ま　え　が　き

「実験装置を扱う者だけが装置を壊す。理論計算だけの研究を行っている学生は，モノを壊す経験ができない。」これは研究室の物品を壊したことを学生が申し訳なさそうに私に報告したときに声を掛けるフレーズである。じつに寛容なものである。

筆者が企業で研究開発に従事していたとき，誤配線によってパワートランジスタをしばしば破壊したことがある。特注トランスを燃やす事故を起こしたときには肝を冷やしたものだ。原因は整流用ダイオードをラックに実装したときの絶縁不良である。このことを上司に報告したとき「じゃ，特注トランスは2台納入されているから，もう1台を使え。」と私を責めることは一切なかった。その後，コンパクトディスクプレーヤが市場に出始めたころ，光ヘッドの開発に従事することになった。当時の半導体レーザは高価であったが，半導体レーザを駆動する，すなわち発光させる APC（automatic power control）回路を幾種類も製作して実験した。じつに楽しかった。設計した電子回路に半導体レーザを接続し，これに電源を投入する。その後出射光を取り出すガラス窓を，焦点が合わないようにちょっとだけ覗き込む（危険）。半導体の接合部は赤々と燃えている。生きている。そして，ワクワクしながらレーザ光を視認するビューアでガラス窓を覗き込み，一筋の発光が確認できたときは爽快であった。この感動を得るために，高価な半導体レーザを破壊する経験を数えきれないほど積み上げた。このような経験があるから，モノを触って失敗することを通してこそ工学は血肉化すると信じている。学生もまたしかりである。学部3年生までの座学によって基礎知識を獲得しても，卒業研究あるは修士課程の研究という実践場面では必ず失敗をおかす。失敗を経験してこそ力量が上がる。自身が経験済みなので，失敗を報告にきた学生を叱責するわけにはいかない。

だから，壊れるはずがない 2 相発信器を学生が故障させたときも，泡立つ怒りを平静な態度で覆い隠した。「発信器なんて壊れはしないのだよ。君は珍しいことをしでかしたねェ。」と皮肉を言うだけであった。

企業の研究開発の現場では，失敗を大げさに責め立てはしない。開発者の意欲をそぐ損失のほうが，モノを壊すことよりも深刻な事態を招くからだ。だから，計測装置を不注意によって故障させても，即座に修理がなされる。あるいは新品が手配される。資金豊富な企業の場合はそれでよい。しかし，大学の一研究室で企業のマネはできない。不注意あるいは経験不足によって，いとも簡単に測定器を壊されては，修理代だけで研究費が細る。どうにかしたい。対策を考えていたとき，「人のふり見て我がふり直せ」ということわざが浮かんだ。他人の行動を見ることによって自身の悪い点を改めるという意味である。つまり，他人のおかした失敗を十二分に擬似体験すれば，単純ミスによる失敗を防げるのではないかと考えた。これが本書執筆の動機である。

本書では，まず，現役学生たちの何気ない会話を紹介している。日常会話での稚拙さが，摩訶不思議な連鎖によって技術分野の失敗につながると思うからである。次に，実際に彼らがおかした失敗，そして私自身が若手技術者のときにおかした失敗を実例にしている。決して空想でつくり出した失敗や事故の話ではない。生々しい事実なのである。これらの事例は，筆者の所属学科だけの特別な失敗ではないと思う。ほかの理工系大学生および若手技術者も同様の誤りをおかしているはずだ。

ここで，他人からの揶揄や非難を一切受けたくないために，失敗などは皆無だと言いたがる人たちがいる。あえて，さらし者になるような失敗を披露するまでもない，と無難に考える人たちがいることは確かである。それが組織の長であり，彼の無難な考え方が蔓延していったとき，組織は腐っていくと私は思っている。本書の読了による擬似失敗体験によって，実際の場面においては過ちをおかさない，ということだけを私は希望している。

2014 年 11 月

著者　涌井伸二

目　　次

1. 序　　論

1.1　感 激 と 記 憶 …… 2

1.2　経 験 が 大 事 …… 3

1.3　失 敗 の 経 験 …… 4

2. ボキャ貧と気づきの貧弱さ

2.1　ボキャ貧の実態 …… 5

2.1.1　技術会話の例（電気電子関係の技術用語）　5

2.1.2　技術会話の例（機械関係の技術用語）　11

2.1.3　話し方・聞き方の問題　19

2.1.4　日常会話の例（話が途切れる語彙の貧弱さ）　23

2.1.5　私　の　場　合　31

2.2　ボキャ貧が招く失敗 …… 35

2.3　気づきの貧弱さが事故につながる予感 …… 37

2.3.1　交　通　事　故　38

2.3.2　電 源 の 遮 断　39

2.3.3　半田ごての不用意な電源投入　41

2.3.4　ケーブル越え事件　42

3. 態 度

3.1 遅刻そして朝の挨拶のこと …… 45
3.2 フレックスタイム制度の光と影 …… 46
3.3 居 眠 り 事 件 …… 48
3.4 椅子に座っていられる才能 …… 50
3.4.1 椅子に座っていられない学生と企業人 51
3.4.2 卒論の見直し 52
3.5 エ プ ロ ン 事 件 …… 53
3.6 サンダル履き事件 …… 55
3.7 尻ブチ先生の教育 …… 58
3.8 注意書きは景色の一部となる（その 1）…… 61
3.9 注意書きは景色の一部となる（その 2）…… 63
3.10 重量物持ち上げ作業に見る事故の予感…… 64

4. 機械はやさしく

4.1 プリンタのトレイ故障事件 …… 68
4.2 ね じ 締 め 事 件 …… 71
4.3 空圧レギュレータの破壊 …… 75
4.4 半田ごての破壊 …… 78
4.5 ねじは緩むもの …… 79
4.6 機械は生き物のように動く …… 82
4.7 空 気 漏 れ 事 件 …… 86
4.8 IC の抜き差し作業 …… 97

5. 電気接続のこと

5.1　半田付けのいろいろ …… 101
5.1.1　半田ボールや配線の折れ　102
5.1.2　ハウジングの接続　104
5.1.3　BNC ケーブルの半田付け　105
5.1.4　バナナの半田付け　107
5.2　テンションによる断線事件 …… 109
5.3　エナメル線は皮膜をむく …… 111
5.4　電気を通すには 2 本の配線が必要 …… 115
5.5　アクティブ素子を動かすには電源が必要 …… 118
5.6　電気信号の加算 …… 121
5.7　オシロスコープは何のために使用？ …… 125
5.7.1　減衰振動波形　126
5.7.2　オーバシュート　126
5.7.3　オフセットとドリフト　127
5.7.4　ノイズなの？　128
5.7.5　10：1 と 1：1 のプローブ　130
5.7.6　DC カップリングと AC カップリング　130
5.7.7　プローブの校正　131
5.8　ショート事故 …… 132
5.9　筐体アース …… 134

6. 失敗の事例

6.1　抵抗からの発煙事故 …… 138
6.2　装置からの発煙事故 …… 141
6.3　IN と OUT の誤認による失敗（その 1）…… 145

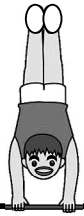
6.4 IN と OUT の誤認による失敗（その 2）…… 147
6.5 感 電 事 故 …… 150
6.6 大規模プロジェクトの失敗 …… 156

付録 アナロジの効用

A.1 時間領域と周波数領域 …… 163
A.2 コンプリメンタリ・ペア，相補型トランジスタ …… 165
A.3 垂 下 特 性 …… 166
A.4 スライディングモード制御 …… 167
A.5 PID 制 御 …… 168
A.5.1 織田・豊臣・徳川と PID 制御 169
A.5.2 現在・過去・未来と PID 制御 170
A.6 除振装置の空気ばね …… 171

お わ り に …… 173
引用・参考文献 …… 176
索 引 …… 179

1. 序　　論



JR 山陽新幹線の福岡トンネルで起きたコンクリート剥落事故（1999 年 6 月 27 日），ウラン溶液が核分裂反応を起こした東海村 JCO の臨界事故（1999 年 9 月 30 日），種子島宇宙センターから発射された H-2 ロケットの打上げ失敗（1999 年 11 月 15 日），そして乗客 5 名が亡くなった地下鉄日比谷線の脱線事故（2000 年 3 月 8 日）などが起きて以降，東大名誉教授の畑村洋太郎先生は「**失敗学（失敗工学）**」[1)～3)†]という新しい学問体系を提唱された。提唱に至るまでの考えの変遷を筆者なりに理解すると次のようになる。

まず，人は失敗をおかす動物であるという認識に立つ。したがって，失敗をことさら責め立ててはならないのである。しかし，お金，モノ，時間，情報を駆使して行った行為の中には，重要な知見が必ずある。失敗を不問にしたまま，つまり失敗の原因を明確にしないままでは，お金，モノ，時間，情報そのものを無駄にする。そこで，失敗を分析し，これを乗り越えるために失敗を糧にする行為が必要であり，これを体系化しようということが失敗学の提唱となった。

畑村先生の「失敗学」と同様に，本書も失敗の体系化を目指すのかと問われれば，それは完全に否である。もう少し，柔らかいイメージを持ってもらいたい。「**人のふり見て我がふり直せ**」ということわざは，他人の姿や行動を見て，自分の悪い点を改めることを意味する。また，「**他山の石**」とは，他人のよくない言動や間違いを戒めとして自己の修養に役立てる，という意味である。このことわざのように，他人の失敗を通して自身が失敗をおかさないことを目指

† 肩付数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

したいのである。

以下に述べる「感激と記憶」,「経験が大事」，そして「失敗の経験」の各項目は，筆者の想いである。

1.1　感 激 と 記 憶

高校生のとき，古文の先生は言った。松尾芭蕉の「奥の細道」に収録されている俳句を覚えなさいと。

「**閑さや岩にしみ入る蝉の声**」

私が家族を持ったとき，夏休みの旅行として東北地方を選んだ。その際，山形の立石寺（山寺と言ったほうが，むしろとおりがよいだろう）にも立ち寄った。

山の頂には，有名な五大堂が仰ぎ見える。早く，そこから下界を眺望したい。しかし，少しだけきつい登山をしなければたどり着けない。まず，身支度を整える登山口の広場に行った。ここには，松尾芭蕉と弟子の曽良（そら）の像があり,「閑さや岩にしみ入る蝉の声」の句碑があった。高校生のときに覚えさせられた例の俳句である。いちべつした後，ゆっくりと山を登り始めた。新緑の木陰になる登山道とはいえ，それは夏の盛りである。たちまち汗が吹き出し，膝が震えてきた。そこで，しばしの休憩をとった。大きな陰をつくる屹立（きつりつ）した大岩盤のところだ。

荒い息を整えていると，蝉しぐれとなった。それは，高僧が奏でる読経のように聞こえた。抑揚の効いた読経が岩盤に吸い込まれていくようだった。それはもう，20 年以上も前のことなのである。「岩にしみ入る」と芭蕉が詠んだことを，私も山寺で感じ取れた。このことは今でも忘れていない。

このようなプライベートな旅行の話から，普遍的な教訓を導き出したくはないが，つくづく人間は経験に左右される，強烈な感激は忘れようにも忘れられない記憶になると思っている。

1.2 経 験 が 大 事

電磁気学は学生にとって難解な科目の一つである。この修得には苦労している。もし，登場する原理のすべてを，実験を通して逐一経験できたならば教育効果は抜群となろう。また，電子回路の書籍に登場する全回路を設計，製作，そして評価したならば，もう実際の開発の場面で使いものになる技術者になるはずだ。しかし，すべて実験という経験を通して，工学原理の理解を図る手間ひまは掛けられない。だから，効率の観点から，体系的に整理された書籍を使っての講義を学生たちが受講することになる。

ここで，体系的であることには欠点がある。電子回路の講義では，能動素子としてトランジスタが扱われる。例えば，コレクタ-エミッタ間電圧やコレクタ電流の具体的な数値を使って，コレクタ損失を計算する演習問題を解く。もちろん，問題そのものに誤りなどはない。しかし，電子回路のデバックを行う初期段階で，実務家は数値を振り回した議論などはしない。「トランジスタのモールド部を指で触ると熱い。」，「鼻先にトランジスタを持ってきたとき焦げた匂いがある。」という皮膚感覚を介してコレクタ損失というものを実感する。しかる後に，定量的な取扱いに入っていく。「熱い」，「焦げた匂い」などのあいまいなことは，体系的であることを要件とするテキストには絶対に書けない。そうではあるが，「熱い」，「焦げた匂い」を経験することによって，トランジスタが何者であるかがわかる。わかったとき，次には定量的解析を行える能力が容易に身に付く。経験を通して，知識が血となり肉ともなるのだ。つまり，体系的な書籍では一般性を重視するため，生々しい個別的な記述を行うことはできない。そのため，身体感覚がない状態で，知識を頭に入れ込むため，苦痛を伴う勉強になってしまう。

話は少し変わる。某電力会社の中堅社員の方が，「新人が電力会社に勤め続けて中堅クラスになっても電気の本質がわかっていない者がいる。」と話してくれたことがあった。電気工事は傘下の会社が行うシステムなので，実務体験

がまるでない。そのため，書類に記載された技術内容に実感が湧いてこない，というわけである。だから，「新人社員研修のときに，感電を体験させるメニューを用意してみたい。」と言う。いわんとすることは即座に理解できた。経験が知識の獲得およびこの運用において不可欠だと言われたのである。

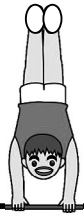
1.3 失 敗 の 経 験

6.2 節では，私の犯した「装置から白煙の事故」の内容を紹介している。もともとの原因は，オシロスコープの扱いに関する無知である。だから，オシロスコープのプローブを測定点に接続していく順番が違っている学生を見つけた場合には，私が無知であり，そのため大事故になった可能性もあった経験を隠すことなく話している。

さて，実験系の研究テーマでは，これを新人の学生に引き継がせることがある。この場合，後輩学生の独り立ちまで，先輩が横にべったりはりついて指導することを方針としている。この引き継ぎのときの実験指導の話が聞こえてきた。さすがに私が無知という話は省いてくれたが，オシロスコープの使い方に間違いがあったときの事故の可能性までを懇切丁寧に後輩に話をしていた。オシロスコープの扱いが間違っているという指摘だけに留まらなかったのである。そうして，白煙をあげる惨状の場面も，まるで体験したかのように語っていた。実体験のない学生が，私の経験を自分にものとして吸収してくれたのであり，私は大いに満足であった。

失敗が幾層にも重なったとき，事故にいたる。そのため，一つでも失敗を防ぐことができたならば，事故までの連鎖をそこで断ち切れる。怪我をせず，かつ損失が巨大にはならない程度の失敗は数多く経験すべきなのかもしれない。しかし，危害，大損害は絶対に避けねばならない。だから，生々しい失敗事例を通した擬似体験をしてもらいたいのである。

2. ボキャ貧と気づきの貧弱さ



ボキャ貧とは，「ボキャブラリー（語彙）が貧困」の略であり，コミュニケーション能力の低さをあざ笑う，あるいは自嘲するときに使用される俗語である。本章では，まず，ボキャ貧の実態を明らかにする。次に，ボキャ貧が招いた時間浪費の一例を紹介する。最後に，ボキャ貧と同類の気づきの貧弱さが招く失敗例を説明する。

蝶の羽ばたきが，巡りめぐって大きな現象を招くときこれを**バタフライ効果**と言う。ボキャ貧も気づきの貧弱さも，この効果を発現する引き金になる。

2.1　ボキャ貧の実態

研究室では，学生一人ごとに異なる研究テーマを与えている。数名の学生をグループにした場合，依存し合って卒業論文あるいは修士論文作成に向けた訓練が疎かになると思うからである。毎年 20 名弱の学生が在籍しており，各人の進捗を把握し，そして適切な指示を与えて研究を少しずつ進めねばならない。週 1 回開催する研究室全員のゼミだけでは，詳細を把握できない。そこで，学生と 1 対 1 のゼミを居室で頻繁に行っている。この中から，記憶にとどめる学生との会話を再現し，ボキャ貧の実態を明らかにする。

2.1.1　技術会話の例（電気電子関係の技術用語）

まじめに勉強している学生は，技術用語の意味を問う試験問題に対して容易に正解を出す。しかし，仕事を進める打合せの中でこそ，技術用語を自在に操ってほしい。

【例 1：電位（potential）】

先生：回路図面を見せなさい。ここの**電位**はどの程度か？

学生：……（無言）

先生：なぜ，黙っているの？

学生：「でんい」の意味がよく理解できないのです。

先生：簡単に言えば電圧のことだ。電磁気学の講義で必ず登場する専門用語だぞ。

【例 2：重畳の理（law of superposition）】

先生：**重畳の理**を用いて，説明してみなさい。

学生：何のことですか？

先生：**重ね合わせの理**だ。足し算のことだよ。

学生：はじめから，重ね合わせ，と言ってくれればわかりました。

【例 3：差動回路（difference circuit）】

先生：これは，**差動回路**の構造になっている。この回路を用いた実験データをまとめなさい。実験が複雑なので，Word で文章にしてきなさい。経過がわかるようにね。

後日，Word ファイル添付の e-mail を受信し，これをチェックした。おおむね良好であったが漢字の間違いがある。「差動回路」を「作動回路」と誤記していたが漢字の間違いはよくある。学生なので許してあげようと思った。

さて，実験レポートのチェックが一通り済んだこともあって，研究をより進捗させるために，学生を再び呼び出して新たな指示を与えた。指示後に，漢字の間違いについてちょっと指摘したところ以下のような返事があった。

学生：先生は「さどう」と言いました。つまり，回路が動作しているので，動作を作動とも言い換えることができますよね。

先生：う～。

漢字の間違いは，じつは表層的なことだったのである。差動回路の有難い特徴を理解したうえで，実験をしたのではないことが，漢字の間違いから知ることができた。

索　　引

【あ】

圧力センサ　87

【い】

イナーシャ　11

【え】

エアーコンプレッサ　86
エアーシリンダ　79
液　冷　97
エクステンション　151
エナメル線　111
エントリーシート　20

【お】

オフセット　128
オペアンプ　97
温度コントローラ　41

【か】

回生回路　142
回転運動　37
外　輪　12
重ね合わせの理　6
加算回路　124
仮説検証　96
カットモデル　12
慣性モーメント　11

【き】

危険予知トレーニング　173
逆起電力　167
逆バイアス　115
筐体アース　134
金属皮膜抵抗　9
金皮抵抗　9

【く】

空圧式除振装置　82
空圧レギュレータ　75
クリアランス　13
クリーンペーパ　152
クリーンルーム　150

【け】

減衰振動波形　83

【こ】

コアタイム　47
校　正　131
構想設計　157
コネクタ　104
コミュニケーション不足　20

【さ】

差動回路　6
サーボアナライザ　164
サーボバルブ　79

【し】

治　具　13
指差確認　63
試作設計　159
試作レス　159
失敗学　1
失敗工学　1
ジャイロセンサ　71
シャーシアース　134
シャットダウン
　シーケンス　40
周波数応答　12
周波数応答分析装置　164
消費電力　140
除　振　147

【す】

垂下特性　166
ストレートケーブル　105
スライダック　145
スライディングモード
　制御　167

【せ】

静圧軸受　75
成果主義　155
絶縁皮膜　111
セラミクス　84
センタポンチ　14

【そ】

相補型トランジスタ　165
束線バンド　40

【た】

ダウンフロー　150
ターボ分子ポンプ　42, 64
玉軸受　12
ダーリントン接続　142
炭素皮膜　9
段取り　67
ダンピング　13

単巻変圧器 145

【ち】

超音波モータ 126
重畳の理 6

【つ】

継　手 89

【て】

定格電力 140
デバック 102
電　位 6
電解コンデンサ 8
電磁誘導 114
転動体 12

【と】

同　期 7
同軸ケーブル 104
動　線 44
取　説 70
ドリフト 128
トレードオフ 8

【な行】

内　輪 12
ニッパ 108
濡れ性 101
熱容量 109
ノギス 16

【は】

バイアス 9
ハインリッヒの法則 153
ハウジング 104
バタフライ効果 5
ハードディスク 39
バナナプラグ 107
バリ取り 18
パワーオペアンプ 138
半田吸引器 112
半田ごて 41, 78
半田付け 101
汎用的 24

【ひ】

火入れ 132
光エンコーダ 80
ピッチング 35
ピンセット 17

【ふ】

フィードバック 72
フェイルセーフ 7
フォトダイオード 115
負　荷 8
負帰還 167
プッシュ・プル回路 166
フライホイール効果 162
フラックス 103
フレックスタイム制度 46

【へ】

ベアリング 12
並進運動 37

【ほ】

報連相 20
ボキャ貧 5
ポンチ 13
ポンチ絵 25

【ま行】

マイクロメータ 16
右ねじの法則 114
メカトロニクス 138
モンキーレンチ 14

【ゆ】

誘導モータ 12

【よ】

ヨーイング 35
予備半田 78

【ら】

ランド 103

【り】

理想オペアンプ 120
リニアスライダ 36
リーマ 14
量産設計 159
稟議書 160

【ろ】

六角レンチ 15
ローパスフィルタ 118
ローリング 35

【A】

AC カップリング 131
ADC 149

【B】

BNC ケーブル 103

【D】

DAC 149
DC カップリング 131
DIP 型 97
DSP 39

【E】

ES 20

【I】

IC クリップ　103
IV 変換　115

【L】

LCR メータ　8

【M】

MEMS　75

【P】

PID 制御　168

【数字】

10：1 のプローブ　130
1 自由度角速度検出ジャイロ　71
5 軸磁気軸受　42

——著 者 略 歴——

1977 年　信州大学工学部電子工学科卒業
1979 年　信州大学大学院修士課程修了（電子工学専攻）
1979 年　株式会社第二精工舎（現セイコーインスツル株式会社）勤務
1989 年　キヤノン株式会社勤務
1993 年　博士（工学）（金沢大学）
2001 年　東京農工大学大学院教授
　　現在に至る

エンジニアのための失敗マニュアル
—— 痛快な珍問答と失敗のてんまつ ——
Failure Manual for Engineers
—— Delightful Questions & Answers and All the Details of Failure ——

© Shinji Wakui 2015

2015 年 1 月 23 日　　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　　者　涌井伸二（わくい しんじ）
発 行 者　株式会社　コロナ社
　　代 表 者　牛来真也
印 刷 所　壮光舎印刷株式会社

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発行所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo　Japan
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-07797-1　（松岡）　（製本：グリーン）
Printed in Japan

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします