

## プログラム・発表論文抄録集目次

会場：同志社大学京田辺キャンパス夢告館1階 MK102

開場：9:30

10:20~10:30 オープニング

10:30~11:00 中谷正和 (NPO 法人 京都文化財建造物研究所)・庄政典

「同志社校地内歴史的建造物群のアーカイブ化に向けて」

11:00~11:30 當山日出夫 (立命館大学)

「古典籍と JIS 漢字についての再考察

—何が変わったか、変わらないでいるか—」…………… 1

11:30~12:00 大田 靖 (大阪大学)

「弾性波による建造物調査における数学的貢献について」…………… 11

12:00~13:30 休憩

13:30~14:45 特別講演 同志社大学文化情報学部 教授

村上征勝 先生

『浮世絵の計量分析』

14:45~15:00 休憩

15:00~15:30 寺村裕史 (総合地球環境学研究所)

「GIS を用いた遺跡のデジタル測量と遺跡空間データベースの構築」

…………… 21

15:30~16:00 山口欧志 (国際日本文化研究センター)

「遺跡調査における文化的景観把握の試行—文化財の継承のために—」

…………… 29

16:00~16:30 鎌倉快之 (大阪工業大学)

「先史人類学への数理モデルによるアプローチ」

…………… 37

16:30~17:00 岸田徹 (天理大学)・酒井英男 (富山大学)

「遺跡探査法による削平を受けた古墳の形状復元」

…………… 43

17:00~17:10 クロージング

18:00~ 懇親会



## 古典籍とJIS漢字についての再考察 — 何が変わったか、変わらないでいるか —

### The re-considering about the Classic text and the JIS-KANJI

當山日出夫  
TOUYAMA Hideo

立命館大学グローバルCOE (DH) 客員研究員  
Ritsumeikan - University Global-COE (Digital Humanities)

京都市北区等持院北町 56-1  
56-1, Toujiin- Kitamchi, Kita-ku, Kyouto  
E-Mail : htoym@kcn.ne.jp

あらまし：本稿は、13年前の、第1回の「人文科学とデータベース」シンポジウムで発表した論文を、再デジタル化し掲載する。それに対して、現在の視点からの考察をこころみる。古典籍に限らず、資料のデジタル化（文字テキスト）では、そこに、研究者（作成者）の解釈がある。解釈なしに、エンコードはあり得ない。そして、テキストの解釈こそが、研究者にとって最も重要な課題である。

**Summary** : The author released a paper, the " classic text and JIS kanji ", 13 years before. The author released this paper by the symposium of the first. The author rereads the previous paper from the present viewpoint and reevaluates it. " We don't solve the problem of the classic text and JIS kanji " even if the character increases. The basic investigation about the text and the character is important

キーワード：古典テキスト JIS漢字 0208 0213 ユニコード

Keywords : Classical-TEXT JIS-KANJI 0208 0213 Unicode

#### 1.本稿の意図について

筆者は、この本稿が掲載になる『人文科学とデータベース』シンポジウムの第一回（大阪電気通信大学、1995年）で、『古典籍とJIS漢字—テキストの本文校訂との関係において—』と題する発表を行った。今からふりかえれば、この1995年という年は、Windows95が発売になった年であり、インターネットが急速に一般化した時期でもある。そして、この論考は、さらに8年前に書いた論考『コンピュータではあつかえない漢字—「和漢朗詠集」の場合—』（『汲古』、汲古書院）を、ふまえて書い

ている。昭和62（1987）年。つまり、合計すれば、21年前の論考になる。

ここでは、まず、このとき論考を再掲載してみたい（個人的には、再デジタル化してみたいということであるが）。その意図について、述べれば、

第一に、すでに引用されることもない人目につかない資料になってしまった論考ではある。それを、現在の時点では、どのように読めるか、提起した問題は解決されたのか、考えてみたい。

第二に、これは、コンピュータと文字についての論考

である。その原稿を書いたコンピュータと文字の環境は、この間に大きく変化している。日本のコンピュータ(Windows95)では、JIS漢字(0208いわゆる83JIS)だけの時代である。それが、Windows Vistaになり、「JIS X 0213:2004」や「Unicode」が使える環境になって、どう書けるのか、自ら考えながら書き直してみたい、のである。

まず、原則として全文を再掲載する(注はのぞく)。

### 【1】はじめに—JIS漢字の論点—

JIS漢字をめぐっては、これまでに各所で様々に議論されてきている。筆者もまたいくつかの問題提起をおこなってきた。その論点を整理すると次のようになる。

- (1) .字体・字形・書体・フォントなどJIS漢字を論じるための諸概念の整理
- (2) .収録字数・字種の範囲の問題
- (3) .78年版と83年版以降の改訂をめぐる新旧JIS漢字の問題
- (4) .そもそもJIS漢字とは何を規定したものなのか
- (5) .これからのJIS漢字はどうあるべきか
- (6) .JIS漢字の有効利用と漢字検索の問題

このような、JIS漢字についての議論は、古典テキストをあつかう人文学研究においてコンピュータ利用がはじまった時から既に、最大の問題点であった。研究者が自分の研究目的でコンピュータを使うようになった時、まず直面したのは、「必要とする文字がない」「近い字はあるが字体が不満である」という、JIS漢字の字種・字体についての問題であった。それが、近年になってようやく上記のように整理されてきた段階、と言えるであろう。だが、依然として、JISに無い字をどうするかということは、未解決のまま残された問題点である。

### 【2】JISに無い字

JISに無い字への対処策としては、現時点では、次のようなものがある。

- (1) .外字作成。最近では、アウトラインフォントを簡単に自作できるようになってきた。
- (2) .代用。アルファベットや仮名文字、あるいは、大漢和番号など、JISコード内の文字で記述可能な方法

で代用する。

- (3) .あきらめる。JISに無い字は、「■」(活版印刷でいうところのゲタ)とでもしておき、紙に書いた一覧表を付属させる。
- (4) .他の文字コード系を使う。現に、中国文学研究者などは、日本のJISコードで日本語文と、中国の簡体字を使う中国語文を、一つの文書に同居させることを行っている。

どの方法がよいのか、それぞれの研究目的・利用目的によって異なる。

だが、ここで改めて考えてみるべきことは、そもそもJISに無い字とは何であるのか、ということではないだろうか。一見、分かり切ったことのように思えるテーマであるが、考えてみると、広範囲にわたる歴史的考証と厳密な論理構成が要求される、きわめてやっかいな問題である。以下、『和漢朗詠集』を材料として、JISに無い字とはいったい何であるのか、あらためて考えてみたい。

### 【3】『和漢朗詠集漢字索引』の方針

『和漢朗詠集』は、平安時代、藤原公任の撰になる秀句集で、およそ800程の和歌と漢詩句を、テーマごとに分類して編纂したものである。王朝貴族文化の精髓であるとともに、その後の文学作品に多大の影響を与えた作品として、文学史上に名をとどめている。多数の写本・版本のテキストが伝えられているが、最も標準的に用いられるのは、伝藤原行成筆御物本である。現代の校訂注釈本の多くは、このテキストを底本に採用している。

この写本(複製)に基づき、2種類の校注本(岩波日本古典文学大系・新潮日本古典集成)を参看して、本文の表記にもちいられている全ての漢字を検索することを目的として、漢字索引を作成した。

凡例から、字体の認定にかかわる箇所を引用する。

#### [1] 本文

- 3 本文は、次の方針による。
  - a ①の影印本文を本行とする。
  - b なるべく正字体をもちいるが、原本(影印本)での書写字体にも配慮する。
  - c 異体字については、索引としての検索のため、原則的に正字体に統一する。

d ②③の校訂本文をともに（ ）で示す。ところにより、校注者の判断の違いがあるが、それらを区別することはしない。また、必ずしもすべての異同を示すこともしない。わずかな字体の違いなどで、索引としての検索に支障のないものについては、採用しなかったものもある。

#### [6] 字体

- 1 本索引は、その作成はパーソナルコンピュータによったものである。印刷については、レーザープリンタで印字したものを、そのままの形でオフセット印刷してある。したがって、使用字体および字種は、すべて原則的にJIS規格 (JIS C 6226 78) によらざるをえなかった。
- 2 JIS規格に無い字については、編者が外字として作成した。
- 3 そのため、すべての漢字を正字体に統一することは不可能であり、結果として部分的に新字体・正字体の混乱が生じている。しかし、索引として、「和漢朗詠集」の漢詩句の漢字を検索するのに、実用上の不都合は生じていないはずである。
- 5 編者が外字として作成したのは、「和漢朗詠集」本文の漢字では次の63字である。

最終的に、上記のような方針にもとづく漢字索引を作成したのであるが、古典テキストのコンピュータ処理という観点からは、次の問題点を指摘できる。

##### (1) .字体の統一処理

多くの場合、古典テキストの校訂にあたっては、字体を正字体に改めて統一的に処理することが多い。古典を、いわゆる「正字」（まさしく「正しい文字」）で表記するのは当然のこのように思われるかもしれない。しかし、実際の写本等では、必ずしも「正字」ですべて書かれているということはない。むしろ、当時の通行の書写字体で書かれるのが普通であり、現在の『康熙字典』を規範とする正字意識を杓子定規に適用すると、かえって、テキストの本来の姿を理解できないことになってしまう。

##### (2) .索引としての字体処理

古典テキストのコンピュータ処理が、電子化テキストとして、文字・語彙の検索に利用することを目的とす

る場合、あるいは、索引の作成を目的とするような場合、検索の便宜のための字体処理が必要になる。具体的には、

A. テキスト全体を統一的に処理する。

B. 検索システムに、異体字シソーラスのようなものを用意する。

この何れかが必要になる。

##### (3) .本文校訂

凡例3のdとした、校注本の字まで検索の対象とするか否かである。『和漢朗詠集』を一般の研究者が読む場合、実際には通行の校注本によっている。校注者により、本文校訂の判断が異なる場合があり、現実には、校注本に独自の本文が生じることになる。これらをどこまで採用するかが問題である。また、底本（写本）の誤写とおぼしき箇所であっても、簡単に廃棄してしまってよいかどうか疑問である。

以上の3点について総合的に考えたうえで、また、索引としての実用的性格にも配慮して、実際の漢字索引作成となる。

#### [4] 『コンピュータであつかえない漢字』

『和漢朗詠集漢字索引』の刊行にさきだって、筆者は、『コンピュータであつかえない漢字—「和漢朗詠集」の場合—』という論文を発表した。これは、索引作成にあたって、準備的に考えたこと、特にJIS漢字関係の問題点を、まとめたものである。この論文を書いた時、筆者の使ったパソコンに搭載されていたJIS漢字の規格は、「JIS C 6226 78」であった。現在では、「JIS X 0208 90」になっており、この間に、78年版から83年版への変化、いわゆる新旧JIS漢字の改訂がおこなわれたことは周知の事実である。

しかし、古典テキストの本文校訂とJIS漢字についての、もっとも基礎的な問題点については、現在にいたるまで十分に議論がつくざれたとは言い難い状況であり、今から、8年前に書いたものではあるが、この論文についてふりかえってみたい。

結論として、『和漢朗詠集』における非JIS漢字として、64字を認定した。

一般に、ある文献におけるJIS漢字・非JIS漢字を問題にする時、まず問題になるのは、JIS漢字でどの程度入力

可能か、非JIS漢字はどれぐらい出てくるのか、ということであろう。それについてみれば、『和漢朗詠集』の総字数は約10,000字、異なり字数は約1,800字である。したがって、総字数に対する非JIS漢字の割合は約0.7%であり、異なり字数に対しては約3.5%ということになる。

だが、筆者は、このような数字にそれほど意味があるとは思わない。まったく無意味とするわけではないが、重要なのは、何%かという数字ではなく、その中身である。JIS漢字・非JIS漢字と判定した、具体的な字の種類であり、さらには、その判定基準である。

表には全部で64種類の漢字が並んでいる。おそらく古典テキストの本文校訂の現場には疎い、強いていえば理系のコンピュータ研究者の目からは、どれも同じようにJISに無い字と見えるかもしれない。

たしかに、誰がどう見ても、JISに無い字（非JIS漢字）であると判断する字はある。そして、それが一覧表に表に示した非JIS漢字のかなりの部分をしめることは事実である。だが、中のいくつかの字については、そう単純に非JIS漢字であると判定してしまうには躊躇される、微妙な学問的判断が要求されている。テキストの本文校訂とかかわる場合である。

#### [5] 所属部首とJIS漢字

まず、筆者の作成した『和漢朗詠集』の電子化テキストは、最終的には部首画数順配列の漢字索引を作成することを目的とした。そのため、異体字等については、次のような原則でのぞむことになった。

- (1) なるべく正字体をもちいることにするが、原本（平安時代の写本）で使用される字体にも配慮する。
- (2) その字の所属部首が変わってしまうなどの特にいちじるしい支障がないかぎりにはJIS漢字をもちいる。

ここで注目してもらいたいのは(2)の方針である。もし、部首画数順ではなく、他の配列方式、例えば、四角号碼配列や音訓配列による索引を作成するのであったならば、また異なった判断を下すことになったからである。具体的には、次の諸例である。

A.所属部首が同じであるので、統一処理した例。

- [1] .崑 所属部首は「山」。「山」を上を書く字（JIS）と、左に書く字（非JIS）とがある。所属部首が同じであるので、「崑」に統一的に処理することにした。

[2] .楫 所属部首は「木」。原本では、この字の右旁が「戈」になった字体をもちいている。しかし、所属部首は「木」であるので、「楫」に変えた。

[3] .苑 所属部首は「艸」。原本では、全8例のうち2例が、「苑」。残りの6例は、「艸冠」の下に「ウ」ないし「ワ」を書く字。特に区別して用いた形跡も認められないので、「苑」に統一。なおこの字については、現代の校注本の書き下し文は、「苑」を使用している。

B.反対に、所属部首が同じであっても、統一せずに別の字とした例がある。

[5] .寧 原本では普通に「寧」をもちいる。しかし、1例だけ下部を「用」に作る字が使用されている。それは、固有名詞（人名）で使用されている。こと固有名詞の用字については、原本どおりの字体（非JIS）を使用することになる。ただし、この箇所、所属部首という点では、同じ「ウ冠」に属する。

C.似通った字ではあっても、所属部首が異なるために別の字として処理することになる例。

[6] .「徘徊」の熟語で使われるが、「徘徊」と書けばJIS漢字で表記可能。この「徘」の「彳」を「人偏」に作る「俳」はあるが、「徊」を「人偏」に作る字はない（非JIS）。一般に、古写本の書写字体において、「彳」と「人偏」とは、さほど厳格に区別されているとは言い難い場合が多い。特に行書や草書で書かれた場合には、同じように書かれてしまう。

しかし、明朝体で印刷する場合、区別される字となるし、また、所属部首が異なってしまう。なお、この箇所、新潮古典集成では「徘徊」としている。

ただし、最終的な漢字索引においては、「徘徊」とした。それは、その当時使用したパソコン（NEC 9801M2）の能力では、作成できる外字数に厳しい制限があったからである。やむをえず、「徘徊」の例に限って、原則を曲げて妥協することとした。

以上は、所属部首とJIS漢字の判定がからんでいる例である。原則は、原本で使用される異体字（非JIS漢字）が、部首を同じくするならばJIS漢字で処理し、異なるならば外字を作る、ということである。これはあくまでも部首画数順配列の漢字索引作成という目的に即して考えた場合のことである。四角号碼配列索引であるならば、[1]



字あれば何%をカバーできるかというたぐいの発想では、本文校訂の質を論ずることはできない。そして、古典テキスト研究者にもとめられるのは、より良質の本文校訂にもとづく電子化テキストの作成である。この研究の原点を常に認識しておかねばならない。

## 【8】文字とコンピュータ

最近のコンピュータと文字をめぐる議論は、「ISO 10646」およびその日本規格である「JIS X 0221」に話題が集中しているように見受けられる（本稿執筆の時点では、まだ規格が決まった段階で、それを実装したコンピュータは登場していない。）

ISO 10646について考える前に、そもそもコンピュータと漢字をめぐる議論では、次の各レベルを区別して論じる必要があることを見ておきたい。

### (1) .文字集合

例えば、「JIS漢字・教育漢字・常用漢字」などのように人為的に定めた文字集合（キャラクターセット）である。

ここでは、どのような文字を、どのような字体で、どれほどの数、集めるのが妥当かどうか、が議論される。異体字については、教育漢字・常用漢字などは、意図的に、その文字集合に限定する限り、排除する方針である。JIS漢字の場合は、（その方針が無定見であるとはいえ）ある程度の異体字を取り込んでいる。

### (2) .コード系

上記の(1)で定められた文字集合を、具体的にどのような形でコンピュータで使うかである。今日一般に使われている「シフトJIS」などがこれにあたる。

### (3) .文字属性

漢字というものが「形音義」でなりたつものである以上、(1)の設定の段階で、既にある判定が下されている。そうでなければ、文字の選定は出来ない。だが、一旦決まった文字集合に対して、ユーザの側がどのような認識を持って対応するかは、また別の問題である。

JIS漢字についても、すぐに全体を問題にするから議論が混乱するのであって、実際的な利用法として、中にふくまれる教育漢字だけを使う、常用漢字だけを使う、という選択肢は可能である。

常用漢字中心の使い方をした場合、例えば「余・餘」

は新字体・旧字体の関係として認定されるが、正字体中心の使い方でのぞむならば、「余・餘」は別の字として使い分けることになる（「余」は「自分」の意味、「餘」は「あまり」の意味）。また、「芸」と「藝」の新字体として使うか、「ウン」と読んで植物の名称として使うかは、利用者の解釈に依存する。

あるいは、コード表の制定は、それがISOであれJISであれ、個々の利用者の漢字に対する属性認識まで拘束するものではない、と考えるべきであろう。言い換えれば、自然言語の表記として、人間は自由に文字を使うのである。

### (4) .文字検索

文字集合（コード表）にある字であっても、利用者が実際に探せなければ、存在しないに等しい。JISにある漢字であるにもかかわらず、ワープロの仮名漢字変換で出せなかったためか、その字の箇所だけ手書きになっている文書を、目にするには希ではない。

文字集合が現実にも有効に活用されるためには、そこにふくまれるすべての漢字を、もれなく速やかに検索可能なシステムを必要とする。場合によっては、それに無い字については、無いことの確認が求められる。

特に、古典テキスト研究の場合、JISに無い字が頻出するので、JISに無いことを確認する作業が、重要な意味を持つてくる。

### (5) .フォント

コンピュータのディスプレイ上で、または、プリントアウトで、実際に目にする字のかたちである。上述の(1)の文字集合、(3)文字属性、(4)文字検索、これらは、「字体」レベルで、ある程度抽象的な概念として文字をとらえることになる。だが、現実には、文字は個々の具体的な文字デザインとして存在する。

具体的な文字デザインと、抽象的な字体概念とは、すくなくとも概念的には区別して議論しなければならない。

以上、各レベルの諸問題は、コンピュータで人為的な文字集合を使用する場合、必然的に発生することである。これは、JIS漢字だけに固有の問題ではない。将来、ISO 10646に的確に対応するためにも、上記の各概念についての認識は不可欠である。

**[9] ISO10646 (JIS X 0221)**

ISO10646の実現によって、古典テキスト研究は、どのように変わるであろうか。はたして、多大の恩恵をこうむるであろうか。

確かに、ISO10646が使えるようになれば、使用可能な字は増える。非JIS漢字を外字作成でしのぐような例は、かなり減るに違いない。しかし、だからといって、100%大丈夫かといえばそんなことはないであろう。古典テキストで、これまで「非JIS漢字」が問題になったのと同じように、これからは「非ISO10646漢字」という問題が発生することは必至である。

いや、実は、問題の本質は、字が足りるとか足りないとかではない。いわば、自然言語としての文字表記に対して、人為的な固定的文字集合（JISやISO）で対応する場合の、文字論・表記論にかかわる原理的問題が未解決なままなのである。論点を絞っていえば、

(1) .数の不確定

人為的な固定的文字集合では、絶対に数が不足する。なぜなら、漢字は、部品（部首）の組み合わせによって、新たに作ることが可能な文字である。

(2) .属性のゆれ。

漢字の属性（形音義）は、一義的に決定不可能である。異なる文字集合間で、漢字属性の整合性をどのように考えるか。

このようなことから、文字論的考察の視点が定められていないのが現状である。

これは、上記の(1)文字集合および(3)文字属性にかかわる問題であるが、その他にも、(4)文字検索が、ISO10646でどうなるのかも、不安材料である。

JIS漢字でも、実際に研究者が、古典テキストの研究に使うためには、オリジナルのコード表「JIS X 0208」そのものだけでは不十分で、市販のJIS漢字コード辞典の類や、JISコード付の漢字辞典を、座右におかなければならない。

JIS漢字は、一応、日本の漢字を対象としているので、漢字の属性認定については、そう大きな問題は生じない。しかし、ISO10646になれば、中国・台湾・韓国といった、漢字文化圏とはいっても、日本とは異なる言語文化における漢字までをも対象にしなければならなくなる。日本の既存の漢字辞典の中に、どうやって外国の漢字を

とりこめばよいのであろうか。

**【10】 おわりに—ある提言として—**

JIS漢字（およびISO10646）については、近年、特に東洋の古典テキストを扱う学問領域においては、重要な議論のテーマとなっている。

ISO10646は、研究者に福音をもたらすであろうか、それとも、より混沌とした混乱状態を招来するに終わるであろうか。期待もある反面、なかなかその実像がつかめないでいる。

今、ここで我々がなすべきことは、過度に期待することでもなければ、問題点の指摘に終始することでもない。人為的文字集合（キャラクターセット）とはいったい何であるのか、異なる文字集合間における漢字属性の整合性とはいったい何であるのか、という問題について、冷静に文字論・表記論的に考察をすすめることである。

人文学の研究者の世界である。研究者の数だけ考え方が異なる。文字についても、必要とする文字はそれぞれに異なっている。研究者としての文字の共有化は困難かもしれない。しかし、文字についての、基礎概念の共有化であれば、可能かもしれない。我々に求められているのは、そのための資料収集であり、考えることである。

今まさに、ISO10646 (JIS X 0221) が登場し、同時にJIS漢字 (X 0208) の改訂も進行している。今後、コンピュータと文字は、どうなっていくか予断を許さない。だが、どのような状況を迎えようとも……すくなくとも「この字が無いのは問題だ」と言うことだけにとどまるのは、もう止めにしようではないか。

---

**2. コンピュータと漢字を考える視点**

以上が、今から13年前（1995）年の『人文科学とデータベース』（第1号）に書いた文章の、脚注を除いたほぼ全文である。用語について確認すると、文中で、「ISO10646」と表現しているものは、現在いうところの「Unicode」である。

あらためて確認しておきたいのは、何故、今になって、古い原稿を取り出してきたのか（そして、それをここに再掲載したのか）ということである。

第一には、「コンピュータであつかえない漢字」といっ

ても、それは、一義的に決まるものではない。あくまでも、本文校訂とともにある。そして、その本文校訂は、そのテキストをどのようにあつかいたいのか、研究者の判断によってきまる。原本で使用する文字を、異体字など区別して可能な限り忠実に再現したい場合もあるし、また、逆に、異体字などは統合して検索の便宜を優先する場合もある。どのような方針でのぞむかによって、校訂の結果は異なり、必要とする文字も異なる。したがって、「無い字」も異なるものとなる。前稿および本稿でしめたのは、あくまでも、筆者の判断によって必要とした文字である。このことを踏まえなくて、一律に、文字の有無を論ずることには意味がない。

第二には、コンピュータと文字、というのは、人文情報学（デジタル・ヒューマニティーズ）の歴史そのものであると言ってもよいからである。すくなくとも、多くの人文学系研究者が、コンピュータ（パソコン）を使うようになったのは、PC-9801 などにおいて、第二水準漢字まで実装可能になったのが、大きな契機となっている。日本語、あるいは、漢字表記文献の、テキスト処理のはじまりである。

それまでは、コンピュータで漢字をあつかうことは不可能ではなかった。しかし、それは、大型計算機で利用するしかなかった。それが、個人レベルで使用する、パーソナルコンピュータで可能になったことの意義は大きい。そして、現在は、この流れの中にある。

また、初期のパソコンの処理能力では、画像データの処理などは、不可能であった。デジタルカメラなどもまだ登場していない。その後、今日、画像処理やGISなど、多様な処理が可能になっていることは、周知のごとくである。

しかし、画像データなどであっても、そのアーカイブのメタデータの記述としては、文字から離れることはできない。

全体として、このような経緯を俯瞰するとき、コンピュータで文字をあつかうことについて、どのように考えられてきたかを、「歴史」としてふりかえてみることは、決して無意味であるとは思えない。いや、過去の「歴史」をふまえることによってしか、未来への展望はないであろう。

第三に、たしかに、今となっては、すでに古びてしま

った内容がいくぶんふくまれている。だが、筆者自身が、かつての自分の文章を読み直して、まだ、この問題は解決されていない、と感じる箇所も無いではない。特に、現在、コンピュータと文字は、新たな局面をむかえている。その論点としては、

・ Windows Vista によって実装されている「JIS X 0213:2004」

・ Unicode

・ (新) 常用漢字表 (仮称)

などがある。

現在、審議中の「(新) 常用漢字表」のゆくえによって、現在の文字コード (0213:04) や、Unicode にまで、その影響がおよびかねない。

### 3. JIS X 0213:04 と『和漢朗詠集』

本稿の執筆の時点では、『和漢朗詠集』全体 (約1万字) の再検討は、はたしていない (今後、これが、筆者にとっての当面の研究課題の一つである。) ここでは、「コンピュータであつかえない」とした、63 (64) の漢字について、簡略にはあるが、再確認した結果を示しておきたい。0213:04 にある漢字については (3) (4) で、水準を表示した。「U+」とあるのは、Unicode。

01 芼 (4)

02 蕙 (3)

03 萸 (3)

04 遄 (4)

05 𦉳 (4)

06 庾 (3)

07 縵 U+7E3F

08 媿 (4)

09 擎 (3)

10 𪗇 (3)

11 翎 (3)

12 熒 (3)

13 婕 (4)

14 杼 (3)

15 𪗇 (4) ※「并」「𪗇」を包摂。

16 颯 U+98BD

17 漚 U+5675

18 飡 (4)  
19 鄺 (3)  
20 嶠 (4)  
21 嚶 U+5593  
22 跽 (3)  
23 醅 (4)  
24 醕 U+9191  
25 屨 (4)  
26 斨 (3)  
27 佃 (3)  
28 滹 (4)  
29 臺 (3)  
30 漪 (3)  
31 扃 (3)  
32 藿 (3)  
33 濩 (4)  
34 颯 (4)  
35 忿 (3)  
36 墀 U+58C0  
37 緌 (4)  
38 闕 (3)  
39 繳 (4)  
40 摭 (3)  
41 詹 (3)  
42 縻 (3)  
43 紈 (3)  
44 舩 (4)  
45 舩 (4)  
46 闡 (4)  
47 牖 (4)  
48 瀼 (4)  
49 裊 (4)  
50 敲 (3)  
51 仞 (3)  
52 閫 (3)  
53 辰 (4)  
54 庫 U+5EB3  
55 輦 U+8F5D  
56 甯 (3)  
57 涇 (3)

58 顛 (4)  
59 頼 (4)  
60 褰 (3)  
61 峴 (3)  
62 閫 (4)  
63 𠄎 「𠄎」 + 「忿」  
64 幡 U+76A4

結果は、以上のごとくであり、『和漢朗詠集』については、JIS X 0213:04 をもちいれば、かなりの文字が記載可能である。また、いくぶんは、この範囲外の文字もある。しかし、それも、Unicode Ext.A の範囲までもちいれば、いくぶんはおぎなえる。

だが、それでも、書けない文字が残る。それは、63番とした、「𠄎+忿」の字である。これは、「蕙」(4)の異体字である。ここも「蕙」を使用すれば、すべて書けることになる。しかし、本文での使用を見ると、801番の漢詩句で「口嶺」として、固有名詞(地名)で使われている。固有名詞で使用する文字は、軽々に改めるべきではないと判断するならば、この字だけが残ることになる。この字の大漢和番号は31165。

さらにメタレベルでは、次のことが指摘できる。筆者が前稿を執筆したのは、0208規格によっている。今回、同じ内容を0213:04規格で書くとすれば、次の点が変わってくる。0213では、「部首」が単独の文字として入れられている。したがって、前稿で「サンズイ」「艸冠」などと表記していた箇所が、現在では、「彡」「艸」などが、使える。無い字はあるとしても、その字がどのような字であるのかの表現がたやすくなっている。

しかし、本文校訂全体として見るならば、文字が増えることは、異体字処理の問題を増やすことでもある。例えば、0208では、「崑」一種類しか文字がなく、やむを得ず統合することになって、その制限があるがゆえに、異体字処理ができた。だが、0213に拡大することによって、「峴」(4)が使用でき、「峰」「峯」に類する問題を生ずることになる。

この観点からは、『和漢朗詠集』という古典テキストが、現在の文字コード(0213:04)で、どのようにエンコード可能であるか、ゼロから、本文校訂を再検討しなければならぬ。

筆者自身が、ここでおこなったごとく、0208 で無かった字が、0213:04 で使えるようになったかどうかだけの調査では不十分である。といよりも、この視点からだけの文字についての調査は、学問的に批判に耐えるものではない。文字コード系が変わるということは、異体字処理をふくめて、すべての文字表記にかんする環境が変わることである。今後、筆者自身の課題として、このことを確認しておきたい。

前稿で指摘した問題点、「【7】字が増えれば解決するか?」は、依然として残された問題なのである。また、最後に記した、「どのような状況を迎えようとも……すくなくとも「この字が無いのは問題だ」と言うことだけにとどまるのは、もう止めにしようではないか」は、今でも同じ思いでいる。特に、現在の文字論の課題である、「新常用漢字」について考えるとき、この視点にたちかえるべきと考える。

#### 4.おわりに

本稿は、蒼惶としてしたためたものであり、前稿の再掲載ということで、大部分の紙数をついやしてしまっている。しかしながら、かつて、0208 の環境で書いた自らの論文を、新しく、0213:04 の環境で、書き直してみることに、やはり、筆者なりに意義があったと感じている。それは、文字について論ずるとき、その論ずる論文を書く環境によって、論の方向、すくなくとも、執筆の有り様が、大きく影響を受けるということを実感できたからである。

このことは、いうまでもなく、古典テキストのみならず、あらゆる文字データ資料について、考えなければならない問題である。写本・版本をデータ入力する場合はもちろん、近代以降に活字として出版されたテキストを、入力する場合にも、同様の問題を考えなければならない。

これは将来において、現在の文献資料（ワープロ作成の文書）を、再デジタル化（文字コードで表現）するとき、オリジナルの資料が、どのような文字環境で書かれたものか、重要な意味を持つてくるはずだからである。

今の時代の「資料」を、「史料」として、我々は、次の世代にアーカイブズとして残していかなければならない。このとき、原資料の執筆環境（文字環境・使用のコンピュータや実装フォント）についても、また、残すべきデ

ータとして、考慮しなければならない。

また、筆者自身として、本稿の執筆を契機として、かつて若かりし時の仕事である『和漢朗詠集』（0208 による）および『神田本白氏文集』（これは、完全に手書き原稿による）などの、古典テキストについて、どのような文字環境でエンコードすれば、どのような本文校訂上の問題が生じるのか、再考察・再調査する必要を、強く感じる次第である。

この新たな課題の第一歩として、本稿をしたためた次第である。

#### 5.付記・謝辞

本稿のテーマ、文字環境の違いによる本文校訂の問題、および、再調査、とういことは、以前より筆者の念頭あったことである。今、あらたに「新常用漢字表」の議論が起こっている。文字の規格を決めるとはどのような行為であるのか、そこでしめされる字の「かたち」とはいつたいなんであるのか、この根本的なところから議論を深めていく必要がある。

拙稿につき、発表の機会を与えてくださった、同志社大学文化情報学部の関係者のかたがた、特に、津村宏臣先生には、深く謝意を表するものである。

#### 参考文献

- 當山日出夫 (1988). 『和漢朗詠集漢字索引』. 勉誠社  
當山日出夫 (1995). 「古典籍と JIS 漢字一テキストの本文校訂との関係において」. 『公開シンポジウム 人文科学とデータベース—「データ」を読む・観る・解く—』  
『ユニコード漢字情報辞典』. ユニコード漢字情報辞典編集委員会 (編). 三省堂. 2000

# 弾性波による構造物調査における数学的貢献について

## On the mathematical contribution in the structure investigation by the elastic wave

大田 靖

Yasushi OTA

大阪大学大学院理学研究科数学教室 豊中市待兼山 1-1

Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka

あらまし: 弾性波を用いて構造物や空洞などの地下資源の探査を行う際に様々な角度からの数学的な貢献が考えられる。特に、弾性波は速さの異なる波が発生し、地球が等方性の弾性体と仮定するといわゆる P 波と S 波とよばれる 2 つの波が発生する。本講演では、散乱理論を用いて構造物の凸包を再構成する数学的手法を紹介するとともに、弾性波特有のモードの変換とよばれる入射波と反射波の速さが異なる場合の新たな数学的な結果を地下資源探査に応用する方法を提案する。

**Abstract:** When we analyze the reflection phenomenon for the elastic wave, the one of the most complicated and interesting problems is to study the mode conversion case. For the elastic wave, there are waves of different modes and a remarkable phenomenon called "mode-conversion" which causes serious difficulties. In this paper, by considering the non back-scattering case, we examine the singularities of the scattering kernel for the elastic wave equation with transverse incident waves and derive a new result about the singularities of the scattering kernel.

キーワード: 散乱理論, 弾性方程式, 特異性, モード変換, P-波, S-波.

**Key words:** scattering theory, elastic wave, singularities, mode-conversion, P-wave, S-wave.

### 1 Introduction

Let  $\Omega$  be an exterior domain in  $\mathbf{R}^3$  with smooth and compact boundary. We consider the isotropic elastic wave equation with the Dirichlet boundary condition

$$\begin{cases} (\partial_t^2 - L)u(t, x) = 0 & \text{in } \mathbf{R} \times \Omega, \\ u(t, x) = 0 & \text{on } \mathbf{R} \times \partial\Omega, \\ u(0, x) = f_1(x) \quad \partial_t u(0, x) = f_2(x) & \text{on } \Omega, \end{cases} \quad (1.1)$$

where  $u(t, x) = {}^t(u_1, u_2, u_3)$  and  $f_i(x) = {}^t(f_{i1}, f_{i2}, f_{i3})(i = 1, 2)$ . Recall that  $L$  has the following form:

$$L = \sum_{i,j=1}^3 a_{ij} \partial_{x_i} \partial_{x_j},$$

where  $a_{ij}$  are  $3 \times 3$  matrices of which  $(p, q)$ -entry is expressed by  $a_{ipjq}$ . We say that the elastic medium  $\Omega$  is isotropic, if  $a_{ipjq}$  is given by

$$a_{ipjq} = \lambda \delta_{ip} \delta_{jq} + \mu (\delta_{ij} \delta_{pq} + \delta_{iq} \delta_{jp}),$$

where  $\lambda, \mu$  are Lamé's constants satisfying the following inequalities:

$$\lambda + \frac{2}{3}\mu > 0, \quad \mu > 0.$$

Under the assumption that the elastic medium  $\Omega$  is isotropic, Yamamoto [13] and Shibata-Soga [8] have formulated a scattering theory which is analogous to the theory of Lax-Phillips [5]. Let  $k_-(s, \omega)$  and  $k_+(s, \omega) \in L^2(\mathbf{R} \times S^2)$  denote the incoming and outgoing translation representations of an initial data  $f = {}^t(f_1, f_2)$  respectively (see [5]). Recall that the scattering operator  $S$  is the mapping

$$S : k_-(s, \omega) \longmapsto k_+(s, \omega).$$

The scattering operator  $S$  admits a representation:

$$(Sk_-)(s, \theta) = \iint_{\mathbf{R} \times S^2} S(s - \tilde{s}, \theta, \omega) k_-(\tilde{s}, \omega) d\tilde{s} d\omega$$

with a distribution kernel  $S(s, \theta, \omega)$  called the scattering kernel. Majda [6] has obtained a representation formula of the scattering kernel  $S(s, \theta, \omega)$  for the scalar-valued case. This representation formula is very effective to investigate inverse scattering problems (cf. Majda [6], Soga [9], Petkov [7]). For the elastic case, Soga [10] and Kawashita [3] have derived a representation formula of the scattering kernel.

The characteristic matrix  $L(\xi)$  of the operator  $L(\partial_x)$  has the eigenvalues  $C_1^2|\xi|^2$  and  $C_2^2|\xi|^2$ , where

$$C_1 = (\lambda + 2\mu)^{\frac{1}{2}}, \quad C_2 = \mu^{\frac{1}{2}}.$$

Let  $P_i(\xi)$  be the eigenprojector associated to the eigenvalues  $C_i^2|\xi|^2$  ( $i = 1, 2$ ), where

$$P_1(\xi) = \xi \otimes \xi, \quad P_2(\xi) = I - P_1(\xi).$$

Then  $P_1(\xi)\mathbf{R}^3$  is the space spanned by  $\xi$ , and  $P_2(\xi)\mathbf{R}^3$  is the orthogonal complement of  $P_1(\xi)\mathbf{R}^3$ . Associated with the eigenvalues  $C_i^2|\xi|^2$  ( $i = 1, 2$ ), there are

waves of two different types (modes). The one propagates with the speed  $C_1$ , and the other with  $C_2$ . Furthermore their amplitudes are longitudinal and transverse to the propagation direction respectively, and therefore these waves are called longitudinal and transverse waves respectively. For elastic waves there is a remarkable phenomenon called "mode-conversion", that is, when longitudinal or transverse incident wave hits the boundary  $\partial\Omega$ , both longitudinal reflected wave and transverse reflected wave appear. This phenomenon causes serious difficulties in the analysis of singularities of the scattering kernel for the elastic wave equation.

In view of results concerning mode-conversion (cf. Chapter 5 of Achenbach [1] and Theorem 2.1 of Soga [12]), we can expect that corresponding phenomenon occurs for the scattering kernel  $S(s, \theta, \omega)$ , because in the asymptotic sense the kernel  $P_i(\theta)S(C_i^{-\frac{1}{2}}\theta \cdot x - t, \theta, \omega)P_l(\omega)$  expresses the  $C_i$ -mode component of the scattered wave in the direction  $\theta$  for the  $C_l$ -mode incident plane wave in the direction  $\omega$ . In the back-scattering case (i.e.  $\theta = -\omega$ ), by Soga [10, 11] we can obtain results of the same type as in Majda [6]. Moreover, in Kawashita-Soga [4], they have derived same results in the mode-conversion case. In Ota [14], by considering the non back scattering case (i.e.  $\theta \neq \omega$ ), we have the following results :

**Theorem 1.1.** *Let  $\omega, \theta \in S^2$ . Assume that  $|\theta + \omega|$  is different from zero and sufficiently small, and  $n_{i1}(\theta, \omega)$  is a regular direction for  $\partial\Omega$ . Then we have*

$$(i) \quad \text{supp}[P_i(\theta)S(\cdot, \theta, \omega)P_1(\omega)] \subset (-\infty, -r_{i1}(\theta, \omega)) \quad (i = 1, 2)$$

$$(ii) \quad P_i(\theta)S(s, \theta, \omega)P_1(\omega) \text{ is singular (not } C^\infty)$$

$$\text{at } s = -r_{i1}(\theta, \omega) \quad (i = 1, 2).$$

In Ota [14], we have derived an asymptotic expansion of the scattering kernel in the non back scattering case (cf. Soga [11]). In this paper, by means of this expansion, we investigate the singularities of  $P_i(\theta)S(s, \theta, \omega)P_2(\omega)$  and shall show that the leading term of this asymptotic expansion of  $P_i(\theta)S(s, \theta, \omega)P_2(\omega)$  don't vanish.

## 2 Main results

Before giving the main results in the present paper, according to Ota [14], we give several definitions for stating those.

We set  $r_{i1}(\theta, \omega) := \min_{x \in \partial\Omega} x \cdot n_{i1}(\theta, \omega)$ , where  $n_{i1}(\theta, \omega) := -(C_i^{-1}\theta - C_i^{-1}\omega)$ . Next, we denote the first hitting points at  $\partial\Omega$  by  $N_{i1}(\theta, \omega) := \{x; n_{i1}(\theta, \omega) \cdot x = r_{i1}(\theta, \omega)\} \cap \partial\Omega$ . Furthermore, we arbitrarily pick a point  $a_t \in N_{i1}(\theta, \omega)$  and choose a system of orthogonal local coordinates  $y = (y', y_3)$ , with  $y' = (y_1, y_2)$ , in  $\mathbf{R}^3$  such that  $y_3 = (r_{i1}(\theta, \omega) - n_{i1}(\theta, \omega) \cdot x) |n_{i1}(\theta, \omega)|^{-1}$ , and that  $y = 0$  expresses the reference point  $a_t$ . Then  $\Omega$  is represented by  $y_3 > \psi(y')$  in a neighborhood  $U$  of  $a_t$ , where  $\psi(y')$  is a  $C^\infty$  function defined in a neighborhood of  $y' = 0$ .

If the Hessian matrix  $H_{\psi(y')}$  of  $\psi(y')$  is negative definite at  $y' = 0$  for every such picked point, we say that  $n_{ij}(\theta, \omega)$  is a regular direction for  $\partial\Omega$ , which does not depend on the choice of the coordinates  $y = (y', y_3)$ . If  $n_{i1}(\theta, \omega)$  is a regular direction, the set  $N_{i1}(\theta, \omega)$  consists of a finite number of isolated points.

For a distribution  $f(s)$  on  $\mathbf{R}$  we use the notation

$$f(s) \sim f_0(s) + f_1(s) + \cdots \quad \text{at } s_0,$$

which means that there exists an integer  $m$  and a  $C^\infty$  function  $\varphi(s)$  with  $\varphi(s_0) \neq 0$  such that for every integer  $N \geq 0$

$$\varphi(s)\{f(s) - (f_0(s) + \cdots + f_N(s))\} \in H^{m+N}(\mathbf{R}).$$

Then we have

**Theorem 2.1.** *Let  $\omega, \theta \in S^2$ . Assume that  $|\theta + \omega|$  is different from zero and sufficiently small, and  $n_{i1}(\theta, \omega)$  is a regular direction for  $\partial\Omega$ . Then we have*

$P_i(\theta)S(s, \theta, \omega)P_1(\omega)$  is singular (not  $C^\infty$ ) at

$$s = -r_{i1}(\theta, \omega) \quad (i = 1, 2).$$

## 3 Asymptotic expansion of the scattering kernel

In order to examine the singularities of  $P_i(\theta)S(s, \theta, \omega)P_1(\omega)$ , it is useful to know the asymptotic behavior of the scattering kernel. In this section we shall derive an asymptotic expansion of the scattering kernel which plays an essential role in the proof of Theorem 2.1.

In order to derive an expansion of  $P_i(\theta)S(s, \theta, \omega)P_1(\omega)$ , we review some results in [11]. Let  $v_l(t, x; \omega)$  be the solution of the following boundary value problem:

$$\begin{cases} (\partial_t^2 - L)v_l(t, x; \omega) = 0 & \text{in } \mathbf{R} \times \Omega \\ v_l(t, x; \omega) = (2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_l^{-\frac{3}{2}} \delta(t - C_l^{-1}\omega \cdot x) P_l(\omega) & \text{on } \mathbf{R} \times \partial\Omega \\ v_l(t, x; \omega) = 0 & \text{for } t < C_l^{-1}r(\omega) \end{cases} \quad (3.1)$$

where  $r(\omega) = \min_{x \in \partial\Omega} x \cdot \omega$ . Namely  $v_l(t, x; \omega)$  is the scattered wave for the incident wave

$$(2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_l^{-\frac{3}{2}} \delta(t - C_l^{-1}\omega \cdot x) P_l(\omega). \quad (3.2)$$

The scattering kernel is represented by means of  $v_l(t, x; \omega)$ :

$$\begin{aligned} S(s, \theta, \omega) &= \sum_{i,j=1}^2 C_i^{-\frac{3}{2}} \int_{\partial\Omega} \left\{ P_i(\theta)(\partial_t N v_j)(C_i^{-1}\theta \cdot x - s, x; \omega) \right. \\ &\quad \left. - C_i^{-1} P_i(\theta)^t (N(\theta \cdot x)) (\partial_t^2 v_j)(C_i^{-1}\theta \cdot x - s, x; \omega) \right\} dS_x \end{aligned} \quad (3.3)$$

where  $N = \sum_{i,j=1}^3 a_{ij} \nu_i \partial_{x_j}$  and  $\nu = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)$  is the unit outer normal to  $\Omega$ .

By the Hamilton-Jacobi method we have a real-valued  $C^\infty$  function  $\varphi_l^k(x)$  ( $k, l = 1, 2$ ) satisfying

$$\begin{cases} |\nabla \varphi_l^k(x)| = \frac{1}{C_k} & \text{in } \Omega \cap U_\epsilon, \\ \varphi_l^k(x) = \frac{1}{C_l} \omega \cdot x & \text{on } \partial\Omega \cap U_\epsilon, \\ \frac{\partial \varphi_l^k}{\partial \nu}(x) < 0 & \text{on } \partial\Omega \cap U_\epsilon, \end{cases} \quad (3.4)$$

where  $U_\epsilon = \{x; |n_{il}(\theta, \omega) \cdot x - r_{il}(\theta, \omega)| < \epsilon\}$  with a small  $\epsilon > 0$ .

We set

$$\rho_j(t) = \begin{cases} \frac{t^{j-1}}{(j-1)!} & \text{for } t \geq 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad \text{when } j = 1, 2, \dots,$$

$$\rho_j(t) = \rho'_{j+1}(t) \quad \text{when } j = 0, -1, \dots$$

Let us note that

$$\rho_0(t) = \delta(t),$$

$$\rho'_{j+1}(t) = \rho_j(t) \quad \text{for any integer } j.$$

**Lemma 3.1.** *Assume that there exists a sufficiently small  $\delta > 0$  such that  $|\nabla \varphi_l^k|_{\tan} < \delta$ . Then the solution  $v_l$  of (3.1) admits the following asymptotic expansion for  $t \in \mathbf{R}$  sufficiently close to  $r_{ij}(\theta, \omega)$*

$$v_l(t, x; \omega) \sim \sum_{k=1}^2 \sum_{j \geq 0} \rho_j(t - \varphi_l^k(x)) u_{lj}^k(x), \quad (3.5)$$

where  $u_{lj}^k(x)$  are some  $C^\infty$  functions defined in  $\bar{\Omega} \cap U_\epsilon$  and  $\nabla \varphi_l^k|_{\tan}$  denotes the tangential part to  $\partial\Omega$  of  $\nabla \varphi_l^k$ .

*Proof.* Combining Theorem 2.1 in Soga [11] and Theorem 1.1 in [12], we can derive the above asymptotic expansion in this case.  $\square$

Let  $v_l(t, x; \omega)$  be the solution of (3.1). Then  $u = v_l P_l(\omega)$  satisfies the equation  $(\partial_t^2 - L)u = 0$  in  $\mathbf{R} \times \Omega$  and verifying the same boundary condition as  $v_l$ . Hence, by the uniqueness of the solutions, we obtain that  $v_l(t, x; \omega) = v_l(t, x; \omega) P_l(\omega)$ . Moreover combining the representation of the scattering kernel (3.3) and the asymptotic expansion (3.5), we have

$$\begin{aligned} P_i(\theta) S(s, \theta, \omega) P_l(\omega) &\sim \sum_{k=1}^2 C_i^{-\frac{3}{2}} \left[ \sum_{j \geq -1} \int_{\partial\Omega} \rho_{j-1}(-s - n_{il}(\theta, \omega) \cdot x) \right. \\ &\quad \times P_i(\theta) \sum_{p,q=1}^3 a_{pq} \nu_p(x) \{ (-\partial_{x_q} \varphi_l^k(x)) u_{lj+1}^k(x) \\ &\quad \left. + \partial_{x_q} u_{lj}^k(x) \} P_l(\omega) dS_x \right. \\ &\quad \left. - C_i^{-1} \sum_{j \geq 0} \int_{\partial\Omega} \rho_{j-2}(-s - n_{il}(\theta, \omega) \cdot x) P_i(\theta) \right. \\ &\quad \left. \sum_{p,q=1}^3 {}^t a_{pq} \nu_p(x) \theta_q u_{lj}^k(x) P_l(\omega) dS_x \right]. \end{aligned} \quad (3.6)$$

For a regular direction  $n_{il}(\theta, \omega)$  we have  $N_{il}(\theta, \omega) = \{a_1, \dots, a_M\}$ . By using a partition of unity, it is enough to examine the terms whose integrands are supported on a small neighborhood of the reference point  $a_t \in N_{il}(\theta, \omega)$ . Then we can rewrite the above integrals (3.6) as  $\sum_{t=1}^M I_t(\theta, \omega)$ . Since the analysis of above integrals near each point  $a_t$  is same, it is sufficient to study the leading term in  $I_t(\theta, \omega)$  for only one  $a_t$ , where we may assume  $a_t = 0$ .

We take an orthonormal frame  $\{p_1, p_2, p_3\}$  where  $p_3 = -n_{il}(\theta, \omega) |n_{il}(\theta, \omega)|^{-1}$ , and choose the local coordinate system  $y = (y_1, y_2, y_3)$  such that  $x = y_1 p_1 + y_2 p_2 + y_3 p_3$ . Let us denote by  $T$  the  $3 \times 3$  orthogonal matrix  $T = (t_{pq})$  such that  $T(e_j) = p_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ),

where  $\{e_1, e_2, e_3\}$  is the canonical basis in  $\mathbf{R}^3$ . Then  $\partial\Omega$  is represented by  $y_3 = \psi(y')$  near 0. Since the equation is isotropic, we have the following result.

**Lemma 3.2.** *Assume that the elastic medium  $\Omega$  is isotropic, then we have*

$$TL({}^tT\xi){}^tT = L(\xi) \text{ and } T \sum_{p,q=1}^3 a_{pq} t_{rp} t_{sq} {}^tT = a_{rs}.$$

*Proof.* By the isotropicity of the equation,

$$TL({}^tT\xi){}^tT = T\{(\lambda + \mu){}^tT\xi \otimes {}^tT\xi + \mu|T\xi|^2 I\}{}^tT = (\lambda + \mu)\xi \otimes \xi + \mu|\xi|^2 I = \sum_{r,s=1}^3 a_{rs} \xi_r \xi_s.$$

On the other hand, a direct computation shows

$$\begin{aligned} \sum_{p,q,m,n=1}^3 t_{im} a_{pmqn} t_{rp} t_{sq} t_{jn} \\ = \lambda \delta_{ri} \delta_{sj} + \mu (\delta_{rs} \delta_{ij} + \delta_{rj} \delta_{si}) = a_{risj}. \end{aligned}$$

Thus the proof is complete.  $\square$

By Lemma 3.2 and an easy computation, we have the following identities:

$$L(\partial_y)u|_{y={}^tTx} = {}^tTL(\partial_x)Tu({}^tTx) \quad \text{for any } x \in \Omega, \quad (3.7)$$

$$(N_y u)({}^tTx) = {}^tTN_x Tu({}^tTx) \quad \text{for any } x \in \partial\Omega, \quad (3.8)$$

where  $N_x = \sum_{pq=1}^3 a_{pq} \nu_p \partial_{x_q}$ ,  $N_y = \sum_{pq=1}^3 a_{pq} \nu_p^* \partial_{y_q}$

and  $\nu^*(y) = {}^tT\nu(Ty)$ . Then from (3.7), it follows that  $\tilde{v}_l(t, y; \tilde{\omega}) := {}^tTv_l(t, Ty; \omega)T$  satisfies the same boundary value problem (3.1) in  $\tilde{\Omega} = {}^tT\Omega$  where  $\omega$  is replaced by  $\tilde{\omega} = {}^tT\omega$ . Moreover  $\tilde{v}_l(t, y; \tilde{\omega})$  admits the following asymptotic expansion:

$$\tilde{v}_l(t, y; \tilde{\omega}) \sim \sum_{k=1}^2 \sum_{j \geq 0} \rho_j (t - \tilde{\varphi}_l^k(y)) \tilde{u}_{lj}^k(y). \quad (3.9)$$

Here  $\tilde{u}_{lj}^k(y) := {}^tT u_{lj}^k(Ty)T$  and  $\tilde{\varphi}_l^k(y) := \varphi_l^k(Ty)$  which satisfies

$$\begin{cases} |\nabla \tilde{\varphi}_l^k(y)| &= \frac{1}{C_l^k} & \text{in } \tilde{\Omega} \cap \tilde{U}_\epsilon, \\ \tilde{\varphi}_l^k(y)|_{y_3=\psi(y')} &= \frac{1}{C_l} \tilde{\omega} \cdot y & \text{on } \partial\tilde{\Omega} \cap \tilde{U}_\epsilon, \\ \frac{\partial \tilde{\varphi}_l^k}{\partial \nu^*}(y)|_{y_3=\psi(y')} &< 0 & \text{on } \partial\tilde{\Omega} \cap \tilde{U}_\epsilon, \end{cases} \quad (3.10)$$

where  $\tilde{U}_\epsilon = \{y; |n_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \cdot y - r_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})| < \epsilon\}$  with a small  $\epsilon > 0$ .

Since  $P_l(\omega) = TP_l(\tilde{\omega}){}^tT$ ,  $P_i(\theta) = TP_i(\tilde{\theta}){}^tT$ , by Lemma 3.2,  $I_t(\theta, \omega)$  takes the following form:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^2 C_i^{-\frac{3}{2}} P_i(\theta) \int_{\mathbf{R}^2} \rho_{-2}(-s + |n_{il}(\theta, \omega)|\psi(y') - r_{il}(\theta, \omega)) \\ \times \left\{ \sum_{p,q=1}^3 a_{pq} \nu_p(Ty) (-\partial_{x_q} \varphi_l^k(Ty)) \right. \\ \left. - C_i^{-1} \sum_{p,q=1}^3 {}^t a_{pq} \nu_p(Ty) \theta_q \right\} u_{i0}^k(Ty) \beta_{-2}(y') P_l(\omega) dy' \\ + \sum_{j \geq -1} \int \rho_j(-s + |n_{il}(\theta, \omega)|\psi(y') - r_{il}(\theta, \omega)) \beta_j(y') dy' \\ = \sum_{k=1}^2 C_i^{-\frac{3}{2}} \int_{\mathbf{R}^2} \rho_{-2}(-s + |n_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|\psi(y') - r_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ \times T \left\{ P_i(\tilde{\theta}) \sum_{r,s=1}^3 \left\{ {}^tT \sum_{p,q=1}^3 a_{pq} t_{pr} t_{qs} T \right\} \right. \\ \left. \times \nu_r^*(y) (-\partial_{y_s} \tilde{\varphi}_l^k(y)) \right. \\ \left. - C_i^{-1} \sum_{r,s=1}^3 \left\{ {}^tT \sum_{p,q=1}^3 {}^t a_{pq} t_{pr} t_{qs} T \right\} \nu_r^*(y) \tilde{\theta}_s \right\} \\ \times \left\{ {}^tT u_{i0}^k(Ty)T \right\} \beta_{-2}(y') P_l(\tilde{\omega}) {}^tT dy' \\ + \sum_{j \geq -1} \int \rho_j(-s + |n_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|\psi(y') - r_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ \times \beta_j(y') dy' \\ = \sum_{k=1}^2 C_i^{-\frac{3}{2}} \int_{\mathbf{R}^2} \rho_{-2}(-s + |n_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|\psi(y') - r_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ \times T \left[ P_i(\tilde{\theta}) \left\{ \sum_{r,s=1}^3 a_{rs} \nu_r^*(y) (-\partial_{y_s} \tilde{\varphi}_l^k(y)) \right. \right. \\ \left. \left. - C_i^{-1} \sum_{r,s=1}^3 {}^t a_{rs} \nu_r^*(y) \tilde{\theta}_s \right\} \tilde{u}_{i0}^k(y) \beta_{-2}(y') P_l(\tilde{\omega}) \right] {}^tT dy' \\ + \sum_{j \geq -1} \int \rho_j(-s + |n_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|\psi(y') - r_{il}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \beta_j(y') dy', \end{aligned}$$

where  $\beta_j(y')$  are some  $C^\infty$  functions supported near  $y' = 0$  and  $\beta_{-2}(0) = 1$ .

Since  $n_{il}(\theta, \omega)$  is a regular direction, by the Morse lemma we can take a new system of local coordinates

$\tilde{y}'$  so that  $\tilde{y}' = 0$  means  $y' = 0$  and that

$$\begin{aligned}\psi(y'(\tilde{y}')) &= -\frac{1}{2}|\tilde{y}'|^2, \\ \det \frac{\partial \tilde{y}'}{\partial y'}(0) &= K(a_t) a_t^{-\frac{1}{2}}.\end{aligned}$$

We can determine the phase functions  $\tilde{\varphi}_i^k$  and the amplitudes  $\tilde{u}_{i0}^k$  by the methods in Kawashita [2]. Applying the Taylor expansions to  $\nu^*(\tilde{y}), \nabla \tilde{\varphi}_i^k(\tilde{y})|_{y_3=\psi(\tilde{y}'), \tilde{u}_{i0}^k(\tilde{y})|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} :$

$$\begin{aligned}\nu^*(\tilde{y}) &= |n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|^{-1} n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) + \dots, \\ \nabla \tilde{\varphi}_i^k(\tilde{y})|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} &= C_i^{-1} {}^t(\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \tilde{\kappa}_{kl}) + \dots, \\ \tilde{u}_{i0}^k(\tilde{y})|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} &= (2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_i^{-\frac{3}{2}} \tilde{P}_{k,0}^l P_l(\tilde{\omega}) + \dots\end{aligned}$$

where  $\tilde{y} = (\tilde{y}', y_3)$ ,  $\tilde{\kappa}_{kl} = \sqrt{\tilde{\omega}_3^2 + C_i^2 \cdot C_k^{-2} - 1}$  and  $(\nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} )^{-1} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \otimes \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} = \tilde{P}_{1,0}^l + O(|\tilde{y}'|)$  and  $I - (\nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} )^{-1} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \otimes \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} = \tilde{P}_{2,0}^l + O(|\tilde{y}'|)$ . We can rewrite the integrals  $I_t(\theta, \omega)$  in the following way:

$$\begin{aligned}& (2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_i^{-\frac{3}{2}} C_l^{-\frac{3}{2}} \\ & \times \int_{\mathbf{R}^2} \rho_{-2}(-s - |n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})| |\tilde{y}'|^2/2 - r_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ & \times T \left[ P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \left\{ \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^2 a_{pq} n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})_p (-C_l^{-1} \tilde{\omega}_q) \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{p=1}^3 a_{p3} n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})_p (-C_l^{-1} \tilde{\kappa}_{kl}) \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{p,q=1}^3 {}^t a_{pq} n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})_p (-C_i^{-1} \tilde{\theta}_q) \right\} \right. \\ & \left. \times |n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|^{-1} \tilde{P}_{k,0}^l P_l(\tilde{\omega}) \right] \\ & {}^t T K(a_t) a_t^{-\frac{1}{2}} \tilde{\beta}_{-2}(\tilde{y}') d\tilde{y}' \\ & + \sum_{j+|\alpha| \geq -1} \int_{\mathbf{R}^2} \rho_j(-s - |n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})| |\tilde{y}'|^2/2 \\ & \quad - r_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \tilde{\beta}_j^\alpha(\tilde{y}') \tilde{y}'^\alpha d\tilde{y}',\end{aligned}\tag{3.11}$$

where  $\tilde{\beta}_j(\tilde{y}')$  are some  $C^\infty$  functions supported near  $\tilde{y}' = 0$  and  $\tilde{\beta}_{-2}(0) = 1$ . By using Lemma 6.3 and

Lemma 6.4 in Soga [11], we show that the leading term of (3.11) is the following form:

$$\begin{aligned}& (2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_i^{-\frac{3}{2}} C_l^{-\frac{3}{2}} |n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|^{-2} \delta^{(1)}(-s - r_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ & \times K(a_t) a_t^{-\frac{1}{2}} |S^1| \\ & \times T \left[ P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \left\{ \sum_{q=1}^2 \left\{ a_{3q}(C_l^{-1} \tilde{\omega}_q) + {}^t a_{3q}(C_i^{-1} \tilde{\theta}_q) \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. + a_{33}(C_l^{-1} \tilde{\kappa}_{kl} + C_i^{-1} \tilde{\theta}_3) \right\} \tilde{P}_{k,0}^l P_l(\tilde{\omega}) \right] {}^t T.\end{aligned}$$

Summing over all points  $a_t$ , we arrive at the following proposition.

**Proposition 3.3.** *Let  $\omega, \theta \in S^2$ . Assume that  $|\theta + \omega|$  is sufficiently small, and  $n_{i\ell}(\theta, \omega)$  is a regular direction for  $\partial\Omega$ . Then we have*

$$\begin{aligned}& P_i(\theta) S(s, \theta, \omega) P_l(\omega) \\ & \sim (2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_i^{-\frac{3}{2}} C_l^{-\frac{3}{2}} |n_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})|^{-2} \delta^{(1)}(-s - r_{i\ell}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ & \times \sum_{t=1}^M K(a_t) a_t^{-\frac{1}{2}} |S^1| \\ & \times T \left[ P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \left\{ \sum_{q=1}^2 \left\{ a_{3q}(C_l^{-1} \tilde{\omega}_q) + {}^t a_{3q}(C_i^{-1} \tilde{\theta}_q) \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. + a_{33}(C_l^{-1} \tilde{\kappa}_{kl} + C_i^{-1} \tilde{\theta}_3) \right\} \tilde{P}_{k,0}^l P_l(\tilde{\omega}) \right] {}^t T \\ & + \dots,\end{aligned}$$

where  $T = (t_{pq})$  is  $3 \times 3$  orthogonal matrix and  $x = Ty$ ,  $\tilde{\omega} = {}^t T \omega$ ,  $\tilde{\theta} = {}^t T \theta$  and  $(\nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} )^{-1} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \otimes \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} = \tilde{P}_{1,0}^l + O(|\tilde{y}'|)$  and  $I - (\nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} )^{-1} \cdot \nabla \tilde{\varphi}_i^1|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} \otimes \nabla \tilde{\varphi}_i^2|_{y_3=\psi(\tilde{y}')} = \tilde{P}_{2,0}^l + O(|\tilde{y}'|)$ .

## 4 Proof of Theorem 2.1

*Proof of Theorem 2.1.* Note that  $P_1(\xi) = \xi \otimes \xi$ ,  $P_2(\xi) = I - \xi \otimes \xi$  and each  $\tilde{P}_{k,0}^2 P_2(\tilde{\omega}) (k = 1, 2)$

takes the following form:

$$\begin{aligned} \bar{P}_1(\tilde{\omega}) &:= \tilde{P}_{1,0}^2 P_2(\tilde{\omega}) \\ &= 2/\bar{A}(\tilde{\omega}) \begin{pmatrix} \tilde{\omega}_1^2 \tilde{\omega}_3^2 & \tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_3^2 & \tilde{\omega}_1 |\tilde{\omega}_3| (1 - \tilde{\omega}_3^2) \\ \tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_3^2 & \tilde{\omega}_2^2 \tilde{\omega}_3^2 & \tilde{\omega}_2 |\tilde{\omega}_3| (1 - \tilde{\omega}_3^2) \\ \tilde{\kappa}_{12} \tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_3^2 & \tilde{\kappa}_{12} \tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_3^2 & \tilde{\kappa}_{12} |\tilde{\omega}_3| (1 - \tilde{\omega}_3^2) \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$\bar{P}_2(\tilde{\omega}) := \tilde{P}_{2,0}^2 P_2(\tilde{\omega}) = 1/\bar{A}(\tilde{\omega})$   
 $\times \begin{pmatrix} \bar{A}(\tilde{\omega}) - \tilde{\omega}_1^2 z_+ & -\tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_2 z_+ & \tilde{\omega}_1 |\tilde{\omega}_3| z_- \\ -\tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_1 z_+ & \bar{A}(\tilde{\omega}) - \tilde{\omega}_2^2 z_+ & \tilde{\omega}_2 |\tilde{\omega}_3| z_- \\ -\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_1 A(\tilde{\omega}) & -\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_2 A(\tilde{\omega}) & (1 - \tilde{\omega}_3^2) A(\tilde{\omega}) \end{pmatrix},$   
 where  $A(\tilde{\omega}) := \tilde{\omega}_1^2 + \tilde{\omega}_2^2 + \tilde{\omega}_3 \tilde{\kappa}_{12}$ ,  $\bar{A}(\tilde{\omega}) := \tilde{\omega}_1^2 + \tilde{\omega}_2^2 + |\tilde{\omega}_3| \tilde{\kappa}_{12}$  and  $z_{\pm} := |\tilde{\omega}_3|(\tilde{\kappa}_{12} - \tilde{\omega}_3) \pm 1$ . Recall that  $n_{i2}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})/|n_{i2}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})| = (0, 0, -1)$ , we can rewrite  $P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \left[ \sum_{q=1}^2 \{a_{3q}(C_2^{-1} \tilde{\omega}_q) + {}^t a_{3q}(C_i^{-1} \tilde{\theta}_q)\} + a_{33}(C_2^{-1} \tilde{\kappa}_{k1} + C_i^{-1} \tilde{\theta}_3) \right] \tilde{P}_{k,0}^2 P_2(\tilde{\omega})$  in the following form:

$$\begin{aligned} P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \left\{ (a_{31} + {}^t a_{31}) \tilde{\omega}_1 + (a_{32} + {}^t a_{32}) \tilde{\omega}_2 \right. \\ \left. + a_{33}(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{k2} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|) \right\} \bar{P}_k(\tilde{\omega}) / C_2. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Then, calculating each term in (4.1) more carefully, we can obtain

$$\begin{aligned} P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & \lambda + \mu \\ 0 & 0 & 0 \\ \lambda + \mu & 0 & 0 \end{pmatrix} \tilde{\omega}_1 \bar{P}_k(\tilde{\omega}) \\ = (\lambda + \mu) \tilde{\omega}_1 \{2(a \otimes q) + \bar{a} \otimes \tilde{p}_{i3} + \bar{c} \otimes \tilde{p}_{i1}\} / \bar{A}(\tilde{\omega}), \\ P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + \mu \\ 0 & \lambda + \mu & 0 \end{pmatrix} \tilde{\omega}_2 \bar{P}_k(\tilde{\omega}) \\ = (\lambda + \mu) \tilde{\omega}_2 \{2(b \otimes q) + \bar{b} \otimes \tilde{p}_{i3} + \bar{c} \otimes \tilde{p}_{i2}\} / \bar{A}(\tilde{\omega}), \\ P_i(\tilde{\theta}) \sum_{k=1}^2 \begin{pmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 2\mu \end{pmatrix} (\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{k2} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|) \bar{P}_k(\tilde{\omega}) \\ = \left\{ 2(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{12} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|)(c \otimes q) \right. \\ \left. + (\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{22} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|)(\mu(\bar{a} \otimes \tilde{p}_{i1} + \bar{b} \otimes \tilde{p}_{i2}) \right. \\ \left. + (\lambda + 2\mu)\bar{c} \otimes \tilde{p}_{i3} \right\} / \bar{A}(\tilde{\omega}), \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} a &= {}^t(\tilde{\omega}_1 \tilde{p}_i^{(13)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(11)}, \tilde{\omega}_1 \tilde{p}_i^{(23)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(21)}, \\ &\quad \tilde{\omega}_1 \tilde{p}_i^{(33)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(31)}), \\ \bar{a} &= {}^t(\bar{A}(\tilde{\omega}) - \tilde{\omega}_1^2 z_+, -\tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_2 z_+, \tilde{\omega}_1 |\tilde{\omega}_3| z_-) \\ b &= {}^t(\tilde{\omega}_2 \tilde{p}_i^{(13)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(12)}, \tilde{\omega}_2 \tilde{p}_i^{(23)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(22)}, \\ &\quad \tilde{\omega}_2 \tilde{p}_i^{(33)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(32)}), \\ \bar{b} &= {}^t(-\tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_1 z_+, \bar{A}(\tilde{\omega}) - \tilde{\omega}_2^2 z_+, \tilde{\omega}_2 |\tilde{\omega}_3| z_-) \\ c &= {}^t(\mu(\tilde{\omega}_1 \tilde{p}_i^{(11)} + \tilde{\omega}_2 \tilde{p}_i^{(12)}) + (\lambda + 2\mu)\tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(13)}, \\ &\quad \mu(\tilde{\omega}_1 \tilde{p}_i^{(21)} + \tilde{\omega}_2 \tilde{p}_i^{(22)}) + (\lambda + 2\mu)\tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(23)}, \\ &\quad \mu((\tilde{\omega}_1 \tilde{p}_i^{(31)} + \tilde{\omega}_2 \tilde{p}_i^{(32)}) + (\lambda + 2\mu)\tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_i^{(33)}), \\ \bar{c} &= {}^t(-\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_1 A(\tilde{\omega}), -\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_2 A(\tilde{\omega}), (1 - \tilde{\omega}_3^2) A(\tilde{\omega})), \\ q &= {}^t(\tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_3^2, \tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_3^2, |\tilde{\omega}_3| (1 - \tilde{\omega}_3^2)). \end{aligned}$$

each  $\tilde{p}_i^{(pq)}$  and  $\tilde{p}_{il}$  denote  $(p, q)$ -entry and  $l$ th column of  $P_i(\tilde{\theta})$  respectively, and  $\tilde{n}_{i2} = n_{i2}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})$ . Hence, applying the asymptotic expansion derived in the Proposition 3.3, we obtain

$$\begin{aligned} P_i(\theta) S(s, \theta, \omega) P_2(\omega) \\ \sim (2\sqrt{2}\pi)^{-2} C_2^{-\frac{5}{2}} C_i^{-\frac{3}{2}} \delta^{(1)}(-s - r_{i1}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})) \\ \times \sum_{t=1}^M K(a_t)^{-\frac{1}{2}} |S^1| T M(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) {}^t T + \dots, \end{aligned}$$

where  $M(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})$  is a  $3 \times 3$ -matrix whose  $(p, q)$ -entry is expressed by  $m_{pq}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})$ . As shown above, it is represented in the following form:

$$\begin{aligned} M(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \\ = \left[ (\lambda + \mu) \tilde{\omega}_1 \{2(a \otimes q) + \bar{a} \otimes \tilde{p}_{i3} + \bar{c} \otimes \tilde{p}_{i1}\} \right. \\ \left. + (\lambda + \mu) \tilde{\omega}_2 \{2(b \otimes q) + \bar{b} \otimes \tilde{p}_{i3} + \bar{c} \otimes \tilde{p}_{i2}\} \right. \\ \left. + \left\{ 2(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{12} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|)(c \otimes q) \right. \right. \\ \left. \left. + (\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{22} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|) \{ \mu(\bar{a} \otimes \tilde{p}_{i1} + \bar{b} \otimes \tilde{p}_{i2}) \right. \right. \\ \left. \left. + (\lambda + 2\mu)\bar{c} \otimes \tilde{p}_{i3} \right\} \right] / \bar{A}(\tilde{\omega}). \end{aligned}$$

Finally, by considering the case of mode conversion and non-mode conversion case separately, we shall show that the leading term of the right hand side of (3.4) does not vanish. To show it, we prove that  $m_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \neq 0$  and  $m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \neq 0$ .

**Lemma 4.1.** *Assume that  $|\tilde{\theta} + \tilde{\omega}|$  is different from zero and sufficiently small. Then we have  $m_{33}(\theta, \omega) \neq 0$ .*

*Proof.* Let  $i = 1$  (i.e mode-conversion case). According to (3.5),  $m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})$  is expressed as follows:

$$\begin{aligned}
m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) &= \left[ (\lambda + \mu)\tilde{\omega}_1 \left\{ 2(\tilde{\omega}_1\tilde{p}_1^{(33)} + \tilde{\kappa}_{12}\tilde{p}_1^{(31)})|\tilde{\omega}_3|(1 - \tilde{\omega}_3^2) \right. \right. \\
&\quad + \tilde{\omega}_1|\tilde{\omega}_3|z_-\tilde{p}_1^{(33)} + (1 - \tilde{\omega}_3^2)A(\tilde{\omega})\tilde{p}_1^{(31)} \left. \right\} \\
&\quad + (\lambda + \mu)\tilde{\omega}_2 \left\{ 2(\tilde{\omega}_2\tilde{p}_1^{(33)} + \tilde{\kappa}_{12}\tilde{p}_1^{(32)})|\tilde{\omega}_3|(1 - \tilde{\omega}_3^2) \right. \\
&\quad + \tilde{\omega}_2|\tilde{\omega}_3|z_-\tilde{p}_1^{(33)} + (1 - \tilde{\omega}_3^2)A(\tilde{\omega})\tilde{p}_1^{(32)} \left. \right\} \\
&\quad + 2(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{12} + C_2|\tilde{n}_{i2}|) \left\{ \mu(\tilde{\omega}_1\tilde{p}_1^{(31)} + \tilde{\omega}_2\tilde{p}_1^{(32)}) \right. \\
&\quad + (\lambda + 2\mu)\tilde{\kappa}_{12}\tilde{p}_1^{(33)} \left. \right\} |\tilde{\omega}_3|(1 - \tilde{\omega}_3^2) \\
&\quad + (\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{22} + C_2|\tilde{n}_{i2}|) \left\{ \mu|\tilde{\omega}_3|z_-(\tilde{\omega}_1\tilde{p}_1^{(31)} + \tilde{\omega}_2\tilde{p}_1^{(32)}) \right. \\
&\quad + (\lambda + 2\mu)(1 - \tilde{\omega}_3^2)A(\tilde{\omega})\tilde{p}_1^{(33)} \left. \right\} \Big] / \bar{A}(\tilde{\omega}) \\
&= \left[ (\lambda + \mu)|\tilde{\omega}_3|(1 - \tilde{\omega}_3^2) \left\{ 2(1 - \tilde{\omega}_3^2) + z_- \right\} \tilde{p}_1^{(33)} \right. \\
&\quad + (\lambda + \mu)(1 - \tilde{\omega}_3^2) \left\{ 2\tilde{\kappa}_{12}|\tilde{\omega}_3| + A(\tilde{\omega}) \right\} \\
&\quad \quad \quad \times (\tilde{\omega}_1\tilde{p}_1^{(31)} + \tilde{\omega}_2\tilde{p}_1^{(32)}) \\
&\quad + \mu|\tilde{\omega}_3| \left\{ 2(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{12} + C_2|\tilde{n}_{i2}|)(1 - \tilde{\omega}_3^2) \right. \\
&\quad \quad \quad + C_2|\tilde{n}_{i2}|z_- \left. \right\} (\tilde{\omega}_1\tilde{p}_1^{(31)} + \tilde{\omega}_2\tilde{p}_1^{(32)}) \\
&\quad + (\lambda + 2\mu)(1 - \tilde{\omega}_3^2) \left\{ 2(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{12} + C_2|\tilde{n}_{i2}|)\tilde{\kappa}_{12}|\tilde{\omega}_3| \right. \\
&\quad \quad \quad + C_2|\tilde{n}_{i2}|A(\tilde{\omega}) \left. \right\} \tilde{p}_1^{(33)} \left. \right] / \bar{A}(\tilde{\omega}).
\end{aligned}$$

By  $\tilde{n}_{12}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})/|\tilde{n}_{12}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})| = (0, 0, -1)$ , that is,

$$\begin{aligned}
C_2^{-1}\tilde{\omega}_p &= C_1^{-1}\tilde{\theta}_p \quad (p = 1, 2), \\
C_2^{-1}\tilde{\omega}_3 &= C_1^{-1}\tilde{\theta}_3 - |\tilde{n}_{12}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})| \quad \text{and} \quad |\tilde{\theta}| = 1,
\end{aligned}$$

we can express  $m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})$  as a function in  $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$ :

$$m_{33}(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) = F(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) / \bar{A}(\tilde{\omega}(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)),$$

where

$$\begin{aligned}
F(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) &= (\lambda + \mu)C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2)|\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta})| \\
&\quad \times \{2C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2) + z_-\} \{1 - (\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2)\} \\
&\quad + (\lambda + \mu)C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2)|\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta})| \\
&\quad \times \{2\tilde{\kappa}_{12}|\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta})| + A(\tilde{\omega}(\tilde{\theta}))\} C_1^{-1}C_2\tilde{\theta}_3(\tilde{\theta})(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2) \\
&\quad + \mu C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2)|\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta})| \\
&\quad \times \left\{ 2(\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta}) + \tilde{\kappa}_{12} + C_2|\tilde{n}_{12}|)C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2) \right. \\
&\quad \quad \quad + \left. \{\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta}) + \tilde{\kappa}_{22} + C_2|\tilde{n}_{12}|\}z_- \right\} C_1C_2^{-1}\tilde{\theta}_3(\tilde{\theta}) \\
&\quad + (\lambda + 2\mu)C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2) \\
&\quad \times \left\{ 2(\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta}) + \tilde{\kappa}_{12} + C_2|\tilde{n}_{12}|)\tilde{\kappa}_{12} \right\} |\tilde{\omega}_3(\tilde{\theta})| \\
&\quad \quad \quad + C_2|\tilde{n}_{12}|A(\tilde{\omega}(\tilde{\theta})) \left. \right\} \tilde{\theta}_3^2(\tilde{\theta}) \\
&= C_1^{-2}C_2^2(\tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2)\tilde{F}(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2).
\end{aligned}$$

Here we note that  $|\tilde{\theta} + \tilde{\omega}| \neq 0$  is equivalent to  $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) \neq (0, 0)$ . In order to show  $m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \neq 0$ , it suffices to show that  $\tilde{F}(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) \neq 0$ . Since  $\tilde{F}(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$  is a  $C^\infty$  function near  $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) = (0, 0)$  and  $|\tilde{n}_{12}| = C_1^{-1} + C_2^{-1}$ ,  $\tilde{\kappa}_{12} = C_1^{-1}C_2$ ,  $A(\tilde{\omega}(\tilde{\theta})) = -C_1^{-1}C_2$ ,

$$\begin{aligned}
\tilde{F}(0, 0) &= C_1^{-1}C_2 \left\{ (\lambda + \mu) + \mu C_1 C_2^{-1} (1 + C_1^{-1}C_2) \right. \\
&\quad \quad \quad \left. + (\lambda + 2\mu)(3C_1^{-1}C_2 - 1) \right\} \\
&= C_1^{-1}C_2 \left\{ \mu C_1 C_2^{-1} + 3(\lambda + 2\mu)C_1^{-1}C_2 \right\} > 0
\end{aligned}$$

we can obtain that  $\tilde{F}(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2) \neq 0$  provided  $|\tilde{\theta} + \tilde{\omega}|$  is different from zero and sufficiently small.

Thus the proof is completed.  $\square$

**Lemma 4.2.** *Assume that  $|\tilde{\theta} + \tilde{\omega}|$  is different from zero and sufficiently small. Then we have  $m_{11}(\theta, \omega) \neq 0$ .*

*Proof.* Let  $i = 2$  (i.e non mode conversion case). According to (3.5),  $m_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega})$  is expressed as follows:

$$\begin{aligned}
 & m_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \\
 &= \left[ (\lambda + \mu)\tilde{\omega}_1 \left\{ 2(\tilde{\omega}_1 \tilde{p}_2^{(13)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_2^{(11)})\tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_3^2 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \{ \bar{A}(\tilde{\omega}) - \tilde{\omega}_1^2 z_+ \} \tilde{p}_2^{(13)} + (-\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_1) A(\tilde{\omega}) \tilde{p}_2^{(11)} \right\} \right. \\
 &+ (\lambda + \mu)\tilde{\omega}_2 \left\{ 2(\tilde{\omega}_2 \tilde{p}_2^{(13)} + \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_2^{(12)})\tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_3^2 \right. \\
 &\quad \left. + (-\tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_1) z_+ \tilde{p}_2^{(13)} + (-\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_1) A(\tilde{\omega}) \tilde{p}_2^{(12)} \right\} \\
 &+ 2(\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{12} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|) \left\{ \mu(\tilde{\omega}_1 \tilde{p}_2^{(11)} + \tilde{\omega}_2 \tilde{p}_2^{(12)}) \right. \\
 &\quad \left. + (\lambda + 2\mu) \tilde{\kappa}_{12} \tilde{p}_2^{(13)} \right\} \tilde{\omega}_1 \tilde{\omega}_3^2 \\
 &+ (\tilde{\omega}_3 + \tilde{\kappa}_{22} + C_2 |\tilde{n}_{i2}|) \left\{ \mu \{ \bar{A}(\tilde{\omega}) - \tilde{\omega}_1^2 z_+ \} \tilde{p}_2^{(11)} \right. \\
 &\quad \left. + (-\tilde{\omega}_2 \tilde{\omega}_1) z_+ \tilde{p}_2^{(12)} \right\} \\
 &\quad \left. + (\lambda + 2\mu)(-\tilde{\omega}_3 \tilde{\omega}_1) A(\tilde{\omega}) \tilde{p}_2^{(13)} \right] / \bar{A}(\tilde{\omega})
 \end{aligned}$$

Since, in the case of back-scattering,  $\tilde{\omega} = (0, 0, -1)$  and  $\tilde{\theta} = (0, 0, 1)$ , we can derive that  $m_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) = 2\mu + O(|\tilde{\theta} + \tilde{\omega}|)$ .

Therefore, by using our assumption that  $|\tilde{\theta} + \tilde{\omega}|$  is sufficiently small, we can prove that  $m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \neq 0$ .  $\square$

As shown above, we can prove  $m_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \neq 0$  and  $m_{33}(\tilde{\theta}, \tilde{\omega}) \neq 0$ , that is, in each case of mode conversion and non mode conversion, we show that the leading term of the right-hand side of (3.4) does not vanish. Thus the proof is completed.  $\square$

### Acknowledgment

I wish to express my sincere gratitude to Professors Tatsuo Nishitani and Hideo Soga for helpful discussions and guidance.

### 参考文献

- [1] J. D. Achenbach, "Wave propagation in elastic solids", North-Holland, New York, 1973.
- [2] M. Kawashita, *On asymptotic solutions for the elastic wave*, Master's thesis. Osaka University, 1988, (in Japanese).
- [3] M. Kawashita, *Another proof of the representation formula of the scattering kernel for the elastic wave equation*, Tsukuba J. Math. **18**(1994), 351-369.
- [4] M. Kawashita and H. Soga, *Mode-conversion of the scattering kernel for the elastic wave equation*, J. Math. Soc. Japan **42**(1990), 691-712.
- [5] Lax, P., Phillips, R. "Scattering Theory", Academic Press, New York 1967.
- [6] A. Majda, *A representation formula for the scattering operator and the inverse problem for arbitrary bodies*, Comm. Pure Appl. Math. **30**(1977), 165-194.
- [7] V. P. Petkov, "Scattering theory for hyperbolic operators", North Holland, Amsterdam(1989).
- [8] Y. Shibata and H. Soga, *Scattering theory for the elastic wave equation*, Publ. RIMS Kyoto Univ. **25**(1989), 861-887.
- [9] H. Soga, *Singularities of the scattering kernel for convex obstacles*, J. Math Kyoto Univ. **22**(1983), 729-765.
- [10] H. Soga, *Representation of the scattering kernel for the elastic wave equation and singularities of the back-scattering*, Osaka J. Math. **29**(1992), 809-836.

- [11] H. Soga, *Non-smooth solution of the elastic wave equation and singularities of the scattering kernel*, Lecture notes in pure and applied mathematics. **161**(1994), 219-238.
- [12] H. Soga, *Asymptotic solutions of the elastic wave equation and reflected wave near boundaries*, Comm. Math. Phys. **133**(1990), 37-52.
- [13] K. Yamamoto, *The behavior of scattered plane waves of elastic wave equations and applications to scattering theory*, J. London Math. Soc. **41**(1990), 461-47.
- [14] Y. Ota, *On the Singularities of the Scattering Kernel for the Elastic Wave Equation in the case of Mode-Conversion* Osaka J. Math. **43**(2006), 665-678.
- [15] Y. Ota, *On the analysis of the scattering problem for the elastic wave in the case of the transverse incident wave*, Proc. Japan Acad.84, Ser. A (2008) to appear.

# GIS を用いた遺跡のデジタル測量と遺跡空間データベースの構築 Digital Topographic Survey and Construction of the Site Database by Means of Geographic Information Systems

寺村 裕史

Hirofumi Teramura

人間文化研究機構 総合地球環境学研究所, 京都市北区上賀茂本山 457-4

Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto

あらまし: 考古学において過去の歴史や文化を復元する上で、「形」の重要性は特筆されるべき事項であろう。型式学においては遺物や遺構、ひいては遺跡そのものも対象となりうるし、かつそうした「形」の情報をいかにして取得するのかについて様々な議論がなされてきている。そこで本稿では、筆者がこれまで実践してきた遺跡(ここでは前方後円墳およびインダス文明期の都市遺跡)における GIS を用いたデジタル測量の成果について述べるとともに、GIS の管理・分析機能は如何なる種類の情報でも、ID 番号、属性、時間、空間という四種の情報があれば、GIS 上で運用してその表示・分析機能を用いることができるため、その利点を活かした遺跡空間データベースの構築について報告する。

**Summary:** This paper presents my study results as follows; (1) Digital topographic survey at Tsukuriyama burial mound (Okayama), Farmana and Kanmer site (India) by means of GPS and Total Station, (2) Digital photogrammetry of the architectural remains at the site of Harappan culture, (3) Development of the geodatabase and chronological mapping of the Harappan-related sites in Pakistan and Northwest India. The archaeology with GIS has been pursuing digital documentation, management and analysis of archaeological data concerning the ranging from the macro (supra-regional and regional) levels to the micro (site, built remains and artifact) levels, by means of Geographic Information Systems (GIS).

**キーワード:** デジタル測量, トータルステーション, GPS, データベース, 地理情報システム

**Keywords:** Digital Topographic Survey, Total Station, GPS, Database, Geographic Information Systems

## 1. はじめに

考古学において発掘調査から得られる遺物、遺構のデータや、動植物遺存体などの古環境を復元するために必要な試料に関する様々な情報を、いかに効率良く取得し、蓄積・管理した上で、分析・研究に応用していくかは、常に付きまとう重要な課題である。GIS はそれらの情報を統合し、考古学調査のモデルとなるようなシステムを構築する上で欠くことの出来ないツールであると考えている。

そこで本稿では、筆者がこれまでに実践してきた遺跡のデジタル測量や写真測量の成果を述べ、遺跡の

形に関する情報をどのように効率的に取得し、以降の分析に役立てていくのか、また調査から得られた様々なデータをどのように GIS 上で管理・運用していくのかについて展望を述べることにする。

具体的には、岡山市造山古墳の墳丘デジタル測量と、インダス文明期の都市遺跡であるカーンメール遺跡とファルマーナー遺跡での調査成果、そしてそこで実践されている遺跡空間データベース作成を中心に報告する。

## 2. 岡山市造山古墳の墳丘デジタル測量

従来、考古学において古墳の墳丘などをはじめとする地形測量は平板測量が中心を担ってきた。しかし造山古墳の測量にあたっては、伝統的な平板測量による方法の利点を認識しながらも、地理情報システム (GIS) などを用いた三次元での墳形の分析や表示に耐えうる新たな測量方法が必要であると考え、デジタル測量をあわせて採用することにした。平板測量にもトータルステーション (TS) を使用する方法があるが、本調査におけるデジタル測量は全てのポイントをトータルステーションで記録し後処理をコンピュータ上で行うため、平板及び紙図面を全く用いないことに特徴がある。また、すべてのデータを国際的に統一化された座標系のなかに位置づけていくため、墳丘上や周辺に設置する基準点の座標を GPS によって求め、そこから各測点の座標を求めることとした。

造山古墳は5世紀前半に築造された墳長約350mの、全国第4位の規模を誇る前方後円墳である。墳丘内に立ち入りの出来る古墳としては全国最大となる。そのような造山古墳の墳丘デジタル測量には GPS とトータルステーション (ニコン・トリプル社製) を使用し、GPS はジェノバ社による高精度位置情報サービスの VRS-RTK 観測を用いることで水平誤差±2cm 以内の精度で計測が可能となった。

測量にあたっては、まず GPS により墳丘各所に基準点 (釘) を設置し、それらを元に器設したトータルステーションを用いて、さらに必要な釘を設置していく方法を採用した。トータルステーションの器設については、GPS で設置した釘3点あるいは2点を視準して行なっている。

次に、データ形式とデータの記録方法について述べ

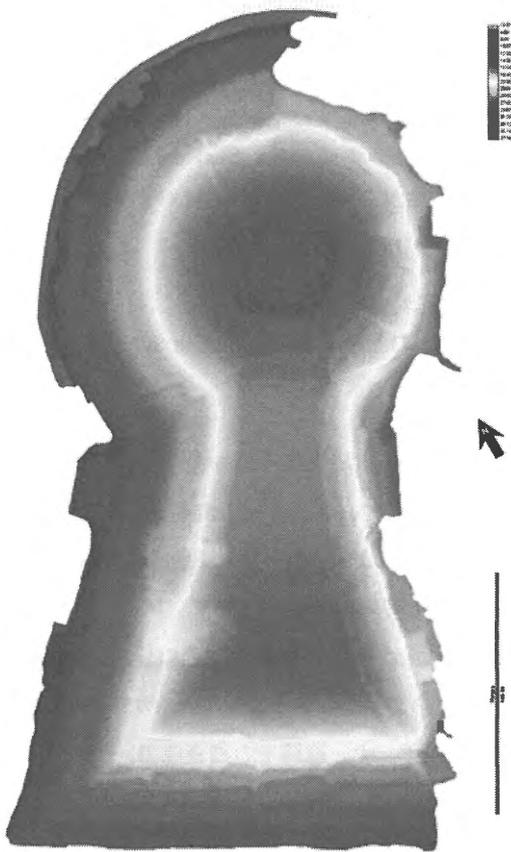


図1 墳丘全体のDEM

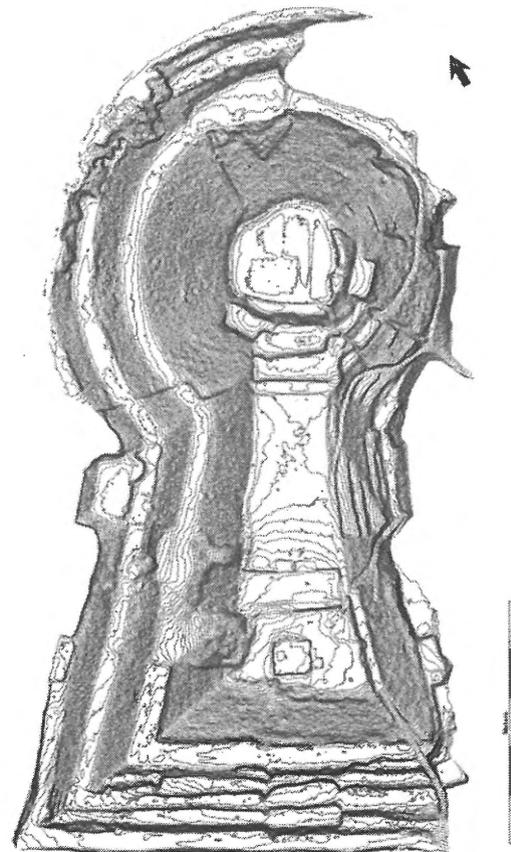


図2 墳丘全体の等高線図 (25cm 間隔)

る。測点のデータは国土座標：平面直角座標系(第V系)に則したXYZ形式でトータルステーションに記録し、単位は全てメートルで世界測地系に準拠したデータ取得を行なった。標高(Z値)に関しては、GPSで設置した釘10点の平均値を求め基準原点の標高値とし、その原点から他の釘にレベル移動を行なった。GPSで計測した標高値そのままの値を使用しなかったのは、GPS単体での計測では個々の釘の垂直誤差がやや大きくなるためであり、古墳全体で最終的に一つの原点からの標高で統一できるよう基準原点からレベル移動することとした。

データの記録方法は、以下のように行なった。まず墳丘上で、ある程度の面積の調査範囲を決定し、後に重複が無いようにビニルテープで区画をする。その区画内にピンポールを立て並べ、GPSで設置した釘を基準に器設したトータルステーションで、ピンポールを立てた箇所の墳丘表面のXYZ値を計測する。計測した部分はピンポールを抜き、まだ計測していない箇所に差し換えたうえで、以降同様に計測していった。

ピンポールはおおよそ50~100cmの間隔で基本的に無作為に立てるが、本調査では測点を結ぶ不整形三角網(TIN, Triangulated Irregular Network)によって墳丘の表面を記録・表現する方法を採ることにした。これは調査者による墳丘表面の観察結果をある程度反映でき、かつ効率良くデータを取得できるよう柔軟な測点の取り方ができるのがTINを採用した理由である。50cm間隔の格子上の点を機械的に計測する方法も考えられたが、そうした場合グリッド(格子)を作成する手間や、該当箇所に木などの障害物があった場合のデータ欠損によるデメリット等を考慮して、グリッドによる記録方法は採らなかった。

基本的に計測したデータはそのまま利用し改変等は行っていないが、計測点のうち周囲の5~6点と比較してその1点だけが50cm以上標高値が異なる測点に関してはノイズであると判断し、分析するにあたって除外した。ノイズと判断した約40点を除外した3年間の総計測ポイント数は、120,548点である。データはXYZ

の値をカンマ区切りのテキスト形式で記録・保存している。

その後、計測した座標データはGISソフトであるIDRISIにインポートしたうえで、計測点のベクタデータを作成し、様々な処理を行なった。先にも述べたが、この調査ではTINにより墳丘表面を記録することを前提としているため、まずIDRISIのモジュールである「TIN」を用いて、TINモデルを作成した。その後、TINデータを空間内挿(空間補間)し標高値を補間することでDEM(Digital Elevation Model)を作成したものが図1である。さらにそのDEMから同じくIDRISIの「Contour」モジュールを用いて等高線図(25cm間隔)を作成した(図2)。

次に、墳丘全体の図では細部がわかりにくいいため、墳丘上のある程度特徴的な部分について、個別にみていくことにする。

造山古墳には本来くびれ部両側に造り出しが存在するといわれているが、墳丘東側の造り出し付近は住宅が建てられ原形を確認することは困難なため、比較的残存状況のよい西側の造り出し周辺を取り上げる。下草が刈られた状態での調査前の墳丘観察では、岡山県史による測量図ほどは改変を受けておらず、長方形をした造り出しの形状が保たれており、良好な測量成果が期待された。

結果としては、従来の墳丘測量図では丸みを帯びていた造り出しの四隅部分が、きちんと角をなしており、造り出しが本来の長方形の形状をよく保っていることが明らかになった。また従来の測量図では表されていなかった後世の改変と考えられるテラス部分のえぐれなども、詳細に表現されている(図3~5)。

後円部墳頂平坦面は、現状では周縁部に土手状の高まりがみられ、平坦面も一様に平坦ではなく凹凸が観察できたが、デジタル測量によりそれらがどこまで表現できるのかを念頭においてやや測点を密にして計測を行なった。結果として、肉眼で墳丘を観察しただけでは分かりにくかった溝状の窪みが、北東から南西方向と、北西から南東方向にそれぞれ幾筋か延びて

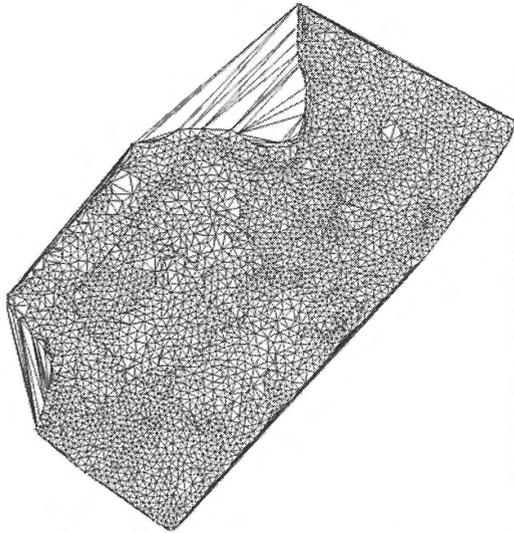


図3 造り出し周辺の測点と TIN

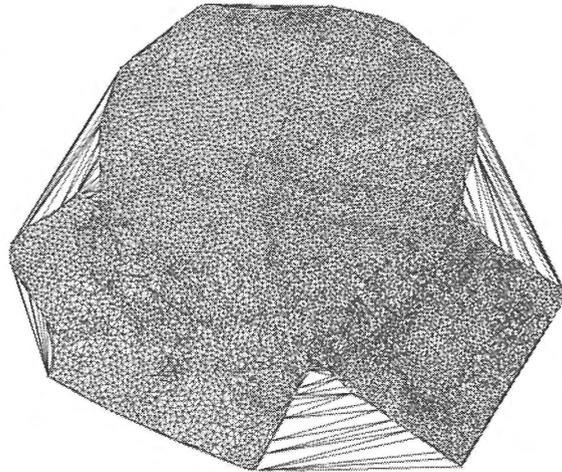


図6 後円部墳頂周辺の測点と TIN

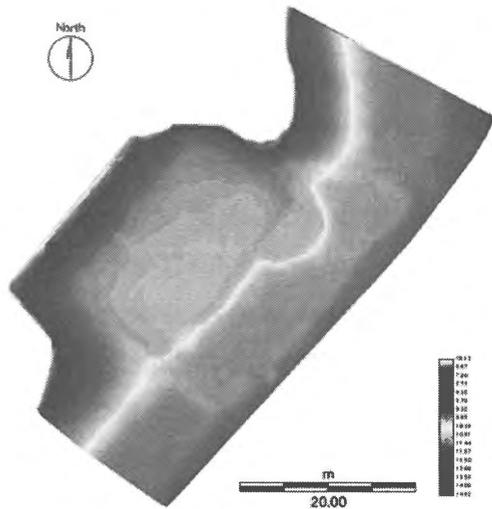


図4 造り出し周辺のDEM

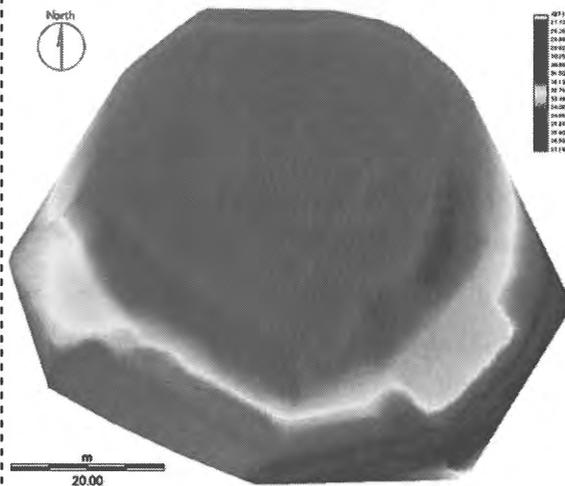


図7 後円部墳頂周辺のDEM

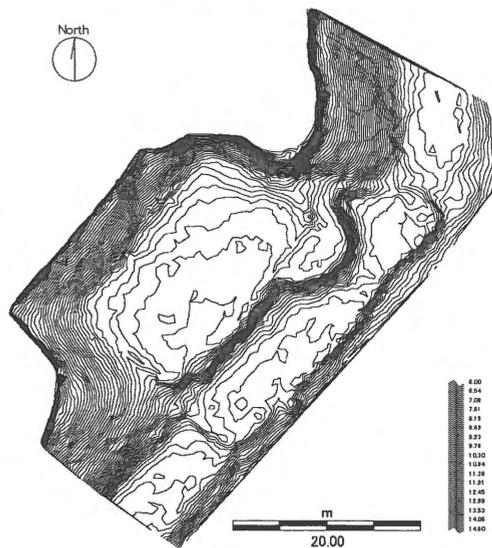


図5 造り出し周辺の等高線図 (10cm 間隔)

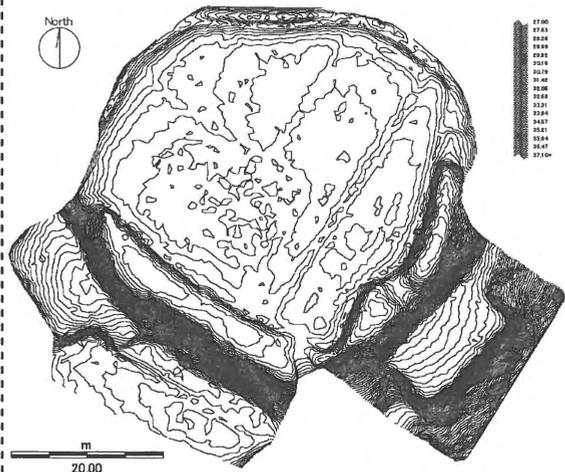


図8 後円部墳頂周辺の等高線図 (10cm 間隔)

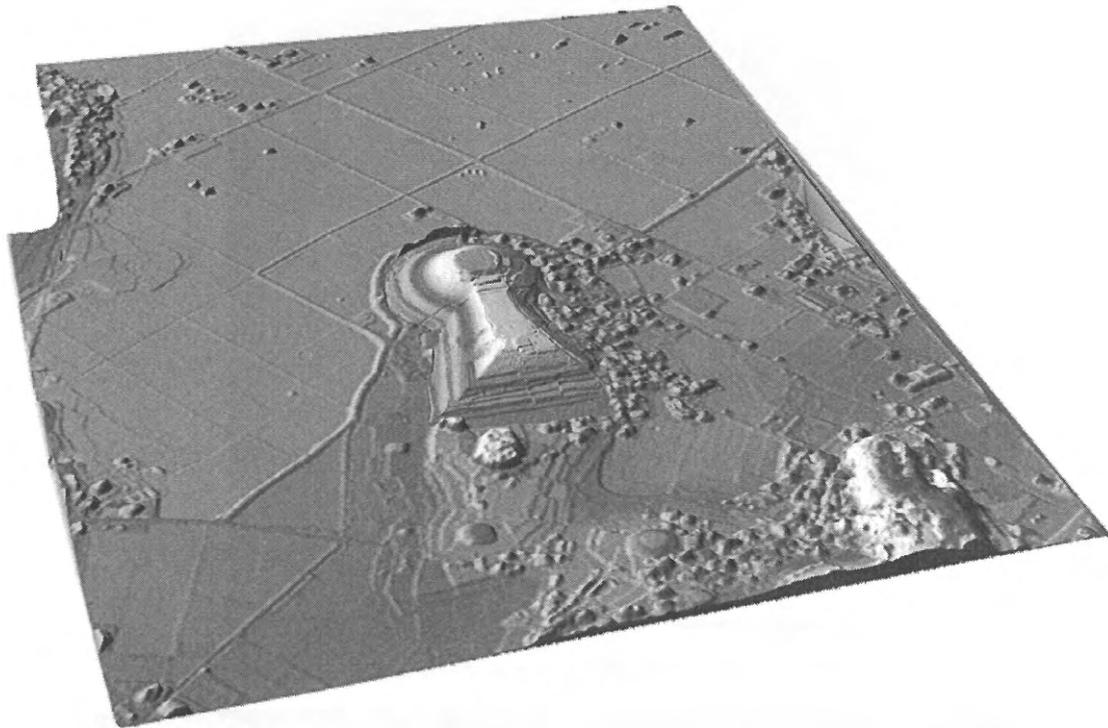


図9 造山古墳と周辺地形の鳥瞰図

いることが明らかになった。等高線図では、IDRISI による処理で 10cm 間隔の線を引いたため細かなところで多くの多角形が出来てしまっているが、DEM をみると、墳頂平坦面が一様に平坦ではなく、開墾の痕跡か山城に関する構造物の跡かは現時点では不明なもの何らかの改変を受けていることがよく表れている。肉眼による観察では限界があったが、DEM ではその溝の走行状況がよく表現され、遺構の検討に十分活用できるであろう。

さらに造山古墳の調査においては、周辺地形も航空写真から DEM を作成し、デジタル墳丘測量の成果と合成している(図9)。こうした GIS を用いた鳥瞰図などを作成することにより、より具体的な遺跡周辺の地形情報を取得することができ、遺跡の立地や周辺環境について考察することができるようになるであろう。

### 3. インド・カーンメール遺跡とファルマーナー遺跡における地形測量

筆者が所属している総合地球環境学研究所では“イ

ンドス文明と環境変化”プロジェクト(プロジェクトリーダー:長田俊樹教授)において、人間が古代以来環境にどう向かい合ってきたのかに焦点をあて、古代の環境がインドス文明に及ぼした影響を研究している。

その一環として調査を行っているインド・グジャラート州所在のカーンメール(Kanmer)遺跡とハリアーナー州所在のファルマーナー(Farmana)遺跡における地形測量の成果と、そこで構築している遺跡空間データベースについて述べる。

カーンメール遺跡とファルマーナー遺跡の位置をインドス平原周辺の DEM 上におとしたもの(図中の星印)が図10である。カーンメール遺跡が所在するインド西北部、サウラーシュトラ半島北側およびカッチ湿原周辺はその名のとおりに、雨季には水がたまり乾季には水が干上がり陸地になる地域である。カーンメール遺跡は、標高 20~25 メートル付近に立地している。一方ファルマーナー遺跡はインドス平原のガッガル・ハークラ川上流に位置する遺跡で、周囲には耕作地が広がっている。

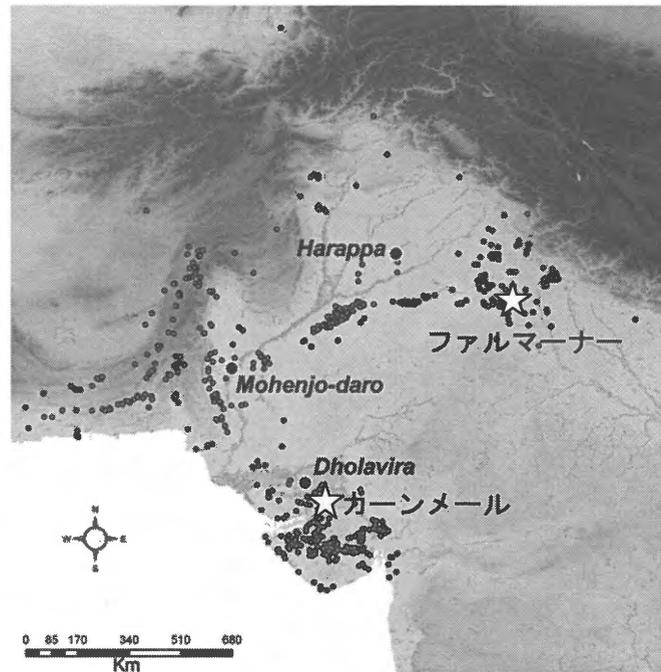


図10 カンシメール遺跡とファルマーナー遺跡の位置

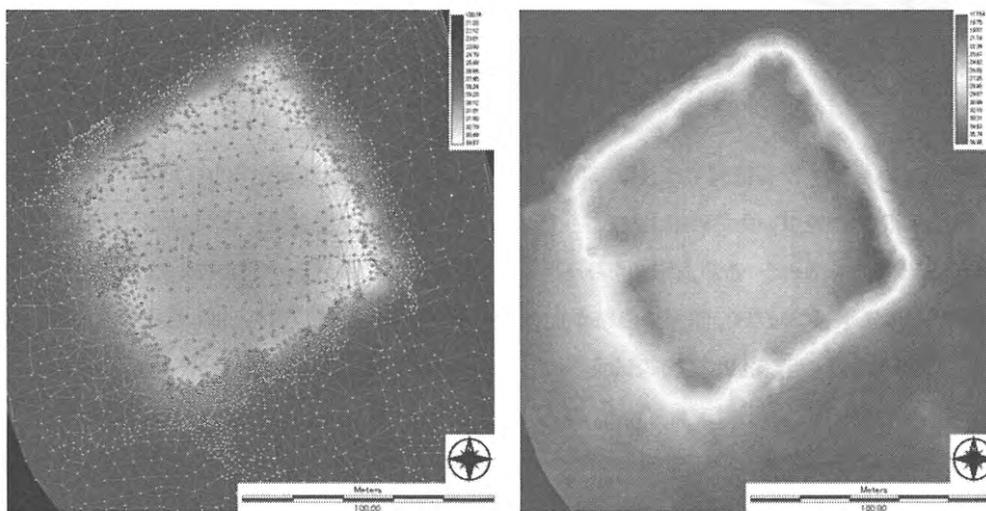


図11 カンシメール遺跡におけるトータルステーションによる測点・TINモデル(左)とDEM(右)

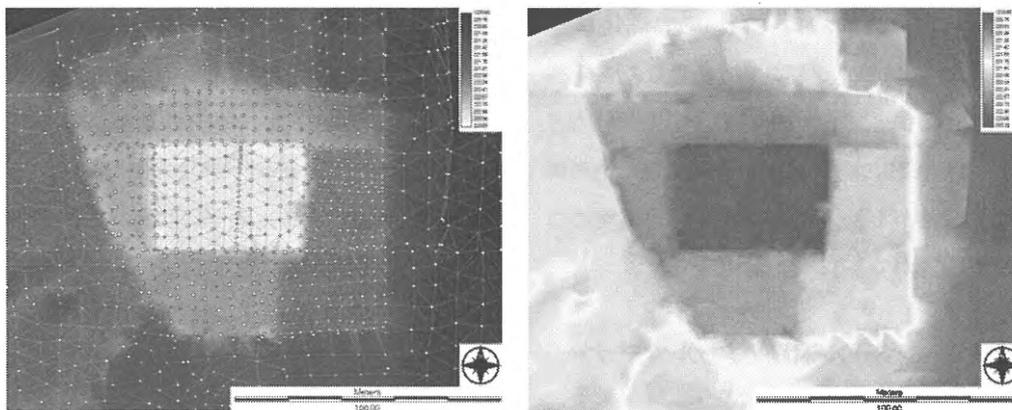


図12 ファルマーナー遺跡におけるトータルステーションによる測点・TINモデル(左)とDEM(右)



図 13 カーンメール遺跡のコンター図と  
 写真測量図のオーバーレイ

上記のような立地が対称的な両遺跡において、高精度の GPS とトータルステーションを用いて、地形測量および遺構の写真測量を実施した。造山古墳と同様に、GPS により基準点を設置しトータルステーションでポイントを計測した上で、TIN モデルと DEM を作成した(図 11・12)。同じインダス文明期の都市遺跡ではあるが、マウンドが良好に残っているカーンメール遺跡と、耕作のために削られて畑の区画が DEM に表現されているファルマナー遺跡の差違が明瞭に分かる。

さらにカーンメール遺跡においては、発掘で検出された建物遺構の写真測量も並行して行っている。そうして得られた遺構プラン(オルソ画像)をデジタル測量で得られたデータをもとに作成した等高線の上にオーバーレイしたものが図 13 である。このように GIS 上で遺跡の地形情報と遺構の情報を重ね合わせることで、城壁の連続性や、建物の配置などを具体的に検討することが可能となる。

#### 4. 今後の課題と展望

上記に述べてきたように、造山古墳の墳丘デジタル測量においては従来には試みられることのなかった新たな手法で等高線図を作成し、インダス文明遺跡の分

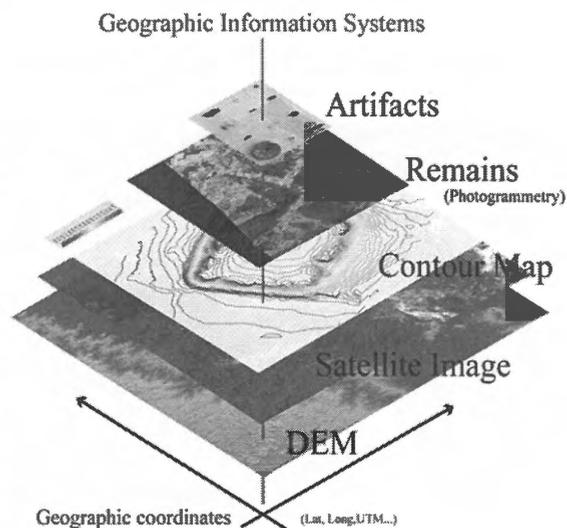


図 14 GIS を軸とした空間データの統合

布・発掘調査においては、高精度 GPS、トータルステーションなどの器材や、写真測量などの技術を用いて、すべてのデータに世界測地系経度緯度値、あるいはそれに準拠した UTM 座標値を付与して GIS で運用する仕組みを作り、実践してきた。最終的には図 14 のように GIS を軸とし、遺物から周辺環境のデータまですべての情報を一元的に管理・運用・分析するシステムの構築を目指している。その一環として、インダス文明遺跡のデータベースを作成し、そのデータを基に GIS の分析機能を用いたインダス文明遺跡の分布研究をおこなっている(図 15)。

現時点では発掘データについては、トータルステーションによる位置の記録と写真測量とを併用し、遺構の発掘状態や遺物の出土状態を、空間データをもつオルソ画像としてベースマップ上に表示することが可能となっている。こうすることで、トレンチの位置と遺構写真から得られた城壁の位置などを視覚的に把握することができ、今後どの場所にトレンチを設ければいいのか、あるいは城壁がどのように続いているのかを検討する際にも有用であろう。今後は GIS の管理・分析機能に加え、さらにデジタルの利点を生かしたインターネット上での情報共有も見据えた上で、GIS で統合

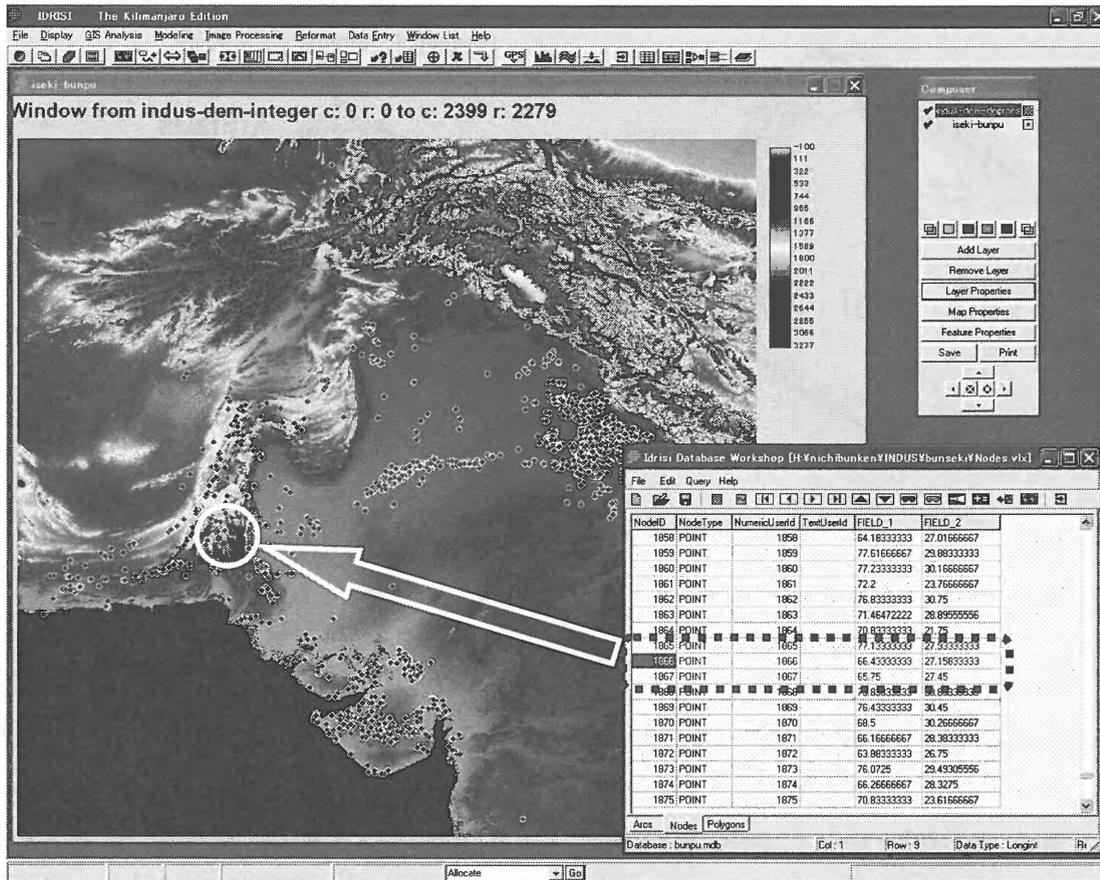


図 15 インダス文明遺跡の分布と遺跡空間データベース

されたデータのオンラインによる管理・検索機能を持たせた「WebGIS」の構築も、検討していくべき課題であると考えている。

註:本稿は、新納泉・岡山大学大学院教授を代表とする「科学研究費補助金基盤研究(B)・空間情報科学を用いた吉備中枢地域の考古学的研究」の成果の一部を含み、長田俊樹・総合地球環境学研究所教授をリーダーとする「インダス文明と環境変化」プロジェクトの一環として実施した成果も含むものである。調査成果は調査に関わられたすべてのメンバーの多大な協力によって得られたものである。誌面の都合上ここに芳名をすべて記載することはできないが、心よりお礼申し上げます。

<引用・参考文献>

新納泉・寺村裕史(2006)「GPSを用いた墳丘デジタル測量—岡山県造山古墳を例に—」『日本考古学協会第72回総会研究発表要旨』日本考古学協会

Teramura, H., Uno, T. (2006). “Spatial Analyses of Harappan Urban Settlements.” *Ancient Asia* Vol.1, Shinde, V. ed. Society of South Asian Archaeology.

寺村裕史(2008)「墳丘デジタル測量の方法論的課題と展望」新納泉(編)『岡山市造山古墳測量調査概報』新納泉編(2008)『岡山市造山古墳測量調査概報』科学研究費補助金基盤研究(B) 研究成果報告書, 岡山大学大学院社会文化科学研究科

Teramura, H., Kondo, Y., Uno, T., Kanto, A., Kishida, T. and Sakai, H. (2008) “Archaeology with GIS in the Indus Project” Osada, T. and Uesugi, A. ed. Occasional Paper 5 – Linguistics, Archaeology and the Human Past. Indus Project, Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, Japan.

遺跡調査における文化的景観把握の試行  
—文化財の継承のために—  
A Pilot Study of grasp of the Cultural Landscape  
In archaeological research

山口 欧志

Hiroshi YAMAGUCHI

国際日本文化研究センター，京都市西京区御陵大枝山町3丁目2番地

International Research Center for Japanese Studies,

3-2 Oeyama-cho, Goryo, Nishikyo-ku, Kyoto

あらまし：考古学の遺跡調査では、遺物・遺構・遺跡として残された痕跡から、過去に起きた文化現象を検討する。しかしそれだけでなく、文化的景観を理解する視座とそのための方策を有しておく必要がある。小論では、第1に国内外での調査事例を挙げつつ、この取り組みについて検討する。そしておわりに若干ではあるが、一般の人たちが文化財情報を自ら収集・集積・発信できるようなシステムの構築の構想についてふれる。

Summary: Archaeological research need viewpoint and strategy to grasp of the Cultural Landscape. In this paper, at first, I make study this subject, while the examples at home and abroad. And in the end, In some, but I mentioned the idea of building the system about many people can gather and accumulation and transmit information of cultural properties and art.

キーワード：GIS, 文化財, 遺跡, 文化的景観

Keywords: GIS, cultural resource, archaeological site, cultural landscape

## 1. はじめに

文化財を未来に発展的に継承するために、我々はどうのような調査・研究、そして普及のための取り組みができるだろうか。小論を展開するにあたっての問題意識は、この点にある。

小論で扱う遺跡は、日本国内に限定されるものではないが、文化財の定義としては、以下の日本のものを挙げておきたい。

すなわち、日本では文化財とは、文化財保護法により、「有形文化財」・「無形文化財」・「民俗文化財」・「記念物」・「文化的景観」・「伝統的建造物群」と定義されている。また、埋蔵文化財および文化財の保存修復に必要不可欠な伝統的な文化財保存技術は保護の対象と位置づけられている(図1)。

小論では、これら文化財を対象とした調査研究について検討するものである。特に文化的景観の把握を視座においた記念物および埋蔵文化財の調査には、どのような方法があり、またいかなる問題点があるかについて、報告者がこれまでに実践してきた調査研究例をふまえて論じる。

文化的景観とは、文化財保護法により、下記のように定義されている。すなわち、「地域における人々の生

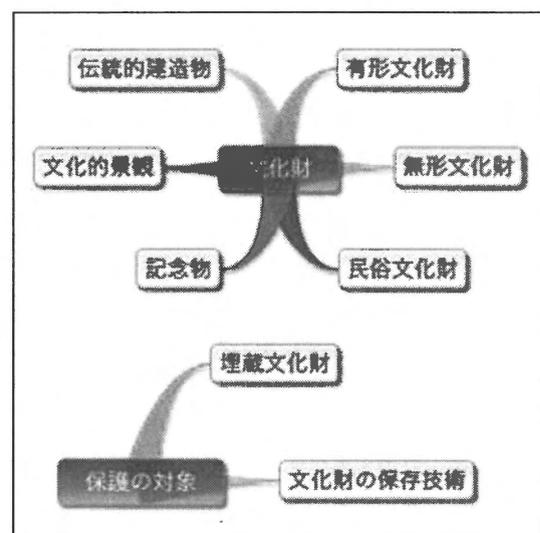


図1 文化財の定義と種別

活又は生業及び当該地域の風土により形成された景観地で我が国民の生活又は生業の理解のため欠くことのできないもの」(文化財保護法第2条第1項第五号より)である。また埋蔵文化財とは、土地に埋蔵されている文化財である(文化財保護法第92条第1項)。

これをふまえるならば、遺跡と周辺環境、そして歴史と風土が醸し出す景観は、人類活動の痕跡であり、次世代への貴重な遺産であるといえる。しかし20世紀以降、遺跡の消滅は地球のいたるところで驚異的な速度で進行している。こうした状況の下では、研究者は遺跡の調査研究だけでなく、研究の社会還元や、文化財を保存・活用するための具体的な活動が求められる。特に、「遺跡」や「文化財」というフレームワークが人々に浸透していない国々の調査では、迅速に対応を迫られている課題である。

今日、考古学に関連する諸科学・技術の発展は進み、大きな変化を遂げている。考古学も一般社会の動向とは無縁ではなく、色々の新しい技術や機器が導入されている。しかし、当然のことではあるが技術なり道具は、最新のものであるからといって、必要十分条件を満たすのではない。

実際、近年の情報科学技術の発達には、考古学における遺跡の調査方法に大きな変革をもたらしつつある。具体的な事例には、GPS・レーザースキャン・デジタルカメラを利用した比較的高精度な遺跡・遺構の計測があげられるだろう。

また、遺跡とその古環境を結びつける時空間情報を統合する技術基盤にはGISが大きな役割を果たす。考古学の調査研究が、歴史的空間の総合的な理解と社会還元を目指すのであれば、これら情報科学技術の応用実践が一層求められる。

遺跡の調査では、事例毎に最適な道具を選択し駆使する必要がある。いかに目的達成のために適切な方法を選択するか。その方法を実行するための道具をいかに適切に使用するか。そして、そもそも方法や道具の選択肢の幅を広くもっておくこと。これが肝要であろう。結局、道具は方法を十分に遂行させるためのものでしかない。

しかし現実には理想とする方法ばかり選ぶことのできる調査は甚だ少ない。調査に用いることができる道具が充実していることも多くはないだろう。実際には現有の、あるいは少し手を伸ばせば届くような道具、工夫を凝らした方法で計画を実行するだろう。これまでの多くの調査では、その時の最大戦力で遺跡や地域の姿を捉えようとしてきた。

また、新たな技術や方法を採用した遺跡調査による成果や調査方法それ自体と、これまでの調査で積み

重ねられた資料や洗練されてきた方法を組み合わせ、今後も広く社会に還元し活かす方がますます必要になるだろう。

## 2. 発表の背景

発表者は、これまでに岐阜県の象鼻山古墳群・青森県の中世十三湊遺跡・唐川城跡・福島城跡、富山県の阿尾島田古墳・沖縄県の具志川城跡、ロシア連邦のサハリン自主土城・ウズベキスタン共和国のゼラフシヤン渓谷中流域シルクロード関連遺跡群・モンゴル国トール川流域契丹城郭などの調査に参加し、それぞれに様々な景観をもちあわせる遺跡の姿をみてきた。

調査毎に目的や方法は異なり、遺跡を対象とした同じ考古学的な調査であっても調査の実際は異なる。しかし遺跡やその場で活動した人々を分析し理解するには、彼らが生きられた景観を把握しようとする必要があることは不変であると考えている。

それでは、遺跡調査において、いかにして過去ないし現在の文化的景観を捉えようとしているのか、その試行の一例を挙げていきたい。

## 3. 遺跡を測量すること

遺跡を測量することは、単に遺跡の“形状”を捉えることだけでなく、遺跡をとりまく歴史的・自然環境を知ることこそある。それは、人々によって、遺跡がどのように行為の場として形成され、利用され、廃棄され、その後いかなる人為的・自然的改変を受けながら今のような姿を為したのか。これを理解することに他ならない。

たとえば、古墳は墳丘を主要な対象として測量するだけでなく、古墳の周囲の微地形も、古墳が作られた空間を理解するための重要な資料として、測量図を作成すべきであろう。凹地や湿地の空間的な広がりから、周溝などの存在が明らかになるかもしれない。

また測量調査と地中物理探査調査、文献や絵図に残る土地の改変履歴の研究結果や地質に関する情報と組み合わせれば、貴重な文化資源を壊すことなく、古墳の築造以前から現在に至るまでの有用な情報を得ることができるだろう。

ここで、十分な時間が確保されている古墳の測量調査を想定してみよう。平板やトータルステーション、GPSを用いて古墳を測量できるとする。最終的な成果の図は、等高線の入った図をつくるのか、等高線の間隔はどれくらいかなど、この点にも、古墳のかたちをどのように捉えるか、その視点が現れているように思う。

あるいは中世寺院の測量は、建築物の存在を窺わせる場所周辺の地形だけでなく、寺院内の区画を示す石積みや土塁、そして水路や谷地形など、自然地

形の人為的改変による水平・垂直的な区画を捉えようとする。そして測量調査から、寺院空間の形成の過程を明らかにすることを試みる。また、こうした人工物の広がる範囲だけでなく、その空間がいかなる場所にあるか、たとえば特定の丘陵に、連なるかのように立地する複数の寺院の検討には、平野部からどのように認識されていたかなど、より大きな空間スケールで遺跡を理解するための視点が必要である。

「なぜ遺跡がそこに在るのか。なぜそのように在るのか」は、考古学を軸として、色々の視点とスケールで対象を捉えなければならない。そのために使うことができる有効なもの、どんなものであれ、意欲的に取り入れる必要があるだろう。ただし、“使う”には、限界や課題を理解しておくことが肝要である。

#### 4. モンゴル契丹城郭の測量調査

本発表では、歴史空間を遺跡だけでなく遺跡を含む歴史的・自然的環境を含む空間という意味で用いる。遺跡を理解するには、その背景となる歴史空間を理解する試みが必要である。そして歴史空間への考古学的なアプローチは、先行研究に学ぶことはもちろんのこと、地域における遺跡の詳細な分布調査や計画的な地形の測量調査から始まると考えているからだ。

一定地域の中で「なに」が「どこ」に「どのように」に在るかを歴史的に位置づけ、一定の見解を得ることで、発掘調査を実施する遺跡がより豊かに明らかになる。

遺跡の測量調査では、色々な道具がある。平板・トランシット・トータルステーション・GPS などである。どのような機器を使うのであれ、遺跡の考古学的な特徴を捉えた図を作成できるように、測る点を決める。例えば遺構の上端と下端であり、傾斜の変換点である。

また、GPS やトータルステーションを用いた地形測量は、平板による測量と比較すると高精度かつ確度の高い位置情報をデジタルな数値として取得することができる。しかし、地形を捉えて効果的に測量しなければ、まるで対象の特徴を捉えておらず、考古学的には意味を為さない図になる。平板測量と異なるのは測る道具であり、等高線の引き方など図化の方法である。測量に用いる道具は異なっても、遺跡の形状を捉えるために必要な測点の選択についての考え方に大きな違いはない。

発表者の場合、遺跡の地形測量調査を実施する際は、高精度のGPS とトータルステーションを用

いることが多い。GPS は頭上に樹木等が無く開けている遺跡での広い面積の測量に向いている。

例えばモンゴル国トーラ川流域契丹城郭であるチントルゴイ城址（南北約 1250m、東西約 650m）やオランヘレム城址（南北 540m、東西 480m）の調査は、短期間かつ少人数であったので、機械の性能としては、水平誤差 5mm、垂直誤差 10mm のGPS による RTK-GPS 測量が非常に有効であった。

チントルゴイ城址とオランヘレム城址は、モンゴルの首都ウランバートルからは西へ約 200 km の位置にある。遼代から元代にかけての遺跡では、最も保存状況・調査条件が良好で、北方シルクロードの様相を典型的に示す可能性のある遺跡である。

この調査は、当初から複数の学問領域を横断する情報を総合的に扱い、遼代東西ネットワークの検討や、モンゴル国における歴史・文化資源のマ



図2 GISを利用した調査情報の統合システム

ネージメントへの貢献を目標として開始された。そこで、調査研究に関わる様々な情報を時空間情報を基軸に統合する技術基盤としてGISを導入した（図2）。

そしてまず、現地調査に先立ち、SRTM データとGISを利用して調査遺跡周辺のDEMを作成した。特に、作成した図と衛星画像から、オランヘレム城址は、旧河道や湿地帯に接する一段高い場所に立地すると読み取り、水の流れを利用したモノや人

の移動の可能性を考えた。そこで、現地調査ではこの仮説の妥当性も検討課題とした。

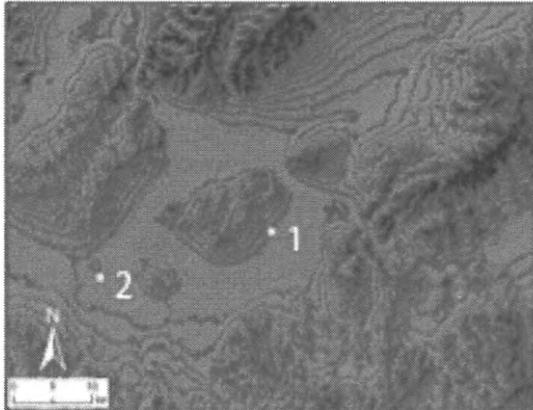


図 3 契丹城郭の分布と周辺地形

(1. オランヘレム城址 2. チントルゴイ城址)

オランヘレム城址の本格的な調査は、2006年夏から実施している。2006年度の野外調査は7日間実施し、目的をオランヘレム城址の地形の把握においた。そこで、精密な地形測量を実施して測量図の作成を開始した。また並行して、遺跡内において塔跡など場所の性格を窺い知るために、遺物の分布調査を実施した(図4)。

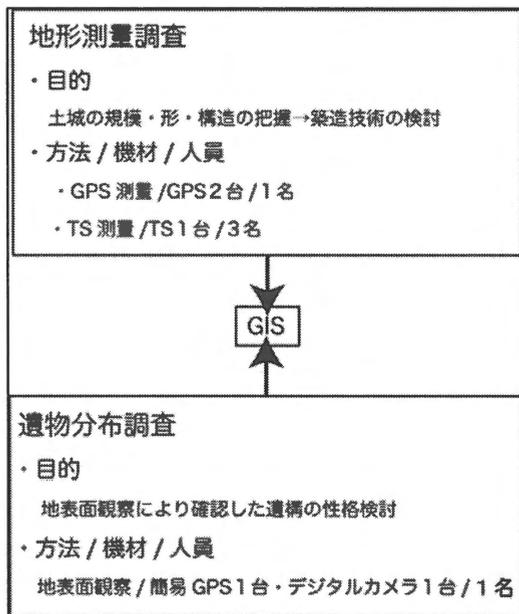


図4 調査の体制

その結果、遺跡の位置・規模・形、遺跡内の遺物の散在状況などが明らかになった。

地形測量調査は、トータルステーション(以下TSと略す)とGPSを用いた。

TSは、測点のデータをX・Y・Zの3次元データとして機械内のメモリに記録し、市販のケーブルでPCと接続、測量データをcsvなどのファイル形式でダウンロードできる機種を用いた。

TSによる測量では、はじめに基準杭を設置した。基準杭は、土城を囲む土塁のうち、南北の土塁それぞれの中央付近に、およそ同経度になるよう設置した。この時の経度の測定には、高い精度は必要無いためハンディタイプの簡易GPS(誤差5m程度)を用いた。また、2点設置した基準点のうち、南側のものを測量原点0(X=0, Y=0, Z=0)とし、この基準点2つからローカル(局地的)な座標を設定した。グローバルな座標への変換は、GPSで測った基準点座標を利用することとした。

このような準備作業を行った後、土塁や堀の上端・下端など土城の形態を端的に示す地点に重点を置いて測量を実施した。

いっぽうGPSによる測量では、GPS2台と簡易無線を利用してRTK-GPS測量を実施した。この方法は、GPS2台のうち、1台は固定局として、もう1台は移動局として利用し、搬送波位相測定により移動局の高精度な位置情報(精度約2cm)を得るものである。なお、固定局として利用するGPSは、原点0の上に設置した。

ただし、固定局の位置座標、すなわち原点の座標はGPS1台による単独測位で得るため、誤差が大きい。そこで、先の基準点2点について、STATIC観測を約6時間実施し、より正確な位置情報を取得することとした。観測時間を6時間とした理由は、オランヘレム城址に最も近いIGS

(International GNSS Service)のネットワーク2局がウランバートルまで約190km、イルクーツクまで480kmの距離にあるためである。

このSTATIC観測で得たデータと、IGSを利用した後処理により、基準点の補正をおこなう。なお、本調査地ではインターネットに接続可能な環境ではなかったため、帰国後基準点を補正した。したがって、今回の調査で取得した地形データはすべて、この補正した基準点を利用し、補正する処理が必要である。

日本国内での遺跡のRTK-GPS測量調査の場合、固定局の位置情報取得には、全国に配備された電子基準点のデータを使っている。電子基準点のデータは、Internetを利用して、国土地理院Websiteより無料でダウンロード可能である。

RTK-GPSによる地形測量では、歩行移動しながら2秒に1回の間隔で自動的に記録した。専用の三脚を使わず、リュックにアンテナを接続し移動性を重視した。三脚を利用すれば安定性が増し精度も向上するが、数時間凸凹の地面を歩きながら高さ2m以上になるアンテナを持ち続けるのは危険である。また、目的は遺跡の測量であるから、ポールを使って1点1点地点を測るほどの正確さはいらないと判断した。



写真1 基準点の STATIC 測量

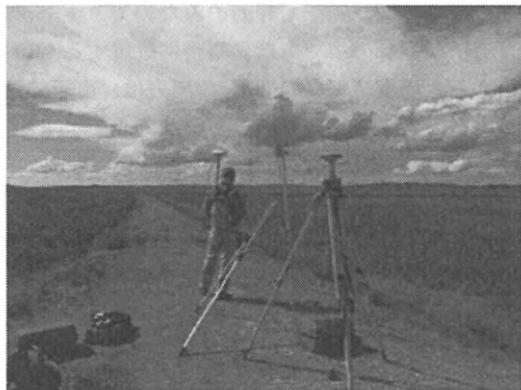


写真2 遺跡の RTK-GPS 地形測量

GPSによる遺跡の地形測量は、TSによる測量同様に、城壁・堀などの上端・下端をなぞり歩いた後、地形の凸凹の特徴を捉えるように歩き、さら

に斜面を等高線に沿うよう歩いた。また測量中に遺構らしき高まりなどを確認した際にはその形状を取得するであろう測量データから復元できるよう綿密に歩行した。GPS測量においても、平板測量やTSによる測量同様、考古学的に重要性が高いと判断する地点の測量を優先した。

こうした測量の結果、オランヘルム城址について、次のことを明らかにすることができた。

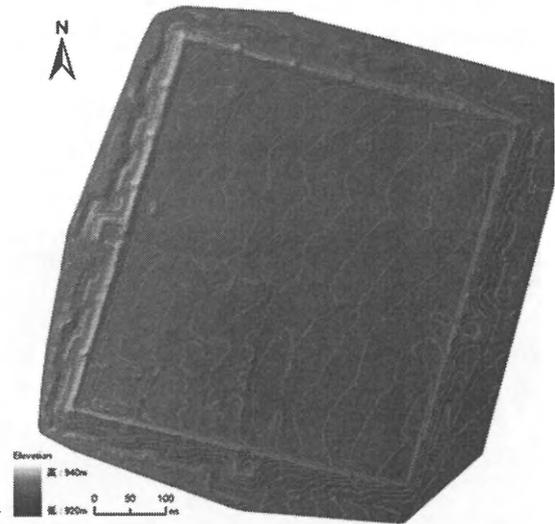


図5 オランヘルム城址地形測量図

1. 遺跡の位置は  $N47^{\circ} 55' 49'' E104^{\circ} 32' 28''$
2. 4辺を2重の土塁と堀で囲まれた略方形の土城
  - 2a 城内から土塁（城壁）>堀>土塁という構造
  - 2b 城内の面積は約26 ha、遺跡の外周は約2.6 km
  - 2c 北壁480m・東壁536m・南壁483m・西壁548m
3. 城壁には馬面を築く
  - 3a 馬面は西・北・東壁に各5箇所、南壁は4箇所
  - 3b 馬面の外側下に平場空間を対置する
4. 城壁の南・西・東側中央に城門を各1門築く
  - 4a いずれの城門も甕城を有する
  - 4b 東西の城門の開口方向は南向き、南は東向き
5. 東西・南北には幅50mの道が城内を区画
6. 城内に基壇跡や塔跡と考えられる遺構の存在

以上の測量成果から、次のようなウランヘルム遺跡の特徴を挙げる事ができる。第1に計画的な馬面の配置と甕城の発達、第2に堀・土塁が複雑に屈曲し防御性の高い構造を成す、第3に馬面に対応して平場が設けられ戦闘時の効率的な殺傷空間を形成する、などを指摘できる。

オランヘルム城址が位置するトーラ川流域には、この地域の中心的な役割を担った鎮州城に比定されるチントルゴイ遺跡が存在する(白石, 2001)。このチントルゴイ遺跡と比較して、ウランヘルム遺跡は非常に防御性が高いといえる。

また、測量調査と並行して実施した城内の地表面観察から、基壇跡や塔跡と考えられる遺構と契丹の瓦や陶器の散在を確認した。一般的な遺物分布調査では遺物の位置を記録し採集・保管するが、短期間の海外調査では遺物管理のための場所と時間、人の確保は難しい。そこでハンディタイプの GPS 簡易 GPS である GARMIN 社の GPSmap60CS とデジタルカメラを利用して遺物の位置情報と散布状況を記録するに止めた。



写真3 遺物散布状況

ハンディタイプの簡易 GPS で取得した遺物の位置情報と撮影した写真は、GIS に格納する。この作業によって、たとえば瓦の分布状況と城内の地形測量から、塔跡などの遺構の性格に迫ることができる。

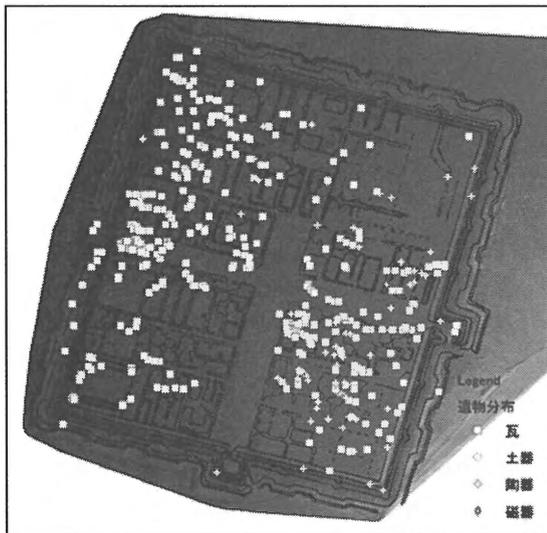


図6 オランヘルム城址内の遺物分布図

この調査では、主に GPS と GIS を遺跡の調査に利用することにより、短期間に多くの重要な情報

と知見を得ることができた。今後は、城内の遺構配置などを綿密な測量調査によって把握する。これまでに取得した調査データは、すべて GIS を基盤に統合している。したがって、これから得る調査データも、それら先行調査と統合して扱うことが容易である。

また、前述のような高精度の GPS を用いた遺跡の測量調査事例は未だ少ないのが現状である。また、樹木の茂る日本の古墳のような遺跡での調査では GPS 測量は効力を発揮しないことがしばしばある。その場合は、平板よりも器械点と測点の高低差と距離による誤差が少ないトータルステーションを用いている。

トータルステーションを用いる測量の場合、測量用の基準杭が必要である。測量用の基準杭は多くの場合、先述の RTK-GPS 測量か Static 測量を用いて設置している。上記のような調査は、平板測量でも時間と人員を費やすことで可能な調査ではある。しかし、測量調査の実施のみだけでなく、微地形分析や公表などを円滑に達成するために、トータルステーションや GPS を選択している。

## 5. 測量データの取り扱い

トータルステーションや GPS を用いて取得した測量データは、PC と GIS を用いて図化する。

調査で使用しているトータルステーションは、座標を計算できるプログラムが組み込まれており、測量データを記録し、このデータを外部に出力できるものである。自動追尾やノンプリズムの機能などはなく、液晶画面も片面のみなので、トータルステーションの中でも低価格帯に位置するものといえる。測量データの PC への出力は、市販のシリアルケーブルを用いている。シリアルポートが無い PC を用いるには、別途市販の USB 変換ケーブルを用意する。測量データの PC への転送には専用のアプリケーションは必ずしも必要なく、Windows のアプリケーションで行う。トータルステーション以外は、学生の私でも用意ができるような道具で PC に測量データを取り込むことができるのである。

続いて GIS ソフトによる図化である。GIS ソフトというと、高価なイメージがあるが、それは一部のものにすぎない。考古学における代表的な GIS ソフトである IDRISI は学生であれば比較的入手しやすい。また無料の GIS ソフトには、Quantum GIS+GRASS などがある。

通常、トータルステーションから出力する測量データには、X・Y・Z（標高あるいは楕円体高）を含むCSV形式であるので、基本的にはどんなGISでも利用できる。

測量調査の期間中は、毎晩宿舎でその日に自分が取得したデータの整理・解析・表示までを1人でやり、翌日の予定を立てる。しかも電力等が限られた環境で調査を行うことがしばしばなので、少ない時間と労力で、毎日の成果を確認し報告しなければならない。そのためにデジタル機器を用いた測量やGISは有効であると考えている。

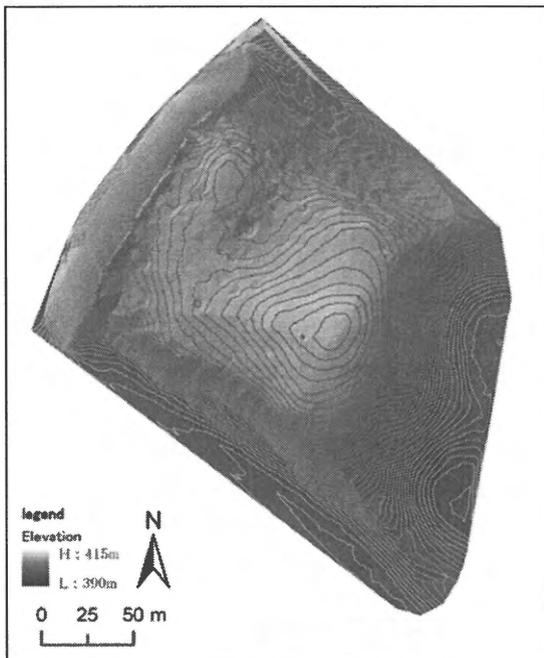


図7 ウズベキスタングダブシア遺跡の地形測量図

## 6. 遺跡発掘調査データの記録と活用

発掘調査では遺物の地点や遺構の形状そして土層など、3次元の情報や土の色情報を取得する。しかし情報を取得するが、これまであまり管理・活用する動きは活発でなかった。そこで、発掘調査で得る3次元情報を管理・活用する試みを始めている。このようなプロジェクトは、すでに海外ではいくつか実施されており、阿児雄之氏からご教示いただいたMarkos Katsianisほか(Katsianis, M. et al. 2008)の研究が参考になる。彼らの研究では、GISを用いて3次元の情報は3次元のまま、そして遺跡の色は写真測量の成果を用いることで表現し、遺跡の形成過程については、土層断面図を立体的な図として組み込むことにより、遺跡の

発掘調査で得た3次元情報を的確に整理し統合している。

日本の遺跡発掘調査でも、基本的には同様の情報は取得しているから、彼らのような試みは少し手を伸ばせば可能である。さらに日本の場合、世界に比類無いほどの密度で発掘調査が実施されているため、このような試みが普及すれば、各調査区を点としてではなく、連続面として捉えることが可能になりうる。その結果、遺跡を立体的に捉えることができ、大変興味深い試みだと注目している。

ところでGISは新たな方法で取得したデータしか利用することができず、既存の発掘調査データは全く使えないということはない。例えば図8・図9のように、既にまとめられ報告された資料やかつて作成した測量図をGISに取り込み近年の調査研究に用いている(図8・図9)。

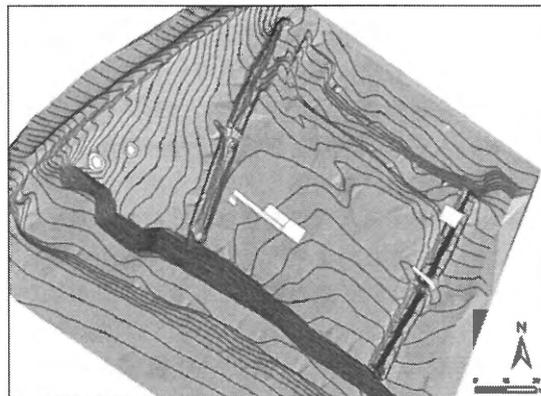


図8 サハリン白土城の測量図



図9 サハリン白土城の鳥瞰図

## 7. 遺跡形成以前の環境

遺跡が形成される土地は、人々がその土地に生活の痕跡を遺す以前から存在する。どのような土地に人は住み、周囲の環境を改変したのか。まず、

どのような土地であったのかを明らかにするには色々な資料がある。たとえば地質情報である。

遺跡や考古学に関連する研究では、石黒氏や小林氏ほか、そして津村氏(石黒2006, 小林ほか2003, TSUMURA2001)らの研究があるものの、地質図やボーリングデータを活発に利用しているとは言い難い状況にある。しかし現在、産業技術総合研究所では地質情報のデータベース化を進めている。GISを用いて地質図のデータベースと膨大な地質ボーリングデータベースを統合し、地形や土質の高精度の把握を試みである。考古学の調査で得る土層断面図の資料と比較すると、空間スケールは大きく、資料の密度は疎ではあるが、一定の効果を得ている。考古学の発掘調査で得る資料には、これらと同じような性質をもつものがある。土層断面図である。全国で年間数万件にも上る発掘調査は実施され、この数の数倍の土層断面図は作成され、調査区毎の土地の履歴を示すものとなる。しかし調査や研究での体系的な利用は少ない。貴重な文化資源をより有効に活用できないだろうか。産業技術総合研究所が用いたもの方法を参考に考古学にも導入すれば、時空間情報を用いた調査成果の蓄積ができる。さらにミクロな視点では、同じ遺跡内の調査で得た成果を新たな調査の指標となることができる。また、マクロな視点からは、一定地域の文化的景観の探究にも繋がるだろう。

## 8. 文化財ローカルナレッジの集積と発信

さて、ここまでは遺跡を調査研究する者の視点からの文化的景観把握を中心に、事例を挙げつつ論を進めてきた。

しかし文化財である遺跡は、研究者ではない一般の人々の貴重な財産でもある。いや、本来は後者にこそ主がある。

より多くの一般の人々が文化財に興味を持つにはどうしたらよいだろうか。その方策は色々な方々が思索し、また実行している。だがすでに十分満たされているということは無い状況である。そこで、文化財に関わる調査や研究の「成果」を享受するのではなく、その場所にある、生のままの文化財に、自分の手で“ふれる”ような基盤の構築を試行したい。

具体的には、コンパクトなデジタルカメラを用いて各々が興味を持った文化財の写真を撮影し、これをWebGISを用いて統合・発信するシステムである。実際の試行には、NikonのコンパクトデジタルカメラCOOLPIX P6000を用いている。このカメ

ラの特徴は、撮影場所の位置情報(緯度・経度)を画像データにタグとして付加するGeotag対応のGPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)を備える点にある。また、高画質・広角レンズの性能を有しているため、無料のアプリケーションを使用して、撮影地点からのパノラマ画像を作成することもできる。

誰でも扱うことのできるカメラを用いて文化財や、その文化財がある場所を撮影し、WebGISを用いたシステムに集積することによって、撮影者が文化財にふれながら、なおかつ他者も利用できるように情報を創出することができる。また、複数の人が同じ対象を写した写真や情報に関連づけてゆけば、同一の文化財を多面的に捉える可能性が広がり、それぞれの人が認識する文化財、そして文化的景観に接近できる可能性がある。そして何より、一般の人たちによる能動的参加型の文化財の保存と活用の可能性が創出できると期待したい。

## 引用・参考文献

- 白杵勲・千田嘉博・前川要 2006 「モンゴル トーラ河流域の契丹城郭」『考古学研究』第53巻第3号, 考古学研究会, pp117-120。
- 宇野隆夫編 2006 『実践 考古学GIS』, NTT出版。
- 宇野隆夫編 2008 『文化資源の高度活用 GISを基盤とする考古・歴史民俗・環境情報の高度連携研究—ユーアジア集落・都市の営みと環境の関わりを中心として—』(中間成果報告書), 大学共同利用法人・人間文化研究機構。
- 青山高義・小川肇・梅本亨編 2000 『日本の気候景観—風と樹 風と集落』, 古今書院。
- 金田明大・津村宏臣・新納泉2001 『考古学のためのGIS入門』, 古今書院。
- 白石典之2002 『モンゴル帝国史の考古学的研究』, 同成社。
- 村上征勝(編) 2006 『文化情報学ライブラリ 文化情報学入門』, 勉誠出版。
- Markos Katsianis, et al. 2008 "A 3D digital workflow for archaeological intra-site research using GIS", Journal of Archaeological Science 35, pp.655-667.
- 山口欧志・井出靖夫 2008 「サハリン白土城」『中世の北東アジアとアイヌ - 奴児干永寧寺碑文とアイヌの北方世界 - 』, 高志書院, pp253-272。

先史人類学への数理モデルによるアプローチ  
The possibility of theoretical and computational model utilization  
for prehistoric anthropology

鎌倉 快之

Yoshiyuki Kamakura

大阪工業大学 工学部, 大阪市旭区大宮 5 丁目 16-1

Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology, 5-16-1 Omiya, Asahi-ku, Osaka

あらまし: 人類の文化や社会は複雑系のひとつとされており, 予測不可能でダイナミックな振る舞いをとる。これら文化や社会の時間的・空間的な変化を, 遺物の形状の再現や復元, 遺跡や周辺景観の復元といった静的な情報の積み重ねから読み取ることは困難である。生物現象も複雑系のひとつとされており, 静的な情報の積み重ねによる現象の解明の他に, 現象全体をひとつの系と捉え, その系をあらわす理論モデル(幾つかの基礎的な理論とその相互作用を定義したモデル)を用いたシミュレートから現象を解明する試みがある。本稿では, 文化や社会をひとつの系と捉え, 実際の遺跡情報と, 人口の増加と移動に関する数理モデルを相互作用させるモデルを構築し, シミュレートを行った結果について述べる。この結果から, 文化や社会を復元し, その動態を捉えることの可能性について検討したいと考えている。

**Summary:** Human culture and society regarded as one of the complex systems show chaotic and. It's difficult to see spatiotemporal in its behavior from information obtained from the static data. The life phenomena are also regarded as one of the complex systems. There is an attempt to see the phenomena as one system elucidate phenomena from the simulation using theoretical and computational models which is constructed using some primary theories and their interaction. In this study, we simulated the interaction between actual information from the remains and theoretical and computational models of growth and migration of population. From the results, we want to discuss the possibility to consider dynamic behavior in Human culture and society.

**キーワード:** 理論的モデル, コンピュータシミュレーション, エージェントモデル, 相互作用, 社会環境復元

**Keywords:** theoretical model, computer simulation, agent model, interaction, restoration of social environment

## 1. はじめに

人類の文化や社会は, 特定の理論・法則で一意に決定されるのではなく, 文化や社会を形成するヒトや環境といった因子の相互作用と, 時空間的な蓄積・連鎖作用によって予測不可能でダイナミックな振る舞いをとる(複雑系)という考え方が一般的になりつつある。これら文化や社会の時間的・空間的な変化は, 遺物の形状の再現や復元, 遺跡や周辺景観の復元といった静的な視覚情報の積み重ねから読み取ることは困難である。

生物科学分野では, 複雑性や多様性を持つ生物現象を, 現象を形成する個々の因子を詳細に調べ上げ, 枚挙しようとする手法のほか, 現象全体をひとつの系として大局的に捉えてモデル化し, モデルの振る舞いから現象の意味を解釈し, 理解しようとする試みが存する。

本稿では, 本研究では, 実際の遺跡情報を GIS に格納して“人類史の舞台”を復元し, これに基づいて社会の相互作用と遺跡や文化の動態がどのような実体であったかを, 数理モデルの構築と利用を通して検

討した結果について報告する。数理モデルの構築に際しては、生物の形態や紋様にみられる多様なパターンの生成過程のモデルを用いた解明の試みにも利用されている反応拡散モデルを基とし、生態学的な簡単な特性を持ったヒト(エージェント)と、実際の GIS データを基に構築した疑似的な環境(静的な情報)との相互作用モデル(エージェントモデル)を構築した。このモデルを利用したシミュレート結果から、文化や社会を復元し、その動態を捉えることの可能性について検討したいと考えている。

## 2. 生物現象のモデル化と Turing パターン

### 2.1 生物現象のモデル化

生物の最も基本的性質としての固有性と多様性がみられる。その固有性と多様性を解明するための試みとして、対象となる個々の生物現象を単純な共通のルールによって捉え、その細部にはとらわれず、現象全体をひとつの系と扱うことで、その意味を解釈し、理解するという手法が考えられる。この手法は、多様な現象から、ある特定の条件(視点)の下での骨組みだけを取り出すものであり、多様な現象のある特定の条件下で単純化して捉えることは、現象をモデルとして把握し、表現することと同義的である。そして、そのモデルから読み取ることのできる、多様性の中に存在する規則性や法則が示すものは、多様性の中に潜在する普遍的なものであると考えられる。多様性の中にみられる共通した普遍的な情報は、すなわち、その生物現象の持つ多様性を生み出す基礎となるものであり、その現象の持つ意味を読み取り、理解する要因となるものである。

### 2.1 Thompson の理論的モデル化手法

モデルの構築と利用によって生物現象の解明の糸口としようという試みは、D'Arcy Thompson によって広く一般化された[1]。Thompson は、生物の形態について注目し、それを物理化学的要因と生物の機能的要

因から理論的に捉え、形態の多様性と複雑性に共通する普遍的な性質を読み取ることを試みた。

生物の持つ形態は、外形と生物の体を構成する各要素の形や位置、各要素間の相互関係の総和として構造的に形成されている。形態は、それ自身が持つ役割のひとつである機能と相互に関係しており、その形態と機能の相互作用によって生物的性質が既定されていると考えられる[2]。Thompson の理論的モデル化手法は、生物の形態を、既知の物理化学的な法則を組み合わせた簡単なルール(条件)によって捉えることで、その機能を検討し、性質の予測を試みるものである。この手法は、生物の形態を解析するだけでなく、発生仕組みの解明や系統進化の解析など、様々な現象の解明にも有効であると考えられ、その後の様々な研究に応用されてきた。

### 2.2 Turing モデルとパターン形成

生命現象の中でも、発生や成長に伴う形態形成では、遺伝情報の時間的発現に対応した細胞間コミュニケーションによる自己組織化(自律的な形成)によって種々のパターンが形成されており、そこには散逸的な構造と繰り返し構造が認められる。一方、生命現象には、心拍や呼吸、生物時計に代表される種々の規則的な時間的リズム(パターン)の存在も知られている。これら生命現象の中に存在するパターンの形成は、前者は空間的パターン形成、後者は時間的パターン形成と呼ばれている。この繰り返しパターンの形成には空間的、時間的な振動(波)の仕組みが必要なことが知られている[3]。

Aran Turing は、この生命現象にみられる空間的パターンは、生体内での化学反応と反応によって生成された物質の拡散によって説明しようと考え、空間的パターンに類似するパターンを形成する理論的モデルの構築と利用を通しての解明を試みた[4]。Turing は形態形成についての理論的考察を発表したが、あまり関心を示されることはなかった。その後、Turing の理論は計算機科学の発展と共に再考されるようになり、2次

元の非平衡反応として代表的な、時間的に変化し、動的な空間パターンを形成する化学反応にみられる移動する波(BZ波)の発見以来、その先見性が再評価されることとなった。現在、Turingの理論とそのモデルは、複雑性を持った生命現象の中に見られる繰り返し(パターン)構造の解明を試みる数多くの研究に利用されている。その最も代表的なものとして、以降にも述べるKondoらによる熱帯魚の縞模様シミュレートが挙げられる[5]。

Turingは、細胞内に存在するとされるモルフォゲンと呼ばれる化学物質が拡散しながら相互に反応(相互作用)するというモデルを用いて生物の発生、形態形成を表現した。Turingのモデルでは活性化に働く因子であるモルフォゲン(X)と阻害的に働く因子であるモルフォゲン(Y)が仮定されている。このとき、化学反応によるモルフォゲンXの生成と、モルフォゲンYによるXの生成の阻害による相互作用、モルフォゲンのXとYの拡散現象による移動が、因子の空間的な不均一を生じ、因子の非一様な分布を形成し、維持される。Turingは、この因子の濃度の不均一さ(非一様性)によって形成されるパターンが、生物の発生、形態形成にみられるパターン形成の要因であると結論付けた。この現象は拡散不安定化と呼ばれ、現象を数理モデルとして表現したときの因子の濃度変化を示す微分方程式を反応拡散方程式、それによって形成されるパターンをTuringパターンと呼ぶ。

Turingパターンの形成理論は、形体形成や紋様生成などをはじめとする生命現象にみられるパターンの形成機構の解明、また、非一様なパターンがみられる生物現象以外の種々の現象の解明など、様々な研究に広く用いられてきている。Turingのモデルをより一般化してあらわしたMurrayの式を式(1)に示す[6]。この微分方程式はTuringモデルをより明確に表現するものとして用いられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= f(x, y) + D_x \nabla^2 x \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= g(x, y) + D_y \nabla^2 y \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで、 $x, y$ は、モルフォゲンX, Yの濃度を、 $f(x, y)$ ,  $g(x, y)$ はX, Yの生成を、 $D_x, D_y$ はX, Yの拡散係数をあらわす。

Murrayは、Turingモデルにより示された「阻害物質の反応速度が活性化物質のそれより遅く、阻害物質の拡散が活性化物質のそれより速い条件において、定常的な空間パターン(非一様平衡)が現われる」という結果を用いて、モルフォゲンの拡散しうる領域の大きさと形状がパターンの形成に与える影響の違いについて検討した。また、Hans Meinhardtは、Turingモデルにおけるモルフォゲンに対して、活性(activator)と抑制(inhibitor)の2種類の因子を仮定し、これら2つの因子の合成、分解、拡散などを、一般的な生化学的特性を基礎として定義してTuringモデルに適用した、反応拡散モデルを提唱した。なお、活性因子と抑制因子の特性は以下のとおりである。

- ・活性因子は自己触媒的に増殖する
- ・活性因子は抑制因子を作り出す
- ・抑制因子は活性因子の増加を抑える
- ・抑制因子はそれ自身減衰する

反応拡散モデルでは、モデルを構成する方程式のパラメータの微小な差異や、局所的なルールの違いだけで、生成されるパターンがダイナミックに変化する。Meinhardtは、この特性を利用し、反応拡散モデルを巻殻表面にみられる紋様の持つパターン形成に適用することで、巻貝紋様が持つパターンの多様性が、共通した機構によって生成することが可能であることを示した[7]。Fig.1に拡散反応方程式によって形成されたパターン(右)と実際の巻貝紋様パターン(左)の比較結果を示す[8]。

### 3. エージェントモデル・シミュレーション

#### 3.1 エージェントモデル・シミュレーション

エージェントモデル・シミュレーションは、ある特定のルールに従って活動する「エージェント」を定義し、エージェントを人工的な「場」に多数配置した際に起こる相互作用について検討するシミュレート手法である。本稿では、Meinhardtの反応拡散モデルを基に、増加・減少し、移動するエージェントを定義し、統計的手法を用いて復原した古環境(場)に配置するというモデルを構築し、利用した。

本モデルでは、エージェントと、エージェントが存在する「場」の環境利用度をそれぞれ定義し、以下のような特性を与えた。

- ・エージェントは自己触媒的に増加する(人口の増加)
- ・エージェントは「場」の環境利用度を低下させる(環境の悪化)
- ・「場」の環境利用度はエージェントの移動(流入)を阻害する
- ・「場」の環境利用度は能動的に変化しない

#### 3.2 エージェント

##### 3.2.1 エージェントの増加

エージェントは、生物の一般的な個体増加と同様に指数的に増加することとし、ヴェアフルストの人口モデル(マルサスの人口増加モデルに、人口の増加に伴って増加の抑制が生じるという制限を加えたモデル)を基に下記のように定義した。

$$\frac{dN}{dt} = a(1 - \frac{N}{N_{max}})N \quad \dots(2)$$

- $N$  : 現在の人口
- $N_{max}$  : 人口の収束点  
(生死が一定になる点, 定数)
- $a$  : 人口増加の加速度

また、人口の増加に伴い、人口がある閾値(mv\_threshold)を超えた場合には、一定の割合(mv)で周辺地域へ移動すると仮定した。

$$\frac{dN_{mv}}{dt} = mv \times N(N > mv\_threshold) \quad \dots(3)$$

- $N_{mv}$  : 移動する人数
- $N$  : 現在の人口
- $mv$  : 移動係数
- $mv\_threshold$  : 移動閾値

さらに、エージェントは、ある確率で不確定要因により死滅すると仮定した。

#### 3.3 エージェントの活動の場

エージェントの活動する「場」については、DEMを基盤とした古環境属性値[9]を利用することとし、これを説明変数とした重回帰モデルから得られた点数(環境利用度)がエージェントの活動に影響すると仮定した。環境利用度が高い場合にはエージェントは活発に活動し、低い場合には活動が低下する。エージェントが活動する際の最小区画(セル)を50mメッシュで定義し、説明変数と遺跡(集落)の関係を相関係数として次式で求め、変数の有意性をt検定で評価するステップワイズ重回帰モデルとした。

$$r = \frac{\sum_x \sum_y \{(A(x,y) - \overline{A(x,y)}) (B(x,y) - \overline{B(x,y)})\}}{\sqrt{\sum_x \sum_y (A(x,y) - \overline{A(x,y)})^2} \times \sqrt{\sum_x \sum_y (B(x,y) - \overline{B(x,y)})^2}} \quad \dots(4)$$

エージェントの増加は各セルの中で式(2)に従って増加し、式(3)に従って隣接するセルへと移動することとした。その際、

- ・8近傍の隣接セルのうち、上記点数が最も高いセルへと移動する
- ・各セルの環境利用度は人口の増加に伴って低下する(エージェントの活動が低下する)

という条件を設定した。

#### 3.3 シミュレートのプロセス

本モデルによるシミュレートは、次の①～③を1回のStepとし、このStepを繰り返すことで離散的な時系列でのエージェントの振る舞いの推移を得るというプロセスを経た。プロセスの概略をFig.2に示す。

- ① 「場」に展開されたすべてのセルにおいて、各セルの人口を更新する
- ② 時間tにおける人口から各セルの環境利用度を更新する
- ③ 人口増加分、

### 4. シミュレート結果

本モデルを利用して、ヒト・環境の相互作用のある貝塚立地と分布を基礎データに、それらが時間どのような相互作用を伴って次の時間の位相となるかを、モデ

ル(パラメータ)の側面から検討することとした。貝塚の立地と分布は、縄文時代中期から後期にかけての千葉県(下総台地)の貝塚遺跡を対象とした。GISに格納した基礎情報は、樋泉らによって構築された遺跡空間データベースを利用した。シミュレーション結果の一例をFig.3に示す。

## 5. 考察

シミュレートの初期状態が同じであっても、本モデルで定義したパラメータ(人口増加の加速度、移動係数、移動閾値、死滅確率、人口が各セルの環境利用度を与える影響)の微小な変化で、エージェントの粗密の状態がダイナミックに変化した。エージェントが高密度となる地域は環境が良く、エージェントが集落を形成したと考えられ、環境が悪化すればより良い環境を求めて移動する。パラメータを変化させつつ、集落の形成と移動を繰り返す中で、実際の集落立地に類似した状態も得られたことから、人口増加と環境による移動(移住)の阻害に限定された仮想的な環境下での、人口の増加と移動、集落の形成の過程の解明に向けたエージェントモデルの利用の可能性が示唆された。ただし、本モデルの有効性や、本結果と離散時系列変化、各種パラメータの関係と、実際の集落立地、遺跡の規模や分布のデータとの比較検証などの詳細については今後の検討課題である。

なお、これら数理モデルの利用においては、パラメータの数値そのものに基本的には意味がない。パラメータそのものの意味や各パラメータ相互の関係、モデルの「振る舞い」と導き出された結果を實現象と比較し、一致する部分や異なる部分について考察を行う必要がある。

## 6. 展望

今回の結果は単純な反応モデル(人口増加)に、拡散モデル(環境による阻害)を設定しただけの単純なエージェントモデルであり、ヒト-ヒト、ヒト-社会の相互作用そのものの様態に関するパラメータの導入などの必要性が考えられる。今後は、より階層的な変数の設定、評価、検証により、古環境復原と人類社会・文化復原との関連と定量化を試みていく。

## 参考文献

- [1] Thompson, D'Arcy: On Growth and Form, Cambridge University Press (1917)
- [2] 養老孟司: 形を読む 生物の形態をめぐって, 倍風館 (1986)
- [3] 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋 (共著): セルオートマトン法 — 複雑系の自己組織化と超並列処理 —, 森北出版株式会社 (1998)
- [4] Turing, A.M.: The chemical basis of morphogenesis, Phil. Trans. Roy. Soc. (1952)
- [5] 近藤滋: 振動現象による空間的な周期性(繰り返し構造)の形成, 細胞工学, Vol.22, No.12, p1331-1335 (2003)
- [6] Murray, J.D., How the leopard gets its spots, Sci. Am., 258, p80-87 (1988)
- [7] Meinhardt, Hans, The Algorithmic Beauty Of Sea Shells Enlarged Edition, Springer (1995)
- [8] 鎌倉快之: 生物の形態と紋様のモデル化に関する研究 (2005)
- [9] 津村宏臣: 遺跡立地の定量的解析と遺跡存在予測モデル, 実践 考古学 GIS, NTT 出版 (2006)
- [10] 樋泉岳二・津村宏臣・西野雅人: 東京湾東岸と印旛沼周辺の縄文後期貝塚群の動物資源利用と遺跡立地の諸相, 日本第四紀学会講演要旨集, 32 (2002)

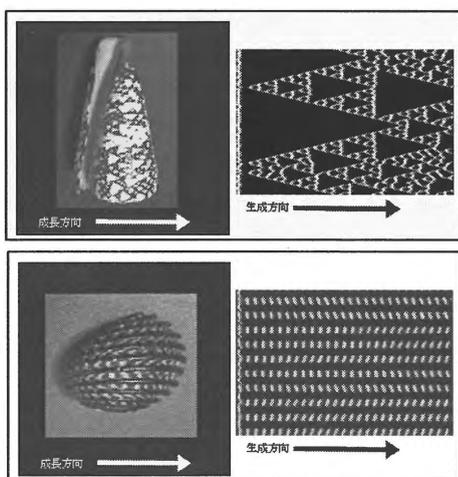


Fig.1 反応拡散モデルで形成されたパターン(右)と  
 実際の巻貝の貝殻に見られる類似紋様(左)

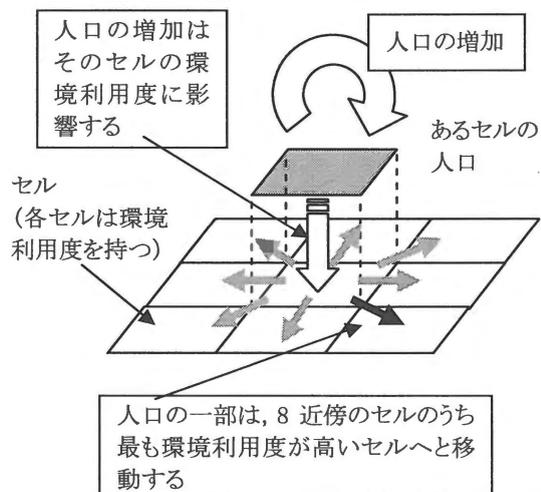


Fig.2 エージェントモデルの相互作用プロセスの概略

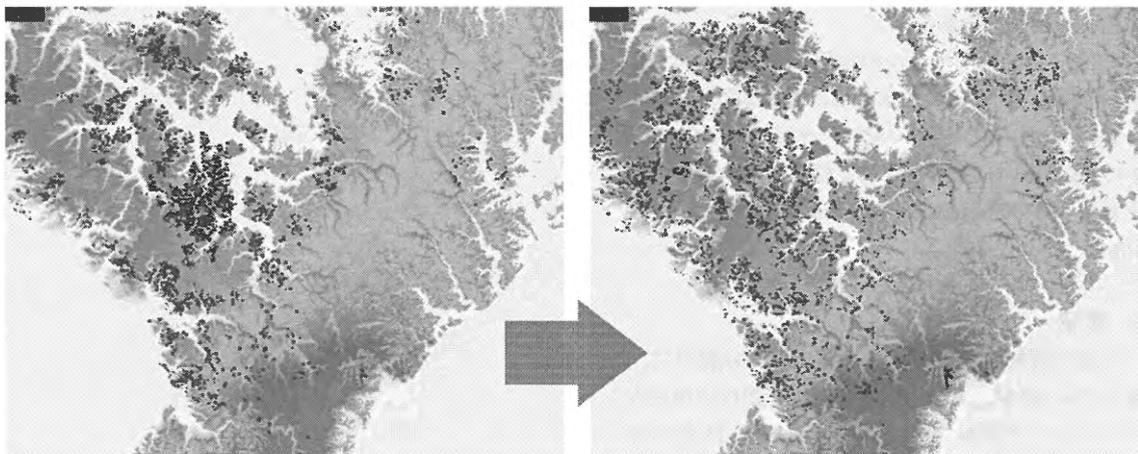


Fig.3 シミュレーションの結果  
 (エージェントの内陸部への拡散)

## 遺跡探査法による削平を受けた古墳の形状復元

### Shape reconstruction of the leveled mound using archaeological prospection

岸田 徹, 酒井英男

Toru Kishida, Hideo Sakai

天理大学 文学部, 天理市柚之内町 1050

Tenri University, 1050 somanouchi-cho, Tenri, Nara

富山大学大学院 理工学研究部, 富山市五福 3190 番地

Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama, Toyama

あらまし: GPR 探査と高密度電気探査を用いて古墳の研究を行った。削平されて現状では確認が難しい古墳の復元を目的の一つとしており、徳島県の円墳では、両探査において、地中 1m までの古墳の周濠を明確に捉えることができた。成果は、同円墳が徳島県内 2 番目の規模であり、2 重の周濠を持つ可能性あることを明らかにした。

また、探査では、古墳築造当時の地形（旧地表面）が南北に緩やかに傾斜していたことや、尼塚古墳が完全には削平されておらず、盛土が多少残っている可能性があることも示していた。GPR探査と電気探査の2種類の探査法を併用する調査により、周濠の異常応答の要因を多面的に検討できた。

**Summary :** Ground penetrating radar (GPR) and electric resistivity surveys were conducted on *kofun* (mounded tombs) in Tokushima Prefecture. One purpose was to reconstruct tombs presently undetectable from the surface. Applying both survey methods to an area where a destroyed *kofun* was inferred to exist, we successfully detected the circular moat surrounding the mound below the surface. The reconstructed tomb (Amazuka *kofun*) was determined to be the second largest circular mound in Tokushima Prefecture.

The GPR survey also indicated that the original ground level of the *kofun* sloped slightly to the south, which may be related to the topography of the area at the time. Based on the electric survey, we discovered that the presently undetectable Amazuka *kofun* was not completely destroyed, and that the lower part of the mound remains beneath the modern surface.

We were also able to clarify the reason for the anomalous response, in addition to the topography around the moat, through the parallel use of GPR and electric surveys.

キーワード: 地中レーダ探査, 電気探査, 消失古墳, 周濠

Keywords : ground penetrating radar (GPR), electric resistivity survey, leveled mound, surrounded moat

## 1. はじめに

遺跡探査による古墳の研究は、従来は、現存する古墳の主体部の推定や周濠の有無等を目的として行われていたことが多い(西村 1993; 酒井他 1997, 1998; Kamei et al. 2000 など)。

しかし、古墳には、度重なる開発の過程で削平されたものも多い。完全に削平された古墳は判別できず、復元は困難とされる場合も少なくないので、探査は有用となる。古墳の分布やその形状は、その地域の当時の勢力や、社会情勢を知る上での貴重な情報源である。従来、地表に痕跡が認められない古墳の探査として、Edwards et al. (2000) や天理大学遺跡探査チーム (2001) では、地中レーダ探査を用いて、九州の地下式横穴墓において、空洞を探査して墓室を検出している。

本稿では、地中レーダ探査と高密度電気探査を用いて、削平された古墳の形状を調査した研究を報告する。徳島県の2つの古墳において、後世の削平により縮小・消失した古墳と周濠の探査と解析による復元を目的とし、特に周濠に着目し、地中レーダ探査と高密度電気探査による異常の出現を比較し、検討した。本地域で行った地中レーダ探査の結果については、岸田・酒井 (2006) においても考察を行っている。

## 2. 研究概要

### 2-1. 調査地の概要

徳島県鳴門市(図1)のカニ塚古墳と尼塚古墳の二つの古墳を対象に研究を実施した。

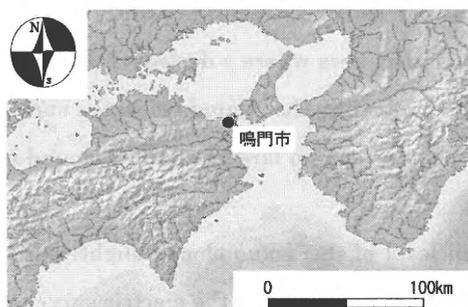


図1 調査地の位置

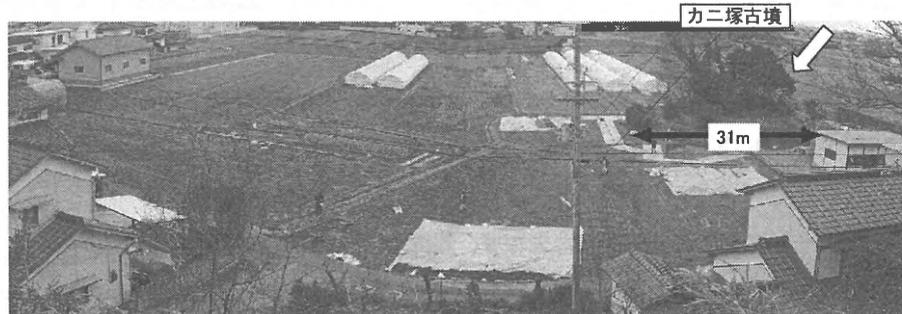


図2 調査地遠景写真(北から)

両古墳は、徳島平野北端の阿讃山脈南縁に位置し、「鳴門・板野古墳群」に含まれる。カニ塚古墳は、6世紀後半に築造されたと考えられる円墳である。尼塚古墳は、カニ塚古墳に隣接して存在していたが、近傍の津西小学校の改築時(1926年頃)、校地の盛土を取るために同古墳は掘削されたい。そのため、現時点では、地表で古墳を確認することは難しい状況であった(図2)。また、詳細な記録も残っておらず、古墳の形状も規模も不明とされていた(徳島県埋蔵文化財センター 2001)。

図3に、地中レーダ探査と高密度電気探査を行った範囲と測線の位置を示す。



図3 カニ塚古墳の位置、探査範囲、代表的な測線

### 2-2. 地中レーダ探査

地中レーダ探査(GPR: ground penetrating radar)では、送信アンテナより地中にレーダ波を送りこみ、比誘電率の異なる境界面(土層の変わり目や石・空洞など)での反射波を、受信アンテナで受信して地下を探る。地中からの反射波の強度や減衰、反射波受信までに要した時間(走時)が計測パラメータとなり、それらの解析により、地下の地層構造、空洞や埋設物等が推定できる。

探査結果は、各測線で得たデータから擬似的な地中断面図(GPR profile図)を求めて表示している。また、

全測線で得た探査データをまとめて、Time slice 図法による解析も行った (Conyers and Goodman 1997). この図法では、各測線のプロファイルを総合し、走時のある時間幅 (深度範囲) のデータを選別する。そして、レーダ反射波の相対強度の平均化と内挿により、設定した深度範囲での地下構造を図化する。具体的には、三次元で整理した解析結果をもとに、反射の強弱を色分けしながら様々な深度での平面図を作成し、異常応答の変化を検討する。この Time slice 図法は遺構や遺物の平面分布が対象となる研究において有効である。

GPR 探査は、カナダ Sensors & Software 社製の Noggin plus を使用し、カニ塚古墳の東側と尼塚古墳の推定地域に、8つの区画 (A-H区) を設定して行った。測線の方向はBのみ東西方向であり、その他 (A区, C~H区) は南北方向である。総面積約 3,500 m<sup>2</sup> の範囲を設定して行った。アンテナ周波数は 250MHz を用いた。

### 2-3. 高密度電気探査

電気探査では、図4に示すように、電流電極 (C1, C2) により、人工的に電流を地下に流して、生じた電位差を電位電極 (P1, P2) で検出する。

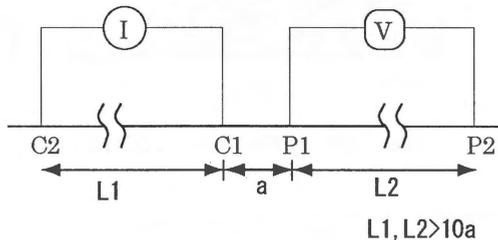


図4 二極法の電極配列

電位差から大地の見かけ比抵抗を算出し、地下の比抵抗構造を探る。電極配列は、C2, P2 電極を測線から十分離れた位置に固定し (遠電極)、C1 と P1 電極のみを移動する二極法を用いた。また、測線に沿って多数の電極を高密度に配置し、コンピューター制御により電極の組み合わせを自動的に切りかえて探査を行った。そして二次元比抵抗分布を詳細に解析するために、垂直方向の比抵抗を求める垂直探査と、水平方向の比抵抗を求める水平探査を組み合わせた 2次元探査を実施した。

次に述べる解析法については、Fujita and Ikuta (2000) を参照している。解析は、有限要素法を用いて、作成した比抵抗分布の初期モデルから計算される理論値と実測地の残差が小さくなるまで、反復計算を繰り返す逆解析手法を用い、最終的な比抵抗分布モデルを得た。信頼できる解析深度は通常、最少電極間隔の 10~15 倍である。今回の探査では最少電極間隔を 0.5m とした。

そのため 7.5m 深度までの解析を行った。

比抵抗は、電気を通しやすい鉱物 (粘土鉱物など) の含有量、間隙率、水分含有量、飽和度、間隙水の水質 (比抵抗)、温度など、多くの要因に左右される。結果の解釈では、どの要因が比抵抗に影響しているかの推定が重要になる。

探査装置には、応用地質社製 McOHM (MODEL-2115) を使用した。各測線の概要を表 1 に示す。

表 1 電気探査を行った測線の概要

測線名	測線長	電極間	探査深度	測定回数
ERT-1	15.5m	0.5m	7.5m	360回
ERT-2	15.5m	0.5m	7.5m	360回
ERT-3	31.5m	0.5m	7.5m	840回

## 3. 結果

### 3-1. GPR 探査

図5に、代表的な GPR Profile を示している。上の図 (GPR-1) では、測線距離の 2~7m に異常応答が認められる。この領域では周囲に認められる成層構造が鮮明ではなく、地層が改変を受けていると考えられる。反射強度も相対的に弱くなっており、この異常の下部に、船底形の構造が読み取れ、これがカニ塚古墳の周濠跡に対応する反応と推測される。

探査から得られたレーダ波の周濠底までの走時は 25ns であった。探査後の発掘調査において、探査で推定した箇所でも周濠が発見された。周濠底までの深さは地表面より約 75cm であった。この深度と探査による走時から、レーダ波の遺構中での伝搬速度 (v) は  $v \approx 0.06\text{m/ns}$  と算出され、土壌の比誘電率は約 25 となった。一般に水田土壌は粘土質で保水性が高く、含水率が高い。湿潤な粘土の比誘電率は 15~40 (物理探査学会 2005) であり、求められた値は妥当である。

図5下に示した GPR-2 の探査結果では、測線距離 14~21m、深度約 0.7m までの領域に異常応答が認められた。この異常は GPR-1 と同様に周囲よりも反射の弱い領域であり、その下には船底形の構造が認められた。これも濠と考えられるが、カニ塚古墳から約 35m はなれており、削平された尼塚古墳に伴う周濠であると推測した。

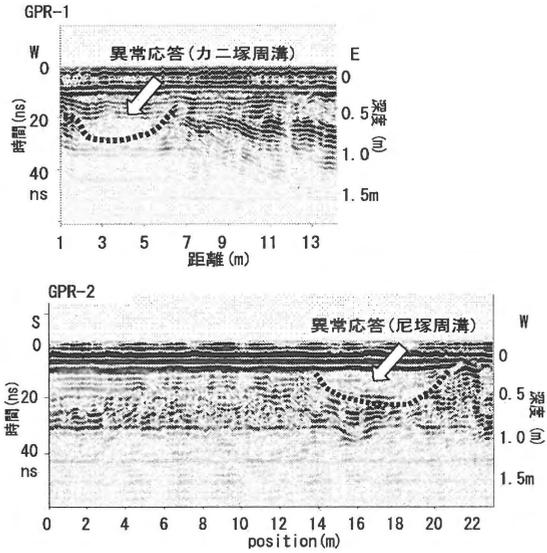


図5 カニ塚・尼塚古墳の両周溝を捉えた結果

### 3-2. 電気探査

以下では測線ごとの探査結果を示す。

#### 3-2-1. ERT-1 測線

図6に比抵抗断面図を示している。水平距離5mまでの地表面付近に  $150\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗の領域が見られる。これは古墳の盛土を表している。水平距離6-13mの地表面付近には、船底形の低比抵抗の領域が認められ、周溝跡を示すと考える。また、2m以深の低比抵抗帯は地下水によって飽和されていると考えられる。

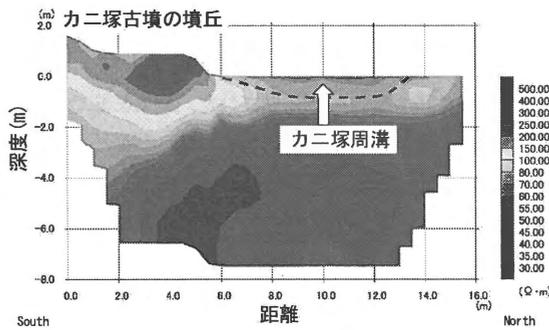


図6 ERT-1 測線における探査結果

#### 3-2-2. ERT-2 測線

図7に比抵抗断面図を示している。水平距離9-15mの地表面付近に見られる  $100\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗域は、過去に盛土が掘削され、消滅した尼塚古墳跡と考えられる。水平距離5-8mには、船底形を示す比抵抗の領域が認められる、これは尼塚古墳に伴う周溝跡を表していると考えられる。

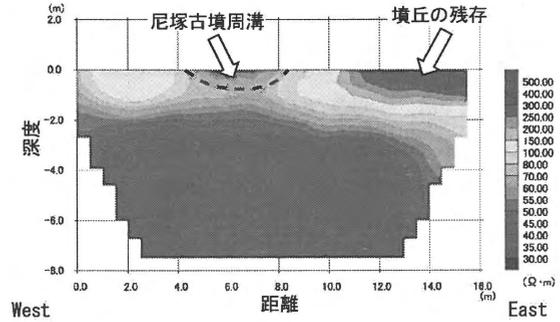


図7 ERT-2 測線における探査結果

#### 3-2-3. ERT-3 測線

図8に比抵抗断面図を示している。水平距離22mまでの地表面付近に見られる  $150\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗域は、尼塚古墳跡と考えられる。古墳跡の高比抵抗域の中で水平距離12-16mに周囲より比抵抗値の低い部分が認められたが、現時点では遺構であるかどうかは不明である。水平距離22-31mには、船底形を示す低比抵抗の領域が認められ、周溝跡を表していると考えられる。

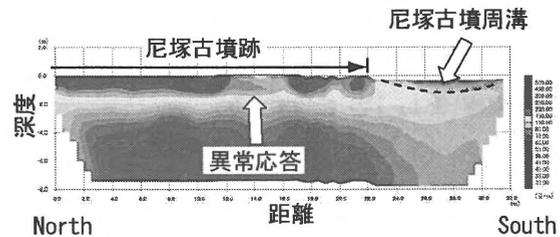


図8 ERT-3 測線における探査結果

## 4. 考察

### 4-1. GPR探査と高密度電気探査で捉えた古墳の異常

3本の測線で行った電気探査の結果は、地表面から約1mの深度までに、周溝跡と考えられる低比抵抗の異常を示している。異常の位置は、GPR探査による周溝の異常部よりやや広範囲となっている。この要因として、GPR探査に比べて、電気探査の分解能が低いことが考えられる。しかし、異常の位置は、両者ともほぼ一致しており、周溝を明確に捉えることができた結論する。

電気探査では、削平された尼塚古墳の墳丘跡が、高比抵抗の領域として認められた。カニ塚古墳の盛土も高比抵抗を示していることを考慮すると、この結果は、尼塚古墳の盛土が、完全には削平されずに残っていることを示す。

### 4-2. GPR 探査の Time slice による解析

全測線の探査データをもとに、Time slice 図による解析を行った。図9には、深度0.6-0.9m(走時20-30ns)において、反射強度を平均化した平面図を示している。

図にはカニ塚古墳の周濠が明確に現れており、周濠の幅は約5mと推測された。

カニ塚古墳の北東領域にも、円形を示す異常部分が認められる。これは、削平されて消失した尼塚古墳に伴う周濠を示している。周濠は幅3-6mの周濠Iとその外側に表れている周濠II(幅1-2m)の、2本が存在すると推測された。

探査結果をもとに行われた尼塚古墳の試掘調査により、探査で示した異常部分が周濠であると確認され、そして、探査から推定した墳丘は約38mの内径を持つとわかった。この結果、削平されて現地形では確認が困難であった尼塚古墳は、徳島県内の円墳として2番目の大きさを誇る古墳であることがわかり、県内では初めての2重周濠をもつ円墳の可能性も指摘できた。

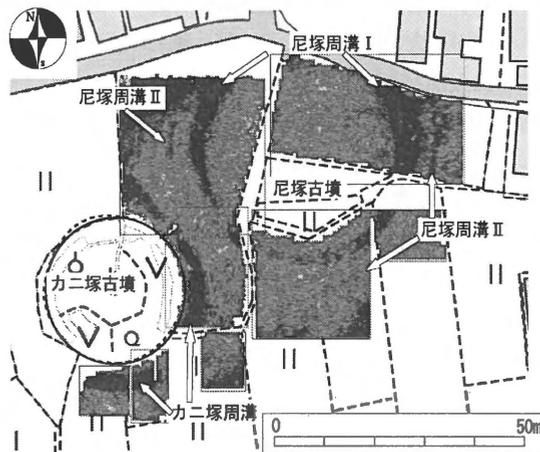


図9 深度約0.6-0.9m(走時20-30ns)におけるtime slice 図

#### 4-3. 旧地形の傾斜

図9において、周濠の幅は、北側のほうが広く見える。これは、探査地区は水田であり、現在の地表面はほぼ水平に整地されているが、古墳の築造当時の地表面は、やや南側に傾斜していたためと考えられる。つまり、北側の方が遺構を埋める埋土が薄く、現地表面を水平面としてTime slice 処理を行う際に浅い深度で異常が表れ、北側の周濠が広く見えたと考えられる。

#### 4-4. 古墳の周濠がレーダ探査で鮮明に判別できた理由

GPR探査では、周濠は、反射の弱い領域として認められており、その要因は、周濠内の埋土層の比誘電率にあまり差が無く均質であり、レーダ波が反射しなかったことが考えられる。図10(深度約0.9-1.2m)に見られる様に、周濠の底面より少し深い領域で解析したTime slice図においても、周濠は反射の弱い領域として表れて

いる。GPR探査では周濠内の埋土の比誘電率は均質であり、レーダ波が反射しなかったことが考えられた。この結果は、同時に、周濠の埋土は比誘電率が高く、レーダ波が減衰しやすい領域であったことも示している。

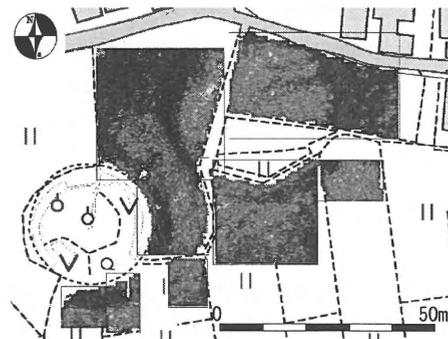


図10 深度約0.9-1.2m(走時30-40ns)におけるtime slice 図

電気探査では、周濠部は周囲に比べて低い抵抗値(40-80Ω・m)を示している。この結果を考慮すると、周濠内の埋土は周囲土壌より含水率の高い領域となっており、レーダ波が減衰しやすい状況であったと考えられる。

しかし、富山市若王子塚の地中レーダ探査では、周濠部は周辺よりも反射が強い領域として認められている(岸田・酒井 2001)。周濠内の埋土の物性によってどのような異常応答が表れるかは様々であると考えられ、今後、研究例を増やして更に探査する必要がある。

#### 5. まとめ

GPR探査と電気探査を用いて削平されて現状では確認が難しい古墳の復元を目的に研究した。徳島県の円墳を対象に両方の探査により、2つの円墳の周濠を明らかにすることが出来た。地表では痕跡が認められない尼塚古墳では、地下約1mまでの周濠が示され、特にGPR探査のTime sliceで明確に捉えられ、探査結果は、トレンチ調査でも確認された。成果は、同円墳が徳島県内2番目の規模で、県内では初めての発見となる2重の周濠を持つ可能性があることを明らかにした。

周濠が探査で異常として認められた理由を考察した。GPR探査で反射の弱い領域となったことは、周濠の埋土は、ほぼ均質で、比誘電率の高い(含水率の高い)領域であったためと考えられた。電気探査では、周濠は低抵抗を示しており、GPR探査の異常部と整合している。また、探査結果は、古墳築造当時の地形(旧地表面)が緩やかに傾斜していること、削平された尼塚古墳でも盛土が残っていることも示していた。GPR探査と電気探査

の2種類の探査法を併用して調査することにより、探査で出現した異常応答の原因の検討も可能となり、結果の信頼性を上げることができた。

各地には、古墳を削って平らにしたことから名付けられたといわれる「平塚」や、かつての古墳群を示唆する「百塚」などの地名が多くある。この様な場所において、古墳の立地や形状を復元することは考古学研究にも重要であり、今後探査による調査の活用が望まれる。

### 謝辞

現地での調査において、藤川智之氏（徳島県埋蔵文化財センター）、辻佳伸氏（徳島県教育委員会）には、ご指導、ご助力を賜った。新谷崇氏（株式会社村尾地研）には、電気探査についてご協力を頂いた。以上の方々に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 足立和成, 中條利一郎, 西村康 編著 (1999) : 文化財探査の手法とその実際, 316p, 真陽社
- 物理探査学会 (2005) : 新版物理探査用語辞典, 279p, 愛智出版
- Conyers, L. B. and D. Goodman (1997) : Ground-Penetrating Radar -An Introduction for Archaeologists, 232p, ALTAMIRA PRESS.
- Edwards, W., M. Okita and D. Goodman (2000) : Investigation of a Subterranean Tomb in Miyazaki, Japan, *Archaeological Prospection*, 7, 215-224, John Wiley & Sons, Ltd.
- Fujita, K. and O. Ikuta (2000) : Resistivity structure of the central part of the Yamasaki fault studied by the multiple electrodes resistivity method, *Earth Planets and Space*, 52, 567-571, The society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science.
- Kamei, H., Y. Marukawa, H. Kudo, Y. Nishimura and M. Nakai (2000) : Geophysical Survey of Hirui-Otsuka Mounded Tomb in Ogaki, Japan, *Archaeological Prospection*, 7, 225-230, John Wiley & Sons, Ltd.
- 岸田徹, 酒井英男 (2001) : 若王子塚古墳における地中レーダ探査, 富山市水橋金広・中馬場遺跡発掘調査報告書, 富山市埋蔵文化財調査報第113, 99, 富山市教育委員会
- 岸田徹, 酒井英男 (2006) : 徳島県尼塚古墳・カニ塚古墳における地中レーダ探査, 徳島県埋蔵文化財センタ

- ー調査報告書第66集, 徳島県埋蔵文化財センター。
- 岸田 徹, 酒井英男 (2007) : 地中レーダ探査による古墳の研究ー削平された古墳の復元・盛土量の推定, *考古学と自然科学*, 45-59, 日本文化財科学会。
- Kishida, T. and H. Sakai (2006) : Study of *kofun* in Tokushima prefecture using ground penetrating radar and electric resistivity surveys: Reconstruction of the moat of the leveled mound, 15-24, *J. Archaeological Prospection Soc. Jap.*
- 西村 康 (1993) : 小山古墳・黒福古墳群の探査, 玉丘遺跡群II, 加西市埋蔵文化財調査報告, 15, 45-54, 加西市教育委員会
- 酒井英男, 黒沢尚美, 田中保士, 宇野隆夫 (1997) : 岐阜県養老町象鼻山1号前方後円墳の電磁気探査, 象鼻山1号古墳ー第1次発掘調査の成果ー, 養老町埋蔵文化財調査報告第1冊, 53-64, 養老町教育委員会, 富山大学人文学部考古学研究室
- 酒井英男, 小島信人, 宇野隆夫, 田中保士, アダムオニール, 上坂麻子, 佐藤朗 (1998) : 岐阜県養老町象鼻山1号前方後円墳の電磁気探査ー地下レーダ探査と高密度電気探査, 象鼻山1号古墳ー第2次発掘調査の成果ー, 養老町埋蔵文化財調査報告第2冊, 103-116, 養老町教育委員会, 富山大学人文学部考古学研究室
- Tenri University Archaeological Prospection Team (2001) : Prospection of Graves Without Mounds Research, Report (Revised) 1997 - 2000 Grant-in-Aid for Scientific Research (B2), 309p, Tenri University Archaeological Prospection Team.
- 徳島県埋蔵文化財センター (2001) : 阿讃山脈東南縁の古墳群ー四国横断自動車道建設に伴う埋蔵文化財調査概報ー, 徳島県埋蔵文化財センター調査概報第3集, 2-9, 徳島県埋蔵文化財センター。



第 14 回 公開シンポジウム「人文科学とデータベース」発表論文抄録集

発行日 2008 年 12 月 13 日

編集・発行

第 14 回公開シンポジウム「人文科学とデータベース」実行委員会

事務局 〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3

同志社大学文化情報学部文化情報学科

津村宏臣（シンポジウム事務局）