

# データサイエンス教育における講義・演習環境の構成例

## - Jupyter Notebook を活用した計算機実験を軸に -

横山重俊<sup>†1,3</sup>, 浜元信州<sup>†1</sup>, 長久勝<sup>†2</sup>, 政谷好伸<sup>†3</sup>, 竹房 あつ子<sup>†3</sup>, 合田憲人<sup>†3</sup>

<sup>†1</sup> 群馬大学, <sup>†2</sup> ライフマティクス株式会社, <sup>†3</sup> 国立情報学研究所

yoko@gunma-u.ac.jp

### A Courseware Environment for Data Science Courses

SHIGETOSHI YOKOYAMA<sup>†1,3</sup> NOBUKUNI HAMAMOTO<sup>†1</sup> MASARU NAGAKU<sup>†2</sup>

YOSHINOBU MASATANI<sup>†3</sup> ATSUKO TAKEFUSA<sup>†3</sup> KENTO AIDA<sup>†3</sup>

<sup>†1</sup> Gunma University <sup>†2</sup> Lifematics <sup>†3</sup> National Institute of Informatics

### 概要

Jupyter Notebook を活用した計算機実験を主体にしたデータサイエンス教育向け講義・演習環境を国立情報学研究所が開発する教育現場のワークフローに特化した Jupyter Notebook 実行環境 CoursewareHub により構築し、教育実践を進めている。本稿では、これまでの実験的な取り組みを基礎に、データサイエンス教育の全学教育などへ本格展開する際に課題となる各講義・演習環境の構築・運用コストの削減策について提案する。

## 1 はじめに

情報教育およびデータサイエンス教育の全学展開が必然的な事項として認識され、これらの講義演習の大規模化にどのように対応して行くべきかについて、各教育機関で検討が進められている。群馬大学は、情報数理及びデータ科学を中心とした情報学分野の教育を展開するとともに、これらの素養を持った人材の育成及び研究の推進を図ることを目的として2017年12月1日に教育研究組織「数理データ科学教育研究センター」を設置した。また本学は、「大学における数理・データサイエンス教育の全国展開」の協力校であり、現在「数理データ科学教育研究センター」が中心となり数理・データサイエンス教育の全学展開などを行っている。具体的には、全学へのデータサイエンス教育への展開のためのカリキュラム作成、e-learning 教材の開発やそれらを実施するための基盤作りを行っている。

一方、データサイエンス教育およびプログラミング教育を主なターゲットとして、ノートブックを教育メディア用として活用するためのオープンソースプロダクト Jupyter Notebook[1]

を使った講義演習環境の教育現場への浸透も国内外で始まっている[2]。

この様な状況のもと、群馬大学と国立情報学研究所は共同で情報学関連講義において Jupyter Notebook 実行環境を講義・演習環境として適用する教育実践を行って来た。

本稿では、今後この取り組みをデータサイエンス教育およびそれを支える数学、統計学、情報学の講義・演習環境としてさらに拡大展開する場合に問題となる課題とその解決策について述べる。その課題とは、今後増加する講義毎の講義・演習環境を個別に構築・運用するコストの削減である。

本稿ではこのコスト削減策として、国立情報学研究所の提供する学認クラウドオンデマンド構築サービス[3]の新たなアプリケーションテンプレートを開発し、それを使って各教育機関が自立的に各講義の要求条件に合わせた Jupyter Notebook 実行環境を自身が確保したクラウド上のマシンリソースに動的に構築することを提案する。この提案手法での実践を積み重ねることで、今後取り組みが加速するデータサイエンス教育の全国展開の一助としたい。

## 2 背景

### 2.1 データサイエンス教育カリキュラム

「数理及びデータサイエンスに係る教育強化」の拠点校に設置されたセンターが結集した数理・データサイエンス教育強化拠点コンソーシアムは、データサイエンス教育のための「カリキュラムサンプル」を公開している。「カリキュラムサンプル」は、拠点6大学で開講中あるいは2019年度中に開講予定の数理・データサイエンスに関わる科目のシラバスやその教材を、協力校向けに提供する取り組みである。「カリキュラムサンプル」として提供することになった科目は概ね学部低年次向けの科目であるが、データサイエンスの基礎科目として認識されている数学、統計学、情報学が含まれている。

### 2.2 各大学でカリキュラム実施する際の問題

筆者らは、前節に例示したようなカリキュラムに沿ってデータサイエンス教育を各大学で実施しようとした時に、現状の各大学の環境を考慮すると、主に以下の三つの問題が存在すると考えている。問題1は、大規模講義を全学展開するという要件から発生し、その環境でも一方通行に陥らない講義品質の確保する必要性を言っている。問題2は、そのような品質を確保するために人的コストを増加させることは出来ないという制約のもと、講師に対する支援を基盤側などで確保する必要性を言っている。問題3は、そのような講義を体系的に全学共通の基礎的講義群として育てて行くために、基盤側と教材作成の指針（教育手法）の双方を組合わせて統一感のある講義群とする必要性を言っている。

問題1：受講者エンゲージメント向上

- (1) 講義と演習の連携性
- (2) 演習環境の対話性
- (3) 受講生間の共有性

問題2：講師側への支援機能充実

- (1) 教材開発・配布支援
- (2) 受講生進捗状況把握支援
- (3) 受講生回答回収・集約支援

問題3：数学、統計学、情報学への広範囲適用

- (1) データサイエンス教育+数学教育（統計・線形代数・微分積分など）への適用
- (2) 情報基盤教育・プログラミング教育などへの適用

#### 2.2.1 受講者エンゲージメント向上

数学、統計学、情報学の講義に限らないことではあるが、講義対象となる知識範囲が広範なことに加えて講義時間に制約があるため、どうしても概要的な説明が主体となってしまう。このため単なる座学だけの講義では、特に、全学を対象とした場合、受講側のエンゲージメントを確保するのが難しい。この課題を克服しようと、アクティブラーニング手法を適用することを奨励されているが、実際の実践内容については各講師に委ねられている。

アクティブラーニング実践の一つの方向として講義と演習の連携性を保ち、受講生が自主的に実行できる対話的な演習環境を提供すること、および受講生間での演習実行に関して進捗の共有やわからなさ[4]の共有などを利用することが有用であると考えられる。

#### 2.2.2 講師側への支援機能充実

データサイエンスに関する知識を提供するカリキュラムを全学的に展開する要求に現状の教員体制で対応するための現実的な方法として、講義動画などを活用した反転授業を援用することが考えられる。この際、反転授業をスムーズに実施する方法を工夫する必要がある。さらにこれらの授業は対象受講者が大人数になることが多く、大規模講義の品質を確保するための仕組みを導入する必要もある。

例えば、従来型の講義や反転授業のためのe-learning講義と組み合わせるアクティブラーニングの実践方法の一つとして計算機実験を主体とした演習を常用する手法を取ることがある。

少人数の講義なら各受講生の進捗状況は適宜巡回するなどして把握可能であるが、ある程度規模以上になると各実験内容も理解したTeaching Assistant (TA) 配置が必要となり実

施のハードルが高くなる。また、TA がたとえ十分配置できたとしても彼らに対する事前指導・養成などの手当てが必要となり、これも講師の負担となる。このため、基盤側で教材の開発から配布、そして前述の受講生状況把握や回答回収・集約を支援することで、その講師負担を軽減できると考える。

### 2.2.3 数学, 統計学, 情報学へ広範囲適用

カリキュラム作成上の制約で、新しく導入するデータサイエンス教育と既存の情報教育を統合することが現実的に起こっている。この統合を行うにあたって双方を親和性を持たせた形で統合を実現する必要がある。さらに今後データサイエンス教育の関連講義が増加することが予想できるので、その際に基盤や教育手法の広範囲への拡大が可能な手当てを用意しておく必要がある。

筆者らはこれらの問題を解決するために、対話性が高く受講生も編集可能なメディアとしての Jupyter Notebook を講義や演習で活用することが有効であるという仮説のもとにこれまで実験的な教育実践を進めている。その実践を通じて確認できた問題解決への見通しを関連研究との比較により第 3 章で説明し、今までの実践の概要とそこではまだ解決できていない課題について第 4 章で述べる。さらに第 5 章で課題解決への提案を行い、第 6 章で提案に沿った実装例を紹介、第 7 章でその実装例についての机上評価、最後に第 8 章で今後の取り組みについても触れる。

## 3 関連研究

Jupyter Notebook は、データサイエンスやプログラミングの教材として広く使われている。例えば、Project Jupyter が英語圏におけるさまざまな取り組みをまとめた”A gallery of interesting Jupyter Notebooks[2]” などがある。Jupyter Notebook の教育・研究への適用を組織的に行っている事例は数多く存在するが [5, 6] , 教育への大規模な適用例としては以下

の二例が代表的である。

### 3.1 data8 [7]

UC Berkeley Data8: Foundation of Data Science コースは、経済データ、文書コレクション、地理データ、ソーシャルネットワークなど、実際のデータセットを実際に分析しながら、コンピュータプログラミングと統計的推論における重要な概念とスキルを学ぶ。教科書と課題を含むコースのためのすべての材料は、Creative Commons ライセンスの下、無料でオンライン利用可能である。さらに受講生が自分の Jupyter Notebook を編集して実行するための環境が提供されている。これは、コース用に特別に設計された Kubernetes ベースの JupyterHub と、課題を受講生の環境にロードする課題サーバから構成されている。

### 3.2 Syzygy [8]

PIMS(The Pacific Institute for the Mathematical Sciences) は Compute Canada および Cybera と協力して研究者と教育者をサポートするために JupyterHub プラットフォームプロジェクト Syzygy を立ち上げた。Syzygy は、既存の大学・研究機関の認証情報を使用してクラウドでホストされ Jupyter Notebook へのアクセスを提供し、データサイエンスのスキル開発を促進している。

Data8, Syzygy を代表とする JupyterHub をこれらの基盤とするプロジェクトでは、Jupyter Notebook 環境をマルチユーザ化するという JupyterHub の汎用的な機能を活用して、それに Github などを課題提供用に利用するハイブリッドなシステム構成になっている。

これらの取り組みにおいて第 2 章で提示した問題のうち Jupyter Notebook の持つ対話性などの特徴を活かすことで、問題 1 (1), (2) については有効な取り組みであることが確認されて来ている。また、Jupyter Notebook の当初のターゲットであったデータ解析教育やプログラミング教育などの教材も揃って来ている。それらの教材を使った教育実績が出て来ている。そ

ういう意味では問題 3 についてもあるレベルでは解決できている。

一方、それぞれの受講生の Jupyter Notebook 環境を汎用的な JupyterHub により提供するという関連研究の取り組みの範囲では、教育のシーンに特化した問題 1 (3) や問題 2 については未解決であると言える。そして問題 3 についても、基盤側が提供する統一的な環境に当てはまる場合は問題がないけれど、講義の分野範囲が広がった際にそれぞれの講義の要求に柔軟に対応できるアーキテクチャーではないため、それが教材作成の幅を制限する。また、基盤は統一的であるが教材内での Jupyter Notebook の活用方法について統一的な方針が用意されていない。このため、その基盤の上に講義毎にその担当者が自由に教材開発をしているので、講義間の連携性確保という観点では工夫の余地がある。

## 4 現在までの取り組みと解決すべき課題

### 4.1 現在までの取り組み

前章で述べた関連研究調査をもとに群馬大学と国立情報学研究所を中心とする共同研究プロジェクトで前述の背景で述べた問題の解決を図ることを目標にいくつかの教育実践を行っている [9-12]。

プロジェクトの基本方針は以下の通りである。  
 方針 1：関連研究では未解決の問題 2 とまだ改善の余地のある問題 3 に対応するために、講義・演習環境として使う Jupyter Notebook 実行環境を大学などの教育現場でのワークフローに合わせてカスタマイズすることで講師及び受講生の利便性を向上させる。

方針 2：講義・演習環境上で実行する Jupyter Notebook の利用方法を“計算機実験”として統一し、教材は受講生の実験実施の枠組みを作り出し、その枠組みに合わせて開発する [13-21]。

プロジェクト取り組み方針を説明するために、図 1 に Jupyter, JupyterHub, CoursewareHub の関係とそこでのプロジェクトの方針についてその位置付けを記述した。

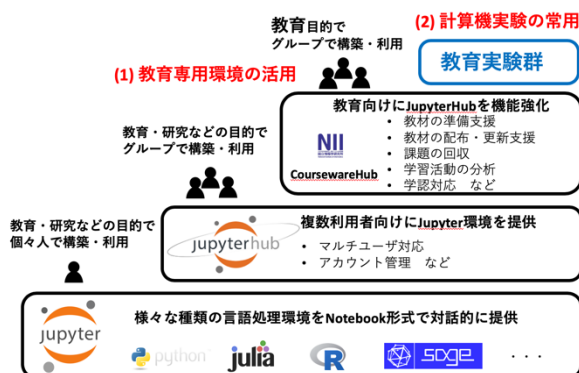


図 1 プロジェクト取り組み方針

Jupyter Notebook は、それを個人が研究環境や学習環境として構築し利用するためには良く整備されたオープンソースプロダクトである。しかし、複数の受講生に対して講義・演習環境として提供する場合や複数の研究者が利用する研究環境を構築したい場合は、アカウントの管理や、実行環境の分離など、いくつかの機能が不足している。

これに対する答えとして、Project Jupyter は、JupyterHub を開発した。JupyterHub は、複数の利用者に対して Web ベースで利用可能な演習環境を、サーバからサービス提供する。JupyterHub には複数のアカウントを管理するとともに、アカウント毎に分離した実行環境を多数並列に提供するなどの機能がある。しかし、JupyterHub は、講義・演習のライフサイクル全体をカバーするには至っていない。講義・演習内容に合わせた実行環境の作り込みを含む教材の準備、教材の配布・更新、課題の回収、学習活動の分析などの機能が備わっていない。

このため、実行環境の作り込みにエンジニアの支援が必要となったり、GitHub など外部のリポジトリを通じて教材を配布する必要があったり、教材の軽微な誤りを見つけて修正しても迅速に再配布する手段がなかったり、いくつかの場面で不便がある。

国立情報学研究所では、講義・演習の準備から実施までに渡る煩雑な講師の作業負担を軽減することを目的として以下のような機能追加、拡張を実装した CoursewareHub を開発した。

前節で触れた関連研究との関係はプロジェクトの取り組み方針を示す図 1 に示す通り関連研究では汎用の Jupyter Hub をそのまま利用するのに比べて国立情報学研究所で教育向けに特化して機能拡張している CoursewareHub [22, 23] を利用することと Jupyter Notebook の利用を実験実施の枠組みに合わせ計算機実験を講義・演習で常用することである。

これらの方針に沿った教育実践を通じて CoursewareHub を利用することによる受講生のエンゲージメント向上及び講師負担の軽減や情報基盤や数学における講義への適用性について、まだ事例としては少ないながらもその有効性についての手応えを感じることができている。

## 4.2 解決すべき課題

前節で述べた情報基盤や数学における教育実践を行うために、国立情報学研究所のクラウド環境内に国立情報学研究所クラウドチームが CoursewareHub を構築し、それに対する運用監視サービスも同時に構築、監視することで講義の実施に問題がない体制を作り上げている。これらの構築にあたってはこのチームが開発している基盤構築技術である Literate Computing for Reproducible Infrastructure (LC4RI) の手法を用いて、その構築・運用コストの削減を実現している [24]。

しかしながら、このような体制は実験的なサイズでのみ実施可能なものであり、各教育機関が行うデータサイエンス教育の全学展開に適用することはできない。

従って、我々の実験成果を活かした実運用への橋渡しのソリューションを見つけることが今後解決すべき課題となる。具体的には、各教育機関がそれぞれの事情に合わせた Jupyter Notebook 実行環境の構築と運用のためのコストを実施可能な範囲に止める仕掛けを作り上げる必要がある。

つまり、現状の我々の取り組みでは第 3 章に述べた「各講義の要求に柔軟に対応できるアーキテクチャーではない」という部分についての

解決策を我々も提示できていないので、これへの対応が必要なのである。

## 5 提案する解決策

各講義の要求に柔軟に対応できるアーキテクチャーにするための方策として、国立情報学研究所クラウドチームが構築・運用している CoursewareHub を SaaS (Software as a Service) 化し、その SaaS 機能として各講義への対応の柔軟性を追求するというアプローチも考えられる。但し、このアプローチでは SaaS というアーキテクチャーが抱え持つ限界から自ずと柔軟性にも限りがある。

SaaS 化のアプローチと並行して、さらなる柔軟性を追求する必要がある場合への対応を考える必要がある。

それは各教育機関が自らリソース確保から構築する CoursewareHub の仕様の設定、そしてその確保したリソース上への CoursewareHub 構築・運用を各機関が自立して実施できることが必要になる。これは単純に JupyterHub のコードに加えて CoursewareHub のコードをオープンソース化すれば解決する単純な問題ではない。各機関の CoursewareHub の構築・運用をサポートする仕掛けが重要である。

その仕掛けとして、国立情報学研究所の提供する学認クラウドオンデマンド構築サービスのアプリケーションテンプレートとして CoursewareHub 用のものを開発する。そのアプリケーションテンプレート（以後、CoursewareHub テンプレートと呼ぶ）を使って各講義の要求条件に合わせた Jupyter Notebook 実行環境をクラウド上に動的に構築することでデータサイエンス教育における講義・演習環境の構築・運用のコストの削減を目論む。

学認クラウドオンデマンド構築サービスは、SINET5 と学術・商用クラウドの資源を活用したアプリケーションの構築・運用を支援する。まず基盤ソフトウェアにより、SINET5 の L2 VPN を介した利用機関とクラウドとのネットワーク設

定支援を行い、仮想クラウドの構築準備をする。次に、基盤ソフトウェアで用意した環境上での仮想クラウド構築を支援する。またアプリケーションテンプレートによりアプリケーション環境構築・運用の手順書を提供しする。

アプリケーションテンプレートは、研究・教育目的で広く利用されているアプリケーションの構築・運用手順をテンプレート化したものが Jupyter Notebook 形式で提供される。これにより、クラウドでのアプリケーション構築に不慣れな利用者に対してクラウドの利活用を支援がなされている。現時点では、アプリケーションテンプレートとして HPC テンプレート、LMS テンプレート、VDI テンプレート、ゲノム解析テンプレートが開発され、それぞれの分野で活用されている。このアプリケーションテンプレートを順次用意していくという戦略はまだ途上ではあるものの可能性は示されていて、今回既存のアプリケーションテンプレートに加えデータサイエンス教育における講義・演習環境の構築・運用のための CoursewareHub テンプレートを追加するという解決策を目論んだ。

## 6 実装

前述のように国立情報学研究所クラウドチームはすでに CoursewareHub の構築手順書を LC4RI の考えにもとづき Jupyter Notebook 形式で記述し、それを用いて我々の教育実践で使っている環境を構築し、実際の運用を行っている。今回の実装では、この手順書を外部機関でも利用できる状態に汎化する作業を行った。

汎化の主な作業は、CoursewareHub を構築する際に利用するクラウド資源を抽象化することと認証部分の接続パターンを利用環境に合わせて複数用意することであった。

前者については、学認クラウドオンデマンド構築サービスが提供する利用するクラウドを抽象化するためのミドルウェア Virtual Cloud Provider (VCP) を利用することで、クラウド上の計算資源である Virtual Cloud Node (VC ノー

ド) と仮想ネットワークを利用した CoursewareHub の構築を Jupyter Notebook 形式で記述することで実現した。

後者については、Reverse Proxy を用いたベーシック認証、CoursewareHub のローカル認証機能、学認連携による認証の三レベルについて Jupyter Notebook の記述を用意した。

VCP を利用した CoursewareHub の構築のためには図 2, 3 にその一部を示したような以下の三つの Jupyter Notebook (001-VC ノードの起動.ipynb, 002-JupyterHub のセットアップ, 003-CoursewareHub のセットアップ) を用意した。これが CoursewareHub テンプレートのプロトタイプとなる。

### 001-VC ノードの起動.ipynb:

利用するクラウドを指定して必要なスケールで VC ノードと仮想ネットワークを用意し、そのクラスタを Ansible で制御可能にし、他の二つの Notebook で前提とする Docker Swarm 環境を作り出す。

### 002-JupyterHub のセットアップ:

JupyterHub のインストールに必要なコンポーネント類の準備と本体のインストールを行う。

### 003-CoursewareHub のセットアップ:

JupyterHub への機能強化のためのコンポーネント類のインストールを行う。

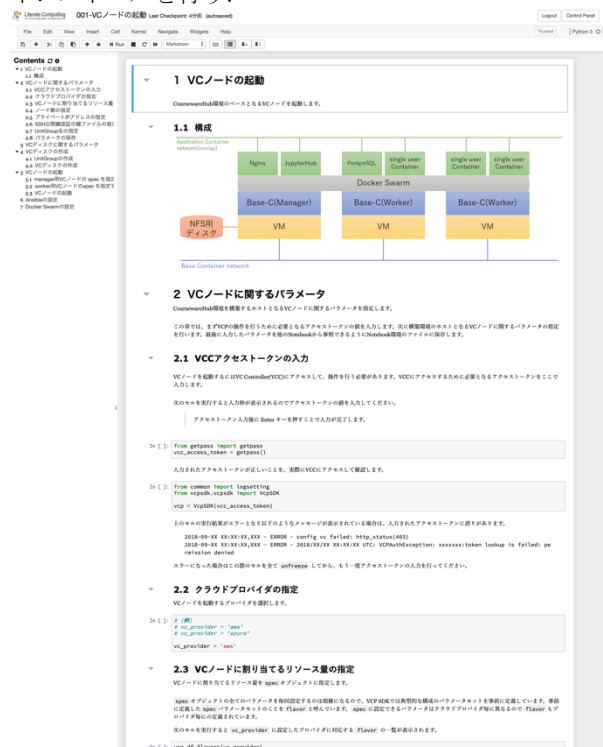


図 2 001-VC ノードの起動.ipynb (一部)

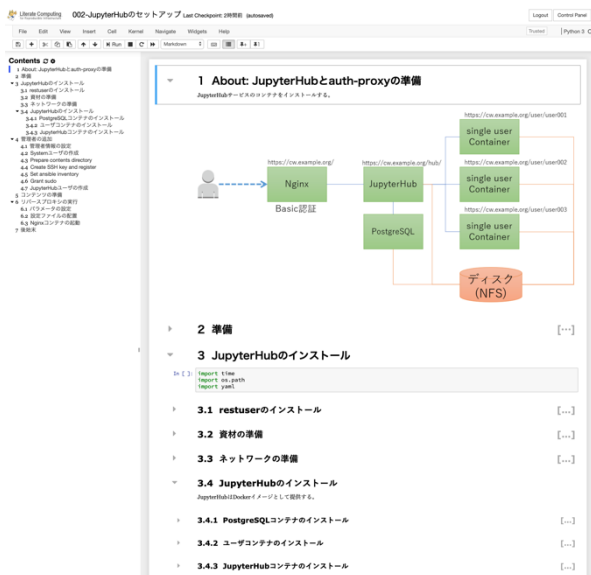


図3 002-JupyterHub のセットアップ(一部)  
 これら三つの Jupyter Notebook に必要なパラメータを設定して学認クラウドオンデマンド構築サービスで実行することによりパブリッククラウド Amazon Web Services (AWS) 上に構築した。構築後の CoursewareHub に 2019 年前期講義で使用した教材を持ち込み動作確認のためにアクセスして利用している様子を図4に示す。

以上説明したように提案する解決策が上記方針に沿って実装が可能であることを確認できた。

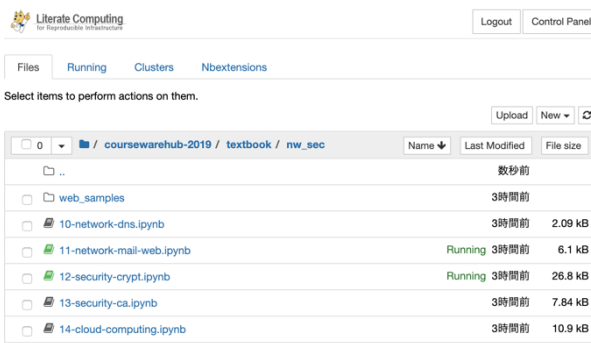


図4 VCP を利用した CoursewareHub 構築例

## 7 評価

今後、実利用シーンで実際にこの実装をベースとした CoursewareHub の構築・運用とその利用を進めて行って評価を進める必要があるが、現時点机上でできる範囲の評価について述べておきたい。

まず、データサイエンス教育用 Jupyter Notebook 実行環境構築にかかる項目は、利用す

るクラウドの選定と利用準備(契約他)と構築する CoursewareHub のパラメータ決定と学認クラウドオンデマンド構築サービスの利用リテラシーの獲得と実際の上記 CoursewareHub テンプレートの実行である。

コスト想定であるが、利用するクラウドの選定と利用準備(契約他)については、昨今の状況からしてすでに出来ている機関も多いため特に計上しないで良いと仮定する。

構築する CoursewareHub のパラメータ決定については CoursewareHub テンプレート内に明示的なパラメータ設定部分があり、さらにデフォルト設定値も含めすでに実績のあるものを共有することでコストを大幅に削減できる可能性がある。

学認クラウドオンデマンド構築サービスの利用リテラシーの獲得については頻繁に開催される本サービスのハンズオンセミナーに参加することで実現できると言える。このセミナーは最大単日で完了するものである。

CoursewareHub テンプレートの実行については、パラメータ設定などがなされているので、ほぼクラウド内の仮想マシン起動や必要ソフトウェアのインストール時間だけになる。

以上、特に問題が発生しない前提での楽観的な見積もりではあるが、仮に各フェーズのどこかで問題が発生した場合にも、実行した CoursewareHub テンプレートの中に含まれる実行結果やそのテンプレート内に設定したパラメータ値などを共有することで問題の解決を加速出来る仕組みが含まれている。

## 8 今後の展開

2019 年度前期講義まで利用していた国立情報研究所のクラウド内に CoursewareHub テンプレート無しで構築した環境に加えて、前章で紹介した CoursewareHub テンプレートを利用した環境で講義を実施しその際の構築コスト評価や実利用時に出現した問題点などを抽出して行く。

さらには、今回は教育用に特化した

CoursewareHub テンプレートについて述べたが、データサイエンス研究のために同様の枠組みで図5に示すような CoursewareHub テンプレートの派生のテンプレートとして ResearchHub テンプレートと呼べるようなものについても検討を進めたい。これは今後研究実験環境の再現性および共有につながる可能性を持っているからである。

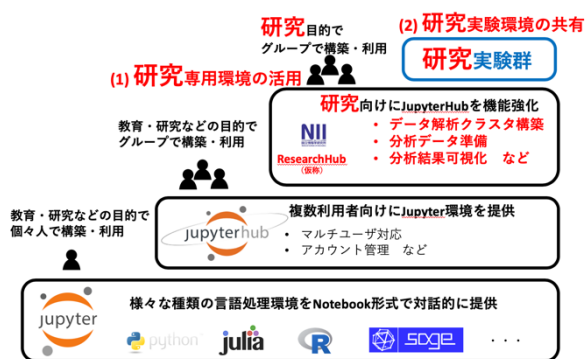


図5 ResearchHub の位置付け

## 参考文献

- [1] "Project Jupyter", <https://jupyter.org/>, (参照 2019-09-01)
- [2] "A gallery of interesting Jupyter Notebooks": <https://github.com/jupyter/jupyter/wiki/A-gallery-of-interesting-Jupyter-Notebooks>, (参照 2019-09-01)
- [3] 竹房あつ子, 佐賀一繁, 丹生智也, 横山重俊, 合田憲人, 学認クラウドオンデマンド構築サービスの推進, AXIES 2018 年度年次大会
- [4] 吉岡拓也, 「自律的学習者」を育てるための実践研究 - 「わからなさの共有」を通して -, 2019 年度 数学教育学会 夏季研究会 (関西エリア)
- [5] "JupyterHub", <https://jupyter.org/hub>, (参照 2019-09-01)
- [6] A Gallery of JupyterHub Deployments: <https://jupyterhub.readthedocs.io/en/stable/gallery-jhub-deployments.html>, (参照 2019-09-01)
- [7] Data8: <http://data8.org>, (参照 2019-9-01)
- [8] Syzygy: <http://syzygy.ca>, (参照 2019-9-01)
- [9] 横山重俊, 浜元信州, 政谷好伸, Jupyter Notebook を活用したアクティブラーニングへのトライアル - 暗号技術教育を例に -, 2019 年度 数学教育学会 夏季研究会 (関西エリア)
- [10] 横山重俊, 浜元信州, 政谷好伸, Jupyter Notebook を活用した実験数学におけるリアルタイム進捗収集ツール, 2019 年度 数学教育学会 夏季研究会 (関東エリア)
- [11] 横山重俊, 浜元信州, 政谷好伸, 合田憲人, Jupyter Notebook を活用した情報教育実践, 情報処理学会 情報教育シンポジウム SSS2019
- [12] 横山重俊, 浜元信州, 政谷好伸, Jupyter Notebook を活用した実験数学環境に関する提案, 2019 年度 数学教育学会 秋季例会
- [13] 山本芳彦, 実験数学入門, 岩波書店, 2000 年
- [14] 小池正夫, 実験・発見・数学体験, 数学書房, 2011
- [15] 銀林浩, 実験数学のすすめ: 課題に取り組む楽しい授業, 国土社 1993
- [16] ジミー・ドイ: シミュレーションに基づく統計的推論とアクティブ・ラーニングの授業事例, 数学科におけるデータサイエンス(1), 日本数学教育学会誌, 101(3), pp.28-39.
- [17] 清水克彦, 目代充寿, Mathematica for Student を用いた実験数学の教材開発, 数理解析研究所講究録 第 1780 巻 2012 年 213-220
- [18] 原田耕平, 世紀の科学教育における実験・観察・課題研究: 数学分野から, 日本科学教育学会年会論文集 19 巻 (1995), 9-10
- [19] 清水克彦, 実験数学による創造性の育成についての検討: テクノロジーによる帰納・類比, そして推測の導入, 日本科学教育学会年会論文集 / 34 巻 (2010)
- [20] 岩崎紀子, 棚橋源太郎の理科教授論における「実験」観 - 子どもの「自己活動」の具体化としての「生徒実験」分析, 日本教育方法学会紀要「教育方法学研究」第 25 巻 1999 年
- [21] 鬼塚史朗, 理科教育における実験の意義, 物理教育 第 46 巻 第 5 号 (1998)
- [22] "CoursewareHub", [https://github.com/NII-cloud-operation/CoursewareHub-LC\\_platform](https://github.com/NII-cloud-operation/CoursewareHub-LC_platform), (参照 2019-09-01).
- [23] 長久勝, 政谷好伸, 合田憲人. Notebook による講義・演習環境の開発. 第 27 回教育学習支援情報システム研究会 2019 年 3 月 22 日 情報処理学会
- [24] 長久勝, 政谷好伸, 谷沢智史, 中川晋吾, 合田憲人. Literate Computing for Reproducible Infrastructure による研究・教育環境の構築と運用. 大学 ICT 推進協議会 2017 年度年次大会, 2017-12-13.