

発音解析のための大規模可視化情報プラットフォーム

野崎 一徳^{†1} 伊達 進^{†1} 中川 真志^{†1}
馬場 健一^{†1} 下條 真司^{†1,†2}

近年、歯科治療後に発生する発音変化を予測するため、発音に関する知識の体系化が行われている。そのためには発音の数理モデル化とその結果についての専門家による評価を収集しなければならない。しかし、このような研究は複数の専門分野にまたがり、かつ研究者は地理的に分散しているため、各研究者が研究評価したデータを登録、蓄積するためのプラットフォームが求められている。そこで、研究者が広域分散環境においても協調して情報を登録、編集できる知識データベースを構築するため、1) 発音研究用評価支援フローを提供するポータル機能、2) 発音解析用メタデータ管理機能、3) 高速な大規模分散データ管理機能、を統合した大規模可視化情報プラットフォーム Penetrator を提案する。Penetrator によって、専門家による発音時の気流のシミュレーション結果に関する評価の蓄積が可能となった。それとともに、発音研究者、流体研究者、歯科医師が地理的に分散していた場合であっても、それぞれの専門性によって醸出されるアノテーションを解析結果中の三次元座標上に付記していくことで、有用な知識が得られることが確認できた。また、地理的に離れた研究者間であっても、高速転送プロトコルを分散ファイルシステムに適用することで、大規模な物理シミュレーション結果データそのものを用いた、アノテーションの追加、編集が行えることを確認した。

A Large Scale Visualization Platform for Speech Analysis

KAZUNORI NOZAKI,^{†1} SUSUMU DATE,^{†1} MASASHI NAKAGAWA,^{†1}
KEN-ICHI BABA^{†1} and SHINJI SHIMOJO^{†1,†2}

The prediction of the distortion of pronunciation occurred after dental treatments is expected by both clinicians and patients, which interdisciplinary scientists who live in geographically dispersed can only treat. A platform is therefore necessary for the scientists to evaluate the results of speech analyses in their own specific area, and submit the reports into a common database. In order to develop the platform so that can collect assessments by researchers who live in geographically dispersed, we propose the large scale visualization platform which consists of three functions mainly: 1) web portal function which supports

researchers to edit and submit their assessments for the results of speech analyses, 2) the metadata management function, and 3) the high speed large data management in distributed environment. Accordingly, the large scale visualization platform enabled scientists to share the large scale data and visualization parameters by using the proposed metadata management thorough the web portal in wide area network. Finally, the usefulness of our proposed platform was verified though the evaluation of this paper.

1. まえがき

近年、歯科治療分野では、歯の治療だけではなく、話す、咬む、息をする等の口腔機能を新たな治療対象領域としている。口腔は1つの臓器として複数の機能を同時に担うため、治療に必要な知識を体系化することが難しい。そこで、発音科学で用いられる音声解析、工学で応用されている流体力学解析、そして計算科学で用いられる数値計算法を用いて、口腔機能の1つである発音の数理モデル化に取り組み始めている^{1),11)}。

発音の数理モデル化を行うことで、口腔形状という入力となされれば、数理モデルから音声という結果を出力することが可能である。このような入力と出力の関係を蓄積していけば、いずれは口腔形状と音声を分類問題とし、決定木による帰納的推論ができると考えられる。

図1は、著者らが提案する、発音に関する知識の体系化を実現するまでのプロセスを示している。本研究は、図1の大規模可視化情報プラットフォームに視点をあてる。数理モデルの構築では、まず被験者からCBCTと呼ばれる歯科用断層撮像装置によって、発音時の口腔形状をボリウムデータとして取得し、そのデータから三次元計算用メッシュを作成する。次に、そのメッシュを用いて、発音時の気流の流体シミュレーション(CFD)を行い、さらにその結果を用いて、音響シミュレーション(CAA)を行う。一方で、計算用メッシュと同じジオメトリを用いて三次元プリンタにより実体化し、それを用いて物理実験を行い、物理実験の測定値と、CFD/CAAにより導出された流れや音のスペクトル等とを比較することで、発音解析に適応した数理モデルが正しいか否かを確認する。その際、専門家によって様々なデータが可視化されて比較検討され、その結果が評価として下される。本研究では、発音に関する知識の体系化を実現するために、この段階でなされる評価を発音

^{†1} 大阪大学
Osaka University

^{†2} 情報通信研究機構
National Institute of Informatics and Communication Technology

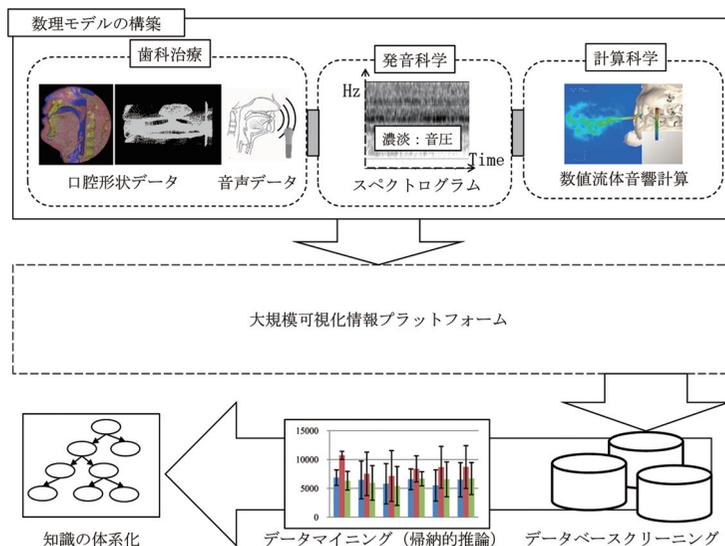


図 1 発音に関する知識の体系化プロセス
Fig. 1 Process of systematization of pronunciation.

解析に用いたデータに関連付けて蓄積していくための大規模可視化情報プラットフォームを構築する。この大規模可視化情報プラットフォームでデータベースに蓄積されるデータは、スクリーニングされ、統計処理される。その結果、帰納的な結論が得られると考えられる。

本研究により、発音解析のための大規模可視化情報プラットフォームを構築することで、口腔形状と音声の関係を物理法則によって解き明すことによる知識の体系化実現への第一歩を踏み出す。

2. 大規模可視化情報プラットフォーム実現への課題

発音解析のための大規模可視化情報プラットフォームは、図 2 に示すように、発音研究者、歯科学研究者、流体研究者、そして計算科学研究者の間で、解析データを共有し、その可視化情報に対する所見や考察を知識として蓄積することを目的としている。このプラットフォーム上で、専門分野の異なる研究者が、地理的に離れていても、各々の研究者が同様にシステムを利活用できる仕組みが必要である。また、専門分野が異なるため、知識として共有していくためのメタデータ管理技術が必要となる。さらに、CFD や CAA 等の大規模な

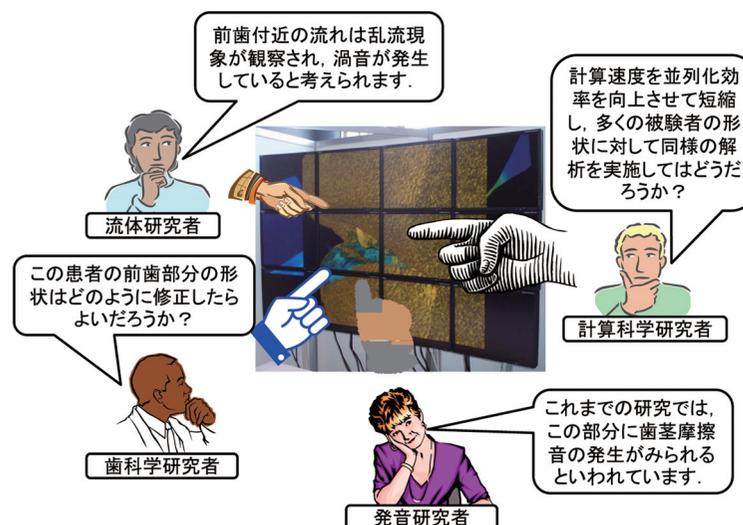


図 2 大規模可視化プラットフォーム上での情報伝達
Fig. 2 Schematic vision of Large Scale Visualization Platform.

データを利用、蓄積するためには、それに対応するスケーラブルなデータ蓄積方法を用いなければならない。以下にこれらの問題点を解決する際の課題について述べる。

2.1 発音研究を支援するポータル

各分野の研究者は様々なデータを可視化して比較検討し、その結果を数理モデルの評価として蓄積していく。そのため、ユーザインタフェースは研究者がどこにいても同じ環境として利用可能で、さらにできる限り、可視化アプリケーションと独立して実装されている必要がある。

また、本研究では規模の異なる様々なデータを統合的に利用するため、いくつかの機能を複数のサーバに分散して構築する必要があり、そのような分散環境でのユーザ認証についても考慮したウェブポータルを構築する必要がある。

2.2 知見データの構造化とその管理機構

スクリーニングの際に用いる種々の推論に対応するメタデータの構造には、医療系で規格化されている Health Level 7²⁾ が考えられる。この方式に従いデータを収集した場合の問題点として、計算科学、流体工学、音響工学、発音科学で用いられていない形式であるた

め、それらの分野に対応したスキーマを新たに定義していく必要がある。

2.3 大規模データへの対応

大規模なデータを知識に取り入れるには、メタデータの構造以外にも問題がある。すなわち、地理的に分散した専門家による知見（アノテーション）に CFD 等の結果を合わせて表示するためには、大規模結果データの管理手法を考慮する必要がある。大規模データそのものを蓄積していくには、ネットワーク上に分散してデータを蓄積する方法が考えられる。しかし、その際には、たとえネットワーク帯域が十分に用意されていても、その帯域を有効に利用できていないという問題もある¹²⁾。

3. 提案手法

発音に関する知識の体系化を実現するために、図 1 において、数理モデルと知識の体系化を結び、専門家の知識を導入するしくみが必要である。そこで、数理モデル構築に用いた発音解析用データとその結果に関する専門家の評価とを関連付けて蓄積していく大規模可視化情報プラットフォーム（図 3）を提案する。提案する大規模可視化情報プラットフォームは、(1) ウェブポータル、(2) メタデータ管理部、(3) データベースから構成される。本研究では上記 (1)~(3) を実現するため、それぞれ以下の手法を提案する。

3.1 発音研究用評価支援ポータル機能

数理モデルの評価を蓄積、利用していくには、利用者が慣れない情報システムにとまどうことなく、直観的かつ容易に評価を入力できなければならない。そのため、本研究では専門家らのユースケースを考慮し、専門家らがウェブインタフェースを通じて、知見の蓄積、利用が容易に行えるようナビゲートできるロジックを備えるポータル環境を提案する。

発音研究では、歯科学研究者によって倫理委員会の認証を得た CBCT データを利用しているが、CBCT データは DICOM データとして撮影機器から出力されるため、個人情報として隠蔽されるべき、被験者の氏名、性別、生年月日、病院名等の個人情報がメタデータとして付属している。そこで、提案システムでは、DICOM データをポータル経由でサーバにアップロードする際に、それら個人情報を省略して ID を付与し保存する。この ID を匿名化 ID と呼ぶ。また、発音研究では DICOM データから抽出された口腔内構造データを基にして、様々な解析処理を行うため、すべての解析結果の元は、ある被験者の DICOM データということを匿名化 ID を参照することで確認できる。

図 4 と図 5 は、専門家らが数理モデルを可視化し、評価するためのポータル環境における処理の流れを示したものである。提案する専門家らによる数理モデル評価環境では、まず

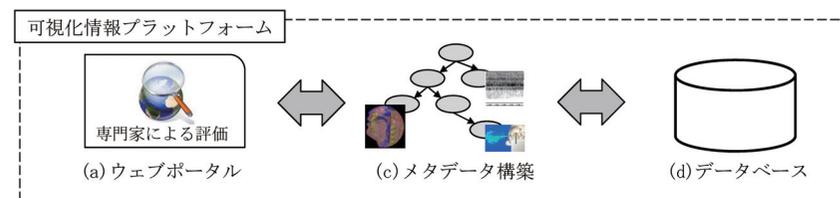


図 3 発音のための大規模可視化情報プラットフォーム
Fig. 3 Visualization platform for speech analysis.

ウェブポータル上でユーザが登録される。ユーザは与えられた ID とパスワードによって、認証、認可後、ログインを行う。次にデータ検索画面で、匿名化 ID (anonymousid) やキーワードを入力し検索を行う。その後、データ選択画面から任意の実験データセット (リソース) を選択し、可視化手法選択画面に進む。その際、自身や他の利用者が残した知見やそれを解釈するための可視化方法を再現するか、新たに可視化パラメータの設定を行うかを決定し可視化を実行する。その後、可視化パラメータ設定画面に進むが、可視化結果表示窓上の三次元座標上に任意のメタデータを記入することができ、ユーザは共同研究者に伝えたい箇所に必要事項を記入し、可視化パラメータの一部として保存することができる。新規にデータを追加する場合には、既存のリソースにデータを追加するか、新たにリソースを追加し、データを追加するかを選択する。このようなロジックによって構築された、ウェブポータル上の可視化環境により、専門家による三次元上に付記されたアノテーションの閲覧、編集を行うことができるようになる。また、ユーザは anonymousid によるデータ検索だけでなくアノテーションに記載されたキーワードからも検索を行うことができ、その際、すでに保存されている可視化パラメータを用いることで、ポータル上の可視化環境を再現することができると思われる。

次に、可視化インタフェースとデータベースとの連携部分等のプログラム構造については、インタフェースとポリゴン生成等を行うレンダラを実装上分離し、インタフェースは共通であっても、レンダラは他のものが利用できるようにする。そこで、インタフェースからユーザが指定した可視化パラメータをレンダラによらない共通の XML フォーマットで記述し、レンダラに送信する方式を提案する。これにより、ユーザインタフェースと可視化を担うレンダラ間を通信させることで、互いを独立させることができる。

本研究で対象とする発音解析では、CBCT, MRI, CFD の結果データを三次元で可視化し、専門家が設定した視点に基づき、知見を共有する必要がある。そのためには、専門家

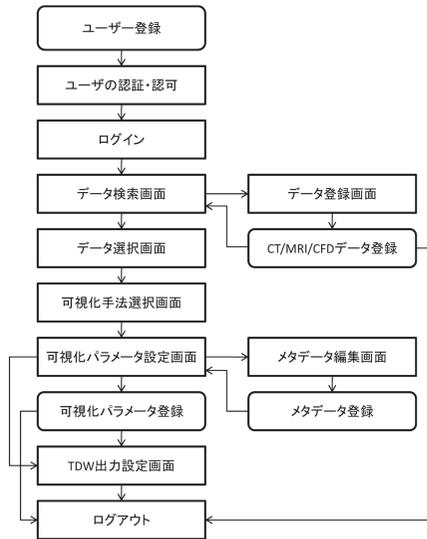


図 4 ウェブポータルでの可視化とデータ登録処理の流れ

Fig. 4 Flow of visualization and data registration on the web portal.

が普段使用するレンダリング機能，具体的には，スライス面へのコンタースライス描画機能，等値面形成機能，ボリュームレンダリング機能を具備する必要がある．このような理由から，CFD や CBCT の可視化で一般的なレンダリング機能を定義し，0 個以上の等値面 (iso_surface) や，0 枚以上のスライス面，0 個以上のボリュームデータの閾値設定，そして，ViewParam タグ以下には，ユーザの視野情報 (アングル，スケール等) を表現する可視化パラメータ，Viz.xml を提案する．図 6 では，CBCT のデータをボリュームレンダリングした結果と CFD の結果を同時に可視化したリソースに関する実例を示している．アノテーションの一例として “Sibilant groove” が入力されている．“Sibilant groove” は摩擦音を発音する際に舌と上顎によって形成される狭窄した気道を意味しており，この例では $(x, y, z) = (230.5, 194.46887, 240.4017)$ に “Sibilant groove” が観察されたということを示している．しかし，この “Sibilant groove” は口腔内部に局限して観察されるため，その存在を理解している専門家が設定した視点から観察しなければ，正しく見つけることが困難である．そのため，視点の設定がメタデータとして保存されていることが有効に作用し，専門家の視点を他の専門の研究者等が共有することが可能となる．



図 5 データ登録と可視化処理画面の流れ

Fig. 5 Flow of data registration and visualization image.

3.2 発音解析のためのメタデータ管理

W3C で定義された Resource Description Framework (RDF)¹³⁾ であれば，類義語データベース (Wordnet⁴⁾)，CAD デザインのオントロジ等がすでに用意されている．RDF は

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>
- <viz>
  - <VizParam>
    <renderer number="1" />
    <note instance="1" id="CT volume and CFD result" />
    <imestep>5</imestep>
    + <ParamItem id="param1" instance="1" iso="0" slice="0" volume="1">
      + <ParamItem id="param2" instance="1" iso="0" slice="0" volume="0">
        - <Data coord_max_x="52.8088" coord_max_y="36.0918" coord_max_z="40.1538"
          coord_min_x="6.45295" coord_min_y="-2.95353" coord_min_z="15.6307"
          filepath="/export/tmp/B6E0CF8631BC0EC46C17D445B5C467C/download/To7 avs.txt.inp"
          max="140.392860419922" min="0.0" stepmax="5" type="UCD" typestr="Pressure" />
      - <iso_surface id="iso_surface_0" instance="0">
        - <iso_val>70.1964340209961</iso_val>
        <opacity>1.0</opacity>
        <colormap>0</colormap>
      </iso_surface>
      + <iso_surface id="iso_surface_1" instance="0">
        + <slice_plane id="slice_plane_0" instance="0">
          + <slice_plane id="slice_plane_1" instance="0">
            + <slice_plane id="slice_plane_2" instance="0">
              + <volume_renderer id="volume_renderer" instance="0">
            </volume_renderer>
          </slice_plane>
        </slice_plane>
      </iso_surface>
    </ParamItem>
    + <ParamItem id="param3" instance="1" iso="1" slice="1" volume="0">
  - <VizParam>
    - <ViewParam>
      <scale>1.0</scale>
      <Xform>center = {255.5,248.418,255.5}; dcenter = {3.89211,3.78422,3.89211}; mat =
        { 0.00999395,0.,0.0114967,0.,0.011105,0.00394267,
          0.00965341,0.,0.00297557,0.0147142,0.00258662,0.,0.,0.,1. }; xlate = {-3.89211,-3.78422,-
          3.89211}; center = {255.5,248.418,255.5};</Xform>
      + <annotation edit="0" id="anotation0" instance="1">
      + <annotation edit="0" id="anotation1" instance="1">
      + <annotation edit="0" id="anotation2" instance="1">
      - <annotation edit="0" id="anotation3" instance="1">
        <imestep>5</imestep>
        <sentences>"Sibilant groove"</sentences>
      </annotation>
      - <coord>
        - <x>230.5</x>
        - <y>194.46887</y>
        - <z>240.40717</z>
      </coord>
      </annotation>
      + <annotation edit="0" id="anotation4" instance="1">
      + <annotation edit="0" id="anotation5" instance="1">
      + <annotation edit="0" id="anotation6" instance="1">
      + <annotation edit="0" id="anotation7" instance="0">
    </ViewParam>
    - <OutputImage>
      - <Data>
        filepath="/usr/local/tomcat/webapps/nict/work/imageB6E0CF8631BC0EC46C17D445B5C467C.jpg" />
        <Xsize>230</Xsize>
        <Ysize>230</Ysize>
      </Data>
    </OutputImage>
  </viz>

```

図 6 Viz.xml インスタンス文書
Fig.6 Example of Viz.xml.

メタデータを主語、述語、目的語の3つの要素でグラフ化している。このようなグラフを用いることで、概念を定義し、様々なノードの相互関係を表すことができる。たとえば、ICD-10の病名集では“decade tooth”に“K1-13”というIDを与えているが、そのIDをRDFのノード、述語を“japanese”とし、さらにリテラルを“う蝕”とすれば、「“K020”の日本語は“う蝕”だ」という意味を表現できる。さらに、述語とリテラルを様々な言語について記述すれば、たとえば英語であれば、「“K020” is “decade tooth” in English.」と表現したことになる。すなわち、専門用語をこのようにIDとRDFで関係付けて記述することで、日本語“う蝕”、英語“decade tooth”のどちらのクエリであっても、検索漏れは起こらない⁸⁾。さらにいえば、これにより地理的に離れた専門家が母国語で評価を入力した場合であっても、専門用語に関しては検索漏れを防ぐことが可能となる。

また、本研究におけるメタデータを構造化する方法としてRDFを選択することは、Word-

net や病名データベース等の異種のデータベースと発音解析データベースとを、抽象概念による関係性に基づいて関連付けを行う想定した場合においても、先に述べたノード間の相互関係を活用した検索が容易であることや、RDFS や OWL への拡張が容易であるため、有効である。さらに、RDFS/OWL への拡張により、直接は関係のない他の分野のRDFSで書かれたデータに関しても意味関連があれば検索によって抽出できると考えられる。

本研究で提案するRDFによるメタデータの構築手法では、アノテーションや、CFD結果データ、そして口腔形状データ等の関係を、それぞれのデータが持つ意味を考慮に入れ体系化されたRDFグラフにより表現する。その際、発音解析に特化するため、RDFグラフは下記のとおりとした。1) データ群は被験者個人に付随し、さらに個人情報の漏えいを防ぐため、被験者に述語 anonymousid を付加することで匿名化する。2) 1回以上実験が各被験者に対して行われるため、1人の被験者に複数の述語 resouceid を付加することによって、複数の実験と1人の被験者とを関連付ける。3) 1回以上の実験につきそれぞれ、1個以上の実験結果データが発生するため、それぞれの実験に複数の述語 data を付加し実験データとを関連付ける。4) 実験データそのものは大規模データであり、分散ストレージに蓄積させる必要があるため、分散ストレージへの論理パスと実験との間を述語により関係付ける。5) 各実験では、CBCT と CFD の結果を重畳して可視化し表示させ、さらに専門家による評価がアノテーションとして三次元空間上に入力されるため、実験に述語 annotation, vparam, PHOTO を付加する。

図7は、上述の関係を示したものであり、このRDFグラフ構造によって、発音解析で重要なCBCTとCFDデータ、それらを重畳して可視化するための可視化パラメータ情報、そして専門家によるアノテーションデータを、実験ごとに蓄積することが可能である。さらに、以下のRDFデータを検索するクエリ言語SPARQLを用いることで必要なデータを一括して呼び出すことができる。

図7の右下の囲みは、ウェブポータルで anonymousid や annotation として入力されたキーワードに該当するグラフの一覧を取得する際に用いるSPARQLクエリである。SPARQLクエリでは、PREFIXを用いて本節で提案する接頭辞を設定し、SELECTによって、クエリが返す変数を設定する。次にWHEREにより、Turtleベースの構文を使って表現されたトリプル・パターンとRDFデータとの一致を調べ、一致したグラフパターンにおける変数のバインディングが、クエリ・ソリューションとなっている。本例は、“?A1 NICT:annotation “sibilant””にある“sibilant”がユーザがウェブポータルでキーワードとして入力した値で、本クエリによって“?A1 NICT:annotation “sibilant””に該当するすべてのグラフをクエ

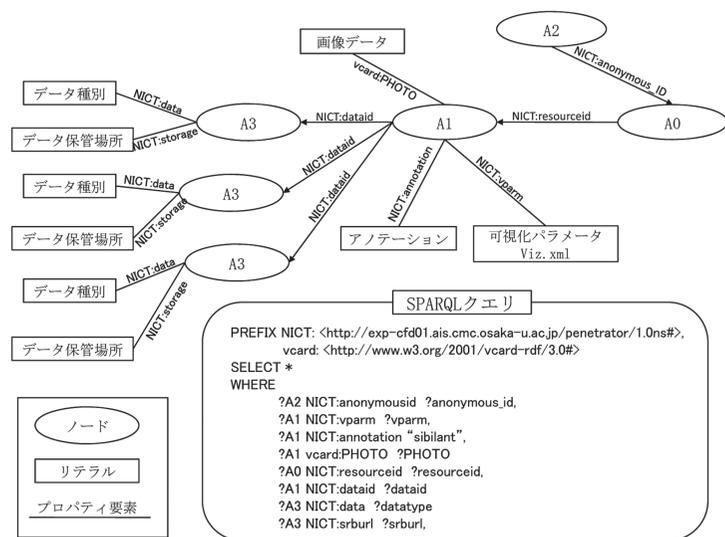


図 7 RDF メタデータの詳細と SPARQL によるクエリ
 Fig. 7 Metadata details and query of SPARQL of analysis of sibilant.

リ・ソリューションとして返す。このような述語を用いた検索を行えることにより、たとえば、インターネット上のリソースとして多言語辞書があった場合、“?A1 NICT:annotation “sibilant”” と “?x icd:english “sibilant”” と “?x icd:japanese “歯茎摩擦音”” が存在すれば、そのリソースを PREFIX に含めることで、“?A1 NICT:annotation “歯茎摩擦音”” もクエリ・ソリューションとして返すことができる。

さらに、発音解析のような研究用データベースの場合、研究が進展するに従い様々な形式のデータへの対応が新たに求められると考えられる。そのような要求に柔軟に対応するという観点からも、本節で提案する RDF によるメタデータ構造のように、データ間の関連付けが可能で、かつ検索への反映も容易なデータベースが適していると考えられる。

3.3 高速な大規模分散データ管理機能の構築

発音の流体音響解析で取り扱うデータは、1 人の被験者につき数テラバイト～数十テラバイトである。このような大容量データの蓄積には、病院内の小規模なデータ管理用サーバ等では保管が困難である。また、地理的に分散する専門家が共同で知見を蓄積、利用する観点からも単一のサーバで管理することは現実的ではない。そこで、データをネットワークを介

して分散して保管する方法を用いる。

また、本研究でのデータ転送は広域 IP 網や広帯域接続を想定する。しかし、このような大規模データを広域ネットワークを通して転送し可視化することは容易ではない。そこで、一般的な通信プロトコルである TCP を用いる代わりに、高速転送プロトコルを採用する方針をとる。

4. 大規模可視化情報プラットフォーム Penetrator の実装

4.1 実装の概要とその動作

本研究では、前節の提案手法に基づき、発音解析のためのインタフェースを具備するポータル、RDF によるメタデータ構造に基づくデータベース、高速データ転送技術を組み込んだ分散ファイルシステムを中心とする大規模可視化情報プラットフォーム Penetrator (図 8) を実装した。ユーザインタフェースをポータルの実装手法と分離するため、Gridsphere バージョン 2.2.8 をポートレットコンテナとして採用し、RDF の制御ライブラリとして Jena バージョン 2.4, ARQ-2.1 を使い、分散ファイルシステムとして、ファイルの論理的所在と物理的所在を管理する Metacatalogue (MCAT) サーバを擁する Storage Resource Broker (SRB) バージョン 3.1 を選択した。

Penetrator は、レンダリングサーバ、GAMA サーバ、SRB サーバ、メタデータサーバ、コントロールサーバによって構成される。レンダリングサーバは、レンダリングマスタの司令によりポリゴン生成を行い、GAMA サーバはユーザ、グループ管理を支援する。SRB サーバは、MCAT サーバによって仮想的ストレージを構成する。メタデータサーバはクエリによる問合せに応じてクエリ・ソリューションを返す。コントロールサーバは、ポータル、データフロー、可視化コントロール機能を制御する。

Penetrator は次のとおり動作する、ユーザがデータを登録する場合は、ウェブポータル上のデータ登録 GUI から、ローカル PC 上のデータを選択しアップロードする (図 8 中 (1)–(3))。次に、SRB クライアントは、メタデータハンドリングクライアントにメタデータからデータ登録時に渡された anonymousid に一致するグラフを要求し ((4)–(5))、存在していれば、同じ anonymousid のグラフに新たなデータとして追加し、存在しない場合には、新規にグラフを作成する。次にコントロールサーバにアップロードされたデータを SRB に保存するために、GSI 認証を行うためのユーザ証明書を GAMA に要求し (6)、SRB サーバにデータを転送する (7)。SRB サーバでは、MCAT サーバによりデータの所在の論理パスと物理パスを管理し、論理パスを SRB クライアントに返すと同時に、SRB サーバのス

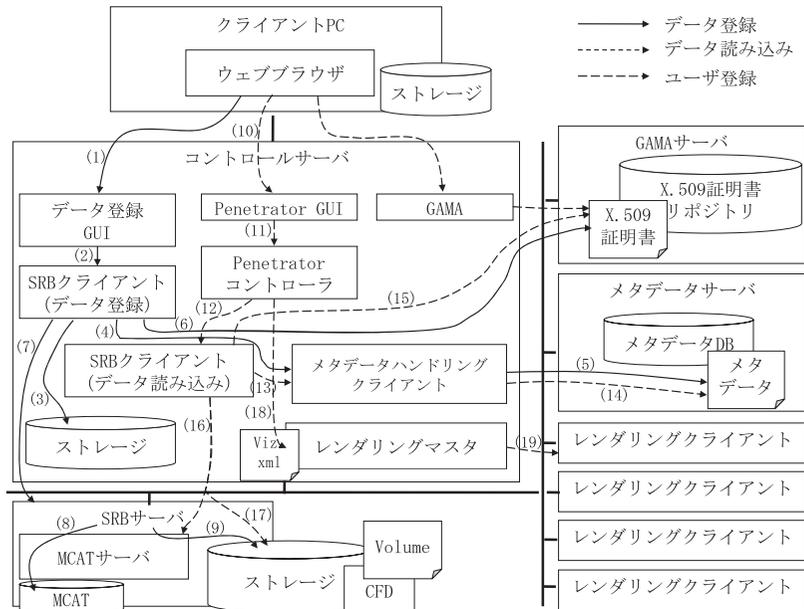


図 8 Penetrator
Fig. 8 Penetrator.

トレージにデータを保存する (9)。

一方、データ読み込みを行う場合は、Penetrator GUIで任意のデータを選択する (10) ことで、Penetrator コントローラ (11) が、まず、SRB クライアントにデータ読み込み命令を送り (12)、SRB クライアントはそれを受けて、メタデータハンドリングクライアントを通して (13)、メタデータサーバにウェブサービスによって選択したデータのメタデータを返却する (14)。そしてメタデータに含まれている大規模データのSRB上の論理パスを取り出し、SRBサーバのMCATサーバによって論理パスから物理パスを図7のA3ノードに基づいて照合し (16)、データをSRBサーバからコントロールサーバに転送する (17)。その際、データ登録の際と同様に、GAMAサーバからプロキシ証明書を取得する (15)。コントロールサーバに転送されたデータは、メタデータに含まれる、専門家らから得られた情報である可視化パラメータ (Viz.xml) に従って、レンダラによって可視化され (17)–(18)、ウェブブラウザ上に表示される。

4.2 発音解析のためのメタデータ構造とその管理

メタデータサーバはウェブサービス化され、コントロールサーバとSOAPによって通信する。これは、メタデータサーバはコントロールサーバから利用されるだけでなく、知識の体系化を実現するためのスクリーニング・アプリケーションからも利用されることを想定しているためである。メタデータサーバでは、RDFを格納し、その特徴を活かした検索を行う機能を提供するため、JenaとそのSPARQL対応検索エンジンARQを用いた。

4.3 発音研究用評価支援フローを提供するポータル機能

ウェブポータル上に構築された可視化環境により、専門家による三次元上に付記されたアノテーションの閲覧、編集を行うことができるように、本研究では、CBCTやCFDのデータ等大規模データを可視化した結果画像のみ蓄積していくのではなく、データそのものを蓄積する方針をとっている。これにより、利用者は専門家がアノテーションを付した箇所を様々な角度から観察することができ、また新たに気づいたことを、三次元空間中に書き加えることができる。

4.4 大規模データ蓄積と連携したメタデータのデータベース構築

本研究では、大規模データを転送するために高速転送プロトコルを利用する。高速転送プロトコルは多数提案されているが、実装が容易なライブラリとして提供され、カーネルの再構築なしに利用可能であるgUDT (gentle UDT) プロトコル¹⁰⁾を採用する。さらに、gUDTプロトコルは、UDTプロトコルを改良しTCPとの親和性を高めた高速転送プロトコルであり、広域IP網における他の通信、LAN内の制御のための通信等との競合が起こりうることを考えても有効なプロトコルである。

SRBはデータ転送時のプロトコルとして通常TCPを用いるが、SRBにgUDTプロトコルを追加することで、大規模データ転送を効率化する方法を選択した。gUDTプロトコルによるファイル転送方法は、ファイルの物理的所在をMCATサーバにSRBの機能を用いて問い合わせ、gUDTプロトコルによるファイル転送プログラムによって実現している。

5. 評価

本章では、Penetratorシステムの有用性と実用性を、各分野の専門家である主要なユーザからの情報を基に評価する。まず最初に、Penetratorによって得られる主要な知識データの具体例について述べ、次に、Penetratorの客観的な評価を行うために実施したアンケート調査の結果について述べる。さらに、地理的に離れたユーザ間でのPenetratorの利用例として、フランス発音研究所の例をあげ、Penetratorの有効性とその利用の意義について

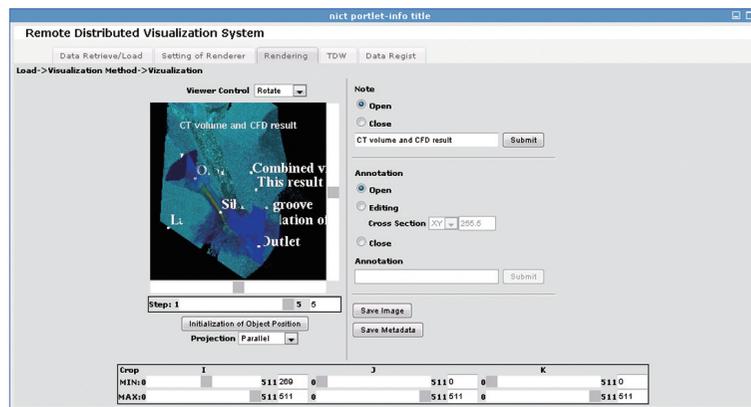


図 9 sibilant groove を示した可視化結果
Fig.9 Visualization of sibilant groove.

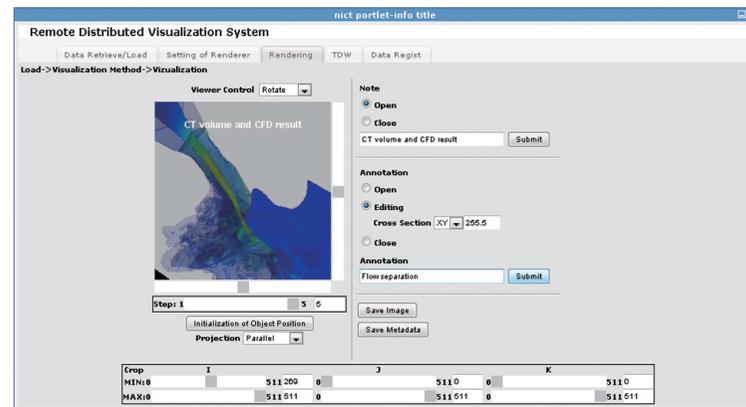


図 10 三次元空間座標上へのアノテーション付与
Fig.10 Inputting of annotations in three-dimensional space.

述べる．最後に，Penetrator の汎用性に関して述べる．

5.1 可視化情報蓄積の有効性についての評価

本システムの主な使用例として，CBCT から得られた三次元構造データと CFD から得られた解析データとを同時に可視化し観察する例がある．図 9 は，CBCT からのデータと CFD 結果を重畳させ可視化した結果を表示しており，発音研究者によってアノテーション“sibilant groove”が付記されている．この結果は，ウェブポータルでのデータ検索画面において，“sibilant”と入力し，既存の可視化パラメータを用いて得られた画面である．この結果から，流体研究者は，“sibilant groove”において最初の流れの剥離が観察されることを画面の三次元空間座標上に追記し，歯科学研究者は，解剖的特徴である“S 状隆起”，“オーババイト小”，“オーバジェット大”等と追記する．図 10 は，三次元空間上に任意の空間平面を表示させ，その平面上の任意の箇所に“Flow separation”とアノテーションを書き込む様子である．これらのアノテーションが得られた理由は，CBCT と CFD 結果を重畳し可視化を行っていることと，複数の分野の異なる研究者が同じアングル，同じ可視化手法で同じデータを観察していることにある．その結果，大規模可視化情報プラットフォームから得られる知識構築用データの主要なケースデータとして，

“sibilant”は“sibilant groove”において剥離がおり，“S 状隆起”や，“オーババイト小”，“オーバジェット大”が関係する．

が得られた．被験者数が増していけば，“オーババイト小”が“オーババイト大”では，“sibilant groove”における剥離現象にどのような差異が生じるか，という知見が得られることになる．このように，Penetrator を用いることにより，分野の異なる複数の研究者からの知見を，可視化情報として互いに三次元空間上で関連付けることにより，新たな知見を導出できた．

5.2 システムの有効性の評価

また，現在 Penetrator を利用している主要なユーザ 9 名（(a) 計算科学研究者 4 名，(b) 歯科学研究者 2 名，(c) 流体研究者 2 名，(d) 発音研究者 1 名）についてアンケートを実施した．各ユーザに提示したアンケートの内容は図 11 のとおりである．なお，以下の設問において，ユーザの専門によって (a)～(d) を適宜入れ替えて質問を行った．

本システムの必要性を問う，1 つ目の質問について，「そう思う」と答えたユーザは 8 名（88.9%），「そう思わない」と答えたユーザは 1 名（11.1%）であった．「そう思う」と答えたユーザから，「コンピュータ・エイディッド・デザイン分野において，対象となる現象を十分に考慮したうえで適当なシミュレーション手法を選択し，解析の目的となる部位において計算精度を確保できるようなメッシュ生成を行うことが必要であるが，その部位を三次元空間上で把握することが困難なことが多い」という意見が得られた．また，「歯科医師や発音研究者が前提としている知識を必ずしも計算科学研究者が持っているとは限らないため，正

Penetratorのウェブポータル上で検索していただくリソースは、口腔内流体計算結果、口腔のCBCTデータを重畳して可視化し、得られたある知見を三次元空間中に記入し保存したものです。

例えば、歯科学研究者が共同研究者である計算科学研究者、流体研究者に前歯の先端に現れた知見について、専門的な所見を問う場合、本システムを用いれば、視点、拡大率、そして、レンダリング方法をそのまま保持した状態を伝える事ができると考えられます。

そこで、以下の内容に、「そう思う」、「わからない」、「そうは思わない」でお答えください。もしよろしければコメントも記入してください。

(質問1)
(a)の研究者は、(b)や(c)はどのような現象・部位に興味を持っているのが、三次元的につかみにくい(共通理解が難しい)。

(質問2)
本システムを用いれば、(c)が、ある特定の視点からみた特定の可視化手法によって、得られた知見を、(d)の研究者に伝えることが可能となる。

(質問3)
多人数で様々な分野の研究者から知見を得るには、本システムのようなウェブベースでタブによるフロー管理がなされたインターフェースは適当である。

図 11 Penetrator についてのアンケート
Fig. 11 Questionnaire about Penetrator.

しく空間的に現象を把握するためには、多くの時間が必要となり、また、ときには誤った認識をする可能性が高い」という意見も得られた。これらの意見から、三次元空間上での関心領域の把握が難しいということが各専門家間で共通の悩みであると分かった。

複数の専門家による知見共有手段としての有効性を問う、2つ目の質問について、「そう思う」と答えたユーザは6名(66.7%)、「分からない」は3名(33.3%)であった。「分からない」と答えたユーザの意見の中には「テキストでアノテーションを入力できるが、詳細な説明を入力したり、専門用語の理解補助がなければ、内容理解が困難である」というものがあった。しかし、専門用語については、このような問題が生じると想定されたため、RDFによるメタデータ記述方式を採用し、類義語や他言語対応を行う仕組みを実装している。

ウェブベースでのタブによる処理フローの統一の有効性を問う、3つ目の質問について、「そう思う」と答えたユーザは9名(100%)であった。意見には、「地理的に離れた研究者が一堂に会することができる場所としてウェブベースシステムは有効であり、また、タブを利用して利用者に処理フローを認識させるというのも意識を統一化するうえで有効である」というものや、「特殊なソフトウェアを必要としないという点、直感的な操作が可能である点は、様々な環境が想定される多人数からの知見を得る目的には適当であると考えられる。

オブジェクトの回転等でレンダリングのレスポンスの悪さが改善されればなお良いと思う」というものがあった。これらの意見から、Penetratorのウェブインタフェースは、様々な研究者が知見を得るのに有効であることが示唆された。また、レンダリング時間によるレスポンスの低下は、今後レンダリングの並列処理を実装することで解決を図る。

以上のアンケート結果から、システムの有効性の評価として、本システムの必要性、複数の専門家による知見共有手段としての有効性、そして、ウェブベースでのタブによる処理フローの統一の有効性について肯定する評価が得られた。

5.3 実運用状況

現在、日仏間の共同研究として、口腔形状を単純化した発音時の疑似口腔形状に対する大規模数値流体解析を実施している。具体的には、前歯部分の傾斜角度、上下前歯間距離を変化させ、その形状が流れ場に及ぼす影響を調査し、さらに、解析条件に与える初期条件として流れの性質を変化させ、それらの違いを調査している。この実験を進めていく際の問題は、様々な形状や流れの性質の違いを解析していく際に、実験ケース数が膨大となり、解析結果の整理や蓄積が煩雑になるということである。Penetratorを用いることで、地理的に大きく離れた日仏間で、上記のような研究における知見の共有を実現した⁶⁾。日仏間のような地理的にもネットワーク的にも離れた環境で、Penetratorが運用されたことで、今後我々が展開する発音研究に興味をもった研究者が、地理的にどこにいようと、提案するウェブ上のインタフェースを通して、大規模可視化情報プラットフォーム上で研究を展開することができる。すなわち、アンケートによるPenetratorの評価結果から、多分野の研究者らが、統合されたウェブインタフェースを通して、様々な発音研究データに関する可視化情報を登録し、それらを提案メタデータ管理手法によって蓄積していけば、研究者間での知見の共有が実現できる。さらに、日仏間でのPenetratorを用いた取り組みは、地理的にも分野的にも広範囲な研究における可視化情報共有プラットフォームとなる可能性を具備している点で意義がある。

5.4 システムの汎用性

Penetratorは、インタフェース部分、メタデータ管理検索部分、高速分散ストレージ部分の3つに区分される。インタフェース部分に関しては、検索画面や、データ登録画面(図5)でのデータの種別に、新たなデータの種類を追加することで、他の科学アプリケーションにも対応できる。それに対応し、メタデータ部分については、RDFメタデータ(図7)における、データの種別に新たな種類が追加されることになる。

たとえば、脳科学におけるアプリケーションへも対応可能である。高速分散ストレージ部

分については、Penetrator で独自にメタデータサーバを実装していることで、脳科学分野のアプリケーション⁵⁾に多く取り入れられている SRB の MCAT サーバと直接連携はできない。しかし、Penetrator のメタデータサーバが SRB の MCAT サーバと連携している手法と同様の手法を適応すれば、これまでに脳科学研究で用いられてきた MCAT サーバを包含することが可能である。ただし、脳科学分野独自の可視化方法が存在するため、Viz.xml の拡張が必要となる。

ほかには、電子顕微鏡分野の研究に適応可能である。具体的には、電子顕微鏡から得られた断層像画像を複数枚撮像し、立体構築を行い、可視化する。その際に Penetrator のウェブインタフェースを介して、画像データを SRB サーバにアップロードすれば、CBCT 等と同様に種々のレンダリングが可能となり、三次元空間へのアノテーションの記述とその共有が実現する。ただし、現在画像データの読み込みモジュールは DICOM 形式のみに対応しているため、拡張が必要である。

上記の例のように、Penetrator は様々な研究に対応した可視化情報プラットフォームになる基本的な機能を具備している。

6. 関連研究

我々が提案する大規模可視化情報プラットフォームに類似する既存研究として、主なものに、CCDB⁹⁾と 3D slicer⁵⁾がある。CCDB は SRB を用いた分散ストレージと、それとは別にメタデータ管理を Oracle9i を用いて行い、脳組織画像データの任意の箇所にメタデータを付記することで、検索可能な画像データベースを構築している。本研究では、同様に SRB と、メタデータを分離した方式を採用するが、異なる点として、可視化環境を構築することや、それにともない大規模なデータを複数統合して可視化可能なメタデータの構造、そして大規模データの転送が発生した場合でもシステム性能の低下を軽減する仕組みを導入している点で異なる。

3D slicer は標準化した表記形式で、三次元データのある閾値で抽出しポリゴンサーフェスを貼ったオブジェクトに対してメタデータを付与できる機構を実装しており、さらに SRB をデータ格納先に設定できる。しかし、3D Slicer は研究者自身のローカル PC にインストールされるアプリケーションとして提供されるため、本研究で提案する可視化環境とは以下の点で異なる。1) 統一した可視化インタフェース、2) 遠隔地間での可視化結果の共有、3) 解析に関係する様々なデータの一括管理、である。CCDB や Slicer の目的は、主に脳神経分野での MRI や顕微鏡画像データを対象とした専門家による知識共有プラットフォームであ

るが、我々の大規模可視化情報プラットフォームは、人の機能時の構造と結果の関係を大規模数値計算によって三次元可視化し、その結果に対する専門家の評価を共通のインタフェースによって収集、蓄積するためのものである。さらに、蓄積されたデータは帰納的推論可能なメタデータによって関係付けられている点で異なっている。

様々な科学研究分野に特化したグリッドポータルには、たとえば、電磁気シミュレーションポータル⁷⁾や、宇宙物理シミュレーションポータル³⁾がある。両者とも、Penetrator が志向する可視化情報の共有による知識の体系化ではなく、計算リソースの共有を基盤としたシミュレーション環境の構築を目指している。前者はユーザが可視化データを得て、ポータルで提供されている可視化ツールを用いて可視化を行い結果を評価することができるが、評価の共有や蓄積については取り組まれていない。後者では、可視化サービスをポータル上で提供しており、共同研究用の工夫としては、視点をリアルタイムで共有できる機能をあげている。一方、Penetrator では、地理的に離れた研究者同士は、実際の研究生活の中で非同期情報共有を行うことが多いと考え、各研究者が解析結果について、三次元空間中にテキストを入力し、そのテキストが情報としていつでも検索可能であるシステムとなっている。

7. まとめ

本研究では、発音に関する知識体系化を帰納的推論により実現するため、発音解析結果に関する専門家の評価をデータベース化する際に必要となる、大規模可視化情報プラットフォームを設計・実装した。この大規模可視化情報プラットフォーム Penetrator は、ウェブポータルを通じたインタフェース機能、メタデータ管理機能、大規模データ蓄積と連携したメタデータのデータベース機能から構成される。Penetrator によって、専門家らによる発音時の気流のシミュレーション結果に関する評価の蓄積が可能となった。それとともに、発音研究者、流体研究者、歯科医師が地理的に分散していた場合であっても、それぞれの専門性によって醸出されるアノテーションを解析結果中の三次元座標上に付記していくことで、有用な知識が得られることが確認できた。また、地理的に離れた研究者間であっても、高速転送プロトコルを分散ファイルシステムに適應することで、物理シミュレーション結果データそのものを用いた、アノテーションの追加、編集が行えることを確認した。

本研究で構築した大規模可視化情報プラットフォームにより構築したデータベースを用いた、データベース・スクリーニング手法の考案については今後の課題と考えている。

謝辞 CBCT 撮影についての大阪大学大学院歯学研究科倫理委員会において許認可を得るにあたり、多大なるお力添えをいただいた、大阪大学歯学部附属病院、玉川裕夫准教授に

感謝いたします。また、評価実験にご協力いただきました、各専門分野の先生方に心より感謝申し上げます。本研究は情報通信研究機構委託研究費「新世代ネットワークサービス基盤技術に関する研究開発（課題ウ）」と日本学術振興会科学研究費補助金若手（B）「ヒト歯茎摩擦音の原理解明とその臨床応用」の支援を受け実施されました。

参 考 文 献

- 1) Adachi, S.: Numerical simulation of fricative sound sources, *Proc. Conference on Turbulence*, Berlin, Germany, Zentrum für Allgemeine Sprachwissenschaft, pp.10–11 (2005).
- 2) American National Standards Institute: Health Level Seven. <http://www.hl7.org/>
- 3) Bondarescu, R., Allen, G., Daues, G., Kelly, I., Russell, M., Seidel, E., Shalf, J. and Tobias, M.: The astrophysics simulation collaboratory portal: A framework for effective distributed research, *Future Generation Computer Systems*, Vol.21, pp.259–270 (2005).
- 4) Fellbaum, C.: *WordNet*, The MIT Press (1998).
- 5) Goodman, A., Rosolowsky, E., Borkin, M., Foster, J., Halle, M., Kauffmann, J. and Pineda, J.: A role for self-gravity at multiple length scales in the process of star formation, *Nature*, Vol.457, pp.63–66 (2009).
- 6) Grandchamp, X., Hirtum, A., Pelorson, X., Nozaki, K. and Shimojo, S.: Towards Sibilant/s/ Modeling: Preliminary Computational Results, *The Journal of Acoustical Society of America*, Melville, NY, USA, p.3579, Acoustical Society of America (2008).
- 7) Lin, M. and W.D., W.: GEVEM: A portal based grid application for computational electromagnetic, *Future Generation Computer Systems*, Vol.24, pp.66–72 (2008).
- 8) Ly, B.L.N., 野崎一徳, 伊達 進, 下條真司: セマンティック Web 技術を用いた医療情報検索システム, 情報処理学会研究報告 (2007-BIO-9), pp.39–45, 情報処理学会 (2007).
- 9) Martone, M.E., Gupta, A., Wong, M., Qian, X., Sosinsky, G., Ludaescher, B. and Ellisman, M.H.: A cell centered database for electron tomographic data, *Journal of Structure Biology*, Vol.138, pp.145–155 (2002).
- 10) Noro, M., Tameshige, F., Baba, K. and Shimojo, S.: Performance evaluation of advanced high-speed data transfer methods in long-distance broadband network, *Proc. IEEE FINA2008* (2008).
- 11) Nozaki, K.: Numerical simulation of the sibilant[s], *Proc. Conference on Turbulence*, Berlin, Germany, Zentrum für Allgemeine Sprachwissenschaft, pp.12–13 (2005).
- 12) Sakamoto, H.: Data grid deployment for high energy physics in Japan, *Computer*

Physics Communications, Vol.177, pp.239–242 (2007).

13) W3C: Resource Description Framework. <http://www.w3.org/RDF/>

(平成 21 年 1 月 27 日受付)

(平成 21 年 5 月 17 日採録)



野崎 一徳 (正会員)

昭和 49 年生。平成 16 年大阪大学大学院歯学系研究科分子病態口腔科学専攻博士課程修了。同年大阪大学サイバーメディアセンター教務職員。計算口腔科学推進のための情報プラットフォーム (DentGrid) の研究開発に従事。平成 21 年より大阪大学臨床医工学融合研究教育センター特任講師。歯茎摩擦音変化の大規模数値計算による予測技術の研究開発に従事。

歯学博士。平成 18 年 IEEE/ACM SC2006 HPC Analytics Challenge Finalist。日本音響学会会員。



伊達 進 (正会員)

昭和 50 年生。平成 14 年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻博士後期課程修了。工学博士。平成 14 年大阪大学大学院情報科学研究科助手。この間 (平成 16 年 2 月から 9 月まで)、米国カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員。平成 17 年大阪大学大学院情報科学研究科特任准教授、平成 18 年大阪大学サイバーメディアセンター准教授、現

在に至る。



中川 真志

平成 15 年関西大学総合情報学部卒業。平成 17 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。3 次元グラフィックス、画像処理、分散処理に興味を持ち、ネットワークを介したボリュームレンダリング、GPU コンピューティングの研究に取り組む。平成 20 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。情報学博士。



馬場 健一

平成 2 年 3 月大阪大学基礎工学部情報工学科卒業，平成 4 年 3 月同大学大学院基礎工学研究科物理系専攻情報工学分野博士前期課程修了，平成 4 年 4 月同大学院博士後期課程に進学し，同年 9 月同大学院退学．同年 10 月大阪大学情報処理教育センター助手として採用，平成 9 年 4 月高知工科大学工学部電子・光システム工学科講師，平成 10 年 12 月大阪大学大型計算機センター助教授，平成 12 年 4 月同大学サイバーメディアセンター助教授，平成 19 年 4 月より准教授として勤務．現在に至るまで広帯域ネットワーク，コンピュータネットワーク，フォトニックネットワークシステムの性能評価に関する研究に従事．電子情報通信学会，IEEE 各会員．



下條 真司（正会員）

修士，博士（工学）を昭和 58 年，昭和 61 年にそれぞれ大阪大学より授与．昭和 61 年大阪大学工学部情報コンピュータ科学専攻助手．平成 2 年から平成 9 年まで大阪大学サイバーメディアセンター（当時大型計算機センター）助教授．カルフォルニア大学アーバイン校の客員研究員．平成 9 年からサイバーメディアセンター教授．平成 17 年から平成 18 年の間サイバーメディアセンターセンター長．現在，独立行政法人情報通信研究機構上席研究員．マルチメディアアプリケーション，ピア・ツー・ピア通信ネットワーク，ユビキタスネットワークシステム，グリッド技術，そして次世代ネットワークの研究に従事．平成 17 年大阪科学賞受賞．IEEE，ISPS，IEICE 各会員．