

## 序説

この応用記述はAtmel® AVR®マイクロ コントローラのAtmel megaAVR®系統で利用可能な外部割り込みを形態設定するための機能的な説明と方法を提供します。この応用記述は外部割り込み元のピンとして汎用入出力ピンを使用する間に考慮されるべき点も記述します。

例のコードはAtmel Studio 7でATmega2560デバイスに実装され、機能性に関してAtmel AVR STK®600スタータキットで検査されています。

## 特徴

- 柔軟なピン形態設定
- 同期と非同期の割り込み感知
- 休止動作形態から起こすための非同期起動信号
- Atmel ATmega2560用ドライバ ソースコード内包
  - ATmega2560での基本的な外部割り込みの使い方
  - ATmega2560での入れ子にされた(多重)外部割り込みの使い方
  - ATmega2560で出力として形態設定された外部割り込みピンでのソフトウェア割り込み生成
  - ATmega2560でのデバイスを起こすための外部割り込みの使い方

## 目次

---

序説	1
特徴	1
1. 外部割り込み – 概要	3
1.1. 外部割り込みベクタ	3
1.2. 外部割り込み感知	4
1.2.1. ATmega2560での非同期感知	4
1.2.2. ATmega2560での同期感知	4
1.3. 割り込み応答時間	4
1.4. 割り込み優先権	4
1.5. 外部割り込み使用時に注意すべき重要な点	5
2. 始める前に	5
2.1. 課題1 – 基本的な外部割り込みの使い方	5
2.2. 課題2 – 入れ子にされた(多重)外部割り込みの使い方	6
2.3. 課題3 – ピンでの信号変化に基づく外部割り込み	6
2.4. 課題4 – デバイス起き上がりのための外部割り込み	7
3. ドライバ実装	7
4. 改訂履歴	7

# 1. 外部割り込み - 概要

割り込みはMCUの内部周辺機能部署または外部ピンのどちらかから、マイクロコントローラのCPUに提供される信号です。起こった割り込みに基づいて予め定義されたいくつかの場所で命令ルーチンを実行するために飛ぶのをCPUに許すことによって、プログラム実行の規則的な流れを変えます。CPUはそのルーチンを終わると、飛ばされた場所からの位置に戻ります。

これらの予め定義された位置は割り込みベクタアドレスまたは割り込みベクタと呼ばれます。

割り込みはそれの実行の状態を保存して割り込み処理部を実行します。Atmel AVRマイクロコントローラに関しては、PCレジスタが割り込みの事象で保存され、スタックポインタレジスタが更新されるべき唯一のレジスタです。割り込みの事象で、応用に於いてそのような必要があれば、ステータスレジスタ、32個の汎用レジスタ(レジスタファイル)のような他のレジスタを保存することは使用者の義務です。

割り込みは一般的に(不確定に起こる事象を待つ)伝統的なポーリング法よりも(多重作業(マルチタスク)のように)時間を節約するのに使用されます。

## 1.1. 外部割り込みベクタ

Atmel megaAVRは重要な外部割り込み以外に様々な割り込み元を支援します。外部割り込みは2種のピンの組を使用して起動することができます。それはINTnピン(通常的外部割り込みピン)とPCINTnピン(ピン変化外部割り込みピン)です。'n'はデバイス単位で変化する、INT0のように番号を指定します。

Atmel ATmega2560についての外部割り込みピン数は次の通りです。

1. (様々な入力感知形態設定を持つ)INT7~0
2. ピン変化割り込みピン(PCINT23~0)

各割り込み元に対して、対応する処理ルーチンを実行するため、プログラム実行が飛ぶのを制御する割り込みベクタがあります。ATmega2560の外部割り込み用の割り込みベクタは次表で示されます。デバイス特有の割り込みベクタについては各々のデータシートを参照してください。

ベクタ番号	プログラムアドレス	供給元	ATmega2560でのポートピン	割り込み定義
1	\$0000	RESET	RESET	外部リセットピン、電源ONリセット、低電圧検出(BOD)リセット、ウォッチドッグリセット、JTAG AVRリセット
2	\$0002	INT0	PD0	外部割り込み要求0
3	\$0004	INT1	PD1	外部割り込み要求1
4	\$0006	INT2	PD2	外部割り込み要求2
5	\$0008	INT3	PD3	外部割り込み要求3
6	\$000A	INT4	PE4	外部割り込み要求4
7	\$000C	INT5	PE5	外部割り込み要求5
8	\$000E	INT6	PE6	外部割り込み要求6
9	\$0010	INT7	PE7	外部割り込み要求7
10	\$0012	PCINT0	PCINT7~0/PB7~0	ピン変化0群割り込み要求
11	\$0014	PCINT1	PCINT8/PE0,PCINT15~9/PJ6~0	ピン変化1群割り込み要求
12	\$0016	PCINT2	PCINT23~16/PK7~0	ピン変化2群割り込み要求

8つの外部割り込み元(INT7~0)は専用の割り込みベクタを持ち、一方ピン変化割り込みの群は表1-1. 外部割り込みベクタアドレスで一覧にされるように同じ割り込みベクタを共有します。

(許可されていれば)PCINT7~0の8つのピンの何れかでの何らかの信号レベル変化がPCINT0割り込みを起動します。これは割り込みがPCINT0またはPCINT4のどちらかによって起動された場合にCPUが同じベクタアドレス \$0012へ飛ぶことを意味します。同様に、(許可されていれば)PCINT15~8の8つのピンの何れかでの何らかの信号レベル変化がPCINT1割り込みを起動し、(許可されていれば)PCINT23~16の8つのピンの何れかでの何らかの信号レベル変化がPCINT2割り込みを起動します。

ピン変化割り込みについては、PCINT0からPCINT7の各々が共にORされて同期されます。以前のピン値の経緯を保つことによる処理での解決はアプリケーションコードの義務で、その後割り込みルーチンがどのピンが変化したかを調べるために現在のピン値を走査します。PCINT15~8とPCINT23~16についても同じことが当て嵌まります。

## 1.2. 外部割り込み感知

外部割り込みは同期または非同期のどちらかで感知されて記録されます。同期感知はI/Oクロックが必要で、一方非同期感知はI/Oクロックを必要としません。これはアイドル動作を除く全ての休止形態でI/Oクロックが停止されるため、非同期に検出される割り込みはアイドル動作以外の休止形態からデバイスを起こすのに使用することができることを意味します。

Atmel ATmega2560に対する外部割り込みとピン変化割り込み用の感知形態設定は表1-2. 外部割り込み感知形態設定で示されます。デバイス特有の感知形態設定については各々のデータシートを参照してください。

表1-2. 外部割り込み感知形態設定から、全てのピン変化割り込みは非同期に検出されます。他の割り込み(INT7~0)は対応する割り込みピン上での上昇端または下降端、またはLowレベルを感知することによって起動することができます。INTn(Atmel ATmega2560に関してはn=0~7)の各々に対する感知の形式(エッジまたはレベル)は割り込み毎の2つの割り込み感知制御(ISC)ビットを用いてソフトウェアで形態設定可能です。これは下表で提供されます。

表1-2. 外部割り込み感知形態設定

プログラム アドレス	割り込み元	感知
\$0002	INT0	非同期(エッジとレベル)
\$0004	INT1	非同期(エッジとレベル)
\$0006	INT2	非同期(エッジとレベル)
\$0008	INT3	非同期(エッジとレベル)
\$000A	INT4	同期(エッジとレベル)
\$000C	INT5	同期(エッジとレベル)
\$000E	INT6	同期(エッジとレベル)
\$0010	INT7	同期(エッジとレベル)
\$0012	PCINT0	非同期
\$0014	PCINT1	非同期
\$0016	PCINT2	非同期

表1-3. 外部割り込み個別感知形態設定

ISCn1	ISCn0	説明
0	0	INTnのLowレベルが割り込み要求を生成します。
0	1	INTnの何れかのエッジが割り込み要求を生成します。
1	0	INTnの下降端(エッジ)が割り込み要求を生成します。
1	1	INTnの上昇端(エッジ)が割り込み要求を生成します。

注: PCINT23~0は感知形態設定任意選択を持ちません。これはピンで論理変化がある、即ち、HighからLowへの遷移とLowからHighへの遷移の時に必ず割り込みが生成されることを意味します。

### 1.2.1. ATmega2560での非同期感知

表1-2. 外部割り込み感知形態設定から、INT3~0の割り込みは非同期に記録されます。最小パルス幅(ATmega2560については代表的に50ns)よりも広いINT3~0上のパルスが割り込みを生成します。より短いパルスは割り込みの生成が保証されません。

### 1.2.2. ATmega2560での同期感知

表1-2. 外部割り込み感知形態設定から、INT7~4の割り込みは同期で記録されます。INT7~4ピン上の値はエッジが検出されるのに先立って採取されます。エッジまたは切り替わり(トグル)の割り込みが選択された場合、1クロック周期よりも長く持続するパルスが割り込みを生成します。より短いパルスは割り込みの生成が保証されません。

両感知形式について、Lowレベル割り込みが選択された場合、割り込みを生成するために、Lowレベルは現在実行している命令の完了まで保持されなければなりません。

## 1.3. 割り込み応答時間

許可された全てのAVR割り込みに対する割り込み実行応答は最小4/5クロック周期です。この4/5クロック周期はプログラムカウンタ幅に依存します。プログラムカウンタ幅が2バイトよりも大きくなければ、割り込み応答時間は最小4クロック周期で、プログラムカウンタ幅が2バイトよりも大きければ割り込み応答時間は最小5クロック周期です。

これらの4/5クロック周期は以下を含みます。

- スタックにプログラムカウンタ(PC)値を押し込めるための2/3周期
- スタックポインタを更新するための1周期
- 全体割り込み許可(I)ビットを解除(O)するための1周期

MCUが休止形態の時に割り込みが起きる場合、割り込み実行応答時間は5クロック周期増やされます。この増加は選択した休止動作形態からの始動時間に加えてです。この始動時間はクロック元を開始するのにかかる時間です。

複数周期命令の実行中に割り込みが起きた場合、その命令は割り込みが処理される前に完了されます。

## 1.4. 割り込み優先権

割り込みに関する優先権は割り込みベクタアドレスによって決められます。最低の割り込みベクタアドレスを持つ割り込みが最高優先権を持ちます。故にリセットが最高優先権で、INT0が後続し、その後にINT1、以下同様です。2つの割り込みが同時に起きた場合、より高い優先権を持つ割り込みが先に処理されます。

## 1.5. 外部割り込み使用時に注意すべき重要な点

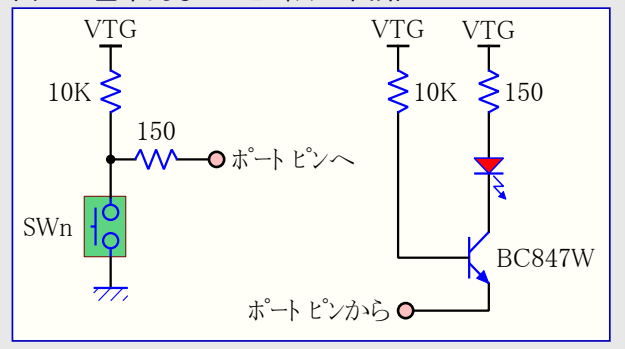
1. パワーダウンからデバイスを起こすのにレベル起動割り込みが使用される場合、レベル割り込みを起動するために、必要とされたレベルはMCUが完全に起き上がるのに十分な長さを保たなければなりません。始動時間の最後に先立ってそのレベルが消滅した場合、MCUは未だ起き上がりますが、割り込みが全く生成されません。
2. INT7~0とピン変化割り込みの両方がどの休止動作形態からもデバイスを起こすのに使用することができます。しかし、INT7~4はアイドル動作以外の休止形態からデバイスを起こすためには、レベル感知割り込みに形態設定されるべきです。
3. 許可されていれば、レベルで起動された割り込みはピンがLowに保たれている限り、割り込み要求を生成します。
4. 外部割り込みn条件制御(ISCn)ビット変更時、割り込みが起き得ます。従って、外部割り込み許可(EIMSK)レジスタで割り込み許可ビットを解除(0)することによって先にINTnを禁止することが推奨されます。
5. フラグビットが設定(1)されている時は、割り込みを許可した瞬間に割り込みが起動されるため、割り込み許可の前に、対応する割り込みのフラグビットを解除(0)することが推奨されます。
6. 許可されていれば、例えばピンが出力として形態設定されていても割り込みは起動されます。これはソフトウェア割り込みを生成する方法を提供します。
7. “ピン上の上昇端、下降端、または何れかの論理変化”として形態設定された非同期外部割り込みピン上に論理Highレベルが存在して同時にその外部割り込みが許可されていない場合、対応する外部割り込み要求フラグはパワーダウン、パワーセーブ、スタンバイの休止動作形態から再開する時に設定(1)されます。
8. 一旦CPUが割り込み処理ルーチン(ISR)に入ると、ステータスレジスタ(SREG)の全体割り込み許可(I)ビットは他の全ての割り込みが禁止されるように解除(0)されます。入れ子にされた(多重)割り込みを使用するためには、CPUがISRに入った時にソフトウェアによってIビットが設定(1)されなければなりません。

## 2. 始める前に

本章はAtmel megaAVRデバイスでの外部割り込みの開始に際してと動かすための基本的な段階を軽く片付けます。下で与えられる課題はAtmelのSTK600で利用可能はスイッチとLEDを単純に使用します。STK600を使用せずに、これらの課題は図2-1. 基本的なLEDとスイッチの回路で示されるようにスイッチとLEDの回路を直接ポートピンに接続することによって確認することができます。

最初の3つの課題が割り込みの使用を実演するために割り込み処理ルーチン(ISR)の内側で幾許かの遅延繰り返しを使用することに注意されるべきです。一般的にISRの内側で遅延ルーチンを使用することは決して推奨されません。

図2-1. 基本的なLEDとスイッチの回路



### 2.1. 課題1 – 基本的な外部割り込みの使い方

課題：それらの各々の割り込み処理ルーチンで各々に対して1つのLEDを点灯するようにINT0割り込みとPCINT0ピン変化割り込みを許可してください。

1. ポートAを出力として形態設定してください。割り込み元としてSTK600内のスイッチを使うように、ポートB(PCINT0用)とポートD(INT0用)上のプルアップを許可してください。
2. INT0を上昇端感知に形態設定してください。INT0とPCINT0の割り込みを許可して全体割り込み許可ビットを設定(1)してください。
3. INT0の割り込み処理ルーチン(ISR)の内側で、LED0をONにし、その後に幾許かの遅延後にLED0をOFFにしてください。同様にINT1に対して、間での幾許かの遅延でLED1をONとOFFに切り換えてください。

ハードウェア構成設定:

1. 10芯リボンケーブルを使用してSTK600上でPORTAヘッダをLEDヘッダに接続してください。
2. SW0とPD0間に1つ、SW1とPB0間に別の1つで2つの線を接続してください。

STK600を使用しない場合、図2-1. 基本的なLEDとスイッチの回路で示されるように2つのLED回路をPA0の1つとPA1の別の1つに、2つのスイッチ回路をPD0の1つとPB0の別の1つに接続してください。

例のコードが走行している間にSW0が押されると、プルアップのためにSW0が開放された時にINT0割り込みが起動されてLED0が一度点滅します。SW1スイッチが押されると、PCINT0割り込みが起動されてLED1が一度点滅し、SW1が開放されると、PCINT0割り込みが再びもう一度起動されてLED1が再び一度点滅します。従ってSW1上の単一のスイッチ活動(押下と開放)はLED1上で2回の点滅を生成します。

## 2.2. 課題2 – 入れ子にされた(多重)外部割り込みの使い方

先に言及したように、一旦CPUが割り込み処理ルーチン(ISR)に入ると、SREGの全体割り込み許可(I)ビットが解除(0)され、故に他の全ての割り込みが禁止されます。入れ子にされた(多重)割り込みを使用するために、CPUがISRに入った時にソフトウェアによってビットが設定(1)されなければなりません。

**課題：**INT0とINT1の割り込みを許可してください。INT0のISR内で、CPUがINT0のISRの内側の間にINT1割り込みが感知されて(INT1のISRに飛ぶことによって)実行されるようにビットを設定(1)してください。

1. LED0とLED1をONに切り換えるために各々ポートBのPB0とポートCのPC0を出力として形態設定してください。割り込み元としてATMELのSTK600内のスイッチを使用するために、(PD0とPD1が各々INT0とINT1なので)ポートDでプルアップを許可してください。
2. INT0とINT1を上昇端感知に形態設定してください。INT0とINT1の割り込みを許可して全体割り込み許可ビットを設定(1)してください。
3. INT0のISRの内側で、(sei()命令を使用して)ビットを設定(1)してLED0をONにし、その後に幾許かの遅延の後でLED0をOFFにしてください。同様にINT1に対して、間での幾許かの遅延でLED1をONとOFFに切り換えてください。

**ハードウェア構成設定:**

1. STK600上で、線を使用してPB0をLED0に、PC0をLED1に接続してください。
  2. SW0とPD0間に1つ(INT0用)、SW1とPD1間に別の1つ(INT1用)で2つの線を接続してください。
- STK600を使用しない場合、[図2-1. 基本的なLEDとスイッチの回路](#)で示されるように2つのLED回路をPB0の1つとPC0の別の1つに、2つのスイッチ回路をPD0の1つとPD1の別の1つに接続してください。

例のコードが走行している間にSW0が押されると、プルアップのためにSW0が開放された時にだけINT0割り込みが起動されてLED0が或る時間の間点滅します。LED0が光り輝いている間の時間中、SW1上でのスイッチ活動がINT1を起動し、従ってLED1は瞬間点滅してOFFになります。これはINT0のISRの内側でビットが設定(1)され、故に他の全ての割り込みが活性にされるためです。従って例えCPUがINT0ルーチンの内側の時でも、INT1割り込みを感知してINT1のISRに飛んでそのルーチンを実行し、その後にINT0のISRに飛び戻ります。

INT0のISRで'sei()'行を注釈にして出力を観測してください。

## 2.3. 課題3 – ピンでの信号変化に基づく外部割り込み

「外部割り込み使用時に注意すべき重要な点」項の第6項目で言及したように、一旦割り込みが許可されると、例え対応するピンが出力として形態設置されても、それは起動されます。

**課題：**比較一致で切り換えるOC3Bピン(出力として形態設定されるPE4ピン、またINT4ピンでもあります)とのCTC動作形態で16ビットのタイマ/カウンタ3を許可してください。ポートAに接続されたLED0をONとOFFに切り換えるルーチンを含む割り込み処理ルーチン(ISR)と共にINT4割り込みを許可してください。

1. LED0を駆動するためにポートAのPA0を出力として形態設定してください。
2. 上昇端を感知するようにINT4を形態設定してINT4を許可してください。また全体割り込み許可ビットも設定(1)してください。
3. 比較一致で切り換えるOC3Bピンとの(TOPとしてOCR3A)のCTC動作形態でタイマ/カウンタ3を形態設定してください。同じ値をOCR3Aに設定してください。
4. OC3Bピン(INT4ピン/PE4ピン)を出力として形態設定して何かの前置分周値(例のコードでは256分周)でタイマ/カウンタを開始してください。
5. ISR内でポートAのPA0に接続されたLED0をONにし、幾許かの遅延後にLED0をOFFにしてください。

**ハードウェア構成設定:**

1. PA0ピンとLED0間に線を接続してください。
  2. OC3B出力を見るためにPE4ピンとLED1間に線を接続してください。
- STK600を使用しない場合、[図2-1. 基本的なLEDとスイッチの回路](#)で示されるように2つのLED回路をPA0の1つとPE4の別の1つに接続してください。

例のコードが走行している時に計時器の活動のために(OC3Bピンに接続された)LED1が切り換ります。LED1が(LowからHighへの遷移である上昇端を意味する)OFFに切り換える時は必ずINT4が起動され、従ってLED0が一度点滅します。

## 2.4. 課題4 – デバイス起き上がりのための外部割り込み

課題：INT0を許可してデバイスを休止動作形態にしてください。デバイスを起こすのにINT0を使用し、デバイスが活動動作形態であることを示すためにLED0をONに切り換えてください。

1. LED0を駆動するためにポートAのPA0を出力として形態設定してください。
2. SW0とSW1のスイッチを接続するためにポートBのPB0とポートDのPD0で各々プルアップを許可してください。
3. (ポートDのPD0の)INT0を上昇端感知に形態設定してINT0を許可してください。また全体割り込み許可ビットも設定(1)してください。
4. 休止動作形態をパワーダウン動作に設定してLED0をONに切り換えてください。
5. SW0スイッチが押されるまで待ってください。一旦それが押されると、(デバイスが休止動作形態に入ったことを示すために)LED0をOFFに切り換えて休止動作形態に移行してください。
6. (起き上がり後の)ISRの内側で、デバイスが今や活動動作形態であることを示すためにLED0をONに切り換えてください。段階5と6.を繰り返してください。

ハードウェア構成設定:

1. PA0ピンとLED0間に線を接続してください。
2. PB0ピンとSW0間に線を接続してください(この接続はデバイスを休止動作形態へ移行させるためです)。
3. PD0ピンとSW1間に線を接続してください(INT0外部割り込み接続)。

STK600を使用しない場合、[図2-1. 基本的なLEDとスイッチの回路](#)で示されるように1つのLED回路をPA0で、2つのスイッチ回路をPB0の1つとPD0の別の1つに接続してください。

例のコードを実行することにより、LED0がONに切り換ります。一旦SW0が押されると、LED0がOFFに切り換ってデバイスが休止動作形態へ移行します。今やSW1上のスイッチ活動がデバイスを起こしてLED0をONに切り換えます。

## 3. ドライバ実装

この応用記述はAVRツールチェーンと共にAtmel Studio 7.0 IDE用に書かれたソースコード一括を含みます。この外部割り込みドライバが高性能コードでの使用のために意図されていないことに注意してください。これは外部割り込みでの開始を得るためのライブラリとして設計されています。例のコードは以下を含みます。

- Atmel ATmega2560での基本的な外部割り込みの使い方
- ATmega2560での入れ子にされた(多重)外部割り込みの使い方
- ATmega2560で出力として形態設定された外部割り込みピンでのソフトウェア割り込み生成
- ATmega2560のデバイス起き上がり用外部割り込み

## 4. 改訂履歴

資料改訂	日付	注釈
8468A	2011年11月	初版資料公開
8468B	2016年3月	ファームウェアをAtmel Studio最終版(Atmel Studio 7)に更新と資料内での些細な変更

Atmel®, Atmelロゴとそれらの組み合わせ、Enabling Unlimited Possibilities®, megaAVR®, AVR®, STK®とその他は米国及び他の国に於けるAtmel Corporationの登録商標または商標です。他の用語と製品名は一般的に他の商標です。

**お断り:** 本資料内の情報はAtmel製品と関連して提供されています。本資料またはAtmel製品の販売と関連して承諾される何れの知的所有権も禁反言あるいはその逆によって明示的または暗示的に承諾されるものではありません。Atmelのウェブサイトに表示する販売の条件とAtmelの定義での詳しい説明を除いて、商品性、特定目的に関する適合性、または適法性の暗黙保証に制限せず、Atmelはそれらを含むその製品に関連する暗示的、明示的または法令による如何なる保証も否認し、何ら責任がないと認識します。たとえAtmelがそのような損害賠償の可能性を進言されたとしても、本資料を使用できない、または使用以外で発生する(情報の損失、事業中断、または利益と損失に関する制限なしの損害賠償を含み)直接、間接、必然、偶然、特別、または付随して起こる如何なる損害賠償に対しても決してAtmelに責任がないでしょう。Atmelは本資料の内容の正確さまたは完全性に関して断言または保証を行わず、予告なしでいつでも製品内容と仕様の変更を行う権利を保留します。Atmelはここに含まれた情報を更新することに対してどんな公約も行いません。特に別の方法で提供されなければ、Atmel製品は車載応用に対して適当ではなく、使用されるべきではありません。Atmel製品は延命または生命維持を意図した応用での部品としての使用に対して意図、認定、または保証されません。

**安全重視、軍用、車載応用のお断り:** Atmel製品はAtmelが提供する特別に書かれた承諾を除き、そのような製品の機能不全が著しく人に危害を加えたり死に至らしめることがかなり予期されるどんな応用(“安全重視応用”)に対しても設計されず、またそれらとの接続にも使用されません。安全重視応用は限定なしで、生命維持装置とシステム、核施設と武器システムの操作の装置やシステムを含みます。Atmelによって軍用等級として特に明確に示される以外、Atmel製品は軍用や航空宇宙の応用や環境のために設計も意図もされていません。Atmelによって車載等級として特に明確に示される以外、Atmel製品は車載応用での使用のために設計も意図もされていません。

© HERO 2016.

本応用記述はAtmelのAVR1200応用記述(Rev.8468B-03/2016)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には( )内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。