

カリキュラム CS2013 と CC2001 の比較・考察

角田 博保^{1,a)} 石畑 清² 中谷 多哉子³

概要: 2013年12月, 米国にて ACM/IEEE-CS によるコンピュータ科学カリキュラム標準 CS2013 が公表された. それまでの標準だった CC2001 の刊行後 10 年以上が経ち, その後継として作成されたものである. 日本では, 情報専門学科カリキュラム標準「J07」が 2008 年に公表されているが, 現在, 改訂への活動が始まりつつある. J07 は, CC2001 を元として作られたものであるため, CC2001 が CS2013 にどのように改訂されたかを知ることは重要である. 本報告では, CS2013 と CC2001 を比べ, 知識体系 (BOK) を中心に, どのように改訂されたのかを比較, 考察する.

1. はじめに

情報処理学会では「情報専門学科カリキュラム標準 J07」[1] を 2008 年に公表している. これは情報科学技術分野のカリキュラムについて約 10 年ごとに公表しているものの最新版である. 1991 年の「大学の情報系学科におけるコンピュータ科学の専門教育コアカリキュラムの提言 (J90)」[2], 1997 年の「大学の理工系学部情報系学科のためのコンピュータサイエンス教育カリキュラム J97」[3] に引き続くものである. 時代の変化に応じて, このように改訂作業が行われ, 現在, 次期改訂が必要な時期となっている.

これらのカリキュラムは, ACM が 1968 年, 1978 年, 1988 年, 1991 年と行ったコンピュータ科学の教育カリキュラムの改訂, ACM と IEEE Computer Society が協同で制定したカリキュラムモデル CC2001 [4] を大いに参考にしている.

ACM と IEEE Computer Society は 2013 年にコンピュータ科学カリキュラム CS2013 [5] を公表した. これは CC2001 の中間改訂版 CS2008 をさらに大幅に改訂した版となっている. J07 が CC2001 を参考にしたことから, CC2001 と CS2013 を比較検討することは今後の J07 後継のカリキュラムを考えるにあたり, 必要な調査だと考えられる.

本稿では, CS2013 と CC2001 の比較を行う. 特に知識体系 (Body of Knowledge) のユニット構成とトピックスを

中心に比較し, 考察する. 学習到達目標については深く触れない.

2. CS2013 の概要

CS2013 の目次と各節の説明を図 1 に示す. 本体は全 514 ページである. 本文が 54 ページであるのに対して, 付録 A の BOK が 149 ページ, 付録 C のコース例が 235 ページと, 大部分は付録にあてられている.

BOK とは学び方ないし教え方を捨象して, 学生が学ぶべき内容を定めたものである. 科目ではなく BOK を与えることが CC2001 以来のカリキュラム標準の方針となっている. まずは, BOK について簡単に説明する.

BOK は 3 階層をしている. エリア, ユニット, トピックスである. CS2013 の BOK はコンピューティングを学ぶために典型的な分野である 18 のエリア (知識分野) からなっている. 各エリアはそれぞれ複数のユニットから構成される. 各ユニットは複数のトピックスと学習到達目標 (learning outcome) によって説明される. 各トピックスは Core か Elective に分類される. また, Core には Tier1 と Tier2 の区別がある. CC2001 では Core は 1 種類であり, ユニット単位でコア時間が設定されたただけだったが, CS2013 ではトピックスごとに Core Tier1, Core Tier2, Elective の区別がつけられている.

CS2013 を基にコンピュータ科学のカリキュラムを構築する場合, Core Tier1 は必ずカリキュラムに含め, 全受講生がその内容をカバーすることを求めている. Core Tier2 はほとんど含めるべき (90–100%) ではあるが, 最低でも 80% を含めるべきだとしている. Elective は適切なレベルで含めることが求められている. Core だけしか含んでないカリキュラムは不完全だとしている.

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo
182-8585, Japan

² 明治大学
Meiji University

³ 放送大学
Open University

a) kakuda@cs.uec.ac.jp

CS2013 の目次と説明

1. 序

CS2013 の原則：

- CS は情報系科目の基礎となること
- カリキュラムサイズを一定に抑えること
- 機関のニーズにこたえること

BOK は 18 エリア (CS2001 より 4 増, 2 変更)

職業的訓練 (Professional Practice)

ソフトスキル (チームワークやコミュニケーション)

自分と違う背景や分野を持つ人とうまく働ける能力

専門的能力と起業家精神

カリキュラムとコースの実例

知識エリアをカバーした実例

2. カリキュラムの原則

- (1) 多くの分野に対応できる柔軟性を提供
- (2) 様々な職業につけるように設計
- (3) 卒業生の習熟レベルのためのガイダンスを提供
- (4) 革新的でその分野の最近の発展に追従したカリキュラム設計を許すような推奨項目を提供
- (5) 様々な機関に適切なガイドラインを提供
- (6) コア知識のサイズを管理
- (7) 変化が激しい分野で卒業生が成功できるように設計
- (8) トピックスを選ぶ際に最大限の柔軟性を提供するとともに CS の全卒業生が持つべき基本的スキルと知識を識別
- (9) トピックスをコースやカリキュラムに組織化する際に最大の柔軟性を提供
- (10) CS2013 の開発と見直しには広範囲の意見を聴取

3. 卒業生の持つべき能力

- CS の技術的理解
- 共通のテーマや原理に習熟
- 理論と実践の相互作用の理解
- システムレベルの見方
- 問題解決スキル
- プロジェクトの経験
- 生涯にわたり学習すること
- 職業的責任を持つこと
- コミュニケーションスキル, 組織スキル
- コンピューティングの広い応用性への自覚
- 領域固有な知識の獲得

4. BOK の概要

- 3 種類のトピックス (Tier1, Tier2, Elective)
- Learning outcome (Familiarity, Usage, Assessment)
- BOK の構成

5. 入門コース

6. 大学 (組織) ごとの課題

- A. BOK (149 ページ)
- B. Migrating to CS2013 (24 ページ)
- C. コース例 (235 ページ)
- D. カリキュラム例 (52 ページ)

下の三つのレベルが設けられている。

- Familiarity
その概念が何か分かる。
- Usage
その概念を具体的に利用, 応用できる。
- Assessment
その概念を様々な視点で考え, 問題解決に適切なアプローチを選ぶことができる。

3. CS2013 と CS2001 の違いの要約

CS2013 の Appendix B に, Migrating to CS2013 として CC2001 との違いをまとめてある。その前書きと結論から重要と思われる部分だけを抜粋して翻訳したものを以下に示す。

技術の進歩と需要の増大に応じて, CS2013 ではトピックスの構成を変え, トピックスの数を増やした。しかし, 授業の時間を増やして, より大きな知識体系に対応することは難しいと感じる大学が多いだろう。CS2013 では, カリキュラムのサイズを抑制するために, 次のようなアプローチをとった。

- コアを Tier1 と Tier2 に分けた。これによって, それぞれの項目の重要度がより明確になる。
- 共通のテーマと認識されているものについて, 知識エリアの構成を変えた。
- 学生に期待される知識のレベルを明確にした。Familiarity レベルとされた outcome は, Usage レベルよりも浅いカバーでよく, Usage レベルは Assessment レベルよりも浅いカバーでよい。
- それぞれのエリアのトピックスを state of the art を反映するように変えた。

CS2013 は, 1110 個の outcome を挙げている。そのうち半分強がコアである。Tier1 は, outcome 全体の 1/5 強になっている。outcome の半分以上が Familiarity レベル, 1/3 が Usage レベルである (Assessment レベルは 1/6 程度という計算になる)。

560 個のコア outcome のうち, 160 以上が新しいもので, さらに 150 程度が CC2001 のものから大きく変わっている。20 を越える CC2001 のトピックスがコアからはずされた。elective になったものと, 完全に削除されたものがある。

結論として, CC2001 と CS2013 の違いは大きい。outcome のうちの半分ほどが新しいか, または大きく変わった。これらの多くは, CS2008 に示されていて, CS 教育の現状を反映している。カリキュラムを CS2013 ガイドラインに合わせる方向に徐々に移行している大学も多いだろう。そう

図 1 CS2013 の目次と説明

CS2013 が CC2001 から大きく変わったのは学習到達目標 (learning outcome) に学習レベルを設けた点である。以

表 1 エリアごとのコア時間の比較 (CS2013 対 CC2001)

エリア	CS2013			CC2001	増減
	Tier1	Tier2	合計	Core	
AL Algorithms and Complexity	19	9	28	31	-3
AR Architecture and Organization	0	16	16	36	-20
CN Computational Science	1	0	1	0	+1
DS Discrete Structures	37	4	41	43	-2
GV Graphics and Visualization	2	1	3	3	0
HCI Human-Computer Interaction	4	4	8	8	0
IAS Information Assurance and Security	3	6	9	—	+9
IM Information Management	1	9	10	10	0
IS Intelligent Systems	0	10	10	10	0
NC Networking and Communication	3	7	10	15	-5
OS Operating Systems	4	11	15	18	-3
PBD Platform-based Development	0	0	0	—	0
PD Parallel and Distributed Computing	5	10	15	—	+15
PL Programming Languages	8	20	28	21	+7
SDF Software Development Fundamentals	43	0	43	38	+5
SE Software Engineering	6	22	28	31	-3
SF Systems Fundamentals	18	9	27	—	+27
SP Social Issues and Professional Practice	11	5	16	16	0
コア時間合計	165	143	308	280	+28

でない大学は、computing の世界の情勢が大きく変わっていることに対応できているかどうか、カリキュラムを再検討すべきである。

4. BOK の各エリアごとの比較

この節では CS2013 と CC2001 の BOK をエリアごとに比較する。

CS2013 と CC2001 のユニットレベルでの比較 (コア時間含む) を付録につける。左右が対応するように配置してある。また、CS2013 と CC2001 における BOK の各エリアのコア時間の比較を表 1 に示す。

CS2013 のコア時間は、Tier1 の 165 時間と Tier2 の 143 時間を合わせて 308 時間であり、CC2001 の 280 時間の 1 割増しになっている。しかし、CS2013 では Tier2 からトピックスを取捨選択してよいことにしている (ただし最低でも 80% は必要)。Tier2 の 90% を採用すると 293.7 時間、80% を採用すると 279.4 時間となり、CC2001 並みの時間でカリキュラムを実現可能である。

以下、各エリアの違いをまとめたものを示す。CS2013 では learning outcome を重視しているが、違いを要約することが難しいため、ここではユニット構成とトピックスの違いに限って分析した。

AL — Algorithms and Complexity

コア時間が 31 から 28 に減っている。Appendix B によると、大きく変わったのは P と NP に関する内容をコアに昇格したことである。また、並列アルゴリズムの類を PD に移したことが目につく。ほかは、項目の整理や加除があ

るが、全体として大きく変わってはいない。

ユニットの名前がほとんどすべて変わっているが、細かな語の入れ替えがほとんどで、似た内容のユニットの対応付けは難しくない。ユニットレベルの大きな変化は、ユニットが四つ減っていることである。Distributed algorithms (AL4), Cryptographic algorithms (AL9), Geometric algorithms (AL10), Parallel algorithms (AL11) の四つだ。Distributed と Parallel は PD に、Cryptographic は IAS に移動したと理解できる。Geometric は Advanced Data Structures Algorithms and Analysis のユニットの中に組み入れられた。

Advanced Data Structures Algorithms and Analysis は、Advanced な雑多なものを詰め込んだようなユニットになっている。増えたのは Balanced trees, Graphs, Advanced data structures, Network flows, Linear Programming, Number-theoretic algorithms, Stochastic algorithms, Approximation algorithms, Probabilistic analysis などである。

Algorithmic Strategies のユニットに Dynamic Programming が追加された、Fundamental Data Structures and Algorithms に入れ替えがあった、などの細かな変化はかなりあるが、全体として大きな違いはないと思われる。

P と NP に関するユニットにコア時間 6 が与えられた。NP 完全問題の例を示すよう求めているのは新しい。

AR — Architecture and Organization

ハードウェアやアーキテクチャを扱うエリアである。ユニット構成は、ほとんど変わっていない。枯れた分野であって、教える内容にそれほどの変化がないということだ

と思われる。

ただし、コア時間が36から16に減っている点は大きな変化である。その理由として、一部の話題がSFやPDに移動されたことがある。ARのユニットの変化は、Architecture for networks and distributed systems (AR9)がなくなったことだけだが、これなどはPDに役割を譲ったことが明白である。論理設計の基本部分は、SFでカバーするように見直しが行われた。

コア時間減の理由には、ARの相対的な重みの低下という面もありそうだ。たとえば、命令パイプラインやマイクロプログラミングを扱うFunctional organization (AR6)というユニットがあって、内容は変わっていないのだが、コア時間7が0にされている。

Appendix Bでは、ARで教える内容として、multi-core parallelism, virtual machine support, power as a constraintなどを以前よりも重視し、CAD toolsの使用をトピックスに明記したことが大きな変化だとしている。

個々のトピックスを見れば、ほかにも追加されたキーワードがあるが、この分野の進歩を受けたもので、特に重要視すべきものはなさそうだ。新しいキーワードの例を挙げると、FPGA、スタックによる関数呼出しの実現、マルチプロセッサのcache consistency, vector processor, GPUなどがある。

CN — Computational Science

CN自体は前からあるが、フルスペルの言葉が変わっている。前はComputational Science and Numerical Methodsだった。CC2001はCNのコア時間を0としていて、ある意味で衝撃的だったが、今回はIntroduction to Modeling and Simulationに1時間を割り当てている。

ユニット構成も内容も大きく変わっている。前は、数値計算が基本で、それを使ってできることを並べてあったが、今度はModeling and Simulationが中心で、それを実現するための技術を列挙している。Appendix Bではusing computational power to solve problems in domains both inside and outside of traditional CS boundariesがCNの設計方針だとしている。

新旧ともNumerical Analysisのユニットがあって、内容は変わっていないが、前は最初のユニットだったものが最後のユニットになっていて、位置付けが大きく違う。Modeling and Simulationのユニットも両者に存在するが、内容はまったく違う。CC2001では、乱数とか連続/離散シミュレーションとかの技術についてだった。CS2013では、現実をモデリングするための各種技法を詳しく論じている。ほかにIntroduction to Modeling and Simulationのユニットまで設けられている。

CC2001にあったOperations research (CN2)やHigh-performance computing (CN4)のユニットはなくなった。

線形計画法や待ち行列理論はModeling and Simulationのユニットで、モデリングの技法として論じられている。スーパーコンピュータの各種応用は消えてしまったようだ。

Modeling and Simulationを支える技術として、Processing (技術的詳細), Interactive Visualization (可視化), Data, Information, and Knowledge (情報や知識の扱い)の三つのユニットが新設されている。

DS — Discrete Structures

離散数学に属する事項を扱うエリアで、内容はほとんど変わっていない。ユニット構成も同じだ。ユニットのタイトルのFunctions, relations, and setsがSets, Relations, and Functionsに変わったが、言葉の順序の入れ替えだけの違いだ。

コア時間は43から41に減った。Discrete Probabilityのユニットのコア時間だけ増えていて、ほかのユニットが少しずつ減っている。

GV — Graphics and Visualization

GVというエリアは前からあるが、フルスペルの言葉が変わっている。前はGraphics and Visual Computingだった。コア時間は3で変わらないが、ユニット数が11から6へと五つ減った。CC2001と比べて、Graphic systems (GV2)とGraphic communication (GV3)が除かれ、Virtual reality (GV10)がHCIへ、Computer vision (GV11)がISへと移動され、まとめ方を調整することで、五つの減となっている。つまり、CC2001では、コンピュータグラフィックス、可視化、仮想現実、コンピュータビジョンの四つの分野をカバーするとしていたが、このうちの二つを他のエリアに移動した。これに応じて、タイトルも修正された。

CGの基礎技術が強化され、レンダリング、モデリングも内容を更新している。

Computer AnimationとVisualizationのユニットにも新たなトピックスが追加されている。

HCI — Human-Computer Interaction

名前は変わらないが、省略形がHCからHCIに変更された。CC2001ではソフト開発に重点を置いた狭い範囲の構成であったが、CS2013では、最近ますます重要になっている設計方法と学際的なアプローチに応じて強調点が変わっている。また、CC2001ではGUIに特化していたが、CS2013はGUIは単なるUIの一つという扱いになっている。コア時間は8と同じであるが、ユニットとしては大幅な変更となっている。

前の限定的だったり、もはや古くなったユニットを整理し、ユニット名からGUIを除き、新では以下の五つのユニットでまとめ直している。

- Foundations (基本)
- Designing Interaction (設計)
- Programming Interactive Systems (製作/開発/プログラミング)
- User-Centered Design and Testing (ユーザ中心設計とテスト (評価))
- Collaboration and Communication (協調作業とコミュニケーション)

さらに以下のユニットを新規で追加している。

- New Interactive Technologies
- Statistical Methods for HCI
- Human Factors and Security
- Design-Oriented HCI
- Mixed, Augmented and Virtual Reality

IAS — Information Assurance and Security

新しいエリアである。世界が情報技術に大きく依存するようになってきて、セキュリティが重要になっていることを受けて、知識体系に追加された。

次のようなユニットからなる。

- Foundational Concepts in Security (セキュリティの基本概念)
- Principles of Secure Design (安全な設計の原理)
- Defensive Programming (防衛的プログラミング)
- Threats and Attacks (脅威と攻撃)
- Network Security
- Cryptography (暗号学)
- Web Security
- Platform Security (プラットフォームセキュリティ)
- Security Policy and Governance (セキュリティポリシーとガバナンス)
- Digital Forensics (デジタル科学捜査)
- Secure Software Engineering (安全なソフトウェア工学)

全部でコア時間 9 が割り当てられているが、更に、他の知識体系に 63.5 時間分が分散配置されていると書いてある。つまり、他のユニットのトピックスとして、あるいは、補助的なユースケースとして取り扱われるものとされているが、あまり明確には示されていない。

IM — Information Management

データベースをはじめとする情報管理についてのエリアである。コア時間 10 は変わらない。ただし、Tier1 は 1 時間のみで、残り 9 時間は Tier2 である。

CC2001 では 14 ユニットあったが、Relational databases に関する二つのユニットが一つに統合され、Hypertext and hypermedia (IM12) と Digital libraries (IM14) が除かれ、その代わりに、Indexing ユニットが追加されて、都合 2 ユニット減である。

Indexing ユニットが新設されたことから、CS2013 では、かなり早くから index を意識させる方針をとっているようだ。CC2001 では、実現に関するものは Physical database design (IM9) で初めて述べる構成だった。

全体的にトピックスの追加はあるが、基本は同じである。

IS — Intelligent Systems

いわゆる人工知能に関する事項を扱うエリアである。コア時間は 10 のまま変わっていない。ほとんどは elective な内容にとらえられているようだ。

Fundamental Issues のユニットは、概論に過ぎないが、内容が総入れ替えになっている。IS の技術をどう応用するかという観点でまとめ直したようだ。

Appendix B によると、Machine Learning に重きを置いたのが大きな違いだそうだ。実際、Basic Machine Learning のユニットが純増になっていて、概論的な内容を取り上げている。これのコア時間は 2 である。技術的な詳細は、Advanced Machine Learning のユニットで述べていて、すべて elective だが、内容は従来のものからかなり強化されている。

Search と Knowledge Representation は、古典的な IS の項目であって、新旧ともに Basic と Advanced の二つずつのユニットがあてられている。Basic の内容はほとんど変わっていないが、Advanced の内容は全面的に再編されている。

AI planning systems (IS9) というユニットがなくなったが、その内容は Advanced Representation and Reasoning に吸収されている。

Reasoning Under Uncertainty と Perception and Computer Vision の二つのユニットが新設された。

Agents と Natural Language Processing の二つのユニットは、従来と同じ方針でまとめられている。後者は、それぞれの項目がかなり詳細化されているようだ。

NC — Networking and Communication

CC2001 にも NC というエリアがあるが、Net-Centric Computing の略だった。同じ略語のまま、エリアのタイトルを変えている。ネットワークと通信の重要性が増していることは確かで、新しいタイトルが自然だと思われる。タイトルの変更は、視点の変更も意味する。エリア内のユニット構成は大幅に変わった。その一つの現れとして、ユニットのタイトルで CC2001 と CS2013 で同じものは一つもない。

コア時間は 15 から 10 に減っている。web application や mobile device に関する話題は PBD に移り、セキュリティは IAS に移った。

Appendix B によれば、NC で教える内容の変化は、IP と Ethernet の比較や wireless networking をより重要視

し、reliable delivery や implementation of protocols and applications をカバーするようになったことである。

全体として、web application 中心だった構成から、よりバランスのよい構成になったように見える。CC2001 の時は、分野の揺籃期であり、まだ編成方針に確たるものがなかったということだと思われる。

CC2001 のユニットのうち、次のものがなくなった。Network security (NC3), The web as an example of client-server computing (NC4), Building web applications (NC5), Network management (NC6), Compression and decompression (NC7), Multimedia data technologies (NC8), Wireless and mobile computing (NC9). このうち、Wireless and mobile computing は CS2013 の Mobility に対応するかも知れない。ほかは、元々 elective だったこともあって、他のエリアに部分的に移す程度の対応になっている。

ほかに CS2013 の NC から削除されたトピックスには、ネットワークの歴史、ISO 7-layer reference model、標準化、remote procedure call などがある。

新しいユニットのうちの四つは、レイヤーの上から四つに対応している。Networked Applications, Reliable Data Delivery, Routing and Forwarding, Local Area Networks である。

ほかに新しいユニットは次の三つである。Resource Allocation, Mobility, Social Networking. social networking をユニットのレベルで取り上げるのは意外だった。

OS — Operating Systems

コア時間が 18 から 15 に減った。OS エリアは SF, NC, IAS, PD エリアと相補的である。システム管理は Computer Science ではなくて Information Technology だとも言われるが、すべての学生は基本的管理行動ができるべきだとしていて、セキュリティと保護はコアに含め、仮想記憶の実現は選択に移している。デッドロックの詳細は PD へ移動した。

Overview of operating systems (OS1) では、History of operating system development がなくなった。

Concurrency (OS3) は大幅に減らされ、減った分は PD へ移された。プログラマの視点からの並行プログラミングを削って、OS の implementation に限ったということだと思われる。

Memory management (OS5) も減らされた。仮想記憶に関することは AR でカバーするという方針なのだろうか。その代わりに、Virtual Machines のユニットが追加された。Paging and virtual memory もこのユニットのトピックスになっている。仮想化という観点でまとめ直したものの中に仮想記憶も含めたようだ。

Security and protection (OS7) は縮小したが、一方でコ

ア時間が与えられた。IAS が新設されたので、Encryption などの詳細はそちらに移したのだと思われる。OS としての最小限のものに限ったということだろう。

Scripting (OS12) は削除された。

PBD — Platform-Based Development

新しいエリアである。特定のソフトウェアプラットフォームに常駐したソフトウェアアプリケーションの設計、開発に関わるものである。

汎用のプログラミングと違い、プラットフォームベースの開発にはプラットフォーム特有の制約がある。たとえば、ウェブプログラミング、マルチメディア開発、モバイルコンピューティング、アプリ開発、ロボティクスは開発に制約のある特定のサービス/API/ハードウェアを提供するプラットフォームの例である。

次のようなユニットからなる。

- Introduction (プラットフォームの概要)
- Web Platforms
- Mobile Platforms
- Industrial Platforms
- Game Platforms

いずれも elective であり、コア時間はない。現実的な必要性から導入されたもので、コアとして採用するまでにはいたっていないのだと思われる。

PD — Parallel and Distributed Computing

CC2001 では、並列分散に関する話題がいくつかのエリアに分散していて、しかもすべて elective だった。それを一つにまとめた上でコア時間 15 を割り当てた。この扱いが必要になるほど、分野の重要度が増しているという判断があった。

Parallel and Distributed Computing という切り口で切っているため、取り上げるテーマはさまざまである。programming models, programming pragmatics, algorithms, performance, computer architecture, distributed systems などのテーマが含まれている。

ユニット構成は次のようになっている。

- Parallelism Fundamentals (基本概念の説明)
- Parallel Decomposition (並列に走る単位に仕事を分けるやり方)
- Communication and Coordination (shared variable, message passing, atomicity など)
- Parallel Algorithms, Analysis, and Programming (並列アルゴリズム)
- Parallel Architecture (並列アーキテクチャ、数多くのものが取り上げられている)
- Parallel Performance (負荷分散、性能測定、データの管理など)

- Distributed Systems (かなり具体的内容だ、最初のトピックスは Faults になっている)
- Cloud Computing
- Formal Models and Semantics

SDF (旧 PF) — Software Development Fundamentals

PF (Programming Fundamentals) が改訂されて、名前も変わった。ソフトウェア開発に必要な基本概念と技術を扱うエリアで、PF (プログラミング入門) が元になっているが、AL から基本解析部分を、SE から開発過程を、DS から基本データ構造を、PL からプログラミング言語概念を取り込んでいる。特定のプログラミングパラダイムに特有の部分は、一律な扱いのために、PL に移している。これらにより、コア時間が 38 から 43 に増強されている。

Algorithms and problem-solving (PF2) は SDF の Algorithms and Design に移ったが、コア時間 6 から 11 に大幅増となった。abstraction, program decomposition, アルゴリズムの役割など、基本的事項をみっちり教える趣旨のようだ。

Fundamental data structures (PF3) は SDF の Fundamental Data Structures に対応するが、実装関連の話が削除された。2 時間の減少になっている。

Recursion (PF4) は、SDF の Fundamental Programming Concepts, Algorithms and Design のほか、AL の Algorithmic Strategies, PL の Language Transition and Execution にそれぞれ一部が移され、単独のユニットではなくなった。Event-driven programming (PF5) も、PL に移された。

新しいユニットの Development Methods は、開発に関する基本的な部分として、Software design (SE1, コア 8 時間), Software processes (SE4, コア 2 時間), Software evolution (SE7, コア 3 時間) から内容を取り込んだもので、コア 10 時間になっている。

PL — Programming Languages

プログラミング言語を扱うエリアである。構成が大きく変わった。コア時間が 21 から 28 に増えている。ユニット数が 11 から 17 に増えている。教える内容も強化されていて、何から何まで変わってしまったという印象だ。

最初の二つのユニットがオブジェクト指向と関数型言語で、この二つに大半のコア時間を割り当てている。特に、関数型は従来は elective だったものに 7 時間をあてている。エリア全体のコア時間増のすべてを食っている勘定だ。従来は古典的な手続き型言語を中心とするまとめ方だったが、今回は mutable state のない言語に力点を置いたとしている。かなり大きな変化だが、その背景にはプログラミング言語の専門家集団による働きかけがあったらしい。

三つ目のユニットは、Event-Driven and Reactive Pro-

gramming で、これは CC2001 の PF5 (Event-driven programming) を移転したものだ。

このほかのユニットも変化が大きく、トピックスレベルの比較はとてもできない。以下、ユニット名レベルの比較にとどめる。

言語の種類ごとの議論のユニットは、二つから四つに増えている。オブジェクト指向と関数型は変わらないが、上述の Event-Driven ... のほかに論理型言語が増えている。前は論理型を扱うユニットはなかった。

プログラミング言語総論のようなユニットは、三つから一つに減った。Virtual machines (PL2) と Programming language design (PL11) がなくなって、Language Pragmatics だけになった。

意味論のユニットは一つで変わらない。

個別の言語仕様を扱うユニットは、三つから四つになった。このうち Type Systems のユニットが一つ増えた (Basic Type Systems の追加)。Declarations and types (PL4) と Abstraction mechanisms (PL5) がなくなって、Advanced Programming Constructs と Concurrency and Parallelism が追加された。

言語処理系に関するユニットは、二つから七つに増えた。前は Language translation の Introduction (PL3) と system (PL8) の二つだったが、言語処理のフェーズごとに詳しい議論をするユニットが設けられた。新しいユニットは、Program Representation, Language Translation and Execution, Syntax Analysis, Compiler Semantic Analysis, Code Generation, Runtime Systems, Static Analysis である。プログラム解析や garbage collection などを取り上げられている。

SE — Software Engineering

ソフトウェア、およびシステムを作る技術を扱うエリアである。コア時間が 31 から 27 に減った。コア時間の減少分 4 は、Using APIs (SE2, コア 5 時間), Component-based computing (SE9) が SDF に移動されたことによる。また、Specialized system development (SE12) は、リアルタイムシステム、分散システムなどを紹介するユニットであったが、削除された。ただし、様々なカリキュラムの中で、これらの特別なシステムが技術に与えている影響を教員、学生双方とも理解する必要があると、SE の前書きに明記された。新たに追加されたユニットは Software Construction である。これにはコーディング技術、変更の影響分析などが含まれており、SDF の Development Methods と内容が重複している。そのほか、SDF の 9 コア時間分が SE と重複することとなった。

SE でも個々のトピックスを見れば、追加されたキーワードがあるが、全体的に内容を詳細化し、ユニットの範囲を明記したものであり、CC2001 との対応がとれないほどの

変化はない。分野の進歩を受けた変化の中には、リファクタリング、および開発工程間の関係の追加、テスト方法と内容の拡充がある。これらは、新規開発を前提としていた従来のカリキュラムを、既存システムの改変を前提として信頼性の向上を目指すという世の中の要請を考慮したものと考えられる。特筆すべき興味深い点は、保守性 (maintainable) という用語は残されているものの、保守 (maintenance) という単語がユニットのトピックスから消え、evolution が使われるようになったことである。また、CMMI の普及に伴い選択トピックスではあるが、Software Process に能力成熟度の概念が追加された。

SF — Systems Fundamentals

新しいエリアである。ハードから OS を経由してアプリケーションに到るまでをシステムという観点でまとめたとしている。AR, NC, OS, PD などに分散していたテーマをまとめた。統一的な視点は programming for performance だとしている。

次のようなユニットからなる。

- Computational Paradigms (論理ゲートからスレッドまで)
- Cross-Layer Communications (レイヤーのあるシステム)
- State and State Machines (素子レベルのアーキテクチャ)
- Parallelism (並列処理概観)
- Evaluation (性能測定)
- Resource Allocation and Scheduling (プロセッサやメモリーのスケジューリング)
- Proximity (メモリー階層など)
- Virtualization and Isolation (仮想化の一般論)
- Reliability through Redundancy (信頼性の一般論)
- Quantitative Evaluation (性能測定の方法)

コア時間が合計 27 与えられている。

項目の大半に AR, OS, PD などへの cross reference がある。このエリアの新設の経緯から見て当然だが、別の見方をすれば、完全に独立したエリアになっていないとも言える。

SP — Social Issues and Professional Practice

CC2001 では Social and Professional Issues という名前だった。コア時間は 16 で変わらない。

CC2001 の Risks and liabilities of computer-based systems (SP5) は一部のみを扱い、Philosophical frameworks (SP10) は削除された。その代わりに、HCI や SE と関連する Professional Communication と Sustainability が新規にコアとして増えた。

History はコアからはずれた。トピックスが増えたユニットが多いが、特に、Intellectual Property と Economies of Computing が大幅に増加した。

5. おわりに

CS2013 と CC2001 の BOK の比較を行った。エリアによって大幅な改訂がなされたところと、ほとんど変わらないところがあった。時代の流れを反映した改訂になっていることがわかる。

参考文献

- [1] 情報処理学会コンピュータ科学教育委員会: カリキュラム標準コンピュータ科学 J07-CS 報告書, 情報処理学会 (2009).
- [2] 大学等における情報処理教育検討委員会: 大学等における情報処理教育のための調査研究報告書, 情報処理学会 (1991).
- [3] 情報処理学会情報教育カリキュラム調査委員会 J97 策定ワーキンググループ: 大学の理工系学部情報系学科のためのコンピュータサイエンス教育カリキュラム J97 (第 1.1 版), 情報処理学会 (1999).
- [4] The Joint Task Force on Computing Curricula: Computing Curricula 2001 Computer Science, IEEE Computer Society / ACM (2001).
- [5] The Joint Task Force on Computing Curricula: Computer Science Curricula 2013, ACM / IEEE Computer Society (2013).

付録：CS2013 と CC2001 のユニットレベルでの比較

ユニットの終わりにある括弧はコア時間である。Tier1, Tier2 の時間を (Tier1+Tier2) と表記している。

CS2013 ユニット	CC2001 ユニット
AL. Algorithms and Complexity (19+9) AL/Basic Analysis (2+2) AL/Algorithmic Strategies (5+1) AL/Fundamental Data Structures and Algorithms (9+3) AL/Basic Automata Computability and Complexity (3+3) AL/Advanced Computational Complexity AL/Advanced Automata Theory and Computability AL/Advanced Data Structures Algorithms and Analysis	AL. Algorithms and Complexity (31) AL1. Basic algorithmic analysis (4) AL2. Algorithmic strategies (6) AL3. Fundamental computing algorithms (12) AL4. Distributed algorithms (3) AL5. Basic computability (6) AL6. The complexity classes P and NP AL7. Automata theory AL8. Advanced algorithmic analysis AL9. Cryptographic algorithms AL10. Geometric algorithms AL11. Parallel algorithms
AR. Architecture and Organization (0+16) AR/Digital Logic and Digital Systems (0+3) AR/Machine Level Representation of Data (0+3) AR/Assembly Level Machine Organization (0+6) AR/Memory System Organization and Architecture (0+3) AR/Interfacing and Communication (0+1) AR/Functional Organization AR/Multiprocessing and Alternative Architectures AR/Performance Enhancements	AR. Architecture and Organization (36) AR1. Digital logic and digital systems (6) AR2. Machine level representation of data (3) AR3. Assembly level machine organization (9) AR4. Memory system organization and architecture (5) AR5. Interfacing and communication (3) AR6. Functional organization (7) AR7. Multiprocessing and alternative architectures (3) AR8. Performance enhancements AR9. Architecture for networks and distributed systems
CN. Computational Science (1+0) CN/Introduction to Modeling and Simulation (1+0) CN/Modeling and Simulation CN/Processing CN/Interactive Visualization CN/Data, Information, and Knowledge CN/Numerical Analysis	CN. Computational Science and Numerical Methods (0) CN1. Numerical analysis CN2. Operations research CN3. Modeling and simulation CN4. High-performance computing
DS. Discrete Structures (37+4) DS/Sets, Relations, and Functions (4+0) DS/Basic Logic (9+0) DS/Proof Techniques (10+1) DS/Basics of Counting (5+0) DS/Graphs and Trees (3+1) DS/Discrete Probability (6+2)	DS. Discrete Structures (43) DS1. Functions, relations, and sets (6) DS2. Basic logic (10) DS3. Proof techniques (12) DS4. Basics of counting (5) DS5. Graphs and trees (4) DS6. Discrete probability (6)
GV. Graphics and Visualization (2+1) GV/Fundamental Concepts (2+1) GV/Basic Rendering GV/Geometric Modeling GV/Advanced Rendering GV/Computer Animation GV/Visualization	GV. Graphics and Visual Computing (3) GV1. Fundamental techniques in graphics (2) GV2. Graphic systems (1) GV3. Graphic communication GV4. Geometric modeling GV5. Basic rendering GV6. Advanced rendering GV7. Advanced techniques GV8. Computer animation GV9. Visualization GV10. Virtual reality GV11. Computer vision

CS2013 ユニット	CC2001 ユニット
<p>HCI. Human-Computer Interaction (4+4) HCI/Foundations (4+0) HCI/Designing Interaction (0+4) HCI/Programming Interactive Systems HCI/User-Centered Design and Testing HCI/New Interactive Technologies HCI/Collaboration and Communication HCI/Statistical Methods for HCI HCI/Human Factors and Security HCI/Design-Oriented HCI HCI/Mixed, Augmented and Virtual Reality</p>	<p>HC. Human-Computer Interaction (8) HC1. Foundations of human-computer interaction (6) HC2. Building a simple graphical user interface (2) HC3. Human-centered software evaluation HC4. Human-centered software development HC5. Graphical user-interface design HC6. Graphical user-interface programming HC7. HCI aspects of multimedia systems HC8. HCI aspects of collaboration and communication</p>
<p>IAS. Information Assurance and Security (3+6) IAS/Foundational Concepts in Security (1+0) IAS/Principles of Secure Design (1+1) IAS/Defensive Programming (1+1) IAS/Threats and Attacks (0+1) IAS/Network Security (0+2) IAS/Cryptography (0+1) IAS/Web Security IAS/Platform Security IAS/Security Policy and Governance IAS/Digital Forensics IAS/Secure Software Engineering</p>	
<p>IM. Information Management (1+9) IM/Information Management Concepts (1+2) IM/Database Systems (0+3) IM/Data Modeling (0+4) IM/Indexing IM/Relational Databases IM/Query Languages IM/Transaction Processing IM/Distributed Databases IM/Physical Database Design IM/Data Mining IM/Information Storage and Retrieval IM/Multimedia Systems</p>	<p>IM. Information Management (10) IM1. Information models and systems (3) IM2. Database systems (3) IM3. Data modeling (4) IM4. Relational databases IM5. Database query languages IM6. Relational database design IM7. Transaction processing IM8. Distributed databases IM9. Physical database design IM10. Data mining IM11. Information storage and retrieval IM12. Hypertext and hypermedia IM13. Multimedia information and systems IM14. Digital libraries</p>
<p>IS. Intelligent Systems (0+10) IS/Fundamental Issues (0+1) IS/Basic Search Strategies (0+4) IS/Basic Knowledge Representation and Reasoning (0+3) IS/Basic Machine Learning (0+2) IS/Advanced Search IS/Advanced Representation and Reasoning IS/Reasoning Under Uncertainty IS/Agents IS/Natural Language Processing IS/Advanced Machine Learning IS/Robotics IS/Perception and Computer Vision</p>	<p>IS. Intelligent Systems (10) IS1. Fundamental issues in intelligent systems (1) IS2. Search and constraint satisfaction (5) IS3. Knowledge representation and reasoning (4) IS4. Advanced search IS5. Advanced knowledge representation and reasoning IS6. Agents IS7. Natural language processing IS8. Machine learning and neural networks IS9. AI planning systems IS10. Robotics</p>

CS2013 ユニット	CC2001 ユニット
<p>NC. Networking and Communication (3+7) NC/Introduction (1.5+0) NC/Networked Applications (1.5+0) NC/Reliable Data Delivery (0+2) NC/Routing and Forwarding (0+1.5) NC/Local Area Networks (0+1.5) NC/Resource Allocation (0+1) NC/Mobility (0+1) NC/Social Networking</p>	<p>NC. Net-Centric Computing (15) NC1. Introduction to net-centric computing (2) NC2. Communication and networking (7) NC3. Network security (3) NC4. The web as an example of client-server computing (3) NC5. Building web applications NC6. Network management NC7. Compression and decompression NC8. Multimedia data technologies NC9. Wireless and mobile computing</p>
<p>OS. Operating Systems (4+11) OS/Overview of Operating Systems (2+0) OS/Operating System Principles (2+0) OS/Concurrency (0+3) OS/Scheduling and Dispatch (0+3) OS/Memory Management (0+3) OS/Security and Protection (0+2) OS/Virtual Machines OS/Device Management OS/File Systems OS/Real Time and Embedded Systems OS/Fault Tolerance OS/System Performance Evaluation</p>	<p>OS. Operating Systems (18) OS1. Overview of operating systems (2) OS2. Operating system principles (2) OS3. Concurrency (6) OS4. Scheduling and dispatch (3) OS5. Memory management (5) OS6. Device management OS7. Security and protection OS8. File systems OS9. Real-time and embedded systems OS10. Fault tolerance OS11. System performance evaluation OS12. Scripting</p>
<p>PBD. Platform-Based Development (0+0) PBD/Introduction PBD/Web Platforms PBD/Mobile Platforms PBD/Industrial Platforms PBD/Game Platforms</p>	
<p>PD. Parallel and Distributed Computing (5+10) PD/Parallelism Fundamentals (2+0) PD/Parallel Decomposition (1+3) PD/Communication and Coordination (1+3) PD/Parallel Algorithms, Analysis, and Programming (0+3) PD/Parallel Architecture (1+1) PD/Parallel Performance PD/Distributed Systems PD/Cloud Computing PD/Formal Models and Semantics</p>	
<p>PL. Programming Languages (8+20) PL/Object-Oriented Programming (4+6) PL/Functional Programming (3+4) PL/Event-Driven and Reactive Programming (0+2) PL/Basic Type Systems (1+4) PL/Program Representation (0+1) PL/Language Translation and Execution (0+3) PL/Syntax Analysis PL/Compiler Semantic Analysis PL/Code Generation PL/Runtime Systems PL/Static Analysis PL/Advanced Programming Constructs PL/Concurrency and Parallelism PL/Type Systems PL/Formal Semantics PL/Language Pragmatics PL/Logic Programming</p>	<p>PL. Programming Languages (21) PL1. Overview of programming languages (2) PL2. Virtual machines (1) PL3. Introduction to language translation (2) PL4. Declarations and types (3) PL5. Abstraction mechanisms (3) PL6. Object-oriented programming (10) PL7. Functional programming PL8. Language translation systems PL9. Type systems PL10. Programming language semantics PL11. Programming language design</p>

CS2013 ユニット	CC2001 ユニット
<p>SDF. Software Development Fundamentals (43+0) SDF/Algorithms and Design (11+0) SDF/Fundamental Programming Concepts (10+0) SDF/Fundamental Data Structures (12+0) SDF/Development Methods (10+0)</p>	<p>PF. Programming Fundamentals (38) PF1. Fundamental programming constructs (9) PF2. Algorithms and problem-solving (6) PF3. Fundamental data structures (14) PF4. Recursion (5) PF5. Event-driven programming (4)</p>
<p>SE. Software Engineering (6+21) SE/Software Processes (2+1) SE/Software Project Management (0+2) SE/Tools and Environments (0+2) SE/Requirements Engineering (1+3) SE/Software Design (3+5) SE/Software Construction (0+2) SE/Software Verification and Validation (0+4) SE/Software Evolution (0+2) SE/Software Reliability (0+1) SE/Formal Methods</p>	<p>SE. Software Engineering (31) SE1. Software design (8) SE2. Using APIs (5) SE3. Software tools and environments (3) SE4. Software processes (2) SE5. Software requirements and specifications (4) SE6. Software validation (3) SE7. Software evolution (3) SE8. Software project management (3) SE9. Component-based computing SE10. Formal methods SE11. Software reliability SE12. Specialized systems development</p>
<p>SF. Systems Fundamentals (18+9) SF/Computational Paradigms (3+0) SF/Cross-Layer Communications (3+0) SF/State and State Machines (6+0) SF/Parallelism (3+0) SF/Evaluation (3+0) SF/Resource Allocation and Scheduling (0+2) SF/Proximity (0+3) SF/Virtualization and Isolation (0+2) SF/Reliability through Redundancy (0+2) SF/Quantitative Evaluation</p>	
<p>SP. Social Issues and Professional Practice (11+5) SP/Social Context (1+2) SP/Analytical Tools (2+0) SP/Professional Ethics (2+2) SP/Intellectual Property (2+0) SP/Privacy and Civil Liberties (2+0) SP/Professional Communication (1+0) SP/Sustainability (1+1) SP/History SP/Economies of Computing SP/Security Policies, Laws and Computer Crimes</p>	<p>SP. Social and Professional Issues (16) SP1. History of computing (1) SP2. Social context of computing (3) SP3. Methods and tools of analysis (2) SP4. Professional and ethical responsibilities (3) SP5. Risks and liabilities of computer-based systems (2) SP6. Intellectual property (3) SP7. Privacy and civil liberties (2) SP8. Computer crime SP9. Economic issues in computing SP10. Philosophical frameworks</p>