

ENIAC 이후 디지털 트윈까지의 수치예보 발전 역사와 미래 전망

이성진¹ · 정지원¹ · 윤세민¹ · 문병권^{1,2*}

¹전북대학교 과학교육학부 전주 54896

²전북대학교 과학교육학부, 융합과학연구소 전주 54896

Numerical Weather Prediction Development: Historical Progress and Future Prospects from ENIAC to Digital Twins

Sungjin Lee¹, Jiwon Jeong¹, Semin Yun¹, and Byung-Kwon Moon^{1,2*}

¹Division of Science Education, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

²Division of Science Education, Institute of Fusion Science, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

초 록: 기상 예측은 현대 사회에서 일상생활은 물론 재해 대응과 정책 결정의 중요한 근거로 활용되고 있다. 지난 수십 년 동안 수치예보 기술은 계산 기술과 함께 발전되었다. 이 논문은 최초의 컴퓨터인 1950년 에니악(Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC)을 이용한 수치예보 실험에서 출발하여 현대 전지구 수치예보 체계, 디지털 트윈과 인공지능 기반 예측으로 이어지는 과정을 중등교사가 쉽게 이해할 수 있도록 작성되었다. ENIAC과 현대 수치 예보 모델, 디지털 트윈이라는 각 수치모델에 대해 모델 구성의 복잡성, 관측과 자료동화 체계, 불확실성 처리 방식, 사회적 활용의 기준에 따라 비교하였다. 여기서 우리는 수치예보 발달 과정이 예보 정확도를 높이는 기술의 진보이면서 동시에 불확실한 날씨 정보를 사회적 의사 결정에 통합하는 방향으로 변화해 온 여정임을 강조하였다. 덧붙여 수치예보를 과학 지식, 기술, 사회적 합의가 상호작용하며 발전해 온 사례로 제시하였다. 이 원고의 수치예보를 과학과 사회의 관계를 설명하는 데 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

중심어: 수치예보, 에니악(ENIAC), 디지털 트윈, 사회적 의사 결정

Abstract: Weather forecasting plays a crucial role in modern society, serving as an essential basis for daily life, disaster response, and policy decision making. However, the development of numerical weather prediction (NWP) is often understood primarily as an advancement in computational technology. This paper explains the evolution of NWP from the first numerical weather prediction experiment using Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC) to modern NWP, digital twins, and artificial intelligence-based prediction, with an emphasis on making these developments accessible to secondary school teachers. The ENIAC model, modern NWP, and digital twins are compared in terms of their complexity in model, observation and data assimilation systems, approaches to uncertainty treatment, and social application. Through this comparison, NWP is shown to represent not only technological progress toward higher forecast accuracy, but also a gradual transformation in how uncertain future information has been integrated into social decision-making. By presenting NWP as a case in which scientific knowledge, technology, and social consensus have co-evolved,

*Corresponding Author: Byung-Kwon Moon

Phone: +82-(0)63-270-2824

E-mail: moonbk@jbnu.ac.kr



All the content in Journal of Science & Science Education(JSSE) is Open Access, meaning it is accessible online to everyone, without fee and authors' permission. All JSSE content is published and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Under this license, the authors retain full ownership of their work, while permitting anyone to use, distribute, and reproduce the content in any medium, as long as the original authors and source are cited. For any reuse, redistribution, or reproduction of a work, users must clarify the license terms under which the work was produced.

this study suggests that numerical weather prediction can be effectively used by school teachers as an educational topic for explaining the relationship between science and society.

Keywords: Numerical Weather Prediction, ENIAC, digital twin, social decision-making

I. 서론

수치예보(Numerical Weather Prediction, NWP)란 대기의 움직임을 수학 방정식으로 표현하고, 컴퓨터로 계산하여 미래 날씨를 예측하는 방법을 말한다[1,2]. 1950년 ENIAC 컴퓨터를 이용한 최초의 수치예보는 기상 예측 방법을 근본적으로 바꾼 역사적 사건이다 [3,4]. 이 실험은 Richardson[5]이 구상했던 수치예보를 처음으로 현실화한 것으로, 대기과학사에서 “조용한 혁명”의 시작점으로 평가받고 있다[1,6,7].

이 논문은 70년간의 수치예보 발전사를 단순한 기술 진보가 아닌, 복잡성과 불확실성 관리 및 사회적 의사 결정 지원 방식의 전환 과정으로 재해석하고자 한다. 선행 연구들[4]은 수치예보의 기술적 발전 경로를 중심으로 기술해왔다. 여기서 우리는 이러한 기술 진보의 배경이 된 앙상블 예보와 불확실성 정량화 이론, 그리고 수치예보 시스템의 사회적 역할 변화를 종합적으로 정리하였다[1,8]. 이를 위해 ENIAC, 현대 NWP, 디지털 트윈의 세 시대를 기술적 구조, 사회적 활용, 불확실성 처리의 관점에서 각각 비교하고 분석하였다[1]. 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서 선행연구(Richardson, Charney, Lorenz)와 ENIAC 실험의 역사적 배경을 검토하고, 2.2절에서 ENIAC 모형 구성을 설명하였다. 2.3절에서 현대 수치예보 체계 및 AI 예보의 한계를 분석한 후, 2.4절에서 과거 ENIAC 모델, 현대 수치예보와 디지털 트윈에 대해 비교하였다. 2.5절에서는 수치 예보의 미래 전망을 논의하였으며 마지막으로 3절에서 이 논문의 결론을 제시하였다.

II. 본론

2.1. Richardson의 구상부터 ENIAC 실험을 거쳐 Lorenz의 예측가능도 이론까지

Richardson은 1922년 대기 운동 방정식을 유한차분법으로 계산하여 미래 기상을 예측하는 방법을

최초로 시도했다[5]. 그러나 당시는 상층 대기 동역학에 대한 이해가 부족했고, 관측망이 제한적이었으며, 유한차분법의 안정성 이론도 정립되지 않은 상태였다. 그의 시험 예보는 6시간 동안 지표 기압이 145 hPa 변화하는 비현실적 결과를 보였으며, 이는 실제 변화량의 약 100배에 달하는 오차였다[5]. Lynch는 이 실패의 주된 원인이 시간과 공간 간격의 비를 제한하는 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 조건 위반이 아니라 초기 자료의 역학적 불균형에 있었다고 규명했다[4].

Richardson은 이러한 계산 과정을 거대한 예보 공장(Forecast Factory)으로 형상화하기도 했다(그림 1). 그는 수많은 계산자들이 지구를 격자로 나누어 각 셀마다 대기 변수를 계산하고, 중앙의 지휘자가 오케스트라를 지휘하듯 전체를 조율하는 모습을 상상했으며, 이는 후에 화가 Stephen Conlin에 의해 그림으로 구현되었다[9]. 이 구상은 현대 슈퍼컴퓨터의 핵심 원리인 대규모 병렬 처리(Massively Parallel Processing) 개념과 유사하다[10]. 그러나 그의 실제 예측 시도는 앞서 설명했던 것과 같이 당시의 자료 부족과 초기 조건의 불균형으로 인해 큰 오차를 보이며 실패로 끝났다.

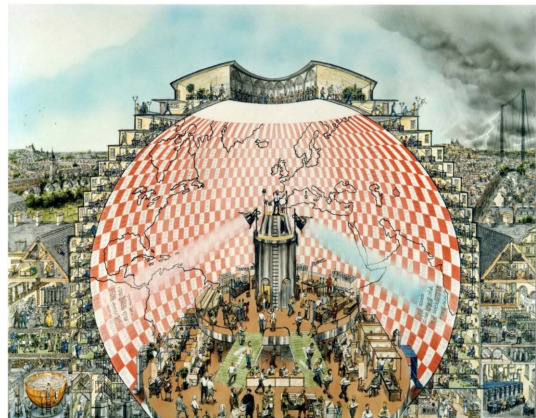


그림 1. Richardson이 상상한 ‘예보 공장’(Forecast Factory)의 개념도[10].

수치예보 실현을 위해서는 네 가지 조건이 필요하다. 첫째, Rossby의 행성과 이론과 Charney의 경압 불안정성 연구를 통해 대기역학 이론이 확립되었다 [11,12]. 이는 복잡한 원시방정식을 계산 가능한 수준으로 단순화하는 이론적 근거를 제공했다. 둘째, 라디오존데 도입으로 상층 대기를 관측할 수 있게 되었다. 정확한 초기 조건이 없이는 예보 자체가 불가능하기 때문이다. 셋째, CFL 조건으로 대표되는 수치 안정성 이론이 정립되었다 [13]. 이를 통해 안정적인 수치 계산을 위한 이론적 기초를 제공했다. 넷째, 자동 전자계산기가 개발되었다. 이를 계기로 John von Neumann은 맨해튼 프로젝트 경험을 바탕으로 1946년 프린스턴 고등연구소에서 기상학 프로젝트를 시작했으며, 1948년부터 Jule Charney가 기상학 그룹을 이끌었다 [4].

Charney는 원시방정식의 난점을 해결하기 위해 스케일 분석을 통해 고주파 중력파를 제거하고 기상학적으로 중요한 Rossby파만 남기는 준지구 근사를 개발했다 [12,14]. 또한 가장 단순한 순압 와도 방정식부터 시작하는 “모델 계층” 전략을 제안했으며, 이 접근법이 ENIAC 예보 실험의 기반이 되었다 [3].

ENIAC 실험 이후에도 수치예보의 본질적 한계에 대한 이론적 탐구는 계속되었다. Lorenz [15]는 초기 조건의 미세한 차이가 급격히 증폭되는 ‘나비 효과’를 발견하여 대기의 유한한 예측가능성의 질적 개념을 입증했다. 그러나 정량적인 예측가능 한계(약 2주)는 Charney가 전지구 모델 실험에서 error doubling time (예보 오차가 2배로 증가하는 데 걸리는 시간)을 약 5일로 제시한 것을 바탕으로 추정된 것이며, 최근 이는 Lorenz 모델의 직접적 결과가 아닌 경험적 외삽에서 비롯되었다고 재평가 되고 있다 [16,17].

2.2. ENIAC 예보의 모형 구성과 기술적 핵심

ENIAC 예보 실험은 컴퓨터를 이용한 기상 예측이 실제로 가능하다는 것을 처음으로 증명한 사건이었다. Charney, Fjörtoft [3]은 계산을 단순화하기 위해 대기를 한 층으로 가정했으며, 비발산 순압 와도 방정식을 사용하였다. 비발산 순압 와도 방정식은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla (\zeta + f) \quad (1)$$

여기서 ζ 는 상대 와도, f 는 코리올리 매개변수, \vec{V} 는 비발산 수평 풍속 벡터를 나타낸다. 이 방정식은 비발산, 비마찰 가정 하에서 절대와도가 유체입자를 따라 보존됨을 나타내며, Charney의 준지구 필터링 이론을 최초로 구현한 사례에 해당한다. 대기 모델에 유체의 유입량과 유출량이 같아 밀도 변화가 없는 비발산 조건 ($\nabla \cdot V = 0$)을 적용하면, 연속 방정식에서 발산항을 제거하여 고속 중력과 위상속도 (~ 300 m/s)를 체계적으로 배제함으로써, 기상학적으로 중요한 Rossby파 역학에 집중할 수 있게 된다.

ENIAC은 24시간 예보를 계산하는 데 24시간이 소요되는 계산 능력을 보여주었는데, 이는 Richardson이 같은 계산에 6주가 걸린 것과 비교하면 획기적인 발전이었다 [4]. 계산은 19×16 격자, 약 736 km 해상도에서 수행되었으며, 1949년 1월과 2월의 네 가지 사례를 예보했다 [3,4]. ENIAC 예보는 대규모 기압 패턴을 부분적으로 재현했으나, 그 한계가 명확했다. 비발산 순압 모델이었기 때문에 온도 경도에 의한 저기압 발달을 설명할 수 없었으며, 해상도가 낮아 작은 규모의 현상은 포착할 수 없었다. 그럼에도 불구하고 ENIAC을 활용한 날씨 예측 시도는 수치예보가 가능하다는 것을 증명한 “조용한 혁명”의 출발점으로 평가받고 있다 [1,6].

2.3. 현대 수치예보 체계의 핵심 요소

ENIAC 이후 지속된 기술 발전의 결과로 실제 운영 예보의 정확도는 관측과 모델, 동화 체계의 발전에 따라 지속적으로 향상되어 왔다. Simmons and Hollingsworth [18]는 500 hPa 고도장 예보 정확도가 10년마다 약 1일씩 향상되어 왔다고 보고했으며, 그 원인을 자료동화 기법의 고도화, 위성 관측의 확장, 모델 물리 개선, 해상도 증가의 복합적 결과로 설명했다.

그림 2는 수치예보 발전의 세 시대를 보여준다. ENIAC 시대(그림 2a)의 소수 전문가 중심 실험에서 현대 NWP 시대(그림 2b)의 불확실성 정량화를 거쳐, 디지털 트윈 시대(그림 2c)의 다양한 사용자 중심의 사결정 지원으로 진화해 왔다. 현대 수치예보는 네 가지 핵심 기술로 특징지어진다. 첫째, 전지구 모델의

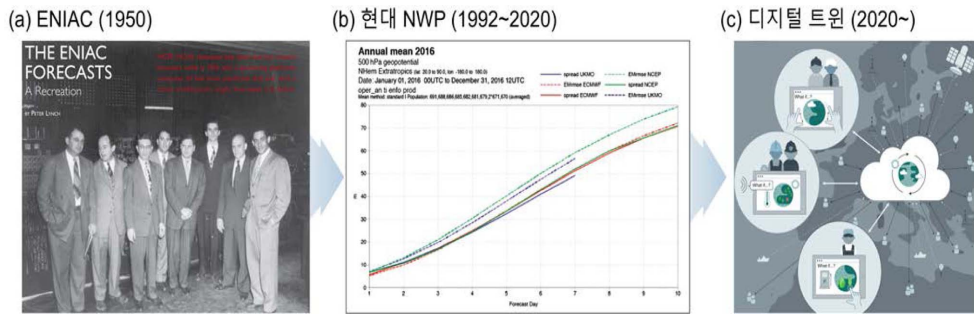


그림 2. 수치예보 발전의 세 시대. (a) ENIAC 시대 (1950): 최초의 컴퓨터 기반 수치예보 실험 [22]. (b) 현대 NWP 시대 (1992~): 주요 운영 센터의 앙상블 spread(실선)와 RMSE(점선) 비교로 본 불확실성 정량화(Palmer, 2019) [8]. (c) 디지털 트윈 시대 (2020~): “What if?” 시나리오 탐색을 통한 의사결정 지원 플랫폼(Bauer et al., 2021) [27].

고도화이다. 예를 들어, ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 모델은 약 9 km 수평 해상도, 137개 연직층의 조밀한 모델 해상도로 대기-해양-육지-빙하의 상호작용을 구현한다[1]. 둘째, 4D-Var(Four-Dimensional Variational Data Assimilation)와 앙상블 칼만 필터(앙상블 기반 오차 공분산 추정)를 결합한 하이브리드 자료동화 기법이 널리 활용된다 [1,2]. 셋째, 1992년부터 활용된 앙상블 예측이 불확실성 정량화를 가능하게 했다[19]. 앙상블 예측은 초기조건에 섭동을 부여한 다수의 모델을 수행함으로써 예보 불확실성을 확률적으로 표현한다. 넷째, GraphCast[20], Pangu-Weather[21] 등 AI 모델은 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 와 같이 관측 자료와 단기 예보를 자료 동화로 결합한 재분석 자료를 기반으로 학습한다. 특히 GraphCast는 1분 이내 10일 예보 생성이 가능하며, 이는 전통적 NWP 시스템(수 시간 소요)보다 획기적으로 빠르다.

그러나 AI 모델은 중관 규모 패턴은 잘 재현하지만, 열대저기압의 최대풍속과 최저기압을 과소모의하는 경향이 있다[23]. 또한 예보 선행시간이 길어질수록 예보장이 과도하게 평활화되어 극값이 감소하고 편향이 누적되는 한계가 있다[24]. 더 나아가 예측 모델 내부에 질량, 수분, 에너지 등 물리적 보존 제약이 명시적으로 강제되지 않으면 반복적인 적분 과정에서 작은 불일치가 시간에 따라 누적되어 드리프트(예보 시간이 길어질수록 누적되는 편향) 및 체계적 오차로 이어질 수 있다. 최근 연구에서는 AI 예보가 생성한 출력장을 전지구 보존법칙을 만족하

도록 재조정하는 후처리를 통해 이러한 한계를 완화할 수 있음이 보고되었다[25]. 이러한 한계는 AI 예측을 단독 해법으로 보기보다, 더 큰 의사결정 시스템의 일부로 통합해야 함을 시사한다.

2.4. ENIAC, 현대 NWP, 디지털 트윈의 비교·비판적 분석

과거 ENIAC에서 현대의 NWP를 거쳐 디지털 트윈으로의 진화는 단순한 계산 속도의 발전 이상의, 예보 시스템의 존재 목적과 사회적 역할에 대한 개념적 재정의 과정이었다. 표 1의 비교는 이러한 재정의가 각 시대에 따라(ENIAC, NWP, 디지털 트윈) 어떻게 전개되었는지를 보여준다. 예측 대상은 단순한 기압장에서 복합 지구 시스템 모델(현대 NWP)을 거쳐 인간-지구 시스템 통합 모델(디지털 트윈)로 확장되었고, 시스템의 사용자는 소수 전문가에서 공공 서비스 이용자를 거쳐 다양한 사회적 행위자로 확대되었다. 이 모든 변화는 “복잡성과 불확실성을 어떻게 관리하고 사회적 의사결정에 통합할 것인가” 라는 근본적인 질문에 대한 각 시대의 답변이며, 단순한 기술적 선택이 아닌 사회·기술적 선택의 결과이다[1,26,27].

모델 복잡성 측면에서 보면, ENIAC의 단순한 순압 모델은 현대의 복합 지구 시스템 모델로 발전했고, 이는 다시 인간 활동을 포함하는 디지털 트윈으로 진화하고 있다. 그러나 모델이 복잡해질수록 예보 오차의 원인을 특정하기 어려워지는 문제가 있다[1]. 한편, 불확실성을 다루는 방식도 크게 변화해 왔다. ENIAC 시대에는 소수 사례의 단일 예보를 분석장 또는 관측과 비교해 패턴 재현과 오차 원인을 주로

표 1. 수치예보 패러다임의 진화: 세 시대의 비교 분석. 각 시대별 모델 복잡성, 관측·자료동화, 불확실성 관리, 사회적 역할 측면의 변화를 제시함

비교 항목	ENIAC 시대 (1950)	현대 NWP (1992~2020)	디지털 트윈 (2020~)
모델 복잡성	단층 순압 모델	복합 지구 시스템 모델 (대기-해양-육상 결합)	통합 사회-지구시스템 모델 (인간 활동, 의사결정 통합 지향)
공간 해상도	~736 km (19×16 격자)	~9 km (전지구), 137 연직층	<5 km (목표), 실시간 적응형
관측 및 자료동화	제한된 지상/상층 관측, 수작업 초기장 분석	위성/레이더/재분석 자료, 4D-Var 및 앙상블 동화	초고밀도 센서 네트워크, 실시간 데이터 스트리밍[19,21]
불확실성 관리	단일 결정론적 예보	앙상블 기반 확률 예보	상호작용적 시나리오 탐색
계산 시간	24시간 예보에 24시간 소요	10일 예보에 수 시간 (물리 모델) 또는 <1분 (AI 모델)	실시간 상호작용형 시뮬레이션
주요 목적	개념적 증명 (수치예보 가능성 입증)	정확한 기상 예측 (공공 서비스 및 재해 대응)	예측 기반 의사결정 (정책/비즈니스 최적화)
사회적 관계	소수 전문가 중심 (군사, 학계)	전문기관-이용자 관계	다양한 행위자 협업 체계 (공동 생성 및 활용)

정성적으로 평가했으며, 현대에는 앙상블로 예보 불확실성을 확률적으로 정량화하는 체계로 발전하였다. 디지털 트윈 시대에는 사용자가 직접 다양한 시나리오를 탐색하는 것이 가능해졌다. 하지만 이러한 도구가 모든 사람에게 공평하게 제공되지 않을 경우, 오히려 정보 격차를 심화시킬 위험이 있다는 점도 지적된다[26].

2.5. 디지털 트윈 및 AI 통합 예측의 미래 방향

앞서 분석한 수치예보 발전 과정을 바탕으로, 미래 수치예보가 나아가갈 방향을 세 가지 측면에서 제시한다. 첫째는 예보 품질을 높이는 물리적 신뢰성과 계산 효율성 간의 최적 균형 모색이다. 이는 해상도를 무조건 높이기만 하기보다 예보 목적에 따라 필요한 공간, 시간 해상도와 물리과정의 상세도를 선택하는 목적 지향적 설계가 요구한다. 이 과정에서 계산 비용이 큰 물리 모수화의 일부를 AI 기반 에뮬레이터(물리 과정을 기계학습으로 근사한 대리 모델)로 대체할 수 있으나 그 경우에도 에뮬레이터가 질량, 에너지, 수분 보존 등 핵심 물리 제약을 얼마나 만족하는지를 정량적으로 검증해야 한다[27,28]. GraphCast와 Pangu-Weather 같은 AI 모델이 이 방향의 대표적 사례이다[20,21].

둘째는 “사람을 위한 디지털 트윈”이라는 관점이 다. Hazeleger et al.[26]이 강조한 것처럼, 디지털

트윈은 단순한 기술 시스템이 아니라 의사결정 지원 시스템으로 기능해야 한다. 취약 계층도 정보에 접근할 수 있어야 하며, 불확실성이 투명하게 전달될 필요가 있다. 이를 위해서는 다양한 이해관계자가 참여하는 제도적 설계가 동반되어야 한다.

셋째는 불확실성에 대한 소통과 학습 문화이다. 불확실성을 계산하는 것만으로는 충분하지 않으며, 사용자가 이해할 수 있도록 시각화하고 예측이 틀렸을 때 그 원인을 체계적으로 학습하는 문화가 요구된다[26,29].

III. 결 론

이 논문은 ENIAC을 이용한 최초의 수치예보에서 현대 전지구 예보 시스템과 디지털 트윈까지의 발전 과정을 살펴보았다. Richardson의 실패는 대기역학 이론, 관측망, 안정성 이론, 계산 자원이라는 네 가지 성립 조건의 필요성을 보여주었고, Charney의 준지균 근사와 모델 계층 전략은 복잡성을 단순화하여 관리하는 원형을 제시했다. ENIAC 예보는 이러한 접근의 실현가능성을 처음으로 증명했으며, 현대 NWP는 앙상블 예측을 통해 불확실성을 정량화하는 체계로 발전했다. 나아가 AI 모델의 등장은 물리적 보존법칙 통합과 극한 사상 예측 능력 향상이라는 차세대 발전 방향을 제시하고 있다[24,25].

이 논문은 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저 기술적 구조 측면에서 단층 순압 모델은 복합 지구 시스템 모델로 발전했다. 사회적 활용 측면으로는 소수 전문가로 제한되었던 정보가 다양한 이해 관계자들을 위한 공공 인프라로 확장되었다. 마지막으로 불확실성 처리 측면에서 결정론적 검증은 확률적 시나리오 탐색으로 전환되었다. 이러한 변화는 단순한 기술 진보가 아니라, 예보 정보를 불확실성까지 포함해 위험관리와 정책·운영 판단에 활용할 수 있도록 만드는 체계가 성숙해 왔음을 반영한다. 따라서 미래의 디지털 트윈은 단순히 더 정교한 모델을 만드는 데 그쳐서는 안 된다. 궁극적으로 수치예보 시스템은 기상·기후 위험 속에서 사회가 더 나은 결정을 내리도록 돕는 인간 중심의 의사결정 플랫폼으로 발전해야 한다. 이러한 목표는 기술적 진보만으로는 달성되기 어렵다. 정보 접근성, 투명성, 책임성을 보장하는 제도적·사회적 신뢰 구축이 함께 이루어질 때 실현될 수 있다.

참고문헌

- [1] Bauer, P., A. Thorpe, and G. Brunet, The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, **525**(7567), 47-55 (2015).
- [2] Kalnay, E., *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. 2003, Cambridge: Cambridge University Press.
- [3] Charney, J.G., R. Fjörtoft, and J.v. Neumann, Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus*, **2**(4), 237-254 (1950).
- [4] Lynch, P., *The emergence of numerical weather prediction: Richardson's dream*. 2006, Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] Richardson, L.F., *Weather prediction by numerical process*. 1922, Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] Smagorinsky, J., The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling: early recollections, in *Advances in geophysics*. 1983, Elsevier: New York. p. 3-37.
- [7] Platzman, G.W., The ENIAC computations of 1950—Gateway to numerical weather prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **60**(4), 302-312 (1979).
- [8] Palmer, T., The ECMWF ensemble prediction system: Looking back (more than) 25 years and projecting forward 25 years, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **145**, 12-24 (2019).
- [9] Richardson, L., An Artist's Impression of Richardson's Fantastic Forecast Factory, *Weather*, **71**(1), 14-18 (2016).
- [10] Lynch, P., An artist's impression of Richardson's fantastic forecast factory, *Weather*, **71**(1), 14-18 (2016).
- [11] Rossby, C.-G., Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action, *Journal of Marine Research*, **2**, 38-55 (1939).
- [12] Charney, J.G., The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, *Journal of Atmospheric Sciences*, **4**(5), 136-162 (1947).
- [13] Courant, R., K. Friedrichs, and H. Lewy, Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische annalen*, **100**(1), 32-74 (1928).
- [14] Charney, J.G., On the scale of atmospheric motions, in *The Atmosphere—A Challenge: The Science of Jule Gregory Charney*, American Meteorological Society, 251-265 (1990).
- [15] Lorenz, E.N., Deterministic Nonperiodic Flow, *Journal of Atmospheric Sciences*, **20**(2), 130-141 (1963).
- [16] Shen, B.-W., et al., Exploring the origin of the two-week predictability limit: A revisit of Lorenz's predictability studies in the 1960s, *Atmosphere*, **15**(7), 837 (2024).
- [17] Charney, J.G., The feasibility of a global observation and analysis experiment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **47**(3), 200-221 (1966).
- [18] Simmons, A.J. and A. Hollingsworth, Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **128**(580), 647-677 (2002).
- [19] Palmer, T., et al. *Ensemble prediction*. in *Proc. ECMWF Seminar on Validation of models over Europe*. 1993. Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- [20] Lam, R., et al., Learning skillful medium-range global weather forecasting, *Science*, **382**(6677), 1416-1421 (2023).
- [21] Bi, K., et al., Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks, *Nature*, **619**(7970), 533-538 (2023).
- [22] Lynch, P., The ENIAC Forecasts: A Re-creation, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **89**(1),

- 45-56 (2008).
- [23] Xu, H., et al., Exploring the typhoon intensity forecasting through integrating AI weather forecasting with regional numerical weather model, *npj Climate and Atmospheric Science*, **8**(1), 38 (2025).
- [24] Sun, Y.Q., et al., Can AI weather models predict out-of-distribution gray swan tropical cyclones?, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **122**(21), e2420914122 (2025).
- [25] Sha, Y., et al., Improving AI weather prediction models using global mass and energy conservation schemes, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **17**(11), e2025MS005138 (2025).
- [26] Hazeleger, W., et al., Digital twins of the Earth with and for humans, *Communications Earth & Environment*, **5**(1), 463 (2024).
- [27] Bauer, P., B. Stevens, and W. Hazeleger, A digital twin of Earth for the green transition, *Nature Climate Change*, **11**(2), 80-83 (2021).
- [28] Bauer, P., et al., The digital revolution of Earth-system science, *Nature Computational Science*, **1**(2), 104-113 (2021).
- [29] Ponzano, M., et al., Bridging the gap between ensemble forecasting and end-user needs for decision-making on high-impact events, *Advances in Science and Research*, **22**, 39-52 (2025).