



太陽光発電と制御技術

スマートコミュニティ技術講座III

株式会社 協栄エレクトロニクス

目次 (2日目)

1. 電力制御の手法
 - I. 電力制御の必要性
 - II. マイコンを用いる電力制御
 - III. PWM制御
2. PWM実習I
3. 太陽光発電学習キットについて
4. PWM実習II
5. 太陽光発電と電力制御
 - I. 太陽電池の仕組み
 - II. 太陽電池の特性
 - III. 太陽電池の技術的課題

目次 (3日目)

1. MPPT制御実習I
2. MPPT制御の仕組み
 - I. MPPT制御とは
 - II. MPPT制御と制御理論
 - III. MPPT制御の実装法
3. MPPT制御実習II
4. MPPT制御実習III



電力制御の手法

電力制御の必要性

- 電力は従来は一方向
 - 発電⇒送電⇒配電⇒消費
- 太陽電池パネルや燃料電池の設置数の増加
 - 売電の必要性
- 双方向の電力網の構築が必要
 - 電力の双方向供給
- 必要なところに必要なだけ電力を供給
- 電力制御

電力制御の必要性

- 現在の電力制御は目的が2つ
 - 3/11以前: CO₂削減
 - 3/11以降: 原発停止による電力不足
- 自家発電の余剰電力の売電
 - ガスタービン、太陽電池
- 蓄電池の有効活用によるピークシフト
 - EVやPHVの電池の有効活用
- 再生可能エネルギーの変動吸収
 - 太陽光・風力は発電量の変動が大きい
- これらを適切に使えるように電力を制御する

電力制御の必要性

- 電流は電圧の高いところから低いところへ流れる
 - 供給より高い電圧をかけると逆に送ることができる
 - 交流の場合は位相を合わせる必要あり
(逆潮流)
 - 電圧のモニタリングを常時行う必要がある
- 太陽電池を効率よく使うには最大出力点追従
 - 太陽電池の仕様と電圧・電流のモニタが必要
- 蓄電池への充電は過充電対策が必要
 - ΔV を常時モニタする必要がある
- 常時モニタリングが必要!
 - モニタリング \Leftrightarrow 各機器の制御

電力制御の必要性

- 従来は大規模機器向け
 - 発電所・変電所・電車・工場等
- 近年は小型の機器
 - 自動車・家庭の太陽光/風力発電
- 電力制御を用いるところが増えている
 - 身の回りさまざまなところで用いられる

電力制御の必要性

- 任意の電力を作るための制御
 - 機器への出力を調整するため
 - 機器を滑らかに動かす
 - 機器を保護する

電力制御の必要性

- 身近な電力制御
 - モーターの回転を変える
- ON/OFFだけ(制御なし)
 - 換気扇、ミニ四駆
- 段階的な回転の変化(簡単な制御)
 - ドライヤー、(古い)扇風機、掃除機
- 滑らかな回転の変化(複雑な制御)
 - 洗濯機、電車

電力制御の必要性

- 電力制御しなかったら(電車の例)
- 発車と同時にフル回転
 - レール・車輪の摩擦が耐えきれずホイールスピン状態に
 - 摩擦が回復すると急加速
- 減速時は回転停止
 - 車輪がロックしレール上を滑る
 - 急減速
- 徐行運転できない
- 公共交通機関が危険なアトラクションに…

電力制御の基礎

- **電力の式** (P:電力、V:電圧、I:電流)

$$P = IV = \frac{V^2}{R}$$

- **電圧を制御**

- **電圧の制御方法**

- オームの法則 (電圧降下)

$$V = IR$$

- 抵抗を調整すると電圧を変えられる

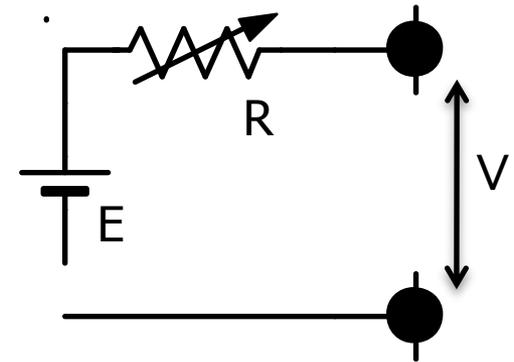
単純な電力制御1 (直流の場合)

- 抵抗制御
 - 抵抗での電圧降下

$$V = IR$$

- 端子電圧

$$V = E - IR$$



- 最も簡単な電力制御
 - スピーカーのボリューム
 - 旧式の電車
- 欠点
 - 負荷で使わない電力は熱になる
 - エネルギー効率が悪い



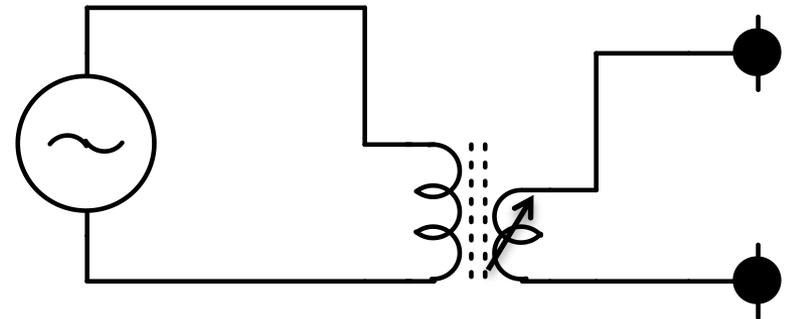
ラジオのボリュームに使われる可変抵抗

簡単な電力制御2 (交流の場合)

- 変圧器を使用
 - 電気機関車・電車では「タップ制御」
 - スライダック(可変変圧器)
- 変圧器の巻数を変更

$$V_2 = \frac{n_2}{n_1} V_1$$

- 交流において最も簡単
 - 抵抗制御より効率が良い
- 欠点
 - 接点の切り替えで放電(火花)
 - 重量増



スライダック

簡単な電力制御3 (温度変化を利用)

- サーマスタット

- バイメタル

- 感温フェライト

ホットプレート等で利用

- 熱を発する電気機器

- ドライヤー

- ホットプレート

- 炊飯器

- 水槽用ヒーター

(旧式)炊飯器



釜の底に当たるところに
感温フェライト

- ある温度前後での
ON/OFFのみ

マイコンを用いる電力制御

- ここまで紹介した手法
 - アナログ的な手法
 - 人が操作 or 単純な動作
 - 機械的な機構
- 細かい制御を行いたい
 - 細かく自動制御
 - 機械的な動作をしない
- マイコンによる電力制御

マイコンを用いる電力制御

- 全てマイコン制御すれば？
- あまり変動させる必要のないものは従来型で良い
 - 安価な扇風機、据え置き装置
- より高度な電力制御
 - 大規模で損失が無視できないもの
 - 変動が大きいもの
 - 電子制御する必要があるもの

マイコンによる電力制御

- マイコンで出来ること
 - リアルタイムでの計測ができる
 - 計測したものを演算できる
 - デジタル処理は得意 (ON/OFF切り替え)
- マイコンの苦手なこと
 - アナログ処理は少し苦手
 - 大電力の直接制御は難しい
- マイコンの得意なことをうまく使って電力制御

電力制御の基礎

- 電力がする仕事

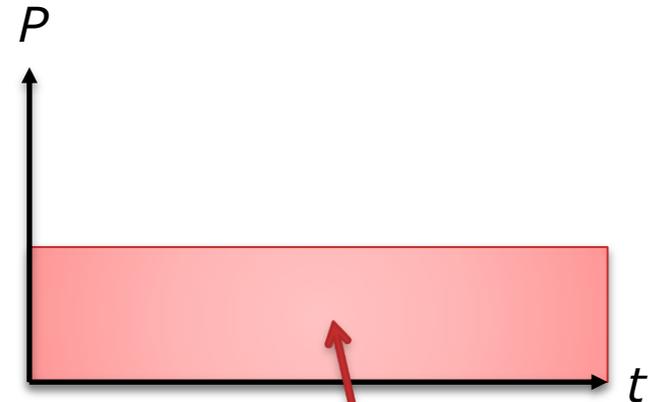
- 単純には

$$W = IVt$$

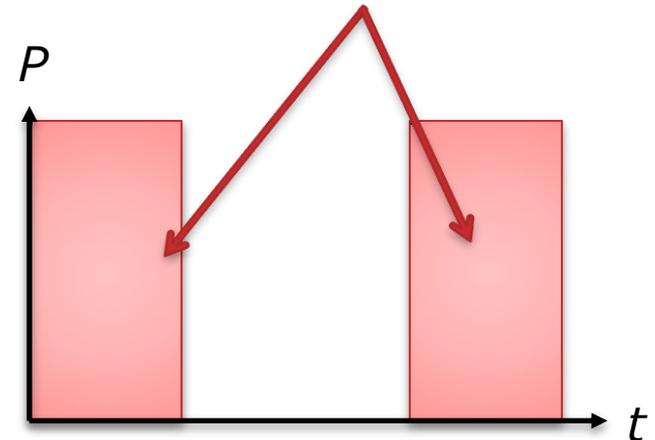
- 実際は...

$$W = \int IVdt$$

- 時間をいじっても結果は同じ



面積が等しければ
同じ仕事をする



電力制御

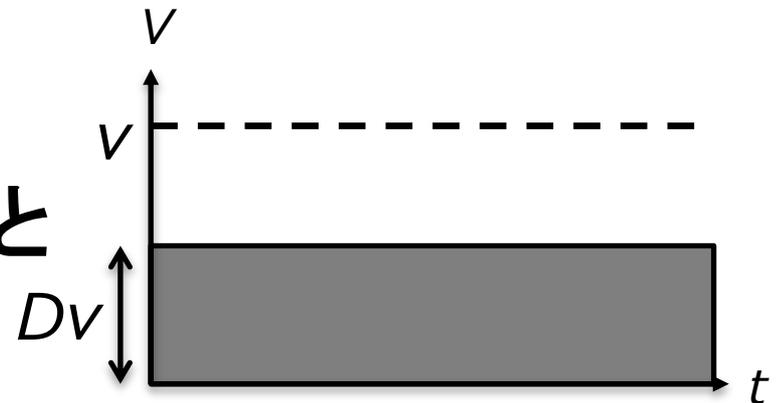
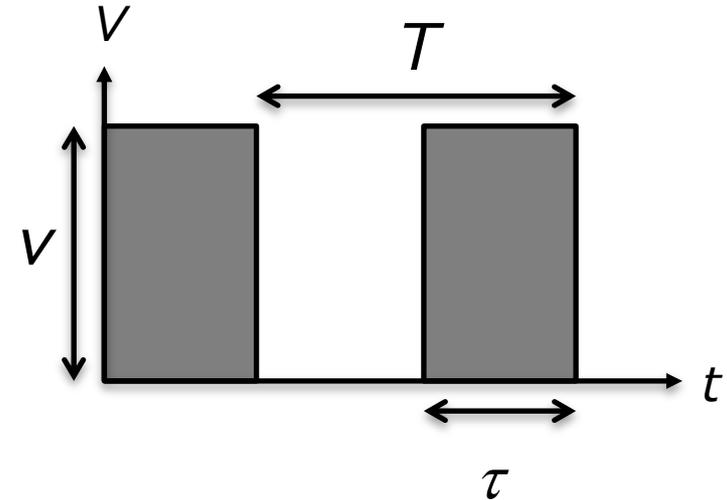
- 電子回路
 - 電圧を変化させるにはアナログ出力
 - ON/OFFを切り替えるにはデジタル出力
 - ON/OFFを切り替えるほうが楽!
 - もともとの電圧 $V[V]$ から
 - 電圧を半分
 - 電流が流れる時間を半分
 - パルス幅変調 (PWM)
- } 同じ効果

PWM (パルス幅変調)

- 十分短い時間でスイッチをON/OFF
 - デューティ比: D
 - ONの時間: τ
 - 切り替え周期: T

$$D = \frac{\tau}{T}$$

- 電圧を D 倍するのと同じ



PWM

- 利点
 - 大容量DAC不要
 - 高精度
 - 平滑化で目的電圧
 - 低損失
- 欠点
 - 制御機が必要
 - ノイズ対策が必要
 - 騒音
- PWM制御するもの
 - 滑らかな変化が必要な機器
 - 一定の値を維持すべきもの
- PWM制御を用いないもの
 - 多少の変動は許容できるもの
 - 安価な物

PWM制御

- チョッパ回路
 - (本物の)電車
- スイッチング電源
 - デスクトップPCの電源ユニット
- ラジコンカーのスロットル

(株)タミヤ ラジコンカーサイトの説明図参照

<http://www.tamiya.com/japan/cms/rcstartguide/240-rcguide01.html>

- 鉄道模型の速度調整(一部)
- LED照明の調光
- インバータ

PWMの使われているところ

- そのまま使う
 - モーターのチョッパ制御
- 平滑化して使う
 - スイッチング電源
- 正負振り分けて平滑化
 - インバータ

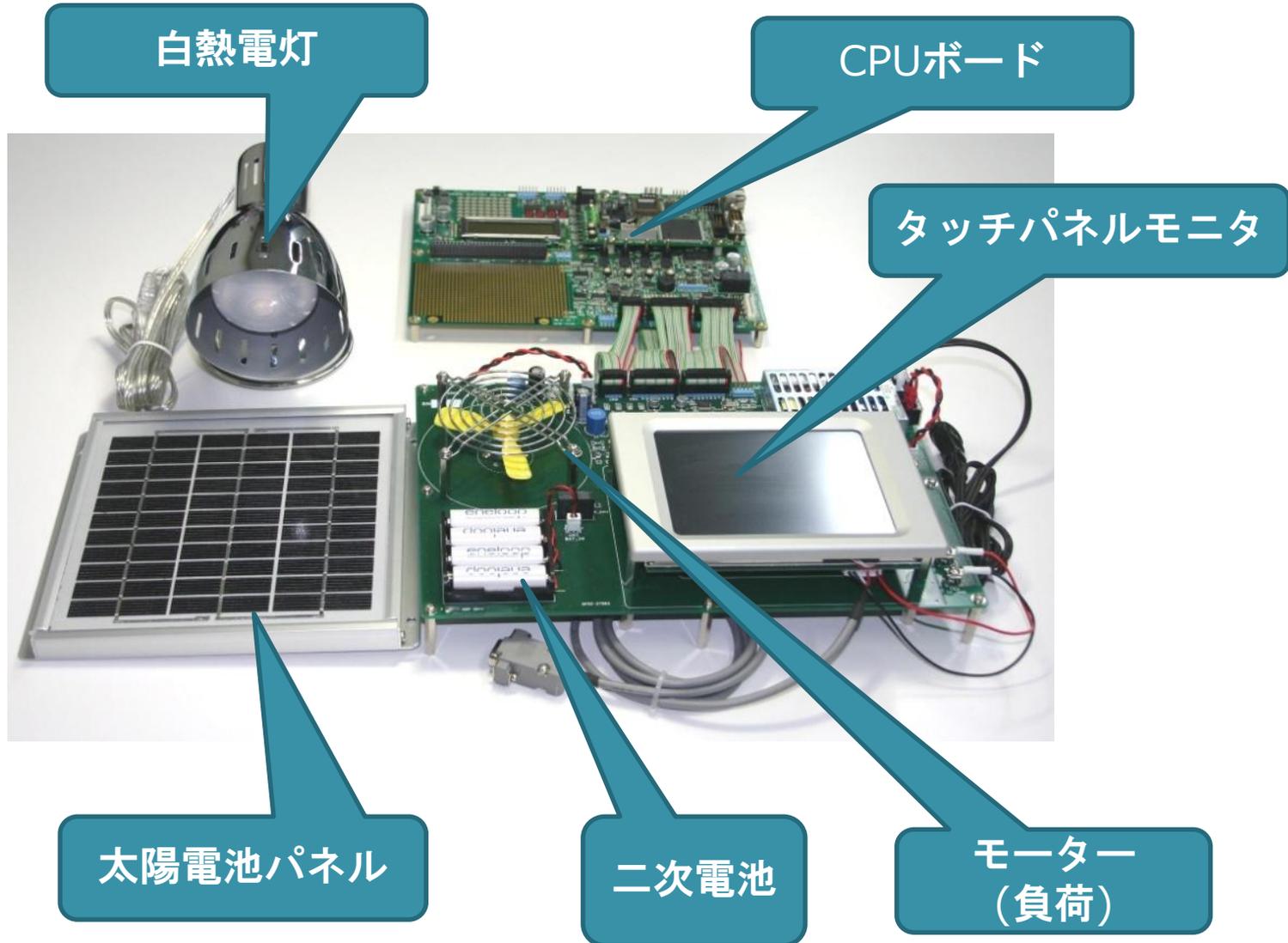


PWM実習I



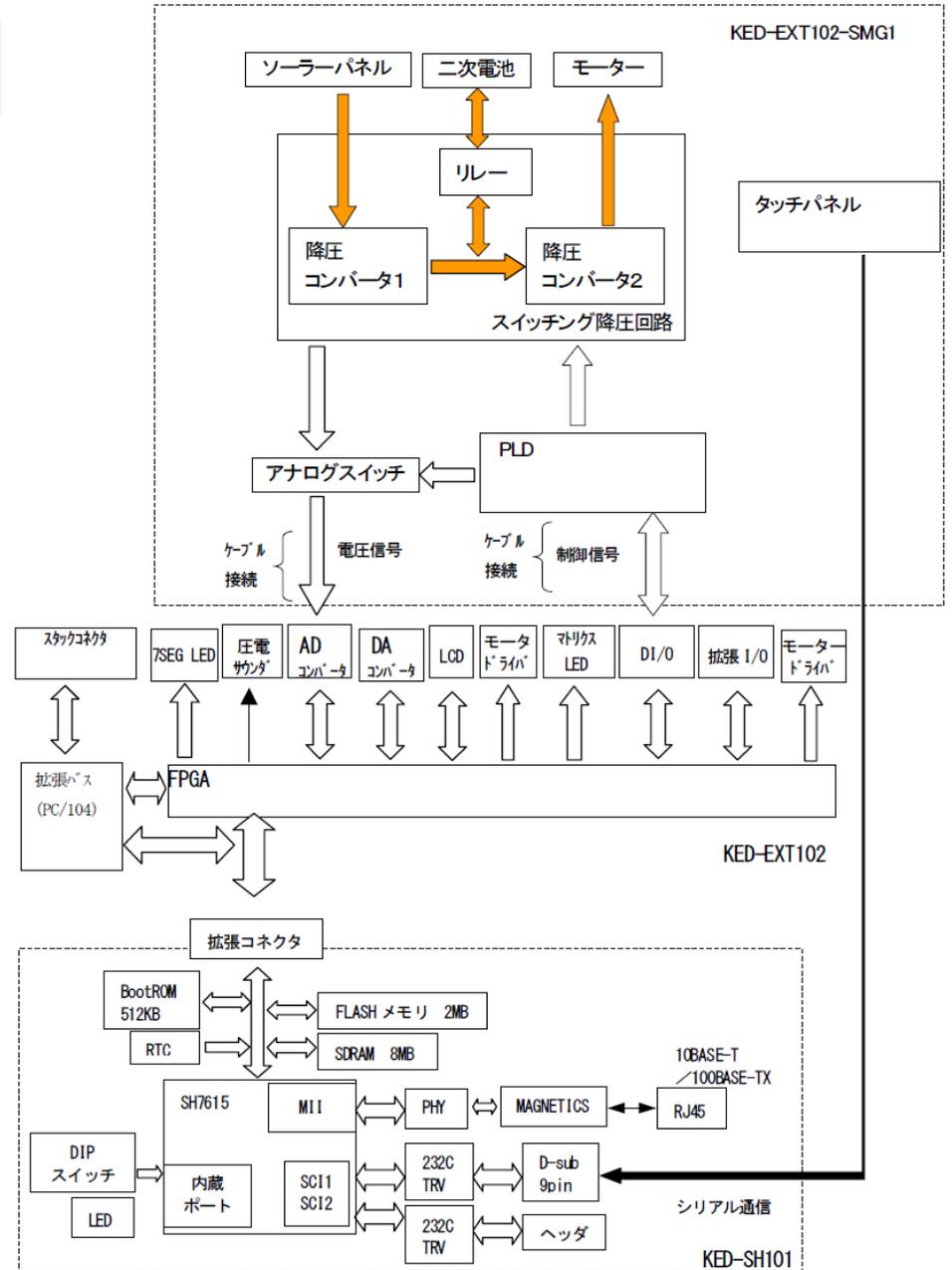
**太陽光発電
学習キットについて**

太陽光発電学習キット



ブロック図

→ 信号の流れ
→ 充放電・電力消費の流れ



機器構成

- 制御はCPUボード側で行う
- タッチパネルは直接制御に寄与しない
- 太陽電池パネルの充電用に白熱電灯
 - 蛍光灯やLEDの光では発電できない
(スペクトルの関係)
- モータを負荷とする
- 二次電池への充電、放電可能
- 2系統のDC-DCコンバータ
 - 太陽電池側、モータ側



PWM実習II



太陽光発電と電力制御

太陽電池の仕組み

- 太陽電池は光から直接電力に変換
 - 水を沸かしタービンを回し発電
(原子力・火力・地熱・太陽熱)
 - 直接タービンを回し発電
(水力・風力・潮汐力)
 - 理論的な効率は大い
 - 実際は蒸気タービンのほうが上
 - 太陽電池で15%程度
 - 超臨界圧石炭火力発電で45%程度

太陽電池の仕組み

- 発光ダイオード(LED)と逆の過程
 - LED: 電力が直接光エネルギーに
 - 太陽電池: 光エネルギーが直接電力に
- エネルギー変換を繰り返さないため
(原理的には)高効率
- ミクロな現象を使った発電方法
(蒸気タービンや水力・風力はマクロな現象から)

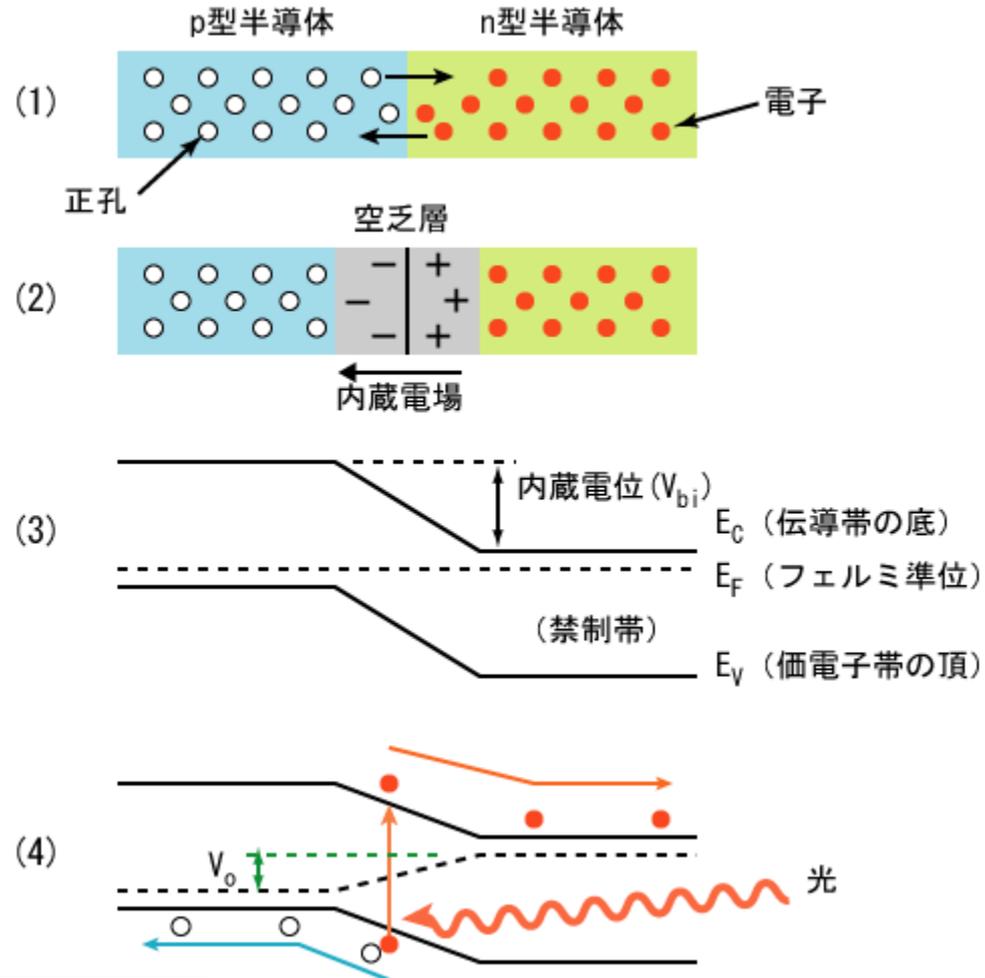
太陽電池の仕組み

- 光起電力効果

- 光が半導体に当たることによって、電子にエネルギーが与えられる
- エネルギーを与えられた電子が移動して電流となる

- LEDにレーザーを当てても発電する

すごく弱いけど…



太陽電池の特性

- 発電する光に敏感
 - 太陽光を当てると高効率
 - 熱スペクトル
 - 白熱灯の光に近い
 - 蛍光灯やLEDではほとんど発電しない
- 光量が足りてないと発電しない
 - 雨や夜間はもちろん曇天でも
 - 埃・火山灰・雪など

太陽電池の技術的課題

- 発電能力に上限・制約がある

- 地表に入射するエネルギー: $1,000\text{W}/\text{m}^2$
- 効率のよい太陽電池: $192\text{W}/\text{m}^2$
- メガソーラーの基準: $67\text{W}/\text{m}^2$
- 川内原子力発電所の発電能力(1.78GW)をまかなうために必要なメガソーラーの敷地: 26.7km^2

これを超えることはできない

この面積で約 26.7km^2



太陽電池の技術的課題

- 温度が上がると効率が落ちる
 - 日光が当たらないと発電できないが、当たりすぎて温度が上がると効率が落ちる
 - 冷却手段が必要
 - 隙間を開けて設置・水冷
- 劣化
 - 物によっては光によって劣化する

太陽電池の技術的課題

- 安定しない
 - 光のエネルギーの変化が激しい(雲・陰)
- 電流-電圧の関係が不規則
 - 後述: MPPT制御
- 発電可能時間帯が日中のみ
 - 夜間の電力には使えない
 - 二次電池・キャパシタ等の蓄電設備
- 直流
 - 系統連係には交流化



MPPT制御実習I



MPPT制御の仕組み

MPPT制御

- 太陽電池の出力は一定ではない
 - 光量や温度に依存
 - 最大電力になる電圧・電流は変動

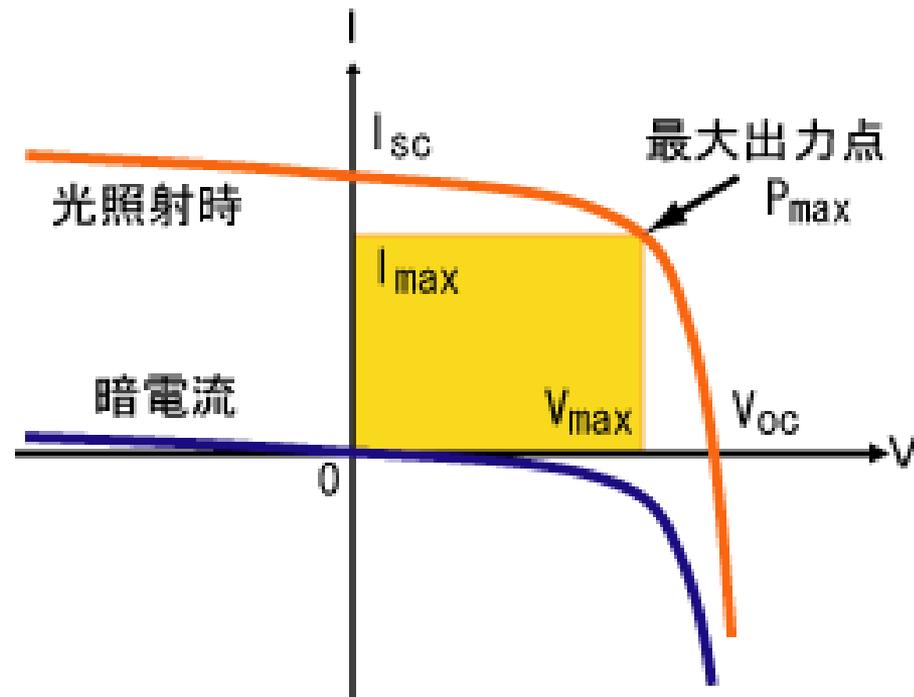
最大電力点追従

Maximum Power Point Tracking(MPPT)

- 太陽電池の電気エネルギーを最大限利用

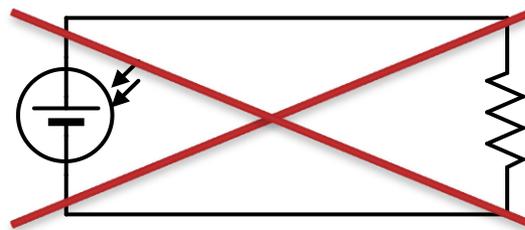
MPPT制御

- 最大電力点で電力を得る
 - 照度によって最大電力点は変動
 - その瞬間の最大電力を得る必要がある

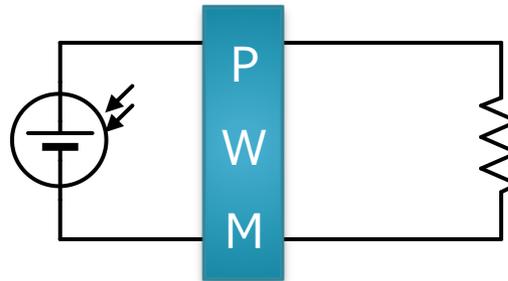


MPPT制御の実現

- 電力と電圧を同時に決める
- どうやって?
 - 抵抗をつなぐだけでは無理

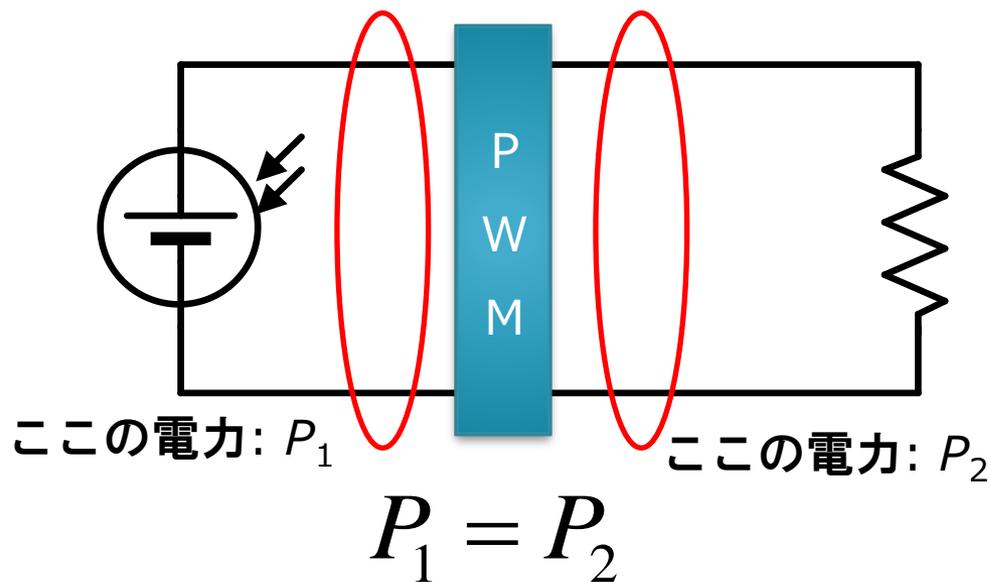


- PWMを用い出力電圧を制御



MTTP制御の実現

- 出力側を平滑化
- PWM後の電圧・電流を操作できる



- 太陽電池からの電力を操作

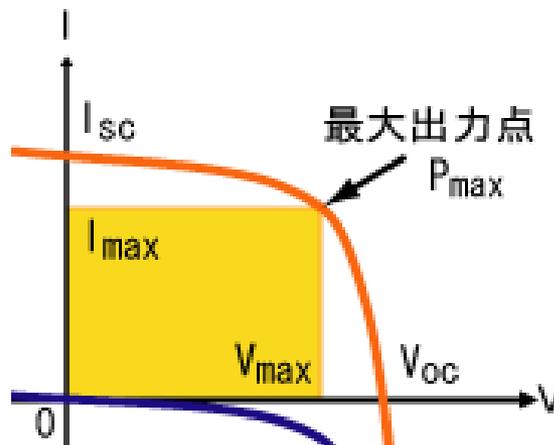
MPPT制御の制御方法

本キットの
サンプルではこちら

● 山登り法

- I-V特性を知る必要はない
- 最大電力を確実に追える
- 処理量が膨大

1. 電圧を取得
2. 電圧に微小変動
3. 電力を計測
4. 電力が大きくなる側に調整



● 電圧追従法

- あらかじめI-V特性を知っている
- 解放電圧の〇〇%の電圧を目標値
- 最大電力の确实性に難あり
- 処理量が少ない

1. 解放電圧を取得
2. 解放電圧の〇〇%の電圧設定

- 本教材では80%を設定

MPPT制御

- PWMのデューティ比を大きく



電圧は下降（電流は大きく）

- PWMのデューティ比を小さく

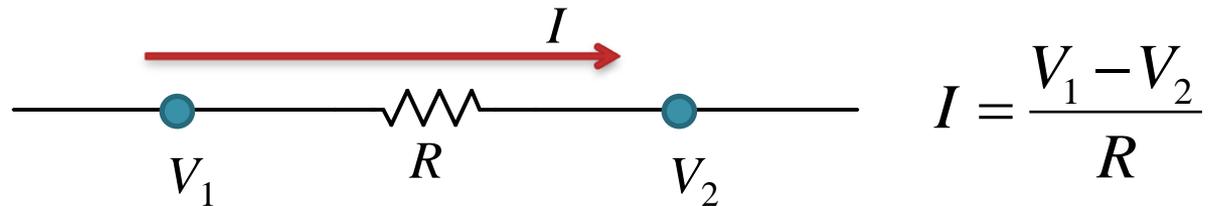


電圧は上昇（電流は小さく）

- 流そうとすると電圧が下がる。
 - ダムと水位の関係
 - 一般のPWM制御とは逆

電圧・電流検出

- 電圧はAD入力より取得可能
 - 上下限・精度の制限はある
- 電流は直接取得できない
 - 抵抗を用い電圧降下させる
 - 抵抗の前後の電圧を取得すると電流値が求まる



- 1か所の電流測定に2か所の電圧を測定
 - ADポートが足りなくなる
 - 切り替えたり共通化したりする工夫が必要

制御?

- PWM制御は具体的な制御の方法
 - アクセルをこれくらい踏めばこれくらい加速する、という関係
- 実際に機器を動かすには高次的な制御が必要
 - 目標速度の設定
 - 目標速度までの加速 (現在の速度との比較)
 - 巡航速度維持 (現在の速度との比較)
- 処理の結果を見て次の処理を判断する
- フィードバック制御

フィードバック制御

- 動作の結果を、次の動作の指標にする。
 - Aだけ入力したらBだけ動作した
 - B'だけ動作させたいのでA'の入力に変更



- どのくらい入力を変更すればよいか
- PID制御

PID制御

- 目標値と現在値との差=偏差 $e(t)$

- 比例制御 (Proportional)

- 操作量は偏差に比例 $y(t) = K_P e(t) + y_0$

- 積分制御 (Integral)

- 操作量は偏差の時間積分に比例

$$y(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt$$

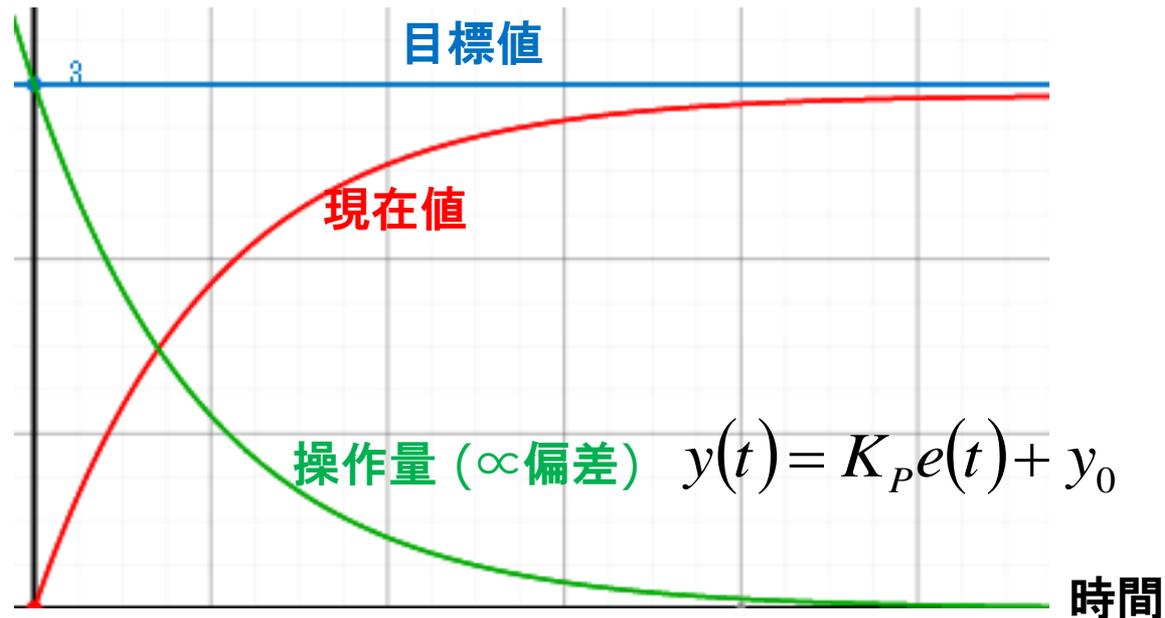
- 微分制御 (Derivative)

- 操作量は偏差の時間微分に比例

$$y(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

P制御

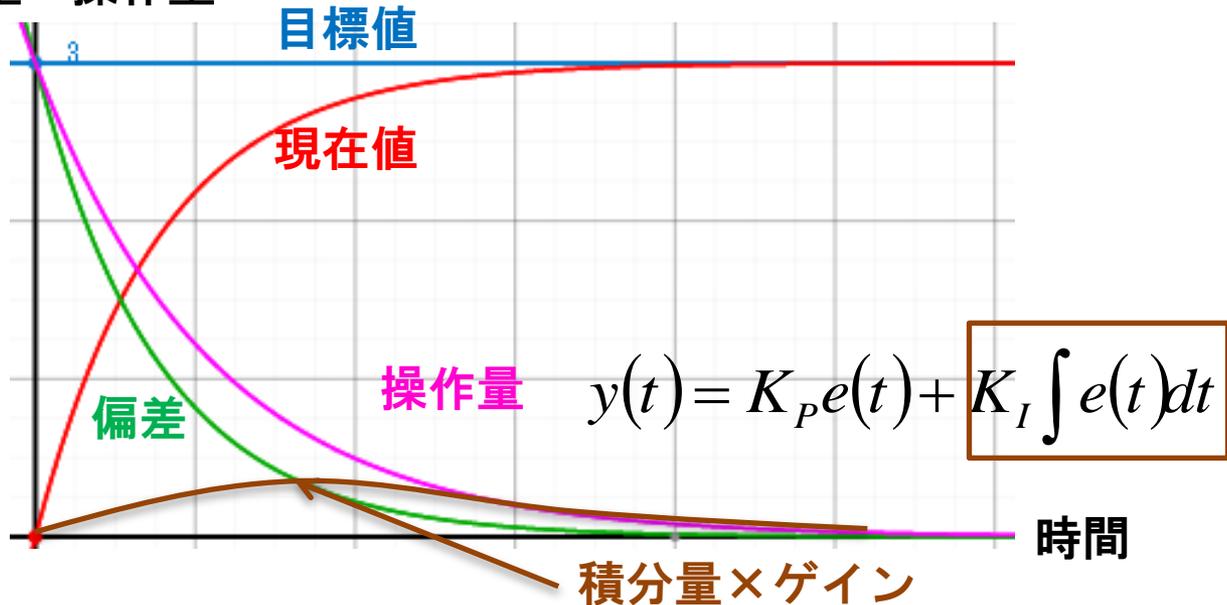
制御量・操作量



- 偏差が小さくなると操作量が小さくなる
 - 目標値に近くなると接近が遅くなる
- 目標値に漸近的に接近はするが完全一致はしない
- 無限に長い時間をかけるわけにはいかない

I制御 (PI制御)

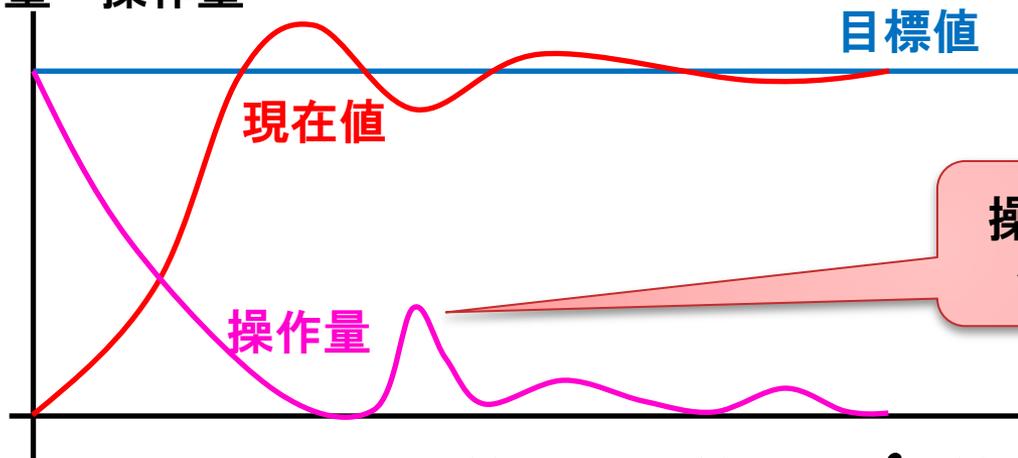
制御量・操作量



- 偏差を時間積分する
 - 小さな偏差でも解消可能
- P制御とともに使う
- 偏差の収束が速くなる
 - ゲイン K_I を増すことで目標値に現在値を一致させることが可能
 - ゲインを増やしすぎるとオーバーシュートする

D制御

制御量・操作量



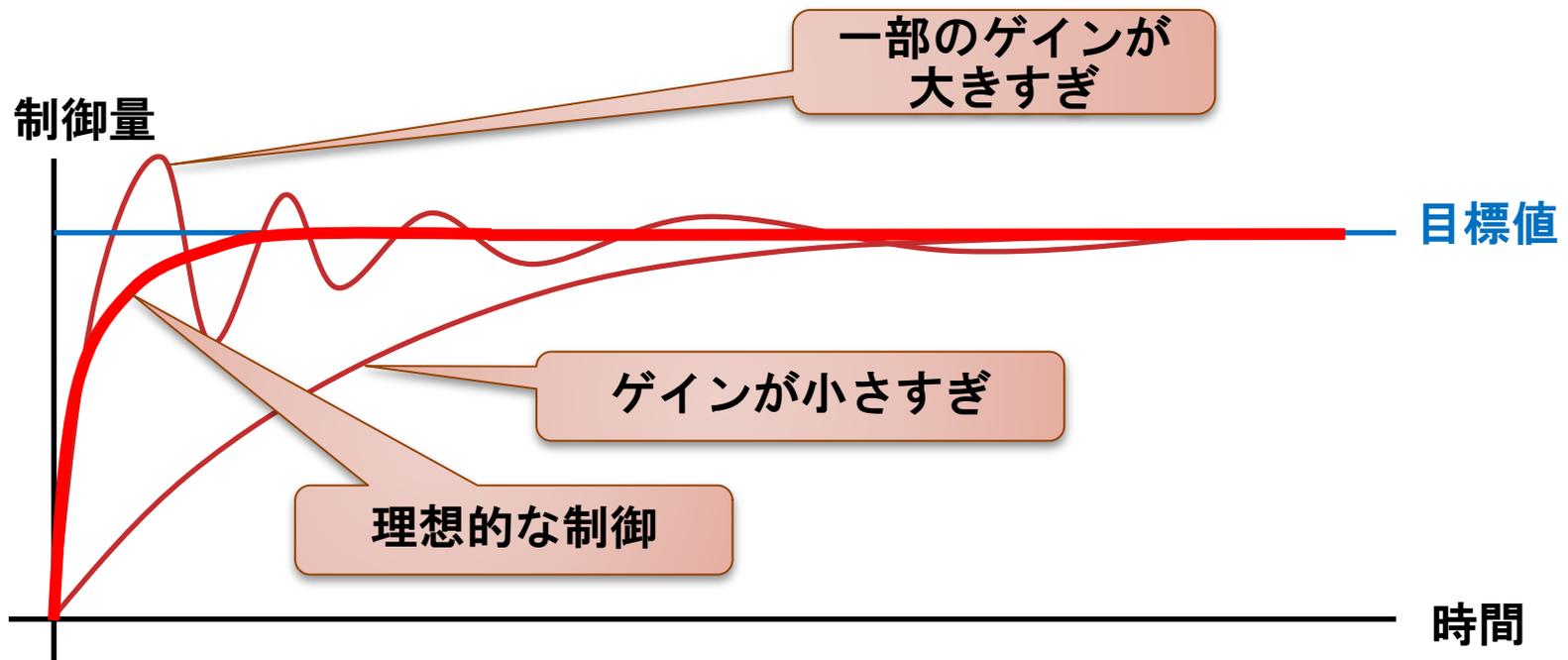
操作量が大きくなるところもある

$$y(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

- PI制御で追従可能
 - 収束速度(応答速度)は遅い
- 偏差の時間微分をとり、その変化を打ち消す向きの操作量調整
- ゲインの調整次第ではオーバーシュート
- 本キットではD制御までは行わない

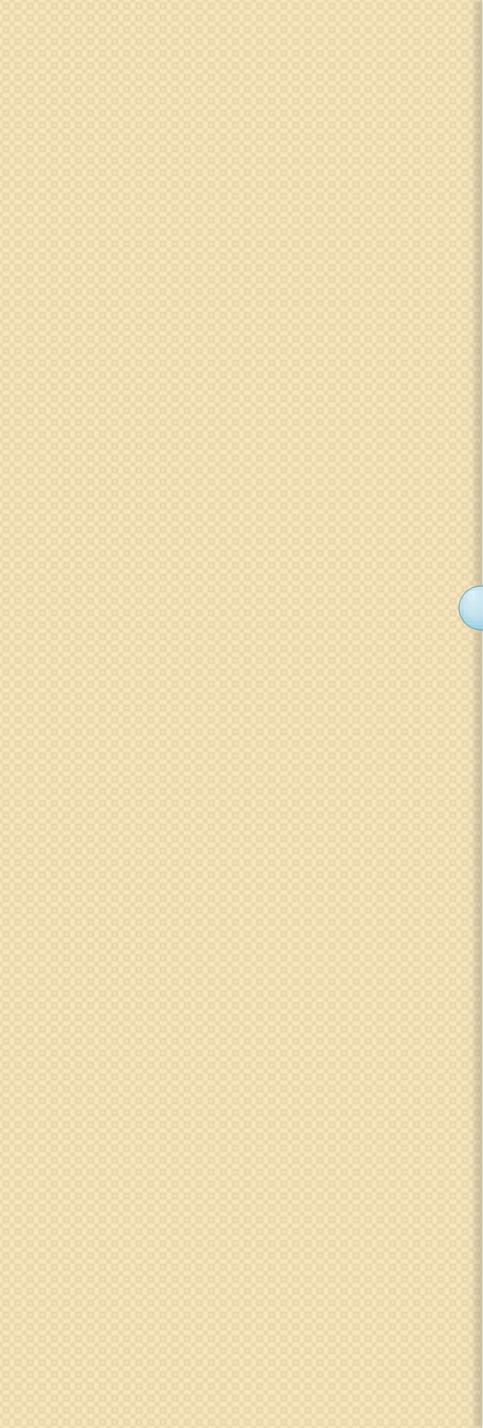
ゲイン

- P・I・Dの値にそれぞれかける係数
 - K_P 、 K_I 、 K_D の3つの値の調整
- ゲインの調整次第で収束の様子を変えられる



無意識に使っているPID制御

- 車の運転の場合
 - アクセルの踏み具合: 操作量
 - 走行速度: 制御量
- 走行開始⇒等速巡航
 - 走り始めは偏差が大きい=P制御→アクセル踏込み
 - 加速状況から後の速度を予測=D制御→アクセル弱め
 - 等速巡航のための微調整=I制御
- 斜度の変化
 - 坂道にさしかかり減速=D制御→アクセル踏み増し
 - 目標速度を保つための微調整=I制御
- ゲイン=アクセルの踏込み量とエンジン回転数の相関
- ダイエットもPID制御?
 - 体重計からの食事・運動へのフィードバック



MPPT制御実習II



MPPT制御実習III

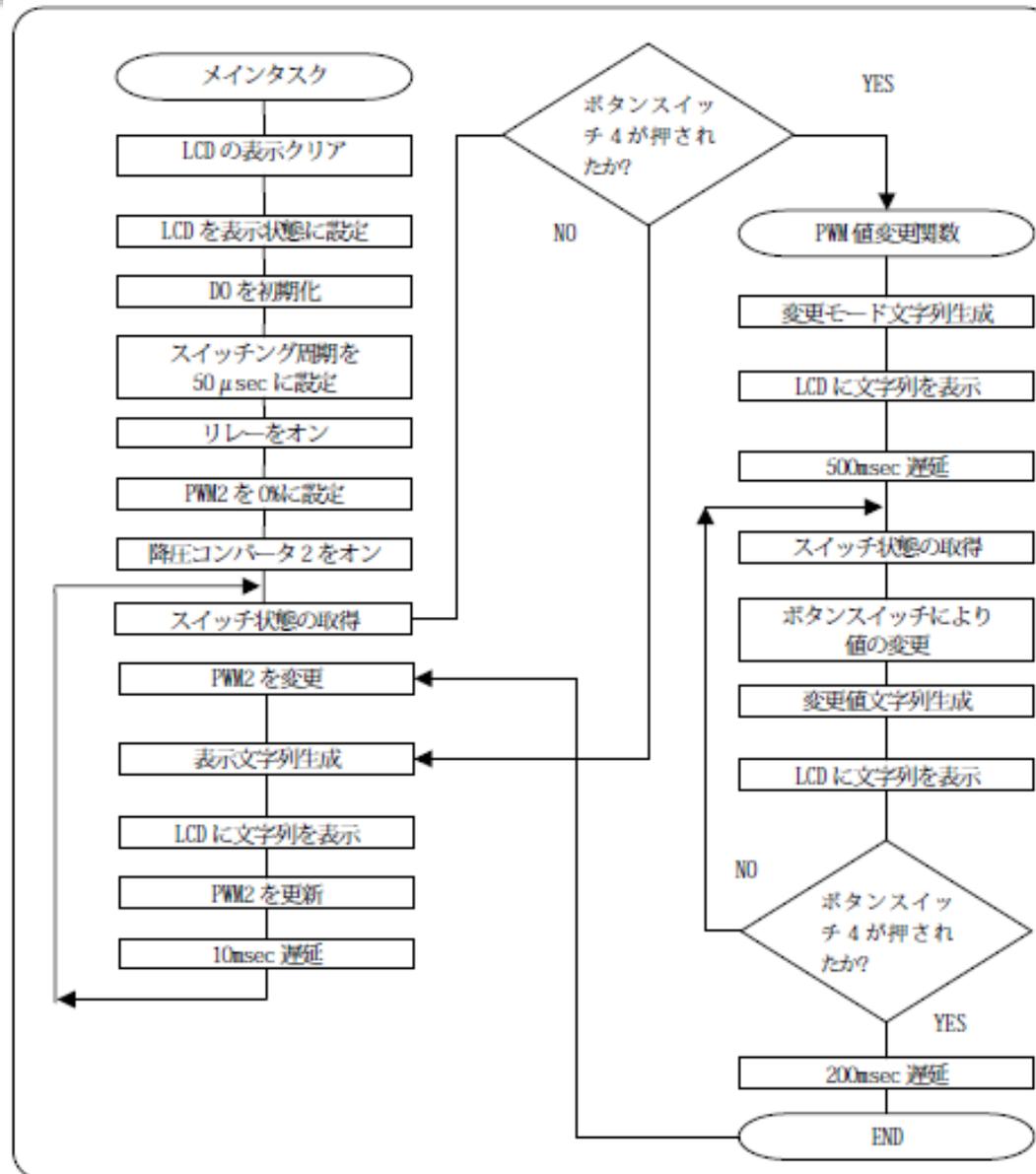


付録I: サンプルソースの フローチャート

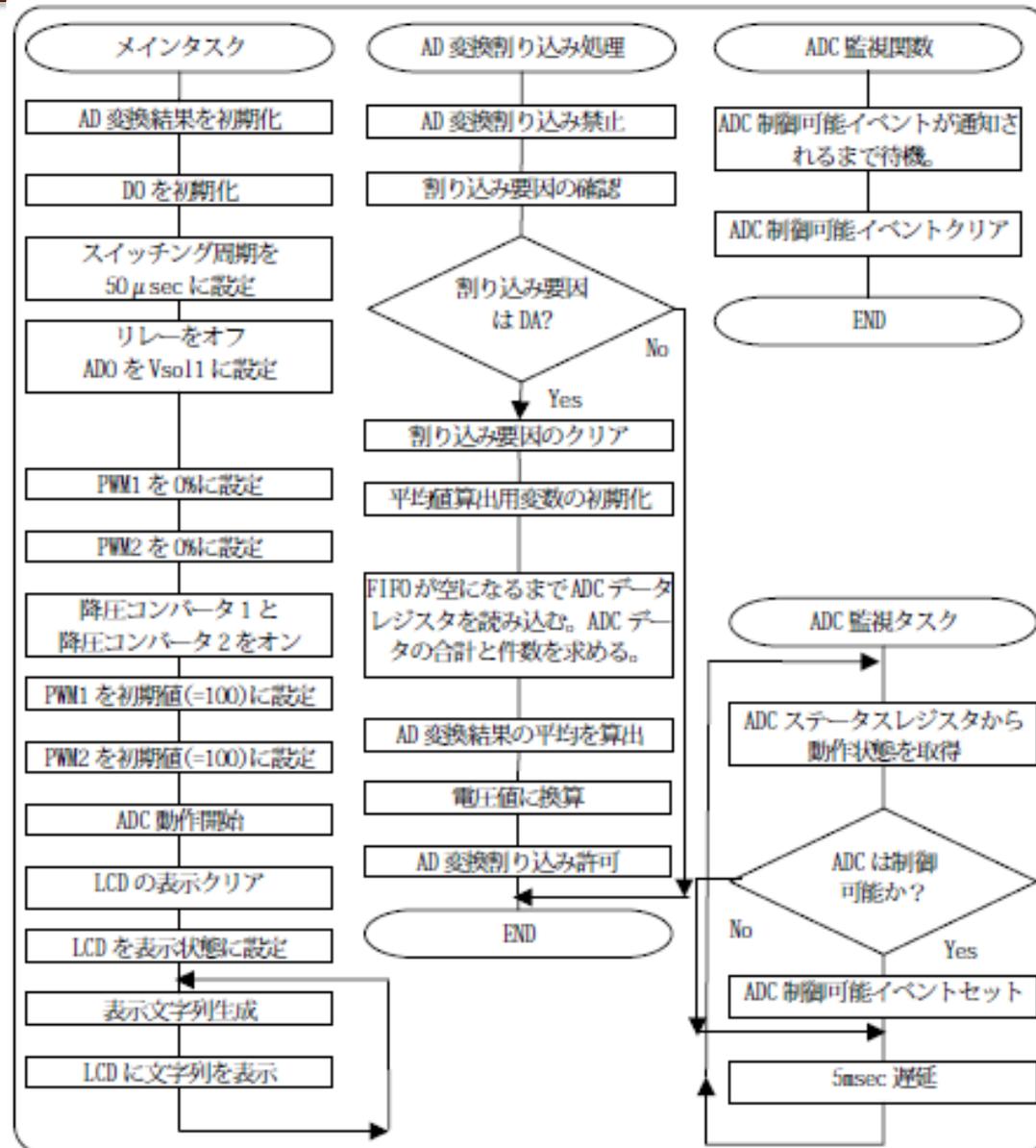
サンプルソース I

- bat_mot
(バッテリーからモータ駆動・PWM)
- vol_meas
(電圧計測)
- cur_meas
(電流計測)

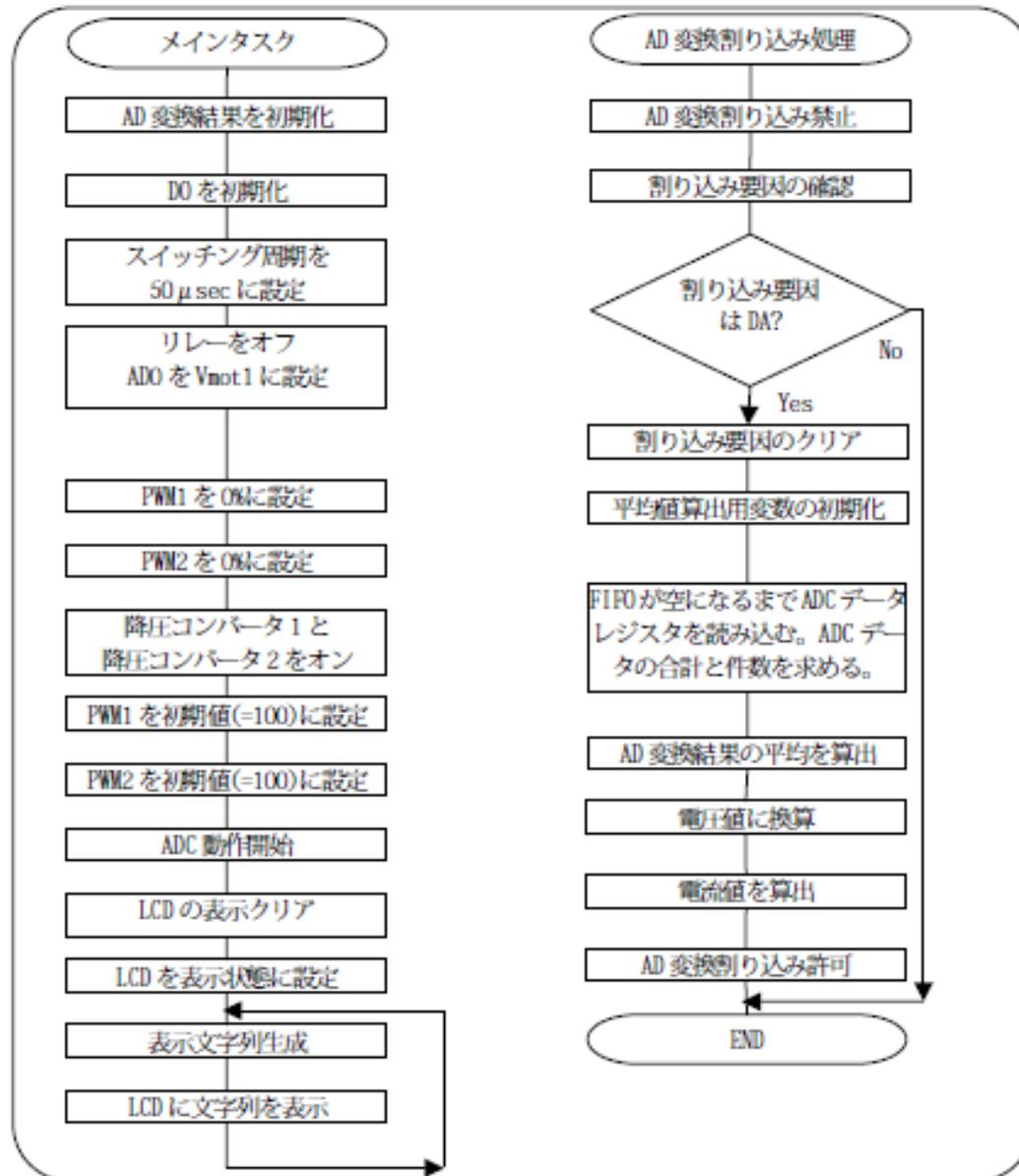
bat_mot



vol_meas



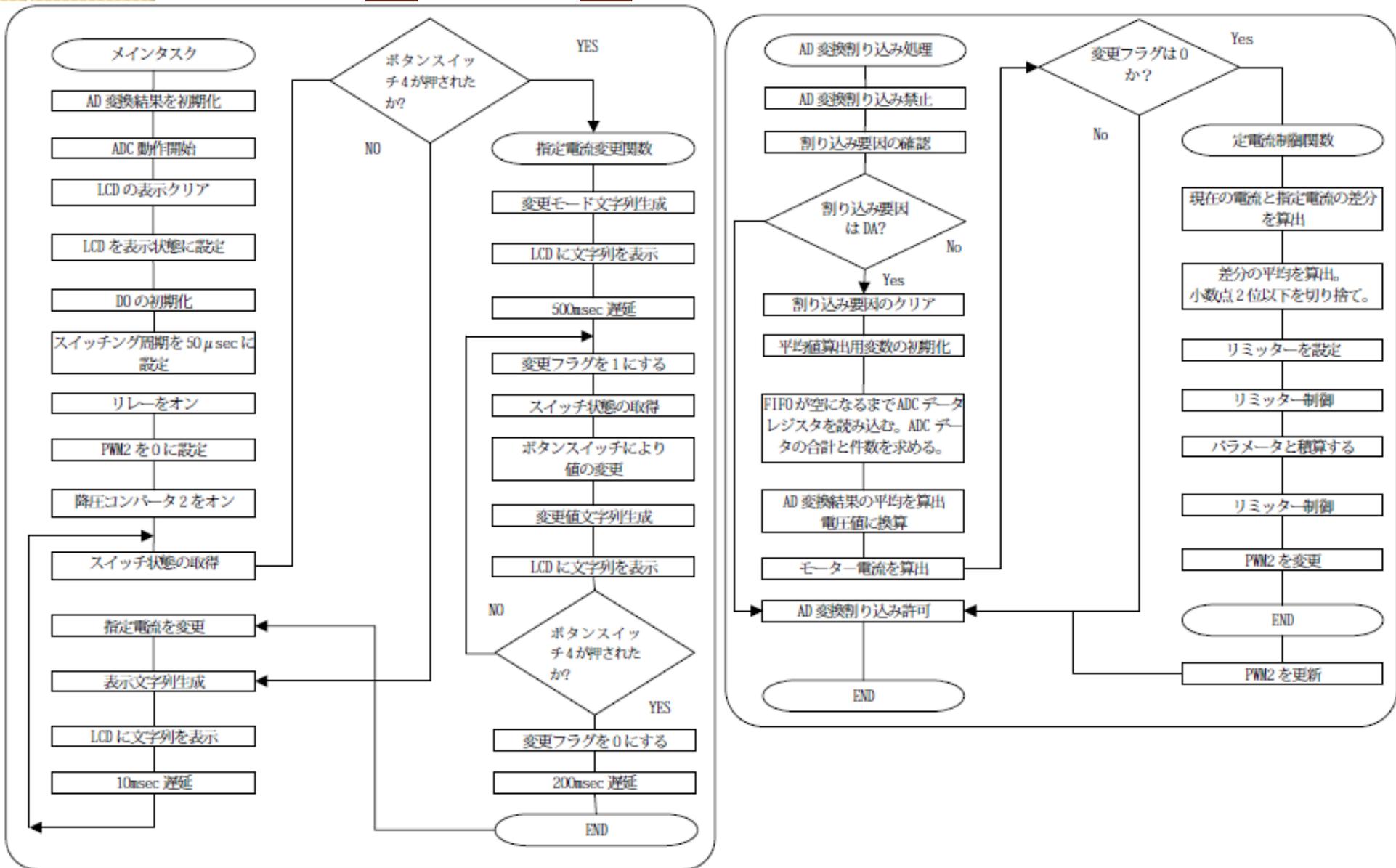
cur_meas



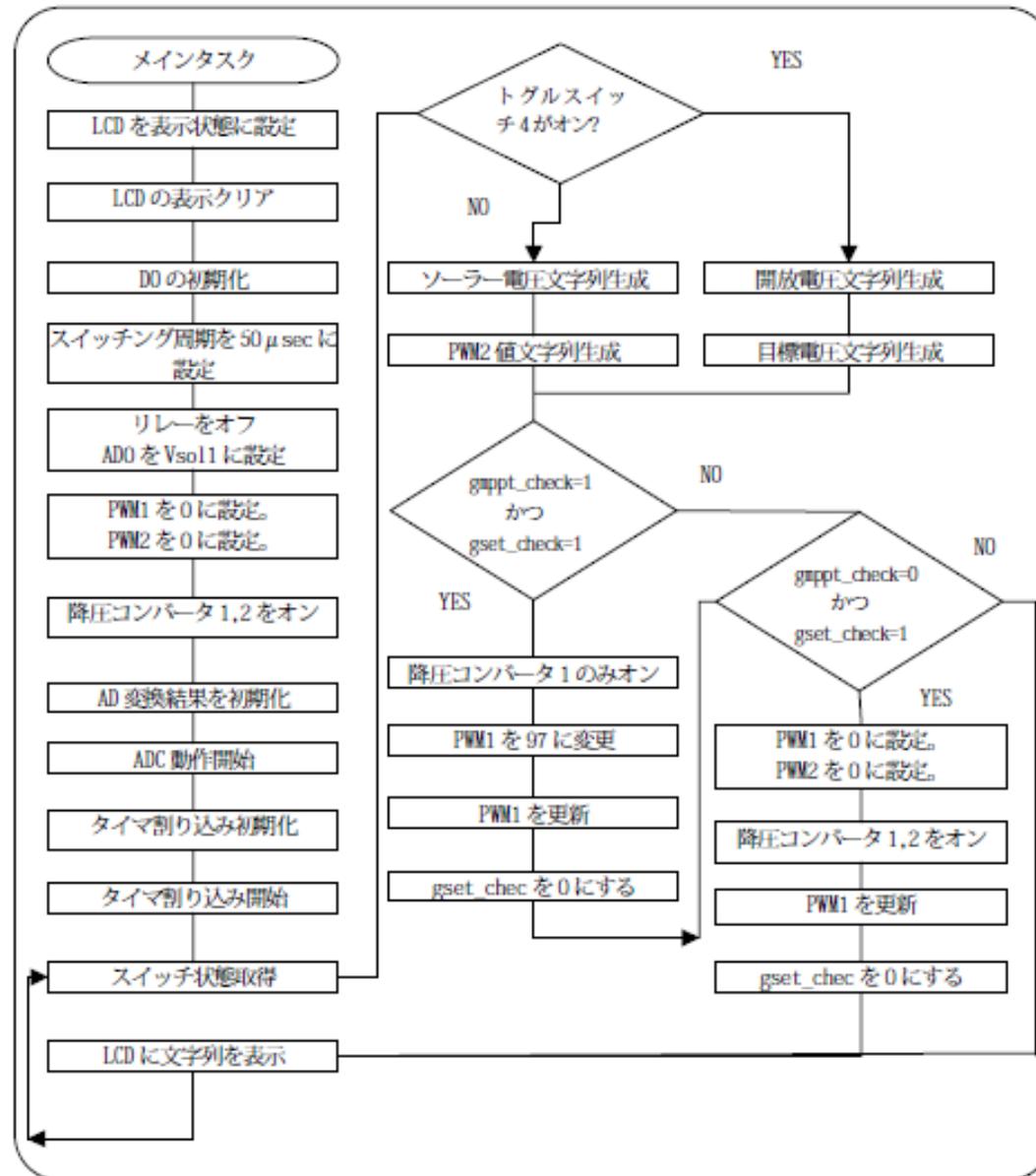
サンプルソース II

- bat_mot_volcons
(バッテリーからモータ駆動・PWM・定電圧)
- bat_mot_curcons
(バッテリーからモータ駆動・PWM・定電流)
- mppt_volcons
(太陽電池からモータ駆動・MPPT)
- charge_curcons
(太陽電池からバッテリー充電・定電流)

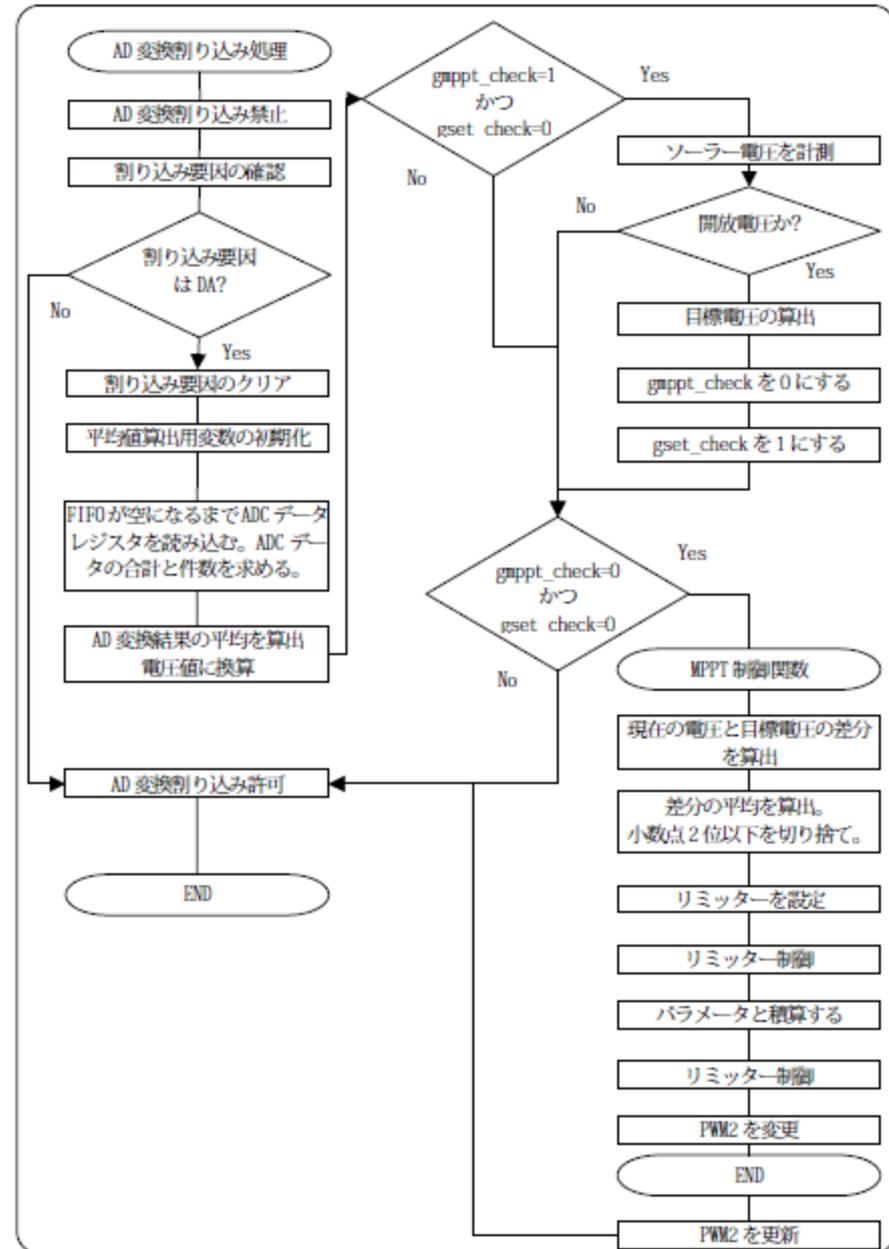
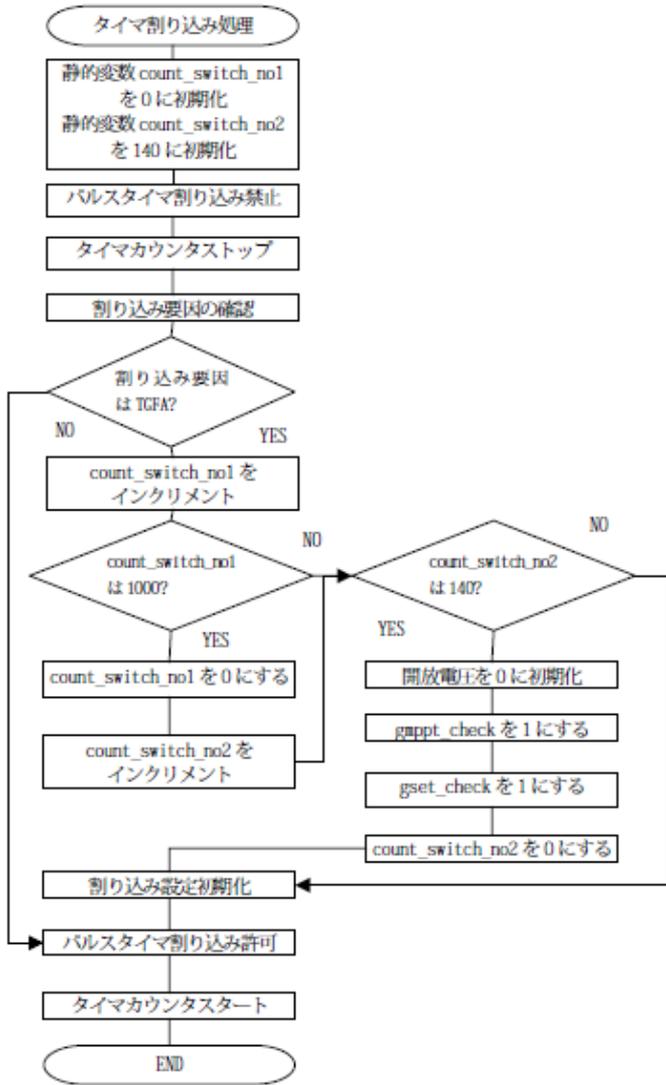
bat_mot_curcons



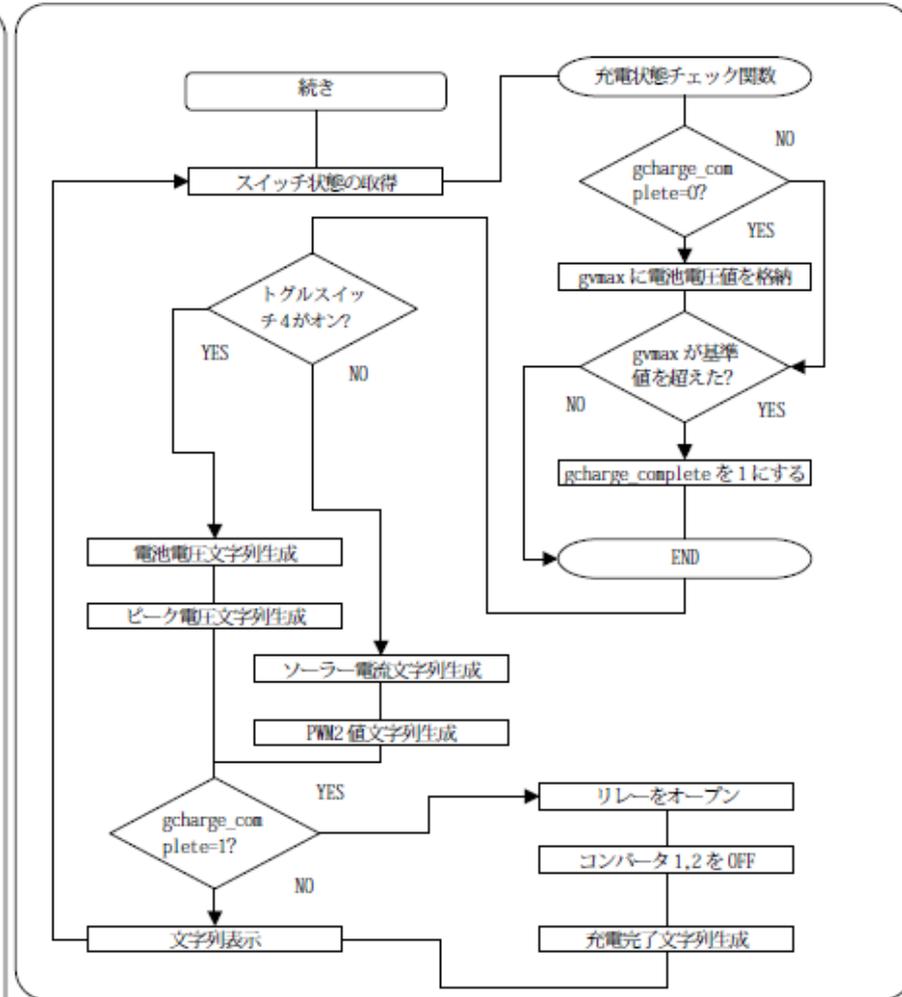
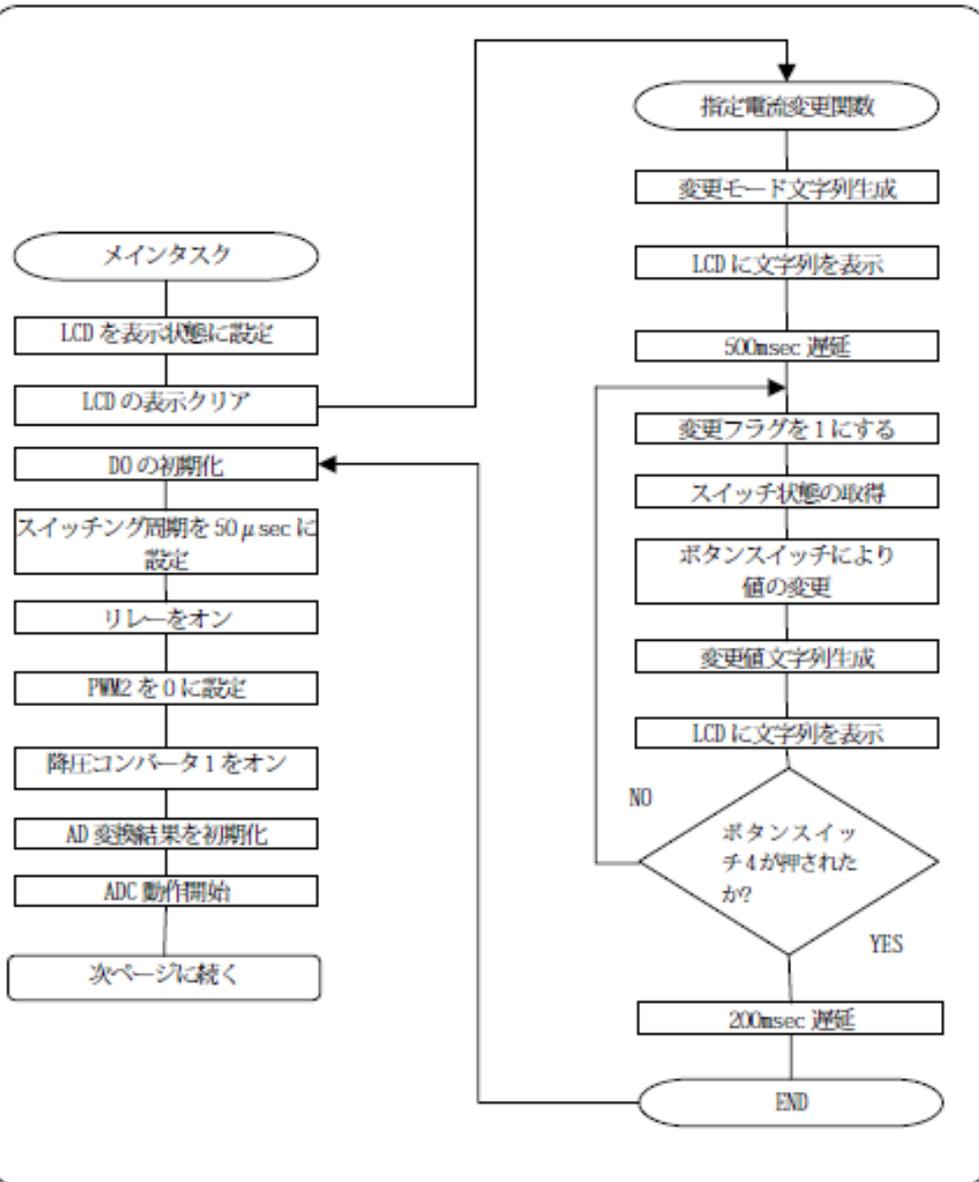
mppt_volcons



mppt_volcons



charge_curcons



charge_curcons

