

デジタル信号処理の 研究と教育を振り返って

— 雑音は友達，誤差は先生 —

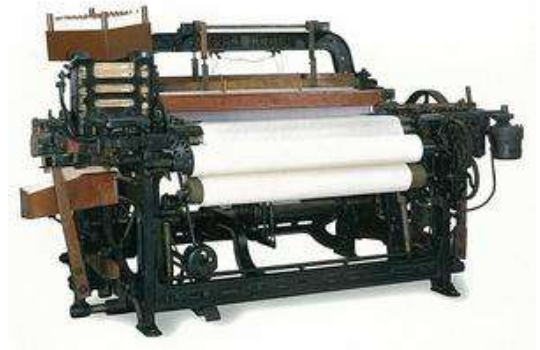
川又 政征

多数の副題案

- 1 0 1 から 1 0 1 へ
- 日日是好日
- 青葉山好日
- 仙台好日
- 青葉山の 4 5 年間
- Society 2.5 から Society 3.5 へ
- 雑音は友達，誤差は先生
- × 友達は雑音，先生は誤差

大学に入るまで：Society2.5 から Society3.5の世界へ

- 1954年 栃木県南部の山間部の古民家に生まれる。
- 家業：機織り業（住居の裏にある小さい織物工場（こうば））と農業。
- 工場（こうば）の中：豊田自動織機，糸繰機，整経機、動力シャフト，トランス，工具などがたくさんあった。一番多かったのは騒音だった。
- 生育環境：生まれる前も生まれた後でも工場の騒音に包まれて，野山を（本当に）駆け回りながら育つ。
- 子供の役割：子供の体力と能力でできることはすべて手伝う。
- 逃避：だんだん知恵がついてくると，手伝いの単調さ・辛さを感じ，学校というところに逃げ込んで行く。



<http://gemba-sembonknock.com/2011/05/20/1318.html>



https://twitter.com/ganaha_masako/status/1117775330863763456

大学生時代の授業

- 数学の授業が抽象的・公理的に行われたのはブルバキの「数学原論」の影響ではないか？
- 授業を貴びて授業を頼らず（数式や現象，回路を自分なりに図式化して解読・理解しようとした）
（宮本武蔵：「神仏を貴びて神仏を頼らず」をもじって）
- お詫びに電気情報系の最終講義はほとんど聴講した。

ディジタル信号処理とは？

- ディジタル：計算機による
- 信号：時間的に，あるいは空間的に変化する量
- 処理：加工，変形，分析，合成
- 「ディジタル信号処理」の最初の授業では，信号は食材，処理は料理だと例えて説明をしていた（これは単なる例えではなく本当だった）

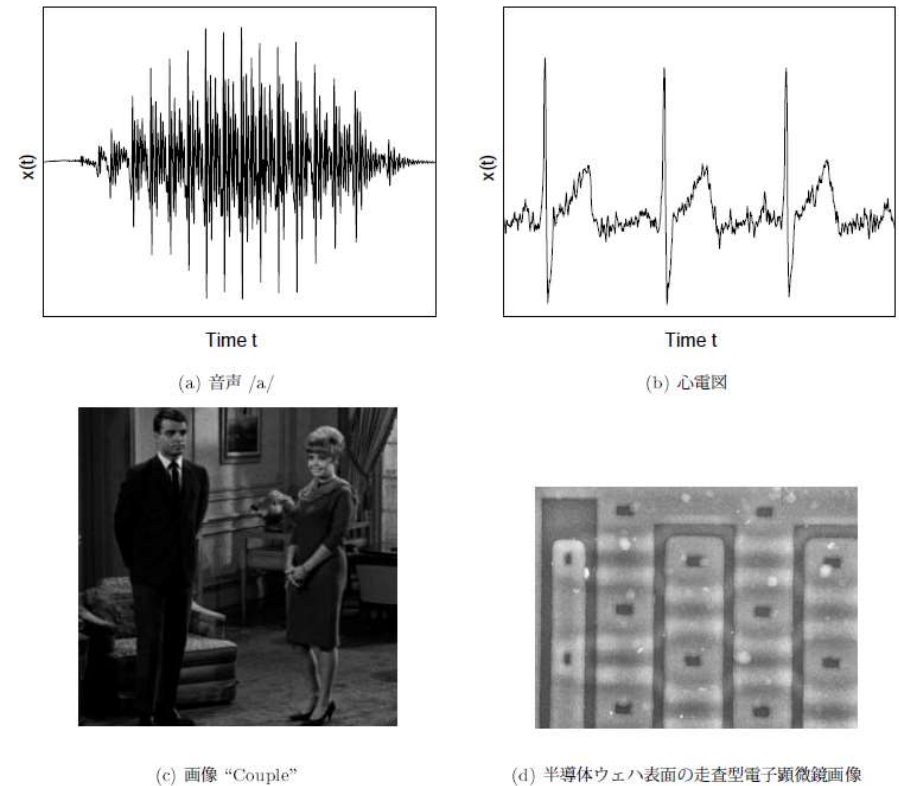


図 1.1 様々な信号の例

余談 1 : 林先生のことば検定 (TV朝日)

2019年 7月12日朝



<正解> 青：うまく処理する

<解説>

- 料理の **料** は、**米**を**升**で計ること。
推し量る，考える との意味が派生した。
- 料理の **理** は **ことわり** と読み，
物事の筋道，おさめるの意味。
- その後，古代中国では薬を調合するという意味も生まれ，
- 日本では食材をうまく調理するという意味に変わっていった。



電子制御工学研究室に配属される

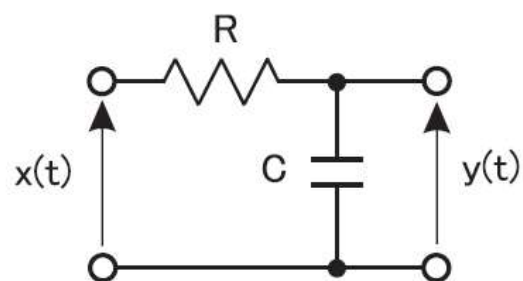
(樋口龍雄助教授，田所嘉昭助手，古山健三技官，他全12名)



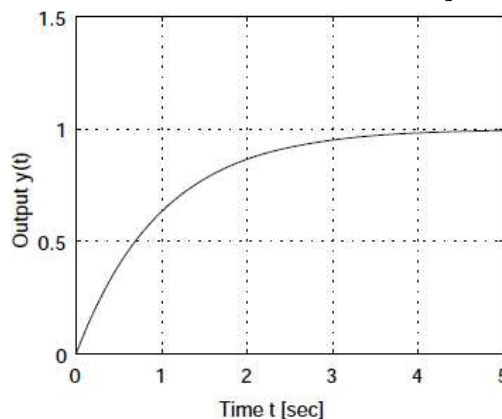
4年生4名，修士3名，博士2名
1977年3月25日，卒業式の日，1号館5階の研究室にて

2021年3月5日（金）

アナログフィルタとデジタルフィルタ



回路構造



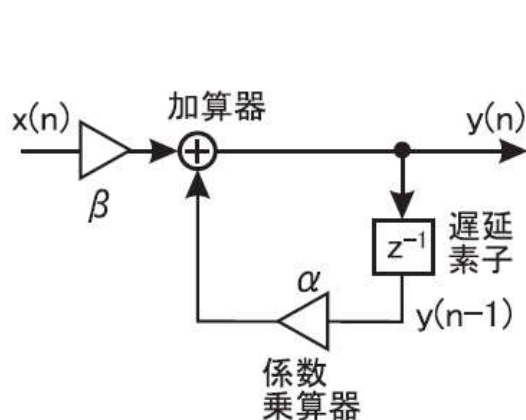
単位ステップ応答

アナログフィルタ

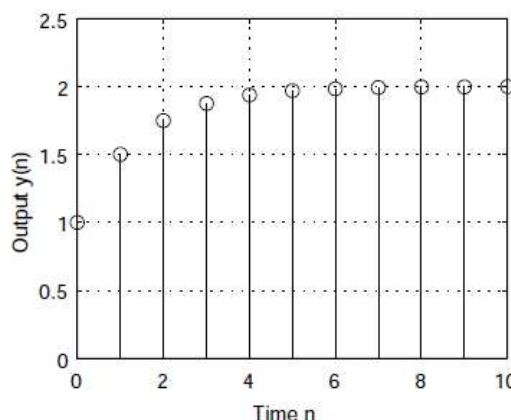
微分方程式

$$RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + RCs}$$



回路構造



単位ステップ応答

デジタルフィルタ

差分方程式（漸化式）

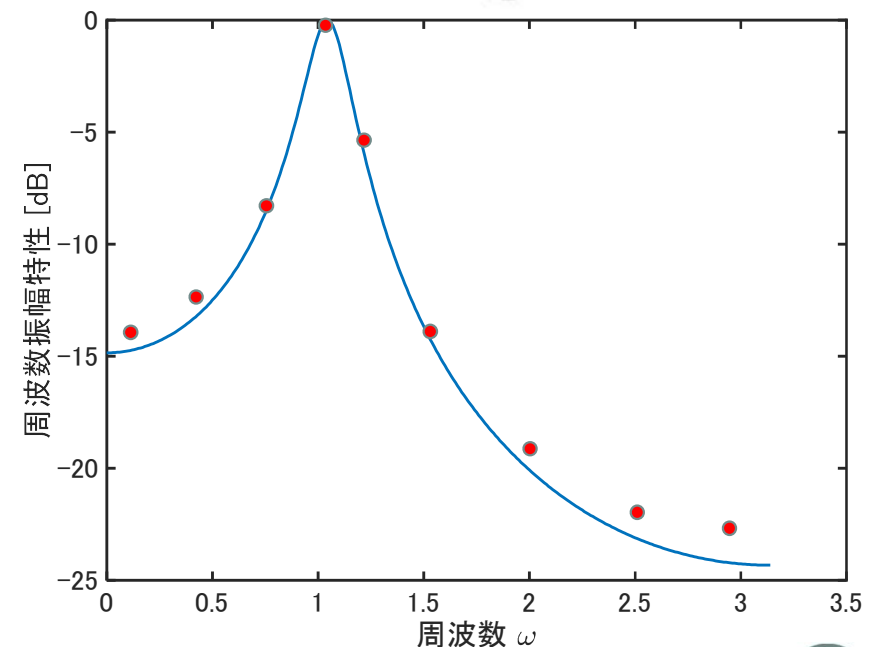
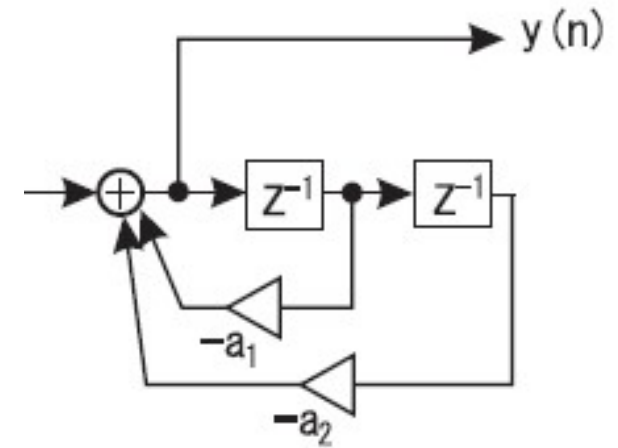
$$y(n) = \alpha y(n-1) + \beta x(n)$$

$$H(z) = \frac{\beta}{1 - \alpha z^{-1}}$$

2021年3月5日（金）

4年前期研修： ディジタルフィルの実現

- 目標：8ビット語長の2次ディジタルフィルタを作り，周波数特性を測る.
- 部品：74シリーズ(TTL)のSSIと MSI (NAND, OR, NOT, FF, 加算器など) を用いる.
- AD変換器，DA変換器，乗算器，遅延素子も自作する.



4年前期研修での経験がその後の研究・教育の基盤となった

- 基本的な電子回路（論理回路，演算回路，増幅器，アナログフィルタ）を設計，制作した．
- アナログ入出力(A/D, D/A)，加算器，遅延素子，乗算器などの原理を理解し，回路を自作した．
- 原始的な（低速・低精度・低次数）ディジタルフィルタを自作したので，様々な現象を目で直接見ることができた．
- アナログの雑音，スイッチングの雑音，アース，量子化誤差などの問題を肌身で感じた．

恩師の先生方の集合写真（卒業式の日）



1977年3月25日,
電気情報系1号
館前にて

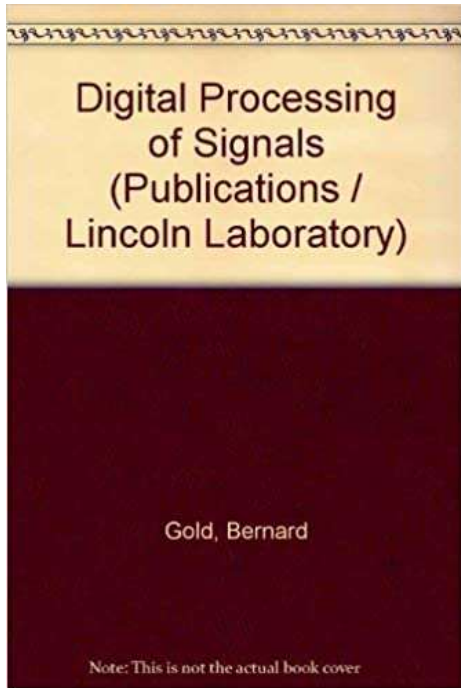
昭和51年度東北大学工学部電気・情報系卒業記念

S 52. 3. 25

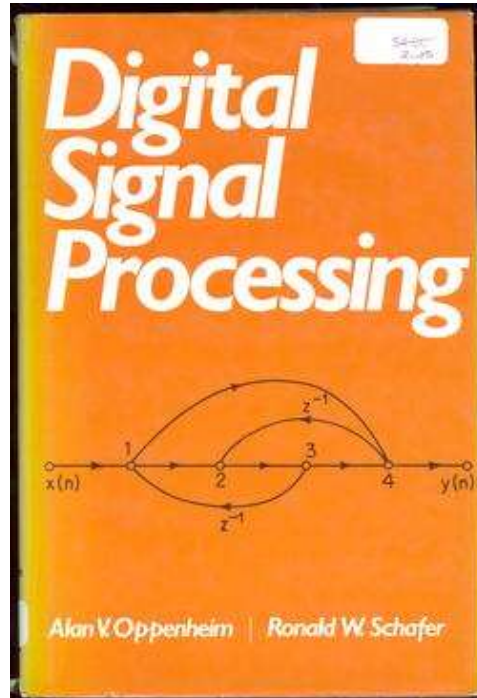
2021年3月5日（金）

11

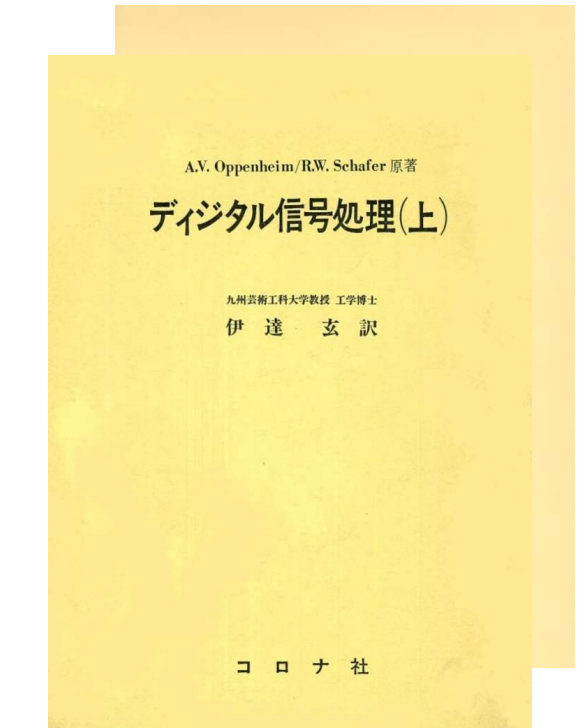
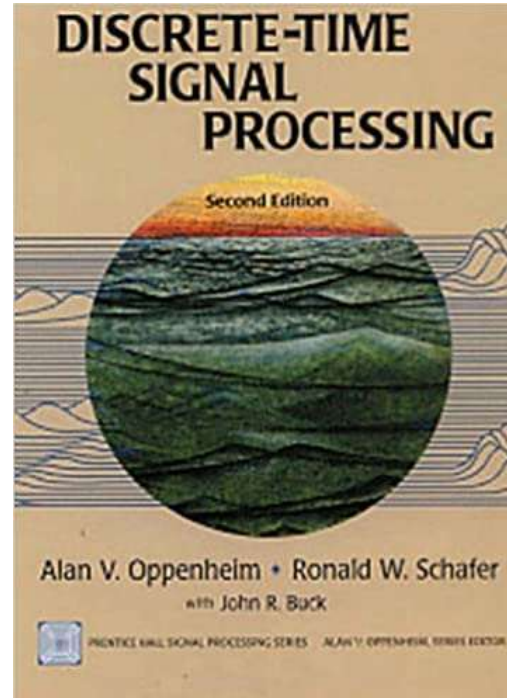
余談 2 : デジタル信号処理のバイブル



B. Gold and C.M. Rader,
1969
4 年前期研修の輪講の教科書



A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer,
1975, 1999

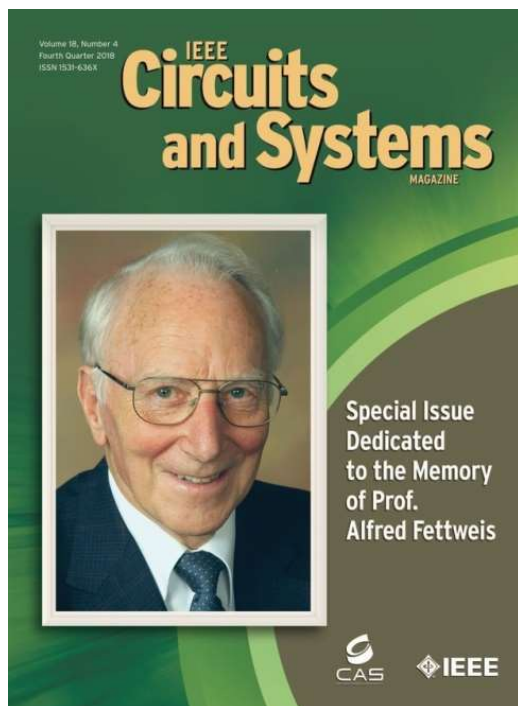


伊達 玄 訳：デジタル信号処理
(上)，(下)，コロナ社，1978

博士論文の研究テーマ探し

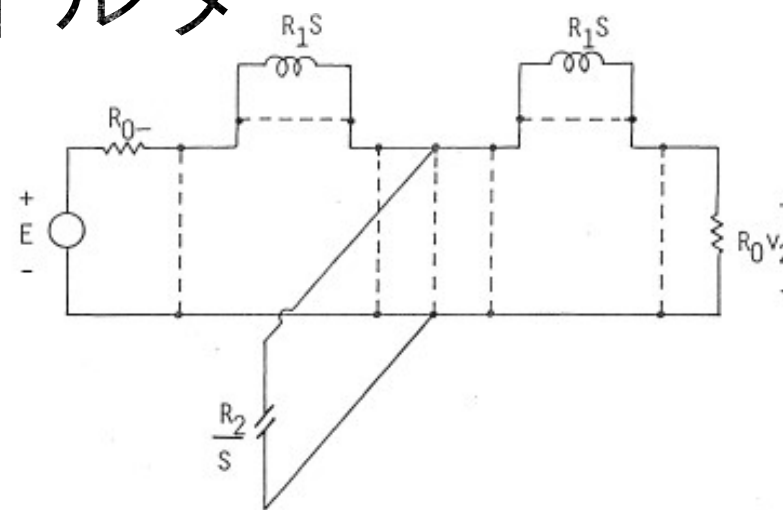
- 博士課程に進学し，研究テーマを探すために手あたり次第に論文を読んでいると，1980年ころからIEEE論文誌にウェーブデジタルフィルタ (Wave Digital Filter) という題目の論文が多数出版され，目を引いた.
- ウェーブデジタルフィルタ：
 - 無損失アナログフィルタの区間の入射波と反射波をシミュレートして設計されるデジタルフィルタ
 - プロトタイプのアナログフィルタの優れた特性を保存することに特徴がある.

ウェイブデジタルフィルタ

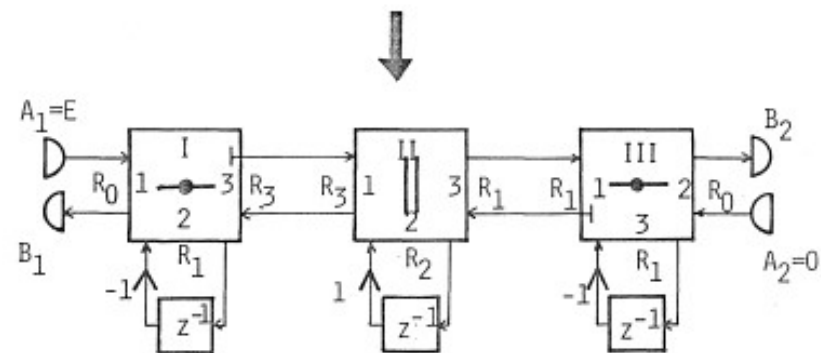


ウェイブデジタルフィルタの提案者：
Alfred Fettweis, 1926-2015

東北大学工学部電子情報システム・応物系 2020年度最終講義資料



3次はしご形アナログフィルタ



3次ウェイブデジタルフィルタ

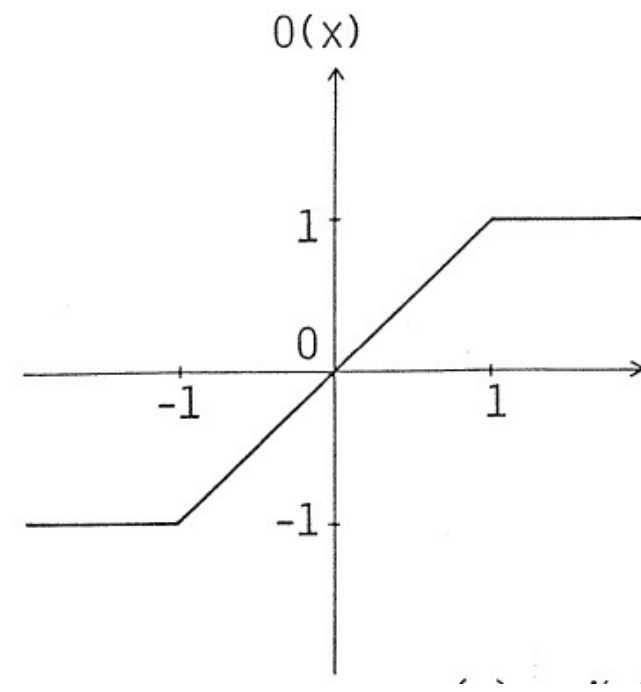
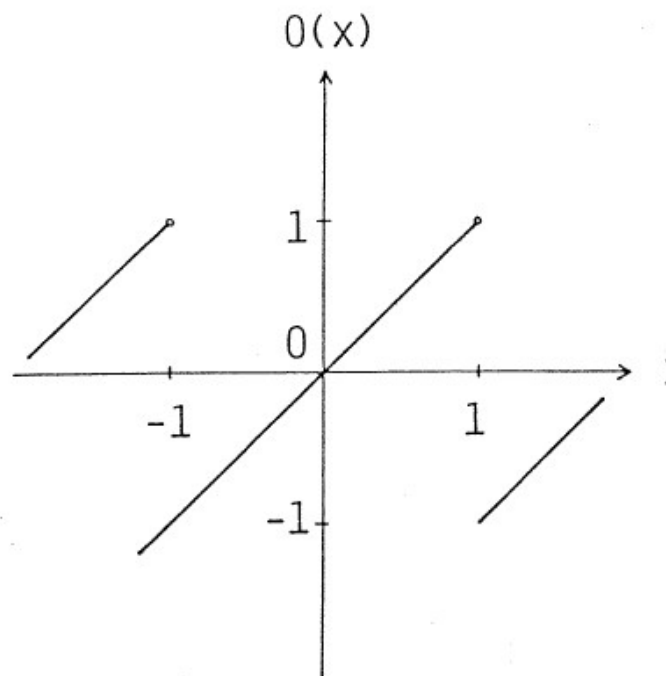
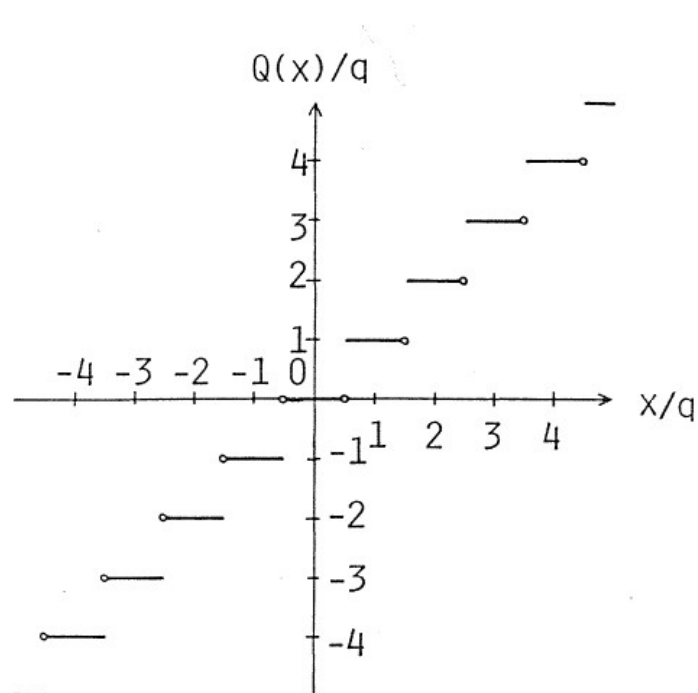
2021年3月5日（金）

博士論文の研究テーマの方向

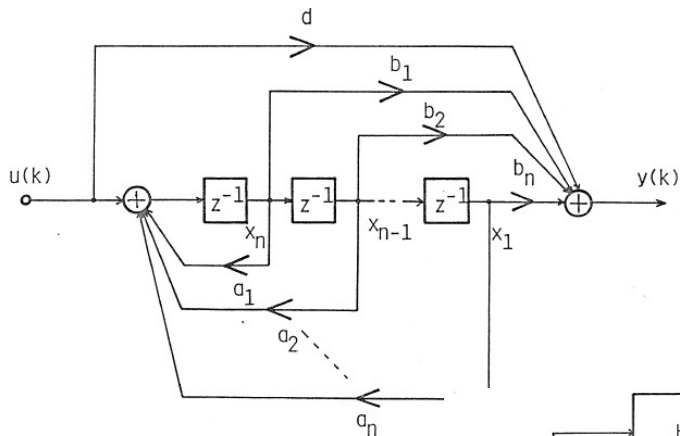
- ウェイブディジタルフィルタを目指すのではなく、
ウェイブディジタルフィルタを目指すものを目指す。
- 研究室での伝統である「状態空間法」によるディジタルフィルタの最適合成法の研究を発展させる。
- 理論的に最高精度のフィルタ構造の合成を目指す。
 - 丸め誤差の小さいフィルタの合成
 - 係数感度の低いフィルタの合成
 - リミットサイクルのないディジタルフィルタの合成

2進固定小数点表現による量子化

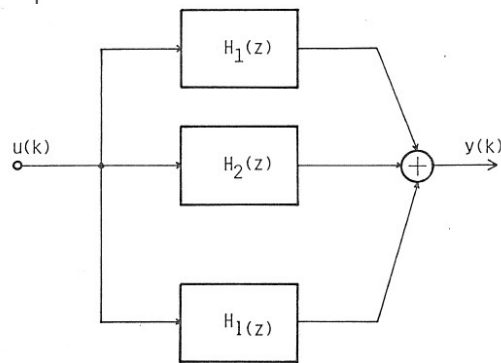
2進2の補数表現のオーバーフローと飽和特性



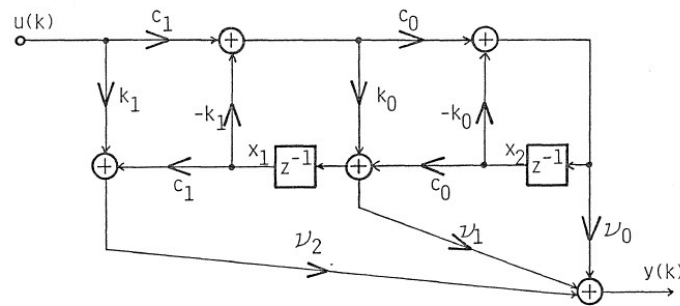
ディジタルフィルタの様々な構造



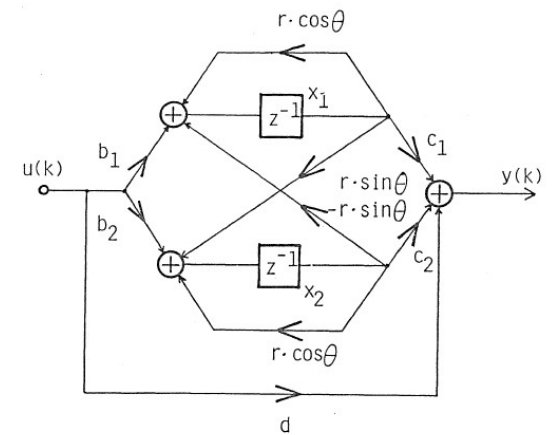
第2.4図 直接形II



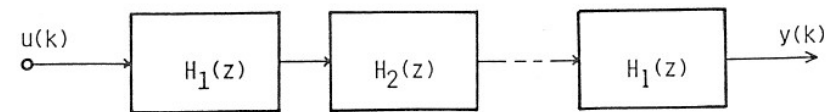
第2.6図 並列形



第2.9図 正規形

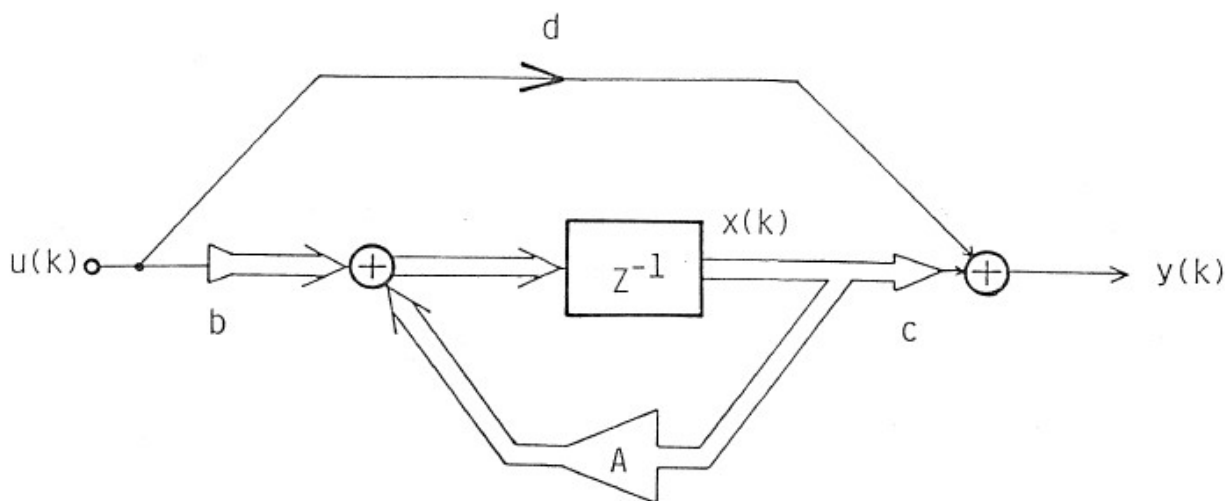


第2.8図 最小ノルム形



第2.7図 縦続形

状態空間ディジタルフィルタ



第3.2図 無限語長ディジタルフィルタ DF (A, b, c, d)

状態方程式

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k)$$

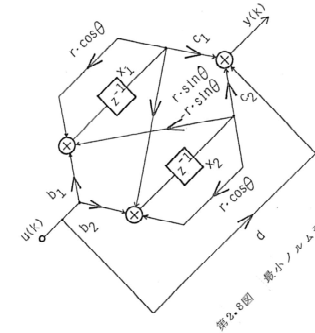
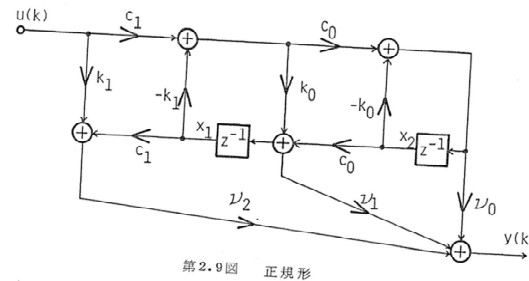
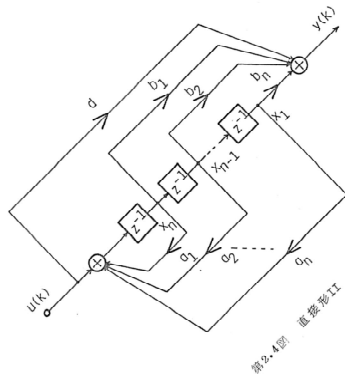
$$y(k) = cx(k) + du(k)$$

伝達関数

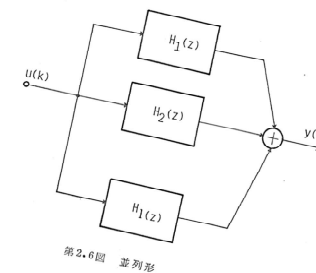
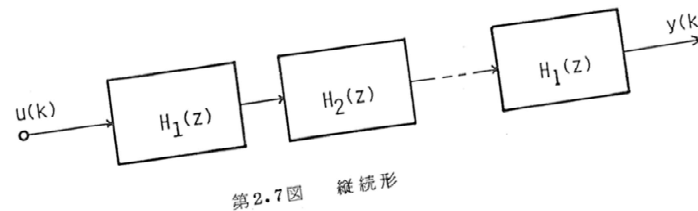
$$H(z) = c(zI - A)^{-1}b + d$$

量子化誤差が最小となるフィルタ構造を合成する（見つける）ことを目指す

$$H(z) = c(zI - A)^{-1}b + d$$



一番良いフィルタ構造は？



量子化誤差が最小となるフィルタ構造を合成することができた

	A	b	c	d	誤差
量子誤差 最小構造	0.9662 0.1012 0.0128 0.0121 -0.0824 0.9402 -0.0325 -0.0598 0.0333 0.0178 0.9697 0.1011 0.0122 0.0900 -0.1261 0.9503	0.0377 0.4213 0.1171 -0.0183	0.1031 -0.0111 -0.0213 -0.1823	0.869e-5	4.606
並列形	1 -0.8999 1.8929 1 -0.9573 1.9335	0.0363 0.0449	-0.5125 0.7219 0.4406 -0.05816	0.869e-5	144.449
直接形II	1 1 1 -0.8610 3.5511 -5.5166 3.8264	0.0006	0.0019 0.1047 0.0067 0.1085	0.869e-5	620232.425

状態方程式の係数を延々と眺めて、
量子化誤差の最小性の意味を考えて悩む

A

b

c

d

量子誤差
最小構造

0.9662	0.1012	0.0128	0.0121
-0.0824	0.9402	-0.0325	-0.0598
0.0333	0.0178	0.9697	0.1011
0.0122	0.0900	-0.1261	0.9503

0.0377
0.4213
0.1171
-0.0183

0.1031
-0.0111
-0.0213
-0.1823

0.869e-5

このフィルタ構造は、
なぜ量子化誤差最小となるのか？

対称性？
対角要素が1に近い？
平均的に分散した係数？

計測と制御の解説論文に出会う

伊里，児玉，須田：

“特異値分解とそのシステム制御への応用”，1982年6月

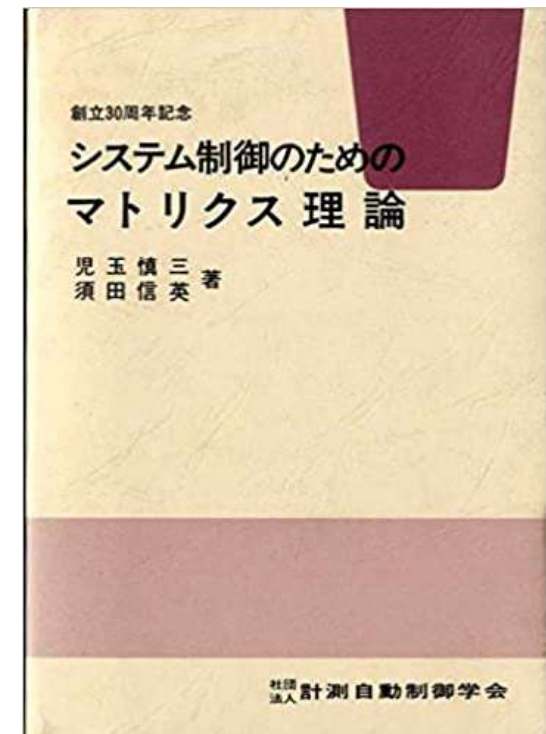
$$\bar{W} = TWT^T, \bar{M} = (T^{-1})^T M (T^{-1}) \quad (4.4)$$

と変換され，明らかに $\bar{W}, \bar{M}$ の固有値は W, M のそれと同一ではない(注²) ((4.4) から $\bar{M}\bar{W} = (T^{-1})^T MWT^T$ であるから積 MW の固有値は不変であることに注意).

ところで， W と M が正定であるから，(4.4)は T を適当に選んで $\bar{W}$ と $\bar{M}$ を同時に対角形とすることが可能であることを示している²⁾. 実際つぎの3つの型の対角化がいずれも可能であり^{14), 15)}, システム低次元化を考えるうえで興味がある.

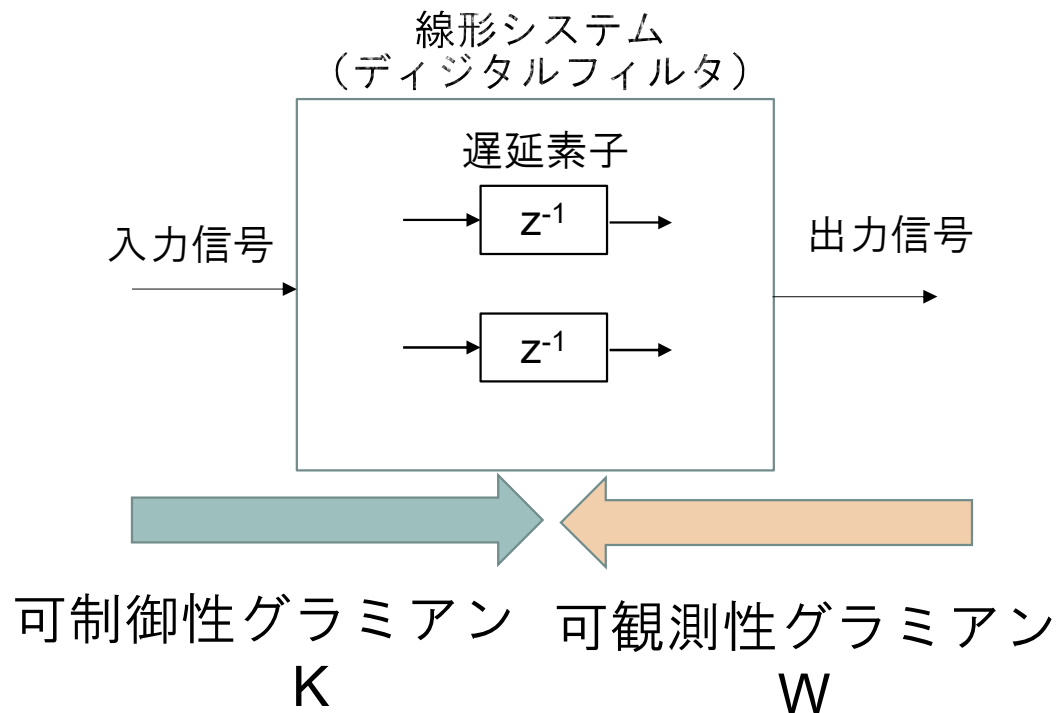
$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad & \bar{W} = I_n, \bar{M} = \Sigma^2, \\ \text{(ii)} \quad & \bar{W} = \Sigma^2, \bar{M} = I_n, \\ \text{(iii)} \quad & \bar{W} = \bar{M} = \Sigma \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここで $\Sigma^2 \triangleq \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2)$, $\sigma_i^2 \triangleq MW$ の固有値.



線形システムの動特性を理解するための 可制御性と可観測性グラミアン

B. C. Moore, IEEE Trans. , AC-26-1, 17/32 (1981)



システムは三つの典型的なタイプに変換できる

1. 入力正規形

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} \alpha^2 & 0 \\ 0 & \beta^2 \end{pmatrix}$$

2. 平衡形

$$K = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}$$

3. 出力正規形

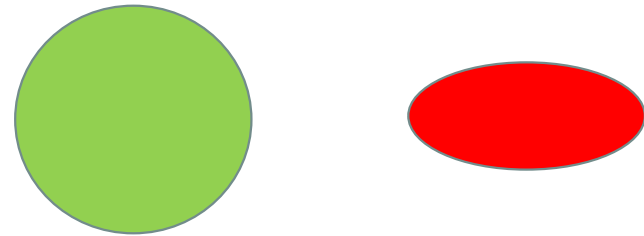
$$K = \begin{pmatrix} \alpha^2 & 0 \\ 0 & \beta^2 \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

α^2 と β^2 は行列積 KW の積の固有値, 伝達関数で決まる不変量 (2次モード) .

三つの典型的なシステムと対応する楕円

1. 入力正規形

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} \alpha^2 & 0 \\ 0 & \beta^2 \end{pmatrix}$$



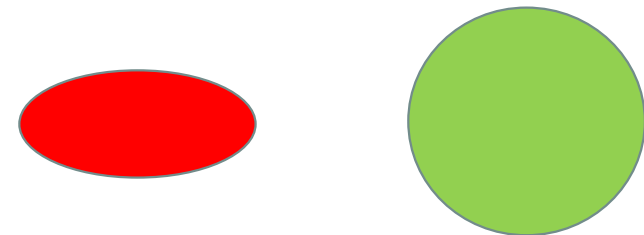
2. 平衡形

$$K = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}$$



3. 出力正規形

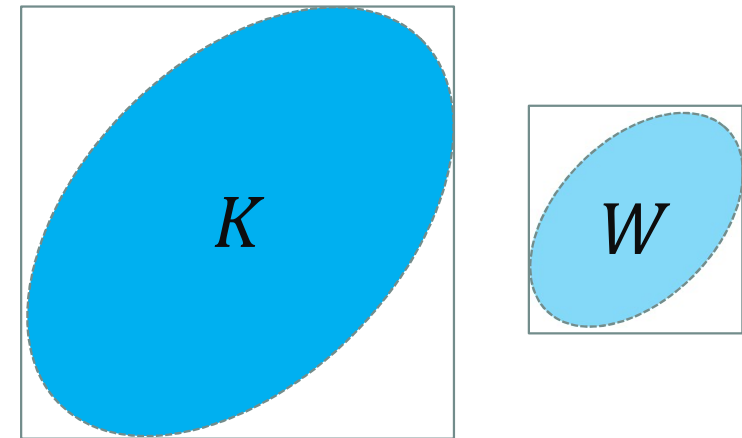
$$K = \begin{pmatrix} \alpha^2 & 0 \\ 0 & \beta^2 \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



平衡性の観点で量子化誤差最小性を見ると

量子化誤差最小の K と W は

$$K = \begin{pmatrix} 1 & * \\ * & 1 \end{pmatrix}, \quad W = \rho^2 K$$



- 量子化誤差最小のデジタルフィルタは
回転・スケールされた平衡形システム
- 量子化誤差最小フィルタを合成する最も簡単なアルゴリズムの提案
(5ステップを2ステップに簡単化)

研究の拡張 多次元ディジタルフィルタへ

- 1次元のディジタルフィルタの研究成果を

画像処理のための2次元ディジタルフィルタ $H(z_1, z_2)$ へ

映像処理のための3次元ディジタルフィルタ $H(z_1, z_2, z_3)$ へ

N次元ディジタルフィルタ $H(z_1, z_2, \dots, z_N)$ へ 拡張



- 多次元ディジタル信号処理
- 川又 政征, 樋口 龍雄, 朝倉書店, 1995年

余談 3：量子化誤差の最小化の研究から学んだ教訓

まず、最も簡単な場合（次数 $N = 1$ ）を考えよ。

それが解けたら、その次に難しい場合（次数 $N = 2$ ）を考えよ。

それが解けたら、一般の場合（次数 $N \geq 3$ ）を考えよ。

- 長い間悩んでいた問題は実は次のよう簡単な問題だった：

- 問題（1 次のフィルタの場合）：

次の $S(K, W)$ を最小化する K と W および最小値 S_{min} を求めよ。

$$S(K, W) = (K + 1)(W + 1)$$

ただし 条件として $KW = \theta^2$ （一定）， $K, W > 0$ である。

- 解答： 明らかに

$$K = W = \theta \text{ のとき, } S_{min} = (\theta + 1)^2 \text{ である.}$$

余談 4 : デジタルフィルタ設計の有名な公式の 誤りが発表から34年後に発見・訂正される. 自分で発見・訂正できなかったことが悔やまれる.

- インパルス不変法：アナログフィルタのインパルス応答を模擬するデジタルフィルタを設計する方法. 教科書に必ず紹介されている.
- 1966年に提案されたインパルス不変法(J.F. Kaiser)の公式の誤りが2000年に発見され訂正される.
(L.B. Jackson, IEEE SP. Lett. 7, 2000)

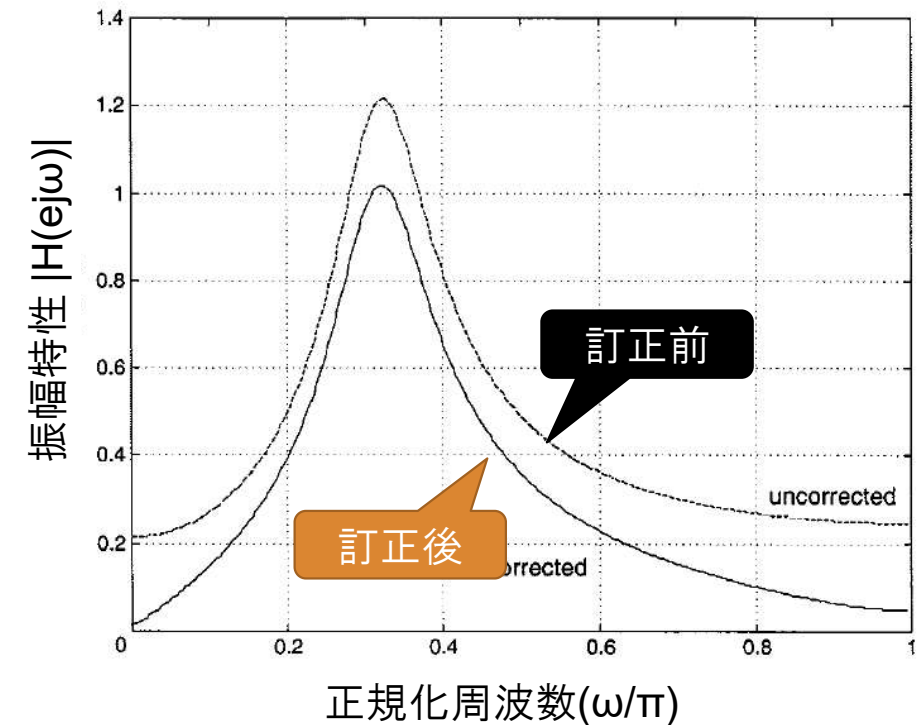


Fig. 1. Comparison of corrected and uncorrected bandpass magnitude responses from (11) and (4), respectively, derived from (14) with $a = 2$, $\Omega_0 = 10$, and $T = 0.1$.

公式の誤りの原因はラプラス逆変換のちょっとしたミス

正しい逆変換の公式（Bromwich-Wager積分）：

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{a-iR}^{a+iR} F(s) e^{st} ds = \begin{cases} f(t) & (t > 0) \\ \frac{1}{2} f(+0) & (t = 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

正しい逆変換の例：

$$H(s) = \frac{1}{s+\alpha} \Rightarrow h(t) = \begin{cases} e^{-\alpha t} & (t > 0) \\ \frac{1}{2} & (t = 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

21 電気・電子工学基礎シリーズ

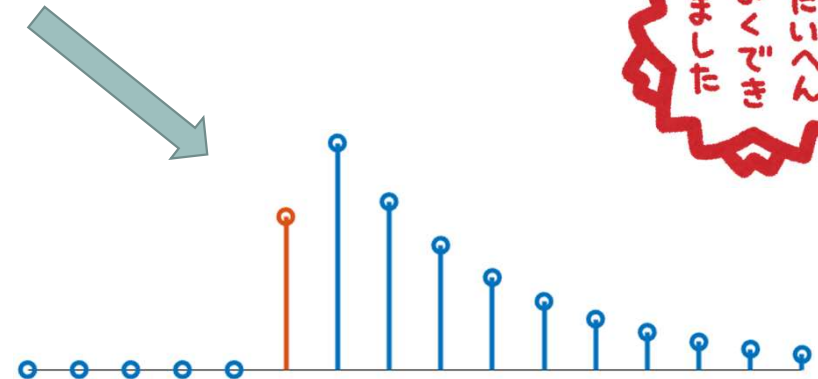
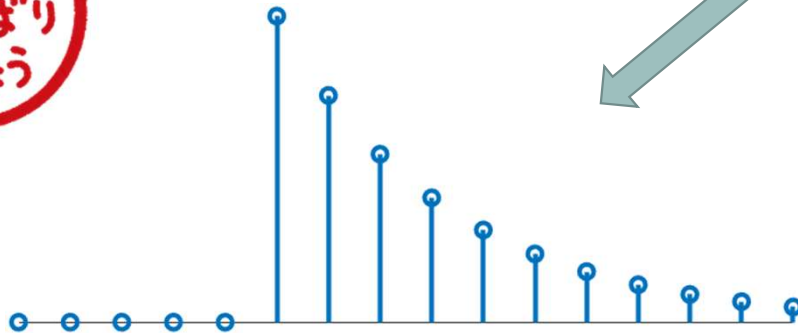
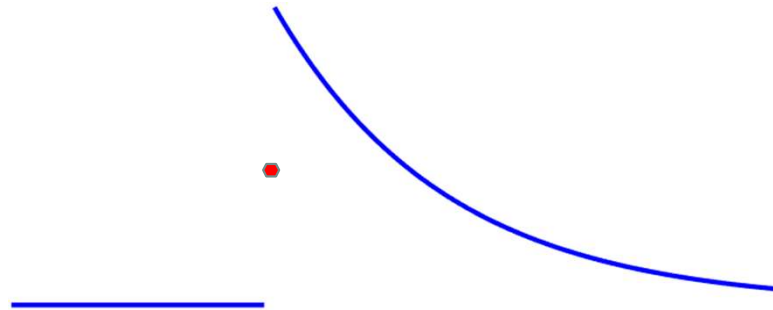
電子情報系の
応用数学

田中和之・林 正彦・海老澤丕道 [著]

朝倉書店

$t = 0$ で不連続なインパルス応答の適切な標本化方法はどちらか？

$$h(t) = \begin{cases} e^{-\alpha t} & (t > 0) \\ \frac{1}{2} & (t = 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$



インパルス不変法により設計される ディジタルフィルタの伝達関数

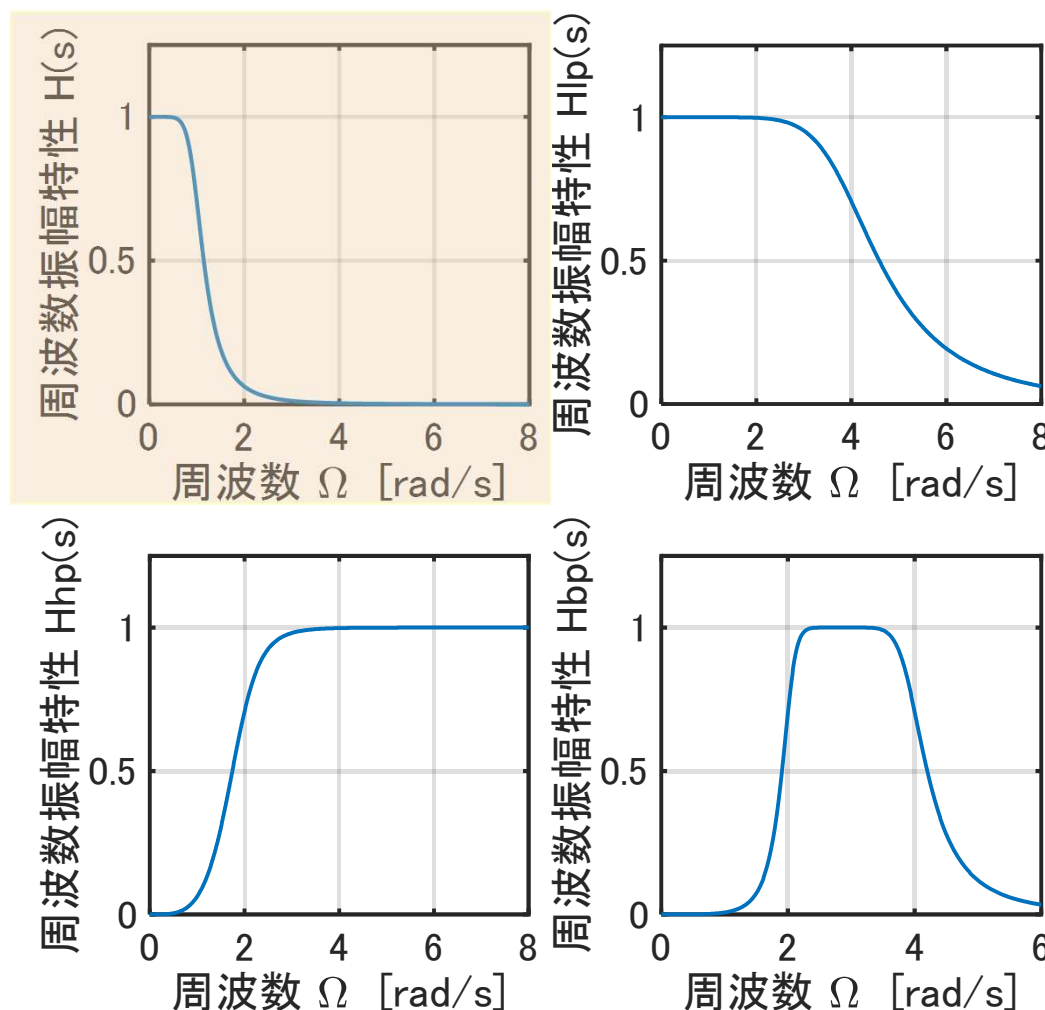
$$H_a(s) = \frac{1}{s+\alpha}$$




$$H_d(z) = \frac{1}{1 - e^{-\alpha} z^{-1}}$$


$$H_d(z) = \frac{1}{1 - e^{-\alpha} z^{-1}} - \frac{1}{2}$$

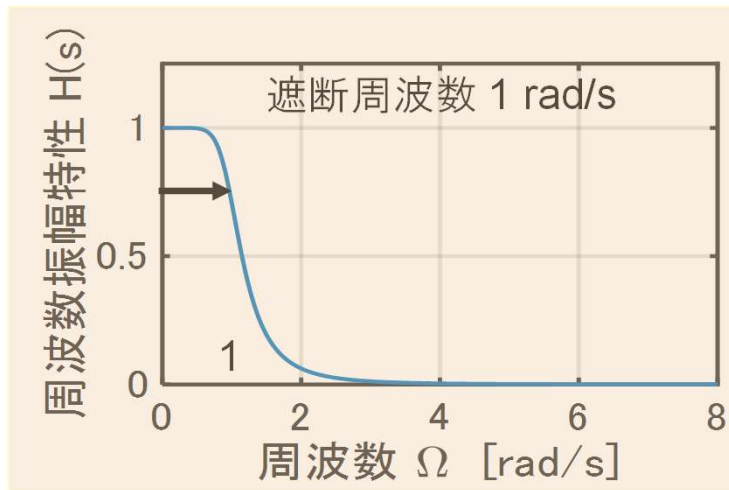
アナログフィルタの周波数変換による ゲラミアンKとWの変化は？



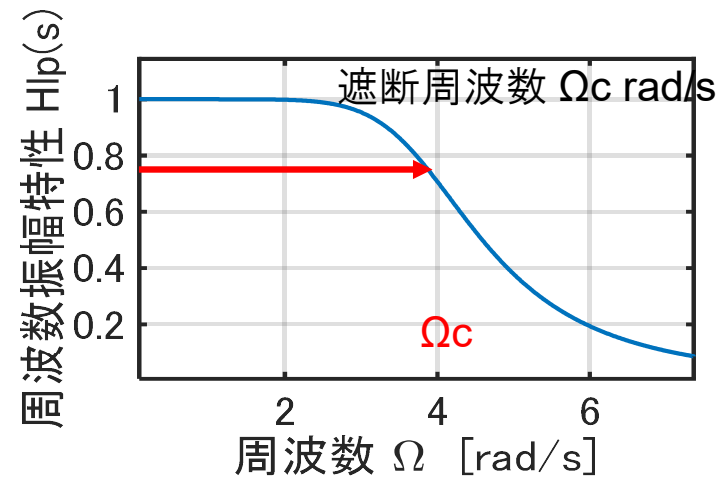
周波数変換によるアナログフィルタ
の設計法:

- プロトタイプアナログフィルタ
(低域フィルタ, 遮断周波数1rad)
の伝達関数 $H(s)$ を準備
- 低域-低域変換 $s \leftarrow \frac{s}{\Omega_c}$
- 低域-高域変換 $s \leftarrow \frac{\Omega_c}{s}$
- 低域-帯域変換 $s \leftarrow \frac{\Omega_0}{\Delta} \left(\frac{s}{\Omega_0} + \frac{\Omega_0}{s} \right)$

アナログフィルタにおける周波数変換に対するグラミアンのスケーリング則と2次モードの不変性



変換前



変換後

可制御グラミアン K
可観測グラミアン W

周波数変換 $s \leftarrow \frac{s}{\Omega_c}$

$$K' = \Omega_c K$$

$$W' = W / \Omega_c$$

- したがって $KW = K'W'$
2次モード(KW の固有値の平方根)不変性
- リアプノフの方程式とリカッチの方程式の研究に発展

アナログ回路網における一般の変数変換の影響

変換の名称	変換後の可制御・可観測グラ ミアンの積	変換後の 2次モード
無損失正実変換 $s \leftarrow F(s)$ ($1/F(s)$ は L と C から作られる 伝達関数)	不変 $K'W' = KW \otimes I$ (ただし多重化もあり)	不変 $\theta_i' = \theta_i$
正実変換 $s \leftarrow G(s)$ ($1/G(s)$ は, L, C, R から作られる 伝達関数)	減少 $K'W' \leq KW \otimes I$ (ただし多重化もあり)	減少 $\theta_i' \leq \theta_i$

アナログ回路網における研究の見落としを見つけ、一矢報いる

B.D.O. Anderson,
S. Vongpanitlerd, 1973
アナログ回路網の受動性の研究

水上, 今野, 越田, 八巻2002年ころから
発表（アナログの場合の周波数変換に対
するグラミアンと2次モードの不変性）

アナログ回路網の様々な概念・研究成果

研究成果の伝搬

研究成果の伝搬

研究成果の伝搬

デジタルフィルタの様々な概念・研究成果

研究成果の伝搬

Mullis, Roberts, 1976,
デジタルの場合の周波数変換に対す
るグラミアンと2次モードの不変性

2021年3月5日（金）

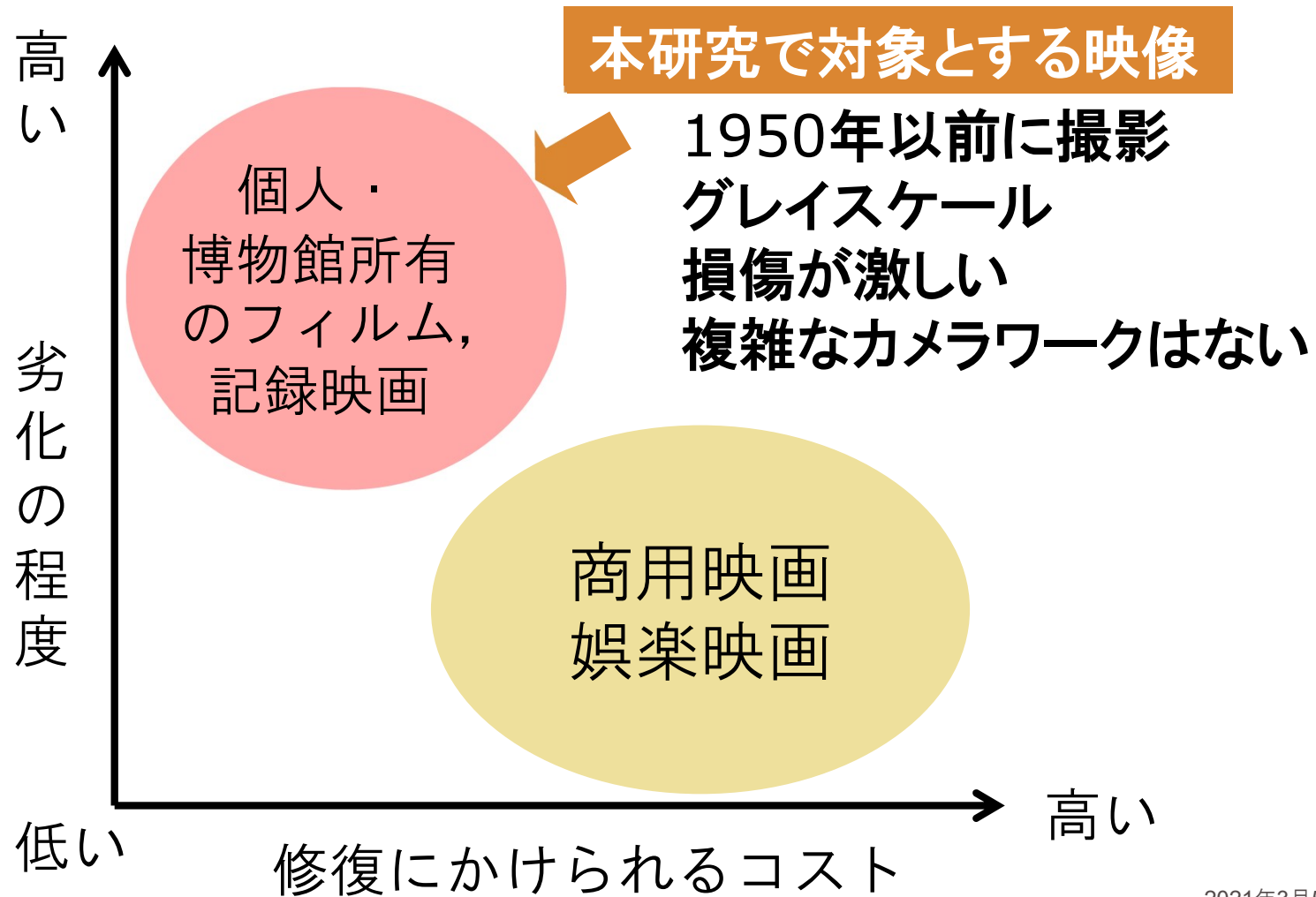
コンピュータによる映像の修復 (講義時間が残っていれば)



映像フィルムの歴史

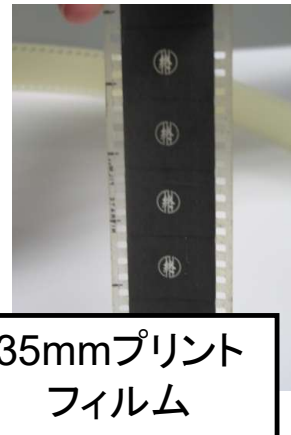
(朝日新聞の記事を改変 **2017年1月29日**)

1895	フランスのリュミエール兄弟が映画を発明
1896	米コダック社が映画用フィルムの販売を開始
1923	米コダック社が16ミリのフィルムとカメラを発売
1934	日本で富士写真フィルム社が創業
1970年代	家庭用8ミリカメラのブーム
2000年代	社会にデジタル化の波
2012	米コダック社が破産申請
2013	富士フィルムが撮影・上映用フィルムの生産終了



古いフィルム映像例

- 題目「観光仙台」
- 仙台市博物館所蔵
- 1930年代に撮影された映像
- 35mm白黒プリントフィルム（ナイトレートフィルム）
- 13224フレーム



古いフィルムのスキャン作業



デジタルスキャナ

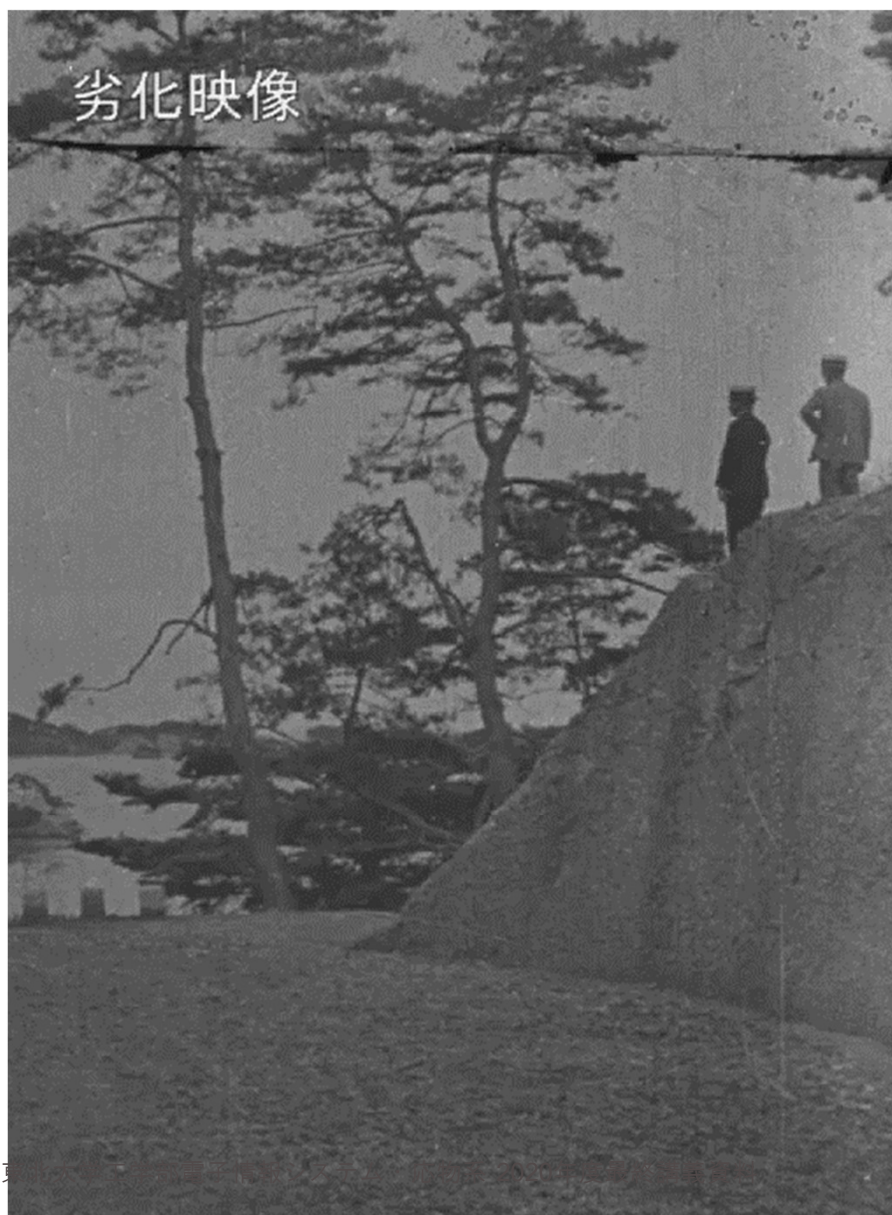


スキャン風景

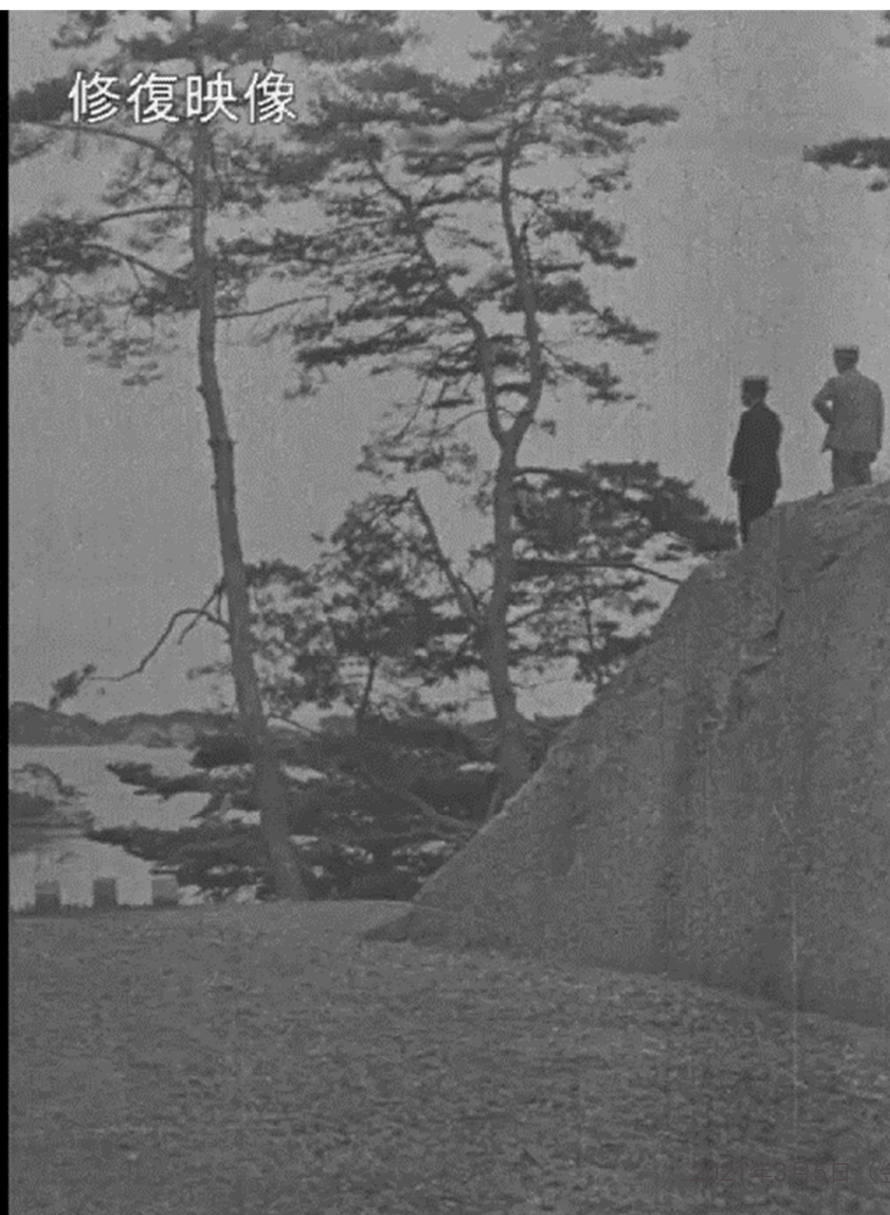




劣化映像



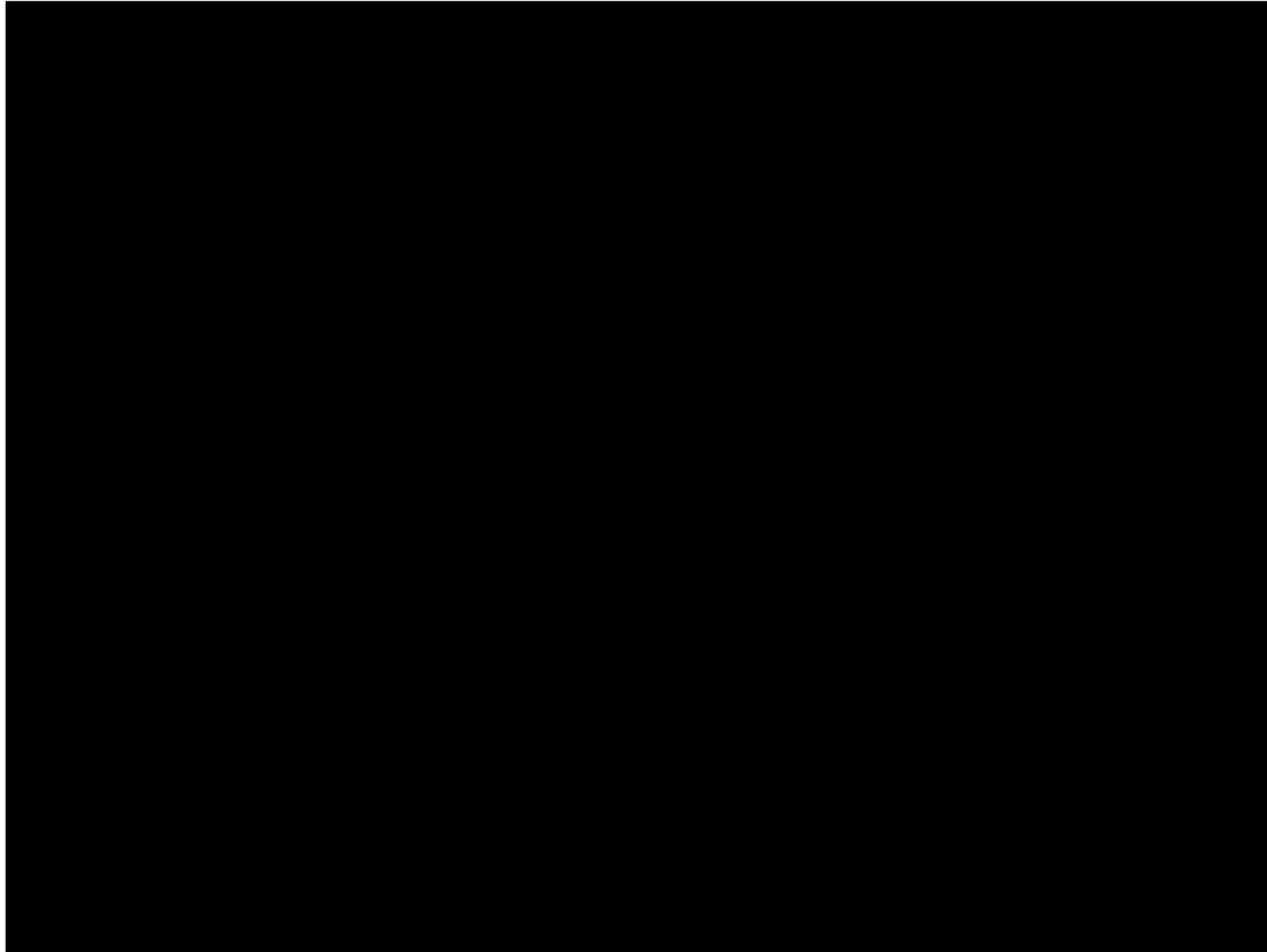
修復映像



昭和8年6月5日(金)

余談 5 : 映像修復と東日本大地震

1号館の取り壊しと新築の記録



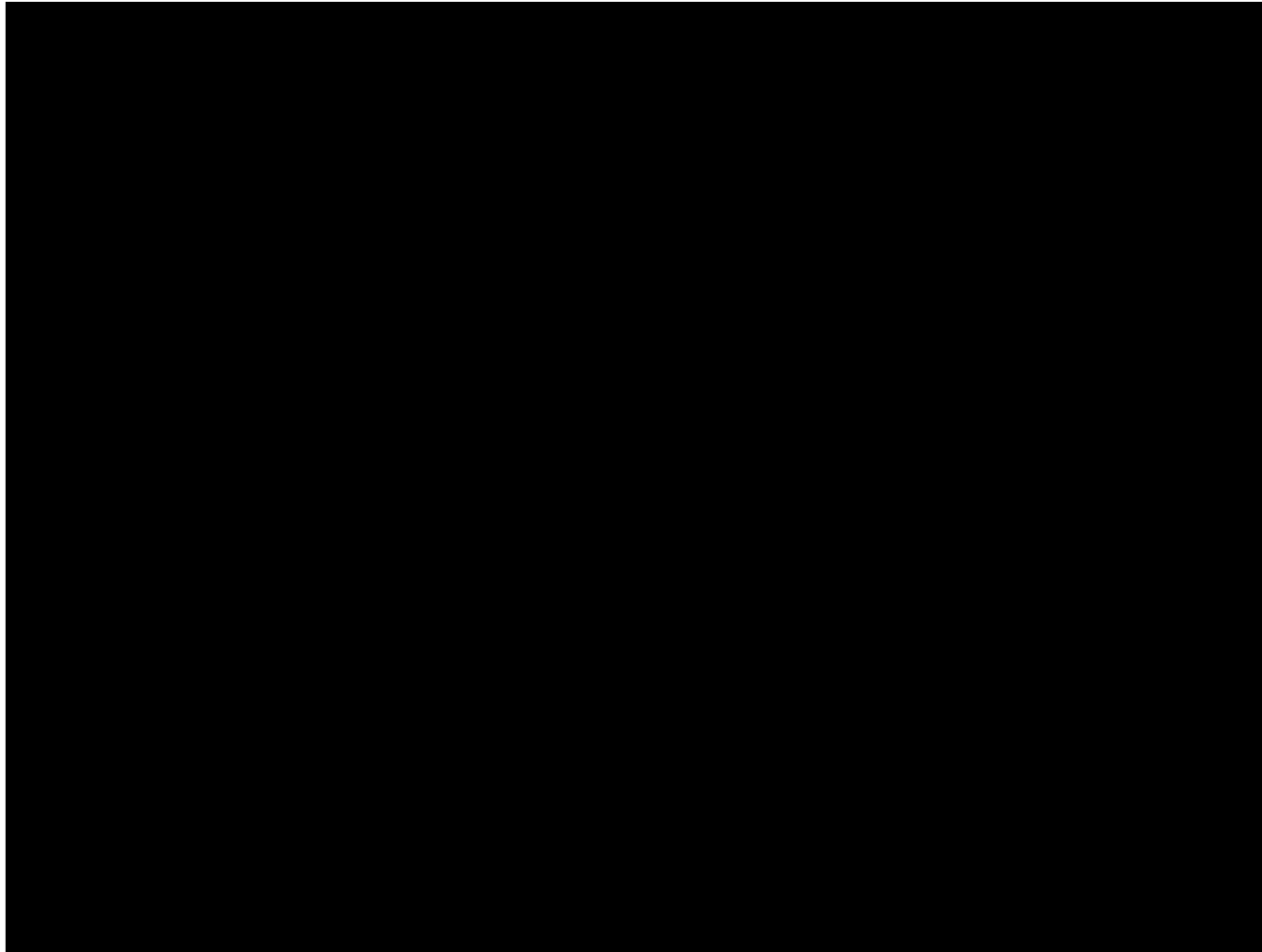
2021年3月5日（金）

44

安定化後



フリッカ除去後



余談 5 終

25年間の研究室運営・活動の総まとめ

博士論文（18名）

- 25年間の研究室運営・活動に加わったメンバー
- 准教授：G. Stoyanov, 阿部正英
- 助手・助教 阿部正英, S. Maha Sami
越田俊介
八巻俊輔
- 博士修了生 18名
- 修士修了生 112名
- 学士卒業生 106名

1次元および多次元
デジタルフィルタ
越田 俊介, 八巻 俊輔,
河野 健,
Hyuk-Jae Jang

遺伝的・進化論的アル
ゴリズム
上坂 和義, 阿部 正英,
李 永浩, 李 忠縞

画像・映像処理
張 曉勇, 南 相哲,
袁 帥, 萩原 瑞木,
安孫子 俊瑞, 魏 浩千

適応信号処理
Md. Akhtar, Md. Tufail
J. Seiji Oshino-Ortiz,
S. Maha Sami

教育上のいくつかの試み (さらに講義時間が残っていれば)



実現したかった授業

- 教授になりたてのころ
- 「学生の日本語能力に心配があるので、
科学技術分野の日本語の教育の科目を作ってはどうか
でしょうか？」と提案したところ
- 「日本語はだれでもできるのに、そんなものが必要
なの？ いったい何を教えるの？」などと叱られた

表現のうまさを追求する国語の技術ではなく、
明解・簡潔・論理的な日本語の作文技術の代表的書籍



主題の選定，目標規定文
パラグラフ，トピックセンテンス
文の構造と文章の流れ
はっきり言い切る姿勢
わかりやすく簡潔な表現

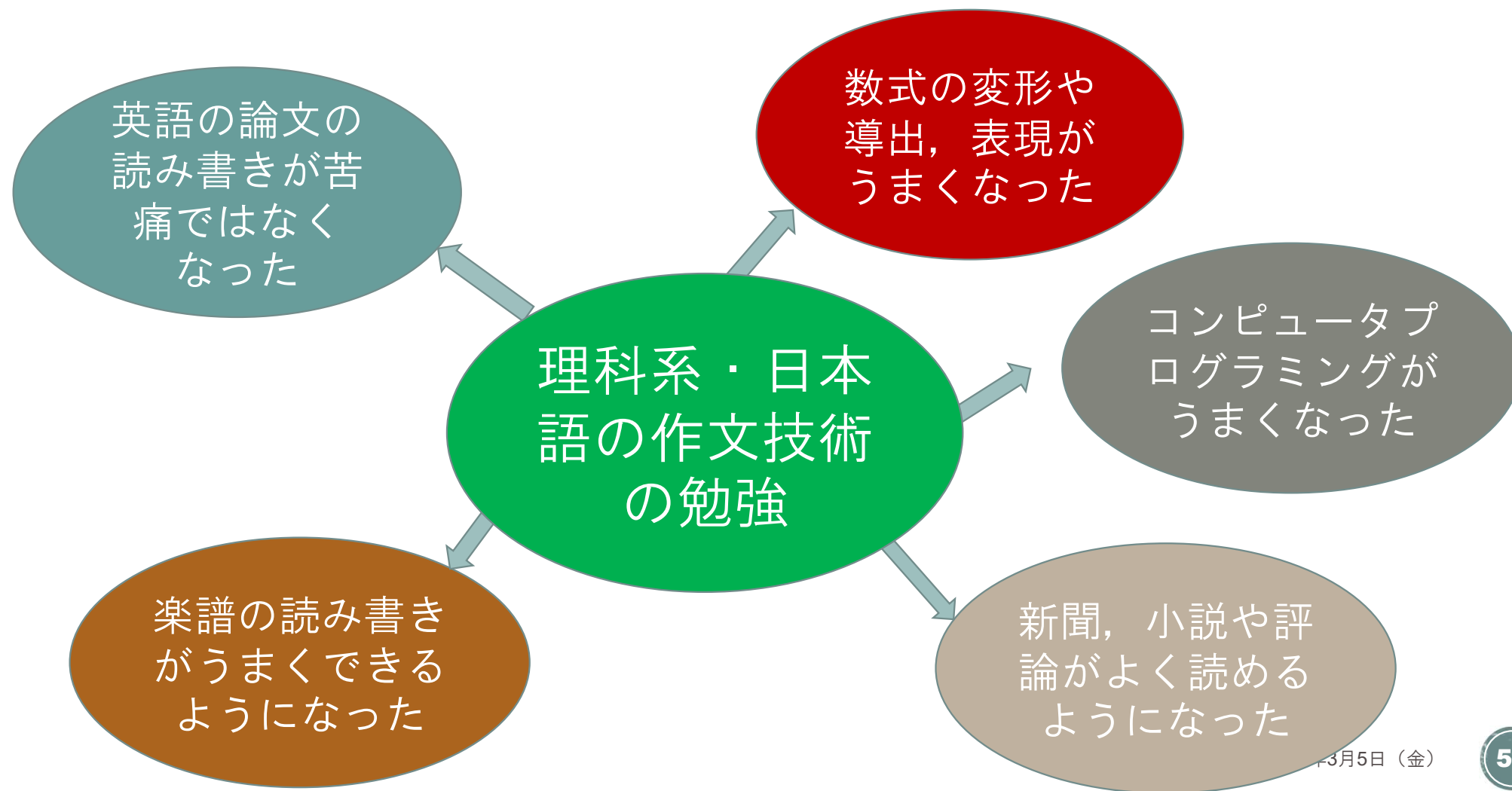
修飾の順序
句読点のうちかた
漢字とカナ
助詞の使い方
段落

「理科系の作文技術」と「日本語の作文技術」を必ず読んでから卒論を書くように指導した学生からの読後の感想

- 普通のことしか書いていないので、つまらない。
- 何を言っているのか分からない。
- ぜんぜん実感がわかない。
- 役に立たない。
- 内容が古めかしい。
- 自分には関係ない。

しかし，学生が卒業して会社に入ると作文技術を勉強してよかったとみな言っている。

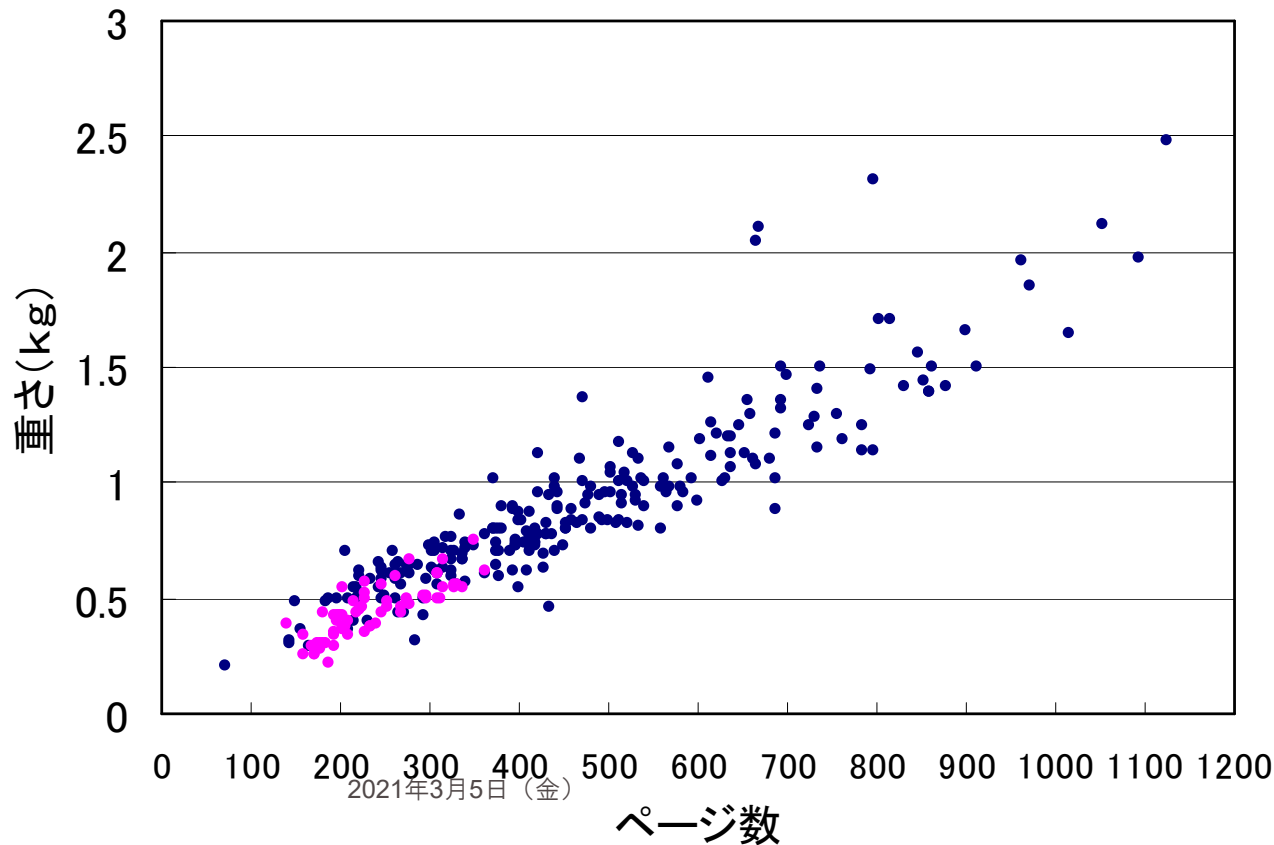
作文技術を勉強後の個人的な副次効果



日本の大学の教科書問題

日本語の大学生向け教科書はページも内容も薄すぎる。

DSP教科書・専門書の比較



平均では

日本語教科書：
229頁, 432g

英語教科書：
499頁, 993g



青葉工業会ニュース コラム「薫風」に 「日本の大学の教科書への不満」を寄稿



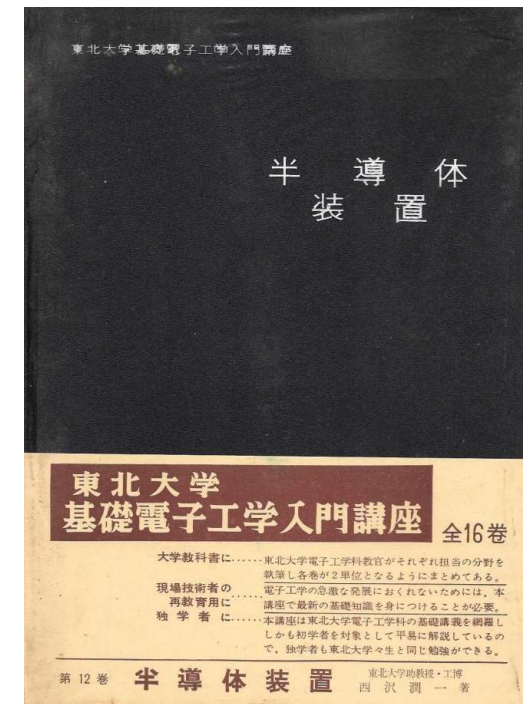
- 日本の教科書は説明が簡略化されていて、図版も例題も少なく、結果として味気ないものになっている。

- 米国の教科書は、色々な知識が盛り込まれていて、図版も例題も豊富で、先生方も授業で活用している。現役の先生方からの反応はなし。

- 出版社いわく「日本の教科書は、図版も例題も豊富で、先生方も授業で活用している。名譽教授の先生方から、数多くの賛同と励ましをいただいた。

小池勇二郎 教授) 編集 基礎電子工学 入門講座 (全 16 巻) の 序文 (昭和 3 4 年 1 2 月)

- ▶ 日ごろ私はアメリカの教科書のよく書かれているのに関心している。名著と呼ばれるもののものは、第一流の研究者・教育者によって書かれているが、しかもなお、その著述に費やされた長年月にわたる細心の注意を読み取るとき、真に敬服の念を禁じ得ない。よい教科書は決して資料の集成や羅列から短時日で出来上がるものではない。また著者の研究業績を誇示する意図から生まれ出るものでもない。高邁な科学思想を背景とし、永年にわたる教育経験を通して、にじみ出る情熱なくしては、よい教科書は書かれないであろう。



- 教員の皆さんへのお願い

500ページ・1kg・1万円の教科書を書いて下さい.

- 出版社へのお願い

500ページ・1kg・1万円の教科書を出版して下さい.

- 学生さんへのお願い

500ページ・1kg・1万円の教科書をちゃんと買って
しっかり勉強してほしい.

- これから電子書籍が普及すれば本の重さは無視できる.

まとめと謝辞

- 卒論から退職までの長い間、3種類の演算（乗算，加算，遅延）の組み合わせの問題を研究対象としていました．たった3つの演算の組み合わせでも，無限と言ってもよいほどの興味深い課題があった．
- 学生として9年間，教員として38年間，合計47年間もの長い間，東北大学電気情報系に活動の場を頂くことができ，心より感謝いたします．皆様の益々のご活躍をお祈り申し上げます．

