

ATLAS- 日本グループ
地域解析センター計画書

ATLAS 日本グループ と
東京大学 素粒子物理国際研究センター

平成 12 年 5 月 24 日

はじめに

ATLAS 実験での物理解析は、(1) 従来の実験より約100倍多いデータを扱う、(2) 世界中に分散した多くの研究者で協同研究を行なう、(3) CERN は計算機資源必要量の約1/3しか提供出来ず、各国の研究者が解析に用いる計算機資源は、自ら確保しなければならない、という3つの理由で、世界各地に「地域解析センター」を置くことは必然的な流れとなっている。ATLAS-日本グループとしても、日本に地域解析センターを設置することの重要性は、「データ解析基本構想提案書」(平成12年1月31日付)で詳しく述べたように明らかである。同時に提案書の中に詳しく述べてある様に、CERNにもその計算機資源の一部を置き、日本国内の地域解析センターが保持するデータ生成の前処理を行ったり、緊急を要する物理解析やデータの較正など、CERNに於けるATLAS-日本グループの仕事を支える必要がある。

本計画書では、地域解析センターでの計算機資源の必要量を現実的に評価し、コストパフォーマンスとシステムの構成及び保守に必要な人的資源の両面を考慮して、導入すべき計算機システムの設計並びにその費用を見積もったものである。国内分の計算機システムは、階層化された巨大なマストストレージシステムと高速なI/O転送能力をもったサーバ型計算機から構成される基幹部分に、モンテカルロの生成やインタラクティブな用途に用いるPC型計算機を接続するハイブリッド式とし、システム全体をレンタルにより賄う。一方、CERN分室の計算機システムは、計算機の買い取りにより構成する。また、本計画書では触れないが「東京大学 情報基盤センター」のスーパーコンピューターを利用する可能性について、技術的な検討を現在行なっている。この研究の結果、スーパーコンピューターを有効に使用することが可能な場合は、モンテカルロ・シミュレーション生成をこれに委ねることにより、ATLAS日本グループが準備する計算機の保守に懸かる人的資源やコストの節約を行なうことが可能になる。

本計画書は、6つの章から成り、第1章では、言葉の定義を兼ねてATLAS実験に於けるデータ解析の流れを模式的にまとめ、続く第2章に於いて、実際のデータの流れと計算機システムの役割について述べる。ここまでは、先の提案書を簡単にまとめたものである。第3章に於いて、必要となる計算機資源の評価を行ない、その設置計画を第4章に於いて述べる。続く第5章に於いては、地域解析センターのもう一つの重要な要素であるネットワークの必要な帯域幅についてまとめる。

もくじ

1	ATLAS 実験に於けるデータ解析の流れ	5
2	ATLAS- 日本グループのデータの流れ	8
2.1	CERN に於けるデータ処理	10
2.2	日本国内に於けるデータ処理	11
3	計算機資源の必要量の評価	12
3.1	必要な計算処理能力の評価	12
3.1.1	サーバ型計算機	12
3.1.2	PC 型計算機	13
3.2	データ容量の規模	14
3.3	必要とされる計算資源のまとめ	15
4	計算機システム設置計画	17
4.1	国内のシステム	17
4.1.1	計算機システムの仕様	17
4.1.2	計算機システムのレンタル料金の見積もり	18
4.2	CERN 分室のシステム	20
4.2.1	年次ごとの購入計画	20
4.2.2	計算機資源購入に必要な経費の見積もり	20
5	必要なネットワークの帯域幅	24
5.1	国際ネットワーク	24
5.2	国内ネットワーク	27
6	まとめ	28
A	計算機関連機器の価格予想	31

表一覧

3.1	計算機資源の必要量のまとめ	16
4.1	2004 年時点での計算機レンタル料金の見積もり (国内)	18
4.2	計算機資源の購入計画と経費の見積もり (CERN 分室)	22
6.1	計算機資源調達に必要となる経費 (国内分と CERN 分室合わせて)	30
A.1	計算機本体と磁気 DISK の価格予想	31

図一覧

1.1	ATLAS 実験 データ解析の流れ	6
2.1	ATLAS 実験 データの流れ	9
4.1	計算機システム概念図 (国内)	19
4.2	計算機資源の必要量と購入量 (CERN 分室)	21
4.3	計算機資源調達に必要な経費 (CERN 分室)	23
5.1	ネットワークの必要な帯域幅	25
6.1	必要経費の総額	29
A.1	計算機機器の価格予想	32

第 1 章

ATLAS 実験に於けるデータ解析の流れ

この章では実験データ処理の流れに沿って、扱うデータの種類と規模を計算機システムの役割に触れながら、簡単に纏める。

一般に加速器実験で収集されたデータは、測定器の較正やデータ・クオリティのチェック、実際の物理解析など、目的にあった数種類のデータを保持するのが普通である。測定器の較正やデータ・クオリティのチェックなどに使用するデータは検出器から得られた全ての情報を含んでなければならないが、物理解析ではその必要はなく、むしろ重要性の低い情報は落してデータのサイズを削った方が有利である。ATLAS 実験では、以下に挙げる 3 段階のデータを保持する予定であり、そのデータ加工の流れを示したのが図 1.1 である。この図が示すように、解析可能なデータを生成するまでに 3 段階の処理過程があり、3 種類のデータが存在する。

- 1. 生データ (データ・サイズ = 1 MBytes/ 事象)** 第 1 段階処理として検出器からの情報をイベントごとに集めて、粒子の情報を再構成して、生データを生成する。これは検出器に直接接続された計算機によってなされる。生データは、検出器から読み出されたデータとオンラインで再構成された粒子の情報などを全てを含んでいる。1 年に 1 回、この生データに対して総合的な較正を行なう。ATLAS 実験で収集されるデータ量は、年間 10^9 イベントを収集という予測値から、実験データだけで、年間 1 PBytes (10^{15} Bytes) となる。
- 2. 集約データ (ESD) (データ・サイズ = 100 kBytes/ 事象)** 第 2 段階処理として、生データ中の細かい情報を削除し、データサイズを約 1/10 に削減して、Event Summary Data (ESD) を生成する。ESD は、生データの中で事象を再構成できるだけの情報を残した中間段階のデータである。イベント・ディスプレイには、この情報が必要である。1 年に数回、この ESD に対して限定的な較正を行なう。
- 3. 物理解析データ (AOD) (データ・サイズ = 10 kBytes/ 事象)** 第 3 段階処理は、ESD から物理解析に必要な情報だけを取り出し、物理解析に最適化されたデータである Analysis Object Data (AOD) を作る。AOD では、検出器ごとの情報はすでに失われていて、レプトンや、ジェット等の物理解析に即した形の情報になっている。そのデータの取り出し方の最適化が、異なる物理を対象とするグループ間で異なる為、数種類の AOD が作られる。

ATLAS実験 データ加工の流れ

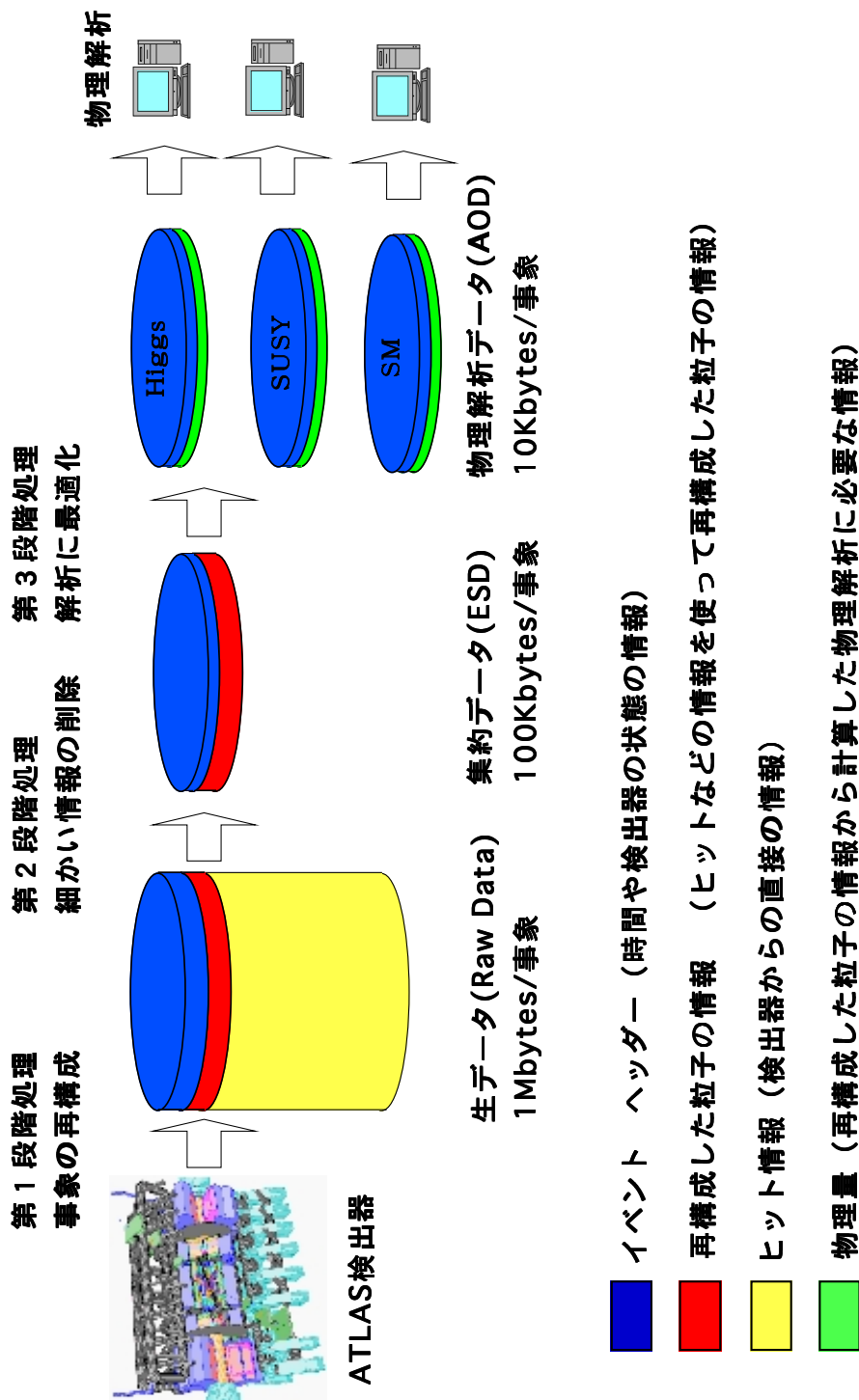


図 1.1: ATLAS 実験 データ解析の流れ

このデータの流れの中で、第2段階処理 (ESD の生成) までは CERN の計算機資源が賄う予定である。ここまでに必要となるソフトウェア及び、ESD に対して作用するソフトウェアのフレームワークの製作は、測定器建設がそうであるのと同じように、ATLAS 実験参加国の国際協力のもとに行われる。先の提案書の第4章に詳しく述べられているこれらのソフトウェア開発に、アトラス日本グループも進んで参画する予定である。この為一部 (約5%) の生データを地域解析センターで保持し、これを用いてプログラム開発を行なう。

AOD を用いて物理解析を行なう作業のみならず、第3段階処理 (ESD から AOD を製作する作業) は、物理解析の技術や知識を多く必要とする為、この作業は「世界各国の研究者が凌ぎを削る」競争原理に支配されたものになる。従って、地域解析センターの計算機資源には、最新の ESD から独自の AOD を数種類生成し、同時にこれを解析する能力が是非とも必要となる。この計算機能力を保持することが、日本国の ATLAS 実験への投資成果を勝ち取るために欠くべからざるものである。

物理解析には図 1.1 に示した実験データのみではなく、これと比較検討する為のモンテカルロ・シミュレーション・データを生成する必要がある。これには、各国が分担して行なう共通のシミュレーション・データの生成と、先の提案書の第 5.2 節で述べた様に、日本グループが独自に研究開発しているシミュレーション・データの生成の二つがある。前者は、各国の計算機資源の大きさに比例して分担する、謂わば義務にあたるものである。一方後者は、従来のモンテカルロ・ジェネレーターの問題点を洗い出し、より正確に実験データを再現する次世代のモンテカルロ・ジェネレーターによるものである。日本グループは、世界に先駆けてこの研究開発に既に着手している。実験開始初期 (2005 ~ 2008 年頃) に、実験データとの比較を通して、新しいモンテカルロ・ジェネレーターの性能を世界に示し、その後の世界標準とする予定で研究開発を急いでいる。その為には、2004 ~ 2009 年頃に掛けて、独自にシミュレーション・データを大量に生成する必要がある。

第 2 章

ATLAS- 日本グループのデータの流れ

ATLAS- 日本グループの研究者や学生が国内でデータ解析を行なうための支援、モンテカルロ・シミュレーション・データの生成、共通ソフトウェア開発などのために、日本に地域解析センターが設置されることは ATLAS 実験全体からも強く期待されている。一方、測定器から得られたデータの較正やデータ・クオリティーのチェックなど、測定器のある CERN でしか行なえない作業に対応する必要もある。データ解析においても、何か新しい素粒子現象の兆候が見つかった場合、現地で他国の研究者と緊密に関係をとりながら、緊急かつ綿密に解析を展開する必要がある。これらの目的のため、CERN には日本国内と同程度の研究者・学生が常駐することが予想されている。従って、CERN にもデータ解析環境 (CERN 分室) が必要である。この章では、この国内と CERN の 2 つの計算機システムの役割と関係を、ATLAS 実験データの流れを追いながら説明していく。

これらのデータが具体的にどのように転送され保持されるのかをふまえ、ATLAS 検出器から実際に解析を行なう各研究機関の研究者までの一連のデータの流れを示したのが図 2.1 である。この図に示されている様に、高速ネットワークにより結ばれている 3 つの大きなサイトが存在している。各サイトは以下に列記する機能を持っている。

ATLAS 中央計算機システム この建設、運営は CERN が責任を持って行なう。まず、ATLAS 検出器から送られてきた生データを生成保持 (第 1 段階処理) し、これから ESD を製作し、管理する (第 2 段階処理)。年に数回、この ESD に対する較正も行なう。また、世界各地の地域解析センターで製作されたモンテカルロ・シミュレーション・データを一括管理する。

地域解析センター (CERN 分室) ATLAS 中央計算機システムに保持されている最新の ESD や生データを用いて、データの較正や、データ・クオリティーのチェックをリアルタイムで行う。また、最新の ESD を日本国内に転送する作業を行なう。大きなデータ・サイズの ESD を、ATLAS 中央計算機システムと大量にやりとりするので、CERN に設置する必要がある。

地域解析センター (東京大学) CERN 分室より転送された最新の ESD を用いて、必要な AOD を数種類製作し、これを保持、管理する (第 3 段階処理)。このサイトと ATLAS- 日本グループ参加の各研究機関は、国内の高速ネットワークにより結ばれている。各研究機関の研究者は、国内ネットワークを通して最新の AOD や ESD を用いて最先

ATLAS実験 データの流れ

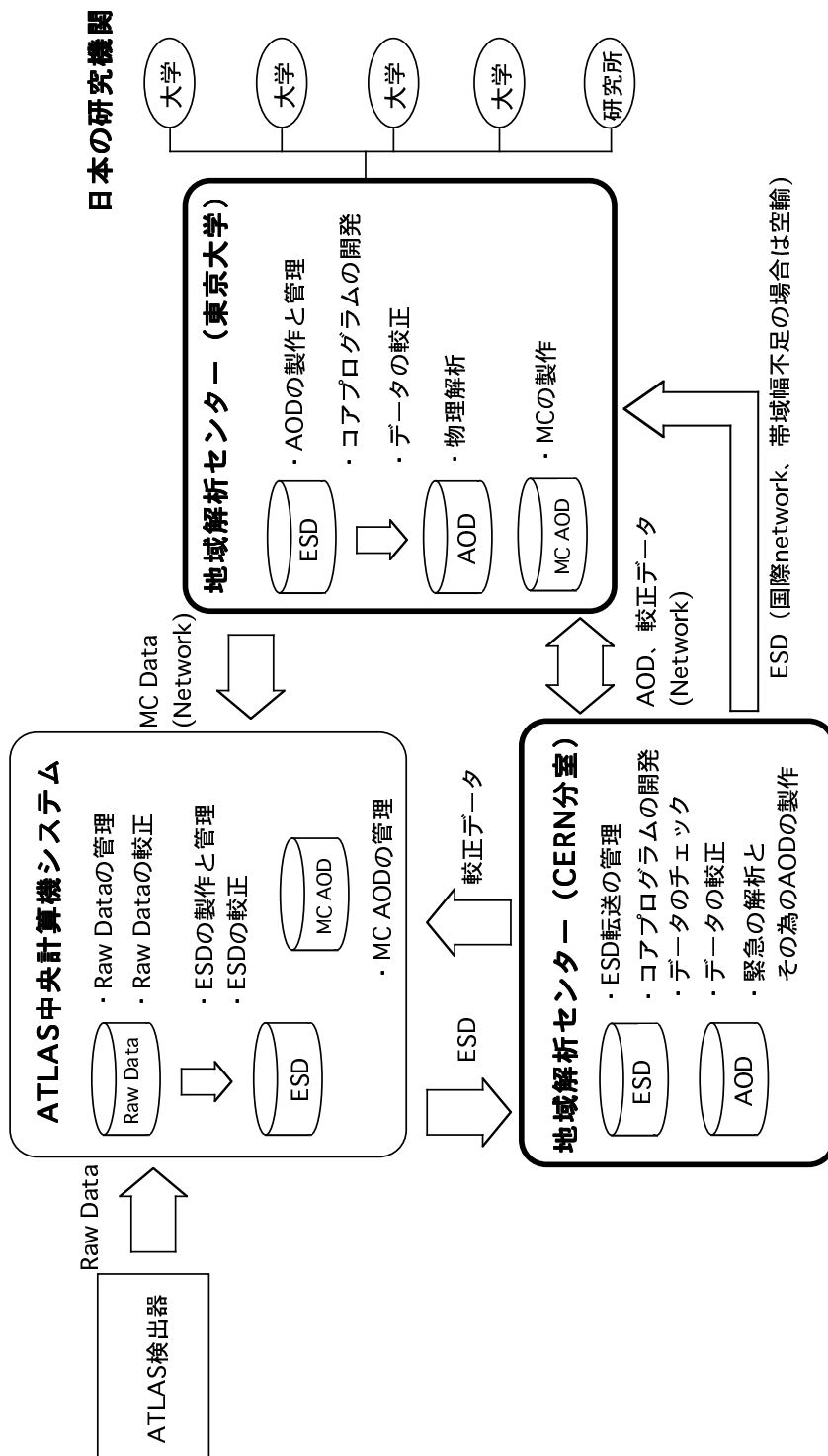


図 2.1: ATLAS 実験 データの流れ

端の解析を行なうことが出来る。地域解析センター（東京大学）のもう一つの重要な役割は、モンテカルロ・シミュレーション・データの生成である。ここで生成されたモンテカルロ・シミュレーション・データは、ATLAS 中央計算機システムに送られ、各国の地域解析センターで生成されたデータと一括管理される。

2.1 CERN に於けるデータ処理

測定器のある現地でないと実施困難な作業、現地で他国の研究者と綿密な連絡が必要となる作業、ATLAS グループ全体で緊急に進めなければならない作業、また国内に最新データ転送をする作業等の為に、地域解析センター（CERN 分室）を設置する。地域解析センター（CERN 分室）を ATLAS- 日本グループ単独で、建設・運営するか、ATLAS 参加の一部の国と共同で、建設・運営するかは、今後の議論に依る。地域解析センター（CERN 分室）の主要な業務は、以下の 4 つである。

1. **ESD や生データの較正：** データの較正は、収集したデータを意味のあるものにする重要な作業であり、年に 4 回ぐらい行なわれる予定である。この作業は、検出器の状態や、他の検出器の較正状況をよく把握して行なわねばならない為、CERN で行なう必要がある。これを行なう為に、較正用データを保持しておく必要がある。
2. **データ・クオリティーのチェック 及び ATLAS コア・コードの保守及び開発：** 実験中は、検出器から収集したデータの質を速やかにチェックして、問題がある場合はすぐに改善せねばならない。この為、データ・クオリティーのチェックは現地で行なう必要がある。また、ATLAS のオンラインとオフラインのコア・プログラムの開発、保守は CERN 分室の重要な職務である。これらのプログラムは、巨大であると同時に ATLAS 実験参加グループ全体で製作する様々なプログラムの集合体であるため、現地に関係する研究者と綿密に連絡を取り合いながら、各国共同で行なう必要がある。
3. **ESD 転送の準備：** 最新の ESD を地域解析センター（東京大学）に転送する準備を行なう。一部の不要なイベントを削ると同時に全体のサイズを圧縮し、国際ネットワークを用いて転送する。仮に、実験開始当初の 2005 年に、正味の帯域幅約 450Mbps の国際ネットワークが学術情報ネットワークにより供給されない場合は、圧縮した ESD をテープに記録し、空輸する作業を行なう。
4. **緊急の物理解析：** LHC はエネルギーフロンティアであるので、何が発見されるかわからない。何か新しい素粒子現象の兆候が見つかった時、現地の他国の研究者と緊密に連絡をとりながら、緊急かつ綿密に解析を展開する必要がある。この場合、事前に準備された解析ツールや手法が使えない場合がある為、緊急に新しいツールを用いて AOD を生成する必要が生じてくる。これは一刻を争う作業であり、ESD を日本国内に転送して AOD を生成する時間的猶予はなく、CERN 分室で行なう必要がある。

2.2 日本国内に於けるデータ処理

地域解析センター（東京大学）は、日本の参加研究機関所属の研究者が研究を行なう際に中核となる組織である。同時に日本が相当に分担するモンテカルロ・シミュレーション・データの生成を行なう。これは、ATLAS-日本グループ単独で、東京大学・素粒子物理国際研究センターが中心となってKEKの協力の下、建設・管理する。地域解析センター（東京大学）の主要な業務は、以下の4つである。

1. **AODの製作・管理**： CERN分室から転送された最新のESDを用いて、AODを製作、管理する（第3段階処理）。このAODを用いて、最終的な物理解析を行なう。
2. **ATLAS-日本グループの共同実験者の解析**： ATLAS-日本グループの研究者が、物理解析を日本国内で行なうための環境を提供する。この為、最新のAODを保持すると同時に、最新の解析プログラムの保守・管理を行なう。また、ATLAS-日本グループの物理解析が常に世界をリードしていく様に、世界各国の研究機関の研究状況を把握し国内の研究者に紹介すると同時に、それらの研究成果をまとめて配布を行なう窓口の役割も果たす。
3. **データ・クオリティーのチェック及びATLASコア・コードの保守及び開発**： ATLAS-日本グループの研究者が、国内でデータ・クオリティーのチェック及びATLASデータ処理の第1、2段階処理で必要となるコア・プログラムの保守及び開発を行なう作業のサポートをする。この為、データ・クオリティーのチェックやATLASコア・プログラム開発をする為、一部の生データ及びESDを保持・管理する。
4. **モンテカルロ・シミュレーション・データの生成**： 世界各国の地域解析センターが、その規模に応じて、モンテカルロ・シミュレーション・データの生成を分担する。日本に振り分けられた分担に応じて、この作業を行なう。また、日本独自で研究開発をしているモンテカルロ・ジェネレーターを用いたシミュレーション・データの生成も併せて行なう。

地域解析センターの規模は、国内の研究者・学生のデータ解析を支援するため十分な計算機資源と人的資源を有することが強く望まれる。また、地域解析センター（CERN分室）の規模は、ATLAS実験のデータ収集を滞りなく行い、データ解析を速やかに行なう為、また国内と同程度の研究者がCERNに常駐して研究を行なう為にも、日本国内の半分程度の規模であることが強く望まれる。地域解析センター（東京大学）は、CERN分室がこれを支援することで、その機能を効率的かつ最大限に発揮することが出来る。

第 3 章

計算機資源の必要量の評価

この章では、地域解析センターに必要な計算機資源のハードウェアの評価を行ない、続く第4章で、国内と CERN 分室それぞれの設置計画をまとめる。計算機のハードウェア能力を定める最大の要素は、計算処理能力（CPU サイクル）と、データ格納の為に記憶装置の容量である。記憶装置には、高速読み出しが可能な磁気 DISK と、アクセス速度は遅いが、記憶量当たりの単価が安価な磁気テープユニットがあり、それぞれの目的に合わせて併用するものである。

3.1 必要な計算処理能力の評価

計算処理能力を評価する上で、CPU とデータ記憶装置間の高速かつ円滑なアクセスを考える必要がある。AOD の製作・解析などの作業は、膨大なデータに高速にアクセスする必要があるため、CPU と記憶装置の間のアクセスに特別の設計を施した計算機が必要となる。この I/O アクセスの効率が悪いと処理能力が活かされずに、効率の悪いシステムになってしまうからである。従って、これらの作業には、I/O の強い計算機（以後、「サーバ型計算機」と呼ぶ）が必要である。一方、モンテカルロ・シミュレーション・データの生成や研究者がインタラクティブに使用する計算機は、必ずしも、高速な I/O を必要としない。これらの用途には、安価な PC 型計算機を用いる。

3.1.1 サーバ型計算機

サーバ型計算機の用途は、以下に挙げた 2 点である。

- AOD 製作:

第 3 段階処理である「ESD を解析して AOD を製作する作業」に必要な計算処理能力は、約 $10 \text{ SI}_{95} \cdot \text{sec/event}$ である。年に 4 回（予定）、ESD が更新されるので、これに合わせて最新の AOD を作り直す必要がある。1 回の AOD 更新に許される時間を 3 カ月として、作り直し等の安全ファクターを 2 と仮定すると、1 年分の実データ (10^9 イベント) の AOD を作るのに必要な計算処理能力は、 $10 \times 10^9 \times 2 / (3600 \times 24 \times 90) = 2.5 \text{ kSI}_{95}$ となる。実験データばかりでなく、ほぼ同量のモンテカルロ・シミュレーション・データの AOD も製作する必要があるため、AOD・1 種類当たりの製作に必要な計算処理能力は、**5kSI₉₅** となる。

AOD は既に述べた様に、対象とする物理トピックスにより異なる為、トピックスに応じて数種類準備する必要がある。先の提案書の第 5 章に詳しく述べている様に、ATLAS 実験では非常に多彩な物理が期待されているが、ATLAS- 日本グループは、製作する AOD を 4 種類に絞り、緊急性の高いもの 1 種類を CERN 分室で生成し、残りの 3 種類を国内で生成する。従って、AOD 生成に必要な計算処理能力は、日本国内では、**15kSI₉₅** であり、CERN 分室では、**5kSI₉₅** である。

- AOD の解析と解析ツールの開発:

AOD を解析するのに必要な計算処理能力は、1 イベント当たり、約 6 SI₉₅·sec である。データとシミュレーション合わせて 2×10^9 event を 1 週間で解析するのに必要な計算処理能力は、1 つの解析当たり 20 kSI₉₅ となる¹。地域解析センターの利用希望者数は約 60 名であることから、約 20 種類の物理解析ジョブを実行する能力は最低限必要である。AOD が更新されるサイクルが 3 カ月であることを考慮すると、最低限 2 つの物理解析のジョブを並行に処理するだけの処理能力が必要である。(2 つの物理解析のジョブを並行に処理する場合、3 カ月で 24 種類の物理解析ジョブを処理することが可能である。)従って、**40kSI₉₅** の計算処理能力が AOD 解析の為に必要である。これを、日本国内 **30kSI₉₅**、CERN 分室 **10kSI₉₅** に分けて保持する。

以上の 2 つを合わせて、**60kSI₉₅** のサーバ型計算機の計算処理能力が必要である(日本国内:**45kSI₉₅**、CERN 分室:**15kSI₉₅**)。これ以外に生データや ESD に直接作用するプログラム開発にも CPU が必要であるが、これは上記の二つに較べて十分小さいと思われるので評価に加えていない。

3.1.2 PC 型計算機

次に、PC 型計算機の必要とされる能力の評価を行なう。

- 日本が分担するモンテカルロ・シミュレーション・データの生成:

実験データは、年間 10^9 イベントが収集される。実験データの最低限 10% に相当する量のモンテカルロ事象を、検出器の反応を出来る限り正確に扱うシミュレーション(フル測定器シミュレーション)を用いて生成する計画を ATLAS グループは持っている。更に、その内の 10%、すなわち実験データの 1% に相当する量(毎年 10^7 イベント)が日本グループの分担であり、義務としてこれを生成せねばならない。1 イベント当たりに必要な計算処理能力の見積もり²は、 7.5×10^3 SI₉₅·sec である。更に、生成されたシミュレーション・データを ESD に対応するデータ形式に変換するには、 1×10^3 SI₉₅·sec の計算処理能力が必要となる。従って、年間に最低限必要な計算処理能力は、 8.5×10^{10} SI₉₅·sec になる。100% の稼働率として、**3.3kSI₉₅** の計算処理能力が日本に分担されたモンテカルロ・シミュレーション・データの生成に必要なとなる。

¹ $6 \times 2 \times 10^9 / (3600 \times 24 \times 7) = 20 \text{ k SI}_{95}$

²これは、FORTRAN で書かれた DICE を用いて評価している。

- 日本独自のモンテカルロ・シミュレーション・データの生成:

分担分の生成以外にも、日本グループ独自に開発している次世代のモンテカルロ・シミュレーション・ツールを用いたデータの生成が是非とも必要である。この生成は、全ての反応過程について行なう必要はないが、世界に認知され、世界標準となるまでの間は、日本グループ単独で生成しなければならない。有意義であると思われる反応過程は、全体の反応過程の内およそ 1/3 であるので、これを全て日本独自で生成するのに必要な計算処理能力は、**10kSI₉₅** である。

- 高速シミュレーション:

上記のフル検出器シミュレーションと異なり、検出器の反応を簡略に扱い、高速化したシミュレーション（高速シミュレーション）を用いて、実験データ量に較べて十分多い統計量のデータ生成が必要である。この生成は、各国の地域解析センターが独自に行なうものである。高速シミュレーションは、フル検出器シミュレーションに較べて約 1/100 の計算処理能力で事象を生成可能であるが、最低でも実験データの約 4 倍の量を生成しなければならないので、**16kSI₉₅** の計算処理能力がこれに必要となる。

- インターラクティブな使用:

データ解析で得られた結果を最終的な物理結果として表現する為には、いろいろな結果をフィッティングしたり、モデルのパラメーターを変えて予測を行ない、これを解析結果と比較する必要がある。これらのインターラクティブな使用に必要とされる計算処理能力の詳細な評価は現段階では不明であるが、LEP 実験に於ける実績をデータ量で規格化すると、国内及び CERN 分室でそれぞれ **10kSI₉₅** は必要である。

シミュレーション・データ生成に必要な計算機能力は 3 種類合わせて、**30kSI₉₅** であり、これを日本国内 **20kSI₉₅**、CERN 分室 **10kSI₉₅** で分担する。これに加えてインターラクティブな使用に、それぞれ **10kSI₉₅** で必要であり、PC 型計算機の必要量は、国内 **30kSI₉₅**、CERN 分室 **20kSI₉₅** となる。

3.2 データ容量の規模

- ESD と一部の生データの保存:

日本国内に ESD と一部 (5%) の生データを保存する。ESD のサイズが年間 100 TBytes であり、5% の生データのサイズは年間 50 TBytes である。これにモンテカルロ・シミュレーションの一部の ESD (年間 10 TBytes) を加えると、毎年 160 TBytes ずつ増加してゆく。但し、これらの ESD 及び生データは、CERN の ATLAS 中央計算機が全て保持している為に、最新の 3 年分のみを保存するのみとする。その場合、最大総量は 480 TBytes になる。また、同じ理由により、CERN 分室ではこれを保持しない。

- AOD の保存:

既に第 3.1.1 節で述べている様に、CERN 分室と国内合わせて、4 種類の AOD を保持する。1 種類の AOD のサイズは、実験データとモンテカルロ・シミュレーション・データと合わせて、年間 20 TBytes であるので、**年間 80 TBytes** の AOD が新たに生成されることになる。この内、60 TBytes を国内に、20 TBytes を CERN 分室に保存する。AOD は、CERN の ATLAS 中央計算機が保持しない為、古い年度の AOD も全て保存する必要がある。5 年分の積算で、国内 **300 TBytes**、CERN 分室 **100 TBytes** となる。

- 作業用領域とユーザー領域:

モンテカルロ・シミュレーション・データ生成の中間生成物や、共通ソフトウェア開発の為のデータなどを一時的に保存する領域が必要である。また個人が管理するプログラムやデータを保存するユーザー領域も必要である。これらの目的に、国内では **150 TBytes**、CERN 分室では **100 TBytes** が必要である。

国内のデータ総量は **1000 TBytes** となる為、これを効率的かつ安定的に運営する為には、HPSS 相当の階層化ストレージ・システムが必要である。国内のデータ格納は、この階層化ストレージ・システムを用いて行なう。一方、CERN 分室でのデータ総量は **200 TBytes** であり、階層化ストレージ・システムを用いるには、コストパフォーマンスの面で利点がなく、基本的に磁気 DISK で行なう。AOD などの貴重なデータは、RAID 型磁気 DISK 上に保存する必要がある。この RAID 型磁気 DISK は、磁気 DISK が破損した場合にデータの損失を防ぐ目的で、一部の領域にデータのパリティを保存している磁気 DISK システムである。これにより、磁気 DISK が破損した場合の復旧が容易になり、AOD などの貴重なデータの管理に割かれる膨大な人的資源を節約することが可能になる。

3.3 必要とされる計算資源のまとめ

この章で評価した計算機資源の必要量を、年次ごとに表 3.1 にまとめる。2005 年の実験開始年には、まだ十分な実験データが収集されないとして、必要な量を半分にしている。また 2004 年は、ESD や生データに作用するソフトウェアの初期開発、並びに計算機システム全体の R&D が必要である。モンテカルロ・シミュレーション・データの生成は、2004 年から開始する必要がある。

HPSS 相当の階層化ストレージ・システムは、国内だけに導入する。このテープ総量の 10% にあたる量が、キャッシュ領域として必要であり、RAID 型磁気 DISK でこれを賄う。RAID 型磁気 DISK をキャッシュ領域として用いることで、アクセスの途中で DISK が破損しても、システム全体には影響がなく、複雑なシステムである階層化ストレージ・システムを安定的に運営することが可能になる。この表に示されているユーザー数は、ATLAS-日本参加 17 研究機関にアンケートを行なった結果である。

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
サーバ型計算機 (kSI ₉₅)						
国内	15	25	45	45	45	45
CERN 分室	3	8	15	45	15	15
PC 型計算機 (kSI ₉₅)						
国内	20	30	30	30	30	30
CERN 分室	5	20	20	20	20	20
階層化ストレージ・システム とテープ (Tbytes)						
国内のみ	200	370	590	810	870	930
RAID 型磁気 DISK (TBytes)						
国内	20	40	60	80	90	100
CERN 分室	5	20	40	60	80	100
通常型磁気 DISK (TBytes)						
国内	50	70	100	100	100	100
CERN 分室	10	40	70	90	100	100
ユーザー数 (人)						
国内	10	36	30	30	30	30
CERN 分室	10	40	30	30	30	30

表 3.1: 計算機資源の必要量のまとめ

第 4 章

計算機システム設置計画

第3章で評価した必要量を満たす計算機システムの設置計画をこの章で述べ、必要な経費を見積もる。

4.1 国内のシステム

国内の地域解析センターで必要となるデータ記憶総量は、1000TBytesと巨大なものである。この様な巨大なストレージ・システムを安定的に運営するには、HPSS 相当の階層化ストレージ・システムを用いるのが現実的である。この階層化ストレージ・システムと高速な I/O 転送能力を持ったサーバ型計算機から構成される基幹部分に、モンテカルロの生成やインタラクティブな用途に用いる PC 型計算機を接続するハイブリッド式がコスト効率が良いと思われる。これら全体のシステムは、階層化ストレージ・システムを始めとする高度な技術を必要とする為、外注レンタルで賄い、同時にシステム構成並びに保守に必要となる膨大な人的資源を確保する。

4.1.1 計算機システムの仕様

基幹部分を始めとする基本仕様は以下の通りとし、システム全体の模式図を図 4.1 に示す。オブジェクト・データベースシステム (ODBMS) を利用することし、導入後、必要に応じて増強可能にすることを考慮し、機能ごとにサーバクライアント・システムに切り分けてある。

- サーバ型計算機:

AOD 生成と解析並びに ESD 解析などを行なう目的に用いる。データサーバから必要なデータを読み込み、結果をデータサーバに記録する。データサーバと高速 (300MBytes/sec) に通信を行うために必要なネットワーク装置を各ホストに持つ仕様とする。計算処理能力の合計は、**45kSI₉₅** である。

- PC 型計算機:

PC 型計算機の計算処理能力は、シミュレーション・データ生成とインタラクティブな使用合わせて **30kSI₉₅** である。

- データ・サーバシステム:

大容量ストレージ・システム（テープ・ライブラリー）、磁気 DISK 装置及びデータ・サーバ計算機で構成された「HPSS 相当の階層化ストレージ・システム」を導入する。ログインサーバ及びサーバ型計算機から、ESD、AOD 等のデータへのアクセスを実現する。階層化ストレージ・システムを利用し、磁気 DISK の総量を減らしコストダウンを図る。各ホストは、高速の通信装置 (300MBytes/sec) を備え、ログインサーバおよびサーバ型計算機との間で、十分な速度でデータのやり取りが出来るように設計する。テープライブラリーの総量は **1000TByte** とし、キャッシュディスクとして、テープ容量の 10% にあたる **100TBytes** の高速磁気 DISK 装置を備える。

- ログイン・サーバシステム:

ユーザーが直接ログインして、ソフトウェアの開発やインタラクティブな作業を行う。各ユーザーのホームディレクトリ用の磁気ディスク装置 (1TBytes)、およびそのバックアップ装置等を含む。ユーザー管理のデータの内、大きなサイズのものは、ユーザー・スクラッチ領域で管理し、実質的に、上記のテープ・サーバシステムに保存される。

4.1.2 計算機システムのレンタル料金の見積もり

上記のシステムを 5 年契約のレンタルで導入し、この計算機システムのハードウェアを保守する SE を 3 人配置した場合の価格を見積もる。システムの導入を 2004 年度とし、その時点での価格を性能価格比の向上及び割り引き率を考慮して見積もりを行なう。性能価格比の向上は、過去 7 年分の価格調査 (付録 A) を基に得られた数字を用い、人件費及びソフトウェア料金は、一定で変化しないとしている。また、割り引き率は、これまでの大型計算機システムの納入実績などを例にして算定している。これらを考慮した 2004 年度時点での実質的なレンタル料金を表 4.1 にまとめる。

	機器価格	保守費用 (5 年分)
ハードウェア	7.4 億円	3.8 億円
ソフトウェア	0.35 億円	0.3 億円
運転支援 (SE)	3 億円	-
初期費用等	2.5 億円	-
合計	13.25 億円	4.1 億円

表 4.1: 2004 年時点での計算機レンタル料金の見積もり (国内): これまでの大型計算機システムの納入実績を例にして適正な割り引きを施してある。

この表の示す様に、5 年間の総額で 17.35 億円となり、年間 **3.47 億円** が必要となる。レンタル期間は、2004 ~ 2008 年の 5 年間とする。また、2009 年以降も同規模の計算機システムを導入する必要がある。2005 ~ 2008 年の LHC 実験で発見された新しい素粒子現象を精密に検証する目的で、2009 年以降、LHC 実験の衝突ルミノシティーは約 **10 倍** に

計算機システム設置概念図 (国内)

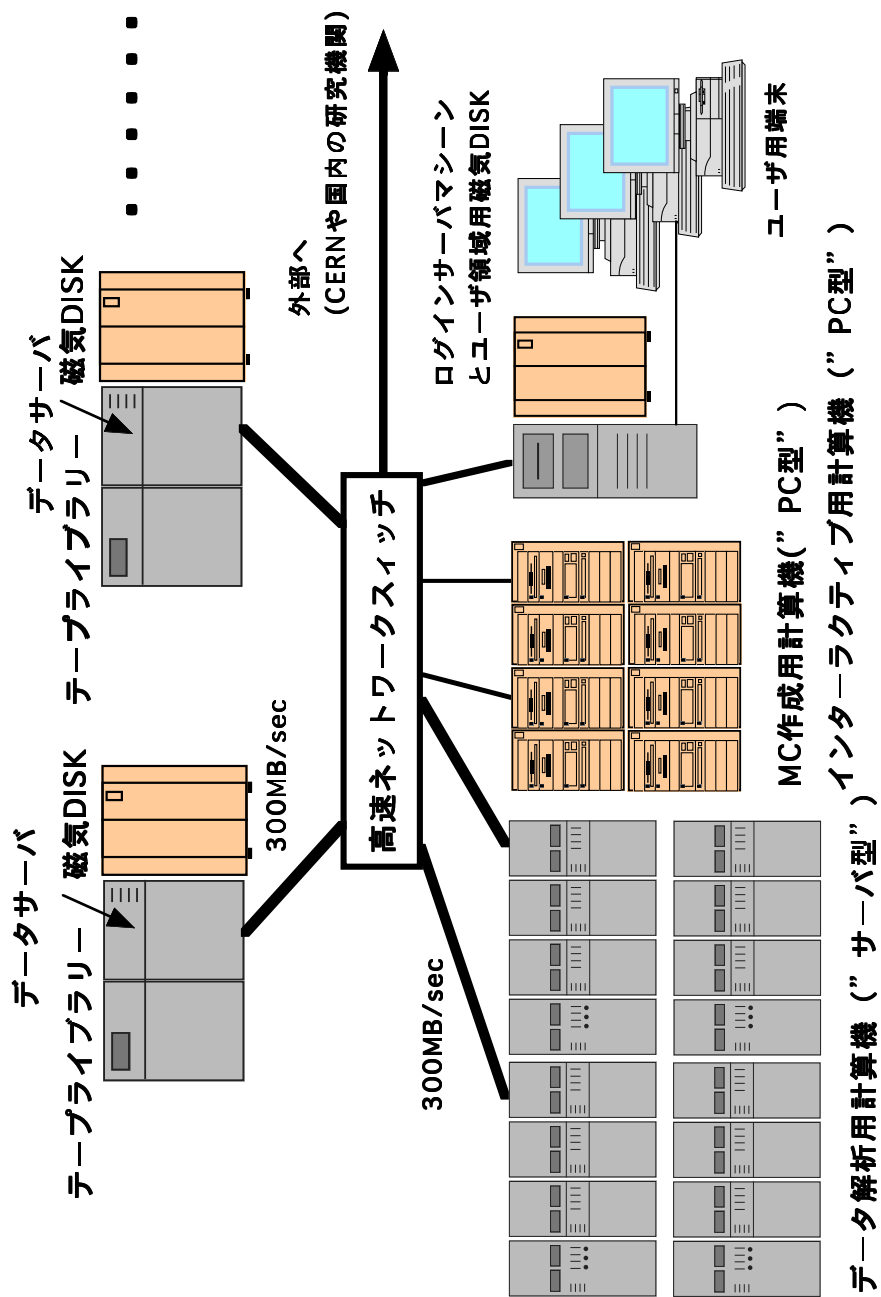


図 4.1: 計算機システム概念図 (国内)

増強される予定である。新現象の発見から、それらを測定検証することに実験の軸足を移動する為のものである。これに伴い、より細かな解析が必要となり、計算機資源の必要量も増大する。同時に計算機の性能価格比も向上する為、2004-2008年と同程度の予算で2009年以降の実験に必要な計算機資源も賄うことが可能である。

4.2 CERN 分室のシステム

CERN 分室の計算機システムは、CERN の ATLAS 中央計算機や他国が同様に設置する CERN 分室と同じにすることが強く要請される。これらの計算機システムは、PC 型計算機を基本に、高速の I/O を必要とする箇所にサーバ型計算機を接続するハイブリッド形式の PC ファームの予定である。ATLAS- 日本グループもこれに従う。計算機の性能価格比は年々向上するので、買い取りにより、年々増強していく方がコスト面で効率が良い。

4.2.1 年次ごとの購入計画

前章で示した必要量の推移を、年次ごとに購入する計算機の量と、それを積算した値と共に示したものが、図 4.2 である。緑色の棒グラフが年次ごとの購入必要量を示し、赤色の折れ線グラフが積算値を示す。この積算値を計算する上で、年間の故障率を 10% とし、実質の寿命を 3 年として計算している¹。一方、青色の折れ線グラフが、第 3 章で評価した必要量である。

左上図は、AOD の生成及び解析に用いられるサーバ型計算機の実験計画であり、2005 年の実験開始年には、まだ十分な実験データが収集されないとして、必要な量を半分にしてある。一方、左下図は、PC 型計算機の計画を示したものである。

CERN 分室のデータ保存必要量は、国内に較べて約 1/5 であり、HPSS 相当の階層化ストレージ・システムを使うのは、コストパフォーマンスの面でも、これを維持運営する人的資源の面においても効率的でない。従って、CERN 分室のデータ格納は磁気 DISK を用いて行なう。AOD は極めて貴重なデータであり、RAID 型磁気 DISK (第 3.2 節参照) 上に保存する必要がある。既に第 3.1.1 節で述べている様に、CERN 分室は、緊急性の高い AOD を 1 種類保持し、そのサイズは、実験データとモンテカルロ・シミュレーション・データと合わせて **年間 20 TBytes** である。これを示したものが、図 4.2 の右上である。AOD 以外のデータとして、高速シミュレーションの生成物や、個人が管理するプログラムやデータ、並びに共通ソフトウェア開発の為のデータなどがある。また、ESD を日本国内の地域解析センターに転送する為、一時的に磁気 DISK 上に保存する必要がある。これらのデータは、安価な通常型磁気 DISK に保存する。その購入年次計画を同図の右下に示す。

4.2.2 計算機資源購入に必要な経費の見積もり

CERN 分室の計算機システム購入に必要な経費を見積もる。計算機関連機器の性能価格比は、年々著しく向上している。過去 7 年間の向上率と 1999 年現在の価格を基に、それぞれの計算機関連機器の将来の価格の予想 (付録 A) を行ない、これを基に必要な経費を見積もっている。前節で示した購入量とその必要経費の見積もりを下表 4.2 にまとめる。

¹これは、OPAL 実験の経験によるものである。

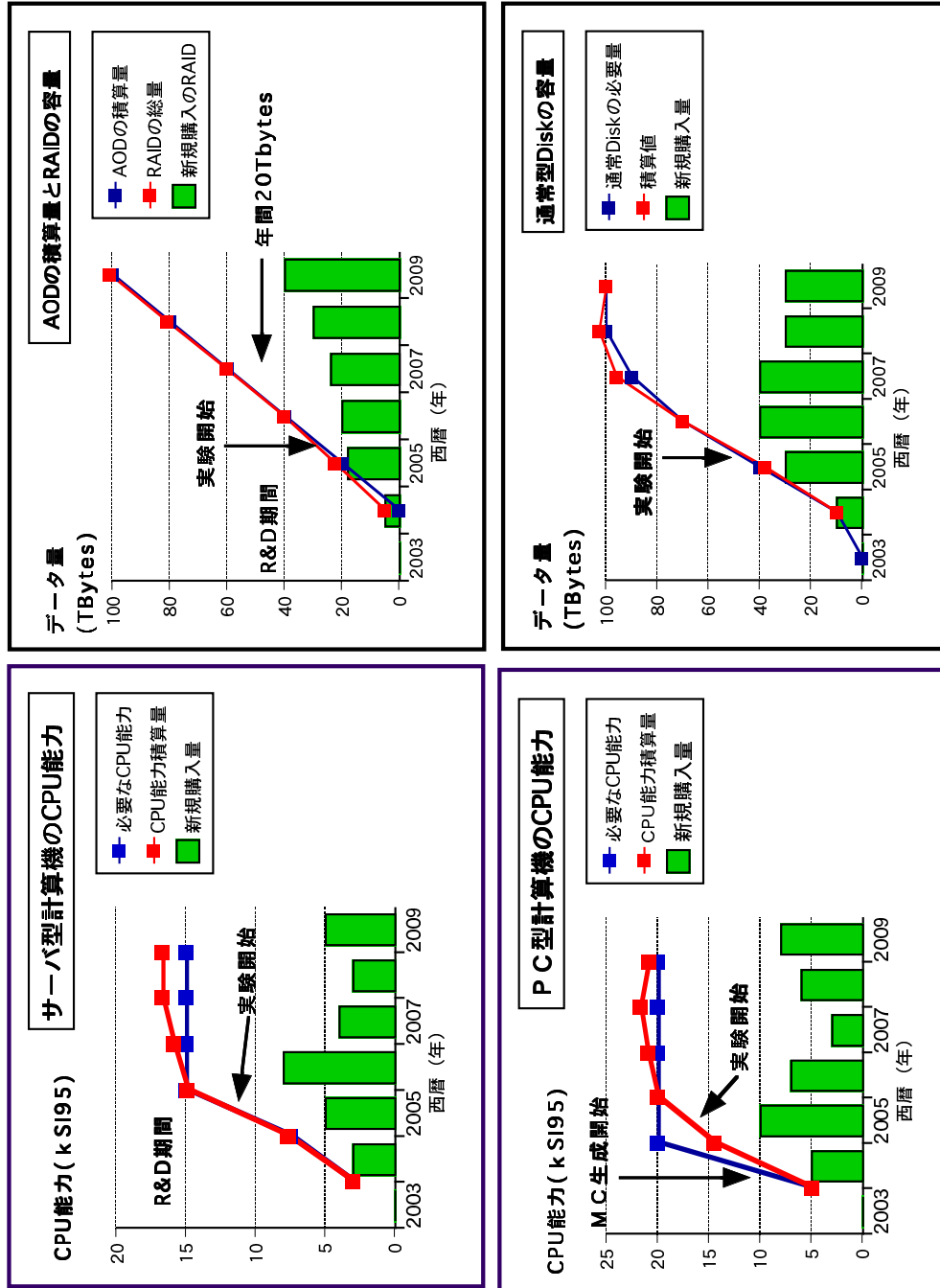


図 4.2: 計算機資源の必要量と購入量 (CERN 分室)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	合計
サーバ型計算機 (kSI ₉₅)	3	5	8	4	3	5	
PC 型計算機 (kSI ₉₅)	5	10	7	3	6	8	
RAID 型磁気 DISK (TBytes)	5	18	20	24	30	40	
通常型磁気 DISK (TBytes)	10	30	40	40	30	30	
サーバ型計算機 (百万円)	45.0	55.0	64.0	24.0	12.9	15.0	215.9
PC 型計算機 (百万円)	29.5	38.0	18.9	6.0	9.6	8.0	110.0
RAID 型磁気 DISK(百万円)	16.0	41.4	32.0	26.4	22.5	21.6	159.9
通常型磁気 DISK(百万円)	8.0	17.7	15.6	11.6	5.7	4.2	62.8
年次ごとの経費の合計 (百万円)	98.5	152.1	130.5	68.0	50.7	48.8	548.6

表 4.2: 計算機資源の購入計画と経費の見積もり (CERN 分室): 上段は、年次ごとに購入する資源の値を示している。下段は、必要となる経費の見積もりを示している (単位は百万円)。

年次ごとの経費を項目別に示したものが、図 4.3の上図である。実験開始当初 (2004–2006 年) に比較的大きな経費が必要となるが、その後は、年間約 5000 万円の一定の経費で設備を維持、発展させることが可能である。図 4.3の下図は、各項目ごとに 2004–2009 年間で合計したものの割合を示している。総額 5 億 4860 万円の必要経費のうち、60% は計算機本体の購入にあてられる。また、全体の 70% は、AOD を製作・解析する為に不可欠な計算機機器の経費である。

計算機本体や DISK の台数は、東京大学素粒子物理国際研究センターが現在 OPAL 実験の為に、CERN に於いて管理している台数の約 5 倍にあたる。OPAL 実験での経験より、この CERN 分室のシステムの購入及び保守に必要な人的資源は約 4 名であり、30 名のユーザー数と比較して適正な規模である。

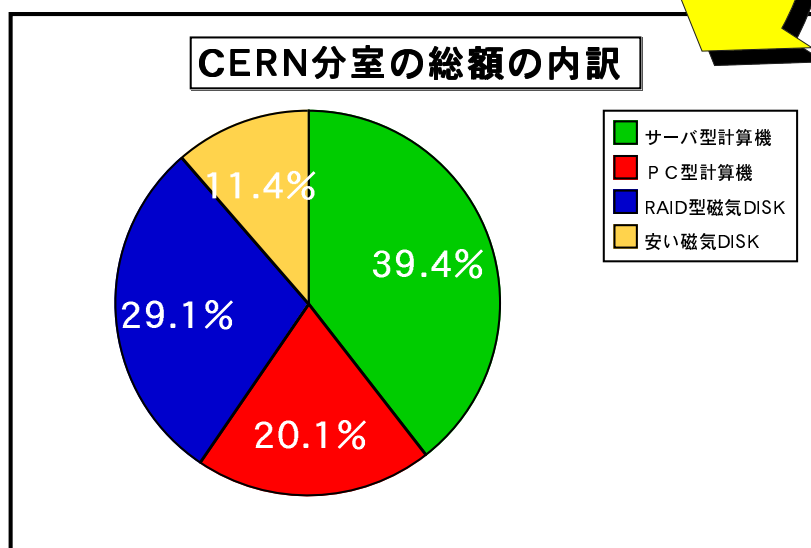
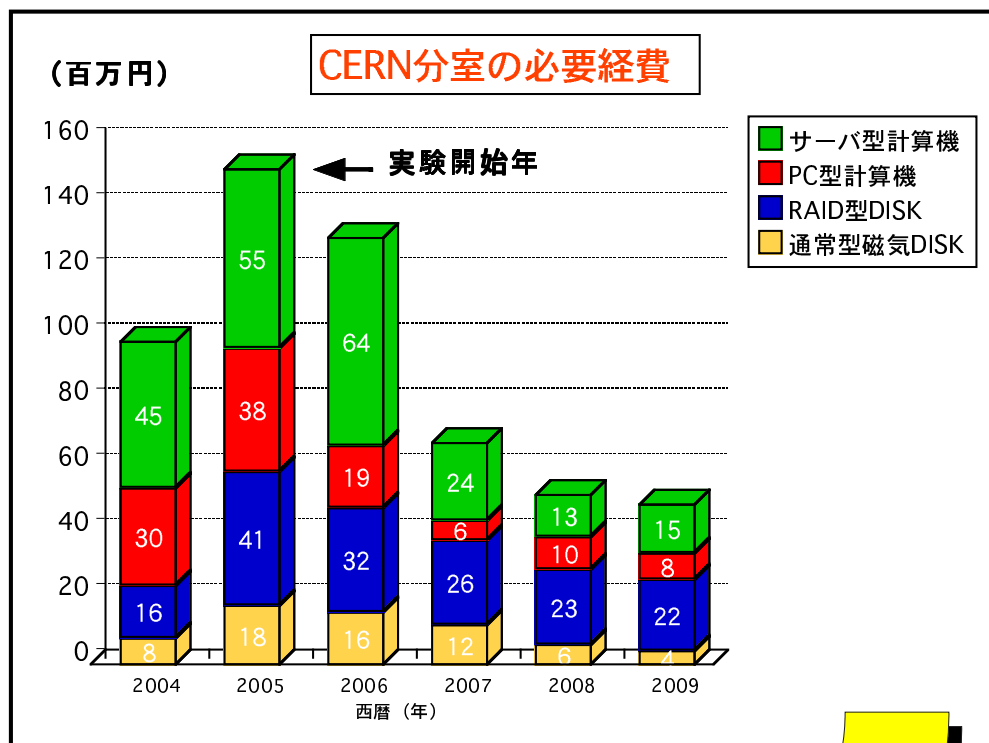


図 4.3: 計算機資源調達に必要な経費 (CERN 分室)

第 5 章

必要なネットワークの帯域幅

国際及び国内ネットワークは、データ転送、リモートアクセス、解析プログラムやライブラリーの世界同時開発などに重要な役割を果たし、地域解析センターには必要不可欠なインフラストラクチャーである。この章ではデータ転送に必要な「**正味の帯域幅**」を見積もることとし、ネットワーク・プロトコルの選択や、途中経路の選択、連続データ転送またはインタラクティブ処理の違いによる QoS(Quality of Service) トラフィック分別、などの帯域確保技術などから生じる予想される実効の転送効率については考慮しない。またデータ転送の手法としてはデータセットを複製するバルク転送と必要時に必要な部分のデータだけを転送するオンデマンド転送などが考えられるが、ここではバルク転送のみを考える。

5.1 国際ネットワーク

地域解析センターを運用する上で必要不可欠となる国際ネットワーク帯域幅の見積もりを図 5.1 の上図に示し、根拠となる評価をまとめる。

- AOD の転送:

1 種類の AOD のサイズは 実験データとモンテカルロ・シミュレーション・データとを合わせて、年間 20 TBytes になる。緊急性の高い物理トピックスの AOD を 1 種類を CERN 分室から日本国内へ転送する。AOD の更新は、較正のため年間 4 回程度行なわれる予定である。この為に、20 TBytes を 30 日で転送する必要があり、 $20 \text{ TBytes} / (3600 \times 24 \times 30 \text{ sec}) = 62 \text{ Mbps}$ がこの目的の為に必要である。

- モンテカルロ・シミュレーション・データの転送:

日本グループが義務として生成したモンテカルロ・シミュレーション・データの生データ型サイズは、年間 10 TBytes (生データの 1%) である。これを ATLAS 中央計算機システムに送らねばならない。また、他国の地域解析センターの生成したモンテカルロ・シミュレーション・データの ESD 型サイズは 9 TBytes である。これを ATLAS 中央計算機システムから国内の地域解析センターに送る必要がある。ふたつ合わせて 19 TBytes である。これを 30 日間で転送するとすると、 $19 \text{ TBytes} / (3600 \times 24 \times 30 \text{ sec}) = 59 \text{ Mbps}$ がこれに必要なものである。

- ESD と生データの転送:

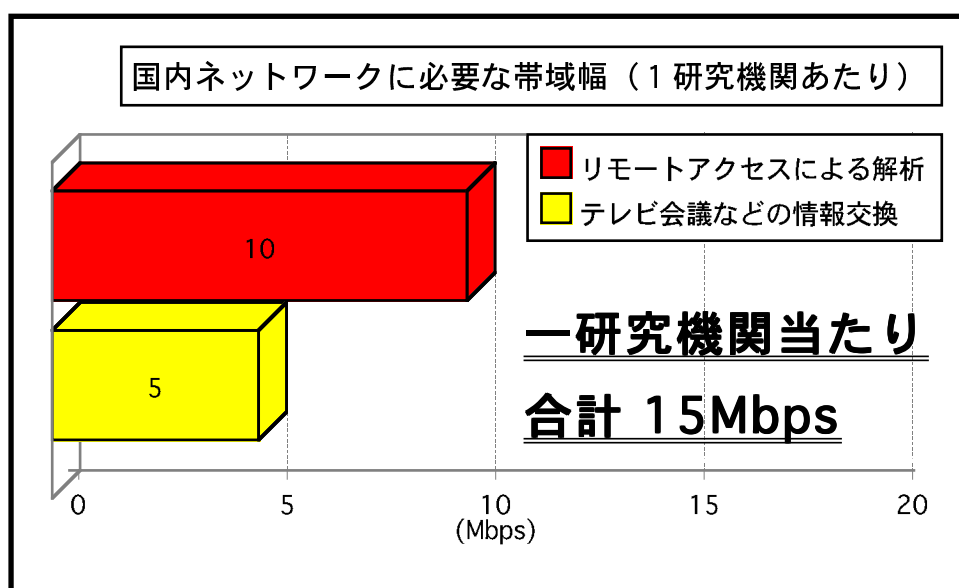
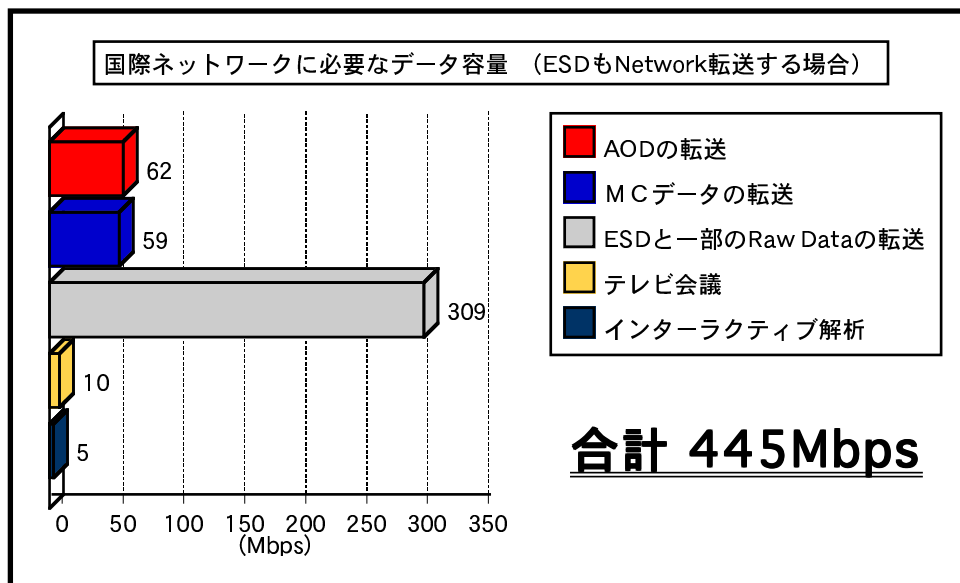


図 5.1: ネットワークの必要な帯域幅：上図は国際ネットワークの必要な帯域幅を示し、下図は一大学あたりに必要となる国内ネットワークの帯域幅を示している。これらのはデータ転送に必要な正味の帯域幅である。

生データの5% (50 TBytes/年) と、ESD(100 TBytes/年) の合計 150 TBytes/年を転送する。これらのデータが較正により更新される期間が3カ月であることを考慮して45日間で転送するには、 $150 \text{ TBytes} / (3600 \times 24 \times 45 \text{ sec}) = 309 \text{ Mbps}$ が必要である。

広い帯域幅の確保が困難な場合、ESDと一部の生データを空輸する。しかし、空輸に要する時間が、1カ月以上であることを考慮すると、一部のデータをネットワークを用いて転送し、AOD生成のテスト等を行なう必要がある。この量を生データの1% (10 TBytes/年)、ESDの10%(10 TBytes/年)の合計20 TBytes/年とし、残りは全て磁気テープによる空輸で賄う。これらを45日間で転送するには、 $20 \text{ TBytes} / (3600 \times 24 \times 45 \text{ sec}) = 41 \text{ Mbps}$ が必要である。

- テレビ会議その他:

テレビ会議や解析結果(イベント・ディスプレイ)の情報交換の為に、1人当たり約1Mbpsの使用が予想される。常時10人が使用しているとすると、**10 Mbps**が必要となる。これは、パケットロスや遅延の少ない環境であることが是非とも必要である。

- インターラクティブ解析:

共通プログラムコード開発のためのファイル転送、編集、バージョン管理などに必要な帯域幅は**5Mbps**である。円滑な作業の為に、これもパケットロスや遅延の少ない環境であることが重要である。

図5.1の上図が示す様に、正味で約**450 Mbps**の帯域幅が必要である。実験開始当初(2005年)には、正味で450Mbpsの国際ネットワークが使用出来ない場合も考慮せねばならず、この場合は、ESDを国際ビジネス便で空輸することも考えている。この為の一連の準備作業を行なうCERN分室の計算機資源の確保は、必要不可欠である。この場合に必要とされる帯域幅は、正味で約**180 Mbps**である。しかし、ESDも空輸ではなくネットワークによる転送が強く望まれ、地域解析センターを有効に機能させる為には、正味で帯域幅450Mbpsの国際ネットワークが是非とも必要である。

年間を通じてみれば、ネットワークで大量のデータ転送が必要とされる期間は典型的には、 $45 \text{ 日} \times 4 \text{ 回} / 365 \text{ 日} = 50\%$ と限定されており、アトラス日本グループだけの専用線を持つことは経済的とは言えない。より帯域幅の小さな回線でデータ転送を行うと、年間のネットワーク利用率は上昇するが、データ解析のタイミングで他の解析センターに著しい遅れをとることになる。CERNで最新のESDの供給に歩調を合わせてデータ転送及びデータ解析が進行することが最も重要である。しかしこれらのタイミングは加速器運転のスケジュールやESDの更新時期に著しく依存する為、データ転送がいつ開始されるかを予測することは、事実上、困難である。このため、365日24時間のネットワーク利用可能性が求められる。また、Grid計画などのオンデマンド転送が選択された場合には、ネットワークの回線容量が地域解析センターの解析能力のボトルネックにならないための配慮が必要となり、国際ネットワークには、より高度な常時接続の信頼性が要求される。

過去の実績では、学術情報センターNACSIS(2000年4月より「国立情報学研究所NII」と改名)の日欧回線が1999年10月より25Mbps。これに「1年で2倍」の伸び率を適用

すると 2005 年には 1.6 Gbps となる。アトラス日本グループは国立情報学研究所の日欧回線容量の一部を上記のデータ転送に用いることを強く希望する。

5.2 国内ネットワーク

地域解析センター(東京大学)が国内の解析活動の中心となる為、他の大学や研究機関からはネットワークを介しての解析プログラム開発やジョブ投入、テレビ会議などによる打ち合わせが主体となる。これらの活動で必要となる国内ネットワーク帯域幅の見積もりを図 5.1 の下図に示す。1 研究機関当たり、正味で 15 Mbps が必要である。これを国内の学術情報ネットワーク SINET で賄う予定である。

過去の実績では、国内各大学の高エネルギー物理学研究室は、学術情報センターの学術情報ネットワーク SINET のノード校まで HEPnet-J の回線を確保し、SINET の回線を使用している。各研究室からノード校までの回線は、それぞれの実験グループが負担している。ATLAS-日本グループ参加 17 機関のうち、東京農工大、東京都立大、福井大、京都教育大、鳴門教育大、広島工大、長崎総合科学大の 7 大学が、学術情報ネットワーク SINET のノード校ではなく、この分については国内のネットワークに費用が必要となる。1999 年の実績を基に評価すると、年間約 600 万円が必要となる。

第 6 章

まとめ

日本に地域解析センターを設置することは、日本グループが物理解析を行なう為に極めて重要で、かつ必要不可欠である。本計画書では、その地域解析センターに必要な計算機資源の量を出来るだけ現実的に評価している。ATLAS 実験と物理解析を円滑かつ効率良く始める為に、実験開始当初(2005-2006年)に約 110 kSI₉₅ の計算処理能力が必要となる。また、1130 TBytes が 5 年分のデータ格納に必要となる。そのうち、約 70% を国内が、残りの 30% を CERN 分室が担うのが望ましい。

本計画書の第 4 章に於いて、国内と CERN 分室にそれぞれに最適な計算機システムの導入計画をまとめている。国内の計算機システムは、巨大なデータ記憶装置(1000 TBytes)が必要となる為、これを HPSS 相当の階層化ストレージ・システムで賄い、高速な I/O 転送能力を持ったサーバ型計算機から構成される基幹部分に、モンテカルロ生成やインターラクティブな用途に用いる PC 型計算機を接続するハイブリッド式のシステムを考えている。一方、CERN 分室の計算機システムは、CERN の ATLAS 中央計算機や他国が同様に設置する CERN 分室と同じシステムにすることが強く要請されるので、買い取りにより構成する計画である。計算機の性能価格比は年々向上しているので、少しずつ買い足していく方がコスト面で効率が良い。

これらの計算機資源の調達に必要な費用は、過去の大型計算機システムの納入実績の例や、過去の価格動向の調査に基づき見積もっている。図 6.1 及び表 6.1 に、必要経費の年次計画を示す。2004-2009 年までの 6 年間の積算値で、総額 26 億 3060 万円が必要である。全体の費用のうち約 80% は、国内の地域解析センターの建設・保守に必要な費用である。国内の地域解析センターの建物や空調関連の費用はこれに含まれていない。これらに関しては、既存施設の利用も含め、今後の検討課題である。

ATLAS 実験で期待される物理トピックスは、今後の素粒子物理学の発展の鍵を握る重要なものばかりであり、日本グループが、これらの物理解析で主導的な役割を担うことは、国際的にも大いに期待されている。また、エネルギーフロンティアである ATLAS 実験での研究活動を通して多くの若い人材を育てることが、今後の日本の素粒子物理学の発展の為に是非とも必要である。そして、この研究活動を支える唯一の手段が、この計画書で述べた地域解析センターである。この報告書の中で評価した量の計算機資源を、日本の研究者の物理解析の為に用意することは、日本国の LHC 実験への投資成果を勝ち取るために欠くべからざるものであることを、最後にもう一度強調しておく。

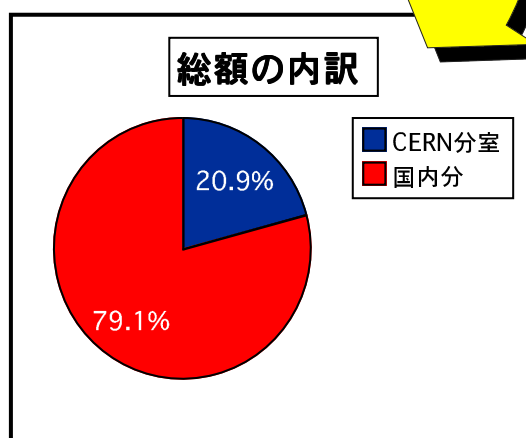
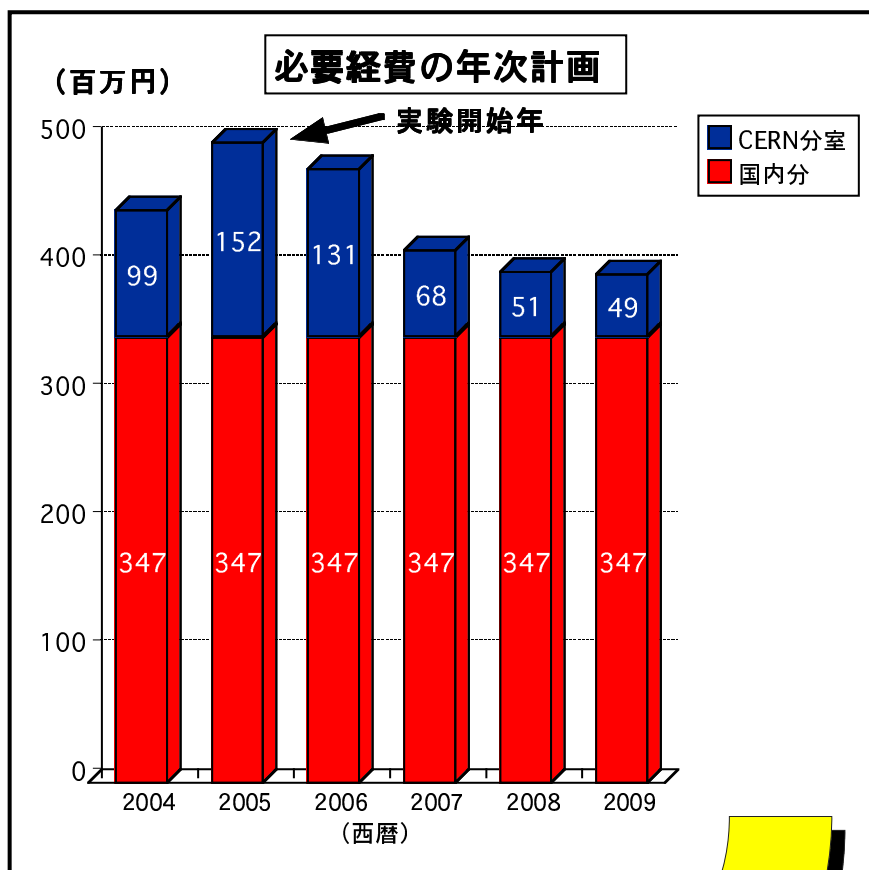


図 6.1: 必要経費の総額：上図は、計算機資源に必要となる経費の総額を示している (単位は百万円)。下図は、国内と CERN 分室の経費の割合を示している。

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	合計
国内分	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	347.0	2082.0
CERN 分室	98.5	152.1	130.5	68.0	50.7	48.8	548.6
年次ごとの合計	445.5	499.1	477.5	415.0	397.7	395.8	2630.6

表 6.1: 計算機資源調達に必要となる経費 (国内分と CERN 分室合わせて):(単位は百万円)。

付録 A

計算機関連機器の価格予想

計算機関連機器の性能価格比は、年々著しく向上している。過去7年間の価格・性能調査をもとに、それぞれの計算機関連機器の将来の価格の予想をここにまとめる。

1台の計算機の計算処理能力は、**1年で1.4倍**になる向上率である。一方、1台当たりの価格は目立った変化をしていない。この向上率と1999年時点の性能と価格を基に予測すると、表 A.1の上段になる。一方、磁気 DISK ユニットの容量は、3.5 インチ DISK を12層実装した35 GBytesの容量を持つものが1999年後半に商業ベースとして主流となった。1台の磁気 DISK ユニットの容量は、**1年で1.5倍**の向上率で過去7年推移している。一方、1ユニット当たりの価格は、横ばいである。RAID型磁気 DISK は、昔は極めて高価なシステムしか販売されていなかったが、近年の著しいIT革命で需要が新たに開拓され、この2,3年は、比較的安価なシステムが発売される様になった。2,3年の推移で、性能価格比の向上率を算定するのは困難であるので、通常の磁気 DISK と同じ向上率であると仮定する。この向上率と1999年時点の性能と価格を基に予測すると、表 A.1と図 A.1の様になる。

		1999	2003	2005	2007	2009
サーバ型計算機 (4CPU Board 型)	価格(万円)	8300	2100	1100	600	300
	台数	8.3	2.1	1.1	0.6	0.3
PC 型計算機 (2CPU Board 型)	価格(万円)	3330	830	380	200	100
	台数	33.3	8.3	3.8	2.0	1.0
RAID 型磁気 DISK	価格(万円)	2000	480	230	110	54
通常型磁気 DISK	価格(万円)	500	120	59	29	14
	台数	300	40	14	5	2

表 A.1: 計算機本体と磁気 DISK の価格予想：上段は、処理能力1kSI₉₅当りの計算機本体の価格と必要な台数。下段は、容量1TBytesあたりの磁気 DISK の価格と必要な台数を示している。

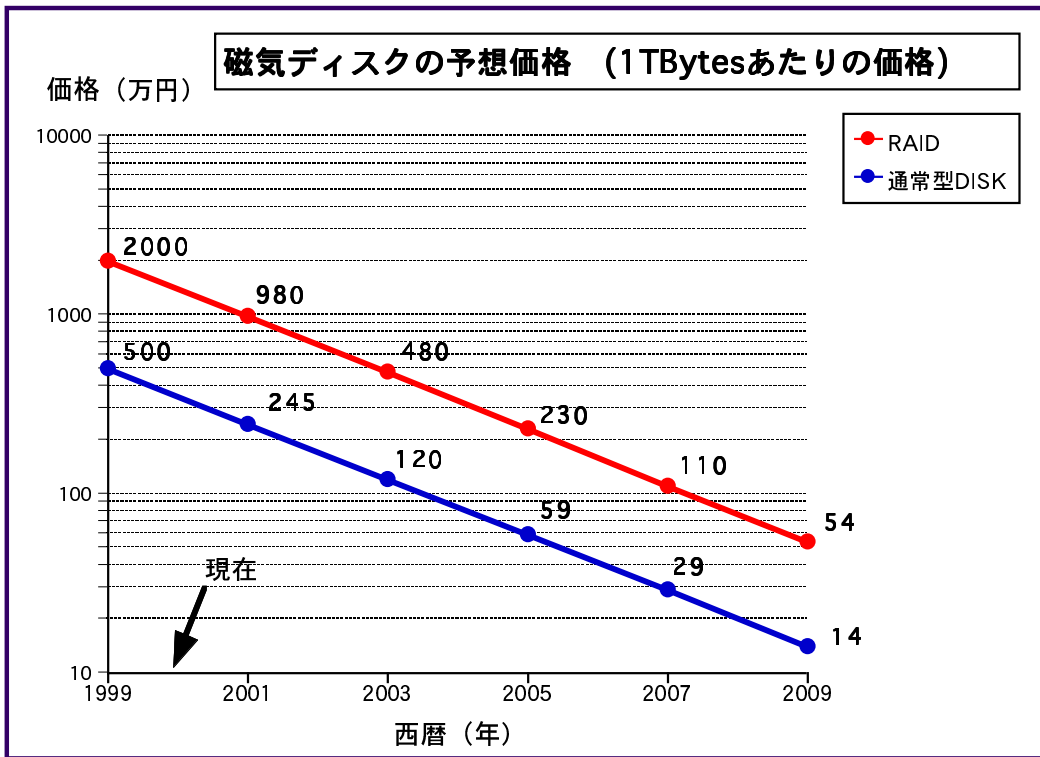
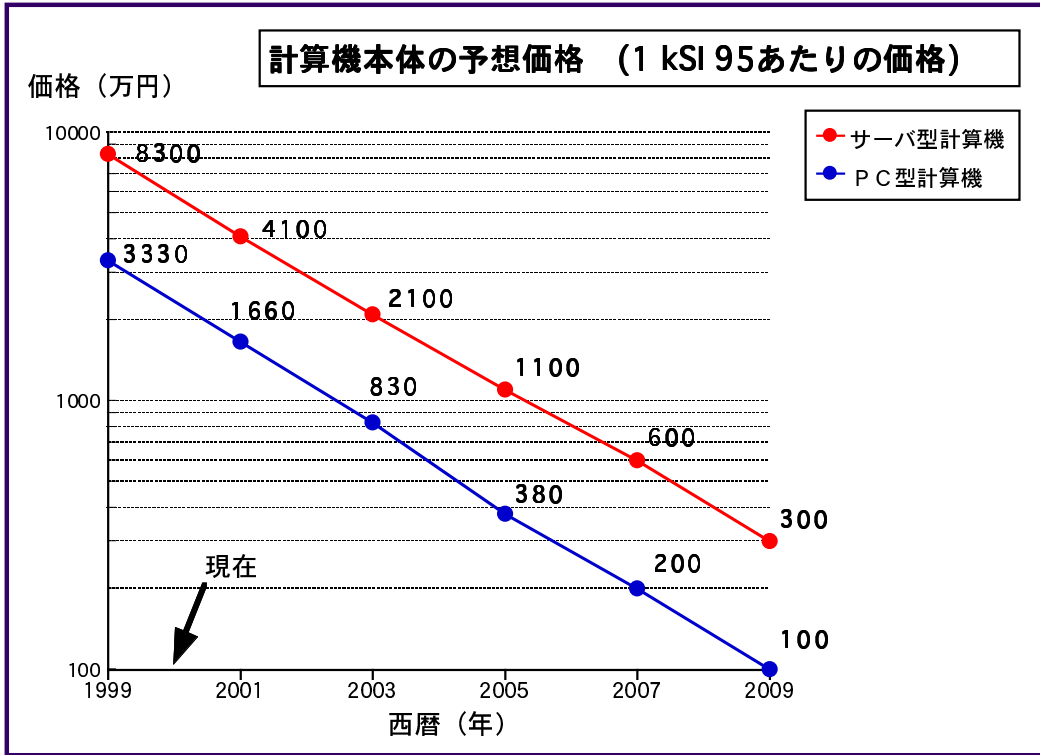


図 A.1: 計算機機器の価格予想