

## 情報可視化手法「平安京ビュー」を用いた 原子カプラント情報の可視化

伊藤貴之\*\* 大島宏之\*\*\* 岡本孝司\*\*\*\*

### Visualization of Nuclear Reactor Information by Information Visualization Technique “HeiankyoView”

Takayuki ITOH Hiroyuki OHSHIMA Koji OKAMOTO

#### 1. はじめに

原子力システムの安全性、信頼性の確保は重要である。原子力システムの安全性、信頼性を保持するためには、原子力システムに備え付けられた数千個の計測情報を監視する必要があるが、この膨大な情報の全貌をリアルタイムに監視することは難しい。また、これらの計測情報には故障や事故の予兆や、トラブルの原因間の複雑な因果関係が潜むことがあり、これらの発見（データマイニング）は非常に有益であると考えられる。

そこで我々は、大規模原子力システムにおける大量の計測情報から、故障や事故の予兆をリアルタイムに検出すること、またトラブルの原因を視覚的に発見すること、などを目標として、平成17年度から19年度にかけて原子力プラント情報の可視化に関する研究事業に取り組んできた。本稿はその概要を紹介するものである。

我々が研究開発を進めてきた可視化システムでは、原子力プラントに関する計測情報およびシミュレーション結果を対象としており、コア可視化技術には階層型データ可視化手法「平安京ビュー」<sup>1)</sup>を適用した。本システムでは原子力プラントの計測結果およびシミュレーション結果を、さまざまな単位を有する数百個から数千個の物理量で構成される時系列データと定義する。このデータに対して本システムでは、位置や単位系に基づいて階層的に物理量をグループ化する。このようにして構築された階層型データを、本システムでは「平安京ビュー」

を用いて一画面に表示する。それと同時に本システムでは、時系列情報の要約となる縦長のウィンドウを設け、ここに物理量の時系列変化の要約情報を表示する手法「今昔物語」を搭載する<sup>2)</sup>。このウィンドウには時刻ごとにボタンが設けてあり、これを押すと「平安京ビュー」は特定の時刻における全物理量を一覧表示する。このような仕組みによって本システムでは、時系列変化の要約情報と、特定時刻における全情報を、対話的に可視化する仕組みを提供する。

本システムの特徴は、物理量を階層型データおよび時系列データとして可視化している点である。理学・工学の多くの事例において、物理量の可視化にはサイエンティフィックビジュアライゼーション手法に基づいた3次元空間での可視化手法（およびそのアニメーション）が採用されている。原子力プラントの可視化においても同様に、3次元空間での可視化手法が多く用いられている<sup>3)4)</sup>。それに対して本システムは、階層型データおよび時系列データのための情報可視化手法を採用することで、その構造的特徴や時間変化を明示的に表現できることが特徴である。また、多次元的な物理量の同時可視化が可能であること、極めて局所的な（または微小な）物理現象を発見しやすい可視化を実現できること、なども特徴としてあげられる。このような情報可視化手法は今までも、システムの安全性や信頼性を確保するための監視やデータマイニングの目的として活用されており、例えば計算機ネットワーク管理<sup>1)</sup>やビジネスプロセス管理<sup>5)</sup>などの分野で応用が進んでいる。しかし我々の知る限り、原子力プラントの計測情報やシミュレーション結果の可視化に情報可視化手法を適用した研究事例はまだ稀であると考えられる。

本稿では、本可視化システムのコア可視化技術である「平安京ビュー」と「今昔物語」を紹介し、可視化結果の具体的な事例とユーザテスト結果を示す。なお本稿の内容は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、お茶の水女子大学が実施した

\* 原稿受付 2011年4月15日

\*\* 正会員 お茶の水女子大学 理学部情報科学科  
(〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1, E-mail : itot@is.ocha.ac.jp)

\*\*\* 正会員 日本原子力研究開発機構(JAEA) 次世代原子力システム研究開発部門

\*\*\*\* 正会員 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻

平成 17～19 年度「原子力システム管理技術の大規模情報可視化に関する研究開発」の成果の一部である。

## 2. 平安京ビュー

日常生活に氾濫する情報の多くは、階層化された構造を持っている。計算機のファイルシステム、企業や大学の組織構造、図書館の書籍の分類、などはその典型的な例であろう。このように階層化された情報の全貌を、計算機のディスプレイで一望できたら、という要求は当然のように起こりえる。「平安京ビュー」は、そのような要求を満たす大規模情報可視化手法として提案されている。

「平安京ビュー」は図 1 に示す通り、階層型データの葉ノードを長方形のアイコンで、枝ノードを長方形の枠で表現し、階層構造を 2 次元の長方形群の入れ子構造で表現し、その全体を一画面に表示することを目標とした手法である。計算機のファイルシステムに例えるなら、葉ノードはファイルに、枝ノードはディレクトリに相当する。企業の組織構造に例えるなら、葉ノードは従業員、枝ノードは部・課・プロジェクトといった団体に相当する。この手法は、階層型データ中の葉ノードと枝ノードの親子関係よりも、階層型データ全体に分布する葉ノード群を全て一画面に表現することに主眼をおいた手法である。

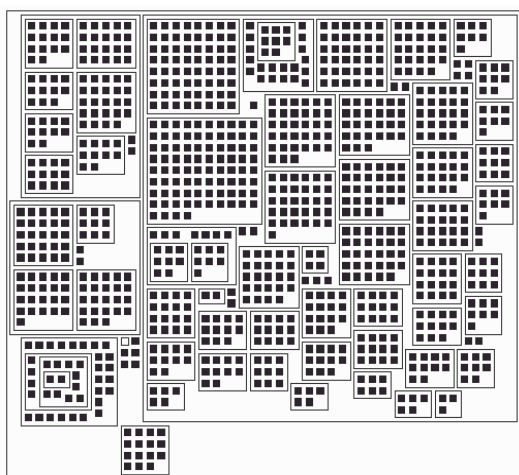


図 1. 「平安京ビュー」による大規模階層型データの可視化の例。

「平安京ビュー」の適用事例は著者らによって既に、非常に広範囲にわたって報告されている。例として、計算機ネットワーク不正侵入履歴、クレジットカード不正利用履歴、薬物実験情報、遺伝子や蛋白質などの生命情報、医療シミュレーション、新聞記事データベース、写真や音楽のコレクション、といった分野での可視化の事例が報告されている。

## 3. 本システムが想定するデータ

本システムでは、ナトリウム冷却炉における計測情報、およびナトリウム冷却炉を模擬したプラントシミュレ-

ーションを採用した。具体的には、炉心を含む原子炉容器、1 次主冷却系、中間熱交換器、2 次主冷却系、そして蒸気タービンを有する水・蒸気系で構成されるプラントを想定し、その計測情報およびシミュレーションデータを採用した。

本システムが採用した計測情報は、実際に稼働する原子力プラントのデータ収録システムから、現実的に計測された温度、圧力、速度などの多種多様な物理量を、時系列データとして出力したものである。

本システムが採用したシミュレーションデータは、日本原子力研究開発機構による MSG-COPD コードというシミュレータによる計算結果である。このシミュレータはモジュール構造を用いており、熱計算や流動計算を含む数種類の機器モジュールを自由に組み合わせてプラントを構成し物理量を計算する。その結果としてこのシミュレータは、プラントを構成する各部位において、温度、圧力、速度などの多種多様な物理量を、時系列データとして出力する。

## 4. 「平安京ビュー」による可視化

原子力プラントに限らず科学技術シミュレーションに関する可視化手法の大半は、その結果を物理空間にマッピングすることで物理量を表現する。しかし本システムでは、あえて物理空間ではなく階層構造としてシミュレーション結果を可視化する。そのメリットについては既発表の論文でも議論した<sup>(3)</sup>通り、多次元的な物理量の同時可視化が可能であること、極めて局所的な（または微小な）物理現象を発見しやすい可視化を実現できること、などにあると考えている。

本システムでは、シミュレーション結果として得られる約 300 個の計測情報を、位置および単位系で階層的にグループ化することで、階層構造を構築した。これらの計測情報を「平安京ビュー」で画面空間に配置し、色と高さをつけることで物理量を表現した。

図 2 は色算出の伝達関数である。ここでは物理量の最小値と最大値、それと安定状態の下限值と上限値を設定し、それとの相対値を入力、色を出力とした関数を用いている。この関数は、物理量が安定状態の範囲内であれば灰色、安定状態の下限值より低ければ緑や青、安定状態の上限値より高ければ黄や赤を与えるものである。

図 3 は高さ算出の伝達関数である。ここでは物理量の直前時刻に対する差分の最小値と最大値を設定し、それとの相対値を入力、高さを出力とした関数を用いている。この関数は、差分の絶対値がゼロであれば高さがゼロ、差分の絶対値が最大であれば高さが最大、となるものである。

図 4 は本システムによる可視化の例である。多数の棒グラフが、長方形の枠で囲まれたブロックを構成しており、同一の位置かつ単位系の計測情報が結集して表示されている。また、安定状態にある物理量には目立たない灰色を割り当てることで、安定状態から外れて注意を要

する物理量だけが目につくようになっている。さらに、直前時刻からの差分が大きいものだけを高く表示することで、突然に物理量が増加したものが目立つよう表示されている。

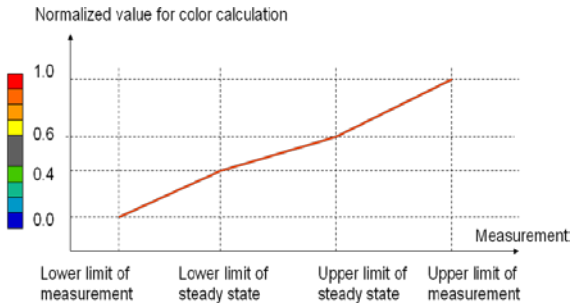


図2 色算出のための伝達関数.

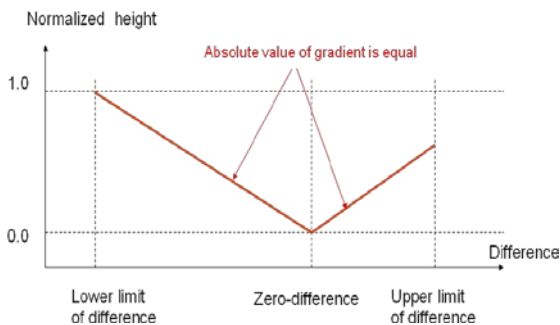


図3 高さ算出のための伝達関数.

用いる。ここで左側の縦長のウィンドウは、物理量の時系列変化の要約情報を示すものである。このウィンドウは縦軸が時刻を表しており、ウィンドウ右側のカラーマップによって物理量の変化を表現する。さらにウィンドウ左側にはボタンが縦に並んでおり、このボタンを1個押すことで特定の時刻を選択できる。このボタンを押すと、右側のウィンドウに表示されている「平安京ビュー」において、選択された時刻における全ての物理量を、4章にて説明した手法で可視化する。

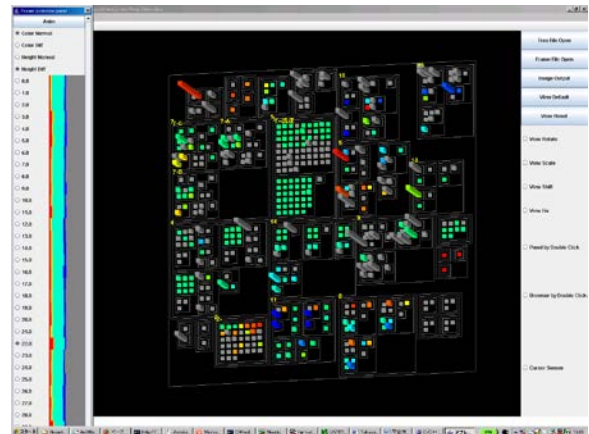


図5 階層構造と時系列変化の同時可視化.

ここで問題となるのは、細長い領域に数百、数千といった大量の物理量の時系列変化を要約表現する手段である。「今昔物語」では、音声情報に用いられている「量子化テーブル」に似た概念を導入して、大量の数値群の分布を、少ない画素数の領域に表現する。音声情報の圧縮技術では、量子化テーブルに予め記録された量子化係数を乗じることで、人間の耳につきやすい重要な周波数領域では大きく量子化し、それ以外の周波数領域では小さく量子化する。この技術によって音声情報は、重要度に依存した情報量で合理的に記録される。それに倣って「今昔物語」では、注目すべき数値（例えば定常値を大きく外れている数値や、時間変化量の大きい数値など）には量子化を大きめに、それ以外の数値には量子化を小さめにすることで、重要度に依存した情報量で可視化を実現する。

ある特定時刻  $t$  における  $n$  個のスカラ値  $f_i(t)$  があるとす。ただし、 $i$  は1から  $n$  までの整数であり、 $f_i(t)$  は区間  $[0,1]$  に正規化されているとする。この  $n$  個のスカラ値を、横  $m$  画素の細長い領域に表現することを考える。このとき「今昔物語」では、 $i$  番目のスカラ値の重要度  $p_i$  を式(1)で算出する。ただし、 $S_1$  および  $S_2$  は正の定数である。

$$p_i = S_1 |f_i(t) - 0.5| + S_2 |f'_i(t)| \dots (1)$$

この重要度  $p_i$  を用いて「今昔物語」では、 $i$  番目のスカラ値の画面上の幅  $w_i$  を、式(2)で算出する。

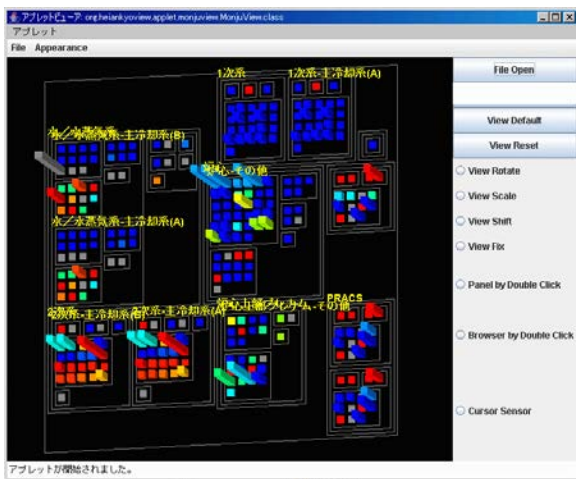


図4 「平安京ビュー」による可視化の例.

以上の方法により、数百個にわたる物理量の全貌を階層構造化された形で概観でき、しかも注意すべき物理量に特に目が届きやすい、という可視化を実現できると考えられる。

## 5. 時系列情報の付加表示「今昔物語」

本システムでは4章で説明した階層構造の可視化に加えて、物理量の時系列変化の要約情報を別ウィンドウにて可視化する手法「今昔物語」<sup>2)</sup>を掲載する。図5に示すとおり「今昔物語」では、2つのウィンドウを同時に

$$w_i = m \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad \dots(2)$$

以上の算出式によって本システムでは、スカラ値が安定状態を外れている（0 または 1 に近い）物理量、またはスカラ値が突然に変化している（微分量の絶対値が大きい）物理量に大きな幅を与え、これらの物理量が強調表現されるような可視化を実現する。

描画の手順は以下のとおりである。まず各々の  $f_i(t)$  の値を区間に分類する。我々の実装では、正規化されたスカラ値を 0.1 間隔で 10 個の区間に分類している。続いて各々の区間について、 $w_i$  の総計を算出すると同時に、図 2 に示した伝達関数を用いて各区間の色を決定する。そして各区間について、所定の順番に左から、 $w_i$  の総計で与えられる幅を塗りつぶす。我々の実装では左から、安定状態を上回るスカラ値（1.0 から 0.6 までの 4 段階）、安定状態を下回るスカラ値（0.4 から 0.0 までの 4 段階）、安定状態のスカラ値（0.6 から 0.4 までの 2 段階）の順に描画している。

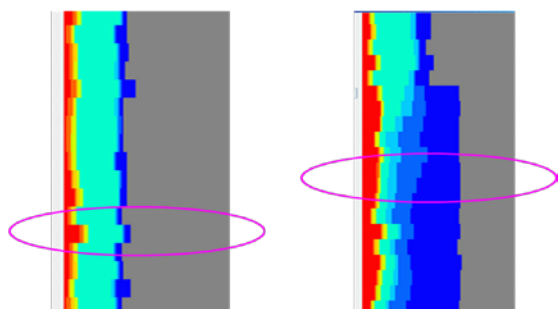


図 6 本システムにおける時系列情報の可視化の例。

「今昔物語」による時系列情報の可視化の例を、図 6 に示す。図 6 (左) では、1 個の物理量が急激に上昇した瞬間に○がつけられている。赤い領域がこの時刻だけ拡大されていることで、それが強調表現されているのがわかる。また図 6 (右) では、非常に多くの物理量が安定状態を下回り始めている過程に○がつけられている。青い領域が段階的に拡大されていることから、それが適切に表現されているのがわかる。

## 6. 可視化例

本システムによる可視化の例を示す。

図 7 (左) は、1 か所の温度が急激に上昇した時刻の前後における時系列表示である。また図 7 (右) は、図 7 (左) にて赤丸で囲んだ時刻における全ての数値を、「平安京ビュー」で可視化した例である。図 7 (右) からわかるように、

この時刻に急激に値が変化した（＝背の高い棒グラフで表現されている）数値は 1 か所だけである。にもかかわらず図 7 (左) では、この時刻に限りカラーマップ中の赤い部分が大きな面積を占めており、ユーザーに注意を促せるようになっている。このようにして本機能による時系列表示では、警告を要する急激かつ局所的な値の変化が発生した時刻を、明確に強調表現できていることがわかる。

図 8 (左) は、トリップ操作を実施した後における時系列表示である。また図 8 (右) は、図 8 (左) にて赤丸で囲んだ時刻における全数値を、「平安京ビュー」で可視化した例である。図 8 (右) からわかるように、トリップ操作から一定の時間が経過しているために、非常に多くの数値が非常に低くなっている（＝青く表示されている）。図 8 (左) をみても、この時刻の少し前から、カラーマップ中の青く塗られた部分の面積が時間とともに増大していることから、低い値を示す計測値の数が時間とともに増えていることがわかる。この時系列表示からも、トリップ操作によって伝搬的に計測値が遷移しているのが視覚的に確認できる。



図 7 時系列情報の表示例(1).

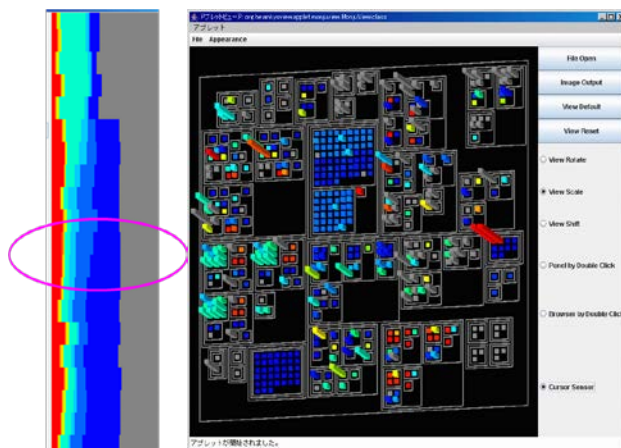


図 8 時系列情報の表示例(2).

## 7. ユーザテスト

本研究の過程において我々は、7 種類の原子力プラン

## 可視化情報学会誌特集・連載記事原稿見本

トデータを用意し、11人の被験者に対して本システムに対する被験者評価を実施した。なお7種類のデータのうち、「データ1」は現実に稼動していたプラントの計測データ、「データ2」および「データ3」は2種類の原子力プラントにおける仮想事故シミュレーション結果、「データ4」から「データ7」は故障の予兆になり得る数値的外乱のシミュレーション結果を示す。また、11人の被験者は可視化の専門家ではあるが、原子力プラントの現場に勤務する者ではない。

被験者評価の手順は以下のとおりである。まず被験者に本システムの操作方法と表示内容を説明させた。続いて、時系列表示ウィンドウから要注意と思われる時刻を発見させ、その時刻に対応するボタンを押させて「平安京ビュー」における表示結果を確認させた。そして、その表示結果が警告に値すると思われる場合には、その時刻を列挙させた。それと同時に、上記の7種類のデータ作成に携わった専門家に、各データにおいて警告に値すると思われる時刻を列挙させた。以上の結果を照合し、専門家が列挙した時刻を、被験者のうち何人が列挙できたか、を集計した。

まず表1に、「データ1」から「データ7」において回答の対象となった時刻数、および専門家が「警告に値する」と回答した時刻数を示す。続いて表2に、専門家が「警告に値する」と回答した各々の時刻について、11人の被験者のうち何人が同様に「警告に値する」と指摘したかを集計し、データごとにその平均値を出した結果を示す。また、7種類のデータ全体の平均は11人中9.5人であった。これらの結果から、本システムを長時間にわたって利用していない被験者であっても、十分に高い確率で警告に値する時刻を視覚的に発見できることを検証できた。

なお被験者が「警告に値する」と指摘した時刻のうち、実際には専門家からみて「警告に値しない」と判断される時刻がいくつかあった。これらの時刻についても専門家に検証してもらい、「警告に値しないが要注意」である時刻、「注意に値しない」時刻の2種類に分類してもらった。そしてデータごとに、各時刻を指摘した人数の平均値を出した。表3および表4にその結果を示す。この結果から、専門家が「警告に値しない」と判断した時刻を指摘した人数は、表2に示す人数より非常に小さく、本システムが一定の効果をあげたことがわかる。

しかし注意点として、表3では、計測データであるデータ1が、シミュレーション結果であるデータ2~7と比較して、専門家が「警告に値しない」とした時刻を指摘した人数が多い傾向にある。おそらく計測データはシミュレーションデータに比べて、物理量のゆらぎなどが多く含まれていることが一因であろう。また別の注意点として、表4では、周期的な外乱をシミュレートしたデータ4~6において、専門家が「注意に値しない」と判断した時刻を指摘した事例が相対的に多い傾向にある。おそらく明示的に事故や故障を仮想したシミュレーションと

比べて、警告に値する時刻と値しない時刻の視覚的な差異が明確でないことが一因であろう。これらについては、考察の余地があると考えられる。

## 8. むすび

本稿では、原子力プラントの計測情報およびシミュレーション結果を、あえて物理空間に基づくサイエンティフィックビジュアライゼーション手法を用いずに、階層型データおよび時系列データのための情報可視化手法「平安京ビュー」「今昔物語」を用いたシステムを紹介した。また本稿では、数百個の数値の中から1箇所だけが異常値を示している事象を明示的に示した可視化例や、トリップ操作が順調に進んで伝搬的に数値低下が進んでいることを示した可視化例を示した。またユーザテスト結果から、本システムが概ね良好な視認性を有するシステムであることを確認した。

本研究の課題として、計測結果やシミュレーション結果をリアルタイムに可視化するシステムの構築、プラント管理の現場勤務者によるユーザテストなどがあげられる。

## 参考文献

- 1) T. Itoh, H. Takakura, A. Sawada, and K. Koyamada, Hierarchical Visualization of Network Intrusion Detection Data in the IP Address Space, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 26, No. 2 (2006), pp. 40-47.
- 2) T. Itoh, S. Furuya, H. Ohshima, K. Okamoto, Hierarchical Data Visualization for Atomic Plant Data, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 4 (2008), pp. 553-562.
- 3) 飯塚, 岡本, 原子力発電所のトラブルデータの2D/3D可視化研究, 可視化情報学会誌, Vol. 29, No. 1 (2009), pp. 89-92.
- 4) V. E. Whisker, et al., Using Immersive Virtual Environments to Develop and Visualize Construction Schedules for Advanced Nuclear Power Plants, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (2003).
- 5) M. Suntinger, H. Obwegger, J. Schiefer, M. E. Groller, The Event Tunnel: Interactive Visualization of Complex Event Streams for Business Process Pattern Analysis, IEEE Pacific Visualization Symposium (2008), pp. 111-118.

## 可視化情報学会誌特集・連載記事原稿見本

表1 回答の対象となる時刻数, および専門家が「警告に値する」と回答した時刻数.

	回答の対象となる時刻数	「警告に値する」時刻の数
データ1	360	54
データ2	100	7
データ3	100	5
データ4	180	30
データ5	180	31
データ6	180	44
データ7	180	5

表2 被験者が「警告に値する」と指摘した人数の平均値.

	人数の平均
データ1	9.4
データ2	9.0
データ3	9.8
データ4	9.4
データ5	10.2
データ6	9.3
データ7	9.4

表3 被験者が「警告に値する」と指摘したが専門家は「要注意」とした時刻に関する集計.

	「要注意」な時刻の数	人数の平均
データ1	17	2.8
データ2	3	2.3
データ3	10	2.7
データ4	17	2.1
データ5	33	1.8
データ6	19	1.8
データ7	3	1.7

表4 被験者が「警告に値する」と指摘したが専門家は「注意に値しない」とした時刻に関する集計.

	「注意に値しない」時刻の数	人数の平均
データ1	0	0.0
データ2	2	1.5
データ3	5	1.6
データ4	16	1.4
データ5	8	1.5
データ6	21	1.5
データ7	6	1.2