酸素を抑えてガンを予防する効果がある。また $\beta$ カロチンは体内でビタミンAに変わり、眼精疲労や角膜の乾燥を予防したり、肌に潤いを与える効果がある。このように多くの薬用効果を有するため、健康食品として今後も需要が高まるものと予想される。

### 4. おわりに

本文の主要参考文献とした「よみがえる地下水」の編者はこう結んでいる。

各務原市がこのように汚染問題を乗り越えられたのは、①協力者に恵まれたこと、②市域が地下水盆の最上流部に位置していたこと、③汚染水の水源井戸への拡散が抑えられたことなど、幾つもの幸運が重なったからだ。このように自然や大地の恵みと人、つまり天地人と時が重なったとき、人知は困難を乗り越えられるのだろうと。

今回の東日本大震災も後世において、このように語り伝えられるように乗り越えられんことを祈念してやまない。

#### 主要参考文献

「よみがえる地下水-自然史と地下水」(株)京都自然史研究所発行

「各務原の歴史」各務原市発行

〔(株)東京ソイルリサーチ 長縄直樹〕

# 各地の残すべき地形・地質

## 室戸半島

土佐湾岸を通り室戸岬方面へ国道55号線  
(羽根岬～室戸岬～佐喜浜)

### はじめに

室戸半島は、高知県の南東部に位置する逆三角形の半島地形で、国道55号線はその外周に沿って走っている。

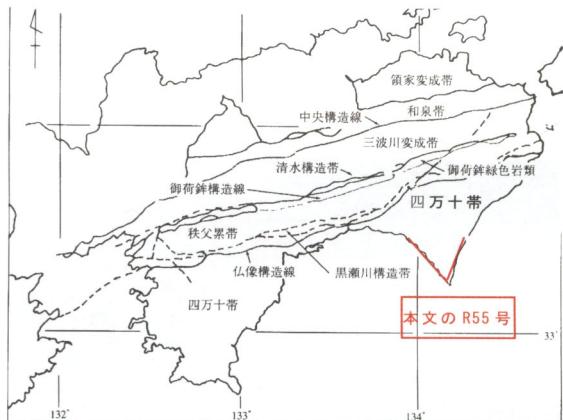


図1 四国の地質区分と本文のR55号の区間<sup>1)</sup>

図1に示すように、四国の北部を中央構造線が東西に通り、その両側では地質のでき方や構成が大きく異なるため、北側を西南日本内帯、南側を外帯と呼んでいる。高知県は四国の南半部を占め、形態的には扇面のような形で、扇の天側（北側）に四国脊梁山地を、地側（南側）に土佐湾岸を配し外帯の地質が分布する。それらは、三波川変成帯、御荷鉢緑色岩類、秩父累帯、そして四十帯が東西性に配列・分布し、境界は断層・構造線によって区切られている。地形的にもそれらの影響で東西性に配列した山地群からなり、間を開析する河川群も同様である。

室戸岬に到る国道55号線の車窓からの風景は左手が山地で右手に海が見え比較的単調であるが、周辺は「室戸ジオパーク」の名称で世界ジオパークネットワークへの加盟申請中で、四十帯付加体の地質や変形性、貫入岩体、隆起海成段丘等があり地形・地質的に興味深い地域である。

### 室戸ジオパークと見どころ



図2 国道55号線と室戸ジオパークの見どころ<sup>2)</sup>

この区間では所々で車を止めて海岸縁など周辺を散策すると、図2に示すように見どころが満載で、台地等の地形形成や隆起の証拠、貫入岩体など海底火成活動、および付加体の各種地質現象等々の地形・地質的に一見の価値がある様々な事象が観察できる。

この付近の地質は四十帯に属するもので、これらは陸側プレートであるユーラシアプレートに、海洋プレートであるフィリッピン海プレートが衝突し潜り込む海溝部（南海トラフ）で形成された付加体と呼ばれる地質群からなっている。海洋プレートが陸側プレート下に潜り込むときに、図3のように、海洋プレート表層にある堆積物が陸側プレート斜面下に挟み込まれてゆく。このような堆積物が「付加体」で、それらは図にみられるように、「より古いブロック」の下に「より新し

いブロック」が押し込まれて形成される。断層関係で境界を接するため、上位のものより下位が新しいという通常の堆積過程ではあり得ない状態の地層の形成のされたたによって出来ている。

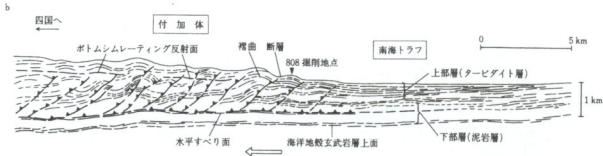


図3 南海トラフでの付加体の形成（人工地震波断面での解釈）<sup>3)</sup>

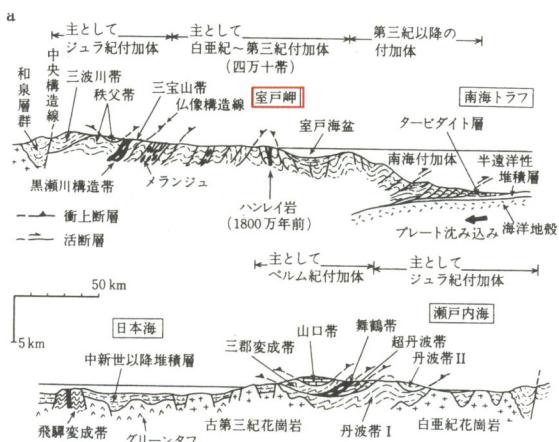


図4 西南日本の地質構造概念図<sup>4)</sup>

南海トラフで形成された付加体は、図4のように陸側プレートの斜面下に潜り込んだあと次第に地表付近に移動し、現在見られるような四十万帯の付加体となっており、外帶の三波川帯、秩父帯等のより古い地質群も同じような出来方をしたと考えられている。

### 地形・地質的見どころの例



写真1 羽根岬付近より行当岬、室戸岬方面を望む

写真1：この付近の山地は、左手から緩く下る山頂部稜線が海寄りで更に緩くなり、台地になって

いる場合が多い。この台地は隆起した海成段丘で、先端は急崖になっている。背後に薄く見える岬地形の上部にも同様の海成段丘地形が分布する。



写真2 ターピダイト層（行当岬付近）

写真2：砂岩と泥岩が細かく互層している。陸側プレート斜面からの乱泥流堆積物が海溝底に堆積してきたものである。



写真3 斑レイ岩体（室戸岬）

写真3：堆積岩中にシート状岩体（シル）として貫入したもので、ほぼ水平に貫入後垂直方向に変位したものである。

この他にも砂岩岩脈、乱堆積、スランプ、メランジュ、枕状溶岩、あるいは地震による土地の隆起など色々な事象が見られる他、自然の観察や文化的知識の得られる地域もある。

### 引用・参考文献

- 1) 鈴木堯士 (1998) 「四国はどのようにしてできたか」 (株)南の風社, p27 第2図.
- 2) 室戸ジオパーク推進協議会発行「室戸ジオパークパンフレット」内の室戸ジオパークサイトマップ.
- 3), 4) 平朝彦 (1990) 「日本列島の誕生」 (株)岩波書店 p 6 図 1-3 (b), p 87 図 3-3 (a).

[株式会社 四国トライ 奥田 之宏]

# 各地の博物館巡り

## 北海道三笠市 「三笠市立博物館」 —三笠1億年の歴史を今に—



三笠市立博物館の全景

### 沿革

三笠市立博物館は、市内の自然史、歴史、産業史を保存すべく、昭和54年（1979年）に設置された総合博物館です。特に、約1億年前の白亜紀における様々な生物の化石が約1,000点展示されており、別名「化石の博物館」とも呼ばれています。毎年、道内外から多くの観光客が訪れ、太古の生物たちに触れていただいています。

当館では、平成21年度より2年間、展示室の改修や講演室の整備などを行ってきました。そして、平成23年4月より、装いをあらたにリニューアルオープンしました。この改修工事により、化石の展示室では、CG映像などを導入して視覚的にわかりやすい展示が製作され、さらにiPadを使ったタッチパネル式の情報検索機器も取り入れられ、大人から子供まで、楽しく、そして詳しく化石について学ぶことができるようになりました。また、体験学習室や講演室を整備することで、化石に関する体験実習や講演会を積極的に開催することができるようになり、更なる生涯学習の場としての役割も果たしています。

### 展示室の概要

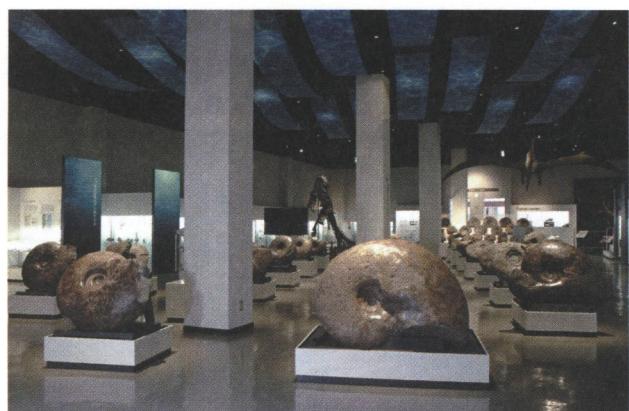
#### (1) 展示室1：白亜紀の世界と化石

約1億年前の中生代白亜紀の海をイメージしたブルーの展示室には、北海道産アンモナイトを中心約1,000点の化石が展示されています。それの中には直径1.3mの日本最大のアンモナイトをはじめ、国の指定天然記念物「エゾミカサリュウ」化石など貴重な標本が数多く含まれており、アンモナイトや化石について詳しく知ることができます。

アンモナイトはイカやタコの仲間で、中生代の海で大繁栄した軟体動物です。国内では北海道か

ら最も多く産出し、当館では約600点のアンモナイトが展示され、国内最大のコレクションとして知られています。

展示室の設備として、アンモナイトや恐竜の解説を見られる「大型モニター」、展示されている恐竜の全身骨格が徐々に肉付けされ動き出す映像を見られる「中生代スコープ」、展示標本について詳しく学習することができる「情報タブレット」があります。



#### (2) 展示室2、3：郷土出身者の足跡

三笠出身者で、医学、芸術、スポーツなどの分野で活躍した方の業績や遺品が展示されています。展示室2では、外科医として、がん治療に力を尽くした「黒川利雄」、産婦人科医として、母子保健事業に力を尽くした「森山 豊」の遺品や著書が展示されています。



展示室3では、新劇女優の「岸 輝子」と北海道出身者で始めて大関まで昇進した「太刀光電右衛門」の遺品が展示されています。

### (3) 展示室4：北海道の開拓と囚人

縄文時代から明治の開拓期までの、三笠市の郷土資料が展示されています。市内で発掘された土器や石器、明治15年(1882年)に設置された監獄「空知集治監」の発掘品、文献、衣服、調度品などが展示されています。



監獄「空知集治監」の資料

### (4) 展示室5：炭鉱の人々とくらし

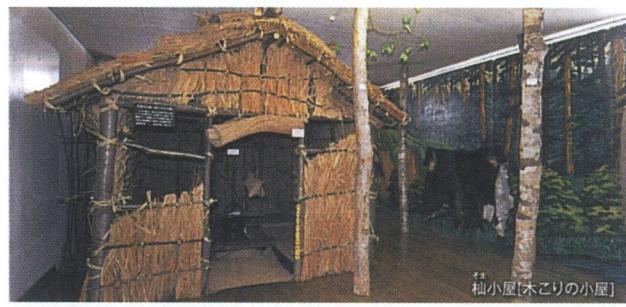
三笠の発展を支えた炭鉱資料が展示されています。明治12年(1879年)に開かれた幌内炭鉱は北海道発の近代的な炭鉱でした。昭和期の炭鉱で使用された機器類を中心に、明治から平成の閉山までの歴史を見ることができます。



炭鉱で用いた機械・道具類

### (5) 展示室6：森林資料展示室（分館）

展示室は本館から約100m東にある分館内にあります。三笠市に生息する動植物標本や、林業関係の資料が展示されています。なお、分館は11月から3月は休館しています。



木こりの小屋

### (6) 野外博物館（1.2km）

野外博物館は、昭和13年(1938年)から昭和31年(1956年)まで、伐採木の搬出に用いられた森林鉄道の路線跡を利用して、動植物や地層の観察をすることができるサイクリングロードとして整備されました。

ここでは、垂直に隆起した泥岩、砂岩、礫岩からなる、約1億年前の白亜紀層と、石炭層を含む約5,000万年前の古第三紀層を観察することができます。

### (7) 多目的ホール：特別展

毎年夏季の期間、自然科学をテーマとした特別展を開催しています。今年は、三笠市開港130周年を記念して、7月上旬～10月まで期間、特別展「白亜紀の恐竜（仮題）」を開催する予定です。

## 一般情報

### (1) 住所・電話番号

北海道三笠市幾春別線町1丁目212-1  
Tel. 01267-6-7545

### (2) アクセス

自家用車等：道央道「三笠I.C.」より桂沢湖方面(東)へ約20分。新千歳空港より道央道経由約1時間30分。

公共交通機関：「JR 岩見沢駅」下車、中央バス「幾春別町行」終点下車。東へ徒歩5分。

### (3) 料金

大人450円(360円)、小・中学生150円(120円)。( )内は20名以上の団体料金。

### (4) 開館時間

午前9時～午後5時(入館は午後4時30分まで)

### (5) 休館日

毎週月曜日(月曜が祝日の場合は翌平日)  
冬季間の祝日(12月～3月)  
年末年始(12月30日～1月4日)

本文の作成にあたり、館長の栗山俊彰様と主任研究員の栗原憲一様に多大なるご協力を頂きました。深く感謝致します。

[北海道土質コンサルタント(株) 松本 和正]

# 地盤材料におけるせん断試験とその適用について

## 【Key Word】

せん断試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、動的変形特性

つぼ た くに はる  
坪田 邦治\*

## 1. はじめに

本講座第4回目は、「せん断試験」について解説するが、改訂となった地盤材料試験の方法と解説ではせん断試験は「変形・強度試験」とまとめられている<sup>1)</sup>。これらの変形・強度試験のなかで実務によく適用されている試験は表1のように区分される。

一般的に、軟弱地盤上に盛土した場合には、地盤は変形し、地盤の有する支持力以上の盛土を載荷すると地盤は破壊する。従来の設計手法では、地盤の変形に関しては主に線形弾性体として扱い、地盤の破壊に関しては、剛塑性論による極限釣り合い解析が適用されている。このように、地盤の変形問題と安定問題は別々に扱われてきた。

近年では、コンピューターの進化と連動して、土の構成モデルに関する研究と解析技術の発展、地盤材料試験における計測技術の向上などによって、対象とする土を区別なく、強度と変形を同時に扱える（例えば、GEOASIA<sup>2)</sup>など）ようになってきた。

しかしながら、土の場合には、歪みと応力の関係は、非線形が一般的であり、弾性・塑性・粘性が混在するとともに、異方性も有している。また、よく知られていえるように、地盤の破壊に対して、瞬時に破壊面が完成するのではなく、進行性破壊が一般的であり、支持地盤の土のピーク強度はせん断層全体にわたって同時に発揮されない。

これらのことから、現在の実務における設計面では、数値解が比較的容易に得られ、問題の全体像が把握しやすい従来のながれでせん断定数を設定している傾向が強いといえる。

地盤が破壊しないためには、せん断破壊させようとする荷重に耐えうる強さを有する必要がある。この強さを土の強度と称し、土のせん断試験を実施してこの土の強度を把握する。

前述したように、せん断試験には主として表1に示すような試験があるが、ここでは実務で多く適用されている一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の静的試験を中心に、試験結果に与える影響、評価方法、留意点などについて記載する。

表1 実務で適用されているせん断試験の分類と適用<sup>1)</sup>を加筆修正

実務で適用される主な試験手法の区分			求まる地盤の力学特性		対応する工学的問題	試験の原理
主応力載荷型	軸対象型	一軸圧縮試験 三軸圧縮試験	強度定数 変形特性	粘着力( $c$ )、内部摩擦角( $\phi$ ) 変形係数( $E$ )	(地盤の変形・破壊) ・静的変形 ・支持力、斜面安定 ・土圧	
		繰返し三軸試験	液状化特性	液状化強度曲線	(地盤の動的問題) ・液状化的判定	
			動的変形特性	$G-\gamma$ 曲線、 $h-\gamma$ 曲線	(地盤の動的問題) ・動的変形	
せん断応力載荷型	側方変位非拘束型	繰返しねじりせん断試験	動的変形特性	$G-\gamma$ 曲線、 $h-\gamma$ 曲線	(地盤の動的問題) ・動的変形	
	側方変位拘束型	一面せん断試験	強度定数	粘着力( $c$ )、内部摩擦角( $\phi$ )	(安定問題) ・斜面、掘削面の安定 ・擁壁の支持力 ・地すべりなど安定	

\* 中部土質試験協同組合（ジオ・ラボ中部）専務理事

## 2. 一軸圧縮試験

### (1) 試験結果を見る際の留意点

本書の読者の中には、試験結果を見る際に、最大圧縮力と、そのときの歪み、変形係数の  $E_{50}$  だけをチェックする傾向が多いと考えられる。JIS A 1216 では、一軸圧縮試験を実施した場合に、圧縮力が最大となって、引き続き歪みが 2% 以上生じるか、圧縮力が最大値の 2/3 程度に減少するか、または圧縮歪みが 15% に達したら圧縮を終了することとしていることに留意されたい。

また、圧縮歪みの速度については、上記の JIS であれば、毎分 1% の圧縮歪みを標準とすることが多いが、歪み速度の違いによって、どの程度、最大圧縮力に差異が生じるかを理解しておくことも必要と考えられる。この点に関して、清水・高田<sup>3)</sup>は、図 1 のように、試料の塑性指数に関らず  $q_u$  は歪み速度が小さくなると低下すること、図に示した圧縮速度の範囲では、低塑性試料で最大約 10%，高塑性試料で約 8% 変化することを示している。なお、ここで適用されている試料は、高塑性試料 ( $w_L = 104.6\%$ ,  $w_P = 28.6\%$ ,  $I_P = 76.0\%$ )、低塑性試料 ( $w_L = 55.8\%$ ,  $w_P = 31.8\%$ ,  $I_P = 24.0\%$ ) を用いて試験を実施されている。

### (2) 一軸圧縮強度から圧密降伏応力 ( $p_c$ ) の推定

土の強度は圧密圧力に比例する。したがって、 $p_c$  は一軸圧縮強度からもある程度推定できる。全国の港湾地区の沖積粘性土は、 $c/p = 1/3$  で代表され、 $q_u/p = 2/3$  とおくことができるところから、 $p_c \approx 1.5 q_u$  となる。ただし、有機質粘性土となると、 $c/p = 1/2$  となることが多い、 $p_c \approx 2.0 q_u$  の関係を示すことが多くなることに留意されたい<sup>4)</sup>。

図 2 は東海地域における相関を示したものであるが、このことを裏付けている。なお、洪積粘性土では  $q_u = 100 \sim 400 \text{ kN/m}^2$  と幅広く分布し、 $p_c = 200 \sim 800 \text{ kN/m}^2$  で、 $p_c \approx (1.5 \sim 3.0) q_u$  を示す。

多くの試験を実施した場合には、この関係を用いて、各試験のデータをチェックすることが可能である。試験を実施する立場からの要望として、

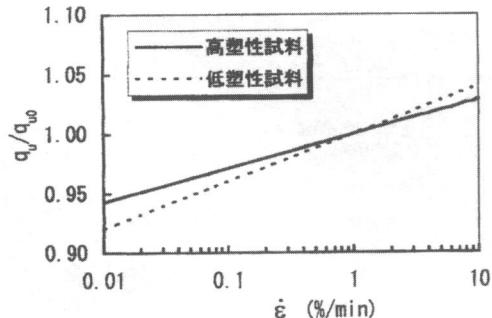


図 1 一軸圧縮強さ比と圧縮速度の関係<sup>3)</sup>  
(有効応力履歴が同じ供試体)

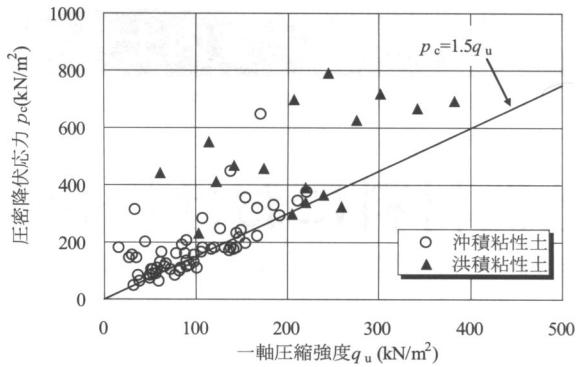


図 2 一軸強度と圧密降伏応力<sup>5)</sup>

単に圧密試験の結果を利用するだけでなく、深度方向に変化する堆積環境・強度分布などを考慮して、設計値を設定してほしいと考えている。

### (3) サンプリングチューブ内一軸圧縮強度分布

港湾関係業務であれば、サンプリングチューブ内で、力学試験の供試体の採取深度が決まっている。伊勢湾沿岸地域で採取された、細粒土分 90% 以上の沖積層の乱さない試料（現在、公益社団法人地盤工学会の表記委員会では、「乱れの少ない試料」は確定されておらず、「乱さない試料」で統一していることから、本編では、元の表記で記載する）28 本の試験結果を図 3 に示す。この結果をみると、サンプリング最下端を 0 cm として正規化してプロットしたが、チューブ先端から 40~50 cm のところが最も高い  $q_u$  値が得られていることが判る。最も下位の  $q_u$  値と比較すると、20% 程度高い値が得られていることが判る。一方、同様に得られた正規化した湿潤密度は、それほど大きな差は見あたらない。

これらの傾向は、現在分析中であるが、沖積層のみならず洪積層でも全く同様な傾向を示すことが判明している。今後、サンプリングチューブ内

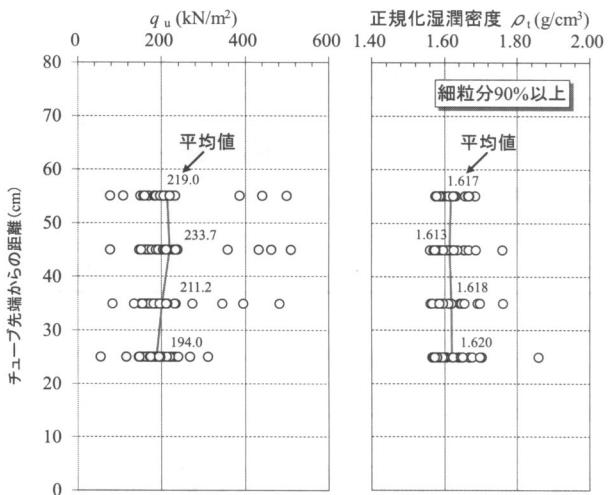


図 3 伊勢湾岸地域における沖積層のサンプリングチューブ内の  $q_u$  値と湿潤密度分布（試料：細粒分 90% 以上）

の試料の歪み発生などを解析し、図3の結果を検証していきたいと考えているが、試験を実施される場合に一考したい事象であると考えている。

#### (4) 攪乱による一軸圧縮強度の低下

サンプリングされた試料は、試料の採取過程において、有効応力の低下と解釈し次式で定義される攪乱比( $R$ )によって、攪乱の影響を評価することが提案されている<sup>6)</sup>。

$$R = \sigma'_v / \sigma'_s$$

ここで、 $\sigma'_v$ : 完全試料の残留有効応力

$\sigma'_s$ : 試験時における試料の残留有効応力

攪乱強度比は、攪乱によって強度が完全試料の強度に対して低下する割合<sup>6)</sup>である。正規圧密状態にあるとされる本牧海底粘土とボストンブルークレーで、攪乱強度比との相関を図4に示す。粘土によって、同一の $R$ に対する強度低下は異なるが、 $R$ は平均的には5程度であるとされ、本牧粘土の場合では、強度比=0.7に対応していることが読み取れる。つまり、一般的な乱れが与えられた試料に対して行われた一軸圧縮試験から得られる非排水せん断強度は、3割程度小さな強度が得られているものと考えられる。なお、ここでボストンブルークレーと比較していることは、我が国の粘土のみならず、世界的なデータと比較することで特異性を消去するために適用されている。

また、我が国の臨海地域では、下末吉海進によって堆積した洪積粘土層のように、採取深度が大きくなると、潜在クラックが入っていることが多い、このような供試体に一軸圧縮試験を適用すると、潜在クラックの存在によって、強度が低下することが多くなる。このような場合には、後述する三軸圧縮(UU)試験を適用することが適切であるといえる。

#### (5) 調査結果から設計値の設定に際する留意点

森田<sup>7)</sup>は、遠賀バイパスの調査体験に基づき一軸圧縮強度を用いて設計値設定に際する留意点の事例を示している。

軟弱地盤であったことから、情報化施工が採用され、順調に施工が進められていたが、盛土高が3.0mに到達すると、急に沈下量が大きくなりすべり破壊が生じた。この原因を究明するために、詳細な追加地盤調査が実施された。

図5に事前調査を含めた追加調査に基づく地層断面図、図6に該当区間の土質特性深度分布図を示す。地盤特性の設定に際しては、一般的によく採用されているように、該当区間の平均値を採用して、当初設計値として深度方向に増分する代表値を設定されていた。

$$q_u = 15 + 2.0 \times Z \quad (Z: \text{深度 m}, q_u: \text{kN/m}^2)$$

追加調査の結果、2つの問題点が明らかになった。最初の問題点は、破壊が生じた地域は、当初想定されていたような単純な地層構成ではなく、図5に示されるように、基盤の第三紀層に起伏があることが明らかにされるとともに、破壊の発生した付近では著しく厚い軟弱粘性土が分布していることが判明した。2点目は、追加調査を実施すると、この付近の一軸圧縮強度特性(図6の△)は、全体のばらつきの範囲の下限値附近に分布し、含水比は上限附近に分布することが判明した。この結果、破壊が生じた付近の一軸圧縮強度は、当初設計値よりも小さい強度であることが判った。

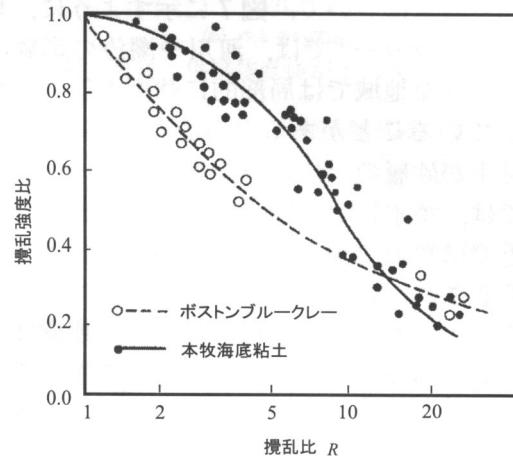


図4 攪乱比と攪乱強度比の関係<sup>6)</sup>

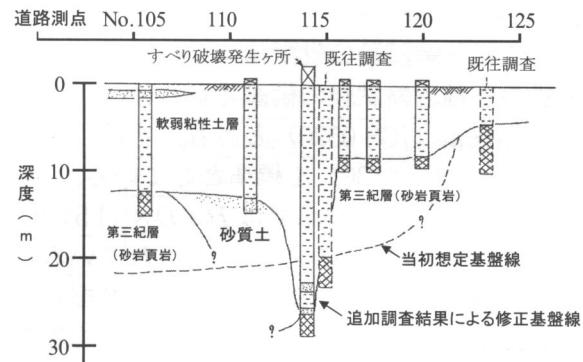


図5 追加調査に基づく地層断面図<sup>7)</sup>を一部編集

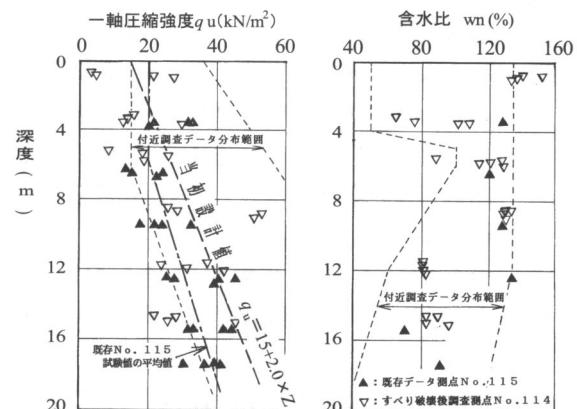


図6 地盤特性深度分布<sup>7)</sup>を一部編集

しかし、事前の試験値をよく分析すると、すべり破壊が生じた近傍の試験値（No. 115）は、追加調査で判明したこのすべり破壊箇所の代表値に近いことも判明した。

この事例では、事前の調査段階で問題のある区間の地盤特性を見抜き、他の区間と区別した小さい設計値を設定しておくことが必要であることを示唆している。最近のように、自分でプロットせずに、パソコンでデータを一括整理する時代となつては、こうした特性を見抜くことが難しいが、ここで示した事例は、地盤技術者にとって、地域限定の特異なデータの存在を見抜くことが重要であることを示している。

これらの点について、図7に示すように、地盤工学ライブラリー<sup>8)</sup>では、河川や潮汐の影響で滞水するような地域では局部的に強度の低い地盤が堆積していることがあると解説している。また、海成粘土が砂層の上位に厚く堆積しているような地域では、淡水化の影響で、砂層と海成粘土の境界付近では鋭敏比が高くなっていることがあることに留意されたいとしている。

ここで事例として示した留意点は、地盤技術者に対して、周囲の地形を読み、地盤の堆積環境を考慮したうえで、各種の地盤条件を設定することを求めていいるともいえる。

### 3. 三軸圧縮試験

#### (1) 三軸圧縮試験の供試体について

一般の三軸圧縮試験の供試体形状は、直径( $D$ )が3.5~10cm (JGS 0520)とされ、粗粒土対象では、30cm (JGS 0530)を標準としている。一方、供試体の高さ( $H$ )は標準では $H=D\times(1.5\sim2.5)$ 、粗粒土では $H=D\times(2.0\sim2.5)$ とされている。このような供試体寸法比( $H/D$ )が内部摩擦角に与える影響を、Bishop & Green (1965)は均等な砂を用いて、 $D=10\text{ cm}$ ,  $H=10\sim20\text{ cm}$ として実験し、図8を得ている<sup>9)</sup>。この図から、各種の端面摩擦補正処理を行っても $H/D=1$ の供試体は、 $H/D=2$ の供試体に比較して、大きめの値が得られている。一方、 $H/D=2$ の供試体はその補正処理に影響のない値が得られていることが判る。これにより、粗粒土の場合には、2.0~2.5倍を標準にしたとされている<sup>6)</sup>。

一方、今井等は、直径と最大粒径との関係は、均等係数が10程度の粒径幅が広い試料を用いて、図9に示すように直径( $D$ )は、最大粒径の5倍以上あればせん断抵抗角( $\phi$ )に及ぼす影響が小さくなることを示している<sup>10)</sup>。

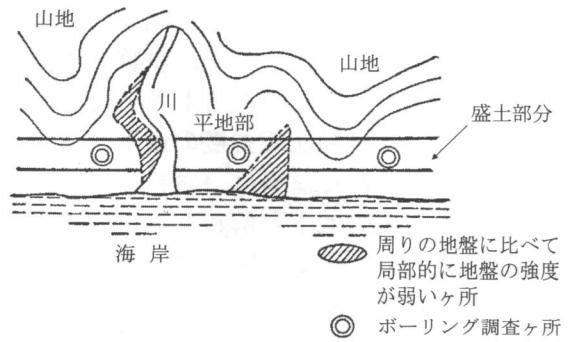


図7 局部的に軟弱地盤が分布する地域<sup>8)</sup>

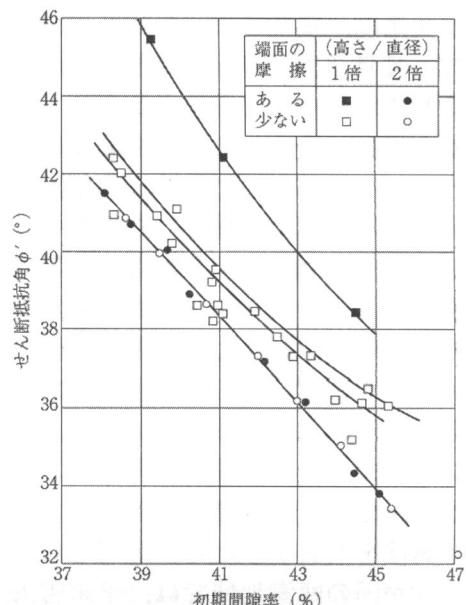


図8 供試体寸法比がせん断抵抗角に及ぼす影響<sup>9)</sup>

現在新しく改訂された地盤工学会基準 (JGS)では、三軸圧縮試験毎に適用する供試体について表2のように記載しているので参考にされたい。

#### (2) 一軸圧縮強度と三軸圧縮強度の適用性

阪口<sup>11)</sup>は、東京上部層（更新世後期）で実施した一軸圧縮強度 $q_u$ と三軸圧縮(UU)試験で求めた軸差応力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ をそれぞれ図10、図11に示した。図10の①、②、③層に区分して、両者を比較すると、表3のようになる。この結果、軸差応力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ は $q_u$ に比較すると、1.5倍となることを示した。

この事例のように、洪積層を対象（特に潜在クラックを有しているような場合）とするような場合には、三軸圧縮(UU)試験を適用することが望ましいといえる。

#### (3) 簡易三軸CU試験を用いたせん断特性の推定

新しく改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説では、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験による強度を併用して粘性土地盤のせん断定数を定める

方法を提案している<sup>12)</sup>。

この手法は、乱さない試料であるシンウォールサンプリングについて、3本の一軸圧縮試験（平均 $s_u$ ）と1本の簡易三軸CU試験を実施する。これらから求めた $q_u$ と簡易三軸CU試験（ $s_u$ ）の強度を組みあわせ、試料の乱れの程度を評価して強度を決定する方法である。簡易三軸試験を実施する場合、原位置の平均有効応力（ $K_0=0.5$ のとき、 $2\sigma_{v0}/3$ になる）で等方圧密した後、非排水圧縮する三軸CU試験を対象としており、得られた非排水せん断強さを経験的に0.75倍するといった補正を用いて設計値を採用している。ただし、本手法は自然地盤を対象としており、埋立地の未圧密地盤には適用できないことに留意が必要である。

#### (4) 中間土のせん断試験の選定<sup>12)</sup>

砂分含有率が50~80%の範囲にある土は、砂質土と粘性土の中間的な土であり透水係数と設計条件から判断して砂質土または粘性土としてせん断強さを算定することが望ましい。新港湾基準<sup>12)</sup>によると以下のような試験選定に対する示唆を与えているので参考にされたい。

①透水係数が $10^{-6}\text{m/s}$ 以上の場合、地盤を排水条件と考え、 $c_d=0$ として $\phi_d$ を電気式コーン貫入抵抗値あるいは三軸CD試験により求めた値を用いることができる。

②透水係数が $10^{-6}\text{m/s}$ 以下の場合は、粘性土地盤として性能照査を行う。ただし、中間土では試料採取時の拘束圧の解除による影響が粘性土よりも大きいため、 $q_u$ 法によるせん断強さは過小となる。

③一軸圧縮強度を粘土分含有率や塑性指数によって補正する方法が適用されているが、中間土地盤の強度評価法としては一軸圧縮試験と三軸圧縮試験を併用するか、一面せん断試験の強度を用いることが望ましいとされている。

#### 4. 動的変形試験について

伊勢湾沿岸地域における動的変形試験結果と既存の各種データとの整理・比較を行った結果を図12に示す<sup>13)</sup>。

この図はせん断定数 $G$ とせん断歪 $\gamma$ の関係をH-Dモデルにより得られた初期せん断剛性定数 $G_0$ でそれぞれ正規化しプロットした。沖積粘性土は岩崎・常田等<sup>14)</sup>、沖積砂質土は岩崎・龍岡等<sup>15)</sup>、洪積砂質土は国生・佐々木<sup>16)</sup>によるデータに、大

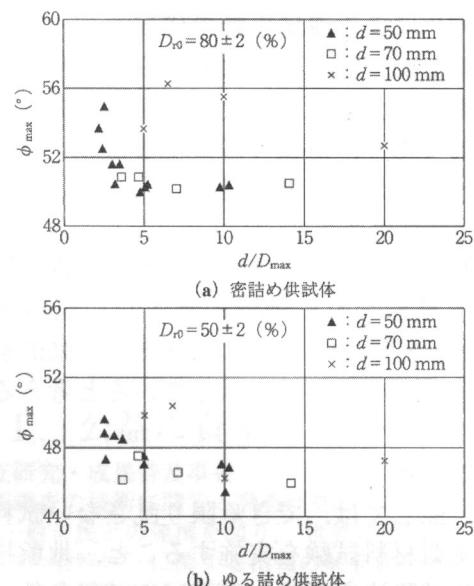


図9 最大粒径と供試体直径が $\phi$ に及ぼす影響<sup>10)</sup>

表2 供試体作成基準と三軸圧縮試験の供試体

供試体作成基準、三軸圧縮試験種別	供試体寸法比(H/D)	備考
JGS 0520-2009	1.5~2.5	$D$ は最大粒径の20倍以上 (粒径幅の広い場合は最大粒径の5倍程度まで許容される)
JGS 0530-2009	2.0~2.5 (D=30cm標準)	$D$ は最大粒径の10倍以上 (均等係数5以上では最大粒径の5倍程度まで許容される)
UU(JGS0521-2009)	2.0以上	粗粒土(20mm以上)の場合、JGS0530に従う
CU(JGS0522-2009) CU(JGS0523-2009)	JGS 0520-2009 JGS0530-2009	
CD(JGS0524-2009)	JGS 0520-2009 JGS0530-2009	

表3 一軸圧縮強度と軸差応力の比較<sup>文献11) を編集</sup>

地層区分	一軸圧縮強度	軸差応力
	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kN/m <sup>2</sup> )
①	1.28 ± 1.05	2.13 ± 1.05
②	1.55 ± 0.64	
③	1.82 ± 0.81	3.03 ± 0.87

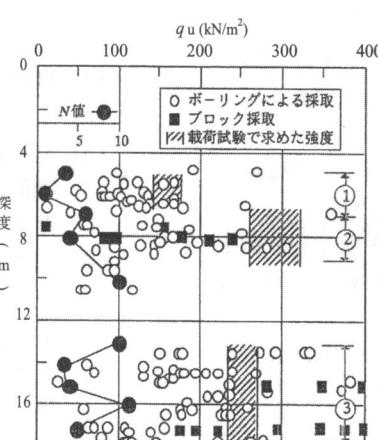


図10 更新統粘土の一軸圧縮試験<sup>11) を編集</sup>

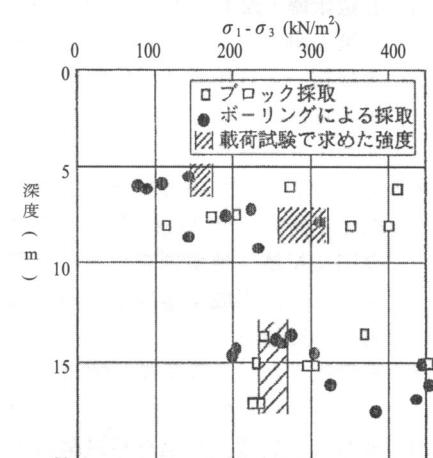


図11 更新統粘土の三軸圧縮(UU)試験<sup>11) を編集</sup>

橋・森本<sup>17)</sup>による濃尾平野の代表的データをそれぞれ比較した。各データとも歪みレベルが小さい領域において、 $G/G_0$ の低下の割合が小さいことが特徴的であり、洪積の砂質土層においては国生等のデータに比べて特に違いが大きいことが判った。

この結果、公表されている代表的特性を適用するよりも検討地点の地盤の乱さない試料を採取し、動的変形試験を実施したうえで、動的解析を実施することの重要性を示していると考える。

## 5. まとめ

試験に際しては、できる限り乱さない試料を採取し、地盤材料試験を実施すること、地盤技術者は、JGS 試験法を読み守るべき試験条件を確保して、適切にせん断試験を行い、設計指針に適用することが重要と考えている。また、現地の地盤環境を考慮した上で、特異なデータが存在するかどうかを十分チェックして、代表的設計値の設定を行うなど細心の注意を払うことが重要と考えている。紙面の都合で、静的なせん断試験を中心とした内容となつたが、実務者にとって、せん断定数の設定に際して役立てば望外の喜びである。

## 引用・参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説二分冊の2—, pp. 535~536, 2009.11.
- 2) 野田利弘：部分排水振動三軸試験における砂の締固め、液状化・液状化後の圧密拳動の水～土連成計算、ジオ・ラボ中部ニュースレター No. 17, 大学の研究室紹介—東海シリーズ No. 17—, 平成 20 年 10 月
- 3) 清水正喜・高田 亮：一軸圧縮強さに対する圧縮速度の影響—有効応力による評価—, 第 41 回地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 29~32, 1996.
- 4) 渡辺崇博・鈴木一正・菅原紀明・柄木 博：軟弱地盤対策工事ポケットブック, 山海堂, pp. 74~76, 1986.
- 5) 久保裕一・坪田邦治：伊勢湾および濃尾平野地域の圧密特性について, 平成 19 年度中部地質調査業協会ミニ・フォーラム, 2007.
- 6) 奥村樹郎：粘土の攪乱とサンプリング方法の改善に関する研究, 港湾技研資料, No. 193, 1974.
- 7) 森田悠紀雄：地盤調査結果の解釈と評価—失敗例を交えて—, 平成 4 年度第 1 回愛媛県土質工学研究発表会, 1992.
- 8) 地盤工学会：土質基礎工学ライブラリー 32, 設計における強度定数—c,  $\phi$ , N 値—, p. 93, 1988.
- 9) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説二分冊の2—, p. 563, 2009.11.
- 10) 今井五郎・プラダンテージ・鎌田隆司：粒状体のせん

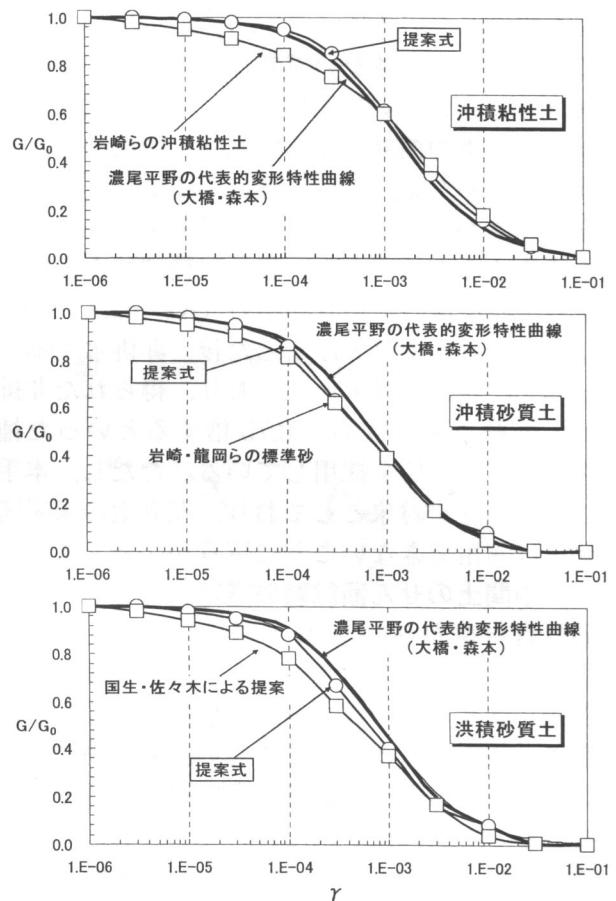


図 12 濃尾平野地域の  $G/G_0$ ～せん断歪  $\gamma$  の関係<sup>13)</sup>

- 断特性に及ぼす寸法効果, 土木学会第 46 回年次学術講演会概要集, 第 3 部, pp. 444~445, 1991.
- 11) 阪口 理：丘陵地地盤の調査法と課題, 日本応用地質学会関西支部・関西地質調査業協会, 丘陵地域の応用地質学的特性と課題シンポジウム, pp. 69~78, 1993.
  - 12) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 319~320, 2007.
  - 13) 久保裕一・坪田邦治：伊勢湾沿岸地域における動的変形特性とその動的解析結果の一考察, 理学・工学情報が海岸平野の地盤環境に果たす役割に関するシンポジウム, 地盤工学会中部支部・中部地質調査業協会・日本応用地質学会中部支部, 2007.
  - 14) 岩崎敏男・常田賢一他 1 名：沖積粘性土の動的変形, 土研資料 1504 号, 1979.
  - 15) 岩崎敏男・龍岡文夫他 1 名：広範囲な歪領域の砂の動的せん断変形特性—低周波動的せん断試験装置の開発—, 土研資料 1080 号, 1975.
  - 16) 国生剛治・佐々木正美：繰返し三軸試験による不攪乱洪積砂の動的物性試験, 第 15 回地盤工学会研究発表会, pp. 537~540, 1980.
  - 17) 大橋正・森本巖：濃尾平野地域の地盤の動的変形特性について, 第 25 回地盤工学会研究発表会, pp. 841~842, 1990.