Nov. 20, 2015 and Jan 29, 2016

電気電子基礎学「集積回路分野」

1. 進化する集積回路技術
2. 変貌する通信技術における集積回路技術

Kazuya Masu
ICE Cube Center
Frontier Research Center
Precision
Dept. Ele
Tokyo Ins

益　一　哉
異種機能集積研究センター
フロンティア研究機構
学研究所
創造専攻
工業大学

一部資料はマスキングされてます。
講義受講者は、OCWiを参照下さい。

Tel & Fax: 045-924-5010 Email: masu.k.aa@m.titech.ac.jp,
http://masu-www.pi.titech.ac.jp/~masu/index-j.html

Green ICE Tokyo Tech Information Communication Energy
Semiconductor Solution Research

TOKYO TECH Pursuing Excellence

Outline

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

1. はじめに
2. 周波数利用
3. LSIと通信技術

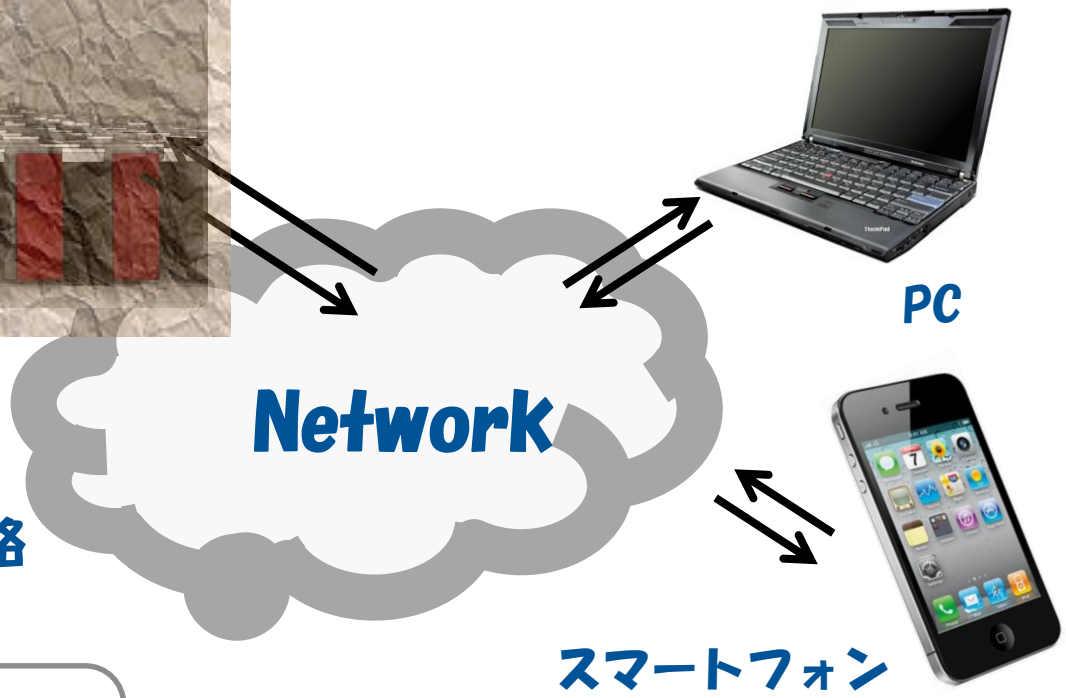
これからを考える。

TOKYO TECH Pursuing Excellence

シリコン屋の視点

現在

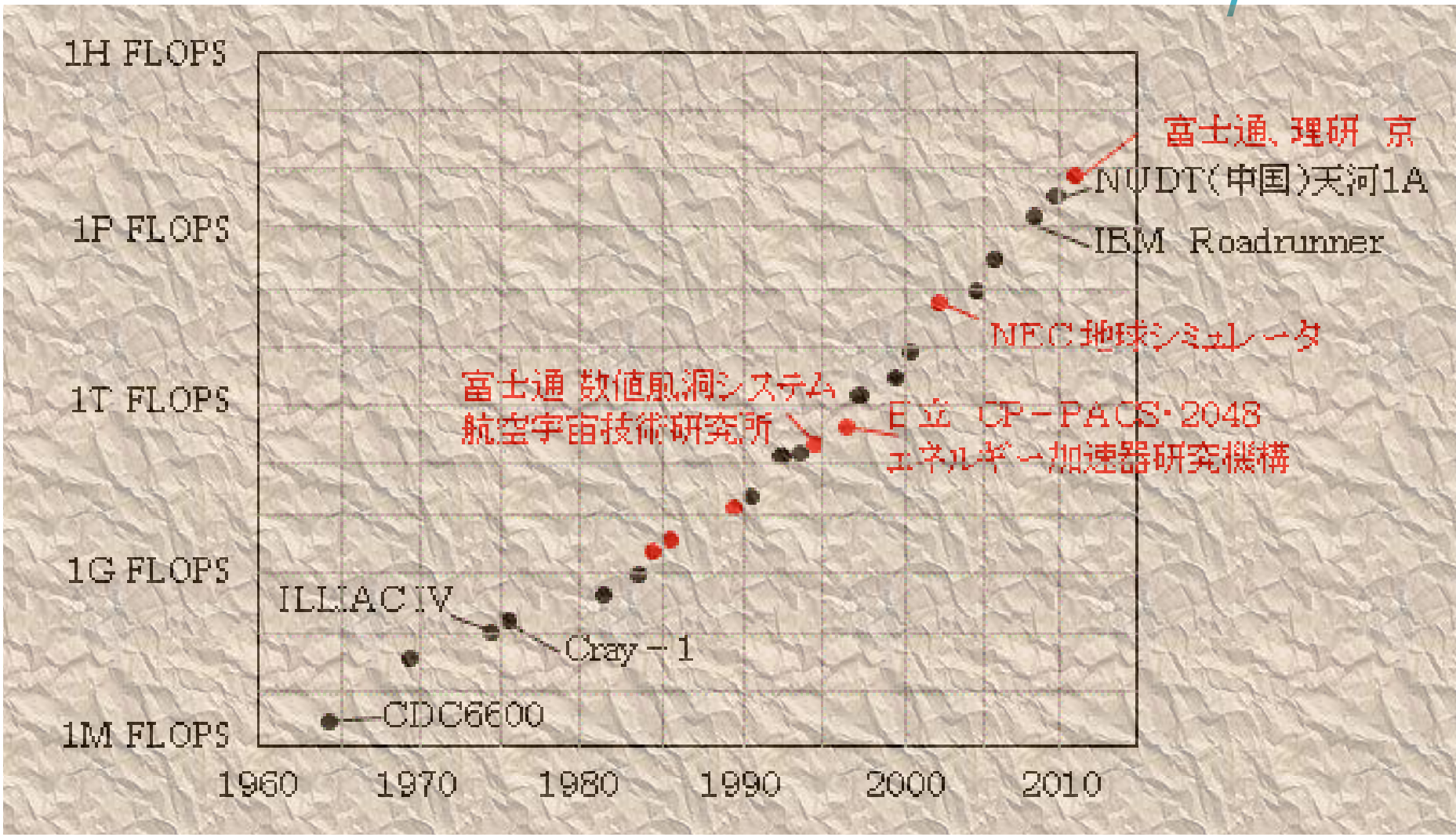
スパコン／サーバー



ハードウエアはシリコン集積回路

- シリコンは進化するのか？
- ネットワークは？

Supercomputer



http://www.kogures.com/hitoshi/history/super-computer/index.html

接頭辞

TOKYO TECH Pursuing Excellence

10^{24}	ヨタ (yotta)	一秭
10^{21}	ゼタ (zetta)	十垓
10^{18}	エクサ (exa)	百京
10^{15}	ペタ (peta)	千兆
10^{12}	テラ (tera)	一兆
10^{9}	ギガ (giga)	十億
10^{6}	メガ (mega)	百万
10^{3}	キロ (kilo)	千
10^{2}	ヘクト (hecto)	百
10^{1}	デカ (deca, deka)	十

10^{-1}	デシ (deci)	分
10^{-2}	センチ (centi)	厘
10^{-3}	ミリ (milli)	毛
10^{-6}	マイクロ (micro)	微
10^{-9}	ナノ (nano)	塵
10^{-12}	ピコ (pico)	漠
10^{-15}	フェムト (femto)	須臾
10^{-18}	アト (atto)	刹那
10^{-21}	ゼプト (zepto)	清浄
10^{-24}	ヨクト (yocto)	涅槃寂静

京 = 10 peta

今の製品と20年前の製品

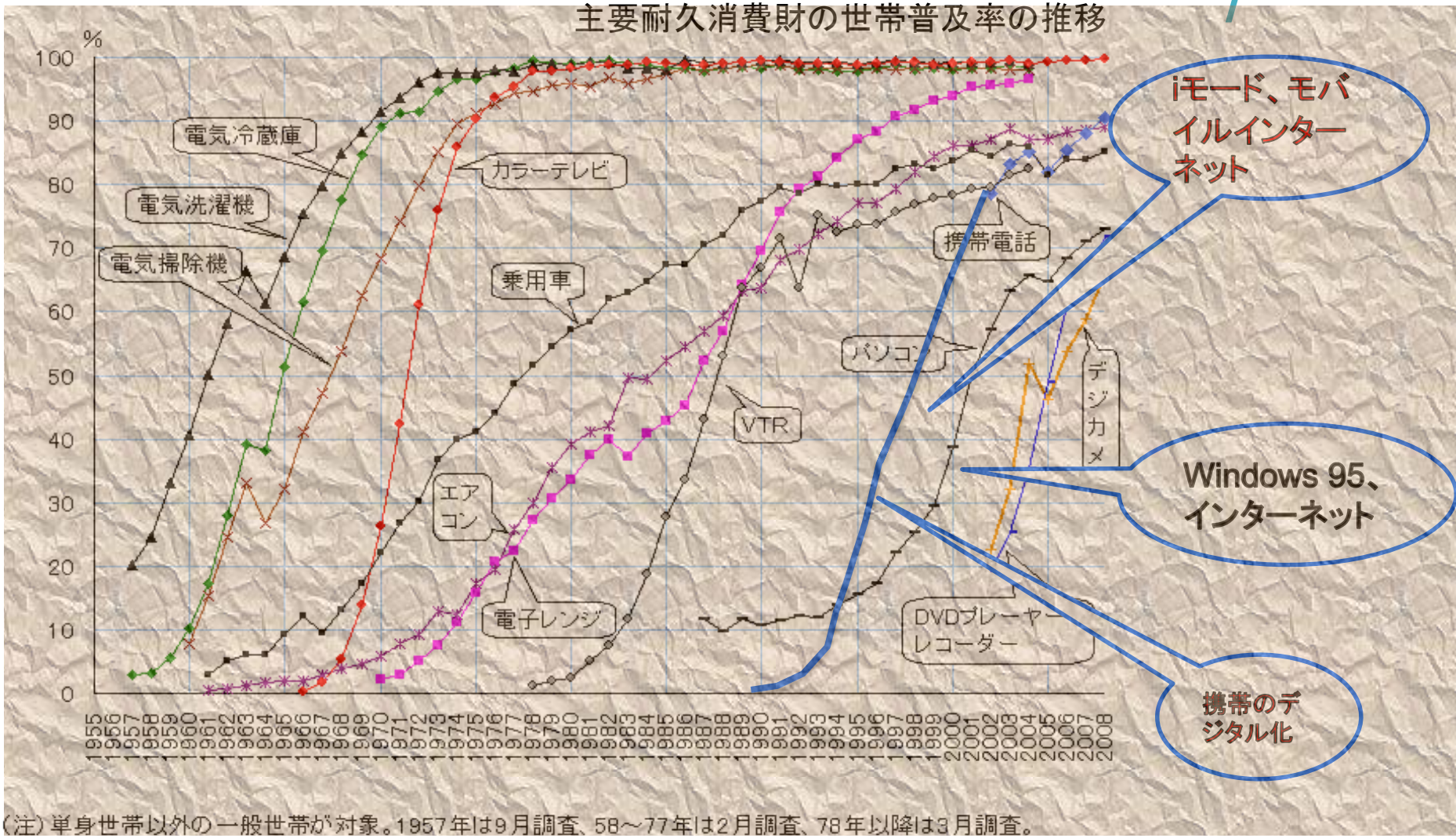
TOKYO TECH
Pursuing Excellence

現製品	20年前の製品	前世代の産業	何が どう変わったか	これからどうなるか
携帯電話	家の黒電話	電電公社	家庭から個人へ、無線に、TV付き	スマートフォンになるかも
iPhone(スマートフォン)	電子手帳(Zaurus)	家電メーカー	通信との融合	
パソコン	ブラウン管デスクトップ	コンピュータメーカー	液晶へ、ノートブックへ	スマートブックへ
テレビ	ブラウン管据え置き型	家電メーカー	LCDやプラズマに	本当の壁掛けへ
デジカメ	機械式カメラ	精密機械メーカー	失敗できる、アルバム不要	笑顔しか写さない、etc
MP3プレイヤー	Walkman MD/CDプレイヤー	家電メーカー	超小型、ポケットへ、1万曲etc	イヤフォン線なし、ビデオプレイヤー
ICレコーダー	テープレコーダー	家電メーカー	ランダムアクセス、テープ不要	MP3との一体化、
BluRayレコーダー	VTR	家電メーカー	ランダムアクセス、ディスク	ダウンローダブルか、HDDに
ファックス・プリンタ	オフィス機器サイズ	精密機器メーカー	インク技術の進展、	より複合機へ
クルマ(ﾊﾟﾜｳｨﾝﾄﾞｳ、LED、ﾊﾞｯｸﾓﾆﾀｰ、ｶｰﾅﾋﾞ)	手動式・	自動車メーカー	燃費・安全性・快適性向上	電気自動車、ﾌﾟﾗｸﾞｲﾝﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞへ

Courtesy of Kenji Tsuda, SemiconPortral, 2009
And revised partially by K. Masu

産業としての携帯電話

主要耐久消費財の世帯普及率の推移



（注）単身世帯以外の一般世帯が対象。1957年は9月調査、58～77年は2月調査、78年以降は3月調査。
05年より調査品目変更。デジカメは05年よりカメラ付き携帯を含まず。
（資料）内閣府「消費動向調査」　携帯電話の数値はTCA調査値を追加

佐相秀幸氏（富士通）の好意による

http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/shouhi.html

無線通信（一般には）

TOKYO TECH Pursuing Excellence

- 無線通信
  - Wireless communication
  - Radio communication
- 信号が伝わる経路(伝送路)として電信線等を使わない(自由空間を伝送路とする)電気通信。
- 一般には、電波(空間波)を用いる"Radio Communication"。広義には、赤外線・可視光線等(レーザー等)を用いた光通信、音波または超音波を用いた音響通信も含む。

携帯電話の進化

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

- 通信手段(電話)から、なくてはならないモノへ変化
  - 電話機能
  - メイル
  - カメラ（写真の概念も変えた？）
  - インターネット接続
  - おサイフ携帯
  - ワンセグTV
  - 音楽、GPS, wireless earphone ・・・・
- 一人一台。

貨幣やクレジットカードが産まれたとき、
人はこれらが必需品になると思っただろうか？

Symbiotic
Symbiosis

Outline

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

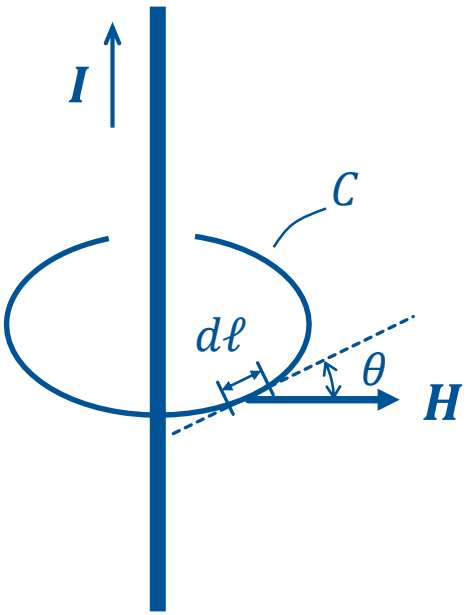
1. はじめに
2. 周波数利用
   - 電磁気学のさわり
   - 通信回路のさわり
3. LSIと通信技術

Ampere's circuital law（アンペアの法則）

Ampereの周回積分の法則

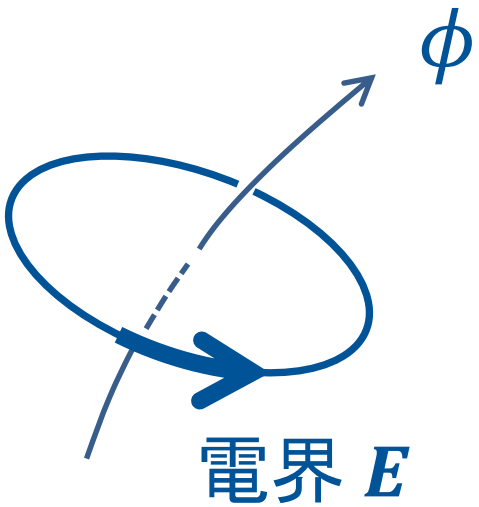
- 任意の閉曲線 c に沿う磁界 $\boldsymbol{H}$ の周回積分は、c と鎖交する電流 $\boldsymbol{I}_i$ の代数和に等しい。

$$\oint_C \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \sum \boldsymbol{I}_i$$



Faradayの電磁誘導の法則

- ある回路に鎖交する磁束 ϕ が時間的に変化すると、その変化を妨げる方向に逆起電力 e が発生する。
- 起電力



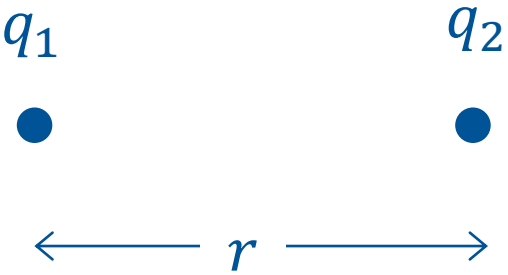
$$e = \oint_C \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s} = -\frac{d}{dt}\int_S B_n dS = -\frac{d\phi}{dt}$$

（回路に動きがなく、磁束電界 $\boldsymbol{B}$ が変化するとき）

Coulombの法則

- 静止している電荷q_1, q_2に働く力F

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{q_1 q_2}{r}$$

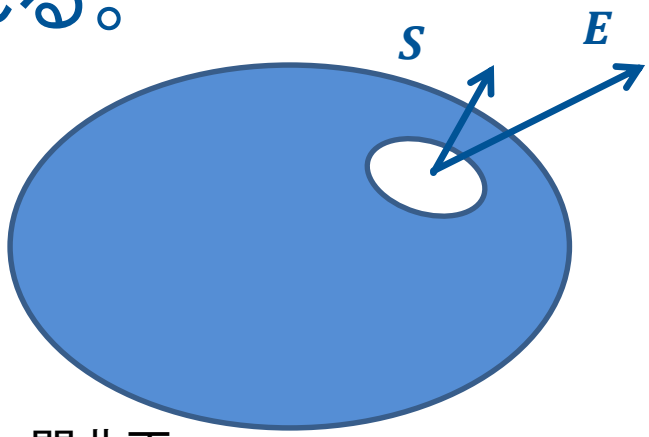


- これを元に、閉曲面S上の電界Eの面積分は次式で表されることが導かれる。

$$\int_S \varepsilon \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{S} = \sum Q_i$$

$\sum Q_i$ は、閉曲面内の電荷の総和

$\boldsymbol{S}$ は法線ベクトル



閉曲面

Maxwell's equations

TOKYO TECH Pursuing Excellence

	積分形	微分形
アンペアの法則	$\oint_C \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = I$	$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{i_c} + \epsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$
ファラデーの法則	$\oint_C \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$	$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t}$
ガウスの法則（電界）	$\int_S \boldsymbol{D} \cdot d\boldsymbol{S} = \sum Q_i$	$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$
ガウスの法則（磁界）	$\int_S \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$	$\nabla \cdot \boldsymbol{H} = 0$

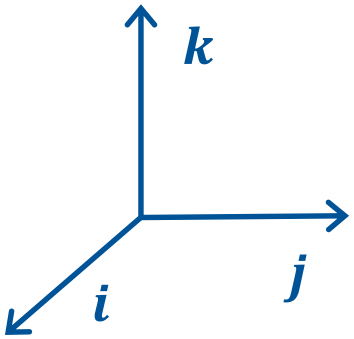
$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H}$　$\boldsymbol{B}$:磁場　$\boldsymbol{H}$:磁界　μ :透磁率

$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E}$　$\boldsymbol{D}$:電束密度　$\boldsymbol{E}$: 電界　ϵ :誘電率

ベクトル

- ベクトル　$\boldsymbol{E} = E_x\,\boldsymbol{i} + E_y\,\boldsymbol{j} + E_z\,\boldsymbol{k}$

単位ベクトル



- ベクトルの内積、外積

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B} = A_xB_x + A_yB_y + A_zB_z$$

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

- 微分演算子　$\nabla = \boldsymbol{i}\dfrac{\partial}{\partial x} + \boldsymbol{j}\dfrac{\partial}{\partial y} + \boldsymbol{k}\dfrac{\partial}{\partial z}$

ベクトル

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \left(\boldsymbol{i}\frac{\partial}{\partial x} + \boldsymbol{j}\frac{\partial}{\partial y} + \boldsymbol{k}\frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \left(E_x\,\boldsymbol{i} + E_y\,\boldsymbol{j} + E_z\,\boldsymbol{k} \right)$$

$$= \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$

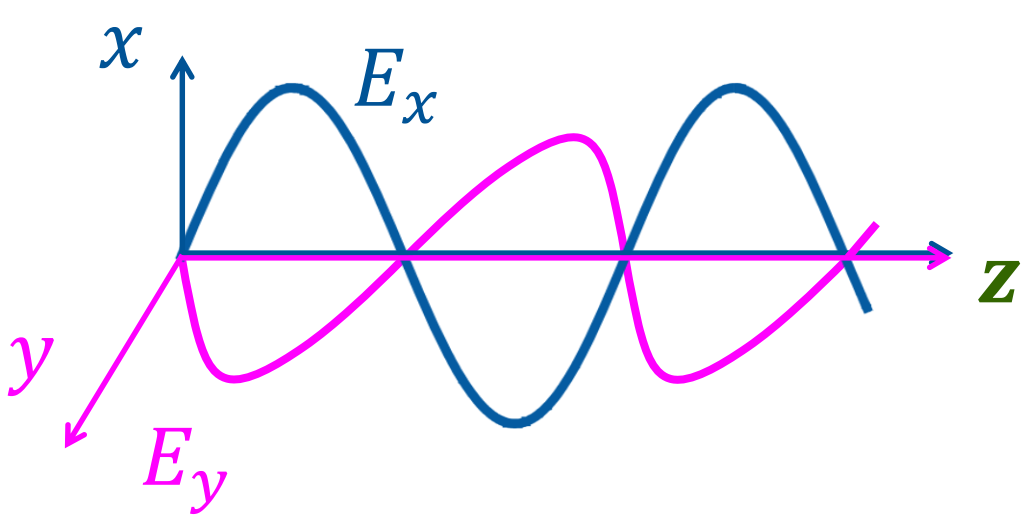
$$= \boldsymbol{i}\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) + \boldsymbol{j}\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) + \boldsymbol{k}\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right)$$

電磁波

- Maxwellの方程式から波動方程式が得られる。

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}, \qquad \nabla^2 \boldsymbol{H} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial t^2}$$

$$c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$$



Poynting vector

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}$$

電磁気学

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

- 電磁気学の講義は、Maxwellの方程式を導き、波動方程式を示すことで導き出すことで大団円を迎える。
- 折角、電磁気を勉強するときには下記のことも勉強してみて下さい。（何故か、電気系学生の学ぶ電磁気の教科書には言及されていない）

- Maxwellの方程式から導かれる波動（電磁波）に光も含まれるのは何故か？
- Maxwellの方程式と特殊相対性理論の関係は？

Maxwellの方程式から言えること。

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

- Maxwellの方程式から言えることは、まとめて見ると、
  1. 電磁波なる波動が存在することを予見する。
  2. 光は、Maxwellの方程式から予見される電磁波である。（正確にはそのひとつである）
  3. 光の速度は一定である。

- ふと立ち戻ってみると、疑問が湧いてくる。
  - 誰が、光がMaxwellの方程式から予見される波動だと言ったのだろう？　或いはどうやって証明したのだろう？
  - Maxwellの方程式から光速度一定が導出できるの？

Maxwellの方程式は何を教えてくれるか(1)

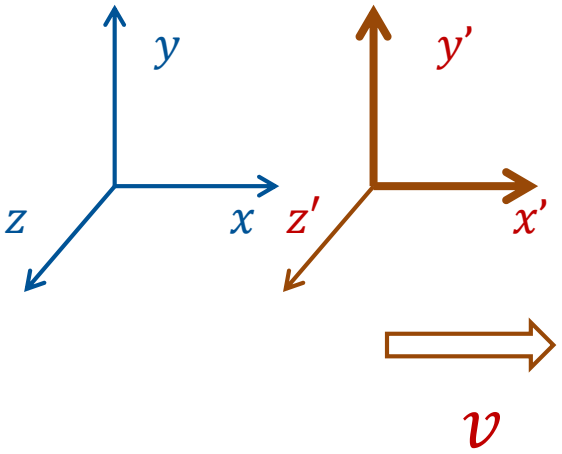
- ところで、Maxwellは、何を根拠に光は電磁波だと言ったのだろうか？
- 電気磁気的な測定から求められていた誘電率、透磁率の値を利用して、Maxwellの方程式から予測される電磁波の速度を計算すると、当時知られていた「光速」に近かった。また、光は横波であると知られていた。
- これらの事実をもって、光はMaxwellの方程式から予測される電磁波であるとした。（少なくともMaxwellはそのように主張した）
- 今に至るまでこれを否定する実験事実はない。従って、Maxwellの方程式から求まる波動に光が含まれる。

Maxwellの方程式は何を教えてくれるか(2)

- Newtonの運動方程式、$m\dfrac{d^2\boldsymbol{r}(t)}{dt^2} = \boldsymbol{F}$
- Galilei変換の元では式が変わらない。共変的（covariant）である。
- Galilei変換

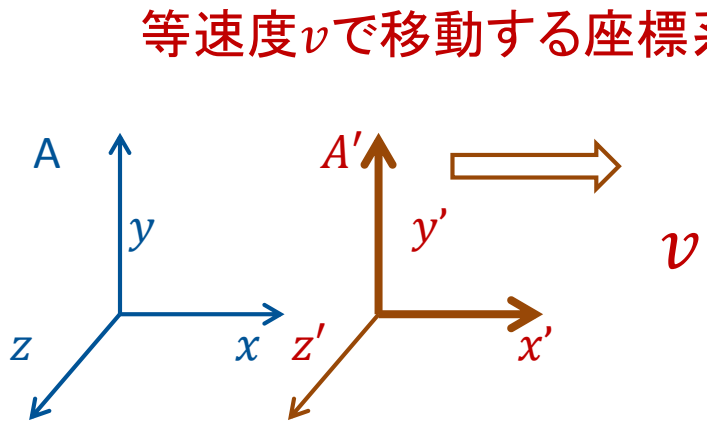
$$x' = x - vt, t = t'$$

等速度vで移動する座標系



Maxwellの方程式は何を教えてくれるか(3)

- Maxwellの方程式が等速運動するA,A'の二つの座標系で共変的(式が変わらない)ためには、座標系に次の関係が要請される。



$$x' = \frac{x - ct}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad y' = y, \qquad z' = z, \qquad t' = \frac{t - \frac{1}{c}\beta x}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- 所謂、Lorentz変換と言われる関係で、光の速度が座標系によってよらないことを要請する関係式である。
- すなわち、Maxwellの方程式から光速度が一定であることが導かれる。

と、ここまで理解できれば電磁気学も面白い！

Maxwellの方程式について

James Clerk Maxwell
(1831年6月13日-1879年11月5日)

- James Clerk Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155, 459–512 (1865). (This article accompanied a December 8, 1864 presentation by Maxwell to the Royal Society.)
- http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/155/459.full.pdf+html （ダウンロードできます）

VIII. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field.* By J. Clerk Maxwell, *F.R.S.*

Received October 27,—Read December 8, 1864.

PART I.—INTRODUCTORY.

(1) The most obvious mechanical phenomenon in electrical and magnetical experiments is the mutual action by which bodies in certain states set each other in motion while still at a sensible distance from each other. The first step, therefore, in reducing these phenomena into scientific form, is to ascertain the magnitude and direction of the force

Maxwellは、「電磁波は光である」と主張

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

as those of WEBER, which expresses the number of electrostatic units of electricity which are contained in one electromagnetic unit.

This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws. If so, the agreement between the elasticity of the medium as calculated from the rapid alternations of luminous vibrations, and as found by the slow processes of electrical experiments, shows how perfect and regular the elastic properties of the medium must be when not encumbered with any matter denser than air. If the same character of the elasticity is retained in dense transparent bodies, it appears that the square of the index of refraction is equal to the product of the specific dielectric capacity and the specific magnetic capacity. Conducting media are shown to absorb such radiations rapidly, and therefore to be generally opaque.

The conception of the propagation of transverse magnetic disturbances to the exclusion of normal ones is distinctly set forth by Professor FARADAY* in his "Thoughts on Ray Vibrations." The electromagnetic theory of light, as proposed by him, is the same in substance as that which I have begun to develope in this paper, except that in 1846 there were no data to calculate the velocity of propagation.

コメント

- 人の言うことをそのまま信じるか？
  - 必ず原典をチェックして、自分の目で確かめる。
  - 論文を信じるか？　自分の頭で考える
  - 要は、鵜呑みにするな。

- 原典にあたる
  - 今の時代インターネットを利用すれば、かなりの情報が手に入る。なんと、Maxwellのオリジナル論文やオリジナル書籍をみること、それも無料で可能

周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴

TOKYO TECH
Excellence

直進性が弱い
情報伝送容量が小さい

直進性が強い
情報伝送容量が大きい

波長	100km	10km	1km	100m	10m	1m	10cm	1cm	1mm	0.1mm
周波数	3kHz	30kHz	300kHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	30GHz	300GHz	3THz

超長波 VLF | 長波 LF | 中波 MF | 短波 HF | 超短波 VHF | 極超短波 UHF | 超高波 SHF | ミリ波 EHF | サブミリ波

長波
船舶・航空機用ビーコン
標準電波

中波
船舶通信
中波放送（AMラジオ）
船舶・航空機用ビーコン
アマチュア無線

短波
船舶・航空機通信
国際短波放送
アマチュア無線

VHF
FM放送
（コミュニティ放送）
TV放送
防災行政無線
消防無線
列車無線
警察無線
簡易無線
航空管制通信
無線呼出
アマチュア無線
コードレス電話

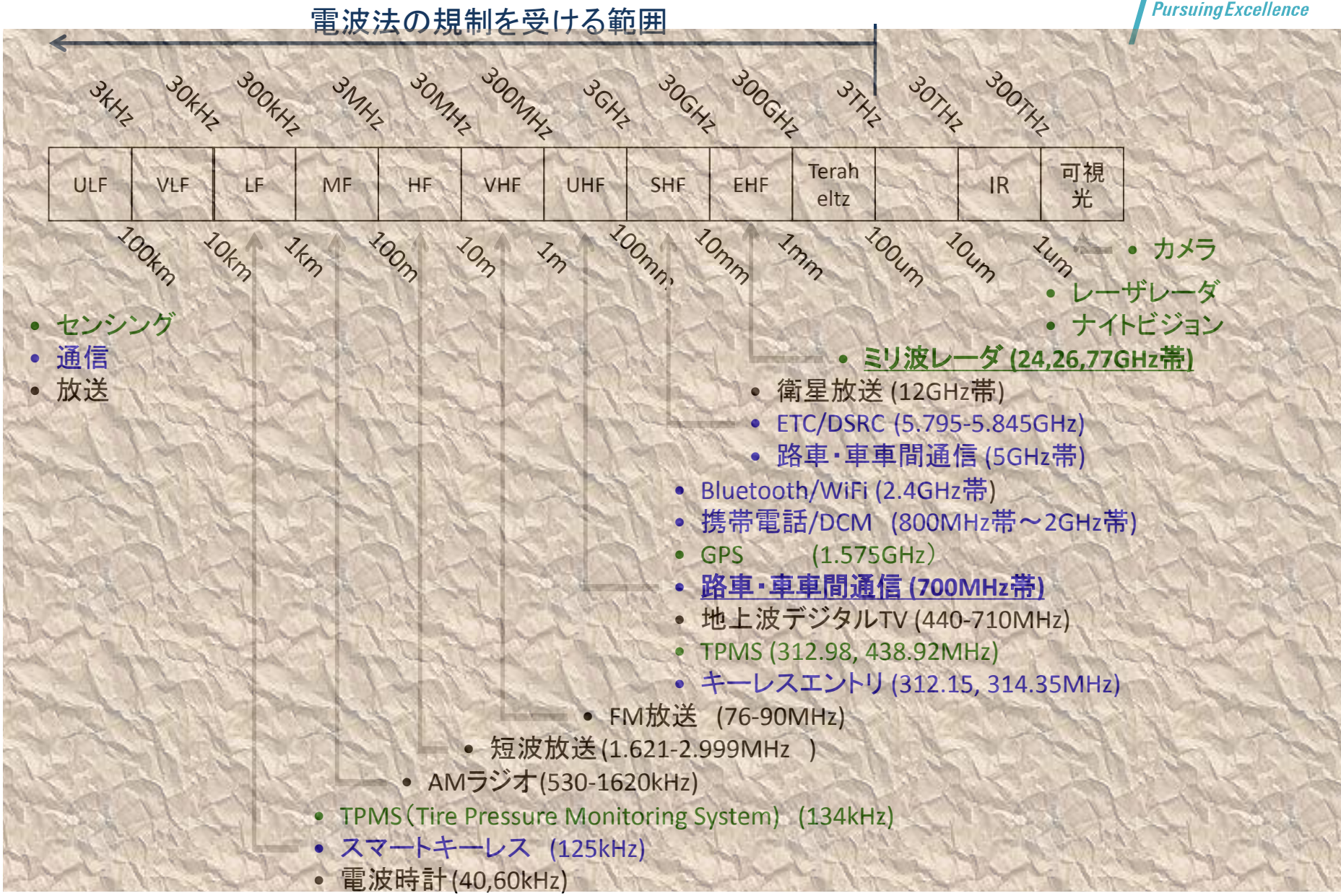
UHF
携帯電話
PHS
MCAシステム
タクシー無線
TV放送
防災行政無線
移動体衛星通信
列車無線
警察無線
簡易無線
レーダー
アマチュア無線
パーソナル無線
無線LAN
コードレス電話
ISM機器

ミリ波
電波天文
衛星通信
簡易無線
加入者系無線アクセス
レーダー

マイクロ波
マイクロ波中継
放送番組中継
衛星通信
衛星放送
レーダー
電波天文・宇宙研究
無線LAN
加入者系無線アクセス
DSRC
ISM機器

http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/index.htm

主な車載無線システムと利用周波数

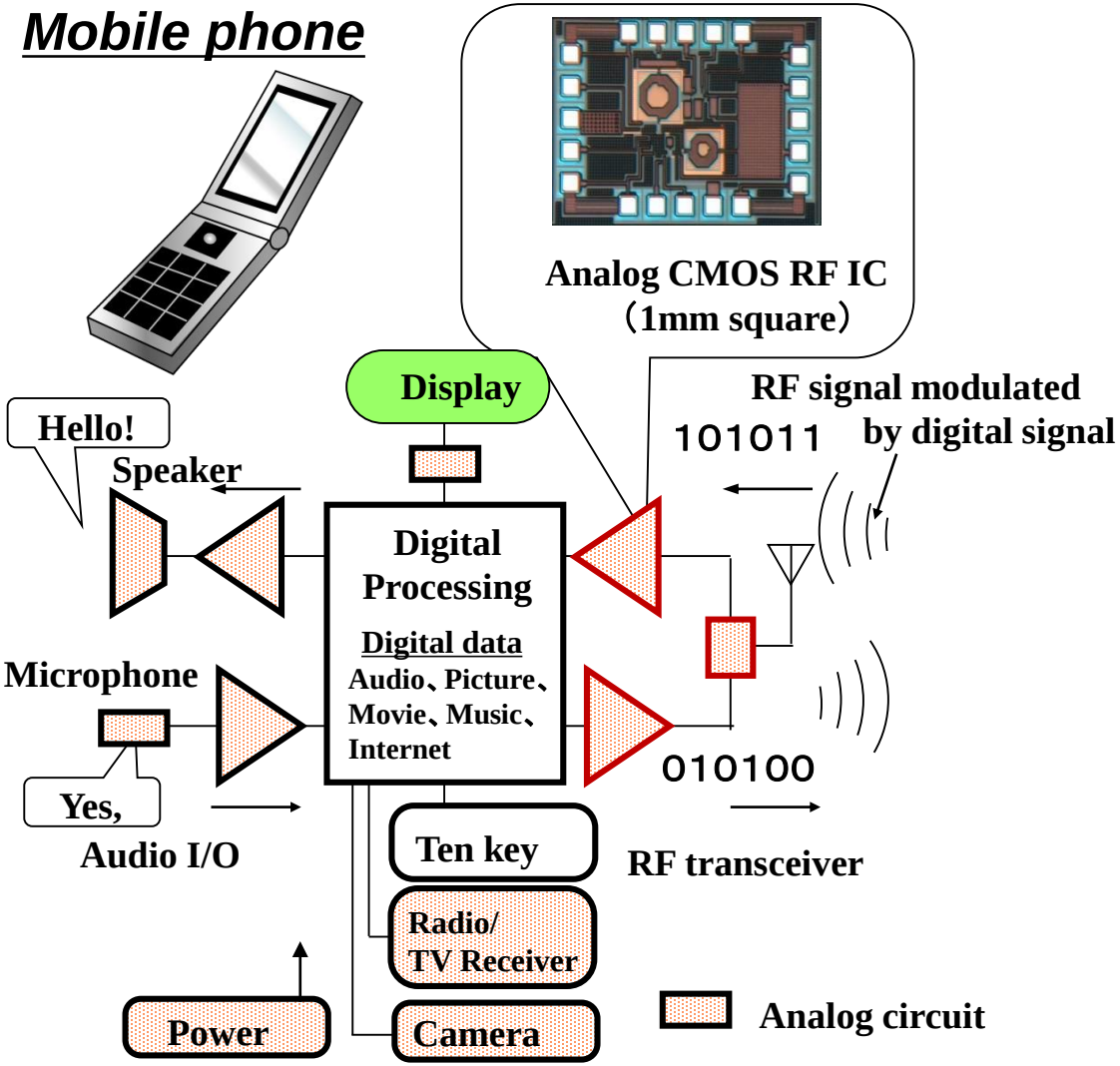


Analog Circuits in High-speed Digital System

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

RF circuit is one of the analog IF in the digital equipment.

Mobile phone



A natural phenomena

Radio wave, Temperature,
Humidity, Pressure, Sound, pH,

Analog front end

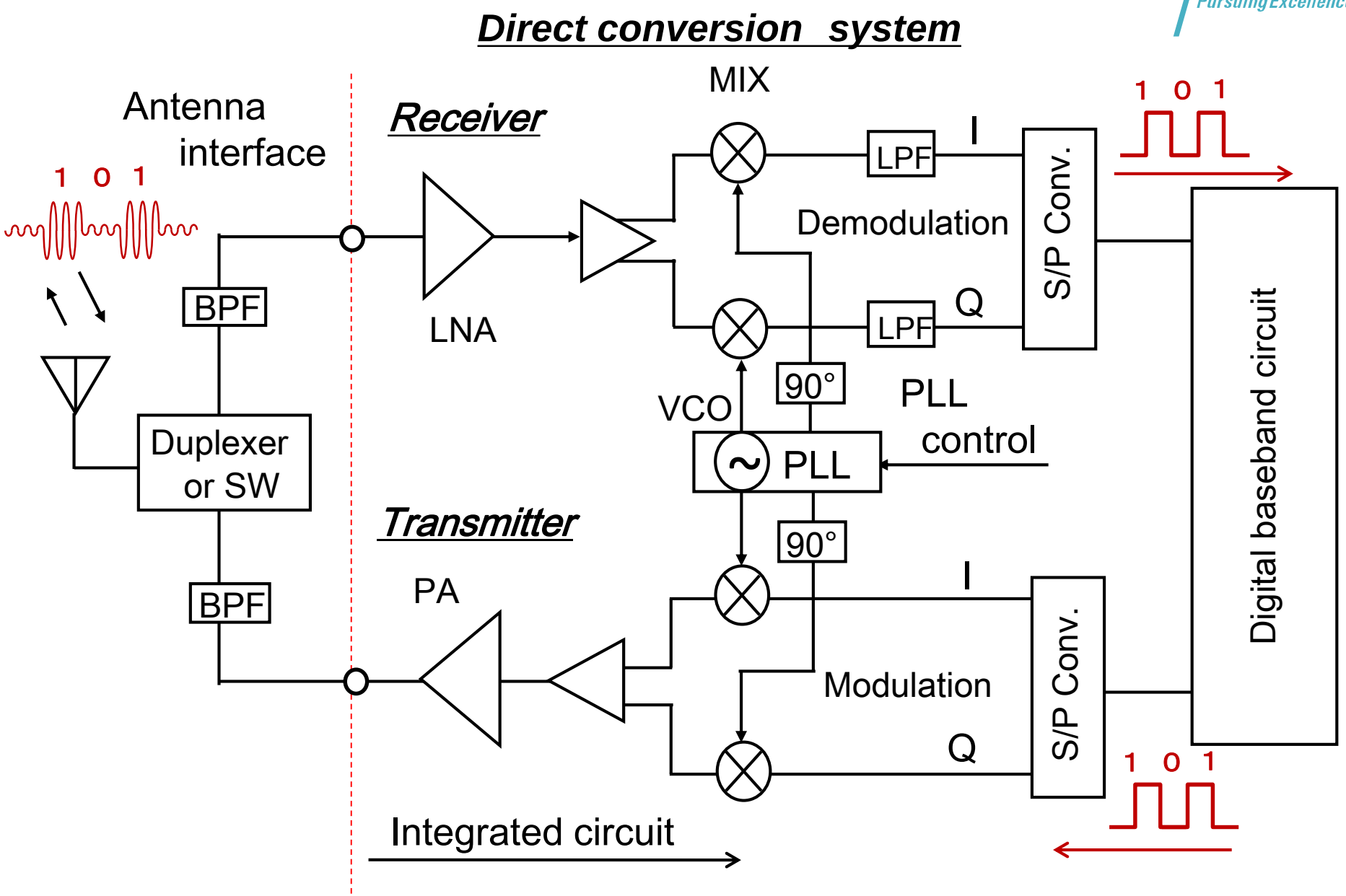
Sensors

Analog Integrated Circuits

Digital processing systems

Communication, Robots,
Home electronics, Cars,
Distribution systems,
Environment monitoring,
Agricultures, Energy

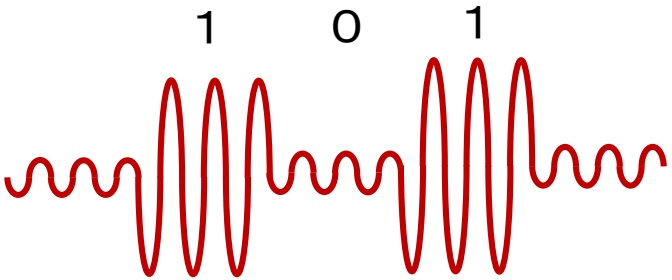
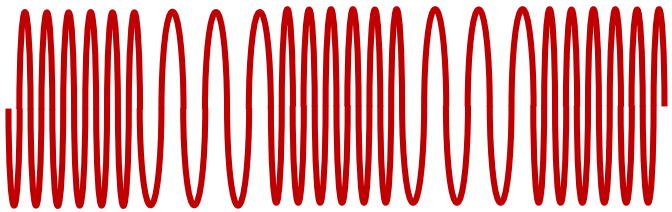
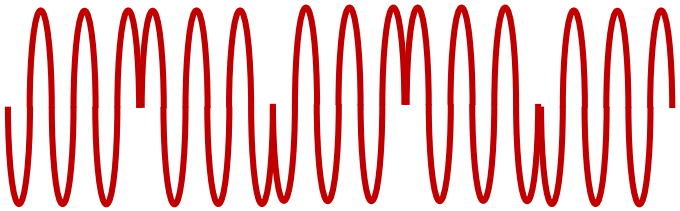
Example of RF interface circuit



RF signal modulation and demodulation

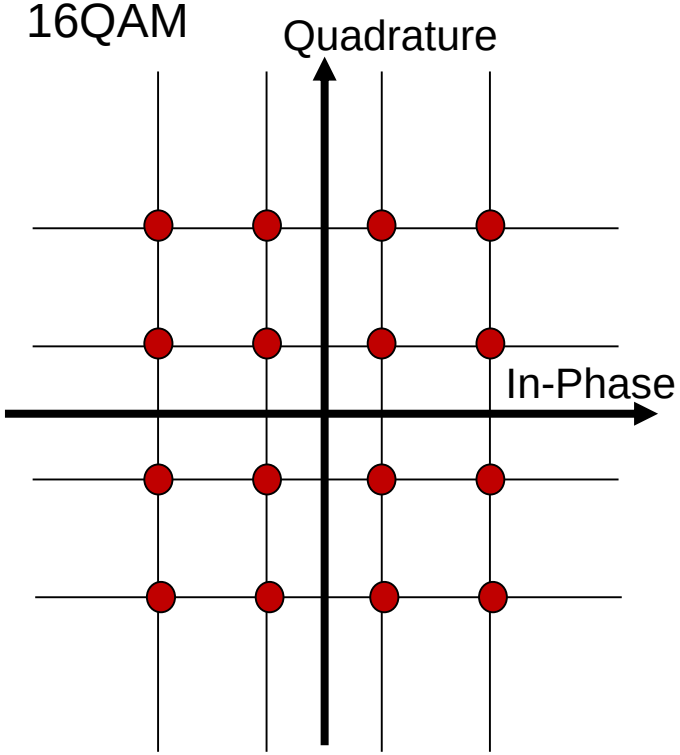
Type of RF signal modulation

$$A \sin(2\pi F \cdot t - P)$$

Amplitude ASK OOK	
Frequency FSK MSK GMSK	
Phase PSK QPSK π/4 shift-QPSK	

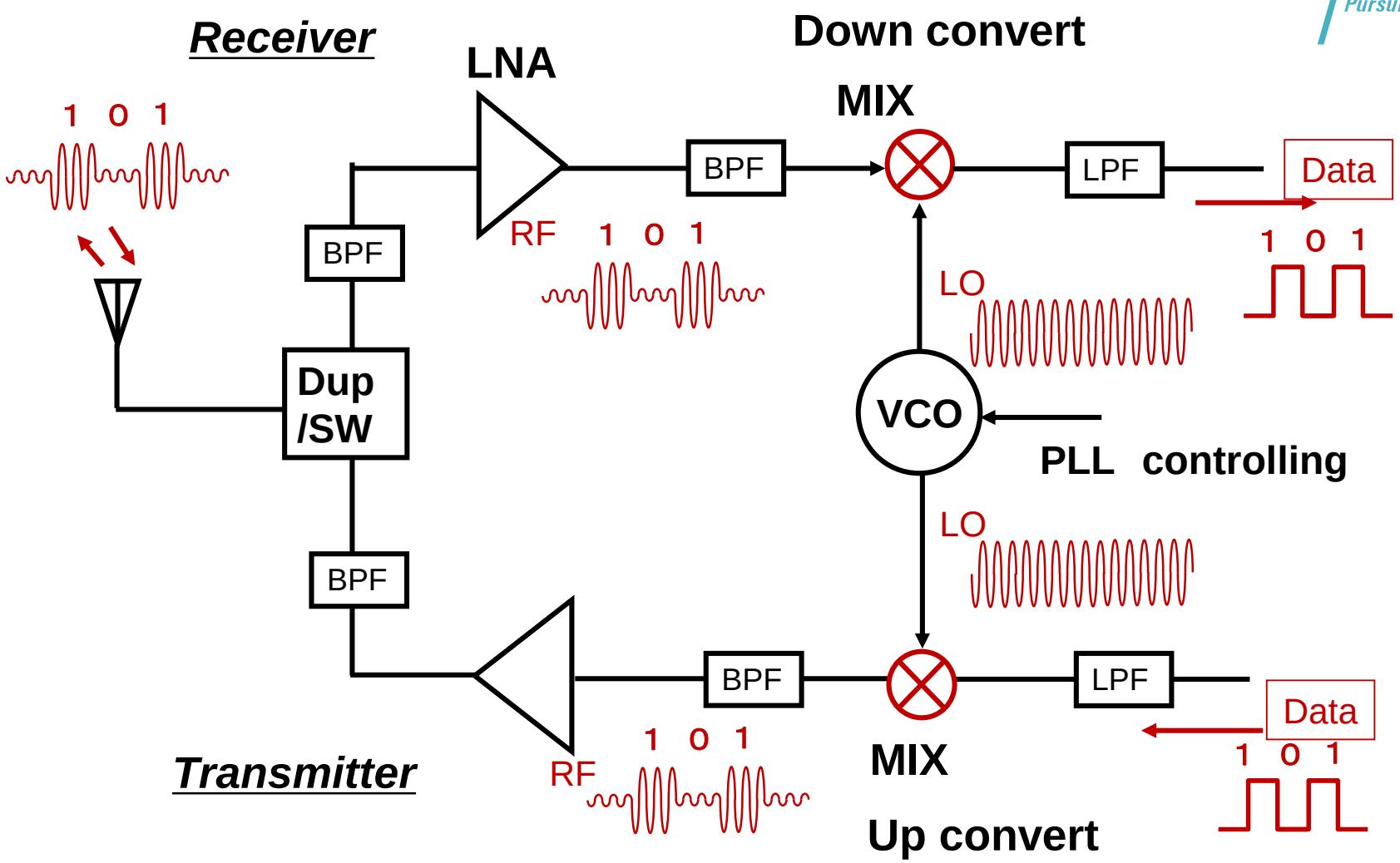
Combination of Amp. And Phas.

16QAM



Constellation

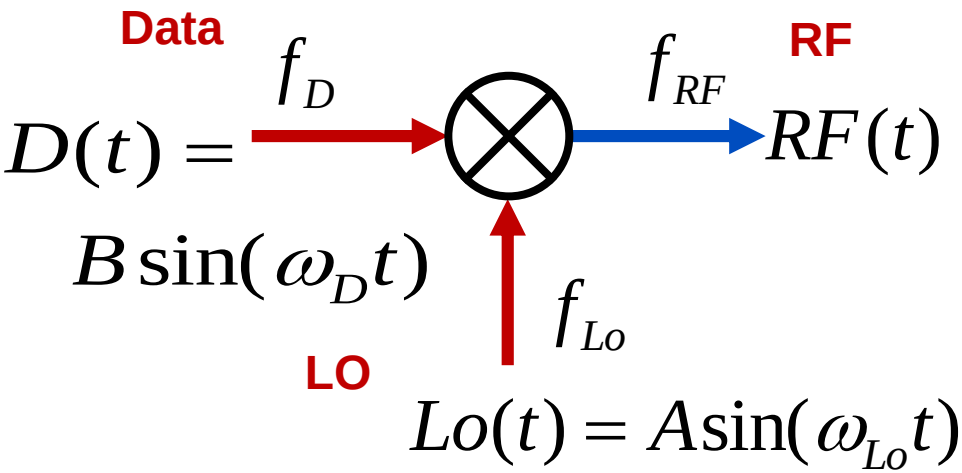
Basic RF interface circuit

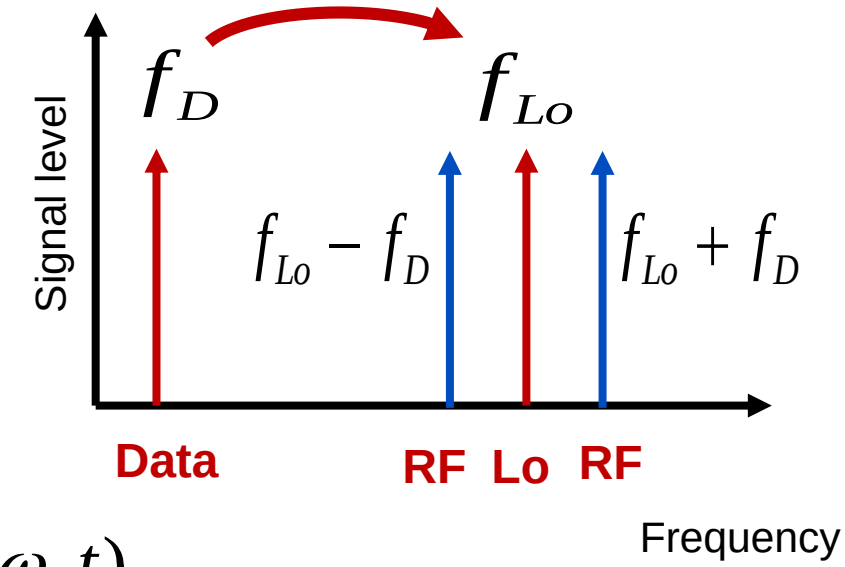


LNA: Low Noise Amplifier, PA: Power Amplifier, MIX: Mixer,
BPF: Band Pass Filter, LPF: Low Pass Filter, LO: Local signal

Mixer (Multiplier)

What is the mixer?



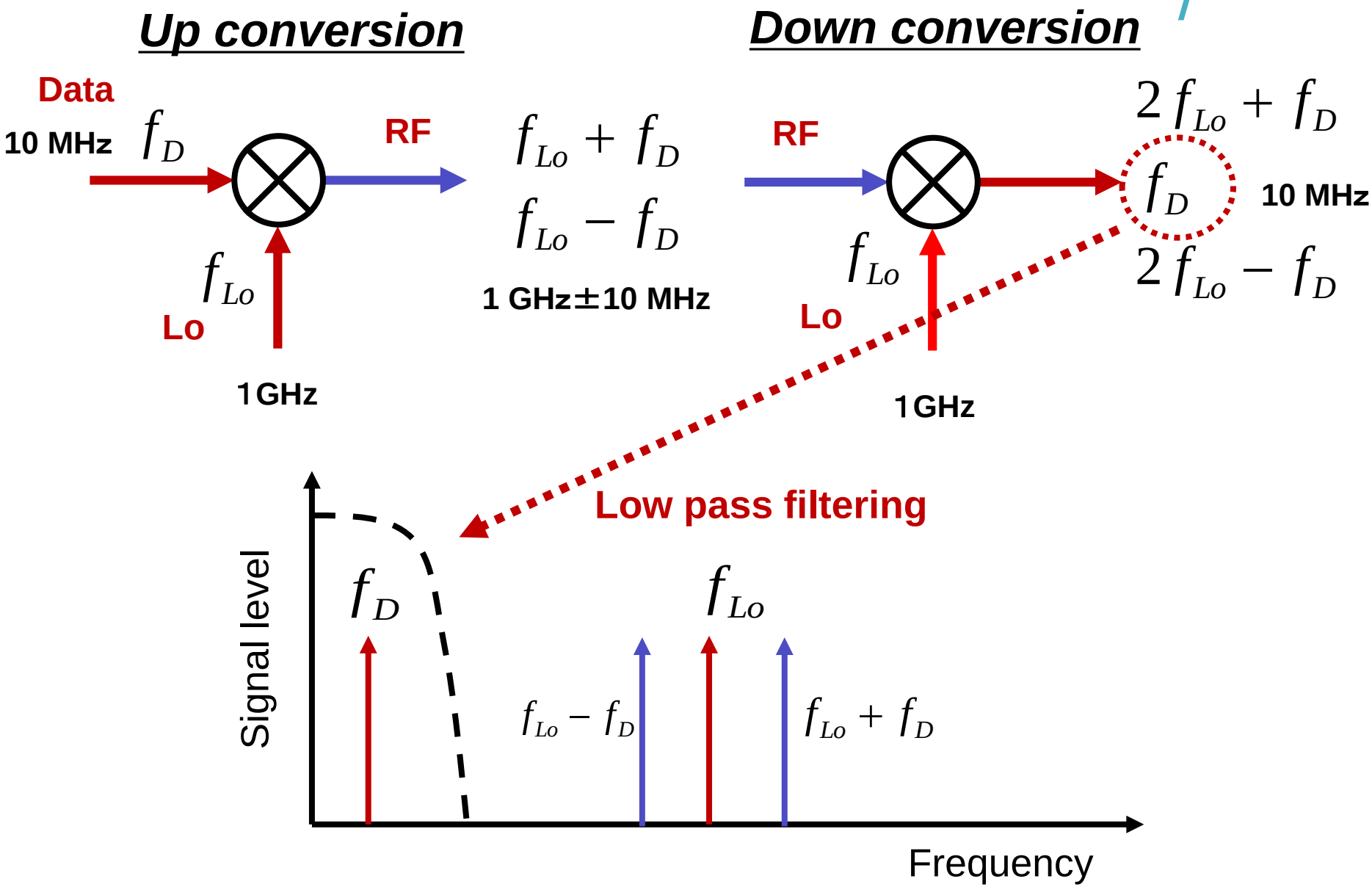


$$RF(t) = A\sin(\omega_{Lo} t) \cdot B\sin(\omega_D t)$$

$$= \frac{AB}{2}\left[\cos(\omega_{Lo} - \omega_D)t - \cos(\omega_{Lo} + \omega_D)t\right]$$

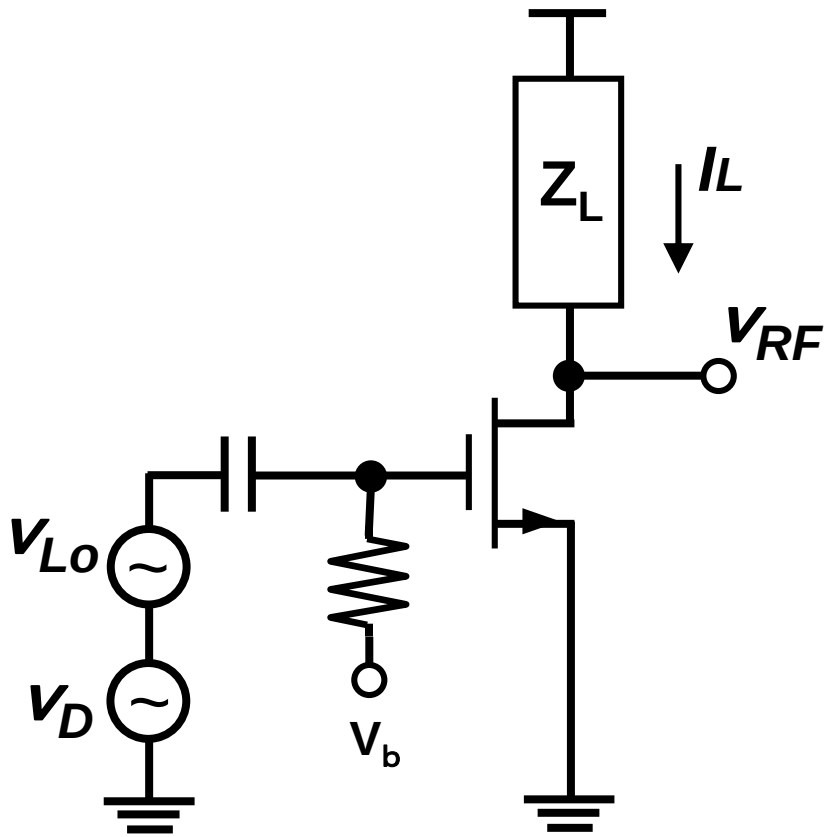
$$= \frac{AB}{2}\left[\cos(2\pi(f_{Lo} - f_D)t) - \cos(2\pi(f_{Lo} + f_D)t)\right]$$

Up conversion and down conversion with Mixer



How is the mixing function realized?

How is the multiplication function realized?



Use of device's non linearity

$$\begin{cases} \text{Diode} \\ \text{Transistor} \end{cases}$$

$$I_L = K \cdot (V_b + v_{Lo} + v_D - V_t)^2$$

$$V_{dc} = V_b - V_t$$

$$I_L = v_{dc}^{\ 2} + 2V_{dc}\underbrace{(v_{Lo} + v_D)}_{\text{fundamental}}$$

$$+ \underbrace{2v_{Lo} \cdot v_D}_{\text{multiplied}} + \underbrace{(v_{Lo}^{\ 2} + v_D^{\ 2})}_{\text{square}}$$

Shannon–Hartley theorem

- 通信容量（誤りなしで伝送可能な最大レート）C[bit/sec]は次式で与えられる。

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- **C**: Channel capacity [bit/sec]

  B: Band width [Hz]

  S: Signal power [W]

  N: Noise power [W], Gaussian noise is assumed.

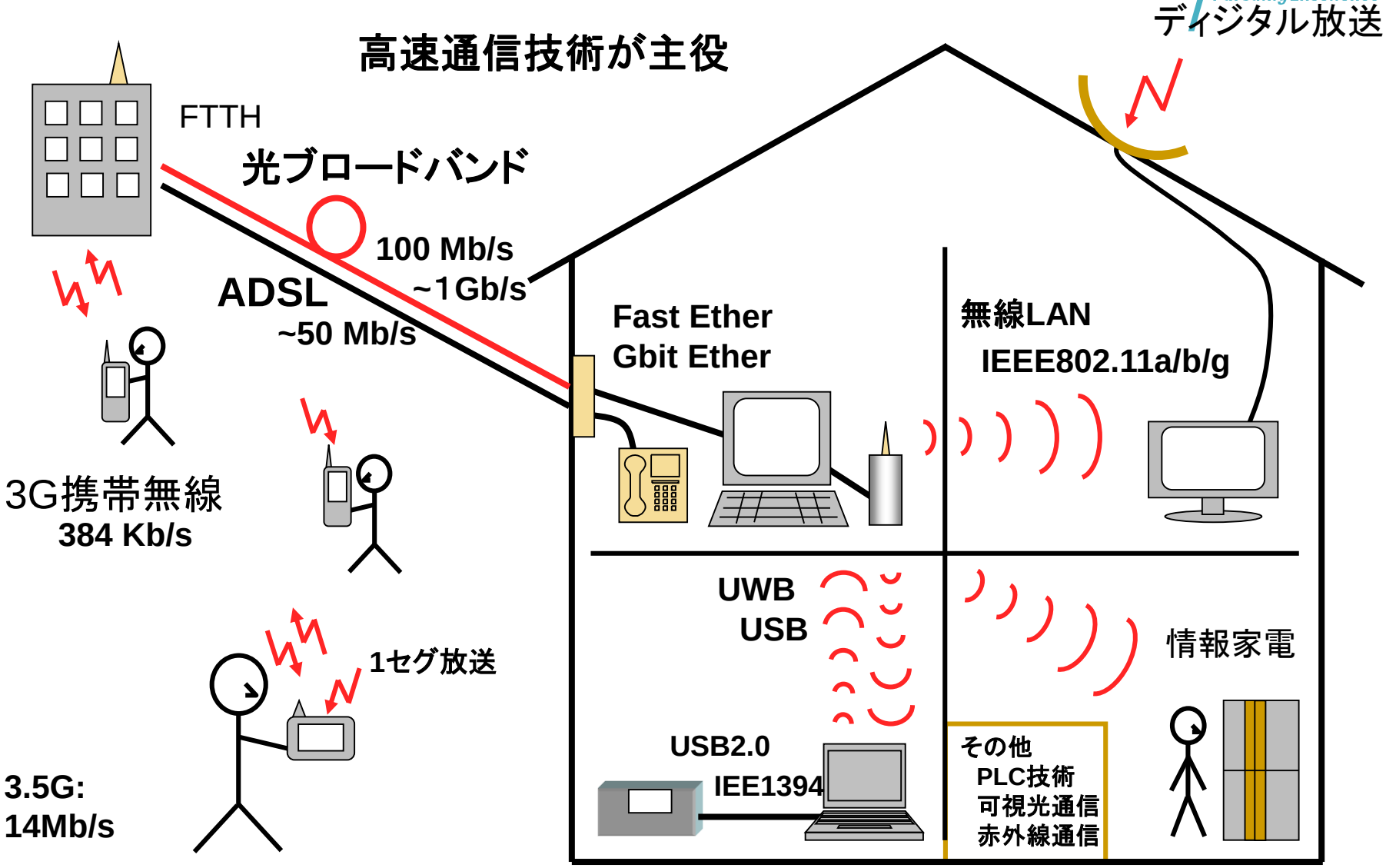
Shannon–Hartley theorem

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

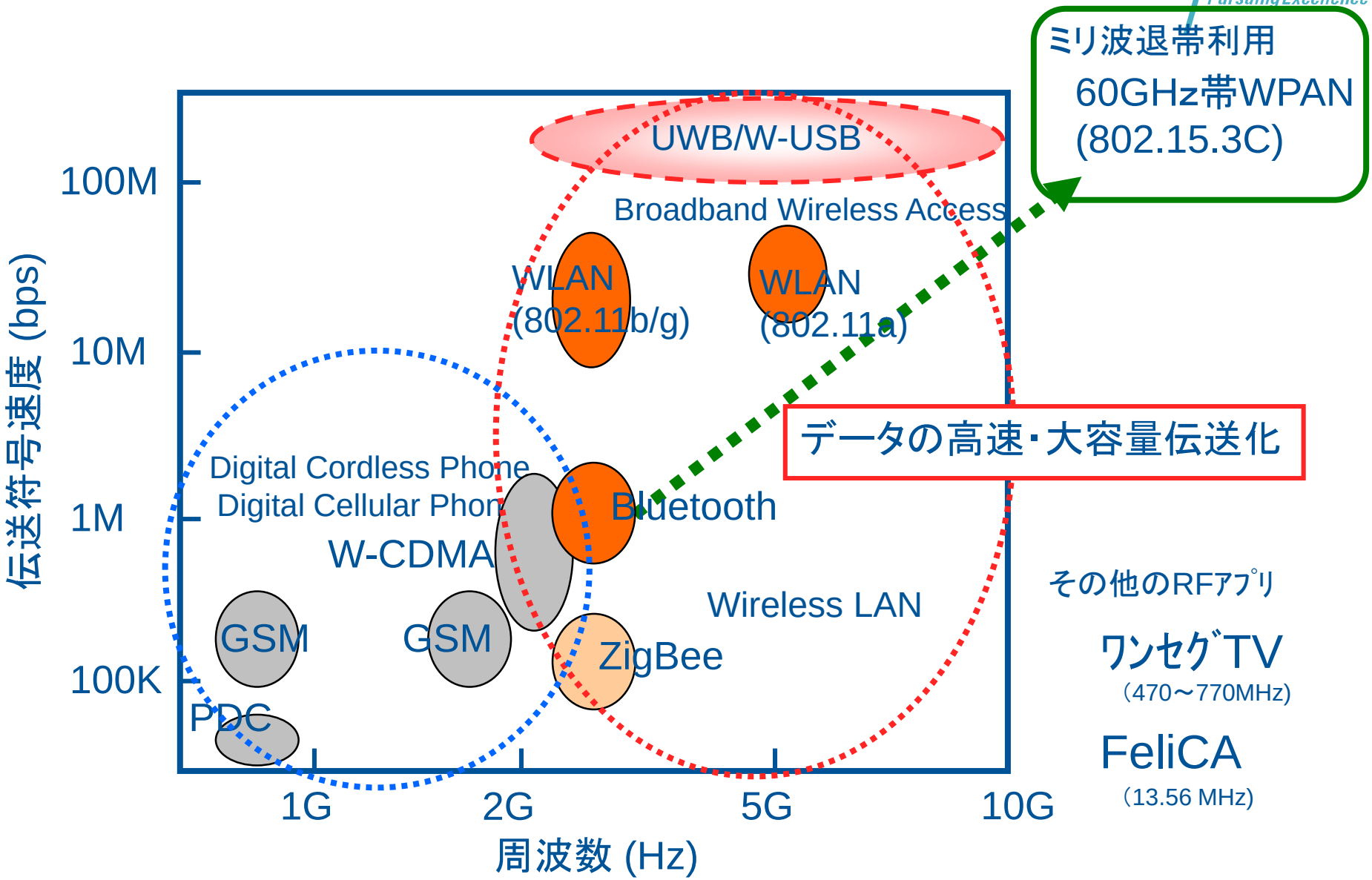
- 伝送レートを大きくしたければ、どうすれば良いか？

- 最近の要求

ユビキタス社会を支える通信



各種ディジタル無線通信



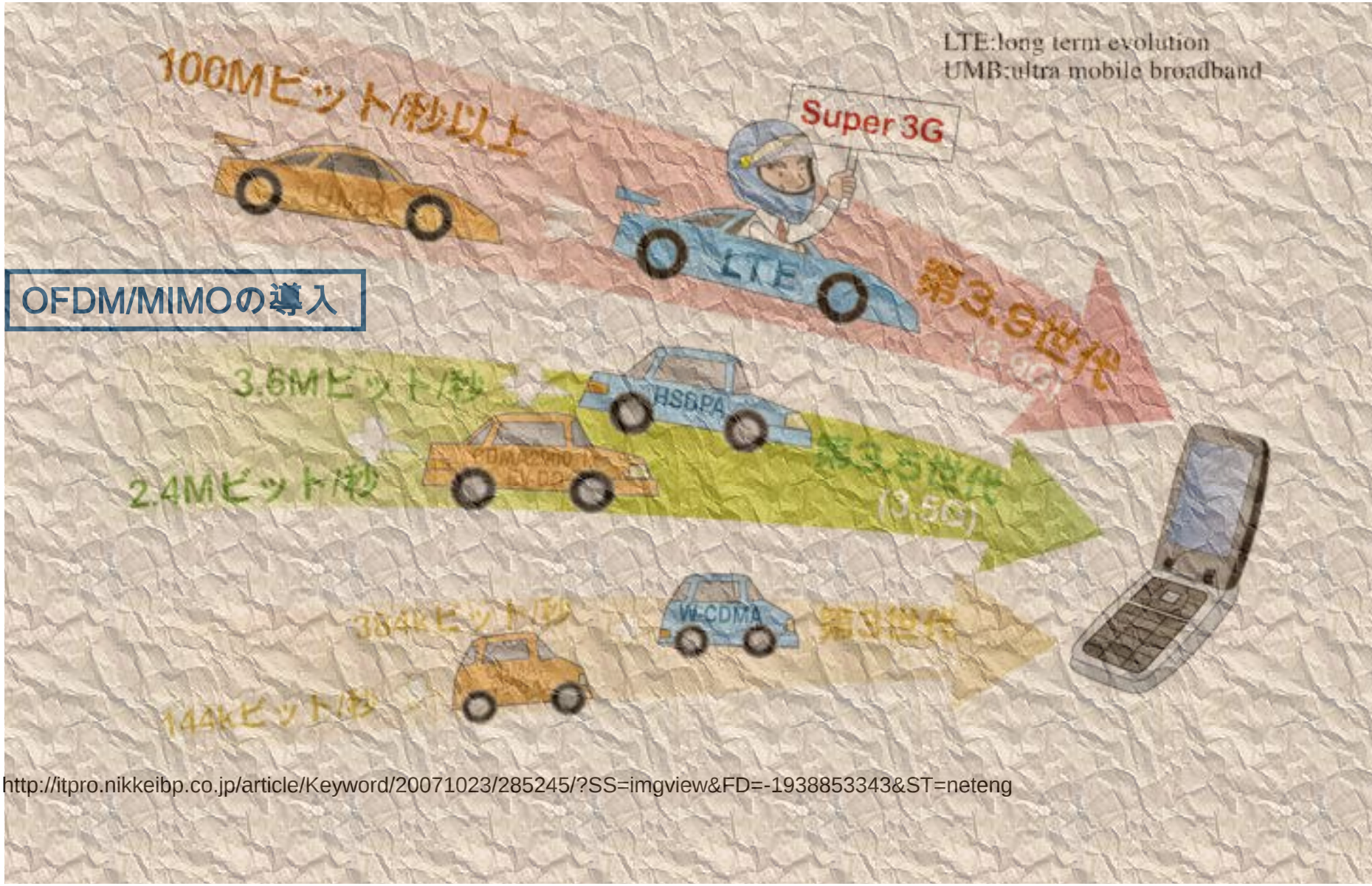
ミリ波　周波数帯域と応用分野

TOKYO TECH Pursuing Excellence

応　用	応　用		特　徴
通信	衛星		上り回線30GHz帯、下り回線20GHz帯（VSAT：超小型地球局）などを利用
	地上	FWA	22GHz帯、26GHz帯、38GHz帯などを利用。加入者無線アクセスでは、数Mbps～数百Mbpsでサービス
		無線PAN	60GHz免許不要帯（7GHz）を利用。マルチギガビット通信が可能。伝送距離～20m
レーダ・センサ	車載レーダ（前方監視）		60GHz帯、76GHz帯を利用。±8°　程度のビーム幅を軽視。距離1～150m程度の前方を監視。
	車載レーダ（近距離）		24GHz帯（準ミリ波）を利用した短距離、広角のセンサ。短パルスのUWB技術を利用。
	踏切監視		45GH帯などが用いられる。光センサでの外乱光の問題がない。

FWA:　Fixed Wireless Access

携帯も進化

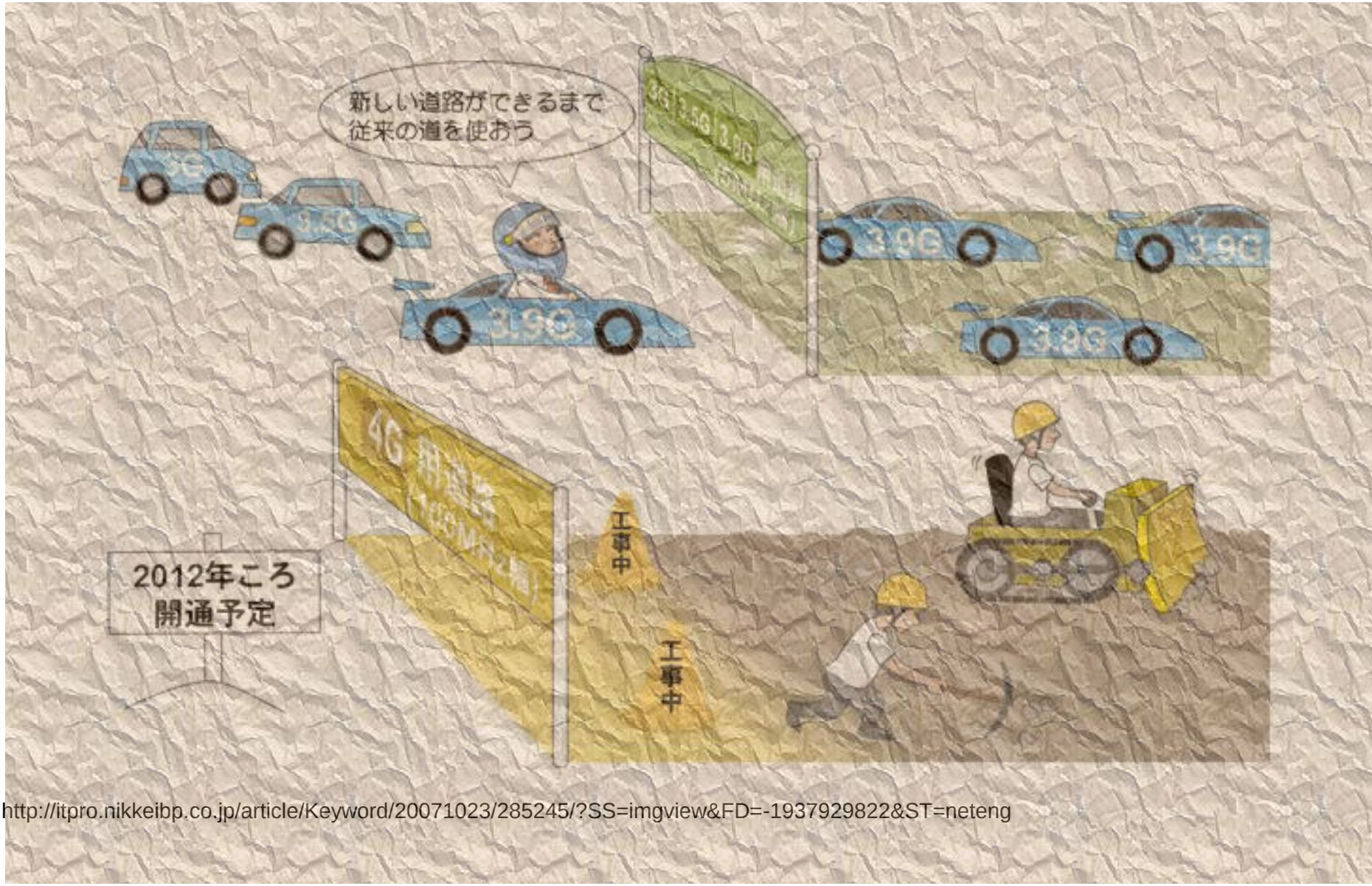


OFDM/MIMOの導入

http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Keyword/20071023/285245/?SS=imgview&FD=-1938853343&ST=neteng

携帯も進化

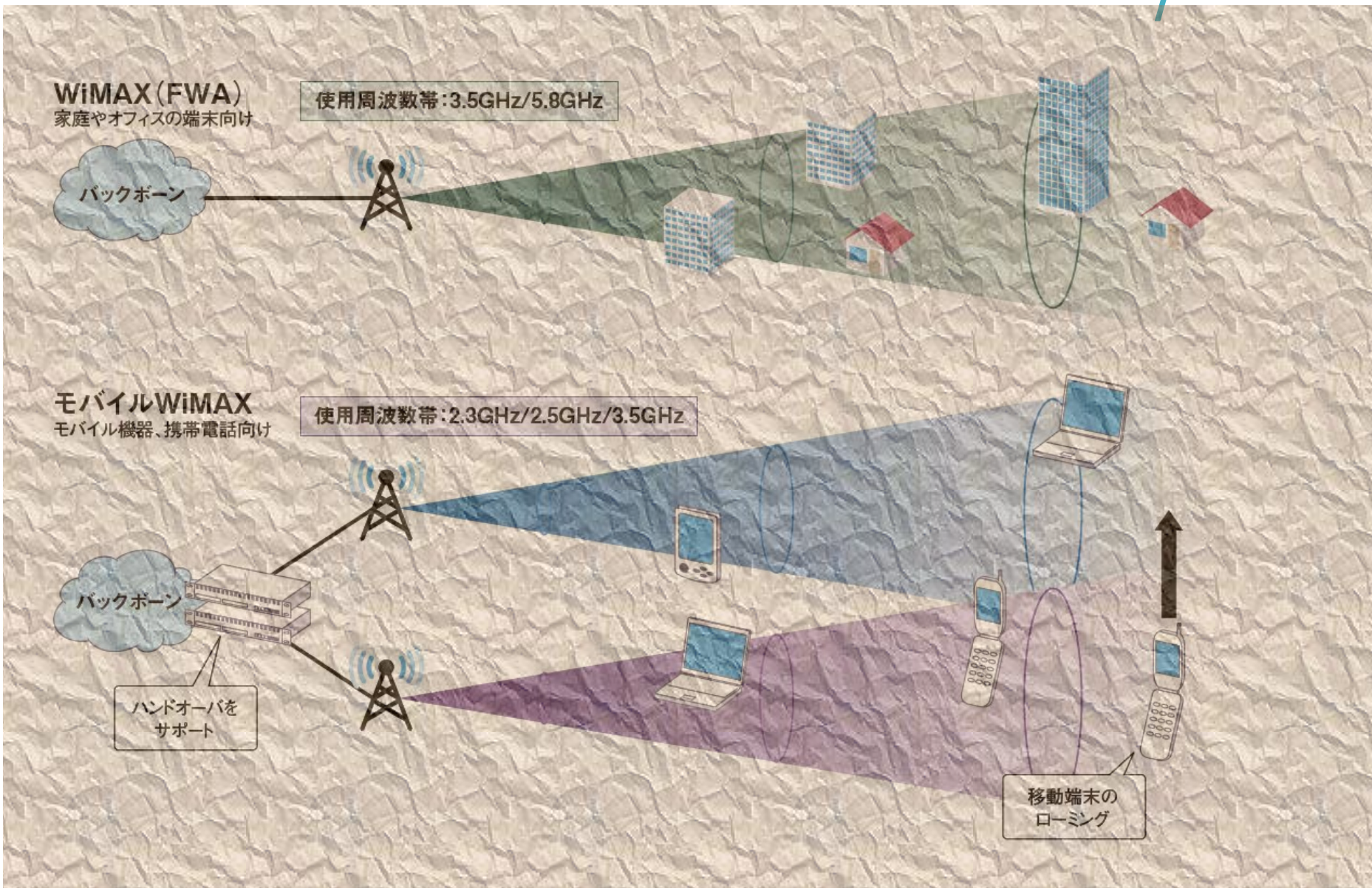
現状で使われている周波数帯と帯域幅を使って通信する
（イラスト：なかがわ みさこ）



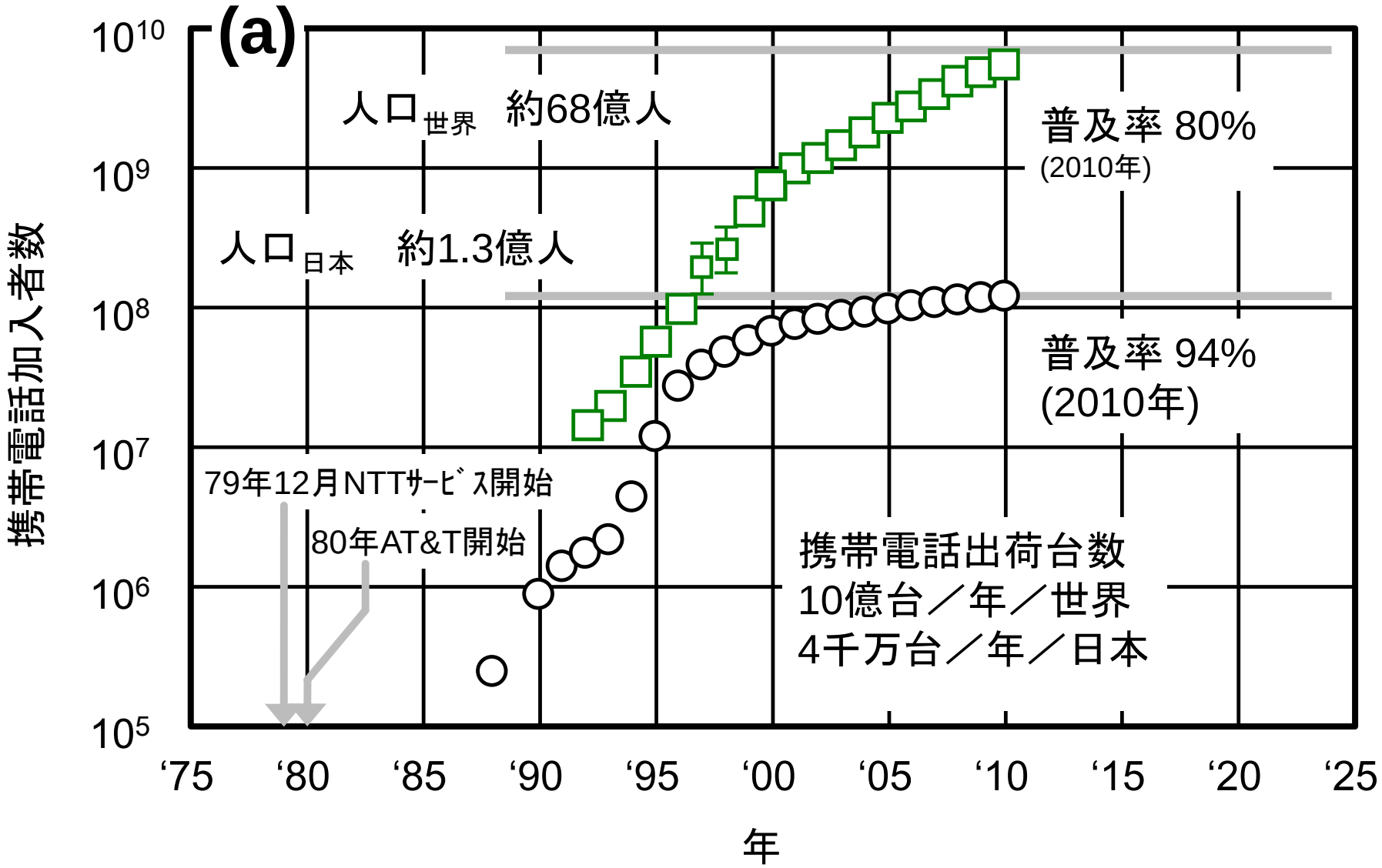
http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Keyword/20071023/285245/?SS=imgview&FD=-1937929822&ST=neteng

WiMAX/モバイルWiMAX

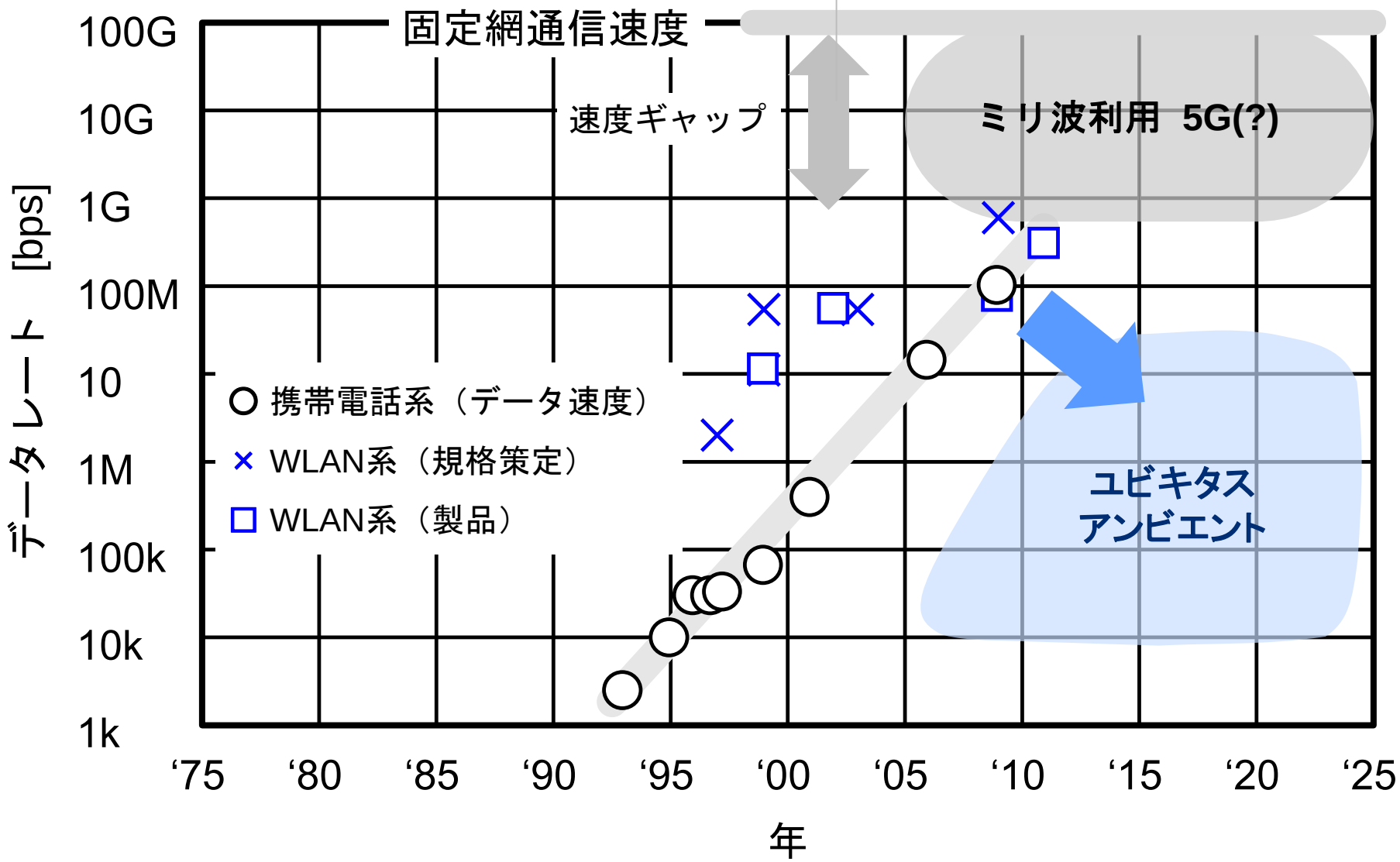
TOKYO TECH
Pursuing Excellence



Subscribers of mobile phone



Data rate of consumer wireless



Outline

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

1. はじめに
2. 周波数利用
3. LSIと通信技術

携帯電話

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

FOMA 906iシリーズ

ワンセグ, FeliCa, GSM, HSDPA, GPS, カメラ

P906i

From 『日経エレクトロニクス』, 2008年9月22日号, pp.93-100

http://techon.nikkeibp.co.jp/NEWS/disassembly

最近の携帯電話　－構成要素－

TOKYO TECH Pursuing Excellence

携帯電話は、800～1000点余りの部品で構成されている
＜参考：PC約1000点、PS2約1600点、自動車約3万点＞

集積回路

LSI/ﾒﾓﾘ	×4
専用IC	×16
汎用IC	×23

一般部品

基板	×3
抵抗	×144
ｺﾝﾃﾞﾝｻ	×341
ｺｲﾙ	×52
TR/Di	×64
振動子類	×8
ｺﾈｸﾀ類	×27
音響部品	×5
電池	×1
その他	×12

構造系部品

ｹｰｽ類	×30	板金類	×8
ﾈｼﾞ類	×12	ｼｰﾄ、ﾗﾍﾞﾙ類	×22
ﾊﾟｯｷﾝ類	×13	機構ﾓｼﾞｭｰﾙ	×7

ｷｰｺﾝﾎﾟｰﾈﾝﾄ

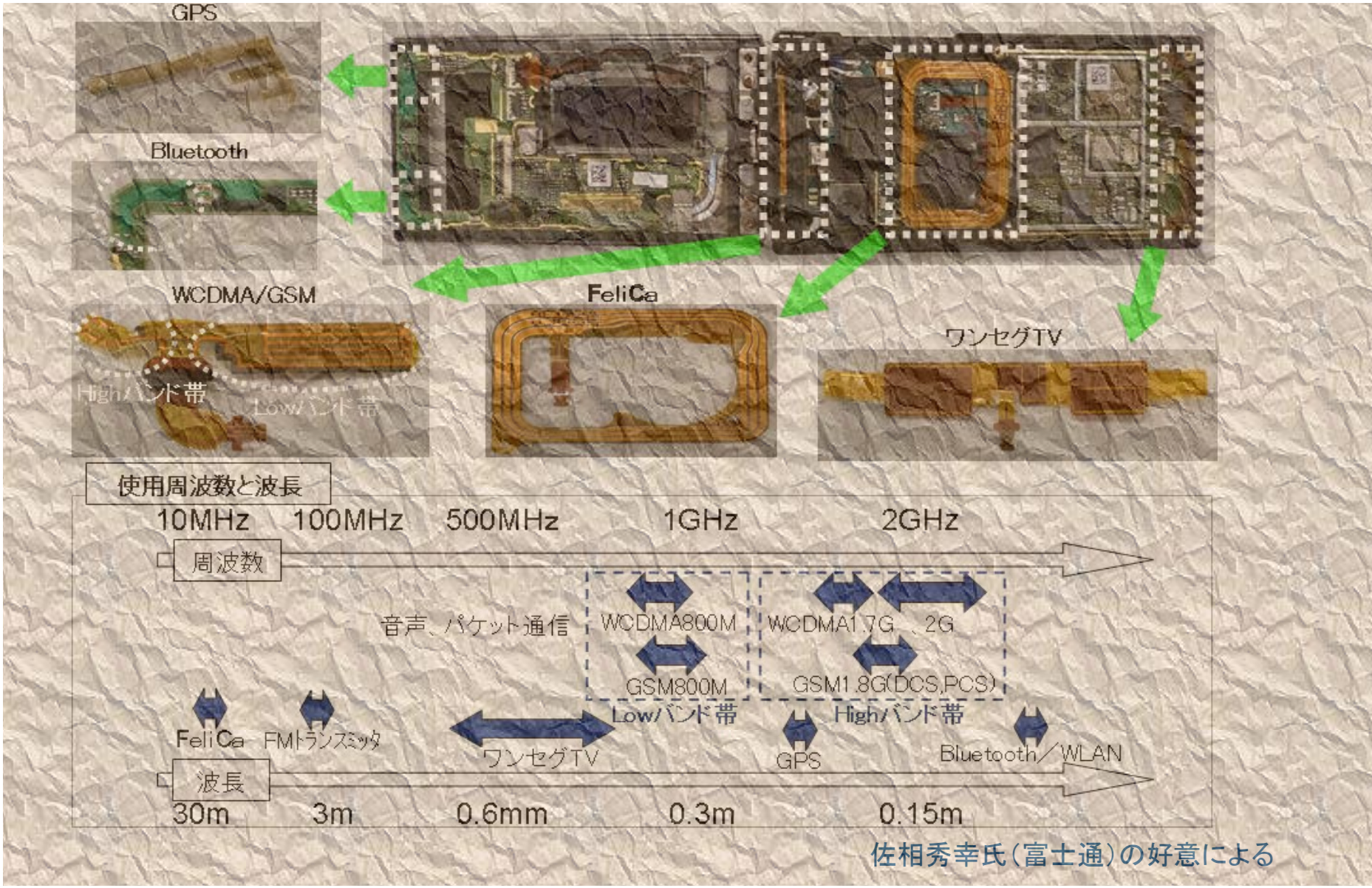
ｶﾒﾗ	×2
LCD	×2
ﾜﾝｾｸﾞ	×1
指紋ｾﾝｻ	×1
ﾌｪﾘｶ	×1

アンテナ

FOMA/GSM（800M～2G）	×1
GPS	×1
ワンセグ	×1
フェリカ	×1
Bluetooth	×1

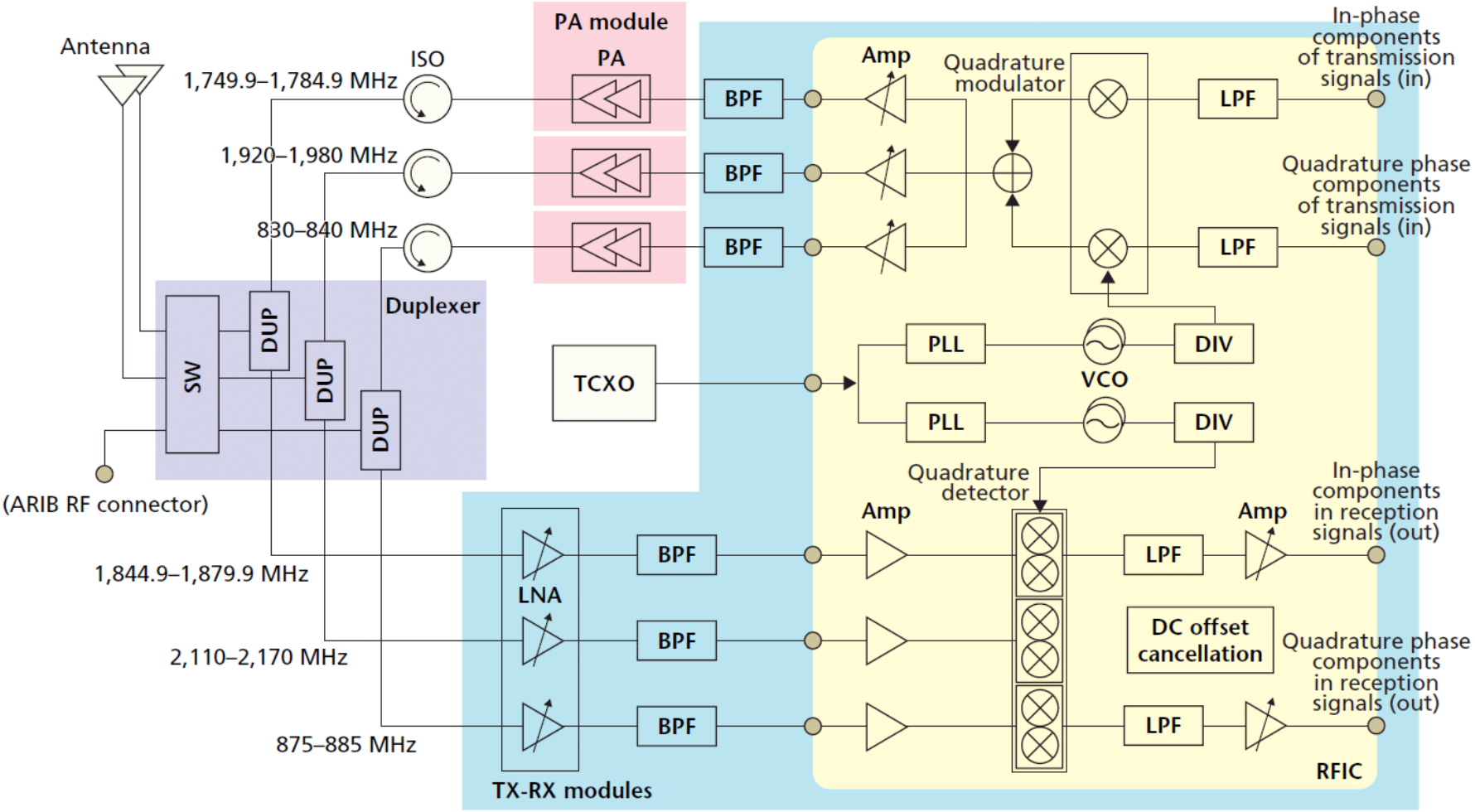
佐相秀幸氏（富士通）の好意による

最近の携帯電話



佐相秀幸氏（富士通）の好意による

携帯電話構成



M. Koiwa, F. Inoue, and T. Okada, NTT DoCoMo Technical Journal, 8(2), 35-38,Sept. 2006

Conventional digital CMOS

TOKYO TECH Pursuing Excellence

上層配線ほど太く、配線間隔も広い。

Several μm

http://www.ieice.org/jpn/index.html

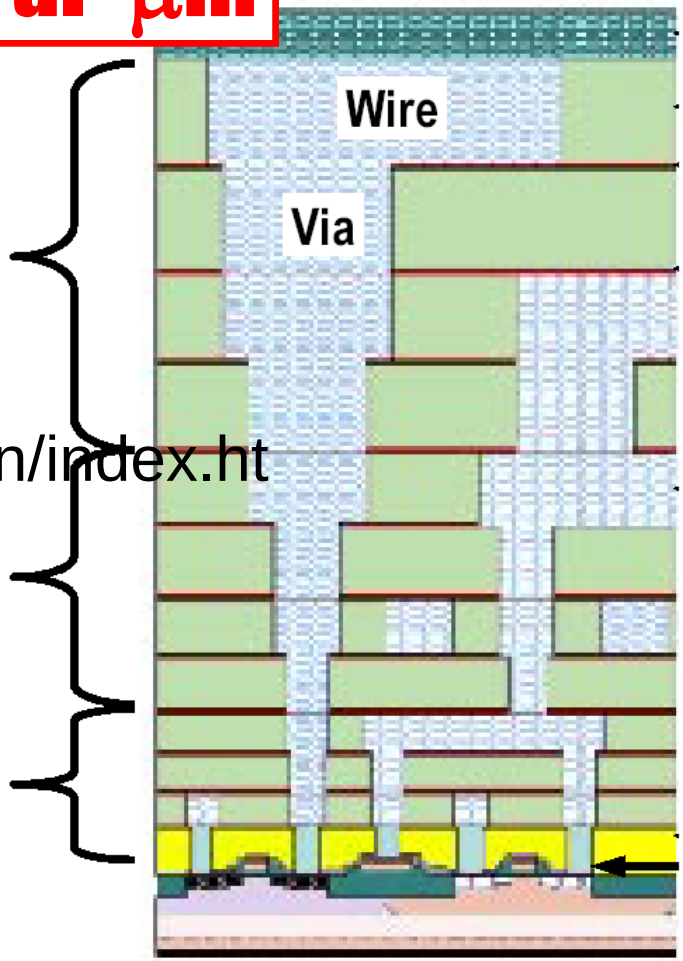
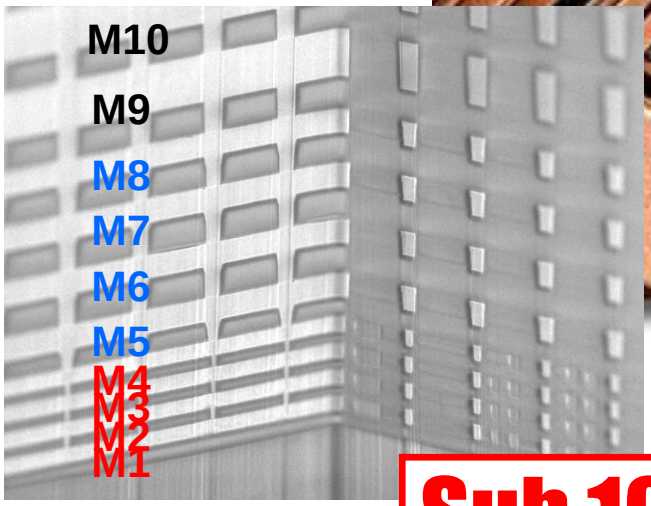
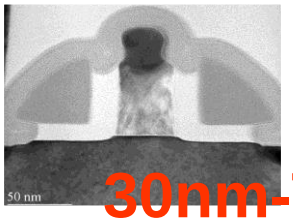


Figure 36 Cross-section of Hierarchica



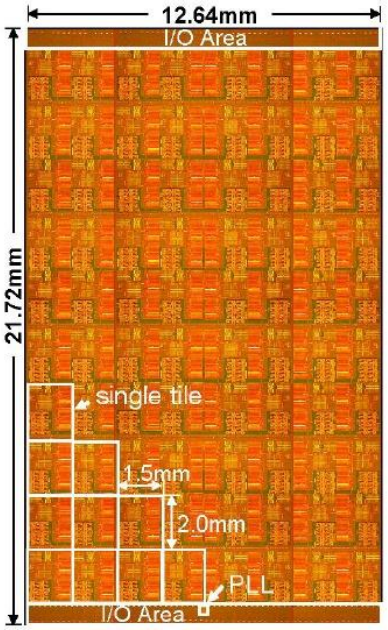
Sub 100nm to 10nm



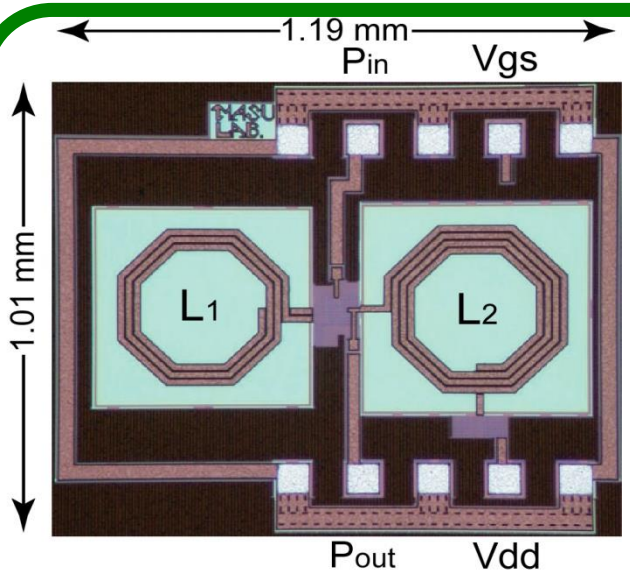
30nm-Tr

Digital and RF/analog

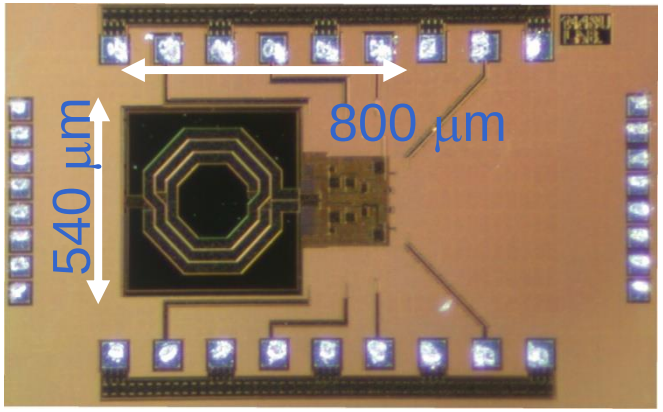
TOKYO TECH
Pursuing Excellence



Many Core10^8Tr/3mm^2



RF CMOS

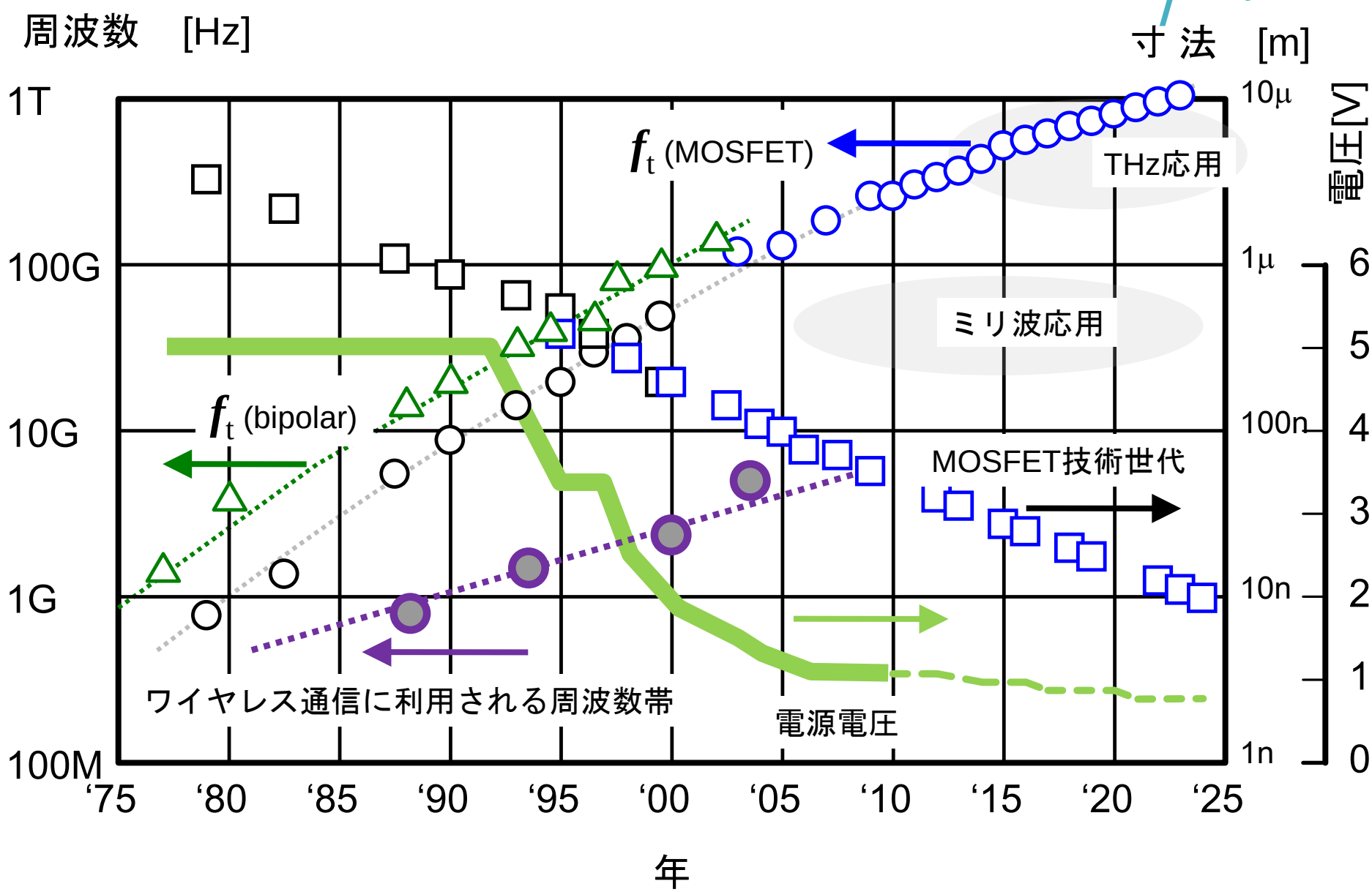


LNA（Low Noise Amp）　VCO（Voltage Controlled Oscillator

- RF CMOS回路：受動素子面積『大』 →デバイスが微細化されてもチップ面積縮小せず → Scaling Meritなし！
- Digital Radio：実はCapacitance面積爆発！
- コストも含めてScalingできるようにしたい

⇒ **True Scaling**

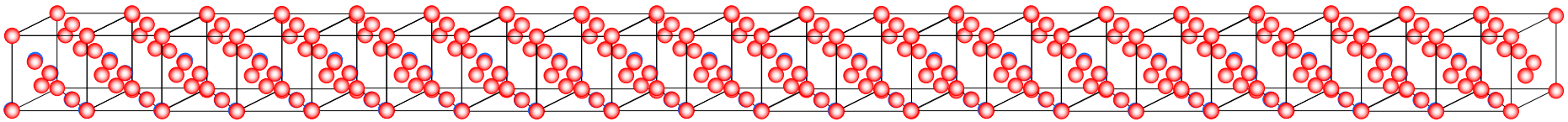
Miniaturization of MOSFET/CMOS



10nm（100A）を想像してみる

TOKYO TECH Pursuing Excellence

今時の集積回路では、原子レベルを制御



10nm

Atomを数えることができる　！！！

- ナノ、IT、バイオ、環境
- CMOSは、“ナノ”そのもののに立脚。
- 回路、システムの人にも認識して欲しい。

f_t and f_{max}

- f_t : Cut-off frequency (遮断周波数)
  - 電流増幅率(h_{21})が1になる周波数
  - デジタル回路の性能指数になる。

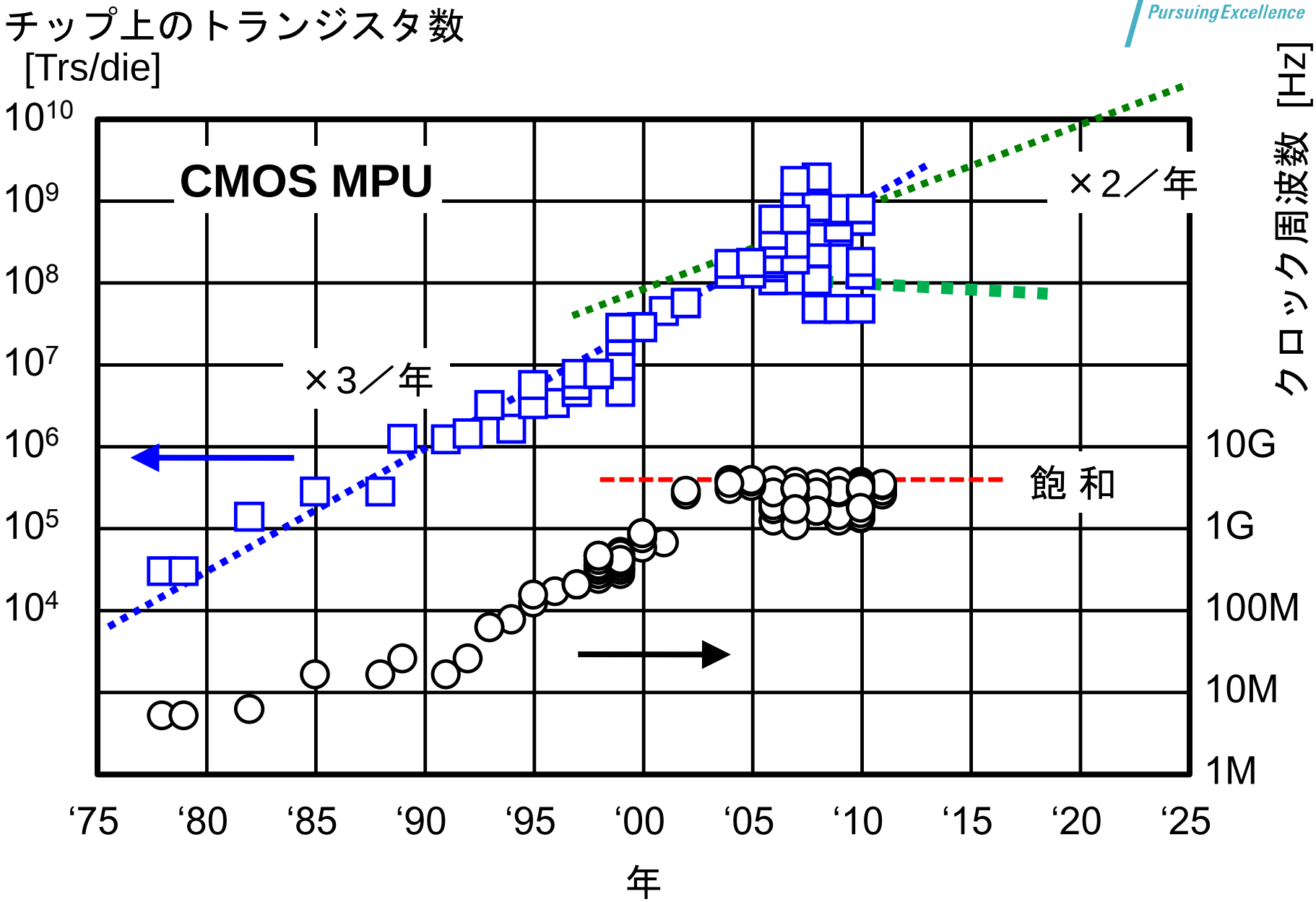
- f_{max} : Maximum oscillation frequency(最大発振周波数)
  - 電力増幅率が1になる周波数。
  - アナログ回路の性能指数になる。(寄生抵抗や容量が影響する)
- $f_t \neq f_{max}$

CMOS trend

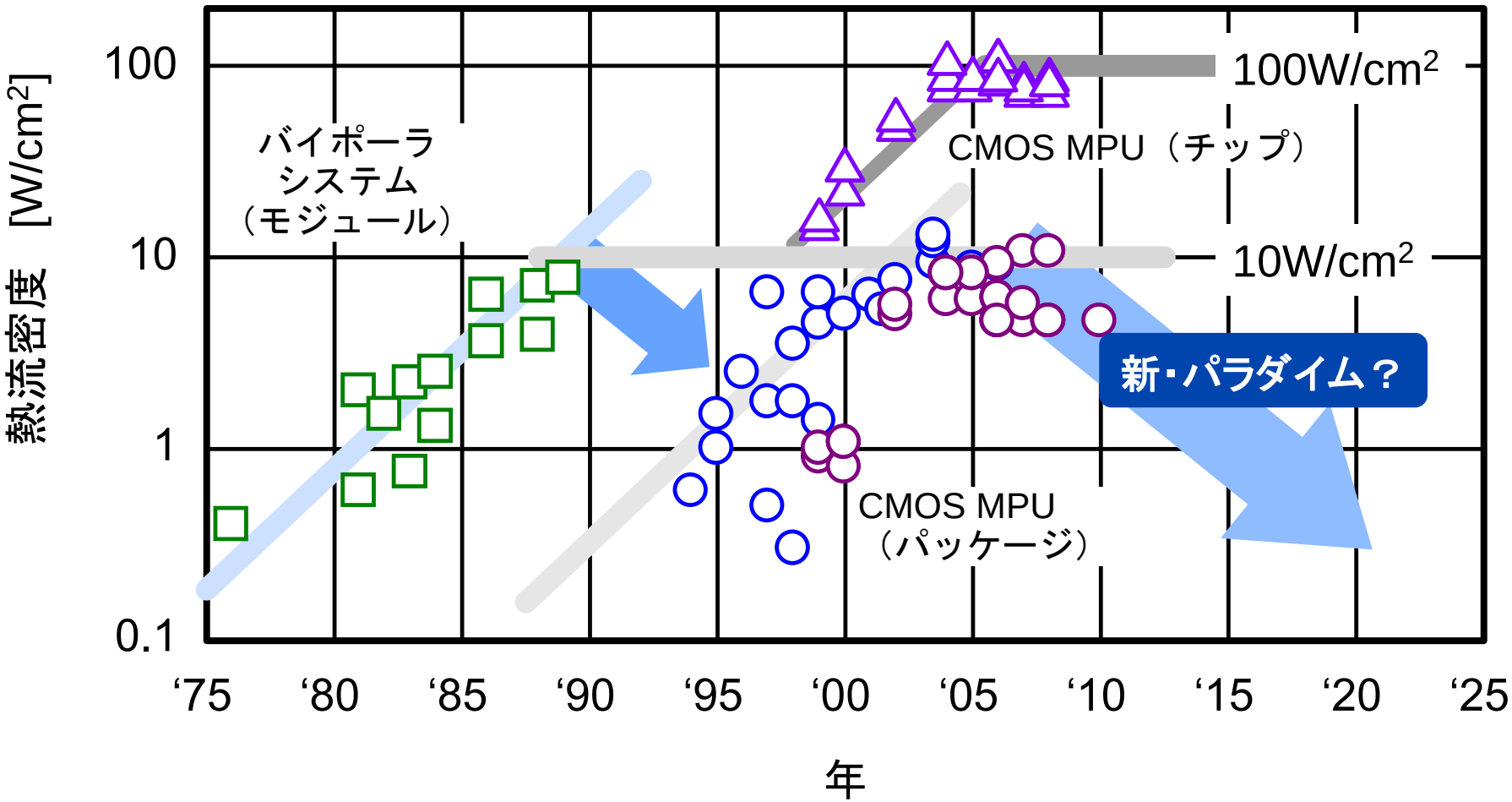
TOKYO TECH Pursuing Excellence

- たゆまない微細化
- f_t f_{max} の向上。 GHz応用からミリ波、テラヘルツ。
  - CMOSできるとCommodity化（広く利用）される。
  - 何故？
- 微細化とともに電源電圧も減少
  - 高電界効果などの回避
  - 低消費電力には、非常に効果的！

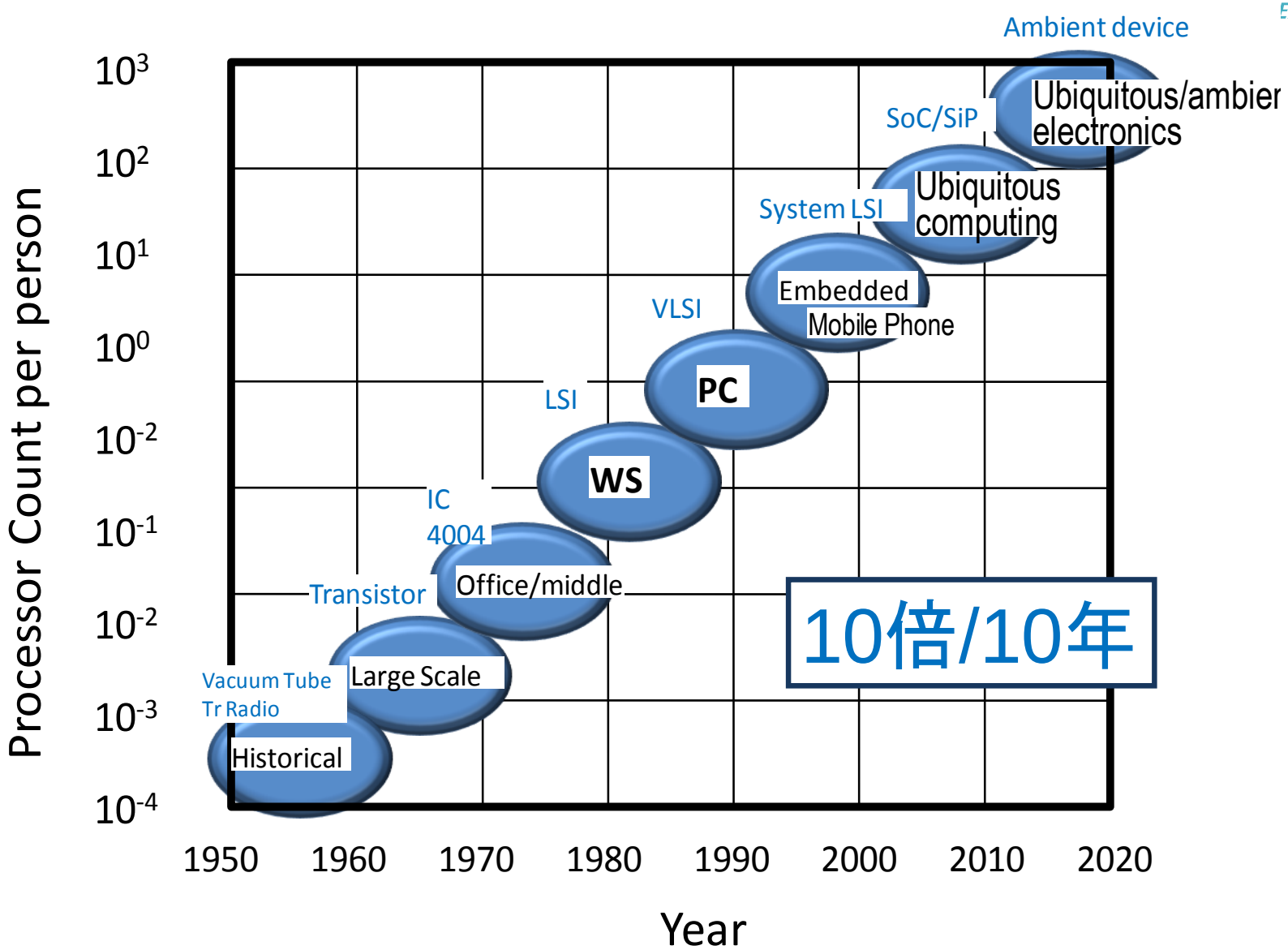
Progress of MPU



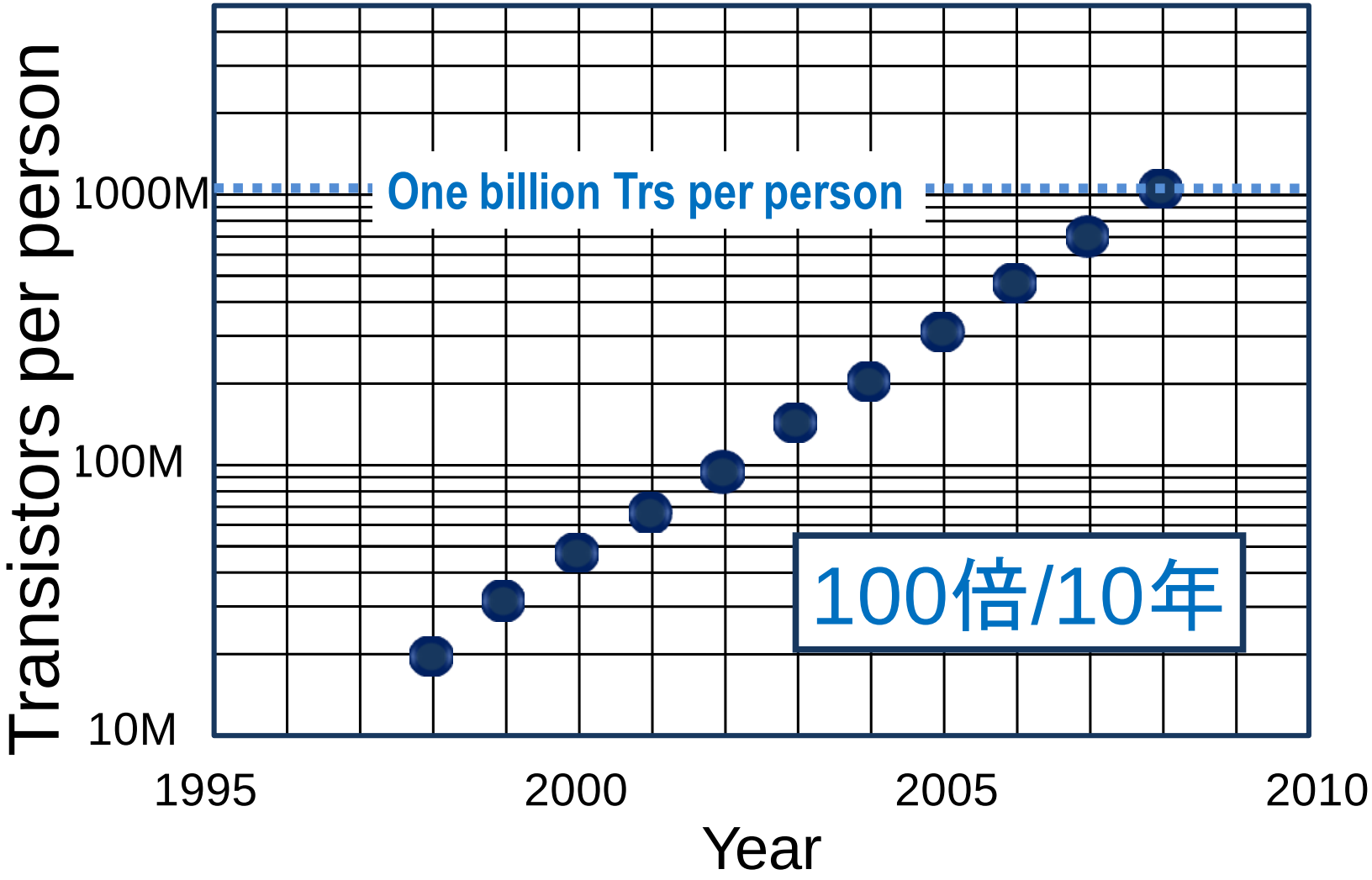
Heat flux of module/chip



LSIは増加の一方


Ambient device
Ubiquitous/ambier electronics
SoC/SiP
Ubiquitous computing
System LSI
Embedded
Mobile Phone
VLSI
PC
LSI
WS
IC
4004
Office/middle
Transistor
Large Scale
Vacuum Tube
Tr Radio
Historical
10倍/10年
Processor Count per person
10^3
10^2
10^1
10^0
10^{-2}
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Year

LSIは増加の一方


Transistors per person
1000M
100M
10M
One billion Trs per person
100倍/10年
1995
2000
2005
2010
Year

45nm・32nm, and beyond

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

- そもそも微細化デバイスができない。
- 配線が問題:　同じ機能すらチップ面積を低減できない。
  - 専門化的にはリピータの異常な増加による。
- 電力食い過ぎ
  - 1Wも消費したら、すぐ使えなくなる。
  - 1W消費したらバッテリは1時間しか持たない。
- 規模が大きすぎて、設計できない。
  - 新規チップは、Boeing 777を設計する手間と同じ
- そもそも、何つくるの？

集積回路技術の歴史から何を学ぶか。

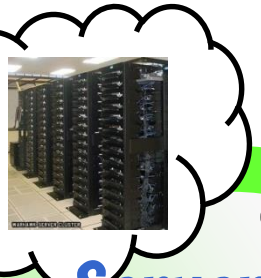
TOKYO TECH Pursuing Excellence

- Device and LSI
  - Bipolar Tr　1948年
  - Kirby特許　1958年
  - MPU(4004）1970年
- 集積度のかげり　2000年代　→　パラダイムシフトの訪れ。
- 通信技術：90年代に芽生え、’00年代に爆発的（指数関数的）に伸びる。　→　10年代は通信のパラダイムシフトの年代

Information and Energy

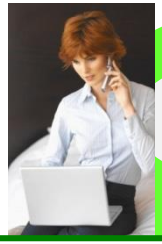
Network cloud

<NGN, Smart Grid, Cloud・・・・>



Server

Data Center

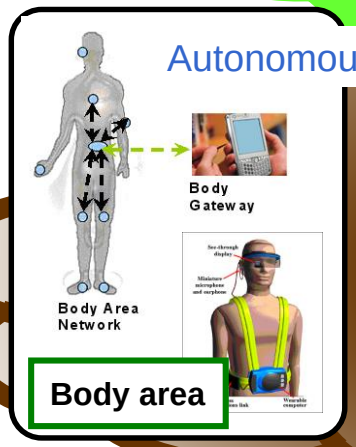


Very small
Information space

ネットワーク・クラウド上には情報端末ばかりでなく、新・移動情報空間としての車、ロボット、スペースアプリ、また末端には、Autonomous Sensor Control Network が張り巡らされる。

Courtesy of Riken and Tokai Rubber Industries

Autonomous Sensor Control Network



Body area

Living organisms

Energy as well as Information

Novel mobile
Information space

Courtesy of AIST

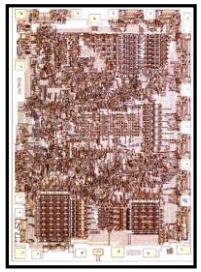
Realistic Robot
Mobile machine

その時、クラウドの末端は
Autonomous Sensor Control Networkが張り巡らされる。

シリコンの発展で、通信を考えてみる(1)

TOKYO TECH Pursuing Excellence

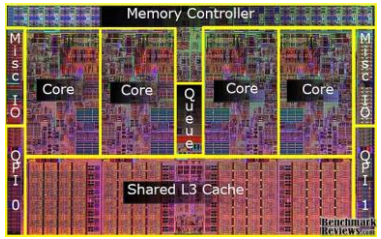
世界初のMPU
Intel 4004, 1971年
（10μmプロセス）

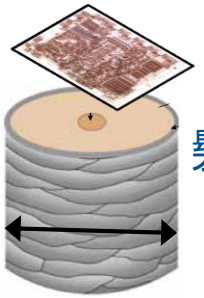


2mm

微細化

現在：65nm-32nm CMOS
10億トランジスタが集積





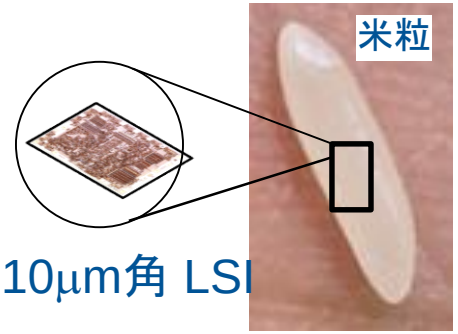
髪

50 μm

現在の技術を使えば、
4004は髪の毛の断面以下

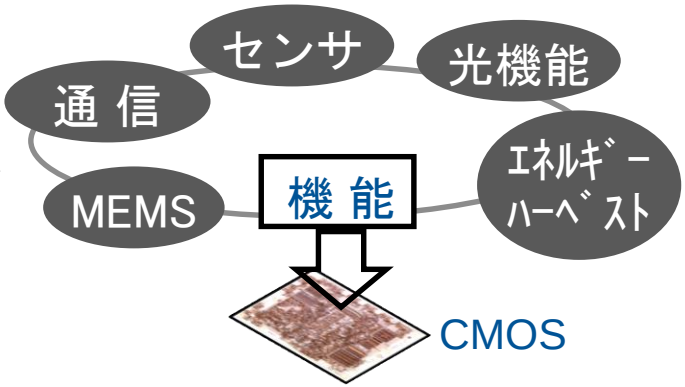
徹底的な
微細化

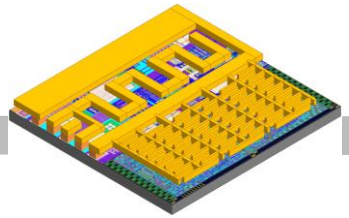
2024年：
5nm CMOS
1兆個のﾄﾗﾝｼﾞｽﾀ
が集積



10μm角 LSI

5nm CMOS技術を使えば
米粒に貼付けられる！





機能を集積する
→異種機能集積

STEP1：異種機能集積を実現

**STEP2：機能集積チップ
（知能シリコン）**

シリコンの発展で、通信を考えてみる(2)

TOKYO TECH Pursuing Excellence

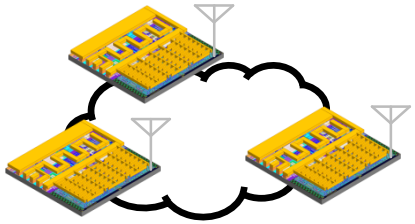
徹底的な微細化

スパコンは、
京（10^{16}）からExa（10^{18}）を超える

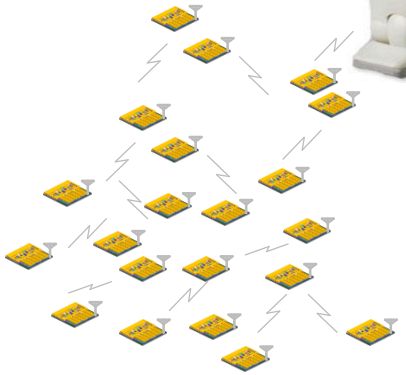
STEP2：機能集積チップ（知能シリコン）

体の中へ

ロボットは機能チップの集まり



センサネットワーク



多数集まれば群として相互作用

STEP3：群知能シリコン

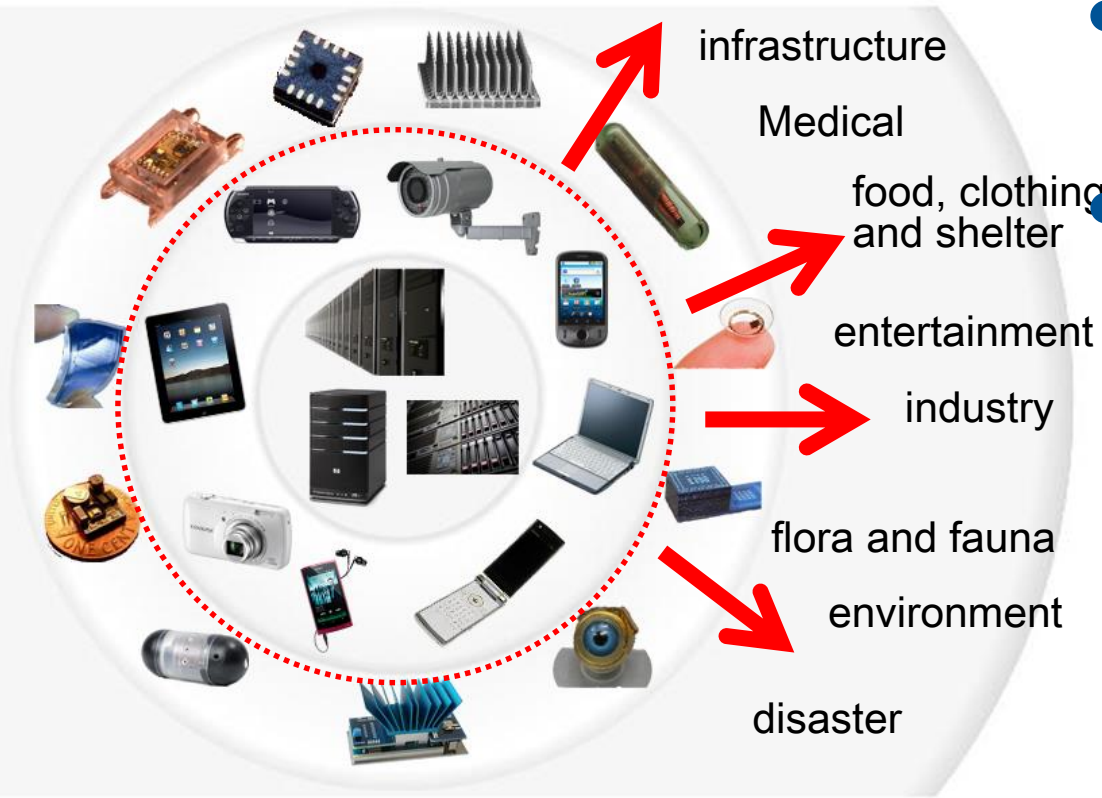
Everything connects network and communicate

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

- Internet of Things
- Trillion Sensors

} Fusion of real and cyber space

- Information is resource.
- Beginning of battle for securing the resource.



- Everything connects network; **agent**, *eg*. mobile terminal, every electronic equip, everything thru RF tag,
- These agents detect various information, *eg*. environmental info. of temp., humidity, *etc*..
- Enormous amounts of agent: Although reliability of information from each agent is very low, "**number**" may induce high reliability.

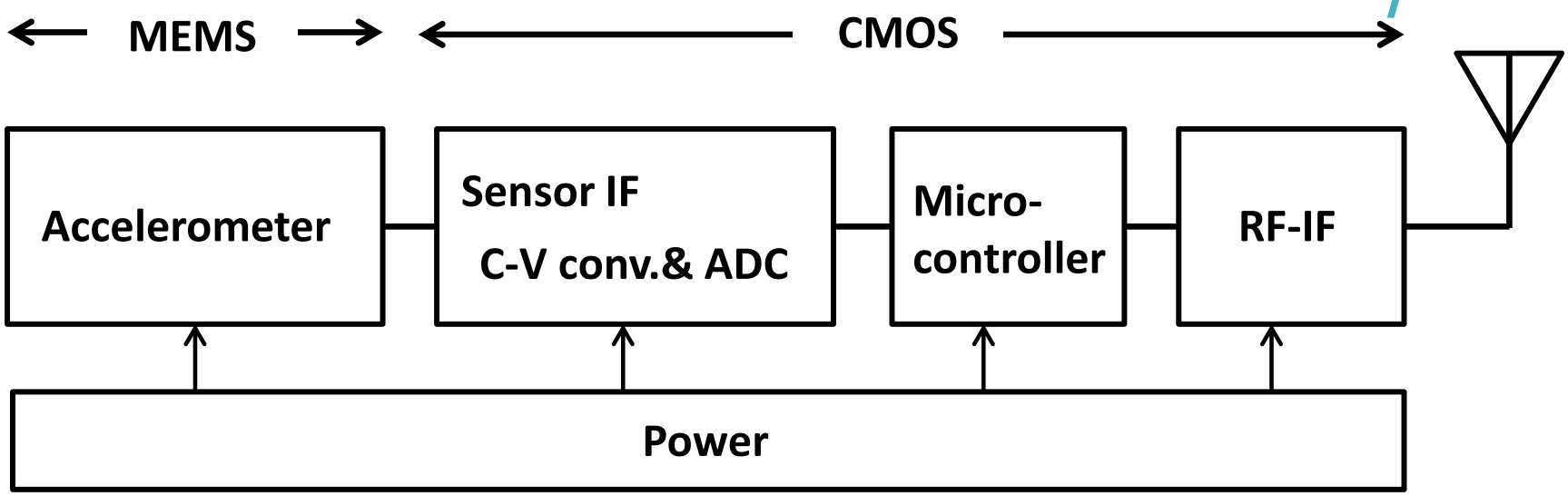
Swarm

Quantity produces quality.

- In IoT/IoE era, how will be CMOS R&D progressing?

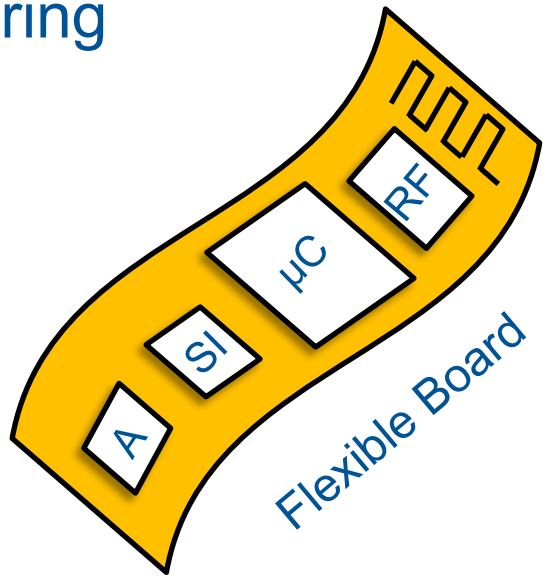
Wireless sensitive acceleration sensor module

TOKYO TECH
Pursuing Excellence



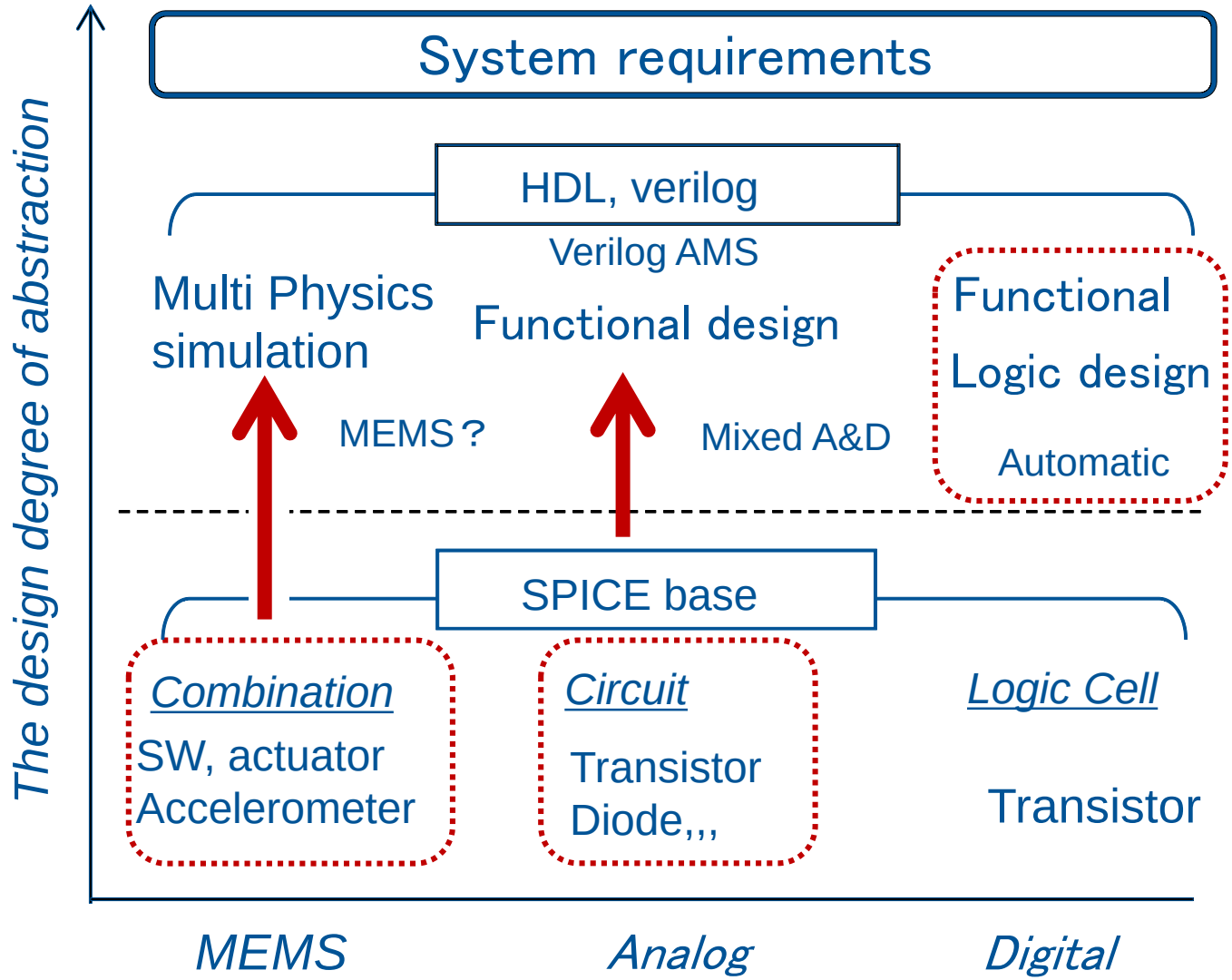
Target Application: Human Activity Monitoring

- Size: less than 0.1 cc
- RF band: 2.5 GHz or 5.8 GHz
- Power supply: Battery less



What is required technology?

Hierarchy of system design



Bio-Integrated Electronics (IEDM2012, Plenary)

R. A. Rogers, Univ. Illinois,IEDM2

- 35nm-thick Si nanomembrane
- Epidermal（表皮）electronics
- 35nm-thick Si can be dissolved in pH=7.5 solution.
  - Transient electronics
  - Disposable material
  - Edible!

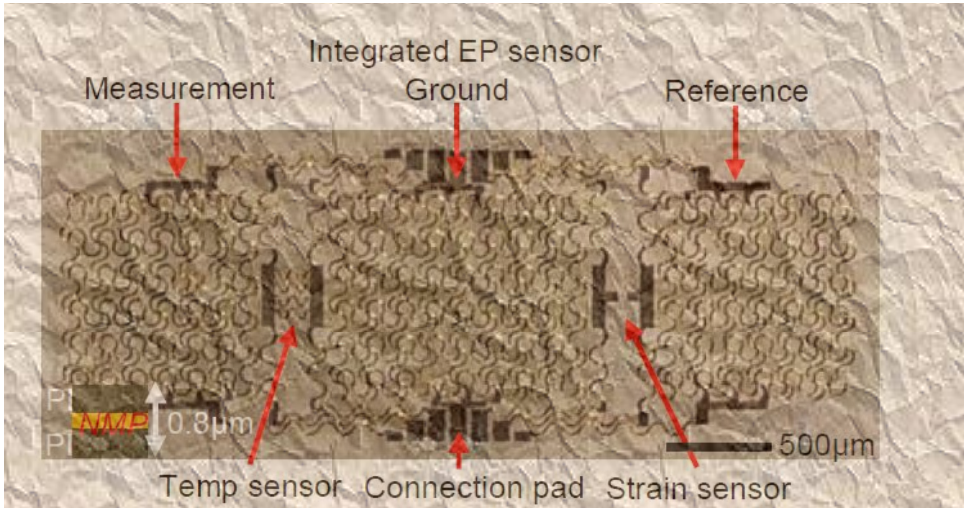


Fig. 1 Multifunctional, stretchable electronic device, for mounting on the skin. The lower left schematic illustration shows the neutral mechanical plane (NMP) construction of the devices and interconnects.

This device can pasted/bounded on the surface of internal organs. And then, the device is solved, i.e. disposable!

Flexible electronics

- Device is fabricated on flexile film?
  - How do we design? Design kit has not been available for designers.
- Realistic solution
  - Integration of thin CMOS LSI on flexible film.
  - Design kit and environment for flexible film…….

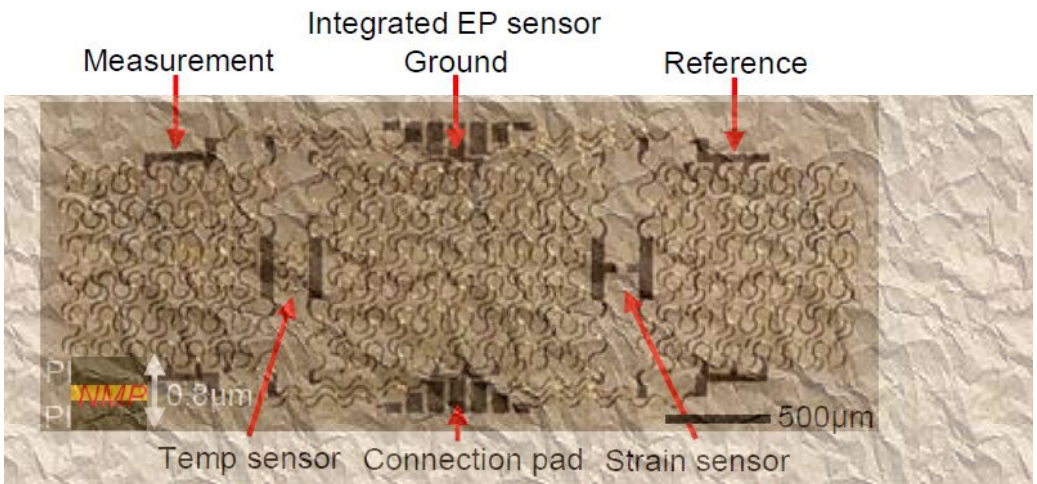
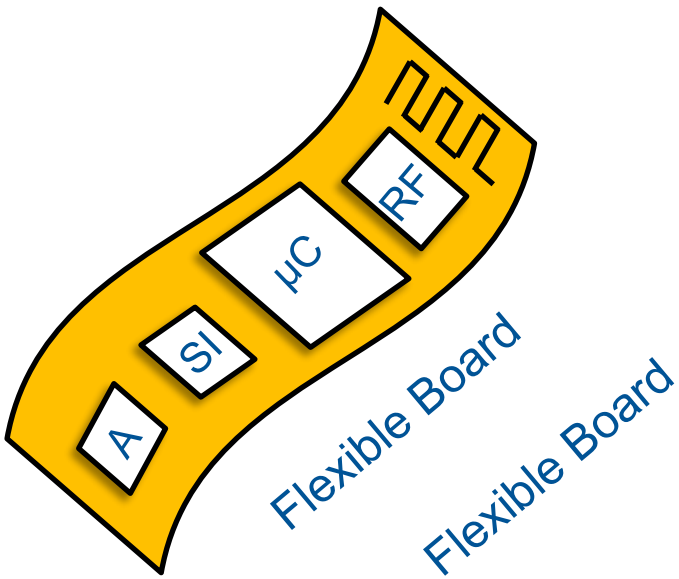


Fig. 1 Multifunctional, stretchable electronic device, for mounting on the skin. The lower left schematic illustration shows the neutral mechanical plane (NMP) construction of the devices and interconnects.



考えてみてください。

TOKYO TECH Pursuing Excellence

1. 20年後の集積回路技術はどうなっているだろう？
   a. 最小線幅はどれくらい？
   b. 20年後の集積回路は社会生活にどのようなimpactを与えるだろうか？
2. 20年後の通信技術として、以下のいずれかについて述べよ。
   a. どのような通信が欲しいか？
   b. 思いもつかないようなどんな通信が出現するか？
   c. 今、思いつく通信技術はどう発展しているか？（衰退している？）

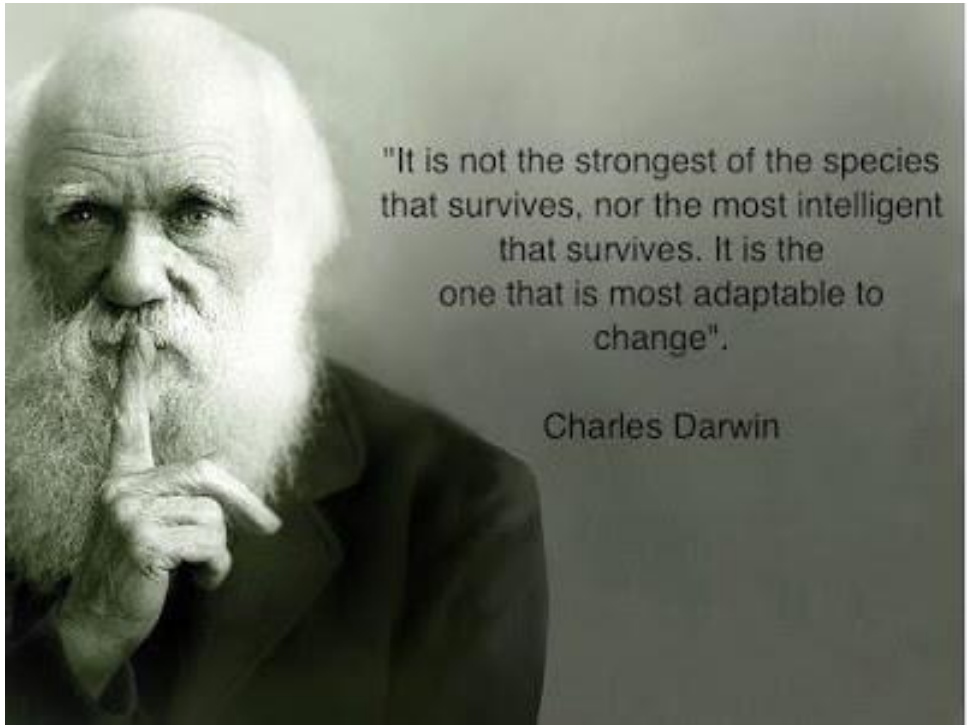
集積回路から考える

TOKYO TECH Pursuing Excellence

- 微細化は限界を迎えていると言われているが本当にそうだろうか？
- どこまで追求すべきなのだろうか？
- 夢はないのか？

- 最近の「4K/8K」や「ハイレゾ」から何を考えるか？

One message



生き残るものは強者ではない。知恵者でもない。変化に対応できる者だ

- この言葉は、確かに含蓄がある。
- 何を思いますか？