

動態經濟模型에 對한 시스템 理論的 批判 (II)

R. E. Kalman

〈스위스연방工科大學校教授·工博〉

朴 永 文譯

〈서울대工大電氣工學科教授·工博〉

〔註〕本文은 今年 6月 23~30日 美國 뉴욕크大學校에서 開催된 第1次 國際方策解析 및 情報시스템심포지움(The First International Symposium on Policy Analysis and Information System)에서 招請演士로서 講演한 시스템理論分野의 預學 K.E. Kalman 教授의 講演原稿를 번역한 全文으로 지난號의 계속임.

7. 시스템理論의 犯則(Crimes)

至今까지는 너무 딱딱한 內容만 이야기하였으므로, 분위기를 돌리기 위하여, 다음에는 經濟學 分野에서 아무렇게나 4問題만 골라서 論議하기로 하자.

(a) (프레스터)-미이도우즈 世界模型(The (Forester)-Meadows World Model)

미이도우즈 研究팀의 研究結果를 參照할 것 (1972).

이 模型은 非線型差分方程式시스템으로 構成되어 있으며, 그 解析은 시뮬레이션으로 行하고 있다. 이와 같은 시스템에서는 거의 어떠한 事象도 야기되는 것이 可能한 것이다. 그 實例로서 메이(May, 1976)의 調査 文獻을 參照하기 바란다.

이 方程式을 構成하고 그 性質을 調整하는 先驗的 推論(a priori)을 위한 構成原則(organizing principle)이 없다면, 一般性을 갖는 理論的 根據에 對하여 오히려 複雜하고 번덕스러운 作爲만이 期待된다.

이와 같은 構成原則은 理論經濟學에서는 適用되지 아니하므로, 方程式이 現實을 表現한다는 純眞한 信念은 確實이 充分하리만큼 通하지 아니한다.

미이도우즈 模型을 支配하는 것처럼 보이는 理念에 對하여 뚜렷한 異論을 提起하는 여러 文獻중에서 버어물렌과 드중(Vermeulen and De Jong, 1977)의 시스템理論의 研究에 對하여만 引用 普及하기로 한다.

이 研究에서 미이도우즈 方程式 시스템의 感度를 分析한 결과 假定한 패러미터와 初期條件이 조금만 變化하여도 觀察된 作態는 크게 變化하게 된다는 것이 實證되었다. 여기서, 不過 2-10% 程度의 패러미터 變化는 經濟 環境의 通常的인 不確性值(30~100%程度)에 比하면 매우 적은 값이나, 미이도우즈 事例計算値는

全的으로 使用할 수 없을 程度로 쓸모없게 된다. 따라서 이 模型의 作態는 패러미터 不確性 狀況下에서는 믿을 수 없으므로, 이 模型에서 얻는 一般的인 結論도 受諾할 수 없는 것이다.

이 點과 關聯하여 特히 言及코져 하는 바는 미이도우즈 模型의 科學的 根據가 純粹한 시스템理論의 檢討에 依據하면 壽命이 끝났다는 點이다. 즉, 패러미터, 變數 또는 方程式의 具體的 意味에 對하여 討議조차 할 必要가 없겠다 하겠다. 미이도우즈 模型에 內包되고 있는 經濟學의 情報의 “價値(value)”는 매우 낮거나 또는 오히려 適用되지 않거나 또는 너무나 形式論理 感性的(context sensitive)임이 分明하다. 어쨌든, 이 模型의 豫測能力은, 實證한 바와 같이, 初步的인 시스템理論의 立場에서 볼 때 全無한 것이다.

實은 시스템理論의 接近方法이 미이도우즈 模型에 對하여 그 模型의 創始者인 미이도우즈보다도 오히려 버어물렌과 드중으로 하여금 더 나은 洞察力을 갖게 하였다. 그 理由는 이 模型의 感度分析이 實對象에서(이 模型이 實對象과 相關성이 있다고 가정한다면) 經濟的 또는 政治的 構造의 再編成에 依한 그 시스템 自體의 變化를 야기시키는 “壓力點(pressure points)”을 밝혀 내었기 때문이다. 미이도우즈 등은 시스템理論의 透徹한 論理로 檢證하면 無意味한 經濟 “法則” 및 데이터에만 全的으로 依持하였기 때문에 그 自身이 세운 模型이 內包하는 뜻을 理解할 能力이 없었던 것이다.

模型樹立에 對한 無能을 쓸데없이 誤解하는 미이도우즈의 研究에서 緣由된 흥미로운 시스템理論의 問題가 있는데, 그것은 다음과 같다.

즉, 그 作態가 局部的 變化에 非正常的으로 敏感한 抽象的 方程式 시스템 模型化 手段으로서(無用함)과 作態가 正常的인 方程式 시스템(古曲的인 物理方程式의 경우)과의 區別이 可能한다.

* 本稿는 電氣學會誌 第28卷 第9號의 계속임.

(b) 景氣變動周期模型(Business Cycle Models)

1950年代 中期에는 安定한 非線型振動(리미트사이클) 特性을 갖는 方程式시스템을 構成하여 이를 景氣變動周期의 解析에(可的) 適用하려는 試圖가 大流行이었다.

이러한 試圖도 미이도우즈模型에서 경험한 錯覺, 混鈍의 더욱 두드러진 實例라 할 수 있다. 非線型 微分方程式에 關한 가장 基本的 知識에 依하면, 非線型動態 시스템의 周期振動을 위한(抽象的) 機構(mechanisms)의 可能動類數는 엄청나게 많다는 事實이 立證되고 있다(그 實例로서 칸만(1957)의 類型을 參照할 것). 이들 抽象的 機構中의 어떠한 것도 “經濟問題의 解明”에 副應될 수도 있고, 副應되지 못할 수도 있다. 本人의 見解로는 景氣變動 周期의 說明은 經濟學의 問題가 아니라 시스템理論의 問題에 屬하는 것으로 생각한다. 왜냐하면, 經濟理論은 對象 機構間의 相互作用에 關하여 詳細하게 說明할 充分한 能力을 갖고 있지 못하기 때문이다(이런 意味에서, 人間 頭腦의 機能遂行도 生物學의 問題라기보다는 오히려 시스템理論의 問題에 屬하는 것이라 하겠다).

確率의 要素(stochastic elements)를 經濟力學에 導入하기란 그렇게 簡單한 것이 아니다. 더욱이, 方程式을 單純히 構成만 하는 것은 전혀 無意味하다. 方程式을 어떤 總體의 原則의 通用 結果에 따라 導出하지 아니하면, 그것은 特定의 性質을 喪失하기 때문에, 어떠한 種類의 作態도 나타낼 수 있음을 意味한다(사뮤엘선의 “經濟學에 있어서의 非最大問題”(Samuelson, 1971, section on “Nomaximum problem in economics”)를 參照할 것).

사뮤엘선이 最大原理(maximization principle)를 科學의 內容性을 지닌 方程式(物理學의 경우)을 얻을 수 있는 指針이라고 過度하게 強調하는 것에 對하여 本人은 絶對 同意할 수 없다.

이것이야 말로 興味로운 시스템이라고 速斷하는 것은 너무나 純眞한 생각이다. 實際로, 興미를 끄는 大部分의 시스템(아마도 經濟的 分野에서조차도)은 最大化를 考慮함으로써 얻어지는 것이 아닐 뿐만 아니라 그 構成原理(organizing principles)도 現在로서는 不完全하거나 전혀 未知이다.

(c) 時系列의 季節의 調節

時系列(time series)을 “季節의 調節하는 것(seasonally adjust)”은 大部分의 工業國의 경우 一種의 政治的 미신이라 할 수 있다.

季節의 調節의 理論의 根據는 4月 1日이 12個月 時間隔을 두고서 周期的으로 反復되므로, 모든 經濟事象

따라서 全體的인 經濟活動을 記述하는 高次數의 벡터 時函數의 投影인 經濟學의 時系列도 同一한 時間隔을 두고서 反復될 것이라는 假定에 依據한 것이다. 그리고 모든 (經濟學的) 時系列은 周期成分이 內包되고 있어, 예를들면, 失業에 對한 보다 正確한 單一 指數尺度를 求하기 위하여는 이와 같은 周期成分을 除去하여야 한다는 事前 및 任意 假定을 前提로 한 것이다.

(아직까지는) 非線型 時系列分析法과 같은 것이 發見되지 않고 있으므로, 季節調節 作業은 理論과 實際に 있어서 線型數學의 領域에 屬하고 있다. 前述한 二例와는 달리, 이 경우는 시스템理論을 適用함으로써 判斷하면 매우 有力한 結果를 얻을 수 있는 狀況下에 있다.

線型시스템理論에서 導出된 結論을 要約하자면 매우 簡單하다. 萬一 데이터속에 周期成分이 정말 包含되고 있다면, 그것은 데이터의 性質이므로 그 데이터의 分析에 依하여 그것을 얻는 것은 可能하다. 그러나 그것을 미리 假定해서는 아니된다.

그러나 周期條件이 正確하게 充足되는 경우에 限해서, 嚴密한 周期成分이 存在하는 것이다. 即, 예를 들자면, 每年 크리스마스 보너스의 額數가 同額이 아니면, 크리스마스 보너스가 周期成分이 아님을 意味한다. 이와 같은 嚴密條件이 經濟學의 風土에서 實際로 充足될 수 있는지를 論議하려는 것은 오히려 우수광스러운 일이다. 構造의 觀點에서 볼 때, 經濟는 每年 正確하게 同一할 수는 없기 때문이다. 다만 한 가지 考慮事項을 言及하자면, 經濟의 高度成長率, 供給不足, 스트라이크 등은 年間不變 周期의 假定처럼 初步的인 線型分析의 範圍를 초월하는 非線型效果를 導入케 한다는 것이다.

換言하건데, 正確한 豫測性向模型 構成에 關한 限, 季節調節에 對한 모호한 經濟學의 議論은 正確하고 充分한 知識에 到達하지 못하므로, 實際의 데이터 性質에 關係없이 事前에 이를 받아 받아들여야 할 것이다.

이것은 感情의 問題가 아니라 數量的 問題이다. 만일 失業率을 10^{-3} 의 精度로 豫測하기 바라는 경우(시스킨(Shiskin, 1978 參照), 數量的 事前理論(a priori theory)(洞察力)은 本人이 이미 봉자한 바 있는 營성한 經濟學의 推論보다 훨씬 우수함에 틀림없다. “季節調節”을 基本的으로 假定하는 것 自體가 데이터를 偏奇시키고, 數量的, 科學的 急當性이 없는 偏見을 介在케 한다는 點은 容당 야기될 수 있는 일이다.

이러한 狀況에서의 傳來의 시스템理論의 知惠는 任意로 假定한 季節成分을 檢出하기 위한 데이터의 偏奇處理值가 雜音을 除去하기보다는 오히려 雜音을 첨가

하는 것이라는 것을 알고 있다.

成功的인 經濟政策을 찾기 위해서는 時定數의 1배 또는 2배 期間 以前까지 過去(예를 들면 美國經濟에서는 3~5年前 分)의 未調節된 깨끗한 데이터를 公表, 使用하는 것이 훨씬 나을 것이다. 이것은 적어도 制御理論의 不可避性에 基因한다고 보겠다.

明白히 말하건대, 失業의 時系列에 關한 本人의 批評은 純全히 시스템理論의 論理에 立脚한 것이므로, 基本 데이터의 意味에 關한(極히 急當性을 지닌) 經濟學의 留保問題와는 아주 無關하며 그것에 添加되는 셈이다(펠러너(Fellner, 1978) 參照).

이 狀況은 플리에 해석(Fourier analysis)의 “應用” 時에 直面하는 狀況과 다를 것이 없다. 世界間隔(bounded interval) 內에서는 어떠한 함수도 等間隔 周波數 成分의 플리에級數로 任意 近似化할 수 있다는 數學의 事實은 시스템 理論과는 相關性이 없다. 왜냐하면, 等間隔 周波數成分을 갖는 正弦波 近似函數를 假定한 것이 바로 데이터에 事前偏見을 注入하였기 때문이다.

現象이 周期性이 強한 경우(피아노 弦의 경우)에는 플리에方法이 썩 잘 들어 맞는다는 事實을 實際로 經驗하였다고 하여 놀랄 바는 없다. 왜냐하면, 이 경우의 事前偏見은 溫順하여(現象과는 크게) 어긋남이 없어 이것이 貴重한 情報을 提供하기 때문이다. 그러나 데이터가 根本적으로 이와는 相異한 機構에 依하여 生成되는 경우에는 플리에法이 썩 들어 맞지 아니할 것이다(칼만(1979)를 參照할 것).

(d) 弗貨價値 下落이 美國內 인플레이션에 미치는 影響(Effect of Dollar Depreciation on US Domestic Inflation)

우리가 어리석지도 新聞을 믿는다면, “美(弗)貨의(外貨에 對한 相對的) 價値下落은 美國人이 海外旅行을 하지 아니하면 美國人에게 아무 影響이 없게 된다.”

그러나, 專門的인 經濟分析은 그렇게 單純한 것은 아니다.

基本的 케인즈模型에 依하면, 貨幣價値의 下落率이 最高로 國家經濟上의 海外交易率과 比等하게 될 때, 美國의 경우에 對하여 例를 들건데, 弗貨의 價値가 相對的으로 約 8% 以下가 될 때에는, 國內 物價의 上昇이 도리혀 더 높은 物價上昇의 形態로 作用한다.

한편, 所謂 世界通貨理論(global monetary theory) [13]에 依하면, 그 影響은 窮極的으로 100%에 이르게 된다.

以上 두 陣容間의 相反된 論爭點은 놀라우리만큼 客觀的으로 또한 分明하게 휘트만(Whitman, 1975, 1976)

에 依하여 提示되고 있다.

케인즈模型이나 世界通貨理論家 模型은 모두 經濟現實의 一短面을 把握코져 試圖하고 있음에 틀림없다. 그런 點에서, 이 模型들은 直觀的으로 볼 때는 貴重하다. 그러나, 이것들이 經濟시스템을 現實 그대로 模型化하는 데 있어서는 거의 奇與하지 못하고 있어, 그것이 가져다 주는 情報價値는 너무나 겸손스러운 것이다. 要는 必須的인 問題는 動態方式(dynamic type)에 關한 것임은 勿論이다. “短期”, “長期”라는 自己 비호用 用語는 自己가 樹立한 單純한 模型이 實對象 問題의 動態의 局面을 解析할 能力이 없음을 反證하는 것이다.

經濟理論이 어떻게 되어 있건, 豫測能力을 갖는 模型의 樹立에 經濟理論을 導入하는데 따르는 實効性은 現在 極히 限定的이며, 앞으로도 그럴 것이다. 이 模型의 씨나리오(scenario)는 방대한 프로그램을 넣어서 나오는 計算機의 거의 쓸모없는 作態 即 出力을 豫測하는 것과 類似하다는 點을 명심하는 것이 慎重을 期하기 위한다는 立場에서 타당할 것이다.

케인즈派는 “計算機는 곧 많은 數値를 만들어 낼 것이다”고 말하며, 世界通貨理論家는 “計算機는 끝내는 멈추게 될 것이나, 그때는 始動할 때보다는 溫度가 올라갈 것이다”고 말한다. 그러나, 이와 같은 말은 無意味하게, 實對象시스템과는 無關하거나 또는 誤導적이다. 프로그램이 實際로 어떠한 것인지를 알아내는 데에는 다른 代案이란 있을 수 없는 것이다.

以上 論議한 經濟問題에 있어서는 國內物價水準에 對한 外換率의 變化效果가 餘他的 經濟와 粗하게 聯關되어 있을 경우에 限해서 簡單하고 心빙성이 있는 解答을 期待할 수 있다는 點을 또한 명심하는 것이(시스템分野의 理論에서 얻은 傳來的 知惠를 빌려서 거듭 申明하는 것이) 좋을 것이다.

現實이 粗하게 聯關되어 있으면, 古曲科學의 狀況下에 놓여 있으므로 問題視될 것이 없다(이 경우에는 아다도 問題가 이미 解決되었을 것이다). 그러나 한편, 現象이 밀하게 聯關되어 있을 경우에는, 이것은 시스템 決定的 問題가 되므로, 온갖 難關이 수반하게 된다. 實例(c)의 議議를 想起할 것.

現代의 解析的 經濟理論에서는 이와 같은 初步的 實相(fact of life)을 거의 깨닫지 못하고 있는 것이다.

8. 總括(Summary)

天文學, 物理學, 電氣工學 等の 傳統的 科學에서는 시스템 模型化는 主로 事務的(장부기장과 같은) 것이어서 一般의 性格의 새로운 洞察力을 提供하지 아니하지만, 特定 시스템의 作態에 關한 數量的인 데이터를 얻는

때에는 便利하다.

古曲의인 “法則”이 急當性을 갖는 領域을 벗어나면, 狀況이 劇的으로 달라진다. 이 경우에는 模型의 方程式을 樹立하는 뚜렷한 處方法이란 있을 수 없으며, 模型樹立의 一般의 “價値”는 非確性(fuzzy, 우리나라에서 이 用語에 對한 適切한 번역어가 아직 없음)을 지니고 있다.

模型樹立과 關聯하여 完全히 相異하나 通常的으로는 서로 뒤엎여 있는 2가지 論據가 있는데, 그것은 다음과 같다.

(i) 시스템 部類(class)에 對하여 새로운 洞察力을 얻는 것.

(ii) 利用 데이터를 보다 콤팩트(compact) 形態로 凝縮(condense)하는 것.

첫번째 論據는 科學的 探究에 關聯된 모든 節次나 條件에 拘束된다. 模型이 이와 같은 自己自身の 內部論理에 違背된다면, 利用可能하고 永久的인 어떠한 것에도 이르지 못함을 明白하다. 그러나, 不幸하게도 模型論理는 通常的인 아리스토텔論理(Aristotelian logic) 보다는 훨씬 抽象的이며, 미묘하여, 우리가 바라는 바와 같이 成功하기란 至難한 것이다.

두번째 論據는 本人의 見解로는 첫번째 것보다는 優越하다고 본다. 여기서는 模型에 依하여 要約코져 하는 使用 데이터에 關聯된 特定 分野에 對한 것 보다는 오히려 模型樹立理論에 對하여 보다 專門的인 知識을 要請하고 있다. 이것은 여러 “技法(arts)”이 活用을 一般的인 業으로 하는 사람들에게는 別로 유쾌하지 못한 事實이라 할 수 있다. 그러나, “시스템決定的” 分野에서 進歩를 이룩하기 위해서는 이 事實을 받아들이지 않으면 아니될 것이다.

本人이 누차 指適한 바와 같이, 模型樹立에 依하여 새로운 “法則(laws)”이 發見되는 것은 아니다. 이 法則은 이미(古典分野에서) 發見되었거나, 또는(새로운 分野)에서 存在하지도 아니하는 것이다. 시스템에는 아마도 “高次的 法則(higher laws)”이 存在할 수도 있는데, 이것은 通常的인 物理法則보다는 高次的인 抽象法則으로 간주하여야 할 것이다(파동의 “高次的 法則”의 경우를 생각할 때, 이 法則에 對하여는 現在까지는 古典的 數式化를 斷念하고 있는 實情인).

이와 같은 “高次的 法則”은 物理學的 實驗이나 模型化 實驗으로서는 究明할 수 없고, 理論的 解析(theoretical analysis)에 依해서만이 찾아낼 수 있는 것이다. 그렇다면, 本人은 實際로 모든 科學分野에서 目擊될 不可避하고도 持籍化될 “數式化(mathematization)”에 對하여 解明해야 立場에 있다. 그러나 解明代車, 本人

은 博士學을 所持한 專門分野 從事者의 投票에 依하여 (多數 意見으로) 定義 採擇된 純粹數學이라 할지라도 이를 上述한 새로운 種類的 理論科學과 同等한 地位에 놓는다는 것에는 의문을 갖는다.

物理學이 地質學과 같은 派生 分野에 對하여 科學的 理論의 中軸骨格과 源泉구실을 遂行하는 것처럼, 시스템理論은 모든 種類的 模型化 活動에 對하여 理論을 提供한다(또는 將次 곧 提供할 것이다). 시스템理論은 基本 現象 위(above)에서 그 機能을 遂行하면서 適用 分野를 초월하는 洞察力을 要求한다. 이러한 모든 시스템理論의 研究對象 模型이 이 模型이 適用되는 個個 分野에 關聯된 基本的 科學情報를 함께 利用할 수 있을 경우에만 可能한 것이다.

오늘날 大部分의 分析經濟學에서는 問題의 部分을 全體에서 孤立分離시켜서 다루려고 하고 있으며, 앞으로 才氣발달한 뒤귀의 着意이 (또는 大膽한 單純化가) 새로운 洞察力을 創造하기를 바라고 있다. 이와 같은 생각은 古典的 接近法의 典型的인 例이다.

本人은 이와 같은 方法이 시스템決定的 問題에서는 通하리라고 믿지 아니한다. 그렇다고 해서 悲觀論의 動因에 사로잡힐 必要는 없다. 왜냐하면, 시스템理論的 方法은 急速히 進歩하고 있는 中이어서, 今世紀가 끝나기 前에는 經濟學分野에 決定的 影響을 기치게 될 것이며, 本人의 所見으로는 이미 그 징조가 明白히 나타나고 있다고 보기 때문이다.

要是(시스템理論的 知識말고는) 別代案이 없는 것이다. 스탠포드 大學校의 新任行政家 도널드케네디(Donald Kennedy)가 한 다음 陳述(1979年 4月號의 스탠포드오드업서버에서의)의 見解에 本人은 결코 加擔할 수 없다.

“당신은 나르 하여금 다음과 같은 可恐할 科學的 오류(실수)를 犯하도록 나를 誘因하였다: 重要하지 아니한 對答可能한 質問을 重要한 對答不可能한 質問으로 代置함”

오늘날의 科學을 우롱하는 것은 政略的으로는 매우 쉽고 아마도 出世的(career-wise)일한지 모른다. 그러나, 그렇게 하는 것이 問題, 특히 最小限上述한 여러 問題의 解決策은 아니다. 그리고 進歩라는 것은 어려우나 解答可能한 質問을 하는 科學者에 依하여 이룩된다는 事實을(美國科學아카데미(National Academy of Sciences) 會員이) 認識하지 못하는 점이 정말 可恐할 科學的 오류인 것이다. 本人은 이 點을 確信하는 바이며, 이와 같은 確信이 없다면 本人이 至今까지 行한 演說은 한갓 쓸모없는 演習에 지나지 아니할 것이다.

참 고 문 헌

- R.J. Ball [1978]—Report of the Committee on Policy Optimization, Her Majesty's Stationery Office, Cmnd. 7148, 117 pages.
- G.C. Chow [1975]—Analysis and Control of Dynamic Economic System, Wiley, 307 pages
- W.M. Corden [1977]—Inflation, Exchange Rates, and the Economy, Clarendon Press, Oxford.
- W. Fellner [1978]—"Structural Problems, behind our Measured Unemployment Rates," in Contemporary Economic Problems 1978, Edited by W. Fellner, American Enterprise Institute, Washington, DC, pages 83~112.
- M. Hazewinkel [1978]—"On Identification and Geometry of the Space of linear Systems", Econometric Institute, Erasmus University, Rotterdam, 15 pages (preprint).
- R.E. Kalman [1956]—"Nonlinear Aspects of Sampled-data Control Systems", Proc. 2nd. Symp. on Nonlinear Circuit Theory, Polytechnic Institute of Bklyn., pp. 273~313.
- R.E. Kalman [1957]—"Physical and mathematical Mechanisms of Instability in Nonlinear Automatic Control Systems", Trans. ASME, 79 : 553~556.
- R.E. Kalman [1968]—"On the Mathematics of Model Building", in Neural Networks, Edited by E. Caianiello, Springer, pp. 170~177.
- R.E. Kalman [1971]—"On the Minimal Partial Realizations of a linear input/output Map", in Aspects of Network and System Theory, Edited by R.E. Kaman and N. DeClaris, Holt, Rinehart and Winston, pp. 385~408.
- R.E. Kalman [1974]—"Realization Theory of Linear Dynamical Systems", in Control Theory and Functional Analysis, Vol. 11, International Atomic Energy Agency, 1976, Vienna, Austria, pp. 235~256.
- R.E. Kalman [1978]—"A Retrospective after Twenty Years: from the Pure to the Applied", in Applications of Kalman Filter to Hydrology, Hydraulics, and Water Resources, edited by Chao-Lin Chiu (Proc. of AGU Chapman Conference at the University of Pittsburgh, May (1978), Dept. of Civil Engineering University of Pittsburgh.
- R.E. Kalman [1979]—"Parametric Model in Time Series and Dynamic Identification" in Developments in Statics, Edited by P.R. Krishnaiah, Academic Press.
- D.A. Livesey [1976]—"A minimal Realization of the Leontief Dynamic Input-Output Model", in K.R. Polenske and J.V. Skolk(eds.), Advances Input-Output Analysis, Ballinger Publishing Company, Cambridge, MA. pp. 527~541.
- R.M. May [1976]—"Simple Mathematical Models with very Complicated Dynamics", Nature, 261 : 459~467.
- D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, and W.W. Behrens [1972] The limits of Growth, Potomac Associates-Universe Book, New York.
- P.A. Samuelson [1971]—"Maximum principles in Analytical Economics", (Nobel Lecture), Science, 173 : 991~997.
- J. Shiskin [1978]—"Seasonal Adjustment of the US Unemployment Rate", Cambridge Time Series Conference, July 1978.
- E.D. Sontag and Y. Rouchaleau [1976]—"On Discrete-Time Polynomial Systems", J. Nonlinear Analysis, 1 : 55~64.
- P.J. Vermeulen and D.C.J. De Jongh [1977]—"Growth in a finite World A Comprehensive Sensitivity Analysis", Automatica, 13 : 77~84.
- M.V.N. Whitman [1975]—"Global Centrism and the Monetary Approach to the Balance of Payments", Brookings Papers on Economic Activity, 1975 (3) 491~536.
- M.V.N. Whitman [1976]—"International Dependence and the US Economy", in AEI Studies in Contemporary Economic Problems 1976, Edited by W. Fellner, American Enterprise Institute, Washington, DC. pp. 183~223.