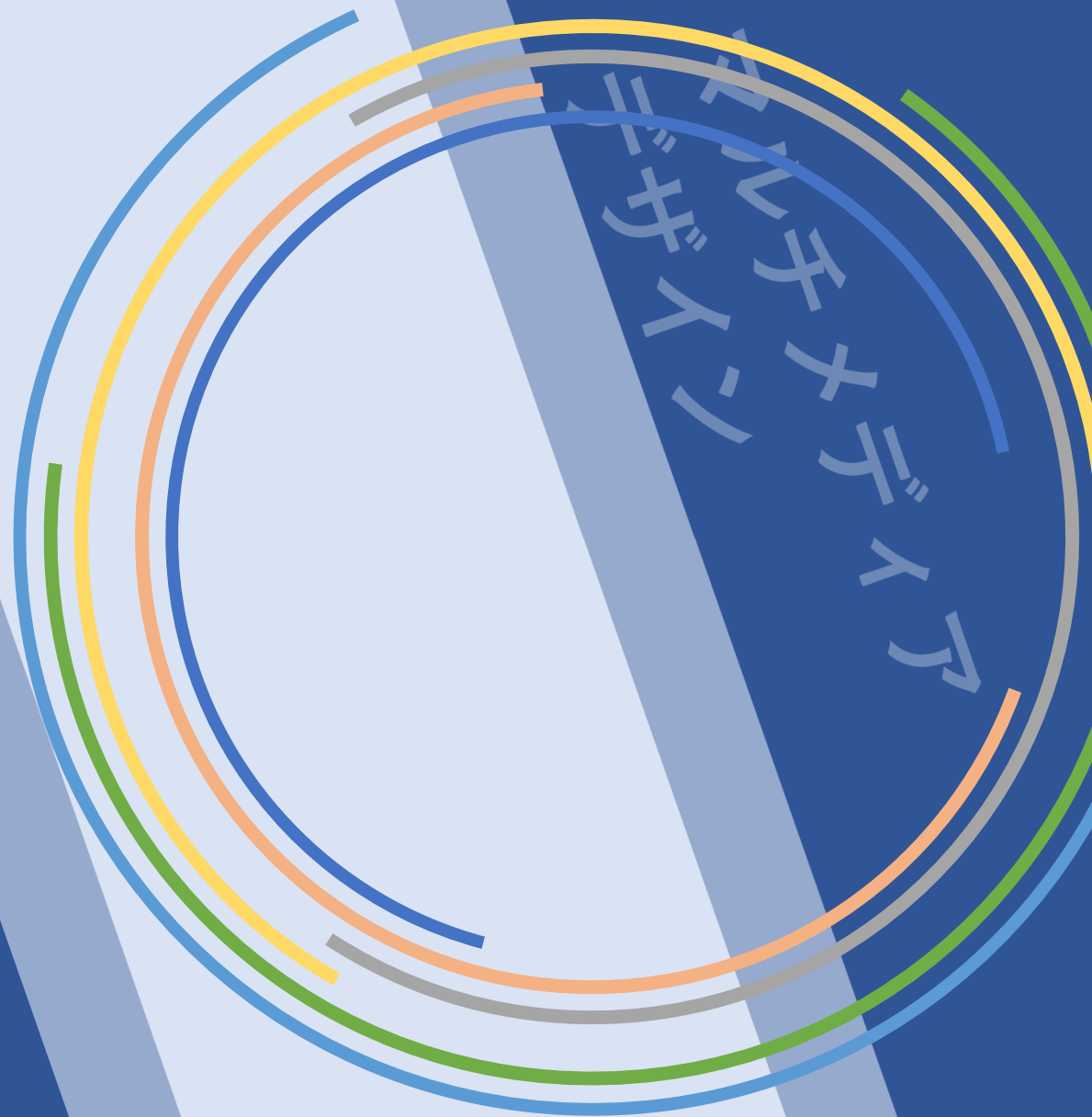


この授業のスライドはLMSで公開されます  
授業やレポートに関する質問などはSlackへ  
<https://keio-st-multimedia.slack.com>

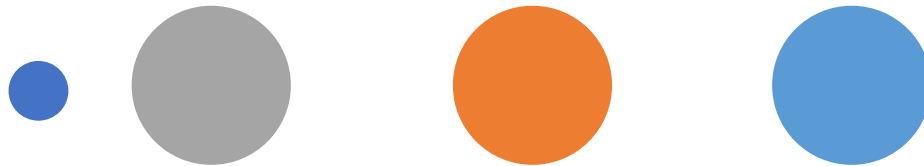


# #5 プラットフォーム 周辺技術

担当： 西 宏章



# プラットフォーム

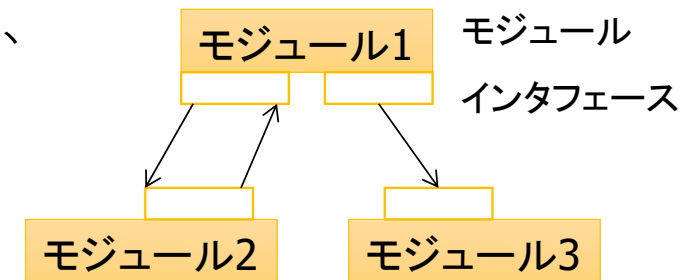




- 8bit/16bit程度のレジスタ、数MHzから数百MHz程度の組み込み用プロセッサがよく利用される
  - 低消費電力が求められるため、周波数を低く抑えるか、超低周波数動作によるスリープモードを備える
  - Microchip PIC、Atmel AVRなど、通常のPC用プロセッサとは異なり、FLASHを内蔵し、A/Dコンバータや、I2Cインタフェースを備えるなどセンサ親和性が高い
  - TI MSP、DALLAS/MAXIM DS80(Java VM)、ルネサス H8/SH、TORONなどが著名で、処理能力が求められる場合にはARMやXscaleといったPDAなどに用いられるプロセッサが利用される
- 近年では、より高い処理能力が求められる場合ARMなどの利用も進んでいる



- 一般にOSは搭載せず、直接I/Oを操作する単一実行バイナリあることが多い
  - 開発環境や基本ライブラリが充実しており、OSを介さずとも割り込みによるイベントドリブンのプログラミングパラダイムを利用したシステムを構築できる
  - SUNマイクロシステムズによるJAVAを利用したシステムもOSを利用しない
  - ARMなどでは、ネットワーク親和性と移植性を重視し  $\mu$ CLinuxが利用される場合がある
- 軽量なセンサノードではTinyOSが著名（独自すぎて普及していない）
  - センサネットワークシステムの目的は外部状態の測定であり、限られた資源で測定データを送信
  - そこで、測定と通信を並列で実行できるように資源共有
  - プログラムをロードして実行することがないため、カーネル空間保護機能はなく、ユーザという概念もない
  - アプリケーションプログラムはその構成要素（モジュール）を接続したグラフで表現し、モジュール間の双方向接続（インタフェース）を呼び出し（コマンド）とその受信（イベント）によりモジュール間通信を行う
  - 一連の処理はタスクと呼ばれ、イベントドリブンで複数のタスクを実行する
  - サスペンドすることなく実行され(run-to-completion)、実行の横取りは行われない(no-preemption)





# マイクロノードとIPv6


119

- PCの仲介なくインターネットに直接接続する
- 8bit/16bit CPUにIPv4, IPv6のデュアルスタック、UDP、TCP/IPをサポートし、中にはJavaサポートをするプラットフォーム
- メリット
  - グローバルスタンダード
  - 情報システムと連携
  - 通信コストの低減
- 一つの問題
  - IPv6はセンサネットワーク親和性が高い？本当か？
  - センサネットワークはIPv6のキラーアプリケーション足りえるか？



## 周辺技術





# センサネットワークにおける電源問題

121

- センサネットワークに関する研究で最も重要なのは電源をどのように獲得するかである
- 電池で長時間駆動できるように低消費電力化や通信量の削減、スリープ時間の拡大などが議論されている
- 太陽光（蛍光灯）発電や、風力等を利用した定常的な自己発電機能を備えたセンサノードが現在主流
  - Solar Biscuit
- ワイヤレスではなくワイヤーを利用した電源供給と通信の両立という考え方も根強い
  - Pushpin Computing
  - Network Surface





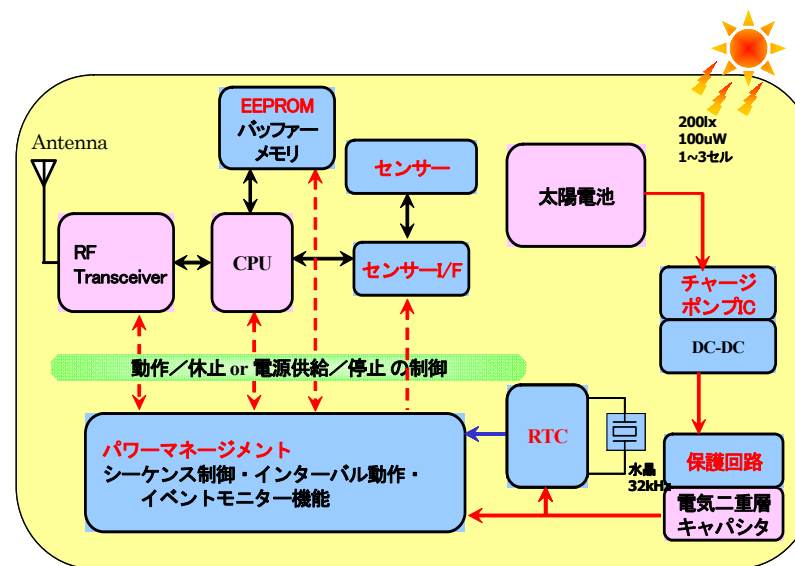
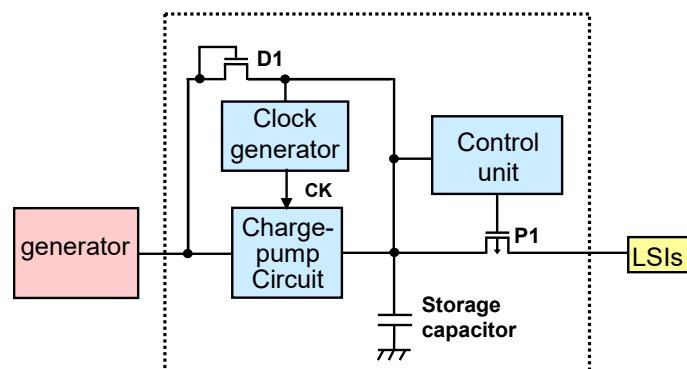
# エネルギーハーベスティングへの道

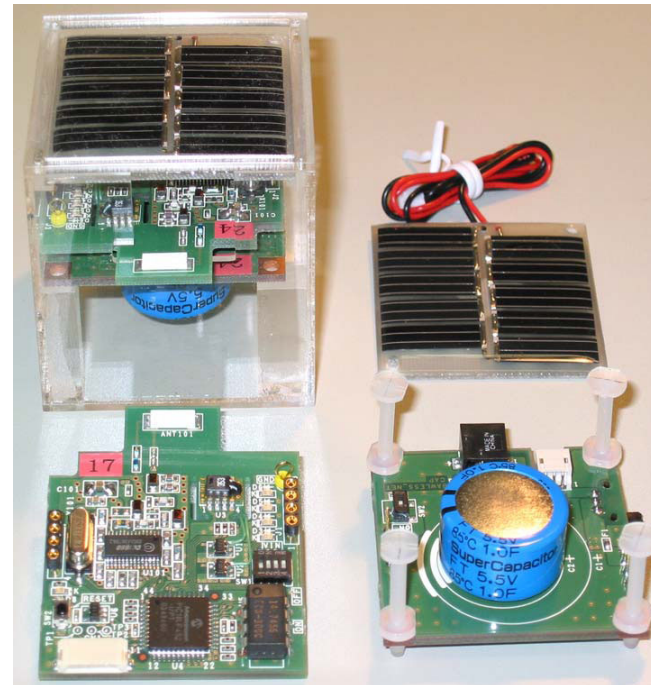
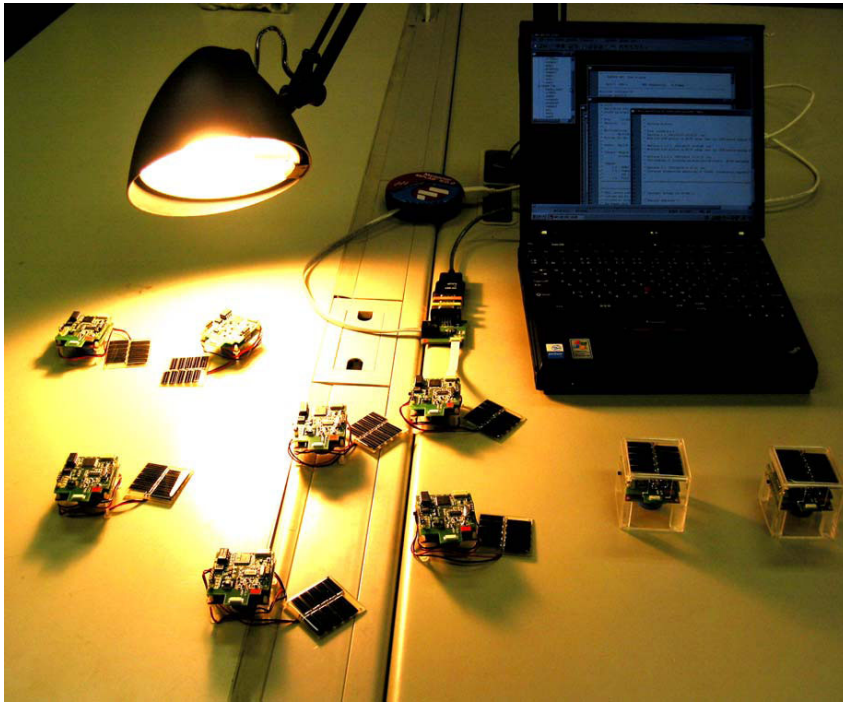
122

## • バッテリレス・センサノード

- 「昇圧し、蓄え、必要なときに出力」

- 設置された環境下での効率的な発電と蓄電技術
- 非常に低消費電力で動作するデバイスで構成（センサ、無線IC、CPU）
- 間欠動作をはじめとするきめ細かなパワーマネジメント

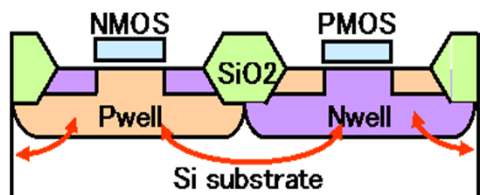




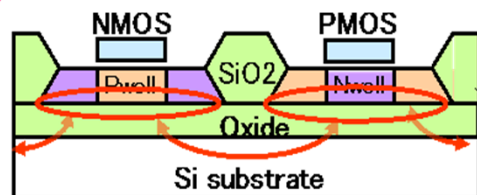
環境モニタリング用 バッテリレス無線センサネットワークシステム  
太陽電池による発電電力を電気二重層キャパシタで蓄電

<http://www.lisa.ele.shibaura-it.ac.jp/PDF/conf/0408minami-mobiquitous-demo.pdf>



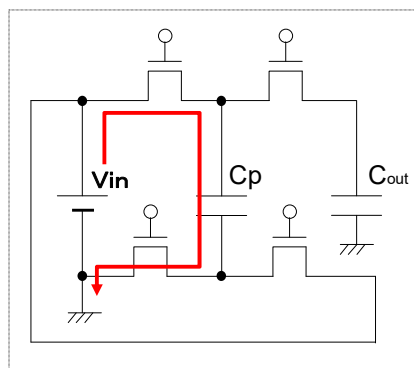


これまでのデバイス

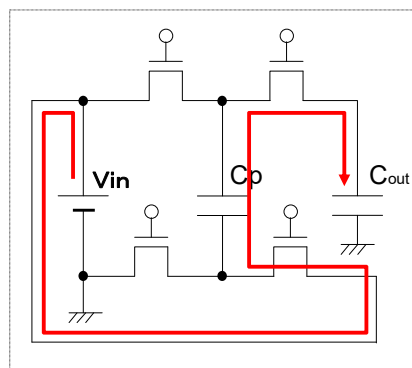


SOIデバイス

SOI(Silicon on Insulator)デバイス  
リーク電流の低減・接合容量の削減による  
低消費電力、高速、低ノイズ  
スピントロニクス応用



Charge cycle



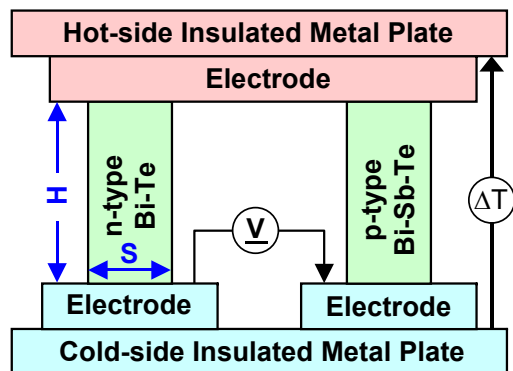
Discharge cycle

## チャージポンプ方式

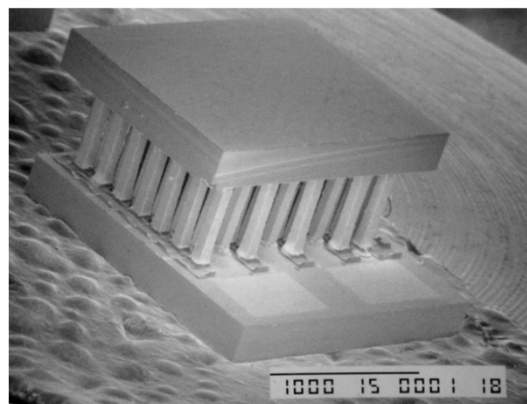
発電電圧が低い場合でも昇圧して利用可能とする

RS232Cインタフェースでは古くからある技術



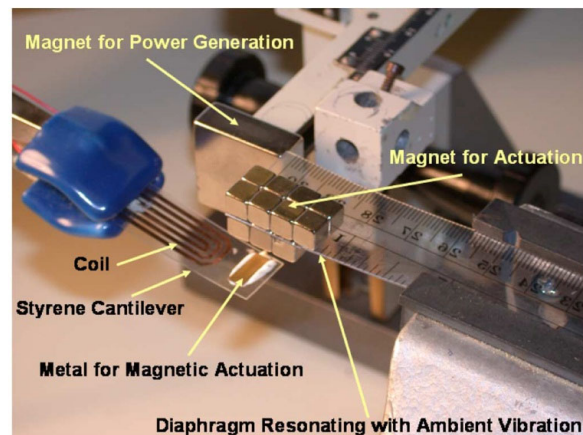
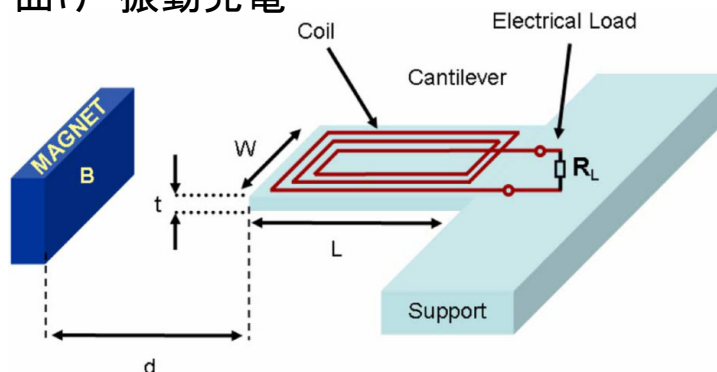


熱電変換素子の構造断面図

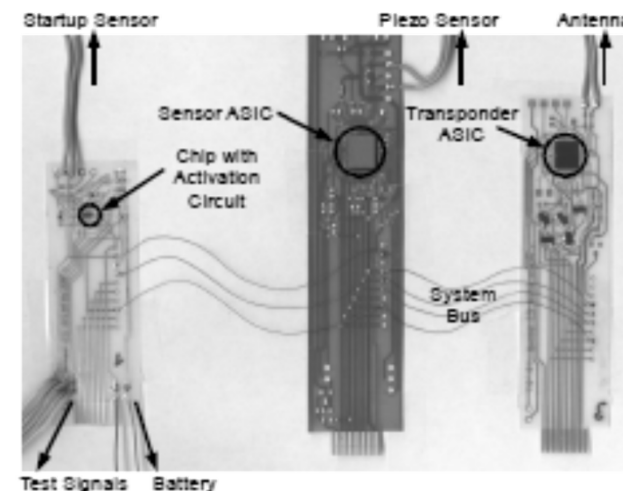


超小型熱電素子のSEM写真  
( $200\mu\text{V/K}$ ) 104: 世界最小

## 曲げ・振動発電



H.Kuelah, *et al.*, "Energy Scavenging from Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications", IEEE Sensor Journal, Vol.8, No.3, pp.261-268, 2008.



## 低消費電力型即時応答対応センサネットワークシステム (2007 IEEE)

K. -U. Roscher, *et al.*, "Integrated Sensor Network with Event-Driven Activation for Recording impact Events in Textile-Reinforced Composites", Proc. IEEE Sensors 2007, pp128-131





## さらなる延命処理・適応型トポロジ

126

- 必要となるセンサノード数よりも多いセンサノードを投入し、必要数だけリスニング状態に移行することで全体の延命をはかる
- この場合にもトレードオフが存在する
  - スリープ状態のノード数が少ない場合、省電力の観点から効率が悪く、通信輻輳の発生確率も増大するため通信エラー率が増大する
  - スリープ状態のノード数が多い場合、アクティブノード間距離が延びるため通信エラー率が高くなることや送信電力が増大するなどの要因によりライフタイムが減少する





- 電力資源温存のために、なるべくスリープ状態であるべき
  - 定められたタイミングで測定・通信状態に復帰し他のノードと同期をとって情報を交換する
- スケジューリング方式
  - あらかじめどのノードがいつ復帰するかを定めておく
  - ノード数が動的に変化するセンサネットワークでは利用が困難
- コンテンション方式
  - あらかじめ定められたタイミングで全体が復帰する
  - IEEE802.11には、アイドルリスニング時間を減少させる仕様が存在
  - アドホックトラフィック発生通知メッセージ（ATIM:ad-hoc Traffic Indication Message）を受信したノードはデータが送信されるのを待機し、それ以外のノードは休止状態に移行する





- TDMAをセンサネットワークで効率よく運営する場合、時刻同期を行うドメイン内のノード数を限定し、複数のドメイン（クラスタ）に分けて管理する方が望ましい
- 各クラスタでの情報集約ノード（クラスタヘッド）がまとめてセンタサーバに情報を集約する
  - クラスタヘッド数にはトレードオフがある
  - クラスタヘッドが少ないと遠距離通信が必要となるため電力消費量が増大する
  - クラスタヘッドが多いとスリープ状態に移行できる時間が少なくなるため電力消費量が増大する
  - クラスタヘッドの決め方も様々存在する
    - 順番に割り当てる
    - 電力消費順
    - 経路を勘案

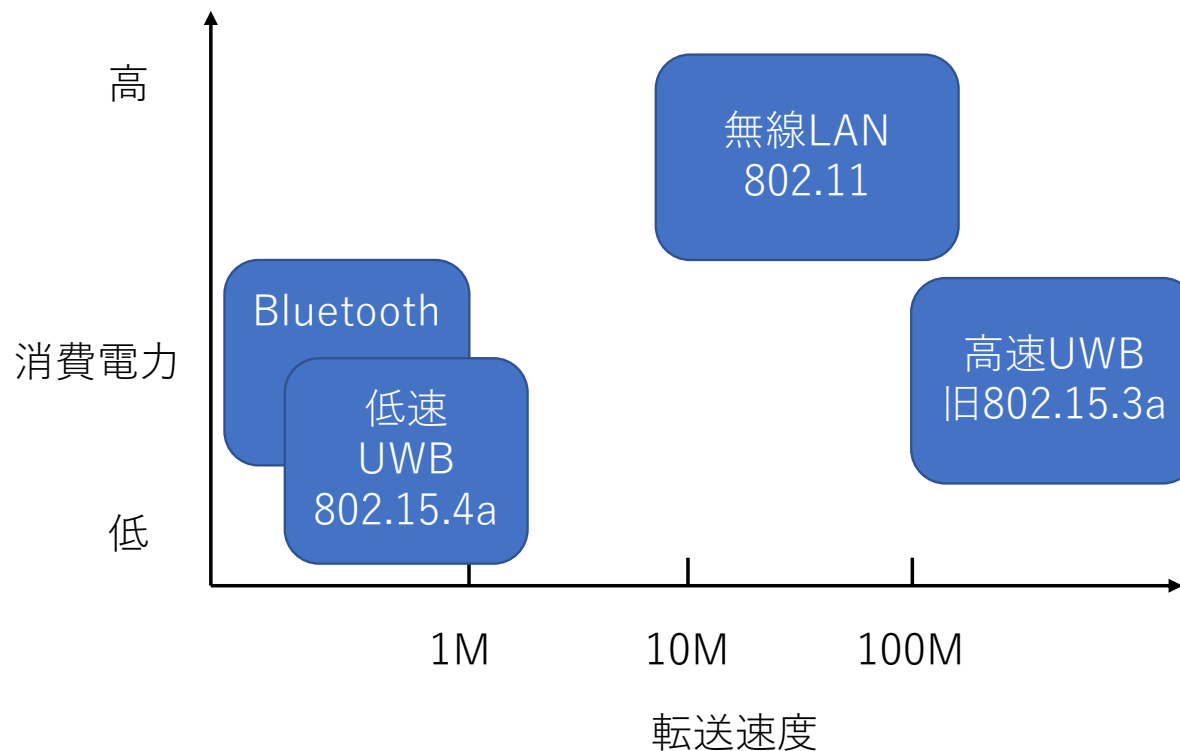




# 無線による測距・測位

129

- RSSIにより距離を計測（ただし誤差が大きい）
- 超広帯域無線技術UWB(Ultra Wideband)の利用により100Mbpsの高速通信と誤差数cmの測距を実現（高周波ほど誤差は小さくなるが伝搬距離が短くなる）

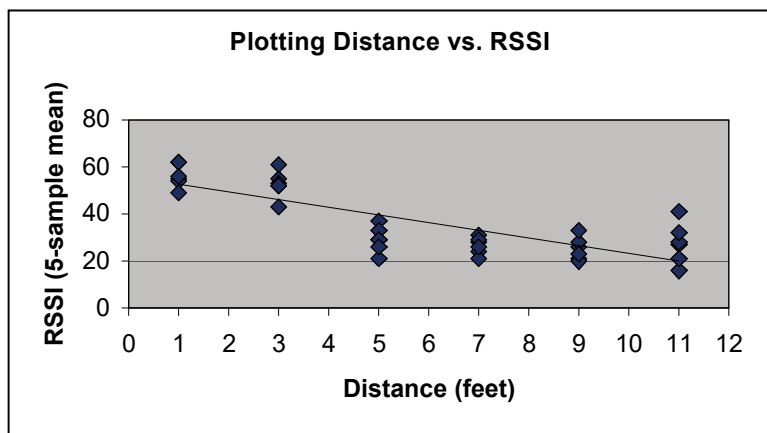
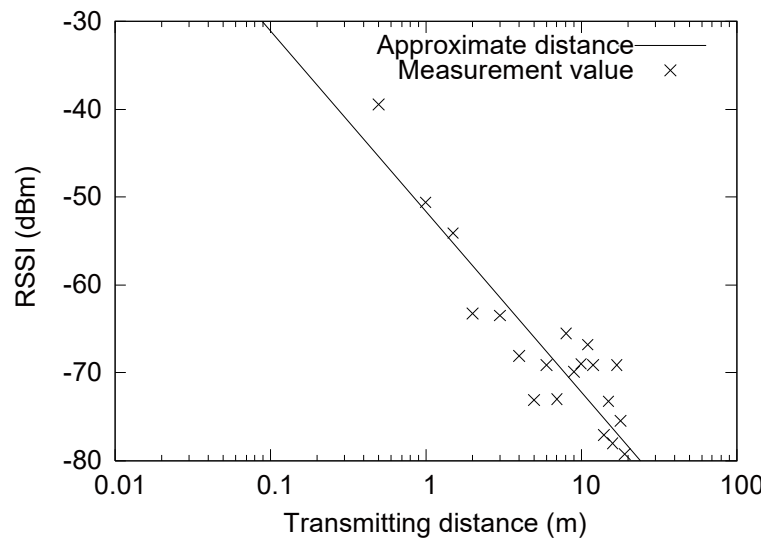




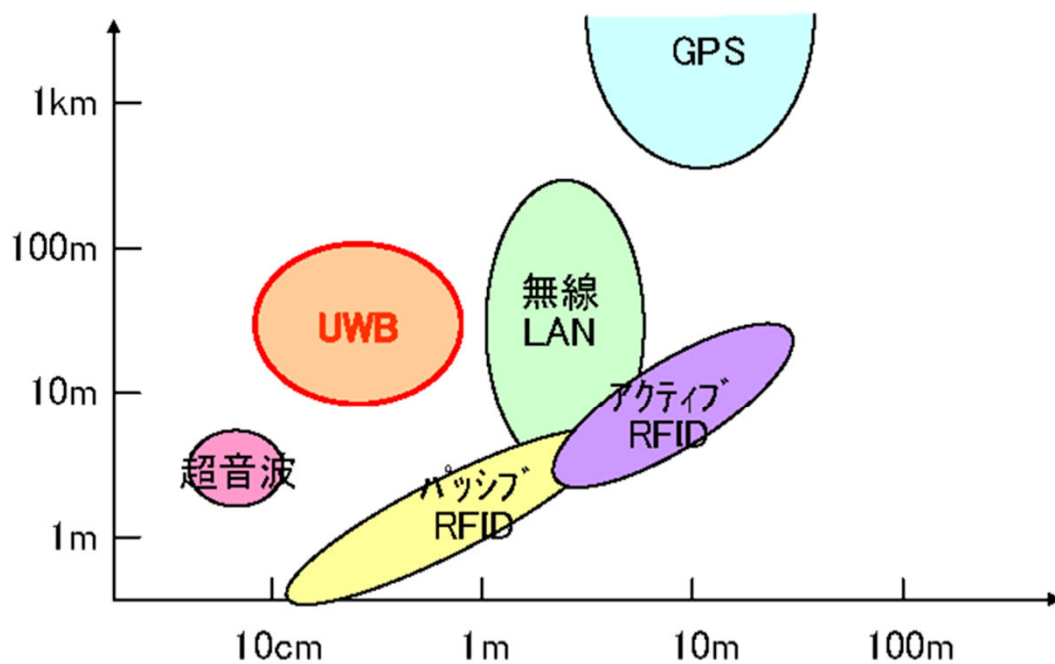


# RSSIと距離

130



測定範囲



測定精度





# 無線による測距

131

名称	微弱無線	特定省電力無線	Bluetooth	ZigBee	低速UWB	無線LAN	高速UWB
規格	独自	独自	IEEE802.15.1	IEEE802.15.4	IEEE802.15.4a	IEEE802.11.a/b/gなど	IEEE802.15.3a
周波数帯	300MHz帯	500MHz帯	2.4GHz	2.4GHz	3.1～10.5GHz	5.2GHz	10.6GHz
通信距離	30m	30～300m	10～100m	10～70m	10m	100～500m	1～10m
伝送速度	10kbps	10kbps	1Mbps	250kbps	数100kbps	100Mbps	480Mbps
消費電力	数10mW	数10mW	100mW	数10mW	10mW	数100mW	100mW
測距制度	無し	無し	無し	(数m)	数10cm	(数m)	無し



- センサネットワークと通常のネットワークの違いは、実世界からの情報を扱うこと  
インターネットではサーバの場所はまだ重要ではないが、センサネットワークは「場所の情報」が重要と
  - 位置を取得することは、センサネットワークにおいてもっとも重要かつ困難な課題
- 位置情報取得手段
  - GPS (Global Positioning System)  
10m程度の精度で位置情報を取得可能であるが、精度が十分ではないアプリケーションも多く、また屋内では利用できない
    - 携帯電話等の受信モジュール 10m 準天頂衛星システムで数cm
  - リアルタイムキネマティック測位 数10cm、UWBで数cm
- レンジベース手法 (Range-based)
  - ノード間距離をRSSIなどで測定し、その情報から位置を「直接的に」特定
- レンジフリー手法 (Range-free)
  - 既知であるノードとの距離やホップ数から位置を求めるなど「間接的に」特定しRSSIなど  
は利用しない
    - RSSI (Received Signal Strength Indicator : 受信信号強度)、受信機入力に入る受信信号の強度を示す数値





# ローカライゼーション

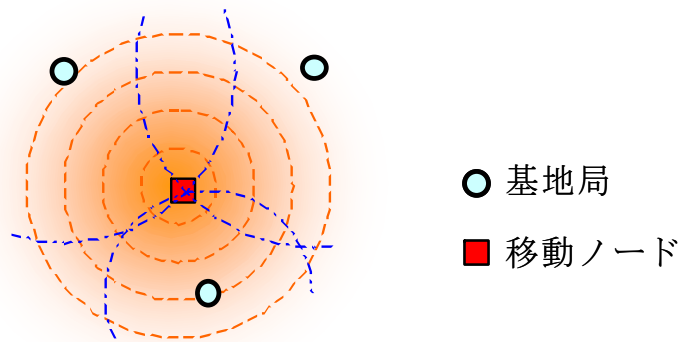
133

- センサネットワークは、実世界を扱うため位置情報が重要となる
  - インターネットでは、サーバの位置はあまり重要ではないが、センサネットワークは、どの環境のデータを取得しているかが重要となる
  - 位置取得は、センサネットワークにおいてもっとも重要かつ困難な課題
- 位置情報取得方法
  - レンジベース  
センサネットワークを構成する各ノード間の距離を測定しそれぞれの位置を決定
  - レンジフリー  
電波や音波など、距離測定信号を用いて位置を決定センサネットワークではレンジフリー位置推定方式が一般的
    - ノード数が多い場合レンジベースでは通信コストや電気消費コストが大きすぎる



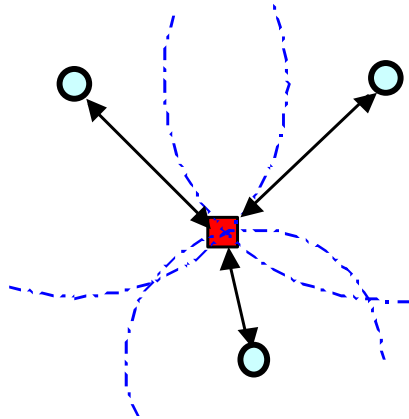
# レンジベース手法 (Range-based)

134

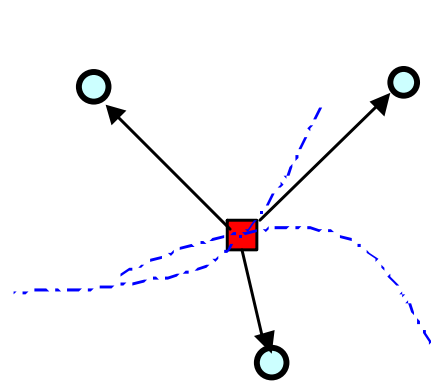


RSSIもしくは伝搬遅延時間による距離の推定

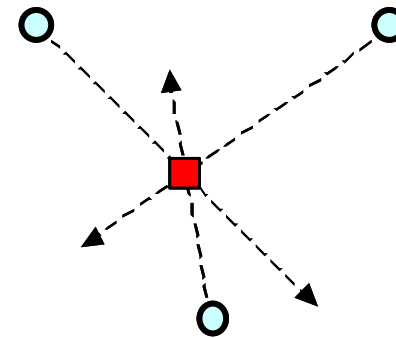
ToA(Time of Arrival)  
TDoA(Time Difference of Arrival)  
AoA(Angle of Arrival)



往復遅延時間(ToA)



時刻伝搬(TDoA)



方位(AoA)

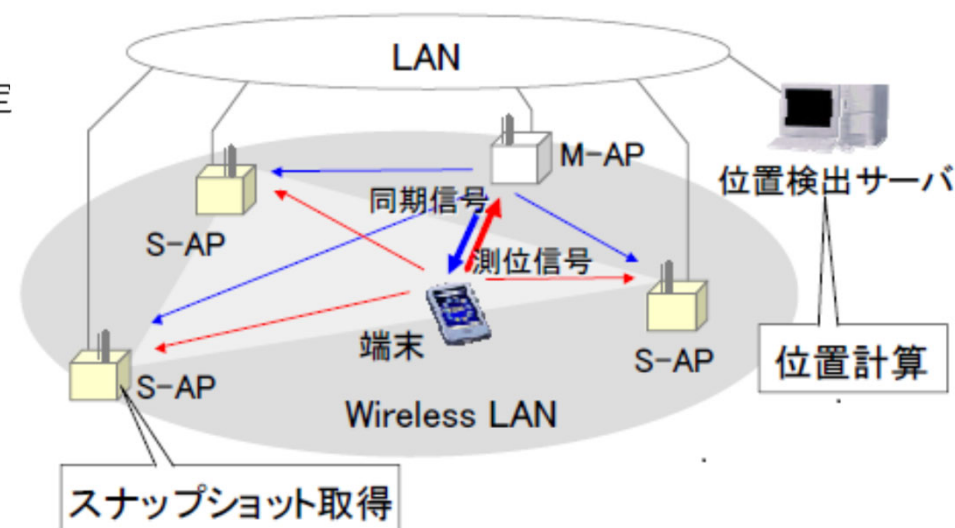
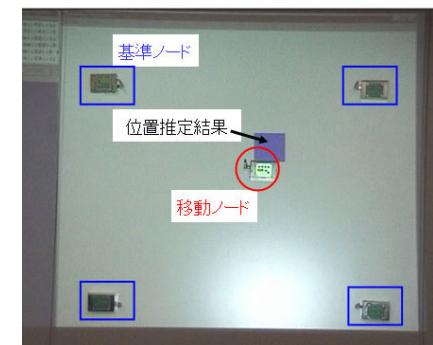
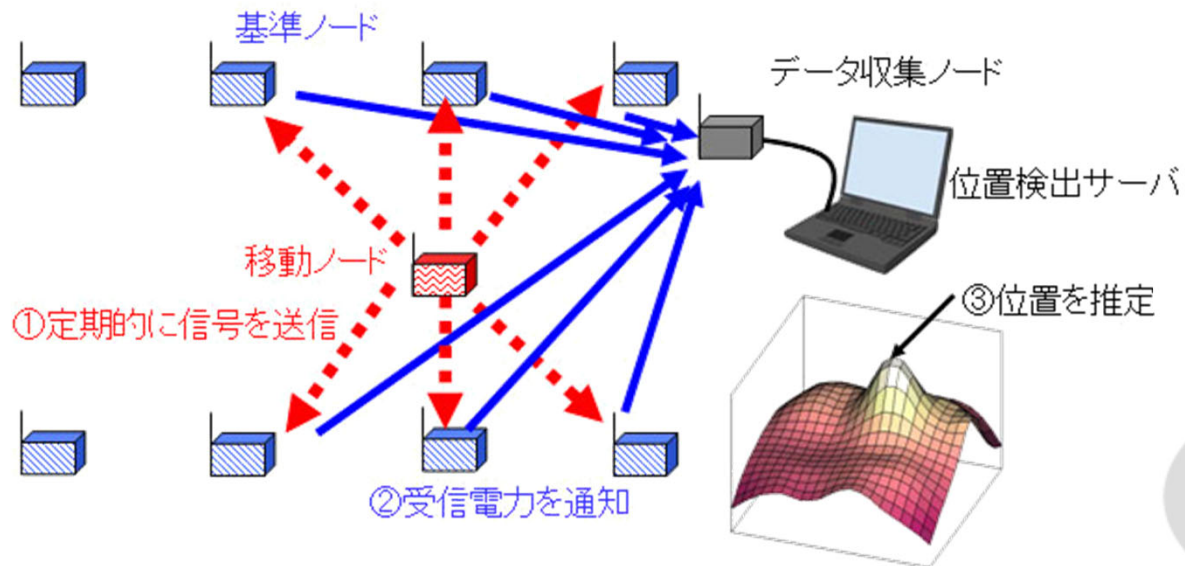


# レンジベース手法 (Range-based)

135

## ZigBee による RSSI 位置検知システム例

<http://www.oki.com/jp/Home/JIS/New/OKI-News/2006/01/z05106.html>



## 無線LANによるTDOA位置検知システム例

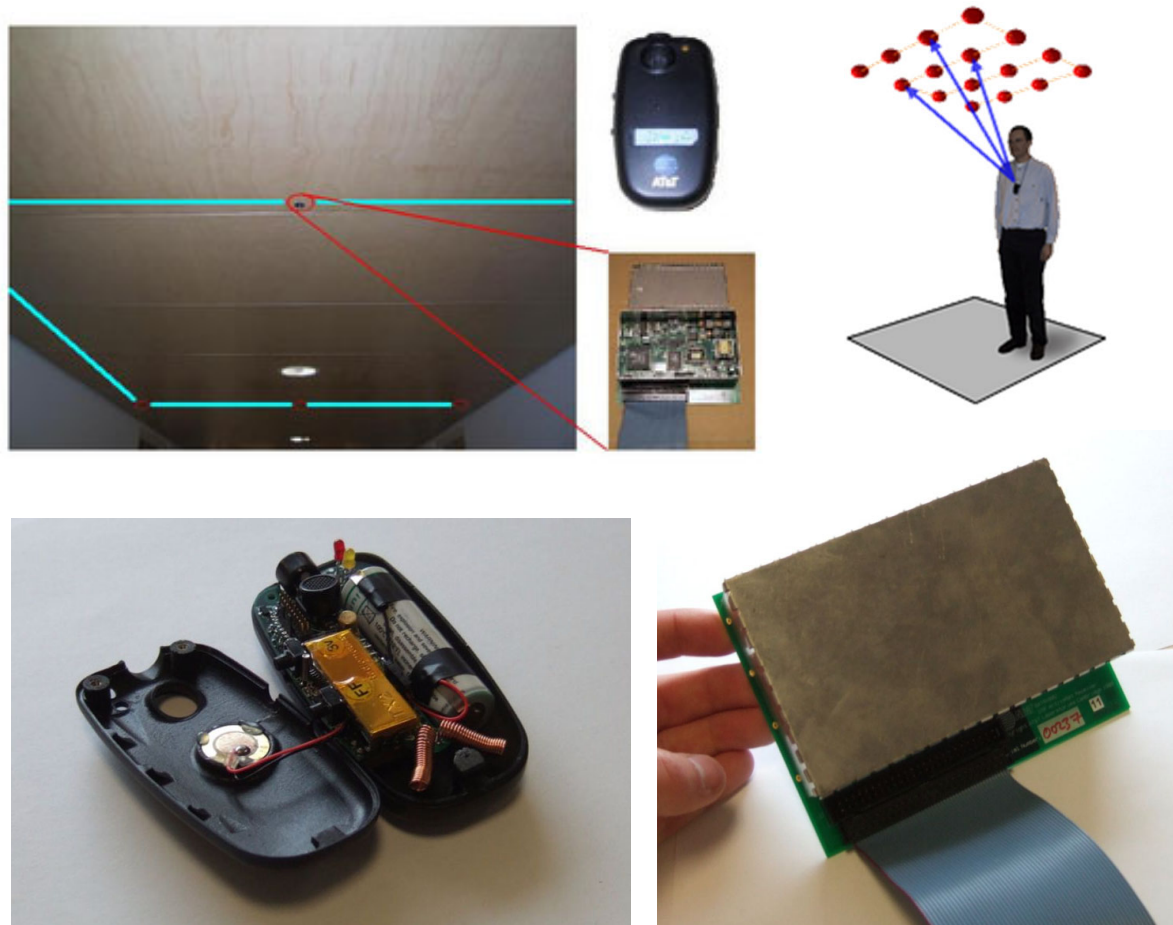
<http://www.hitachi.co.jp/wirelessinfo/airlocation/index.html>



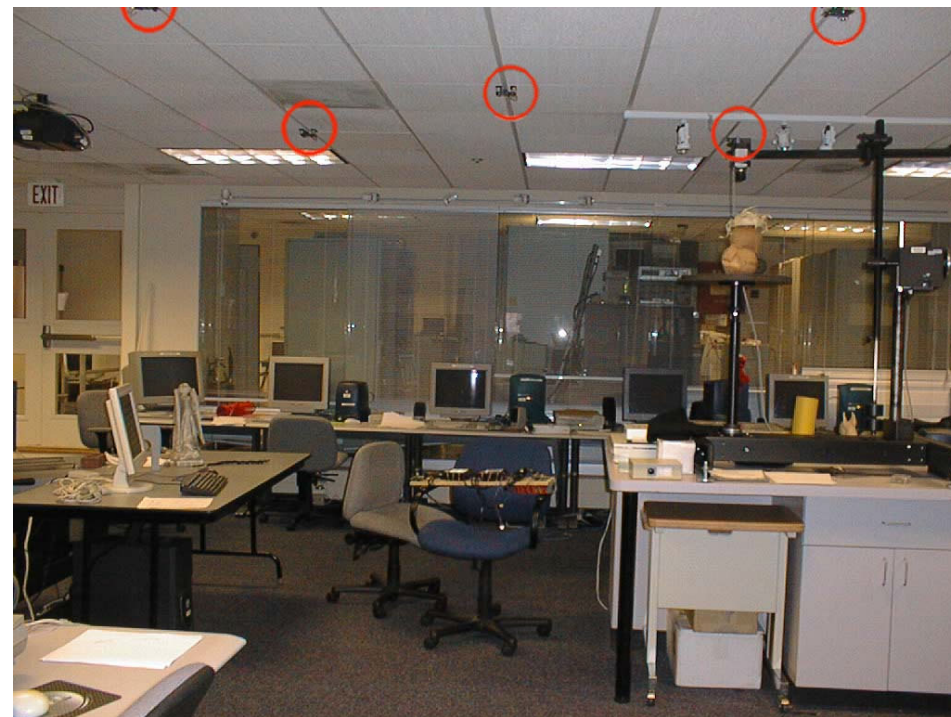


# レンジベース手法による応用例

136



<http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/research/wiki/BatSystem>

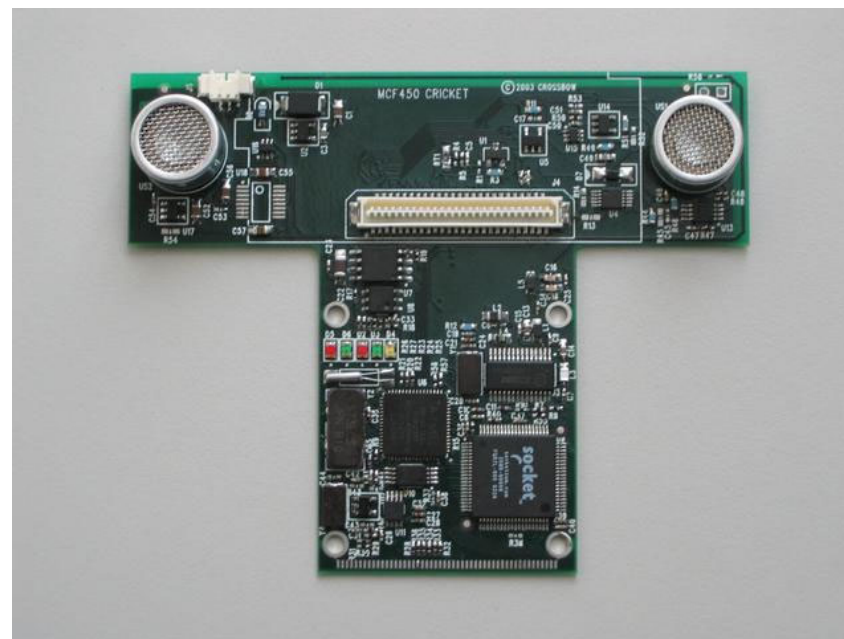
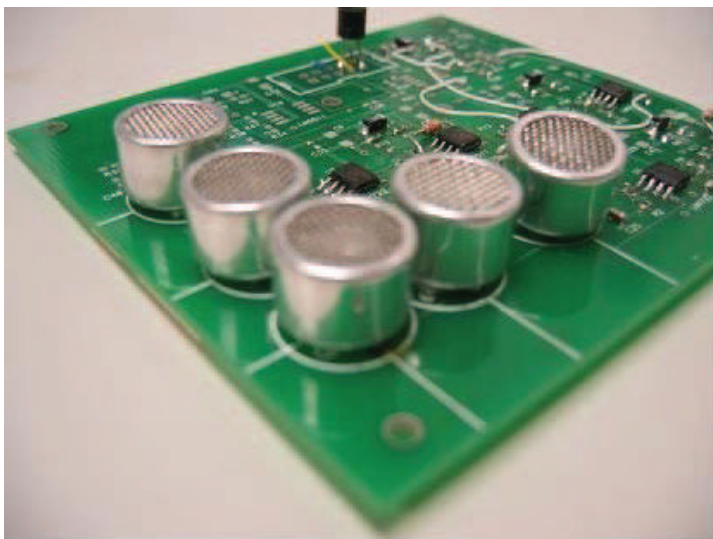
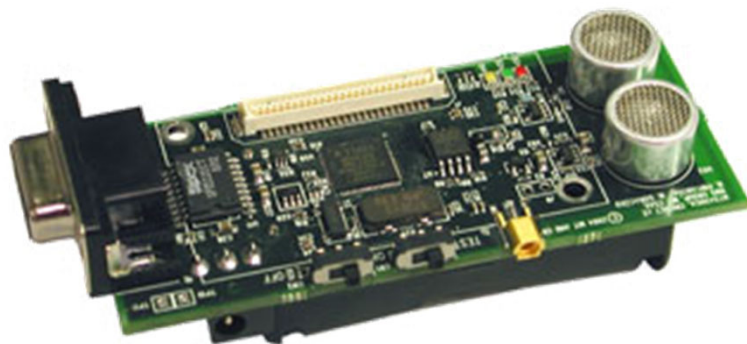


<http://cricket.csail.mit.edu/>



# 音波の伝搬遅延による測距

137







## RFIDタグによるゾーン検出

<http://jp.fujitsu.com/group/fst/services/ubiquitous/rfid/>



## 赤外線タグによる位置検知システム例

<http://www.nec.co.jp/press/ja/0602/0903-01.html>

距離を求めず、電波が届いたか届かないかなどを利用

- ・受信信号の伝搬特性を利用(特徴量)
- ・データベースとパターン照合
- ・ホップ数
- ・通信遅延時間



# 位置情報の取得

139

- 基準局を利用する方法（GPSなど）
  - 基準局A, B, Cから測定対象Dまでの距離が既知であれば

$$\sqrt{(x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2 + (z_A - z_D)^2} = d_{DA}$$

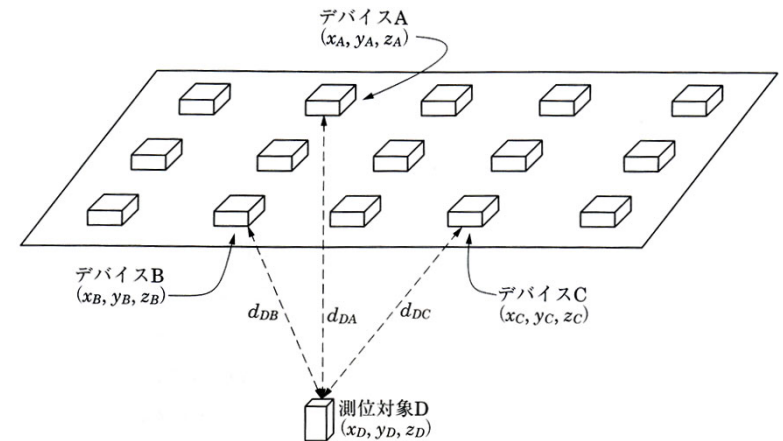
$$\sqrt{(x_B - x_D)^2 + (y_B - y_D)^2 + (z_B - z_D)^2} = d_{DB}$$

$$\sqrt{(x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2 + (z_C - z_D)^2} = d_{DC}$$

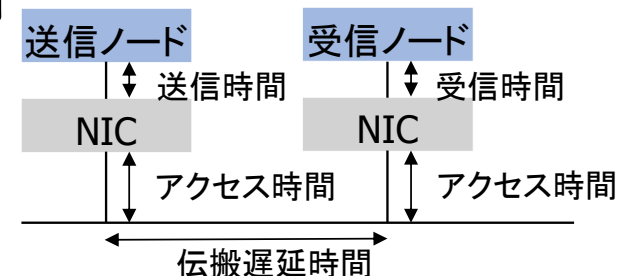
この方程式の一般解を求めるのは困難なため、連立ニュートン法や最小二乗法などで解くことが多い

- 3点では解が唯一に定まらない（2つ存在）、4点でも同一平面上にあれば解が唯一に定まらない

- 超音波による応用例（精度数cm）
  - Active Bat（ケンブリッジ大学）超音波
  - Cricket（MIT）超音波



- センサネットワークは実世界を扱うため、何時その事象が計測されたかという時刻を正確に知る必要がある
  - TDMA (Time Division Multiple Access) には正確な時刻 (時間) が必要
  - スリープ状態から通常 (通信) 状態に移行する時刻の同期
  - GPSおよびNTPでも時刻取得は可能



- 時刻同期に生じる遅延要素
  - 送信時間：時刻情報をサーバが生成しデバイスに送信するまでの遅延で、コンテキストスイッチやシステムコールによるオーバヘッドが含まれる
  - アクセス時間：ネットワークデバイス内での遅延で、物理媒体のチャネル空き待ち時間や、エラーによる再送時間が含まれる
  - 伝搬遅延時間：送信されたデータがクライアントのネットワークインタフェースに届くまでの遅延で、中継ルータやスイッチでの遅延が含まれる
  - 受信時間：クライアントのネットワークインタフェースデバイスが受け取った時刻同期情報が、アプリケーションに渡されるまでの遅延

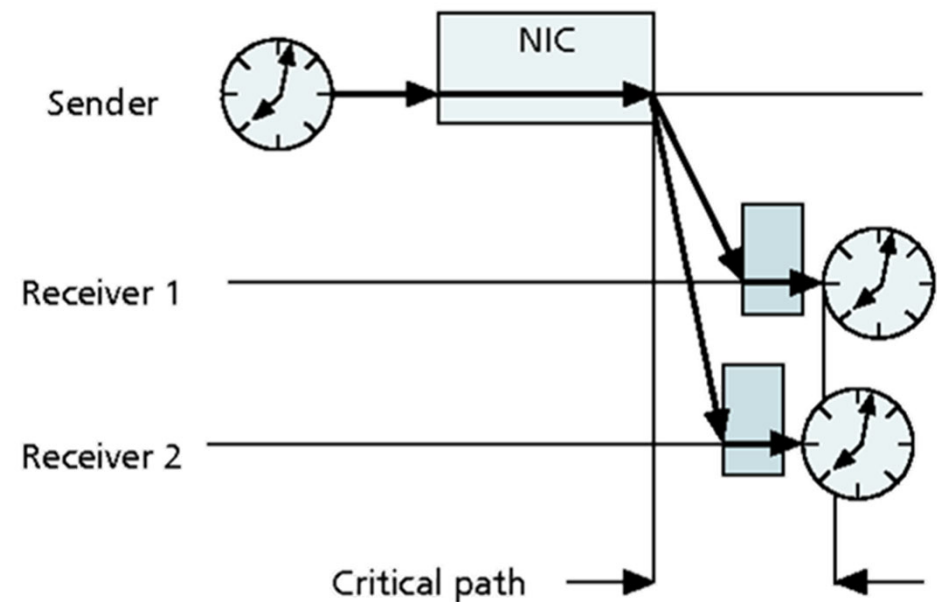
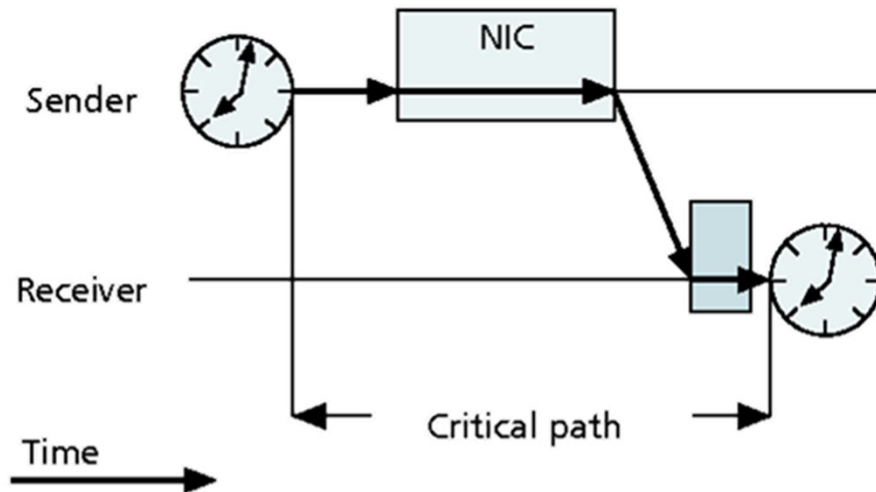




# 一般的な時刻同期手法

141

- RBS (Reference Broadcast Synchronization)
  - サーバは時刻同期信号をブロードキャスト
    - すべてのクライアントについて、送信時間とアクセス時間は同じ（場合によってはハードウェアで時刻同期）
    - 伝搬遅延時間と受信時間の不確定性が若干残るが、同じ時刻を刻むことができる



# より正確な時刻を取得するために

142

- 往復時間を考慮する（NTP Network Time Protocolと同様）
  - 時刻情報を受け取ったら直ちにその情報を送信ノードへ送り返すことで、往復遅延  $T_r$  が得られる
  - $T_r/2$ は伝搬遅延時間を含んでおり、これを元に補正する
- 何度か時刻RBSを受け取ってスキュー  $C_{ij}$  を算出する
  - 温度依存性は補償回路である程度除去できるが、超音波を利用する場合など、環境による不確定要素が含まれるため一度測定すればよいという値ではない
- クライアント間で時刻情報を受信したローカルな時刻を交換しあい、オフセットを求める
  - 平均はだれが計算しても同じという単純な方法で算出

$$\forall i \in n, j \in n: O_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_{jk} - T_{ik})$$

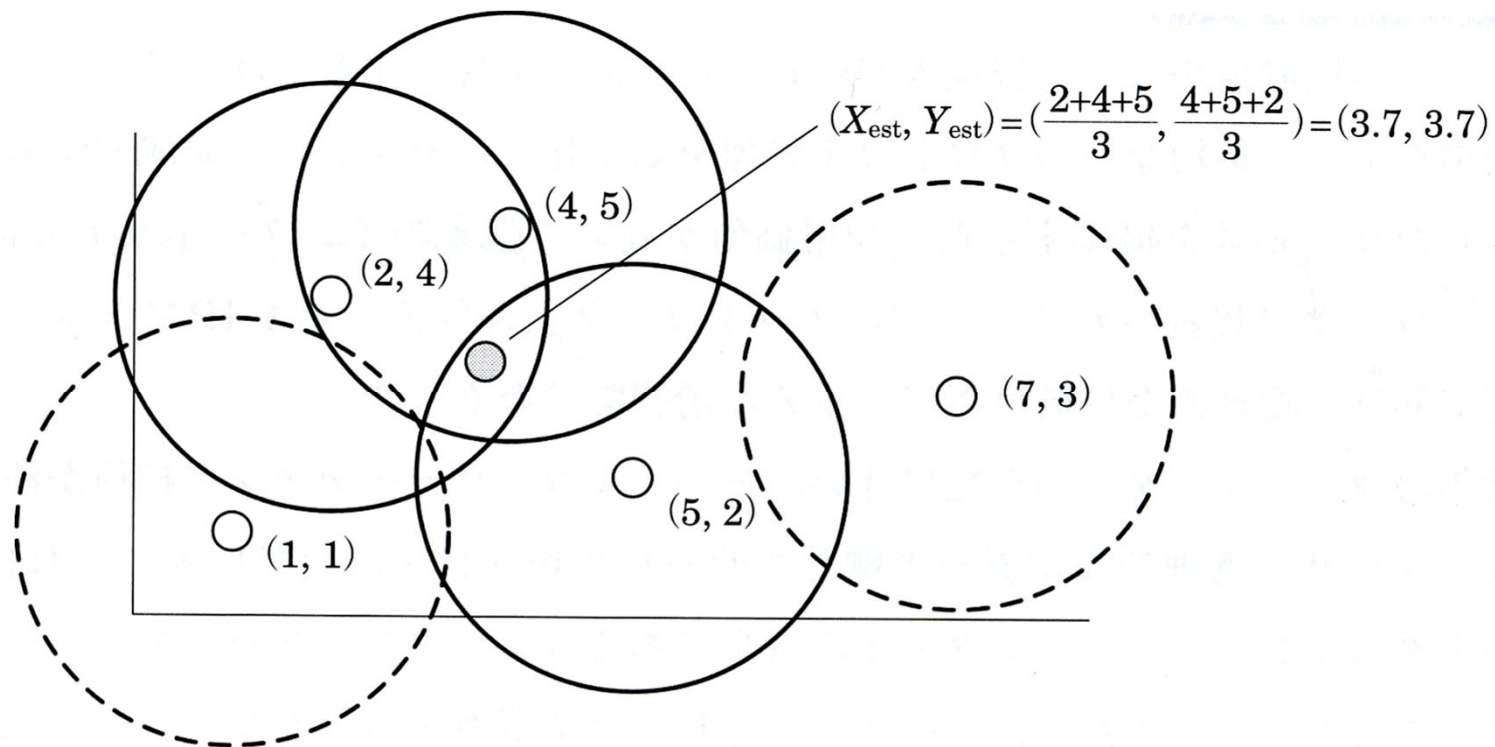
$$T_i \approx T_j C_{ij} + O_{ij}$$



# Centroid測定による位置測定

143

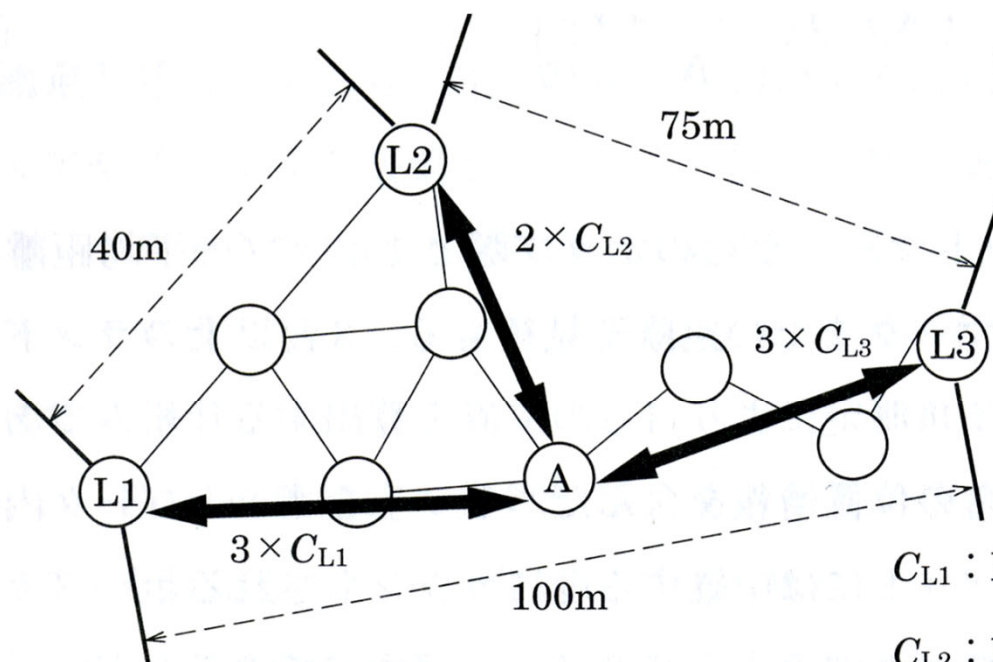
- 位置が既知であるランドマークノードからの受信状況で重心位置を推定



# DV-Hop測定による位置測定

144

- ホップ数を勘案して位置を推定



$$C_{L1} = \frac{100+40}{6+2} = 17.5$$

$$C_{L2} = \frac{40+75}{2+5} = 16.42$$

$$C_{L3} = \frac{75+100}{6+5} = 15.90$$

$C_{L1}$  : L1から1ホップの平均距離

$C_{L2}$  : L2から1ホップの平均距離

$C_{L3}$  : L3から1ホップの平均距離





# より正確な位置推定

145

- RSSIによりランドマークからの距離を実際に得る
- 複数の方法を融合する
- 自位置の移動距離や移動方向を地磁気やエンコーダにより入手しハイブリッド計測を行う
- 周波數位相差により正確に距離差を測定する

## RSSIの理論値

$$P_r = P_t - L_p + G_r + G_t$$

Pr: received power [dBm]

Pt: transmitted power [dBm]

Gr: receive antenna gain [dBi]

Gt: transmit antenna gain [dBi]

Lp: loss of propagation [dB]

Parameter	Value
Send interval	10 msec
Send count	100 times
Channel	11ch (2405 MHz)
Transmitter power	0 dBm

## 自由空間における伝搬損失

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = 10\alpha \log_{10} \left( \frac{4\pi f D}{3 \times 10^8} \right)$$

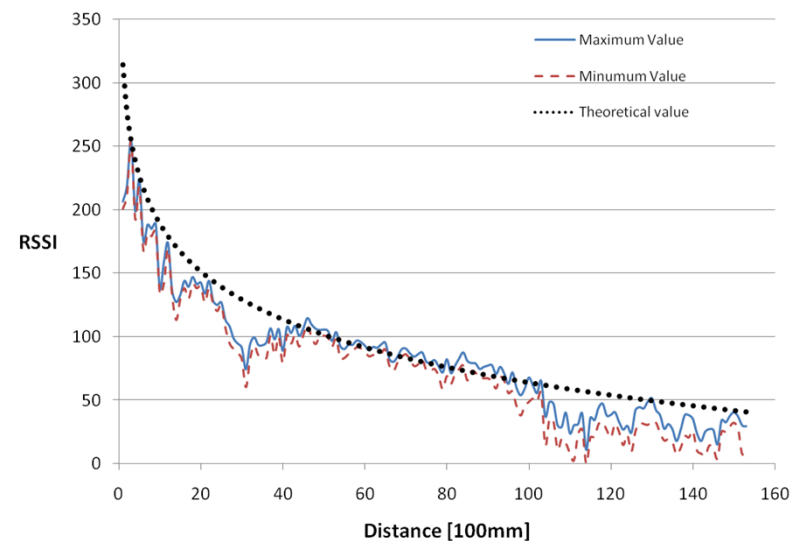


Fig. 1 Relation between RSSI and the distance

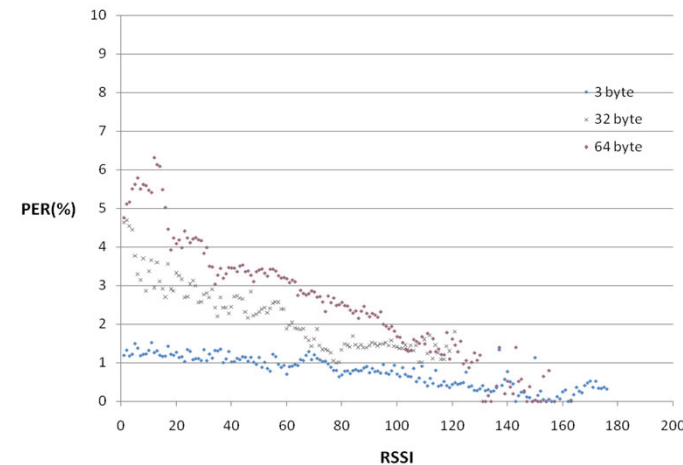
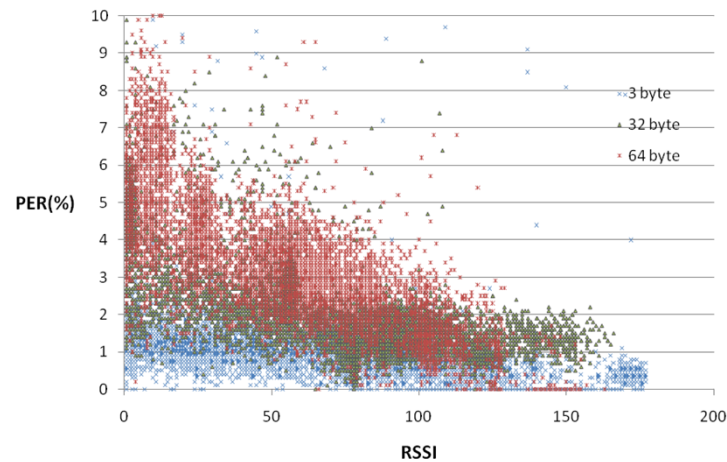




# RSSIは信用に足るのか？

146

- RSSIが環境の影響を受けやすく不安定な指標
  - 障害物の影響だけでなく、相互干渉、外乱等、不安定になる要素が多数あり、その特定や影響が困難であることからRSSIのみを用いた位置推定は難しい
- PER (Packet Error Rate) と密接な関係がある
  - 安定した通信環境を得るためにもRSSIを無視することはできない
  - さらには送信パケットサイズとも関係がある
- 送信データ長及びRSSI と PERの相関実験
  - 送信ノード：固定長データパケット送信・受信ノード：受信パケット数カウント





# 取得データの格納

147

- センサネットワークで取得した情報をどのように格納するか
- 外部ストレージ方式
  - センサから取得したデータをノードが直接蓄積せず、センサネットワーク外部のノードに送信する
  - データの回収は外部ストレージに直接アクセスすればよく、外部ストレージへの情報伝送コストが必要であるがクエリに対するコストは小さい
- ローカルストレージ方式
  - センサが取得したデータをその情報を取得したノード自身が保持する
  - クエリが少ない場合に電力消費コストが少ないが、小型センサノードに巨大なローカルストレージを搭載するのは難しい
- データセントリックストレージ方式
  - センサネットワーク中の各ノードに保持すべき情報の種類が定められており（タグ等）、関係する情報が該当するノードで蓄えられる
  - 情報の取得と対応するノードの位置関係などがうまくいけばよいパフォーマンスが期待できる





## 演習問題（3）

148

次の用語について、それぞれ100文字程度で説明しなさい。

- (3-1) スケーラビリティ
- (3-2) フォールトトレランス
- (3-3) ラストワンマイル
- (3-4) ゲートウェイ
- (3-5) エナジーハーベスティング





# 演習問題（3） 続き

149

## 注意事項

- これらの設問に対する回答を、Microsoft Wordファイルで作成
- LMSで提出すること
- A4 1～2枚で作成すること
- 最初にタイトルとして「演習問題（3）」と書き、名前と学籍番号を記載すること。  
このフォーマットに従っていないレポート答案は受け取らない
- 締め切りなど詳細はLMSを確認すること

