

欧米の研究・教育用 テストベッドの開発動向

角田 健男

日本電気（株） t-kakuta@ax.jp.nec.com



■欧米の研究・教育用テストベッドの 強化の背景

米国のInternet2やカナダのCA*net4、欧州のGEANTやオランダのSURFnet5に代表される欧米の研究・教育用の高速ネットワークは、急速に進展している。いずれも光ファイバの整備とDWDMや光クロスコネクタ等の光通信技術を利用した機器やGigabit Ethernet機器等を利用して広域のバックボーンネットワークの伝送速度は、2.5～10Gbpsへ、MAN (Metropolitan Area Network) も大幅に強化または計画が進行中である。それに伴い、科学、医学、遺伝子工学、天文学、気象、海洋学、地震学、原子力エネルギー、宇宙工学、工学、教育などの各分野の世界各国の研究・教育コミュニティで利用されてきたGridコンピューティング環境も、次世代の超高速ネットワークの利用へと変革の動きが見られる。しかも、光技術を利用した超高速ネットワークにはエンドユーザによるエンド・ツー・エンドの光波信号（ラムダ）の経路制御、複数の光波信号のダイナミックな割り当て制御などの多数の課題があり、欧米の超高速ネットワークの推進組織はこれらの課題解決に向け実証実験などの共同作業を開始している。研究教育用ネットワークとこれに接続して利用される計算機も含めたシステムは、実用的な利用に先立って試験や実証実験等に利用されるため、テストベッドと呼ばれる。

本稿では、科学研究コミュニティのネットワーク環境の動向、欧米の最先端の研究教育用ネットワークに

関するテストベッドの開発・強化の動向、それぞれの課題への取り組み状況などについて紹介する。表-1および表-2にそれぞれ北米と欧州の主要な研究・教育用のテストベッド一覧を示す。

■科学研究コミュニティの ネットワーク環境の動向

米国NSFのCyber Infrastructure構想

NSFは、これまで科学やエンジニアリングに関する多数の大規模な共有設備の構築・運用プロジェクトに取り組んできたが、世界に分散された計算機の規模の拡大、共有データマイニング規模の拡大、これらの計算機資源とデータ資源の共同利用、広域センシングと観測などを科学研究コミュニティでさらに利用推進するため、2001年からCyber Infrastructure構想を開始した。

NSFが従来実施してきたCISE (Computer and Information Science and Engineering : コンピュータと情報科学およびエンジニアリング) 研究は、Grid Computing¹⁾、デジタルライブラリ、仮想現実、および高性能ネットワークとミドルウェアアプリケーションなどの情報システムにさまざまな変革のきっかけを作ってきた。NSFは、CISEの研究をもとにCyber Infrastructure構想の実現のため、2001年度のMajor Research Equipment (MRE) 計画に約\$138Mの予算要求を議会に提出した。MRE計画には、多数の地震計データの解析とSan Andreas断層の観測をするEarthScope^{☆1}、地震工学シミュレーション用ネットワーク (NEES^{☆2})、分散型Terascale Computing Systems^{☆3}、米国生態観測ネット

☆1 <http://www.earthscope.org/safod.com.html>

<http://quake.wr.usgs.gov/research/physics/sanandreas/>

☆2 <http://www.neesgrid.org/>, <http://www.ev1.uic.edu/cavern/TIDE/SeattleQuake2001/>

☆3 <http://www.nsf.gov/cgi-bin/getpub?nsf0151>

<http://www.psc.edu/machines/tcs/status/>



プロジェクト名称	Internet2 (米国)	NGI (米国)	CA*net4 (カナダ)	StarLight (米国)
テストベッド名称	Abilene, vBNS(+)	SuperNet, DREN, vBNS(+), ESnet, NREN,		
構築目的	・先端的アプリケーション開発 ・ネットワークの能力試験 ・先端的ネットワーク研究 (Multicast, QoS, IPv6, 計測)	・研究・業務・教育用の高性能ネットワークの構築 ・先端的な AP 実証実験 ・NW 制御・管理, QoS, セキュリティなどの研究開発, 実験	・CA*net3 の後継の光インターネット用バックボーン NW の構築, 運営 ・先端的な研究・アプリケーション開発, 支援	・研究・教育用ネットワークの国際 IX の STAR TAP を強化する光 IX 実証実験。 ・Grid コンピューティング実証実験
推進組織	UCAID	アメリカ政府	CANARIE Inc.	iCAIR,EVL,ANL
メンバ	大学, 研究機関, 企業など 180 以上 (Qwest, Cisco, Nortel, Indiana 大学等)	DARPA, NSF, DOE, NASA, NIH/NLM, NIST	120 以上の民間企業, 大学, 公共機関	I-WIRE, TeraGrid, OMNInet, SURFnet, CANARIE, DataTAG
構築実績	1996/10 Educomm で 34 大学が広帯域ネットワークの必要性を強調。 1997/9 UCAID 創設。 2000/9 全米 11 都市を結ぶ OC-48(2.5Gbps) ネットワークを構築済み。	(vBNS の構築) 1993 年 NSF が HPCC 計画援助のネットワーク構築計画を公開 1995 年 MCI が構築開始 (IPoverATM/SONET, 622Mbps) 2000 年 4 月, NSF から MCI が vBNS を譲り受け, vBNS+として引き続きサービス中(全米 12 都市を接続, 622M-2.5Gbps)	・CA*net3 1998 年より構築開始。(IP over WDM, 2.5Gbps) 1999 横断光ネットワーク完成。現在, カナダと米国に 14 GigaPOP を配置。 ・CA*net4 2001 年 8 月, 構築計画書を発行。第 1 次参加公募を実施	・STAR TAP 世界の高性能学術 NW のクロスコネクタのため 1997 年に設置。45-622 Mbps。 ・StarLight Cisco 6509(GigE 付き), IPv6 ルータ, Juniper M10, データマイニングクラスタ, 表示用クラスタ等を設置。SURFnet とのラムダ接続実験用 Cisco ONS15454 も設置。
運営 (組織, 方法)	Qwest がネットワークを構築, Nortel, Cisco が機器を寄付, Indiana 大学が運用を担当。	MCI WorldCom 等がネットワーク構築, Cisco が機器を寄付。国家機関, 大学, 民間企業がネットワーク技術, アプリケーションに関する研究を担当。	CANARIE が CA*net4 設計, proj 管理を行う。	2001 年, ノースウェスタン大学内に設置, 運用を開始。
現状の利用例	3 次元の脳のマッピング, デジタルビデオネットワークほか	気象レーダリモートセンシング, コンピュータマイクロビジョン Matisse, Digital Earth, HDTV のマルチキャストほか	遠隔授業 (Learning Program), ビデオ配信・会議, 学校向け Web キャンピング, 科学教育用 cLab, X 線画像利用ほか	Abilene, CA*net3, I-WIRE, TeraGrid, APAN/TransPAC に接続。 SURFnet の間でラムダ接続実験の準備中。
トラフィック状況	7 カ月ごとに倍増 http://hydra.uits.iu.edu/~abilene/traffic/	http://www.vbns.net/main.html?g=2&t=100&f=2 (2000/1 までのデータ)		
Test Bed の今後の強化計画	2001 UIC/NU との 1Gbe 接続, CA*net3/4 との 10Gbe 接続 2002 DWDM/CWDM 導入	MPLS を導入したネットワークにより 2 重化を図る。2000 年末までに 2 重化を完了予定。	2002 年 7 月 CA*net4 の運用開始の予定。	10GigE, DWDM, 光 switching/routing 機器を導入予定。

表-1 北米の研究・教育ネットワーク一覧

ワーク (NEON^{☆4}), ミリ波天体望遠鏡を構築する Atacama ミリ波アレー (ALMA^{☆5}), 高エネルギー下での衝突によりプロトンとイオンを生成させる巨大加速器施設 Large Hadron Collider (LHC^{☆6}), Grid 物理学ネットワーク (GriPhyN^{☆7}) 等のプロジェクトが含まれている。

上記の各プロジェクトは, 実験設備やアプリケーションの開発だけではなく遠隔地にいる科学者や研究者から超高速ネットワークを利用して分散配置された計算資源を相互接続し, 計算処理の分散と集約, 生成データの蓄積検索と可視化などが一層高速にできる必要がある。これらの実現にはこのアプリケーションの実行に必要な広帯域のネットワークを科学者や研究者が専用に利用できる環境, すなわち光ネットワークの構築と, 米国国内および国際間の研究教育用ネットワー

クの相互接続環境が必要となる。

このような環境下で, Northwestern 大学の iCAIR (International Center for Advanced Internet Research) の Dr. Joe Mambretti や Illinois 大学シカゴ校の EVL (Electronic Visualization laboratory) の Dr. Tom DeFanti らは, NSF の資金を得て, カナダの CANARIE やオランダの SURFnet やスイスの CERN などの協力の下に, STAR TAP の光バージョンである StarLight プロジェクト²⁾ を計画開始した。すでに Northwestern 大学内の StarLight 施設には GigE や試作の 10GigE のスイッチやルータ群, IPv6 ルータ, SURFnet の Cisco 12000GSR などが設置され 2001 年 9 月時点で運用を開始した。

研究教育用のテストベッド推進組織の活動と Grid コミュニティのニーズと, 両者の課題の解決のための共同

☆4 <http://www.sdsc.edu/NEON/>

☆5 <http://www.alma.nrao.edu/>

☆6 <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>

☆7 <http://www.griphyn.org/>, <http://www.sdss.org/>, <http://www.ligo.caltech.edu/>

プロジェクト名 (国名)	GEANT (欧州)	SuperJANET4 (英国)	SURFnet5 (オランダ)	G-WIN (ドイツ)
構築目的	・TEN-155 に代わる GigaBit 級の汎欧州研究ネットワークの構築 ・textbed や QoS 保証などのサービスの提供 ・先端的なネットワーク研究	・研究・業務・教育用の高性能ネットワークの構築 ・先端的な AP 実証実験	・SURFnet 4 の 100 倍の速度のバックボーン NW の構築 ・運営 ・先端的な研究・アプリケーション開発、支援	・ドイツ科学研究ネットワーク用ギガビットネットワーク構築、実験 ・先端的なアプリケーション開発
推進組織	欧州の 27NREN と DANTE	UKERNA	SURFnet	DFN-Verein
メンバー	28NREN、32カ国の 3000 研究・教育機関	英国の大学・研究機関の 200 サイト以上が接続	200 以上の民間企業、大学、公共機関を接続し、利用者 50 万人	国立機関、研究所、大学・学校、民間企業など 400 メンバ
構築実績	・TEN-155 欧州 25 カ国の 21NREN を接続。 ・GEANT 2001 年 12 月 1 日より運用開始。欧州 32 カ国の 28NREN にサービスを提供。	1991 年 JANET IP service 1993 年 SuperJANET 34Mbps 1995 年 SuperJANET II 34Mbps + 155Mbps、アクセス系、8Mbps 2000 年 8 月 SuperJANET III MAN との接続を強化 2000 年 6 月 WorldCom と契約 2000 年末からサービス開始。	1987 年 SURFnet1 9.6Kbps 1989 年 SURFnet2 64Kbps 1992 年 SURFnet3 2Mbps 1995 年 SURFnet4 34Mbps 1997 年 SURFnet5 155Mbps 1999 年 1 月から SURFnet5 の GigaPort プロジェクトが開始。 2001 年 6 月 SURFnet5 10Gbps の運用開始。	1996/4 B-WIN(155Mbps) 開始。 1997 Gbps 級のテストベッド(GTB)の開発を開始。 2000/6 G-WIN のサービス開始。GTB-West(3都市)と GTB-South(4都市)の 2 テストベッド(2.5Gbps)を 1998 年に構築。
運営(組織、方法)	3 ネットワーク事業者と運営契約を締結。COLT Telecom(UK, F, G, I, NL, BNLX), Telia(北政、PO), T-Systems(AT, CH, HU)	WorldCom と開発・運営契約を締結。UKERNA から遠隔制御。 MAN Consortium とサービスレベル契約作業。	GigaPort Project のネットワーク構築運用は SURFnet が、アプリケーションの開発は Telematica Instituut が担当。	DFN、資金は教育省が提出する。ネットワーク構築は、Deutsch Telekom, Cisco が中心的に取り組み。
現状の利用例	・TEN-155 の継続 ・目標 全世界接続、End-to-End QoS、各種の QoS の提供	情報検索、ビデオ会議、Grid 活動など	教育、遠隔医療、仮想ラボラトリ、電子商取引、電子コラボレーション、情報検索、ビデオ配信など	フラックホールによる微粒子の可視化、HIV の増殖を促進する分子の可視化、気象のモデリング、脳磁気計測ほか
トラフィック状況	・バックボーン NW 2.5Gbps (当初) から 10Gbps に増加の予定。 ・アクセス速度 11NREN では 2.5Gbps に ・4 年以内に 100Gbps に強化の予定。	・バックボーン NW 2000 年末 2.5Gbps 2001 年 10Gbps 2002 年 20Gbps ・アクセスリンクアップ 構築 Large MAN 2.5 → 10-20Gbps Medium MAN 622M → 2.5Gbps	2001 年のトラフィックは急増中。 ・2002 年に 80Gbps のバックボーン NW と、20Gbps のアクセス性能の実現を目標。 ・欧州研究 NW との接続： 2001 年 622Mbps 2003 年 2.5Gbps ・StarLight とラムダ接続試験 計画 ・IPV6 Multicasting 試験：2002 年	2000 年末までに G-WIN 構築終了 2001 2.5G の数倍の BB 構築、2002 10Gbps まで

(1/2)

プロジェクト名 (国名)	NORDUNET2 (Denmark, Sweden, Finland, Norway, Iceland)	Renater2 (フランス)	PIONIER (ポーランド)	GRNET2 (ギリシャ)
構築目的	・北欧 5 カ国の先端的ネットワーク共同研究 ・先端的なアプリケーション開発	・研究・業務・教育用の高性能ネットワークの構築 ・先端的な AP 実証実験 ・NW 制御・管理、QoS、セキュリティなどの研究開発、実験	・ポーランドの学術研究ネットワークの基礎構築 ・先端的なアプリケーション開発、利用	・ギリシャの学術研究ネットワークの強化のため光ネットワークの構築 ・先端的な AP 開発利用
推進組織	NORDUNET	Renater	KBN	GRNET
メンバー	北欧 5 カ国の大学、研究機関など 580 サイト以上、106 万ユーザ。	フランス国立の研究、教育、文化組織の 600 サイト以上が接続。 国内接続は完了 Renater2 の国際接続： パリの NIO 経由で、TEN-155 と GEANT、STAR TAP、アジアオセアニア諸国に接続。	大学、研究機関など	大学、研究所、教育機関の 65 サイト以上が接続。19 万人のユーザ。
構築実績	NORDUNET の構成と速度 (Mbps) Forskingsnet(DK) 622 FUNET(FI) 622-2,488 RHnet 1,024 UNINETT(NO) 155-2,488 SUNET(SE) 622		・運用中の 2 つの NNW (1)ポーランド国立科学学術 NW : NASK (2)研究教育広帯域 NW POL34 ・PIONIER 計画 2001-2005 年で 2.5Gbps から 10Gbps のバックボーン NW と GBE を利用した MAN 接続などを実装予定。	既存の GRNET の代替計画 2001 年 4Q に DWDM によるコアバックボーン NW、3Gigabit(Athen, Thesslonki, Crete) とアクセシ系 MAN の構築運用を開始の予定。6 年間で 30M Euro を投資 (75% を EU、25% を政府が負担)
運営(組織、方法)	NORDUNET2、プロジエクトリダー、事務局はオスロ大学、NORDUNET オフィスはコペンハーゲンにあり。各国に NOC を置き、運営管理。 遠隔教育と生涯教育 遠隔医療、電子図書館、基礎ミドルウェア (QoS, MIM, マルチキャスト、PKI など)	国内 24 地域接続および商用 NRD と、国際接続および商用インターネット接続用のオペレーター接続ノードがある。各 NRD はパリの NOC から遠隔制御。	NASK と POL34 は Poznan Supercomputing and Networking Center が運用。	GRNET の技術管理と運営はアテネ工科大学の NW 管理センターに委託。 2000 年末に GRNET と OTE とが契約を締結。
現状の利用例	遠隔教育と生涯教育 遠隔医療、電子図書館、基礎ミドルウェア (QoS, MIM, マルチキャスト、PKI など)	ヤスト、IPx6, ATM VPN サービス	計画 National Computing Grid、分散データ・アーカイブ、ライブビデオ伝送、デジタル図書館、分散 3 次元シミュレーション、遠隔教育、遠隔医療	計画 ビデオ、音声伝送、QoS サービス、VPN など
トラフィック状況	北欧から外部への帯域幅は、2000 年で 10000dbps 超。年 144% 増。 構築。費用は 4MUS\$ (30M DKR、3years)	2001/1 から Renater2-bis に強化。Paris-Lyon 間は 2.4Gbps、Lyon-Marsaille 間は 622Mbps、その例外は 155 Mbps		2004 年アテネ五輪を控え現状 GRnet のインフラでは対応できない状況。
Test Bed の今後の強化計画				地方都市の GigaPop と MAN の構築を行う計画がある。

(2/2)

表-2 欧米の研究・教育ネットワーク一覧



Gridアプリケーション開発コミュニティのニーズ

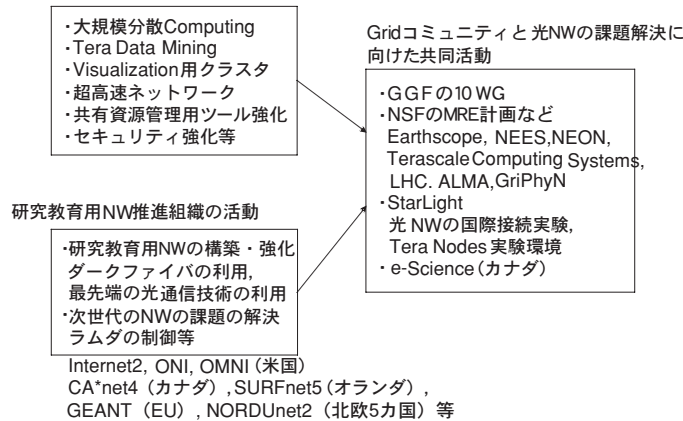


図-1 研究教育用NWとGridコミュニティの活動の動き

作業の動きを図-1に示す。

(1) 国内の研究教育用バックボーンネットワークとMANの強化

これには光技術を利用したバックボーンネットワークの構築・強化, 地域, 都市の研究センターや大学にギガビットレベルの性能を有するGigaPoPの設置, ダークファイバの整備・調達, GigaPoPのバックボーンネットワークへの接続, 無線LAN等のアクセスネットワークの強化が含まれる。

(2) 国際ネットワークの相互接続機能の強化

米国, 欧州, アジアなどの研究教育用ネットワークの国際相互接続サービスを提供してきたSTAR TAPの光技術を利用した強化。すなわち, StarLightの構築と欧州間の光ネットワーク接続試行実験を行うこと。

(3) Gridアプリケーション開発環境 (Gridテストベッド)の強化

Grid環境には, 図-2と図-3に示すように計算能力指向型とデータ指向型があるが, 今後は双方ともに膨大な数のPCクラスタやスーパーコンピュータ群, ストレージクラスタ, 表示端末クラスタが超高速の光ネットワークに接続された環境を遠隔地にいる研究者が利用できるように資源管理方法・ツールの強化が必要になってきたこと。

このような, 要求に対し欧米の主要な研究教育用テストベッドの構築・強化プロジェクトの取り組み状況を以下に記す。

■北米の研究教育用テストベッドの開発動向

北米における最近の研究教育用テストベッドは, DWDMや光クロスコネクタなどの光通信技術を利用したネットワーク機器やGigabit Ethernet機器などを利用した第3層以下のネットワークの強化と, これと並行して第3層より上位に位置するGridコンピューティング環境の強化やGridを利用したe-Scienceつまり科学, 医学, 生物化学や遺伝子工学分野などの各分野のアプリケーション開発が進行中である。

特に米国のInternet2のバックボーンネットワークAbileneの強化計画, カナダのCA*net3の後継のCA*net4構築計画, 米国カリフォルニア州のCENIC (<http://www.cenic.org>) が計画したONI (Optical Network Infrastructure) 構想, 研究ネットワークの国際Internet Exchange (IX) のSTAR TAPの光版である

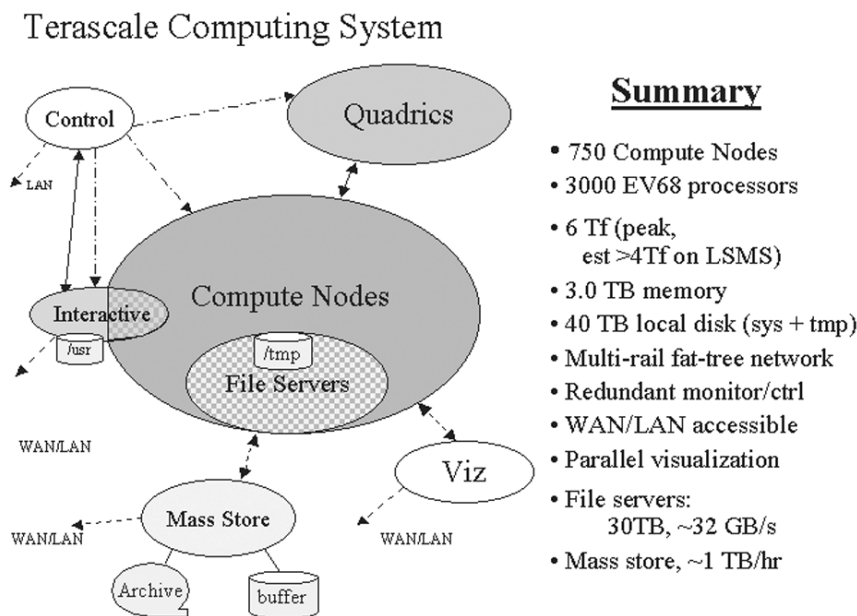


図-2 計算指向型Grid例 - Terascale Computing Systemの概念図
(出典: http://www.psc.edu/machines/tcs/status/tcs_slide.gif)

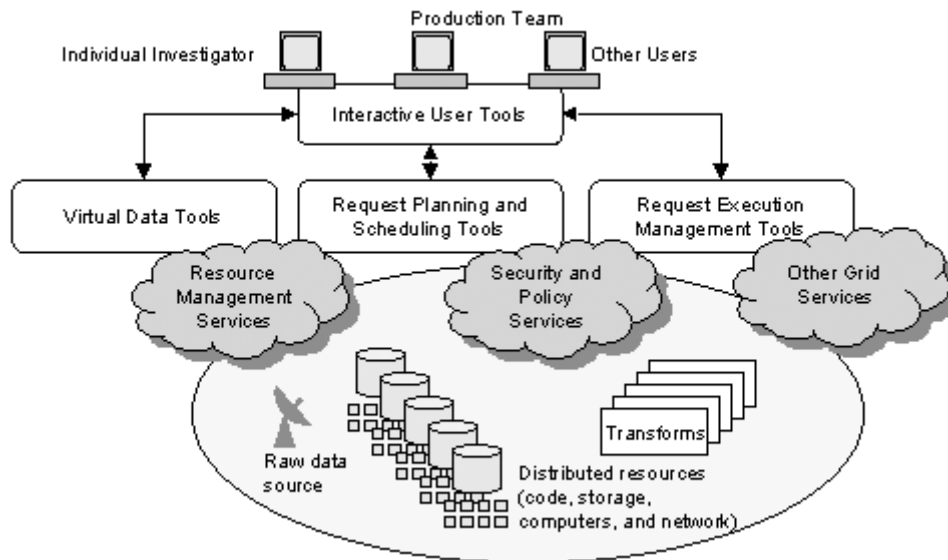


図-3 データ指向型Grid例 - GriPhyNの概念図
 (出典: <http://www.griphyn.org/info/info2.html>)

StarLightの構築運用などが主要な活動である。

欧米の先端的な研究教育用ネットワーク推進機関が光通信技術の積極的な利用や光ファイバの整備やデータファイバの調達などを推進した結果、大学や研究所、および学校ではさらに超高速の研究教育用テストベッドが利用可能になってきた。その中で、カナダのCANARIE Inc., 米国のStarLightとiCAIR, オランダのSURFnet等は共同して、ネットワークのエッジでユーザ自身がエンド・ツー・エンドの光波長（ラムダ）の経路制御を行う方式やラムダリソースのダイナミックな割り当て制御などの実現に向けて挑戦を開始している。

StarLight

StarLightは、STAR TAPで提供している国際ネットワークの相互接続サービスをさらに光ネットワーク上での提供と、科学分野等のGridアプリケーション開発向けに最適化されたネットワークサービスの提供を目指しているプロジェクトである。StarLightの開発はNSFの資金提供により、イリノイ大学シカゴ校 (UIC) の電子可視化研究所 (EVL), ノースウエスタン大学のiCAIRおよび国立アルゴンヌ研究所の数理計算機科学科が中心となりカナダのCANARIE, オランダのSURFnetやスイスのCERNの協力により進行中である。

Internet2

Internet2では、現在Qwest社のAbileneのIP over SONET (OC-48) バックボーンネットワークを利用し、Multicast, IPv6, QoS, Security (DDoS検出) のサービスを提供している。Internet2を運営管理しているUCAIDはQwest社との契約更改によりPoPの強化を2002年1月に開始し、2003年10月までにAbileneのラムダ化により伝送速度を10Gbpsに強化する予定である。

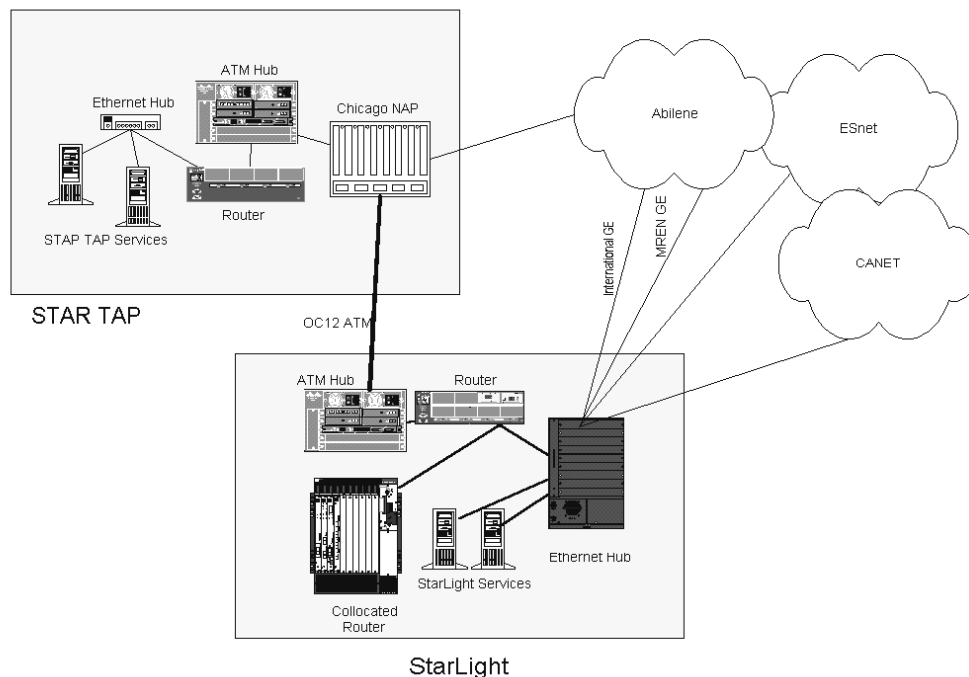


図-4 StarLightのネットワーク接続
 (出典: <http://www.startap.net/starlight/ENGINEERING/engArchDiagram.gif>)



Evolving StarLight Optical Network Connections



図-5 StarLightの光ネットワーク接続図
(出典：http://www.terena.nl/conf/lambda/slides/DeFanti2.ppt)

STAR TAPは、米国政府の研究機関のネットワークの相互接続のために1997年に設置され、現在世界中の学術および科学研究コミュニティに先端的なデジタル通信サービスを提供しているが、次世代のインフラとして大容量高性能化が求められていた。StarLightの施設には、国際的な光接続を行うためのコロケーション機能とAmeritech, AT&T, Qwest, Global Crossingの各社へのアクセス用設備がある。さらに、StarLightは、Gridを強化するeScienceアプリケーションやネットワーク性能測定・分析、計算機とネットワーク技術評価のためのグローバルな基盤を提供する。図-4に示すように、StarLightは2001年9月時点でSTAR TAPと2回線のOC-12c ATM回線で接続され、SURFnetと2.5Gbps OC-48で、AbileneとはGigE2回線で、カナダのCA*net3（2002年にはCA*net4）とGigEで接続されその後10GigEで接続される予定である。イリノイ州の多数の大学・研究所に分散配置されたクラスタコンピュータをネットワークで接続利用する環境I-WIREやNSFのTeraGridとも接続されている。TransPAC/APANとは2001年11月にOC-12で接続され、後にOC-48で接続の予定である。StarLightの国際的な光ネットワーク接続図を図-5に

示す。

StarLightは、光通信技術を利用したネットワークの制御用プロトコルや広帯域ネットワークリソース制御技術の実証実験の場と通信機器ベンダの新規開発製品の相互接続実験の場を提供する予定である。2002年には10GbEスイッチング機能に強化し、その後国際ネットワーク接続速度をOC-48からOC-192にする計画である。

StarLightの提供するサービスに向けた挑戦項目には以下のものがある。

- (a) 大学などの顧客自身が10Gbpsのネットワークフローを制御するツールや技術の提供。
- (b) Gridコンピューティング資源へのアクセスと資源割り当てに使用されているGlobusなどの toolkit を発展させ汎用の制御機構を構築すること。
- (c) 光ネットワークとそのコンポーネントの設計、構成および管理用にGMPLSやOBGPなどの新しい一連のツールを試験すること。この中には光ネットワークのドメイン間接続試験も含まれる。
- (d) マルチレベルでの観測および測定用次世代ツールの新規作成。

StarLightの2002年～2005年のサービス目標を以下に記す。

- (1) 研究教育用の商用GigEを使用したNAPの運用
- (2) 都市部で10Gbpsでの光スイッチングの実現
- (3) アムステルダムなどの各都市との光波長の国際的なスイッチング機能の実現
- (4) 先端的な実験用のホスティング設備の提供
DWDM, ラムダ変換, 光ルーティング, 超高精細ビデオ, Tera Nodeコンピューティング, Petabyteデータマイニング用の実験設備を提供する(図-6参照)。

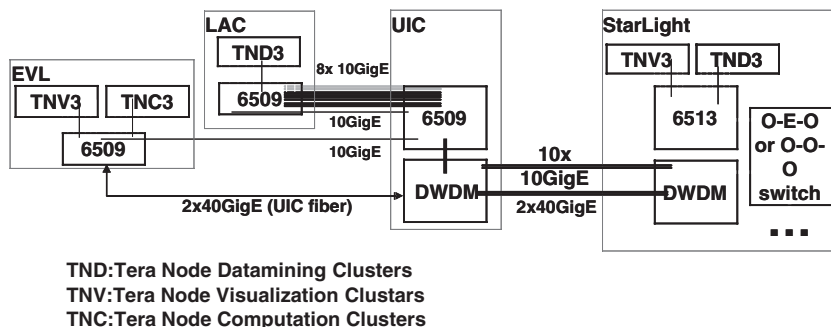


図-6 StarLightに接続予定のTera Node実験環境
(出典：http://www.terena.nl/conf/lambda/slides/DeFanti2.ppt)

Possible CA*net 4 Architecture

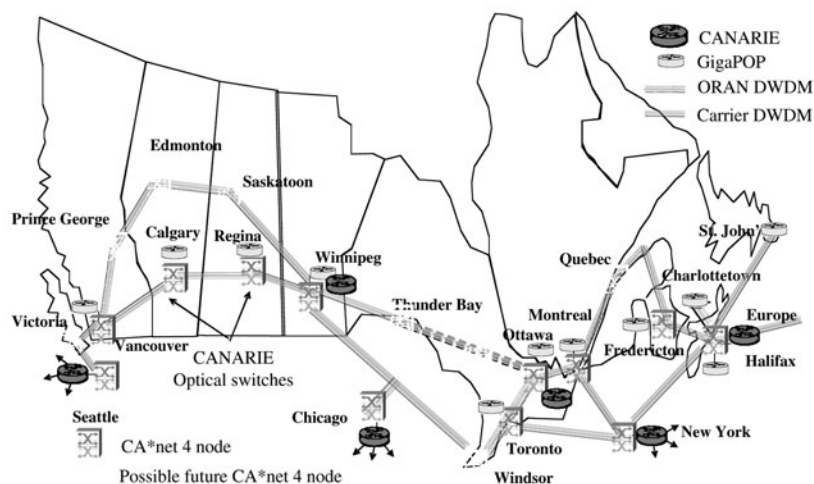


図-7 CA*net4のアーキテクチャ
(出典：http://www.terena.nl/conf/lambda/slides/StArnaud2.ppt)

カナダのCA*net4

カナダでは研究教育用の光ネットワークの構築と強化を産業界と大学等から組織されるCANARIE Inc.が推進している。CANARIEは、世界に先駆けて光技術を利用した研究教育用のネットワークCA*net3（バックボーンネットワークの伝送速度は2.5Gbps）構築計画を立案し、政府の資金援助を得て1999年夏に完成させ、カナダの各地域の先端ネットワークや大学、研究所、学校などの接続利用を推進してきた。しかし、2002年7月末にカナダ政府とのCA*net3の資金援助契約が切れるため、CANARIEはその後継としてCA*net4の構築を計画し³⁾、ダークファイバ保有事業者やベンダや研究所に対し第1次の参加提案公募（2001年10月締め切り）を実施した。CA*net4の運営開始は2002年7月を目標と

している。カナダ政府は、CA*net4構築に\$110Mの資金提供を2001年12月10日に発表した。CA*net4のアーキテクチャを図-7に示す。

CA*net4構築の目的は下記の3点である。

- (a) 地域研究ネットワーク、大学、研究センター、学校や他の最適なサイトをCA*net4に接続し、これらの中で科学と教育の共同作業を推進すること。
- (b) インターネットの基盤設計の強化概念の実証実験を行い、ネットワークアーキテクチャの研究でのカナダのリーダーシップを維持すること。CA*net4のアプローチの基本概念は、ネットワークのエッジでネットワークユーザがネットワークノードを通る光波長パス（ラムダ）を制御する「顧客管理型ネットワーク」である。

Customer Empowered Network

No Central Managed Wavelength Cloud

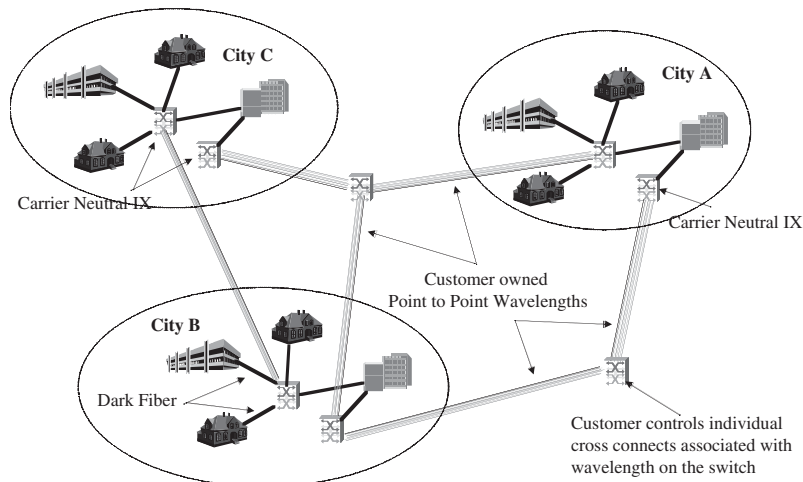


図-8 顧客自身が光信号の経路を制御する顧客管理型ネットワークの概念図
(出典：http://www.terena.nl/conf/lambda/slides/StArnaud2.ppt)



Possible GigaPOP-IX architecture

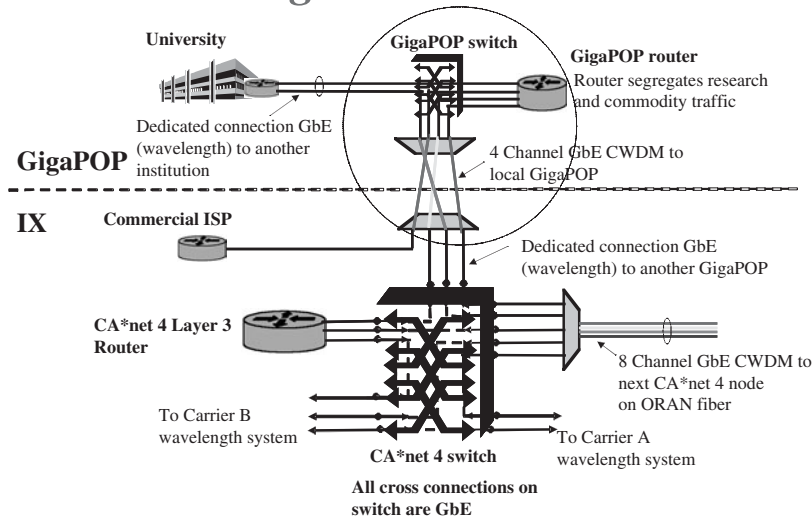


図-9 CA*net4のIXとGigaPoPの構成図

(出典： <http://www.terena.nl/conf/lambda/slides/StArnaud2.ppt>)

(c) カナダの通信事業者と機器ベンダ、ダークファイバを敷設している地域研究ネットワークとがパートナーとなり、将来商用化が期待される顧客管理型光波長やネットワーク、DWDMや光スイッチ新技術や製品・サービスの開発、試験、実証実験を推進すること。

CA*net4の実装要件には、(a) ダークファイバ、光波長およびSONETチャンネルの利用、(b) CANARIEの設備としてキャリアに中立的なIX群とGigaPoP、(c) 欧州やアジアへの接続用光波長、(d) 光クロスコネクタ機器とルータ群、などがある。この光クロスコネクタスイッチ機器は、光波長やGigabit EthernetやSONETチャンネルの接続交換に利用される。そのほか光スイッチ機器や高性能ルータ (native multicastとnative IPv6をサポート) が利用される。

CA*net4では、バックボーンネットワークには地域の通信事業者の光ファイバやダークファイバや光通信設備も利用され、大学や研究所のエンドユーザのいる各都市にはキャリアに中立的なIXが設置される。大学や研究所のエンドユーザはダークファイバ等を通る光波長を保有後、Optical BGP (OBGP) プロトコルを使用して光クロスコネクタスイッチの制御を行うことにより、ポイント・ツー・ポイント光波信号の経路制御とスイッチングを行うことを考えている。顧客に制御権限を与える顧客制御型光ネットワークの基本概念を図-8に、IXとGigaPoPの構成を図-9に示す。カナダはOBGPプロトコルを提案しており、その実証実験をStarLightやSURFnet等と共同で実施する予定である。

カナダのe-Science構想

e-Scienceの基本概念は、Gridと分散コンピューティングとCA*net4を利用したピア・ツー・ピアネットワーク

を統合するものである。分散タスクにおいては、各タスクはサーバ経由ではなくピア・ツー・ピアベースで他のタスクに計算データを渡す。CA*net4等の高速ネットワークは大学等の大規模計算資源と学校やコミュニティの分散資源とを相互接続する。e-Scienceのアプリケーションの例としては、地方の気象予測、宇宙線観測、海底へのダークファイバ敷設、森林火災モデリング、DNA接合、光波長を利用したディスクドライブ構築などを計画している。

■欧州の研究・教育用テストベッドの動向

欧州の研究教育ネットワークは、ドイツやオランダ、北欧5カ国が先行していたが、さらにオランダはSURFnet4を強化したSURFnet5の運用を2001年6月に開始した。一方、汎欧州ネットワークのTEN-155に代わる高速ネットワークGEANTの構築は順調に進み、2001年12月1日から運用を開始した。また、英国のSuper-JANET4、イタリアのGARR-G、ギリシャのGRNET2、ポーランドのPIONIERプロジェクトなども進行している。さらに、欧州委員会の第5次研究計画Framework Program 5 (FP5) の中のIST (Information Society Technologies) のプロジェクトでは、光技術を利用する先進的なネットワークの研究開発、Euro6IXや6NETなどのIPv6ネットワーク実証実験、MAN構築実験、欧州各国の研究教育基幹ネットワーク (NREN) への接続、さらには国際接続試験用のテストベッド開発が実施・進行中である。また、表-2に欧州各国の研究教育用ネットワークprojectの一覧を示す。



The Gigabit Research Network

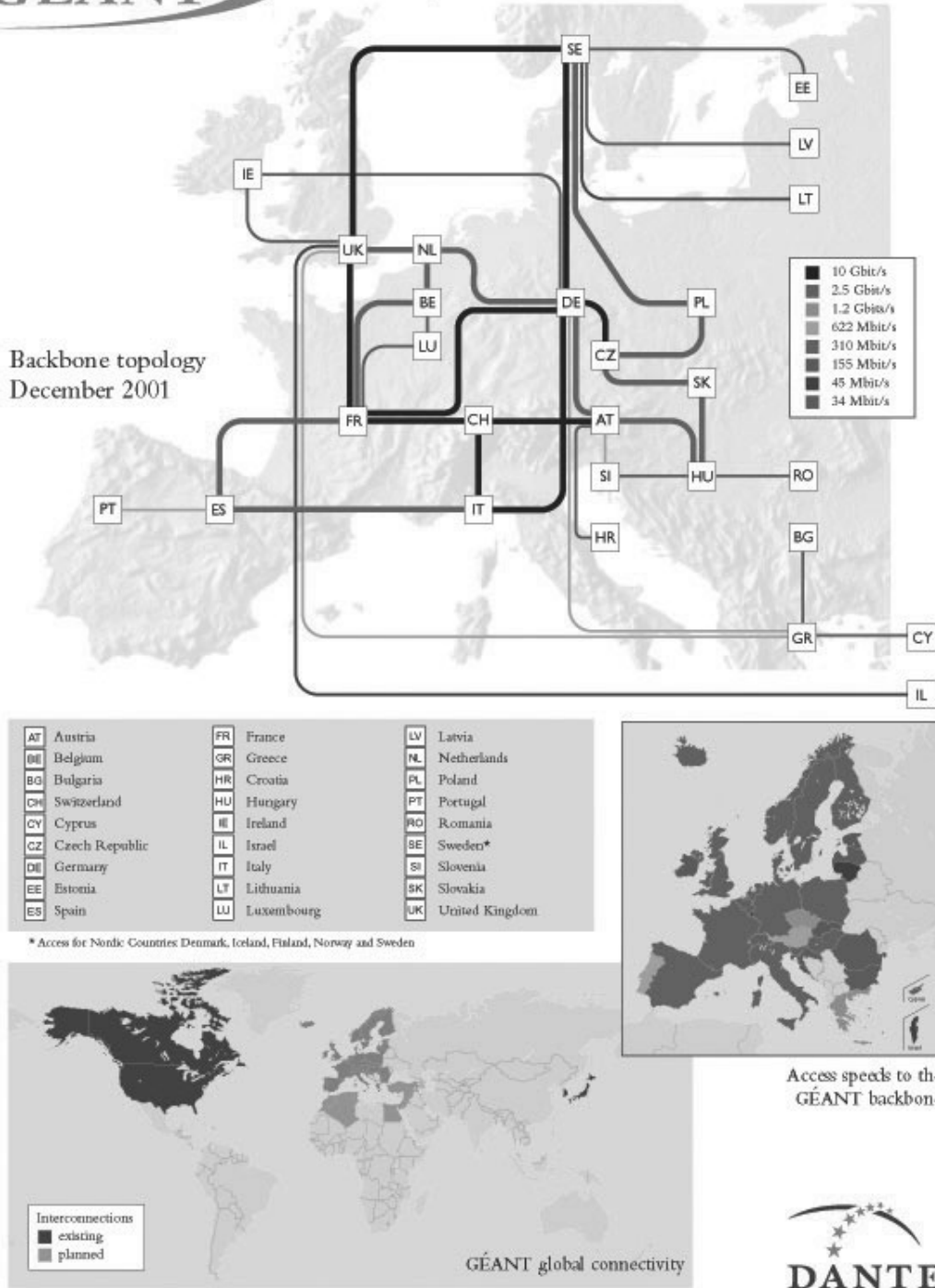


図-10 GEANTのバックボーンネットワーク・トポロジ (2001年12月現在)
(出典: <http://www.dante.net/geant/poster-dec01.jpg>)

汎欧州各国間研究ネットワーク：GEANT

GEANTは、欧州委員会のFP5に含まれる4年プロジェクトであり、欧州の各国間を接続する学術研究用ギガビットネットワーク構築プロジェクトである。2000年11月1日に発効し、総費用200MEuroのうち80MEuroをECが資金提供する。欧州研究教育ネットワークNREN (National Research and Education Network) Consortiumが所要費用とポリシー策定を担当し、DANTEがプロジ

ェクトを運営管理する。全EU諸国のNRENへの接続を行う (<http://www.dante.net/geant/>)。

GEANTの目標と実現状況

- 目標1：ギガビットの伝送速度を実現
9カ国間バックボーンネットワークで10Gbpsを、7カ国間で2.5Gbpsを実現している。

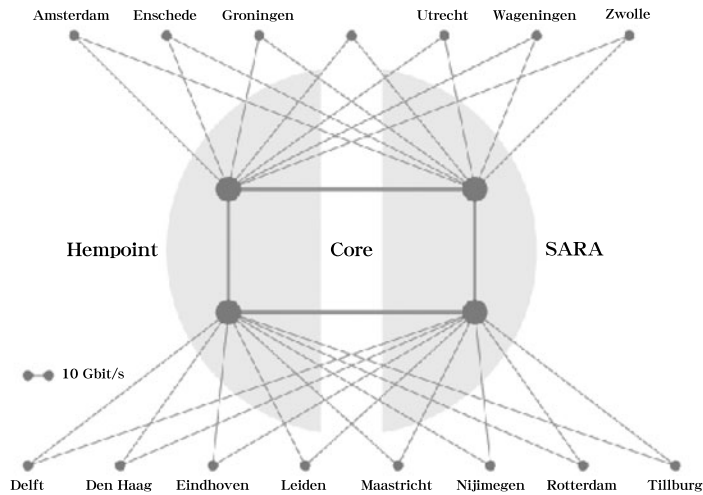


図-11 SURFnet5のネットワーク・トポロジ (2001年11月現在)
 (出典: http://www.canarie.ca/advnet/workshop_2001/presentation/neggers.ppt)

●目標2：グローバル接続

北米 (Abilene, CA*net), Asia-Pacific (SINET, KOREN, SingAREN) との接続強化に加え, 南米, 地中海地域との接続に注力する。

●目標3：QoS保証サービスの提供

TEN-155でもManaged Bandwidth Serviceを提供してきたが, GEANTではIP QoS (MPLS+diffserv) によるエンド・ツー・エンド QoSの提供を目標とする。そのほか, IPv4に加えIPv6のtest networkを構築する。

●目標4：接続国の拡大

TEN-155に接続されている各国に加え, GEANTはBulgaria, Estonia, Latvia, Lithuania, RomaniaおよびSlovak Republicに接続の予定。GEANTは, 当初から28のNRENを経由して32カ国の3,000以上の研究教育機関と相互接続する。

図-10にGEANTトポロジを示す。

オランダのSURFnet5

SURFnet5は, SURFnet4の100倍のスピードのバックボーンネットワークで, GigaPortネットワークプロジェクト (国家プロジェクト) の1つである。ネットワークの構築企画・管理は, 業界と大学等からなる推進団体のSURFnetが行っている。GigaPort, BT Ignite (ネットワークインフラを担当), Cisco SystemsおよびSURFnetは, 2001年6月27日よりSURFnet5の運用を開始させた。SURFnet4からSURFnet5への移行は, 予定より1年早く2002年中に完了の予定である。SURFnet5は光ファイバとIP over DWDMを使用し, そのバックボーン伝送速度は10Gbpsである。アムステルダムに4台のコアルータと国内15カ所にGigaPoP用ルータの計19台のCisco 12416 routerを設置している。ネットワーク接続は障害

対策のため冗長性を持たせた構成としている。また, Cisco routerは, IPv4とIPv6のデュアルスタック構成にしている。SURFnet5のバックボーンネットワーク・トポロジを図-11に示す。

— 2002年のSURFnet5の機能拡張計画は, 以下の通りである。

- 2002年末までにバックボーンネットワークを80Gbpsに, アクセス性能を20Gbpsに強化。
- GigaPoPをさらに10カ所追加し, ダークファイバとGbEで接続。
- ラムダネットワークとの統合の試行実験。
- IPv6 マルチキャスト試験の実施。

— 国際ネットワーク接続

- グローバル・インターネット接続先には, Abilene (1Mbps), STAR TAP (622Mbps) があるが, SURFnetは光テストベッド用ラムダ接続計画を実行中である。

— 光テストベッド用ラムダ接続計画

- SURFnet, CANARIE, StarLight および iCAIRとの共同プロジェクト。シカゴのStarLightの施設にSURFnetのPoPを設置し, アムステルダムに光スイッチ機器Cisco ONS 15454を設置した。これをNetherLightと呼んでおり, StarLight間をTeleglobeのDWDMネットワークで接続し, 2.5Gbpsラムダの接続実験を行い, その後10Gbpsラムダに強化する計画である (図-12参照)。

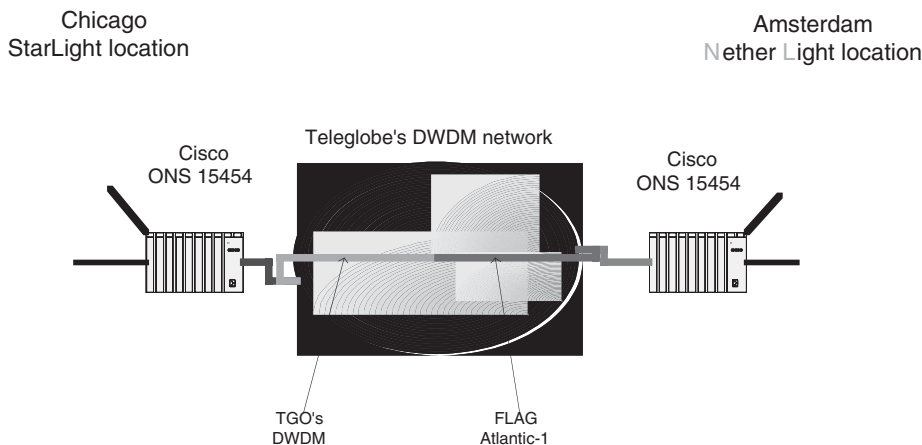


図-12 StarLightとAmsterdam NetherLight間のラムダ接続実験
 (出典：http://www.canarie.ca/advnet/workshop_2001/presentation/neggers.ppt)

■おわりに

Gridコンピューティングと研究教育用ネットワークにおいて解決すべき課題には以下のものがある。

Gridコンピューティングの課題

Global Grid Forum (GGF) では、スケジューリングと資源管理、セキュリティ、性能、遠隔データアクセス、Grid情報サービス、先端的なプログラミングモデル、課金/資源追跡、Gridコンピューティング環境、アプリケーションとテストベッドなどをテーマとしたWorking Groupが各種の課題の解決に向け活動している。特に横断的な技術課題としては、地理的に分散した資源を集中管理でないやり方で、信頼性を確保しつつ、使いたいときに即時にGrid資源を使用できるツールの開発がある。このためには高度に分散かつ異質な環境の資源探索と特質の明確化、身元確認、ポリシー、認証、使用許可、遠隔地の計算機やストレージやセンサなどへのアクセス、さらに超高速ネットワークの有効利用問題など各種の資源環境問題解決とそのツールの開発が課題となる。

研究教育用テストベッドの課題

研究教育用テストベッドの目標は、(1) ラムダベースの通信基盤の構築、(2) グローバルなラムダGridの実現である。このためにはGridコンピューティング環境を利用できるどの国の研究者でもCA*net4などの最先端の超高速テストベッドを利用可能にするため、光ネットワーク・アーキテクチャについて下記の課題を解決する必要がある。

- 光ネットワークリソースのオン・デマンドで動的な割り当て
- 光波パス（ラムダ）の複数ノードの通過方式の確立

- ラムダのドメイン内およびドメイン間制御
- 単方向パスなどの特性を持たせた光パスなど
光ネットワークの課題の実証・解決のために各国内はもとより国際的にも下記の共同プロジェクトの推進が一層必要と思われる。

- Terascale computing環境におけるネットワーク研究・実験
- 新プロトコルの開発
- Gridコンピューティングとの統合
- 強化されたGlobusサービスとの接続実験
- 地域、国際光ネットワーク実験

上記の課題の解決のため、日本の超高速ネットワークの研究プロジェクトが国際的な共同プロジェクトに参加・貢献することが一層期待される。

なお、グローバルな研究教育用ネットワークの強化に向けた動きは活発で、2002年2月18日にInternet2とIndiana大学（Global NOCサービスを担当）、CANARIEと欧州のNRENコンソーシアムは、NSFの資金提供のもとにSTAR TAP/StarLight経由によるGlobal Terabit Research Network (GTRN) の確立に協力していくことを発表した。

謝辞 本稿の執筆にあたり、(財)情報処理相互運用技術協会 (INTAP) が実施したインターネット調査委員会の活動成果を引用させていただいた。委員長の江崎浩東京大学助教授を始め、関係者の皆様に深く感謝する。

参考文献

- 1) Foster, I. and Kesselman, C. eds.: The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure, Morgan Kaufmann Publishers (1999).
- 2) Schmidt, A.: StarLight, the Optical STAR TAP (2002).
http://www.startap.net/starlight/PUBLICATIONS/pubEngPapers.html
- 3) CANARIE Inc., CA*net4 Design Document, revision No.4, August 21 (2001).

(平成14年2月8日受付)

