Jan 6 and 27, 2012

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
Director, ICE Cube Center
Solutions Research Laboratory
Precision and Intelligence Laboratory
Dept. Electronics and Applied Physics
Tokyo Institute of Technology

益　一　哉
異種機能集積研究センター
ソリューション研究機構
精密工学研究所
大学院・物理電子システム創造専攻
東京工業大学

Tel & Fax: 045-924-5022 Email: masu@ieee.org,
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. 集積回路基礎（先週の続き）
3. 周波数利用
4. LSIと通信技術

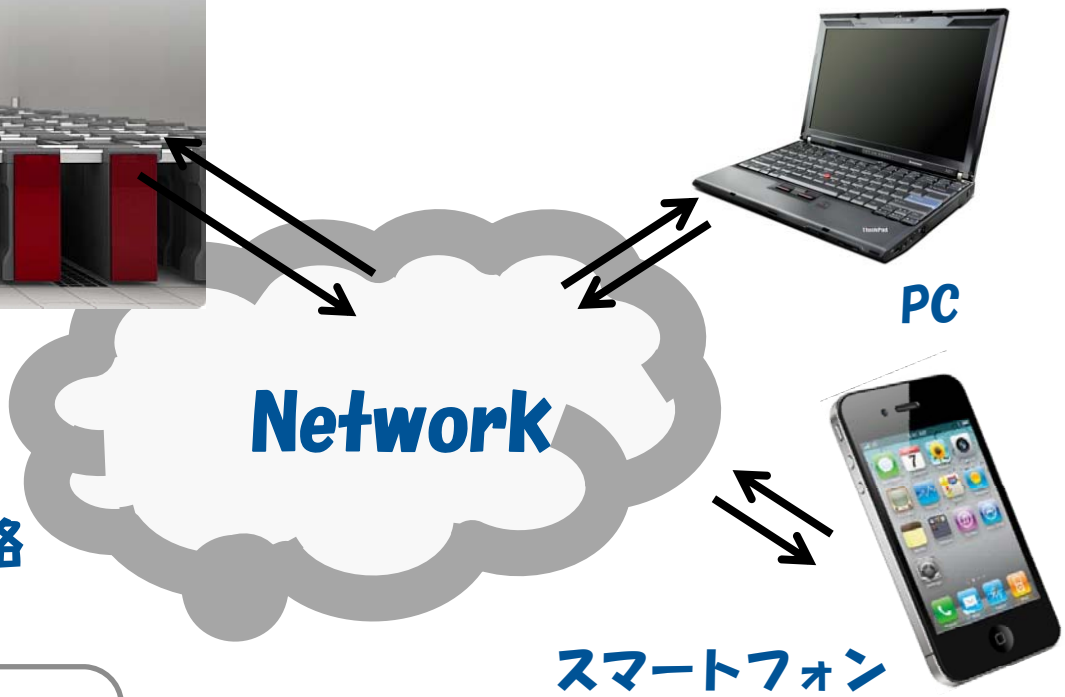
本資料は、講義の際に配布した資料に説明部分を補足したものである。

これからを考える。

シリコン屋の視点

現 在

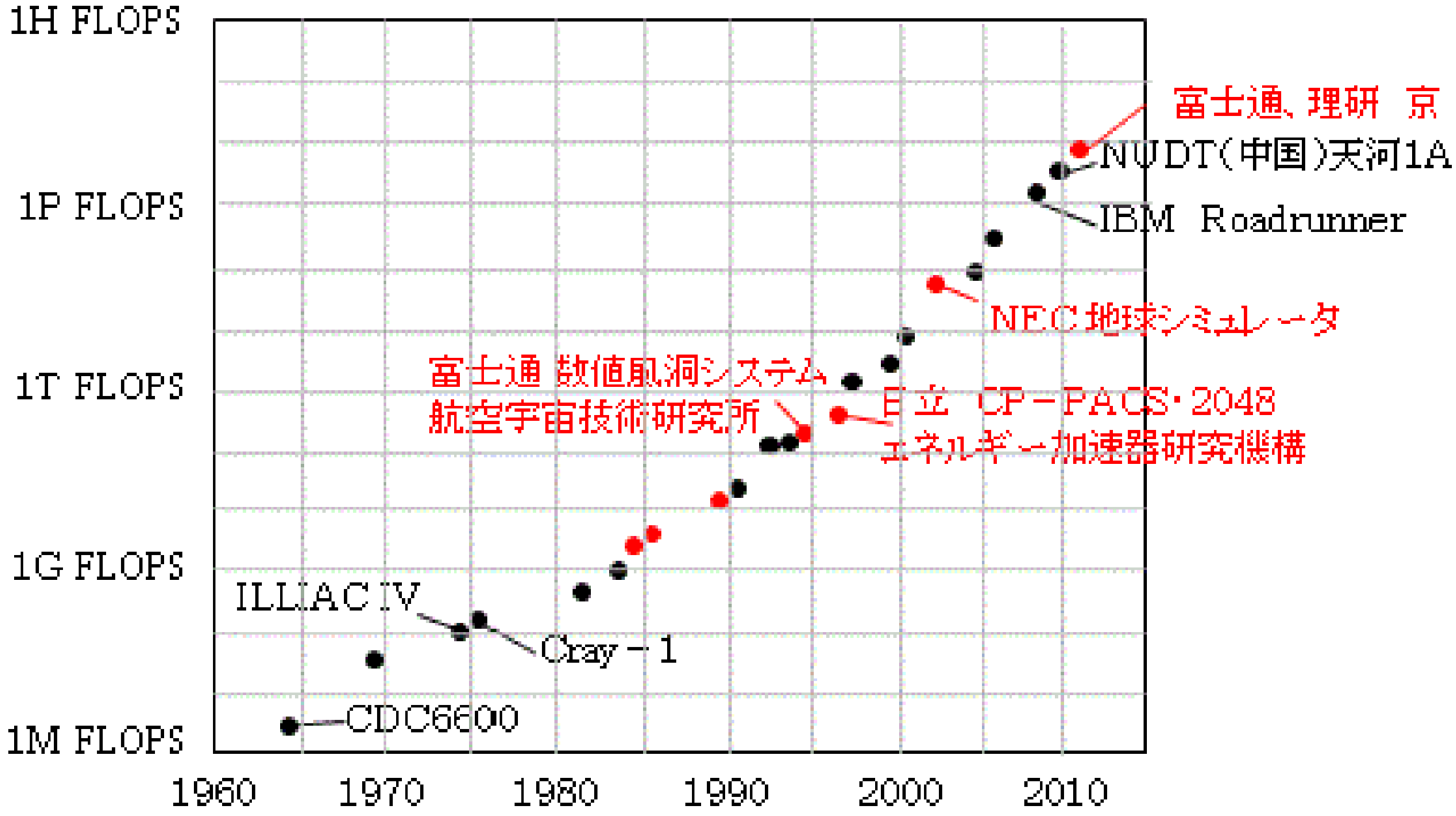
スパコン／サーバー



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

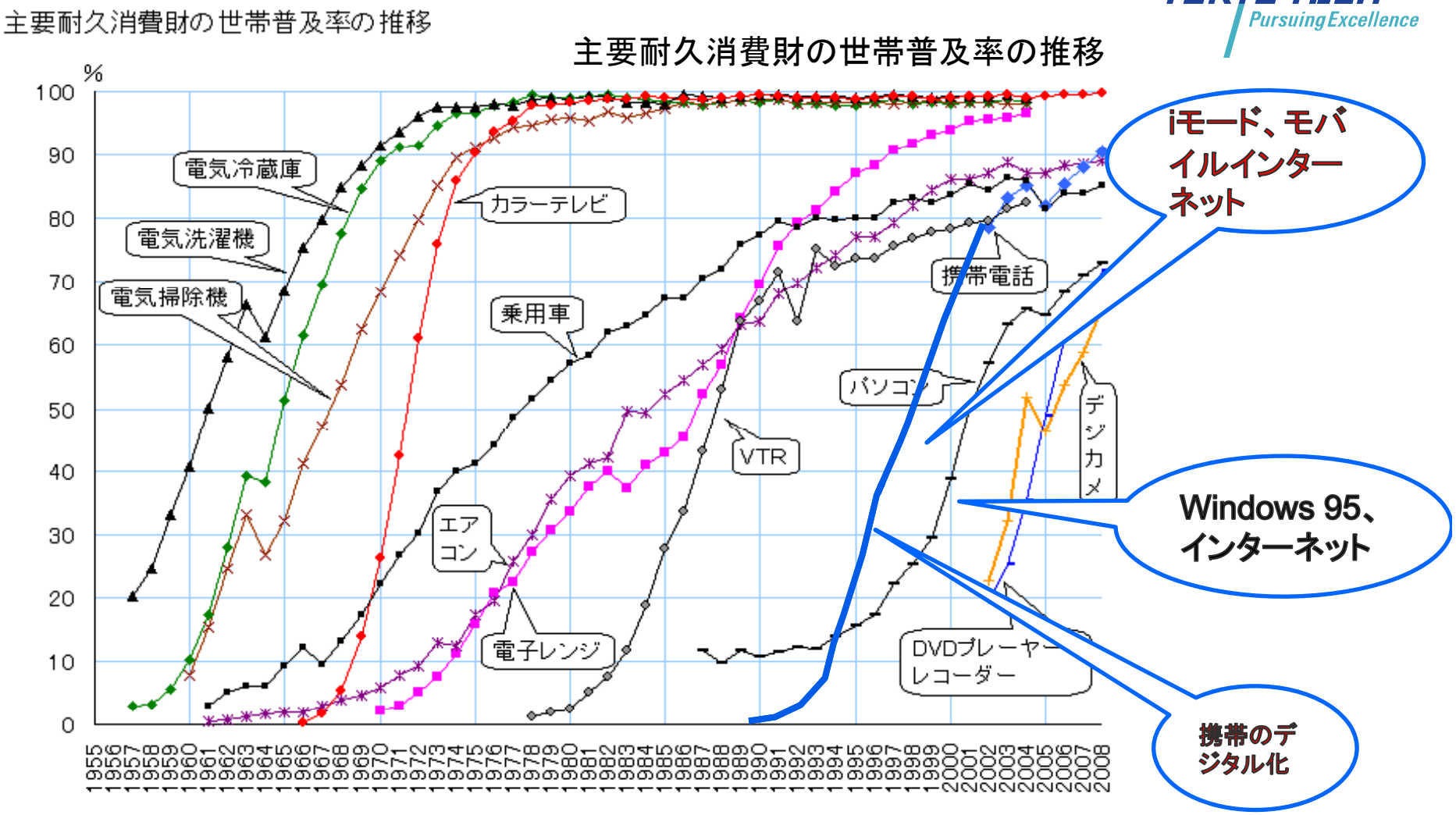
今の製品と20年前の製品

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



（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）

- 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

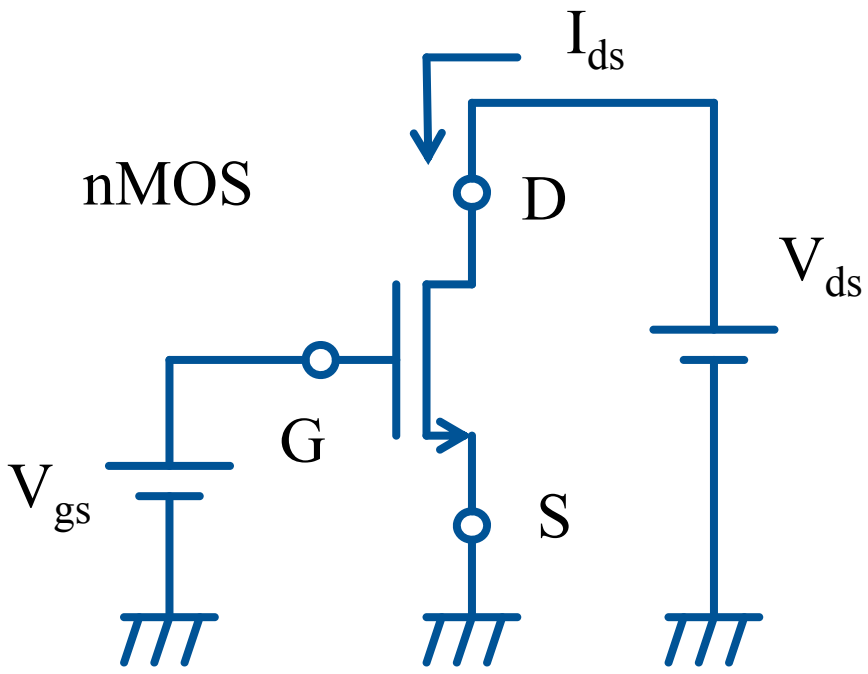
1. はじめに
2. 集積回路基礎（先週の続き）
3. 周波数利用
4. LSIと通信技術

MOSFET電流電圧特性

$$I_{DS} = \frac{W}{L}\mu C_{ox}\left[\left(V_{GS} - V_{th}\right)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right] \quad V_{DS} < V_{GS} - V_{th} \qquad (5)$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2}\frac{W}{L}\mu C_{ox}\left(V_{GS} - V_{th}\right)^2 \quad V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \qquad (6)$$

- V_{th}:閾値電圧
- W:ゲート幅
- L:ゲート長
- μ:　移動度
- C_{ox}:酸化膜容量



MOSFET回路の基礎中の基礎

TOKYO TECH Pursuing Excellence

$$I_{DS} = \frac{W}{L}\mu C_{ox}\left[\left(V_{GS} - V_{th}\right)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right] \quad V_{DS} < V_{GS} - V_{th} \qquad (5)$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2}\frac{W}{L}\mu C_{ox}\left(V_{GS} - V_{th}\right)^2 \quad V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \qquad (6)$$

$$V_{th} = 0.45\ [\mathrm{V}]$$

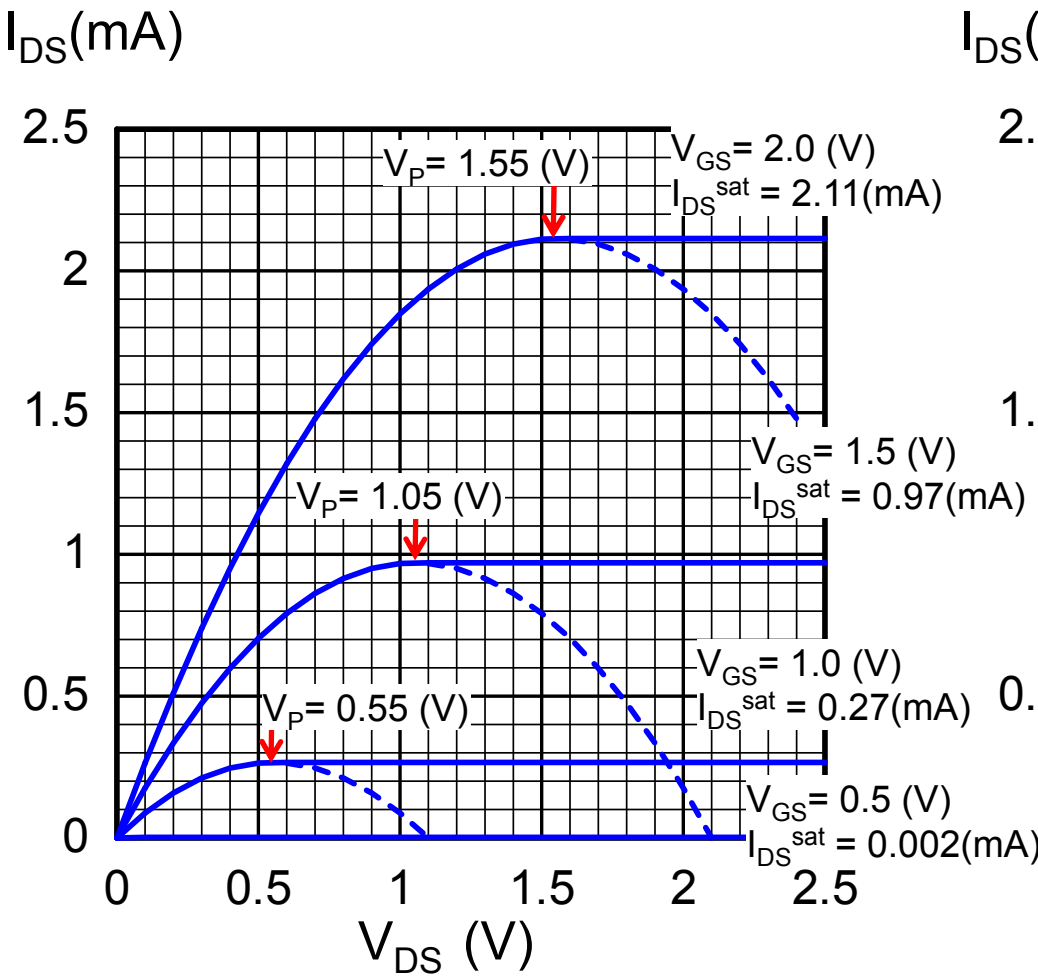
$$\frac{W}{L} = 8$$

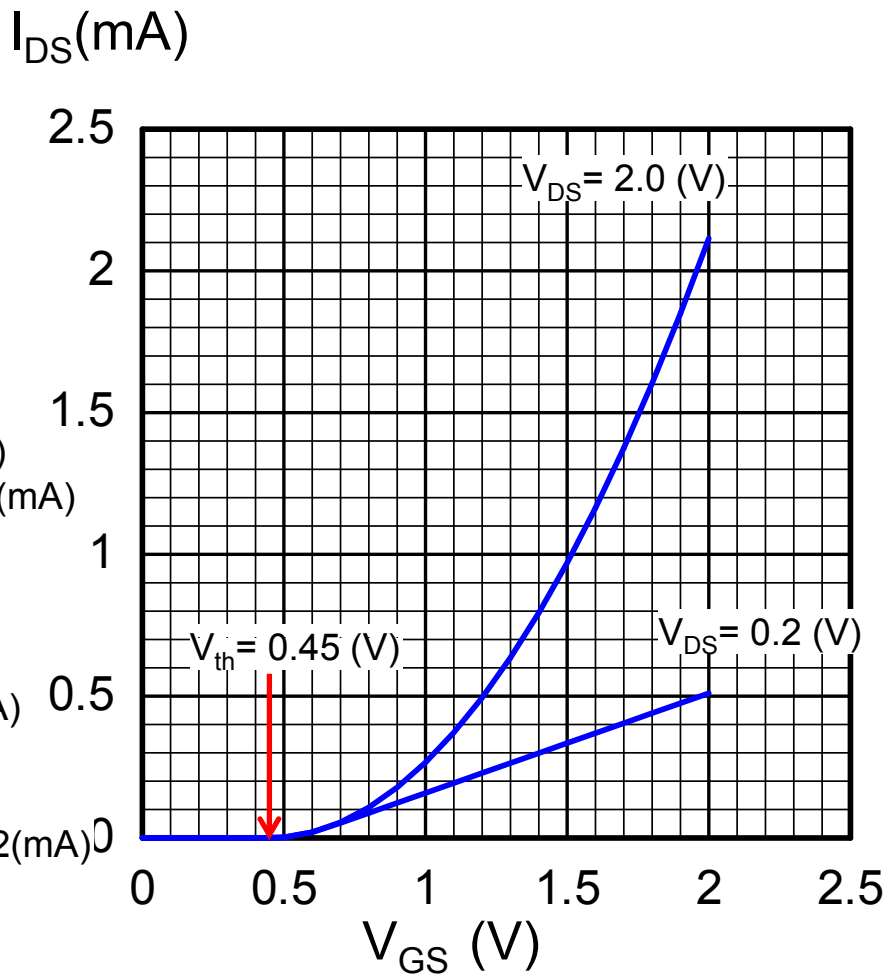
$$\mu C_{ox} = 220\ [\mu\mathrm{A/V^2}]$$

- 宿題　左の数値を利用して、以下の特性を方眼紙にプロットせよ。

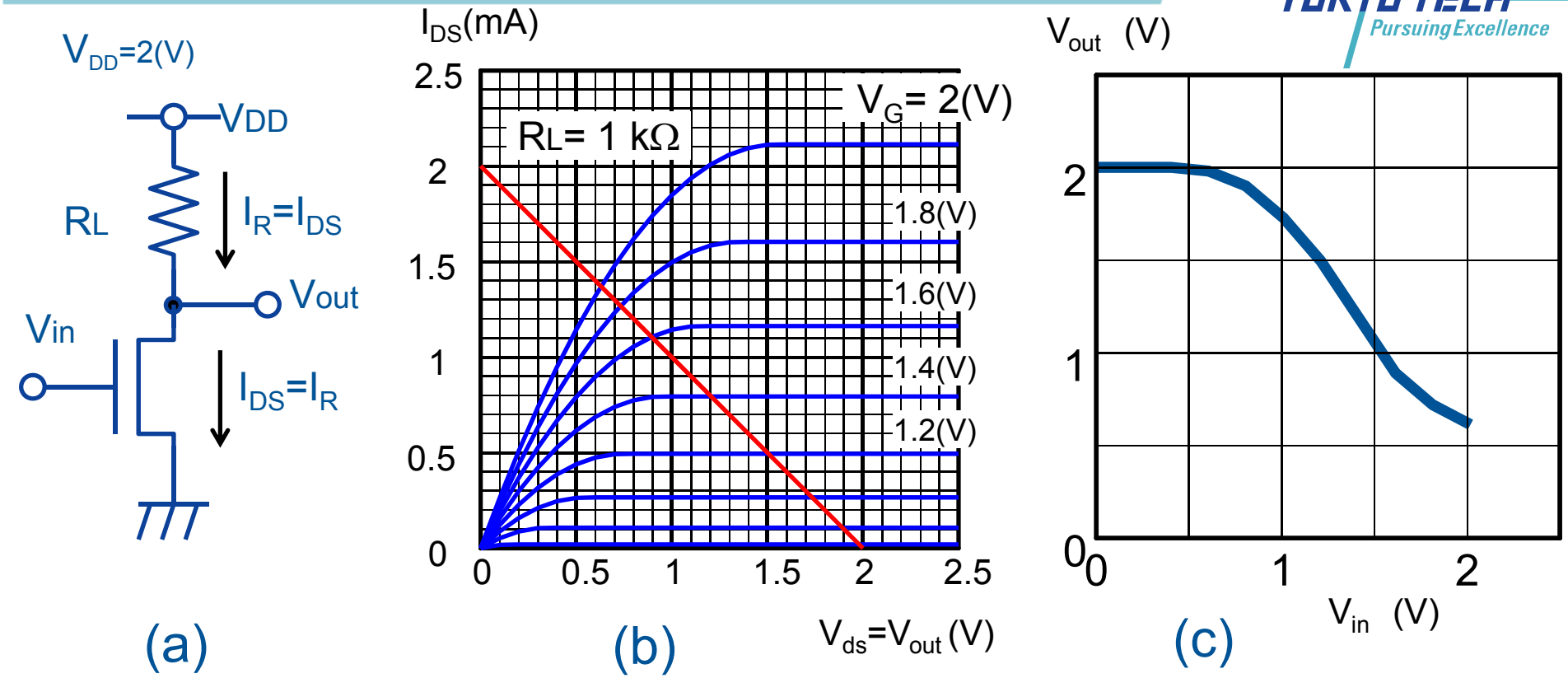
1. V_{GS}= 0.5, 1.0, 1.5, 2.0Vとしたときの、I_{DS}-V_{DS}特性（V_{DS}は0から2Vとする）
2. V_{DS}=0.2、2.0VとしたときのI_{ds}-V_{GS}特性（V_{GS}は0から2Vとする）

MOSFETの電流電圧特性（宿題の答え）



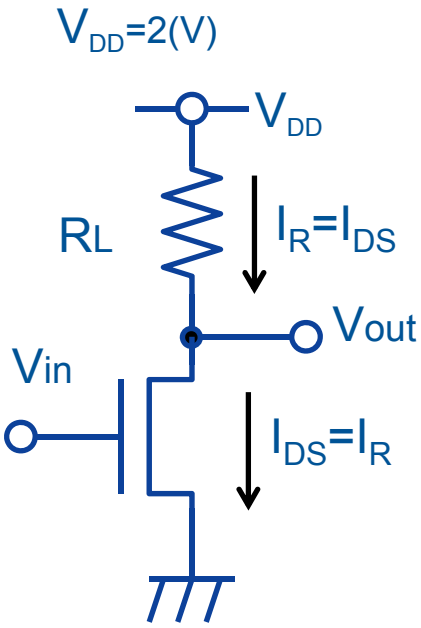


MOSFET回路

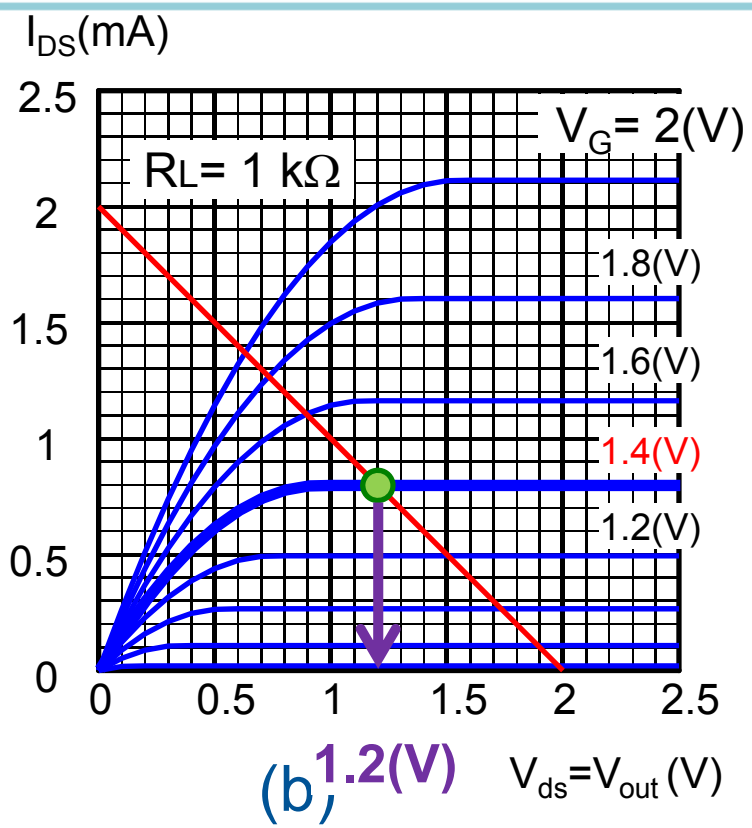


- 図(a) MOSFET基本回路
- 図(b) MOSFET特性（青：I_{DS}-V_{DS}特性、赤：I_R-V_{out}特性）
- 図(c) 基本回路ののV$_{in}$-V$_{out}$特性
- 図(c) この特性はデジタル回路でもアナログ回路でも同じ！

MOSFET回路



(a)



(b)

1. 抵抗R_Lに流れる電流（赤線）

$$I_R = \frac{V_{DD} - V_{out}}{R_L}$$

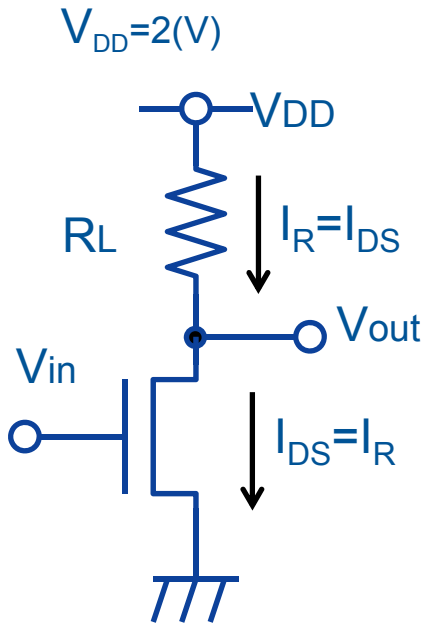
$$y切片 \frac{V_{DD}}{R_L} = \frac{2\,[\mathrm{V}]}{1\times10^3\,[\Omega]} =$$

$$2\times10^{-3}[\mathrm{A}] = 2\,[\mathrm{mA}]$$

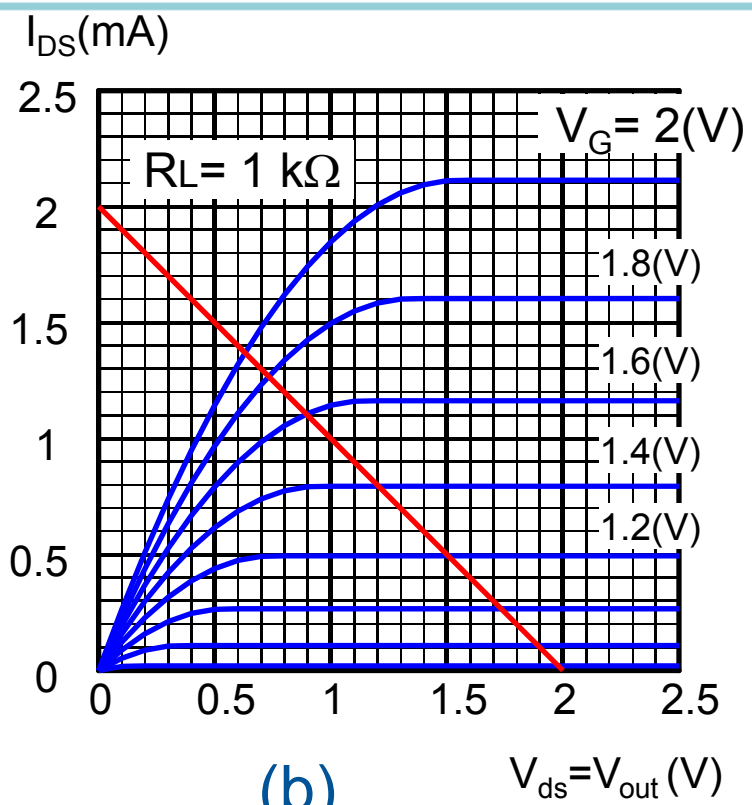
2. MOSFETに流れる電流（Blue lines）

3. V_{in}=1.4（V)のI_{DS}（青線）とI_R（赤線）の交点
4. この交点のV_{DS}は、V_{DS} =V_{out}=**1.2(V)**
5. 入力電圧V_{in}を変化させて、V_{out}を求めると、V_{in}-V_{out}特性を得る。

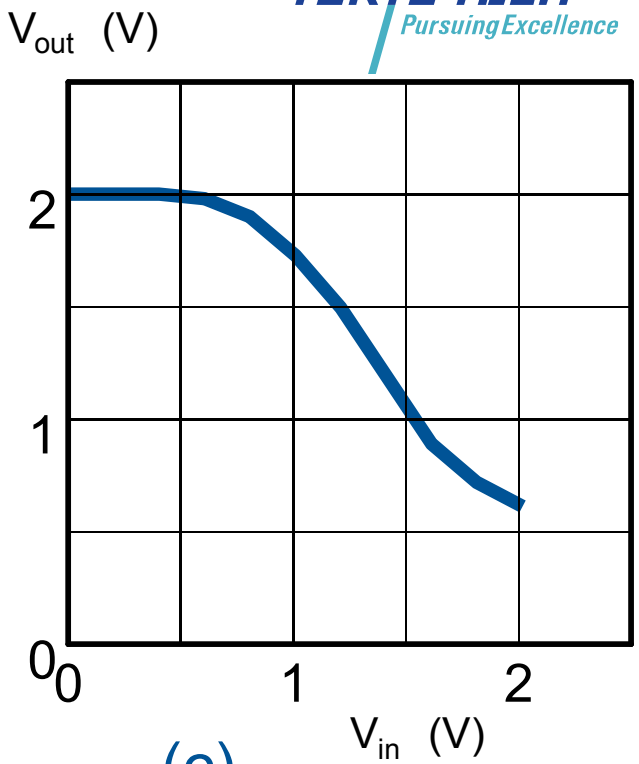
MOSFET回路



(a)



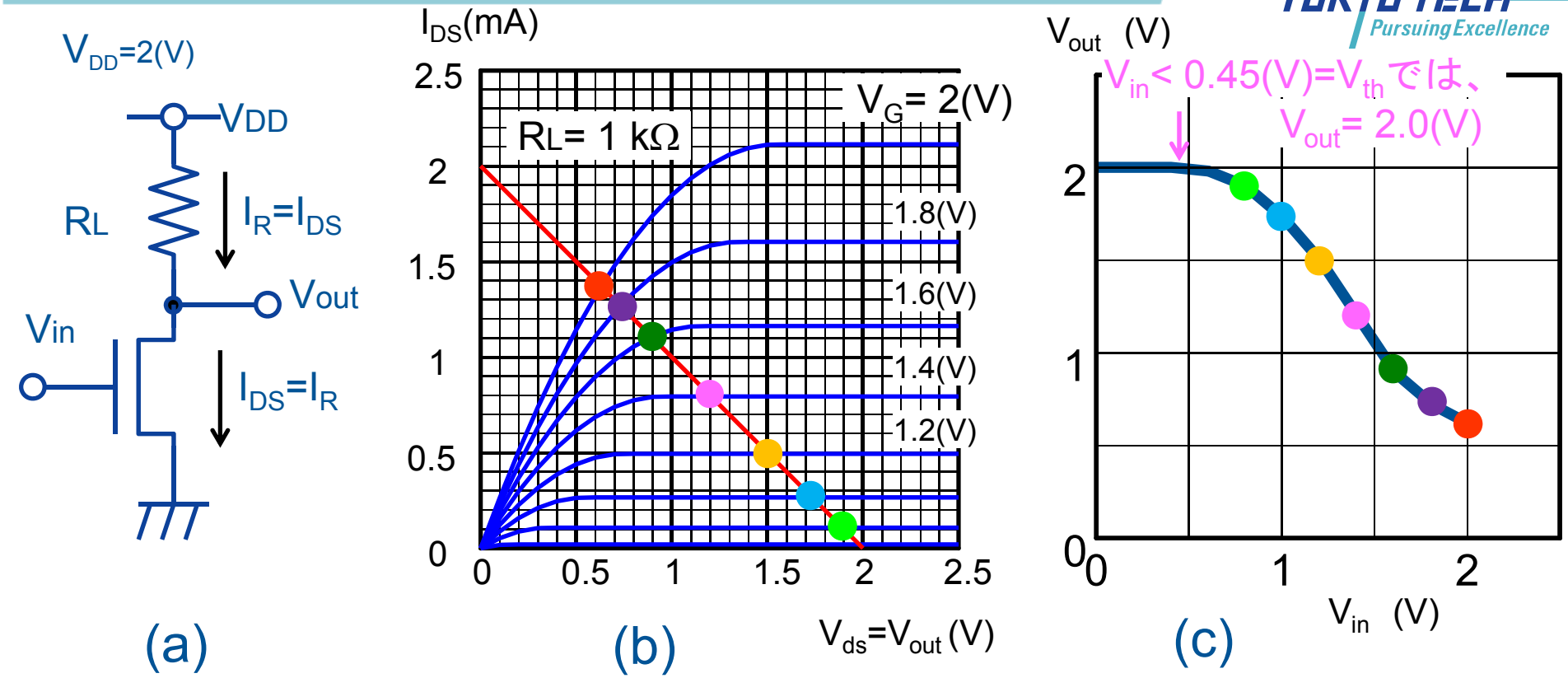
(b)



(c)

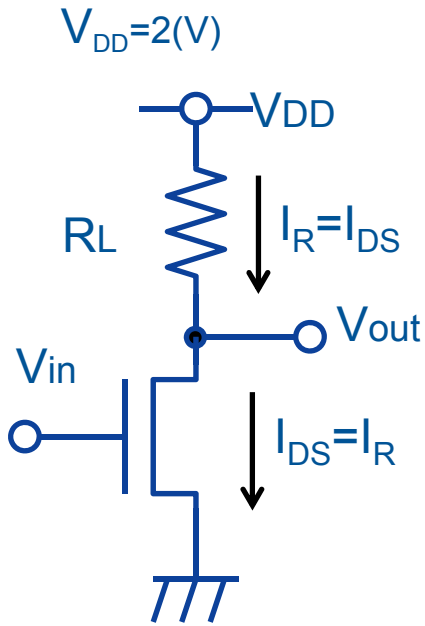
- V_{in} =2.0(V)の時のV_{out}？
- V_{in} =1.8(V)の時のV_{out}？　と順次求めると図(c)になる。

MOSFET回路

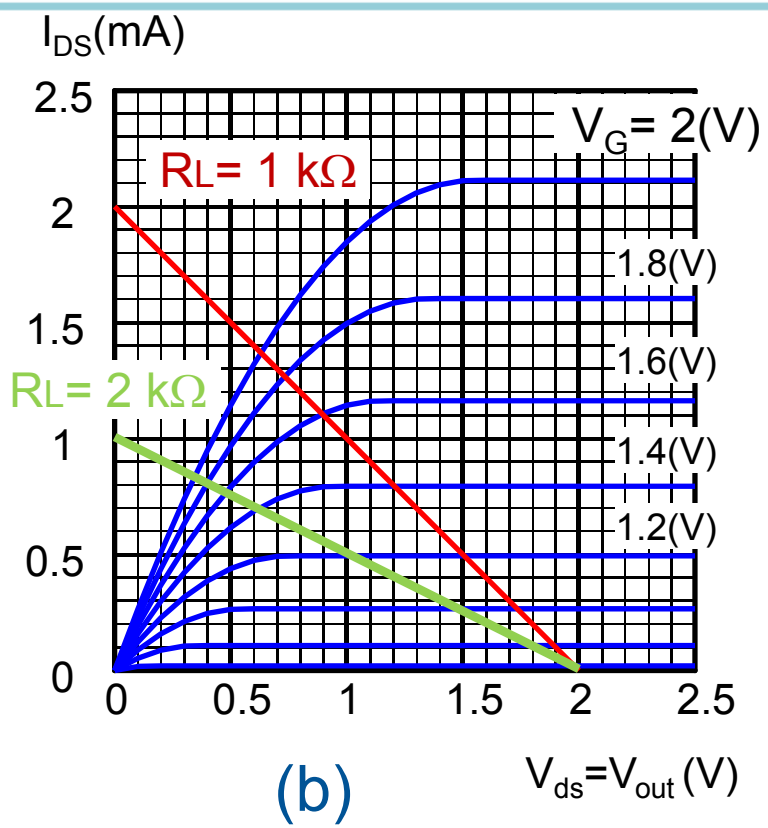


- V_{in} =2.0(V)の時のV_{out}？
- V_{in} =1.8(V)の時のV_{out}？　と順次求めると図(c)になる。

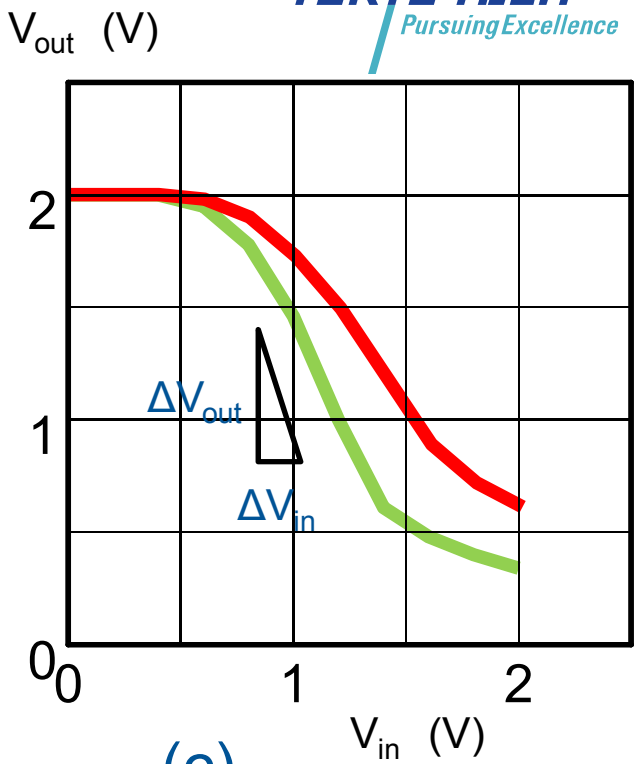
MOSFET回路



(a)



(b)



(c)

- R_L =2(kΩ)はどうなるか？
- Gain（増幅率）= ΔV_{out}/ ΔV_{in}

MOSFET回路

- RL=2(kΩ)の時の増幅率を求める。
- 図(c)から、 $Gain: G = \left| \Delta V_{out} / \Delta V_{in} \right| \approx 3$
- 数式から検討してみる。

$$G = \left| \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \right| = \left| \frac{\Delta I_{DS} \times R_L}{\Delta V_{in}} \right| = \left| \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{in}} \right| \times R_L = g_m R_L$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu C_{ox} \left(V_{GS} - V_{th} \right)^2, when\ V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$$

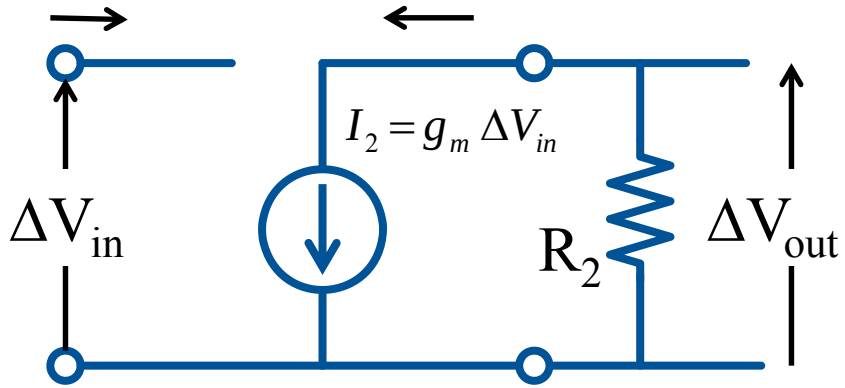
$$g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{W}{L} \mu C_{ox} \left(V_{GS} - V_{th} \right)$$

$$g_m = 8 \times 220 \left[\mu A / V^2 \right] \left(\approx 1.2 - 0.45 \right) \left[V \right] \approx 1.32 \times 10^{-3} \left[A/V \right]$$

$$G = g_m R_L = 1.32 \times 10^{-3} \left[A/V \right] \times 2 \times 10^3 \left[\Omega \right] \approx 2.6$$

小信号等価回路

- MOSトランジスタ
  - Gateが制御端子、
  - 挙動は「電圧制御電流源」
- 小信号等価回路



$$G = \left| \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \right| = \left| \frac{\Delta I_{DS} \times R_L}{\Delta V_{in}} \right| = \left| \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{in}} \right| \times R_L = g_m R_L$$

$$\Delta V_{out} = -g_m R_L \Delta V_{in}$$

dB

- Gain in dB, decibel $$G[\mathrm{dB}] = 20\log\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right|$$
- Examples

$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = 5 \rightarrow G[\mathrm{dB}] = 20\times\log 5 = 20\times 0.699 \approx 14\,\mathrm{dB}$$

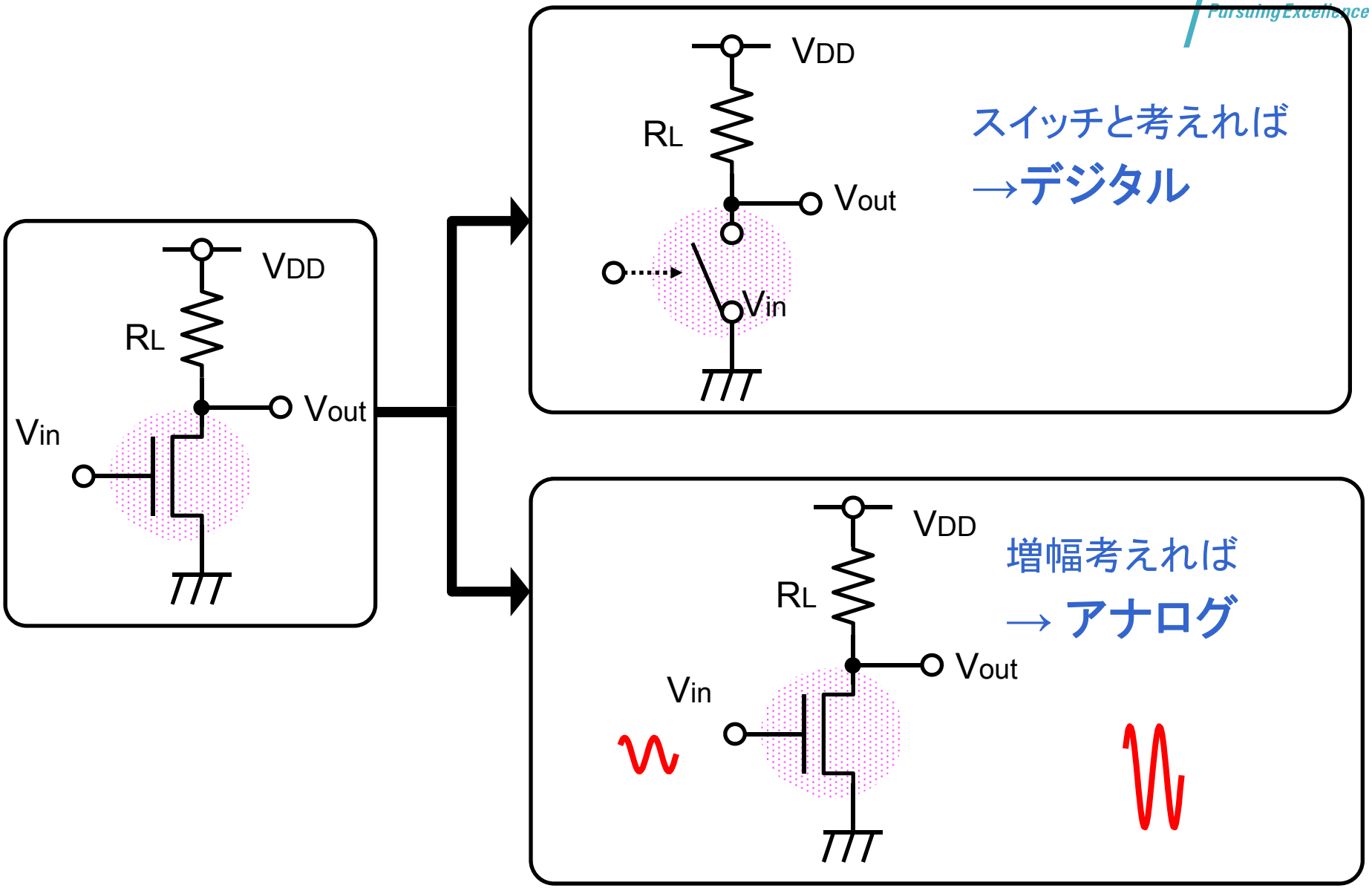
$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = 10 \rightarrow G[\mathrm{dB}] = 20\times\log 10 = 20\times 1 = 20\,\mathrm{dB}$$

$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = 100 \rightarrow G[\mathrm{dB}] = 20\times\log 100 = 20\times 2 = 40\,\mathrm{dB}$$

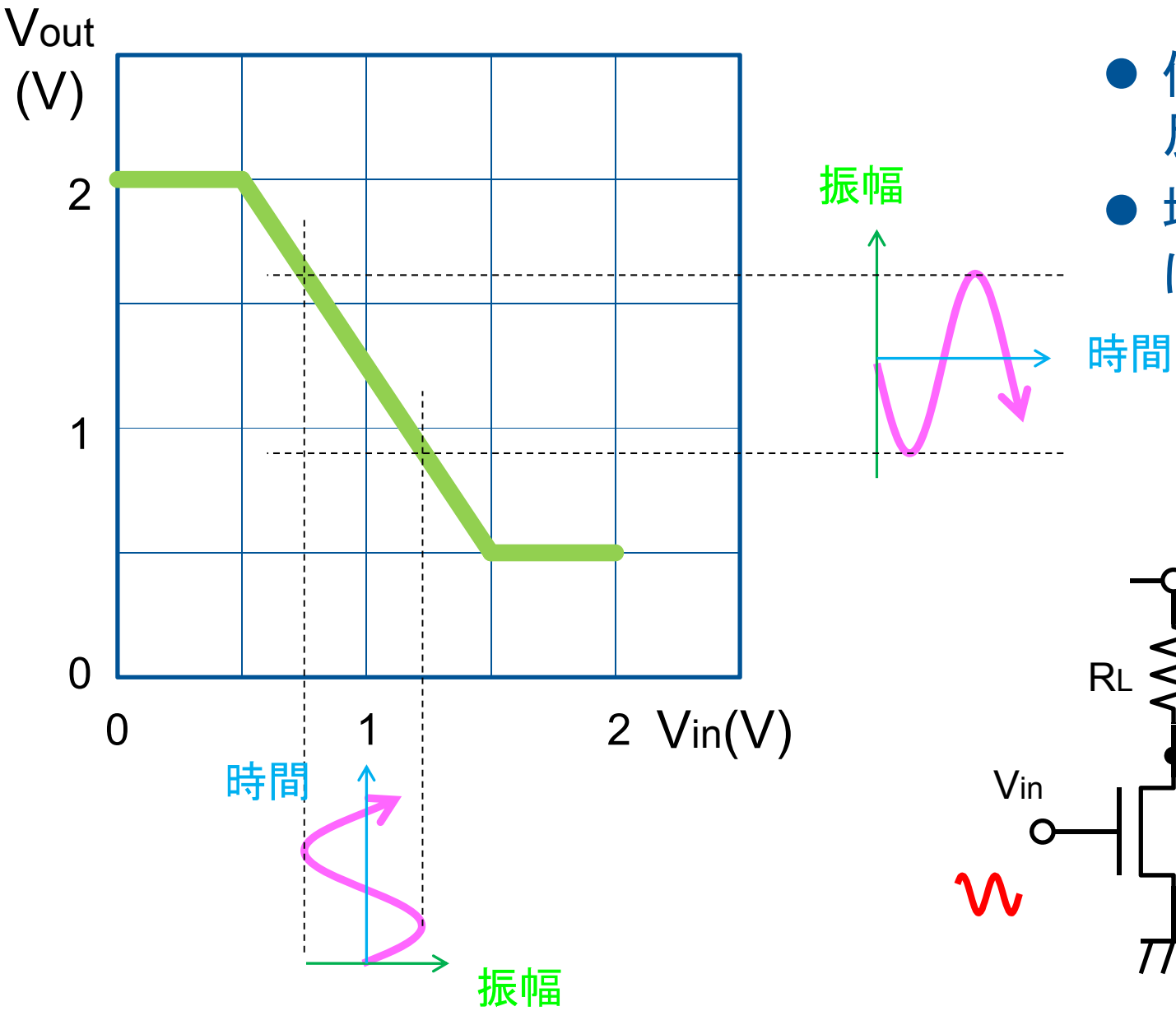
$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = 1 \rightarrow G[\mathrm{dB}] = 20\times\log 1 = 20\times 0 = 0\,\mathrm{dB}$$

$$\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right| = 0.5 \rightarrow G[\mathrm{dB}] = 20\times\log 0.5 = 20\times(-0.303) = -6\,\mathrm{dB}$$

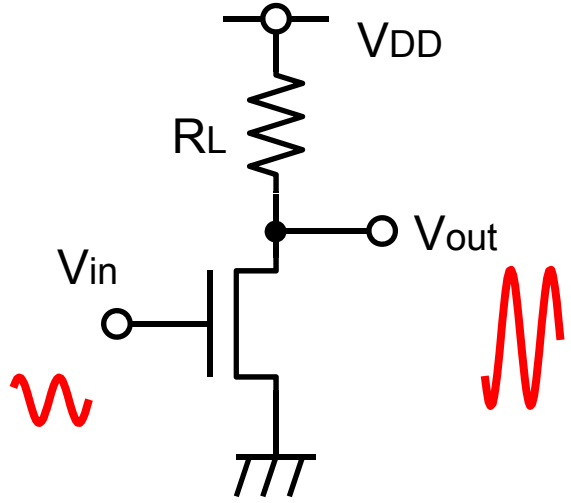
集積回路の基礎の基礎


VDD
RL
Vout
Vin
VDD
RL
Vout
Vin
スイッチと考えれば
→デジタル
VDD
RL
Vout
Vin
増幅考えれば
→ アナログ

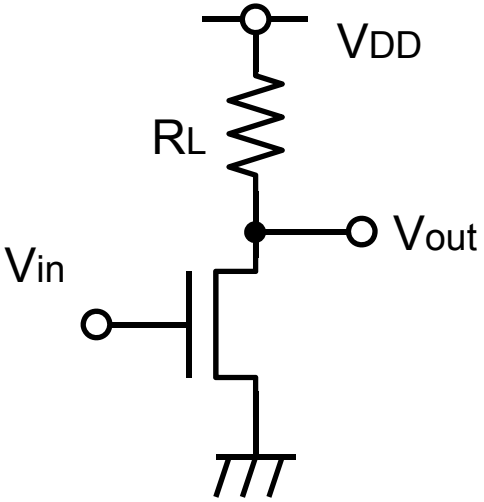
アナログ回路（増幅器）の動作

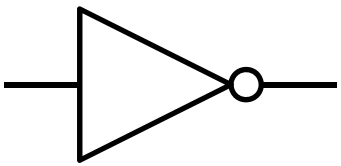


- 信号の位相は反転する。
- 増幅率（gain）は傾き。

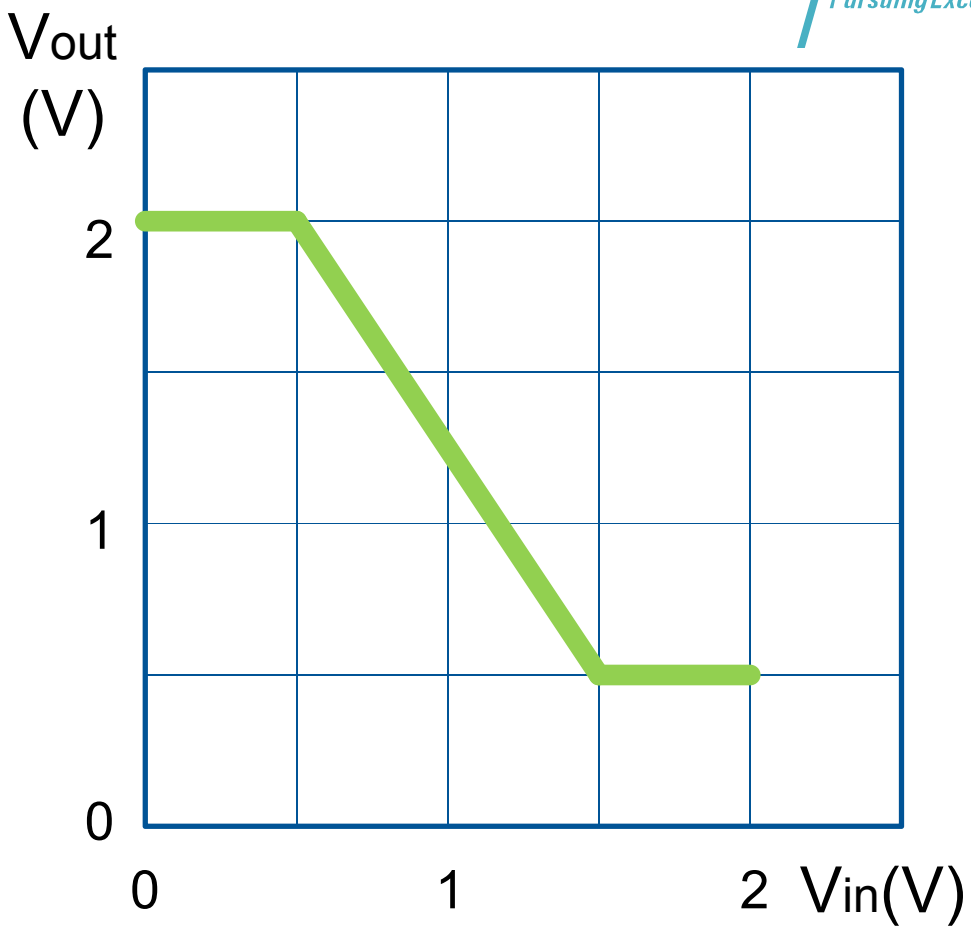


デジタル論理回路(inverter　反転器)



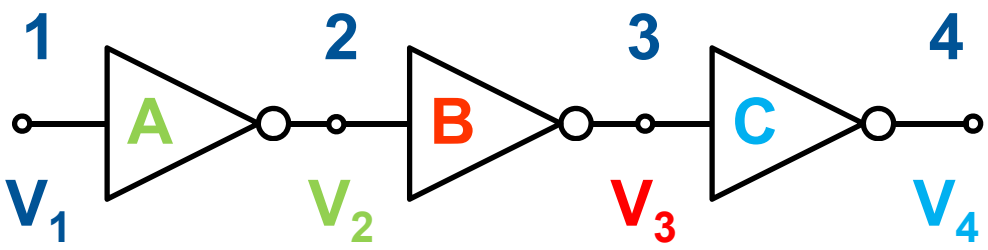


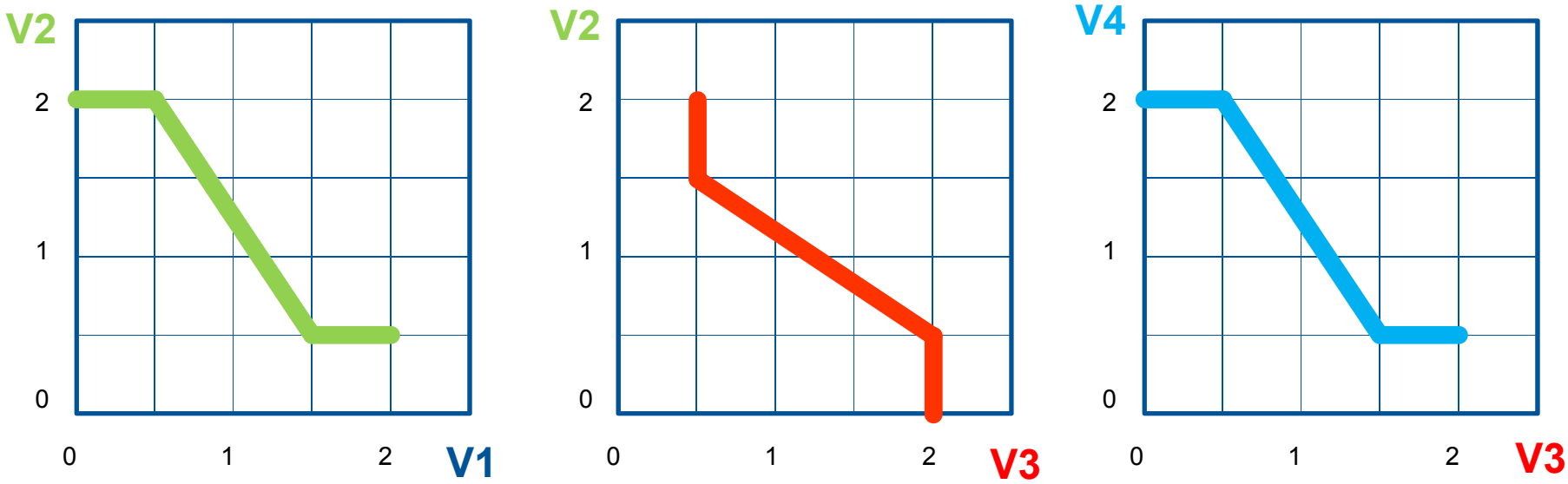
回路記号



- V_{in}は、0またはV_{DD}(=2 volts)
- Voutは、V_{DD}または 0+α (今の場合、0.5volts)

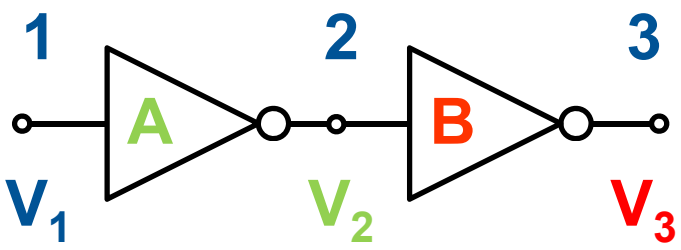
Inverter chain





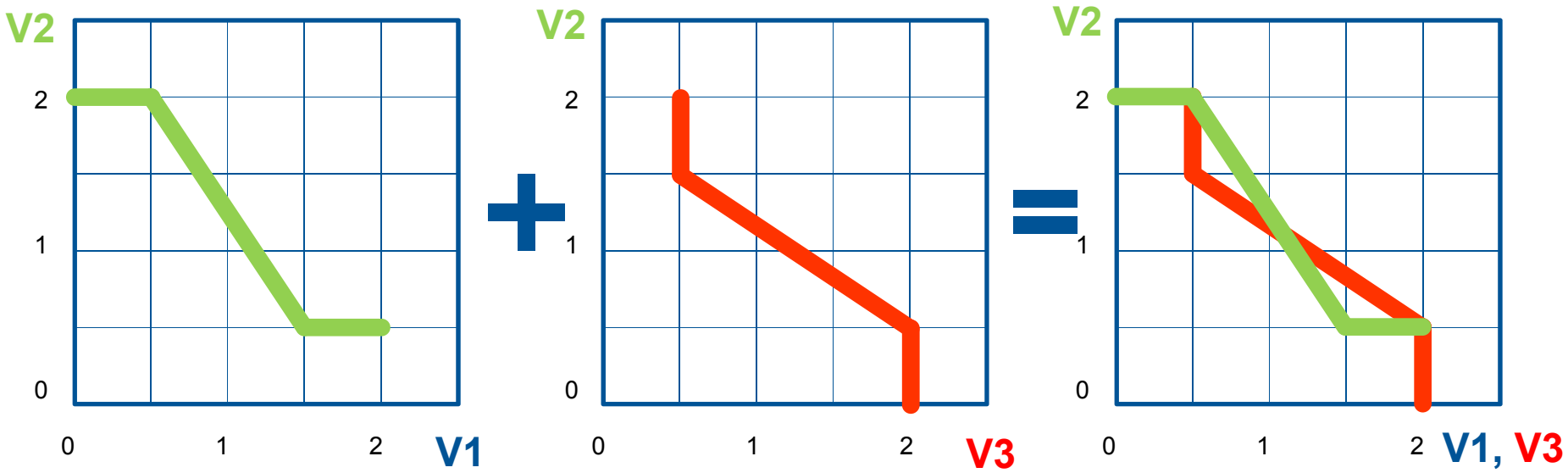
- V1=0(V)→V2=2(V) →V3=0.5(V) →V4=2(V)
- V1=2(V)→V2=0.5(V) →V3=2(V) →V4=0.5(V)
- High → Low → High → Low → High → Low → ・・・

Inverter chain



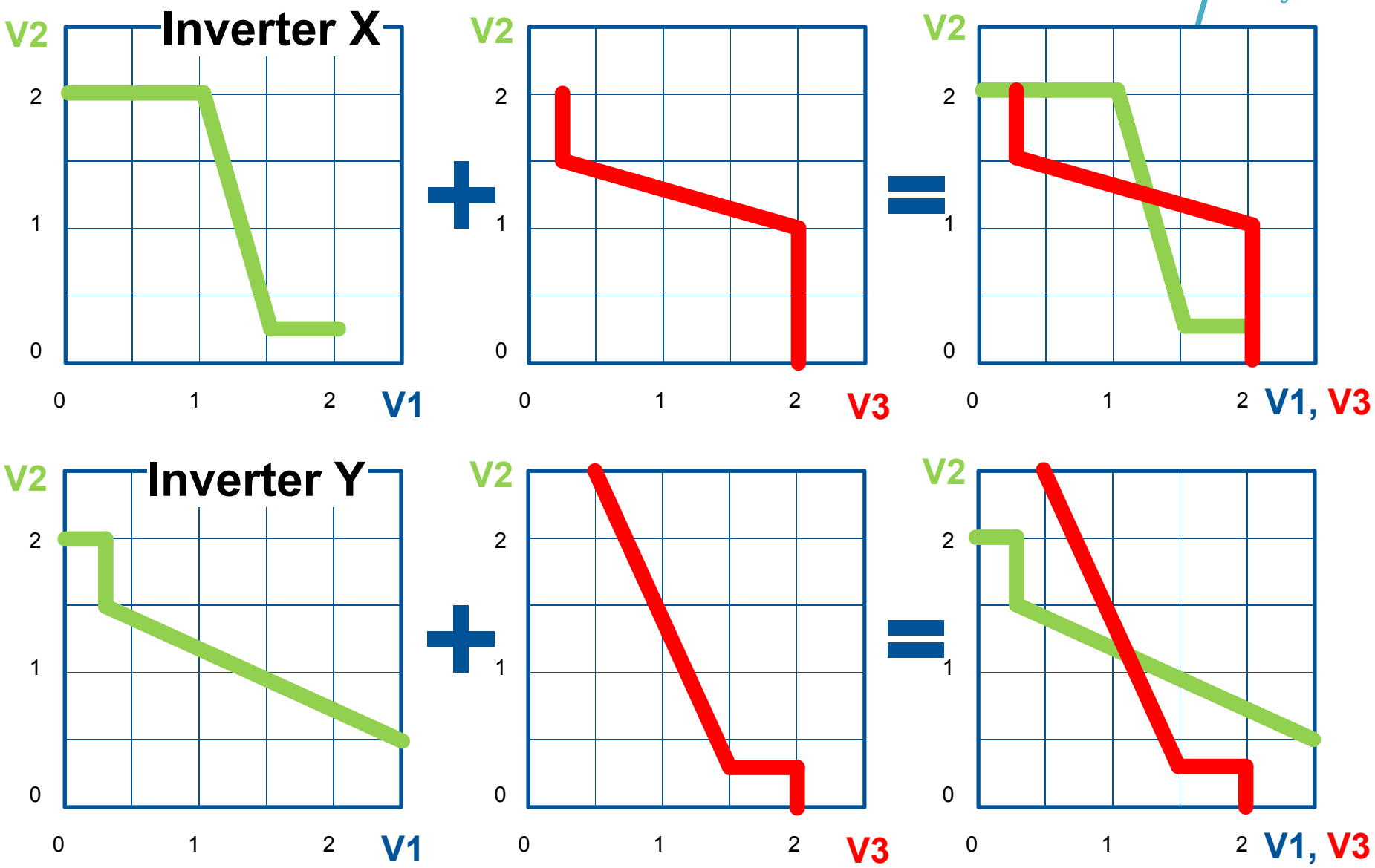
眼鏡カーブ

Butterfly curve

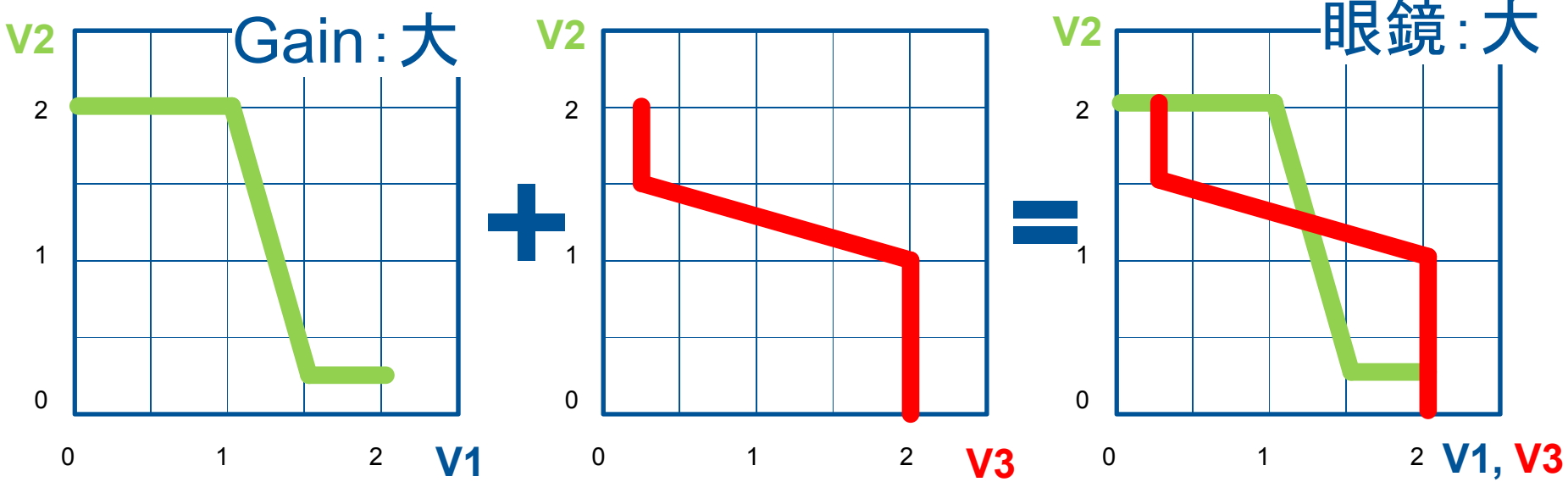


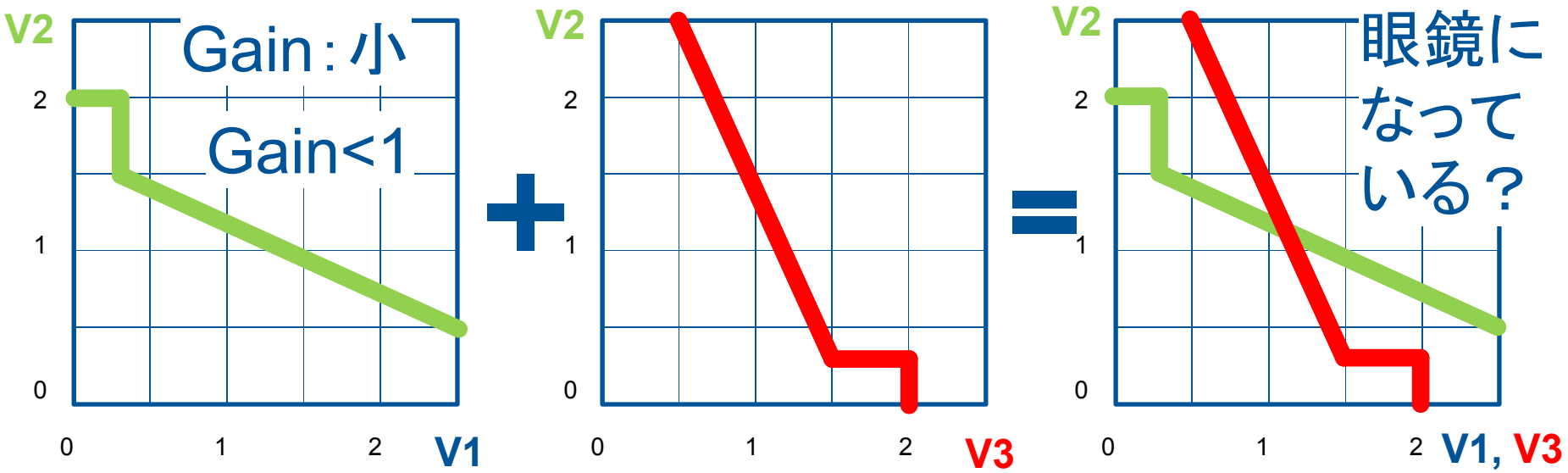
● 眼鏡カーブから何がわかる？

Inverter chain



Inverter chain





Inverter chain （宿題）

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

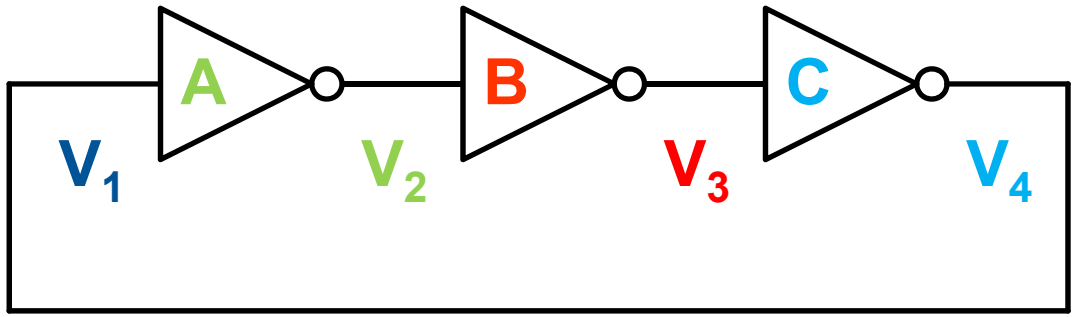
- Inverter X及びYで、inverter chainを作る。

1. 一段目に、1.75(V)の電圧を加えたときの2段目以降の出力電圧(V2,V3,V4,・・・)を求めよ。
2. InverterがinverterとしてIn動作するためにgainが備える条件は？

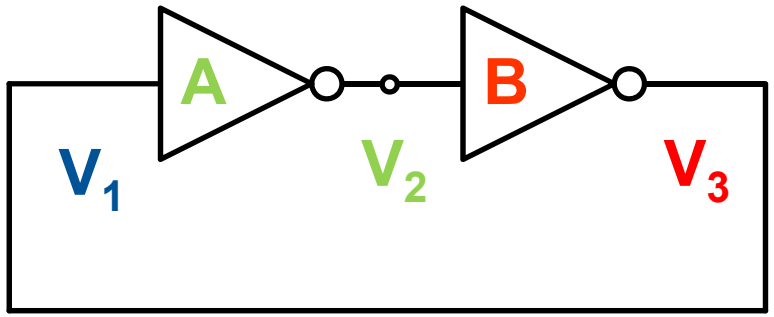
- 上記(1)(2)について電子メイルで解答を送付すること。締切：平成24年1月31日（火）
- Subject欄に「★電気電子基礎・宿題」と書く。
- メイルには、学籍番号、氏名を記載のこと。

Inverter chain

- どのような動作をするだろうか？

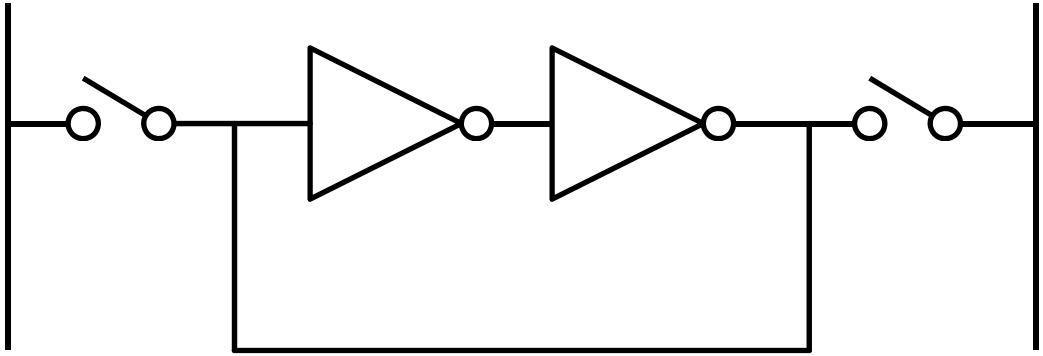


- V1がHighとする。V4はLowとなる。端子電圧は安定しない。
- リング発振器

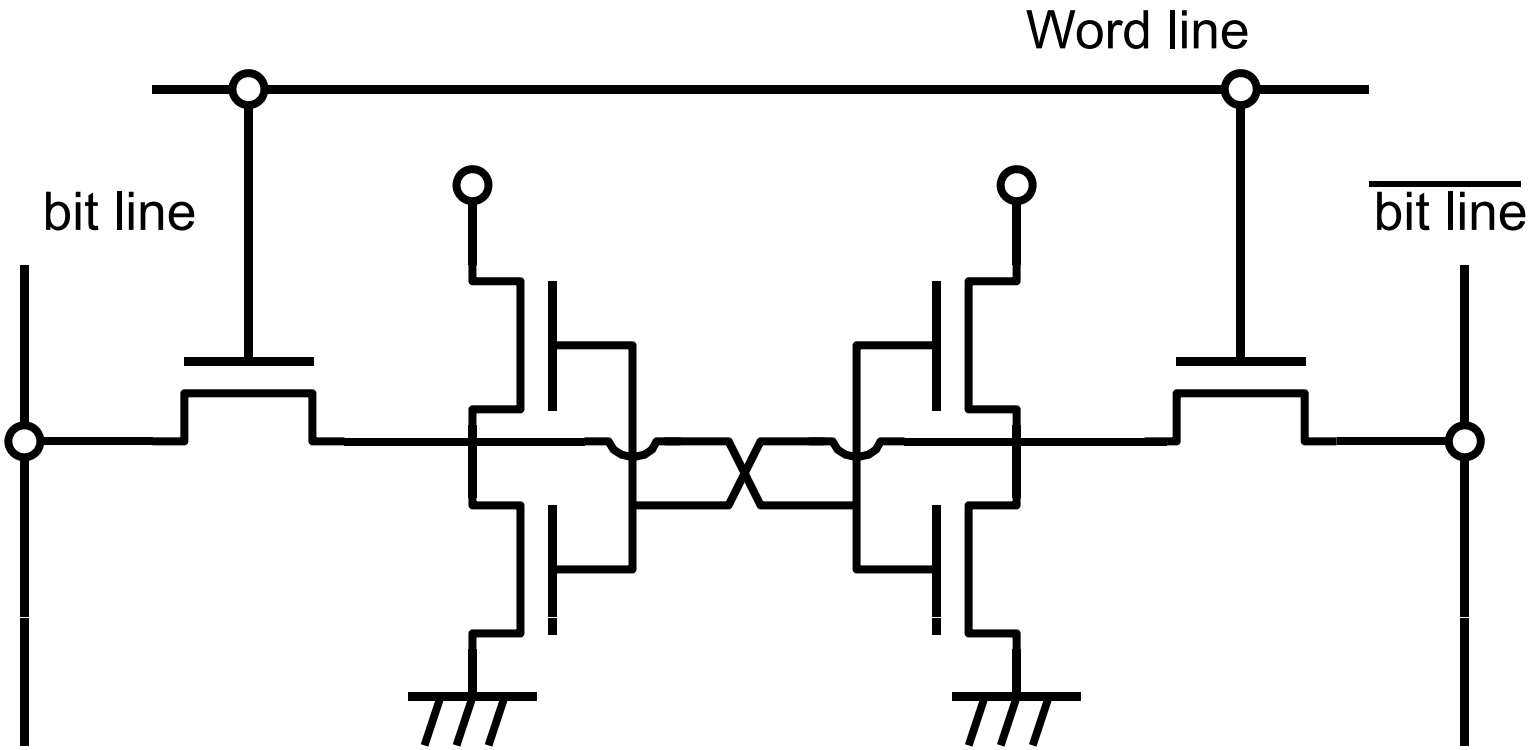


- V1（=V3）はHighまたはLowで安定する。

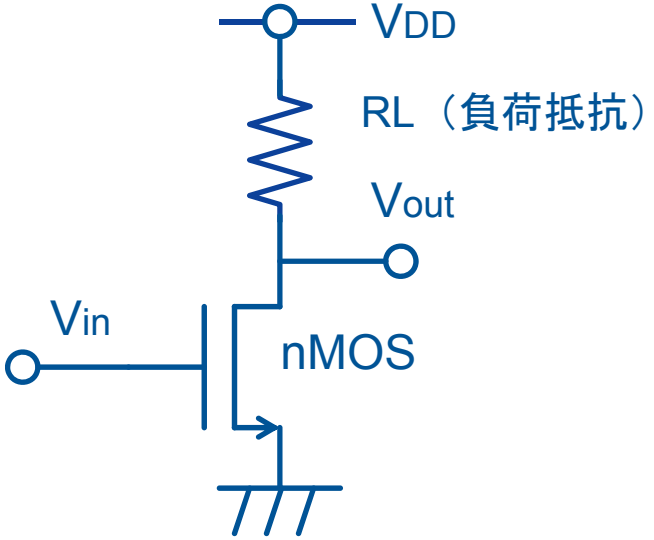
SRAM (Static Random Access Memory)

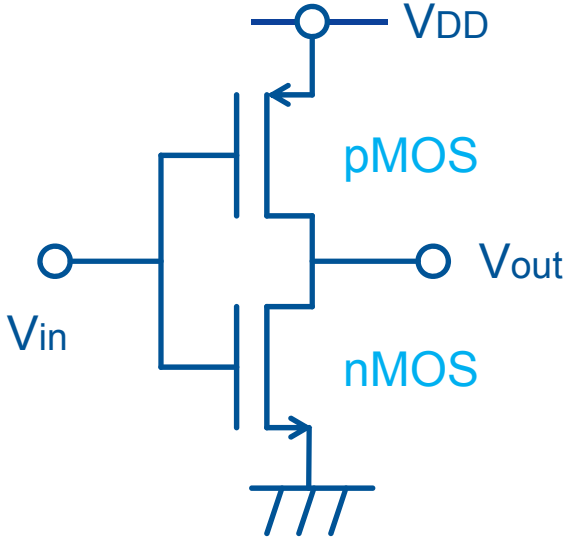


- SRAMはトランジスタのみで構成される。
- 高速動作（キャッシュ）

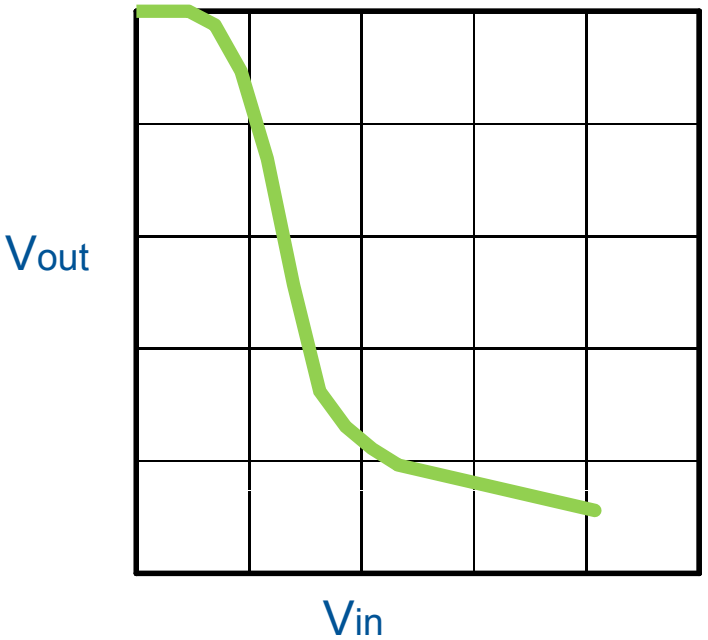


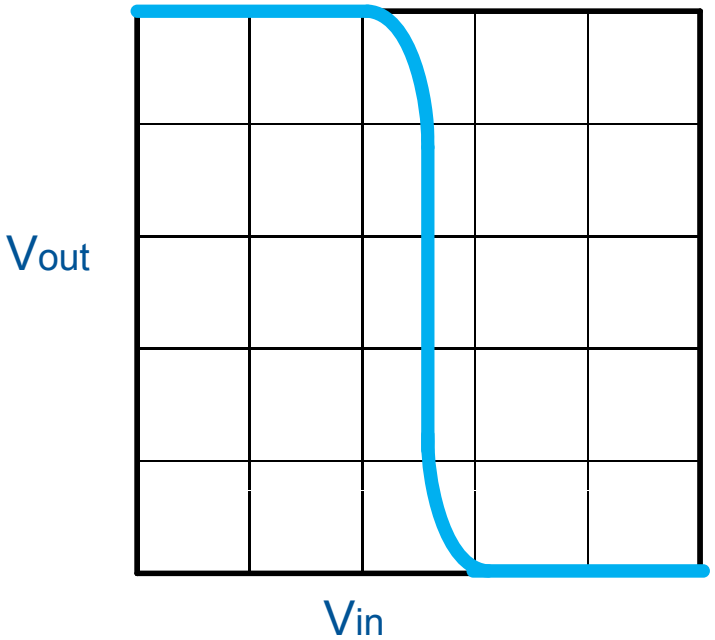
CMOS (Complementary MOS) 相補形



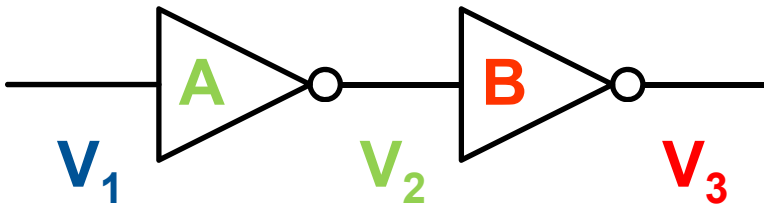


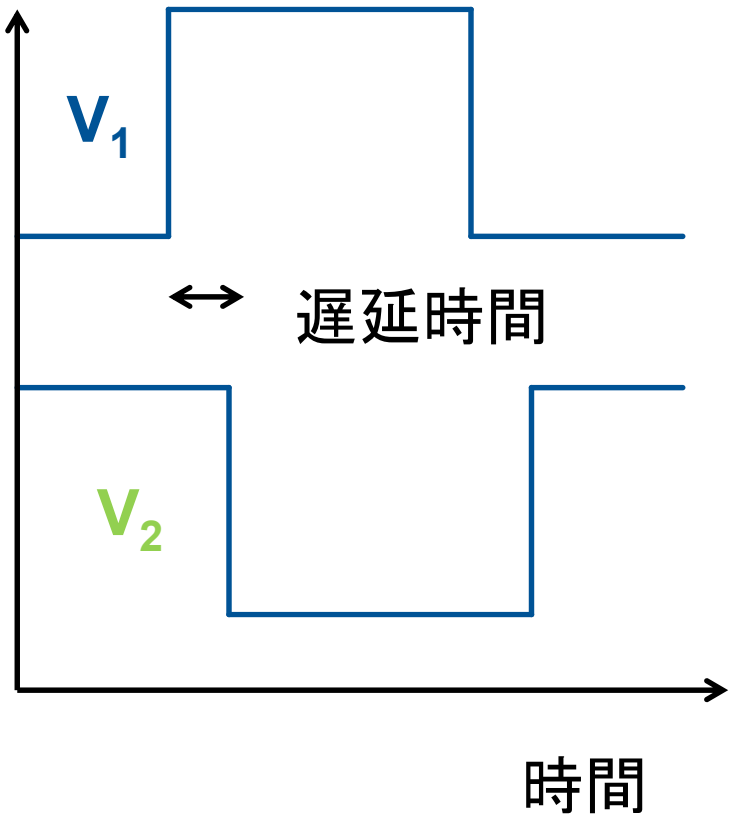
- 実質的に負荷抵抗が大きい。Gainが大きい
- 対称性が良い。
- 貫通電流が流れない。（低消費電力）

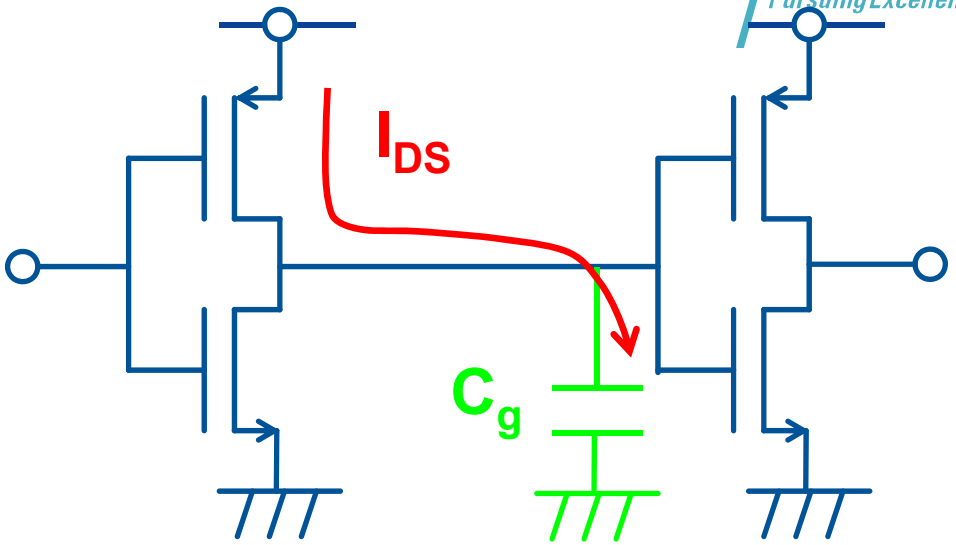




Inverter chain







- 遅延時間：次段のゲート容量を充電（放電）する時間

$$\tau = \frac{Q}{I} = \frac{C_g V_{DD}}{I_{DS}}$$

- 消費電力（充放電電力）

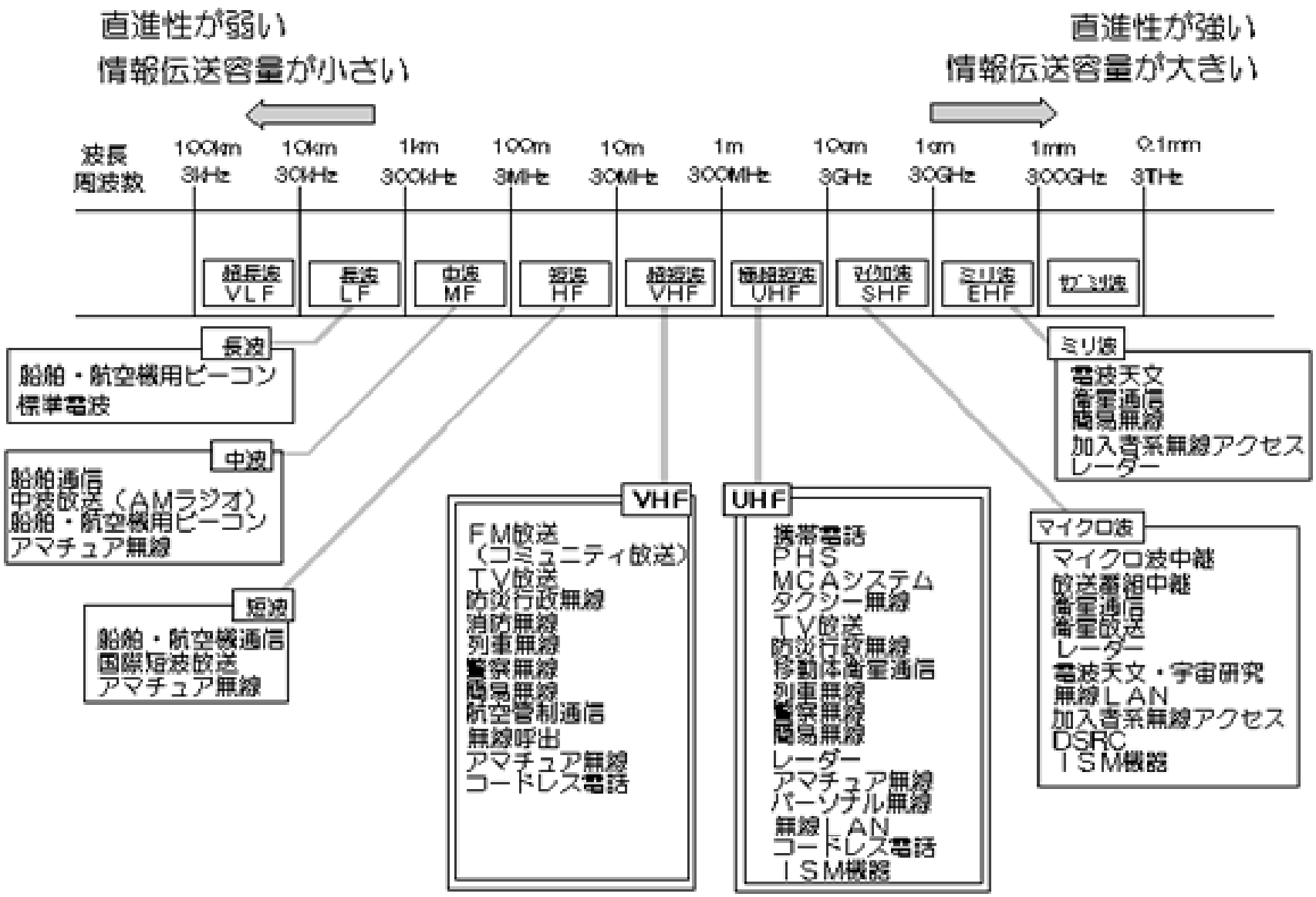
$$P = \alpha \times \left(\frac{1}{2} C V_{DD}^2 \right) \times f_{clock} \times (\text{ゲート数})$$

Outline

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

1. はじめに
2. 集積回路基礎（先週の続き）
3. 周波数利用
4. LSIと通信技術

周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴



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

周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

1. 超長波（VLF：Very Low Frequency）
   - 超長波は10～100kmの非常に長い波長を持ち、地表面に沿って伝わり低い山をも越えることができます。
   - また、水中でも伝わるため、海底探査にも応用できます。
2. 長波（LF：Low Frequency）
   - 長波の波長は1～10kmで、非常に遠くまで伝わることができます。1930年頃までは電信用として利用されていましたが、大規模なアンテナと送信設備が必要な欠点があることと、短波通信が発展したことにより、電信用にはあまり用い(にわ・あまりもちい)られなくなっています。
   - 長波の一部はヨーロッパやアフリカ等でラジオ放送に使われているほか、日本では無線航行用のロランC局や、船舶や航空機の航行用ビーコン及び電波時計などに時間と周波数標準を知らせるための標準周波数局に利用されています。
3. 中波（MF：Medium Frequency）
   - 中波の波長は100～1000mで、約100kmの高度に形成される電離層のE層に反射して伝わることができます。
   - 電波の伝わり方が安定していて遠距離まで届くことから、主にラジオ放送用として利用されています。送信機や送信アンテナは大規模なものが必要ですが、受信機は簡単なもので済む利点があります

周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

4. 短波（HF：High Frequency）

- 短波の波長は10～100mで、約200～400kmの高度に形成される電離層のF層に反射して、地表との反射を繰り返しながら地球の裏側まで伝わっていくことができます。
- 長距離の通信が簡単に行えることから、現在でも、遠洋の船舶通信、国際線航空機用の通信、国際放送及びアマチュア無線に広く利用され、今後も需要が続く見込みです。

5. 超短波（VHF：Very High Frequency）

- 超短波の波長は1～10mで、直進性があり、電離層で反射しにくい性質もあります、山や建物の陰にもある程度回り込んで伝わることができます。
- 短波に比べて多くの情報を伝えることが出来るため、アナログTV放送やFM放送の放送メディアを中心に、多種多様な移動通信に幅広く利用されています。

6. 極超短波（UHF：Ultra(ウルトラ) High Frequency）

- 極超短波の波長は10cm～1mで、超短波に比べて直進性が更に強くなりますが、多少の山や建物の陰には回り込んで伝わることもできます。
- 伝送できる情報量が大きく、小型のアンテナと送受信設備で通信できることから、携帯電話を初めとした多種多様な移動通信システムを中心に、空港監視レーダーや電子レンジ等に幅広く利用されています。最近では、電子タグへの応用が期待されているところです。

周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

7. マイクロ波（SHF：Super High Frequency）

- マイクロ波の波長は1～10cmで、直進性が強い性質を持つため、特定の方向に向けて発射するのに適しています。
- 伝送できる情報量が非常に大きいことから、主に電話局間や放送の送信所間を結ぶ固定の中継回線、衛星通信、衛星放送や無線LANに利用されています。この帯域は無線LANやFWAなどの無線アクセスシステム、次世代移動通信システムなどの移動通信システムへの需要が大きいことから、一部の周波数利用について見直しを行い、移動通信システムへの需要に応え、ワイヤレスブロードバンドを推進するための「電波開放戦略」が進行中です。
- この他、レーダーもマイクロ波の直進性を活用した利用システムのひとつで、気象レーダーや船舶用レーダー等に利用されています。

8. ミリ波（EHF：Extra High Frequency）

- ミリ波の波長は1mm～10mmと非常に短く、マイクロ波と同様に強い直進性があり、非常に大きな情報量を伝送することができますが、悪天候時には雨や霧による影響を強く受けてあまり遠くへ伝わることができません。
- このため、比較的短距離の無線アクセス通信や画像伝送システム、簡易無線、自動車衝突防止レーダー等に利用されている他、電波望遠鏡による天文観測が行われています。
- なお、低い周波数帯と比較してあまり利用が進んでいないことから、大容量・長距離の伝送を可能とする技術や無線装置の小型化・低価格化等、利用促進に向けた技術の研究開発が行われているところです。

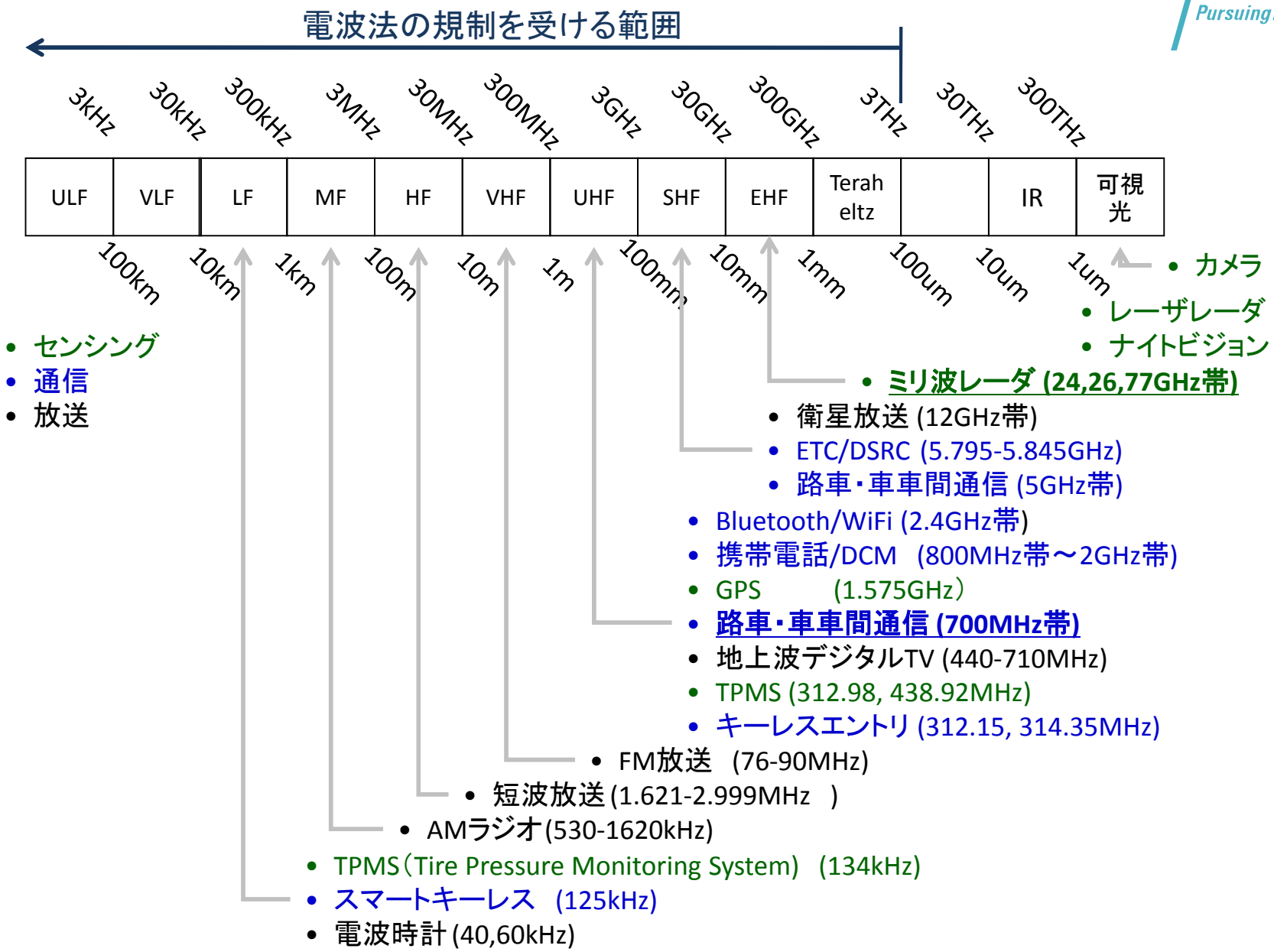
周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

7.　サブミリ波

- サブミリ波の波長は0．1mm～1mmで、光に近い性質を持った電波です。
- 現在の技術では巨大な無線設備が必要で、また水蒸気による吸収が大きいという性質があるため、通信用としてはほとんど利用されていませんが、一方では、ミリ波と同様に電波望遠鏡による天文観測が行われています。
- この周波数帯についても、無線通信技術の発達による今後の利用拡大が期待されています

主な車載無線システムと利用周波数



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]

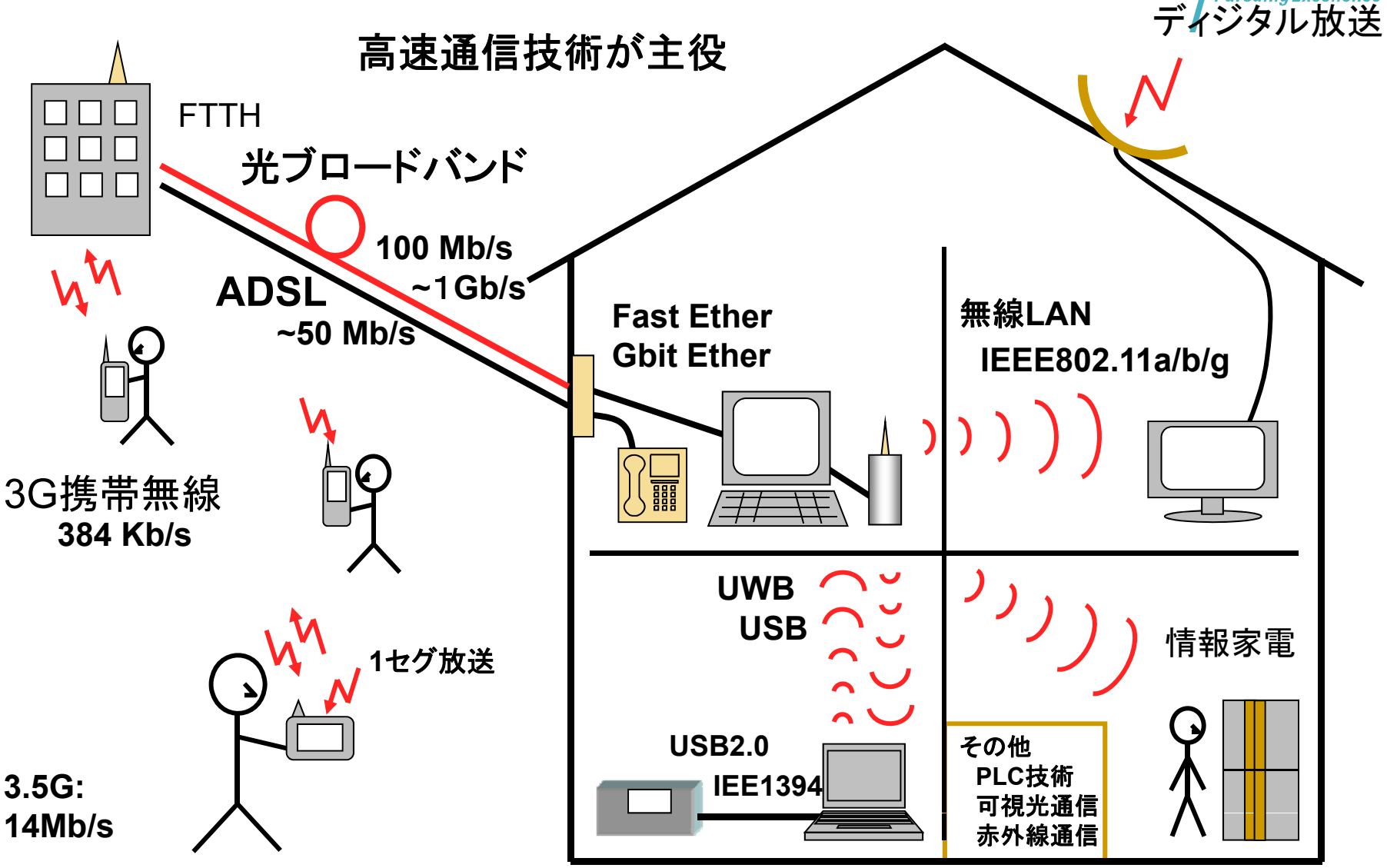
  N: Noise power [W], Gaussian noise is assumed.

Shannon–Hartley theorem

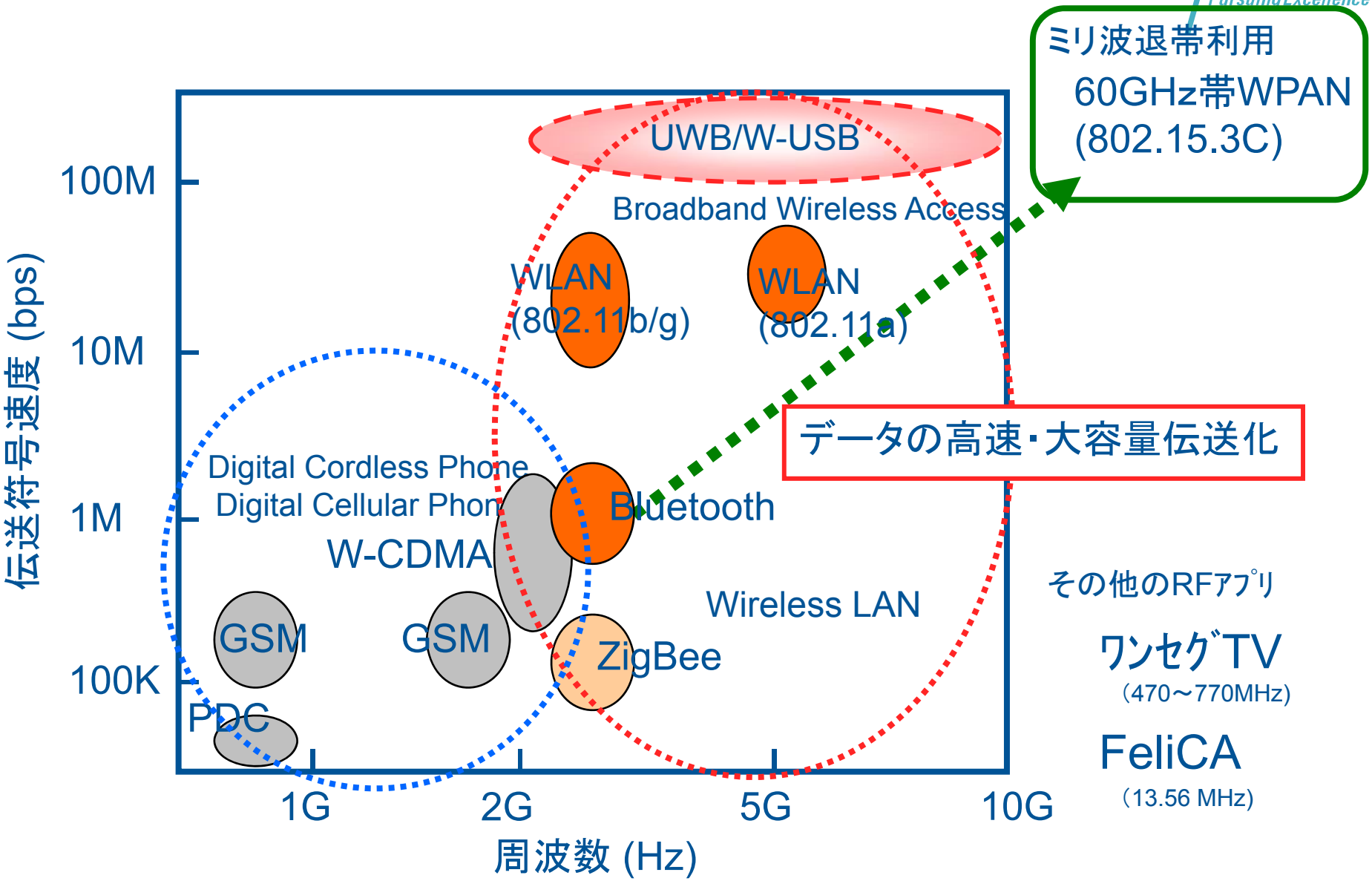
$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

- 伝送レートを大きくしたければ、どうすれば良いか？
  - ■バンド幅を広く（周波数を広く利用しろ）
  - ■S/Nを大きく → 電力を沢山つかえ。
- 最近の要求
  - ■周波数当たりの通信容量を大きく。（周波数利用効率を向上させる）
  - ■低消費電力に！

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

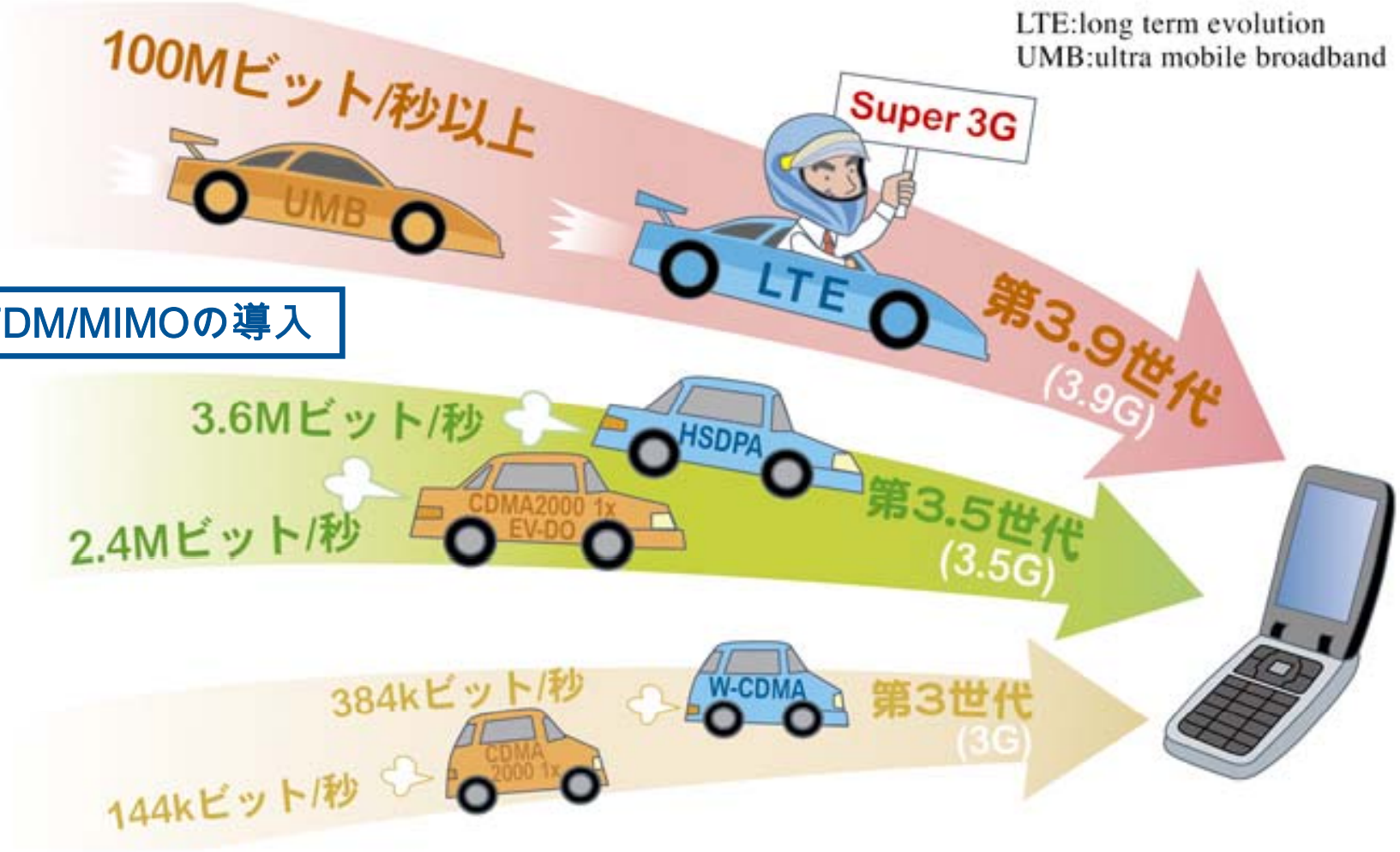
TOKYO TECH
Pursuing Excellence

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

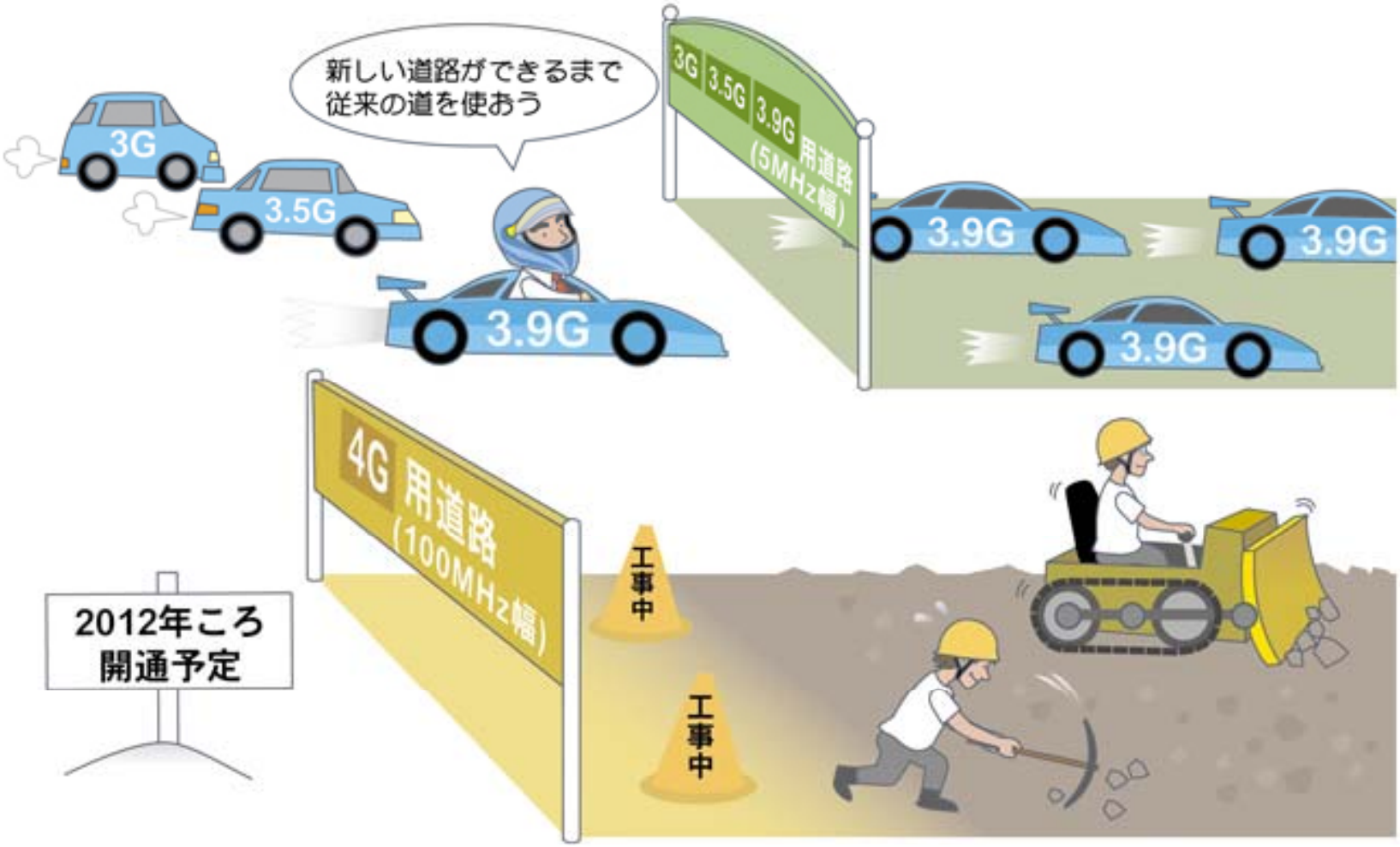
OFDM/MIMOの導入



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

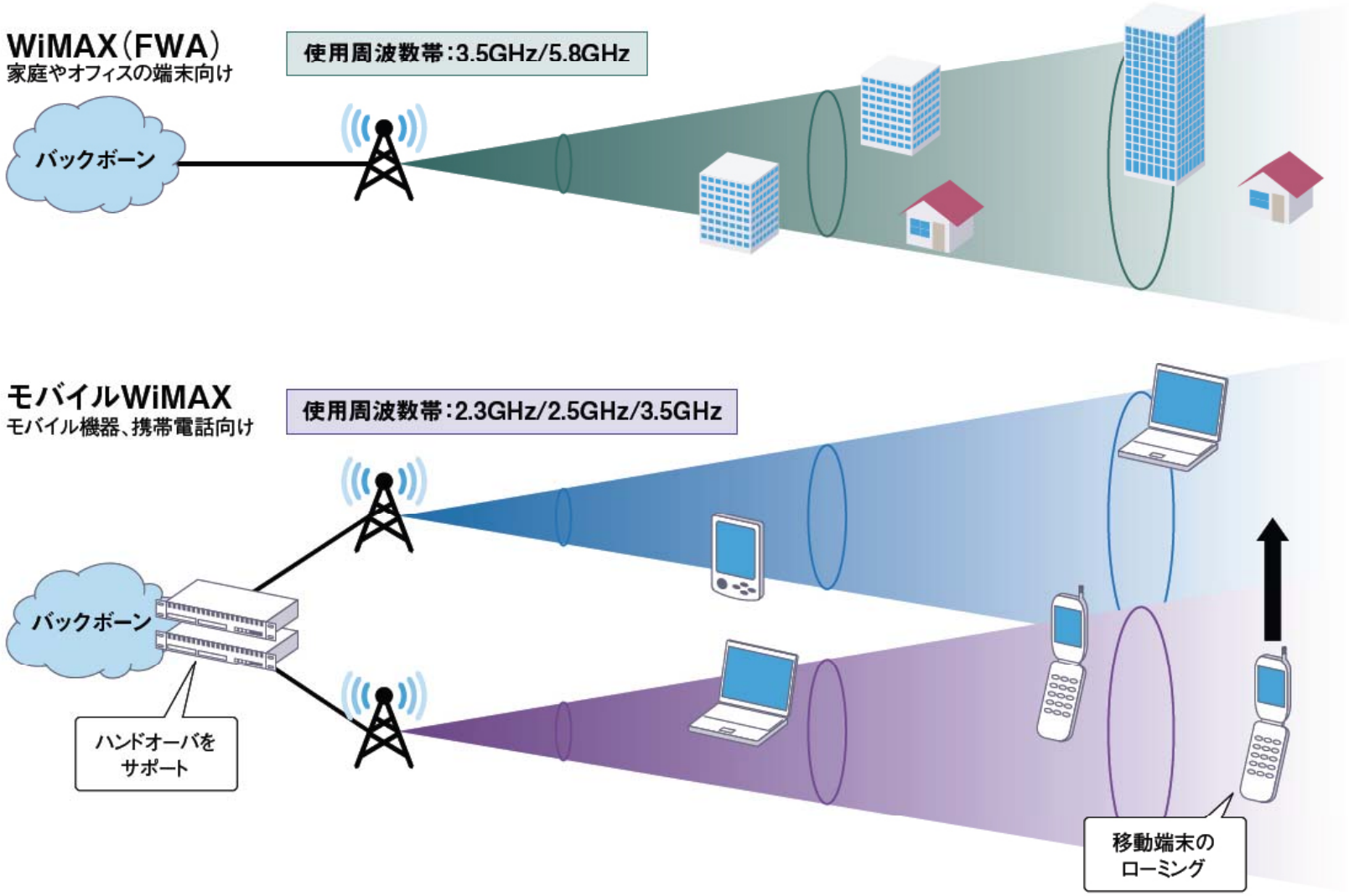
携帯も進化

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）

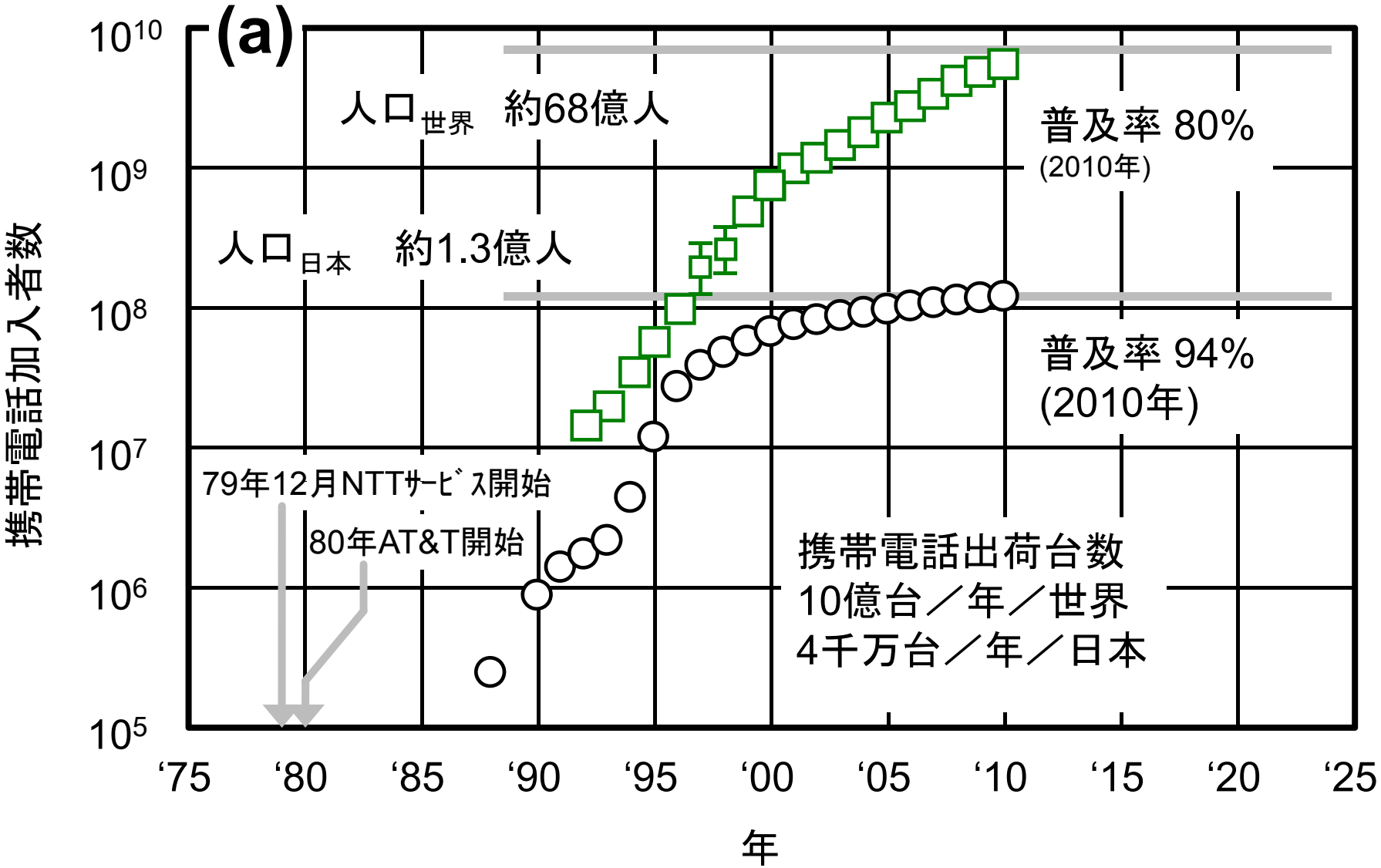


http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Keyword/20071023/285245/?SS=imgview&FD=-1937929822&ST=neteng

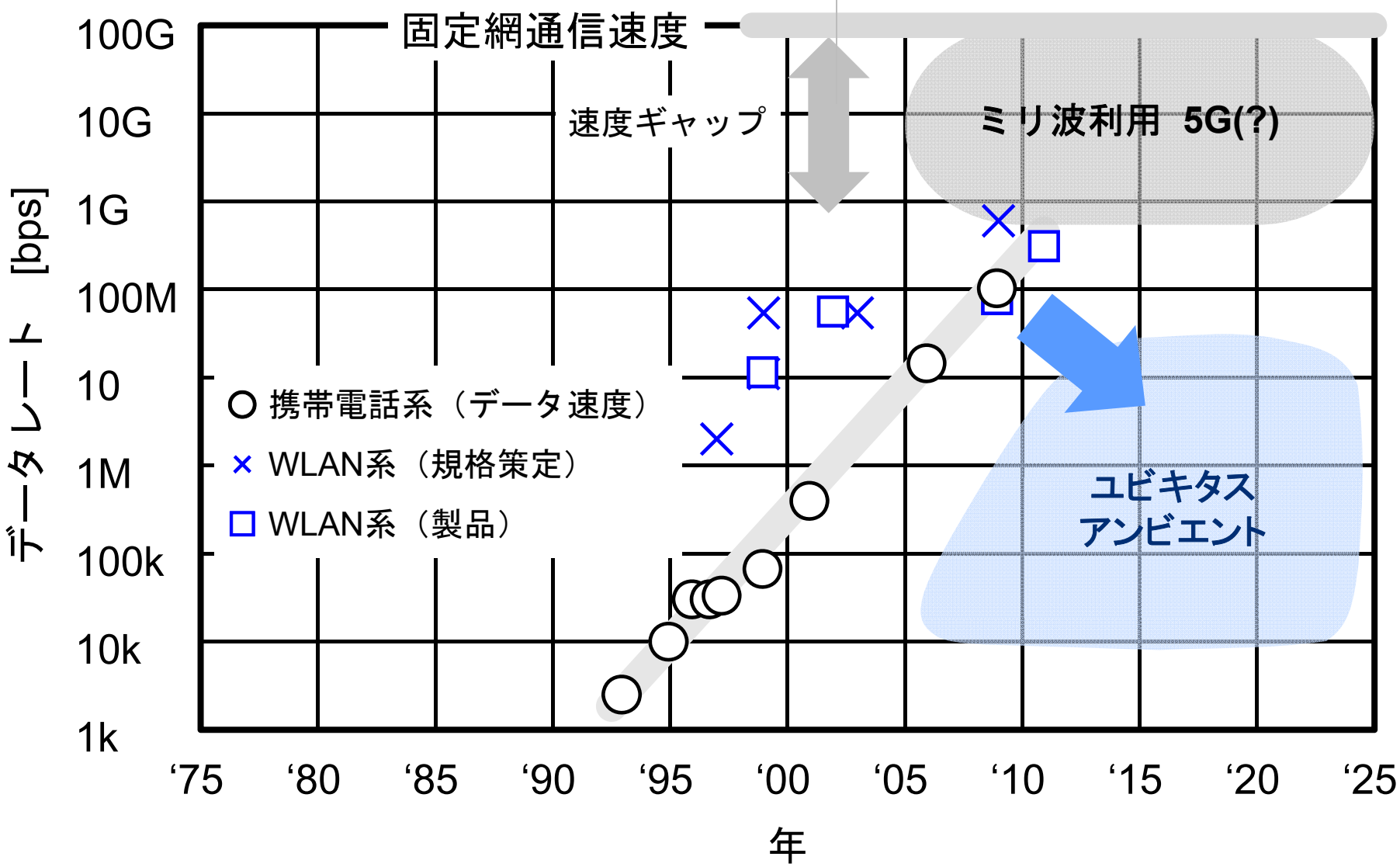
WiMAX/モバイルWiMAX



Subscribers of mobile phone



Data rate of consumer wireless



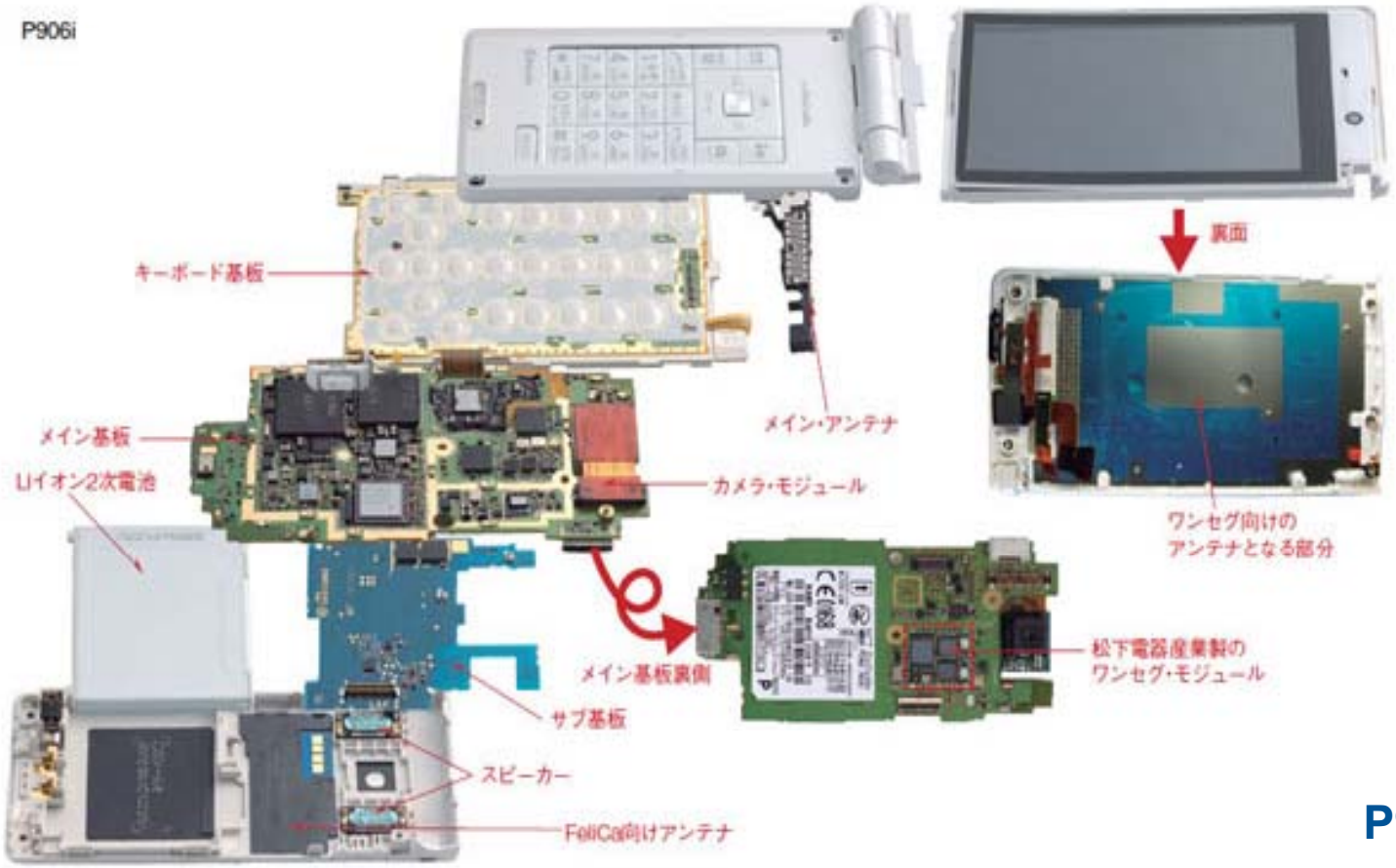
Outline

1. はじめに
2. 集積回路基礎（先週の続き）
3. 周波数利用
4. 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

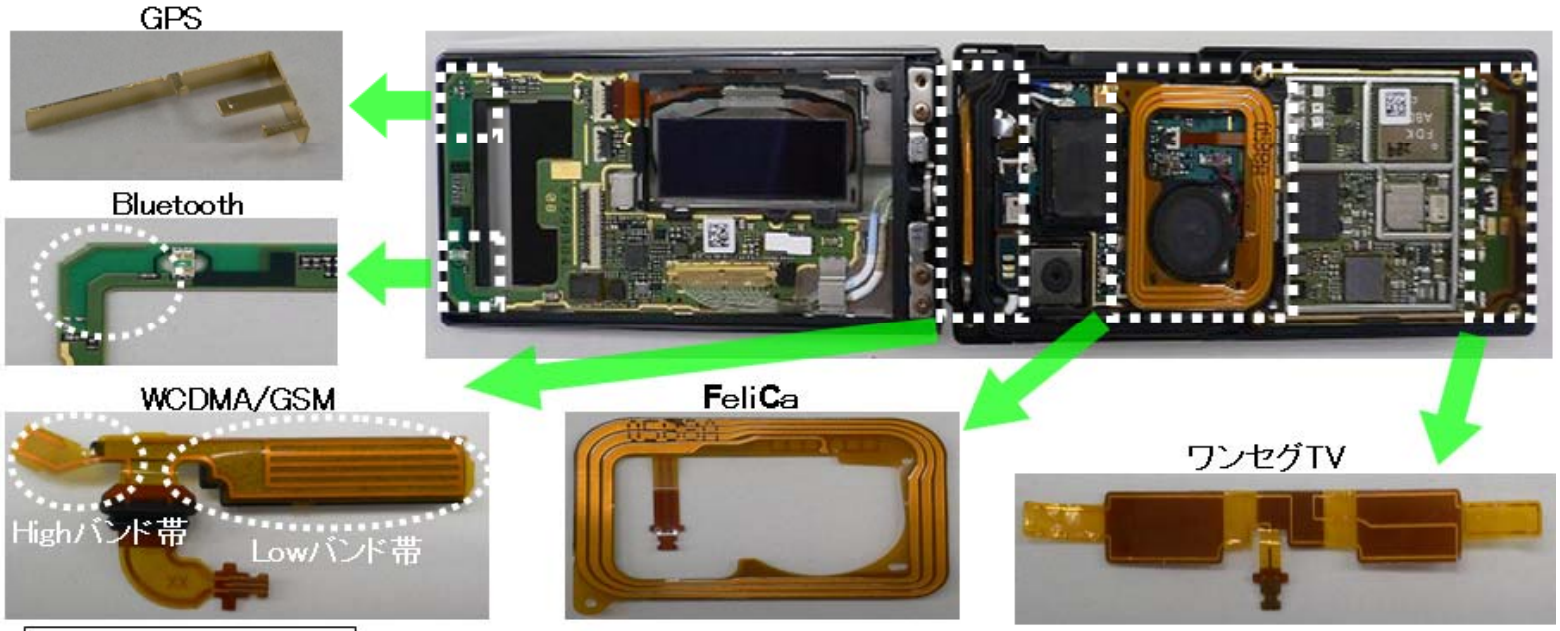
ｶﾒﾗ	×2
LCD	×2
ﾜﾝｾｸﾞ	×1
指紋ｾﾝｻ	×1
ﾌｪﾘｶ	×1

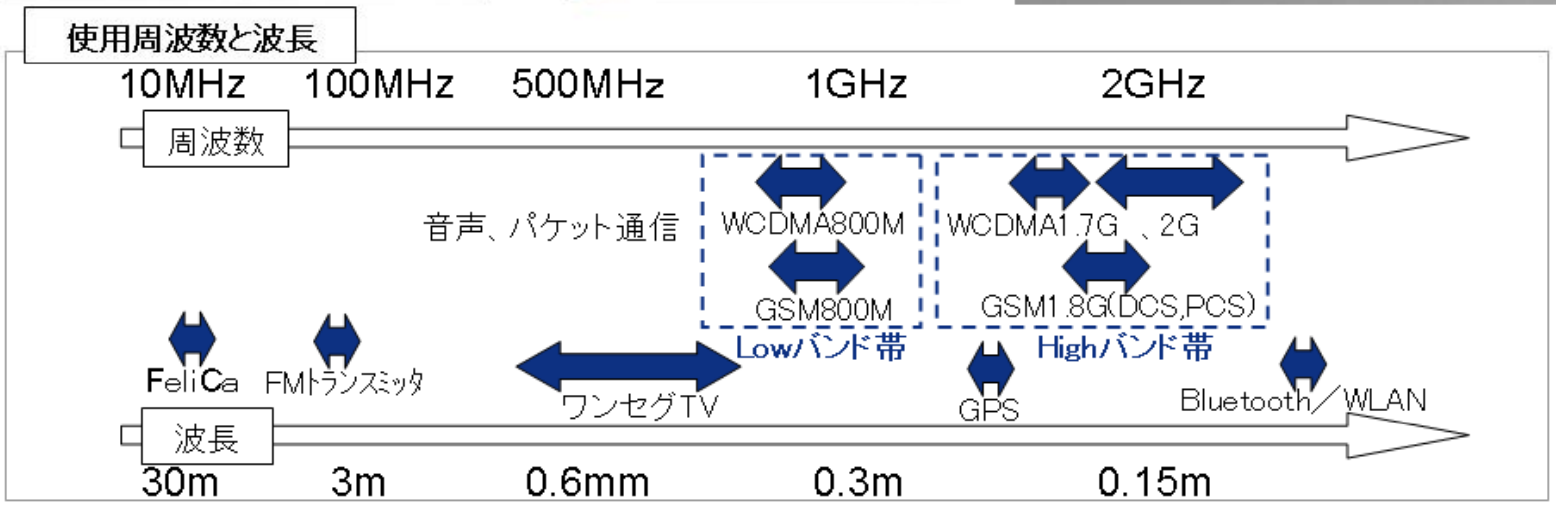
アンテナ

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

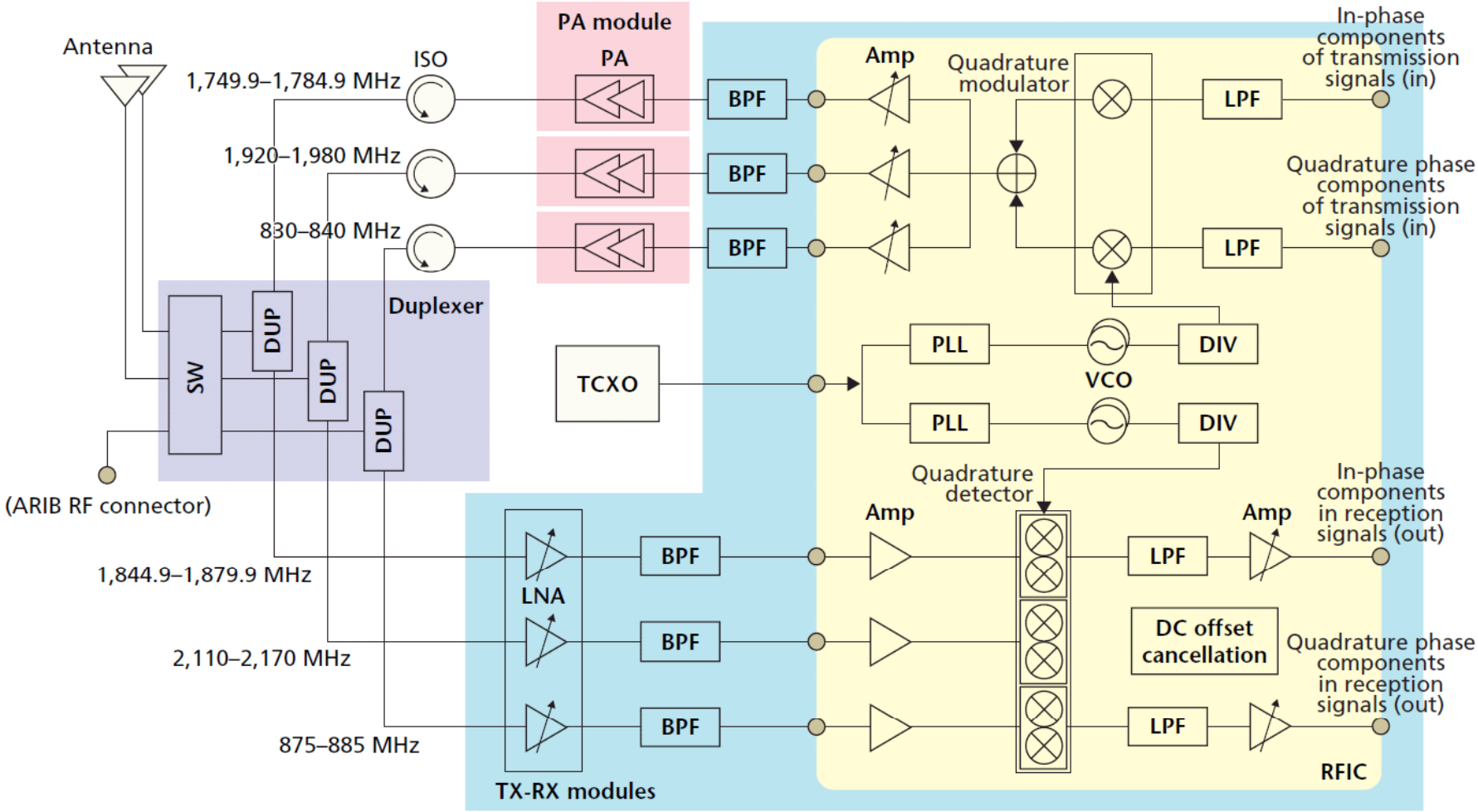
最近の携帯電話





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

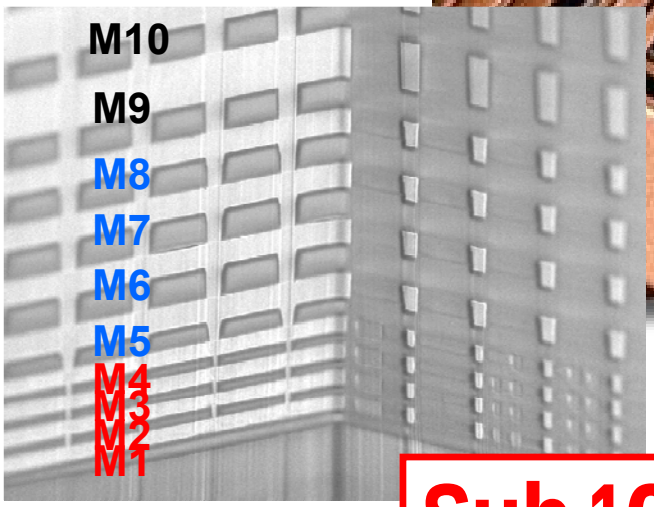
Conventional digital CMOS

TOKYO TECH Pursuing Excellence

上層配線ほど太く、配線間隔も広い。

Several μm

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



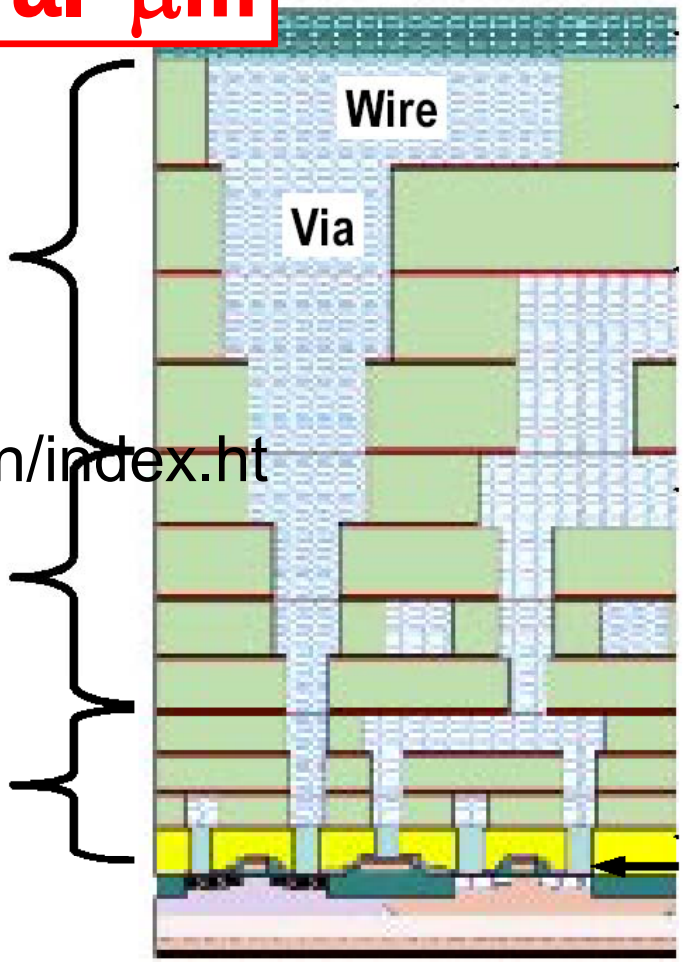
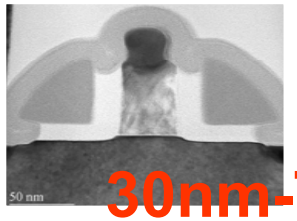


Figure 36 Cross-section of Hierarchica

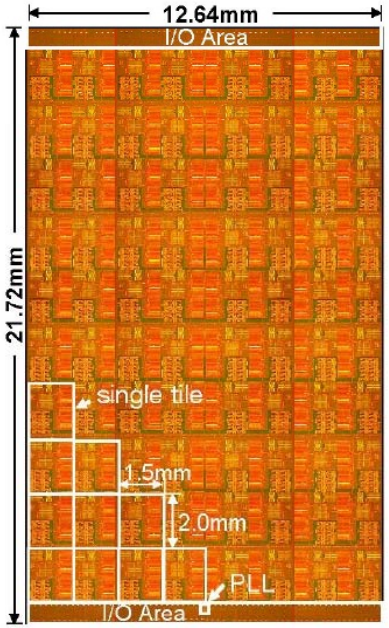


Sub 100nm to 10nm

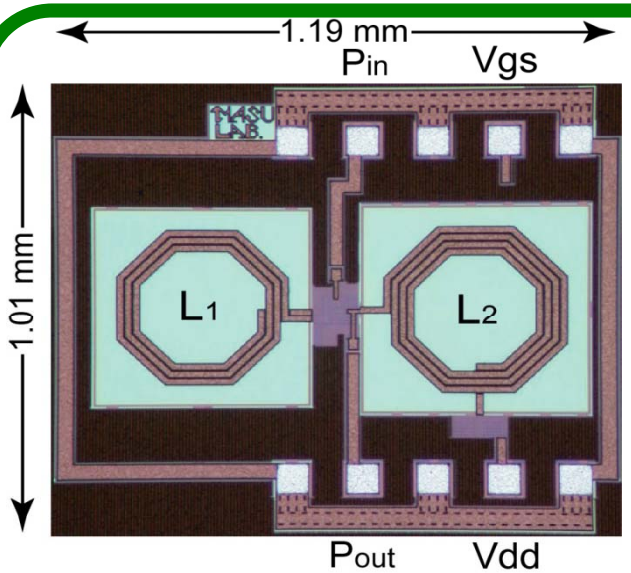
30nm-Tr

Digital and RF/analog

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

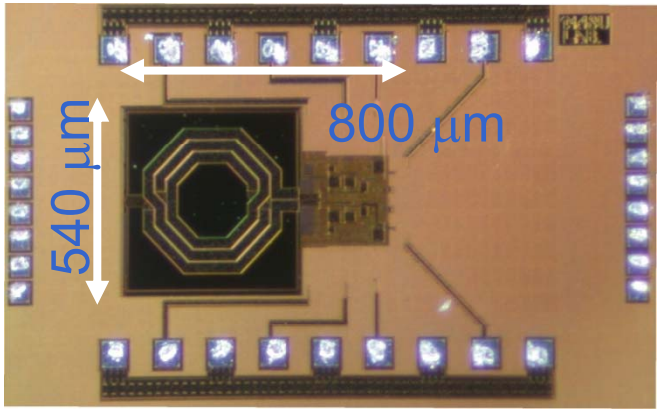


Many Core10^8Tr/3mm^2



LNA（Low Noise Amp）

RF CMOS

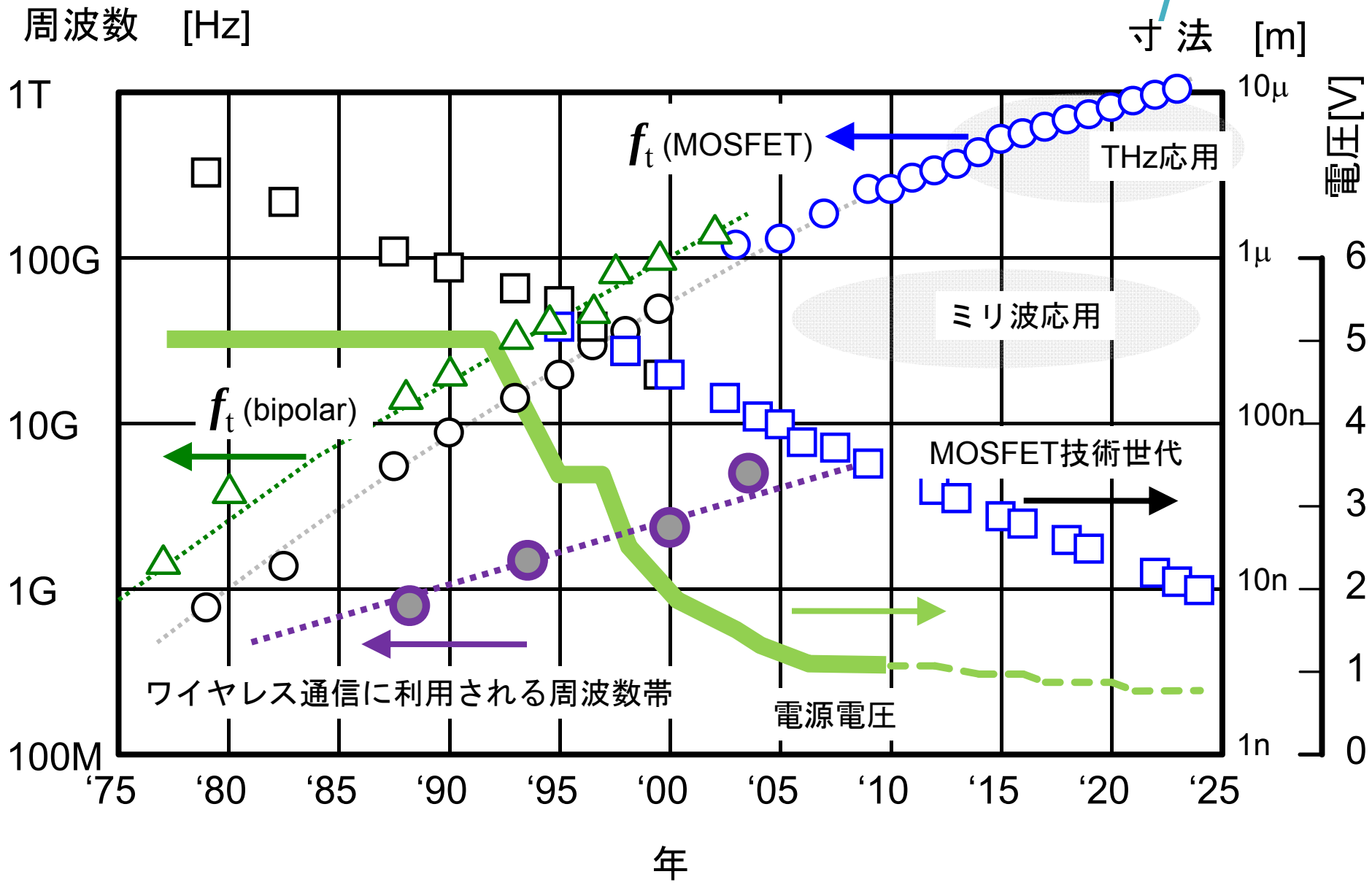


VCO（Voltage Controlled Oscillator

- 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

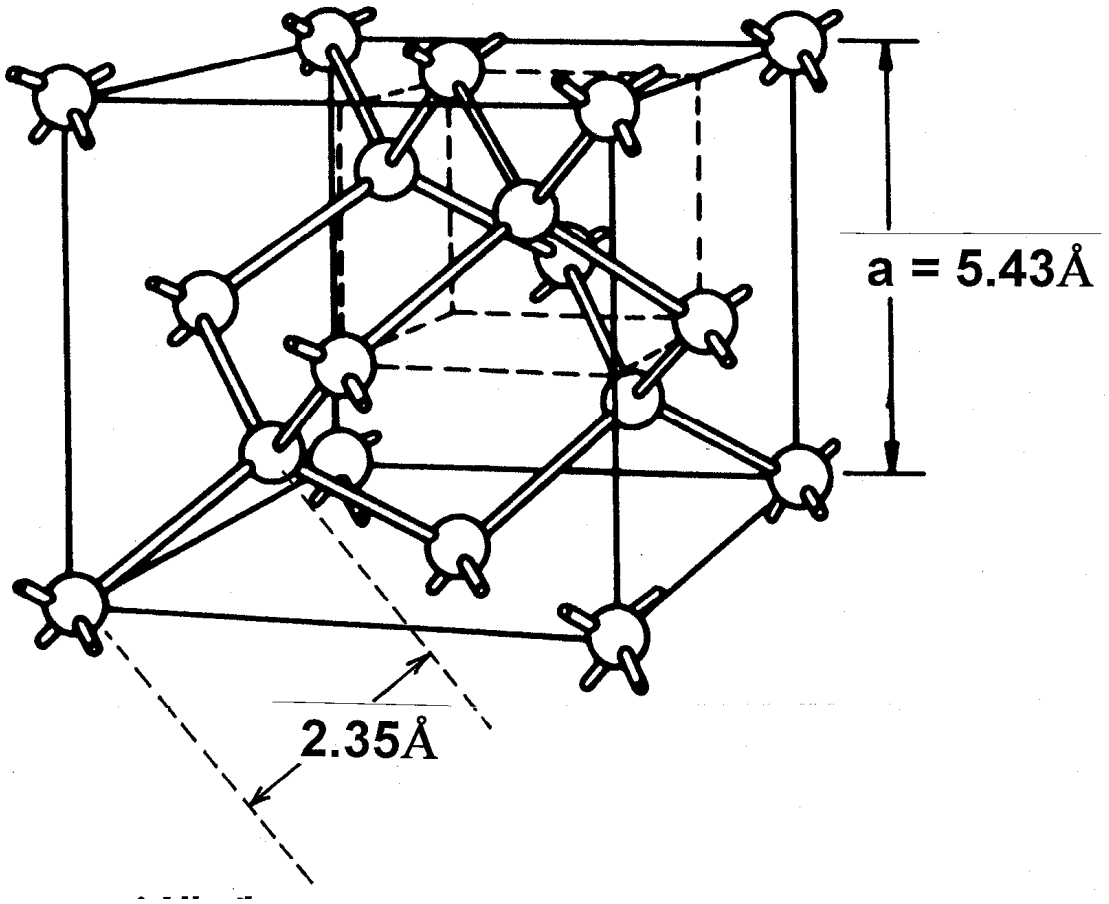
⇒ **True Scaling**

Miniaturization of MOSFET/CMOS



Si　ダイヤモンド構造

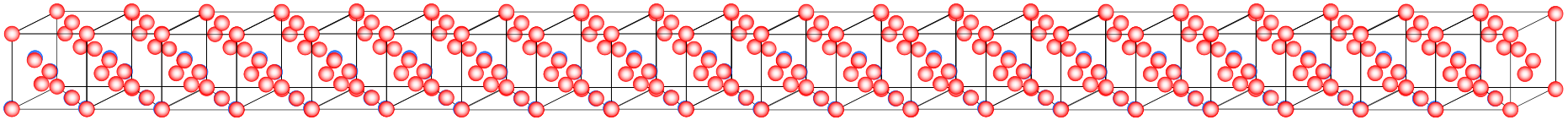
- Si 原子が規則正しく並んでいる。



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。

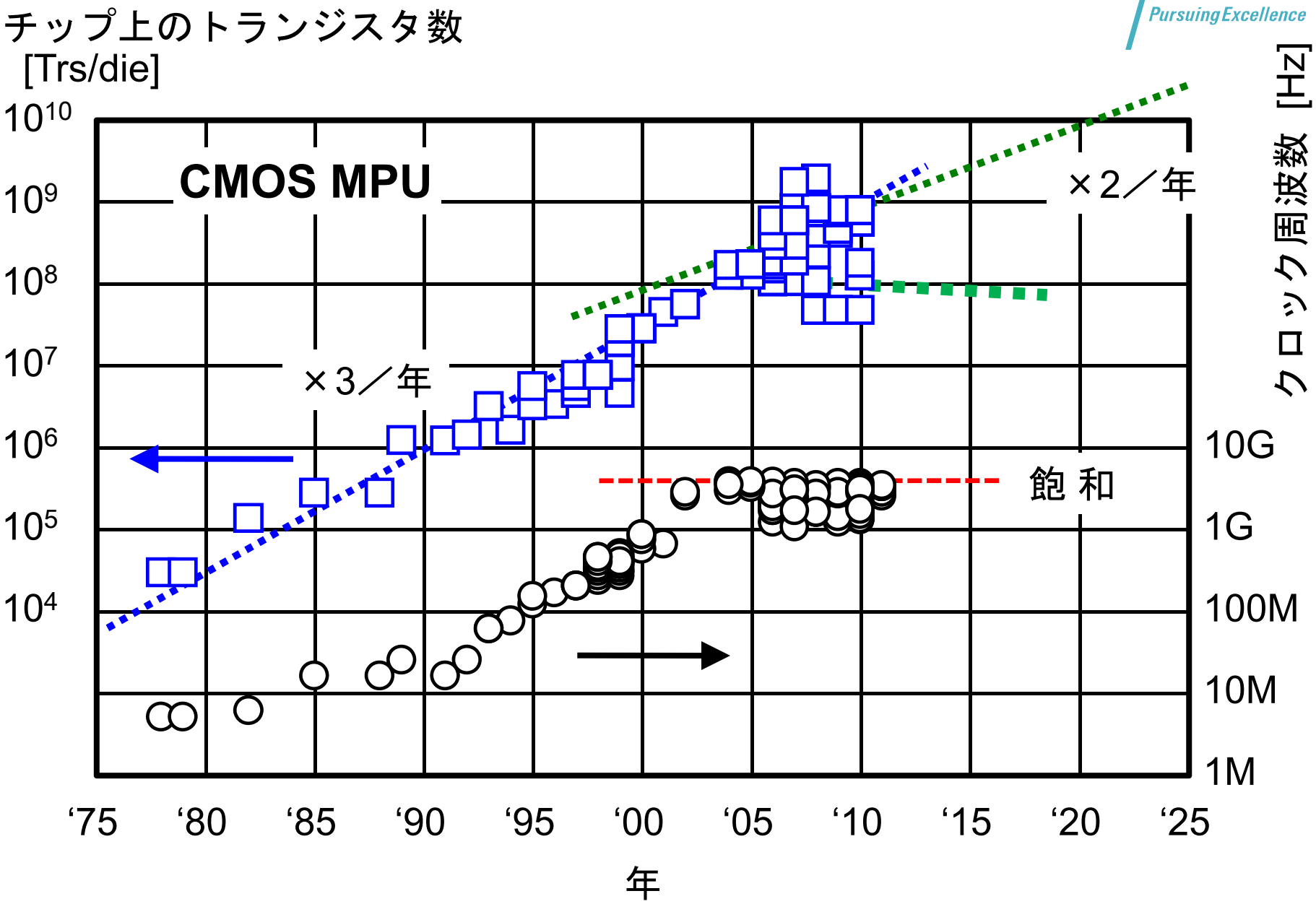
- f_{max} : Maximum oscillation frequency(最大発振周波数)
  - 電力増幅率が1になる周波数。
  - アナログ回路の性能指数になる。(寄生抵抗や容量が影響する)
- $f_t \neq f_{max}$

CMOS trend

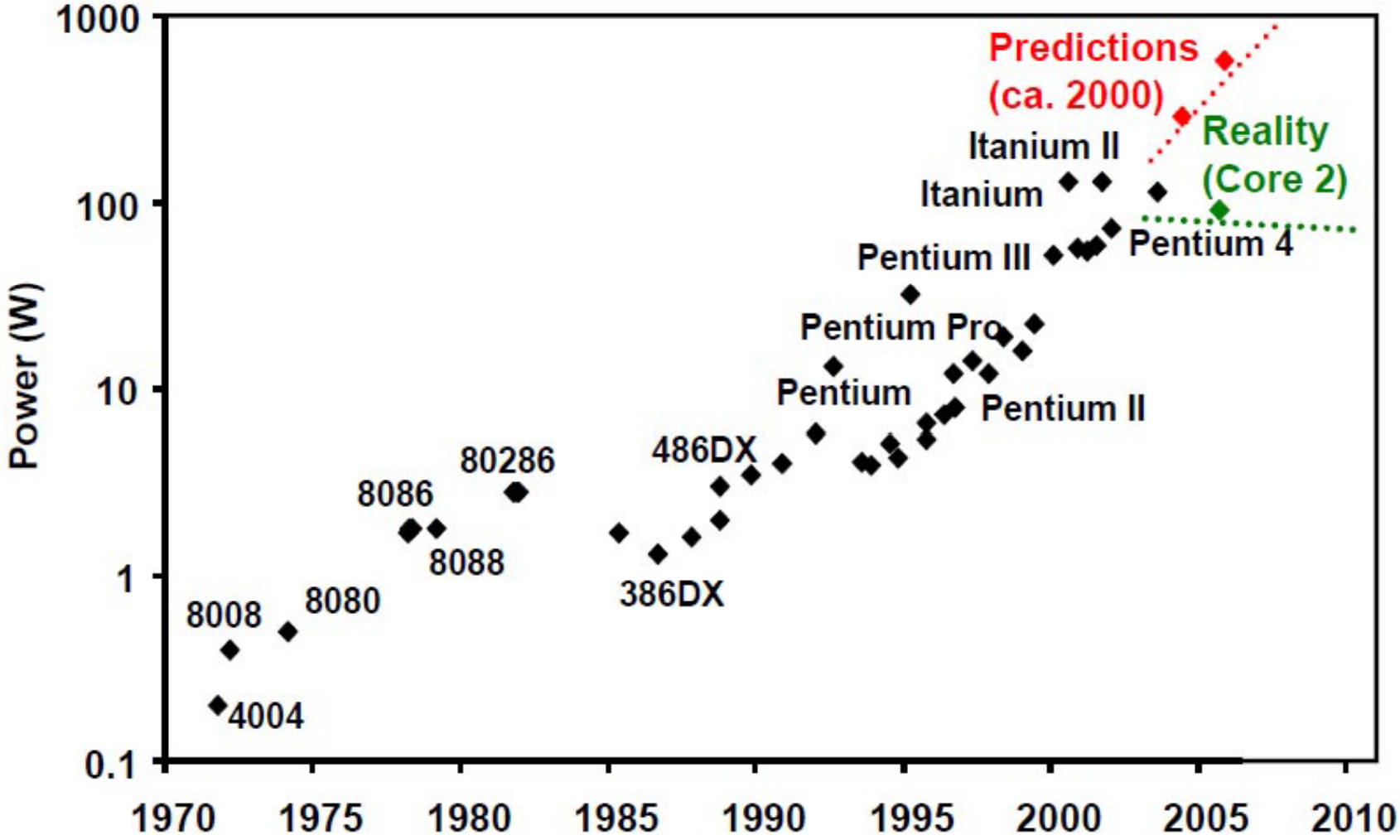
TOKYO TECH Pursuing Excellence

- 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

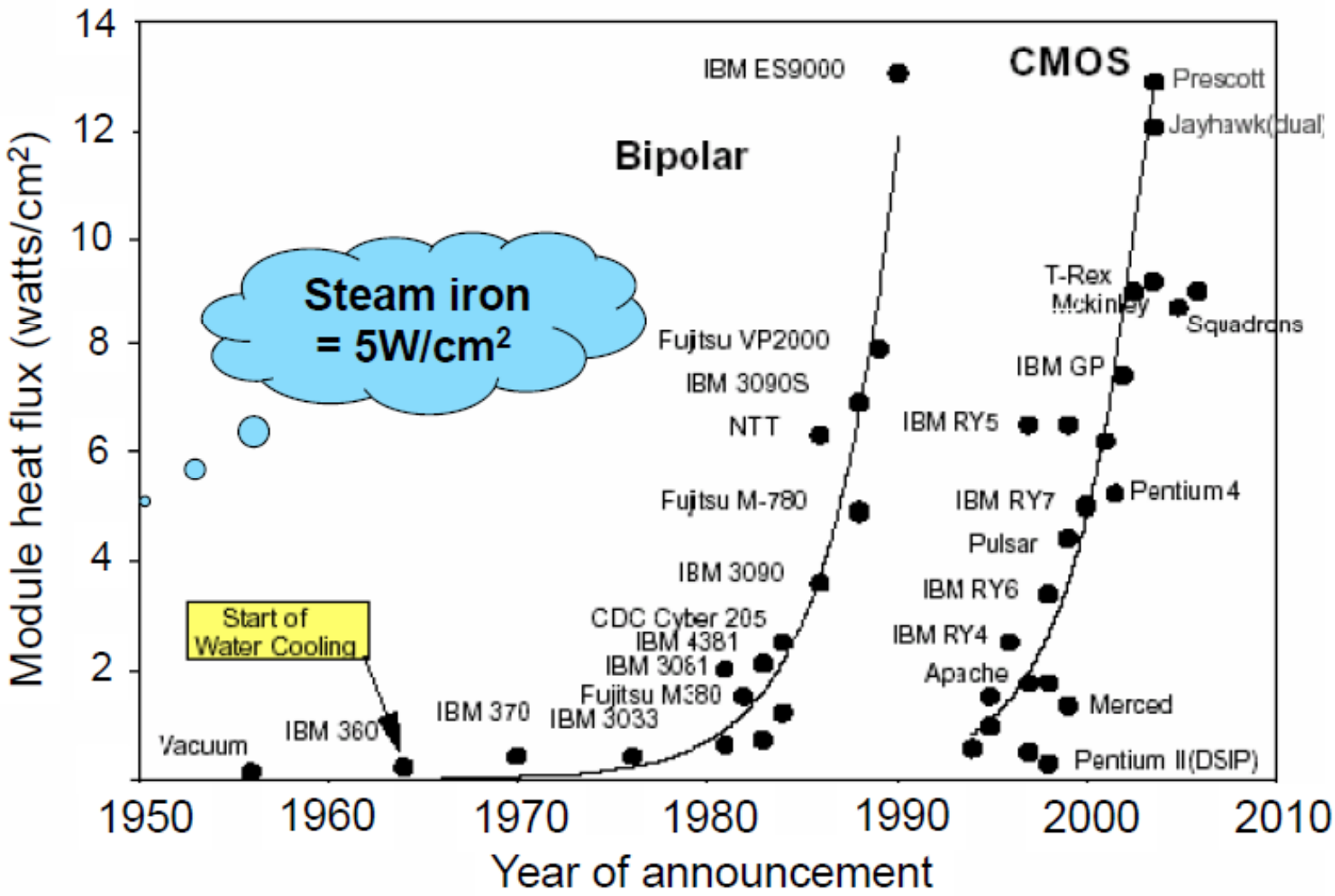


CMOS power scaling



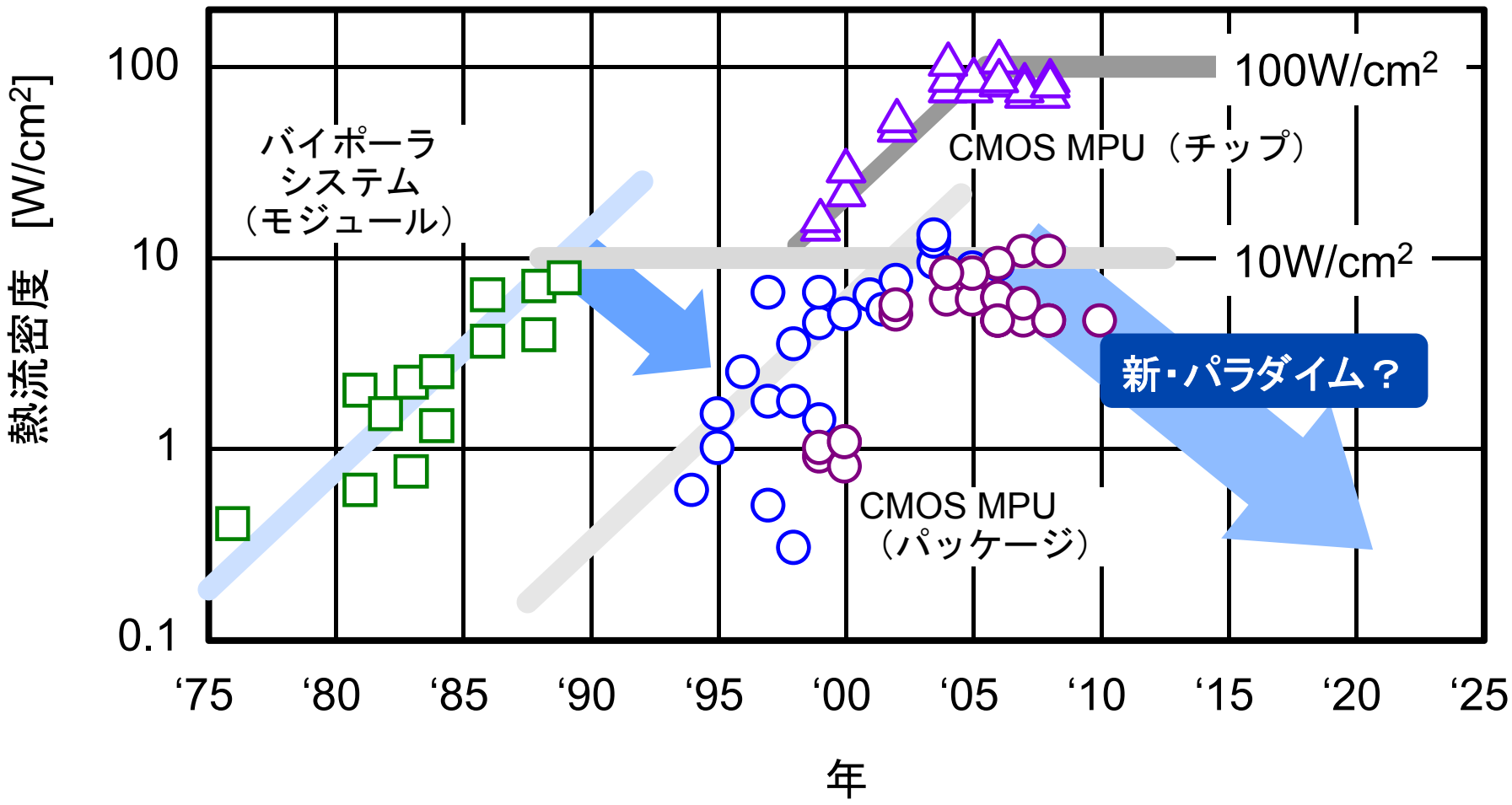
Source: S. Borkar, Intel

Watts happening in technology

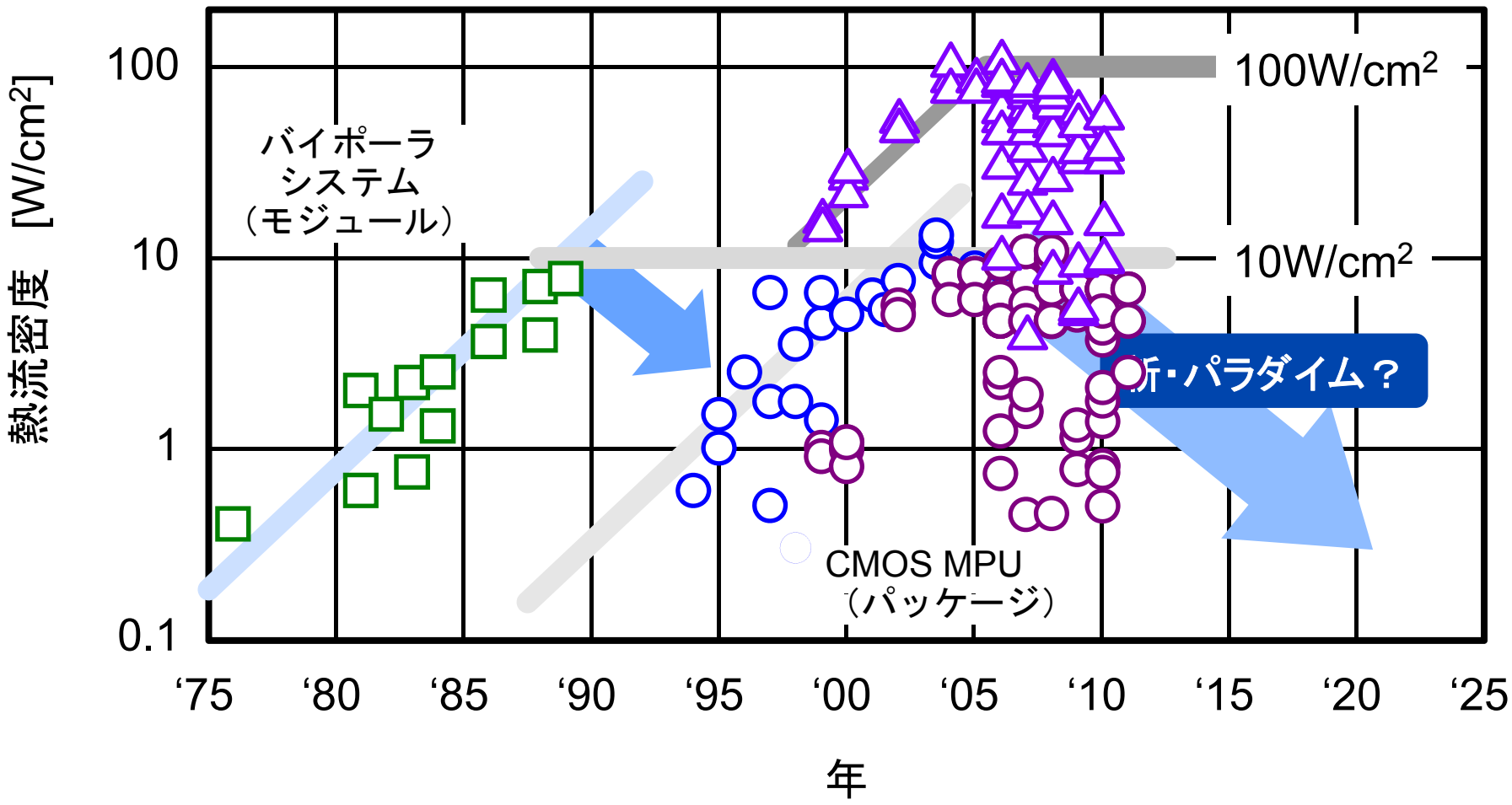


Source: Bernard S. Meyerson, IBM, 2005

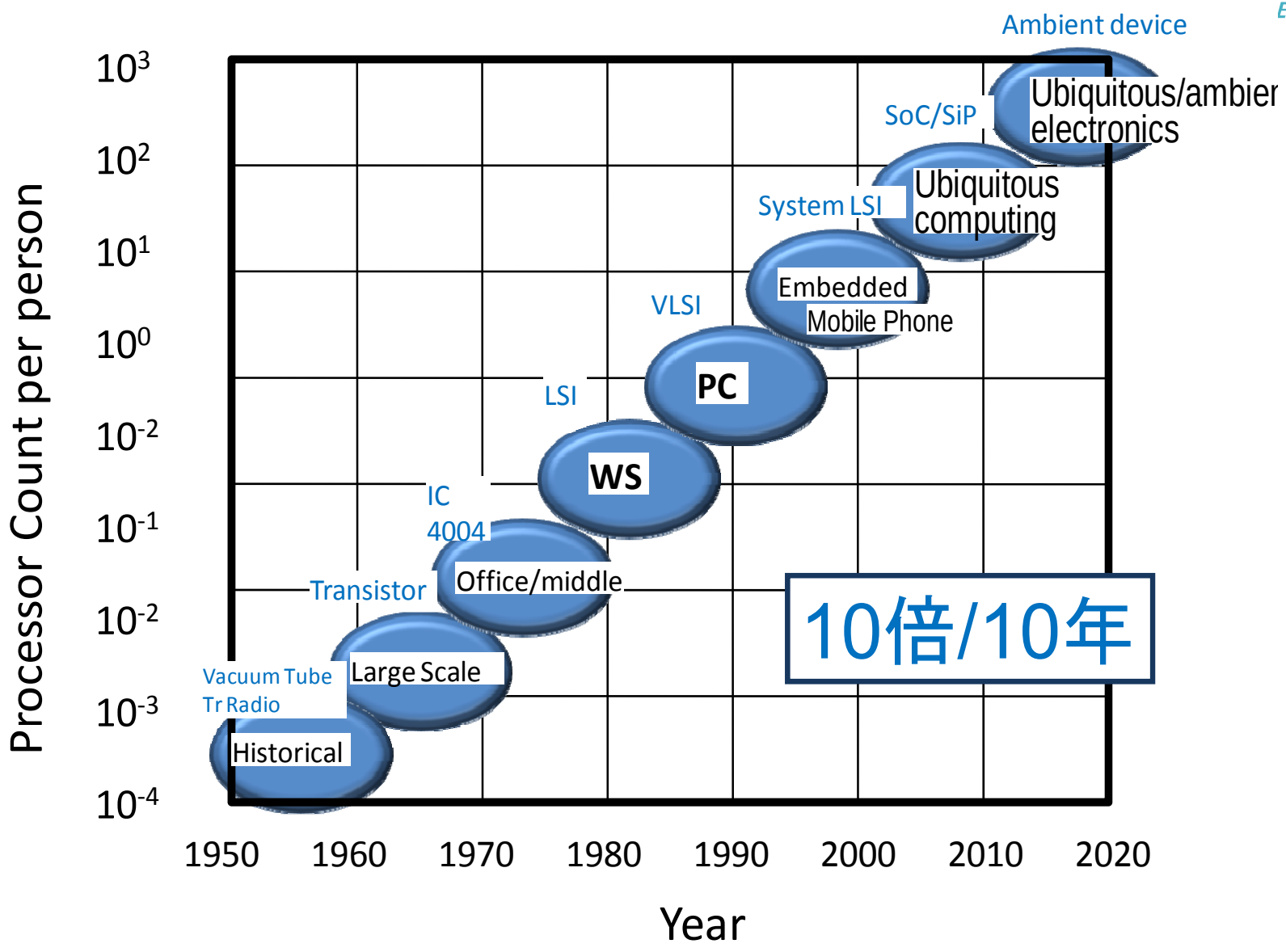
Heat flux of module/chip



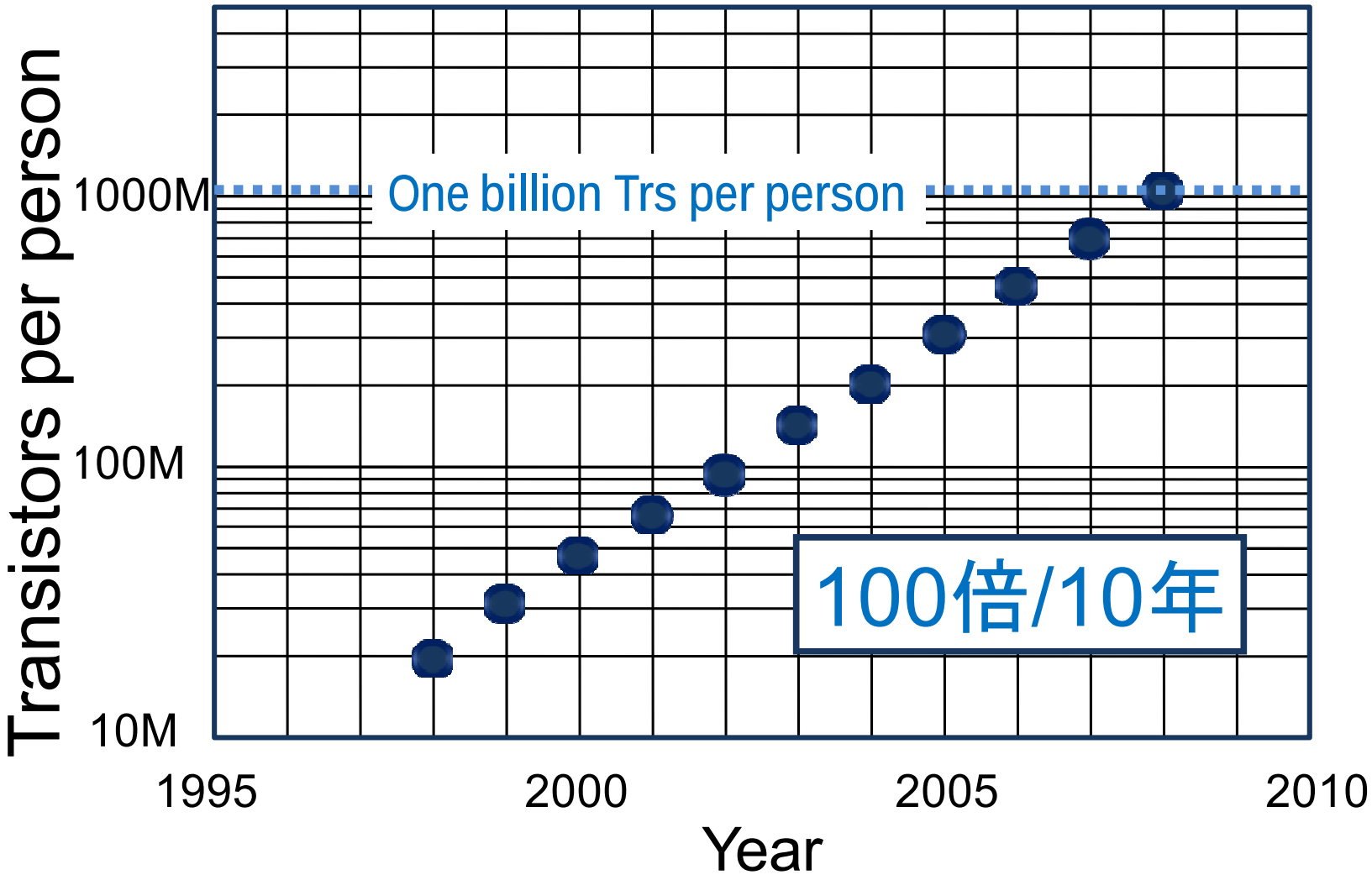
Heat flux of module/chip



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

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)

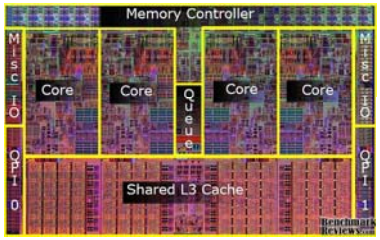
TOKYO TECH Pursuing Excellence

世界初のMPU
Intel 4004, 1971年
（10μmプロセス）

2mm

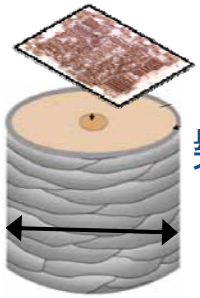
微細化

現在：65nm-32nm CMOS
10億トランジスタが集積



徹底的な
微細化

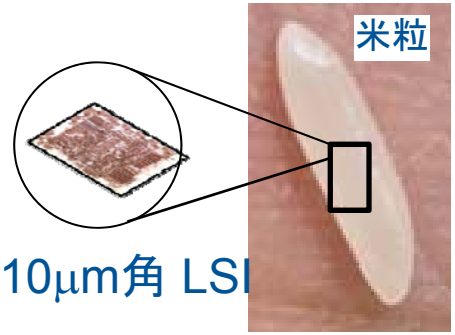
2024年：
5nm CMOS
1兆個のﾄﾗﾝｼﾞｽﾀ
が集積



髪

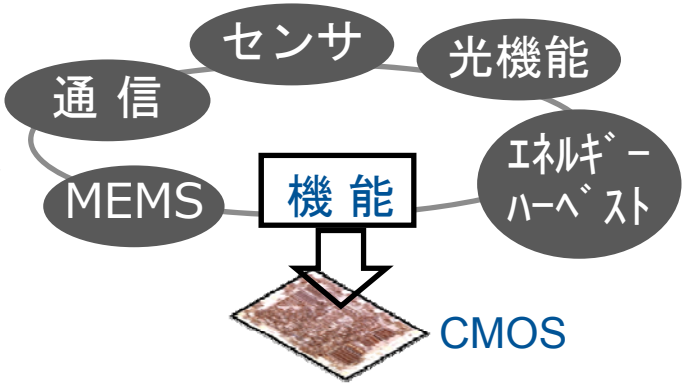
50 μm

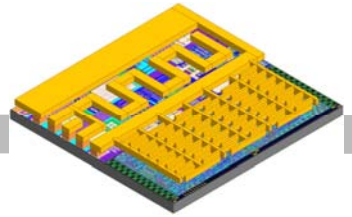
現在の技術を使えば、
4004は髪の毛の断面以下



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

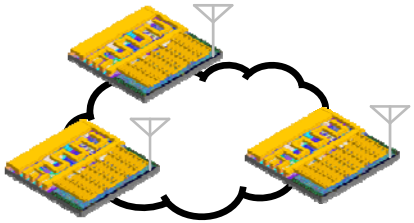
徹底的な
微細化

スパコンは、
京（10^{16}）からExa（10^{18}）を超える

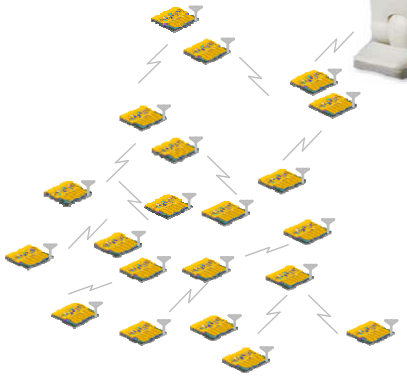
STEP2：機能集積チップ（知能シリコン）

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

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？）