トラフィックを抑制する アドホックネットワーキングプラットフォームの超低消費電力化

～超低消費電力化データ駆動ネットワーキングシステム～

2012年11月30日

筑波大学　西川博昭

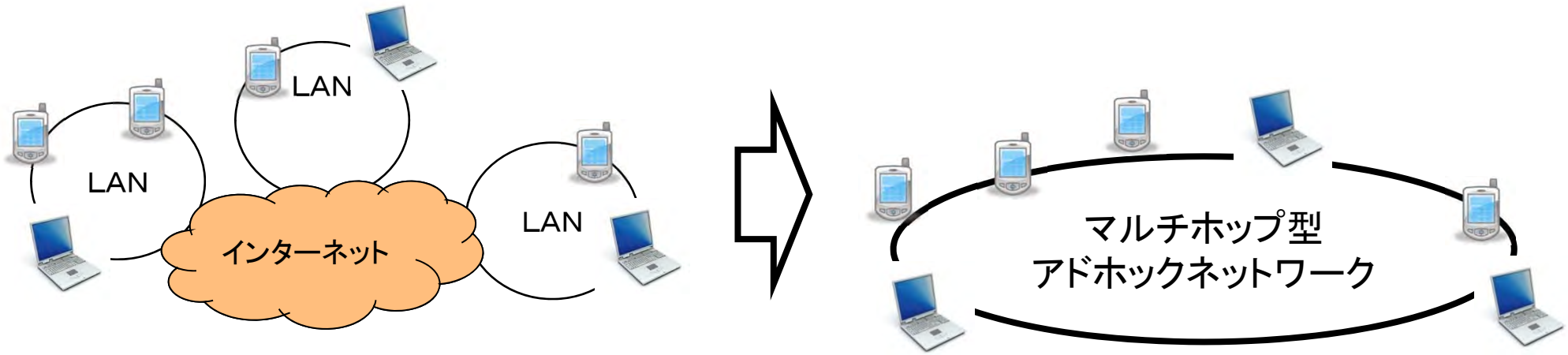
アウトライン

- トラフィック抑制型アドホックネットワークの必要性
- 研究目的
- 超低消費電力化効果の総合評価の枠組み
- 提案方式
  - トラフィック抑制型アドホックネットワーキング方式
  - 自己同期型パイプラインによる
    データ駆動チップマルチプロセッサ（CMP）プラットフォーム
- 総合評価
  - ULP-DDNSの消費電力の評価
    - トラフィック抑制型
      アドホックネットワーキング方式の評価
    - ULP-DDNSプラットフォームの評価

    ⇨ プラットフォームシミュレータによる
    統合評価
  - 比較対象として従来型ネットワークシステムの消費電力の評価
- 研究成果のデモ

アドホックネットワークとは？

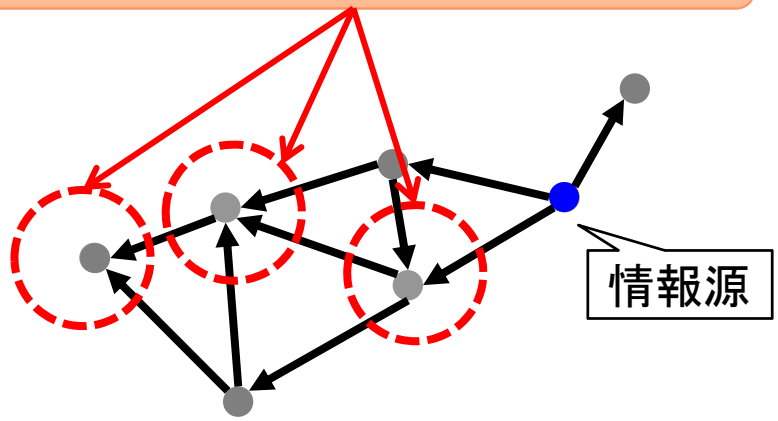
- 中継機能を実現したノードで構成される、通信インフラを要しないネットワークをアドホックネットワークと呼ぶ。
- 災害時などの緊急時に有用とされている。
  - 緊急時の暫定ネットワークとして、アドホックネットワークを活用する。



トラフィック抑制型アドホック ネットワーキングプラットフォームの要件

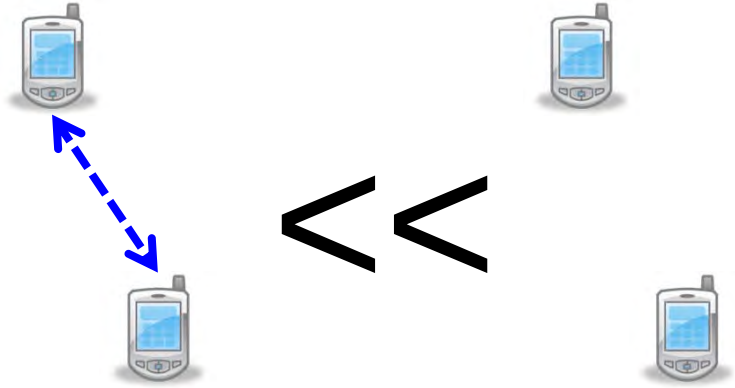
- 情報の到達率を向上させる情報転送方式を実現する。
  - アドホックネットワークではマルチホップによる放送型情報転送を行うため、パケットの衝突が起きやすい。
  - パケットの衝突を抑制し、情報の到達率を向上させる方式の実現が必要である。

パケットの衝突が起こる。



- 通信環境を長時間維持するための超低消費電力化を実現する。
  - 緊急時の電力不足時にも通信環境を維持する必要がある。
  - 通信時はもとより、圧倒的な割合を占める待機時の超低消費電力化の実現が必須である。

待機時間の割合が圧倒的に多い。



通信時　　待機時

ULP-DDNS

研究目的

- ネットワーキングシステムを超低消費電力で実現して、緊急時にも、通信時間を可能な限り長く維持する。

- 超低消費電力化データ駆動ネットワーキングシステム
  ULP-DDNS：Ultra-Low-Power Data-Driven Networking System

  ⇩

  – 本質的な電力によって受動的に動作するデータ駆動原理を最大限に活用した、
    トラフィック抑制型アドホックネットワーキング方式、ならびに、
    自己同期型パイプラインによるデータ駆動CMPプラットフォーム
    を統合して実現する。

超低消費電力化効果の総合評価の枠組み

従来型ネットワークシステム

従来型アドホックネットワーク

ノードの送受信パケットログ

プラットフォームの入出力パケット

クロック同期による従来型プラットフォーム上のUDP/IP処理
(ネットワークプロセッサXScaleの後継と捉えられるAtom)

低消費電力化効果の評価

単位時間あたりの入出力パケット数[packet/sec.]

×

パケットあたりの（通信処理時間[sec./packet]と待機時間[sec./packet]）

×

通信処理時消費電力 [W]と待機時消費電力[W]

||

総消費電力[W]

ULP-DDNS

トラフィック抑制型アドホックネットワーキング方式

ノードの送受信パケットログ

プラットフォームの入出力パケット

自己同期型パイプラインによるデータ駆動CMPプラットフォーム（ULP-DDCMP+）上のUDP/IP処理
（二重化環状パイプライン＋CMP＋VS＋PG）

CMP: Chip Multiprocessor
VS: Voltage Scaling
PG: Power Gating

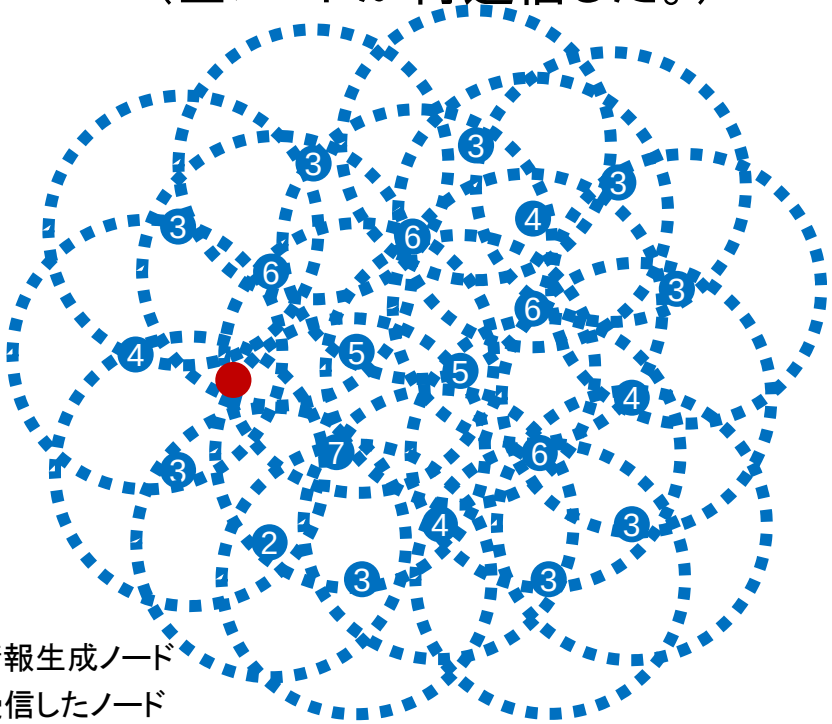
(ULP-DDNSの消費電力)/(従来型ネットワークシステムの消費電力)=数百分の一をめざす。

トラフィック抑制型アドホックネットワーキング方式

トラフィックを抑制しパケットの衝突を回避して、情報の到達率を向上させる。

既存方式：SF

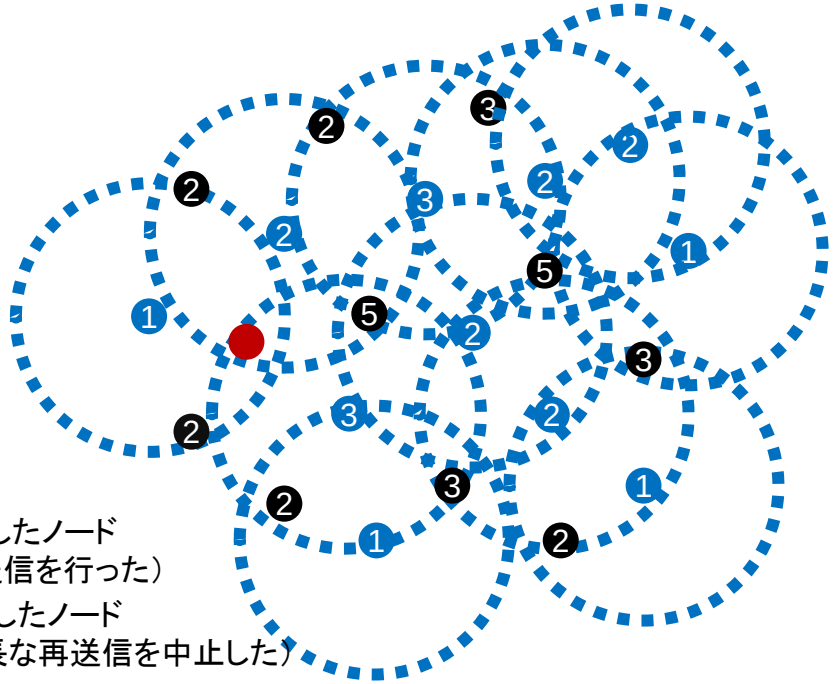
再送信を行ったノード： 21
（全ノードが再送信した。）



情報生成ノード
受信したノード

提案方式：LDCF

再送信を行ったノード： 11



受信したノード
（再送信を行った）
受信したノード
（冗長な再送信を中止した）

SF: Simple Flooding
LDCF:Load-aware Dynamic Counter-based Flooding

ULP-DDNS

LDCF: Load-aware Dynamic Counter-based Flooding

- 提案手法
  - 想定：災害現場のライブ中継などのストリーム系の高負荷アプリケーションを想定し、ある情報源から連続的に動画フレームパケットがフラッディング送信される。
  - 負荷感応型フラッディング方式LDCF：自ノード内負荷を見て効率的（無駄な中継再送信をやめ、可能な限り多くのノードに情報を届けるような）情報転送を行う。
- トラフィックの抑制法
  - パケットを受信した全てのノードは、単純フラッディングのように全パケットを再送信せずに、自ノードの負荷を見て再送信の抑制／非抑制を決定する。
    - ノード負荷はレイヤ2送信キュー長で判断する。
      - 自ノード負荷が高い ⇒ 再送信を抑制する。
      - 自ノード負荷が低い ⇒ 再送信を抑制しない。
  - 一定時間内に、同一の情報源が発信した同一内容のパケットの受信回数をカウントする。カウント値が、再送信許可閾値※を下回る場合にのみ再送する。
    ※事前にネットワークシミュレーションにより閾値を選出する。

放送型情報転送のシミュレーションによる評価

設定

同一条件下で
SF／LDCFをシミュレーション

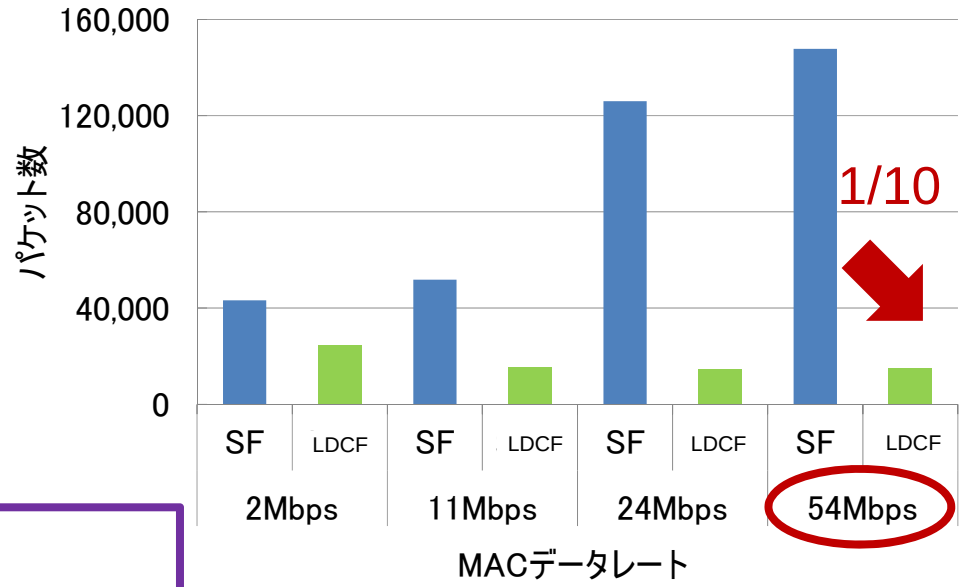
結果

1000 m

600 m

（パラメータ）災害発生時を再現

- ノード総数：100ノード
- 初期配置：ランダム
- 発信ノード：2ノード
- ノードの移動速度：0～4m/s（ランダム方向）
- 下位レイヤ：IEEE802.11g(54Mbps)



シミュレーション結果
（10回試行の平均値）

ULP-DDAS

ULP-DDNSの統合評価方法

トラフィック抑制型アドホックネットワーキング方式と自己同期型パイプラインによる
データ駆動CMPプラットフォームの相乗効果からなる超低消費電力化効果を評価する。

トラフィック抑制型アドホックネットワーキング方式

ノードの送受信パケットログ

ネットワークシミュレーション結果より、プラットフォームの入出力パケットを抽出する。

プラットフォームの入出力パケット

ULP-DDCMP+上のUDP/IP処理
（二重化環状パイプライン＋CMP ＋ VS ＋ PG）

ULP-DDCMPの回路シミュレーション結果と実測結果より、ULP-DDCMP+のパイプライン段毎のタクトと消費電力を抽出した。

プラットフォームシミュレータ

UDP/IP処理時電力 約0.026 mW

待機時電力 約0.019 mW

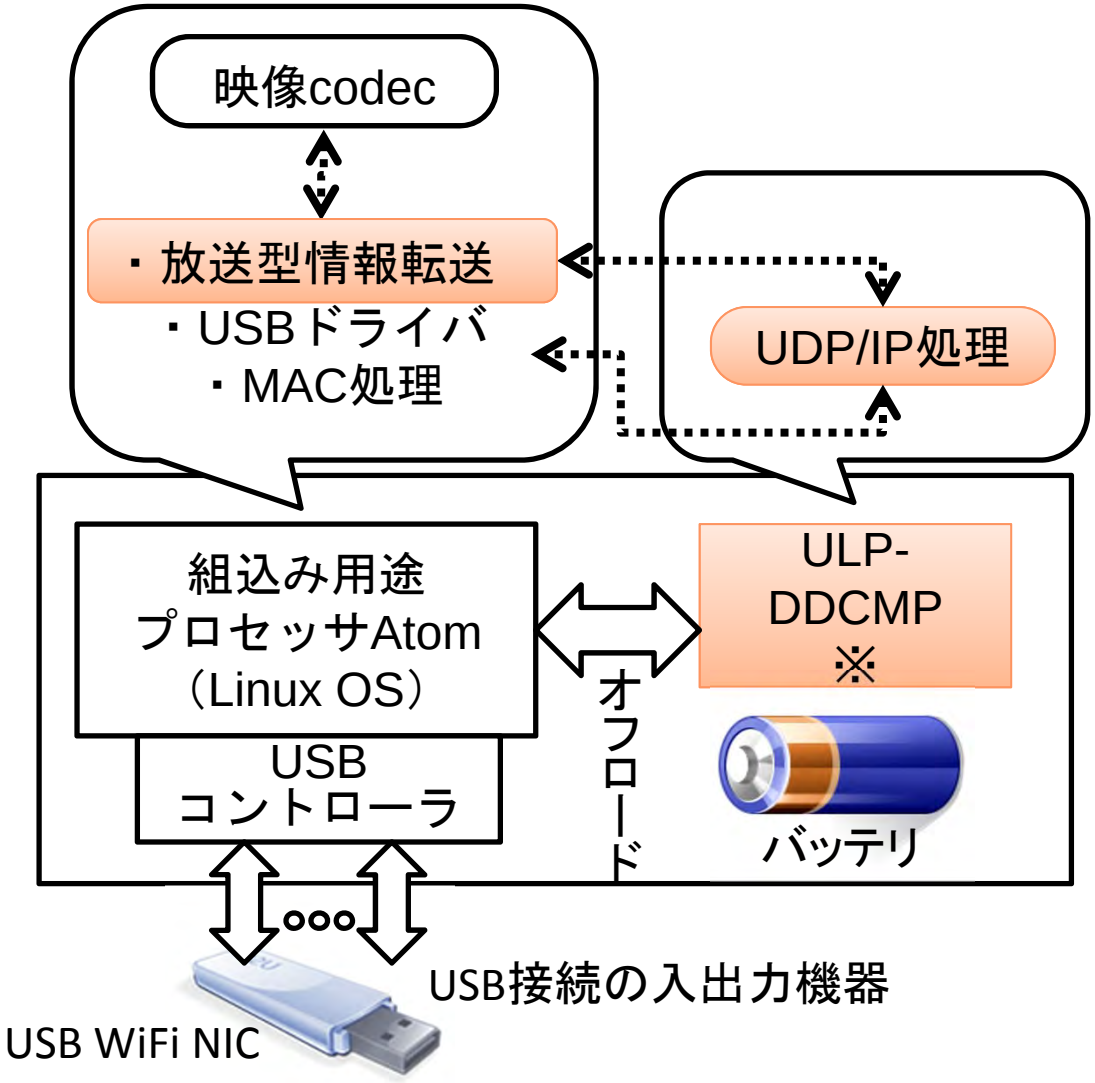
ULP-DDCMP+の自己同期型パイプラインの段単位でトークンの生成・消費のシミュレーションを実施し、パイプライン段単位で消費電力を積算し、総消費電力を求められる。

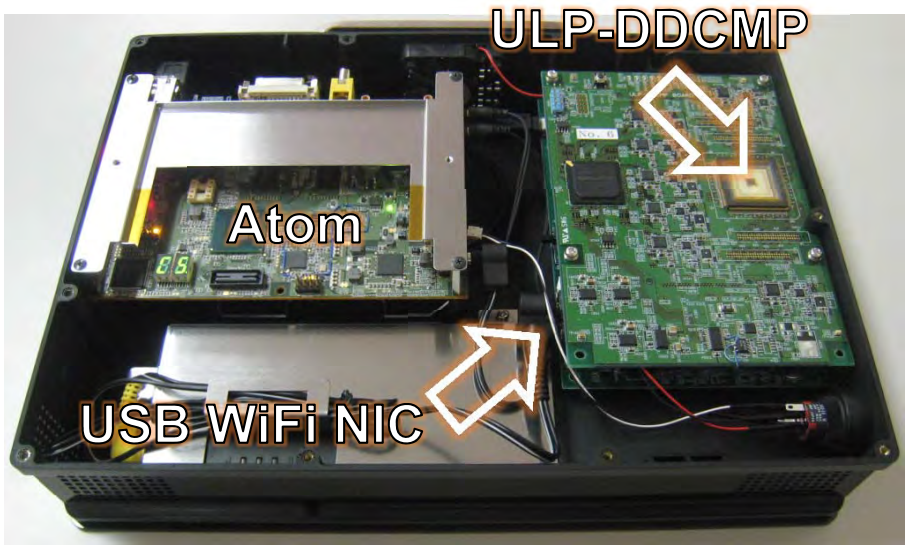
総消費電力 約0.045 mW

ULP-DDCMP：二重化環状パイプラインとCMPを実現した、データ駆動CMPの試作VLSI

ULP-DDNS

ULP-DDNSプラットフォーム





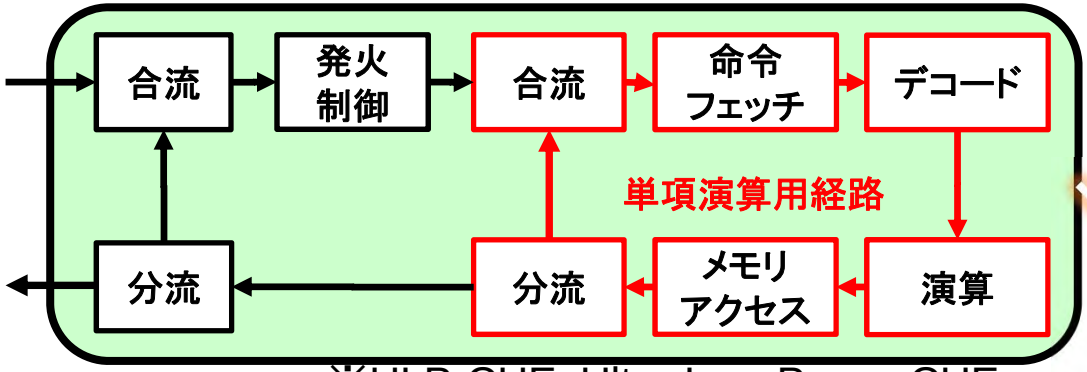
ULP-DDNSプラットフォーム

※ULP-DDCMP：自己同期型二重化環状パイプラインによるデータ駆動CMP

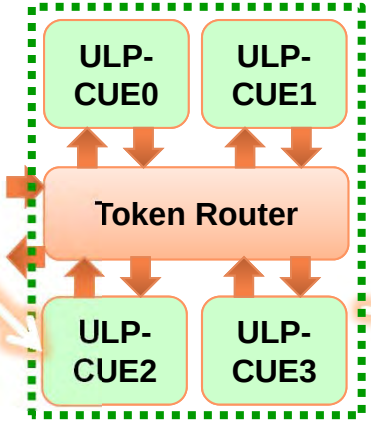
ULP-DDNS

超低消費電力化データ駆動CMP：ULP-DDCMP

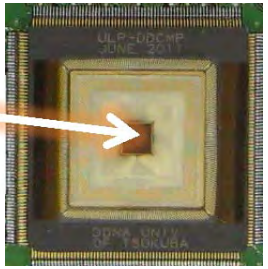
- 効率的情報転送に用いられるUDP/IP処理のデータ駆動実現
  - 総実行命令数の約80%を占める単項演算を低消費電力で実行可能とする。
- 二重化環状パイプライン：ULP-CUE
  - 単項演算実行時に発火制御を回避する。



※ULP-CUE: Ultra-Low-Power CUE



☆65nm CMOS 7ML
☆4 x 32bit ULP-CUE
☆4.2mm x 4.2mm Die



データ駆動CMPチップ：
ULP-DDCMP
(fabricated in June 2011)

- 自己同期型パイプラインによるデータ駆動CMP
  - データ駆動方式では、負荷・機能分散が自在にできる。
  - 自己同期型パイプラインでは、CMP化が自在にできる。
    →低消費電力化のため、4個のコアへ入力パケットを振り分け負荷分散処理を実現した。

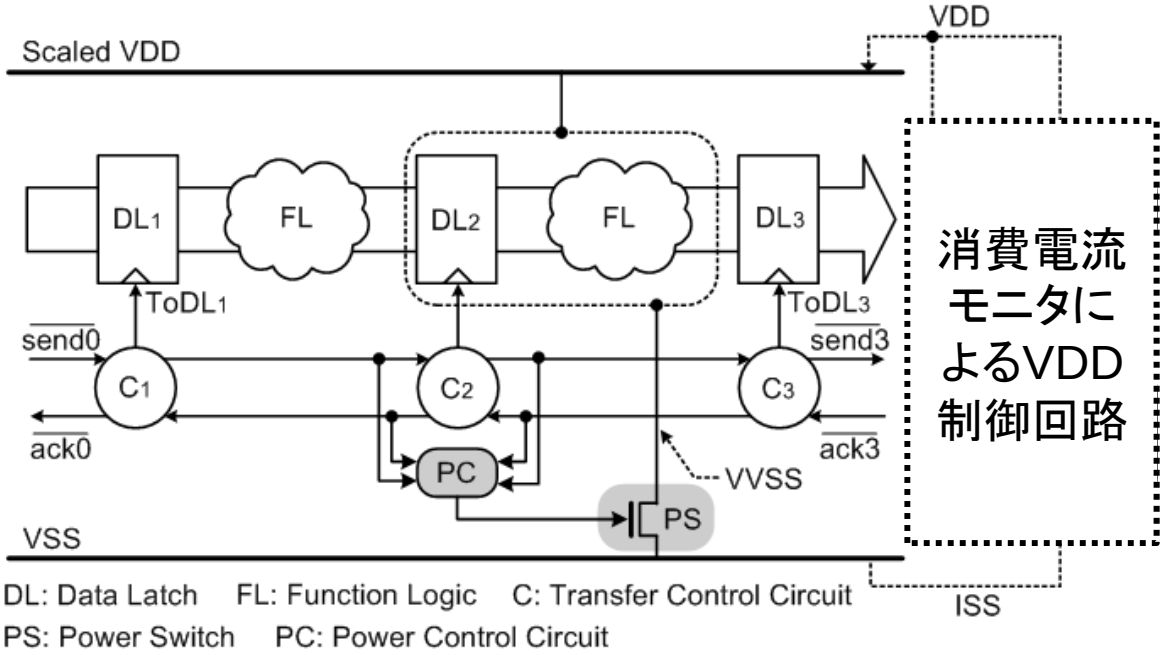
ULP-CUE（1.2V）によるUDP/IP処理時の消費電力4.64mW
＞ ULP-DDCMP（0.8V）によるUDP/IP処理時の消費電力1.46mW

自己同期型VLSI実現（ULP-STP）とその評価方法

- 自律的かつ局所的な制御による低消費電力化
  - (a) トークン流量に応じた電力供給 ⇒ 実行時電圧制御(VS)
  - (b) 待機時のリーク電流の遮断 ⇒ 細粒度パワーゲーティング(PG)

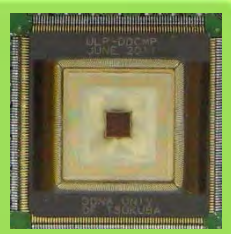
特長１：トークンの処理中であってもVSが可能。

特長２：トークンを処理していないパイプライン段をPG可能。
PGの粒度（パイプライン段数）を、リーク量（製造プロセス）に応じて設定可能。



【評価方法】

ULP-STP（2009）



ULP-DDCMP（2011）

65nm試作チップの実測

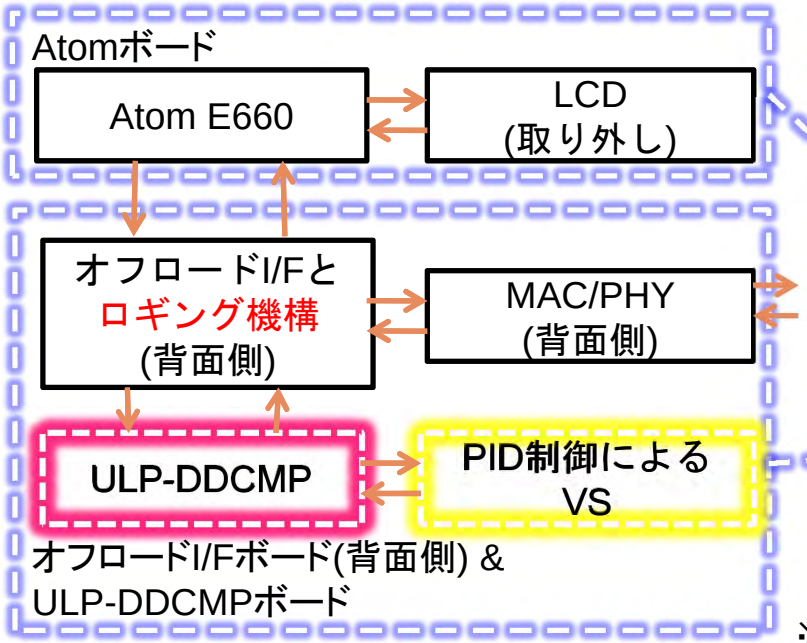
＋

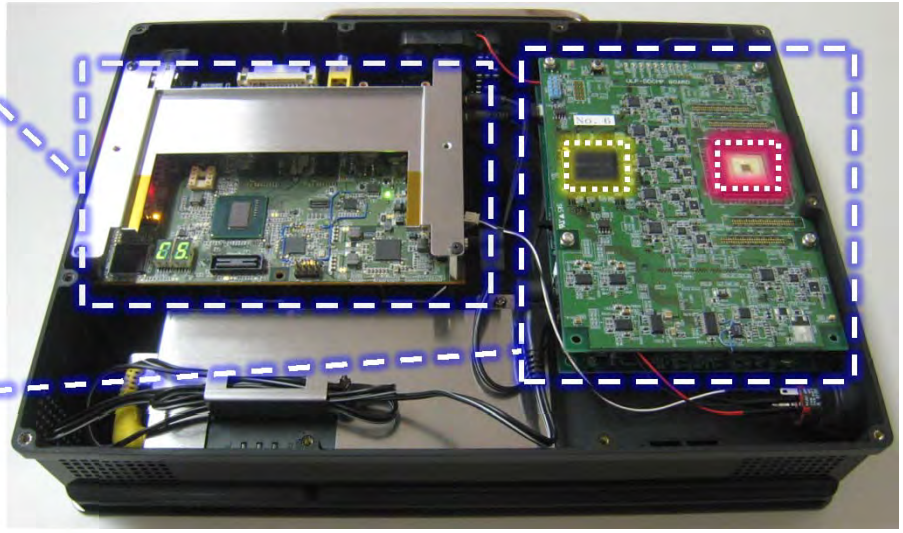
PS、ISOの最適化を施した回路のSPICEシミュレーション

↓

パイプライン段数最適化後の低消費電力効果の半定量化（含 電力・性能オーバヘッド、リーク電力量）

ULP-DDNSプラットフォームによる実測



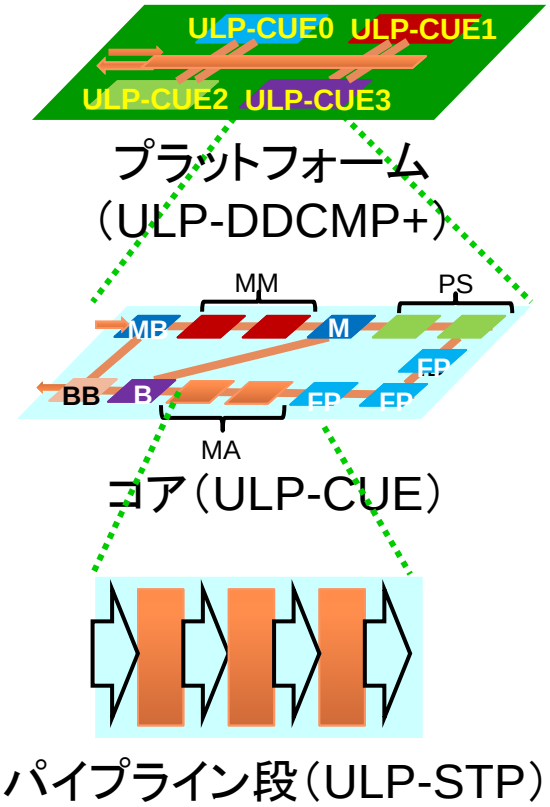


※LCD: Liquid Crystal Display

- ULP-DDCMPとAtomの消費電力の実測方法
  - ULP-DDCMP、AtomボードおよびオフロードIFボードを対象に、電源電圧、電流ならびに入出力データの変化を同時に記録するロギング機構をFPGAを用いて実現した。
    - 電源電圧[V]および電流[A]をデジタル化（※）した値および入出力データの総量[token]を、周期的（※ ）にサンプリングし、タイムスタンプとともに記録する。
      ※設計時点で入手可能であった12bit-12.5MHzのアナログ・デジタル変換器を用いた。
    - UDP/IP処理時とスタンバイ時の消費電力の実時間観測を可能とした。

プラットフォームシミュレータに設定する パイプライン段毎のタクトと消費電力

- パイプライン段毎のタクト
  - 論理ゲートレベル回路シミュレーションより求めた各タクトを設定する。
    （←ULP-DDCMPにおける周回時間の実測値と論理ゲートレベル回路シミュレーションより求めた周回時間がほぼ一致した。）



- パイプライン段毎の消費電力
  - ULP-DDCMPの消費電力を、SPICEより求めたパイプライン段毎の消費電力の比率を用いて比例配分して、パイプライン段毎の消費電力を設定する。

プラットフォームシミュレータに設定する パイプライン段毎のタクトと消費電力

PG回路を最適化したULP-DDCMP＋の性能特性・消費電力特性をプラットフォームシミュレータのパラメタ群として設定した。

☆パイプライン段毎のタクト[sec.]：標準電圧1.2Vの場合を基準として、VDDを0.8V～1.3Vに変えた場合のULP-DDCMPの周回時間の変化率を実測し、これを1.2V時のsend時間・ack時間に乗算した。

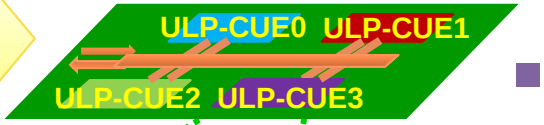
☆パイプライン段毎の消費電力[W]：VDDを0.8V～1.3Vに変えた場合のULP-DDCMPのスイッチング電力とリーク電力（PS on時）の実測値を、SPICEより求めたパイプライン段毎の電力比により比例配分した。

		PG回路のオーバヘッド
パイプライン段毎のタクト	send時間・ack時間	PSのオン抵抗によるVVSS上昇率は平均1%であったため、電力当りの性能の観点から速度オーバヘッドは無視できると仮定した。
パイプライン段毎の消費電力	PSスイッチ時の電力量	最適化したPSセルのゲート幅および個数に基づいて、PS のスイッチング時におけるPSとPS駆動用バッファの消費電力量を加算した。
	PS-on時の突入電流による電力量	スリープ時間に応じて、突入電流が発生する。 →突入電流の最大値をSPICEにより求めて、電力量を加算した。
	PS-off時のリーク電力	ULP-DDCMP内でPGを実現したパイプライン段を対象に、リーク電力削減率＝（PS off時のリーク電力）／（PS on時のリーク電力）を実測し、パイプライン段毎のリーク電力（PS on時）に乗じた。

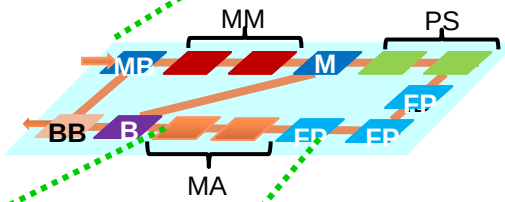
プラットフォームシミュレータによる消費電力の評価

ネットワークシミュレーションより抽出したプラットフォームの入出力パケット

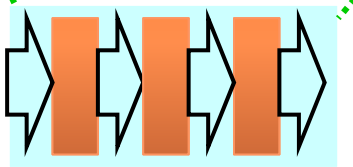
入力



プラットフォーム（ULP-DDCMP+）



コア（ULP-CUE）

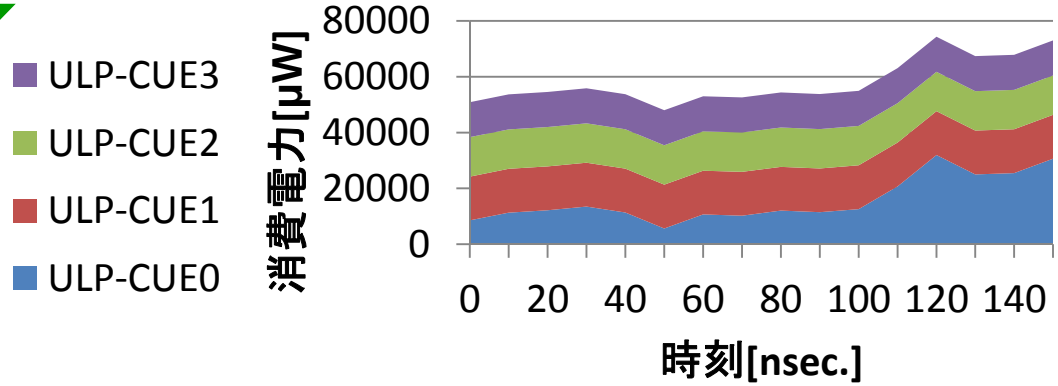


パイプライン段（ULP-STP）

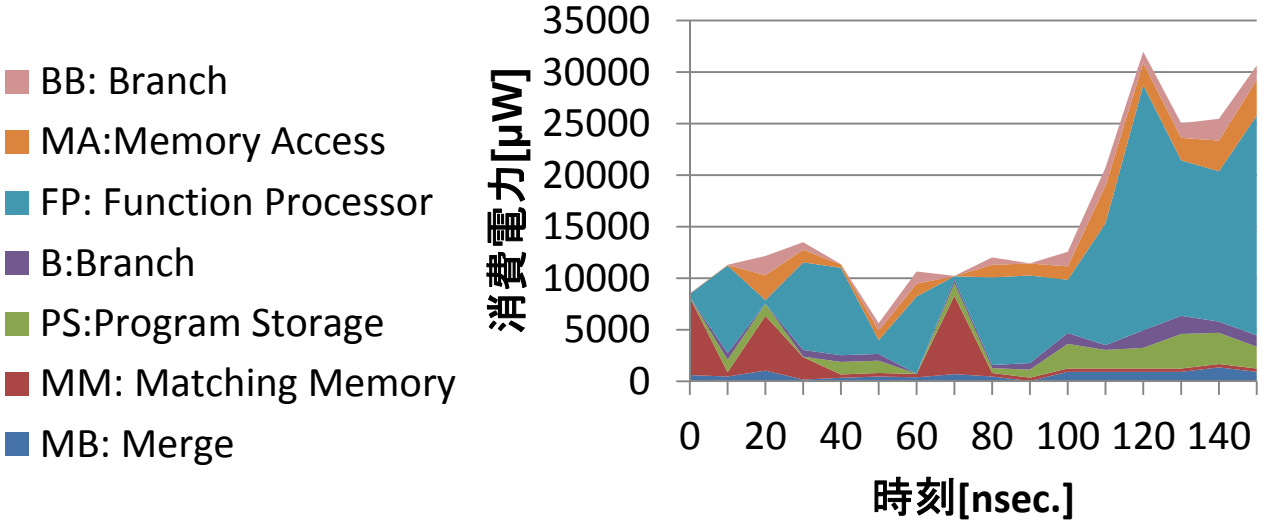
各パイプライン段の消費電力[W]

各パイプライン段のタクト[sec.]

実測・回路シミュレーションより抽出するパラメタ



(b) コア→プラットフォームへの積み上げイメージ



(a) パイプライン段→コアへの積み上げイメージ

☆各パイプライン段の消費電力とトークンの滞在時間を積み上げて、プラットフォームの消費電力を算出する。

ULP-DDNS

従来型ネットワークシステムの消費電力の評価

従来型アドホックネットワーク

ノードの送受信パケットログ

プラットフォームの入出力パケット

クロック同期による従来型プラットフォーム上のUDP/IP処理
(ネットワークプロセッサXScaleの後継と捉えられるAtom)

従来型アドホックネットワークのネットワークシミュレーション結果より、1秒間あたりの入出力パケット数を抽出する。

送信：約56.2個

受信：約2555.6個

AtomにおけるUDP/IP処理時間に、ULP-DDCMPにおける送信処理時間と受信処理時間の比を乗算して、パケットあたりの送受信処理時間を求める。

送信：約2.23μsec.

受信：約2.83μsec.

Atomの実測結果より、UDP/IP処理に要する電力(約1084 mW)とスタンバイ時電力(約1.91 mW)を求める。

UDP/IP処理時間＝入出力パケット数×パケットあたりの送受信処理時間＝56.2×2.23＋2555.6×2.83＝7.36msec.
待機時間＝1sec. – UDP/IP処理時間＝992.64msec.

比例配分

UDP/IP処理時電力
約7.99mW

待機時電力
約1.89mW

総消費電力
約9.88 mW

ULP-DDNS

従来型プラットフォームの処理時間と消費電力

◆ Atomボードのロギング結果

☆UDP/IP処理時間
＝パケットあたり約20.24μsec. (1024Byte)
→パケットあたり約5.06μsec. (256Byte)
※処理時間∝パケット長と想定。

☆ **UDP/IP処理時電力**（UDP/IP処理自体に要する電力として推定する。）
①OS起動後、UDP/IP処理を実行した場合のAtomボードの消費電力：**約11490 mW**
②OS起動後のAtomボードの消費電力：**約10406 mW**
①から②を減算して、Atom以外の、インタフェイス回路などの周辺回路のリーク電力、およびUDP/IP処理の実行に不可欠なOSによる消費電力を取り除き、Atomの通信処理時電力を推定した。
①－②＝**約1084 mW**

☆**スタンバイ時電力**
通信処理時電力約1084 mW × 0.016（※1）× 0.11（※2）＝**約1.91 mW**

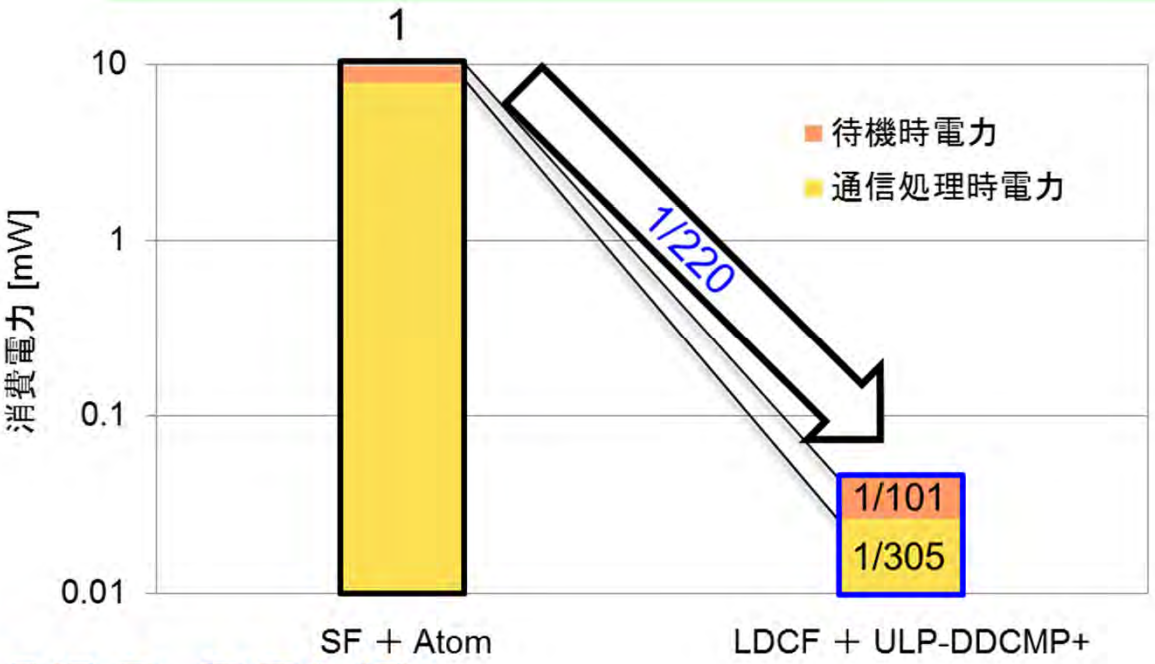
※1：G. Gerosa, et al., 2008 ISSCCより（90℃時のピーク電力に対する待機時電力の比率）
※2：90℃時に対する25℃時のリーク電力の比率

ULP-DDNS

超低消費電力化の総合評価結果

- 削減目標に向けた現時点までの評価
  - UDP/IP処理時の電力で1/300程度に削減される。
    （vs. 従来型プラットフォームにおけるUDP/IP処理時）
  - 待機時には1/100程度に削減できる。（vs. 従来型プラットフォームにおける待機時）

総消費電力として1/200程度の削減効果が見込める評価結果を得た。
→研究開始当初に想定した、ネットワークプロセッサXScaleを基準とすれば、
当初目標とした数百分の一程度の超低消費電力化が達成されたと考えている。



	SF ＋ Atom	LDCF ＋ ULP-DCMP+
待機時電力 [mW]	1.89	0.0188 (1/101)
UDP/IP処理時電力 [mW]	7.99	0.0262 (1/305)
総消費電力 [mW]	9.88	0.0450 (1/220)

ULP-DDNS