

なぜ計算情報科学・技術を学ぶか？

Unix (Linux) / Internet の歴史と 学問の情報化への展開を踏まえて

石渡正樹・倉本圭・鎌田俊一・高木聖子
北海道大学 大学院理学研究院・理学院宇宙理学専攻

林祥介・高橋芳幸・檜村博基・はしもとじょーじ
神戸大学 大学院理学研究科・惑星学専攻

2025年4月18日

目次

- 情報実習の目標
- 計算機・ネットワークの発展の歴史
 - ハードウェアの歴史概観
 - 情報処理環境への発展
 - Unix
 - X Window System
 - Internet
- 情報実習の先にある高い理想に向けて
 - 地球惑星科学の情報化

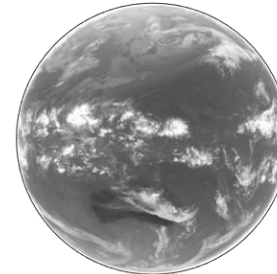
情報実習の目標

なぜ情報実習か？：背景

• 地球惑星科学は総合科学

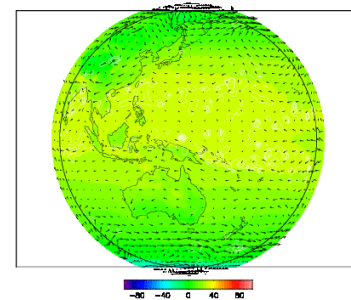
- 多様な「知識」を動員
 - 物理, 化学, 生物, 地学, etc.
- 多様なデータを利用
 - 衛星データ, 地震波データ, 惑星探査データ, etc.
- 多様な手法を駆使
 - 観測, 実験, 数値計算
- 多様な情報交換方法を活用
 - ネットワーク上での意見交換、成果を公開, etc.
- **いずれの場面でも計算機・ネットワーク技術は不可欠**

衛星観測

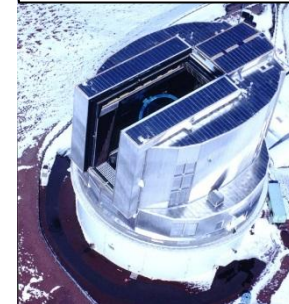


http://www.jma-net.go.jp/sat/data/web89/himawari8_first_image.html

数値計算

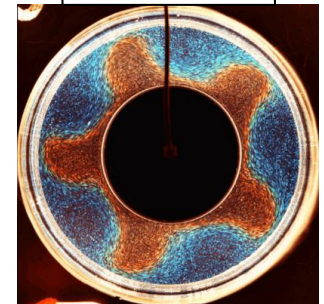


すばる望遠鏡



http://www.naoj.org/photo/enclosure_300.jpg

流体実験



https://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_j/

情報実習の具体的な目標

- 情報技術の基本概念

- 計算機(パソコン)の構造(CPU・メモリ・etc.)
- Unix(Linux)・ネットワークプロトコル・クライアントサーバシステム

を実体験し, 具体的な仕組みを知ることにより

自分の情報環境は自分で構築・維持できるようになる
(他人に迷惑をかけないネットワーク社会の大人になる)

- 自分の置かれている**ネットワーク環境がどのように成り立っているのかを理解する**

情報実習の先にある高い理想

- 計算機・ネットワークに関する高いスキル
(技術と倫理)を身につけ、情報の発信者へ
 - 各研究室で活躍、企業で / 個人事業者として活躍
 - 情報を使う人ではなく、情報を生み出す人材・情報を組み合わせて新たな世界を作る人材が出てきて欲しい
- 情報技術を用いた地球惑星科学の発展へ貢献できる人材が(勝手に)生まれる・育つ
 - 互いに協力する・教えあうことにより自発的に成長できるようになってもらいたい

計算機・ネットワークの 発展の歴史

計算する機械から
情報を処理する機械への発展

なぜ歴史を知る必要があるのか

- 計算機ネットワークのしくみの理解のために
 - 自分の環境が形成された過程を知る
 - 計算機・ネットワークはどのようにして、今の姿を持つに至ったのか
 - 文化的背景を知る
 - 計算機・ネットワークの発展をもたらした背景は何だったのか
 - 歴史を知るのは物事を理解する基本手順
- これから進むべき道を模索するための素養を身につけるために

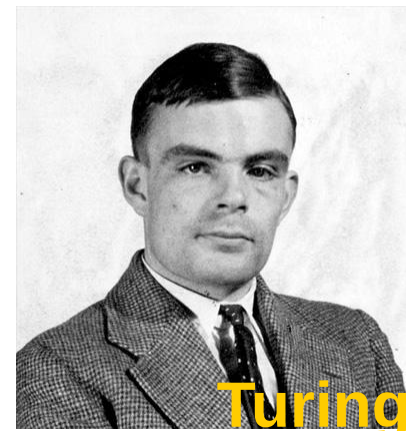
ハードウェアの歴史概観

(電子)計算機のはじまり:原理

• 計算機の原理・情報理論

– Alan Turing (1936, 1938)

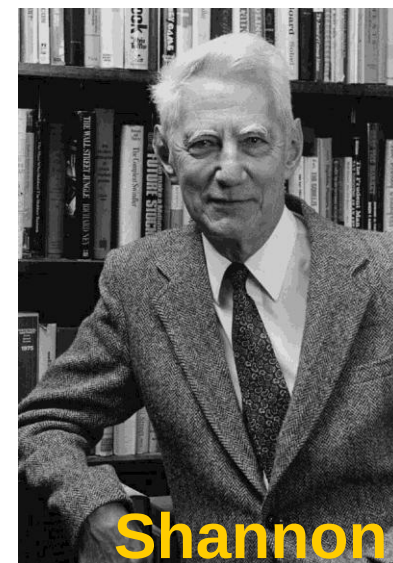
- ドイツ軍の暗号 Enigma の
解読で有名
(参考: 映画イミテーションゲーム)
- Turing Machine を提案
 - 計算機の計算手順をモデル化
 - あらゆる計算機械の動作は Turing Machine の動作に還元できる



<https://www.princeton.edu/turing/alan/photos/>

– Claud Elwood Shannon (1948)

- 全ての情報は「ビット」にコード化できる
- ビット: binary digit (2進数字) の略



<http://www.research.att.com/~njas/doc/ces5.html>
95-3510XclaudexshannonXolderXphoto.jpg

電子計算機の実駆け

- **Atanasoff Berry Computer (ABC machine)**

- Atanasoff & Berry (1939)
- 連立一次方程式の求解専用
- 米国特許訴訟 (ABC vs ENIAC) では世界初の計算機と認定される

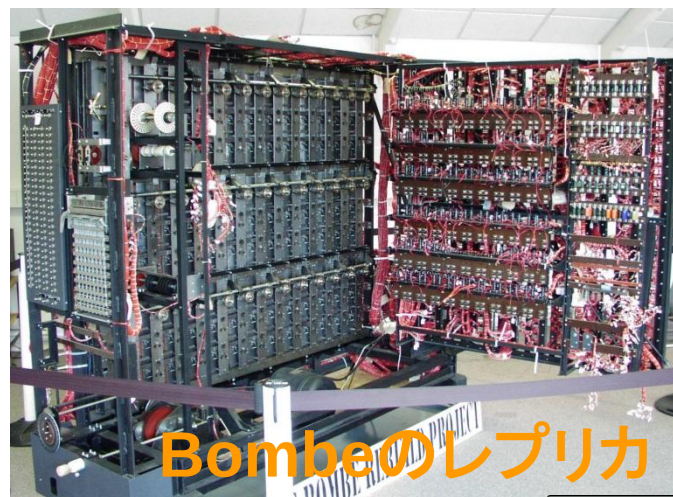


ABC machineのレプリカ

<http://science.slc.edu/~jmarshall/courses/2003/spring/cs10/lectures/week01/HistoryOfComputing.html>

- **Bombe (ボンブ)**

- Turing (1940)
- ドイツ軍暗号Enigmaの解読
- 1970年代まで秘密に



Bombeのレプリカ

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Bombe-1>

プログラムできる計算機: ENIAC

(Electronic Numerical Integrator And Calculator)

- Eckert & Mauchly (1946)
- 多くの問題の計算が可能。ただし問題に応じて配線を変更する

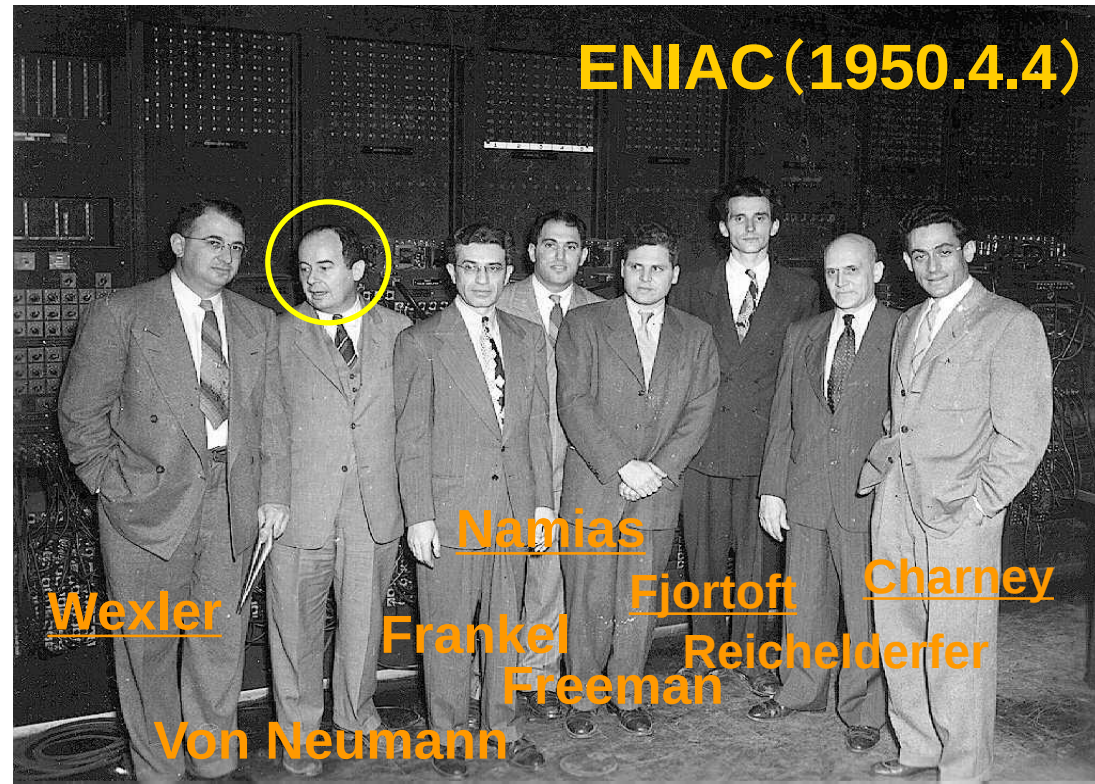
- 水爆開発

- 最初のプログラム

- 弾道計算

- 気象計算

- 順圧非発散2次元渦度方程式
 - 気象関係者が多数協力。日本人も参加。(岸保勘三郎)



UCSD ECPC(Experimental Climate Prediction Center) 写真集より
<http://ecpc.ucsd.edu/general/pics/eniac-50.html>

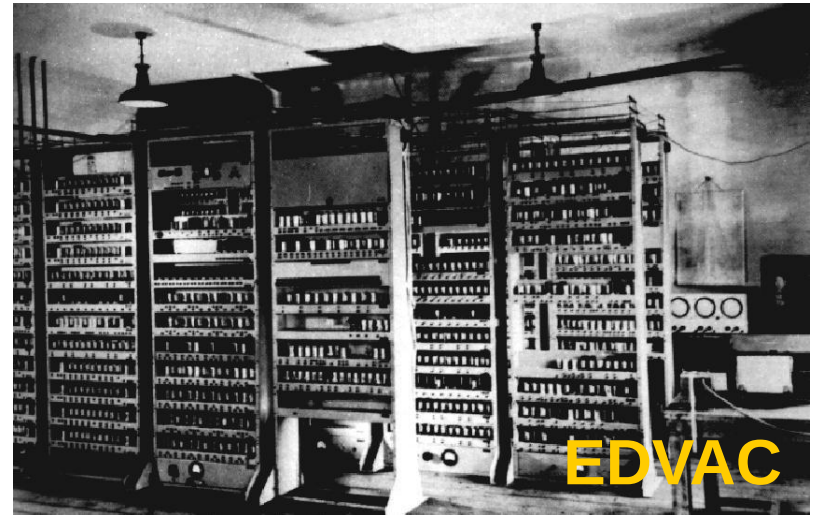
ノイマン型計算機

- プログラム内蔵型計算機

- 命令(プログラム)をメモリに格納し順次呼び出して計算を実行
- 色々な計算が可能
- 理論的な提案は Neumann(1945)
 - First draft of a report on the EDVAC

- 初期のノイマン型計算機

- EDSAC
 - Wilkes, 1949
- EDVAC
 - Eckert , Mauchly ,
Neumann, 1950



<http://www.afn.org/~cybrcent/chapt01/edvac.jpg>

汎用(大型)計算機

- いろいろな用途(事務処理, 天気予報, etc.)のための計算機
- メインフレームとも呼ばれる
- 汎用計算機の例
 - **UNIVAC-1(1950)**
世界初の商用計算機,
米国国勢調査局に納入
開発したのは Eckert と Mauchly の会社
 - **IBM704(1954)**
以後の汎用計算機の基本
気象庁最初の数値予報用計算機(1959)
- 高級プログラミング言語の登場(詳しくは次で)
- 計算機はさまざまな企業に普及しはじめる

IBM704



<http://www.columbia.edu/cu/computinghistory/704.html>

高級プログラム言語の登場(1950')

- コンパイラ(compiler)によって機械語に翻訳する
(人間が読んでわかる形式から計算機で実行できる
形式に変換する)

- **FORTRAN**: 数値計算

FORmula TRANslator system(J. Backus, IBM, 1954)

- **COBOL**: 事務処理(帳簿)計算

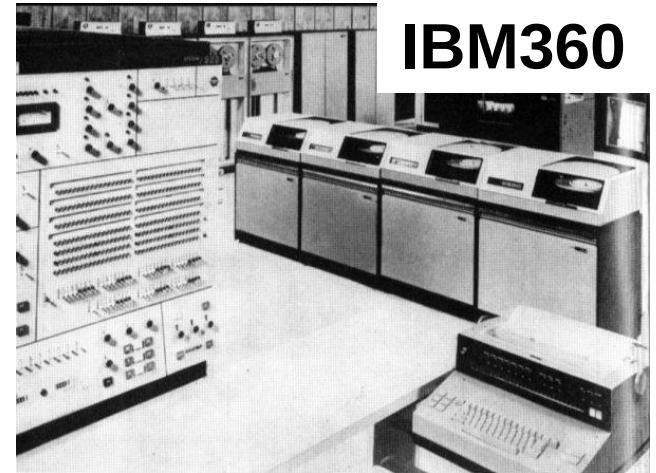
COmmon Business Oriented Language

(The Conference on Data System Languages [CODASYL],
1959)

汎用(大型)計算機の発達

- **IBM360(1964)**

- **OS**(Operating System)の導入
- **1byte = 8bit**
 - それまでは6~7 bit
- バッチシステム(batch system)
 - 計算作業の順番待ちを自動化
- プログラムが資源に
 - 後継機でも同じプログラムが使える(互換性の端緒)
 - 360度どの方向(用途)にも使える
- 世界的大ヒット(世界シェア70%)
- 計算機ハードウェアに関する基本はここで形成された
 - その後の各種仕様に大きく影響



<http://www.computermuseum.li/Testpage/IBM-360-1964.htm>

その後の展開:ハードウェアの発展

• ダウンサイジング

– 1970' : **マイクロプロセッサ**の登場

- CPU(計算機の心臓部)が真空管・トランジスタ・集積回路の組み合わせから単一の集積回路へ

– 1980' 後半～1990' 前半:

ワークステーションへ

- X Window System (後述)の主要なプラットフォーム

– 1990' 後半: **パソコン(Mac, PC-AT互換機)と携帯電話**へ

- DOS V から Windows へ
- Hitachi SH-1 (1992), ARM2 (1986)

– 2000年代:スマートフォン、タブレット

- 2007: 米国で iPhone 販売開始
- 2008: 日本で iPhone 販売開始
- 2010: iPad
- コミュニケーションのための計算機へ

Intel4004: Intel社が開発したマイクロプロセッサ



https://ja.wikipedia.org/wiki/Intel_4004



<http://itstrike.biz/wp-content/uploads/Steve-Jobs-holding-original-iPhone.jpg>

もう一方のその後の展開： 大規模処理の実現

- ・ 一方で大規模処理への対応(スパコン, 並列化)
 - 1980年代: ベクトルプロセッサの開発(プロセッサ内並列)
 - 1990年代: スカラー並列機の登場
 - 2012: 「京」運用開始
 - 2021: 「富岳」運用開始

富岳



情報処理環境への発展

Unix, X Window System, Internet

Unix

なぜ Unix なのか

- **科学技術用計算機のOSとして広く普及**
 - パソコンから大型計算機まで
 - 現在のネットワークサービスの基盤
- **フリーウェア文化, オープン開発文化が発祥した環境**
 - 使う人が作る人, 大学の精神を体現
- **インターネットの発展と不可分**
 - 現在のネットワーク社会を支えているもの

Unix とは

- K. Thompson と D. Ritchie が
プログラム環境として開発開始
(1969年)
 - それまでMultics の共同開発:
ベル研究所・企業(GE)・大学(MIT)
+国(ARPA)の支援
 - しかしベル研は開発から撤退. 安全
性と利便性のバランスが悪かった
 - ベル研でお古になっていたDEC社
PDP-7 を使用して, Multics に対す
る **Unix** (Uniplexed Information
and Computing System) を開発
 - プログラム開発・計算環境として
所内外に広まり, 認知



http://en.wikipedia.org/wiki/Ken_Thompson



<https://ja.wikipedia.org/wiki/PDP-7>

Unix の画期的な側面：情報処理

- 文字, 更にあらゆる情報を処理する
(情報を統べる) 計算機

- 文字 (アルファベット) 処理環境

- プログラム書く人に幸せな環境
- 文字処理: 1 byte (= 8 bit) 単位の処理
- 数値処理: 1 word (= 4 byte) 単位の処理

- プログラム開発環境

- エディタ (文字・ファイルの処理をする) の登場

- プログラムのドキュメンテーション (解説文書作成) 環境

- roff とオンラインマニュアル

- 文字処理を得意とするプログラム言語: **C 言語**



Digital's VT100 video terminal (1978)
<http://vt100.net/>

Unix の普及 (情報科学分野)

- Unixは情報科学研究者に便利なプログラミング環境を提供
 - ソースコード(プログラムのファイル)を無料で公開, 改変, 再配布
 - 自分達に都合よく改変可能
 - 使う人が作る人
お互いに資源を出しあい, 使いあい, 修正・改良しあう
 - 米国の情報科学科でソースコードが教科書として利用され広まる
 - Internet, Linux へ続くフリーウェア文化, オープン開発文化の発祥

Unix の普及 (一般研究分野)

- (計算機を使う) 科学者の研究用環境として普及
 - 計算機から情報処理環境 (= 文房具) へ
 - プログラム開発環境 + ドキュメント処理機能
 - 米国の大学では1970' 後半に Unix が普及
 - ソフトウェアが作りやすい
 - 数値計算ができる (そもそも計算機)
 - マニュアル作成ユーティリティーを使えば文章 (論文) が清書できる
 - その整理 (情報処理) ができる
 - 科学技術用計算機が Unix (Linux) を OS とするようになったルーツ
 - 米国での科学諸分野と情報科学分野とが交流する土台
 - 情報科学が目指していることが他分野にも流れ出しそれぞれの分野での情報化を促す
 - 今日の科学の情報化に結びつく基盤, グローバリゼーションの土台

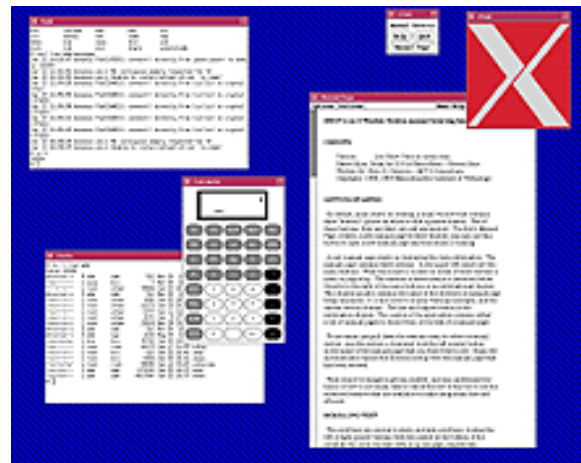
Unix 普及の背景：軍の支援

- 米国での諸々の活動のスポンサーは軍
 - ソースコードが公開されていることは軍にとっても望ましい
 - 特定企業に国防「情報」が支配されてはいけない
- よって大学に委託
 - 軍がオープン開発を支援
 - カリフォルニア大学バークレー校 (UCB), MIT, カーネギーメロン (CMU), スタンフォード大学 (SU), etc.
 - 1970'~1980' に Unix は大学で大きく発展
 - 1980'後半には研究環境といえば Unix
 - その後は Internet の歴史と不可分

UNIXの標準環境: X Window system

- UNIXにおける標準的な
ユーザインターフェース環境
- X Window System の誕生
 - MIT, DEC, IBM の共同研究
(Project Athena, 1983年)
- 背景;ビットマップディスプレイの登場
 - 文字と絵を同時に扱える
 - それまではキャラクターディスプレイと
グラフィックディスプレイは別
 - マルチウィンドウ: ディスプレイを
複数持っているのと同じ
- 文字を書く計算機から絵を書く計算機へ
 - ワークステーションとともに普及

X Window Systemのデスクトップ



ワークステーション(SUN SS20)



X Window Systemの「業績」

- **規格化とクライアントサーバシステムの確立**
 - 個々の命令セットが体系化され規約化: Athena Widget
 - ディスプレー, マウス, キーボード, スピーカなどの人間・機械インターフェースをサーバで制御
 - 文字の表示, 絵の表示, 音の発生等々は個々のソフトウェア(クライアント)が担当
- **ネットワーク透過性(network transparent)の確保**
 - 遠方の資源を仮想資源として利用, ウィンドウを飛ばす
 - ネットワークを介した作業が当たり前
- **多言語化対応**
 - **日本語**が表示できるようになった
 - 1985年までに文字: Unix 拡張コード(Extended Unix Code:EUC)の制定
 - ようやく日本でも**計算機から情報処理環境**(文房具)へ
 - それまでは日本ではUNIXは普及していなかった
- **これらは現在の計算機・ネットワーク環境における基本**

日本の事情

- 日本では Unix はなかなか流行らなかった
- Unix が輸入されたのは1970'後半(東大和田研)だが, 情報科学研究者以外は使わない・使えない
 - Unix は英語しか扱えない
 - ワープロ(1978年:東芝JW-10), パソコン(1983年:ジャストシステムJS-WORD)の方が先に日本語対応
 - 高額な初期投資が必要
 - Unix が動く米国製計算機(DEC VAX)は高くて買えない
 - 拠点大学には全国共同利用大型計算機センターが設置され, 良質な計算機環境を提供
 - 情報科学者と科学計算ユーザとの分離, 科学の情報化の遅れ
- 1980'後半のワークステーション + X Window System 時代により普及
 - X Window System による日本語表示

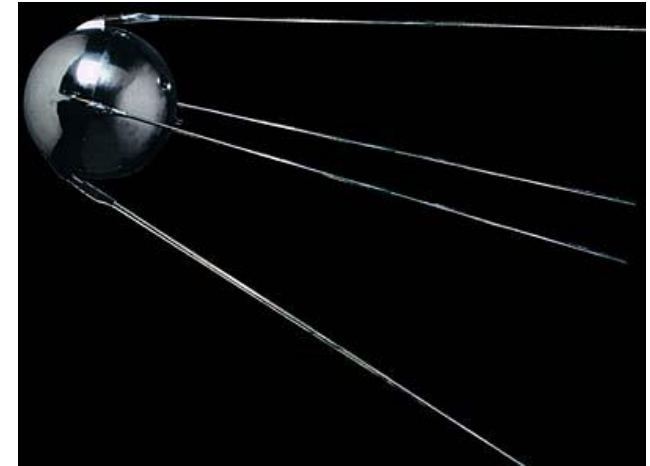
Internet

ARPAnet

- 背景：冷戦と米国の危機感

- 1957年：スプートニクショック
 - ソ連による世界初の有人衛星
- 1961年：電話中継基地爆破テロ
 - 軍用回線も停止
- 1962年：キューバ危機
 - 米ソ間緊張 核戦争勃発寸前

スプートニク

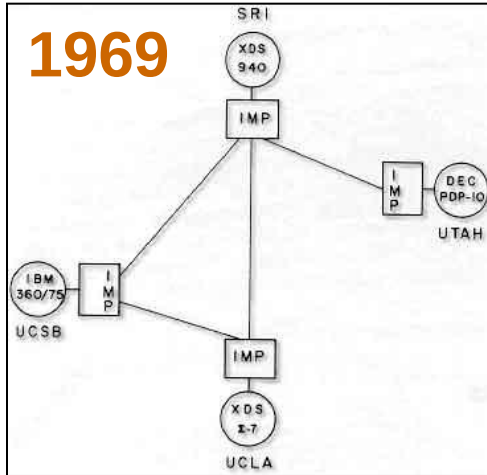


[http://www.educ.cc.keio.ac.jp/~te04811/page1-1-5-5\(2\).htm](http://www.educ.cc.keio.ac.jp/~te04811/page1-1-5-5(2).htm)
SPUTNIK1.JPG

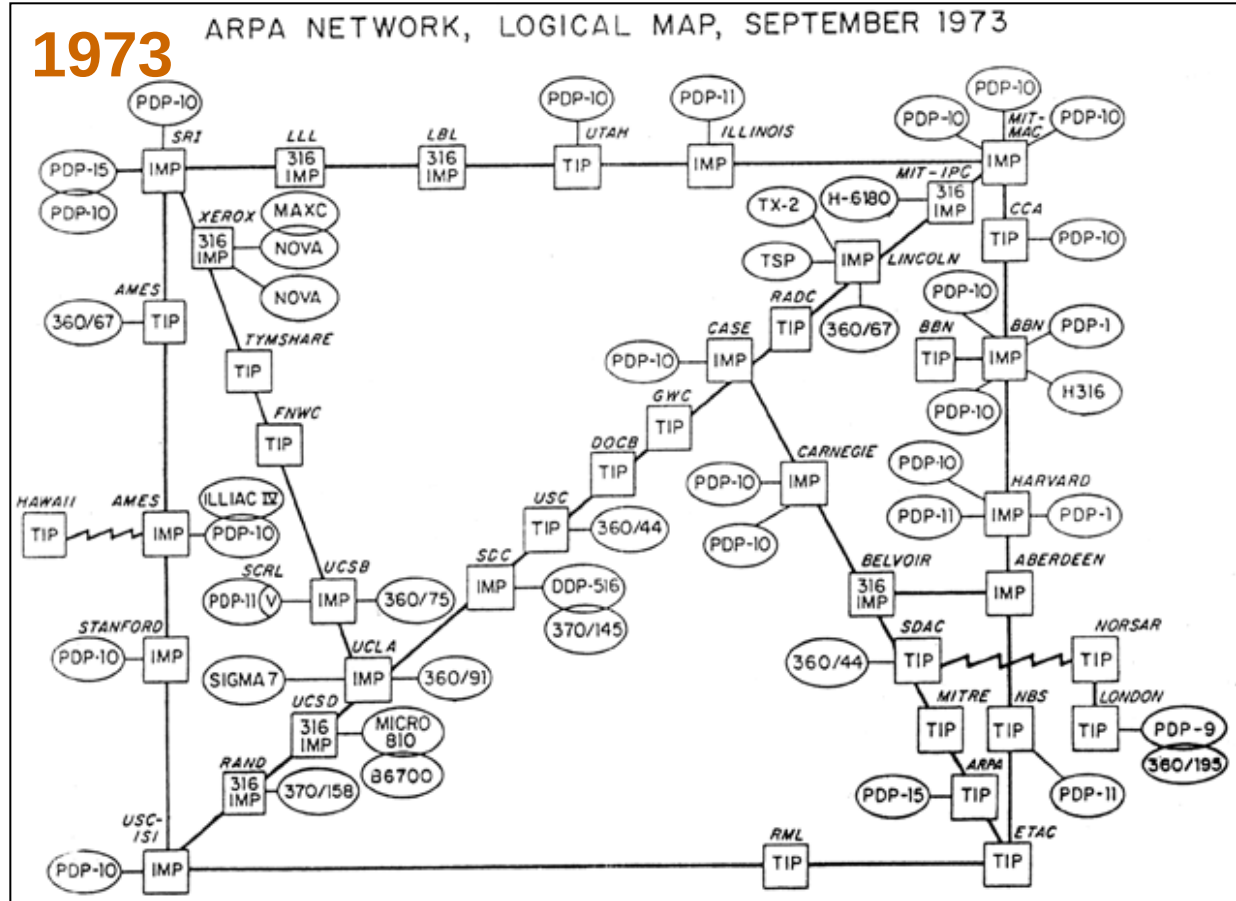
- 1958年：ARPA設立

- Advanced Research Projects Agency
- 軍事応用可能な科学技術研究の推進
- 1960'から核攻撃を受けても停止しない分散型通信システムの研究を開始
 - スタンフォード研究所(SRI), カリフォルニア大学(UCLA), ユタ大学
- 1967年：UCLA と SRI で最初のデータ通信(ARPAnet)
- 1983年：研究目的ネットワークとして独立

ARPAnet 初期の接続経路



http://www.netvalley.com/httpdocs/intval/07262/content/img/fournode-2_lowres.jpg



http://www.cybergeography.org/atlas/arpanet_sept1973_large.gif

ARPAnet の基本設計

- 中心のない分散型通信システム

- どのホストコンピュータが核攻撃によって蒸発しても、どこかのコンピュータが生き残りネットワーク全体としては機能が維持される
- Paul Baran (1962)

- パケットによる通信

- 回線の「占有」から「共有」へ

- プロトコル(通信規約)の標準化

- **TCP/IP** (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)

- これらによりネットワークの基本概念が確立



<http://www.zdnet.fr/u/017/091/4ec78a394eb4e4ec.jpg>

ARPAnet のプロトコルの標準化

- 国防総省 ARPA が OS としてバークレー版 Unix (BSD:Barkley Software Distribution)を採用
 - ソースコードの公開は軍にとっても望ましい。
特定企業に国防システムを預けなくて済む
- Unix と ARPAnet の諸々の技術が結合, TCP/IP が事実上の標準に
 - 1982年, バークレー版 BSD Unix がTCP/IP を実装
 - Unix は米国の研究高等教育機関現場にすでにある程度普及していたので, TCP/IP は米国研究教育業界での通信プロトコルの事実上の標準 (de facto standard) となった

インターネットへ

- TCP/IP で接続されたネットワークが次々と ARPAnet につながり, **インターネット(Internet)** へ
 - 複数のネットワークを相互につないだもの, という意味
 - 米国では州間高速道路網を interstate という, そのもじり
 - 国際的な共同運営団体に加盟し, 整合性を保ったアドレス管理, 経路制御がなされている
- 利用者からはインターネットはあたかも一つのネットワークのごとく見える
 - TCP/IP 接続の特徴
 - 複数のネットワークが接続されてできていることを全く意識しないで良い.

Internetの大発展

- 1990年代後半の爆発

- 下地

- Windows と PC-AT 互換機の普及
 - Internet の民営化 (ISP の登場, 日本では 1992)

- 起爆剤: **WWW** (サーバ) と **ブラウザ** (クライアント)

- CERN の研究者が情報交換のため開発
 - CERN HTTPd (1990) → Apache
 - NCSA mosaic (1993) → Netscape
 - html (Hyper Text Markup Language)
 - プラットフォーム (OS) によらず閲覧できる
 - 「**ハイパーリンク**」による知識の結合

- 検索エンジン: 1990 年代後半

- Yahoo: 1995年、Google: 1998年
 - 日本では1995年は「インターネット元年」と呼ばれる

日本におけるインターネットの黎明

- **大学のネットワーク研究活動に端を発する**

- WIDE (1988年～現在, 村井純)
 - <http://www.wide.ad.jp>
- TISN (1989年～1996年, 釜江常好)
 - 東京大学国際理学ネットワーク
 - 最初の日米回線 (つまり Internet)
 - KDD (現KDDI) の海底ケーブルを利用させてもらう
 - 高エネルギー物理学がリード
 - TISN の開通には地球惑星科学者も参加, 計算/観測データ流通のため



<http://biography.sophia-it.com/imgb/bimu001.png>



<http://www.slac.stanford.edu/slac/faculty/hepfaculty/kamae.html>

- **科学一般の研究室がワークステーションを使いだした時代に急速に普及**

文化的背景

- 文化的背景: Unix 文化の継承＝基本的に古きよき大学の精神
 - 自分で自分の環境を構築できる. 自分の責任において
何をやっても良い
 - 相互扶助(ボランティア)
 - 自力更生(自分のことは自分でやる)
 - 無保証
- 研究室から学科, 学部, 大学, 研究所, そしてそれら相互のネットワークを接続し, 自分のネットワーク上を他人のパケットが通過することを許容することにより, 総体として Internet を作っていった

日本における Internet の発展

- **プロバイダ: Internet 接続サービスの提供「組織」**
- **SINET(1991 年末): 大学・研究機関**
 - 1987年に始動, 本格的に整備されたのは 1994 年春頃
 - 文部省(現: 文部科学省)による研究組織間接続のための基幹ネットワーク
 - 学術情報センター(現在の情報学研究所)が管理運営
 - SINET の下に各大学が独自のキャンパスネットを運営
 - HINES, UTnet, Kuins, ...
- **ISP (Internet Service Provider): 個人や企業**
 - IJ が1992 年末, 開業
 - 研究とは関わりのない業務で Internet に参加し通信できるようになった
 - 1995 年は Internet 元年と日本では呼ばれている
 - Windows95にインターネット接続機能が標準搭載
 - プロバイダにより, 個々人や企業などが契約さえすれば Internet アクセスサービスを実質的に受けられるようになった
 - web とブラウザの普及により一般に見えるようになった

日本の大学におけるネットワーク環境

- 日本における Internet の発展に, 大学や研究者個々人の活動は触媒として有効に機能した
 - WIDE プロジェクトの役割が非常に大きい
 - Unix の普及と同時にネットワークの利用が広まる / ネットワーク接続のために Unix を導入するようになる
 - 日本の大学の触媒機能
 - 情報科学の発展に対してはいまいち
(各業界との交流があまり生まれなかった)
 - 大型計算機・スーパーコンピュータの発展には大きく寄与
 - Internet の発展には本質的に寄与
- 一方で, 大学におけるネットワーク運用には困難な状況も
 - 使う人が作る人(利用者は高いモラルと技術知識を持っていることが前提)
 - 予算がない: 研究基盤としての認識が遅れていた
- 現在では各大学の情報基盤センターが運用管理をなんとか担っている

ここまでのまとめ

• 計算のための計算機から情報を統べる計算機へ

- 汎用計算機→ワークステーション→パソコン→スマホ
大規模並列計算機
 - 同じ処理をより小さな計算機で(ダウンサイジング)
- 特定の科学技術計算→文字処理, あらゆる情報の処理
 - 基盤となったのがUnix と関連ハードウェア・ソフトウェア
 - プログラミングのための各種ツール(エディタ, マニュアル作成, C言語)
 - ビットマップディスプレイと X Window System(多言語化, ネットワーク透過性)

• インターネットの誕生と普及

- 最初の種は中心のない分散型通信システムの構築実験
- 研究者・政府が相互作用して Internet が誕生・発展
 - ARPAnet へのUNIX導入, 通信規約 (TCP/IP) の実装・標準化
- 日本のインターネットは大学から
 - 「自力更生」と「相互扶助」の精神が前提であった

情報実習の先にある
高い理想に向けて

高い理想

- 情報技術を用いた地球惑星科学の発展へ貢献できる人材が(勝手に)生まれる・育つ
- 何が問題か？
 - 最初に「地球惑星科学は総合科学」という話をした
 - 多様な知識を動員、多様なデータを利用、etc
 - 一人では無理。必然的に共同作業
 - 情報の蓄積・整理・共有が必須
 - ここでは知識の蓄積・整理・共有の問題について考える

知識の整理に関する問題提起

- **Vannevar Bush(1945)**
 - MITの副学長, 第二次大戦中は国防研究委員会議長
 - レーダーから対潜水艦作戦, マンハッタン計画にいたるまでの兵器開発計画の監督
- **人類の課題は知の爆発への対応**
 - 人類にとっての真の挑戦は、「原子をさらに細かく調べたり生命の複雑さを探求することではなく、**科学技術が氾濫させる情報のよりよい管理方法を発見すること**」



http://en.wikipedia.org/wiki/Vannevar_Bush

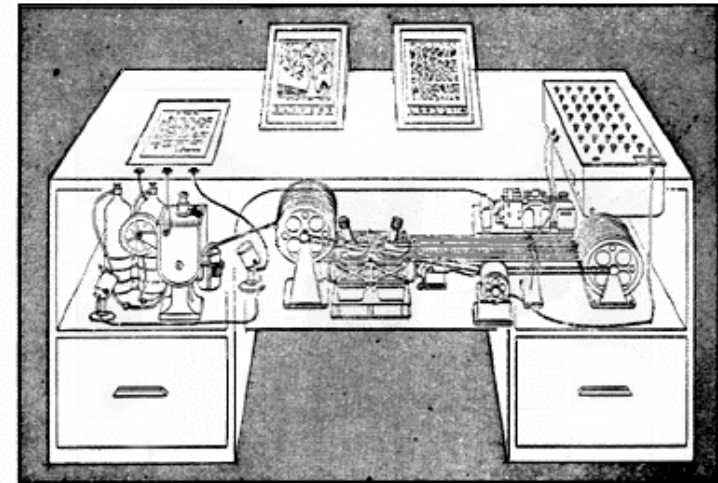
知識の集積装置: Memex

- **Memex (Bush, 1945)**

- 関連がある異種の情報を結び付ける装置
- 誰もが自分専用の情報を整理蓄積できる
 - 弁護士は、自分自身・友人・関係当局の関連意見や決定を探し出すことができる
 - 弁理士は、数百万件もの特許情報を即座に調べることもができる
 - 医師は、類似した症例を手早く調べたうえ、解剖学や組織学などの書物まで引くことができる

- **膨大な記録を整理し誰もが活用できるようにする**
先駆的な職業も生まれるだろう

Memexの概念図



<http://journal.systemone.at/spaces/journal/members/Michael+Schuster>

高い理想に向けて考えるべき問題

- **Bush の夢 (Memex) は実現したのか？**
 - Google で良いのか？ 分野・問題に応じた知識の集積の仕方・整理の仕方があるはず
 - 膨大な知識を整理する方法を考えるのも大問題
 - 「知」の爆発への対応
- **実はいろいろな深い問題と関連**
 - 知識集積の仕方を考えるためには情報の掌握（自分達のものとして持つこと）が不可欠
 - 情報の掌握には努力が必要。多くの場合、特定集団に全ての情報が集まってしまう。「知の収奪」の問題
 - 自分達の情報として持つには母国語による考察・整理が必要。最近ではその考察基盤すら危うい。英語化問題
- **これらについては最終回で再度触れる**

まとめ

- **本実習の目標**

- 情報技術の基本概念を実体験し、
自分の情報環境は自分で維持できるようになる
 - Unix 文化(大学の精神)の継承, 自力更生と相互扶助

- **計算機・ネットワーク発展の歴史**

- 「計算のための」計算機から「情報処理する」計算機へ
 - 汎用機からパソコンへ, Unix とインターネットの共進化

- **その先にある高い理想へ向けて**

- 地球惑星科学の情報化に貢献する人材が(勝手に)育つことを期待

参考書, 参考文献

- Bush, V., 1945: As we may think. Atlantic Monthly, 1945 July, 101-108.
<http://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/3881/>
- 朝日ジャーナル編1989: 世界経済三国志: 覇権の150年, 42節, 朝日新聞社
- D. Libes & S. Ressler 著, 坂本 文 訳, 1990: Life with UNIX, アスキー.
- Tom Van Vleck ed. 1994: The Multicians web site
<http://www.multicians.org/>
- 村井純, 1997: インターネット, 岩波新書 新赤 416, 岩波書店.
- 歌田明弘, 2000: 本の未来はどうか 新しい記憶技術の時代へ, 中公新書 1562, 中央公論新社
- 坂村健, 2002: 痛快! コンピュータ学, 集英社文庫.
- 情報処理学会 2003: IPSJ コンピュータ博物館
<http://museum.ipsj.or.jp/index.html>
- 村井純, 2010: インターネット新時代, 岩波新書 新赤 1227, 岩波書店.
- ITホワイトボックス <http://www.nhk.or.jp/itwb/>
- 情報処理学会編 2010: 日本のコンピュータ史, オーム社

参考書, 参考文献

- 佐塚秀人, 2012: 計算機アーキテクチャ2012,
<https://sites.google.com/a/sazuka.net/arch2012/home>
- 福井健策, 2014: 誰が「知」を独占するのか –デジタルアーカイブ戦争–, 集英社
新書0756A, 集英社
- 西垣透, 2015: 集合知とは何か, 中公新書2203, 中央公論社
- 野口悠紀雄, 2016: 知の進化論, 百科全書・グーグル・人工知能, 朝日新書590,
朝日新聞出版
- 西垣透, 2016: ビッグデータと人工知能, 中公新書2384, 中央公論社
- 来夢来人: フリーイラスト素材の来夢来人
<http://www.civillink.net/esozai/>
- GATAG: フリーイラスト素材集, <http://free-illustrations.gatag.net/>
- ビジネスアイコン無料素材, <https://business-icon.com/>