

通信技術の進化 ～大洋横断光海底ケーブルを中心として～

2018年12月9日

(株) KDDI総合研究所 主席研究員
公益財団法人 KDDI財団 理事長

鈴木 正敏

1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

【19世紀】

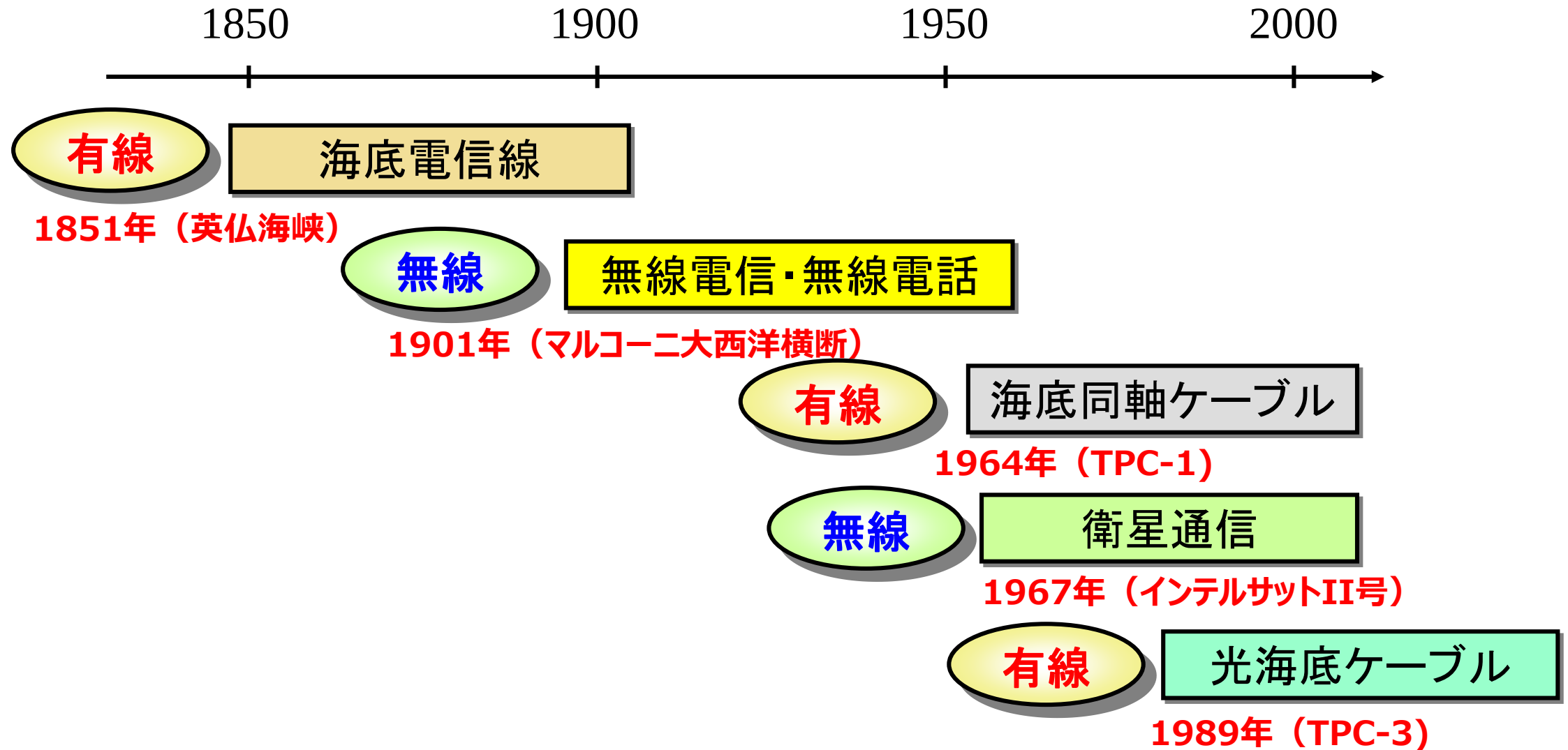
- 1851年：世界最初の**海底ケーブル(電信)**が英仏海峡に敷設。初めて海を越えての通信
- 1866年：大西洋横断**海底ケーブル**が完成
- 1871年：長崎～上海、長崎～ウラジオストク間に**海底ケーブル**を敷設。日本初の国際通信
- 1876年：ベル（米）電話発明
- 1888年：ヘルツ（独）**電磁波実験**に成功
- 1891年：英仏海峡に世界初の電話の**海底ケーブル**敷設

【20世紀】

- 1901年：マルコーニ（伊）大西洋横断**無線通信**に成功
- 1906年：日本～アメリカ間**海底電信線開通**。対米との電信サービス開始
- 1957年：ソ連が人工衛星スプートニク打ち上げ
- 1962年：米国が実験**通信衛星**テルスター 1 号、リレー 1 号打ち上げ
- 1963年：リレー衛星を介した我が国初の**テレビ受信実験**に成功
- 1964年：初めて太平洋を横断した第一太平洋横断**同軸海底ケーブル**（TPC-1）開通
- 1967年：太平洋にインテルサットⅡ号が打ち上げられ、日米間の**衛星通信サービス**が開始
- 1989年：光ファイバーによるが太平洋**横断光海底ケーブル**（TPC-3）が完成

赤字：有線通信 青字：無線通信

通信伝送路の発達史(国際通信)



(1) 海底電信線の開通

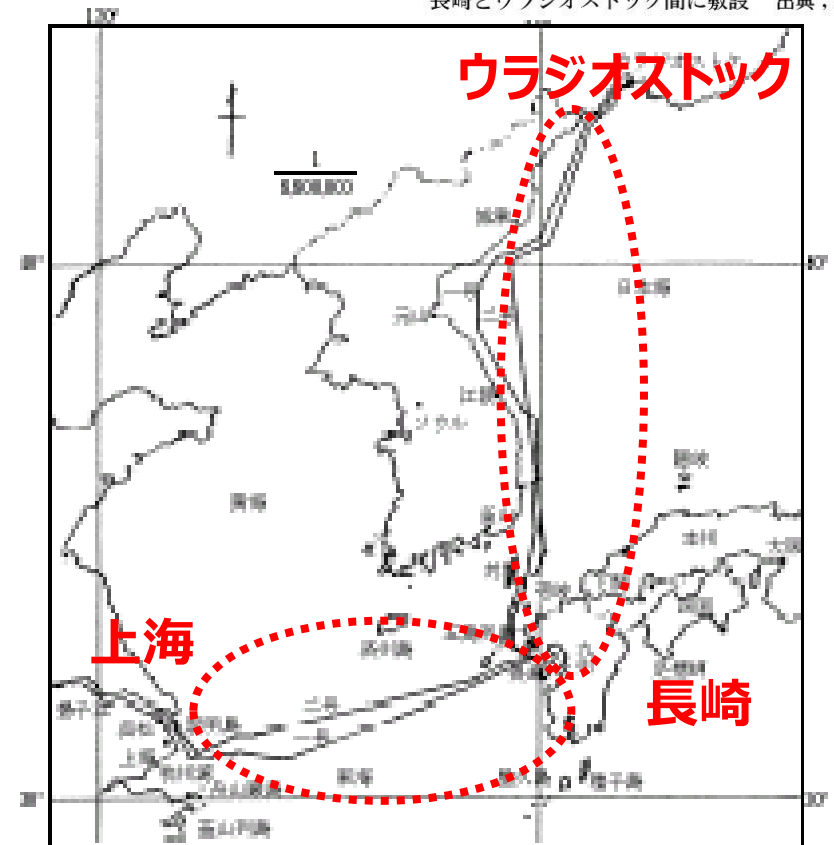
- デンマークの大北電信会社による長崎～上海（1871年）、長崎～ウラジオストック（1872年）間に敷設
- 1872年当時外国電報の利用状況は100通未満、1877年には約3万通
- 1906年 日本～アメリカ（グアム）間海底電信線開通



(b) 海底ケーブルの断面図。1871年に長崎とウラジオストック間に敷設 出典；KDDI



大西洋横断から40年遅れの悲願の国際通信
(明治**天皇**とルーズベルト**大統領**間で祝電の交換)



(2) 無線電信の登場

- ヘルツ(独):電磁波実験に成功(1888年)
- マルコーニ(伊):海上無線伝送実験の成功(1897年)、
大西洋横断無線伝送実験に成功(1901年)
- タイタニック号(英):氷山に接触水没、無線でSOS(1912年)
- 日本
 - 日露戦争の日本海海戦で歴史的成果(1905年)
 - 陸船間無線電信サービス開始(1908年)
 - ロシア北海道間で固定局間の無線電信業務の開始(1915年)

(3) 太平洋横断海底ケーブルの建設

- 1959年 KDD/AT&T間でTPC-1建設の可能性について会談を開始
- 1962年 建設保守協定の締結
- 1964年 TPC-1 敷設完了、総建設費用約243億円
海底同軸ケーブル方式の採用、138回線
全長9790km、274個の海底中継器と26個の海底等化器を使用
- 1967年 ケーブルシップ「KDD丸」を建造



TPC-1開通を記念してメッセージを交換するジョンソン米大統領と池田首相



KDD丸



IEEE Milestone認定

(4) 衛星通信商用開始までの道のり

- 1945年 イギリス作家アーサークラークが静止衛星の実現を予言
- 1957年 ソ連が人工衛星「スプートニク」を打ち上げ
- 1962年 米国が実験通信衛星テルスター1号、リレー1号を打ち上げ
- 1963年 茨城宇宙通信実験所完成
- 1963年 リレー衛星を介した我が国初のテレビ受信実験に成功
- 1964年 リレー3号を介して東京オリンピックの宇宙中継
- 1965年 アーリーバード打ち上げ、インテルサットのもと商用衛星通信が開始
- 1966年 インテルサットII号(F19)による日米テレビジョン伝送サービス開始

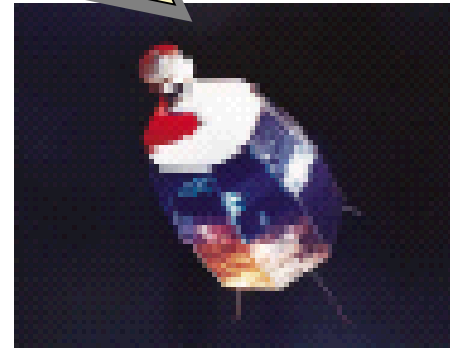
初の日米間テレビ宇宙中継



初の日米間テレビ宇宙中継は、ケネディ米大統領暗殺のニュースで幕を開けた

茨城県十王町(現日立市)に建設された茨城宇宙通信実験所

宇宙中継に用いられたリレー衛星



IEEE Milestone認定



(5) 光海底ケーブル実用への道のり

- 1966年 イギリスのカオ氏等(2009年ノーベル賞受賞) がガラスファイバーによる光伝送の実現性を予測
- 1970年 米国コーニング社が光ファイバー (損失 : 20 d B/km) を実現
- 1975年 KDD研究所 光ファイバーによる海底ケーブルの研究開発に着手。
米国ベル研と協力
- 1986年 光海底ケーブルと中継器の量産・品質管理体制確立
- 1989年 太平洋横断光海底ケーブルTPC-3開通 (280Mbps/FP)



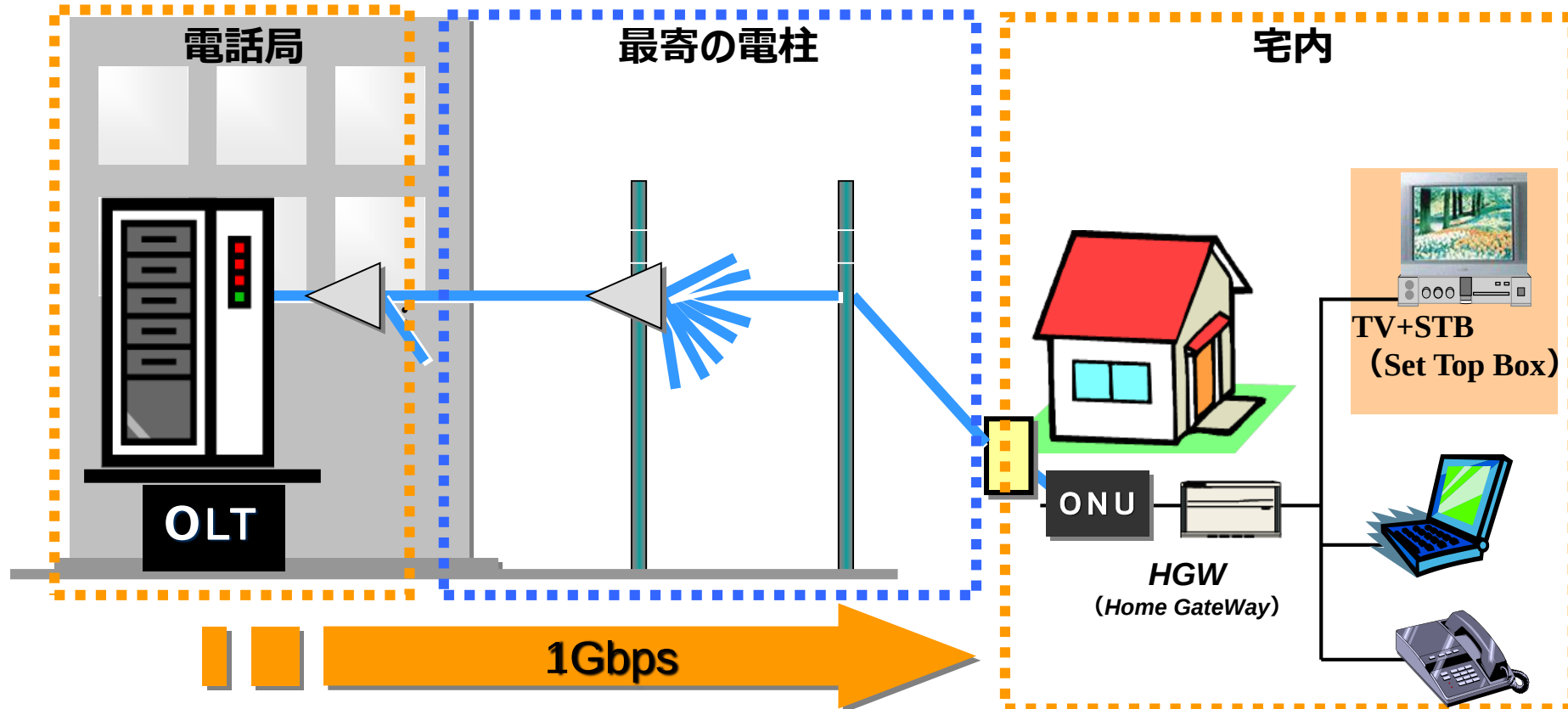
光海底ケーブル (深海用)



OS-280M光海底中継器

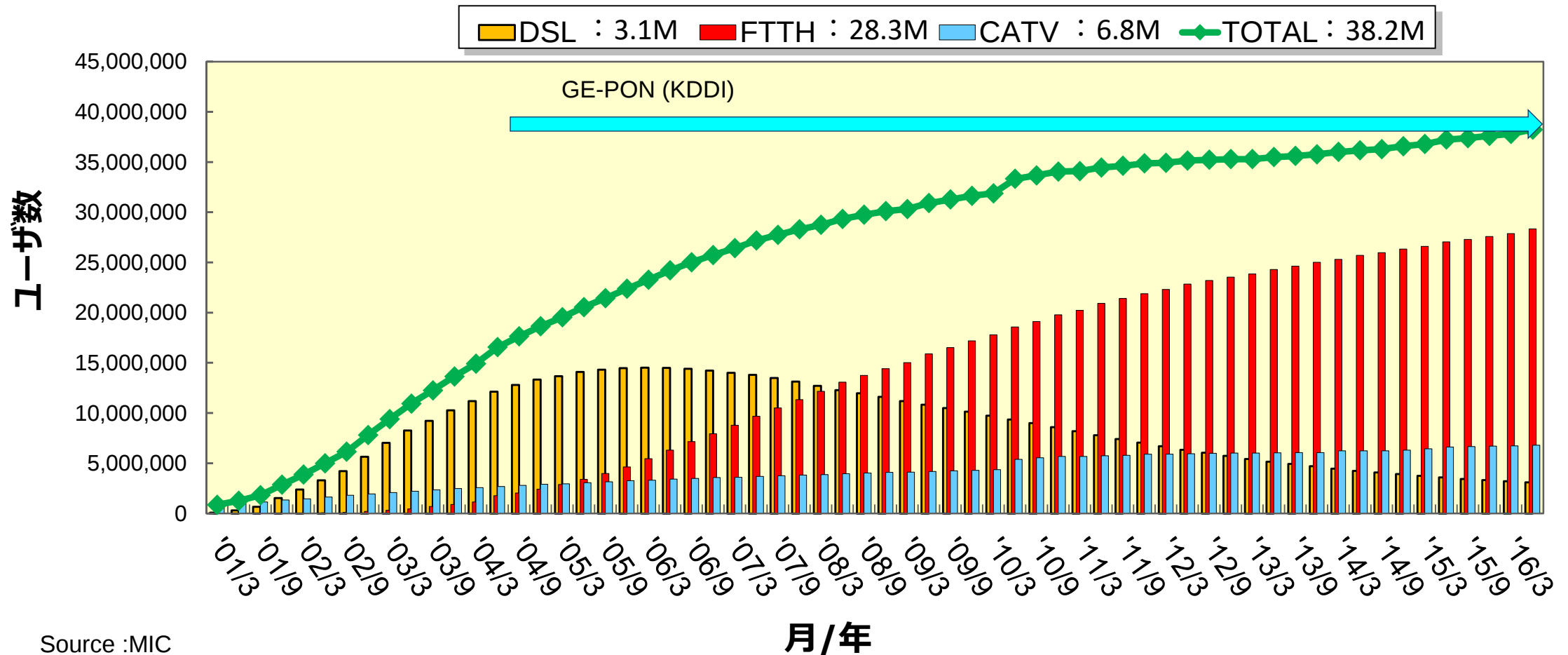
現在 Fiber To The Home (FTTH)

- ADSL（電話線）、CATV（同軸ケーブル）からFTTH(光ファイバ)へ
- 一本の光ファイバを32～64分岐して、各家庭に最大1 Gbpsのトリプルプレイサービス（電話、インターネット、ビデオ）を提供
- 2018年から10Gbps光サービスが開始



現在：ブロードバンドユーザ数の変遷(固定アクセス)

- 日本：GE-PON（IEEE標準）を十年以上に渡り使用
- 欧米：G-PON(ITU-T標準)を主に使用
- FTTHが3000万加入を突破（2017年3月末現在）

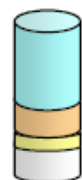


- 1950年代は公共分野におけるVHF帯等の低い周波数帯の利用が中心。
- 1985年の電気通信業務の民間開放をきっかけに移動通信分野における利用が爆発的に普及・発展。
- 現在、携帯電話・PHS・BWAの契約数は、1億6,792万※（平成29年3月末）であり、日本の人口1億2,682万人（平成29年1月1日）を上回る。

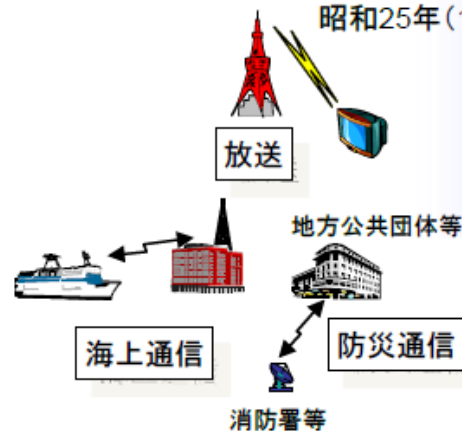
※グループ内取引調整後の数値

5,118局

移動局 4,195局
固定局 552局
放送局 80局
その他 291局

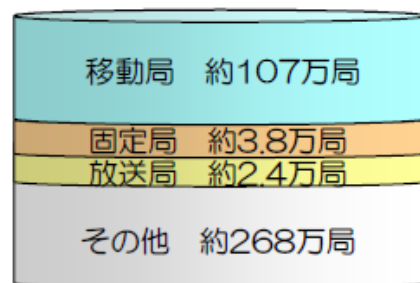


昭和25年(1950年)

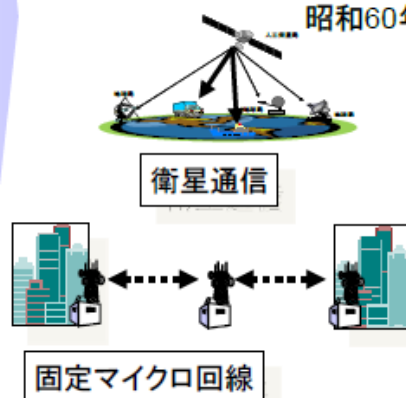


約381万局

移動局 約107万局
固定局 約3.8万局
放送局 約2.4万局
その他 約268万局

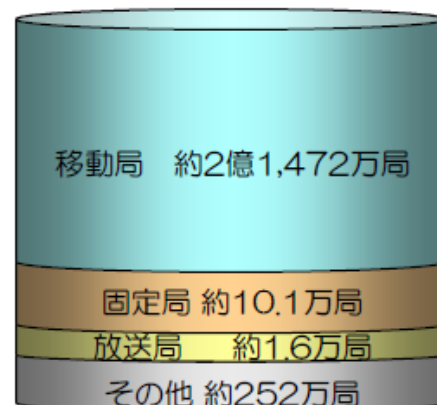


昭和60年(1985年)



約2億1,735万局

移動局 約2億1,472万局
固定局 約10.1万局
放送局 約1.6万局
その他 約252万局



平成29年(2017年) 3月末

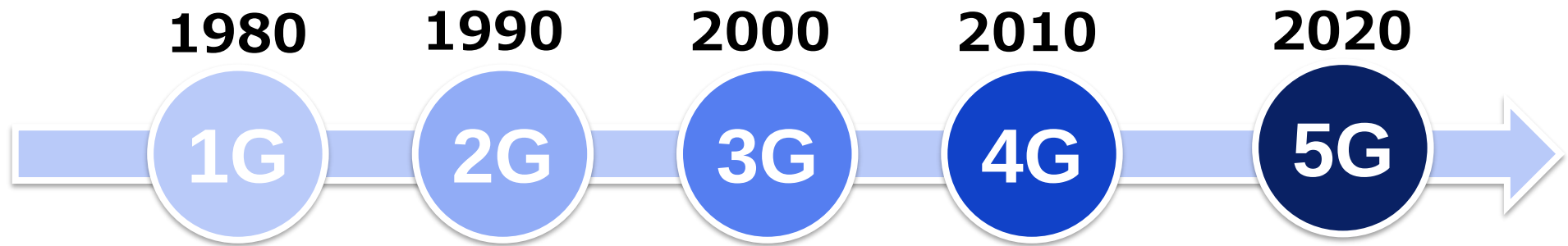


携帯電話・携帯インターネット



無線LAN

移動通信システムの進化



ピークスループット

—

100kbps

1Mbps

1Gpbs

10Gbps

ユースケースの進化

携帯電話

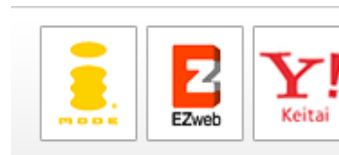
ショート
メッセージ

データ通信

モバイル
インターネット

IoT
(Internet of Things)

ユーザセントリック



初めてポケットに
入った携帯電話

相手の時間に
縛られない
コミュニケーション

ケータイ文化

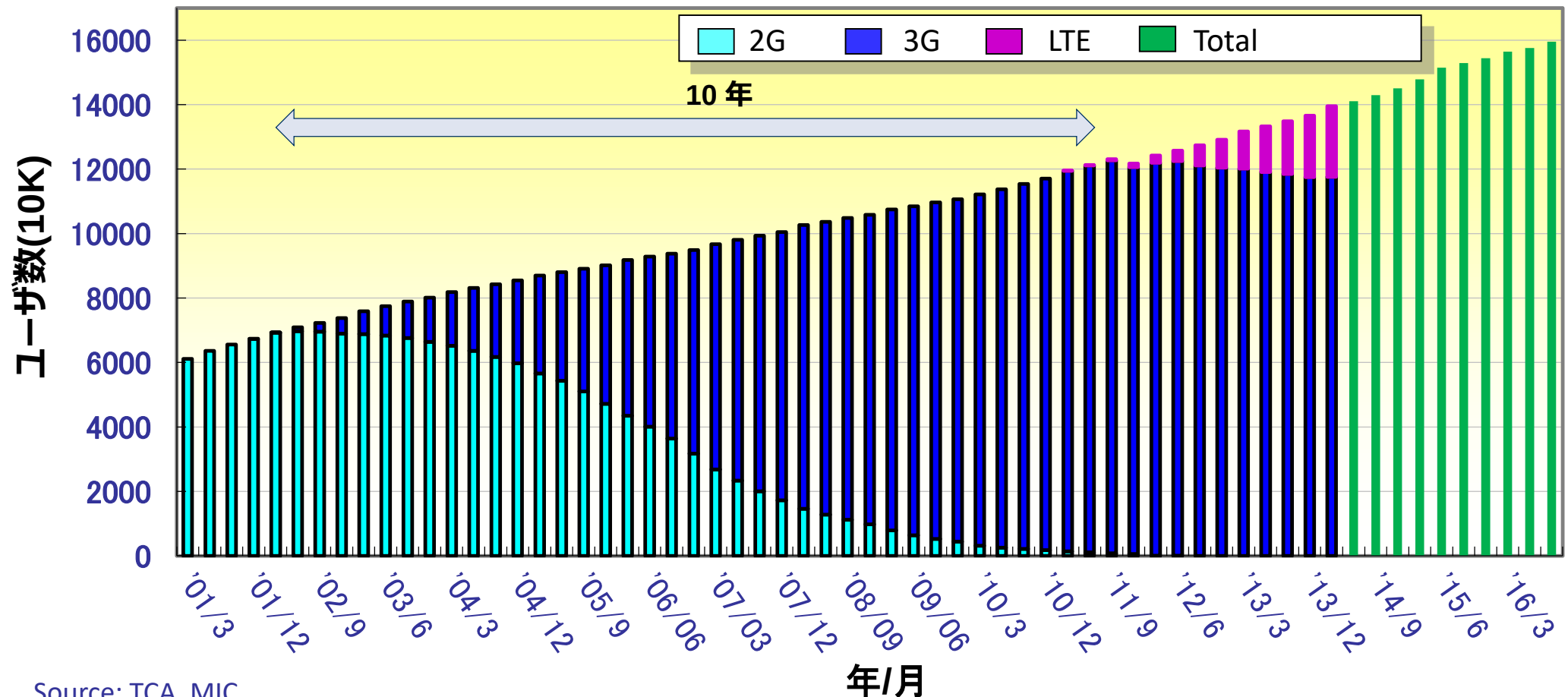
手の中に
インターネット

あらゆるものが
インターネットに繋がる

現在：モバイルユーザ数の変遷(ワイヤレスアクセス)

- ユーザ数は、現在も、順調に増加
- 10年毎に、新技術が導入され世代交代が進展

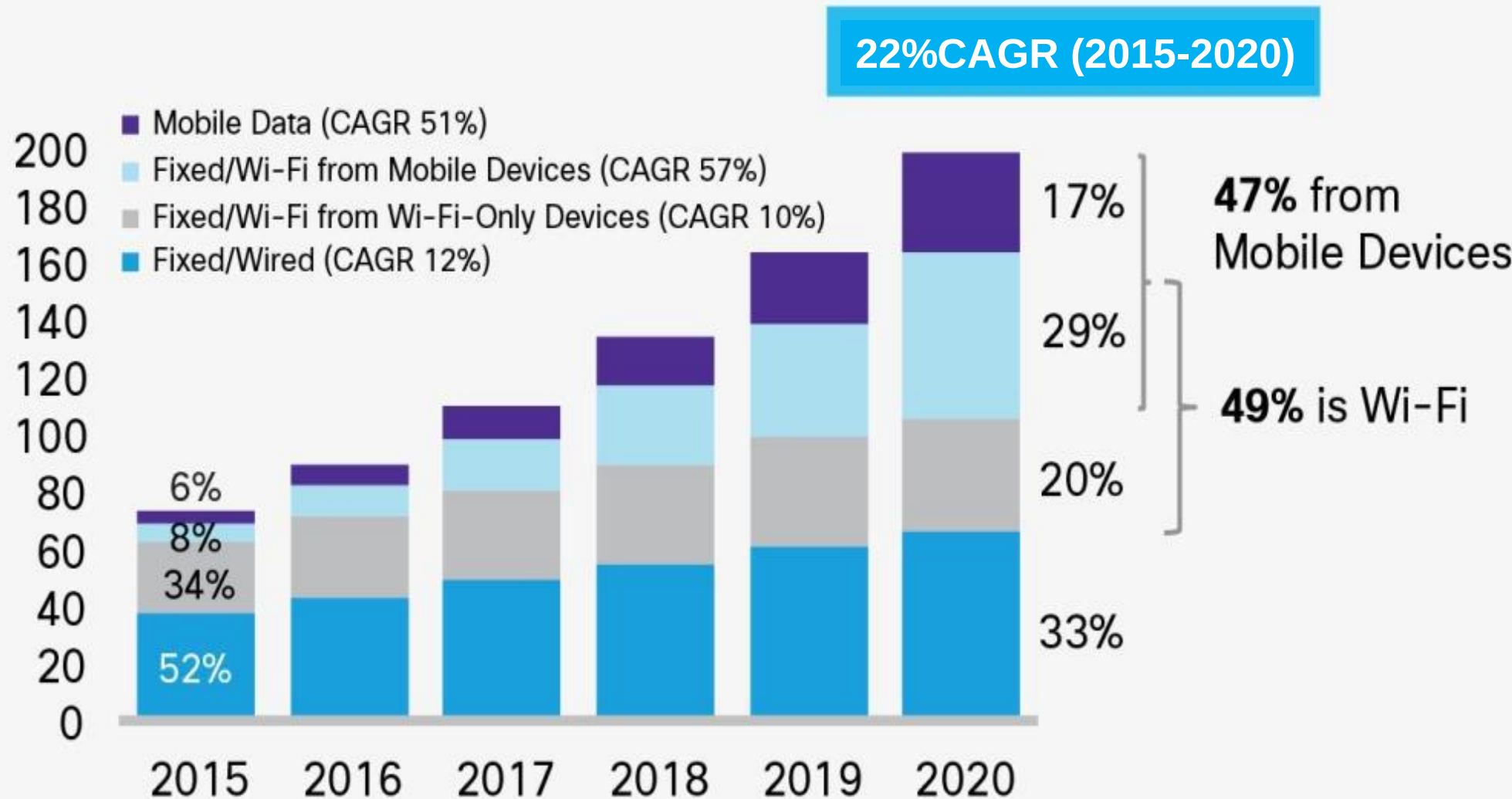
□ 携帯電話の契約数は2016年12月末現在で1億6,071万契約。そのうちLTEの契約は、全体の約60.7% (9,756万契約) を占め、契約数は直近1年で約1.2倍に拡大。



Source: TCA, MIC

グローバルインターネットのトラフィックの推移

Exabytes
per Month



世界の固定インターネットと携帯電話の普及状況(面的拡大)

2000年 : 6.5%

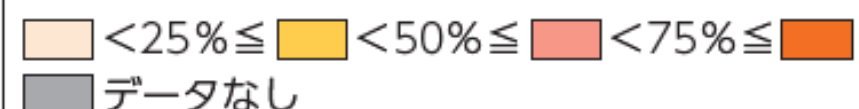
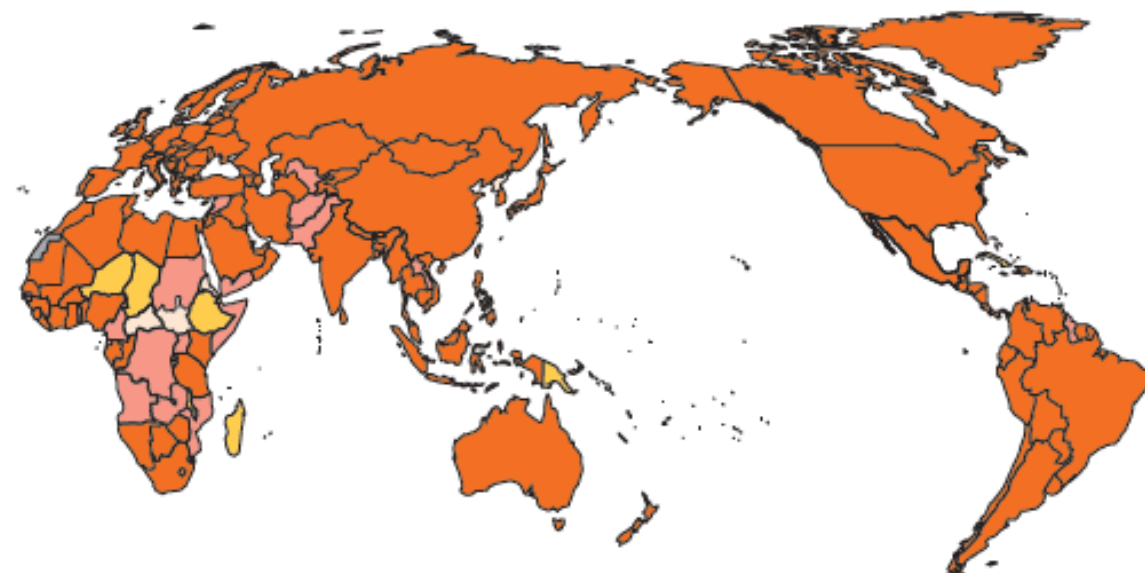
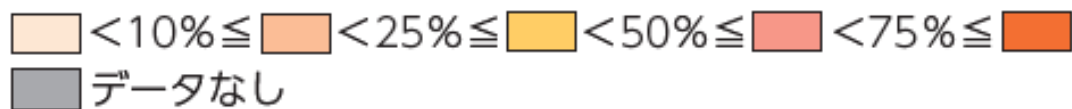
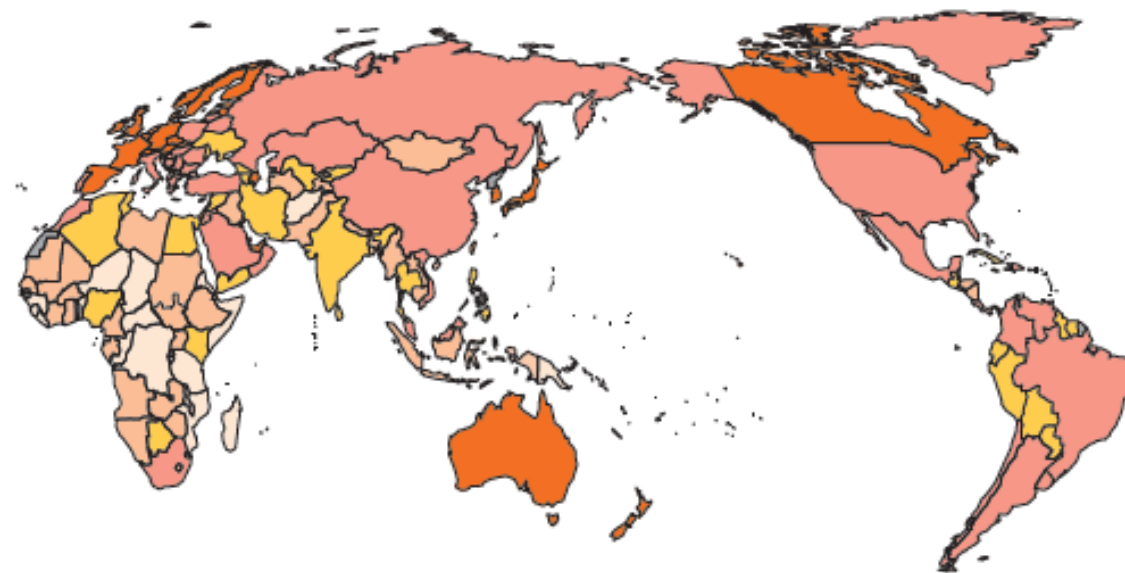


2015年 : 世界のインターネット普及率 43.8%

2000年 : 12.1%



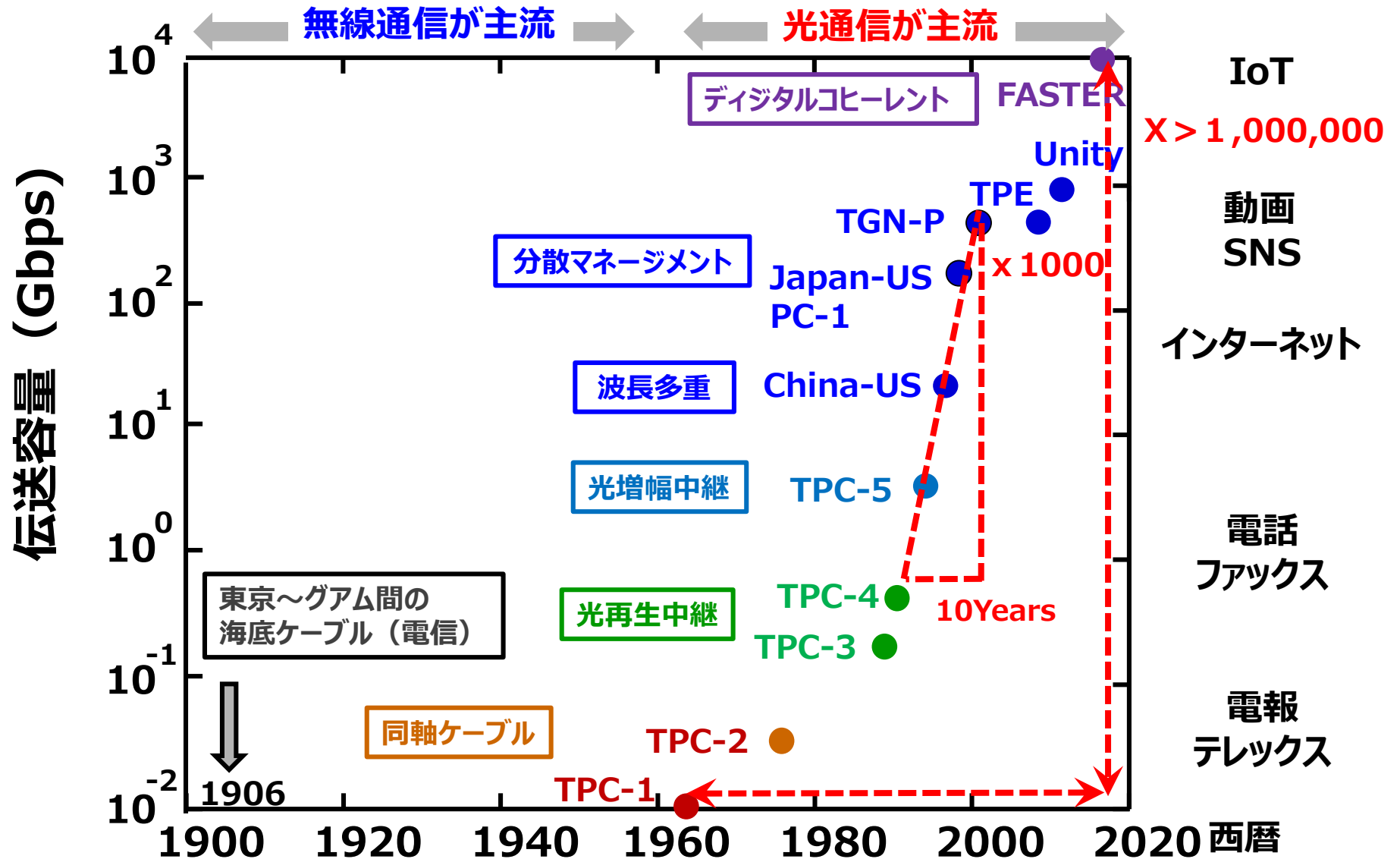
2015年 : 世界の携帯電話普及率 98.6%



出典:「平成29年版情報通信白書」(総務省)

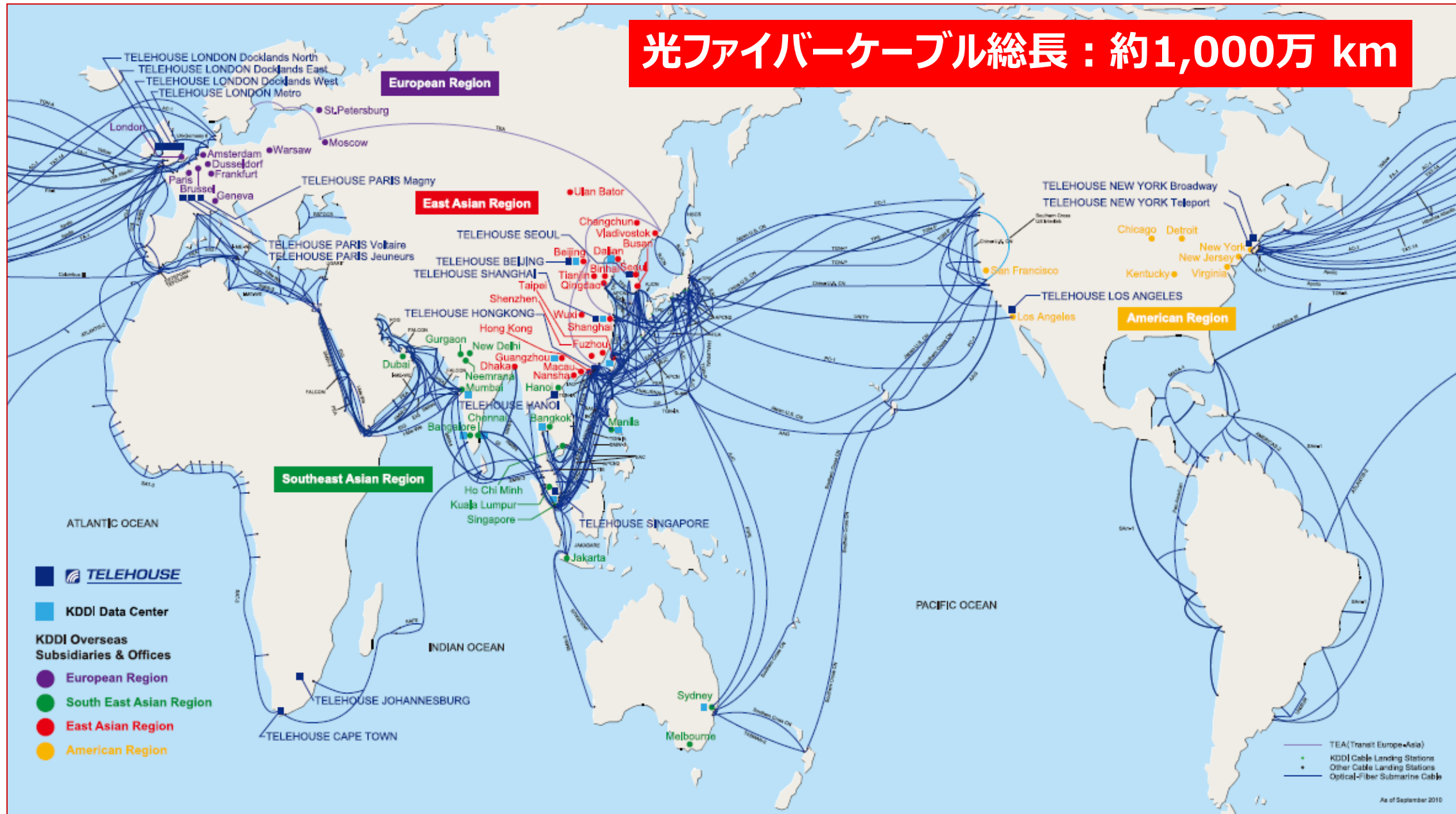
海底ケーブルの容量の推移

半世紀で100万倍 (10^6) 以上、10年で1000倍 (10^3)



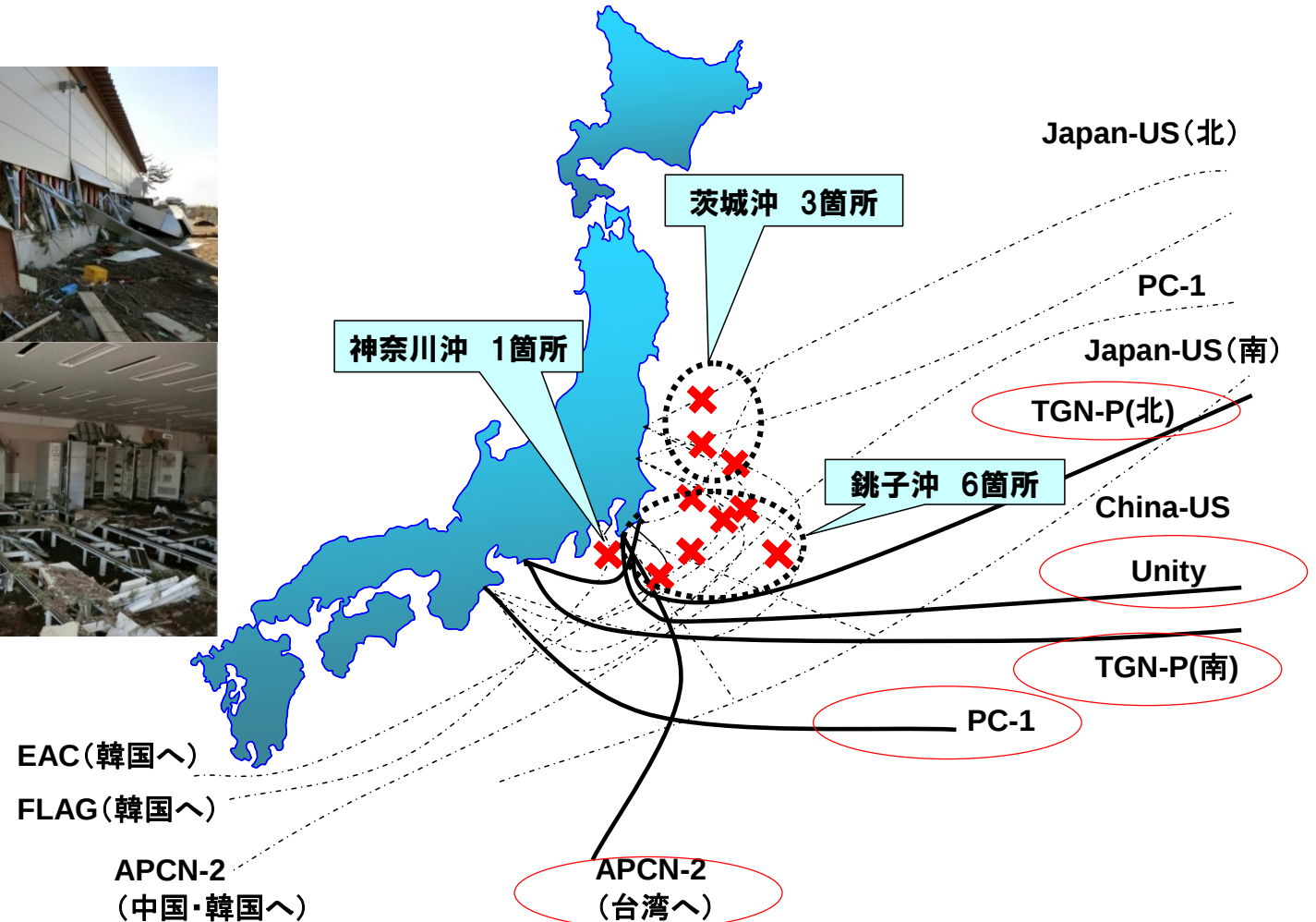
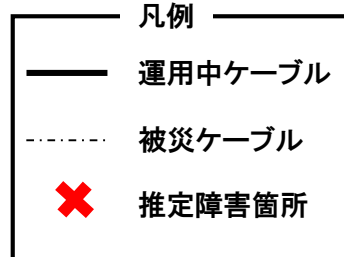
現在の海底ケーブルシステム

光ファイバーケーブル総長：約1,000万 km



東日本大震災時の被災状況（海底ケーブル）

（基地局・局舎）



2011年3月11日の東日本大震災時、海底ケーブルの故障により、国際専用線・国際 I P - V P N・国際電話付加サービスにサービス影響が発生したが、2011年3月15日15時9分に復旧

- 世界中に一気に光海底ケーブル網が張り巡らされ、国際通信は光海底ケーブルが主流となり、現在では日本の国際通信の99%以上が海底ケーブルを利用
- 携帯電話の爆発的な普及（1億6,273万契約、2017年3月末）により、モバイル通信技術が急速に進展

たくさんの情報を、より遠くへ！

光通信は、1.3-1.5 μm （約200THz）の光を使用するため、携帯電話等の約1GHzの電波に比べて、5桁以上の大容量化が可能（最新データ：10Pbps）

いつでも、どこでも、誰とでも！

無線通信は場所非依存通信が特徴でモバイル通信がパーソナルゲートウェイとして急速に普及。また、非常時の通信手段として携帯端末は必需品。

Mega : 10^6	Giga : 10^9	Tera : 10^{12}	Peta : 10^{15}	Exa: 10^{18}
百万	10億	1兆	1000兆	100京

～最初のメッセージ交換者の地位 $\propto 1 / (\text{ICT 普及率})$ ～

音声チャネル数

1906 :
東京-グアム
電信ケーブル

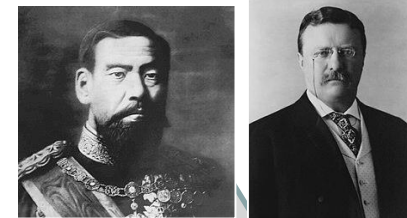
1964 : TPC-1

2016 : FASTER
(10Tbpsx6)

203x : (10Pbpsx6)? 約1兆回線



最初のメッセージ交換者



明治天皇陛下 & ルーズベルト大統領



池田総理大臣と ジョンソン大統領



会社の担当者



AI マシン



50年を経て ～TPC-1完成時と現在の比較～



1966年ごろ

2016年現在(50年後)

電話



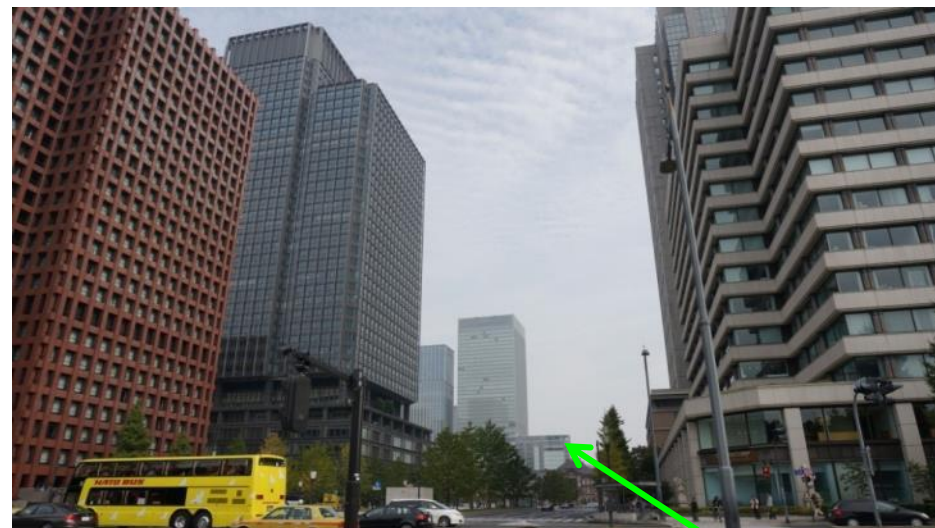
黒電話

1人に0.1台 東京駅



スマートフォン
1人に1台

風景



大卒
初任給

約2万円

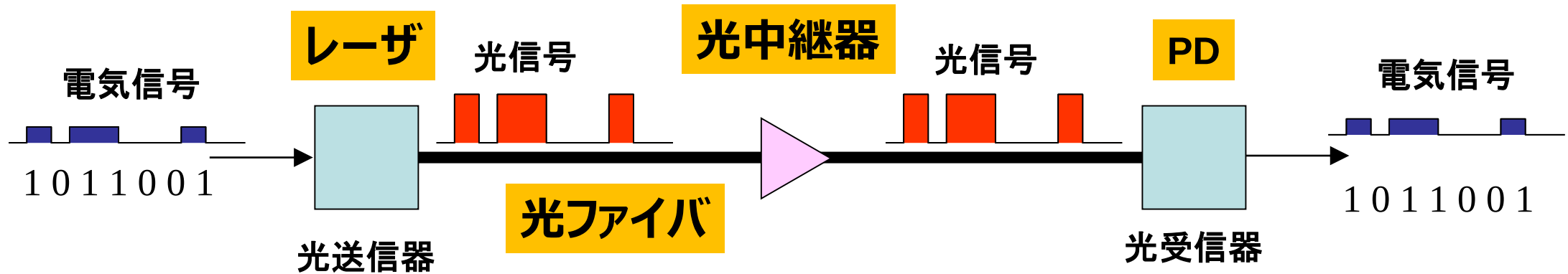
約20万円

東京駅

1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
 - 光海底ケーブル、光ソリトン、光空間多重
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

光通信システムの基本構成

- ・伝送路 : **光ファイバ（石英ガラス）**
- ・光送信部 : 電気／光変換（E/O）部 : **レーザダイオード(LD)、光変調器**
- ・光受信部 : 光／電気変換（O/E）部 : **フォトダイオード(PD)**
- ・光中継部 : **再生中継、光増幅中継（エルビウム添加ファイバ(EDF)）**



【革新技術1】 光通信を可能とした2つの発明

■ Invention of Laser

- **The Nobel Prize in Physics 1964**

Charles H. Townes, Nicolay G. Basov, Aleksandr M. Prokhorov

The Nobel Prize for physics is in this year given for the invention of the maser and the laser. "Maser" stands for "microwave amplification by stimulated emission of radiation", and the word "laser" is obtained by replacing "microwave" by "light".

- **Izuo Hayashi and Morton B. Panish (AT&T Bell Labs) reported the first room temperature CW operation of GaAs-AlGaAs semiconductor diode Laser in 1970 (APL, p.109, 1970)**

■ Invention of Glass Fiber

- **The Nobel Prize in Physics 2009**

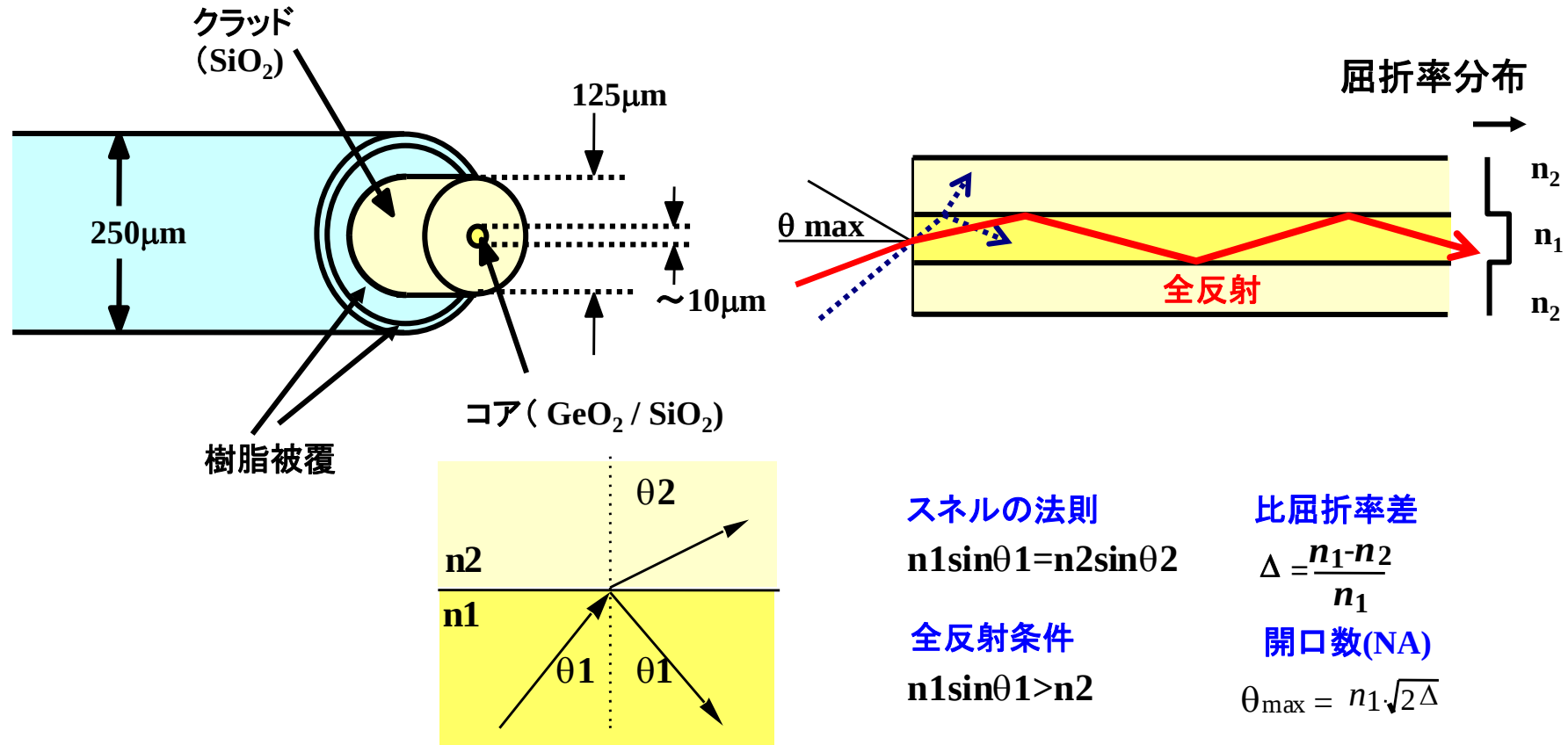
Charles K. Kao

In 1966, **Charles K. Kao** made a discovery that led to a breakthrough in fiber optics. He carefully calculated how to transmit light over long distances via optical glass fibers. With a fiber of purest glass it would be possible to transmit light signals over 100 kilometers, compared to only 20 meters for the fibers available in the 1960s

- **The first ultrapure fiber was successfully fabricated (20dB/km@632.8nm) just four years later, in 1970 by Corning (F. P. Kapron et al., APL, p.423,1970)**

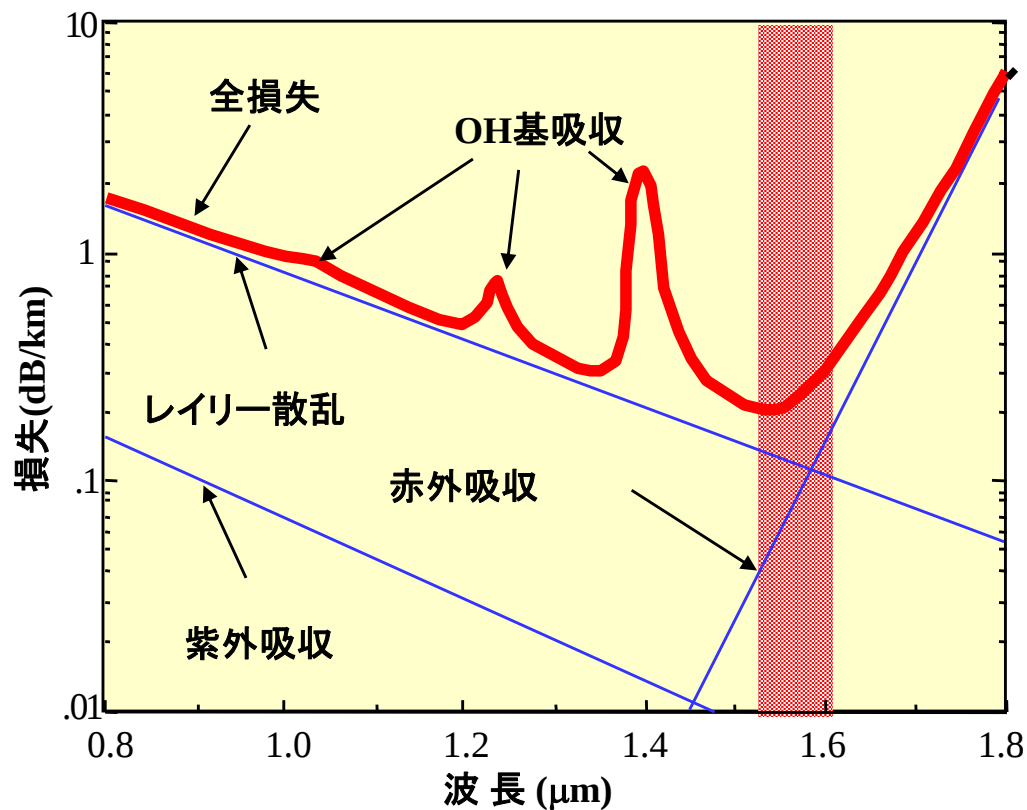
光ファイバの基本導波原理

～シングルモードファイバ～



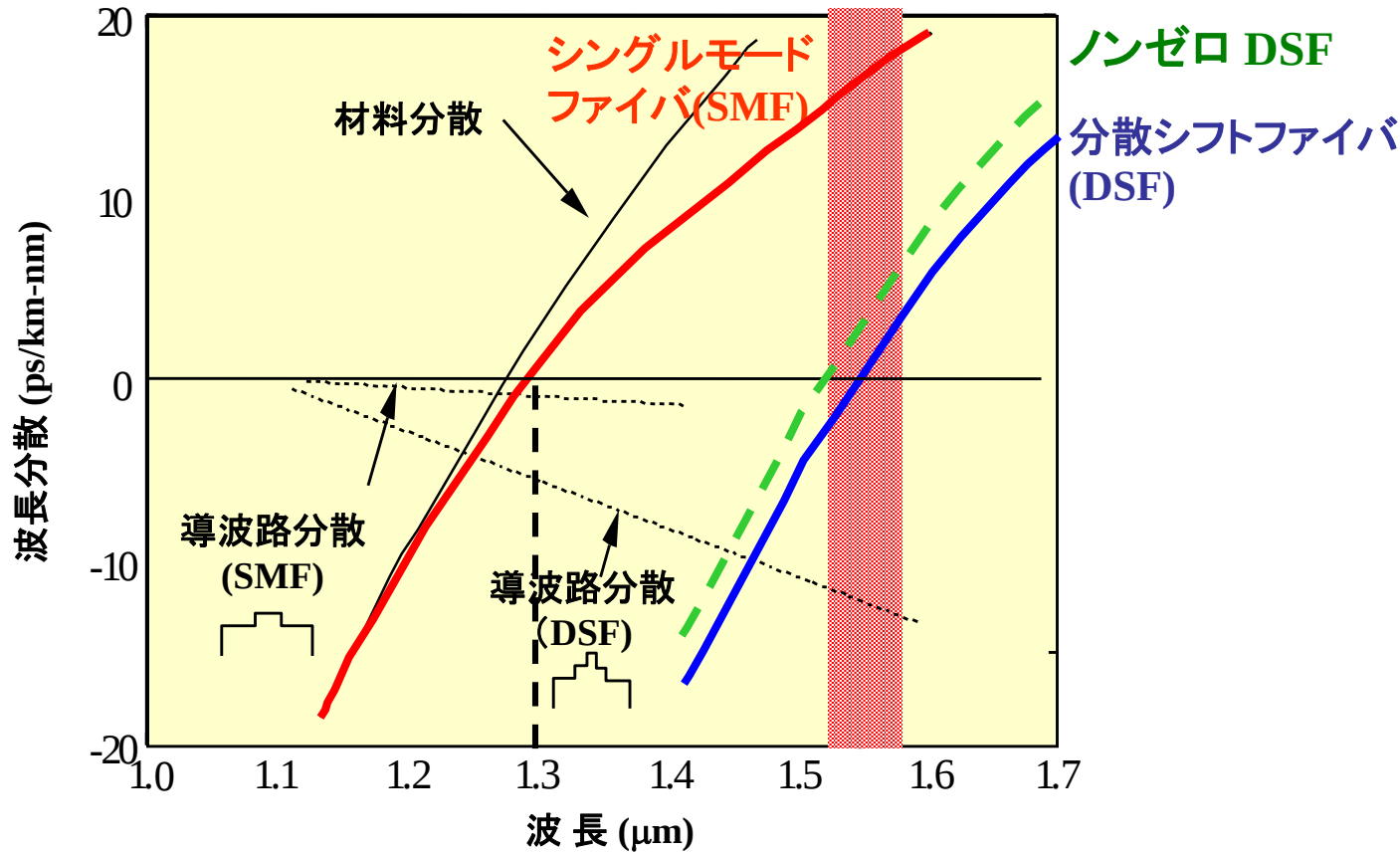
光ファイバは屈折率の高いコア部分とそれを取り囲むクラッドから構成されている。コアの屈折率 n_1 と、クラッドの屈折率 n_2 の差は、約0.3～1%程度で、この屈折率差によりコアとクラッドの境界で全反射が起き、光がコアに閉じ込められる。ただし、閉じ込められる光は、ある入射角（ $\theta_{\max}$ ）以下の光線に限られる。

光ファイバの損失



光ファイバの損失は、吸収損失と散乱損失に分けられる。吸収損失には、材質に起因した紫外吸収と赤外吸収による固有損失と、遷移金属やOH基(1.4 μm波長帯)による不純物に起因した外部要因による損失がある。一方、散乱損失としては、ガラス状に起因するレイリー散乱と製造にともなうコア部とクラッド界面の不整、気泡の混入などの外的要因に分けられる。現在、外的要因による損失は最小化され、**1.55 μm波長帯で0.2dB/km以下**をきる理論限界に近い損失まで達している。

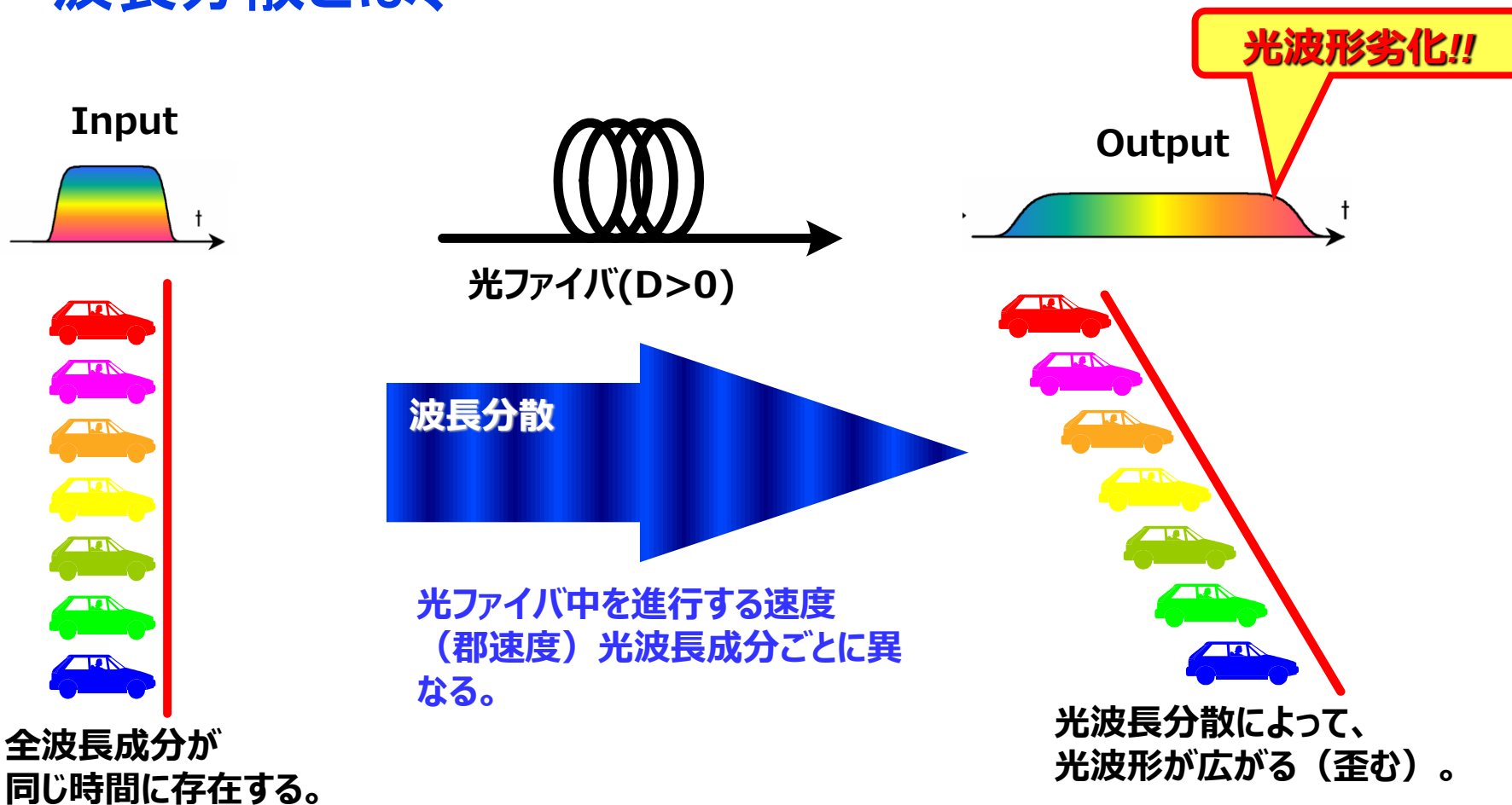
光ファイバの波長分散



シングルモードファイバ (SMF) の波長分散は $1.3 \mu\text{m}$ 波長帯でゼロであり、 $1.55 \mu\text{m}$ 波長帯では大きな値となり波形劣化が著しいため、ゼロ分散波長を $1.55 \mu\text{m}$ 波長帯にシフトした分散シフトファイバ (DSF) により、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の高速通信が可能となった。後に、完全ゼロ分散は、波長多重に不向きであることが判明し、ノンゼロDSF (NZ-DSF) が開発された。

波長分散 (Chromatic Dispersion) 概念

波長分散とは、



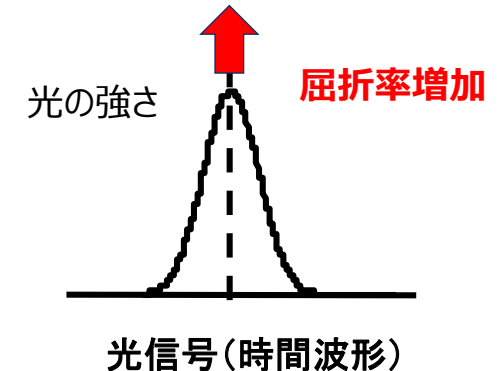
光ファイバの主な非線形光学効果

● 屈折率変化 (Kerr Effect)

$$\text{材料の屈折率 } n = n_0 + n_2 |E|^2$$

n_2 : 材料の非線形屈折率係数

$|E|^2$: 光強度



- 自己位相変調/相互位相変調 (Self/Cross Phase Modulation : **SPM/XPM**)
 - ・ 自身(他者)の光強度に応じた位相変調で、スペクトル幅が広がり、波長分散を介すると波形歪みに変換される
- 四光波混合 (Four Wave Mixing : **FWM**)
 - ・ 2波長間のビート信号により、屈折率が変調され新たな波長成分を生成する。WDM信号の場合、FWM光がクロストークとなり雑音が増加する。

● 誘導散乱

- 誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman Scattering : **SRS**) → 広帯域
 - ・ 入射光の周波数がシフトして散乱される。散乱された波長の信号が増幅される。
- 誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering : **SBS**) → 狭帯域
 - ・ 入射光がSRSにより反射し、光ファイバへの入力を増やすことが出来なくなる

光ファイバの非線形光学効果

● 非線形光学効果とは？

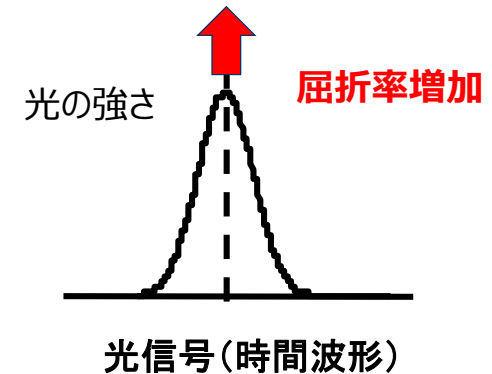
- 光の強さに応じて光ファイバの特性（屈折率など）が変わる現象
- 石英ガラスそのものは低非線形であるが、損失が少ないため、相互作用長が長くなり（パワー1/10になるのに50km必要（0.2 dB/km x 50km = 10dB））、直距離システムでは無視できない。

● 屈折率変化

$$\text{材料の屈折率 } n = n_0 + n_2 |E|^2$$

n_2 : 材料の非線形屈折率係数

$|E|^2$: 光強度



– 自己位相変調 (Self Phase Modulation :SPM)

- 自身の光強度に応じた位相変調で、スペクトル幅が広がり、波長分散を介すると波形歪みに変換される

1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
 - 光海底ケーブル、光ソリトン、光空間多重
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

光海底ケーブル

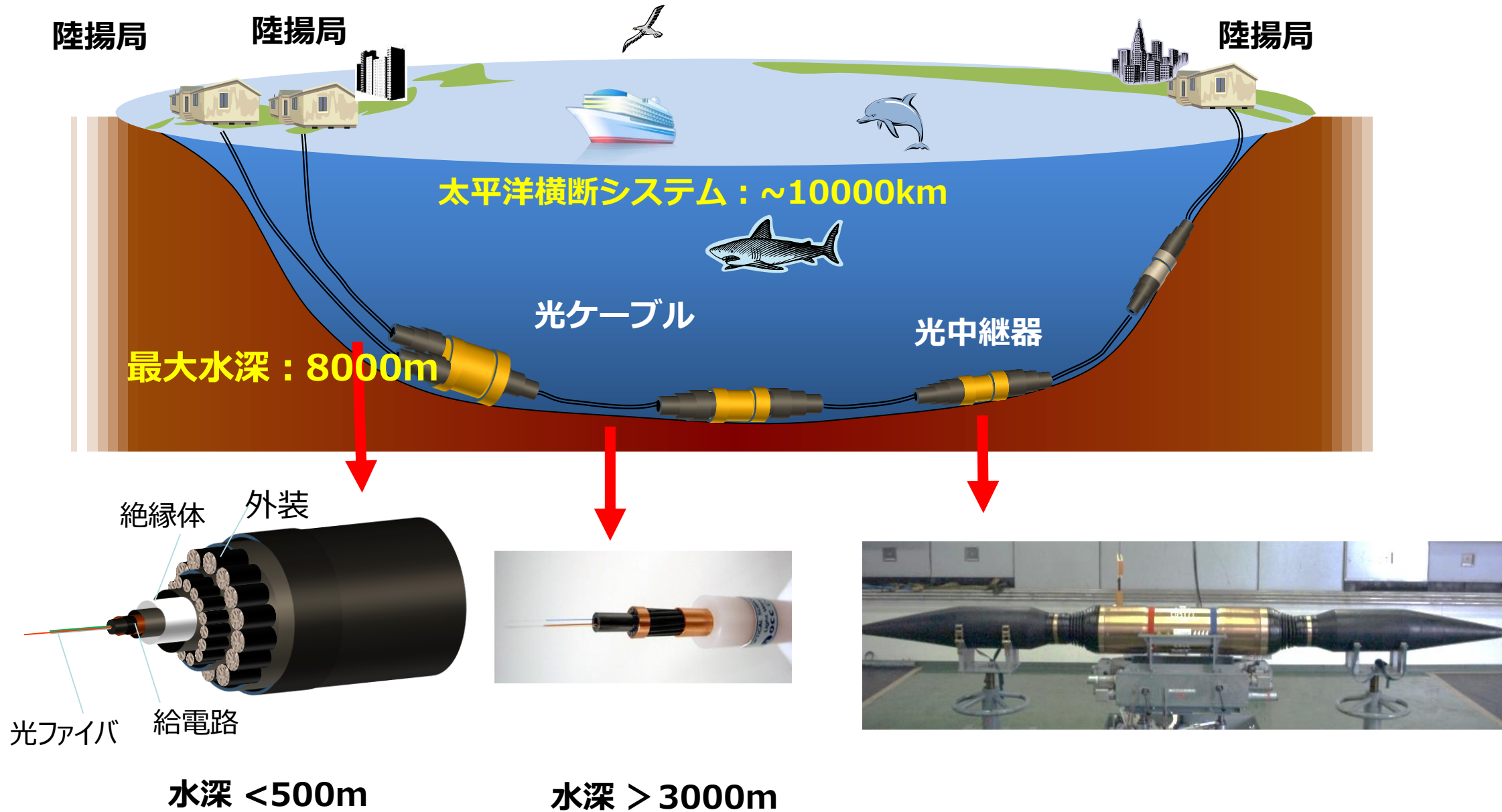
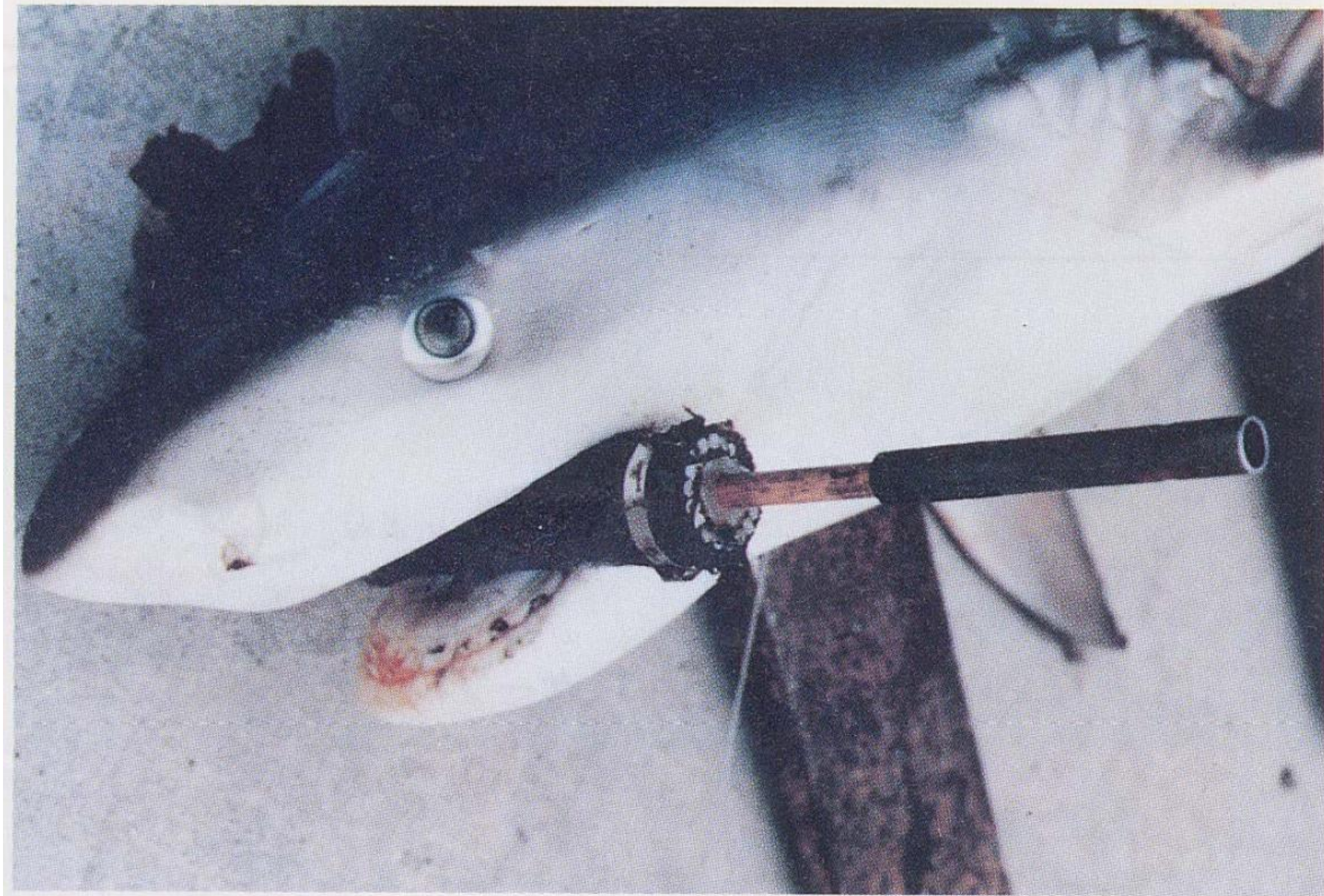


写真 5 サメにかまれた光海底ケーブル(実験)



光海底ケーブルの種類

外装ケーブル

DA
ケーブル



水深 < 500m

SAM
ケーブル



水深 < 1,000m

SAL
ケーブル



水深 < 1,500m

無外装ケーブル

LWS
ケーブル

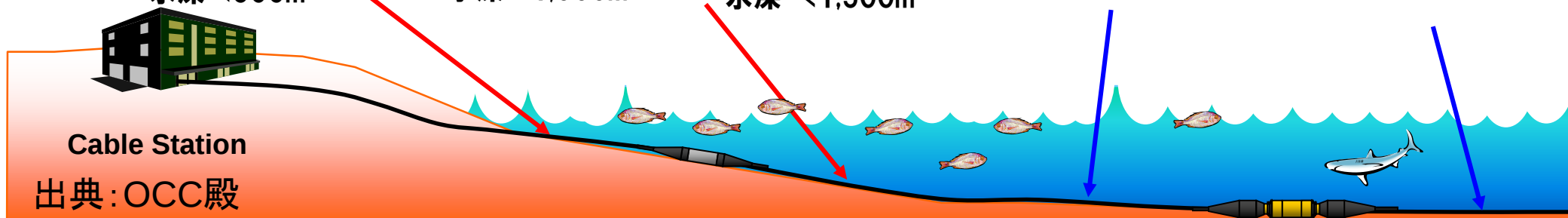


水深 < 3,000m

LW
ケーブル



水深 > 3,000m



光海底ケーブル敷設船

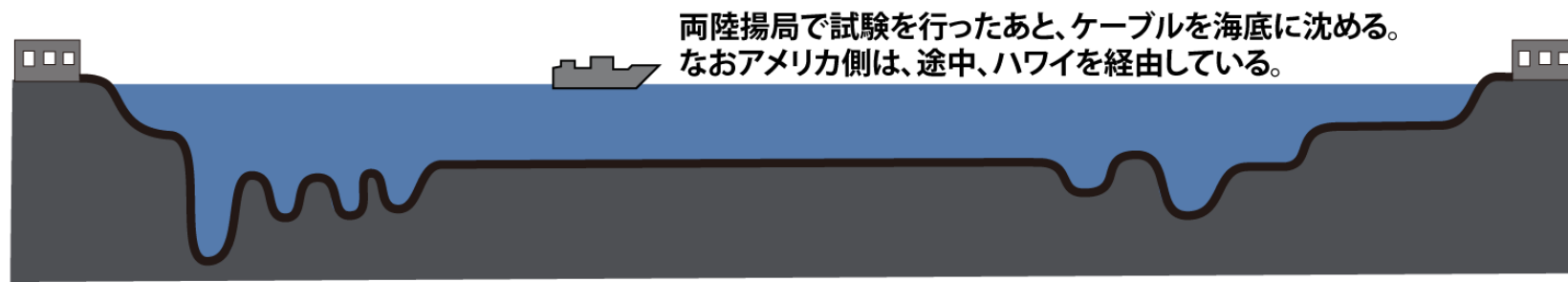
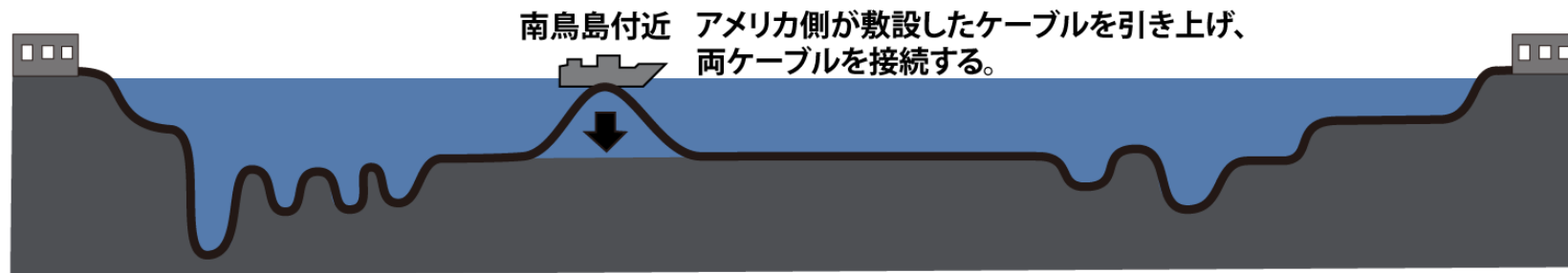
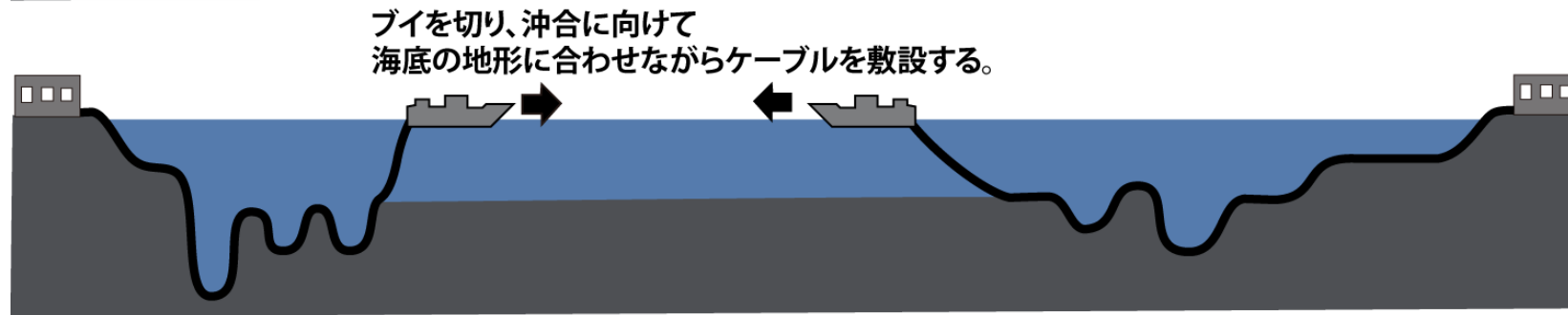
KDDIオーシャンリンク



全長	133.16m
幅	19.6m
深さ	11.6m
総トン数	9,510 トン
載荷重量	6,270 トン
ケーブルタンク容量	2,300m ³ (3つの主タンクの合計)
航海速力	15ノット (時速約28km)

<http://www.k-kcs.co.jp/>

光ケーブルの敷設



光海底ケーブルの保守（水中ロボット）

自律走行式水中ロボットAQUA EXPLORER 2000



- 母船とロボットを結ぶ制御ケーブルを必要としない無索式の自立走行式水中ロボット（AUV:Autonomous Underwater Vehicle）AQUA EXPLORER 2000
- 深度2,000mまで潜航可能。海中を自由に移動できる特性を活かし、従来の調査装置やロボットと比べて、光海底ケーブルの建設・保守に、優れた費用対効果を実現

埋設用水中ロボットROV MARCAS-III



- 船上から遠隔操作される水中ロボットは、ROV（Remotely Operated Vehicle）MARCAS: マーカス
- 海底ケーブルを漁具や大型船のアンカーから守るため、ケーブルや中継器、ケーブル接続箱などを埋設、障害点の状況調査

- **給電**：1万V以上（電力制限）
 - 両端(または片端) の陸揚げ局から、一定電流を供給
 例) $1\text{ A} \times 1\text{ 万km} \times 0.7\Omega/\text{km} + (5\text{ V} \times 8 (4\text{ FP})) \times 200\text{ 中継} = 15000\text{ V}$
- **圧力**：800気圧（水深8000m） 、張力：7～8 t
 - 耐圧ケーブル・中継器
- **超高信頼性**
 - 25年の設計寿命の中で、船による修理は3回以下
- ファイバの心線数：数芯から10芯程度(スペース制限)
- **超長距離**（1万km以上）
 - 特性劣化要因が著しい累積（分散・非線形）

光増幅中継システムであるTPC-5で 5 Gbit/sの信号速度を実現していたが、WDMを導入したChina-USでは、非線形劣化が顕著で、信号速度を2.5Gbit/s (NRZ)まで落とさざるを得なかった

■ 10Gbit/s WDM長距離系での非線形対策技術

- 非線形耐力があり所要SNRが低い、RZ光パルスの導入
- 低非線形化のために、980nm励起低雑音光増幅器の導入
- 低非線形化のために、大口径光ファイバの導入
 $A_{\text{eff}}: 45\mu\text{m}^2 \text{ (DSF)} \Rightarrow 80\mu\text{m}^2 \text{ (大口径NZ-DSF)} \Rightarrow (150\mu\text{m}^2 \text{ (最新ファイバ)})$
- 非線形と大きな累積分散の非可逆的波形劣化を避けるため、NZ-DSFに適した分散マネージメント (-D/+D)
- 広帯域分散補償に適した、分散制御ソリトン同様の分散マネージメント (+D/-D)
 (低非線形化のための伝送損失の低減 (0.1419 dB/km))

Y. Tamura et al., OFC2017, LA, Th5D1 (Mar. 2017) (住友電工)

1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
 - 光海底ケーブル、**光ソリトン**、光空間多重
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

基本的な物理現象：ソリトン

Soliton : Solitary wave + on (粒子的)

● 1834年 John Scott Russel :スコットランド運河での孤立波発見

粒子の特徴をもつ孤立波。波の1つの盛り上がりだけが進む。19世紀前半、英スコットランドの運河で、船が止まった後にできる波として見つかった。この波は非線形方程式の解であることが、理論研究でわかった。互いにぶつかっても姿を変えないなど粒子らしさがあるので、語尾に粒子名のような“on”がついた。安定していて高密度にできるので、光通信などで応用研究が進む。寄り添う波の頂を結ぶ線が孤立波の波形を描き、全体としてソリトンを形づくるとき、包絡ソリトンという。



J・スコット・ラッセル
(1808-1882)

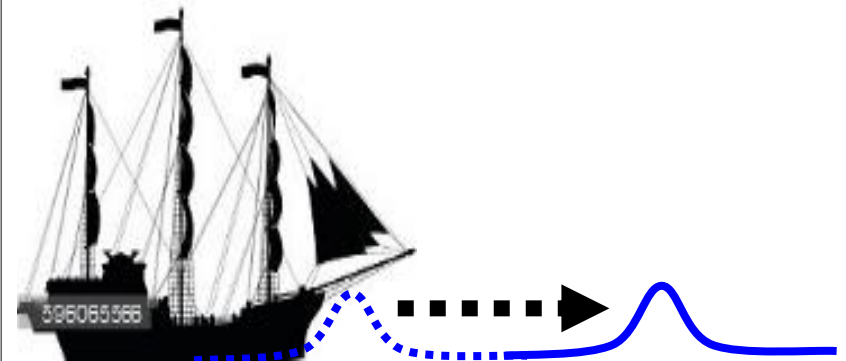
ラッセルはエジンバラ郊外の運河で馬にひかれていたボートが急にとまったとき、船首に水の高まりができ、そこから孤立波が生じ、時速8-9マイル（時速13-14キロメートル程度）の速度でほとんど波形を変えずに伝播していくのを偶然目撃し、1マイル以上馬で追跡しながら観察した。その後、彼は水槽をつくり、波高の大きい波ほど、伝播速度は速いなどの孤立波の性質を報告している。（Wikipediaより引用）

KdV方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0$$

非線形シュレディンガー方程式

$$i \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \kappa |u|^2 u = 0$$

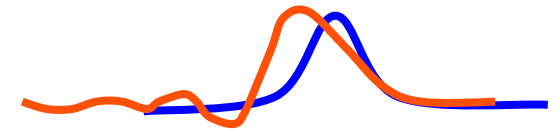




葛飾北斎 富嶽三十六景

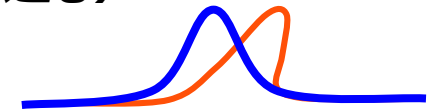
波の広がり

(**分散性**：伝搬速度が周波数成分ごとに異なる)

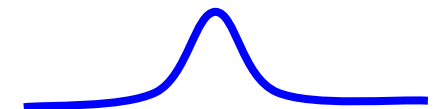


波の突っ起ち

(**非線形性**：水面の高いほうが早く進む)



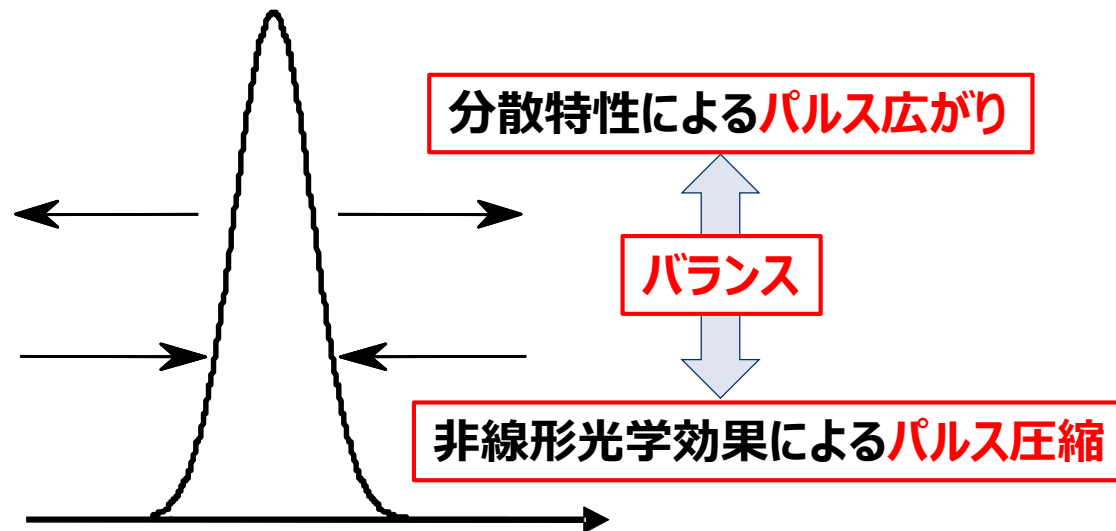
分散性と非線形性が**バランス**すると形が変わらない**ソリトン**が作られる



●長谷川晃博士(当時、AT&Tベル研究所) が1973年に非線形シュレディンガー方程式を導出。その解として光ファイバ中のソリトンを理論導出

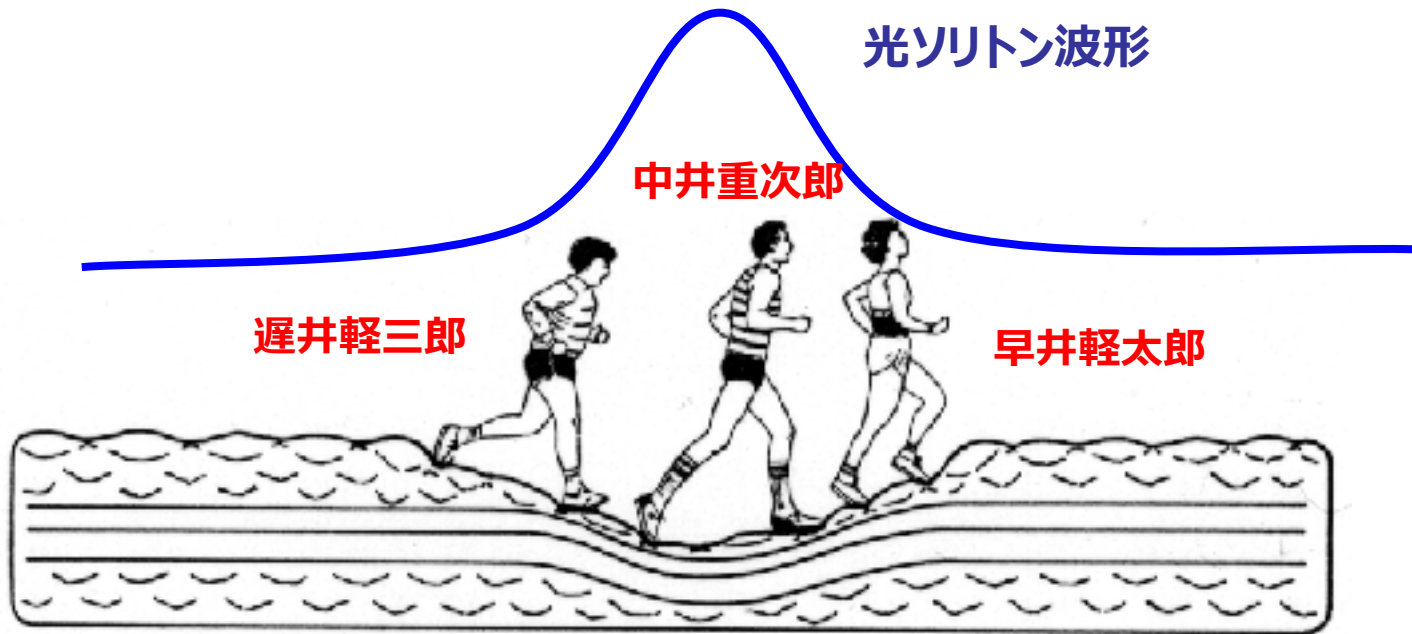
【光ソリトン通信方式】

伝送路である光ファイバの波長分散特性による**パルス広がり**と、非線形光学効果による**パルス圧縮**とを**バランス**させることで長距離伝送後も**パルス形状が一定**となる光短パルス信号で、高速信号の長距離伝送に適している。



送信光パルス信号が形を変えずにどこまでも伝わる

光ソリトンのたとえ（マットレスを走る3人のランナー）



Evangelides (AT&T)氏より

重いランナ**中井重次郎**がマットレスにくぼみを作る。
スピードの早いランナ**早井軽太郎**は坂道を登り減速される
遅いランナ**遅井軽三郎**は坂道を下り加速される。



3人の集団は形を変えずに走り続ける。
(硬い道を走った場合は、3人は速度差により、広がっていく)

光ソリトン関連の主な研究

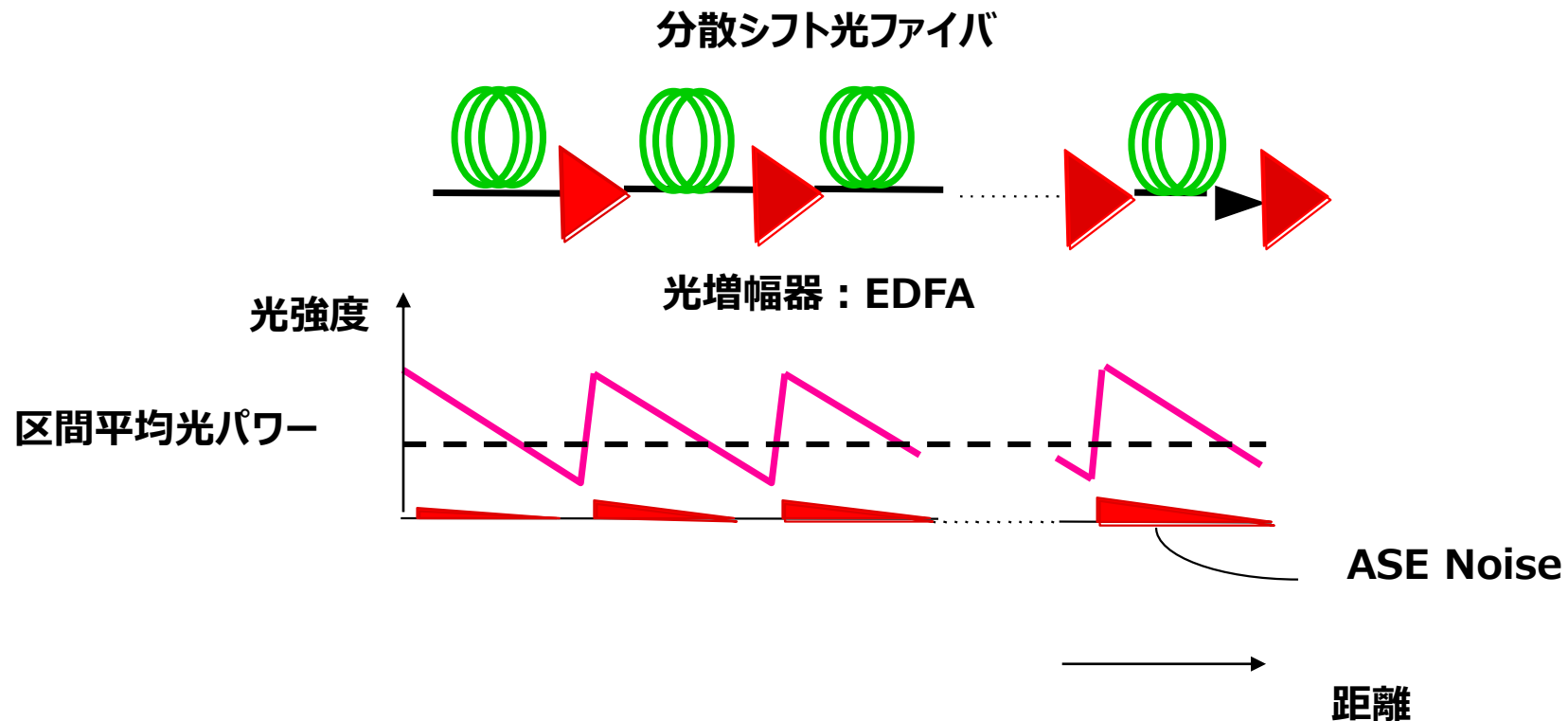
ソリトンを用いたものが光ソリトンは、光波形が変わることなく高速光信号を長距離伝送できる**夢の通信**として世界中で注目された。

- 1973 光ソリトン伝送原理提案 (Hasegawa, AT&T)
- 1980 光ソリトン観測 (L. Mollenauer, AT&T)
- 1986 Gordon-Hausタイミングジッタ問題提起(J. Gordon、AT&T)
- 1988 分布光増幅中継器を用いたソリトン6000km長距離伝送(L. Mollenauer, AT&T)
- 1989 EDFAを用いたソリトン伝送 (M. Nakazawa, NTT)
- 1995 分散制御光ソリトン伝送方式考案 (M. Suzuki, KDD)
- 1998 40Gbit/s 10200km分散制御光ソリトン伝送(I. Morita, KDD)

本来の光ソリトンは固有値：一定分散（D）と一定光強度（非線形）のバランス（ロスレス）

損失のある実際の光ファイバ増幅システムでは：一定分散と区間平均光パワーがバランス

名称： Guiding Center Soliton (Dr. A. Hasegawa, AT&T), Path-average soliton (Dr. L. Mollenauer, AT&T)、
Average soliton (Dr. N. Doran, BT), Dynamic soliton (Dr. M. Nakazawa, NTT)



Gordon-Hausタイミングジッタ

到着時間の揺らぎ

光ファイバの波長分散

光ファイバの非
線形による中心
周波数揺らぎ

光増幅器による
強度雑音

$$\langle \Delta t^2 \rangle \sim \frac{D^2 L^3}{Za} \langle \Delta \omega^2 \rangle$$

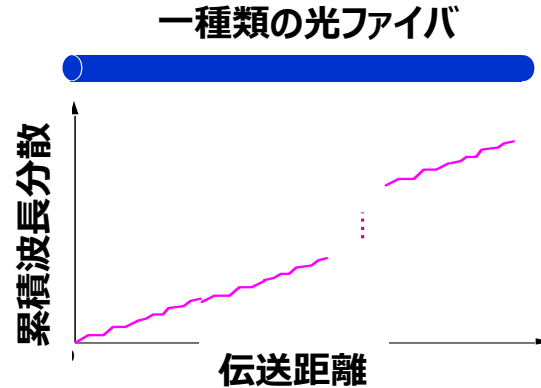
L : Total system length、D : fiber dispersion、Za : amplifier spacing

- 距離の3乗、分散の2乗に比例するため、長距離系では致命的
- 1タイムスロット (T=1/B) の約1/12のタイミングジッタで、BERが10⁻⁹まで劣化

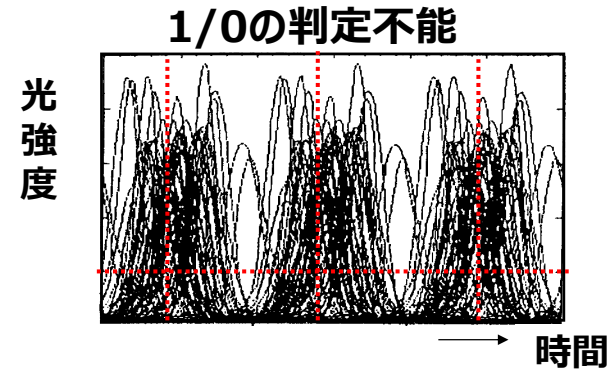
光ソリトンは、高速光信号を長距離伝送できる**夢の通信**として注目されていたが、到着時間が揺らぐ問題があり、暗礁に乗り上げていた。

分散制御ソリトンによるタイミングジッタの抑制

従来技術



(a) 光ファイバ伝送路構成

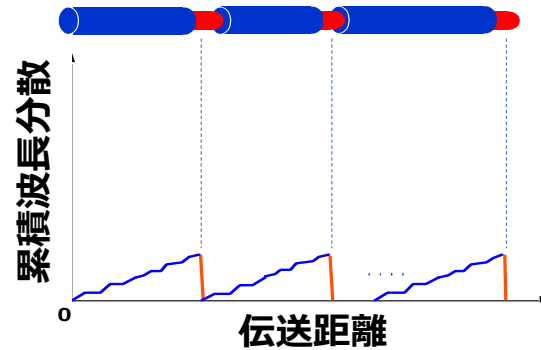


(b) 受信光信号波形

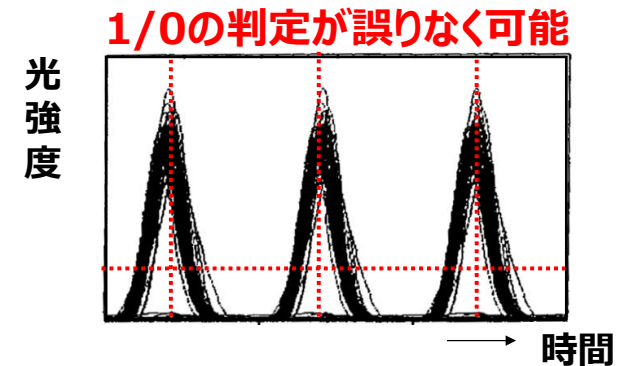
従来の光ソリトン方式を用いた高速光通信伝送路構成と長距離伝送後の受信波形

波長分散 + - + - + -

新技術



(a) 光ファイバ伝送路構成



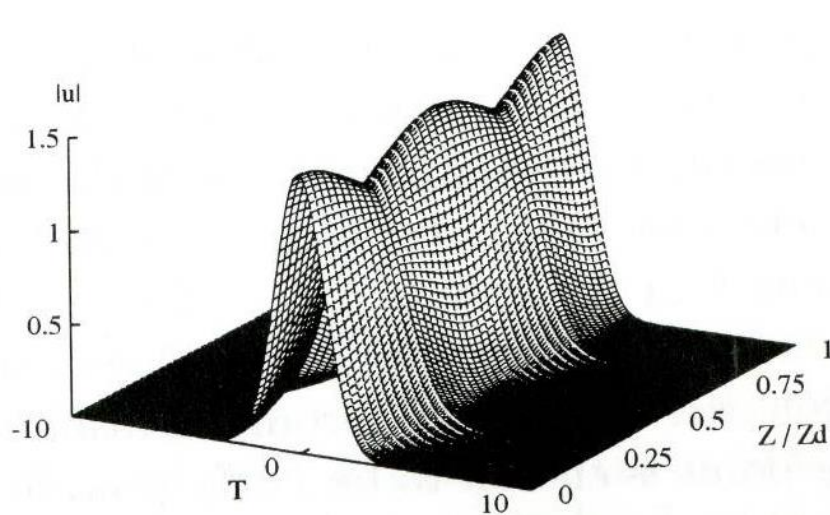
(b) 受信光信号波形

分散制御光ソリトン方式を用いた高速光通信伝送路構成と長距離伝送後の受信波形

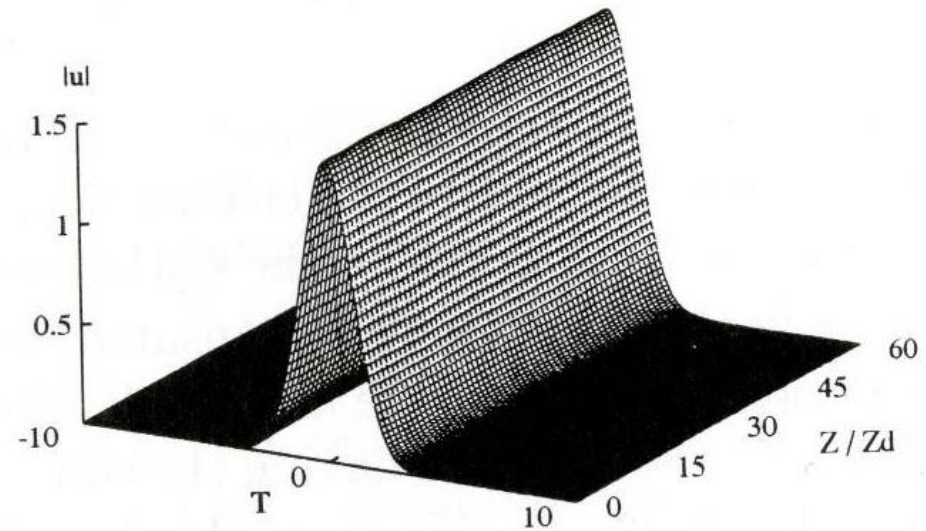
ソリトンを破壊すると信じられていた異なる性質の光ファイバ（-の分散）を組み合わせた。
⇒時間の揺らぎなし、波形の劣化もなし、伝送限界は10倍以上に拡大

非線形を考慮した分散補償 ～分散制御光ソリトンの一般化～

- KDDIの提案・実証後、ほぼすべてのソリトン研究者は、純粋なソリトンから分散制御ソリトンの研究にシフトし多くの理論的・実験的研究(Aston大学等)が進められ、その結果、**Gauss波形が周期的に分散が変動する光ファイバの非線形シュレディンガー方程式の安定な定常解**であることが明らかになった。
- 対象ファイバもDSFからNZ-DSF (+または-)、SMF(+D/-D)等に拡張され、WDMとのコンパチビリティがある**Dispersion Managed Soliton**と称され一般化した。



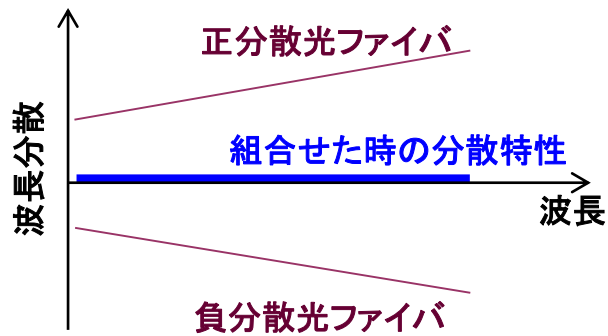
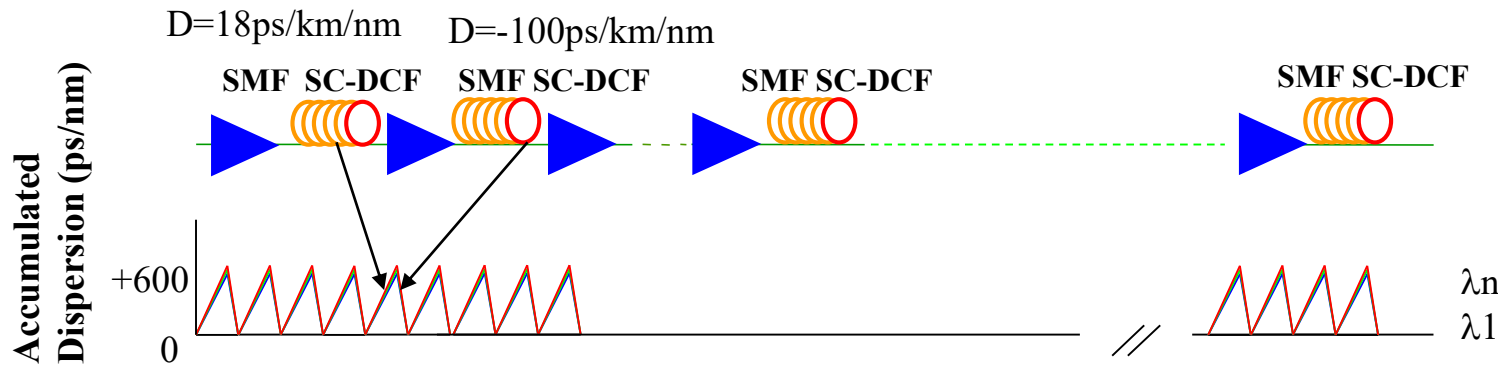
(分散補償 1 区間内 : パルス幅伸縮)



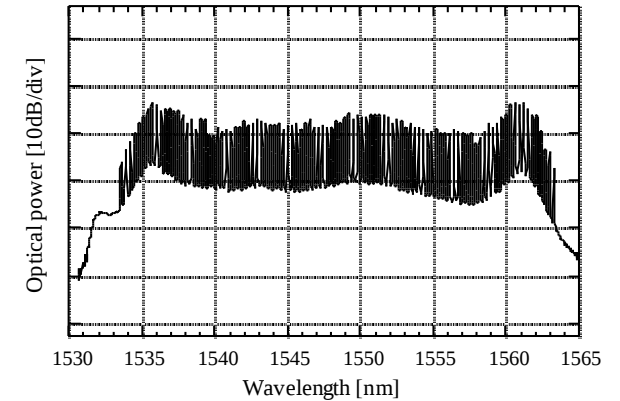
(周期的な観測点での伝送波形 ; 定常Gauss解)

1 Tbit/sの大洋横断光伝送実験 ~10Gbit/s x 100WDM, 7750km~

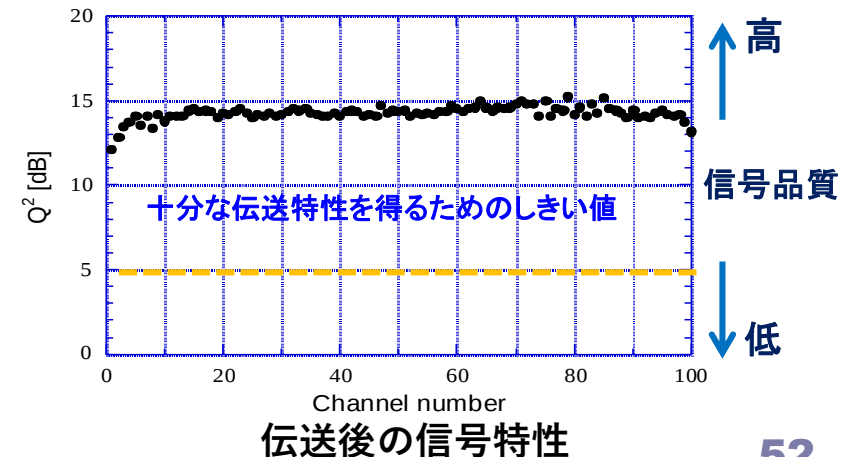
- 分散制御の対象を波長分散だけでなく、波長分散スロープへ拡張し、**分散制御の広帯域化 (+D/-D)**
- 10Gbit/sの**RZ光信号**を用いた100波長多重伝送において、7750km伝送に初めて成功し、テラビット級の容量を有する大容量波光海底ケーブル伝送方式を確立。(1999年/2000年:ECOC99-PD / OECC2000, T. Tsuritani et al.)



SMFとSC-DCF)の波長分散特性



伝送後の信号スペクトル



伝送後の信号特性

商用ケーブル：TGN-Pなど

長距離波長多重システムのPotentialの最大化 光ファイバ分散制御技術

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030

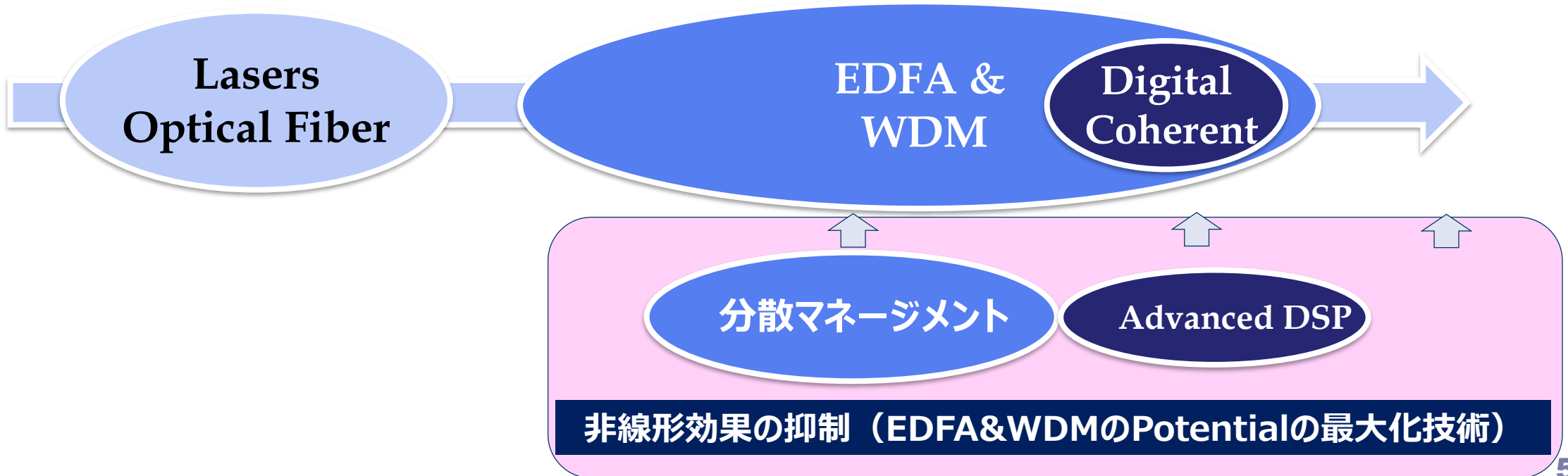
【多重化技術】

時間 (X100)
(100M to 10G)

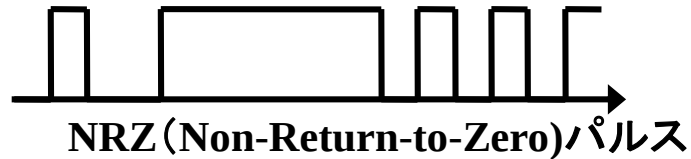
波長 (X1000)
(10G to 10T)

空間 (X1000)
(10T to 1P)

【革新技術】



【送信光波形】

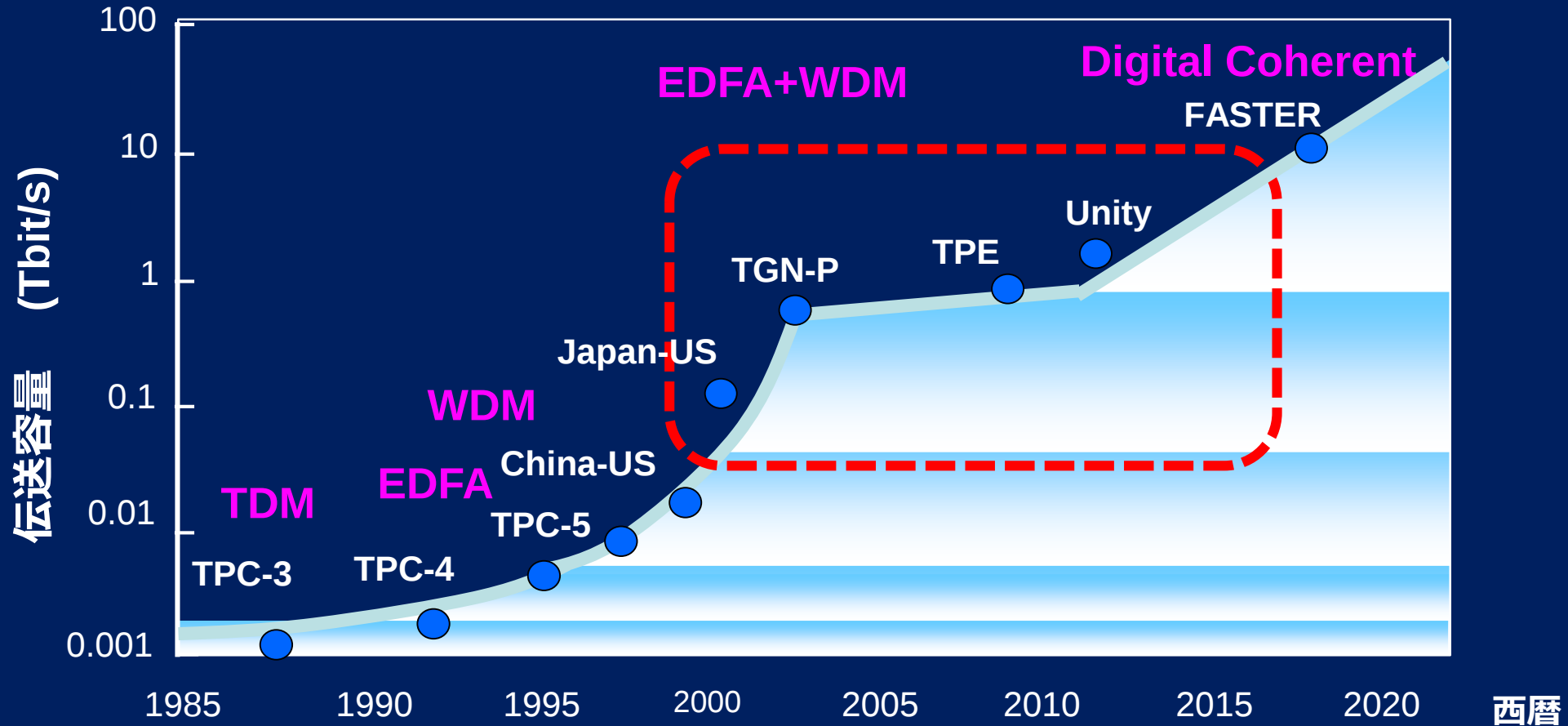


赤字：10Gbit/s RZ光パルスと分散制御光ファイバを用いたシステム

	サービス開始時期	容量/ファイバ (b/s)	信号速度 (b/s)	波長数	ファイバペア数	総容量 (b/s)	送信光波形	ファイバタイプ
TPC-3	1989	280M	280M	1	2	560M	NRZ	SMF
TPC-4	1992	560M	560M	1	2	1.12G	NRZ	CSF
TPC-5	1996	5G	5G	1	2	10G	NRZ	DSF
China-US	1999	20G	2.5G	8	4	80G	NRZ	NZ-DSF (-D/+D)
PC1	1999	160G	10G	16	4	640G	RZ	NZ-DSF (-D/+D)
Japan-US	2000	160G	10G	16	4	640G	RZ	NZ-DSF (-D/+D)
VNSL-P (TGN-P)	2002	640G	10G	64	8	5.12T	RZ	DMF (+D/-D)
Unity	2010	960G	10G	96	5	4.8T	RZ (DPSK)	DMF (+D/-D)
Faster	2016	10T	100G	100	6	60T	DP-QPSK	SMF

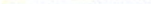
太平洋横断光ケーブル容量の推移

研究開発成果が適用された光海底ケーブル



Designing The Future
KDDI



EUROPE	ASIA - OCEANIA	AMERICA	
KDDI EUROPE LTD. Tel: 0044 (0)20 7061 5000 Fax: 0044 (0)20 7061 5001 Email: info@kddi-europe.com KDDI EUROPEALIAN GmbH Tel: 0049 (0)69 909 9000 Fax: 0049 (0)69 909 9001 Email: info@kddi-europe.com KDDI EUROPEALIAN GmbH, Amsterdam Branch Tel: 0031 (0)20 485 4000 Fax: 0031 (0)20 485 4001 KDDI EUROPEALIAN GmbH, London Branch Tel: 0044 (0)20 7061 5000 Fax: 0044 (0)20 7061 5001 KDDI FRANCE SAS Tel: 0033 (0)1 69 36 36 36 Fax: 0033 (0)1 69 36 36 37 Email: info@kddi-europe.com	KDDI HONG KONG LIMITED Tel: 00852 (0)2 222 2222 Fax: 00852 (0)2 222 2223 KDDI CHINA CORPORATION Tel: 0086 (0)10 646 6466 Fax: 0086 (0)10 646 6467 KDDI CHINA CORPORATION, Taipei Branch Tel: 0086 (0)2 272 2722 Fax: 0086 (0)2 272 2723 KDDI CHINA CORPORATION, Tokyo Branch Tel: 0081 (0)3 556 5566 Fax: 0081 (0)3 556 5567 KDDI CHINA CORPORATION, Seoul Office Tel: 0082 (0)2 377 3777 Fax: 0082 (0)2 377 3778 KDDI THAIAN Corporation Tel: 0066 (0)2 262 2622 Fax: 0066 (0)2 262 2623 KDDI KOREA CORPORATION, Seoul Office Tel: 0082 (0)2 377 3777 Fax: 0082 (0)2 377 3778 KDDI JAPAN CORPORATION, Osaka Office Tel: 0081 (0)6 677 6777 Fax: 0081 (0)6 677 6778 KDDI JAPAN CORPORATION, Nagoya Office Tel: 0081 (0)52 555 5555 Fax: 0081 (0)52 555 5556 KDDI PHILIPPINE LTD. Tel: 0063 (0)2 888 8888 Fax: 0063 (0)2 888 8889 KDDI SINGAPORE Pte Ltd Tel: 0065 (0)6 434 4344 Fax: 0065 (0)6 434 4345 KDDI SINGAPORE Pte Ltd, India Branch Tel: 0091 (0)11 262 2622 Fax: 0091 (0)11 262 2623 KDDI India Private, LTD Tel: 0091 (0)11 262 2622 Fax: 0091 (0)11 262 2623 KDDI Vietnam Corporation Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Hanoi Office Tel: 0084 (0)4 388 3888 Fax: 0084 (0)4 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Ho Chi Minh City Office Tel: 0084 (0)8 388 3888 Fax: 0084 (0)8 388 3889 KDDI Vietnam Corporation, Da Nang Office Tel: 0084 (0)51 388 3888 Fax: 0084 (0)51 388 3889 KDDI Vietnam Corporation,		

赤字：KDDIグループ会社が供給、青字：他社様が供給

分散制御光ソリトン通信方式(基礎研究)

- 従来不可能とされた光ソリトン通信システムでの分散補償を初めて実証（**分散制御光ソリトン方式**）（1995）→ 信号到着時間揺らぎを抑制し高速光信号の伝送距離を10倍以上に拡大
- 原論文は、被引用回数が**光通信分野で日本人最大**（工学全分野では、青色LEDでノーベル賞受賞の赤崎・天野氏）

波長多重用分散制御技術(実用化研究)

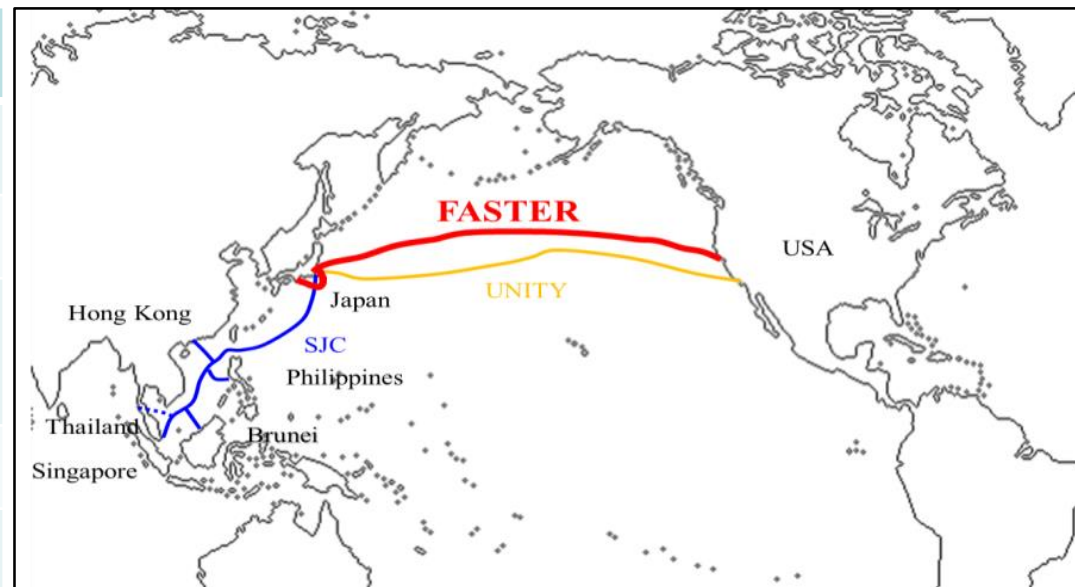
- RZ光パルス光源と波長多重用光ファイバの分散制御技術により超長距離波長多重光通信システムにおいて**信号速度の高速化**（2.5Gbpsから10Gbpsへ）を実証（10Gbps, 16波長多重、10850km）（1998年）
- 分散制御を広帯域化し、**波長数を100波長多重へ拡大**した1 Tbpsの大洋横断光伝送方式を確立（10Gbps, 100波長多重）（1999年）
- **開発技術は太平洋・大西洋・アジアの多数の商用システムに適用**（総長20万km以上）

FASTER : 日本～米国間の新光海底ケーブル

世界最大規模60Tbpsの大容量光海底ケーブル

FASTER概要

ネットワーク構成	日本～米国
運用開始時期	2016年度第1四半期
回線容量	60Tbps (100Gbps x 10波長 x 6FP)
総延長	約9,000km
総建設費	約3億米ドル (約306億円)



1964年
128回線

x734万/50年

2016年
9億4千万回線相当
60,000,000,000,000 bps※

※高精細映像 (15Mbps) を約400万人が同時にストリーミング視聴可能

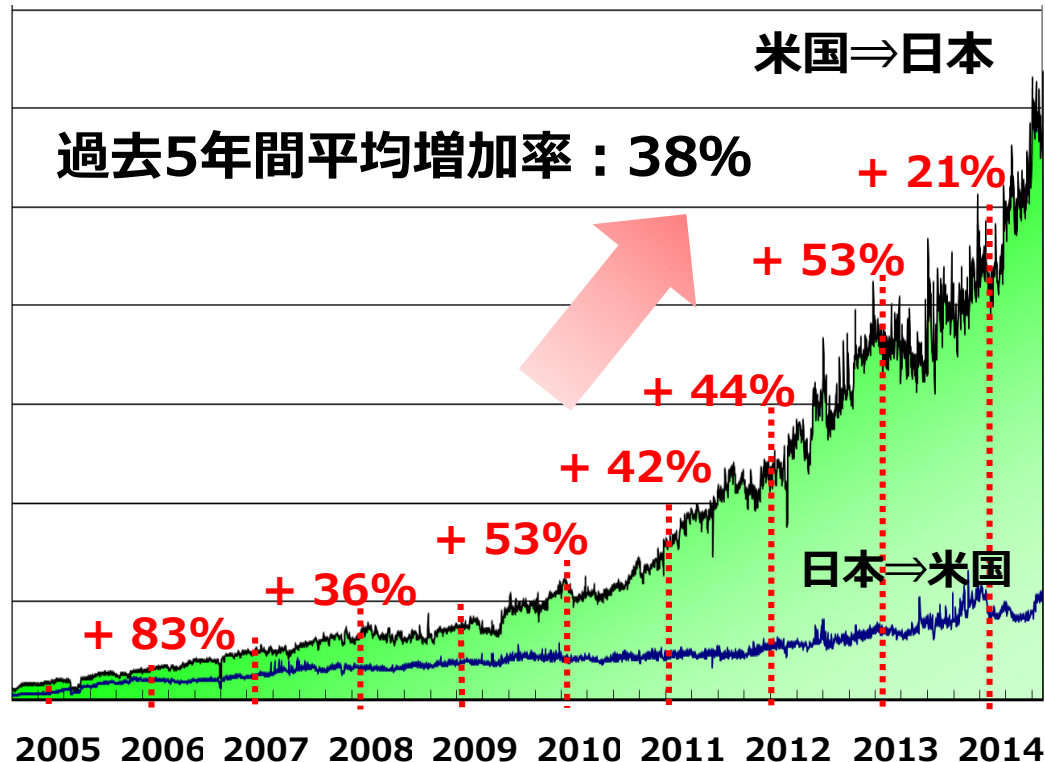
FASTER共同出資者 :

KDDI (日本)、Google (米国)、China Mobile International (中国)、China Telecom Global (中国)、SingTel (シンガポール)、Global Transit (マレーシア)

1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
 - 光海底ケーブル、光ソリトン、**光空間多重**
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

日米間の通信トラフィック量(KDDI)

- 光海底ケーブルは、急増するインターネットトラフィックを収容する（ガス、水道、電気同様の）社会インフラ。
- KDDI日米間バックボーン：年間約40%の伸び(10年後30倍以上)



スマホ/LTEの
急速な進展
(5G)

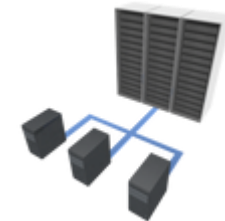


+

4K/8K
伝送



ビックデータ・
IoTの進展



R-J, Essiambre et al., "Capacity limits of optical fiber network", JLT 28, pp. 662-7001, 2010

- EDFAにより**損失の問題を解決**。DSPの進展により、線形劣化（分散、PMD等）はほぼ解決。
しかし、**非線形の問題は未解決**。
- 非線形光学効果によりシャノンリミット（周波数利用効率、伝送容量）は制限
- 陸上では約100Tbit/s、海底では約50Tbit/sが物理的な伝送限界

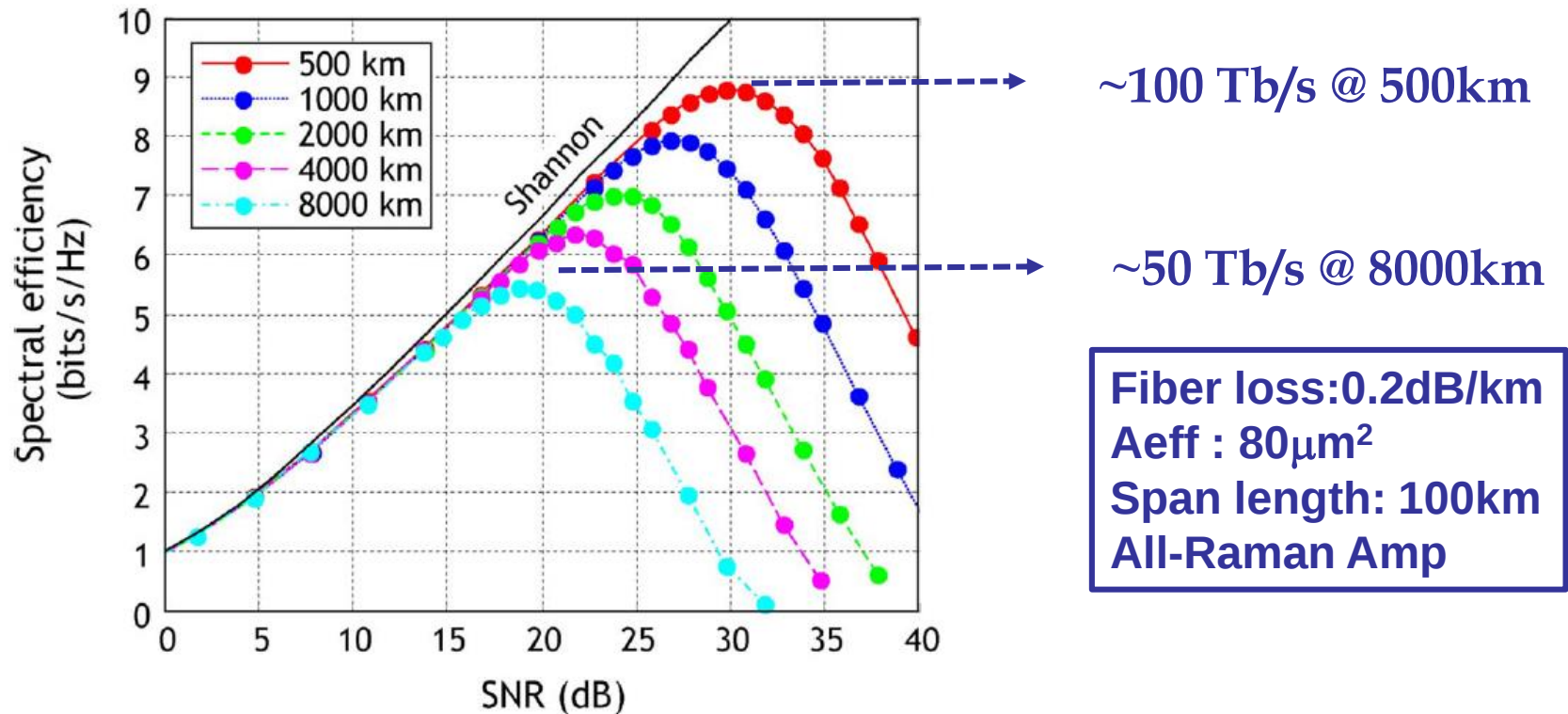
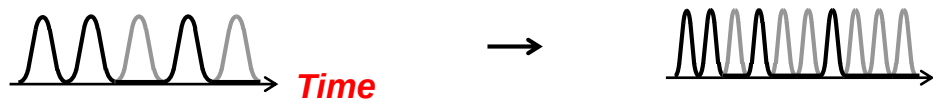
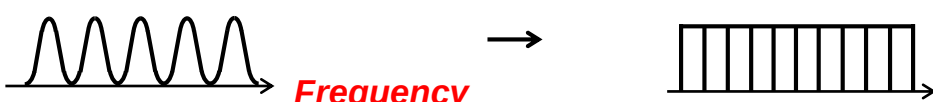
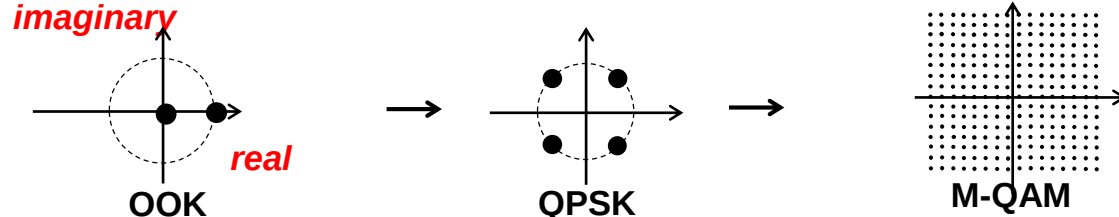
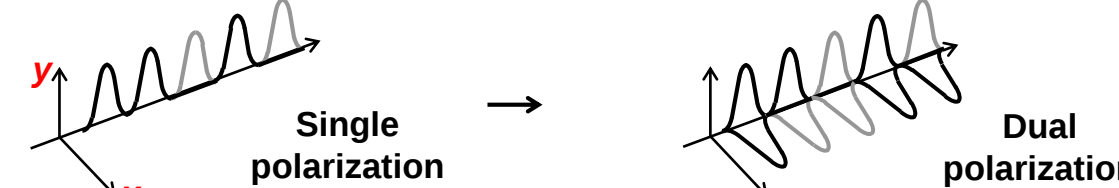


Fig. 35. Spectral efficiency after transmission for various distance. All links are without dispersion compensation.

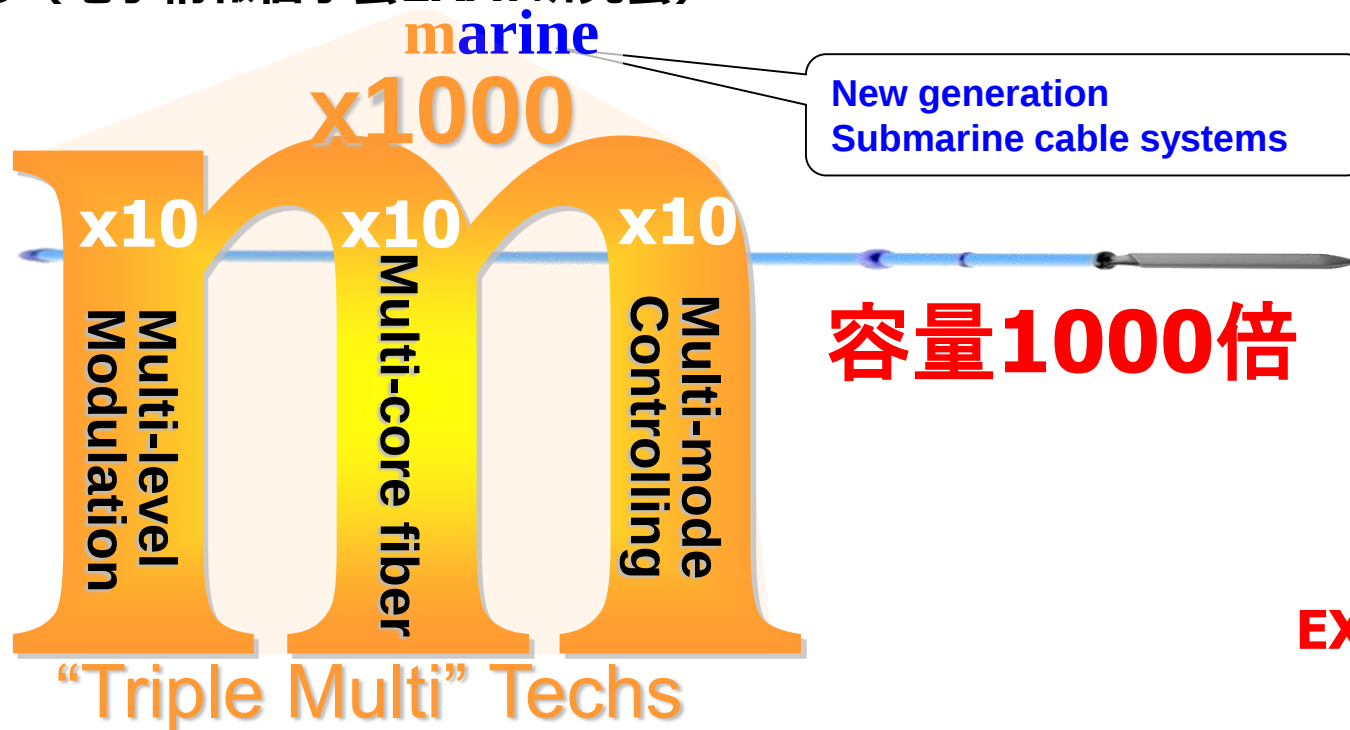
光信号多重化技術

時間 $\delta(t + nT_s)$	
周波数 $\exp(jn\omega_s t)$	
I/Q空間 $\cos(\bullet)$ $\sin(\bullet)$	
偏波 $e_X = (1,0)^T$ $e_Y = (0,1)^T$	
コア $\exp[jk(r-r_s)]$	
モード $\exp(jk_s r)$	

伝送限界を超えるため 新たな直交空間の活用:3M戦略

EXAT研究会の発足

- 2008-2010 (NICT : EXAT Initiative)
委員長 : 中沢 (東北大)、副委員長 : 鈴木 (KDDI)・盛岡 (NICT)
- 2010から (電子情報信学会EXAT研究会)



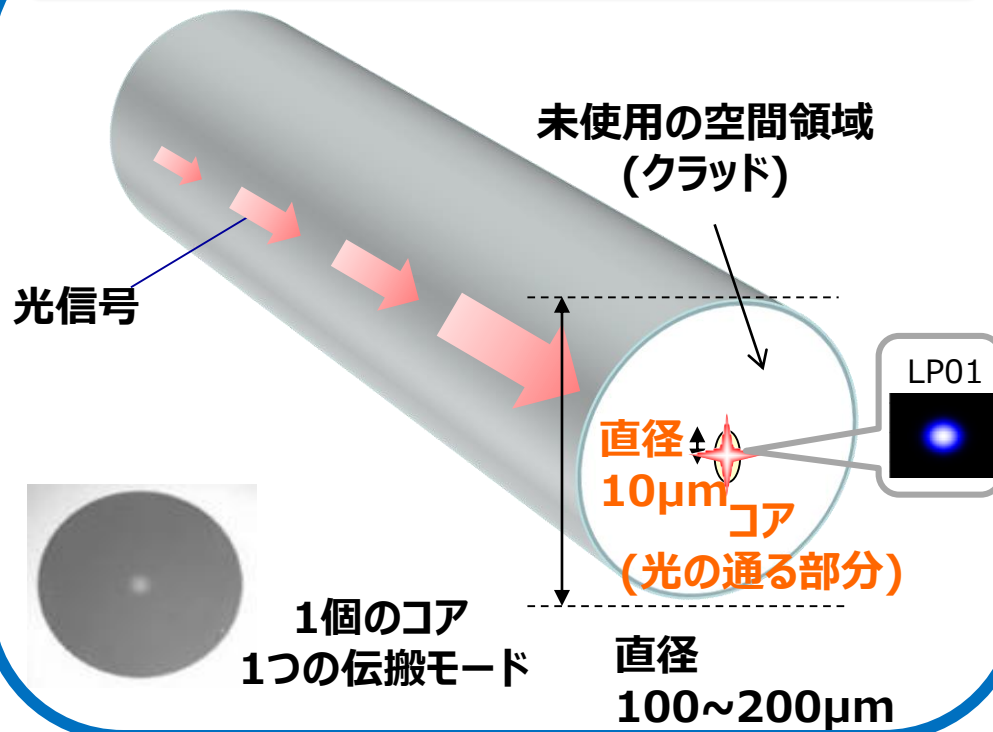
EXA bit/s **T**ransmission

Related National Research Projects



従来

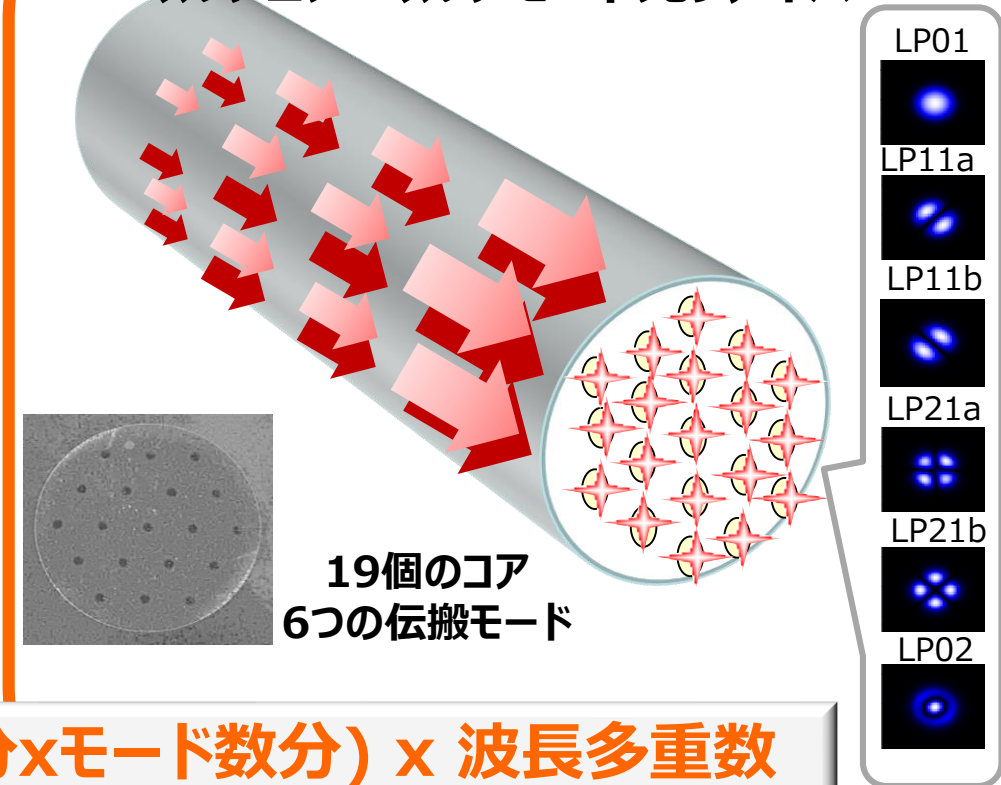
従来の光ファイバ



新技術

新しい光ファイバ

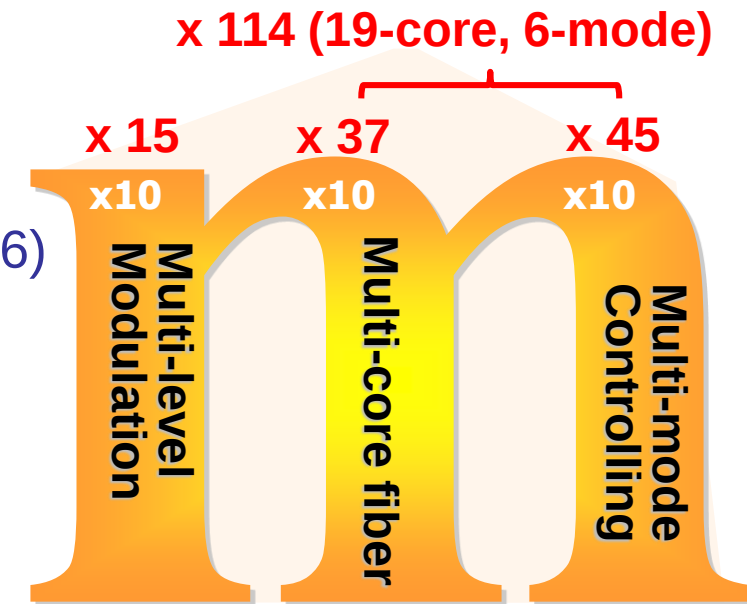
～マルチコア・マルチモード光ファイバ～



(コア数分×モード数分) × 波長多重数
の伝送容量増加が可能！

最近の主な空間多重光伝送実験 (World Records)

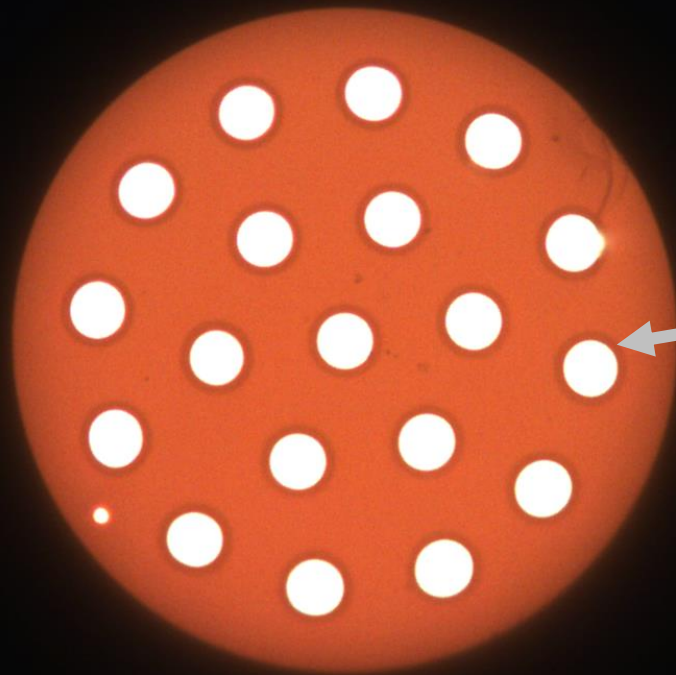
- Number of cores
 - **37-core**, Fujikura(OFC2017)
- Number of modes
 - **45-mode**, Bell lab(ECOC2018)
- Spatial Multiplicity
 - **114** (19-core x 6-mode), KDDI(OFC2015), NTT(OFC2016)
- Capacity
 - **10.16 Pbit/s**, KDDI(ECOC2017)
- Spectral Efficiency
 - **1099.9bit/s/Hz**, KDDI (ECOC2017)
- Capacity-distance product
 - **4.59Ebit/s-km** (0.52Pbit/s, 8830km), TE Subcom (ECOC2016)
- (Multi-level modulation)
 - **PS-4096QAM**, 17.3bit/s/Hz, Bell labs(OFC2018)



光通信も「京」の時代へ

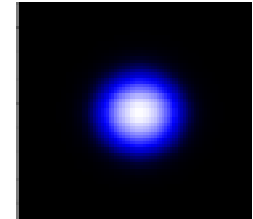
KDDI:10ペタ(10,000,000,000,000,000)ビット/秒光通信に成功

19-コア 6-モード 光ファイバ

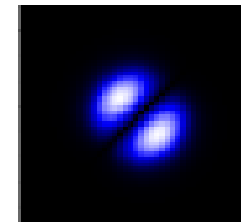


コア

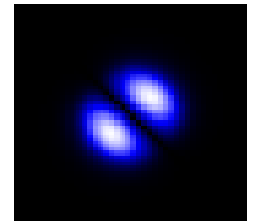
モード



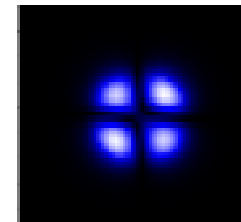
LP01



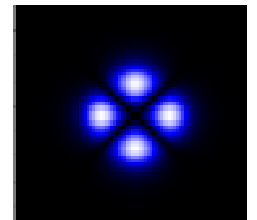
LP11a



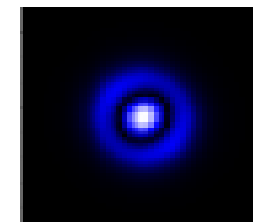
LP11b



LP21a



LP21b

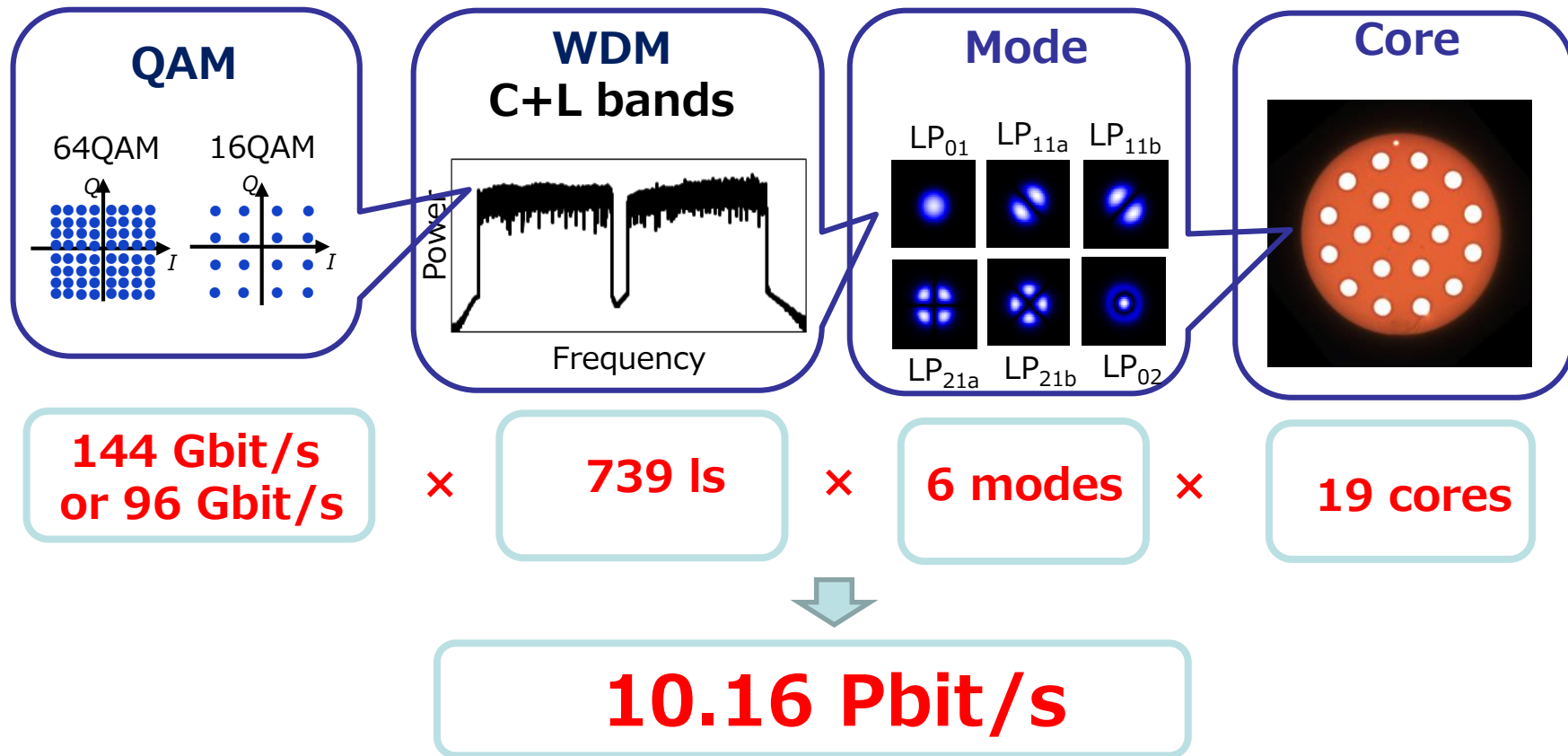


LP02

光通信：京（ 10^{16} ）の時代へ

10.16 Pbit/s over 11.3-km transmission with 6-mode 19-core fiber

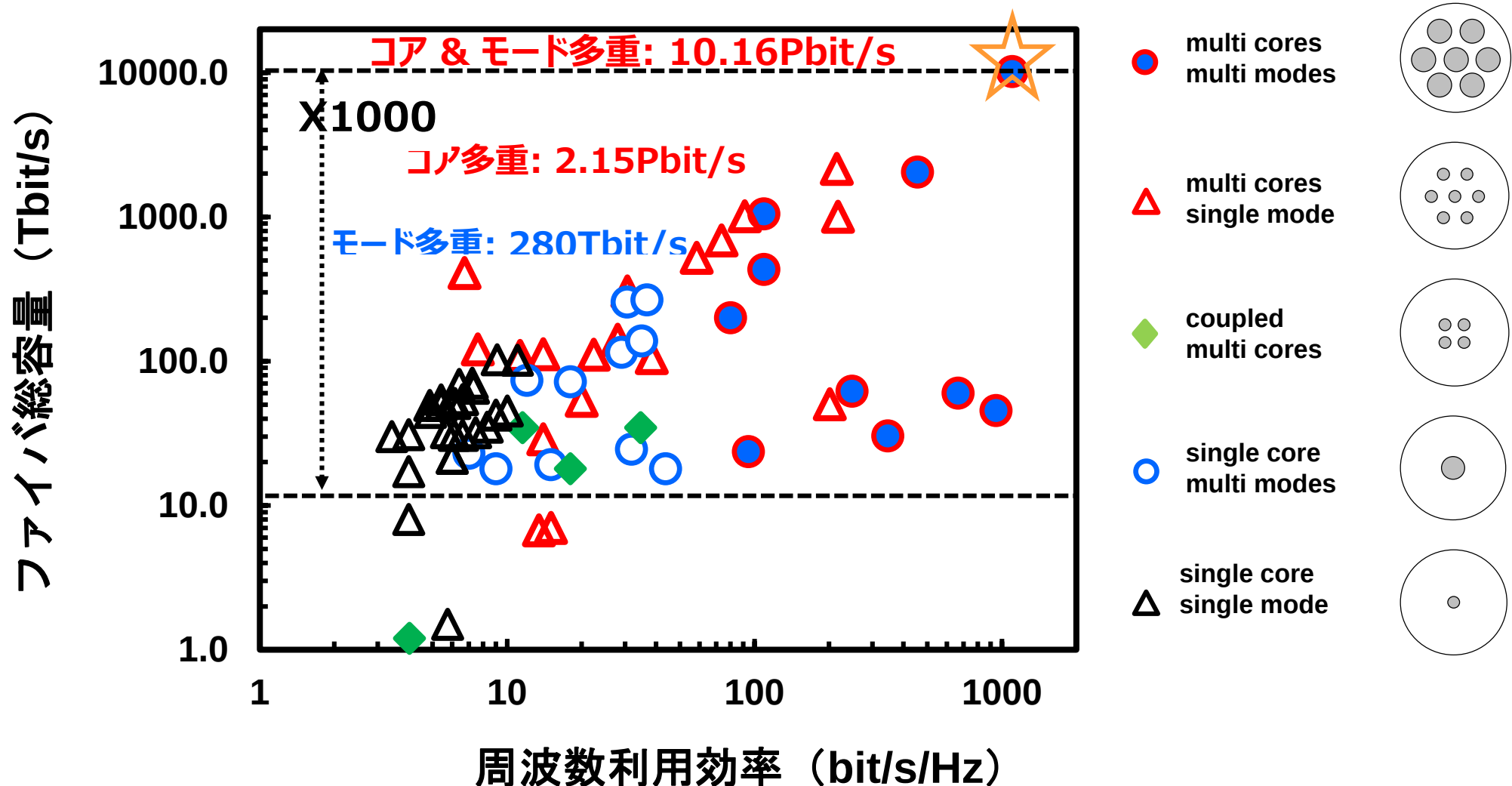
D. Soma et al., ECOC2017, PDP.A.1 (KDDI)



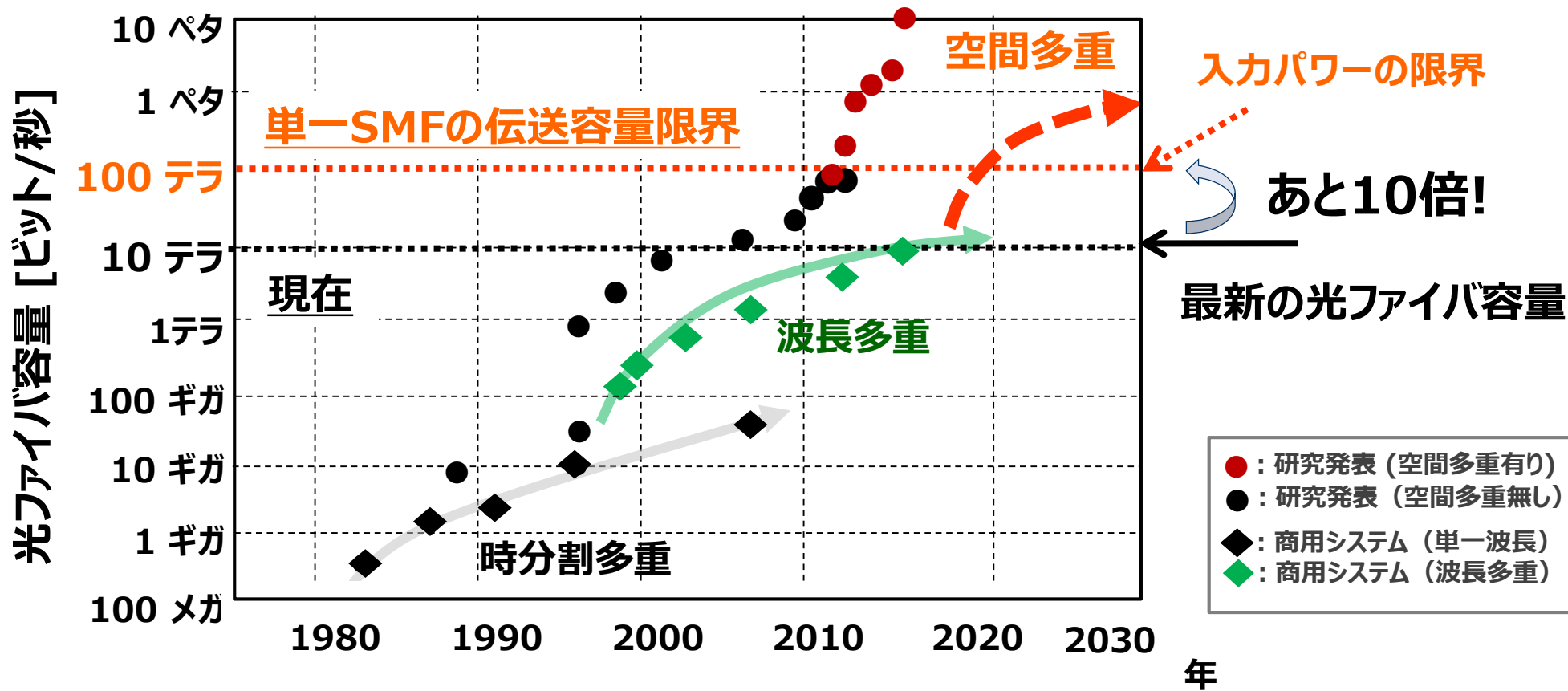
- 8,4246チャネル (739WDM x 114SDM) で良好な伝送特性を確認
- 総容量: 10.16 Pbit/s、周波数利用効率: 1.1Kbit/s/Hz

総容量 vs 周波数利用効率

- 総容量 : 10.16 Pbit/s (19コア,6モード), KDDI (ECOC2017)
- 周波数利用効率: 1099.9bit/s/Hz (19コア,6モード), KDDI (ECOC2017)



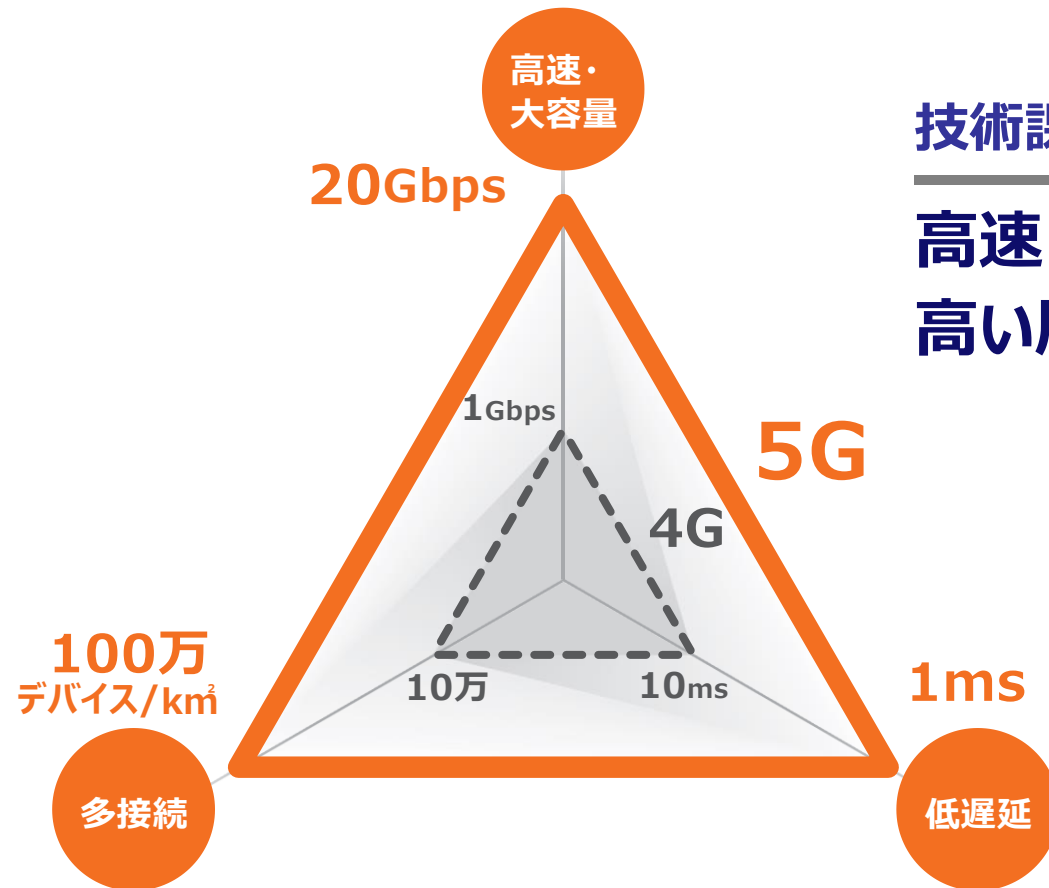
既存の光ファイバの物理的限界を超えて



1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

5Gの技術課題

高速・大容量、低遅延、多接続など多様な要件を一つのNWで実現



技術課題 1

高速・大容量実現のための
高い周波数帯の活用



技術課題 2

多様なサービスを
一つのNWに収容できる
アーキテクチャの実現



利用シーン開拓のための実証実験

5Gを活用した様々な実証実験により利用シーンを開拓



多数の端末への
映像配信

〔沖縄県〕



高精細映像による
建機の遠隔操作

〔埼玉県〕



移動環境での
8K映像中継

〔東京都〕



カメラやウェアラブル端末
によるデータ中継

〔東京都〕

関連技術の開拓

ライフスタイル変革につながる技術開発を推進

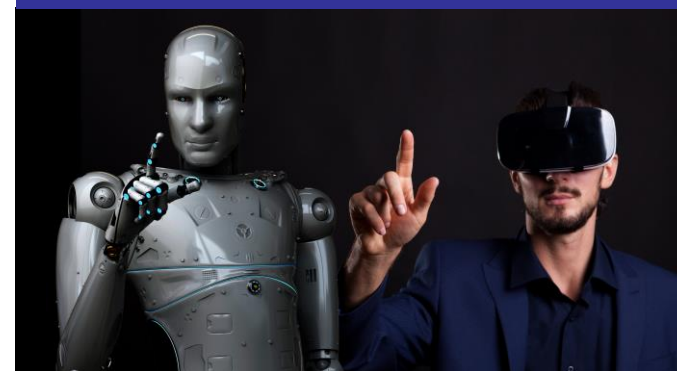
コネクティッドカー



自由視点VR



トレイグジスタンス



音のVR



配車支援システム



空飛ぶ基地局



SYNC DINNER

超臨場感通信 テレプレゼンス



8K超高精細映像



遠く離れたふたりの心が近づくディナー

In this restaurant, two distant hearts will be connected together...

東京と大阪。クリスマスイブの夜、
会いたくても会えない人たちのために。

400kmの距離を1つのテーブルでつなぐ特別なレストランが
12月24日にだけオープンします。

TOKYO $\longleftrightarrow$ OSAKA

For couples set apart between Tokyo and Osaka on Christmas Eve...
A special restaurant will connect the two remote cities
across a single dining table.



1. 通信技術の変遷
2. 光通信システムの進化
3. 近未来のサービス
4. 未知（月と深海）への挑戦
5. まとめ

XPRIZEとは

- 1995年に設立された米国の非営利組織である「Xプライズ財団」によって運営され、人類の抱える課題を解決することを目的とした賞金付き世界コンペティション。
- 1996 : アンサリXprize (人を乗せて宇宙を目指す (2週間以内に2回))
- 2007 : Luna Xprize (月探査)
- 2015 : Ocean Discovery Xprize (石油探査、深海探査)
- 2018 : ANA アバターXprize (分身ロボット遠隔制御)

Google
LUNAR

XPRIZE®

宇宙 (月)

Shell
OCEAN DISCOVERY

XPRIZE®

深海

宇宙への挑戦

au  HAKUTO

MOON
CHALLENGE

◆「Google Lunar XPRIZE」

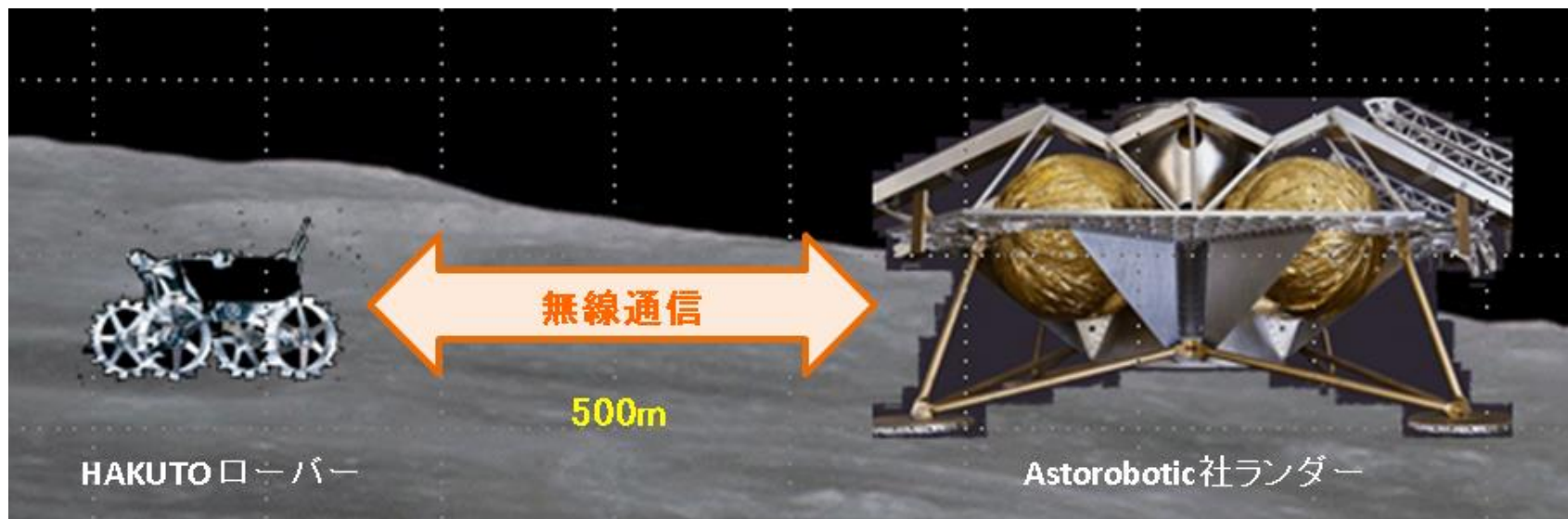
- ①ローバーを500m以上走行させ、
- ②ローバーに搭載されたカメラで撮影した月面の動画や静止画データを地球に送信
- ・最初にミッションクリアしたチームに2千万ドルの賞金（期限2017年末）

◆「au x HAKUTO」概要

KDDIが民間月面探査チーム「HAKUTO」とオフィシャルパートナー契約締結し、世界初の民間による月面探査レース「Google Lunar XPRIZE」の挑戦を発表。研究所から通信技術をサポート中

◆サポート技術概要

- ①無線通信技術：月面通信に最適なアンテナ設計（月面での反射、障害物の影響回避）
- ②画像伝送技術：月面、月・地球間（38万 km）での、伝送エラー対策や月面特徴に最適な圧縮伝送制御



深海への挑戦

Shell Ocean Discovery XPRIZEへの挑戦



Shell
OCEAN DISCOVERY XPRIZE®

Shell Ocean Discovery XPRIZEとは

- 賞金総額 \$7 million
- ミッション
支援母船なし、水中ロボットシステムのみ、無人オペレーション
 - **ROUND1** : 水深 2,000mで 16時間以内に
100km²以上の海底地形マップ構築、海底ターゲットの写真撮影 (5枚)
 - **ROUND2** : 水深 4,000mで 24時間以内に
250km²以上の海底地形マップ構築、海底ターゲットの写真撮影 (10枚)
- スケジュール
 - 2017年11月～2018年1月 ROUND 1 参加19チーム
日本からは**Team KUROSHIO**が参加
 - 2018年3月7日 Team KUROSHIO ROUND2出場決定
全世界から8チームが出場
 - 2018年12月 Round2競技実施 (場所 : ギリシャカラマダ沖)



海中はどんな環境？

■ 高圧環境

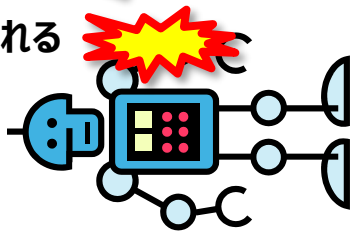
10m潜る毎に1気圧の圧力が
増加

つまり、1,000m潜ると...

ハイヒール：
断面積(1cm²) 力士：
100kg



踏まれる

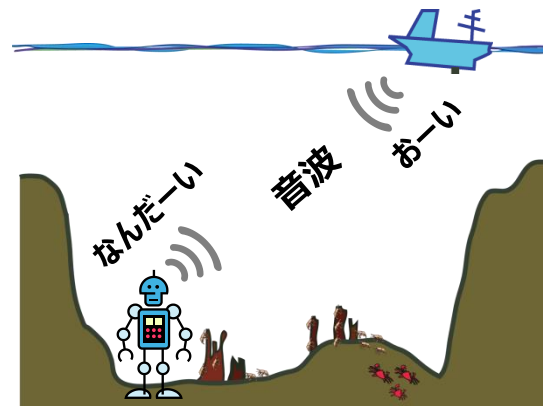


■ 電波が使えない環境

電波が使えない

↳ { ・GPSが使えない
・無線LANが使えない

※通信や位置計測が非常に難しい



通信、測位は音波のみ

■ 日光が届かない環境

日光



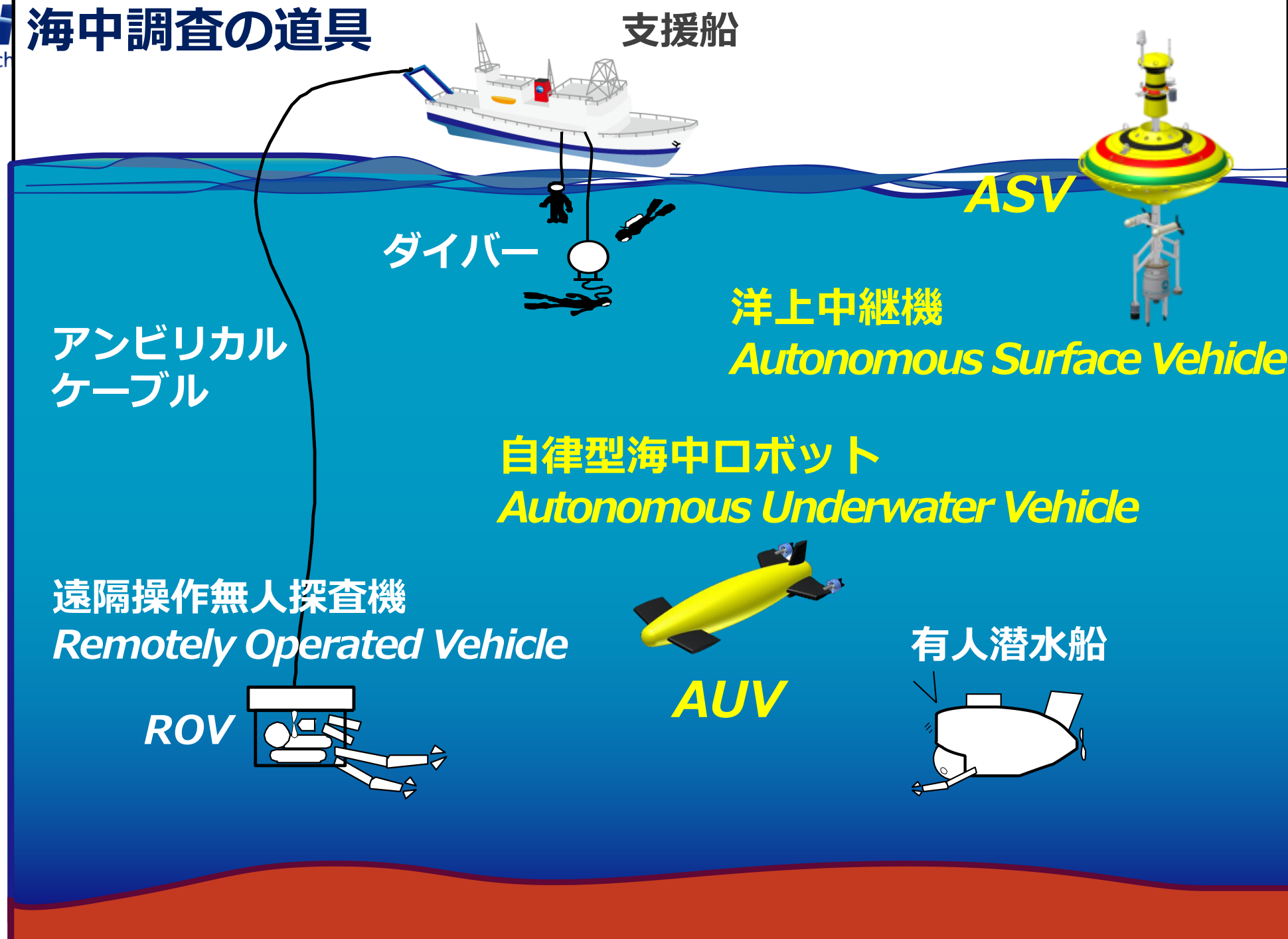
約200mまでしか
届かない



広範囲を照明するのは難しい

海中ロボットは、陸上のロボットに比べ過酷な環境

支援船



Round1で使ったAUV/ASV

AUV “AE2000a”、“AE2000f”、“航行型2号機”およびASV “ORCA”を用いてRound1に挑戦

AUV “AE2000a”



2000年：KDDIが海底ケーブル調査用に開発。2012年：東大に移管し、海底資源調査に活躍中

東京大学生産技術研究所

AUV “AE2000f”



東京大学生産技術研究所

ASV “洋上中継器”



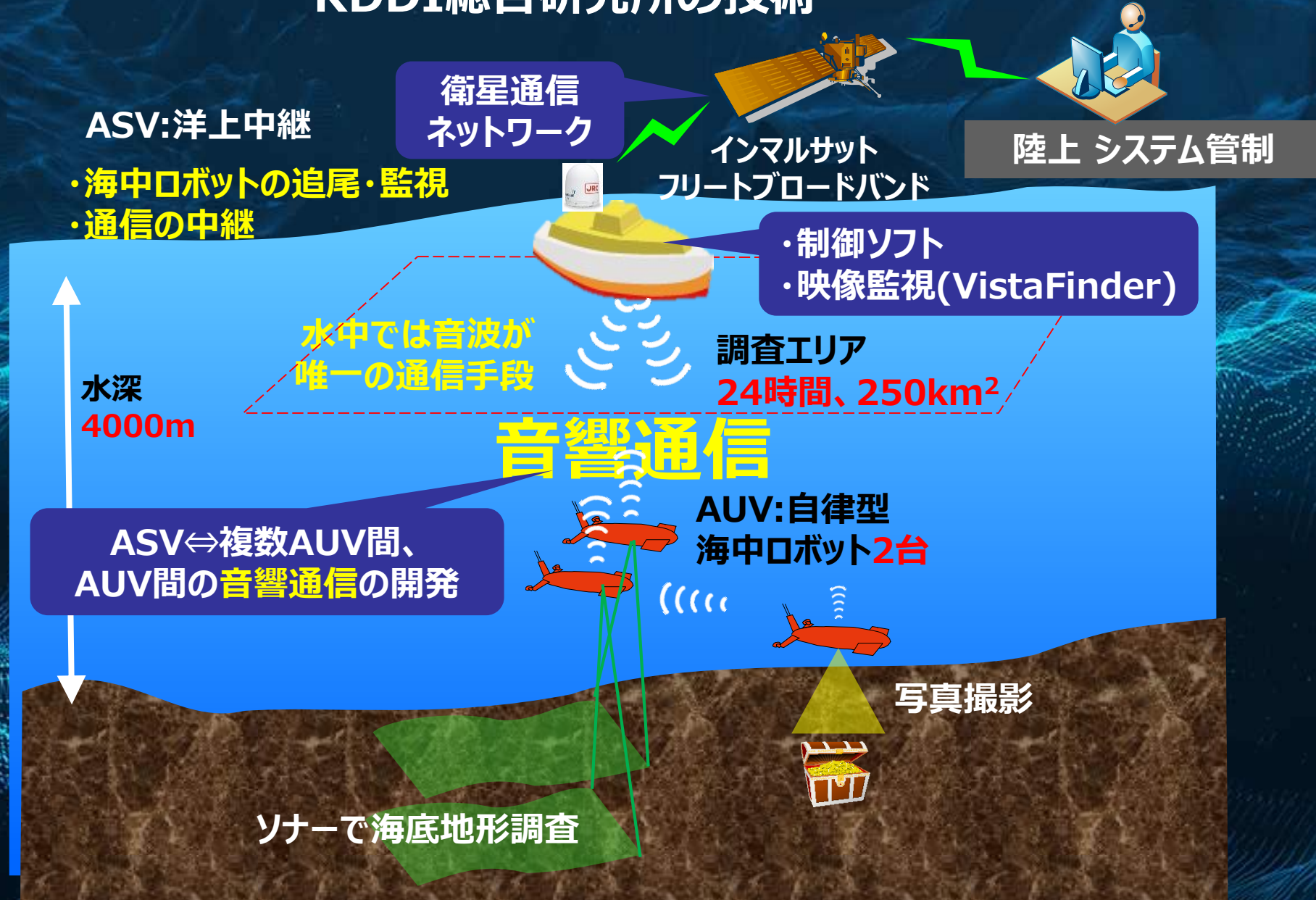
三井造船株式会社

AUV “航行型2号機”



海上技術安全研究所

電波も光も届かない深海での通信 KDDI総合研究所の技術



まとめ

- 1850年から現在、そして、未来への通信技術の変遷や、近未来のサービス、海、宇宙への挑戦事例を紹介しました
- 通信基盤である光技術として、光ソリトン、光海底ケーブル、光空間多重技術を紹介し、光通信にも「京」の時代が到来することを紹介しました
- 新サービスとして、次世代モバイル通信技術「5G」に係わる実証試験を紹介するとともに、月と深海への挑戦事例を紹介しました
- 通信はすでに、私たちの生活にはなくてはならない社会インフラとなっています
- 将来も、ますます、ICTの重要性は増大します。世界中の皆様に笑顔を届けるため、これからも革新的通信技術へ挑戦し続けます

ご清聴ありがとうございました。

