

呉工業高等専門学校

研究報告

第64号

平成14年8月(2002)

目次

1. ダム反対運動の組織戦略と政治的機会構造 —川辺川ダム反対運動を事例にして—	木原 滋哉	1
2. 2×2 行列におけるジョルダンの標準形について	岡中 正三	7
3. 多価写像による連続写像の近似について	赤池 祐次	13
4. 有害獣監視システムの試作	野原 稔	17
5. スクッテルダイト型 CoSb_3 の電子状態の研究	植田 義文, 川浪 徹	23
6. 運動制御問題への遺伝アルゴリズムの適用	山崎 勉	31
7. Lagrange の運動方程式によるはり及び棒の連成熱弾性自由振動の減衰解析	丸上 晴朗	37
8. コンクリート表面におけるひびわれの定量評価に関する研究 市坪 誠, 竹村 和夫, 山口 隆司, 丸岡 弘晃, 山根 浩		41
9. 材料表面における損傷検出システムに関する基礎的研究 市坪 誠, 竹村 和夫, 山口 隆司, 山根 浩, 丸岡 弘晃		47
10. 芸予地震(2001)における広島県の液状化現象に関する一考察 西村 光正, 門前 勝明, 荒川 智輝, 芳賀 保夫		53
11. 2001年芸予地震による鉄筋コンクリート造建物の変形 門前 勝明, 部谷 悠也, 藤川 大使		63
平成13年本校教官による研究業績一覧		69

ダム反対運動の組織戦略と政治的機会構造 — 川辺川ダム反対運動を事例にして —

(一般科目) 木原滋哉

Organizational Strategies of Anti-Dam Movements and Political Chance Structures: A Case of the Anti-Kawabe River Dam Movements

(Department of General Education) Shigeya KIHARA

Abstract

This paper presents the relationship between organizational strategies of anti-Kawabe River dam movements and political chance structures. Single-issue-movements, which have more possibilities than multi-issue-movements, are changing local governments around the Kawabe River.

Key Words: anti-dam movement, political chance structure, social overhead capital

ダム反対運動, 政治的機会構造, 社会的共通資本

§1 はじめに

川辺川の水はすみきっている。清冽ということばがそのままびったりする流である。川の水のすみきっていることはよいことだが、同時にそこにはきびしい生活をしている人のいることをそのきれいな流がものごとくくれる(宮本常一 1972: 97)。

民俗学者・宮本常一が球磨川の支流・川辺川を訪れたとき、すでに川辺川ダム計画が立案され、水没予定地を含む五木村と相良村では川辺川ダム計画への対応が議論されていたはずである。宮本常一の観察には、川辺川ダム問題は直接には出てこないが、二つのことが語られている。まず、30年前の川辺川が清冽な流れであったことを伝えている。さらに、澄みきった川の流れが人びとの生活のありようと結びついていることも物語っている。澄みきった球磨川・川辺川は、「社会的共通資本」のひとつとして、流域の人びとの生活と結びついて、さまざまな形で利用されてきたのである。河川という「社会的共通資本」は、自然環境だけではなく、ダムや堤防など社会的インフラストラクチャーを含み、さらに河川の管理に関する制度的諸条件とも関わっている(宇沢弘文, 2000)。河川などの自然環境を含めて、誰が、どのように維持・管理するかを分析するための概念でもある。ダム建設を推進するか、ダム建設に反対するかは、文字通り、河川という社会的共通資本を、誰が、どのような目

的で、どのように維持・管理するかという対立と直結している。

川辺川ダム計画は、球磨川(熊本県)の支流・川辺川に、洪水調節、農業用水の供給、発電などを目的とする、水没予定 289 世帯(五木村と相良村)、総貯水容量 13300 万トンという巨大な多目的ダムを建設しようとする計画である(川辺川ダム計画全体の問題点については、福岡賢正 1996 に詳しい)。宮本常一が川辺川を訪問してから 30 年後の現在、水没予定地でのダム反対運動は終息しているものの、球磨川中流と下流の地域でダム反対運動が高揚している。さらに川辺川ダム問題は熊本県内にとどまらず、全国からも注目されるようになってきている。ダム反対運動は、多くの場合、ダム建設によって水没してしまう地域の住民によって担われてきた。下流地域は、受益者として、水資源を利用し、電力を享受し、洪水を回避することができた(「受益圏」)が、水没地は犠牲者として、故郷を失うことになるからである(「受苦圏」)。川辺川ダム反対運動の場合、ダムの水を利用することになっている農家は水が必要ないとしてダム反対を表明し、中流・下流域の人びとはダム以外の洪水対策が可能であり、ダム建設はかえってダムを原因とする洪水の危険性を高めるとしてダム反対を表明している(「受益圏」の消滅と「受苦圏」の拡大)(公共事業と「受益圏」「受苦圏」とのかかわりについては、木原滋哉 2001 参照)。前者の農民団体(「川辺川利水裁判原告団」など)と後者の流域住民の団体(「清流球磨川・川辺川を未来に手

渡す流域郡市民の会」など), さらに球磨川漁協がダム反対運動の中心的担い手であることは言うまでもない。

しかし, 本稿の目的は, 川辺川ダム計画の全体あるいは川辺川ダム反対運動の全体を検討するものではない。川辺川ダム反対運動の中で, とりわけ川辺川の価値を再発見しようとする動き, 国家による河川管理の独占化を批判する動きを手がかりにして, 川辺川ダム反対運動の組織戦略と政治的機会構造の関連を取り上げることにある。筆者はすでに, 政治的機会構造, 動員構造, フレーミング過程という3つの側面からさまざまな社会運動を比較・分析する中で, 川辺川ダム反対運動についても分析を加えたことがある(木原滋哉 2000)。本稿では, 社会的共通資本をめぐる意味づけと解釈の枠組みを形成する「フレーミング」過程を出発点にして, 地域政治の力関係のもとにおけるダム反対運動の組織戦略の論理を明らかにするとともに, その可能性を検討したい。

§ 2 川の記憶と経験

2.1 川と流域住民の生活

川辺川と本流の球磨川は, 全国の川と同様に, 流域の住民の生活と密接に結びついていた。農業用水や生活用水をして川水が利用されてきた。洪水は肥沃な土壌を提供するものの, 多くの被害ももたらしてきた。ここでは, 水利権に関する問題は除いて, それ以外の水と人びとの生活のかかわりを簡単に見てみたい。

17世紀には, 河口の八代から人吉までの球磨川が開削され, さらに明治中期には人吉から五木村までの川辺川が開削されて, 舟運が利用されてきた。しかし, 明治末に八代から人吉まで鉄道が開通し, 人吉から下流の舟運は衰退していく(熊本県教育委員会 1988)。このとき, 人吉の温泉旅館の経営者が球磨川下りの遊覧船を運行して, 人気を博し, 今日に至るまで, 人吉観光の目玉になっている。昭和初期にも, 日本窒素工場(現チッソ)が五木村で川辺川に小規模のダムを用いた発電を開始した。しかし, 戦後球磨川の環境を一変させたのは, 1953年に球磨川下流に荒瀬ダム, さらに瀬戸石ダム(58年)が, そして球磨川上流に市房ダム(60年)が建設されたことに由来する。

とりわけ下流のダム建設によって回遊性の鮎が自然遡上できなくなったことが流域の人びとの生活に大きな影響を与えた。鮎は, 秋に川で生まれ, 海へ下り, 翌年の春に川を遡上するが, ダム建設によって回遊が遮られてしまった。このため秋に鮎から採卵して, ふ化した稚魚を河口で放し, 春先に球磨川河口で再び捕獲して, 球磨川上流まで運び放流しなければならない。このように球磨川流域の漁業資源を維持・増殖するための組織とし

て, 球磨川漁業協同組合が設立された。同時に, 組合員以外の人びとが球磨川流域で鮎などを捕獲するためには, 球磨川漁協に入漁料を支払わなければならなくなった。ダム建設以前の川の様子は, 「鮎が遡上するとき川が真っ黒になった」として, ダム建設以前の球磨川の豊かさの記憶として語られる。また, 「子供の頃, 夕食のおかずにするために, 竿を持って鮎を釣りに行った。川辺川は『いけす』みたいなものだった」という思い出として語られるように, ダム建設によって漁協が漁業資源を管理せざるをえなくなって, 流域の人びとと川とのかかわりが希薄になった。さらに, 60年代に学校にプールが建設されるとともに, 子供たちが球磨川・川辺川で泳ぐことが少なくなった。もちろん今でも川遊びをする「川ガキ」は存在するが, 川と子供たちの距離が大きくなっていった(球磨川とのかかわりの記録として, 麦島勝 2002 参照)。

鉄道の開通, ダムの建設によって, さらに水道の普及などによって, 川と人びととのかかわりは大きく変化して, 疎遠なものになっていった。こうして球磨川・川辺川に大きく依存しているのは, 水利権の問題を除けば, 球磨川漁協, さらに人吉温泉旅館組合, 人吉市も出資している第三セクターの球磨川下り株式会社など, 直接・間接に利害関係をもつ既存の利益集団である。社会的共通資本の管理には, 限られた範囲で, これらの利益団体が参画して, 実施されるようになった。

2.2 国家による河川管理の独占化

流域の住民が川とのかかわりを薄くしていった時期は, 国家が河川に対する管理を強めていったのと同時期でもある。川辺川流域では, すでに53年に電源開発株式会社によって発電を主目的とするダムが計画されていた。しかし水力発電から火力発電へと発電が変化するにつれて, 電源開発はダム建設を断念した。しかし, 63, 64, 65年の洪水をきっかけにして, 建設省が治水目的のダム計画を発表した。目的が変化しながらも, ダム建設が推進されてきたこともさることながら, 川辺川流域におけるダム計画の背景には, 国家による河川管理に関する法整備があった。「電源開発促進法」(53年), 「特定多目的ダム法」(57年), 「新河川法」(64年), 「水源地域対策特別措置法」(73年)といった法制度の整備を背景として, 建設省によって河川管理が独占され, 川辺川でもダム計画が立案されてきた(ダム法制の整備とその特質については, 田中滋 2001)。

球磨川流域で3年連続して洪水が発生したのをきっかけにして, 当時のダム法制を駆使して, 川辺川ダムが計画された。しかし, 流域住民の洪水体験は, 国家による河川管理の独占に対する信頼を弱めることになった。それまでも球磨川水系では何度となく水害被害が起きてい

たが、川辺川ダム計画のきっかけになった水害(1963, 64, 65年)の経験は、意外にも、流域の人吉市ではダムへの危惧の念を高めたのである。65年の水害の際に、球磨川上流の市房ダムの緊急放水が人吉の水害被害を拡大したのではないかという考えは広く市民のあいだに浸透している。水害直後には、人吉市民がダム管理者の刑事告訴を訴えるビラさえも配ったほどであった。水害の経験は、ダム建設への期待ではなく、ダム建設への根強い不安を高めているが、それにもかかわらずダムによる洪水対策を推進しようとする建設省に対する不信の念は根強いものがある(球磨川大水害体験者の会 1999)。

同時に市房ダムは、下流域の人びとには水質が悪くなったという経験として記憶されている。こうした記憶は、市房ダム建設以前の球磨川を経験している人、若い頃球磨川で川遊びをした世代に強く刻み込まれている。このような人びとにとって、川辺川ダム計画は、自らの経験と記憶に基づいて、不安をかき立てている。河川という社会的共通資本を国家が独占的に管理することに対する不信が、経験に裏打ちされて存在しており、記憶されているのである。

豊かな川とかかわった経験の記憶、水害の経験の記憶は、流域住民にとってダム反対運動の根拠であり、源泉でもある。したがって、川辺川ダム反対運動は、川と人びとのかかわりを回復し、川の価値を再発見しようという試みでもある。以下では、初めに社会的共通資本としての川の価値を再発見しようとする活動に焦点を当てて(「フレーミング」の側面)、ダム反対運動の組織戦略を類型化したい(§3)。さらに、川辺川ダム反対運動が、どのように発生し、促進されたのかを説明するために、川辺川ダム反対運動の中心となっている団体を取り上げて、地域政治とのかかわりを検討したい(§4)。

§3 川の再発見と組織戦略

3.1 「球磨川水系ネットワーク」

流域住民が球磨川・川辺川で遊び、触れるという新たな経験から、川の「記憶」の中に眠っていた川の価値を再発見しようとする動きは、「球磨川水系ネットワーク」の活動に見てとれる。「球磨川水系ネットワーク」は流域の自然保護や地域おこしの12団体を中心として96年に設立された。「球磨川水系ネットワーク」最大のイベントは、球磨川と川辺川源流の水を汲み上げて、マウンテンバイク、徒歩、カヌーなどで河口の八代市まで多くの人びとの手で運ぶ「源流水リレー」である。当初は50人ほどの参加者であったが、01年は数十の参加団体、1000人近くの参加者の手で源流水が運ばれるまでになっている。

「源流水リレー」は、源流水を運ぶという「経験」を通じて、山と海を結びつける川の価値を再発見するきっかけになるものとして想定されていた。直接にダム反対を唱えるのではなく、川と親しみ川の価値を再発見することによって間接的にダム反対につながる活動であると考えていた中心メンバーも少なくなかった。山と海を結びつける「源流水リレー」は、山と海の結びつきを断ち切るダム建設と相容れないものであると考えても不思議ではない。しかし、「源流水リレー」でダム反対を唱えることは「球磨川水系ネットワーク」内部で反対があつて実現していない。「球磨川水系ネットワーク」に多くの団体が参加し、「源流水リレー」も大規模なイベントになったことによって、逆に、「ダム反対」という争点では結集できなくなったのである。「球磨川水系ネットワーク」のように多くの団体が参加する運動体の組織戦略を「団体結集型ネットワーク」と呼びたい。

97年の河川法改正により、河川管理の目的に治水や利水に加えて、河川環境の整備と保全が加えられるとともに、市民参加、市民とのパートナーシップの形成が促進されることになった。しかし、川辺川ダム計画の場合、漁業権に対する前例のない強制収用が申請されるなど、国土交通省の強硬姿勢が目立つ中で、市民と行政のとパートナーシップの形成は不可能となっている。

一方で、多様な団体が結集する「団体結集型ネットワーク」は「ダム反対」という争点を結集軸としておらず、他方では、行政の強硬姿勢が、多様な団体の中に亀裂を生み出している。このため多様な団体が結集する「球磨川水系ネットワーク」は、「ダム反対」という争点に結集することができていない。

3.2 「尺鮎トラスト」

球磨川・川辺川で鮎を捕る川漁師と消費者のあいだで鮎の産直を実施する「尺鮎トラスト」を始めた「川辺川を守りたい女性たちの会」(以下では、「女性たちの会」と略称)は、「球磨川水系ネットワーク」と同じように川の価値を再発見し川辺川ダム反対と結びつけようとしながらも、異なる成果を生みだしている。「女性たちの会」は、熊本市周辺の女性たちを中心として2001年に結成された。その中心メンバーは、環境保護団体や市民オンブズマンなどで活動している女性たちである。環境保護団体とは言っても、川辺川ダム反対の活動に専念しているわけではない。そこで、さまざまな団体の中で、とくに川辺川ダム問題に関心を持っている女性を中心にして結成された。単一の争点に基づいて形成された運動体の組織戦略を「争点結集型ネットワーク」と呼びたい。

「女性たちの会」は、川辺川ダム計画を阻止するためにさまざまな活動をしているが、もっとも注目を浴びているのが「尺鮎トラスト」運動である。尺鮎とは、球磨

川や川辺川で捕れる約 30 センチの大鮎のことである。釣り人にとって垂涎的であるが、このような鮎が捕れる川はほとんどないこともあって、多くの釣り人が尺鮎を目当てに球磨川流域を訪れているという。その「尺鮎」をシンボルにして、鮎の産直を実施することによって、川漁師を経済的に支援し、消費者には清流川辺川の豊かさを知ってもらおうとする活動である。

鮎の価格はシーズン中もかなり変動するが、川漁師は安定した価格で鮎を売り、川の経済的恩恵を得ることができるようになる。とりわけダムの本体工事の前提としての漁業補償金を球磨川漁協が拒否しているの、補償金以上に鮎漁による収入のメリットが大きいことを具体的に示すことにもなっている。1年目の01年は、約1500口、750万円を売り上げた。産直運動に取り組む人びとは、最初の宣伝に苦勞することが少なくないが、川辺川ダム問題が広く知られるようになってきていることもあって、「尺鮎トラスト」運動は事業としても成功していると言ってもよいだろう。

もともと運動体の内部では、川辺川産の鮎をブランド化したいという声はあったが、「尺鮎トラスト」によって、川辺川の尺鮎は、大雪山のナキウサギ、諫早のムツゴロウなどと同じように、自然保護の「シンボリック動物」になった。しかも、鮎の場合は、単なる自然環境だけではなく、経済的利益を生み出す豊かな自然環境のシンボルとなっている。

3.3 「団体結集型」か「争点結集型」か

「球磨川水系ネットワーク」は、川と疎遠になっている人びとと川とのかかわりを深めることにあって、川の価値を再発見しようという試みである。流域の様々な人びとが参加するようになってきているが、そのせいで、「球磨川水系ネットワーク」としてダム反対を表明しにくくなっている。河川という社会的共通資本を地域で管理していこうという考えに立つと、地域の多くの人びとを参加させようという組織戦略（「団体結集型ネットワーク」の形成）も必要とされるが、国土交通省が強硬姿勢でダム建設に臨み、ダムへの賛成と反対が地域社会に亀裂を生み出している現状では、広範な人びとの参加とダム反対表明を同時に実現することは困難となっている。

これに対して「尺鮎トラスト」と「女性たちの会」は、川辺川の価値を再発見しようという同様の目標を掲げながらも、異なる組織戦略を採用している。まず、「女性たちの会」の中心メンバーは、環境保護団体や市民オンブズマンなどのメンバーでもある。環境保護団体とはいえ、川辺川ダム問題はさまざまな問題のひとつにすぎないので、川辺川ダム問題に専念することはできない。「女性たちの会」は、さまざまな団体の連合体ではなく、とりわけ川辺川ダム問題に関心を持っている女性たちの集

まりであることによって、逆に、機動的に活動できる団体になっているのである。「女性たちの会」は、「川辺川ダム反対」という争点を軸にして結集する「争点結集型ネットワーク」という組織戦略を採用することで、うまく機能しているのである。

「尺鮎トラスト」を推進する川漁師グループも、独自のグループを形成することによって機動力を獲得している。川漁師の利益団体は、「球磨川漁業協同組合」であるが、組合長や理事会がダム容認派で占められるようになるとともに、ダム反対派は、逆に、相互に連帯を強めて、国土交通省との漁業補償交渉阻止のために効果的に活動している。ダム反対派の川漁師は、「球磨川漁業協同組合」という公式の利益団体の内と外で、「川漁師組合」という「任意団体」を結成してダム反対派の団結を強めている。

河川という社会的共通資本を管理していくためには、多様な団体や人びとが参画することが望ましいが、国土交通省の強硬姿勢のもとで地域社会がダム賛成と反対に分裂しているばあいは、多様な団体からなる「団体結集型ネットワーク」では「ダム反対」という目的の達成は困難である。それに対して、「ダム反対」という争点を軸にして形成される「争点結集型ネットワーク」は、ダム反対のために機動的に活動できている。

§ 4 ダム反対運動の組織戦略と地域政治

4.1 地域政治の変化（協調から対決へ）

「団体結集型ネットワーク」から「争点結集型ネットワーク」への変化がダム反対運動の強化に結びついているのは、川辺川ダム反対運動の中心となっている運動体「清流球磨川・川辺川を未来に手渡す流域郡市民の会」（以下では「流域郡市民の会」と略記）の形成過程でも確認される。とりわけ、地域政治の変化（「政治的機会構造」の変化）によって、「争点結集型ネットワーク」としての「流域郡市民の会」形成が促進されていることを見てみたい。

人びとの生活が河川とは疎遠になるとともに、人吉市で球磨川・川辺川という社会的共通資本に深くかかわっているのは、漁業協同組合、温泉旅館組合、球磨川下り株式会社などという既存の利益団体であった。川辺川ダム計画が発表されたあと、当時の市議会議員によると、永田正義前市長は、「人吉市としては、水害対策として河川拡張など河川改修を建設省に要望しているので、ダム反対を公言できない。ダム問題は、市議会の特別委員会で取り上げてくれ」と語っていたということである。永田前市長のもとで、これら利益団体と市議会とのあいだで合同会議がもたれ、河川環境の保全、水量確

保、漁族の保護などを国に対して要望しているが(79年)、この要望は「川辺川ダム反対」を公言しているわけではなかった。当時の市議会議員によると、この要望は、ダム建設にとって困難な条件を出すことによって、事実上のダム反対意思表明を意味するものであったが、さまざまな意見をまとめるには、明確なダム反対は表明できなかったという。これらの既存の利益団体は、ダム計画に利害関係を持っている団体ではあるが、「ダム反対」という争点のために設立された利益団体ではないために、妥協した内容の要望になってしまったのである。

市長の交代、水没地を含む五木村によるダム建設同意、流域自治体による「川辺川ダム建設促進協議会」の設立(88年)など地域政治の変化は、自治体が川辺川ダム問題について「協調」から「対決」へと政治姿勢を変更したことを意味する。政治的機会構造が、ダム建設という「争点」について「開放」的なものから「閉鎖」的な構造へと変化していったのである。こうして既存の利益団体は、事実上のダム反対表明の機会さえも失われていった。同時にダム問題について多様な意見を抱える利益団体では、ダム反対を主張することはできなかった。地域政治の変化と団体内部の問題から、利益団体が川辺川ダム反対を表明できなくなる中で設立されたのが、「流域郡市民の会」である(93年)。

しかし、「政治的機会構造」の変化が「争点結集型ネットワーク」としての「流域郡市民の会」形成を促進したとしても、ゼロから形成されたわけではない。80年代に人吉を中心として、「くまがわ共和国」という地域おこし団体が、JR湯前線存続などを訴えて結成されていた。湯前線が第三セクター「くまがわ鉄道」として存続されることが決まった後で、JR湯前線存続とともにダム問題が重要だとして、そのメンバーを含めて、川辺川ダム反対の運動団体として設立されたのが、「流域郡市民の会」なのである。

「流域郡市民の会」の結成は、球磨川・川辺川という社会的共通資本の管理とかかわってきた利益団体を通してのダム反対表明が断念された上で(「政治的機会構造」の変化)、「くまがわ共和国」を基にして、「ダム反対」という争点を中心とする「争点結集型ネットワーク」を設立してダム反対を強めていこうという選択であった。「球磨川水系ネットワーク」や「女性たちの会」は、河川の価値を再発見して、河川という社会的共通資本との新たななかかわりを模索しているに対して、「流域郡市民の会」は、社会的共通資本の国家による独占的管理を批判して、住民の意思に基づく河川の管理を主張していく。

4.2 ダム反対運動の広がり地域政治

国だけではなく、自治体までも、協調から対決へと姿勢を変えるにつれて、多様な利害を含む「団体結集型ネ

ットワーク」ではダム反対の意思を表明できなくなった。こうしてダム反対という争点に集中した「争点結集型ネットワーク」という組織戦略に基づくダム反対運動が次々に形成されていく。では、地域政治の政策決定過程から排除されたにもかかわらず、ダム反対運動が影響力を強めることができたのは、どのようにしてなのだろうか。

「ダム反対」は、単一の争点に集約されることによって、運動がかえって拡大したというだけではなく、それ自体多様な争点の結節点でもある。環境保護、財政赤字への懸念、地域民主主義の無視などの争点が重なっているゆえに、川辺川ダム反対の運動が広がっている面もある。とりわけ、財政悪化が伝えられる中で、むだな公共事業に対する都市住民の批判が高まっていることは、川辺川ダム計画への批判をも高めることになっている。さらに、有明海のノリ養殖に大打撃を与えたのが、諫早湾干拓の結果として有明海全体の環境が悪化したためではないかという疑惑が高まったことも、公共事業一般への批判を後押しした。単一の争点としての「ダム反対」が広まるとともに、「ダム反対」という争点自体がさまざまな争点を重層化させているという点で、ダム反対運動が強化・拡大されているのである。

また自治体でも、「ダム反対」という争点に焦点を当てることによって、ダム反対が強まっている。多様な争点を取り扱う自治体では、ダム問題はひとつの争点にすぎず、川辺川ダム建設促進と掲げる流域自治体では、「争点化」自体が阻止されてきた。「争点結集型ネットワーク」という組織戦略が、「ダム反対」という単一の争点に集中して、逆に活動の場を広げたように、単一の争点をめぐって住民の意思表明を実現しようとするのが、「住民投票」である。住民投票は、「争点結集型ネットワーク」と同じように、川辺川ダム計画という単一の争点について賛否を問う手段だからである。すでに、流域自治体の中では、坂本村と人吉市で川辺川ダムの賛否を問う住民投票条例制定の直接請求がおこなわれた。人吉市では有権者の過半数の署名を集めたが、それぞれの市議会と村議会では1票差で否決された。否決されたとはいえ、流域では、清流の記憶、既存のダムが水質悪化とダム洪水をもたらしたという経験が、川辺川ダム計画への懸念を高めていることは、住民投票の動きにも見てとれる(岐部明廣 2002)。

さらに、このように「川辺川ダム反対」のネットワークが広がり重層化する中で、流域自治体にも変化の兆しが現れている。球磨川河口にある流域最大の都市・八代市においてダム計画見直しを公約とした中島新市長の誕生、福島前知事の急死後に当選した潮谷知事の誕生は、地域の政治的機会構造を変えているように見える。ダム反対派住民が国土交通省のデータをそのまま利用してもダムは必要ないという代替案(川辺川研究会 2001)が

出された後、塩谷知事は、ダム問題について国土交通省と住民との討論集会を実施している(2001年12月,02年2月,6月)。毎回数千人が参加している討論集会は、ダム計画の白紙化あるいは中止を前提とするものではないが、川辺川ダム計画が必要なものかどうかをダム計画を推進する国土交通省とダム計画に反対する住民グループのあいだで議論していくという前例のない試みである。

「争点結集型ネットワーク」としての「女性たちの会」や「流域郡市民の会」は、川辺川ダム反対という点で機動性をもつことができている。「女性たちの会」は、社会的共通資本の維持・管理にも関与している。しかし、社会的共通資本は、川辺川ダム建設阻止を掲げる「争点結集型ネットワーク」だけではなく、地域社会全体によって維持・管理されるべきものであり、理念上は、多様な団体が関与すべきである。

かつて球磨川や川辺川に利害関係を強く持つ利益団体(球磨川漁協、温泉旅館組合、商工会議所など)は、地域社会の政治的力関係の変化とともに、団体としては、ダム問題について発言できなくなったことをすでに見た。「争点結集型ネットワーク」としてのダム反対の運動体は、国家による社会的共通資本の管理への批判を強め、自ら社会的共通資本としての河川とのかかわりを深めて、自然環境としてだけではなく、豊穡な環境として維持・管理をおこなうことによって、地域社会の政治的力関係の再逆転を目指し、「団体結集型ネットワーク」だけではなく、利益団体や自治体などの地域社会全体も巻き込むようになる。そのためには、河川と流域住民、流域外の市民とのかかわりをを深めることによって、自治体そのものを変えていく必要がある。

§ 5 終わりに

川辺川ダム反対運動の場合、ダム問題に対して地域政治が協調的姿勢から対決的姿勢へと変化するにつれて、ダム反対運動は「団体結集型ネットワーク」から「争点結集型ネットワーク」へと変化してダム反対という争点を拡大し影響力を強めることができた。その際、球磨川や川辺川に関する流域住民の記憶や経験がダム反対運動の源泉になっている。またダム反対という争点は、それ自体、環境保護・財政赤字・地域民主主義など多くの争点と重なり合っており、そのこともダム反対という争点の強化に寄与している。

川辺川ダム反対運動が拡大していくとき、環境保護団体など既存の団体がそのままダム反対運動の担い手になることはそれほど多くない。しかし、さまざまな団体を横断するような形で、それぞれの団体のメンバーがダム反対という争点のために、新たなグループを結成してい

る(「争点結集型ネットワーク」の形成)。市民社会に多様な活動をおこなう団体やグループが存在することは、そのままの形では、ダム反対という新たな争点の解決に寄与しなくとも、新たなネットワーク形成に寄与している。市民社会におけるネットワーク形成が、民主主義の基盤であることを示していると言えよう。

河川という共通社会資本を管理していくためには、ダム反対を掲げる「争点結集型ネットワーク」だけではなく、さまざまな団体や自治体も巻き込んでいく必要がある。そのためには、自治体がダム問題に対して対決的姿勢から協調的姿勢へ変わることが欠かせない。しかし、国が強硬姿勢のままであるかぎり、問題解決は望めないだろう。

以上のように、川辺川ダム反対運動を事例にして、ダム反対運動の組織戦略と地域政治の政治的機会構造の関連を検討してきた。川辺川ダム反対運動については、その関連を一部を抽出することができたが、より一般的に、社会運動の組織戦略と政治的機会構造との関連を解明するためには、他のダム反対運動やダム反対運動以外の社会運動との比較が欠かせない。また、川辺川ダム反対運動の全体を解明する作業もまだ着手したばかりである。これらは、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 福岡賢正, 1996, 『国が川を壊す理由』葦書房
- 2) 川辺川研究会, 2001, 『球磨川の治水と川辺川ダム』川辺川研究会
- 3) 岐部明廣編, 2002, 『川辺川の詩 尺鮎の涙』海鳥社
- 4) 木原滋哉, 2000, 『九州・沖縄』における社会運動ネットワークの形成・試論 石川捷治・平井一臣編『地域から問う国家・社会・世界』ナカニシヤ出版, 171-197
- 5) 木原滋哉, 2001, 「公共事業を変える」畑山敏夫・平井一臣編『実践の政治学』法律文化社, 99-124
- 6) 球磨川大水害体験者の会, 1999, 『球磨川大水害体験録集』球磨川大水害体験者の会
- 7) 熊本県教育委員会, 1988, 『熊本県歴史の道調査一 球磨川水運一』熊本県文化財保護協会
- 8) 麦島勝, 2002, 『川の記憶 球磨川の五十年』葦書房
- 9) 宮本常一, 1972, 『私の日本地図 11 阿蘇・球磨』同友館
- 10) 田中滋, 2001, 「河川行政と環境問題」船橋晴俊編『講座環境社会学第2巻』有斐閣, 117-143
- 11) 宇沢弘文, 2000, 『社会的共通資本』岩波書店

2 × 2 行列におけるジョルダンの標準形について

(一般科目) 岡中 正三

On the Jordan Canonical Form in 2 × 2 Matrices

(Department of General Education) Shozo OKANAKA

Abstract

A simultaneous differential equations with constant coefficients can be rewritten by the vector and the matrix. Then, the unknown functions are derived by the standardization of the matrix. The 2 × 2 matrix whose characteristic values are distinct was discussed in the last paper. This paper deals with the 2 × 2 matrix whose characteristic polynomial has multiple root. For that purpose, Jordan canonical form is used.

Key Words : simultaneous differential equations, vector, matrix, diagonal matrix, Jordan canonical form, characteristic polynomial, characteristic value
連立微分方程式, ベクトル, 行列, 対角行列, ジョルダンの標準形, 固有方程式, 固有値

§ 1 はじめに

複素数を学ぶまでは、誰しも 2 次方程式の解は実数であると思い込んでいたはずである。それは中学校の時に実数解をもつタイプの 2 次方程式ばかり解かされてきたためである。

ところが、複素数の導入によってすべての 2 次方程式が複素数の範囲で解けることを知ることとなった。また、導入された当時は奇妙な存在であった複素数が、その後の理工学分野で極めて有用な数となっていることは、周知の事実である。

それと似たようなことが、行列の対角化についても言える。対角化できる行列と対角化できない行列があることはよく知られている。

複素数の導入によって、すべての 2 次方程式が複素数の範囲で解けることとなったように、対角化の概念を拡張することによって、すべての行列を対角化または対角化に近い形にできないだろうか？ そこで考えられたものが、ジョルダンの標準形である。すなわち、実数が複素数の一部だと見なされたように、対角行列をジョルダン標準形の特殊な場合だと見なすのである。

本稿では、連立微分方程式の解法を通して、対角化はできないけどジョルダンの標準形にすれば充分有効であることを例題で示したい。また、ジョルダンの標準形の理論は非常に難解であるが、2 × 2 行列の場合について、あらゆる行列が対角化またはジョルダンの標準形に出来ることを、難解な理論を使

わないで分かりやすく解説してみたい。

§ 2 対角化できない行列の例

例題 1

次の連立微分方程式の一般解を求めよ。

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = 5x_1 + 4x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_1 + x_2 \end{cases}$$

【解】

上の連立微分方程式を行列とベクトルを使って書くと、次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 4 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

ここで、

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 4 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

とおく。

行列 A の固有方程式は、

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} 5 - \lambda & 4 \\ -1 & 1 - \lambda \end{vmatrix} = (\lambda - 3)^2 = 0$$

より、固有値は3（重解）である。

固有値3に対する固有ベクトルは $\mathbf{p}_1 = t \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}$

、 $t \neq 0$ だけであるから、 \mathbf{A} は対角化できない。

§ 3 ジョルダンの標準形の有効性

例題2

次の連立微分方程式の一般解を求めよ。

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = 3y_1 + y_2 & \text{①} \\ \frac{dy_2}{dt} = 3y_2 & \text{②} \end{cases}$$

【解】

上の連立微分方程式を行列とベクトルを使って書くと次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

ここで、

$$J = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

をジョルダンの標準形という。この行列は対角行列ではないが、充分有効であることがわかる。

この例題2は連立微分方程式とは言っても、2番目の式は y_2 だけの式であり、解 y_2 は直ちに、

$$y_2 = c_1 e^{3t} \quad \text{③}$$

であることがわかる。そこで、③を①に代入すると、

$$\frac{dy_1}{dt} = 3y_1 + c_1 e^{3t} \quad \text{④}$$

が得られ、

$$y_1 = c_2 e^{3t} + c_1 t e^{3t}$$

となることも容易にわかる。

§ 4 変換行列の求め方

§ 3 でジョルダンの標準形の有効性が確かめられたので、ここでは、例題1の行列 \mathbf{A} をある正則行列 \mathbf{P} を用いてジョルダンの標準形にすることを考える。すなわち、

$$\mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} = \mathbf{J}$$

を満たす \mathbf{P} を求めたい。

そこで、両辺に左から \mathbf{P} を掛けると、 $\mathbf{A} \mathbf{P} = \mathbf{P} \mathbf{J}$ となる。ここで、 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2]$ とおくと、

$$\mathbf{A} [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2] = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2] \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

すなわち、

$$[\mathbf{A} \mathbf{p}_1 \ \mathbf{A} \mathbf{p}_2] = [3 \mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_1 + 3 \mathbf{p}_2]$$

ゆえに、

$$\begin{cases} \mathbf{A} \mathbf{p}_1 = 3 \mathbf{p}_1 & \text{①} \\ \mathbf{A} \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_1 + 3 \mathbf{p}_2 & \text{②} \end{cases}$$

となる。①は、 \mathbf{p}_1 が \mathbf{A} の固有ベクトルであることを示しているから、

$$\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}$$

をとればよい。②は、

$$(\mathbf{A} - 3\mathbf{E}) \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_1$$

となる。すなわち、

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}$$

となるから、 $\mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ とすればよいことがわかる。

そこで、 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2] = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ とおけば、

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \text{となり、}$$

$$\mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \quad \text{③}$$

となることが確かめられる。

§ 5 例題1の解答例

§ 4 の結果を踏まえて、ここでは、例題1のベクトルと行列を使った解答例を示す。

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 4 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

とおくと、与えられた連立微分方程式は行列とベクトルを使って書くと次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \text{①}$$

行列 A の固有方程式は、

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} 5 - \lambda & 4 \\ -1 & 1 - \lambda \end{vmatrix} = (\lambda - 3)^2 = 0$$

より、固有値は3（重解）である。

固有値3に対する固有ベクトルは $\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}$ よ

り、次の式を満たす \mathbf{p}_2 を求める。

$$(A - 3E)\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_1$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}$$

より、 $\mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ とする。

そこで、 $P = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2] = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ とおくと、

$$P^{-1}AP = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} = J \quad \text{②}$$

となる。ここで、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \text{とおくと、} \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \frac{dy_1}{dt} \\ \frac{dy_2}{dt} \end{bmatrix} \text{とな}$$

り、これらを①へ代入すると、次の式が得られる。

$$P \begin{bmatrix} \frac{dy_1}{dt} \\ \frac{dy_2}{dt} \end{bmatrix} = AP \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

さらに、②より、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \frac{dy_1}{dt} \\ \frac{dy_2}{dt} \end{bmatrix} = P^{-1}AP \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

これを成分で書くと、次のようになる。

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = 3y_1 + y_2 \\ \frac{dy_2}{dt} = 3y_2 \end{cases}$$

上の連立微分方程式の解は例題2で見たように、

$$\begin{cases} y_2 = c_1 e^{3t} \\ y_1 = c_2 e^{3t} + c_1 t e^{3t} \end{cases}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2 & c_1 \\ c_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3t} \\ t e^{3t} \end{bmatrix}$$

となる。また、 $\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$ より、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 & c_1 \\ c_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3t} \\ t e^{3t} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c_1 + 2c_2 & 2c_1 \\ -c_2 & -c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3t} \\ t e^{3t} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{cases} x_1 = (c_1 + 2c_2)e^{3t} + 2c_1 t e^{3t} \\ x_2 = -c_2 e^{3t} - c_1 t e^{3t} \end{cases}$$

となる。

§ 6 特殊な行列の固有ベクトル

例題3

次の行列の固有値と固有ベクトルを求めよ。

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

【解】

行列 A の固有方程式は、

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} 2 - \lambda & 0 \\ 0 & 2 - \lambda \end{vmatrix} = (\lambda - 2)^2 = 0$$

より、固有値は2（重解）である。

固有値2に対する固有ベクトルを $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ とお

くと、次の式が成り立つ。

$$(A-2E) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

上の式は任意の x_1, x_2 に対して成り立つから、

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

となる。ただし、 s, t は任意の数である。従って、

$$\mathbf{p}_1 = s \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, s \neq 0$$

$$\mathbf{p}_2 = t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, t \neq 0$$

なる2つの固有ベクトルが求まる。

§7 2×2行列のジョルダン標準形

ここでは、すべての2×2行列が、対角行列またはジョルダンの標準形にできることを示す。

行列 $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ の固有方程式は、

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} a - \lambda & b \\ c & d - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

である。行列式を展開すると、 λ に関する2次方程式

$$\lambda^2 - (a+d)\lambda + (ad - bc) = 0 \quad \text{①}$$

となる。この方程式の解 λ_1, λ_2 が固有値である。

$\lambda_1 \neq \lambda_2$ の場合は正則行列 P を用いて、

$$P^{-1}AP = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}$$

と対角化されることはよく知られている。

ここでは、 $\lambda_1 = \lambda_2$ の場合について詳しく調べてみる。さらにこの場合は、次の2つの場合に分かれる。

i) $A - \lambda_1 E = O$ の場合

このときは、

$$A = \lambda_1 E = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}$$

となり、例題3で見たようにそれ自身対角行列であり、何もすることはない。

ii) $A - \lambda_1 E \neq O$ の場合

①より、次の2式が成り立つ。

$$\lambda_1 = \frac{a+d}{2} \quad \text{②}$$

$$D = (a+d)^2 - 4(ad - bc) = 0$$

すなわち、

$$(a-d)^2 + 4bc = 0 \quad \text{③}$$

一方、②より、

$$A - \lambda_1 E = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{a+d}{2} & 0 \\ 0 & \frac{a+d}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} & b \\ c & -\frac{a-d}{2} \end{bmatrix}$$

となる。 $A - \lambda_1 E \neq O$ より、行列 $A - \lambda_1 E$ の列ベクトルのうち少なくとも一方は零ベクトルではない。以下では第1列が零ベクトルではないとして、それ

を $\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} \\ c \end{bmatrix}$ として議論するが、第2列が零ベ

クトルではない場合も同じようになる。

$$(A - \lambda_1 E) \mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} & b \\ c & -\frac{a-d}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(a-d)^2 + 4bc}{2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\because \text{③より})$$

$$\therefore (A - \lambda_1 E) \mathbf{p}_1 = \mathbf{0} \quad \text{④}$$

$$\therefore A\mathbf{p}_1 = \lambda_1\mathbf{p}_1$$

このことは、 \mathbf{p}_1 が、 A の固有ベクトルであることを示している。

さて、このようなベクトル \mathbf{p}_1 に対して、

$$(A - \lambda_1 E)\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_1 \tag{5}$$

を満たすベクトル \mathbf{p}_2 は、

$$\begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} & b \\ c & -\frac{a-d}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} \\ c \end{bmatrix}$$

より、 $\mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ととればよいことが分かる。

最後に、 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ が線形独立となることを、以下に示す。そのためには、

$$c_1\mathbf{p}_1 + c_2\mathbf{p}_2 = \mathbf{0}$$

を満たす c_1, c_2 が $c_1 = c_2 = 0$ しかないことを示せばよい。まず、両辺に左から行列 $A - \lambda_1 E$ をかけると、次のようになる。

$$c_1(A - \lambda_1 E)\mathbf{p}_1 + c_2(A - \lambda_1 E)\mathbf{p}_2 = \mathbf{0}$$

ここで、④、⑤より、次の式が成り立つ。

$$c_2\mathbf{p}_1 = \mathbf{0}$$

ところが \mathbf{p}_1 は零ベクトルではないので、

$$c_2 = 0$$

$$\therefore c_1 = 0$$

従って、 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ は線形独立である。

以上のことから、

$$P = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2] = \begin{bmatrix} \frac{a-d}{2} & 1 \\ c & 0 \end{bmatrix} \text{とおけば、}$$

$$P^{-1}AP = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}$$

となる。

§ 8 終わりに

本稿では、連立微分方程式の解法を通して、ジョルダンの標準形の有効性を示した。また、ジョルダンの標準形にするための変換行列 P が必ず存在することを示した。

しかしながら、変換行列 P の列ベクトル $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ の求め方は、§ 7の④、⑤さえ満たしていれば、どのように求めてもよいことを付け加えておく。

また、2×2行列は、必ず次のいずれかにすることができることを示した。

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}$$

ただし、 $\lambda_1 \neq \lambda_2$ である。

なお、機会があれば3×3以上の行列についても難しい理論を使わないで分類してみたい。

参考文献

- 1) 小寺平治, なっとくする微分方程式, 講談社, 2000.
- 2) 薩摩順吉, 四ッ谷晶二 共著, キーポイント線形代数, 岩波書店, 1994.
- 3) 横田一郎, 佐倉直男, 味木 博 共著, ベクトルと行列, 竹内書店, 1972.

多価写像による連続写像の近似について

(一般科目) 赤池 祐次

Approximation of Continuous Maps by Multi-valued Maps

(Department of General Education) Yuji AKAIKE

Abstract

The notion of a multi-net was introduced and constructed a new shape category in [2]. This description is intrinsic in the sense that does not make use of external elements such as *ANR*-expansions.

We introduce in this paper the notion of an approximate multi-net between compact metric spaces and give a characterization of continuous maps by approximate multi-nets.

Key Words: multivalued map, approximate multi-net, uniform multi-net.

多価写像、近似的多価網、一様多価網

§1. はじめに

無限操作によって作られる複雑な空間（あるいは図形）から複雑な空間への連続写像を、それぞれの空間を射影的極限に展開した空間列の間の連続写像で特徴づける試みは論文 [1] などに見られる。これは、複雑な空間を比較的わかりやすい空間（例えば多面体）で近似してわかりやすい空間の間の写像により近似することができることを示している。

一方、ホモトピー理論とは、空間を連続的に変形したときに変わらない性質を主に代数的に調べる数学である。しかし複雑な空間の場合、2つの空間の間には自明な（定値写像とホモトピックな）連続写像しか存在しないことがある。一般のコンパクト距離空間についてホモトピー理論のアナロジーとして、シェーブ理論が K. Borsuk により 1968 年に導入された。これは、2つの空間を比較するとき、連続写像ではなく射影的極限により展開された空間列の間の連続写像を調べること、シェーブ型が等しいか等しくないかを判定するという理論である。これにより、複雑な空間に対しては、局所的な性質を無視して全体的な性質を考え、ホモト

ピー理論より適切な分類を与えることができるようになった。（一般に、ホモトピー型が等しければシェーブ型も等しい。）

しかし、シェーブ理論は空間を射影的極限で展開するため、調べたい空間以外に別の近似された空間を必要とする。そのために空間を展開しない方法が試みられ、特に論文 [2] では連続写像ではなく集合値関数（多価写像）の集まりである多価網（multi-net）によってシェーブ理論を論じている。

本研究では、ある条件を満たす多価網（近似的多価網）を定義し、論文 [1] のような連続写像の特徴づけを空間の間の近似的多価網によって行うことを試みた。そして、連続写像が近似的多価網によって近似されるための条件を考え、どのようなときに連続写像が近似されるかを調べた。

§2. 近似的多価網

ここでは簡単のため、空間は全てコンパクト距離空間とする。

まず、議論に必要な定義をする。

X, Y をそれぞれ距離 d_X, d_Y の入った距離空間とする。 X から Y への写像 $f: X \rightarrow Y$ が $x \in X$ で連続 (continuous) であるとは、任意の正数 ε に対し、ある正数 δ が存在して、 $d_X(x', x) < \delta$ ($x' \in X$) ならば $d_Y(f(x'), f(x)) < \varepsilon$ となるときをいう。混乱の恐れのないときは距離を単に d とかく。任意の $x \in X$ について連続であるとき、単に連続であるという。

X の部分集合 A の直径 (大きさ) を $\text{diam } A$ で表し、 A の ε -近傍を $B_\varepsilon(A)$ で表す。

$x \in X$ に Y の部分集合 $F(x)$ を対応させる集合値関数 $F: X \rightarrow Y$ を考える。 F が多価関数 (multivalued function) であるとは、 $F(x)$ が Y の閉集合であるときをいう。多価関数 F が上半連続 (upper semicontinuous) であるとは、任意の $x \in X$ と $F(x)$ の任意の近傍 V に対して x の近傍 U が存在して、 $F(U) = \bigcup_{x' \in U} F(x') \subset V$ となるときをいう。 X から Y への多価関数が上半連続であるとき多価写像 (multivalued map) とよぶ。

自然数 $n = 1, 2, \dots$ を添え字とする多価写像 $F_n: X \rightarrow Y$ の集合 $\{F_n\}$ があるとき、それをまとめて $\{F_n\}: X \rightarrow Y$ と表す。 $\{F_n\}: X \rightarrow Y$ が近似的多価網 (approximate multi-net) であるとは、次の2つの条件を満たすときをいう。

- (1) 任意の $x \in X$ と任意の正数 ε に対してある自然数 n_0 が存在し、 $n \geq n_0$ である任意の自然数 n について、 $F_n(x) \subset B_\varepsilon(F_{n_0}(x))$ 。
- (2) 任意の $x \in X$ について、 $n \rightarrow \infty$ のとき $\text{diam } F_n(x) \rightarrow 0$ 。

近似的多価網 $\{F_n\}: X \rightarrow Y$ が連続写像 $f: X \rightarrow Y$ と同伴 (associated) であるとは、任意の正数 ε に対してある自然数 n_0 が存在し、 $n \geq n_0$ である任意の自然数 n について、 $f(x) \in B_\varepsilon(F_n(x))$ となるときをいう。この定義から、各 n に対し $y_n \in F_n(x)$ が存在し、 $n \rightarrow \infty$ のとき $y_n \rightarrow f(x)$ が成り立つ。

命題 1. 近似的多価網 $\{F_n\}: X \rightarrow Y$ が連続写像 $f: X \rightarrow Y$ と同伴するための必要十分条件は、任意の正数 ε に対してある自然数 n_0 が存在し、 $n \geq n_0$ である任意の自然数 n について、 $F_n(x) \subset B_\varepsilon(f(x))$ となることである。

証明) 必要性: 背理法で証明する。もし、ある正数 ε が存在してどんな自然数 n_0 をとってきても $F_n(x)$ が $B_\varepsilon(f(x))$ に含まれないような n ($n \geq n_0$) があるとする。すなわち、 $y'_n \in F_n(x)$ であつて $y_n \notin B_\varepsilon(f(x))$

となる y'_n が無数に存在する。 $\{F_n\}$ が f と同伴であるから、各 n に対し $y_n \in F_n(x)$ が存在し、 $n \rightarrow \infty$ のとき $y_n \rightarrow f(x)$ が成り立つ。無数の n に対して $y'_n, y_n \in F_n(x)$ であり、 y'_n は $f(x)$ に ε 以内に近づくことがないので、 $\text{diam } F_n(x)$ は小さくならない。これは $\{F_n\}$ が近似的多価網である条件 (2) に矛盾する。

十分性: $F_n(x) \in B_\varepsilon(f(x))$ であるならば、 $f(x)$ は1点なので明らかに $f(x) \in B_\varepsilon(F_n(x))$ が成り立つ。□

この命題から、近似的多価網 $\{F_n\}$ は、集合 $F_n(x)$ が小さくなりながらだんだん $f(x)$ に近づいていくというイメージになる。

§3. 連続写像と同伴しない近似的多価網の例

多価写像の集合 $\{F_n\}$ が近似的多価網の条件を満たすだけでは連続写像と同伴するとは限らない。ここではその反例を与える。

座標平面に次のように点 a_n と点 b_n をとる:

$$a_n = \left(\frac{1}{n}, 1 \right), \quad b_n = \left(\frac{1}{n+1}, 0 \right).$$

平面上の2点 u と v を直線で結んだ線分を $\langle u, v \rangle$ と表し、 $J = \{(x, y) \mid x=0, 0 \leq y \leq 1\}$ とする。2つの空間 X, Y を次のように定める:

$$X = \{(x, y) \mid 0 \leq x \leq 1, y=0\},$$

$$Y = J \cup \bigcup_{i=1}^{\infty} \langle a_{i+1}, b_i \rangle \cup \langle b_i, a_i \rangle.$$

X は長さ1の閉区間、 Y は曲線が線分 J に振動しながら近づいていく $\sin \frac{1}{x}$ -連続体といわれるものと同じ図形である (図1参照)。

Y の部分集合 Y_n を

$$Y_n = J \cup \bigcup_{i=n}^{\infty} \langle a_{i+1}, b_i \rangle \cup \langle b_i, a_i \rangle$$

とおく。 $r_n: Y_n \rightarrow J$ を Y_n から J への自然な射影とし、

$$p_n: Y_n \rightarrow \left[0, \frac{1}{n} \right]$$

を $p_n(x) = \frac{1}{n} r_n(x)$ とする。区間 $[\frac{1}{i+1}, \frac{1}{i}]$ の中点 $t_i = \frac{2i+1}{2i(i+1)}$ をとり、区分的線形写像

$$f_i: \left[\frac{1}{i+1}, \frac{1}{i} \right] \rightarrow \langle a_{i+1}, b_i \rangle \cup \langle b_i, a_i \rangle$$

を、区間 $[\frac{1}{i+1}, t_i]$ では $\langle a_{i+1}, b_i \rangle$ へ、区間 $[t_i, \frac{1}{i}]$ では $\langle b_i, a_i \rangle$ へ、1対1に写し、かつ $f_i(\frac{1}{i+1}) = a_{i+1}$, $f_i(t_i) = b_i$, $f_i(\frac{1}{i}) = a_i$ となるものとする。

以上の準備のもとで、 $F_n : X \rightarrow Y$ を次のように定義する：

$$F_n(x) = \begin{cases} f_i(x), & x \in (\frac{1}{i+1}, \frac{1}{i}) \ (i \leq n) \text{ のとき} \\ p_{n+1}^{-1}(x), & x \in [0, \frac{1}{n+1}] \text{ のとき} \end{cases}$$

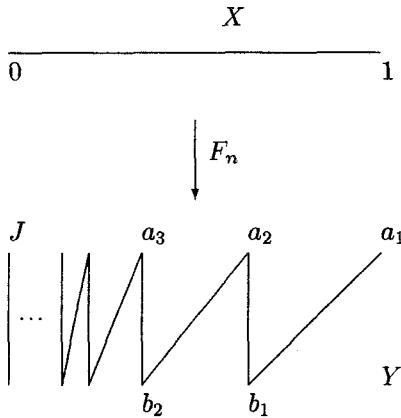


図 1

つまり、 F_n は X の部分区間 $(\frac{1}{n}, 1]$ では 1 対 1 の区分的線形写像で、 $[0, \frac{1}{n}]$ では多価写像になっている。

$\{F_n\}$ は X から Y への近似的多価網になっている。なぜならば、もし $x \in (0, 1]$ ならば、ある n_0 が存在して $x \in (\frac{1}{n_0+1}, \frac{1}{n_0}]$ となり、 F_n の定義から $n \geq n_0$ である任意の n について $F_n(x) = f_{n_0}(x)$ (1 点) となり、近似的多価網の条件 (1) (2) を満たす。また、もし $x = 0$ ならば、 $F_n(x) = p_{n+1}^{-1}(0) = \{b_k \mid k \geq n+1\}$ となり、 $F_{n+1}(0) \subset F_n(0)$ かつ $\text{diam } F_n(0) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$) となっているからである。

しかし、この $\{F_n\}$ は連続写像と同伴しない。実際、もしある連続写像 $f : X \rightarrow Y$ で $\{F_n\}$ と同伴するものがあるならば、同伴の定義から、任意の ε に対しある n_0 が存在して $n \geq n_0$ となる任意の n に対して $f(0) \subset B_\varepsilon(F_n(0))$ であり、 $\bigcap_{n=1}^\infty F_n(0) = (0, 0)$ から $f(0) = (0, 0)$ でなくてはならず、また $f(1) \subset B_\varepsilon(F_n(1))$ であり、 $F_n(1) = a_1$ ($n \geq 1$) であるから $f(1) = a_1$ でなければならない。これは、 f が $(0, 0)$ と a_1 を弧で結ぶ X から Y への連続写像であることを示しており、 Y が弧状連結でないことに反する。したがって、この $\{F_n\}$ は連続写像を同伴しない。

§4. 連続写像と同伴するための条件

本研究では、近似的多価網が連続写像と同伴するためには、一様連続性と類似の性質を満たしている必要があることがわかった。そのために次の定義をする。

距離空間の 2 つの部分集合 A と B に対して

$$D(A, B) = \inf\{d(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

とする。 $\{F_n\} : X \rightarrow Y$ が一様多価網 (uniform multi-net) であるとは、任意の正数 ε に対して、ある自然数 n_0 と正数 δ が存在して、 $d(x, x') < \delta$ ($x, x' \in X$) ならば $n \geq n_0$ である任意の自然数 n について $D(F_n(x), F_n(x')) < \varepsilon$ となることをいう。

定理 2. 近似的多価網 $\{F_n\} : X \rightarrow Y$ が連続写像と同伴するためには $\{F_n\}$ が一様多価網であることが必要十分である。

証明) 必要性： $\{F_n\}$ がある連続写像 $f : X \rightarrow Y$ と同伴であるとする。任意の正数 ε をとる。 X がコンパクトであるから、 f は一様連続である。したがって、ある正数 δ が存在して、 $d(x, x') < \delta$ ($x, x' \in X$) ならば

$$d(f(x), f(x')) < \frac{\varepsilon}{3}$$

とすることができる。 $\{F_n\}$ が近似的多価網であるから、 $x, x' \in X$ に対してある自然数 n_1, n_2 が存在して、

$$F_n(x) \subset B_{\frac{\varepsilon}{3}}(f(x)) \ (n \geq n_1),$$

$$F_n(x') \subset B_{\frac{\varepsilon}{3}}(f(x')) \ (n \geq n_2)$$

とすることができる。ここで、 $n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ とすると、 $n \geq n_0$ となる任意の n について、 $y_n \in F_n(x)$ 、 $y'_n \in F_n(x')$ で

$$d(y_n, f(x)) < \frac{\varepsilon}{3}, \quad d(y'_n, f(x')) < \frac{\varepsilon}{3}$$

となるものがとれる。したがって、

$$\begin{aligned} D(F_n(x), F_n(x')) &\leq d(y_n, y'_n) \\ &\leq d(y_n, f(x)) + d(f(x), f(x')) + d(f(x'), y'_n) \\ &< \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon \end{aligned}$$

となり、 $\{F_n\}$ が一様多価網の条件を満たすことがわかった。

十分性：一様多価網 $\{F_n\}$ が与えられたときに、それと同伴する連続写像が存在することを示す。 $\{F_n\}$ が近似的多価網であるから、 $F_n(x) \subset Y$ はどんどん小さくなりながら Y のある元に近づいていく。その行き先を $f(x) \in Y$ とする。すなわち、任意の $x \in X$ に対してある $f(x) \in Y$ が存在して、任意の $y_n \in F_n(x)$ に対し $y_n \rightarrow f(x)$ ($n \rightarrow \infty$) とできる。この $f : X \rightarrow Y$ が連続写像であることを示そう。任意の正数 ε と任意の $x \in X$ をとる。 $\{F_n\}$ が一様多価網であるから、ある正数 δ と自然数 n_0 が存在して $d(x', x) < \delta$ ($x' \in X$) ならば $n \geq n_0$ である任意の自然数 n に対して

$$D(F_n(x'), F_n(x)) < \frac{\varepsilon}{3}$$

が成り立つ。したがって、 $y'_n \in F_n(x')$, $y_n \in F_n(x)$ が存在して

$$d(y'_n, y_n) < \frac{\varepsilon}{3}$$

となる。また、 $f(x)$ の取り方から、十分大きな自然数 n に対して

$$\begin{aligned} F_n(x) &\subset B_{\frac{\varepsilon}{3}}(f(x)), \\ F_n(x') &\subset B_{\frac{\varepsilon}{3}}(f(x')) \end{aligned}$$

とできる。したがって

$$d(f(x), y_n) < \frac{\varepsilon}{3}, \quad d(f(x'), y'_n) < \frac{\varepsilon}{3}$$

となり、

$$\begin{aligned} d(f(x), f(x')) &\leq d(f(x), y_n) + d(y_n, y'_n) + d(y'_n, f(x')) \\ &< \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon \end{aligned}$$

が成り立ち、 f が連続であることが示された。□

§5. 終わりに

論文 [3] において、フラクタル幾何学で重要なリブシツツ写像の近似的分解 (approximate resolution) による特徴づけが得られた。これは論文 [1] のように、連続写像を射影的極限に展開した空間列の間の連続写像で特徴づける研究の延長線上にあるものといえる。このことから、本研究で定義された近似的多価網によるリブシツツ写像の特徴づけができる可能性があると思われる。

参考文献

- [1] J. Mioduszewski, *Mappings of inverse limits*, Colloquium Math. 10(1963), 39-44.
- [2] J. M. R. Sanjurjo, *An intrinsic description of shape*, Transaction of Amer. Math. Soc. 329 no. 2, (1992), 625-636.
- [3] T. Miyata and T. Watanabe, *Lipschitz functions and approximate resolutions*, preprint.

有害獣監視システムの試作

(機械工学科) 野原 稔

Trial Production of Surveillance System of Harmful Animals

(Department of Mechanical Engineering) Minoru NOHARA

Abstract

Since cultivation abandonment of farmland etc. is performed as the age of a farm population becomes high recently, harmful animals, such as a wild boar and a deer, breed in these farmland, and the damage to agricultural products has increased. Although the electric fence, the tin fence, and the network fence are used in order to prevent the damage to the agricultural products by the harmful animals, much a labor and cost are needed for installing these fences.

In this paper, when the wild boar approached farmland, after the sensor detected the wild boar, CCD camera, the monitor for surveillance, and the alarm were operated, and the system which tells a surveillance member about approach of a wild boar was made as an experiment. Therefore, the manufacture process and the situation of operation of required hardware and software are reported.

Key Words: Micro Computer, Operation Control, Simulation, Harmful Animals

マイクロコンピュータ, 制御, シミュレーション, 有害獣

§1 緒言

最近, 農業人口の高年齢化に伴い, 農地などの耕作放棄が行われているため, これらの農地などで猪, 鹿および狸などの有害獣が繁殖し農作物への被害が増加してきている。有害獣(以降, 猪と呼ぶ)による農作物などへの被害を防ぐため, 電気さく, トタンさくおよびネットさくなどが使用されているが, これらのさくを設置するには多くの労力や経費を必要とする。

本研究では, 猪が農地に接近すると, センサーがこれを検知してCCDカメラ, 監視用モニターおよび警報機が作動して監視員に猪の接近を知らせるシステムを試作した。そのために必要なハードウェアとソフトウェアの製作過程および動作状況について報告する。

§2 監視システムの概要

図1は, 猪監視システムの概要を示している。赤外線センサー(以降, センサーと呼ぶ)が猪を検知すると, その信号がマイクロコンピュータ(以降, マイコンと呼ぶ)に入力され, マイコンの出力ポートに接続されたDCリレーを, さらにDCリレーに接続されたACリレーを作動させ

て, CCDカメラおよびモニターの電源をONとしモニターに猪を映し出す。また, 警報機が回転しブザーが鳴って猪の接近を監視員に知らせる。猪の接近を知らせた後CCDカメラとモニターの電源を停止する。

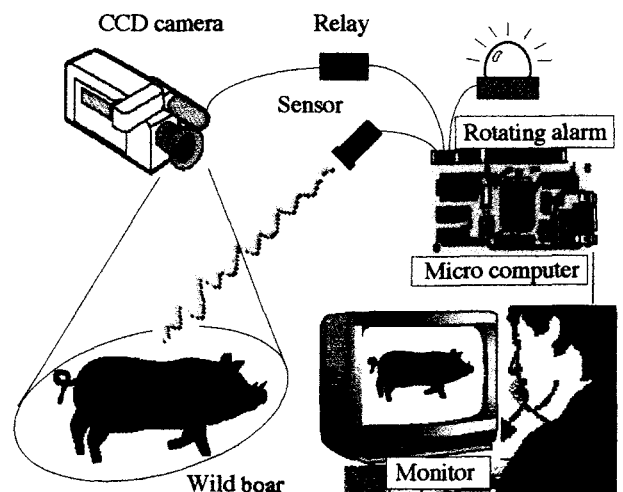


図1 猪監視システム

§3 ハードウェア

これらの監視システムを構成するための、主要なハードウェアは以下の通りである。

3.1 マイコン

猪監視システムを動作させるためのマイコンには、秋月電子通商のAKI-80¹⁾を、ROMにはEPROM 27C256を使用した。

3.2 センサー

周囲の様子を監視し、猪を検知するには、人間の目に相当するセンサーが必要となる。センサーは、焦電型赤外線センサーユニットを使用した。このセンサーは、生体から放出される赤外線を熱に変えて検出するセンサーであり、生体の検知に使用される。センサーの検出エリアは、視野角5~80°、最大視野距離30mである²⁾。

3.3 警報機

警報機の構成は、LEDとLEDの光を拡散反射させる回転反射板である。警報機に内蔵したLEDは、緑色と赤色の2色のLEDを使用した。猪を検知すると緑色のLEDが点灯、さらに猪が一定時間停留した場合には、赤のLEDを点灯させるようにした。LEDの光を拡散させる反射板はモータによって回転させるが、モータの回転数は現場の状況によって変えるため、モータドライバIC TA7257P（以降、ドライバと呼ぶ）を使用してマイコンで制御した。

3.4 ブザー

ブザーは、2色のLEDを制御するDCリレーのコイル端子と、並列に接続しているが、電力が不足するため、出力ポートBの6ビット目からも電力を供給した。なお、ブザーもLEDと同様に警報機の中に搭載した。

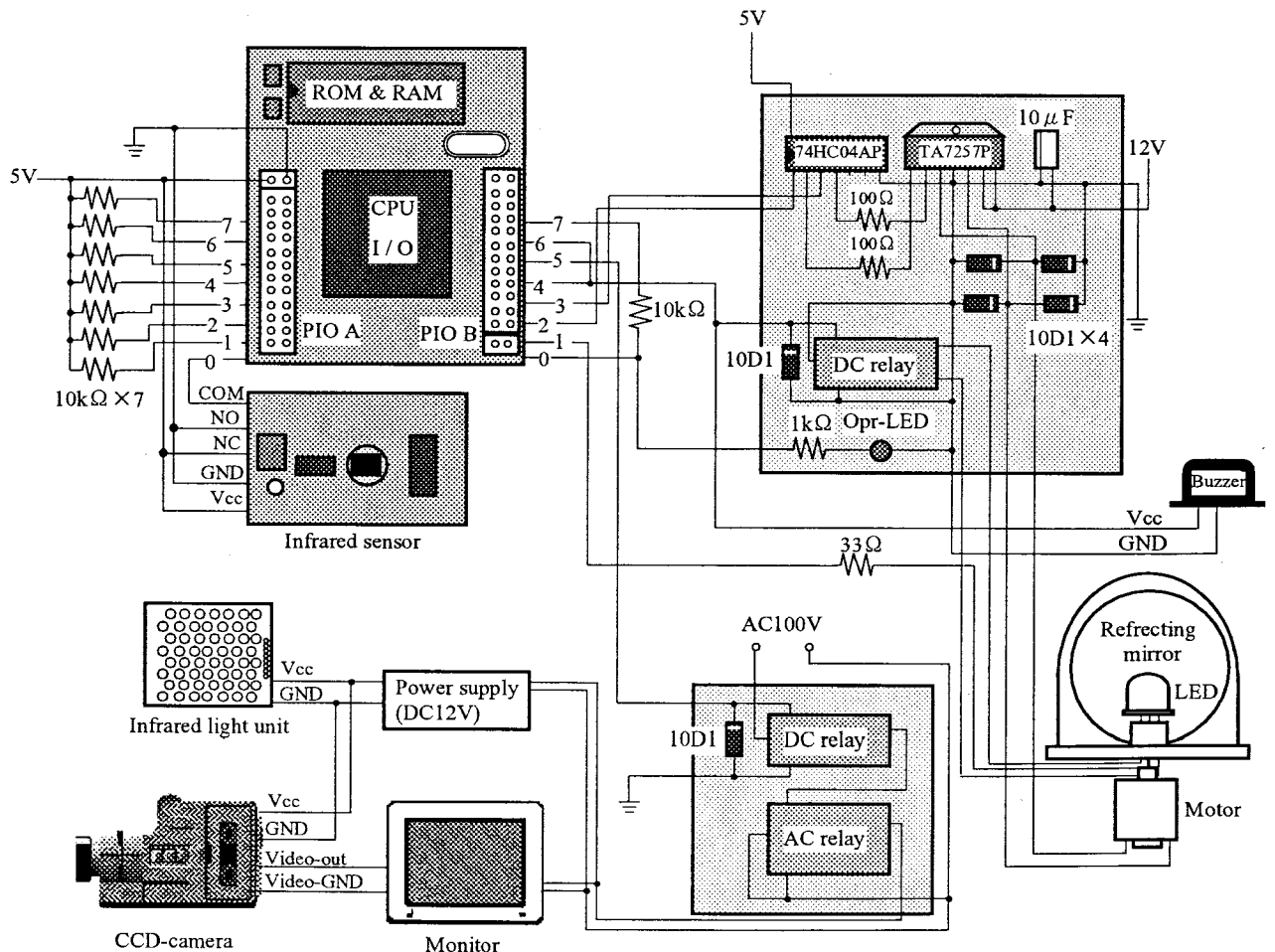


図2 猪監視システムの全体配線図

表1 AKI-80のI/Oポートの使用状況

Z80PIO	PIO A (Input)	A ₀	Sensor input
	PIO B (Output)	B ₀ ,B ₇	Operate LED
		B ₁	Rotating alarm LED
		B ₂	Motor driver in ₁
		B ₃	Motor driver in ₂
		B ₄ ,B ₆	DC relay & Buzzer
	B ₅	AC relay	

表2 TA7257Pの機能

(Pin No.)	In ₁	In ₂	Out ₁	Out ₂
	1	2	3	5
CW/CCW	L	H	L	H
CCW/CW	H	L	H	L
Brake	H	H	L	L

3.5 CCDカメラ

CCDカメラは、夜間での撮影が可能な秋月電子通商の赤外線モノクロCCDカメラユニットSC-120を使用した。このCCDカメラの有効画素数は、約25万画素である。

3.6 猪監視システムの全体配線図

図2は猪監視システムの全体配線図を示す。図2中に示すように、ドライバへの制御信号はBポートからドライバのIn₁, In₂に入力するが、Bポートとドライバの間にインバータIC 7404を入れ、ドライバの破損がマイコンに及ばないようにした。表1は、AKI-80のI/Oポートの使用状況を示す。表1中におけるAポート（入力）にはセンサーを、Bポート（出力）には警報機、ブザーおよびDCリレーを接続した。また、表2は、TA7257Pの機能を示したもので、モータの正転、逆転、ブレーキの3つの動作を、TA7257PのIn₁とIn₂に入力する信号によって変えることができる³⁾。

§4 ソフトウェア

猪監視システムは、I/Oポートの設定プログラム、メインプログラムおよびタイマルーチンプログラムの3つから構成した。図3は、プログラムのチャート図を示す。以下に、これらのプログラムの概要を述べる。

4.1 I/Oポートの設定プログラム

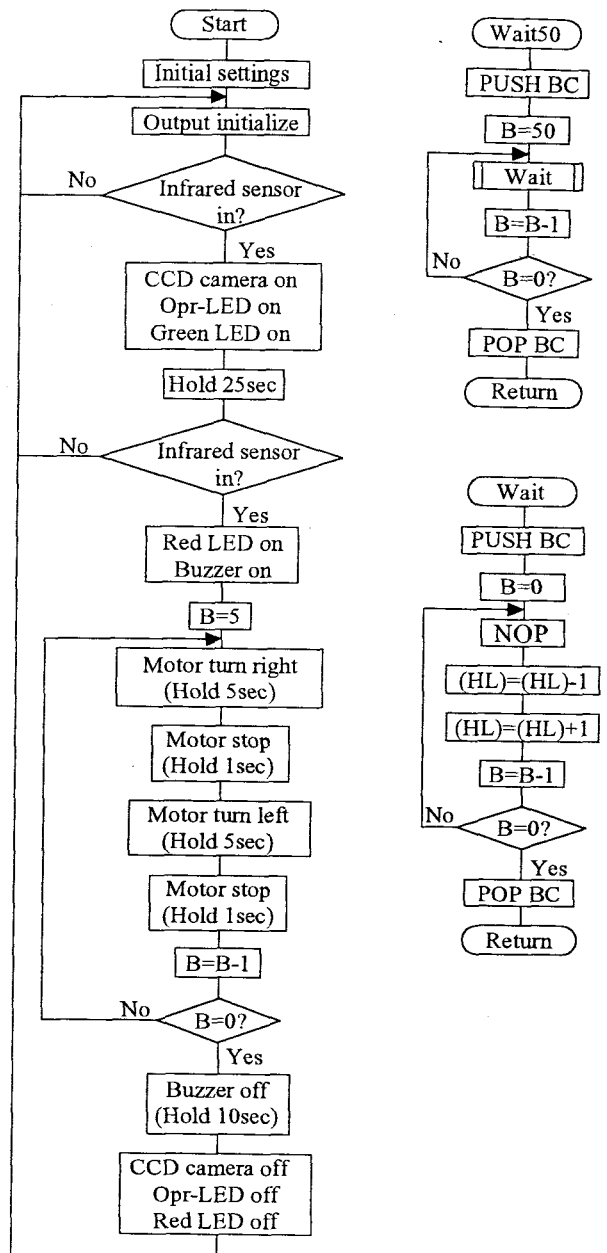


図3 プログラムのチャート図

パラレルI/Oポートのモード設定は、ビットごとの入出力設定を2進数で行うモード3を選んだ。このプログラムでは、パラレルI/Oポートのモード、ポートI/O、割込モードおよび割込対象ビットの設定を行う。なお、図3における「Opr-LED」は、猪監視システムの動作確認のLEDである。

4.2 メインプログラム

メインプログラムは、センサー入力と警報動作で構成した。

4.2.1 センサー入力と警報動作

Bポートに接続している全ての出力機器を停止させてセンサーからの入力を待つ。センサーからの入力があるまでこの状態を繰り返す。センサーの入力があると、Bポートに接続されたDCリレーや警報機などが作動するが、これらの駆動や停止時間は、タイマルーチンによって制御した。

4.3 タイマルーチン

タイマルーチンは、センサーの入力間隔、モータの駆動や停止、ブザーによる警報などの時間に関する処理を行っている。ここでは基本的な2つのタイマルーチンを示す。

4.3.1 WAIT

全てのタイマルーチンの基本である。16ビットレジスタHLから1を加減算しながら、1ミリ秒の時間をつくる。

4.3.2 WAIT50

1msの時間がつくれるサブルーチンWAITを50回繰り返し、50ミリ秒の時間をつくる。これら2つのタイマルーチンを組み合わせれば、ループ回数を指定するのみで、任意の時間をつくることができる。

4.4 プログラムのROM化

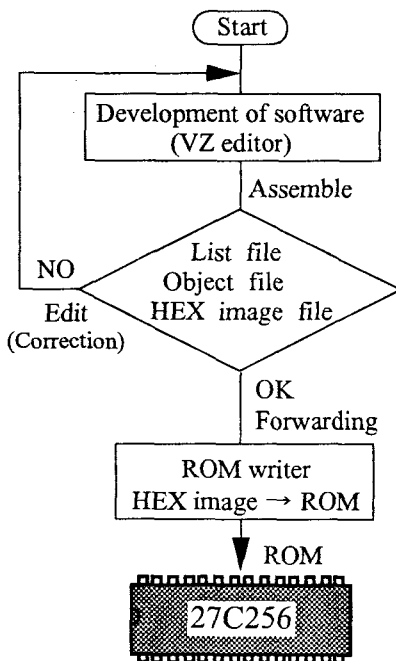


図4 プログラムのROM化

図4は、プログラムのROM化の過程を示す。アセンブラを使用して作成したプログラムは、クロスアセンブラソフトMPZ80を使用して実行形式のオブジェクトファイルに変換した後、ROM WRITERを使用してROMに書込んだ。

§ 5 動作プログラム

図5は、監視システムを動作させるのに必要なプログラムを示す。

メインプログラム

```

PIOAD equ 1ch
PIOAC equ 1dh
PIOBD equ 1eh          初期設定
PIOBC equ 1fh
org 0000h
LD SP,0
IM 2

LD A,11001111b
OUT (PIOAC),A
LD A,11111111b
OUT (PIOAC),A      Aポートの設定
LD A,00110111b    PIOモード3
OUT (PIOAC),A
LD A,00000001b
OUT (PIOAC),A

LD A,11001111b
OUT (PIOBC),A
LD A,0000000b
OUT (PIOBC),A      Bポートの設定
LD A,00010111b    PIOモード3
OUT (PIOBC),A
LD A,11111111b
OUT (PIOBC),A

DO: LD A,0CH
    OUT (PIOBD),A
    IN A,(PIOAD)   センサー入力待ち
                    (出力取消)
    JR Z,CTUP
    JR DO
    EI

CTUP: LD A,0AFH   ACリレー・LED緑
      OUT (PIOBD),A 動作確認LED ON
      CALL TM25S    25秒待つ
      JP CHKS
  
```

```

CHKS: IN  A, (PIOAD)
      BIT  0, A      センサー入力確認
      JR   Z, ONBT   次の動作決定
      JR   DO

ONBT: LD   A, 0FFH
      OUT  (PIOBD), A
      LD   B, 5      警報動作開始
RPT:  CALL RRT      LED 赤 ON
      CALL STRT     ブザー ON
      CALL LRT      モータ回転・停止
      CALL STRT     (5回繰返して60秒)
      DJNZ RPT
      JR   NLT

NLT:  LD   A, 0ADH
      OUT  (PIOBD), A  警報機 OFF
      CALL TM10S     10秒待つ
      JP   DO

```

タイマールーチン

```

TM25S: PUSH BC
      LD   B, 5
LT0:  CALL TM5S      タイマールーチン1
      DJNZ LT0      (25秒)
      POP  BC
      RET

TM10S: PUSH BC
      LD   B, 40
LT1:  CALL TM025S   タイマールーチン2
      DJNZ LT1      (10秒)
      POP  BC
      RET

TM5S:  PUSH BC
      LD   B, 20
LT2:  CALL TM025S   タイマールーチン3
      DJNZ LT2      (5秒)
      POP  BC
      RET

TM1S:  PUSH BC
      LD   B, 20
LT3:  CALL WAIT50   タイマールーチン4
      DJNZ LT3      (1秒)
      POP  BC
      RET

```

```

TM025S: PUSH BC
      LD   B, 5
LT4:  CALL WAIT50   タイマールーチン5
      DJNZ LT4      (0.25秒)
      POP  BC
      RET

WAIT50: PUSH BC
      LD   B, 50
WT50:  CALL WAIT    タイマールーチン6
      DJNZ WT50     (50ミリ秒)
      POP  BC
      RET

WAIT:  PUSH BC
      LD   B, 0
WT1:  NOP
      DEC  (HL)     タイマールーチン7
      INC  (HL)     (1ミリ秒)
      DJNZ WT1
      POP  BC
      RET

```

図5 監視システムの動作プログラム

§ 6 システムの動作過程

猪監視システムは、猪をセンサーで検知して動作するが、その過程を以下に述べる。

いま、一例として、猪監視システムの動作過程とその内容を①～⑤の番号を付けて図6に示す。

- ①. 猪がセンサーの視角外であるため、センサーに入力がない。
- ②. 猪がセンサーの視野角内に入ったため、センサーがこれを検知する。警報機が回転し緑色LEDが点灯、DCリレーが作動し、さらにDCリレーに接続されたACリレーを作動させて、CCDカメラおよびモニターの電源をONとしモニターに猪を映す。また、タイマールーチン1が働き時間のカウントを開始する。
- ③. センサーの視野角内に猪が存在している間は、センサーは作動したままの状態となる。カウントを開始してから25秒経過して、再びセンサーの作動状況を確認する。このとき、猪がセンサーの視野角外であれば、センサーに入力がないため①に戻る。
- ④. ③の状態でセンサーの視野内に猪がいれば、センサーに入力があるため、DCリレーが作動して赤色LEDが点灯し、警報機が回転する。また、同時にブザーが作動して、

警戒音を発生する。このとき、タイマールーチン3, 4を使用する。

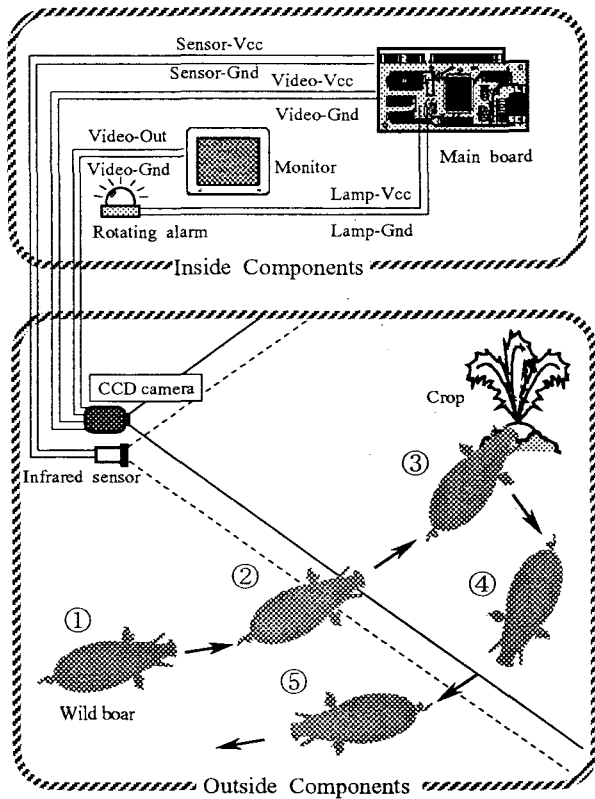


図6 猪監視システムの動作過程とその内容

⑤. 警報機の反射板は、タイマールーチン3, 4により、右回転(5秒間)→停止(1秒間)→左回転(5秒間)→停止(1秒間)の動作を5回繰返して、LEDの光を拡散させる。ブザーは、警報機が作動している60秒間鳴り続ける。その後、タイマールーチン2が働いて10秒待ち①に戻る。

基板に付けている動作確認LEDは、②～⑤の動作中は常に点灯している。

§ 7 結 言

有害獣監視システムを試作した結果を要約すると以下のようになる。

- (1) マイコンを使用して有害獣を監視するシステムを設計、製作することが可能となった。
- (2) この監視システムを使用して、農作物を有害獣から守れるかどうか、実際に試す必要があろう。

参考文献

- 1) AKI-80 12MHz キットマニュアル(1993), 秋月電子通商.
- 2) 焦電センサキットV.2 製作マニュアル(1993), 秋月電子通商.
- 3) マイクロコンピュータによる自立型移動ロボットの制御(1996), 呉高専研究報告.
- 4) MPZ80 ユーザーズガイド(1992), 無線パーツ.
- 5) 青木, 恩田 マイクロコンピュータ講義(1999), 昭晃堂.

スキッターダイト型 CoSb_3 の電子状態の研究

(電気情報工学科) 植田 義文
川浪 徹

Electronic Structures of Skutterdite CoSb_3

(Department of Electrical Engineering and Information Science) Yoshifumi UEDA,
Tohru KAWANAMI

Abstract

Skutterudite CoSb_3 crystals attract much attention as one of candidates for thermoelectric material with a high value in thermoelectric figure-of-merit. Electronic structures of skutterudite CoSb_3 were calculated with a discrete variational (DV)- $X\alpha$ method. The calculated total density of states (DOS) is in agreement with the experimental results obtained by means of ultraviolet photoemission (UPS) and inverse-photoemission (IPES) spectra. The calculated Co 3d partial DOS (PDOS) distribute over 0 to 6 eV in the valence band. This is in agreement with the results obtained from Co 3p-3d resonant photoemission measurements (RPES). It is found that contribution from the hybridization between Co 3d and Sb 5p states to the valence band is important in skutterudite CoSb_3 .

Key Words : skutterdite, photoemission, density of states (DOS), discrete variational (DV)- $X\alpha$ method
スキッターダイト, 光電子分光, 状態密度図, DV- $X\alpha$ 法

§1 序論

熱電材料を高温下で用いるためには,性能指数 Z

$$Z = \frac{S^2}{\kappa \rho} \propto \frac{m^* \mu}{\kappa_l}$$

が大きくなければならない^{1,2)}. ここで S はゼーベック係数, ρ は電気抵抗率, m^* は有効質量, そして μ はキャリアの移動度である. また κ は熱伝導率であり, そのうち格子振動による熱伝導率を κ_l と表している. スキッターダイト型 CoSb_3 は, キャリアの移動度が大きく, 熱伝導率が小さいため, 熱電材料として注目されている.

CoSb_3 の結晶構造は図 1. に示すように, 各々の頂点に Co 原子を配した立方体が 8 個組合わさっており, そのうちの 6 個に, 4 つの Sb により構成されるリングが収まっている. 残る 2 個の立方体の空隙に何らかの原子を入れたものを, 充填スキッターダイト型という. CoSb_3 の電子状態は Co を他の 3d 遷移金属元素に置き換えたり, Ce などレアアース元素を空隙に充填したりすることによって制御することができ^{3,4)}, これは, 非常

に高い性能指数を実現する可能性を示唆している.

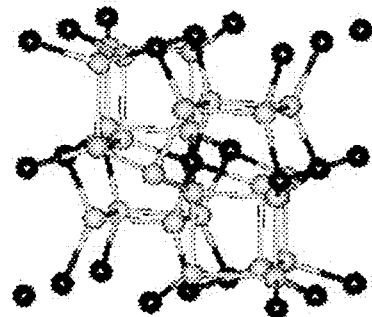


図 1. スキッターダイト型 CoSb_3 の結晶構造 ここで黒い玉は Co を, 灰色の玉は Sb を表している.

このように, CoSb_3 は非常に興味深い物質でありながら, 複雑な結晶構造のために結晶を作ることが難し

く、物性に関しても分かっていないことが多い。本研究では、CoSb₃の物性を理解するために、DV-X α 法^{5,6)}を用いて電子状態を計算し、その結果を他の計算結果³⁾や正・逆光電子分光法によるデータ⁷⁾とあわせて評価した。

§2 DV-X α 分子軌道法

2.1 局在密度近似(X α)法

固体中の電子状態を計算する方法には大きく分けて二つの方法がある。一つは、秩序正しい結晶内では原子が周期的に並んでいるため、電子状態を記述する波動関数も周期的になるBlochの定理を利用するもので、電子状態を運動量空間上で計算する。ほとんどのバンド計算はこれを用いている。

一方、電子系の基底状態の全エネルギー E は、電子密度 $\rho(\mathbf{n}) = \sum n_i \phi_i^* \phi_i$ の汎関数として表すことができるというHohenbergとKohnの定理を応用し実空間上で電子状態を計算する方法がある。これは表面の電子状態や、結晶の空格子等、結晶の周期性が乱れているときにも計算できるという長所がある。

これを応用したHartree-Fock-Slater (HFS)方程式は、分子スピン軌道 Ψ_i を原子軌道の線形結合とし

$$h(r_1)\psi_{k\uparrow}(r_1) = \varepsilon_{k\uparrow}(r_1)\psi_{k\uparrow}(r_1) \quad (1)$$

$$h(r_1) = -\frac{1}{2}\nabla_1^2 - \sum_N \frac{Z_N}{r_{1N}} + \int \frac{\rho(r_2)}{r_{12}} d\tau_2 + V_{xc} \quad (2)$$

表される⁴⁾。ここで、ハミルトニアン h の第1項は運動エネルギー、2項目は原子核と電子間に働くクーロン力による、3項目は電子間相互作用による静電エネルギーである。また、第4項はそれ以外の全ての作用による和で、交換相互ポテンシャルという。

ここで、交換相互ポテンシャルを自由ガス電子モデルに基づいて計算し、

$$V_{xc} = -3\alpha \left[\frac{3}{4\pi} \rho_1(r) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

と置くのが局在密度近似(X α)法である^{5,6)}。

2.2 DV-X α 法

局所密度近似したHFS方程式の分子スピン軌道に

$$\psi_i(r_1) = \sum_{\mu} C_{i\mu} \phi_{\mu}(r_1) \quad (4)$$

で表されるLCAO近似を導入し、積分すると、次の永年方程式を得る。

$$(H - \varepsilon S)C = 0$$

$$H_{\mu\nu} = \int \phi_{\mu}^*(r_1) h(r_1) \phi_{\nu}(r_1) d\tau_1 \quad (5)$$

$$S_{\mu\nu} = \int \phi_{\mu}^*(r_1) \phi_{\nu}(r_1) d\tau_1$$

ここで積分 $H_{\mu\nu}$ 、 $S_{\mu\nu}$ が得られれば、この永年方程式を解くことができ、系の波動関数と軌道エネルギーが得られる。この積分を実行する際に、計算する全空間にわたって積分するのではなく、空間の任意の点における $H_{\mu\nu}$ 、 $S_{\mu\nu}$ の値を求め、各点の重みをかけて全サンプル点について和をとる。この方法が離散変分法である。このような方法で得られた積分の結果から、系の各点におけるポテンシャルを求めることができる。

そこで、まず系を構成する原子が孤立原子である場合の波動関数を用いて系のポテンシャルを算出し $H_{\mu\nu}$ 、 $S_{\mu\nu}$ を得る。この値を初期値として永年方程式を解くことによって波動関数と軌道エネルギーを求める。得られた波動関数をもとに系のポテンシャルを求め、計算によって得られた波動関数を初期値として永年方程式を再び解く。このように再計算を繰り返すことによって、系のポテンシャルの初期値と計算結果の差が目的とする精度に等しくなったとき、すなわちセルフコンシステントになったとき計算を終了させる⁴⁾。

DV-X α 法は、計算の入力としては原子番号と原子の座標のみの入力により、他の一切の実験から得られた情報を用いることなく理論計算を実行することが可能である。このような計算は量子論の原理に基づいた計算なので第一原理計算と呼ばれている。

§3 正・逆光電子分光による電子状態の測定

光電子分光法とは、物質にある振動数以上の光を当てたとき、光電効果によって電子が飛び出すことを応用して占有帯の電子状態を調べる実験方法である。このとき入射する光のエネルギー $h\nu$ は、光電子の運動エネルギー E_{ko} と仕事関数 V_0 、そして始状態のエネルギー $E_i < 0$ を足したものになる。すなわちフェルミエネルギーを基準にして

$$h\nu = -E_i + V_0 + E_{ko} \quad (6)$$

が成り立つ。そこで(6)式を満足するように光を入射し、飛び出してくる光電子の数と運動エネルギーを観測することにより、価電子帯の電子状態を知ることができる。

一方、逆光電子分光は非占有帯の高いエネルギー準位

に入射された電子が、より低い空準位、すなわち終状態に遷移する時に、光を放出することを利用している。このとき放出される光のエネルギー $h\nu$ は入射した電子の運動エネルギー E_{ki} 、終状態のエネルギー E_f 、および仕事関数 V_0 を用いエネルギー保存則から求められる。つまり、フェルミエネルギーを基準に取るならば(7)式で表される。

$$h\nu = E_{ki} + V_0 - E_f \quad (7)$$

入射する電子のエネルギーを変化させながら、放射される特定のエネルギーの光の強度を観測すると、伝導帯の電子状態が分かる⁸⁾。

CoSb₃ の正・逆光電子分光スペクトルを図2に示す。横軸が、フェルミエネルギーを基準にとった電子系のエネルギー、縦軸が光電子分光に対しては光電子数、逆光電子分光に関しては光の強度を表している。

図2に示すように、価電子帯は0~5eVに広がっておりピークが-1.1eV付近にある。一方伝導帯は0~5eVに幅の広いバンドがあり、ピークが1および4eV近傍に見られる。

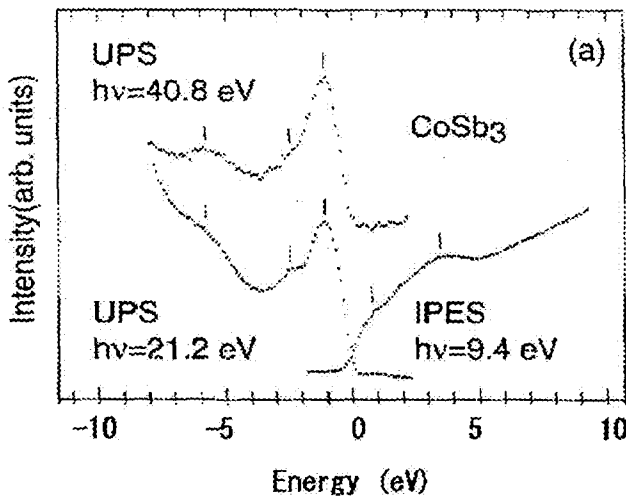


図2. CoSb₃ の正・逆光電子分光スペクトル⁷⁾

価電子帯はCo 3dおよびSb 5pの最外殻電子による結合性軌道から成り立っている。それで価電子帯にCoの3dがどのように広がっているかを調べるために、Co3p-3d共鳴光電子分光実験が行われた。

共鳴光電子分光法は光電子分光強度の共鳴効果による増減を観測することにより、価電子帯を構成している特定の元素の部分状態密度を実験的に知る方法である⁸⁾。

Co 3p-3d 内殻吸収領域における共鳴光電子分光実験の結果を図3に示す⁷⁾。Co 3p-3d 内殻吸収に対応する光エネルギー $h\nu$ が60 eV 近傍で光電子放出強度に顕著な共鳴現象が見られないことから、Coの3d状態が価電子帯

中に広がっていることを示している。この

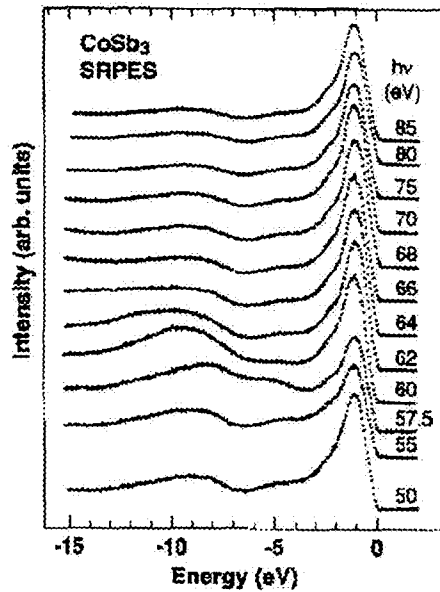


図3. Co 3p-3d 共鳴光電子分光スペクトル⁷⁾

ような実験的結果を裏付けるため、DV-X α 法^{3,6)}により電子状態を計算し、比較検討を行った。

§4 計算結果と考察

DV-X α 法で計算する際、スクッテルダイト型CoSb₃の結晶の各パラメータは、表1に示すShumidtらの実験結果を用いた⁹⁾。計算によって得られた電子状態密度曲線(DOS: Density of States)を図4に示す。伝導帯が0から6eVまで広がっており、そして価電子帯は0から-6eVに広がっている。バンドギャップは非常に小さく46meVとなった。この計算結果はSofaとMahanのGGA法による計算結果²⁾とも良い対応を示している。しかし、価

表1. 計算に用いたCoSb₃の結晶パラメータ⁹⁾

CoSb ₃	Co 27	Sb 24	atoms
	Space Group	Im3	skutterdite
	lattice parameter	a=9.0385(3)	[Å]

電子帯のピークの大きさやバンドギャップの大きさなどが異なっている。これは計算法や用いた結晶パラメータの違いによるものである^{3,10)}。

また,このDOSを正・逆光電子分光スペクトルと比較した結果は図5に示すように良い対応が見られている。

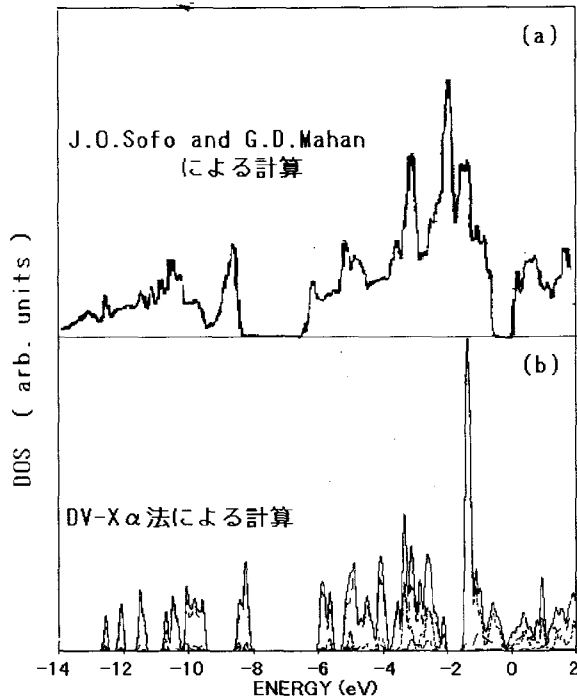


図4. 計算によって得られたCoSb₃のDOS
SofaとMahanのGGA法による計算とDV-Xα法による計算結果

続いて,結晶のなかにどのように電子が分布しているかを知るため,単位格子を高さ方向にある一定の間隔でいった断面における電子密度を計算した.その結果を図6に示す. Z=0.0a.u.の面内には9つのCoの原子が並んでいるが,Sbの電子による影響も見られる。

さらに, 図7-図10にZ=0.0, 1.5, 3.0および4.5a.u.における価電子帯中の3つのエネルギー,つまり価電子帯のトップ付近(0.0eV)とピークの位置(-1.1eV),およびショルダーの位置(-2.4eV)における,波動関数の値を示した等高線を示す.ここで実線は波動関数の正の値を、破線は負の値を示している。

Z=0.0のときを見ても価電子帯のトップ,ピーク,そしてショルダーのどの位置でも,Coの3dからの波動関数が広がっているので,図3の共鳴光電子分光実験の結果を裏付けている。

Z=1.5, 3.0, 4.5a.u.の面を見ると,Coの3d軌道と,Sbの5p軌道とが混成して価電子帯に広がっていることがわかる。

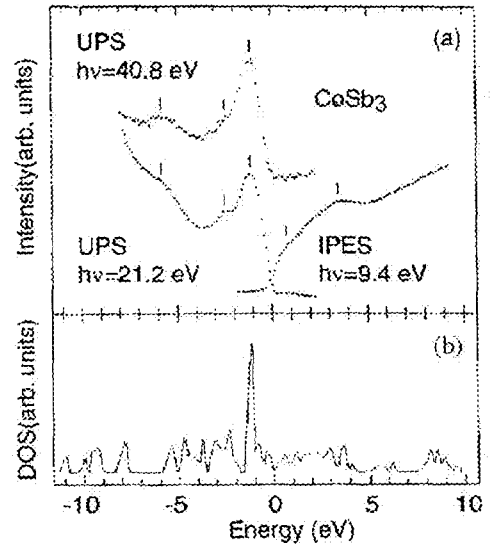
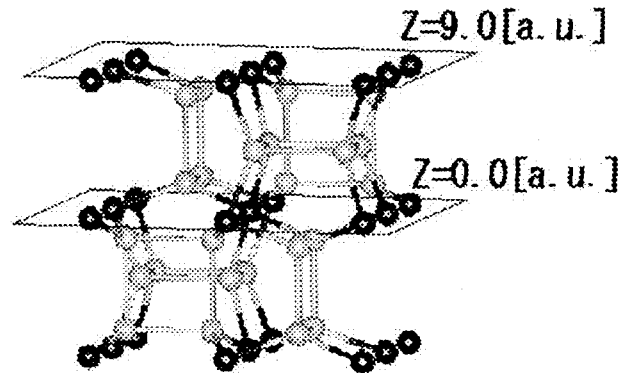
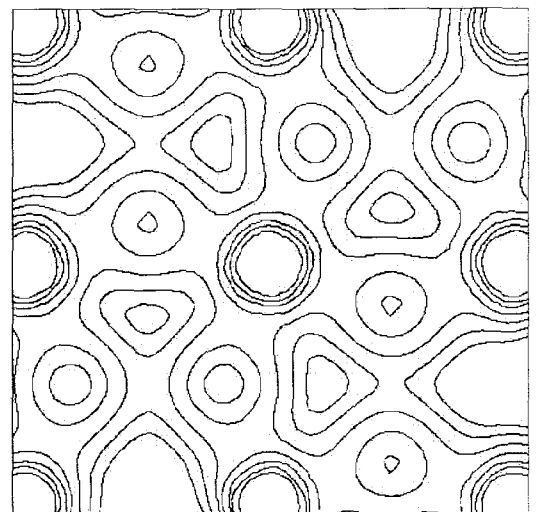


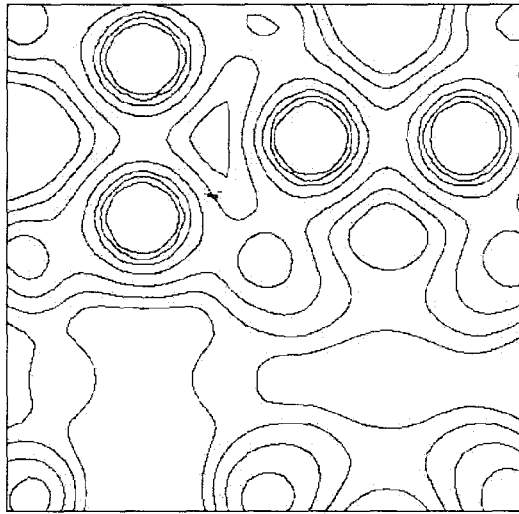
図5. 正・逆光電子分光スペクトルと計算結果の比較
(a)正逆光電子分光スペクトル(b)DV-Xα法によるDOS



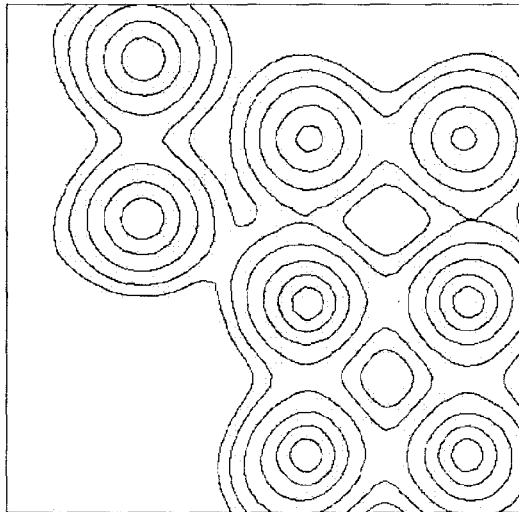
(a)



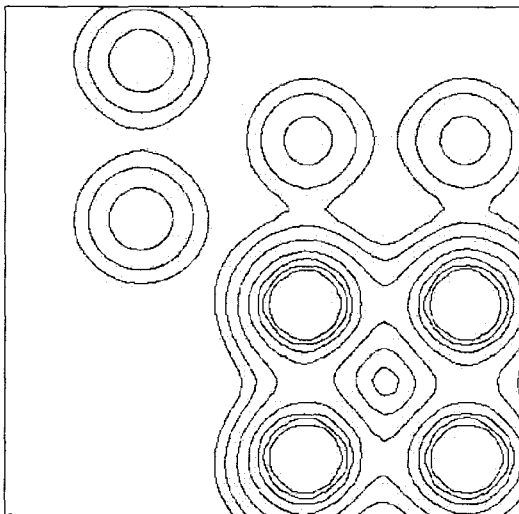
(b) Z=0.0 a.u.



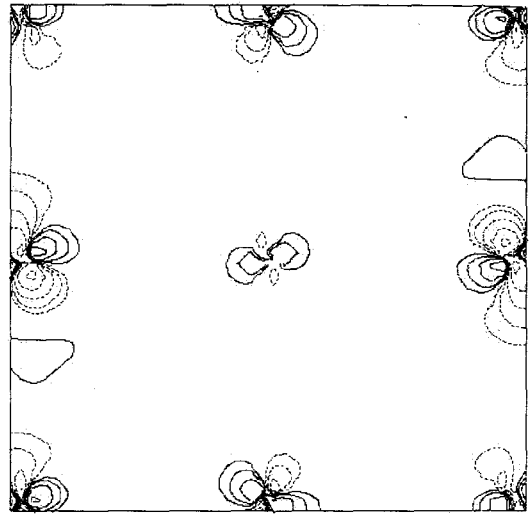
(b) $Z=1.5$ a.u.



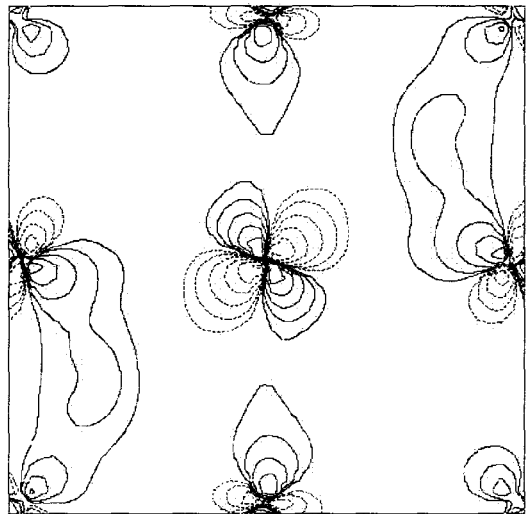
(b) $Z=3.0$ a.u.



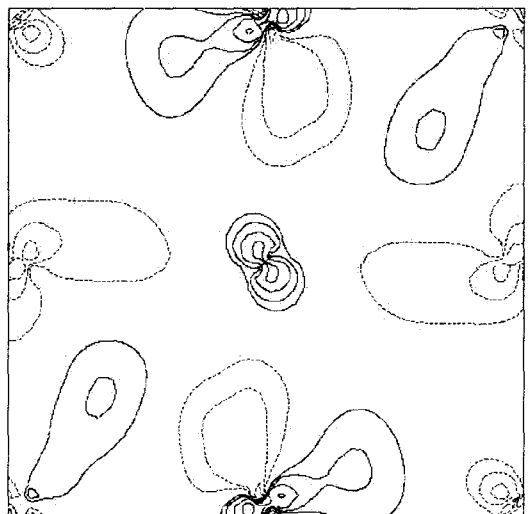
(b) $Z=4.5$ a.u.



$E=0$ eV (at E_F)



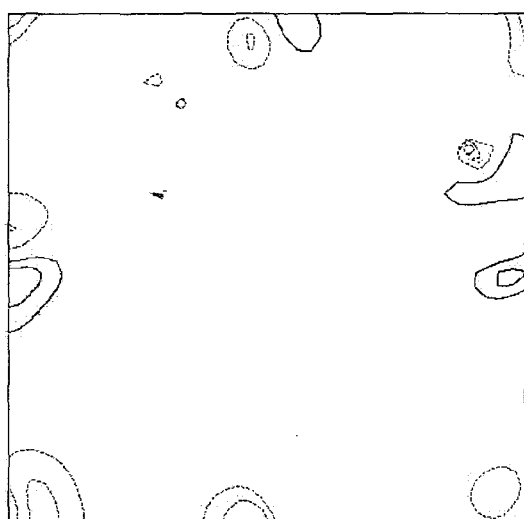
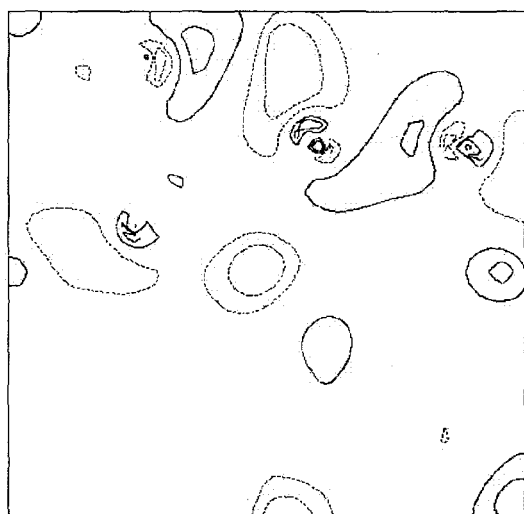
$E=-1.1$ eV



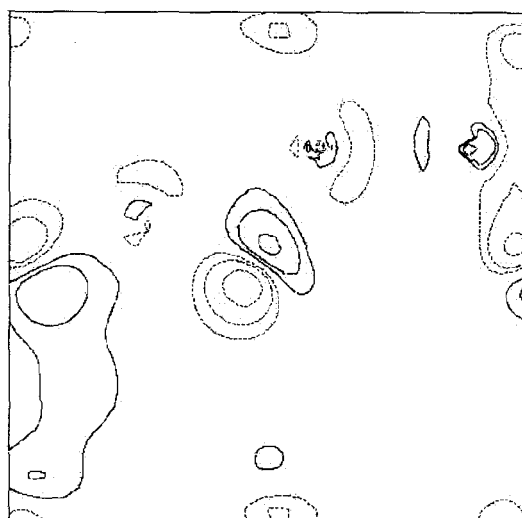
$E=-2.4$ eV

図6 CoSb_3 の電子密度等高線
(a)座標の取り方(b)各座標での等高線

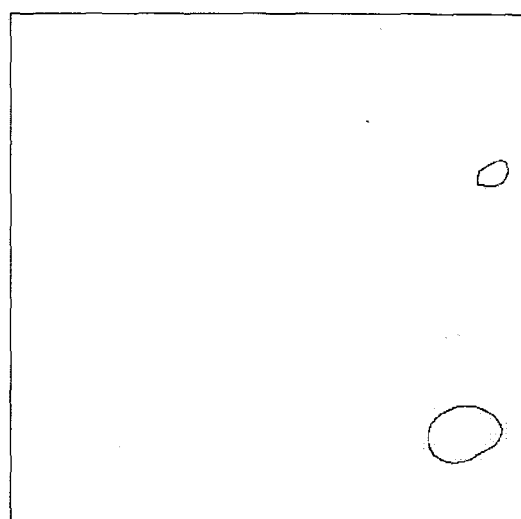
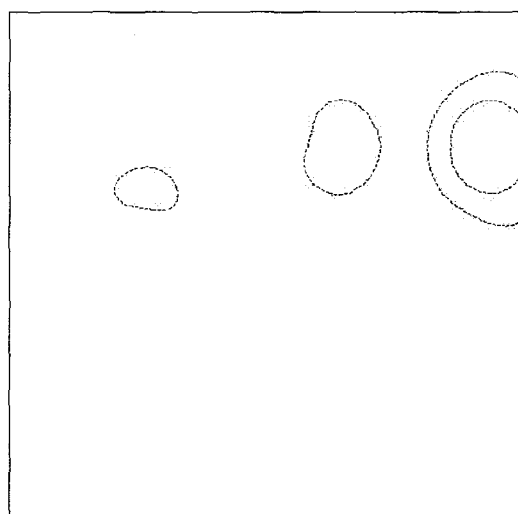
図7 $Z=0.0$ [a. u.] 面での価電子帯の波動関数

E=0 eV (at E_F)

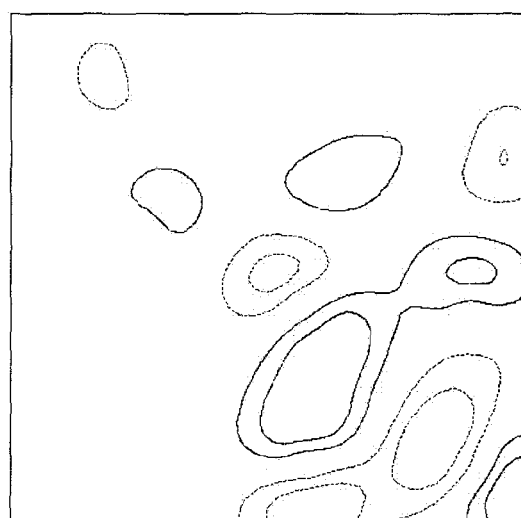
E=-1.1 eV



E=-2.4 eV

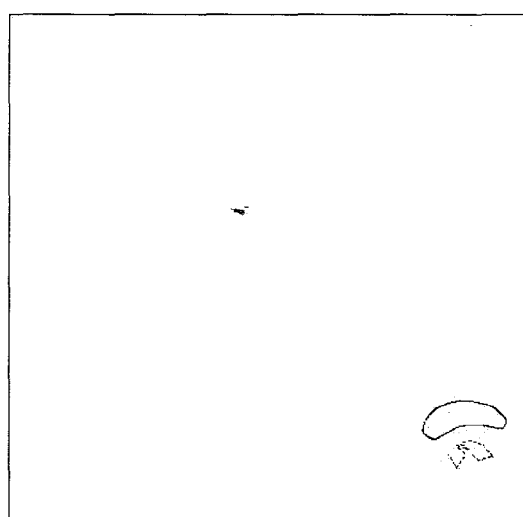
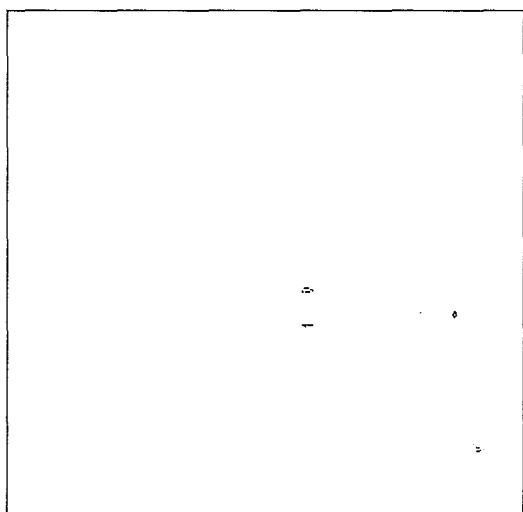
E=0 eV (at E_F)

E=-1.1 eV

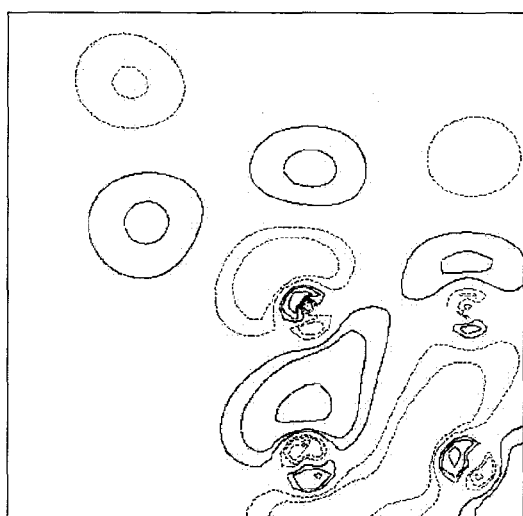


E=-2.4 eV

図 8 $Z=1.5$ [a.u.] 面での価電子帯の波動関数図 9 $Z=3.0$ [a.u.] 面での価電子帯の波動関数

E=0 eV (at E_F)

E=-1.1 eV



E=-2.4 eV

§5 まとめ

DV- $X\alpha$ 法の計算結果から CoSb_3 の電子状態はCoの3d軌道が局在しているのではなくSbの5pと混成して、価電子帯全体に広がっていることが明らかになった。また、これは実験結果とも良く対応している。

Coを他の金属と置換したり^{11,12},空隙にCeなどを充填した物質系のフェルミエネルギー近傍の電子状態を調べることによって、これらの物質系の熱電的性質をより深く理解することが可能になってくると期待している。

謝辞

広島大学放射光科学研究センター センター長 谷口雅樹教授ならびに同研究センタースタッフ、また、広島大学大学院物質科学科 佐藤仁氏には、光電子・逆光電子分光測定において大変お世話になりました。ここに、厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) G.D.Mahan, Solid State Physics, **61**,81 (1998).
- 2) 和田正信: 電子工学基礎論 (近代科学社,1971).
- 3) J.O.Sofa and G.D.Mahan. Phys. Rev. B. **58** 15620 (1998).
- 4) J.Yang, G.P.Meisner, D.T.Morelli and C.Uher. Phys. Rev. B. **63** 014410-1 (2000).
- 5) 岩沢美佐子,足立裕彦: DV- $X\alpha$ 法による電子状態計算-そのプログラムと解説 (三共出版,1996).
- 6) 足立裕彦,小和田善之監修,田中功,中松博英,水野正隆共著: 初めての電子状態計算 (三共出版,1998).
- 7) Y.Ueda, H.Sato, F.Nagasaki, C.Hirai, A.Kimura, M.Takeguchi, M.Nakatake and H.Namatame. Surf. Rev. Lett. (in press).
- 8) 高橋隆: 固体物理 Vol.29 No.1, 25 (1994).
- 9) Th.Schmidt, G.Kliche and H.D.Lutz, Acta Crystallogr. Sect. C: Cryst. Struct. Commun. **43**, 1678 (1987).
- 10) D.J.Singh and W.E.Pickett, Phys. Rev. B **50**, 11 235 (1994).
- 11) H. Anno, K. Matsubara, T. Caillat, and J. P. Fleurial. Phys. Rev. B **62**, 10 737 (1994).
- 12) J.Nagano, T.Ebinuma, T.Uchuda, S.Takeya, M.Ferhat, E.Hatta, K.Mukasa, H.Anno and K.Matsubara:phys. stat. sol. (b), 228, 705 (2001).

図 10 $Z=4.5$ [a. u.]面での価電子帯の波動関

運動制御問題への遺伝アルゴリズムの適用

(電気情報工学科) 山崎 勉

Application of Genetic Algorithm to Solve a Motion Control Problem

(Department of Electrical Engineering and Information Science) Tsutomu YAMAZAKI

Abstract

Results of computer simulations of motion control problem of an inverted pendulum to swing up and to stabilize in inverted state were presented. Calculations were carried out using genetic algorithm to find time-sequential signals to swing up an pendulum from pendent state and to stabilize it in inverted state. Individual genome consist of four locuses, four time intervals for bang-bang control principle to swing, and four gains for states feedback control to keep standing were developed in evolutionary computation with evaluating cost function as sum of deviations from final state to be minimized. Obtained control signals were good compared to optimized one derived by trial and error method.

Key Word: inverted pedulum, genetic algorithm, motion control, computer simulation

倒立振り子、遺伝アルゴリズム、運動制御、計算機シミュレーション

§ 1. はじめに

大規模複雑化する科学技術の発展に伴ってソフトコンピューティングの重要性はますます大きくなってきた。各種の最適化技法が提案され、試行錯誤法に代わって、能率よく最適解を短時間で発見する方法の研究が盛んである。玉置氏らは、計測自動制御学会の会誌「システム/制御/情報」の講座「遺伝アルゴリズム I ~ VI」、(1995 年)においてGAの基礎、GAによる最適化計算、GAに関する理論、GAの様々な拡張例、進化的計算の動向について解説した。⁽¹⁾

制御工学の分野ではシミュレーションが活用され、無作為に選定したいくつかの入力系列で得られた制御結果を目的関数により定量評価し判断を行う事が容易にできる。評価値の高い系列を中心にその変種を生成しより高い評価値の系列に近づくようにする。この変種の生成に工夫が必要でそこに自然界から学び得た遺伝アルゴリズムやニューラルネットワークが導入された。⁽²⁾ しかし、評価関数の選び方の一般的な方法は確立していないが、目標を的確にかつ定量的に測定する方法は問題に応じて構成すしかない。コンピュータは高性能で、繰り返し作業を得意とし、シミュレーションとその結果の評価に適している。川路茂保氏らは、「遺伝的アルゴリズムによる倒立振り子の降り上げ制御」において、振り上げ入力を一定時間ごとに 0 または ± 1 に設定、振り上げ後振り子角度 0.5rad 以下にて最適レギュレータに切り替える条件下で、GAによりシミュレーションし得られた入力系列について実験し、まずまずの結果を得た。⁽³⁾ また、オンラインで個

体数20、8世代程度のGA制御実験も試みその問題点などを検討した。

前報告にて、試行錯誤法で振り子の振り上げから倒立安定化制御への制御入力系列を決定や⁽⁴⁾、ファジィ制御を用いた方法についても同様に検討した。そして振り上げ制御入力系列をバンバン制御にするとともに容易に最適化が可能と考えられる。そこで遺伝アルゴリズムを用いて、(1)倒立振り子のバンバン制御による振り上げのための極性切り替え時間の決定、(2)倒立安定化の状態フィードバック制御器のゲインの探索を試みる。また、(3)バンバン制御器の極性切り替えから既知のフィードバック制御器に移行し倒立安定化する制御入力系列の探索を行ったので報告する。

§ 2. 理論

2.1 制御対象

振り子が付随する台車は、それに繋いだベルトをサーボモータで駆動して直進運動させる。振り子は同じ平面内の台車運動方向と垂直な軸の周りに自由に回転し、台車の運動で制御できる。図1にその概要を示す。⁽⁴⁾

運動シミュレーションに必要な数式モデルは次のように表される。レールの中央部の原点 ($x=0$) からの台車位置 x [m] と速度 v [m/s]、および振り子の鉛直に対する振り子角度 θ [rad] とその角速度 ω [rad/s] とすると、運動方程式は次のようになる。ただし、 $M=4.4$ [kg] 台車の質量、 $m=0.1$ [kg] 振り子の質量、 $2L=0.230$ [m] 振り子の長さ、 $F=19.2$ [kg/s] 台

車とレールの摩擦係数、 $C=4.9 \times 10^{-4}[\text{kgm}^2/\text{s}]$ 振り子の摩擦係数、 $g=9.8[\text{m}/\text{s}^2]$ 重力加速度、 $J=2.14 \times 10^{-3}[\text{kgm}^2]$ 振り子の慣性モーメントである。⁴⁾ 制御入力 u は台車の運動と振り子の運動の両方に影響している。

$$dv/dt = \{-J^*Fv + J^*mL\sin\theta\omega^2 + mL\cos\theta C\omega - m^2gL^2\cos\theta\sin\theta + J^*u\}/\Delta$$

$$d\omega/dt = \{mL\cos\theta Fv - m^2L^2\cos\theta\sin\theta\omega^2 - M^*C\omega + M^*mgL\sin\theta - mL\cos\theta u\}/\Delta$$

ただし、 $M^*=M+m$, $J^*=J+mL^2$, $\Delta=M^*J^* - m^2L^2\cos^2\theta$

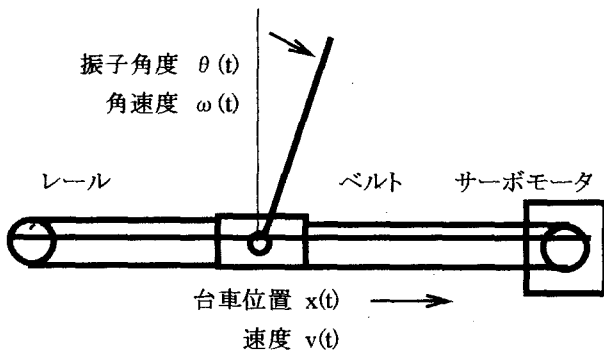


図1 制御対象の倒立振り子の概要

2.2 制約条件

前報で示したように本装置には次のような制約がある。⁴⁾

- (1) 台車の可動範囲はレールの中心から $X = \pm 0.45[\text{m}]$
- (2) モータ入力電圧 $u=1 \sim 3\text{V}$ であるが最大値 $U=1.5\text{V}$ 以下とする
- (3) サンプル時間は 10msec とし、制御入力系もこの時間を基本とする
- (4) ステップ応答より得られている振り振動周期の半分は $0.5 \sim 0.6$ 秒である。

2.3 切り替え時間の探索

最短時間問題などに対する効率のいい制御方法としてバンバン制御が知られている。⁵⁾ 半周期毎に入力の極性を変え、振り子(ブランコ)の振動に共鳴する力を加えると振り上げ続けることができるという経験則に一致する。入力継続時間 $t=0.6 \times \text{RND}$ で計算する。ここで $\text{RND}=[0,1]$ は一様乱数で決定する事を示し、振り子と台車の運動は2秒程度観測しその間に倒立させるものとし、図2に示すように切り替え回数は3回以上その時刻を $T1, T2, T3, T4$ とする。

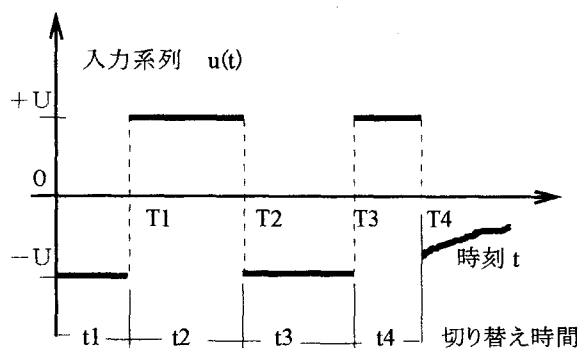


図2 バンバン制御の切り替え時刻

2.4 シミュレーション手順

入力の大きさの最大値 $U=1.5\text{V}$ の条件下、バンバン制御の切り替え時間を4つ求める。初めに $u=-1.5\text{V}$ で $t1$ 秒間、次に $u=+1.5\text{V}$ で $t2$ 秒間、それ以降は交互に極性を変え $t3, t4$ 秒ずつとし最後に残り時間 $u=0\text{V}$ とする。一つの個体は各時間を遺伝子とする4つの要素 $\{t1, t2, t3, t4\}$ からなり、個体数は100で世代集合を構成する。各遺伝子は $t=0.6 \times [0,1]$ 一様乱数で決定する。⁶⁾

2.5 評価関数の設定⁶⁾

倒立振り子の数式モデルは非線形な運動方程式で表され、振り上げ制御は初期条件の垂下状態(台車の位置 $x[\text{m}] = 0$ 、速度 $v[\text{m}/\text{s}] = 0$ 、振り子の角度 $\theta[\text{rad}] = \pi$ 、角速度 $\omega[\text{rad}/\text{s}] = 0$) から倒立状態 ($x=0, v=0, \theta=0, \omega=0$) に到達することが目的である。その評価関数はある時刻での目標値からの偏差すなわち状態変数の絶対値の和とし、各量に対する重みを例えば次のように表した。⁶⁾

$$F=20|x/X|+10|v|+10|\theta/\pi|+|\omega|$$

ここで、 $X=0.45$ は台車の走行可能限界距離、 $U=1.5\text{V}$ は入力電圧の最大値。台車移動許容範囲を超える場合 ($|x| > X$) ペナルティを課し $+100(|x|-0.45)$ を加算することとし、 F の最小化を考える。

2.6 進化型計算処理とその手順

(1) 生成した個体 i ($i=1 \sim 100$) に対して2秒間追跡し、評価関数値 F_i を記録する、運動シミュレーション [Motion] 計算は、時間刻み 0.5msec でルング・クッタ法で実行した。

(2) 評価関数値の最大値 F_{max} で割って適応度 $W_i=1-F_i/F_{\text{max}}$ に規格化する [Fitness]。

(3) 適応度 W_i の低い順に並べ替える [Ordering]。

(4) 上位 0.01% をエリートとして保存し、残りをルーレット選択で決定する [Roulette]。

(5) 遺伝子列の部分交換は、全個体を乱雑に並べ替え [Random]、連続する2つの個体について取り出し交叉するかどうかを交叉確率 (0.9 以下) と乱数の比較で判定する。交叉する場合その遺伝子順位を求め一点交叉する [Exchange]。

(6) 突然変異は各個体について突然変異確率 (0.1 以下) と乱数の比較により突然変異の有無を決定する。その遺伝子順位を乱数で決定し新しい遺伝子 ($t=0.6 \times \text{RND}$) を決定する [Mutation]。

(7) 新しくなった個体群に対して運動シミュレーションにより評価値を計算し新世代に入る。世代交代の終了判定は平均適応度の変化が小さくなるかまたは世代数の上限值 (100) により終了を判定する。

§ 3. 結果とその考察

3.1 振り上げシミュレーション結果の一例

個体数 100、世代数 100、運動シミュレーション終了時の偏差の重み付き和で表した評価関数

$F=20 \cdot |x/X| + 10 \cdot |v| + 10 \cdot |\theta/\pi| + |\omega|$ の場合、切り替え時刻 $T1=0.32587$ $T2=0.919935$ $T3=1.31745$ $T4=1.34174$ の後 $T5=1.46169$ 秒から $u=0$ として倒立条件に接近した。また、切り替え時刻 $T1=0.326$, $T2=0.920$, $T3=1.3175$, $T4=1.7455$ の後、倒立条件に達しデモンストレーション用の倒立安定化制御器に切り替えると安定化できた。ここで倒立安定化制御器デモ用の状態フィードバック制御のゲインは $u=16.701x+15.7478v+55.705\theta+6.96\omega$ で表される。⁴⁾

この時の台車と振子の運動の時間経過を図3に示す。

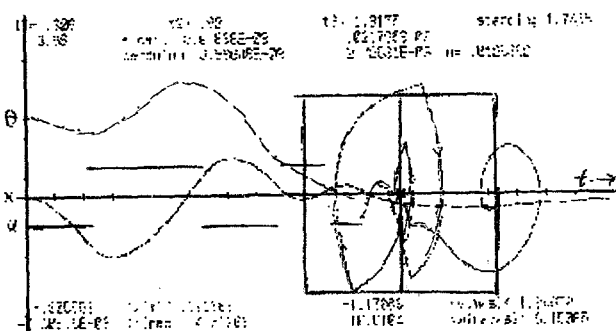


図3 振り上げ制御の時間経過とその位相面表示

台車はレール中央部から左に引かれ移動し、振子は反時計方向に振られる。最初の入力極性切り替え後、少し遅れて台車は右方向に移動し始め振子は時計方向に回転する。二回の切り替え後制御開始時と同様に運動し振子は大きく回転し水平より上側に到達し、次の極性切り替えで振子は倒立状態に達した。一方台車はこれまでに得た速度が大きく目標位置を通り過ぎ位置偏差が残った。その解消にレギュレータが働き、振子倒立のまま台車はレール中央部にしだいに移動していった。この時入力の大さは最大値を維持し、振り上げの切り替え回数は5回と見ることもできる。なお図の時間軸は $0.15[\text{sec}/\text{div}]$ である。位相面図の枠一刻みは、台車に対し横軸位置 $0.45[\text{m}]$ と縦軸速度 $1.2[\text{m/s}]$ 、振子に対し横軸角度 $\pi[\text{rad}]$ と縦軸角速度 $4\pi[\text{rad/s}]$ である。位相面図中心部の原点から台車の軌跡が始まり時計回りに1周し、2周目は速度・位置ともに小さくなった。そして振子の倒立後、減速した後位置偏差の減少により原点付近に達している。振子は $\theta=\pi$ の垂下状態から振動を始め、倒立安定化器の制御範囲に入ると一気に目標の原点に達している。

評価関数 $F=10 \cdot |x/X| + |v| + 10 \cdot |\theta/\pi| + |\omega|$ の場合、切り替え時刻 $T1=0.3365$ $T2=0.8965$ $T3=1.3995$ $T4=1.7265$ の後倒立条件に達した。探索過程では開始から 50 世代あたりで

から不変。得られた制御入力時系列は 1.7695 秒からレギュレータ制御(デモ用)に移行。

次に振り上げ評価関数の振子角度に対する重みを大きく $10 \rightarrow 100$ 、ある時刻での評価値の最小化は同じとする。

$$F=10 \cdot |x/X| + |v| + 100 \cdot |\theta/\pi| + |\omega/\pi| + |u/U|$$

$T1=0.336584$, $T2=0.896614$, $T3=1.4000$, $T4=1.795781$ が得られた。前回に試行錯誤法で得た切り替え時刻 $T1=0.33$, $T2=0.98$, $T3=1.46$ の後、 $T4=1.4635$ 秒以降レギュレータ制御に移行し、整定時刻 1.975(5%)の結果と比較すると次の事がわかる。⁴⁾ 制御器のサンプリング時間 $6[\text{msec}]$ または $10[\text{msec}]$ を考慮すると1回目、2回目の切り替え時刻はほぼ等しい。3回目の時刻は多少異なるが倒立安定化制御に移った後の最大値入力の継続により調整された。以上では評価の重みの影響は表1のように小さい。

表1 評価の重みの影響

20,10,10,1	$T1=0.326$, $T2=0.920$, $T3=1.3175$, $T4=1.7455$
10,1,10,1	$T1=0.3365$, $T2=0.8965$, $T3=1.3995$, $T4=1.7265$
10,1,100,1	$T1=0.3366$, $T2=0.8966$, $T3=1.400$, $T4=1.796$
20,10,10,1	積分型 これは非積分型とほぼ同じ結果

積分形評価関数 $F = \int (20 \cdot |x| + 10 \cdot |v| + 10 \cdot |\theta/\pi| + |\omega|) dt$ の場合、切り替え時刻 $T1=0.32587$ $T2=0.919935$ $T3=1.31745$ $T4=1.34174$ の後 $T5=1.46169$ 秒以降零入力を得られた。探索過程では開始から 50 世代あたりで平均値と最大値がほぼ一定で一致し最小値は20世代程度から不変。得られた制御時系列は 1.92 秒からレギュレータ制御(デモ用)に移行。

3.2 倒立安定化制御のゲインの計算

倒立安定化制御は4つの状態フィードバックゲインより決まり、その制御入力を次式で表す。

$$u = K_x \cdot x + K_v \cdot v + K_\theta \cdot \theta + K_\omega \cdot \omega$$

その4つのゲインを遺伝子として持つ個体 $\{K_x, K_v, K_\theta, K_\omega\}$ を 100 個、一様乱数 RND によりゲイン $K_i = 2000 \times (0.5 - \text{RND})$

$i=x, v, \theta, \omega$ により初期状態として生成する。各個体について制御性能の評価関数

$$F = \int (10 \cdot |x/X| + |v| + 10 \cdot |\theta/\pi| + |\omega| + |u/U|) dt \text{ を 2 秒間求める。}$$

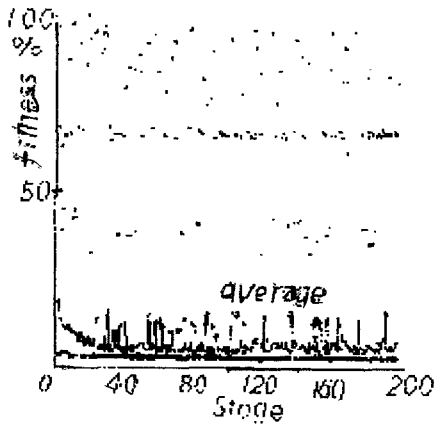
倒立振子の運動方程式はルンゲクッタ法で数値解析し評価関数を計算、初期値は $X=0, V=0, \theta=0.05 \cdot \pi$ (または $0.1 \cdot \pi$), $\omega=0$ 。この値 F が小さい方が評価が高いとする。シミュレーション手順は前述と同じ、計算プログラムは適応度計算 [Fitness] 遺伝操作は [Ordering] - [Roulette] - [Random] 選択、[Exchange] 交叉、[Mutation] 突然変異 であり、終了判定は世代数 (stage) < 200 または Faverage がほぼ一定とした。その結果 $\{K_x, K_v, K_\theta, K_\omega\} = \{680, 764, 678, 319\}$ が得られた。

または正值のゲイン $K_i = 1000 \times \text{RND}$ のみを考えて同様に探索した結果 $\{K_x, K_v, K_\theta, K_\omega\} = \{555, 342, 857, 171\}$ が得ら

れ、前述の場合に比べ評価値の平均値(12.87 → 7.36)最も良い評価値(3.69 → 2.68)ともに減少した。その安定化性能は等しく次の範囲で安定化可能である。x(0)=0, v(0)=0として初期角または初期角速度を与えたとき、レールの範囲内 |x| < 0.45m で倒立を続けることが可能な領域を求めたところ

$$|\theta(0)/0.1011 \pi + \omega(0)/1.904| < 1$$

が求まった。安定限界付近では制御入力大きさは上限値にあり、バンバン制御になっていた。例えば、振子の傾き角の初期値 $\theta = 0.097 \cdot \pi$ を立て直すため、初めの 0.42 秒まで $u = +U$ 、一回目の極性切り替え後、1.08 秒までの入力の大きさは一定値 $u = -U$ 、その後は制御入力の計算値も |u| > U の範囲となり、短時間で極性が切り替わるバンバン制御となった。(図5参照) この原因はゲインが大きいくわずかの偏差に対しても上下限を越えてしまったためと考えられる。その進化型最適化計算の世代経過を図4に示す。



各世代(stage)の最大評価値は40%, 70%, 90%辺りに多く分布し、最小評価値はほとんど一定で平均値に比べ改善されていない。

図4 進化型計算による最適ゲインの計算過程

30世代辺りから適合度の平均値はほぼ一定で、最も最適なゲインを表す最小値はもっと早い世代から変化がほとんどなくなった。一方最も良くない評価値は大きく変動し収束の兆しは全く見られない。この原因はゲインの範囲が広く変動したためと考えられる。

正値のゲイン $K_i = 100 \times \text{RND}_i$ のみを考えて、初期値は $X=0, V=0, \theta = 0.1 \cdot \pi, \omega = 0$ として同様に探索する。その結果 $\{K_x, K_v, K_o, K_w\} = \{55.0, 60.6, 96.6, 38.1\}$ が得られた。ゲインが大きいことから前記の場合と同じ性能で、安定化可能である。

表2 ゲイン最大値により得られたゲインの違い。

ゲイン	{Kx,Kv,Ko,Kw}=	世代	初期角度
± 1000	{680,764,678,319}	199 stages	$\theta(0) = 0.05 \pi$
1000	{555,342,857,171}	196 stages	$\theta(0) = 0.05 \pi$
100	{55.0,60.6,96.6,38.1}	164 stages	$\theta(0) = 0.10 \pi$
	{16.701,15.7478,55.705,6.96}	demonstration	最適制御

3.3振り上げから倒立安定化に切替時系列の探索

次に、振り上げから倒立安定化に切り替え時系列を探索する。制御性能の評価関数は各時刻の偏差の絶対値に重みをつけ、次式のように安定化制御に移行した後は |u| を加算した。

$$F = 10 \cdot |x/X| + |V| + 10 \cdot |\theta / \pi| + |\omega| + |u/U|$$

振り上げの途中でレール端に達した場合には大きなペナルティ 100 の加算を課した。倒立安定化のための各ゲインは次のように判明しているとし、例えば $\{K_x, K_v, K_o, K_w\} = \{555, 342, 857, 171\}$ 、4つの切り替え時間をGAにより探索し最終切り替え時刻以降は状態フィードバック系に任せるとする。また状態フィードバック系の出力の大きさは最大出力 U 以下に制限されることとする。運動シミュレーション時間を4秒に延長した。その結果 20世代あたりで、切り替え時刻 $T_1 = 0.3365, T_2 = 0.8965, T_3 = 1.3995, T_4 = 1.6485$ 秒 時刻 1.7695 秒以降は制御信号の大きさは時間とともに小さくなり振子は倒立安定化された。倒立安定化制御器のゲインが大きいため強力に安定化されている。しかし100世代あたりでは、切り替え時刻 $T_1 = 0.349, T_2 = 0.927, T_3 = 1.3375, T_4 = 1.519$ 秒が高い評価を得るが、その後の入力はバンバン制御を継続していた。この原因はフィードバック入力の感度が高すぎ計算された入力値が上下限を越えその大きさが最大値で制限された結果である。この様子を図5に示す。位相面軌跡より、大きな入力で短時間に原点付近に移動し、倒立安定化器のバンバン制御により細かく変動しているのが分かる。

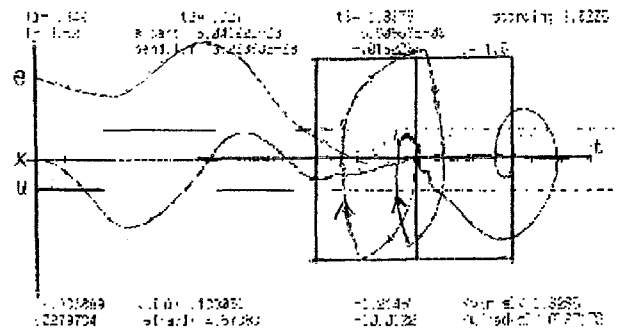


図5 制御の時間経過と位相面表示(ゲイン K < 1000)

このような時系列が現れた原因は評価関数に入力に関する項がないためと考えられる。また、ゲインが大きいと運動が激しくなりその変化に対応する制御にも大きな力を必要とする。ゲインが一桁小さい場合、倒立安定化の各ゲインが $\{55, 61, 97, 38\}$ 、同じ条件の下4つの切り替え時間をGAにより探索した結果、5世代あたりで切り替え時刻 $T_1 = 0.3365, T_2 = 0.8965, T_3 = 1.3995, T_4 = 1.7265$ 秒が得られた。これは時刻 1.7695 秒以降は制御信号の大きさが時間とともに小さくなり振子は倒立安定化に成功した。その後 200 世代まで計算を進めたが、この切り替え時間より良い入力系列は発見されなかった。

最初の切り替え時刻が $T_1 = 0.492$ 秒より遅い場合、台車はレールの端に達し制御終了となる場合が多く見られ、その評

価関数値は約 120 である。内訳は位置と角度の評価がそれぞれ 10、レール範囲外に達したことにより 100 加算した結果である。原因は、最初の振りはその周期が後の振りの半分であり、⁽⁹⁾ 一様乱数では、突然変異で現れる短い周期が少なくなった。また、振子が一回転した後に倒立状態に近づく場合も見られたが、ここではその対策をとっていないため角度は 2π を越え倒立安定化制御はできない。例えば突然変異により最初の切り替え時間を決定するとき $t1=0.492 \times \text{RND}$ を導入すると図6のような進化計算結果となる。この条件をにより倒立の可能性は増したが、振子が1回以上回転し制御が完了しない場合(100%付近)も増加した。最も評価の高い制御系列はこの条件がない場合の方が良かった。

図6 振り上げから倒立安定化全期間の進化計算($t1=0.492 \times \text{RND}$ の場合)

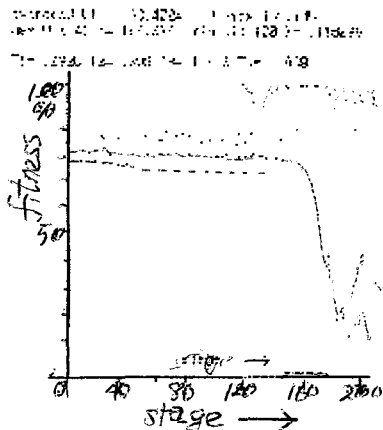


表3 評価関数 $F=10 \cdot |x| + |v| + 10 \cdot |\theta| / \pi + |\omega|$ による振り上げ安定化制御、倒立後の評価追加項目 $+|u|$ 、レール範囲外に達した場合のペナルティ + 100 各世代で最も高い評価が得られた場合の入力系列を示す。

$\{Kx, Kv, Ko, Kw\} = \{555, 342, 857, 171\}$	
20stage	$T1=0.3365, T2=0.8965, T3=1.3995, T4=1.6485$ 時刻 1.7695 秒からレギュレータに移行
113stage	$T1=0.349, T2=0.927, T3=1.3375, T4=1.519$ 秒 バンバン制御を継続
$\{55.0, 60.6, 96.6, 38.1\}$	
5stage	$T1=0.3365, T2=0.8965, T3=1.3995, T4=1.7265$ 秒 時刻 1.7695 秒からレギュレータに移行
$\{16.701, 15.7478, 55.705, 6.96\}$	
13stage	$T1=0.4245, T2=1.0115, T3=1.3545, T4=1.535$ 秒 時刻 1.8175 秒からレギュレータに移行
47stage	$T1=0.375, T2=0.919, T3=1.388, T4=1.4545$ 秒 時刻 1.7995 秒からレギュレータに移行

最適制御理論に基づき倒立安定化制御器の各ゲインが $\{16.701, 15.7478, 55.705, 6.96\}$ の本機デモンストレーション用で、同じ条件の下4つの切り替え時間をGAにより探索した結果、20世代あたりで切り替え時刻 $T1=0.375, T2=0.919, T3=1.388, T4=1.4545$ 秒、時刻 1.7995 秒以降は制御信号の大きさは時間とともに小さくなり振子は倒立安定化に成功した。ただし、倒立安定化が可能な範囲は $x(0)=0, v(0)=0$ として $|\theta(0)/0.098\pi + \omega(0)/1.84| < 1$ である。

得られた結果を表3と比較すると、倒立安定化制御器に

より振り上げの切り替え時刻は異なっている。シミュレーションでは全て倒立振子の振り上げ制御は可能であった、また試行錯誤法で求めた最短時間に振り上げの入力系列に近似しているがその性能はかなり広く分布しているようである。

実機ではシミュレーションで用いた装置定数との不一致の影響により制御に失敗する可能性も考えられる。数回のオフライン遺伝アルゴリズム計算で得た近似解から実機を用いて最適解を探索する方法でも、予想外の入力による機械装置へのダメージの可能性が懸念された。⁽⁹⁾ 各種保護対策を導入するか、制約条件を初期の厳しい状態から進化とともに緩和していくことが考えられる。

§ 4. まとめ

遺伝アルゴリズムは近似解を得るには便利である事がわかった。この計算は 20MHz クロックのパソコンの N88BASIC でプログラムにより実行した。計算時間は一世代全て計算して平均 160 分程度から世代が進むにつれ短縮し中盤以降 60 分程度となった。手順としては定常系(フィードバック制御)を初めに求め、過渡部分を追加し全体を構成するのがよい。各探索ともに目的を実現する近似的な制御則を見つけることができたが、最善とは言い難い。適切に目標を定量化し、経験則の定量化が重要である。また、得られた入力系列は最適値に近いものと考えられるが、シミュレーション結果の実機による確認が必要である。

参考文献

- (1)玉置久,喜多一,岩本貴司,三宮信夫 講座「遺伝アルゴリズム I ~ VI」、システム/制御/情報より Vol.39No.6(1995)pp295-302「GAの基礎」 Vol.39(8)pp400-407「GAによる最適化計算」 Vol.39(10)pp431-438「GAによる最適化計算」 Vol.39(12)pp507-514「GAに関する理論」 Vol.40(2)(1996)pp69-76「GAの様々な拡張例」 Vol.40(4)pp170-177「進化型計算の動向」
- (2)青山武郎,大松繁,岸田芳幸:「倒立振子のモデル化と安定化のためのニューロPD制御」システム制御情報学会論文誌 Vol.11, No.1, pp10-18(1998)
- (3)川路茂保,小笠原健一,本田秀宣:「遺伝的アルゴリズムによる倒立振子の降り上げ制御」電学論 D Vol.115, No.6, pp680-685(1995)
- (4)山崎勉:「倒立振子の振り上げと安定化」、呉高専研究報告 呉高専研究報告 Vol.62pp63-70(2000)
- (5)森,西原,古田:「倒立振子制御用ハイブリッド制御」計測自動制御学会論文集 12-4, pp482-487(1976)

Lagrangeの運動方程式によるはり及び棒の 連成熱弾性自由振動の減衰解析

(環境都市工学科) 丸上 晴朗

Damping Analysis for Coupled Thermoelastic Free Vibrations of Beams and Bars by Lagrange's Equations of Motions

(Department of Civil Engineering) Seiro MARUGAMI

Abstract

For the purpose of developing dynamic structural theory with mechanical and thermoelastic coupling, Lagrange's equations of motions are formulated by using Biot's principle. In the present paper, two kind equations of motions for the cases of coupled thermoelastic flexural vibrating beam and coupled thermoelastic longitudinal vibrating straight bar are treated.

Key Words : coupled thermoelastic vibration, Biot's principle, beams and bars, Lagrange's equations of motions, damping of coupled thermoelastic free vibration.

連成熱弾性振動, Biotの原理, はりと棒, Lagrangeの運動方程式, 連成熱弾性自由振動.

§ 1 緒言

構造材料の急速な弾性変形に基づいて出現するひずみ場に生じる温度・熱流場とひずみ・応力場との連成を考慮した振動解析が連成熱弾性振動解析である。弾性体が自由振動する際に振動方程式中へ減衰力項を全く持ち込まなくても、連成熱弾性振動解析を行うことによって、弾性エネルギーが熱エネルギー変換・散逸することを解析的に考慮することができるので、振動の減衰解を求めることができる。このようにして生じる減衰は内部摩擦(材料減衰)の一因となるが、内部摩擦は金属材料の転位、点欠陥、面欠陥等の結晶の格子欠陥やこの他の原因によっても発生するものであり¹⁾、内部摩擦の全てを解析的に求めることは容易なことではない。内部摩擦は構造部材の支持部や継ぎ手部に発生する摩擦減衰や変位速度に比例する粘性減衰に比較して一般に小さいので振動解析上無視して差し支えない場合が多い。内部摩擦の影響が無視できない場合の例としては、非保存力の作用する動的不安定問題の場合等がある。この場合には内部摩擦(減衰力)の効果で著しい不安定化が現れる。即ち座屈耐荷力が内部摩擦のない場合のそれより大幅に低下する²⁾。はりの連成熱弾性曲げ振動の減衰解析に関する研究結果は既に種々のものが発表^{3), 4), 5), 6), 7)}されている。

本報においてはBiot⁵⁾の手法に準じてLagrangeの運動方程式を用いて連成熱弾性振動解析するために必要な運動方程式の定式化を、はり及び棒の場合について試みたので以下これについて述べることにする。

なお、はりと棒の材質は均質で等方性であるとして取り扱うこととする。

§ 2 連成熱弾性振動の解析原理

2.1 Biotの原理

解析にはLagrangeの運動方程式を用いる。純粋力学上のLagrangeの運動方程式は、Hamiltonの原理から求められるが、温度・応力連成場のLagrangeの運動方程式はBiotの原理から求めることになる。Hamiltonの原理に熱流に関する変分項を加えた変分方程式がBiotの原理でありその式は次のように表される。

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta (V_B + P_B - K) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta D dt = 0 \quad \dots (1)$$

式(1)中の各項の意味は次の通りである。

$$V_B = \iiint_V \{ E_{ijkl} e_{ij} e_{kl} / 2 + \rho c_v \theta^2 / (2T_0) \} dv \quad (2)$$

ここに、 V_B は熱弾性ポテンシャルエネルギー、 E_{ijkl} は弾性率テンソル、 e_{ij} はひずみテンソル、 ρ は物質の密度、 c_v は物質の定積比熱、 θ は基準絶対温度 T_0 からの変化温度である。なお下添字はテンソルの総和記号の記法に従うものとする。

$$P_B = - \iiint_V X_i u_i dv - \iint_S (f_i u_i + \theta \nu_i H_i / T_0) dS \quad (3)$$

ここに、 P_B は熱弾性外力ポテンシャルエネルギー、 X_i 、 u_i 、 f_i 、 ν_i はそれぞれ体積力、変位、表面力、物体表面 S 上の外向き単位法線ベクトルの i 軸方向成分である。 H_i/T_0 はBiotのエントロピー変位ベクトルの i 軸方向成分である。

$$K = \iiint_V (\rho u_i u_i) / 2 dv \quad (4)$$

これは物体全体の運動エネルギーである。

$$\delta D = \iiint_V \lambda_{ij} H_j \delta H_i / T_0 dv \quad (5)$$

これはエネルギー散逸 D の変分 δD を右辺の式で直接定義したものである。 λ_{ij} は熱伝導率テンソル k_{ij} の行列 $[k_{ij}]$ の逆行列 $[k_{ij}]^{-1}$ の i, j 成分である。

2.2 Lagrangeの運動方程式

式(2)、(3)、(4)、(5)の各式を具体的な式で表した後、これらの各式を式(1)へ代入し変分計算すると連成熱弾性振動の支配方程式であるLagrangeの運動方程式が得られる。はり及び棒の場合についてこれらの計算を以下に具体的に示す。

§ 3 両端単純支持ばりの連成熱弾性曲げ自由振動のLagrangeの運動方程式による解析

3.1 はりの連成熱弾性曲げ自由振動場の設定

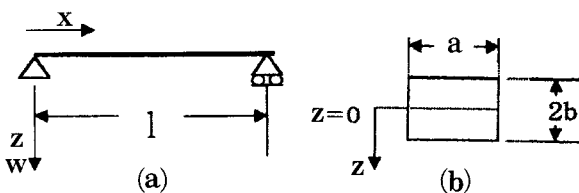


Fig.1 Coordinate system of a beam (a) and cross section of a beam (b)

はりの座標系及び断面形状をFig.1のように定める。変位場は x 軸方向変位成分 $u=u(x, z, t)$ と z 軸方向変位成分 $w=w(x, t)$ とを考慮し、 y 軸方向変位成分は無視する。

$$w=w_n=q_n \sin(n \pi x/l) \quad (6)$$

$$u=-(\partial w_n / \partial x) z \quad (7)$$

ここに、 $n=1, 2, \dots, n$ であり q_n は時刻 t の関数でこれが一般座標になる。

温度場については、式(2)中の θ を直接仮定することも考えられるが、ここでは $\theta=T_0(\rho\eta - \beta e) / (\rho c_v)$ の関係を用いてエントロピー密度 η の式を仮定することにする。なおこの θ の式の右辺の β は熱弾性定数であり、 $e=e_{ii}$ (体積ひずみ)であり、式(6)、(7)及びポアソン比 ν による変形を考慮すると e は次のようになる。

$$e=(1-2\nu)(n\pi/l)^2 q_n z \sin(n\pi x/l) \quad (8)$$

この式形を考慮して η を次式で仮定する。

$$\eta = (\rho_n z/b) \sin(n\pi x/l) \quad (9)$$

ここで、 ρ_n は時刻 t の関数で一般座標である。

温度場に係わる量のエントロピー変位ベクトル H_i/T_0 については次式が成立する。

$$H_{i,i}/T_0 = -\rho\eta = -(\rho \rho_n z/b) \sin((n\pi x/l)) \quad (10)$$

H_i はこの式のみからは決まらないが、境界 $x=0, l; z=\pm b$ で断熱条件式 $H_x=0, H_z=0$ を考え、 $H_y=0$ とすると H_x, H_z はそれぞれ次のように求まる。

$$H_x=T_0 \rho \rho_{xn} (lz/n\pi b) \{ \cos(n\pi x/l) - (-1)^n \} \quad (11)$$

ここで、一般座標 ρ_{xn}, ρ_{zn} について次の関係式が成立する。

$$\rho_{xn} + \rho_{zn} = \rho_n \quad (12)$$

3.2 はりの連成熱弾性曲げ自由振動のLagrangeの運動方程式

3.1項に示した変位場の式(6)、(7)と温度・エントロピー等の熱力学場の式(9)、(11)を用いて $V_B, P_B, K, \delta D$ の式を求めると次のようになる。

$$V_B = (1/2 - \nu) \lambda I I (n\pi/l)^4 q_n^2 + \{ T_0 V / (12 \rho c_v) \} \times \{ \rho \rho_n - \alpha b E (n\pi/l)^2 q_n \}^2 \quad (13)$$

ここに、 $I=2ab^3, V=2abl$ である。

次に式(3)で自重の影響を無視すると体積力成分 $X_i=0$ となり、自由振動を考慮して表面力成分 $f_i=0$ として P_B の値を求めると、 $P_B=0$ になる。

K の値は次式で表される。

$$K = (\rho/4) \{ V + I I (n\pi/l)^2 \} q_n^2 \quad (14)$$

δD を求めると次のようになる。

$$\delta D = (T_0 V / 6 \kappa) (\rho b)^2 \{ I^2 / (n\pi b)^2 \rho_{xn} \delta \rho_{xn} + 2/5 \rho_{zn} \delta \rho_{zn} \} \quad (15)$$

以上の式(13)、(14)、(15)を式(1)に代入し変分計算を行うと次の式が求まる。

$$\int_{t_1}^{t_2} [(T_0/6c_v) \{ \rho(\rho_{xn} + \rho_{zn}) - \alpha b E (n\pi/l)^2 q_n \} - (T_0/6\kappa) (\rho l/n\pi)^2 \rho_{zn}] \delta \rho_{xn} dt$$

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1}^{t_2} [(T_0/6c_v) \{ \rho (p_{xn} + p_{zn}) - \alpha b E (n\pi/l)^2 q_n \} \\
& \quad - (T_0/15) (\rho b)^2 p_{zn}] \delta p_{zn} dt \\
& \int_{t_1}^{t_2} [(1/6) (n\pi/l)^4 \{ (T_0/\rho c_v) (\alpha b E)^2 + \\
& \quad + 2\lambda b^2 (1-2\nu)^2 \} q_n - (1/6) (n\pi/l)^2 T_0 \alpha b E (p_{xn} \\
& \quad + p_{zn})/c_v + (\rho/2) \{ 1 + (n\pi b/l)^2/3 \} q_n] \delta q_n dt \\
& = 0 \dots\dots\dots (16)
\end{aligned}$$

この式が常に成立するためには、被積分関数が常に0にならなければならない。このためには、被積分関数は互いに独立な変分 δp_{xn} , δp_{zn} , δq_n の1次多項式であるから、各変分の係数がそれぞれ同時に0とならなければならない。これがLagrangeの運動方程式である。具体的に書き下ると次の通りである。

$$\begin{aligned}
& \kappa \{ \rho (p_{xn} + p_{zn}) - \alpha b E (n\pi/l)^2 q_n \} \\
& \quad - c_v (\rho l/n\pi)^2 p_{zn} = 0 \dots\dots\dots (17)_1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 5 \{ \rho (p_{xn} + p_{zn}) - \alpha b E (n\pi/l)^2 q_n \} \\
& \quad - 2c_v (\rho b)^2 p_{zn} = 0 \dots\dots\dots (17)_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (n\pi/l)^4 \{ T_0/(\rho c_v) (\alpha b E)^2 + 2\lambda b^2 (1-2\nu)^2 \} q_n \\
& \quad - (n\pi/l)^2 (T_0/c_v) \alpha b E (p_{xn} + p_{zn}) \\
& \quad + \rho \{ 3 + (n\pi b/l)^2 \} q_n = 0 \dots\dots\dots (17)_3
\end{aligned}$$

3.3 振動数方程式の作成とその解

Lagrangeの運動方程式(17)_{1, 2, 3}の各式に含まれる一般座標は次の式で表される。

$$\begin{aligned}
& p_{xn} = P_{xn} \exp(i\omega_n t), \quad p_{zn} = P_{zn} \exp(i\omega_n t), \\
& q_n = Q_n \exp(i\omega_n t) \dots\dots\dots (18)_{1, 2, 3}
\end{aligned}$$

ここに、 ω_n は第n次固有振動モード形の角振動数でありiは虚数単位である。

式(18)の右辺の各式をLagrangeの運動方程式(17)_{1, 2, 3}の各式へ代入すると、次のようになる。

$$\begin{aligned}
& \kappa \rho P_{xn} + \{ \kappa \rho + c_v (\rho l/n\pi)^2 \omega_n^2 \} P_{zn} \\
& \quad - \kappa \alpha b E (n\pi/l)^2 Q_n = 0 \dots\dots\dots (19)_1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 5 \rho P_{xn} + \{ 5 \rho + 2c_v (\rho b)^2 \omega_n^2 \} P_{zn} \\
& \quad - 5 \alpha b E (n\pi/l)^2 Q_n = 0 \dots\dots\dots (19)_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (T_0/c_v) \alpha b E (n\pi/l)^2 (P_{xn} + P_{zn}) \\
& \quad + [\rho \{ 3 + (n\pi b/l)^2 \} \omega_n^2 \\
& \quad - b^2 (n\pi/l)^4 \{ T_0/(\rho c_v) (\alpha E)^2 + 2\lambda (1-2\nu)^2 \}] Q_n \\
& \quad = 0 \dots\dots\dots (19)_3
\end{aligned}$$

これらの式は P_{xn} , P_{zn} , Q_n の同次の連立一次方程式であるから、意味のある解を持つためには P_{xn} , P_{zn} , Q_n の係数から作成された行列式=0が成立しなければならない。この式が求める振動数方程式になる。この式を数値的に解けば固有角振動数 ω_n の複素数解が求まり、実数部 $\text{Re}(\omega_n)$ は角振動数を表し、虚数部 $\text{Im}(\omega_n)$ は振動の減衰を表す。

S 4 直線棒の連成熱弾性縦方向自由振動のLagrangeの運動方程式による解析

4.1 直線棒の連成熱弾性縦方向自由振動場の設定

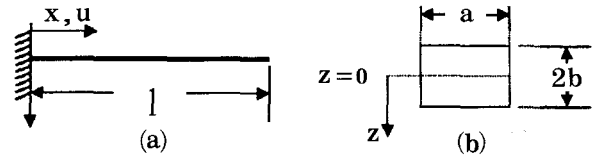


Fig.2 Coordinate system of a straight bar (a) and cross section of a straight bar (b)

直線棒の座標系はFig.2のように定める。左端を固定支持とし、右端は自由とする。

変位場は近似的にx軸方向変位成分 $u=u(x, t)$ のみが存在すると考えられるので、縦振動方程式の解が境界条件を満足するように、式で仮定する。

$$\begin{aligned}
& u = u_n = q_n \sin \{ (2n-1) \pi x / (2l) \} \dots\dots\dots (20) \\
& \quad (n=1, 2, \dots, n)
\end{aligned}$$

q_n は時刻tの関数でこれを一般座標とする。

温度場の仮定は3.1項の場合と同様に $\theta = T_0 (\rho \eta - \beta e) / (\rho c_v)$ を用いて η の式を仮定することにする。

$$\begin{aligned}
& e = (1-2\nu) \{ (2n-1) \pi / (2l) \} q_n \cos \{ (2n-1) \pi x / (2l) \} \\
& \quad \dots\dots\dots (21)
\end{aligned}$$

となるので、 η を次のように定める。

$$\eta = p_n \cos \{ (2n-1) \pi x / (2l) \} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 p_n は時刻tの関数で一般座標である。

3.1項の場合と同様にエントロピー変位ベクトル H_i/T_0 について次式が成立する。

$$H_{i, i}/T_0 = -\rho \eta = -\rho p_n \cos \{ (2n-1) \pi x / (2l) \} \dots\dots (23)$$

ここでは、 $H_y=0, H_z=0$ と仮定し、 H_x は式(23)を積分して得られる次の式(24)を採用する。 $\partial \theta / \partial x$ の式と形が一致するように式(24)を決めた。

$$\begin{aligned}
& H_x = -T_0 \rho (2l) / \{ (2n-1) \pi \} p_n \sin \{ (2n-1) \pi x / (2l) \} \\
& \quad \dots\dots\dots (24)
\end{aligned}$$

4.2 直線棒の連成熱弾性縦方向自由振動のLagrangeの運動方程式

4.1項に示した変位場の式(20)、エントロピー密度等の熱力学場の式(22), (24)を用いて $V_B, P_B, K, \delta D$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned}
& V_B = T_0 V / (4 \rho c_v) \{ \rho p_n - \beta / (2l) (1-2\nu) (2n-1) \pi \\
& \quad \times q_n \}^2 + (\lambda + 2\mu) V / 4 \{ (2n-1) \pi / (2l) \}^2 q_n^2 \\
& \quad \dots\dots\dots (25)
\end{aligned}$$

ここに、 V, β 等は前節の場合と同じである。

$$\begin{aligned}
& P_B \text{は前節と同様に0になり、} K \text{は次式のようになる。} \\
& K = \rho V / 4 q_n^2 \dots\dots\dots (26)
\end{aligned}$$

δD は次のようになる。

$$\delta D = 2T_0 V / \kappa \{ \rho l / (2n-1) \pi \}^2 p_n \delta p_n \dots\dots (27)$$

これらの式(25), (26), (27)を式(1)へ代入し, 変分計算すると最終的に次式になる.

$$\begin{aligned}
 & \int_{t_1}^{t_2} [1/(2c_v) \{ \rho p_n - \beta/(21) (1-2\nu) (2n-1) \pi q_n \} \\
 & + 2/\kappa \{ \rho l/(2n-1) \pi \}^2 p_n] \delta p_n dt \\
 & + 1/2 \int_{t_1}^{t_2} [-T_0 \beta/(2c_v l) (1-2\nu) (2n-1) \pi p_n \\
 & + \{ (2n-1) \pi/(21) \}^2 \{ \lambda+2\mu \\
 & + T_0 \beta^2/(\rho c_v) (1-2\nu)^2 \} q_n + \rho q_n] \delta q_n dt = 0 \quad (28)
 \end{aligned}$$

3.2項の場合と同様に変分 δp_n , δq_n の係数が同時に0になるべきであることから, Lagrangeの運動方程式は次のようになる.

$$4c_v \{ \rho l/(2n-1) \pi \}^2 p_n + \kappa \{ \rho p_n - \beta/(21) (1-2\nu) (2n-1) \pi q_n \} = 0 \quad (29)_1$$

$$\begin{aligned}
 & T_0 \beta/(2c_v l) (1-2\nu) (2n-1) \pi p_n \\
 & - \{ (2n-1) \pi/(21) \}^2 \{ \lambda+2\mu \\
 & + T_0 \beta^2/(\rho c_v) (1-2\nu)^2 \} q_n + \rho q_n = 0 \quad (29)_2
 \end{aligned}$$

4.3 振動数方程式の作成とその解

3.3項の場合と全く同様にして p_n , q_n を次のように表す.

$$p_n = P_n \exp(i \omega_n t), \quad q_n = Q_n \exp(i \omega_n t) \quad (30)_{1, 2}$$

これらの式を式(29)_{1, 2}へ代入すると次の各式が成立する.

$$[\rho \kappa + 4c_v \{ \rho l/(2n-1) \pi \}^2 (i \omega_n)] P_n - \beta \kappa/(21) (1-2\nu) (2n-1) \pi Q_n = 0 \quad (31)_1$$

$$\begin{aligned}
 & T_0 \beta/(2c_v l) (1-2\nu) (2n-1) \pi P_n \\
 & + [\rho \omega_n^2 - \{ (2n-1) \pi/(21) \}^2 \{ \lambda+2\mu \\
 & + T_0 \beta^2/(\rho c_v) (1-2\nu)^2 \}] Q_n = 0 \quad (31)_2
 \end{aligned}$$

以上の両式から P_n , Q_n の係数を成分とする行列式を作成して, この行列式=0とすればこれが振動数方程式となる. この式の数値解を求めるとこれが第n次振動モードの解になる.

§ 5 連成熱弾性振動解析の別解

はりの変位場と温度場を未知関数とする連立偏微分方程式の理論解を求めて, はりの連成熱弾性曲げ自由振動の減衰振動性状を解明した研究⁴⁾がある. この手法によると一義的な解を求めることができるが, 解明できるはりの形状, 境界条件に制約が生じる. この制約条件を解除した解析を行うために, 著者らは一般化高次理論と称する汎用的理論解析手法を適用してはり, 平板の連成熱弾性曲げ振動の解析を行ったが^{(6), (7), (8)}, 求まる固有角振動数に数値的不安定性が発生する難点が解消されない

§ 6 結言

前節に述べた解析手法の不備を補うために, Lagrangeの運動方程式によってはり, 棒の連成熱弾性自由振動解析するための, 理論式の定式化を行った. 数値計算による理論の具体的比較検討は今後行う予定である.

参考文献

- 1) 橋口, 近角編, 結晶の強度(1969), pp207~208.
- 2) N.C.Huang and R.C.Shieh, THERMOELASTIC COUPLING EFFECT ON THE STABILITY OF NONCONSERVATIVE ELASTIC CONTINUOUS SYSTEMS, Int.J.mech.Sci., Vol.12 (1970), p.49.
- 3) 角・ほか2名, 九州大学工学集報, 56(1983), pp695~701.
- 4) C.V.Massalas and V.K.Kalpakidis, J.Sound Vib.88(1983), pp.425~429.
- 5) M.A.Biot, Thermoelasticity and Irreversible Thermodynamics, J.Appl.Phys.No.3(1956), pp.240~253.
- 6) 丸上・平島, 機論, 59-558, A(1993), pp.344-351.
- 7) 丸上・平島, 機論, 64-624, A(1998), pp.2065-71.
- 8) 丸上・平島, 講論, 98-3, Vol.1(1998), pp.319-320.

コンクリート表面におけるひびわれの定量評価に関する研究

(環境都市工学科) 市坪 誠, 竹村和夫, 山口隆司
(専攻科建設工学専攻) 丸岡弘晃, 山根 浩

A Study on Quantitative Evaluation of Distress on Concrete Surface

(Department of Civil Engineering) Makoto ICHITSUBO, Kazuo TAKEMURA
and Takashi YAMAGUCHI
(Advanced Architecture and Civil Engineering Course) Hiroaki MARUOKA, Hiroshi YAMANE

Abstract

The concrete structure is usually constructed with materials that exhibit distresses after construction due to various loading, environmental conditions. For the inspection of the surface distress of concrete surface, the most widely used method to conduct such surveys is based on human observation. We require developing automated computer system for surveying surface distress of concrete construction, but we don't precisely understand measuring conditions to survey distress on concrete surface.

The goal of this paper is to investigate quantitative evaluation of distress on concrete surface. Especially, this experiment is to estimate the effect of light on distress evaluation of concrete surface. As a result, we obtained the databases of the relationship between the distress images and lighting condition.

Key Words: concrete structure, distress, cracking, inspection, quantitative evaluation

コンクリート構造物, 損傷, ひびわれ, 検査, 定量評価

§ 1 はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が顕在化し、その健全性や第三者影響度が注目されるようになってきた。建設構造物の主要な構成材料であるコンクリートにおいて、安全性、耐久性、美観といった要求性能を確保するためには、躯体内部や表層部における欠陥やひびわれの早期発見が求められる。

従来、コンクリート表面に発生したひびわれの調査は、スケッチおよびカメラによる撮影（フラッシュ）が行われている。これらは、人手と時間を有する作業であり、マイクロクラックを含む全ての損傷を正確に把握するこ

とは困難であった。近年では、デジタルカメラやコンピュータシステムを活用した調査が行われているが、ひびわれ情報は高解像度のデジタルカメラを用いても十分取得できるとはいえない。

そこで本研究では、ひびわれ抽出手法の基礎的資料を得るために、測定条件の中でも特に照明について検討を行った。つまり、LED（発光ダイオード）やD₆₅光源を用いて、照明種類とその分光特性の違いがひびわれ抽出に及ぼす影響の把握を行った。特に、市販のデジタルカメラを用いることにより、コンクリート材料の持つ演色性（光源によって色が変わる現象）を把握することに本研究の特徴がある。

§ 2 目視検査によるひびわれ測定

アルカリ骨材反応による劣化性状を示すまでもなく、劣化が進行したコンクリートはその表層部にひびわれや損傷が表れることが多い(図-1)。

目視調査(検査)とは、その損傷状況やコンクリート構造物全体の変形状況、構造物周辺の環境状況等を目視観察や簡単な器具等を用いて把握する調査方法である。ゆえにコンクリート構造物を診断する上で、最も重要な情報を得る調査の一つである。

現在、トンネル、橋梁床版および橋脚のひびわれ点検・調査に、デジタルカメラを使用し撮影したデジタル画像を用いその劣化状態を診断している。これは、劣化状態の調査および検査を行なうコンクリート表面を、デジタルカメラにより撮影を行なう。作成したデジタル画像を、パーソナルコンピュータに取り込み、画像処理ソフトを使用し画像データからひびわれなどの劣化データを抽出し、目視調査の評価資料として用いる。しかし、現在の調査方法は精度および適用限界が良くなく、コンクリート表面の汚れなどいくつかの要素が重なれば画像処理をほどこしてもデータとして不十分となる。ひびわれの自動認識やひびわれ幅の計測をデジタル画像から判断するには画像処理が十分でないことがあげられている。

§ 3 研究内容

本研究では、現在行なわれているデジタルカメラの目視調査方法の改善を行なうため、ひびわれ抽出手法の基礎的資料を得ることを目的とした。その基礎的資料は、写真撮影の条件設定を変化させることにより得ることが可能であると推定される。写真撮影時の条件設定は、照明種類、分光特性、被写体までの距離およびデジタルカメラの解像度である。この条件下において、コンクリート表面の演色性について検討を行なうものとする。

3.1 実験条件

以下の条件を考慮し、デジタルカメラによってひびわれの撮影を行なった。実験に用いたデジタルカメラ、照明の種類、供試体のひびわれ寸法を表-1に示した。

3.1.1 供試体のひびわれ寸法の検討

目視調査の補修・補強指針には、補修の要否に関するひびわれ幅が定められている。その中に、コンクリートのひびわれ幅の限度は耐久性から見た場合は0.1mm以上、防水性から見た場合は0.05mm程度とされている(表-2)。これより、ひびわれはモルタル供試体(4×4×16cm)を割裂試験により作成し、コンクリートの防水性

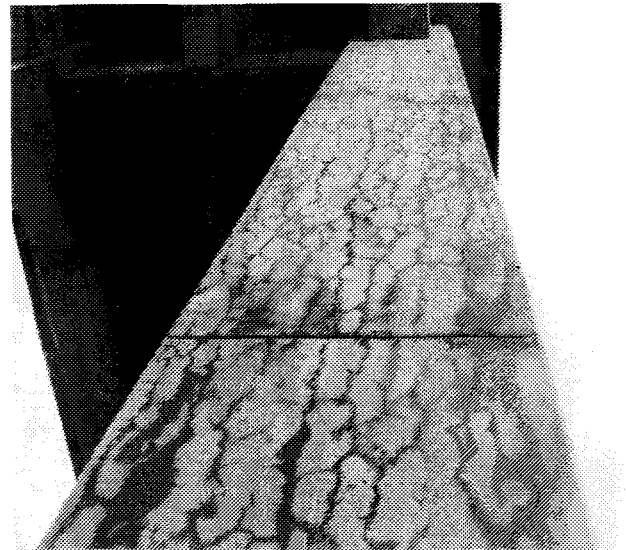


図-1 劣化が顕在化した例

表-1 実験概要

要因	水準
デジタルカメラ	約240万画素
ひび割れ幅	0.02、0.05、0.08、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5mm
照明種類	D ₆₅ 蛍光ランプ LED ランプ(青色、緑色、赤色)
画像処理方法	部分分割処理

表-2 補修に関するひびわれ幅の限度

区分 環境	耐久性から見た場合			防水性から見た場合
	厳しい	中間	緩やか	
補修を必要とするひびわれ幅 (mm)	0.4以上	0.4以上	0.6以上	0.2以上
	0.4以上	0.6以上	0.8以上	0.2以上
	0.6以上	0.8以上	1.0以上	0.2以上
補修を必要としないひびわれ幅 (mm)	0.1以下	0.2以下	0.2以下	0.05以下
	0.1以下	0.2以下	0.2以下	0.05以下
	0.2以下	0.3以下	0.3以下	0.05以下

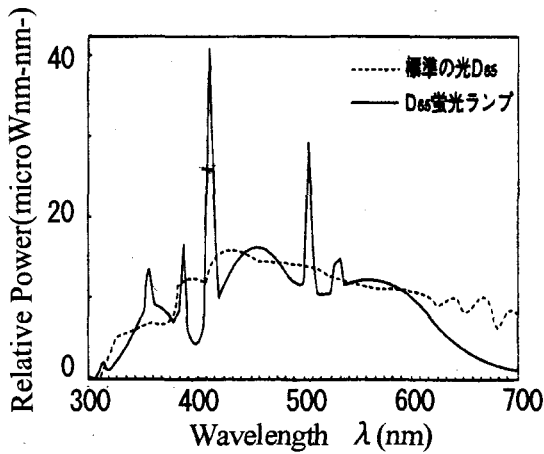


図-2 D₆₅ 蛍光ランプの分光分布

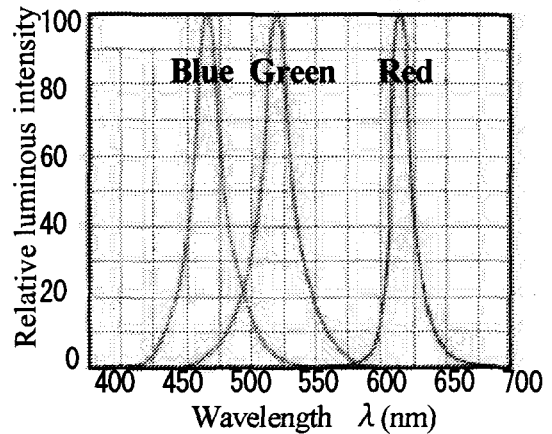


図-3 LEDの分光分布

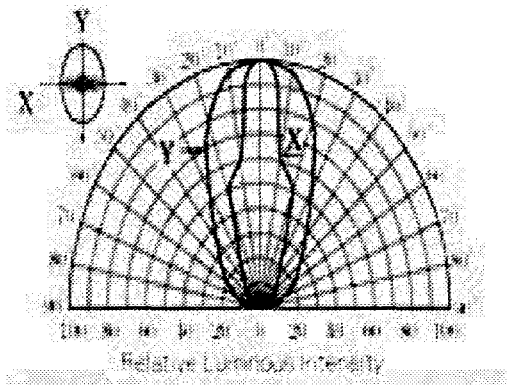


図-4 LEDの指向特性

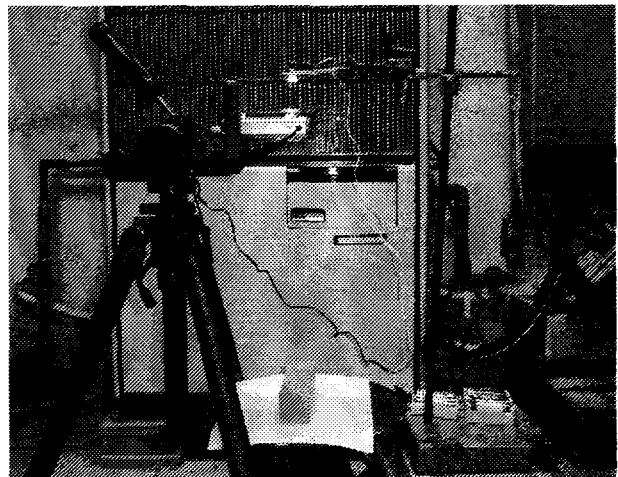


図-5 実験状況

も考慮したひびわれ寸法として 0.02mm 以上のひびわれ供試体を 8 種類作成した。

3.1.2 照明種類の検討

光源として使用する照明は、分光特性がひびわれ抽出に及ぼす影響を評価するために、CIE（国際照明委員会）において標準光とされる D₆₅ 光源に最も近い蛍光ランプを選ぶとともに、分光分布および指向特性が明確で照度が十分得られる高輝度 LED（赤色、青色、緑色）を選出した。それぞれのランプの分光特性および LED の指向特性を図-2～4に示した。

3.1.3 撮影条件

デジタルカメラは、ひびわれ調査におけるコスト面および操作性を考慮し、一般的に用いられる解像度（画素数）の物とした。なお、撮影条件はすべて同じ条件となるマニュアル設定としている。

撮影画像を一定条件とするために、光源の照度を 50lx となる供試体の真上に配置し、ひびわれの進行方向に対し並列となるようデジタルカメラを 30cm の位置に配置にした。デジタルカメラの撮影距離は、撮影画角と認識ひびわれ幅の関係より決定した¹⁾。実験状況を図-5に示した。

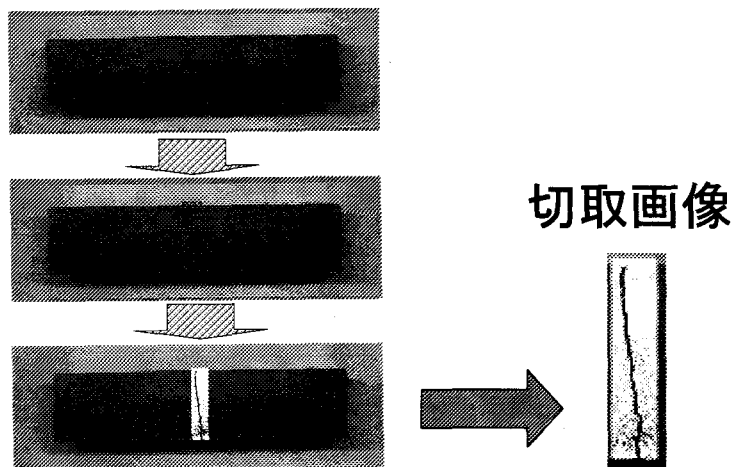


図-6 2値化手順

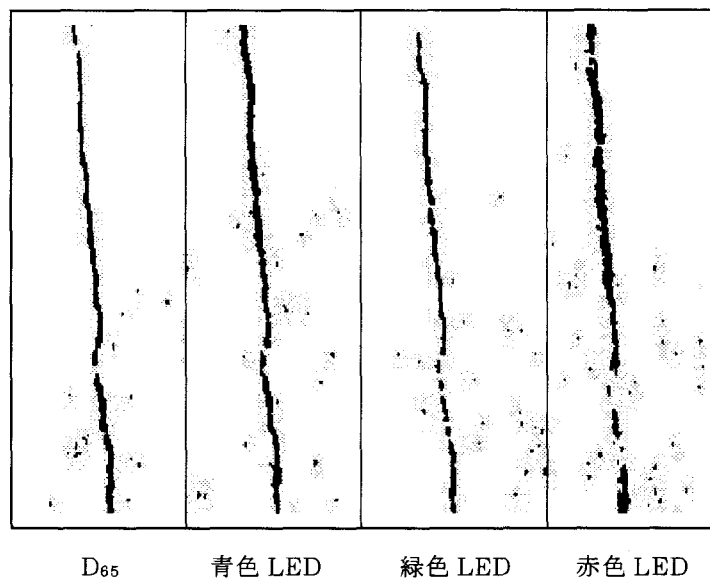


図-7 ひびわれ抽出画像の光源の差による影響

3.2 実験概要

以上の条件により撮影した画像よりひびわれを抽出するために、供試体表面の照度が均一である部分を部分分割し、光源ごとに閾値を適当な値で固定し単純2値化を行なった。その2値化手順を図-6に示した。

ひびわれ抽出の程度を把握するために処理画像のひびわれ進行方向の長さを画像上のひびわれ長さとし、横方向を画像上のひびわれ幅として、実際のひびわれ長さ、ひびわれ幅の比較を行なった。また、光源の差によるひびわれ抽出の変化を把握するために、デジタル画像のひびわれ中心部分とその周辺の色差を測定した。

§ 4 実験結果

各光源、デジタルカメラにより撮影した撮影画像(図-7)は、画像処理ソフトを用いて、光源ごと閾値一定で単純2値化を行い、その画像を用いて考察を行った。

4.1 処理画像の程度

0.2mm~0.5mmまでの8種類のひびわれ幅の試料に対し、4種類の光源下で撮影を行なった撮影画像は、単純2値化を行った。画像を図-8(0.2mmの処理画像)に示した。処理画像は、最も微細なひびわれ幅の0.02mmに対して、すべての光源で確認することができなかった

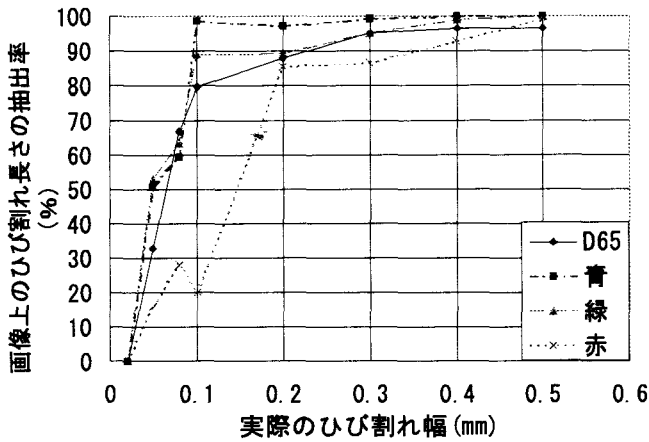


図-9 ひびわれ長さの抽出値

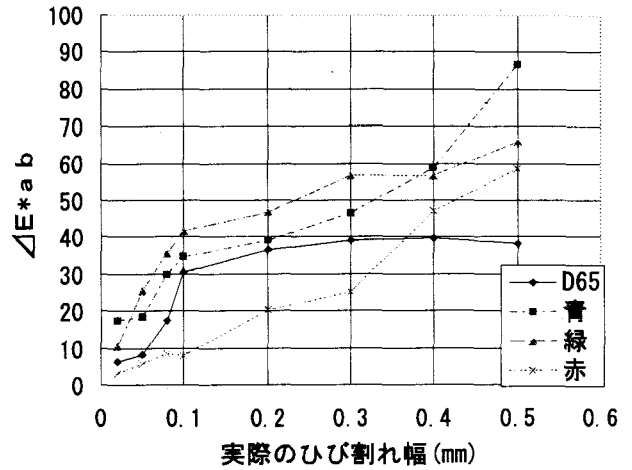


図-10 ひびわれ幅と色差の関係

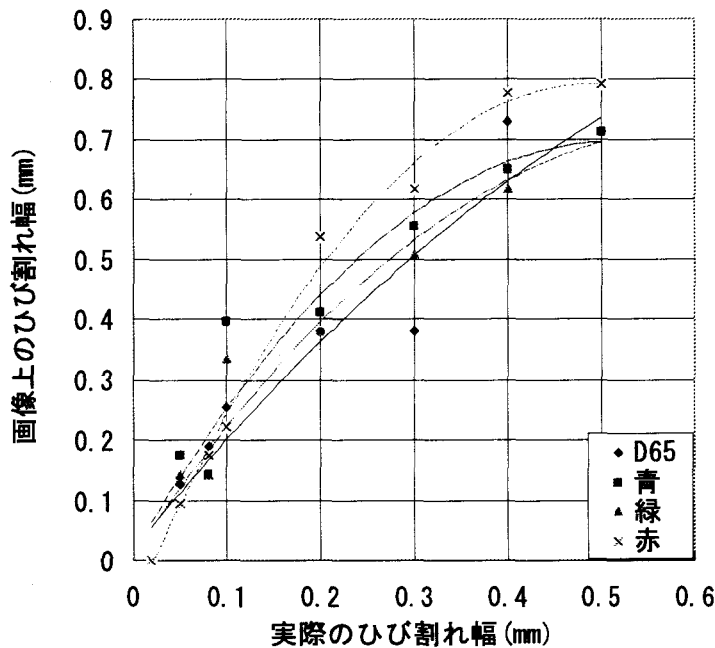


図-11 ひびわれ幅の抽出値

が、0.05mm 以上のひびわれ幅は、光源ごとに差はあるものの確認することが可能であった。

撮影したデジタル画像が光源ごとにひびわれの見えが変化することはもとより、2 値化処理後のひびわれ幅およびひびわれ長さの状態が、各光源下で異なることが理解できた。特に赤色光源下でのひびわれ長さは、他の処理画像に対し性状が異なり途中切れた状態となった。青色と緑色の光源下のひびわれ画像はひびわれ性状を的

確に表す傾向にあった。つまり、この3色の成分を含み、太陽光をイメージした D₆₅ 光源下での画像は、ひびわれ抽出に必要な情報だけでなく、余分な情報も含んでいることが理解できた。

4.2 ひびわれ長さの抽出

画像内におけるひびわれ長さの抽出程度を理解するため、各光源のひびわれ幅における抽出率を測定した。

抽出には途切れ途切れとなっているひびわれを測定し、総括的な長さをもとに抽出率を測定した。結果のグラフを図-9に示した。どの光源においても、微細なひびわれ幅である0.02mmを確認できなかったが、0.05mmでは青色緑色の光源下で50%抽出した。そして0.1mmのひびわれ幅で、青色および緑色光源下でのひびわれ長さは約90%抽出するのに対し、長波長の赤色光源下では低い抽出率となり、処理画像は途切れ途切れのひびわれ性状となった。しかし、0.2mm以上のひびわれ幅において、ひびわれ長さの抽出率は光源の差異がなくなる傾向にあり、どの光源下においても90%を超える抽出率となった。

4.3 ひびわれ色差の測定

光源の違いによるひびわれ抽出の程度を把握するため、撮影画像のひびわれ中心部とその周辺部の色差を測定した(図-10)。これより、赤、青、緑色の波長の光源下での色差は、 D_{65} 光源より大きくなる傾向にあった。特に中波長である緑色の光源下では、他の光源より色差が大きくなる傾向にあった。また、ひびわれ幅と色差との間は比例する傾向にあった。

各光源下における画像内の見かけのひびわれ幅と、実際のひびわれ幅の対応を図-11に示した。実際のひびわれ幅に対し、見かけのひびわれ幅は総じて大きく抽出された。特に、0.1mm以下の微細なひびわれに対して青色や緑色の光源下では大きく抽出される一方、0.2mm以

上のひびわれ幅では赤色光源下での抽出率が他に比べて顕著となった。

§5 まとめ

本研究で得られた結果を以下に示した。

- 1) 青色と緑色の光源下のひびわれ画像はひびわれ性状を的確に表す傾向にあった。
- 2) 0.2mm以上のひびわれ幅において、ひびわれ長さは光源の差異がなく正確に抽出する傾向にあった。
- 3) 緑色の光源下での、0.05mmから0.3mmまでのひびわれ幅は他に比べ色差が大きくなる傾向にあった。
- 4) ひびわれ幅の抽出率は、0.1mm以下のひびわれに対して青色や緑色の光源が有効となるのに対し、0.2mm以上では赤色光源が有効となった。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関する研究委員会報告書，2001，3
- 2) 例えば、魚本健人ほか：コンクリート構造物の非破壊検査、森北出版、pp4-26、1990

材料表面における損傷検出システムに関する基礎的研究

(環境都市工学科) 市坪 誠, 竹村和夫, 山口隆司
(専攻科・建設工学専攻) 山根 浩, 丸岡弘晃

A Fundamental Study of Computer System for Surveying Surface Distress

(Department of Civil Engineering) Makoto ICHITSUBO, Kazuo TAKEMURA
and Takashi YAMAGUCHI
(Advanced Architecture and Civil Engineering Course) Hiroshi YAMANE, Hiroaki MARUOKA

Abstract

Highway and roadway are usually constructed with materials that exhibit distresses after construction due to various loading, environmental conditions. The distresses are presented in the form of surface cracking in most situations. Successful automation of surface distress survey would reduce the overall cost of performing distress surveys and provide more objective and standardized results for rehabilitation management. For the inspection of the surface distress on pavement, the most widely used method to conduct such surveys is based on human observation.

The goal of this paper is to develop a user-assisted method for detection of change of pavement surfaces caused by various loading. As a result, we constructed the computer system for surveying surface distress. And we obtained the databases to identify the relationship between surface images and opinions of inspector.

Key Words: computer system, surface distress, road inspection, pavement, automatic surveying

コンピュータシステム, 表面劣化, 道路点検, 舗装, 自動抽出

§ 1 はじめに

近年、高架橋やトンネル内部におけるコンクリート片の落下など、建設構造物の早期劣化が顕在化し、その耐久性や第三者影響度が大きな社会問題として取上げられるようになった。特に、構造物の表層部に発生するひびわれは、水や空気などといった外界物の進入速度を早め、その耐久性を著しく低下させる恐れがある。

一般に土木用構造物の点検(検査)は、目視を主体とした定期検査が行われるものの、劣化程度に応じた詳細検査への移行は容易かつ迅速とはいえない。

ここで、膨大なストックを有する道路(一般道路の実延長: 1,155,438.6km, 平成11年4月1日現在)の路上点検は主に検査員の目視および車上感覚により実施されており、将来の熟練した検査員の不足や点検車両の低速走行での事故・渋滞の解消のためには検査のシステム化が必要とされる。

そこで本研究では、アスファルトやコンクリートによる舗装表面を対象として、剥離やひびわれといった表面劣化を抽出するシステムの開発を行った。つまり、構造物表面の画像処理、劣化抽出、データベース化といった一連のシステムを構築し、その自動化の適応を検討した。



図-1 舗装面における劣化抽出システムのプロセス図

特に本研究では構築したシステムの路面情報の診断手法について概要を示すとともに、データベース上における画像の劣化診断事例を示すものである。

§ 2 システム概要

既存の劣化抽出技術及び研究成果を考慮し、システム自体が安価で拡張性があり、操作者が容易かつ迅速に扱えるシステム構築を目的としている。

2.1 検査対象と検査手法

道路を安全に運転する上で支障となるのは舗装表面の剥離やひびわれである。そこで、社会的な影響を考慮し道路利用者の安全性を図ることから、検査対象をアスファルトおよびコンクリート舗装表面の“表面劣化”とした。つまり、道路舗装面および橋梁床板などにおいて、道路の安全通行上問題となる比較的大きなひびわれや欠陥を対象としている。

検査手法のスキームを図-1に示した。まず、検査機器（ビデオカメラ）を搭載した走行式車両（検査車）が対象となる道路を走行する。光源を有するデジタルカメラは非接触にて路面劣化（凹凸）を撮影することを意図しており、日照、天候や気温などといった検査条件に左右されないシステム開発を目指している。続いて、撮影された舗装面は搭載されたハードディスクに画像データベースとして記録される。構築したソフトウェア上でこの画像データは画像処理及び劣化抽出などといった演算加工が行われ、舗装面の劣化状況やその位置を瞬時に出力することとなる。特にこれら一連の作業をシステム化することにより、路面表面の劣化を自動的に抽出することが大きな特徴となる。そして本結果をもとに、道路管理者は劣化性状や頻度を踏まえて補修すべき路線の優先順位や規模を決定することとなる。

2.2 劣化抽出システムの構成

本システムは GIS（地理情報システム）ソフトを用いて、画像処理／図化／劣化抽出の3つのサブシステムから構成される。（図-2）

(1) 画像処理サブシステム

まず路線図を作成するために、デジタルビデオカメラで撮影された画像の処理を行う。また、車両の走行スピードに対応して画像を切断し、隣接する画像同士の結合を行うこととなる。

(2) 図化サブシステム

GIS 機能の特徴の一つとして、画像情報に地理情報を付加することにより空間情報とすることが挙げられる。本サブシステムは上記で作成された画像に座標を付加し、路線地図を作成する。これより、路面上のひびわれを画像（図）として定性的に把握することとなる。

(3) 劣化抽出サブシステム

地図内の画像情報を特定の閾値で分割することにより、舗装部（健全部）と劣化部とに分割する。地図内の座標情報をもとに、劣化中心部の座標と長さを抽出する。これより、ひびわれを定量的に把握することとなる。

§ 3 実験計画

3.1 舗装の分類

舗装の種類において、アスファルト舗装のものをA、コンクリート舗装のものをCとする。本研究における劣化の深さにおいて、5 mm以上のものを深い、これ未満のものを浅いと判断し、それぞれDおよびSとした。劣化の幅において、5 mm以上のものを広い、これ未満を狭いとして、それぞれWおよびNとした。実験上分類された舗装はこれらの記号により8通りとなり、これを図-3に示した。

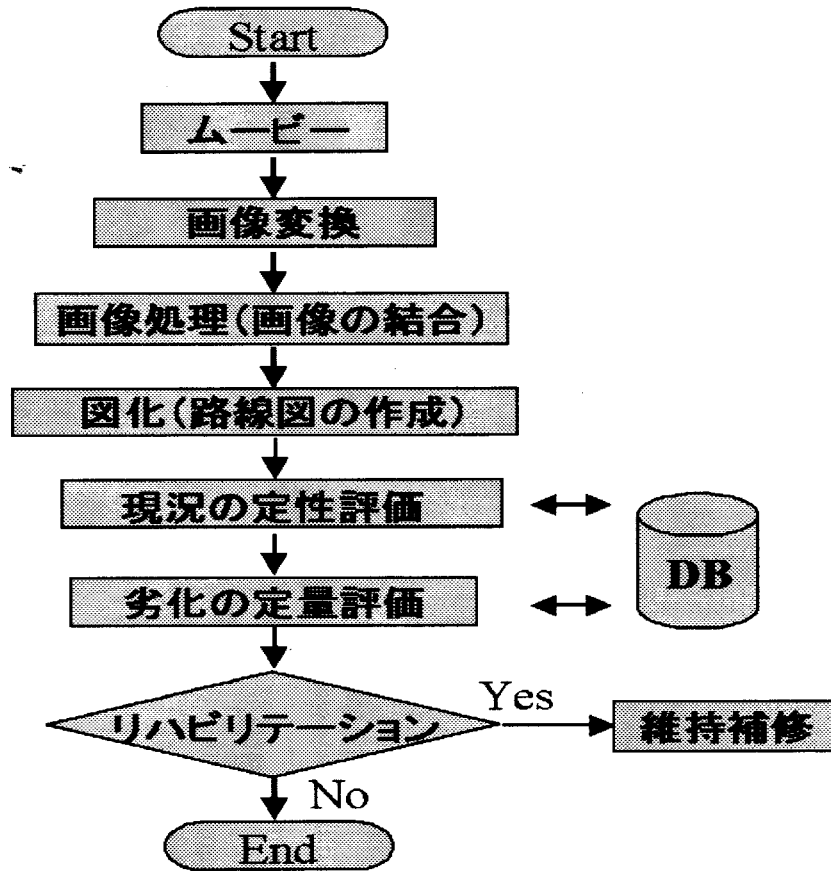


図-2 劣化抽出システムのフロー図

3.2 舗装の画像抽出

撮影された舗装面は画像データベースとして記録された。本研究のひび割れ抽出の特徴として、ひび割れ部を影として把握することから、データの記録手法はグレースケールを用いることとした。これより、ひび割れ抽出精度を落とすことなく個々のデータの容量を小さくすることが可能となり、後の画像処理においても効率なものとなった。これら画像データは、構築されたソフトウェア上で、画像解析や劣化抽出といった演算加工が行われ、舗装面の劣化状況やその位置を瞬時に出力することとなる。

構築したシステムにおいて、ひびわれの定性評価と定量評価の事例を以下に示した。

§ 4 結果及び考察

ひびわれ抽出におけるシミュレーション実験の結果から、構築されたシステムの検討を行った。

舗装の種類	劣化の深さ	劣化の幅
A:アスファルト	S:浅い	W:広い
C:コンクリート	D:深い	N:狭い
A	S	W
		N
A	D	W
		N
C	S	W
		N
C	D	W
		N

図-3 舗装の分類

舗装の種類	劣化の深さ	劣化の幅	デジタルカメラ画像	2値化画像	ライン変換	深さ(mm)	幅(mm)
A	S	W				3	16
A	S	N				1.7	7.5
A	D	W				31.5	21
A	D	N				7	8.5
C	S	W				2	5.2
C	S	N				1.2	3.5
C	D	W				185.6	15
C	D	N				34.5	2.1

図-4 舗装面における劣化抽出処理の図化

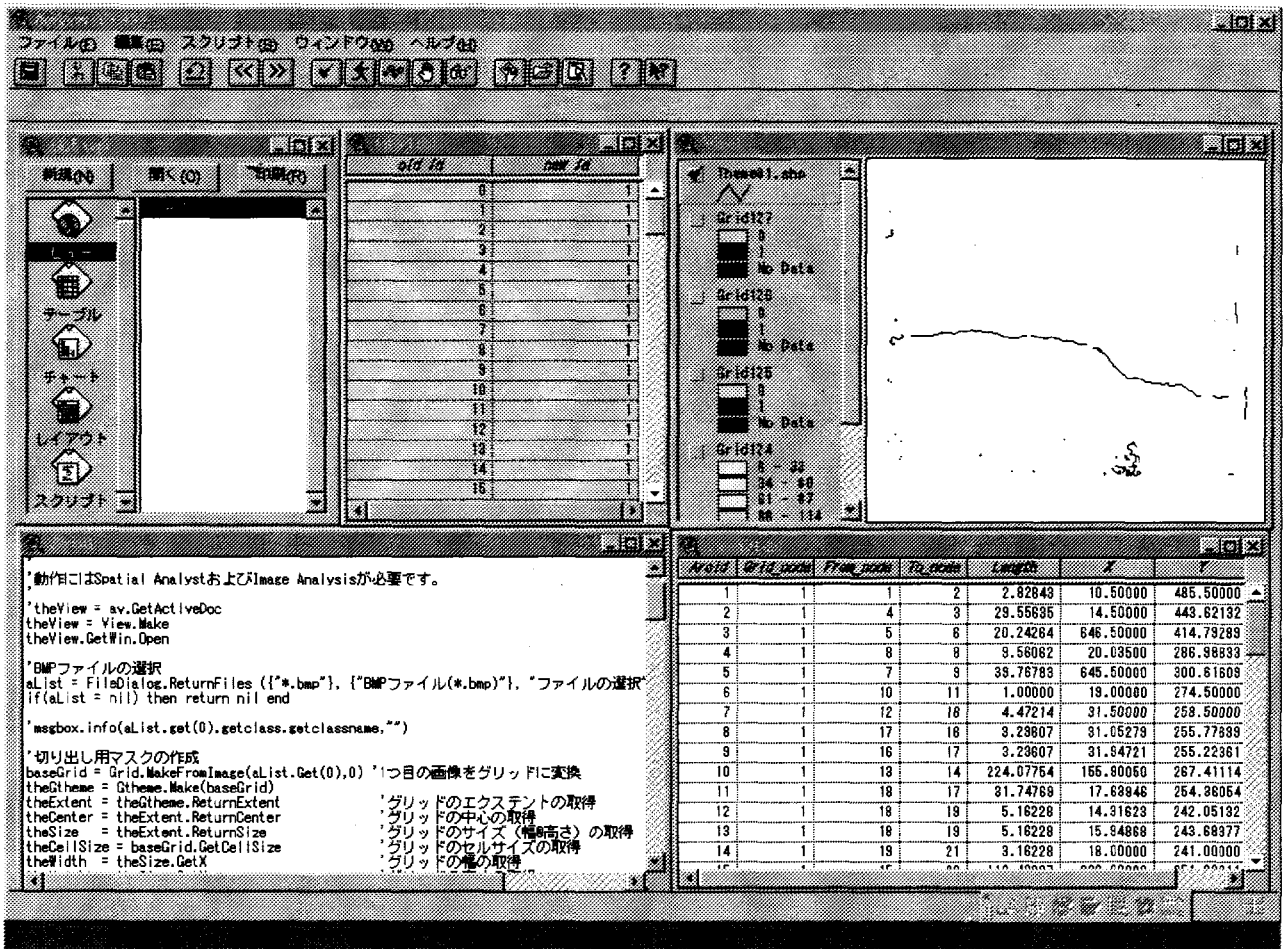


図-5 システム内における画像データと属性データの表示

4.1 劣化抽出の定性評価

舗装面におけるひびわれ性状を図-4に示した。

まず、舗装材料(母材)の影響としてアスファルトとコンクリートとの比較を行った。コンクリート舗装はアスファルト舗装より明確にひびわれが抽出されていることが理解された。特に、デジタル画像から2値化画像、ライン化へと処理するにしたがって、より鮮明に認識できた。このことは、コンクリート舗装面がアスファルトに比し平坦であることと、ひびわれ部と路面(健全)部との明度差が大きいといった材料特性から差異が出たものと判断された。

続いて、ひびわれ幅および深さ要素の検討を行った。コンクリート舗装において、ひびわれ幅の小さいCSNは、実際のひびわれが図中の右端まで延びているにもかかわらず、2値化処理後の画像では劣化と認識されず、ライン変換後もひびわれとして抽出されなかった。これ

より、コンクリート舗装では、ひびわれ幅が狭いものは認識しにくいことが理解された。アスファルト舗装において、ASW、ASNの舗装より、ADW、ADNの舗装のほうがひびわれを明確に抽出した。これより、アスファルトでは、ひびわれ幅よりむしろ深さの要素が重要と把握された。

以上の結果、本システムはコンクリートやアスファルトといった両舗装においてひびわれの定性評価が可能と判断された。また、ひびわれ幅や深さにおいて、運転上危険となるものを正確に評価することが理解された。

これより、ひびわれの性状と位置(分布状況)が定性的に把握され、舗装面における安全性判断の基礎的資料を得ることとなった。

4.2 劣化抽出の定量評価

本システムは、上記画像による定性評価をもとに定量

評価を行うものである。記録された舗装面において、ひびわれおよび舗装面を、それぞれライン認識および無認識する。舗装面における劣化認識の事例を図-5に示した。画面右上部に定性評価(ライン)が示され、画面右下部に定量評価結果(表)が提示された。表内にはライン番号とこれに対応したライン中心位置(X, Y)とライン長さ(Length)が示されている。これより、ひびわれの定量評価が把握されるとともに劣化抽出システムの構築とその自動化が確認された。このことは、舗装面の安全性診断の基礎的資料を得ることを意味する。

なお、本システムは、舗装面のひびわれ性状を自動的に検知するだけでなく、専門知識を有さない一般の操作者でも容易に活用できるものとなった。また、データベースの構築により、道路管理者は補修路線の優先順位、補修の時期や規模、対策方法の選定を容易に判断することが可能となった。

§ 5 まとめ

舗装面の劣化抽出システムの自動化を検討した結果、次のような結論が得られた。

- (1) 本システムはアスファルトやコンクリートといった舗装面の材質によらずひびわれを抽出することが理解された。
- (2) ひびわれ抽出要素において、コンクリート舗装ではひびわれ幅、アスファルト舗装ではひびわれ深さが重要と把握された。
- (3) 舗装面のひびわれ長さおよび中心座標は自動的に抽

出されることが理解できた。

- (4) 本システムによる定性および定量データは、路面安全性を判断する基礎的資料となる。

なお、構築された本システムは、ひびわれの位置および分布状況を自動的に評価するものであり、今後劣化部抽出の精度向上のみならず、他部材への適用等さらに改良を行う予定である。

謝辞

本研究のシステム構築に際し、株式会社パスコの名和裕司氏にご助力を頂きました。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. C. Wang : Designs and Implementations of Automated Systems for Pavement Surface Distress Survey, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol. 6, No. 1, pp. 24-32, March, 2000.
- 2) 社会法人日本コンクリート工学協会 : コンクリート診断技術'01 (基礎編), pp. 80 - 81, 2001
- 3) Environmental Systems Research Institute (ESRI), Using ArcView Image Analysis, Manual of ArcView Image Analysis Extension, ESRI, 1998.
- 4) M. Shinozuka, H. C. Chung, M. Ichitsubo, J. Liang : System Identification by Video Image Processing, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, S.C. Liu(ed.), SPIE Vol.4330, pp. 97 - 107, 2001.

芸予地震(2001)における広島県の液状化現象に関する一考察

(建築学科)西村光正、門前勝明
(専攻科)荒川智輝、(福山大学)芳賀保夫

The Consideration on the Liquefaction of Hiroshima Prefect. in Geiyo Earthquake(2001).

(Department of Architecture) Mitsumasa NISHIMURA and Katsuaki MONZEN
(Advanced Architecture and Civil Engineering Course)Tomoteru ARAKAWA
(Fukuyama University)Yasuo HAGA

Abstract

It was anticipated that the liquifaction was generated in each place by the Geiyo-Earthquake in Hiroshima-Prefect. However, the site point was little. The cause is examined, and the site which generated the liquefaction was surveyed on site, and it observed the situation of the crack and sand boil in the ground. They are reported in this paper.

Key Word:Liquefaction, Sandy ground, Site investigation, Case history
液状化、砂質地盤、現地調査、事例

§1. はじめに

地震の被害報告で液状化と呼ばれる現象も現地をよく観察すると次の3種に区分できるようである。

- (1) 地下水面下のゆるい砂層の体積圧縮に起因するいわゆる液状化現象。
- (2) 含水比が液性限界をこえる非塑性または低塑性シルトが振動で液化する現象。
- (3) 埋立土が振動で締固められて表面が沈下し部分的に噴砂、噴泥をとまう現象。

現在、液状化危険度の判定はN値と細粒土含有率によって行っているが、これは液状化に必要な条件の1つを示すもので、実際に発生するかどうかの十分条件を示すものではない。以下鳥取県で発生した液状化事例も参考にして、(1)~(3)の特性を検討する。

§2. 砂の液状化

2.1 砂の体積圧縮

砂の体積圧縮の生じ易さを示す値として(最大)体積圧縮比を用いるのが便利である。

(最大)体積圧縮比 ϵ_{max} は

$$\epsilon_{max} = \frac{e_{max} - e_{min}}{1 + e_{max}} \quad \dots (1)$$

ここに e_{max} : 最大間隙比 e_{min} : 最小間隙比
いずれも測定は地盤工学会の試験法による。

我国各地の試験結果によると e_{max} , e_{min} の間に次のような関係が見られる^{1) 2)}。

$$e_{min} \approx 0.65 e_{max} \quad \dots (2)$$

これより

$$\epsilon_{max} = \frac{0.35 e_{min}}{1 + e_{max}} \quad \dots (3)$$

(3)式は図1のように示され、 e_{max} が大きいほど ϵ_{max} が大きくなる様子がわかる。 e_{max} を決める主な要因は砂の形状と均等係数である。

形状と e_{max} の関係は文献²⁾の測定結果から大略、図2のように示される。粒子が角ばるほど詰まりにくく、 e_{max} が大きくなる様子がわかる。図2には鳥取県西部地震(2000.10.6)で液状化した弓ヶ浜の砂および液状化

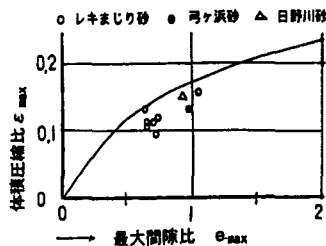


図1 砂の最大間隙比と体積圧縮比
文献^{1) 2)}による

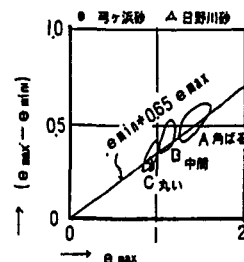


図2 砂の形状と間隙比
文献²⁾による

しなかった日野川河口砂の試験結果¹⁾も併記する。

砂の均等係数は次のように定義される。

$$\text{均等係数 } U_c = D_{60} / D_{10}$$

D_{60} : 60%径 D_{10} : 10%径

文献1)の測定結果では U_c と空隙比の関係は図3のようになる。図3

には弓ヶ浜砂、日野川河口砂の値も併記する。

U_c が1.5~4.0の間で空隙比、体積圧縮比共に急激に減少する様子がわかる。

図3の結果は図1にも転記しておく。図1の(3)式のグラフは測定値のほぼ上限を示すことができる。

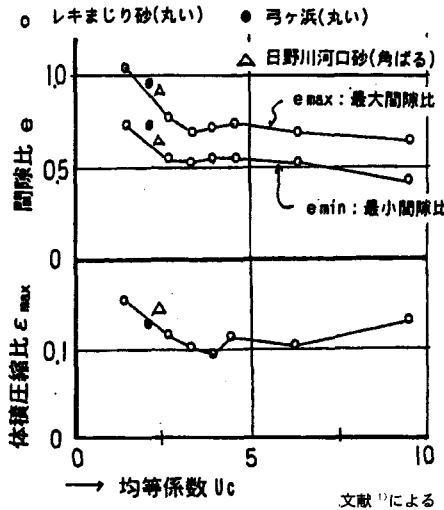


図3 砂の均等係数と体積圧縮比 空隙比e

2.2 砂の透水性

砂の体積圧縮が生じて透水性が良ければ空隙水圧の上昇はなく液状化にはならない。

透水係数 K (cm/sec) と透水性の関係は

- 10^{-1} 以上 透水性大
- $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 透水性中位
- $10^{-3} \sim 10^{-8}$ 透水性低い

ハーゼン(Hazen)によると⁴⁾砂の10%径 D_{10} と K との関係は次のようになる。

$$\text{透水係数 } K = CD_{10}^2 \text{ (cm/sec) } \dots (4)$$

ここに D_{10} : 10%径 (cm)

C ($1/\text{cm} \cdot \text{sec}$) は均等な砂で150、ゆるい細砂で120、よく締った細砂で70程度である。液状化が問題となるゆるい細砂を考え $C=120$ とする。主な砂について透水係数の値を示す。

鳥取県西部地震で液状化した細砂の上限
 $D_{10} = 0.25\text{mm}$ $K = 7.5 \times 10^{-2}$ (cm/sec)

液状化しなかった日野川河口砂
 $D_{10} = 0.32\text{mm}$ $K = 1.2 \times 10^{-1}$ (cm/sec)

細粒土を10%含む砂
 $D_{10} = 0.075\text{mm}$ $K = 6.8 \times 10^{-10}$ (cm/sec)

鳥取県西部地震で液状化したシルトの下限
 $D_{10} = 0.026\text{mm}$ $K = 7.6 \times 10^{-4}$ (cm/sec)

これらの結果から液状化の危険のある砂(シルト)は透水係数中位の範囲のものと考えてよからう。

鳥取県西部地震の際、弓ヶ浜砂では大きな余震が続い

た2日以内に噴砂はおさまったが、竹の内工業団地のシルト質砂では噴泥が1週間程度続いたと云われる。透水性が悪く過剰空隙水圧の消散がおくれたことを示すものと云えよう。

2.3 砂の相対密度

砂の相対密度 D_r の定義は次のとおりである。

最もゆるい砂 (e_{max} に相当) の $D_r = 0\%$

最も密な砂 (e_{min} に相当) の $D_r = 100\%$

$D_r < 1/3$ がゆるい砂、 $D_r > 2/3$ が密な砂でその中間が普通の砂である。自然状態のゆるい砂の D_r は $1/4 \sim 1/3$ であり、これが大地震で体積圧縮された後の D_r は $1/2 \sim 2/3$ 程度である。液状化による砂の体積ひずみは最大体積圧縮比 ϵ_{max} の $1/4 \sim 1/3$ 程度と考えられよう。 ϵ_{max} を約0.15とすると体積圧縮量は4~5%以内と推定される。鳥取県西部地震の際の噴砂の少ない地表面の沈下量から砂の体積圧縮量は3~4%程度と推定される。

振動締固めでゆるい砂の体積を8~10%圧縮すると液状化対策に有効であるのはこの理由による。締固め杭打でも5%程度の体積圧縮は容易に実施できるが、同様に液状化対策として有効である。

現在のところ D_r は N 値 (またはスウェーデン式サウンディング N_{sw}) から間接的に推定する他に適当な方法がない。 N 値から液状化危険度を判定する方法は各種提案されているが、実際に液状化が起こったかどうかは、現地の観察により確認する必要がある。

§3. 非塑性、低塑性シルトの液化

日本建築学会の指針⁵⁾では0.075mm以下の細粒土含有率によって土を区分している。

- 細粒土含有率：
- 0~20% 砂質土、
 - 20~50% 中間土、
 - 50~100% 粘性土

文献6)による弓ヶ浜の砂と大山火山灰粘土の混合土の土質試験結果を図4に示す。

液性限界 W_L 、塑性限界 W_P 時の空隙比を最大、最小空隙比 e_{max} 、 e_{min} とみなしている。

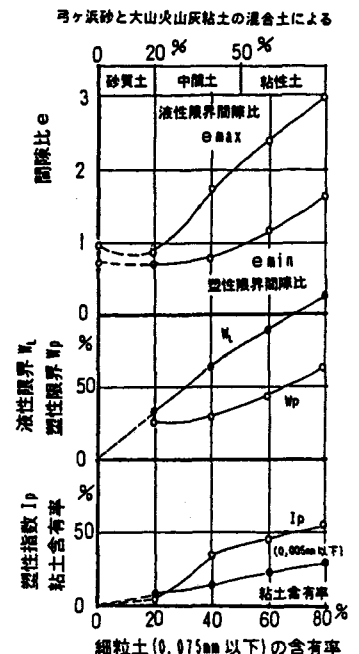


図4 細粒土含有率による土性の変化
文献⁵⁾による

細粒土含有率20%までは e_{max} 、 e_{min} 共に減少し、塑性指数 I_p も5%以下であり、砂質土の延長上にあると見られる。細粒土含有率20%をこえると粘性土の性質が現れるものの30%付近までは W_L 50%以下、 I_p 15%以下となり、ポンプによる埋立シルトなど造成後日の浅い土では自然含水比が W_L をこえてしまう例が多い。

このような土は地震による衝撃でゾル⇄ゲルの変化を繰り返し余震による噴泥が長時間続くことになる。

鳥取県西部地震の際に竹の内工業団地のシルト層では $W_L=40\sim50\%$ 、自然含水比は W_L とほぼ等しい。液化による噴泥は地震後1週間以上続いたという。地震前後の比較では自然含水比が3~5%減少しており、体積圧縮も3~5%生じているものと推定される。

細粒土含有率が35%をこえると液化が起こりにくくなることは文献5)でも指摘されているが、自然含水比が W_L をこえる場合にはこのような土でも液化の危険性があることを考慮する必要がある。

§ 4. 埋土・盛土の体積圧縮

埋土・盛土は施工後、かなりの期間クリープ沈下が続く。強い振動・衝撃は施工後日の浅い埋土・盛土のクリープ沈下を一気に進行させる。このときの体積圧縮量は転圧良好な盛土でも1~2%、転圧をしていない埋立土では3%をこえるであろう。雨水、地下水の溜まった部分からは噴砂、噴泥が発生することは鉄道の路盤に生じる噴砂、噴泥と同じ現象である。

水深の大きい埋立地へマサ土を投入するだけで十分な締りを行わなかった場合に、地震時に体積圧縮が起こり、分離された細粒土が地表に噴出する。阪神大震災(1995.1)時の神戸ポートアイランドの噴砂現象はこの区分に入るものであろう。(大塊を含むマサ土のN値は締り具合を正しく表してはいない)

§ 5. 広島県沖積平野の砂地盤

鳥取県西部地震の事例から液状化の可能性の高いと考えられる粒度範囲を図5のように想定する。

図5には次の事項を併記する。

- (1) 鳥取県西部地震で液化した埋立シルトの主な粒度範囲
- (2) 同地震で液状化した弓ヶ浜砂、液状化しなかった日野川河口砂の粒度¹⁾
- (3) 地盤工学会指針による重力排水可能の範囲⁴⁾

広島県地盤図'97¹⁾によると広島県沖積平野の沖積砂層U Sの下底は地表面から8~10m程度である。地表付近の表層U mは厚さ2~3mで堆積粘性土または埋立土

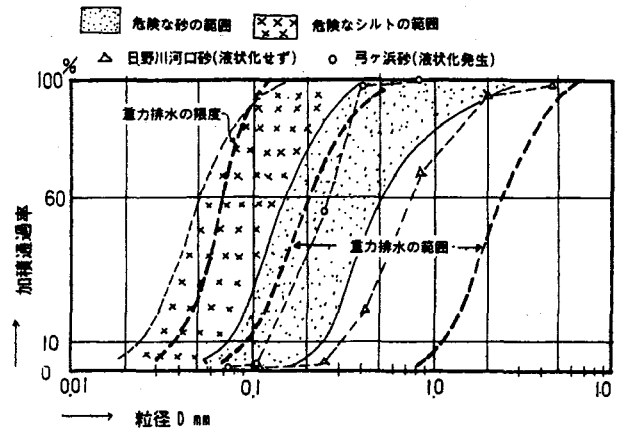


図5 危険な砂・シルトの粒度範囲 文献¹⁾ほか

からなる。地盤図からUs層Um層中に図5の危険な粒度範囲の砂(レキ分 $\leq 5\%$ かつ、細粒土 $\leq 10\%$ のもの)の存在する地点を抽出し、その分布図を○印で付図1に示す。特にこの内 $N < 10$ の砂は条件次第では液状化する危険が高く付図1に●印で示す。広島市をはじめ大小の河口三角州の他に崖錐状の海岸低地にもこのような危険地点が広く分布している。全抽出地点の●印の割合は52%にも達する。島々の塩田跡地など調査の行われていない地区にもこのような危険地点は存在する筈である。

付図1に示す危険な砂の粒度分布を図6に示す。

図5に示す弓ヶ浜の砂は10%径 $D_{10}=0.12\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=2.24$ であるが、図6に見る広島の砂の均等係数の最頻値 ≈ 3.5 と弓ヶ浜砂の1.5倍近くに達する。

図1、図3から均等係数が大きいと e_{max} が小さく ϵ_{max} も低下する。結果として広島の砂は弓ヶ浜の砂よりも液状化が起こりにくいのではないかと推定される。

液化の危険度の高い非塑性、低塑性シルトとして自然含水比 $W \geq W_L$ 、 $I_p \leq 10\%$ の範囲を想定し、これらのシルトが沖積砂層と同じ深さまでに存在する地点を付図1に×印で併記する。これらの地点数は多くないものゝ海岸埋立地の他に後背湿地にも分布する。

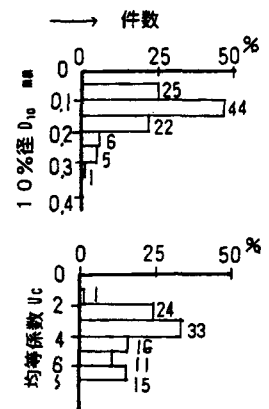


図6 広島県下の危険な砂の粒度分布 (サンプル数157件) 文献¹⁾による

§ 6 芸予地震(2001.3.24)液状化の事例

付図1によると広島県臨海平野全域に液状化の可能性のある地点が分布しているが、今回の地震で実際の液状

化が観察された地点は極めて限られている。その最大の原因は地震の規模が小さく、沿岸部沖積層の地表面加速度が平均的に200~300galと小さかったことがあげられる。

その他液状化を抑制する条件としては次のような事項があげられる。

(1) 地下水位の深さ(地盤高さ)

地下水位の深さが地表面から3mをこえると上載圧が液状化をおさえる効果があり、噴砂があっても多くは途中で吸収されてしまう。

一方地下水位が浅く、地表面から液状化層が始まる時には激しい液状化が起る。鳥取県西部地震時の彦名干拓地(米子市)では地表面から液状化が生じ全体が海面のように波打つのが観察されている。

海岸付近では地下水位は潮汐の影響を受ける。

(2) 表層(非液状化層)の厚さ

広島特有のマサ土や粘性土を十分転圧した非液状化層が2~3mあると(1)と同様の効果がある。

鳥取県西部地震時の竹の内工業団地(境港市)では、地表面に舗装などの仕上げの行われていない裸地ほど激しい噴砂が発生している。

(3) 埋立後の年数

サンドポンプで吐き出された砂は、時間と共にセメンテーションによる効果により、せん断強度が増加して液状化を抑制する。砂質シルトの場合には圧密による体積圧縮のため含水比が低下しせん断強度が増すため、同様に液状化を抑制する。

鳥取県西部地震時の昭和町工業団地(境港市)は竹の内工業団地と同様に施工されたのかかわらず、造成年代が20年程度早いため液状化の程度はごくわずかで済んだ。

(4) 側方流動の防止

護岸壁や排水路擁壁等のすべり破壊、転倒等による側方流動を防止すれば液状化の引金がひかれずにすむ。

(2)の竹の内工業団地では排水路擁壁のすべり破壊のため壁面から100mの範囲に側方流動が生じ、液状化の被害を増加させている。

液状化の疑いのある事例を含め調査を行ったのは広島県内23地区33地点である。

今回の芸予地震のように小規模な地震であるのに液状化が発生した地点は、これらの抑制効果が働かなかった貴重な事例と考えられる。各事例の詳細は付1に、発生地点は付図1に併記する。噴砂・噴泥の粒度分析の結果は表1に示す。これらの事例からは今後の液状化対策の有益な教訓を得ることができる。

§7 事例の検討

付表1をもとに液状化発生事例23ヶ所33件について検討する。

(1) 震度

発生地点のすべてが震度5強である。震度5弱の福山には発生していない。

(2) 液状化発生場所

すべてが埋立地である。

造成年代は昭和以降28件、大正以前5件である。大正以前の内訳は次のようである。

- ・護岸の押出しが原因と考えられるもの 2件
- ・昭和以降に掘削・埋戻が行われたもの 3件
- 以上から造成後の年代の効果が認められる。

(3) 液状化の規模

・広域にわたるもの 4件(1(1). 廿日市市阿品埋立地、2. 廿日市市木材港、6. 三菱重工観音グランド、16. 呉高専付近)

・中域のもの 7件

・局部的なもの 22件

全般に小規模のものが多い。

(4) 護岸壁の押出

護岸壁の押出しにより地表面に噴砂・噴泥を生じたものの8件の内訳は次のようになる。今回は側方流動まではいかなかったものの更に大きな震度では流動の引金になる危険がある。

・広域に発生したもの 2件(1(1)廿日市市阿品埋立地、2. 廿日市市木材港)

・中域のもの 1件

・局部的で収まったもの 5件

文献8)によると観察された護岸の押出量は0~5cmが多い。

(5) 噴砂、噴泥

噴砂・噴泥の区分と噴出量は次のようになる。

・なし 4件

・噴砂 8件(多量3件、少量1件、微量4件)

・噴泥 14件(多量3件、少量9件、微量2件)

・噴砂・噴泥 7件(少量6件、微量1件)

噴砂の内1件、噴泥の内6件は埋立マサ土の細粒分である。噴泥の割合が高く、小規模のものが多い。

(6) 地割れ、段差、地表面の沈下量

・地割れの長さ

10mをこえる(10件)、5mをこえ1m以下(8件)、5m以下(6件)、なし(9件)

・地割れの幅

5cmをこえる(1件)、2cmをこえ5cm以下(8件)、2cm以下(15件)、なし(9件)

・構造物との段差

20cmをこえる（1件）、10cmをこえ20cm以下（6件）、5cmをこえ10cm以下（7件）、5cm以下（3件）、なし（14件）

・地表面の沈下量

20cmをこえる（3件）、10cmをこえ20cm以下（9件）、5cmをこえ10cm以下（7件）、5cm以下（14件）

地表面沈下量、構造物との段差ともおおむね20cm以下であり、地割れも小規模のものが多い。

(7) 埋立地盤

・埋立後の地盤高（T、P）

3mをこえる（8件）、1mをこえ3m以下（24件）、1m以下（1件）

・地下水他の深さ（平均）

2mをこえる（8件）、2m以下（24件）、

・埋立土の厚さ

2mをこえる（26件（内2件は1m以上））、2m以下（7件）

・埋立土

砂（3件）、砂の上にマサ土（10件）、マサ土（20件）

埋立地盤の標高は3m以下が多く、したがって地下水位も2m以下となる。しかし地震発生時広島湾は干潮で海面は平均潮位よりも1.5m程度低い。液状化発生地点の地下水位も潮位

の影響を受けていつもより低目であった可能性がある（図7参照）。

埋立土の厚さも2m以上が多

く、マサ土を転圧したものが多い。このため液状化の程度が小規模ですんだものと思われる。

サンドポンプではき出した砂は11件あるが、地表面をマサ土でおおうことで液状化の程度を軽減できるようなる。

ただしマサ土の埋立であっても、水深の大きい海面へ十分な締固めを行わずに投入されただけでは体積圧縮による噴砂が発生することは§4で述べたとおりである。

(8) 液状化した地層

・地層の種別（複数回答）

埋立土（埋戻土） 砂（12件）、マサ土（10件）

旧地盤 砂（4件）、シルト（15件）

・液状化の種別（複数回答）

砂の液状化 14件（内埋立土12件）

シルトの液化 15件

埋立土の圧縮 10件

液状化した地層は埋立土が過半を占める。特に液状化の激しかった地点をあげると次のようになる。

1(1)、(2) 廿日市阿品団地、廿日市木材港

サンドポンプ埋立砂の上をマサ土でおおう。護岸の押し出しが引金となって地割れ噴砂が発生。

6 三菱重工観音工場グラウンド

地表面までサンドポンプ埋立砂

16 呉高専付近一帯

埋立マサ土の薄い部分には著しい噴泥が発生。建物の部分は海底シルトをマサ土で置換えたので噴泥なし。

(9) 構造物の損傷

・損傷の程度

なし（11件）、軽微（17件）、中破（2件）・・・

（19 三原新幹線、23(1) 大柿町住宅）

杭打の建物は周辺地盤との段差を生じたものの沈下・不同沈下は見られない。

軽微な損傷は次のようである。

* 舗装の段差、地割れ

* 杭の無い木造建物の不同沈下および壁のきれつ

中破を生じたのは三原駅西1.5km付近のJR新幹線高架（鉄筋コンクリートラーメン構造）である。損傷は柱の中間をつなぐはりに生じたせん断きれつであるが、応急処理を行い列車は正常に運行されている。地盤高が低い（上載圧が小さい）部分にだけ発生しており、埋立土の下は後背湿地の有機シルト（もとは水田であった）である。

地割れ、噴泥は生じていないもののこの有機シルトが液化したことにより杭の水平抵抗力が低下、架構の変形が増加したため、スパンの短いつなぎばりが変形に耐えられずせん断きれつが発生したものであろう。これも一種の液状化被害と考え調査結果に収録した。

大柿町飛渡瀬では埋立マサ土が薄く、旧水田のシルトの液化のため木造住宅に不同沈下を生じた。ただし、損傷建物は老朽化しており基礎も簡易に造られているように見える。

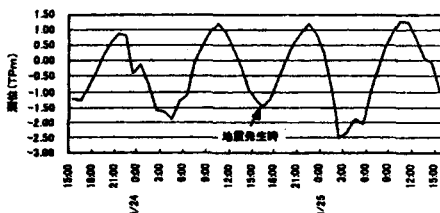


図7 地震前後の広島市草津港付近の潮位（中国地方整備局大田川工事事務所提供）

§8 まとめ

広島県臨海平野は液状化の危険度の高い地盤でありながら今回の地震による被害が少なかったのは次のような原因によると考えられる。

・震度が5強にとどまった。

・造成後の年数を経ている（多くは大正以前）。

・砂の粒度、粒径が液状化の起こりにくいものである。

・地表面が厚さ2m以上の非液状化層（主に転圧されたマサ土）におおわれている。

・護岸壁の押出量がわずかであり、側方流動が生じていない。

・地震発生時広島湾は干潮であり、地下水位が低下していた。

液状化は旧海底土よりも埋立土自体に多く発生しており、次の原因があげられる。

- ・埋立土の締固め不足。
- ・地表面をおおう非液状化層厚の不足。
- ・護岸の押出しによる地割れが液状化を誘発。

噴砂だけでなく噴泥も多く発生しており、地表面付近の含水比の高い非塑性シルトにも注意が必要である。

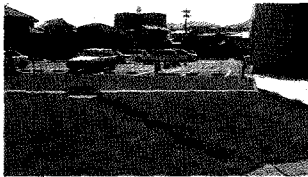
(参考文献)

1. 砂地盤の性質と基礎の設計 79、日本建築学会中国支部基礎地盤委員会編
2. Takeaki Fukumoto 他、Investigation of Shear Characteristics of Natural Sand in Japan.、地盤工学会論文報告集 1999.2、pp.113~120
3. 鳥取県西部地震(2000.10.6)災害資料、中国地方基礎地盤研究会2001.1(芳賀保夫:竹内工業団地内建物の液状化被害調査, 2001.3)
4. 地盤工学会, 土質試験法の透水性の項参照
5. 日本建築学会、建築基礎構造設計指針 1988
6. 松浦・芳賀、粘土・砂混合土の圧縮性、日本建築学会中国支部研究報告、第7巻2号 1980.3、pp.121~124
7. 広島県地盤図'97、中国地方基礎地盤研究会、広島県建築士会、他
8. 地盤工学会、平成13芸予地震災害緊急調査速報、土と基礎 2001.6、pp.35~38
9. 日本建築学会中国・四国支部、平成13年芸予地震被害調査速報会資料

表1 噴砂・噴泥の粒度 文献⁸⁾(○印)⁹⁾より判読

No.	場所	粒度分布 %			D ₁₀ mm	D ₆₀ mm	U _c
		G	S	M+C			
○ 2 (1)	廿日市木材港南	8	80	12	0.06	0.24	4.0
(2)	〃	10	88	2	0.13	0.54	4.2
(3)	〃	28	72	0	0.23	1.30	5.7
○ 5	観音新町運動広場	0	93	7	0.09	0.33	3.7
○ 6 (1)	観音三菱重工グラウンド	0	92	8	0.08	0.29	3.6
(2)	〃	0	97	3	0.125	0.35	2.8
○ 15	呉市宝町	0	65	35	0.03	0.12	4.0
○ 17	仁方棧橋	10	78	12	0.06	0.60	10.0

G: 粒径2mm以上 S: 粒径2~0.075mm M+C: 粒径0.075mm以下
 D₁₀: 10%径 D₆₀: 60%径 U_c=D₆₀/D₁₀: 均等係数



1(2) 阿品高層マリナタウン建物前の噴砂と手前の地割れ



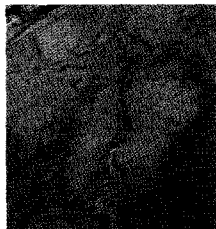
2 廿日市木材港地割れと噴砂



3 廿日市中学校グラウンドバレーコートでの噴砂



4 草津港岸壁の陥没道路補修部が長さ150m、40cm陥没



5 南観音運動広場の噴砂



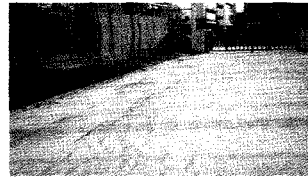
10 中広製材用地の噴砂



14 呉ポートピアパーク南門入り口付近、40cm陥没



15 宝町埋立地敷地敷力所に噴泥跡



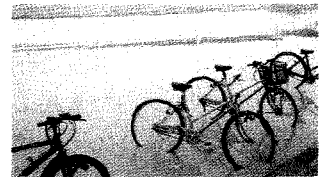
16(1) 呉高専南門付近道路が噴泥で真っ白、舗装が浮き上がり



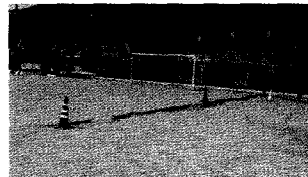
16(1) 呉高専テニスコート地割れと噴泥



16(1) 呉高専陸上競技場トラック横の噴泥跡の穴



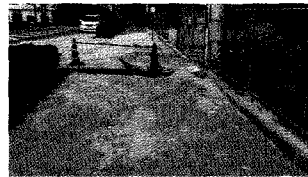
16(1) 呉高専合宿研修所前晴天なのにプールとなった



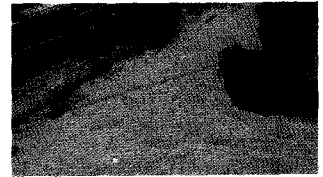
16(2) 阿賀小学校グラウンド地下構造物の周り18cm沈下



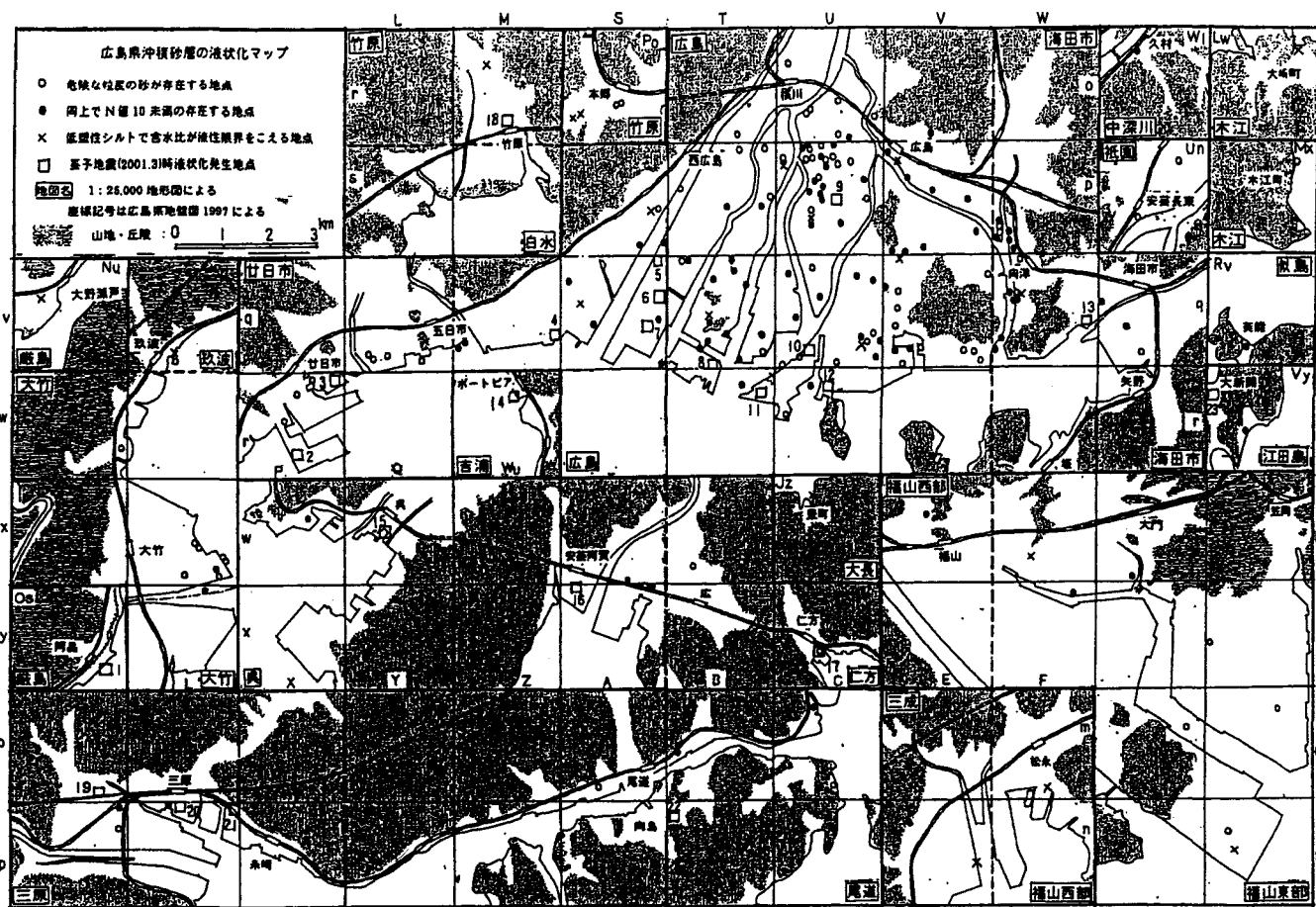
16(4) 広鶴堂前煉瓦を突き破り噴泥、付近20cm沈下



17 仁方棧橋道り公園前の道路の噴砂



18(1) フジタビル駐車場前噴砂、建物周囲も20cm位沈下



付図1 広島県沖積砂層の液状化マップ

付1 液状化事例調査結果

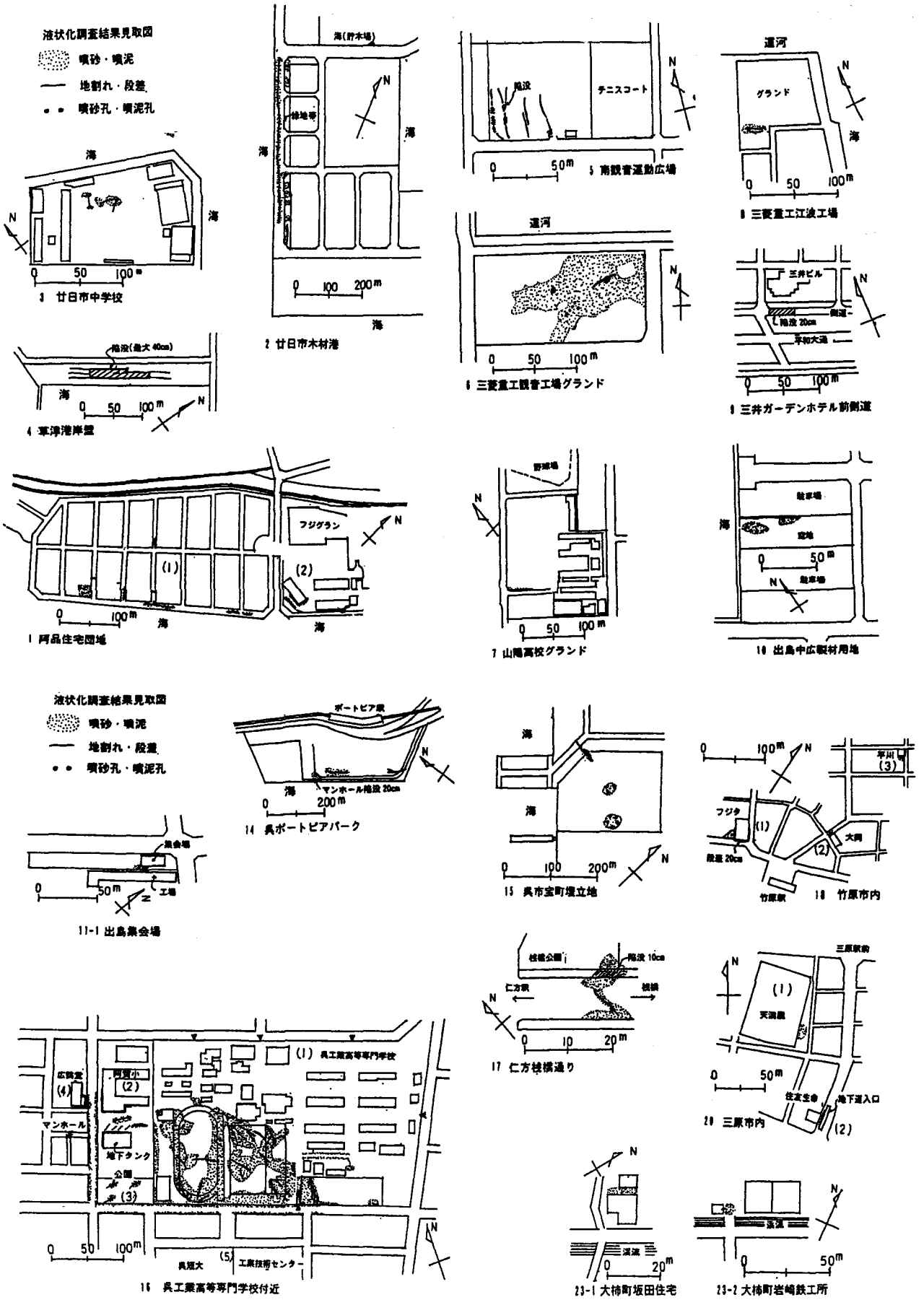
No.	調査場所	造成年代 付近住区画	液状化				埋立土			液状化した地層 液状化の種類	調査物損傷程度 備考
			範囲 影響半径	噴砂 噴出量	地割れ (最大値) 長さ	液漏 (最大値) 埋立土下量	地盤高 T.F 地下水位	厚さ 土質	サンド ポンプ		
1	住宅団地内道路 (1) 廿日市市阿品3丁目2-16	昭和 蔵島Ot 7	広域	噴砂・噴泥	10m	0~5cm	1~3m	2m以上	○	埋立砂、海底シルト 砂の液状化、シルトの液化	軽微 石垣のキレツ幅5cm
2	高層住宅マリナタウン (2) 廿日市市阿品3丁目1	昭和 蔵島Ot 7	局部的	噴砂	30m	25cm	1~3m	2m以上	○	埋立砂 砂の液状化	軽微 擁壁の裏込め土の沈下
2	湾岸道路、緑地帯 廿日市市木材港南2-5	昭和 廿日市Pr 18, 19	広域	噴砂	10m以上	5~10cm	1~3m	最大10m以上	○	埋立砂層 砂の液状化	軽微
3	廿日市中学校グラウンド 廿日市市桜尾3丁目9	大正、明治 廿日市Pr 1	局部的	噴泥	20m	—	1~3m	2m以上	—	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下	なし 噴泥はマサ土の細粒分
4	草津沿岸壁 広島市西区草津港2-7	昭和 広島Rq 32	中域	—	100m	40cm	3m以上	最大10m以上	○	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下	なし
5	南観音運動広場 広島市西区観音新町2丁目	昭和 Sq 21	局部的	噴砂・噴泥	13m	—	1~3m	2m以上	○	埋立砂、海底シルト 砂の液状化、シルトの液化	なし
6	三菱重工観音工場グラウンド 広島市西区観音新町4丁目	昭和 広島Sq 21	広域	噴砂	10m	—	1~3m	2m以上	○	埋立砂、海底砂 砂の液状化	なし
7	山陽高校グラウンド 広島市西区観音新町4丁目	昭和 広島Sq 30	局部的	噴砂・噴泥	5m	—	3m以上	2m以上	○	埋立砂、海底シルト 砂の液状化、シルトの液化	なし
8	三菱重工江波工場グラウンド 広島市中区江波中町	昭和 広島Tq 45	局部的	噴砂	20m	5~10cm	3m以上	2m以上	○	埋立砂、海底砂 砂の液状化	なし
9	三井ガーデンホテル前側道 広島市中区中町9	江戸以前(埋戻は昭和) 広島UpI 53	局部的	—	10m	10cm	1~3m	2m以上	—	埋戻土(マサ土) 埋戻土の圧縮沈下(締固不足)	軽微
10	中広製材用地(空地) 広島市南区出島1丁目27	昭和 広島Uq 69	局部的	噴砂・噴泥	5m	0~5cm	3m以上	2m以上	○	埋立砂、海底シルト 砂の液状化、シルトの液化	なし
11	出島集会所 (1) 広島市南区出島2丁目14	昭和 広島Tr 11	局部的	噴砂・噴泥	5m	0~5cm	3m以上	2m以上	○	埋立砂、海底シルト 砂の液状化、シルトの液化	軽微

No.	構造物 場所	造成年代 付近柱状図	液状化				埋立土			液状化した地層 液状化の種類	構造物損傷程度 備考
			範囲 液状化 範囲	噴砂・噴泥 噴出量	地割れ (最大値) 長さ	液面 (最大値) 地盤面 沈下量	地盤高 T.P 地下水位	厚さ 土質	サント ポンプ		
11 (2)	出島西公園 広島市南区出島2丁目	昭和 広島Tr 13	局部的 —	噴砂・噴泥 少量	15m 1cm	— 0~5cm	3m以上 2m以深	2m以上 砂の上にマサ土	○	埋立砂、海底シルト 砂の液状化、シルトの液化	なし
12	宇品保宮棧橋付近舗装他 広島市中区宇品海岸4丁目	昭和 広島Ur 15	局部的 ○	噴砂 微量	1m 1cm	— 0~5cm	1~3m 2m以浅	2m以上 砂の上にマサ土	○	埋立砂 砂の液状化	なし
13	瀬野川河口埋立地調 広島市安芸区船越南5丁目	大正、明治 海田市Wq 46	局部的 ○	噴砂 微量	— —	— 5~10cm	1~3m 2m以浅	2m以上 砂の上にマサ土	○	埋立砂 砂の液状化	軽微 不同沈下5~10cm
14	* 呉ポートピアパーク舗装 呉市天応大浜3丁目	昭和 吉浦Wu 1~5	局部的 ○	噴泥 少量	20m 3cm	20cm 10~20cm	1~3m 2m以深	最大10m以上 マサ土	—	海底シルト シルトの液化	軽微
15	* 呉市宝町埋立地 呉市宝町	平成 呉Yw 54	局部的 —	噴泥 ¹⁾ 少量	7m 5cm	— 20cm以上	1~3m 2m以浅	10m以上 マサ土	—	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下(締固不足)	なし 噴泥はマサ土の細粒分
16	* 呉工業高等専門学校構内 (1) 呉市阿賀南2丁目	昭和 呉Ax 2	広域 —	噴泥 多量	40m 2cm	5~10cm 10~20cm	1~3m 2m以浅	2m以上 マサ土	—	海底シルト シルトの液化	軽微 建物部分はマサ土で置換
	* 阿賀小学校構内 (2) 呉市阿賀南2丁目	昭和 呉Aw 23	中域 —	噴泥 多量	25m 2cm	15~20cm 10~20cm	1~3m 2m以浅	2m以上 マサ土	—	海底シルト シルトの液化	軽微
	* 阿賀児童公園 (3) 呉市阿賀南2丁目	昭和 呉Aw 23	局部的 —	噴泥 微量	4m 1cm	— 0~5cm	1~3m 2m以浅	2m以上 マサ土	—	海底シルト シルトの液化	なし
	* 広鶴堂前道路 (4) 呉市阿賀南2丁目	昭和 呉Ax 1	中域 —	噴泥 多量	10m 2cm	10~15cm 10~20cm	1~3m 2m以浅	2m以上 マサ土	—	海底シルト シルトの液化	軽微
	* 工業技術センター、呉短大構内 (5) 呉市阿賀南2丁目	昭和 呉Ax 2	中域 —	— —	— —	15~20cm 10~20cm	1~3m 2m以浅	2m以上 マサ土	—	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下	軽微
17	* 仁方棧橋通り道路他 呉市仁方棧橋通り	昭和 仁方Cx 20	局部的 —	噴砂 ¹⁾ 微量	6m 2cm	10cm 5~10cm	1~3m 2m以浅	2m以上 マサ土	—	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下	軽微 噴砂はマサの細粒分
18	* フジタビル (1) 竹原市中央4丁目2-1	昭和 竹原Mr 9	中域 —	噴砂 多量	10m 2cm	15~20cm 10~20cm	1~3m 2m以浅	2m以上(塩田跡) マサ土	—	塩田砂 砂の液状化	軽微 出入口開閉不良 浄化槽キレツ
	* モード大岡 (2) 竹原市中央1丁目3-7	昭和 竹原Mr 9	局部的 —	噴泥 少量	— —	— 0~5cm	1~3m 2m以浅	2m以上(塩田跡) マサ土	—	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下	なし 噴泥はマサの細粒分
	* 平川生花店 (3) 竹原市中央2丁目11-20	昭和 竹原Mr 9	局部的 —	噴泥 少量	— —	— 0~5cm	1~3m 2m以浅	2m以上(塩田跡) マサ土	—	埋立マサ土 埋立土の圧縮沈下	なし 噴泥はマサの細粒分
19	新幹線高架 三原市宮浦町2丁目	昭和 三原So 5~7	中域 —	— —	— —	— 0~5cm	0~1m 2m以浅	2m以下(水田跡) マサ土	—	後背湿地のシルト シルトの液化	中微、つなぎばりのせん断 きれつ、地盤面の低い所に 発生
20	* 天満屋前広場 (1) 三原市城町1-3-1	江戸以前(埋戻は昭和) 三原Tp 8	局部的 —	噴泥 少量	— —	— 5~10cm	1~3m 2m以浅	2m以下 マサ土	—	埋戻土(マサ土) 埋立土の圧縮沈下(締固不足)	軽微 噴泥はマサの細粒分
	* 住友生命前歩道 (2) 三原市城町1-5-9	江戸以前(埋戻は平成) 三原Tp 8	局部的 —	噴泥 少量	— —	10cm 10~20cm	1~3m 2m以浅	2m以下 マサ土	—	埋戻土(マサ土) 埋立土の圧縮沈下(締固不足)	軽微 噴泥はマサの細粒分
21	木造2階建住宅 三原市寿町	昭和 三原Tp 16	局部的 —	噴泥 微量	— —	— 5~10cm	1~3m 2m以浅	2m以下 マサ土	—	海底シルト シルトの液化	軽微 ドア開閉不良
22	住宅街路地(木造住宅) 向島町東富沢尾道工業高南	昭和 尾道Yp 3	中域 —	噴砂・噴泥 微量	10m 2cm	— 0~5cm	1~3m 2m以浅	2m以下(塩田跡) マサ土	—	海底の砂、シルト 砂の液状化、シルトの液化	軽微 壁キレツ幅最大3cm 出入口開閉不良
23	* 坂田住宅 (1) 大柿町飛渡瀬2436	昭和 —	局部的 —	噴泥 少量	— —	— 10~20cm	3m以上 2m以浅	2m以下 マサ土	—	水田のシルト シルトの液化	中微 木造住宅の不同沈下
	* 岩崎鉄工所車庫前 (2) 大柿町飛渡瀬3019	昭和 —	局部的 —	噴泥 少量	0.5m 1cm	5~10cm 5~10cm	3m以上 2m以浅	2m以下 マサ土	—	水田のシルト シルトの液化	なし

- 注 1) 各地の震度は5強である。
 2) №に*の付いたものは見取図のあるもの
 3) 付近柱状図は広島県地盤図'97(文庫7)による
 4) 噴砂・噴泥に*の付いたものは噴砂の粒度分析資料のあるもの(表1)
 5) T.Pは東京湾中等潮位(標高)

情報提供者、引用資料

- №3 廿日市市教育総務課 №12.13 文献¹⁾による
 №5 広島市西区スポーツセンター岩井氏 №21 塩見設計 佐藤 正孝氏
 №6 中国新聞2001.3.25日付による №22 福山大学 寺井 雅和氏
 №8 三笠重工 吉田 優氏 中森 康博氏 №23(1) 呉高専 福原 安洋氏



付図2 液状化結果見取図

2001年芸予地震による鉄筋コンクリート造建物の変形

(建築学科) 門前 勝明
 ((株)森組) 部谷 悠也
 (甲陽音楽院) 藤川 大使

Deformation of Reinforced Concrete Building during the 2001 Geiyo Earthquake

(Department of Architecture and Structural Engineering) Katuaki MONZEN
 (Morigumi Corporation) Yuuya HIDANI
 (Koyo Conservatory) Taishi HUZIKAWA

Abstract

Many reinforced concrete school buildings in Kure City suffered contact or collision damage of expansion joint during the 2001 Geiyo Earthquake. With a purpose of finding the appropriate clearance of expansion joint for reinforced concrete building, the clearances of expansion joint for the school buildings which suffered collision damage during the 2001 Geiyo Earthquake were investigated. From the clearances of expansion joint which suffered damage, the deformation of reinforced concrete building subjected earthquake is examined.

Key Words: the 2001 Geiyo Earthquake, damage of expansion joint, deformation of reinforced concrete building subjected earthquake

2001年芸予地震, エキスパンションジョイントの被害, 鉄筋コンクリート造建物の地震による変形

§ 1 はじめに

2001年3月24日安芸灘で発生した2001年芸予地震では広島県湯来町で832.8gal, 三原市で651gal, 大野町で441gal, 呉市で425gal, 因島市で390gal, 愛媛県東予市で458gal, 北条市400galなど震源に近い地域で非常に大きな最大加速度が記録された。この地震による被害は広島県南西部、愛媛県北西部で著しく、概ね大きな加速度が観測された地域に一致している。建築物では木造住宅棟瓦の落下や外壁のひび割れと落下の被害が多数発生した。観測された地震動の最大加速度は非常に大きかったが、木造住宅の被害と地震応答解析の結果は概ね一致しており¹⁾、木造住宅の被害は観測された地震加速度による地震応答解析から説明できる。鉄筋コンクリート造建物の主な被害は、大破・倒壊建物が3棟、一部の柱が大破した建物2棟、被災度判定基準による中破建物が1棟でその他の建物は小破

以下が無被害だったと報告されている²⁾。大きな最大加速度を記録した呉市と大野町について被害と地震応答解析の結果を比較すると、呉市の場合両者は概ね一致するが、大野町では鉄筋コンクリート造建物は無被害であり、応答解析の方が過大評価になった¹⁾。

呉市をはじめ大きな加速度が観測された地域で鉄筋コンクリート造校舎のエキスパンションジョイントで接触・衝突被害を受けた。被害を受けたエキスパンションジョイントのクリアランスから、鉄筋コンクリート造建物の芸予地震による変形を推定する方法が考えられる。この報告は、呉市の鉄筋コンクリート造校舎について、接触・衝突被害を受けたエキスパンションジョイントのクリアランスから、芸予地震によって鉄筋コンクリート造建物に生じた変形を推定しようとするものである。

§ 2 呉市における学校建築の被害

学校建築被害の概要を把握するため、呉市教育委員会による地震後の現地調査資料^{3), 4)}を整理した。現地調査資料と他の災害復旧事業計画書を比較すると、両者は若干異なる場合も見受けられるが、現地調査資料による被害は地震直後目視によって確認できた主な被害と解することができる。

呉市には小学校、中学校を合わせて 57 校あるが、被害を受けた学校数は小学校が 32 校、中学校が 14 校であり、81%の学校が何らかの被害を受けた。

図 - 1 は校舎における被害の種類と割合を円グラフにしたものである。主な被害は校舎と校舎の接合部や校舎と渡り廊下などのエキスパンションジョイント（以下 Exp. J と略記する）の接触・衝突被害が最も多く全体の約 24%、壁の亀裂等の被害が 22%、高架水槽の配水管や上下水配管の破裂といった設備関係の被害が 17%、地盤の沈下による床や廊下の亀裂が 10%、その他渡り廊下や手摺りの腰壁の亀裂・落下やガラスの破損等である。ブロック塀やフェンス等の亀裂・倒壊もかなり報告されている。図 - 1 から Exp. J の被害が非常に多いことがわかる。

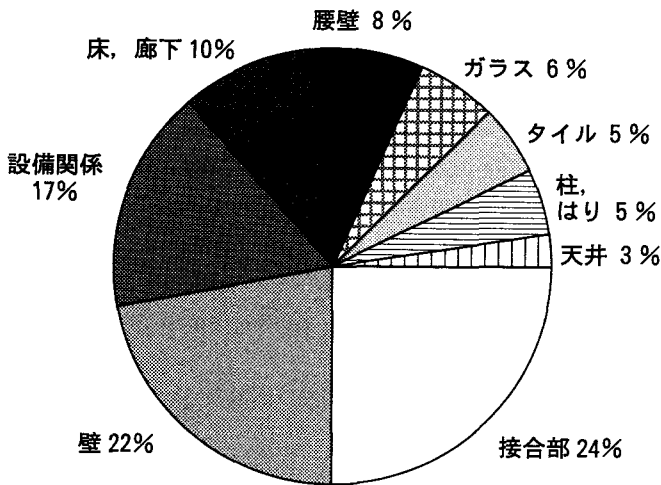


図 - 1 校舎の被害

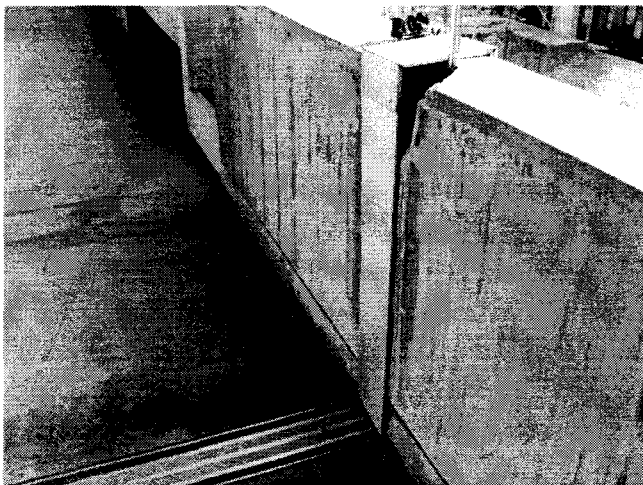


図 - 2 エキパンションジョイントの接触・衝突被害

典型的な Exp. J の被害を図 - 2 に示す。この被害の場合、

衝突した箇所が 10cm 以上も破損していた。その他の被害としては、プールの沈下、シャッター破損などであった。

体育館の被害を図 - 3 に示した。壁の被害は校舎の被害と同様に落下、剥離、亀裂が多い。校舎の場合に比較してガラス、天井の落下被害が多いことがわかる。その他の被害にはステージの破壊や建具のゆがみや破損などが含まれる。

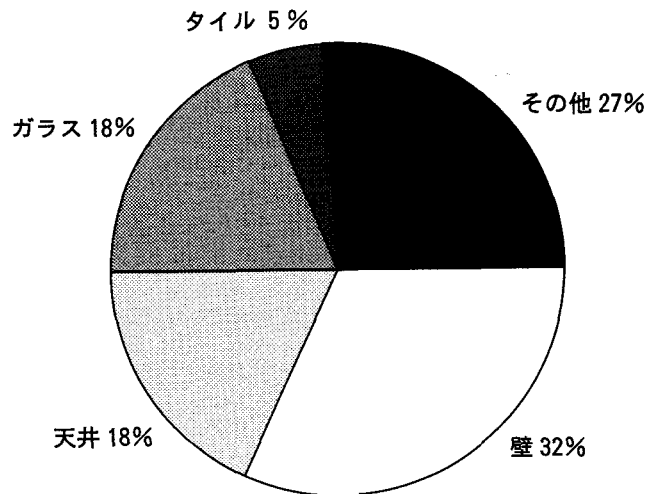


図 - 3 体育館の被害

§ 3 エキパンションジョイントの被害とその間隔

3. 1 エキパンションジョイントの被害

Exp. J の被害が多かったことから、Exp. J の被害を調査した。Exp. J の被害調査は適切な Exp. J の間隔を検討するためだけでなく、被害を受けた Exp. J の間隔と被害を受けなかった Exp. J の間隔から、地震によって建物に生じた水平変位を推定することができると思われる。

呉市教育委員会がまとめた資料をもとに Exp. J の被害の有無を調べた。教育委員会の資料に掲載されていない学校については、Exp. J の有無と被害の有無が分からないので、電話で

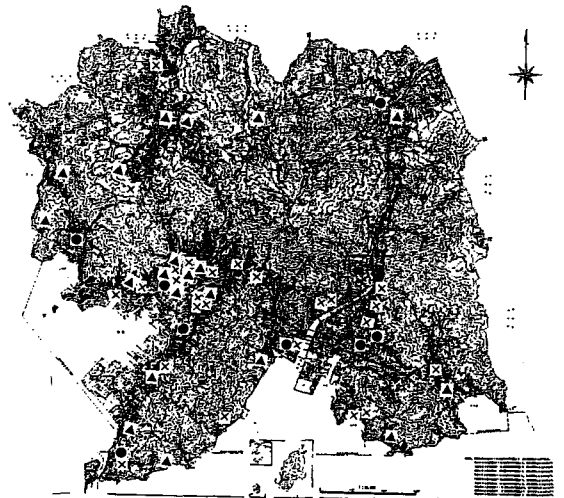


図 - 4 エキパンションジョイントの被害の有無

Exp. J の有無と Exp. J の被害の有無を確認した。その結果を地図上にプロットしたものが図-4である。図中に示す×は Exp. J の被害を受けたもの、●は Exp. J はあるが被害を受けなかったもの、▲は Exp. J がなかった学校である。Exp. J があつた学校は小・中学校合わせて 35 校で、全体の 60%程度に Exp. J があつた。Exp. J がある学校のうち、28 校が Exp. J の被害を受けており、実に Exp. J がある学校のうち 80%が被害を受けていることが分かる。

3. 2 エキスパンションジョイントの間隔

Exp. J の被害を受けた学校を中心に、小学校 17 校、中学校 8 校について Exp. J の間隔と階高の計測、Exp. J の被害状況や校舎全体の被害状況の調査を実施した。

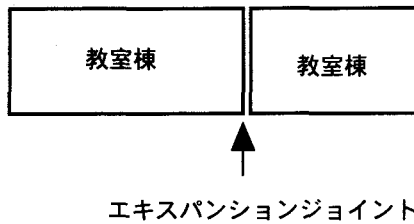


図-5 エキスパンションジョイントの位置

Exp. J は図-5 や図-6 に示すように校舎と校舎の間、または校舎と渡り廊下の間、渡り廊下と渡り廊下の間等に設けられている。Exp. J は安全面から図-5 に示すようにステンレスやアルミ板等で保護されているため、計測不能の場合も

生じた。Exp. J の主な被害は地震時の接触・衝突により図-2 に示すようにコンクリート部分が欠損したり、軽微なものでは安全用の金属板が外れたものなどである。

表-1 に計測結果を示した。表中の高さ H は Exp. J の地盤面からの高さで単位は (cm) である。間隔 δ が計測した Exp. J の間隔を示す。Exp. J の間隔は特に規定が無いため、かなりばらつき認められる。また上層で間隔を大きくする等の配慮は認められない。備考欄の校舎～校舎等は校舎と校舎間の Exp. J であることを示す。被害は計測した Exp. J が衝突等の被害を受けていたもの、他階被害は計測した Exp. J は被害を受けてないが他の階の Exp. J が被害を受けていたものを示す (実際は計測可能な Exp. J はかなり限定された)。無被害は



図-6 校舎と校舎間のエキスパンションジョイント

表-1 エキスパンションジョイントの間隔

学校名	計測階 (高さH)	間隔 δ (cm)	$R = \delta / H$	備 考	学校名	計測階 (高さH)	間隔 δ (cm)	$R = \delta / H$	備 考
AZ小 (4階)	2階(340)	3.0	0.0088235	校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害)	SY中 (4階)	3階(710)	6.0	0.0084507	校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～校舎 (被害)
	3階(680)	3.0	0.0044118			3階(710)	6.0	0.0084507	
	4階(1020)	3.0	0.0029412			3階(710)	6.5	0.0091549	
KA小 (3階)	2階(345)	5.5	0.015942	校舎～校舎 (無被害) 校舎～校舎 (無被害)	TA小 (3階)	2階(330)	5.5	0.0166667	校舎～階段室 (無被害) 校舎～階段室 (他階被害)
	3階(675)	5.5	0.0081481			3階(660)	3.0	0.0045455	
SY小 (4階)	2階(350)	4.0	0.0114286	校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害)	HO小 (3階)	2階(420)	8.0	0.0231884	校舎～渡り廊下 (他階被害) 校舎～渡り廊下 (被害)
	3階(690)	4.0	0.0057971			2階(345)	18.0	0.0521739	
WA小 (4階)	3階(690)	6.0	0.0057971	校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害)	HG中 (4階)	2階(330)	21.0	0.0605187	校舎～渡り廊下 (他階被害) 校舎～渡り廊下 (他階被害) 校舎～渡り廊下 (他階被害) 校舎～体育館 (他階被害)
	3階(690)	7.0	0.0101449			2階(330)	18.0	0.0518732	
	4階(1035)	6.0	0.0057971			2階(330)	21.0	0.0605187	
	4階(1035)	7.0	0.0067633			2階(340)	5.0	0.0147059	
SO小 (4階)	4階(1050)	5.5	0.0052381	校舎～渡り廊下 (被害)	DA (4階)	2階(350)	4.5	0.0128571	校舎～渡り廊下 (被害)
TE小 (3階)	2階(370)	6.0	0.0162162	校舎～校舎 (被害)	HA小 (3階)	2階(355)	3.5	0.0098592	校舎～渡り廊下 (被害)
MS小 (4階)	2階(350)	18.5	0.0528571	渡り廊下～校舎 (無被害) 校舎～校舎 (無被害)	MI小 (3階)	2階(330)	12.0	0.0363636	校舎～渡り廊下 (他階被害) 校舎～渡り廊下 (他階被害)
	2階(350)	5.0	0.0142857			3階(670)	12.0	0.0179104	
RY小 (4階)	2階(340)	2.0	0.0058824	校舎～校舎 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害)	KE中 (4階)	2階(345)	8.0	0.0231884	校舎～渡り廊下 (無被害) 校舎～渡り廊下 (無被害)
	2階(340)	4.0	0.0119403			2階(345)	6.0	0.0173913	
TE中 (3階)	2階(345)	6.0	0.0173913	校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (他階被害)	YO中 (4階)	2階(350)	4.0	0.0114286	校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害)
	2階(345)	9.5	0.0275362			2階(350)	12.0	0.0342857	
NI小 (4階)	3階(700)	14.0	0.02	校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害) 校舎～校舎 (被害)	YS小 (3階)	2階(350)	12.0	0.0338028	校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害) 校舎～渡り廊下 (被害)
	3階(700)	2.0	0.0019048			2階(350)	2.5	0.0071429	
	4階(1050)	14.0	0.0133333			2階(350)	6.0	0.0171429	
	4階(1050)	2.0	0.0014286						
YO小 (3階)	2階(360)	6.0	0.0166667	校舎～渡り廊下 (他階被害)	AG中 (3階)	3階(700)	6.5	0.00625	校舎～校舎 (被害)
NA中 (3階)	3階(700)	11.0	0.0157143	校舎～校舎 (被害)	HI中 (4階)	2階(375)	5.0	0.0133333	校舎～渡り廊下 (他階被害)

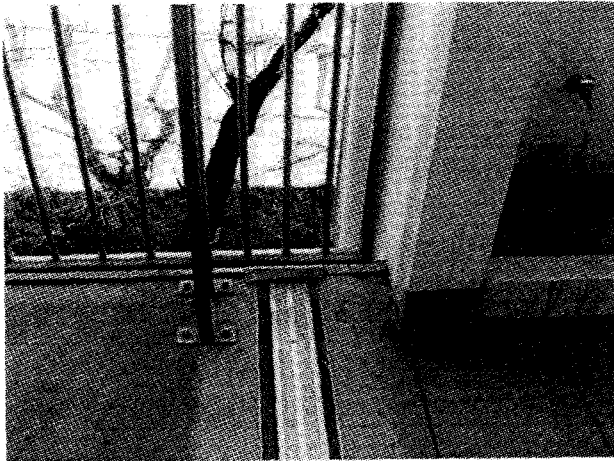


図-7 校舎と校舎間のエクスパンションジョイント

計測した接合面ではExp. Jの被害を受けていなかったことを示す。

3. 3 変形角 R と被害の関係

三角次式で定義される変形角 R を求めて表-1 に示した。

$$R = \delta / H \tag{1}$$

δ を地震による水平変位に対応させる。これは地震による建物の変形分布が逆三角形になる場合は問題ないが、壁の少ないせん断型の場合 R は下層で過小評価になり、上層で過大評価になる傾向が生じ、壁の多い曲げ型の場合はその逆になる恐れがあるが、学校建築の場合は大きな誤りにはならないと考えてよい。

図-8 に Exp. J の高さ H と変形角 R の関係を示した。図中に ○ と □ で示した衝突の被害を受けなかった場合を見ると、上層よりも下層の方が多い。これより Exp. J の衝突被害は下層よりも上層で多かったことが知れる。

次に被害を受けた Exp. J の上限について検討する。変形角 R の一番大きなものは 1/15.7 となった。これは、HG 中の校舎と渡り廊下の Exp. J である。既往の研究によれば⁵⁾ (純ラーメンの基礎ロッキングを含む地震応答解析結果) 建物と建物の Exp. J で 1/50rad (地震は兵庫県南部地震) まで間隔を取る必要は無く、渡り廊下の場合は 2 倍近い間隔を取る必要があると報告されている。これを参考にすると HG 中の場合兵庫県南部地震のような大地震で 1/25 程度を想定すると、芸予地震によって受けた変形角 1/15.7 がいかに大きな変形であったか知れる。校舎と校舎の Exp. J で被害を受けた R が大きいものから順に挙げると、1/57.5 (TE 中), 1/61.7 (TE 小), 1/62.7 (TA 小) となり、これらの値も兵庫県南部地震相当の変形角が生じたことが分かる。そこでこれらの建物の平面形状を見ると R が一番大きかった TE 中は、桁行方向と梁間方向の衝突で、梁間方向に振動した建物はロッキングによって大きな変形が生じたことも考えられる。しかし、TA 小と KA 小は桁行方向同士の衝突であり純粋な建物同士の変形と考えられる。以上の考察から Exp. J の間隔は、芸予地震程度の地震であっても衝突を避けるためには 1/60 以上は必要で

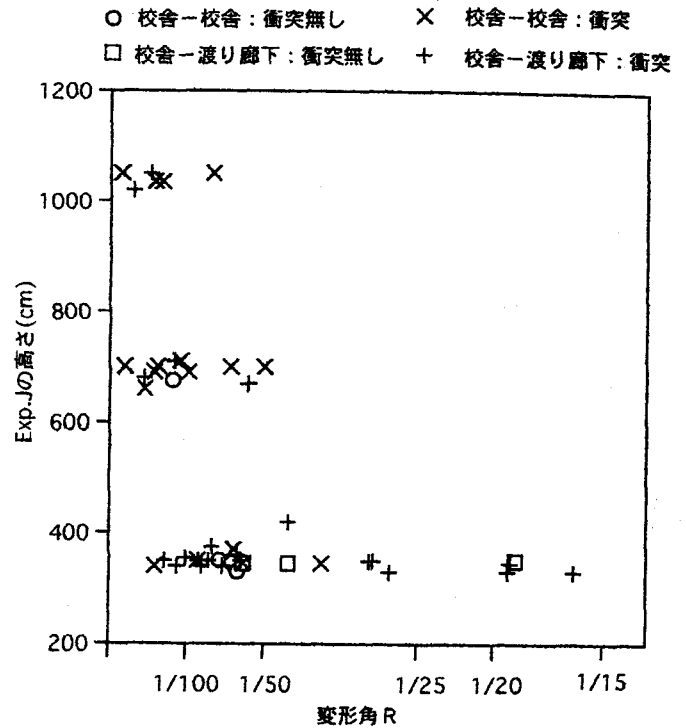


図-8 変形角 R

あったことがわかる。

R から建物の変形を推定すると、もし最悪の場合を想定して両建物の最大変形時に衝突したと仮定すると、建物の変形角は 1/120 変形したことになる。既往の研究結果を参考にして変形角の 80% で衝突すると考えると建物の変形角は 1/96 となる。これよりこれらの建物は、芸予地震によって変形角 R は 1/100 は変形したと考えられる。

上記 3 校の他の被害は、TA 中は校舎床面亀裂、高架水槽破損、TA 小は校舎中央通路内壁亀裂、TA 小は校舎内外壁亀裂落下、校舎廊下の手摺り亀裂、トイレタイル落下、水道管破損、ブロック塀破損であり R=1/100 の変形が生じたわりには被害が軽微であった。

3. 4 地震応答解析との比較

地震による鉄筋コンクリート造建物の水平変形を以下の簡単なモデルで算出する。建物の高さは 3 階建てを想定して 10m とし、履歴特性が完全弾塑性モデルで表わされる等価 1 自由度系を考える。降伏せん断力は層間変形角 $R = 1/150rad$ で生じるものとする。このような等価 1 自由度系モデルの 2001 年芸予地震による応答結果を図-9 に示した¹⁾。縦軸はせん断力係数 qy が横軸には最大応答塑性率 μ がとってある。図中の呉が 2001 年芸予地震の呉市で観測された地震波による応答である。比較のため大野 (2001 年芸予地震の大野町で観測された地震波), Kushiro (1993 年釧路沖地震), Fukiai (1995 年兵庫県南部地震の大阪ガス葺合記録) による結果も示した。図から呉の記録は他の地震波よりも小さいことがわかる。呉の記録による結果をみると、降伏せん断力係数 qy が約 0.4 よりも大きい建物は塑性率 μ が 1 以下になるが降伏せ

弾力係数 q_y が 0.4 よりも小さい建物は塑性率 μ が 1 以上になる。これより、多くの学校建築は最大応答塑性率 μ が 1 前後であったものと予想される。Exp. J の被害から、芸予地震によって変形角 R は大きいもので $1/100$ 程度と考えると、最大応答塑性率 μ は 1.5 をなり、地震応答解析の結果とも一致している。文献 1) で指摘したように、大野は地震応答解析に比較して、実際の被害が軽微であった。今後、呉市以外の地域について Exp. J の被害調査を実施して、地震応答解析と実被害の差異について検討する予定である。

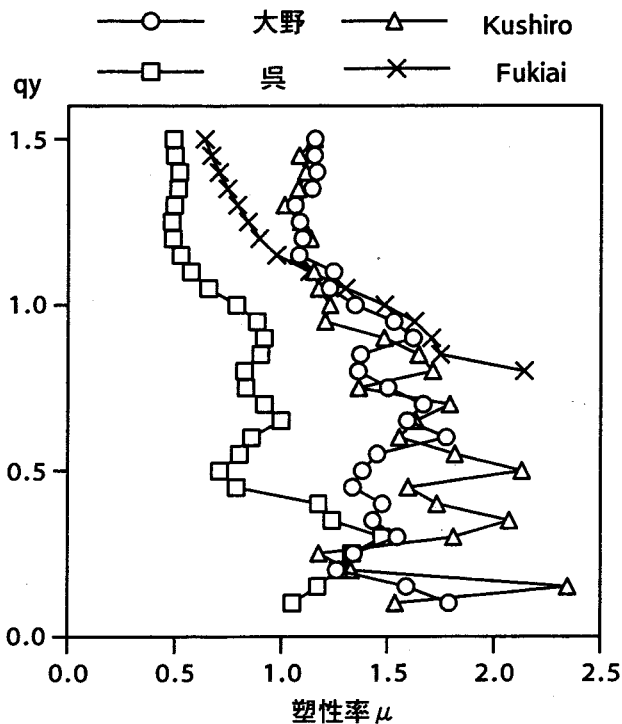


図-9 地震応答解析結果

§ 4 おわりに

呉市における学校建築の 2001 年芸予地震による被害を整理し、特に小・中学校のエキスパンションジョイントの被害を調査し、エキスパンションジョイントの被害から鉄筋コンクリート造建物の地震による変形について検討したところ次のことが知れた。

- (1) 呉市教育委員会がまとめた学校の被害の資料によれば、エキスパンションジョイントのある学校の内、約 80% の学校が被害をうけた。
- (2) エキパンションジョイントの被害から鉄筋コンクリート建物の芸予地震による水平変位を推定すると、変形角 R で $1/100$ 程度は変形したと考えられる。
- (3) エキパンションジョイントの間隔は、芸予地震程度の地震であっても衝突を避けるためには建物と建物の間隔で $1/60$ 以上、建物と渡り廊下の間隔では $1/15$ 程度必要である。

謝辞

小・中学校の地震被害は呉市教育委員会の被害調査報告書を利用した。また、被害建物の調査では各校の校長のお世話になった。これらの関係各位に深堪の謝意を表わします。

参考文献

- 1) 門前勝明：2001 年芸予地震における地震動の強さ、日本建築学会中国支部研究報告、第 25 巻、平成 14 年 3 月
- 2) 日本建築学会：2000 年鳥取県西部地震災害調査報告 2001 年芸予地震災害調査報告、2001 年 10 月
- 3) 災害報告書、芸予地震関係資料、呉市教育委員会
- 4) 芸予地震による被害状況等調（平成 13 年 3 月 26 日 平成 13 年 4 月 2 日、平成 13 年 5 月 18 日）、呉市教育委員会
- 5) 室重行他 2 名：大地震を想定したエキスパンションジョイントの必要間隔、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999 年 9 月

平成13年(2001年)

研究業績一覧

研究業績一覧凡例

平成13年1月～平成13年12月 (Jan., 2001～Dec., 2001)

この研究業績一覧の論文等は、本校教官が上記期間中に他誌等へ発表した研究業績である。ゴシック体により標記した者は、本校教官・技官である。例：高専太郎, T.KOSEN
研究業績の範囲は主として次に掲げるものとし、各業績の末尾に番号による区分を示した。

1. 査読付論文は [1] とした。
2. 国際会議発表*は [2] とした。
3. 著書は [3] とした。
4. 学会誌等掲載記事（総説，解説，技術資料等），報告書は [4] とした。
5. 紀要，査読無論文は [5] とした。
6. 学会発表は [6] とした。
7. 特許等は [7] とした。
8. 芸術活動，建築作品，フィールドワークは [8] とした。

注：*は Proceeding 発表，Symposium 発表，ポスターセッション発表を含む

掲載事項は以下のとおり。

1. 査読付論文は 著者名：論文名：雑誌名，巻（号），最初頁－最後頁，（発行年） [1]
2. 国際会議発表は 発表者名：発表題目：発表誌名，巻（号），最初頁－最後頁，（発表年月，場所） [2]
3. 著書は 著者名：書名（編集者）：出版社名，（発行年） [3]
4. 学会誌等掲載記事，報告書は 著者名：論文名：雑誌名，巻（号），最初頁－最後頁，（発行年） [4]
5. 紀要，査読無論文は 著者名：論文名：雑誌名，巻（号），最初頁－最後頁，（発行年） [5]
6. 学会発表は 発表者名：発表題目：発表誌名，巻（号），最初頁－最後頁，（発行年） [6]
又は 発表者名：発表題目：発表会名，（発表年月，場所） [6]
7. 特許等は 発明者：特許等の名称：登録番号，（登録年） [7] 又は
発明者：特許等の名称：出願番号，（出願年） [7]
8. 芸術活動，建築作品，フィールドワークは
制作者：作品等の名称，（発表年月，発表した場所等） [8] 又は
フィールドワーク実施者：フィールドワークの名称，（フィールドワーク実施年月，場所等） [8]

校長

Ichiro Aoi(早稲田大), Makoto Ishino(〃), Makoto Yoshida(広島大), Hideharu Fukunaga, Hideo Nakai(早稲田大) : Influence of Growth Direction on the Microstructure of unidirectionally Solidified Cu-Pb Monotectic Alloy using Zone-melt Technique : Journal of Crystal Growth, Vol.222, pp.806-815, (2001) [1]

潘 進(広島大), 岡本章博(〃), 李常ピル(東義大工), 佐々木元(広島大), 吉田誠(〃), 福永秀春 : $Al_{18}B_4O_{33}/Al$ 合金複合材料の強度に及ぼすマグネシウム蒸気を利用したウイスカ表面処理の影響 : 日本金属学会誌, 第65巻第3号, pp. 199-206, (2001) [1]

福山誠司(産総研), 林 建鴻(〃), 横川清司(〃), 福永秀春 : Inconel 718の水素環境ぜい化におよぼす炭化物の影響 : 材料, 第50巻第11号, pp. 1186-1190, (2001) [1]

Makoto Yoshida(広島大), Shingo Takeuchi(〃), Jin Pan(〃), Gen Sasaki(〃), Nobuyuki Fuyama(西部工技セ), Toshio Fujii(西部工技セ) and Hideharu Fukunaga : Fabrication of Aluminum Borate Whisker Reinforced AZ91D Magnesium Alloy Composites by Semi-solid Process and their Mechanical Properties : Advanced Composites Materials, Vol. 10(No. 2-3), pp.255-263, (2001) [1]

J.Pan(広島大), S.P.Lee(東義大工), M.Yoshida(広島大), G. Sasaki(〃), N.Fuyama(西部工技セ), T.Fujii(〃) and H. Fukunaga : Effect of Whisker Surface Treatment on the Tensile Strength of Aluminum Borate/Al Alloy Composites, Advanced Composites Materials, Vol.10, No.4, pp.299-307, (2001) [1]

Gen Sasaki(広島大), Makoto Yoshida(〃), Jin Pan(〃), Hideharu Fukunaga, Nobuyuki Fuyama(西部工技セ) and Tshio Fujii(〃) : Effect of Compcasting Conditions on Mechanical Properties and Microstructures of $Al_{18}B_4O_{33}/AZ91D$ Composites : Proceeding of PRICM-4, pp.1239-1242, (2001.12.11-15, Honolulu, USA.) [2]

Kenya Nagahisa(中国電力), Makoto Yshida(広島大), Gen Sasaki(〃), and Hideharu Fukunaga : Fabrication and Mechanical Properties of SiC Fiber Reinforced Al_2O_3 -YAG Composites : Proceeding of The Forth Pacific Rim International Conference on Advanced Material and Processing, The Japan Institute of Metals and The Minerals, Metals and Materials Society, pp.2799-2802, (2001.10, Hawaii, U.S.A.) [2]

Q.F.Xing(広島大), Gen Sasaki(〃), and Hideharu Fukunaga : Contact Mechanism and Bond Formation of Al/Glass in Anodic Bonding : Proceeding of The Forth Pacific Rim International Conference on Advanced Material and Processing, The Japan Institute of Metals and The Materials Minerals, Metals and Society, pp.791-794, (2001.10., Hawaii, U.S.A.) [2]

福永秀春(分担執筆) : ダイカスト用金型(金型教本編集部会編) : (財)素形材センター発行, (2001年3月12日) [3]

福永秀春(分担執筆) : 粉体ダイキャスト新技術(福永秀春企画編集) : NEDO地域コンソーシアム合同研究会発行, (2001年6月1日) [3]

佐々木元(広島大), 吉田誠(〃), 潘 進(〃), 福永秀春 : 粉体離型潤滑剤を用いたクリーン・省エネダイカストシステムの開発 : アルトピア, 第31巻第11号, pp. 33-38, (2001) [4]

永久堅也 (中国電力), 北谷和也 (広島大), 吉田誠 (〃), 佐々木元 (〃), 福永秀春 : SiC繊維強化酸化物マトリックス複合材料の作成と機械的性質 : 九州大学応用力学研究所研究集会報告, pp. 106-109, (2001年3月発行) [5]

福永秀春, 吉田誠 (広島大) : 金型鑄造用の粉体離型潤滑剤および金型鑄造法 : 特願2000-176649, 特開2001-353550, (2000. 6. 13出願, 2001. 12. 25公開) [7]

福永秀春, 佐々木元 (広島大), 吉田誠 (〃) : 多孔質プリフォーム、金属基複合材料およびそれらの製造方法 : 特願2000-129822, 特開2001-316785, (2000. 6. 13出願, 2001. 11. 16公開) [7]

福永秀春, 吉田誠 (広島大), 澤井敬己 (花野商事) : A Powder Mold-Releasing Lubricant for Use in Casting with a Mold and a Mold Casting Method : US Patent Application Serial No. 09/879, 552, (Filing Date 2001.6.12) [7]

福永秀春, 佐々木元 (広島大), 吉田誠 (〃) : Preforms, Metal Matrix Composite Materials Using said Preforms, and Producing Process Thereof : US Patent Application Serial No. 09/699,566, (Filing Date 2001.10.31) [7]

一般科目

小助川元太 (分担執筆) : 『唱導文学研究』第三集 (編集者 廣田哲通・福田 晃) : 三弥井書店, (平成13年2月) [3]

小助川元太 : 『壺囊鈔』と雑談 : 中世文学会春季大会 (平成13年6月26日, 群馬県立女子大学) [6]

小助川元太 : 『壺囊鈔』の後宮婦人論 : 説話・伝承学会例会 (平成13年9月23日, キャンパスプラザ京都) [6]

木原滋哉 (分担執筆) : 実践の政治学 (畑山敏夫・平井一臣編) : 法律文化社, (2001年) [3]

木原滋哉 (分担執筆) : 住民図書館25年のあゆみ : 住民図書館, (2001年) [3]

今井 勲, 多賀正夫 (元近畿大) : 地中埋設スパイラル管による太陽熱利用 (一般家庭居室の冬期暖房) : 太陽/風力エネルギー講演論文集2001, 251-254, (2001. 11) [6]

岡中正三 : 連立微分方程式の解法について : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 1-6, (平成13年8月) [5]

Y. KUROKAWA : Singularities for projections of contour lines of surfaces onto planes : Hokkaido Mathematical Journal, Vol.30(No.3), 573-587, (2001) [1]

Y. KUROKAWA : Singularities of differential equations of asymptotic lines on surfaces in R^4 : Singularities and related topics : (2001年7月, 東北師範大学, 長春, 中国) [2]

地主弘幸 (福山大), 笠松義隆, 平岡耕一 (愛媛大), 小島健一 (広島大), 檜原忠幹 (福山大) : $MnAs_{1-x}M_x$ ($M=P, Sb$) の高圧下NMR : 日本物理学会講演概要集, 第56巻1号, 第3分冊, pp. 391 (2001年3月, 東京) [6]

小山通榮, 佐藤仁 (広島大), 長崎太 (〃), 谷口雅樹 (〃), 植田義文 : NiAs型 Cr_xY ($Y=S, Se, Te$) の電子構造 : 放射光学会, (2001年1月14日, 広島) [6]

平井千之(広島大), 仲武昌史(〃), **小山通榮**, 可兒裕也(広島大), 上田裕子(〃), 佐藤仁(〃), 木村昭夫(〃), 谷口雅樹(〃), 島田賢也(〃), 生天目博文(〃) : Crカルコゲナイドの光電子分光 : 放射光学会, (2001年1月14日, 広島) [6]

矢治光一郎(広島大), 平井千之(〃), 木村昭夫(〃), 佐藤仁(〃), 谷口雅樹(〃), **小山通榮**, 島田賢也(広島大), 齊藤祐児(JAERI), 室隆佳之(JASRI), 今田真(大阪大), 菅滋正(〃) : CrTe の内殻吸収磁気円二色性 : 日本物理学会, (2001年3月27日, 八王子) [6]

矢治光一郎(広島大), 平井千之(〃), 木村昭夫(〃), 佐藤仁(〃), 谷口雅樹(〃), **小山通榮**, 島田賢也(広島大), 齊藤祐児(JAERI), 室隆佳之(JASRI), 今田真(大阪大), 菅滋正(大阪大) : CrTe の内殻吸収磁気円二色性Ⅱ : 日本物理学会, (2001年9月17日, 徳島) [6]

橋原孝博(広島大), 金致偉(〃), **佐賀野健**, 小村堯(広島大), 西村清巳(〃) : 映像解析によるバレーボール女子世界トップレベルチームの攻撃に関する戦術研究 : スポーツ方法学研究, 第14巻第1号, 155-166, (2001) [1]

能登原祥之(比治山大), 石井淳二, 川尻武信, 周藤剛士, 岡中正三, 谷岡憲三, 長町三生(広島国際大) : Computer-Mediated Communication 活動を通じた国際交流授業の運営 — E-mail Writing 活動の場合の記述研究 — : 論文集「高専教育」, 第24号, 271-276, (平成13年3月) [1]

Makoto Eguchi : Keats's *Lamia*: Another Serpent Story : 英語英文学研究, 第45巻, 87-100, (2001) [1]

中山文(著) : 『ウィリアム・ブレイク — 200年後の世紀末』 : 大阪教育図書 (2001年) [3]

中山文 : 神話としての『四つのゾア』 : 広島女学院大学大学院 言語文化論叢, 第4号, pp.29-43, (2001年) [5]

中山文 : 「ケルトの伝統〈バード〉とブレイク」 : 中国四国イギリス・ロマン派学会, (2001年6月, 白鳥会館) [6]

Jun YAMADA (Hiroshima Univ.), Hiroomi TAKASHIMA : The semantic effect on retrieval of radicals in logographic characters : Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal, 14 (1-2), 179p-194p, (2001年) [1]

高島裕臣 : 語の翻訳における誤りの分析 : 第228回広島言語文化談話会口頭発表, (平成13年2月24日, 広島女学院大学) [6]

高島裕臣, 山田純(広島大) : 語彙指導研究の課題 : 第27回全国英語教育学会 課題研究フォーラム口頭発表, (平成13年8月8日, 広島国際会議場) [6]

長町三生(広島国際大), 田邊達雄(広島保健福祉大), 石井淳二, 川尻武信, 能登原祥之(比治山大), 周藤剛士, 岡中正三 : 技術教育のための知的マルチメディア開発と実施に関する共同研究 : 科学研究費補助金研究成果報告書, (平成13年発行) [4]

機械工学科

灘野宏正, 中迫正一, 河野正来, 野田善友(呉高専専攻科), 深田一徳(鋼鉄工業) : 四球試験におけるラジカル窒化処理軸受鋼SUS2の焼付き強さ : 日本機械学会論文集(C編), 67巻662号, 3298-3304, (2001年10月) [1]

- 灘野宏正, 中迫正一 : 中国支部の現状と会員マップ : 設計工学, 36巻9号, 396-397, (2001年9月) [4]
- 灘野宏正, 中迫正一, 河野正来, 柞磨辰也 (呉高専専攻科) : 鉄-銅系粉末焼結材料の焼付き強さ : 日本設計工学会平成13年度秋季研究発表講演会講演論文集, 55-58, (2001年9月, 岡山) [6]
- 野田善友 (呉高専専攻科), 灘野宏正, 中迫正一, 河野正来, 深田一徳 (鋼鉄工業) : 四球試験におけるラジカル窒化処理SUJ2鋼の焼付き強さ : 日本機械学会中国四国支部第39期総会・講演会講演論文集, No. 015-1, 329-330, (2001年3月, 岡山) [6]
- 八木良尚 : 自主的な卒業研究による教育的な効果 : 実践教育, 16(2), 55-57, (2001) [5]
- 八木良尚, 中田雅士 (呉高専専攻科) : ガス拡散電極を用いた電磁推進模型の推力特性 : 実践教育, 16(6), 35-37, (2001) [5]
- 八木良尚 : ガス拡散電極を用いた電磁推進模型の推力特性 : 2001年実践教育研究発表会講演予稿集, 11-12, (2001-9, 千葉) [6]
- M.KOHNO, H.NADANO, M.NAKASAKO, K.FUKADA (鋼鉄工業) : Scoring Resistance of Austenitic Stainless Steel Gears with Plasma Diffusion Processing : Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, MPT2001-Fukuoka, Volume I, 261-266, (Nov. 2001, Fukuoka) [2]
- 河野正来, 灘野宏正, 中迫正一, 深田一徳 (鋼鉄工業) : プラズマ表面硬化処理を施したSCM415H歯車のスコーリング強さ : 日本設計工学会平成13年度秋季研究発表講演会講演論文集, 97-100, (2001年9月, 岡山) [6]
- T.Yoshimura, T.Machida (日立) and T.Hattori (〃) : Fatigue Strength Evaluation Method of Compressor Dovetail Using Stress Singularity Parameter at Contact Edge : Third International Symposium on Fretting Fatigue, 91, (2001-5, Nagaoka) [2]
- T.Yoshimura and Y.Ishikawa (横浜国大) : Study on Modification of Hydrogen Trap Site in Nickel and Stainless Steel Using Atom Probe : IUVSTA 15th International Vacuum Congress, As-TuM10 71, (2001-10/28~11/2, San Francisco) 71 [2]
- 吉村敏彦, 町田隆 (日立), 服部敏雄 (〃) : 応力特異場パラメータを用いた圧縮機ダブテールのフレットイング疲労評価法”, 日本機械学会 第9回機械材料・材料加工技術講演会, 213-214, (2001年11月, 琉球大学) [6]
- 吉村敏彦, 大城戸忍 (日立), 榎本邦夫 (〃), 守中廉 (〃), 平野克彦 (〃), 黒沢孝一 (〃), 林英策 (〃) : ウォータジェットピーニングによる原子炉内機器溶接部の残留応力低減 : 日本材料学会 第38回X線材料強度に関する討論会講演論文集, 38-44, (2001年11月, 神楽坂エミール) [6]
- 野原 稔, 永村和照 (広島大), 池条清隆 (〃) : リップリング損傷に及ぼす周速度および相対的接触位置の影響 : 日本機械学会論文集, 67 - 661, C, 2969-2975, (2001) [1]
- Minoru NOHARA, Kazuteru NAGAMURA (Hiroshima Univ.) and Kiyotaka IKEJO (〃), Kohei MATSUO (Sumico Lubricant Co., LTD), Kenichi OGAWA (ShinMaywa Industries, LTD) : EFFECT OF ADDITIVES OF LUBRICATING OIL ON RIPPLING FAILURE : The proceedings of the JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, MPT2001- Fukuoka, Vol. I, 267 - 272, (November 15 - 17, 2001, Fukuoka, JAPAN) [2]
- Y.Kawaguchi, N. Tamaki (近畿大), M. Shimizu (〃) and H. Hiroyasu (〃) : Experimental Investigation on the Waste Oil Combustion Burner for Energy Saving and Low-Pollution : Sixth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 679-684 (July, 9-12, 2001, at Oporto, Portugal) [2]

- Y. Kawaguchi, N. Tamaki (近畿大), M. Shimizu (〃) and H. Hiroyasu (〃) : Development of a Waste Oil Combustion Burner for Energy Saving and Low-Pollution : 3 rd International Symposium on Advanced Energy Conversion Systems and Related Technologies, 2A15, (December 15-17, 2001, at Nagoya, Japan) [2]
- 河口勇治, 山根光夫 : 呉工業高専における設計・製図・もの作り教育事例 : 設計工学, 36巻6号, 259-263, (2001年6月) [4]
- 廣安博之 (近畿大), 清水正則 (〃), 玉木伸茂 (〃), 河口勇治 : 省エネ型・低公害廃油燃焼バーナーの開発研究 : 近畿大学工業技術研究所研究報告書, Vol.1, 55-62, (2001年) [5]
- 玉木伸茂 (近畿大), 清水正則 (〃), 河口勇治, 廣安博之 (近畿大) : 内部混合型二流体噴射弁による廃油の燃焼と排出ガス特性 : 第39回燃焼シンポジウム, 261-262, (平成13年11月, 慶応義塾大学) [6]
- H. IWAMOTO, S. SEKI (岡山大) : Digitalized Analysis of Surgeons' Suturing for Refinement of their Techniques and Computer-Integrated Operation : 39th World Congress of Surgery Centennial Congress, (August 26-30, Brussels Belgium) [2]
- 岩本英久, 大崎紘一 (岡山大), 関洲二 (〃) : 手術用ロボットによる運針動作のための軌道計算に関する研究 : 平成13年度日本経営工学会秋季研究大会, (平成13年11月17日, 福岡市) [6]
- M.NAKASAKO, H.NADANO, M.KOHNO, K.FUKADA (鋼鉄工業), Y.NODA (呉高専専攻科) : Seizure Resistance of Radical Nitrided Stainless Steel (SUS440C) in Two Roller Test and Gear Test : Proceedings of The International Tribology Conference Nagasaki, 2000, Volume III, 1873-1878, (Nov. 2000, Nagasaki, Published in Sept. 2001) [2]
- 野村高広, 京免進 : 自然対流を伴う水平長方形管内脈動流れにおける摩擦損失と熱伝達 : 日本機械学会熊本地方講演会, (平成13年10月20日, 熊本大学工学部) [6]
- 山田祐士 : 空気圧サーボ系に対する知能化適応制御 : H13年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集, p67 - 69, (H13.5, 東京) [6]
- 北村充(広島大), 上寺哲也 : ズーミング境界に変位再解析式を用いた構造最適設計に関する研究 : 西部造船会会報, 第102号, pp.361-369, (2001) [1]
- 北村充(広島大), 上寺哲也 : ズーミング境界に変位再解析式を用いた構造最適設計に関する研究 : 西部造船会第102回例会論文梗概, pp.241-246, (2001年5月, 下関市・シーモールパレス) [6]

電気情報工学科

- Y.Ueda, H.Sato (広島大), F.Nagasaki (〃), C.Hirai (〃), A.Kimura (〃), M.Taniguchi (〃), M.Nakatake (高エネPF), H.Namatame (広島大) : A Photoemission and Inverse-Photoemission Study of CoSb₃: The Thirteenth International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics, Program and Abstracts, Th080, (July 23-27, 2001, Trieste, Italy,) [2]
- H.Sato(広島大), Y.Kani(〃), Y.Ueda, F.Nagasaki(広島大), S.Senba(〃), M.Taniguchi(〃), H.Namatame(〃),

- M.Nakatake(高エネPF) : 3p-3d Resonant Inverse-Photoemission Spectroscopy of NiAs-type MnTe : The Thirteenth International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics, Program and Abstracts, Tu029, (July 23-27, 2001, Trieste, Italy) [2]
- H.Sato (広島大), F.Nagasaki (〃), Y.Kani (〃), S.Senba (宇部高専), Y.Ueda, A.Kimura (広島大), M.Taniguchi (〃) : Electronic Structure of CoSe₂: The Thirteenth International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics, Program and Abstracts, Th067, (July 23-27, 2001, Trieste, Italy) [2]
- 植田義文, 竹口正治(呉高専本科) : 二次元空間における量子ダイナミクス : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 7-12, (2001) [5]
- 植田義文, 佐藤仁(広島大), 長崎太(〃), 平井千之(〃), 木村昭夫(〃), 谷口雅樹(〃), 仲武昌史(高エネPF), 生天目博文(広島大) : CoSb₃の正・逆光電子分光法による電子状態 : 日本物理学会講演概要集第4分冊, 17pRG5, (9/17-20/2001, 徳島文理大学徳島校) [6]
- 植田義文, 佐藤仁(広島大), 長崎太(〃), 平井千之(〃), 木村昭夫(〃), 谷口雅樹(〃), 生天目博文(〃), 仲武昌史(高エネPF) : 正・逆光電子分光法によるCoSb₃の電子状態 : 第15回日本放射光学学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集12P25, (1/11-13/2002; Jan. 12, 東京大学柏キャンパス) [6]
- C.Hirai (広島大), Y.Ueda, H.Sato(広島大), A.Kimura(〃), M.Taniguchi(〃), M.Nakatake(〃), H.Namatame(〃) : Electronic Structure of CoSb₃ investigated by photoemission and inverse-photoemission spectroscopies : The 6th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Abstracts P-12, March 14-15, 2002; March 14 [6]
- F.Kuroki, S.Shinke(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) and H.Sato(Sharp Co.) : Band-Widening of Ceramic Resonator Loaded NRD Guide Band-Pass Filter at 60 GHz : IEICE Trans. Vol.81-E, No.10, pp.1569-1574, (October, 2001) [1]
- F.Kuroki, S.Shinke(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), M.Yamaguchi(〃), E.Suematsu(Sharp Co.), H.Sato(〃) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Wireless Multi-Channel TV-Signal Distribution System by Using NRD Guide Transmitter and Receiver at 60 GHz : Proceedings of IEEE MTT-S Microwave Symp., Vol. 3, pp. 1813-1816, (May, 2001) [2]
- F.Kuroki, M.Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : New Type of Millimeter Wave Antenna by Using the NRD Guide with LSE Mode Transmission : Proceedings of IEEE MTT-S Microwave Symp., Vol.2, pp.1205-1208, (May, 2001) [2]
- F.Kuroki, M.Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Millimeter Wave Antennas Fed by High Permittivity LSE-NRD Guide : Proceedings of IEEE AP-S and URSI Int. Symp., Vol.2, pp.262-265, (July, 2001) [2]
- F.Kuroki, S.Shinke(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Low-Loss and Wide-Band NRD Guide Band-Pass Filter with Ceramic Resonators at 60GHz : Proceedings of IEEE AP-S and URSI Int. Symp., p.346, (July, 2001) [2]
- F.Kuroki, A.Takada(Kure Natl. Coll. of Tech.), M.Eguchi(〃) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : NRD Guide Compatible Pyramidal Horn Antenna for Multiple Access Wireless LAN at 60GHz : Proceedings of IEEE AP-S and URSI Int. Symp. p.224, (July, 2001) [2]
- F.Kuroki, S.Shinke(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) and H.Sato(Sharp Co.) :

Band-Widening of Ceramic Resonator Loaded NRD Guide Band-Pass Filter at 60 GHz : Proceedings of the 31st European Microwave Conf., Vol.2, pp.33-36, (September, 2001) [2]

F.Kuroki, M.Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), Y.Wagatsuma(Tohoku Univ.) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Folded Planar Antenna Fed by LSE-NRD Guide at 60GHz : Proceedings of the 31st European Microwave Conf., Vol.2, pp.161-164, (September, 2001) [2]

F. Kuroki, A. Takada(Kure Natl. Coll. of Tech.), M. Eguchi (") and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Radiation Characteristics of NRD Compatible Pyramidal Horn Antenna for Multiple Access LAN Applications at 60 GHz : Proceedings of the 13th Asia Pacific Microwave Conf., Vol.3, pp.1354-1357, (December, 2001) [2]

F. Kuroki, M. Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.) and T. Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : High Permittivity LSE-NRD Guide As a Radiator for Millimeter-Wave Antennas : Topical Symp. on Millimeter Waves, pp.43-46, (March, 2001 in Yokosuka) [2]

F. Kuroki, S. Shinke(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), T. Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) and H. Sato(Sharp Co.) : Band-Widening of NRD Band-Pass Filter Using Ceramic Resonators at 60GHz : Topical Symp. on Millimeter Waves, pp.139-142, (March, 2001 in Yokosuka) [2]

F. Kuroki, A. Takada(Kure Natl. Coll. of Tech.), M. Eguchi (") and T. Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Radiation Pattern Control of Pyramidal Horn Antenna Fed by NRD Guide at 60GHz : Topical Symp. on Millimeter Waves, pp.135-138, (March, 2001 in Yokosuka) [2]

F.Kuroki, M.Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), Y.Minamitani(New JRC CO.) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Fan Beam Antenna Fed by LSE-NRD Guide at 35GHz : Progress in Electromagnetics Research Symp., p.445, (July, 2001 in Osaka) [2]

F.Kuroki, M.Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), T.Wagatsuma(Tohoku Univ.) and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : A Study on Planar Antenna Fed by LSE-NRD Guide at 60GHz : Progress in Electromagnetics Research Symp., p.444, (July, 2001 in Osaka) [2]

F.Kuroki, M.Yamaguchi(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) and H.Sato(Sharp Co.) : Precise Short Range Pulse Radar Using NRD guide at 60GHz : Progress in Electromagnetics Research Symp., p.205, (July, 2001 in Osaka) [2]

F.Kuroki, S.Shinke(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.), T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) and H.Sato(Sharp Co.) : A Study on Band Widening of NRD Guide Band-Pass Filter with Ceramic Resonators at Millimeter-Wavelength : Progress in Electromagnetics Research Symp., p.206, (July, 2001 in Osaka) [2]

F.Kuroki, A.Takada(Kure Natl. Coll. of Tech.), M.Eguchi (") and T.Yoneyama(Tohoku Inst. of Tech.) : Radiation Pattern Control of NRD Guide Compatible Pyramidal Horn Antenna at 60GHz : Progress in Electromagnetics Research Symp., p.446, (July, 2001 in Osaka) [2]

黒木太司 : NRDガイドミリ波集積回路 : (株)リアライズ社, (2001, 9月) [3]

黒木太司 (分担執筆) : 最近のミリ波・サブミリ波デバイスの技術とその応用, 4.2節 NRDガイド(技術解説) : 電気学会、電子・情報・システム部門電子デバイス技術委員会技術報告, 第811号, (2001, 1) [4]

- 黒木太司 (分担執筆) : エネルギー使用合理化に係わるIT改革をサポートする高周波デバイスの開発に関する調査研究報告書, 第3章 ミリ波NRDガイドへの電子デバイスの実装 : 新エネルギー・産業開発技術総合開発機構, (2001年3月) [4]
- 黒木太司 : 携帯電話やインターネットに代表される電気通信技術のしくみ : 呉オープンカレッジ公開講座, IT革命の基盤をなす電磁波応用技術 ~いま, 通信がおもしろい~, 第1回, (2001, 3月, 呉) [6]
- 黒木太司 : 通信の歴史 ~太古の時代から今日まで~ : 呉オープンカレッジ公開講座, IT革命の基盤をなす電磁波応用技術 ~いま, 通信がおもしろい~, 第2回, (2001, 3月, 呉) [6]
- 黒木太司 : 21世紀における高度通信システムの動向 : 呉オープンカレッジ公開講座, IT革命の基盤をなす電磁波応用技術 ~いま, 通信がおもしろい~, 第3回, (2001, 3月, 呉) [6]
- ペイジョンソク(東北大), 和田光司(青山学院大), 川上憲司(三菱電機), 黒木太司, 飯草恭一(超伝導研), 中條渉(通信総研) : 2000年アジア・太平洋マイクロ波国際会議の報告 : 電子情報通信学会マイクロ波研究会特別講演, (2001, 4月, 東京) [6]
- 黒木太司, 山口倫史 (呉高専専攻科), 米山務 (東北工大) : LSE-NRDガイド給電ミリ波アンテナ : 電子情報通信学会マイクロ波研究会, Vol. 101, No. 24, pp. 89-94 (2001, 4月, 東京) [6]
- 黒木太司, 高田淳年 (呉高専本科), 江口正徳 (〃), 米山務 (東北工大) : NRDガイド給電電磁ホーンアンテナの指向性制御に関する一考察 : 電子情報通信学会マイクロ波研究会, Vol. 101, No. 100, pp. 53-56 (2001, 5月, 岡山) [6]
- 黒木太司, 山口倫史 (呉高専専攻科), 我妻壽彦 (東北大), 米山務 (東北工大) : LSE-NRDガイド給電60GHz帯平面アンテナ : 電子情報通信学会マイクロ波研究会, Vol. 101, No. 100, pp. 57-60 (2001, 5月, 岡山) [6]
- 黒木太司, 新家暁 (呉高専専攻科), 米山務 (東北工大), 佐藤浩哉 (シャープ (株)) : セラミック共振器装荷NRDガイド帯域フィルタの広帯域化 : 信学ソサイエティ大会, Vol. C-I, p. 71, (2001, 9月, 東京) [6]
- 黒木太司, 山口倫史 (呉高専専攻科), 我妻壽彦 (東北大), 米山務 (東北工大) : LSE-NRDガイド給電ミリ波平面アンテナ : 信学ソサイエティ大会, Vol. B-I, p. 163, (2001, 9月, 東京) [6]
- 黒木太司 : ミリ波電磁波利用技術に関する現状と将来展望 : 福岡県工業技術センター高度技術者招聘講演会招待講演, (2001, 11月, 福岡) [6]
- 黒木太司, 中村昭造 (呉高専専攻科), 福地稔栄 (古河電工 (株)), 米山務 (東北工大) : NRDガイドを用いた76GHz帯p-i-nダイオード回路素子 : 電子情報通信学会マイクロ波研究会, Vol. 101, No. 418, pp. 43-48, (2001, 11月, 佐賀) [6]
- 黒木太司, 山下高文 (呉高専本科), 米山務 (東北工大) : 50GHz帯小型・低損失NRDガイドリング共振器 : 電子情報通信学会マイクロ波研究会, Vol. 101, No. 418, pp. 49-52, (2001, 11月, 佐賀) [6]
- 丸橋建一(NEC), 高木直(三菱電機), 黒木太司, 山田敦史(シャープ), 李可人(通信総研) : 第31回欧州マイクロ波会議出席報告 : 電子情報通信学会マイクロ波研究会特別講演, (2001, 12月, 福井) [6]
- 黒木太司, 神崎仁(日本ピラー工業(株)), 得竹良勝(〃) : NRDガイド及びその製造方法 : 特願2001-040173, (2001年2月16日出願) [7]

- 黒木太司, 馬場潤寧(松下電器産業(株)), 玉江隆浩(〃), 福田達朗(〃): ガン発振器: 特願2001-053910, (2001年2月28日出願) [7]
- 馬場潤寧(松下電器産業(株)), 黒木太司: NRDガイド回路: 特願2001-053919, (2001年2月28日出願) [7]
- 黒木太司, 南谷康次郎(新日本無線(株)): 非放射性誘電体線路と導波管の変換回路: 特願2001-152232, (2001年5月22日出願) [7]
- 黒木太司, 南谷康次郎(新日本無線(株)), 沖有一郎(〃): マイクロ波発振器: 特願2001-186321, (2001年6月20日出願) [7]
- 山崎勉: 酸素放電プラズマの数値計算: 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 13-19, (2001) [5]
- 藤井敏則, 船曳繁之(島根大): メンバーシップ関数の自動構築法を用いた電力平滑化制御: 電気学会論文誌C, 第121巻第6号, 1133-1139頁, (2001) [1]
- 藤井敏則, 松木憲児(呉高専専攻科): 人工網膜センサカメラによる環境認識法: 平成13年電気学会産業応用部門大会, (2001年8月, 島根) [6]
- 藤井敏則, 浅野間将太(呉高専専攻科): 自律移動ロボットによる環境認識実験: 平成13年電気学会産業応用部門大会, (2001年8月, 島根) [6]
- 横瀬義雄, 野口聡(広島大), 山下英生(〃): 制約条件を考慮する目的関数を用いた遺伝的アルゴリズムによる電磁機器の形状設計 (Genetic Algorithm with restriction conditions of objective functions for shape optimization of electromagnetic devices): 日本AEM学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 33- 38, (2001年) [1]
- 横瀬宏(広工大), 横瀬義雄: 誘導発電機系統併入用新スタート法について: 電気・情報関連学会中国支部第52回連合大会 講演論文集, p. 513, (2001年10月20日, 広島市) [6]
- 横瀬宏(広工大), 宇根大樹(〃), 横瀬義雄: 誘導発電機と系統電圧の同期化特性について: 電気・情報関連学会中国支部第52回連合大会 講演論文集, p. 514, (2001年10月20日, 広島市) [6]
- 横瀬宏(広工大), 管沼浩志(〃), 川島之宣(〃), 横瀬義雄: 誘導発電機の異常周波数出力電圧特性について: 電気・情報関連学会中国支部第52回連合大会 講演論文集, p. 515, (2001年10月20日, 広島市) [6]
- 横瀬宏(広工大), 横瀬義雄, 宇根大樹(広工大): 誘導発電機の新しいソフトスタート法について: 電気学会研究会資料(回転機研究会), RM-01-170~176, pp. 7- 12, (2001年11月16日, 千代田区) [6]
- 福島学(呉高専専攻科), 横沼実雄, 野村利英: 超電導磁気浮上走行モデルの試作: 電気・情報関連学会中国支部第52回連合大会講演論文集, p. 521, (平成13年10月20日, 広島工業大学) [6]
- M.H. Jung(Hiroshima Univ.), T. Yoshino(〃), S. Kawasaki(〃), T. Pietrus(〃), Y. Bando, T. Suemitsu(Hiroshima Univ.), M. Sera(〃), T. Takabatake(〃): Thermoelectric and transport properties of CeBiPt and LaBiPt: J. Appl. Phys., 89(11), 7631-7633, (2001) [1]
- M-S. Kim(Hiroshima Univ.), T. Sasakawa(〃), T. Suemisu(〃), Y. Bando, K. Umeo(Hiroshima Univ.), F. Iga(〃), H. Mitamura(Tokyo Univ.), T. Goto(〃), T. Takabatake(Hiroshima Univ.): Transport and magnetic properties of a low-density carrier system SmBiPt: J. Phys. Soc. Jpn., 70(12), 3650-3653, (2001) [1]

- T. Takabatake(Hiroshima Univ.), T. Suemitsu(〃), T. Sasakawa(〃), Y. Bando, T. Takagi(Hiroshima Univ.), Y. Echizen(〃), T. Yoshino(〃), K. Umeo(〃), F. Iga, M. Sera(〃), Ch. Paul(Tech. Univ. Wine), St. Berger(〃), E. Bauer(〃) : Kondo semiconductors as a novel thermoelectric-cooling material : Proc. 20th Int. Conf. on Thermoelectrics, 266, (2001) [2]
- 板東能生** : 価数揺動化合物CeRhSnの熱電物性 : 熱電変換シンポジウム, (2001. 8, 工学院大学) [6]
- 末光敏明(広島大), 笹川哲也(〃), 浜島俊介(〃), **板東能生**, 梅尾一則(広島大), 世良正文(〃), 鈴木孝至(〃), 藤田敏三(〃), 高島敏郎(〃) : 近藤半金属CeRhAsの相転移と熱電物性 : 日本物理学会, (2001. 3, 中央大学) [6]
- 内平和幸(広島大), 中野寿寛(〃), **板東能生**, 梅尾一則(広島大), 伊賀文俊(〃), 高島敏郎(〃) : 金属-非金属転移系YCaTiOの異方的伝導と圧力効果 : 日本物理学会, (2001. 3, 中央大学) [6]
- 大西義浩**, 山本透(広島大), 大松繁(大阪府大) : ニューラルネットワークを用いた非線形システムの学習制御 : 電気学会論文誌, Vol. 121-C, No. 11, pp. 1683-1689, (2001) [1]
- Y. OHNISHI, T. YAMAMOTO (広島大) and S. OMATU (大阪府大) : Design of Neural-Net based Generalised Minimum Variance Controller : Proc. of IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, pp.121-126, (2001年8月, Como, Italy) [2]
- 大西義浩**, 山本透(広島大), 大松繁(大阪府大) : ニューラルネットワークを用いた非線形S T Cの一設計 : 第1回適応学習制御シンポジウム資料, pp. 81-84, (2001年1月, 東京) [6]
- 大西義浩**, 山本透(広島大) : ベンチマーク問題に対するセルフチューニングコントローラからのアプローチ : 第1回適応学習制御シンポジウム資料, pp. 97-100, (2001年1月, 東京) [6]
- 大西義浩**, 大松繁(大阪府大) : 内部モデル構造を有した多変数セルフチューニングP I D制御系の一設計 : 平成13年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, 2, pp. 253-256, (2001年9月, 沖縄) [6]
- 大西義浩**, 大松繁(大阪府大), 藤中透(〃) : ニューロP I D制御系の設計 : 平成13年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, 2, pp. 283-284, (2001年9月, 沖縄) [6]
- 瀬戸香樹(呉高専専攻科), **大西義浩** : セルフチューニング極配置法における閉ループ極の一調整法 : 第10回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 196-197, (2001年11月, 宇部) [6]
- 正木秀明(呉高専専攻科), **大西義浩** : ニューラルネットワークを用いた一般化最小分散制御系におけるパラメータの一設計 : 第10回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 202-203, (2001年11月, 宇部) [6]
- H. INOUE and H. NARIHISA (岡山理大) : Parallel Distributed Mining with Ensemble Self-Generating Neural Networks : Proc. The 2001 International Conference on Parallel and Distributed Systems, pp.423-428, (平成13年6月, 韓国, 慶州) [2]
- H. INOUE, Y. FUKUNAGA (岡山理大) and H. NARIHISA (〃) : Efficient Hybrid Neural Network for Chaotic Time Series Prediction : Proc. International Conference on Artificial Neural Networks, pp.712-718, (平成13年8月, オーストリア, ウィーン) [2]
- H. INOUE and H. NARIHISA (岡山理大) : Experiments with an Ensemble Self-Generating Neural Network : Proc. Fifth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems & Allied Technologies, part I, pp.456-460, (平成13年9月, 大阪) [2]

- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : アンサンブル自己生成ニューラルネットワークの汎化能力改善特性 : 岡山理科大学紀要, vol. 36A, pp.97-106, (平成13年) [5]
- 福永好伸 (岡山理大), 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : アンサンブル自己生成ニューラルネットワークと階層型ニューラルネットワークのマッチングによる降水量推定 : 電子情報通信学会総合大会, (平成13年3月, 滋賀) [6]
- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : 自己生成ニューラルネットワークによるアンサンブル学習 : 第2回AI若手の集い, (平成13年5月, 島根) [6]
- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : アンサンブル自己生成ニューラルネットワークによる並列分散データマイニング : 第15回人工知能学会全国大会, (平成13年5月, 島根) [6]
- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : 枝刈り自己生成ニューラルネットワークを用いた効率的なアンサンブル学習 : 電子情報通信学会技術研究報告, NC2001-43, (平成13年7月, 奈良) [6]
- 福永好伸 (岡山理大), 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : 複合ニューラルネットワークによる効率的なカオス時系列予測 : 電子情報通信学会技術研究報告, NC2001-44, (平成13年7月, 奈良) [6]
- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : 自己生成ニューラルネットワークを用いたアンサンブル学習 : 第4回情報論的学習理論ワークショップ予稿集, pp.195-200, (平成13年7月, 東京) [6]
- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : アンサンブル自己生成ニューラルネットワークのための高速枝刈り法 : 情報処理学会研究報告, MPS-36-1, (平成13年9月, 岡山) [6]
- 井上浩孝, 成久洋之 (岡山理大) : A Fast Pruning Method for Ensemble Self-Generating Neural Networks : 電気・情報関連学会中国支部連合大会, (平成13年10月, 広島) [6]

環境都市工学科

- 竹村和夫 (分担執筆) : コンクリート構造 : コロナ社, (平成13年3月) [3]
- 竹村和夫 : 根 : コンクリート工学, Vol. 39, No. 10, P60, (平成13年10月) [4]
- 竹村和夫, 大東延幸 (広工大), 藤村彰 (呉高専専攻科) : 公共交通機関のサービス可能範囲に関する基礎的研究 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 499-500, (平成13年6月, 宇部) [6]
- 竹村和夫, 市坪誠, 小松孝二 (香川大), 山口隆司, 迫井裕樹 (呉高専専攻科) : 複合劣化によるコンクリートの劣化現象が美観評価に与える影響 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 619-620, (平成13年6月, 宇部) [6]
- 竹村和夫, 市坪誠, 田岡幸 (ダイフク興産), 梶川奈津紀 (呉高専専攻科) : 再生細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮と耐久性, 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 655-656, (平成13年6月, 宇部) [6]

- 竹村和夫, 市坪誠, 梶川奈津紀 (呉高専専攻科), 藤村彰 (〃) : 再生骨材を用いたらせんRC柱の一軸耐力 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 659-660, (平成13年6月, 宇部) [6]
- Sigehisa Kobori, Takenobu Kawajiri, Syouji Katou, Akira Harada(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.) : A study on the mechanism of slope failure due to seepage of rainwater : Proceedings of international symposium on Geotechnical and Environmental challenges in mountains terrain, pp415-422, (Nov. 2001, Nepal) [2]
- Sigehisa Kobori, Takenobu Kawajiri, Syouji Katou, Akira Harada(Kure Natl. Coll. of Tech., Adv.) : A characteristic survey on time-series of cliffs after a slope failure : Proceedings of international symposium on Geotechnical and Environmental challenges in mountains terrain, pp423-428, (Nov. 2001, Nepal) [2]
- 小堀慈久, 加藤省二, 原田明(呉高専専攻科) : 降雨浸透における斜面崩壊機構の研究 : 地すべりと斜面崩壊の機構解明と防災に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会四国支部, pp261-273, (2001年) [6]
- 小堀慈久, 加藤省二, 力石美希子 (呉高専専攻科) : 地盤改良材としての水砕スラグの混合強度物性 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp257-258, (2001年6月, 山口) [6]
- 小堀慈久, 力石美希子 (呉高専専攻科), 原田明 (〃) : 降雨浸透による斜面崩壊機構の実験的研究 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp299-300, (2001年6月, 山口) [6]
- 小堀慈久, 力石美希子 (呉高専専攻科), 坂本将充(山口大) : 降雨による地盤災害の地域性要因と防災対策の研究 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp311-312, (2001年6月, 山口) [6]
- 小堀慈久, 力石美希子 (呉高専専攻科), 川上万由佳 (中国電力) : 平成11年6月豪雨災害に関する「崖のアンケート」の研究 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp335-336, (2001年6月, 山口) [6]
- Shuji Nakano : Failure mechanism in I-beam subjected to transverse bending : Creative Systems in Structural and Construction Engineering, Balkema, Rotterdam, 815p-820p, (2001.1, Hawaii) [2]
- Shuji Nakano, D.A.Uy(Hiroshima Univ.) : Stress analysis of precast slabs subjected to bending and torsion : Creative Systems in Structural and Construction Engineering, Balkema, Rotterdam, 931p-936p, (2001.1, Hawaii) [2]
- 小松孝二 (香川大), 市坪 誠, 今田寛典 (呉大) : 質問紙調査による測量教育の改善に関する要因分析 : 応用測量論文集, Vol. 12, pp. 17-22, (2001. 6) [1]
- 市坪 誠, 小松孝二 (香川大), 迫井裕樹 (呉高専専攻科), 今田寛典 (呉大), 河合研至 (広島大) : 劣化コンクリート構造物の視覚評価に関する研究 : 複合劣化コンクリート構造物の維持管理計画に関するシンポジウム論文集, pp. 21-28, (2001. 5) [1]
- Makoto Ichitsubo, Tatsuo Nishino (広島国際大) and Mitsuo Nagamachi (〃) : An Application of Kansei Engineering to Public Works : Journal of Design and Manufacturing Automation, CRC-Press Inc., pp. 846-851, (2001.8, Las Vegas) [2]
- Makoto Ichitsubo, Koji Komatsu (香川大), Shigekazu Ishihara (広島国際大), Tatsuo Nishino (〃) and Mitsuo Nagamachi (〃) : A Kansei Engineering Analysis on Bridge Landscape of the District Landmark, Proceeding of The International Conference on Affective Human Factors Design, Asean Academic Press, London, pp. 116-123, (2001.6, Singapore) [2]
- Masanobu Shinozuka(南カリフォルニア大), Hung-Chi Chung (〃), Makoto Ichitsubo, Jianwen Liang (天津大) : System

Identification by Video Image Processing, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, S.C. Liu(ed.), SPIE Vol. 4330, pp. 97-107, (2001.3, Newport Beach) [2]

市坪 誠 (分担) : 研究成果報告書平成11・12年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (1)) 「感性の非線形性を取り扱う手法の基礎的研究」 (課題番号: 11832024) (研究代表者: 長町三生), p. 56, 2001. 3 [4]

市坪 誠, 山口隆司, 今田寛典 (呉大), 谷本泰雄 (呉高専専攻科) : 河川における整備指針と事後評価の整合性に関する研究 : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 45-50, (平成13年8月) [5]

市坪 誠, 竹村和夫, 山口隆司, 迫井裕樹 (呉高専専攻科) : コンクリート構造物の表面劣化が視覚評価に与える影響 : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 51-56, (平成13年8月) [5]

今田寛典 (呉大), 小松孝二 (香川大), 市坪 誠 : 情報通信ネットワークを介した社会福祉政策の効果計測に関する研究—山間地域を対象として— : 社会情報学研究, Vol. 7, pp. 37-49, (2001.12) [5]

小松孝二 (香川大), 今田寛典 (呉大), 市坪 誠 : 高齢者福祉政策研究の概観と山間地のコンピュータ通信ネットワークによる福祉行政に関する一考察 : 社会情報学研究, Vol. 7, pp. 63-79, (2001.12) [5]

市坪 誠, 小松孝二 (香川大), 長町三生 (広島国際大), 今田寛典 (呉大), 山根武志 (ヒロコン), 谷本泰雄 (呉高専専攻科) : 公共事業における事後評価に関する基礎的研究—景観評価について— : 土木学会年次学術講演会講演概要集 第4部門, pp. 14-15, (2001.10, 熊本) [6]

市坪 誠, 小松孝二 (香川大), 長町三生 (広島国際大), 今田寛典 (呉大), 迫井裕樹 (呉高専専攻科), 河合研至 (広島大) : コンクリート構造物表面の劣化現象が劣化評価に及ぼす影響 : 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部門, pp. 864-865, (2001.10, 熊本) [6]

市坪 誠, 小松孝二 (香川大), 山口隆司, 山根武志 (ヒロコン), 谷本泰雄 (呉高専専攻科) : 都市河川における整備コンセプトと景観評価との整合性評価について : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 483-484, (2001.6, 山口) [6]

市坪 誠, 小松孝二 (香川大), 山口隆司, 掛 園恵 (呉高専本科) : 旧軍水道施設の視覚評価に関する基礎的研究 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 485-486, (2001.6, 山口) [6]

市坪 誠, 小松孝二 (香川大), 山口隆司, 栗津大介 (呉高専本科) : ダム設置環境の変遷に関する基礎的研究—明治~大正編— : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 575-576, (2001.6, 山口) [6]

市坪 誠, 竹村和夫, 小松孝二 (香川大), 山口隆司, 迫井裕樹 (呉高専専攻科) : 複合劣化によるコンクリートの劣化現象が美観評価に与える影響 : 第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 619-620, (2001.6, 山口) [6]

T. YAMAGUCHI, S. YAMAZAKI (Kouchi National Coll. of Tech.), S. UEMURA (Kisarazu National Coll. of Tech.), A. OHASHI (Nagaoka Univ. of Tech.), H. HARADA (") : Microbial Ecological Significance of Sulfide Precipitation within Anaerobic Granular Sludge Revealed by Micro-electrodes Study : Water Research, 35, 3411-3417, (2001) [1]

山口隆司, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : 前段可溶化槽と中温UASB反応器による焼酎製造工程廃液の処理 : 第35日本水環境学会年次学術講演集, 387, (2001/3, 岐阜) [6]

山口隆司, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : UASB反応器と好気性ろ床を組み合わせた都市下

- 水処理システムにおける硫黄の酸化・還元微生物の生態評価 : 第35日本水環境学会年会講演集, 322, (2001/3, 岐阜) [6]
- 山崎慎一 (高知高専), 山口隆司, 原田秀樹 (長岡技科大) : UASB反応槽を用いた下水処理システムの有機物・窒素の除去特性 : 平成13年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, 478-479, (2001/5, 松山) [6]
- 山崎慎一 (高知高専), 山口隆司, 原田秀樹 (長岡技科大) : UASB反応槽を用いた下水処理システムの窒素除去条件の検討 : 平成13年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, 480-481, (2001/5, 松山) [6]
- 山崎慎一 (高知高専), 山口隆司, 原田秀樹 (長岡技科大) : ろ紙吸光法を用いた清流河川の水質評価 : 平成13年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, 490-491, (2001/5, 松山) [6]
- 山崎慎一 (高知高専), 山口隆司, 原田秀樹 (長岡技科大) : ろ紙吸光法を用いた河床ろ材浄化特性の比較 : 平成13年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, 492-493, (2001/5, 松山) [6]
- 山崎慎一 (高知高専), 山口隆司, 原田秀樹 (長岡技科大) : 河床礫付着珪藻種による水質判定 : 平成13年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, 494-495, (2001/5, 松山) [6]
- 山口隆司, 立花由美子 (呉高専専攻科), 市坪 誠, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : UASB反応器と好気性ろ床による都市下水処理特性の評価 : 第53回土木学会中国支部技術研究会講演概要集, 795-796, (2001/5, 山口) [6]
- 山口隆司, 三浦佑己 (北大), 市坪 誠, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : 都市下水処理を行うUASB反応器と好気性ろ床の微生物生態評価 : 第53回土木学会中国支部技術研究会講演概要集, 797-798, (2001/5, 山口) [6]
- 山口隆司, 竹林 賢 (長岡高専専攻科), 市坪 誠, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : UASB反応器と好気性ろ床を組み合わせた都市下水処理における窒素の挙動 : 第53回土木学会中国支部技術研究会講演概要集, 789-790, (2001/5, 山口) [6]
- 山口隆司, 樋渡三夏 (呉高専専攻科), 市坪 誠, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : 可溶化槽とUASB反応器による焼酎製造工程廃液の処理 : 第53回土木学会中国支部技術研究会講演概要集, 791-792, (2001/5, 山口) [6]
- 山口隆司, 岡本由美子 (呉高専専攻科), 市坪 誠, 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : 嫌気性処理後段散水ろ床における硫黄酸化特性 : 第53回土木学会中国支部技術研究会講演概要集, 801-802, (2001/5, 山口) [6]
- 山口隆司, 岡本由美子 (呉高専専攻科), 山崎慎一 (高知高専), 原田秀樹 (長岡技科大) : 都市下水処理を行う嫌気・好気反応槽における硫黄の動態評価 : 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集・部門, CD-ROM, 358-359, (2001/9, 熊本) [6]
- Takahisa Shigematsu, Tatsuro Muro (愛媛大), Tadaomi Eguchi (明石高専), Yasukuni Honda (愛媛大) : Turning Characteristics of Two-axle Four-wheel Vehicle under Traction on Sandy Soft Terrain : Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, pp.254-260, (2001.12) [2]
- Takahisa Shigematsu, Yasunari Kobayashi (呉高専専攻科), Tatsuro Muro (愛媛大) : Influence of Contact Length of

Tracked Vehicle running on Soft Sandy Terrain : Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, pp.247-253, (2001.12) [2]

- 小林康成(呉高専専攻科), 重松尚久, 川野正彦(伸和建設) : 軟弱地盤上を走行する履帯式車両の走行性に関する研究 : 第53回平成13年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp665-666, (2001年6月, 山口) [6]
- 本田泰邦(愛媛大), 重松尚久, 室達朗(愛媛大) : 軟弱地盤上を定常円旋回する車輪式車両に関する研究 : 第53回平成13年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp667-668, (2001年6月, 山口) [6]
- 森伸一郎(愛媛大), 村上ひとみ(山口大), 河原荘一郎(松江高専), 向谷光彦(高松高専), 重松尚久, 山下裕一(荒谷コンサルタント), 俵司(愛媛大) : 中国・四国全域における2001年芸予地震のアンケート震度調査 : 第一回日本地震工学研究発表・討議会梗概集, p.116, (2001年11月) [6]
- 黒川岳司, 小松登志子(広島大), 福島武彦(〃) : 廃棄物埋立地層内における重金属の溶出性の評価 : 廃棄物学会論文誌, 第12巻(第5号), pp. 209-218, (2001) [1]
- 福岡捷二(広島大), 松下智美(〃), 三浦心(〃), 黒川岳司, 船橋昇治(国土交通省), 中村幹雄(島根県内水面水産試験場) : 連結系汽水湖における塩分変化特性 : 水工学論文集, 第46巻, pp. 899-904, (2001) [1]
- T. KUROKAWA, S. FUKUOKA(広島大), H. UEHARA(パシフィックコンサルタンツ(株)), H. GODOU(国土交通省) : Effect of low atmospheric pressure and typhoon on water quality in a brackish lake : 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes, 5A-005, pp.17-20, (2001.11. Siga, Japan) [2]
- 黒川岳司, 福岡捷二(広島大), 五道仁実(国土交通省), 松下智美(広島大), 三浦心(〃) : 宍道湖における湖内流動と水質変化の特徴 : 第53回土木学会中国支部研究発表会, (2001. 6, 山口市) [6]
- 松下智美(広島大), 黒川岳司, 三浦心(広島大), 福岡捷二(〃), 五道仁実(国土交通省), 中村幹雄(島根県内水面水産試験場) : 連結系汽水湖における流れと水質分布に関する研究 : 第53回土木学会中国支部研究発表会, (2001. 6, 山口市) [6]
- 黒川岳司, 福岡捷二(広島大), 五道仁実(国土交通省), 松下智美(広島大), 三浦心(〃) : 宍道湖における湖内流動と水質分布の変化 : 土木学会第56回年次学術講演会, (2001. 10, 熊本市) [6]
- 松下智美(広島大), 黒川岳司, 三浦心(広島大), 福岡捷二(〃), 五道仁実(国土交通省), 中村幹雄(島根県内水面水産試験場) : 宍道湖の塩分変化を支配する要因 : 土木学会第56回年次学術講演会, (2001. 10, 熊本市) [6]
- 岡林隆敏(長崎大), 吉村徹(オリエンタル建設), 河村進一, 細川雅史(長崎大) : 無線LANおよびインターネット技術を活用した橋梁施工管理のための遠隔計測システム : 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 285-292, (2001) [1]
- 吉村徹(オリエンタル建設), 岡林隆敏(長崎大), 河村進一, 細川雅史(長崎大) : インターネット技術を活用した橋梁の施工管理のための遠隔計測システムについて : プレストレストコンクリート, Vol. 43, No. 6, pp. 95-98, (2001) [4]
- 細川雅史(長崎大), 岡林隆敏(〃), 西星匡博(フジエンジニアリング), 河村進一 : 平成13年3月, 橋梁施工管理のための遠隔モニタリングシステムの開発 : 平成12年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, A-70-71, (2001. 3, 福岡) [6]

- 中宮義貴（長崎大），河村進一：数値解析による橋梁桁断面のフラッター特性の検討：平成12年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集A, pp.180-181, (2001.3, 福岡) [6]
- 河村進一，中宮義貴（長崎大），久保喜延（九工大）：数値流体解析による橋梁桁断面の非定常空気力特性：平成12年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集A, pp.182-183, (2001.3, 福岡) [6]
- 河村進一：建設CALIS/ECへの対応と情報処理教育の方向性について：平成13年度情報処理教育研究集会講演論文集, pp.406-407, (2001.10, 和歌山) [6]
- 藤田素弘（名工大），山岡俊一，松井寛（名工大）：意識量と実環境値に基づく生活道路の歩道形態別評価分析：都市計画論文集, No36, pp.607-612, (2001) [1]
- Motohiro FUJITA（名工大），Shunichi YAMAOKA, Hiroshi MATSUI（名工大）：Structure Analysis on Residents' Participation Consciousness for the Project of Improving Residential Streets : Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies, Vol.4, No.4, pp.29-44, (2001 Hanoi) [1]
- 山岡俊一，藤田素弘（名工大），松井寛（〃）：居住地の整備状況を考慮したコミュニティ・ゾーンの環境経済的評価に関する研究：土木学会論文集, No.688/IV-53, pp.101-114, (2001) [1]
- Motohiro FUJITA（名工大），Shunichi YAMAOKA, Hiroshi MATSUI（名工大）：Evaluation Models for the Improvement of Traffic Safety and Environment of Japanese Residential Area : Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research, CD-ROM, (2001 Seoul) [2]
- 山岡俊一，藤田素弘（名工大），松井寛（〃）：コミュニティ・ゾーン形成事業に対する市民の賛否態度構造に関する研究：平成12年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.407-408 [6]

建築学科

- 藤井英昭（呉高専専攻科），藤本知美（〃），西村光正，竹内謹治（T&P設計社長）：井桁型地盤改良ベタ基礎工法について 3) ベタ基礎の版としての不同沈下性状に関する模型実験：日本建築学会中国支部研究報告集, 第24巻, pp.331-334, (平成13年3月, 山口大学) [6]
- 藤井健，緒方信一郎：指向性音源に対する吸音衝立の減音効果について：呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 57-60, (平成13年8月) [5]
- 福原安洋（共著）：紙模型でわかる鋼構造の基礎：技報堂出版, (平成13年9月) [3]
- 福原安洋，坂田憲彦（呉高専専攻科）：学生寮の耐震補強とその効果について：日本建築学会中国支部研究報告集, 第24巻, pp77-80, (平成13年3月, 宇部) [6]
- 緒方信一郎，藤井健：建築部品におけるユニバーサルデザインの基礎的研究ープッシュプルハンドルの断面形態についてー：呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 61-66, (平成13年8月) [5]
- 緒方信一郎，藤井健：建築部品におけるユニバーサルデザインの基礎的研究ー玄関ドア通過時の平面動作スペースについてー：呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 67-70, (平成13年8月) [5]

- 門前勝明, 三浦隆志(広島大) : 鳥取県西部地震で観測された地震動のスペクトル特性 : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, 71-76, (平成13年8月) [5]
- 岡本二郎, 河野友紀(呉高専専攻科) : 神戸市の近代洋風建築とその保存方法について : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, pp. 21-34, (平成13年8月) [5]
- 岡本二郎, 永見敦(三井建設) : 北九州市の近代洋風建築とその保存方法について : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, pp. 35-44, (平成13年8月) [5]
- 岡本二郎, 永見敦(三井建設) : 北九州市の近代洋風建築とその保存方法について : 日本建築学会中国支部研究報告集, 第24巻, pp767-770, (平成13年3月, 山口大学工学部) [6]
- 岡本二郎, 佐藤一佑(トータテハウジング) : 福岡市の近代洋風建築とその保存方法について : 日本建築学会中国支部研究報告集, 第24巻, pp771-774, (平成13年3月, 山口大学工学部) [6]
- Jitsuro Mase : 3D sketching : University of Cambridge, The Martin Centre for Architectural and Urban Studies Report, 2000-2001, p.13, (2001.6) [5]
- 小谷竜也(呉高専専攻科), 間瀬実郎 : ラスタデータを利用した簡易地形モデラに関する研究 : 平成13年度日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 455-456, (2001.9) [6]
- 河野友紀(呉高専専攻科), 橋本悠(〃), 小林隆暁, 間瀬実郎 : 携帯端末を利用した空間把握に関する研究—その1 空間把握のための要素の系列化— : 平成13年度日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 463-464, (2001.9) [6]
- 橋本悠(呉高専専攻科), 河野友紀(〃), 小林隆暁, 間瀬実郎 : 携帯端末を利用した空間把握に関する研究—その2 効果的な空間表現のための画像補正— : 平成13年度日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 465-466, (2001.9) [6]
- 石井仁, 松本真奈美(呉高専専攻科), 竹内大樹(〃), 松尾涼香(フリー) : 本校普通教室における温熱環境の実測調査 : 呉工業高等専門学校研究報告, 第63号, pp. 77-83, (平成13年8月) [5]
- 石井仁, 松本真奈美(呉高専専攻科) : 高等専門学校における温熱環境に関する実測調査 その2 温熱環境評価および温熱環境指標による検討 : 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 127-128, (2001年9月, 東京) [6]
- 石井仁 : 高等専門学校普通教室の温熱環境の実測調査 : 日本生気象雑誌, 38 (2), p.45, (2001年10月, 大阪) [6]
- 石井仁 : 高専普通教室における温熱環境の長期実測 : 第25回人間—生活環境系シンポジウム研究報告集, pp. 11-14, (2001年12月, 沖縄) [6]
- Yulia Hayati (豊橋技科大), Tetsuzo Kaku (〃), Kazunari Matsuno, Akiteru Okamura (豊橋技科大) : Bond Strength of Reinforcement Concrete Members Confined with FRP Sheets : コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 805-810, (2001) [1]
- 松野一成, 角徹三(豊橋技科大), 山崎敬子(〃), 桶谷秀人(〃) : 逆対称載荷を受ける連続繊維シートで補強されたRC部材の付着割裂強度 : コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 997-1002, (2001)

[1]

松野一成, 河野進 (京都大), 角徹三 (豊橋技科大) : 連続繊維シートによるRC部材の付着割裂強度増大効果 第1報 付着強度式の提案 : 日本建築学会構造系論文集, No. 548, pp. 95-100, (2001.10) [1]

足助晃一 (呉高専本科), **松野一成**, 片谷陽子 (呉高専専攻科), 角徹三 (豊橋技科大), **福原安洋** : 連続繊維シート補強によるRC部材の付着割裂強度 : 日本建築学会中国支部研究報告集, 第24巻, pp. 21-24, (2001.03) [6]

松野一成, 角徹三 (豊橋技科大) : 連続繊維シート補強によるRC部材の付着割裂強度 その6. 逆対称荷はり型試験の結果 : 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), C-2 構造IV, pp. 843-844, (2001.09) [6]

富田英夫, 杉本俊多 (広島大) : W. グロピウスの建築構成手法—古典主義的なものとピクチュアレスク的なもの— : 藝術研究, 第14号, pp. 73-89, (2001年7月) [1]

富田英夫, 杉本俊多 (広島大) : ファグス靴型工場クリック・ナイフ部門増築案設計過程—W. グロピウスにおけるヴォリューム造形方法の形成— : 日本建築学会計画系論文集, 第550号, pp. 287-294, (2001年12月) [1]

富田英夫, 杉本俊多 (広島大) : ドイツ・モダニズム建築の形態構成に関する研究 - W. グロピウスの工場建築における採光問題 - : 日本建築学会中国支部研究報告集, 第24巻, pp. 437-438, (2001年3月, 山口大学) [6]

編 集 委 員

丸 上 晴 朗
小 山 通 榮
中 山 文
吉 村 敏 彦
植 田 義 文
緒 方 信 一 郎 (平成14年 7 月15日まで)
門 前 勝 明 (平成14年 8 月 1 日から)

呉工業高等専門学校

研究報告

第64号(2002)

平成14年8月印刷

平成14年8月発行

編集者
発行者

呉工業高等専門学校

〒737-8506 呉市阿賀南2丁目2-11

電話(0823)73-8406

印刷所

総合印刷 青木印刷所

〒729-2507 広島県豊田郡安浦町内海1581

電話(0823)84-2104

MEMOIRS OF KURE NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY

No.64
August, 14th Year of Heisei (2002)

CONTENTS

1. Organizational Strategies of Anti-Dam Movements and Political Chance Structures: A Case of the Anti-Kawabe River Dam Movements	Shigeya KIHARA	1
2. On the Jordan Canonical Form in 2×2 Matrices	Shozo OKANAKA	7
3. Approximation of Continuous Maps by Multi-valued Maps	Yuji AKAIKE	13
4. Trial Production of Surveillance System of Harmful Animals	Minoru NOHARA	17
5. Electronic Structures of Skutterdite CoSb_3	Yoshifumi UEDA and Tohru KAWANAMI	23
6. Application of Genetic Algorithm to Solve a Motion Control Problem	Tsutomu YAMAZAKI	31
7. Damping Analysis for Coupled Thermoelastic Free Vibrations of Beams and Bars by Lagrange's Equations of Motions	Seiro MARUGAMI	37
8. A Study on Quantitative Evaluation of Distress on Concrete Surface Makoto ICHITSUBO, Kazuo TAKEMURA, Takashi YAMAGUCHI, Hiroaki MARUOKA and Hiroshi YAMANE		41
9. A Fundamental Study of Computer System for Surveying Surface Distress Makoto ICHITSUBO, Kazuo TAKEMURA, Takashi YAMAGUCHI, Hiroshi YAMANE and Hiroaki MARUOKA		47
10. The Consideration on the Liquefaction of Hiroshima Prefect. in Geiyo Earthquake (2001) Mitsumasa NISHIMURA, Katsuaki MONZEN, Tomoteru ARAKAWA and Yasuo HAGA		53
11. Deformation of Reinforced Concrete Building during the 2001 Geiyo Earthquake Katuaki MONZEN, Yuuya HIDANI and Taishi HUZIKAWA		63
Research Activities in 2001		69