

観測棧橋のない海域で波浪観測を可能とする 可搬式多点計測システムの開発

瀬戸口喜祥* ・ 浅野 敏之** ・ 西 隆 一 郎***
佐 藤 道 郎**** ・ 中 村 和 夫***** ・ 神 田 信 之*****

1. 研究の目的と意義

わが国の海岸工学研究は、ともすればマイクロ・メソスケールの現象の解明に偏りがちで、平面的に大きな広がりを持った現地波浪や海浜流の観測は、70年代後半のNERCプロジェクト以来あまり行われて来なかった。この理由の1つとして、現地観測に多大な費用と労力を要することが挙げられる。

筆者らは、観測棧橋のない海域で現地波浪を機動的に観測するための、可搬式多点計測システムの開発を行っている。海底面に設置するだけでデータ収録まで完了する装置であること、複数の観測点での同時データの記録と回収を計測ユニットを開けることなく完了することが開発の主眼である。これによって、電源ケーブル・信号ケーブルを引き回すことによる電氣的・物理的障害から解放され、労力も節減できるために、広範囲にまたがる多点の同時観測が可能となる。

同種の可搬式の波浪観測装置は市販のものもあるが、同じ研究機関に所属する海岸工学の研究者と電気技術者が協力して開発することの意義は、研究者サイドの現地観測の要望が開発サイドに直ちに反映されることにある。その他の利点として、日進月歩で性能向上がなされる電子機器を取り入れて部品の更新が容易にできること、安価で多数のユニットの製作が可能であること、技術・ノウハウの集積などが挙げられる。

平成7年度から科学研究費の補助を得て開始したこのプロジェクトも、ごく一部の未完成部分を残し完成品を組み立てることができた。また取得した水位・流速データの精度の検討も行ったので以下に報告する。

2. 可搬式多点波浪計測システムの概要

(1) 全体システムの概要

可搬式多点波浪観測システム (Multi-station Data

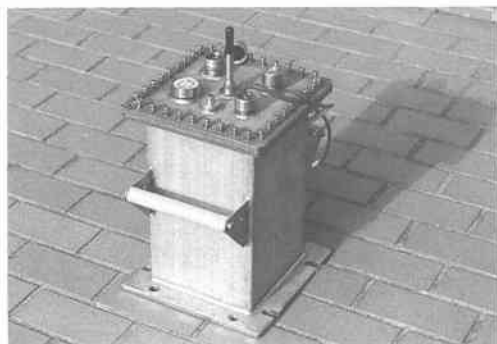


写真-1 MDAS-DLU

Acquisition System; 以下 MDAS と呼ぶ) は、水圧式波高計と電磁流速計から成る計測ユニット、多チャンネルの通信分岐ユニット、ノートパソコンに収められた制御ユニットから構成される。全体システムの構成図を図-1に示す。計測ユニットは平面的な波浪場・流速場を測得するために全部で12個製作することにした。ただし、現時点では半分にあたる6個のユニットについては流速計を取り付けず、水位データの取得のみとなっている。

(2) 計測ユニットの概要

計測装置 (Data Logging Unit; MDAS-DLU) は、水圧式波高計と電磁流速計から成るセンサー部・電源部・データ制御・記録部を一体化した194×194×374 mmの筐体である (写真-1)。筐体はステンレス製 (本体部分 SUS 304, 上蓋部 SUS 316) で、耐圧・水密性のものである。内部の構成を図-2に示す。

水位変動測定には、絶対圧半導体圧力センサー (IC Sensors 社, 型式 154-50 A) を採用した。このセンサーはシリコンオイル封入 SUS ダイアフラム受圧型で応答性に大変優れ、センサーそのものの分解能は無限に近いものとされている。センサーの仕様は 50 psi (100 mV) で、ノイズレベル 2 μV, 精度は full scale に対し ±0.25% である。水位計からの出力信号は $\Sigma-A$ 変換方式で 16 ビットデータ (216=65536) に変換される。波浪ならびに異常潮位による水圧が加わることを考慮して、最大設置水深を約 15 m とする。

流速計センサーは東京計測 (株) に製作を依頼した 2 次

* 学生会員 工修 鹿児島大学大学院博士後期課程
** 正 会 員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科
*** 正 会 員 工修 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科
**** 正 会 員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
***** 正 会 員 鹿児島大学技官 工学部海洋土木工学科
***** 東京計測 (株)

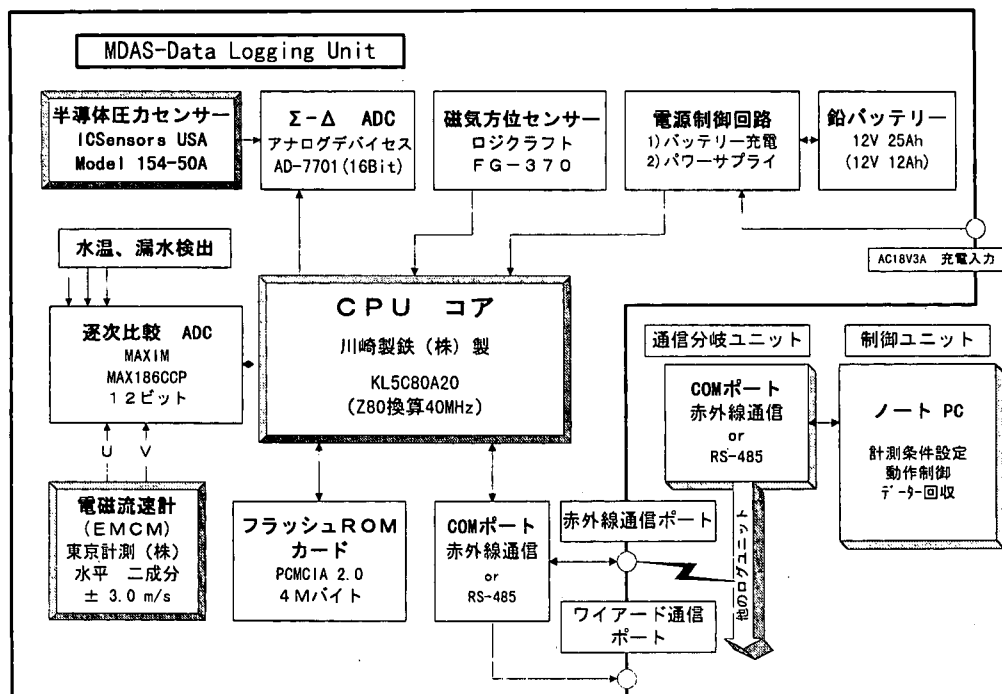


図-1 Multi-station Data Acquisition System (MDAS) の構成

元電磁流速計を採用した。測定範囲 ± 3.0 m/s (± 1.5 V)、ノイズレベル 5 mm/s、応答速度 50 ms である。流速計からの出力信号については逐次比較方式で 12 ビットデータに AD 変換される。AD 変換後の論理分解能は片側測定範囲に 1500 カウントが割り当てられるので 1 カウントは 2 mm/s となる。内蔵のロジクラフト社製の磁気コンパス記録から取得した $u-v$ データの方位補正がなされる。方位測定精度は校正後 $\pm 1^\circ$ で、AD 変換の分解能は $360^\circ/1440$ である。

データの記録には PCMCIA フラッシュROM カード (4 M バイト) を採用した。このメモリーは一度書き込んだデータはバッテリーのパワーが切れても保存され、従来の紫外線消去型 EP-ROM と異なり、信号を送るだけで消去できるので装置を開ける必要がない。なお、こうしたメモリーカードは最近の性能向上が著しい分野の 1 つであって、2 年半前の設計開始時点に PCMCIA タイプのフラッシュROM カードが 2 M バイトで定価 3 万 5 千円程度で新製品として市販されたものが、97 年 5 月時点では 40 M バイトと容量が 20 倍に増えて定価 10 万円で購入できる。こうした部品能力の向上をシステムに直に取り込むことも、大学がこうした開発を行う大きな利点の 1 つである。

メモリー管理や通信を行う CPU は、処理能力の早さや低電力消費の点から川崎製鉄(株)製の KL 80 C 20 A を用いた。この CPU は多重割り込み制御が可能でデー

タ通信の面から使い勝手が良いものである。バッテリーはシール型鉛電池を採用した。水位計と流速計搭載時には電源容量は 12 V で 25 Ah、水位計のみ搭載時には 12 Ah である。このバッテリーには観測ユニットの蓋を開けずに、専用端子を使って 16 V、3 A の交流入力によって充電される。1 回の充電で本ユニットは連続サンプリングで約 3.5 日間稼働できる。設定したスケジュールでデータ収録を行う場合、1 日の稼働率を 50% とすると、1 週間程度は海底に設置したままで使用できる。将来、リチウムイオン電池に取り替えれば、稼働時間を数倍程度延長させることと軽量化が可能となろう。

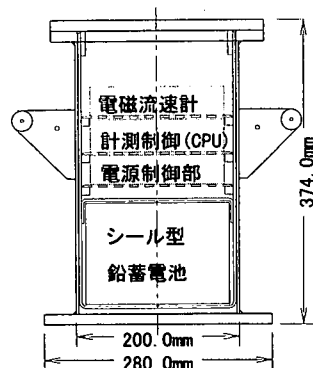


図-2 MDAS-DLU の寸法と内部構成

(3) 多チャンネル通信分岐ユニットの概要

計測ユニットを観測ポイントに投入する前に、オンライン通信でサンプリング繰り返し時間、サンプリング回数、サンプリング間隔のスケジュールテーブルを書き込む。次いで、水位計のゼロ水深データと電磁流速計のゼロ流速データを初期値として収録する。その後データ収録開始までの時間を計測ユニットに書き込むと同時に、計測ユニットのCPUボード上のクロックカウンターによってパルスの計数を開始する。こうした指令は多チャンネル通信分岐ユニットによって複数台の計測ユニットに一斉に送り込まれる。これで計測準備が完了し、計測ユニットは所定の観測位置にセットされる。

一連の観測が終了すると計測ユニットを回収し、再びオンライン状態で一斉に停止信号を与える。それぞれの計測ユニットのカウンター値を処理することによって、各ステーション間の基準時間の相対誤差を ± 0.5 サンプリング間隔以内(現設定では ± 25 ms以内)で同期をとった時間合わせができる。すなわち、ある海域の水位・流速・流向をほとんど同時刻の情報として収集できることになり、この点が市販の機器に見られない本装置の特徴の1つである。

データの回収は光通信モジュールによる方法と、調整・非常時の際の有線通信(RS-485)の2通りで行う。現地では漏水・塩害・砂の混入などのトラブルが考えられ、物理的に非接触型の光通信モジュールが威力を発揮する。システムには赤外線通信ポートIrDA, Ver. 1.0を使用する。データ転送速度は115 kbit/sで、4 Mのデータを約13分で転送する。これにより計測装置の蓋を開けることなく、赤外線リンクでデータ収集のスケジュール管理やデータの回収ができる。なお、光通信モジュールの技術は日進月歩であり、最近ではIrDA, Ver. 1.1のものが4 Mbit/sの転送速度で製品化され市場に出回っている。こうした新技術の導入によって大量データを短時間に回収処理することが、今後、中期的に計測システムの改良を考える際のポイントとなろう。

(4) 制御ユニットの概要

前項の通信分岐ユニットで述べた、データ収録開始・終了時刻、サンプリング間隔などの設定にあたっては、すべてノートパソコンをターミナルとして使用する。ノイズフィルターをかぶせるなどのデータの後処理、スペクトル・波別解析などの解析プログラムは研究室でプログラムをほぼ整備し終えている。データの前には、機械番号・測定年月日・場所・サンプリング間隔などの表題をヘッダーとして入力するが、こうした細部の記述については研究者の要請を反映してデフォルトでない使い勝手の良い設定にできることが特徴である。

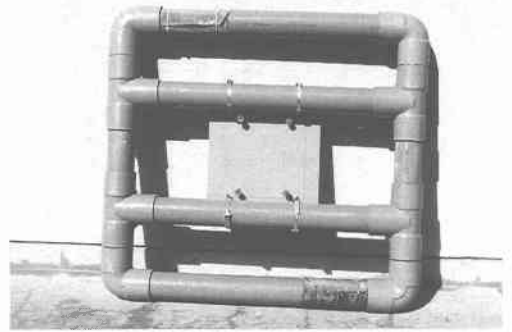


写真-2 計測ユニットの取り付け架台

3. 室内実験及び現地観測の概要

本装置の基本的な動作確認および取得データの精度の検討は鹿児島大学工学部海洋土木工学科の平面水槽(長さ26.7 m×幅14 m×深さ1.2 m)で行い、現地観測は東シナ海に面する吹上浜で行った。本研究室では現地波浪観測に関して20年近くの実績を有するものの、現地においては細部にわたる機材の準備・調整が必要なことや、実際に作業にあたる学生諸君に何度かの訓練を積ませる必要もあって、現時点では本格的な大規模観測は実施していない。

現地観測は2~3 mの潮差を利用して、干潮時にMDAS計測ユニットを設置し、地形測量を行った後、満潮時まで待機し波浪と流れの計測を行った。計測ユニットが自重により海底の砂地盤に沈んだり、波によって洗掘を受けて傾いたりすることを防ぐため、写真-2に示すような塩化ビニルパイプで組み立てられた筏式の取り付け台に設置した。このパイプは空洞であって軽量で運びやすく、いったん海底面に設置した後は内部に注水して自重を増すように工夫されている。96年10月8日に吹上浜で行った現地観測では、有義波高で41 cm、有義波周期4.4 s程度の穏やかな波であったが、この範囲では架台に問題は生じなかった。高波浪時にも使用できるかについては検討の余地がある。

4. 取得水位変動データの精度の検討

水圧変動のスペクトル $S_p(f)$ は表面波のスペクトル $S_\eta(f)$ と次式で結ばれる。

$$S_\eta(f) = \frac{1}{[K(f)]^2} S_p(f) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$K(f)$ は伝達関数で、微小振幅波理論によれば

$$K(f) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに h は水深、 z は水圧センサーの水面からの位置である。応答関数 $1/K(f)$ は高周波数領域ではき

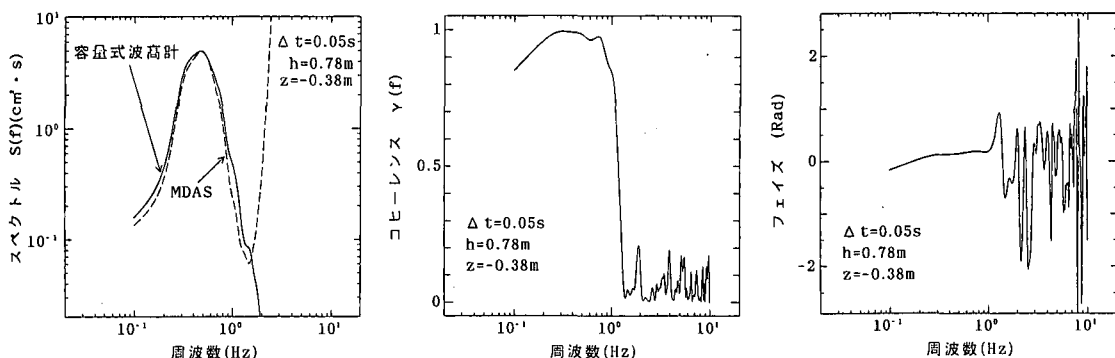


図-3 MDAS と容量式波高計で取得された水位変動波形のスペクトル、コヒーレンス、フェイズ（平面水槽実験）

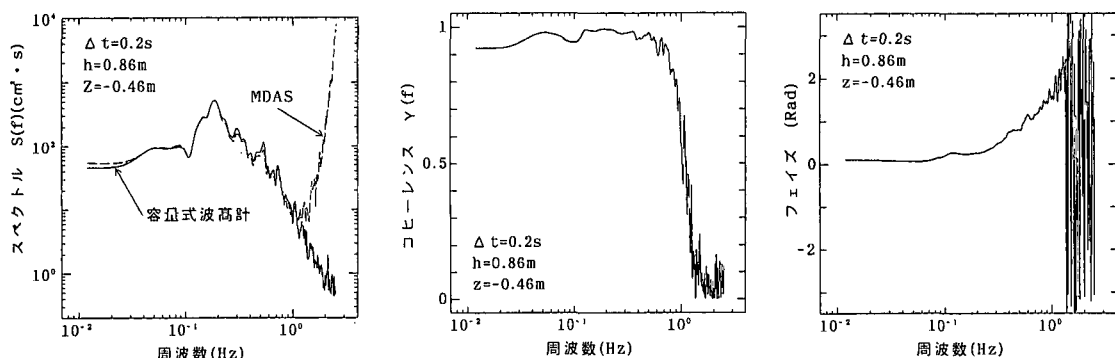


図-4 MDAS と容量式波高計で取得された水位変動波形のスペクトル、コヒーレンス、フェイズ（吹上浜）

わめて大きな値となり、水圧式波高計が原理的に水深に比して波長の短い波を正確に測定できないことを示している。

図-3 は平面水槽で測定された MDAS の水圧記録から換算された表面波のスペクトルと、同地点に設置された容量式波高計から得られた表面波のスペクトルを比較したものである。このときの水深 $h=78$ cm、水圧センサーの高さ $h+z=40$ cm である。サンプリングタイムは 0.05 s である。図中には両者の記録のコヒーレンス、フェイズも示した。MDAS から得られたスペクトルは上述の応答関数の特性上、高周波数領域できわめて大きな値となるが、波のエネルギーの大部分が集中している周波数領域（約 0.2 Hz～ 1.0 Hz）にはこの影響は見あらず、両者は良く一致している。この周波数領域ではコヒーレンスが 1 に近く、またフェイズはほぼ 0 となっている。

図-4 は吹上浜で得られた現地観測データについて同様な考察を行ったものである。このときの測定点の水深は 86 cm であって、MDAS は砕波帯の中に設置されていた。図-3 同様、容量式波高計のデータとコヒーレンスが 1 に近い周波数領域においては（このときフェイズもほぼ 0 となる）、パワースペクトルもほぼ一致しており、しかもその領域に波のエネルギーの大部分が集中していることがわかる。

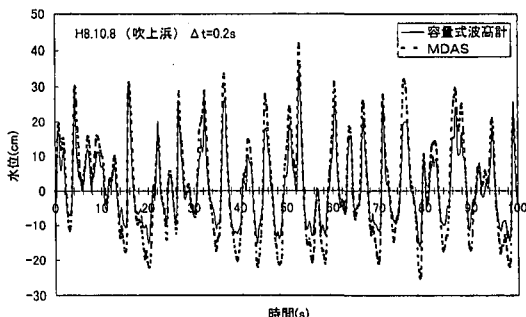


図-5 水位変動時系列の比較

図-5 は図-4 と同じ記録に対して表面水位変動の時系列の比較を行ったものである。ただし、MDAS の水圧変動記録を水位変動記録に変換する際には、(2) 式の伝達関数中の波数 k は水圧波形の有義波周期に対応する波数で与えた。水圧波形から水位変動波形に変換するには厳密にはいくつかの補正を行う必要がある。このデータは砕波帯内で測定されたものであるが、水圧式波高計は砕波帯の尖鋭な波形についても容量式波高計のデータと良好に一致することがわかる。

本研究の最終的な目的は現地観測により沿岸域の動力学を明らかにする事にあるが、その際には浅海表面波が

対象であり、深い海域においては長周期波のみが沿岸域の動力学に関与する。したがって、今回開発した MDAS の水圧式波高計は、本研究を行う上で、実用上十分な精度でデータを取得することができると言えよう。

5. 取得水粒子速度データの精度の検討

本節では、異なる 2 つの物理量データの測定精度を検討するため、水圧式波高計で得られた水位の時系列データを数値フィルターを用いて水粒子速度の時系列データに変換し、これを電磁流速計によって得られた同時刻の水粒子速度の時系列データと比較検討する。

水位変動 η と水平方向流速 u の関係は、微小振幅波理論によれば次式で結ばれる。

$$u = 2\pi f \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \eta \dots\dots\dots (3)$$

従って、 u と圧力変動 $p^* = \Delta p / \rho g$ 間の応答関数 $R(f)$ は (2), (3) 式より

$$R(f) = n_p 2\pi f \frac{1}{\tanh kh} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに n_p は補正係数であるが、ここでは $n_p = 1.0$ とした。線形応答系を仮定すると水粒子速度の時系列は $u(t)$ は、圧力変動の時系列 $p^*(t)$ から次式の畳み込み積分によって計算される。

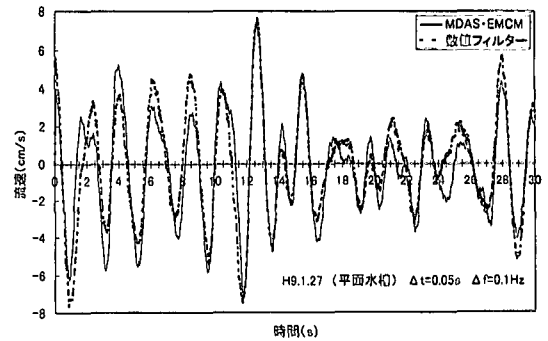
$$u(t) \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) p^*(t-\tau) d\tau \approx \sum_{n=-N}^{n=N} a_n p^*_{t-n} \dots\dots\dots (5)$$

a_n は応答関数 $R(f)$ のフーリエ・コサイン変換で求められる。

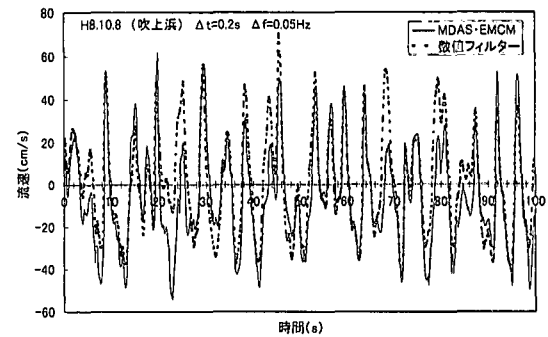
$$\begin{aligned} a_n &= 2 \int_0^{1/(2\Delta t)} R(f) \cos(2\pi f n \Delta t) df \\ &\approx 2 \sum_{m=0}^M R(m\Delta f) \cos(2\pi m \Delta f n \Delta t) \Delta f \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

まず、本学科の平面水槽内で測定された結果を用いて検討を行った。実験は有義波周期 $T_{1/3} = 2.0$ s の不規則波を用いて行われた。MDAS の圧力センサーの位置は水底面から 34 cm の高さにあり、電磁流速計 (EMCM) のセンサー部はそれより 10 cm 程度高い。両者の鉛直位置の違いについては補正した。図-6(a) に不規則波に対する結果を示す。すべての時間領域を通じて一方が他方より大きいという結果は出ていない。このときの MDAS の設置点が砕波帯外にあり、波の非線形性が卓越する領域ではない。両者は良好に一致していると言える。

次いで、吹上浜で観測された現地データを用いて検討を行った。設置点は砕波帯の中にある。両者の比較を図-6(b) に示す。岸向き流速については、水圧波形から数値フィルターを用いて岸沖方向の水粒子速度 u に変換した結果の方が、電磁流速計で水粒子速度を測定した結果よりやや大きな結果を生じている。一方、沖向き流速は



(a) 平面水槽実験



(b) 吹上浜における現地実験

図-6 MDAS の電磁流速計から直接測定された水粒子速度の時系列と、水位変動から数値フィルターを通じて変換された水粒子速度の時系列の比較

電磁流速計の方が大きく、設置点で戻り流れが生じていた可能性がある。ここでは補正係数 n_p を 1.0 としており、砕波帯で非線形性の大きな波に対する数値フィルター法の限界について検討する必要がある。また、現地の風波は多方向から成り、波が直角に入射することを前提として水位変動から水粒子速度波形を求めたことも、誤差要因の一つと考えられる。

6. むすびに

今回開発した可搬式多点計測システムは、当初目標とした機能をほぼ満足させる形で完成することができた。取得データの精度の検討も行ったが、さらに詳細な検討を行う余地が残されている。今後は沿岸域の波浪場・流速場を広範囲にわたって高精度で測定できるよう、システムの向上を図る必要がある。

最後に、電子回路の開発に L テックの福満氏にご協力を頂いたこと、現地観測には鹿児島大学海洋土木工学科海工学研究グループの学生諸君に協力頂いたことを付記し、謝意を表す。この研究の実施にあたっては、文部省科学研究費 (基盤研究 (A) (2)) の補助を得たことを付記する。