

# 気象の観測

## Meteorological Observations

住 明 正\*

Akimasa Sumi

### 1. はじめに—気象の観測の独自性— —気象庁の観測と大学の観測—

地球物理学が対象とする自然現象の観測では、物理実験などと異なり人間の力で現象を再現することが出来ないために、観測網を張って現象が起きるのを待つという、いわば、「待ち」の観測という側面がある。そのため、観測を行おうとすると、水平的な範囲は、出来る限り広く、時間的には、出来る限り長期間観測することが最も望ましいという事になる。また、観測項目も「何が起きるか解らないから出来る限り多くの項目を観測する」ということになる。このような、広域・長期に観測を継続することをモニタリング (monitoring) と呼んでいる。また、このような観測を業務として行う政府機関が存在する。そこで、このような政府機関として行われている観測と研究者が研究的観点から行われている観測が存在することに注意しておく必要がある。このような地球物理学観測全般については、「地球物理概論」(小嶋編, 1991)、或いは、岩波講座「地球惑星科学」の「地球の観測」などを参照して貰いたい。

### 2. 地上での観測

気象の観測として馴染みが深いのは、小学校の校庭にあった白い百葉箱であろう。地表付近の大気の状態は、日射などにより大きく変化する。そこで、ある水平スケールを代表する観測値を得るために、日射の効果避け、通風の良い条件で観測するのである。

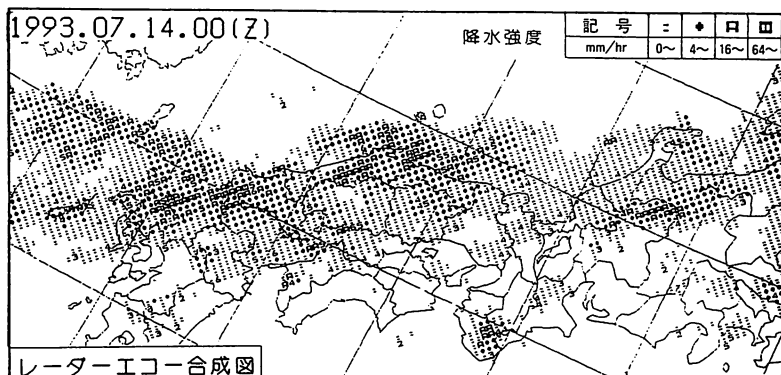
このような地上気象観測では、気圧・気温・湿度・風・降水・降雪・視程・積雪・天気・日照、並びに、蒸発・日射などが観測されている。観測には、気象台・測候所の露場で行われる観測と、アメダスなどに代表

される自記観測装置による観測に分けられる。

このような伝統的な測器による観測の他に、電磁波・音波・光などを用いた地上からのリモートセンシングによる観測が広く用いられるようになった。その代表例は、マイクロ波を用いた気象レーダーによる降雨観測である。レーダーは、radio detection and ranging の略語で、パラボラアンテナからビーム状の電波(この場合はマイクロ波、普通、気象用のレーダーでは、波長3 cm, 5 cm, 10cmの電波が用いられている)を放射し、降水粒子(雨滴や雪片など)による後方散乱を測定し、降水域と降水強度を測定するのである。この時に、反射電波のドップラーシフトを測定できるようなレーダーが、ドップラーレーダーと呼ばれ、降水粒子の視線方向の移動速度が測定できることになる。この他、偏波を測定する装置を付ければ、降水粒子の形状に関する情報を得ることが出来る。このようなレーダーは、広く日本を覆うように北は北海道から南は沖縄まで全国各地の気象台・測候所に設置して在る。そして、このような各地のレーダーデータを合成して、日本全域を覆うレーダー合成図を作成している(図-1)。しかしながら、これらのレーダーデータから降雨の絶対量を求めることはそれ程簡単ではなく、現在の気象庁では、地上での降水量によりレーダーデータを較正して雨量としている。

通常の気象レーダーは、降水粒子に伴う後方散乱を計測しているが、その他の物体(虫や密度の揺らぎ)からの後方散乱を受けることがある。大気中に存在する乱流に伴う密度の揺らぎからの後方散乱のドップラーシフトを測定し、乱流層が大気の流れと同じに移動していると仮定して大気の風速を測定しようとする観測装置が、ウインドプロファイラーである。視線方向の速度しか得られないので、通常は、独立した3方向にビームを放射し、これらを用いて風速の3成分を求めている。これは、もともと成層圏・中間圏の乱流観測を目的として作られたMSTレーダーの成果から対流

\* 東京大学気候システム研究センター長・教授  
〒153-0041 東京都目黒区駒場4-6-1



(注) 観測データをデジタル化して合成して得られる。表示について降水強度の単位を用いている。降水強度を記号で表わしている。色の薄い記号が、0～4 mm/hr、そして順々に、4～16mm/hr、16～64mm/hr、64mm/hr以上と階層表示してある。

※図中の実線は、高度3000mでの観測範囲を示す。完全な円形でないのは、障害物などにより観測できないことを示している。

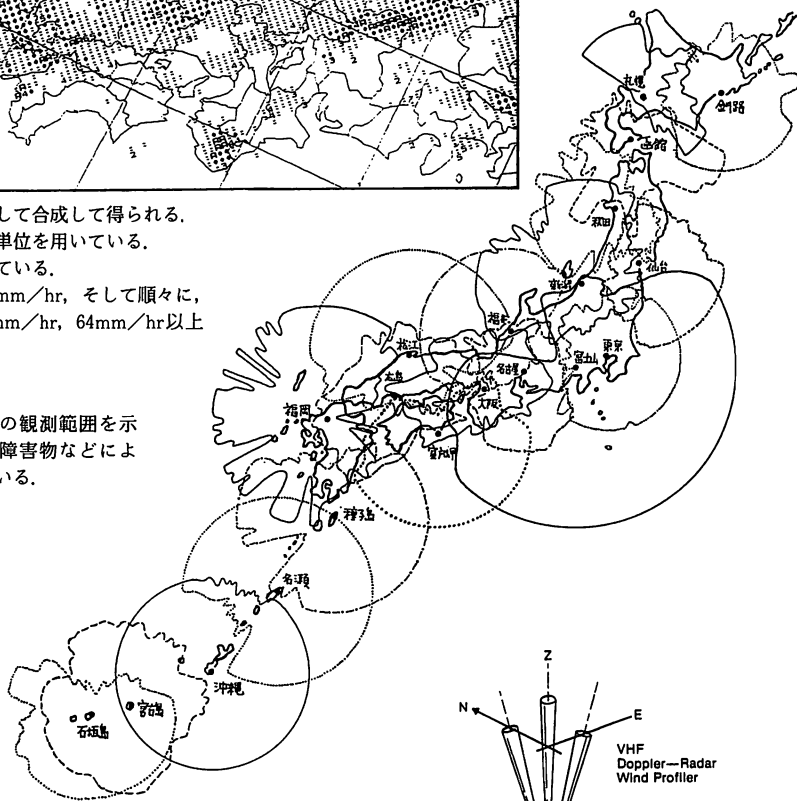


図-1 気象庁のレーダー観測網

圏用に開発された測定器である。日本では、信楽に京都大学のMUレーダーがある。これは、アンテナの大きさが直径100m程度の野球場程度の大きさである。これらの観測の特徴は、ビームの広がりも考えても観測点の直上の半径50km程度の風が測定できることになる(図-2)。通常何回かの測定を平均してS/Nを上げているが、ウィンドプロファイラーでは、対流圏の風が1時間毎に得られている。また、普通の観測ではなかなか計測が困難な上昇流が直接測定できるのも利点の一つである。また、音波の伝搬速度が温度の関数であることを利用したRASS (Radio Acoustic Sounding System) と呼ばれる測定装置もあり、これらを組み合わせた次世代の気象観測システムが考えられている。

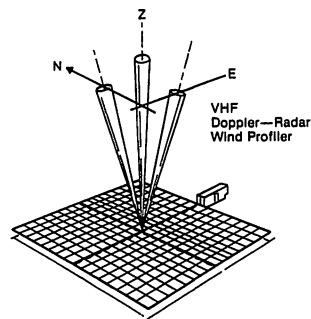


図-2 ウィンドプロファイラーの模式図。鉛直、東向き、北向きに電波を放射し、散乱波を受信して、風の3成分を求める

### 3. 高層観測

地球大気の3次元構造が強く意識されてきたのは、航空機の登場からである。航空機の安全な運行のために上空の大気の状態が必要になってきたわけである。

上層の大気の状態を測るためには、様々な工夫が行われたが、現在、主流となっているのは、風船に測定器を付け、放球し、温度・湿度のデータを電波で地上に伝える一方、風船の方位角・仰角・距離を電波

で計測し、風船の位置の差から風を求めるラジオゾンデである（普通は、ラジオゾンデで温度・湿度と風の両方を測定できるゾンデを指しているが、厳密には、温度・湿度を計測するゾンデをラジオゾンデ、風を測定するのをレーウインゾンデと呼ぶ）。

風船を放球すると、約分速300メートル程度の上昇速度で上空に昇って行く。おおよそ、風船は、30km程度まで上昇するので、単純に計算すると100分かかることになる。実際は高度が高くなるにつれて上昇速度が早くなるのでそれ程長くはかからないが、上空で風船が破裂した後、落下傘を付けて測定器が落下してくるので観測時間はおおよそ、1時間半から2時間程度かかることになる。また、中緯度のように風が強いと、ゾンデは上昇するに連れて風下に大きく流される事になる。それ故に、ラジオゾンデ観測は、その場(in-situ)観測の代表例のように言われるが、高度方向には同じ位置のデータを取得しているわけでは無いことに注意する必要がある。また、出来る限り測定器を回収するべく努力をしているが、基本的には、ラジオゾンデ観測は使い捨て型の観測であり、経費の点からも環境汚染の観点からも見直しが行われている。この他、風船を放球し、目視により方位角・仰角を測定し、上昇速度を仮定して、風向・風速を求めるパイロットバルーンと呼ばれる観測も行われている。これらの高層観測の多くはルーチ的に定時に(00UTC, 12UTC)各国の气象台・測候所で行われ、相互に通報され、天気予報に、実況監視に用いられている(図-3)。

この風船の位置を地上から計測する代わりに、地球上での位置決めのために広く用いられているGPS信号を用いようとするのがGPSゾンデである。これは、昔、オメガ電波が使用可能であった時に用いられていたオメガゾンデの後継機である。

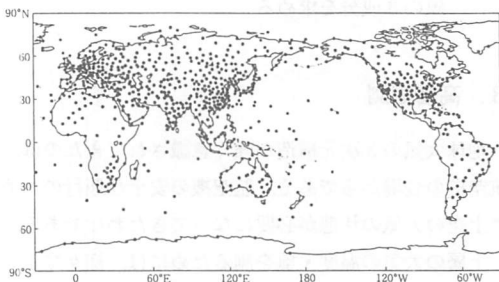


図-3 全世界中の高層観測点の分布。多くの所では、1日2回(00GMTと12GMT)観測が行われ通報されている

この他に重要な観測データは、航空機による観測である。商用航空機には、風向・風速計、温度計がついており、また、航空路の所々に通報地点が定義されており、観測データが通報されてくる。また、これらの飛行機観測を自動化した機器も開発されている。これらのデータを用いると、飛行場を離陸してから目的地の空港に着陸するまで6分毎にデータが入ってくる。これらのデータが使用可能であれば、東京や札幌、福岡の高層観測は必要がない、という話もあるが、これらの航空機観測は、台風などの暴風雨の時に行われないのでいざというときの役に立たないことになる。

#### 4. 宇宙からの観測

地球上には、広大な海や人の住むのに不適当な砂漠や山岳などが存在し、地球上の全ての所でラジオゾンデ観測を行うことは不可能である。そこで、このような観測が非常に困難なデータの空白域での観測をどうするかが、長い間の懸案事項であった。

このような問題を解消する一つの方向が、衛星に搭載した観測器による”宇宙からの観測”である。この宇宙からの観測では、可視や赤外、マイクロ波などの様々な波長帯で地表及び地球大気による地球放射を観測する。これらの観測データの利用法としては、データを画像として使用する方法と、何らかの手法を通して物理量に変換して使用する方法がある。

画像として衛星データを用いる例は、毎日のテレビの天気予報番組で放映されている静止気象衛星「ひまわり」の画像の例が分かりやすい(図-4)。「ひまわり」

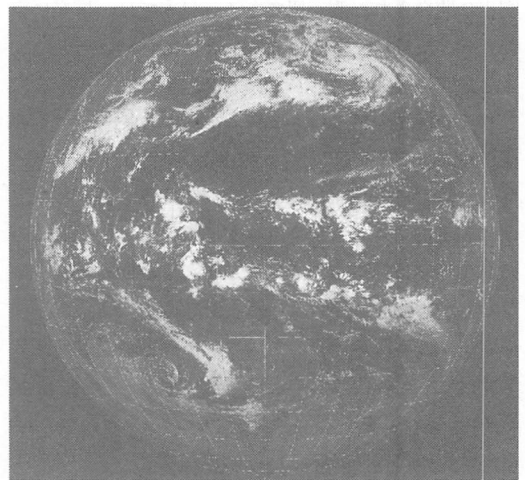


図-4 静止気象衛星「ひまわり」の赤外画像。  
図-1のレーダー合成図と日時は対応している

の雲画像の利用の根拠には、①悪天候や降水・降雪などが低気圧・前線や台風など気象擾乱に伴うこと、また、②このような気象擾乱には特有の雲のパターンが存在すること、そして、③このような雲のパターンは気象衛星の雲画像から検出できることなどである。

赤外放射計やマイクロ波放射計の放射データから大気や地表面の状態を求めることを、一般に、リモートセンシングと呼んでいる。この原理は以下のように書ける。

一般的に、地表面の状態や大気の状態が決まれば、放射伝達方程式と呼ばれる方程式を解いて一意に放射量が決まる（この様な問題は、解が一意に決まるので順問題と呼ばれている）。ところが、この問題を逆に解いて地球大気の状態や地表面の状態を求めようと言うのがリモートセンシングで用いられる手法である（これは逆問題と呼ばれている）。この場合には、必ずしも解が一意である保証がないなどの問題があり、正しい解を得るのは必ずしも容易ではない（図-5）。

衛星データから正しい物理量を求めるためには、逆問題を解くアルゴリズムが必要になる。先に述べたように、物理的に逆問題を解いて正解が得られればそれに越したことはないのであるが、実際はなかなか困難である。そこで、実際のデータと衛星データを用いて統計的な関係式を作ったりしてアルゴリズムを作成したりしている。とにかく、衛星データは、測定器自体が劣化して値が劣化するので、測定自体の校正自体にも問題がある。そのために、地上で客観的に物理量を検証する観測点が不可欠となる（日本の観測隊によるオゾンゾンデの発表を待って、衛星データによるオゾンホール発表がされたのはこの良い例である。以前から衛星データによればオゾンの減少が示されていたが、これが測定器の劣化によるものか、実際の場合か

が判断できなかったと言われている）。

以上のリモートセンシングは、地表面や地球大気からの熱放射を受信して行うので、passive（受動的）なりモートセンシングと呼ばれている。それに対し、衛星に自ら電波や光を放射する測定器を積み込み計測する手法をactive（能動的）な観測と呼んでいる。97年11月に種子島から日本のH2ロケットで打ち上げられたTRMM衛星は、日米共同の衛星で、世界で始めて降雨レーダーを搭載しており、熱帯域の降雨を観測しようとしている。

## 5. データ処理

この観測手法では、広い地域に散在した観測データを集めて自然現象のなんたるかを解明しようとする。そのためには、このようなデータを用いて自然現象を解析しようとする方法が必要となる。

そのような手法として、気象学で開発されてきた手法が、4次元データ同化作用（4-dimensional data assimilation）、あるいは、システムという手法である。この手法の要点は、様々なデータを数値モデルを用いて総合的に使用し、現象を解析しようとすることである（住，1991）。

4次元データ同化作用の必要性が考えられたのは、1960年代に全世界の気象関係者を巻き込んで行われたGARP（Global Atmosphere Research Programme）という研究計画を実行する過程である。この計画では、数値天気予報の精度向上のために全球的な観測システムを構築することを目指していた。従来の気象の観測は、主として、気象機関によって維持されてきた高層観測が主であったが、これでは、熱帯域、南半球など広大な地域が観測がない領域として取り残されてしまう。この観測のない領域をなんとしても観測することが当時の大きな重点課題であった。その様なときに登場したのが、人工衛星による宇宙からの観測であった。宇宙からの観測は、リモートセンシングであるとはいえ、全球を同一の測器でくまなく覆うことが出来る。少なくとも、衛星データが有効に使用できるならば、観測がない領域の問題は無くなることになる。しかしながら、衛星データは別の問題を投げかけた。普通、気象学では、太陽同期の極軌道衛星を用いることが多い。この衛星軌道であると、各地域での地方時は等しくなるが、軌道毎に観測時間が異なることになる。気象観測、特に、従来のモニタリングでは、同一時刻の大気場の量を求めることが主であったの

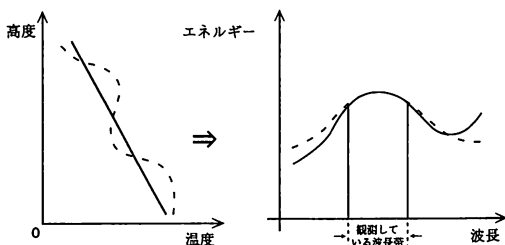


図-5 大気の温度の鉛直分布が異なっても（左：実線の場合と破線の場合）測定している波長帯で放射エネルギーが同じならば、このデータだけでは2つの状態を区別できないことになる

で、観測は全て同一時刻に行われてきた。それ故に、データ処理も観測時間の違いを考慮する必要はなかったのである。

衛星観測は、もう一つの新たな問題を投げかけた。それは、観測の質の違いである。従来の高層観測では、各国によってセンサーが異なるものの（それは、比較検定すれば良く）同じ原則、同じ手法による観測であった。ところが、衛星による観測は、リモートセンシングということもあり、観測する原理、観測された値の意味などが従来の観測と全く異なることになる<sup>(注1)</sup>。これらの質の違った観測を、最適に用いる必要が生じたのである。

以上のことをまとめると、時間・空間の4次元空間の中に、種々の観測が散在していると考えられる。これらを総合して、時刻が一定（例えば、 $t=t_0$ ）の場の値を解析すれば良いことになる。一方、この4次元空間の各点は、力学的・熱力学的な法則によって相互に結びつけられている。天気予報できるといふ事は、初期値問題として、異なる時刻の値が関連していることを意味する。例えば、時間、 $t_0$ でのa点のデータは、時間 $t_1$  ( $>t_0$ )での領域Aの値と関係があるはずである（図-6）。それ故に、数値モデルを用いて正しく時間積分が出来れば、a点のデータは、領域Aの大気の状態を正しく推定できるはずである。一方、時間 $t_1$ でのb点のデータは、時間 $t_0$ での領域Bのデータの結果と考えることが出来る。そこで、領域Bのデータ

(注1) 例えば、ラジオゾンデによる観測は、風船につり下げた温度計が触れる周りの空気塊の温度を測っている。温度計の応答特性にもよるが、一般的には、数10メートルの空気塊の温度を代表していると考えられる。ところが、衛星の放射計は、数キロから数十キロの領域の平均された放射量を観測しているので、そこから導き出される温度も、空間平均された温度となる。

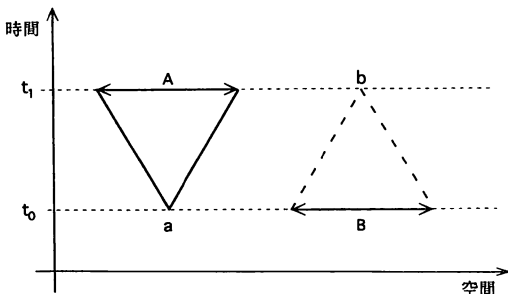


図-6 点aのデータの影響は、時刻 ( $t_1$ ) では、領域Aに及ぶ。また、点bでの状態は、時刻 ( $t_0$ ) での領域Bの状態の結果である

に基づいた数値モデルの予測値を、b点のデータと比較すれば（数値モデルが正しい範囲内で）、領域Bの状態を正しく推定する鍵となる。また、離散的に分布する観測点を用いて空間的にデータを内挿する場合でも、空間的な各点は、様々な力学的・熱力学的な関係式（地衡風の関係式や静力学の平衡式など）を満足していると考えられるので、これらの関係式を拘束条件として解析する必要がある（住, 1991）。

実際のモデルには、現実大気と同様に地衡風調節機能が存在する。そこで、様々なデータをモデルの中に代入して時間積分を行うと、大規模な気象現象に対応するようなモードに寄与する情報だけが取り込まれ、不要な情報は自然に淘汰されることが期待される<sup>(注2)</sup>。同化作用とは、生命体が自分に必要な栄養素を摂取して自分のものとする過程をさすが、4次元データ同化作用とは、4次元空間に散在した各種のデータを、数値モデルが適宜取り込んで統一的な解析を行うことを意味しているのである（図-7）。

さて、モニタリングというのは、長期間継続的に展開された観測網を運用して自然の姿を解明することを目的としている。このようなシステムを長期間、効率よく運用しようとするれば、当然として、組織的な対応が必要となる。このようなモニタリングシステムの代表的な例として、WMO（World Meteorological Organization, 世界気象機関）を中心に各国の気象

(注2) このように書くとは簡単な問題のように思うかも知れないが、このような概念が実現するには、大規模気象現象に関する力学、数値予報に関する力学の理解が発展する必要があった。主として、数値予報関係者30年余の努力の結晶として今日の姿があるのである。

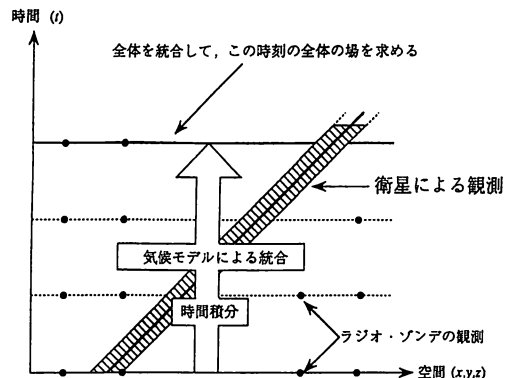


図-7 時空間に散在するデータを統合して解析して行く4次元解析（4次元データアシミレーションとも呼ぶ）の模式図

機関の協力を得て展開されているWWW計画を見てみることにしよう。WWW (World Weather Watch) 計画は、世界に於いて天気予報を効率的に行おうとするシステムである。それは、観測を扱うGOS (Global Observing System), データの集配信を扱うGTS (Global Telecommunication System), そして、処理を扱うGDPS (Global Data Processing System) とに分かれる。

観測を扱うシステムの主要な仕事は、観測点の維持、観測器の更新などである。この様に書くと簡単そうに思われるが、地球の観測では観測点の維持に大きな費用を要することが多い。無駄な観測を省いて効率よく観測を進めるよう不断に研究をすすめる必要がある。観測されたとしてもデータが集められなければ意味がない。また、使いやすい形でデータが整理されていない、宝の持ち腐れになる。日本国内の場合には、主として問題は通信料だけになるが、地球全域を考えると、このデータを集めるシステムというのは決定的に重要な役割を占める。特に、開発途上国や野外観測など通信回線が確保されていないところが大きな問題となる。現在の所、このような観測点からのデータ収集については、通信衛星などを用いたデータの収集が良いと考えられているが、ここでも問題は回線使用料と

いう事になる。最後のデータ処理システムとは、数値モデルを用いた4次元データ同化を行うことである。このような仕事は、気象庁の予報センターで主として行われている(日本の気象庁では、予報部数値予報課で行われている)。このようなデータ処理には、最高速のスーパーコンピューターや、モデル開発、データの処理など膨大な人間が必要となる。

そして、これらの処理され解析された大気場の情報は、数値予報の初期値として、大気の解析値として、予報に解析に多種多様に使われることになる。この段階で重要になるのが、データ配布サービスである。もし、各研究者の要望に応じて、これらのデータが容易に手にはいるようになっていけば、研究は大いに発展することになる。また、計算機に処理しやすいようになった気象場の値は、民間気象への応用という意味でもきわめて重要になる。そこで、これらのデータの外部への配信、あるいは、配布サービスがきわめて重要な機能となる。

我が国では、このようなデータセンター、あるいは、データ配布センターの機能が非常に脆弱である。このようなシステムを維持するには、膨大な人手が必要であるが、このような部分に対する投資を怠ってきたために、現在では、大きな問題となっている。

協賛行事ごあんない

## 第50回化学機械技術講習会

### 「ダイオキシン対策の最前線－見学&講演」

〔主 催〕化学工学会関西支部

〔内 容〕講演11件

〔協 賛〕大阪工研協会、廃棄物学会 等

見学(堺市クリーンセンター東第2工場)

〔日 時〕平成10年5月14日(木)、15日(金)

〔申込先〕〒550 大阪市西区靱本町1-8-4

〔会 場〕大阪府立大学学術交流会館 大会議室  
(堺市学園町1-1, TEL 0722-52-1161)

大阪科学技術センター6F

化学工学会関西支部

TEL 06-441-5531 FAX 06-443-6685